

技術資料



Technical Data

高圧浸窒機能を備えた真空浸炭浸窒炉「ModulTherm」の開発

田村和之^{*1}, 林 建太^{*1}, 林 幸宏^{*2}, 辻井健太^{*3}

Development of the “ModulTherm” Vacuum Carburizing and Nitriding Furnace with High Pressure Nitriding Capability

Kazuyuki TAMURA, Kenta HAYASHI, Yukihiro HAYASHI and Kenta TSUJII

Synopsis

Gear components used in the powertrain of electrified vehicles are used at higher rotation speeds compared to ICE vehicles. As a result, these components are required to have higher strength and lower strain. To meet this demand, Daido Steel Co., Ltd. has developed the ModulTherm heat treatment furnace, which combines vacuum carburizing and high-pressure nitriding. In conventional carburizing treatment, high strength and low strain are contradictory characteristics, resulting in increased manufacturing costs. However, ModulTherm solves these problems by combining pulse carburizing under vacuum pressure and nitriding treatment with NH_3 concentration control in a high-pressure atmosphere. Carburizing and nitriding with ModulTherm improved the temper softening resistance of the treated product, and a roller-pitching test confirmed an increase in life of 8.5 times. In addition, ModulTherm was confirmed to have a 35% energy-saving performance compared to conventional gas carbonitriding furnaces. ModulTherm is expected to contribute to the production of high-strength, low-strain parts in various fields, including the automotive industry.

1. はじめに

自動車用エンジンや駆動系部品に用いられるギヤやシャフト状の製品では、複雑な形状ゆえに鍛造や切削加工などが行われ、当然ながら柔らかいほど加工性が良い。一方で、組立時や使用時には耐久性を高めるために表層のみ硬く、深部は粘り強さが求められる。この相反する特性を付与するための代表的な熱処理が浸炭処理（浸炭焼入れ処理）であり、工業炉を用いて実用化・量産適用されている。

浸炭焼入れ処理は、900℃前後に加熱した鋼材部品の表面に炭素を浸入させて表層付近の炭素濃度を高め、油中に浸漬して急冷（焼入れ）する熱処理方法である。炭素が過飽和固溶したことによる固溶強化をはじめとする各種強化機構を含むマルテンサイト組織によって、部品の表面は硬化する。

従来技術としてはガスを燃焼させるガス浸炭炉が主流であったが、近年はよりエネルギー効率の高い真空浸炭炉が普及し始めている。真空浸炭炉は減圧下で熱処理を行うため、製品表面の酸化を防ぐことができ、外観・意匠の低下も抑えることができる。

2025年4月8日 受付

* 1 大同特殊鋼(株)機械事業部 (Machinery Division, Daido Steel Co., Ltd.)

* 2 大同特殊鋼(株)知多工場 (Chita Plant, Daido Steel Co., Ltd.)

* 3 大同特殊鋼(株)技術開発研究所 (Corporate Research & Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

Table 1 に大同特殊鋼(株) (以下、当社という) が製造・販売する真空浸炭炉 ModulTherm および SyncroTherm[®] の主な仕様を示す。いずれの機種も基本技術はドイツ ALD 社が開発したもので、当社は JIS その他国内規格に準拠するようあらためて設計したものを製造・販売している¹⁾。ModulTherm と SyncroTherm[®] の大きな違いは 1 バッチ (一度に熱処理する単位) 当たりの処理量と焼入方式である。ModulTherm は 1 バッチ当たり最大で 500 kg を処理可能であり、基本コンセプトとしては大バッチ炉である。焼入れ方式としては日本国内において一般的な油焼入れを行う。SyncroTherm[®] は 1 バッチ当たり最大で 50 kg と ModulTherm の 1/10 ではあるが、処理量が少ないが故に短時間で加熱可能な点と、少量をガス焼入れすることで油焼入と比較してひずみを抑えた熱処理が可能である点²⁾ が特徴である。

2. 市場予測

Fig. 1 に自動車向けギヤにおける開発トレンドを示す。従来型内燃機関のミッションなどに用いられるギヤと比較して、電動化車両 (ICE+ モータで構成

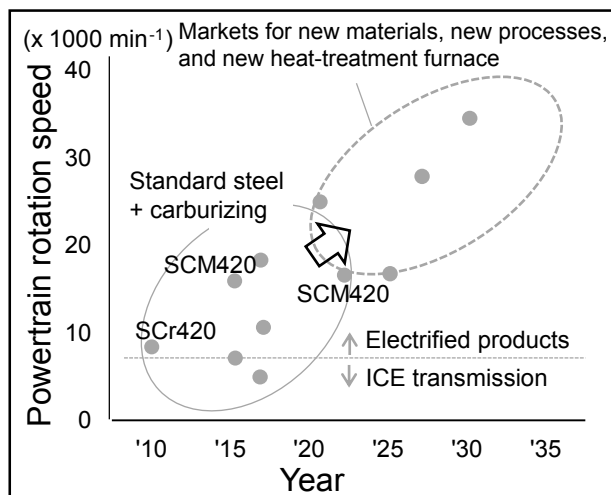


Fig.1. Development trends and market forecasts for electrified products.

されるハイブリッド車、電気自動車、燃料電池車など) のパワートレインは 10000 ~ 30000 min⁻¹ と高回転領域で使用される。これまでは標準鋼に浸炭処理を組み合わせ対応していた領域であるが、今後はさらなる高回転化が予測され、新たな鋼種、プロセス、そして熱処理炉の市場が期待できる。高回転で使用されるギヤに求められる特性は大きく 2 つが挙げられ、高負荷環境で十分な耐久性を発揮するための面疲労強度の向上と、ノイズ、振動を抑えるための低ひずみ化である。従来の浸炭処理では高強度化と低ひずみ化は相反するものであり、例えば浸炭工程の後工程で歪とり加工を追加するなどの手当が必要であり、製造コスト増加の要因となっていた。

近年、これまで課題となっている面疲労強度の向上と低ひずみ化を両立するための手段として浸炭浸窒処理に期待が高まっている。当社は、2024 年に省エネルギー性に優れた真空炉をベースとして浸炭浸窒処理が可能な ModulTherm を開発し、販売を開始した³⁾。

本稿では、プレスリリース仕様に加えて高圧下での浸窒機能を新たに実装した ModulTherm を解説する。

3. 真空浸炭・高圧浸窒プロセス

当社の提供する浸炭プロセスはパルス浸炭である。C₂H₂ ガスを導入する浸炭期と N₂ ガスを導入する拡散期を必要な回数繰り返すことが特徴であり、シミュレーションソフト浸炭くん[®] によって最適なパルスが計算される。浸炭期では一時的には鋼材表面に黒鉛が形成されるまで高い炭素濃度となり、この黒鉛との平衡反応⁴⁾ によって C を理論上の最高速度で拡散させる。これにより従来型のガス浸炭プロセスと比較して短時間のうちにプロセスが完了する。

一方、浸窒プロセスでは雰囲気中に含まれる NH₃ が鋼材表面において下記式 (1) のように分解し、N 原子が鋼材の表層部に導入される。



Table 1. Specification of Daido's vacuum carburizing furnace.

	ModulTherm	SyncroTherm [®]
Production Capacity	5~20 ton/day	1~5 ton/day
Effective dimensions	L 1000 × W 600 × H 750 mm	L 600 × W 500 × H 150 mm
Load Capacity	Max.500 kg	Max.50 kg
Quenching method	Oil Quench	Gas quench (Max.0.9 MPaG)
Footprint	450 m ² (30 m × 15 m) *TC1~TC6	28 m ² (4.6 m × 6 m)
Release year	2005	2013

ここで、[N] は、鋼材に取り込まれたN原子を意味し、 NH_3 が分解した結果として H_2 が発生する。一般的な浸窒方法としては一定流量の NH_3 を炉内に導入する定流量制御が用いられている。これまで ModulTherm および SyncroTherm[®] を用いてさまざまな条件のもとで基礎実験を継続してきたが、真空浸炭に続いて行う浸窒処理の品質を安定させることが難しい課題があった。真空浸炭に続いて行われる浸窒品質にばらつきが生じやすい原因として、大きくふたつの要素を見出した。

- (1) NH_3 流量制御では、 NH_3 濃度が処理条件ごとに变化するため、浸窒品質がばらつくことがある。
- (2) 表層部に導入される N 原子の濃度は圧力に影響され、圧力が低い程 N 原子の吸収量が低下し、圧力が高い程 N 原子の吸収量は増加する。

このため浸炭処理を真空中で行った場合でも、その後の浸窒処理については大気圧付近で行うことが有効である。これらの知見から、浸窒品質の安定化を目的として真空中から大気圧以上まで処理室内の圧力を制御可能な ModulTherm を採用し、かつ処理室内の NH_3 分圧に着目した NH_3 濃度制御による雰囲気処理を行うこととした。

Fig. 2 に ModulTherm の外観を示す。ModulTherm は複数の処理室、搬送モジュール + 保温室、焼入モジュールから構成される熱処理設備であり、この例では処理室として浸炭室と浸窒室、そして油焼入モジュールを持つ。

Fig. 3 に ModulTherm によって実施される典型的な真空浸炭・高圧浸窒プロセスの一例を示す。はじめに大気中の O_2 の影響を除外するため搬送モジュール内で真空排気された製品は、第一プロセスである浸炭処理を行うため浸炭室に投入される。ここでおよそ 930°C から 1050°C の温度域まで加熱を行う。加熱方法としては 120 kPa まで加圧した雰囲気加熱と真空加熱を組み合わせることが主である。特に雰囲気加熱中に攪拌扇を稼働させ対流加熱とすることで加熱時間を短縮できる。十分に均熱された後、浸炭圧力（例えば 1500 Pa ）に調整し、浸炭プロセスを開始する。ここに示す例では浸炭時間が 38 分であり、これは浸炭くん[®] によって浸窒時の C の拡散も考慮にいれ計算された最適レシピである。

第二プロセスである浸窒処理での温度はおよそ 770°C から 930°C の温度域であり、ここで示す例では処理時間は $60 \sim 300$ 分である。前述の通り、N の拡散と同時に C の拡散も進行するため、全体を通した処理時間は浸炭時間と浸窒時間の単純加算と比べて短くなる。処理圧力に関しては (2) 項の通り、圧力が高いほど N の収率が向上するため、大気圧からおよそ 160 kPa の範囲で設定する。処理圧力が高まることで、より高温であっても NH_3 分圧を高くすることが可能となり、従来よりも浸窒

処理の高温化、浸窒時間の大幅な短縮も可能となった。例えば、 930°C で浸窒処理する場合、浸炭処理の拡散期を浸窒処理に置き換えただけの処理が可能で、浸炭処理と同等の処理時間で浸炭浸窒処理が可能となる。浸窒シミュレーションソフトである浸窒くん[®] を用いれば、設定した浸窒処理条件、すなわち温度、時間、狙い NH_3 濃度、鋼材表面積、処理圧力といった入力項から鋼材 N 濃度分布を予測可能である。

浸窒処理完了後は保温室に製品を移し、焼入れ前温度に整えながら油焼入モジュールに投入し油焼入れを行う。ここでの処理圧力は大気圧、または減圧下にて実施する。浸窒温度と焼入れ前温度が等しい条件を設定した場合は、降温均熱時間を短縮できるといった利点も挙げられる。

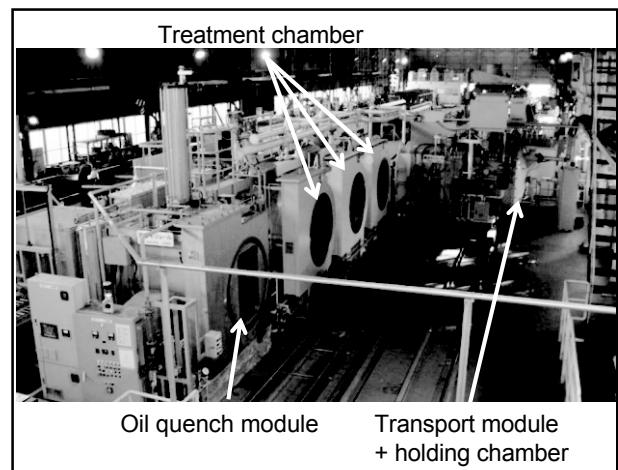


Fig. 2. Appearance of ModulTherm.

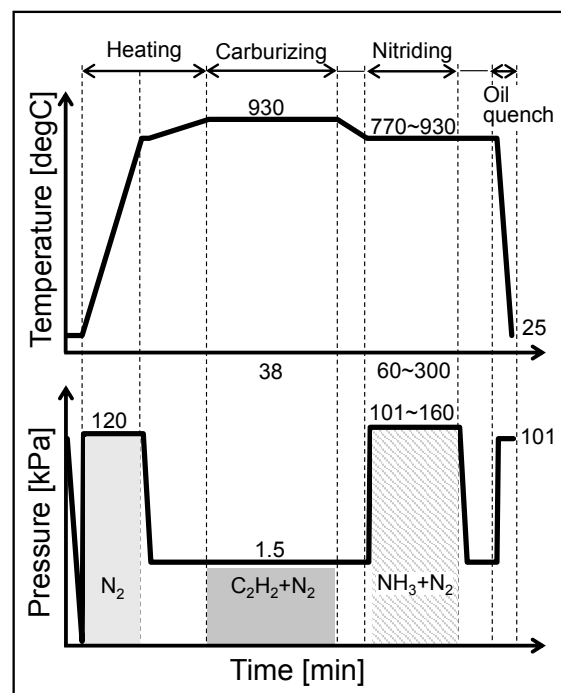


Fig. 3. Typical carbonitriding process.

4. 改造箇所

3項に示した真空浸炭・高圧浸窒プロセスをModulTherm上で実現するため、浸窒室は浸炭室をベースとして次に示す改造を加えている。

(1) 高圧雰囲気への対応

浸窒室内を高圧雰囲気に維持管理するため、圧力コントロールバルブを従来よりも高圧仕様とし、応答性の高いものを採用している。また、安全設計として各種安全弁についても同様に高圧仕様とし、安全弁から雰囲気が出た場合でも工場内に拡散しないよう後述する排気ガス無害化装置へと導いている。

(2) NH_3 ガス導入システムの追加

浸窒処理に対応するため、工場ユーティリティに NH_3 供給システムを増設している。本稿で示す最小単位の実験炉（すなわち浸炭1室、浸窒1室）の規模では小型の液化 NH_3 ボンベで運用可能であり、各種漏洩対策を施したシリンドーキャビネット内にボンベを格納している。 NH_3 ガス供給能力は液化 NH_3 の気化速度に律速される。量産時はより多くの NH_3 を必要とするため、大型の液化 NH_3 タンクを備えて生産量に応じたガス供給量を確保する必要がある。浸窒室内に NH_3 を導入する方法としては質量流量計（Mass Flow Controller, 以下MFC）を用いており浸炭室に C_2H_2 を導入する方法と同様であるが、違いとしては NH_3 に対応する機種を選定している。

(3) NH_3 ガスによる腐食対策

NH_3 によって腐食する材料としては一般的に銅が挙げられる。銅は真空炉で多用される材料であり、冷却部材・摺動摩擦部・ガスケットなど多岐にわたり、これらを腐食の程度を見極めながら必要な箇所について耐腐食材へ置き換えている。

(4) 浸窒室内雰囲気の分析装置

Fig. 4に浸窒室内雰囲気の分析装置の概要を示す。また、Fig. 5にフィードバック制御時の目標 NH_3 濃度とMFCの NH_3 流量の概要を示す。分析装置を用いて浸窒室内の雰囲気を常時計測し、適切な浸窒雰囲気を維持することで、高い浸窒収率と安定した品質の両立を実現している。雰囲気計測に用いるセンサとしては NH_3 センサと H_2 センサの2種類を用いている。これらは浸窒室に直接取り付けても分析上の制約は無いものの、センサが常時高い温度に晒されるためセンサ寿命が短くなることが懸念される。センサ保護の観点から、分析装置一式を浸窒室から遠方に配置することで熱の影響を抑えている。分析装置が遠方にあってもサンプリング速度が十分であれば応答性などの問題は生じない。浸窒室の雰囲気

制御方法としてはフィードバック制御としており、あらかじめ設定した一定流量を導入する定流量制御とは異なる。 NH_3 センサで検出した浸窒室内雰囲気濃度の値を調節計に伝達し、MFCにフィードバックして導入ガス量を適宜調整する。センサを通過した後の排気ガス（ NH_3 , H_2 , N_2 , HCN またはそれらの混合ガス）は後述する排気ガス無害化装置へと排気する。

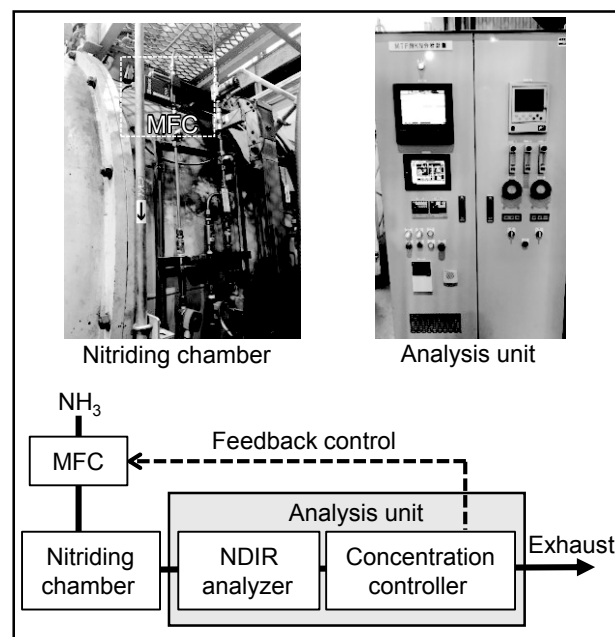


Fig. 4. Schematic of nitriding concentration controller.

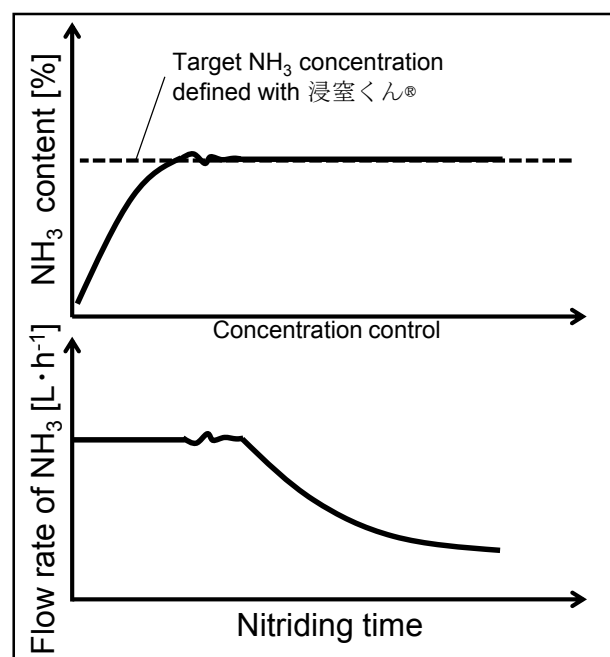


Fig. 5. Typical control result during nitriding.

(5) 排気ガス無害化装置

浸窒室の圧力コントロールバルブと分析装置から排出される排気ガスには未分解の NH_3 ガスなどが含まれるため、これを安全かつ環境影響が無い水準まで無害化処理するため排気ガス無害化装置を設けている。通常濃度の排気ガスのほか、何らかの不適合によってプロセスが正常に行われなかった場合の排気ガスも考慮する必要がある。排気ガス無害化方法は種々あるが、当社の実験炉においては Fig. 6 に示す、小型のバーナを用いた燃焼処理方法を採用している。フェイルセーフとして、バーナが失火した場合に備え大量の大气で希釈するブローファンを兼備する。バーナの燃料としては都市ガスまたは C_3H_8 のどちらも使用実績があり、設備納入先の調達都合に合わせて選択可能である。排気ガス無害化目標としては納入先の環境規制値に従うもので、当社実験炉の場合は愛知県の法令に準拠する。排気ガス無害化装置を経て大気放出される排気ガス中の有害物質濃度、および燃焼によって生じる NO_x のいずれも環境規制値を満足する結果が得られている。他方、工場内での燃焼処理が困難な納入先に対しては、生産量から想定される排気ガス量に応じた代替装置（例えば、スクラバ排気洗浄塔など）の提案を行っていく。

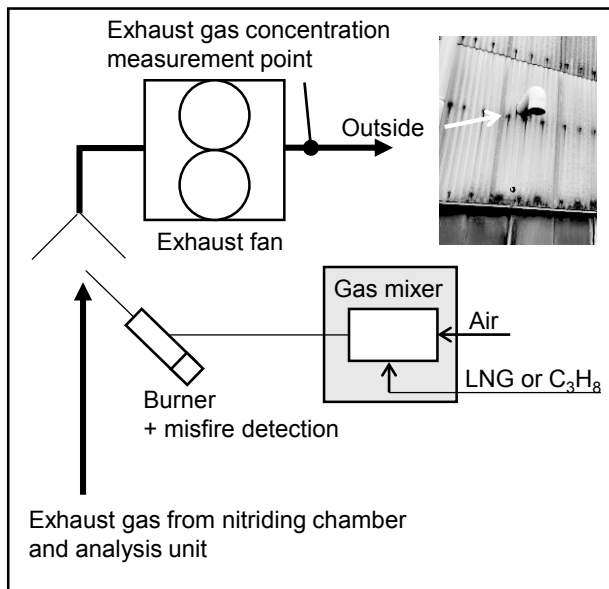


Fig. 6. Schematic of emissions control system during nitriding.

5. 本プロセスの効果

Fig. 7 に量産負荷を想定した ModulTherm の実験荷姿を示す。この荷姿はダミー材を用いて表面積を 2 ～ 10 m^2

まで可変することができ、調査したい箇所に試験片を取り付けることで浸炭浸窒プロセスの妥当性を検証することができる。ModulTherm を用いて行われた辻井⁵⁾らの研究により、鋼材 N 濃度が高いほど焼戻し軟化抵抗が向上することが JIS-SCr420H 相当試験片の特性調査によって確認されている。その効果は 300℃～500℃付近まで発揮され、高温で焼戻しを行っても硬さを保つことがわかっている。この効果をさらに検証するため、ローラーピッチング試験を行い、浸炭材と比較して浸炭浸窒材では 8.5 倍の寿命向上効果が確認された。この長寿命化には 300℃付近での焼戻し軟化抵抗の向上が寄与していると考察している。

この優れた特性は浸炭浸窒処理によって得られたものであり、従来の浸炭処理と比較して高強度ギヤ部品の実用化に応える技術である。車両の電動化によって高強度化、低ひずみ化といった特性向上が益々求められるなか、本プロセスが一層普及していくものと期待される。

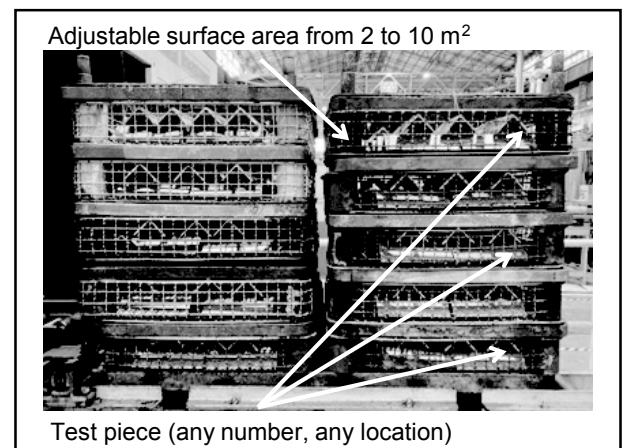


Fig. 7. Dummy loads used for quality verification of carburizing and nitriding process.

6. 省エネルギー性能

当社の ModulTherm は従来型のガス浸炭浸窒炉と比較して高い省エネルギー性能を誇る。ModulTherm は熱源として電気ヒータを使用するため、ガス燃焼方式のガス浸炭浸窒炉に比べ CO_2 排出量が少ない。炉体構造としては 2 種類の断熱材と水冷ジャケット方式の炉殻を組み合わせ、断熱性能に優れ、かつ周囲への熱放散も抑えることができるため、工場内の作業環境にも優しい。設備立ち上げ時間が約 2 時間と短時間（焼入油の昇温時間を除く）で完了することも利点であり、週末ごとに設備を休転することで処理室内温度の維持や雰囲気ガスの管理

が不要となり、無駄な待機エネルギーを削減することができる。同時に労務面としても設備の立ち上げ・立ち下げに係る変則勤務シフトが解消できることで労務コストの削減効果も期待できる。

Fig. 8 に当社が実験炉として保有しているガス浸炭浸窒炉と ModulTherm の CO₂ 原単位の比較を示す。典型的な浸炭浸窒レシピを前提としたときの CO₂ 原単位 (CO₂ - kg/製品 kg) として 35% の削減効果が見込める。これは CO₂ 換算係数として 0.388 (CO₂ - kg/kWh, 2021 年度中部電力(株)速報値) を用いて算出した当社測定値である。内訳としては排気ガスによる熱エネルギー損失と消費電力量のどちらも低減効果が認められ、ModulTherm の省エネルギー性能が発揮できていることを確認できた。

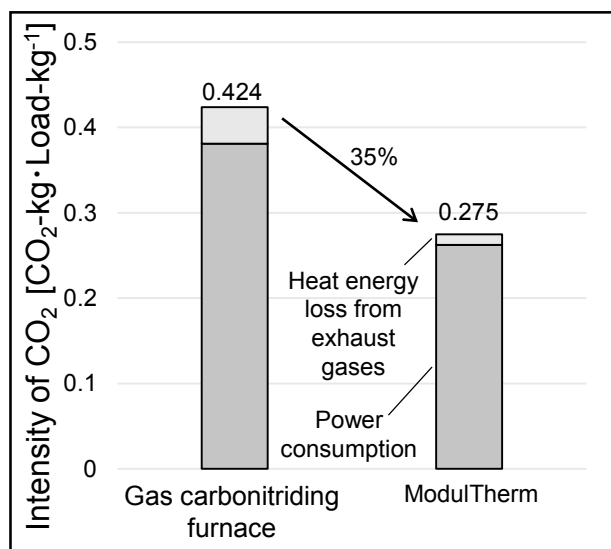


Fig. 8. Comparison of energy saving effects (Daido's furnace).

7. おわりに

ModulTherm は当社滝春テクノセンター内において実験炉として見学が可能であり、さらに賃処理、試作評価、設備導入前の製品品質確認、量産立ち上げ前の条件出しといった用途として多方可らご活用いただいている。浸炭浸窒処理についてもテスト処理が可能であり、実際の製品を用いた品質検証によってその有効性をご確認いただくと幸甚である。また、従来型の ModulTherm に部分的な改造を施すことで浸窒機能を追加実装することも可能であり、新設・既設改造のどちらの場合も対応可能である。

浸炭浸窒処理は多くの魅力的な特徴があるが、適切なレシピを用いなければ、処理室内は浸炭による煤や

浸窒時の NH₃ の影響によってたちまち汚染され、20 年、30 年といった長期間の連続生産には耐えられない。当社の提供する設備+シミュレーションソフトのパッケージという販売形態は、従来の競合製品と比較して熱処理レシピ作成と操業操作が容易であることに利点がある。また、レシピの妥当性確認と製品の品質確認という点では鋼材に関する高度な知見が必要であり、鋼材メーカーである当社の利点が最大限発揮される場所である。当社は独自に読み解いた複雑な理論をベースに、設備・材料・プロセスの開発を継続しており、ユーザとともにより良い製品開発に向けて全社で一丸となってサポート体制を提供していきたい所存である。

(商 標)

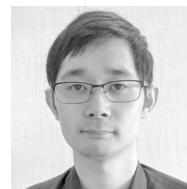
- ・ ModulTherm は ALD Vacuum Technologies 社の登録商標です。
- ・ SyncroTherm, シンクロサーモ, 浸炭くん, 浸窒くん は大同特殊鋼(株)の登録商標です。

(文 献)

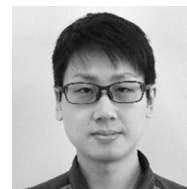
- 1) 堀哲: エレクトロヒート, 221(2018), 19.
- 2) V. Heuer, K. Loeser, T. Leist, D. Bolton: American Gear Manufacturers Association, ISBN: 978-1-61481-054-4(2012)
- 3) 森田敏之, 井上幸一郎, 羽生田智紀: 電気製鋼, 77(2006), 5.
- 4) 真空浸炭炉「ModulTherm」に浸窒機能を追加し 2024 年 4 月から販売～自動車の電動化に伴う部品の高強度化ニーズに CO₂低排出+省エネで対応～: 大同特殊鋼プレスリリース, (2024)
- 5) 辻井健太, 林幸宏, 山崎歩見, 林建太: 電気製鋼, 95(2024), 79.



田村和之



林 建太



林 幸宏



辻井健太