

---

# 乾燥シミュレーションによる乾燥エネルギー予測とCO<sub>2</sub>削減

## Estimation of Drying Energy Consumption and CO<sub>2</sub> Reduction

---

杉山 邦利\*

Kunitoshi SUGIYAMA

小堀 英之\*

Hideyuki KOBORI

---

### 要 旨

---

塗布製品の乾燥工程は大量のエネルギーを消費し、CO<sub>2</sub>を排出している。生産工程のCO<sub>2</sub>排出を削減し、将来的に脱炭素を目指すには、まず、対象工程の高効率化を第一優先とし、そのち再生可能エネルギーへの転換を目指す構想である。乾燥工程においては、塗膜欠陥の回避や品質上の問題から、乾燥の進行にあわせて乾燥強度の調整が必要となる制約もある。制約をクリアした上で、効率的な乾燥条件検討ができるように、乾燥条件と乾燥挙動、及びエネルギー消費を関連付けてシミュレーションを行った。計算結果は生産機の実測とよく一致した。これを用い、効率的な乾燥条件を検討し展開した例を報告する。さらに、脱炭素化に向けたエネルギー転換の乾燥への影響についても考察を加えた。

### ABSTRACT

---

The drying process of coated products consumes a large amount of energy and emits CO<sub>2</sub>. To reduce CO<sub>2</sub> emissions in the production process and ultimately aim for decarbonization, the primary focus must be on improving the efficiency of the target process, followed by a transition to renewable energy sources. In the drying process, there are constraints that require adjusting the drying intensity to avoid coating defects and maintain product quality. To enable efficient drying while satisfying these constraints, simulations were conducted that correlate drying conditions, drying behavior, and energy consumption. The simulation results showed good agreement with actual measurements obtained from production equipment. This paper reports an example of how the simulation was used to examine and implement efficient drying conditions. Furthermore, the impact of energy transition on the drying process in the context of decarbonization is also discussed.

---

\* RIS BU サーマルメディア事業部 グローバル生産技術開発室  
Thermal Media Business Center, Global Production Development Department

---

# 1. 背景・目的

---

## 1-1 背景

環境省によれば、日本のCO<sub>2</sub>排出の1/3が産業部門から排出され、その約60%が熱の利用に由来する<sup>1)</sup>。カーボンニュートラルを実現していくためには、ものづくりにおける熱利用のCO<sub>2</sub>排出削減が重要である。感熱紙生産においても葉液を塗布したのちの乾燥工程で熱を消費し、CO<sub>2</sub>を排出している。

リコーの感熱紙生産工程では、工程全体のCO<sub>2</sub>排出量の凡そ半分が乾燥工程の熱に由来している。脱炭素生産への転換のため、エネルギーを電化することは技術的には容易でも、課題もある。電力と化石エネルギーのエネルギー当たりの単価を比較すると、電力の単価は化石エネルギー（液化天然ガス：LNG）の3～4倍<sup>2,3)</sup>であり、このエネルギー費用増加を許容することは大きな負担となる。さらに、エネルギー量が他の工程に比して膨大であることから、工場インフラの再構築にまで影響する改造が必要となる。

このようなことから、大規模な塗布乾燥工程の脱炭素化は実際問題として、経済合理性とのバランスを取り進めていくことが現時点では難しい。

熱の脱炭素化においては、脱化石燃料であるバイオマス、水素やそこから合成されるアンモニアや合成メタン（E-methane）などに転換していく方法がある。木質チップなどのバイオマス燃料は、現時点でも、燃料調達に対する地域的なマッチング性や、熱需要の対象プロセスが適合すれば、経済合理性が成り立つ例も多い<sup>4)</sup>が、これらの条件が当てはまる範囲は限定される。

一方、水素、アンモニア、E-methaneについては、世界的な取り組みが進められている。日本においても、2050年のカーボンニュートラル実現の重要施策として経済産業省が水素基本戦略<sup>5)</sup>を公表し、技術開発と社会実装へ向けた取り組みを進めている。しかしながら、戦略の中で設定されている価格や供給

量から考えると、安価な水素やアンモニアが安定的に供給されるのは2040年から2050年頃と考えられる。

COP28でも、脱炭素に向けた第一プライオリティとしてエネルギー効率の改善が挙げられており<sup>6)</sup>、効率化を最大限進めておくことが重要である。具体的には、乾燥負荷の低減や、乾燥装置の効率向上などを通じて、CO<sub>2</sub>削減を進めておくことが重要である。

## 1-2 目的

塗布製品の乾燥には、塗膜欠陥の回避や品質上の問題から、塗膜温度の上限、塗膜濃縮の速度を抑制するなどの制約があり、生産速度の律速となる場合がある。感熱紙の場合には、製品の温度を一定温度以下に保ったまま乾燥する必要があるほか、カールコントロール、塗膜欠陥回避などの目的で、乾燥強度（温度や風速）を調整する必要がある。このような制約を守った上で、より消費熱量の少ない生産を達成しなければならない。

その解決手段として、これまでも乾燥シミュレーションを生産機の条件予測のために活用してきたが、その目的は、おおよその装置設計からはじまり、より発展し、ドライヤー内で発生する乾燥欠陥などのメカニズム解明や欠陥回避条件の検討<sup>7,8)</sup>に活用しており、品質達成条件の生産機での再現といったものが多かった。

本報告では、製品品質の生産機での再現だけでなく、エネルギー視点で統合的に扱えるシミュレーション技術の確立を目的とする。

## 2. 対象製品及びその生産工程とシミュレーションの概要

### 2-1 対象製品と生産工程の概要

#### 2-1-1 製品の構成と特徴

Fig. 1に、感熱紙の写真を示す。感熱紙は食品、物流品など、個別の物品に貼り付けられる媒体として広く用いられている。食品であれば、価格、内容物の情報、管理情報などを含む文字やバーコードが印字される。



Fig. 1 Examples of thermal media products.

Fig. 2に感熱紙の断面構成を示す。感熱紙は基材の表裏に複数層の塗膜が設けられており、塗布と乾燥の工程を繰り返して生産される。各々の層は、水系の微粒子分散液が塗布されて乾燥してできた層であり、乾燥前の膜厚が $10\mu\text{m}$ 前後、乾燥後は数 $\mu\text{m}$ と比較的薄い。基材は紙とフィルムがあり、いずれも $60\mu\text{m}$ 程度の厚みの製品が一般的である。紙が一般的であるが、フィルムは被着体の商品自体が水濡れなどの負荷を受ける冷凍商品などの用途に供されている。

乾燥現象における両者の違いは、基材への水分の浸透性である。基材に対して塗布した面を表面とした場合、紙であれば塗布液水分が基材に浸透し、塗布面の裏面からも水分が蒸発する。一方、フィルムでは、水分蒸発は表面のみからになる。蒸発面が片

面となるフィルム基材では、紙よりも効率的な乾燥が難しくなり、生産速度も若干低下することがある。ただし、紙基材であっても、塗布層を積層するにしたがい塗布液の浸透性は低下し、裏面からの水分蒸発も弱くなる。

このような、基材の性質により異なる乾燥現象をシミュレーション予測するにあたっては、基材がフィルムであれば既報<sup>9)</sup>と同様な方法を適用できるが、紙基材の場合には、浸透性と裏面からの蒸発に対する考慮が必要となる。

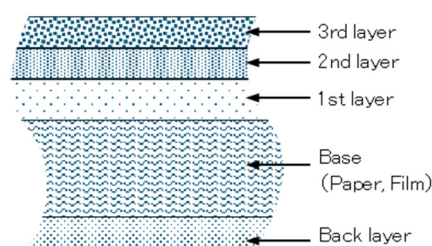


Fig. 2 Cross sectional diagram of thermal media.

#### 2-1-2 塗布機のドライヤー部の構成と機能

塗布製品の乾燥方法には、温風乾燥、赤外線乾燥、ヒートロール等の方式がある。これらの複数方式を組み合わせて使用する場合もあるが、温風乾燥が主たる乾燥手段として広く利用されている<sup>10)</sup>。Fig. 3に塗布機の温風ドライヤー部の基本的な構成を示す。Fig. 3の形式は単層塗布機であり、アンワインダーから繰り出された基材は塗布部にて1回塗布され、ドライヤーで乾燥後にワインダーにて巻き取られる。Fig. 2で示したような多層で構成される製品は、アンワインダーから繰り出された基材がワインダーで巻き取られるまでに、複数回の塗布と乾燥を受ける多層塗布機にて生産される場合もある。このような塗布機は塗布部とドライヤー部の組み合わせが、塗布層の数だけ連続して構成される。

温風ドライヤーにおいては、ノズルから温度調整された温風を被乾燥物に衝突させることで、伝熱と蒸発面からの水分除去（物質移動）を促進している。乾燥はそれぞれ単独に制御できる複数のゾーンに分

割され、乾燥の進行に合わせて各ゾーンの温度や風速条件などを調整して設定される。

量産機においては、各々のゾーンは基材の走行方向に対し数メートルの長さを有しており、単層の塗布と乾燥を行う工程だけでも、数十メートルになる大規模な装置となる。

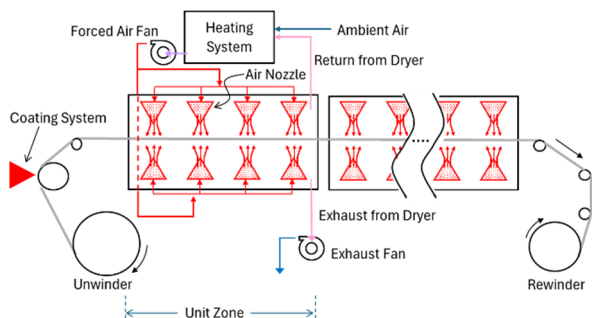


Fig. 3 Schematic diagram of drying equipment.

ドライヤーノズルから供給された温風は基材表面に衝突し、熱・物質移動によって温度・湿度が変化し、一部はドライヤー外へ排気され、残りは循環流となる。循環流は外部から取り入れた空気と共に加熱手段により温度調節され、再びノズルに供給される。このような方式を循環方式という。加熱手段には蒸気などの熱媒を用いた熱交換方式と、LNG等を燃焼させる直燃方式がある。両方式には各々、長所と短所があるが、熱効率の視点からは一般に後者が優れ、現在では直燃方式が主流になっている<sup>1)</sup>。

## 2-2 乾燥挙動とエネルギーのシミュレーション

本報告では、乾燥方式としては温風乾燥を、温風の加熱手段としては熱交換方式と直燃方式の両者を対象として乾燥挙動とエネルギーのシミュレーションを実施した。

Fig. 4に本報告の乾燥シミュレーションの概要構成を示した。このブロックダイアグラムはFig. 3に示した単一ゾーンごとの計算である。実際に複数ゾーンで構成される乾燥工程では、この計算をゾーン数分つなげて、乾燥工程全体のシミュレーションを行っている。

各ブロックで行っている計算について説明する。

### 2-2-1 水系乾燥過程の特徴とモデル化

本項ではFig. 4におけるCalculation of Dryingに関する乾燥モデルと基礎式を説明する。

乾燥の基礎式は、新規なものではなく、既報<sup>9)</sup>でも紹介されているため、これと重複する部分の説明は簡便に特徴を記し、浸透性のある紙基材に対応した新規な部分について詳細に説明する。

- ①塗布膜及び基材内部の温度分布及び水分分布は考慮しない。
- ②蒸発表面における湿度は、水の蒸気圧に活量係数を乗じて求める。活量係数は、塗膜の主成分である水-高分子2成分系のフローリーハギンス式から求めた。
- ③乾燥の一般的な取り扱いである定率乾燥、減率乾燥期間に対応する水分蒸発抵抗に対し、既報<sup>9)</sup>と同様に乾燥速度補正曲線を導入した。乾燥速度補正曲線は、主として被乾燥物の塗布液組成、塗布量及び、基材の性質などにより異なる乾燥特性を反映するものとして、フィッティングパラメータとして扱った。
- ④紙のような水分透過性のある基材への塗布の場合、紙と塗膜は一体とし、全体の乾量に対する水分量を含水率とし、上記③のモデル化を行った。
- ⑤紙のような水分透過性のある基材への塗布の場合、裏面からの水分蒸発性を反映するよう考慮した。

上記①②は、既報<sup>9)</sup>と同様である。上記③④及び⑤は、基材が紙であることに伴って対応した内容である。③については以下(1)で既報<sup>9)</sup>から変更した点について、④⑤については、続く(2)で具体的に説明する。

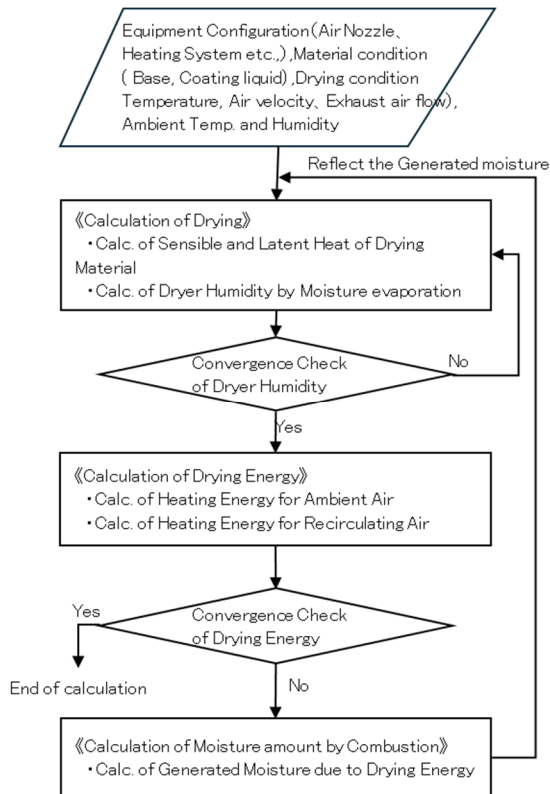


Fig. 4 Block diagram of simulation for drying and energy consumption.

### (1) 乾燥速度補正曲線

乾燥速度補正曲線は、被乾燥物の含水率と乾燥速度との関係を示した曲線である。系の乾燥が進行し、表面蒸発律速から内部拡散律速に移行し始める含水率を限界含水率と定義し、それ以降徐々に低下する乾燥速度の変化を表したものである。

本シミュレーションでは、この乾燥速度補正曲線を表面蒸発律速の乾燥速度を用いて規格化した値 $k_e$ を導入し、Fig. 5のように乾量基準の含水率との関係で与えるようにモデル化した。既報<sup>9)</sup>でも同様の取り扱いをしているが、補正点を1つ加え2つの補正点で与えている点異なる。

この変更は、対象の系が紙であること、及び、感熱紙の乾燥工程としての特徴が影響している。感熱紙の乾燥工程では、製品の温度を比較的低温に保つ制約の中で、目標の残留水分値（凡そ5~7%）を達成しなければならない。この残留水分域での予測精度を向上させるため、低水分域での補正をより細かく

行う必要があり、限界含水率以降を異なる3本の直線で近似し与えるようにした。

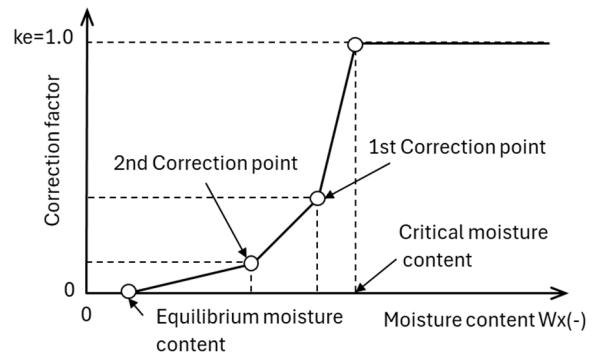


Fig. 5 Correction curve for drying behavior and correction coefficient.

したがって、物質移動基礎式はこの $k_e$ を用いて式(1)のように表される。

$$-\frac{dw_l}{dt} = k_e k_m \rho_A (Y_l - Y_\infty) \quad (1)$$

$w_l$  : 水の付着量 [kg/m<sup>2</sup>]

$t$  : 時間 [s]

$k_m$  : 物質移動係数 [m/s]

$k_e$  : 補正係数 [-]

$\rho_A$  : 空気密度 [kg/m<sup>3</sup>]

$Y_l$  : 水の膜表面湿度 [kg-water/kg-dry-air]

$Y_\infty$  : ノズル出口での成分絶対湿度 [kg-water/kg-dry-air]

乾燥速度補正曲線は、Fig. 2の4つの層各々に対し、既報<sup>9)</sup>と同様な方法で実験機により取得し凡その曲線を求めたのち、生産機における水分量の実測値に基づいて決定した。本報告3章以降の検証においては、塗布液組成、塗布量、乾燥条件が異なる数種の生産品種に対して行っている。しかしながら、乾燥速度補正曲線は生産品種によらず層ごとに、紙系で共通な曲線を1つ、フィルム系で共通な曲線を1つ用いて行った。品種ごとに塗布液組成などが変化しても、共通の乾燥速度補正曲線により適切な予測が可能な理由は、各層の塗布液組成や既設層を含む基材との関係に品種間で大きな差異がないことによると考えられる。

## (2) 浸透性のある基材への対応

紙基材の特徴として、塗布液が紙の内部に浸み込む現象と、塗布面と逆の裏面から水分が蒸発する現象を考慮する必要がある。この現象は、紙基材でも紙の厚さや、すでにある塗布層の水分透過性などにもより変化する。概念とシミュレーションでの取り扱いをFig. 6に示した。

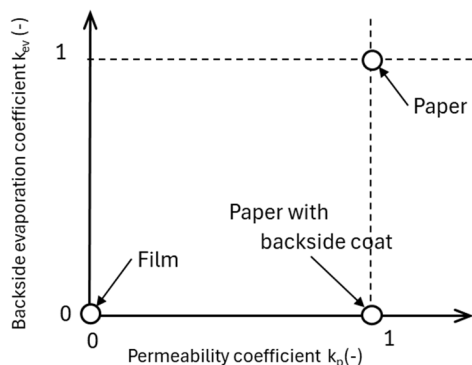


Fig. 6 Conceptual diagram of film drying modeling on a permeable substrate.

シミュレーションの中では、裏面蒸発係数を裏面からの物質移動係数に乗ずる形で反映させた。基材裏面からの物質移動を考慮すると、物質移動基礎式は、式(2)のように表すことができる。

$$-\frac{dw_l}{dt} = k_e(k_{mf} + k_{ev}k_{mb})\rho_A(Y_l - Y_\infty) \quad (2)$$

$k_{mf}$ : 表面物質移動係数 [m/s]

$k_{mb}$ : 裏面物質移動係数 [m/s]

$k_{ev}$ : 裏面蒸発係数 [-]

ただし、 $k_{mf}$ 、 $k_{mb}$ は、既報<sup>9)</sup>と同様にドライヤーノズルによる衝突風の伝熱係数から、Chilton-Colburnのアナロジー式を用いて推算した。

浸み込み係数は、Fig. 5の乾燥速度補正曲線を参照する被乾燥物の含水率計算において、式(3)のように、基材重量を乾量重量に加算する形で反映させた。

$$W_x = \frac{w_l}{w_{base}k_p + w_s} \quad (3)$$

$W_x$ : 含水率 [-]

$w_{base}$ : 基材の絶乾坪量 [kg/m<sup>2</sup>]

$w_s$ : 塗布液中の非揮発成分の付着量 [kg/m<sup>2</sup>]

$k_p$ : 浸み込み係数 [-]

なお、今回の適用の範囲において、裏面蒸発係数はフィルム基材で0、紙基材では塗布層が基材の片面のみの場合は1、基材両面に塗布層が施されると0として実測値を再現できている。また、浸み込み係数は紙基材の場合は1として、フィルム基材の場合は0として計算している。

## 2-2-2 乾燥エネルギーの予測

本項ではFig. 4におけるCalculation of Drying Energyのブロックで行っている計算について説明する。

乾燥に要するエネルギーは、外気から取り入れた空気を乾燥温風の所定温度まで加熱するためのエネルギーと、ドライヤーボックスから戻った温風（循環流）を所定温度まで加熱するエネルギーを計算し、その和を乾燥必要エネルギーとしている。

Fig. 7にドライヤーの個々のゾーンで給排気される空気流量を示した。

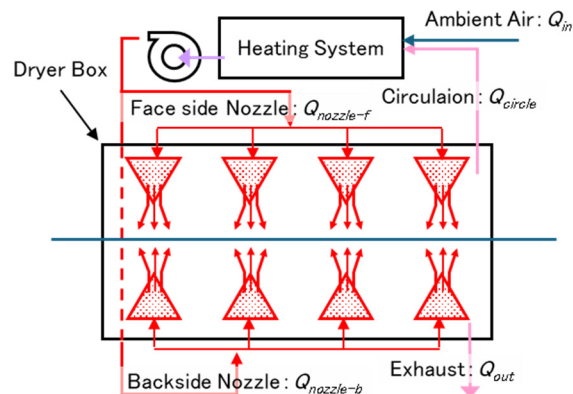


Fig. 7 Air flow rate in each dryer zone.

$Q$ : 気体の質量流量 [kg/s]

$T$ : 温度 [°C]

$H$ : 絶対湿度 [kg-water/kg-dry-air]

添え字 in: 給気

out: 排気

circle: 循環

nozzle-f, nozzle-b: 各々、表裏のノズル

### (1) 外気加熱のためのエネルギー

湿り空気の比熱を $C_H$ とすると、外気を乾燥設定温度まで加熱するための熱量 $E_{in}$ は、

$$E_{in} = C_{H-in} \{ (T_{nozzle-f} - T_{in}) Q_{nozzle-f} + (T_{nozzle-b} - T_{in}) Q_{nozzle-b} \} \frac{Q_{in}}{Q_{nozzle-f} + Q_{nozzle-b}} \quad (4)$$

ただし、 $C_H$ は

$$C_H = C_g + C_v H \quad (5)$$

$C_g$  : 乾き空気の定圧比熱 [J/kg°C]

$C_v$  : 水蒸気の定圧比熱 [J/kg°C]

$E_{in}$  : 外気を乾燥設定温度に加熱するための熱量 [J/s]

## (2) 循環風加熱のためのエネルギー

循環風を加熱するための熱量は、対象となる個別ゾーン内に温風ノズルを通じて供給された加温湿り空気が、乾燥のために熱量が費やされ、温度低下した湿り空気を、所定の乾燥設定温度まで加熱するための熱量である。

乾燥のために費やされた熱量は、蒸発のために費やされた熱量及び、基材と塗布液が温度変化（多くは温度上昇）するために費やされた熱量である。

蒸発に費やされた熱量と、基材と塗布液の温度変化に費やされた熱量は、それぞれ式(6)、(7)で表される。

$$E_{vap} = -H_{vap}(w_{l-out} - w_{l-in})V_{coat}W_{coat} \quad (6)$$

$$E_{Hup} = C_B(T_{layer-out} - T_{layer-in})V_{coat}W_{coat} \quad (7)$$

ここで、

$E_{vap}$  : 水分蒸発に費やされた熱量 [J/s]

$w_{l-in}$  : ゾーン入口の水分付着量 [kg/m<sup>2</sup>]

$w_{l-out}$  : ゾーン出口の水分付着量 [kg/m<sup>2</sup>]

$E_{Hup}$  : 基材及び塗布膜が温度上昇するのに費やされた熱量 [J/s]

$H_{vap}$  : 蒸発潜熱 [J/kg]

$T_{layer-in}$  : ゾーン入口の膜温 [°C]

$T_{layer-out}$  : ゾーン出口の膜温 [°C]

$V_{coat}$  : 塗布速度 [m/s]

$W_{coat}$  : 塗布幅 [m]

$C_B$ は、基材と塗膜の比熱 [J/kg°C] であり、基材と塗膜の合計熱容量を、基材と塗膜の合計質量で割り求めた。

個別ゾーンに供給された湿り空気（全風量）のうち、再加熱されるのは循環流量分だけになる。全風量は、上下ノズルから供給される流量の合計であり、循環風加熱のためのエネルギーは、式(8)のように表すことができる。

$$E_{circle} = (E_{vap} + E_{Hup}) \frac{Q_{circle}}{Q_{nozzle-f} + Q_{nozzle-b}} \quad (8)$$

循環流量 $Q_{circle}$ を直接計測できる場合はその値を用いればよいが、シミュレーションでは他の風量との関係から、式(9)を用いて算出した。

$$Q_{circle} = Q_{nozzle-f} + Q_{nozzle-b} - Q_{in} \quad (9)$$

したがって、循環流量を加熱するための熱量は、式(8)に式(9)を代入した、式(10)から得られる。

$$E_{circle} = (E_{vap} + E_{Hup}) \frac{Q_{nozzle-f} + Q_{nozzle-b} - Q_{in}}{Q_{nozzle-f} + Q_{nozzle-b}} \quad (10)$$

## 2-2-3 加熱エネルギーによる湿度影響と反映

本項ではFig. 4におけるCalculation of Moisture amount by Combustionのブロックで行っている計算について説明する。

直燃方式のドライヤーは、乾燥風の流路で燃料を燃焼させるため、発生する水分が乾燥風に混入する。例えば、LNG燃焼の場合、低位発熱量の単位熱量当たりの水分発生は、約45g/MJとなる。同様に水素燃焼の場合は74.8g/MJであり<sup>12)</sup>、熱量当たりの水分はより多くなるため、同じ乾燥負荷に対してはLNGの約1.7倍の水分が発生することになる。

この水分発生は、乾燥風の湿度増加として、乾燥進行に影響する。シミュレーションにおいては、乾燥手段に対応する単位熱量当たりの水分発生量を、前項で算出した乾燥必要エネルギーに乗じて、ドライヤー内で発生した水分量を算出した。

この水分量を、Fig. 4のReflect the Generated moistureの矢印のように、乾燥計算に反映し再計算を行った。ドライヤー内湿度値と、乾燥必要エネルギー値が収束するまで、繰り返し計算を行った。

## 3. 乾燥シミュレーションによる予測の検証

乾燥シミュレーションによる乾燥挙動及び、乾燥必要エネルギーの予測を生産機の実測と比較し検証した。乾燥挙動は、直接的には被乾燥物の水分や温度を指標としたいが、これらを高温環境下でオンライン測定することは難しいため、間接的な指標としてドライヤー内で蒸発した水分量が反映される湿度値を用いた。

比較においては、塗布基材、塗布液、塗布速度が異なる3品種を対象に、外気温湿度が異なる条件で行った。

### 3-1 設備稼働データ

生産機の稼働データとして時系列にオンラインで収集しているデータを用い、シミュレーションの妥当性を検証した。

乾燥挙動の検証は、湿度プロファイル（ドライヤーの複数ゾーンの湿度値）を対象とした。各ゾーンの湿度の平均値として、Fig. 3に示した循環風の戻り経路（Return from Dryer）に相当するダクトを通過する温風の湿度を用いた。

エネルギーの検証は、蒸気熱交換方式については、蒸気流量を測定し、LNG直燃方式については、ガス流量を測定する方法とした。

また、乾燥シミュレーションの入力値となる乾燥条件（温度や給気湿度など）も同様にオンラインのデータを用いた。

### 3-2 予測検証の例

検証結果の一部を例として示す。

#### 3-2-1 乾燥挙動(ドライヤー内湿度)の予測

Fig. 8にシミュレーションによるドライヤー湿度予測を実測値と比較して示した。基材種と塗布幅及び、水分負荷（いずれも規格化値（NV））が異なる3つの条件に対し、外気条件の温湿度が大きく異なる4つの条件に対するデータを示した。また同じ

データを用い、Fig. 9に各ゾーンの湿度値の実測値とシミュレーション値の関係を示した。Fig. 9中には適合性の評価として決定係数（ $R^2$ ）及び、各ゾーンの湿度範囲が異なるため、平均絶対パーセンテージ誤差（MAPE）も併記した。

Fig. 8において、実測値に $\pm 2\text{g/kg}$ の誤差範囲を示したが、いくつかのポイントを除き、ほとんどその誤差範囲に収まっており、湿度プロファイルを概ね再現している。

Fig. 9において、各ゾーンの実測値とシミュレーション値の相関関係は、概ね $X=Y$ の直線上に分散している。 $R^2$ はゾーン3が最も低く0.77、その他は約0.9、MAPEは6~18%という結果であった。実用的なレベルの予測精度が得られていると考えられる。

ただし、より詳細に比較すると、紙系の後半ゾーンのプロファイルにシミュレーション値と実測値の差異が見られる。乾燥工程の前半から後半にかけて配置されたゾーン1から4の実測湿度値は、紙系の一部データを除き、前半から後半にかけて減少している。一方、紙系の計算値では一様にゾーン4がゾーン3よりも高くなっている。ゾーン3と4の湿度値の逆転は、実際の乾燥条件が、ゾーン4の外気給気量はゾーン3に対して大きく減少させており、ゾーン内の蒸発量が減少していく中でも湿度値が上がる可能性はあるものの、実測値では頻度が低い。

この紙系における実測と計算の差異の原因は、Fig. 5でモデル化し、フィッティングパラメータとした乾燥特性曲線の低含水率側での設定が不十分で、 $k_e$ 値が過大であった可能性が考えられる。

紙系の限界含水率以降の水分低下傾向については、モデル自体の改良も含め、今後の課題としたい。

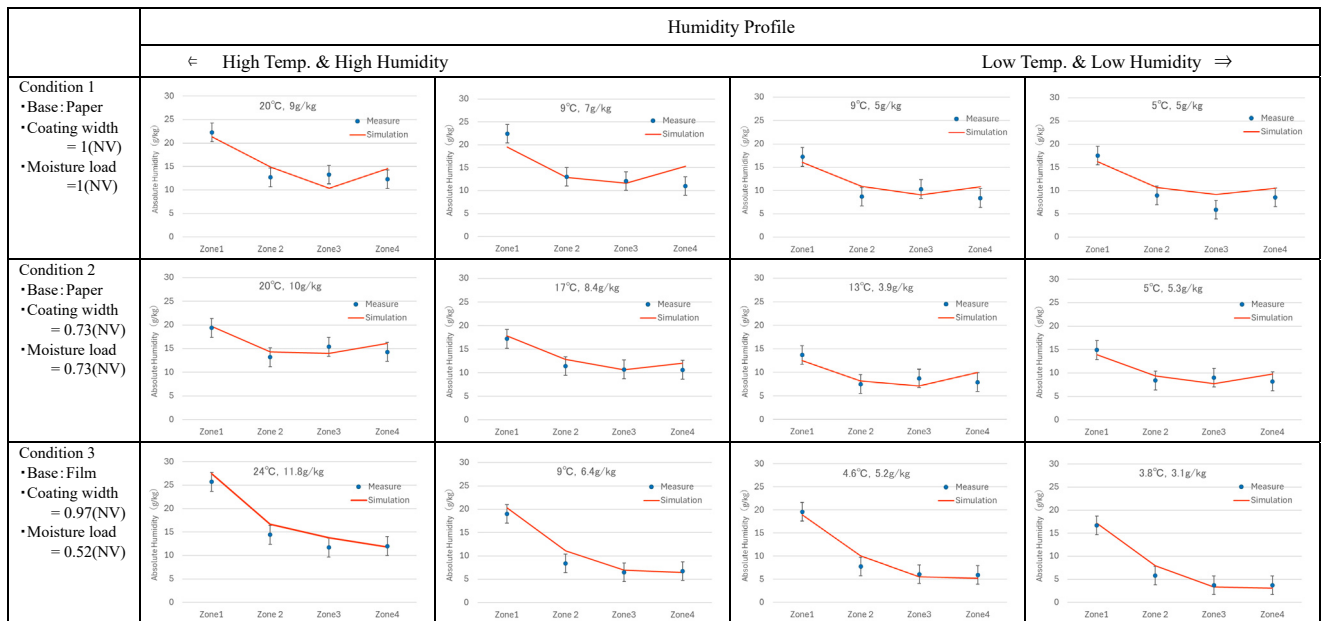


Fig. 8 Comparison between measured and simulated value of dryer humidity profile.

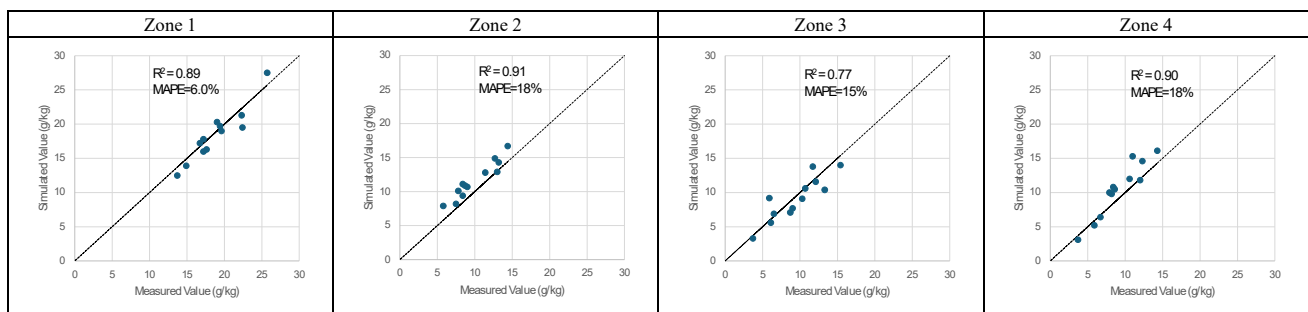


Fig. 9 Agreement between measured and simulated value of humidity for each zone.

### 3-2-2 乾燥必要エネルギーの予測

乾燥消費エネルギーの実測値と、シミュレーション値を対比して妥当性を確認した。Fig. 10に加熱手段が蒸気熱交換方式の場合のグラフを示した。横軸は実測値、縦軸はシミュレーション値であり、規格化して示した。実測値は蒸気流量から算出しているが、ここで対象にした塗布機は多層塗布機であり、蒸気流量は複数工程（複数の塗布～乾燥工程）の合計値となっている。このためシミュレーション値も複数工程のドライヤーのシミュレーション値を合計し、対比している。図中には、基材種類、生産速度、負荷水分の異なる3つの品種について、外気温湿度が異なる生産実績の値を示している。

品種ごとに乾燥消費エネルギー値が変化しているのは、外気の温湿度が変化しており、式(2)で表される外気加熱のためのエネルギーが変化することが、主な要因である。Fig. 10にはX=Yの直線を示しているが、同一品種内及び、品種を問わずプロットは線上または、若干下方に位置しており、R<sup>2</sup>値も高く、シミュレーションの妥当性が確認できた。

## 4. CO<sub>2</sub>排出削減の事例とエネルギー転換に向けた考察

### 4-1 湿度制御によるCO<sub>2</sub>排出削減

乾燥操作では乾燥風の温度や風速，給排気量などを制御できる。これらの制御可能な因子により，乾燥消費エネルギーの削減を検討した例を示す。

Fig. 10やFig. 11の同一品種内で乾燥消費エネルギーが変動するのは，外気加熱に要するエネルギーが変動することによると考えられる。一方，Fig. 8を見ると，同じ品種を生産しても，外気湿度が変化するとドライヤー内湿度も変動している。これは，ドライヤー内で蒸発する水分量が一定であっても，外気から給気した空気に含まれる水分が変動するためである。乾燥理論の基礎式(1)から明らかなように，乾燥風の温度・湿度が一定であれば，水分蒸発は一定であり，ドライヤー内湿度を一定にするような制御をする方法もある。具体的には，冬季などの低湿環境下では外気給気量を減らしても，ドライヤー内湿度は低く保ち，外気加熱に要するエネルギーを減じることができる。

Fig. 12に，単独乾燥工程のドライヤーを構成する3つのゾーンの給排気条件を変化させたときの湿度プロファイルについて，実測値と計測値の関係を示した。図中のすべての実測値は夏季の高温高湿時に1時間程度の間の実測しており，外気温湿度はほぼ同一である。また，図中の排気流量比はBaseline条件の排気量に対する比率である。Fig. 13には，Fig. 12のBaseline条件の乾燥エネルギー消費の実測値を基準としたときに，条件変更により削減できたエネルギー値について，実測値と計測値を相関させて示した。

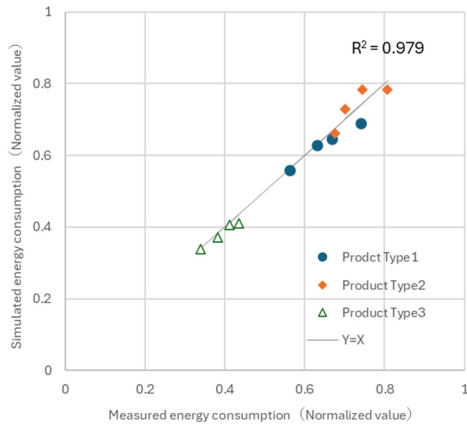


Fig. 10 Comparison between measured value and calculated value of drying energy.

次に，Fig. 11に加熱手段がLNG直燃方式の場合のグラフを示した。図中には基材種，塗布液組成，塗布幅，生産速度などの条件が異なる9品種のデータを示した。ガス流量は乾燥工程ごとに計測されており，単独の乾燥工程での比較である。

Fig. 10と同様に，シミュレーション値は，計測値と同等か，若干低い値を示し，R<sup>2</sup>値も高かった。計算値は被乾燥物の水分蒸発と温度変化に必要な正味のエネルギーを計算しているため，ドライヤー機体や温風循環のダクト類からの放熱ロスなどが含まれる実測値よりも低めの値となっていると考えられる。

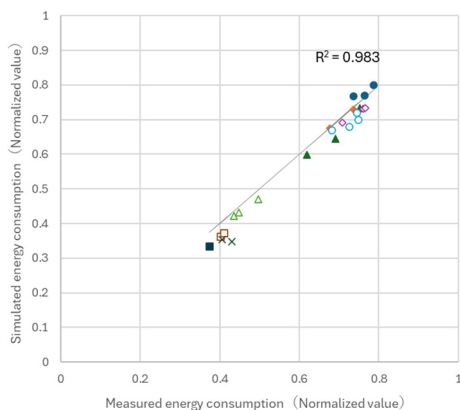


Fig. 11 Comparison between measured value and calculated value of drying energy.

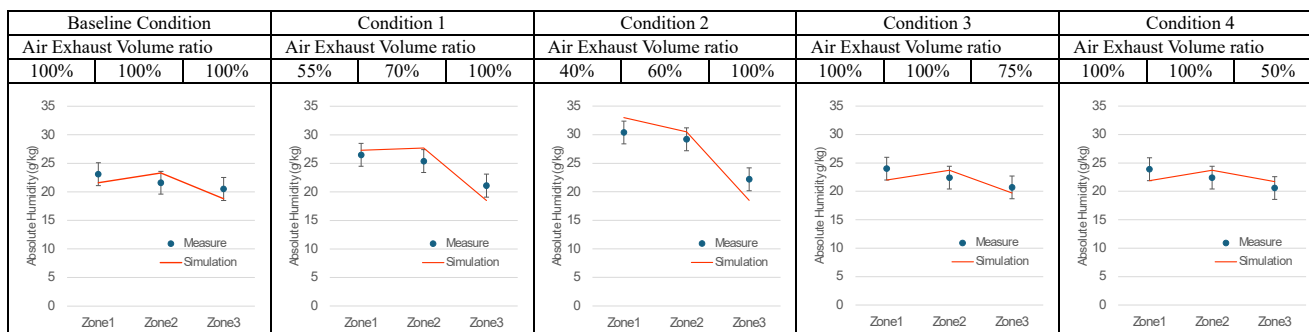


Fig. 12 Variation in humidity profile due to exhaust condition

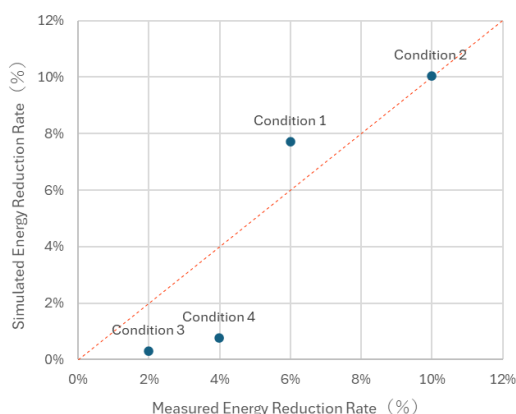


Fig. 13 Comparison between measured and simulated value of energy reduction rates.

このように、同一の外気温湿度において、外気給気量を変化させた場合の、湿度プロファイル及び、エネルギー消費の実測値とシミュレーション値は凡そ一致した。一方、外気温湿度の消費エネルギーへの影響は前節で予測の妥当性が確認できている。これらにより、給排気条件を含む乾燥条件及び、外気温湿度変化に対応した操業条件検討を机上で効率よく行えることが分かった。

この例では、各ゾーンに湿度上限を設定した給排気量制御により、それぞれのゾーンの給排気量を調整し、外気湿度が低下する冬季には、給排気制御がない場合と比較して約20%のエネルギー削減が行えた。ただし、生産への展開においては、ドライヤー内湿度の上昇が、機内の特定の低温部位での結露に

つながるなど、トラブルにつながる可能性もあり、確認しながら進めることが重要である。

#### 4-2 再生可能エネルギーへの転換と課題予測

4-1のような条件の適正化による乾燥消費エネルギーの削減を極限まで進めたのち、再生可能エネルギーへの転換を進めていきたい。その際に、2-1-2で述べたような熱交換方式か、直燃方式かという加熱システムの影響も考慮することが必要と考えられる。具体的には、加熱システムとして、一般には高効率な直燃方式を選択する場合、2-2-3で述べたような、乾燥風に燃焼で発生する水分が混入する。水分発生量は燃料により異なるため、湿度への影響も変化する。ここでは、蒸気熱交換方式、LNG直燃方式、水素直燃方式について、湿度プロファイルを同等に保つ条件において、乾燥必要エネルギーがどのように変化するのかを推算し、その影響度について考察した。

##### 4-2-1 燃料転換の乾燥必要エネルギーへの影響

Fig. 14に、蒸気熱交換方式の乾燥必要エネルギーに対し、LNG直燃、水素直燃方式のエネルギー増加率を2つの外気条件（高温高湿、低温低湿）について示した。また、低温低湿の条件では、給排気を調整し、高温高湿の湿度プロファイルと同等となるように湿度制御した場合についても示した。これらの検討は、塗布液や乾燥制約条件の異なる4つの乾燥工程について行った。

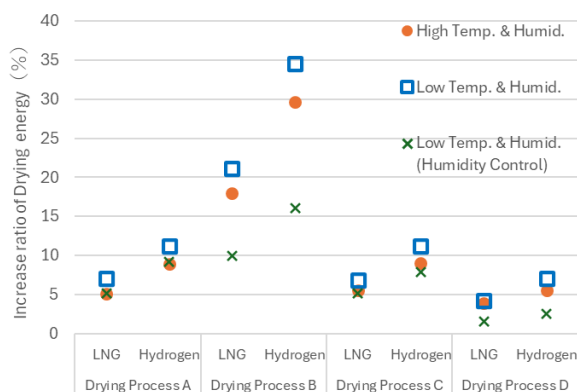


Fig. 14 Effect of combustion types on energy required for drying.

Fig. 14において、直燃方式は熱交換方式に対して、乾燥必要エネルギーが5~35%増加している。

増加率は乾燥工程ごとに異なり、特に増加率が大きいのは乾燥工程Bであった。乾燥工程Bは、他の工程に比して乾燥初期の予熱期間で湿度を低く設定した条件であることが影響していると考えられる。

LNG直燃と水素直燃を比較すると、水素直燃の方が大きい増加率である。これは、燃焼の単位熱量当たりの水分発生量が大きく、湿度を適正に保つためより多くの給排気量を必要とするためである。

高温高湿と低温低湿のエネルギー増加率では、低温低湿の方が大きいですが、湿度制御をすることで、その増加率を大幅に低減できている。

#### 4-2-2 加熱システム全体の効率を考慮したエネルギー消費

ここまでは、乾燥必要エネルギーについて述べた。この値は温風加熱の正味のエネルギーであり、実際のエネルギー消費は加熱システム全体の効率が影響する。直燃方式の熱効率は高く95~100%<sup>11)</sup>といわれている。一方、蒸気熱交換方式では、ボイラ、蒸気配管や熱交換器を含めたシステムとしての熱効率が、これよりも劣るため、Fig. 14で示したような、直燃方式により実際の消費エネルギーが増加するという傾向は、逆転する可能性もある。

ここでは、蒸気熱交換方式と直燃方式の加熱システム全体の効率を考慮したエネルギー消費について考察する。所定の乾燥必要エネルギー $E_{req}$ を得るための乾燥消費エネルギー $E_{cons}$ は、直燃方式の場合、

$$E_{cons} = \frac{E_{req}}{\eta_{comb}} \quad (11)$$

蒸気熱交換方式の場合、

$$E_{cons} = \frac{E_{req}}{\eta_{boiler}\eta_{steam}} \quad (12)$$

ここで、

$E_{req}$  : 乾燥必要エネルギー [J/s]

$E_{cons}$  : 乾燥消費エネルギー [J/s]

$\eta_{comb}$  : 直燃方式の熱効率 [-]

$\eta_{boiler}$  : ボイラの蒸気生成効率 [-]

$\eta_{steam}$  : 蒸気エネルギーの利用効率 [-]

ただし、 $\eta_{comb}$  及び  $\eta_{boiler}$  は低位発熱量を基準とする。

ボイラの蒸気生成効率 $\eta_{boiler}$ は比較的高い。特に貫流式ボイラは効率がよく、燃焼に伴って発生した水分を凝縮させて、その潜熱を回収するエコノマイザーを設けることでさらに効率を向上させている。燃料がLNGの場合は98%、水素の場合は105%も可能といわれている<sup>13)</sup>。水素が燃料の場合に効率が向上するのは、前出のように燃焼による水分発生量が多いため、回収できる潜熱も大きくできるためである。

蒸気エネルギーの利用効率 $\eta_{steam}$ については、ボイラから熱交換器までの配管の長さや保温状況、熱交換後の凝縮水（ドレン）の再利用方法、運転条件などにより大きく変化する。ドレンの再利用がない場合の蒸気エネルギーの利用効率は60~80%程度であり、ドレンの排出はロスの数パーセントを占めている<sup>14)</sup>。なおリコーの感熱紙生産工程では、蒸気熱交換方式においてドレンを再利用しており、蒸気エネルギーの利用効率は凡そ90%を達成している。

直燃方式及び、蒸気加熱方式について、加熱システムの影響を考慮し、両者の乾燥消費エネルギーを

比較するために、Fig. 15を示した。Fig. 15においては、 $\eta_{steam}$ の変化に対する、蒸気熱交換方式の乾燥消費エネルギーと乾燥必要エネルギーの比を、燃料がLNGと水素の場合について示している。また図中には、Fig. 14で議論した直燃方式における熱交換方式に対する乾燥必要エネルギーの増加率の例として5%、10%、15%を点線で示したが、LNG及び水素ボイラの線がこの点線より下であれば、蒸気熱交換方式の方が消費エネルギーが少ないことになる。ただし、 $\eta_{comb}$ は98%、 $\eta_{boiler}$ は、LNGでは98%、水素では105%と仮定した。

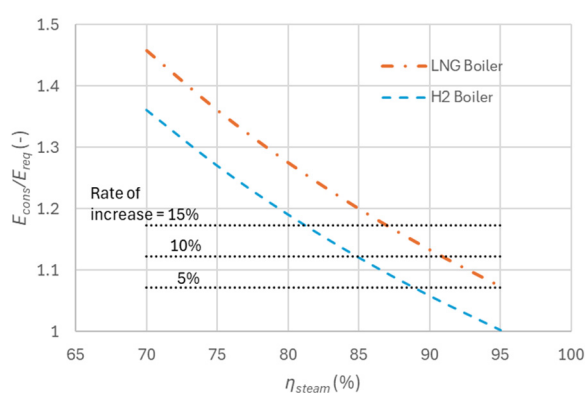


Fig. 15 Changes in drying energy consumption relative to steam heating system efficiency and comparison with direct-combustion method.

4-2-1で、直燃方式の燃料を水素に転換すると、熱交換方式に対して乾燥必要エネルギーが増加することを示した。その増加率は湿度制御した場合で2～15%程度であった。Fig. 15において、例えば、その増加率が5%程度の場合、同じ水素を燃料とする蒸気熱交換システムの蒸気利用効率が凡そ90%を達成していれば、蒸気熱交換方式の方が乾燥消費エネルギーは少なくなることになる。

#### 4-2-3 再生可能エネルギーへの転換の方向性

脱炭素化に向けた燃料転換を進めるにあたっては、一般的に高効率とされる直燃方式を選択し、水素への燃料転換を行うことが適切と考えがちである。しかし、本検討の結果、乾燥工程の制約や加熱システ

ムの効率によっては、蒸気熱交換方式が、直燃方式よりも消費エネルギーが少なくなる場合もあることが示唆された。

すなわち、乾燥工程の脱炭素化を進めるにあたって、現状の乾燥工程の加熱システムがLNGを燃料とする蒸気熱交換方式であっても、蒸気の利用効率の改善と乾燥工程の湿度制御を行うことで、蒸気生成ボイラの水素燃焼対応のみで、大きなシステム変更なく、高効率とされる直燃方式と同等の燃料効率が期待できると考えられる。

## 5. 結論と今後の展開

乾燥過程と乾燥必要エネルギーの算出が行えるようシミュレーションを開発した。塗布液組成、基材種類などの被乾燥物の条件、生産速度及び、外気温湿度など様々な変化に対して、計算結果は生産工程の実測値とほぼ一致した。このシミュレーションにより、机上で乾燥必要エネルギーの削減を検討することが可能となり、その一例を検証し、乾燥工程のCO<sub>2</sub>削減検討に有効であることを確認した。

さらに、脱炭素化に向けた乾燥熱源のエネルギー転換を想定し、燃焼で発生する水分の乾燥必要エネルギーへの影響を、実際の例で検討した。その結果、乾燥工程の脱炭素を目指すには、まず、湿度制御などの乾燥条件の適切化を行った後に、対象乾燥工程の湿度上限等の制約に応じて熱交換方式か直燃方式などの方式選定をすべきことが示唆された。

現状乾燥工程の効率改善によるCO<sub>2</sub>削減はまだ余地があることが分かっており、塗布液の高濃度化による乾燥負荷自体の低減、ドライヤーの排気から熱回収する装置の適用拡大などを進行中である。大規模な生産工程では、設備状態の可視化自体に多大な労力が必要で定量的な検討が困難になることが多い。シミュレーションを活用することで、効率的にCO<sub>2</sub>削減を進め、来る脱炭素化に備えていきたい。

## 参考文献

- 1) 環境省: 2023年度温室効果ガス排出量及び吸収量について (2025年4月発表), <https://www.env.go.jp/earth/ondanka/ghg-mrv/emissions/> (参照2025-11-27).
- 2) TEPCO: 業務用電力 (契約500kW以上), [https://www.tepco.co.jp/ep/corporate/plan\\_h/plan04.html](https://www.tepco.co.jp/ep/corporate/plan_h/plan04.html) (参照2025-10).
- 3) 新電力ネット: コモディティ統計情報, 天然ガス価格の推移, 2025年9月の日本価格, <https://pps-net.org/statistics/gas> (参照2025-10).
- 4) 日本木質バイオマスエネルギー協会: 木質バイオマスによる産業用等熱利用導入ハンドブック, <https://jwba.or.jp/wp/wp-content/uploads/2021/12/木質バイオマスによる産業用等熱利用導入ガイドブック.pdf> (参照2025-11-27).
- 5) 経済産業省: 再生エネルギー・水素等関係閣僚会議 水素基本戦略 (2023年6月6日), [https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene\\_shinene/suiso\\_seisaku/pdf/20230606\\_2.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene_shinene/suiso_seisaku/pdf/20230606_2.pdf) (参照2025-11-27).
- 6) COP28 Presidency: Global Renewables and Energy Efficiency Pledge, <https://cop28.com/en/global-renewables-and-energy-efficiency-pledge> (accessed 2025-11-27).
- 7) 堀内浩平: フィルム塗工の乾燥シミュレーション, 第37回化学工学会秋季大会研究発表要旨集, B317, 化学工学会 (2005).
- 8) 青木圭一: 塗膜均一性に及ぼす乾燥プロセスの影響, 第35回化学工学会秋季大会研究発表要旨集, E2P02, 化学工学会 (2003).
- 9) 杉山邦利ほか: 塗工製品の乾燥シミュレーション, *Ricoh Technical Report*, No. 25, pp. 15-23 (1999).
- 10) E. D. Cohen, E. B. Gutoff: *Modern Coating and Drying Technology*, pp. 277-286, VCH Publishers (1992).
- 11) 木村明彦: 乾燥器, 熱処理機 (テンター) の省エネルギー, *繊維機械学会誌*, Vol. 62, No. 3, pp. 169-172 (2009).
- 12) 三菱重工業株式会社: 水素発電ハンドブック, 第5版, p. 56, [https://power.mhi.com/jp/catalogue/pdf/hydrogen\\_jp.pdf](https://power.mhi.com/jp/catalogue/pdf/hydrogen_jp.pdf) (2025).
- 13) 三浦工業株式会社: 製品情報 水素燃料ボイラ, <https://www.miuraz.co.jp/product/boiler/steam/hydrogen/an.html> (参照2025-10).
- 14) 長伸朗ほか: 工場の蒸気利用生産設備の熱ロスの実態調査, *中部電力技術開発ニュース*, No. 155 (2016).