

省エネソリューション技術による省エネトップランナー工場の実現

Realization of Energy-Saving Top-Runner Factory through Energy-Saving Solution Technology

伊藤 貞 芳
Sadayoshi Ito

村上 友 康
Tomoyasu Murakami

領 木 直 矢
Naoya Ryoki

田 端 大 助
Daisuke Tabata

松 田 直 子
Naoko Matsuda

中 裕 之
Hiroyuki Naka

要 旨

省エネルギー対策が重点的に進められてきた産業分野においても、さらなる省エネ技術の開発が求められている。そこで、生産状況や生産環境の変化に合わせて生産設備と原動設備を連携制御し、エネルギーの使用量を最小化する、新しい省エネ連携制御システム“Save Energy-Link”(“SE-Link”)を開発した。さらに、独自開発のシミュレーション技術を“SE-Link”に組み込み、品質を確保しながら生産性を2倍に向上する省エネ乾燥炉を開発した。このシミュレータをリアルタイム自動制御に応用すれば、より革新的な省エネ制御が可能となる。これらの省エネソリューション技術を、省エネトップランナー工場を目指すモデル工場に導入し実証した結果、生産時、生産待機時ともに最大40%のエネルギー使用量を削減できた。

Abstract

In industry fields where energy-saving countermeasures have been taken selectively, developing further energy-saving technology is demanded.

We have developed a new co-control system named “Save Energy-Link” that can minimize energy consumption by co-control of production equipment and power equipment according to changes in production conditions and the production environment. Additionally, by integrating our original simulation technology with the co-control system, we have developed a dry furnace that achieved double the normal productivity. By applying this simulator to real-time automatic control of production equipment, advanced energy-saving control can be realized. The above energy-saving solution technology has been implemented in a model factory which aims to be an energy-saving top-runner factory, and energy consumption in both processing and stand-by modes has been reduced by up to 40%.

1. はじめに

産業分野におけるエネルギー消費量は、わが国のエネルギー消費量の約半数を占め、当社が属する製造業はこの産業分野の約9割を占める[1]。1970年代以降、省エネルギー対策が重点的に進められてきた産業分野においても、地球温暖化防止の観点から、さらなる省エネ技術の開発が求められている。環境革新企業を目指す当社は、省エネトップランナー工場を実現するべく、工場省エネの取り組みを加速している。

一般に、工場におけるエネルギーの80%以上が、原動設備(コンプレッサーやボイラ、ポンプ、空調設備など)と生産設備で消費される。原動設備の主目的は、工場エアや冷温水、蒸気といった、各種エネルギーを生産工程へ安定供給することである。そのため、原動設備は生産工程の最大使用量に合わせてエネルギーを過剰供給していることが多い。

一方、生産設備では生産待機中に不要なエネルギーを大量に消費していることが多い。例えば乾燥炉や焼成炉の場合、生産待機状態においても、生産時と同じ炉内温度と給排気風量を維持し、生産に直接寄与しないエネルギーを消費している。すなわち、必要な時に、必要なエ

ネルギー量を、原動設備から生産設備へと供給し、消費するような連携制御がなされていないのが実状である。

そこで、生産活動で消費されるエネルギーの最小化を図るため、独自の視点でFEMS(Factory Energy Management System: 工場エネルギー管理システム)を構築した。このFEMSを活用し、生産状況や生産環境の変化に合わせて、生産設備と原動設備のエネルギー消費を最小化することを目的とする省エネ連携制御システム(“SE-Link”)を開発した。

“SE-Link”を核とした省エネソリューション技術を、省エネトップランナー工場を目指すモデル工場へ導入し、実証した結果、生産時、および生産待機時のエネルギーをともに最大で40%削減できた。

ここでは、上記FEMSの特徴、および省エネ連携制御システム“SE-Link”について述べる。

2. 工場エネルギー管理システム(FEMS)の構築

FEMSは、工場内で使用される主要なエネルギーを把握し、エネルギーの使用量の合理化を図ることを目的とするシステムである。各種センサを用い、エネルギー使用量、製品の生産数、生産設備の稼働といった生産活動に

関するデータの監視や、収集データの分析により、具体的な省エネ施策につなげることができる。近年、このFEMSを活用し、エネルギーの「見える化」と、エネルギー損失を徹底的に削減する「ムダとり」などの省エネ取り組みが積極的に行われるようになってきている[2]。また、エネルギー使用量を生産数で割ることで得られる、エネルギー原単位の推移を分析すれば、生産におけるエネルギー使用効率の課題を抽出できる[3]。

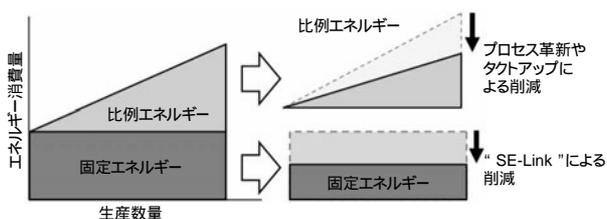
ここで筆者らは、エネルギーの消費と生産プロセス条件が密接に結びついていることに注目した。例えば、半導体製造のクリーンルームにおける空調設定や、炉設備における温度プロファイル設定などのプロセス条件は、製品の品質に直結している。したがって、プロセス条件が常に一定となるよう厳密に管理するために、多くのエネルギーが消費される。そのため一般的には、組立工場よりも、プロセス条件の厳しい材料やデバイス系の生産工場の方が、エネルギー使用量は多い。

そこで、通常の電力計や燃料ガス流量計、生産数量カウンタに加え、プロセスに関係する物理量（温度、湿度、流量、圧力、速度など）を計測するセンサを、特にエネルギー消費の大きな生産設備を中心に、積極的にFEMSに組み入れた。これを厳密に管理することで、品質を保証しながら過剰なプロセス条件を緩和し、エネルギー使用量の最小化を実現した。

物理量の計測は秒単位で行っており、計測結果はリアルタイム監視システムと、後述する“SE-Link”で利用している。分析用には、データ保存容量と時間分解能とを考慮し、1分間隔での記録を基本とした。

3. 省エネ連携制御システム“SE-Link”の考え方

工場で使用されるエネルギーは、第1図に示すように、生産数量とは無関係に存在する固定エネルギーと、生産数量に比例して増加する比例エネルギーに分類できる。生産待機時のエネルギー消費は、この固定エネルギーに分類される。



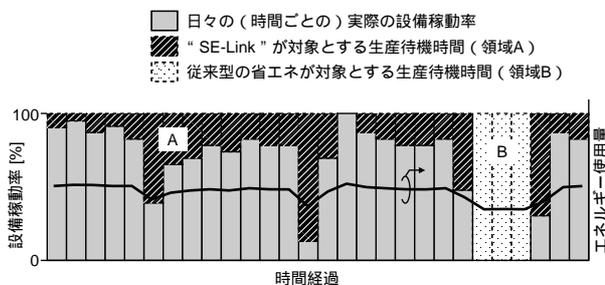
第1図 エネルギー消費削減の考え方

Fig. 1 Concept of energy saving

“SE-Link”の目的は、固定エネルギーを削減することである。また、比例エネルギーを削減するには、タクトアップによる生産性の向上や、生産プロセスそのものを見直すプロセス革新の取り組みが必要となる。

一般に、時間ごとの生産数量は一定ではなく、生産品種の切り替え、メンテナンスなどに代表される生産待機時間が20%~30%程度を占める。この生産待機時間は短時間で分散して存在することが多い(第2図の領域A)。炉設備の場合で考えると、この比較的短い生産待機時間に対し、単純にヒータの電源を切るなどの操作によりエネルギー消費を削減しても、炉内の温度状態が安定し生産が再開できるまでに時間が必要となる。このため、生産待機時でも生産時と同じ状態で運転させてしまい、その結果、生産に直接関係しないエネルギーが消費されているのが現状である。

従来の省エネ制御は、比較的時間の長い生産待機時間(第2図の領域B)におけるエネルギー消費を削減することを主な目的としていた。これに対し、“SE-Link”では、第2図の領域Aで表される生産待機時間に対しても、積極的な省エネ制御することで、エネルギー使用量の最小化を図る。10分程度の比較的短い生産待機時間でも省エネが可能であるため、総合すると平均15%程度のエネルギーを削減できる場合が多い。



第2図 工場における設備稼働率とエネルギー使用量の推移

Fig. 2 Transition of equipment operation rate and energy consumption in factory

4. 省エネ連携制御システムの適用

工場の消費エネルギーのうち、最も多いのが炉設備であり、当社の統計によると、工場全体のエネルギーの33%を占める。また、ほぼすべての工場において必要とされるユーティリティとして、工場全体のエネルギーの8%を占める工場エアが挙げられる。これらについて、省エネ連携制御をモデル工場に導入した具体的事例について説明する。

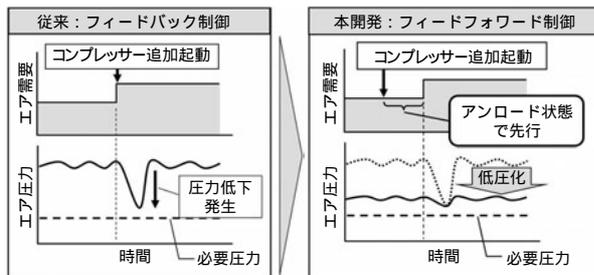
4.1 工場エアのフィードフォワード制御

工場エアは、生産設備のエアシリンダの駆動や、ダストのブローなど、一般的に用いられるユーティリティである。

工場エアの消費量が比較的多い工場では、コンプレッサーを複数台設置し、コンプレッサー群からの工場エアが集合されるエアタンクの圧力を監視して、圧力が所定の範囲に収まるように台数制御を行っている。生産設備が稼働を開始し、工場エアを使用すると、エアタンクの圧力が低下する。台数制御装置は、圧力が閾値（しきいち）以下になったことを検出すると、コンプレッサー群からの吐出エア量が不足していると判断する。そして、台数制御装置はコンプレッサーに追加の起動命令を送信し、予備のコンプレッサーが起動することで不足分を補い、エア圧力が元に戻る。このように、従来のコンプレッサーの台数制御は、圧力低下が起こった後に制御が行われるフィードバック制御である。

このため、工場エアを大量に使用する生産設備が稼働する場合や、朝一番の生産開始時に工場全体がエアを一斉に使用する場合、コンプレッサーの追加起動が遅れ、工場全体の圧力が低下するという問題を生じる。したがって、従来のフィードバック制御による台数制御を用いる場合、圧力低下が生じることを前提として、設定圧力をあらかじめ2割程度高めに設定することで対応していた。しかし、これではコンプレッサーの消費エネルギーが増加し、さらにエア漏れによるロスも増加する。

そこで、生産設備が稼働を開始する直前に稼働情報（起動信号）を台数制御装置へ送り、あらかじめコンプレッサーをすぐにエアを吐出可能なアンロード状態で待機させる、フィードフォワード制御“SE-Link”を開発した（第3図）。アンロード状態は、消費電力を20%~70%と低く抑えることができるものの、実際には、エアを吐出していないため、待機エネルギーを発生させている状態



第3図 従来のフィードバック制御と今回開発したフィードフォワード制御の違い

Fig. 3 Differences of existing feed-back control and developed feed-forward control

である（第1表）。したがって、極力、アンロード状態で長時間の待機させないことが効率改善に重要である。FEMSの情報から生産設備の稼働を把握し、“SE-Link”の連携制御により適切なタイミングでアンロード状態を開始させる。

第1表 コンプレッサーの運転状態による差異

Table 1 Differences depends on state of compressor

運転状態	電力消費量	吐出流量	備考
フルロード	100 %	100 %	効率最大
アンロード	20 % ~ 70 %	0 %	数秒でエアを吐出
停止	0 %	0 %	起動まで数十秒必要

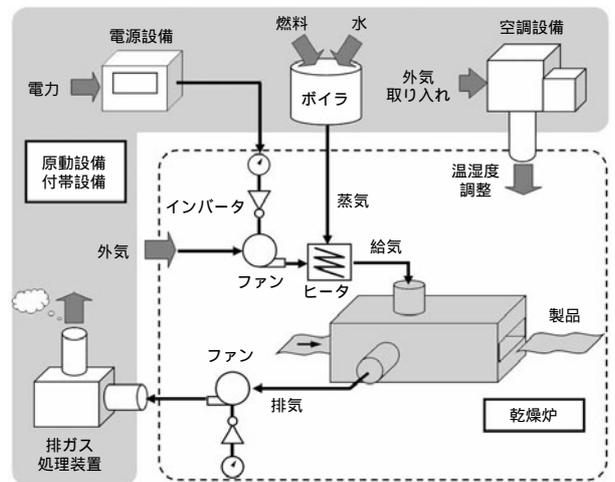
これにより工場全体の突発的な圧力低下を防止し、コンプレッサーの設定圧力を低くすることができた。結果として、コンプレッサー動力の削減量である約7%に、低圧化によるエア漏れの減少分を加えた、約10%のエネルギーを削減できた。

4.2 乾燥炉の待機ロス削減

〔1〕乾燥炉のエネルギーロス

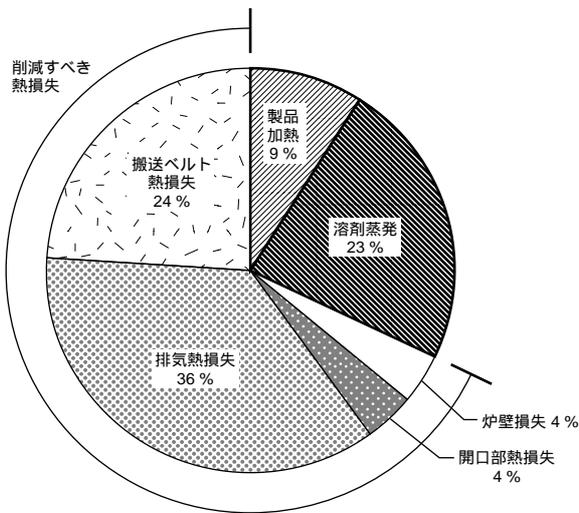
一般に乾燥炉は、加熱源である電気ヒータや蒸気ボイラ、給気と排気のための大型ファン、排気ガスの処理装置などから構成される。さらに、乾燥炉からの放熱や排気に対応するため、空調設備への負荷も増える（第4図）。

このような乾燥炉において、乾燥温度が100 ~ 200 である場合のエネルギー消費量の内訳の一例を、第5図に示す。溶剤の蒸発に使われる有効エネルギー（23%）よりも、排気熱損失（36%）や搬送ベルトの熱損失（24%）といったエネルギー損失の方が圧倒的に多い。この排気熱損失や搬送ベルトの熱損失は、乾燥炉内の製品の有無



第4図 乾燥炉と連携する原動設備

Fig. 4 Power equipments linked to dry furnace

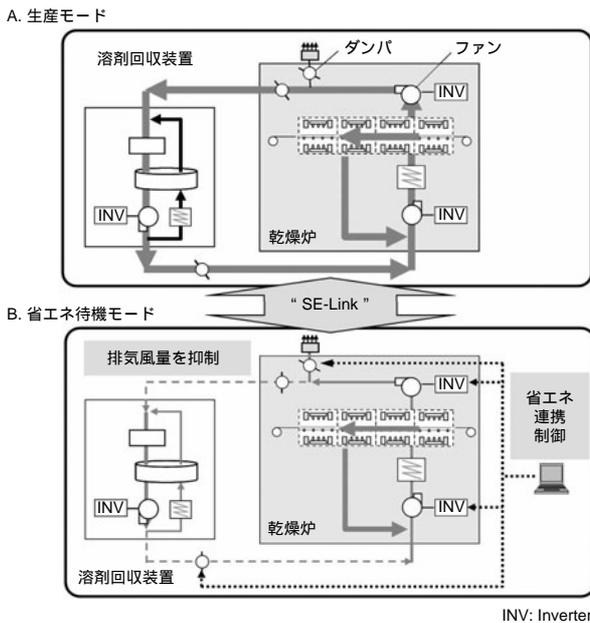


第5図 乾燥炉のエネルギー消費の内訳
Fig. 5 Break down of energy consumption in dry furnace

にかかわらず、常に発生する。これらの熱損失が、第1図で説明した固定エネルギーにあたり、削減すべき待機エネルギーロスである。

【2】省エネ待機モードの適用

生産待機時における待機エネルギーロスを削減するため、新たに省エネ待機モードを設けた(第6図)。省エネ待機モードは、省エネ待機モードから生産モードへの復帰が極力短くなるよう、乾燥炉内の温度は維持しながら、給排気の風量を最小限に絞ることでエネルギー消費を大



第6図 乾燥炉における待機モードの模式図
Fig. 6 Schematic diagram of stand-by mode in drying furnace

幅に抑えるモードである。

省エネ待機モードを実現する要点を以下に示す。

(1) 生産モードの切り替え機構の追加

生産モードと、省エネ待機モードの2つのモードに応じて、給排気の配管経路を自動で切り替えるためのダンパを追加した。生産時は、炉で発生した溶剤成分を含む排気ガスを溶剤回収装置へ送り、凝縮によって除去した後、再び炉へ戻す循環経路をとるようなダンパ設定である(第6図A)。省エネ待機時は、溶剤を含む排気ガスは発生しないため、ダンパを切り替えて最小限の炉内の循環経路を確保するようにし、炉内温度の均一性を維持可能な状態とする(第6図B)。排ガスを溶剤回収装置へ送る必要はなく、溶剤回収装置も最小運転にできる。

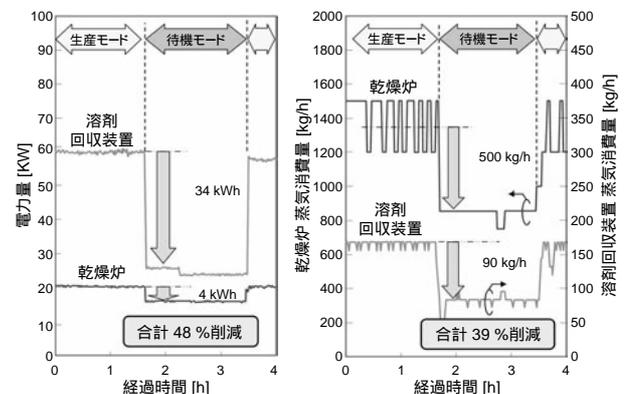
(2) センサ類の追加

乾燥炉内の温度や風量、ガス濃度を常に監視するためのセンサ類を設置した。これにより、乾燥プロセス状態が正常であることを確認し、乾燥品質を維持するとともに、排気量削減に伴う防爆対策などの安全を保障する。

(3) 省エネ待機モードへの移行と復帰判断

生産中断時は、炉内の溶剤濃度が低下したことを確認した後、モータダンパの切り替え指示や、給排気ファンのインバータ制御を行い、省エネ待機モードへ移行する。また、生産モードへの復帰は、生産開始のタイミングより復帰にかかる時間を差し引いて前倒したタイミングで開始するように制御する。

モデル工場に省エネ待機モードを導入し、実証した結果を、第7図に示す。生産モードと比較し、電力量を48%、蒸気量を39%削減できた。両者を熱量換算して合わせると、約40%の削減となる。この省エネ待機モードは、従来放置されてきた、数十分程度の比較的短い生産待機時に対しても適用できるため、より細かくエネルギーを削減できる。



第7図 待機モードにおける“SE-Link”の効果
Fig. 7 Effect of “SE-Link” at stand-by mode

4.3 乾燥シミュレータと“SE-Link”の融合

さらに、生産プロセスの変更にも踏み込むことで、大きな省エネ効果が期待できる。シミュレーション技術を適用し、乾燥炉のエネルギー効率を高めたプロセス革新の事例を述べる。

【1】乾燥炉の問題点

従来の乾燥炉のプロセス設計と運用管理における問題点を2点挙げる。

(1) 試行錯誤によるプロセス条件の決定

炉内で乾燥プロセス中に起こる製品の状態変化を、直接的に把握することは困難である。したがって、生産プロセス条件の決定は、条件を変更しながら何度も試作を繰り返す必要があり、決定までに多くのコストと時間を費やしていた。

(2) 予測困難な生産環境の変化による過剰な品質保証

乾燥炉へ送り込まれる給気の温度や湿度は、季節や天候によって変化し、乾燥の挙動に大きく影響する。この生産環境の変化が製品の乾燥品質に与える影響を厳密に予測することは困難であった。そこで、外調機による給気の空調処理が必要であり、最悪の環境条件下でも良品が得られる空調設定のまま運用されることが多い。このため、エネルギーの無駄な消費や生産性の低下を招いていた。

【2】乾燥シミュレータの開発

上記の問題点を解決するため、乾燥炉における製品の乾燥の進行状況を精度良く予測して、生産環境の変化に応じて常に最適なプロセス条件を導出可能な乾燥シミュレータを開発した[4][5]。ウェブ状の基材に塗布されたペーストを乾燥させて塗膜を形成する、乾燥炉の乾燥シミュレータの理論モデルを、第8図に示す。

この乾燥シミュレータは、ヒータや熱風の温度、風速などの値を基に、塗膜への熱移動の式と、塗膜から蒸発

する成分の物質移動の式を連成して解くことで、時間ごとの蒸発量を精度良く計算することができる。蒸発量と同時に製品温度も計算することで、炉内で製品温度が過上昇して塗膜が割れるなどの不良現象を事前に予測し、それを防止するプロセス条件を導出できる。

また、この乾燥工程では塗膜の結着強度が重要な品質スペックであるが、生産性を高めるために乾燥速度を過度に高速化すると、この結着強度が低下してしまう。これに対し、別途開発した実験機を用いて導出した乾燥速度と塗膜の結着強度との相関式を、乾燥シミュレータに組み込んだ。これにより、乾燥過程における塗膜の結着強度の変化挙動を予測し、乾燥を高速化しつつ結着強度を維持する最適なプロセス条件を机上で導出することができる。

本乾燥シミュレータをモデル工場の既存の生産工程に適用し、プロセス条件を最適化して省エネ効果を実証した。結果として、製品の品質を維持したまま、生産速度を2倍に高めることができた。これにより、エネルギー原単位を約40%削減し、また新モデル立ち上げ時の量産設備を用いた試作のコストと時間を80%程度削減できた。

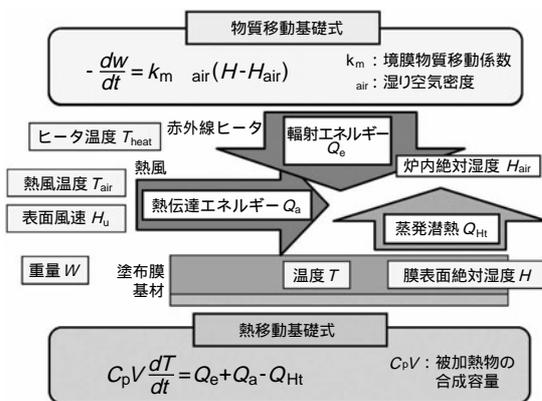
【3】リアルタイム乾燥シミュレータ

生産環境、特に給気の温湿度に変化があった場合、製品の乾燥状態も変化する。この乾燥状態の変化も、乾燥シミュレータにより予測できる。1サイクルの計算時間は2秒程度と短く、ほぼリアルタイムでの計算予測が可能である。

さらに、乾燥炉の制御システムに本シミュレータを組み込むことで、より高度なプロセス制御を実現できる。生産中に絶えず変化する生産環境の変化に応じた製品の乾燥状態の変化を予測し、乾燥状態が最適となるヒータ温度などのプロセス条件をほぼリアルタイムで算出し、乾燥炉を制御する(第9図)。したがって、空調を常に一定の条件に制御する従来の方法ではなく、生産プロセス条件自体を柔軟に変化させる本方式を採用することで、品質の安定化と、エネルギー使用の最小化を実現することが期待できる。

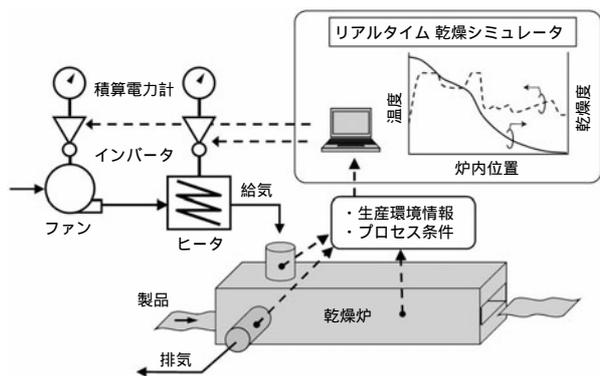
上記の乾燥炉の例では、従来、湿度が高く乾燥が抑制される夏季においてプロセス条件が設定され、年間を通じ同じプロセス条件で生産が行われていた。この場合、湿度が低い冬季においては、生産速度に換算して20%程度、乾燥が促進される。このため、速すぎる乾燥速度に起因した塗膜の割れが発生するなど、品質への影響が発生していた。

リアルタイム乾燥シミュレータを活用した“SE-Link”制御を適用すれば、直接の把握が困難な炉内の製品の乾燥状態を予測でき、年間を通じて最適なプロセス条件と



第8図 乾燥炉の省エネシミュレータの理論モデル

Fig. 8 Theoretic model of simulator of dry furnace



第9図 リアルタイムシミュレータを用いた乾燥炉の最適省エネ運転システムの概要

Fig. 9 Concept of "SE-Link" system using real-time-simulator

最適な乾燥速度で生産することが可能となるため、平均して約10%の生産速度向上とエネルギー削減が期待できる。また、塗膜の割れや結着強度の低下などの品質不良も未然に防げるため、歩留まりを100%近くまで向上できる。

なお、このような省エネ連携制御技術や、省エネシミュレーション技術は、本稿で説明した乾燥を目的とする炉に限らず、アニール炉やリフロー炉といった、種々の炉設備のプロセス設計と最適制御に応用できる。さらには、クリーンルームにおける空調といった分野でも、外気の変化に合わせた空調制御などへの応用が可能である。

5. まとめ

工場で使用される主要なエネルギーに加え、エネルギー使用量と密接に結びつく、生産プロセス条件に関する物理量を把握することを目的としたFEMSを構築した。さらに、生産設備と原動設備の連携制御システム“SE-Link”を開発し、生産待機時のエネルギーを削減した。この“SE-Link”のシステムに、独自のシミュレーション技術を組み合わせることで、エネルギー使用量を最小化する独自の省エネソリューション技術を提供した。これらにより、乾燥炉の事例では、生産時、生産待機時におけるエネルギーをともに最大で40%削減できた。

“SE-Link”の省エネ連携制御のコンセプトは、工場の生産設備に広く応用が可能であり、省エネトップランナー工場を実現するために不可欠な技術である。今後、社外への展開も視野に、環境革新企業としての責務を果たすべく、さらなる応用技術を開発する。

参考文献

- [1] 経済産業省, エネルギー白書2010, pp.160-164, 2010.
- [2] 高田憲一 他, “エコものづくり省エネ工場, 新次元へ,” 日経ものづくり, 1月号, pp.28-53, 2010.
- [3] 伊藤誠, “FEMSの省エネ成功事例紹介,” 電機, 6月号, pp.41-44, 2007.
- [4] E. Cohen et al. “Important issues in drying of thin films: An industrial engineers perspective, Part 2 models,” Industrial Coating Research, vol.4, pp.47-72, 1998.
- [5] P. E. Price et al, “Optimization of single-zone drying of polymer solution coatings to avoid blister defects,” Drying Technology, 17, pp.1303-1311, 1999.

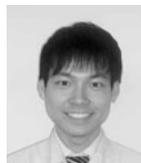
著者紹介



伊藤貞芳 Sadayoshi Ito
生産革新本部 環境生産革新センター
Green Manufacturing Innovation Center, Corporate Manufacturing Innovation Div.



村上友康 Tomoyasu Murakami
生産革新本部 環境生産革新センター
Green Manufacturing Innovation Center, Corporate Manufacturing Innovation Div.



領木直矢 Naoya Ryoki
生産革新本部 生産技術研究所
Production Engineering Lab., Corporate Manufacturing Innovation Div.



田端大助 Daisuke Tabata
生産革新本部 環境生産革新センター
Green Manufacturing Innovation Center, Corporate Manufacturing Innovation Div.



松田直子 Naoko Matsuda
生産革新本部 環境生産革新センター
Green Manufacturing Innovation Center, Corporate Manufacturing Innovation Div.



中 裕之 Hiroyuki Naka
生産革新本部 環境生産革新センター
Green Manufacturing Innovation Center, Corporate Manufacturing Innovation Div.
工学博士