

鉄鋼の脱炭素化



半田 和行
Kazuyuki Handa
材料技術研究部
摩擦材料研究室長

はじめに

鉄道には構造物、軌道、車両など多量の鉄鋼が使用されています。ここでは鉄鋼の特徴と脱炭素化に関連する話題を紹介し、鉄道用の鉄鋼について解説します。

エネ技術の海外移転によって約1.2億トンのCO₂排出削減を目標としています¹⁾。このうち「エコプロセス」が製鉄プロセス自体の改善による脱炭素化の目標です。以下、製鉄でどのようにCO₂が排出されるかと、それに対する脱炭素化の取り組みを紹介します。

製鉄と炭素排出

鉄鋼業界の脱炭素目標

表1に示すように鉄鋼業界では2030年度までにエネルギー起源CO₂排出量の30%削減(2013年度比)と、さらに鉄鋼の高性能化や省

金属の特徴と酸化物の還元反応

製鉄所の代表的な設備である高炉と、鉄の原料である鉄鉱石を図1に示します。そもそも金属は、延性や電気伝導性などほかの素材では代替できない特徴をもちますが、これは図2のよ

表1 鉄鋼業界の脱炭素化目標¹⁾

エコプロセス 自らのプロセスにおける省エネ/CO ₂ 削減努力	2030年度のエネルギー起源CO ₂ 排出量を2013年度比30%削減
エコプロダクト 高機能鋼材の供給による製品の使用段階での削減貢献	約4,200万t-CO ₂ の削減貢献(推定)
エコソリューション 日本鉄鋼業が開発・実用化した省エネ技術の移転普及による地球規模での削減貢献	約8,000万t-CO ₂ の削減貢献(推定)
革新的技術開発 長期的・抜本的なCO ₂ 削減技術の開発	グリーンイノベーション基金「製鉄プロセスにおける水素活用」プロジェクトの下、我が国の2050年カーボンニュートラルに貢献すべく、ゼロカーボン・スチール実現に向け以下4テーマの技術開発に果敢に挑戦する。 ・所内水素を活用した水素還元技術等の開発 ・外部水素や高炉排ガスに含まれるCO ₂ を活用した低炭素技術等の開発 ・直接水素還元技術の開発 ・直接還元鉄を活用した電炉の不純物除去技術開発



出典：©Transpassive, CC BY-SA 3.0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=277663> による



出典：© 松岡明芳, CC BY-SA 3.0 を改変,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=10192835> による

図1 鉄鉱石と製鉄所の高炉

うに原子がもつ電子の一部が原子から放出されて原子群全体を自由に移動し、原子の位置がずれても影響されないことによります。一方、電子が原子から容易に放出されるため酸化されやすい特徴があります。貴金属以外の金属は自然界ではほぼ酸化物として存在するため、金属を利用するには金属の酸化物から酸素を取り除くプロセス（還元反応）が必要です。

高炉法と電炉法

鉄は金属の中でも資源量が多く強度や延性に優れ、炭素量と熱処理で特性を大きく変えることができるため、鉄道をはじめさまざまな産業の基盤となっています。鉄の原料である鉄鉱石を還元する設備が高炉です。高炉では、鉄鉱石と、石炭からつくられる高純度の炭素であるコークスを積層した炉内に約1200℃の熱

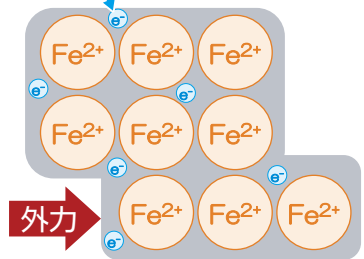
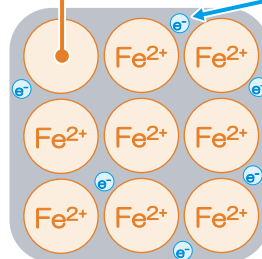
図2 金属の特徴

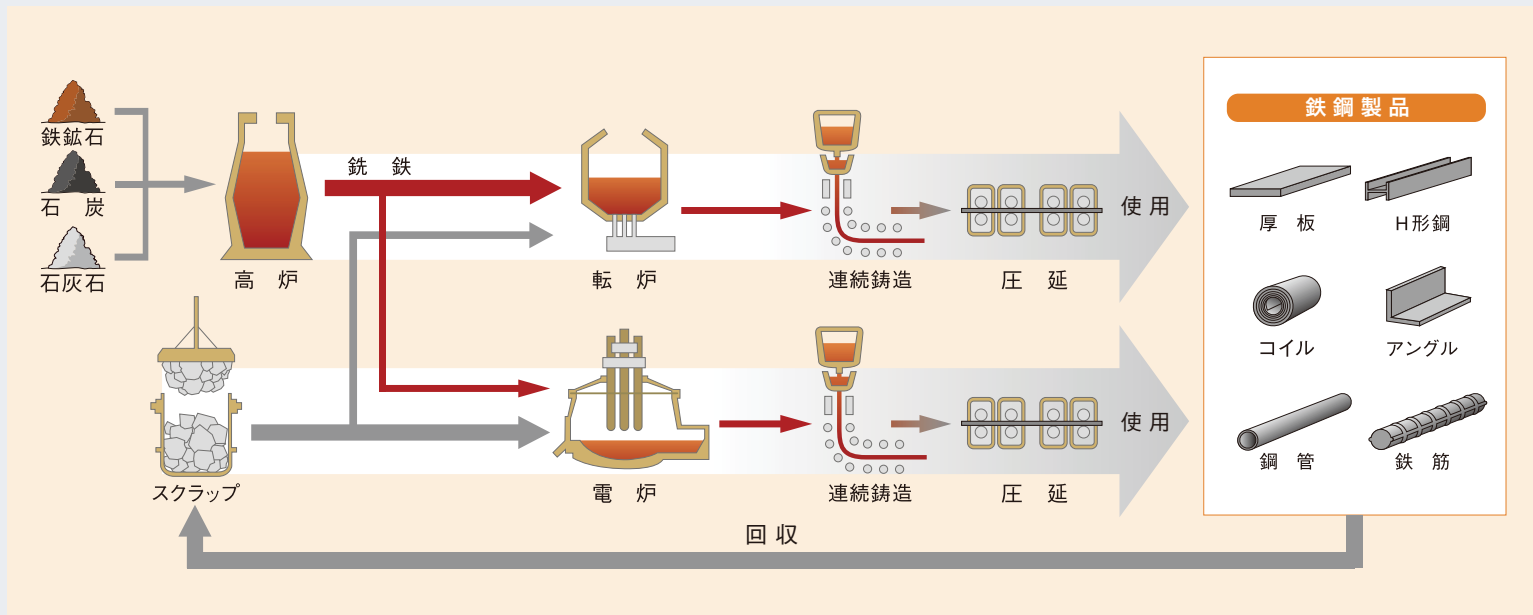


金属の特徴：延性・導電性・光沢 etc

規則正しく配列した原子
 (最外殻電子を放出)

自由電子が動き回っている
 (電子の海)





出典：一般社団法人日本鉄鋼連盟「鉄の輪がつなぐ人と地球」

図3 鉄鋼製品の製造とリサイクルの流れ

風を吹き込み、コークスを燃焼させてCO（一酸化炭素）を得ると同時に炉内を加熱し、鉄鉱石をCOと反応させて還元します。高炉は高さ100m、容積5000m³、炉内温度2000℃、生産量1万トン／日におよぶ反応容器で、炉内状態は精密に制御されています。このように鉄鉱石を石炭で還元する製鉄法を高炉法^①とよびます。高炉法では、鉄鉱石の還元反応や炉内の加熱にともないCO₂が排出されます。

一方で、鉄は「素材の出発点に戻ってくるリサイクル」(クローズドループリサイクル、後述)ができるため、使用後に回収された鉄を溶かして新たな鉄鋼製品を作ることができます。これ

が電炉法で、すでに還元されている鉄を原料とするので、工場から排出されるCO₂は高炉法の約1/4です²⁾。したがって高炉法に代わって電炉法を用いれば製鉄所のCO₂排出削減が可能です。両者による製造からリサイクルを含む鉄鋼製品の流れを図3に示します。

電炉法では、図4に示す各製品のCu（銅）などの許容濃度²⁾などに応じ、鉄筋コンクリート用の棒鋼、形鋼や鍛造鋼品などの大部分が製造されています。一方、自動車用鋼板や建築・造船用の厚板などは大部分が高炉法で製造されています³⁾。

① 高炉法

高炉で還元して得られる溶けた鉄（銑鉄^{せん}）に酸素を吹き込み炭素と不純物元素を酸化して除去する設備が転炉で、高炉・転炉法ともよばれます。また銑鉄は電炉法の原料の一部としても使用されます。

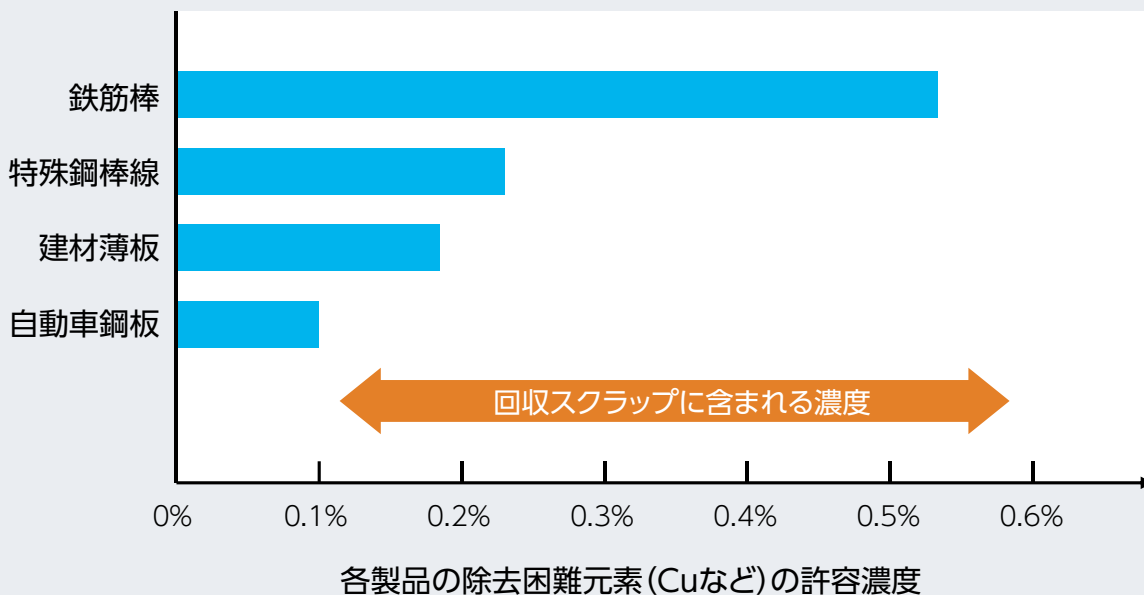


図4 鉄鋼製品の除去困難元素の許容濃度²⁾

脱炭素化の取り組み例

デジタルツインの活用

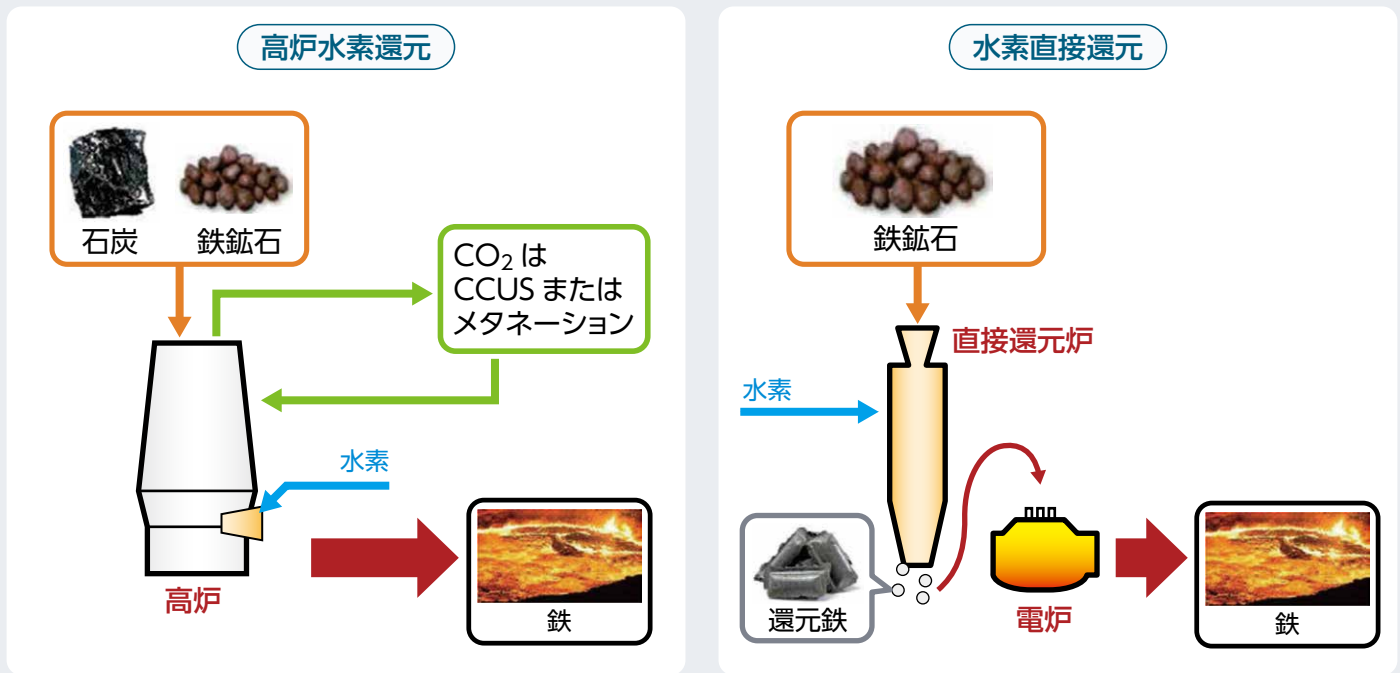
高炉法において還元剤であり炉内を加熱する燃料でもある炭素の使用量は炉内温度に影響します。炭素の使用を減らすとCO₂排出は減少しますが、温度が下がりすぎると炉内で生成される酸化物を排出しにくくなり生産性が低下します。そこで近年では、高炉全体のデジタルツイン（仮想高炉）を構築して炉内状態の近未来予測を行い、安定操作ができる限界まで炭素使用量を抑制してCO₂排出を低減する取り組みが行われています⁴⁾。

水素還元法

製鉄時のCO₂排出の大部分は鉄鉱石を炭素で還元することで発生します。還元剤に炭素でなく水素を使用すれば排出されるのはCO₂でなくH₂O（水）となります。水素を利用した製鉄法は、高炉で還元剤の炭素の一部を水素に置き換える方法（高炉水素還元）と、炭素を使わず水素だけで還元する方法（水素直接還元）が検討されています（図5）⁵⁾。しかしこれらは技術的な難易度が高く、高い効率で生産するには大きな技術革新が必要と考えられています。また、還元に用いられる水素の製造に起因するCO₂排出も考慮する必要があります。⁶⁾ **コラム**

コラム「水素の種類」

水素は、化学工業の副生成物を除き、炭素と水素からなる化石燃料を改質して製造され、炭素はCO₂として排出されます。これをグレー水素とよびます。これに対し化石燃料からの水素製造で排出される（のと同量の）CO₂を地中貯留するものをブルー水素とよびます。一方、再生可能エネルギーで水を電気分解して製造される水素をグリーン水素とよびます。



出典：「鉄鋼業のカーボンニュートラルに向けた国内外の動向等について」(経済産業省) (2023/5/25 参照)
 (https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/green_innovation/energy_structure/pdf/010_04_00.pdf) を加工して作成

図5 水素還元法の模式図

脱炭素の観点から見た鉄鋼と鉄道 鉄道における鉄鋼使用

鉄道用の鉄鋼製品を見ると、コンクリート橋用の鉄筋では、電炉法による経済的な製造方法が確立した昭和40年代以降は、広く電炉鋼が使用されています。一方、車両用鋼材やレール／車輪および鋼橋などでは、溶接性など製造上の知見が豊富で合金組成が限定される高炉鋼が使用されています³⁾。ただし、これらの用途でも製造方法があらかじめ指定されているわけではなく、Cu濃度などの規格値が異なれば電炉

鋼の適用範囲は広がります。例えば、電炉鋼の車輪は海外では広く使用されています⁶⁾。

鉄のリサイクル性

使用後回収される小片（スクラップ）には不純物が混入するため、多くの素材ではリサイクルしても元の素材よりも品質の低い素材しか製造できません。これをカスケードリサイクル⁷⁾とよび、金属や非金属など大部分の素材が該当します⁷⁾。

一方、鉄の場合も回収される素材には不純物元素の混入が避けられませんが、Cu（銅）など

7) リサイクルの種類（カスケードリサイクル、クローズドループリサイクル）

リサイクル回収品にはほかの素材が混入して除去できず、低品位の素材しか製造できないものをカスケードリサイクルとよびます。これに対し、回収品が元の原料の地点に戻ってきて同等の製品を製造できるものをクローズドループリサイクルとよびます。こうした素材単位のリサイクルとは別に、製品単位で、特定の製品だけを回収して同じ用途に使用するものを水平リサイクルとよびます。水平リサイクルでは回収品の選別に多大なコストや人的労力を要する場合があります。

表2 鉄のリサイクル性の特長

鉄のリサイクル性の特長
・ 使用後そのまま資源として買い取ってもらえる
・ ほかの素材と混ざっても、磁石で選別できる
・ 溶かした状態でほとんどの不純物を除去できる
・ 同等の鉄の原料として出発点に戻ってくる

鉄よりも酸化されにくい元素以外は全て溶けた状態で除去でき、元の原料の地点に戻して同等の素材に再生することができます⁷⁾。鉄のリサイクル性の特長を表2に示します。これを生かし、図3に示すように、使用後の鉄は回収され鉄の原料として製品となり、その使用後また回収されて原料となる無限循環が成立しています。鉄のように使用後の素材が元の原料の地点に戻ってくるものを「クローズドループリサイクル[®]」とよびます⁷⁾。

これは鉄がもつ特別な特性であることから、無限の回数にわたり循環利用できる鉄鋼のリサイクル効果を考慮したLCA手法が2018年にISO 20915として規格化されました⁸⁾。詳細は省略しますが、無限循環のリサイクル効果を考慮すると、直近の製造法にかかわらず鉄鋼製品

のCO₂排出量は同じ⁹⁾となります。

このように鉄は、材料としての優れた特性に加え、リサイクル性の点でもほかの素材にない大きな利点をもっています。事実、鉄鋼製品では古くからリサイクルが定着し、スクラップが商業ベースで回収されて電炉鋼が製造されさまざまな形で社会を支えてきました。その中には鉄道で使用された鉄鋼も含まれてきたと考えられます。

おわりに

鉄鋼の脱炭素化と題していくつかの視点を紹介しました。鉄道総研は鉄鋼の脱炭素化にまつわる社会動向もふまえた研究開発を行い、鉄道の発展に貢献していきます。RRR

文献

- 1) 日本鉄鋼連盟：カーボンニュートラル行動計画, <https://www.jisf.or.jp/business/ondanka/kouken/keikaku/> (入手日: 2023/8/8)
- 2) 日本製鉄：日本製鉄カーボンニュートラルビジョン2050, https://www.nipponsteel.com/ir/library/pdf/20210330_ZC.pdf (入手日: 2023/8/8)
- 3) みずほ情報総研：諸外国の電炉業の経営動向や原材料・電力コストの動向を踏まえた我が国電炉業の競争力強化による省エネルギー対策調査事業 平成26年3月, https://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/mono/iron_and_steel/downloadfiles/denro.pdf (入手日: 2023/8/8)
- 4) 橋本佳也, 澤義孝, 加納学, 北村洋平, 大橋知弘, 岡本悠揮, 海瀬達哉, 益田俊介:高炉溶銹温度制御ガイドランスの実用化, 計測と制御, Vol.60, No.4, pp.301-303, 2021
- 5) 経済産業省製造産業局金属課：金属産業の現状と課題 令和3年12月21日, https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/seizo_sangyo/pdf/010_03_00.pdf (入手日: 2023/8/8)
- 6) EN 13262:2004+A2: Railway applications - Wheelsets and bogies - Wheels - Product requirements, 2004
- 7) JFE鋼板, 経済産業省:3Rシンポジウム ~東京2020オリンピック・パラリンピックに向けて~ 鉄鋼製品の3Rの取組みと低炭素社会構築への対応, リデュース・リユース・リサイクル推進協議会, <https://www.3r-suishinkyogikai.jp/data/event/H29SS2.pdf> (入手日: 2023/8/8)
- 8) ISO 20915:2018:Life cycle inventory calculation methodology for steel products, 2018
- 9) 磯原豊司雄:鉄鋼製品のLCI計算法の国際標準化と同計算法に基づくLCIデータベースの整備および普及活動, LCA日本フォーラムニュース, No.74, pp.3-7, 2019