

# HYFOR-水素ベース微粉鉱石還元

## HYFOR – Hydrogen-based Fine-Ore Reduction



Daniel Spreitzer\*1

Johann Wurm\*2

Bernhard Hiebl\*3

Norbert Rein\*2

Thomas Wolfinger\*4

Wolfgang Sterrer\*5

Alexander Fleischanderl\*6

鉄鋼業は産業における主要な CO<sub>2</sub> 排出部門であり、そのため 2050 年までの低炭素経済への転換を迫られている。転換を実現するために有望と見られているアプローチの一つは、水素を利用した直接還元法である。現在、シャフト炉を利用した直接還元法が支配的であるものの、装入材としては、DR(Direct Reduction: 直接還元)グレードのペレットフィード(微粉鉱石)を造粒した上で供給しなければならない。この制限を受けない手法として、プライメタルズテクノロジーは、水素を還元剤に使用しながらも、事前の造粒を経ずに微粉状の鉄鉱石(粒径 150 μm 未満)を直接装入可能な直接還元プロセス“HYFOR(Hydrogen-based fine-ore reduction)”を開発した。本報では、既に建設されているパイロットプラント、及び今後のスケールアップの可能性を含め、その開発状況を紹介する。

### 1. はじめに

CO<sub>2</sub> 排出量の削減をめぐる年々高まりつつある経済的及び政治的圧力は、多くの鉄鋼メーカーにとって課題となっている。高炉・転炉法と呼ばれる銑鋼一貫プロセスは、過去数十年にわたり継続的に開発及び改良されてきており、今日の主要な粗鋼生産方法となっている。エネルギー源、及び還元剤としてコークスを使用し大量の CO<sub>2</sub> を排出する点を除けば、この銑鋼一貫プロセスにはいくつかの利点がある。例えば、幅広い品位の鉄鉱石を扱うことができる柔軟性や、鉄分を含有する副生成物のリサイクル能力などである。この銑鋼一貫プロセスとシャフト炉を利用する直接還元(DR)法を比較することは難しい。直接還元法は、下流に設けられる電気炉(EAF: Electric Arc Furnace)での熔融を考慮すると、原料として DR グレードのペレットフィードが必要となるためである。また、銑鋼一貫プロセスおよびシャフト炉を用いる直接還元法の双方において、炉内での十分な通気性を確保するために、塊状の原料を装入する必要がある。したがって、例えば、原料を焼結鉱やペレットに加工する追加の塊成(造粒)工程が必要であり、これは CAPEX(Capital Expenditure)や OPEX(Operating Expenditure)などの費用の増加につながるだけでなく、CO<sub>2</sub> 排出量の大幅な増加にもつながる。これらの問題に対応するために、プライメタルズテクノロジーは、流動床技術に基づくHYFORプロセスの開発に取り組んでいる。これにより、グリーン水素、又は低炭素水素のみを還元剤として使用し、CO<sub>2</sub> の発生を伴うことなく、また事前の造粒を必要とすることなく微粉鉱石を直接使用することができる<sup>(1)-(3)</sup>。

主要な鉄源としてペレットフィードを事前に造粒することなく直接処理する技術は、今日まで存

\*1 Primetals Technologies UP I&S DR TI Technology Expert      \*2 Primetals Technologies UP I&S DR TI Senior Expert

\*3 Primetals Technologies UP I&S DR&AG TI Department Head \*4 K1-Met GmbH Technology Expert

\*5 Primetals Technologies UP I&S DR Business Head Dr.      \*6 Primetals Technologies UP&TI Technology Officer Dr.

在していなかった。鉱山からの鉄鉱石の品質(鉄含有量及び粒度)が低下し続ける一方で、微粉鉄石は大量に利用可能となっている。HYFOR プロセスは、様々な微粉鉄石で一般的である最大粒径 150  $\mu\text{m}$  未満のものを造粒することなく直接処理できる唯一のプロセスであり、高品位から低品位までのあらゆる種類の鉄鉱石(ヘマタイト・リモナイト・マグネタイトなど)を処理することができる。このプロセスは、還元ガスと被還元原料とで生じさせる対向流の利用を基本としている。微粉鉄石原料を使用する流動床技術に水素を還元剤として使用することで、流動化挙動に有利な低温還元を可能にするとともに、適切な還元速度による高いガス利用率を実現する。

プライメタルズテクノロジーは直接還元、熔融還元、及び流動床に基づくソリューション(Finored 直接還元プロセス, FINEX®予備還元プロセス)の分野において長年の経験を有している。このような技術力を基に最も柔軟で炭素排出量が少ない直接還元技術として HYFOR プロセスが開発されている。

次章以降で、HYFOR プロセスの開発について詳しく説明する。

## 2. HYFOR - ラボスケール試験からパイロットプラント試験まで

2016 年、レオーベン鉱山業大学鉄鋼冶金学科の還元研究室で HYFOR 技術に基づく最初のラボスケールの研究が開始された。これには様々な流動床炉が使用された。

微粉鉄石原料の一般的な流動化挙動を調べるために、静止流動床反応器で一連の冷間流動化試験を実施した。流動状態にある原料の可視観察に加えて、様々な圧力測定器を設けることで異なる種類の微粉鉄石の流動化挙動を検証した。その一方で、冷間流動化試験で得られたデータに基づいて、静止流動床での熱間還元試験も実施した。これらの熱間還元試験は、純水素を流動ガス及び還元ガスとして用いて、様々な銘柄の鉄鉱石の流動化挙動、及び被還元性を調べるために実施された。反応器内の気体空塔速度、還元温度、又は装入サンプル質量(典型的には 5~7.5kg の間)などのプロセスパラメーターを検討することで、後に HYFOR パイロットプラントの設計の基準に使用される原料での運転範囲を決定することができた。

ラボスケール試験実施中に得られた結果から、微粉鉄石原料に還元剤として水素を組合せて使用することで、低い還元温度が適当でありながらも、高いガス利用率が達成できることが証明された。還元温度が低いことにより、金属化率が高い場合においても安定した流動化が可能となる<sup>(4)</sup>。

ラボスケール試験は最初に成功を収めた後も継続された。鉄鉱石は流動化挙動と被還元性に関して異なる性質を示す可能性があるため、新たに使用される鉄鉱石は全てラボスケール試験を通じて HYFOR プロセスへの適合性を確認する。

全てのラボスケール試験で得られた有望な結果に基づいて、2018 年に HYFOR パイロットプラントの設計とエンジニアリングを開始する決定をした。パイロットプラントは、ラボスケール試験で得られた結果を検証し、将来の商用プラントのための基礎データを蓄積するための試験設備として機能することが期待され、2020 年下半期に据付工事を実施し、2021 年上半期にコールド試運転、及びホット試運転が行われた。

パイロットプラントの概略フローシートを [図1](#) に示す。この構成の試験において、原料が通過する経路は2つある。1つ目は、還元前に原料を予熱するための経路である。この段階で、原料は原料ビンから熱風炉の煙道ガス流に直接装入され、サイクロンへと輸送される。サイクロン内では、ガス流から原料が分離され、その後、原料は原料ビンに空気輸送により戻される。この構成では、還元開始前に所望の原料温度に到達させるために、系内で原料を複数回循環させることが可能である。サイクロンからの排ガスはその後スクラバとデミスタを通過して、冷却・清浄化され、大気中に放出される。

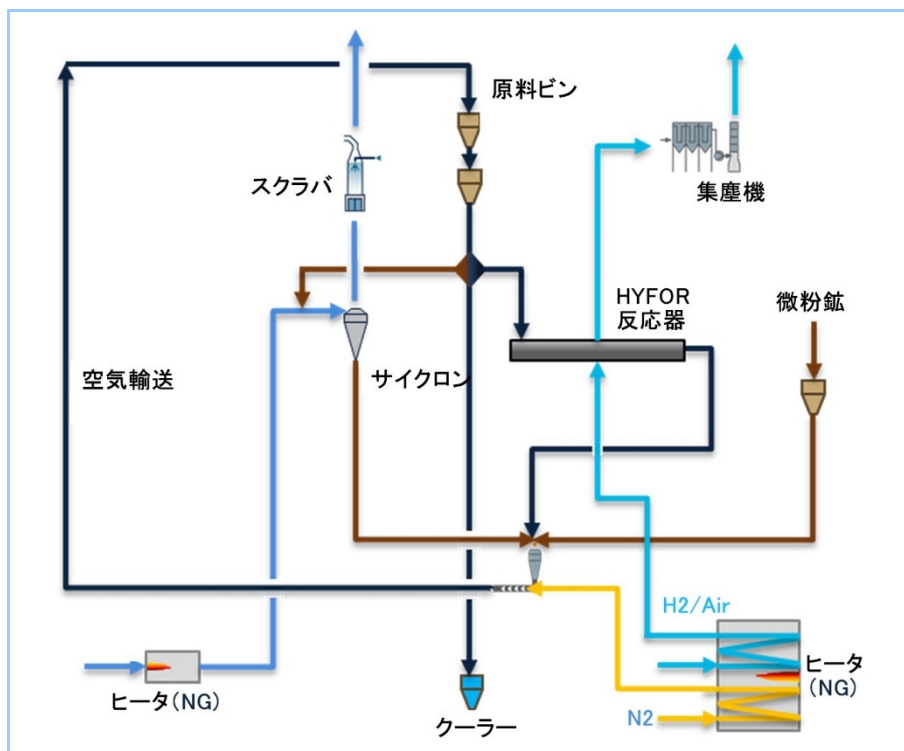


図1 HYFOR パイロットプラント - 概略フローシート

マグネタイト系鉄鉱石を使用する場合には、原料予熱中に酸化反応も進行させる。酸化反応の発熱特性は、原料の予熱を補助し、予熱の一次エネルギー消費量を低下させる利点がある。また、原料の被還元性の観点からも利点がある。一般に、マグネタイトは被還元性に劣っているが、事前酸化により還元時に異なる形態変化がもたらされ、還元速度、すなわち被還元性が向上する<sup>5)</sup>。

還元時の気体と固体の対向流の適用、及び酸化鉄と水素の還元反応における吸熱特性のために、通常 HYFOR プロセスでは原料の予熱が個別に必要である。

原料の予熱が完了した後、還元が実施される。つまり、原料が原料ビンから HYFOR 反応器へと装入される。反応器自体の断面積は1 m<sup>2</sup>未満である。原料は反応器の一方から装入される。反応器の他方には堰が設けられており、規定の流動床高さを確保し、したがって滞留時間を確保することができる。この滞留時間は調整することができる。堰を超えた原料は、空気輸送により原料ビンに戻し、還元反応器に再装入することで、目標とする金属化率を達成するために必要な全体の還元時間を確保することができる。

還元に必要な水素は、反応器に入る前にまずヒータで予熱される。反応器内の均一なガス分配を実現するために、また計画外の突発的なプラント停止時に、風箱への固体逆流を避けるようガス分配器が適切に設計される。原料を流動化及び還元した後、ダストを含んだ排ガスは反応器を出て、二次燃焼され、大気に放出される前に乾式集塵機を通過する。商用プラントへ適用される際には、未使用の水素の再循環が確実に考慮される。分離されたダストは反応器に再投入され、プロセスの歩留りを向上させる。還元と最終サンプリングの後、全ての原料が原料ビンに再び集められ、クーラーへと排出される。

2021 年中頃の試運転実施の後、設備そのものの試験および最適な試験手順の確立を主な目的として、最初の試験を実施した。これに合わせて改造や改良も実施した。

プラントの改良を実施した後、2022 年の焦点は、この技術の商用化可能性を検証するために様々な鉄鉱石の試験を実施することにある。次の4つの課題を様々な試験に基づいて検討する：第一に、所定の金属化率に達するために必要な滞留時間；第二に、気体空塔速度及び反応器圧力に依存するガス消費量及び/又はガス利用率；第三に、ガス分配器における微粉の固着を

防止するための最適な還元ガスの入側温度;第四に、マグネタイト系原料を使用する場合の還元速度、つまり被還元性に対する種々の酸化処理の影響。

パイロットプラントを使用した一連の試験を適切に実施することでこれらの課題に対する十分な回答が得られれば、商用規模プロトタイプへのスケールアップについて決定を下すことができる。

### 3. HYFOR 商用規模プロトタイププラント - 次の一步

商用規模プロトタイププラントは、パイロットプラントと、毎時約 5~15 トンの生産能力で連続操業可能な商用プラントとの中間段階と定義することができる。HYFOR の商用規模プロトタイププラントで考えられる概略フローシートを図2に示す。

原料の予熱(及び酸化)は直列多段サイクロン内で行われる。予熱に必要なエネルギーは、ガス循環経路からの水素を含むブリードガスを燃焼させる高温ガス発生器によって供給される。予熱された原料は、1段目の還元反応器に装入される前に、バッファとして機能するビンに装入される。還元反応のためにいくつかの反応器が連続して配置され、十分な滞留時間が確保される。各反応器には清浄な還元ガスが注入される。全ての反応器の排ガスは、ガスからダストを分離するための乾式集塵機を通過する。ダストは還元反応器へと送り返され、高い歩留りを実現する。使用する鉄鉱石の品質に応じて、様々な最終製品へ適用できる。鉄含有量が多い高品位鉄鉱石が原料に使用される場合、最終製品はブリケット化され HBI(Hot Briquetted Iron)として扱うことができ、様々な製鋼設備に供給することができる。あるいは、最終製品を電気炉に熱間装入することも可能である。鉄含有量が少ない低品位鉄鉱石から作られた HDRI(Hot Direct Reduced Iron)は、電気製鉄炉(Smelter)に直接装入することができる。これは HYFOR プロセスの最大の利点の一つである、幅広い鉄鉱石品位の使用における柔軟性を示している。

反応器から出た排ガスは、乾式集塵機を通過した後に、還元中に生じた水蒸気を除去するために熱交換器及びクーラーを通過する。未反応の水素は、循環器、熱交換器、還元ガス炉を経て再利用される。還元ガス炉は電気エネルギーを利用している。還元で消費された水素に対しては、メイクアップ水素を熱交換器前からプロセスライン中に添加することで補償する。鉄鉱石の品質にもよるが、DRI1 トンに対して 550~600 Nm<sup>3</sup>の水素が必要である。これらの機器構成によりプラントの完全な連続操業が可能になり、室温の微粉鉄石から最終製品を製造することができる。

パイロットプラント試験の進捗状況、及びブリードカスタマーの決定次第ではあるものの、このような商用規模プロトタイププラントは 2025 年までに運転開始する可能性がある。

HYFOR プロセスの利点は、以下の通りまとめることができる:

- ・ 微粉鉄石を事前の造粒工程を経ずに直接使用できること
- ・ グリーン水素又は低炭素水素を還元剤として使用し、還元中に CO<sub>2</sub> が発生しないこと
- ・ 様々な鉄鉱石(ヘマタイト, リモナイト, マグネタイトなど)が柔軟に使用できること
- ・ 乾式集塵機を利用したダストリサイクルにより鉄歩留りが高いこと
- ・ 高い鉄歩留りと造粒設備の省略によりエネルギー消費量が少ないこと
- ・ 低い還元温度による微粉のスティッキング防止で設備稼働率が高いこと

HYFOR 技術にとっては、従来の鉄鋼メーカーはもちろんのこと、付加価値のある製品として HBI や銑鉄(PI:Pig Iron)の生産を検討している鉄山会社も潜在的な顧客になり得る。

HYFOR プロセスは鉄鋼産業のエネルギー転換と脱炭素化に大きく貢献し、グリーンスチールプロセスとなる。

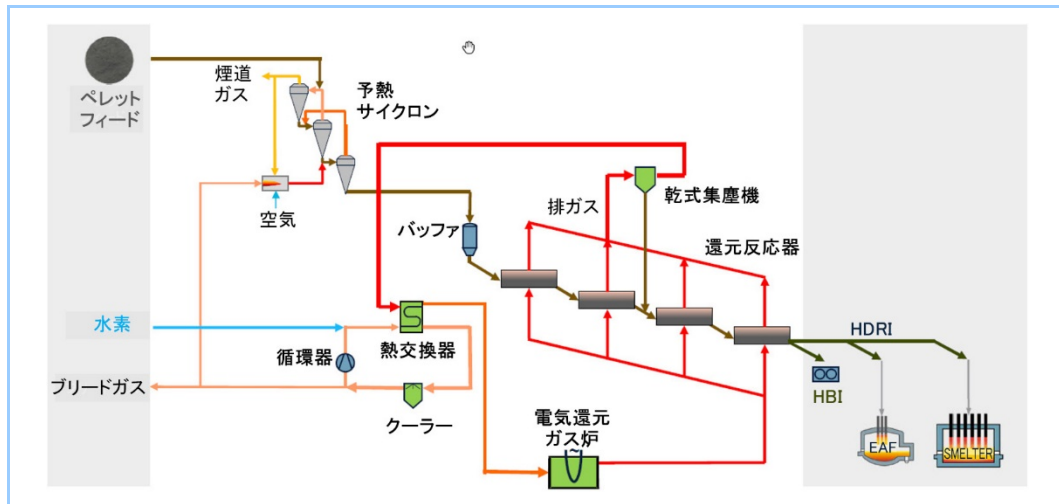


図2 HYFOR 商用規模プロトタイププラント - 概略フローシート

## 4. まとめ

鉄鋼産業の脱炭素化には、水素経済に基づく新たな革新的プロセス技術が必要である。プライメタルズテクノロジーは、流動床技術を利用したソリューションを含め、直接還元、及び熔融還元分野において長い歴史と幅広いポートフォリオを有しており、現在、微粉鉱石を事前処理することなく水素により還元する次世代の直接還元プロセス“HYFOR (Hydrogen-based fine ore reduction)”を開発している。2021年には、ラボスケール試験から得られたプロセスデータに基づいて、パイロットプラントの設置、及び試運転を実施した。パイロットプラントは、幅広い鉄鉱石品位のプロセスデータを収集するための試験設備として機能し、ここで集められたデータは商用規模プロトタイププラントへのスケールアップに使用される。得られる結果にもよるが、2025年までに商用規模プロトタイププラントの運転が開始される可能性がある。

## 参考文献

- (1) Primetals Technologies Press Release, June (2019).  
<https://www.primetals.com/de/presse-medien/news/primetals-technologies-develops-breakthrough-technology-for-carbon-free-hydrogen-based-direct-reduction-for-iron-ore-fines>
- (2) Primetals Technologies Press Release, June (2021).  
<https://www.primetals.com/de/presse-medien/news/hyfor-pilot-plant-under-operation-the-next-step-for-carbon-free-hydrogen-based-direct-reduction-is-done>
- (3) Primetals Technologies Press Release, August (2021).  
<https://www.primetals.com/de/presse-medien/news/wasserstoffbasierte-eisenerzeugung-mhi-australia-und-primetals-technologies-beteiligen-sich-an-forschungszentrum-fuer-die-dekarbonisierung-der-schwerindustrie>
- (4) Spreitzer, D., PhD-Thesis, Montanuniversitaet Leoben, Leoben, 2020.
- (5) Wolfinger, T., Master Thesis, Montanuniversitaet Leoben, Leoben, 2018.