

2024年2月22日

日本高炉メーカーの生産プロセスの転換

－高炉廃止、電炉化の選択－

中曽根平和研究所

主任研究員

柿原 敏彦

1. 高炉廃止、電炉化の流れ

2022年 JFE スチール(株)が西日本製鉄所倉敷地区の第2高炉¹を、2023年日本製鉄(株)が九州製鉄所八幡地区の戸畑第4高炉²を廃止し電炉化する方針を発表した。また、(株)神戸製鋼所は2030年頃までに低炭素化の取組みとして高炉の設備更新にあわせて電炉化も視野に入れ検討する³としている。高炉の設備寿命は補修等を考慮すると約20年である。JFE スチール(株)の倉敷第2高炉は2003年より稼働⁴しており、設備更新にあわせての電炉化の選択であったが、日本製鉄(株)の戸畑第4高炉は稼働開始が2014年⁵であり法定耐用年数14年を経過していない9年目での電炉化への決定であった。従来、自動車メーカー等、需要家が求める高機能鋼材は高炉法でしか製造できず、また電炉は高炉に比べ生産性が低いといったことから、現在の日本の粗鋼生産量の約75%が高炉法、約25%が電炉法により生産されている⁶。

なぜこの時期に日本の高炉メーカーは高炉法から電炉法へと生産プロセスを転換することについて検討し、その方針を決定するに至ったのであろうか。

2. グリーンスチール市場の拡大

2050年カーボンニュートラルに向け世界の低炭素化、脱炭素化の流れは加速しており、高炉メーカーは販売環境において環境に配慮した、いわゆるグリーンスチールの供給要請を需要家から受けている。例えば、高機能鋼材の主要需要家である自動車メーカーは、自動車の素材製造、車両製造、走行、メンテナンス、廃棄、リサイクルと自動車のライフサイクル全体を通してCO2排出量の目標を設定し削減に取り組んでいる。具体的にはライフサイクル全体でメルセデス・ベンツ・グループ AG は2039年にネットカーボンニュートラルを⁷、フォルクスワーゲン AG は2030年に2018年比40%削減、2050年にカーボンニュートラルを⁸、トヨタ自動車(株)は温室効果ガスを2030年に2019年比30%削減、2050年にカーボンニュートラルを⁹目指している。トヨタ自動車(株)によると従来のGV(ガソリン車)からHV(ハイブリット車)、HVから水素を使って走行するFCEV(燃料電池自動車)への移行において、ライフサイクル全体でのCO2排出量はGV対比HVでは主に走行時のCO2排出量が減少するため約4割減、他方GV対比FCEVでは走行時のCO2排出量はHVよりも減少するものの素材製造時のCO2排出量は増加し約5割減に留まる¹⁰と評価、分析している。また素材における鉄の重

量割合はGV、HV、FCEV、いずれにおいても5～6割¹¹と最も大きく、自動車メーカーがライフサイクル全体でのCO₂排出量ゼロに向けて取り組むにあたり、主に素材製造プロセスを担うサプライヤーである高炉メーカーの低炭素化、脱炭素化は必要不可欠である。

このような需要家の要請を踏まえグリーンスチール市場は拡大が見込まれている。IEA(国際エネルギー機関)によると世界市場における実質CO₂排出量ゼロの還元鉄(鉄鉱石から還元した鉄)の生産規模は2050年で約5億Tまで拡大、2070年には約10億Tとなり概ね実質CO₂排出量ゼロの生産プロセスへ転換すると予想している¹²。つまり、環境にやさしい鉄でないと売れない未来が見通されているということである。

では、高炉メーカーは市場拡大が見込まれるグリーンスチールの生産供給体制を早期に確立することは可能なのであろうか。そもそも現在、グリーンスチールに明確な定義はなくIEAが提案した「ニア・ゼロ・エミッション鉄鋼」¹³と同義とするならば、鉄スクラップ配合率を既存高炉での粗鋼生産と同水準の15%とした場合、CO₂排出量は350kg/粗鋼生産T以下が該当することとなる。現在の高炉でのCO₂排出量は約2T/粗鋼生産T¹⁴であり、「ニア・ゼロ・エミッション鉄鋼」製造には80%以上の低炭素化を実現する必要がある。

これに対し日本の高炉メーカーは既存高炉を改造し還元材料のコークス、炭素の一部を水素に置換える水素活用還元技術を確立し、CO₂排出量を50%以上削減、CCUS(CO₂の利用、貯留)とあわせてCO₂排出ゼロを実現するSuper COURSE50について2040年頃の実用化を目指している¹⁵。これら低炭素化の取組みと並行して脱炭素化を実現すべく水素による直接還元法、いわゆる水素還元製鉄の技術確立、実用化も2040年頃を目途に対応を図っている¹⁶。このように実質CO₂排出量ゼロの還元鉄製造を可能とする低炭素化、脱炭素化の取組みは、ともに2040年頃の実用化を目指しており、その後の設備実装期間を考慮すると、早期に「ニア・ゼロ・エミッション鉄鋼」が求める現状対比80%以上の低炭素化は非常に厳しい状況である。

このような状況を踏まえ日本の高炉メーカーは需要家の供給要請に早期に答えるべく、マスバランス方式を採用¹⁷しグリーンスチールの製造、販売を行うこととした。マスバランス方式とは低炭素化、脱炭素化の促進を狙いとしつつ、CO₂排出の削減量を既存製品に配分し、実際にはCO₂排出ゼロで製造せずとも削減量見合いで実質CO₂排出ゼロにより製造した製品として販売することを可能とする方式である。マスバランス方式では低炭素化を進めれば進めるほどグリーンスチール、環境負荷の低い付加価値品として販売することができるため、如何にして低炭素化、脱炭素化によるCO₂排出量の削減効果を極大化し、かつスピーディーに実現するか、が高炉メーカーの重要課題となっている。

3. 水素調達への懸念とCCS

日本の高炉メーカーは、既存高炉での一部水素活用による低炭素化、100%水素還元製鉄の実用化による脱炭素化、いずれも還元材料を炭素から水素へ置換することによりCO₂排出量削減を企図している。これら還元用途に加え、鉄の加工工程で必要となる加熱炉での熱源用途等、2050年での鉄鋼業全体における水素使用量は2,000万T/年¹⁸と想定されている。2050年の日本全体の水素需要予測、約7,000万T/年のうち産業用は3,200万T/年¹⁹であり、鉄鋼業のみで日本全体の約3割、産業用の約6割を占めることが見込まれている。これに対し日本の水素基本戦略における2050年の

日本全体での水素供給、導入目標は2,000万T/年²⁰であり、うち製鉄用は還元用途の約700万T/年（水素使用1,000Nm³/粗鋼生産T、粗鋼生産量8千万T/年、水素比重約0.09kg/Nm³）のみが考慮されていると推察される。つまり、現時点では2050年時点で鉄鋼業関連の水素は需要2,000万T/年に対し700万T/年の供給しか見込まれておらず、需給バランスに1,300万T/年の乖離があり、大量の水素を必要とする高炉メーカーとしては安定的な水素確保に懸念がある。

次に水素価格であるが、日本の水素基本戦略において供給コスト目標は2050年で20円/Nm³²¹とされている。供給コストは近年の化石燃料価格と同等を目標とし2023年3月のLNG価格と等価であれば24円/Nm³²²と試算されている。他方、米国は水素価格を2031年までには13円/Nm³（1ドル/Kg²³、145円/ドル前提）とする目標としており、日本の水素価格は2050年で米国の約1.5倍と割高な目標設定となっている。現状では太陽光発電、風力発電等の再生エネルギー由来による電力を使用し水を電解するグリーン水素の早期普及は難しく、石炭、LNG、いわゆる化石燃料を原料とし、水素製造時に発生するCO₂をそのまま排出するグレー水素、同じく発生するCO₂を貯留、利用するブルー水素が市場の大宗を占めると想定されている。水素の原料となる化石燃料を船舶による輸入に頼る日本は、自国採掘、ラインパイプによる搬送で化石燃料を安価に調達できる海外諸国に比べ原料コスト段階で劣位にあり、水素価格における国際競争力の確保は厳しい状況にある。また、化石燃料を加工し製造する水素は、既存の炭素還元製鉄の還元材料であるコークス、石炭に比べ割高となる。コークスの原料である原料炭と同等となる水素価格、いわゆるパリティコストは17円/Nm³（11.6セント/Nm³²⁴、原料炭300ドル/T、145円/ドル前提）と試算されており、2050年目標の日本の水素供給コスト20円/Nm³を下回り、原料炭から水素への置換によるコスト増加が見込まれる。現状、高炉メーカーとしては水素供給、確保とともに国際的競争力のある価格での水素購入にも懸念を抱えている。

このように日本の高炉メーカーはカーボンニュートラルの目標年である2050年時点において水素調達面での懸念を抱えており、CO₂排出ゼロを可能とする水素還元製鉄へ生産プロセスの100%を変更することは困難であるため、現在対応中の低炭素化の生産プロセスを継続せざるを得ない。しかしながら低炭素化の取り組みではCO₂排出をゼロにすることはできず、止む無く発生するCO₂についてCCS（CO₂の貯留）にて対応する必要がある。日本におけるCCSへの対応は、貯留総量について現在も地質調査を継続中ではあるが、2030年までに貯留量600万～1200万T/年を確保し、2050年には1.2億～2.4億T/年へ拡大することを計画²⁵している。これは現状の日本のCO₂排出量約11億T/年²⁶の10～20%程度に相当する。つまり、2050年でのCO₂排出ゼロの実現には、CCSを活用する前提であっても、日本全体で現状比80%以上のCO₂排出量削減が必要である。

4. 中期目標の達成に向けて

日本政府の2030年度中期目標は温室効果ガス2013年度対比46%削減²⁷、そのうち鉄鋼業は同年度対比30%削減²⁸を目途としており、この早期実現が日本の高炉メーカーの当面のマイルストーンとなる。目標達成に向けまず起点となる2013年度と近年の生産水準を比較してみる。2013年度の高炉メーカーの粗鋼生産量約86百万Tに対し2019～2022年度の平均は約68百万Tと内需減等により約21%の生産減となっている²⁹。よって、近年の生産水準が2030年も維持されているとすれば、目標達成にはCO₂排出量現状比約12%の削減が必要であり、この実現には既存高炉による炭素

還元製鉄から生産プロセスの転換が不可避である。

転換後の生産プロセスとしては CO₂ 排出ゼロが可能な直接水素還元製鉄が最も望むべき姿ではあるが 2040 年頃の実用化を目指しており、2030 年時点で年間粗鋼約 7 千万 T の 10% 以上を製造できる生産体制を構築することは現実的ではない。次善策として低炭素化の生産プロセスとして既存高炉の改造による水素活用、または電炉化が考えられる。既存高炉の水素活用では、水素が気体であるため高炉内の還元反応ガスの通気確保、水素還元が吸熱反応であるため水素の高温加熱、還元された鉄が固体のため熔融プロセスとしての電炉の追加が必要となる。また、追加する電炉および電炉化では、高機能鋼材製造のために不純物除去レベルを高めた電炉法の確立、生産性維持のための電炉の大型化といった、非常に高度な技術革新が求められている³⁰。日本の高炉メーカーはこれら技術課題に対し経済産業省主導のグリーンイノベーション (GI) 基金による補助金を活用しつつ、これらの課題解決に取り組んでいる。

既存高炉の水素活用においては、試験炉にて 2023 年には世界最高水準である CO₂ 排出量を現状比 33% 削減する効果を確認、2026 年には稼働中の大型高炉、日本製鉄(株)東日本製鉄所君津地区第 2 高炉での実証試験を開始する³¹。このように着実に研究開発を推進し、試験炉では当初計画の 2030 年 CO₂ 排出量現状比 10% 削減³²を大幅に上回る効果は確認できてはいる。しかしながら、実機試験での削減効果の確認まで至っていない現段階では、その後の設備実装の期間を考慮すると既存高炉の水素活用のみで中期目標を確実に達成できるとまでは言い切れない状況にある。他方、電炉化においては、高機能鋼材の製造を可能とする電炉法について日本製鉄(株)瀬戸内製鉄所広畑地区で 2022 年より世界初の電炉一貫でのハイグレード電磁鋼板の商業運転を開始し、次なる大型電炉での高機能鋼材の製造に向けた知見を蓄積しつつ、技術開発に取り組んでいる³³。高炉法から電炉法への転換による CO₂ 排出量削減効果は現状比 75% 削減と既存高炉の水素活用に比べ大きく、たとえ高炉 1 基の電炉化であったとしても十分な効果が見込まれる。日本の高炉メーカーは、このような既存高炉での水素活用の研究開発、実用化の進捗、設備実装までの期間、電炉での高機能鋼材の製造、大型化の目処、および CCS のインフラ整備等の状況を総合的に勘案し、原料、電力をはじめとする操業コストの上昇は見込まれるものの、中期目標の達成に向け高炉を廃止し電炉化する生産プロセスの転換を選択するに至ったのである。

では、既に公表された高炉 2 基の電炉化の対応で中期目標は達成できるのであろうか。廃止が決定されている日本製鉄(株)東日本製鉄所鹿島地区第 3 高炉を除く現在稼働中の高炉の設備規模は 19 基、生産能力をを図る指標である炉容 (高炉内の体積) は約 93 千 m³ である³⁴。電炉へ生産プロセスを転換する高炉 2 基の炉容をあわせて約 9 千 m³ であり³⁵、高炉全体の生産能力の 10% 弱にあたる。電炉化による CO₂ 排出量削減効果は高炉 1 基あたり現状比 75% 削減であり、生産能力の 10% 弱を占める高炉 2 基を電炉化することにより CO₂ 排出量は全体では現状比約 7% 削減となる。中期目標達成には現状比約 12% 削減が必要であり、追加で更に約 5% の削減が求められる。

これを既存高炉で水素を活用して実現するには、仮に試験炉で確認された CO₂ 排出量現状比 33% 削減³⁶が実用化できるのであれば炉容約 13 千 m³、高炉 3 基相当の設備実装で目標を達成できることとなる。他方、電炉化の追加で実現するには、炉容約 6 千 m³、高炉 2 基相当の生産プロセスの転換が必要となる。現実的には稼働中の高炉の設備寿命、更新時期を考慮しつつ、また既存高炉の水素活用、および電炉化の研究開発、実用化の進捗も踏まえ、追加で必要な生産プロセスの転換を図

り、その他あらゆる CO2 排出量削減のための施策を進め、中期目標の達成を目指すこととなろう。加えて、これら施策を推進しても CO2 削減の目標達成に満たない場合は、その不足分を CCS で対応することとなる。更に CCS の貯留量を超える CO2 が発生する場合は明示的なカーボンプライシング、排出量取引で CO2 排出権を購入するという選択肢がある。

5. 更なる生産プロセスの転換

日本の高炉メーカーは既存高炉の水素活用、電炉化および CCS 等により、2030 年度の中期目標の CO2 排出量の 2013 年度対比 30%削減については一定の目処を得たといえるだろう。しかしながら、2030 年度はあくまで通過点に過ぎず 2050 年カーボンニュートラルには CCS を考慮しても製造工程における CO2 排出量の現状比 80%以上の削減が求められており、更なる生産プロセスの転換が必要となる。

では、2050 年に向け日本の高炉メーカーはいつ、どのような生産プロセスへ転換するのであろうか。現状の炭素還元製鉄における CO2 排出の主たる製造プロセスは高炉である。高炉は補修時以外、24 時間常に高温にさらされているため炉内耐熱レンガの損傷による寿命があり、修繕を考慮しても概ね稼働後約 20 年で新設、リプレースが必要である。高炉メーカーは、現在稼働中の高炉が寿命を迎えるタイミングで次なる生産プロセスの選択に迫られる。転換後の主な生産プロセスは、脱炭素化としては CO2 排出ゼロを可能とする水素還元製鉄、低炭素化としては現状比 CO2 排出量 50%以上削減を目途としている既存高炉の水素活用、または現状比 CO2 排出量の 75%削減の電炉化の 3つのパターンが現状では想定される。なお、低炭素化の生産プロセスは、炭素の使用により CO2 排出量をゼロにすることはできず、CCS の併用が必要となる。

高炉メーカーは、転換後の生産プロセスの中で望むべき姿である水素還元製鉄について 2040 年頃の実用化を目途に取組んでおり、稼働中の高炉が実用化以降に寿命を迎える場合はこれを選択する可能性が高く、それ以前に高炉が寿命を迎える場合は次回の設備更新までの間、低炭素化の既存高炉の水素活用、または電炉化を一時的に選択することとなる。現在稼働中および廃止決定の高炉を除くと高炉は 19 基あり、高炉の寿命を 20 年と仮定すると、2040 年以降に寿命を迎える対象はそのうち 4 基、炉容は約 18 千 m³ であり³⁷、これは高炉全体の約 20%にあたる。この 4 基を CO2 排出ゼロが可能な水素還元製鉄に転換した場合、CO2 排出量の現状比 80%削減を達成するには、残り 15 基について CO2 排出量の現状比 75%削減が必要であり、CO2 排出量の現状比 50%削減以上を目指している既存高炉の水素活用では達成が厳しく、CO2 排出量を現状比 75%削減できる電炉化を選択せざるを得ない状況にある。

では、日本の高炉メーカーは水素還元製鉄の実用化までの間、高炉が寿命を迎える都度、電炉化を選択することについて特に課題はないのであろうか。確かに電炉化は日本における CO2 排出量削減においては有効な手段となりうるが、電炉化にともない原料となる鉄スクラップの国内消費量は増加し、主な輸出先であるアジア圏向けの輸出量³⁸は減少する。他方、アジア圏では輸入鉄スクラップが不足し、鋼材需要を満たすためには従来どおり高炉法による炭素還元製鉄を行わざるを得ない。日本の炭素還元製鉄のエネルギー効率は世界最高水準³⁹である。日本の電炉化にとまなうアジア圏での炭素還元製鉄の増加により、世界全体でみると CO2 排出量が増加することが見込まれる。また、電炉法はリサイクル法であるため、将来にわたる世界の人口増加、経済発展にとまなう人一人当た

りの鉄鋼製品保有、蓄積量の増加⁴⁰には対応できない。つまり、自然界にある鉄鉱石を還元し鉄を生産する還元法からリサイクル法へ日本が転換したとしても、世界的な鋼材需要を満たすには、いずれかの国で還元法による製鉄を行わざるを得ない。他国において実質 CO2 排出ゼロとする生産プロセスで生産されれば問題はないが、既存の炭素還元製鉄による生産を行うとすれば、日本では電炉化により低炭素化は進展しても世界全体で見れば CO2 排出量は減少しない、いわゆる炭素リーケージを引き起こす虞がある。

このような状況を踏まえ、JFE スチール(株)西日本製鉄所倉敷地区第 2 高炉の電炉化においては現時点での電炉法技術では鉄スクラップのみでの高機能鋼材の製造が難しいことも考慮し、UAE において LNG による直接還元法と CCS により徹底した低炭素化で製造された還元鉄を輸入原料として使用することを検討している⁴¹。電炉化といたつても低炭素還元鉄のサプライチェーンを構築することによって還元法による製鉄の生産を維持しながら、結果的に鉄スクラップの国内消費量の増加を抑制しつつ、高品質な鉄鋼製品を生産し、世界全体での CO2 排出量を減少させることを可能とする取組みである。このように低炭素化のために単に電炉化するといった生産プロセスの転換ではなく、日本のカーボンニュートラルを達成することはもとより、世界の鋼材需要の動向、還元鉄製造の必要性をも勘案しつつ、世界全体での CO2 排出量削減の効果を最大化することを考慮し、適時適切な生産プロセスへ転換することが望まれる。例えば高炉の寿命を 20 年とした場合、2030 年までに設備更新が必要となる高炉は 8 基、炉容は約 44 千 m³ であり⁴²、高炉全体の約 50% である。これら高炉については、還元鉄製造を可能とする低炭素化の生産プロセスである既存高炉の水素活用に一旦転換し、更に 20 年後の 2050 年までに実用化された水素還元製鉄へ移行すると仮定する。移行期間の CO2 排出量削減効果は電炉化に及ばないまでも、日本での鉄スクラップ消費量増加にともなう他国での炭素還元製鉄増産の虞を回避しつつ、日本のカーボンニュートラルの目標も達成できることとなる。このように次回の設備更新を考慮した生産プロセスの二次転換についても、それが世界全体での CO2 削減効果を最大化できるのであれば一考の余地があるのではなかろうか。

6. カーボンニュートラルの達成に向けて

前述のとおり、日本の高炉メーカーは、低炭素化としての既存高炉の水素活用または電炉化、脱炭素化としての水素還元製鉄へと生産プロセスの転換を図ることとなる。この生産プロセスの転換は、有史以来の炭素還元製鉄法からの変更となり、そのためには非常にハードルの高い技術革新への対応はもとより、多額の資金が必要となる。この状況を踏まえ、2023 年 11 月に岸田首相は CO2 排出が多い鉄鋼分野の脱炭素を政府が主導すると表明し、企業の生産プロセス転換のための費用についても、国費で支援、税優遇も調整している、と資金調達をサポートする旨の発言を行った⁴³。

研究開発に関する国費支援については既に動き出しており、既存高炉の水素活用のための「所内水素を活用した水素還元技術の開発」、「外部水素や高炉排ガスに含まれる CO2 を活用した低炭素化技術等の開発」、また水素還元製鉄のための「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」、これら 4 つの研究開発を行う水素製鉄コンソーシアム（高炉 3 社および（一財）金属系材料研究開発センター）に対し、GI 基金として 2021 年より 1,935 億円⁴⁴の補助、支援を行っていたが、2023 年に 2,334 億円⁴⁵を追加し、合計で 4,269 億円を支援することとなった。更に 2023 年 11 月段階で水素還元製鉄のための「電気溶融炉（メルター）を用いた水素還元

製鉄技術の開発」について、事業規模 384 億円のうち 230 億円⁴⁶の追加支援を政府は検討している。これらをあわせると 4,499 億円を国費で支援することとなり、GI 基金の予算総額約 2.8 兆円⁴⁷のうち製鉄の生産プロセス転換関連全体で約 16%を占めることとなる。これら追加支援の効果として、高炉メーカーは既存高炉の水素活用、および水素還元製鉄について、当初計画の実用化時期を 2050 年から 10 年前倒し、2040 年を目途とすること⁴⁸となった。

しかしながら、GI 基金はあくまで研究開発への支援であり、高炉メーカーはその成果として確立した技術を基に実用化し設備を実装する、いわゆる設備投資が必要となる。また、生産プロセスの転換は付帯設備も変更せざるを得ず、例えば公表された高炉 2 基の電炉化においては、原発 1 基規模の発電所、電力系統の増強、および港湾設備新設、ヤード転換といった製鉄所そのものを刷新することとなる⁴⁹。その規模は大きく日本製鉄(株)九州製鉄所八幡地区では敷地の半分、約 350 万m²(東京ドーム 70 個分)を刷新、JFE スチール(株)西日本製鉄所倉敷地区では残存する高炉関連設備の移設含め大型リプレースが必要となる⁵⁰。これら巨額な設備投資の資金調達に関し、既存のトランジション・ファイナンス、グリーン・ファイナンス制度の活用はもとより、増産効果などの収益効果が見込めないことも踏まえると、設備投資の分野においても継続的な政府のサポートが必要ではなかろうか。

また、生産供給体制が構築されたのちには設備投資の償却費、固定資産税、金利負担に加え、水素、電力の使用等による操業コストの上昇も見込まれる。これらコスト上昇は社会的要請にともなうコストであり、グリーンスチールの付加価値として需要家含め社会全体で負担する仕組みの構築が必要となる。この仕組みの一つとして、2024 年度税制改正大綱⁵¹において戦略分野国内生産促進税制が創設され、半導体、電動車、基礎化学品、航空機燃料とあわせて鉄鋼も対象となった。具体的に鉄鋼、グリーンスチールについては、設備稼働後 10 年間（繰越 4 年間）、毎年法人税額の 40% を上限とし、当期の販売 T 当たり 2 万円（7 年目以降減額）、または当期の対象設備の取得価額の少ない方を税額控除できることとなる。これにより設備投資、操業コストの相当程度は税額控除が可能となる。ただし、本優遇税制は設備稼働後 10 年間の適用であることに留意する必要がある。

日本の高炉メーカーは、資金調達面での政府の支援を受けつつ、各社ともヒト、モノ、カネのリソースを可能な限り投入し対応しているが、企業努力のみでは如何ともしがたい課題が残されている。まず、水素、電力供給の課題である。還元材料の炭素から水素への変更により、大量の水素を使用する。また、還元時に吸熱反応となる水素の加熱用、溶解用に追加する電炉および電炉化にともなう大幅な電力使用の増加が見込まれる。これに対応すべく、大量に安定供給できる、また優遇税制期間を終えたのちも国際的競争力を維持したカーボンフリー水素、電力を確保する必要がある。次に、発生する CO₂ への対応である。脱炭素化の対応が完遂するまでの移行期間においては、低炭素化を推進するものの CO₂ は少なからず発生する。発生する CO₂ にはまず CCS で対応し、CCS 貯留量を超え排出せざるを得ない CO₂ には明示的なカーボンプライシング、排出量取引での対応が必要となる。加えて、各国ごとに低炭素化、脱炭素化の進展に跛行性があるため、炭素リーケージの課題、いわゆる産業拠点の海外移転や炭素効率の低い製品の輸出入品への対応も必要となる。これら課題への対応には、カーボンフリー水素、電力供給、CCS のインフラ整備、および国際的競争力を踏まえた水素、電力価格の設定、排出量取引の仕組みや炭素国境調整といった CO₂ 主要排出国とのイコールフットイングを考慮した制度設計が求められる。このようなインフラ整備、制度設計への

対応は、高炉メーカーのみですべて対処できる課題ではなく、各国での研究開発、実用化に向けた取組みが加速しているなか、鉄鋼製品の国際的競争力を維持すべく、官民一体となった対応が急務である。

現状日本の産業分野において最も CO2 排出量の多い鉄鋼業ではあるが、鉄鋼製品は素材供給を通じて自動車、産業機械等、様々な産業の競争力を支えるとともに成長が見込まれる風力発電設備等、再生可能エネルギー設備での使用も想定され、自国消費はもとより輸出においても自動車、電子部品分野に続き日本の輸出総額の約 4 % (2019～2022 年度平均)⁵²を占める貿易財でもあり、低炭素化、脱炭素化の流れの中で自国生産を失う訳にはいかない。

¹ JFE スチール(株)「カーボンニュートラル戦略説明会」12 頁 (JFE スチールウェブサイト、2022 年 9 月 1 日 https://www.jfe-steel.co.jp/company/pdf/carbon-neutral-strategy_220901_1.pdf) (2024 年 2 月 21 日閲覧、以下同)

² 日本製鉄(株)「高炉プロセスから電炉プロセスへの転換に向けた本格検討を開始」(日本製鉄ウェブサイト、2023 年 5 月 10 日 https://www.nipponsteel.com/common/secure/news/20230510_400.pdf)

³ 日刊産業新聞「神鋼「電炉、重要な選択肢」山口社長」(日刊産業新聞ウェブサイト、2023 年 5 月 19 日 <https://www.japanmetal.com/news-t20230519126999.html>)

⁴ JFE スチール(株)「JFE スチールハンドブック 2023」35 頁 (JFE スチールウェブサイト <https://www.jfe-steel.co.jp/company/pdf/handbook2023/all.pdf>)

⁵ 日本製鉄(株)「日本製鉄ファクトブック 2023」製鉄事業 製造拠点の概要 (日本製鉄ウェブサイト <https://www.nipponsteel.com/factbook/2023/11-04.html>)

⁶ 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」32 頁 (経済産業省ウェブサイト、2022 年 9 月 12 日 https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/green_innovation/energy_structure/pdf/010_04_00.pdf)

⁷ メルセデス・ベンツ AG「メルセデス・ベンツアンビション 2039」(メルセデス・ベンツウェブサイト <https://group.mercedes-benz.com/responsibility/sustainability/climate-environment/ambition-2039-our-path-to-co2-neutrality.html>)

⁸ フォルクスワーゲン AG「フォルクスワーゲンの「Way to ZERO」ー包括的戦略」(フォルクスワーゲンウェブサイト、2022 年 10 月 5 日 <https://sp.volkswagen.co.jp/way-to-zero/way-to-zero-the-overall-strategy/>)

⁹ トヨタ自動車(株)「Sustainability Data Book2023」18 頁 (トヨタ自動車ウェブサイト、2024 年 2 月 https://global.toyota/pages/global_toyota/sustainability/report/sdb/sdb23_jp.pdf)

¹⁰ トヨタ自動車(株)「The MIRAI LCA レポート」11 頁(トヨタ自動車ウェブサイト、2015 年 6 月 10 日 https://global.toyota/pages/global_toyota/sustainability/esg/challenge2050/challenge2/life_cycle_assessment_report_jp.pdf)

¹¹ トヨタ自動車(株)「The MIRAI LCA レポート」12 頁 (トヨタ自動車ウェブサイト、2015 年 6 月 10 日 https://global.toyota/pages/global_toyota/sustainability/esg/challenge2050/challenge2/life_cycle_assessment_report_jp.pdf)

¹² IEA「エネルギー技術の展望 2020 重工業のニーズ」(IEA ウェブサイト <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2020/technology-needs-for-heavy-industries>)

- ¹³ IEA 「Achieving Net Zero Heavy Industry Sectors in G7 Members」 113 頁 (IEA ウェブサイト <https://iea.blob.core.windows.net/assets/c4d96342-f626-4aea-8dac-df1d1e567135/AchievingNetZeroHeavyIndustrySectorsinG7Members.pdf>)
- ¹⁴ 日本製鉄㈱ 「日本製鉄カーボンニュートラルビジョン 2050」 11 頁 (日本製鉄ウェブサイト、2021 年 3 月 30 日 https://www.nipponsteel.com/ir/library/pdf/20210330_ZC.pdf)
- ¹⁵ 日本製鉄㈱ 「2023 年度 3 Q 決算説明会」 40 頁 (日本製鉄ウェブサイト、2024 年 2 月 7 日 https://www.nipponsteel.com/ir/library/pdf/20240207_300.pdf)
- ¹⁶ 同上
- ¹⁷ (一社)日本鉄鋼連盟 「マスバランス方式を適用したグリーンスチール」 (日本鉄鋼連盟ウェブサイト、2023 年 10 月 26 日 https://www.jisf.or.jp/business/ondanka/kouken/greensteel/documents/2023_greensteel_explanation.pdf)
- ¹⁸ (一社)水素バリューチェーン推進協議会 「政策提言 2022 「水素ロードマップ」」 7 頁 (水素バリューチェーン推進協議会ウェブサイト、2022 年 8 月 29 日 https://www.japanh2association.jp/pages/6060688/page_202205201049)
- ¹⁹ (一社)水素バリューチェーン推進協議会 「政策提言 2022 「水素ロードマップ」」 5 頁 (水素バリューチェーン推進協議会ウェブサイト、2022 年 8 月 29 日 https://www.japanh2association.jp/pages/6060688/page_202205201049)
- ²⁰ 「水素基本戦略」 11 頁 (再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議、2023 年 6 月 6 日 https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/saisei_energy/pdf/hydrogen_basic_strategy_kaitei.pdf)
- ²¹ 「水素基本戦略」 12 頁 (再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議、2023 年 6 月 6 日 https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/saisei_energy/pdf/hydrogen_basic_strategy_kaitei.pdf)
- ²² 同上
- ²³ 「水素基本戦略」 7 頁 (再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議、2023 年 6 月 6 日 https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/saisei_energy/pdf/hydrogen_basic_strategy_kaitei.pdf)
- ²⁴ 資源エネルギー庁 「水素・アンモニアサプライチェーン投資促進・需要拡大策について」 22 頁 (資源エネルギー庁ウェブサイト、2022 年 4 月 18 日 https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene_shinene/suiso_seisaku/pdf/002_01_00.pdf)
- ²⁵ 経済産業省 「CCS 長期ロードマップ検討会 最終とりまとめ 説明資料」 6 頁 (経済産業省ウェブサイト、2023 年 3 月 https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/ccs_choki_roadmap/pdf/20230310_2.pdf)
- ²⁶ 環境省 「2021 年度 (令和 3 年度) の温室効果ガス排出・吸収量 (確報値) について」 3 頁 (環境省ウェブサイト、2023 年 4 月 21 日 <https://www.env.go.jp/content/000128750.pdf>)
- ²⁷ 「地球温暖化対策計画」 11 頁 (閣議決定、2021 年 10 月 22 日 <https://www.env.go.jp/content/900440195.pdf>)
- ²⁸ (一社)日本鉄鋼連盟 「カーボンニュートラル行動計画フェーズI (2020 年度) 実績およびフェーズII (2030 年度) 目標見直し等について」 (日本鉄鋼連盟ウェブサイト、2022 年 3 月 4 日 <https://www.jisf.or.jp/news/topics/20220304.html>)

- ²⁹ 日本製鉄㈱「日本製鉄ファクトブック 2023」製鉄事業 生産（日本製鉄ウェブサイト <https://www.nipponsteel.com/factbook/2023/11-01.html>）、旧、日新製鋼㈱「平成 26 年 3 月期決算短信 決算発表用資料」1 頁（日本製鉄ウェブサイト、2014 年 5 月 7 日 https://www.nipponsteel.com/common/secure/ir/library/pdf/20140507_300.pdf）、JFE スチール㈱「JFE スチールハンドブック 2023」33 頁（JFE スチールウェブサイト <https://www.jfe-steel.co.jp/company/pdf/handbook2023/all.pdf>）、㈱神戸製鋼所「統合報告書 2023」コーポレートデータ 110 頁（神戸製鋼所ウェブサイト https://www.kobelco.co.jp/about_kobelco/outline/integrated-reports/files/23_05.pdf）、㈱神戸製鋼所「2013 年度決算発表 補足説明資料」6 頁（神戸製鋼所ウェブサイト、2014 年 4 月 25 日 https://www.kobelco.co.jp/ir/library/fnc1_results/2013/_icsFiles/afiedfile/2014/04/25/130425_hosoku.pdf）を基に筆者算出
- ³⁰ 日本製鉄㈱「日本製鉄カーボンニュートラルビジョン 2050」17-28 頁（日本製鉄ウェブサイト、2021 年 3 月 30 日 https://www.nipponsteel.com/ir/library/pdf/20210330_ZC.pdf）
- ³¹ 日本製鉄㈱「2023 年度 3 Q 決算説明会」39 頁（日本製鉄ウェブサイト、2024 年 2 月 7 日 https://www.nipponsteel.com/ir/library/pdf/20240207_300.pdf）
- ³² 日本製鉄㈱「日本製鉄カーボンニュートラルビジョン 2050」29,30 頁（日本製鉄ウェブサイト、2021 年 3 月 30 日 https://www.nipponsteel.com/ir/library/pdf/20210330_ZC.pdf）
- ³³ 日本製鉄㈱「2023 年度 3 Q 決算説明会」40 頁（日本製鉄ウェブサイト、2024 年 2 月 7 日 https://www.nipponsteel.com/ir/library/pdf/20240207_300.pdf）
- ³⁴ JFE スチール㈱「JFE スチールハンドブック 2023」35 頁（JFE スチールウェブサイト <https://www.jfe-steel.co.jp/company/pdf/handbook2023/all.pdf>）、日本製鉄㈱「日本製鉄ファクトブック 2023」製鉄事業 製造拠点の概要（日本製鉄ウェブサイト <https://www.nipponsteel.com/factbook/2023/11-04.html>）、㈱神戸製鋼所「加古川製鉄所第 2 高炉再稼働について」（神戸製鋼所ウェブサイト、2007 年 5 月 24 日 https://www.kobelco.co.jp/releases/2007/1178399_14785.html）、㈱神戸製鋼所「加古川製鉄所第 3 高炉再稼働について」（神戸製鋼所ウェブサイト、2016 年 12 月 26 日 https://www.kobelco.co.jp/releases/1196038_15541.html）を基に筆者算出
- ³⁵ 同上
- ³⁶ 日本製鉄㈱「2023 年度 3 Q 決算説明会」39 頁（日本製鉄ウェブサイト、2024 年 2 月 7 日 https://www.nipponsteel.com/ir/library/pdf/20240207_300.pdf）
- ³⁷ JFE スチール㈱「JFE スチールハンドブック 2023」35 頁（JFE スチールウェブサイト <https://www.jfe-steel.co.jp/company/pdf/handbook2023/all.pdf>）、日本製鉄㈱「日本製鉄ファクトブック 2023」製鉄事業 製造拠点の概要（日本製鉄ウェブサイト <https://www.nipponsteel.com/factbook/2023/11-04.html>）、㈱神戸製鋼所「加古川製鉄所第 2 高炉再稼働について」（神戸製鋼所ウェブサイト、2007 年 5 月 24 日 https://www.kobelco.co.jp/releases/2007/1178399_14785.html）、㈱神戸製鋼所「加古川製鉄所第 3 高炉再稼働について」（神戸製鋼所ウェブサイト、2016 年 12 月 26 日 https://www.kobelco.co.jp/releases/1196038_15541.html）を基に筆者算出
- ³⁸ (一社)日本鉄源協会「世界鉄スクラップ流通量 (2022 年)」(日本鉄源協会ウェブサイト <http://tetsugen.or.jp/kiso/8worldsuku.htm>)

- ³⁹ (一社)日本鉄鋼連盟「地球温暖化対策への取組状況について カーボンニュートラル行動計画 (低炭素社会実行計画) 報告」24 頁 (日本鉄鋼連盟ウェブサイト、2022 年 3 月
https://www.jisf.or.jp/news/topics/documents/tikyuondankataisaku_torikumijoukyou_20220304.pdf)
- ⁴⁰ (一社)日本鉄鋼連盟「日本鉄鋼連盟長期温暖化対策ビジョン」1-3 頁 (日本鉄鋼連盟ウェブサイト、2018 年 11 月
https://www.jisf.or.jp/business/ondanka/zerocarbonsteel/documents/zerocarbon_steel_honbun_JISF.pdf)
- ⁴¹ JFE スチール(株)「カーボンニュートラル戦略説明会 2023」9 頁 (JFE スチールウェブサイト、2023 年 11 月 8 日
https://www.jfe-steel.co.jp/company/pdf/carbon-neutral-strategy_231108_1.pdf)
- ⁴² JFE スチール(株)「JFE スチールハンドブック 2023」35 頁 (JFE スチールウェブサイト <https://www.jfe-steel.co.jp/company/pdf/handbook2023/all.pdf>)、日本製鉄(株)「日本製鉄ファクトブック 2023」製鉄事業 製造拠点の概要 (日本製鉄ウェブサイト <https://www.nipponsteel.com/factbook/2023/11-04.html>)、(株)神戸製鋼所「加古川製鉄所第 2 高炉再稼働について」(神戸製鋼所ウェブサイト、2007 年 5 月 24 日
https://www.kobelco.co.jp/releases/2007/1178399_14785.html)、(株)神戸製鋼所「加古川製鉄所第 3 高炉再稼働について」(神戸製鋼所ウェブサイト、2016 年 12 月 26 日
https://www.kobelco.co.jp/releases/1196038_15541.html) を基に筆者算出
- ⁴³ 日本経済新聞「首相「鉄鋼・化学の脱炭素主導」COP28 で企業支援表明へ」(日本経済新聞ウェブサイト、2023 年 11 月 30 日
<https://www.nikkei.com/article/DGXZQOUA29DVX0Z21C23A1000000/>)
- ⁴⁴ 経済産業省「グリーンイノベーション基金事業の 今後の取組の方向性等について」9 頁 (経済産業省ウェブサイト、2023 年 5 月 24 日
https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/green_innovation/pdf/011_02_00.pdf)
- ⁴⁵ 経済産業省「「製鉄プロセスにおける水素活用」プロジェクトにおける取組の追加について」1-3 頁 (経済産業省ウェブサイト、2023 年 11 月 20 日
https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/green_innovation/energy_structure/pdf/019_03_00.pdf)
- ⁴⁶ 同上
- ⁴⁷ 経済産業省「グリーンイノベーション基金事業の 今後の取組の方向性等について」2 頁 (経済産業省ウェブサイト、2023 年 5 月 24 日
https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/green_innovation/pdf/011_02_00.pdf)
- ⁴⁸ 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」13 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)、日本製鉄(株)「2023 年度 2Q 決算説明会」33-34 頁 (日本製鉄ウェブサイト、2023 年 11 月 1 日
https://www.nipponsteel.com/ir/library/pdf/20231101_300.pdf)
- ⁴⁹ JFE スチール(株)「カーボンニュートラルに向けた 鉄鋼業の取り組み」4 頁 (内閣官房ウェブサイト、2023 年 11 月 7 日
https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/gx_jikkou_kaigi/dai8/siryou2.pdf)
- ⁵⁰ 同上
- ⁵¹ 「令和 6 年度税制改正の大綱」43-45 頁 (閣議決定、2023 年 12 月 22 日
https://www.soumu.go.jp/main_content/000919575.pdf)
- ⁵² 財務省「財務省貿易統計」(財務省ウェブサイト <https://www.customs.go.jp/toukei/shinbun/happyou.htm>)、<https://www.customs.go.jp/toukei/shinbun/kako/happyou2.htm>) を基に筆者算出