

MIDREX[®] プロセス ～カーボンニュートラルへの挑戦～

椎野 純一*・三村 毅・杉立 宏志

株式会社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

MIDREX[®] Process Challenge for Carbon Neutral

Junichi SHIINO*, Tsuyoshi MIMURA and Hiroshi SUGITATSU

Technology & Process Engineering Section, Iron Unit Division, Engineering Business, KOBE STEEL, LTD.

1. 緒 言

鉄鋼生産は古くはたたらや木炭高炉のように森林資源に依拠していたが、産業革命と共に化石燃料、特に石炭の使用により大きく拡大してきた。しかし、地球温暖化防止のために、鉄鋼業はカーボンニュートラルを早期に達成することが求められており、その実現の鍵として直接還元プロセスに大きな期待が寄せられている。

神戸製鋼所が保有する MIDREX[®] プロセスは、直接還元プロセスの代表的なものである。本プロセスの概要と、それを発展させ活用することによりカーボンニュートラルを達成していく道筋を紹介する。

2. 鉄鋼生産における CO₂ 削減と還元鉄の役割

2.1 鉄鋼生産における CO₂ 排出と削減要請

現在の鉄鋼生産プロセスは化石燃料に依存しているため、鉄鋼業は温室効果ガスの最大の排出産業の一つである。2019年の鉄鋼生産における CO₂ 排出量は、使用電力製造に伴う間接排出を除いた直接排出量で年間 2.6 Gt CO₂、間接排出量を含めると年間 3.6 Gt CO₂ であり、世界の CO₂ 排出総量年間 36 Gt CO₂ (注) の 7% ないし 10% を占めている^{1,2}。(注：エネルギー起源およびプロセス起源の合計)

このため、鉄鋼業は CO₂ 排出量削減を強く求められている。その具体的な目標として、国際エネルギー機関 (IEA) が 2020 年に Sustainable Development Scenario (SDS) を設定している。このシナリオは、パリ協定に沿って世

界のエネルギー使用に関わる CO₂ 排出が 2070 年にネットゼロを達成することを目標としており、鉄鋼業においては 2019 年度比で 2050 年に -54%、2070 年に -90% 削減が必要とされている¹。昨年採択された COP26「グラスゴー合意」では、世界の気温上昇を今世紀末に 1.5°C 以内に抑える目標が明記され、鉄鋼業における排出削減は前記のシナリオよりさらに加速させることが求められている。

2.2 鉄鋼生産プロセスの概要

原料から溶鋼段階までの鉄鋼生産の主なルートを Fig. 1 に示す。鉄鋼生産の主原料は鉄鉱石と鉄スクラップである。

鉄鉱石を主原料とする代表的なプロセスが高炉 (BF) 一転炉 (BOF) 法であり、高炉に塊成化した鉄鉱石とコークス・微粉炭を装入し、鉄鉱石を還元・溶融して高炭素溶銑を製造し、転炉で脱炭して溶鋼にしている。鉄鉱石を主原料とするもう一つのプロセスが直接還元 (DR) 一電気炉 (EAF) 法である。塊成化された鉄鉱石を直接還元炉で天然ガスを還元材および熱源として還元し、得られた固体の還元鉄を電気炉において溶解精錬して溶鋼を製造している。この方式は、天然ガスが安価に入手可能である一方、スクラップ発生が限られた中近東などの地域における製鉄法として採用されている他、後述するスクラップ一電気炉法が主流の地域において、スクラップ中の銅などの不純物元素 (トランプエレメント) が鋼材品質上問題となり、これを希釈するために「清浄鉄源」として使用する還元鉄を供給する役割を果たしている。(注：直接還元法には還元材として石炭を使用する方式があるが、説明を省略する。)

鉄スクラップを主原料とするプロセスはスクラップ一電気炉 (EAF) 法である。スクラップを使用するため還元が必要がなく、電気炉でスクラップを溶解精錬して溶

2022年6月3日 第140回学術講演会において発表
*e-mail: shiino.junichi@kobelco.com

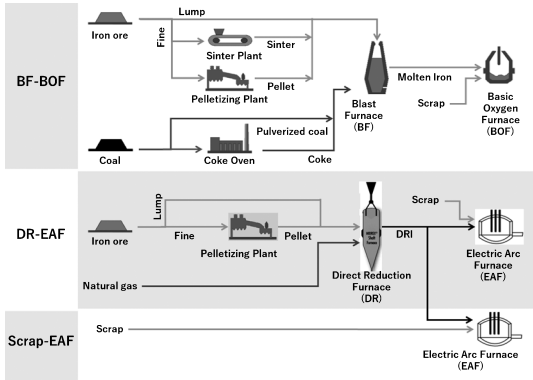


Fig. 1 Steel production processes

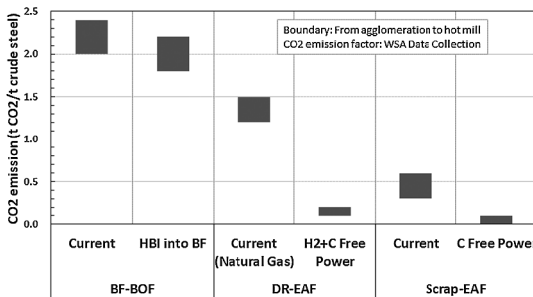


Fig. 2 CO₂ emission of steel production processes

鋼を製造している。

現在、鉄鋼生産の内、約7割が鉄鉱石由来（内、高炉が9割、直接還元炉が1割）で、3割がスクラップ由来であり、高炉一転炉法が大半を占めている。

2.3 各鉄鋼生産プロセスにおけるCO₂排出量

各鉄鋼生産プロセスにおけるCO₂排出量をFig. 2に示す。

高炉一転炉法ではコークスおよび石炭を熱源および還元材として使用するため、現在約2.2 t/steelの多量のCO₂を排出する²。後述するように、高炉において還元鉄を使用することにより、還元に必要なコークス・石炭が削減できCO₂排出量を減らすことができる。

直接還元(DR)一電気炉法では天然ガスを還元材とし、電気を溶解の熱源として使用していることから、同じ鉄鉱石を主原料としている高炉一転炉法と比べてCO₂排出量が20～40%少ない。さらに、CO₂フリー電力による水素製造が可能になれば、還元材の天然ガスを水素に置き換えることにより、CO₂排出量を大幅に低下させることができる。

スクラップ一電気炉法では還元が不要であることから、現行プロセスの中でCO₂排出量が最も少ない。

2.4 今後の鉄鋼生産の見通しと還元鉄の役割

Fig. 3に、各機関による予測¹³をもとに2050年の粗

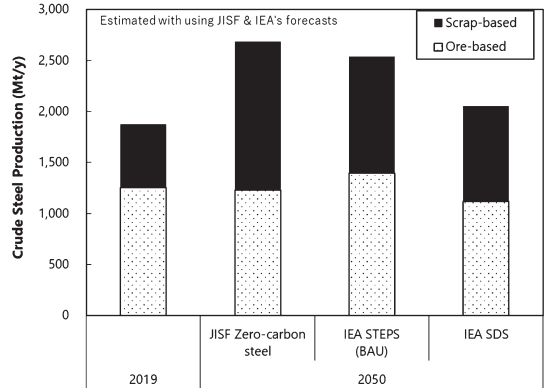


Fig. 3 Forecasts of world crude steel production in 2050

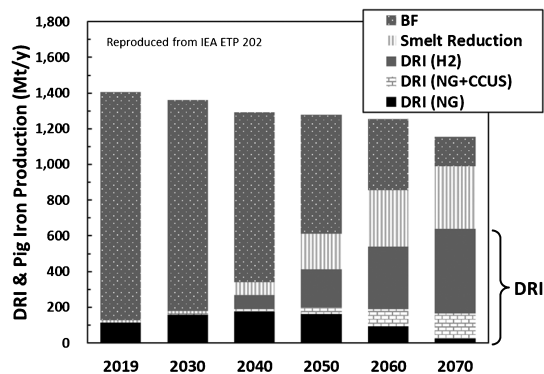


Fig. 4 Forecast of DRI and pig iron production by IEA¹

鋼生産の内訳の予測を示す。今後2050年に向けて、経済発展に伴って世界の粗鋼生産量は増加していくと予想されており、そうした中で、スクラップ発生量の増加に伴って、スクラップ由来の粗鋼生産量が増加していくものの、粗鋼生産量全体の増加を補うために、鉄鉱石由来の粗鋼生産は現状並みの量が維持されると見られている。従って、鉄鋼生産におけるCO₂排出の削減が求められている中、スクラップの最大限の活用に加え、鉄鉱石由来の鉄鋼生産におけるCO₂排出を如何に下げることが大きな課題となっている。

Fig. 4にIEAによる生産方式別の還元鉄および銑鉄の生産量予測¹を示す。これは、鉄鋼業が前記IEAのSDSに即してCO₂排出量を削減することを想定した予測である。高炉による銑鉄生産は2050年に向けて減っていく一方で、還元鉄の生産は2019年の約1億トンから、2050年には4億トンにまで増加すると予測されている。天然ガスを使用した直接還元法を適用することにより直ちにCO₂削減が可能であり、さらには水素やCCSを利用することにより削減目標を達成することが可能であることを示している。

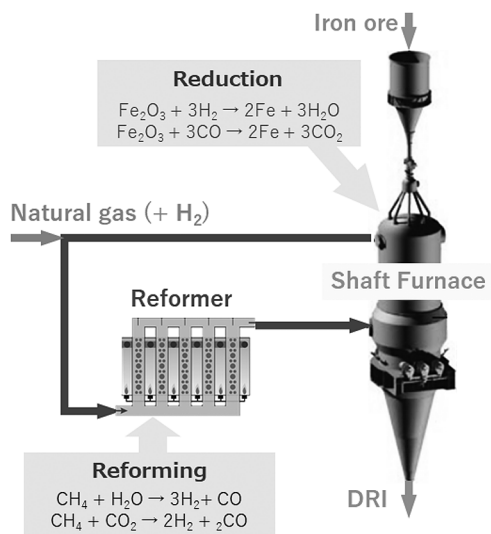


Fig. 5 MIDREX Process flow

3. MIDREX プロセスの特徴

3.1 プロセスの概要

直接還元プロセスの代表例として、MIDREX 法のプロセスフローを Fig. 5 に示す。

主要な構成要素は二つあり、鉄鉱石原料（ペレットもしくは塊鉄石）を還元して還元鉄にするシャフト炉と、シャフト炉での還元に必要な還元ガスを製造するリフォーマー（改質炉）である。

プロセスの特徴は、リフォーマーで炉頂ガス中 CO₂ を利用して天然ガスを水素（H₂）と一酸化炭素（CO）に改質し、還元ガス（H₂：約 55%、CO：約 36%）を製造することである。水素リッチな還元ガスを使用することと炉頂排ガス中 CO₂ を有効利用していることから、排出される CO₂ がコークスを使用する高炉法に比べて 20～40% 低い。加えて天然ガスに部分的に水素を付加する、さらには設備に大きな改造をすることなく天然ガスを 100% 水素に置き換えていくことが可能で、CO₂ の排出量を大幅に削減することができる。

3.2 還元鉄の用途と形態

MIDREX プロセスのシャフト炉で製造される還元鉄（DRI: Direct Reduced Iron, 以下 DRI という）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（Fig. 6）、用途に応じて多様な組み合わせで製造することが可能である。

還元後にはほぼ常温まで冷却された CDRI には、酸素が

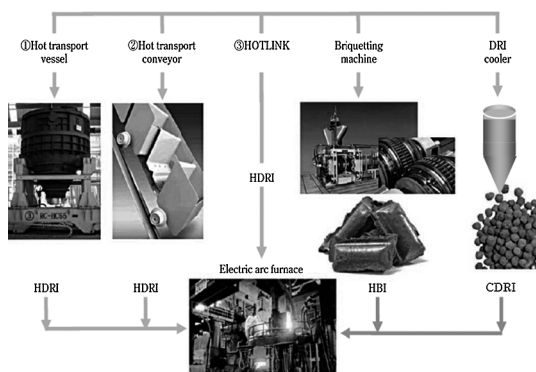


Fig. 6 Forms of DRI products⁴

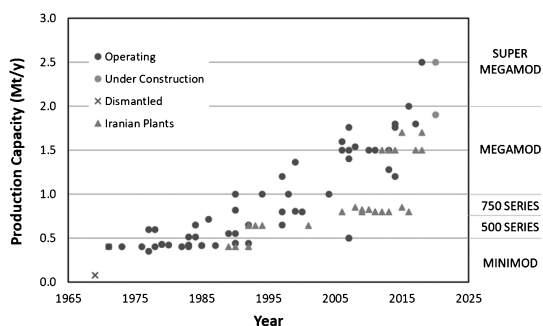


Fig. 7 Evolution of MIDREX Module capacities over the last 50 years⁵

除去されたことによって生じた気孔が多数空いており、長期貯蔵時等に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、シャフト炉を出て直ぐの高温の還元鉄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。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、生産コストが低く輸送の便が良い場所で製造された HBI が市場で入手可能になっている。

一方、直接還元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°C 以上の DRI を高温のまま電気炉で使用することで、溶解エネルギーの多くを減らすことができる。このような熱間還元鉄（HDRI）を搬送して電気炉へ装入する技術が開発され、電気炉の生産性向上と CO₂ 排出削減に貢献している。

3.3 大型化

MIDREX プロセスは、当初年産 15 万トン（3.66 m 径）のプラントで商業生産が開始され、その後大型化が図られてきた。現在では、最大で年産 250 万トン（7.65 m 径）

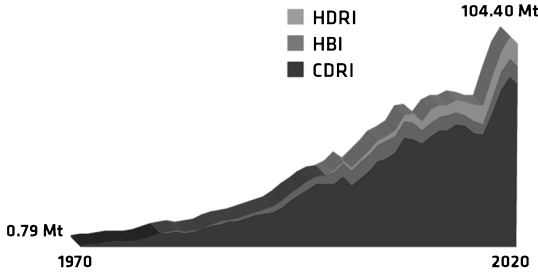


Fig. 8 Trend of world DRI production⁶

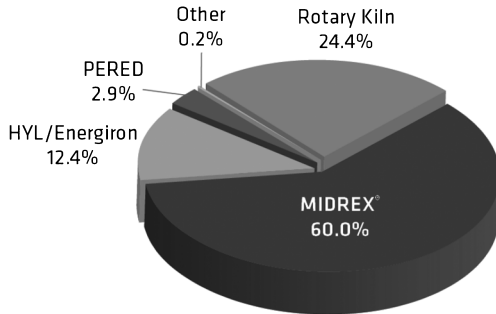


Fig. 9 World DRI production by process⁶

のプラントが稼働している。(Fig. 7)

3.4 還元鉄生産量とプロセス別シェア

還元鉄生産量は近年急激に伸びてきており、Fig. 8 に示すように2018年に1億トンを超え、2020年はコロナ禍の影響もあり2019年を下回ったが、104.4百万トンと3年続けて1億トン以上を生産している⁶。前述のようにCO₂排出削減のニーズに伴い、還元鉄生産量は今後さらに加速して増加していくことが予測されている。

直接還元法にはいくつかのプロセスがあるが、その中でMIDREX法はFig. 9⁶に示すように世界の還元鉄生産量の約60%のシェアを、天然ガスベースの還元鉄生産量の約8割のシェアを占めていて、世界で90基以上の納入実績がある。MIDREX法が拡大してきた理由の一つは、プロセスがシンプルで安定操作が可能なことである。鉄鉱石の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であること、また低い運転圧力を採用しているため操作が容易であり、多くのプラントが安定した操業を行い、年間8,000時間を超える稼働時間を達成している。

4. MIDREX プロセスによるカーボンニュートラルへの道筋

4.1 現在のCO₂削減貢献量

2020年におけるMIDREXプロセスによる還元鉄生産

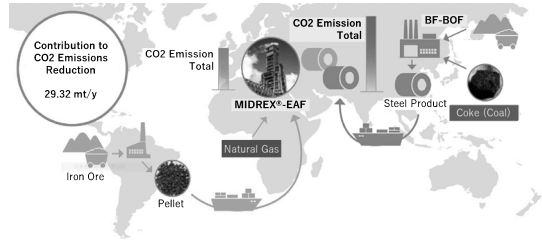


Fig. 10 Contribution to reduction of CO₂ emissions by MIDREX Process in 2020

量は6,263万トンである⁶。この量に相当する鉄鋼製品が高炉-転炉法で生産される場合のCO₂排出量と比べたCO₂排出削減貢献量は約2,932万トンとなり⁷、CO₂排出削減に大きく貢献している。(Fig. 10)

4.2 カーボンニュートラルへの道筋

以下、MIDREXプロセスを利用することによってカーボンニュートラルを達成していく道筋を概説する。Fig. 11は、横軸に2050年までのカーボンニュートラルに向けた時間の流れを、縦軸に鉱山から製鉄所までの動きとCO₂削減量を表している。

世界的なカーボンニュートラルの動きの中で、スクラップを主原料としてCO₂排出量の少ない電気炉化の動きが広がりつつある。しかし、Fig. 3で示されるようにスクラップの発生は限られることから、スクラップを代替ないし補充する電気炉原料として還元鉄の需要が大きく拡大していくと見られる。

また、還元鉄(HBI)を高炉に投入することで、高炉でのCO₂排出を20%削減できる技術の実証も報告されている⁸。既設の高炉を使用しながら直ちにCO₂削減を図る方法として、還元鉄の高炉使用の拡大が期待される。

直接還元-電気炉法においては、SiO₂、Al₂O₃などの脈石成分が少ない高品位鉄鉱石が使用されている。それは、鉄鉱石中の脈石成分は電気炉で溶解時にスラグとなるが、電気炉で行う酸化精錬時に鉄分が酸化してスラグ中にロスするのを抑えるために、スラグ量が少ない、すなわち脈石量が少ないことが望ましいからである。しかし、高品位鉄鉱石の供給は限られており、現在高炉法で使用され供給量の豊富な低品位鉄鉱石を直接還元-電気炉法において活用していくという課題がある。この課題に対し、還元鉄電気メルターを導入して還元鉄から鉄を製造するソリューションが開発されている。これは脈石分の多い還元鉄を電気炉に装入する前に、還元鉄メルターで溶解し、脈石分を除去するとともに、還元雰囲気下でスラグへの鉄分のロスを抑えることで、低品位鉄鉱石の使用を可能にするものである。

天然ガスを使用するMIDREXプラントにおいて、低

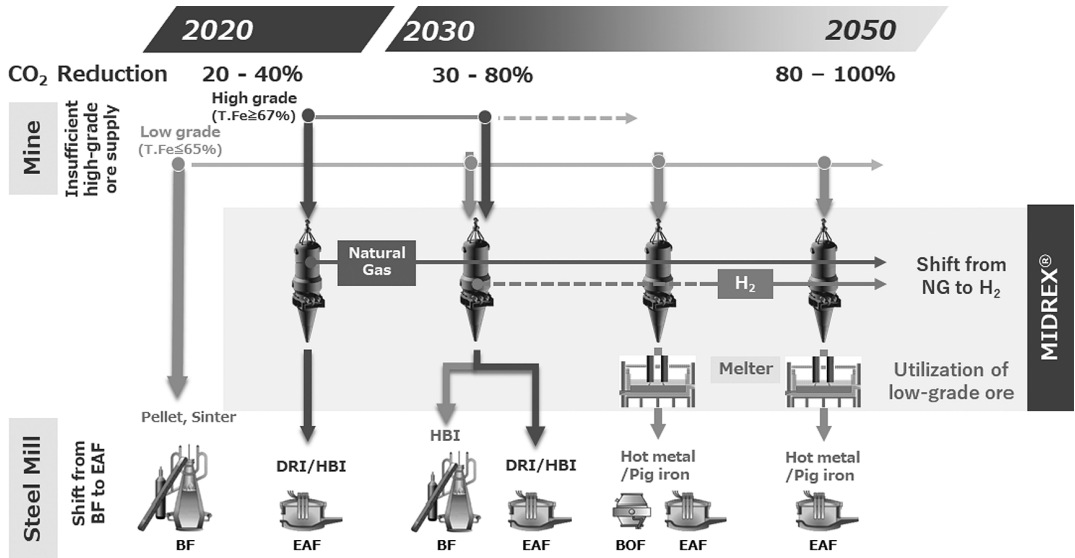


Fig. 11 Roadmap to carbon neutral in steel production by MIDREX Process

CO₂ 電力が使用可能になれば水素製造を行って天然ガスを部分的に水素で置換していき、最終的には水素 100% への置換が可能である⁵。また、CO₂ 貯留が可能な条件であれば、MIDREX プラントに CO₂ 除去設備を組み込むことで、CO₂ を分離回収することも可能である⁵。

このように、MIDREX プロセスを軸にすることで、足元の短中期的な対応だけでなく、長期的な観点で将来のカーボンフリー製鉄への道筋を現実のものとして描くことができる。鉄鋼生産プロセスにおけるカーボンニュートラルという大きな課題に対して、MIDREX プロセスを進展させ適用を拡大することで貢献していく。

References

1. International Energy Agency: *Energy Technology Perspectives 2020*, pp. 198–215 (2020)
2. International Energy Agency: *Iron and Steel Technology Roadmap*, pp. 11–107 (2020)
3. The Japan Iron & Steel Federation: *JISF long-term vision*

4. M. Atsushi, H. Uemura, T. Sakaguchi: *KOBELCO TECHNOLOGY REVIEW*, **29**, pp. 50–57 (2010)
5. V. Chevrier, L. Lorraine, H. Michishita: *KOBELCO TECHNOLOGY REVIEW*, **39**, pp. 33–40 (2021)
6. Midrex Technologies, Inc.: *2020 WORLD DIRECT REDUCTION STATISTICS*, https://www.midrex.com/wp-content/uploads/Midrex-STATSbookprint-2020.Final_.pdf (Reference date: 19th Sept. 2021)
7. Kobe Steel, Ltd.: *KOBELCO Group Integrated Report 2021*, https://www.kobelco.co.jp/english/about_kobelco/outline/integrated-reports/files/integrated-reports2021_e.pdf (Reference date: 8th Feb. 2022)
8. 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 (Reference date: 19th Sept. 2021)