

素材産業における電化

Electrification in the material industry

池田和俊*

1. はじめに

2019年6月11日に閣議決定された「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」で掲げられた最終到達点としての脱炭素社会の実現及び2050年までの温室効果ガスの80%排出削減の実現に向けては、これまでの延長線上にない非連続なイノベーションを通じた取り組みが必要となる。長期戦略においては、産業部門について、「多くの産業分野においては、技術や経済の観点から現実的に採用し得る既存の代替プロセスが存在しない」という課題に挑戦し、新たな代替生産プロセスを確立し「脱炭素化ものづくり」を実現するとビジョンが掲げられており、その実現に向けて、以下のとおり対策の方向性が提示されている。

- ・CO₂フリー水素の活用
- ・CCU／カーボンリサイクル／バイオマスによる原料転換
- ・抜本的な省エネルギーの実現
- ・フロン類の中長期的な廃絶
- ・企業経営等における脱炭素化の促進

当社で実施した、80%削減が実現した場合のエネルギー需給の姿の定量分析においても、脱炭素社会の実現に向けては、再生可能エネルギーの大量導入や徹底的な省エネや電化にとどまらず、火力発電、製鉄等の産業部門での高温熱処理、船舶や航空機等様々な分野での化石燃料由来の排出を削減する必要があるとの解析結果が得られている。これらは、技術的には代替が難しい分野でもあり、現状では実用化に至っていない技術を開発し併用する必要がある。

本稿では、我が国における産業部門の温室効果ガスの大量排出業種である鉄鋼業等の素材産業に注目

し、海外における脱炭素化技術としての電化の取り組みを述べる。

2. 製鉄プロセスにおける電化

2.1 我が国における鉄鋼需給

我が国における鉄鋼の循環図を図1に示す。鉄鉱石を高炉で還元した銑鉄を転炉で精錬して製造された粗鋼は、圧延・熱処理・表面処理等を経て、多種多様な形状・性質の鉄鋼製品へと姿を変える。市場に供給された鉄鋼製品は、その役割を終えた後にスクラップとして回収され、主に電炉で溶解し、成分調整を行うことで、再び粗鋼として利用される。

我が国における2018年度の粗鋼生産量は、転炉鋼が76%、電炉鋼が24%となっており、粗鋼生産に占める電炉鋼の比率は低位に留まる(図2参照)。

米国等と比較すると電炉鋼の割合が低いが、その背景として、電炉鋼は土木・建築用途の鉄筋、形鋼、平鋼、圧板等が中心であり、自動車用等の高級鋼材としての製品に限られること、また、近年の国内粗鋼生産のうち過半が、転炉鋼による高級鋼材を中心とした外需(直接輸出・間接輸出)で占められていることが挙げられる。

2.2 鉄鋼業における脱炭素化技術

鉄鋼業の脱炭素化に向けては、CO₂排出の大部分を占める製銑～製鋼工程の排出削減が不可欠である。

2.2.1 電炉鋼の高付加価値化

対策の方向性の1つとして、鉄スクラップを鉄源とする電炉鋼の利用促進が挙げられる。ただし、土木・建築用途を中心とした従来用途から高級鋼材へと用途を拡大する上では、スクラップ中に含まれる銅、ニッケル、錫等の除去困難な不純物元素(トラ

* (株)三菱総合研究所 環境・エネルギー事業本部 脱炭素ソリューショングループ 主任研究員

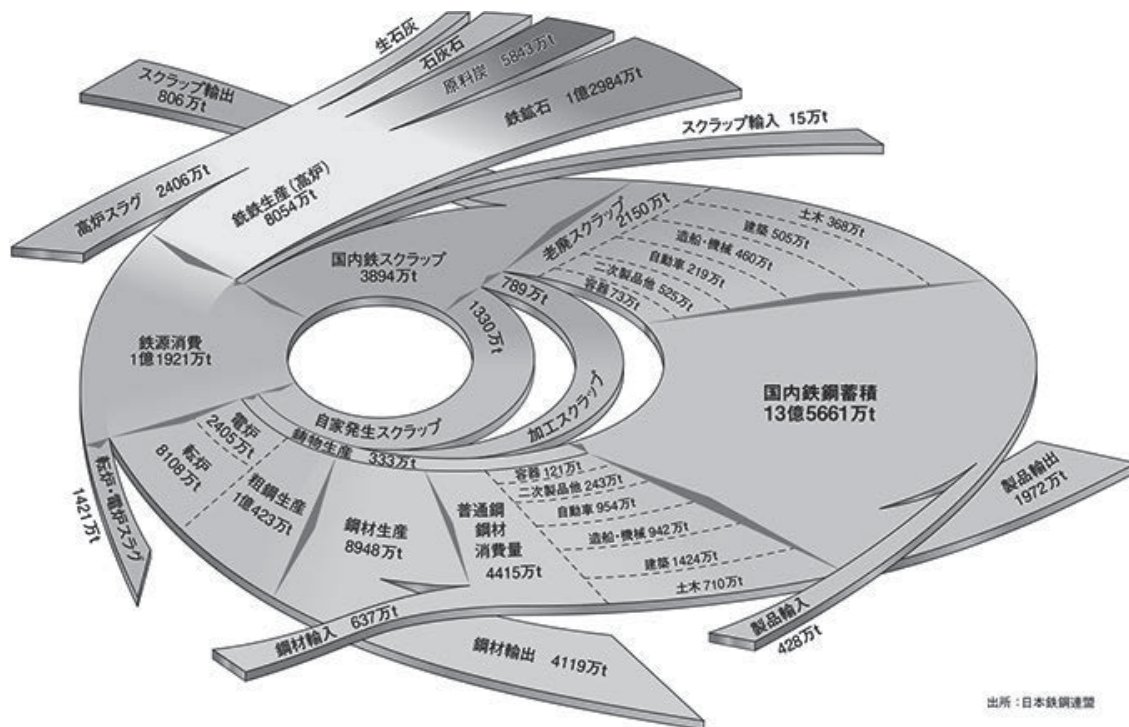


図1 我が国における鉄鋼循環図 (2015年度)
 出所) 日本鉄鋼連盟ウェブサイト「日本の鉄鋼循環図 (2015年度)」
https://www.jisf.or.jp/business/lca/material_flow/index.html (2019年2月25日取得)

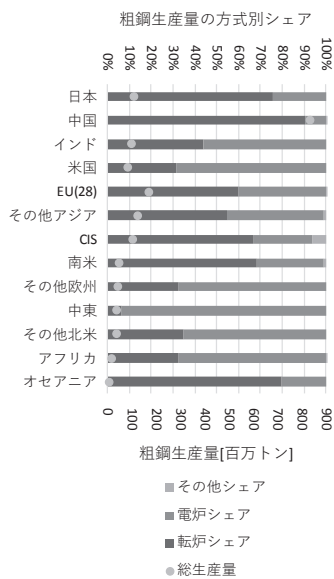


図2 各国における粗鋼生産方式 (2017年)
 出所)「STEEL STATISTICAL YEARBOOK 2018」(World Steel Association) より作成

ンプエレメント) 等が製品の品質に与える影響に係る課題を克服する必要がある。

この課題に対しては、精錬技術の進展により、スクラップ中に含まれるトランプエレメントの混入量を管理し、その特性を活かして転炉鋼汎用材と同等品質の鋼材製造が行われている。また、例えば東京製鉄株式会社では「鉄スクラップの自動車部品への

高度利用化技術調査」(環境省、2012～2014年度)において、老廃スクラップを主原料とした自動車用鋼板を実現させることを目的として、電炉鋼の自動車部品への適用性評価、電炉鋼固有因子の表面品質への影響調査等が実施されている。本調査では、汎用ハイテッククラス(370～400MPa)の電炉鋼について実自動車部品での製造性の評価が行われ、自動車の車体重量の10%程度を電炉鋼で置換可能な見込みとされている。

なお、鉄スクラップの品質管理も重要である。例えば米国の場合、鉄スクラップの回収・販売の仕組みが比較的整備されており、サプライチェーンのより上流で選別された質の良いスクラップを利用可能であることが、電炉鋼の割合が高水準な要因の一つと考えられる。

2.2.2 製鉄プロセスの電化

中長期的には、鉄鋼業においてCO₂排出の大部分を占める製鉄プロセスにおける脱炭素化技術が不可欠となる。

我が国においては、COURSE50において、コークスの一部を水素で代替する水素活用還元プロセス技術とCO₂分離回収技術を組み合わせた技術の2030年の実用化に向けた開発が進められている。また、日本鉄鋼連盟による長期温暖化対策ビジョン

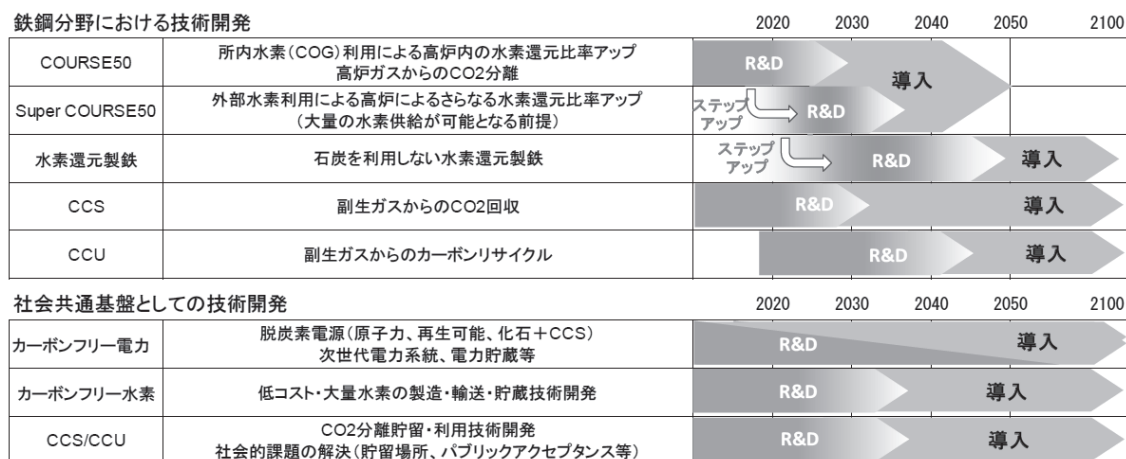


図3 日本鉄鋼連盟の長期温暖化対策ビジョンにおける超革新技術開発に向けたロードマップ
出所：日本鉄鋼連盟「長期温暖化対策ビジョン -ゼロカーボン・スチールへの挑戦-

「ゼロカーボン・スチールへの挑戦」(2018年11月公表、図3参照)においては、最終的な製鉄プロセスからのゼロエミッションに向けた道筋として、水素還元製鉄、CCSU等の技術開発及び、社会共通基盤としての安価かつ安定供給可能なカーボンフリー水素関連技術開発の必要性が挙げられている。

他方で、世界においては、製鉄プロセスにおける脱炭素化に向けた取組みとして、例えば直接還元法や電解還元法に係る開発が行われている。

米国では、1997～2008年に実施された、米国エネルギー省と米国鉄鋼協会との共同研究プログラム「Technology Roadmap Research Program (TRP) for the Steel Industry」において、2020年を見据えた米国鉄鋼業のエネルギー効率向上、競争力強化、環境改善を目的とした産官学連携による技術開発プログラムが実施され、その高炉代替技術の1つとして、熔融酸化物による電解還元法に係る技術開発がマサチューセッツ工科大学によって行われた。その後、Boston Metal社において、将来の工業生産化を目指した開発が進められている。また、同プログラムでは、フラッシュ炉による水素直接還元技術の開発がユタ大学によって進められ、現在は大型の準備炉の次の段階として工業用パイロットプラントの設計が進められている。

欧州では、2050年における製鉄分野におけるCO₂排出50%削減を目標として、欧州で2004年に開始された研究ULCOS(Ultra-low Carbon Dioxide Steelmaking: 極低炭素排出製鉄)プログラムにおいて、高炉ガス炉頂循環、熔融還元、天然ガスによる直接還元、電解還元の4つの開発テーマが設定され、電解還元についてはULCOWINプロセス(アルカリ溶液中での鉄鉱石の電解還元)、ULCOLYSIS

プロセス(高温酸性またはアルカリ性溶液中での鉄鉱石の電解還元)の2つの試験が実施された。

このように、欧米では、高炉に代わる将来技術として直接還元法や電解還元法等に係る取り組みが行われているが、その実現に向けては、技術確立、コスト低減等の課題を解決する必要がある。EUレポート「Iron production by electrochemical reduction of its oxide for high CO₂ mitigation」(2016年10月)では、2050年までの鉄鋼業の経済モデル分析が実施され、3つのシナリオを設定し、各種製鉄方法が比較されている。電解還元が成功するかどうかの決定要因は、電力と石炭に対する相対価格であり、2035年以降に電解還元が欧州における基本技術の一つとなるためには、炭素価格が150/tCO₂以上、かつ石炭価格に対する電力価格の倍率が4を下回る必要があるとされている(図4)。

3. 石油化学プロセスにおける電化及び Power to X

日本や欧州の石油化学工業においては、原油から蒸留精製されたナフサが主要原料であり、ナフサを高温熱分解して精製するエチレン・プロピレン等が主な基礎原料としてその後の製品製造に活用される。ナフサ分解時には、800℃以上の超高温スチームをナフサに多量に加えて熱分解を行う必要がある。

これに対して、大量の熱を要するナフサ分解に代わって、メタノールからエチレンやプロピレンを製造する手法に係る開発が顕在化している。例えばドイツの石油化学メーカーであるBASF社では、ナフサをオレフィンと芳香族化合物に分解するスチームクラッカーのエネルギー源を再生可能エネルギー

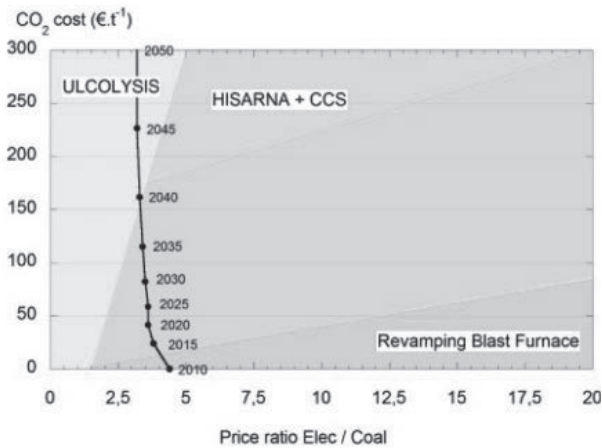


図4 EUレポートにおける石炭・電力価格、炭素価格と製鉄技術との関係（高炭素シナリオ）

出所：“Iron production by electrochemical reduction of its oxide for high CO₂ mitigation”, EU Law and Publication 2016

電力とすることで、CO₂排出量の大幅削減を可能とする電熱コンセプトを今後5年間で開発することを2019年に発表している。850℃の超高温燃焼に必要な熱源を天然ガスから再生可能エネルギー電力に置換することで、従来比で最大約9割のCO₂排出削減が可能な見込みとされている（図5）。

また、ドイツでは、風力等の再生可能エネルギー由来の電力を用いて水を電気分解してCO₂フリー水素を製造し、そのままガスパイプラインに混入させるPower to Gasに係る取り組みも行われている。その背景として、2050年までにCO₂排出量を1990年比80%以上削減との長期目標の達成に向けて、

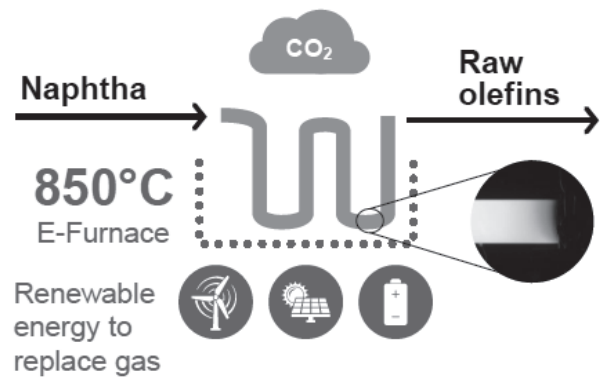


図5 E-Furnaceの概要

出所：R&D Webcast for Investors and Analysts on January 10, 2019 “Carbon Management at BASF -R&D strategies to reduce CO₂”

発電部門だけでなく、熱供給部門、運輸部門でもエネルギー供給構造を転換すること、また、天候依存型の変動性再生可能エネルギー電力の普及が拡大する中で、電力をガス等に変換することで大容量、長期間の貯蔵が可能となり、再生可能エネルギーの電力システムへの統合に向けた柔軟性の確保手段となることが挙げられる。再生可能エネルギー由来のガス等は、カーボンフリー燃料として、産業部門の脱炭素化に貢献可能となる。

ただし、Power to Gasを利用した電力システムが経済的に有益となるのは、長期的に見て、再生可能エネルギーの割合がかなり高くなった局面と見込まれている。ドイツエネルギー機構（dena）のPower to Gasのロードマップでは、産業部門にお

ドイツの気候政策目標		GHG排出削減：-40%	GHG排出削減：-55%	GHG排出削減：-80～-95%
利用範囲・市場	熱・交通(運輸)・産業部門での利用	物流における燃料電池車両		
		船舶・航空交通におけるPower to Liquid活用	近距離交通・鉄道交通における燃料電池車両	
	自動車・大型輸送車		精製プロセスにおけるPower to Gas活用	
	原料・化学産業における化石資源の代替		合成メタンによる天然ガスの代替	
インフラ	熱・交通・産業における再生エネルギー		再生エネルギーの二重利用	
	天然ガス管網に水素混合		水素供給	
電力市場	最善な分散型再生エネルギー供給への解決策/地域の余剰電力削減		再生エネルギー・燃料の国際取引	
	長期電力貯蔵		予備力/電力市場における価格変動調整	
推奨事項	政策	短期 (2017 - 2020)	中期 (2020 - 2030)	長期 (2030 - 2050)
		産業・交通・熱部門におけるCO ₂ 削減、化石燃料代替のインセンティブ付与		CO ₂ の国際取引
	個々の阻害要因や差別の除去			
	部門間の租税公課の調和化		部門連携のための	
	統合不可再生エネルギー利用の機会		全技術を対象とした法的枠組みの改善	
	インフラ	研究助成・パイロットプロジェクト助成		水素インフラ構築のための枠組み条件
連盟	水素混合		電力・ガスの共同ネットワーク計画	
設備製造者・事業者	Power to Gas技術の最適化/マルチ利用コンセプトの開発		全部門間でのスマートインフラ計画	
	Power to Gas技術の輸出市場の開拓			

図6 ドイツのPower to Gasのロードマップ
出所) dena, “Roadmap Power to Gas”, 2017より作成

ける原料，化学産業における化石燃料代替等は2030年以降に有望視されている（図6）。

4. 将来に向けて

我が国の産業部門における温室効果ガスの大量排出業種である素材系産業では，高温の熱利用や還元反応等の化学反応を有しているが，技術的には化石燃料以外への代替が難しい分野でもあり，脱炭素社会の実現に向けては，現状では実用化に至っていない技術を開発し併用する必要がある。

海外においては，高炉法以外の還元技術や Power to X 等様々な技術に係る検討が進められており，鉄鋼業界や石油化学業界のプロセスにイノベーションの可能性が生じつつある。

素材系産業における温室効果ガスの大幅削減に向けては，こうした技術オプションについて，経済性，温室効果ガスの削減効果を評価し，その他技術確立，普及に向けた必要条件を見極めていく必要がある。

また，我が国でも太陽光発電を中心として再生可能エネルギーの導入が進む中，太陽光や風力といった変動性再生可能エネルギーの導入コストがどの程度低減し，どのようなペースで導入が進み，どの程度の余剰電力が生じうるか，といった状況も考慮に入れておく必要がある。その上で，素材系産業のプロセス代替技術を実装していく際には，エネルギー源となる電力や水素等の低炭素化と一体で進めるべきである。

著者略歴



池田和俊（イケダ カズトシ）

2004年3月大阪大学大学院 工学研究科 修士課程修了，同年4月株式会社三菱総合研究所入社

主に省エネ技術普及政策・市場調査，エネルギー需給分析等に従事。