



連携記事

ミドレックスプロセス —その進化と脱炭素製鉄への展望—

MIDREX Process : Bridge to Ultra-low CO₂ Ironmaking

Midrex Technologies Inc.
Director

道下晴康

Haruyasu Michishita

(株) 神戸製鋼所
エンジニアリング事業部門
新鉄源センター 技術室 担当部長

三村 毅

Tsuyoshi Mimura

(株) 神戸製鋼所
エンジニアリング事業部門
新鉄源センター 担当部長

杉立宏志

Hiroshi Sugitatsu

1 はじめに

パリ協定の批准を受けて温室効果ガス排出量の削減が課題となるなか、天然ガスを使用した直接還元製鉄法は、今日の鉄鋼業において、CO₂排出量の大幅な削減が達成できる商業的に実証された唯一の製鉄プロセスである。各種ある直接還元製鉄法の中で、ミドレックスプロセス (MIDREX® Process) は1979年以降、世界の年間還元鉄 (Direct Reduced Iron、以下DRIという) 生産量の50%以上を占めており、シンプルで効率的なプロセスと長年にわたる継続的な技術革新・改善、プラント操業技術の進化により発展してきた。

MIDREX NG™の水素置換とMIDREX H₂™は、CO₂排出のほとんどない製鉄を実現できるミドレックスプロセスの進化系である。特にMIDREX NGの水素置換は、ミドレックスプロセスが使用する天然ガスを0~100%の任意割合で水素に置き換えられる機能を有し、水素化への移行に対応できる。競争力のある価格で十分な量の水素がいつ確保できるかわからない不確実性を考えると、MIDREX NGの水素置換は現時点で直ちにCO₂削減が図れるとともに、将来の更なるCO₂削減を達成するための有効な選択肢となる。

本稿は、過去50年間にミドレックスプロセスに導入された重要な改良と革新技術を解説し、水素社会の到来で実現するミドレックスプロセスによる超低炭素製鉄を展望する。

鉄鉱石直接還元プロセスである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の第一号機から活動を始めた。2018年にはDRI累積生産量10億トンというマイルストーンを達成している。ポートランドの第一号機以降、プラント1基当たりの生産能力は図1に示す通り年産15万トンから250万トンに増加した。

また、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年に建設された現在稼働中最古のプラントは、仕様能力年産40万トンに対し、2017年に63万5千トンとこれまでで最高の年間生産量と8000時間を超える稼働時間を達成した。

最新のプラントとしては、アルジェリア・トシアリ社向け、およびアルジェリアン・カタール・スチール社 (AQS) 向けの、それぞれ年産250万トンの能力を持つ二つのプラントが運転を開始した。アルジェリア・トシアリ社プラントはアルジェリア・オラーン近郊に建設され、2018年11月に生産を開始した。このプラントは、竣工後わずか8か月の2019年7月に日産7,700トンの世界記録を樹立し、2020年に年間DRI生産量の世界記録を達成したが、さらに翌2021年に228万トンを生産し世界記録を更新した。アルジェリア・ベラーラのAQSプラントは2021年2月13日に立ち上がり、3月18日に最初のDRIを生産した。

また、クリーブランド・クリフス社は、米国オハイオ州トレドで年産160万トンのホットブリケットアイアン (HBI) プラントの運転を2020年後半に開始した。さらに、ロシアのクルスク近くにそれぞれ208万トンの能力を持つ二つのHBIプラントの納入契約が、メタロインベスト社と締結されている。

DRI市場拡大の最も大きな要因は、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世界的なシフトが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の維持には、鉱石由来の鉄源 (Ore-based Metallics: OBM) の併用が必要で、これによりDRIの需要が世界的に増えている。

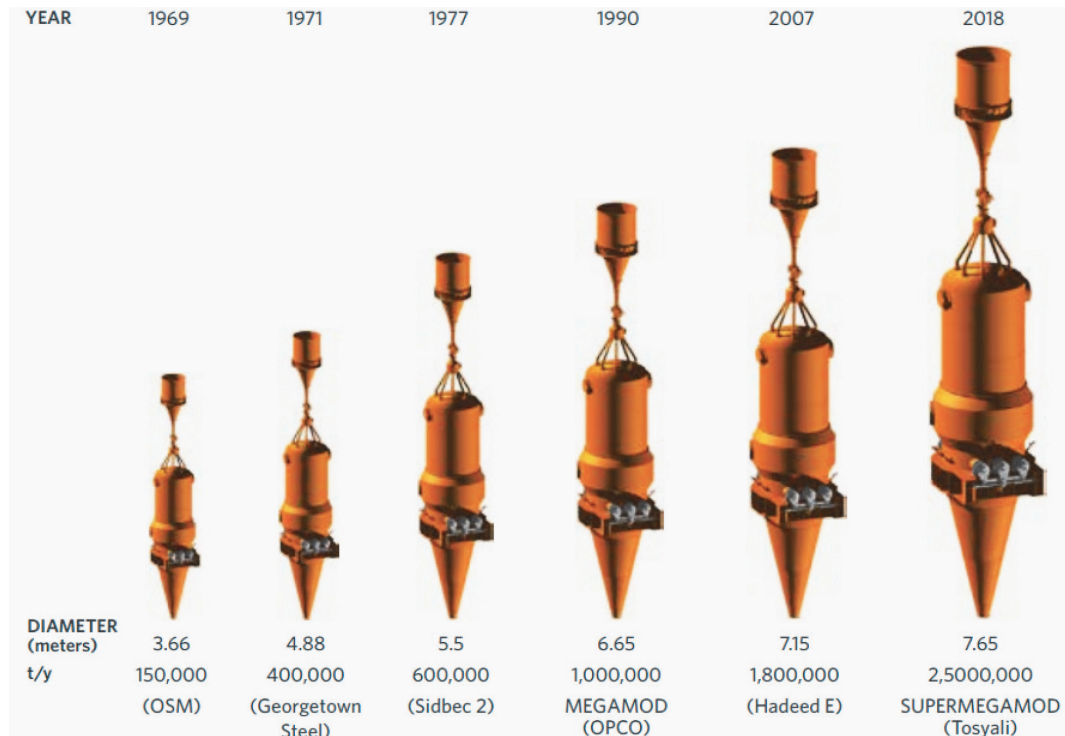


図1 ミドレックスシャフト炉設計の進化 (Online version in color.)

一方将来的には、天然ガスおよび水素で還元されたDRIをスクラップと共に電気炉で使用することがCO₂削減に繋がるので、環境面からもDRI市場の拡大が期待されている。競争力のある価格で十分な量の水素を製造する手段が開発され、直接還元プラントでその水素が使用できるようになるに伴い、既存のミドレックスプラントを改造して天然ガスを水素に置き換える機能（MIDREX NGの水素置換）を付加すること、もしくは100%までの水素を燃料と還元剤とする新しいプラント（MIDREX H₂）を展開していくことで、鉄鋼業のCO₂排出削減にミドレックスプロセスが貢献できると考える。

2 DRI：製品付加価値を向上させる製鋼原料¹⁾

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一方で、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り、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。

2.1 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）、その物理・化学性状に応じて電気炉、高炉などで使用されている。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、酸素が抜け出たことによって生じた気孔が多く存在しており、空気などに触れると再酸化するという性質がある。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、気孔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中の再酸化に伴う品質劣化と発熱・発火の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。このようにHBIは外販に好ましい形態であることから、サプライチェーンが形成され、ロシア、米国、リビア、マレーシア、ベネズエラなど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が市場で取引されている。米国にはフェーストアルピーネ社のテキサスとクリーブランドクリフス社のトレドに二つのHBIプラントがある。

一方、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℃以上のDRIを高温のまま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、電気炉の生産性向上とCO₂排出削減に貢献している。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2019年の世界

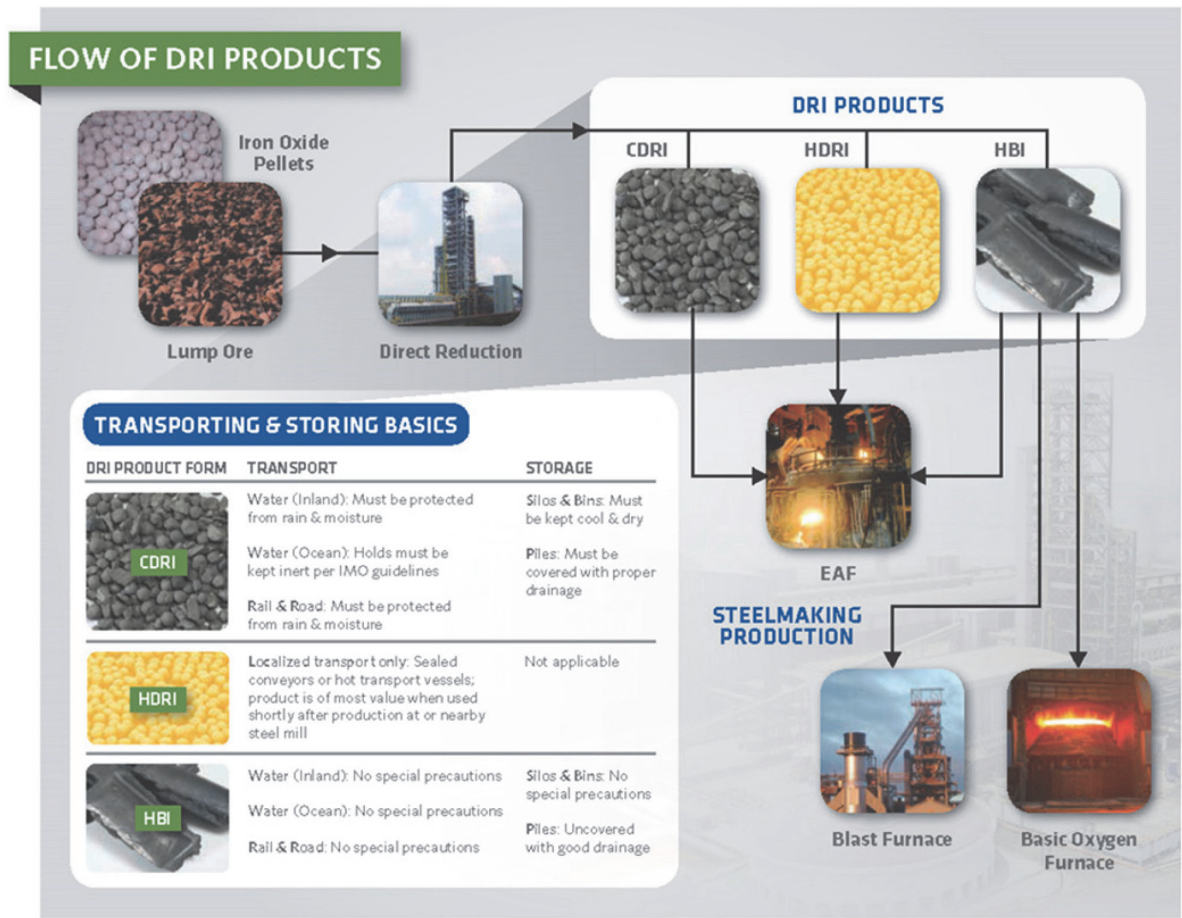


図2 各種DRI製品の特徴とその用途 (Online version in color.)

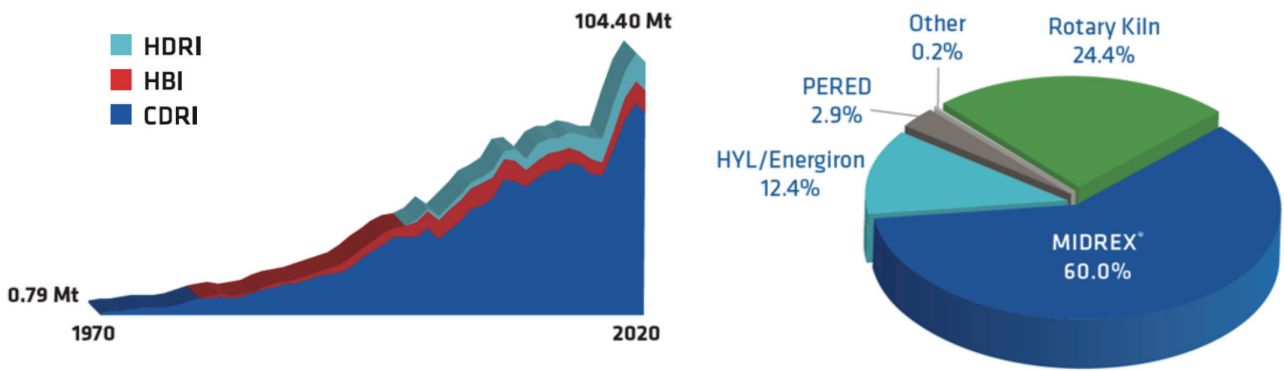


図3 世界のDRI年間生産量の推移と2020年における生産プロセスの内訳²⁾ (Online version in color.)

DRI生産量は1億8百万トンとなり、2020年はCOVID-19の影響を受けたものの1億4百万トンを維持している²⁾。

③ ミドレックスプロセスの概要¹⁾

天然ガスベースの最新のミドレックスプロセス (MIDREX NG) 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) の外観写真をそれぞれ図4、図5に示す。MIDREX NGプロセス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から構成される。

シャフト炉では、常温の鉄鉱石ペレットあるいは塊鉱石が炉頂から装入され、炉内を降下する鉄鉱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、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 (H_2) と反応して除去され、二酸化炭素 (CO_2) と水蒸気 (H_2O) になる。

これらの固体—ガス反応を図6に示す。 H_2 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 (CH_4) 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に吹き込むことにより、DRI 中の炭素含有量を高めることができ、

CDRI のプラントにおいてはDRIの冷却を同時に行っている。

シャフト炉頂から排出される350～450℃の還元後ガスは冷却・除塵される。このガスには還元反応生成物である CO_2 と H_2O に加えてCOと H_2 も含まれている。このため、その



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)) (Online version in color.)

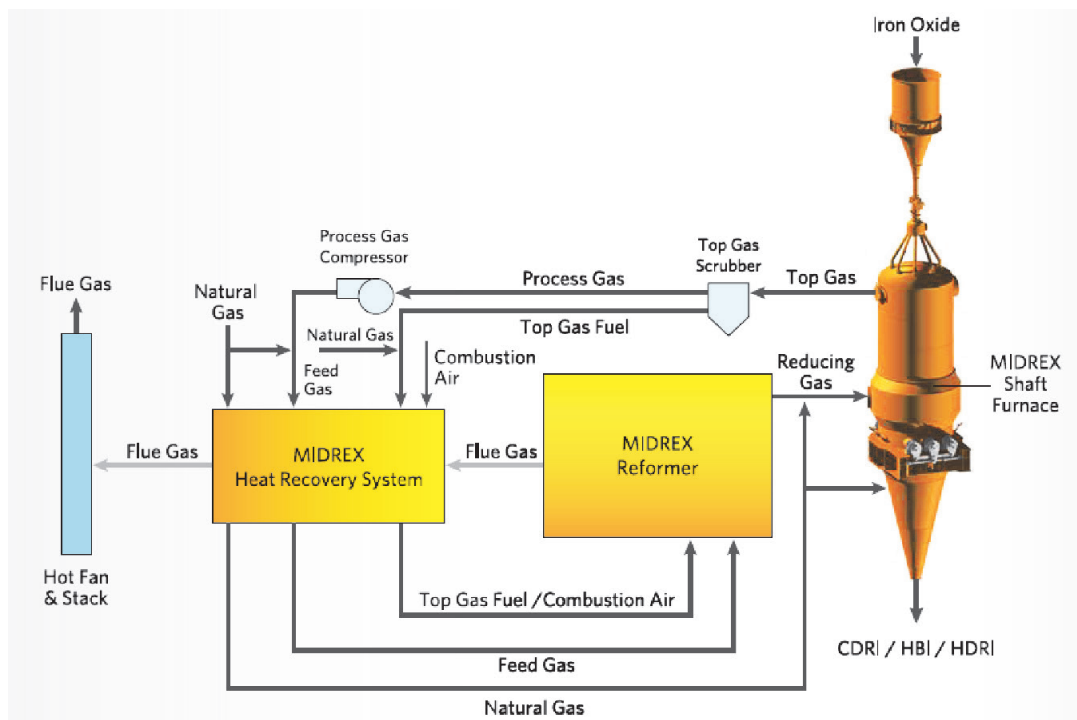


図4 MIDREX NG フローシート (Online version in color.)

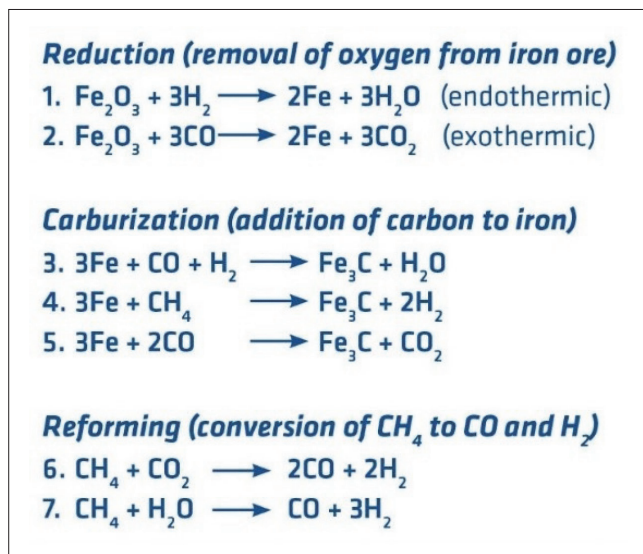


図6 ミドレックスプロセスの主要な化学反応 (Online version in color.)

約2/3は還元ガスとしてリサイクルされ、残りは天然ガスの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(以下プロセスガスという)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を耐火物ケーシング内に収容し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(CO_2 , H_2O)とメタンとが触媒によって反応し、 CO と H_2 に改質される。ミドレックスリフォーマは、従来の水蒸気リフォーマを使用する他のDRI製造プロセスとは異なり、主な改質剤として H_2O に加えて CO_2 を使用し、約1.5と低い H_2/CO 比のガスを製造する。これをシャフト炉の還元ガスとして使用することにより、図6に示すような H_2 による吸熱還元反応と CO による発熱還元反応を共存させて熱的なバランスがとれる。その結果、シャフト炉内を安定した高温に維持することが可能となり、安定した操業と高品質なDRIの製造が可能となっている。

ミドレックスプロセスは、天然ガスを次の三つの目的で効率的に使用している。

- (1) 鉄鉱石の還元に必要な CO と H_2 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、 $\text{H}_2/\text{CO}=0.5\sim 3.5$ の様々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、小規模ではあるが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、最高で $\text{H}_2/\text{CO}=4.2$ の還元ガスを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8000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¹⁾

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、2021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の採用により、ミドレックスプロセスは最も信頼性が高く、効率がよく、また環境に優しいものに進化した。これまでミドレックスプロセスに採用されてきた革新的技術のうちの6件を以下に例示する。

- (1) 熱回収設備増強による大幅なエネルギー効率の向上
- (2) 鉄鉱石ペレット表面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
- (3) 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
- (4) 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
- (5) 電気炉へのHDRI直接装入 (HOTLINK[®]*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
- (6) 大型シャフト炉 (MEGAMOD[®]*2) の適用によるプラン

*1 HOTLINKは、Midrex Technologies Inc.の登録商標

*2 MEGAMODは、Midrex Technologies Inc.の登録商標

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、ミドレックス社R&Dチームと神戸製鋼所が協力して以下の新技術を開発した。

- (1) ミドレックスリフォーマの性能向上技術
 - 大口径11インチチューブ
 - 高温時のひずみを抑えるMA-1合金
 - 圧力損失を低減する新触媒（R7RWH、R17）
 - NO_x排出を低減する新たなバーナーシステム
- (2) ACT™（Adjustable Carbon Technology）
COと天然ガス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
- (3) 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最適化を支援するコンピュータツール
- (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。
- (5) MIDREX-NGの水素置換およびMIDREX H₂
後述参照
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10基のプラントを建設し稼働させた。加えて、複数のプラントが現在建設中である。これら全ての新プラントが上にリストアップした技術の全て、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をもとに斬新で意義ある商品開発を行ってきた成果である。

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

現在の製鉄プロセスが石炭に大きく依存しているため、鉄鋼業は最大の温室効果ガス排出産業の一つとなっており、排出量全体のおよそ7～11%を占める³⁾。世界で生産される粗鋼の約70%が、高炉で造られた銑鉄を転炉で精錬したものである⁴⁾。高炉ではコークスおよび石炭をエネルギー源および還元剤として使用しているため、高炉—転炉プロセスでは1.6～2.0t/t-steelの多量のCO₂を排出する。

一方、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。以下に、ミドレックスプロセスを利用することによりCO₂排出量を下げていく道筋

を概説する。

5.2 高炉へのHBI装入

DRIとHBIは電気炉で最も多く使用されるが、HBIは高炉でも長年使用されている。これは、HBIが主に還元された金属鉄で構成されており、高炉で使用される場合には炉内の還元負荷を減少させることにより、増産に寄与しうること、またコークス消費量を減少させることでCO₂排出量の減少をもたらすためである。高炉でのHBI装入に伴い、装入物の金属化率が10%増加すると、8%の生産性向上と7%のコークス比低減が実現できると報告されている⁵⁾。このように高炉のCO₂排出量を削減する即効的手段として、HBIを利用することができる。神戸製鋼所加古川製鉄所の高炉では、溶銑1トン当たり約300 kgのHBIを使用して、コークス比が溶銑1トン当たり85kg低下した実績があり、CO₂排出量はHBIプラント発生分を含めて約12%削減になることが示されている⁶⁾。

5.3 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を組み合わせた場合、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1.1～1.2t/t-steel⁷⁾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。

5.4 CO₂分離回収と利活用（CCUS）

MIDREX NGプラントでは通常、シャフト炉頂ガスの2/3に含まれるCO₂が改質剤としてリフォーマに再利用されてCOに変換される一種のカーボンループを形成し、CO₂除去を必要としない。残る1/3の炉頂ガスは、いわゆる炉頂ガス燃料としてリフォーマのバーナの燃料として利用され、これに含まれるCO₂が系外に排出される。MIDREX NGプラントでのCO₂排出量は通常0.5～0.6 t-CO₂/t-DRIである。これに対し、例えば炭素税控除などによりCO₂を貯蔵または利用する手段が経済的に成り立てば、CO₂排出量を削減するために、MIDREX NGプラントの炉頂ガス燃料からのCO₂除去システムを含めることが可能である。

CO₂を分離回収するには、次の2つの方法がある。

- (1) 炉頂ガス燃料からCO₂を除去することで、CO₂排出量の約50%を回収することができる。
- (2) リフォーマの排ガスからCO₂を除去することで、CO₂排出量の大半を回収する。

上記(1)では、炉頂ガス燃料の圧力、CO₂濃度が高いためCO₂の分離が容易であるが、炉頂ガス燃料中のCOはCO₂と

なって排出されるため、CO₂排出量0.5~0.6 t-CO₂/t-DRIの約半分が系外に排出される。上記 (2) は、(1) より複雑で費用がかかるが、CO₂排出量をほぼゼロとする事が可能となる。ミドレックスプラントは、CO₂分離回収設備を備える事ができ、CO₂の貯蔵または利用が経済的に成り立った段階で、CO₂分離回収設備を追加設置することも可能である。

5.5 ミドレックスプロセスによる水素製鉄

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。グリーン水素は、ほとんどの場合、グリーンまたはカーボンフリーの電気で製造されると想定され、現在の水電解技術は、1 MWのグリーン電力当たり約200 Nm³/hの水素を生成する^{8) *3}。MIDREX NGの水素置換もしくはMIDREX H₂による100%水素ベースの直接還元プラントでは、1トンのCO₂フリーDRIを製造するために、還元に必要な約600 Nm³の水素を製造する電力に、還元ガスヒーターのエネルギー源である電力を加え、計約4MWHのグリーン電力を必要とする。したがって、年産250万トンのCO₂フリーミドレックスプラントでは、約1250 MWのグリーン電力が必要となる。

一方、ヨーロッパで最近発表された最も野心的なプロジェクトでは、100 MWのアルカリ電解で水素を製造する計画がある⁹⁾。ミドレックスプラントに必要な水素を確保するためには、この9倍のスケールが必要である。水電解ベースのプロジェクトをより実用的で経済的にするためには、水電解水素設備のさらなるスケールアップが必要である。

また、現在日本で生産されている年間約1億トンの粗鋼を、スクラップとMIDREX H₂で製造されたDRIを電気炉に50:50の比率で供給することにより製造すると仮定する。DRIをグリーン水素のみで製造する場合、年間約220TWhのグリーン電力が必要であり、これは日本の2020年の総電力消費量(907 TWh¹⁰⁾)のおよそ1/4に相当する。これは日本で脱炭素製鉄を実現するために必要なグリーン電力量を示しており、日本の総電力需要に大きな影響を与える。したがって、水力発電のようなグリーン電力が豊富に利用できる特定の地域を除いて、DRIを生産するのに十分な量のグリーン水素または電力がいつ妥当な価格で利用できるようになるのかは想定が難しく、不確実である。

このようにグリーン水素の利用可能性が不確実な中で、天然ガス100%のミドレックスプラントを建設してCO₂排出量を削減することからスタートし、十分な量と競争力のあるコ

ストで水素の利用が可能となった時に水素使用に移行することで、さらに大幅なCO₂排出量削減を図ることが現実的な方策であると思われる。また、現在天然ガス100%で稼働している既存のミドレックスプラントに後述する設備改造を将来実施することで、天然ガスを100%まで任意割合で水素に置換した運転が可能となり、製鉄業のCO₂削減に貢献できる。(MIDREX NGの水素置換)

さらに、現在でもグリーン水素が豊富に利用できる特定の地域において、あるいは将来十分な量のグリーン水素が利用可能になった段階では、100%水素運転に特化したプラントの適用が可能である(MIDREX H₂)。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、現在の高炉一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 MIDREX NG プロセスにおける水素置換¹¹⁾

6.1 プロセスフロー

MIDREX NGの基本プロセスは、既に述べたように還元ガスに多量の水素を含有しており、標準的なMIDREX NGプラントでは、使用する天然ガス量の30%まで、プロセス設備を変更することなく水素に置換することができる。また、さらに高い割合の水素置換による運転も、リスクの低い装置改造によって、100%まで任意の水素置換割合で可能であり、たえず変化する市場のニーズと原燃料の入手可能性に柔軟に対応できる。図7は、MIDREX NGの水素置換での3つの水素添加ポイントを示すフローシートである。

水素添加の初期段階から水素による天然ガス置換割合が一定の高レベルに達するまで、水素はリフォーマの下流にのみ添加される(①)。これにより、リフォーマの運転条件をMIDREX NGで実績のある条件に近づけることができ、リフォーマの運転の最適化が容易になり、還元ガスの品質(還元度)を最大限に高めることが可能となる。さらに高い天然ガス置換割合においては、還元ガスの品質を維持し、プロセスのエネルギー効率を高めるため、水素添加ポイントがリフォーマの下流から上流に変更される(③)。また、製品DRI中の炭素含有量を可能な限り維持し、かつCO₂排出量を削減するために、高い天然ガス置換割合においては、リフォーマバーナ燃料に加えられる天然ガスが水素に置換され(②)、シャフト炉還元ゾーン下に吹き込まれるDRI浸炭用の天然ガスが最後に水素に置換される。

*3 1 MWhの電気で製造できる水素量は約200 Nm³ (18 kg)

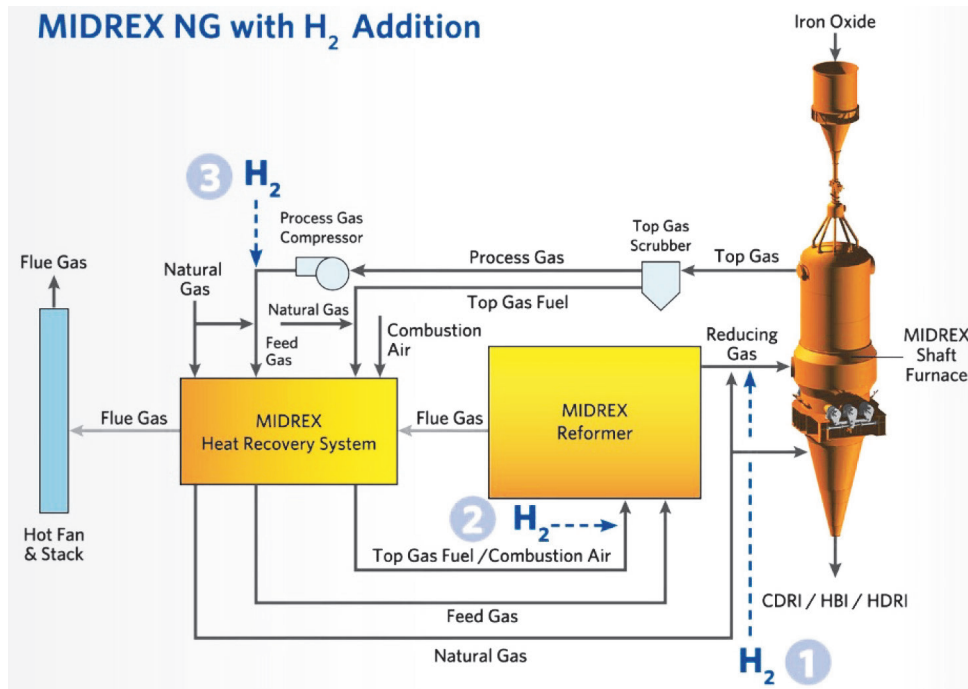


図7 天然ガスを水素に置き換えたときの水素添加ポイント (Online version in color.)

6.2 設備および操業¹¹⁾

ここでは、MIDREX NGをMIDREX NGの水素置換へ転換するプラントの設計思想と、転換するために必要な設備、およびプラント運転とDRI炭素含有量へ与える影響について述べる。

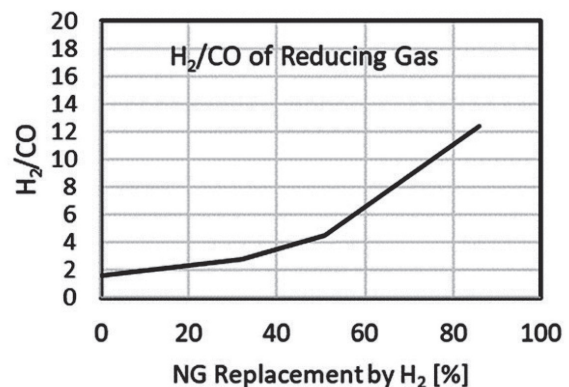
6.2.1 設計思想

設計思想は以下の通りである。

- プラントの生産量は水素置換によらず維持する。
- DRI炭素含有量は同じ天然ガス置換割合において最大化する。
- 最適な還元ガス品質（ガス還元度）を維持するために、水素による天然ガス置換割合に応じて水素を添加する位置をリフォーマの上流又は下流に変える。
- 図8に示すように、水素による天然ガス置換割合が上がるにつれて還元ガスの H_2/CO 比が上昇する。水素による還元反応は吸熱反応であり、 H_2/CO 比が上昇するとシャフト炉の熱負荷が増加するので、必要な熱量を確保するためにトン当たりの還元ガス流量を並行して順次増加させる。
- 設備改造や新しい設備の追加を最小限に抑える。

6.2.2 設備

既存のMIDREX NGプラントは、最小限の設備改造で水素置換が可能なプラントに転換することができる。原料供給/

図8 水素置換にともなう還元ガスの H_2/CO 比の変化

製品排出系、還元炉、スクラバ、プロセス配管、リフォーマ、酸素添加系、浸炭ガス添加系、製品冷却器、HBI冷却系の設備変更は不要である。この項では、100%天然ガスから100%水素までの全ての置換範囲に対応するための主要な設備改造について解説する。

(1) プロセスガス圧縮機

COによる還元と異なり水素による還元は吸熱反応であるので、天然ガス置換割合を増加させるべく水素添加量を増加させると、必要な反応熱量を補償するためにプロセスガス流量を増加させる必要がある。既存プラントのプロセスガス圧縮機能力は天然ガス置換割合が約30%で限界となるが、圧縮ステージを1段追加すると、100%までの水素置換範囲での運転が可能になる。

(2) 熱回収エリア

天然ガス置換割合が増加し天然ガス改質量が減少するにつれ、リフォーマ排ガス熱交換器による熱回収量は減少する。広い運転領域において高いエネルギー効率と運転の柔軟性を維持するために、熱回収システムにはいくつかの改造が必要である。たとえば、配管とバルブを追加することにより、熱交換器の各ラインへの流量を調整、熱交換量を調整して、熱交換器のパフォーマンスを制御してバランスを取る機能が追加される。これに加えて、いくつかのマイナーな機器を追加することで100%までの水素置換範囲で運転することが可能になる。

(3) 冷却ガス圧縮機エリア

既存ミドレックスプラントが、還元炉から直接または外部製品冷却器を介してCDRIを排出するように設計されている場合、天然ガス置換割合が増加すると小規模な並列圧縮ステップを追加する必要がある。

6.2.3 DRI炭素含有量へ与える影響

DRI炭素含有量はミドレックスプラントで消費される天然ガス量に依存し、天然ガス置換割合が上昇するに従い、炭素含有率を高く維持することができなくなる。例えば、天然ガス置換割合30%の場合、HDRI炭素含有率は約1.5%、天然ガス置換割合75~85%の場合は0.3~0.5%となる（図9参照）。

7 MIDREX H₂ プロセス
(100% 水素使用)

7.1 プロセスフローと設備

MIDREX H₂ プロセスのフローシートを図10に示す。図10 (a) は外部で製造された水素を供給する場合、図10 (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、吸熱である天然ガス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、MIDREX NGプラントでのデザインのまま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還元に必要な水素原単位は約600 Nm³/t-DRIであり、加えて還元ガスヒータのエネルギー源として電気、水素、もしくは別のCO₂ 負荷の低い熱源、たとえば廃熱が必要となる。

7.2 MIDREX H₂ プロセスの実証プラント¹⁾

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

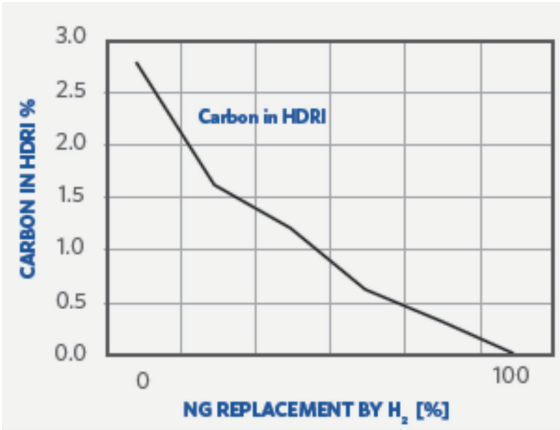


図9 水素置換の増加によるDRI炭素含有量

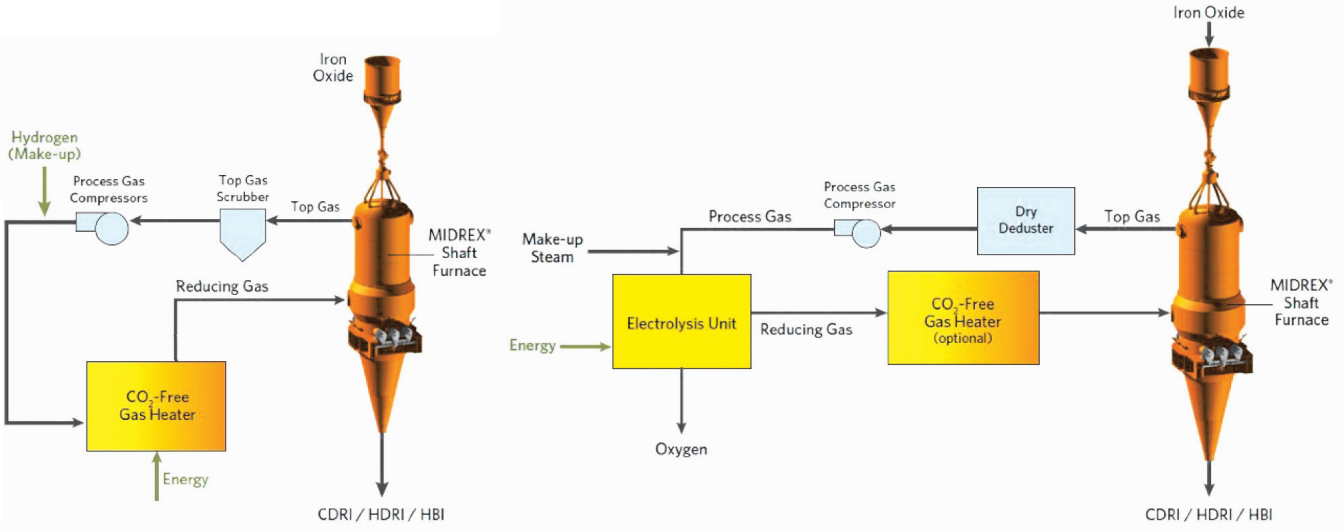


図10 MIDREX H₂ フローシート (a) 水素を外部から供給、(b) 水素発生設備の組み込み

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の実証である。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。

8 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。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。

鉄鋼業は、温室効果ガス、特にCO₂の最大の排出産業の一つであり、脱炭素化が強く望まれている。CO₂排出削減の短期的な手段として、MIDREX NGで製造されたHBIを高炉に供給することにより、CO₂排出量を約12%削減することができる。また、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1.6~2.0 t/t-steelから、1.1~1.2 t/t-steelへ大幅なCO₂削減が可能である。CO₂の貯蔵や利活用が経済的に成り立つ立地であれば、MIDREX NGプラントでCO₂を分離回収し、これを活用ないし貯蔵するCCUSが適用可能である。

鉄鋼業界のCO₂排出量を大幅に削減するための最善の方策の一つは、ミドレックスプロセスでエネルギー源および鉄鉱石の還元剤としてグリーン水素を使用することである。しかし、水力などのグリーン電力が豊富に利用できる特定の地域を除いて、製鉄に使用するのに十分な量のグリーン電力を妥当な価格で利用可能になるかには、大きな不確実性がある。ミドレックス社は、100%天然ガスから100%水素にわたる直接還元技術を提供している。例えばMIDREX NGは、設備を変更することなく天然ガスの30%を水素に置換することが可能であるが、MIDREX NGプロセスで更に多くの天然ガスを水素で置換し、天然ガスと水素を任意の割合で運転することも、いくつかのリスクの低い改造によって可能になる。また一方で、MIDREX H₂では、100%水素を使用するように設計されている。このようにミドレックスプロセスは、業界で最も幅広い原材料と還元ガス源を基にした運転が実現

できるように展開されている。

水素還元製鉄で脱炭素化が進み、ほぼゼロエミッションの製鉄業が実現されることは強く期待されているところであるが、それは最終的な将来像であり、短期的には水素社会への道筋が不確実であるのは否めない。しかしながら、今から確実に製鉄業の低炭素化を進める方法として、水素社会への移行にも柔軟に対応できるMIDREX NG技術をベースにしたミドレックスプラントを建設することは、将来を見据えた今日の現実的な方策として多くの関心を集めている。

参考文献

- 1) ビンセント・シェヴリエ, ローレン・ロレーン, 道下晴康: R&D 神戸製鋼技報, 70 (2020) 1, 81.
- 2) Midrex Technologies, Inc., 2020 World Direct Reduction Statistics.
- 3) <https://www.globalefficiencyintel.com/new-blog/2021/global-steel-industrys-ghg-emissions>.
- 4) <https://worldsteel.org/steel-topics/statistics/world-steel-in-figures-2022/>.
- 5) J. Bolen: Economics of HBI Addition to North American Blast Furnaces, AISTech 2017 Proceedings, (2017).
- 6) Kobe Steel, Ltd., KOBELCO Group's CO₂ Reduction Solution -Innovative technology to reduce CO₂ emissions from blast furnace operations successfully verified-, https://www.kobelco.co.jp/english/releases/1207624_15581.html, (accessed 2021-09-19).
- 7) Treatise on Process Metallurgy, Volume 3: Industrial Processes, Elsevier, (2013), 170.
- 8) V. Chevrier: MIDREX H₂: Ultra Low CO₂ Ironmaking in the Transition to the Hydrogen Economy, METEC & 4th ESTAD, (2019).
- 9) Reuters, German energy grids say plans ready for 100 MW hydrogen plant. February 11, 2019, <https://uk.reuters.com/article/us-amprion-opengridenturope-hydrogen/german-energy-grids-say-plans-ready-for-100mw-hydrogenplant-idUKKCN1Q01S4>, (accessed 2020-02-10).
- 10) FY2020 Energy Supply and Demand Report (Preliminary) published on November 26, 2021, Agency for Natural Resources and Energy, METI.
- 11) T. Astoria, G. Hughes and N. Mizutani: Direct from Midrex, 1st Quarter, (2022).

(2022年4月26日受付)