

熱処理炉のカーボンニュートラルに向けた取り組み

Activities for Carbon Neutrality in Heat Treatment Furnaces

平出裕紀 Y. HIRADE 小栗正彦 M. OGURI 松原 周 A. MATSUBARA
松本公明 K. MATSUMOTO 三枝賢治 K. SAIGUSA

To achieve carbon neutrality by 2050, it is essential to take energy-saving measures in the heat treatment furnace process, which makes up a large portion of the CO₂ emitted in all processes. In a heat treatment furnace, only about 20% of the energy input is effectively used to heat the work, and the remaining 80% is lost. Losses caused by Endothermic gas, heat dissipation from the furnace body, and temperature control of quenching oil are particularly significant. Focusing on these energy losses, we developed energy-saving technology and conducted demonstration tests to confirm its effectiveness.

Key Words: Carbon neutrality, Carbon-free society, Energy conservation, Curburizing furnace

1. はじめに

2050年のカーボンニュートラル実現に向け、日本政府は2030年までにCO₂排出量を2013年比で46%削減するという、非常に高い目標を掲げている¹⁾。ジェイテクトグループでも政府方針にこたえるため、2013年を基準として、2030年にCO₂排出量を60%削減し、2035年にはカーボンニュートラル達成という目標を設定した。

図1に示すとおり、ジェイテクト国内工場のCO₂排出量は、熱処理工程が全工程の22%と非常に高くなっている。さらに、熱処理炉を保有する工場に限定すると、全工程の40%以上のCO₂が熱処理工程で排出されている。このような背景からCO₂排出量削減目標を達成するには、熱処理炉の省エネルギー対策が急務である。

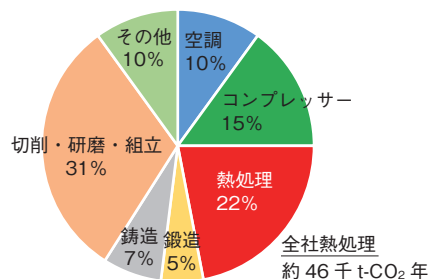


図1 ジェイテクト国内工場 CO₂ 排出量内訳
CO₂ emissions at JTEKT's domestic plants

2. 熱処理炉における消費エネルギー内訳

図2にバッチ炉の消費エネルギーの内訳を示す。熱処理に必要な製品の加熱エネルギーや、製品搬送などの駆動エネルギーとして使用されるのは、投入したエネルギーのわずか20%程度である。残りの80%はエネルギー損失で、炉殻からの放散熱量や焼入れ油の温度制御、雰囲気ガスの生成・加熱、扉・ファン・ハースローラーなど貫通部からの放散熱量となっている。

本報では、これらのエネルギー損失のうち、大きな割合を占める炉殻からの放散熱量と焼入れ油温度制御によるエネルギー損失、雰囲気ガス生成・加熱に必要なエネ

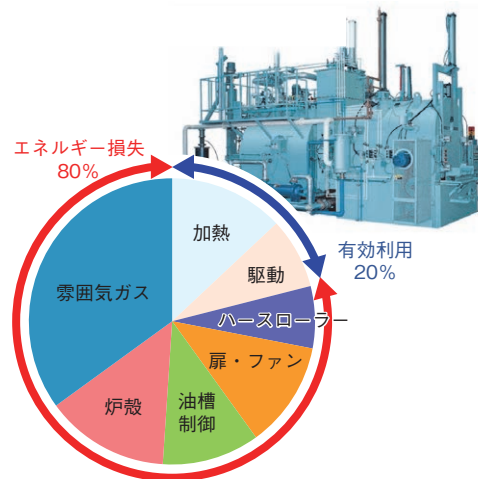


図2 バッチ炉エネルギー消費量内訳
Batch furnace energy consumption

ルギーに着目し、それぞれに対応する省エネルギー技術を開発した。それらを実機検証した結果を報告する。

3. カーボンニュートラル達成のための省エネルギー技術

3.1 炉体断熱性の向上²⁾

まず、炉殻からの放散熱量を削減するため、炉体の断熱構造を再検討した。従来のガス浸炭炉は図3に示すとおり、炉内側から外側に向けて断熱れんが、高温用断熱ボード、低温用断熱ボードという構造になっている。一方、新たに開発した省エネルギー炉では断熱性向上のため、株式会社ジェイテクトサーモシステムで開発した高断熱性能を有するスーパーモルダサーム^{®2)} (以下、SMT) を高温側である炉内側最表面に配置し、低温側の炉外側最表面には多孔質断熱ボードを配置した構造としている。SMTは主成分がセラミックファイバーで微粒子を配合・分散・吸着した断熱材であり、高温領域で優れた断熱性能を有するため、炉内の最表面に配置することで、炉体からの放散熱量を大きく削減できる。それにより熱処理工場内の環境温度が下がり、作業環境の改善も可能となる。

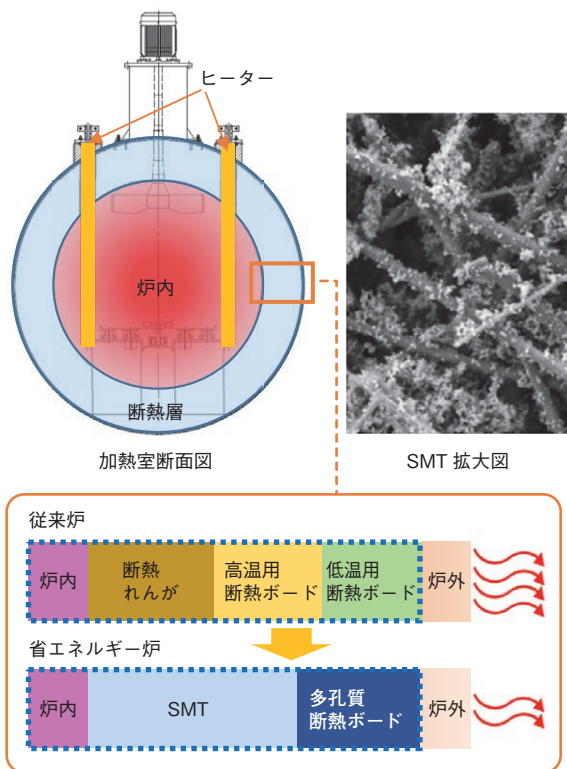


図3 エネルギー炉の断熱構造
Energy-saving furnace insulation structure

3.2 焼入れ油温度制御方法の最適化²⁾

図4に、熱処理炉における一連の工程と焼入れ油温度の制御方法を示す。熱処理の油冷工程では、850℃程度に加熱された製品が焼入れされ、焼入れ油の温度が10～20℃程度上昇する。そのため、次の処理の焼入れまでに、この上昇した温度を設定温度へ冷却する必要がある。従来の焼入れ油の温度制御は、焼入れ時に上昇した温度がすみやかに設定温度になるよう、熱交換器を使って強制的に冷却している。また、焼入れ油の温度が設定温度に到達すると、ヒーターのオン・オフを繰り返して設定温度を保持するため、多くの電力を消費していた。そこで、焼入れ油を強制的に冷却する方法を見直し、次の焼入れタイミングまでに焼入れ油温度を徐々に設定温度まで冷却するよう、制御方法を最適化する。この方法により、温度保持に使用していたヒーターの消費電力を削減する。

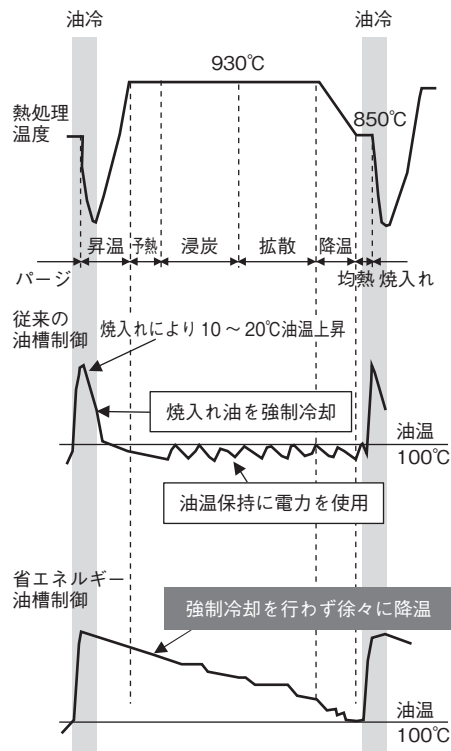


図4 焼入れ油温度制御方法の概要
Overview of quenching oil temperature control method

3.3 雰囲気ガスの削減²⁾

図5に、熱処理パターンと雰囲気ガス量の関係を示す。浸炭処理ではCO、N₂、H₂を主成分とする変成ガスを多量のエネルギーを消費しながら変成炉で生成し、この変成ガスを熱処理炉へ常時一定流量導入するのが一般的

である。熱処理炉では製品の投入・排出などのタイミングで炉内扉が開閉し、加熱炉と焼入れ油槽内の圧力が大きく変動する。このタイミングで炉内、油槽内が負圧になると未燃焼エアーを吸い込み、爆発のリスクとなる。そのため、炉内が負圧にならないよう加熱炉には常時大流量の変成ガスを導入しているが、それ以外の圧力が安定したタイミングでは、過剰な変成ガスの投入となっている。今回開発した炉では、**図5**に示すとおり常時小流量の変成ガスを投入し、炉内圧力が乱れるタイミングはN₂ガスを追加投入(N₂ショット)することで、変成ガスの削減を図る。

また、別の方策として、変成炉でのガス生成量を必要に応じて自動調整する方法もある。これは、**図5**の圧力安定領域では小流量の変成ガスを導入し、炉内圧力が乱れるタイミングはN₂の代わりに大流量の変成ガスを導入するシステムであり、N₂ショットと同様に大きな変成ガス削減効果が得られる。

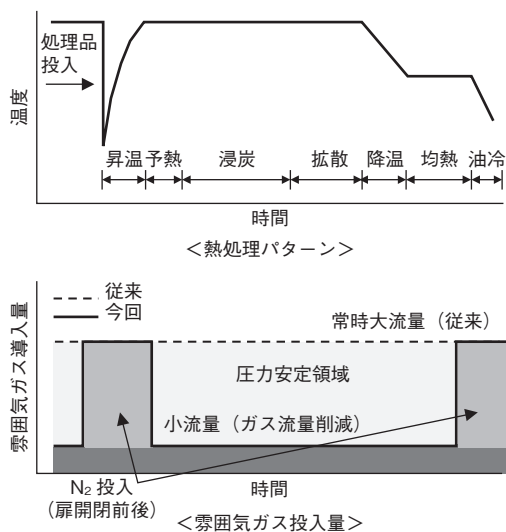


図5 熱処理パターンと霧囲気ガス量の関係

Relationship between heat treatment pattern and amount of Endothermic gas

4. 実機検証結果

4.1 炉体断熱性の向上

電気加熱式バッチ炉のオーバーホールの際に、炉内断熱構造を従来のれんが構成から省エネルギー仕様のSMTと多孔質断熱ボードの構成に更新し、霧囲気を安定させるため、触媒を投入した。本構成の断熱性能を確認するため、炉内温度を930℃に保持した際の消費電力を更新前後で比較した結果を**図6**に示す。消費電力は更新前の21.7kWに対して、更新後は16.9kWとなり、

4.8kW (-22%)の電力を削減できた。

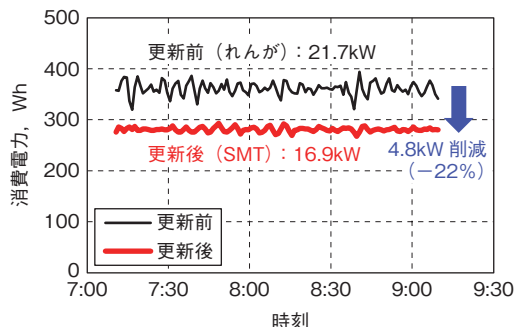


図6 930℃空炉時の消費電力の比較

Comparison of power consumption by empty furnace at 930℃

次に、断熱材更新前後で浸炭処理した製品の有効硬化層深さを比較したところ、**図7**に示すとおり12%程度有効硬化層深さが深くなる結果が得られた。この要因調査として、炉内のガス成分を比較すると、浸炭反応に寄与するCO濃度が23%から25%に増加しており、より浸炭されやすいガス成分になっていることが確認できた。上記より、処理時間を40分短縮しても従来同等の有効硬化層深さが得られるため、処理時間短縮による生産量増加が見込める。ただし、本効果の持続性についてはさらなる調査が必要である。

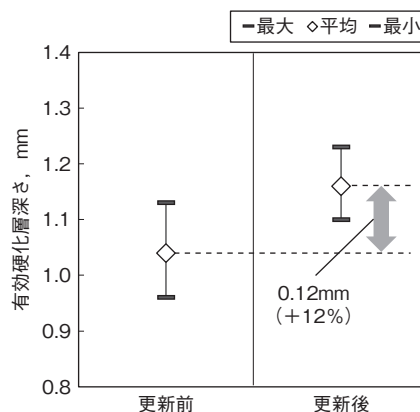


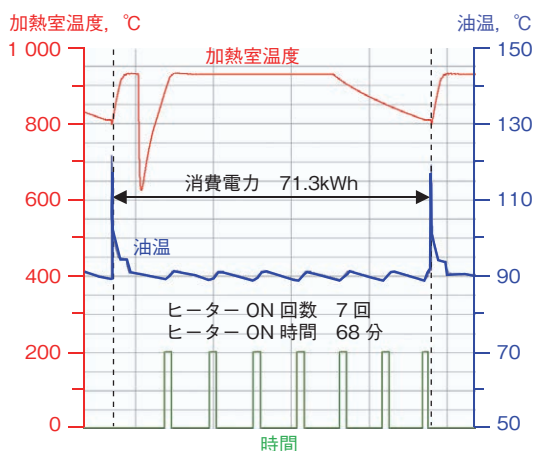
図7 有効硬化層深さの比較

Comparison of effective case depth

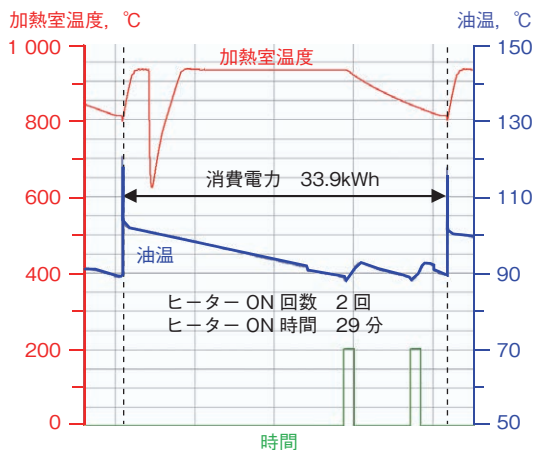
4.2 焼入れ油温度制御方法の最適化

ヒーターで油槽の温度制御を実施している炉について、前述のとおり焼入れ油の冷却完了が焼入れ直前となるように温度制御方法を最適化した。具体的には焼入れ後の強制冷却を行わず、緩やかに冷却することで、熱源としてのヒーターや焼入れ油循環ポンプ、かくはん機の

消費電力について最小化を図った。この焼入れ油温度制御の最適化により、**図8**に示すように処理1回当たり37.4kWhの電力削減が確認できた。今回改造した炉の油種は熱処理歪と焼入性を両立可能なセミホット油で、温度は90℃に制御しているが、焼入れ油温度がより高いホット油を使用している炉であれば、温度保持のためにより多くのエネルギーが必要となるので、さらなる削減効果が期待できる。また、焼入れは製品の熱処理品質を決定する重要な要因であるため、改造前後の熱処理品質も調査したが両者に有意差はなく、改造後も従来同等の品質が得られたことを確認している。



<従来の油槽制御>



<省エネルギー油槽制御>

図8 焼入れ油温度制御最適化によるエネルギー効果
Energy saving effect of optimization of quenching oil temperature control

4.3 雰囲気ガスの削減

N₂ ショットの基礎評価として、浸炭処理の際に変成ガス導入量を従来の3分の2に削減したときと、3分の1に削減したときで、炉内ガス成分(H₂濃度、CO濃度)と熱処理品質を評価した。変成ガス導入量を削減すると、

図9に示すとおり浸炭反応に寄与するH₂濃度が最大2%程度増加し、CO濃度が最大1%程度減少した。一方、**図10**に示す有効硬化層深さなどの熱処理品質については、変成ガス導入量を3分の1に削減しても、従来同等の品質を確保できることが確認できた。今後は熱処理炉としての安全性を担保するため、扉開閉時など炉内、油槽内の圧力が大きく変動するタイミングでのN₂導入量を最適化するとともに、最適なN₂導入箇所を見極め、本技術の量産展開を目指す。

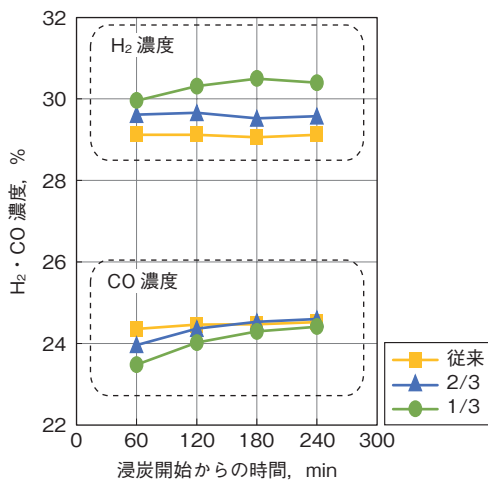


図9 変成ガス削減時の炉内ガス成分
Furnace gas composition during Endothermic gas reduction

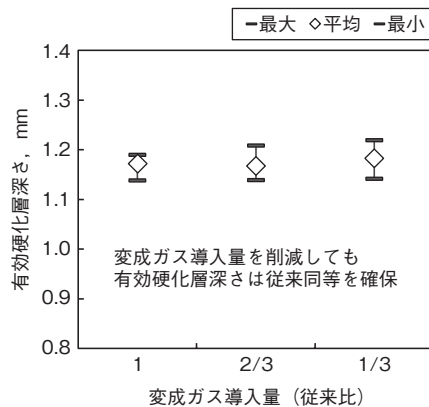


図10 変成ガス削減時の熱処理品質
Heat treatment quality during endothermic gas reduction

5. 水素バーナー化による熱源カーボンニュートラル

カーボンニュートラルの実現に向けたさらなる方策として、水素バーナーの熱処理炉への適用可否を評価した。水素燃料は、燃焼時にCO₂を排出しないクリーンな燃料であるため、熱源から発生するCO₂をゼロにできる。

一方で、漏れやすく燃えやすい、発熱量が都市ガスの約4分の1倍などの特長を有するため、安全性、昇温能力、排ガス特性、コストについて実際にバッチ炉に水素バーナーを導入して確認した。

安全性については、水素検知器などの漏れ対策、消炎素子や逆止弁での逆火対策をすることで、問題ないことを確認した。昇温能力については、都市ガスと水素での炉内温度分布を比較し、燃料の違いによる温度特性の差異がないことを確認した。一方、排ガス特性では、表1に示すとおり換算NO_xは基準値以下となったが、都市ガスに比べて大きく増加するため、今後はNO_x低減対策を進める必要がある。さらに、燃料消費量については都市ガスの4倍にも及ぶ結果となった。

以上より、水素バーナーは技術的には熱処理炉への適用可能と判断できる。しかし、水素ガスが高価なことから熱処理コストが上昇するため現時点では製造コストの悪化を余儀なくされる。そのため、水素価格を注視し、投入タイミングを見極める必要がある。

表1 都市ガスと水素の排ガス特性比較

Comparison of exhaust gas characteristics between town gas and H₂ gas

	換算 NO _x (ppm)	CO (ppm)	露点 (°C)
判断基準	≤ 180	≤ 0	≤ 500
都市ガス	70 ~ 97	○ 0	○ 54.3
水素	114 ~ 143	○ 0	○ 65.0

6. おわりに

熱処理工程はその他の工程に比べて多くのCO₂を排出している。特に熱処理炉は1基当たりのCO₂排出量が非常に多いことから、カーボンニュートラルを達成するには、熱処理炉の省エネルギー対策は急務である。また、熱処理炉は一度導入すると30年以上使用することが多いため、既存炉に対するCO₂排出量削減技術も要求される。本報で述べた省エネルギー技術の適用は既存炉への改造が可能のため、大きな投資をすることなくCO₂排出量を削減できる。スーパーモルダサム®による炉体断熱性の向上や焼入れ油温度制御方法の最適化、雰囲気ガスの削減など三つの省エネルギー技術を適用することで、既存炉のエネルギー損失のおよそ35%が削減可能となる。また、熱源のCO₂排出量をゼロにできる水素バーナーを導入することで、製品加熱を含むバッチ炉での消費エネルギーをおよそ65%削減できる。さ

らに、技術的な難易度は高いが、今後は投入したエネルギーを無駄なく活用できる排熱利用などについても積極的に検討する。そして熱処理工程がカーボンニュートラル達成に貢献できるように、今後も開発を推進していく。

*モルダサム®は、株式会社ジェイテクトサーモシステムの登録商標です。

参考文献

- 1) 経済産業省：地球温暖化対策計画(令和3年10月22日), https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/ontaikeikaku/keikaku_honbun.pdf (2021) .
- 2) 山本亮介:脱炭素社会に向けた熱処理装置の動向と活用, 熱処理, 63巻, 3号(2023)116-119.

筆者



平出裕紀*
Y. HIRADE



小栗正彦*
M. OGURI



松原 周**
A. MATSUBARA



松本公明**
K. MATSUMOTO



三枝賢治**
K. SAIGUSA

* 生産技術本部 熱処理生技部

** 株式会社ジェイテクトサーモシステム
工業加熱装置部