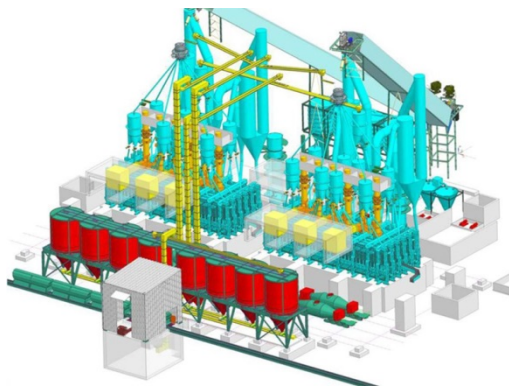


鉄鋼業のカーボンニュートラルの達成へ向けたブレークスルー

Breakthrough Pathways to Decarbonize the Steel Sector

Gerald Wimmer*¹Bernhard Voraberger*²Benjamin Kradel*³Alexander Fleischanderl*⁴

鉄鋼業は産業界における主要な CO₂ 排出元であり、その排出量は世界全体の CO₂ 排出量の約8%に相当する。製鉄工程において化石燃料を使用する高炉 (BF: Blast Furnace) が主要な排出源である。このような鉄鋼業のカーボンニュートラルを達成するための技術として、スクラップを使用する電気炉 (EAF: Electric Arc Furnace) に加えて、水素を使用する直接還元法にも大きな可能性がある。プライメタルズテクノロジーは三菱重工グループの一員として、直接還元法及び製鉄技術の包括的なポートフォリオをもって、鉄鋼生産のグリーントランジションを促進する。

本報では、ホットメタル (溶銑)、直接還元鉄 (DRI: Direct Reduced Iron) /ホットブリケットアイアン (HBI: Hot Briquetted Iron)、及びスクラップなど、異なる鉄源を使用するいくつかの製鋼プロセスを CO₂ 排出量とともに示す。そして、電気炉と BOF 転炉 (Basic Oxygen Furnace) を組み合わせたハイブリッドプロセス、水素を使用する直接還元法と電気炉を組み合わせた高品位 DRI 向けの新しいプロセス、及び電気製銑炉と BOF 転炉を組み合わせた低品位 DRI 向けの最新の“2ステッププロセス”を含めて、エネルギー需要側の取組みとしてグリーントランジションの複数のシナリオを紹介する。

1. はじめに

鉄鋼業は産業界における主要な CO₂ 排出元であり、その排出量は世界全体の CO₂ 排出量の約8%に相当する。鉄鋼業が地球環境に与える影響は、主に製銑時に高炉で発生する CO₂ によるものである。高炉を経由するプロセスは今なお支配的であり、世界の鉄鋼生産の約70%は高炉を経由している⁽¹⁾。

石炭を使用する高炉の還元工程と、酸素を使用する下流の製鋼工程で、粗鋼1トン当たり約2トンの CO₂ が排出され、そのうち約80%は溶銑の生産により生じる。天然ガスを使用して生産される DRI などの他の装入原料では CO₂ 排出量はこの半分以下である。水素を使用する直接還元法では既に CO₂ 排出量ネットゼロに近づきつつあり、鉄スクラップを使用する場合の CO₂ 排出量はゼロである (図1)。

製鉄メーカーにとって CO₂ 排出量を削減する最初のステップは、既存のプラントでのスクラップの使用率を最大化すること、及びスクラップを使用する電気炉を新たに設置して製鋼することである。電気炉は、全ての製鋼プロセスの中で、最も CO₂ 排出量が少ない。電力網次第ではあるものの、プライメタルズテクノロジーの最新の電気炉である Quantum などの極めて効率の良い電気炉技術をグリーン電力 (80g CO₂ / kWh 未満) と組み合わせることにより、CO₂ 排出量を平均で粗

*1 Primetals Technologies UP I&S CS TI CS Technology Head *2 Primetals Technologies UP I&S ES TI EAF Technology Head

*3 Primetals Technologies UP I&S CS CS Business Head Dr. *4 Primetals Technologies UP-TI Chief Technology Officer Dr.

鋼1トン当たり 150 kg 以下にすることができる。しかしながら、スクラップ量には限りがあり、生産できる鋼種も制限されるため、製鉄業全体が電気炉での生産に移行することは不可能である。そのため、将来においても鉄源の大部分として清浄鉄源（還元鉄等の不純物の少ない鉄源）が必要となるだろう。スクラップ及び DRI を使用する製鋼に移行する中間段階においては、電気炉と BOF 転炉を組み合わせたハイブリッドプロセスによる製鋼が理想的な選択肢となる。電気炉－BOF 転炉のハイブリッドプロセスでは、プライメタルズテクノロジーによる、極めて柔軟性の高い EAF FUSION が最適な選択肢の1つとなる。いずれにしても、鉄鉱石から生産される DRI を装入原料として使用することは、グリーン製鋼の実現に向けて最も有望な手段である。

プライメタルズテクノロジーは、MIDREX®, HyREX®, HYFOR (Hydrogen Fine Ore Reduction) など DRI 生産設備の幅広いポートフォリオを有しており、鉄鉱石の特性と粒径(図2)に応じて適切な技術が適用できる。鉄鉱石の品質は DRI 生産以降の下流の生産プロセスも決定する要因となる。高品位 DRI の電気炉での処理は既に確立された技術であり市場に存在するが、高品位の鉄鉱石は量に限りがある。低品位の鉄鉱石は現在高炉法で使用されているため、低品位 DRI の最終還元、溶解、精錬については新たなグリーンソリューションが必要となる。電気製鉄炉で溶銑を生産し、BOF 転炉で精錬する“2ステッププロセス”が低品位の鉄鉱石に対する最も有望なソリューションになると思われる。プライメタルズテクノロジーは、耐火材のサプライヤである RHIM 社や他のパートナー企業の協力のもと、このようなソリューションの開発及びスケールアップを行っている^(2,3)。

CO₂ 排出量を削減する上述のソリューションと並んで、二酸化炭素の回収・貯留(CCS:Carbon Capture and Storage)及び回収・有効利用(CCU: Carbon Capture and Utilization)も鉄鋼業における脱炭素に貢献するだろう。特に高炉操業を継続するプラントでは、温室効果ガス削減を実現するソリューションとなり得る。

以下の章では、様々な製鋼技術を比較、説明し、いくつかのソリューションの実装について紹介する。最後に電気製鉄炉－BOF 転炉による“2ステッププロセス”の詳細について述べる。

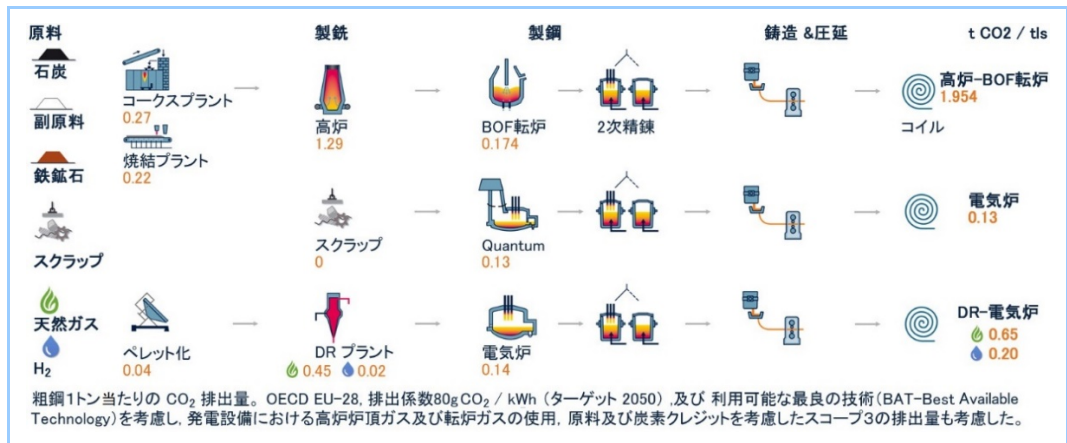


図1 一般的な製鉄・製鋼プロセスにおける CO₂ 排出量



図2 DRI の生産及び溶解技術の概要

2. 銑鋼一貫製鉄所におけるスクラップ使用率の最大化及び電気炉—BOF 転炉ハイブリッドプロセス

既存の BOF 転炉においてスクラップの使用率を増やすことで、設備を改造することなく、即時に効果的に CO₂ 排出量を削減できる。プロセス最適化、スクラップの予熱、及び積極的な二次燃焼等の様々なソリューションにより、BOF 転炉におけるスクラップの使用率を最大で 30% まで増やすことができる。その結果、溶銑使用率を 10~20% 削減でき、それに相当する CO₂ 排出量を削減できる。しかしながら、BOF 転炉は電気炉とは異なり外部から加熱することができないため、スクラップ使用率及び CO₂ 削減量には限りがある⁽²⁾。電気炉は、原料配合においてより柔軟性があり、電極を介した電力供給により、スクラップ、HBI、または DRI を最大 100% まで装入可能である。ホットメタルラウンダー、追加のトップブローランス、移行段階に応じた専用の炉壁に特徴を持つ EAF Fusion の設計では、最大 75% の高い溶銑使用率が実現できる。これらの特徴により、EAF Fusion は、高炉を継続して操業するプラントまたはスクラップ及び DRI の入手に制限があるプラントにおいては革新的なソリューションとなり得る⁽⁴⁾。

しかしながら、電気炉を既存の銑鋼一貫製鉄所に統合することは、電力需要の増加、生産鋼種の再評価、既存インフラの制限、ロジスティクス及び生産プロセスの大きな変更などで課題がある。とりわけ 300 トン以上の出鋼量では、トランスの大容量化、電力需要の増加、及びプロセス時間の不一致のために、BOF 転炉を同サイズの電気炉に置き換えることは困難である。

このような理由により、プライメタルズテクノロジーは、PREMELT と呼ばれる、特許出願中のプロセスを開発した。このプロセスではスクラップと DRI を電気炉で“予め溶解 (pre-melt)”した後に、高炉からの銑鉄と混合し、BOF 転炉に装入する。

PREMELT プロセスでは、電気炉では溶解のみを行い、BOF 転炉で精錬を行う。このプロセスの利点は電気炉の出鋼量を BOF 転炉の出鋼量よりも小さくできることである。電気炉の設置場所を柔軟に考えることができ、部分的には製鉄プラントの外に設置することも可能であるため、製鉄プラント内のロジスティクスを変更する必要がなく、既存の生産ラインについて生産鋼種の再評価をする必要もない。

PREMELT プロセスで使用する炉の種類及び設計は、原料配合及び出鋼量により異なる。70 トン以下の出鋼量では、誘導加熱炉 (IF : Induction Furnaces) で必要な溶銑量を生産することが可能であるものの、それ以上の出鋼量では、増加する電力消費量のために電気炉の方がより効率的である。スクラップを主原料に使用する高効率な電気炉である Quantum により、可能な限り少ない CO₂ 排出量を実現することができる。Quantum では、高温の排ガスでスクラップを予熱することで、全体のエネルギー消費量を低減することができる。しかしながら、PREMELT プロセスにもデメリットがある。高炉が休止した場合、もしくは、直接還元法による生産に切り替わった場合に、電気炉の種類、設置場所、出鋼量が生産プロセスに適応しなくなり、追加の改造が必要となる可能性がある。図3は、BF グレードの鉄鉱石を使用する銑鋼一貫製鉄所が、電気炉—BOF 転炉ハイブリッドプロセスへ移行するステップを示すとともに、水素を使用する直接還元法に基づく“2ステッププロセス”へと長期的に移行するシナリオを示している。

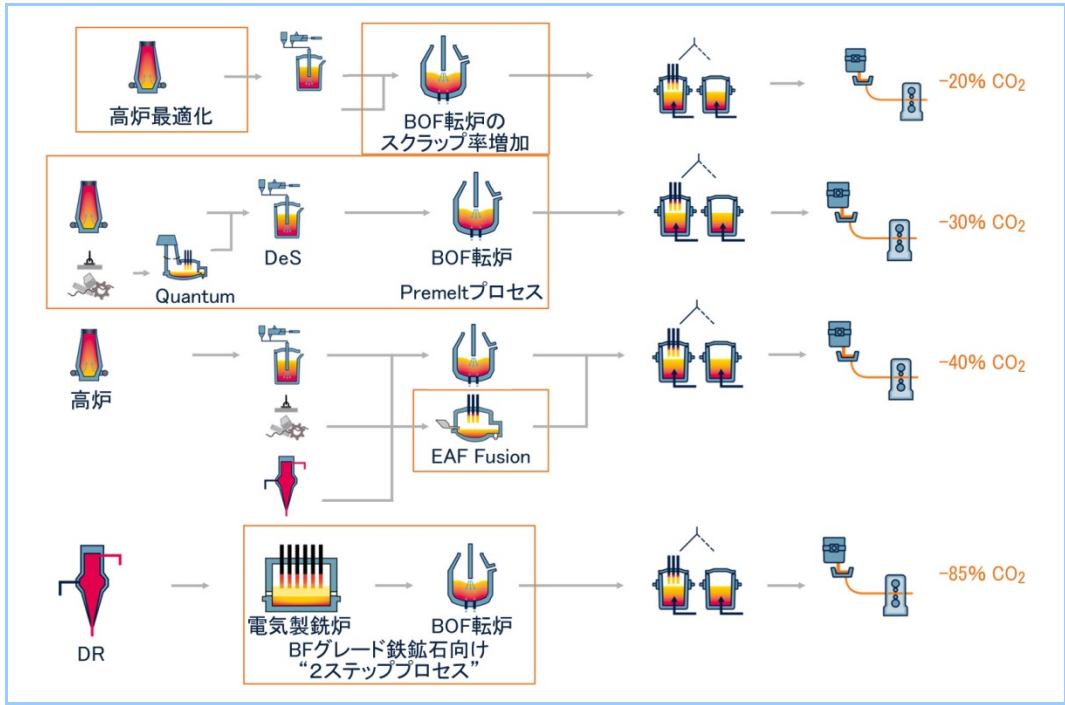


図3 電気炉－BOF 転炉ハイブリッドプロセス及び BF グレード鉄鉱石を使用する鉄鋼一貫製鉄所の転換への可能なプロセス

3. DRI を使用する製鋼

直接還元 (DR) 法は、高炉を経由する製鉄プロセスを代替し CO₂ 排出量を最小化する最も有望な手段と見られている。今日、最も有力な直接還元技術はシャフト炉を用いた MIDREX®法である。MIDREX®法では天然ガスを改質した還元ガスを主に使用して DR グレードのペレットを生産する。将来においては還元ガスとして水素の使用も見込まれている。還元工程の後、DRI は電気炉に直接供給されるか、または HBI に加工され、輸送の後に高炉、BOF 転炉、または電気炉に供給される。プライメタルズテクノロジーズは様々な構成の DRI 対応電気炉を中東地域を中心として供給してきており、DRI 装入比率 100%まで対応することができる。スクラップを主原料として使用する電気炉と比較して、DRI 比率の高い操業はエネルギー消費量が多く、出鋼間隔が長くなる傾向にある。その主な理由は DRI に含まれる脈石成分の処理と、FeO 成分の最終還元時間に時間を要するためである。一方で、DRI 比率が高いことで窒素含有量を抑えて出鋼することができる。これはスクラップの使用が少ない、あるいは全くなく、湯面を完全にスラグで覆うことができるためである。

電気炉の経済的な操業のためには脈石成分が少なく金属化率の高い高品位の DRI/HBI が必要となる。脈石成分が少なく、金属化率が高いことで、電気炉で発生するスラグ量を通常処理可能な範囲に留め、鉄分のロス、電力消費量、及び添加材の装入量も抑えることができる。その結果、低品位の DRI/HBI と比べて高い歩留まりを得ることが可能となる。しかしながら、高品位の鉄鉱石の入手性は限られており、現在海上貿易されている高炉向け鉄鉱石のほとんどは低品位である(図4)。従って、低品位の鉄鉱石から生産される DRI を処理するプロセスが必要となる。

低品位の鉄鉱石には一般に 12%程度の脈石成分が含まれている。これは高品位の鉄鉱石と比べると2倍以上の含有量である。脈石成分が多いことで、電気炉での目標塩基度への到達及び適切なスラグフォーミングのために必要な添加材の量が増加する。スラグ層を形成した安定した電気炉の操業には約 1.8 の塩基度が必要とされる。これは、低品位の鉄鉱石で操業する場合、溶鋼1トンに対するスラグ量が 400kg 以上増加することを意味する。FeO 含有量が 20%を超えるスラグの量が増加することで、鉄分のロスが非常に多くなり、従って低歩留まりに陥る。このような操業で生じる大量のスラグの処理と再利用の問題も、ここで述べるべきだろう。一般的には、機械

的な分離の後の利用先がいくつかと、工場内での再利用があるのみである。

低品位の DRI を、電気製鉄炉と BOF 転炉からなる“2ステッププロセス”において処理することがソリューションとなり得る。この場合、電気製鉄炉では溶解と最終還元を実施し、その後の BOF 転炉において全ての冶金的なプロセス及び精錬を実施する。プロセスを2段階に分けることによって、第一段階でメタルとスラグを効率的に分離できるだけでなく、セメント産業での利用に適したスラグを生成することが可能になる。電気製鉄炉は、約 1.0 と低い塩基度で操業が可能であり、これによりスラグ量の低減と、既存の高炉スラグに近いスラグの生成が可能になる。電気製鉄炉のように閉鎖され、傾動しない炉内での還元性雰囲気は、還元率を高め、スラグ中の鉄分を減らし、高い歩留まりを実現する。

高い歩留まりという優位性に加えて、スラグ量は少なく、セメント産業での利用が可能ならうに、転炉操業及び下流プロセスをそのまま維持することが可能である。低品位の鉄鉱石によるコスト低減が、電気炉のみからなる“1ステッププロセス”と比べて高い“2ステッププロセス”の運転コストを補う⁽²⁾。双方のプロセスの合計コストを、異なる鉄鉱石品位について欧州市場の価格に基づいて計算し比較したものを図5に示す。

いずれのプロセスにおいても、主に電気エネルギー消費、添加材消費、及びユーティリティ消費等からなる製鋼コストは鉄鉱石品位の低下に応じて増加する。一方で、DRI の製造コストは低下する。図5から、低品位の鉄鉱石からなる DRI を処理する場合は“2ステッププロセス”が、高品位の鉄鉱石を処理する場合は電気炉による“1ステッププロセス”が適していることが分かる。これは現在の市場のトレンドを反映している。今日の DRI 対応電気炉を有する工場は全て、高品位の DRI を使用しており、材料の付加コストを受け入れていることになる。

直接還元法を用いる製鋼法は、現在の鉄鋼一貫工場における高炉を経由する製鋼法のシェアの多くを置き換え、将来のグリーン製鋼を促進する技術である。図6に将来における製鋼プロセスのシェア予想を示す。DRI を使用する電気炉製鋼法と、電気製鉄炉を使用する“2ステッププロセス”は、いずれもグリーンな製鋼プロセスになり得る。既存の鉄鋼一貫工場においては、低品位の鉄鉱石を中心とした原料の使用を継続するニーズがあるため、溶解と最終還元を電気製鉄炉で実施し、最終精錬を BOF 転炉で実施するプロセスが望ましいと言える。

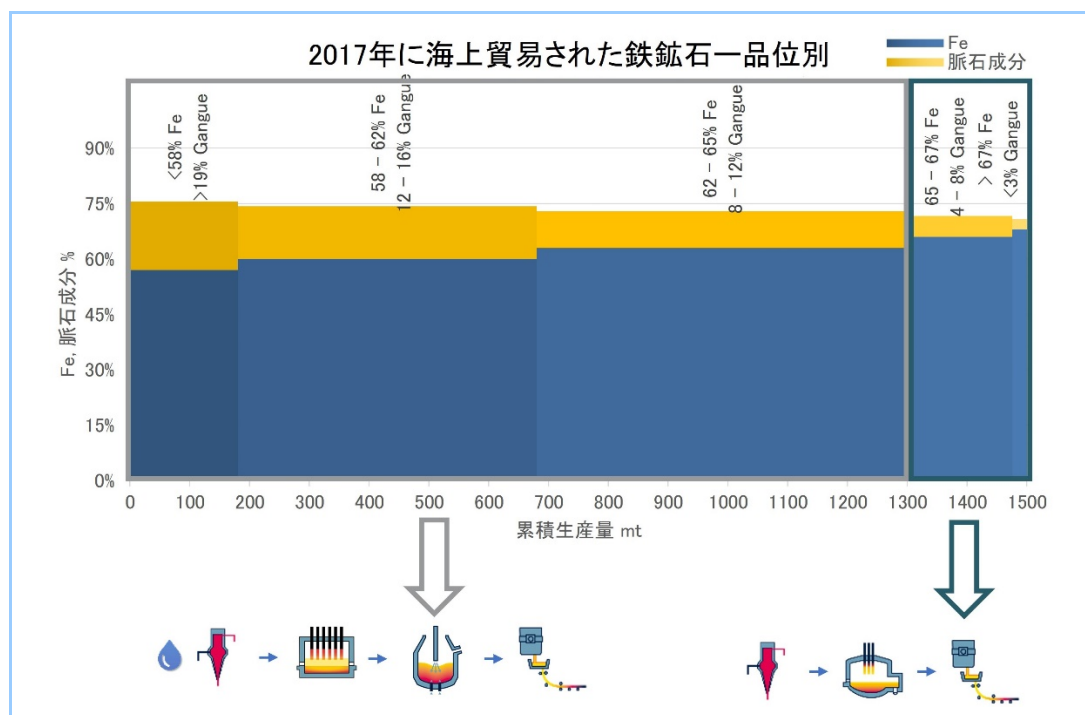


図4 2017年に海上貿易された鉄鉱石の一般的な Fe 含有量及び脈石成分含有量、及び好ましいプロセスルート

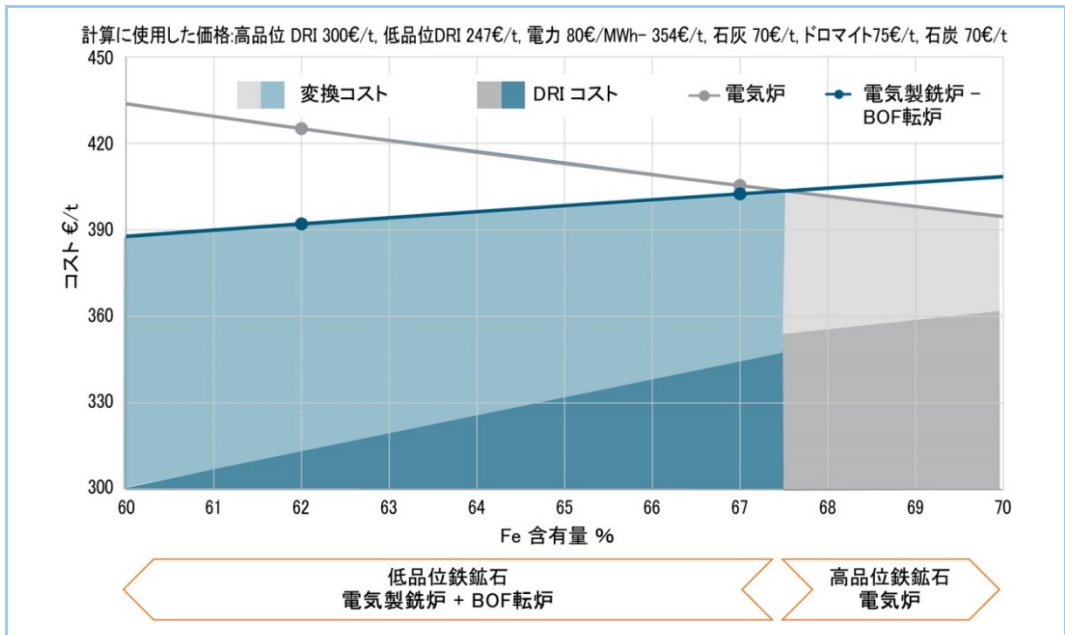


図5 鉄鉱石品位 (Fe 含有量) 別での電気炉及び電気製鉄炉 + BOF 転炉の生産プロセス総コスト

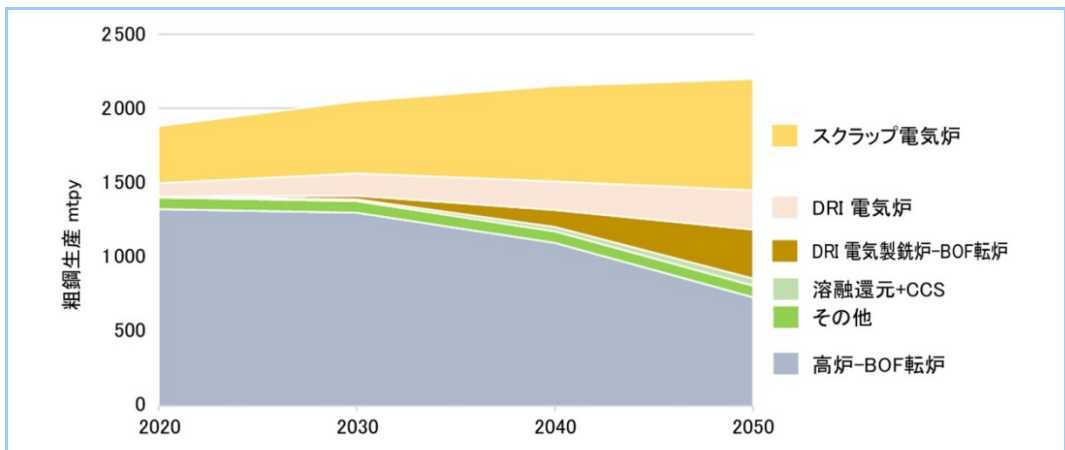


図6 2050年までの鉄鋼生産ルートの将来のシェア予測

4. 電気製鉄炉の開発及び設計

電気製鉄炉は幅広い原料を処理することができる。その範囲は、例えば MIDREX®直接還元プラントを使用してペレット化あるいはホットコンパクトアイアン (HCI: Hot Compacted Iron) 化した低品位 DRI から、HYFOR または HyREX®を使用して微粉鉱から作る DRI までに及ぶ。DRI に加えて、ダスト、スケール、またはスラグの形での酸化鉄を含む副生成物も電気製鉄炉で熔融及び還元することが可能である。

電気製鉄炉の設計の基本は、炉内にホットヒール (溶銑) を多く保持し、電気のみで加熱することである。DRI 対応電気炉と同様に、炉壁からの酸素吹込み等の化学エネルギーの投入は実施しない。ゼーダーベルグ電極を使用した抵抗加熱により熱を生み出し、安定して効率的な耐火物寿命の長い操業を実現する。加えて、ショートアークあるいはブラッシュアークを利用する運転が生産性を向上させる期待もある。しかしながら、電極当たりの電力投入量と湯面に対する比電力投入量は従来の電気炉よりも小さいため、炉体を大きくする必要がある。炉体の形状は円筒形または矩形のいずれかとなる。円筒形の炉体では、従来通りレンガを円周上に並べることになるため、典型的な耐火物レイアウトが適用可能である。矩形の炉体では、熱膨張により耐火材の間に隙が生じるため、調整可能な皿ばねを使用した与圧装置の使用が見込まれる。電気製鉄炉の容量は、通常、年 150 万トンから 250 万トン程度の生産能力を備える直接還元プラントの容量と一

致する必要がある。矩形の炉体では、同一直線上に6本の電極を備え、年 150 万トンまでの DRI を処理することができ、従って大容量の直接還元プラントの下流工程では2基の電気製鉄炉を同時に稼働させる。3本の電極を備える円筒形の炉体は、矩形の炉体に比べると処理能力も半分しかない。

2基の矩形の電気製鉄炉と、それらに還元鉄を熱間供給する直接還元プラントとの構成を図7に示す。電気製鉄炉はそれぞれ年 125 万トンの生産能力を備えており、ゼーダーベルグ電極がこれらの炉体に十分な電力投入量を実現する。出鉄方法は高炉と同様で、開孔機を使用して、樋に出鉄し、トピードカーへ鉄銑を案内する。そのため、溶銑の搬送装置等、既設の下流設備を流用することができる。

電気製鉄炉の開発において、プライメタルズテクノロジーズと RHIM 社は、プロセスを詳細に検討し炉体を設計した。適切な耐火物レイアウトがホットヒール(溶銑)を多く保持した状態での連続運転を可能にし、冷却システムにより数年間という長い耐火物寿命を実現する。商業ベースでの評価を経て、複数の顧客に向けた検討を実施した結果、“2ステッププロセス”を導入することが低品位 DRI の溶融において有利であることが分かった。次のステップは小規模なテストによってプロセスの妥当性を評価することであり、これはスケールアップしたプロトタイププラントでの実証に繋がっていくことになる。理想的には HYFOR プロセスと組み合わせて実施することが望ましい。いくつかの要素と、リードカスタマーの決定次第ではあるが、商用規模のデモプラントは 2025 年までに操業を開始できると考えている。

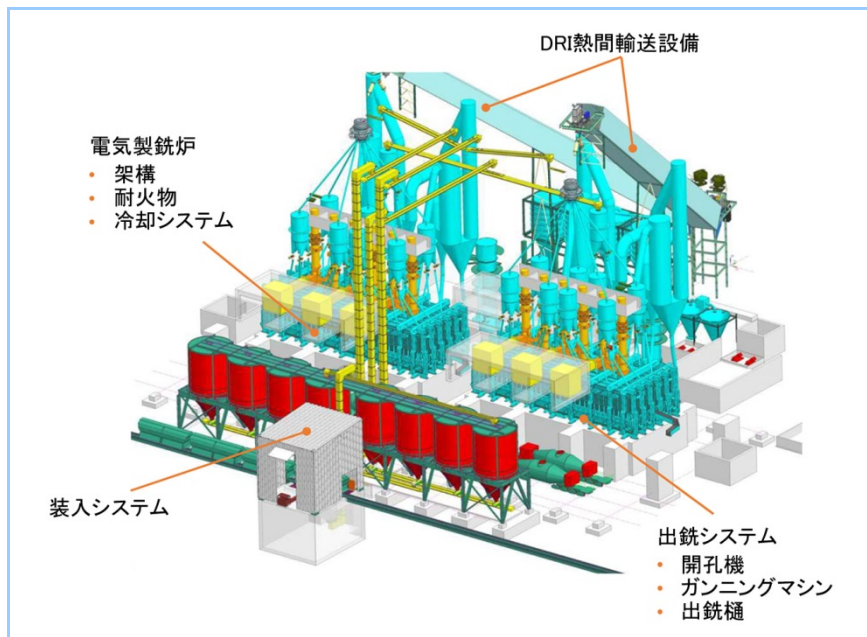


図7 電気製鉄炉の 3D レイアウト及び主な構成

5. まとめ

鉄鋼業のカーボンニュートラルの達成、つまり製鋼法のグリーン化を実現しグリーンスチールを生産するには、より多くのスクラップと直接還元法を使用したプロセスが必要である。カーボンニュートラル達成のスタート地点は、既存の鉄鋼一貫工場におけるスクラップ使用率を最大化することであり、そして革新的なハイブリッドプロセスへと移行していくことである。長期的には、水素を使用する直接還元法が最も有望なソリューションとなるが、使用する鉄鉱石の品位によっては二つの異なるプロセスを採用する可能性もある。高品位 DRI には、電気炉を使用した製鋼法が最も現実的なカーボンニュートラル達成ソリューションである一方で、低品位 DRI には、電気製鉄炉と BOF 転炉を組み合わせた“2ステッププロセス”が、経済的にも良い選択肢となる。

プライメタルズテクノロジーズは、包括的なポートフォリオと広範な知見を有し、鉄鋼業における

グリーントランスフォーメーションの実現をサポートする。既存の銑鋼一貫工場におけるスクラップ使用率を高めるソリューションや、MIDREX®直接還元プラントと電気炉を組み合わせるプロセスの他、微粉鉱を水素で直接還元するHYFORプロセスや、低品位DRIの溶解と最終還元を行う電気製鉄炉のような開発途上にある革新的なソリューションまで、プライメタルズテクノロジーズのポートフォリオを構成する主要な技術が、鉄鋼業の将来を形づくっていくであろう。

(翻訳:プライメタルズ テクノロジーズ ジャパン株式会社 森正樹, 黒原裕美子)

MIDREX®は株式会社神戸製鋼所の登録商標です。

HyREX®は株式会社 POSCO の登録商標です。

参考文献

- (1) IEA. Technology Report. October 2020. Available online: <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap> (accessed on 7 March 2022).
- (2) Wimmer, G.; Rosner J.; Fleischanderl A.; Apfel J.; et al. Smelter Technology for Transforming Integrated Steelmaking towards Net-Zero Carbon; The Iron and Steel Institute of Japan (ISIJ), Bulletin Ferrum, Vol 27: 2021 .2, Tokyo, Japan
- (3) Voraberger B et al. “Green LD (BOF) Steelmaking—Reduced CO₂ Emissions via Increased Scrap Rate.” Metals 12, no. 3 (March 10, 2022): 466
- (4) Apfel, J. “The EAF for integrated plants.” In Proceedings of the AIST Conference, Nashville, TN, USA, 29 June 2021.