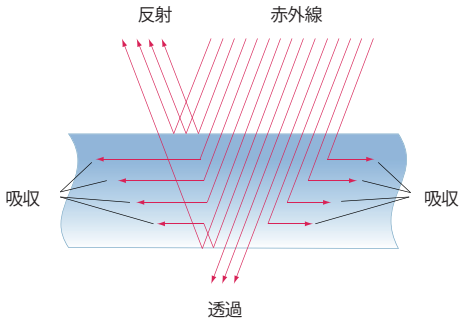
# 炭素繊維強化プラスチック成型への赤外線加熱の応用

## 1. はじめに

炭素繊維強化プラスチックは航空機に採用され、自動車市場までに拡大してきている。現在は熱硬化性 CFRP (CFRTS) が主流であるが、熱可塑性 CFRP (CFRTP) も多分野への応用が注目されてきた。両者の成形プロセスは異なるが、どちらも加熱プロセスがあり、品質・生産速度を決める大切な鍵となっている。ヘレウスでは CFRP プレプレグ加熱プロセスに赤外線システムを提供しており、欧州を中心に多くの実績を持つ。幾つかの赤外線システムの応用を紹介したい。

## 2. 輻射加熱の原理と特長

はじめに、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。下図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。




光が照射されれば対象物は加熱されるので、前面に透過性の高い耐熱ガラスを配置して、ガラス越しで加熱することも可能である。また、空気により遮断される事が無いので風との共有が可能となってくる。あるいは真空中での加熱にも利用できる。

## 3. 赤外線ヒーターの種類

工業用に用いられる電気式赤外線ヒーターは、波長範囲で 0.8~5μm 温度範囲で 400~2,500℃である。日本では古くから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。

表1：性能比較表

| | 石英管サイズ | 最長加熱長 | フィラメント | 発熱体温度※1 | 最大エネルギー波長 | 立上り速度 | 最大エネルギー密度※2 | 平均寿命※3 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 短波長赤外線ヒーター（別称：近赤外線ヒーター） | Φ 10mm | 800mm | タングステン | 1,400 ～ 2,100℃ | 約 1.2μ | 1～2秒 | 100kW/m² | 5,000時間以上 |
| | 23x11mm | 2.6m | | | 約 1.2μ | 1～2秒 | 150kW/m² | |
| | 34x14mm | 6m | | | 約 1.6μ | 3～5秒 | | |
| 中波長カーボンヒーター | Φ 19mm | 1.5m | カーボン | 950～1,450℃ | 約 2.0μ | 2～3秒 | 100kW/m² | 8,000時間以上 |
| | 34x14mm | 3.0m | | | | | 150kW/m² | |
| 中波長赤外線ヒーター | 18x8mm | 1m | カンタル | 800～950℃ | 約 2.6μ | 1～2分 | 60kW/m² | 2万～3万時間 |
| | 22x10mm | 1.5m | | | | | | |
| | 33x15mm | 6m | | | | | | |
| 長波長赤外線ヒーター（別称：遠赤外線ヒーター。弊社では取扱いがございません。） | セラミックパネル型 | | - | 500 ～ 700℃ | 約 4.0μ | 約10分 | 30kW/m² | 2万～3万時間 |

※1　石英ガラス内の発熱体温度（石英ガラス管面温度ではありません）。長波長赤外線ヒーターはセラミックパネルの表面温度を意味します。
※2　実際に設置できる単位面積1m²当たりの最大量
※3　実績時間（保証時間ではございません）

## 4.　熱硬化性 CFRP（CFRTS）での応用

CFRTS では赤外線システムが採用される例はそれほど多いとは言えない。CFRTS の熱硬化に用いられるのは、オートクレーブが基本である。成型品に圧力を掛けながら、硬化反応を進めていくにはオートクレーブが最適と言えよう。しかし、赤外線の特長を活かしながら採用している例があるので紹介したい。右の写真は航空機主翼での採用例である。ここではドレーピング後の加熱に用いられている。特殊シートで覆われているのがお分かりいただけるだろうか。シートを真空にし、対象物を圧縮させながら加熱している。おそらくは、基材内に残る空気を取り除く役目も兼ねているはずである。ここでは透過力の強い短波長赤外線を採用し、赤外線は透明シートを透過し直接 CFRTS を加熱しているのが特徴である。温度均一性を上げるために、対象物を反復回転させ、さらに複数のゾーンに分け、放射温度計で細かく PID 制御を行っている。その他、何点もの熱電対が見られるが、温度制御とは別に細かく温度測定がされ工程管理データとして記録されているとのことである。

## 5.　熱可塑性 CFRP（CFRTP）への応用

CFRTP には赤外線ヒーターシステムが多様なプロセスで採用されているが、大きく分けると CFRP プレプレグ製造プロセス（炭素繊維乾燥、繊維開繊、および樹脂含浸）と、成形プロセスの 2 つに分かれる。今回は成形用予備加熱を取り上げる。

CFRTS と比較すると生産速度で優位な CFRTP は、今後インジェクションとの複合型プレス方式も含め広まっていくものと思われる。そのプレス工程では熱可塑性プレプレグの加熱が不可欠である。実ラインにおけるプレプレグのプレス直前加熱に求められるのは、右の点であろう。

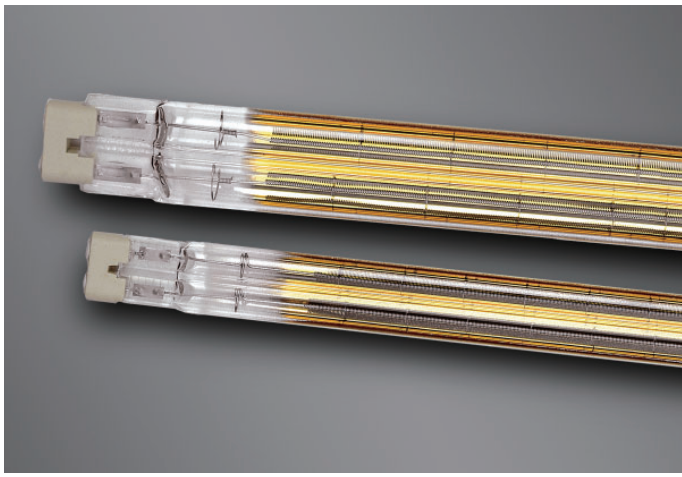
- ✓ 急速加熱
- ✓ 省エネ型システム
- ✓ 面内均一温度
- ✓ 表裏温度差（内部との温度差）
- ✓ 過加熱による樹脂表面劣化を防ぐ

カーボンは赤外線の吸収率が高い素材であるので、非常に加熱しやすく、どの赤外線波長であっても加熱効率の大差はない。加熱効率以外のポイントからヒーターを選択すべきと考える。ヘレウスでは多くの CFRP 素材で実験してきたが、短波長赤外線ヒーターが最適であると考えている。以下にその理由と赤外線プロセスでの注意点を述べる。

### 5.1　動きの速いヒーターが必須

プレス成型はタクトプロセスのため、必然的に加熱プロセスもタクト運転となる。タクト時間はさまざまであるが、1 分以内のプロセスが主流である。そうなると、遠赤外線ヒーターや中波長赤外線ヒーターでは立ち上がり速度が遅いために、常時立ち上げた状態でオペレーティングすることになるが、エネルギーの無駄が多い。

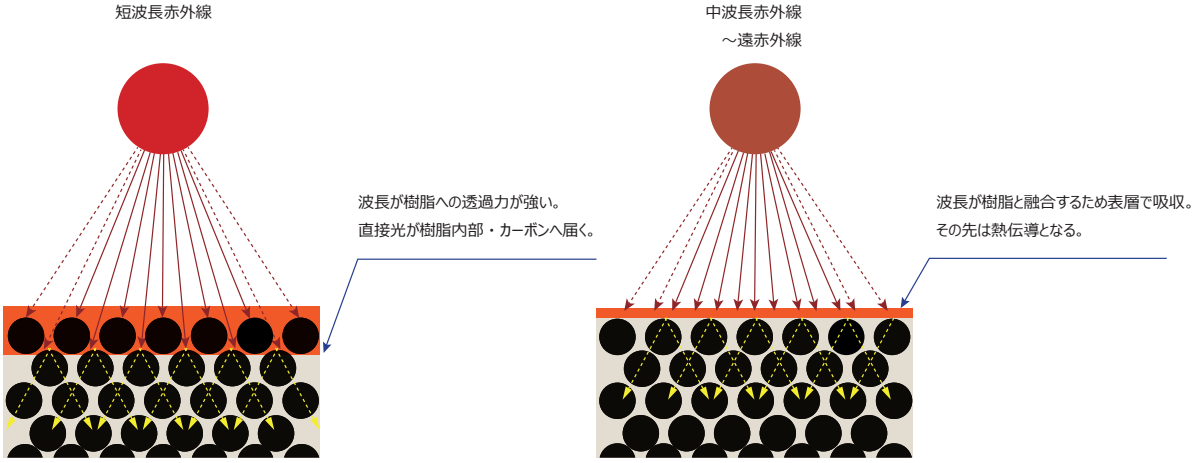
また、急速加熱を求める場合には、エネルギー密度が十分ではない。さらに、後に述べるが 2 段（多段）ステップ運転を採用できなくなる。秒単位で立ち上がるタイプの赤外線ヒーターを採用すべきである。



### 5.2　波長は透過性で選ぶ

赤外線ヒーターを選ぶときには吸収率を重視する傾向が強い。しかし、ヘレウスは実験を通して、CFRTP の加熱では透過性の

大きい短波長赤外線の方が、目的に沿った加熱がしやすいと判断している。ヘレウスは動きの速いヒーターとして、カーボンヒーター（中波長）と短波長ヒーターを持っており、比較実験をしてきた。 どちらも加熱能力・速度には差は見られないが、カーボンヒーターの場合は吸収率が良い為に、表面の熱劣化が早い傾向がある。中波長は含浸樹脂に対しても吸収率が高く、表面樹脂自体も加熱される。それに対し、短波長赤外線は透過力が大きいので樹脂層を透過し、カーボンファイバーに光が届いているのだろうと推測される。 このため、表面樹脂の劣化を防ぐには短波長赤外線の方が有利である。GFRTP での比較実験では、短波長赤外線が中波長赤外線より加熱効率の点で優れていた。 もし、同プロセスで GFRTP の成型も検討されている場合は、短波長赤外線が断然有利と言える。

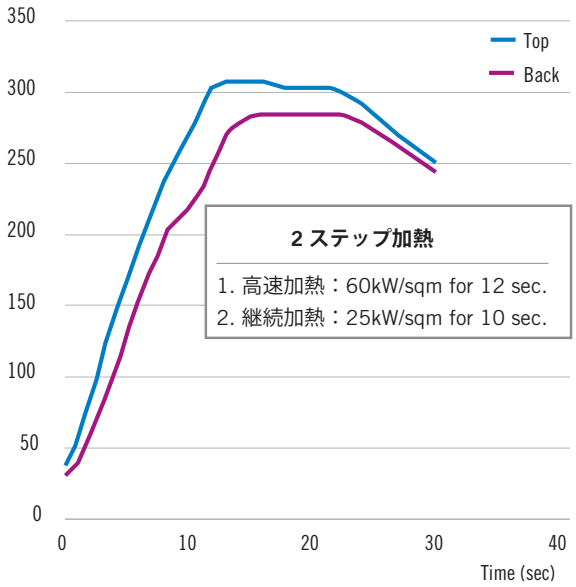



### 5.3　風を利用する、排気は必須

プレプレグ加熱で要望される温度まで加熱すると機材から蒸発分（煙）が多く発生する。急速加熱をすれば一気に発生するために、その発煙量は強く感じるはずである。この煙処理として、実機ラインでは排気が重要なポイントとなる。熱損失ばかりを気にして密閉型の加熱プロセスにすると大きな失敗となる。右の写真をご覧いただきたい。短波長赤外線ヒーターを用いた片側加熱システムであるが、側面に排気ダクトが設置されていることが分かる。ヘレウスでは、吸気型の空冷式モジュールを採用している。反射板側から赤外線ヒーターに向けて風を送り出すことにより、適正なシステムの冷却と煙処理を施し、安全でクリーンなシステム設計を実現している。もちろん、その冷却風に見合った排気をしなければ工場内に熱と煙をバラまいてしまう事になる。これからの設備は作業環境にも考慮した設計が求められるべきであろう。

### 5.4　両面加熱とステップ加熱

急速加熱をすれば、表裏の温度差が大きくなる。厚み方向の温度差を小さくするためには、両面加熱は有効な手段である。一般に 2mm を越える厚みの場合、両面加熱をお勧めしている。またステップ加熱も重要となる。表面（照射面）を耐熱温度近くまで急速加熱し、表面が過加熱にならないように照射エネルギーを下げたステップ運転を組むのがポイントである。通常は 2 ステップで良いと思うが、多段ステップを採用されるケースもある。



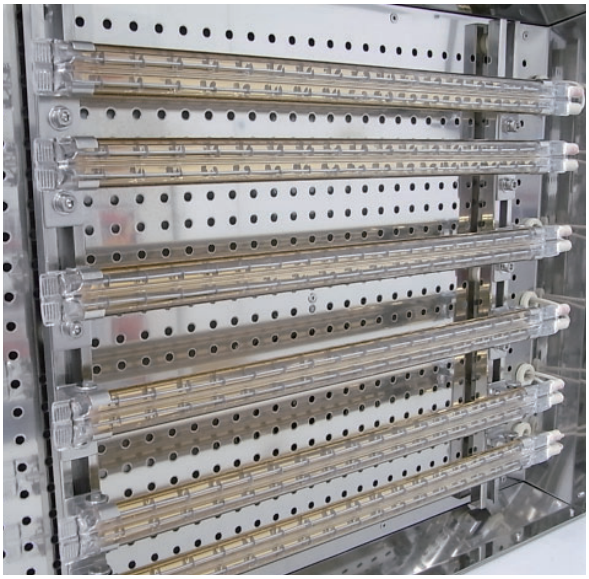
## 5.5　面内均熱について

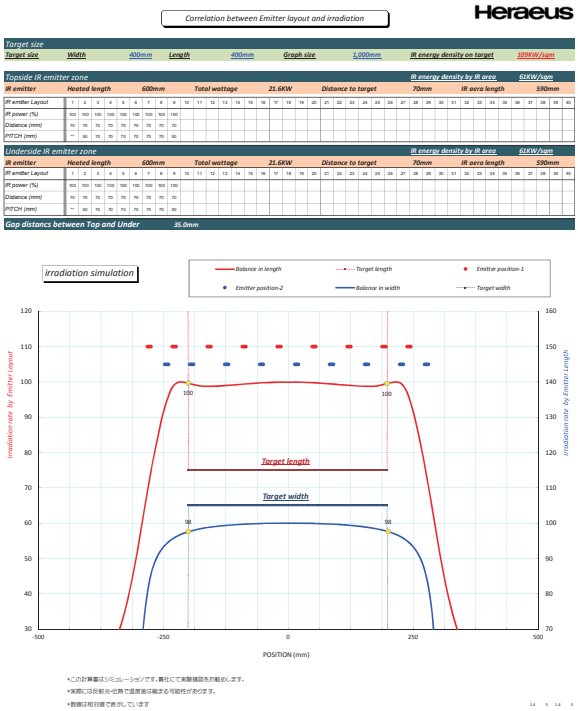
プレス成形には、プレプレグの均一温度が求められる。どの程度の温度差が許容されるのかは材料や目的成形レベルによって違ってくる。均一加熱で重要なポイントは、「プロセス内の換気」と照射分布を考慮した「ヒーター配置」である。

排気の重要性は先に述べているが、プロセス内の換気は均熱性についても影響してくる。特に、大きなサイズになってくると、中央部分に熱い空気が溜まり、反対に端は外気が入り込んでくる傾向があるので、加熱ゾーン内の空気温度差が大きくなってくる。均一加熱を重視するのであれば、余った熱を取り除く排気プロセスをキチンと考えるべきである。ヒーター配置も重要である。均等ピッチで赤外線ヒーターを配置すると、理論的に中央部の照射エネルギーが高くなる。並行照射型の反射板を採用したとしても、この傾向は同じである。ヘレウスでは照射分布シミュレーションにより、偏ピッチ方式を採用して均一加熱をサポートしている。両面加熱であれば、上下モジュールでヒーターを千鳥配列を利用すれば、更に均一性が上がる。

## 6.　まとめ

自動車分野での検討が進む中、新しい CFRP の素材が開発され、スプリングバックする素材など加熱プロセスに課せられる要望はさらに高くなっていくと考えている。ヘレウスではユーザーの要望に合わせ加熱ソリューションを提供していく。







**ヘレウス株式会社**
ノーブルライト事業部

東京本社
〒 112-0012
東京都文京区大塚 2-9-3
住友不動産音羽ビル 2F
Phone (03) 6902-6601
Fax　(03) 6902-6613
ip.hkk@heraeus.com
www.heraeus-noblelight.jp

名古屋営業所
〒465-0095
愛知県名古屋市名東区高社1-89
第二東昭ビル3階B
Phone (052) 725-9120
Fax　(052) 725-9121


Ver.3. 05/2020 Printed in Japan

All rights reserved by Heraeus K.K.