

2023年6月21日

日本鉄鋼業における低炭素化、脱炭素化に向けた取組み

中曽根平和研究所

主任研究員

柿原 敏彦

1. はじめに

1992年国連での「気候変動に関する国際連合枠組条約（UNFCCC）」採択以降、参加国は2015年第21回締約国会議（COP21）において「世界共通の長期目標として世界の平均気温上昇を産業革命以前に比べて2℃より十分低く保ち、1.5℃に抑える努力を追求することを目標」とした、いわゆるパリ協定を合意し、2021年COP26では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ることにむけ「より野心的な1.5℃目標に向かって努力する」方向性を合意した。この対応として日本では2050年カーボンニュートラルを目指すことを宣言し、2030年度の中期目標を温室効果ガス2013年度対比46%削減としている¹。

2. 日本のCO₂排出の現状

日本の温室効果ガス排出量は2020年度1,150百万トン（CO₂換算、以下T）であり2013年度1,409百万Tに対し18.4%減であるが、さらに2030年までに約400百万T、2013年度対比約30%削減が必要である。温室効果ガスの90%以上を占めるCO₂排出量（電気・熱配分後）を排出部門別でみると約3分の1を産業部門が排出している。更に産業部門の業種別CO₂排出量では鉄鋼が36.7%、131百万Tと最も多く日本のCO₂排出量の12.5%を鉄鋼部門が排出していることとなり、その規模は自動車等の運輸部門の約70%、家庭部門の約80%に相当する²。このような状況に鑑み鉄鋼業のCO₂排出量の削減は急務である。

3. 製鉄におけるCO₂排出の仕組み

鉄鋼業におけるCO₂排出は製造プロセスに起因する。現在の製造プロセスは大きく2つある。自然界にある鉄鉱石（Fe₂O₃）を石炭や石炭を蒸し焼きにしたコークス（C）により昇温、還元、熔融（非鉄成分分離）する高炉法、および使用後のスクラップを電気により再溶解、リサイクルする電炉法である。高炉法においては鉄1Tつくるにあたり鉄の還元プロセス（製鉄、製鋼）工程を主体に約2TのCO₂が発生する。他方、電炉法においては鉄1Tつくるにあたり約0.5TのCO₂の発生でありCO₂排出量だけみれば高炉法は比較劣位である。

しかしながら、人々の生活を豊かにするためには一人当たりの鉄鋼製品保有、蓄積量を増加させることが求められる。その為には鉄スクラップをリサイクルするため鉄鋼製品保有の総量が増えない電炉法ではなく、自然界にある鉄鉱石を還元することにより総量が増える高炉法による製鉄が

必要となる。素材としての鉄の優位性は加工性、高機能性に加え安価であることであり、有史以来、長きにわたり CO2 を排出しないことを第一義とせず、効率的に鉄を熔融するために還元と燃焼反応による熱源確保、利用の観点から還元材料として木炭、石炭、コークス等、炭素を使用してきた。

4. 鉄鋼業における低炭素、脱炭素化への取組み

日本の鉄鋼業は従来からの炭素還元による製造プロセスが前提ではあるものの、これまで温暖化対策として主に3つのエコに取り組んできた。製造プロセス効率化および排出エネルギー、副産物の再利用等、世界最高水準のエネルギー効率を実現する「エコプロセス」、鉄鋼製品の機械的、電磁的特性を高めた高機能鋼材の供給を通じ最終製品使用時の CO2 排出を削減する「エコプロダクト」、高い省エネ技術を中国、インド、ASEAN 等へ多国間協力の枠組みで移転することにより海外での省エネルギー化を推進する「エコソリューション」である³。これまでの3つのエコの取組みは引き続き継続、進展は図るものの、仮に現時点での最先端の省エネルギー製造プロセスを世界的に導入、普及することにより CO2 排出原単位（鉄 1T 生産あたりの CO2 排出量）の改善を図ったとしても、人口増加、経済成長にともない世界の粗鋼生産量は増加し、CO2 排出総量は増加することが見込まれており、現状の炭素還元製鉄では CO2 排出量削減において限界がある⁴。

脱炭素のためには炭素以外の還元材料として水素による還元が考えられるが、有史以来不変の製鉄法を根本から変える非常にハードルの高い技術革新が必要である。まず水素の特性としては、常温常圧で炭素が固体である一方、水素は気体であり、また炭素還元が発熱反応である一方、水素還元は吸熱反応であり鉄が熔融しない、ということがあげられる。このため水素還元製鉄の実現には、炭素還元により昇温、還元、熔融を同時にかつ効率的に行う高炉法と違い、次のような技術的課題がある。それは、①水素は気体であり鉄鉱石と還元材の隙間ができないことを解消する高炉内の還元反応ガスの通気確保、②吸熱反応の補填のための水素の高温加熱、③水素還元炉からできる鉄は融点(1,538度)を超えておらず固体のため、熔融プロセスとしての電炉の追加、④既存電炉では不純物除去レベルが低く高機能鋼材を製造できないため高級鋼製造を可能とする電炉法の確立、⑤高炉法同様の生産性を維持するための電炉の大型化、などである⁵。

これら技術課題に対し鉄鉱石を還元ガス、水素により直接還元する製鉄法、いわゆる水素直接還元法の取組みが進められている。従来の直接還元法の還元ガスは主に天然ガス、メタン(CH₄)であり CO2 排出量をゼロにするまでには至っておらず、還元ガスを天然ガスから水素に置換え CO2 排出ゼロの達成に向け技術開発を行ってきた。2022年10月、(株)神戸製鋼所が出資するスウェーデンの製鉄会社 H2 グリーンスチール社（正式社名 H2GS AB）が世界初となる 100%水素直接還元鉄プラントを発注し年産能力 210 万 T、2025 年の稼働開始を目指している⁶。このように水素直接還元法は技術を確立し、目下、これから実用化する段階にあり、年産能力は 200 万 T 規模にすぎず、早期に年間粗鋼 7~8 千万 T を製造する国内既存製鉄設備を流用し生産活動を維持することは困難である。これら課題を一挙に解決し競争力を維持した生産体制を構築するためには、研究開発に加え、実装のための設備投資、既存技術の転換、他製鉄所への展開等、相当程度の時間を要せざるを得ない。

一方、2030 年度の温室効果ガス削減の中期目標の達成に向けた CO2 排出量削減は待ったなしの状況でもあり、日本の鉄鋼業としては脱炭素化を目指しつつ、既存製鉄設備を流用できる形での更

なる低炭素化への取組みが必要となる。国内で現在進められている低炭素化の主な取組みとしては、①低品位鉄鉱石と石炭を成形したフェロコークスの使用により還元反応の高速化を実現し、従来の石炭のみからなるコークスと比較し、還元材料、コークス原単位（鉄 1T 生産あたりのコークス使用量）の低減を図る（JFE スチール(株)西日本製鉄所福山地区に試験機導入）⁷。②製鉄所内で発生する水素系、コークスガスを利用し、還元材料のコークスの一部を水素に置換え、高炉発生 CO₂ 排出量の 10%削減を実現する水素活用還元技術である COURSE50（日本製鉄(株)東日本製鉄所君津地区に試験機導入）。更に製鉄所外からの水素を利用し、水素活用還元を拡充する SuperCOURSE50 の実用化を目指している。また、COURSE50 ではあわせて高炉ガス（CO₂、CO、H、N などからなる複合ガス）から、CO₂ を貯留（CCS）、利用（CCU）できるよう、CO₂ の分離、回収も行う⁸。③CCU として回収した CO₂ をメタネーション設備で水素と合成することにより変換したメタン（CH₄）により鉄鉱石の還元を行うカーボンリサイクル炉（CR 高炉）の開発にも着手している（JFE スチール（株）東日本製鉄所千葉地区に小規模 CR 高炉、西日本製鉄所倉敷地区に中規模 CR 高炉と順次試験機導入）⁹。

5. 低炭素化、脱炭素化における財務面での影響

このように日本で高炉法による製鉄を営む日本製鉄(株)、JFE スチール(株)、(株)神戸製鋼所の高炉 3 社は、2050 年カーボンニュートラルに向け低炭素化に取り組むつつ、複線的に脱炭素化のための生産プロセス転換についての革新技術の研究開発を進めている。しかしながら現時点においてこの生産プロセス転換の研究開発、設備投資が、既存の高炉法により製造される鉄鋼製品の性能、品質、エネルギー効率、製造コストを同水準で製造することが主眼となっていることは否めない。つまり地球温暖化対策、カーボンニュートラルという社会的要請に応えるべく、これからの低炭素化、脱炭素化の取組みを膨大なヒト、モノ、カネのリソース投入により成しえたとしても、現状すでに日本の鉄鋼業は世界最高水準のエネルギー効率¹⁰、生産性を実現しているが故に鉄鋼製品の高付加価値化、生産性向上、コスト競争力強化による利益増加の将来を描き切れず、必要な革新技術開発、設備新設、投資でありながら資本コストを上回る明確なリターンを見越せない、というジレンマに陥っている。他方、仮に低炭素化、脱炭素化の取組みが不十分で、革新技術開発が達成できなかった場合、環境負荷の高い製品販売は縮小し、投入した膨大なリソースはコスト増加に繋がり減収減益、ひいては資金調達も困難となって、企業、事業の持続性に関わる問題となりかねないというリスクも存在する。

このような状況を踏まえ高炉 3 社における低炭素化、脱炭素化の取組みの財務面での影響はいかほどのものであろうか。投入コスト、必要資金については、日本製鉄(株)によると研究開発費約 0.5 兆円、設備実装に約 4~5 兆円⁵、日本製鉄(株)の単独粗鋼生産量が高炉 3 社単独合計の約 55%（直近 5 年間 2017~2021 年度平均）であることを踏まえると、研究開発費約 1 兆円、設備実装に約 9 兆円、あわせて約 10 兆円になろう。

まず各社の CF、資金調達への影響であるが、必要資金に対し高炉 3 社の直近 5 年間（2017~2021 年度。各社連結）の FCF は年約 1 千億円である。つまり資金は自己捻出できず資本コストが必要となる外部調達に頼らざるを得ない。しかしながら資本投入によるリターン、利益増加の明確な道筋が描き切れていない現状では、国際的、社会的な課題への取組みであったとしても外部からの資金

調達は厳しいと言わざるを得ない。

次にBSへの影響であるが、現状高炉3社の資産は、約17兆円うち固定資産残高が約6兆円、負債が約10兆円うち社債、借入等、有利子負債が約6兆円、資本が約7兆円である(2022年3月末。各社連結)。これに対し、2050年脱炭素化を完遂するまでは高炉等の既存炭素還元製鉄設備と新規水素還元製鉄設備の併存が見込まれ、将来的には新規設備の減価償却、不要資産の売廃却による資産減少はあるものの、一過的には約10兆円、資産は増加する。他方、資本は明確な増益効果が見込まれにくい現状において新たな出資者の確保、増資は難しく、また株式の希薄化影響を考慮すると既存出資者の同意を得ることも難しい。そうであれば、資産増加、研究開発費、新規設備投資に必要な約10兆円は社債、借入等の負債で賄わざるを得ない。この結果、有利子負債は増加、D/Eレシオは上昇し、企業の健全性、安定性が損なわれ、これらを踏まえ格付け機関がランクを落とすことになれば、株価下落、企業価値棄損、より資金調達も困難へという悪循環が生じることが懸念される。

次にPLへの影響であるが、主として固定費では固定資産増加による減価償却費(7,140億円/年平均。定額法、耐用年数14年、投資額10兆円)、固定資産税(700億円/年平均。定額法、耐用年数14年、有形固定資産10兆円)等地方税、有利子負債増加による金利(400億円/年平均。長期借入調達金利0.8%/年、借入額10兆円、平均借入残高5兆円)は費用増となる。これは固定資産耐用年数14とすると、その間、総額約8,000億円費用増、年間粗鋼7千万TとするとT当たり12千円費用増となる。これに加えて低炭素化、脱炭素化に伴う不要設備の売廃却による固定資産売廃却損益および減価償却費減が見込まれる。他方、変動費はカーボンフリー水素、電力が安価供給されなければ費用増となる。例えばコークス還元と等価となる水素価格は8円/Nm³である⁵にもかかわらず、2023年6月時点での「水素基本戦略¹¹」の価格目標は、2050年で20円/Nm³であり、粗鋼1T生産あたりの水素使用量は1,000Nm³である⁴ことから、T当たり12千円費用増となり年間粗鋼量7千万Tとすると総額8,400億円費用増となる。加えて脱炭素が完遂されるまでの間、CCSによる費用増、また現在、還元材用石炭には課されていない炭素税、およびCO₂排出量取引、いわゆる明示的なカーボンプライシングが整備、導入された際には費用増が見込まれる。高炉3社を含む日本の鉄鋼業全体の直近5年間(2017~2021年度)の経常利益は年約6千億円¹²であり、固定資産増加に伴う固定費増だけでも年約8千億円であることから、現状の販売、製造環境では鉄鋼業全体における経常黒字の確保は厳しい状況が見込まれる。また、日本の全産業の経常利益は現状約80兆円¹²規模であり、鉄鋼業の低炭素化、脱炭素化投資の固定費増のみで約1%の減益影響を与えるインパクトである。

6. 課題への対応

鉄鋼業における低炭素化、脱炭素化の実現に向け最も困難な課題である革新的な技術開発、実用化を克服することはもとより、リーズナブルに資金調達が行えることが不可欠である。この資金調達課題に対応すべく官民一体となって対応を図っている。まず、研究開発に関して経済産業省はグリーンイノベーション基金(GI基金)を国立研究開発法人新エネルギー・産業技術開発機構(NEDO)に造成し、全産業を対象として2020年度2兆円¹³、2022年度に追加で0.3兆円¹⁴の財源予算を確保した。NEDOは鉄鋼関連として2022年9月段階で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、高炉法関連として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、直接還元法および電炉法関連として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、あわせて事業規模約 4,363 億円に対し GI 基金より約 1,935 億円の補助、直接支援を行っている¹⁵。とはいえ現状、研究開発費の全額支援、補助にまでは至っておらず、その後の設備実装も含め高炉各社は更なる資金調達が必要となる。

このような資金調達が必要な企業に対し、経済産業省、環境省、金融庁主導により金融機関等と連携し、低炭素化、脱炭素への移行期対応としてトランジション・ファイナンス、脱炭素化関連としてグリーン・ファイナンス制度を導入し、比較低金利での債券発行、借入を可能としており、すでに高炉メーカーは制度利用を開始している¹⁶。しかしながらこれら制度による債券発行、借入はあくまで負債であり、その増加により企業の健全性、安定性が損なわれることに違いはなく、根本的な課題解決には至っていない。

これに加え企業にとって実質的なキャッシュアウト抑制につながる優遇税制も導入されている。具体的にはカーボンニュートラルに向けた投資促進税制¹⁷であり、炭素生産性（付加価値額（営業利益＋人権費＋減価償却費）／エネルギー起源 CO₂ 排出額）を一定程度以上向上させる設備投資に関し特別償却または税額控除が認められている。しかしながら、課税負担総額を減少させる税額控除であっても各社最大 50 億円、高炉 3 社で 150 億円までに留まっており、資金調達課題を解消するとまでは言えない規模であることは否めない。今後、政府により例えば、既存 GI 基金、優遇税制の更なる拡充等、いままで以上に思い切った財務面での更なる支援、サポートが必要ではなかろうか。

このような対応により高炉各社として資金調達含め諸課題を解決し、低炭素化、脱炭素化の製鉄プロセスの革新技术開発を達成、実用化できたとしても、大量、安価安定供給できるカーボンフリー水素、水素加熱のためのコスト競争力のあるカーボンフリー電力の確保、止む無く発生する CO₂ を貯留、利用するための CCS、CCU といった社会共通基盤の技術開発、実用化、および CO₂ 主要排出国とのイコールフットイングを考慮した適切なカーボンプライシング制度の導入、加えて従来からの課題である主要鉄鋼産出国にはない課税制度である償却資産税の縮減および撤廃、これらなくしては国際的競争力を維持した鉄鋼製品の製造、販売は行えない。また、すでに鉄鋼製品の需要家である自動車メーカー等も温室効果ガスの発生が極めて低い方法で造られたグリーンスチールの調達契約を締結する¹⁸など、最終製品まで含めたトータルでの脱炭素化の流れは加速しているが、生産プロセスの変換によるコスト上昇は、社会的要請にともなうコストと認識し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。

7. おわりに

鉄鋼製品は自動車、産業機械、造船、建築、土木等の産業用、民生用および軍用に加え、成長が見込まれる風力発電等、再生可能エネルギー設備も含め多様な分野において素材として利用されており、機能性、生産性を考慮すると代替品が見当たらない現状では自国生産が必要な素材であるといえる。日本の鉄鋼業としても低炭素化、脱炭素化技術を早期に確立し炭素還元製鉄同様に世界最高水準の効率性、生産性を維持した生産プロセスの実現を目指し向け官民一体となった対応が急

務である。

- 1 「菅総理大臣の米国主催気候サミットへの出席について」(外務省) 2021年4月22日
(2023年6月21日閲覧、以下同) https://www.mofa.go.jp/mofaj/ic/ch/page6_000548.html
- 2 「2020年度(令和2年度)の温室効果ガス排出量(確報値)について」(環境省) 2022年4月15日
<https://www.env.go.jp/press/110893.html>
- 3 鉄鋼業界の3つのエコ(一般社団法人日本鉄鋼連盟)
<https://www.jisf.or.jp/business/ondanka/eco/>
- 4 「日本鉄鋼連盟長期温暖化対策ビジョン」(一般社団法人日本鉄鋼連盟) 2018年11月公表
https://www.jisf.or.jp/business/ondanka/zerocarbonsteel/documents/zerocarbon_steel_honbun_JISF.pdf
- 5 「日本製鉄カーボンニュートラルビジョン」(日本製鉄(株)) 2021年3月30日
https://www.nipponsteel.com/ir/library/pdf/20210330_ZC.pdf
- 6 「スウェーデン・H2 グリーンスチール社向け MIDREX H2TM 直接還元鉄プラントの新規受注 ならびに同社への出資について」((株)神戸製鋼所) 2022年10月12日
https://www.kobelco.co.jp/releases/files/20221012_1_01.pdf
- 7 「フェロコックス製造のための中規模設備の実証試験を開始」(JFE スチール(株)、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構) 2020年10月12日
<https://www.jfe-steel.co.jp/release/2020/10/201012.html>
- 8 革新的技術開発によるCO2削減(日本製鉄(株))
<https://www.nipponsteel.com/csr/env/warming/future.html>
- 9 鉄鋼事業におけるカーボンニュートラルへの挑戦と道筋(JFEホールディングス(株))
<https://www.jfe-holdings.co.jp/csr/carbon/>
- 10 「世界最高水準のエネルギー効率を堅持している日本鉄鋼業」(一般社団法人日本鉄鋼連盟) 2022年1月28日
<https://www.jisf.or.jp/news/topics/documents/energy-kouritu-syousai.pdf>
- 11 「水素基本戦略」(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
- 12 「年次別法人企業統計調査(令和3年度)」(財務省) 2022年9月1日
<https://www.mof.go.jp/pri/reference/ssc/results/r3.pdf>
- 13 グリーンイノベーション基金(経済産業省)
https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/gifund/index.html
- 14 「物価高克服・経済再生実現のための総合経済対策」<施策例>(内閣府) 2022年10月28日
https://www5.cao.go.jp/keizai1/keizaitaisaku/2022-2/20221028_sesaku.pdf
- 15 「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 2022年度WG報告資料」(国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構) 2022年9月12日
https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/green_innovation/energy_structure/pdf/010_05_00.pdf
- 16 「トランジションボンド発行条件決定に関するお知らせ」(JFEホールディングス(株)) 2022年6月3日
<https://www.jfe-holdings.co.jp/release/2022/06/220603.pdf>
「グリーンボンドの発行条件決定に関するお知らせ」(日本製鉄(株)) 2023年3月3日
https://www.nipponsteel.com/news/20230303_100.html
- 17 No.5925 カーボンニュートラルに向けた投資促進税制(生産工程効率化等設備等を取得した場合の特別

償却又は税額控除) (国税庁) <https://www.nta.go.jp/taxes/shiraberu/taxanswer/hojin/5925.htm>

¹⁸ BMW、ザルツギッターからグリーン鉄鋼を調達 (独立行政法人日本貿易振興機構)

<https://www.jetro.go.jp/biznews/2022/02/48e89cd225d386b4.html>