コーティングラインにおける赤外線乾燥技術

ヘレウス㈱　ラジエーションシステム部　近江　善夫

1．概要

乾燥方式の代表的なものは熱風乾燥と言えよう。現実に日本工業界では、かなりの数の熱風乾燥設備が稼働している。赤外線乾燥はそれら熱風乾燥設備に対する補強として採用される事例が多く、ライン速度アップや炉長短縮、品質向上などの成果を上げている。しかし、それは赤外線が単に熱風を強くしているという意味ではない。赤外線は熱風乾燥と違うテクノロジーであり、熱風にはできない面を得意としているのである。両者の違いを理解するのが、赤外線乾燥を考える時の大切な鍵となる。

2．輻射加熱の原理と特長

初めに、輻射加熱の原理を簡単に説明する。赤外線は電磁波の一種で、ある波長を持った光エネルギーである。図１のように光源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。

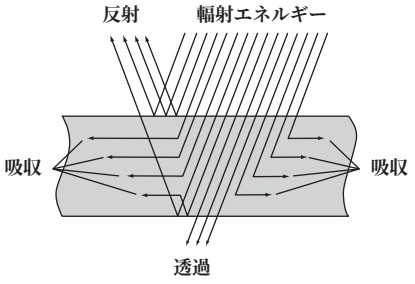

図１　赤外線加熱原理

次に熱風乾燥との相違を考えたい。熱風との大きな違いは、光がコート膜の中に入るという点にある。熱風乾燥の原理については先に詳細が述べられていると思うが、基本的に熱風は表面にしか作用しない。その熱の伝わり方は表面からの熱伝導となる。そのため、どうしてもコート表層から乾燥が始まるので皮張りなどの問題を抱えやすく、おのずと急速乾燥に限界がある。

それに対し赤外線乾燥の場合、赤外線がコート内部まで透過するのでコート全体を同時に加熱・乾燥することができる。もちろん熱伝導のファクターもあるが、熱風と比べると断然加熱速度に優れている。また、空気という媒体を使用せずにエネルギーを目的物に与えることができるので、熱風特有のゴミ問題も極端に改善できるメリットがある。

もう１つの特長は、熱風より小さなスペースに大きなエネルギーを投入できることである。言い換えると、乾燥炉長を短くする能力・可能性を持っていると言えよう。

ただし、弱点もある。赤外線は照射し続けると、どんどん対象物の温度が上がってしまうので、対象物温度をキープさせるには対象物温度を検知してコントロールする必要が生じる。熱風乾燥のような熱風温度を管理するだけといった簡易的な方法は、赤外線設備では使えない。どうしても対象物温度を測定し、かつゾーンを分けての精密な制御を必要とする。

そこで考えられるのが、予備乾燥ゾーンもしくは昇温ゾーンでは赤外線設備を用い、本乾燥ゾーンもしくは温度キープゾーンでは熱風設備を配置するという使い分けである。これは、両者の特長を生かした使い方と言えよう。

3．赤外線ヒーターの種類

一般に工業用に用いられるのは、波長範囲で 0.8 ～ 5 μm、温度範囲で 400 ～ 2,500℃の赤外線である。日本では遠赤外線と近赤外線という２つの表現が一般的だが、ドイツ・ヘレウス社では自社商品群に合わせてさらに細かく分類している。表１を参考されたい。なお、赤外線の分類方法は業界で統一されておらず、各社が独自の表現をとっていることが多いので注意が必要である。

4．赤外線ヒーターの注意ポイント

赤外線ヒーターに投入された電気エネルギーは赤外線となり熱に変換されるが、そのすべてが目的物の加熱に寄与するのではない。いくつもの要因が絡み合って、その目的の加熱効率に影響を及ぼすのである。赤外線ヒーターを使用する際には、以下のようなファクターが影響してくることを理解しておくと良い。

4．1光源温度のファクター（図２）

赤外線ヒーターは表１の性能比較表にも見られるように、工業用赤外線ヒーターと呼ばれている中でも、その光源温度が500～2,100℃まで広がる。赤外線輻射加熱の原理ではこの〔光源の絶対温度〕^{4}と〔対象物の絶対温度〕^{4}の

差が１つのファクターになる。“温度の高いヒーターほど強い加熱ができる”というのは感覚的に理解できると思うが、なんと理論的にはその効果は４乗で効くのである。

ただし、このファクターは目的温度が100℃というような低い温度では影響は感じられない。むしろ目標温度が高くなった場合に影響する。例えば目標温度を300℃に設定した場合、光源温度500℃の遠赤外線ヒーターでは温度差が小さすぎて目標到達はかなり困難になるが、短波長赤外線ヒーターのような2,100℃の光源では十分な温度差を確保しており、目標達成が容易となる。赤外線加熱に限らないが、どんなエネルギーも高いところから低いところへしか流れない。このレベル差がエネルギー移動速度に影響するのである。

４．2ヒーターの対流損失のファクター

赤外線ヒーターには輻射光にはならずに外気へ熱損失として奪われるエネルギー分がある。一般的にセラミック製や金属製の遠赤外線ヒーターではその表面から赤外線光を輻射するが、表面に外気が当たると熱を奪われてしまうという構造的欠陥を持っている。これを熱風乾燥炉内に設置した場合、風の影響を大きく受け所定の赤外線エネルギー量は輻射できない。それに比べ、石英ガラスで光源を覆う構造を持つタイプは、風が光源に直接当たらない配慮がされている。特に短波長赤外線ヒーターおよびカーボンヒーターは熱源部が石英ガラスにすら接触していないので、極めて外気の影響を受けない構造となっている。熱風乾燥などの風と併用する場合は適していると言えよう。

４．3赤外線吸収率と透過率のファクター

対象物の赤外線吸収特性も１つのファクターとなる。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。ゆえに吸収率の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と言える。一般的には次のように分類される。

・金属系……１～２μｍ
・樹脂系……２～４μｍ

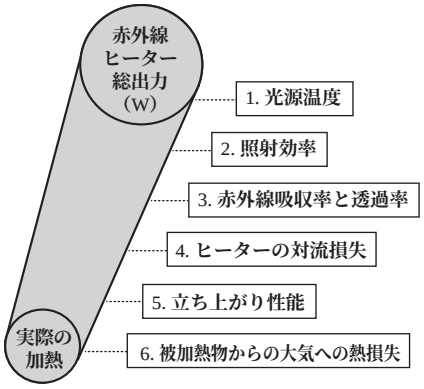

図２　光源温度のファクター

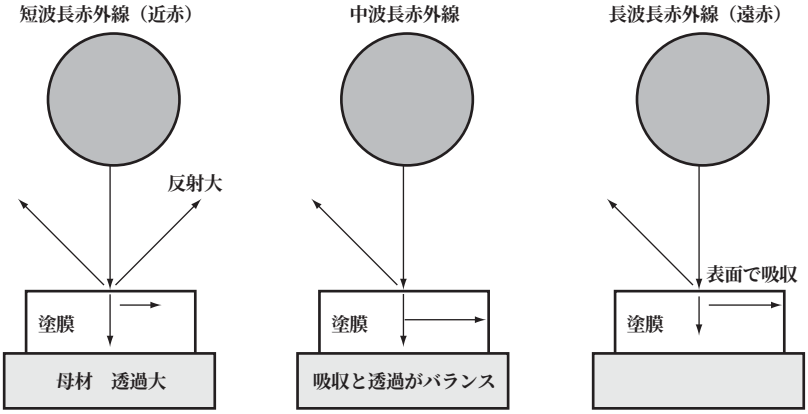

図３　赤外線吸収率と透過率のファクター

表１　ヘレウス社製品の性能比較表

	石英管サイズ	最長加熱長	発熱体温度3)	最大エネルギー波長	立ち上がり速度	最大エネルギー密度4)	寿命5)
短波長赤外線ヒーター1)	23×11	2.6m	1,600～2,100℃	約1.2μm	1～2秒	120kW/m²	5,000時間以上
	34×14	3.2m	1,400～1,600℃	約1.6μm	3～5秒	100kW/m²	
中波長カーボンヒーター	φ19	1.5m	950～1,200℃	約2.0～2.5μm	2～3秒	100kW/m²	8,000時間以上
	33×14	3.0m					
中波長赤外線ヒーター	18×8	1m	800～900℃	約2.6μm	1～2分	50kW/m²	2万～3万時間
	22×10	1.5m					
	33×15	4m					
長波長赤外線ヒーター2)	セラミックパネル型		500～700℃	約4.0μm	約10分	30kW/m²	2万～3万時間

1)別称：近赤外線ヒーター　2)別称：遠赤外線ヒーター
3)石英ガラス内の発熱体温度を意味し、石英ガラス管面温度ではない。長波長赤外線はセラミックパネル表面温度を指す
4)単位面積1m²当たり、実際に設置できる最大量を意味する
5)実績時間を指し、保証時間を意味しない

・ガラス系……2～4μm
・水系乾燥……2～4μm
・セラミック系…3～5μm

コート乾燥の場合、コート膜は上層と下層ができるだけ同じように加熱されることがコート仕上がりに影響する。熱風乾燥での皮張り・突沸トラブルは、温風では表面だけを加熱してしまい、表層だけが先に乾くのが原因というのは先にも述べた。同じように遠赤外線ヒーターの場合も、確かに一般的な樹脂コート材料との吸収率は適合するのだが透過成分が少なすぎるため、表層だけにしか効果を及ぼさないことが多い。図３に示すように、コート乾燥には中波長赤外線が吸収成分と透過成分のバランスが良く、当社の実績でも仕上がりも良好との評価を数多くいただいている。

４．4 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光が目的物にどれだけ照射されるかは、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）。案外見落とされやすいが、実際にはこのファクターの影響が一番大きいと思える。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いるが、これはヘレウス独自のもので目的方向に95%の赤外線光を輻射できる効果を有する。それに比べセラミックパネルヒーターは背面に30～40%のロスが生じ、アルミ製の反射板を用いても20%くらいの光損失が生じる。もし急速加熱を目的とするなら、ヘレウス製品のような照射効率を高めたタイプが有効で、20%ぐらい効率がアップすることになる。

４．5 被加熱物からの大気への熱損失について

赤外線ヒーターとは直接的には関係ないが、加熱された目的物からの大気へ熱損失も考慮に入れておくべきである。温風加熱とは違い、赤外線加熱では周りの大気温度よりも高い温度に物温度を上げられる。と言うことは、加熱された物から大気への熱損失が生じることにもなる。特に基材が薄いシートのような場合この外気の影響が大きく、赤外線で加熱されたシートがすぐに冷えてしまう傾向にある。また通常は大気が均一に目的物に触れることは少なく、例えばシートの端部が多く冷却されるなどの不均一温度のトラブルとして影響が現れることもあるので、外気の影響も十分に考慮する必要があるだろう。

４．6 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倍くらいはかかると考えれば良い。コーティング乾燥の分野では、緊急停止時の対策で動きの速いヒーターを採用することを勧めている。

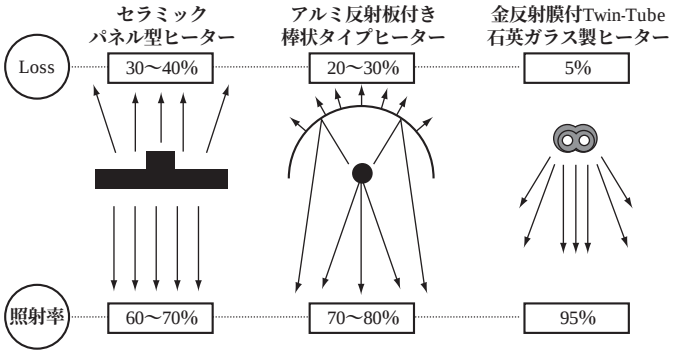

図４　照射効率のファクター

４．7 乾燥設備ではどのヒーターが良いのか

最終的にどの赤外線ヒーターが良いかとなると、性能面とコスト面などから検討することになろう。コスト面では安価なハロゲンランプが代表的であるが、寿命・信頼性の点では劣ることは否めない。当社のラインアップの中にもハロゲンランプはあるが、工業用の乾燥工程に勧めることは非常にまれである。当社の場合、寿命重視の選定をお勧めしているが、一般的なコーティング乾燥には中波長カーボンヒーターがすべての特性面において優れていると考えている。なお、赤外線ヒーターの選択に関してはいろいろな要素がかかわってくるので、当社まで相談されたい。

５．赤外線乾燥の実際

５．1 熱風炉との併用がポイント

コート膜を乾燥するには、①水分（溶媒）が飛びやすい環境と、②蒸発に必要な熱エネルギーを与えてやらなければならない。①は熱風乾燥が得意とする。赤外線は蒸発した水分をそこから取り除く効力はない。ただ熱エネルギーを与えるだけである。しかし、②に関しては赤外線の方がはるかに勝る。一般的に熱風の熱効率は５%以下である。それに対し、赤外線加熱は金反射膜を利用した場合で30～45%の加熱効率が得られる。これは大きな違いである。

赤外線で蒸発に必要な熱エネルギーを目的物に与え、周りの環境を熱風炉が整えるという、この役割分担がポイントである。

５．2 どのように赤外線を利用するのか

赤外線は熱風炉の手前に、予備乾燥ゾーンとして配置するのが最善であろう。赤外線の光エネルギーは膜内部まで届き、内部も同時に加熱するので、皮張りや突沸を気にせずに、短時間に多くのエネルギーを投入できる。

また熱エネルギーを与えればすぐに乾燥するのではなく、膜の厚みを水分が移動する時間、あるいは水分が気化する時間はどうしても必要になる。この時間は熱風炉にて温度を保持するとともに、水分が蒸発しやすい状態を風の流れによって提供するのが良いと思われる。もちろん、印刷のような薄膜であれば赤外線乾燥炉だけで十分乾燥してしまうアプリケーションもある。

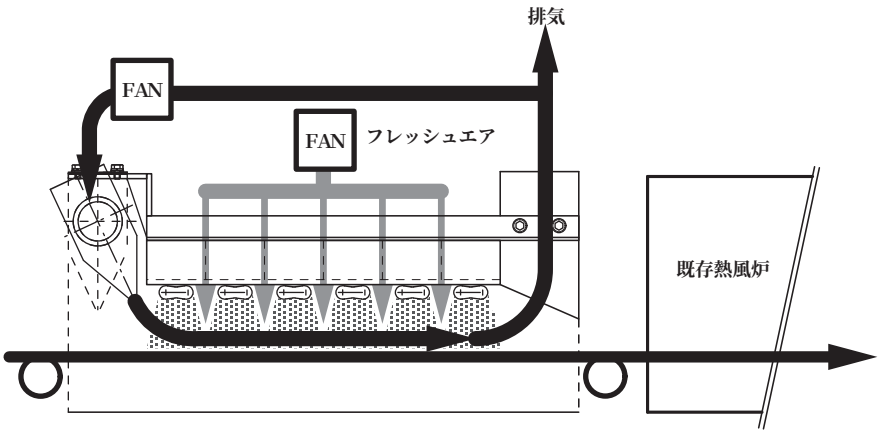

図５　中波長カーボンヒーターを使用した設備事例

５．3どれだけの赤外線エネルギーが必要か

実際に設備化する場合、設備に用いる赤外線ヒーター容量を決める必要がある。当然、実験により確認し決定していかなければならないのだが、実験に先立ち当社では熱量シミュレーションをしている。下記に例を挙げ説明する。

ある白色プラスチックシート（厚み：0.1mm、幅：1,000mm、比重：900kg/m^3、比熱：0.3kcal/kg℃）に水系コーティング（水分：0.005kg/m^2）を塗布し、生産速度は100m/minを目標とする。

その場合、蒸発水分量は（１×100×60）m^2×0.005kg＝30kg/hとなる。その蒸発潜熱は30×539/860　19kWとなる。ここでの539は水の蒸発潜熱、860はkcalからkWへの換算係数である。

またシートも室温から100℃まで加熱すると仮定すれば、この熱量も必要となる。シート処理用は（１×100×60×0.0001）m^3×900＝540kg/hとなる。その熱量は540×0.3×（100－25）/860　14kWとなり、両者の総計で19＋14＝33kWとなる。

次にこの値に加熱効率を考慮していく。加熱効率とは、赤外線ヒーターで投入したエネルギーが実際に目的加熱に関与する率であるが、ここでは30%と仮定してみる。すると、33kW/0.3＝110kWとなる。

さらにヒーターを対象物の幅よりも長いヒーターを採用すれば、そのロス分を考慮しなくてはならない。そして最後に安全率を含ませることになろう。そうしてみると、約130～150kW設備と予想される。

しかし、この熱量計算は全乾燥を赤外線ヒーターだけで行った場合である。実際には熱風乾燥炉が主体となるはずであるから、目標速度100m/minのうち、20m/min分だけを赤外線ゾーンでまかなうと考えれば赤外線容量30kWとなってくる。既存設備のスピードアップの場合も同様な計算となる。

６．最近の設備例

６．1水性コーティング

近年注目を浴びている中波長カーボンヒーターを使用した設備事例を図５にて紹介する。高出力の中波長カーボンヒーターを採用しており、加熱幅1mで炉長360mm（付属装置を含めると600mm以下）という小さいスペースに約50kWを投入している。ここで組み込まれている中波長カーボンヒーターは、欧州最大手の印刷機メーカーにも水系乾燥でOEM採用されており、その実力は高い評価を得ている。

６．2防爆タイプ設備

水性系乾燥に対して防爆構造の要求がある。水性乾燥に赤外線システムを導入するにしても、同工場内で有機溶剤を使用する、あるいは１つの設備で溶剤系と水性系を切り替えながら使っていく時に、設備はどうしても防爆構造に対応する必要があるからである。

しかし工業用電気赤外線ヒーターには防爆型というものはなく、システム全体で防爆に対応するしか手がない。本格的な対策を取るためにはセラミックガラスもしくは石英ガラスによって外気とヒーターを分離する必要がある。輻射された赤外線光はガラスを透過して目的物に照射されるが、外気はガラスによって遮断されるのである。ただ、このケースだけでは十分な防爆とは言えず、吸気ファン起動やヒーターケース内のパージ圧などのインターロックをシステムとして採る必要がある。また所轄の消防署に相談しながら、さらなる安全対策を加えていくことになろう。詳しくは当社に問い合わせていただきたい。

７．今後について

最近の赤外線ヒーターに対する要望は、新しい広がりを見せている。技術内容的に見ても新しく・前例がないようなアプリケーションの問い合わせが増えている。それは未知のことに挑戦していく企業の前向きな姿勢の現れだと思う。今後、さらに新しいことへの挑戦が続くと思われる。赤外線加熱の分野だけではあるが、当社では技術ソフト面も提供している。ご利用いただきたい。