

塗装乾燥工程における赤外線加熱の適用

齊藤 正明 (さいとう まさあき) ヘレウス(株) ヘレウス ノーブルライト部 部長
 真壁 義孝 (まかべ よしたか) ヘレウス(株) ヘレウス ノーブルライト部

1. はじめに

ほとんどの生産プロセスには、一ヶ所、または数サイクルの加熱、乾燥プロセスがある。しかし、改善を重ねたはずの生産設備も、こと加熱、乾燥工程は前時代的で、事実多くの業界で生産のボトムネックとなっている例が多い。特に、塗装の乾燥工程では、脱 VOC 対応の環境対応型塗料（水性、粉体塗料）への移行、さらに CO₂ 削減対応と、システム全体の見直しが必須である。既存設備の多くは熱風炉である。理論的にも対流熱伝達に解決を求めるのは限界に達している。有効エネルギーが大きい中波長レベル以上の赤外線ヒーターの採用は予想以上に乾燥、硬化が速く、エネルギーコスト、設備コスト、スペース、生産性、品質、環境問題などの総合的な生産性の改善できる余地がある。

2. 乾燥炉の伝熱形態と熱流速

炉の能力は熱流速 (W/m^2) で決まる。乾燥炉の高性能コンパクト化とは大きな熱流速（エネルギー密度）を高温の熱源から、低温のワークに投入することである。

対流熱伝達 : $q = h \cdot (T_1 - T_2)$ 熱風炉

放射熱伝達 : $q = \varepsilon \cdot \delta \cdot (T_1^4 - T^2)$ 赤外線炉

ここで、 q : 热流速 (W/m^2)

h : 対流熱伝達率 ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$)

ε : 放射率

δ : ステファン・ボルツマン定数

T_1 : 热風温度、放射源温度 (K)

T_2 : ワーク温度 (K)

加熱の方法（対流、伝導、放射）にかかわらず加熱源 T_1 （高温側）と被加熱物 T_2 （低温側）の差がエネルギーの質である。赤外線加熱の放射熱伝達も例外ではなく、放射源から温度の低いワークへ熱が移動する

ことにより、ワークの温度を上昇させる。媒体を通して熱が移動する伝導、対流とは異なり電磁波の形で熱が伝わるが、温度の差が熱移動の駆動力であることは変わりない。

3. 热風炉の長所と限界

3-1 長所

箱物など 3 次元形状も雰囲気温度で均等に加熱しやすい。热風温度以上にワーク温度が上がるがなく、オーバーベークになることがない。制御点数が雰囲気温度、コンベヤスピードだけで操作が簡単である。昇温が必要ない保持ゾーンには向いている。

3-2 性能の限界

現在求められている乾燥炉の省エネ、CO₂ 削減、脱 VOC、生産性のどれをとっても熱風方式の炉での改良は限定されている。

热風炉は対流熱伝達で、その基本式は前記から；

$$q = hc \cdot (T_1 - T_2)$$

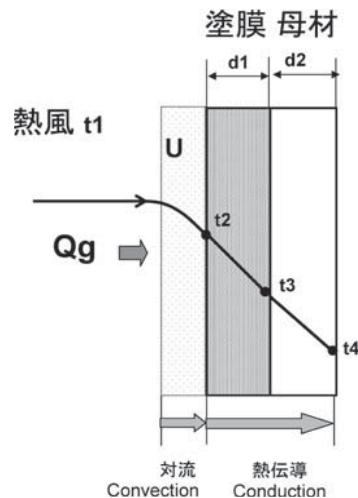


図 1 热風方式

熱風の温度 T_1 を上げることで、熱流速 q が大きくなる。しかし、塗装乾燥では、高くしても $200\sim250^\circ\text{C}$ が限度であろう。排気、炉壁、炉の出入り口からの損失も比例的に増加する。強制対流熱伝達率 (hc) は、ワーク表面近傍の熱風の流速に比例して大きくなるが、現実は数 m/s で、層流対流熱伝達が支配的で、自然対流に近い炉も多い。流速を高くすると、塗膜面の品質、粉体の場合には付着率にも影響する。さらに実際の熱流速は、ワークの温度上昇で熱風温度との平均温度差は、 $((t_1-t_2)+(t_3-t_4))/2$ となり、次式となる。

$$q = hc \cdot ((t_1-t_2)+(t_3-t_4))/2$$

局所熱流速は炉の出口に近くなるほど小さくなり、ワーク温度が降下しやすい原因ともなっている。

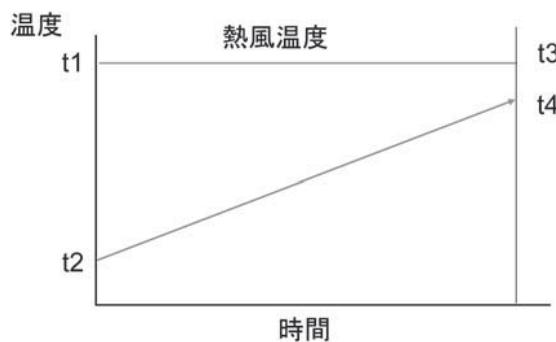


図 2 平均温度

理論的に水平平板平均の層流対流熱伝達率をモデルで熱流速がどの程度になるか推定してみる。

$$Nu = 0.664 Pr^{1/3} Re_L^{1/2}$$

Nu : ヌッセルト数

Pr : プラントル数

Re : レイノルズ数

この式に空気温度 200°C の物性値を代入すると、伝熱係数が次式で概算できる。

$$hc = 3.8(u/L)^{1/2}(W/m^2K)$$

ここで、ワークの代表長さ 0.3m 、流速 3m/s で計算すると、

$$hc = 12 W/m^2K$$

ここで、上記の条件でワークの初期温度 20°C 、ワーク温度 180°C 、熱風温度を 200°C とすると、

$$q = 12w/m^2K \cdot ((200-20)+(200-180))/2 \\ = 1200w/m^2$$

片側加熱の赤外線加熱と比較のために、ワーク両側から加熱されることを考慮し 2 倍としても、 q は $2400w/m^2$ である。

実炉内では流れの乱れ、壁面からの輻射など複合な総括熱伝達率が上がるとしても、 hc は $30 w/m^2K$ 、熱流束 q は $3000 w/m^2$ ($3 \text{kw}/\text{m}^2$) 程度と推定する。

4. 赤外線の区分と赤外線ヒーターの種類

4-1 赤外線の区分

赤外線は実用上の理由で、近赤外線、中赤外線、遠赤外線に区分されている。図の区分波長は IEC (国際電気標準会議) の例である。その区分内の波長範囲は広く、実際のヒーターの選定では遠赤外線、近赤外線などの呼称で判断するのではなく、放射体の温度から波長を算出すべきである。放射される各波長のエネルギーは放射体温度 T (K) によって決まり、放射されるエネルギーが最大となる波長、最大エネルギー波長 λ_{max} はヴィエンの変位則より、

$$\lambda_{max} = 2897/T(\mu\text{m})$$

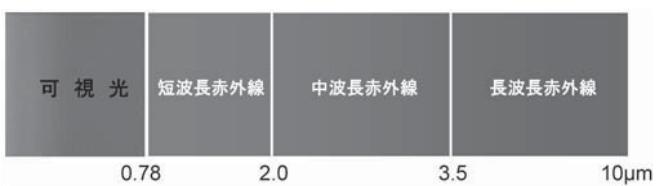


図 3 赤外線区分

4-2 代表的な赤外線ヒーターの種類と特性

表 1 赤外線ヒーターの種類と特性

加熱体温度 (°C)	最大エネルギー波長 λ_{max} (μm)	立上がり速度	寿命
遠赤外線	500~700	約 4.0	約 10 分
中波長	800~900	約 2.6	1~2 分
中波長カーボン	1000~1200	約 2.0	2~3 秒
短波長(近赤外)	1600~2100	約 1.2	5000~8000 時間

5. 赤外線加熱の特長と乾燥炉のコンパクト化

5-1 エネルギー密度（熱流束）が大きい

対流熱伝達と放射熱伝達は基本式が違う、両者の式から一目で熱流束を比較するのは難しい。ここで、比較のために対流熱伝達率 h_c に相当する有効放射熱伝達率を導くと、

$$qr = \varepsilon\sigma(T_1^4 - T_2^4)$$

ε : 放射率

σ : ステファンボルツマン定数

T_1 : 放射体温度（透明石英ヒーターの場合、コイル温度）

T_2 : ワーク温度

この式を分解すると、

$$\begin{aligned} qr &= \varepsilon\sigma(T_1^4 - T_2^4) \\ &= \varepsilon\sigma(T_1^2 + T_2^2)(T_1^2 - T_2^2) \\ &= \varepsilon\sigma(T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2)(T_1 - T_2) \end{aligned}$$

ここで、対流熱伝達率 h_c に相当する、有効放射熱伝達率 hr は、

$$hr = \varepsilon\sigma(T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2)$$

となり、 hr は放射温度（赤外線ヒーターの発熱体温度）がファクターで、急激に大きくなる。代表的な赤外線ヒーターでワーク温度を 200°C とした場合の hr ($\text{W/m}^2\text{K}$) を計算すると、

遠赤外線（放射発熱体セラミック、500°C）: 52 $\text{W/m}^2\text{K}$
中波長（ニクロム、850°C）: 107 $\text{W/m}^2\text{K}$

中波長カーボン（カーボンフォイル、1200°C）: 250 $\text{W/m}^2\text{K}$

短波長（タンクステン、2100°C）: 265 $\text{W/m}^2\text{K}$

対流熱伝達率に比べると大きいことが分かる。

「照射最大エネルギー密度」

実際は、赤外線ヒーターは管状で、実際炉壁に隙間なく設置することはできず、適当なピッチで設置する。「照射最大エネルギー密度」は「単位面積あたり物理的に設置できる赤外線ヒーター出力」で熱風炉の熱流速に相当する。

表 2 各種赤外線ヒーターの照射最大エネルギー密度

最大エネルギー密度 (KW/m^2)	
遠赤外線	約30
中波長	約50
中波長カーボン	約100
短波長(近赤外)	約120

最大エネルギー密度は単位面積あたり設置できる赤外線ヒーター出力

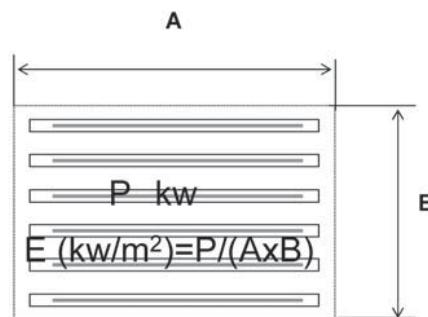


図 4 照射エネルギー密度の定義

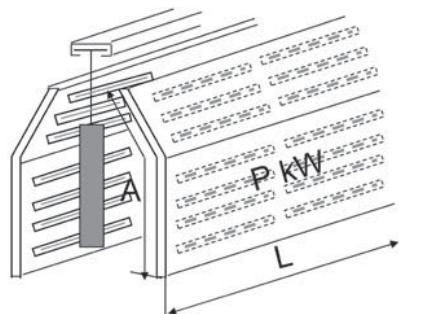


図 5 実炉のエネルギー密度（例）

「塗料による照射エネルギー密度の目安」

中波長赤外線ヒーターの塗料による照射エネルギー密度の目安は、

水性塗料: ~最大 15 kW/m^2

粉体塗料: ~最大 35 kW/m^2

水性塗料の赤外線加熱で注意する点は、水の局部沸騰によるワキ等の欠陥を避けるため、エネルギー密度を低くし、ワーク温度も 60~80°C と低く抑える。

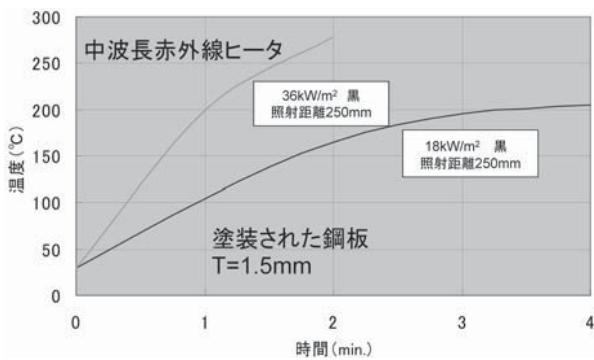


図 6 エネルギー密度と昇温

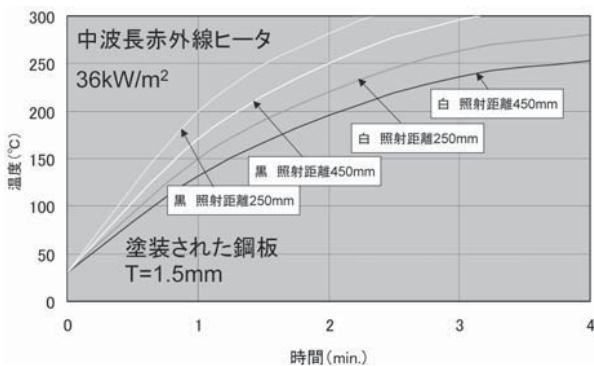


図 7 塗装色と照射距離

5-2 ワーク温度との差が大きく、安定した加熱ができる

熱風炉では、熱風温度とワークの到達温度との差が小さく、特に温度差が小さくなる炉の出口付近で外部温度の影響を受けやすく不安定となる。赤外線加熱の場合は加熱体温度が 800°C 以上で安定した加熱ができる。

5-3 保持時間が短い

例えば、塗料メーカーの推奨保持時間が 20 分で、コンベヤスピードが 3 m/min. の場合、60 m の保持ゾーンが必要である。赤外線加熱炉の多くの実績で、保持ゾーンが半分以下になった例が多くある。薄物の場合は保持ゾーンが必要ない場合もある。高いエネルギー密度で、速い昇温、かつ塗膜内部に赤外線が吸収されることで硬化が促進されるのではないかと推定する。

5-4 制御性が良い

サイリスター、SCR でゾーン制御が可能である。ワークの大きさ、塗膜厚さに応じた最適な温度勾配に制御できる。

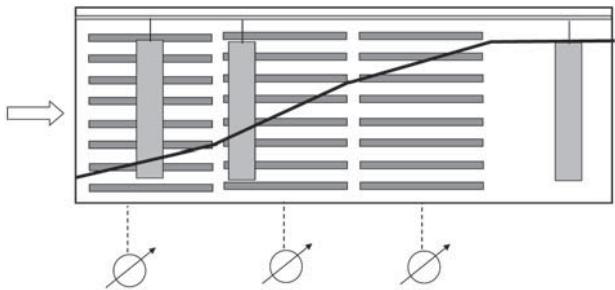


図 8 ゾーン制御

5-5 必要部分の選択加熱ができ省エネとなる

熱風炉は、熱流束が一定である。重い部分の昇温が遅く、この部分の昇温がボトルネックとなる。赤外線炉では、赤外線ヒーターの配置、またサイリスター制御で、バンク毎のエネルギー密度を変えることができる。

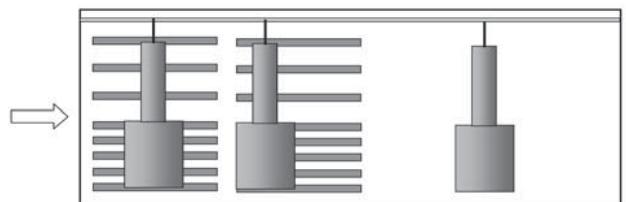


図 9 エネルギー密度の調整

5-6 塗装膜品質の向上

特に粉体塗装で、昇温速度が遅いと溶融と硬化が部分的に起こり、目的の塗膜品質を得ることができない。赤外線加熱は硬化時間を短縮させるだけでなく、速く、瞬時に硬化させることにより、滑らかで艶のある仕上がりが得られる。また粉体が飛び散りワークに再付着、離脱することもない。

5-7 燃焼排ガスがない

5-8 赤外線ヒーターからの汚れの発生がなくクリーンである

6. なぜ中波長レベル以上の赤外線ヒーターか？

6-1 通過加熱のメカニズム

前記では、照射側（ヒーター単独）のエネルギーの質を熱力学的に見れば、有効エネルギーの大きさは、放射源温度の高い近赤外線、中赤外線、遠赤外線の順となる。しかし、赤外線加熱でもう一つ重要な点は、被加熱物（塗料）の赤外線吸収特性である。熱硬化塗料、粉体塗料、水性塗料は、例外なく波長 $2.5\text{~}3.5\mu\text{m}$ に高い吸収特性を持っている。放射された赤外線が塗料に吸収され、かつエネルギーの一部が透過し母材をも加熱し、内部からも加熱するためには、塗料の吸収特性に対して、いくぶん短波長よりの最大エネルギー波長 $2.5\mu\text{m}$ が有効である。

「照射側の有効エネルギー」、「塗料の吸収特性に対し、吸収と透過のバランスのとれた波長特性」の両者を満足し、最大効率が得られるのは中波長赤外線ヒーターである。遠赤外線ヒーターは有効エネルギー不足で、母材を加熱する力が不足している。短波長赤外線ヒーターは、エネルギーが大きく母材を加熱する力はあるが、放射波長域が塗膜の吸収特性に合わなく、エネルギーが生かされていない。しかしエネルギー密度

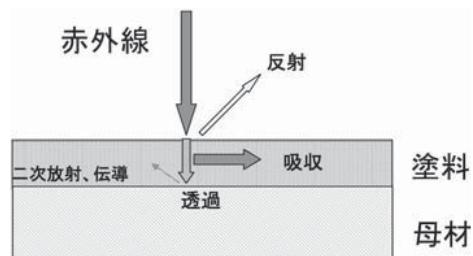


図 10 通過加熱のメカニズム

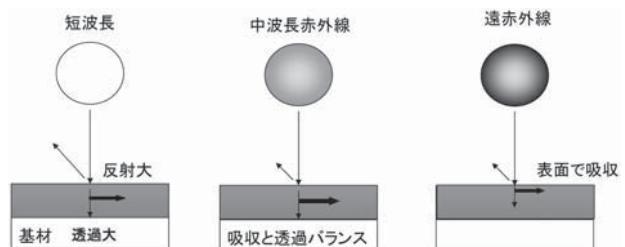


図 11 吸收、透過特性

を 100 kW/m^2 以上とすることが可能で、数 10 mm の厚物の塗装乾燥に使用される。

6-2 赤外線ヒーターの放射エネルギー分布

表 3 放射エネルギー分布

発熱体温度	$<2\mu\text{m}$	$2\text{~}4\mu\text{m}$	$>4.0\mu\text{m}$	赤外線ヒーター
600°C	3.4%	38.4%	61.8%	遠赤外線
900°C	13.0%	46.4%	40.6%	中波長
1200°C	26.1%	46.9%	27.0%	中波長カーボン
2200°C	62.5%	28.7%	8.8%	短波長(近赤外線)

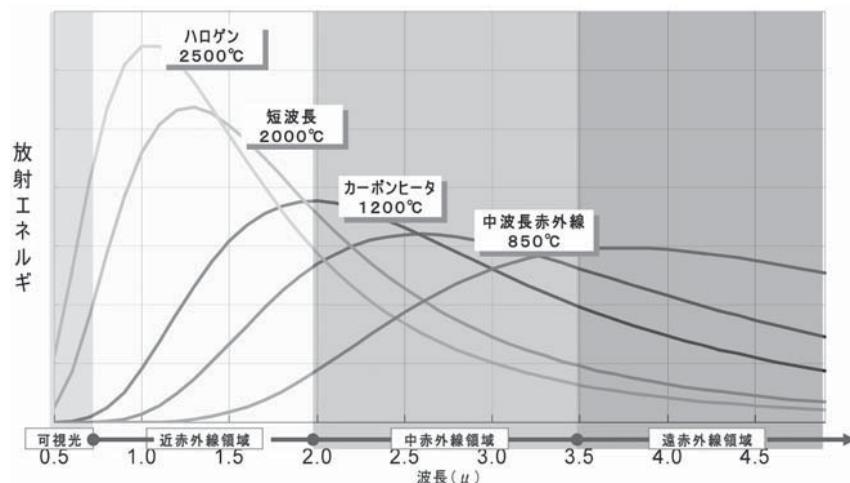


図 12 放射エネルギー分布

7. 赤外線加熱に影響するファクター

7-1 ワークの厚さと熱伝導率

ワークが金属で薄い（数 mm 程度）場合は、塗膜と母材がほぼ同時に上昇する。複雑な形状でなければ、影の部分も熱伝導により昇温できる。ワークが厚く、形状が単純な場合は、赤外線加熱のほうが熱風加熱よりエネルギーを節約できる。これは、表面近傍温度が、熱伝導により温度が上昇する前に、乾燥、硬化温度まで上昇するからである。

7-2 ワークの形状

ワークの形状は乾燥、硬化時間の設定に影響する。平板の場合は熱分布、塗膜の厚さが均等で、高いエネルギー密度の赤外線照射ができ、非常に速い炉の設計が可能である。3次元形状の箱物等は、平板の約 50% 程度のエネルギー密度に設定する必要がある。つまり、赤外線ヒーターと最短距離にある部分のオーバーベーク、角部の厚塗り部のフキを防ぐためである。この場合、昇温ゾーンに赤外線、保持ゾーンに熱風を使用するシステムが有効である。

7-3 塗料の色

塗料の色は赤外線の吸収に影響します。特に波長が短い近赤外線は影響を受けやすい。黒色の塗料は白色の半分から 2/3 の時間で同温度まで昇温できる。実際には炉構造によって対流の影響、壁面からの遠赤外線の二次放射もあり、時間差は理論ほど大きくない。

8. 粉体塗装の赤外線炉の実例

実例 1：粉体塗装の硬化工程の生産性が 4 倍に

FM 社は自動車用ブレーキパッド、シュー、ライニングの製造会社である。エポキシ系粉体塗料が採用されてからも、熱風炉で乾燥、キュアをしていたが、需要の増加で生産増加の要求に、粉体塗装の熱風炉キュア工程が生産増加の障害となっている。製造工程のボトルネックとなっている乾燥炉を大幅に改善するプロジェクトチームを作り、キュアスピードの改善は、限られたスペースに大きなエネルギー密度を投入できる赤外線加熱が最も適していると決定した。

試験で、赤外線加熱はキュア時間を短縮するだけではなく、速く溶融、硬化させることで、滑らかで艶のある仕上がりが得られることを確認した。赤外線炉は昇温ゾーンと保持ゾーンの 2 ゾーンとし、ON-OFF スピードが速いハイスピード中波長ヒーターを 30 本、162 kW とした。

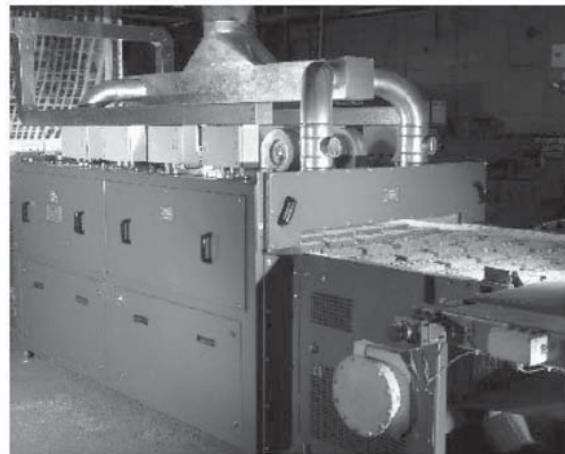


写真 1

生産のボトルネックがなくなり、かつ熱風炉乾燥時と比較して 4 倍のキュア速度となった。

実例 2：保持ゾーンなしでキュア

ZE 社は大型コントロールキャビネットの製造会社である。平板、多孔板の粉体塗装を熱風炉で 180°C、15 分間のキープ時間が必要だった。

赤外線炉の導入検討で、中波長赤外線ヒーターで試験を行った。結果、180°C 昇温後に、碁盤目テスト、テープ剥離テスト、MEK (Methyl Ethyl Keton) テストの結果、キープ時間なしで完全にキュアしていることが分かった。

さらに、粉体塗料は赤外線の吸収が非常に良く、温度上昇が速く、熱風と比べて非常に速く溶融、硬化し滑らかで艶のある仕上がりを得られた。赤外線炉は、昇温時間だけではなく、キープ時間を大幅に短縮できる。結果、省エネ、生産性、省スペースの改善となる。

実例 3：重いワークの粉体塗装

LA 社は、ガスボンベの製造会社である。大きなス

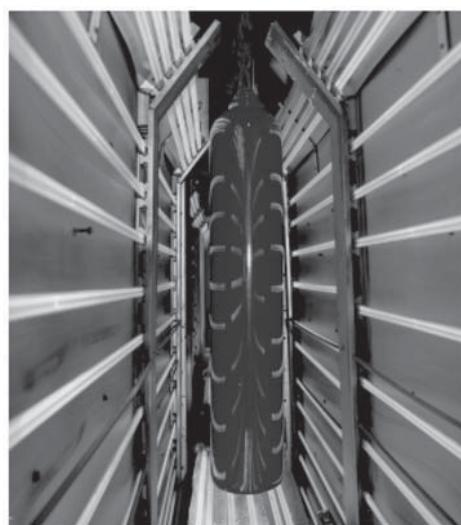


写真 2

ペースを占有し、生産のボトルネックとなっている熱風炉を除去し、赤外線炉を導入した。

既存の熱風炉の炉長は30mで、重いボンベの昇温、キープに60分かかり、さらに熱風で粉体が舞い上がり品質に影響した。導入した赤外線炉の炉長は6mで、キュア時間は12~18分となった。ボトル全体を均等に昇温するため、肉厚の厚いネック部、底部の照射する赤外線ヒーターの照射密度を高くした。熱風の場合は、エネルギー密度(熱流束)が同じで、重い部分の昇温の遅さがキュア時間のネックとなっていた。

9. 課題

最近、大物重量物の塗装乾燥の引き合いが増えていく。薄板の場合はワーク表裏の温度差がほとんどなく瞬時に加熱される、つまり静的な正味熱量計算となる。しかし、厚物をゆっくり静的に加熱したのでは、必要エネルギーが膨大となり実用的ではない。短波長赤外線ヒーターの大きなエネルギー密度の照射で、裏面側に熱が移動する前に表面を目的温度にすることで乾燥、キュアさせる検証が必要である。この場合は、エンドユーザー、設備メーカー、塗料メーカーの協力が必要である。

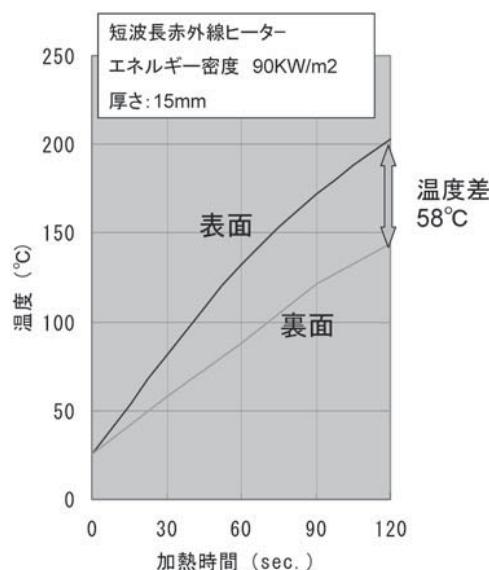


図 13 厚板の高エネルギー密度加熱

10. おわりに

コンパクトな赤外線乾燥炉が生産性、エネルギーコスト、環境、占有スペースなど塗装乾燥が抱える多くの問題を解決できる。さらに、治具費用の節減、炉の省スペースが塗装システム全体の改善にフレキシビリティを与える等の効果も大きい。

参考、引用文献

- 日本機械学会、伝熱工学
伊藤 章、上江洲一也、Excel で化学工学
斉藤正明、パウダーコーティング Vo 18, No 1
斉藤正明、塗装技術、2007年8月
斉藤正明、伊藤一洋、1999年9月
その他、自社資料