

脱炭素社会への移行が迫るアジアの鉄鋼業の将来

調査部

主任研究員 熊谷 章太郎

(kumagai.shotaro@jri.co.jp)

要 旨

1. 鉄は様々な産業で用いられる極めて重要な金属素材である一方、鉄鋼製品の生産は大量のCO₂を排出する。そのため、経済成長と環境保全を両立するためには、鉄鋼業のカーボンニュートラル目標の達成が不可欠である。世界の粗鋼生産量の約6割を占める中国、それに続いて生産量の多いインドや日本で鉄鋼業の生産方式がどのように見直されるかが注目される。
2. 鉄鋼業のCO₂排出量の削減に向けた生産方式の見直しのポイントとしては、①鉄鉱石を原材料とする高炉における製鉄から鉄スクラップを原材料とする電炉における製鉄へのシフト、②高炉におけるCO₂排出量削減に向けた水素活用還元技術などの革新的技術の導入、③再生可能エネルギー由来の電力や水素の利用拡大、④CCUS (CO₂の回収・有効利用・貯留) 技術の導入、が挙げられる。
3. 新たな生産方式への移行は技術的課題を多く抱えている。また、その克服に必要な技術開発、設備導入、関連インフラの整備は莫大な資金を必要とする。さらに、新たな生産方式への移行に伴う鉄鋼製品の価格の上昇は、短期的に景気にマイナス圧力をもたらしかねない。そのため、各国は、段階的に脱炭素を進めることで、一連の課題に対応するだろう。短期では実用化に必要な技術が確立されている電炉の生産拡大や、再生可能エネルギー由来の発電拡大に注力し、中長期では高炉における水素活用還元技術やCCUSの導入を目指すと見込まれる。
4. 主要な鉄鋼生産国の脱炭素に向けた動きにはばらつきがみられる。2060年のカーボンニュートラル目標の達成と過剰生産能力の解消を目指す中国は、環境負荷の大きい製鉄所の閉鎖や電炉比率の引き上げを進めている。また、近年政治対立が深まる豪州への鉄鉱石や石炭の依存を減らす観点からも、鉄スクラップを原材料とする製鉄の拡大や水素活用還元技術の自主開発を積極的に進めるだろう。インドは、再生可能エネルギーの導入拡大や水素の国内生産に注力する一方、高炉の水素活用還元技術やCCUSなどについては海外から技術を輸入することで対応しようとしている。2050年にカーボンニュートラル社会の達成を目指す日本は脱炭素における技術開発を産官学の連携により強化していくことが不可欠である。

目次

はじめに

1. なぜ鉄鋼業に注目するのか

- (1) 経済成長と環境保全のジレンマ
- (2) 鉄鋼製品の需給構造の現状

2. 脱炭素社会への移行が迫る生産構造の変化

- (1) CO₂排出量の削減に向けた鉄鋼の生産方式の見直しのポイント
- (2) 低炭素・脱炭素を進めるうえでの課題

3. 主要国の鉄鋼生産のCO₂排出量削減に向けた動き

- (1) 中国：環境志向に加え豪中対立も脱炭素に向けた取り組みを促進
- (2) インド：革新的技術は輸入で対応
- (3) 日本：目標達成時期を大幅に前倒し

おわりに

補論:豪中対立の現状と先行き

はじめに

各国のカーボンニュートラル宣言に象徴される世界的な環境志向の高まりを背景に、各産業でCO₂（二酸化炭素）排出量の削減に向けた取り組みが進められている。代表的な取り組みとしては、再生可能エネルギー由来の電力生産の拡大、ガソリン車からEV（電気自動車）へのシフトなどが挙げられる。こうした生産構造の転換は素材関連産業にも広がりつつあり、鉄鋼業における動向が特に注目されている。この理由は、鉄は様々な産業で用いられる汎用性の高い金属素材である一方、鉄鋼製品の生産は大量のCO₂の排出を伴うためである。製造業の中でCO₂排出量が多い鉄鋼業でどのような構造変化が起き、それを利用する産業にどのような影響が生じるかを把握することは、経済成長と環境保全を両立出来るかを展望するうえで非常に重要である。

以上の問題意識のもと、本稿は鉄鋼業の構造変化を切り口に、アジアの経済と環境関連政策の現状と先行きを展望する。まず、1. で鉄鋼業は重要な産業基盤である一方、環境負荷の大きい産業であることを確認するとともに、現在の鉄鋼の需給動向を整理する。次に、2. で経済成長と環境保全の両立に向けた鉄鋼業の生産方式の見直しの方向性やその課題を整理する。最後に、3. で粗鋼生産量の世界トップ3カ国（中国、インド、日本）

における低炭素化・脱炭素化に向けた動向を分析する。なお、これら3カ国は世界の粗鋼生産量の3分の2を占めるとともに、CO₂排出量の約4割を占めている。

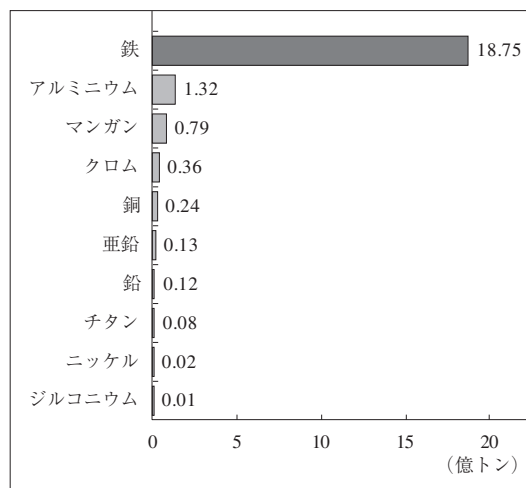
1. なぜ鉄鋼業に注目するのか

まず、鉄は様々な産業で用いられる重要な金属素材であることを改めて確認するとともに、今後も生産活動において重要な役割を担い続けることを述べる。その後、需給動向の現状と先行きを展望する。

(1) 経済成長と環境保全のジレンマ

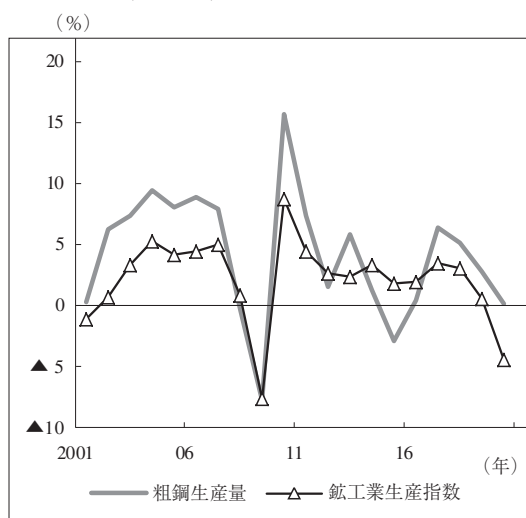
鉄鋼業はわが国の戦後復興から高度経済成長期を支えたこともあり、かつて鉄は「産業のコメ」と呼ばれた。その後の産業の高度化を受けて、現在、「産業のコメ」という表現は半導体に対して用いられるようになった。しかし、鉄は現在も生産活動にとって極めて重要な役割を果たしている。半導体の製造装置や工場、製品を運搬する輸送機械や物流インフラなど様々な分野で鉄鋼製品は利用されている。製造業や建設業では鉄以外の金属素材も利用されているが、鉄は生産・消費量において他の金属を圧倒する汎用性の高い素材である（図表1）。そのため、製造業の生産活動と密接にかかわっており、世界の鉱工業生産指数と粗鋼生産量の間には明確な相関関係が見られる（図表2）。

図表1 鉱物別生産量（2019年）



(注) 鉄は粗鋼生産量、アルミニウムはアルミナ生産量、銅、亜鉛、鉛、ニッケルは地金生産量、その他は鉱石生産量。
 (資料) World Steel Association、International Aluminium Institute、JOGMEC (石油天然ガス・金属鉱物資源機構) 「鉱物資源マテリアルフロー2020」を基に日本総合研究所作成

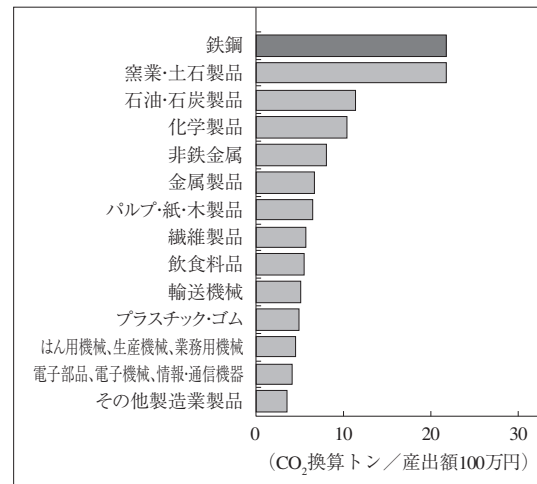
図表2 世界の鉱工業生産指数と粗鋼生産量 (前年比)



(資料) World Steel Association, CPB Netherlands Bureau for Economic Policy Analysis

今後、素材としての鉄の重要性は低下する可能性があるものの、鉄鋼製品の相対的な重要性が大きく低下するとは考えにくい(注1)。輸送機械産業や電子機器産業などでは、製品の軽量化を通じたエネルギー利用率の改善に向けて鉄の代替素材の研究開発が進められている。代替製品の利用拡大に伴い、今後、車体に占める鉄鋼製品の使用割合が低下するとの見方がある(例えば、Shashank Modi, Abhay Vadakara [2017])。しかし、①他の鉱物資源と比べた鉄鉱石の埋蔵量の豊富さ、②鉄の強度や加工性の高さ、③大量生産に伴う鉄鋼製品の価格の安さ、④鉄スクラップのリサイクル体制の確立、などを踏まえると、鉄以外の素材の導入余地は限られる。特に、経済成長を通じて貧困や飢餓といった問題を克服する必要がある新興国では、安価で耐久性の高い鉄製の建築資材が重要な役割を担い続けるだろう。

鉄鋼製品に対する需要は経済成長に伴い増加する一方、鉄鋼業は製鉄の過程で石炭製品や大量の電力を使用する環境負荷が極めて大きい産業である。わが国の産業連関表ベースの排出原単位を見ると、鉄鋼業の産出額100万円当たりのCO₂排出量は他の産業を上回っている(図表3)。また、世界のCO₂排出量を部門別にみると、鉄鋼業は製造業の排出量の3割強を占めている(図表4)。鉄鋼生産が集中する中国では、製造業のCO₂排出量に占める鉄鋼業のシェアは4割強である。また、

図表3 日本の業種別のCO₂の排出単位

(注) 産業連関表ベースの排出原単位。403部門を集約して作成。

(資料) 環境省「サプライチェーンを通じた組織の温室効果ガス排出等の算定のための排出原単位データベース(Ver.3.1)」を基に日本総合研究所作成

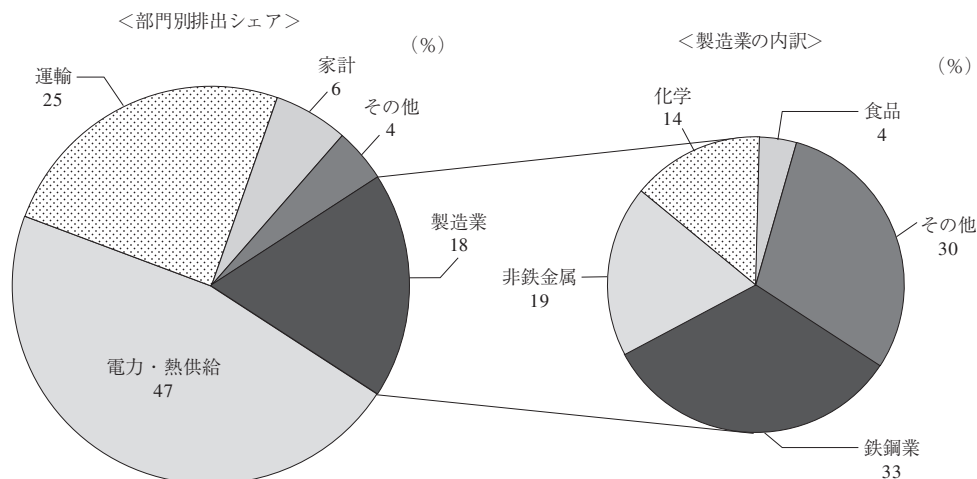
全排出量に占める鉄鋼業のシェアは1割強と、世界平均(5%)の約2倍となっている。

コロナ禍の発生以降、景気回復と環境保全の両立を目指す「グリーン・リカバリー」を追求する動きが各国に広がっているが、製鉄過程のCO₂排出量の削減はこの実現に不可欠である。そのため、鉄鋼業で脱炭素に向けた生産方式の転換が進むか否か、そして生産方式の見直しで鉄鋼製品を利用する他の産業にどのような影響をもたらすか、この問題が各国経済に与える影響は大きい。

(2) 鉄鋼製品の需給構造の現状

次に、世界の鉄鋼業の需給構造の現状を確

図表4 部門別の世界のCO₂の排出量（2018年）



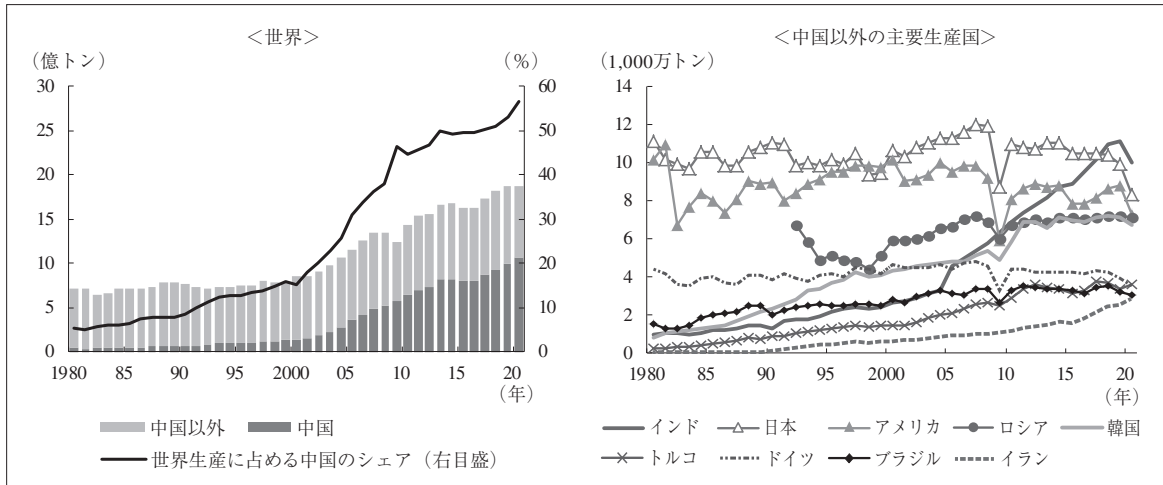
(資料) OECD iLibrary "IEA CO₂ Emissions from Fuel Combustion Statistics"

認する（注2）。2000年に約9億トンであった世界の粗鋼生産量は2020年に約19億トンに増加した（図表5）。生産増加の大半は中国によるものであり、世界の粗鋼生産量に占める中国のシェアは2000年の15%から2020年に56%に高まった。企業別の粗鋼生産量をみても、中国企業はトップ10の大半を占めており（図表6）、宝武鉄鋼集団は2020年にアルセロール・ミタルを（注3）抜き世界第1位の鉄鋼企業となった。中国と同様、経済成長に伴い鉄鋼需要の拡大が続くインドの粗鋼生産量も過去20年間で約4倍に拡大し、2018年に日本の生産量を追い抜き世界第2位の鉄鋼生産国となった。しかし、インドの生産量は依然として中国の約1割に過ぎない。

中国の粗鋼生産量の世界シェアは約6割と、GDPの世界シェア（2割弱）と比べても高い。この理由としては、まず、2000年代にグローバル化が進むなかで中国へ製造業の生産の集中が進んだことを指摘出来る。中国で生産された鉄鋼は建設、機械、自動車などを中心に大半は国内で利用されているが（図表7）、その一部は輸出を通じて中国国外でも消費されている。

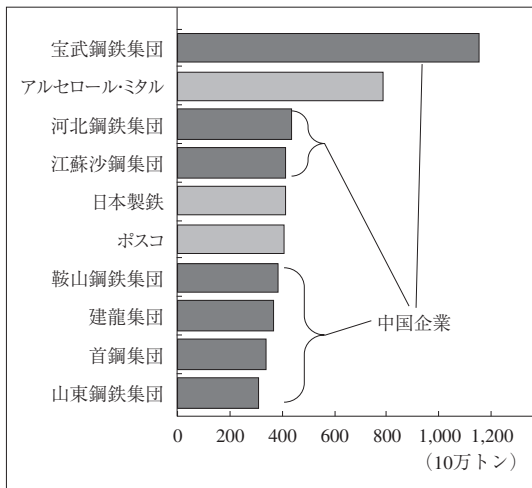
また、リーマン・ショック後の中国政府の大規模な景気対策をきっかけに鉄鋼企業が生産能力を増強させる一方、政府の補助金により採算性の低い企業の市場からの退出が進まなかったことも中国が世界で圧倒的な粗鋼生産能力を占める要因となった（注4）。

図表5 各国の粗鋼生産量



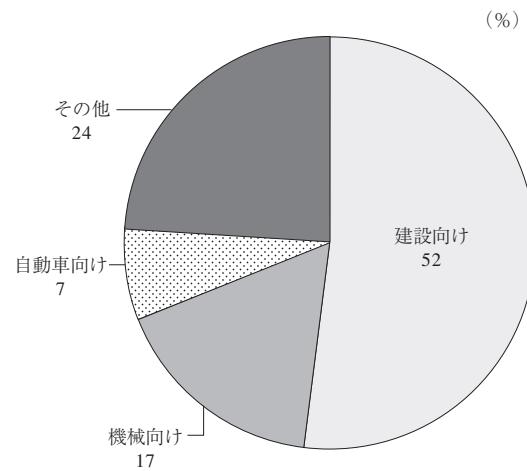
(資料) World Steel Association

図表6 粗鋼生産量トップ10企業 (2020年)



(資料) World Steel Association

図表7 中国における鋼材の使用用途(2018年)



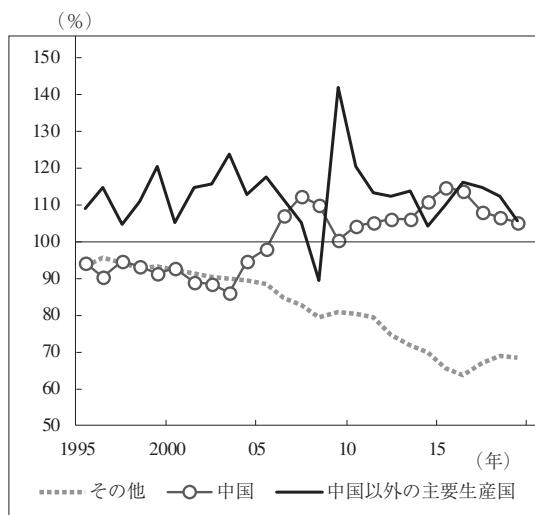
(資料) 三井住友銀行(中国)有限公司「中国鉄鋼市場の動向」を基に日本総合研究所作成

過剰生産能力問題に対し、中国政府は、①国内の鉄鋼生産能力の削減、②「一帯一路構想」に関連した沿線国のインフラ整備を通じた鉄鋼製品の海外輸出、といった2つのアプローチを通じて需給ギャップの解消を進めている。前者についてみると、2016年2月、中国政府は第13次5カ年計画（2016～2020年）の期間中に、生産能力を1億トン以上削減する方針を示した。この目標の達成に向け、同期間中に設備を新設する場合はその生産能力を上回る旧設備の廃棄を義務付けた。これにより供給能力は一定程度削減されたものの、政府統計に含まれていない生産能力（注5）の存在を踏まえると過剰生産能力問

題は依然として解消されていないことが指摘されている（例えば、川端 [2019]）。

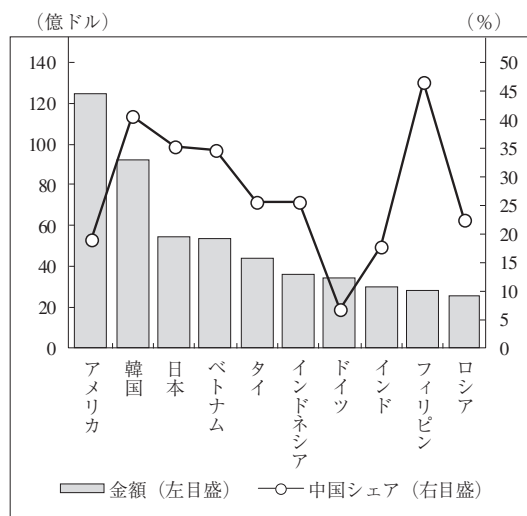
また、鉄鋼の海外輸出についてみると、中国の安価な鉄鋼製品の輸出拡大は、各国の中国への輸入依存度の上昇を引き起こした。中国の鉄鋼自給率（粗鋼生産量÷見掛消費量（注6））は110%前後で推移する一方、粗鋼生産量の拡大に伴い輸出数量は拡大しており、鉄鋼生産主要国以外の自給率は低下している（図表8）。アジア各国の自給率と中国への輸入依存度にはばらつきがあるが、アジアではフィリピンやベトナムが鉄鋼製品の輸入の3～4割を中国に依存している（注7）（図表9）。なお、中国は、韓国や

図表8 鉄鋼の自給率



(注1) 自給率は、粗鋼生産量÷見掛消費（Apparent Steel Use）で計算。
 (注2) 中国以外の主要生産国は2020年粗鋼生産トップ10に含まれる国。
 (資料) World Steel Association

図表9 鉄鋼製品（HS72～73類）の輸入額と中国シェア（2019年）



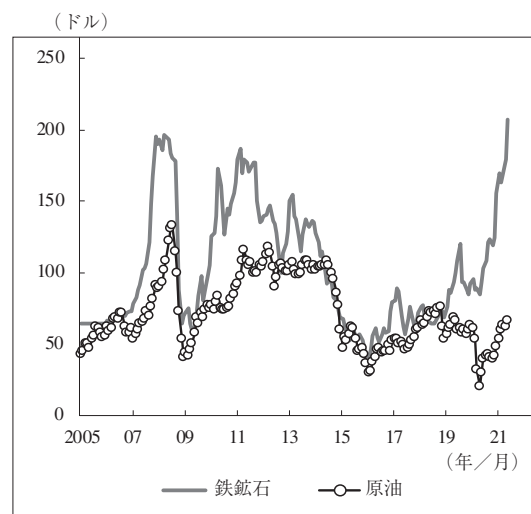
(資料) United Nations UN Comtrade

日本など、鉄鋼の国内自給率が100%を上回る国に大量の鉄鋼製品を輸出するとともに、これらの国からも鉄鋼製品を輸入している(注8)。これは、中国との間で品質や用途の異なる鉄鋼製品の分業が行われているためである(注9)。

続いて世界の鉄鋼業の需給構造を短期と中長期に分けて展望する。短期では引き続き中国の動向に大きく左右される状況が続く。中国政府は生産能力削減に向けた取り組みを強化する一方、コロナ禍に対応するための景気対策を打ち出している。それらは中国の鉄鋼需給のタイト化を通じ、2021年前半にかけて鉄鋼製品およびその原材料である鉄鉱石やスクラップの価格上昇を招いた。一次産品の価格は全般的に上昇しているが、その中でも鉄鉱石の価格上昇が著しい(図表10)。ただし、足元では、鉄鋼製品およびその原材料の価格上昇は一服しつつある。その背景には、不動産市場の過熱抑制を目的に、住宅ローン総量規制や不動産企業の資金調達厳格化といった措置が導入されたことがある。それらを受けて鉄鋼製品およびその原材料の価格上昇は一服しつつある。今後、一段の規制厳格化により不動産市場が急速に冷え込み、需給が大幅に緩むことが警戒されている(注10)。

中長期の需給を展望するうえでも、中国の動向は引き続き重要である。ただし、以下を踏まえると、世界の鉄鋼市場における中国のプレゼンスは需給両面で低下する可能性が大

図表10 原油と鉄鉱石価格



(注) 原油はWTI、ドバイ、ブレントの1バレル当たりの平均価格。鉄鉱石は中国の1ドライ・メトリック・トン・ユニット当たりのCFR価格。

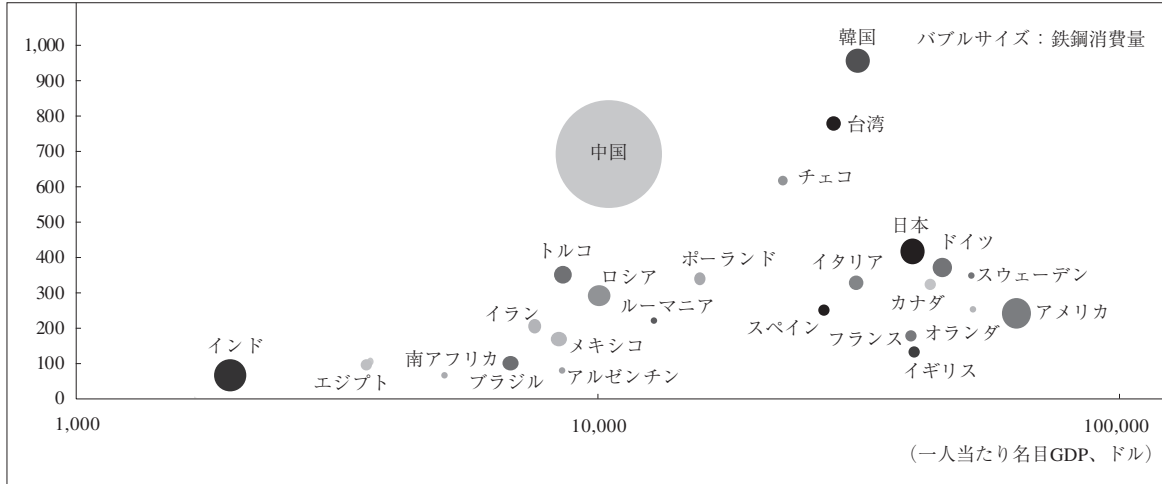
(資料) World Bank

きい。これは、需要面では東南アジア、南アジア、アフリカなどの鉄鋼需要が中国を上回るペースで拡大し続ける一方、供給面ではCO₂排出量削減に向けて中国が国内の生産能力の削減を進めると見込まれるためである。

まず、所得水準と鉄鋼消費量の関係を見ると、一人当たり名目GDPが2万ドル前後に達するまで一人当たりの鉄鋼消費量は増加し、その後は減少する傾向が看取される(図表11)。①中国の一人当たり名目GDPは既に1万ドルを超えており、かつ現在の所得水準対比でみた消費量は諸外国と比べて大きい。そのため、今後の伸びしろは限られること、②近く人口減少社会に突入すること、③労働コス

図表11 所得水準と鉄鋼消費量（2020年）

（一人当たり見掛粗鋼消費量（Apparent Steel Use）、キログラム）



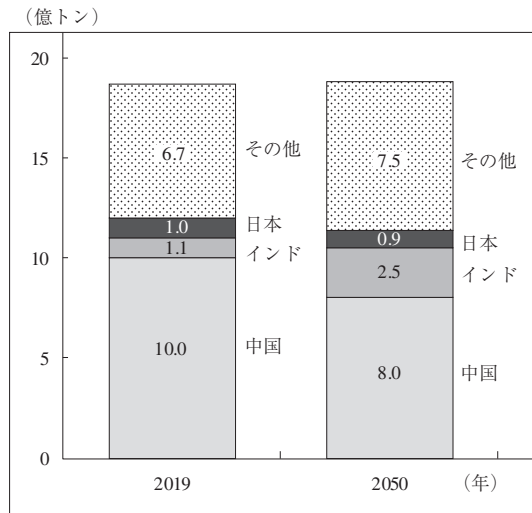
（資料） World Steel Association、IMF World Economic Outlook 2021 Aprilを基に日本総合研究所作成

トの上昇や米中対立などを背景に、中国に集中させていた生産拠点を東南・南アジアに分散する動きが続くと見込まれること、などを踏まえると、過去20年間のようなペースで鉄鋼消費量が増加するとは考えにくい（注11）。一方、他の新興国では、都市化の進展、中間所得層の拡大に伴う耐久消費財の普及率上昇などに伴い、鉄鋼需要が拡大すると見込まれる。インドやインドネシアなど人口規模が大きく、中長期的に堅調な経済成長が続くと見込まれる国のプレゼンスが次第に高まってくると考えられる。

他方、供給面で中国のプレゼンスがどの程度維持されるかは、中国の粗鋼生産能力が需要の減少に合わせてどこまで調整されるかに

依存する。近年の環境志向の強まりなどを踏まえると、CO₂排出量の削減に向けて、付加価値の高い高級鋼材以外の生産能力を大幅に削減させるような政策が採られる公算が大きい。中国鉄鋼工業協会も長年追求してきた自給自足の概念を転換し、不足分については輸入により対応する方針を打ち出している（注12）。こうした流れを踏まえ、世界的な鉄鋼分析機関WSD（World Steel Dynamics）は、中国の年間粗鋼生産量が2050年にかけて2億トン以上減少する一方、中国以外の新興国の生産量が同程度増加するため、世界の粗鋼生産量は現在と変わらず、概ね横ばいで推移するといった見方を示している（注13）（図表12）。

図表12 世界の国別粗鋼生産（2019年実績と2050年予測値）



(資料) Peter Marcus, John Villa [2021] を基に日本総合研究所作成

- (注1) 現在および将来の鉄の重要性についてはVaclav Smil [2016] を参照。
- (注2) アジアの鉄鋼生産の発展については、佐藤 [2008] を参照。
- (注3) アルセロール・ミタルは、その前身であるミタル社の創業者／現CEOがインド人であることからインドとかかわりの深い企業と認識されている。しかし、同社の事業は欧米市場が中心であり、アジア／インドの鉄鋼市場におけるプレゼンスは限られている（同社の発展の経緯については、堀 [2012] を参照）。
- (注4) 中国の鉄鋼業における過剰生産能力問題については、渡邊 [2017]、経済産業省 [2018] を参照。
- (注5) 例えば、「地条鋼」と呼ばれる、鉄スクラップを溶解し製造される品質が低い鉄鋼製品の生産は違法であり、生産統計に含まれない。中国政府は地条鋼の生産の取り締まりを進めたが、一時的な生産停止を経て復活する動きがあり、完全な淘汰は容易ではない。
- (注6) 見掛消費量=国内生産+輸入-輸出。
- (注7) アメリカが中国からの鉄鋼輸入に対してアンチ・ダンピング課税を課したことをきっかけに、行き場を失った鉄鋼の価格が値崩れを起こし東南アジアに流入したことも、東南アジアの鉄鋼の中国依存度が高まった一因である。
- (注8) なお、アメリカは世界第4位の粗鋼生産国であるが、同

国の鉄鋼の自給率は8割前後で推移しており、中国からの輸入に依存している。アメリカが鉄鋼の純輸入国である理由としては、鉄鋼業界の独占体制、短期利益志向型の経営などを理由に高炉メーカーの生産能力の拡大が遅れたことが指摘されている（加賀美 [1995]、川端 [1995] を参照）。

- (注9) 日中間の鉄鋼業の分業については箱崎 [2007] を参照。
- (注10) 2021年秋口以降、不動産大手：恒大集団の債務問題をきっかけに不動産・金融市場が急速に悪化するリスクが高まっている。
- (注11) 中国の今後10年程度の粗鋼生産量に関する予測にはばらつきがあるが、2050年頃までの長期予測の多くは減少を見込んでいる（例えば、Rethink Technology Research 2021年4月22日“Global steel demand to grow 60% through 2050”）。
- (注12) 日本貿易振興機構 ビジネス短信 2021年4月20日「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（中国）」
- (注13) なお、中国が国内の鉄鋼生産量を縮小に向けた政策を強化する場合、中国の鉄鋼メーカーは直接投資を通じた海外事業の拡大をこれまでよりも積極化すると見込まれる。そのため、輸出における中国のプレゼンスの低下は、世界の鉄鋼生産における中国のプレゼンスの低下を必ずしも意味しないと見ておくべきである。

2. 脱炭素社会への移行が迫る生産構造の変化

世界経済の動向とともに、脱炭素に向けた生産方式の見直しも鉄鋼業の需給構造に大きな影響を及ぼす。脱炭素に向けた取り組みは緒に就いたばかりであり、取り組み状況は各国でばらつきがあるが、各国が中長期で「ゼロカーボン・スチール（注14）」の生産体制の構築を目指すことは間違いない。

そこで、鉄鋼業における低炭素・脱炭素に向けた中長期の生産方式の見直しの方向性と課題を確認する。

(1) CO₂排出量の削減に向けた鉄鋼の生産方式の見直しのポイント

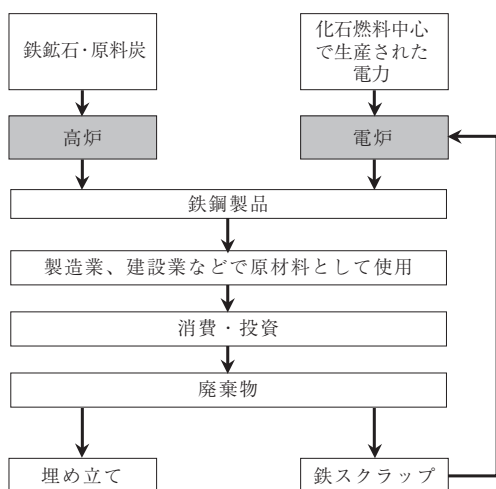
まず、現在の鉄鋼の生産方式を整理する。製鉄工程には大きく分けて2つの方式があり、現在の主流は、鉄鉱石とコークスを原材料とする高炉を用いた生産方式である(図表13)。高炉では熱延鋼板をはじめとする様々な鉄鋼製品が生産されており、それらは各産業で中間財として用いられている。高炉による生産は、原料から加工段階までを一貫して管理出来るため、自動車の車体用鋼材など、均一で高い品質を要求される製品の生産を担っている。環境面への影響についてみる

と、高炉による製鉄は大量のCO₂の排出を伴う一方、製鉄の過程で発生した熱を用いて発電を行うことで工場の電力を賄うことが出来るため、電力消費が相対的に少ないといった特徴がある。

もう一つの生産方式は鉄スクラップを原料とする電炉を用いた生産方式であり、H型鋼やL型鋼など一定の形状に成形された鉄鋼製品が主に生産されている。電炉での製鉄はコークスの投入を必要としないため、直接的なCO₂の排出量は高炉による製鉄よりも少ない。ただし、大量の電力を必要とするため、石炭や天然ガスなどにより電力が生産される場合はCO₂の間接的排出を誘発する。また、鉄スクラップに混入している不純物の問題を理由に電炉での高品質の鉄鋼製品の製造は困難であったが、不純物を除去する技術の発展により電炉で生産出来る製品の品質は向上している。この他、電炉の建設コストは高炉の10分の1程度であるため、資金力が限られるとともに生産量が少ない鉄鋼メーカーの参入が可能であるといった特徴を有する(注15)。

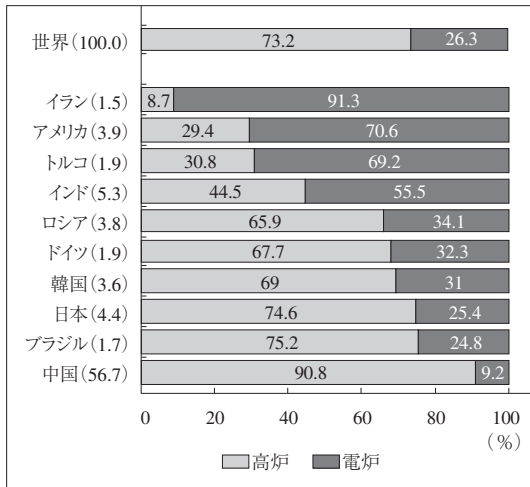
主要な鉄鋼生産国の高炉と電炉の割合は国ごとに大きなばらつきが見られ、イラン、アメリカ、トルコ、インドでは過半が電炉で生産されている(図表14)。他方、世界の約6割の生産を占める中国では約9割が高炉で生産されており、同様に粗鋼生産量が世界第3位と同6位の日本や韓国でも大半が高炉で生産されている。そのため、世界全体で見ると、

図表13 現在の鉄鋼の生産・消費プロセス



(注) 製鉄の生産・消費プロセスを大まかに把握することを目的としているため、単純化している。
(資料) 日本総合研究所

図表14 電炉と高炉の生産シェア（2020年）



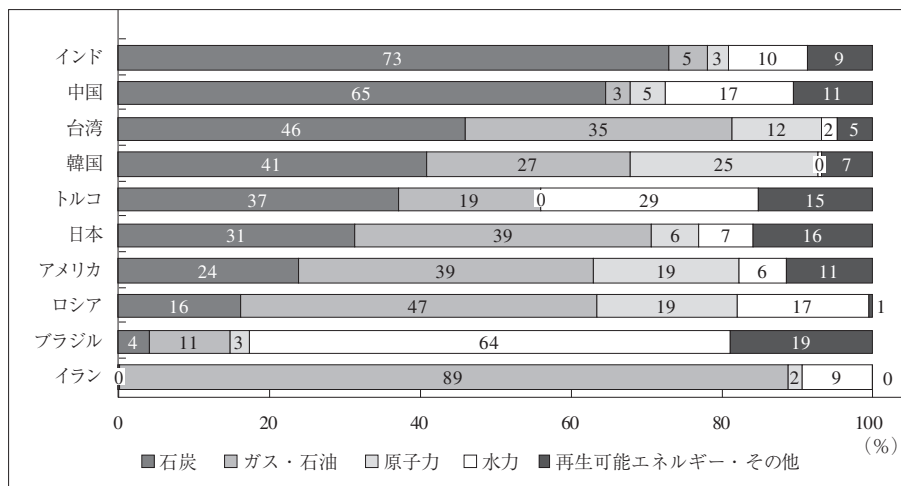
(注) 国名のカッコ内数値は世界の生産に占めるシェア。電炉・高炉以外の生産方式も存在するため、世界の電炉・高炉の生産シェアの合計は100%とまらない。
 (資料) World Steel Association

鉄鋼製品は7割強がが高炉で生産されていることになる。また、主要な鉄鋼生産国の電力の供給構造を見ると、インドや中国では電力の大半が石炭火力により発電されており、ブラジルを除くその他の国も大半を化石燃料に依存しているため（図表15）、電炉への切り替えが進んでもCO₂の排出量が減らない構造となっている。

低炭素・脱炭素に向けた生産方式の見直しのポイントとしては、以下の4点が挙げられる（注16）（図表16）。最初の2点は鉄鋼業に求められる対応であり、後の2点は鉄鋼業以外に求められる取り組みである。

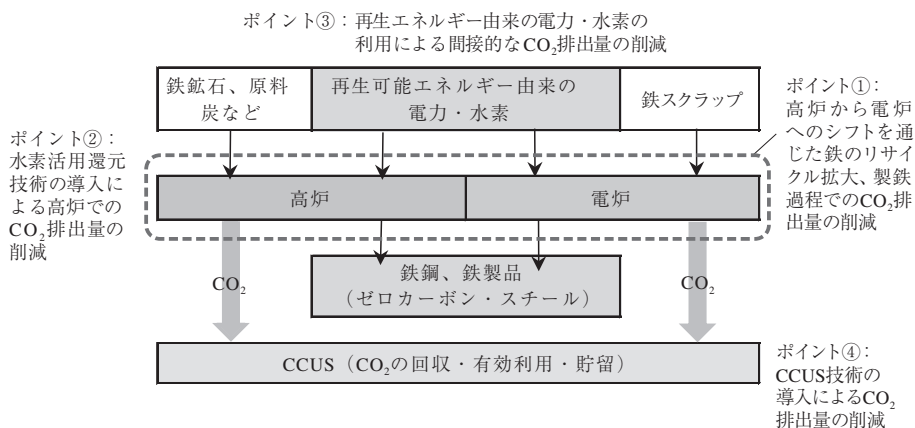
第1に、高炉から電炉へのシフトである。鉄スクラップを原材料とする電炉による製鉄

図表15 鉄鋼の主要生産国・地域の電力構造（2019年）



(資料) BP Statistical Review of World Energy 2020

図表16 ゼロカーボン・スチールの生産に向けた生産方式の見直しのポイント

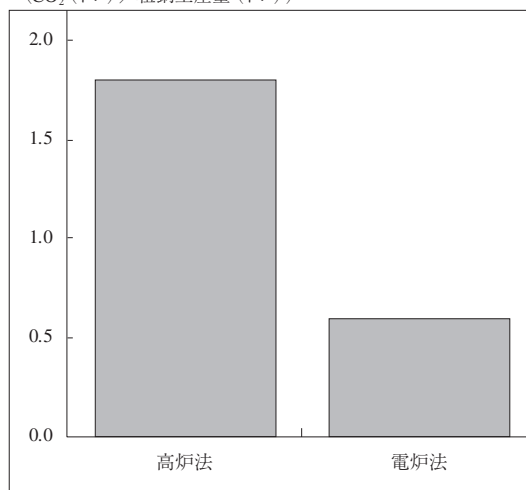


(資料) 日本総合研究所

比率を高めることで、製鉄の過程で発生するCO₂を大幅に抑制するとともに、鉄鉱石や石炭などの新たな採掘を抑制することが可能になる。既述の通り、電炉による製鉄の環境負荷は電力の生産構造にも依存する。そのため、高炉から電炉に切り替えることによるCO₂排出量の削減効果を一律に評価することは出来ないが、わが国の場合は電炉における鉄鋼1単位当たりのCO₂排出量は高炉における排出量の約3分の1になるとされる(図表17)。

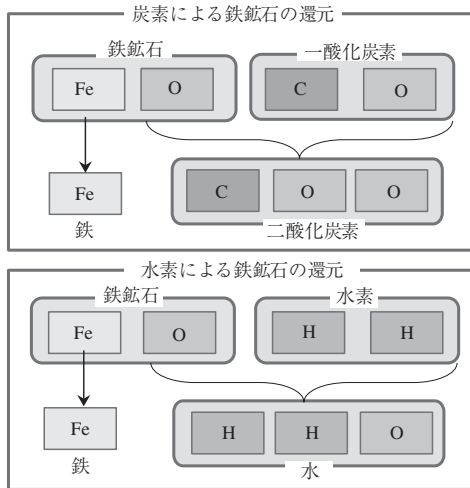
第2に、高炉における水素を活用した生産方式の導入である。現在の生産方式では、コークスをガス化することで発生した一酸化炭素に鉄鉱石に含まれる酸素を結合させることで鉄鉱石から鉄を生成しているため(図表18)、大量のCO₂排出を伴う。他方、新たな生産方

図表17 高炉法と電炉法のCO₂排出原単位 (CO₂(トン)/粗鋼生産量(トン))



(資料) 環境省「長期大幅削減に向けた基本的考え方参考資料集」を基に日本総合研究所作成

図表18 鉄鉱石の還元方式

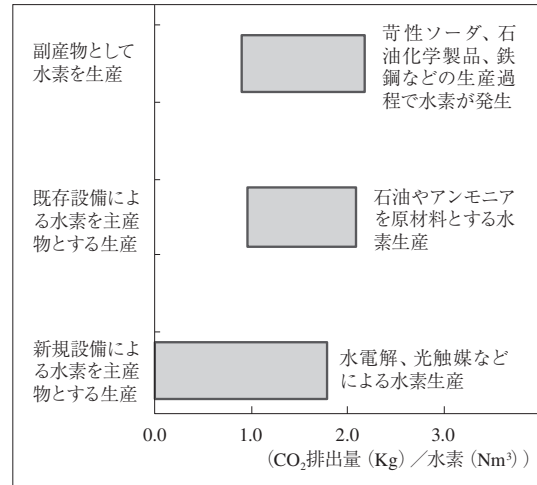


(資料) 日本総合研究所

式は、鉄鉱石に含まれる酸素を水素と結合させることで、鉄を生産することを目指している。同方式で鉄鉱石を還元する場合、発生するのは水のみとなる。このほか、高炉から発生するCO₂と水素を合成してメタンに変換し、それを還元材として繰り返し使用する「カーボンリサイクル高炉」技術や、粒状にした鉄鉱石を天然ガスで還元する「直接還元法」など(注17)、従来の方式よりもCO₂排出量が少ない生産技術の研究が進められている。IEA (International Energy Association、国際エネルギー機関)は、新たな技術による製鉄は2050年にかけて生産量の約5割を占めるようになる予測している (IEA [2020b])。

第3に、再生可能エネルギー由来の電力・

図表19 水素の製造法別にみたCO₂排出量



(注) Nm³は、標準状態(大気圧、0℃)における体積量。
 (資料) 経済産業省 水素・燃料電池戦略協議会ワーキンググループ(第5回)配布資料 資料2「水素の製造、輸送・貯蔵について」を基に日本総合研究所作成

水素の利用拡大である。電炉による生産拡大や高炉による水素活用方式の導入を進めるとともに、再生可能エネルギーを基に製造される電力や水素を用いることで、間接的なCO₂の排出を抑制することが出来る。電力については各国で再生可能エネルギーの拡大に向けた政策が展開されており、太陽光、風力、地熱などを利用した発電システムの導入が進められている。水素については、現在は工業製品の副産物として生産されるものが中心となっているが、再生可能エネルギー由来の電力を用いた水分解や、光触媒と太陽光による水分解など、CO₂排出量の少ない生産技術の開発が進められている(図表19)。水素は製鉄だけでなく、発電や運輸部門のエネルギー

としても利用出来、かつ原材料である水や太陽光などの入手コストが安価であるため、各国がその実用化に高い関心を示している。また、水素の液化および液化水素の輸送には、LNGの生産・運搬などにかかわる既存のインフラを活用出来ることもあり、豪州やロシアといった天然ガスの輸出国も水素関連技術の開発を進めている。

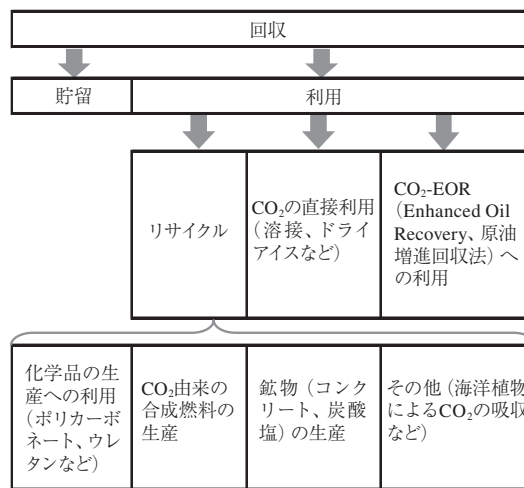
第4に、CCS/CCU/CCUS (Carbon Capture Utilization and Storage、CO₂回収・有効利用・貯留) 技術の導入である(注18)。電炉へのシフトや高炉での水素活用還元技術の活用を通じたCO₂排出量の削減には限界があり、今後も製鉄過程でCO₂が一定程度発生する。そこで、CCUSを導入し、回収したCO₂を化学製品、燃料、コンクリートなどの生産に利用するほか、利用が出来なかった分を地中に貯蔵することで実質的な排出量をゼロにすることを目指している(図表20)。

(2) 低炭素・脱炭素を進めるうえでの課題

各国は上記の取り組みを通じて鉄鋼の生産に伴うCO₂排出量の削減を進めると見込まれるが、その実現には、様々な課題が立ちほだかっている(図表21)。

まず、技術的な課題についてみると、水素活用還元技術を用いた製鉄、効率的な水素生産・供給、CCUSの導入に必要な技術は開発の途上にあり、まだ商用化の目途は立っていない。水素活用還元技術の活用については、

図表20 CCUSによるCO₂の回収後の流れ



(資料) 各種資料を基に日本総合研究所作成

高炉内の温度が低下するといった問題が導入の制約要因となっており、その課題の克服に向けた研究が進められている。また、水素についても、大規模な生産・供給体制が確立されておらず、他のエネルギー源と比べたコストの高さが当面利用拡大の制約になり続けるだろう。CCUSについては、空隙の多い帯水層にCO₂を貯蔵する技術の開発や適地の特定をはじめ、様々な導入ハードルがある。これまで実施されてきたCCUSのプロジェクトの大半は、「CO₂-EOR (Enhanced Oil Recovery)」という、地下の油層にCO₂を注入することで原油採掘の効率性を高めるものであるが、同方式により注入されたCO₂は大気中に再放出されるため、温暖化の抑制につながらない。

図表21 鉄鋼業の低炭素化・脱炭素化を進めるうえでの課題

| | 項目 | 具体的な制約 |
|-----------|-------------------------|----------------------------------|
| 技術的課題 | 高炉における水素活用還元技術の導入 | 高炉内の温度を高温に保つことが困難 |
| | 水素の生産・供給体制の整備 | 大規模生産・供給体制は開発途上 |
| | CCUSの導入 | 帯水層にCO ₂ を貯留する技術は開発途上 |
| | 再生可能エネルギーによる発電 | 発電量が気象条件に依存 供給安定化技術は開発途上 |
| 資金制約 | 脱炭素に必要な研究開発資金の確保 | 鉄鋼メーカーの研究開発費の不足 |
| | 脱炭素に必要なインフラ整備にかかわる資金の確保 | 財政赤字を背景とする政府の資金不足 |
| マクロ経済への影響 | 鉄鋼業へのマイナス影響 | 鉄鋼製品の生産コストの大幅な上昇に伴う財務悪化 |
| | 製造業・建設業へのマイナス影響 | 鉄鋼製品の値上がりを受けた収益悪化、輸出競争力低下 |

(資料) 日本総合研究所

CO₂を長期にわたって地層に貯蔵する技術は開発の途上にある。

すでに商用化が進められている分野の取り組みにも技術的な課題が残されている。例えば、各国で導入が進められている太陽光や風力などの再生可能エネルギーに基づく電力生産は、発電量が気象条件に左右されるといった問題がある。電力供給の安定化に向けた蓄電設備などは電力供給のコスト増加につながり、VPP（Virtual Power Plant）やP2P電力取引といった、需給安定に向けたソフトインフラも開発途上である（注19）。

さらに、技術的な課題の克服に必要な研究開発や脱炭素に関連したインフラ整備には巨額の資金が必要となるため、資金面での制約に直面する可能性がある。例えば、日本製鉄は脱炭素に必要な研究開発に最低5,000億円、

設備の導入には4～5兆円規模の費用が必要になると指摘しているが（日本製鉄 [2021]）、その費用をどのように調達するかは目途は立っていない。各国が研究開発を加速させるには、公的支援の拡充が不可欠であるが、コロナ禍の発生を受けて財政赤字が深刻化した国や、少子高齢化の進展に伴い社会保障関連支出の拡大が続くと見込まれる国では、脱炭素社会への移行に必要な資金を十分にねん出出来ない可能性がある。

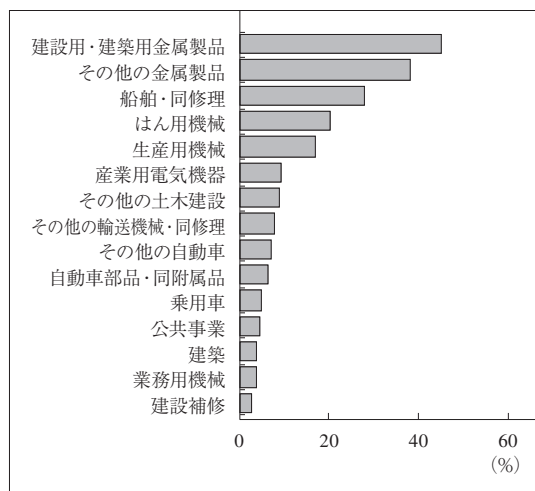
加えて、新たな生産方式への移行は、開発コストが鉄鋼製品に転嫁されることで、製造業の生産コストを押し上げ、マクロ経済にマイナス圧力をもたらしかねないことにも留意する必要がある。今後、鉄鋼製品の価格がどの程度上昇するかは、①生産方式の見直しがどこまで進むか、②脱炭素に必要な研究開発

や設備の導入にかかる費用をどの程度政府が負担するか、③従来の方式で生産される鉄鋼製品に対して課税を含めどのような利用規制を課すのか（注20）、など複数の要因に依存する（注21）。そのため、定量的な分析を行うことは困難であるが、欧州鉄鋼連盟は鉄鋼の生産コストが現状から35～100%増加する可能性を指摘している（注22）（EUROFER [2019]）。生産コストの上昇は、鉄鋼業はもとより、一般機械、輸送機械、電子機器、建設といった中間財に占める鉄鋼製品の投入比率の高い業種などを中心に広範なコスト増加圧力をもたらす（図表22）、様々な経路から

経済成長を下押ししかねない。

新たな生産方式への移行は中長期的な経済成長の持続性を高めるという点で不可欠であるものの、移行期の経済成長へのマイナス影響にも十分に配慮する必要がある、それが早期の導入の制約となる。地球温暖化は生態系の破壊や異常気象の発生を通じて農林水産業に大きなマイナス影響をもたらすことを踏まえると、カーボンニュートラルは超長期的に同産業への依存度の高い新興国にプラスの影響を与えると見込まれる。しかし、CO₂の排出抑制に向けて鉄鋼製品の生産・使用規制が厳格化され、それが製造業の停滞、さらに経済成長の下押し要因になれば、貧困層の生活水準が悪化するリスクがある。

図表22 日本の中間投入に占める鉄鋼製品のシェア（2015年）



（注）107部門の生産者価格評価の取引基本表における中間投入合計に占める鉄鉄・粗鋼・鋼材・铸造製品（鉄）・その他の鉄鋼製品の投入額のシェア。

（資料）総務省「2015年産業連関表」

このような技術的・資金的な制約やマクロ経済への影響を踏まえると、鉄鋼業の脱炭素化は段階的にしか進まず、しかもそのペースは主要鉄鋼メーカーの財務状況や財政状況を含むマクロ経済状況に左右されと考えられる。短期的には、既に技術が確立している電炉における生産比率を引き上げるとともに、再生可能エネルギー由来の電力比率を高めることを通じた低炭素化が、中長期的には水素活用還元技術、水素生産・供給体制、CCUSの導入が目指されることになると見込まれる。

なお、鉄が金属素材の中で中心的な役割を担い続ける状況に大きな変化は起こらないものの、生産方式の見直しに伴う鉄鋼製品の価

格上昇は、代替製品の開発・利用などを加速させるきっかけになるだろう。既に、アルミニウム、マグネシウム、チタン、FRP (Fiber Reinforced Plastics、繊維強化プラスチック) などは様々な分野で鉄の代替品として利用されているが(図表23)、製品の強度を保ちつつ複数の素材を組み合わせる技術の開発が進むとともに鉄との価格差が縮まれば、製品の軽量化と環境負荷の軽減に向けてこれらの素材を積極的に活用する動きが広がっていくと予想される(注23)。

(注14) 生産過程でCO₂を発生させない鉄鋼製品について、「CO₂ Free Steel」、「Carbon Free Steel」、「Net Zero Steel」、「Green Steel」などの表現が用いられることがあるが、本稿は日本鉄鋼連盟が使用する「ゼロカーボンスチール」を用いる。

- (注15) 製鉄所の建設コストはその規模により大きなばらつきがあるが、高炉では5,000億~1兆円、電炉では数百億~1,000億円程度と概算される(2020年4月2日 日経クロステック「巨額の赤字で高炉を休止。日本の鉄鋼メーカーに何が起きているのか」を参照)。
- (注16) 今後の、鉄鋼業界のCO₂排出量削減に向けた生産方式の見直しの方向性については有山[2019]、経済産業省[2021]、デロイトトーマツコンサルティング[2021]、EUROFER[2013]、IEA[2020]、World Steel Association[2020]を参照した。
- (注17) 直接還元法は、天然ガスを大量に必要とするとともに、高品位の鉄鉱石を原材料として使用する必要がある。そのため、安価な鉄鋼製品の大量生産には適さないといった課題がある。
- (注18) CO₂の回収貯留技術と回収有効利用技術に分けて言及するときには「CCS」と「CCU」、両者をまとめて表現する場合には「CCUS」が使われる。
- (注19) 再生可能エネルギーの導入にかかわる課題、VPPやP2P電力取引については熊谷[2021]を参照。
- (注20) 2021年6月、アメリカとEUは温暖化対策が不十分な国からの輸入に対して「国境炭素税」を適用することについて協議していくことで合意した。今後、こうした動きが世界全体に広がっていく可能性がある。
- (注21) こうした生産方式の見直しに伴う影響に加え、中国で過剰生産能力や、脱中国に向けた輸入先の多様な

図表23 鉄の代替製品の使用・開発動向

| 使用分野 | | 素材(◎：実用化、○：開発、△：基礎研究) | | | | | | | | | |
|--------|------|-----------------------|--------|--------|-----|---|------|------|------------|-----------------|----|
| | | 鉄鋼 | アルミニウム | マグネシウム | チタン | 銅 | シリコン | 希少元素 | ファインセラミックス | FRP(繊維強化プラスチック) | 樹脂 |
| 自動車 | 車体 | ◎ | ○ | ○ | | | | | | ◎ | |
| | モーター | ◎ | | | | ◎ | | ◎ | | | |
| | 部品 | ◎ | ◎ | ◎ | | ◎ | | | ◎ | ◎ | ◎ |
| 鉄道 | 構体 | ◎ | ◎ | ○ | | | | | | | |
| | エンジン | ◎ | ◎ | △ | ○ | | | | △ | △ | |
| 発電分野 | タービン | ◎ | | | ◎ | | | | ○ | △ | |
| | モーター | ◎ | | | | ◎ | | ◎ | | | |
| 燃料電池 | | ◎ | △ | △ | ◎ | ◎ | | ◎ | ○ | | |
| 社会インフラ | ビル | ◎ | ○ | | ○ | | | | | | |
| | 橋梁 | ◎ | ○ | | | | | | | ◎ | |
| 住宅用資材 | | ◎ | ◎ | | ◎ | ◎ | | | | | ◎ |
| 情報通信機器 | | ◎ | ◎ | ◎ | | | ◎ | | ◎ | ◎ | ◎ |
| 医療分野 | | ◎ | | ○ | ◎ | | | | ○ | ◎ | ◎ |

(資料) 経済産業省「金属素材産業の現状と課題への対応」を基に日本総合研究所作成

- ども各国の鉄鋼製品の価格に対して上昇圧力をもたらすと考えられる。
- (注22) 日本製鉄も生産コストが従来の倍以上になる可能性を指摘している。
- (注23) 鉄の代替素材の開発などについては、経済産業省[2015]を参照。

その次に長期的に中国に代わる鉄鋼需要のけん引役となるポテンシャルを有するインド、そして、最後にわが国の動向を分析する。

(1) 中国：環境志向に加え豪中対立も脱炭素に向けた取り組みを促進

中国は2060年にカーボンニュートラルを達成する目標を打ち出しており、その実現に向けて鉄鋼業の過剰生産能力の解消と生産方式の見直しを進めている（注24）（図表24）。

政府は環境改善に向けて、全生産能力の80%に相当する生産設備について、2025年までにCO₂排出量の削減につながる設備更新を完了することを目指している。また、過剰生

3. 主要国の鉄鋼生産のCO₂排出量削減に向けた動き

各国の鉄鋼業を取り巻く環境や今後のエネルギー計画にはばらつきがある。そこで、世界の粗鋼生産量の約7割を占めるトップ3カ国（中国、インド、日本）の動向をみる。はじめに、世界の鉄鋼生産の約6割を占める中国の低炭素・脱炭素に向けた動向をみる。

図表24 中国の鉄鋼のCO₂排出量削減に関連する動き

| | | 政策の方向性・目標 | 左記に関連した企業の動きなど |
|------------|--------------|---|---|
| 鉄鋼関連政策 | 高炉・電炉の割合について | 電炉による粗鋼生産比率を2025年までに2割に引き上げることを計画（2019年 工業情報化省、「電炉製鋼発展の指導意見」） | 宝武鋼鉄集団と河北鋼鉄集団、電炉による生産引き上げを表明 |
| | 高炉での生産方式の見直し | 政府、高炉でのCO ₂ 排出量削減につながる技術開発を鉄鋼メーカーに指示 | 河北鋼鉄集団、年間生産量120万トンの水素活用還元製鉄プロジェクトを実施 |
| | 過剰生産抑制関連 | 新規設備の建設に際し、既存設備の廃棄を義務付ける「鉄鋼業生産能力置換実施弁法」を改定（2021年6月施行） | 鉄鋼企業237社が炭素排出量の大幅な削減を目的とした粗鋼生産設備の改造を完了または実施（中国鉄鋼工業協会発表） |
| | 設備の近代化 | 2025年までに全生産能力の80%以上の設備でCO ₂ 排出量の削減に向けた改造を完了する | |
| エネルギー／電力政策 | | 非化石燃料の1次エネルギーに占める割合を2020年に15%、2050年に50%以上に引き上げる（2017年「エネルギー生産・消費革命戦略」） | 2020年の総発電量に占める再生可能エネルギー由来の電力比率は11.1%と2010年の1.8%から上昇 |
| 水素関連政策 | | 水素・燃料電池産業を戦略的振興産業に位置づけ（「中国製造2025」、第13次・第14次5カ年計画など） | 宝武鋼鉄集団、実証用水素燃料充填ステーションの建設を計画 |
| | | 2050年までに全エネルギー消費の1割を水素が占め、平均生産コストを10元/kgに引き下げる（2019年「中国水素エネルギー燃料電池産業白書」） | 国有企業の3分の1以上が水素エネルギー関係の事業計画を策定（中国国务院 国有資産監督管理委員会の発表） |
| CCUS関連政策 | | 2050年頃に20～30ドル/トンのコストで年間24億トン削減出来るCCUSの導入を提案（ADBが2015年に作成したロードマップ、その後科学技術省・社会開発科学技術局とアジェンダ21管理センターが共同で新たなロードマップを策定） | 2021年7月、シノベック、中国初の大規模CCUSプロジェクトを開始したと発表 |

（資料）NEDO [2020a] [2020b]、各種報道などを基に日本総合研究所作成

産能力の解消を促進するため、新規設備の建設時にその生産量を上回る生産能力を削減することを義務付ける「鉄鋼業生産能力置換実施法」を2021年に厳格化した。

このような取り組みに加えて、生産構造の見直しも進めている。高炉・電炉の割合については、政府は粗鋼生産に占める電炉の比率を現在の約1割から2025年までに2割に引き上げる方針を示している。これを受けて宝武鋼鉄集団（2020年の世界粗鋼生産量第1位）や河北鉄鋼集団（同第3位）は電炉での生産拡大に向けて、新規の電炉建設計画を進めている。

また、高炉での生産方式の見直しに向けた動きも出始めている。中国大手鉄鋼メーカーは、高炉におけるCO₂排出量の削減に向けて、これまで「酸素高炉」という技術の開発を進めてきたが（注25）、水素活用還元技術を含む新たな生産方式の開発も進めている。これまでの水素を活用した製鉄に関する特許出願件数に基づけば、宝武鋼鉄集団、鞍山鋼鉄集団、甘肅酒鋼集団などが特に積極的に技術開発を進めている模様である（注26）。

水素の生産・供給についても、長期の発展計画に具体化の動きが見られる。水素はこれまで産業高度化政策「中国製造2025」や5カ年計画で戦略的振興産業に位置づけられたものの、具体的な発展計画は示されなかった。こうしたなか、2019年、中国政府が指導する水素エネルギー・燃料電池産業戦略創新連盟は、

2050年までに全エネルギーの1割を水素で賄うとともに、生産コストを10元/kgにするといった目標を含む、「中国水素エネルギー燃料電池産業白書」を発表した（注27）。また、2021年7月、政府は国有企業の3分の1以上が水素エネルギー関連の事業計画を策定していると発表した。

中国は水素とともに再生可能エネルギーや原子力を活用することで、1次エネルギーに占める化石燃料の割合を2050年に5割以下に引き下げることを目指している。発電源に占める再生可能エネルギーのシェアは2020年に約1割と、2010年のほぼゼロ%から大きく上昇した。ただし、再生可能エネルギーの導入促進の一役を担っていたFIT（Feed in Tariff、固定価格買取制度）を段階的に廃止する一方、原子力による発電シェアを当面現状と同程度にとどめる方針を掲げていることを踏まえると、政府が目指すペースで化石燃料への依存度を低下させることは容易ではない。

他の分野と比べると動きは遅いが、CCUSの導入に向けた政策も具体化しつつある。2015年、中国は2050年までにCCUSにより24億トン（現在の4分の1に相当する排出量）を削減することを目指すロードマップをADBと共同で作成していたが、その後、科学技術省・社会開発科学技術局とアジェンダ21管理センター（政府の環境政策にかかわる専門家のワーキンググループ）が共同で新たなロードマップを策定した。2021年7月に

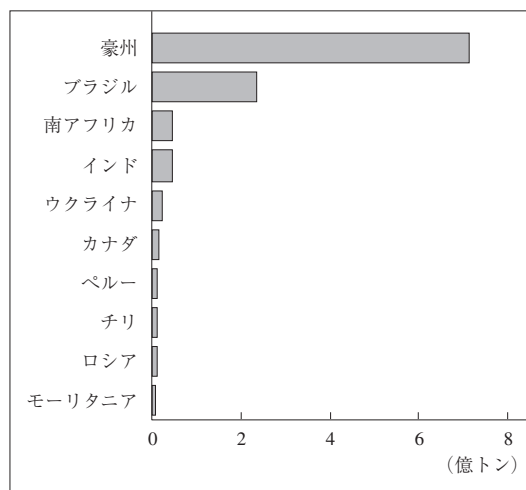
シノペック（中国石油化工集団）が中国初の
大規模CCUSの取り組みを発表するなど、具
体的な動きも出始めている。

このように中国は鉄鋼業の低炭素・脱炭素
化に必要な取り組みを様々な分野で進めてい
るが、鉄鉱石や石炭の主要調達先である豪州
との政治対立も、中国の鉄鋼業の生産方式の
見直しペースを加速させる要因となるだろ
う。

2020年4月以降、豪中の政治関係は急速に
悪化しており、それは経済面にも波及してい
る（豪中対立の現状については補論を参照）。
これまでのところ、豪中双方にとって甚大な
影響を及ぼす鉄鉱石の取引に対する規制は導
入されていない（注28）。一連の豪中対立が
鉄鉱石に飛び火する可能性は極めて低いと見
込まれるが、その場合のマイナス影響は非常
に大きい（注29）。中国は鉄鉱石輸入の約6
割を豪州に依存しており（図表25）、これは
豪州の鉄鉱石輸出の約8割に相当する。その
ため、豪中間の鉄鉱石の取引に支障が生じれ
ば、中国の生産活動の停滞は避けられないだ
ろう。そのため、鉄鉱石を必要としない電炉
ルートでの鉄鋼生産の拡大、高炉における石
炭製品を必要としない製鉄方式の導入は、豪
州への輸入依存の引き下げを目指す中国に
とって極めて重要である（注30）。

なお、こうした生産方式の変化を背景に、
今後、鉄スクラップへの需要が大幅に増加す
ると見込まれる。今後、中国国内の建築物、

図表25 中国の鉄鉱石（HS2601類）の国別輸
入（2020年）



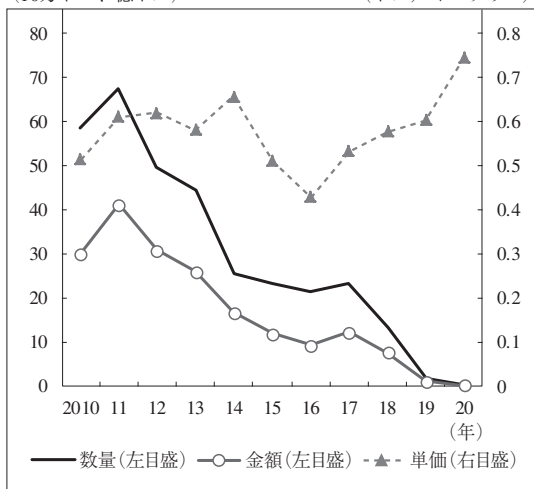
（資料）United Nations

産業用機械、自動車などが使用寿命を迎える
ことで、国内で調達出来る鉄スクラップの量
は増加し続ける一方、輸入も拡大すると予想
される（注31）。中国は不適切な廃棄処理に
よる環境への悪影響を避けるため2010年代に
鉄スクラップの輸入規制を段階的に厳格化し、
輸入量は大幅に減少したが（図表26）、
2021年には一転して輸入を解禁する方針を示
した。鉄スクラップの需要増加は価格を押し
上げる方向に作用すると見込まれる（注32）。

(2) インド：革新的技術は輸入で対応

次に、2018年に粗鋼生産量でわが国を抜き、
今後中長期的に世界の鉄鋼需要のけん引役
になっていくと見込まれるインドの動向を見

図表26 中国の鉄スクラップ(HS7204類)の輸入
(10万トン、億ドル) (ドル/キログラム)



(資料) United Nations

る(注33)(図表27)。

インドは、パリ協定に基づいて国連気候変動枠組条約に提出したNDC (Nationally Determined Contribution、自国が決定する貢献度)において、GDP原単位の温室効果ガスの排出量を2030年にかけて2005年対比33～35%削減する方針を示している。また、各国が環境保全への取り組みを加速させるなか、インドでも排出量の削減目標を引き上げる動きが出ている(注34)。今後、2050～2060年前後を達成時期としてカーボンニュートラル目標が示され、その実現に向けて関連政策が

図表27 インドの鉄鋼のCO₂排出量削減に関連する動き

| | | 政策の方向性・目標 | 左記に関連した企業の動きなど |
|------------|--|--|---|
| 鉄鋼関連政策 | 生産能力増強 | 2030年度までに粗鋼生産能力を現在の約1億トン/年から3億トン/年に拡大する (National Steel Policy 2017) | タタ・スチール、JSWスチール、SAIL (Steel Authority of India Limited、インド鉄鋼公社)、粗鋼生産能力の増強を計画 (各社IR資料) |
| | 高炉・電炉の割合について 環境改善に向けた取り組み | 高炉生産比率を60～65%に引き上げ、電炉生産比率を35～40%に引き下げる (National Steel Policy 2017) | 2016年4月、SAIL、製鉄所内のエネルギー効率の向上に向けて日本のNEDOと「製鉄所向けエネルギーセンターの最適制御技術実証事業」を開始 タタ・スチール、CO ₂ 排出量の削減に向けて、水素を活用した新たな生産方式を欧州の生産拠点で導入することを計画 |
| エネルギー/電力政策 | 再生可能エネルギーの導入を通じて石炭火力発電の比率を2016年度の59%から2026年度に39%に引き下げる (*設備容量ベース) | 2020年の総発電量に占める再生可能エネルギー由来の電力比率は9.6%と2010年の3.6%から上昇 | |
| 水素関連政策 | 独立100周年の2047年までに再生可能エネルギーや新エネルギーの利用によりエネルギーにおける自立を達成する方針を発表。その実現に向けた「国家水素ミッション」を発表 (2021年の独立記念日の首相演説) | 2021年8月、インドの再生可能エネルギー発電会社ACME、グリーン水素・アンモニアを一貫製造出来る工場を近く稼働すると発表 2021年7月、インド石油公社、グリーン水素製造プラントを建設する方針を発表 2021年9月、ライアンス、今後3年間で7,500億ルピーを投資して水素を含む再生可能エネルギー事業を拡大する方針を発表 | |
| CCUS関連政策 | 国内のCCUSに関する包括的な戦略などは存在せず。2015年のCOP21で立ち上げられたクリーン・エネルギー分野の研究開発投資を促進する「ミッション・イノベーション」への参加を通じてCCUS関連の研究開発を進める | 2021年2月、インド石油公社、ノルウェーのエネルギー企業と水素やCCUS関連の研究開発拠点の整備に向けて趣意書を締結 | |

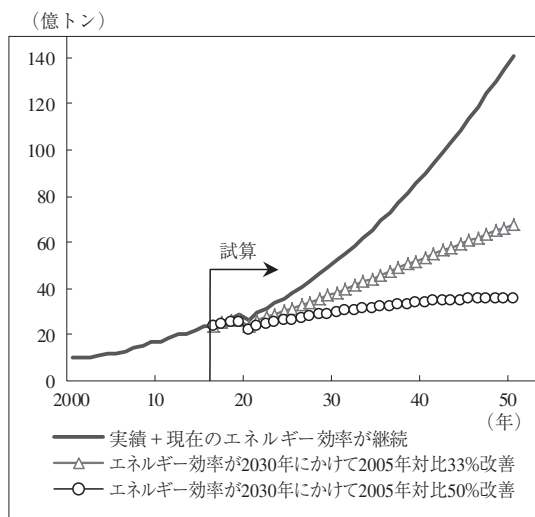
(資料) Ministry of Steel [2017]、Tata Steel “Investor Day July 2021”、JSW Steel “Corporate Presentation July 201”、SAIL “Results Presentation for Q1 FY2021-22”、各種報道を基に日本総合研究所作成

大幅に見直される可能性がある。ただし、経済成長に伴う排出量の増加や脱炭素に必要な技術革新や関連インフラの整備に必要な資金不足などを踏まえると、インドの脱炭素は中国や日本よりもハードルが高い。現在の目標を大幅に上回るペースでエネルギー効率が改善しても、CO₂排出量は2050年にかけて増加し続けると見込まれる（図表28）。

2017年に公表されたNSP（National Steel Policy、国家鉄鋼政策）も、鉄鋼業のCO₂排出量の削減が容易には進まないことを示唆している。NSPは、建設や輸送機械関連を中心に鉄鋼需要が2030年度にかけて2015年度の約

3倍に拡大すると予測しており（図表29）、それに対応するために国内の粗鋼生産能力を2030年度にかけて現在の1億トン弱から年間3億トンに拡大する方針を示している（注35）。この政策に対応するかたちで、タタ・スチール、JSWスチール、SAIL（Steel Authority of India Limited、インド鉄鋼公社）といった主要な鉄鋼メーカーは、生産能力の増強を進める方針を打ち出している。また、高級鋼材の国内生産比率の上昇に向けて、2030年までに高炉生産比率を現行の約5割から60～65%に引き上げることも計画しており、生産規模の拡大と高炉比率の引き上げの

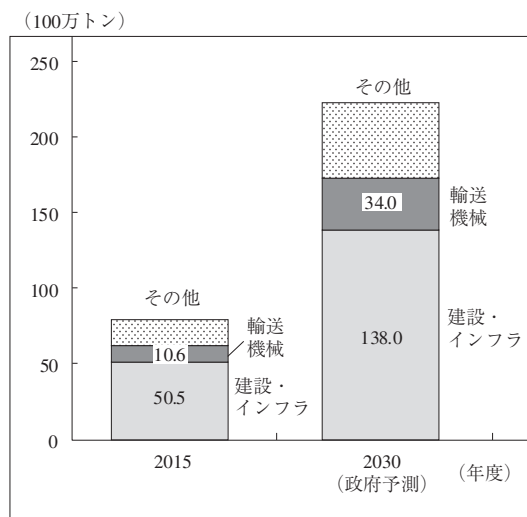
図表28 インドのCO₂排出量



（注）実質GDPの先行きは2026年度まではIMF予測を参照、その後は2050年にかけて成長率が緩やかに4%台前半に鈍化すると想定。エネルギー効率が改善するケースでは、2030年以降も2005～2030年の期間平均と同ペースでGDP原単位の排出量が削減し続けると想定。

（資料）World Bank、IMFを基に日本総合研究所作成

図表29 インドの鉄鋼消費



（資料）Ministry of Steel [2017] を基に日本総合研究所作成

2つがCO₂排出量の増加に作用する。

CO₂排出量の削減に向けては、製鉄所の近代化などを通じたエネルギー利用効率の改善、再生可能エネルギーによる発電の拡充など、既に商用化されている技術の導入による対応が中心となっている。電力政策では、現状約6割となっている石炭火力発電への依存度を2020年代半ばに約4割に引き下げるべく、再生可能エネルギーの導入が進められている。発電に占める再生可能エネルギーの割合は徐々に高まっているものの、過去10年間の上昇ペースを踏まえると、同目標の達成はほぼ不可能である（注36）。

革新的な技術の導入に向けた動きは分野により濃淡が見られる。足元で政府が注力しているのは水素関連政策である。2021年8月、モディ首相が独立記念日の演説において、独立100周年の2047年までのエネルギー自立に向けてNHM（National Hydrogen Mission、国家水素ミッション）を発表し（注37）、これを受けて水素生産を拡大しようとする機運が高まっている。地場の再生可能エネルギー発電会社ACMEは、再生可能エネルギー由来の水素製造工場を2021年中に稼働する方針を示している。また、インド石油公社やリライアンス・グループといった大企業グループも水素生産を開始する方針を打ち出した。

他方、水素活用還元方式による製鉄やCCUSなど、革新的な技術の導入にかかわる具体的な動きは限られており、これらについ

ては海外から技術を輸入することで対応しようとしているものと判断される。例えば、タタ・スチールは、環境関連規制でアジアに先行する欧州の生産拠点で水素を活用した生産方式の導入を通じてCO₂排出量の削減を目指す方針を示しており（注38）、技術開発が進めば同技術を国内に導入すると見込まれる。また、2019年に日本製鉄とアルセロール・ミタル社により買収されたエッサール・スチールのように、海外の鉄鋼メーカーと資本関係にある企業では、提携先企業の技術を導入することで環境対応を進めると見込まれる。

包括的な戦略がないCCUSについても、海外から技術協力を受けながら導入を模索すると考えられる。インドは、COP21で立ち上げられたクリーン・エネルギー分野の研究投資を促進する「ミッション・イノベーション」への参加を通じてCCUS関連の知見を深めている。また、インド石油公社がノルウェーのエネルギー企業と水素やCCUS関連の研究開発拠点の整備に向けて趣意書を締結するなどの動きがみられる。しかし、インドでは適地調査や用地収用などの手続きに時間がかかると見込まれるため、国内の実証実験に向けた動きは緩慢なものにとどまる可能性が高い。

(3) 日本：目標達成時期を大幅に前倒し

最後に日本の動向についてみる（注39）。わが国は、これまで鉄鋼業のカーボンニュートラルの達成目標を2100年に設定していた

が、菅政権が2050年を達成目標時期とするカーボンニュートラル社会の達成を宣言したことを受けて、計画の大幅な前倒しを迫られている（注40）（図表30）。

まず、現状、粗鋼生産の大半を担う高炉での技術革新にかかわる取り組みをみると、NEDO（新エネルギー・産業技術総合開発機構）と大手鉄鋼メーカー（日本製鉄、日鉄エンジニアリング、神戸製鋼、JFE）が連携する、次世代の製鉄関連技術開発プロジェクト：「COURSE50（CO₂ Ultimate Reduction System for Cool Earth 50）」が実施されている。同プロジェクトは、水素を部分的に利用するとともに、CO₂を分離回収する技術の開発を目指すものである。この技術を発展させることで、

中長期的に水素のみで鉄鉱石の還元を実現することを目指している。

次に、高炉と電炉の生産割合についてみると、政府や日本鉄鋼連盟は具体的な方針について言及していない（注41）。しかし、大手鉄鋼メーカーは高炉での生産を縮小する一方、電炉を増強する動きを見せており、粗鋼生産における電炉比率は中長期的に高まっていくと見込まれる。日本製鉄は2021年3月に示した中長期の経営計画で高炉を15基から10基に削減する一方、2030年までに国内最大級の大型電炉を新規に建設する方針を示している。JFEも2023年度をめどに高炉を8基から7基にする一方、電炉分野の競争力強化に注力する方針を示している。各社が高炉による

図表30 日本の鉄鋼のCO₂排出量削減に関連する動き

| | | 政策の方向性・目標 | 左記に関連した企業の動きなど |
|----------|--------------|--|---|
| 鉄鋼関連政策 | 高炉・電炉の割合について | 今後の電炉による生産比率については政策や業界目標では言及せず。ただし、近年、主要メーカーは高炉を休止する一方、電炉を拡大 | 日本製鉄、高炉5基の休止を計画（2021年3月公表の中長期経営計画） JFE、2023年度をめどに東日本製鉄所京阪地区の高炉を休止することを計画 |
| | 高炉での生産方式の見直し | 水素活用還元技術の導入を含む製鉄の脱炭素化を目指す（日本鉄鋼連盟「我が国の2050年カーボンニュートラルに関する日本鉄鋼業の基本方針」） | NEDOと鉄鋼メーカー、高炉におけるCO ₂ 排出量の抑制やCO ₂ 分離・回収技術の開発プロジェクト「COURSE50(CO ₂ Ultimate Reduction System for Cool Earth 50)」を推進 |
| 電力政策 | | 発電に占める再生エネルギーの比率を現在の22～24%から2030年度に36～38%に引き上げる（2021年7月公表のエネルギー基本計画改定案の素案における目標） | 2020年の総発電量に占める再生可能エネルギー由来の電力比率は11.1%と2010年の2.6%から上昇 |
| 水素関連政策 | | 大規模な供給体制の確立に向けて2030年までに水電解装置の大型化、輸送・貯蔵の大規模実証試験、輸送技術の国際標準化を実施する | 2020年6月、NEDO、次世代水素エネルギーチェーン技術研究組合とともに、世界初の水素の国際サプライチェーンの実証実験を開始 |
| CCUS関連政策 | | 2030年以降の本格的な社会実装に向けて2023年までに最初の商用化に向けた技術を確立する（「統合イノベーション戦略2021」） | 日鉄エンジニアリング、COURSE50で開発された省エネ型CO ₂ 回収技術に独自技術を加えて、産業用途に商品化 2019年11月、日本CCS調査、苫小牧のCCUS実証実験事業で当初の目標としていた累計CO ₂ 圧入量30万トンを達成 |

（資料）経済産業省「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」、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」、日本製鉄「日本製鉄グループ中長期経営計画」、各種報道などを基に日本総合研究所作成

生産を縮小しているのは、日本の鉄鋼需要の減少を見据え、経営資源を収益性の高い分野に集中し、脱炭素に向けた技術開発に必要な資金を確保するためである。

この他、ゼロカーボン・スチールの実現に必要な、電力、水素、CCUSなどに関連する取り組みについてみると、いずれの分野でも中長期の大規模な社会実装に向けて、2020年代中に商用化に必要な技術開発を完了することを目指している。

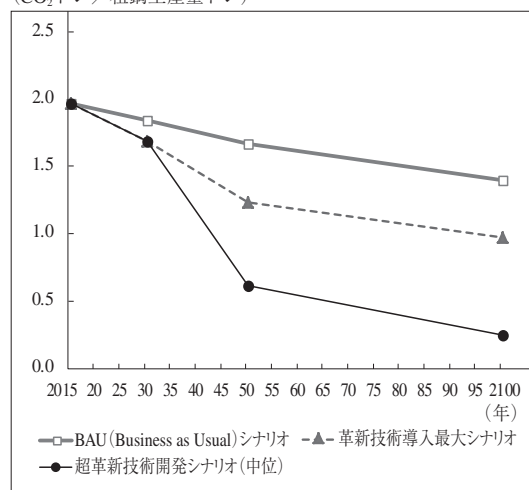
電力については、現在改定中のエネルギー基本計画の素案で発電に占める再生可能エネルギー比率を現状の22～24%から2030年度に36～38%に引き上げることを目指しており（注42）、再生可能エネルギーを用いた発電技術や需給安定化に必要な技術の開発が進められている。発電とともに産業用に用いられる水素については、大規模な供給体制の確立に向けて、2020年6月、NEDOと次世代水素エネルギーチェーン技術研究組合（参加企業：千代田化工建設、日本郵船、三井物産、三菱商事）が水素の国際サプライチェーンの実証実験を開始するなどの動きが見られる。

CCUSについては、COURSE50で開発されたCO₂分離回収技術の商用化が進められるとともに、大規模な実証実験が進められている。

このように、各分野で製鉄の脱炭素に向けた取り組みが進められているものの、一連の取り組みは、2100年を目標達成時期とするカーボンニュートラルの実現に向けて掲げら

れていたものであり、達成時期の50年前倒しに対応した抜本的な見直しは行われていない。従来のCO₂排出量の削減計画は、水素活用還元技術やCCUSといった超革新的な技術の導入が進んだとしても2050年までの製鉄のカーボンニュートラルの実現は困難との見方を示していた（図表31）。そのことを踏まえると、現在の取り組みでカーボンニュートラルが実現出来るとは考えにくい。このことは、産官学の連携強化や研究開発に必要な資金調達環境の改善などを通じて、技術開発やその導入に向けた取り組みをより強力に推進する

図表31 従来の鉄鋼業のCO₂排出量の削減目標
(CO₂トン/粗鋼生産量トン)



(注) BAUシナリオ：現状から技術は殆ど変化せず。革新技術最大導入シナリオ：現在開発中の革新技術が2030～2050年にかけて導入。超革新技術開発シナリオ：水素還元技術やCCUSをはじめ、まだ緒に就いていない技術の導入が実現。

(資料) 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』」(2019年11月19日)

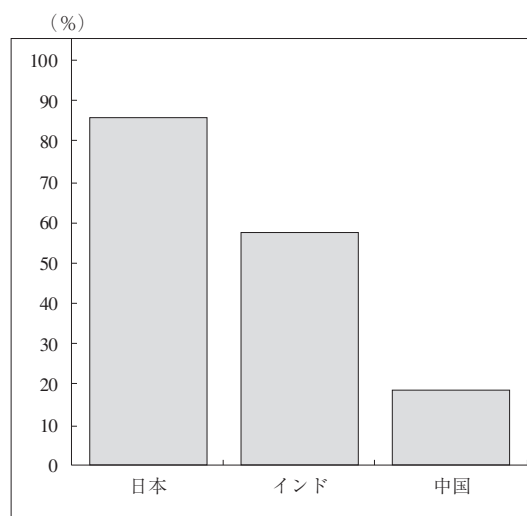
必要があることを意味する。

足元の政府の取り組みをみると、政府はNEDOに設立した2兆円グリーンイノベーション基金を軸に脱炭素につながる新技術の開発を支援している。しかし、NEDOが実施する実証実験が全ての技術をカバーしているわけではない。例えば、製鉄における新技術の開発についてみると、COURSE50は主に水素を活用する技術の開発に注力しており、合成メタンを鉄鉱石の還元を用いるカーボンリサイクル高炉や、天然ガスを使用して鉄鉱石を還元する直接還元鉄などにかかわる技術開発は、各社が独自に技術開発を進めている。

競争を通じて新規の技術開発を促すことは重要であるものの、技術開発の不確実性の高さや巨額な研究開発資金が制約となり、新技術の開発が期待通りに進まない可能性もある。わが国の鉄鋼生産は上位3社(日本製鉄、JFE、神戸製鋼)が全体の生産量の8割を占めるなど、中国やインドと比べても寡占化が進んでいるが(図表32)、上位3社の合計粗鋼生産量は中国の上位3社の3分の1に過ぎず、研究開発費も限られている。そのため、参加企業や研究開発の対象分野の拡充などを通じたCOURSE50の強化、個別に技術開発を進める大手鉄鋼メーカーへの税制優遇措置などを含む公的支援の拡充、ESG投資の促進、などを図る必要がある。

このほか、中国の鉄鋼企業の再編を通じた寡占化に対応するため(注43)、独占禁止法

図表32 粗鋼生産の上位3社への集中度(2020年)



(資料) World Steel Associationを基に日本総合研究所作成

を現在よりも弾力的に運用することで鉄鋼業界の再編を促し、経営効率の改善を通じて大規模な研究開発を行いやすい体制を構築すべきという意見もある(注44)。

(注24) 中国の再生エネルギー関連政策についてはNEDO [2020a] を、水素関連政策についてはNEDO [2020b] を、CCUS関連政策については、三菱総合研究所 [2020] とADB [2015] を、鉄鋼メーカーにおける取り組みについてはZhang Yilong, and Wei Wei [2019] を参照。

(注25) 高炉における熱風の代わりに純酸素を吹き込むことを通じて製鉄過程のCO₂排出量の削減を目指す方式である(高橋・野内・佐藤・有山 [2016] を参照)。

(注26) エネルギー・環境グローバルコンソーシアム 2021年5月14日「中国の大手鉄鋼企業 水素利用への取組」を参照。

(注27) 同白書のエネルギー関連企業により策定されたものであり、楽観的な予測が含まれているとの見方がある(例えば、NEDO [2021b])。

(注28) 2020年の豪州の中国への鉄鉱石の輸出は、豪州のGDPの約5%に相当する一方、中国のGDPの0.5%であり、豪中間の鉄鉱石貿易が減少することの直接的なマ

- イナス影響は豪州への方が大きい。ただし、豪州からの鉄鉱石の輸入不足を理由に中国の鉄鋼生産が制約される場合、原材料として鉄鋼製品を利用する建設業、一般機械や輸送機械を中心とする製造業、建設業や製造業に付随するサービス業などの生産活動も制約されるため、それらを含めると中国へのマイナス影響はより大きなものになる。
- (注29) 実際、豪州の元資源相が中国への鉄鉱石輸出に対して報復関税を導入することを提案している（2020年12月23日ロイター「豪中の貿易摩擦、鉄鉱石市場に飛び火か」）。
- (注30) 生産方式の見直しとともに、ブラジルや南アフリカなどからの輸入拡大、アフリカなどの新規鉱山の開発、国内の採掘拡大などを進めることで、石炭や鉄鉱石の豪州依存度の低下を図ると見込まれる。
- (注31) 中国の鉄スクラップ市場の現状と見直しについては、中国廢鋼鉄應用協會 [2021] を参照。
- (注32) ただし、世界の鉄スクラップの主要輸出国は、アメリカ、ドイツ、日本などであり、中国とアメリカ（およびその同盟国・友好国）の対立を受けて供給が不安定化する可能性がある。そのため、親中国からの輸入拡大や国内の鉄製品のリサイクル体制の拡充などを通じて、供給体制の安定性の向上を目指すだろう。
- (注33) インドの動向については、Ministry of Steel [2017]、日本製鉄 [2021] などを参照。
- (注34) 2021年3月、独立100周年となる2047年を目標年とするカーボンニュートラルの目標設定について、インド政府が外国人アドバイザーとともに検討を進めていると報道された。
- (注35) ただし、土地収用問題を背景とするインフラプロジェクトの遅延やコロナ禍の発生に伴う景気悪化などを踏まえると、インドの鉄鋼消費・生産の拡大ペースはNSPが想定するよりも緩やかなものにとどまると見込まれる。
- (注36) これまでの倍以上のペースで再生可能エネルギーによる発電比率が上昇しても、総発電量に占める比率が4割に達するのは2050年頃になると判断される。
- (注37) 政策の具体的な中身は未発表であるが、化学関連製品、鉄鋼、セメントなどの分野でグリーン水素の使用が義務付けられる可能性がある。
- (注38) タタ・スチールは2007年にコーラス社を買収し、欧州で事業を拡大している。2017年にはティッセンクルップ社と欧州事業を統合することで暫定合意していたが、欧州委員会の独占禁止当局や労働組合の反対などを理由に2019年に統合を断念した。
- (注39) わが国の鉄鋼業については、川端 [2020] を参照。
- (注40) 日本鉄鋼連盟 2021年2月15日「我が国の2050年カーボンニュートラルに関する日本鉄鋼業の基本方針」
- (注41) 日本鉄鋼連盟は2010年に公表した資料（「地球温暖化対策における高炉・電炉業の役割について」）で、地球温暖化対策に向けて高炉から電炉に切り替えるべきという意見に対して否定的な見解を示していた。その理由として、拡大する鉄鋼需要に世界の鉄鋼需要の拡大に対応するには高炉生産が不可欠であること

や、高炉と電炉による生産は一体としてとらえるべきであることを挙げている。

- (注42) 参考値として示された2050年の電源構成では、再生可能エネルギーの比率は5割強となっている。
- (注43) 中国は国際競争力の強化に向けて上位10社の市場シェアを60%に引き上げるべく、企業再編を進めている。
- (注44) 例えば、日刊工業新聞 2021年7月29日「ニッポン鉄鋼「脱炭素」に知恵絞るも、重い経営課題に」。また、ダイヤモンドオンライン 2020年2月13日「日本製鉄の抜本改革、高炉休止の次は神戸製鋼との統合も検討？」は、日本製鉄と神戸製鋼の統合の可能性について言及している。

おわりに

鉄鋼業の脱炭素化は、まず野心的な目標を打ち出し、その実現に必要な取り組みを逆算的に計算することで、必要なイノベーションの促進などを促す、いわゆる「ムーンショット型」の目標設定がとられている。そのため、現時点で目標の実現可能性が担保されていないこと自体は問題ではない。ただし、鉄鋼生産の主要国の動向を踏まえると、現在各国が掲げる計画が順調に実現したとしても、21世紀半ばに脱炭素を実現出来る可能性は低いと言わざるを得ない。

今後、2050年にかけて、中国、インド、日本の3カ国の鉄鋼の生産構造が大幅に見直され、①電炉による生産比率が5割に達する、②電炉で使用される電力の5割が再生可能エネルギーで生産される、③高炉における水素活用還元技術を活用した製鉄のシェアが5割に達する、という構造変化が起こったとしても、鉄鋼業のCO₂排出量の削減効果は7割程度にとどまる（注45）。このことは、他の分

野と比べても技術的な課題が多く残されており、かつ政策の具体化が遅れているCCUSに関する議論を加速させなければカーボンニュートラルの実現は不可能であることを意味する。特に、CO₂の分離、回収、有効利用と比べても取り組みが遅れている貯留に関する取り組みを推進する必要がある。その実現に向けて、既存の枠組みにとらわれないアイ

デアが出てくるとともに、業界内や国家間の連携が加速することを期待したい。

(注45) 中国、インド、日本の3カ国合計の電炉・高炉生産比率を基に、①電炉にシフトすることで単位当たりのCO₂排出量が3分の1に低下する、②再生可能エネルギーの導入拡大により発電部門のCO₂排出量が半減する、③水素活用還元技術を活用した製鉄によるCO₂排出量がゼロとなる、などの大胆な仮定を置いて単位当たりのCO₂排出量の変化を試算した。

補論：豪中対立の現状と先行き

2020年4月、中国の新型コロナの初期対応を巡り、豪州政府がWHO（World Health Organization、世界保健機関）以外の独立機関による調査を実施することを提案して以降、豪中関係は急速に冷え込んでいる。また、①香港国家安全維持法の施行後の豪州政府の香港市民に対する滞在ビザの延長や香港との間の犯罪人引渡条約の停止、②新疆ウイグル自治区における人権問題を巡る中国の対応に対する豪州政府の非難、③日米豪印戦略対話（「クワッド」）を通じた対中包囲網の強化、なども豪中対立を加速させる一因となっている。

豪中の政治対立は経済面にも波及している。豪州の中国に対する要求が内政干渉であると批判する中国政府は、豪州産の大麦やワインへの関税導入、一部の食肉の輸入停止、石炭の輸入規制などの制裁的な措置

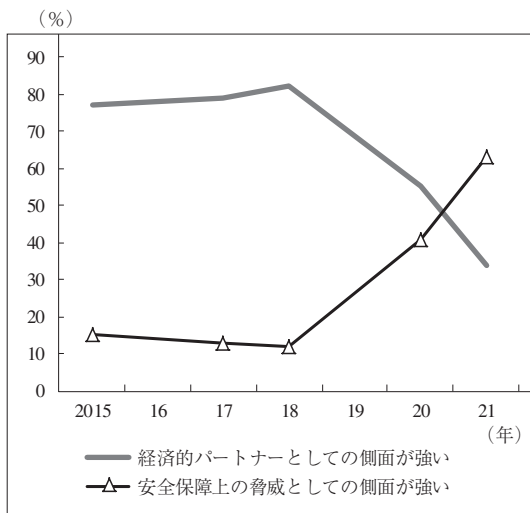
を講じた。さらに、2021年5月、国家発展改革委員会は、豪州との戦略対話の枠組みで行われる全ての活動を無期限停止すると発表した。一方、豪州政府も、中国の輸入規制についてWTO（World Trade Organization、世界貿易機関）に提訴するとともに、ビクトリア州と中国の経済協力の覚書の無効化や、中国企業が権益を有する港湾の有効性について再検討を始めるなどの対抗措置に乗り出している。二国間の経済関係が悪化するなか、豪州では中国を経済的パートナーとしてではなく安全保障上の脅威として見る動きが強まっている（図表33）。一連の政治対立が鉄鉱石の取引に飛び火する可能性はゼロに近いが、鉄鉱石の取引に問題が生じる場合は豪中経済のみならず世界の鉄鋼供給を不安定化させるインパクトを有するテールリスクとみておくべきである。

アメリカ（およびその同盟国・友好国）

と中国の対立長期化を踏まえると、今後、豪中関係が急速に改善するとは考えにくい。ただし、豪中対立が一段と先鋭化するか否かは、豪州国内の政治動向にも左右される。上院については2022年5月までに、下院については2022年9月までに選挙が行われることが予定されており、下院の早期

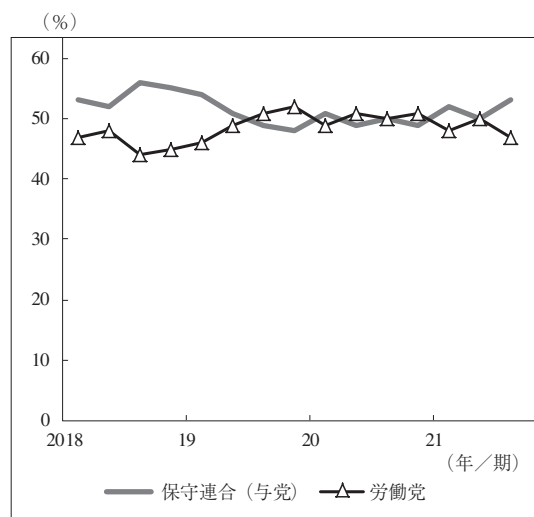
解散により上院・下院の総選挙が実施される可能性がある。対中強硬路線を強める現在与党（保守連合）と対中融和路線を展開してきた野党（労働党）の支持率は拮抗しており（図表34）、今後政権交代が生じることで豪中間の対立が和らぐといった展開も考えられる。

図表33 豪州国民への意識調査：中国を経済的パートナーとしてみているか、それとも安全保障上の脅威とみているか



(資料) Lowly Institute Poll “China Economic Partnership or Security Threat”

図表34 豪州の政党別支持率



(資料) The Weekend Australian

参考文献

(日本語)

1. 有山達郎 [2019] 「鉄鋼における二酸化炭素削減長期目標達成に向けた技術展望」日本鉄鋼協会『鉄と鋼』2019 Vol.105, No.6
https://www.jstage.jst.go.jp/article/tetsutohagane/1955/81/11/81_11_N541/_pdf-char/ja
2. 加賀美彰之 [1995] 「産業組織から見た諸外国の電炉業の比較」日本鉄鋼協会『鉄と鋼』1995 Vol.81, No.81
https://www.jstage.jst.go.jp/article/tetsutohagane/1955/81/11/81_11_N541/_pdf-char/ja
3. 川端望 [1995] 「戦後アメリカ鉄鋼業における成長の一体的構造」、大阪市立大学証券研究センター『証券研究年報』第10号
<http://www2.econ.tohoku.ac.jp/~kawabata/paper/americansteelpostwar.pdf>
4. ——— [2019] 「中国鉄鋼業の生産能力と能力削減実績の推計—公式発表の解釈と補正」、東北大学TERG Discussion Papers 2019-11
<https://core.ac.uk/download/pdf/268718854.pdf>
5. ——— [2020] 「日本鉄鋼業の現状と課題—高炉メーカー・電炉メーカーの競争戦略と産業のサステナビリティ」『粉体技術』2020年10月号
<http://www2.econ.tohoku.ac.jp/~kawabata/paper/funtai202010.pdf>
6. 熊谷章太郎 [2021] 「新たな転換期を迎えるアジアの電力政策」日本総合研究所『環太平洋ビジネス情報 RIM』2021 Vol.21 No.80
<https://www.jri.co.jp/MediaLibrary/file/report/rim/pdf/12400.pdf>
7. 経済産業省 [2015] 「金属素材産業の現状と課題への対応」金属素材競争力強化検討会 第1回（平成27年5月21日）資料2
https://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/mono/iron_and_steel/downloadfiles/kinzokuzozai2.pdf
8. ——— [2018] 「通商白書2018」
https://www.meti.go.jp/report/tshaku2018/pdf/2018_hombun.pdf
9. ——— [2021] 「「製鉄プロセスにおける水素活用」プロジェクトの研究開発・社会実装の方向性（案）」第3回 産業構造審議会 グリーンイノベーションプロジェクト部会 エネルギー構造転換分野ワーキンググループ 資料2
https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/green_innovation/energy_structure/003.html
10. 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO） [2020a] 「第13次5カ年計画期間の中国の再生可能エネルギーの政策と状況」
<https://www.nedo.go.jp/content/100917339.pdf>
11. ——— [2020b] 「中国の水素・燃料電池産業の動向」
<https://www.nedo.go.jp/content/100902859.pdf>
12. 佐藤創 [2008] 『アジア諸国の鉄鋼業—発展と変容—』研究双書 571
13. 石油天然ガス・金属鉱物資源機構 [2021] 『鉱物資源マテリアルフロー 2020』
http://mric.jogmec.go.jp/wp-content/uploads/2021/06/material_flow2020.pdf
14. 高橋功一、野内泰平、佐藤道貴、有山達郎 [2016] 「製鉄工程におけるエネルギー消費削減を目指した酸素高炉の展開」日本鉄鋼協会『鉄と鋼』2016 Vol.102, No.7
https://www.jstage.jst.go.jp/article/tetsutohagane/102/7/102_TETSU-2015-110/_pdf-char/ja
15. 中国廃鋼鉄応用協会 [2021] 「中国 鉄スクラップ産業の現状と発展傾向」第9回国際鉄リサイクルフォーラム資料
<https://www.jisri.or.jp/common/wp-content/uploads/2021/07/20210709-CAMU-.pdf>
16. デロイトトーマツコンサルティング [2021] 「令和2年度 地球温暖化対策における国際機関等連携事業 ミッション・イノベーションを通じた国際連携に関する取組等調査 最終報告書」（経済産業省受託調査）
https://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2020FY/000044.pdf
17. 日本製鉄 [2019] 「エッスール・スチールの共同買収について」
https://www.nipponsteel.com/common/secure/ir/library/pdf/20191216_500.pdf
18. ——— [2021] 「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
19. 箱崎大 [2007] 「鉄鋼業における日中間の分業」アジア経済研究所『東アジアFTAと日中貿易』第4章
<https://core.ac.uk/download/pdf/288450933.pdf>
20. 堀一郎 [2012] 「アルセロール・ミタル社のグローバル・ビジネスモデル（上）」愛知県立大学大学院国際文化研究科論集第13号（2012）
21. 三菱総合研究所 [2020] 「令和元年度二国間クレジット取得等のためのインフラ整備調査事業（CCUS国際連携事業）報告書」経済産業省受託調査
https://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2019FY/000271.pdf
22. 渡邊真理子 [2017] 「中国鉄鋼業における過剰生産能力問題と補助金：ソフトな予算制約の存在の検証」RIETI Discussion Paper Series 17-J-058
<https://www.rieti.go.jp/jp/publications/dp/17j058.pdf>

(英語)

23. ADB (Asian Development Bank) [2015] “Roadmap for Carbon Capture and Storage Demonstration and Deployment in the People’s Republic of China”
<https://www.adb.org/sites/default/files/publication/175347/roadmap-ccs-prc.pdf>
24. EUROFER (The European Steel Association) [2013] “A Steel Roadmap for a Low Carbon Europe 2050” (IEA Global Industry Dialogue and Expert Review Workshop)
https://iea.blob.core.windows.net/assets/imports/events/205/NEWSteelRoadmappresentation_IEA20131007.pdf
25. ——— [2019] “Low Carbon Road Map”

- <https://www.eurofer.eu/assets/Uploads/EUROFER-Low-Carbon-Roadmap-Pathways-to-a-CO2-neutral-European-Steel-Industry.pdf>
26. IEA (International Energy Agency) [2020a] “Iron and Steel Technology Roadmap”
https://aceroplatea.es/docs/Iron_and_Steel_Technology_Roadmap_IEA.pdf
27. ——— [2020b] “Energy Technology Perspective 2020”
https://iea.blob.core.windows.net/assets/7f8aed40-89af-4348-be19-c8a67df0b9ea/Energy_Technology_Perspectives2020_PDF.pdf
28. Ministry of Steel (India) [2017] “National Steel Policy 2017”
<https://steel.gov.in/national-steel-policy-nsp-2017>
29. World Steel Association [2020] “Climate change and the production of iron and steel” Public Policy Paper
https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:228be1e4-5171-4602-b1e3-63df9ed394f5/worldsteel_climatechange_policy%2520paper.pdf
30. Peter Marcus, John Villa [2021] “Global Steel Production in 2050: Not Much Change” World Steel Dynamics 2021 February
<https://www.aist.org/AIST/aist/AIST/Publications/wsd/WSD-February-2021.pdf>
31. Shashank Modi, Abhay Vadakara [2017] “Technology Roadmap: Materials and Manufacturing” Center for Automotive Research
https://www.cargroup.org/wp-content/uploads/2019/10/Technology-Roadmap_Materials-and-Manufacturing.pdf
32. Vaclav Smil [2016] “Still The Iron Age” Butterworth-Heinemann
33. Zhang Yilong, Wei Wei [2019] “Sustainable development transition from the perspective of China and Baosteel” IEA, Experts’ Dialogue on Effecting the Sustainable Transition of Iron and Steel in the framework of the IEA Global Technology Roadmap for Iron and Steel
<https://iea.blob.core.windows.net/assets/imports/events/169/1.YilongZhang.pdf>

本誌は、情報提供を目的に作成されたものであり、何らかの取引を誘引することを目的としたものではありません。本誌は、作成日時時点で弊社が一般に信頼出来ると思われる資料に基づいて作成されたものですが、情報の正確性・完全性を保証するものではありません。また、情報の内容は、経済情勢等の変化により変更されることがあります。本誌の情報に基づき起因してご閲覧者様及び第三者に損害が発生したとしても執筆者、執筆にあたっての取材先及び弊社は一切責任を負わないものとします。