

「製造分野における熱プロセスの脱炭素化」 プロジェクトの 研究開発・社会実装の方向性

令和5年3月

製造産業局

前回WGの委員ご指摘等を踏まえた対応①

- 2月15日の第11回産業構造転換分野WGにおける各委員及びオブザーバの御指摘やパブリックコメント、製造分野の熟プロセスに関する有識者（明治大学 菱田特任教授）等の御意見を踏まえ、**先日御提示した研究開発・社会実装計画（案）を修正**するとともに、**同計画案に基づく予算規模を追記**。

【政策的必要性、方向性】

- ✓ 電気炉について、日本では電気代が高くカーボンニュートラルに向いているか疑問。将来に向けて、小型炉などにも水素やアンモニアを適用することで電力への依存度を下げようとする取り組みも必要ではないか。（稲葉委員） → 資料3:P.11、資料4:P.4~5
- ✓ ユーザーニーズとして、アンモニアへの期待が伺えることは良い点だが、一方で新しい炉の導入に関して何がチャレンジなのか、ユーザーの企業規模によってもハードルが異なるのか、丁寧に見ていく必要があるのではないか。（大園委員） → 資料3: P.9, 35
- ✓ 各国の支援額や時間軸などと比較し、本計画が妥当なのか。また、アンモニアを工業炉に適用する場合、海外では何が課題と考えられていて、本計画で示されている課題とは合致しているのかよく確認いただきたい。（片田江委員） → 資料3: P.19

【シミュレーション・デジタルツイン技術】

- ✓ シミュレーションやデジタルツインについて、燃焼の具合に加え、その先のNOxの発生や水素脆化までシミュレーションができると強力な武器になるのではないか。（高木委員） → 資料3: P.27
- ✓ 中小企業の「匠の技」が活かせる工業炉にすることが重要。匠の技のデジタル化、見える化をし、開発の中に盛り込んでいくのも重要ではないか。予算面での支援に加え、デジタルツイン技術等を中小企業が活用できるよう、人材育成も行っていただきたい。（長島委員）
→ 資料3: P.28,32,35、資料4:P.22

【海外展開・標準化】

- ✓ 海外展開戦略が重要。どこの市場を狙っていくのか、その際の標準化戦略をどう考えるかが重要。（内山委員）
- ✓ 海外展開について、他国がなぜアンモニアの工業炉に取り組まないのか、海外大手メーカーはどうするつもりなのか。仮に他国が別の技術を採用する方針であるなら、その中でどのように海外展開を実現するのか、よく確認して進めていただきたい。（林委員）
- ✓ SIPの成果を活かしてこの先も勝ち続けていくためには、単に開発を進めるだけではなく、標準化もセットで進めることが重要。（白坂座長）
→ 資料3: P.19,31、資料4:P.5,22

前回WGの委員ご指摘等を踏まえた対応②

【KPI・評価方法】

- ✓ アンモニアで2032年50%混焼という目標は良いが、水素は特殊な燃焼をするため、50%混焼が一番難しい技術になるかもしれない。この数値目標だけで評価をすれば、事業者が苦しむことになりかねないことから、評価方法を検討した方が良いかもしれない。
(店橋オブザーバ) →資料3: P.35,36、資料4:P.24
- ✓ 水素、アンモニア、電炉とあるが、それら工業炉そのものの競争力や工業炉ユーザーの競争力への貢献度合いという視点等で分析できるようにすることで、追加のアクションの判断ができるような立て付けになっていると心強い。(大藺委員)
→資料3: P.35、資料4:P.24

【実施体制】

- ✓ 工業炉ユーザーの先のユーザーに選ばれるような、サプライチェーンからのニーズに基づくアプローチがあるとよい。(大藺委員)
- ✓ 工業炉ユーザーの先のユーザー(自動車OEM等)とのコラボレーションは重要。(高木委員)
→資料3: P.28,35、資料4:P.24
- ✓ シミュレーション・デジタルツイン技術については、共通基盤として広く活用できるものであり、プロジェクト外の企業と連携していくことも検討してはどうか。その場合、早い段階で海外ユーザーを取り込んでいく必要があるのではないか。(内山委員)
→資料3: P.27,28、資料4:P.24
- ✓ 燃料のサプライチェーンなどは、グリーンイノベーション基金だけに閉じない取組であり、他の施策や領域との連携が重要。連絡を密に進めていただきたい。(白坂座長) →資料3: P.28,31、資料4:P.24
- ✓ シミュレーション・デジタルツイン技術についてはスタートアップが活躍できる可能性がある領域だと思う。門戸を開いて新しい力にも参画してもらい、彼ら自身の成長を促していくことも重要。(白坂座長) →資料3: P.27,28

目次

1. 背景・目的

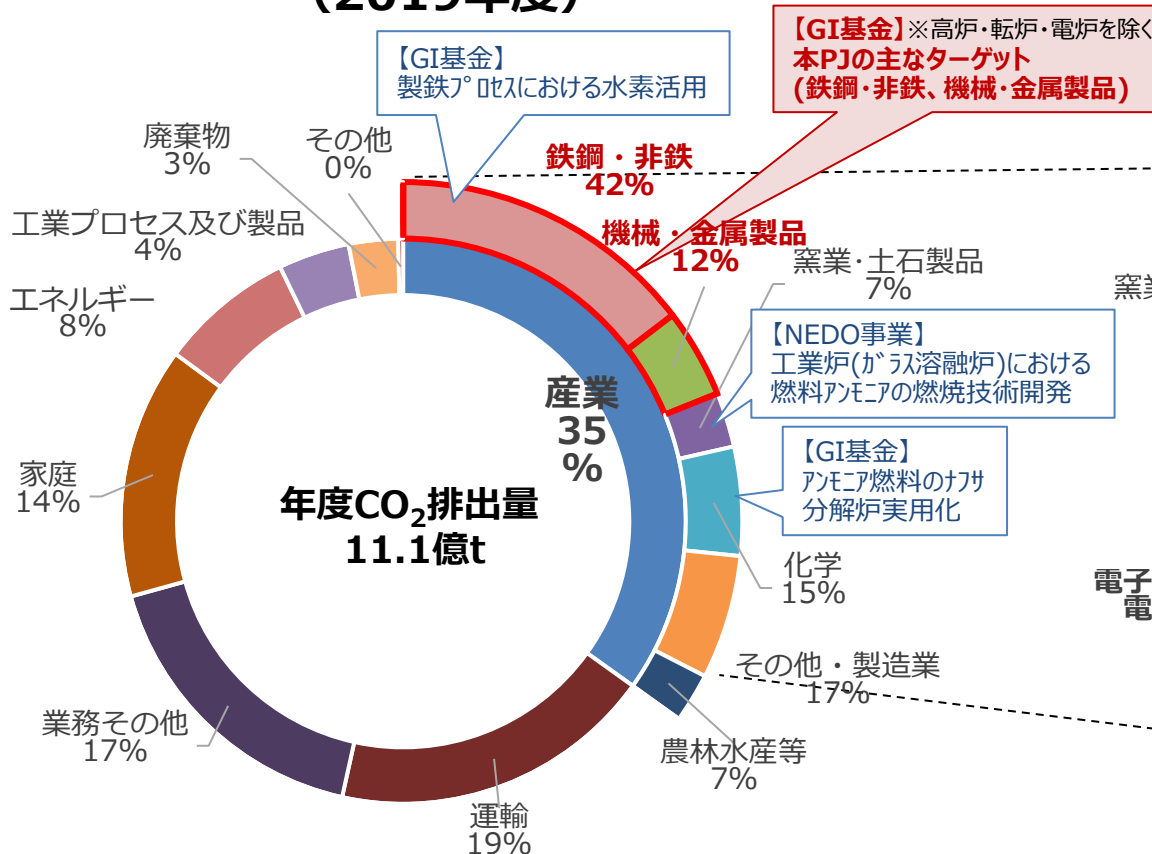
2. 研究開発項目と社会実装に向けた取組

3. 想定スケジュール

製造分野における熱プロセスにおける脱炭素の必要性

- 2019年度の我が国CO₂排出のうち、産業部門のCO₂排出は35%。
- 産業部門のCO₂排出のうち、多くを占める製鉄プロセス等ではGI基金事業等によるプロジェクトが開始されているものの、残りの多くの排出を占める製造分野における熱プロセスの脱炭素化は喫緊の課題。
→ 工業炉によるCO₂排出は1.5億tと、我が国全体の13.5%を占める。

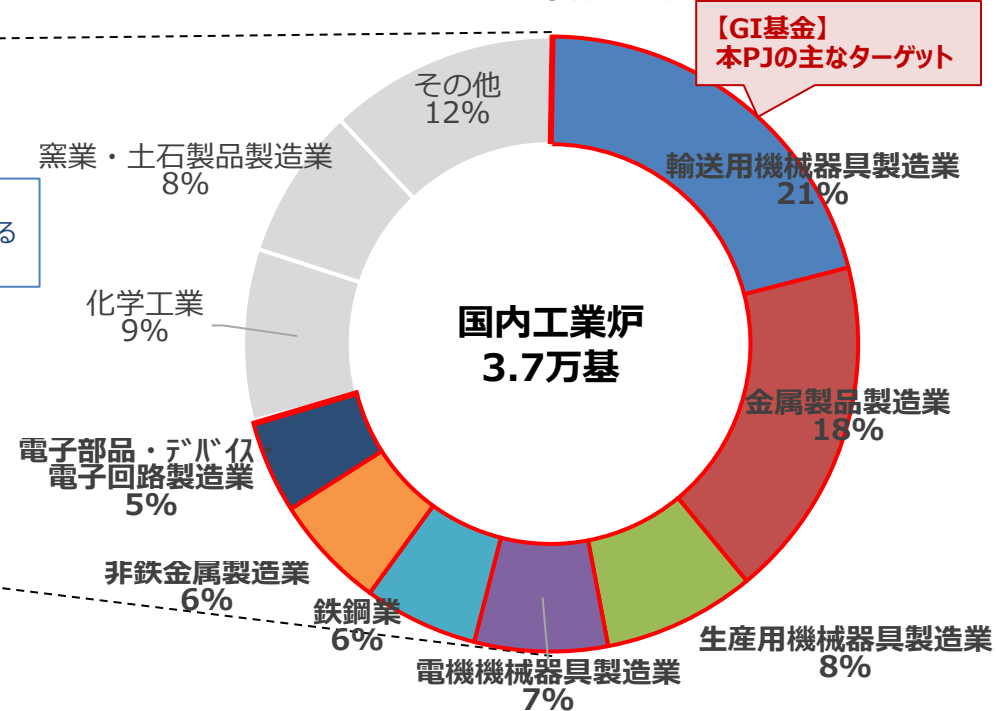
国内部門別CO₂排出量 (2019年度)



工業炉からのCO₂排出量 1.5億t (2019年度)

※鉄鋼大手を除く工業炉保有企業へのアンケート調査からの推計値

<国内工業炉基数>



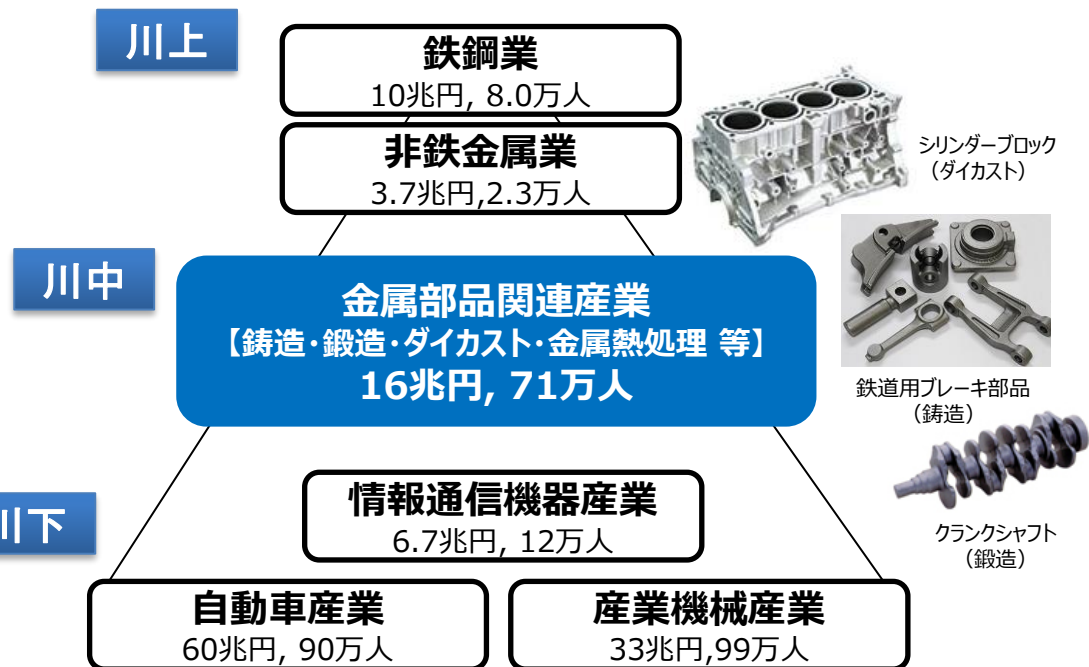
(出典) 国立研究開発法人国立環境研究所「日本の温室効果ガス排出量データ」(2019年度確報値)

(出典) 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

主な工業炉ユーザーである金属部品関連産業の状況

- 工業炉は、サプライチェーンの川上から川下まで幅広く熱プロセスに用いられている。特に川中を占める金属部品関連産業においては、自動車産業、産業機械産業等の重要部品の製造にあたって、鋳造、鍛造、ダイカスト、熱処理、粉末冶金など、工業炉を用いた加熱プロセスが不可欠。
- 金属部品関連産業の国内総出荷額は16兆円、従業員は71万人。中小企業が多く、国内5.1万事業所。

1. 金属部品関連産業の構造



2. CN産業に不可欠な金属部品等

■ A社

・国内唯一無二の大型熱処理設備で風力発電のベアリングの熱処理を行い、最高レベルの品質によって、設備の長寿命化に貢献。(対応年数20年)



■ B社

・国内外のダイカスト金型を独自の熱処理工法により、大幅に性能を向上。同社のものは形状によるが、20万ショットでも破損しない実績がある。

■ C社

・発電機タービン軸材用のローターシャフト (重量600t) を製造。世界でも作れる企業は限られ、国内外の発電所等に納入。



(出典) 出荷額は2020年工業統計調査 産業別統計表より算出
 鉄鋼業：高炉による製鉄業、製鋼・製鋼圧延業（転炉・電気炉を含む）、熱間圧延業（鋼管、伸鉄を除く）、冷間圧延業（鋼管、伸鉄を除く）の合計
 非鉄金属業：第1次製錬・精製業、第2次製錬・精製業の合計
 金属部品関連産業：鋳鉄鋳物製造業、鍛工品製造業、金属熱処理業、粉末や金製品製造業、ボルト製造業、鉄骨製造業などの合計
 情報通信機器産業：通信機械器具・関連機械器具製造業、電子計算機・附属装置製造業等の合計
 自動車産業：自動車製造業、車体・付随製造業、部分品・付随品製造業の合計
 産業機械産業：はん用機械器具製造業、生産用機械器具製造業の合計

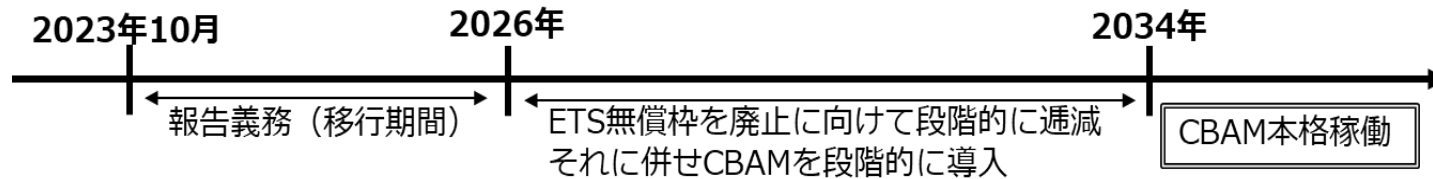
※写真は、リョービ(株)HP、アサゴエ工業(株)HP、KAKUTAテックフォーミング(株)HPから

- EUは、域外諸国からのセメント、アルミ、肥料、電力、水素、鉄鋼、限られた下流製品（ネジやボルトなど）等の輸入について、製品当たり炭素排出量に基づく証書の購入（＝輸入課金）を求める炭素国境調整措置（CBAM）を導入。
- 2023年10月から報告義務が開始され、2026年から2034年にかけて段階的に導入されていく。
→ 金属部品関連産業を中心としてカーボンニュートラル対応を急ぐ必要がある。

EUの炭素国境調整措置（CBAM : Carbon Border Adjustment Mechanism）

2023年10月1日から、製品単位あたり排出量や原産国で支払われた炭素価格等の情報を報告*する義務が開始。実際の課金は、EU-ETSにおける無償割当廃止のスピードに併せて、**2026年から2034年にかけて段階的に導入**されていく。

※報告内容は、運用開始に向けて、対象範囲の見直しや排出量算定方法を発展させるために活用される想定。



1.対象産業

- セメント、アルミ、肥料、電力、水素、鉄鋼、限られた下流製品（ネジやボルトなど）等

2.課金について

（2026年～段階的に導入、2034年以降本格稼働）

- EUへの輸入品につき、製品単位あたりの炭素排出量*に基づき、CBAM証書の購入（＝輸入課金）が必要

※排出範囲には、直接排出とある特定の条件下での間接排出含む。

※2021年7月の欧州委員会の提案に基づき調整が行われてきていたが、2022年12月18日、EU加盟国や欧州議会とも合意に至ったとの公式発表あり。今後、議会等での手続きを得て正式な決定となる。~~なお、現時点（12/18時点）で合意された条文は未公開。~~

金属部品関連産業におけるカーボンニュートラル対応の必要性②

- 自動車分野では、LCA評価の導入に向けた検討が進むとともに、自動車メーカーの動きも具体化。
 - 自動車向け金属部品製造を担う、鋳造、鍛造、ダイカスト、粉末冶金、熱処理の5業種だけでも、2兆円規模の影響が生ずる可能性。
- 産業競争力や市場シェアを確保する上で、工業炉の脱炭素化を早期に実現することが必要。

自動車分野におけるLCA評価の導入に関する動き

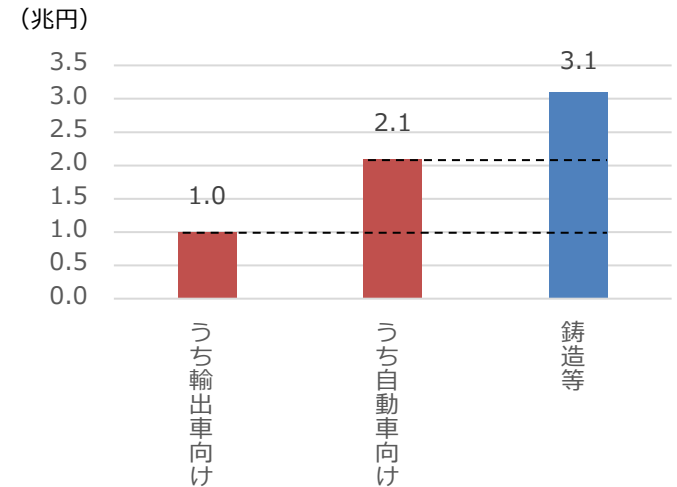
1.各国の動向

- **EU <2050年CN化>**
 - ・ライフサイクルで自動車CO₂を評価する仕組み、ルールの導入を検討
- **中国 <2060年CN化>**
 - ・2025年 自動車LCA規制導入を検討

2.自動車メーカー各社の動向

- **VW**は、EV「ID.3」の生産にあたり、サプライヤーに部品生産時に再生可能エネルギーのみの使用を指示。
- **ポルシェ**は、部品製造時に再生可能エネルギーのみを使用しない場合、将来的な契約締結を不可との方針を打ち出す。
- **メルセデス・ベンツ**は2039年にCN未達となるサプライヤーを取引先から除外する方針。既に約2,000社のサプライヤーのうち75%が「Ambition Letter of Intent」（実現へ向けた覚書）に署名済み。
- **トヨタ**は関係協力会社を中心に、2021年の目標としてCO₂排出量前年比3%削減を要請、**ホンダ**は2019年度比で年平均換算で約4%ずつ減らすよう要請。

鋳造、鍛造、ダイカスト、粉末冶金、熱処理の国内出荷額（2020年）



鋳造、鍛造、ダイカスト、粉末冶金、熱処理の事業所、従業員数（2020年）

- **事業所数：4,068事業所**
- **従業員数：12.1万人**

国内の工業炉の状況

- 工業炉は、主として金属材料等の精製、加工、仕上げなどの工程で用いられ、燃料を燃焼させて加熱する燃焼炉と、電気で加熱する電気炉が存在。いずれも大きなエネルギーを要する。
- 国内には3.7万台の工業炉が存在。平均耐用年数は約30年と長く、更新・入替のタイミングを踏まえた早期の対応が必要。

工業炉の種類

1. 燃焼炉（燃焼加熱）

- ・天然ガス・LPG・重油・石炭等を燃焼させた熱を利用
- ・圧延・鋳造・鍛造・熱処理など幅広い用途

2. 電気炉（電気加熱）

<抵抗加熱>

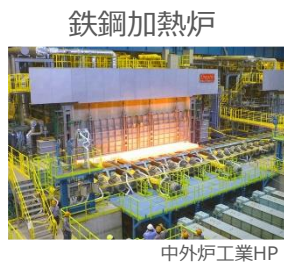
- ・抵抗体に通電した際の電気抵抗による発熱を利用
- ・圧延・鍛造・真空熱処理・ガラス溶解など

<誘導加熱>

- ・電磁誘導を利用して加熱
- ・鋼材表面の急速加熱など

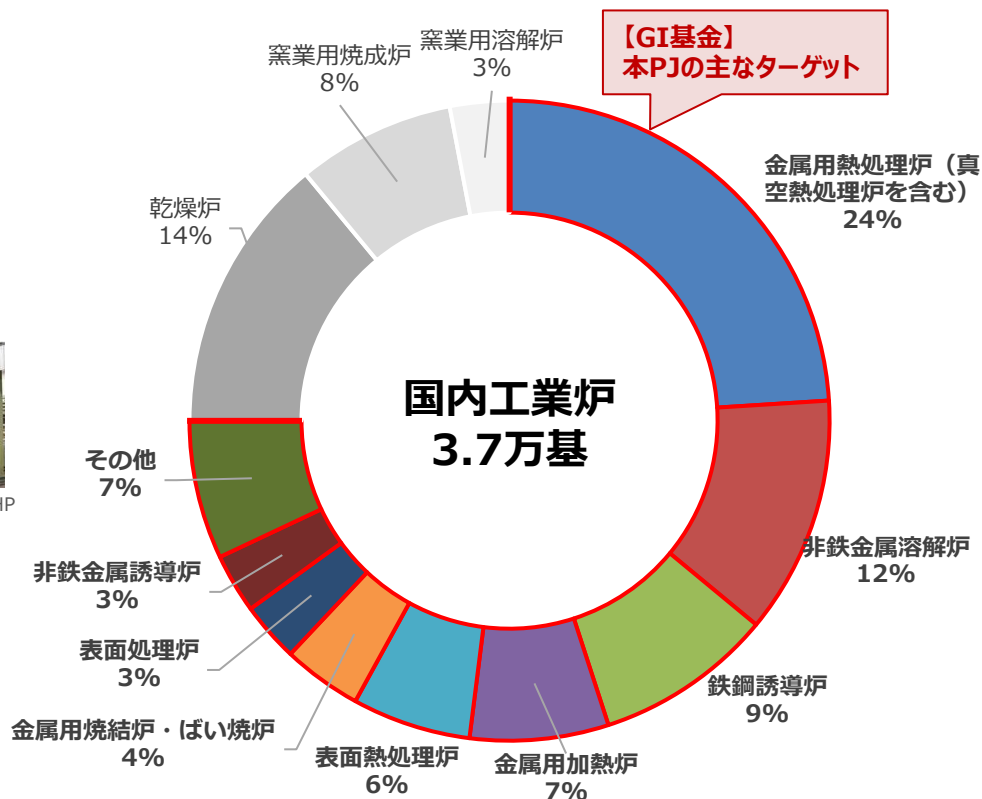
<アーク加熱 等>

- ・アーク放電の熱を利用 等
- ・製鋼、カーバイド製造、合金鉄製造 等



国内工業炉の炉種別保有基数

※鉄鋼大手を除く工業炉保有企業へのアンケート調査からの推計値



(出典) 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

(参考) 国内工業炉の業種別・企業規模別の保有台数

追加

- 国内工業炉の多くは、従業員300人以下の中小企業が保有。一方、従業員300人超の大企業は、一企業あたりの保有台数が多く、かつ、大型なものを保有しているケースが多い。
- また、業種別の工業炉の用途は様々であり、企業毎に独自の運転方法やノウハウを有していることから、工業炉の転換にあたっては、一般的に、コストや効率性に加えて、製品品質（金属材料）や運転方法への影響等が考慮される。

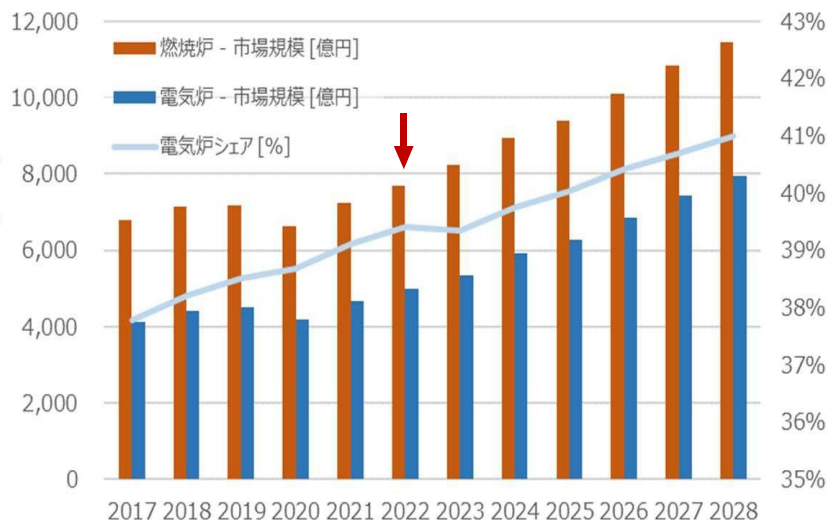
業種・主な工業炉の用途	従業員規模別の工業炉台数	
	300人以下	300人超
輸送用機械器具製造業（熱処理、溶解、加熱等）	6,122	1,539
金属製品製造業（熱処理、表面処理、加熱等）	6,496	268
生産用機械器具製造業（熱処理、表面処理等）	2,506	361
電機機械器具製造業（溶解、熱処理等）	2,095	471
電子部品・デバイス・電子回路製造業（表面処理、加熱、焼結等）	1,045	621
鉄鋼業（熱処理、加熱等）	1,983	249
非鉄金属製造業（溶解、熱処理等）	1,831	242
化学工業（乾燥、焼成等）	2,833	493
窯業・土石製品製造業（乾燥等）	2,641	219
その他	3,792	1,190
合計	31,344	5,653

工業炉の世界市場

- 国内市場は2,000億円規模（2019年）。世界市場は、燃焼炉・電気炉共に市場規模は拡大していく見込み（2028年: 2兆円弱）。
- 世界の工業炉メーカーに比して、日本の工業炉メーカーの事業規模（売上高ベース）は小さいものの、日本勢が開発し、関連特許を押さえているリジネレイティブバーナーシステムなど、高性能機器類を中心に輸出を展開。工業炉に係る世界の輸出総額に対して日本は4~7%程度と言われている（日本工業炉協会）。

工業炉の世界市場規模（実績・予測）

【世界】



【国内】 2017:1,696億円→2019: 2,031億円

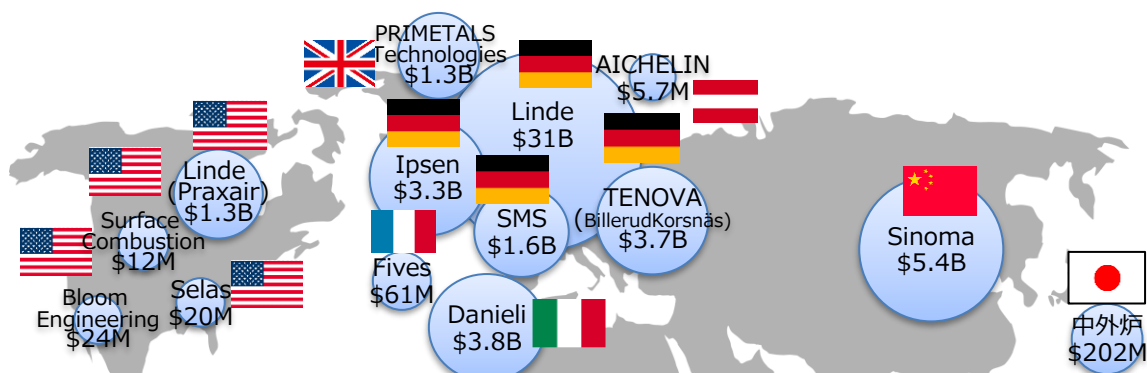
※輸出額 2017:420億円 → 2019:533億円
 輸入額 2017: 94億円 → 2019: 90億円

（出典） QYResearch社 “Global Industrial Furnace Market Insights and Forecast to 2028” に基づきNEDO TSC作成

国内市場規模は工業炉協会（会員企業の売上実績）、輸出入額は貿易統計

世界の工業炉メーカー（燃焼炉）の売上規模

日本は専門メーカーが中心である一方、海外はエネルギーインフラや鉄鋼関連設備、エンジニアリングなども手がける総合メーカー（Linde,SMS等）が目立つ。



※海外企業の売上高には工業炉以外の売上高も含まれる点に留意

日本の主な炉メーカーの海外拠点（提携先含む）

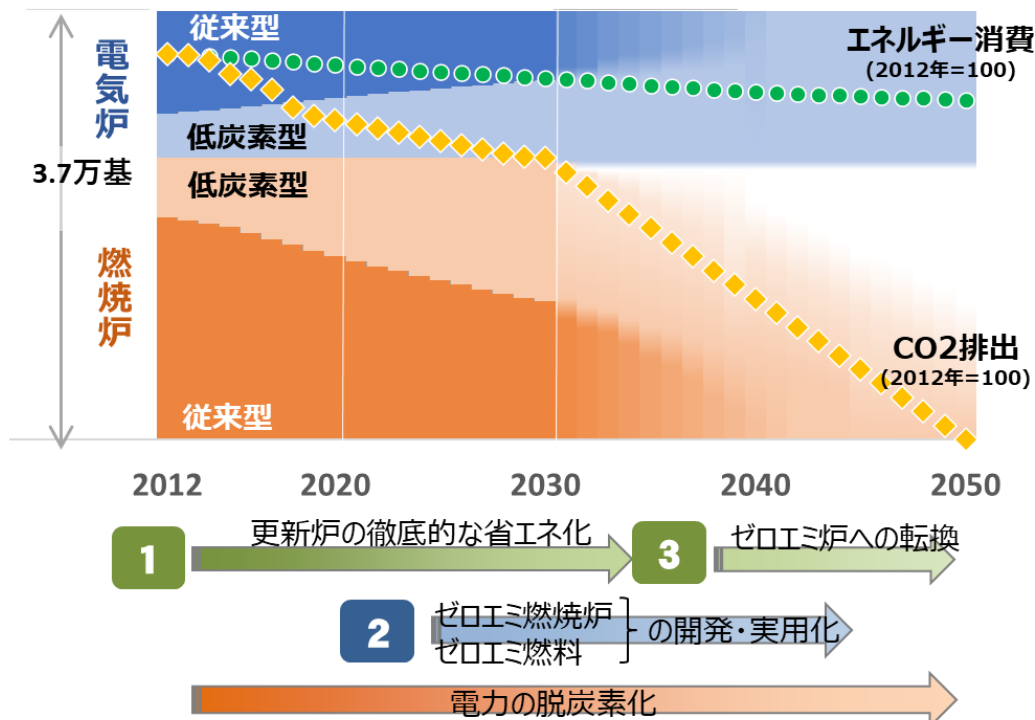
中外炉工業 - 台湾、中国、インドネシア、タイ、メキシコ、米国、韓国
 三建産業 - 中国、インドネシア、タイ、フランス、スペイン、韓国、インド、米国
 ロザイ工業 - 中国、タイ、ベトナム、米国

（出典） 各社HP等の公開データから直近の売上高を記載
 EUR-1.1ドル、CNY-0.15ドル、ドル-130円で換算

工業炉にまつわる加熱プロセスの目指すべき方向性

- 利用時にCO₂を排出せず、金属製品を急速かつコンパクトに加熱し、効率性も高めることが可能な**電気炉は脱炭素化の実現に向けて有力な選択肢**の一つ。他方、大型鍛造品の製造・熱処理プロセス等では、炉内雰囲気制御や炉内温度の均一化といった技術面、コストや効率性等の観点から**電化は困難であり、燃焼炉の活用も不可欠**。サプライチェーンの維持、経済安全保障、レジリエンスの観点からも重要。
- カーボンニュートラルの実現に向けて、港湾・臨海部に隣接する**大型炉を中心に、アンモニア・水素燃料等の活用が進み、小型炉を含めて電化が困難な炉等に普及していく一方、電化によるコンパクト化・効率化が可能なものを中心として、燃焼炉から電気炉への転換が進んでいく可能性**。
- 将来的なエネルギー供給の制約、コスト面も含めた不確実性がある中、中小企業を含めて、**最適な工業炉に転換していくための技術的な制約を克服し、複数の選択肢を確立しておくことが重要**。

C Nに向けた工業炉の方向性（イメージ）



【参考】アンモニア・水素供給の政府目標
(グリーン成長戦略)

		現在	2030年	2050年
燃料 アンモニア	年間供給量	108万t	300万t	3000万t
	コスト	20円程度 /Nm ³ -H ₂	10円台後半 /Nm ³ -H ₂	
水素	年間供給量	200万t	300万t	2000万t
	コスト	100円 /Nm ³	30円/Nm ³ (CIF価格)	20円/Nm ³ (CIF価格)

※2030年：アンモニア供給コスト 石炭の約3倍
水素供給コスト 天然ガスの2倍強

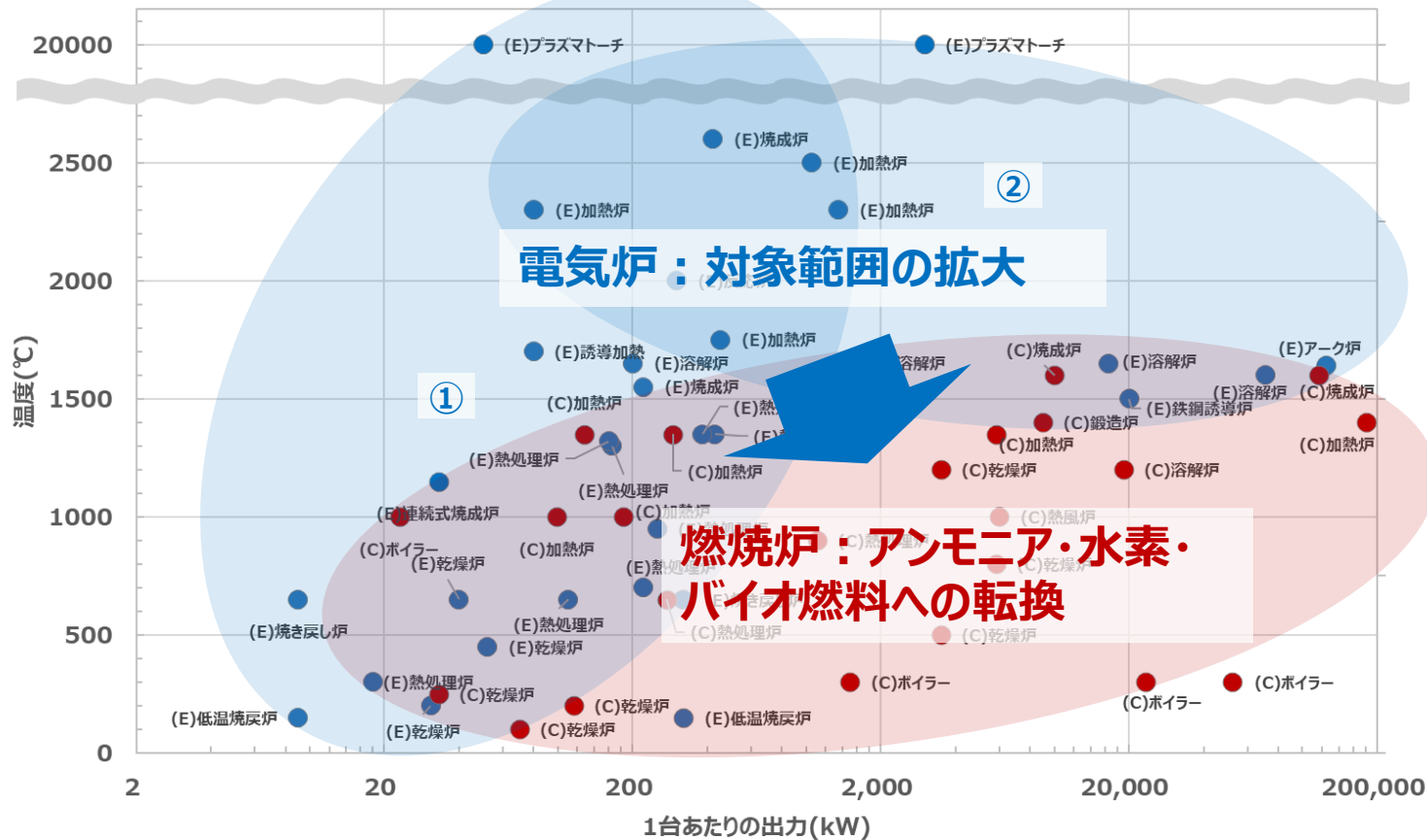
(参考) 工業炉の市場構成、燃焼炉・電気炉の対象範囲

- 工業炉の市場構成を温度（縦軸）、出力（横軸）で整理すると、電気炉は、① **2MW以下の比較的低い出力域で広い温度範囲に分布**、② **1500℃以上の高温域では広い出力範囲に分布**している状況。
- 脱炭素化に向けて、工業炉の電気炉化は有力な選択肢であるものの、コストや効率性、技術的な制約等もあり、**電気炉の対象範囲を拡大させつつ、燃焼炉のゼロエミッション燃料への対応を実現することが重要。**

<現在の使用・市販されている工業炉の分布>

<電気炉の課題>

※炉内温度ではなく材料温度



電気炉については、

- 燃焼炉の半分を電気炉に代えると、**総発電量を4割程度増やす必要有り**
 - **運転費がアンモニア・水素の2倍程度以上必要(2MWの場合)**
 - 生産性の良い連続式加熱電気炉では、**炉内の均一温度維持・急速加熱が難しい**
- 等の課題がある。

(参考) 燃烧炉の電化による脱炭素化の可能性とその課題

- 工業炉の脱炭素化の方策として、**燃烧炉から電気炉への転換は有力な選択肢の一つ**。一方、グリーン電力の確保が必要となるほか、単純な電化では、**運転コストが増加する可能性（1.6～2.4倍）**。
 - **工業炉の規模、使用目的等による燃烧炉との使い分けや運転コストを低減する電気炉の効率向上も必要**。
- ※敷地面の制約がある企業では、受電設備の設置スペース等が確保できず、燃烧炉から電気炉への転換が困難なケースも想定。

※試算は一定の仮定のもと行ったものであり、局所的な加熱を行う場合など、用途や運用方法によってはヒートポンプ以外の電気加熱技術であっても現時点で効率や経済性の改善、排出量の削減に寄与する可能性がある。また、排熱回収型の炉の導入や、蒸気のカスケード利用などを考慮した場合には、評価が異なる場合がある。なお、本試算においては、導入時の空間的制約等については考慮していない。

燃烧炉との比較 (都市ガス)	温度※1 500℃～1500℃程度	燃烧加熱 都市ガスを仮定		電気加熱		燃烧加熱 (都市ガス) との比較			
		効率※1		効率		エネルギーコスト※3 (燃烧加熱 = 1)	CO2排出量※4 (燃烧加熱 = 1)		
				機器効率※1	1次エネルギー※2		2020年	2030年	
		溶解炉	0.3	誘導加熱炉	0.6	0.2	1.8	1.3	0.7
		加熱炉	0.4	抵抗加熱炉	0.6	0.2	2.4	1.7	1.0

燃烧炉との比較 (水素)	温度※1 500℃～1500℃程度	燃烧加熱 水素を仮定※A		電気加熱		燃烧加熱 (水素) ※B との比較			
		効率※1		効率		エネルギーコスト※3 (燃烧加熱 = 1)	CO2排出量※4 (燃烧加熱 = 1)		
				機器効率※1	1次エネルギー※2		2020年	2030年	
		溶解炉	0.3	誘導加熱炉	0.6	0.2	1.6	-	-
		加熱炉	0.4	抵抗加熱炉	0.6	0.2	2.2	-	-

※1 効率・適用温度域はおおよその目安であり、過去の補助事業の要件や、事業者とヒアリングをもとに設定。ヒートポンプの入り口温度は12℃～90℃を想定。 ※2 省エネ法に基づき、受電端発電効率を36.9%として1次エネルギーベースの効率を算出。 ※3 「エネルギー経済統計要覧」より、エネルギー価格を電気(大口):22円/kcal(再エネ賦課金含む)、ガス(工業用):6円/kcalと仮定し、機械効率の逆数に乗じることでコストを計算。 ※4 「地球温暖化対策計画の進捗状況」より、電気の排出係数を2020年:0.439kg-CO₂/kWh、2030年:0.25kg-CO₂/kWh、都市ガスの排出係数を2.2kg-CO₂/m³とし、機械効率の逆数に乗じることで単位加熱量当たりの排出量を算出。

*A: ここでは、水素燃烧炉で、現在の都市ガスと同程度の熱効率が得られるものと仮定、*B: 水素のコストは20円/Nm³-H₂と仮定

【参考】工業炉に対して2MW相当の燃料・電力を供給*した場合、その概算コストは下記の通りとなる：

電力コスト：2.65億円（18.9円/kWh） / 水素コスト：7,900万円（20円/Nm³, 2040年以降の国の目標値）
/ 都市ガスコスト：7,240万円（64.5円/Nm³）

*本参考では、熱損失などを考慮した有効熱量ではなく、単純な燃料供給量で規定している。稼働率は一律80%と仮定した。

(参考) 燃烧炉に関するユーザー企業のニーズ

- 燃烧炉のユーザー企業は、カーボンニュートラルに向けて、省エネの徹底、CO₂回収・資源化、電化など、様々な対応策を検討しているが、その中でも、技術的な制約やコスト、効率性等の観点からアンモニア燃料等に対応した燃烧炉への期待が大きい。

鍛造炉ユーザー企業

- 保有する鍛造加熱炉や熱処理炉を電化した場合、**ランニングコストで2.7倍、ピーク電力需要で2.7倍**となり、炉の改造や受電設備等の**追加投資に最低でも70億円程度を要する**試算。
- **電気炉は**、①自然に熱対流が生じず、ファンの設置が必要で、**高温保持時には均熱性・熱効率が悪くなること**、②鍛造加熱時には、**大量のスケールが生じ、発熱体と反応するため設備破損対策が必要**となる等の技術的な課題もある。
- アンモニアや水素燃料が活用可能となれば、現在の炉の基本構造を大幅に変えることなく、適用できる可能性が高い。

熱処理炉ユーザー企業

- 電気炉化・再エネ利用では**都市ガスに対し2.1倍のコスト増となる試算**。加えて、**再エネ電力の確保にも懸念**。
- 既存工場の工業炉を電気炉に転換するには、**ライン構成の大幅な変更を要する可能性**がある他、**スペースの制約**もある。
- 都市ガス燃烧炉と設計・構成が大きく変わらないと思われる、**アンモニア燃烧の工業炉への置換・改造で対応したい**。

焼成炉ユーザー企業

- 熱処理等の工程は製品機能の確保に重要なプロセスであるが、これらの工業炉から年間5万tのCO₂が排出されている。
- 保有する工業炉を電化するには、**受電設備等の投資も含めて10年間で100億円を超える投資が必要と試算**され、主たる選択肢にはならない。
- そのため、CO₂を排出しない**燃料としてアンモニアに注目**している。**日常的に生産活動で使用しているもの**であり、既存の工業炉をベースとして更新が可能となれば、**電化の半減以上のコスト削減が期待**（水素は十分に安全が確保された堅固な保管・供給施設の新設が必要）。
- 事業経営への影響が抑制される**選択肢として期待**が大きい。

アルミニウム溶解炉ユーザー企業

- アルミニウム溶解炉等を使用した工程は、製品製造に今後も欠かせないプロセス。
- 熱源として使用する都市ガス等の燃烧により、年間約50万tのCO₂が排出されている。**リジェネレイティブバーナー化等の省エネ改善を継続的に努めてきているが、これ以上の大きな改善は見込めない状況**であり、2050年カーボンニュートラルに向けて、**ゼロエミッション燃料による燃烧炉の確立が不可欠**。
- 現状、大型炉の電化はイメージができていない。

グリーン成長戦略における製造分野の熱プロセスに関する位置付け

- グリーン成長戦略において、工業炉における熱プロセスの脱炭素化の技術開発も位置付けられている。

○2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略（令和3年6月18日）（抄）

4.（11）ii）マテリアル

④ 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。

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	

既存・類似事業との関係

- アンモニア工業炉における基礎的な燃焼技術は、内閣府の「戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）」等で開発。その他、ガラス溶融炉、ナフサ分解炉等に関する技術開発も進められている。
- 金属加熱プロセスで用いる工業炉では、温度帯、NOx規制値等が異なるほか、高温空気を高速で噴射し、酸素濃度を極端に低下させた環境で燃焼させる『高温空気燃焼』への適用、金属製品等への窒化・品質対策、多種多様な工業炉に適用させるための設計・シミュレーション技術等を新たに確立させる必要あり。
- NEDOの先導研究プログラムを用いて、金属加熱プロセスにアンモニア燃焼を用いた場合の技術課題の整理等が先行的に進められており、こうした知見も活用して技術開発を実施していく予定。

工業炉に関する研究開発事業

【基盤技術】

2014～2018年度
SIP エネルギーキャリア
-アンモニア直接燃焼

東北大学、大阪大学、産業技術総合研究所、IHI、豊田中央研究所、大陽日酸、日新製鋼、宇部興産、電力中央研究所、中国電力、東北電力、中部電力、関西電力、三菱日立パワーシステムズ、三菱重工業、JFE エンジニアリング、海上・港湾・航空技術研究所、トヨタタービンアンドシステムズ

【ガラス溶融炉】

2021～2025年度 NEDO
工業炉における燃料アンモニアの燃焼技術開発

A G C、大陽日酸、産業技術総合研究所、東北大学

【ナフサ分解炉】

2021～2030年度 NEDO GI基金
アンモニア燃料のナフサ分解炉実用化

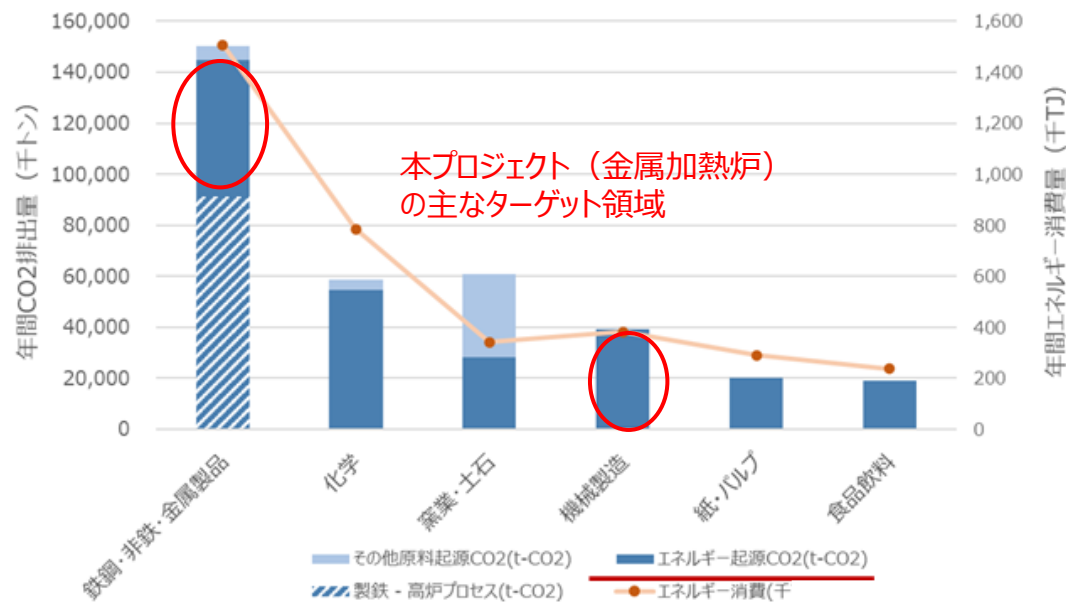
三井化学、丸善石油化学、東洋エンジニアリング、双日マシナリー

【金属加熱炉】

2021～2022年度 NEDO先導研究PG
①革新的アンモニア燃焼による脱炭素工業炉の開発
②アンモニアを燃料とした脱炭素次世代高性能工業炉の基礎研究

①大阪大学、中外炉工業、東京大学
②北海道大学、ロザイ工業、三建産業、東北大学、広島大学

製造業のうちCO₂排出量が多い産業の排出源内訳と投入エネルギー



(出典) 経産省「総合エネルギー統計（2022確報値）」、環境省「温室効果ガス排出量概要（2019速報値）」を基にNEDOTSC作成

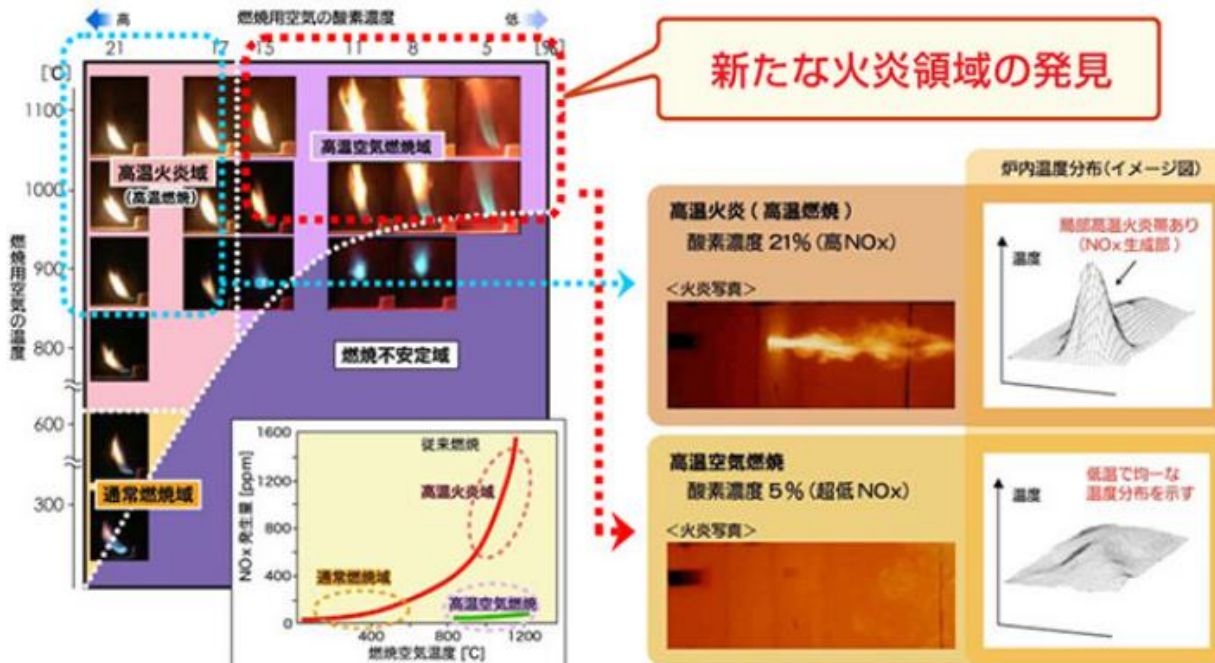
※上記の他、GI基金「大規模水素サプライチェーンの構築」「燃料アンモニアサプライチェーンの構築」、エネルギー対策特別会計予算「産業活動等の抜本的な脱炭素化に向けた水素社会モデル構築実証事業」において、水素、アンモニアの製造・供給・利活用等に関する事業がある。

(参考) 金属加熱プロセスに用いる工業炉に関連した技術開発の事例

- 1993～2000年度にかけて、NEDOのプロジェクトを通じて「高性能工業炉」の研究開発を実施。「高温空気燃焼」現象を解明するとともに、「新燃焼域」を発見し、**従来方式炉に比べて30%以上の省エネ効果とCO₂削減効果**、50%以上のNOx低減効果の両立を可能とする**高性能工業炉の開発に成功**。
- 同プロジェクトでは、300以上の特許全てがコンソーシアム内（13社）で共有化されたことで、高性能工業炉の社会実装が急速に進み、事業終了後の**約10年間で、国内約1,300基の工業炉で採用**。**ISO規格化も実現**。

■ 新たに発見された火炎領域

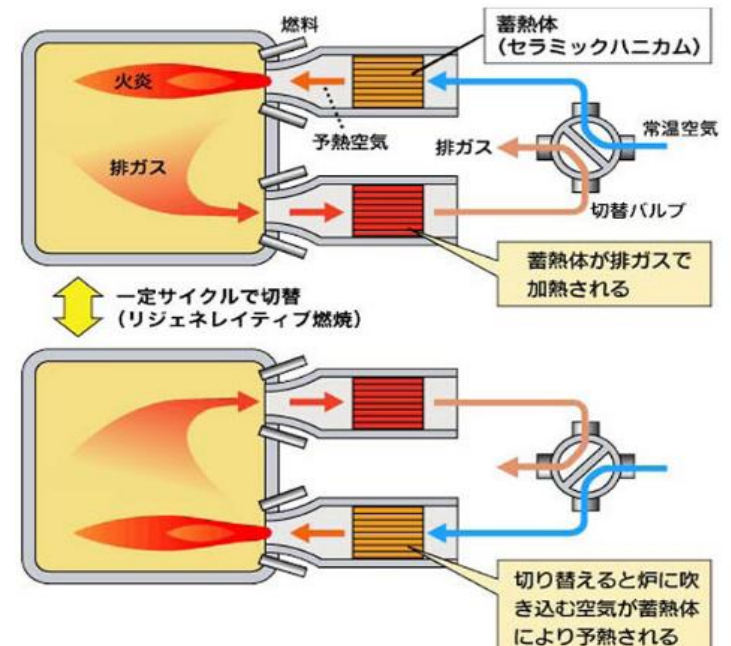
一般的に、NOxは火炎が高温になればなるほど増加するが、高温空気を高速で吹き込んで炉内の酸素濃度を3～10%と極端に低い状態にすることで、超低NOxな「高温空気燃焼」を実現できることを解明。



■ リジェネレイティブバーナー

2個のバーナーを1セットとし、燃焼と排気を短時間に交互に切り換えて使用することで、燃焼用空気を炉内温度近くまで上昇させることが可能。

燃焼ガス中の約85%の熱エネルギーを有効利用



(参考) 世界の工業炉に関する技術開発の動向

- 海外では、工業炉における廃熱回収、原材料余熱、断熱強化など、省エネ関連の取組が進められているが、**現状、アンモニアを工業炉に適用するプロジェクトは確認されない**（水素については一部、鉄鋼加熱炉への適用に向けたPoC等が実施）。一方で、近年、**中国を中心に、アンモニア燃焼に関する論文数、特許数が急増**している。

	EU	ドイツ	米国
燃烧炉の動向	<p>【廃熱回収】レキュペバーナーやリジェネレイティブバーナーが普及。特に自動車産業など大型設備への導入が進展。</p> <p>【断熱強化】断熱ウール等が高価であるため、炉のタイプやエネルギー消費量、スペースなどを考慮して導入判断。設計も重要。</p>	<p>【廃熱回収】レキュペバーナーが主流。</p> <p>【原材料予熱】エネルギー効率向上のための設計、ソフトウェア等の研究が進められる。</p> <p>【断熱強化】工業炉の設計改善のほか、断熱材料の研究が進められる。</p>	<p>【廃熱回収】レキュペバーナーやリジェネレイティブバーナーの導入は部分的。</p> <p>【原材料予熱】一部の大型炉のみで実施され限定的。</p> <p>【断熱強化】炉のハウジングの熱損失やヒートブリッジ等の改善が進む。</p>
電気炉の動向	<p>燃烧炉から電気炉への転換において、誘導加熱が重要な技術と位置づけ。主に中小型炉が対象。</p> <p>高温領域の大型炉、炉内雰囲気均一加熱が求められる鉄鋼加熱炉等の電化は技術的に不可能な状況。</p>	<p>電気炉のエネルギー効率向上の研究開発が進められる。</p> <p>ドイツは電気代が高いため、誘導加熱は、高品質製品、小ロットの製品等に限定して導入される傾向。</p>	<p>一部では燃烧炉の電化が進むが、材料処理能力が限定的との評価。</p> <p>誘導加熱はコイルの最適化等の取組が進む。抵抗炉は炉の構成によって熱が有効利用しにくいケースや、材料が変質してしまうことが課題。</p>
研究開発の事例	<p>総合改修ソリューションとして、エネルギー回収システム用の高温相変化材料（PCM）、新耐火物（断熱材）、最適化された混焼システム及びバーナー、高度な監視・制御システムの導入、バリューチェーンに則った上流・下流工程との統合により、ライフサイクル及びライフサイクルコストに基づいて最適化し、効果検証を実施。（欧州委員会、2019年）</p>	<p>ナノポーラスカーボンをベースにした新しい複合材料を開発。既存の材料の2倍以上の断熱効果が期待。（BMW i, 2020）</p> <p>熱処理システムをピンポイントで制御するコンセプトを確立。工業炉の加熱工程をピンポイントで制御することで省エネに貢献。プロセスガスのモニタリングが製造技術のエネルギー転換を可能にすることを期待。（BMW i, 2021）</p>	<p>電気（アーク）炉から発生するガスを処理する既存システムを用いて、業務レベルで実証された4つの新しい変革的変換技術を活用した、CO₂回収システムの運用に関する実証試験を計画。（DoE, 2021）</p>

(参考) 世界におけるアンモニア・水素の産業利用・政策支援の動向

追加

- アンモニア・水素燃料は、ガスタービンやエンジンなどの燃焼分野への展開が進んでおり、工業炉への展開も時間の問題と考えられる。

■ 米国

2023年1月、IHIと米国GEは、**大型ガスタービンに適用するアンモニア燃焼技術**の開発に関する覚書を締結。**アンモニア100%専焼技術を2030年までに開発**を目指す。

■ E U

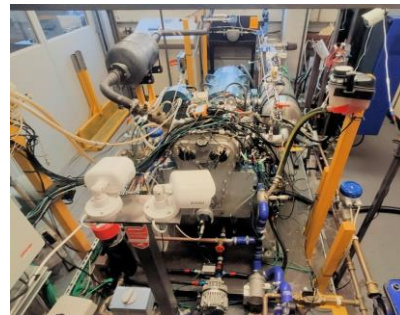
2022年4月、欧州連合は、**アンモニア燃料を船舶エンジンに適用**するためのプロジェクトに対して**1,000万ユーロを支援**。**2025年までにラボベースのアンモニア燃料のエンジン開発**を目指す。



Wärtsilä社 HP

■ 英国

MAHLE社は、英国政府からの支援を受けて、**アンモニア燃料を大型ディーゼルエンジンに適用する新技術の開発**を進める。



MAHLE社 HP
(研究開発中のエンジン)

■ 英国

2022年、Industrial Hydrogen Accelerator Program (£ 2,600万) において、9つの**FS PJに £ 295万を支援**。E.ON社は、**鋼の加熱・熱処理炉の燃料を水素に切り替え、製品品質への影響を解明のためのFS**を行う。

■ ドイツ

2022年11月、ドイツハンブルク港に**グリーンアンモニア輸入ターミナル**を建設決定。2026年に**運転開始**予定。**グリーンアンモニアを水素に変換し、産業や火力発電所に用いる方針**。



Hamburg News HP

■ 中国

2022年12月、中国福建省は「福建省水素エネルギー産業発展行動計画 (2022~2025年)」を発表。交通分野への応用を拡大に加え、**分散型発電、化学工業、鉄鋼・冶金などへの適用**も見据えている。

目次

1. 背景・目的

2. 研究開発項目と社会実装に向けた取組

3. 想定スケジュール

工業炉の脱炭素化に向けた課題と方向性

- カーボンニュートラルに対応した工業炉の実現には、多種多様な形状の炉、使用方法に対応し、**長期間・安定的な運転を可能とする脱炭素技術の確立とコスト低減・高効率化**が必要。
 - アンモニア等の新たな燃料の活用にあたっては、**金属製品等の品質への影響**に加え、長期間の運転による耐火材や蓄熱体等への影響を解明した上で、**最適な工業炉の設計・改造技術の確立**することが必要。
 - また、敷地等の制約がある企業への導入にあたっては**電気炉の受電設備容量を下げる技術開発**も重要。
- 過去の高性能工業炉PJ等も参考にしつつ、**工業炉メーカーやユーザー企業をはじめとする関係事業者が連携した取組**するとともに、デジタルツイン等の開発では、**スタートアップ等も参画した研究開発体制とすることが必要。**

	必要な要素	開発すべき技術	その他事項等
(アンモニア・水素) 燃焼炉	<ul style="list-style-type: none"> ・燃焼特性の違い（燃焼速度、火炎温度・輻射、フューエルNOx）を考慮した燃焼技術 ・被加熱物に及ぼす影響（窒化・脆化）とメカニズム解明、影響防止策 ・専焼技術・高温化技術 	<ul style="list-style-type: none"> ・被加熱物への影響を抑制するバーナー・炉の開発 → 新設炉・既設炉の設計・改造技術 ・中長期耐久性を実現する炉体材・耐火材等の開発 ・シミュレーション、デジタルツイン技術による設計・運用高度化 ・アンモニア・水素供給を含めた長期安定操業を可能にする最適な工業炉システムの確立 	<ul style="list-style-type: none"> ・経済的・安定的な水素・アンモニア供給、インフラ整備 ・アンモニア・水素利用ガイドラインの整備 <p>本PJの対象とする部分</p>
電気炉	<ul style="list-style-type: none"> ・受電設備容量の低減 ・電化の適用範囲拡大・高効率化 	<ul style="list-style-type: none"> ・ピーク電力需要を低減する技術（アンモニア・水素燃焼とのハイブリッド炉の開発等） ・大型炉の均一加熱・均一温度の実現（温度変動幅の低減） ・排ガス利用、抵抗体の劣化防止・長寿命化等による高効率化 ・デマンドレスポンスに対応した操業方法の確立 	<ul style="list-style-type: none"> ・電力の低廉化・脱炭素化
バイオ燃料等 合成燃料	<ul style="list-style-type: none"> ・燃焼特性の違い（燃焼速度、火炎温度・輻射等）を考慮した燃焼技術 ・燃料に含まれる不純物の影響解明・防止 	<ul style="list-style-type: none"> ・高温安定運転のための技術開発 ・運用・保守の簡略化に資する技術開発 ・シミュレーション、デジタルツイン技術による設計・運用高度化 	<ul style="list-style-type: none"> ・既存の燃焼技術、インフラが活用可能 ・経済的・安定的な燃料供給

アンモニア燃料の工業炉への適用に関する海外動向

- **現状、アンモニア燃焼技術は日本が先行。**2014～2018年度にかけて内閣府の「戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）」で、NOx発生を抑制した30%混焼バーナーの開発を実施。2018年の国際燃焼シンポジウムで研究開発成果が公表されて以降、**各国のアンモニア燃焼に係る論文数、特許数ともに急増。**
- **日本が技術面での優位性を新たな市場獲得に繋げるためには、アンモニア燃料に対応した工業炉を早期に社会実装することが重要。**

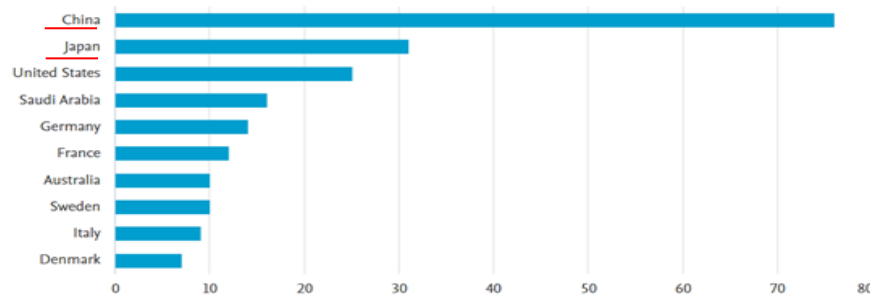
アンモニア燃料に係る論文、特許の動向

文献数の推移

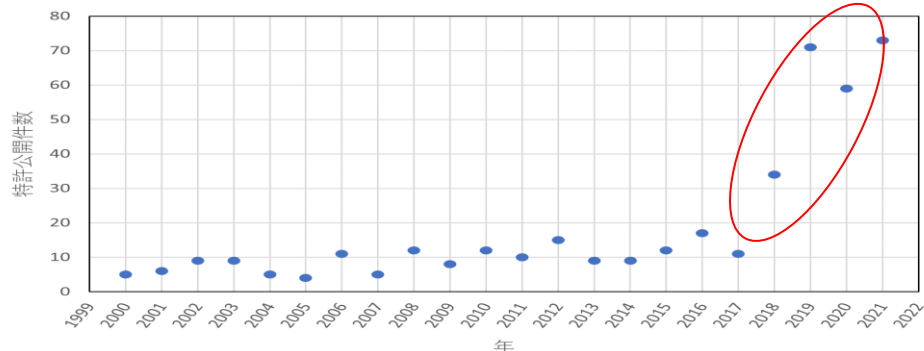


国別の文献数（2019-2022）

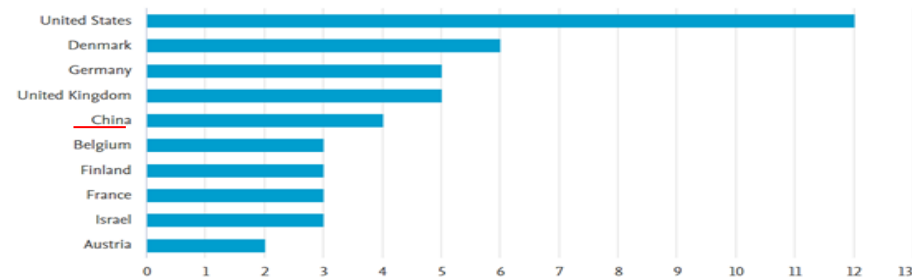
国/地域別の文献数
最大15か国/地域の文献数を比較する。



公開特許件数



国別の文献数（2000-2005）



(出典) Scopus (雑誌名にcombustionを含む&キーワードにammoniaを含むの検索結果)
WIPO PATENTSCOPE (ammonia,combustion,furnaceを含む検索結果)

【研究開発項目 1 → 2】金属製品を取り扱うアンモニア燃烧工業炉の技術確立

修正

- アンモニア燃料の活用には、**金属製品の品質維持、燃烧安定性やNOx抑制等の技術課題**が存在。独自設計の多い工業炉の改造、更新を進めていくためには、**シミュレーション・デジタルツイン技術の確立も必要**。
- **炉の構造、対象金属、運転方法等の異なる代表的な工業炉毎に**、金属製品等への影響や課題も異なることから、それぞれ天然ガスやLPGとの**混焼・専焼技術等の開発、ユーザー企業との実機実証を行う**。
- **2031年度までに50%の混焼技術の確立、専焼炉の実証**を目指す。

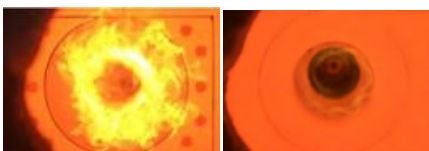
TRL3~4

■ アンモニア燃烧技術

- 難燃性（着火性・燃烧速度・輻射伝熱）対応
- トレードオフの関係にある低NOx化と未燃アンモニア低減の両立
- **最適な燃烧方法・制御技術**（バーナー開発、廃熱回収、断熱技術、設計技術）の**開発**

都市ガスとアンモニアの火炎の違い

アンモニアを燃烧させるため、高速・高温空気を用いるが、昇温時等の燃烧安定性は課題の一つ



都市ガス火炎

アンモニア火炎

■ シミュレーション・デジタルツイン技術

- オーダーメイドで多様な工業炉毎にバーナー等の配置や、燃料・空気の温度・噴射速度等の導入検証を行うには、物理的制約等の課題が存在し非効率
- **多様な炉の最適設計**（加熱効率・加熱均一性の向上）を**可能にする一元的なシミュレーション技術等の開発**



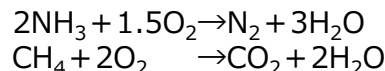
■ 工業炉全体システム、全体高効率化

- アンモニアの人体・環境リスク抑制のため、燃料供給や排ガス処理までの安全性確保を含む、炉の全体設計・運用技術開発/基準策定
- すすの発生や酸化を抑制できる**アンモニア燃烧の特徴を活かした、運用高度化・高効率化**

■ 製品・炉体への窒化等の影響解明と抑制技術の開発

- アンモニア燃烧による窒化や、炉内で生成されるラジカルを含む中間生成物の分布、影響など、未解明な要素は多い
- **最適な燃烧方法・制御技術、炉内ガス循環システムの開発**

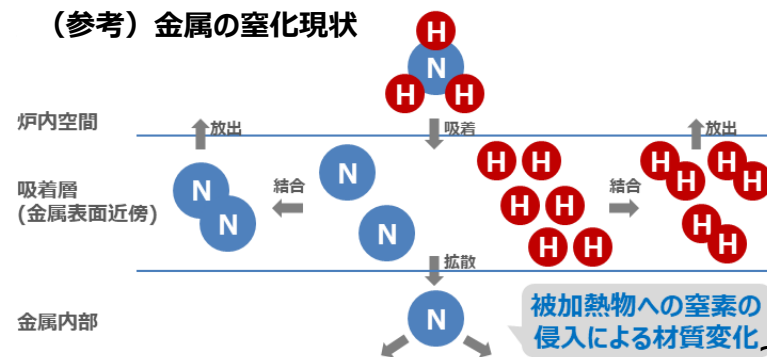
(参考) アンモニア混焼の燃烧反応



様々な中間生成物が発生

- Nラジカル、Hラジカル等による被加熱物への影響解明が必要

(参考) 金属の窒化現状



被加熱物への窒素の侵入による材質変化

【研究開発項目 2→3】金属製品を取り扱う水素燃烧工業炉の技術確立

修正

- 水素燃料の活用にあたっては、アンモニアと異なる特性（金属への影響（水素脆化）、高い燃烧性等）があり、**金属製品の品質維持、燃烧安定性やNOx抑制等の技術課題**が存在。独自設計が多い工業炉の改造・更新を進めていくためには、**シミュレーション・デジタルツイン技術の確立も必要**。
- **炉の構造、対象金属、運転方法等の異なる代表的な工業炉毎に**、金属製品等への影響や課題も異なることから、それぞれ天然ガスやLPGとの**混焼・専焼技術等の開発、ユーザー企業との実機実証を行う**。
- **2031年度までに50%の混焼技術の確立、専焼炉の実証**を目指す。

■ 水素燃烧技術

- 水素は燃烧性が高く、燃烧速度が速いため、サーマルNOxが生じやすいほか、バーナー内部への逆火対策も必要
- アンモニアを改質した水素で燃烧補完する技術など、未確立な技術も多い
- **最適な燃烧方法・制御技術**（バーナー開発、廃熱回収、断熱技術、設計技術）の**開発**

（参考）都市ガスと水素の火炎の違い



都市ガス火炎



水素火炎

■ シミュレーション・デジタルツイン技術

- オーダーメイドで多様な工業炉毎にバーナー等の配置や、燃料・空気の温度・噴射速度等の導入検証を行うには物理的制約等の課題が存在
- **多様な炉の最適設計**（加熱効率・加熱均一性の向上）を**可能にする一元的なシミュレーション技術等の開発**



TRL3~4

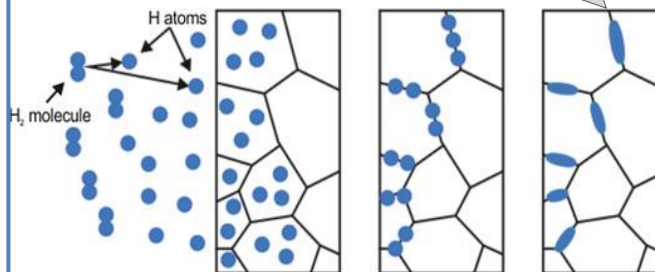
■ 工業炉全体システム、全体高効率化

- 発火性が高い等の水素燃料活用のリスクを最小化するため、燃料供給システムを含む、炉の全体設計・運用技術開発/基準策定
- すすがでない等の**水素燃烧の特徴を活かした、運用高度化・高効率化**

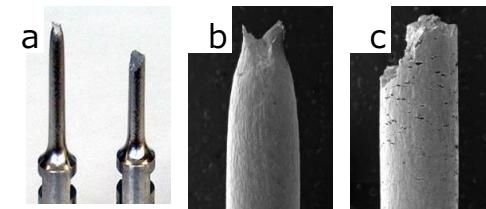
■ 製品・炉体への脆化等の影響解明と抑制技術の開発

- 水素燃烧による脆化や腐食原因となる高温水蒸気の発生、炉内で生成されるラジカルを含む中間生成物の分布・影響など、未解明な要素は多い
- **最適な燃烧方法・制御技術、炉内ガス循環システムの開発**

（参考）金属の水素脆化



Ref) <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128183328000065>



SUS316オーステナイト系ステンレス鋼の水素脆化
a:破断した試験片の写真
a左及びb:70MPaアルゴン中破断
a右及びc:70MPa水素中破断

（出典）高圧ガス保安協会 HP

(参考) 実証する工業炉の比較

- 今回のプロジェクトでは、国内に多く普及し、アンモニア・水素燃料の適用難易度が高い工業炉での実証を想定。
→特に均熱性の確保や炉内環境の制御等の難易度が高い、**1 MWを超えるエネルギー投入量の多い工業炉での実証を想定。**

金属材料 (鉄・非鉄金属)

<金属加熱に用いる工業炉>

(鉄鋼加熱炉、鍛造炉、熱処理炉、アルミ溶解炉等)

【主な特徴】

- 数百℃から高温 (1400℃) まで **様々な温度帯**
- バッチ式、連続加熱など **多様な運転方式**
- **高温空気燃焼**
- **多様な金属材料** (鉄鋼、アルミ、ニッケル合金等)

【研究概要】

- 燃焼特性の違いを考慮した **燃焼技術**
- **金属材料に及ぼす影響解明** (窒化・脆化)
- **バーナー、炉の構造・設計、シミュレーション技術等の開発**

【主な相違点】

- **アンモニアを安定的に燃焼させ、未燃アンモニアを無くすためには高温、酸素付加燃焼の方が有利** (サーマルNO_x対策は必要)
→ **1000℃を下回るアルミ溶解炉や、鉄鋼加熱炉等の昇温時の燃焼技術の開発が不可欠**
- **金属材料への窒化・脆化対策が必要**
- **炉の仕様が多岐に渡るため、効率的に適用させるためのシミュレーション技術が必要**

(出典) (一社) 日本工業炉協会発行『工業加熱』第59巻第6号2022.11掲載
「工業炉における脱炭素燃焼技術の開発動向」(右表)

非金属材料 (窯業)

<ガラス溶解炉の例> (他にセメント焼成炉、乾燥炉等)

※2021~2025年度 NEDO 工業炉における燃料アンモニアの燃焼技術開発PJ

【主な特徴】

- **高温 (1500℃超)**
- **安定・連続運転**
- **酸素付加燃焼**

【研究概要】

- アンモニア-酸素燃焼バーナーによる **燃焼実証**
- **ガラス**や溶解炉を構成する **材料への影響評価**
- 環境基準に対応した **バーナー開発** 等

(参考) 化石燃料とアンモニア・水素の物性値比較

燃料種	アンモニア NH ₃	プロパン C ₃ H ₈	メタン CH ₄	水素 H ₂
大気圧における沸点 (°C)	-33.3	-42.1	-161.6	-252.9
20℃における液化圧力 (atm)	8.5	8.5	常に気体	常に気体
<u>低発熱量 (MJ/kg)</u>	<u>18.6</u>	46.6	50.2	<u>120.4</u>
可熱当量比範囲 (-)	0.63~1.40	0.51~2.51	0.50~1.69	0.10~7.17
<u>最大燃焼速度 (m/s)</u>	<u>0.07</u>	0.43	0.37	<u>2.91</u>
最低自着火温度 (°C)	651	432	537	500
最高断熱火炎温度 (°C)	1750	2020	1970	2120

- 電気加熱は、利用時にCO₂を排出しないため、工業炉の脱炭素化に当たって有力な選択肢の一つ。グリーン電力の確保やコスト低減、受電容量（設備）の確保等の課題が存在。そのため、以下の取組を実施。
 - ✓ ピーク電力容量の低減につながるよう、大きな雰囲気熱量を要する炉において、炉の立ち上げ時や昇温時等にアンモニア燃焼、水素燃焼を行う、ゼロエミッション燃料と電気炉のハイブリッド炉の開発、実機実証
 - ✓ 電気炉における廃熱利用、ヒーターの高出力化等、高効率化に関する技術開発・実証
 - ✓ 炉の立ち上げ時を含めた全ての熱プロセスを網羅し、大型蓄電池・高性能インバータ等の活用を通じて受電容量を最小化するための加熱プロセスシミュレーション技術の確立、実証
- 2028年度までに高効率化技術とシミュレーション・デジタルツイン技術等の社会実装、2031年度までにハイブリッド炉の社会実装を目指す。

TRL3~4

■ゼロエミッション燃料ハイブリッド電気炉

- ・電気炉は、輻射伝熱と自然対流が主体で温度均一化が難しい（対流伝熱の有効活用による温度均一化が課題）
- ・被加熱物への影響（窒化、水素脆化）、必要熱量投入のタイミングなど、様々な加熱パターンに対応した均一加熱・均一温度制御等に技術課題有り

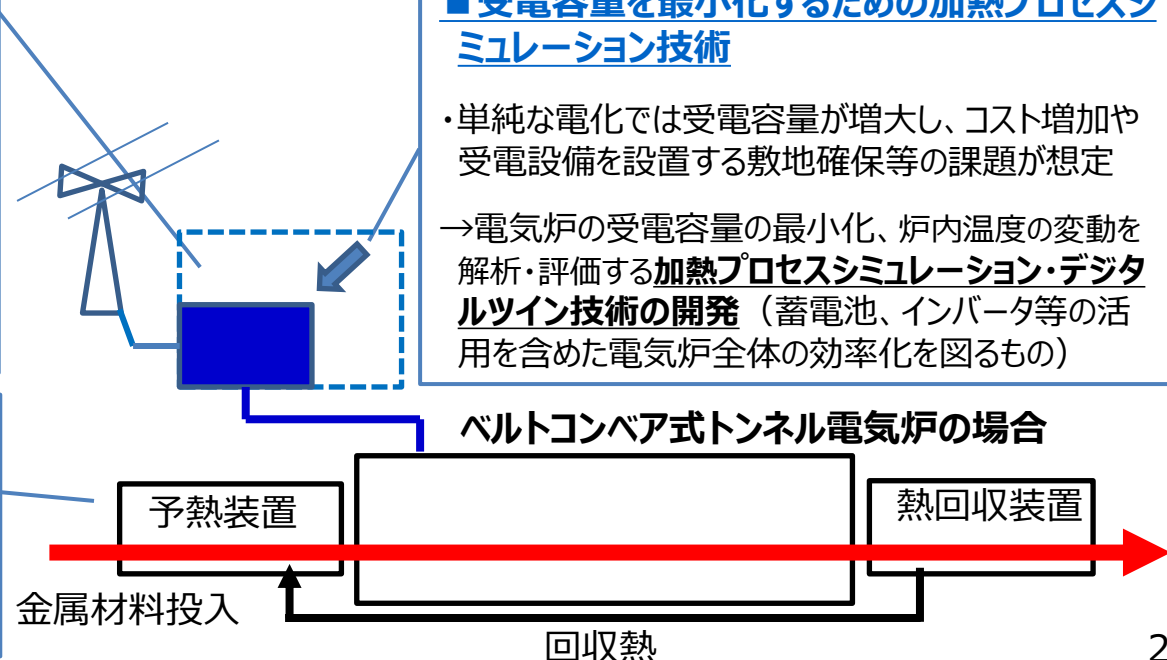
→電気炉の炉内温度変動幅低減とそれによる製品性能等の影響解明、均一加熱・均一温度制御を実現する炉内循環システムの開発

■電気加熱の高効率化

→電気炉の更なる脱炭素化に向けて、電気炉の廃熱・加熱した製品の熱等の利用、ヒーターの高出力化、磁性体か非磁性体かを問わず加熱可能な誘導加熱システムなど、電気炉の高効率化技術の開発

■受電容量を最小化するための加熱プロセスシミュレーション技術

- ・単純な電化では受電容量が増大し、コスト増加や受電設備を設置する敷地確保等の課題が想定
- 電気炉の受電容量の最小化、炉内温度の変動を解析・評価する加熱プロセスシミュレーション・デジタルツイン技術の開発（蓄電池、インバータ等の活用を含めた電気炉全体の効率化を図るもの）



(参考) 本プロジェクトにおけるデジタルツインのイメージ

追加

- 工業炉のデジタルツインには、アンモニア・水素による燃焼反応、金属材料への影響等の原理解明が不可欠。
- 燃焼ガス等の気体・流体と、金属材料等の固体という異なる性質を考慮する必要があり、技術難易度は高い。様々な種類の工業炉、運転方法に対応していくためには、基盤的な部分を協調領域として取り組むことも必要。

シミュレーション・デジタルツインの機能イメージ

Cyber

■ 設計データ

- ・炉全体の設計
- ・バーナー種類・角度・配置
- ・蓄熱体・耐熱材等
- ・製品スペック
- ・燃料種 等

■ 運転データ

- ・運転方法
- ・温度・空気比・圧力
- ・雰囲気ガスの流動
- ・燃料種
- ・燃料噴射速度
- ・炉壁温度分布
- ・材料情報（温度等）等

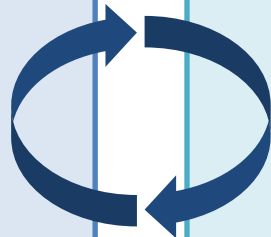
Physical

【アウトプット①】

アンモニア・水素燃焼に適した最適設計・改修（被加熱物への影響予測を含む）

【アウトプット②】

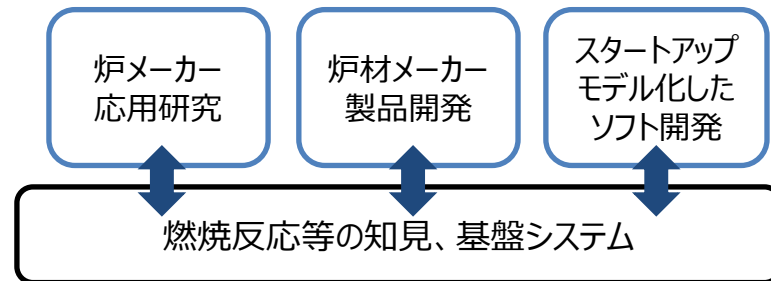
運転効率化・最適制御（保守・保全含む）



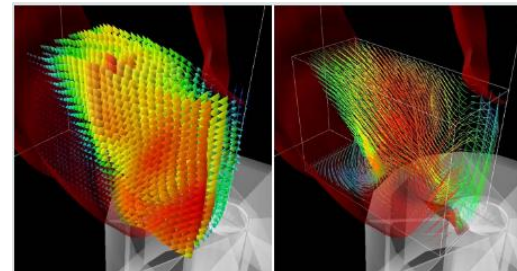
多様な炉の種類、燃焼方法に対応したシステムを構築するためには、アンモニア・水素の燃焼、被加熱物への影響等の原理解明が不可欠

本PJに望まれる開発体制

- ・研究開発リスクを低減しつつ、早期実用化を目指していくためには、燃焼特性等の基礎的知見や、各種実証データに基づく基盤システムは協調領域として取り組み、それを元に、各社が独自の開発を促進することも必要。



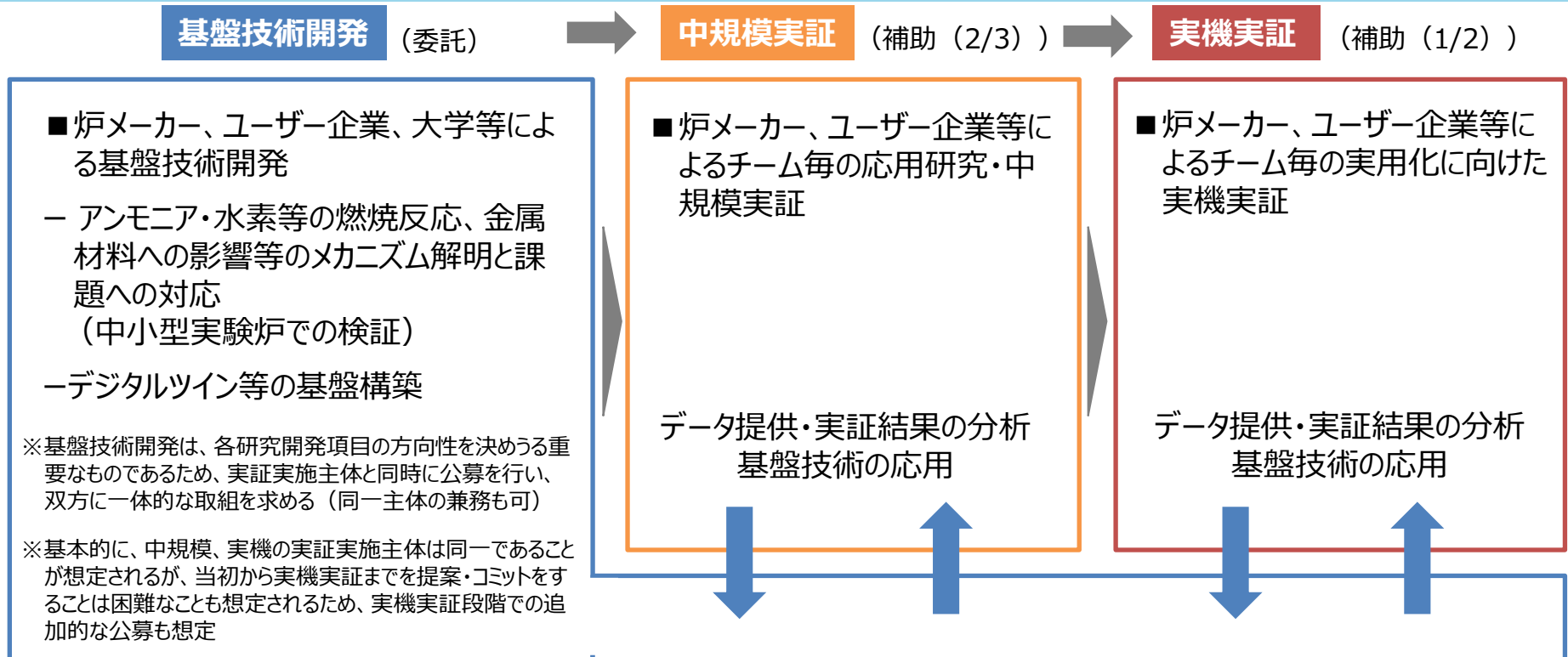
(参考) 燃焼シミュレーションの例



一般的な燃料の燃焼化学反応は数十～数千に及ぶが、反応が盛んな領域のみに存在する中間生成物やラジカルなどを計測することで、瞬時の乱流火炎を可視化。こうした計測方法等による旋回乱流燃焼場の3次元平均速度場と平均火炎面の分布（東工大店橋・志村・源研究室）²⁷

本プロジェクトにおける在るべき実施体制イメージ

- 日本の工業炉メーカーの事業規模等を踏まえれば、アンモニアや水素燃料の燃焼反応や金属材料への品質影響等のメカニズム解明、それらのデータを前提としたデジタルツイン等の基盤開発については、各社で知見を共有しつつ、協調領域として取り組み、自らの製品・技術に適用させていく体制が望ましいのではないかと。
 - そうした体制の中で、中小企業を含めた、工業炉ユーザー企業（その先のユーザー企業も含む）や、工業炉部品のサプライヤー企業、スタートアップ等の関係主体を巻き込んだ体制としていくことも必要。
- 基盤技術開発（協調領域）の実施主体同士の連携はもちろんのこと、基盤技術を用いる中規模実証、実機実証の実施主体とも実証結果等の知見を共有するなど、一体的な取組を求めています。



※実施体制に含まれないユーザー企業等からのニーズも取り入れ、他分野も含めた開発技術の展開可能性を模索

※基盤技術開発（協調領域）については、関係企業、大学等が連携して取り組むべき内容であることから、単独の研究開発項目として切り出し、当該項目に限って、大学・研究機関等が主たる実施者（支出が過半を占める実施者）とすることを可能とする。

委託・補助、予算額の考え方

【研究開発項目1】カーボンニュートラル対応工業炉に関する共通基盤技術の開発

【（9/10委託）＋（1/10インセンティブ）】国費82億円（事業費82億円）

研究開発項目2～4で実施する金属製品の品質影響とそのメカニズム解明、デジタルツイン等の基盤技術開発（委託部分）は、共通する課題に対応するものであり、相互に影響する内容でもあることから、一つの研究開発テーマとして位置付け、委託事業として実施する。

【研究開発項目2】金属製品を取り扱うアンモニア燃焼工業炉の技術確立

【（2/3補助→1/2補助）＋（1/10インセンティブ）】国費134.3億円（事業費212.5億円）

低温燃焼時の未燃アンモニア、 N_2O 抑制対策、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3】金属製品を取り扱う水素燃焼工業炉の技術確立

【（2/3補助→1/2補助）＋（1/10インセンティブ）】国費67.5億円（事業費101.8億円）

1000℃を超えるような工業炉に適用した場合のNOx対策、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4】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

【（2/3補助→1/2補助）＋（1/10インセンティブ）】国費41.3億円（事業費63.4億円）

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1～3とも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、実証の段階から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**。

<予算根拠>

複数者からの機械装置費、労務費、その他経費等に関する見積もり、及び過去のNEDO等における研究開発・実証事業を参考に、事業の規模・期間を考慮し、所要額を試算。

社会実装に向けたその他の取組（国際標準化等）

- 省エネ型の工業炉への転換等を促すべく、**省エネ補助金において、省エネ型工業炉の設計から設置までの複数年の投資計画に切れ目なく対応できる新たな仕組みを創設**。中小企業等に対するエネルギー使用量の見える化・運用改善提案等を行う省エネ診断事業の拡充も実施（令和4年度第2次補正予算）。
- **（一社）日本工業炉協会**は、2008年に設立されたISO/TC 244「工業炉及び関連設備」の国際幹事及び議長を務めており、**国際標準の提案・発行を実現**している。
- **こうした取組とも連携しながら、本プロジェクトで開発・実証した技術を用いた、新たな金属加熱プロセスに用いる工業炉の導入支援・標準化を図っていく。**

令和4年度第2次補正予算 省エネ支援策パッケージ（抜粋）

1. 省エネ補助金の抜本強化【500億円】【国庫債務負担行為の後年度分含め1,625億円】

- **省エネ設備投資補助金において、複数年の投資計画に切れ目なく対応できる新たな仕組みを創設**することで、エネルギー価格高騰に苦しむ中小企業等の潜在的な省エネ投資需要を掘り起こす。

2. 省エネ診断の拡充【20億円】

- 工場・ビル等の**省エネ診断の実施**やそれを踏まえた**運用改善等の提案にかかる費用を補助**することで、**中小企業等の省エネを強力に推進**する。
- また、**省エネ診断を行う実施団体・企業を増加させ、専門人材育成も兼ねた研修を行う**ことで、省エネ診断の拡充を図る。

※ 中小企業向け補助金（ものづくり補助金）についても、省エネ対策を推進するためグリーン枠を強化。

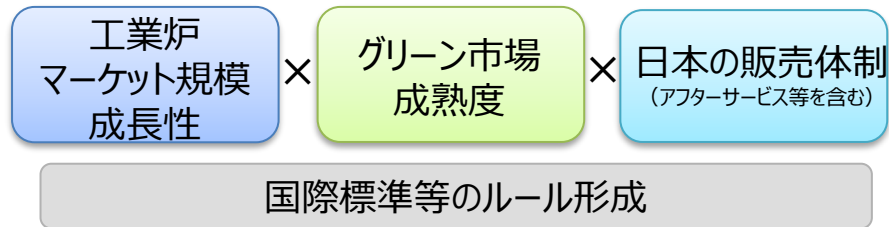
日本工業炉協会による標準化実績

1980年	工業炉安全の研究を開始
1982年	JIS B 8415「工業用燃焼炉の安全通則」制定
1989年	JIS B 0113「工業用燃焼装置用語」改訂
2008年	JIS B 8415「工業用燃焼炉の安全通則」改正 ▷欧米規格及び機械のリスクアセスメント規格（ISO 12100/JIS B 9700）への対応
2010年	JIS B 8407-1,2「強制通風型ガスバーナ」等の制定 ▷国際規格（ISO 22967及びISO 22968）整合
2013年	JIS B 8420「抵抗加熱炉の安全通則」制定 ▷国際規格（IEC 60519-2）整合
2020年	「工業用燃焼炉の安全通則」 JIS B 8415-1~3 制定（JIS B 8415:2008は廃止） ▷国際規格（ISO 13577-1, 2及び4）整合

海外市場の獲得に向けた方向性

- 現在、日本では、アジアを中心に工業炉の輸出を展開。カーボンニュートラル対応工業炉は、アンモニアや水素燃料価格等によってはコスト増になる可能性もあり、グリーン市場の成熟度や日本の工業炉メーカーの販売体制等も考慮した海外展開の戦略が必要。
- 加えて、研究開発と並行して効果的な国際標準化活動を進めていくことが重要。燃料アンモニアなどの先行する取組と連携し、工業炉分野の国際標準化の検討、活動を進めていく。

工業炉の海外市場戦略の要素



アンモニア・水素に関する国際標準の動向

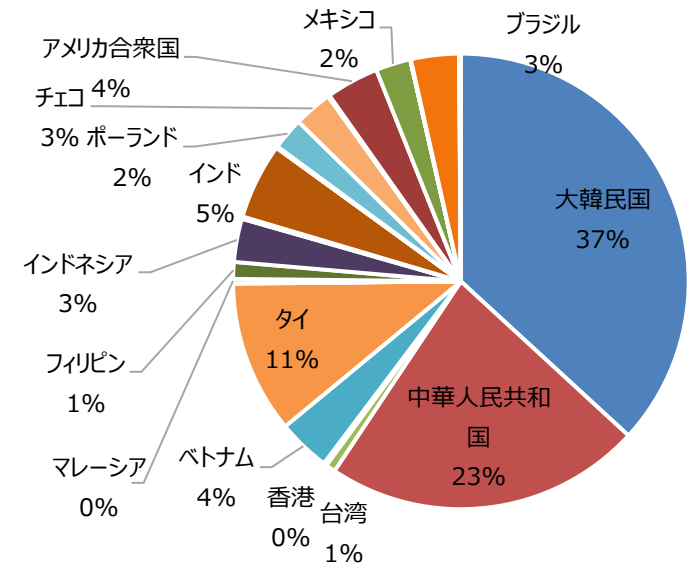
■燃料アンモニア

・燃料アンモニアサプライチェーンの国際標準化に向け、官民一体となって、ISO/TC 67総会で燃料アンモニア関連技術の標準化を働きかけ・提案中。

■水素

・日本が国際取引の主力プレイヤーとなり得る分野では、日本の意向が反映された標準について、順調に進展中（国際輸送や燃料電池）。新しく市場が立ち上がる分野（水電解装置やFCトラック）については、GI基金はじめ、国の実証で国際標準化を後押し。

日本の工業炉（燃焼炉）の輸出国（2019年）



（出典）貿易統計

→ こうした動きと連携しつつ、CN対応工業炉について、安全性やCO₂削減貢献量の評価方法など、国際標準化の利点が高い領域を検討、活動を進める。

中小企業への普及に向けた主な課題

修正

カーボンニュートラル対応工業炉の中小企業への普及に向けては、投資リスクや敷地制約、取引先との調整など、様々な課題がある。→ CAPEX、OPEXの観点からの投資リスクの軽減、炉の更新期間中の生産活動をバックアップする事業者間での連携促進など、必要な対策を講じることに加え、カーボンニュートラル時代のビジネスの在り方等について、検討していく。

普及に向けた主な課題

① 投資リスク

- ✓ 工業炉は30年程度使用されるものであり、炉によっては一基あたり数億円と**中小企業には大きな投資**。
- ✓ エネルギー価格、金属製品需要（生産量、稼働率等）等によって、投資回収年数は変動するため、**投資判断が困難**。

② 敷地等の制約

- ✓ 燃烧炉から電気炉への転換に際して、特別高圧契約と受電設備の設置が必要となるものの、**敷地面の制約から設置が困難**なケースがある。
(例) アルミ溶解炉のユーザー企業
国内取引先（自動車メーカー）からのCN対応の要請が強まっており、燃烧炉から電気炉への転換を検討。製造能力として2~4tが必要となるが、契約電力容量の制約により、1t程度の製造能力が限界。
- ✓ 工業炉は、設計打合せ・図面作成等から実際の工事完了までに数ヶ月~1年程度（+製品認証の期間）を要する。敷地の制約がある場合、その間の**製造に係る代替ラインを設けることが困難**となり、**休業や代替工場の確保、取引先との生産調整等が必要**。

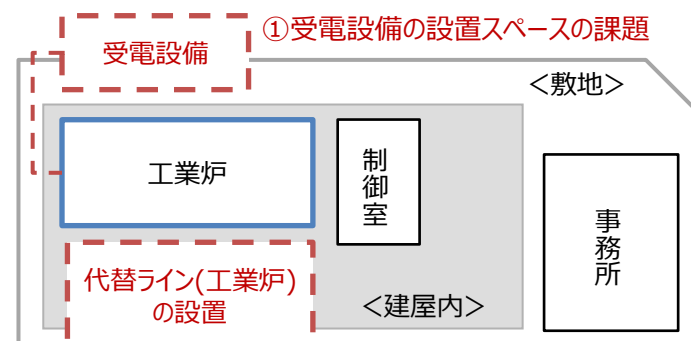
③ 取引先との調整

- ✓ 取引先との関係において、**使用する炉を含めた熱処理方法が指定されているケース**が多く、自社判断で新たな炉による製造はできない。
- ✓ 商慣行上、新設・更新する炉において、取引先が求める品質が担保できるか、安定的な生産ができるか確認し、**取引先の認証取得等が必要となる場合**がある（半年~1年要するケースもある）。

対応の方向性

- ① 省エネ補助金や低炭素設備リース信用保険等の活用による投資リスクの低減
- ②③ 電気炉の**高効率化・受電設備容量の低減**を図るための研究開発、炉の設計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の開発及びその普及（人材育成等の取組も含む）**
- ②③ **取引の適正化**（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等の取組の推進）
- ①②③ **事業環境整備**（グリーン市場の創出、エネルギーの安定的かつ安価な供給等）
- ①②③ **導入事例や施策情報の発信、その他炉の更新に必要な支援策の検討・実施**

(参考) 敷地等の制約イメージ



(参考) GX経済移行債(仮称)を活用した先行投資支援の基本条件

修正

GX経済移行債(仮称)を活用した先行投資支援の基本条件 (令和4年12月22日GX実現に向けた基本方針)	本プロジェクトにおける考え方
I. 資金調達手法を含め、企業が経営革新にコミットすることを大前提として、技術の革新性や事業の性質等により、民間企業のみでは投資判断が真に困難な事業を対象とすること	アンモニア燃焼等によるカーボンニュートラル対応工業炉の開発については、①金属製品の品質に影響を生じさせない燃焼技術など、技術的難易度が高く、②その普及には、アンモニア等の供給側の制約(コスト・量・インフラ等)による外的影響も大きい、③研究開発等に要する投資額も大きいことから、民間企業のみでは早期の投資判断が困難なもの。
II. 産業競争力強化・経済成長及び排出削減のいずれの実現にも貢献するものであり、その市場規模・削減規模の大きさや、GX達成に不可欠な国内供給の必要性等を総合的に勘案して優先順位をつけ、当該優先順位の高いものから支援すること	中小企業が多くを保有する国内3.7万台の工業炉を置き換えていくものであり、工業炉メーカーのみならず、金属材料等を扱う幅広い産業の競争力強化に貢献するもの。2050年までの国内外での経済波及効果は約10兆円(カーボンニュートラル対応工業炉から生産される金属部品等の市場規模は約205兆円) 国内における2050年時点のCO ₂ 排出削減量も0.8億t/年と、政策支援によるインパクトは大きく、優先順位は高い。
III. 企業投資・需要側の行動を変えていく仕組みにつながる規制・制度面の措置と一体的に講ずること	カーボンニュートラル対応の工業炉の普及に当たっては、ユーザー企業に対する省エネ法による規制と設備導入支援等を一体的に講じていく予定。
IV. 国内の人的・物的投資拡大につながるもの(資源循環や、内需のみの市場など、国内経済での価値の循環を促す投資を含む)を対象とし、海外に閉じる設備投資など国内排出削減に効かない事業や、クレジットなど目標達成にしか効果が無い事業は、支援対象外とすること	国内3.7万台の工業炉を置き換えていくものであり、金属部品製造業を中心とした国内の投資拡大につながるものである。加えて、カーボンニュートラル対応の工業炉をいち早く社会実装することで、アジアや欧米を中心に海外マーケットへの展開も図っていく予定。

目次

1. 背景・目的

2. 研究開発項目と社会実装に向けた取組

3. 想定スケジュール

想定スケジュール

修正

- 具体的な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、想定される一例は以下のとおり。

1:委託 2-4:補助(2/3)→補助(1/2)	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032
<p>1.カーボンニュートラル対応工業炉に関する共通基盤技術の開発 ※大学・研究機関等が主たる実施者（支出が過半を占める実施者）となることが可能</p>	<p>要素技術開発 TRL 3 ~ 4 (必要に応じて) 実証結果の原因説明、デジタルツインの改修等 TRL 4 ~ 7</p> <p>※2.~4.と一体的に実施 (要素技術開発は1.で一元的に実施)</p>										
<p>2.金属製品を取り扱うアンモニア燃焼工業炉の技術確立</p>	<p>要素技術開発 TRL 3 ~ 4 → ★ 中規模実証・評価 TRL 4 ~ 5</p> <p>↓ (設計) ★ 実証機建設・実証試験・評価 TRL 6 ~ 7 → ★ 実用化</p> <p>※1.と一体的に実施、3.及び4.と連携</p>										
<p>3.金属製品を取り扱う水素燃焼工業炉の技術確立</p>	<p>要素技術開発 TRL 3 ~ 4 → ★ 中規模実証・評価 TRL 4 ~ 5</p> <p>↓ (設計) ★ 実証機建設・実証試験・評価 TRL 6 ~ 7 → ★ 実用化</p> <p>※1.2.のステージゲートに当たっては、アンモニア・水素の供給可能性等を踏まえて、テーマの統合や絞り込みも検討</p>										
<p>4.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</p>	<p><ハイブリッド化関係></p> <p>要素技術開発 TRL 3 ~ 4 → ★ 中規模実証・評価 TRL 4 ~ 5</p> <p>↓ (設計) ★ 実証機建設・実証試験・評価 TRL 6 ~ 7 → ★ 実用化</p> <p><高効率化関係></p> <p>要素技術開発 小規模実証・評価 実機レベルでの実証・評価</p> <p>TRL 3 ~ 4 → TRL 4 ~ 5 → ★ TRL 6 ~ 7 → ★ 実用化</p> <p>※1.と一体的に実施</p>										

★：ステージゲート

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「ステージゲート」を設定し、適切なマネジメントを実施。移行可否の判断にあたっては、単に研究開発の進捗のみならず、内外の研究開発の動向やユーザー企業との連携状況、他分野への展開可能性等も考慮。

また、一部、アンモニア・水素燃料の燃焼反応、製品品質への影響等が未解明であることから、KPIの達成度・進捗度だけで画一的な評価をせず、取組の進捗を踏まえて必要な見直しや追加対策等も検討。

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：プレ商業実証・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

※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。

製造分野における熱プロセスの脱炭素化

修正

直接コントロールできる部分			経済・社会等の変化 (誰が/何が、どう変化することを目指しているか)		
(インプット)	(アクティビティ)	(アウトプット)	(短期アウトカム)	(中長期アウトカム)	(インパクト)
予算 [2023–2031年] 325.1億円	1. カーボンニュートラル対応工業炉に関する共通基盤技術の開発 [予算:82億円]	共通基盤技術(要素技術)の確立 [測定指標]製品(被加熱物)の品質、NOx規制対応、燃焼安定性、ピーク受電容量低減、高効率化等 [2026年度見込]上記目標値の達成	2040年CO₂削減効果 [測定指標]CO ₂ 削減量試算値 [2040年見込]約0.2億トン/年	2050年CO₂削減効果 [測定指標]CO ₂ 削減量試算値 [2050年見込]約0.8億トン/年	2050年カーボンニュートラル達成 経済効果 290兆円
	2. 金属製品を取り扱うアンモニア燃焼工業炉の技術確立 [予算:134.3億円]	アンモニア燃焼工業炉の確立 [測定指標]製品(被加熱物)の品質、NOx規制対応、燃焼安定性等 [2031年度見込]上記目標値の達成、50%混焼炉の技術確立、専焼炉の実証			
	3. 金属製品を取り扱う水素燃焼工業炉の技術確立 [予算:67.5億円]	水素燃焼工業炉の確立 [測定指標]製品(被加熱物)の品質、NOx規制対応、燃焼安定性等 [2031年度見込]上記目標値の達成、50%混焼炉の技術確立、専焼炉の実証	○中小企業等への導入促進(既存施策の活用含む)		
	4. 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 [予算:41.3億円]	受電設備容量等の低減・高効率電気炉の確立 [測定指標]現状に対する削減量 [2031年度見込]単純電気炉と比較した際のピーク受電容量低減(30%)、高効率化(15%)			
	○国際市場形成に向けた国際標準化	○ISO/TC244(工業炉及び関連設備)等を活用した国際標準化活動 [測定指標]標準化件数 [2031年度見込]1件以上			

アウトカム(世界市場規模推計) 試算の考え方
 ● 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)報告書等に基づき推計