

TODAY

カーボンニュートラルを目指して
日本の鉄鋼業が踏み出した第一歩

日本製鉄株式会社
フェロー 村上 英樹

2020年10月26日菅義偉総理による所信表明演説での2050年にカーボンニュートラルを目指すことの宣言、2021年4月22日政府の2030年の温室効果ガス削減目標2013年比46%削減の表明は、それまでも徐々に高まっていたグリーントランスフォーメーション(GX)への流れを大きく加速しました。非常にハードルの高い目標であり、今、ものづくり産業においても大きな産業変革が求められています。その中でも鉄鋼業は、国内では約1.7億トン/年(約14%)のCO₂を排出しており、日本のカーボンニュートラル実現のためには鉄鋼業におけるカーボンニュートラル実現が不可避の課題になります。

日本鉄鋼連盟は、これまでも地球環境問題における業界のおかれた立場を認識し、京都議定書に対する自主行動計画の達成後も、低炭素社会実行計画を公表、着実に遂行してきました。直近ではカーボンニュートラル行動計画フェーズIの目標(BAU排出量比300万トンのCO₂削減)に対し、2020年度大幅に過達したことも報告されています。しかしながら、2015年COP21にて採択されたパリ協定後、2050年までに温室効果ガスの80%削減目標が「地球温暖化対策計画」で明記されるなど、目標は急速に上がっていきましました。

そのような中、日本鉄鋼連盟は、2018年に長期取組の方向性として、世界に先駆け「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」を発表しました。これは2100年には、化石系炭素に頼らない製鉄法を目指していこうという世界に先駆けした鉄鋼業としての宣言であり、IEA ETP-2017における2°Cシナリオとの整合性も図っていました。

この宣言を具体的に実行していくための新たな技術革新を推進するために、2020年度より高炉メーカー3社とJRCMは、本NEDO先導研究事業「ゼロカーボン・スチール実現に向けた技術開発」を開始いたしました。その後、実行期間中に、冒頭に記しました政府のカーボンニュートラル宣言、2021年の地球温暖化対策推進法の改正、そしてグリーンイノベーション基金が創設、開始されましたが、先行

して本事業にて議論してきた内容からの発展が多くあり、鉄鋼業のカーボンニュートラルへ向けた第一歩であったと感じています。

パリ協定が目指すゴールには、これまで進めてきた革新的製鉄技術「環境調和型プロセス技術」だけでなく、それらを超えた「超革新技術」が必要となります。製鉄プロセスにおけるカーボンニュートラルの実現は、一直線で実用化に至ることが見通せない挑戦であり、本事業では、まずは「先進高炉」「100%水素還元製鉄と精錬」、「バイオマス活用を含むCCU技術の拡大」などを基軸として、あらゆる手段を組み合わせて、複線的に推進していく必要があると提示しましたが、狙いは、これらの技術的なボトルネックを明らかにし、技術的な見地から実現に向けたロードマップを示すことにありました。

検討は、我が国の国際競争力強化と3つのエコ(エコプロセス、エコプロダクト、エコソリューション)により地球環境の両立に貢献してきた日本鉄鋼業の事業継続を前提としています。

今回は、実験室レベルの萌芽的将来技術に関しては最少の記載に止め、2050年までに実用化が必要な技術について、過渡的技術を含め、それぞれの専門家が調査し、必要に応じて基礎実験・シミュレーションを行いながら、ボトルネックとなる課題や重要要素技術について、明確化と進め方を示して頂きました。

調査を進めていくに従い、改めて非常にハードルの高い挑戦であり、実現には、非連続的イノベーションとそれを支える長期にわたる研究開発、技術を実装する際の膨大な新たな設備投資と既存設備の転換、カーボンフリーの水素と電力の大量安価安定供給のための社会インフラ、経済合理的なCCUSの社会実装といった脱炭素化に向けた国家戦略の構築等、多くの難題が立ちまはだかっていることも再認識されました。直近発生したウクライナ問題によってエネルギー安全保障の課題が浮き彫りとなり、少なからず各国のカーボンニュートラル戦略にも影響を与えています。

エネルギー構造的に決して強くない日本が、国際競争におけるイコールフットイングを確保し、産業競争力強化とビジネスチャンスを獲得できる政策の一体的実現、そしてカーボンニュートラル実現に伴う課題を社会全体で理解し取り組むための仕組み作りも必要だと考えられます。

本先導研究が、日本鉄鋼業の今後のカーボンニュートラル実現の一助となれば幸いです。

「ゼロカーボン・スチール」の実現に向けた技術開発プロジェクトの成果

一般財団法人金属系材料研究開発センター 環境・プロセス研究部 加藤 徹

1. はじめに

鉄鋼業界は我が国全体の14%に相当する大量のCO₂を排出しており、その排出削減対策は重要な課題となっている。これに対して、我が国では現行の高炉法による低炭素化について炭素に代わる還元材として水素を高炉に使用する製鉄法や、排出されたCO₂を分離・回収する技術として、2008年度より、NEDOの委託事業である「環境調和型プロセス技術の開発」の「水素還元等プロセス技術の開発」に高炉メーカー等各社が参画し、高炉からのCO₂排出の30%削減を目標とする革新的な技術開発に取り組んできた(COURSE50)。また、同「フェロコークス活用プロセス技術開発」においては、フェロコークス利用により高炉からのCO₂排出量の削減を目指す技術開発も行っており、いずれも2030年頃の実用化を目指している。

しかし、これらの取り組みだけでは2015年に採択されたパリ協定の長期目標と整合する鉄鋼業からのCO₂排出削減を実現することは困難であり、超革新的な鉄鋼製造新技術が必要であると認識されていた。そのような状況の下、製鉄における「カーボンニュートラル」の実現に向けた研究開発に取り組むため、現段階での諸課題を抽出し、研究開発を加速させるための先導研究が、2020年3月に国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)より公募された。一般財団法人金属系材料研究開発センターは日本製鉄株式会社、JFEスチール株式会社、株式会社神戸製鋼所、と共同で、「ゼロカーボン・スチール」の実現に向けた技術開発を提案し、2020年6月に採択された。

本事業は上記委託先の他、再委託先あるいは共同実

施先として地球環境産業技術研究機構(RITE)、東北大学、早稲田大学、九州大学、産業技術総合研究所が参画し、2022.6～2022.3の2年弱を実施期間とし、合計1.9億円の予算で実施された。本稿では本事業での取り組み内容や検討結果、さらには実施期間中の世の中の動きについて概要を報告する。

2. 本事業の検討技術選択の背景と取り組み内容

前述のように高炉法による鉄鋼製造時には大量のCO₂排出を伴うが、これは高炉法が鉄鉱石(酸化鉄)をコークス(石炭)を用いて還元する炭素還元プロセスであることに起因している。還元剤としての炭素の使用量の削減には長年取り組まれてきたが、高炉法の技術成熟化が進み操業改善や効率化による効果は頭打ちとなりつつある。したがって、飛躍的なCO₂排出削減には還元剤を置き換える必要があり、水素による還元を検討することとした。なお、コークスから炉内で生成した一酸化炭素での鉄鉱石還元時は反応熱を放出する発熱反応であるのに対して、水素による還元反応は熱を吸収(吸熱反応)し温度が低下してしまうため、水素還元では熱補填という観点での検討も必要となることが大きな課題の一つである。

表に本事業で検討した主な技術を示す。鉄鋼業が将来、カーボンニュートラルを可能とする新プロセスに移行するとしても、継続的に社会が必要とする鉄鋼需要量を供給していくためには、それまでの過渡的技術、すなわちトランジション技術もあわせて考慮していく必要がある。そのような視点に立つと現在の高炉法をベースとした鉄鋼製造は今後も不可欠であり、そこでCO₂削減に資する技術開発も並行して進める必要がある。具体的には、COURSE50の知見を足掛かりとし

表 本事業で検討した主な技術

分類	技術類型	名称	概要	石炭利用
過渡的技術	高炉	先進高炉1 SuperCOURSE50	外部水素利用による高炉によるさらなる水素還元比率アップ	有
過渡的技術	高炉	先進高炉2 カーボンリサイクル高炉	高炉副生ガス中CO ₂ の炭素化合物への返還(CCU)と高炉への再使用	有
過渡的技術	高炉一貫製鉄所前提 CCU・バイオマス	—	分離・回収したCO ₂ の有価化・循環利用技術(CCU)およびバイオマス炭材代替利用技術	
超革新的技術	直接還元炉+溶解・精錬	シャフト炉	究極的にはシャフト炉による100%水素還元製鉄法	～無
超革新的技術	直接還元炉+溶解・精錬	流動層	究極的には流動層による100%水素還元製鉄法	～無
超革新的技術	直接還元炉+溶解・精錬前提 CCU・バイオマス	—	分離・回収したCO ₂ の有価化・循環利用技術(CCU)およびバイオマスの炭材代替利用技術	～無

て高炉において更に水素による還元を増やす技術の開発 (Super-COURSE50) や、高炉副生ガス中 CO₂ の炭素化合物への変換と高炉への再使用を行うカーボンリサイクル高炉技術の開発に加えて、分離回収した CO₂ の有価化、循環利用技術 (CCU) およびバイオマス利用による化石燃料由来の炭素の代替技術の開発、等の検討も必要と考えた。

一方、超革新的技術としては、石炭 (炭素) を還元材として利用しない水素還元製鉄法のシャフト炉と流動層を選択し、100%水素還元製鉄法の検討とこれらのプロセスから製造される水素還元鉄の溶解・精錬プロセス、およびそれらを前提とした CCU・バイオマス利用を想定した。ここでシャフト炉は炉外で製造したペレットを上部から投入し、対流するガスによって還元するプロセス、流動層は粉体を充填した層の下方から十分な流速の流体を吹込み、粉体を液体のように流動させて還元させるプロセスであり、天然ガスあるいは天然ガスを改質したガスによる鉄鉱石の還元技術としては世界にも適用例が報告されているものの、100%水素による還元については未確立の技術となる。鉄鉱石の還元技術には水素還元の外に電気エネルギーにより還元するプロセスなどが考えられるが、現状では実験室レベルの報告などにとどまることから本事業では研究開発動向の情報収集にとどめた。

技術検討に当たっては超革新的技術においても過渡的技術においても、我が国の鉄鋼業の環境に合致させる必要がある。現在、我が国の鉄鋼生産量は粗鋼約 1 億トンで推移しており、世界第三位に位置するが、その主たる鉄分原料である鉄鉱石は、100%輸入に依存しており、その内 60%は、コストや調達リスクの観点から、世界一位の鉄鉱石生産国である豪州からとなっている。この豪州産鉄鉱石は、2030 年以降、鋼

材の特性を劣化させるりんの濃度の急激な上昇が予測されている。

我が国の鉄鋼業の競争力は、高強度鋼材を始めとした高級鋼の製造によって維持されており、ユーザーである自動車をはじめとする我が国の主要産業の国際競争力にも大きく寄与している。従って、将来にわたりこの豪州産鉄鉱石を主原料として、高級鋼材を製造することを前提としたプロセス開発を目指す必要がある。

カーボンニュートラルの実現に向けた本格的な研究開発事業を見据え、本事業では、超革新的技術および過渡的技術として有望な技術を抽出し、技術調査によりそれぞれの技術の開発課題と必要要素技術を整理するとともに、概念設計に必要なシミュレーションモデル等の構築や基礎データの収集等の基礎検討を行い、これらの結果から得られた開発課題を基に、それぞれ 2050 年度までのロードマップを作成することを骨子とした。ロードマップの作成についてはラボスケール、パイロットスケール、実機スケールの試験時期とそれぞれの適用時期、検討内容を明記して作成した。

本事業における検討内容の構成を模式的に図に示す。本事業では①水素還元、②還元鉄の溶解・精錬、③バイオマス・CCU の活用ならびに④エネルギーモデル・全体ロードマップ作成の 4 つの大項目で構成した。

①水素還元では高炉関連技術として水素還元を極限まで活用する Super-COURSE50 とカーボンリサイクル高炉を、石炭を還元材として利用しない水素還元製鉄法としてシャフト炉と流動層についてボトルネック課題とその解決の道筋について検討した。また、②還元鉄の溶解・精錬ではシャフト炉や流動層で製造される還元鉄を溶解原料とする溶解・精錬プロセスについてボトルネック課題と解決の道筋を検討した。さらに③バイオマス・CCU では高炉法や水素還元製鉄法を前

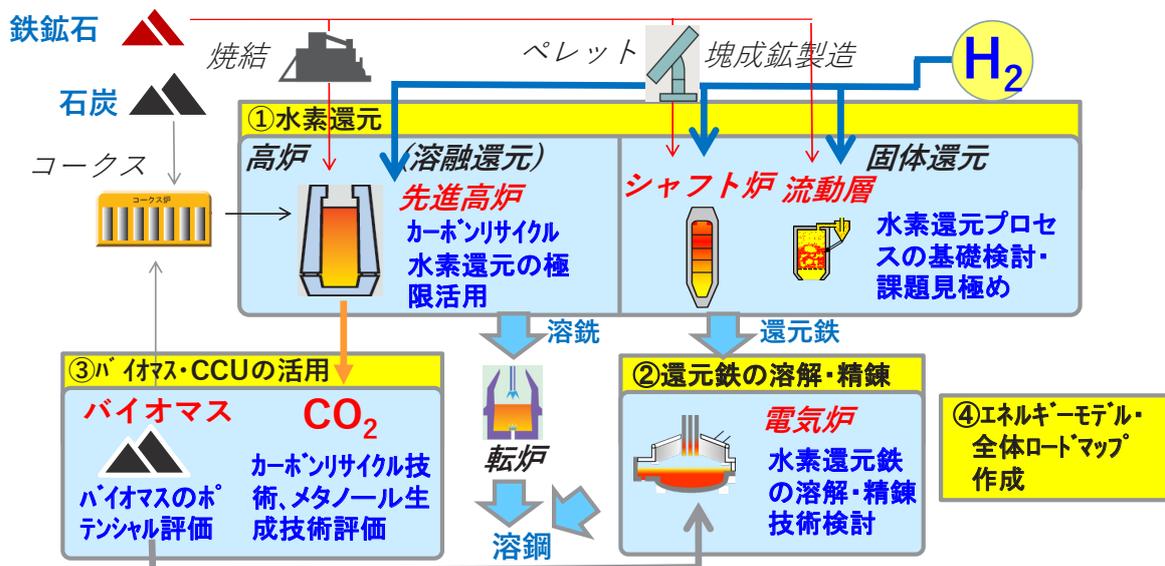


図 本事業における検討内容の模式図

提としたCCU・バイオマス利用について調査および検討した。これらの結果も踏まえ④エネルギーモデル・全体ロードマップ作成では研究開発での評価ツールとして必要な製鉄プロセス全体のエネルギー・物質収支モデル等のプロトタイプも製作と各項目個々のロードマップを総合した全体ロードマップを作成した。

3. 本事業における検討の成果

①水素還元

主要鉄鋼会社の温暖化対策目標、欧州を中心とした水素還元製鉄の取り組み情報の収集に加え、高炉におけるCO₂削減技術開発の経緯及び現状、シャフト炉、流動層に関する稼働状況や水素製鉄への展開状況などに関する技術調査を行った。

また、高炉法に関しては COURSE50 技術に対して、更なるCO₂発生量削減を目的として、水素還元の限界を追求する水素還元拡大利用技術のための開発課題を明らかにするとともに、高炉利用に適したカーボンリサイクル還元材の調査やカーボンリサイクル還元材の高炉利用時のCO₂発生量低減効果の検証などを行い、Super-COURSE50 とカーボンリサイクル高炉のそれぞれについてプロセスの概念設計と実機化に向けたロードマップを作成した。

さらに、シャフト炉や流動層に関するボトルネック課題調査及び実験的な検討として、水素還元時の吸熱反応に伴うシャフト炉内温度への影響、流動層でのボトルネック課題となる流動化不能現象の原因としてのスティッキングやシンタリングに対する水素還元の影響、その原因となる針状鉄生成挙動などを検討した。さらにシャフト炉のモデル計算による解析や鉄鉱石塊成鉱の水素還元挙動に関する基礎実験、流動層に関する小型試験による鉄鉱石の還元凝集挙動、粉化性評価実験などを行い、シャフト炉方式および流動層方式のそれぞれについて技術開発に必要な開発項目と開発ステップをロードマップに整理した。

②還元鉄の溶解・精錬

豪州鉄石の使用や水素還元を前提とした還元鉄の溶解・精錬に関する技術調査および課題抽出を行った。前述のように豪州鉄石は低鉄品位で脈石分とりん濃度も高く、将来はさらに高まると見込まれる。この条件で電気炉により溶鋼を製造する溶解・精錬挙動を検討したところ、脱りん負荷と多量の脈石から多量のスラグが発生するとともに、溶解に多量のエネルギーを必要となることが明らかとなった。これらの結果に基づき、水素還元鉄の溶解・精錬の技術開発に必要な開発項目を整理し、ロードマップを作成した。

③バイオマス・CCU

各種のCCU技術の中から一貫製鉄所で発生する炭素の有価化という視点で調査を行い国内製鉄所にCCUを実装した場合のCO₂削減効果、導入コストの分析、有望な技術の選定を行い、その結果に基づき、技術ロードマップを作成した。また、CO₂を原料とするCCUメタノール合成について技術調査とともにカーボンリサイクル高炉を想定し反応器シミュレーションによる評価を行った。バイオマスに関しては、高炉転炉法におけるコークス・微粉炭代替や焼結用炭材や、直接還元製鉄における利用等の実態とともに廃プラスチックの利用状況を調査し、廃プラスチック、石炭との性状比較を行った。

④全体評価および全体ロードマップの作成

製鉄所エネルギーモデルの概念設計を行い、市販の表計算ソフトで計算可能なプログラムを作成し、使用エネルギー量およびCO₂排出量の定量的な評価を行うとともに先進高炉とCCUSを組み合わせた技術ルートおよび水素直接還元・溶解精錬の技術ルートから構成する全体ロードマップを作成した。

4. 本事業成果の活用

本事業実施中の2年弱の間にも脱炭素社会の実現に向けた課題意識は大きく加速し、我が国でも2020年10月に2050年にカーボンニュートラルを目指すことを宣言したことに続き、同年12月には「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」が策定された。その中で14の重点分野がまとめられ、カーボンリサイクル・マテリアルとして「ゼロカーボンスチールを実現」と明記された。さらに、2021年4月には2030年の温室効果ガス削減目標を2013年比46%削減とすることが表明された。

この流れの中で2021年グリーンイノベーション基金事業が造成され、同年9月製鉄プロセスにおける水素活用プロジェクトが公募、12月に採択され、2022年1月ないし2月より始動した。同プロジェクトは高炉を用いた水素還元技術の開発2テーマと、直接水素還元技術の開発2テーマの計4テーマで構成されており、本事業の成果も活用して計画が策定された。今後も本事業で整理した開発項目やロードマップを生かしつつ、我が国の鉄鋼業の環境に合致したカーボンニュートラルを他国に先駆けて実現し、「2050年カーボンニュートラルの実現」に寄与する技術となることを期待している。

なお、本事業の成果の詳細については、NEDOホームページにて成果報告書として公開される予定である。

The Japan Research and Development Center for Metals
JRRCM NEWS / 第428号

内容に関するご意見、ご質問はJRRCM総務企画部までお寄せください。
本書の内容を無断で複写・複製・転載することを禁じます。

発行 2022年8月1日
発行人 小紫正樹
発行所 一般財団法人 金属系材料研究開発センター
〒105-0003 東京都港区西新橋一丁目5番11号 第11東洋海事ビル6階
TEL (03)3592-1282 (代) / FAX (03)3592-1285
ホームページ URL <http://www.jrcm.or.jp/>
E-mail jrcm@oak.ocn.ne.jp