

グリーンイノベーション基金事業

「製造分野における熱プロセスの脱炭素化」プロジェクト
に関する研究開発・社会実装計画（案）

令和5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.....	9
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.....	20
5. 予算.....	23

1. 背景・目的

- 製造分野における熱プロセスの脱炭素化の重要性と課題解決の方向性
 - 我が国産業の CO₂ 排出量のうち製造業が約 3 割を占めており、中でも鉄鋼、化学等の Hard-to-Abate と呼ばれる脱炭素化が困難なエネルギー多消費産業では、グリーンイノベーション基金事業等も活用しつつ、大企業を中心に官民を挙げて脱炭素化に向けた取組が進められている。
 - 他方、銑鉄鋳物製造業、鍛工品製造業、金属熱処理業など、自動車や産業機械等の我が国の基幹産業に不可欠な金属部品を供給し、サプライチェーンの川中を占める素形材産業等では、国内出荷額 16 兆円、従業員数 71 万人と、地域経済、雇用に大きく貢献する一方で、金属を加熱するための工業炉から多くの CO₂ が排出され、その多くは中小企業（5.1 万事業所）であることから、脱炭素化に向けた検討及び対応が遅れている。これらの産業を中心として、熱プロセスに用いられる工業炉（製鉄プロセスに用いられる高炉・転炉・電炉は含まない。以下同じ。）は国内に 3.7 万基あり、排出される CO₂ は、産業部門の 4 割を超える状況となっていることから、早急に対応策を講じていくことが必要。
 - こうした中、EU では、域外諸国からの鉄鋼、アルミ、セメント等の輸入について、製品当たり炭素排出量に基づき、証書の購入（輸入課金）が必要となる炭素国境調整措置（CBAM : Carbon Border Adjustment Mechanism）が 2023 年 10 月から段階的に導入される予定。2022 年 12 月の欧州議会の発表では、その対象にネジやボルトなどの一部の下流製品が新たに追加されることとされている。
 - また、自動車分野においても、ライフサイクルを通じた炭素排出量を評価する仕組みの導入が欧州等において検討されている。こうした動きを背景として、例えば、ポルシェでは、部品製造時に再生可能エネルギーを使用しない場合、将来的な契約締結を不可とする方針が、メルセデス・ベンツでは、2039 年にカーボンニュートラルが未達となるサプライヤーを取引先から除外する方針¹がそれぞれ打ち出されるなど、各自動車メーカーも CO₂ 削減に向けた動きを見せており、中小企業をはじめ、金属部品関連産業を中心として脱炭素化を早期に実現できなければ、現状の取引関係を喪失するリスクに加え、将来的にグリーン市場への参入が困難となるリスクがある。
 - 金属を取り扱う熱プロセスの脱炭素化には、工業炉に用いる燃料・電力の脱炭素化が不可欠であり、現在、天然ガス等を燃料としている燃焼炉については、将来的な供給量等のポテンシャルを踏まえれば、燃焼時に CO₂ を排出しないアンモニアや水素等のゼロエミッション燃料の活用が有望。他方、アンモニアや水素は、金属製品に対して窒化（表面層の硬化）や水素脆化（靱性の低下）等の化学変化を生じさせる特性があり、燃焼の安定性、NO_x 低減といった燃焼技術に加えて、金属製品や炉材等への影響の解明とその対応が必要となる。また、

¹ 2022.1.18 MUFGE「自動車産業を取り巻くカーボンニュートラル対応の動向」

燃焼炉を電気炉に転換する場合には、炉の新設に伴う設備投資が必要となることに加え、特別高圧電力の契約及び受電設備の設置が必要となり、敷地の制約等から中小企業を中心に導入が困難となる可能性があり、受電容量の最小化や電気炉全体の高効率化が課題となる。

- 金属加熱に用いる工業炉における、アンモニアを中心とした燃焼技術の実用化は、戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）「エネルギーキャリア」のうちアンモニア直接燃焼プロジェクト（2014～2018 年度）²を通じて、新たな燃料としての供給可能性、燃焼技術としての実現可能性が高まってきた。世界に先駆けて技術を確認することで、カーボンニュートラル対応工業炉の新たな市場獲得に加え、金属部品そのもの、又は当該部品を必要とする自動車等のグリーン市場の獲得が可能となるとともに、日本の CO₂ 排出量削減目標の達成に貢献することが期待される。
- 本プロジェクトでは、将来的にアンモニアや水素の安価かつ大量の供給基盤が確立されることを見据え、カーボンニュートラル対応型の工業炉に必要となる燃焼技術、燃焼炉から電気炉への転換を進めるために不可欠な電気炉の受電容量低減・高効率化技術等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

- 我が国の製造分野における熱プロセスの脱炭素化を実現するには、関連する技術開発の動向、アンモニアや水素の供給インフラ等の整備状況を踏まえて、複数の技術的アプローチを行っていくことが適当。
- 工業炉の電化は、利用時に CO₂ を排出しないことから、脱炭素化に向けた一つの有効なアプローチであり、海外の主要な工業炉メーカーも、電気炉の高効率化等に関する研究開発を進めている状況。我が国では、小型の燃焼炉から電気炉への転換が進展していくことが想定されるが、燃焼炉との比較において、経済性や効率性、電気炉の特性（抵抗加熱は、通電する材料が必要であること（直接加熱）、炉の立ち上げ時に大きな投入熱量を要すること（間接加熱）、誘導加熱は大型金属材料の深部への加熱が難しいこと、炉内雰囲気均一加熱・均一温度化等が難しいこと等の制約がある）を踏まえれば、電気炉の普及の課題となる受電容量の最小化や高効率化を進めつつ、燃焼炉の選択肢も確立しておくことが重要。将来的な電力需給の逼迫リスク、有事等の際におけるサプライチェーンのレジリエンスを高める上でも、工業炉のエネルギー源の多様化を図っていくことは、我が国製造業の競争力の維持・強化に係る戦略上不可欠である。
- そのため、より多くの熱量を要する大型の燃焼炉については、アンモニア・水素などのゼロエミッション燃料に対応した工業炉を実用化する必要がある。この点、戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）における「エネルギーキャリア」のうちアンモニア直接燃焼プロジェクト（2014～

² SIP（戦略的イノベーション創造プログラム）HP： <https://www.jst.go.jp/sip/k04.html>

2018 年度) では、実証炉における都市ガスとアンモニアの 30%混焼試験において、都市ガスのみの場合と同等の加熱効率 (55%) を達成しつつ、NOx 発生量を押さえた燃焼を実現し、工業炉への適用可能性を証明した。この成果の発表を受けて、中国・欧米を中心にアンモニア燃焼に関する論文数・特許数が飛躍的に伸びており、水面下での技術開発競争が激化しつつあると推測される。

- また、我が国の工業炉メーカーは、海外企業に比して事業規模が小さいものの、工業炉から排出される排ガス・廃熱によって、工業炉に供給する空気を暖め、当該高温空気を高速で噴射しながら燃焼を行うリジェネレイティブバーナーシステムを世界で初めて確立し、従来比 30% 以上の省エネを実現するなどの実績を有しており、アジアや欧米を中心に海外拠点、現地企業との協力体制の下、世界の工業炉の輸出総額に対して、日本企業が 4 ~ 7% を占めるとも言われている³。また、2021 年度から NEDO 先導研究プログラムにおいて、金属材料の熱プロセスに用いる工業炉へのアンモニア燃料の活用にあたって、①NOx 対策、②未燃アンモニア対策、③非加熱物・炉構成材料への影響検証など、実現性の確認を進めており、この分野の知見も海外勢に先行している状況。
- そうした状況を踏まえ、本プロジェクトでは、アンモニアや水素等のゼロエミッション燃料に対応した燃焼炉の技術開発と、電気炉の受電容量の最小化・高効率化を実現するための技術開発を並行して進めることとし、国内外の環境の変化に柔軟に対応していく。
- 社会実装には、①アンモニア・水素のインフラも含めたゼロエミッション燃料の供給体制の整備、②カーボンニュートラル対応工業炉の技術確立 (本プロジェクト)、③中小企業を中心とした、カーボンニュートラル工業炉の普及、④カーボンニュートラル対応工業炉及びそこから生み出される金属部品等の海外市場獲得に向けた国際標準化等が必要。
- ②については、燃焼炉へのアンモニア・水素燃料の適用に必要な技術として、燃焼速度、火炎温度、輻射、フューエル NOx・サーマル NOx 発生などの燃焼特性の違いを考慮した燃焼・制御技術、金属製品等に及ぼす窒化や水素脆化などの影響メカニズムの解明といった基盤技術開発が必要であり、それを前提として、金属製品等への影響を抑制するバーナー・炉の開発及びその設計技術、中長期的な安定操業を実現するための炉体材・耐火材、多様な工業炉の転換・改造を容易にするとともに、オペレーションを最適化するためのシミュレーション・デジタルツイン技術等の開発が必要。
- また、カーボンニュートラル対応工業炉の普及を進めていく上で、例えば、アンモニア燃焼の特性でもある、煤の排出や酸化 (酸化スケール) の抑制を可能とする等の運用の高度化・高効率化など、脱炭素化に留まらない機能を実現する技術開発も重要となる。
- 電気炉については、中小企業を中心として、現行の燃焼炉を電気炉に転換していくためには、アンモニア・水素燃焼と電気炉のハイブリッド化等によってピーク電力消費量を低減する技術や、現状、その利活用が限定的な電気炉の排ガス・廃熱利用、ヒーターの高出力化や誘導加熱

³ (一社) 日本工業炉協会調べ

システムの適用範囲拡大等による高効率化、電気炉の課題でもある炉内の均一加熱・均一温度化、デマンドレスポンスに対応した運転方法の確立とそれを実現するためのシミュレーション・デジタルツイン技術が必要。

- これらの技術開発は、世界的にも実用化できておらず、長期の研究開発期間と膨大な研究開発費を要すること、社会実装には、アンモニアや水素の価格や供給量、ゼロエミッション電力の供給余力など、外的要因による不確実性も高いことから、日本政府として積極的に研究開発支援を講じるべき分野であり、研究開発の進捗、内外の様々な状況を踏まえながら、取り組むべき研究開発テーマの絞り込みや統合、重点化を行っていくものとする。

- 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

- 燃焼プロセスの燃料転換に関連するプロジェクトとして、基金事業において、「CO₂等を用いたプラスチック原料製造技術開発」プロジェクトでは、エチレンやプロピレン等の製造工程で発生するメタン等のオフガスを熱源として利用するナフサ分解炉について、アンモニアや水素等のカーボンフリー燃料への転換に向けた研究開発が行われている。当該取組では、温度帯域を約800～900℃とし、管式加熱を行うことを想定している。

これに対し、本プロジェクトが対象とする金属加熱用の工業炉は、金属製品への窒化・水素脆化等の影響解明と抑制技術が中心であり、温度帯域が数百℃から1400℃を想定している点、直接的な加熱によって、金属材料等への品質影響を生じさせない技術開発が中心となる点等において異なる。

他方で、燃焼安定性等の知見については、双方のプロジェクトにおいて有用であることから、NEDOをハブとして情報を共有し、双方の研究開発を加速していく。

- また、「燃料アンモニアサプライチェーンの構築」プロジェクトと「大規模水素サプライチェーンの構築」プロジェクトでは、アンモニア・水素の製造・供給・利活用（主に発電利用）等に関する技術の研究開発が進められている。これらのプロジェクトにより、アンモニア・水素の供給拡大、低コスト化が実現されることで、当該プロジェクトから燃焼炉の燃料としてのアンモニア・水素の供給を受ける可能性も考えられる。

- 既存事業

- 以下の2つの予算事業を通じて、工業炉に適用するためのアンモニア燃焼に関する技術開発が行われている。
- 「エネルギー・環境分野の中長期的課題解決に資する新技術先導研究プログラム（産業部門における高温加熱プロセスの小型化・省エネルギー化・脱炭素化のための革新技術の開発）」では、金属材料を取り扱う工業炉へのアンモニア燃料の適用を実現するため、アンモニア燃焼による金属材料への影響解明等に関する基礎研究、実現性の確認を進めている。本プロジェクトでは、当該事業で得られた要素技術や各種データ、確認された技術課題を踏まえて、

実機炉への導入に向けて、本格的な研究開発に取り組む予定としている。

- また、「化石燃料のゼロエミッション化に向けた持続可能な航空燃料（SAF）・燃料アンモニア生産・利用技術開発事業（工業炉における燃料アンモニアの燃焼技術開発）」では、ガラス溶解炉（1500℃超の温度帯域）に特化した工業炉の技術開発として、アンモニア・酸素の燃焼による燃焼実証、環境基準に対応したバーナー開発、ガラス材料への影響評価等の取組が進められている。これに対して、本プロジェクトが対象とする金属加熱用の工業炉は、金属製品への窒化・水素脆化等の影響解明と抑制技術が中心であり、酸素付加燃焼ではなく、高温空気燃焼に適用する必要がある点（1000℃以下のアルミ溶解炉等での安定した燃焼、未燃アンモニアの低減等の技術課題が存在）、多様な工業炉に適用させるために必要となるシミュレーション技術等を開発する点において異なる。

【予算事業】

- エネルギー・環境分野の中長期的課題解決に資する新技術先導研究プログラム（産業部門における高温加熱プロセスの小型化・省エネルギー化・脱炭素化のための革新技术の開発）（2021～2022年度、2022年度予算額 52.9 億円）
 - 化石燃料のゼロエミッション化に向けた持続可能な航空燃料（SAF）・燃料アンモニア生産・利用技術開発事業（工業炉における燃料アンモニアの燃焼技術開発（2021～2025年度、2022年度予算額 70.8 億円）
- グリーン成長戦略の実行計画における記載（抜粋）
 - （11）カーボンリサイクル・マテリアル産業
 - ii）マテリアル
 - ② 熱源の脱炭素化
 - <現状と課題>

製紙業やガラス・セラミックス等の一部の窯業等では、化学や鉄鋼のように製造プロセスにおいて CO₂ を排出するわけではないものの、いずれも高温での乾燥・焼成等が必要であり、現状ではコストが安い化石燃料を用いている。こうした熱源を非化石燃料に転換することで脱炭素化が図られるという意味では方向性は示されているものの、非化石燃料を用いた製造プロセスは過去においても存在せず、実証を経た上での設備転換が課題となる。

<今後の取組>

燃焼させても CO₂ を生じない水素やアンモニア等の非化石燃料由来の熱源に転換することにより、脱炭素化を目指す。転換に当たっては、非化石燃料が安定的かつ安価で手に入ることを前提に、燃料変更に伴う製造設備の転換に取り組んでいく。具体的には、水素等の燃焼特性に合わせた大型ボイラー、コージェネレーション、ナフサ分解炉などの工業炉、セメントキルン、ガラス熔融炉、セラミックス焼成炉及び紙パルプ乾燥工程等の技術開発を行っていく。こうした取組を通じて、日常生活に不可欠な日用品を製造する製紙業等の競争力を維持し、

豊かな国民生活を支える。

2. 目標

● アウトプット

➤ 研究開発の目標

1. 金属製品を取り扱うアンモニア燃焼工業炉の技術確立

- ① 2032 年度までに、天然ガス等の既存燃料とアンモニアとの 50%混焼工業炉を確立する。具体的には、金属製品の品質、NOx 排出量、燃焼安定性・制御精度、長期運転安定性等の項目について、既存の工業炉との比較において同一水準以上となる技術、及び当該技術を既存の工業炉に適用する場合の影響予測、最適設計を可能とする汎用的なシミュレーション技術等を確立する。
- ② 2032 年度までに、既存の工業炉との比較において、金属製品の品質、NOx 排出量、燃焼安定性・制御精度、長期運転安定性等が同一水準以上となるアンモニア 100%専焼技術について、TRL6 以上（IEA の TRL6 以上相当：システムモデルあるいはプロトタイプの相当環境での実証を実施）を実現する。

※複数事業者の連携によって研究開発に取り組む場合において、全体として、上記①及び②の目標を目指す、ある特定の事業者の担当する研究開発領域については、上記の目標そのものではなく、その実現に資する別の目標を設定することが適切と考えられるときは、事業者自らが申請の際に適切な目標を設定することとする。

2. 金属製品を取り扱う水素燃焼工業炉の技術確立

- ① 2032 年度までに、天然ガス等の既存燃料と水素との 50%混焼工業炉を確立する。具体的には、金属製品の品質、NOx 排出量、燃焼安定性・制御精度、長期運転安定性等の項目について、既存の工業炉との比較において同一水準以上となる技術、及び当該技術を既存の工業炉に適用する場合の影響予測、最適設計を可能とする汎用的なシミュレーション技術等を確立する。
 - ② 2032 年度までに、既存の工業炉との比較において、金属製品の品質、NOx 排出量、燃焼安定性・制御精度、長期運転安定性等が同一水準以上となる水素 100%専焼技術について、TRL6 以上（IEA の TRL6 以上相当：システムモデルあるいはプロトタイプの相当環境での実証を実施）を実現する。
- ※複数事業者の連携によって研究開発に取り組む場合において、全体として、上記①及び②の目標を目指す、ある特定の事業者の担当する研究開発領域については、上記の目標そのものではなく、その実現に資する別の目標を設定することが適切と考えられるときは、事業者自らが申請の際に適切な目標を

設定することとする。

3. 電気炉の受電設備容量等の低減・高効率化に関する技術の確立

- ① 2032 年度までに、アンモニア・水素燃焼技術と電気加熱を組み合わせたハイブリッド運転技術や、汎用的な熱プロセスシミュレーション技術等の確立を通じて、燃焼炉を既存の電気炉に置き換えた場合に比べて、ピーク電力消費量及び受電設備容量を 30%以上削減する技術を確立する。
- ② 2028 年度までに、電気炉の廃熱利活用技術、高出力ヒーター、抵抗体の劣化防止・長寿命化技術等の確立を通じて、既存の電気炉に比べて、15%以上の省エネルギー技術を確立する。

※複数事業者の連携によって研究開発に取り組む場合において、全体として、上記①及び②の目標を目指す、ある特定の事業者の担当する研究開発領域については、上記の目標そのものではなく、その実現に資する別の目標を設定することが適切と考えられるときは、事業者自らが申請の際に適切な目標を設定することとする。

(目標設定の考え方)

1. 金属製品を取り扱うアンモニア燃焼工業炉の技術確立

政府の 2030 年、2050 年の CO₂ 削減目標に寄与するため、アンモニアの 50% 混焼、100% 専焼技術の実現に向けて、ユーザー企業が導入を判断するために最低限必要となる技術項目を目標として設定。金属製品や耐火物、蓄熱体等への影響、長期運転時における工業炉全体の安定性・安全性などを実機（既設商用炉の活用を含む。以下同じ。）において検証、データ取得をするためには数年間を要することも考慮して 2032 年度の目標値として設定。

2. 金属製品を取り扱う水素燃焼工業炉の技術確立

政府の 2030 年、2050 年の CO₂ 削減目標に寄与するため、水素の 50% 混焼、100% 専焼技術の実現に向けて、ユーザー企業が導入を判断するために最低限必要となる技術項目を目標として設定。金属製品や耐火物、蓄熱体等への影響、長期運転時における工業炉全体の安定性・安全性などを実機において検証、データ取得をするためには数年間を要することも考慮して 2032 年度の目標値として設定。

3. 電気炉の受電設備容量等の低減・高効率化に関する技術の確立

工業炉のユーザー企業が燃焼炉から電気炉への転換を選択肢として取り得るようにするため、転換に向けた課題の一つであるピーク電力消費量及び受電設備容量の大幅な低減を目標として設定。その実現のための一つの有力な方策がアンモニアや

水素燃焼技術と電気加熱のハイブリット技術であり、1. 及び 2. の技術目標と連動するものとして、2032 年度の目標値として設定。

また、民間独自でも燃焼雰囲気改善（燃料と空気比等の最適化）や断熱材の改良など、様々な省エネの取組が進められているが、燃焼炉から電気炉への転換を進めていくためには、極めて高いレベルで高効率化の実現、早期実装を図っていくことが不可欠。電気炉の廃熱利活用技術等を念頭にしつつも、電気炉システム全体の効率化を図っていく技術の要素は多岐にわたることから、特定の技術アプローチに限定せず、本目標を達成しうる提案を広く対象とする。

（目標達成の評価方法）

提案者の柔軟性を確保する観点から、各目標の評価方法については、現時点で特定せず、その方法についての考え方のみ示すことと、今後案件の採択時により具体的に決定することとする。

1. 金属製品を取り扱うアンモニア燃焼工業炉の技術確立
本プロジェクトにおける技術開発、プロトタイプ・実機実証における各種試験結果、取得データ等を踏まえて、既存の燃焼炉と比較し、同一あるいはそれ以上の性能となっているか（金属製品の品質、NOx 排出量、燃焼安定性・制御精度、長期運転安定性等）、総合的に判断する。
2. 金属製品を取り扱う水素燃焼工業炉の技術確立
本プロジェクトにおける技術開発、プロトタイプ・実機実証における各種試験結果、取得データ等を踏まえて、既存の燃焼炉と比較し、同一あるいはそれ以上の性能となっているか（金属製品の品質、NOx 排出量、燃焼安定性・制御精度、長期運転安定性等）、総合的に判断する。
3. 電気炉の受電設備容量等の低減・高効率化に関する技術の確立
本プロジェクトにおける技術開発、プロトタイプ・実機実証における各種試験結果、取得データ等を踏まえて、いくつかのモデルケースを前提として、燃焼炉から既存の電気炉に転換した場合と比較し、ピーク電力消費量及び受電設備容量の低減割合が目標値を満たしているか、また、既存の電気炉との比較において、効率化が目標値を満たしているか、総合的に判断する。

（目標の困難性）

1. 金属製品を取り扱うアンモニア燃焼工業炉の技術確立
現状、世界においても、金属製品を取り扱う工業炉にアンモニア燃料の活用を可能

とする技術は実用化できていない。アンモニアを燃料として燃焼させる技術開発は各方面において取り組まれている一方、燃焼ガスや未燃アンモニアによる金属製品への窒化等の品質影響、そのメカニズムは未解明であり、工業炉として長期運転を実現するためには、燃焼・制御技術、バーナー、炉材、設計、シミュレーション、安全な燃料供給システムなど、確立すべき技術要素は多岐にわたる。

また、「NEDO 先導研究プログラム／新技術先導研究プログラム（産業部門における高温加熱プロセスの小型化・省エネルギー化・脱炭素化のための革新技术の開発）」において、金属製品を取り扱う工業炉へのアンモニア燃料の適用に向けた要素技術開発、実現性の確認が先行的に取り組まれているところ、これらの取組では、100～1000kW 規模のサブスケールの実証を中心としている。社会実装に向けて、これを 100 倍程度の実機炉（10～100MW）に適用させるには、炉内のアンモニア燃焼ガスや未燃アンモニアの流動、燃焼反応の進行など、様々な影響への検証が必要であり、長期安定的な操業に向けて、解決すべき課題数・難易度から見ても、極めてハードルが高い。

2. 金属製品を取り扱う水素燃焼工業炉の技術確立

現状、世界においても、金属製品を取り扱う工業炉に水素燃料の活用を可能とする技術は実用化できていない。水素を燃料として燃焼させる技術開発は各方面において取り組まれている一方、水素による金属製品の水素脆化や、燃焼時に生じる高温水蒸気による品質影響等について、そのメカニズムは未解明であり、工業炉として長期運転を実現するためには、燃焼・制御技術、バーナー、炉材、設計、シミュレーション、安全な燃料供給システムなど、確立すべき技術要素は多岐にわたる。

社会実装には、実機炉での長期間にわたる実証が不可欠であり、炉内の水素燃焼ガス等の流動、燃焼反応の進行など、様々な影響への検証が必要であり、解決すべき課題数・難易度から見ても、極めてハードルが高い。

3. 電気炉の受電設備容量等の低減・高効率化に関する技術の確立

現状、世界においても、ピーク電力消費量や受電設備容量を 30%以上低減化する技術は実用化できていない。一つの方策として、アンモニアや水素燃焼と電気加熱のハイブリッド化が想定されるが、上述のとおり、アンモニアや水素燃料の工業炉への適用には課題が多く、バーナーや電熱ヒーター、炉体等これまでに無い組み合わせの機器が装着され、炉内の均一加熱等を可能にする制御技術や設計技術の難易度は極めて高い。

また、工業炉の高効率化については、民間独自の取組として、着実に高効率化、省エネ化を実現してきている中で、更に 15%以上の高効率化を図るためには、廃熱利活用や高出力ヒーター、抵抗体の劣化防止・長寿命化など、既存技術を高度

化するだけに留まらない新たな技術開発が必要であり、技術難易度は高い。

- アウトカム

カーボンニュートラル対応型の工業炉の社会実装により、期待される CO₂ 削減効果、予想される市場規模について、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、民間投資誘発額の状態も随時モニタリングしつつ、世界市場の付加価値の相当程度の割合を我が国に環流させ、国内及び世界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）

本プロジェクトで扱う主たる技術開発の成果は、2032 年度以降に社会実装し、順次普及していくことを見据えたものであるため、2040 年、2050 年時点の目標として算出。

- ◇ 約 0.2 億トン/年（2040 年）（国内）
- ◇ 約 0.7 億トン/年（2050 年）（国内）

【算定の考え方】

政府目標であるアンモニア・水素の供給等が計画どおり進展することを前提として、エネルギー源の供給制約は考慮せずに試算。国内 3.7 万基の工業炉の数は変動しない仮定の下、一基あたりの CO₂ 排出量を基準として、2032 年度以降にアンモニア・水素の 50%混焼の燃焼炉（又はそれに相当する電気炉）に毎年一定数ずつ更新されていくものとして試算。2040 年度以降はアンモニア・水素の 100%混焼の燃焼炉（又はそれに相当する電気炉）に毎年一定数ずつ更新されていくものとして試算。

【利用したパラメータ】⁴

- ①工業炉一基あたりの CO₂ 排出量（現状）：約 0.4 万トン/年
- ②アンモニア・水素 50%混焼工業炉（又はそれに相当する電気炉）の普及率：国内工業炉 3.7 万基の 3.5%（約 1,300 基）が毎年更新されるものと仮定（2040 年時点で普及率約 3 割）
- ③アンモニア・水素 100%混焼工業炉（又はそれに相当する電気炉）の普及率：国内工業炉 3.5%（約 1,300 基）が毎年更新されるものと仮定（2050 年時点で普及率約 6 割（専焼 3 割、混焼 3 割））

計算式：

$$0.4 \text{ 万トン} \times 1/2 \times 1,300 \text{ 基} \times 8 \text{ 年} = \text{約 } 0.2 \text{ 億トン}$$
$$(0.4 \text{ 万トン} \times 1/2 \times 1,300 \text{ 基} \times 8 \text{ 年}) + (0.4 \text{ 万トン} \times 1,300 \text{ 基} \times 10 \text{ 年}) = \text{約 } 0.7 \text{ 億トン}$$

⁴ 平成 26 年度エネルギー使用合理化促進基盤整備事業（工業炉等における省エネルギー技術に関する実態調査）報告書の基に試算

➤ 経済波及効果（世界市場規模推計）

本プロジェクトで扱う主たる技術開発の成果は、2032 年度以降に社会実装し、順次普及していくことを見据えたものであるため、2040 年、2050 年時点の目標として算出。

◇ 約 3.8 兆円（2040 年までの累計）（国内＋海外）

※カーボンニュートラル対応工業炉から生産される金属製品等 約 36 兆円

◇ 約 9.6 兆円（2050 年までの累計）（国内＋海外）

※カーボンニュートラル対応工業炉から生産される金属製品等 約 186 兆円

【算定の考え方】⁵

国内 3.7 万基の工業炉が、平均価格約 1 億円⁶の 2 倍程度（燃料供給設備費等も含む。）の付加価値として、2032 年度以降にアンモニア・水素の 50%混焼の燃焼炉（又はそれに相当する電気炉）が毎年一定数（約 1,300 基）ずつ普及（更新）されていくものとして試算。2040 年度以降はアンモニア・水素の 100%専焼の燃焼炉（又はそれに相当する電気炉）が毎年一定数（約 1,300 基）ずつ普及（更新）されていくものとして試算。

海外については、国内同様に一基あたり 2 億円（燃料供給設備費等も含む。）の付加価値として、アンモニア・水素の 50%混焼の燃焼炉（又はそれに相当する電気炉）が現状の輸出額（約 530 億円）・基数（約 530 基）⁷の 2 倍程度、100%専焼の燃焼炉（又はそれに相当する電気炉）が現状の輸出額・基数の 3 倍程度で毎年普及するものとして試算。

※カーボンニュートラル対応工業炉から製造される金属製品は、グリーン製品として新たな付加価値の創出が期待されることから、これについても経済波及効果として盛り込む。国内外ともに、現状の工業炉一基あたりの生産額（約 4.3 億円）に、カーボンニュートラル対応工業炉の想定普及基数を乗じて試算。仮にグリーン製品として金属製品の付加価値が 2 割増加することとなれば、44 兆円の付加価値の創出となる。

⁵ 平成 26 年度エネルギー使用合理化促進基盤整備事業（工業炉等における省エネルギー技術に関する実態調査）報告書の基に試算

⁶ 2019 円及び 2020 年国内工業炉売上高（（一社）日本工業炉協会調べ）を基に経済産業省試算

⁷ 2019 年貿易統計における燃焼炉、電気炉の輸出総額から一基当たり平均約 1 億円と仮定して基数を算出

3. 研究開発項目と社会実装に向けた支援⁸

- 【研究開発項目 1】金属製品を取り扱うアンモニア燃焼工業炉の技術確立

- 目標：

- ① 2032 年度までに、天然ガス等の既存燃料とアンモニアとの 50%混焼工業炉を確立する。具体的には、金属製品の品質、NO_x 排出量、燃焼安定性・制御精度、長期運転安定性等の項目について、既存の工業炉との比較において同一水準以上となる技術、及び当該技術を既存の工業炉に適用する場合の影響予測、最適設計を可能とする汎用的なシミュレーション技術を確立する。
- ② 2032 年度までに、既存の工業炉との比較において、金属製品の品質、NO_x 排出量、燃焼安定性・制御精度、長期運転安定性等が同一水準以上となるアンモニア 100%専焼技術について、TRL6 以上（IEA の TRL6 以上相当：システムモデルあるいはプロトタイプ相当環境での実証を実施）を実現する。

- 研究開発内容⁹：

アンモニア燃料に対応した工業炉を実現するためには、アンモニアの特性である燃焼性や燃焼速度が低いことへの対応（必要な熱量を確保）に加え、燃焼時に NO_x が発生しやすく、低 NO_x 化と未燃アンモニアの低減はトレードオフの関係にあること、金属製品への窒化や、鉄系を除く金属材料に対する強い腐食性を有する特性への対応など、バーナー等の燃焼器関係から炉全体の設計技術に至るまで技術課題は広範にわたる。

そのため、本プロジェクトでは、既存事業で得られたアンモニア燃焼に関する知見を生かしつつ、①アンモニア燃焼による排ガスや未燃アンモニアによる金属製品等への影響や、炉内で生成されるラジカルの分布など、製品や耐火物等との反応機構の解明、②金属製品の品質確保、低 NO_x 化、燃焼安定性等を実現する最適な燃焼方法、それに実現する制御技術、バーナー及び耐火物等の炉材、炉全体の設計技術等の開発、③既存炉からの転換を進めていく上で必要となる、最適なバーナー配置等の設計や運転時の影響等を予測する汎用的なシミュレーション・デジタルツイン技術の開発、④劇物であるアンモニア燃料のリスクを最小化するための、供給から燃焼、排ガス、脱硝など、最適な工業炉システムとしての設計技術の開発と基準策定、⑤①～④の成果を活用し、例えば、より温度帯域が広く、炉内温度の均一性や精緻な温度制御、金属製品への高い品質が求められるなど、よりアンモニア燃料の適用難易度の高い工業炉（鉄鋼加熱炉、鍛造炉、アルミ溶解炉等を想定）を対象とした、既存炉の改造又は新設による実機での長期間の実証を行い、排

⁸ 本プロジェクトは、「GX 実現に向けた基本方針」（令和 5 年 2 月 10 日閣議決定）に基づき実施するものであり、今後、状況によっては、内容等の変更があり得る。

⁹ 「2. 目標」の「研究開発の目標」の達成に向けては、様々な方法が考えられるため、具体的な達成方法は提案者の創意工夫に委ねる

ガス特性、炉の加熱効率、製品の加熱均一性、製品等への影響等を確認する。

また、当該技術に関連する国際標準化活動への参加、標準提案に向けた検討も並行して本研究開発項目内で進める。

なお、本研究開発項目は、アンモニア燃料の工業炉への適用が主テーマとなるが、既存の供給インフラの活用が期待される他のゼロエミッション燃料（合成燃料、ブラックペレットなどのバイオ燃料等）についても、工業炉の脱炭素化に向けて多くの選択肢と技術可能性を担保しておくことが重要。そうした観点から、同等の目標設定、技術困難度等があることを前提として、これらの燃料を工業炉に適用するための技術開発も併せて提案可能なものとする（以下、研究開発項目2においても同様）。

（委託・補助の考え方）

- アンモニア燃焼ガスや未燃アンモニアによる金属製品への品質影響とそのメカニズムは未解明であり、工業炉として長期運転を実現するためには、燃焼・制御技術、バーナー、炉材、設計、シミュレーション、安全な燃料供給システムなど、確立すべき技術要素は多岐にわたる。また、将来的なアンモニア燃料の供給量や価格など、予見性がない中で投資リスクも大きく、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、特に基盤技術開発など、その成果を広く普及させるべきものを中心に委託事業として開始し、実証の段階から補助事業へと移行する。
- 【研究開発項目2】金属製品を取り扱う水素燃焼工業炉の技術確立
 - 目標：
 - ① 2032年度までに、天然ガス等の既存燃料と水素との50%混焼工業炉を確立する。具体的には、金属製品の品質、NO_x排出量、燃焼安定性・制御精度、長期運転安定性等の項目について、既存の工業炉との比較において同一水準以上となる技術、及び当該技術を既存の工業炉に適用する場合の影響予測、最適設計を可能とする汎用的なシミュレーション技術を確立する。
 - ② 2032年度までに、既存の工業炉との比較において、金属製品の品質、NO_x排出量、燃焼安定性・制御精度、長期運転安定性等が同一水準以上となる水素100%専焼技術について、TRL6以上（IEAのTRL6以上相当：システムモデルあるいはプロトタイプの相当環境での実証を実施）を実現する。
 - 研究開発内容

水素燃料に対応した工業炉を実現するためには、燃焼性や燃焼速度が高く、燃焼時にサーマルNO_xが発生しやすい水素の特性への対応、金属製品等の水素脆化や、燃焼時に生ずる高温高濃度の水蒸気による腐食影響等への対応、アンモニア燃焼で不足する熱量をアンモニアから水素に改質し、水素燃料として補完する技術など、バーナー等の燃焼

器関係から炉全体の設計技術に至るまで技術課題は広範にわたる。

そのため、本プロジェクトでは、既に開発されている水素バーナー等の技術を活用しつつ、①水素燃焼による排ガスや未燃水素による金属製品等への影響や、炉内で生成されるラジカルの分布など、金属製品や耐火物等との反応機構の解明、②金属製品の品質確保、低 NOx 化、燃焼安定性等を実現する最適な燃焼方法、それに要する制御技術、バーナー及び耐火物等の炉材、炉全体の設計技術等の開発、③既存炉からの転換を進めていく上で必要となる、最適なバーナー配置等の設計や運転時の影響等を予測する汎用的なシミュレーション・デジタルツイン技術の開発、④発火性が高い水素燃料のリスクを最小化するための、供給から燃焼、排ガス活用など、最適な工業炉システムとしての設計技術の開発と基準策定、⑤①～④の成果を活用し、例えば、より温度帯域が広く、炉内温度の均一性や精緻な温度制御、金属製品への高い品質確保が求められるなど、水素燃料の適用難易度の高い工業炉（鉄鋼加熱炉、金属熱処理炉等を想定）を対象とした、既存炉の改造又は新設による実機での長期間の実証を行い、排ガス特性、炉の加熱効率、製品の加熱均一性、製品等への影響等を確認する。

また、当該技術に関連する国際標準化活動への参加、標準提案に向けた検討も並行して本研究開発項目内で進める。

（委託・補助の考え方）

- 水素燃焼ガスや未燃水素、燃焼時に発生する高温水蒸気等による金属製品への品質影響、そのメカニズムは未解明であり、工業炉として長期運転を実現するためには、燃焼技術、バーナー、炉材、設計、シミュレーション、安全な燃料供給システムなど、確立すべき技術要素は多岐にわたる。また、将来的な水素燃料の供給量や価格など、予見性がない中で投資リスクも大きく、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、特に基盤技術開発など、その成果を広く普及させるべきものを中心に委託事業として開始し、実証の段階から補助事業へと移行する。

● 【研究開発項目 3】電気炉の受電設備容量等の低減・高効率化に関する技術の確立

- 目標：
 - ① 2032 年度までに、アンモニア・水素燃焼技術と電気炉を組み合わせたハイブリッド運転技術や、汎用的な熱プロセスシミュレーション技術等の確立を通じて、燃焼炉を既存の電気炉に置き換えた場合に比べて、ピーク電力消費量及び受電設備容量を 30%以上削減する技術を確立する。
 - ② 2028 年度までに、電気炉の廃熱利活用技術、ヒーターの高出力化、抵抗体の劣化防止・長寿命化技術等の確立を通じて、既存の電気炉に比べて、15%以上の省エネルギー技術を確立する。

➤ 研究開発内容

中小規模の燃焼炉を電気炉に転換していくためには、ピーク電力消費量及び受電設備容量を最小化するための技術開発が必要。一つの有効な手段として、アンモニア・水素燃焼技術と電気加熱を組み合わせたハイブリッド炉が想定されることから、金属製品等への影響の解明に加え、様々な加熱パターンに対応した均一加熱・均一温度化を実現する制御技術、炉内の循環システム、燃焼技術と電気加熱の最適加熱手法や、蓄電池やインバータ等の活用も含めた電気炉全体の効率化を図るための汎用的な熱プロセスシミュレーションの開発を行う。

また、抵抗体の劣化防止・長寿命化、電気炉の廃熱利活用、ヒーターの高出力化、磁性体・非磁性体を問わず加熱可能な誘導加熱システムの開発等を通じて、電気炉全体の更なる高効率化を図るための技術開発を行う。

開発した廃熱回収装置などの各技術については、実証炉に導入し、炉の加熱効率、製品の加熱均一性、製品等への影響等を確認するとともに、当該技術に関連する国際標準化活動への参加、標準提案に向けた検討も並行して本事業内で進める。

(委託・補助の考え方)

- アンモニア、水素燃焼と電気加熱によるハイブリッド炉については、研究開発項目 1 及び研究開発項目 2 と連携して取り組むものであり、解決すべき技術的な課題は広範にわたる。将来的なアンモニア、水素燃料の供給量や価格など、予見性がない中で投資リスクも大きく、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、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。

電気炉全体の高効率化については、高い目標設定及びその実現を求めるものの、様々な技術的アプローチが想定され、個々の民間企業の強みを生かした研究開発が想定されることから、技術難易度の高い要素技術開発を要するものについては、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一方、他の要素技術を活用する等により実証段階から事業を開始するものについては、補助事業として実施する。

● 【社会実装に向けた支援】

本プロジェクトでは、社会実装に向けて必要となる標準化等の取組について、委託事業の中で併せて検討するとともに、研究開発成果の普及については、「省エネルギー設備への更新を促進するための補助金」や中小企業対策予算などの既存施策の活用を含めて検討する。特に、中小企業への研究開発成果の普及については、①エネルギー価格や供給制約、グリーン金属製品需要などによって工業炉の投資回収年数が変動するため、投資判断が難しく、投資額も大きいこと、②燃焼炉から電気炉への転換に際して、敷地等の制約から受電設備の設置が困難となるケースが多く想定されること、③炉の更新に当たって製品品質に影響が生じないか、取引先の認証取得といった調整が必要となる等の課題が想定される。そのため、上述した取組に加え、本プロジェクトで確立する燃焼炉・電気炉への更新や製品品質への影響確認を容易にするシミュレーション技術等の普及に

に向けた支援、親事業者・下請中小企業におけるパートナーシップ構築宣言をはじめとする取引適正化に向けた取組の推進、グリーン市場の創出やエネルギーの安定的かつ安価な供給確保等の事業環境整備など、必要な対策を検討・実施していく。

また、シミュレーション・デジタルツイン技術の開発や、電気炉の更なる高効率化等に関する技術開発は、創意工夫による迅速な事業化等が期待されることから、ベンチャー企業等による追加的な開発等を機動的に支援することを想定する。

4. 実施スケジュール

● プロジェクト期間

➤ 【研究開発項目 1】金属製品を取り扱うアンモニア燃焼工業炉の技術確立

50%混焼のアンモニア燃焼工業炉の 2030 年代前半における社会実装を目指す一方、要素技術の開発から小・中規模試験炉から実機試験炉と長期間の安定運転を前提とした検証に多くの時間を要することを踏まえて、プロジェクト期間は最大 10 年を想定する。

なお、以下のスケジュールは、あくまで一例であり、事業者の提案において、早期の目標達成のために最適なスケジュールを組むことは妨げない。

➤ 【研究開発項目 2】金属製品を取り扱う水素燃焼工業炉の技術確立

50%混焼の水素燃焼工業炉の 2030 年代前半における社会実装を目指す一方、要素技術の開発から小・中規模試験炉から実機試験炉と長期間の安定運転を前提とした検証に多くの時間を要することを踏まえて、プロジェクト期間は最大 10 年を想定する。

なお、以下のスケジュールは、あくまで一例であり、事業者の提案において、早期の目標達成のために最適なスケジュールを組むことは妨げない。

➤ 【研究開発項目 3】電気炉の受電設備容量等の低減・高効率化に関する技術の確立

アンモニア・水素燃焼と電気加熱のハイブリッド炉については、2030 年代前半における社会実装を目指す一方、要素技術の開発から小・中規模試験炉、実施試験炉と長期間の安定運転を前提とした検証に多くの時間を要することを踏まえて、プロジェクト期間は最大 10 年を想定する。

廃熱利用等の高効率化技術の開発については、民間企業が独自に蓄積した知見や基礎研究等の成果を生かした研究開発を念頭にしており、早期の社会実装を目指す観点から、最大 6 年を想定する。

なお、以下のスケジュールは、あくまで一例であり、事業者の提案において、早期の目標達成のために最適なスケジュールを組むことは妨げない。

● キーマイルストーン・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、原則追加公募は想定していないが、その必要性が確認された場合には追加公募を行う。

➤ 【研究開発項目 1】金属製品を取り扱うアンモニア燃焼工業炉の技術確立

◇ 要素技術開発終了時（下表の例では 2025 年度頃に事業継続判断）

- ◇ 実機実証炉の建設開始時（下表の例では 2028 年度頃に事業継続判断）

- 【研究開発項目 2】金属製品を取り扱う水素燃焼工業炉の技術確立
 - ◇ 要素技術開発終了時（下表の例では 2025 年度頃に事業継続判断）
 - ◇ 実機実証炉の建設開始時（下表の例では 2028 年度頃に事業継続判断）

- 【研究開発項目 3】電気炉の受電設備容量等の低減・高効率化に関する技術の確立
 - ◇ 要素技術開発終了時（下表の例では 2025 年度頃に事業継続判断）
 - ◇ ハイブリッド工業炉の実機実証炉の建設開始時（下表の例では 2028 年度頃に事業継続判断）
 - ◇ 高効率化に関する実機レベルでの実証試験開始時（下表の例では 2026 年度頃に事業継続判断）

表1：プロジェクトの想定スケジュール（例）

	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	
1. 金属製品を取り扱うアンモニア燃焼工業炉の技術確立		要素技術開発 TRL 3～4		★	中規模実証・評価 TRL 4～5		(設計) ★	実証機建設・実証試験・評価 TRL 6～7			★	<p>★：ステージート</p> <p>研究開発内容のステージ変化に合わせ、移行可否を判断する「ステージート」を設定し、適切なマネジメントを実施。</p> <p>IEAのTRL：Technology Readiness Levelに基づき、次のとおり研究開発ステージを設定し、TRL3～7を支援。 TRL1：科学的な基本原理・現象の発見 TRL2：原理・現象の定式化・応用的な研究 TRL3：技術コンセプトの確認 TRL4：応用的な開発 TRL5：ラボ・ベンチテスト TRL6：パイロット実証 TRL7：フル商業実証・トップユーザーテスト TRL8：初期商業生産 TRL9：大量生産 TRL10：事業の統合 TRL11：安定性の証明</p>
2. 金属製品を取り扱う水素燃焼工業炉の技術確立		要素技術開発 TRL 3～4		★	中規模実証・評価 TRL 4～5		(設計) ★	実証機建設・実証試験・評価 TRL 6～7			★	
3. 電気炉の受電設備容量等の低減・高効率化に関する技術の確立	<ハイブリッド化関係>		要素技術開発 TRL 3～4		★	中規模実証・評価 TRL 4～5		(設計) ★	実証機建設・実証試験・評価 TRL 6～7			
	<高効率化関係>		要素技術開発		小規模実証・評価	実機レベルでの実証・評価		TRL 3～4 → TRL 4～5 → ★ TRL 6～7 → ★ 実用化				

表2：社会実装スケジュール

⑪カーボンリサイクル・マテリアル産業（マテリアル）の成長戦略「工程表」

●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	
熱源の脱炭素化	燃焼特性にあわせた製造設備の開発					実証	導入・拡大		

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

・2023年〇月 制定