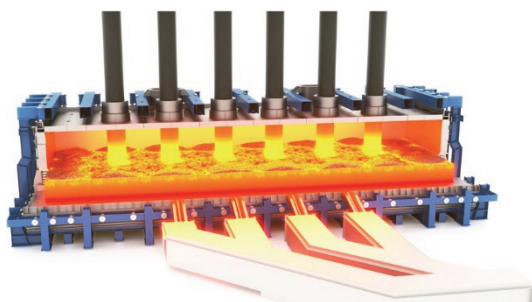


# 電気製鉄炉(スメルター) 低品位原料を用いたグリーン製鋼を実現する新型炉

Smelter - New Furnace for Green Steelmaking Using Low Grade Input Materials



Gerald Wimmer\*1

Bernhard Voraberger\*2

Johannes Rosner\*3

Andreas Pfeiffer\*4

水素を用いた直接還元製鉄法は、将来の製鉄・製鋼プロセスにおけるCO<sub>2</sub>排出量削減の主要な手法の一つとして期待されている。通常、直接還元鉄(DRI)の溶解及び精錬には電気アーク炉(EAF)が用いられる。しかし、世界的に鉄鉱石の多くは低品位であり、選鉱による原料の品位向上には限界がある。そのため、新型の電気製鉄炉(Smelter, スメルター)が求められている。スメルターは、低品位鉄鉱石由来のDRIを効率的に処理し、転炉での精錬や電気アーク炉への装入に適したホットメタル(銑鉄)を生産し、セメント産業での利用に適したスラグを生成する。詳細なプロセス計算に基づき、この新プロセスルートの事業性が確認され、炉の設計が完了した。事前試験を経て、現在、最初の商用化に向けて2件の実証プロジェクトが進行中である。

## 1. はじめに

鉄鋼産業とセメント産業は、産業部門においてCO<sub>2</sub>排出量が多い二分野である。排出量の大部分は、依然として石炭を一次エネルギー源とする高炉一貫ルートの製鉄工程で発生している。鉄のリサイクルを進め、鉄鋼生産におけるスクラップ使用率を高めることは、最初に取り組むべき、かつ最も効果的なCO<sub>2</sub>排出削減策である。しかし、将来の鉄鋼需要量を満たすためには、鉄鉱石を原料とした製鋼プロセスが今後も幅広く必要とされるであろう。そのため、現在、直接還元(以下、DR)は主に天然ガスを使用して行われているが、将来的には水素を使用することの重要性が増していくと考えられる。

図1は、現在も主流である高炉一貫ルートと、水素ベースの直接還元を下流の2ステッププロセス、すなわちスメルター及びBOF(Basic Oxygen Furnace)転炉と組み合わせた将来のグリーン製鋼ルートとの比較を示す。この比較から、グリーン製鋼への移行には、使用するエネルギーの完全な転換が必要であることがわかる。高炉一貫ルートでは膨大な量の炭素材(通常、銑鉄1トンあたり400kg~700kg)を使用するのに対し、グリーン製鋼ルートでは大量の電気エネルギーが必要となる。この電気エネルギーの大部分は水素の生産に必要となる。電解技術や直接還元プロセス(電気加熱の有無など)にもよるが、直接還元鉄(Direct Reduction Iron 以下、DRI)1トンあたり3400kWh~3900kWhの電力を考慮する必要がある。したがって、このようなグリーン製鋼ルートにおけるCO<sub>2</sub>総排出量は、電力網の炭素排出原単位(1kWhあたりのCO<sub>2</sub>排出量g)に大きく依存する。

\*1 Primetals Technologies Austria, Vice President, Converter Steelmaking, Ph.D.

\*2 Primetals Technologies Austria, Head of Technology, Converter Steelmaking

\*3 Primetals Technologies Austria, Head of Engineering, Iron and Steelmaking

\*4 Primetals Technologies Austria, Expert Technology, Smelter, Ph.D.

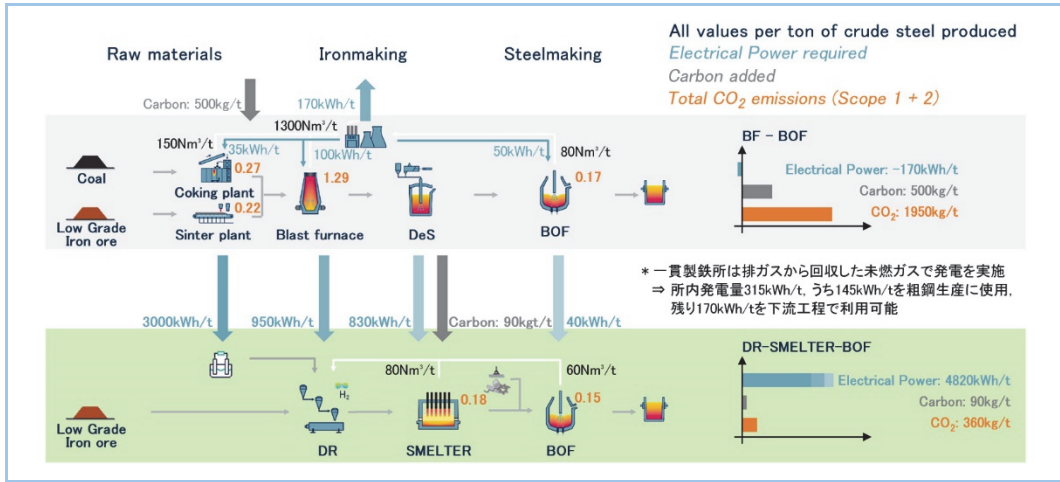


図1 現在主流の高炉一貫ルートと、水素ベースの直接還元、スメルター+BOF 転炉(2ステッププロセス)による将来の製鋼ルートとの比較

## 2.2 ステッププロセス

現在は主にシャフト炉プロセスが用いられ、鉄鉱石ペレットを DRI へ還元し、その後電気アーク炉 (Electric Arc Furnace 以下, EAF) で溶解する手法が一般的である。しかし将来的には、シンターフィード (粉鉱) を用いる HyREX や微粉鉱を用いる HYFOR などの流動床技術により、直接還元プロセスの選択肢はより多様化していくと考えられる。脈石成分が少ない高品位鉄鉱石の場合、溶解時に生成するスラグ量が少ないため、EAF が最適な処理設備となる。一方、脈石成分が多い低品位鉄鉱石の場合、スメルターと BOF 転炉を組み合わせた 2 ステッププロセスが必要となる<sup>(1),(2)</sup>。

スメルターは、抵抗加熱とブラシアーク (ブラシ状の短いアーク) を主な熱源とする電気加熱炉であり、密閉構造のため炉内は還元性雰囲気となっている。スメルターでは、熱間状態の DRI が溶解・最終還元され、メタルとスラグが分離される。スメルターのスラグは高炉スラグに類似しており、造粒後、セメント産業で利用できる。また、スメルターの銑鉄は高炉銑鉄に類似しており、BOF 転炉に送られて精錬が行われる。スメルターは還元性雰囲気で行われるため、DRI の金属化率が低い場合でも影響を受けにくく、最終還元を適切に行なうことができる。これにより、直接還元プラントからスメルターに至るプロセス全体において、生産性最大化、CO<sub>2</sub> 排出量最小化、OPEX 低減などの目標に向けた最適化が可能になる。

EAF の要求を満たす高品位鉄鉱石の供給には限界があるが、スメルターでは、図 2<sup>(3)</sup> に示す通り、より幅広い品位の鉄鉱石を処理できる。高品位鉄鉱石の供給制約と、現在建設中の多数の DR-EAF プラントによる需要増が相まって、高品位鉄鉱石の価格プレミアムはさらに上昇し、スメルターの事業的ポテンシャルが高まるだろう。

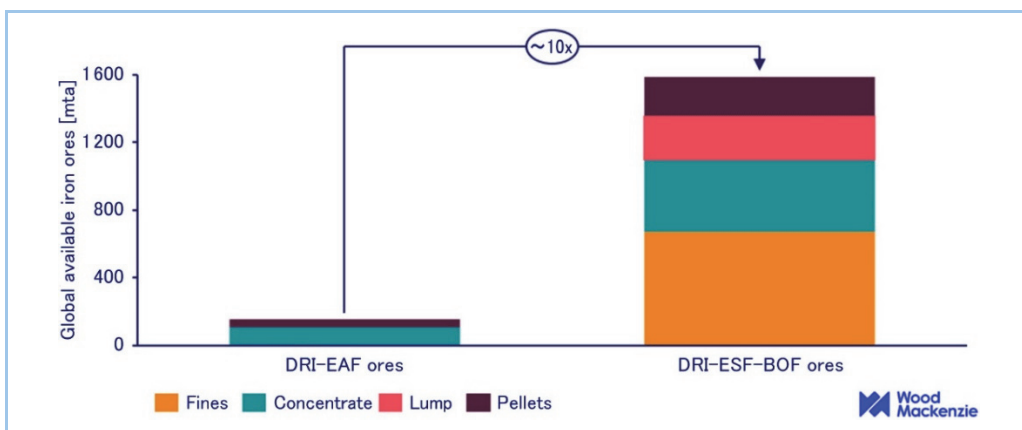


図2 DRI-EAF ルート及び DRI-スメルター (ESF)-BOF ルートの各ルートで適した鉄鉱石の世界的な利用可能量<sup>(3)</sup>

新たに提案された 2 ステッププロセスの経済性を検証するために、高品位及び低品位鉄鉱石を用いた場合について、両方のプロセスルートでの粗鋼生産の総コストを試算した。図 3 に示す結果は、EAF のみを用いる 1 ステッププロセスの場合、低品位鉄鉱石を使用すると、電力やフラックスなどの操業コストが大幅に上昇することを示している。そのため、低品位鉄鉱石は高品位鉄鉱石に比べて非常に安価であるものの、総コストでは低品位鉄鉱石を使用した方が高くなる。一方、2 ステッププロセスの場合は、両プロセス(スメルターとBOF)における操業コストはそれほど増加しないため、低品位原料の価格の低さがコスト傾向に強く反映され、結果として低品位鉄鉱石を使用した方が総コストは低くなる。総コスト曲線の交点は、高品位鉄鉱石では EAF が適しており、低品位鉄鉱石ではスメルターと BOF 転炉を用いた 2 ステッププロセスが適していることを示している。さらに鉄鉱石の追加選鉱処理という可能性も考慮したより詳細な分析においても同様の結果が得られ、2 ステッププロセスの経済的優位性が確認された<sup>(4)</sup>。

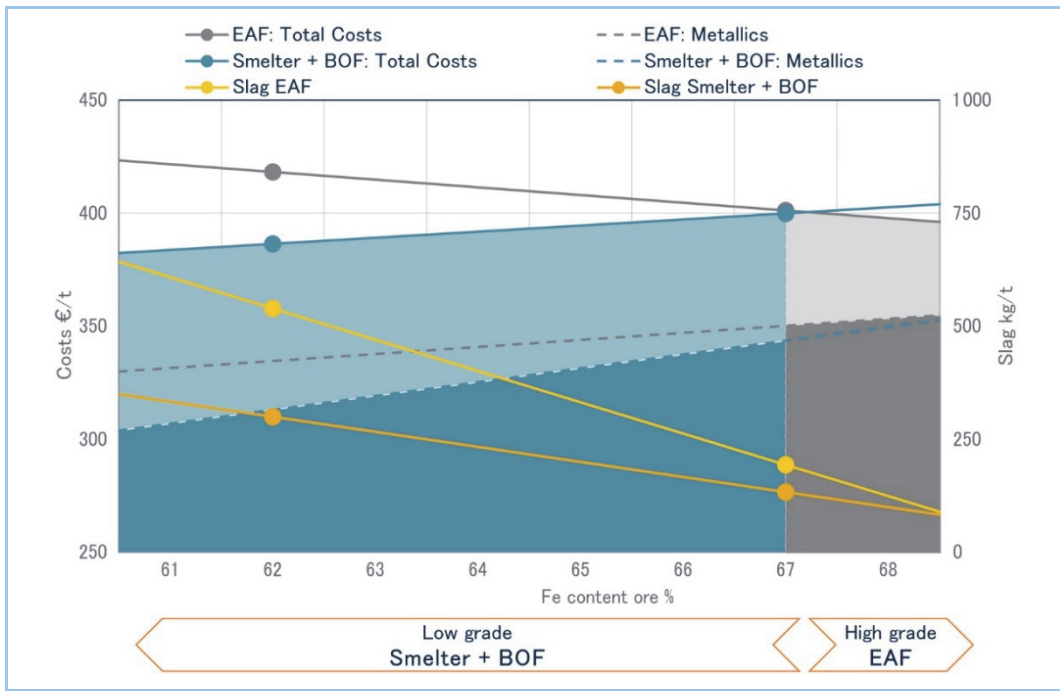


図3 鉄鉱石品位別にみた、スメルター+BOF 転炉による2ステッププロセスと、EAF による粗鋼生産の総コスト比較(前提条件: DRI 247~300€/t, 電力 80€/MWh)

### 3. スメルタープロセスの原理

スメルターは密閉構造により炉内は還元性雰囲気維持されるため、装入される熱間DRIの再酸化が防止され、添加される炭素材の歩留まりが高くなる。さらに、CO リッチな排ガスが発生し、これはプロセス内(例えば、直接還元プロセスの加熱や還元ガスとして)で利用可能である。スメルターで生産される銑鉄は高炉銑鉄に類似しており、炭素含有量は BOF 転炉の要求に合わせて炭素添加量により調整可能である(典型的な炭素含有量は約 3.5%)。また、シリコン(Si)含有量は、スメルターの還元力がやや低いため、高炉銑鉄よりわずかに低くなる。こうした銑鉄の化学成分の違いにより、特定の対策(Dual-Flow-Post-Combustion ランスやスクラップ予熱ランス、複合吹錬転炉など)を講じない場合、BOF 転炉操業におけるスクラップ比率は若干低下する。スメルターのスラグに対しては耐火材保護設計を考慮する必要があるが、高炉スラグに類似しており、セメント産業の要求に合わせて広範囲な調整が可能である。

スメルターは連続操業されるため、電力投入と原料装入は連続的に行われる。大きなホットヒール(溶融プール)からの出銑・排滓は、開孔機とガンニングマシンを用いて周期的に行われる。スラグは適度な電気抵抗を有するため抵抗加熱が可能だが、熱伝導率は比較的low、その結果、スラグと接触した DRI の伝熱及び溶解速度は制限される。そのため、生産性を高めるには、DRI

を直接溶解できるブラシアークが必要となる。したがって、電力投入は抵抗加熱とブラシアークの組み合わせで行われる。変圧器の最大電圧及びタップ数は、純粋な抵抗加熱からブラシアーク比率が高い操業まで全範囲をカバーできるように設計されている。

スマルターに装入される一般的な DRI は比較的高い導電性を有するため、DRI が電極に直接接触し、DRI を介して電流が流れることを防ぐ必要がある。このため、DRI を電極の直下に直接装入することは行わず、DRI は以下に示す 2 つのゾーンに装入される。

#### I. 電極近傍(プロセスゾーン):

主たる溶解が行われる領域で、装入された DRI は比重により電極近傍に浮上し、アーク及び高温スラグによって溶解される。

#### II. 側壁部(ウォールゾーン):

耐火材の保護とスラグ付着層の形成を促進する目的で装入される。

これらの炉内プロセス領域(プロセスゾーン: オレンジ点線枠, ウォールゾーン: 青点線枠)を、簡略的に図 4 に示す。炉の操業は、スラグに電極を浸漬して行う純粋な抵抗加熱方式、あるいはブラシアークと抵抗加熱を組み合わせた方式のいずれでも可能である。

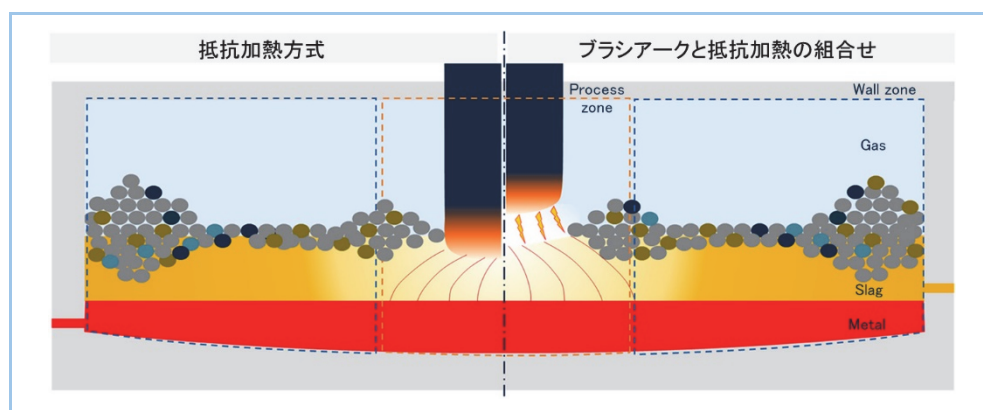


図4 主要な 2 つの加熱モードを示すスマルタープロセスの概略図

## 4. 炉の設計

基本的に、スマルターは 3 本の電極を備えた円形炉、または 6 本の電極を備えた矩形炉としての設計が可能である。しかし、両方式とも、炉浴面積(bath area)と電極径について設計上の制約は存在する。炉浴面積は最大許容炉床電力密度によって決まり、電極径は最大許容電流密度及び電極損耗率によって決まる。こうした新プロセスにおける第一世代スマルターとしては、設計パラメータを慎重に採用する必要がある。その結果として、各方式の最大生産能力を想定すると、円形炉で約 60MW(年産 80 万トン DRI 相当)、矩形炉で約 120MW(同 160 万トン)となる。これらの設計パラメータを前提とすれば、標準的な耐火材寿命としては数年レベルが期待される。これらの期待値は、初号機の実績から得られる知見に基づき、将来的には拡張される可能性がある。

矩形炉は容量が大きいため、典型的な一貫製鉄所のニーズに合致している。一方、円形炉は特殊な用途(バナジウムやチタン含有鉱石を処理する小規模プラントなど)での適用が見込まれる。例えば、年産 250 万トンの能力を持つ大型の MIDREX Mega Module 1 基で構成されるフルスケールの商用プラントに対しては、2 基の大型矩形スマルターが適合する。各スマルターには熱間傾斜コンベアをそれぞれ接続して熱間 DRI を装入し、それぞれの炉容量は約 100MW、年 125 万トンの DRI 処理能力となる。

矩形炉は、操業期間全体を通じて耐火材を安定かつ与荷重状態を維持するための堅牢なクランプ機構を必要とする。このためプライメタルズテクノロジーではソリッドフレーム構造を採用しており、このフレーム内には、バネ機構によって荷重を与えるパネルが設置されている。これらのパネルにより、炉の長手方向、横方向、垂直方向に耐火材を加圧している(図 5)。

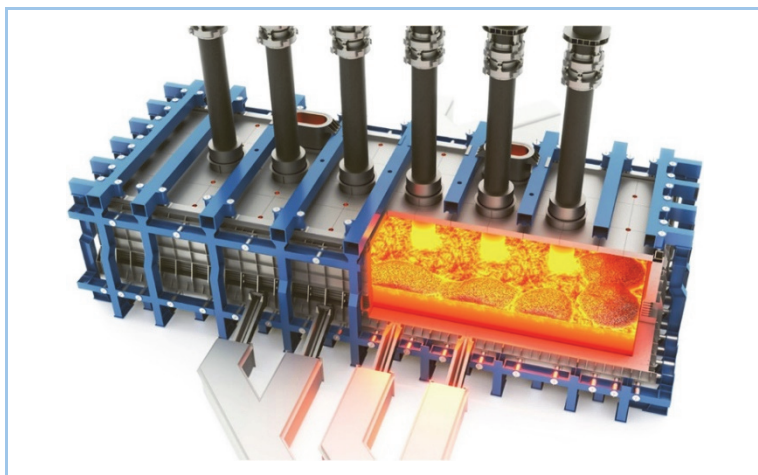


図5 ソリッドフレーム構造及び耐火材クランプ機構を含む商用規模スメルター(約 100MW)の構造

## 5. 試験による実証

プロセス設計及び計算結果を検証するため、既存の電気アーク炉を改造して、低品位 DRI を用いた初期試験を実施した。低品位 DRI はまだ市場で容易に入手できないため、天然ガスベースの MIDREX プラントで製造された標準 DRI に高炉スラグを混合し、高い脈石含有量を模擬した。

2023 年初頭、オーストリア・レオーベン の ARP 社にある 400kW 炉で初期試験を実施した。この交流炉は、炉殻内径 0.9m、直径 150mm の電極 3 本を備えており、最大 1.1 トンの出湯が可能である。変圧器容量の制約により、二次側電圧は最大 120V に制限されており、強い抵抗加熱は可能であるものの、安定したアークの形成は困難であった。

この初期試験では、メタルと高炉スラグによるホットヒール(溶融プール)をあらかじめ形成し、その後、塩基度調整用のフラックスとともに約 600kg の DRI、さらに最終還元と炉浴の加炭に必要な炭素材をあわせて連続装入した。炭素材には低揮発分無煙炭が使用された。2 回の溶解試験が実施され、途中で炉を傾動させて一部を出銑した(図 6 左)。各試験において約 780kg の銑鉄が製造された。炉蓋には電極間の領域を監視するためにサーマルカメラが設置され(図 6 右)、画像から以下のことが観察された。

1. 電極間の中央部に DRI の堆積層が形成され浴面を被膜する。
2. DRI の溶解は主に電極近傍で進行する。DRI ペレットは電極近傍に浮上しており、その場所で急速に溶解する。
3. 電極近傍ではスラグ流動の乱れが観察された。この乱れは主に還元反応にともなう CO 発生により引き起こされ、DRI の溶解を促進している。

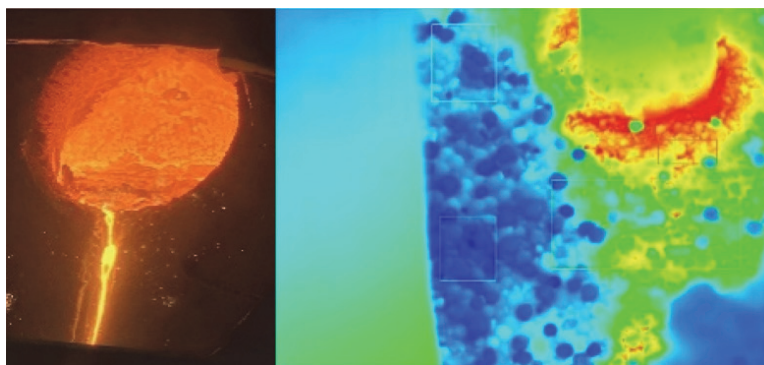


図6 改造電気アーク炉における低品位 DRI の溶解

(左) 炉からの出銑・排滓

(右) 3 本の電極間のサーマルイメージ、装入原料及び電極近傍の高温プロセスゾーン

試験の結果、プロセス計算と物質収支(マスバランス)が良好に一致することが確認された。さらに、低塩基度のスラグ中においても DRI の溶解が可能であることが示された。フラックスの消費量を最小限に抑えるため、平均 B2 塩基度(C/S) 1.05 を目標に設定した。炭素材と DRI の適切な装入により、炉浴の良好な浸炭が達成され、炭素含有量は平均 4.1%となった。最終的に、スラグ中の FeO レベルは低く、平均 1.5%となった。これにより本プロセスの高い歩留まりが実証され、低品位鉄鉱石に対する優位性が確認された。

また、その後の追加試験では、バイオ炭などの様々な炭素材や、HYFOR デモプラント由来の微粉 DRI を含む異なる形態の DRI を使用して検証が実施され、いずれも上述と同様の良好な結果が得られた。

## 6. 実装とスケールアップ

現在、ペレットを用いたシャフト炉による直接還元が最も成熟した技術であるが、将来的には流動床を用いたソリューションを含む、より広範な直接還元技術が普及すると予測される。プライメタルズテクノロジーは流動床による直接還元において豊富な経験を有しており、現在、シンターフィード(粉鉱)を処理する HyREX、微粉鉱を処理する HYFOR の 2 つのソリューションを開発中である。図 7 に示すように、これらのすべての直接還元プロセスにおいて、高品位鉄鉱石の場合は EAF、低品位鉄鉱石の場合はスメルターと組み合わせる必要がある。したがって、スメルターは、次世代の様々な形態の DRI に加え、ミルスケール、ダスト、スラグなどのリサイクル材を含む、将来のあらゆる装入原料に対応できるように考慮されている<sup>(5)</sup>。

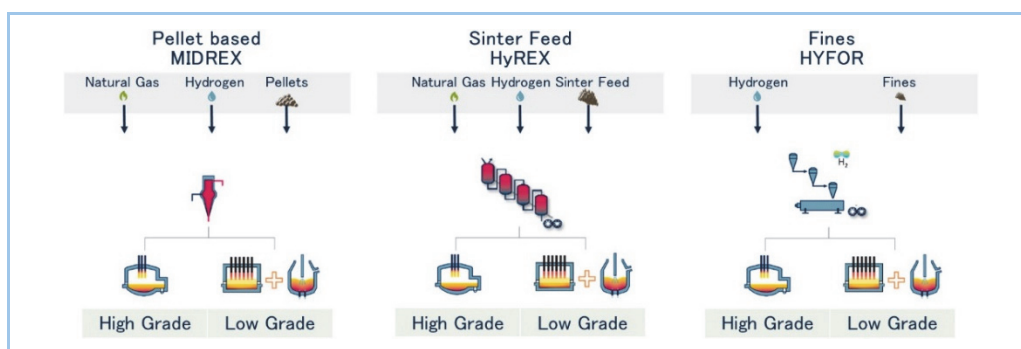


図7 将来の鉄鉱石ベースの生産ルート

鉄鉱石品位(脈石成分)に応じて EAF、またはスメルター+BOF 転炉の 2 ステッププロセスが熱間 DRI の処理に使用される

リスク、開発コスト、及び開発期間のバランスをとるためには、プロセス設計とスメルター設計の段階的なスケールアップが必要であり、これを進めるには鉄鋼業界の強力なパートナーとの協力が不可欠である。プライメタルズテクノロジーは、Hy4Smelt プロジェクトにおいて、voestalpine (オーストリア)及び Rio Tinto (オーストラリア)と提携し、HYFOR 直接還元プロセスと、スメルター(最大能力約 3 ton/hour)を組み合わせた初の実証プラントの実現を目指している。

次のステップとして、矩形タイプで生産能力 30 ton/hour のスメルター(ESF:Electric Smelting Furnace)が、最初の HyREX プロジェクトにおいて、POSCO と協力して実現される予定である。このプロセスは、FINEX の実績に基づいた流動床技術とスメルター(ESF)を組み合わせたもので、シンターフィード(粉鉱)を原料として使用する。

最終ステップでは、年 125 万トン以上の生産能力を持つフルスケールの商用規模スメルターが実現されるだろう。本炉のエンジニアリングはすでに完了しており、現在はリードカスタマー(初期導入されるお客様)の検討が進められている。資金調達や許認可取得の準備を含むプロジェクト計画も、すでに開始可能な状態にある。最終的な技術的決定は、実証プラントで得られた知見に基づいて行われる予定であり、そのため、フルスケールの商用規模スメルターの立ち上げは 2029 年になると見込まれている。図 8 に、このスケジュールの概要を示す。

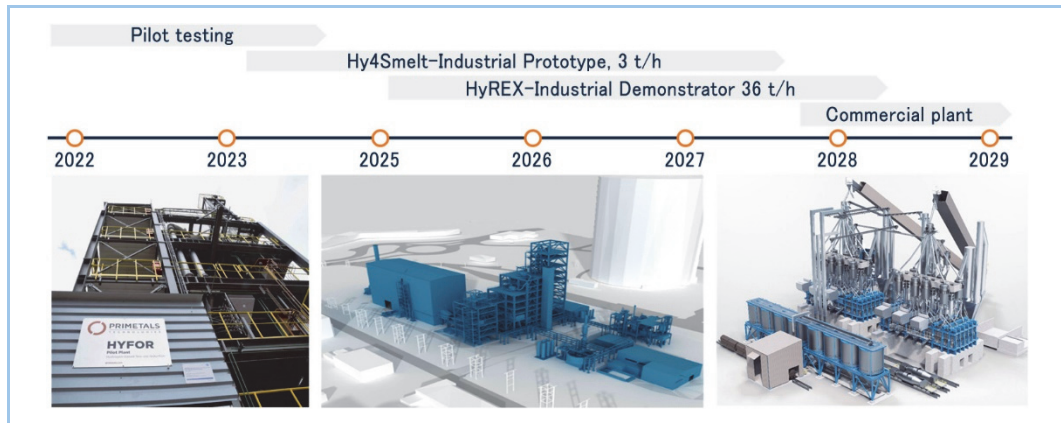


図8 実証プラントから商用プラントまでの、スメルター開発と段階的スケールアップのロードマップ

## 7. 結論

本報では、鉄鋼生産におけるCO<sub>2</sub>排出量削減の中核的な戦略として、水素ベースの直接還元について述べた。特に、スメルターとBOF 転炉を組み合わせた2ステッププロセスを提案している。スメルターは、脈石成分の多い低品位鉄鉱石を処理して熔融銑鉄を生産するように特別に設計されており、その銑鉄はBOF 転炉で粗鋼へ精錬される。

スメルターは密閉環境下で操業されるため、熱間 DRI の再酸化を防止することができ、鉄と炭素の歩留まりを最大化する。プロセス計算と生産コスト評価により、低品位 DRI の処理における2ステッププロセスの経済的優位性が明確に示され、厳格な試験によっても実証された。

これらの理論的及び試験による知見に基づき、実装及びスケールアップのためのロードマップが策定され、業界リーダーとの戦略的パートナーシップに基づいて実行される。このロードマップは、2027年までに最初のスメルターの稼働を実現し、2029年にはフルスケールの商用規模での操業を開始することを目標としており、これにより持続可能な鉄鋼生産への移行を前進させるものである。

(翻訳: Primetals Technologies Japan 株式会社 水城英明, 黒原裕美子)

MIDREX は株式会社神戸製鋼所の登録商標です。

HyREX は POSCO Co., Ltd の登録商標です。

HYFOR は Primetals Technologies Austria GmbH のオーストリアにおける登録商標です。

## 参考文献

- (1) Wimmer, G. ほか, Two steps towards net zero carbon? Steel Times International, April 2022
- (2) Wimmer, G. ほか, 鉄鋼業のカーボンニュートラルの達成へ向けたブレークスルー, 三菱重工技報 59 巻 4 号 (2022)
- (3) Wood Mackenzie, What's next for green steel technologies? 12/2023
- (4) Rahbari, A. ほか, Production of green steel from low-grade ores: An end-to-end techno-economic assessment, Cell Reports Sustainability, Volume 2, Issue 1, 2025
- (5) Voraberger, B. ほか, Smelter to close the raw material gap in green steel production, Metall. Res. Technol., 123 2 (2026) 218