

## 特集 産業電化が拓く省エネ・低炭素社会

# 高压ボンベ製造工程の電化への取り組み

Effort of Electrification of the Manufacturing Process to Make the High Pressure Gas Cylinder

井上 和茂\*・松田 勇\*\*・伊達 健太郎\*\*\*  
Kazushige Inoue Isamu Matsuda Kentaro Date

### 1. まえがき

高压昭和ボンベ株式会社亀山工場の高圧ボンベの製造工程において、誘導加熱炉を導入することによる産業電化により、飛躍的な省エネルギーや省CO<sub>2</sub>、さらには生産性の向上を実現した事例を紹介する。

まず、高圧ボンベの製造工程を説明する。次に、高圧ボンベの製造工程に誘導加熱炉を導入した結果を紹介する。更に、誘導加熱炉の導入前と導入後でエネルギー使用量等を計測したので、計測結果を紹介するとともに、産業電化の効果を定量的に明らかにする。最後に、誘導加熱技術の概要と活用事例を紹介する。

本内容は、平成27年11月19日に開催された第10回エレクトロヒートシンポジウム（一般社団法人日本エレクトロヒートセンターが主催）で発表したものである。優れた特徴をもつ産業電化により、工場の省CO<sub>2</sub>と省コストを実現するとともに、生産性の向上や生産工程の革新まで繋げることで、産業の進化に貢献することができる。

### 2. 誘導加熱炉の導入

#### 2.1 高圧ボンベの製造工程

高压昭和ボンベ株式会社は、昭和47年に創立された高圧ボンベの国内最大手のメーカーである。酸素や窒素、アルゴン等の工業ガス用の高圧ボンベや美術館や図書館、コンピュータ室などの消火設備用の高圧ボンベを製造している。

高圧ボンベの製造方法には、鉄塊をプレスする「エルハルト方式」と鋼管を成形する「マンネスマン方式」の2つの方式がある。高压昭和ボンベ株式会社は、「エルハルト方式」を採用する国内唯一のメーカーである。完全に継ぎ目がないので、安全性や耐久性に優れた高圧ボンベを製造することができる。

\*関西電力株式会社 技術研究所  
〒661-0974 兵庫県尼崎市若王寺3-11-20  
E-mail: inoue.kazushige@c2.kepco.co.jp

\*\*株式会社タイチク 設計部  
〒664-0843 兵庫県伊丹市岩屋2-1-17  
E-mail: matsuda@taichiku.co.jp

\*\*\*高压昭和ボンベ株式会社  
〒519-0166 三重県亀山市布気町1803



図1 高圧ボンベの一例

高压昭和ボンベの高圧ボンベの製造工程を図2に示す。「エルハルト方式」は、安全性や耐久性に優れた高圧ボンベを製造することができるが、鉄塊から高圧ボンベの形状に加熱成型を行うので、加熱や熱処理に大きなエネルギーが必要である。使用エネルギー量を削減することが課題となる。

#### 2.2 誘導加熱炉の導入

高压昭和ボンベ株式会社 亀山工場では、端管加熱の加熱炉や頭部成形用のスピニングマシンの老朽化が問題となり、従来炉（燃焼加熱炉）の設備更新の検討を行った。従来炉（燃焼加熱炉）は、炉の立上りが非常に遅く、生産性向上の障害となっていた。また、廃熱が大量に発生し、高温の劣悪な作業環境であった。炉の補修にも大きな労力がかかっていた。更には、亀山工場の省エネルギーや省コストを進める必要もあった。こうした課題を解決したいと考え、燃焼加熱炉と誘導加熱炉の双方を検討した結果、端管加熱工程への誘導加熱炉の導入を決定した。

誘導加熱炉を導入して、約1年間運転を行い、下記の結果を得ており、高压昭和ボンベでは誘導加熱炉への更新は成功と評価をした。

(誘導加熱炉の導入効果)

- 安定した加熱を実現できた。温度制御性が良いので、頭部成形作業も楽になり、生産計画も立て易くなった。
- 夏場は作業服が汗で塩を吹いていた作業環境が飛躍的に改善され、作業者は大変喜んでいる。
- 加熱時間が短縮されたので、製品の酸化被膜の発生がなくなり、研磨・成型後の仕上がりが滑らかになり、製品の品質は向上した。
- 加熱炉は、ほぼメンテナンス不要となり、加熱炉の保守は圧倒的に楽になった。
- エネルギー費用は大きく削減された。

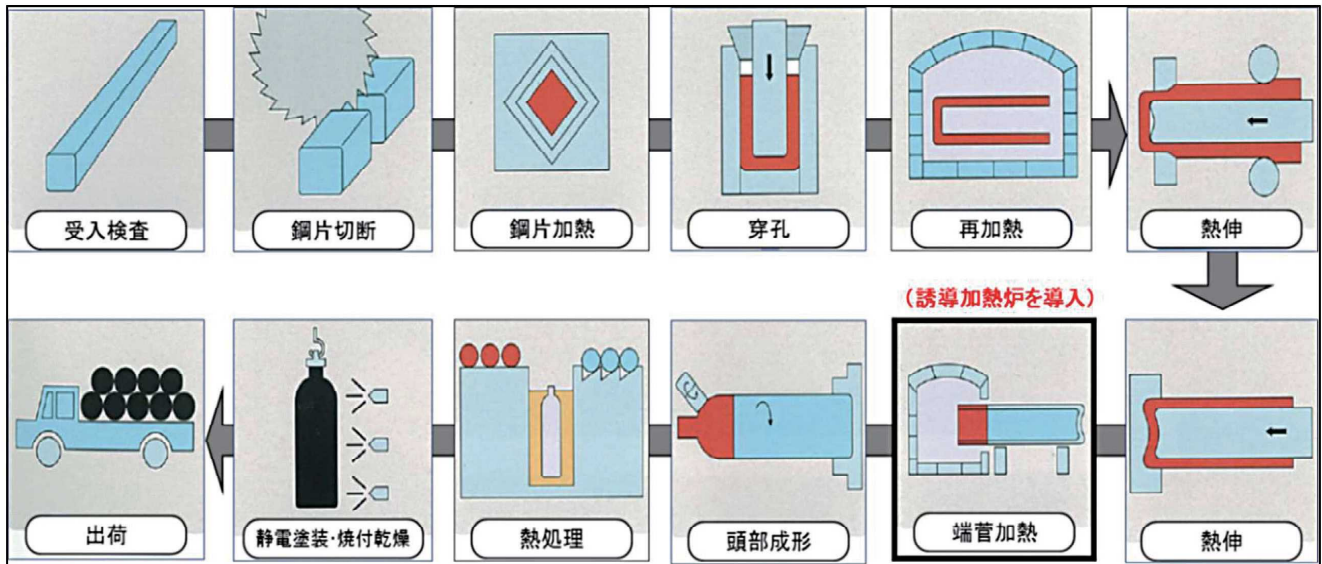


図2 高圧ポンペの製造工程（エルハルト方式）



従来炉（燃焼加熱炉） 導入炉（誘導加熱炉）

図3 従来炉と導入炉の外観

### 3. 誘導加熱炉の計測評価結果

#### 3.1 計測方法

高圧昭和ポンペ株式会社亀山工場の誘導加熱炉のエネルギー使用量は計測されておらず、誘導加熱炉の導入効果は定量的には明らかになっていなかった。そこで、残存している従来炉（燃焼加熱炉）も活用して、従来炉（燃焼加熱炉）と導入炉（誘導加熱炉）を用いて、同一条件で高圧ポンペの生産を行い、エネルギー使用量等の計測を行い、誘

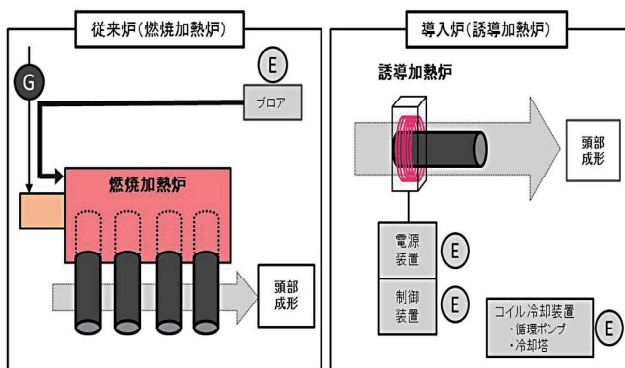


図4 計測方法（G：ガス量，E：電力量）

導加熱炉の導入効果を定量的に明らかにすることとした。

従来炉（燃焼加熱炉）は、ブタンガスを燃料とする燃焼加熱炉で、加熱炉の中に高圧ポンペを4本入れ、順番に抜き差ししながら、加熱を行う。エネルギー使用量の大部分はブタンガスなので、ガス流量計を設置し、ガス使用量を計測した。また、燃料空気を供給するブロアの消費電力も計測した。導入炉（誘導加熱炉）は、コイルに電流を流し磁束を発生させるので、エネルギー使用量の大部分は主回路の電力（3,300V）である。主回路と制御回路の電力、そしてコイル冷却用のポンプと冷却塔の電力を計測した。

#### 3.2 計測評価結果

図5にガス使用量と電力使用量の計測結果を示す。従来炉（燃焼加熱炉）は、起動後の加熱炉の予熱に約50分掛かり、ポンペ1本の加熱に約1,100秒掛かる。加熱時間を短縮するため高圧ポンペを4本同時に加熱し約5分毎に頭部成型工程に送っている。導入炉（誘導加熱炉）は、加熱炉の予熱は不要であり、ポンペ1本は約100秒で加熱できる。誘導加熱炉は、①加熱炉の予熱が不要という所と、②加熱時間が非常に短いという利点を有する。

図6は、加熱炉周辺を赤外線カメラで撮影した画像である。従来炉（燃焼加熱炉）は、炉の開口部を中心に、非常に高温の廃熱が大量に発生している。導入炉（誘導加熱炉）は、殆ど廃熱が発生していない。導入炉（誘導加熱炉）は、ポンペに電流を流すことで、ポンペ自体が発熱するので、廃熱の発生が極めて少なく、作業環境は大幅に改善されていることが分かる。また、廃熱の少なさは、導入炉（誘導加熱炉）の省エネルギーや省コストにも繋がる。

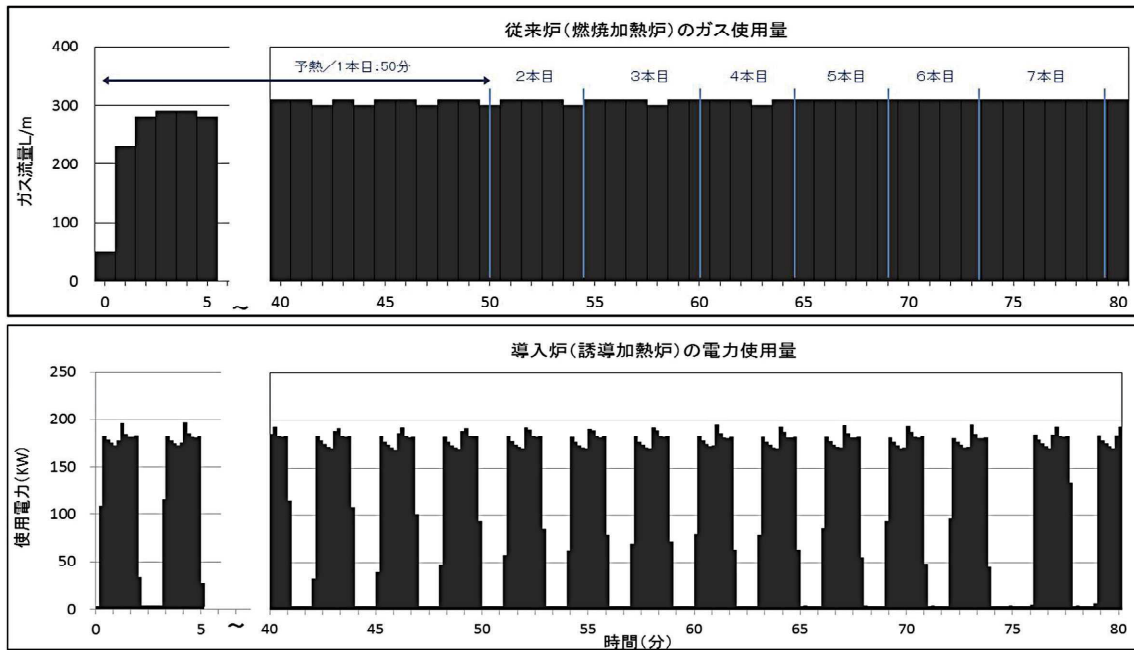


図5 プタンガス使用量と電力使用量の計測結果

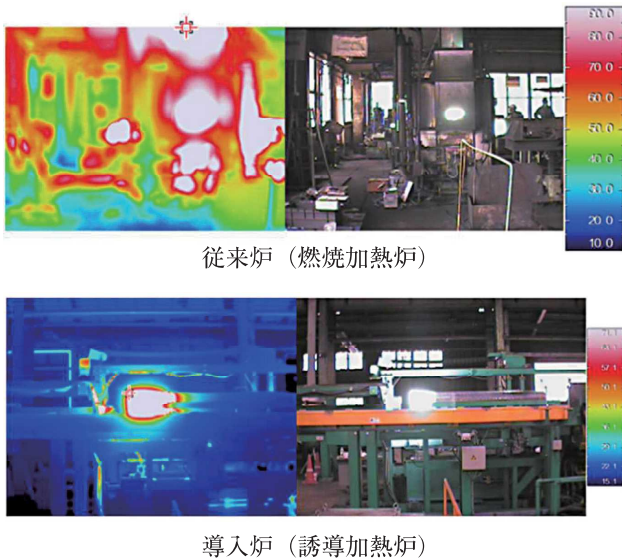


図6 従来炉と導入炉の赤外線画像

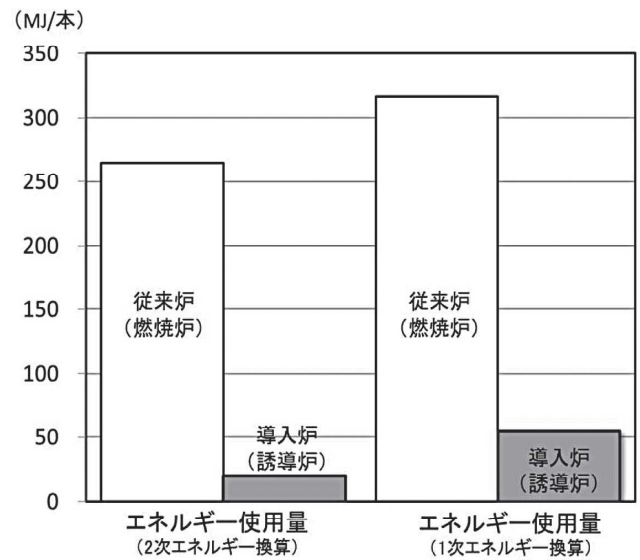


図7 エネルギー使用量の比較

図7は、高圧ポンペ1本当たりのエネルギー使用量の比較である。導入炉(誘導加熱炉)のエネルギー使用量は、従来炉(燃焼加熱炉)に比べ、大幅に減少するとの結果が得られた。また、電気24円/kWh、ブタンガス100円/kgの条件下で、エネルギー費用も1/4まで減少するとの結果も得られた。

図8は、高圧ポンペの生産性である。工場が8時から17時までフル生産した場合は、導入炉(誘導加熱炉)の生産本数は従来炉(燃焼炉)の2倍となる。加熱炉の予熱が不要であり、加熱時間も大幅に短くなる。

誘導加熱炉の導入により、作業環境性を大きく改善し、生産性を大きく向上させるとともに、エネルギー使用量やエネルギーコストを大きく削減することが定量的に明らかになった。

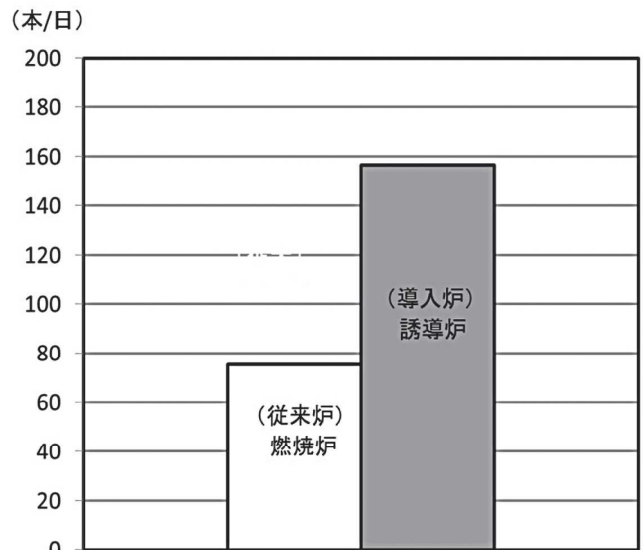


図8 高圧ポンペの生産本数

### 3.3 誘導加熱炉が優れる理由

誘導加熱炉が優れる理由は、間接加熱と直接加熱の違いに由来する。従来炉（燃焼加熱炉）は熱伝導で間接的に熱エネルギーが伝わり、高圧ポンベの温度は徐々に上昇する。これに対して、導入炉（誘導加熱炉）は高圧ポンベに25,740Aという大電流を流すことで、ジュール熱で高圧ポンベ自体が急速に発熱する。従来炉（燃焼加熱炉）と導入炉（誘導加熱炉）の加熱時間に約10倍の違いがあり、廃熱量や生産性の大きな違いに繋がる。また、従来炉（燃焼加熱炉）は生産性を上げるため、高圧ポンベを4本同時に加熱するので廃熱はさらに大きくなる。こうしたことが、省エネルギー性の大きな違いを生み出す原因と推測される。

図9は、加熱した高圧ポンベの温度分布をプロットしたものである。従来炉（燃焼加熱炉）は広い範囲で温度が上昇する。これに対して、導入炉（誘導加熱炉）は高圧ポンベの端部のみ温度が上昇する。誘導加熱炉は、必要箇所だけの加熱が可能なので、エネルギー量を大幅に減らすことができる。大幅な省エネルギーが実現できるとともに、製品の品質を向上させることができる。

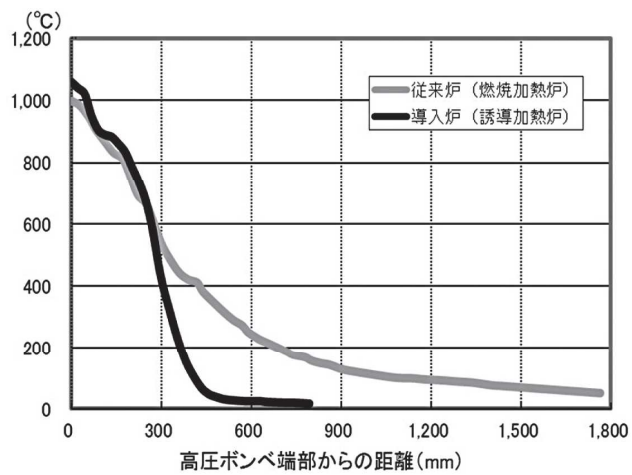


図9 高圧ポンベの加熱温度

## 4. 誘導加熱技術と活用事例

### 4.1 誘導加熱炉と誘導溶解炉

誘導加熱炉を製造した株式会社タイチクは、昭和44年に三菱電機株式会社の誘導溶解炉製造の協力会社として設立され、その後、三菱電機の誘導加熱事業を継承して、誘導加熱炉と誘導溶解炉の製造・販売を行っている。

誘導加熱炉は、鍛造用のビレットヒータとして自動車部品等に広く使われている。自動車部品は誘導加熱で加熱され、鍛造機に送られる。

誘導溶解炉は、金属を加熱して溶かす炉で、鋳物の製造に使われる。アルミや銅など電気の流れるものは何でも溶解でき、自動車部品や建材等に広く用いられている。炉の中にスクラップ等の溶解材料を入れ、誘導加熱により溶解



図10 誘導加熱炉と誘導溶解炉

し、炉を傾動して溶けた湯を取鍋に移し、鋳型に注ぎ込まれ鋳物ができ上がる。

### 4.2 誘導加熱技術の概要

誘導加熱技術は、金属に大電流を流しジュール熱により金属自体が発熱することを利用する。大電流を発生させる為に、コイルを巻いて電流を流し、磁束を作る。

亀山工場に導入された誘導加熱炉は、高圧ポンベの端部を挿入するコイルに約1,430Aの電流を流す。コイルの周りに磁束が発生し、誘導起電力により、高圧ポンベに約25,740Aの大電流が流れる。ポンベの加熱が必要な部分に、25,740Aという大電流が流れることで、ポンベは僅か110秒で1,200℃まで加熱される。誘導加熱技術は、大きなエネルギーを加熱したい部分に短時間で投入することができる。

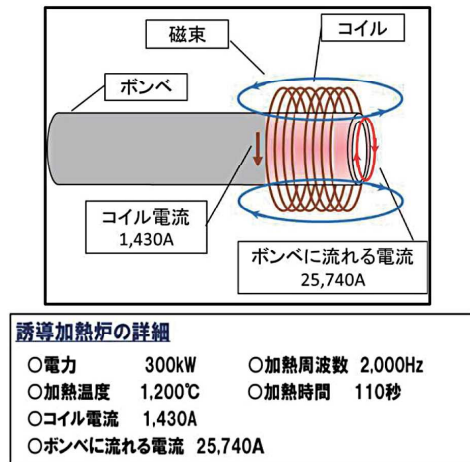


図11 誘導加熱炉の概要

高圧ポンベのようなパイプ形状品の端部加熱を行う場合は次のように考える。

#### (1) パイプ形状品の誘導加熱の特徴

ビレット等の中実円柱を誘導加熱する場合、被加熱物を貫通する磁界の強さは、内部に行くに従い指数関数的に減衰するが、パイプ形状品の場合には内径より内側では、磁界の強さは減衰しない。被加熱物を通る総磁束はパイプ形状品の方が大きくなるので、効率の良い加熱が可能となる。

被加熱物に投入される電力Pwは次式で表される。

$$P_w = (E_c^2 / Z_c) \times (\cos \phi_c \cdot \eta)$$

Ec: コイル電圧, Zc: コイルインピーダンス

Cos φc: コイル力率, η: コイル効率

例えば、パイプ形状品の肉厚がパイプ形状品の外径の3～5%である場合は、中実円柱に比べパイプ形状品への投入電力は1.5～2倍となる。パイプ形状品の誘導加熱は効率の良い加熱となる。

#### (2) 設備容量の決定

電源容量はパイプ形状品に投入する電力（加熱温度から決まる昇温エネルギーとパイプ形状品の放散熱損失の和）をコイル効率（コイル内径，コイル長さ，パイプ形状品のコイル内先端位置から決まる）で除して求める。

#### (3) 加熱周波数の選択

加熱周波数は、パイプ形状品の各サイズについて、加熱周波数とコイル効率の関係を計算し、コイル効率の最も良くなる周波数を選択するが、同じ外径でも肉厚が薄くなると、最適周波数は高くなる傾向にある。一方、パイプ形状品の内外面の均熱化を図るには、周波数を低くする必要があり、端面効果も考慮しながら総合的に周波数を選択する。

#### (4) コイル種類の選択

パイプ形状品の種類が多い場合、コイル種類を何種類用意するかはパイプ形状品のサイズ毎の生産量で決める。印加電力は、コイル力率/コイルインピーダンスに比例するので、外径または肉厚が異なった場合、コイル効率の低下以上に処理量は低下する。処理量が仕様値を満足出来ない場合はコイルの種類を増やす必要が出てくる。設備費、メンテナンス性および稼働率の向上（段取り換え時間）を考えるとコイルの種類は少ない方が良いが、効率と生産量を考慮したトータルのランニングコストでコイル数を決める。

#### (5) 端面効果によるパイプ形状品の端面の温度変化

端部を誘導加熱する場合は、被加熱物の端面温度が中央部に比べ高温であったり、反対に低温であったりする現象が発生することがある。端面効果はコイルとパイプ形状品の寸法，位置関係および加熱周波数等に依存するが、加熱温度の温度分布により最適値を選択する必要がある。

例えば、加熱周波数を2kHzとしパイプ形状品の外径をφ100以上とした場合、端面は過熱傾向となり、φ100以下では加熱不足となるデータもあるが、コイル内のパイプ先端位置をコイル端面に近づけると端面は低温傾向となるので、加熱周波数と先端位置の両者を組合せ最適値を見出す必要がある。

#### (6) パイプ形状品の円周方向の均熱化

コイルの円周方向の中心とパイプ形状品の円周方向中心を合わせることが望ましいが、パイプ形状品の径が変化すると全てのサイズを合わせることが機械的に難しくなる。中心がずれるとパイプ形状品のコイルに近い方が高温となり均熱が損なわれるので、パイプ形状品は加熱中には回転させる。

### 4.3 誘導加熱技術の活用事例

誘導溶解炉は金属を溶かし鋳物製品を作るために広く活用されている。誘導加熱炉は鍛造品を作るために活用されている。鍛造品は自動車部品に使われており、ゴルフクラブのヘッドや炊飯器の厚釜などにも使われている。

鉄鋼業界においては、誘導加熱炉は、鋼板やパイプの加工や品質向上に使用されている。金属の焼き入れや焼き戻しなど、金属の強度アップや耐磨耗性向上を目的として、自動車部品や多くの金属製品の性能向上にも、誘導加熱炉は活用されている。

鋼管の冷間引抜加工前に鋼管先端を加熱加工する工程があるが、従来ガス燃焼炉を使用していたところに誘導加熱炉が導入されている。省エネ，省コスト，作業環境については本事例と同様の効果が得られている。また、誘導加熱炉はコンパクトなので、生産装置に組込むことで生産性を大幅に向上させることができた。その他、ヤクルトのアルミ蓋にも誘導加熱技術が使われている。誘導加熱技術でアルミだけを瞬間に溶かして接着を行う。

誘導加熱技術の応用分野は非常に広範囲で、誘導加熱技術が日本製品の優秀性を支えていると言っても過言ではない。誘導加熱技術の応用分野は今後も広がり続けると思う。

## 5. あとがき

脱炭素社会の実現に向けて、工場の生産プロセスにおいても、脱炭素化の取り組みが求められている。電化を行い、再生可能エネルギー由来の電気を使った電化を広げることで脱炭素化は実現できるが、再生可能エネルギー由来の電気の価格や確保量が課題になるのではないかとと思われる。

本事例では、誘導加熱技術を使った産業電化で、エネルギー使用量を1/6以下まで減らす画期的な省エネルギーを実現することができた。また、ヒートポンプを使った産業電化でも、エネルギー使用量を大幅に減らす事例も出て来ている（2016年度省エネルギー大賞等を参照）。すなわち、産業電化は大幅な省エネルギーを実現できる技術である。産業電化でエネルギー消費量を極限まで小さくし、そして、小さくなったエネルギーを再生可能エネルギーから供給することで、現実的な脱炭素化が可能になると考える。

産業電化により製造プロセスの大幅な省エネルギーを実現するには、製造プロセスと電化技術を擦り合わせて、最適なシステムを構築することが必要である。この分野はわが国が世界の先頭を走っているが、こうした高度な省エネルギーを実現できる技術者は極めて限られているので、技術者の数を増やすとともに、技術の高度化を進めて行く必要がある。