

連携記事

ネットゼロカーボンに向けて 鉄鋼一貫製鉄所を変革する電気製鉄炉技術

Smelter Technology for Transforming Integrated Steelmaking towards
Net Zero Carbon

Primetals Technologies
Austria GmbH
Vice President Converter Steelmaking
Gerald Wimmer

Primetals Technologies
Austria GmbH
Head of Engineering Iron and Steelmaking
Johannes Rosner

Primetals Technologies
Austria GmbH
Technology Officer Upstream
Alexander Fleischanderl

Primetals Technologies
Germany GmbH
Senior Expert EAF
Jens Apfel

(日本語訳) 水城英明・森正樹 (Primetals Technologies Japan (株))

1 はじめに

鉄鋼業は、世界で2番目に多くCO₂を排出している産業部門であり、その排出量は世界の総排出量の7～9%に相当する。これは主に、今日の主要な製鉄設備である高炉 (BF) から排出されている。一方で、鉄鋼材料は長い寿命と持続可能性を兼ね備えており、スクラップとして電気炉 (EAF) に装入することで容易にリサイクルすることも可能である。EAFプロセスのCO₂排出量は高炉プロセスと比べて大幅に少なく、それは主に電力網での排出量によるものである。しかしながら、鉄鋼需要をEAFだけで満たすにはスクラップ量 (2050年時点の予想値は年間9億トン¹⁾) が不足するため、鉄鉱石は長期的に主要な原料であり続けるであろう。鉄鉱石を中心とした生産におけるCO₂排出量の中～低レベルに抑えるために最も有望と見られている方法は2つある。1つは二酸化炭素の回収・有効利用・貯留 (Carbon Capture and Usage or Storage - CCUS) 設備を活用した高炉法である。もう1つは直接還元法で、移行期においては天然ガスを還元剤として使用し、スケールアップおよび実現可能性確認後には低炭素水素を使用する (Fig.1^{2,3)} 参照)。水素ベースの直接還元法は、現在の主要な生産方法である高炉法と比較して、CO₂排出量を約90%削減することができる。但し、水素ベースの直接還元法においても冶金的な目的で炭素は必要であり、この炭素源にはバイオ炭などの再生可能資源が活用されることが考えられる。

高炉法から直接還元法へ移行するには、利用可能な鉄鉱石

を詳細に評価する必要がある。現在の高炉操業に使用される典型的な鉄鉱石は多量のスラグを発生させるため、直接還元炉とその下流に備えられるEAFでの使用に十分適しているとは言えない。そのため、電気製鉄炉 (Smelter) とBOF転炉を組み合わせた新しい「2ステッププロセス」が求められるであろう。

鉄鋼一貫製鉄所がネットゼロカーボンへの変革を果たすためには、速やかに成果を上げるための短期的対策とネットゼロカーボンを達成するための長期的対策の両方を組み合わせる必要があるであろう。

2 短期的対策 - プロセス最適化・スクラップ配合率の増加

製鉄所は巨額の投資を必要とするものであり、その設備寿命は50年を超える。そのため、例えば高炉法から直接還元法への移行といった既存製鉄所の変革についても、このようなライフサイクルに合うものでなければならない。スケールアップや実機導入前の実証を必要とする新技術を採用する場合、変革にはより長い時間が必要となるが、その一方で、大気中への継続的なCO₂排出が気候変動を引き起こしていることは明らかであり、対策が遅れるほど削減必要量は大幅に増加する。したがって、新技術のみならず既存プロセスルートの最適化も投資に見合うものであると言える。最適化されたルートの一部は今後も数年から数十年にわたって使用し続けることができるだろう。既存プロセスの最適化には、実証済みの幅広いソリューションがあり、短期間での導入が可能

なため、CO₂排出削減の第一歩を早期に達成できる。

CO₂排出量を削減するための既存プロセス最適化の一例として、転炉におけるスクラップの利用拡大が挙げられる。高炉からの溶銑をベースにした製鋼工程では、スクラップベースの工程よりもはるかに多くのCO₂が排出される (Fig.1参照)。これに対し、転炉におけるスクラップ配合率を増加させ、溶銑配合率を減少させることにより、既存の銑鋼一貫ルートでもCO₂排出量を削減することができる。

スクラップ配合率を増加させるために、転炉のエネルギーバランスを改善するツール (L2プロセスモデルおよびプロセス最適化、スクラップ予熱ランス、ダブルフロー2次燃焼ランス、複合吹込転炉など) が開発されている。これらのツールを組み合わせることにより転炉におけるスクラップ配合率を最大30%まで増やすことができる⁴⁾。スクラップ配合率をさらに増加させる目的で、底吹ガスに加えて、転炉内のプロセスガスを効率的に利用するランスを備えた特別な転炉が開発され、POSCO, Pohangでの試験に成功した。このプロセスはJet Process⁵⁾と呼ばれる。

3 長期的対策-低品位鉄鉱石を用いた「2ステッププロセス」

既存の生産ルートの最適化はCO₂削減の第一歩である。削減可能な量は最適化前の排出量により異なるが、一般的には20～30%の範囲にある。この削減は重要な第一歩ではあるが、気候目標を達成するには十分ではないため、既存の高炉法に代わるプロセスが必要となる。

CCUS設備を活用する高炉法と共に、直接還元法はCO₂排

出量が大幅に少なく、高炉を中心とした製銑プロセスに代わるものとして現在最も有望である。現在の直接還元炉はシャフト炉を使用しており、このシャフト炉内で還元ガスにより鉄鉱石ペレットを還元している。現在は還元剤として天然ガスが使用されているが、将来的には低炭素水素が採用されるだろう。この還元工程の後、直接還元鉄 (DRI) をEAFに直接供給するか、または、輸送できるようにブリケット化し、輸送先でBF、BOF、EAFに装入して使用する。

収益性の高いEAF操作を行うためには、脈石成分の少ない高品位DRIの使用が望ましい。EAFでのスラグ発生量を抑えることができる上に、電力消費量の削減、フラックスの削減、鉄損失の削減が可能で、歩留まりを改善できるためである。しかしながら、高品位DRIの原料となる高品位鉄鉱石は量に限りがある。Fig.2に示すように今日海上貿易されている鉄鉱石のほとんどは比較的品位が低く、これらは高炉操作に使用されている。Fig.2には、鉄鉱石の一般的な脈石成分量も示しており、低品位鉄鉱石は高品位鉄鉱石の2倍以上の脈石成分を含有していることが分かる。脈石成分が多い場合、EAFではスラグ塩基度を高めて適切なスラグフォーミングを行うために、フラックス消費量が増加する。これは、低品位鉄鉱石を用いてEAFを操作する場合のスラグ発生量増加の原因であり、即ち、EAF操作コストの実質的な増加の理由である。

このような低品位鉄鉱石から生産されるDRIの処理には、「2ステッププロセス」の適用が考えられる。第1ステップである電気製銑炉では、溶解と最終還元のみを行い、第2ステップであるBOF転炉で、全ての冶金工程および精錬を行う。プロセスを2つに分けることにより、第1ステップであ

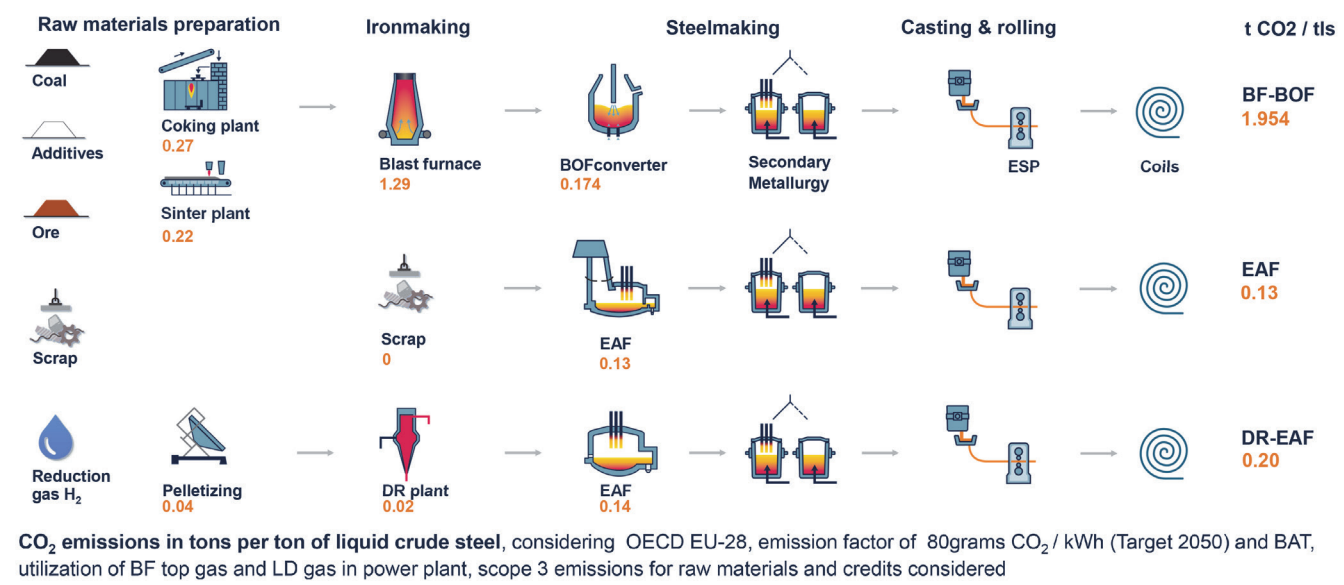


Fig.1 CO₂ emission of typical steel production routes. (Online version in color.)

る電気製鉄炉で金属分とスラグ分の効率的な分離が可能となり、今日の高炉水砕スラグのようにセメント産業での使用に適したスラグを生成することができる。この「2ステップ

プロセス」と、EAFのみを使用する「1ステッププロセス」との詳細な比較をTable1に示す。
「2ステッププロセス」では2種類の設備を操業する必要

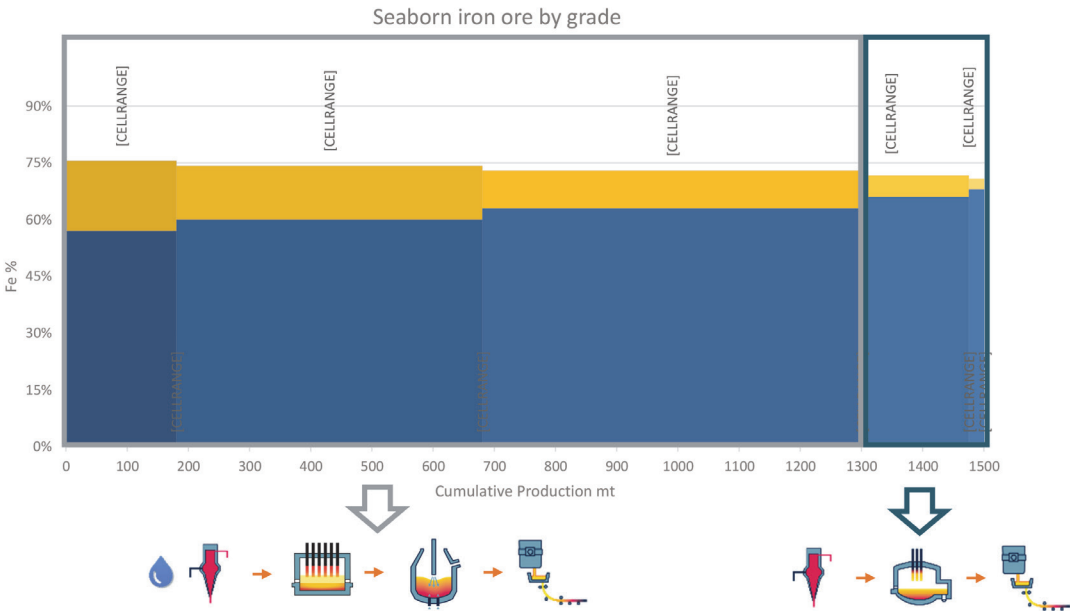


Fig.2 Typical iron and gangue content of seaborne iron ores in 2017 and preferred process routes. (Online version in color.)

Table1 Comparison of one-step process with two-step process combining Smelter and BOF converter.

	「1ステッププロセス」	「2ステッププロセス」	
	EAF	電気製鉄炉	BOF転炉
プロセス	EAFでは、DRIの最終還元、および粗鋼への精錬を行う。	電気製鉄炉では最終還元と溶解のみを行う。	「2ステッププロセス」のすべての精錬はBOF転炉で行う。
スラグ	フォーミングスラグは安定したEAF操業に必要であり、そのため1.6～1.8のスラグ塩基度が必要。脈石成分の多い低品位DRIはスラグ量が多くなる。	電気製鉄炉は約1.0の低塩基度で操業する。したがって、石灰とドロマイトを適度に添加するのみ。	一般的なBOFスラグ組成で塩基度3.6と高い。 電気製鉄炉からの溶銑中にはSiが少ないため、スラグ総量が大幅に少ない(60～80 kg/t)
スラグ使用量	スラグの有効利用法は限られるので、場合によってはスラグの埋立が必要となる。	電気製鉄炉のスラグは高炉のスラグに非常に類似しており、水砕後にセメント産業で使用できる。	BOFスラグの一般的な再利用が可能。Pを多く含むため肥料としても使用できる可能性がある。
歩留り	FeO含有量の多いスラグが排出されるので、スラグを介したFe損失が大きくなり、その結果、歩留りが低下する可能性がある。	炉内の還元性雰囲気と長い処理時間により、FeとFeOの少ないスラグを作る。その結果、電気製鉄炉の歩留りは非常に高くなる。	スラグ中にはFeOが多く含まれるが、スラグ量が少ないため適切な歩留りで運用できる。「2ステッププロセス」の高い歩留りにも繋がる。

があるため、操業コスト増加につながる。EAFのみを使用する「1ステッププロセス」と比較した場合のこのようなデメリットは、低品位鉄鉱石を低コストで処理することによって補う必要がある。2つの異なる品位の鉄鉱石を想定して、「1ステッププロセス」および「2ステッププロセス」それぞれでコスト計算を行った結果をFig.3に示す。主にスクラップとDRIからなる原料コストと、電気・フラックス・ガスからなる変換コストをそれぞれ示している。この計算には、実際の欧州価格ベース（高品位DRI 300€/t、低品位DRI 247€/t、電力80€/MWh、スクラップ 330€/t～354€/t、石灰70€/t、ドロマイト75€/t、石炭70€/t）を使用した。

この比較から、鉄鉱石品位が高くなると変換コストが下がることが分かる。電力消費量や化学消費量等が減少するためである。逆に鉄鉱石品位が低くなると、DRI生産コストが下がることも分かる。EAFの操業はスラグ発生量、つまり鉄鉱石品位に影響を受けやすく、このことが変換コストに対しても大きく影響する傾向がある。この傾向は実際の市場によく反映されており、今日EAFを使用しているすべての製鉄所は高品位DRIに依存し、このような装入材料への追加コストを受け入れている。電気製鉄炉の操業はスラグ発生量の影響を受けにくいため、DRI生産コストが支配的となる。したがって、電気製鉄炉で低品位鉄鉱石から生産されたDRIを使用すれば、総コストはより有利になる。これらの傾向から、鉄鉱石の品位レベルについて、「2ステッププロセス」での処理が最適となる低品位の領域と、EAFでの処理により適した高品位の領域とがあることが分かる。

位の領域とがあることが分かる。

「2ステッププロセス」におけるスクラップ配合率は限られている。これは電気製鉄炉がスクラップを処理できないため、また電気製鉄炉からの溶鉄の炭素量が低くBOF転炉でスクラップを溶解するエネルギーが限られるためである。EAFは原料配合率の面ではより柔軟性があり、幅広いDRI装入率に対応できる。2つの異なるスクラップ価格に対して、DRI比率を下げ、スクラップ比率を上げた場合の計算結果もFig.3に示す。

3.1 既存の鉄鋼一貫製鉄所の転換-電気製鉄炉の導入

「2ステッププロセス」は、既存の鉄鋼一貫製鉄所にとって有望な選択肢である。その第2ステップに既存のBOF転炉を流用可能であり、また流用時の改造も軽微で済むからである。最も重要な改造はBOF転炉の吹錬方案の見直しである。高炉からの溶鉄と比較すると、電気製鉄炉からの溶鉄は炭素含有量およびSi含有量が少ないため、吹錬時間を短くし、またスクラップ配合率は低くする必要がある。搬送系統、サイクルタイム、鑄造シーケンス、プロセス認証、品質管理などのその他の重要な項目は影響を受けないため、「2ステッププロセス」は容易に既存の鉄鋼一貫製鉄所に実装できる。

Fig.4に、既存の鉄鋼一貫製鉄所からグリーンスチール製鉄所に変革するうえで最も有望な2つのシナリオと、達成可能なCO₂排出削減量を示す。現在使用されている低品位鉄鉱石ベースの生産を継続しつつ「2ステッププロセス」に投資する製鉄所もある一方で、別の製鉄所では高品位鉄鉱石の長期供給契約

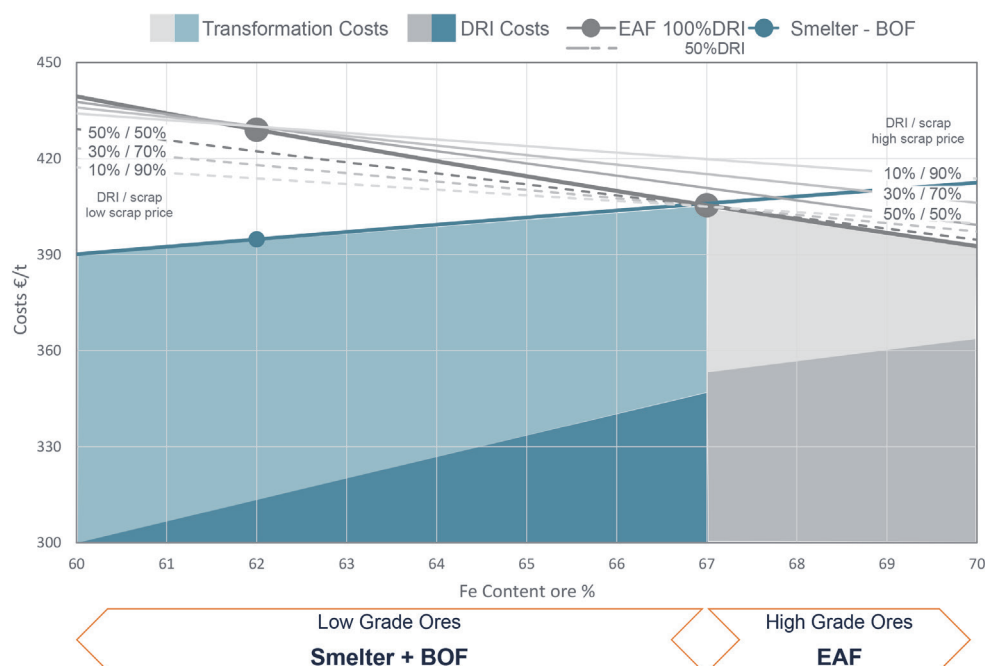


Fig.3 Total costs for one- and two-step process for a low (62% Fe) and a high grade (67% Fe) ore, showing potential of two-step process for low grade ores. (Online version in color.)

を結びEAF操業に切り替えるというケースもあるであろう。

「2ステッププロセス」でもスクラップ配合率を高めるためにEAFや誘導炉などのスクラップ溶解用設備を追設する場合も考えられる。これについても Fig.4を参照されたい。

3.2 電気製鉄炉の設計

プライメタルズテクノロジーズの電気製鉄炉はモジュール式設計で柔軟性があり、幅広い装入原料に対応できる。初号機にはシャフト炉で還元されたペレットが利用される可能性が最も高いものの、将来的にはHYFOR (Hydrogen-based

Fine Ore Reduction: 水素ベースの粉鉱石還元) や Finored などのプロセスで処理された粉状DRIや、他の場所で生産されブリケット化された低品位DRIの使用も期待されている。電気製鉄炉は、還元性雰囲気と気密運転に特長があり、ダスト、ミルスケール、スラグなどの副生成物を含めた鉄源のリサイクルにも適している。設計および試験段階では、装入される可能性があるすべての原料が考慮される。概要については、Fig.5を参照されたい。

電気製鉄炉の還元性雰囲気は、浴中に含まれる炭素量を調整して、下流のBOF操業に適合させる。電気製鉄炉で必要と

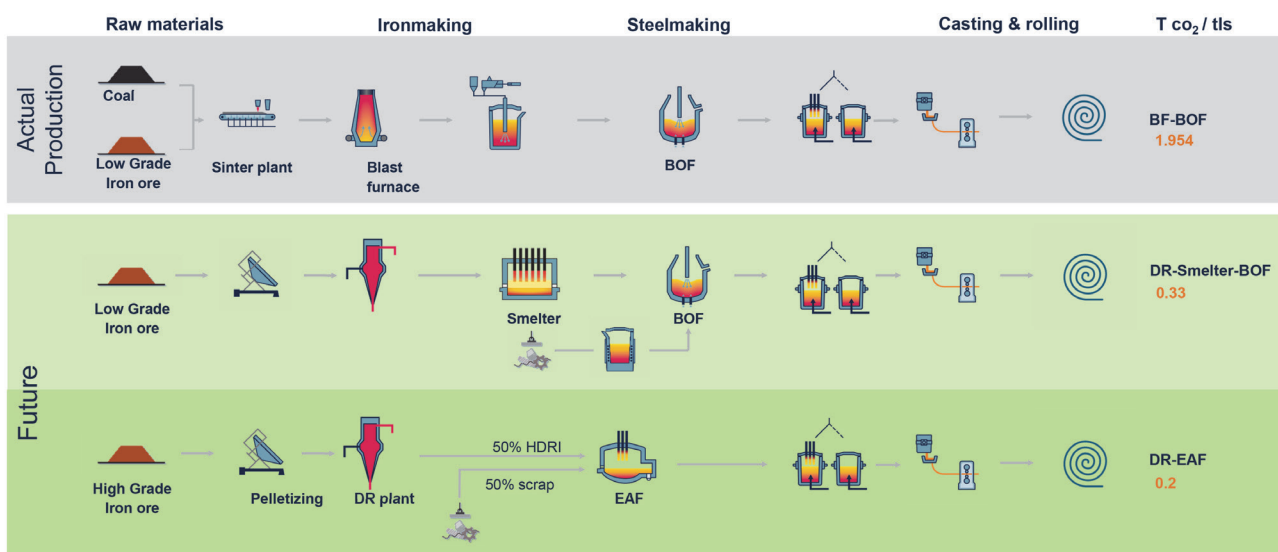


Fig.4 Transformation of an existing integrated plant (top line) towards green steelmaking operated with low grade ores (center line) or high grade ores (bottom line) . (Online version in color.)

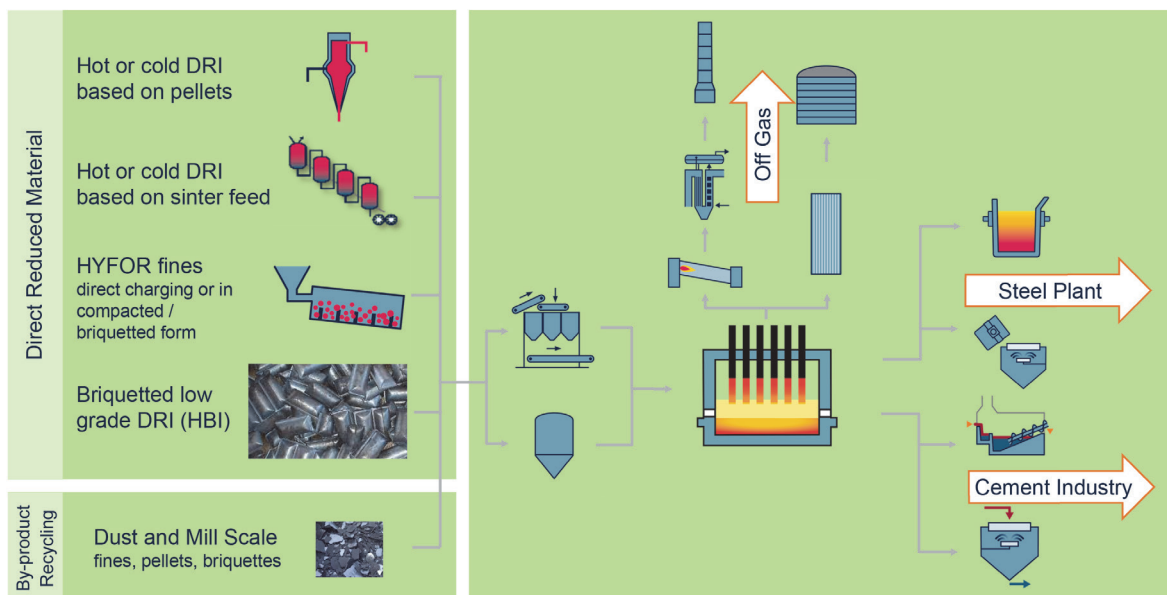


Fig.5 Primetals Technologies Smelter is designed to allow for a wide range of input materials. (Online version in color.)

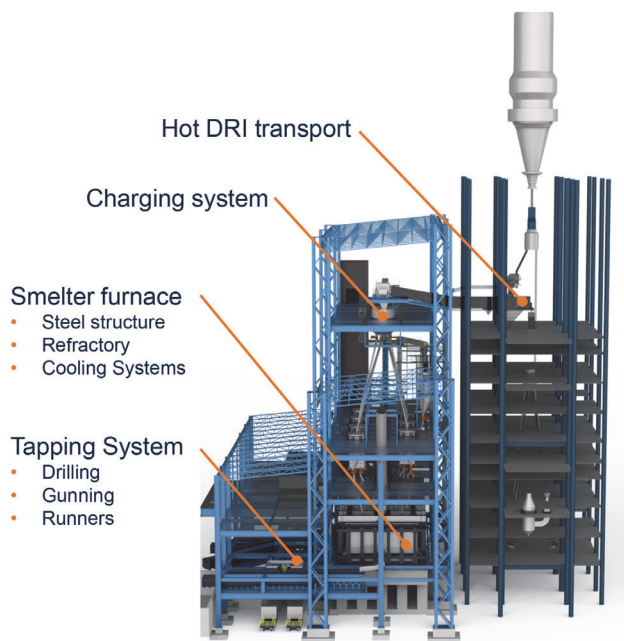


Fig.6 DR shaft feeding a rectangular Smelter with 6-in-line electrodes, total capacity around 1.5 million tons of DRI per year. (Online version in color.)

なる炭素の添加量は、装入されるDRIの炭素含有量および金属化率に依存する。炭素含有量が非常に少ない水素ベースのDRIが装入される場合は、より多くの炭素を添加する必要がある。電気製鉄炉におけるスラグの塩基度調整およびその処理は、スラグ冷却処理時のガラス化率を高めるように実施され、セメント産業への応用を最適化する。スラグ冷却処理については、初期にはプライメタルズテクノロジーの実績ある湿式システム（水砕処理）の使用が計画されているが、将来的には乾式システム（Dry Slag Granulation）が採用される可能性がある。

電気製鉄炉での効果的な還元と長時間の処理により、鉄分含有量の少ないスラグを作ることができるため、スラグ量が非常に多い場合でも高い歩留りが得られる。このスラグの組成は適度な電気抵抗をもたらすため、抵抗加熱のみで電気製鉄炉を操業することができる。生産性を高め、装入原料の溶解を促進するために、短いアーク、いわゆるブラッシュアークでの操業も考慮されている。電極当たりの投入電力量と浴面積当たりの投入電力量は、従来のEAFよりも大幅に少ない。最大36m×14mの内部寸法と同直線上に並ぶ6本の電極を備える矩形炉設計により、年間最大150万トンのDRIが電気製鉄炉に装入可能である。プラント全体の処理量を増やす場合には、複数の電気製鉄炉による並列運転が可能で、例えば、電気製鉄炉2基と直接還元炉1基を組み合わせる。

一例として、電気製鉄炉1基と直接還元炉1基の組合せをFig.6に示す。実証済みの熱間DRI輸送システムで両設備を接続する。トーチカーに出鉄できるため、製鉄所の既存のインフラ設備を使用した溶鉄の運搬およびハンドリングが可能である。

4 おわりに

鉄鋼業はCO₂排出量の削減を求められており、多くの鉄鋼関連企業がネットゼロカーボンへの取り組みを発表している。低炭素水素を用いた直接還元法は、今日の高炉法よりも大幅に排出量を削減できる有望な代替手段であると考えられる。一方で、原材料についても考慮する必要がある。特に鉄鉱石の検討が重要であるが、現在使用される鉄鉱石のほとんどは低品位であるため「2ステッププロセス」が必要となるだろう。これは、溶解・還元用の電気製鉄炉と精錬用のBOF転炉を組み合わせたプロセスであり、既存の鉄鋼一貫製鉄所への導入が期待される。プライメタルズテクノロジーの電気製鉄炉は、ペレット、粉鉱、ブリケット化されたDRIなどの幅広い装入原料を活用するだけでなく、副生成物にも対応できるように設計されている。

参考文献

- 1) B.Bekir Ciftci : The Future of Global Scrap Availability, the World Steel Association, <https://worldsteel.org/media-centre/blog/2018/future-of-global-scrap-availability/>
- 2) Net-Zero Steel – Sector Transition Strategy, the Mission Possible Partnership, <https://missionpossiblepartnership.org/wp-content/uploads/2021/10/MPP-Steel-Transition-Strategy-Oct-2021.pdf>
- 3) The Future of Steelmaking, Roland Berger, https://www.rolandberger.com/publications/publication_pdf/rroland_berger_future_of_steelmaking.pdf
- 4) G.Wimmer : Greening Converter Steelmaking, Metals Magazine, Primetals Technologies, (2020), <https://magazine.primetals.com/2021/03/09/greening-converter-steelmaking/>
- 5) G.Wimmer, K.Pastucha, E.Wimmer and A.Fleischanderl: Stahl und Eisen, 134 (2014), 35.

(2022年1月28日受付)