

(解説)

直接還元製鉄プロセスのエネルギー最適化および生産性改善

Development of Energy Consumption and Productivity of a Gas-based Direct Reduction Iron-making Processes



川村 明*
Akira Kawamura



Robert M. Klawonn**



Glenn E. Hoffman**



上村 宏***
Hiroshi Uemura

Kobe Steel started producing direct reduced iron in 1978 in Qatar with the MIDREX® Process. Since then many plants based on continuous improvements of this technology have been built all over the world. This paper presents an overview of the history of the technical developments in these processes, as well as the latest development in this field.

まえばき = 当社はMIDREX®プロセス^{注1)}による直接還元製鉄プラント(1978年生産開始)をカタール製鉄所に納入して以来、多くの還元製鉄プラントを世界各地に建設してきた^{注2)}。この間、本分野での技術開発をミドレックス社とともに行ってきており、その結果はプロセス競争力の強化に大きく寄与し、シャフト炉の大型化・廃熱回収設備の強化・天然ガス改質(リフォーマ)用触媒の改良・熱間成型ブリケット^{注3)}(HBI)、などの成果として実現することができた。

直接還元製鉄プラントは、高炉のように大規模な設備投資が不要であり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製鉄所の鉄源プラントとして建設されてきた。

また近年、先進国においてもスクラップ代替として灰分が少ない清浄鉄源の還元鉄需要が高まっており、さらにHBI技術の開発により海上輸送が可能となり、世界的なマーケットで取扱われている。最近の鉄鋼需要の増大によりプラント建設需要も高まっており、2005年からMIDREXプロセスによる直接還元製鉄プラントは建設ラッシュの状況にある。現時点におけるMIDREXプラントの建設実績を図1に示す。

脚注1) ミドレックス社により開発された天然ガスベースの直接還元鉄製造法である。ミドレックス社は、1983年から当社の100%子会社となっている。

脚注2) 現在、世界の直接還元鉄の約64%がMIDREXプロセスにより生産されている。

脚注3) HBI(Hot Briquetted Iron)と呼ばれるもので、還元鉄を海外に輸出する際、海上輸送中の再酸化による発熱を防止するために塊成化し海外出荷を可能にしたものである。当初は所内消費用であった還元鉄を世界のマーケットに広げた技術であり、海外出荷専門に還元鉄を生産する還元製鉄プラントがベネズエラなどで建設、運転されている。

1. 生産性およびエネルギー原単位の発展の歴史

MIDREXプロセスによる直接還元製鉄法の発展において最も寄与している項目は、高金属化率で灰分の少ない還元鉄を製造するシャフト炉の生産性の継続的な改良である。

特に、シャフト炉内で消費されるCOとH₂量の改善にもっとも重点が置かれ、これらは生産性および原単位の改善に大きく寄与してきた。COおよびH₂ガスの消費量はこの30年間で25%以上も改善されており、これらは主に原料性状のコントロール、シャフト炉内部のガス流れの均質化による固体・ガス接触の改良、還元ガス温度の高温化によるところが大きい。

1970年代の還元ガス温度は780であったが、1980年代には850に上げることでシャフト炉の生産性は約13%向上した。さらに1990年代に入ってから、原料ペレットに特殊なコーティングを行うことにより、還元ガス温度は約900にまで上がり、シャフト炉の生産性はさらに約11%向上した。これらの改善は、MIDREXプロセス直接還元製鉄法の基本的な機器構成を変更することなしに達成された。

2. 最近のプロセスの発展

シャフト炉の技術改善における最近の重点項目は、酸素吹込みによる還元ガス温度のさらなる上昇にある。高純度の酸素(12~20Nm³/t-DRI)を高温の還元ガスの中に吹込む技術であり、1990年後半に導入され、還元ガス温度は約1,000、シャフト炉内の温度は900以上に達し、シャフト炉の生産性は約12%向上した。

2005年になり、この技術はさらにOXY+®と命名されて改良が行われた。OXY+は、通常のリフォーマで生成される高温還元ガスに加えて、追加の高温還元ガスを天

*新鉄源プロジェクト本部 **Midrex Technologies Inc. ***新鉄源プロジェクト本部 技術センター プロジェクト部



FASTMET Plants (Green)

- 1. Nippon Steel Hirohata (1)
- 2. Kobe Steel Kakogawa (1)

COREX/MIDREX Plants (Red)

- 1. Saldanha Steel (1)

MIDREX Plants (Blue)

- 1. Acindar (1)
- 2. American Iron Reduction (1)
- 3. Amsteel Mills (1)
- 4. ANSDK (3)
- 5. Caribbean Ispat Ltd. (3)
- 6. COMSIGUA (1)

- 7. CORUS Mobile (2)
- 8. Delta Steel (2)
- 9. Essar Steel (3)
- 10. Georgetown Steel (1)
- 11. Hadeed (3)
- 12. IMEXSA (1)
- 13. Ispat HSW (1)
- 14. Ispat Industries (1)
- 15. Ispat Sidbec (1 + 1)
- 16. Khouzestan Steel (4)

- 17. LISCO (3)
- 18. Mobarakeh Steel Company (5)
- 19. OEMK (4)
- 20. OPCO (1)
- 21. QASCO (1)
- 22. SIDERCA (1)
- 23. SIDOR (4)
- 24. VENPRECAR (1)
- 25. Lion Group (1)
- 26. LGOK (1)

• Numbers in parentheses indicate the installed plant number.

図1 世界の MIDREX プラント
Fig. 1 MIDREX plant in the world

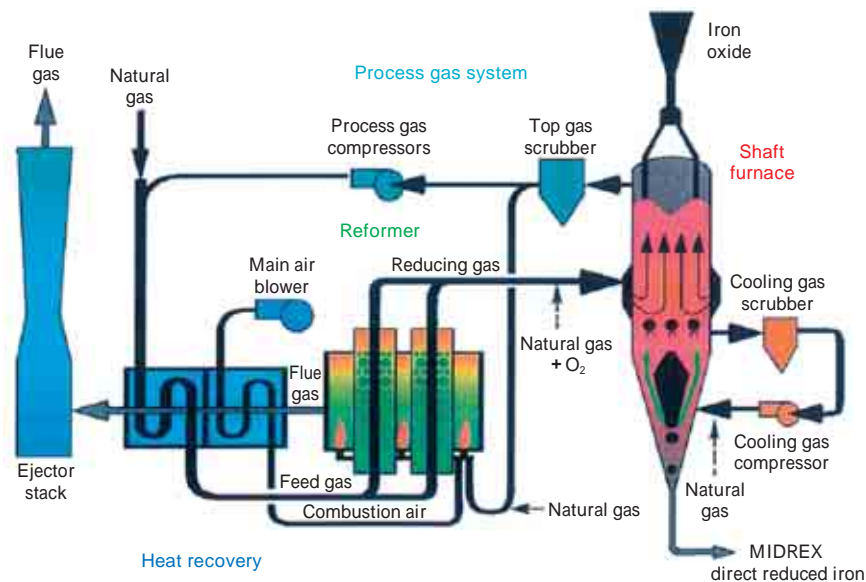


図2 MIDREX プロセスによる直接還元製鉄プラントの標準フロー
Fig. 2 Standard process flow of MIDREX process

然ガスの部分酸化により生成するものである。この部分酸化は、特別に設計された燃焼器で酸素と天然ガスを部分燃焼させるものである。

この OXY + により生成された追加の還元ガス (CO および H₂) は、リフォーマによらないものであり、リフォーマの増設なしでシャフト炉の生産性を上げることができる技術である。したがって、既設であっても工場に余剰酸素が有る場合は、リフォーマの増設なしにシャフト炉の生産性を上げることができる。

部分燃焼反応は、天然ガスと酸素の燃焼が燃料過剰状態での反応であり、下記の反応からなる。



図2 に標準的な MIDREX プロセスによる直接還元製鉄プラントのプロセスフローを示す。

図3 に、最新の酸素添加を行い天然ガスの部分酸化を行う OXY + のフローを示す。さらに、図4 および表1 に、シャフト炉の生産性に関するこれまでの推移を示す。1970 年代から 1990 年代にかけては、おもに廃熱回収の強化および固体ガス接触の改良によるエネルギー原単位の改善、またおもに原料性状の調整などによるシャフト炉内還元層温度 (Burden temperature) の上昇による生産性の改善などが実現されてきて、直接還元製鉄ブ

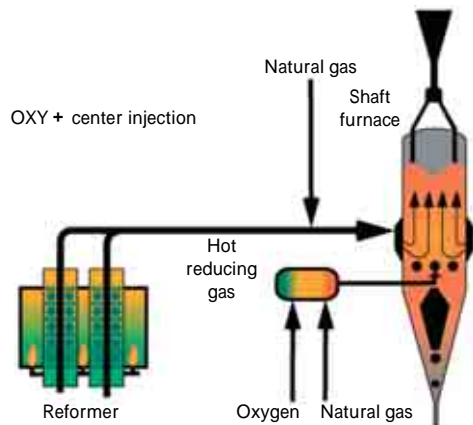


図3 MIDREXプロセスの最新フロー
Fig. 3 Updated process flow of MIDREX process

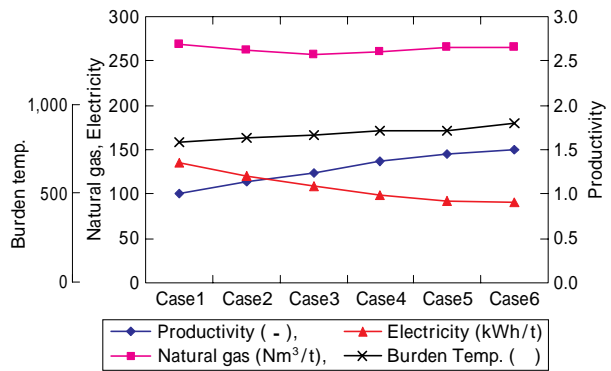


図4 生産性比較
Productivities in case 2 through case 6 are ratios to case 1.
Explanations about the cases are shown in Table 1.

表1 MIDREX プロセスの生産性向上比較
Table 1 History of productivity increase

Case	DRI production (t/h)	DRI production ratio to case 1	Enrichment natural gas (%)	Reducing gas temp. (°C)	Burden temp. (°C)	O ₂ addition (Nm ³ /t)	Natural gas (Nm ³ /t)	Electricity (kWh/t)
1	88.8	1.000	4.5	780	789	0.0	268.6	135
2	100.3	1.130	3.5	850	814	0.0	262.3	120
3	110.2	1.241	3.5	918	834	0.0	257.9	109
4	121.5	1.368	4.5	1,050	860	17.5	260.3	99
5	129.2	1.455	3.0	961	857	30.2	265.8	93
6	133.6	1.504	3.0	1,050	898	41.2	264.6	90

Case 1 : Original practice - 1970's
Case 2 : Practice using lump ore - 1980's
Case 3 : Practice using coating of oxide feed materials - 1990's
Case 4 : Oxygen injection practice - late 1990's
Case 5 : OXY + practice - 2000
Case 6 : Combined practice with oxygen injection & OXY + - Future

ラント単体としては、エネルギー原単位の改善のほぼ限界に達したといえる。1990年代後半からは、還元層温度の上昇（酸素吹込み、あるいはOXY+）による生産性の改善、および還元ガスの増強（OXY+）による生産性の改善に重点が置かれてきた。

3. 還元鉄の熱間排出(HOTLINK®)

これまでに説明した開発成果は、MIDREX プロセス単体（還元鉄製造プラント）としての発展の経緯であるが、最近の新たな提案として、下流の製鋼プロセスも含めた最適な生産効率の向上（トータルとしてのエネルギー原単位および生産性の改善）を目指した技術改良が実施されつつある。

シャフト炉で生産される高温の還元鉄を下流の製鋼設備へ移送する方法として、下記の3種類^{注4)}が提案されている（図5 還元鉄の熱間排出法参照）。

- 1) 図5のA : トランスファカーによる製鋼設備への輸送・供給
 - 2) 図5のB : コンベヤによる製鋼設備への輸送・供給
 - 3) 図5のC : 重力による製鋼設備への供給 (HOTLINK)
- ただし、図5のAは一般的なHBIの生産であり、図5の

Bは一般的なDRIの生産である。

気体輸送による製鋼設備への輸送・供給も別のオプションとして考えられるが、高温の輸送ガス、管内の高速輸送による還元鉄の粉化による粉発生、高い輸送エネルギーコスト、輸送中の還元鉄の温度低下の問題などがあり、あまり得策ではないと判断されている。

3種類の提案のうち、重力による製鋼設備への供給(HOTLINK)が、シャフト炉から排出される700以上の高温還元鉄を製鋼設備へ供給する方法としては最も簡単であり、コストメリットおよび品質の安定性（再酸化など）の観点からも推奨される方法である。一部では具体化されている他の方法は、重要な要件である還元鉄の化学成分、還元鉄サイズおよび温度などを犠牲にしており、既設のプラントに適用する場合にはレイアウト上の問題などから採用せざるを得ない状況にある。しかし新設の場合は、重力輸送による単純なシステムであるHOTLINKが、還元鉄の品質の保持、輸送コストの低減、設備メンテナンスの簡素化、製鋼における高い生産性などの観点で優れており、最も適したプロセスであるといえる。

HOTLINKはシャフト炉を製鋼設備のすぐ外側の上方に置き、シャフト炉から排出された高温還元鉄はこの下に設置された貯蔵槽に一旦貯蔵され、さらに下の製鋼設備（電気炉）へと供給される。

脚注4) 図5のAはインドEssarスチールですでに実用化されている。Bはサウジアラビアに建設中であり、Cはオマーンで建設が計画され、設計が開始された。

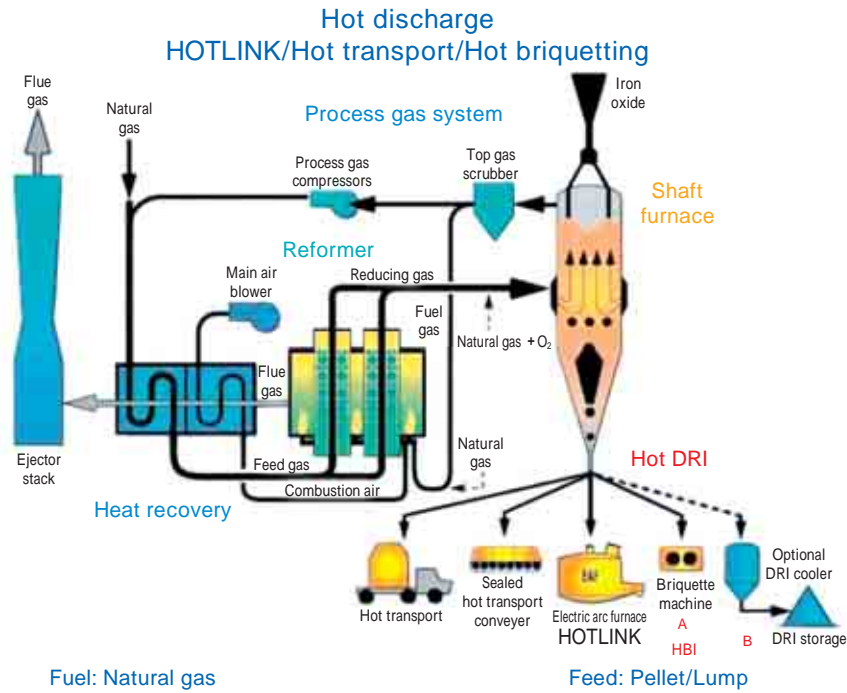


図5 還元鉄の熱間排出法
Fig. 5 Hot discharge

4. HOTLINKの詳細

HOTLINKにおける最重要点は、下流の製鋼設備との運転時間のマッチングにある。製鋼設備（電気炉）はバッチ運転であり、その定期メンテナンスの時期および期間は上流の直接還元鉄製造設備と異なっている。基本的に連続運転である直接還元鉄製造設備とどう調和させるかが、プラント全体としての総合的な生産性を向上させるのに重要となる。

まず、バッチ運転である製鋼設備（電気炉）との運転のマッチングのために設置されるのが高温還元鉄貯蔵槽である。シャフト炉から排出された高温還元鉄はこの下に設置された貯蔵槽に一旦貯蔵され、バッチ運転である下流の製鋼設備（電気炉）との運転時間のずれを吸収する。

さらに、定期メンテナンスの時期および期間が上流の直接還元鉄製造設備とは異なることと、突発的な停止などによるダウンタイムの違いを吸収するためには、製鋼設備（電気炉）への供給をバイパスして、高温還元鉄をプロダクトクーラを通して冷却し cold DRI^{注5}（図5のとBの組み合わせ）とするか、あるいはブリケットマシンにより HBI^{注6}（図5のとAの組み合わせ）として一旦系外へ出し貯蔵する設備が必要となる。これら排出された還元鉄は、再度別系統により製鋼設備へ供給されることとなる。標準的なHOTLINKのフローを図6に、生産性比較を表2に示す。

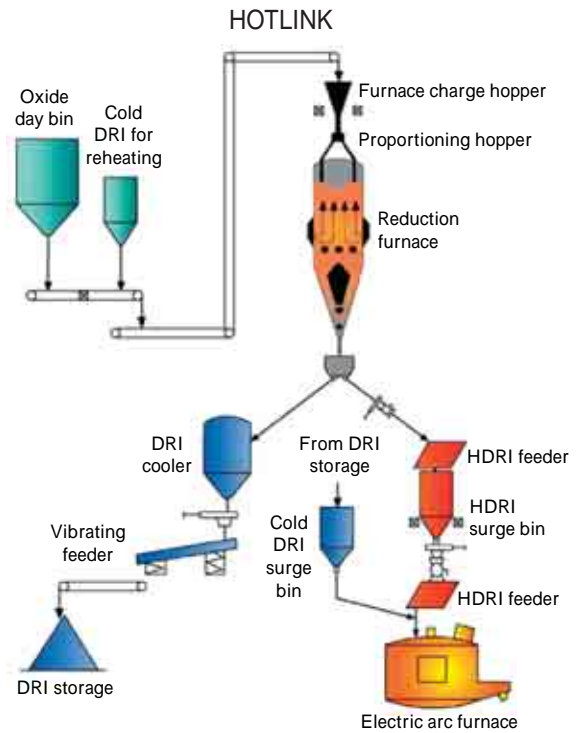


図6 HOTLINKのフロー
Fig. 6 Process flow of HOTLINK

表2 HOTLINKの生産性比較
Table 2 Productivities comparison of HOTLINK

	Case1	Case2	Case3	Case4
Starting product from MIDREX plant	Hot DRI	Cold DRI	Cold DRI	HBI
Fe yield: DRI/HBI to liquid steel	0.96	0.94	0.89	0.91
Energy usage:				
Natural gas used (mmBtu*/t-liq. stl.)	12.9	12.5	13.2	13.5
Power used (kWh/t-liq. stl.)	565	695	701	742
Oxygen used (Nm ³ /t-liq. stl.)	15-20	15-20	15-20	15-20

Case 1 : Adjacent 100% hot DRI use via HOTLINK
Case 2 : Adjacent 100% cold DRI use in an EAF
Case 3 : Remote use of 100% cold DRI in an EAF
Case 4 : Remote use of 100% HBI in an EAF

脚注5) 冷却された還元鉄。

脚注6) 脚注5) 参照。ブリケットマシンにより塊成化し冷却したものである（主に海外出荷用）。

高温の DRI を入れることにより、直接的には EAF (Electric Arc Furnace) における電力消費量の削減 (120 - 140kWh/t-liquid steel) EAF における電極消費量の削減 (0.5 - 0.6kg/t-liquid steel) EAF における生産量の増加あるいは EAF 電気システムのダウンサイズ

などの効果があり、さらには輸送中あるいは貯蔵中の再酸化低減、粉化の減少などの間接的な相乗効果がある。HBI は海外への海上出荷が可能になるというメリットがある半面、還元鉄製造において、HBI 製造は DRI 製造と比較すると原料ペレットへのコーティングができない (還元層の温度上限が低い DRI 製造より低い)、ブリケットマシンが必要となるなどの理由により、トータルとしてのエネルギー原単位は悪くなる。

またそれぞれそれぞれの製品の典型的な仕様を表 3 に示す。

むすび = MIDREX 法直接還元製鉄プラントの歴史および最近の新しい技術に関して解説した。

当社およびミドレックス社の MIDREX 法直接還元製鉄プロセスはその優位性が認められて、2004年から2005年にかけて世界各地で採用が決まった。現在、両社で設計あるいは建設中であるプロジェクトは次のとおりである。

- マレーシア : Lion Gr.
- カタール : QASCO 社
- ロシア : Lebedinsky GOK 社
- オマーン : Al-Ghaith 社
- サウジアラビア : HADEED 社
- トリニダード・トバゴ : NUCOR 社
- パキスタン : Al-Tuwairqi Gr.

表 3 各製品の典型的な仕様
Table 3 Products specifications

	DRI	Hot 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	3.4-3.6	5.0-5.6
Discharge temperature ()	40	> 700	80

*Depend on iron ore source.

MIDREX 法直接還元製鉄プラントをとりまく状況においても、環境への負荷の低減や地球温暖化への対応が近年重要な課題となっている。これは単に排出物をどう扱うかという観点からではなく、排出の絶対量の削減という点からの対応が必要とされている。この意味で、消費エネルギーそのものの低減は単なるコスト削減の観点からだけではなく、環境対応においても重要な要素となっている。

MIDREX 法直接還元製鉄プラントは世界の還元鉄生産量の 64% を占め、環境保護の面でも重要な役割を果たしている。天然ガスを主体に鉄鋼生産を行う各国に今後も大きな影響を与え続けることは確実であり、継続した改良が常に期待されているプロセスである。

当社とミドレックス社は、天然ガスを使用する MIDREX 法に石炭ガス化技術などを活用して石炭燃料へ置換えるプロセスや、石炭ベースの直接還元鉄製造技術である ITmk3 と組み合わせ、さらに効率の良いプロセスなどの新技術についても積極的に取り組んでいる。

エネルギーの多様化と効率化を目指した開発を継続し、世界の鉄鋼生産分野に貢献していきたい。