

2025年2月10日

中国、インドの鉄鋼業における低、脱炭素化の取組み

中曽根平和研究所

主任研究員

柿原 敏彦

1. はじめに

2021年第26回気候変動枠組条約締約国会議、いわゆるCOP26において2050年カーボンニュートラル、温室効果ガスの排出を実質ゼロにすべく、関係各国は方向性を合意した。この実現に向け主要先進国は2050年までに、中国は2060年¹、インドは2070年²と各国それぞれ目標を立て、低、脱炭素化に取り組んでいる。しかしながら、現状に鑑みると世界のCO₂排出量は2023年で37.2GTとピークアウトには至っていない³。また、鉄鋼業はCO₂排出量のうち全体の約7%、最終消費セクションの約13%を占め、世界でCO₂を最も多く排出する産業である(2022年実績)⁴。鉄鋼業におけるCO₂排出は、主に自然界にある鉄鉱石を炭素により酸化還元する、いわゆる炭素還元製鉄の生産プロセスに起因する。このため鉄鋼業は、炭素還元製鉄から低、脱炭素化を可能とする生産プロセスへの転換に迫られている。

中国、インドでも自国の生産状況に応じて転換すべき生産プロセスを選択し、低、脱炭素化の実現を図る。既存炭素還元製鉄にとって転換先となりうる主な生産プロセスについては、省エネ、水素活用等により低炭素化は図ることはできるものの、低、脱炭素化の技術開発の動向およびその効果を踏まえると、炭素による還元のため脱炭素化までの実現は厳しい。その中でも還元材がコークス、石炭(C)である高炉、炭素溶融還元炉-転炉法は、還元材の主体がメタン(CH₄)である天然ガス直接還元炉-電炉法に対して低炭素化の効果が比較劣位である。また、これら生産プロセスでの脱炭素化には、やむなく発生したCO₂を最終的に貯留すべくCCUS(CO₂再利用、貯留)の利用が必須である。他方、スクラッパー電炉法は、脱炭素化の実現は可能であるものの、鋼材保有量、蓄積量の増加に対応できない。よって、還元鉄を製造しつつ脱炭素化を実現できる水素還元製鉄である水素直接還元炉-電炉法が、水素や電力の脱炭素化が必要ではあるものの、目指すべき生産プロセスとなる。

2. 中国、インドにおける低、脱炭素化の取組み

CO₂多排出産業である鉄鋼業においては、主に粗鋼生産までの工程でCO₂が発生することから、まず世界の粗鋼生産量の状況を確認する。世界の年間粗鋼生産量は、1950年約2億Tであったが、世界の人口増加、経済成長にあわせて2004年に10億T、更に2011年に15億Tを超え、2021年約20億Tをピークに2022年、2023年も約19億Tと堅調に推移している。国別の粗鋼生産量は、中国が最も多く10.2億T、次いでインド1.4億T、日本0.9億T、米国0.8億T、ロシア0.8億T、韓

国 0.7 億 T、ドイツ 0.4 億 T の順となっている（2023 年実績）⁵。

このような生産規模を踏まえ、鉄鋼生産大国である中国、更なる生産拡大が見込まれるインドでの低、脱炭素化の取組みについて、現状を整理し考察する。

（1）中国

中国は 2030 年までに CO2 排出量をピークアウト、2060 年での実質的なカーボンニュートラル、いわゆる「30・60 脱炭素化目標」を目指している⁶。中国の粗鋼生産量は、1980 年で約 0.4 億 T、1990 年で約 0.7 億 T、2000 年で約 1.3 億 T となり、以降急増し 2005 年で約 3.6 億 T、2010 年で約 6.4 億 T、2015 年で約 8.0 億 T、2020 年には約 10.6 億 T となった。2021 年以降は過剰生産能力の引下げを推進し減産基調となったが、2023 年も約 10.2 億 T の粗鋼を生産し、世界の粗鋼量の 50%以上が中国で生産されている。また、2023 年の生産プロセスは転炉 90%、電炉 10%である⁷。

中国における生産需給の状況は、国内では景気後退にともない鋼材需要は低迷している。他方、鋼材生産は高水準を継続しており、鋼材輸出は年間約 1 億 T の規模となっている。これにより ASEAN を始めとする、中国鋼材を輸入する周辺国では鋼材価格が低迷している。加えて、インドでの鋼材生産の増加も相まって鉄鉱石、石炭の原材料価格は高止まっている。このためアジアの鉄鋼メーカーにとっては、製品と原材料の市況価格差であるマージンは低水準となっており、採算性が極めて厳しい状況となっている⁸。

現状、中国においては、低、脱炭素化への取組みを推進することはもとより、各鉄鋼メーカーの収益性改善のために生産能力適正化が喫緊の課題である。このような状況を踏まえ、まず中国における政策および鉄鋼業界の動向を整理する。

2021 年 4 月、政府は「循環経済の発展に関する第 14 次五カ年計画」（2021-2025 年）の実行に先駆け、「2021 年に鉄鋼過剰生産能力の解消について、過去を振り返り、粗鋼生産量の減少などについて研究・実行する」との通知を発表した⁹。これを受け同月、中国鉄鋼団体の中国鋼鉄工業協会は、2016 年以降に規則違反し生産を増加した企業、または環境保護水準の低い企業に対して幾つかの措置をとることを明言した。それは、第一に高炉生産量を制限し、CO2 低排出企業や電炉には生産制限を加えないこと、第二に国内需要を賄うために輸出減、更に輸入も行うこと、第三に粗鋼生産量の減少、低 CO2 排出鉄鋼生産技術の開発、および電炉比率の向上により、2025 年までに鉄鋼業の CO2 排出量のピークアウトを実現すること、であった¹⁰。

更に同年 6 月より「鉄鋼業生産能力実施弁法（改訂版）」を施行、企業の新規設備の建設に対し、既存設備の廃却の義務付けをより厳しく運用することとし、高炉－転炉法の新規設備の場合、生産能力の置換比率（廃棄設備：新規設備）を大気汚染の深刻な地域では 1.5：1、それ以外では 1.25：1 と定めた。また、例外として、スクラップ－電炉法または炭素溶融還元炉－転炉法など新しい生産プロセスへの置換の場合、1：1 での設備新設を認めている¹¹。

その後 2022 年 2 月、政府は「鉄鋼業の質の高い発展促進に関する指導意見」¹²を公布し、鉄鋼生産設備の 80%以上を超低炭素排出のものに改良し、2030 年までに CO2 排出量のピークアウトを確実なものにすることを掲げた。

続いて 2024 年 5 月、政府は「2024～2025 年の省エネ・炭素削減行動計画」¹³において、2025 年までの間は新たな鉄鋼生産能力の追加を認めず、スクラップ－電炉法の拡大を支援し、2025 年末ま

で粗鋼生産に占める電炉比率を15%まで引き上げ、スクラップ利用量を3億Tとする。加えて、省エネ、低炭素化に向け、高炉炉頂ガス、コークスガス廃熱などの利用を推進するとともに、水素冶金などの低炭素製鋼技術の実証と応用も強化し、約5,300万TのCO₂排出量削減を実現する、との目標を示した。

その後2024年8月、政府は更なる生産能力の適正化に向け「鉄鋼業生産能力実施弁法(改訂版)」に基づく生産能力の置換計画を一時停止し、政策の見直しを図ることとしている¹⁴。

次にこのような方針を踏まえ、中国鉄鋼メーカーがどのように対応しようとしているのかということについて考察する。

現状、中国における粗鋼の大宗は高炉-転炉法で生産されており、IEAによると中国の高炉の稼働年数は平均12年(2018年時点)と推定されており¹⁵、設備寿命を20年と仮定すると概ね2026年頃には既存高炉は設備更新時期を迎える。各鉄鋼メーカーは、高炉の設備更新にあわせ高炉-転炉法を継続し生産規模縮小を図るか、スクラップ-電炉法や水素直接還元炉-電炉法などへの生産プロセスの転換を図ることとなる。

高炉-転炉法を継続する場合、生産規模の縮減を基本としつつ、省エネ、高効率化による低炭素化効果を享受し、また高炉での水素活用技術の実用化にも取り組み、CO₂排出量を削減することになる。既に水素活用は進んでおり、例えば宝武鋼鉄集団(2023年粗鋼生産量世界1位¹⁶)の八一鋼鉄では2020年7月から小型試験高炉で水素活用の試験を行いCO₂排出量21%以上の削減を確認し¹⁷、2023年9月よりHyCROF(水素濃縮炭酸ガスリサイクル酸素化炉)の商業実証プロジェクトを行っている¹⁸。

また、生産プロセスの転換についても並行して進めている。スクラップ-電炉法への転換、いわゆる電炉化である。中国では旺盛な内需に支えられ鉄鋼製品の供給が急増した。他方、電炉の原料であるスクラップは廃材であるため、鋼材供給時点からは遅れて発生する。この時間差に起因するスクラップ、原料不足により電炉化が滞るという課題を抱えていた。今後、鋼材の使用、廃棄のサイクルが安定し、2025年で3億Tのスクラップ供給が可能となれば、政府目標である同年での粗鋼生産に占める電炉比率目標15%の到達実現性は高いと言えよう。また、中国鋼鉄工業協会は2035年には電炉の生産能力を4億T、粗鋼生産に占める電炉比率を30%以上とする目標を掲げており¹⁹、当面の間、電炉化の流れが加速することが見込まれている。

加えて、脱炭素化の実現のため水素直接還元炉-電炉法の導入も進めており、河北鋼鉄集団(2023年粗鋼生産量世界5位²⁰)では水素直接還元炉の実装に向け2022年12月には年産120万T規模の水素製鋼パイロットプロジェクトが完了し、2023年5月より直接還元鉄の生産を開始している²¹。また、宝武鋼鉄集団では2022年7月広東省の湛江製鉄所で年産規模100万Tの水素還元を目指す直接還元炉導入を決定し²²、2023年12月より稼働している²³。

このように中国の大手鉄鋼メーカーは、低、脱炭素化の取り組みを着実に進めており、主要先進国の鉄鋼メーカーに伍するべく、国家目標の「30・60脱炭素化目標」を前倒ししてその実現を企図しており、河北鋼鉄集団、および宝武鋼鉄集団は、それぞれ2022年、2023年にCO₂排出量のピークアウト、2050年でのカーボンニュートラルを²⁴、鞍山鋼鉄集団(2023年粗鋼生産量世界3位²⁵)は2025年までにCO₂排出量のピークアウト、2060年でのカーボンニュートラルの達成を目指している²⁶。

(2) インド

インドは2030年までに2005年比でGDP当たりCO₂排出量45%減、2070年での実質的なカーボンニュートラルを目指している²⁷。インドの粗鋼生産量は、1980年から2000年にかけては約0.1～0.2億Tに過ぎなかったが、2005年で約0.4億T、2010年で約0.7億T、2015年で約0.9億T、2020年には約1.0億Tとなった。その後も着実に増加し2023年は約1.4億Tの粗鋼を生産し、中国に次ぐ世界の鉄の約7%を生産する状況となっている。また、2023年の生産プロセスは転炉44%、電炉56%である²⁸。そして、国内での鋼材需要の伸長にあわせて鉄鋼生産は増加の一途を辿っている。

このような状況を踏まえ、まずインドにおける政策および現状の生産プロセスを整理する。2017年5月、政府は「国家鉄鋼政策」²⁹を発表し、国内の鉄鋼業の迅速な成長と発展を促進することとした。国内の鋼材需要は2030年で2.3億Tを見込んでおり、粗鋼生産量は3億Tが必要であるとし、その実現に向け高炉比率を60%～65%に引き上げ、他方電炉比率を30%～35%に引き下げる目標を示した。

その後、モディ首相は2022年8月の独立75周年記念日の演説で「我々は今後25年でインドを先進国にすることを決意しなければなりません」と発言した³⁰。この実現に向け、インド政府はいわゆる「Vision India 2047」の策定に取り組んでおり、鉄鋼分野においては2047年には粗鋼生産量5億Tを目指すとしている³¹。

また、政府は2023年1月に承認した「国家グリーン水素ミッション」³²に基づき、2024年2月「鉄鋼分野におけるグリーン水素を利用したパイロット事業実施に関するガイドライン」³³を公表した。これは政府支援により、化石燃料および化石燃料由来の原料をグリーン水素とその派生物に置換え、脱炭素化、低炭素化を可能とする生産プロセスを実用化、実装することが目的である。支援対象事業は、①縦型シャフト高炉、直接還元製鉄プロセスにおける水素の100%使用、②高炉におけるあらかじめ決められた割合の水素の使用、③直接還元製鉄プロセスにおける化石燃料からグリーン水素への段階的な転換、④CO₂排出量削減に向けたその他革新的な水素利用、という分野が想定されている。これらの事業を通じたグリーン水素等の使用は必要なインフラ開発に繋がり、鉄鋼分野でのグリーン水素エコシステムを確立する、としている。

続いてこれら政策実施の前提となる現状の生産プロセスであるが、インドにおいては電炉による粗鋼生産の過半はスクラップー電炉法であり、残りは直接還元炉ー電炉法である³⁴。

インドは急速な内需拡大により、スクラップ発生量より早いペースで鋼材を供給してきた。このため電炉の原料となるスクラップは供給不足に陥り、スクラップー電炉法での生産には限界が生じた。旺盛な鋼材需要を補うには還元鉄の製造が必要であり、高炉ー転炉法での生産拡大を図った中国とは異なり、インドは直接還元炉ー電炉法での生産を選択してきた。

この選択の背景には、まずインドの石炭生産事情が挙げられる。インドは中国に次ぐ世界2位の石炭生産国³⁵ではあるが、その多くは発電、一般産業用の低品位の一般炭や褐炭であり、高炉ー転炉法用の高品位の原料炭の供給は限られており、その大半を輸入に頼っている（2017年時点、約85%を輸入³⁶）。また、インドでは鋳物産業が盛んであり、鋳物の原料となる還元鉄は品質上、転炉や電炉での精錬が不要である。また、鋳物生産の規模は大きく年間1千万Tを超え、世界全体の生

産量の12%を占めている(2020年実績)³⁷。このような状況を背景に、原料炭が不要であり、かつ、高炉-転炉法に比べ資本コストが低い、直接還元炉-電炉法を各鉄鋼メーカーは導入してきた。また、直接還元炉の還元材は、調達が容易な一般炭、褐炭に大きく依存している。

他方、転炉による粗鋼生産は高炉-転炉法が大宗を占めている。IEAによるとインドの高炉の稼働年数は新設から平均25年、最後の大規模改修から15年と比較的古く、生産量あたりのエネルギー消費量は多いと推定されている³⁸。また、一部はJSWスチール(2023年粗鋼生産量世界12位³⁹)のヴィジャヤナガル製鉄所を皮切りに導入されたCOREX⁴⁰、炭素溶融還元炉-転炉法でも生産されている⁴¹。COREXでは、インドの石炭生産事情に鑑み、高炉に比べ品位の低い石炭を使用することができることも導入要因の一つと言えるだろう。

次に、このような政策および現状の生産プロセスを踏まえ、インド鉄鋼メーカーが採用している将来に向けた対応について考察する。

インドでは、まず旺盛な内需を満たすために還元鉄使用による粗鋼生産規模の拡大が急務であり、あわせて低炭素化を進める必要がある。脱炭素化を可能とする水素直接還元炉-電炉法は研究開発、設備実装まで時間を要することから、早期に鋼材供給量を確保するには、設備新設または既存の高炉、還元炉の老朽更新時に高炉-転炉法、炭素溶融還元炉-転炉法、もしくは直接還元炉-電炉法、いずれかの生産プロセスを選択することになるだろう。

まず高炉-転炉法であるが、インドは当面の間、確実な需要増加が見込まれており、高炉の弱みである生産量の変動への弾力性を考慮する必要が少なくないことに加え、既存の高炉が比較的古いが故に新設、更新時に生産、エネルギー効率を上げる余地も多分にあり、また政府方針としても2030年に粗鋼生産に占める高炉比率を60~65%に引き上げることを目標としていることから、第一の選択肢としてあげられるだろう。例えば、アルセロール・ミッタルと日本製鉄㈱の合弁であるAM/NSインディアでは急速な国内での需要拡大へ対応すべく、2022年に高炉2基、転炉3基の新設を決定し⁴²、2025年、2026年にそれぞれ高炉1基の新規稼働を見込んでいる⁴³。また低炭素化への取り組みとして、既に大手鉄鋼メーカーであるタタ・スチール(2023年粗鋼生産量世界10位⁴⁴)では2023年には高炉実機への水素吹き込み試験を実施しており⁴⁵、今後、還元材である炭素の一部水素への置換が進展することも見込まれる。

次に炭素溶融還元炉-転炉法であるが、原料炭を輸入に頼っている状況を踏まえると既に代表的な炭素溶融還元炉であるCOREXの実装実績があり、こちらも選択肢となるだろう。ただし、COREXの原料は高品位の塊鉄鉱石または加工品のペレットのみに限られており、原料調達面では低品位の粉鉄鉱石を使用できる高炉に対し比較劣位である。この弱みを解消するため、COREXの還元シャフト炉を流動層に変更し粉鉄鉱石も使用できる仕様としたFINEXの導入も検討されるものと推測される。これら高炉-転炉法、炭素溶融還元炉-転炉法は、いずれも炭素還元を基本としており、前段で述べた通り生産、エネルギー効率の向上や還元材の水素一部使用により低炭素化を図ることはできるものの、脱炭素化にまでは至らないため将来的にはCCUSの併用が必要となる。

続いて直接還元炉-電炉法であるが、既存の還元材の炭素を水素に置換することで将来目指すべき水素直接還元炉への移行を図りやすいことから、脱炭素化していく上では最適な生産プロセスと考えられる。目下のところ、インドでの直接還元炉による還元鉄生産は、世界最大の生産地域である中東に次ぐ世界2位となっている⁴⁶。これら既存の炭素直接還元炉について、水素直接還元炉へ

の移行を視野に、これまでの知見を活かしつつ、設備更新、および新設による増強を図ることが見込まれる。

ただし、中東では石炭より CO2 排出量を抑制できる天然ガスによる還元が主体であるが、インドでは天然ガスの安定調達に困難であったこともあり、石炭による還元が主体となっている。例えば、AM/NS インディアの前身であるエッサールスチールは代表的な天然ガス直接還元炉である MIDREX のガス調達問題等により操業度が低下、天然ガスに依存しない高炉や COREX の増強を図ったものの多額の負債を抱え倒産破産法の対象となった⁴⁷。また、インド政府の「国家鉄鋼政策」にも「国内からの天然ガス供給不足のために立ち往生しているガスベースの鉄鋼工場」への対応が必要であり、「天然ガスを長期的に確保するため、石油天然ガス省は新たな天然ガス資源の探査を働きかける」とも記載されている⁴⁸。

これら天然ガスの安定調達への対応の進展にあわせて、水素直接還元炉導入へのステップとして、まずは直接還元炉の還元材を石炭から天然ガスへ転換することが想定される。既に大手鉄鋼メーカーである JSW スチール、ジンダルスチール&パワー、AM/NS インディアでは、直接還元炉の還元材を天然ガスから水素へ置換することを可能とする MIDREX 設備について既に実装しており⁴⁹、他メーカーを含め今後の天然ガス直接還元炉の生産能力拡大の動向を注視する必要がある。

他方、低炭素化の対応においてはスクラップ - 電炉法での生産も重要である。インドは現在、スクラップ - 電炉法による粗鋼生産が全体の約 3 割を占めている。今後、内需拡大を背景とした粗鋼生産の増加、鋼材供給にあわせて廃材であるスクラップも今後多量に発生することが見込まれる。これら増加するスクラップを分別、回収、事前処理し、電炉でリサイクル、再溶解できる体制の整備が求められている。これに対し「国家鉄鋼政策」では、「十分な量の良質のスクラップを確保するため、近代的な鉄鋼破碎工場を推進することで、国内における組織的で環境に優しい鉄スクラップ処理施設の設立を促進する。」としており⁵⁰、スクラップ - 電炉法での粗鋼生産の維持、拡大にはこれら施策の着実な実行が必要である。

このような状況を踏まえ、IEA ではインドの粗鋼生産における生産プロセス構成の 2050 年までの推移を想定している⁵¹。2030 年までには国家政策に基づき高炉 - 転炉法比率を引上げ、2040 年には高炉での水素活用や炭素溶融還元炉での CCUS 利用を図りつつ、炭素直接還元炉から水素直接還元炉への移行も実行する。これらのプロセスを経た結果、2050 年時点には旺盛な内需への供給と脱炭素化の両立のために、還元鉄製造プロセスで粗鋼生産量の 75%を生産し、うち炭素還元製鉄での水素活用、CCUS 利用を 25%、水素還元製鉄を 15%、あわせて 40%が脱炭素化を可能とする生産プロセスになることを見込んでいる。他方、再利用プロセスであるスクラップ - 電炉法は廃材の回収、処理、利用のリサイクル基盤が確立し、安定的に粗鋼生産量の約 25%を生産することを見込んでいる。

これら IEA の見通しは、主要先進国と異なり、インドが 2070 年でのカーボンニュートラルを目指していることもあり、2050 年時点では還元鉄製造プロセスのうち脱炭素化を実現できない生産プロセスが約 35%残されていることを示している。

現状、インドでは大手鉄鋼メーカー 5 社で総生産量の約 6 割を占めており⁵²、各社とも低炭素化の実現に向けた計画を立案し、取り組みを進めている。具体的には、インド鉄鋼公社 (SAIL) (2023 年粗鋼生産量世界 19 位⁵³) は、2030 年までに粗鋼 T 当たり CO2 排出量を 2.3T と大幅に削減すると

し、またカーボンニュートラルの目標を 2070 年としている。これは同社が国営企業であることにも由来していよう⁵⁴。他方、民間大手鉄鋼メーカーで、欧州にも製造拠点を持つタタ・スチールは 2030 年までに CO2 排出量を 40%削減し 2045 年までにはカーボンニュートラルを⁵⁵、ジンダルスチール&パワーは 2030 年までに CO2 排出量を 35%削減し、2047 年までにはカーボンニュートラルを目標に掲げ対応を図っている⁵⁶。また、JSW スチール、AM/NS インディアは、カーボンニュートラル達成は将来目標としているが、2030 年の粗鋼 T 当たり CO2 排出量の目標をそれぞれ 1.95T、1.8T と明示し、低炭素化を推進している⁵⁷。このような大手鉄鋼メーカーの対応に加え、今後起こりうるインド国内での事業再編の状況によっては脱炭素化の流れが加速することも想定される。

3. おわりに

国内鋼材需要において中国は減少または維持、インドは増加という違いはあるが、両国とも鉄鋼業の低、脱炭素化を重要課題と位置づけ、政府方針に基づき各企業はそれへの対応として生産プロセスの転換を推進しようとしている。

転換後の生産プロセスの構成については、リサイクル法として自国内のスクラップの回収、処理、供給体制を整備し、スクラップ―電炉法での製造を一定割合維持する。また、還元法としては、当面の間、炭素還元である高炉―転炉法、炭素溶融還元炉―転炉法および炭素直接還元炉―電炉法の既存の生産プロセスにおいて、エネルギー効率化、水素活用技術の導入等により低炭素化を図り、やむを得ず発生する CO2 には CCUS で対処しつつ、将来的には水素還元製鉄である水素直接還元炉―電炉法へ生産プロセスを転換して脱炭素化を目指すこととなろう。両国ともこの生産プロセスの転換には、対処すべき課題として低、脱炭素化を実現するための設備実装に向けた技術開発に加え、転炉法から電炉法への変更にもなう電力、転換後の還元材としての水素、いずれも相当程度の使用が見込まれるため、電力、水素の安定的な供給体制の構築が必要となる。

今後も世界人口は増加し各国の経済成長にあわせて粗鋼生産量は増加が見込まれている。世界の鉄鋼業全体での低、脱炭素化を実現するには、粗鋼生産量では劣後する主要先進国のみでの対応では厳しく、最大の生産国である中国の対応はもとより、成長著しいインドでの対応は必須であり、今後も両国鉄鋼業の動向を注視する必要がある。

¹ BBCNEWSJAPAN 「中国の CO2 排出量、2060 年までに実質ゼロに 習主席が表明」(BBCNEWSJAPAN ウェブサイト、2020 年 9 月 23 日、<https://www.bbc.com/japanese/54260510>) (2025 年 2 月 10 日閲覧、以下同)。

² インド政府 「グラスゴーでの COP26 サミットにおけるナレンドラ・モディ首相の国家声明」(インド政府ウェブサイト、2021 年 11 月 1 日、<https://pib.gov.in/PressReleasePage.aspx?PRID=1768712>)。

³ IEA 「エネルギー関連の CO2 排出量の総増加、1900～2023 年」(IEA ウェブサイト、2024 年 2 月 25 日、<https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/total-increase-in-energy-related-co2-emissions-1900-2023>)。

⁴ IEA 「World Energy Outlook 2023」280 頁(IEA ウェブサイト、<https://iea.blob.core.windows.net/assets/86ede39e-4436-42d7-ba2a-edf61467e070/WorldEnergyOutlook2023.pdf>) を基に筆者算出。

- ⁵ 世界鉄鋼協会「2024年の世界鉄鋼需要予測」(世界鉄鋼協会ウェブサイト、<https://worldsteel.org/data/world-steel-in-figures-2024/>) を基に筆者算出。
- ⁶ BBCNEWSJAPAN「中国のCO2排出量、2060年までに実質ゼロに 習主席が表明」(BBCNEWSJAPAN ウェブサイト、2020年9月23日、<https://www.bbc.com/japanese/54260510>)。
- ⁷ 世界鉄鋼協会「2024年の世界鉄鋼需要予測」(世界鉄鋼協会ウェブサイト、<https://worldsteel.org/data/world-steel-in-figures-2024/>) を基に筆者算出。
- ⁸ 日本製鉄㈱「2024年度3Q決算説明会」9-11頁(日本製鉄ウェブサイト、2025年2月6日、https://www.nipponsteel.com/ir/library/pdf/20250206_300.pdf)。
- ⁹ JETRO「カーボンニュートラル達成に向けて、2021年の粗鋼減産を表明」(JETROウェブサイト、2021年4月20日、<https://www.jetro.go.jp/biznews/2021/04/73a6ba690b90982d.html>)。
- ¹⁰ 同上。
- ¹¹ JETRO「鉄鋼業生産能力置換実施弁法(改訂版)を発表」(JETROウェブサイト、2021年5月14日、<https://www.jetro.go.jp/biznews/2021/05/e87b18238900493e.html>)。
- ¹² 中国政府「鉄鋼業の質の高い発展促進に関する指導意見」(中国政府ウェブサイト、2022年2月7日、https://www.miit.gov.cn/zwgk/zcwj/wjfb/yj/art/2022/art_fc8736cbc5364d6eb19ce17eb0b0cc9c.html)。
- ¹³ 中国政府「2024～2025年の省エネ・炭素削減行動計画」(中国政府ウェブサイト、2024年5月29日、https://www.gov.cn/zhengce/content/202405/content_6954322.htm)。
- ¹⁴ ロイター「中国、鉄鋼生産能力の抑制措置を一時停止・見直しへ」(ロイターウェブサイト、2024年8月23日、<https://jp.reuters.com/markets/commodities/FP2T5QW66VLWVBT7DDKOABKT2A-2024-08-23/>)。
- ¹⁵ IEA, “Iron and Steel Technology Roadmap: Towards more sustainable steelmaking”, IEA Website, p. 46-47, https://iea.blob.core.windows.net/assets/eb0c8ec1-3665-4959-97d0-187ceca189a8/Iron_and_Steel_Technology_Roadmap.pdf)。
- ¹⁶ 世界鉄鋼協会「2024年の世界鉄鋼需要予測」(世界鉄鋼協会ウェブサイト、<https://worldsteel.org/data/world-steel-in-figures-2024/>)。
- ¹⁷ 八一鋼鉄「宝武水素濃縮炭酸ガスリサイクル酸素化炉(HyCROF)が大きな技術的進歩を達成しました！」(八一鋼鉄ウェブサイト、2022年11月20日、<http://www.bygt.com.cn/detail/261713>)。
- ¹⁸ 宝武鋼鉄集団「八一鋼鉄の低炭素冶金2,500立方メートルHyCROF商業実証プロジェクトが稼働開始」(宝武鋼鉄集団ウェブサイト、2023年10月12日、https://www.baowugroup.com/en/media_center/news_detail/295769)。
- ¹⁹ 産業新聞「中国、電炉比率30%超目標 脱炭素に向け普及促進 35年4億トン 鉄スクラップ需給に影響 国有大手、導入を計画」(産業新聞ウェブサイト、2023年9月11日、<https://www.japanmetal.com/news-a20230911129594.html>)。
- ²⁰ 世界鉄鋼協会「2024年の世界鉄鋼需要予測」(世界鉄鋼協会ウェブサイト、<https://worldsteel.org/data/world-steel-in-figures-2024/>)。
- ²¹ 河北鋼鉄集団「HBISが世界初、新たなショートプロセスプロジェクトである水素シャフト炉とゼロカーボン排出アーク炉プロジェクトを開始」(河北鋼鉄集団ウェブサイト、2024年4月22日、<https://www.hbisco.com/en/news/group/t688/2380>)。
- ²² 鉄鋼新聞「湛江にDR Iプラント導入／中国宝武」(鉄鋼新聞ウェブサイト、2022年7月27日、

<https://www.japanmetaldaily.com/articles/-/110176>)。

²³ 鉄鋼新聞「中国・宝鋼の湛江製鉄所／水素還元の本格稼働／当面は天然ガス・コークスガスも併用」(鉄鋼新聞ウェブサイト、2023年12月29日、<https://www.japanmetaldaily.com/articles/-/140673>)。

²⁴ 河北鋼鉄集団「HBISは中国産業界の炭素ピーク対策の先導企業の一つとなる」(河北鋼鉄集団ウェブサイト、2023年1月6日、<https://www.hbis.com/en/news/group/t101/2095>)、宝武鋼鉄集団「中国宝武が炭素排出削減宣言を発表：2023年に炭素排出量をピークに、2050年にカーボンニュートラル達成を目指す」(宝武鋼鉄集団ウェブサイト、2021年1月22日、https://www.baowugroup.com/en/media_center/news_detail/222001)。

²⁵ 世界鉄鋼協会「2024年の世界鉄鋼需要予測」(世界鉄鋼協会ウェブサイト、<https://worldsteel.org/data/world-steel-in-figures-2024/>)。

²⁶ 鞍山鋼鉄集団「Sustainability Report 2021」28-31頁(鞍山鋼鉄集団ウェブサイト、2023年1月6日、<http://en.ansteel.cn/upload/pdf/2021.pdf>)。

²⁷ インド政府「グラスゴーでのCOP26サミットにおけるナレンドラ・モディ首相の国家声明」(インド政府ウェブサイト、2021年11月1日、<https://pib.gov.in/PressReleasePage.aspx?PRID=1768712>)。

²⁸ 世界鉄鋼協会「2024年の世界鉄鋼需要予測」(世界鉄鋼協会ウェブサイト、<https://www.bbc.com/japanese/54260510>

)を基に筆者算出。

²⁹ インド政府「国家鉄鋼政策(NSP)、2017年」(インド政府ウェブサイト、2017年5月8日、<https://steel.gov.in/en/national-steel-policy-nsp-2017>)。

³⁰ インド政府「76回目の独立記念日にレッドフォートの城壁から行われた首相の演説」(インド政府ウェブサイト、2022年8月15日、<https://pib.gov.in/PressReleaseDetail.aspx?PRID=1851994>)。

³¹ インド政府「ラム・チャンドラ・プラサド・シン首相は、シームレスで透明性があり柔軟なプロセスが政府の目標であると述べ、鉄鋼大臣は、2030年までに3億トン、2047年までに5億トンという目標を達成するための戦略を策定する必要があると述べた」(インド政府ウェブサイト、2022年3月27日、<https://pib.gov.in/PressReleaseIframePage.aspx?PRID=1810237>)。

³² インド政府「内閣が国家グリーン水素ミッションを承認」(インド政府ウェブサイト、2023年1月4日、<https://pib.gov.in/PressReleaseDetail.aspx?PRID=1888545>)。

³³ インド政府「鉄鋼分野におけるグリーン水素を利用したパイロット事業実施に関するガイドライン」(インド政府ウェブサイト、2024年2月2日、<https://cdnbbsr.s3waas.gov.in/s3716e1b8c6cd17b771da77391355749f3/uploads/2024/02/20240206917076035.pdf>)。

³⁴ IEA「Iron and Steel Technology Roadmap」121-128頁(IEAウェブサイト、https://iea.blob.core.windows.net/assets/eb0c8ec1-3665-4959-97d0-187ceca189a8/Iron_and_Steel_Technology_Roadmap.pdf)。

³⁵ IEA「石炭 2023」エグゼクティブサマリー(IEAウェブサイト、<https://www.iea.org/reports/coal-2023>)。

³⁶ インド政府「国家鉄鋼政策(NSP)、2017年」(インド政府ウェブサイト、2017年5月8日、<https://steel.gov.in/en/national-steel-policy-nsp-2017>)。

³⁷ IEA「Iron and Steel Technology Roadmap」121-128頁(IEAウェブサイト、[https://iea.blob.core.windows.net/assets/eb0c8ec1-3665-4959-97d0-](https://iea.blob.core.windows.net/assets/eb0c8ec1-3665-4959-97d0-187ceca189a8/Iron_and_Steel_Technology_Roadmap.pdf)

[187ceca189a8/Iron_and_Steel_Technology_Roadmap.pdf](#))。

³⁸ 同上。

³⁹ 世界鉄鋼協会「2024年の世界鉄鋼需要予測」(世界鉄鋼協会ウェブサイト、<https://worldsteel.org/data/world-steel-in-figures-2024/>)。

⁴⁰ 従来の高炉を還元シャフトと熔融ガス化炉に変更することにより、高炉の原料であるペレットや焼結鉱を鉄鉱石に、還元材の кокс を石炭に、ともに前処理加工工程を省略し、設備投資、生産コストの低減を実現することができる。

⁴¹ JSW スチール「ヴィジャヤナガル・ワークス」Corex テクノロジー(JSW スチールウェブサイト、<https://www.jswsteel.in/vijayanagar-works/>)。

⁴² 日本製鉄株「AM/NS India における製鉄事業基盤の強化について ハジラ製鉄所の鉄源・熱延設備投資決定、および、港湾・電力関連設備会社の買収」(日本製鉄ウェブサイト、2022年9月28日、https://www.nipponsteel.com/news/20220928_200.html)。

⁴³ 日本製鉄株「2024年度2Q決算説明会」9頁(日本製鉄ウェブサイト、2024年11月7日、https://www.nipponsteel.com/ir/library/pdf/20241107_500.pdf)。

⁴⁴ 世界鉄鋼協会「2024年の世界鉄鋼需要予測」(世界鉄鋼協会ウェブサイト、<https://worldsteel.org/data/world-steel-in-figures-2024/>)。

⁴⁵ 経済産業省「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」3頁(経済産業省ウェブサイト、2023年9月15日、https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/green_innovation/energy_structure/pdf/018_04_00.pdf)。

⁴⁶ IEA「Iron and Steel Technology Roadmap」121-128頁(IEAウェブサイト、https://iea.blob.core.windows.net/assets/eb0c8ec1-3665-4959-97d0-187ceca189a8/Iron_and_Steel_Technology_Roadmap.pdf)。

⁴⁷ 日本製鉄株「エッサール スチールの共同買収について」9頁(日本製鉄ウェブサイト、2019年12月16日、https://www.nipponsteel.com/common/secure/ir/library/pdf/20191216_500.pdf)。

⁴⁸ インド政府「国家鉄鋼政策(NSP)、2017年」(インド政府ウェブサイト、2017年5月8日、<https://steel.gov.in/en/national-steel-policy-nsp-2017>)。

⁴⁹ MIDREX「MIDREX® PLANTS 2023」(MIDREXウェブサイト、<https://www.midrex.com/wp-content/uploads/Midrex-Plants-Sheet2023.pdf>)。

⁵⁰ インド政府「国家鉄鋼政策(NSP)、2017年」(インド政府ウェブサイト、2017年5月8日、<https://steel.gov.in/en/national-steel-policy-nsp-2017>)。

⁵¹ IEA「鉄鋼技術ロードマップ」持続可能な開発シナリオにおけるインドのルート別鉄鋼生産量、2019-2050年(IEAウェブサイト、<https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap>)。

⁵² IEA「Iron and Steel Technology Roadmap」121-128頁(IEAウェブサイト、https://iea.blob.core.windows.net/assets/eb0c8ec1-3665-4959-97d0-187ceca189a8/Iron_and_Steel_Technology_Roadmap.pdf)。

⁵³ 世界鉄鋼協会「2024年の世界鉄鋼需要予測」(世界鉄鋼協会ウェブサイト、<https://worldsteel.org/data/world-steel-in-figures-2024/>)。

⁵⁴ インド鉄鋼公社「Sustainability Report 2022-23」67頁(インド鉄鋼公社ウェブサイト、
Nakasone Peace Institute

<https://www.sail.co.in/sites/default/files/2024-05/SAIL%20Sustainability%20Report%202022-23.pdf>)。

⁵⁵ タタ・スチール「グリーンスチールプラン」(タタ・スチールウェブサイト、

<https://www.tatasteelnederland.com/en/sustainability/green-steel-plan>)。

⁵⁶ ジンダルスチール&パワー「持続可能な未来を築く JSP の持続可能性」(ジンダルスチール&パワーウェブサイト、<https://jindalsteel.com/sustainability-at-jsp.html>)。

⁵⁷ JSW スチール「Integrated Report 2022-23」16 頁(JSW スチールウェブサイト、<https://www.jswsteel.in/jsw-steel-annual-report-2022-23/pdf/JSW-Steel-IR-22-23.pdf>)、AM/NS インディア「CLIMATE ACTION REPORT 2024」18 頁(AM/NS インディアウェブサイト、<https://www.amns.in/storage/Reports/AMNS-Climate-Action-Report-2024.pdf>)。