

特集 産業電化が拓く省エネ・低炭素社会

塗装乾燥熱源への赤外線加熱導入による生産性およびエネルギー効率向上

Improvement of Productivity and Energy Efficiency by Introducing Infrared Heating to the Paint Drying Heat Source

坂口 勝俊*
Katsutoshi Sakaguchi

1. はじめに

本取り組みは、建設機械部品の粉体塗装後の「焼付乾燥工程」において、従来の熱風炉方式に「赤外線加熱」を新たに追加した「ハイブリッド方式」とすることで、大きな省エネと生産性の向上を実現した事例である。

国内では、どんな形状でも昇温・温度キープが可能な「熱風炉」が標準的に採用されており、どの塗料メーカーも熱風仕様での乾燥条件を推奨している。しかし、熱風は製品の昇温に多くの時間を要するため、必然的に炉が長くなりガスの消費が多くなることが課題だった。

そこで、(株)小松電業所では“塗装乾燥＝熱風乾燥”といった半世紀以上にも亘る既成概念を払拭し、また、塗料メーカーの推奨する乾燥条件に捉われることなく、乾燥時間の短縮による省エネと品質保証の両立を実現する「ハイブリッド乾燥方式」(以降、導入設備を「ハイブリッド炉」と称する)を導入した。さらに設備導入後は、赤外線の最適な照射方法を製品別に実証を繰り返してパターン化した他、炉内後半の設定温度を上げることで、ラインスピードが大幅に速くなるなど、運用改善を通じた省エネ等も追求した。その結果、生産性が向上するとともにエネルギー消費を従来の熱風単一方式よりも58% (426kl/年)を削減した。

2. (株)小松電業所の会社概要

小松電業所は1948年に創業して以来、建設機械のエンジンフードやサイドカバーといった外装部品、運転席ユニット、燃料・作動油タンクならびに各種産業機械部品の制御盤に至るまで、板金・プレス・溶接・塗装・組立までの工程を当社が一貫して生産している。国内では石川県小松市に3工場と栃木県小山市に1工場、さらには海外(中国)には4工場を有する。

本事例が採用された本社工場は、中枢機能を有する工場として全製品を取り扱っており、全社の生産計画や中長期

に亘る設備導入計画を立案・決定している。また、年間のエネルギー消費量は原油換算で1,601kl/年であり、第二種エネルギー管理指定工場に該当する。

3. 本取り組みに至る背景

昨今の建設機械業界では、機械性能やサービスの充実に加えて、自動車並みの外観品質が求められている。自動車との大きな違いは、高い防錆性が求められる点である。そこで、雨風に晒される外装部品には“2度塗り(下塗り・上塗り)”を行う。下塗りに電着塗装、上塗りには塗装膜厚が厚い粉体塗料を用いることが多い。また、近年は大型化や厚板化が進んだことで、焼付時間の延長が必要となり、自社工場ラインで塗装出来ないケースもある。

こうした中、世界的な建機需要の高まりを背景に、生産量を年々増加させる必要があった。特に、上塗り塗装は外観品質に直結し、万が一、不具合が出た場合はその修復に多大な工数を要するため、生産性に大きな影響を及ぼす工程である。加えて、粉体塗装は溶剤塗装に比べて焼付温度が高い上、部品の大型化や厚板化の影響を受け、焼付乾燥能力が塗装ラインの生産性を左右するようになっていた。このように、同ラインの改革が求められる中、その熱源である“熱風加熱”は、省エネ性や生産性という面においてはこの半世紀以上にも亘って全く変革を起こしていない。この理由は、「しがらみ」や既成概念に因るものであり、全く新しい発想とリスクを背負いながら抜本的なプロセス改善に挑戦していく必要があった。

4. 粉体塗装乾燥ラインが抱える課題

4.1 粉体塗装乾燥に熱風炉を使用してきた理由

熱風炉を使用してきたのは、塗料メーカーが熱風仕様の乾燥条件を推奨しているためである。これは、ワークの大小や形状に依らず、どんなワークでも同一炉で様に昇温・温度キープ出来ることを受けたもので、ある意味、合理的と言える。具体的な推奨条件としては、塗料の種類に応じて“塗膜を180℃で15分間キープ”と示されている。なお、推奨条件外の乾燥は、品質保証外となるため、自社責任の

*一般社団法人日本エレクトロヒートセンター 業務部 課長
〒103-0011 東京都中央区日本橋大伝馬町13-7
(現 四国電力株式会社)

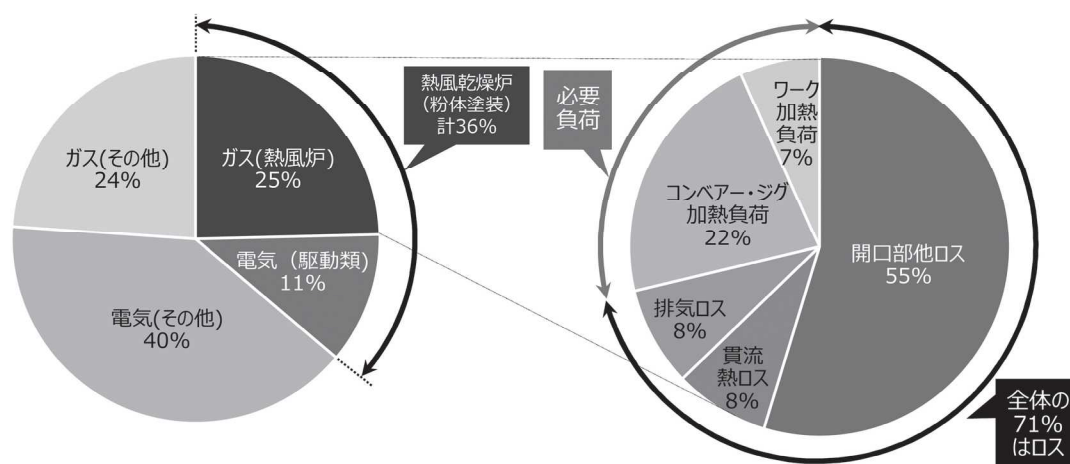


図1 工場全体に占める熱風炉のエネルギー比率 (左) と熱風炉ガスのエネルギー消費内訳 (右)

下で行う必要がある。このような背景の下、当初は従来の熱風炉をそのまま最新式に更新することを考えたものの、次に示す二つの課題を受け、品質への影響を懸念しつつも全く新しい乾燥方法を模索する必要があった。

4.2 エネルギー効率の悪い熱風炉 (課題①)

(株)エスジー (今回のハイブリッド炉を設計・施工したエンジニアリング会社) による支援の下、従来の熱風炉のエネルギー収支を調査した。年間のエネルギー消費 1,119kL (原油換算・炉更新の前年度) の内、当該炉の消費を 36% と推定した。さらにガス負荷も調査したところ、真に必要な負荷はワークやコンペアー・ジグを常温から 170℃弱まで昇温する負荷であり、全体の 29% を占め、残り 71% がロスであった (図 1 参照)。これは、炉の出入り口や隙間からの熱風漏洩や、炉壁や循環用の熱風ダクトの劣化した断熱材からの放熱が原因であった。以上のように、熱風炉は熱ロスが多く、抜本的な省エネ改革が必要であった。

4.3 熱風炉が抱える製造上のリスク (課題②)

ワークの昇温・温度キープに用いる熱風加熱 (180℃・風速 1.5m/s 程度) は、伝導・放射と比較し、伝熱速度で劣る対流熱伝達により被塗物を加熱するため、最大約 500kg ものワークを 20℃ から約 180℃ にまで昇温するのに 45 分程度も要していた。熱風温度を 500℃ や 1,000℃ にすれば昇温スピードを速く出来るが、それでは塗膜の硬化に悪影響を与えてしまう。これは、熱風は塗膜の表面をまずは対流にて加熱し、その後、塗膜内部は伝導により伝熱されることから、塗膜表面を急速加熱するとピンホール (塗膜不良) を招く恐れがあるためである。従って、メーカー推奨温度に近い熱風温度で昇温する必要があり、炉長がどうしても長くなってしまふ。こうした背景から、工場 1 階スペースにおける乾燥炉占有を避け、炉の大半は 2 階に配置していた。2 階の温度キープでは 50 メートル超もの熱風炉が必要となり、ライン形状を直線で納めることは難しいことから、コンペアーにカーブや U ターンを付けていた。

以上により、カーブやアップダウンが発生することで、ワークが脱落する危険性があったり、コンペアーのベアリングから油が落ちたりする可能性が高まる。万が一、ワークに油や金属粉が付着した場合は塗装不良となり、問題のある箇所の塗膜を溶剤などで一旦剥がして再塗装する必要がある。そのため、再塗装を要しない通常の塗装と比較し、再塗装は 5 ~ 10 倍以上のコストとエネルギーを要すると一般的に言われている。

以上を受け、アップダウン廃止のために乾燥炉を工場 1 階で完結する必要があること、さらには乾燥炉の直線化を図るためには既設工場のスペースの制約上、炉長を約 4 割も短縮する必要があった。そこで、粉体塗装の乾燥ラインの更新においては、炉長およびエネルギー使用量の約 4 割削減を目指すチャレンジングな目標とした。

5. 設備導入前の検討

5.1 業者選定に向けて

2013 年 1 月、老朽化した粉体塗装ラインの更新検討を開始し、同年 6 月にエスジー等 3 社 [①塗料メーカーの子会社 (既存ライン納入)、②LPG を供給していたガス会社の子会社、③エスジー] に相談した。

製造業では QCD (Quality, Cost, Delivery) が重視されている中、今回の粉体塗装ライン更新では技術面の優劣、価格面の多寡、および納期対応が論点となる。しかし、今回は QCD に基づく業者選定の前に解決すべき問題が二点あった。

一点目は『取引上のしがらみ』である。過去、塗料メーカーの子会社に塗装ラインの設計、製作およびメンテナンスを依頼していたことから、製造現場や設備部門との繋がりが強く、他メーカーに発注することを躊躇う雰囲気があった。なお、熱風乾燥を推奨する塗料メーカーに紐づくその子会社は、当然、熱風炉を推奨すると予想された。

二つ目は『新しい技術や知識を学ぼうとせず、リスクを

避けることに終始する姿勢』である。エスジーが提案するハイブリッド炉では、昇温後の温度キープ時間が極めて短く、塗料メーカーが推奨（品質保証）する焼付条件*に入ることにはなかった。これを受け、焼付可否を確認せずに反対する意見が社内の一部にあった一方、実証試験による各種データに基づく合理的な判断の必要性や、時にはリスクを取りながら技術的なブレイクスルーを目指すべきとの意見もあった。侃々諤々と議論を交わし、生産性と省エネ性の抜本的改善に向け、まさに社運を賭けた議論を重ねた。

3社から出揃った一次提案資料では、設備価格面では大差が無い一方、炉長と炉内滞在時間についてはエスジー案が他社よりも25%短い結果となった。細部に至る検討を社内で行った結果、塗装ライン全体をエスジー、塗装ブースのみを塗料メーカー子会社へ分離発注することにした。

※塗料メーカーでは、塗膜性能を担保するため、焼付時におけるワークの『推奨キープ温度・時間（熱風乾燥仕様）』を開示している。なお、海外の一部塗料メーカーでは、熱風や赤外線加熱といった加熱種類毎に乾燥条件が提示されているケースもある。

5.2 乾燥炉長と赤外線ヒータの設備能力の選定

大まかな発注先と導入技術が確定したことを受け、小松電業所が扱う部品での焼付可否の確認や、実際の炉長と赤外線ヒータの設備能力を検討する必要があった。そこで、茨城県にあるエスジーの実験室において、焼付条件出しのテストを実施した。テストでは被塗物に温度センサを取付け、昇温テストを繰り返すことで、急速加熱が塗膜品質に与える影響を確認した。しかし前述の通り、ハイブリッド炉の焼付時間は、熱風炉での焼付を前提とした塗料メーカーの推奨焼付条件に比べて圧倒的に短く、品質への影響は不

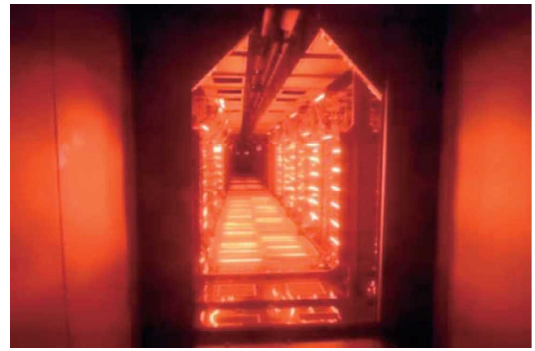


図2 乾燥炉内（赤外線全て照射時）

明であった。また、熱風炉では熱風温度と焼付時間の2条件を調整するだけのテストで済むが、ハイブリッド炉では熱風温度と焼付時間に加え、赤外線出力も含めた計3条件をそれぞれ調整しながら、多種多様な大きさ・板厚の部品を対象に焼付条件を探す必要があった。そのため、様々な板厚でのテストピースを用いた塗装テスト後、最も焼付が難しいと予想される部品に絞って追加のテストを行い、炉長と赤外線ヒータの設計能力を決めることに集中した。結果、計464kW（220本）の設備容量を有する赤外線ヒータを設置し、乾燥炉長は52mから32mへと短縮された。

6. 設備導入後の検討（運用改善）

6.1 最適な赤外線照射方法の確立

実験室ではなく更新後の実炉での加熱試験を2014年9月から年末にかけて何度も繰り返した。赤外線加熱の特徴として、赤外線ヒータに近い場所や、板厚の薄い場所では温度が上がりやすい点が挙げられる。そのため、赤外線の出力を上げすぎると薄板箇所がオーバーベイクとなり、変色するリスクが高くなる他、“塗装ワキ”などの品質不具合

表1 課題とその解決策一覧

I. 赤外線とワークの距離	①	課題	同種類のワークでも、コンペアーへの吊り方が変われば、上下・左右の赤外線ヒータとの距離が変化し、一様な加熱が出来ない。
		解決策	極力、ワークが乾燥炉内の中心部を通るようにハンガーに吊るすこととした。
	②	課題	ワークの形状が上下方向に長いものは、床面の赤外線ヒータとの距離が近くなり、加熱されやすくなる。
		解決策	床面の赤外線ヒータについては、他の部位のヒータよりもタイミングを後にずらして床面から照射した。
II. ワークの板厚（熱容量）	①	課題	一日で300品種以上のワークを取り扱っており、赤外線の照射位置や出力をワーク毎に毎回変更することは困難である。
		解決策	薄物および厚物の二つにグルーピングした。（薄物：板厚1.6mm～3.2mm、厚物：4.5mm以上）
	②	課題	板薄で熱容量の小さいワークは、急激な温度上昇によりオーバーベイクや塗装ワキといった不具合の発生が懸念された。
		解決策	板厚が特に厚いものを除き、炉に入った直後では照射しないこととした。
	③	課題	厚物ワーク深部は、表面からの熱伝導で昇温されるが、深部よりも先に表面温度が高くなり過ぎてしまう。
		解決策	炉の中盤付近では一旦照射を停止させ、温度上昇を抑えるとともに、熱伝導を通じた温度分布の平準化を促進させ、炉の後半で再び照射させることで一様に昇温させた。
III. 赤外線独自の特性	①	課題	塗装する色によって、赤外線の吸収特性が異なる。
		解決策	塗装色および板厚に応じ、計7パターン（薄物：4パターン、厚物：3パターン）で合計30回以上のテストを実施した。
	②	課題	ワークの形状により、赤外線が当たらない陰が発生してしまい、同箇所では昇温スピードが遅くなってしまふ。
		解決策	まずは、光が当たる箇所を昇温した後、陰となる箇所にはワーク内を熱伝導させることで昇温させることとした。そこで、炉序盤で可能な限り急速に加熱し、炉中盤以降で熱伝導により加熱・昇温させることとした。

の原因となる。一方、出力が低ければ焼付が出来ない。そこで、実際の製品をテストピース（特に複雑な形状を採用）として数種類製作し、テスト後の焼付状況を目視することで品質チェックした。最終的には板厚別・色別に7条件を設定し、実ラインでの赤外線出力と熱風温度の条件出しを終え、2014年12月末には本格稼働にこぎつけることができた。検討時における課題および解決策等を表1に示す。

今回の焼付乾燥時間は、メーカーの推奨時間よりも極めて短く、品質への影響が懸念された。しかし、結果としては問題無かった。熱風乾燥では、昇温速度が遅いと塗膜の熔融と硬化が部分的に発生してしまうリスクがあるが、赤外線加熱を用いることで塗膜が一様かつ瞬時に熔融し、その後硬化するためである。

また、今回の取組みでは板厚に関わらずコンベアスピードを同一にしている。一般的に、多くの熱風炉では薄物に比べて厚物は加熱負荷が大きくなるため、厚物乾燥時は同スピードを遅くすることで炉内滞在時間を長くしている。一方、赤外線ヒータは電流値を管理すれば出力状況の把握が可能であり、さらに出力変更後は短時間で設定値に達するという特徴がある。そこで本炉では、薄物から厚物に切り替わる際、ワークが炉に入る3m程度手前の時点で電流値を増加させるだけの対応で済み、現場作業員の余分な手間を掛けない点も特徴である。



図3 乾燥炉から出るワーク（二重扉となっており炉内の熱風流出や異物混入を防いでいる）

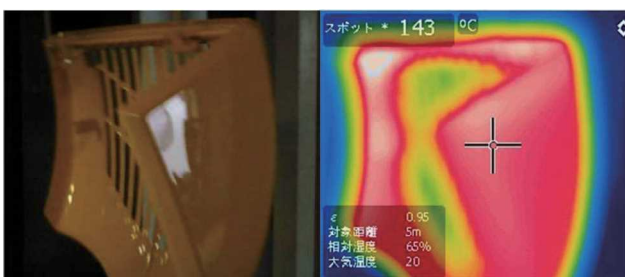


図4 乾燥後のワーク
(炉から出て時間が経過したため、若干温度が低下)

6.2 生産スピードの更なる向上を目指した検討

2018年1月、焼付時間の短縮を目指し、赤外線ヒータ

の照射数および出力増加の他、炉内の前半および後半の設定温度を上げることにについて、幾つかの仮説を立てて検証し、6回程度テストを繰り返した。結果、赤外線ヒータの照射位置や出力は変更せず、炉内温度（後半のみ）を170℃→180℃→190℃と順次上げることで、エネルギー増大を抑制しながら品質確保とスピード向上の両立を目指した。結果、乾燥時間はハイブリッド炉導入当初の30分から25分、22分と段階的に短縮された（従来の熱風乾燥炉は60分であった）。

<主な検討内容>

- ①熱風仕様であるメーカー推奨の焼付条件を参考としつつも、これに囚われることなく、塗膜の外観や色差等をチェックしながら、試験を実施した。
- ②実炉での試験の結果、赤外線ヒータからの照射が無くなる炉の終盤部において、ワークの温度低下が実測により確認されたので、後半の炉内設定温度を上げることにした。
- ③ヒータ出力の増加を検討したが、ワーク内の一部にはどうしても温度が極端に高くなる箇所が発生してしまい、品質不良を招くリスクが高いことから、採用を見送った。
- ④炉の後半温度については、190℃よりさらに高くして、ラインスピードを速くしようと試みたが、やはりワーク内の一部温度が高くなってしまったため、断念した。
- ⑤炉内前半の温度を高くすることも検討したが、赤外線加熱で温度が高くなっている個所を、さらに昇温することに繋がり、断念した。

7. 電力デマンド高騰の回避

赤外線ヒータが熱源に加わったことで、電力デマンド(30分間の平均電力)の上昇による、契約電力の高騰、さらには電気基本料金の増大が懸念された。その対策として、消費電力が小さくて済む薄物は工場の昼間に流し、大きな出力を要する厚物は夜間に流すといった運用方法を取り入れた(図5参照)。

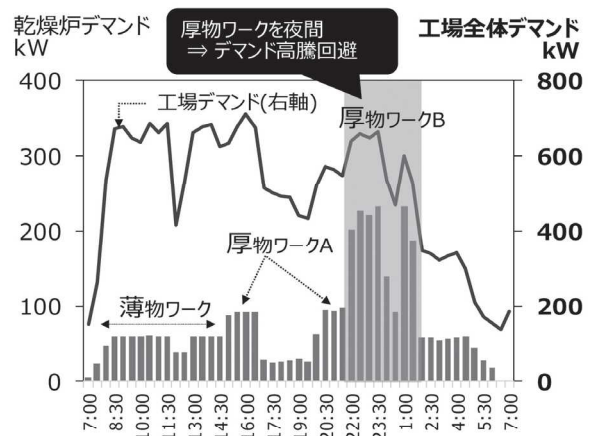


図5 乾燥炉と工場の電力デマンド推移
(2020年3月5日~6日)

8. 乾燥炉の熱負荷について

ハイブリッド炉への更新により、熱風よりも加熱能力(エネルギー密度)の優れた赤外線加熱を活用したことで、炉長および炉容積はコンパクトになり、炉内を高温に維持するための循環風量および熱負荷は約半減した。一方、コンベアーのスピードは熱風炉の時と比較し、ハイブリッド炉導入当初で1.2倍、現在で1.5倍に速くなったことにより、単位時間当たりの処理ワーク数やコンベアー・ジグの炉内通過量が増えたことに伴い、必要加熱負荷は増大している(図6参照)。

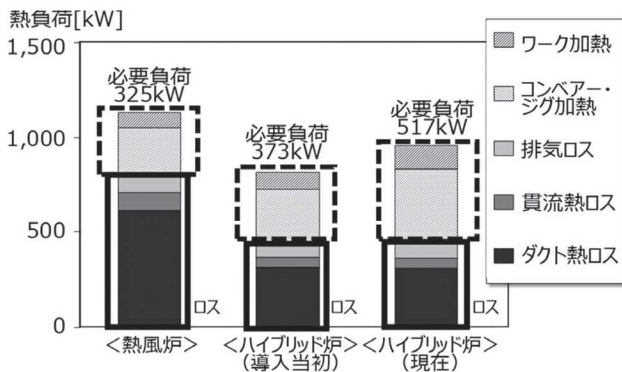


図6 各乾燥炉の熱負荷内訳

9. 省エネルギーの達成状況

従来の熱風炉が抱えていた製造上のリスクが無くなっただけでも十分な効果があったといえるが、ハイブリッド炉に更新したことで、本件はエネルギー効率も併せて向上している。さらに、現在は赤外線の照射位置・強度をワークごとに独自開発したことにより、ハイブリッド炉の導入当初と比較し、運用改善を通じた更なる省エネも実現した。

以降に、従来の熱風炉、ハイブリッド炉(導入当初と現状)におけるエネルギー使用量について説明する。

9.1 熱風炉

年間エネルギー使用量は、737kL(原油換算)と推定した。52mもの長い炉内を高温でキープするため、多くのガスを消費しており、乾燥工程全体のエネルギーの8割を占めている。また、ガス以外にも、バーナーおよび循環・排気ファンで電力を消費している。

9.2 ハイブリッド炉(導入当初)

年間のエネルギー使用量は、445kL(同)となり40%削減と推定された。なお、コンベアースピードが熱風炉に比べて1.2倍に速くなったことで、単位時間当たりの処理ワーク数が増えた。これにより、ジグ当たりのエネルギー消費

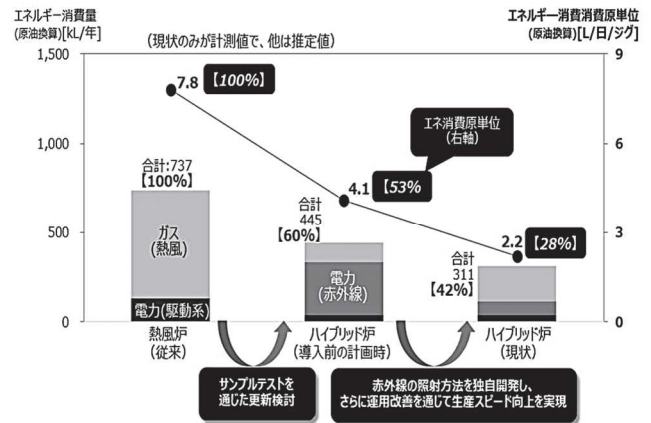


図7 塗装乾燥工程の年間エネルギー使用量とジグ当たりのエネルギー原単位の比較

原単位は47%減となり、エネルギー使用量の削減率を上回る原単位削減(改善)が図られたと推定している。

9.3 ハイブリッド炉(現在)

年間のエネルギー使用量は、331kL(同)となり、従来の熱風炉と比較すると、年間426kL(同)の削減(▲58%)となった。一方、コンベアースピードは薄物・厚物に関わらず、熱風炉の時と比較して1.5倍近く速く出来たことから、ジグ当たりのエネルギー消費原単位は72%減となった。また、本案件の投資金額をランニングコスト削減額で割った単純な投資回収年は6.8年であった。

10. 最後に

今回の熱風乾燥における省エネ事例については、塗装乾燥プロセスに限った話ではない。国内の多くの食品・化学他の工場では、直火あるいはスチームを熱源とした熱風により乾燥を行っている。乾燥プロセスでは、製品中から発生する水分を系外に排出するため、装置内で内気循環している熱風比率は小さく、多くが熱風をワンパスとして使用しているケースが多い。このように“エネルギーの使い捨て”の比率が高いと言える乾燥工程においては、熱風使用量を削減出来る赤外線加熱は、非常に省エネポテンシャルが高いと言える。加えて、熱風よりもエネルギー密度を高く出来る赤外線加熱は、生産スピードの向上や装置のコンパクト化など、省エネ以外の副次的効果もあり、他業種も含めて新たな活用先の広がりが見込まれる。

(備考) 本案件は、令和2年度省エネ大賞(主催:一般財団法人省エネルギーセンター、後援:経済産業省)の省エネ事例部門において、「資源エネルギー庁長官賞」を受賞した。