

TODAY

**ある工業大学での教育研究と
鉄鋼精錬との繋がり**
— 製鉄脱炭素化と劣質鉱石活用に向けて —**日本工業大学 基幹工学部
教授 内田 祐一**

当方は化学系の学科を卒業した後に川崎製鉄(株)(当時)に入社し、途中、京都大学で助手として勤務する機会を挟み、JFE スチール(株)で鉄鋼精錬の研究開発に従事しました。現職に移ってからも、鉄鋼精錬やスラグ利用、リサイクルの研究を続けています。

大学ではこれら研究の説明や、各産業でのカーボンニュートラル対策の講義を行います。学生にそれらを理解させるには相応の時間を割かねばなりません。多くの工学的・化学的素養を伝える場にもなっています。そのような日々の活動と、鉄鋼業界の直面する「製鉄の脱炭素化」「鉄鉱石の劣質化」といった課題との繋がりの一端を、駄文にて紹介したいと思います。

製鉄の脱炭素化の鍵である高炉製鉄での水素利用に関しては、様々な媒体でも紹介され、世間にもその重要性が浸透しつつあります。これに関連して大学では「水素をいかに作るか」を講義することになります。最近ではまさにいろいろなカラーで呼ばれる水素があり、学生も覚えやすいようですが、その製法の説明を通して様々な化学反応の理解に繋がります。

もう一つの鍵である電気炉製鉄の拡大に関しては、鉄スクラップ利用に伴ういわゆるトランプエレメント(酸化除去の困難な銅やスズ等)の混入が、薄板などの高級鋼材の製造の課題になります。現実的な打ち手としてトランプエレメントを含まない鉄源である直接還元鉄や水素還元鉄を利用することになると、これらも炭素濃度が低いため高温(> 1500℃)での溶解となります。このとき、鉄源中のリンなどの不純物元素の酸化除去は、高

温のため熱力学的に不利な条件が課題となります。このように、電気炉製鉄による高級鋼溶製の説明は一言では片付きません。このお題を通じては、エリンガム図(酸化反応の自由エネルギー)、鉄-炭素状態図、メタル/スラグ間の脱リン平衡など、教えることも盛り沢山です。私もこれら課題に取り組むプロジェクトの端くれにおりますので、それに資する研究・教育を心掛けています。

鉄鉱石の劣質化により、脈石の増加による熱ロスやスラグ量増大、および溶鉄中リン濃度の上昇による精錬負荷増大、などの言わば永遠の課題の深刻化が懸念されます。我が国鉄鋼業が磨き上げてきた精錬技術を一層高めるとともに、高炉スラグ、製鋼系スラグの用途拡大を継続的に考える必要があるでしょう。後者については、含有成分の効果による海域環境修復材としての適用が進みつつあります。ブルーカーボンへの貢献も期待され、ピンチをチャンスに変えることになるのかもしれませんが。高リン鉱石からリンを除去して資源活用するNEDOプロジェクトが進められており、私自身も製鋼スラグと下水スラッジを混合してリンを濃化分離する研究を別途行っています。この研究を通しては、スラグ状態図の見方や多相平衡の概念を伝えることができ、さらには海洋での炭素貯留の啓蒙などにまで及びます。

なお当研究室では、鉄鋼業に水素供給するような規模には手が出ませんが、せめて地域レベルへのメタンや水素の供給を念頭に、微生物発酵による有価ガス生成の研究も手掛けています。さらに、発酵ガス中のCO₂や発酵後の消化液の植物への施用を、大学構内にビニールハウスを作って実証する運びになりました。鉄鋼製造に携わった経験をもとに、今風に言えばスピノフした研究となっています。

鉄鋼業は客観的に見て投入、流動、循環する資源やエネルギー量が桁違いです。その製造プロセスを理解することで、関連分野まで視野も広がり、様々な展開が体験されます。今後もJRCM 殿にて推進される技術開発に微力でも貢献しながら、人材育成にも繋がりたいと考えます。

グリーンイノベーション基金事業 「製鉄プロセスにおける水素活用プロジェクト」の概要

(一財) 金属系材料研究開発センター

カーボンニュートラル統括部長 / 環境・プロセス研究部長 加藤 徹

1. はじめに

2020年10月、我が国政府は2050年までに温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする「2050年カーボンニュートラル宣言」を発表した。この目標を実現するために、経済産業省が中心となり、関係省庁と連携して「経済と環境の好循環」を創出していく産業政策、「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、産業政策・エネルギー政策の両面から今後成長が期待される14分野が示され、10年間で2兆円の資金を投じるグリーンイノベーション基金（GI基金）が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）に創出された。

鉄鋼業のCO₂排出量は2020年度実績で年間約1億3,100万トンであり、我が国の産業部門全体の約4割に相当すると報告されている。このため、2050年カーボンニュートラル実現のためにも排出削減を強く求められており、前記の14分野にも輸送・製造関連産業分類のカーボンリサイクル・マテリアル産業に鉄鋼業が記載されている。このような背景を踏まえ、日本鉄鋼連盟は「カーボンニュートラル行動計画」の中で2030年度に2013年度比で30%削減、50年にカーボンニュートラル実現するとCO₂排出量削減目標を設定した。また、高炉各社も、それぞれがこの目標に対応する行動計画を公表している。

こうした動きの下、2050年カーボンニュートラルを実現するために、日本製鉄、JFEスチール、神戸製鋼所の高炉3社に、金属系材料研究開発センター（JRCM）が加わり水素製鉄コンソーシアムを結成し、2022年1月よりGI基金による委託・助成事業として研究開発を開始した。同コンソーシアムは、経済産業省が策定したグリーンイノベーション基金事業「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・社会実装計画を踏まえて、業界が丸一となって基金事業の成果を最大化すべく結成されたものであり、水素製鉄プロジェクト（GREINS: Green Innovation in Steelmaking）として活動している。

だが、原理的にCO₂の発生が避けられないため、その排出量を削減するためには抜本的なプロセス転換が必要となる。高炉法の他に既に還元されているスクラップを原料とする電炉法も鉄鋼生産の大きな割合を占めているが、電炉法では不純物の制約から高級鋼の製造が困難とされていることに加え、鉄鋼分野は世界的に見て将来に渡り需要増加が見込まれるのに対して、需要に対応できる量のスクラップ供給は不可能であり、鉄鉱石を原料とする製鉄プロセスは今後も必要となる。

鉄鉱石を還元するための炭素に代わる還元材となり得る物質は限られており、大量供給の可能性や調達コストの観点から、水素を使用した水素還元製鉄の研究が各国で進められている。わが国でも、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、2020~21年度にNEDO先導研究「ゼロカーボン・スチール」の実現に向けた技術開発」に取り組み、想定されるプロセスについて課題を抽出し、開発のロードマップを作成した。

本プロジェクトはこの成果も踏まえ、水素の活用を想定し、現在の主力製造プロセスである高炉法に水素還元を導入する(1)「高炉を用いた水素還元技術の開発」と、直接水素還元炉 - 電炉一貫プロセスで水素還元法により鉄鋼を製造する(2)「水素だけで低品位の鉄鉱石を還元する直接水素還元技術の開発」の2項目の検討を実施しており、それぞれ以下に紹介する2件ずつのテーマに取り組んでいる。

(1) 高炉を用いた水素還元技術の開発

① 所内水素を活用した水素還元技術等の開発

製鉄プロセスの脱炭素化に向けた技術開発として、我が国の高炉各社は2008年より世界に先駆けて、NEDOの委託事業「環境調和型プロセス技術の開発／水素還元等プロセス技術の開発」において、製鉄所内で発生する水素含有ガス等を活用した高炉での鉄鉱石の還元技術開発（COURSE50: CO₂ Ultimate Reduction System for Cool

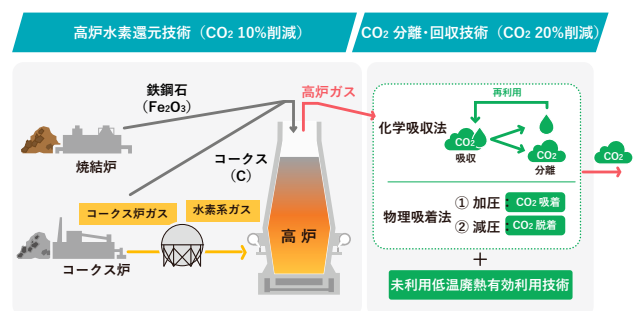


図1 水素製鉄プロジェクト（GREINS）のロゴ

水素製鉄をイメージしたブルーを基調に、環境をイメージしたグリーンとで構成し、グリーン(G)と製鉄(S)を強調しました。iはグリーン水素（水素分子）で鉱石中の酸素原子と反応して水分子を生成、青い地球を支えるイメージを表現しています。

2. 事業の概要と進捗状況

鉄鋼の製造は、古くから木炭や石炭などの炭素を用いて鉄鉱石（酸化鉄）を還元する高炉法により行われてき



<https://www.greins.jp/>

図2 COURSE50 開発技術の概念

Earth 50) に取り組んできた。この技術では、高炉水素還元技術による CO₂ 排出抑制と、製鉄所内の未利用排熱を活用した CO₂ の分離回収技術により、プロセスから排出される CO₂ を 30% 以上削減することを目標としてきた。プロジェクトでは 2016 年に日本製鉄東日本製鉄所君津地区に内容積 12m³ の試験高炉を建設して試験の結果、開発目標である高炉からの CO₂ 排出量 10% 削減を達成可能なことが確認された。

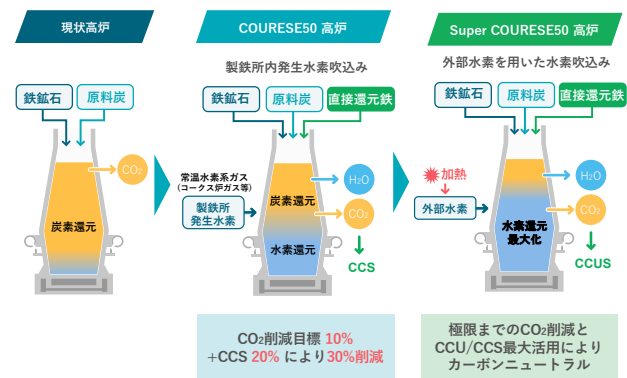
本テーマではこの技術を引き継ぎ、2022 年 8 月のステージゲート審査を経て、25 年度下期に日本製鉄東日本製鉄所君津地区第 2 高炉で実機による実証試験を開始するべく、設備改造工事などの準備を進めている。

② 外部水素や高炉排ガスに含まれる CO₂ を活用した低炭素技術等の開発

高炉内の水素還元を拡大すると、吸熱反応である水素還元に起因する炉内温度の低下や、コークス量の削減に伴う炉内通気性の確保などが課題となる。これらの課題を克服し、高炉内の水素還元を最大化するために、「Super COURSE50」と「カーボンリサイクル高炉」の 2 つの技術に取り組んでいる。

「Super COURSE50」では高炉に大量の水素を加熱した上で吹き込む。これにより、テーマ①で実施する常温のコークス炉ガス吹込みより、さらなる CO₂ 排出削減を目指している。

これまでに、前項に記載した試験高炉において加熱した水素を使用して CO₂ を削減する開発試験を 2022 年 5 月より実施し、2023 年末の試験において、世界最高水準となる、高炉本体からの CO₂ 排出量が 33% の削減できることを確認した。

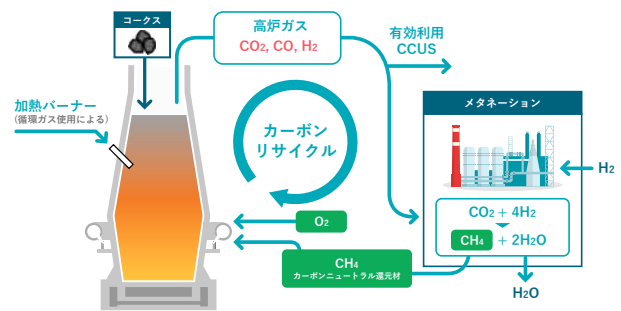


<https://www.greins.jp/>

図 3 COURSE50 と Super COURSE50 技術の概念図

他方、「カーボンリサイクル高炉」では、高炉排ガス中の CO₂ を水素と反応させてメタンに変換し、還元材として繰り返し利用する技術の開発を進めている。こちらは JFE スチール東日本製鉄所千葉地区に小型カーボンリサイクル試験高炉を建設し 25 年 4 月から 26 年度に試験を開始する予定である。

両技術とも、CO₂ の分離回収技術なども含めたあらゆる技術の低炭素化技術を組み合わせることにより、高炉法において製鉄プロセスから CO₂ を 50% 削減する技術を開発することを目標としている。



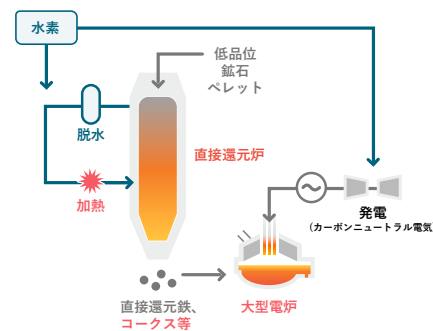
<https://www.greins.jp/>

図 4 カーボンリサイクル高炉技術の概念図

(2) 水素だけで低品位の鉄鉱石を還元する直接水素還元技術の開発

① 直接水素還元技術

2030 年までに、低品位の鉄鉱石を水素で直接還元する技術を開発し、中規模直接還元炉において、現行の高炉法と比較して CO₂ 排出量を 50% 以上削減する技術を実証することを目標としている。また、メタネーション反応を利用して、カーボンをプロセス内で循環再利用するカーボンリサイクルシャフト炉技術の開発にも合わせて取り組む。日本製鉄波崎研究開発センターに小規模試験シャフト炉、JFE スチール東日本製鉄所千葉地区に小型ベンチ試験炉を建設、24 年度～25 年度に試験を開始する予定である。



<https://www.greins.jp/>

図 5 直接水素還元と大型電炉技術の概念図

② 直接還元鉄を活用した電炉の不純物除去技術開発

溶融した銑鉄が生成する高炉法とは異なり、直接水素還元で製造した還元鉄は固体となる。また、還元鉄には鉄鉱石に含まれる脈石分としての SiO₂ や Al₂O₃ などの酸化物や、不純物のりんが含まれ、劣質鉄石を原料とすると、より高濃度となることから、鋼製品を製造するにはこれを溶融し精錬する必要がある。本テーマでは還元鉄を電気炉で溶解、不純物を除去する技術開発を行い、製品に影響を及ぼす不純物の濃度を高炉法並みに低減する技術を実証する。日本製鉄波崎研究開発センターと JEF スチール東日本製鉄所千葉地区に小型試験電気炉を建設し、24 年度に試験を開始する予定である。また、神戸製鋼所高砂製作所の小型商用炉を改造の上、22 年度より試験が開始されている。

3. 取り組み技術の難しさと複線的な取り組みの重要性

(1) わが国鉄鋼業を取り巻く環境と取り組み技術の難しさ

我が国鉄鋼業は、世界でも最高水準の高品質な鋼（高

級鋼)を製造しており、今後もその地位を守り続けていく必要がある。一方で、需要側では各分野でグリーンスチールのニーズが飛躍的に拡大していくことが予想され、高級鋼の分野でも同様の動きが想定される。しかしながら、欧州を中心に多数の直接水素還元法の実生産規模プロジェクトが発表されているにもかかわらず、直接水素還元法を始めとするグリーンスチールの製造プロセスは、技術的に未確立であるとともに、研究開発リスクも高い。

また、我が国は、世界の鉄鉱石主要産地のうち、比較的距離の近い豪州産鉄鉱石を主な原料として製造しているが、豪州産鉄鉱石は南米産などと比べ鉄分の濃度が低く、りん濃度が高いなど相対的に低品位であるとともに、将来的にはさらに劣質化することが予想されている。天然ガスによるシャフト炉直接還元プロセスは商業生産も行われているが、高炉法より高品位な鉄鉱石の使用が前提となっている。世界的に見ても高品位鉄鉱石の供給量には制約があり、豪州鉄鉱石を主として使用する我が国の地政学的理由ばかりでなく、従来直接還元法で使用されていなかった低品位鉄鉱石も使用できる技術の確立は必須となる一方、その開発には技術的にもコスト面でも非常に多くの課題がある。

わが国が豪州産の劣質鉄鉱石を使用しながら、これまでの高炉法と同等の品質を維持しつつ、製鉄プロセスの脱炭素化を実現するためには、これらの課題を克服できる技術開発が必要となり、多額の研究開発投資を伴うことから、官民一体となり各社が連携して取り組む必要がある。

(2) 複線的な取り組みの重要性

前章で述べたようにわが国のプロジェクトは、「高炉を用いた水素還元技術」と、「直接水素還元技術の開発」に並行して取り組むことに特徴がある。

高炉法は、鉄鉱石由来の鋼材を生産するプロセスの大半を担っている現状が示す通り、技術的にも確立されており、エネルギー効率にも優れている。加えて、低品位鉄鉱石の使用が比較的容易であり、転炉法と組み合わせることにより高級鋼の製造が可能という利点がある。しかしながら、カーボンニュートラルの実現にはCCUSの活用が必要である。

直接水素還元技術については、グリーン水素・電力が供給されれば脱炭素プロセスが実現可能であるが、既存の天然ガスを使用した直接還元技術は高品位鉄鉱石を前提としており、低品位鉄鉱石を使用するための技術開発が必要となることに加え、現時点では100%水素還元技術は確立されていない。

IEA(国際エネルギー機関, International Energy Agency)の整理した2050年の鉄鋼生産見通しでも、技術開発が進んだとしても鉄鉱石を原料とする製鉄の約1/2は高炉法が担うと予測されている。高炉法における水素還元技術の開発を同時に進めることは、直接還元法に移行する

までの過渡的技術としてばかりでなく、原料や製品などの種々の条件に対応して想定される種々の状況やシナリオに対応するためにも非常に重要な戦略となる。

4. 本プロジェクトの加速化と実施内容の追加・拡充

前述のように、本プロジェクトは2022年1月にNEDOのGI基金事業に採択され、1935億円を上限として研究開発が開始された。

その後、革新的技術の研究開発・社会実装に係る取組の追加及び加速化の必要性等を踏まえ、2023年5月の第11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において、水素製鉄プロジェクトを含む6プロジェクトの取組の追加・拡充が提言された。

水素製鉄プロジェクトについては、世界各国で製鉄プロセスの脱炭素化に向けた革新的な技術開発が加速していることを背景に、高炉を用いた水素還元技術と直接水素還元技術について、より実機に近い規模での実証を行うとともに、高品質と高生産性を両立可能な新技術の研究開発を追加することで、社会実装を5年程度前倒しする水素還元製鉄技術の実証規模拡大が提言された。

その後、同部会エネルギー構造転換分野WGの二回の審議を経て「製鉄プロセスにおける水素活用」研究開発・社会実装計画が更新され、プロジェクト総額が上限4499億円(国費負担額のみ)に増額されるとともに、水素製鉄プロジェクトの(2)「水素だけで低品位の鉄鉱石を還元する直接水素還元技術の開発」に③直接還元鉄を活用した電気溶融炉による高効率溶解等技術開発が追加された。

5. おわりに

「2050年カーボンニュートラル」の実現に向け、かつてない規模の国費が投じられて「水素製鉄プロジェクト(GREINS)」の取り組みが開始された。本プロジェクトでは、鉄鋼製造におけるカーボンニュートラルの実現という前人未到の技術開発に業界が文字通り一丸となって取り組んでいる。各方面からの期待も大きく、世界に先駆けて技術を確立し、我が国鉄鋼業の技術力、競争力のさらなる向上につなげることを目標に取り組みを強化していく。

水素製鉄プロジェクトは、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)の研究開発委託・助成事業「グリーンイノベーション基金事業/製鉄プロセスにおける水素活用プロジェクト」(JPNP21019)にて実施しています。また、「ゼロカーボン・スチール」の実現に向けた技術開発ならびにCOURSE50プロジェクトは、いずれも同機構の委託事業として実施しました。

参考:

経済産業省 HP: GI 基金事業 「製鉄プロセスにおける水素活用」プロジェクトに関する研究開発・社会実装計画
https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/gifund/pdf/gif_05_randd_r2.pdf
NEDO HP: カーボンニュートラルな未来へ
<https://green-innovation.nedo.go.jp/>
水素製鉄プロジェクト GREINS HP
<https://www.greins.jp/>

The Japan Research and Development Center for Metals
JRCM NEWS / 第 445 号

内容に関するご意見、ご質問は JRCM 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 2024年4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
URL <http://www.jrcm.or.jp/> E-mail jrcm@oak.ocn.ne.jp
※送付先の変更・中止等は上記E-mailに御連絡をお願いいたします。