

高温、高負荷燃焼用ラジアントチューブとバーナの開発

Development of Radiant Tube and Burner for High Temperature
and High Intensity Combustion川崎製鉄(株)水島製鉄所 中川 二彦*・小橋 正満・怒田 邦広
内藤 肅・蔵本 浩史・貝原 利一

1. 緒言

鋼板表面の酸化を防ぐために、雰囲気制御が必要な連続焼鈍炉では、ラジアントチューブ（以下R/Tと記す）による加熱方式が多く用いられている。この方式により鋼板を短時間で900℃以上に加熱する¹⁾ためには、R/Tの平均温度を950~1000℃にする必要がある。また大量処理プロセスにおいて、炉をコンパクトにして設備コストを下げるためには、燃焼容量の大きなバーナを用いるほど有利である。しかし、従来のR/Tとバーナは、高温かつ高負荷燃焼下で使用すると、割れや変形が短時間で発生することが多く、寿命上の問題が生じていた。

今回、この問題を解決するために、W型のR/Tについて検討を行い、高温下で高負荷燃焼が可能なR/Tとバーナを開発したので報告する。

2. 開発の考え方

一般に、R/Tの寿命は、高温酸化によって材質が劣化するよりも、変形や割れが先行して決まることが多い。R/Tやバーナに発生する変形や割れの特徴をFig. 1に示す。R/Tの変形が大きくなると通板が困難になり、また、大きな割れが発生すると炉内の雰囲気維持できなくなる。このため、これらの変形や割れを防止することは非常に重要である。

R/Tの耐熱性は、Fig. 2のように、材質の高温強度特性、R/Tの最高温度と平均温度の差（以下 ΔT と呼ぶ）及び、R/Tに生じる応力値によって評価できる。したがって、R/Tの耐熱性を向上するためには、次のような方法が考えられる。

- ① R/T材質の高温強度を向上する。
- ② ΔT を低減する。
- ③ R/Tに生じる応力を低減する。

材質の高温強度を向上する方法は、

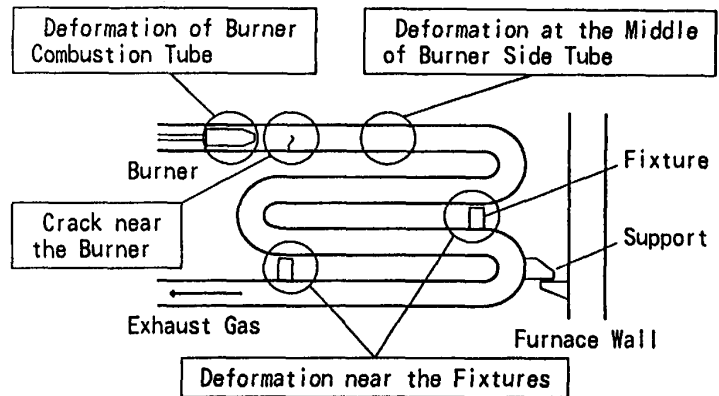


Fig.1 Damage to Radiant Tube Heating System

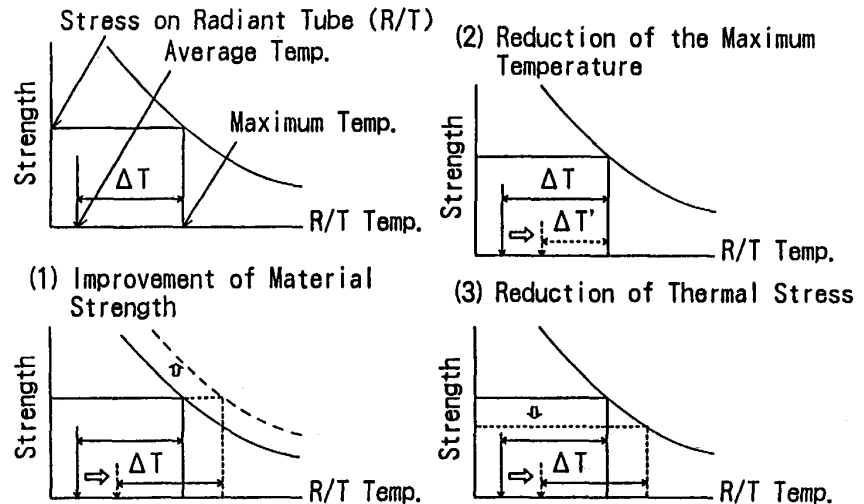


Fig.2 Improving Methods of Thermal Resistance

平成 4年 4月27日受付 (Received on Apr. 27, 1992)

* Tsuguhiko Nakagawa (Mizushima Works, Kawasaki Steel Corp., 1 Kawasakidori Mizushima Kurashiki 712)

僅かな強度向上のためにコストの高い素材を使うことになり、数多くのR/Tを設置する炉において必ずしも有利な方法とはいえない。それに対して、 ΔT を低減する方法は、設計温度を高くできるだけでなく、温度分布に起因する熱応力も低減できる。また、R/Tに生じる応力を小さくする方法も、R/Tの支持方法や構造を最適化することにより効果が期待できる。

3、R/T構造の最適化

非定常熱応力計算と、実機大のR/Tを用いて変形実験を行い検討した。

(1)非定常熱応力計算の結果²⁾

従来のバーナとフィクスチャーの無いR/Tを用いて、炉温を常温から900℃まで昇温した場合、R/Tに生じる応力はFig. 3 (a)に示すように、バーナ燃焼筒の近傍、各ベンド部及び管端部に集中し、断面方向の応力が支配的である。

この現象は、バーナ燃焼筒の先端近傍よりも管端部側は温度勾配が大きいのに対して、燃焼筒の先端近傍と第1ベンド間の温度勾配は小さいため、温度勾配が変化するこの部分において、断面方向に大きな熱膨張差が生じるためである。

したがって、第1直管での割れや変形を防ぐには、 ΔT の低減とともに、局所的な温度勾配も小さくする必要がある。

次に、900℃に昇温して100時間後のR/Tに生じる応力は、Fig. 3 (b)に示すように、第2と第3ベンドにおいて2～3倍に増加する。これはクリープ変形によって第1直管が下降し、第2と第3ベンドに負荷をかけるためである。これより、R/Tの変形は第1直管がクリープ変形によって下降し、それが他の直管の変形を誘発し、より大きな変形に至ることがわかる。

以上より、R/Tの変形を防ぐためには、断面方向の応力を低減するとともに、初期の変形が他の部分の変形を誘発しない構造にすることが重要である。

(2)変形実験の結果

先の計算結果に基づき、最適なR/T構造を検証するために、実機大のR/Tを用いて変形実験を行った。実験用R/Tの材質には、変形が短時間で進行するように、SUS304を用いた。R/Tの変形量は、実験炉に設けたのぞき窓から1時間毎の目視により測定した。

実験に用いたR/Tは、Fig. 4に示すような4種類で、それぞれの特徴は次の通りである。

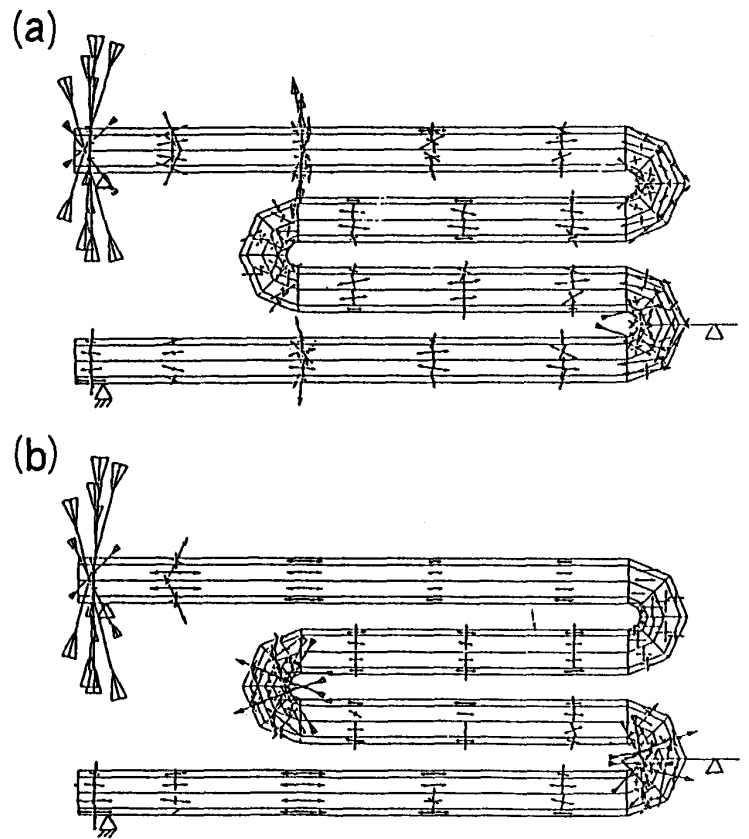
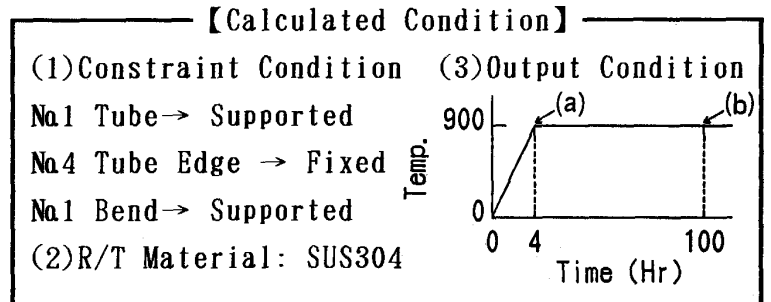


Fig. 3 Calculated Results of Thermal Stress on Radiant Tube

- ① Type1はフィクスチャーが無く先の解析計算に用いたタイプ。
- ② Type2は炉体1点支持で、従来から実機で使用しているタイプ。
- ③ Type3は炉体支持を2点にし、変形の波及を防止するタイプ。
- ④ Type4はバーナ側を大口径化し、断面応力を低減するタイプ。

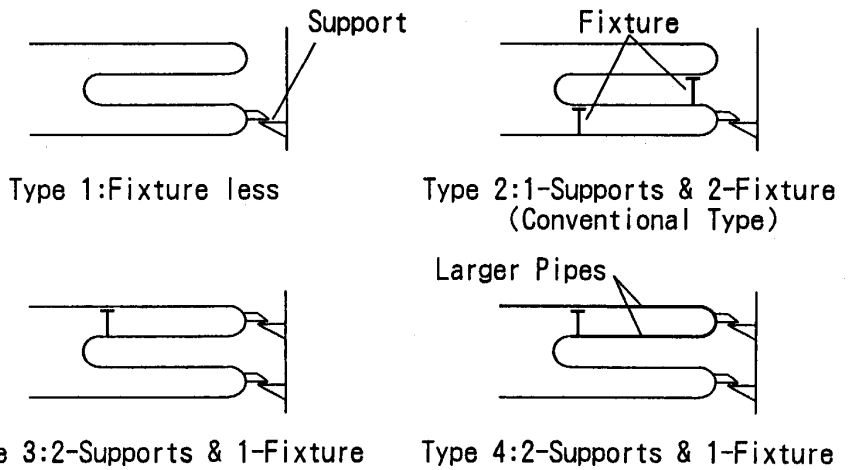


Fig. 4 Experiment of R/T Deformation

R/T平均温度を 900℃一定とし、連続加熱した時のバーナ側直管中央部の変形量をFig. 5 に示す。

これより、変形量は Type 4 < Type 3 < Type 2 < Type 1 であり、バーナ側直管中央部の変形防止には炉体支持点数を増すとともに、バーナ側直管を大口径化する効果大きいことがわかった。これらの検討の結果得られた、最適なR/T構造をFig. 6 に示す。

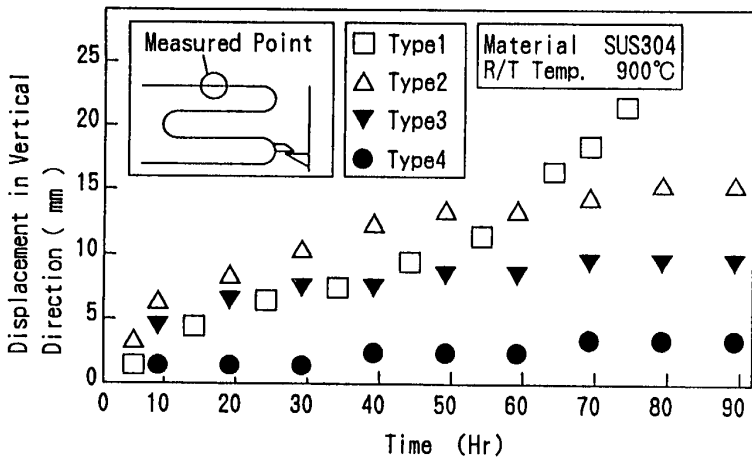


Fig. 5 Experimental Results of R/T Deformation

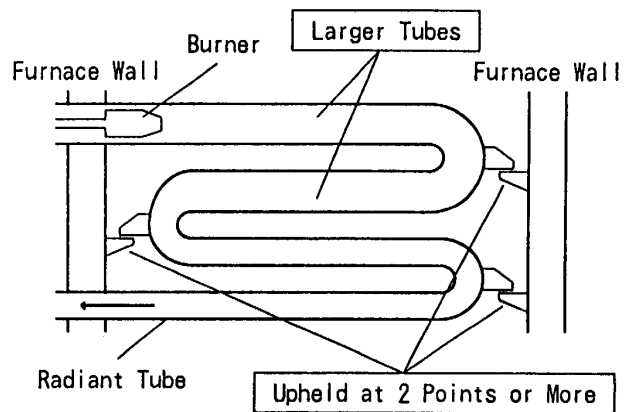


Fig. 6 R/T for High Temperature and High Combustion Load

4、バーナの開発結果

R/Tバーナに要求される特性をまとめると次のようになる。

- ① 広範囲のターンダウン比で燃焼が安定しており、振動燃焼や燃焼騒音の発生が無い。
- ② NO_x の発生が少ない。
- ③ RT長手及び円周方向の温度分布が小さい。
- ④ バーナ構造物（燃焼筒など）の温度が低い。
- ⑤ メンテナンス性が良い。

上記①～⑤の全項目を満足するため、今回開発したバーナは、従来のバーナ³⁾に対して、Fig. 7 に示すように、燃焼筒形状を最適化し、

1次燃焼空気の供給方式を変更した。

効果を検証するために、燃焼実験を行った結果、開発したバーナは最大燃焼容量 16×10^4 kcal/hr において、以下に述べる性能を持っている。

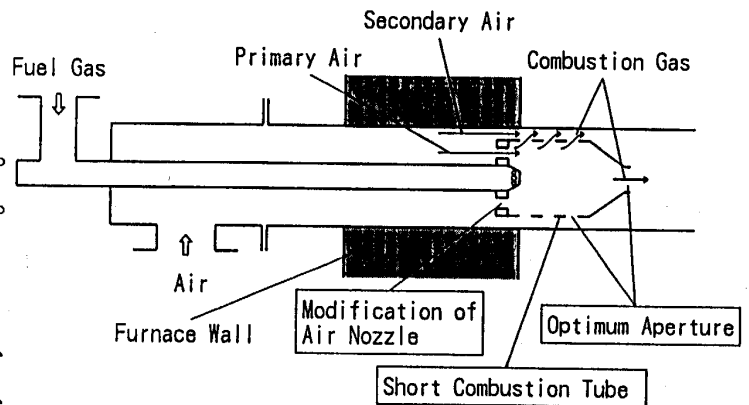


Fig. 7 Structure of Developed Burner

燃焼排ガス中のNO_xは、従来の低NO_x型バーナと同様に、低レベルを達成している (Fig. 8 参照)。

Fig. 9に開発したバーナのR/T長手方向の温度分布を示す。これより、開発したバーナのΔTは45℃であり、長手方向の温度勾配も0.2℃/mm以下にできた。これらの値は、従来のバーナに比べて約1/2である。

Fig. 10にバーナ燃焼筒の最高温度を示す。これより、燃焼筒の最高温度はR/T平均温度1000℃において1005℃であり、従来バーナに比べて約100℃低減され、燃焼筒の長寿命化を図ることができた。

以上の結果から、今回開発したR/Tとバーナを組み合わせた加熱システムについて、R/Tの寿命を推定した例をFig. 11に示す。これより、従来のR/Tとバーナに比べて、寿命は飛躍的に延びると考えられる。

5、結 言

大量焼鈍プロセスにおいて、炉温1000℃を可能にする高温、高負荷燃焼用R/Tとバーナを開発し、次の成果が得られた。

- ① R/Tの耐熱性を向上するためには、R/Tの温度分布の低減が重要なことを示した。
- ② R/Tの変形防止には高温部の大口径化と支持点数の増加が効果のあることを示した。
- ③ 開発したバーナは従来のバーナと比較して、R/Tの最高温度と平均温度の差及び長手方向の温度勾配を約1/2にできた。
- ④ 開発したバーナ燃焼筒の温度は、従来のバーナに比べて約100℃低減できた。
- ⑤ 開発したR/Tとバーナは炉温1000℃において、5年以上の寿命を持つと考えられる。

<参考文献>

- 1) T. Irie et al., "Metallurgy of Continuous Annealed Sheet Steel", Proceedings of the TMS-AIME Symposium, (USA), (1983), 151
- 2) 怒田ら：材料とプロセス, 3(1990), 1485
- 3) 橋目ら：材料とプロセス, 1(1988), 554

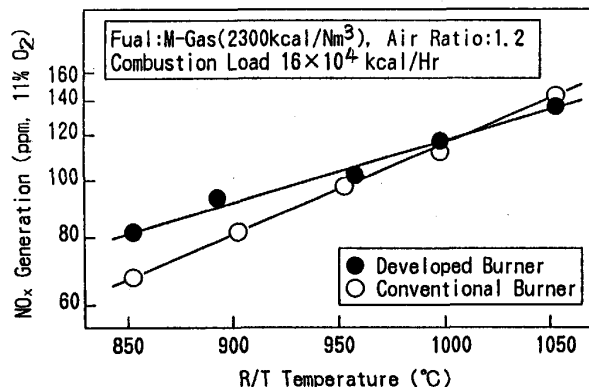


Fig. 8 Characteristic of NO_x Generation

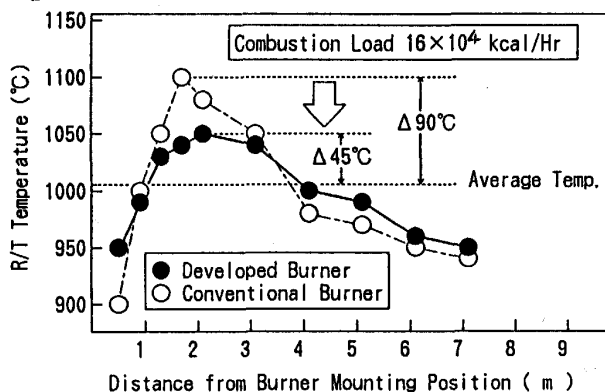


Fig. 9 Characteristic of R/T Temperature Distribution

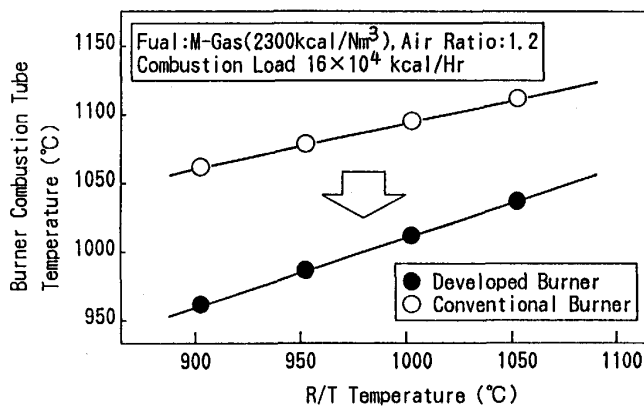


Fig. 10 Relation between R/T Temperature and Burner Combustion Tube Temperature

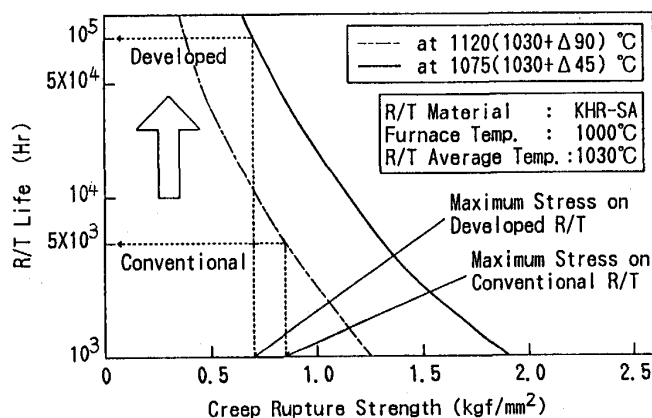


Fig. 11 Life of Developed R/T Heating System