

特別寄稿

工業用赤外線ヒーターとその適用

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 赤外線ヒーター課

要約 ほとんどの業界の生産工程には1サイクルから数サイクルの加熱、乾燥工程がある。環境対応型コーティング剤の増加、CO₂削減、省エネ等と加熱、乾燥工程が改善を担う役割が大きくなっている。中波長レベル以上の赤外線ヒーターの採用で期待以上の改善された実例が多くある。本稿では、赤外線加熱の基礎、赤外線ヒーターの区分、および材料別のアプリケーションの実例を紹介する。

1. 赤外線ヒーター

1.1 赤外線加熱

赤外線は電磁波の一種で、ある振動数（波長）を持った光エネルギーである。図1のように赤外線ヒーターから輻射された赤外線光は目的物に照射され、その物質の中でエネルギーが共振吸収される。吸収されたエネルギーは分子（または原子）を振動させ、振動させられた分子間で摩擦熱が発生する。これが赤外線加熱原理である。

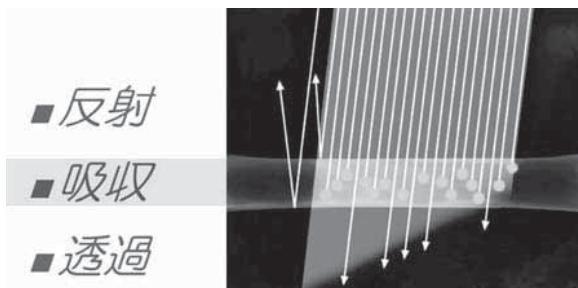


図 1

1.2 赤外線ヒーターの種類

一般的に工業用で用いられる赤外線ヒーターの波長域は0.8μ～5μmで、発熱体（コイル）温度域400～

表 1

	発熱体温度 [°C]	最大エネルギー波長 [μm]	立ち上がり速度	最大エネルギー密度
短波長ヒーター (タングステン)	1400 - 2100	1.2 - 1.6	1 - 2 sec	120 Kw/sq
カーボンヒーター (カーボンコイル)	950 - 1200	2.0 - 2.5	2 - 3 sec	100 Kw/sq
中波長ヒーター (カーボン)	800 - 900	2.5 - 3.0	1 - 2 min	50 Kw/sq
遠赤ヒーター (セラミック)	500 - 700	3.0 - 4.0	10 min	30 Kw/sq



2500°Cに相当する。日本では遠赤外線と近赤外線2種類の分類が一般的であるが、当社は、被加熱物の赤外線吸収特性に最適な放射波長域を選択できるように4種類の赤外線ヒーターをラインナップしている（表1）。

1.3 発熱体（コイル）温度・波長・強度の関係

赤外線放射波長や強度は発熱体（コイル）温度で決まる（式(1))。

$$I(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1} \quad \text{式(1)}$$

c=2.998 · 10⁸ ms⁻¹ (光速)

h=66256 · 10⁻³⁴ Js (プランク係数)

λ=波長 (m)

K=5.67 · 10⁻⁸ Wm⁻²k⁻⁴ (ボルツマン係数)

T=発熱体温度 [K]

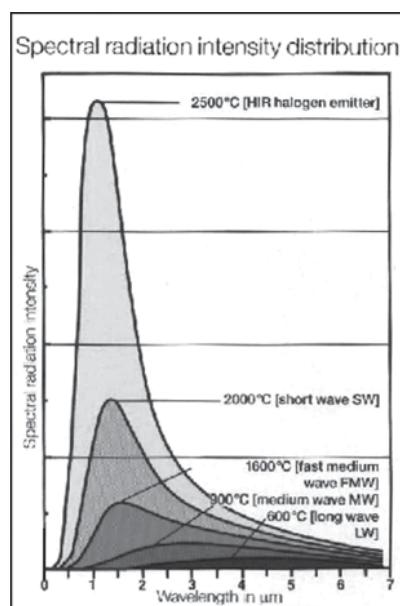


図 2

最大エネルギー波長は式(1)より得られ、右辺を λ で偏微分してゼロになる λ を求めればよい。

これを整理したものがウィンの変位則(式(2))である。つまり発熱体温度(T)が低い遠赤外線ヒーターの放射波長は長く、発熱体温度が高い短波長赤外線ヒーターの放射波長は短いことを意味する。

$$\begin{aligned}\lambda &= 2897/T \\ &= 2897/(t+273)\end{aligned}\quad \text{式(2)}$$

λ : 最大エネルギー波長 (μm)

T : 発熱体絶対温度 ($^{\circ}\text{K}$)

t : 発熱体温度 ($^{\circ}\text{C}$)

赤外線エネルギーの移動は発熱体温度(T_1)、被加熱物温度(T_2)、4剰の差に比例する。

したがって、発熱体温度が高ければ高いほど赤外線エネルギーの移動量は大きくなる。

$$E \propto [T_1^4 - T_2^4] \quad \text{式(3)}$$

1.4 ヒーターの対流損失のファクター

一般的にセラミック製や金属製の遠赤外線ヒーターはその表面温度が最大発熱体温度である。つまり温度が一番高いヒーター表面は外気に直接接している。例えば熱風乾燥炉内に設置した場合、風の影響を受け表面からの対流損失が大きくなる。それに比べ、石英ガラスで発熱体を覆う構造を持つタイプは、風が発熱体に直接当たらない構造となっており対流損失は非常に小さい。

1.5 赤外線吸収率と透過率のファクター

照射された赤外線は目的物に当たってから“反射、吸収、透過”の3つに分かれるが、目的物の加熱に直接寄与するのは吸収されたエネルギーだけである。材料の吸収率に適合した波長を持つ赤外線ヒーターの方が、加熱効率が高くなる。一般的に図3のような吸収傾向がある。

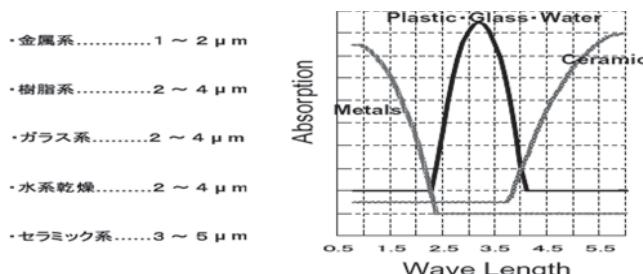


図 3

1.6 照射効率のファクター

赤外線ヒーターから輻射される赤外線が目的物にどれだけ直接照射されるかは、加熱・乾燥効率に大きな

影響を持つファクターである(図4)。赤外線ヒーターの選択でこのファクターの影響が一番大きい。当社の赤外線ヒーターは照射効率を高めるために金反射膜を装着しており、目的方向に95%の赤外線を輻射できる。それに比べセラミックパネルヒーターなどの場合は、入力エネルギーに対してヒーター背面からの損失が30~40%になる。アルミ製の反射板を用いた場合も20%くらいの損失が生じる。

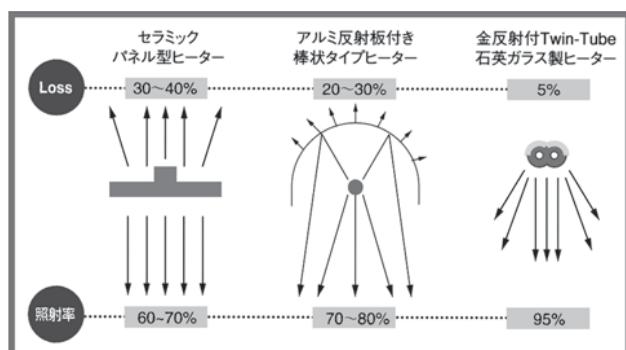


図 4

1.7 立ち上がり性能のファクター

赤外線ヒーターの種類によって、その立ち上がり性能は大きく違ってくる(表1を参照)。また立ち下がり時間は、その2~3倍くらいはかかる。緊急停止時の対策で動きの速いヒーターを採用が必要な場合は、中波長カーボンヒーター、短波長赤外線ヒーター等の立上がり・立下りが速いヒーターの採用が望ましい。



図 5

1.8 赤外線ヒーターと熱風炉の比較(表2)

(1) 仕上り品質

熱風との大きな違いは、例えば、コーティング乾燥の場合、赤外線はコーティング内部で吸収され、また透過した赤外線は材料母材を加熱する。つまりコーティング表面と内部の温度差が小さく、皮張り、ワキ

などの欠陥が少ない。

(2) ゴミ問題

循環熱風量が少なく、短時間乾燥でゴミの付着が少なくなる。

(3) 設置スペース

熱風炉より単位面積あたり大きなエネルギーを投入でき、乾燥炉をコンパクトにできる。

(4) 温度キープ

三次元形状で一定温度キープが必要なコーティング乾燥には、昇温ゾーンに赤外線ヒーターを設置し、温度キープゾーンには熱風対流を採用した赤外線-熱風併用乾燥炉が理想的である（図6）。

表 2
赤外線ヒーターと熱風炉の比較

比較項目	赤外線ヒーター	熱風炉
セッティング		
立上り時間	○	×
目標温度の変更	○	×
加熱要素		
3次元形状への加熱	×	○
温度均一性	△	○
処理量による昇温スピード	○	×
温度キープ	△	○
乾燥要素		
厚塗り乾燥	○	×
パウダー塗装乾燥	○	×
その他		
熱量計算・設計	△	○
設置スペース	○	×
クリーン性	○	×

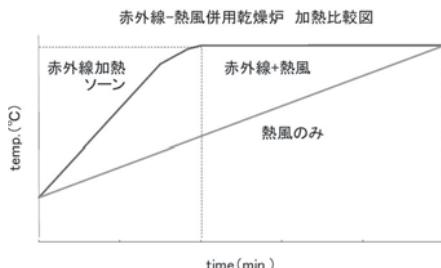


図 6

2. 材料別アプリケーション紹介

2.1 樹脂シート

(1) フィルムシート延伸

フィルムシートを引き伸ばすときに熱をかける。ガイドロールとニップルロールの間にヒーターゾーンが設けられている。一般的にこのゾーンは出来るだけシート幅が収縮しないようするため狭く設計されており、生産性向上させるため出力の大きなヒーターが要求される（図7）。緊急停止のことも考慮して応答性の速いヒーターである短波長赤外線ヒーターまたはカーボンヒーターで対応していることが多く、中波長赤外線ヒーターや遠赤外線ヒーターでは出力と応答性の点で劣ってしまう。

(2) エンボス加工

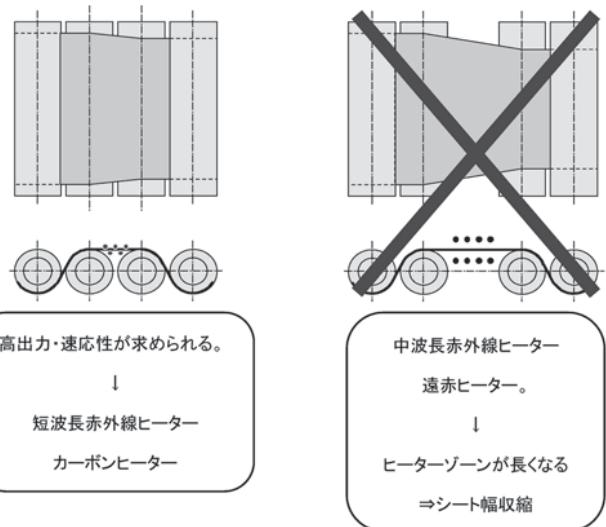


図 7

壁紙エンボスシートの材質はPVCが一般的であったが、近年オレフィン系材質への移行に伴い熱量増強と品質面からの加熱工程改善を要求されることが多い。高出力タイプの赤外線ヒーターをエンボスロール直前に入れることで、短時間でシート表層部のみを加熱軟化させしっかりとしたエンボス（凹凸）をかけるためである（図8）。逆に出力の弱いヒーターでゆっくりとした加熱では、シート表面のみならず裏面まで熱伝導で伝わってしまい、エンボスがかからないという不具合が起こる。その為、エンボス直前加熱では短波長赤外線ヒーターまたはカーボンヒーターの採用されることが多い。

2.2 インク

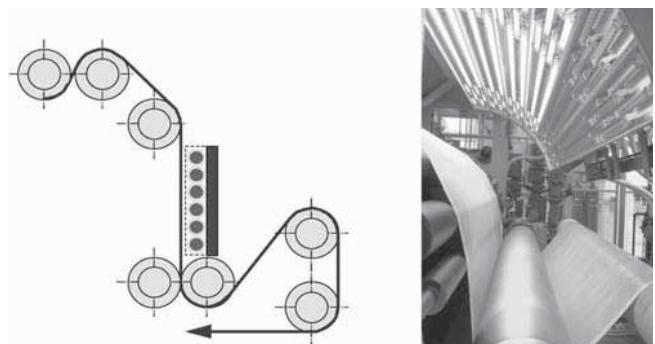


図 8

(1) デジタル印刷

高速インクジェット・ヘッドを採用したデジタル印刷システムが増えている。その乾燥プロセスに当社の中波長カーボンヒーター採用実績が増えている。水性インクおよび基材である紙の赤外線吸収率が適している中波長カーボンヒーターは、他の中波長赤外線ヒーターよりも高出力で、かつ優れた応答性を有している

ので印刷乾燥プロセスでは評価が高い。安全性に優れた早い立下り性能は紙を基材とした印刷では重要点である。これはコーティング分野でも同じである。

中波長カーボンヒーターの性能を十分に発揮するためには、乾燥用の風の入れ方がポイントとなる。図9はその一例であるが赤外線モジュールに乾燥用の空気を取り入れ、排気ダクトと一体型にしている。

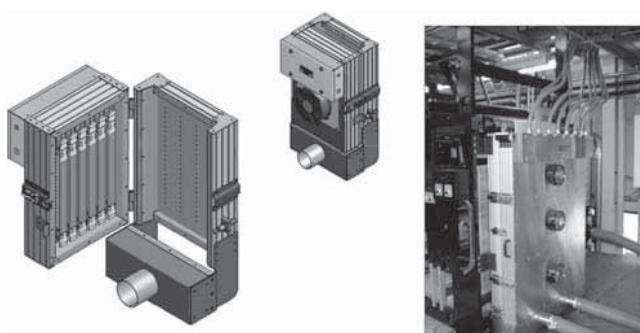


図 9

(2) フレキソ印刷

写真1はフレキソ印刷の導入例である。ここでも中波長カーボンヒーターが採用されている。赤外線モジュールの下側にエアーノズルが併設されている。従来の考え方であれば、ノズルには温風を採用していた。しかし、ここでは室温の空気をそのまま使用している。一見、赤外線ヒーターで加熱しているのに、空気

で冷やしてしまうように思える。従来温風乾燥では、インクの水分蒸発のために必要な熱エネルギー供給と、蒸発した水分を運ぶ働きの両方を、温風が一人二役をしていた。この設備例では熱エネルギー供給を効率の高い赤外線に任せ、風には蒸気を運び乾燥のための環境を整える働きだけをさせ、役割分担をしている。

2.3 金属

(1) 一般特性

金属は比重が高く材質によっては赤外線領波長をほとんど反射してしまうものがあるので注意が必要である。当初予想していたよりも温度が上がらないことが多い。

また表面の状態によっても大きく結果が異なってくる。例えば表面が砂面なのか鏡面なのか、または何か塗装されているものなのかなによって昇温スピードが大きく異なる。

(2) 薄い金属箔の加熱

金属箔の加熱では、当初予想していたよりも加熱効率が上がらないことが多い。片面からの加熱では赤外線を透過しないため、箔裏側には冷たい空気が存在し、加熱効率が20~40%落ちてしまう。両面からの加熱で加熱効率を落とさないようにすることが多い。

(3) 肉厚の厚い金属の加熱

例えば粉体塗装では塗膜を200°C前後まで昇温させている。母材の肉厚が厚ければ厚いほど被加熱物の熱容量が大きくなるため出力の強いヒーターが必要となる。生産性を上げるために短波長赤外線ヒーターの採用

●実プロセスでのポイント —フレキソ印刷（乾燥）の例—



写真 1

も増えている。

温度キープは重量がある分、一度温度が上がると被加熱物温度は冷めにくいため比較的弱い熱源または熱源無しで済むことがある。

重量物加熱(参考)

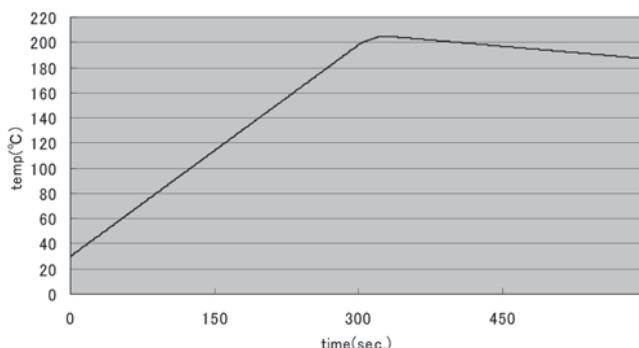


図 10

2.4 ガラス

車・液晶パネル・建材・太陽電池関連で熱処理する際に赤外線ヒーターが採用されている。

当社で過去に行ったガラスラミネート案件で遠赤外ヒーターと中波長赤外線ヒーターのエネルギー密度を揃えた比較テスト（図 11）を紹介する。

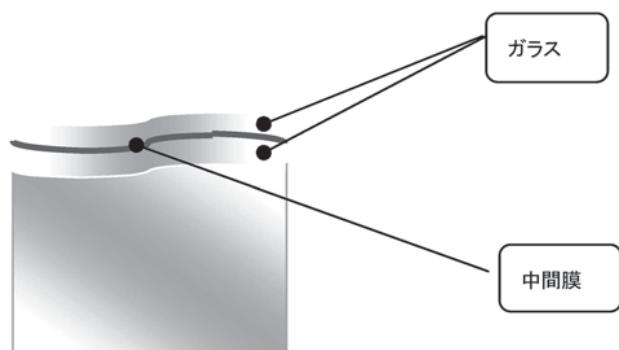
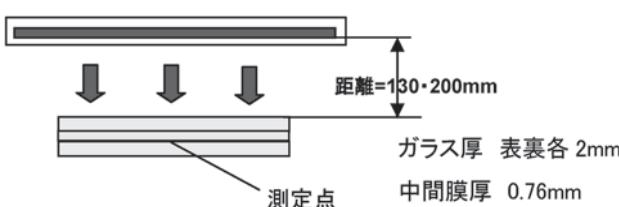


図 11



結果的に中波長赤外線ヒーターが遠赤ヒーターとくらべて約 1.5 倍効率が良いことが分った。図 12 のガラスと中間膜の赤外線吸収特性が示すように中波長赤外線ヒーターから放射される $2.5\mu\text{m}$ 以下のエネルギーの多くはガラスを透過し、直接中間膜を加熱する。

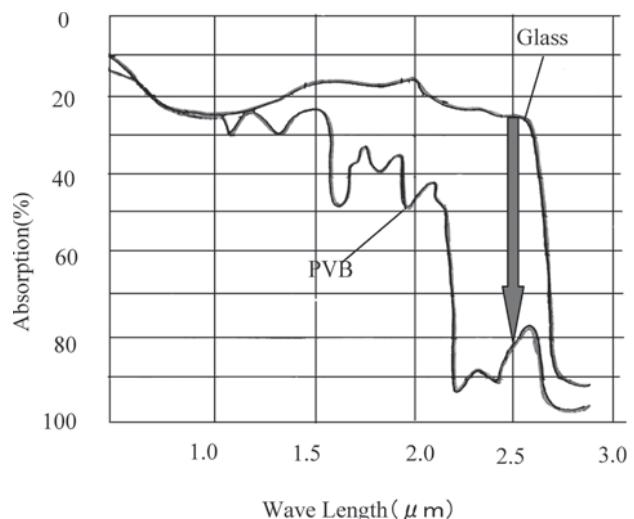


図 12

上記実験レベルのガラス厚では中波長赤外線ヒーターの効率が良いことが分ったが、さらに厚いガラスではどうだろうか？

例えば、ガラス厚が 20 mm もある場合、吸収も大きくなり中波長では中間膜まで光りが届きづらくなり中間膜の昇温がかなり鈍くなる。この場合あえて波長が短く透過程の良い中波長カーボンヒーター、短波長赤外線ヒーターが望ましい。

一括りにガラスの加熱といっても、素材の条件、設置条件、操作性、何をされたいかななどいろいろな事情によってどのヒーターが採用されるか変わってくる。

参考文献

- FRANK P. INCROPERA DAVID P. DE WITT FUNDAMENTALS OF HEAT AND MASS TRANSFER (Third Edition)
- 近江善夫 コンバーテック 2009 年 10 月
- その他、自社資料