



直接還元鉄(常温還元鉄、Cold DRI)

カーボンニュートラルに向け 注目される直接還元鉄

直接還元鉄の生産が世界的に拡大している。これまで主に電気炉の鉄源として知られてきたが、カーボンニュートラルに向けた動きが加速する鉄鋼業界にあって、新たな役割が期待されている。

天然ガスを改質した還元ガスで鉄鉱石を還元する直接還元(DR)プラント(Qatar Steel No.2プラント(150万t/年))

電気炉の鉄源として使用されてきた 直接還元鉄(DRI)

鉄鉱石から鉄を製造するには、鉄と結びついている酸素を取り除く(還元する)必要がある。そのために必要なのが、鉄よりも酸素と非常に結びつきやすい性質を持つ炭素だが、炭素を用いると還元反応の際にCO₂が発生する。CO₂の発生をいかに抑制するかが、鉄鋼業が直面する大きな問題である。

主な鉄鋼製造プロセスの比較を図1に示す。現在の鉄鋼製造の主流は高炉-転炉プロセスである。高炉でコークスによって鉄鉱石(焼結鉱、ペレット、塊鉱石)を還元して溶銑とし、転炉で脱炭により溶鋼とする。この他の方法として電気炉法がある。電気炉法のCO₂排出量は、高炉法に比べ4分の1であり、そのため多くの鉄鋼メーカーが電気炉法の導入を検討している。

電気炉法は、原料に鉄スクラップを主に用いるが、新たな鉄源として注目を集めているのが直接還元鉄(DRI: Direct Reduced Iron)であり、天然ガスなどを改質した水素、一酸化炭素を主成分とするガスを用いて、鉄鉱石を還元したものである。DRIは、鉄鉱石を固体状態のまま鉄に還元した原料である。鉄鉱石中の鉄分は一般的に60~68%程度であり、残りは酸素や脈石である。直接還元炉によって酸素

が取り除かれると、鉄分が80%以上のDRIが得られる。ただし鉄分の割合は、鉄鉱石の品位や還元プロセスの条件などによって異なる。

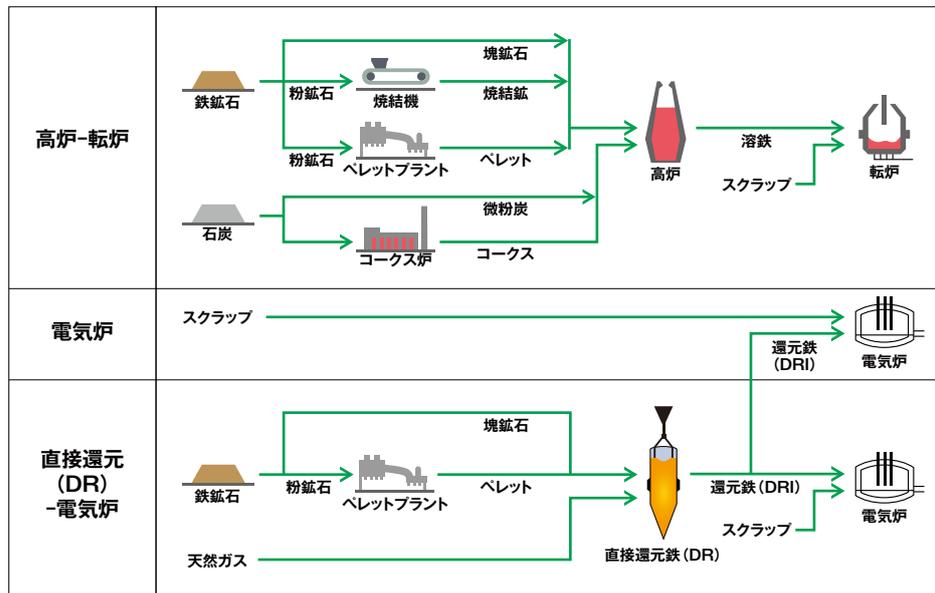
DRプラントは高炉のように大規模ではなく、コークスも不要なので、従来から天然ガスを産出する途上国で電気炉の原料として供給するために建設されてきた。

電気炉は、CO₂排出量が比較的小さいため今後生産量が増加すると見込まれるが、スクラップ量が不足すると代替鉄源としてDRIのニーズが高まると思われる。またDRIはスクラップより不純物が少ないので、スクラップに含まれる、銅などのトランプエレメントを希釈でき、清浄鉄源としてもDRIの利用が増えると予想される。こうした理由から、DRIへの期待がますます高まっているのである。

急速に増加した生産量

世界のDRIの生産量は、1969年に生産を開始以降、この50年の間に大きく増加してきた。最近では、最大生産能力が年産250万tに達する複数の大型プラントが生産開始したことなどから、とくに2018年以降の伸びは大きく、2019年の全世界生産量は1億800万tに達している(図2)。

DRIの製造プロセス別の生産比率を図3に示す。2020年の実績では、全世界の生産量1億440万tのうち約60%を占



高炉-転炉、電気炉、直接還元-電気炉の各プロセスの工程図を並べた。高炉では鉄鉱石をコークスで還元し、溶鉄を得る。電気炉ではスクラップや直接還元鉄 (DRI) を鉄源として使用する。

図1 主な鉄鋼製造プロセスの比較

めるのが「MIDREX®(以下、MIDREX)法」であり、還元剤が天然ガスベースのものに限れば約80%を占めている。詳細は後述するが、MIDREX法は改質炉とシャフト炉によるシンプルな構成であり、安定運転ができることから高いシェアを持っている。

それ以外のプロセスには、MIDREX法と同じ天然ガスを還元剤に使用している「HYL法」と「PERED法」、還元剤に石炭を使用し、ロータリーキルンで転動して還元する「SL/RN法」などがある。

効率の高いMIDREXプロセスの特徴

次に、代表的なDRIプロセスであるMIDREXプロセスの概要を紹介する。

1969年、当プロセスの第1号機が、米国ポートランドで稼働を開始した。当時の生産能力は年産15万tであった。1970年代には、電気炉メーカーが年産40万t規模のプラントを建設するようになった。当時建設されたのは、中東や北アフリカ、南米などが多かった。これらの地域で当プロセスのプラン

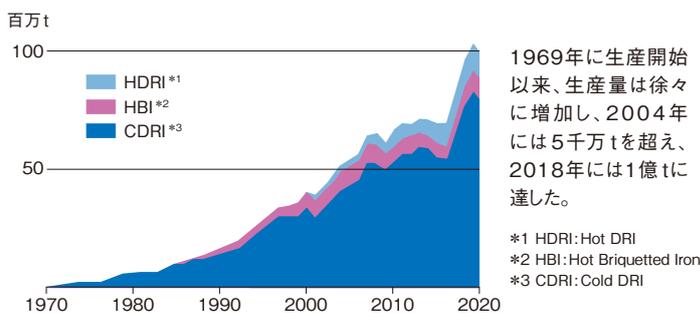


図2 世界のDRI生産量の推移

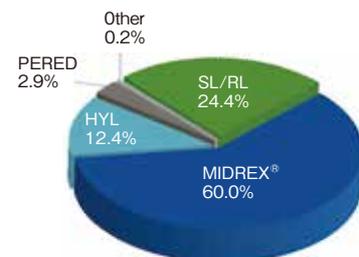
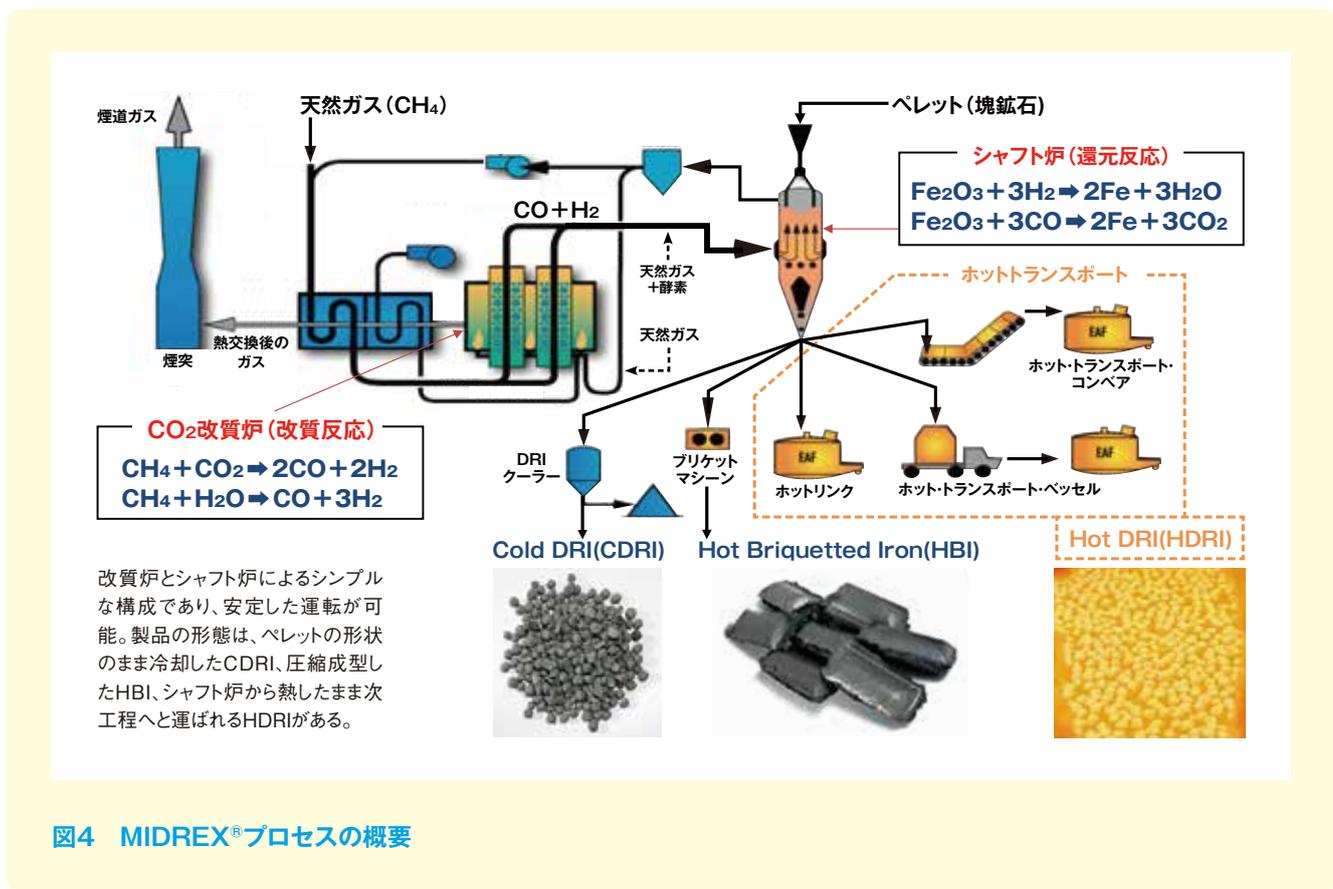


図3 世界のDRI生産比率(製造プロセス別)



トが建設された理由は、欧米や日本のように高炉で大量生産するほど鉄鋼需要が大きくなかったため、DRIを鉄源とした電気炉は必要な生産規模に対して最も経済合理性が高いプロセスだったからである。またこれらの地域では、当プロセスで使用する還元剤である天然ガスを入手しやすい、という理由もあった。

1990年代になるとプラント1基あたりの年産は100万tレベルを超えるようになり、その後もエンジニアリング技術の向上により、現在稼働中の最大のプラントでは250万tに達している。

当プロセスは、改質炉とシャフト炉の2つの設備で構成される(図4)。改質炉では天然ガスを改質してCOとH₂の還元ガスとする。シャフト炉では、鉄鉱石が炉内を降下しながら、炉内を上昇する還元ガスによって効率よく昇温、還元、浸炭され、DRIが得られる。

このように、鉄鉱石還元とガス改質を別々の反応器で行うため、プロセス制御が容易になっている。シンプルなプロセスであるため、原料にさまざまな鉄鉱石を使用しやすく、さらに天然ガスだけでなく、石炭ガス、コークス炉ガスなどさまざまな還元ガスに対応できる。また、シャフト炉内の運転圧力が低く、他プロセスのような大気圧との圧力差に対応する設

備が不要なため、安定した運転を容易に行えることも普及の理由の一つとなっている。

当プロセスはCO₂排出量が極めて少なく、DRIと電気炉のプロセスでは、高炉-転炉プロセスに比べCO₂排出量は20~40%削減するといわれる。還元ガスはH₂約55%、CO約36%と、H₂の比率はCOの比率より多い。

天然ガスベースのDRプラントでは、一般に天然ガスとH₂OやCO₂との改質反応によって改質ガスを得る。当プロセスでは、他のDRプロセスに比べCO₂を使用する比率が大きいですが、それは、シャフト炉からの排出ガスに含まれるCO₂を再利用するからである。

シャフト炉から排出される炉頂ガスには、CO、H₂、CO₂、H₂Oなどが含まれている。改質ガスを得るためにこれらをリサイクルしたり、改質炉の加熱用の燃料ガスに有効利用することにより、CO₂の分離が不要となる。このため、全体としてCO₂排出量が少なくなっている。

普及を加速したHBIの開発

DRIには、還元反応によってO₂が抜けた後の空隙が多数残っている。この状態で、水などに触れると鉄と空気中の



還元直後の高温のDRIには気孔が多数開いており、再酸化すると発熱・発火のおそれがあった。HBI*はDRIを圧縮成型したもの(長さ約11cm)で、再酸化せずに長期貯蔵や輸送が可能となった。

*HBI: Hot Briquetted Iron

図5 貯蔵や輸送に適したHBI

O₂が結び付いて再酸化が起これ、発熱や発火が生じる場合がある。このため、ペレット状のDRIを海上輸送や長期間にわたる屋外保存することはできなかった。この問題を解決するため、DRIを700℃前後に加熱し、圧縮成形して空隙をなくしたHBI(Hot Briquetted Iron)が開発された(図5)。

当初、DRIが再酸化して長期間保存できないことから、DRプラントは電気炉プラントに隣接させなくてはならないという立地上の制約があった。しかしHBIの開発により、この制約はなくなった。そのため、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、そこで製造したHBIを海上輸送して、他国の製鋼プラントに輸出することが可能となり、還元鉄プラントの立地範囲は世界的に拡大した。

現在、MIDREXプラントは世界21か国に約80基が稼働している。所在地は中東、北アフリカ、中南米などが中心だが、最近では北米などにも建設され、米国ではラストベルト地域にも当プロセスプラントが建設されている。世界の大手鉄鋼メーカーでもDRプラントの建設が増えている。

今後DRIに期待されるのは、高炉原料としての活用である。DRIはすでに還元されているため還元剤比を減らすことができ、CO₂排出量を削減できる。直接還元製鉄法のCO₂排出量は、高炉法に比べ20～40%抑制できるといわれている。先ごろ、CO₂排出量を大幅に削減するためにHBIを多量に使用した低CO₂高炉鋼材が国内で初めて商品化され((株)神戸製鋼所による)、注目を集めている。

ゼロカーボンを目指す水素還元製鉄

鉄鋼業がカーボンニュートラルを達成するため、鉄鉱石の還元の水素を使う製鉄法への期待が世界的に高まっている。水素を使えば還元後に水だけが残り、CO₂の排出量は

大幅に削減できる。

日本では2008年より、環境調和型プロセス技術開発「COURSE50」の研究開発プロジェクトが進行している(新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託事業)。現在稼働している一貫製鉄所の既存インフラを最大限活用することを前提に、水素還元でCO₂排出量を10%削減、CO₂分離・回収により20%削減することが目標であり、すでに実証実験を行っている。

一方でDRIでは、還元ガスを全面的に水素に置き換えることによってCO₂排出量を100%近く削減できる可能性がある。ただし、解決すべき課題は残っている。MIDREXプロセスでは、シャフト炉内の熱量の確保が課題の一つである。当プロセスの還元反応には以下の2つがある。



このように、現在のプロセスではシャフト炉の中で吸熱反応と発熱反応が起こる。しかし、還元剤に水素だけを使用すると吸熱反応のみとなるため、シャフト炉内の熱量が足りなくなり、熱量を増やす対策が必要である。

さらに重要なのは、水素の安定供給である。現在、利用されている水素の多くは天然ガスなどの化石燃料から製造され、CO₂を排出する。しかし今後は、水を電気分解して製造されるグリーン水素でなくてはならず、使われる電気もCO₂フリーでなくてはならない。また電気分解にかかるコストのほとんどは電気代で、当プラント1基に必要な水素を賄うには、発電規模が600～800MW程度必要である。発電に再生可能エネルギーを利用するなどの方法はあるが、発電効率が向上して経済的に見合うにはまだ時間がかかるとみられている。

現在、世界に先駆けた取り組みとして、アルセロール・ミッタル社ドイツ・ハンブルク工場において実証プラントの計画が進められている。既設のMIDREXプラントの炉頂ガスから水素を回収し、還元剤として使用する。水素のみを還元剤として使用するDRプラントとしては世界最大規模(生産量約10万t/年)となる予定である。水素還元製鉄については、プライメタルズ・テクノロジーズ社によるHYFORパイロットプラントの生産や、HYBRITイニシアチブのスポンジ鉄生産などが開始されている。

世界の各社で新時代の鉄鋼製造プロセスの模索が進められているが、その中でDRIも新たな役割を果たすことが期待されている。

● 図版提供および取材協力 (株)神戸製鋼所/Midrex Technologies, Inc.
● 文 杉山香里