

## 赤外線炉導入による粉体塗料硬化プロセスの改善

### 1. はじめに

最近、多くの工場の生産技術者を悩ましている、粉体塗装の乾燥、硬化プロセスについて。赤外線加熱炉の導入で、エネルギーコストだけではなく、設備コスト、スペース、品質、そして生産性が大幅に改善された実例を紹介する。

### 2. 古くて、新しい赤外線加熱技術

赤外線加熱の工業プロセスへの応用は新しい技術ではなく、英國で、第二次世界大戦中にひっぱくした軍需品の塗装乾燥に赤外線加熱が応用されたことで知られるようになった、当時の赤外線ヒーターは、白熱電球に反射傘を取り付けたシンプルなバンクで、照射エネルギー密度も  $5 \text{ KW/m}^2$  と低かった。戦後、1950年代に自動車工業の発展と共に、赤外線加熱が自動車ボディの乾燥に使用されるようになり、電球型から、セラミック平板、管状の赤外線ヒーターが開発されエネルギー密度も高くなり、多くのトンネル炉に採用されている。

近年は、環境対応の水性、粉体塗装の増加により、赤外線加熱ゾーンの検討、設置が急激に増加している。

透明石英管採用の赤外線ヒーターの出現により、現在は加熱源コイル温度が  $500^\circ\text{C} \sim 2300^\circ\text{C}$  (最大エネルギー波長が  $4 \mu\text{m} \sim 1.2 \mu\text{m}$ ) の遠赤外線～近赤外線まで、幅広いレンジの赤外線ヒーターが開発され、プロセスの用途に敵した赤外線ヒーターの選択が可能で、照射エネルギー密度 (熱風の熱流束に相当) も、 $10 \text{ KW/m}^2 \sim 200 \text{ K/m}^2$  のバンクが可能である。

### 3. 赤外線加熱の一般的な特徴

- 1) 急速加熱、ほとんど加熱プロセスで放射加熱は対流加熱より速く、放射体温度がワーク温度との差が大きく、安定した加熱ができる
- 2) 加熱時間が短く、必要部分の選択加熱ができ省エネとなる。
- 3) 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。
- 4) 燃焼排ガスがなく、公害の発生がない
- 5) 制御性が良く、安全である

### 4. 粉体塗装での赤外線加熱の特徴

#### 1) 熱風炉の限界：硬化温度が高い粉体塗料

金属に粉体塗装されたワークを常温から  $180 \sim 200^\circ\text{C}$  まで加熱するに必要な正味熱量のほとんどはワークを加熱する熱量である。 $120^\circ\text{C}$  焼き付けの溶剤系塗装乾燥炉と単純に比例設計した熱風炉と比較して、1.5倍以上の熱量、または昇温時間が必要である。

## 「熱風炉の限界」

加熱の方式にかかわらず、速く加熱するということは、単位面積当たりの熱流速  $q$  (W/cm<sup>2</sup>) を大きくすることである。

熱風炉は対流熱伝達であり、その基本式は、

$$q = h c \times (t_1 - t_2)$$

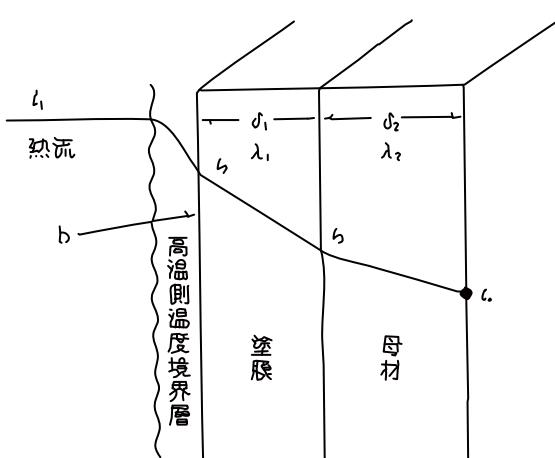
$t_2$ : 热風の雰囲気温度

$t_1$ : ワークの温度

$h c$  : 強制対流熱伝達 (W/m<sup>2</sup>)

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、200°C以上と

高くすると、炉外への損失も比例的に増加する。



強制対流熱伝達率 ( $h c$ ) 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、塗膜の品質、粉体塗装の付着率に影響し、熱風の流速には限界がある。

## 「エネルギー密度（熱流束）が大きい赤外線加熱」

対流熱伝達と放射熱伝達は基本式が違い、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  $h c$  に相当する放射熱伝達率を導くと、

$$q_{rad} = \epsilon \sigma (T_1^4 - T_2^4)$$

$\epsilon$  : 放射率

$\sigma$  : 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

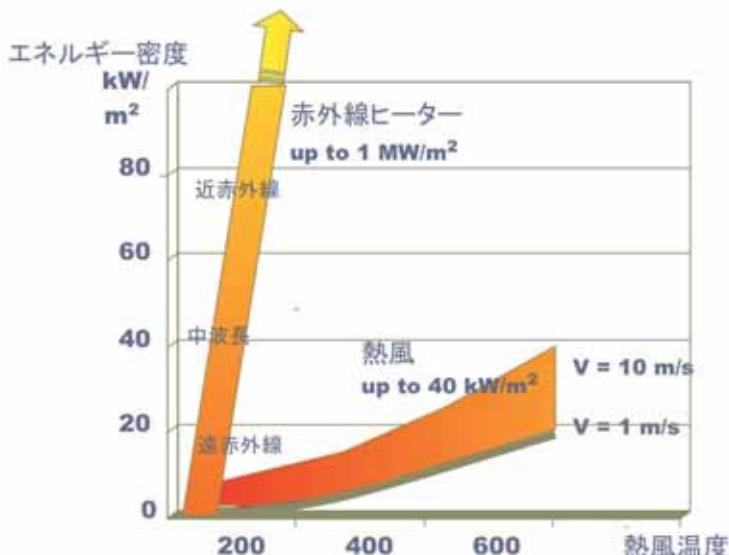
この式を因数分解すると、

$$\begin{aligned} q_{rad} &= \epsilon \sigma (T_1^4 - T_2^4) \\ &= \epsilon \sigma (T_1^2 + T_2^2)(T_1^2 - T_2^2) \\ &= \epsilon \sigma (T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2)(T_1 - T_2) \end{aligned}$$

ここで、対流熱伝達率  $h c$  に相当する、 $h_{rad}$  は、

$$h_{rad} = \epsilon \sigma (T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2)$$

となり、 $h_{rad}$  は放射温度 (赤外線ヒーターの発熱体温度) が大きなファクターであることが分かる、図で示す通り、中波長 (約 850°C) ～短波長 (2100°C) の赤外線ヒーターは熱風の対流熱伝達と比較し大きなエネルギー密度 (熱流速) となる。



赤外線炉と熱風炉のエネルギー密度比較

## 2) 高品質な塗膜

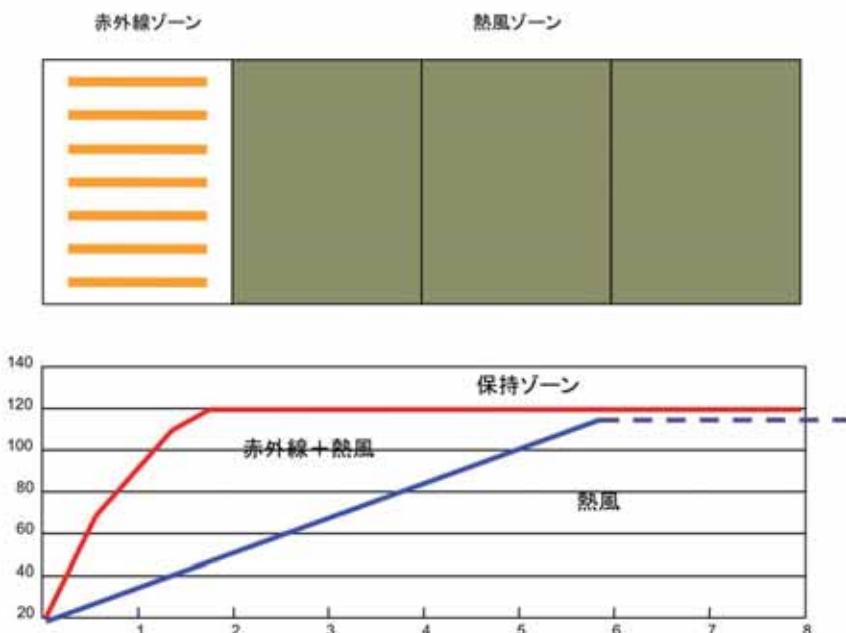
溶剤、水性系塗料と違い、粉体塗料は昇温速度が遅いと溶融と硬化が部分的に起こり、目的の塗膜品質を得ることができない。赤外線加熱は硬化時間を短縮させるだけでなく、速く、瞬時に硬化させることにより、滑らかで艶のある仕上がりが得られる。また粉体が飛び散りワークに再付着、離脱することもない。

## 3) 保持時間が短くなる

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、60m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、粉体塗料の硬化が促進されるのではないかと推定する。

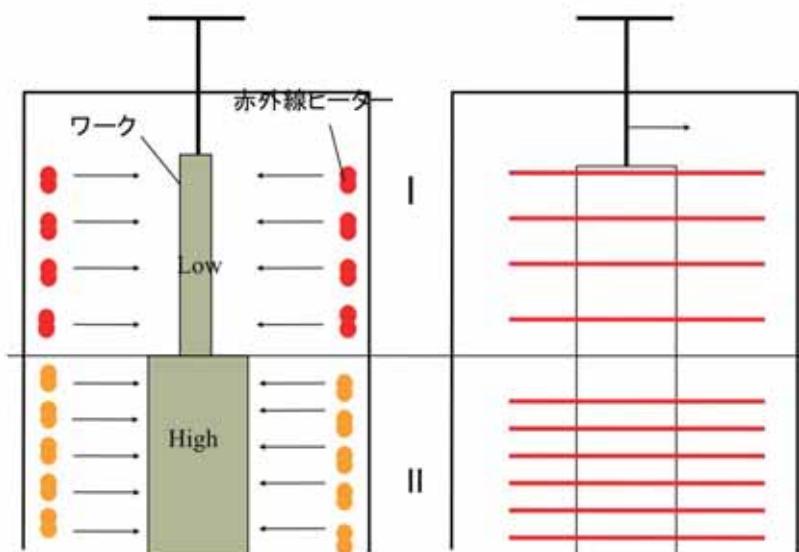
## 4) 赤外線+熱風ハイブリッド

複雑な3次元形状には昇温を赤外線、保持を熱風とする方法が適している。熱風炉は保持だけが目的のため、必要以上に高い温度にする必要がない。



### 5) ワークの重い部分が加熱速度のネックとなる

熱風炉は、熱流束が一定である。よって、重い部分の昇温が遅い。赤外線加熱では、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。



## 5. 粉体塗装の赤外線炉の実例

### 実例 1：溶剤塗料→熱風炉から粉体塗料→赤外線炉

FE社は自動車用オイルフィルターの製造会社で、すべてのフィルターの筒缶を溶剤系塗装、熱風炉で乾燥していた。筒缶は、各スプレーブースで均等な塗膜を得るために、特別な治具に缶を設置し搬送していた。しかし、治具に塗料が堆積し、短期間にその堆積した塗料を焼いてクリーンにする必要

があり、週に 250 t 以上のスラッジをブースから取り除き、廃棄する必要があった。生産性改善と品質を上げるために、試験と評価を繰り返し、粉体塗料と赤外線乾燥炉の導入を決めた。一時間の 3000 缶の粉体塗装キュアで計画し、炉長 10m の中波長赤外線ヒーター 324 KW の炉を導入した。赤外線炉は 12 ゾーンで構成され、それぞれのゾーン単独で ON-Off、サイリスター制御可能で、高さの異なるフィルター缶に対応できるように設計された。当初、缶部と缶上部のふた部の継ぎ目付近の硬化が心配だったが問題がなかった。粉体塗料と赤外線炉の導入は、不良率 1 % が、ほぼ 0 % となり、塗膜の耐性が著しく上がったのは言うまでもない。

### 実例 2：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硬化していたが、生産増加の要求に、粉体塗装の硬化工程が障害となっていた。乾燥、硬化スピードの改善に、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炉の導入を決定した。

赤外線加熱は硬化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品質も向上した。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。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 倍の硬化速度となった。



## 実例3：「遠赤外線」から「短波長赤外線＋中波長赤外線」

B C社はクーラー等のコンプレサー製造会社である。コンプレサーは粉体塗装されるが、最終の塗装工程が、生産量、品質のボトルネックとなっており、乾燥炉の改善を行った。発熱体温度が低く、エネルギー密度が低い遠赤外線ヒーターを、中波長赤外線ヒーターに置き換え、さらに昇温を速くするため、入口部に短波長赤外線ヒーターのブースターゾーンを設置した。粉体塗料のキュア速度は、0.8m/min. から 1.2m/min. と 1.5 倍となり、さらに新赤外線炉では加熱が均等となり、Cold Spotによる欠陥がなくなった。

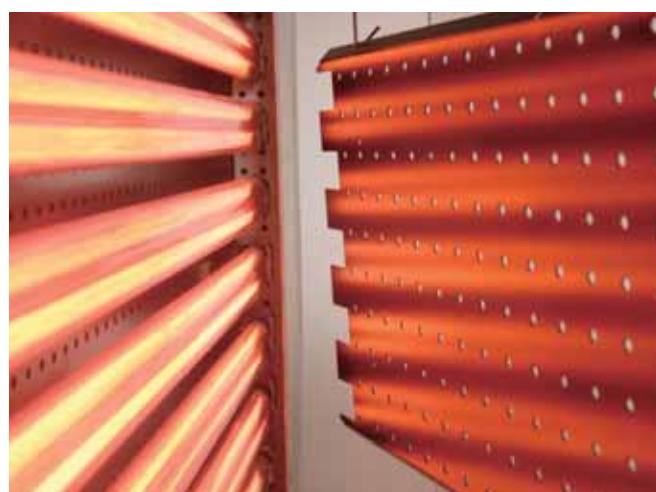


## 実例4：赤外線加熱で、省エネ、省スペース

K社は金属製シーリングガスケットの大手で、石油、ガス、石油化学業界に大きなシェヤを持っている。金属ガスケットのエポキシ系粉体塗料のキュアは重要な工程である。ガス燃焼熱風炉から赤外線加熱炉に変更することで、エネルギーコストが大幅に減少し、炉のスペースが半分となった。熱風炉の欠点は、始業、生産開始の少なくとも 2 時間前に立ち上げておく必要があった。また、粉体塗装をする必要ないシフトでも、炉を停止することができなかった。赤外線ヒーターの立ち上がりは速く、中波長赤外線ヒーターで 1~2 分で、炉全体の安定時間も 10 分程度である。炉長は、熱風炉の 12m が 5.6m となり、昇温ゾーン 90KW、保持ゾーン 30KW が 2 ゾーンで構成されている。

## 実例5：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、保持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

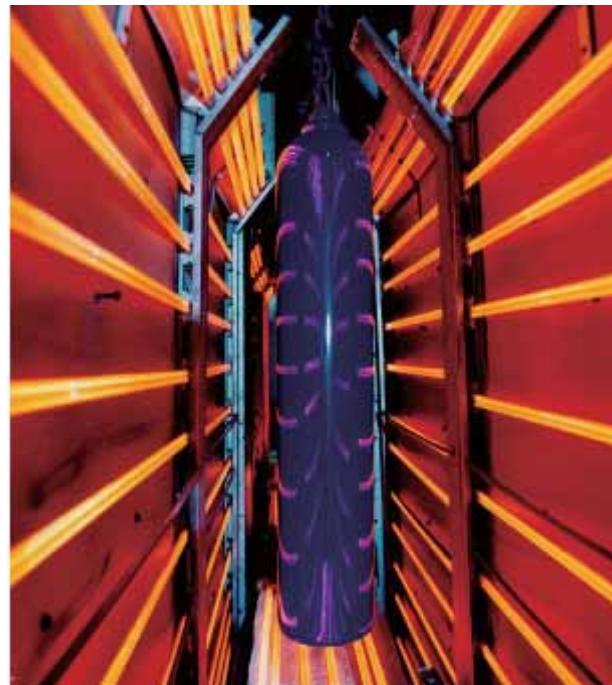


が非常に良く、温度上昇が速く、熱風と比べて非常に速く溶融、硬化し滑らかで艶のある仕上がりを得られた。赤外線炉は、昇温時間だけではなく、保持時間を大幅に短縮できる。結果、省エネ、生産性、省スペースの改善となる。

## 実例 6：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、保持に60分必要で、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。熱風の場合は炉全体のエネルギー密度（熱流束）が同じで、肉厚部分の昇温の遅さがネックとなっていた。

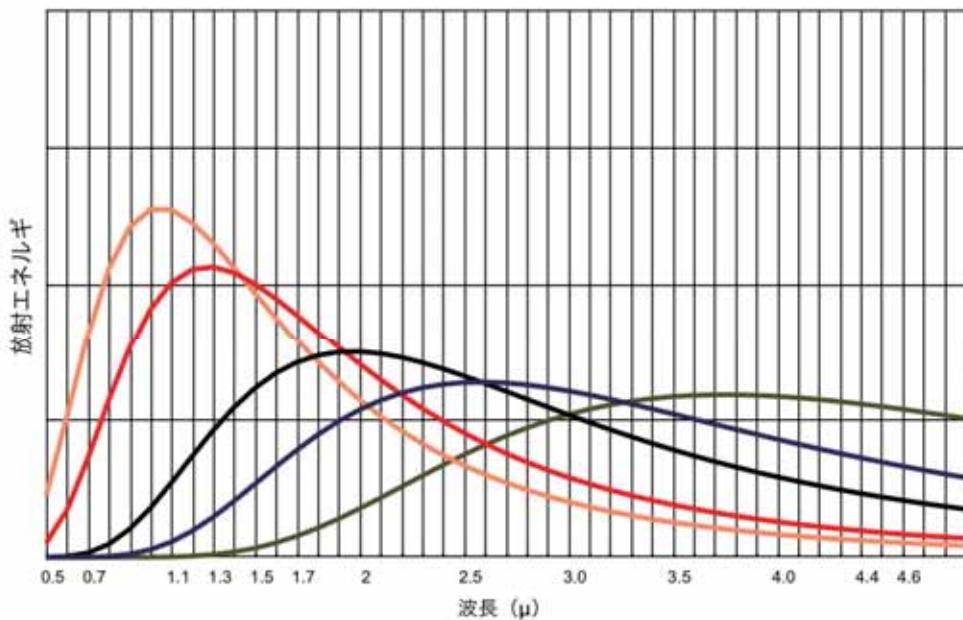


## 6. 赤外線ヒーターの種類と特徴

ヒーターの種類	放射体温度 °C	最大エネルギー波長 $\mu\text{m}$	最大エネルギー密度 KW/m <sup>2</sup>	ON-OFF 速度
遠赤外線	400～500	約 3.0	約 25	10 分以上
中波長	800～900	約 2.6	約 50	1～2 分
中波長カーボン	1100～1200	約 2.0	約 100	2～3 秒
近赤外線	2000～2200	約 1.2	約 150	1～2 秒

- 粉体塗料は波長  $2.5\mu\text{m}$  付近に高い吸収率がある
- 遠赤外線ヒーターは温度、エネルギー密度が低く、また立ち上がり時間が長く、粉体塗料の加熱炉としてはメリットが小さく、中波長以上の赤外線ヒーターの選定する必要がある。

赤外線ヒーター：波長比較グラフ



### 「中波長赤外線ヒーター」

放射体温度も比較的高く、エネルギー密度も高く、また寿命が 20,000～30,000 時間と長く、粉体塗料の赤外線炉の約 80 %は本ヒーターが採用されている。

### 「中波長カーボンヒーター」

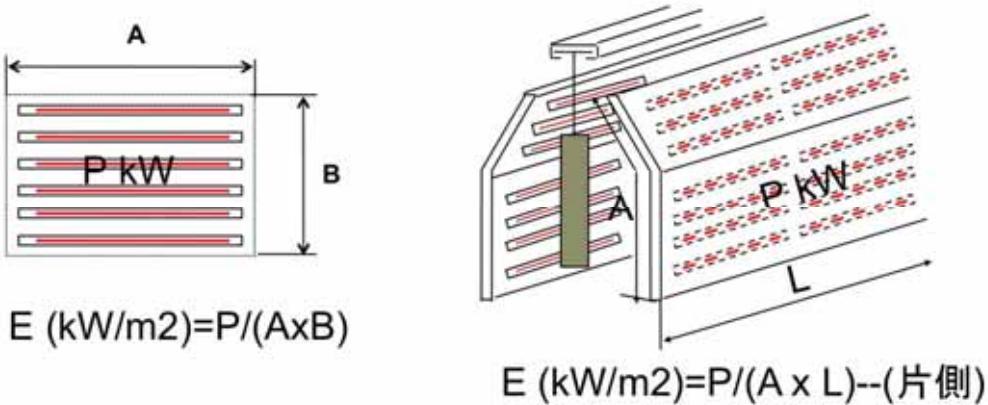
最大エネルギー波長が約  $2.0 \mu\text{m}$  で、中波長の特性を持ち、エネルギー密度が高く、ON-OFF 速度が数秒と速い。重いワークの昇温に適している。

### 「近赤外線ヒーター」

エネルギー密度が高く、重いワーク、また PCMなど速いスピードの昇温に適しており、中波長赤外線ゾーンの前に設置し、ブースターとした例がある。

## 6. 赤外線炉のエネルギー密度の考え方

炉内のある面積（バンク）に取り付けられた赤外線ヒーターの全出力（KW）を、バンクの面積（m<sup>2</sup>）で割った値、つまりバンクの単位面積当たりの赤外線ヒーター出力をエネルギー密度（KW/m<sup>2</sup>）として、試験、設計した方が評価に便利である。



## おわりに

製造工程には、一ヵ所または、数サイクルの加熱プロセスがあることが多い。最新鋭の設備も加熱、乾燥工程が生産のブレーキになって例が多い。エネルギーの質の高い、中波長レベル以上の赤外線加熱の導入で予想以上の生産効率の改善できる。生産性向上、品質向上、省スペースなど、積極的な省エネが可能である。

## 参考文献

塗装技術 2007.8 齋藤正明  
技術資料 : Heraeus Noblelight GmbH