

令和4年度製造基盤技術実態等調査  
(工業炉のカーボンニュートラル対応に向けた  
動向調査)  
調査報告書

令和5年3月31日

JFE テクノリサーチ株式会社



## 目次

|                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------|----|
| 1. 調査の背景 .....                                                     | 5  |
| 1-1. 目的 .....                                                      | 5  |
| 1-2. 調査の方法.....                                                    | 5  |
| 1-2-1. 工業炉のカーボンニュートラルの実現に向けたシミュレーターの作成・仮説構築 .....                  | 5  |
| 1-2-2. 工業炉のカーボンニュートラル化に向けた誘導施策の在り方 .....                           | 5  |
| 1-2-3. 調査の実施方法.....                                                | 5  |
| 2. 工業炉のカーボンニュートラルの実現に向けたシミュレーターの作成・仮説構築.....                       | 6  |
| 2-1. ヒアリング .....                                                   | 6  |
| 2-1-1. 工業炉の用途と炉種 .....                                             | 6  |
| 2-1-2. 電気加熱炉 .....                                                 | 6  |
| 2-1-3. 燃焼加熱式 .....                                                 | 8  |
| 2-1-4. 水素・アンモニアへの対応.....                                           | 9  |
| 2-1-5. 工業炉のCN対応.....                                               | 10 |
| 2-1-6. 使用している工業炉.....                                              | 11 |
| 2-1-7. 普及に向けた施策.....                                               | 11 |
| 2-1-8. 研究開発における産官学の協業 .....                                        | 12 |
| 2-2. 令和3年度シミュレーターの内容確認 .....                                       | 13 |
| 2-2-1. 計算式.....                                                    | 17 |
| 2-3. 統計に基づくシミュレーターの作成.....                                         | 18 |
| 2-3-1. 計算で使用する定数.....                                              | 18 |
| 2-3-2. 年度別計算で使用する変数.....                                           | 19 |
| 2-4. モデルケースと仮説構築 .....                                             | 22 |
| 2-4-1. [ケース 0:ベース] CO <sub>2</sub> 排出原単位が 0 になる場合 .....            | 22 |
| 2-4-2. [ケース 1:ベース] 高効率型形式変化のみでの CO <sub>2</sub> 排出量変化.....         | 22 |
| 2-4-3. [ケース 2:電気式転換] 電気式転換のみでの CO <sub>2</sub> 排出量変化 .....         | 23 |
| 2-4-4. [ケース 3:電気式転換] 電気式に転換した上で電源 CO <sub>2</sub> 排出係数を下げた変化 ..... | 25 |
| 2-4-5. [ケース 4:燃焼炉燃料転換(1)] 燃焼炉の燃料転換による CO <sub>2</sub> 排出量変化 .....  | 26 |
| 2-4-6. [ケース 5:転換の遅れ] 高効率型形式変化のみでの CO <sub>2</sub> 排出量変化(2) .....   | 27 |

|        |                                                                                      |    |
|--------|--------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2-4-7. | 〔ケース 6:燃焼炉燃料転換(2)〕 燃焼炉の燃料転換による CO <sub>2</sub> 排出量変化(高効率型への転換が遅れた場合) .....           | 29 |
| 2-4-8. | 〔ケース 7:現実ケース〕 電気式に転換しつつ、加熱式が一定残った上で電源 CO <sub>2</sub> 排出係数低下と水素・アンモニア転換を考慮した変化 ..... | 29 |
| 3.     | 工業炉のカーボンニュートラル化に向けた誘導施策の在り方 .....                                                    | 31 |
| 3-1.   | 技術的課題・社会的課題の整理 .....                                                                 | 31 |
| 3-1-1. | 技術的課題 .....                                                                          | 31 |
| 3-1-2. | 電気式加熱炉における新技術.....                                                                   | 33 |
| 3-1-3. | 燃焼式加熱炉における新技術.....                                                                   | 33 |
| 3-1-4. | 社会的課題 .....                                                                          | 34 |
| 3-2.   | 誘導施策の在り方についての検討.....                                                                 | 34 |
| 4.     | 添付資料.....                                                                            | 35 |
| 4-1.   | 引用文献.....                                                                            | 35 |

## 1. 調査の背景

### 1-1. 目的

2050年のカーボンニュートラル社会の実現に向け、令和3年6月に2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略、10月にエネルギー基本計画及び地球温暖化対策計画が閣議決定され、それぞれ、技術開発、エネルギー需給、省エネ支援といった政策を総動員して持続的な成長とイノベーションを実現し、2050年カーボンニュートラル社会を目指していく方向性を打ち出している。

製造分野の熱プロセスにおいては、燃料の燃焼及び電力消費により、国内CO<sub>2</sub>の28%程度を占めると見積もられる。2050年に向けた需要側対策として、熱源のゼロエミ化(ゼロエミ燃料の導入(燃料転換)、ゼロエミ電源の導入(電化))と省エネ技術を合わせた脱炭素化の取り組みが必要である。

工業炉は、製品に熱を与える装置の総称であり、国内に3.7万基の工業炉が存在すると推定される。鉄鋼、非鉄金属、自動車、電気電子、窯業、化学工業等多くの産業分野で、溶解、精錬、加熱、熱処理、乾燥等の工程で用いる加熱装置として幅広く使用されている。

今後、工業炉のカーボンニュートラル対応を検討するに当たっては、工業炉の形式、用途、規模等に応じたきめ細かな対応や、諸外国の規制動向等を踏まえてそのあり方を検討する必要がある。

このため、本調査では、工業炉の最新の普及状況を踏まえ、多岐に亘る工業炉の種類、形式、用途、規模、熱源等の基礎情報や国内外の技術開発動向や政策動向を把握しつつ、ゼロカーボン達成の方向性について調査・分析を行う。

### 1-2. 調査の方法

事業目的を達成するため、以下(1)～(4)に基づき、調査を行う。

#### 1-2-1. 工業炉のカーボンニュートラルの実現に向けたシミュレーターの作成・仮説構築

「令和3年度内外一体の経済成長戦略構築にかかる国際経済調査事業(工業炉のカーボンニュートラル対応に向けた動向調査)」の調査結果を踏まえ、現在から2050年までのCO<sub>2</sub>排出量を推計可能とするシミュレーターを作成する。本シミュレーターは、表計算ソフトの関数ベースで構成されるものとする。

上記シミュレーターを用い、工業炉のカーボンニュートラルの実現に向け、現在から2050年までの3つ程度の開発・普及シナリオをモデルケースとした上で、非化石エネルギーの導入や高効率型機器の導入可能性、政策誘導等について仮説構築を行う。

#### 1-2-2. 工業炉のカーボンニュートラル化に向けた誘導施策の在り方

我が国の熱源設備のカーボンニュートラルを実現するための技術的課題、社会的課題等を整理し、政策のあり方を検討する。

#### 1-2-3. 調査の実施方法

上記(1)、(2)の調査にあたっては、以下の実施方法を中心に行うものとする。具体的な調査方法及び調査対象は、経済産業省担当者と協議の上決定する。

- ・ 国内外の文献、インターネット等による情報収集
- ・ 工業炉の有識者(5～10者程度、工業炉に係るメーカーやユーザー企業の技術者等を想定。)に対する個別ヒアリングする。

## 2. 工業炉のカーボンニュートラルの実現に向けたシミュレーターの作成・仮説構築

### 2-1. ヒアリング

ヒアリングはメーカー6社に行った。

うち工業炉を使用した受託加工を行っている会社は 3 社で、1社は自社製品製造の工業炉を使用している。

#### 2-1-1. 工業炉の用途と炉種

##### (1) 工業炉の用途と炉種

- 鉄筋・鉄骨：アーク炉 低カーボン材なのでスラグ精錬ができるアーク炉が有利。また、アーク炉は大規模化が可能で大量処理に向く
- 鑄造：誘導炉 大気中溶解のため精錬ができないので高カーボンに適する。生産規模が小さく、自動車部品・鑄鉄管の規模まで。
- 非鉄：加熱源が電気の場合は抵抗炉が使われることが多い
- 誘導溶解炉が最も使われているのは鑄物用鑄造業
- 鉄筋・鉄骨(電炉)はアーク炉

#### 2-1-2. 電気加熱炉

##### (1) 誘導溶解炉の特徴

- 誘導溶解のプロセス：
  - 炉に対象物を入れる。最初からバッチ一回分は入らずはじめは数分の一量を投入する
  - 加熱し、溶けると追装し、目標時間で必要量が溶け終わるように繰り返す
- 耐火物で炉を作り、コイルを周囲に巻き、外側を鉄心で巻く。炉に入れた金属が誘導加熱され溶融する。
- 誘導加熱炉は電流が流れるものを対象にするのが基本だが、電流が流れる黒鉛るつぼを誘導加熱し、その熱によりるつぼにいた材料を溶かす例はある。
- 耐火物は磁力の影響は受けず、溶融金属の性質に合わせた材料を選定する。
- 誘導炉では、金属に加わる電力は電源の6割～7割くらいになる。ロス分は、炉体への蓄熱、大気への放散熱、炉体水冷の冷却水による除去熱、出湯の際の放散熱、待ち時間の放散熱などがある。
- 鑄鉄鑄物の鑄造の理論必要熱量は384kWh/t(1500℃)と言われる。現実にはエネルギーロスにより、平均600kWh/t(設備ロス・操業ロス入り)、熱処理含めると製品として1000kWh を超える程度。
- 何tバッチを何分で溶解するかで必要電力量が決まる。

##### (2) 高周波誘導加熱炉の特徴

- 焼き入れ等の表面処理では表層の数mmを加熱するため、表皮効果を使い高い周波数を使用し、電力量が少なく、加熱時間も短くなる。同じ誘導加熱でもプロセス・ノウハウが異なり、それぞれに特化したメーカーが多く存在する。
- 高周波誘導加熱はコイルに高周波電流を流し、金属に電磁誘導で電流を流し加熱を行う
- 第二次世界大戦のころからキャタピラや砲身の焼き入れに使われ始めた
- 最近は自動車業界がインラインでない燃焼炉を嫌い、インラインの加工では誘導加熱を使うようになっている
- 工業炉としての誘導加熱では、対象物をコイルの中に入れ、磁束がワークを貫通するようになる。誘導加熱は雰囲気加熱ではない
- 鉄系金属は低温では磁石につくが、高温になるとつかなくなる
- 誘導加熱は透磁率が高いときに加熱効率が高くなる
- 500～600℃以下の領域では誘導加熱の効率は95%ほどある。磁気変態点を超える

と比透磁率がほぼ1になり非鉄と同じになる。ただし鉄は抵抗値が高いので、銅などよりは効率は高いがそれでも効率は65%程度まで下がる

- 温度カーブで見ると、700℃まではずっと上がり、700～900℃くらいまで同じくらいの時間がかかる。これまでの最長の加熱時間は40秒
- 高周波誘導加熱のさらなる効率化は、電流密度の高密度化による加熱の短時間化が有効。
- 誘導加熱の他のメリットとして加熱時間が短時間であるので、複数台炉があっても、加熱処理を重ならないようにすることができる。段取り→加熱の作業時間を複数台で計画的にずらすことで、受電容量は最大の炉に合わせた容量で済む
- デメリットは複雑な形状が難しいこと。形状が複雑になると誘導電流の局所化などが起こり、温度ムラの原因となる。→ハイブリッド化はこの点をカバーできる。(均熱を雰囲気炉で行う)
- 磁束が周辺の他の金属に回って効率が落ちないように磁気シールドを行うことは効率アップに有効
- 鉄以外の材質に対しても工夫することにより誘導加熱の適用は可能(銅鍋のIH炊飯器が例)。ただし、鉄の場合ほどの圧倒的な効率アップにならない。ステンレスなどの熱伝導の悪いものについても有利。非鉄でも誘導加熱を採用するメーカーは多い。
- 周辺物が高温になることがないので安全性が高い

### (3) 電気炉の効率アップ

- 抵抗式誘導式とも溶解炉では対象物の加熱に使う以外のエネルギーは、ほぼ冷却水に逃げているので、この削減がカギになる
- 電気炉は排ガス損失がないので、放散熱の削減が中心になる。
- また、操業負荷を一定にして効率を上げる工夫が必要。
- 単純に燃焼炉を電気炉に置き換えるというだけでは大きな効率アップが難しいところがあるが、特殊ヒーターを使用するような新プロセスで効率アップが可能になる。
- 電気炉(電化)はピークカットをいかに行うか(急速加熱時の燃焼ハイブリッドや蓄電器の活用など)が課題

### (4) ヒーター(発熱体)の省エネ技術

- 長寿命化。消耗を少なくする
- 発熱体以外の導体抵抗を下げたヒーター
  - 発熱部分以外での熱ロスを下げる
  - CN 対応を含めてユーザーの導入希望は増えてきている(従来ヒーターとのそのままの置き換えが可能)が、コストとの兼ね合いで導入が決まっていく側面がある

### (5) 電気炉の採用が難しい工業炉の分野は何があるか

- レンガ焼成はほぼ100%燃焼ではないか。1800℃程度の焼成で利用できる発熱体が(寿命も含めて)なく、燃焼炉が適する領域ではないか
- 電気発熱体の使用温度は雰囲気による。例えば水素などの還元雰囲気であれば抵抗加熱で1800℃は可能であるし、Ar 雰囲気カーボン発熱体であれば3000℃もありうる
- SiC 抵抗加熱では1600℃まで、金属ヒーターだと1200℃程度までとなり、ヒーター材質を変えることで低温から高温まで温度の観点からみると対応可能。しかし、雰囲気と温度で決まるため、参加雰囲気での高温はヒーターがなく対応ができない

### (6) ハイブリッド炉の提案

- 連続炉の前段で常温から500℃～600℃までを誘導加熱で予加熱する
- 1分で700℃くらいまで加熱し、950℃で6分ほど均熱する
- 従来昇温に1時間ほどかかっていたものが10分ほどで可能になる
- 誘導加熱炉は工場ではCO<sub>2</sub>を発生させず、電源のカーボンフリーが進めばCO<sub>2</sub>排出削減になる

- 大型のワークでも数秒で加熱ができる。連続炉で必要だった予加熱エリアの炉長が不要になり省スペースにもなる
- 熱処理の誘導加熱は雰囲気炉ではないので、高温になると放射熱損を抑えにくい
- 対象物だけを加熱するので(誘導電流による自己発熱)熱ロスがなく、作業環境が高温にならない
- また2004年ごろから浸炭熱処理に誘導加熱より高周波焼入れが使われるケースが増えた
- 作業環境(暑熱環境)の改善に貢献する。あるケースで浸炭焼入れを高周波焼入れに変更すると使用電力が60%程度に抑えられた
- 浸炭をガスで行う必要がある場合や、真空浸炭で抵抗炉を使用する場合に、常温からではなく、目的温度近くまでを高周波誘導加熱を用い、そのあとを各方式で処理すること効率の改善になる

誘導加熱による高効率化における3つの柱

- (1) 効率の悪い発振器の置き換え(真空管式→IGBT 式):65%→95%に  
中小において投資が進まない→補助金の活用
  - (2) 誘導式加熱の拡大普及:適用可能な工業炉の置き換え
  - (3) ハイブリッド化の導入のための実験の促進:設備検討に必要、他形式炉との協同  
→補助金の活用
- (1)(2)はメーカー、ユーザーの1対1の取り組みでやりやすいが、(3)は他メーカーとの共同が必要になりコストがかかる

#### (7) 抵抗加熱での CN 対応

- 抵抗加熱のロスはもともと少なく、10%程度。省エネを進めても数%程度の効果が得られるかどうか
- 現状では電力のグリーン化が課題になっている

### 2-1-3. 燃焼加熱式

#### (1) 燃焼式が必要な電気炉

- 鉄・非鉄系の炉は燃焼式がほとんど
- その他無機関係は電気炉もある。例えば電子部品の素材の焼成炉では温度分布の均一性が要求され、ヒーター加熱の制御性の良さが必要になる。要求雰囲気の違いによる加熱方式の選択もある
- セラミック焼成のユーザー様で燃焼式と電熱式両方を使われている会社様もある
- 燃焼が必要なものとして大型炉があげられる。10MW 規模になると特高が必要になり、電力供給・受電設備が必要になり、ハードルが高い。現状だとインフラ整備に(電力会社が)3から5年かかるのが通常と聞いた。
- プロセスとして燃焼が必要という例としては、
  - 高温(1800℃など)のセラミックス焼成があると聞いている。
  - また大型炉等で急速加熱時に大熱量が必要になる場合も電化が難しい。
  - 雰囲気炉でも一部燃焼が必要な可能性がある。

#### (2) 燃焼炉の電気炉転換

- 電気炉転換で CN が進むためには、転換により増える電力も含めてカーボンフリー電力の供給ができるようになるのかは重要な課題
  - アルミの溶解保持炉は電気炉の適用も可能である。アルミ熱処理炉の時効処理は電化しやすいが、溶体化処理で急速加熱が必要な場合には燃焼が適している。(そういった場合でも誘導加熱炉の適用の可能性はある)
- 国内では電気代が高いので、燃焼式のニーズが高い
- しかし、海外の電気代の安い国(東南アジア、中国など)では電気式の要望が多い
- ランニングコストの影響が強い
- 国内の燃焼炉ユーザーで電気式への転換を考えられるケースでは、職場環境の改善を目的とするケースがある(幅広い業種でのニーズ)

- ・ 燃焼式から誘導炉に転換された例は過去にあった(熱処理用炉)
- ・ 燃焼炉から転換を希望されるユーザーは少ない。真空抵抗式はプロセス的に電気式がほとんど(溶解炉で、大型炉では燃焼式もあるが、中小型ではプロセス的に燃焼式は少ない)

### (3) 燃焼炉→誘導加熱炉の改善事例

- ・ キュボラを誘導加熱炉に転換
  - CO<sub>2</sub> 削減につながるが、電力会社の電力 CO<sub>2</sub> 排出原単位の影響を大きく受ける。
  - 現在の排出係数での試算ではキュボラから電気炉への転換での排出量削減が十数%にしかない →グリーンエネルギーであれば4割削減(工場全体での削減)になる事例もある。
  - 特に現在の高騰で約2倍になる事例もある  
※設備補助のメリットはあるが、操業コストの影響が下がらない限りユーザーマインドは向上しない
- ・ 昔から燃焼炉を使用しているメーカーは誘導加熱への置き換えに消極的なケースが多い。(材料の変更や図面の変更に不安がある)←試験による後押し

## 2-1-4. 水素・アンモニアへの対応

### (1) 【水素】

- ・ 水素燃焼は、本社工場にテスト炉を所有しており、自社にて研究開発をしている
- ・ 客先より素材を提供していただき、テスト炉で加熱して素材影響等の試験を行い評価している。
- ・ 大手企業、中小でも大手を中心に、導入まで進むことはまだ少ないが試験依頼は増えてきている。中小は様子見のユーザーが多い。
- ・ CN 対応として水素、アンモニア、メタネーションの手法がある
  - バーナーも実用化されており、テスト依頼も多くなっている。バーナー以外の機器類も徐々に開発が進んできている。大型炉に対応する機器が揃うとエンジニアリングがしやすくなる
  - 普及にはインフラ・供給体制の確立も必要。水素製造ができる地域などは進みやすいか
  - 早ければ数年後にはテスト炉の導入・運用が始まるのではないか。大型で30年くらいが期待できそう
- ・ 水素燃焼に関しては、基盤技術は確立に近い段階にある。
- ・ NO<sub>x</sub>発生はあり得るが、窒素素元が空気中で、火炎温度が上がらなければ NO<sub>x</sub>が抑えられることが分かっており、水素と空気の混合を制御し、緩慢な燃焼になるようにすることで発生を抑えるバーナーが販売されている

### (2) 【アンモニア】

- ・ NEDO 補助金による技術開発中で、製品化はまだできていない
- ・ アンモニア燃焼については NEDO 先導研プログラムに参画しており、現在詳細に話すことはできない
- ・ まだハードルが高い。しかし、水素の数年(1・2年程度)の遅れで進んでいくと予想される。水素よりは扱いやすい(液化温度、燃焼速度など)ので、安全性(毒性など)の課題がクリアされれば普及しやすい。先導研で低 NO<sub>x</sub>化も進めておりめどが立ってきている
- ・ LNG 設備の流用が可能という報告もあるので将来性は高いと考えている
- ・ 普及にはバルブ類等付帯機器類の大型化が必要である
- ・ バーナーは消耗品ではないので、燃料転換などの理由がなければ更新することはほとんどない
- ・ 燃焼時の NO<sub>x</sub> 発生、未燃アンモニアの二つの課題があり、両方を同時に抑える燃焼技術はハードルが高く、燃焼でいずれかを抑えて、後段で残りを取り除くといった方法も選択肢のひとつ

- 未燃アンモニアの処理は規制・規模などの理由から工業炉レベルでの後段での除去対応は難しい。NO<sub>x</sub>は脱硝設備メーカーがあり、現状の技術でも対応が可能と考える。ただし、一般的に工業炉は脱硝設備を有しておらず、設備コストアップに繋がる
- アンモニアは燃料中の N が NO<sub>x</sub>源となる。バーナー形状の工夫である程度抑えられるようになってきており技術開発が進められている(NEDO 先導研究)
- 投資の際の補助金、及び、燃料コストの低下が普及に影響する

### (3) 水素・アンモニアの供給・取り扱い・普及に向けた課題

- 既存の化石燃料は取り扱いが JIS(JISB8415)で規格化されている。水素・アンモニアはまだで、普及に当たっては規格化が必要。現在日本工業炉協会が中心となって規格化・ガイドライン策定を検討していると伺っている
- 現状水素バーナーを使われている会社様では個社の安全基準・ルールを適用されており各社各様で、このためメーカーも各社対応が必要となっている
- 普及は混焼式の導入から徐々に進み始め、混焼率のアップで進んでいくと考えられる
- (アンモニア)30年ころからといってもすぐに全体が置き換わることはないであろう。試験炉の導入等からスタートし、従来燃料との混焼から徐々に始まり50年までには100%を目指して進んでいくと考えられる。
- 技術の社会実装・燃料供給の面では、国がカーボンニュートラル構想や値差補填の検討でバックアップ体制を敷いているので、20年代後半から30年にかけてインフラは同時的に入り始めると思われる。工業炉での普及はこれ以降になると考えられる。
- 30年時点での広がりとは限定的と考えられる。アンモニアの30年における政府供給目標は300万トン/年となっているが、石炭火力の混焼への供給を前提とした量である
- (株)JERA、(株)IHIによる碧南火力発電所での実証事業では100万kW級の20%混焼をターゲットにしている。1基で50万トン/年のアンモニアが必要になり、6基分に当たる。国の目標の2030年度混焼目標1%をアンモニアで賄うとすると、20%混焼が訳8基必要になり、計算上300万トン/年では不足する。さらに供給可能という説もあるが、発電以外に回る量は限定的になると思われる。このため、工業炉など他産業における燃料用途でのアンモニア普及は徐々に進むと考えるのが妥当であろう

## 2-1-5. 工業炉のCN対応

### (1) CN 対応技術

- 省エネ・生産性向上の取り組みとして処理能力のアップ、原単位を下げる設計・開発
  - 1 バッチ処理量を上げて原単位を下げる
  - 同じ容積で損失を変えずに 1 回の処理量を上げることで、相対的に損失量を下げることで原単位を下げるのが可能になる
- 工業炉はユーザーのプロセスに合わせた一品設計になるので、カタログスペック的に効率向上割合を数値化するのは難しい

### (2) 工業炉の効率向上、CN対応についてのユーザーの反応

- CN 対応・省エネの考え方でのユーザーの要求は強くない
- 一方フットプリントの要求はある。工場環境影響の評価という観点と思われる。それに対応すると結果的に生産性が上がり省エネ・CN 対応につながっていると考えている
- 導入の際にユーザーから効率アップの要求は必ずある
- 以前よりはコストアップしても CO<sub>2</sub> 削減を考えるユーザーは増えたが、投資実行まで行く例は少ない
- 記事の例であれば投資コストアップは全体としてみればそう大きくはない
- その他、断熱材メーカーの開発する新材料の採用(黒鉛→カーボンコンポジット)などの取り組みを進めている。(断熱材コストアップは数割程度)
- 省エネ補助を使う例は少ない。認知されていない面があると思われる。設備導入に1年以上かかるケースがあり、年度をまたぐことが多いのも理由としてある可能性がある
- 今後の新炉・更新炉の導入の際には平均的に効率10-15%アップ程度が見込まれる
- バッチ式炉は立ち上げ、立ち下げがとれない、そのロスが発生する

- ・ 冷却に回った熱は温度が低くなかなか利用できない。そういったところから改善は少ないと考えられる
- ・ 連続式にすることでの効率アップはあるが、製品の昇温・降温の温度履歴が大切な場合もあり、連続式に向かないお客様もある
- ・ IoT・DS 技術による操業の安定化(低効率な操業をなくす)。様々なデータを集め、データ処理し、各回の操業実績を見える化し、平均的な操業状態から外れる操業の見直し、高効率な操業の要因分析を行い応用することで効率を上げる、など。

## 2-1-6. 使用している工業炉

### (1) 使用している工業炉

- ・ 焼入れを中心に、ロウ付け、鍛造前加熱などの受託加工を受けている
- ・ 受託加工用の設備も自前製作で、600～700kW の加熱炉を12台所有
- ・ 世の中に売る前に性能確認を行う。最新鋭のものがある

### (2) 工業炉を使用する立場での省エネの取り組み

- ・ 原単位を下げる取り組みを進めている
  - 処理量を上げて原単位を下げる
  - 道具材を軽くして熱損失を下げる  
道具材とは、焼成対象材を載せる台、器などで、軽くする＝熱容量を下げることで持ち出し熱量を下げて原単位を下げる  
SiC 製のセッタ、さや、送りロールなど(軽量化した製品))も製造しており、工業炉事業部に供給を行っている

## 2-1-7. 普及に向けた施策

### (1) 全般

- ・ 水素・アンモニアを使用するにあたっては、工場近隣の住民・企業への安全性の理解促進のための官民共同の啓蒙活動が必要になると考える
- ・ 大型設備への適用に当たっては、小型試験からパイロット試験が必要になるケースが考えられる(5～10倍程度はスケールアップ時の挙動予測が可能)。大型設備への普及促進の際には必要なステップである

### (2) 導入補助について

- ・ ユーザーの意識として、補助があるからまだ使える炉を置き換えようという考えは現実的ではないであろう(補助 100%であれば別かもしれない)
- ・ 老朽化等で更新が必要になった際に補助を利用して CN 化を進めるという流れはありうる
- ・ どちらかというと、ヒーターの置き換えの際の省エネヒーター導入に対する補助の活用の流れが中心であろう
- ・ 熱ロス削減が重要なので、断熱を進めることが決め手になる。しかし断熱材は消耗品なのでユーザーのランニングコストにもかかってくるので費用を抑えたいという意識も強い。高性能断熱材のコストアップ分の補助があるだけでもユーザーの導入意欲が上がるのではないか
- ・ 炉の更新は 30 から 40 年と思う。老朽化で更新となった場合に、同型・同規模での更新になることは少ない。このため導入時の効果の算定で、効率比較・省エネ率算定は難しいなどの理由から、補助金を使っの省エネ炉の導入に難しさがある

### (3) 導入補助以外の課題・方策

- ・ 現在経済産業省で、値差補助の議論がされているが、これが発電事業以外に、工業炉を使用する事業にも展開されることを期待する。(工業炉での普及のめどが立てば検討していただけたらと考えている)
  - 「電気代を下げる」「電力 CO2 排出原単位を下げる(再生エネルギー等の低炭素

電力」がセットにならないと転換は進まない

- 設備導入補助は前提としたうえでランニングコストを下げる必要がある
- 電力代の変動によるコスト増大 → 製品への価格転嫁できずブレーキがかかっている

#### 2-1-8. 研究開発における産官学の協業

- 自社製品はニッチな領域にあり、官学との協同というのはあまりないが、材料開発などで共同開発したりするケースはある
- 研究室では材料系の研究開発で大学と共同研究している（現在していない）
- 学際での誘導加熱に取り組む研究者が少ない。自動車分野、電機分野などの取り組みがあるが、誘導加熱全般の原理から含めたような研究が見られない（1960年代の情報が最新のまま）
- 学を使うケースはあまりない。あまりマッチする世界がない
- 低温排熱の回収技術などが出れば協同があり得る
- 部分的には高度化したところはある、例えば発振器の技術進化による周波数拡大などが進んだ。（旧来はサイリスタの数kHz 以下、真空管の50kHz 以上の間が使えなかった）
- 半導体の場合、以前はサイリスタしかなかったが、今は IGBT(120kHz 程度以下)、MOS-FET(400kHz 程度以下)などが使えるようになり、高周波領域まで半導体が使え、真空管の周波数帯でも半導体発振器が使用できるようになった
- 最適な周波数はワークの材質によって決まる。銅・アルミなどは低い周波数が適する。ステンレスは高い周波数が適している。鉄は特殊で広い範囲が使えるが、おおむね大きなワークは低い周波数、小さなワークは高い周波数が適する。周波数による電流の流れる深さが変わる（表皮効果、skin effect）ので、製品の仕様に合わせた最適化を行う
- 古くから断熱材の性能アップの必要性が言われている
- 極論すると断熱強化のレベルを超えるような、温度域・雰囲気に寄らない、薄くても（例えば 10 cm）常温まで断熱可能な圧倒的な性能を持つ新素材の断熱材の開発を進めるのが有効ではないかと考える

## 2-2. 令和 3 年度シミュレーターの内容確認

令和 3 年度シミュレーターは、令和 3 年度内外一体の経済成長戦略構築にかかる国際経済調査事業(工業炉のカーボンニュートラル対応に向けた動向調査)で作成されており、報告書[1]に記載がある。

表計算ソフトウェアのシート1枚で構成されており、定義した 60 分類の工業炉を 1 行ずつに配置して CO<sub>2</sub> 排出係数、CO<sub>2</sub> 排出量の計算が可能になっている(図表 2-1)。図表 2-2に 1、2行目の項目を、図表 2-3に A～F 列の工業炉分類を、図表 2-4に使用する燃料種別 CO<sub>2</sub> 排出原単位を示す。



図表 2-2 令和 3 年度シミュレーター項目

| 列  | 1 行目             | 2 行目                     |
|----|------------------|--------------------------|
| A  | 新推計・シミュレーション方法   | No                       |
| B  |                  | 熱源                       |
| C  |                  | 加熱方式                     |
| D  |                  | 用途                       |
| E  |                  | 素材                       |
| F  |                  | 日本標準商品分類における工業炉          |
| G  | 基本情報             | 炉種                       |
| H  |                  | 使用年数                     |
| I  |                  | 年間稼働時間(h)                |
| J  |                  | 設備容量(kW)                 |
| K  |                  | 設備容量(MJ/h)               |
| L  |                  | 主要最高温度(℃)                |
| M  |                  | 年間処理量(t-処理量)             |
| N  | アンケート回答工場の電気炉原単位 | 電力原単位(kWh/t-処理量)         |
| O  |                  | CO2 換算原単位 A(t-CO2/t-処理量) |
| P  |                  | 年間電力量(kWh)               |
| Q  |                  | CO2 換算原単位 B(t-CO2/t-処理量) |
| R  | アンケート回答工場の燃焼炉原単位 | 燃料原単位(MJ/t-処理量)          |
| S  |                  | CO2 換算原単位 C(t-CO2/t-処理量) |
| T  |                  | 燃料(MJ)                   |
| U  |                  | A 重油(L)                  |
| V  |                  | 灯油(L)                    |
| W  |                  | 軽油(L)                    |
| X  |                  | LPG(kg)                  |
| Y  |                  | 都市ガス(m3)                 |
| Z  |                  | LNG(kg)                  |
| AA |                  | 石炭(kg)                   |
| AB |                  | コークス炉ガス(m³)              |
| AC |                  | 高炉ガス(m³)                 |
| AD |                  | 転炉ガス(m³)                 |
| AE |                  | CO2 換算原単位 D(t-CO2/t-処理量) |
| AF | 省エネ型炉原単位         | 誘導加熱(コイル最適化、半導体化)        |
| AG |                  | 金属溶解                     |
| AH |                  | 断熱強化                     |
| AI |                  | 廃熱回収                     |
| AJ |                  | 原材料予熱                    |
| AK |                  | 省エネ型炉原単位(t-CO2/t-処理量)    |

図表 2-3 本調査における工業炉分類

| No | 熱源 | 加熱方式   | 用途  | 素材 | 日本標準商品分類における工業炉                                                              |
|----|----|--------|-----|----|------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | 燃料 | 直火式    | 溶解  | 鉄  | キューボラ                                                                        |
| 2  | 燃料 | 直火式    | 溶解  | 非鉄 | 非鉄金属反射炉、非鉄金属るつぼ炉                                                             |
| 3  | 燃料 | 直火式    | 溶解  | 窯業 | ガラス溶解炉                                                                       |
| 4  | 燃料 | 直火式    | 加熱  | 鉄  | 金属均熱炉、鉄鋼圧延加熱炉、鉄鋼鍛造加熱炉、焼きばね炉                                                  |
| 5  | 燃料 | 直火式    | 加熱  | 非鉄 | 非鉄金属均熱炉、非鉄金属圧延加熱炉、非鉄金属鍛造加熱炉、焼きばね炉                                            |
| 6  | 燃料 | 直火式    | 加熱  | 窯業 | セメント焼成炉、石灰焼成炉、陶磁器焼成炉、耐火物焼成炉、その他焼成炉、ガラス熱処理炉、その他の窯業用炉                          |
| 7  | 燃料 | 直火式    | 熱処理 | 鉄  | 焼ならし炉、焼入炉、焼戻炉、焼なまし炉                                                          |
| 8  | 燃料 | 直火式    | 熱処理 | 非鉄 | 焼入炉、焼戻炉、焼なまし炉                                                                |
| 9  | 燃料 | 直火式    | 熱処理 | 窯業 | —                                                                            |
| 10 | 燃料 | 直火式    | 乾燥他 | 鉄  | 焼付乾燥炉、その他の乾燥炉                                                                |
| 11 | 燃料 | 直火式    | 乾燥他 | 非鉄 | その他の乾燥炉                                                                      |
| 12 | 燃料 | 直火式    | 乾燥他 | 窯業 | 鑄型乾燥炉、中子乾燥炉、窯業用乾燥炉、その他の乾燥炉                                                   |
| 13 | 燃料 | 間接加熱式  | 溶解  | 鉄  | —                                                                            |
| 14 | 燃料 | 間接加熱式  | 溶解  | 非鉄 | 非鉄金属るつぼ炉                                                                     |
| 15 | 燃料 | 間接加熱式  | 溶解  | 窯業 | —                                                                            |
| 16 | 燃料 | 間接加熱式  | 加熱  | 鉄  | ろう付炉                                                                         |
| 17 | 燃料 | 間接加熱式  | 加熱  | 非鉄 | ろう付炉                                                                         |
| 18 | 燃料 | 間接加熱式  | 加熱  | 窯業 | —                                                                            |
| 19 | 燃料 | 間接加熱式  | 熱処理 | 鉄  | 焼ならし炉、焼入炉、焼戻炉、焼なまし炉、浸炭炉、窒化炉、浸炭窒化炉、軟窒化炉、その他の表面処理炉、黒化炉                         |
| 20 | 燃料 | 間接加熱式  | 熱処理 | 非鉄 | 焼入炉、焼戻炉、焼なまし炉                                                                |
| 21 | 燃料 | 間接加熱式  | 熱処理 | 窯業 | ガラス熱処理炉                                                                      |
| 22 | 燃料 | 間接加熱式  | 乾燥他 | 鉄  | その他の乾燥炉                                                                      |
| 23 | 燃料 | 間接加熱式  | 乾燥他 | 非鉄 | その他の乾燥炉                                                                      |
| 24 | 燃料 | 間接加熱式  | 乾燥他 | 窯業 | その他の乾燥炉                                                                      |
| 25 | 電気 | 抵抗加熱式  | 溶解  | 鉄  | 鉄鋼真空抵抗溶解炉                                                                    |
| 26 | 電気 | 抵抗加熱式  | 溶解  | 非鉄 | 非鉄金属るつぼ炉、非鉄金属真空抵抗溶解炉                                                         |
| 27 | 電気 | 抵抗加熱式  | 溶解  | 窯業 | ガラス溶解炉                                                                       |
| 28 | 電気 | 抵抗加熱式  | 加熱  | 鉄  | 金属均熱炉、ろう付炉、その他の金属用加熱炉                                                        |
| 29 | 電気 | 抵抗加熱式  | 加熱  | 非鉄 | 非鉄金属均熱炉、ろう付炉、その他の金属用加熱炉                                                      |
| 30 | 電気 | 抵抗加熱式  | 加熱  | 窯業 | —                                                                            |
| 31 | 電気 | 抵抗加熱式  | 熱処理 | 鉄  | 焼ならし炉、焼入炉、焼戻炉、焼なまし炉、浸炭炉、窒化炉、浸炭窒化炉、軟窒化炉、バス炉、その他の表面熱処理炉、めっき炉、黒化炉、拡散炉、その他の表面処理炉 |
| 32 | 電気 | 抵抗加熱式  | 熱処理 | 非鉄 | 焼きならし炉、焼入炉、焼戻炉、焼なまし炉、その他の表面熱処理炉、その他の表面熱処理炉                                   |
| 33 | 電気 | 抵抗加熱式  | 熱処理 | 窯業 | ガラス熱処理炉、その他の窯業用炉                                                             |
| 34 | 電気 | 抵抗加熱式  | 乾燥他 | 鉄  | その他の乾燥炉                                                                      |
| 35 | 電気 | 抵抗加熱式  | 乾燥他 | 非鉄 | その他の乾燥炉                                                                      |
| 36 | 電気 | 抵抗加熱式  | 乾燥他 | 窯業 | その他の乾燥炉                                                                      |
| 37 | 電気 | アーク加熱式 | 溶解  | 鉄  | アーク炉、鉄鋼真空アーク溶解炉                                                              |
| 38 | 電気 | アーク加熱式 | 溶解  | 非鉄 | 非鉄金属アーク炉、非鉄金属真空アーク溶解炉                                                        |
| 39 | 電気 | アーク加熱式 | 溶解  | 窯業 | —                                                                            |
| 40 | 電気 | アーク加熱式 | 加熱  | 鉄  | —                                                                            |
| 41 | 電気 | アーク加熱式 | 加熱  | 非鉄 | —                                                                            |
| 42 | 電気 | アーク加熱式 | 加熱  | 窯業 | —                                                                            |
| 43 | 電気 | アーク加熱式 | 熱処理 | 鉄  | —                                                                            |
| 44 | 電気 | アーク加熱式 | 熱処理 | 非鉄 | —                                                                            |
| 45 | 電気 | アーク加熱式 | 熱処理 | 窯業 | —                                                                            |
| 46 | 電気 | アーク加熱式 | 乾燥他 | 鉄  | —                                                                            |
| 47 | 電気 | アーク加熱式 | 乾燥他 | 非鉄 | —                                                                            |
| 48 | 電気 | アーク加熱式 | 乾燥他 | 窯業 | —                                                                            |
| 49 | 電気 | 誘導加熱式  | 溶解  | 鉄  | 鉄鋼誘導炉、鉄鋼真空誘導溶解炉                                                              |
| 50 | 電気 | 誘導加熱式  | 溶解  | 非鉄 | 非鉄金属誘導炉、非鉄金属真空誘導溶解炉                                                          |
| 51 | 電気 | 誘導加熱式  | 溶解  | 窯業 | —                                                                            |
| 52 | 電気 | 誘導加熱式  | 加熱  | 鉄  | 鉄鋼圧延加熱炉、焼き飯め炉、ろう付炉                                                           |
| 53 | 電気 | 誘導加熱式  | 加熱  | 非鉄 | 非鉄金属圧延加熱炉、非鉄金属鍛造加熱炉、ろう付炉                                                     |
| 54 | 電気 | 誘導加熱式  | 加熱  | 窯業 | —                                                                            |
| 55 | 電気 | 誘導加熱式  | 熱処理 | 鉄  | 焼ならし炉、焼入炉、焼戻炉、焼なまし炉                                                          |
| 56 | 電気 | 誘導加熱式  | 熱処理 | 非鉄 | —                                                                            |
| 57 | 電気 | 誘導加熱式  | 熱処理 | 窯業 | —                                                                            |
| 58 | 電気 | 誘導加熱式  | 乾燥他 | 鉄  | —                                                                            |
| 59 | 電気 | 誘導加熱式  | 乾燥他 | 非鉄 | —                                                                            |
| 60 | 電気 | 誘導加熱式  | 乾燥他 | 窯業 | —                                                                            |

図表 2-4 燃料種別 CO<sub>2</sub> 排出原単位

|         | CO <sub>2</sub> 排出原単位<br>t-CO <sub>2</sub> /MJ | CO <sub>2</sub> 排出原単位<br>t-CO <sub>2</sub> /kWh |    |
|---------|------------------------------------------------|-------------------------------------------------|----|
| 電力      | 0.0001258                                      | 0.000453                                        | ※1 |
| A 重油    | 0.0000697                                      | 0.00271                                         |    |
| 灯油      | 0.0000682                                      | 0.00249                                         | ※2 |
| 軽油      | 0.0000678                                      | 0.00258                                         |    |
| LPG     | 0.0000599                                      | 0.00300                                         |    |
| 都市ガス    | 0.0000556                                      | 0.00222                                         |    |
| LNG     | 0.0000494                                      | 0.00270                                         |    |
| 石炭      | 0.0000893                                      | 0.00233                                         |    |
| コークス炉ガス | 0.0000462                                      | 0.00085                                         |    |
| 高炉ガス    | 0.0001021                                      | 0.00033                                         |    |
| 転炉ガス    | 0.0001567                                      | 0.00118                                         |    |

※1:電気事業者別排出係数(特定排出者の温室効果ガス排出量算定用)－R2年度実績－ [2]

※2:算定・報告・公表制度における算定方法・排出係数一覧 [3]

## 2-2-1. 計算式

本シミュレーターはアンケート調査を行い、回答のあった工業炉 1 台ごとの計算を行うように作成されており、次のように計算を行う。

- ・ アンケートで工業炉分類、基本情報、電気炉または燃焼炉原単位、将来的に導入を考えている省エネ炉形式を入手
- ・ 対応した工業炉分類の行に基本情報、電気炉または燃焼炉原単位を入力
- ・ 経産で得られる現在の原単位と、それに将来導入を考える省エネ型形式に対応する AF 列～AK 列の効率を掛け合わせ、将来の原単位を求める
- ・ 年間の処理量を掛け合わせ省エネ導入による CO<sub>2</sub> 削減量を求める。

すなわち、アンケートで得た現存する工業炉の1台ごとの情報を基に、逐一計算を行い、総量を求めるようになっている。炉原単位の計算式は次の通りとなる。

$$e_{Ek} = \frac{Pw_k \times e_E}{M}$$

$$= \frac{Pw_k \times 3.6 \times 38200 \times 2.62}{M} \dots\dots\dots (1)$$

$e_{Ek}$  : 電気炉ごとの炉原単位 (t-CO<sub>2</sub>/t-処理量)

$Pw_k$  : 電気炉ごとの年間電力消費量 (kWh/年)

$M$  : 年間処理量 (t-処理量/年)

$e_E$  : 電力[受電端]CO<sub>2</sub> 排出原単位(t-CO<sub>2</sub>/kWh)

$k$  : 加熱方式を表す添字

$$e_{Fk} = \frac{Pw_F \times e_F}{M}$$

$$= \frac{Pw_F \times p \times 2.62}{M} \dots\dots\dots (2)$$

$e_{Fk}$  : 燃焼炉ごとの炉原単位 (t-CO<sub>2</sub>/t-処理量)

$Pw_F$  : 年間燃料消費量 ((燃料単位)/年)

$p$  : 燃料種ごとの一次エネルギー換算係数(kl/kl)

$M$  : 年間処理量 (t-処理量/年)

$e_F$  : 燃料 CO<sub>2</sub> 排出原単位(t-CO<sub>2</sub>/燃料単位)

省エネ型炉の原単位を求めるには $e_{Ek}$ 、 $e_{Fk}$ にさらに省エネ比率をかける。

$$e_{ck} = e_{xk} \times e_c \dots\dots\dots (3)$$

$e_{ck}$  : 省エネ型炉の原単位 (t-CO<sub>2</sub>/t-処理量)

$e_{xk}$  : 電気炉もしくは燃焼炉の原単位 (t-CO<sub>2</sub>/t-処理量)

$e_c$  : 省エネ比率 (%)

## 2-3. 統計に基づくシミュレーターの作成

### 2-3-1. 計算で使用する定数

本調査では工業炉のカーボンニュートラル対応を検討するために、現在から 2050 年までの CO2 排出量の推計が必要である。このためには、アンケート結果を必要とする、個々の工業炉の情報による推計方法を行うためには、国内の工業炉を代表し得る相当数の工業炉情報が必要になり、さらに計算が大規模になる。なお、以下の定数は年度別シミュレーションにおいて変化しないものとして扱うが、ケースごとに変更が可能としている。

#### (1) 工業炉の分類と各種定数

そこで、ここでは平成 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 [4]P.57 による分類 7 種類のその他を燃焼式と電気式に分割し、8 種類で計算を行うこととした。

図表 2-5 本調査における工業炉の分類と定数

| 加熱方式    | 総台数    | 処理量(t/台) | 1 台当たり一次エネルギー換算原単位 (kJ/t) | 1 次エネルギーCO2 排出係数 |
|---------|--------|----------|---------------------------|------------------|
| 直火式     | 10,488 | 13,150   | 0.143                     | 2.62             |
| 間接加熱式   | 7,358  | 13,375   | 0.166                     | 2.62             |
| 熱風式     | 3,670  | 3,801    | 0.170                     | 2.62             |
| その他(燃焼) | 1,744  | 5,194    | 0.223                     | 2.62             |
| 抵抗加熱式   | 6,055  | 4,067    | 0.401                     | 2.62             |
| アーク加熱式  | 249    | 34,369   | 0.178                     | 2.62             |
| 誘導加熱式   | 6,558  | 4,976    | 0.122                     | 2.62             |
| その他(電気) | 872    | 5,194    | 0.223                     | 2.62             |

図表 2-5における処理量は H26 年度調査 [4]のアンケート調査結果より独自に集計した数値である。それ以外の数値は [4]に準ずる。原単位については単位を統一するため一次エネルギー換算原単位とした。

#### (2) 各加熱方式別省エネ型炉に関わる定数

各加熱方式における省エネ型炉の定義は令和 3 年度調査 [1]における省エネ型炉定義に従った。

図表 2-6 加熱方式別省エネ型炉原単位

| 加熱方式    | 省エネ型炉原単位比率(%)     |      |      |      |       |
|---------|-------------------|------|------|------|-------|
|         | 誘導加熱(コイル最適化、半導体化) | 金属溶解 | 断熱強化 | 廃熱回収 | 原材料予熱 |
| 直火式     |                   |      | 80%  | 62%  | 80%   |
| 間接加熱式   |                   |      | 80%  | 62%  |       |
| 熱風式     |                   |      | 80%  | 62%  |       |
| その他(燃焼) |                   |      | 80%  | 62%  | 80%   |
| 抵抗加熱式   |                   |      | 80%  |      |       |
| アーク加熱式  |                   |      |      |      | 80%   |
| 誘導加熱式   | 64.8%             |      |      |      |       |
| その他(電気) |                   |      | 80%  |      |       |

これを元に本調査で仮定した省エネ型炉省エネ型炉原単位比率と初年度存在比率を図表 2-8に示す。原単位比率は A をベースとし、令和 3 年度調査の定義から 2 種類(B、C)設定し、存在比率は計算の初年度の数値として仮に定めた。初年度以降の比率は本試算の重要なパラメ

ーターであり、2-3-2で変数として解説する。

図表 2-7 本調査で定義した省エネ型炉

| 本調査での省エネ型炉定義 |     |                    |             |
|--------------|-----|--------------------|-------------|
| 加熱方式         | ベース | 小効率改善<br>(比較的改造容易) | 最高効率改善      |
|              | A 型 | B 型                | C 型         |
| 直火式          | －   | 断熱強化×廃熱回収          | B×原材料予熱     |
| 間接加熱式        | －   | 断熱強化×廃熱回収          | (Bと同じ)      |
| 熱風式          | －   | 断熱強化×廃熱回収          | (Bと同じ)      |
| その他(燃烧)      | －   | 断熱強化×廃熱回収          | B×原材料予熱     |
| 抵抗加熱式        | －   | －                  | 断熱強化        |
| アーク加熱式       | －   | －                  | 原材料予熱       |
| 誘導加熱式        | －   | －                  | コイル最適化、半導体化 |
| その他(電気)      | －   | －                  | 断熱強化        |

図表 2-8 本調査で定義した省エネ型炉原単位比率と初年度存在比率

| 加熱方式    | 本調査での省エネ型炉定義と<br>原単位比率(%) |                                |            | 本調査で仮定した 2020 年度<br>存在比率 |                                |            |
|---------|---------------------------|--------------------------------|------------|--------------------------|--------------------------------|------------|
|         | ベース                       | 小効率<br>改善<br>(比較的<br>改造容<br>易) | 最高効<br>率改善 | ベース                      | 小効率<br>改善<br>(比較的<br>改造容<br>易) | 最高効<br>率改善 |
|         | A 型                       | B 型                            | C 型        | A                        | B                              | C          |
| 直火式     | 100%                      | 49.6%                          | 39.7%      | 70%                      | 20%                            | 10%        |
| 間接加熱式   | 100%                      | 49.6%                          | 49.6%      | 70%                      | 20%                            | 10%        |
| 熱風式     | 100%                      | 49.6%                          | 49.6%      | 70%                      | 20%                            | 10%        |
| その他(燃烧) | 100%                      | 49.6%                          | 39.7%      | 70%                      | 20%                            | 10%        |
| 抵抗加熱式   | 100%                      |                                | 80.0%      | 60%                      |                                | 40%        |
| アーク加熱式  | 100%                      |                                | 80.0%      | 50%                      |                                | 50%        |
| 誘導加熱式   | 100%                      |                                | 64.8%      | 60%                      |                                | 40%        |
| その他(電気) | 100%                      |                                | 80.0%      | 90%                      |                                | 10%        |

### (3) 炉寿命

炉寿命は過去の調査研究において約 30 年とされている。今回のヒアリング調査でも同様の結果になっており、本試算においても 30 年を採用した。

炉寿命に達した際には、同加熱方式の省エネ最高効率型に転換する、もしくは加熱方式の燃烧式から電気式に転換することとした。この点に関しては2-3-2(2)、(3)で解説する。

## 2-3-2. 年度別計算で使用する変数

### (1) 加熱方式別処理量

加熱方式別処理量は台数×一台当たり処理量で得られる。8 種類の加熱方式別処理量の挿話が工業炉の総処理量となる。計算の考え方としては総処理量は一定として式を立てることとした。ただし、変動を加味できるように、排出 CO2 量計算の最終式で 2020 年度を 1 とする係数を掛け算することで変化を考慮できるようにした。ただし、本調査では変化を考慮した試算は行っていない。

$$M_k = N_k \times P_k \dots\dots\dots (4)$$

$M_k$  : 加熱方式別処理量(t/年)

$N_k$  : 加熱方式別工業炉台数(台)

$P_k$  : 加熱方式別 1 台当たりの年間処理量

$$M = m_{I,t} \times \sum_k M_k \dots\dots\dots (5)$$

$m_{I,t}$  : t 年度における処理量指数

## (2) 台数比率の変化 S 類型

ベース型(A)炉が炉寿命に達した時点で最高効率改善型に転換すると仮定して、加熱方式別省エネ型炉台数比率が変化するように計算した。この変化の台数変化を S 類型と呼ぶこととする。

なお、計算初年度に存在した C 型と区別するため、D 型の区分を作り、D 型の省エネ比率は C 型と同等とした。

$$ls = 1/Y \dots\dots\dots (6)$$

$ls$  : 1 年間に炉寿命に達する炉の比率

$Y$  : 炉寿命(30 年と仮定)

$$n_{kD,t} = n_{kD,t-1} + n_{k,t-1} \times (1 - ls) \dots\dots\dots (7)$$

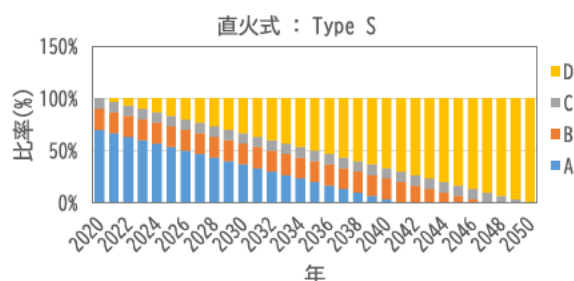
$$n_{kty,t} = n_{kty,t-1} - n_{kty,t-1} \times ls \dots\dots\dots (8)$$

$n_k$  : 加熱方式別台数比率

$n_{kD}$  : 加熱方式別 D 型省エネ型炉台数比率

$ty$  : 省エネ型を表す添字(A,B,C)

図表 2-9 S 類型の台数比率変化



## (3) 台数比率の変化 P 類型 燃焼式から電気式への転換計算

前項で述べたように処理量一定の考え方を採用したが、燃焼式から電気式への転換の考慮が必要である。このために次のように計算を行った。この台数変化を P 類型と呼ぶこととする。

- ・ 加熱方式の転換が発生するのは炉が寿命に達したときとする
- ・ すべて加熱方式への転換とする
- ・ 燃焼式のある形式から電気式のある形式への転換割合は期間中一定とする

前項の(6)、(8)式を使い、(7)の計算の代わりに次の計算を行う。

$$n_{k2,t} = n_{k2,t-1} + n_{k1,t-1} \times ls \times \alpha_{k1k2} \times \beta_{k1k2} \dots\dots\dots (9)$$

$\alpha_{k1k2}$  : 加熱方式 k1 から k2 への生産量変換係数

$\beta_{k1k2}$  : 加熱方式 k1 から k2 への台数変換割合

転換は 1 年間の燃焼式 k1 方式の炉寿命に達した台数のうちの一部が電気式 k2 方式に転換する。転換した際に、k1 での処理量と k2 での処理量が等しくなる必要があるので、1 台当たりの処理量が異なる。このため、(10)式が成り立つ必要があり  $\alpha$  を(11)式で定義する。

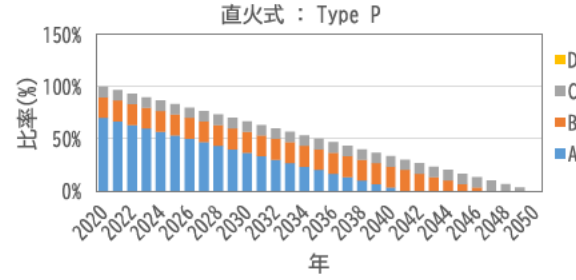
$$N_{k1} \times n_{k1,t} \times P_{k1,t} = N_{k2} \times n_{k2,t} \times P_{k2,t}$$

$$P_{k2,t} = \frac{N_{k1} \times n_{k1,t}}{N_{k2} \times n_{k2,t}} \times P_{k1,t} \dots\dots\dots (10)$$

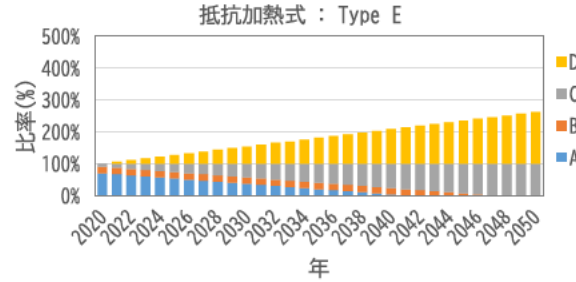
$$\alpha_{k1k2} = \frac{N_{k1} \times n_{k1,t}}{N_{k2} \times n_{k2,t}} \dots\dots\dots (11)$$

$\beta$  は加熱式 k1 方式から抵抗加熱式、アーク加熱式、誘導加熱式に転換する比率である。

図表 2-10 P 類型のk1方式台数比率変化



図表 2-11 P 類型の k2 方式台数比率変化(k1 の 50%が k2 に転換)

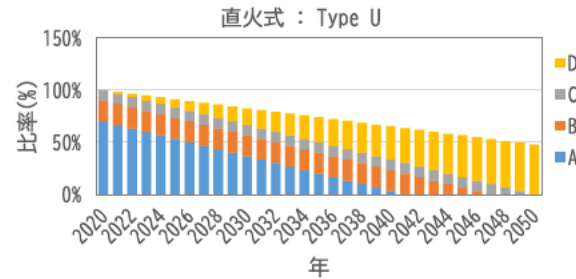


#### (4) 台数比率の変化 U 類型 一部燃焼式が残る

燃焼式加熱処理が必要となるプロセスが考えられるため、一定量は転換せず残す場合を U 類型とした。k1方式で転換せずに残す比率を $\gamma$ とすると、

$$\left. \begin{aligned} n_{k1,t} &= n_{k1,t-1} + n_{k1,t-1} \times (1 - ls) \\ n_{k2,t} &= n_{k2,t-1} + n_{k1,t-1} \times ls \times \alpha_{k1k2} \times \beta_{k1k2} \\ n_{kD,t} &= n_{kD,t-1} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} n_{kD,t-1} &> \gamma \\ n_{kD,t-1} &\leq \gamma \end{aligned} \dots(12)$$

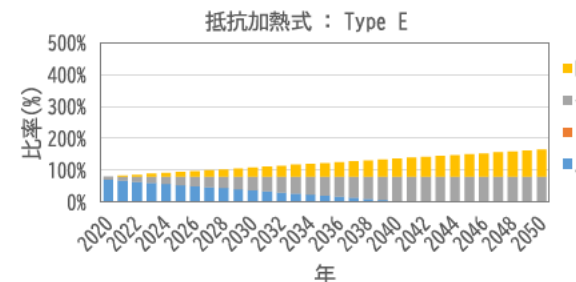
図表 2-12 U 類型の k1方式台数比率変化



#### (5) 台数比率の変化 E 類型 電気式専用の類型

電気式は高効率型が 1 種類のみで定義で、(9)式(12)式の実装が必要であるので、E 類型として定義した。

図表 2-13 E 類型の台数比率変化



## (6) 電源 CO2 排出係数の考慮

電源 CO2 排出係数の変化はどの電気式炉においても共通して適用される。このため、計算では(1)式  $e_E$  が変化するため、次式の  $e_{Epc}$  を定義し、全ての電気式炉の計算式に適用した。

$$e'_E = e_E \times e_{Epc} \quad (0 \leq e_{Epc} \leq 1) \dots\dots\dots(13)$$

## (7) 水素・アンモニア燃料転換の CO2 排出係数の考慮

水素およびアンモニアの排出係数の変化は燃焼炉の改造が必要となる。このため、各類型の改造を行った D 類の CO2 排出計算に適用することとした。計算では(2)式  $e_F$  が変化するため、次式の  $e_{Fpc}$  を定義し、燃焼式炉の改造後の D 類の計算式に適用した。

$$e'_F = e_F \times e_{Fpc} \quad (0 \leq e_{Fpc} \leq 1) \dots\dots\dots(14)$$

## 2-4. モデルケースと仮説構築

作成したモデルにより様々なケースを仮定してシミュレーションを行った。

### 2-4-1. [ケース 0:ベース] CO2排出原単位が 0 になる場合

電力[受電端]CO<sub>2</sub> 排出原単位および燃料 CO2 排出原単位が 0 になった場合は(1)式および(2)式から CO2 排出量が 0 となるのは自明であるので計算結果は省略する。

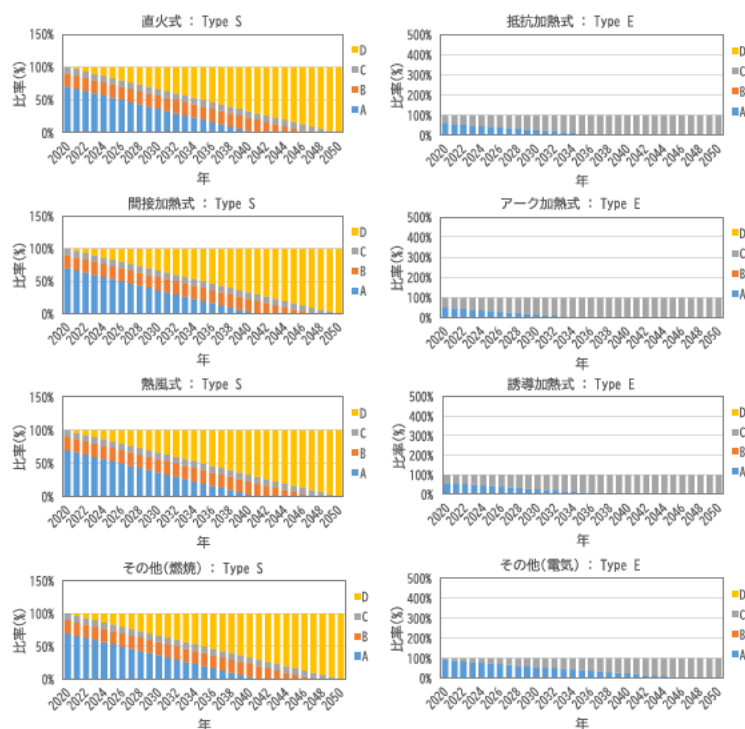
### 2-4-2. [ケース 1:ベース] 高効率型形式変化のみでの CO2 排出量変化

#### (1) 計算条件

図表 2-14 [ケース 1:ベース] 高効率型形式変化のみでの CO2 排出量変化の計算条件

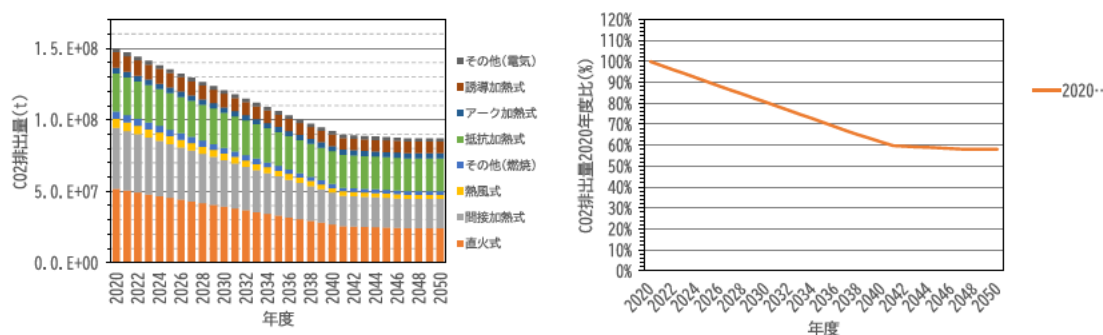
| 変数          |    | 変化形式         |          |         |           |            |             |
|-------------|----|--------------|----------|---------|-----------|------------|-------------|
| 電源 CO2 排出係数 |    | 2020 年度の値で一定 |          |         |           |            |             |
| 燃料転換        |    | 水素・アンモニア導入無し |          |         |           |            |             |
| 炉寿命         |    | 30 年         |          |         |           |            |             |
| 加熱式炉の存続     |    | -            |          |         |           |            |             |
| 加熱方式        | 類型 | ly           | $\gamma$ | 初年度存在割合 |           |            |             |
|             |    |              |          | ベース     | 小効率改善 (A) | 最高効率改善 (B) | 燃焼炉燃料転換 (C) |
| 直火式         | S  | 3.33%        | 48%      | 70%     | 20%       | 10%        | -           |
| 間接加熱式       | S  | 3.33%        | -        | 70%     | 20%       | 10%        | -           |
| 熱風式         | S  | 3.33%        | -        | 70%     | 20%       | 10%        | -           |
| その他(燃焼)     | S  | 3.33%        | -        | 70%     | 20%       | 10%        | -           |
| 抵抗加熱式       | E  | 3.33%        | -        | 60%     | -         | 40%        | -           |
| アーク加熱式      | E  | 3.33%        | -        | 50%     | -         | 50%        | -           |
| 誘導加熱式       | E  | 3.33%        | -        | 60%     | -         | 40%        | -           |
| その他(電気)     | E  | 3.33%        | -        | 90%     | -         | 10%        | -           |

図表 2-15 [ケース 1:ベース] 高効率型形式変化のみでの台数比率変化



## (2) 計算結果

図表 2-16 [ケース 1:ベース] 高効率型形式変化のみでの CO2 排出量変化の計算結果



## (3) 考察

効率アップだけでの排出量削減率は2030年度において約20%、2050年度において42%であった。

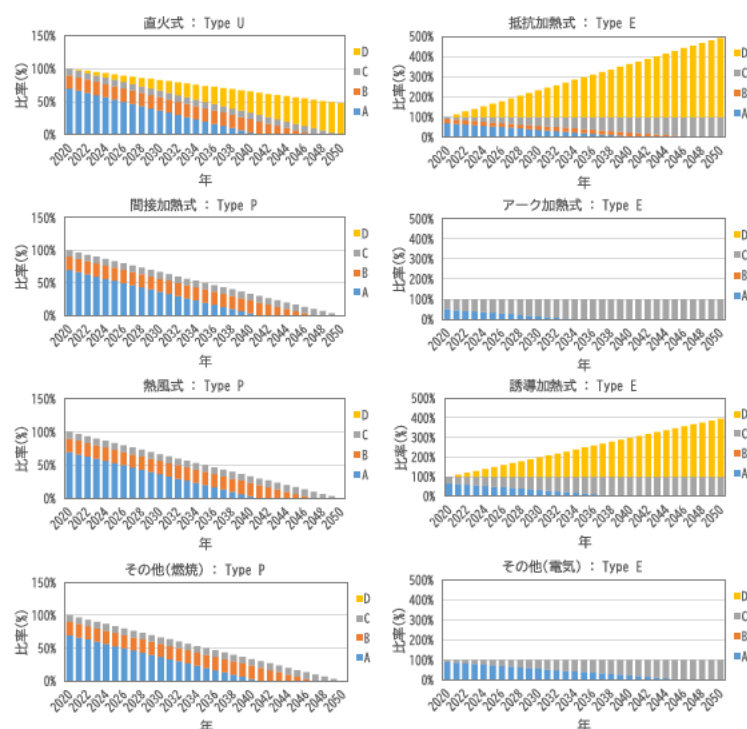
### 2-4-3. [ケース 2:電気式転換] 電気式転換のみでの CO2 排出量変化

#### (1) 計算条件

図表 2-17 [ケース 2:電気式転換] 電気式転換のみでの計算条件

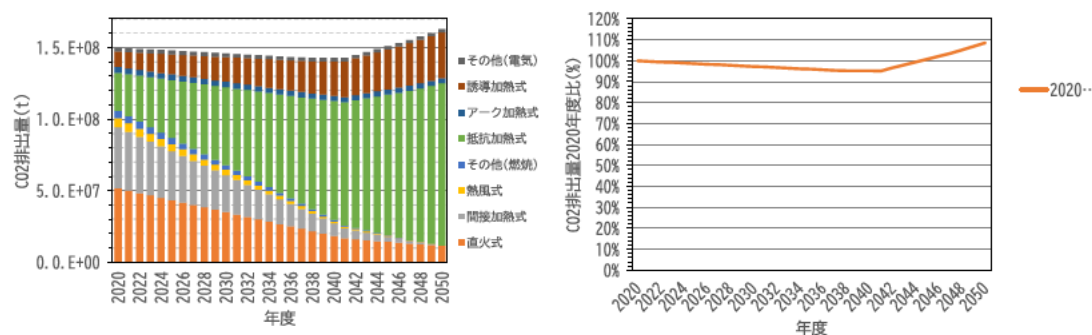
| 変数          |    | 変化形式            |     |         |           |            |             |
|-------------|----|-----------------|-----|---------|-----------|------------|-------------|
| 電源 CO2 排出係数 |    | 2020 年度の値で一定    |     |         |           |            |             |
| 燃料転換        |    | 水素・アンモニア導入無し    |     |         |           |            |             |
| 炉寿命         |    | 30 年            |     |         |           |            |             |
| 加熱式炉の存続     |    | 全炉数の 20%が直火式で存続 |     |         |           |            |             |
| 加熱方式        | 類型 | ly              | γ   | 初年度存在割合 |           |            |             |
|             |    |                 |     | ベース     | 小効率改善 (A) | 最高効率改善 (B) | 燃焼炉燃料転換 (C) |
| 直火式         | U  | 3.33%           | 48% | 70%     | 20%       | 10%        | -           |
| 間接加熱式       | P  | 3.33%           | -   | 70%     | 20%       | 10%        | -           |
| 熱風式         | P  | 3.33%           | -   | 70%     | 20%       | 10%        | -           |
| その他(燃焼)     | P  | 3.33%           | -   | 70%     | 20%       | 10%        | -           |
| 抵抗加熱式       | E  | 3.33%           | -   | 70%     | 20%       | 10%        | -           |
| アーク加熱式      | E  | 3.33%           | -   | 50%     | -         | 50%        | -           |
| 誘導加熱式       | E  | 3.33%           | -   | 65%     | -         | 35%        | -           |
| その他(電気)     | E  | 3.33%           | -   | 90%     | -         | 10%        | -           |

図表 2-18 [ケース 2:電気式転換] 電気式転換のみでの台数比率変化



## (2) 計算結果

図表 2-19 [ケース 2:電気式転換] 電気式転換のみでの計算結果



### (3) 考察

効率アップだけでの排出量削減率は2030年度において約3%、2050年度において-9%であった。

抵抗加熱式の一次エネルギー換算原単位が燃焼式に比べ高いため、電力CO<sub>2</sub>排出原単位が下がらないと排出量が増えることが確認できた。

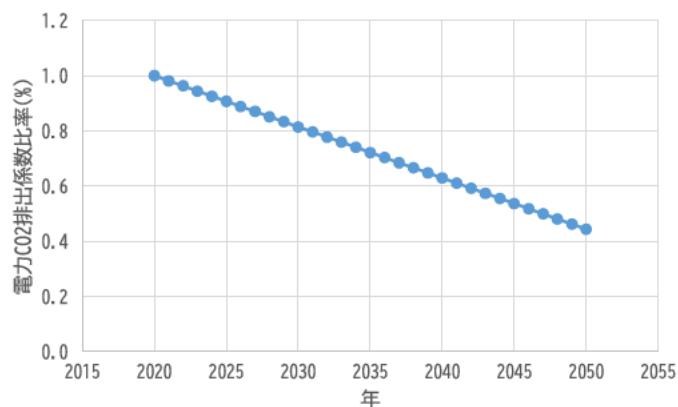
#### 2-4-4. [ケース3:電気式転換] 電気式に転換した上で電源CO<sub>2</sub>排出係数を下げた変化

##### (1) 計算条件

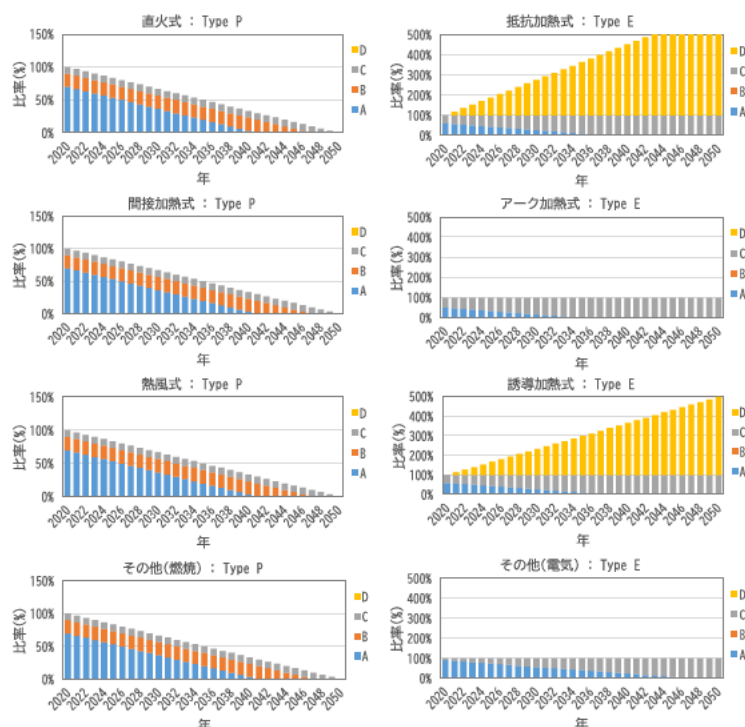
図表 2-20 [ケース3:電気式転換] 電気式転換した計算条件

| 変数                     |    | 変化形式              |   |         |          |           |            |
|------------------------|----|-------------------|---|---------|----------|-----------|------------|
| 電源CO <sub>2</sub> 排出係数 |    | 電気事業における低炭素社会実行計画 |   |         |          |           |            |
| 燃料転換                   |    | 水素・アンモニア導入無し      |   |         |          |           |            |
| 炉寿命                    |    | 30年               |   |         |          |           |            |
| 加熱方式                   | 類型 | ly                | γ | 初年度存在割合 |          |           |            |
|                        |    |                   |   | ベース     | 小効率改善(A) | 最高効率改善(B) | 燃焼炉燃料転換(C) |
| 直火式                    | P  | 3.33%             | - | 70%     | 20%      | 10%       |            |
| 間接加熱式                  | P  | 3.33%             | - | 70%     | 20%      | 10%       | -          |
| 熱風式                    | P  | 3.33%             | - | 70%     | 20%      | 10%       | -          |
| その他(燃焼)                | P  | 3.33%             | - | 70%     | 20%      | 10%       | -          |
| 抵抗加熱式                  | E  | 3.33%             | - | 70%     | 20%      | 10%       | -          |
| アーク加熱式                 | E  | 3.33%             | - | 50%     | -        | 50%       | -          |
| 誘導加熱式                  | E  | 3.33%             | - | 65%     | -        | 35%       | -          |
| その他(電気)                | E  | 3.33%             | - | 90%     | -        | 10%       | -          |

図表 2-21 使用した電力CO<sub>2</sub>排出係数の2020年度比

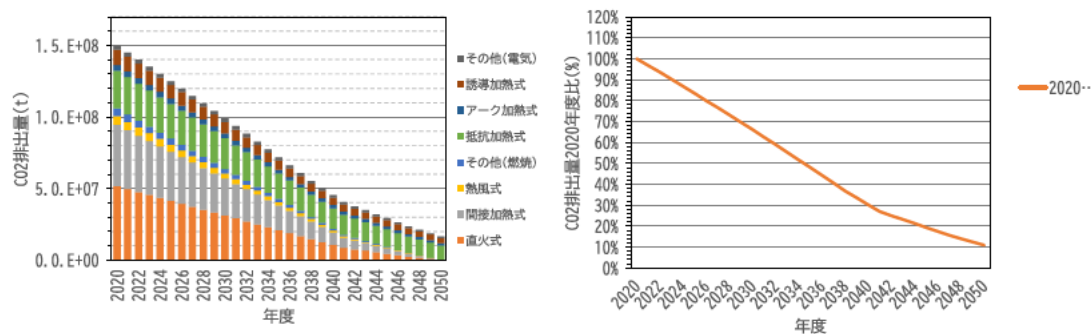


図表 2-22 [ケース 3:電気式転換] 電気式転換のみでの台数比率変化



## (2) 計算結果

図表 2-23 [ケース 3:電気式転換] 電気式転換での計算結果



## (3) 考察

電源 CO2 排出係数が低下した場合の排出量削減率は 2030 年度において約 34%、2050 年度において 89%であった。

### 2-4-5. [ケース 4:燃焼炉燃料転換(1)] 燃焼炉の燃料転換による CO2 排出量変化

ケース 1 と同じ高効率型への転換だけを考慮した条件で燃焼炉の燃料転換が実施された場合。

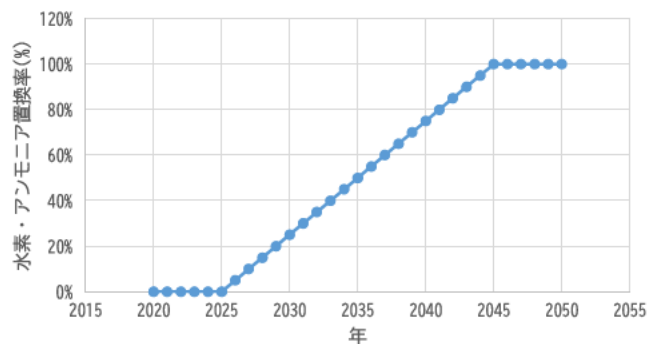
#### (1) 計算条件

計算条件は図表 2-14、図表 2-15と同じである。

燃料炉の水素・アンモニア置換率が 2025 年度から 20 年間で 100%になるものと仮定した。

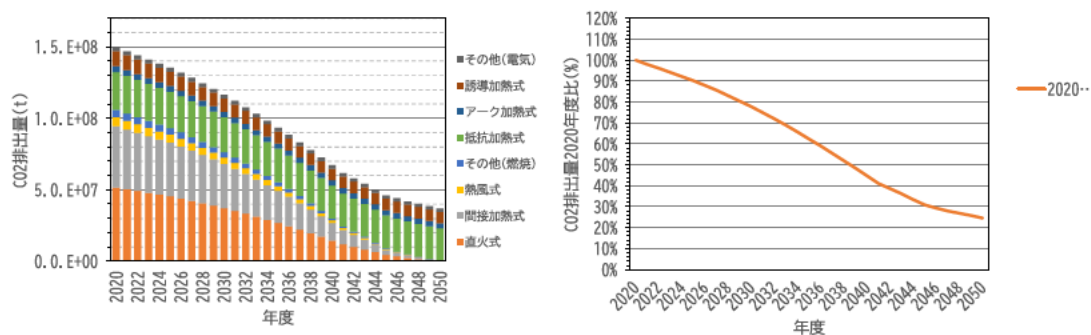
水素・アンモニア置換率の変化を次図に示す。

図表 2-24 水素・アンモニア置換率の変化



## (2) 計算結果

図表 2-25 [ケース 4: 燃焼炉燃料転換(1)] CO<sub>2</sub> 排出量変化の計算結果



## (3) 考察

排出量削減率は 2030 年度において約 22%、2050 年度において 75%であった。

### 2-4-6. [ケース 5: 転換の遅れ] 高効率型形式変化のみでの CO<sub>2</sub> 排出量変化(2)

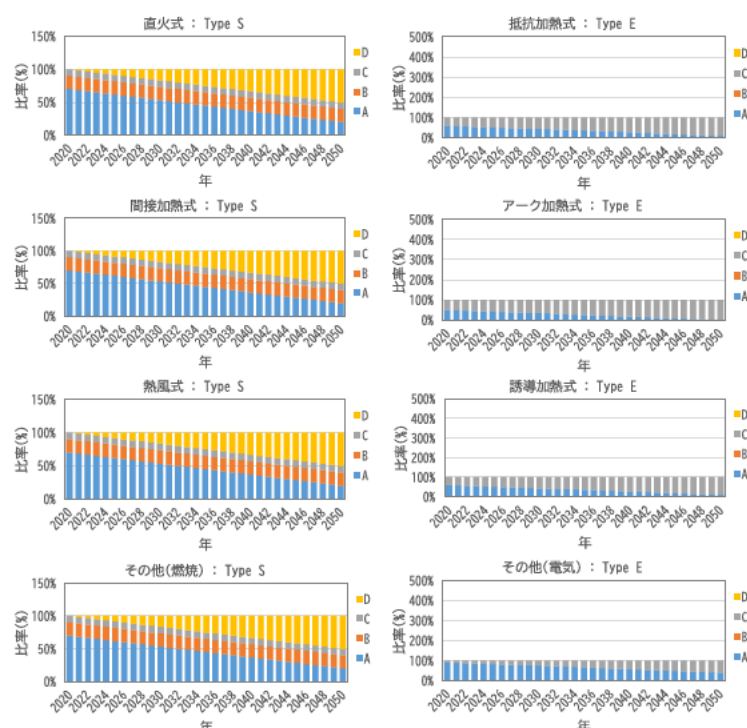
#### (1) 計算条件

ケース 1 の計算の条件で、高効率炉への転換が遅れた場合の状況を、炉寿命パラメーターを 60 年にすることで、転換が半減した場合を模擬し影響を調べた。

図表 2-26 [ケース 5:転換の遅れ] 高効率炉への転換が遅れた場合の計算条件

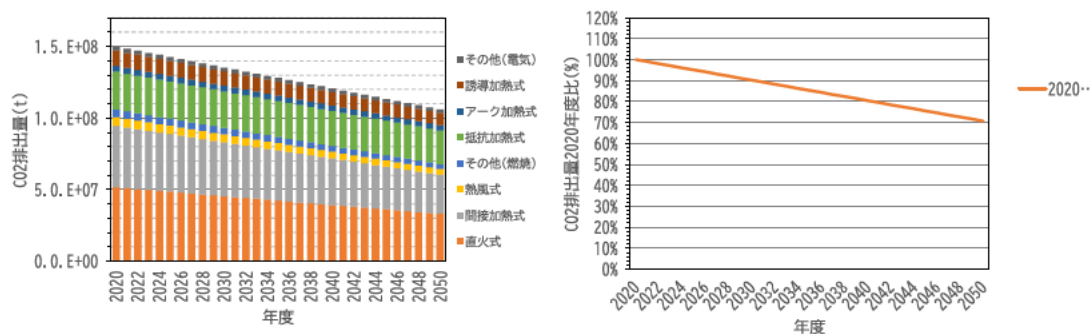
| 変数          |    | 変化形式         |     |         |           |            |             |
|-------------|----|--------------|-----|---------|-----------|------------|-------------|
| 電源 CO2 排出係数 |    | 2020 年度の値で一定 |     |         |           |            |             |
| 燃料転換        |    | 水素・アンモニア導入無し |     |         |           |            |             |
| 炉寿命         |    | 60 年         |     |         |           |            |             |
| 加熱方式        | 類型 | ly           | γ   | 初年度存在割合 |           |            |             |
|             |    |              |     | ベース     | 小効率改善 (A) | 最高効率改善 (B) | 燃焼炉燃料転換 (C) |
| 直火式         | S  | 3.33%        | 48% | 70%     | 20%       | 10%        | -           |
| 間接加熱式       | S  | 3.33%        | -   | 70%     | 20%       | 10%        | -           |
| 熱風式         | S  | 3.33%        | -   | 70%     | 20%       | 10%        | -           |
| その他(燃焼)     | S  | 3.33%        | -   | 70%     | 20%       | 10%        | -           |
| 抵抗加熱式       | E  | 3.33%        | -   | 60%     | -         | 40%        | -           |
| アーク加熱式      | E  | 3.33%        | -   | 50%     | -         | 50%        | -           |
| 誘導加熱式       | E  | 3.33%        | -   | 60%     | -         | 40%        | -           |
| その他(電気)     | E  | 3.33%        | -   | 90%     | -         | 10%        | -           |

図表 2-27 [ケース 5:転換の遅れ] 高効率炉への転換が遅れた場合の台数比率変化



## (2) 計算結果

図表 2-28 [ケース 5:転換の遅れ] 高効率炉への転換が遅れた場合の CO2 排出量変化



### (3) 考察

高効率炉への転換が半減した場合の排出量削減率は2030年度において約10%、2050年度において29%であった。

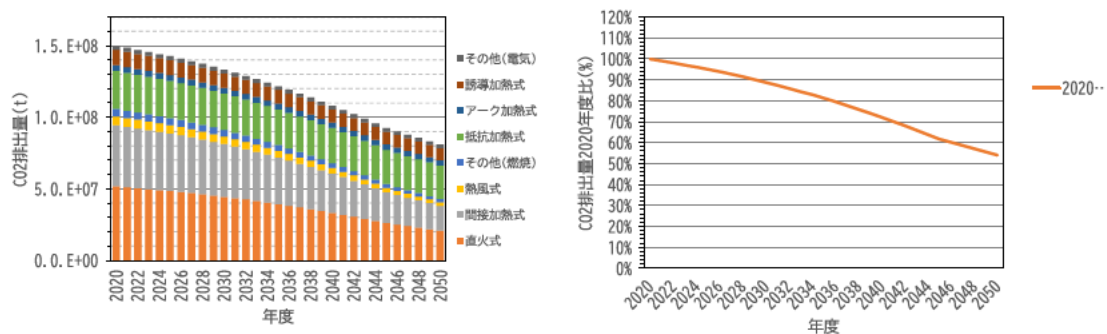
#### 2-4-7. [ケース 6: 燃焼炉燃料転換(2)] 燃焼炉の燃料転換によるCO<sub>2</sub> 排出量変化(高効率型への転換が遅れた場合)

##### (1) 計算条件

計算条件は図表 2-26、図表 2-27、図表 2-24と同じである。

##### (2) 計算結果

図表 2-29 [ケース 6: 燃焼炉燃料転換(2)] CO<sub>2</sub> 排出量変化の計算結果



### (3) 考察

排出量削減率は2030年度において約11%、2050年度において46%であった。

#### 2-4-8. [ケース 7: 現実ケース] 電気式に転換しつつ、加熱式が一定残った上で電源CO<sub>2</sub> 排出係数低下と水素・アンモニア転換を考慮した変化

##### (1) 計算条件

加熱式は電気式に転換を行う。ただし、直火式は全工業炉の20%相当について高効率式にしつつ残す。

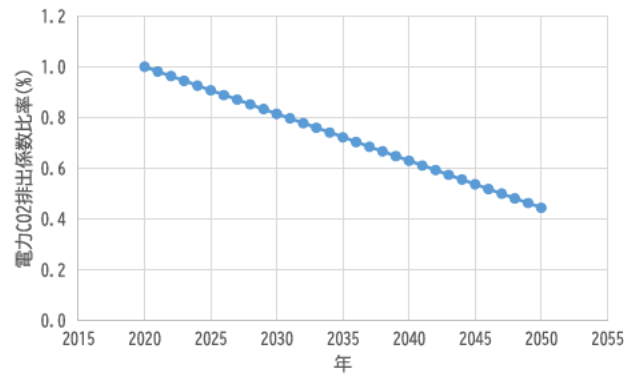
電源CO<sub>2</sub> 排出係数は50年度に向けて低下、燃焼式燃料の水素・アンモニア転換も25年度から20年間で達成する。

図表 2-30 [ケース 7: 現実ケース] 計算条件

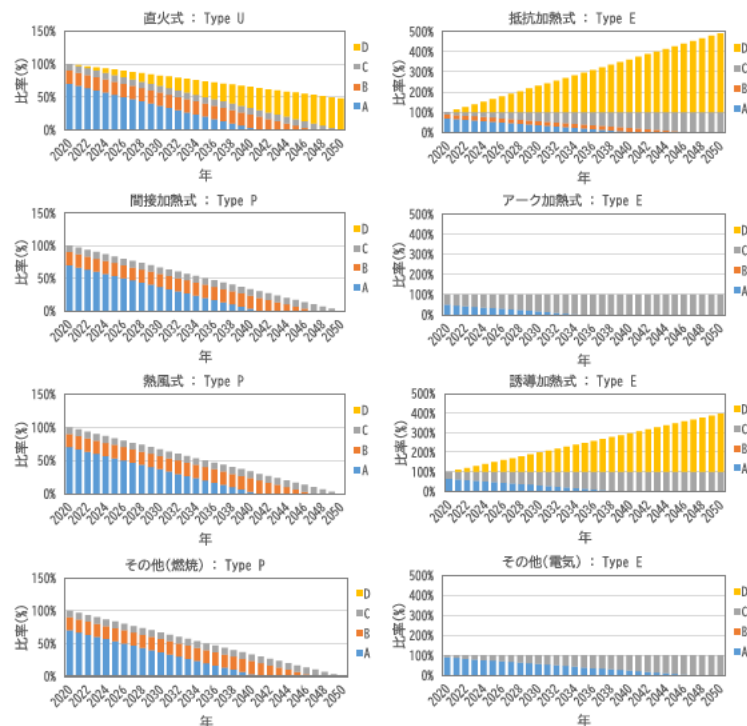
| 変数                      |    |       |     | 変化形式              |           |            |             |
|-------------------------|----|-------|-----|-------------------|-----------|------------|-------------|
| 電源 CO <sub>2</sub> 排出係数 |    |       |     | 電気事業における低炭素社会実行計画 |           |            |             |
| 燃料転換                    |    |       |     | 水素・アンモニア導入無し      |           |            |             |
| 炉寿命                     |    |       |     | 30 年              |           |            |             |
| 加熱式炉の存続                 |    |       |     | 全炉数の 20%が直火式で存続   |           |            |             |
| 加熱方式                    | 類型 | ly    | γ   | 初年度存在割合           |           |            |             |
|                         |    |       |     | ベース               | 小効率改善 (A) | 最高効率改善 (B) | 燃焼炉燃料転換 (C) |
| 直火式                     | U  | 3.33% | 48% | 70%               | 20%       | 10%        | -           |
| 間接加熱式                   | P  | 3.33% | -   | 70%               | 20%       | 10%        | -           |
| 熱風式                     | P  | 3.33% | -   | 70%               | 20%       | 10%        | -           |
| その他(燃焼)                 | P  | 3.33% | -   | 70%               | 20%       | 10%        | -           |
| 抵抗加熱式                   | E  | 3.33% | -   | 70%               | 20%       | 10%        | -           |
| アーク加熱式                  | E  | 3.33% | -   | 50%               | -         | 50%        | -           |
| 誘導加熱式                   | E  | 3.33% | -   | 65%               | -         | 35%        | -           |

|         |   |       |   |     |   |     |   |
|---------|---|-------|---|-----|---|-----|---|
| その他(電気) | E | 3.33% | - | 90% | - | 10% | - |
|---------|---|-------|---|-----|---|-----|---|

図表 2-31 使用した電力 CO2 排出係数の 2020 年度比

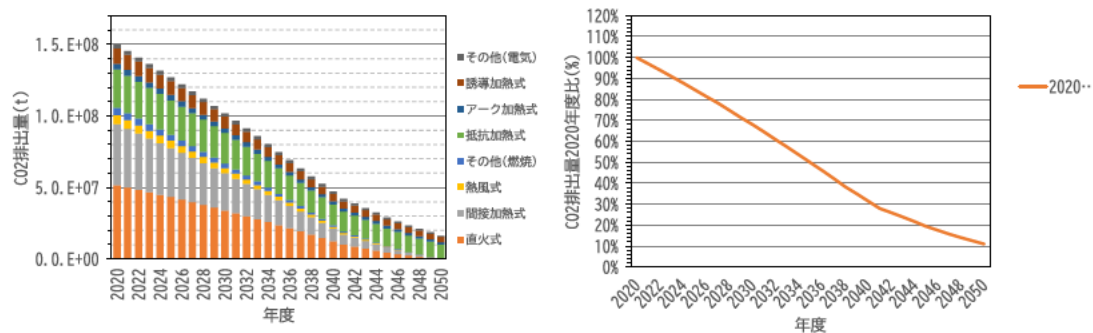


図表 2-32 [ケース 7:現実ケース]台数比率変化



## (2) 計算結果

図表 2-33 [ケース 7:現実ケース]計算結果



## (3) 考察

電源 CO2 排出係数が低下した場合の排出量削減率は 2030 年度において約 32%、2050 年度において 89%であった。

### 3. 工業炉のカーボンニュートラル化に向けた誘導施策の在り方

#### 3-1. 技術的課題・社会的課題の整理

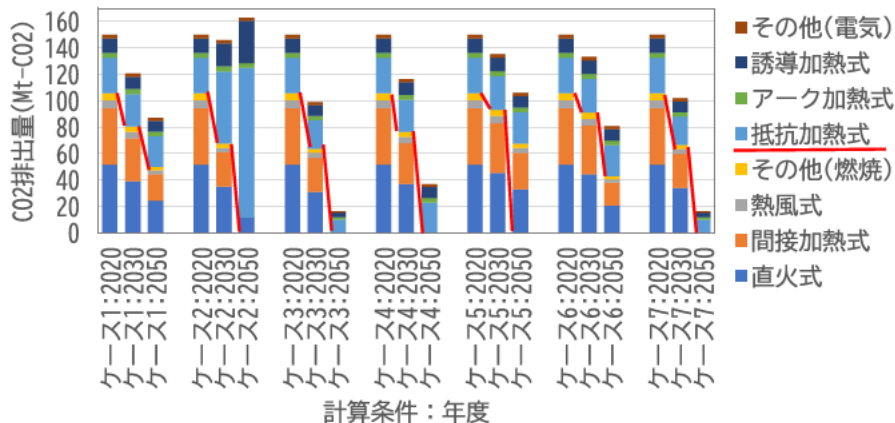
##### 3-1-1. 技術的課題

##### (1) シミュレーション結果の考察

シミュレーション結果で得た知見は次のようになる。

- ① [ケース 1]現状のままで工業炉の効率改善のみが進んだ場合の CO<sub>2</sub> 排出量削減率は 2030 年度において約 20%、2050 年度において 42%であった。
- ② [ケース 2]現状のままで、燃烧式工業炉を高効率電気式工業炉に置き換えを進めた場合の排出量削減率は 2030 年度において約 3%、2050 年度において-9%であった。抵抗加熱式の一次エネルギー換算原単位が燃烧式に比べ高いため、電力 CO<sub>2</sub> 排出原単位が下がらないと排出量が増えることが確認できた。
- ③ [ケース 3]ケース 2 において、電源 CO<sub>2</sub> 排出係数が低下した場合、排出量削減率は 2030 年度において約 34%、2050 年度において 89%であった。
- ④ [ケース 4]高効率炉への転換が半減した場合の排出量削減率は、2030 年度において約 10%、2050 年度において 10%であった。
- ⑤ [ケース 5]ケース 1 において、燃烧炉の燃料転換が進んだ場合の排出量削減率は 2030 年度において約 22%、2050 年度において 75%であった。
- ⑥ [ケース 6]ケース 4 において、燃烧炉の燃料転換が進んだ場合の排出量削減率は 2030 年度において約 11%、2050 年度において 46%であった。
- ⑦ [ケース 7]現実的と考えられる、電気式への転換と燃烧炉の残存があり、電源 CO<sub>2</sub> 排出係数が低下および水素・アンモニア転換を行った場合の排出量削減率は 2030 年度において約 32%、2050 年度において 89%であった。

図表 3-1 シミュレーション計算のケースごとの基準年度排出量



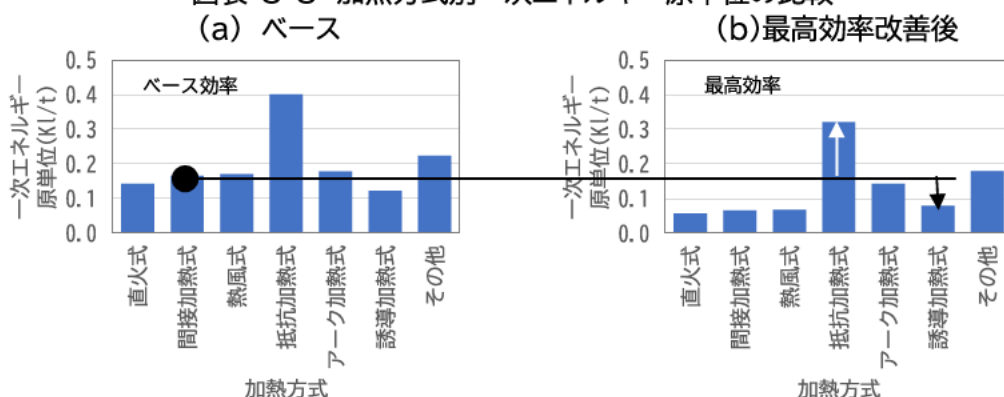
図表 3-2 シミュレーションケースごとの対 2020 年度削減率

|       | 対 2020 年度削減率 |      |
|-------|--------------|------|
|       | 2030         | 2050 |
| ケース 1 | 20%          | 42%  |
| ケース 2 | 31%          | -9%  |
| ケース 3 | 34%          | 89%  |
| ケース 4 | 22%          | 75%  |
| ケース 5 | 10%          | 29%  |
| ケース 6 | 11%          | 46%  |
| ケース 7 | 32%          | 89%  |

| 比較ケース | 比較のポイント                            |
|-------|------------------------------------|
| ①と②   | 各形式のまま効率が上がる場合(ベース)と燃焼式が電気式に転換する場合 |
| ②と③   | 燃焼式が電気式に転換し、電源 CO2 排出係数が下がる効果      |
| ①と⑤   | ベースにくらべ、高効率型への転換が遅れた場合             |
| ①と④   | ベースで燃料転換した場合                       |
| ④と⑥   | ベースで燃料転換した場合に比べ、高効率型への転換が遅れた場合     |

- ①および②より加熱式から電気式への転換は、電気式の原単位が高いことから、エネルギー使用量としては増加する可能性がある。
- しかし、②および③より電源 CO2 排出係数が下がると CO2 排出量は確実に下げることができる。

図表 3-3 加熱方式別一次エネルギー原単位の比較



- ①および⑤より高効率型への転換が遅れると CO2 削減量は減少する。
- ①および④より燃焼炉の燃料転換は有効である。
- ただし、燃料転換のためには設備の改造が伴うため、④および⑥のように更新が遅れる(設備改造が遅れる)と CO2 排出量削減も遅れるため、積極的な燃料転換策をとる必要がある。

この結論は、シミュレーションで仮定した数値によるものであり、実際にはさらに精度の高い数値で検討を行う必要がある。

## (2) 電気式加熱炉

### 【メリット】

- シミュレーションからわかるように、電気式は電源 CO2 排出係数が下がると確実に CO2 排出量を下げることが可能である
- 燃焼式に比べて対象物の加熱を精密に行うことが可能

#### 【デメリット】

- ・ 急速加熱に大電力が必要になり、供給設備容量が大きくなる
- ・ 電力コストが高い
- ・ 設備コストが燃焼式に比べて高い
- ・ 燃焼式からの転換では送電系統の整備、受電設備の新設が必要になり、設備コストの負担が大きい。また、近年では電力会社によるこれらの新設には 2～4年の期間がかかっており、導入までに時間がかかる。

### 3-1-2. 電気式加熱炉における新技術

#### (1) ハイブリッド技術

- ・ 常温から 500-600℃までの予加熱を誘導炉で行い、後段をプロセスに適した炉で処理をする。
- ・ 誘導炉を予加熱に使用することにより昇温にかかる時間が例えば従来 1 時間かけていたところが 10 分ほどで可能になる。
- ・ 大型のワークでも短時間で済むようになり、連続炉の予加熱エリアが不要になり省スペースになる。

### 3-1-3. 燃焼式加熱炉における新技術

#### (1) 水素

- ・ 水素バーナーは商用化されすでに販売されており、水素燃焼に関しては、基盤技術は確立に近い段階にある。
- ・  $\text{NO}_x$  発生はあり得るが、窒素素元が空気、火炎温度が上がらなければ  $\text{NO}_x$  が抑えられることが分かっており、水素と空気の混合を制御し、緩慢な燃焼になるようにすることで発生を抑えるバーナーを販売している
- ・ テスト炉による、自社開発が行われている状況。客先より素材を提供していただき、テスト炉で加熱して素材影響等の試験を行い評価も進められている
- ・ 大手企業、中小でも大手を中心に、導入まで進むことはまだ少ないが試験依頼は増えてきている。中小は様子見のユーザーが多い。

#### (2) アンモニア

- ・ NEDO 様による技術開発中で、製品化はまだできていない
- ・ 技術の社会実装・燃料供給の面では、国がカーボンニュートラル構想や値差補填の検討でバックアップ体制を敷いているので、20年代後半から30年にかけてインフラは同時的に入り始めると思われる。工業炉での普及はこれ以降になると考えられる。
- ・ 普及にはバルブ類等付帯機器類の大型化が必要である
- ・ 燃焼時の  $\text{NO}_x$  発生、未燃アンモニアの二つの課題があり、両方を同時に抑える燃焼技術はハードルが高く、燃焼でいずれかを抑えて、後段で残りを取り除くといった方法も選択肢のひとつ
- ・ 未燃アンモニアの処理は規制・規模などの理由から工業炉レベルでの後段での除去対応は難しい。 $\text{NO}_x$  は脱硝設備メーカーがあり、現状の技術でも対応が可能と考える。ただし、一般的に工業炉は脱硝設備を有しておらず、設備コストアップに繋がる
- ・ アンモニアは燃料中の N が  $\text{NO}_x$  源となる。バーナー形状の工夫である程度抑えられるようになってきているが、抑制可能な空気比の領域が狭いのが難点で、これを解決する技術開発を進められている(NEDO 先導研究)
- ・ LNG 設備の流用が可能という報告もあるので将来性は高い

#### (3) 断熱材の断熱能力の向上

- ・ 断熱強化のレベルを超えるような、温度域・雰囲気に関わらず、薄くても(例えば 10 cm) 常温まで断熱可能な圧倒的な性能を持つ新素材の断熱材の開発が有効

#### (4) その他全般的な課題

- ・ カーボンニュートラルと省エネの両立が必要。シミュレーションで示されたように、電気式で電源 CO2 排出係数が下がれば CN が達成できるが、エネルギー原単位が上がりエネルギー消費量が上昇する可能性がある。
- ・ アンケート調査結果では抵抗式加熱炉の原単位が高いが、原単位を下げる工夫が必要。抵抗加熱のロスはもともと少なく、10%程度。省エネを進めても数%程度の効果が得られるかどうかと言われる。操業に関わるロスも含まれていると考えられ、改善の余地があると考えられる。

#### 3-1-4. 社会的課題

- ・ 工業炉ユーザーは中小企業も多く新技術に対する知見が少ない。必要性はわかっても新技術の導入に対して消極的になりがち。
- ・ また特に中小企業の工業炉ユーザーの工場は住宅地に近い立地のケースが多くあり、水素・アンモニア技術の導入に当たって、周辺住民への安全性にたいする反対活動などが予想され、不安の払しょくなどの周知を官民挙げて行う必要があるのではないかと
- ・ 補助金の活用促進が必要 中小企業にとって最適な補助金選択が難しい、手を上げにくいといった状況がある。
- ・ 設備投資補助は導入促進に効果があるのは間違いないが、燃料・電気代の高騰はランニングコストに関わり、電気代を下げる・安定化する、新燃料の従来燃料との値差を補助するなどの方策が必要。
- ・ 水素・アンモニアの規格整備が必要。ユーザーの独自の規制に頼るのでは、ユーザーの負担も大きく、メーカーも個別対応が必要になり、導入に係る手間が増える。

#### 3-2. 誘導施策の在り方についての検討

##### (1) 米国立標準技術研究所「Manufacturing Extension Program(MEP)」。

National Institute of Standards and Technology's Manufacturing Extension Partnership (NIST MEP) [5]は、メリーランド州ゲイサースバーグに本部があり、全米 50 州すべてと、プエルトリコにある 51 の MEP センターなどで構成されて、1,450 人を超える信頼できるアドバイザーと専門家がいます。

センターは、プロセスの改善や労働力の開発から、サプライチェーンの統合、イノベーション、技術移転などの専門的なビジネス慣行までをサポートする。

NIST(MEP)は、製造業者が、新規および維持売上高で 188 億ドル、コスト削減で 25 億ドル、新規顧客投資で 64 億ドルを達成するのに役立ち、116,700 を超える米国の製造業の雇用創出および維持した。

MEP には、従業員のために、人材の評価と計画、勧誘と採用、従業員のトレーニングと能力開発、リーダーシップ、従業員の能力保持などが含まれる。

- ・ 中小企業では新技術導入の不安があり、従来使用している形式からの転換には抵抗感が強いとされる。
- ・ MEPのようなシステムで、導入時の技術検討、補助事業の適用検討などをサポートするようにすることで新技術導入促進が見込まれる

## 4. 添付資料

### 4-1. 引用文献

#### 引用文献

1. 株式会社富士経済. 令和 3 年度内外一体の経済成長戦略構築にかかる国際経済調査事業 (工業炉のカーボンニュートラル対応に向けた動向調査) 調査報告書. 経済産業省. (オンライン) 2022 年 3 月 31 日.  
[https://www.meti.go.jp/meti\\_lib/report/2021FY/000337.pdf](https://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2021FY/000337.pdf).
2. 環境省. 電気事業者別排出係数(特定排出者の温室効果ガス排出量算定用)ーR2年度実績ー. 環境省へようこそ! (オンライン) [https://ghg-santeikohyo.env.go.jp/files/calc/r04\\_coefficient\\_rev4.pdf](https://ghg-santeikohyo.env.go.jp/files/calc/r04_coefficient_rev4.pdf).
3. ー. 算定・報告・公表制度における算定方法・排出係数一覧. 環境省へようこそ! (オンライン) [https://ghg-santeikohyo.env.go.jp/files/calc/itiran\\_2020\\_rev.pdf](https://ghg-santeikohyo.env.go.jp/files/calc/itiran_2020_rev.pdf).
4. 株式会社野村総合研究所. 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. 国立国会図書館. (オンライン) 2015 年 2 月.  
[https://dl.ndl.go.jp/view/download/digidepo\\_11280804\\_po\\_000214.pdf?contentNo=1](https://dl.ndl.go.jp/view/download/digidepo_11280804_po_000214.pdf?contentNo=1).
5. NIST. About NIST MEP. National Institute of Standards and Technology. (オンライン) <https://www.nist.gov/mep/about-nist-mep>.