

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」プロジェクトに関する 研究開発・社会実装計画

令和 5 年 10 月 27 日

経済産業省

製造産業局

目次

1. 背景・目的	3
2. 目標	10
3. 研究開発項目と社会実装に向けた支援	15
4. 実施スケジュール	19
5. 予算	22

1. 背景・目的

- 鉄鋼業の重要性と課題解決の方向性

- 鉄鋼は、宇宙船から自動車、新幹線、PC、スマートフォン、住宅、日用品等の人々の生活を支えるあらゆる製品に組み込まれている。こうした社会の基盤となる製品の材料を供給する鉄鋼業は、サプライチェーンの川上に位置し、資源・エネルギー・土木・建築等のインフラ分野や、自動車、電機電子・造船等の製造業等のあらゆる産業の基盤の役割を果たしている。2050年のカーボンニュートラル社会においても、鉄鋼は、自動車向けの電磁鋼板や洋上風力のモノパイル等にも利用されるなど、脱炭素化製品に必要不可欠な素材の一つである。IEAの見通しにおいても、2050年断面において、自動車や各インフラ、電子電気機器等で大きな需要が見込まれている。
- しかしながら、鉄鋼業では、製造過程でCO₂を多く排出することが課題となっており、実際、鉄鋼業は産業部門全体の40%ものCO₂を排出している。製鉄プロセスにおいて、炭素（石炭や木炭）を鉄鉱石の還元を用いる技術は古来より不変の製鉄のあり方であり、現行の高炉法は、エネルギー効率、生産効率、生産品質（高級鋼製造）、原料条件（豪州産等の低品位鉄鉱石が利用可能）の面で優れている一方で、コークス（石炭）を用いて還元する過程で不可避免的にCO₂が発生する。
- 2050年カーボンニュートラル（CN）実現に向けて、グリーン成長戦略の実行計画では「循環経済への移行も進めつつ、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ことを掲げた。また、GX推進戦略においても、世界に誇る脱炭素技術の強みをいかして、世界規模でのカーボンニュートラルの実現に貢献するとともに、新たな市場・需要を創出し、日本の産業競争力を強化することを通じて、経済を再び成長軌道に乗せ、将来の経済成長や雇用・所得の拡大につなげることが求められている。
- そのため、鉄鋼業におけるカーボンニュートラル実現のためには、原料や還元剤において化石燃料から脱却するという、製鉄プロセスそのものの抜本的な転換が求められており、現在、製鉄プロセスにおける脱炭素化のため、鉄鉱石の還元に炭素ではなく水素を用いる水素還元製鉄の研究が各国で進められている。世界的に見ても未だ実用化の例は無いが欧州やアジアの各国も実用化を見据えた技術開発を進めており、これまで製鉄プロセスには用いられていない技術の活用に向けた研究も始まっている。世界に先駆けて水素還元製鉄等の革新技术を確立し、グリーンな高級鋼に特化して生産・供給する体制を構築することが、日本の鉄鋼業の「勝ち筋」であり、実現するためには技術開発の更なる加速化による革新技术の早期確立が重要と考えられる。
- 本プロジェクトでは、将来的に安価かつ大量の水素供給基盤が確立されることを見据え、水素還元製鉄技術を始めとした脱炭素技術の確立と社会実装に向けた研究開発を行う。

- 本プロジェクトを取りまく現状と課題解決の具体的方策

- 製鉄プロセスの脱炭素化に向けた我が国の技術開発状況としては、高炉を活用した水素還元技術の開発を目的とした COURSE50 プロジェクトを 2008 年度より実施している。当該プロジェクトでは、①所内水素（製鉄所内で発生・製造した水素）等を活用した鉄鉱石の還元技術（高炉水素還元技術）、②製鉄所内の未利用排熱を活用した CO₂ 分離回収技術、の開発を実施している。これらの技術により製鉄プロセスから排出される CO₂ の約 3 割を削減する技術を確立し、2030 年までに実用化することを目指している。2013 年度から試験高炉（12m³、実機の約 1/400）を用いた試験を開始し、還元工程における CO₂ 排出量 10%減が達成可能であることを世界で初めて検証したほか、製鉄所内の未利用排熱を利用することで、CO₂ の分離・回収に必要な外部エネルギーを軽減する技術（化学吸着法）を確立するなど、着実に成果を上げている。
- 他方、製鉄プロセスの脱炭素化に向けた技術開発は世界各国でも行われており、欧州鉄鋼大手であるアルセロール・ミッタルや、中国鉄鋼大手の宝武鋼鉄集団、韓国鉄鋼大手の POSCO など、日本以外の多くの海外鉄鋼メーカーも 2050 年カーボンニュートラルを宣言し、脱炭素化に向けた技術開発競争が進められている。我が国鉄鋼業の国際競争力を確保していくには、世界に先駆けて製鉄プロセスにおける脱炭素化技術を開発し、「グリーンスチール」を実現することが不可欠となる。

（アルセロール・ミッタル社）高炉法と直接還元法の 2 つのアプローチを同時に追求し、両製法において水素還元技術、CO₂ 分離回収技術、バイオマス活用技術等の適用を進めることで、2050 年までのカーボンニュートラル実現を目指している。直接還元法については、2025 年末までに実証プラントの操業を開始する予定としている。

（ティッセン・クルップ社）高炉法から直接還元法に転換することを追求し、2030 年までに直接還元プロセスに全て置き換えることを目指している。また、直接還元プラントと電気溶融炉を組合せたプロセスで 2026 年末に天然ガスによる操業を開始し、2027 年以降の 100%水素直接還元を目指すとしている。

（宝武鋼鉄集団）高炉において純酸素を吹き込むことによって石炭使用量を削減できる酸素高炉技術開発を進めており、製鉄プロセスから CO₂ 排出を 50%以上削減できる技術の開発を目指している。2022 年に小型試験高炉での試験結果において、CO₂削減率 21%を達成したことを公表し、今後 2500m³級の実炉に導入していくとしている。また、直接還元プラントを導入することを決定し、2024 年にも稼働する予定としている。（POSCO 社）所内排ガスの有効活用、AI 技術等の活用による高炉操業の高効率化・省エネを進めると同時に、低品位原料が活用可能な流動層型の直接還元技術の開発を進めており、将来的には水素での還元を行うことを目指している。高炉から水素流動還元炉へ段階的に移行することで 2050 年までのカーボンニュートラル実現を目指している。

- 現在普及している製鉄プロセスとしては、石炭を用いて鉄鉱石を還元する高炉法、鉄スクラップを原料とする電炉（電気アーク炉）法、天然ガスを用いて鉄鉱石を還元し電炉などで溶解

する直接還元法がある。

- 高炉法の脱炭素化に向けては、水素を直接吹き込む技術や、水素を高炉ガスから分離した CO₂ と反応させて生成したメタンを吹き込むカーボンリサイクル技術などが想定される。最低限のコークスが必要となるため、銑鉄プロセスからの CO₂ が発生してしまうが、バイオマスや CCUS 技術を適用することで、現在普及している高炉システムを生かして脱炭素を実現することが可能である。
- 直接還元法の脱炭素化に向けては、還元ガスを全て水素に置き換えることで、CCUS などの周辺技術がなくとも脱炭素化を実現することが可能である。ただし、還元と溶解で別の炉が必要のためエネルギー効率が低い上、不純物（製品に影響を及ぼす成分。以下同じ。）除去ができず原料制約が存在するなどの課題があり、低品位鉄鉱石（高炉・転炉法で 사용되는豪州産等の鉄鉱石をいう。以下同じ。）へ活用範囲を広げて行く必要がある。
- 我が国の鉄鋼業におけるカーボンニュートラルの実現に向けては、これら革新技术の確立や、水素供給を始めとする社会インフラの整備状況までの時間軸等を踏まえ、複数の技術的アプローチを行っていくことが適当である。
- なお、鉄スクラップを原料とする電炉法は、鉄鉱石の還元プロセスが無いいため、スクラップ由来の CO₂ を考慮せず製造段階のみで評価した場合、高炉法と比較して製鉄プロセスにおける CO₂ の排出量は約 1 / 3 となるが、鉄鋼製品のライフサイクル全体で見た LCA 評価では高炉法と電炉法の CO₂ 排出量は同等である。加えて、スクラップの数量および成分的制約（不純物により高級鋼の製造が困難）も踏まえると、2050 年以降に向けた時間軸においても、我が国において高炉を用いて高級鋼を生産することが不可欠と考えられる。
- 従って、鉄鋼業のカーボンニュートラル実現に向けては、高炉法と電炉法の双方に関する技術革新、及び直接還元法を含めた複線的な技術開発アプローチが不可欠である。
- 以上のような本プロジェクトを取り巻く現状及び想定される革新技术を踏まえ、製鉄プロセスにおけるカーボンニュートラルの実現に向けて、具体的に以下の技術開発に取り組んでいく必要がある。海外企業の取組状況や将来の技術・市場動向の不確実性等も踏まえ、本プロジェクトでは、両技術を並行して開発することとし、国内外の環境の変化に柔軟に対応していく。
 - ① 高炉を用いた水素還元技術（高炉水素還元技術）
 - ② 水素で低品位の鉄鉱石を直接還元する技術（直接水素還元技術）
- ①においては、COURSE50 技術を基盤としつつ、高炉法における更なる CO₂ 排出削減を実現するため、外部水素を活用し水素還元比率を高めていく。また、CO₂ を分離・回収し、回収した CO₂ を還元剤に転換して高炉に活用する技術等を開発することにより、既存の高炉を活かしながら大幅な CO₂ 排出削減の実現が可能となる。
- ②においては、水素で鉄鉱石を直接還元する技術であり、技術ハードルは高いものの、高炉・コークスを用いないため、物理的に CO₂ が排出されない。この方法で高級鋼を製造するには、鉄鉱石の還元に必要な直接還元炉内熱補償技術、さらに低品位鉄鉱石の利用を前提とし

た直接還元炉操業安定化技術、不純物除去技術、還元鉄の溶解技術等の電炉高度化技術等を開発することが必要となる。

- これら水素還元製鉄技術は、世界的に見ても未だ実用化の例は無く、極めてハードルの高いイノベーションが必要である。日本の鉄鋼業が引き続き世界をリードし、我が国の産業競争力全般を維持・強化していくためには、他国に先行していち早く実現し実用化していくことが必須である。また、将来、技術をアジア地域など海外に移転すること等により、世界全体のカーボンニュートラルにも貢献していくべきと考える。
- 従来の製鉄プロセスを抜本的に転換するこれらの技術開発には、長期の研究開発期間と膨大な研究開発費用を要するとともに、水素価格、供給量など不確実な動向を見極めながら進める必要がある。加えて、EU、中国を始めとして海外の大手鉄鋼メーカーは、政府からの多額の支援の元で技術開発を加速している。これらの背景を踏まえ、民間企業が単独で技術開発を実施することが困難であることから、日本政府として積極的な技術開発支援を講じることが不可欠となる。技術開発の実施においては、海外の動向も注視しつつ、共同研究により技術開発の加速が見込まれる分野においては海外連携も視野に入れて早期の実用化を目指す。
- 開発された水素還元製鉄技術の社会実装に向けては、①水素バリューチェーンや CCUS 技術などのプロジェクトと連携して社会インフラを整備するとともに、鉄鉱石輸入国等も含めたサプライチェーン全体、更にはコンビナート等における他産業とも連携してトータルコストの低廉を図るとともに、②製鉄コストが上昇した場合においても、グリーンスチールの環境価値が適切に評価され、社会全体でコストを負担していく仕組みを構築することが重要である。本プロジェクトにおける技術開発の進捗状況や、こうした社会インフラの整備状況を踏まえつつ、実施企業に対しては、製鉄プロセス以外も含めた事業活動全体でのカーボンニュートラル化も視野に、政府の水素供給コスト目標を前提とした持続可能なビジネスモデルの構築を求めていく。

● 関連基金プロジェクトと既存事業

➤ 関連基金プロジェクト

製鉄に関するその他のプロジェクトの該当は無いが、水素の観点で関連するプロジェクトとして「大規模水素サプライチェーンの構築」「再エネ等由来の電力を活用した水電解による水素製造」があり、これらの技術開発により安価かつ大量の水素供給基盤の確立が実現されることが、本プロジェクトで開発する水素還元製鉄技術の普及に向けた前提となる。

また、CO₂ の利活用の観点で関連するプロジェクトとして「CO₂ 等を用いた燃料製造技術開発」があり、本プロジェクトでは特に製鉄プロセスに特化した CO₂ の分離・回収・活用技術を開発する点が異なる。さらに、「CO₂ を用いたコンクリート等製造技術開発」があり、本プロジェクトで開発される不純物処理技術を用いて発生するスラグの有効利用の観点から関連する可能性がある。これらのプロジェクトと必要に応じて情報交換等を行うことで、双方の研究開発

を加速していくことが考えられる。

➤ 既存事業

以下 2 つの予算事業にて、高炉法における省エネ・CO₂ 排出削減技術の開発を行った。

- 「環境調和型プロセス技術の開発事業」では①COURSE50、②フェロコックス技術の開発事業の 2 つのプロジェクトが実施され、COURSE50 については、更なる技術発展を目指す形で令和 3 年度から本基金プロジェクトに移行された。フェロコックス技術の開発事業については、早期の実用化を見据えて、水素還元技術が実用化される前段階における省エネ・CO₂ 排出削減技術として導入を目指している。
- 革新的環境イノベーション戦略加速プログラムで実施した「「ゼロカーボン・スチール」に向けた調査研究」においては、製鉄プロセスにおいて CO₂ を排出しない「ゼロカーボン・スチール」の実現に向けた開発課題の抽出と研究開発ロードマップの作成を行った。本調査研究における成果は開発指針として本基金プロジェクトで活用する。

【予算事業】

○ 環境調和型プロセス技術の開発事業

① COURSE50（2008～2021 年度、2021 年度予算額 18 億円）

所内水素を活用した鉄鉱石の還元技術（高炉水素還元技術）及び製鉄所内の未利用排熱を活用した CO₂ 分離回収技術等、の開発を実施している。現在は実炉の約 1/400 規模の試験高炉（12m³）を活用した実証実験を行い、目標を上回る CO₂ 削減効果が確認されており、今後は実炉での適用を見据えたスケールアップが課題となっている。

2030 年までの実用化を目指しており、本基金プロジェクトにおいて、更なる CO₂ 排出削減を実現する技術の開発を進めている。

②フェロコックス技術の開発事業（2017～2022 年度、2022 年度予算額 9.3 億円）

従来の製鉄プロセスでは活用できない低品位の鉄鉱石及び石炭を有効利用して製造するコークス（フェロコックス）を活用することで、鉄鉱石の還元に必要なエネルギーを大幅に削減する技術を開発する。2022 年度は実炉へのフェロコックスの装入量を段階的に増加させ、省エネ効果の検証を行う実証実験を行った。

事業終了後の現在は、早期の実用化を見据えており、COURSE50 技術等の長期の研究開発が必要となる革新技術が確立される以前に現行の製鉄プロセスでの大幅な省エネ・CO₂ 排出削減の実現を目指している。

(https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100050.html)

- 「ゼロカーボン・スチールの実現に向けた技術開発」（2020～2021 年度、2 年間合計 予算額 2 億円）

革新的環境イノベーション戦略加速プログラムの内数として実施し、「ゼロカーボン・スチール」の実現に向けた技術開発課題の抽出、研究開発ロードマップの策定を行った。本事業で抽出した課題や策定した研究開発ロードマップは本基金プロジェクトの技術開発における指針として活用していく。

(https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100181.html)

- グリーン成長戦略（令和 3 年 6 月）における鉄鋼業の記載（抜粋）

4. (11) ii) マテリアル

<現状と課題>

製錬工程において、鉄鉱石の還元では、日本古来の「たたら製鉄」に始まり、長く木炭や石炭等の炭素を用いて鉄鉱石から酸素を取り除く手法が採られてきたが、化学反応の結果として不可避免的に CO₂ が発生する。還元材を石炭から水素に代替することができれば、大幅な CO₂ 排出削減が期待できるが、現行の石炭（コークス）による還元は発熱反応であるのに対し、水素による還元反応は熱を必要とする吸熱反応であり、還元反応に伴い炉が冷えてしまうことから、連続的に還元するために必要な熱の補填が必要となる。加えて、石炭が減ることで反応ガスの通気に必要な炉内の隙間をどう作るのかなど、技術面の課題は非常に高く、世界的にも水素還元製鉄の技術は確立されていない。加えて、水素還元製鉄の実現には脱炭素燃料として期待される水素を安価（約 8 円/Nm³）かつ大量（約 700 万トン）に調達することが不可欠であるため、還元技術の確立以外にも多くの課題が存在する。

<今後の取組>

鉄鋼業の還元・溶解工程においては、現行の生産性が高く、エネルギー効率に優れる高炉を有効活用し、水素を用いて鉄鉱石を還元するとともに、高炉排ガスに含まれる CO₂ を分離・回収し、還元剤に転換して活用することにより、製鉄プロセスで発生する CO₂ 排出を削減することができる技術を開発する。また、2050 年までの「ゼロカーボン・スチール」の実現を見据え、水素だけで鉄鉱石を還元できる「水素直接還元法」の実現に向けた基礎技術（例えば、①鉄鉱石の還元に必要な炉内熱補償技術、②原料に含まれる不純物を除去する技術、③還元鉄の溶解に不可欠な電炉の高度化技術等）を確立する。さらに、高炉法に比べ生産時の CO₂ 排出量を抑えることのできる電炉の大型化に伴う技術制約の克服により、生産コストを削減し競争力を高めつつ CO₂ 削減を実現する。

- 脱炭素成長型経済構造移行推進戦略（GX 推進戦略）における水素還元製鉄の記載（抜粋）

2. (2) 1) 今後の対応

改正省エネ法に基づき、大規模需要家に対し、非化石エネルギー転換に関する中長期計画の提出及び定期報告を義務化し、産業部門のエネルギー使用量の4割を占める主要5業種（鉄鋼業・化学工業・セメント製造業・製紙業・自動車製造業）に対して、国が非化石エネルギー転換の目安を提示する。また、省エネ法の定期報告情報の任意開示の仕組みを新たに導入することで、事業者の省エネ・非化石エネルギー転換の取組の情報発信を促す。加えて、水素還元製鉄等の革新的技術の開発・導入や、高炉から電炉への生産体制の転換、アンモニア燃烧型ナフサクラッカーなどによる炭素循環型生産体制への転換、石炭自家発電の燃料転換などへの集中的な支援を行う。

2. 目標

- アウトプット

- 研究開発の目標

1. CO₂ 排出を 50%以上削減する高炉水素還元技術の確立

(技術成熟度が異なる以下 2 つの目標の実現)

- ① 2030 年までに、所内水素等を活用した高炉における水素還元技術及び CO₂ 分離回収技術等により、製鉄プロセスから CO₂ 排出を 30%以上削減する技術の実装。
なお、CO₂ 分離回収後の利材化については社会環境全体での整備が前提となるため、分離回収についての技術要素の確認を実施。
- ② 2030 年までに、中規模試験高炉（実炉の 1/5 規模以上）において、製鉄プロセスから CO₂ 排出 50%以上削減を実現する技術を実証。

2. CO₂ 排出を 50%以上削減する直接水素還元技術の確立

(直接水素還元技術を実用化するために必要な以下 2 つの目標の実現)

- ① 2030 年までに、低品位の鉄鉱石を水素で直接還元する技術により、中規模直接還元炉（実炉の 1/5 規模以上）において、現行の高炉法と比較して CO₂ 排出 50%以上削減を達成する技術を実証。
- ② 2030 年までに、低品位の鉄鉱石の水素直接還元-電炉一貫プロセスにおいて、自動車の外板等に使用可能な高級鋼を製造するため、大規模試験電炉（容量約 300 トン規模）において、不純物の濃度を高炉法並み（例えばリン 0.015%以下）に制御する技術を実証。

(目標設定の考え方)

1. ① 製鉄所内で発生する水素（状況に応じ製鉄所外から導入する外部水素も一部活用）や、製鉄所内の未利用排熱を最大限に活用して実現できる CO₂ 排出削減目標として設定。内訳としては、コークス炉ガスに含まれる水素を活用して鉄鉱石を還元する技術等で 10%以上、製鉄所内の未利用排熱を活用して高炉排ガスから CO₂ を分離回収する技術で 20%以上の計 30%以上削減を想定。実機での実証を経た上で、2030 年までに、国内の製鉄所への 1 基以上の導入を目指す。

- ② 製鉄所外から導入する外部水素の活用により水素還元比率を最大とすべく、COURSE50 における実証の結果等も踏まえて、実現可能性・技術的困難度・国際競争力等も考慮した上で、高炉プロセス部分での CO₂ 排出削減の水準を設定。技術の難易度等を踏まえ、2030 年時点では実機での実証が難しいことから、中規模試験高炉で実証実験を行う。なお、中規模試験高炉の規模については、モデルによるシミュレー

ション結果等のこれまでの研究成果を踏まえ、より精度の高い試験結果を得るために実炉の 1/5 規模以上とする。

2. ① 直接水素還元法が、現在我が国において主流となっている高炉法の代替技術となることを目指すべく、高炉水素還元技術と同水準の目標値として設定。技術の難易度等を踏まえ、2030 年時点では実機での実証が難しいことから、小規模試験炉（実炉の 1/250～1/150）での検証を経て、中規模直接還元炉試験での実証実験を行う。なお、中規模試験炉の規模については、モデルによるシミュレーション結果等のこれまでの研究成果を踏まえ、より精度の高い試験結果を得るために実炉の 1/5 規模以上とする。

② 直接水素還元法が、現在我が国において主流となっている高炉法の代替技術となることを目指すべく、自動車の外板等に使用可能な高級鋼を製造するために必要な水準として設定。技術の難易度等を踏まえ、小規模試験電炉（容量 10～20 トン規模）での検証を経て、早期に大規模試験電炉における実証実験を行う。なお、各試験炉については、これまでの研究成果を踏まえ、より溶解・精錬に有効な機能を追加する。

（目標達成の評価方法）

1. ① 水素を活用して鉄鉱石を還元する技術や、高炉排ガスから CO₂ を分離回収する技術等により得られる CO₂ 削減量を算出し、製鉄プロセスから排出される現状の CO₂ 量に対する削減率により達成度を評価する。また、この高炉水素還元技術が国内の製鉄所に導入されたことを確認する。
- ② 外部水素も活用した高炉における水素還元技術、高炉排ガスからの CO₂ を還元剤として利用する技術に加え、コークス代替としてのバイオマス活用や還元鉄・鉄スクラップによる一部原料代替技術などを併用した複数のアプローチによって得られる CO₂ 削減量の合計を算出し、製鉄プロセスから排出される現状の CO₂ 量に対する削減率により達成度を評価する。
2. ① 直接還元炉を用いた水素還元技術、直接還元鉄とスクラップを原料として電炉で溶解する製鉄プロセス並びに直接水素還元鉄を原料として電気溶融炉で溶解する製鉄プロセスによって得られる CO₂ 削減量を算出し、製鉄プロセスから排出される現状の CO₂ 量に対する削減率により達成度を評価する。
- ② 直接還元鉄とスクラップを原料とし、電炉で溶解する製鉄プロセスによって得られる鉄

について、不純物の濃度を分析し、現状の高炉法によって得られる鉄の成分比と比較することで、達成度を評価する。

(目標の困難性)

1. ① COURSE50 で既に一定の効果を検証済みの 12m^3 の試験高炉での技術を、約 400 倍の実炉 ($5,000\text{m}^3$ 級) に適用 (スケールアップ) する必要があり、炉内の還元ガスの流動や、還元反応の進行など、試験高炉とは異なる状況が生じる可能性が高く、長時間の安定操業 (※高炉は 24 時間連続操業) に向けてこれらを一ずつ解消していく必要がある。しかし、試験高炉での実証は、2013 年～2022 年の 10 年の計画であったが、実炉での実証はそれよりも短い 2023 年～2027 年の 5 年で取り組む予定であり、野心的な計画であると言える。

② 水素還元は熱を奪う反応であり、熱源である石炭を減らしつつ高炉 (約 $5,000\text{m}^3$) の還元及び溶解に必要な熱 (約 $1,500$ 度) を補う大規模な熱補償技術の確立や還元ガスを高炉内に行き渡らせる通気技術等が必要となる。また、水素還元反応を促進するため水素を加熱した上で高温の高炉に装入する必要があり、実証のスケールアップには確実に安全性を担保できるまでの技術確立が不可欠となるなど、高いハードルが存在する。水素の吹き込む量を増やすほど、技術的な困難度は増し、既に一定の効果を検証済みの技術とは異なる技術的解決策が必要となるため、本目標の達成は容易ではない。

2. ① 水素直接還元法は国内では実用実績が無く、水素還元技術と関連設備を一から作り上げ、操業技術を完成させる必要がある。高炉における水素還元と同様に、熱補償技術を確立する必要があるほか、より低品位な鉄鉱石を固体のまま還元するため粉化や固着化が生じやすいことなど、オペレーション上の課題も山積しており、高いハードルが存在する。

② 還元鉄やスクラップに不純物が含まれるため、自動車向け等の高級鋼の製造が困難であり、純度の高い銑鉄の製造が可能な高炉と同等の品質を電炉法で実現することは世界的にも達成されておらず非常にハードルが高い。

● アウトカム

水素還元製鉄技術の実用化と普及により、期待される国内及び世界の CO_2 削減効果、予想される世界市場規模について、以下の前提に基づき機械的に算出した。日本企業の国際競争力の状況も意識しつつ、世界市場の付加価値の相当程度の割合を我が国に還流させ、世界及び日本の脱炭素化に貢献することを目指す。

➤ CO₂削減効果（ポテンシャル推計）

○ 2030 年までに、国内で約 200 万トン/年の削減

【算定の考え方】

本プロジェクトで目標として掲げている COURSE50 技術の 2030 年までに国内の製鉄所への導入が実現できた場合の CO₂ 削減ポテンシャル。

【利用したパラメータ】

・2030 年までの COURSE50 技術の導入予定基数：1 基

・高炉 1 基の粗鋼生産量：約 400 万トン/年

・粗鋼 1 トン当たりの CO₂ 排出量（現状）：約 1.5～2 トン CO₂/トン

・COURSE50 技術による CO₂ 削減効果：30%削減

計算式：約 400 万トン/年×約 1.5～2 トン CO₂/トン×30%×1 基＝約 200 万トン/年

○ 2050 年までに、世界で約 13 億トン/年の削減

【算定の考え方】

国際エネルギー機関（IEA）が 2020 年に公表した鉄鋼技術ロードマップにおいて、2050 年時点で水素還元製鉄や CCUS 技術を始めとした革新的製鉄技術が世界的に普及した場合の CO₂ 削減ケース。

【利用したパラメータ】

・2019 年の鉄鋼業からの CO₂ 排出量（世界）：26 億トン（世界）

・革新的製鉄技術の導入による CO₂ 削減効果：50%削減（2019 年比）

計算式：26 億トン×50%＝13 億トン

➤ 経済波及効果（世界市場規模推計）

○ 2030 年頃までに約 3200 億円/年

【算定の考え方】

COURSE50 技術を活用した高炉 1 基から作られる予想年間鉄鋼生産量からの試算。

【利用したパラメータ】

・高炉（5,000m³級）1 基当たり年間粗鋼生産量：約 400 万トン

・平均鉄鋼価格：約 8 万円/トン

計算式：400 万トン×8 万円/トン＝約 3200 億円

○ 2050 年までに約 40 兆円/年

【算定の考え方】

IEA が公表したエネルギー技術見通し 2020 における、2050 年時点のグリーンスチール（水素還元技術、CCUS 技術による製鉄）の最大生産量から算出。

【利用したパラメータ】

・2050 年時点におけるグリーンスチール（水素還元技術、CCUS 技術による製鉄）の

最大生産量：約 5 億トン

・平均鉄鋼価格：約 8 万円/トン

計算式：5 億トン× 8 万円/トン＝約 40 兆円

3. 研究開発項目と社会実装に向けた支援

- 【研究開発項目 1】高炉を用いた水素還元技術の開発

- 目標：CO₂排出を50%以上削減する高炉水素還元技術の確立

（技術成熟度が異なる以下2つの目標の実現）

- ① 2030年までに、所内水素等を活用した高炉における水素還元技術及びCO₂分離回収技術等により、製鉄プロセスからCO₂排出を30%以上削減する技術の実装
- ② 2030年までに、中規模試験高炉（実炉の1/5規模以上）において、製鉄プロセスからCO₂排出50%以上削減を実現する技術を実証

- 研究開発内容：

- ① 所内水素を活用した水素還元技術等の開発

【（9/10委託→1/2補助）+（インセンティブ1/10）】（※現在のTRL:4）

コークス炉ガス中に含まれる水素等（所内水素）の活用に加え、製鉄所以外から導入する外部水素も一部使用（水素の吹き込み量を増やすための改造等を実施）して鉄鉱石を還元する技術や、製鉄所で発生する未利用廃熱を利用し高炉排ガスからCO₂を分離回収する技術等により、外部からの追加エネルギー等を出来るだけ使用しないで、製鉄所から排出されるCO₂を約3割削減する技術を開発する。

具体的には、2030年までに国内の製鉄所へ1基以上を導入するため、試験高炉（12m³）での試験により、2022年頃までに実炉での操業を見据えた諸条件を抽出。外部専門家による指摘を踏まえた水素の取り扱いにおける安全確保の強化等を組み込んだ上で実機を改造後、実炉（5,000m³級）での実証実験を開始し、外部水素利用についても早期に検証することにより、2028年までにスケールアップに伴う反応条件の変化を踏まえた対応を行うとともに、横展開を可能とするための共通技術開発を行う。

- ② 外部水素や高炉排ガスに含まれるCO₂を活用した低炭素化技術等の開発

【（9/10委託→2/3補助）+（インセンティブ1/10）】（※現在のTRL:4）

多量の水素を吹き込んだ高炉法における大規模な水素還元技術はまだ存在しておらず、その確立のための技術開発が必要である。一方で、水素還元による炉内温度低下や通気性の確保が課題となるため、コークス代替等としてバイオマスや還元鉄等を加熱源として一部原料として活用する技術等の開発が有効であると考えられる。また、コークスを用いた場合にCO₂削減を達成するためには、高炉排ガスから回収したCO₂の還元剤等への利活技術の開発が有効であると考えられる。あらゆる技術の低炭素化技術を組み合わせたアプローチによって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。

具体的には、試験高炉での試験により、2025～2026年頃までに、多量の水素吹き込みによる炉内温度の低下を抑制するための手法の開発、メタン投入による反応条件の変化を踏

また吹き込み条件の検討、コークス投入量の減少に伴う反応条件の変化への対応について検討を行う。最終的には、中規模試験高炉（実炉の 1/5 規模以上）での試験を行い、将来の実炉導入に向けた諸課題の抽出及び CO₂ 削減の効果検証を実施する。

（委託・補助の考え方）

- 既に要素技術の開発が進んでいるものもあるが、実用化まで 10 年以上の時間を要することや、膨大かつ現在の高価格の水素の調達が必要になるなど、民間企業単独で実施することが困難であることから、国として積極的な支援を講じ、研究開発を加速するため、研究開発内容①及び②ともに委託事業として開始し、実証の段階で補助事業へと移行する。
- 研究開発内容①及び②は、相互に強い関連性・連続性を有するため、原則、同一の実施主体（企業又はコンソーシアム）とするが、採択後の相互協力が見込まれる場合は、各内容に対して異なる事業者が別々に申請することも可能。

● 【研究開発項目 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

- 目標：CO₂ 排出を 50%以上削減する直接水素還元技術の確立
（直接水素還元技術を実用化するために必要な以下 3 つの目標の実現）
 - ① 2030 年までに、低品位の鉄鉱石を水素で直接還元する技術により、中規模直接還元炉（実炉の 1/5 規模以上）において、現行の高炉法と比較して CO₂ 排出 50%以上削減を達成する技術を実証する。
 - ② 2030 年までに、低品位の鉄鉱石の水素直接還元-電炉一貫プロセスにおいて、自動車の外板等に使用可能な高級鋼を製造するため、大規模試験電炉（容量約 300 トン規模）において、不純物の濃度を高炉法並み（例えばリン 0.015%以下）に制御する技術を実証する。

➤ 研究開発内容：

① 直接水素還元技術の開発

【（9/10 委託→2/3 補助） + （1/10 インセンティブ）】 （※現在の TRL: 4）

製鉄プロセスからの CO₂ 排出量の削減のために、コークスを原料とする高炉製鉄法に代わる方法として海外で実用化されている天然ガスによる鉄鉱石の直接還元法は、コークスと比べて CO₂ 排出が少ないが、CO₂ 排出がなくなるわけではなく、グリーンスチールとは言えない。そこで、天然ガスだけではなく水素を利用する直接還元法を開発する。

具体的には、我が国で主流となっている豪州産鉄鉱石や南米産鉄鉱石など、一般的に直接還元炉で使われている鉄鉱石と比べて品位が劣るとされている鉄鉱石の利用を前提に、原料条件、還元条件及び成品条件から適切なプロセスの構築を目指し、約 5 年間、粉化・固着化防止に有効な機能を追加した小規模試験炉（実炉の 1/250～1/150）での要素技術開発を行う。2026 年頃から中規模直接還元炉（実炉の 1/5 規模以上）の装置製

作後、実証試験を行い、水素と天然ガスを併用しつつ、50%以上の CO₂ 削減が可能となる条件設定を行う。その際、数学モデルも活用し、速やかな技術開発を進める。

- ② 直接還元鉄を活用した電炉の不純物除去技術開発（不純物対策、大型化、効率化）
【（2/3 補助→1/2 補助）+（1/10 インセンティブ）】 （※現在の TRL: 4）

直接水素還元製鉄により生産される製鉄原料は、高炉法と異なり溶解していないため、後段で電炉による溶解工程が必要となる。電炉法は製鉄プロセスから発生する CO₂ が高炉法と比較して大幅に少ないものの、高級鋼生産に必要な不純物除去ができないという課題を抱えている。既存の高炉・転炉プロセスを直接還元炉・電炉プロセスに置き換えるためには、低品位鉄鉱石の利用を前提とした電炉の不純物除去技術（加炭等）を開発する必要がある。併せて、高品質な銑鉄を大量に生産することが可能な既存の高炉・転炉プロセスの生産性や競争力を維持しつつ直接還元炉・電炉で置換するに際しては、電炉の規模を転炉と同等の容量約 300 トン規模（国内の一般的な規模の電炉の約 2 倍）に大型化する必要がある。しかし、大型化すると炉内全体を均一かつ十分に攪拌させることが難しくなり、温度ムラも生じやすくなるため、不純物除去の難易度は上昇する。このような課題に対応するため、事前処理から事後処理までプロセス全体で、直接還元鉄を活用した電炉の不純物除去技術を開発する。

具体的には、2025 年頃までに電炉法での溶鋼において、リンを 0.015%以下、窒素を 40ppm 以下とするための要素技術開発を進める。2025 年頃までに、より溶解・精錬に有効な機能を追加した小規模試験電炉（容量 10～20 トン規模）を設置。2026 年頃からは大規模試験電炉を設置して、大型電炉法での溶鋼において、リンを 0.015%以下、窒素を 40ppm 以下とするための要素技術実証試験を水素還元鉄使用模擬条件下等で行い、実機設備仕様や操業設計に必要な諸条件を設定する。

（委託・補助の考え方）

- 研究開発内容①については、製鉄プロセスからの CO₂ 排出をゼロに出来る可能性のある画期的な技術であるものの、直接還元炉自体を国内で活用した実績は無く、基礎技術からの確立が必要になることと、技術開発に必要な既存の設備が無いことなどから長期の研究開発が必要になること、安価かつ大量の水素供給基盤の確立が必須となることから商用化の目処が 2040 年以降を予定していることなど、民間企業単独で実施するには大きなリスクを伴うため、委託事業で実施し、中規模試験の段階で補助事業へと移行する。
- 研究開発内容②については、既に確立された電炉技術を用いるものであるが、電炉を用いて高炉並に不純物を除去することは未だ技術的に実現できておらず、要素技術の開発までに 4 年以上の長期期間が見込まれていることから、技術開発を加速させるために 2/3 補助で実施し、実証フェーズに入った段階で 1/2 補助に切り換えて実施する。
- 研究開発内容①及び②は、各内容に対して異なる事業者が別々に申請することも可能であ

るが、相互に強い関連性を有するため、採択後に相互協力できることが望ましい。

- 社会実装に向けたその他の取り組み

水素還元製鉄によるグリーンスチールの社会実装のためには、大量かつ安価であるグリーン水素（化石燃料＋CCUS/カーボンリサイクル、再生可能エネルギー等から製造された水素）が必要不可欠である。事業者は、グリーン水素の製造手法の違い等によるコストや供給量の違い等も意識しつつ、持続可能なビジネスモデルを構築していく必要がある。一方で、政府は、水素価格を始めとする市場環境によらず、水素還元鉄を普及させていくため、事業者とともに、水素供給等の社会インフラ整備やグリーンスチールの環境価値の適切な評価に取り組んでいく。

社会インフラの整備に向けて、関連する基金プロジェクトの技術開発や水素バリューチェーン推進協議会やメタネーション推進官民協議会などのコンソーシアムとの連携を進める。また、水素製造に伴い大量に発生する酸素を、例えば、カーボンリサイクル高炉に供給するなど、企業間連携を進めるための仕組み作りも検討していく。さらに、鉄鉱石の主要輸入国の豪州等とも連携し、鉄鉱石の品位に関する共同研究を模索するとともに、採掘から製鉄プロセスまでのサプライチェーン全体での低炭素化に向けた枠組み構築を目指す。

また、水素還元技術等の革新技术が確立・実用化された場合、水素や再エネの価格水準によっては、製鉄コストが上昇することが見込まれる。このような場合においても、我が国鉄鋼業が国際競争力を確保していくためには、グリーンスチールの環境価値が適切に評価され、需要家も含めたサプライチェーン全体でコストを負担していくことが必要である。さらに、G7 気候・環境大臣会合でも議論されているように、グリーン産業製品の国際的に競争力のある市場を創出するためには、国際的に協力して、標準や評価制度作りに取り組んでいくことが必要である。そのため、我が国としても、現在策定している ISO20915 などを基に、製品に含まれる CO₂ の計算方法の確立、環境価値に関する評価制度づくり等、グリーンスチール市場の創出に向け、官民で率先して取り組んでいく。また、グリーンスチールを始めとするグリーン産業製品の普及に向け、政府は、国内の自動車産業等の需要家側のニーズを把握し、グリーンスチールを選択してもらうべく意識喚起を行うとともに、グリーンスチールを始めとするグリーン産業製品の普及に向け、供給側のみならず需要側への制度的措置の検討も含め、技術の導入促進策も検討していく。

本プロジェクトを実施する企業等に対しては、技術開発の進捗状況や、川上（水素）から川下（CO₂ 等）までの社会インフラの整備状況を踏まえたサプライチェーンの将来像を想定し、必要に応じて研究開発の内容を見直すとともに、製鉄プロセス以外も含めた事業活動全体でのカーボンニュートラル化も視野に、政府の水素供給コスト目標を前提とした持続可能なビジネスモデルを構築していくことを求めている。

なお、本プロジェクトを実施する企業等には、「グリーンイノベーション基金事業の基本方針」に基づき、当該分野の取組に対する経営者のコミットメントを求めることとする。また、参画企業等には、2031 年以降も着実に社会実装に繋げていくための取組の継続を求めている。

4. 実施スケジュール

- プロジェクト期間

【研究開発項目 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

所内水素の活用、CO₂ 分離回収技術等により約 30%の CO₂ 削減を実現する技術の 2028 年までの実用化を目指し、2021 年度から 2027 年度頃までの研究開発期間を想定している。

- ② 外部水素や高炉排ガスに含まれる CO₂ を活用した低炭素化技術等の開発¹

高炉での製鉄プロセスからの約 50%の CO₂ 削減を実現する技術については、小規模試験高炉、中規模試験高炉（実炉の 1/5 規模以上）での実証実験を含め 2021 年度から 2030 年度までの研究開発期間を想定している。また、2040 年までの実用化を目指し、本基金プロジェクトが終了する 2030 年度以降も、中規模試験高炉での技術の確立や実機実証に向けた研究開発を継続することを実施者に求める。

【研究開発項目 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

- ① 直接水素還元技術の開発¹

基礎技術からの確立が必要となるため、2021 年度から 2030 年度まで小規模試験及び中規模直接還元炉試験を行うとともに、本プロジェクトが終了する 2030 年度以降も更なるステップアップに向けて技術開発を継続することを実施者に求める。

- ② 直接還元鉄を活用した電炉の不純物除去技術開発²

2021 年度から 2030 年度まで小規模試験電炉及び大規模試験電炉での実証を行い、2030 年までの実用化に向け、低品位の鉄鉱石を水素で直接還元することで製造した直接還元鉄を用いる等により実証することを実施者に求める。

- ステージゲート設定

研究開発目標の達成には、様々なアプローチが考えられることから、具体的な達成方法・スケジュールは提案者の創意工夫に委ねることを原則とするが、以下の通り、事業化段階の切れ目等において、適切なタイミングでステージゲートを設定する。ステージゲートにおいては、事業の

¹ 実証試験炉の規模拡大は、2023 年 10 月 27 日改定により取組を追加。実証機建設及び実証試験は、「脱炭素成長型経済構造移行推進戦略」（令和 5 年 7 月 28 日閣議決定）3.

（2）に基づき実施するもの。

² 実証試験炉の性能強化は、2023 年 10 月 27 日改定により新たに追加。実証機建設及び実証試験は、「脱炭素成長型経済構造移行推進戦略」（令和 5 年 7 月 28 日閣議決定）3.

（2）に基づき実施するもの。

進捗や目標達成状況だけでなく、産業政策の進捗状況など外部環境変化を包括的に考慮して社会実装可能性を精査し、蓋然性が高いプロジェクトに限り、事業を継続する。複数手法が存在する場合には、こうした社会実装可能性による各手法についての比較評価を行う。

【研究開発項目 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

2022 年頃に実機実証実験開始（設計・建設含む）

（下表の例では 2022 年頃に試験高炉において、約 30%の CO₂ 削減が実現できることを確認した上で、事業継続を判断）

② 外部水素や高炉排ガスに含まれる CO₂ を活用した低炭素化技術等の開発

2026 年頃に中規模試験高炉（実炉の 1/5 以上）の設計・建設を開始し、2029 年頃に実証実験開始

（下表の例では 2025～2026 年頃に小規模試験高炉において約 50%の CO₂ 削減が実現できること、2029 年頃に中規模試験高炉の建設を確認した上で、事業継続を判断）

【研究開発項目 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 直接水素還元技術の開発

2026 年頃に中規模直接還元炉の設計・建設を開始し、2029 年頃に実証実験の開始

（下表の例では 2026 年頃に小規模試験炉において、約 50%の CO₂ 削減が実現できること、2029 年頃に中規模試験シャフト炉の建設を確認した上で、事業継続を判断）

② 直接還元鉄を活用した電炉の不純物除去技術開発

2026 年頃に大規模試験電炉の設計・建設を開始し、2029 年頃に実証実験の開始

（下表の例では 2025 年頃に小規模試験電炉において、製品の品質に影響する不純物の濃度を高炉法並みに制御できること、2029 年頃に大型電炉の建設を確認した上で、事業継続を判断）

表 1：プロジェクト・社会実装の想定スケジュール

→ 要素技術開発・小規模実証
 → 中規模実証
 → 大規模・実機実証
 ★ ステージゲート

	2021～2025	2026～2030	2031～2040	2041～2050
【研究開発項目 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	試験高炉試験 (設計)★	実機改造 実機実証試験 ★実装可能		
②外部水素や高炉排ガスに含まれるCO ₂ を活用した低炭素技術等の開発	要素技術開発 設計・建設	小規模試験高炉試験 (設計)★	中規模試験高炉試験 実証機建設 実証試験 ★	実機実証試験 ★実装可能
【研究開発項目 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直接水素還元技術の開発	要素技術開発 設計・建設	小規模試験炉試験 (設計)★	中規模直接還元炉試験 実証機建設 実証試験 ★	★実装可能（天然ガス） 実証試験 ★実装可能（水素）
②直接還元鉄を活用した電炉の不純物除去技術開発	要素技術開発 設計・建設	小規模試験電炉試験 (設計)★	大型電炉試験 実証機建設 実証試験 ★	連携 ★実装可能

※想定されるスケジュールの一例を記載

表 2：社会実装スケジュール

●導入フェーズ： 1. 開発フェーズ 2. 実証フェーズ 3. 導入拡大・コスト低減フェーズ 4. 自立商用フェーズ

●具体化するべき政策手法： ①目標、②法制度（規制改革等）、③標準、④税、⑤予算、⑥金融、⑦公共調達等

	2021年	2022年	2023年	2024年	2025年	～2030年	～2040年	～2050年
精錬・圧延手法	COURSE50（水素活用等でCO ₂ ▲30%）の大規模実証					導入支援		
	水素還元製鉄、電炉拡大の技術開発					実証	技術確立	導入支援
	精錬、圧延、加工プロセスの省エネに必要な基礎技術の開発					実証	導入・拡大	
	国際的協力枠組の構築（過剰生産能力への対応、メタルスプレッドの確保）、開発した省エネ・CO ₂ 削減技術が適切に評価される国際標準の策定を推進							

5. 予算

- プロジェクト総額（国費負担額のみ。インセンティブ分を含む額）：上限 4,269 億円
【研究開発項目 1】高炉を用いた水素還元技術の開発
（研究開発内容①）所内水素を活用した水素還元技術等の開発
 - 予算額：上限 436 億円
 - 予算根拠：コークス炉ガスの改質設備、羽口の改造、配管等の参考見積（複数社から取得）等に基づき試算。
（研究開発内容②）外部水素や高炉排ガスに含まれる CO₂ を活用した低炭素化技術等の開発
 - 予算額：上限 2,386 億円【内訳】（要素技術開発・小規模試験）838 億円、（実証機建設・実証試験）1548 億円
 - 予算根拠：既存事業（環境調和型プロセス技術の開発事業）の試験高炉の規模を 20 倍、100 倍に大型化すると仮定し、大型化した場合のコスト低減効果を考慮し試算。
【研究開発項目 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
（研究開発内容①）直接水素還元技術の開発
 - 予算額：上限 1,141 億円【内訳】（要素技術開発・小規模試験）391 億円、（実証機建設・実証試験）750 億円
 - 予算根拠：天然ガスベースの直接還元炉の実機の建設費（複数社から見積取得）を元に、規模を 1/250、1/25 に小型化した場合の費用から試算。
（研究開発項目②）直接還元鉄を活用した電炉の不純物除去技術開発
 - 予算額：上限 306 億円【内訳】（要素技術開発・小規模試験）270 億円、（実証機建設・実証試験）36 億円
 - 予算根拠：通常電炉の実機の建設費（複数社から見積取得）を元に、規模を 1/20 に小型化した場合の費用から試算。
- ※水素については、実証試験において、必要量が供給されるインフラが整うまでは、天然ガスから自社製造することを想定。
- 取組状況が不十分な場合の国費負担額の返還率：返還が決定した時点における目標達成度を考慮し、WG において「10%、30%、50%」の 3 段階で評価

(参考) 改訂履歴

- ・2021 年 9 月 制定
- ・2023 年 10 月 改定