

(解説)

ミドレックスプロセス—その進化と脱炭素製鉄への展望—

ビンセント シェヴリエ* (Ph.D.)・ローレン ロレーン・道下晴康

MIDREX[®] Process: Bridge to Ultra-low CO₂ Ironmaking

Dr. Vincent CHEVRIER・Lauren LORRAINE・Haruyasu MICHISHITA

要旨

1983年に神戸製鋼所100%子会社となったミドレックス社は、神戸製鋼所およびお客さまプラントのサポートの下、シンプルで高効率なプロセスを継続して革新・改良してきた。これにより、直接還元製鉄のマーケットリーダーの役割を45年間果たしてきた。パリ協定後、温室効果ガスの排出低減が課題となるなか、天然ガス・LNGを使用した直接還元法は、製鉄業におけるCO₂排出量の顕著な低減が期待できる商業規模で確立された唯一のプロセスである。また、水素を使用すべく進化したMIDREX H₂TMにより、CO₂をほとんど排出しない製鉄が実現可能である。しかしながら、再生可能エネルギーを基にした水素が、現状では入手できないほど大量に必要となることが課題である。本稿はミドレックスプロセスおよびその50年間の進化を解説し、水素社会の到来で実現する脱炭素製鉄を展望する。

Abstract

Midrex Technologies Inc. - a wholly owned subsidiary of Kobe Steel since 1983 - has been the market leader in direct reduction of iron for nearly 45 years. This success is based on a simple and efficient process, years of continuous innovations and improvements, the excellence of plant operators, and the support from Kobe Steel. With the emphasis on reducing greenhouse gas emissions following the ratification of the Paris Agreement, direct reduction is the only commercially-proven process that can achieve significant reduction in CO₂ emissions for the iron and steel industry today, using natural gas or liquified natural gas (LNG). The MIDREX H₂TM is an evolution of the MIDREX[®] Process that can produce iron with almost no CO₂ emissions; but it requires amounts of hydrogen that are not currently available from renewable sources today. This article describes the MIDREX[®] Process and significant improvements made over the last 50 years and offers a vision of ultra-low carbon ironmaking that can be realized in the hydrogen economy.

キーワード

直接還元製鉄, ミドレックスプロセス, シャフト炉, 天然ガス改質, 還元鉄, ホットブリケットアイアン, 水素製鉄, CO₂フリー製鉄

まえばき = 鉄鉱石直接還元プロセス (ミドレックスプロセス) 技術を保有するミドレックス社は、1969年に米国オレゴン州ポートランドで第一号機が稼働を始め、2019年に操業50周年を迎えた。その間、1983年に神戸製鋼の100%子会社となり、2018年には還元鉄 (Direct Reduced Iron, 以下DRIという) 累積生産量10億トンの到達というマイルストーンを達成している。また、プ

ラント1基あたりの生産能力は年産15万トンから250万トンに増加した (図1)。

これまでに建設された90基のプラントのほとんどが今なお運転を継続している。たとえば、ドイツ・ハンブルグに1971年に建設されたプラントは現在稼働中の最古のプラントである。仕様能力40万トンに対し、2018年に56万4千トンの生産量と約8,000時間の稼働時間を

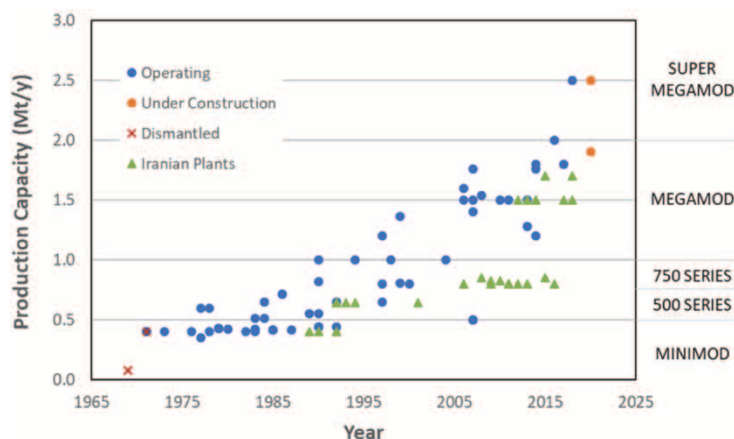


図1 ミドレックスプラント生産能力の50年間の進化
Fig.1 Evolution of MIDREX[®] Module sizes over the last 50 years

* Midrex Technologies Inc.

達成した。

最新のプラントとしては、アルジェリア・トシアリ社向けの年産250万トンの能力を持つプラントがある。アルジェリア・オラン近郊に建設された。2018年11月に最初の製品が製造され、そのわずか8箇月後の2019年7月に日産7,700トンの世界記録を樹立した。さらに、アルジェリア・カタールスチール社向けにアルジェリア・ベラーラに建設中の年産250万トンプラントに加えて、米国オハイオ州トレドに建設中のクリーブランド・クリフス社向け年産160万トンの最新プラント2基が2020年に運転を開始する予定である。

DRI市場拡大の最も大きい要因は、各地でより多くのリサイクルスクラップが活用されるようになり、従来型の高炉一貫製鉄法から電炉法へのシフトが世界的に起こっていることである。スクラップを使用する電炉鋼の品質を維持するためには、鉱石由来の鉄源（Ore-based Metallics：OBM）の併用が必要である。こうした理由からDRIの需要が世界的に増えている。

いっぽう将来的には、天然ガスや水素を利用して還元されたDRIとともにスクラップを電気炉で使用することがCO₂削減につながることから、環境面からもDRI市場の拡大が期待されている。

1. DRI: 製品付加価値を向上させる製鋼原料

DRIは、鉄鉱石ペレットや塊鉄石を溶解することなしに、化学的に結合した酸素を除去した天然鉄鉱石由来の高級鉄鋼原料である。このためDRIは、高濃度の鉄分を含むいっぽうで、鋼材品質に多くの場合悪影響を及ぼす銅などのトランプエレメントや窒素の含有は少ない。すなわち、DRIはスクラップに含まれる不純物を希釈する上で有効な原料であるといえる。このため、自動車外装用鋼板をはじめとして、深絞り用鋼や細線材、特殊棒鋼、鍛造用棒鋼、継ぎ目無し鋼管など、高品質の鉄鋼製

品を製造する電気炉で使用されている。

DRIが最も多く使用されるのは電気炉であるが、高炉でも長年にわたって使用されてきた。DRIは還元された金属鉄が主成分であることから、高炉で使用すると高炉での還元負荷が軽減され、生産量を増やすことができる、もしくはコークスの消費量を下げることが可能になるからである。例えば米国AKスチールの高炉では、溶銑トン当たり約250 kgのDRIが使用されていた¹⁾。

2. DRIの形態

DRIには常温還元鉄（Cold DRI、以下CDRIという）、熱間還元鉄（Hot DRI、以下HDRIという）、およびホットブリケットアイアン（Hot Briquetted Iron、以下HBIという）があり（図2）、それぞれは電気炉、高炉、転炉での使用に好ましい物理・化学性状を有している。初期に建設されたミドレックスプラントでは、還元後にほぼ常温まで冷却されたCDRIを製造し、隣接する電気炉製鋼工場で使用された。DRI使用の利点が広まるにつれ、この高級鉄鋼原料の需要は世界的に増大し、ミドレックス社では新たに二つのDRI形態であるHDRIとHBIを開発・商品化した。

還元後の高温のDRIには、酸素が抜け出したことによって生じた気孔が多数空いており、再び酸素と結びついて（再酸化）空気などに触れると発熱・発火するという欠点がある。そこで、DRIを二つのローラ間で圧縮成型してブリケット化し、空げき率を減少させたのがHBIである。このためHBIは耐再酸化特性に優れ、長期貯蔵や海上輸送に伴う問題を解決するとともに、ハンドリング中の粉発生による歩留りの低下を防いでいる。またHBIは外販に好ましい形態であることからHBIのサプライチェーンが形成され、生産コストが低く海上輸送の便が良い場所で製造されたHBIが市場でいつでも入手可能になっている。前述のクリーブランド・クリフス社向



図2 各種DRI製品の特徴とその用途
Fig.2 Description and use of DRI products

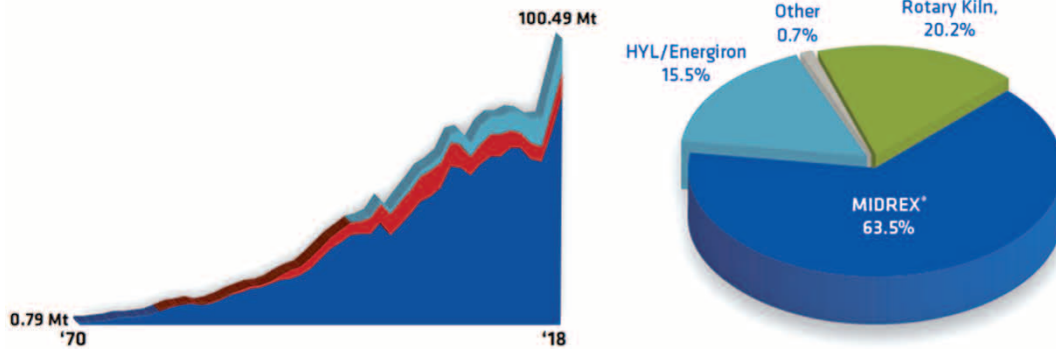


図3 世界のDRI年間生産量の推移²⁾
 Fig.3 Trends in world's annual DRI production²⁾

けのプラントはHBIを製造するプラントである。

いっぽう、ミドレックスプラントで製造されたDRIを隣接する電気炉工場で使用する場合、還元後の600℃以上と高温であるDRIを電気炉で使用すれば溶解に必要なエネルギーの多くを減らすことができる。このため、ミドレックス社ではHDRIを搬送して電気炉へ装入する技術を開発した。これによってDRIの価値がさらに高まった。前述のアルジェリアの最新プラント2基では、HDRIを製造して隣接する電気炉に供給している。

このように、電気炉に隣接してHDRIを製造するプラント、あるいは外販用にHBIを製造する大型プラントの建設が最近のトレンドになっている。

なお、本稿においては以降、CDRI/HDRI/HBIの三つの製品形態すべてを指す包括的な還元鉄製品をDRIという。このDRIにおける製品形態の多様化も世界製鉄業における電気炉生産量の増加に寄与し、図3が示すように2018年の世界DRI生産量は1億トンを超えた²⁾。

3. ミドレックスプロセスの概要

天然ガスベースの最新のミドレックスプロセス (MIDREX NGTM) のフローシートおよびプラント (アルジェリア・オランのトシアリ社の製鉄所) 外観写真をそれぞれ図4、図5に示す。MIDREX NGは二つの主要ユニット、すなわち鉄鉱石を金属鉄に還元するシャフト炉、およびシャフト炉での鉄鉱石還元に必要な還元ガスを製造するリフォーマーから成る。

シャフト炉では、その中を降下する鉄鉱石ペレットあるいは塊鉄石の充填層に対して還元ガスが対向流で供給される。鉄鉱石ペレットはその上昇ガスによって非常に効率よく昇温、還元、浸炭される。常温の鉄鉱石がシャフト炉頂から装入され、炉下部からCDRIまたはHDRIとして排出される。鉄鉱石中に含まれる約30% (重量比) の酸素が、シャフト炉内の高温下において一酸化炭素 (CO) や水素 (H₂) と反応して除去され、二酸化炭素 (CO₂) と水蒸気 (H₂O) になる。

これらの固体-ガス反応を図6に示す。H₂による鉄鉱石の還元は吸熱反応で、COによる還元は発熱反応である。さらにDRIが含有する炭素は、COあるいはメタン (CH₄) との化学反応によって生成される。天然ガスをシャフト炉下部から吹込むことにより、DRI中の炭素含有量を高めること、およびCDRIのプラントにおいて

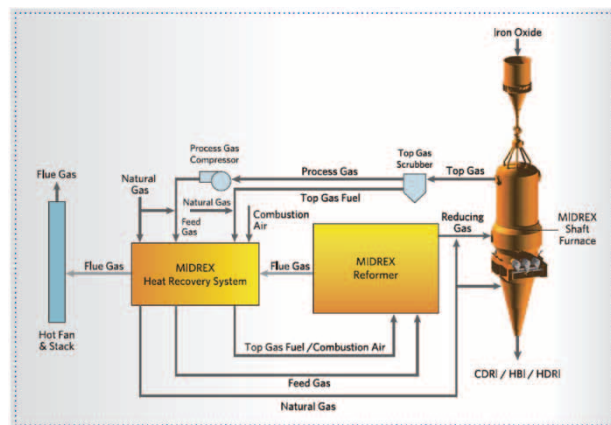
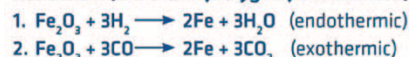


図4 MIDREX NGフローシート
 Fig.4 MIDREX NG flowsheet

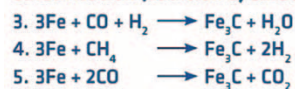


図5 アルジェリア・オランのトシアリ社の製鉄所に建設された最新MIDREX NGプラント (還元シャフト炉 (奥中央) と製鋼工場 (奥左側) にHDRIを搬送するコンベア (手前))
 Fig.5 Latest MIDREX NG plant: Tosyali in Oran, Algeria. (Reduction furnace in center with HDRI conveyor to EAF meltshop on left side.)

Reduction (removal of oxygen from iron ore)



Carburization (addition of carbon to iron)



Reforming (conversion of CH₄ to CO and H₂)

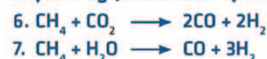


図6 ミドレックスプロセスの主要な化学反応
 Fig.6 Major chemical reactions in MIDREX Process

はDRIの冷却が可能となる。

シャフト炉頂から排出される350~450℃の還元後ガスは冷却されて除塵(じょじん)される。このガスには還元反応生成物であるCO₂とH₂Oに加えてCOとH₂も含まれている。このため、その約2/3は還元ガスとしてリサイクルされ、残りは改質反応に必要な熱源に利用される。リサイクルされるガスは天然ガスが加えられた後に、ミドレックスリフォーマに送られる。ミドレックスリフォーマは、ニッケルをベースにした特殊な触媒を充填したチューブが耐火物ケーシング内に収められた構造になっている。ガスがチューブ内を通る過程で酸化化合物(CO₂, H₂O)とメタンとが触媒によって反応し、COとH₂に改質される。天然ガスを利用した他のDRI製造プロセスでは、通常の水蒸気リフォーマを採用している。これに対して還元生成物であるCO₂を主な改質剤として使用するミドレックスリフォーマでは、H₂/CO比の低いガスを製造できる。これをシャフト炉の還元ガスとして使用することで、COによる還元に伴う発熱によりシャフト炉内を安定して高温に維持でき、安定した操業と高品質のDRI製造が可能となっている。

ミドレックスプロセスは、つぎの三つの目的で天然ガスを効率的に使用している。

- (1) 鉄鉱石の還元に必要なCOとH₂の原料
- (2) シャフト炉およびリフォーマへの熱源
- (3) 還元鉄の冷却および浸炭促進剤

また、ミドレックスリフォーマには排ガス顕熱回収設備があり、リフォーマ供給ガスや燃焼空気、天然ガスなどを予熱することによって高い熱効率を実現している。

ミドレックスプロセスが鉄鉱石原料および還元ガスに関してフレキシブルであることは長年の実績が示している。鉄鉱石原料として、世界各地の鉄鉱石ペレットに加えて、銘柄にもよるが塊鉄石を高配合で使用することが可能である。またミドレックスプロセスは、COREX[®]ガス、石炭ガス、コークス炉ガスおよび水蒸気リフォーマガスなど、H₂/CO = 0.5~3.5のさまざまな還元ガスを商業プラントで用いてきた実績を有している。ミドレックス社は、小規模であるがR&Dセンターに建設したパイロットプラントを1970年代後期から1980年代半ばまで操業し、最高H₂/CO=4.2の還元ガスを用いた実績もある。

ミドレックスプロセスがDRI製造プロセスの中で拡大してきた主な理由は、プロセスがシンプルであることである。たとえば、鉄鉱石還元とガス改質とを別々の反応器で行うことでプロセス制御が容易になっている。また、ミドレックスプロセスは低い運転圧力を採用しており、これがプラントの安定かつ容易な運転をもたらしている。これらにより、多くのプラントが年間8,000時間を超える稼働時間を毎年達成している。

4. イノベーションの継続によるミドレックスプロセスの進化

1969年にオレゴン州ポートランドに最初のミドレックスプラントが稼働を始めてから、2018年にアルジェリ

アの最新プラントが稼働を始めるまで、ミドレックスプロセスには大小多くの改良がなされた。神戸製鋼グループの一員であるミドレックス社に対する神戸製鋼の技術開発支援、プラント操業からのフィードバック、および技術提携パートナーとの協力などから得られる革新的なアイデアを採用してきた。これにより、ミドレックスプロセスは最も信頼性が高く、効率がよく、また環境に優しいプロセスに進化した。

Direct from Midrexの最近の記事³⁾に、これまでミドレックスプロセスに採用されてきた革新技術を網羅するリストが掲載されている。そのうちの6件を以下に例示する。

- ・熱回収設備の増強による大幅なエネルギー効率の向上
- ・鉄鉱石ペレット表面へのコーティングによるクラスタリング防止とシャフト炉高温操業の実現
- ・還元ガスへの酸素吹き込みによるシャフト炉高温操業の実現
- ・HBIの強度・耐再酸化性・歩留りを向上させるホットブリケティングおよびHBI冷却技術
- ・電気炉へのHDRI直接装入(HOTLINK[®]注1))による溶解エネルギーの低減と、これによる電気炉の生産性向上およびコストダウンの実現
- ・大型シャフト炉(MEGAMOD[®]注2))の適用によるプラント規模の拡大(1970年代年産40万トン→現在年産250万トン)

また最近では、当社R&Dチームと神戸製鋼所とが協力して以下の新技術を開発した。

- ・ミドレックスリフォーマの性能向上技術
 - (1) 大口径11インチチューブ
 - (2) 高温時のひずみを抑えるMA-1合金
 - (3) 圧力損失を低減する新触媒(R7RWH, R17)
 - (4) NOx排出を低減する新たなバーナシステム
- ・ACTTM(Adjustable Carbon Technology)

COと天然ガスとの混合ガスをシャフト炉下部に吹込むことにより、HDRI排出温度と含有炭素量を個別に制御できるシステム
- ・DRIPAX and Expert system

プラントのオペレータおよびエンジニアによる操業の最適化を支援するコンピュータツール
- ・MidrexConnectTM

プラント設備を遠隔監視し、操業データを解析するサービスの提供。ミドレックス本社からWeb経由でプラントデータにリアルタイムでアクセスし、プラント性能に影響するプロセス変数と生産プロセス全体への影響を確認する。これによりプラントオペレータが即座に判断して操作しなければならない情報をプラントに伝達する⁴⁾。
- ・Integrated Plant Solutions (IPS)

プラント機器と操業を総合的に解析し、稼働率と

脚注1) HOTLINKは当社の登録商標である。

脚注2) MEGAMODは当社の登録商標である。

生産性を向上する総合ソリューションを提供。ミドレックス社は現在、水処理設備管理サービスを複数のプラントに提供している。

・ Midrex H₂

Midrex H₂については5.4節で詳述した。

この10年間にミドレックス社は提携パートナーとともに9基のプラントを建設し稼働させた。加えて、二つのプラントが現在建設中もしくはコミショニング中である。これらすべての新プラントが上でリストアップした技術のすべて、あるいはほとんどを採用している。これはミドレックス社がさまざまなアイデアから斬新で意義ある商品開発をしてきた成果である。

前述したアルジェリアの年産250万トン最新プラントにおいては主にHDRIを生産し、熱間搬送コンベアにより隣接する電気炉に連続供給することで最大の生産性と最小の消費エネルギーが実現される。また、ミドレックス社が建設したこれらのプラントにおいては、大口徑M1合金チューブを8列配置した新設計のリフォーマ、還元ガスヘッダへの2箇所ガス供給や2基並列リフォーマ排ガスホットファンなどの新技術が適用されている。

さらに、クリーブランド・クリフス社向けに建設中の年産160万トンHBIプラントでは、前述のACT技術の採用によりHBI含有炭素量を調節することが可能な最初のプラントである。

5. ミドレックスプロセスによるCO₂フリー製鉄への道筋

5.1 鉄鋼業によるCO₂排出

鉄鋼業は、とくにその製鉄プロセスが石炭に大きく依存しているため、温室効果ガス最大の排出産業の一つであり、排出量全体のおよそ7~9%を占める。世界で生産される粗鋼の約70%が高炉で造られた銑鉄(せんでつ)が転炉で精錬されたものである⁵⁾。高炉を使った製鉄ではコークスおよび石炭をエネルギー源や還元剤として使用している。このため、高炉-転炉プロセスでは1.6~2.0 t/t-steelの多量のCO₂を排出する。

いっぽう、ミドレックスプロセスは天然ガスをエネルギー源および還元剤として使用していることから、高炉と比べてCO₂排出量の少ない製鉄が可能である。

以下の節では、ミドレックスプロセスを利用することによってCO₂排出量を下げていく道筋を概説する。

5.2 高炉からMIDREX NGプロセスへの置き換え

上記のように、天然ガスを使用したMIDREX NGプロセスはCO₂排出量の少ない製鉄が可能である。このプロセスと電気炉とを組み合わせる場合、CO₂排出量は鉄鉱石を用いて粗鋼を生産する商業プロセスの中で最も少ない1.1~1.2 t/t-steel⁶⁾とすることができる。すなわち、高炉-転炉プロセスからMIDREX NG-電気炉プロセスに置き換えることによって大幅なCO₂削減が可能である。

さらに、MIDREX NGプロセスにCO₂除去設備を設置し、除去したCO₂を地中深くに貯留(CCS: Carbon dioxide Capture and Storage)あるいは新たな商品やエネルギーとして利用(CCU: Carbon dioxide Capture and Utilization)できれば、高炉-転炉プロセスの約1/3のCO₂排出量にまで低減することができる。

MIDREX NGプロセスはCO₂除去設備を含めて豊富な実績があり、これに置き換えることによって技術的リスクを負うことなくCO₂排出量を効果的に大幅に低減することができる。

5.3 MIDREX NGプロセスにおける水素への部分置換

ミドレックスプロセスが排出するCO₂を劇的に低減する究極の方法は、燃料および還元剤に使用する天然ガスの代わりに再生可能エネルギーから製造された水素(以下、グリーン水素という)を使用することである。

その第1段階は、既存のMIDREX NGプラントにおいて、グリーン水素が入手可能になった時点で天然ガスの一部をグリーン水素に置き換えることである。図7に、MIDREX NGプロセスに水素を添加する場合のフローシートを示す。図7(a)では、設備を改造することなく20~30%までの天然ガスを水素に置き換えることが可能である。たとえば、年産200万トン能力のDRプラントにおいては、天然ガス消費量全体の約30%に相当する約20,000 Nm³/hの天然ガスを60,000 Nm³/hの水素によって置き換えることができる。さらに多くの天然ガスを置き換える際には、ミドレックスリフォーマに蒸気を供給する必要がある。この蒸気は別途ボイラで製造するか、あるいは製鉄所内で入手できる他の蒸気源を活

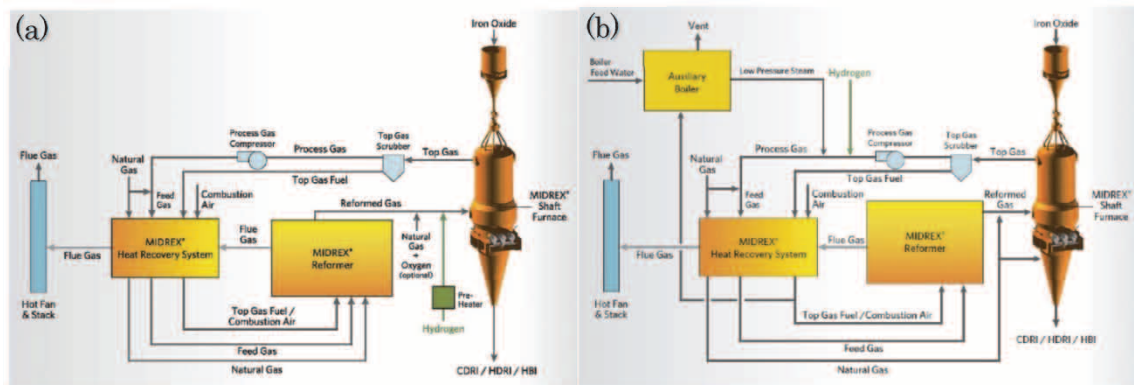


図7 H₂添加MIDREX NGプロセス (a) 20~30%以下の天然ガス置換, (b) 30%以上の天然ガス置換

Fig.7 MIDREX NG Process with hydrogen addition:

(a) less than 20-30% of natural gas displacement, (b) more than 30% natural gas displacement

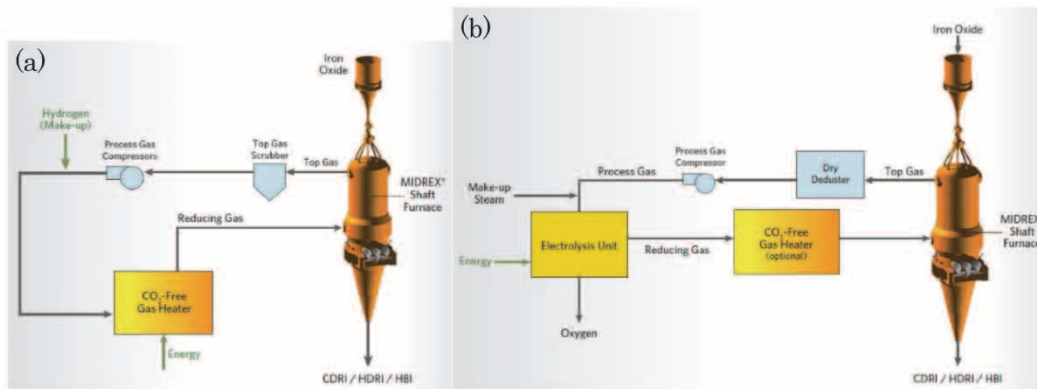


図8 MIDREX H₂プロセス (a) H₂を外部から供給, (b) H₂発生設備の組み込み

Fig.8 MIDREX H₂ Process: (a) hydrogen supplied over-the-fence, (b) integrated hydrogen generation

用することができる。図7 (b) がこの場合のフローシートである。蒸気を供給するためのこれらの改造を既存のMIDREX NGプラントに施すことは可能である。また新規プラントにおいては、将来の改造を考慮した設計にすることが可能である。

炭素経済から水素経済へのインフラ変化の過程で、利用可能となる水素量が日ごとあるいは季節ごとに変動する場合、ミドレックスプロセスはその時の状況に応じて柔軟にエネルギー源を変えることができる。また水素は、プラントサイト内で製造することも、外部で製造された水素を受け取ることも可能である。

5.4 MIDREX H₂プロセス (100%水素使用)

MIDREX H₂プロセスのフローシートを図8に示す。図8 (a) は外部で製造された水素を供給する場合、図8 (b) は水素製造設備をプロセス内に組み込んだ場合である。ミドレックスリフォーマは必要なく、水素を必要な温度まで昇温するガスヒータのみが必要となる。既存のMIDREX NGプラントをMIDREX H₂プラントに切り替える場合、吸熱である改質反応がなくなって熱負荷が下がるため、ミドレックスリフォーマを簡単にガスヒータに転換することができる。新規のMIDREX H₂プラントでは、水素の昇温に限定した機器仕様にする事ができる。シャフト炉については、プロセスモデル計算とラボ実験により、既設デザインのまま100%水素を適用してDRIを生産することが可能であることを検証している。

これらのフローシートにおける水素原単位は約650 Nm³/t-DRIである。さらに150 Nm³/t-DRIまでの水素、あるいは別のCO₂負荷の低い熱源、たとえば廃熱や電気、天然ガスが還元ガスヒータのエネルギー源として必要となる。MIDREX H₂プロセスを電気炉と組み合わせることにより、使用電力のCO₂負荷によって削減量は異なるが、高炉-転炉プロセスで粗鋼を製造する場合と比べて、CO₂排出量を80%以上削減することが可能である。

6. 水素製鉄が直面する課題

本章では、前章で述べたMIDREX NGプロセスにおける水素への部分置換、およびMIDREX H₂プロセスにおける100%水素使用に向けた課題について述べる。図6の化学反応式が示すように、天然ガスを使用する現在

のMIDREX NGプロセスにおいて、すでに多くの水素を鉄鉱石の還元で使用している。したがって、MIDREX NGプロセスでの水素の部分置換あるいはMIDREX H₂プロセスは、技術のブレークスルーというよりMIDREX NGプロセスからの進化というべきである。

このようにMIDREX H₂へのハードルは高くないが、いくつかの課題がある。その一つがシャフト炉内の温度である。還元ガス中に水素が増えることによって、発熱反応である一酸化炭素還元 (図6の反応2) から吸熱反応である水素還元 (図6の反応1) へ移行する。これによってシャフト炉内の熱バランスが影響を受け、シャフト炉内に供給する熱量を増やす必要がある。しかしながらMIDREX H₂ではいくつかの方法のなかから個々のプロジェクトの状況に応じて対応することが可能である。

もう一つの課題は製品DRI中の炭素量である。100%水素で還元するとDRI中の炭素量が0%になる。今日の電気炉で最もよく実施されている操業では、DRIや銑鉄などの鉄源に含まれる炭素あるいはコークスブリーズなどの炭素質物質を積極的に利用している。これは、炭素によって鉄の融点が下がることをはじめ、DRI中に残存する酸化鉄を還元するのに炭素を必要とするからである。また、酸素を吹込むことによって炭素を燃焼し、多くのエネルギーを発生させて溶解時間を短くできるなどのメリットがある。すなわち、炭素なしでは電気炉の効率が大幅に低下することになる。そのため、CO₂排出コストを含む多くの要素を考慮し、電気炉とDRプラントとを全体として最適なDRI中炭素濃度と、それに合わせた操業条件に変更する必要がある。DRIに含まれる炭素の利用効率はコークスブリーズなどの炭素質物質より高い。このため、DRプラントにおいてDRIにいくらかの炭素を添加することが求められる可能性がある。その場合、たとえば50 Nm³/tの天然ガスの添加によって1.4%のDRI中炭素を得ることが可能である⁷⁾。

水素製鉄を実現させるための最大の課題は、グリーン水素のコスト低減と供給の安定化である。世界的に現在、ほとんどの水素は水蒸気リフォーマを用いて化石燃料から製造されている。いっぽう、グリーン水素は水を電気分解することによって製造されており、その電気にはCO₂フリーの電気が利用されている。水の電気分解技術は新しいものではなく、電気分解槽に多くの開発が行

われている。しかしながらどの技術を用いても大量の電力が必要で^{注3)}、電気分解槽の運転コストのほとんどが電気代である。したがって、現在の価格の天然ガスから置き換えるには電気料金が\$0.01/kWh程度に低下しなければ経済的に成立しない。さらに、現在確立している技術をもってしても、DRプラントに必要な量の水素を供給することができない。最近欧州で発表されている最大のプロジェクトでは、100 MWのアルカリ電気分解によって水素を製造する計画⁸⁾がある。しかし、ミドレックスプラント1基に必要な水素を賄うには、この6~8倍の規模が必要である。また、電気料金が\$0.01/kWhになったとしても、化石燃料から製造した水素の価格と同等になるためには、電気分解槽の設備費を現在の1/3~1/4にまで下げる必要がある。電気分解槽の大規模化に向けた開発も進められているが、大規模化で設備コストを下げるとしても、経済的に成立するにはまだ時間を要しそうである。

水素が安定供給されて水素経済が実現するためには、水素製造コストの課題に加えて水素の貯蔵や輸送のような水素インフラの課題にも挑戦していく必要がある。

水素経済実現のもう一つの課題は発電である。たとえば、スクラップとMIDREX H₂で製造したDRIを50:50で電気炉に供給することによって現在の我が国の粗鋼量を生産することを考える。この場合、DRプラントに必要な電力だけでも約25 GWのグリーン電力、すなわち300,000 haのソーラーパネル、あるいは40,000ユニットの発電風車(7,500 haの敷地)、もしくは20基の原子力発電所が必要となる。このように膨大な量のグリーン電力が必要であり、これは国家レベルでの対応を要する課題と考える。

7. MIDREX H₂プロセスの実証プラント

アルセロール・ミッタル社は2019年9月、水素を使って鋼を生産する実証プラントをミドレックス社と協力してドイツ・ハンブルグに建設することを発表した。このプロジェクトの目的は、還元剤に水素のみを用いて生産したDRIを電気炉で使用して溶鋼製造することを実証することである。この実証プラントでは、天然ガスを還元剤とする既設ミドレックスプラントの炉頂ガスに含まれる水素を回収し、これを使って年間10万トンのDRIを製造する。将来的には、部分的もしくは全ての水素を再生可能エネルギーで製造する構想である。このプロジェクトにおいて両社は、水素還元によるDRI物性や溶解特性などの技術課題に取り組む計画である。

むすび=ミドレックスプロセスが誕生して2019年で50周年を迎えた。同時に当社が神戸製鋼所のグループに加わって37年が経過した。このシンプルで優れたプロセスの改善・改良を継続することによって効率が向上し、市場に合わせて進化を遂げてきたことが今日までのビジネスの成功につながっている。鉄鋼業界の最近の動向を背景に、鋼材品質に対する高い要求を満たすと同時に、温室効果ガスの排出を大きく低減できるDRIという高級鉄源を製造する技術として、ミドレックスプロセスの役割はこれまで以上に大きなものになると考える。

ミドレックスプロセスは実績が豊富な確立した技術である。これを導入することによって温室効果ガス排出量を直ちに削減できるのみならず、将来的に求められる大幅な削減を実現させ得る最も信頼できる技術であると考えている。

参 考 文 献

- 1) Blast Furnace Roundup 2002. Iron and Steelmaker. August 2002.
- 2) Midrex Technologies, Inc. 2018 World Direct Reduction Statistics.
- 3) Kopfle, J. et al. DIRECT FROM MIDREX 2nd QUARTER 2019.
- 4) Cotton, C. DIRECT FROM MIDREX 1st QUARTER 2019.
- 5) worldsteel ASSOCIATION. FACTSHEET Steel and raw materials 2019.
- 6) Treatise on Process Metallurgy Volume 3: Industrial Processes. p.170.
- 7) Chevrier, V. et al. MIDREX H₂TM: Ultimate Low CO₂ Ironmaking and its place in the new Hydrogen Economy. AISTech 2018, conference, Philadelphia, PA.
- 8) REUTERS. "German energy grids say plans ready for 100 MW hydrogen plant". February 11, 2019, <https://uk.reuters.com/article/us-amprion-opengrid-europe-hydrogen/german-energy-grids-say-plans-ready-for-100mw-hydrogen-plant-idUKKCN1Q01S4>. (参照 2020.2.10).



Vincent CHEVRIER
Midrex Technologies Inc.



Lauren LORRAINE
Midrex Technologies Inc.



道下晴康
Midrex Technologies Inc.

脚注3) 1 MWhで製造できる水素はおよそ200 Nm³ (18 kg) 程度である。