

技術資料

Technical Data

雰囲気熱処理炉の変遷と改善に関する取り組み

伊藤英樹*

History and Progress of Atmosphere Heat-Treatment Furnace

Hideki Ito

Synopsis

The oxidization of materials is the most important problem for heat-treatment. It needs a peeling process and decrease production yields.

To solve the problems, atmosphere heat-treatment furnaces were developed.

This paper will explain atmosphere furnaces, solutions for energy consumption improvements, and finally discuss a future atmosphere heat-treatment furnaces.

1. はじめに

雰囲気熱処理の歴史、適用の範囲は広い。当然のことながら古くは熱処理炉は大気炉であり、熱処理時に材料が酸化、あるいは脱炭することは自明の理であった。

現在でも長尺の棒材などは、密閉型の熱処理炉での処理が不可能なため、必然的に大気状態で熱処理され、表層部には厚い酸化スケール層が形成される。従って熱処理後のピーリング処理（皮むき処理）は必須の工程である。

熱処理後に規定の材料サイズを得るためには、ピーリング処理による減少を見込んで、熱処理前の材料の径などサイズを決めておく必要がある。つまり熱処理という行為は、材料の無駄を必ず伴う行為であった。

ここに解法を与えたのが雰囲気熱処理であり、真空熱処理である。どちらも熱処理中の処理材の酸化反応をなくす、もしくは抑制することにより、この「材料の無駄」をなくすアプローチであり、ピーリング処理という手の掛る工程を省く試みである。

本論では、雰囲気熱処理の説明と改善の歴史について述べることにする。

2. 鋼の雰囲気熱処理

熱処理される対象としては鋼が圧倒的に大きなウエートを占める。鋼の熱処理プロセスにおける最大の特徴は「変態」であり、変態点を境にして結晶構造の変化が見られ、あるいは熱処理温度、加熱-均熱後の冷却速度を変化させることにより鋼の機械的性質は大きく変化する。熱処理の種類も、焼入れ、焼戻し、焼準、焼鈍など多岐にわたり、焼鈍処理一つ取っても様々な処理に類別できる。また鋼は「炭素」の含有によってまさに「鋼」たる機械的性質を得ているため、鉄の酸化ということ以外に、炭素が酸化されて材料から流出する、いわゆる「脱炭」という現象も、雰囲気熱処理上無視できない重要なポイントである。

2. 1 雰囲気熱処理の試み①

鋼を酸化させないために何をするかとなると、当然のことながら O_2 、あるいは分子構成上酸素を持った水蒸気、 CO_2 などの雰囲気を処理材の周りから除外することである。もっとも簡単なものは、不活性ガスで充満した

2013年10月25日受付

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

容器の中で熱処理を行うことにより、これらの雰囲気を除き、酸化を低減する方法である。

しかしながら、酸素分圧、水蒸気分圧などを理論平衡上酸化しないレベルに低減することは現実的に不可能である。従って材料の酸化、脱炭は避けられない。

一方 Fig. 1 に示すように、比較的低温であれば、熱処理時間はせいぜい 20 h 程度であるため酸化反応の進行レベルは少ないといえ、歪取り、低温焼鈍などでは、不活性ガス下での熱処理が現在でも行われている。

もっとも真の不活性ガスである Ar などは非常に高価なため、N₂ が雰囲気ガスとして用いられることが多い。

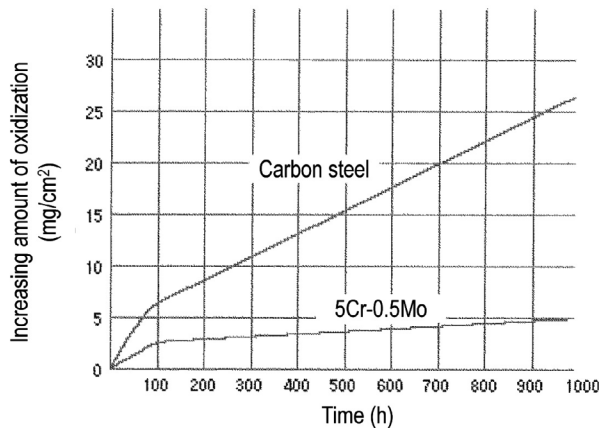


Fig. 1. Increasing amount of oxidation of Carbon steel and 5 % Cr-0.5 % Mo steel (600 (°C)).

2. 2 雰囲気熱処理の試み②

Fig. 2 に示すように、ステンレスでも酸化が無視できない温度になると、N₂ などの雰囲気下での無酸化処理は難しくなる。よって材料が酸化しないよう、周囲の雰囲気に H₂ を添加し還元雰囲気を保つ手法が適用されている。

H₂ をわずかに雰囲気に添加するだけで、雰囲気中の O₂ はほぼ 0 となる。これにより材料の酸化を防ぐことができる。一方 Fig. 2 に示すように、H₂ との反応により H₂O が発生し、H₂ と H₂O の分圧により酸化、或いは強脱炭雰囲気になるので注意を要する。

H₂ は極めて還元力が強いので、雰囲気中の O₂ のみならず、処理材の持ち込む酸化スケールをも強力に還元する。これにより H₂O が発生するため処理材の管理には細心の注意を要する。酸化もしくは脱炭温度以下で還元処理を行い、その後昇温する手法も考えられるが、還元に要する H₂ 量は膨大でコストは非現実的なものとなる。

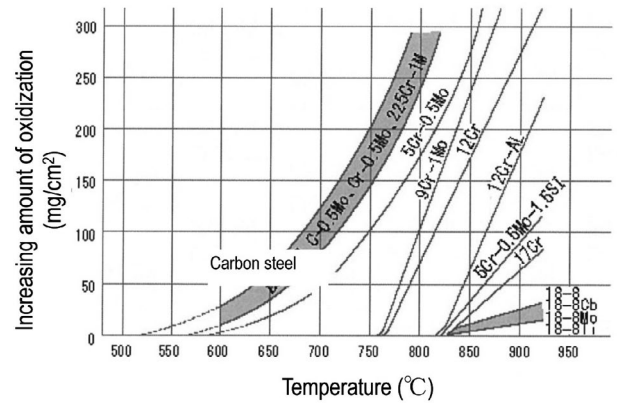


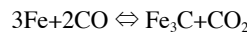
Fig. 2. Increasing amount of oxidation of various steels (1000 h).

2. 3 雰囲気熱処理の試み③

鋼の熱処理をする場合、鉄の酸化よりも炭素が酸化すること、すなわち脱炭を防ぐことが難しく、その対策が肝要である。そこで登場したのが、理論的に脱炭しない、かつ浸炭もしない平衡状態の雰囲気を作り出し、熱処理を行うという試みである。

Carbon・Potential・Factor (PF値) による雰囲気制御

鋼と CO-CO₂ ガスの脱浸炭機構は



すなわち Boudouard 反応



((C) は γ 中の固溶 C, 遊離 Cementite : Fe₃C の C)

(1) 式を平衡定数 K₁ とガス分圧を用いて表すと

$$K_1 = \frac{(P_{\text{CO}})^2}{P_{\text{CO}_2}} \cdot \frac{1}{a_c} \dots \dots \dots (2)$$

a_c は炭素の活量で

$$a_c = \frac{\text{Austeniteに溶解した炭素量}(\%): A_c}{\text{Austeniteの飽和炭素量}(\%): A_s} \dots \dots \dots (3)$$

(2), (3) 式より

$$\text{PF} = \frac{\text{CO}\%}{\text{CO}_2\%} = 100K_1 \cdot \frac{A_c}{A_s} \dots \dots \dots (4)$$

従って、炉内の CO₂, CO 濃度の分析・制御をすることにより脱浸炭なしの雰囲気にすることができる。弊社では雰囲気管理指標として「PF」値を用いた方法を採用している。

これは、吸熱形ガスと呼ばれる高CO、高H₂ 雰囲気ガスを用いて熱処理が行われる。鋼を無脱炭処理する方法としては理想的な処理方法といえ、現在でも最も代表的な雰囲気熱処理手法である。

当社では、温度と雰囲気を同時に協調自動制御できるバッチ炉を開発し、業界に広く使用され好評をいただいている。現在それはSTC[®]炉（ショートタイムサイクルですぐ次の処理に取り掛かれるバッチ炉）として広く認知され、弊社の代表機種の一つとなっている。

また、この手法の利点の一つは、意識的に浸炭させたい場合にも雰囲気を調整して対応が可能なことである。そればかりでなく、素材の性状が悪く素材の時点でいくらかの脱炭層が存在する場合でも、もちろん脱炭レベルにはよるが、脱炭をリカバリーするいわゆる復炭処理でさえ可能である。他の雰囲気ではこのような浸炭、あるいは復炭処理を行うことは不可能である。

脱炭炭を制御する手法としては理想的と言える一方、鋼中の炭素の平衡状態を保持する考え方であるため、他の金属、例えばクロム鋼などの合金鋼を処理する場合には、より酸素と反応しやすいクロムに対しては酸化性雰囲気となる。この場合にはクロムが選択的に酸化されるため、熱処理後の酸洗ではクロム酸化物の除去を考慮する必要がある。

この点においては、H₂ などの還元力の強い雰囲気での処理を選ぶことが適切であり、クロムの酸化物発生を抑制した熱処理に努めることにより酸洗処理の負荷が軽減されるといわれている。

3. 雰囲気熱処理炉の省エネルギー

省エネおよび環境対策は、工業炉に常に付いて回る永遠の命題といえる。どちらの命題も時代の移り変わりに伴い要求は強くなっていくばかりである。

ここでは、雰囲気熱処理炉に関する省エネの試みを紹介する。

3. 1 雰囲気熱処理炉の省エネの試み①

Fig. 3 に示すのは、炉内蔵形バーナ燃焼式ガス発生装置の系統図である。この方式では、バーナ燃焼熱はまずは炉内に放散され、熱処理材の昇温に寄与する。その意味では熱処理材加熱用のバーナという役割の一つを担っている。

一方、炉内ガス生成の目的のため、空気を理論燃焼空気量より少なく設定して燃焼させるため、排ガス中に

は、H₂、CO が含まれる。

この排ガスから、酸化性雰囲気であるH₂O、CO₂ を吸着、除去し精製してから炉内へ送ることで、炉内に還元性のガスを構成することができるという装置である。

吸着は専用の吸着材を内包した吸着塔で行われるが、一定量の吸着を行った後には吸着材を真空ポンプを用いて吸引することにより、吸着材から吸着ガスを分離し再生させる必要がある。よって連続的にこの装置を稼働させるためには吸着塔は必ず対にして、交互にバルブで系統の切換えを行い、吸着と再生を繰り返す必要がある。

この方式では、炉内雰囲気ガス用の専用のガス発生装置が要らなくなるばかりか、雰囲気ガスを生成するための原料ガスさえ必要としないという点で画期的であり、省エネへの貢献度は非常に高い。我々はこの装置をGGレスバーナ（ガス発生装置を不要とするバーナ）と呼んでいる。

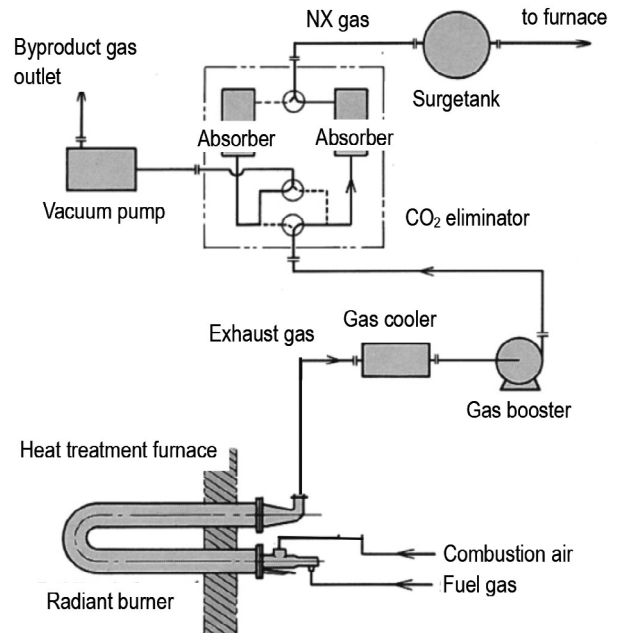


Fig. 3. Flow sheet of gas generator.

一方、この装置は発熱型ガス発生装置であるため、発生するH₂、CO量は多くはない。従って脱炭平衡レベルの高い熱処理をする場合にはGGレスバーナをN₂の代替雰囲気としての目的にとどめ、別途吸熱形ガス発生装置を準備して、雰囲気ガスとして併用して使用する。N₂の代替雰囲気としてもランニングコスト削減効果は非常に大きい。(Table 1)

Table 1. Energy saving estimation of gas generator.

	Electric power		N ₂ gas		Total cost
	Consumption	Cost	Consumption	Cost	
Gas generator 150 m ³ (N)/h	13 kVA	195 yen/h	0m ³ (N)/h	0 yen/h	1.56 × 10 ⁸ yen/ly
N ₂ bomb 150 m ³ (N)/h	0 kVA	0 yen/h	150 m ³ (N)/h	4500 yen/h	36 × 10 ⁸ yen/ly

Gain :
34.4 × 10⁸ yen/ly

3. 2 雰囲気熱処理炉の省エネの試み②

従来の設備は、無酸化雰囲気ガスが充満した加熱室と外部を遮断するために、加熱室の前後に前室、後室を設置し、熱処理材はこの部屋を経由して外部と炉内を行き来する。(Fig. 4) この室内を事前に加熱室と同じ無酸化

雰囲気ガスを用いてパージ、置換することにより大気侵入を抑制してきた。しかし、室内のO₂濃度を1%に置換するために室容積のおよそ3倍、0.1%に下げたためには5.3倍もの無酸化雰囲気ガスを必要とした。

これに代わって登場したのが真空パージ方式である。(Fig. 5) 前室、後室を真空に耐える構造としなければならないが、室内を真空に引くことで簡単に室内の雰囲気置換ができ、必要な雰囲気ガス量も室容積と同じですむため、雰囲気ガスの使用量が大幅に削減される。またこの方式の優れた所は、高性能な真空ポンプを用いることにより、前室、後室の置換レベルを追求できるため、外部からの大気侵入をほぼ完全にシャットアウトした高純度な雰囲気形成できる点にある。これは、後述する極低酸素、極低露点窒素オンリー炉の実現のためにはなくてはならない方式である。

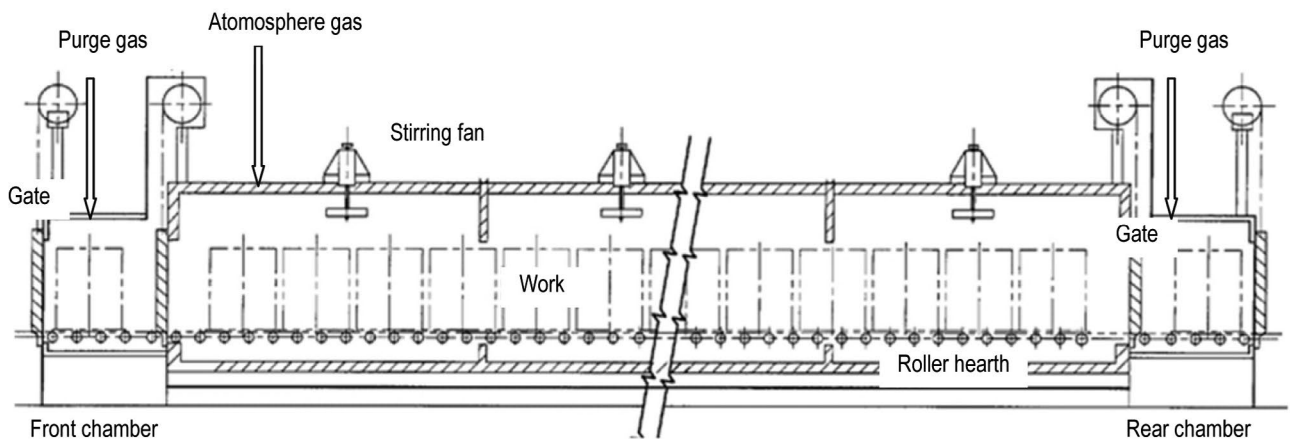


Fig. 4. Outline of continuous heat treatment furnace with front / rear chamber.

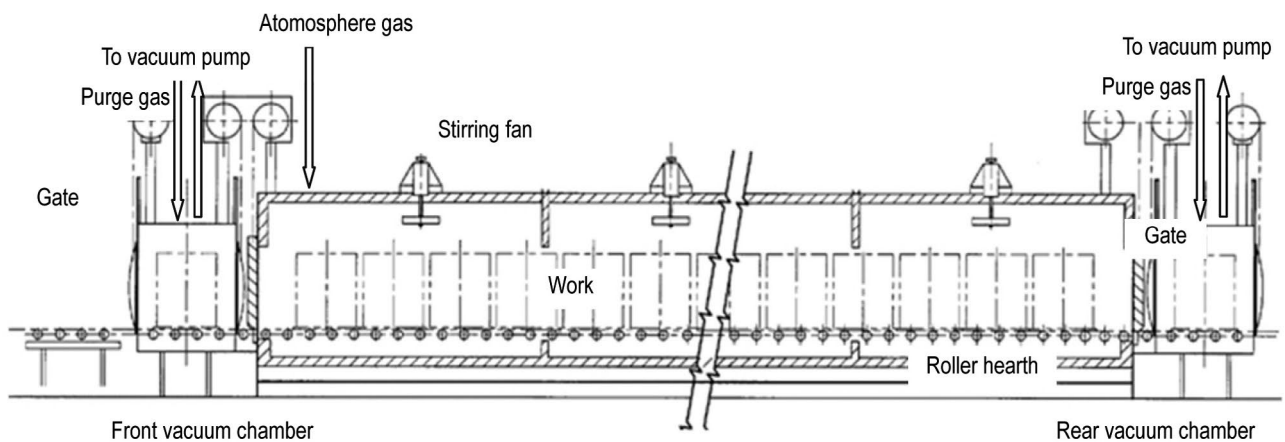


Fig. 5. Outline of continuous heat treatment furnace with vacuum chamber.

4. 今後の雰囲気熱処理

現在の熱処理炉に求められる要求として、更なる高品質処理への対応がある一方、環境対策、省エネルギー、ランニングコストの低減などがあるが、今後さらにこれらの要求が強くなっていくことは想像に難くない。

本論では、今後の雰囲気熱処理への取り組みについて述べることにする。

4. 1 極低酸素、極低露点窒素オンリー熱処理炉

2. 1でも述べたように N₂ 雰囲気だけでは脱炭を防ぐことは困難である。それは理論的な平衡状態にすることが極めて困難であるからである。しかし一般に許容脱炭レベルという指標があり、JISでも許容脱炭レベルを規定している。

すなわち完全な無脱炭で無くとも熱処理として受け入れられる、あるいは微量に脱炭していることが熱処理条件であるというケースもある。

極低酸素、極低露点窒素オンリー熱処理炉とは、炉内 O₂ 量、H₂O 量を極低レベルに管理することにより、N₂ 以外のガスを用いることなく脱炭レベルを制御する試みである。熱処理対象が線材コイルだとすると、線材径と処理材の重量から材料の表面積が分かる。処理材表面が一様に脱炭すると、脱炭深さ×処理材表面積から許容 O₂ 量、許容 H₂O 量の目安を付け、脱炭が許容できるレベルに制御する手法である。この方法では前述の真空パージ室の設置が必須であり、加熱室内への外気侵入をシャットアウトしている。また、投入 N₂ の純度も厳しいレベル（露点 < -80℃）が要求される。

この思想によって提案される熱処理炉は以下の様な優れた特長を持つ。

- ① 可燃性のガスを使用しないため、理論的に炉内で異常燃焼がおこらない。
- ② 炉内に CO ガスが存在しないため、環境に優れる。
- ③ 吸熱形ガス発生装置が不要なため、ガス発生装置のイニシャルコストのみならず、ガス生成に関わるランニングコストを要しない。(Table 2)
- ④ 脱浸炭レベルの異なる材料を処理する時に、炉内の必要「PF」を変更するための時間、コストがかからない。つまりチャンスフリーの熱処理炉である。

Table 2. Gas saving merit of GG less system.

	Endothermic gas		Total cost
	Consumption	Cost	
N ₂ only heat treatment furnace	0m ³ (N)/h	0 yen/h	0 yen/y
Conventional	150 m ³ (N)/h	3300 yen/h	26.4 × 10 ⁶ yen/y

Gain :
26.4 × 10⁶ yen/y

4. 2 高性能雰囲気熱処理炉

前述の、理論的に脱浸炭の平衡状態の雰囲気を形成する時に、高 CO、高 H₂ ガスを持つ吸熱形ガスの他に、ベースガスとして N₂ を使用する。雰囲気の管理指標である「PF」値を上昇させたい時は吸熱形ガスを炉内へ投入し、逆に「PF」値を下げたい時は N₂ を投入している。

「PF」値の上げ下げの制御を容易に行うためには、吸熱形ガスおよび N₂ のそれぞれの量のバランスは重要である。

一方吸熱形ガス中に含まれる H₂ は、直接は熱処理の脱浸炭の制御に寄与していないが、H₂ の持つ高い熱伝導率、高い熱伝達率などは熱処理材の効率的昇温、熱処理材の均等な温度分布などに寄与する。H₂ が 100% の熱処理炉は強い還元性のみならず、この様な H₂ の物理的な特性を利用している。しかし前述の如く、水素炉は熱処理材の酸化スケールなどの表面性状管理に細心の配慮を要する。

そこで、脱浸炭の制御を吸熱形ガスを用いて行うことを基本としながら、「PF」の制御性を確保するための N₂ に替えて H₂ を導入することで、両者の良い特徴を両立できないかという試みを模索している。

ランニングコストの増加、設備費用の増加など問題はありますが、熱処理時間短縮により吸熱形ガスの使用量を削減できる可能性もあり、今後のテーマとして期待がかかる。

5. 終わりに

雰囲気熱処理炉についての変遷と改善への取り組みについて記述してきた。最後に、ランニングコスト削減、環境への雰囲気炉の提案と、一方その対極にあるといえる、より高品質な熱処理を行うための雰囲気炉という 2 つの提案を行った。

雰囲気炉に対する顧客および環境保護の観点からの要求は、これからも変化を続けると思われる。それを踏まえて常に新しい取り組みを継続して行きたい。