

## 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（案）

令和3年〇月〇日

経済産業省

製造産業局

## 目次

1. 背景・目的 .....	3
2. 目標.....	8
3. 研究開発項目と社会実装に向けた支援 .....	11
4. 実施スケジュール .....	15
5. 予算.....	18

## 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は、こうした鉄鋼業が果たす役割はますます重要となり、例えば電動車の軽量化に不可欠な超ハイテン鉄鋼など、脱炭素化製品に必要不可欠な素材の一つであり、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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> を排出している。製鉄プロセスにおいて、炭素（木炭や石炭）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、現行の高炉法では、コークス（石炭）を用いて還元する過程で不可避免的に CO<sub>2</sub> が発生する。
  - 鉄鋼業におけるカーボンニュートラル実現のためには、熱源や原料において化石燃料から脱却するとともに、プロセスそのものの抜本的な転換が求められている。現在、製鉄プロセスにおける脱炭素化のため、鉄鉱石の還元で炭素ではなく水素を用いる水素還元製鉄の研究が進められているが、世界的に見ても未だ実用化の例は無く、史上初のチャレンジとなる。
  - 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技術開発が世界各国で行われており、欧州鉄鋼大手であるアルセロール・ミタルや、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。例えば、アルセロール・ミタルでは、高炉法と直接還元法の 2 つのアプローチを同時に追及し、両製法において水素還元技術、CO<sub>2</sub> 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。宝武鋼鉄集団では、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 CO<sub>2</sub> 排出を 50%以上削減できる技術の開発を目指している。また、POSCO では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を開発中で、高炉から直接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。これらの状況も踏まえ、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、「グリーンスクール」を実現することが不可欠となる。

- 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法、天然ガスを用いて鉄鉱石を還元する直接還元法がある。
- 我が国では、資源制約の観点や生産規模の問題等から直接還元による製鉄は行われておらず、高炉法、電炉法による製鉄が行われているが、現状、粗鋼生産の約 7 割を高炉法が占め、自動車向け超ハイテン鋼等の高級鋼は高炉法で生産されている。電炉法の場合は鉄鉱石の還元プロセスが無いため高炉法と比較して製鉄プロセスにおける CO<sub>2</sub> の排出量は約 1/4 となるが、スクラップに含まれる不純物（製品に影響を及ぼす成分。以下同じ。）による制約から高級鋼の製造が困難である。日本が輸入している豪州産の鉄鋼原料は今後 10 年後以降に高品位原料が不足することが懸念されており、低品位原料を活用しつつ高級鋼が製造できる製鉄法を確立することが喫緊の課題となっている。加えて、我が国鉄鋼業が培ってきた高炉の高生産性や高効率性といった特徴を最大限に活用するためには、2050 年以降に向けた時間軸においても、高炉を用いた高級鋼生産の維持・強化が不可欠と考えられる。
- 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）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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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。
- しかし、これらの技術開発のみでは製鉄プロセスにおけるカーボンニュートラルの実現は不可能であり、これらに加え、以下の革新的な技術が必要となる。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 CO<sub>2</sub> 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ることが出来る。さらに、CO<sub>2</sub> を分離・回収し、回収した CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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炉内熱補償技術、原料に含まれる不純物を除去する技術、還元鉄の溶解に不可欠な電炉の高度化技術等を開発することが必要となる。
- 従来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。その際、水素や CCUS 分野の官民協議会の枠組みも活用しつつ、官民一体となった取組を推進することで、企業単体の取組の相乗作用も促しながら、民間企業の社会実装に向けたコミットメントを引き出ししていく。

- 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。また、国際的な枠組みも活用しつつ、需要家が「グリーンスチール」に価値を見いだせるような、ルールメイキングを検討する。

- 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、CO<sub>2</sub> の利活用の観点で関連するプロジェクトとして「CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> の分離・回収・活用技術を開発する点が異なるが、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・CO<sub>2</sub> 排出削減技術の開発が行われている。

- 「環境調和型プロセス技術の開発事業」では①COURSE50、②フェロコークス技術の開発事業の 2 つのプロジェクトが推進されており、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する予定。フェロコークス技術の開発事業については「環境調和型プロセス技術の開発事業」の中で引き続き開発を行い、事業が終了する令和 4 年度以降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・CO<sub>2</sub> 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ている「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 CO<sub>2</sub> 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ており、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

#### ①COURSE50（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CO<sub>2</sub>分離回収技術、の開発を実施している。現在は実高炉の約1/400規模の試験高炉（12m<sup>3</sup>）を活用した実証実験を行い、目標を上回るCO<sub>2</sub>削減効果が確認されており、今後は実高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、今後は本基金プロジェクトに移行し、更なるCO<sub>2</sub>排出削減を実現する技術への発展を目指して技術開発を加速させる。

#### ②フェロコークス技術の開発事業（2017～2022年度、2021年度予算額 10億円）

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（フェロコークス）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。現在はフェロコークスを実高炉に装入した省エネ効果の検証を行う実証実験を行っており、事業が終了する令和4年度まで装入量を段階的に増加させる試験を行う。

事業終了後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・CO<sub>2</sub>排出削減の実現を目指す。

[https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP\\_100050.html](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ており、「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目標としている。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](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CO<sub>2</sub>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CO<sub>2</sub>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/Nm<sup>3</sup>）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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 削減を実現する。

## 2. 目標

### ● アウトプット

#### ➤ 研究開発の目標

##### 1. CO<sub>2</sub> 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、所内水素を活用した高炉における水素還元技術及び CO<sub>2</sub> 分離回収技術により、製鉄プロセスから CO<sub>2</sub> 排出を 30%以上削減する技術の商用化
- ② 2030 年までに、中規模試験高炉 (500m<sup>3</sup> 級以上) において、製鉄プロセスから CO<sub>2</sub> 排出 50%以上削減を実現する技術を実証

##### 2. CO<sub>2</sub> 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、直接水素還元技術により、現行の高炉法と比較して CO<sub>2</sub> 排出 50% 以上削減を達成する基礎技術を小規模試験炉 (実炉の 1/50~1/10) で実証
- ② 2030 年までに、直接還元炉-電気炉プロセスにおいて、自動車の外板等に使用可能な高級鋼を製造するため、不純物 (製品に影響を及ぼす成分。以下同じ。) 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、小規模試験電炉 (処理量 10~20 トン規模) で実証

#### (目標設定の考え方)

1. ① 製鉄所内で発生する水素や、製鉄所内の未利用排熱を最大限に活用して実現できる CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> を分離回収する技術で 20%以上の計 30%以上削減を想定。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 CO<sub>2</sub> 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。

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 1/50～1/10) における実証実験での技術の確立を目指す。

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、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、小規模試験電炉（処理量 10～20 トン規模）における実証実験での技術の確立を目指す。

#### （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 CO<sub>2</sub> を分離回収する技術等により得られる CO<sub>2</sub> 削減量を算出し、製鉄プロセスから排出される現状の CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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及び直接還元鉄とスクラップを原料とした電炉溶解する製鉄プロセスによって得られる CO<sub>2</sub> 削減量を算出し、製鉄プロセスから排出される現状の CO<sub>2</sub> 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た電炉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（製品に影響を及ぼす成分）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<sup>3</sup> の試験高炉での技術を、約 400 倍の実高炉（5,000m<sup>3</sup> 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～2023 年の 11 年の計画だが、実高炉での実証はそれよりも短い 2024 年～2029 年の 6 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 5,000m<sup>3</sup>）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。例えば、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 直接還元法は国内では実用実績が無く、還元技術と関連設備を一から作り上げる必要がある。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、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実現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<sub>2</sub> 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。

### ➤ CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 排出量（現状）：約 1.5～2 トン CO<sub>2</sub>/トン
- ・COURSE50 技術による CO<sub>2</sub> 削減効果：30%削減

計算式：約 400 万トン/年×約 1.5～2 トン CO<sub>2</sub>/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CO<sub>2</sub>削減ケース。  
【利用したパラメータ】
  - ・2019年の鉄鋼業からのCO<sub>2</sub>排出量（世界）：26億トン（世界）
  - ・革新的製鉄技術の導入によるCO<sub>2</sub>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年ごろまでに約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（5,000m<sup>3</sup>級）1基による年間粗鋼生産量：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：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：CO<sub>2</sub>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、所内水素を活用した高炉における水素還元技術及びCO<sub>2</sub>分離回収技術により、製鉄プロセスからCO<sub>2</sub>排出を30%以上削減する技術の商用化

- ② 2030年までに、中規模試験高炉（500m<sup>3</sup>級以上）において、製鉄プロセスからCO<sub>2</sub>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）】

コークス炉ガス中に含まれる水素（所内水素）だけを活用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CO<sub>2</sub>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CO<sub>2</sub>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基以上導入するため、試験高炉（12m<sup>3</sup>）での試験により、2024年頃までに実高炉での操業を見据えた諸条件の抽出を行う。2025年頃から実高炉（5,000m<sup>3</sup>級）での実証実験を開始し、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CO<sub>2</sub>を活用した低炭素化技術等の開発

【（9/10委託）＋（インセンティブ1/10）】

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CO<sub>2</sub>削減を達成するためには、高炉排ガスから回収したCO<sub>2</sub>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CO<sub>2</sub>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、2027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え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（500m<sup>3</sup>級以上）での試験を行い、将来の実高炉導入に向けた諸課題の抽出及びCO<sub>2</sub>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する。他方、研究開発内容①については、既存事業の成果の活用が可能であるため、実機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】水素だけで鉄鉱石を還元する直接水素還元技術の開発

目標：CO<sub>2</sub> 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、直接水素還元技術により、現行の高炉法と比較して CO<sub>2</sub> 排出 50% 以上削減を達成する基礎技術を小規模試験炉（実炉の 1/50～1/10）で実証
- ② 2030 年までに、直接還元炉-電炉プロセスにおいて、自動車の外板等に使用可能な高級鋼を製造するため、不純物（製品に影響を及ぼす成分。以下同じ。）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、小規模試験電炉（処理量 10～20 トン規模）で実証

- 研究開発内容：

- ① 直接水素還元技術の開発

【（9/10 委託） + （1/10 インセンティブ）】

製鉄プロセスからの CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 排出が少ないが、CO<sub>2</sub> 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チリ産鉄鉱石など、一般的に北欧産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 年間のラボレベルでの要素技術開発を行う。2027 年頃から小規模試験炉（実炉の 1/50～1/10）での試験を行い、直接水素還元製鉄で、水素と天然ガスを併用しつつ、50%以上の CO<sub>2</sub> 削減が可能となる条件設定を行う。

- ② 直接還元鉄を活用した電炉の不純物除去・大型化技術開発（大型化、効率化、不純物対策）

【（2/3 補助→1/2 補助） + （1/10 インセンティブ）】

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 CO<sub>2</sub> 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。また、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-転炉プロセスを直接還元炉-電炉で置換するに際しては、電炉を大型化する必要があり、技術的課題（品質

面、生産性)を克服する必要がある。このような課題に対応するため、直接還元鉄を活用した電炉の不純物除去・大型化技術を開発する。

具体的には、2026年頃までに電炉内での冷鉄源溶解・精錬反応の挙動を解明するための要素技術開発を進める。2027年頃からは実機電炉プロセスを模擬した小規模試験電炉(処理量10~20トン規模)を設置して、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CO<sub>2</sub>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、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、基礎技術の開発までに5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、実機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、相互に強い関連性を有するため、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。

● 【社会実装に向けた支援】

水素還元製鉄には、大量かつ安価な水素が不可欠であるため、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を通じて、関連する基金プロジェクトの技術開発も含めて連携し、社会インフラ整備に向けた取り組みを行う。また、鉄鋼製品のリサイクル効果を含めた環境負荷計算法の国際規格化等、需要家がグリーンスチールに価値を見いだすための、国際的なルールメイキングに取り組む。

## 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、CO<sub>2</sub>分離回収技術により約30%のCO<sub>2</sub>削減を実現する技術の2030年までの実用化を目指し、2021年度から2028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CO<sub>2</sub>を活用した低炭素化技術等の開発

高炉での製鉄プロセスからの約50%のCO<sub>2</sub>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（500m<sup>3</sup>級以上）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、早期の実用化を目指し、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

基礎技術からの確立が必要となるため、2021年度から2030年度まで技術開発及び小規模実証を行うとともに、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・大型化技術開発

2021年度から2030年度まで要素技術の確立とパイロット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。

- 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において、ステージゲートを設定し、事業の進捗を見て、継続可否を判断する。いずれのタイミングにおいても、追加公募は想定していない。

【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

2024年頃に実機実証実験開始

（下表の例では2024年頃に事業継続判断）

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

2027年頃に中規模試験高炉（500m<sup>3</sup>級以上）での実証実験開始  
（下表の例では2027年頃に事業継続判断）

【研究開発項目2】水素だけで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

2026年頃に小規模試験炉（1/50～1/10程度）での実証実験の開始  
（下表の例では2026年頃に事業継続判断）

② 直接還元鉄を活用した電炉の不純物除去・大型化技術開発

2026年頃に小規模試験電炉（処理量10～20トン規模）での実証実験の開始  
（下表の例では2026年頃に事業継続判断）

表1：プロジェクト・社会実装の想定スケジュール

▶ ラボ ▶ 小規模試験炉 ▶ 中規模・大規模試験炉・実機試験 ★ ステージゲート

	2021~2025	2026~2030	2031~2040	2041~2050
<b>【研究開発項目1】高炉を用いた水素還元技術の開発</b>				
①所内水素を活用した水素還元技術等の開発	小規模試験高炉 <span style="color: gold;">★</span>	実機実証試験 <span style="color: gold;">★</span>	実装	
②外部水素等を活用した低炭素技術等の開発	小規模試験高炉	中規模試験高炉 (第1フェーズ) <span style="color: gold;">★</span>	中規模試験高炉 (第2フェーズ)	大規模試験高炉・実機実証試験 <span style="color: gold;">★</span> 実装
<b>【研究開発項目2】水素だけで鉄鉱石を還元する直接水素還元技術の開発</b>				
①直接水素還元技術の開発	ベンチプラント試験 <span style="color: gold;">★</span>	小規模試験炉	中規模直接還元炉試験 <span style="color: gold;">★</span> 実装	
②直接還元鉄を活用した電炉の不純物除去・大型化技術開発	要素技術開発 <span style="color: gold;">★</span>	小規模試験電炉	大規模試験電炉 <span style="color: gold;">★</span> 実装	

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 <sub>2</sub> ▲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、メタルフレッドの確保）、開発した省エネ・CO <sub>2</sub> 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**

---

(分野別ワーキンググループでの審議結果を踏まえ、研究開発項目及び研究開発内容を必要に応じて修正した後、今後の分野別ワーキンググループにおいて、項目ごとの予算額と予算根拠を提示予定)

(参考) 改訂履歴

・2021年〇月 制定