

生産形態に適した浸炭設備

大 下 修*

1. はじめに

自動車等の輸送機器の燃費向上や高出力化などを背景に、部品の軽量化・高強度化への要求がますます高まっており、また生産現場を取り巻く外部環境も急激に変化している。浸炭設備においても高性能化と共に、省人化や環境負荷低減、熱処理現場の作業環境の改善などが求められ、これらの要望に応じられる技術として真空浸炭が期待されている。本稿では真空浸炭とガス浸炭の特性比較、バッチ型・量産型・小ロット型などの設備構成の比較をまじえて浸炭焼入れ設備について解説し、熱処理を取り巻く環境や操業形態との関わりについて考察する。

2. 真空浸炭とガス浸炭の特性比較

2.1 浸炭焼入れ

浸炭焼入れは炭素を含有した鋼材を急冷（焼入れ）すると硬化する特性を利用したもので、鋼材表面に炭素を浸透（浸炭）させた後に焼入れし、内部は靱性を保ったまま表層のみを硬化させる熱処理プロセスである。

一般的に 950℃ に加熱して浸炭、その後に歪低減のため 850℃ に降温保持してから急冷する（図 1）。浸炭焼入れはガス浸炭が主流であるが、現在は真空浸炭が増加しつつあり、真空浸炭とガス浸炭では炭素の浸透プロセスに違いがある。

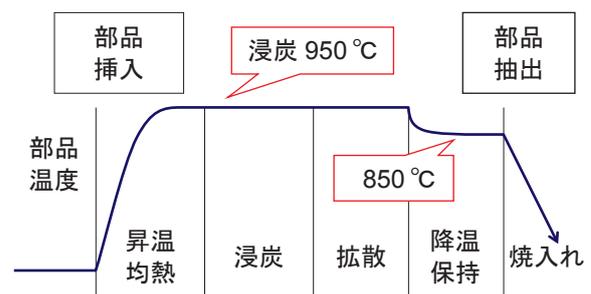


図 1 浸炭ヒートパターン

ガス浸炭は炭化水素ガスから変成した浸炭性ガス（変成ガス）を導入して大気圧状態で浸炭するが、真空浸炭は炉内にアセチレンなどの炭化水素ガスを直接導入して 1 kPa 程度の真空状態で浸炭する。

浸炭焼入れ処理の重要管理ポイントは、真空浸炭、ガス浸炭に関わらず、雰囲気、温度及び焼入れに

* 中外炉工業株式会社 熱処理事業部 真空浸炭設計部 部長 0.0oshita
連絡先 Eメールアドレス：Osamu_0oshita@n.chugai.co.jp

集約される。高品質な製品を安定して生産するには、図2に示す条件を安定して再現・管理できる設備であることが重要である。

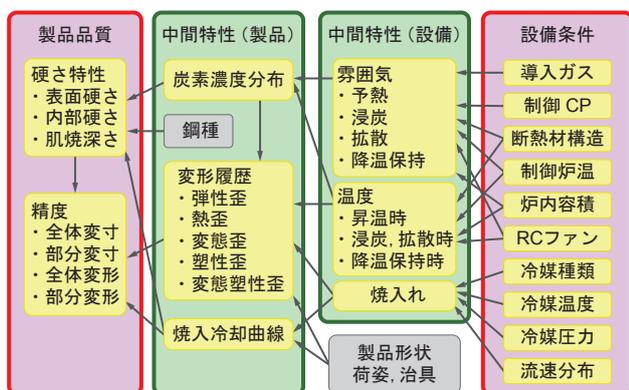


図2 製品品質，設備条件と中間特性

2.2 真空浸炭とガス浸炭の比較

真空浸炭とガス浸炭の比較を表1に示す。

表1 ガス浸炭と真空浸炭の比較
(当社比較) 注) 表中○は有利な項目

	ガス浸炭炉	真空浸炭炉
浸炭ガス	変成ガス	アセチレンガス
炉内圧力	大気圧	~ 1.2 kPa (abs)
処理温度	max.960℃程度	○高温浸炭可
浸炭制御	○CP制御	ガス流量および導入時間で管理
浸炭品質	○過剰浸炭が生じにくい	過剰浸炭対策としてパルス浸炭
	表面に粒界酸化が生じる	○粒界酸化が無く、表面強度が向上
	細穴の浸炭が困難	○細穴浸炭が可能
コスト	○設備費が安価	○保全費は安価
安全性	操作を誤ると火災、爆発の危険がある	○火炎レス、真空のため火災や爆発の可能性は低い
操作性	浸炭の微調整や異常処置に熟練必要	○無人化しやすい ○シーズニング不要
作業環境	設備の放熱で暑い	○炉体放熱が少なく、火炎レスで工場内がクリーン

【浸炭雰囲気】 ガス浸炭は変成ガスにエンリッチガスを添加するが、真空浸炭は百分の一気圧の真空でアセチレンガスにより浸炭する。アセチレンガスの使用量は変成ガスの数%であり設備から排出する温室効果ガスは少ない。

【処理温度】 ガス浸炭は炉内に金属を使用していることから960℃程度が実用上の上限であるが、真空浸炭は炉材に炭素材料などの非金属を使用するので1050℃以上の処理も可能である。高温浸炭で問題となる結晶粒粗大化については浸炭粗大粒防止鋼が開発されており¹⁾、有効硬化層深さ0.6mmの浸炭において浸炭・拡散温度を930℃から1000℃に上げるだけでも浸炭・拡散時間は100分を40分に短縮できるので高温化の効果は大きい。また高濃度浸炭処理²⁾などで用いられる高温浸炭+徐冷+再加熱焼入処理にも適している。

【浸炭制御】 ガス浸炭はCP(カーボンポテンシャル)制御した雰囲気ガス中で浸炭するが、真空浸炭はあらかじめ計算で求めた浸炭レシピに従い浸炭する。真空浸炭では過剰浸炭を防止するため浸炭と拡散を繰り返すパルス浸炭法を一般的に採用する。

【品質】 真空浸炭は過剰浸炭が生じないように注意が必要だが、粒界酸化が無いことから表面強度が向上することや、減圧での浸炭であることから細穴の浸炭が可能といったメリットがある。

【コスト】 真空浸炭は設備費が高価な一方で、炉材に炭素材料やセラミックスを使用するのでカーボンアタックやクリープ変形がなく保全費は安価であり、ランニング費用は浸炭温度が同じ場合はおおむね同等である。真空浸炭においても950℃浸炭が一般的であるが、高温化の効果は大きく、浸炭時間短縮によりランニング費用が低減でき、設備基数を減らせるので設備費や保全費も低減できる。

【安全性】 真空浸炭は火炎レスであり、真空容器内で少量の可燃ガスを使用して処理するので火災や爆発の可能性は極めて低い。

【操作性】 真空浸炭は浸炭プロセスが単純で雰囲気の微調整が不要であり、停電時等の異常時に自動的に安全停止するので、自動起動や自動停炉などの無人化が可能である。また停炉時に真空パックするためシーズニング(断熱材乾燥)が不要で1時間以内に始動できるので夜間停炉などの間欠運転に対応しやすい。

【作業環境】 真空浸炭炉は炉体を水冷しているので設備からの放熱が少なく、火炎レスで燃焼ガスや雰囲気ガスによる汚れが無くクリーンである。

少子高齢化により人材確保が厳しくなる中、熱処理現場では休日や夜間の稼働による勤務時間、工場内の酷暑環境、雰囲気ガスや油脂による汚れ、可燃ガスによる爆発・火災のリスクなどが課題としてある。これらに対して真空浸炭は

- ① 作業の熟練が不要で省人化・無人化しやすい
- ② 設備の立上げ・立下げが容易で速く、休日や夜間停炉などの間欠運転に適している
- ③ クリーンで快適な作業環境とできる
- ④ 爆発火災の危険が極めて少ない

などの特徴があり、今後ますます採用が増えると考えられる。

3. 真空浸炭とガス浸炭の設備比較

浸炭方式として真空浸炭とガス浸炭、生産形態に応じてバッチ型、量産型、小ロットインライン型などの方式を選択し、その組み合わせで設備の仕様が決まる。

以下、当社設備を例に解説する。

3.1 ガス浸炭設備

ガス浸炭設備の代表例として ① バッチ式、② 連続式、③ セミ連続式を紹介する。

表2に仕様の代表例を示す。

表2 ガス浸炭設備の種類と主仕様（当社例）

方式	バッチ式 (ハイ・シフター)	連続式	セミ連続式
用途	多品種用	量産用	左記の中間処理
有効寸法	760×1220×660 H	760×610×660 H	760×1220×660 H
最大積載重量	900 kg/トレイ	400 kg/トレイ	900 kg/トレイ
加熱方式	ガス加熱 / 電熱		
浸炭ガス	変成ガス (R ガス) + エンリッチガス		
浸炭圧力	大気圧		
焼入方式	油冷	油冷	油冷
処理能力	100 % (基準)	約 600 %	約 280 %

3.1.1 バッチ式ガス浸炭炉

バッチ炉は、生産性は連続炉に劣るものの、熱処理条件を変更しやすく、設備費が安価であるメリットがある。

代表的形式としてハイ・シフター®を図3に示す。浸炭処理のほかにガス軟窒化、浸炭窒化処理等も可能である。

また、省エネルギーと作業環境を向上させたフレームレス ハイ・シフター®では、バスタブル (VES.) を真空置換することで装入扉の開時に火炎が無く、変成ガスの使用量を従来型と比較して45%以下に低減できる。

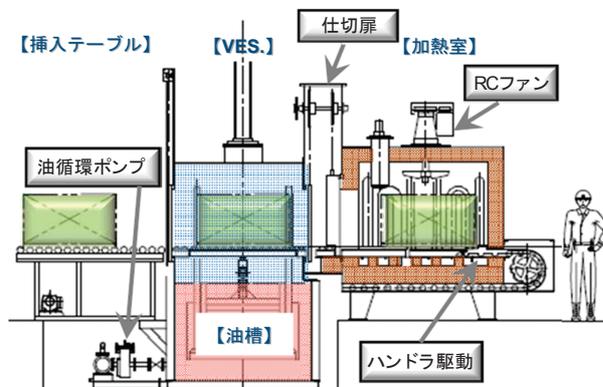


図3 ハイ・シフター®

3.1.2 連続式ガス浸炭炉

連続炉は温度・雰囲気が一定に維持されている処理室中を処理品が移動する方式で、一定周期で装入・抽出が行われる。生産性が高く品質は安定するが、処理条件の変更や停炉を頻繁に行う作業では生産効率が低下する。

ローラーハース (RH) 型、トレイプッシャ (TP) 型、TP と RH の併用型があり、代表例として RH 型連続ガス浸炭設備を図4に示す。

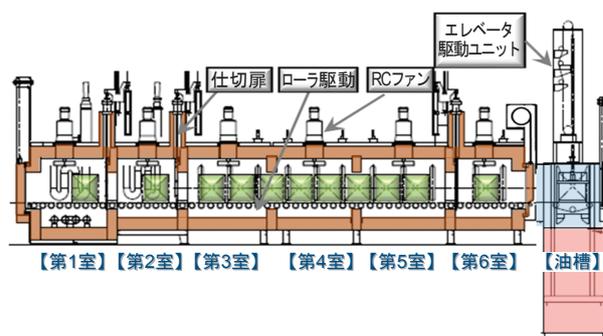


図4 RH型連続式ガス浸炭炉

RH型連続設備では、仕切扉を取り付けられることから、効率的で均一な昇温・降温および雰囲気制御が可能となり、処理時間短縮、設備省スペース化、トレイ内品質ばらつき低減といった効果が得られる。さらに第1室でバーンオフ (脱脂) と予熱を行うことができ、省エネルギー、省スペース、安全性向上のメリットがある。TP型では必要な条件変更や停炉時のダミートレイの装入がRH型では不要であり、またローラ駆動をセクション

分割して独立した異なる速度で搬送することも可能である。これらにより省エネルギーは勿論、条件変更時の待ち時間低減により生産効率や多品種への対応性が向上する。

3.1.3 セミ連続式ガス浸炭炉

バッチ式と連続式ガス浸炭炉を融合した設備で、バッチ式と連続式の中間的な処理量に適している。バッチ式の280%の処理能力があり、装入室、炉内3室、油槽で構成される(図5)。炉内の3室で各々の温度・雰囲気制御ができるので、処理パターンにあわせた最適操業が可能である。装入室と油槽上部の抽出ベスチブルは真空置換式で扉の開時に火炎が無く、安全性と作業環境の向上を図っている。

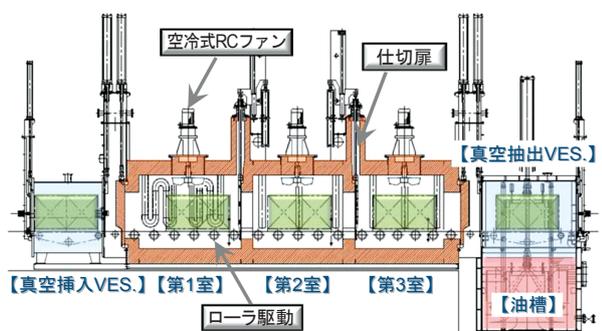


図5 セミ連続式ガス浸炭炉

3.2 真空浸炭設備

真空浸炭設備の代表例には ① バッチ型、② 量産型、③ 小ロット型がある。

表3 真空浸炭設備の種類と主仕様(当社例)

方式	バッチ型 (ユニファルコン)	量産型 (ハイファルコン)	小ロット型 (コンパクトファルコン)
用途	多品種用	量産用	小ロットインライン用
有効寸法	760×1220×660 H	760×1220×700 H	600×500×250 H
最大積載重量	900 kg/トレイ	900 kg/トレイ	100 kg/トレイ
加熱方式	電熱		
浸炭ガス	アセチレン		
浸炭圧力	～1.2 kPa (abs)		
焼入方式	油冷	油冷	油冷 / ガス冷
設備構成	浸炭 : 油槽 = 1 : 1	浸炭 : 油槽 = n : 1 n ≥ 4 が合理的	浸炭 : 油槽 = n : 1 n = 3 or 6 (or 9)
処理能力	100% (基準)	約500% @ 浸炭4室	約100% @ 浸炭6室

バッチ型は多品種少量生産用、量産型は連続式ガス浸炭炉と同様に大量生産用として用いられる。小ロット型はバッチ型よりさらに少量を処理する場合や中間在庫なしで前後工程とインラインで処理する場合に採用される。表3に仕様代表例を示す。

真空浸炭設備共通のメリットであるが、浸炭室や油槽は真空仕様のため焼入れ時の油面圧は任意に選択できるので減圧焼入れなどが可能であり、炉内部品として金属を使用しないのでカーボンアタックやクリープ変形がなく定期交換等のメンテナンス頻度を少なくできる。

3.2.1 バッチ型真空浸炭設備

バッチ型真空浸炭設備の外観を図6に示す。バッチ式ガス浸炭炉と同様に浸炭室と油槽が一体の構成で、多品種少量生産に適した設備であり、バッチ型ガス浸炭ラインに併設して洗浄装置や焼戻炉などの付帯装置を兼用することもできる。

バッチ型は量産型などと異なり浸炭室が油槽と隣接しているため油槽の油煙により浸炭室内が汚染される。その対策として当社では耐熱・耐真空のセラミックチューブを採用し、ヒータ発熱体を炉内ガスから分離してヒータ絶縁不良を防止し、また高温化対応や炉内バーンアウトも可能としている。

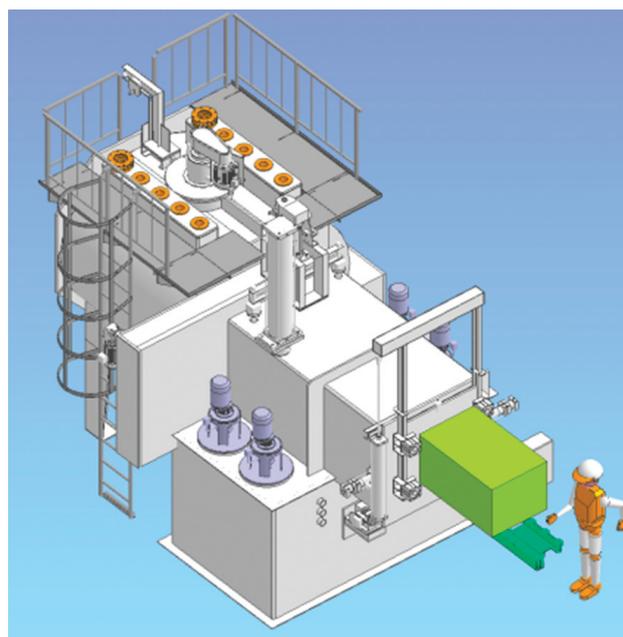


図6 バッチ型真空浸炭設備 外観

3.2.2 量産型真空浸炭設備

大量生産できる量産型真空浸炭油焼入れ設備のレイアウト例を図7に示す。複数の浸炭室と油槽（油焼入室）を分離して設置し、浸炭室や油槽へのトレイ搬送は搬送室の搬送機構が全て受け持つ。装入部（図では割愛）より受け取った処理材は搬送室を経由して浸炭室に運ばれて浸炭処理、その後は搬送室に付属した保温室で焼入れ温度に降温保持される。浸炭室が多く保温室の処理時間が不足する場合には、油槽前に降温保持室を設置する。バッチ型では浸炭室の炉温を下げて降温保持するが、量産型は焼入れ温度に設定された別室で降温するので降温冷却時間が短縮でき、また各室の炉温は上げ下げしなくて良いので省エネルギーとなる。降温保持後は油槽で焼入れして排出される。油焼入室は2種の焼入油（ホット油、コールド油など）に対応できるように2槽設置の場合もある。複数の浸炭室に対し油槽は共用できるので焼入れ条件の管理が容易である。

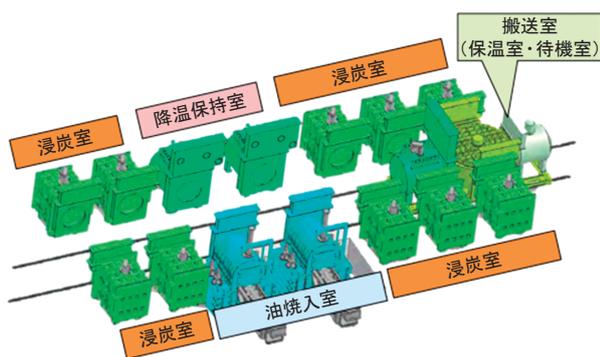


図7 量産型真空浸炭設備 レイアウト例

生産量の増加に合わせて浸炭室を増設し、また生産量に応じて一部の浸炭室を休止することで生産負荷の変動に対応できる。

量産型は各室の炉温を一定とできる、降温冷却時間が短縮できる、1台の油焼入れ室で処理できるなどのメリットがある。

量産型とバッチ型の比較において、量産型を選択する目安として、処理量がバッチ型4基相当以上であることが基準となるが、同一処理のロット量も考慮する。

量産型は油焼入れ室や搬送室が共用であり、処理時間が同じ場合は装入・抽出ピッチが一定周期となるため理想的であるが、処理時間が異なるトレイを混在して処理する場合は装入のタイミング

を独自の方法で演算することによって浸炭室の空き時間を最小として効率的に処理する。連続ガス浸炭炉はトンネル形状のため処理時間、処理温度、処理雰囲気何れか異なれば条件変更の待ち時間が生ずる。一方、多室で構成される量産型真空浸炭炉は各室で個別のヒートパターンと出来るために処理時間のみが条件変更の対象となり、処理時間のグループ数が少ないほど条件変更の待ち時間ロスを削減できるので、グループ化と変更ロスを試算して最適な設備構成や室数を決定する。

3.2.3 小ロット型真空浸炭設備

バッチ型よりもさらに小ロットな処理やインラインによる連続生産を目的とした設備である。積載は100kg/トレイ・グロスで、搬送室を中心に装入室、焼入れ装置、浸炭室を設置する（図8）。焼入れ装置は油焼入れ、ガス焼入れを選択できる。浸炭室は処理時間や生産量に見合った室数が設置でき、3段式の浸炭室を2組設置すれば6室となる。また真空浸炭設備の付帯として洗浄装置、焼戻炉を備えてもコンパクトなスペースに配置することができ、設備全体はピットレスであるため移設も容易である。

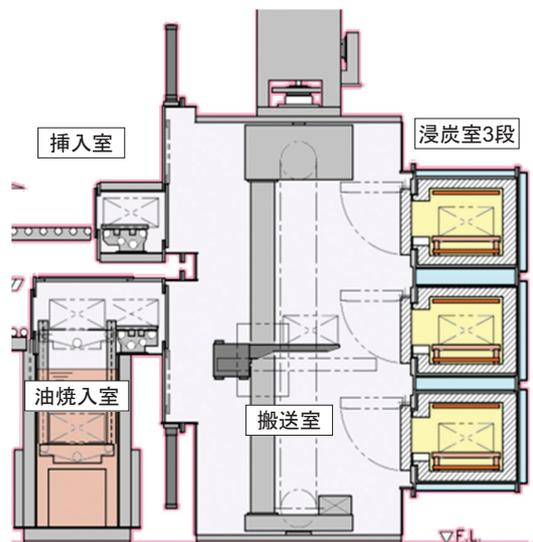


図8 小ロット型真空浸炭設備

多くの場合、熱処理は長時間を要するので、処理材はまとめて処理されている。また防火対策などの理由により熱処理工程は機械加工工場とは別の熱処理専用工場で行われている。これまでに紹介したバッチ式、連続式、量産型はその代表例である。

一方、小ロット処理を従来（バッチ式、連続式、量産型等）方式と同じ時間で処理すれば設備基数が増え、設備コストや設置スペースが増加してしまうので、その対策として処理時間の短縮が命題となる。処理時間の短縮について以下に説明する。

① 昇温時間の短縮

炉内の上下面に高出力のヒータを配置し、急速加熱する。処理材の積載高さが従来の約 1/3 と低いので中央部への入熱も良く、従来方式の約 3 割の 30 分で昇温する。

② 浸炭・拡散時間の短縮

処理材の積載高さが従来方式の約 1/3 と低いので、焼入れ時のトレイ上下位置での冷却速度の差を小さくできる。浸炭深さは、炭素濃度と冷却速度で決まり、冷却速度の底上げに見合う浅浸炭化が可能となり、浸炭深さ狙い値を浅くできることで浸炭時間を短縮できる。

③ 降温保持の廃止

焼入れひずみとの背反はあるが、ひずみを規格内として降温保持を廃止する。

比較条件次第であるが、上記により処理時間を従来の 1/3 に短縮した事例もある。

小ロット型の特徴を以下に解説する。

【品質関連】

① 局所加熱の無い急速加熱

コンパクトな炉内に大容量のヒータを設置して急速加熱を行うので、処理品の積載荷姿によっては昇温時に過大な温度ばらつきや局所加熱が生じる。これらに対し、荷姿に関わらず過昇温なく最短で最適に昇温が可能ないように上下独立の 2 ゾーン制御方式としている。

② 浸炭室の雰囲気完全分離

各々の浸炭室で異なる処理がコンパクトな装置内で進行するので、浸炭ガスが他の浸炭室に侵入すれば浸炭品質不良が発生する。これに対し浸炭室を独立した真空室として雰囲気完全分離して、浸炭ガスが他の浸炭室に侵入することによる浸炭品質不良を防止している。浸炭室のシール状態の確認は真空差圧の確認により簡単確実にできる。

③ 油焼入れとガス加圧焼入れの選択が可能

焼入れは、油焼入れとガス加圧焼入れを選択で

きる。当社試験設備は、浸炭室 3 室にガス冷却室と油焼入室を設置しており、いずれも試験可能で、ガス加圧冷却は最大 1.0 MPa の加圧が可能である。

【省スペース、最適な配置】

搬送室を中心とした 4 面に、浸炭室、装入室、焼入室が配置され、浸炭室は上下方向に 3 段の立体式として省スペースを図っている。また搬送室廻りの設備は自由な方向に配置できるので、工場の物流ルートに合わせて直線状に搬送することも、装入と抽出を同じ方向にすることもできる。

【小ロットの効率的な処理】

小ロット型のもう一つの命題は多品種生産である。同じサイクルタイムの製品のみを熱処理する場合には装入と抽出が同期するが、サイクルタイムが異なる場合には、独自の演算でこれを完全に防止して、小ロット多品種生産を実現している。また生産量に応じて一部の浸炭室を休止することもできる。

【コスト】

① 処理時間の短縮によるコスト低減

前記の、材料昇温、浸炭・拡散時間の低減と降温保持の廃止により、処理時間を従来の 1/3 に短縮した事例もあり、条件次第であるが特に浸炭深さが浅い製品では従来方式と競合できる。

② ガス焼入れのコスト対策

ガス焼入れにより後洗浄が不要となる、焼入れ油が不要となり消防対策費用が削減できる等のメリットは大きいですが、ガス焼入れの課題として冷却能力の向上とともに、N₂ ガスのコストがあげられる。当社のガス冷却室は外冷ダクト及び仕切弁に

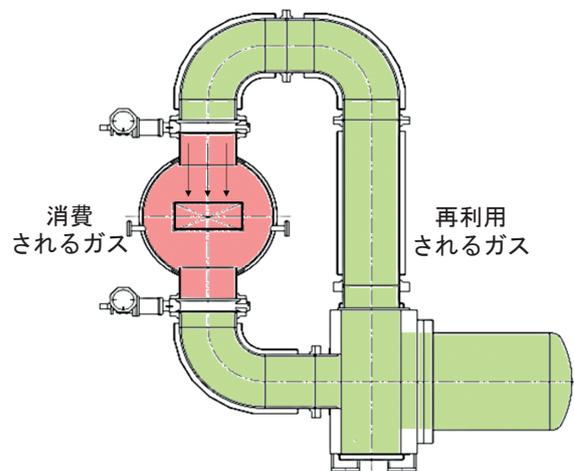


図9 ガス再利用式ガス焼入れ設備

よるガス再利用方式を採用しており，冷却室の総容積のうち60%のガスは再利用する。これによりガス温度の上昇の抑制とガス消費量の低減を両立しながら，ガス純度の安定化と加圧速度の高速化も図っている。

小ロット処理の特徴を説明したが，熱処理工程を機械加工・組立工場でおこない，インライン化することで，さらに工場内の物流簡素化，中間在庫削減，リードタイム短縮ができ総合的なコストの低減も期待できる。

4. まとめ

真空浸炭とガス浸炭の特性比較，代表的な浸炭設備を紹介して解説した。処理量とその処理ロット量により最適な設備構成を計画すること，省人化や作業環境の改善もあわせて計画することが重要であり，その参考資料となれば幸いである。

外部環境は急激に変化しており，

- ① 製品のさらなる多様化が求められている。
また生産性向上や付加価値の拡大の必要性がますます強まっている。
- ② 少子高齢化の影響で労働力不足が顕在化し，将来の労働力不足が懸念されている。

③ 働き方改革関連法が成立し，労働時間の効率的活用や夜間休業等の労働環境の改善が求められている。

④ コロナ禍により勤務形態，生産拠点，サプライチェーンが見直されており，生産体制の多様化が進むことが予測される。

そのため，熱処理現場においても省人化や無人化を図りながら多種多様な製品を小ロット単位で効率的に生産するニーズがますます高まることが予測され，特に小ロット型真空浸炭設備については，紙面の許す限り詳細に解説した。

職場環境の多様化にお応えできる様に改善や開発を継続し，熱処理業界の更なる発展のために貢献していく所存である。

参考文献（参考資料・引用文献）

- 1) たとえば久保田学，越智達郎：新日鉄技報 378号（2003）
- 2) 安部聡，池田正一：神戸製鋼技報，Vol. 54 No. 3（2004）