

技術資料



Technical Data

大同製真空炉の設備技術進歩

石浜克則*

Development of Equipment Technology for Vacuum Furnace
in Daido Steel

Katsunori Ishihama

Synopsis

The vacuum furnace was developed in 1950 and brought about many benefits, such as less oxidization, good surface brightness, reduction of the dimensional change of works, and easy operativity.

Since 1971, Daido Steel has been developing vacuum furnaces like batch type gas quenching vacuum furnaces, batch type/continuous type sintering vacuum furnaces, vacuum carburizing furnaces and so on.

This paper will describe the outline of vacuum furnaces with the origination and the functional progress.

1. はじめに

1950年代に真空炉が熱処理の分野に登場して以来今日までに幾多の開発、改良が加えられてきた。初期の真空熱処理炉は冷却能力が劣るために焼きなまし、脱ガスなどの限られた処理目的でしか使用されていなかった。その後コールドウォール式で炉内にガスクーラとガス循環ファンを内蔵した炉が開発されたことにより、利用範囲が拡大し急速に普及した。真空炉による熱処理は処理品の酸化、脱炭などの表面性状の変化が少なく、光輝性に優れ、かつ放射加熱のため昇温が緩やかであり処理品の変形が少ない。また、熱処理の自動化が容易であり、作業環境も良いことから幅広く使用され発展をとげてきた。

大同特殊鋼(株)機械事業部(以下当社という)の真空炉の歴史は1971年、米国のVacuum Industry社(以下VI社)との技術提携による技術導入が始まりである。ただ

し、VI社が得意とする特殊用途の真空炉は市場規模が小さく、民生品を主体とする市場を開拓すべく、当社固有の技術を盛り込んだ、バッチ式ガス焼入炉、2室油冷却炉、焼結炉などを商品化し、さらには多量生産向けのローラハース炉を開発した。

また2004年、真空浸炭炉についてドイツのALD社と技術提携を結び、ALD社の最先端の技術に独自の改良を加えた、国産の量産形真空浸炭炉(ModulTherm[®])を商品化し、直近では、同ALD社の最新炉である前後工程と同期したスリムバッチ真空浸炭炉(SyncroTherm[®])についても国産化した。

このように、当社では常にユーザーの要求に合致した自動化、省エネルギー、生産性の高い真空熱処理炉を提供し続けて、これまでに約400基、800室の納入実績を有している。以下、当社の代表的な真空熱処理炉、真空焼結炉、真空浸炭炉について、生い立ち、その時代背景、機能拡張など、設備技術進捗の歴史について述べる。

2013年10月29日受付

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

2. 真空熱処理炉

真空熱処理炉は処理品の光輝性、長寿命化、後加工省略によるコストダウン、省エネルギー、無公害、作業環境の改善など多くのメリットが評価されて急速に普及し、広い分野で使用されるようになった。これに伴ってユーザーから炉メーカーに対する要求も多様化してきているが、これらの要求のうち各機種に共通している点は、急速な均一冷却性、冷却速度のコントロール、温度分布精度の向上、高能率化、省エネルギー、保守管理の簡易化といった点である。

先に述べたが当社の真空炉はVI社との技術提携にもとづく真空熱処理炉が起源であり、当初は冷却ガス圧力が大気圧未満の減圧冷却炉であったが、さらに冷却速度を改善するために大気圧以上、200 kPaの加圧ガス冷却真空熱処理炉が開発された。ただし、大物のハイス金型など一部の鋼種に対しては冷却性能が充分でなく、これらユーザーのニーズに対応すべく、炉内に最高700 kPaまで封入したガスを循環させて処理品を強制対流で急冷する急速ガス冷却式真空熱処理炉（QHSシリーズ、以下急冷炉）、さらには、その上位機種として熱伝達係数を大きく取ることができるジェット噴流で炉内に最高600 kPaまで封入したガスを循環させて処理品を冷却する噴流ガス冷却式真空熱処理炉（FHSシリーズ、以下噴流炉）を開発した。

Fig. 1に急冷炉、Fig. 2に噴流炉の炉構成を、Fig. 3に急冷炉と噴流炉の冷却時間の比較例を示す。

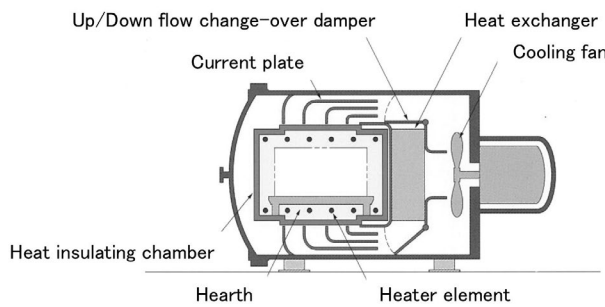


Fig. 1. QHS.

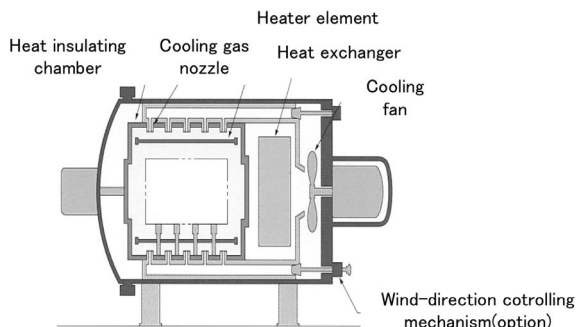


Fig. 2. FHS.

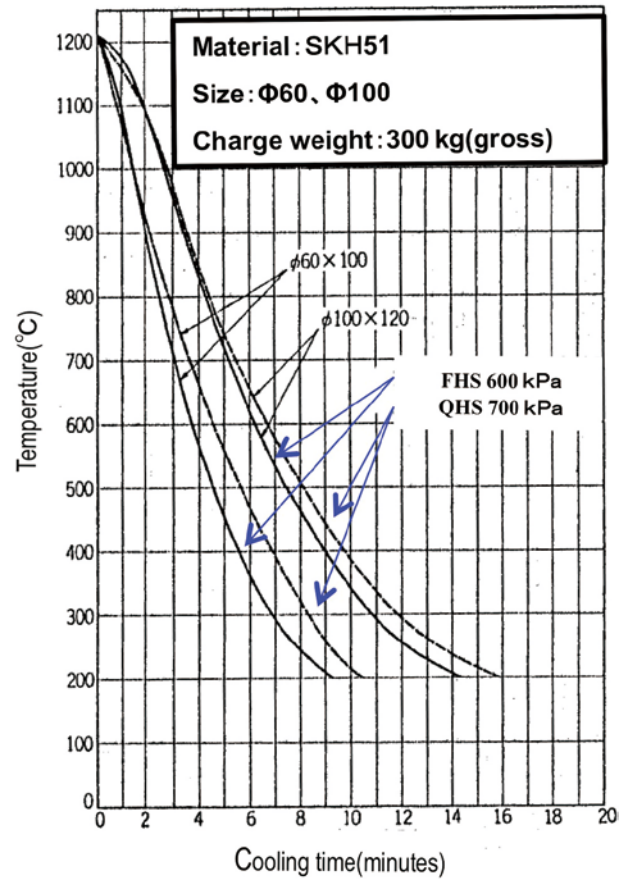


Fig. 3. Comparison between FHS and QHS about cooling time.

その後、現在までに各種ニーズに応えるべく機能が追加され、主な項目としては以下の通りである。

- (1) 温度分布精度の向上
目的に応じたヒータ制御の適正な細分化
- (2) 低温域の昇温速度、温度分布向上
軸流ファンによる対流加熱仕様をオプションで装備
- (3) 冷却制御の向上
処理品温度による冷却制御
- (4) 冷却能力向上(油冷却からの置き換え)
ガス冷却圧力の1000 kPa対応、および大風量化
- (5) 均一冷却
目的に応じたガス整流機構および熱風ガスによる冷却仕様をオプションで装備

3. 真空焼結炉

粉末冶金技術の進展に伴い、焼結製品の種類が増加すると共に材料の種類も多岐にわたり、Cr-Mn添加のFe系粉末、ステンレス粉末、希土類磁石用粉末、さらにTa, Ti, WCなど特別粉末が焼結されるようになった。当初の焼結炉は雰囲気炉主体であり、アンモニア分解ガス、発熱型ガス、吸熱型ガス、水素ガスおよび窒素ガスなどの雰囲気下で焼結が行われていたが、その後前記材料は酸化防止のため真空焼結炉で行われるのが一般的となった。ところで真空中で焼結することは以下のようなメリットがある。

- (1) 処置品を酸化させない
- (2) 最高温度が高い(機種にもよるが max. 2000~2300℃まで可能。雰囲気炉は1300℃が限界)。
- (3) 磁性材の場合、不純物の混入が少ないため、磁気特性がよい。

このような真空焼結炉のニーズのもと、当社の真空焼結炉の歴史は、VI社の1室、2室形真空熱処理炉技術をベースとし、焼結処理に必要な技術を独自開発し誕生した。

その後の処理量の増加や処理品の高品質化に伴い、多室連続炉の必要が生まれた。多室真空炉の難しさは、搬送機構である。当社ではいち早くこの問題に取り組み、処理品質の高度化と、生産性の向上を図るべく、従来の搬送機構の制約から解放された自由な室数が実現できるローラハース式連続焼結炉を開発した。ただし、初期のローラハース式連続焼結炉では高温対応のため水冷構造にしたロールからの水冷損失が大きく、原単位に難があるとのことで爆発的な普及には至らなかった。その後、当時まだメーカーでも試作段階であったC/Cコンポジットでのロール開発に成功し、原単位の改善だけでなく、温度分布も改善され、不良率低減による歩留り向上効果もあり、当時発展段階であった焼結磁石業界に採用され、主にこの業界の成長と共に納入実績を伸ばし現在に至っている。

以下に当社の代表的な真空焼結炉である、1室真空焼結炉、2室真空焼結炉、ローラハース式連続真空焼結炉の特長について述べる。

3. 1 1室真空焼結炉

Fig. 4に1室真空焼結炉の例を示す。

これらの炉は脱バインダー、焼結、冷却を1室で行うもので、稼働率があまり高くない小ロット製品に用いられる。小回りが利くのみでなく、何よりも廉価さが魅力であり市場普及率も高い。

加熱室はカーボンファイバー断熱材に囲まれ、その内部にカーボン製ヒータが配置されている。真空排気系はバインダーキャッチャー、メカニカルブラスター、ロータリーポンプで構成され、高真空仕様の機種では拡散ポンプを付加する。通常処理品の酸化防止と、稼働率アップのため冷却速度を高める必要があり、冷却ファンを設ける。設置スペースや風向きの問題で冷却ファンを天井に設ける場合 (Fig. 4(a)) と後壁に設ける場合 ((Fig. 4(b)) に分かれる。また稀であるが、処理品を下から装入する型 (Fig. 4(c)) を用いる場合もある。射出成型品などバインダー使用量が多い場合、Fig. 4(d) に示すようなマッフル付の機種が使用される。

3. 2 2室真空焼結炉

1室炉は、加熱室が装入・装出時大気にさらされるため、真空排気に対する注意(酸化防止)や、メンテナンスなど常に気を配らなければならない、その点2室真空焼結炉は冷却室で処理品が出入されるため加熱室が大気にさらされることなく取扱いが容易である。また、冷却専用の部屋があるため、加熱室の温度を下げる必要がなく、稼働率が上がると共に省エネルギーにもなる。Fig. 5に縦形の2室真空焼結炉の例を示した。

処理品は、銅板製の冷却室に装入し、真空排気後、真空仕切弁を開き、加熱室に移動する。加熱室は1室真空炉とほぼ同じ構造となっており、操業も1室と同じ方法で行われる。焼結後は再び冷却室に戻され、N₂ガスで復圧後ファンにより冷却される。この場合、加熱室と冷却室が独立しているため、冷却速度が速く、炉内の残留バインダーもないため仕上がり品質もよい。

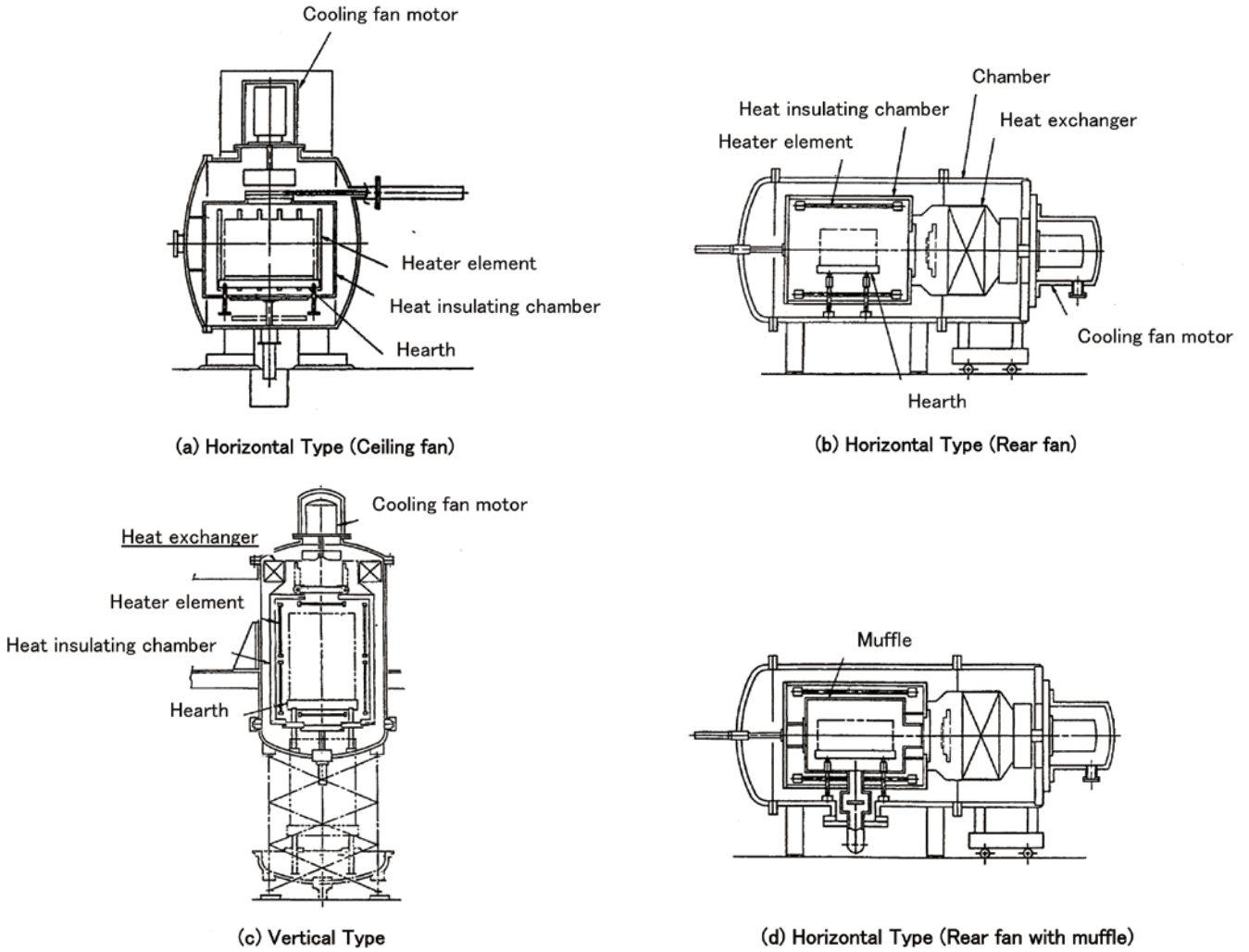


Fig. 4. Batch type sintering vacuum furnace.

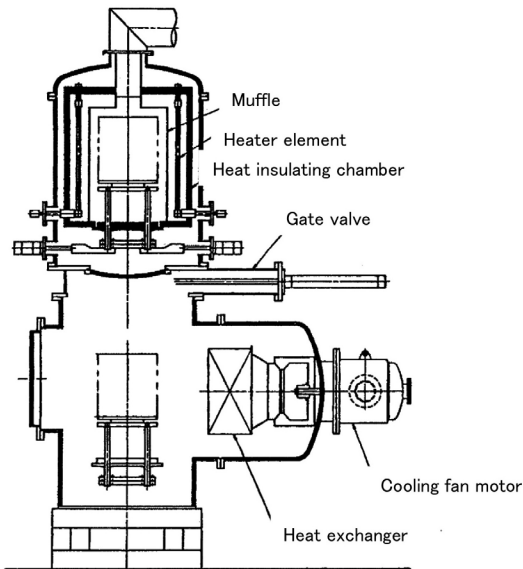


Fig. 5. Double room vertical type sintering vacuum furnace

3. 3 ローラハース式連続焼結炉

本炉は生産性の向上、自動化および省エネルギーを全て満足した設備であり、Fig. 6に代表的な構造例、Table 1に標準仕様を示し、以下にその特長を述べる。

(1) 搬送上からの処理室数制約なし

ローラハースによる搬送は、理論上無限の室数を接続するができ、処理目的に合わせた最適室数の構成が可能である。また前後設備を含めた搬送の自動化、省力化が容易であると共にコストパフォーマンスも高い。

(2) 非常にコンパクト

搬送構造がシンプルなため、炉内容積がコンパクトになり、a) 真空排気容積が小さい。b) 微圧ガスおよび冷却ガスの使用量が少ない。c) 設置スペー

Vacuum purging chamber Dewaxing chamber Degassing chamber No.1 Sintering chamber No.2 Sintering chamber Gas cooling chamber

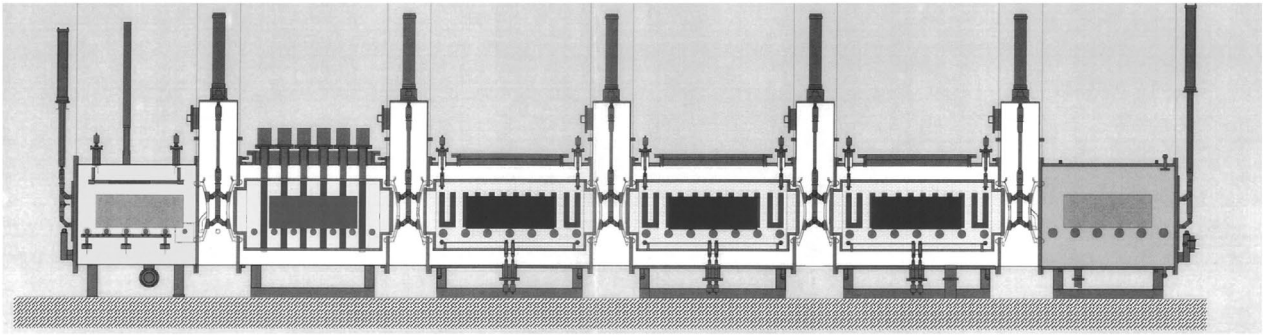


Fig. 6. Roller hearth type continuous vacuum sintering furnace.

Table 1. Roller Hearth Type Continuous Vacuum furnace standard specifications

	SH□R-755	SH□R-965	SH□R-1555
Effective dimensions (mm)	L750×W500×H500	L900×W600×H500	L1500×W500×H500
Max. charge weight	250 kg (gross)	500 kg (gross)	800 kg (gross)
Cooling pressure (Pa)	$7 \times 10^{-4} \sim 1000$ k	←	←
Temperature (°C)	Max. 1400	←	←

スが小さいなど、ユーザにとって好都合である。

(3) 合理的搬送

高温ゾーンでは、ローラーは C/Cコンポジットを使用し、非水冷でオシレーションをする必要もなく停止状態で保持可能であり、温度分布の確保とローラーの長寿命化が図れる。

(4) 各室の機能独立性が高い

機能毎にユニット化を図ることによって、当面必要な部分のみ設置し、生産状況などにより処理室の追加が容易に行える。

3. 4 各室の機能例

(1) 脱ワックス室

このゾーンはステアリン酸亜鉛などのワックスで成形した処理品を約 650 °C まで昇温し脱ワックスするゾーンである。個体状のワックスは昇温と共に液化または気化するが、脱ワックス室外部から N₂ ガスなどのキャリアーガスを微量導入しつつ、断熱室内から直接真空排気を行うことによって、断熱室外部のワックス汚染を防止しつつ高効率の脱ワックスが行える。ワックスキャッチャーは、2系統の回収機能をもつワックス回収システムを採用してい

る。本システムは運転中においてもワックスキャッチャーの再生ができ、交互に冷却加熱をくり返しながら使用することにより、連続運転が可能となっている。炉内ヒータはワックスの影響を考慮し金属チューブヒータを採用したため、常にクリーンな状態が維持され通常の操業においては清掃などが不要となっている。ロールは耐熱金属製で、変形防止のためオシレーションさせている。なお炉殻にはワックス付着防止のため、シーズヒータが保温材と共に巻かれており、常に 90 ~ 160 °C の温度に制御保持されている。

(2) 焼結室

脱ワックス室からローラーハースにより次のゾーンに搬送された処理品は、焼結温度まで加熱され焼結処理が行われる。ここでは温度分布が重要となるが、本炉ではヒータの適正な出力配分と非水冷の C/Cコンポジット製ローラーの採用により ± 3 °C 以内の温度分布が達成されている。炉殻は二重鋼板製の水冷ジャケット式であり、一般的にはその中にカーボン製断熱材の加熱室が構成されている。なお、1室とは異なり、常時高温に保持され温度変化が少ないため、処理用途に応じ断熱材の種類、構成、厚みを変

えることにより、極力放熱損失を低減するよう設計されている。加熱ヒータはグラファイト製で、温度分布とメンテナンス性を配慮して設計が行われている。また C/Cコンポジット製ローラにより、熱損失が少なく、耐熱性、耐久性にも優れている。

(3) 徐冷室

徐冷室は処理品の急冷を防止しつつ、均一徐冷を行うゾーンである。本ゾーンは構造的には焼結室とほとんど同じであるため、材料のヒートパターンによっては第2焼結室として使用することもでき、焼結時間の長い材料の場合サイクルタイムを短縮することも可能である。

(4) 冷却室

冷却室は処理品の取出し温度まで(急速に)冷却するゾーンである。炉殻は軟鋼製でロールも一般的な仕様は金属製であり放熱性がよい。また冷却を加速するためガス循環ファンとクーラを組合せ炉内ガスとして N₂ガスなどの冷却媒体を強制循環させ冷却させる。本炉では炉内冷却ガス圧を大気圧から 1000 kPaまで可変できるため、冷却ガス圧力を適正に選ぶことにより冷却スピードを広範囲に調整することができる。

(5) 仕切弁

各ゾーンの温度、圧力および雰囲気をもつての処理条件にするため、各部屋の境目には仕切弁が設けられている。これらは、最大 300 kPaの差圧に対しシーリング性を損なうことなく、また最高 1300℃にも耐え、なおかつスムーズな開閉が可能ないように設計されている。

4. 真空浸炭炉

浸炭焼入れ処理は、自動車を始めとする輸送機械、産業用機械の動力伝達系鋼材部品の表面硬化方法として広く普及しており、その技術開発は熱処理全般の中でも特に盛んに行われている。

現在の主流であるガス浸炭処理と比べて、減圧下で行われる真空浸炭処理は、

- ・ 表面に粒界酸化層を形成しない
- ・ 浸炭温度の高温化による処理時間短縮が可能

- ・ 変成炉を持たずシーズニング不要のため立上げ、立下げ時間が短い
 - ・ 細穴、深穴の浸炭が可能
- などの特長があり、日本国内では単室形のバッチ炉を中心に普及が進んでいる。

当社の真空浸炭炉は当時最先端の浸炭技術をもった独自の ALD 社との技術提携をもとにスタートしたが、国内へ展開するにはいくつかの課題を抱えていた。

ALD 社製 ModulTherm[®] は高圧ガスを使用するガス冷却仕様であり、国内へ展開するためには、製品歪の問題から油冷却仕様への変更が必須であった。また、それまでの真空浸炭では、経験値により浸炭条件を見出すしかなく、コスト・時間とも多大なロスを生むという大きな課題を抱えていた。

当社は真空浸炭炉の国内展開に必要な油冷却技術、浸炭シミュレーション技術を独自開発し、国産 ModulTherm[®] 式真空浸炭炉を商品化した。

Fig. 7 に ModulTherm[®] の外観、Table 2 に標準仕様を示し、以下に当社の代表的な真空浸炭炉の ModulTherm[®] システム固有の特長を述べる。

4. 1 モジュールシステム

ModulTherm[®] はモジュールと呼ばれる複数のバッチ炉の数量や仕様を自在に組み合わせてシステムが構成されており、ユーザの所要生産能力と品質要件から算出される熱処理の所要時間を基に、最大の生産効率を得られる設備仕様の提案が可能である。



Fig. 7. ModulTherm[®] appearance.

Table 2. ModulTherm® standard specifications

Effective dimensions (mm)		L1000×W600×H750
Max. charge weight		500 kg (gross)
Cooling method		Oil Quenching
Productive capacity * 400 kg/ch (net), temperature : 930 °C, material : SCr420, ECD : 0.6 mm	Carburizing chamber×2	5 ton/day
	Carburizing chamber×4	10 ton/day
	Carburizing chamber×6	15 ton/day

4. 2 浸炭モジュール

処理品の昇温・均熱・浸炭・拡散の各工程が浸炭モジュール内で行われる。常時高温に保持され温度変化が少ないため、カーボンとセラミックの複層断熱材構造により極力放熱損失を低減するよう設計されている。

また最大 140 kPa・abs の窒素ガスによる対流加熱機能が備えられており、真空加熱に比べて昇温時間が約 20 % 短縮されている。

4. 3 保温モジュール

処理品を焼入温度に保持したままレール上を走行する保温モジュールは、存在自体が大きな特長であり、具体的には下記の利点を有する。

- ・焼入前の処理品温度低下防止および均熱保持
- ・徐冷工程(プロセスによっては拡散工程の一部を含む)を浸炭モジュールから切り離すことによる浸炭モジュールの回転率向上
- ・簡易ガス冷却機能による高濃度浸炭処理時の最適構造

4. 4 搬送モジュール

Fig. 8 に搬送モジュールの外観を示す。処理品の搬送はすべて搬送モジュール内のフォークによって行われる。搬送系を 1ヶ所に集約することにより、熱負荷の大きい浸炭モジュールおよび保温モジュールから駆動部分を排除し、設備の耐久性を高めている。

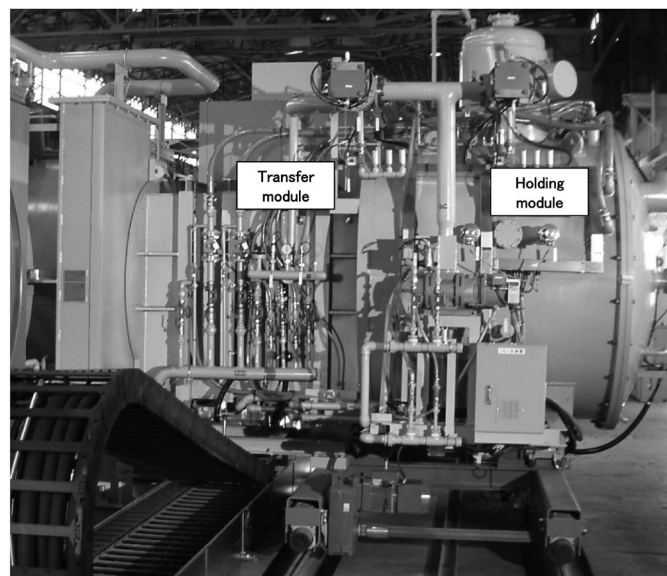


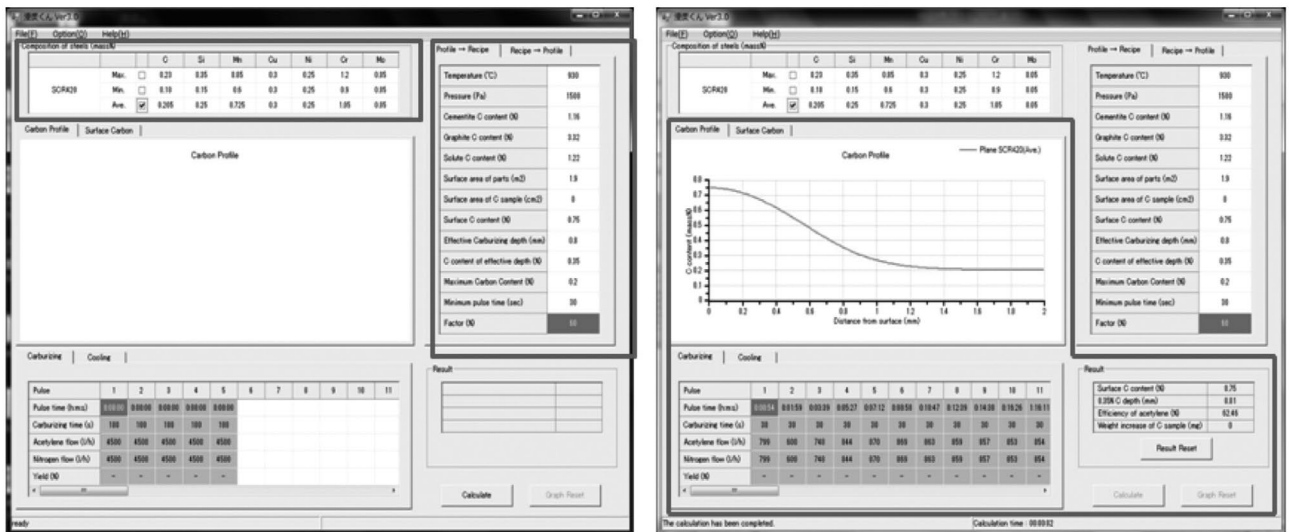
Fig. 8. Transfer module.

4. 5 浸炭シミュレーション

真空浸炭法ではガス浸炭処理に用いられるCP (Carbon Potential) の概念の適用が困難で、代わりに飽和値調整法とも呼ばれるガス流量、時間を制御する方法が用いられるが、これらの条件を勘や経験だけで的確に求めようとすれば大変な時間と労力が必要となる。当社は、膨大なデータベースを基に開発されたシミュレーションソフトウェアを用いることにより、浸炭条件（以下、レシピという）の決定にかかる手間を大幅に軽減している。

Fig. 9 にソフトウェアの表示画面を示す。対象となる材料の化学成分は自由に設定できるため、JIS 鋼はもちろん当社独自鋼種にも適用可能である。

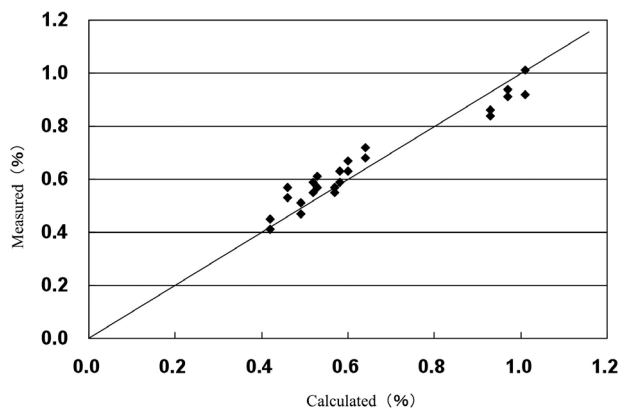
シミュレーションの精度を検証するために、表面炭素濃度および浸炭深さ（炭素濃度が0.35%となる表層からの距離）について計算値と実測値を比較した結果を Fig. 10 に示す。計算値と比べて実測値は最大約20%のばらつきはあるものの、これだけの精度があれば1, 2回程程度のテスト処理で狙いどおりのレシピを決定できるものと考えている。



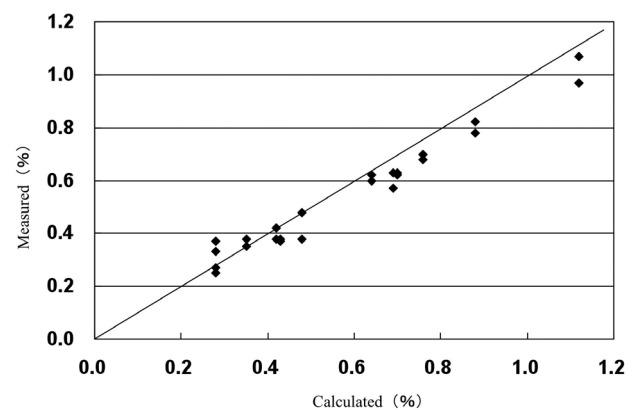
Condition input screen

Calculated result(distribution of carbon density)

Fig. 9. Screen of simulation software for carburizing.



(a)Surface Carbon Concentration



(b) Carburized depth (C=0.35%)

Fig. 10. Comparison between calculated value and measurements.

4. 6 ModulTherm®の導入効果

当社納入先において確認された量産型 ModulTherm®の導入効果は以下の通りである。

(1) 省エネ効果

製品重量あたりのエネルギー使用量を既設のガス浸炭炉と比較したところ、約 39 %の省エネ効果が確認された。これは以下の要因によるものである。

- ・製品への炭素供給源となる雰囲気ガスの使用量が 1/100 以下、かつ炉から排出される余剰の雰囲気ガスを燃焼させずに排気
- ・設備の立上げ、立ち下げ時間が短いため、週末など短期間の休日ごとに停止させることで無駄な待機エネルギーを削減

(2) 省人化効果

操炉要員 1 人・1日あたりの生産量を既設のガス浸炭炉と比較したところ、約 3 倍の生産量向上効果が確認された。ModulTherm®は電気加熱方式を採用しているため、バーナの監視要員が不要であるほか、前述の通りガス浸炭炉は休日も炉を停止しないため監視要員が必要であることによる。

(3) 安全・快適な作業環境

ModulTherm®は浸炭モジュールにアセチレンガスを導入して浸炭処理を行っているが、炉内の圧力は大気圧の約 1/100 と低く、炉体は外部と空気の出入りのない完全気密構造のため、ガス浸炭炉と比べて潜在的な爆発リスクが低減されている。

また従来の熱処理現場は高温と粉塵に晒され、いわゆる典型的な“3K”職場として認識されてきたが、ModulTherm®は高温の浸炭モジュールおよび保温モジュールの全周を水冷ジャケットで囲っているため、周囲への放熱がほとんどない上に、燃焼排ガスが発生しないため粉塵の飛散もなく、現場の作業環境は格段に改善された。

5. むすび

以上、代表的な当社の真空熱処理炉を例にとり設備技術の進歩について紹介したが、まだ他にも多くの開発が検討され成果をあげている。当社は特殊鋼材料のメーカーであるため、材料の研究開発、生産はもとより製鋼設備、熱処理設備、関連機器に至るまで、一貫して製作するプラントメーカーでもある。真空熱処理という工程をとってみても、一連の鋼材生産のうちの一工程としてとらえることのできる数少ないメーカーであるという利点を生かし、今後も材料面、設備ハード面の両面からユーザーのニーズに応えていきたい。