

新しい真空浸炭炉 E V C 21 の開発

山口和嘉

Development of New Vacuum Carburizing Furnace EVC21

K. YAMAGUCHI

We have developed a new vacuum carburizing furnace which solves the soot problem of conventional furnace. The new process uses a mixture of ethylene and hydrogen as a carburizer gas and operating pressure is 4kPa~5kPa. Workpiece quality with this new process is uniform compared with that with conventional processes. The influence to environment is small, due to fast carburizing speed and low carbonic acid gas production which is less than 10% that of usual gas carburizing furnace.

Key Words: vacuum carburizing furnace, soot

1. はじめに

1997年12月に開催された地球温暖化防止京都国際会議では、先進工業国に対して炭素排出量を2010年までに1990年のレベルより5%削減することが確認された。今、世界のエネルギー経済の基盤は、炭素から水素への移行の初期段階にある。熱処理分野においても地球環境の保護やコスト削減に向けて技術革新が模索されている。真空浸炭法は20数年前アメリカで開発され、宇宙・航空機産業の発展とともに導入されてきた。当社で1977年に1号機を開発したが、真空浸炭は優れたメリットとともにデメリットもあり、あまり普及しなかった。従来の真空浸炭炉はグラファイトの断熱

材とヒーターを装備したもので、プロパンガスなどを使って40~80kPaで処理していた。粒界酸化もなく、浸炭品質は良好だったが、多量の煤が発生するという問題があった。

最近、ヨーロッパの大手自動車メーカーが相次いで連続真空浸炭炉を導入、国内でも真空浸炭炉が注目されている。そこで当社では環境への影響の少ない真空浸炭炉 E V C 21を開発した。

2. 真空浸炭炉のメリット

新プロセスの真空浸炭炉 E V C 21とガス浸炭炉や従来の真空浸炭炉との比較を表1に示す。

表1 浸炭方法の比較

Comparison of carburizing method

| | ガス浸炭 | 従来の真空浸炭 | 新プロセスの真空浸炭 |
|-----------------------|------------|------------------------|------------|
| 原料ガス | 空気 + L P G | N ₂ + L P G | エチレン + 水素 |
| 圧力 | 101kPa | 40 ~ 80kPa | 3 ~ 9kPa |
| 付帯設備 | 変成炉 | 真空ポンプ | 真空ポンプ |
| スーティング | 無 | 多量 | 無 |
| 浸炭ばらつき | 0.2mm | 0.2mm | 0.16mm |
| 細穴の浸炭 | 難 | 困難 | 可 |
| 光輝性 | 灰緑色 | 銀白色 | 銀白色 |
| 粒界酸化 | 13 μ m | 0 μ m | 0 μ m |
| 処理時間比(1 mm浸炭) | 1 | 0.5 | 0.5 |
| ランニングコスト比(1 mm浸炭) | 1 | 0.5 | 0.6 |
| シーズニング | 必要 | 不要 | 不要 |
| 浸炭ガス量比 | 1 | 0.06 | 0.03 |
| 生産性 | 連続稼働 | 煤掃除 | フレキシブル |
| 作業環境 | 炎・煤・油煙 | クリーン・煤 | クリーン |
| C O ₂ 排出量比 | 1 | 0.22 | 0.08 |

2.1 浸炭時間の短縮

真空浸炭炉は高温浸炭が可能なので浸炭時間を大幅に短縮できる。SCM415材で有効硬化層深さ1mmを狙った場合、従来のガス浸炭炉に比べ、930で15%、1040で70%の浸炭時間短縮が可能である。もちろん高温浸炭を行うと結晶粒が粗大化して組織が荒れるので、急冷・再加熱処理を行って組織を微細化する必要がある。このロスタイムを含めても、50%の処理時間短縮になる。

高温浸炭のメリットは浸炭深さが深くなるほど顕著になる。例えばSCM415材で有効硬化層深さ2mmを狙った場合、930のガス浸炭で処理すると24時間かかるが、1040の真空浸炭で処理すると7時間である。

2.2 フレキシブルな生産性

従来のガス浸炭炉のようなシーズニングが不要なので、立ち上げ時間が短縮できる。クイックスタートが可能で、生産量に応じて必要な時に立ち上げて、必要な時間だけ使える。停止中の雰囲気ガスや温度の管理が不要なので、休日や夜間は完全に止めることができる。

2.3 高品質

ガス浸炭で見られるような粒界酸化がないため、疲労強度が優れている。

2.4 クリーンな作業環境

フレームカーテンがなく、真空加熱室となっているので、煤煙や熱気の発生がなくなり作業環境が大幅に改善できる。また、カーテンバーナーや多量の炉気の燃焼が不要となり、炭酸ガスの発生量が削減でき、地球温暖化防止に有効である。

3. 開発の経過

3.1 従来型真空浸炭炉の問題点と課題

従来の真空浸炭炉はプロパンやメタンを使って40～80kPaの圧力で処理していた。品質の均一性は良好だったが、処理するたびに多量の煤が発生するため量産は不可能だった。煤の発生を防止するために処理圧力を下げると浸炭むらが発生した。従来の真空浸炭炉は炉内雰囲気攪拌ファンによって均一性を得ていたので、圧力が下がるとその効果が薄れるためと考えられる。

したがって、低圧(高真空)で煤の発生を防止して、均一な浸炭を行うことが課題であった。

3.2 エチレンガスの問題点

課題を解決するために、まず浸炭ガスをエチレンガスに変え、27ℓ/minの流量で、圧力は13.3kPaで実験したところ、スレーティングも少なく、均一に浸炭となった。しかし、この条件ではエチレンガスが高価なためガスコストが高くなるという問題が生じた。また、表面炭素濃度の制御性も不安定であった。

単純にエチレンガス流量を減らすと、テストピースの上面と下面あるいは炉内の位置による浸炭むらが発生した。エチレンガス消費量の削減が大きな課題となった。

3.3 真空浸炭メカニズムの解明

エチレンガスの消費量を削減するために、ガス流量や圧力、圧力制御方法やガス導入位置、治具材質、断熱材材質、ヒーター材質などを変更しさまざまな実験を行った。温度分布の再確認やアセチレンガスの使用も検討した。また、真空中での浸炭反応のメカニズムを調べるため、四重極質量分析計(QMS)を使って各ガス分子の挙動を解析した。

解析の結果、浸炭中はエチレンガスの分解による浸炭反応と同時に、酸化物の還元反応が起きていることが判った。この酸化物の還元反応にエチレンガスが消費されて、浸炭に必要なエチレンガスが不足すると浸炭むらが発生することが判った。また、処理品を浸炭ガスの気流中に置けば、0.1mmの隙間でも均一に浸炭することを確認した。

3.4 課題の解決

前項で得られた知見をもとにエチレンガスに水素ガスを添加することにした。また、雰囲気攪拌ファンを撤去し、処理品が浸炭ガスの気流中に配置されるように、ガス導入管と排気管の形状を変更した。その結果、4kPa、エチレンガス10ℓ/min、水素5ℓ/minで、煤が発生しない均一な浸炭ができた。さらに表面炭素濃度の制御性も870～1040の広い温度範囲で良好であった。課題解決により、この新プロセスの真空浸炭炉EVC21を開発した。

4. 真空浸炭反応

四重極質量分析計(QMS)を使って各浸炭ガスの分子数の挙動を測定して、真空炉内での反応メカニズムを解析した。

4.1 浸炭反応

解析の結果、炉内では、式に示すような分解反応が起きていることが判った。すなわち、エチレンの分解によって発生した遊離の炭素原子が、図1に示すように鋼の表面に侵入して浸炭が起きている。

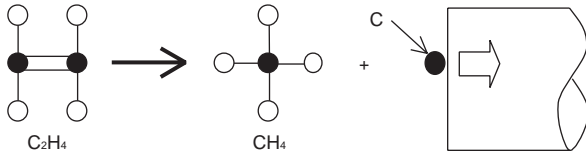
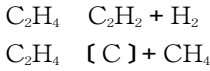


図1 真空浸炭反応

Vacuum carburizing reaction

4.2 還元反応

また、炉内では、式のような分解反応と同時に式に示すような酸化物の還元反応が起きていることも判った。



この酸化物の還元反応がスーティングや浸炭むらの要因である。炉内に酸化物や酸素があると式のような反応が起きて、炭素が析出する。すなわち、錆やリークがあると炭素が析出し、煤が発生する。

4.3 真空中の反応解析

図2(a)と図2(b)は浸炭ガスの分子数の挙動を測定した結果である。横軸は時間(sec)で、縦軸はイオン電流値(擬似対数・1E-(n)(A))である。図2(a)はスーティングや浸炭むらのない時で、図2(b)は浸炭むらのある時である。浸炭むらがないときはH₂O分圧が低く、C₂H₂とCH₄の分圧が高い。この時は、式(1)の分解反応が活発に起きている。

また、炉内の酸化物に対してエチレンガスが少ないと、大部分のエチレンガスが式(2)のような還元反応に消費されてしまう。そのため、浸炭に必要なエチレンガスが不足するので浸炭むらが生じる。

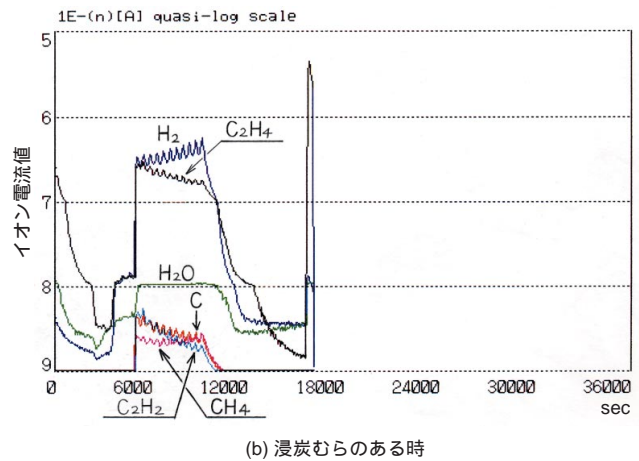
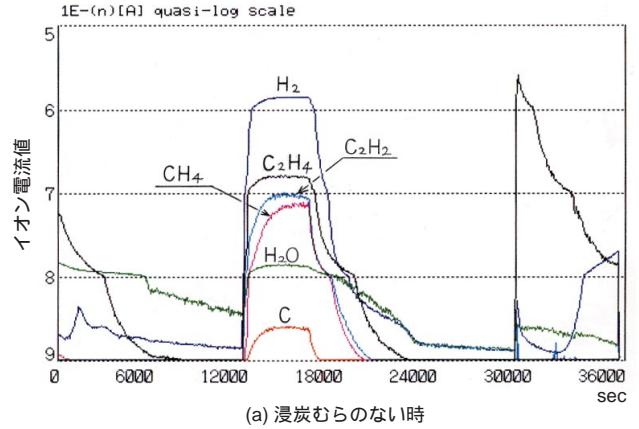


図2 浸炭ガスの挙動測定結果
Behavior of carburizer gas

4.4 水素ガスの効果

水素ガスを添加することによって、式(1)のような分解反応をコントロールしている。また、式(2)のような酸化物の還元反応は水素でまかなって、エチレンガスを節約している。

4.5 圧力とガスの流れ

一定のガス流量で、圧力が低すぎるとエチレンが分解する前に排気されてしまう。反対に圧力が高すぎると分解反応によって析出する炭素が過剰になり、スーティングを起こす。

$$\begin{aligned} S/N \text{比} &\Rightarrow \eta \\ \eta &= -10 \log \sigma^2 \\ \text{ただし } \sigma^2 &= \frac{1}{n} \left(\frac{1}{y_1^2} + \frac{1}{y_2^2} + \dots + \frac{1}{y_n^2} \right) \end{aligned}$$

有効硬化層深さのばらつきをS/N比に置き換えて定量的に分析した結果、4~6.7kPaが適正な圧力であることが判った。実験で得られた圧力と有効硬化層深さのS/N比の関係を図3に示す。

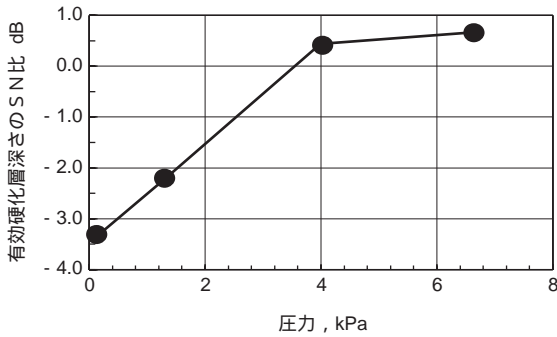


図3 圧力と硬化層深さのSN比の関係

Relation between pressure and SN ratio of effective case depth

なお、SN比は式で求めた。SN比が大きいほどばらつきが少なく、有効硬化層も深い。しかし圧力が適正でもガスがワークに当たらなければ浸炭しないことは明らかである。したがって、4～6.7kPaの真空領域で均一に浸炭するためには、浸炭ガスの気流中に処理品を配置する必要がある。

5. 新プロセスの特徴

新プロセスでは前述の従来の真空浸炭炉のデメリットを解消し、真空浸炭炉のメリットに加えて以下に示すような特徴を持っている。

5.1 圧力

新プロセスでは低圧(3～9kPa)で処理することにより、浸炭に寄与しなかった余分なガスを速やかに炉外へ排出している。余分なガスが炉内で熱分解して煤になる前に排出することによって、煤の発生を防止している。

5.2 浸炭ガス

浸炭ガスにはエチレンガスに水素ガスを添加した混合ガスを使用している。この水素ガスが煤の発生を防いでいる。

5.3 ガス導入・真空排気方法

新プロセスでは処理品を浸炭ガスの気流中に配置することによって、低圧でも均一な品質を得ている。浸炭中は一定流量の浸炭ガスを流し、排気弁の開度を制御して一定の圧力に制御している。浸炭期以外の予熱や拡散、昇降温などの間は浸炭ガスを流さない。

5.4 圧力制御方法

新プロセスでは表2に示すような圧力制御方法を取っている。浸炭初期のようにエチレンの分解が活発で炉内の水素が多いときには排気弁を閉

じ、逆に浸炭後期のように炉内のエチレンが余って、水素が少なくなって来たときには排気弁を開くように、炉内の圧力を制御する。そうして、浸炭中の炉内のエチレン分子数を一定にコントロールしている。

表2 圧力制御方法

Pressure control method

| | エチレンの分解 | 水素 | 排気弁開度 |
|------|---------|----|-------|
| 浸炭初期 | → | → | → |
| 浸炭後期 | ← | ← | ← |

5.5 最適条件の実現

実験計画法を使って品質のバラツキをSN比に置き換えて、定量化して捉えることにより、最適な処理条件を設定している。

5.6 ランニングコスト削減

エチレンガスよりも安価な水素ガスを添加することにより、ガスのコストを削減している。1m³あたりの単価はエチレンが約1125円～1250円、水素は約570円～620円である。

5.7 安全性

アセチレンよりも安全なエチレンを使用している。エチレンガスは造船の船内溶断作業向けに、昭和45年にアセチレンに代わるものとして開発された。アセチレンは切断に有効だが、三重結合が不安定で、自然に分解して爆発する危険性がある。エチレンは二重結合で自然爆発の危険性がなく、アセチレンと同様に空気よりも比重が小さいので安全である。各浸炭ガスの安全性に関する性質を表3に示す。エチレンガスの用途としては溶断用が主流であるが、他には果物が熟れるのを早める熟成作用がある。

表3 浸炭ガスの安全性

Safety property of carburizer gas

| | | プロパン | プロピレン | アセチレン | エチレン |
|------------|--------|------|-------|-------|------|
| 爆発範囲 | 下限界, % | 2.1 | 2.4 | 2.5 | 2.7 |
| | 上限界, % | 9.5 | 11.1 | 100.0 | 36.0 |
| ガス比重(空気=1) | | 1.55 | 1.48 | 0.98 | 0.91 |

6. 真空浸炭炉 E V C 21 の特徴

真空浸炭炉 E V C 21 の雰囲気制御のシステムフローを図4に示す。真空浸炭炉 E V C 21 は図4に示すように新プロセスで必要な装備に加えて、以下のような特徴を備えている。

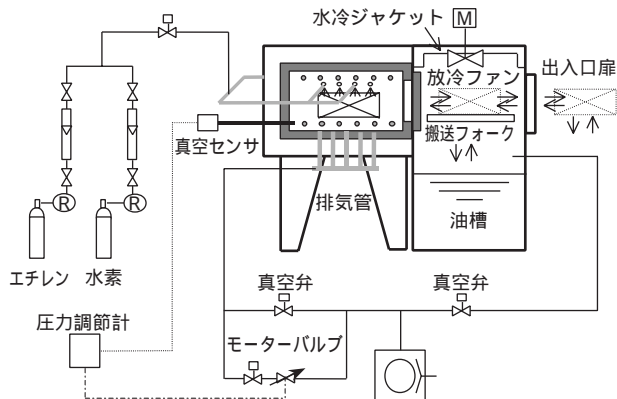


図4 真空浸炭炉 EVC21
Vacuum carburizing furnace EVC21

6.1 強制冷却機構を標準で装備

高温浸炭や高濃度浸炭に必要な油槽上での冷却機構を標準で装備している。浸炭後、処理品を一旦油槽上に取り出して窒素ガスで復圧し、図4に示す放冷ファンと水冷ジャケットにより冷却する。所定時間冷却した後、加熱室に装入して再加熱できるようになっている。高温浸炭を行うと結晶粒が粗大化する。図5に示すように浸炭後、一旦変態点以下まで冷却してから、再加熱して焼入れすれば結晶粒が微細化する。

また、高濃度浸炭では図6に示すように一定時間浸炭した後、一旦変態点以下まで冷却してから再加熱して浸炭する操作を複数回繰り返す。こうすれば球状炭化物が生成し、成長して高濃度浸炭が可能となる。さらに、この機能を積極的に活用すれば降温時間の削減ができる。サイクルタイムが短縮できるだけでなく、降温時間という不確定要素がなくなるので品質も安定する。

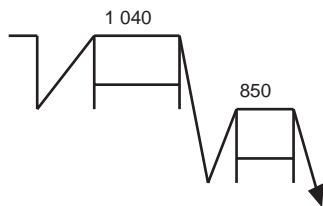


図5 高温浸炭
High temperature carburizing

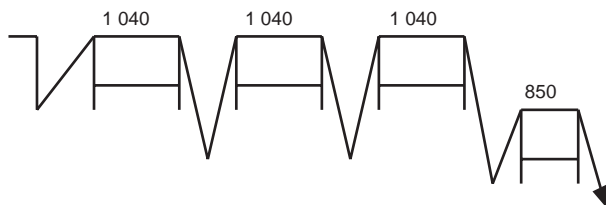


図6 高濃度浸炭
High density carburizing

6.2 操作性

炉の操作はタッチパネルで行うようにした。データの表示部分をタッチするとキーボードが画面に表れて設定できるようになっている。フィールドネットワークを採用しているので、温度調節計や圧力調節計などはすべてタッチパネルで操作できる。従って、温度や時間、ガス流量などの処理条件は各パターン毎に表形式の設定画面で簡単に設定できるようになっている。処理条件を一度設定しておけば、処理品に応じたパターンNo.を選択するだけで自動的に処理することができる。

6.3 油面圧制御(オプション)

焼入時の油面圧を制御して、歪みを低減できる。

図7は焼入油の冷却曲線を模式的に示したものである。通常の大気圧で焼入れする場合に比べ、減圧すると蒸気膜段階が長くなり、逆に加圧すれば短くなる。この特性を利用して、焼入れ開始時は減圧状態で焼入れし、各部分の温度が均一になる頃を見計らって復圧して一気に蒸気膜を切る。そうすれば、各部分が同時にMs点を切ってマルテンサイト変態するので均一に膨張する。

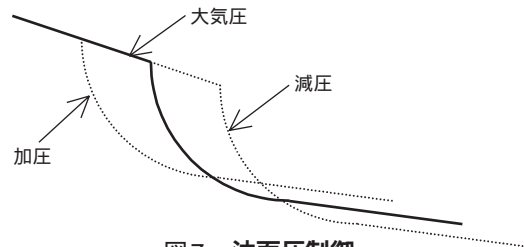


図7 油面圧制御
Pressure control of oil quench

7. 真空浸炭の実際

S C M415材のテストピース(24 × 10t)を使って実験して求めた浸炭温度と有効硬化層深さのK値(浸炭係数)の関係を図8に示す。焼入油にはホット焼入油(出光興産製ハイテンプA)を使い、油温110 ~ 130 °C、油面圧80kPaで処理した。

図8を元にした浸炭時間と有効硬化層深さ(焼入後)の関係を図9に示す。K値と有効硬化層深さおよび浸炭時間は式の関係である。

また、実験で求めたD / C比(拡散時間 / 浸炭時間)と表面炭素濃度の関係を図10に示す。

$$D_{ECD} = K\sqrt{T}$$

ただし D_{ECD} : 有効硬化層深さ mm

K : 浸炭係数

T : 浸炭時間 h

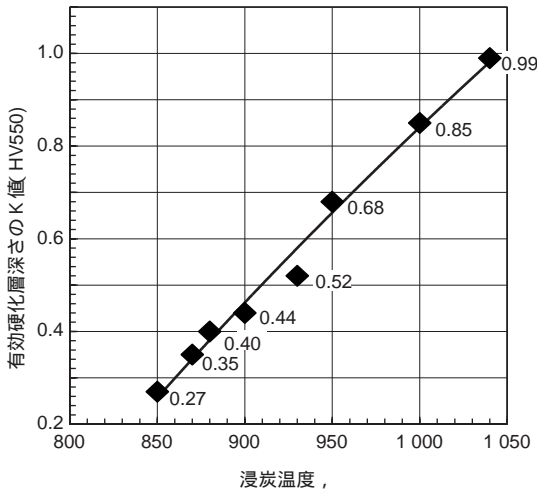


図8 浸炭温度とK値の関係

Relation between carburizing temperature and K value of effective case depth

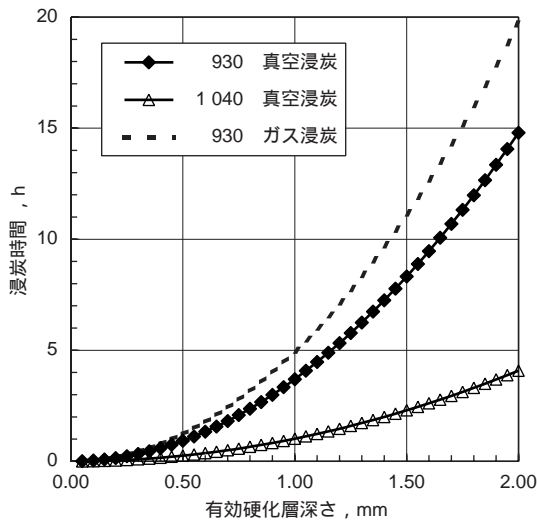


図9 硬化層深さと浸炭時間の関係

Relation between effective case depth and carburizing time

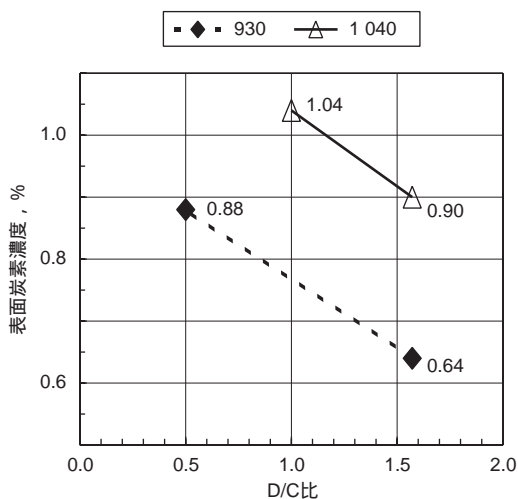


図10 D/C比と表面炭素濃度の関係

Relation between D/C ratio and surface carbon density

図9から判るように同じ温度の930 で比較しても、ガス浸炭より真空浸炭のほうが浸炭速度は速い。その理由は次のように考えられる。

ガス浸炭ではいくらカーボンポテンシャルを高く設定しても表面炭素濃度は1.2%ぐらいで飽和してしまう。しかし、真空浸炭では浸炭中1.3%以上の非常に高い表面炭素濃度になるので、図11に示すようにガス浸炭に比べ炭素の積分量が多くなるために有効硬化層が深くなる。

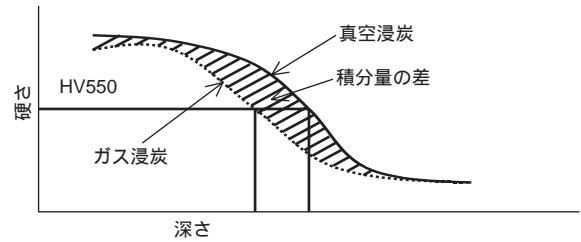


図11 硬さ推移曲線の比較

Comparison of hardness transition curve

8. おわりに

当社の浸炭炉は安全性とクリーン化を目指して、ガス浸炭炉から1991年に開発した真空パージ式浸炭炉へと進化し、今回の真空浸炭炉 E V C 21へと進んできた。

今後は更なる環境への影響削減や高速処理を目指して、この新プロセスをさらに発展させ開発と改良に取り組んでいきたい。

筆 者



山口和嘉*

K. YAMAGUCHI

* 光洋サーモシステム株式会社
金属熱処理装置部