

コンバーティングにおける赤外線のキーポイント 加熱・乾燥における赤外線プロセスの役割

ヘレウス(株)
ノーブルライト事業部
近江 善夫

1. はじめに

日本では機能性材料の開発が盛んであり、その種類は多岐に及ぶ。新しい市場・用途・機能を求めて新素材の開発・生産をするなかで、加熱・乾燥は品質を左右する重要なプロセスの1つである。赤外線プロセスはフィルム・シート加工において大切な役割を担っている。しかし残念なことに、まだまだ赤外線ヒーターの特長を活かしきれていないように思える。それは「輻射加熱」の赤外線ヒーターを「対流加熱」のイメージで捉えられていることが原因ではないかと考えている。本稿では幾つかの例を示しながら、赤外線プロセスの特長を活かす方法を考えていきたい。

2. 加熱の種類

加熱プロセスを考えるときに、まず加熱の種類を確認することは大切だろう。加熱を大きく分類すると、直接加熱と間接加熱に区分される。直接加熱とは、対象物にエネルギー（例えば電気）を与えることにより直接的に加熱する方法で、金属を対象とした抵抗加熱・誘導加熱がある。本誌が対象とするプラスチックでは直接加熱はあまり耳にしたことがないので詳細は省かせていただく。

では、間接加熱とは何か。簡単に説明すると、ある場所で発生させた「熱エネルギー」を対象物へと移動させる方法と

言えよう。対象物で直接「熱」を発生させるのではなく、加熱装置で熱を作り、その熱を対象物に移動させる手段である。その熱を移動させる方法は、3つの原理「伝導」「対流」「輻射」で分類されている。一般的にプラスチックの工程で採用されているのは間接加熱であるが、この3つの原理の特徴と違いを理解することは、今後の製品開発・製造プロセス開発に役立つと思う。

3. 間接加熱の比較

間接加熱のなかでの輻射加熱の位置付けや特長を理解することは大切である。まずは間接加熱全般から話をさせていただきたい。加熱とは高温側から低温側へ熱が移動する現象である。エネルギーは高いところから低いところにしか流れない。また、その差が大きいほど移動速度が速くなる。熱の世界でも同じで、温度差がないと熱は移動しないし、温度差が大きければ早い加熱ができる。どのように対象物に熱エネルギーを移動させるかという視点から、「伝導」「対流」「輻射」の3種類を簡単に整理・比較してみたい。

3.1 伝導加熱

伝導加熱は加熱源に対象物を接触させ熱伝導で加熱する（図1）。この原理を用



図1 伝導加熱の原理

いたのが加熱ロールであり、フィルム工場でも広く利用されている。加熱源が持っているエネルギーを「熱」という形で利用し、直感的に分かりやすく、実ラインでの採用例が多い。加熱源が有する熱レベルのまま利用するので、確実な加熱方法ともいえる。実ラインでの問題は、熱源と対象物を必ず接触させなければならず、利用上の制限があることである。また加熱ロール（熱源）の設定温度は多くの方が理解されていても、対象物がいったい何度まで加熱されているかをほとんどの方が把握されていないのも現状である。

3.2 対流加熱

対流加熱は加熱源の有する熱エネルギーを直接対象物に与えるのではなく、いったん媒体に熱を預けて、媒体により

問い合わせ

✉ ip.hkk@heraeus.com

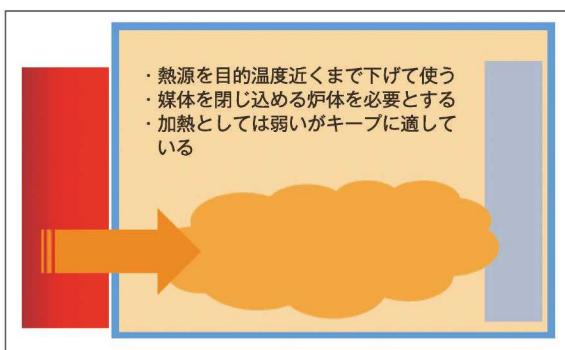


図2 対流加熱の原理

対象物へと熱エネルギーを運ばせる方法である(図2)。この原理を用いたのが対流炉(温風炉)になる。自由自在に温風を運べる特長を活かして、対象物から離れた位置に加熱源を設置するのが一般的である。そのため安全な加熱方法として認識されている。日本には優秀な対流炉メーカーが多く、温度安定性、温度均一性を有した設備が供給されてきた。対流炉は日本のフィルム市場を支えてきた大切な技術であり、今後も絶対に必要な技術であることには変わりはない。

しかし、弱点がないわけではない。熱エネルギーという視点から考えてみよう。温風となる前の熱源の温度・熱はもっと高い熱エネルギーであるが、媒体である空気へ熱を伝えるために、必ず下げた熱エネルギーしか利用できることになる。例えると、90°Cのお湯を作って、水で薄めて40°Cに下げて使うのが対流である。90°Cのお湯ならコーヒーが入れられるが、私は40°Cのお湯で入れたコーヒーは飲みたくない。逆に40°Cはお風呂に適しているが、90°Cのお湯で入浴する人はいない。熱エネルギーは温度によって働き・質が違ってくるのである。対流は下げるエネルギー・低い熱エネルギーを使う技術と捉えておくことは大切なポイントである。実ラインでは、低温領域や温度キープゾーンに非常に有効であるが、急速加熱あるいは高温加熱には他の手法よりも不利となってくる。

また必ず炉体が必要になるという制限がある。オープンの状態で対流加熱をすることは不合理である。媒体をある空間

に留めてはじめて能力が発揮できる。安定した対流空間が温風炉としての性能を左右するものであり、その空間を整えているのが炉体である。これは対流加熱の抱える固有の制限である。近年ではフットプリントを小さくしたいとのユーザー希望に対して問題を抱える要因となってきている。

残念なことに、炉体は対流加熱だけが抱える制限だと気づいていない技術者が多い。日本の対流加熱技術が優れていただけに、多くの人が「加熱=炉体がいる」という大きなイメージを埋め込まれているのではないだろうか。加熱プロセスを検討するときに、実際に多くの方がこの固定観念から始めるため、他の加熱方法の利点を活かせずにいると思われる。

3.3 輻射加熱

輻射加熱とは熱源から出てくる赤外線を対象物に輻射して加熱する方法である(図3)。熱源の温度レベルに応じて、あらゆる物体から赤外線エネルギーが放射されるが、赤外線は振動エネルギーに属する。高い温度の熱源からは強い振動エネルギー、すなわち振動数が大きい光が、低い温度からは弱い振動エネルギーである小さい振動数の光が照射される。これを波長で考えると、高い温度からは短波長の赤外線が、低い温度からは長波長の赤外線が輻射されることになる。

この赤外線というエネルギーは対流の媒体とは違い、熱源自体が持っている固有のエネルギーそのものであり、本来熱源が持っているエネルギーレベルで対象物に作用できる。工業界で利用されている電気赤外線ヒーターの熱源温度は500~2600°Cであるが、他の間接加熱と比較すると高いエネルギーを利用できることが分か

る。そのため高温領域や高速加熱に大きな強みを持ってくる。また非接触で加熱ができるのも大きな特長といえよう。繰り返しになるが、雰囲気を閉じ込めるような炉体は輻射には不要である。かえつて邪魔になったり、問題を起こしたりする。適切な反射板を利用することは好ましいが、輻射加熱はオープンな状態で使用できるのも特長といえよう。小スペースに高エネルギーが配置でき、大きな炉体を必要としないので、フットプリントには有利である。

しかし欠点はある。輻射は温度という指標では管理しにくい。本来であれば加熱プロセスでは対象物温度で管理すべきである。しかし透明フィルムなどでは、物温測定が難しいために対象物温度では管理できないのが現実である。そのため多くのプロセスでは代理温度で工程が管理される。伝導加熱であればロール温度、対流加熱であれば温風温度が代理温度となる。しかし、輻射加熱は管理用の代理温度は何かという問題に直面する。仮に対象物との間に温度計をセットしたとしても、温度計が赤外線で加熱された温度を示すだけで、対象物温度とは関係性の持たない数値となる。この点で失敗を経験された方は多い。輻射加熱プロセスの管理値としては、ヘレウスでは赤外線ヒーターの出力値(ワット数)を管理指数として推奨している。しかし、温度という指標が得られないという点は課題として残っている。また、強い加熱・速い加熱は得意だが、弱い加熱、特に温度キープは苦手とも言える。正確な物温が測定で



図3 輻射加熱の原理

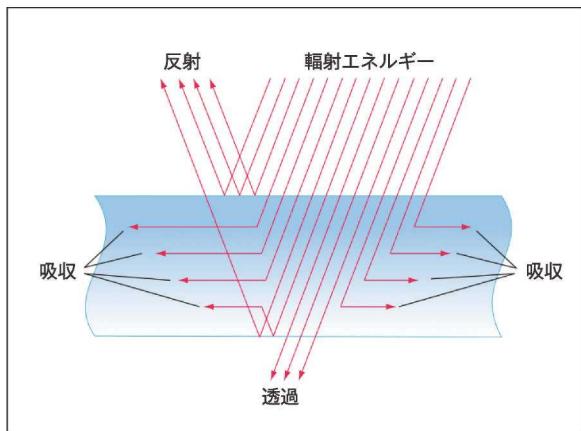


図4 赤外線の加熱原理

きるのであればPID制御は可能なのだが、現実には代理温度すら得られないことが多いため、温度キープゾーンには対流加熱・伝導加熱の方がはるかに容易であると言えよう。

4. 最適な輻射加熱とは

さて、輻射加熱の中での比較へと話を移す。赤外線ヒーターの中にも種類があり、プロセスに適したものを見つけることは重要なポイントである。少し繰り返しになるが、赤外線の加熱原理から始めよう。

4.1 赤外線の加熱原理

図4のように光源から輻射された赤外線光が目的物に照射され、その物質の中で振動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。赤外線ヒーターから放射された赤外線エネルギー（可視光を除いて）はすべて熱になる。ただし、この図4でも分かるように対象物にすべてのエネルギーが吸収されるわけではない。反射、透過、そして、初めから当たらなかった赤外線エネルギーは加熱目的に対してはロスとなる。

4.2 赤外線ヒーターの種類

一般に工業用に用いられる電気赤外線ヒーターは波長範囲で $1\sim4\mu\text{m}$ 、温度範

表1 赤外線ヒーターの種類

赤外線ヒーター種類	発熱体温度(°C)	最大エネルギー波長(μm)	最大エネルギー密度(kW/m²)	立ち上がり時間
遠赤外線				
セラミックヒーター	500~700	3~4	30	10~30分
シーズヒーター	500~700	3~4	30	5~10分
中赤外線				
中波長赤外線ヒーター	750~950	2.4~2.8	50	1~2分
カーボン赤外線ヒーター	950~1400	1.7~2.4	100	1~3秒
近赤外線				
短波長赤外線ヒーター	1400~2100	1.2~1.7	150	1~2秒
ハロゲンランプ	2000~2600	1.0~1.3	—	1秒

囲で500~2600°C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、十分な表現ではない。最近では、遠赤外線、中赤外線、近赤外線という3分類の表現も見受けられる。それに倣い分類してみた（表1）。

赤外線の波長として用いられるのは「最大エネルギー波長」で、ウイーンの変位則によって求められる。

$$\lambda = 2897/T = 2897/(t + 273)$$

λ：最大エネルギー波長、T：発熱体絶対温度(°K)、t：発熱体温度(°C)

図5は光源温度と波長の関係を同一出力で換算したイメージ図である。温度と波長の関係がお分かりいただけるであろう。なお、可視光は振動エネルギーとして吸収されないため加熱には寄与しない。照明用に開発されたハロゲンランプは可視光を多く得られる良い技術であるが、加熱としては10%近くのロスがあることに注意したい。

なお、以下の説明では当社で用いている、短波長赤外線、カーボンヒーター、中波長赤外線という表現を用いさせていただく。

4.3 加熱プロセスにおける赤外線

実際の加熱プロセスを考えるときに一番大切なのは、どのような加熱をしたいのかをハッキリさせておくことである。

「オレフィン系フィルムに一番合う赤外線ヒーターは何ですか？」というような曖昧な質問を受けることがある。残念ながら

ら、この情報では不十分である。目標温度には達したけれども、問題解決にはならなかった、ということになりかねない。

加熱目的は何であるか、既存プロセスの問題点が何か。どのような加熱を実現すれば、今の問題をクリアできるかをしっかりと考えておくべきである。特に加熱が要因で品質問題が発生しているのであれば、要因推察を基に加熱方法（伝導・対流・輻射）の選択から始める必要がある。

①レスポンス性能

フィルム・シートの加熱プロセスで重視されるポイントにレスポンス性能がある。赤外線ヒーターが緊急時にどのくらいの速度で立ち下がるかは、プロセスの安全対策を考えたときに非常に重要である。一般に立ち下がるのに表1の立ち上がり時間の2倍くらいの立ち下り時間が掛かるとお考えいただきたい。表から分かるように、大きく分けると分単位と秒単位のヒーターに区別される。多くの場合このレスポンス性能は必須となる。緊急停止の性能が必要であれば、実質選択の幅は絞られてしまう。当社の製品群では短波長赤外線ヒーターと中波長系のカーボンヒーターの2種類となる。まずは対象プロセスがレスポンス性能を必要としているかどうかを考えいただきたい。

②光源温度

光源温度が高いほど強いエネルギーが得られるが、今までの透明フィルムでは高い温度を求められてなかったため、光

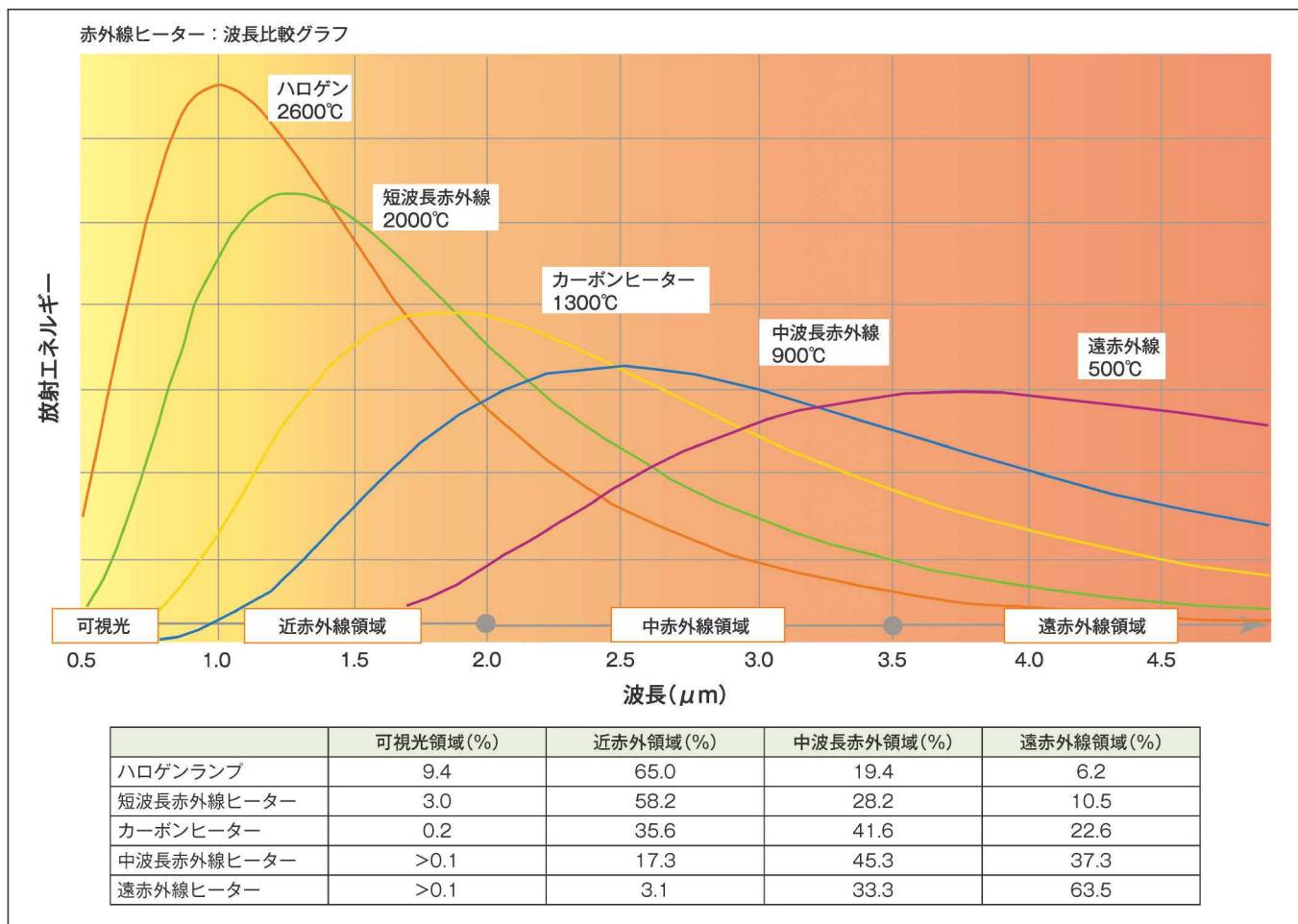


図5 赤外線ヒーター種類と波長の関係

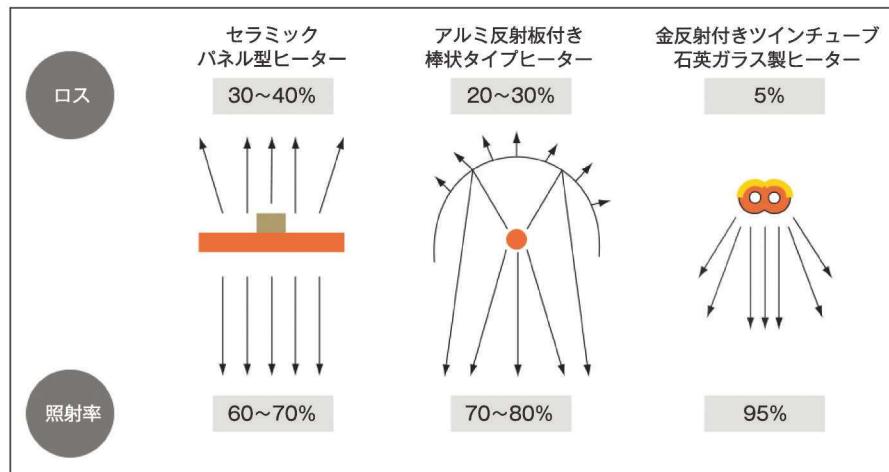


図6 赤外線ヒーターの効率

源温度は大きなファクターと考えられていなかった。しかし、近年ではPEEK成型加工、シートの熱溶着など、高温の要望が増えてきている。目標温度が高くなれば、光源温度は重要となってくる。PEEKに代表されるような400°Cで急速加

熱を求めるのであれば、光源温度は1000°C以上のヒーターを選定すべきであろう。目標温度を明確にする必要がある。

③照射効率と対流損失

赤外線加熱の効率で一番大切なのは、光を対象物に多く当てることがある。熱

源から放射される光が、対象物に當たなければロスになる。照射効率は赤外線ヒーターの構造により変わってくるので注意が必要である（図6参照）。ヘレスは照射効率を高めるために、赤外線ヒーター自体に金の反射膜を付けている。これにより95%の光を目的方向に向け、効率アップを図っている。照射効率はメーカーにより違うので、比較されることをお勧めする。

④吸収率と透過率

材質によって吸収波長が違うことは周知のことである。対象物の吸収波長を理解して、赤外線ヒーターを選定することは重要である。一般的にプラスチックの吸収波長は中波長領域が適合する。薄い透明フィルムなどを効率良く加熱するためには、短波長赤外線よりも中波長系のカーボンヒーターの方が加熱効率は良い。しかし光の特性である、透過力も見逃せ

ない特徴である。図4のように光は対象物の中に透過していく力を持っている。伝導・対流加熱では表面にしか熱を伝えることができなかつたが、赤外線は厚み方向に直接入っていき中身を加熱する能力がある。これは厚いシートの加熱プロセスで大きなメリットとなる。

代表的な例を紹介する。PETフィルムなどの縦延伸工程で赤外線加熱が用いられるが、このプロセスでは透過性の高い短波長が採用される。延伸前のPETは厚みのあるシートである。厚み方向での温度均一がフィルムの性能に影響するために、加熱効率よりも透過力を重視するプロセスの1つである。このプロセスで求められるのは透過力と高出力およびレスポンス性である。短波長赤外線はこの条件に適している。均一性を求めて両面加熱を配置されるが、最小スペース設置でネッキングを抑えたいとの要望も強い。そのため水冷式で200 kW/m²以上の高出力ユニットが一般的である。さらに最新のユニットでは、ユニット反射面に金メッキを施し加熱効率を高め、さらにニップロールへの熱影響を配慮した構造が取られている（図7）。

同じPET材料といえども、吸収率から選ぶ場合と、透過力を用いる場合では赤外線の種類が変わってくる。赤外線加熱の光の特徴は伝導・対流にはない性質である。是非、この光の性質を利用していただきたい。

4.4 乾燥プロセスにおける赤外線

乾燥プロセスの基本は対流炉である。赤外線プロセスは対流乾燥の補助として用いられることが一般的であり、対流で抱える問題を緩和するために赤外線エネルギーを利用する例が多い。対流炉では風による膜の乱れ・干渉ムラの発生、そしてコンタミ付着が課題となる。あるいは粘度が高いコート・厚膜コートなどでは、対流乾燥では表面だけが先に乾いてしまうという問題もある。対流の独特な品質問題を解決するために、炉手前での赤外線照射により、問題の軽減を実現し

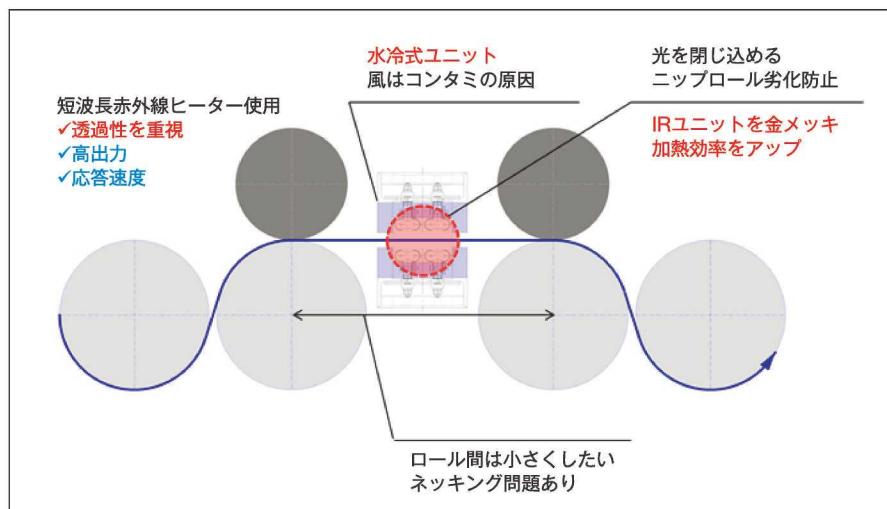


図7 PETフィルム縦型延伸工程での赤外線加熱の例

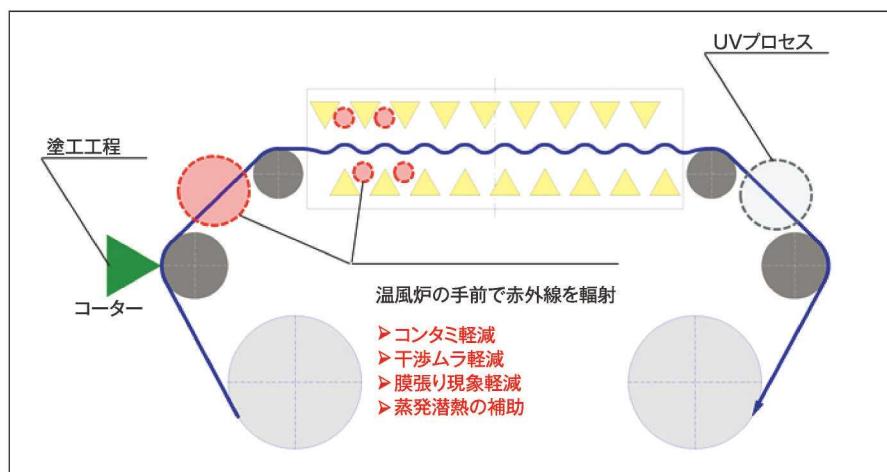


図8 コート乾燥での赤外線の導入例

ている例が数多くある。赤外線の透過力を用いて解決を見出しているのである（図8）。前述の①～④項目は乾燥プロセスも同様である。

⑤赤外線ヒーターの対流損失

乾燥工程では赤外線ヒーターからの対流損失にも注意を払いたい。乾燥には必ず風が伴ってくる。この風の影響を受けてしまう赤外線ヒーターがある。表1のセラミックヒーターおよびシーズヒーターは、内部で発生させた熱エネルギーを表面から輻射する構造をとっている。風と共にすると、照射面温度が落ちてしまい十分な輻射能力を発揮できない。これらを選択するのは乾燥工程では得策ではない。石英ガラスでフィラメントを守っている構造、いわゆるランプ型のヒーター

であれば、風によってフィラメント温度が下がることはないので、風の中でも輻射の能力を発揮できる。

5. まとめ

新素材開発における加熱・乾燥の要望は新しい広がりを見せている。特に高速・高温プロセスの要望が増えてきている。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ばかりである。それは未知へ挑戦していく企業の前向きな姿勢の現れだと思う。今後、さらに新しいチャレンジが続くと思われる。赤外線加熱・乾燥の分野だけではあるが、当社では技術的なサポートも提供している。是非ご利用いただきたい。