

特集：技術解説

新型高機能ガス浸炭炉(N-BBH)の開発

オリエンタルエンジニアリング株式会社

河田 一喜

「工業加熱」Vol. 46 No.6 (2009) 別刷



新型高機能ガス浸炭炉 (N-BBH) の開発

河田 一喜*

概要

従来のガス浸炭の長所を維持しながら、短所を克服した新型高機能ガス浸炭炉 (N-BBH) を開発した。その特徴を次に示す。

- ・ 高効率断熱材，真空断熱構造，シミュレーション技術により短時間昇温と優れた温度分布を実現できる。
- ・ 浸炭速度が真空浸炭と同等以上に速い。装置・ランニングコストが安い。
- ・ 粒界酸化や表面不完全焼入れ層が従来の 1/2 以下に低減でき，仕上がり肌が光輝である。
- ・ 前室，加熱室の真空引き構造により安全性が高く，シーズニングが全く必要なく断続操業も可能である。
- ・ 雰囲気ガス使用量が少なく，CO₂ 排出量が従来の 1/10 以下に削減できる。
- ・ 攪拌，噴流，その他特殊油槽内機構により低歪を実現できる。

1. はじめに

現在，自動車部品に適用されている熱処理のなかで最も多いのは浸炭処理で，そのほとんどがガス浸炭処理である。ただ，最近では，環境上の観点から真空浸炭処理も徐々に適用されてきている。ガス浸炭は，真空浸炭に比べて環境，省エネルギー，浸炭特性の一部において劣っている点はあるが，品質の安定性，信頼性において非常に優れた点もある。

そこで，ガス浸炭の優れた特徴を維持しながら，真空浸炭に比べての短所を改善あるいは克服した新しいガス浸炭炉について報告する。

2. ガス浸炭と真空浸炭との比較

一般的に，ガス浸炭は真空浸炭に比べて次のような短所があると言われている。

- (1) 浸炭速度が遅い。
- (2) 粒界酸化と表面不完全焼入れ層が生成する。
- (3) エネルギー効率が低く，CO₂ ガス発生量が多く，環境への負荷が大きい。
- (4) 炎が発生し，安全性が低い。
- (5) シーズニング時間が長く，断続操業には向かない。

また，一方，ガス浸炭は真空浸炭に比べて次のような長所がある。すなわち，ガス浸炭は真空浸炭と違って，炉内ガスの平衡反応によって浸炭が進むため，その雰囲気ガスを分析制御することによりカーボンポテンシャル (CP) を精密に制御でき，処理の品質保証ができる。

3. 新型高機能ガス浸炭炉 (N-BBH)

3.1 新型高機能ガス浸炭炉のコンセプト

ガス浸炭は真空浸炭に比べて上記のような短所があるため，新型高機能ガス浸炭炉のコンセプトは次のようにその短所を改善，克服するものとした。

- (1) 浸炭速度が真空浸炭以上に速い。
- (2) 粒界酸化や表面不完全焼入れ層が極めて少ない。
- (3) 浸炭ばらつきが少なく，細穴内面浸炭性に優れる。
- (4) 省エネルギーで環境に優しい。
- (5) 安全性が高い。
- (6) シーズニング時間が全く必要なく，断続操業も可能である。

* オリエンタルエンジニアリング株式会社
取締役 研究開発部 部長 K. Kawata

- (7) 装置，ランニングコストが安い。
- (8) 平衡反応下のガス雰囲気制御により品質保証ができる。

3.2 新型高機能ガス浸炭炉の構造と特徴

新型高機能ガス浸炭炉 (N-BBH) の外観を図1に、概略図を図2に示す。

この炉の仕様と特徴を以下に示す。

- ・有効処理寸法：W380 × H380 × L760mm
- ・処理重量：200kg/gross
- ・セラミックラジエントチューブヒータを採用 (最高使用温度：1100℃)

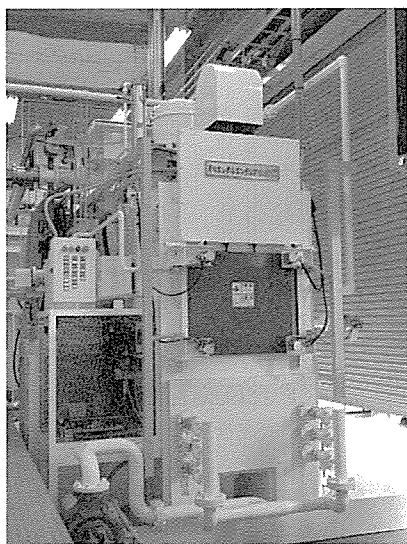


図1 新型高機能ガス浸炭炉 (N-BBH) の外観

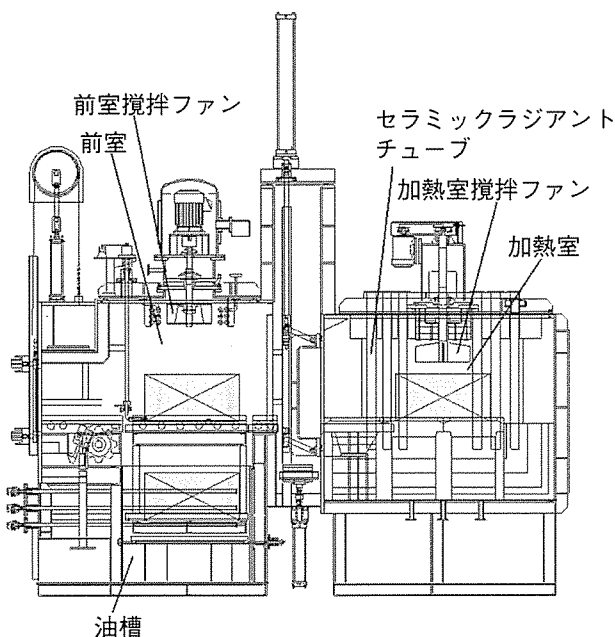


図2 新型高機能ガス浸炭炉 (N-BBH) の概略図

新型高機能ガス浸炭炉内の断熱材は，図3に示すように，高効率断熱材の採用により，従来よりも軽薄化でき，蓄熱量を少なくできた。しかも，真空断熱層を設けることにより放散熱量を従来の変成炉式ガス浸炭炉に比べて62%も削減することができた。

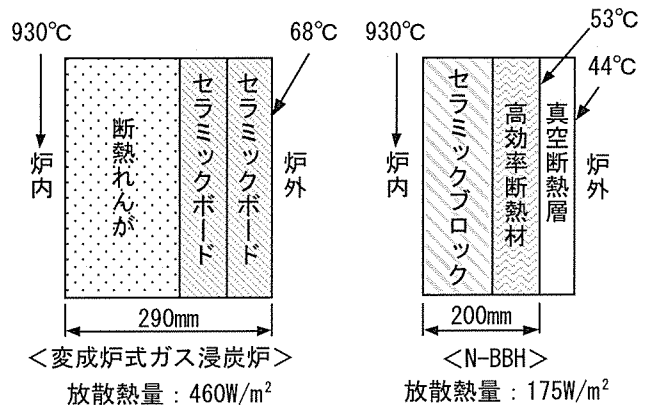


図3 N-BBHの断熱層の構成と放散熱量

また，三次元熱流体解析ソフトを活用することにより，最適な攪拌ファンの大きさ，形状，回転数を決定し，ガス回りに優れた炉内構造を構築することができた。図4に三次元流体シミュレーションによる新型高機能ガス浸炭炉の炉内ガス流速分布を示す。

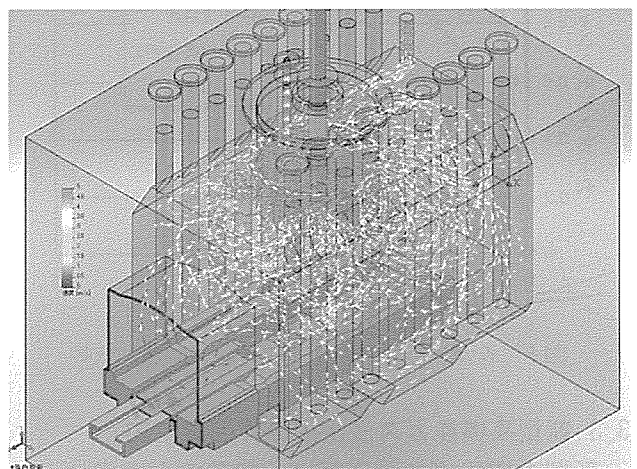


図4 三次元流体シミュレーションによるN-BBHの炉内ガス流速分布

高効率断熱材と真空断熱層の採用，三次元熱流体解析ソフト活用によるガス回りに優れた炉内構造により均一急速昇温ができるようになり，昇温時間が従来のレンガ炉に比べて35%以上短縮できた。しかも，実炉温度分布が昇温30分後において幅で10℃以内，60分後において幅で7.5℃以内と極めて良好な結果が得られた。

最大の特徴としては、前室と加熱室が両方とも真空引きできる構造になっていることである。そのため、前室は真空パーズ後窒素復圧できるためフレームカーテンレスで安全性が高く、環境にも優しい。炉停止中も加熱室、前室ともに空気が入らないため、真空浸炭炉と同様にシーズニング時間が全く必要なく、断続操業も容易にできる。

図5に各ガス浸炭炉のシーズニング時間の比較を示す。

気密性に優れているため、炉内供給ガスも少なく、CO₂ 排出量も大幅に削減できる。真空パーズ式のため油の酸化劣化が少なく、しかも、真空炉と違って通常の安価で焼入れ性に優れた焼入れ油（コールド油からホット油まで）を使えるため、焼入れ油の選択幅が広い。前室にも攪拌ファンを装備しているため、二次焼入れ、高濃度 (CD) 浸炭、ガス冷却処理が可能である。油槽は減圧焼入れ機構、攪拌ファン、噴流ポンプ、その他特殊機構の組み合わせにより低歪を実現できる構造になっている。

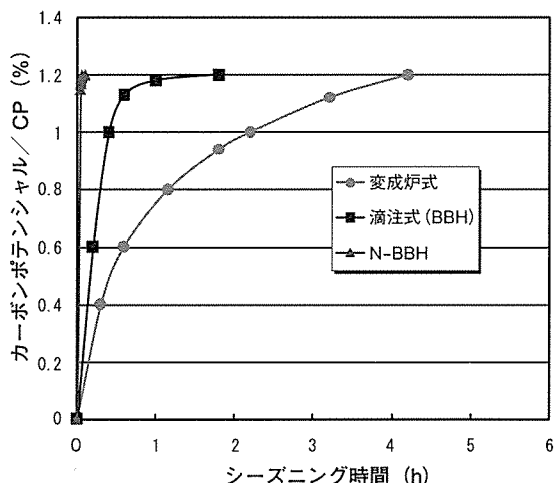


図5 各ガス浸炭炉のシーズニング時間の比較

3.3 新型高機能ガス浸炭炉の雰囲気制御

新型高機能ガス浸炭炉は、加熱室も真空に引ける構造のため気密性に優れている。そのため、炉内供給ガスを少なくでき、2つの方式のガス浸炭が可能である。すなわち、(1) 完全密閉型浸炭と(2) 炉内供給ガスが極めて少ないガス浸炭である。

まず、完全密閉型浸炭であるが、この方式は処理品が加熱室に搬入されると炉内を真空引きし、その後窒素復圧し昇温する。昇温完了後、再び真空引きし、浸炭ガスを炉内容積分のみ供給し復圧して浸炭処理を開始する。すなわち、この密閉型

浸炭の炉内供給ガスは最初に一度復圧したほぼ炉内容積分のみのため、究極の省資源・省エネルギーガス浸炭法と言える。このような密閉型浸炭法は、炉内に浸炭ガスを流し続けられないので、密閉状態のガスにより浸炭処理が進み、排ガスがほとんどでないため、排ガス燃焼が必要なく、安全で環境にも優しい。しかし、密閉型浸炭法は浸炭が進むにつれて炉内のCO濃度が変化するためCO-O₂あるいは、CO-CO₂の2成分を分析してカーボンポテンシャル (CP) の演算制御が必要になる。図6にカーボンポテンシャル (CP) 制御システム構成図を示す。また、図7にCO-O₂を分析しCPを演算制御したときの実際の雰囲気制御チャートを示す。こ

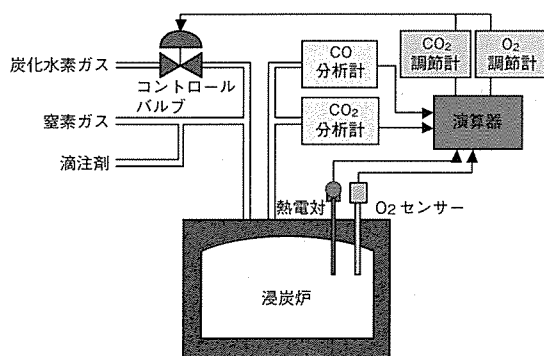


図6 カーボンポテンシャル (CP) の制御システム構成図

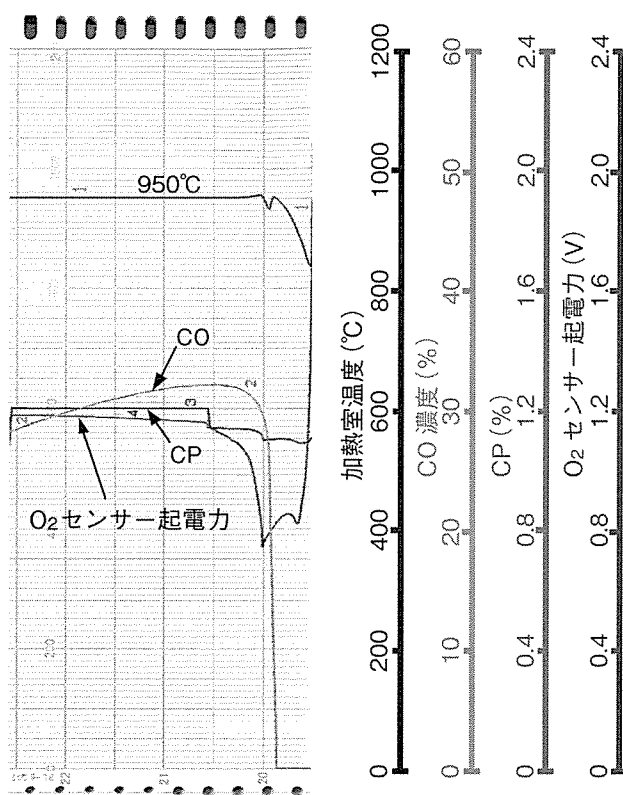


図7 CO-O₂を分析しCPを演算制御したときの実際の雰囲気制御チャート

の図より CO 濃度に変化しても両成分を分析し演算制御すれば CP を一定に制御できることがわかる。

次に、炉内に浸炭ガスを流し続けるが、その量が極めて少ない方式のガス浸炭について述べる。気密性に優れた加熱室により外乱が少ないため、炉内に浸炭ガスを流し続けるが、炉内に供給するガスは、たとえば炉内容積の約 0.5 倍/h のガス量で安定して処理できる。そのため排ガス量が少なくなり、CO₂ 排出量も少なくできる。また、ガスを流し続けるため炉内の CO 濃度を一定にでき、CP の制御は O₂ あるいは CO₂ の 1 成分のみの分析制御で済むことになる。

4. 浸炭速度

R. Collin ら¹⁾ は、ガスと鋼との界面での挙動が重要であるという観点から炭素移行係数 β を採り上げている。雰囲気ガス中の C 原子が鋼の表面から内部方向へ侵入拡散した量を J [g/cm²・s] とする。また、雰囲気中の炭素濃度 (カーボンポテンシャル, CP) を C_g [g/cm³]、鋼の表面炭素濃度を C_s [g/cm³] とした場合、炭素移行係数 β [cm/s] と J , C_g , C_s との関係は次式で表される。

$$J = \beta (C_g - C_s)$$

この式より β が一定のとき、 C_g と C_s との差が大 (すなわち、CP を高くする) にすると J は大となり、多くの C が鋼中に侵入拡散することになる。また、 $C_g - C_s$ が一定であれば、 β を増大させると J は大となる。

Neumann らは図 8²⁾ に示すように、雰囲気ガス成分の相違により β を求めている。その結果、CO および H₂ 成分が β に大きく影響していることがわかる。たとえば、CO : 33%, H₂ : 67% の滴注式ガス浸炭は β が 2.8×10^{-5} [cm/s] と CO : 23.6%, H₂ : 31.5% の変成炉式ガス浸炭の β : 1.2×10^{-5} [cm/s] に比べて約 2.3 倍大きいため、浸炭速度が速いことがわかる。

また、Edenhofer らは表 1³⁾ に示すようにガス浸炭に使う各種の雰囲気ガスを調査し、メタノールを使ったいわゆる滴注式ガス浸炭の β が 2.85×10^{-5} [cm/s] と最も高くなることを報告している。この滴注式ガス浸炭の β の値は、プロパン変成の吸熱型変成ガスの約 2.5 倍で、しかも CO 濃度が 40% 以上の雰囲気ガ스에比べても高いことが示され

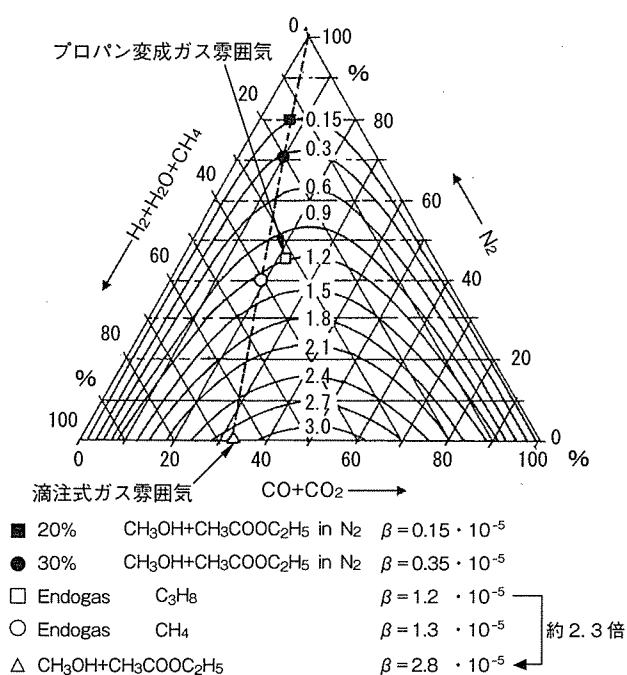


図 8 各種雰囲気ガスにおける炭素移行係数 β ²⁾

表 1 各種雰囲気ガスにおける炭素移行係数 β の平均値³⁾ (950°C, CP: 1.15%)

Type of atmosphere	CO (vol%)	H ₂ (vol%)	β (cm/s × 10 ⁻⁵)
Endothermic gas (from natural gas)	20	40	1.25
Endothermic gas (from propane)	23.7	31	1.15
Methanol + 40%N ₂	20	40	1.25
Methanol + 20%N ₂	27	54	2.12
Natural gas/air	17.5	47.5	1.30
Propane/air	24	35.5	1.34
Acetone/air	32	34.5	1.67
Isopropanol/air	29	41.5	1.78
Natural gas/CO ₂	40	48.7	2.62
Propane/CO ₂	54.5	39.5	2.78
Methanol	33	67	2.85
Acetone	25	75	2.55
Isopropanol	20	80	2.25

約 2.5 倍

ている。このことは、 β を大きくするには雰囲気中の CO 濃度だけでなく、H₂ 濃度も重要で、CO : 33%, H₂ : 67% 当たりにも最適なガス組成があり、滴注式ガス浸炭の雰囲気組成が最も高い β になっていることがわかる。

新型高機能ガス浸炭炉は、以上のような炭素移行係数 β が高くなる滴注式ガス浸炭の CO : 33%, H₂ : 67% 当たりの雰囲気ガスをを用い、CP を高くしてもスーティングしない、あるいは、炉内供給ガスを少なくしても高 CO 濃度を維持できる工夫

を施している。そのような高 CP、高 β の雰囲気中で浸炭することによって浸炭速度を大幅に速くすることができる。

図 9 に各ガス浸炭法の浸炭速度比較を示す。この図より N-BBH によるガス浸炭は変成炉式ガス浸炭や滴注式ガス浸炭より浸炭速度が速いことがわかる。また、浸炭温度が 950°C の比較では、N-BBH によるガス浸炭は真空浸炭よりも浸炭速度が速くなっている。

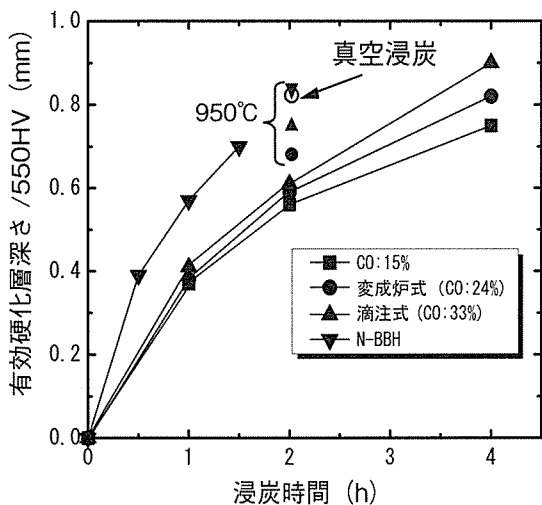


図 9 各ガス浸炭法の浸炭速度比較 (930°C, CP: 1.0%)

これは、一般的な雰囲気制御していない真空浸炭の場合、炭素移行速度は非常に速く、浸炭時間も短いですが、表面炭素量が飽和値に達した後、真空中での拡散時間を長く取る必要があるためである。また、真空浸炭はエッジ部におけるセメントタイトの析出を抑えるため、平坦部での表面炭素濃度をたとえば 0.7% 以下に抑える必要がある。そのためトータルの処理時間が意外と長くなる。

次に表 2 に各ガス浸炭法における浸炭深さとロット内の浸炭ばらつきを比較を示す。これより、N-BBH によるガス浸炭は変成炉式ガス浸炭に比べても、浸炭深さが深く、ロット内の浸炭ばらつきも最も少ないことがわかる。

5. 細穴内面浸炭性

各ガス浸炭法の細穴内面浸炭性を調査した結果を図 10 に示す。N-BBH によるガス浸炭は CO 濃度の低い変成炉式ガス浸炭に比べて細穴内面浸炭性に優れていることがわかる。細穴内面浸炭性に関しても、浸炭速度のときと同様に CO: 33% 以上にしても改善される傾向がなく、CO: 33%, H₂: 67% 当たりに最適なガス組成があることが判明した。

表 2 各ガス浸炭法における有効硬化層深さとロット内ばらつき (950°C, CP: 0.8%, 850°C 焼入れ)

浸炭法 TP 位置	変成炉式	滴注式	N-BBH
1	0.71	0.88	0.94
2	0.79	0.88	0.95
3	0.70	0.87	0.94
4	0.76	0.89	0.96
5	0.75	0.90	0.96
6	0.73	0.90	0.96
7	0.73	0.89	0.96
8	0.82	0.91	0.97
9	0.80	0.89	0.95
平均値	0.75	0.89	0.95
ばらつき	0.12	0.04	0.03

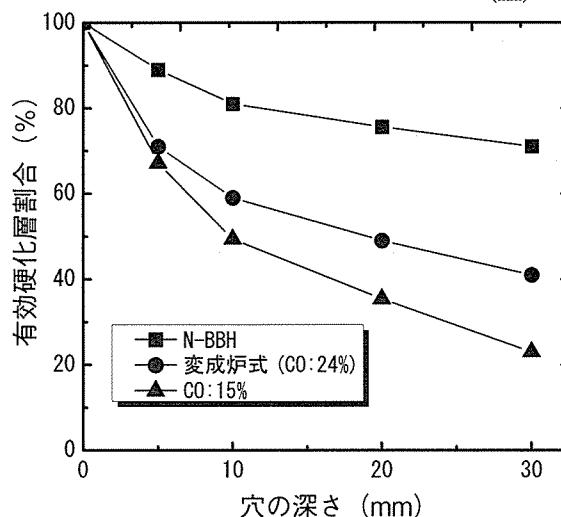


図 10 各ガス浸炭法の細穴内面浸炭性 (止り穴: $\phi 5 \times 35$ mm, 930°C, CP: 1.0%)

6. 粒界酸化

ガス浸炭はその雰囲気ガス中に CO₂, O₂, H₂O という酸化成分ガスが存在するため、粒界酸化とそれに伴う表面不完全焼入れ層が必ず発生する。ただし、その酸化成分ガスを少なくできれば、粒界酸化も表面不完全焼入れ層も減少させることができる。

図 11 に N-BBH と従来ガス浸炭炉により浸炭処理した SCM415 の断面組織と粒界酸化の比較を示す。また、図 12 に N-BBH と従来ガス浸炭炉により浸炭処理した SCM415 の粒界酸化の断面 SEM 像を示す。このように、N-BBH によるガス浸炭は粒界酸化と表面不完全焼入れ層を従来のガス浸炭に比べて 1/2 以下に低減できることがわかる。

これは N-BBH では、低温域の昇温や降温を N₂ 中で行い、浸炭期は高 CP にすることにより低酸化成分ガス雰囲気中で浸炭を行い、拡散期は低 CO 濃度にするにより低酸化成分ガス雰囲気中で

拡散を行っているためである。

また、N-BBH では、その他の酸化成分ガスを抑える対策を施しているため、粒界酸化の低減だけでなく、処理品の仕上がり肌が従来のガス浸炭品と比べて光輝である。

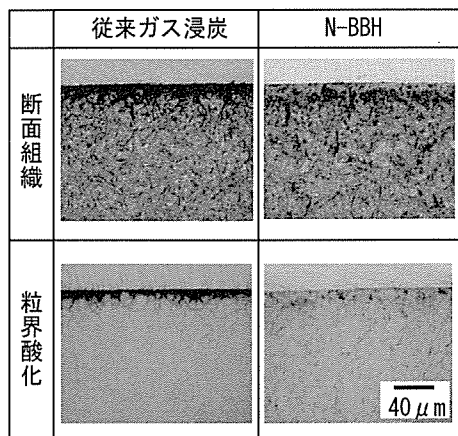


図 11 N-BBH と従来ガス浸炭炉により浸炭処理した SCM415 の断面組織と粒界酸化の比較

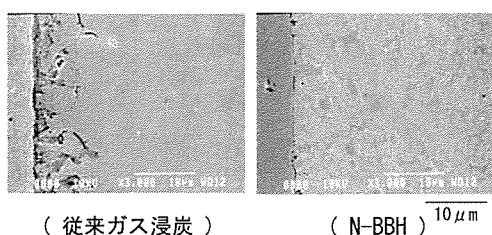


図 12 N-BBH と従来ガス浸炭炉により浸炭処理した SCM415 の粒界酸化の断面 SEM 像

7. 炉内ガス導入量および CO₂ ガス排出量

N-BBH は気密性に優れるため、他のガス浸炭炉に比べて炉内ガス導入量が最も少なく、変成炉式ガス浸炭炉の 1/10 以下にまで削減できる。また、N-BBH で密閉式ガス浸炭を行えば、炉内ガス導入量は炉内容積分だけを 1 回使用するのみである。

図 13 に各ガス浸炭炉の CO₂ ガス排出量の比較を示す。N-BBH は他のガス浸炭炉に比べて炉内ガ

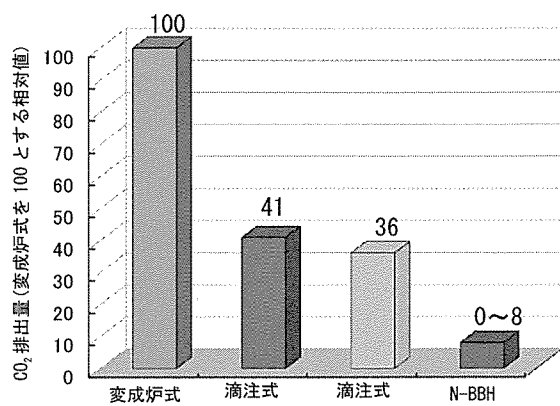


図 13 各ガス浸炭炉の CO₂ ガス排出量の比較

ス導入量が少ないため CO₂ ガス排出量も最も少なく、変成炉式ガス浸炭炉の 1/10 以下にまで削減できる。

8. まとめ

新型高機能ガス浸炭炉 (N-BBH) の特徴をまとめると以下ようになる。

- (1) 高速浸炭雰囲気により浸炭速度が真空浸炭と同等以上に速いため、生産性が高くコストダウンが図れる。
- (2) 粒界酸化、表面不完全焼入れ層が従来のガス浸炭の 1/2 以下に低減可能である。
- (3) 雰囲気ガス使用量が従来の変性炉式ガス浸炭炉の 1/10 以下と極めて少ないため、省エネルギーで CO₂ 排出量も少なく、環境に優しい。
- (4) フレームカーテンがなく、しかも、真空と N₂ ガス使用により安全性が極めて高い。
- (5) シーズニング時間が全く必要なく、断続操業も問題なくできる。
- (6) 仕上がり肌が従来のガス浸炭品と違って光輝である。
- (7) 加熱室、前室の真空引きにより完全密閉処理が可能である。
- (8) 特殊高効率断熱材と真空断熱構造により熱効率が低い。
- (9) シミュレーション技術を駆使し、短時間昇温、優れた温度分布を実現。
- (10) 攪拌、噴流、その他特殊油槽内機構をシミュレーションに基づいて調整することにより低歪を実現可能である。
- (11) 平衡反応下のガス雰囲気制御により処理の品質保証ができる。

<参考文献>

- 1) R. Collin, S. Gunnarson and D. Thulin: Journal of Iron and Steel Institute, Oct. (1972) 777.
- 2) F. Neumann and U. Wyss: Härtereitechnische Mitteilungen, 49, 4 (1994) 255.
- 3) B. Edenhofer: Heat Treatment of Metals, 22, 3 (1995) 55.

※本稿はサーモテック 2009 第 5 回国際工業炉・関連機器展 (2009.7.22 ~ 24 東京ビッグサイト) での講演をもとに執筆したものである。