

## 解説



## Review

# オートマチックトランスミッションの材料・熱処理技術の動向と課題

大林巧治\*

## Trends in Materials and Heat Treatment of the Automatic Transmission for Automobile

Kouji Ohbayashi

### Synopsis

*The automobile greatly gives the influence to recent environmental problems. The environmental problems solution is not thought without measures of the automobile. The improvement works by various parts of the automobile to solve this problem.*

*An automatic transmission controls the driving performance of the automobile and controls the fuel cost performance. Because the automotive performance is improved, the improvement approach of AT is important.*

*It explains the material technology and the carburizing technology. In addition, it explains while introducing a recent case about the low pressure carburizing technology.*

## 1. 緒 言

今日の環境問題に対して、自動車を与える影響は大きく、自動車の対策なしに環境問題解決は考えられない。この問題を解決するべく、自動車のさまざまな部品で改良がとりくまれている。

オートマチックトランスミッション（以下、AT）は自動車の走行性能を大きく左右するとともに燃費性能も大きく左右する。自動車本来の走る魅力と環境負荷の両側面から、ATの改良の取組は極めて重要な位置づけとなる。

このATの取組における材料技術と熱処理技術の動向と課題について解説する。特に、自動車の低燃費化に欠かせない軽量化を実現するための高強度化技術であるガス浸炭焼入れ技術と、次世代浸炭として期待される真空浸炭技術について最近の取組事例を紹介しながら、解説する。

## 2. ATの機構と技術動向

### 2. 1 多段ATの技術動向

近年、自動車には、高い走行性能と燃費向上の両立が求められている。そのため、ATは高効率を追及したシステムへ変化しており、中に組み込まれる部品は軽量で複雑形状なものに変化し、高強度化と高精度化が同時に求められるようになった。

多段ATでは長い間、3速と4速ATが主流だったが、近年、5速、6速化が急速に進み、最近では7速、8速ATが登場している。Fig.1に、従来型5速ATと近年の6速ATの断面比較を示す<sup>1)</sup>。この6速ATでは、多段化しながらもコンパクト化と高トルク対応がなされた。これら近年の6速以上の多段ATには、ラビニヨ型プラネタリに代表されるように、ピニオンギヤとピニオンギヤが複合的に噛み合う複式プラネタリが主流であり、これに組み込まれるギヤは、以前に増して、高強度化と高精

2007年10月24日受付

\* アイシン・エイ・ダブリュ(株)生産技術本部 熱処理生技部 (Heat Treatment Engineering Department, Manufacturing Engineering Division, AISIN AW Co., Ltd.)

度化が要求されるようになった。例えば、Fig.2に、1970年代から2000年代ATの代表的プラネタリリングギヤの肉厚と外径と熱処理の変化を示す<sup>2)</sup>。ここに示すように近年のプラネタリリングギヤは薄肉化と大径化が進んでいることがわかる。またギヤへの負荷も増大し、使用回転数も高速化しており、熱処理は高周波焼入れから浸炭焼入れへ代わっていった。熱処理変形が起り易い部品形状でありながら、従来よりも高い疲労強度が要求されるようになった。Fig.3にアイシン・エイ・ダブリュ(株) (以下、当社という)のAT生産と熱処理の変遷を示す<sup>1)</sup>。AT生産全体で見ても、ATの改良とともに、熱処理は高周波焼入れから浸炭焼入れへ代わっていった。

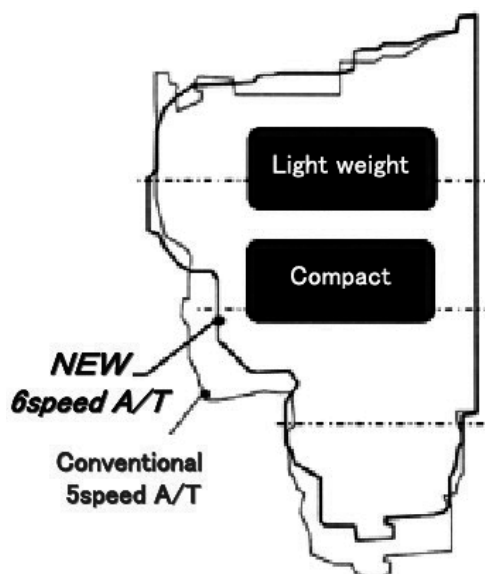


Fig.1. The sectional view of 5 speed AT and 6 speed AT.

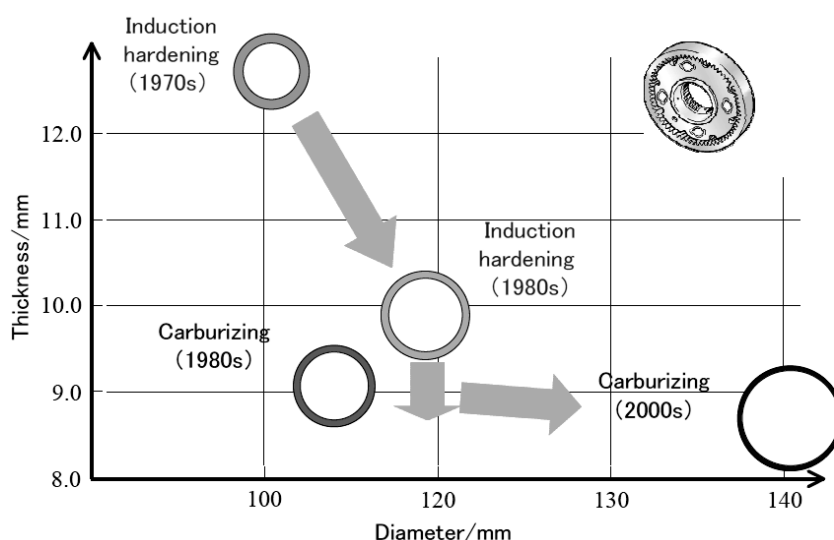


Fig.2. Change of the shape of the planetary ring gear in 1970 to 2000.

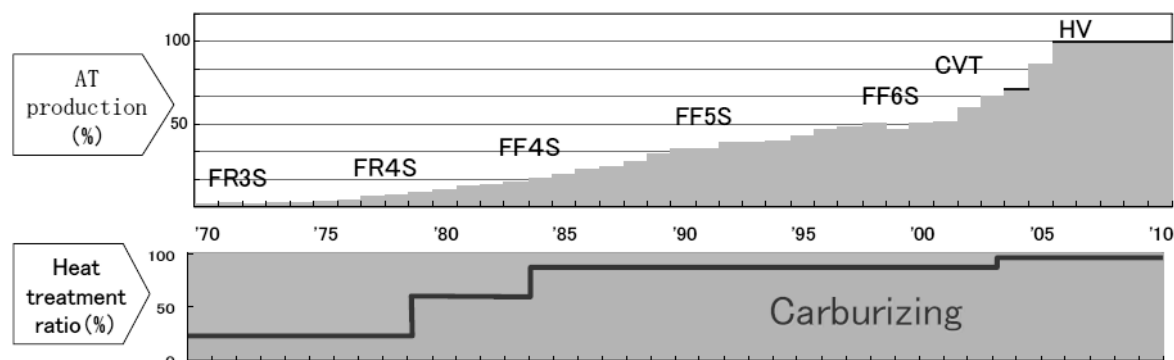


Fig.3. AT production of AISIN AW and changes of heat treatment.

## 2. 2 無段変速機の技術動向

従来、小型車向けが中心であった無段変速機（以下、CVT）は、大排気量車への適用が見られるようになった。CVTでは、特殊な金属ベルトをシーブで挟んで動力を伝達する機構が主で、金属ベルトとシーブの高強度化と高精度化が、CVTそのものの性能を大きく左右する。ユニット内の部品点数は多段ATに比較して大幅に低減しているものの、金属ベルトとシーブでユニット内スペースもコストも多くを費やしている。現段階では、ユニット全体で多段ATと比較して、大きく、重く、コストも割高になるケースがある。

金属ベルトはオランダの旧VDT社が開発したものが主だが、これに代わる次世代ベルトの開発が望まれる。シーブは肌焼鋼を熱間鍛造し、ガス浸炭焼入れしたものが主だが、素形材の歩留り改善とガス浸炭の生産性改善などが望まれる。さらには部品の設計を変えるような革新的な材料・熱処理の開発が必要である。

## 2. 3 その他トランスミッションの技術動向

さらには、ハイブリッド型トランスミッションや、手動変速機を二つのクラッチで自動に切り替えるデュアルクラッチトランスミッションなど、新しいユニットが、現在、開発進行中である。

ハイブリッド型トランスミッションは、ATの中にモーターとジェネレーターを組み込んだ機構が主であり、現在ではFF型もFR型も商品化がなされている。製造コストなど課題を残すものの、高い走行性能と燃費向上を成立させている。しかし、改良が進んだ前述の多段ATと比較すると、まだまだ改良の余地を多く残す。改良が進めば、潜在的な高い性能が、より一段と発揮されるものと期待される。

デュアルクラッチトランスミッションも、一部で実用化され、高い走行性能と燃費向上が実現された。これも改良が進めば、さらに魅力的商品になる可能性がある。

これらの新しいトランスミッションには、従来に無かった構造の全く新しい部品が多く必要となってきた。一つの部品に複数の機能が要求されていて、要求強度モードも複合化している。精度的にも以前より高精度化が要求されていて、今後ますますものづくりが難しくなると考えられる。

## 3. 材料技術の動向

### 3. 1 材料技術の動向

各種熱処理技術に応じてさまざまな材料が用意されている。高周波焼入れの特性を上手く引き出すように設計さ

れた材料や、軟窒化の特性を上手く引き出すように設計された材料、浸炭焼入れの特性を上手く引き出すように設計された材料、素形材の製造性と熱処理性の両立をねらった材料、素形材の中間熱処理省略をねらった材料、などさまざまな材料が開発されており、広く活用されている。

近年、自動車のCO<sub>2</sub>排出量削減ニーズを受けて、従来ではコスト的に敬遠され、見合わせられていた高強度を達成するための特殊材料が見直され、改めて再検討されるようになった。

## 3. 2 浸炭用材料技術の動向

特に浸炭焼入れ用特殊鋼では、さまざまな機能が付与されるよう材料設計されている。強度面では、曲げ疲労強度を引き出す材料、面疲労強度を引き出す材料、衝撃強度を引き出す材料、さらには、前述の3つの強度モードを同時に引き上げようと設計された材料も開発されている。例えば、材料中のSi量を減少し、ガス浸炭焼入れ時に発生する浸炭異常層を低減させ、疲労強度を向上させる材料や、逆に材料中のSi量やCr量を増加させ、ガス浸炭焼入れを施し、面疲労時の軟化抵抗を向上し、結果として面疲労強度を向上させる材料、などがある。これらの材料は、きめ細かく必要機能に応じて材料設計されている。

AT内の部品の一部で、普通鋼の浸炭焼入れのままでは要求機能を満足できない場合、こうした特殊鋼を適用して機能を満足させ、AT全体の大きな設計変更を避けて対応するケースが少なくない。

また、新しい浸炭技術を活かすために開発された材料もある。例えば、結晶粒粗大化防止材料と高温浸炭の組合せによって、浸炭時間を大幅に短縮する事例や、炭化物生成を配慮した材料と高濃度浸炭の組合せによって、微細炭化物を分散、析出させ面疲労強度を大幅に向上する事例などが代表的なケースである。最近では、セメント析出防止設計した材料を真空浸炭焼入れに組み合わせることによって、真空浸炭品質の安定化を図ることも考えられている。量産での適用はごく一部に留まっているが、今後の適用拡大が期待される。

## 4. 熱処理技術の動向

### 4. 1 局所熱処理技術の動向

高強度化熱処理はもちろんだが、低変形熱処理、低コスト熱処理、低環境負荷熱処理などの開発がとりくまれている。熱処理は、炉などを使用する全体熱処理技術と、高周波装置などを使用する局所熱処理技術に大別される。

低変形、低コスト、低環境負荷などの観点から、高周

波装置などを使用する局所熱処理技術は魅力的である。中でも高周波焼入れ技術は代表的な局所熱処理で、その優れた特性を、従来以上に引き出すために、輪郭・短時間高周波焼入れ技術や、超高周波（衝撃）焼入れ技術などが開発されてきた。また、高周波加熱に不向きな平面の処理とか、高周波コイルを近接配置できない箇所の熱処理として、レーザービーム、電子ビームを用いた熱処理も開発され、さらに多様な局所熱処理が可能となった。

しかし、炭素鋼などの普通鋼材にこれらの局所熱処理を組み合わせただけでは、浸炭焼入れ材の疲労強度に及ばない。対策として、素形材に調質を施したり、合金鋼を適用したりすると、熱処理前の機械加工の生産性が著しく低下するなどの問題がある。部品の機械加工と熱処理をスルーで考えると、浸炭焼入れ技術などに一歩及ばず、適用拡大の制限となっている。Fig.4に、浸炭焼入れ技術と高周波焼入れ技術の特徴を示す<sup>1)</sup>。

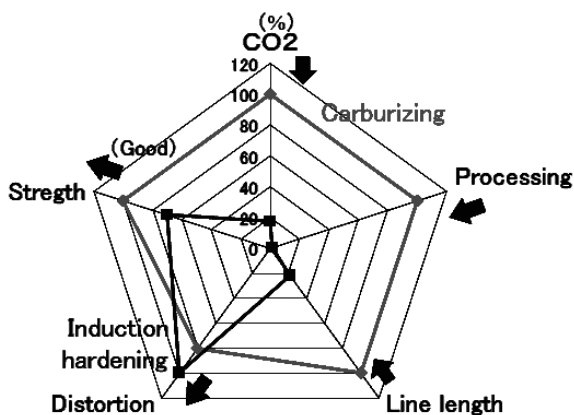


Fig.4. The feature of carburizing and induction hardening.

## 4. 2 浸炭焼入れ技術の動向

炉などを使用する全体熱処理技術の代表は浸炭焼入れ技術である。年々要求が厳しくなる高強度化には、特殊鋼材との組合せや、ショットピーニングとの組合せにより対応してきた。さらに浸炭窒化技術や高濃度浸炭技術などの開発がとりくまれており、材料、熱処理技術の醍醐味ともいえる、高度な技術開発がされている。

反面、低変形、低コスト、低環境負荷などは残された課題となっており、高強度化と裏腹に大きな問題となっている。これらの問題に対する取組は、例えば、ソルト焼入れ、高油温焼入れ、減圧油焼入れ、などの低変形焼入れ技術がある。また、低コスト、低環境負荷を目指した改良技術として、加熱源のガス化、加熱バーナーのリジェネ化、高温浸炭による短時間処理化、さらには高圧ガス焼入れによる油フリーと後洗浄廃止、などがある。真空浸炭による省エネルギーも期待されている。しかし、まだまだ残された課題が多く、今後一層の技術開発が必要である。Fig.5に、浸炭焼入れ技術の改良アイテムをまとめる<sup>1)</sup>。

## 5. 真空浸炭技術の動向

### 5. 1 真空浸炭技術の動向

高強度化、低変形、低コスト、低環境負荷を同時に成立させる次世代浸炭として期待されているのが、真空浸炭技術である。日欧米で、自動車メーカーを中心に採用、実用化が試みられている。真空浸炭ではガス浸炭に比較して消費ガス量を大幅に低減でき、処理した部品表層に

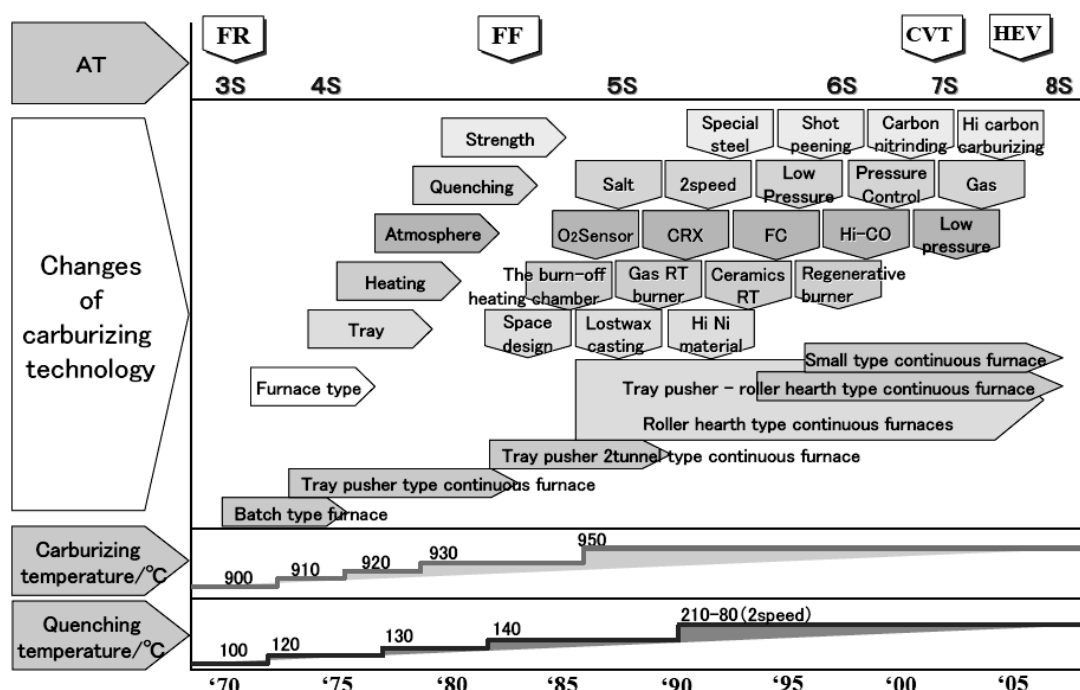


Fig.5. Improvement technology of carburizing.



は浸炭異常層がなく疲労強度向上も期待される。装置の立ち上げはシーズニング不要で、装置内雰囲気コンディションは再現性が高い。フレームベントなどの炎はどこにもなく、比較的安全な操業も可能となる。装置からの放熱も少なく作業環境も改善される。

従来の連続ガス浸炭焼入れに代わる代表的な例として、マルチセル型の真空浸炭装置に高圧ガス冷却装置を組み合わせたシステムがある。このシステムでは、焼入れ油も中間洗浄工程も必要としない。高温浸炭にも対応でき、浸炭時間の大幅短縮の可能性もある。適用部品によっては低変形になる場合もある。

これらが次世代浸炭として期待されている主な理由である。しかし難しさもあり、特に日本では適用が限られている。この一因に、浸炭品質がある。真空浸炭ではアセチレン、プロパンなど炭化水素系ガスを使い、非平衡反応により、一方的に浸炭し、表層のカーボンポテンシャルは一時的に2%以上となる。この浸炭中に生成したセメントタイトを、拡散で消失させることによって、従来ガス浸炭相当である共析点付近のカーボンポテンシャルとなるよう調整する。この浸炭方法では、部品の形状と部位によって拡散の状態が異なるため、セメントタイト残りを発生させる危険がある。平面部で共析点付近のカーボンポテンシャルをねらうと、エッジ部では拡散不足となりセメントタイト残りを発生させる可能性が高い。

例えば、これを防止するには、平面部での拡散後のカーボンポテンシャルを共析点よりも0.1~0.2%程度低目をねらう。するとエッジ部でもセメントタイト残りの発生確率を低減することができる。このような方法においては、部品の形状別、材質別、投入量ごとに、浸炭時間と拡散時間の割合を精密に調整する必要がある。また、このように低目のカーボンポテンシャルをねらった平面部でも健全なマルテンサイトを得るには、焼入れ能が高いコールド油焼入れや、焼入れ油の強撹拌を適用する必要がある。これは大きな熱処理変形とバラツキを誘発させることを意味する。部品精度を確保するには熱処理後の仕上げ加工を追加するなどの処置も必要となる。

さらに、真空浸炭に高圧ガス焼入れを組み合わせる場合もあるが、これは焼入れ能が通常の油焼入れよりも低くなる。この場合、平面部での共析点付近のカーボンポテンシャルは必要条件となり、エッジ部での拡散不足によるセメントタイト残りの対策は困難となる。

このように真空浸炭では、精密な条件設定と、前後工程の設定にきめ細かい配慮が必要である。従来ガス浸炭のような、平衡反応によるロバスト性を活かした、多種部品の同一条件、混合生産は不可能であり、現実的に管理が非常に難しい。浸炭、拡散時のカーボンポテンシャル

の自動制御技術であるとか、根本的なセメントタイト防止技術無くして、現在ガス浸炭焼入れに取って代わるような本格的普及は難しいと考えられる。

## 5. 2 真空浸炭材の疲労強度

真空浸炭材では、処理した部品表面に浸炭異常層がなく、残留応力も若干の圧縮状態になることから、疲労強度が向上することが期待される。Fig.6にJIS SCM420鋼において、ガス浸炭焼入れ材と真空浸炭焼入れ材の回転曲げ疲労強度を示す。ガス浸炭材に比較して、通常の真空浸炭材では、回転曲げ疲労強度が約17%低下した。破面は粒界破面となっており、金属組織を観察すると結晶粒界に沿って微細なセメントタイトが析出しており、粒界を脆化させ疲労強度が低下したと考えられる<sup>3)</sup>。対策として微細なセメントタイトを消失するよう、浸炭、拡散条件を調整した真空浸炭材では、逆に回転曲げ疲労強度を約23%向上する結果となった。これは粒界の脆化を解消し、浸炭異常層がなく表層へ圧縮残留応力が付与されるという、真空浸炭本来の優位性が発揮された結果と考えられる。このように真空浸炭では、微妙な条件の差が、敏感に疲労強度に影響することから、適用部品、適用材質、適用条件、前後工程など注意深い検討と設定が必要となる。

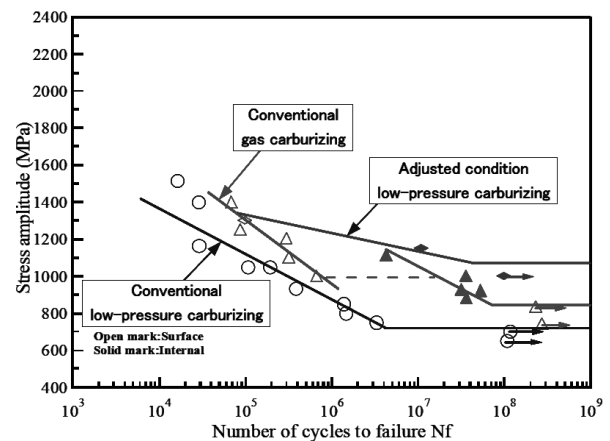


Fig.6. Rotating bending fatigue test of conventional carburized and low-pressure carburized SCM420.

## 5. 3 真空浸炭装置について

連続ガス浸炭装置は、直線トンネル式の連続炉が一般的であるのに対して、真空浸炭装置では、バッチ炉が基本である。連続処理を望む場合、直線トンネル式の連続炉ではなく、マルチセル型の連続システムが一般的となりつつある。これは、装置内を減圧に維持する容易さと、前述の浸炭品質の問題に対処し、処理チャージごとに最適条件を設定できることが理由と考えられる。

ガス浸炭では、同様の熱処理品質を求める部品は、たとえ部品形状が異なっても、同一条件で処理するこ

とが可能である。直線トンネル式の連続ガス浸炭炉を適用し、多種部品の同一条件、混合生産が可能で、高い生産性を獲得している。

真空浸炭では処理部品ごとにあらかじめ最適条件を調整、把握しておき、処理部品に応じて、最適条件を設定する必要がある。大量に単一部品を処理する場合以外は、処理途中で条件変更ができない直線トンネル式の連続炉を真空浸炭に適用することは考えられない。このため処理部品ごとに条件設定変更可能なバッチ炉が基本となっており、連続ガス浸炭装置に匹敵する生産性を得たいならば、複数の浸炭室をセパレートに配置したマルチセル型の連続システムとなるのである。このシステムでは処理部品ごとに条件を設定変更可能としながら、浸炭室以外は共用装置として、コンパクトに合体させてあり、比較的省スペースで、連続ガス浸炭炉の生産性に匹敵できるようになった。

このマルチセル型の連続システムは、当初フランスのECM社のみが製造していたが、現在では、数社が開発している。各メーカー、複数の浸炭室を合体する構造を改良しており、信頼性、メンテナンス性などの向上を図っている。メーカーによって浸炭に使用するガスも、真空度も異なっており、選択幅が広がっている。最初に開発したECM社以外、まだまだ量産での使用実績は少ないが、今後の展開が期待される。

## 6. 最近の開発事例

### 6.1 真空浸炭用材料について

過剰浸炭を防止できる材料が開発されている。真空浸炭の弱点である過剰浸炭を材料設計で防止している。この材料を真空浸炭に適用すれば、同様の熱処理品質を求める部品であれば、部品の形状別、材質別、投入量ごとに、別々に最適条件を設定する必要がなくなり、ガス浸炭と

同様、共通条件で多種部品の混合生産が可能となりうる。

こうした材料によって、真空浸炭が多種部品の混合生産でも、安定した品質を保証できるようになれば、本来、真空浸炭が目指していた高強度化、低変形、低コスト、低環境負荷の実現が、現実味を増してくる。まだまだ課題はあるが、真空浸炭が、ガス浸炭焼入れに取って代わり本格的普及するきっかけとなるキー材料になるかもしれない。

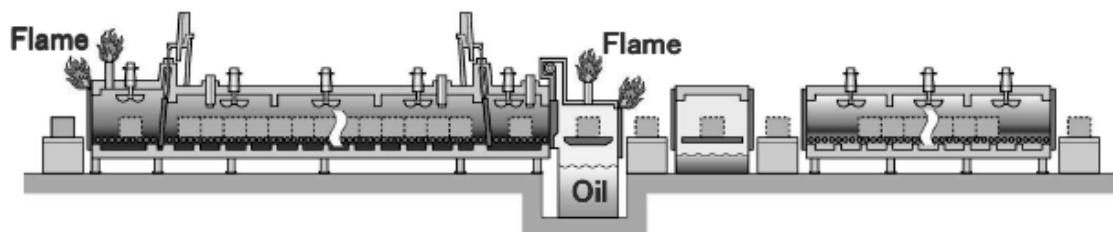
### 6.2 マイルド浸炭プロセスについて

当社では、新しい熱処理「マイルド浸炭プロセス(以下、マイルド浸炭と呼ぶ)」を開発した。まず、真空浸炭をする。その後、いったん窒素ガスで徐冷してから、改めて高周波焼入れをする。処理温度はガス浸炭と同じ950℃だが、470分だった処理時間は210分と、55%短縮した。それでも出てくる部品の熱処理特性はほとんど変わらない。Fig.7に連続ガス浸炭とマイルド浸炭プロセスの装置概要を示す<sup>2)</sup>。

ガス浸炭は1個流しができない。熱処理トレイにセットした多くの部品を一度に油につけて焼入れをする。油を使って比較的ゆるやかに焼入れし、熱処理歪みの量とバラツキを抑制している。高周波焼入れには「1個流し」ができるという良さがある。加工工程と同じサイクルタイムで、1個ずつ処理している。1個ずつならば、回転しているワークに水を噴射して、焼入れ能が高く、均一な水焼き入れができる。多少浸炭量を減らし表面カーボンポテンシャルが低くても、この水焼き入れであれば十分に強度を引き出すことができる。

Fig.8に示すように、有効硬化層の硬度を得る炭層濃度は、油焼入れに比較して、水焼入れでは0.1%程度低下できる<sup>2)</sup>。このように高周波の水焼き入れと組み合わせた場合の、低いねらいのカーボンポテンシャルであれば、部品の形状や処理数に応じて投入ガス量や時間を微調整

#### Continuous gas carburizing furnace



#### Mild carburizing process machine

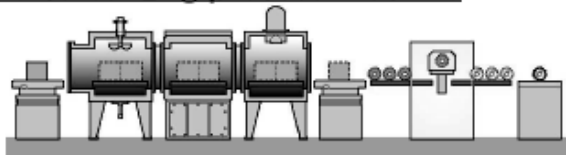


Fig.7. Cross section of continuous gas carburizing furnace and Mild carburizing process machine.

しなくとも、過剰浸炭は起こらない。つまり、マイルド浸炭では、特別な材料を適用することなく、真空浸炭の弱点をカバーできる。部品の形状別、材質別、投入量ごとに、最適条件を設定する必要がなくなり、ガス浸炭と同様、共通条件で多種部品の混合生産が可能となった。

また、マイルド浸炭の浸炭量であれば、浸炭、拡散時間は約1時間程度の短時間で済む。複雑な連続式真空浸炭装置でなく、バッチ式真空浸炭装置でもかなりの生産能力を確保できる。マイルド浸炭では、バッチ式真空浸炭装置をベースに浸炭室の前後に加熱室と冷却室を配置した単純なセミ連続構造の真空浸炭装置を開発し適用した。生産能力は、小型装置でありながら大鑑巨砲の連続ガス浸炭炉に匹敵するようになった。

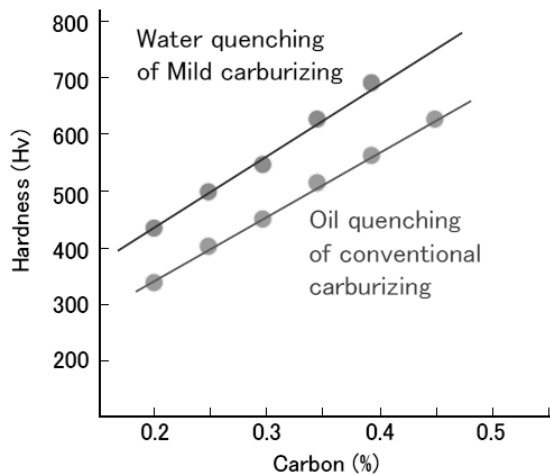


Fig.8. Relation between hardness and carbon content.

このプロセスでは、ライン長は47 mから26 mになり、CO<sub>2</sub>の排出量は902トン/年から550トン/年と、これもおおよそ半減となった。ライン内からは火と油が姿を消し、高圧ガスと危険物取扱いの有資格者も不要となった。油槽地下ピット、防火壁、排ガスダクト、化学消火器なども一切不要となっている。普通の工作機械と並列に取扱い、加工現場の一隅に置くことができる。

海外生産においても、マイルド浸炭は好都合となる。特別な材料を調達する必要はないし、真空浸炭装置の取扱いに際して、ガス浸炭のシーズニングなどの経験を必要としない。熱処理ラインは加工現場の隣に置いて生産できる。現地にラインが不要となれば、リレイアウトすることも可能であり、比較的容易に海外生産にとりくめる。

当社では、ガス浸炭焼入れは、AT工場内に熱処理専用エリアに集約して設置し、防火壁で囲っている。このマイルド浸炭プロセスは工場内の加工現場の一隅に設置し、6速ATの量産部品へ適用した。Fig.9に連続ガス浸炭ラインとマイルド浸炭プロセスラインのレイアウトイメージを示す<sup>2)</sup>。

こうした技術によって、ATの厳しい要求機能にこたえつつ、品質、生産性、コスト、環境、安全を改善するとりくみを進めていきたい。先般、この技術に対して、経済産業省から「第2回ものづくり日本大賞」の経済産業大臣賞をいただいた。大変ありがたく、光栄なことである。

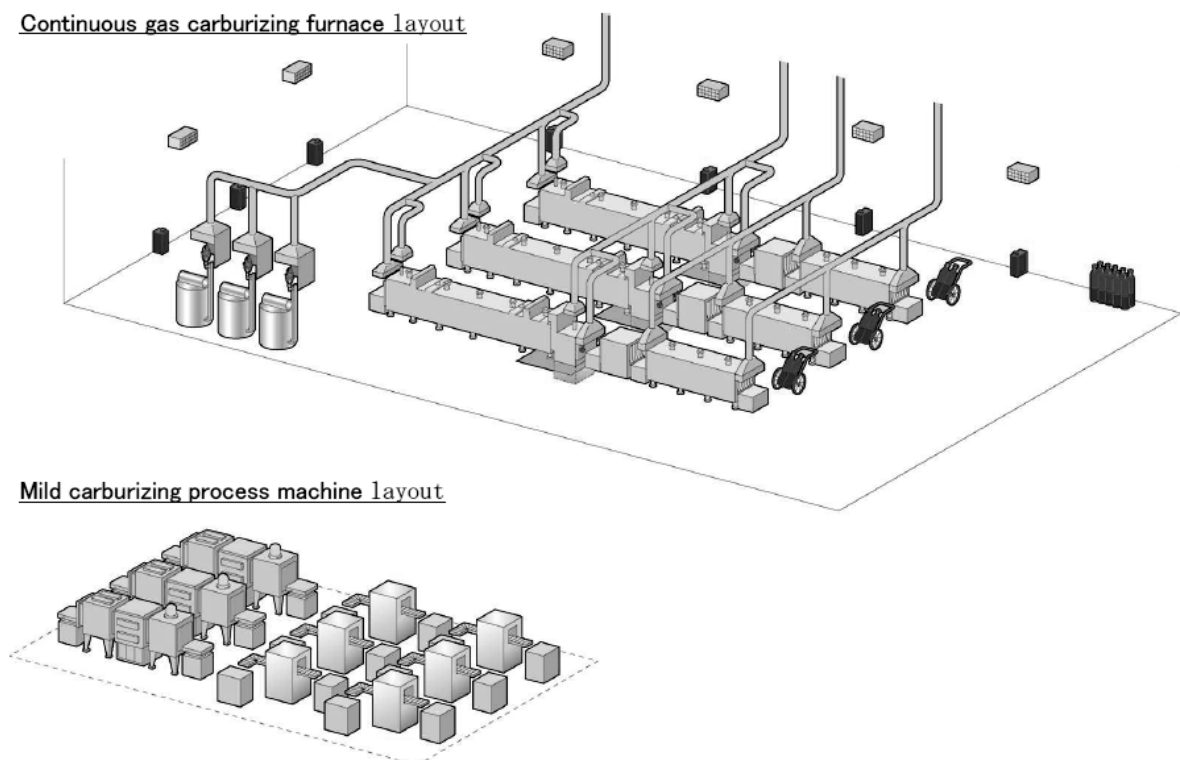


Fig.9. Example of continuous gas carburizing furnace layout and Mild carburizing process machine layout.

## 7. 結 言

今日の環境問題に対して、自動車は高い走行性能と燃費向上をいかに両立するかとりくまれ、それを支えるべく、材料、熱処理の技術開発がとりくまれている。日本の材料、熱処理技術は世界をリードしていると思われ、日本の自動車は世界をリードし、大きな成果をあげている。特に、ものづくりの繊細な調整や、管理を上手く具現化し、高度な技術をものにしている。

今後も世界をリードし、環境問題を解決へ先導することを望みたい。これを実現するため、生産技術と設計と製造現場が三位一体となりとりくむ必要がある。生産技術の中でも材料技術、熱処理技術、成形技術、機械加工技術、CAE解析技術、計測評価技術など、さまざまな分野が連携を取ってとりくむ必要がある。その中で、材料技術と熱処理技術は中心的役割を果たすはずである。課題解決は簡単ではないかもしれないが、一つ一つ技術確立していけば、一步一步課題解決へ近づけるはずである。日本のものづくりと材料技術、熱処理技術の発展とともに課題解決を期待したい。

### (文 献)

- 1) 大林巧治：熱処理技術協会 特定テーマ講習会資料，1 (2006)，4.
- 2) 大林巧治：日経 Automotive Technology，日経 PB 社，11 (2007)，160.
- 3) 猿木勝司，大林巧治：微粒子衝突表面改質研究会資料，7 (2007)，32.