



工業炉における省エネルギー技術への取り組み

吉井 聡一*

1. はじめに

近年、地球温暖化による気候変動や地政学的リスクが高まっている。その原因が二酸化炭素(CO₂)をはじめとする温室効果ガスによるものであるため、温室効果ガスの実質的な排出量をゼロとするカーボンニュートラルへの取り組みが行われている。

当社は1945年の設立以来約80年間、多くの工業炉やバーナを販売しており、その多くは今もお客様の現場で稼働している。これらの製品は多くのCO₂を排出しているため、カーボンニュートラルは当社に課された使命として取り組んでいる。

図1は当社の稼働中の製品から排出されているCO₂の量を示したものである。パリ協定の基準年である2013年において約1200万tのCO₂を排出しており、これは日本全体の排出量の約1%に相当する。これを2050年までに実質ゼロにする目標としている。納入済みの製品から排出されるCO₂を当社によって削減することはできないため、新たな製品によるCO₂排出削減量を含めることで目標の達成を実現する。CO₂削減の手段として省

エネルギー・電熱化・水素燃焼・アンモニア燃焼の技術を柱として、これらの開発を進めている。しかしながら、電熱化・水素燃焼・アンモニア燃焼については、現時点では普及には時間がかかる。本稿では、比較的取り組みが容易となる省エネルギー技術について、当社の主力製品の一つであるガス浸炭設備、ガス窒化・ガス軟窒化設備に的を絞って紹介する。

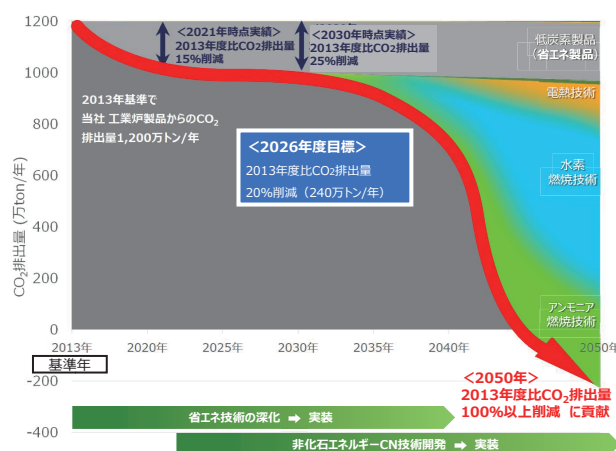


図1 中外炉工業の脱炭素目標

* 中外炉工業株式会社 熱処理事業本部 熱処理事業部 開発試験課 専門課長 T.Yoshii

2. 省エネルギー技術の紹介

表1は当社が取り扱っている、熱処理設備に対する省エネルギー提案例のリストである。省エネルギーについて、従来はランニングコスト削減を主目的としていたが、近年は脱炭素を目的とした省エネルギーへの投資が増加している。ランニングコスト削減を目的とする場合、投資回収期間が2～3年、短い場合では1年で回収することが一般的であったが、最近では脱炭素が目的のため、投資回収が10年以上でも投資するケースもある。

3. ガス浸炭設備における省エネルギー

当社の主力製品のひとつであるバッチ式ガス浸炭炉は、ハイ・シフター®という名称で販売しており、1954年に1号機を販売して以来1300基以上納入している。ガス浸炭炉は、加熱室の熱源にバーナを用いることが多く、キャリアガスであるRガスも炭化水素系のガスより変成されているため、多くのCO₂を排出する設備である。

図2にバッチ式ガス浸炭炉の加熱室におけるエネルギー割合を示す。材料熱等有効なエネルギー利用は約30%であり、残りの70%は放熱や

損失等のロスとなっている。従って、放熱や損失を減らすことや、エネルギー効率をアップすることが、省エネルギーのアイテムとなる。

以下にガス浸炭設備に利用できる省エネルギーについて紹介する。

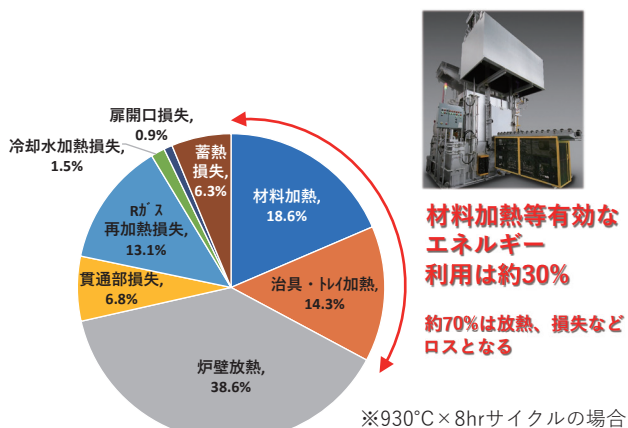


図2 バッチ式ガス浸炭炉加熱室におけるエネルギー割合

3.1 高効率断熱材

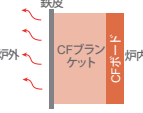
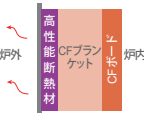
高効率断熱材は、すでに新設や改造で採用されており、当社も30年以上前から熱処理炉に採用している。

表1 熱処理炉の省エネルギーリスト

No.	目的	項目	内容	投資回収期間目安		
				5年未満	5～10年	10年～
1	放熱量削減	高効率断熱材使用	炉表面温度放熱量を低減で燃焼ガス量削減	○		
2		レンガ→セラミックファイバー	炉表面温度放熱量を低減で燃焼ガス量削減		○	
3		断熱塗料の塗布	炉壁外面に断熱塗料を塗布する	○		
4		炉壁外面に保温	炉壁に保温材を施工し放熱を抑える	○		
5		RCファンの水冷スリ化	必要以上放熱させない		○	
6		炉内設置型のRガス発生機	発生機の放熱量削減、Rガスの再加熱が不要	○		
7	バーナ効率UP	レキュペレータ使用	有効熱効率(AH)：約65%	○		
8		高効率レキュペーナ化	有効熱効率(AH)：約70%	○		
9		リジェネバーナ化	有効熱効率(AH)：約80%		○	
10		空気比の最適化	空気比を適正に調整することで、ガス使用量削減		○	
11		PIDバーナ制御化	ON-OFF制御からPID制御	○		
12		ラジアントチューブ内に蓄熱体設置	排気熱の利用で熱効率向上	○		
13	ユーティリティの変更	酸素（富化）バーナ	支燃剤を酸素にすることでレキュペーナ、リジェネバーナと同等の省エネを実現			○
14		電熱化	パイロットバーナの電熱化			○
15	電力量削減	灯油→LPG→都市ガス（13A）	CO ₂ 排出量 灯油→LPG：14%減、LPG→13A：13%減			○
16		高効率モータ化	電力使用量の削減		○	
17		インバータ化	必要以上に大きなポンプを絞って運転している場合	○		
18		アモルファストランス化	待機電力の低減		○	
19		トレイ・治具の軽量化	材質を熱容量の小さいもの（C/Cなど）にする	○		
20	雰囲気ガス削減	Rガス発生機のダウン	Rガスを必要量だけ発生する	○		
21		雰囲気再生装置による水素除去	水素を除去してCO濃度を維持			○
22	昇温時間短縮	昇温時のRCファン回転数UP化	温度域で可変させることで昇温時間短縮	○		
23	排ガス・排熱利用	バーナ排ガスの再利用	アルカリ洗浄液・焼戻炉等の予熱	○		
24		バーナダウンバーナ	Rガスを燃料として使用	○		
25	見える化	IoT化（CRISM®）	運転状況を確認することでトラブル予防・安定稼働	—	—	—
26		サーモグラフィ	炉の表面温度を可視化し、熱損失防止対策実施	—	—	—
27	無駄削減	不要時のポンプ・機器運転停止	待機時にブロー停止、冷却時以外の冷却水量削減	○		
28		コンプレッサーの設定見直し	設定圧を下げることで消費電力削減	○		
29		炉立上げ時間の調整	必要な装置から立ち上げて、待機時間を削減	○		
30		待機時間の削減	待機時間を減らすことで生産性向上	○		

表2に採用例として、当社バッチ式ガス浸炭炉の加熱室断熱材の厚さを変えず、一部高効率断熱材に変更した場合の結果と省エネルギー効果を示す。高効率断熱材を施工すると、炉壁温度が30℃低下し、それに伴い燃料ガス使用量も約17%低減削減した。

表2 高効率断熱材の省エネルギー効果

項目		従来断熱材 	高性能断熱材 	効果
実測値	ガス消費量	7.0 m³/h	5.8 m³/h	▲ 1.2 m³/h
	炉壁表面温度	115.2℃	84.9℃	▲ 30.3℃
想定効果	年間ガス消費量	55,944 m³/年	46,673 m³/年	▲ 17%
	燃料費	397万円/年	331万円/年	▲ 66万円/年
	CO₂ 排出量	116.9 t/年	97.5 t/年	▲ 19 t/年

実測値測定条件：950℃、Rガス雰囲気、燃料都市ガス13A使用、空炉

想定効果条件：24hr×333日稼働の場合

3.2 RCファンの水冷レス化（空冷化）

RCファンは、摺動部やシール部保護のため水冷している。しかし、水冷により以下のデメリットが生じる。

- ① 放熱量が増える
- ② 冷却水の水質管理や、配管詰まりに対するメンテナンスが必要
- ③ 炉内へ水漏れした場合、雰囲気が乱れ熱処理不良となる、また修理するための停炉期間が必要

RCファンの冷却を、水冷から空冷にすることで上記のデメリットも解消される。水冷レス化への改造については、水冷ボックスの交換、水冷配管の撤去、既設エアブローからのエアの取り込みとなり、比較的容易である。

3.3 炉内設置型Rガス発生機¹⁾

ガス浸炭はRガスと呼ばれるキャリアガスが使用される。Rガスは都市ガスやプロパンガスなどの炭化水素ガスと空気から変成される。多くは浸炭炉とは別の変成炉と呼ばれるガス発生機（別置型Rガス発生機）が用いられるが、この発生機で変成されたRガスは変成直後にクーラーで冷却され、浸炭炉へ導入時再加熱される。

炉内設置型Rガス発生機は、図3に示すように浸炭炉の天井に設置でき、変成したRガスは直接炉内へ導入可能な発生機である。別置型Rガス発生機と比較し、装置の設置面積が不要であり、Rガスの再加熱も不要である。また、発生機からの放熱も大幅に低減できる。表3に別置型Rガス発生機と比較した、炉内設置型Rガス発生機の省エネルギー効果を示す。前述した放熱とRガス再加熱不要により、エネルギーは約80%削減可能である。

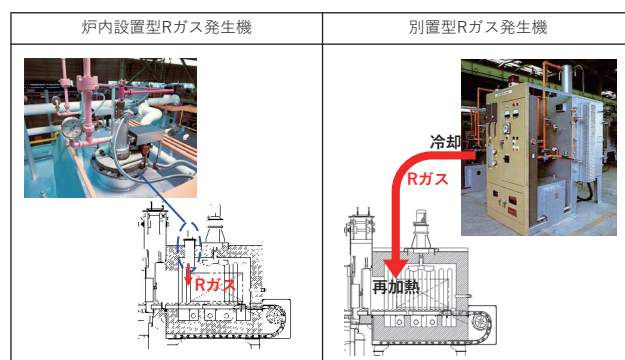


図3 炉内設置型と別置型のRガス発生機

表3 炉内設置型Rガス発生機の省エネルギー効果

[単位：Wh/m³N (Rガス)]

項目		別置型 Rガス発生機	炉内設置型 Rガス発生機
加熱容量	変成熱量	70	70
	放熱損失	380	60
ブロー電力		30	30
Rガス再加熱熱量		355	0
排ガス用パイロットバーナ		75	0
制御電力		20	20
合計		930	180

3.4 バーナの空気比最適化制御装置

バーナは燃料と空気の割合が乱れると燃焼状態が悪くなり、未燃ガスが発生したり、余分な空気を温めるために無駄なエネルギーを消費することになる。そのため、燃焼状態の維持管理が重要となるが、燃焼バーナ近くの過酷な環境での作業となるため、十分な維持管理が困難である。

バーナの燃焼状態を表す空気比については、一般的に1.1が最適といわれている。空気比が1.1より小さくなると、未燃ガスが出たり煤けたりする。一方、大きくなると正常に燃焼しているよう

に見えるが、余分な空気を温めるための燃料消費が増える。図4に、ある空気比の状態を1.1に改善したときの燃料節約率のグラフを示す。例えば、炉温900℃において空気比を1.2から1.1へ改善した場合、約5%の節約となり、1.4から1.1への改善になると約16%の節約となる。

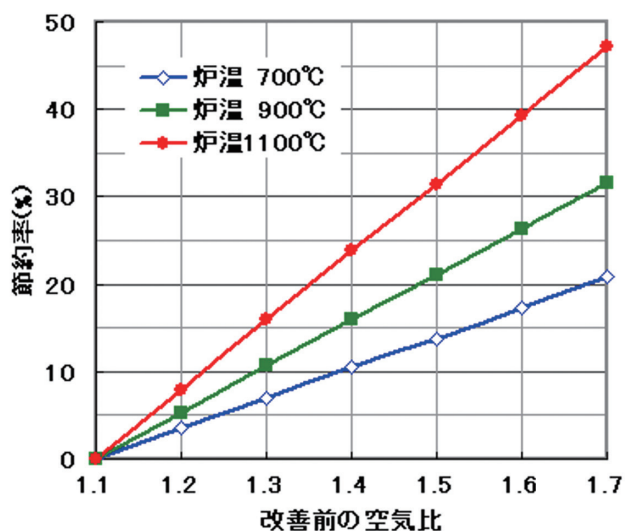


図4 空気比の改善による省エネルギー効果

図5は、バーナの空気比を自動で制御する装置を示す。Lamuda-i® (ラムダアイ®) は、バーナの燃焼排ガス中の酸素濃度を測定する機器で、その酸素濃度から空気比を計算し、調節計にて最適な空気比となるように燃焼空気量を制御するシステムである。従来の手動での燃焼調整では、高温域のみの調整であったが本制御装置を用いると、立ち上げの昇温段階から制御することも可能である。

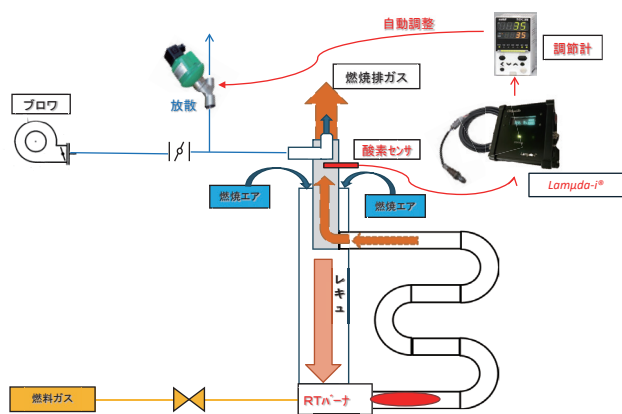


図5 バーナの空気比最適化装置

3.5 ラジエントチューブの熱損失低減

間接加熱に用いるラジエントチューブにおいて、排気側内部にスパイロコア® (Saint-Gobain

社製) と呼ばれる高放射材^{ふくしゃ}を挿入することで、燃焼効率を向上できる。図6に示すように、従来排気側は対流伝熱のみで伝熱効率が低いものであったが、スパイロコア®を挿入することで、放射熱量が向上し、伝熱効率が上がる。バッチ式の炉では、約5%の省エネルギーが見込まれ、この場合CO₂の年間削減量は5.1tとなる。

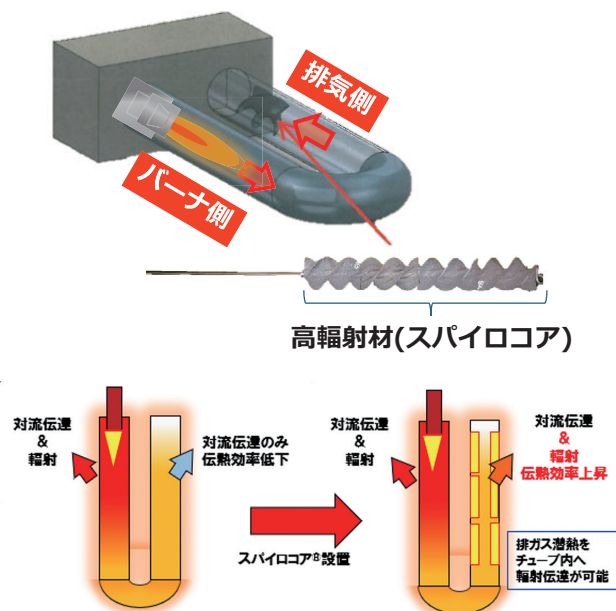


図6 ラジエントチューブの熱損失低減

3.6 パイロットバーナの電熱化

ガス浸炭炉では、炉内雰囲気ガスを排出するベント部や、装入・抽出扉のカーテンバーナ部にパイロットバーナを用いている。このバーナを写真1に示すようなSiN製のセラミックヒータに変更することで、パイロットバーナに使用するランニングコスト及びCO₂排出量が97%も削減できる(常時点火で24hr×300日稼働の場合)。



写真1 パイロットバーナの電熱化

3.7 雰囲気再生装置²⁾

バッチ式のガス浸炭炉において、時間当たりの R ガス導入量は、浸炭室内容積の最低 6 倍必要といわれている³⁾。しかしながら、実際に浸炭に必要とされる R ガスはこの一部である。ここで紹介する雰囲気再生装置は、R ガス導入量を従来より約 50 % 削減可能な装置である。

R ガスの主成分は、CO、H₂、N₂ ガスを含んでおり、浸炭反応で CO が鋼表面と反応し CO₂ となり、エンリッチガスとの反応で、CO₂ は CO と H₂ となる。結果として、H₂ 濃度が増加することで、相対的に CO 濃度が減少する。CO 濃度が低下すると制御 CP (カーボンポテンシャル) と、実雰囲気^{かいり}の CP に乖離^{かいり}がおり、結果として制御 CP で計算される深さより浸炭が浅くなったり、トレー内で浸炭深さにバラツキが生じたりする。前述した R ガスを多く導入する理由は、増加した H₂ を追い出し、雰囲気の成分変動を低減させるためである。

図 7 に雰囲気再生装置の構成を示す。炉内 R ガスを循環ポンプで循環させ、循環中に H₂ のみを透過するフィルターを用い、H₂ を除去する装置である。なお H₂ を過剰に除去しないようにするため、炉内 CO 濃度を測定し、CO 濃度が規定濃度より低い場合は H₂ の除去を行い、規定濃度に達すると H₂ の除去はしないように制御する。これにより、炉内 CO 濃度は一定に保たれる。

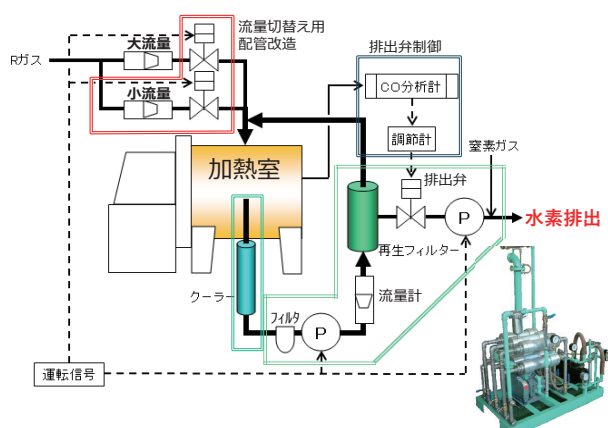


図 7 雰囲気再生装置の構成

図 8 は雰囲気再生装置使用有無を含む、以下 3 条件の浸炭焼入れ試験中の CO、H₂ 濃度推移を示す。

- ① 基準条件：従来の R ガス量
- ② R ガス減少：従来の R ガス量より 50% 削減したもの

- ③ R ガス減少 + 雰囲気再生装置：従来の R ガス量より 50% 削減し、雰囲気再生装置を使用したもの

雰囲気再生装置を用いた条件 ③ は、CO 濃度が一定で H₂ 濃度の上昇も抑制されている。一方、基準条件 ① においては、若干の CO 濃度の減少は見られる。

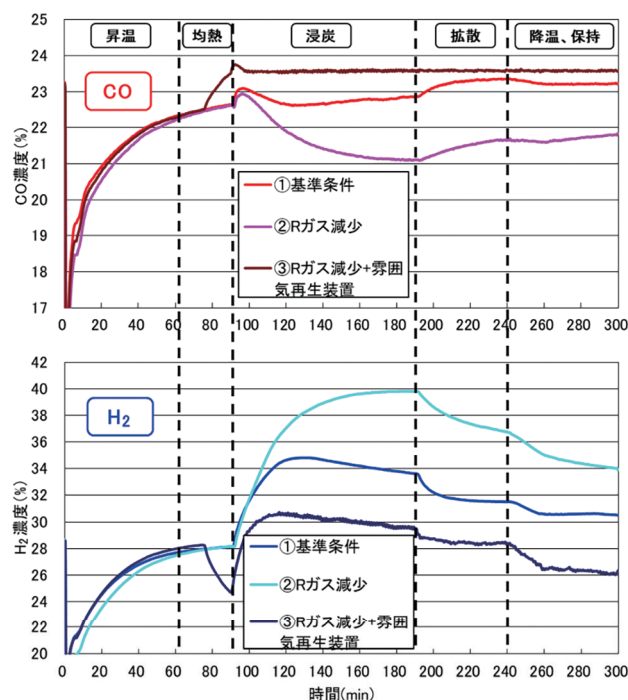


図 8 CO、H₂ 濃度の推移

図 9 は上記試験の硬さ分布を示す。試験における荷姿は、処理材の表面積を増やすため、ダミー用の鋼板を積載し、評価用のテストピースは荷姿のコーナー部（端）と中心部（中）の 2 箇所とし、荷姿内でのバラツキも調査した。結果として、R ガスを減少した ② の条件は、他と比べ、顕著な硬さの低下とバラツキが確認でき、雰囲気再生装置を用いた条件 ③ は、基準条件 ① と同等以上の硬さ分布が得られた。

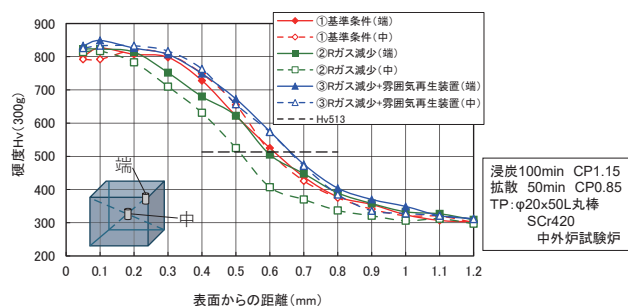


図 9 硬さ分布

4. ガス（軟）窒化設備における省エネルギー

ガス（軟）窒化設備の省エネルギーについても、ガス浸炭炉と同様のものが多い。ここでは、ガス（軟）窒化設備特有のものとして、3つのアイテムをピックアップして紹介する。

4.1 炉内設置型 AX ガス発生機

近年、窒化組織のコントロールを目的とし、窒化ポテンシャルを用いた窒化雰囲気制御する手法が取られている⁴⁾。窒化ポテンシャル制御で用いられるガスは、 $\text{NH}_3 + \text{N}_2$ や $\text{NH}_3 + \text{AX}$ ガス（ NH_3 分解ガスで H_2 75 %、 N_2 25 %）などがある。特に、AX ガスを用いた処理は、 N_2 を用いた場合と比べ雰囲気制御が容易となる。

従来、AX ガスはガス浸炭に用いる R ガス同様別置型の発生機が使用されていた。AX ガス発生に用いる触媒は、Ni 触媒で変成温度は $900 \sim 950^\circ\text{C}$ 程度である。

図 10 に示す炉内設置型 AX ガス発生機は、炉内設置型 R ガス発生機と同じ思想で開発した。開発にあたり従来の Ni 触媒を用いると、炉内の窒化温度が $500 \sim 600^\circ\text{C}$ 程度に対し、発生機の温度が $900 \sim 950^\circ\text{C}$ と高くなり、炉内温度に影響を与えることが課題であった。そこで本発生機では、 NH_3 分解触媒として低温度で高活性を示す Ru 触媒を採用した。この触媒より変成温度を 600°C とすることができるため、炉内温度への影響はほぼ皆無となる。

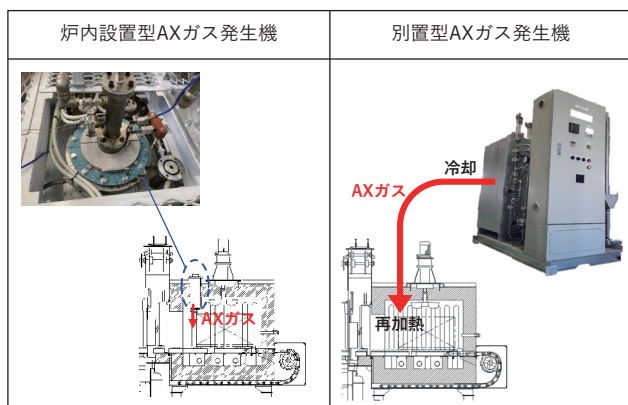


図 10 炉内設置型と別置型の AX ガス発生機

表 4 に炉内設置型 AX ガス発生機の省エネルギー効果を示す。炉内設置型 R ガス発生機同様、放熱低減と、AX ガス再加熱不要により、エネルギーは約 40%削減可能である。

表 4 炉内設置型 AX ガス発生機の省エネルギー効果

[単位：Wh/m³N (AX ガス)]

項目	別置型 AX ガス発生機	炉内設置型 AX ガス発生機
	AX ガス発生機	AX ガス発生機
加熱容量	変成熱量	821
	放熱損失	158
AX ガス再加熱熱量	210	0
制御電力	20	20
合計	1209	737

4.2 窒化ポテンシャル制御

窒化ポテンシャル制御を用いると、余分に導入していた NH_3 ガス量を低減できる場合がある。

ガス軟窒化処理のように、積極的に表面に化合物層を析出させる処理の場合、 NH_3 ガスを余分に導入している場合がある。図 11 は、SCM435 のガス軟窒化 ($570^\circ\text{C} \times 3$ 時間) において、窒化ポテンシャルを 1.0 で制御した時の NH_3 導入量の推移を表したものである。初期は、窒化反応が進み NH_3 消費量が多いが、徐々に NH_3 消費量は低減する。従って、従来の処理のように NH_3 量を終始定量で導入すると、処理の後半では余分な NH_3 を導入している可能性がある。

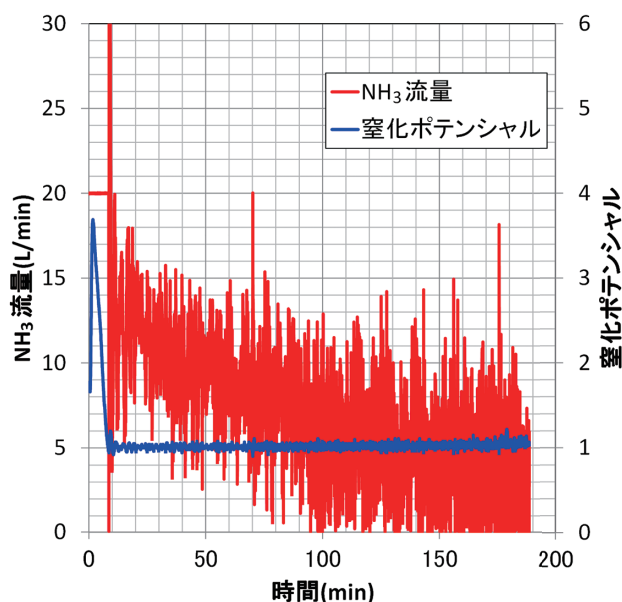


図 11 ガス軟窒化中の NH_3 導入量の推移

図 12 は、図 11 で説明した窒化ポテンシャル制御で処理したものと、 N_2 と NH_3 を 1:1 で定量化導入処理したものとの窒化品質の比較を示す。硬さ分布及び金属組織に見られる化合物層の厚さは、両者とも差がなく、窒化ポテンシャル制御した場合、

定量導入したものと比べ、NH₃ ガスの総導入量は約 30 % 低減した。

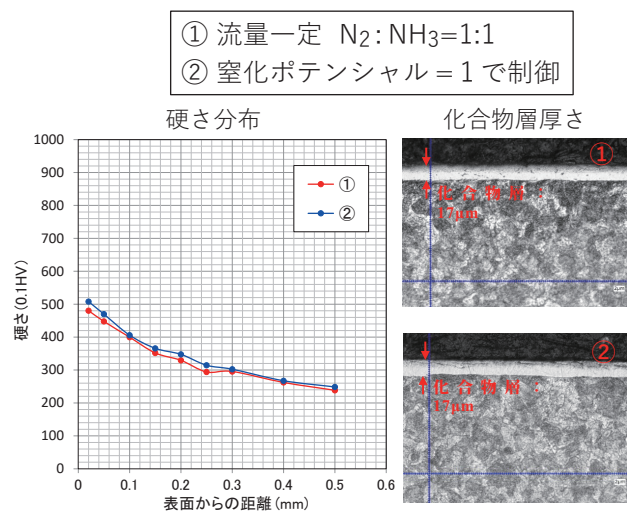


図 12 硬さ分布と金属組織の比較

4.3 二段窒化

二段窒化は、窒化の促進方法として古くから用いられている技術である⁵⁾。第一段を低温かつ NH₃ の分解率が低い雰囲気、第二段を高温かつ NH₃ の分解率が高い雰囲気で行う方法である。近年では、雰囲気を窒化ポテンシャルで制御する方法についても報告されている⁶⁾。

ここでは、弊社で実施した二段窒化試験における処理時間短縮効果について紹介する。

処理材料は SKD61 を用い、化合物層レスを狙いとした。導入ガスは NH₃ と AX ガスを用い、520℃×10 時間で定量導入したものを基準条件とし、窒化ポテンシャル制御し、520℃×2 時間→540℃×6 時間処理 (合計 8 時間) したものを比較条件とした。なお、二段窒化で用いた窒化ポテンシャル及び保持時間は、事前に窒化ポテンシャルと保持時間をマトリックスとした試験を行い、化合物層が現れる境界条件を求めることで決定した。

図 13 に硬さ分布、窒素濃度分布、金属組織の比較を示す。二段窒化では、処理時間を 2 時間短縮したにも関わらず、硬さ分布、窒素濃度分布ともに深い結果となった。また、金属組織は化合物層レスが得られた。本試験結果では、処理時間が 20 % 短縮できただけでなく、窒化に用いた総 NH₃ 導入量が約 7 %、炉の加熱に必要なヒータの電力量も約 10 % 削減できた。

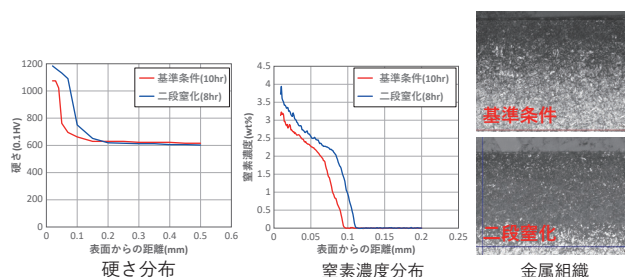


図 13 硬さ分布、窒素濃度分布、金属組織の比較

5. まとめ

省エネルギー技術について、従来取り扱ってきたものから最新のものまで紹介した。本稿により、工業炉における省エネルギーへの一助となれば幸いである。

— 参考文献 —

- 1) 尾崎 彰:工業加熱,Vol. 22 No. 4, P.18-25 (1985) .
- 2) T. Yoshii, H. Nakatsu and T. Fujino : NETSU SHORI Vol. 64, Extra edition (2024) p. 227-232.
- 3) 日本鉄鋼協会編：鋼の熱処理, 改訂 5 版, 丸善株式会社, P. 334.
- 4) 河田 一喜:熱処理, 第 49 巻 2 号 (2009), P. 64-68.
- 5) 滝島 延雄：鉄と鋼, 第 70 年 (1984), 第 6 号, P. 20-25.
- 6) 梅田 孝彰, 宮部 一夫 : KOMATSU TECHNICAL REPORT, 2014 VOL. 60 NO. 167, P. 17-23.