

論文・解説

20

空調設備の効率・運用改善技術

Technologies for Improving the Efficiency and Operation of Air Conditioning Equipment

二宮 仁^{*1} 三好 滋^{*2} 安井 尚志^{*3} 松下 洋^{*4}
Masashi Ninomiya Shigeru Miyoshi Takashi Yasui Hiroshi Matsushita
山根 克之^{*5} 田中 博己^{*6} 藤下 祐司^{*7}
Katsuyuki Yamane Hiromi Tanaka Yuji Fujishita

要約

マツダは、2050年までに自動車のライフサイクル全体においてカーボンニュートラル（以下CN）を達成することを目指している。CNの実現には、革新的な技術を開発・導入するだけでなく、現時点で利用可能な技術を最大限に活用し、即座に取り組みを開始することも不可欠である。本稿では、CN実現に向けた基盤となる「省エネ」に関して、全社的な取り組みの中で重要な影響をもつ空調設備の事例を紹介する。オフィスビルや工場の空調に使用される冷凍機や冷却塔などの設備が能力低下する課題に対し、単一の設備内で洗浄薬品を循環させる局所洗浄技術を導入することで、低コストかつ容易にエネルギー「効率」を改善させた。更に、温度設定などの季節変動を考慮して空調設備の運転方法を工夫することで、「運用」の改善を実現した。また、これらの取り組みを定着させるために、改善効果を可視化し、PDCAサイクルを回す仕組みを導入した。

Abstract

Mazda aims to achieve carbon neutrality (CN) throughout the entire vehicle life cycle by 2050. In order to realize CN, it is essential not only to develop and introduce innovative technologies, but also to make maximum use of currently available technologies and start working on them immediately. This paper introduces an example of air conditioning equipment, which has an important impact on company-wide efforts to save energy, which is the basis for achieving CN. To address the problem of reduced capacity of equipment such as refrigerators and cooling towers used for air conditioning in office buildings and factories, we have introduced local cleaning technology that circulates cleaning chemicals within a single piece of equipment, making it easy and cost-effective. improved energy efficiency. Furthermore, improvements in operation were achieved by devising ways to operate air conditioning equipment that take into account seasonal fluctuations in temperature settings and other factors. Additionally, to ensure that these initiatives take hold, we have introduced a system that visualizes the effects of improvements and runs a PDCA cycle.

Key words : Carbon neutrality, Energy saving, Efficiency, Operation, Visualization of effects

1. はじめに

マツダは、「クルマ」、「人」、美しい「地球」が共存できる未来を築いていくため環境に配慮した方法でクルマのライフサイクル全体を見据えた商品開発を行っており、クルマの製造・使用・廃棄／リサイクルまで網羅し環境負荷の最小化を目指している。CN領域では、2035年グローバル自社工場でのCN実現を目標として定め、「省エネ」「再エネ導入」「CN燃料導入」を3本柱として段階的に進めている（Fig. 1）。その中でまずは「省エネ」が

最優先の取り組みと考える。「再エネ導入」「CN燃料導入」は技術革新が急激に進みつつあるが、価格や導入時期などまだ不透明な段階にあることに対し、「省エネ」は、今すぐに取り組めるアイテムであり、省エネすることにより使用エネルギーを最小限にでき、必要な「再エネ導入」「CN燃料導入」を低減できるためである。

マツダで使用する総エネルギーのうち、空調設備は約25%と大きな割合を占めている。事務所ビルに使われている空調設備は、世の中で一般的に普及している設備であることから、この設備で踏み込んだ省エネ活動が確立

*1～7 プラント技術部
Plant Engineering Dept.

できれば、水平展開することでより多くの効果が見込まれるとともに、熱のコントロール技術として生産系設備に応用することも考えられる。

本稿では、マツダがこれまで取り組んできた空調設備の省エネ技術について紹介する。

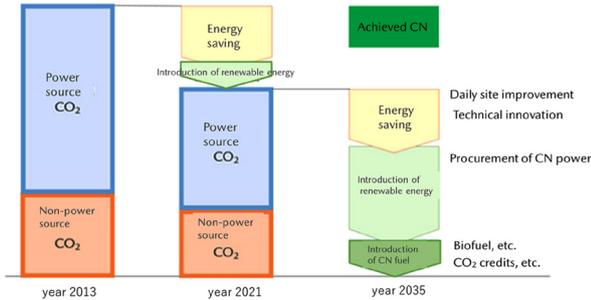


Fig. 1 Mazda's Roadmap for Reducing CO₂ Emissions

2. 空調設備の目指す姿と課題

マツダが考える空調設備の目指す姿は、「空調品質」と「環境性能」の両立であり、空調品質は「一人ひとりが最高のパフォーマンスを発揮でき、クルマづくりに専念できる快適な空間であること」、環境性能としては「貴重な資源・エネルギーを価値あるものとして使い切ること」と考えている。これを実現するコンセプトとして、大切なエネルギーを「必要な時に、必要な場所へ、必要な量だけ」使用することと設定した。

空調は、大きく4つのプロセスで構成されている (Fig. 2)。①熱製造：冷凍機や熱交換器などの設備で夏は冷水を冬は温水を製造する。②液体搬送：冷温水にポンプで圧力を与え、各フロアまで搬送する。③熱交換：冷温水を冷風・温風に熱交換する。④気体搬送：ダクトを通過して送風する。この中の、①熱製造・③熱交換プロセスで、エネルギー消費の85%を占めることから、冷凍機・冷却塔に、空調機など熱交換を行う設備の「効率」を維持していくことが重要である。

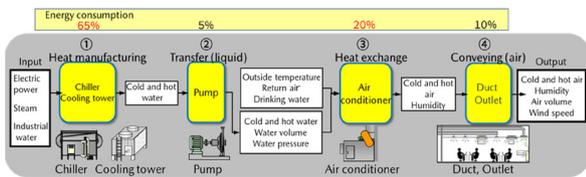


Fig. 2 Air Conditioning Process

一方で、効率を維持するためのメンテナンスは、労力やコストが掛かることから不十分な箇所もある。また、コロナ禍の在宅勤務などでオフィスでの働き方も大きく変わり、事務所の使われ方の変更による熱バランスの変化に加え、猛暑や気候変動により、「快適性」性能の維持が難しく、空調設備の「運用」改善も重要な課題となっ

ている。また、これら「効率」「運用」改善には多くの因子が絡むため効果の確認が難しくなっており、自立・定着化には「見える化」にも大きな課題があった。

上記課題に対し、マツダは①経年劣化により低下した既存設備の性能を回復する「効率改善」、②こまめなコントロールで省エネと快適性を両立する「運用改善」、③取り組みのPDCAを加速させるための「効果の見える化」について取り組んだ。

3. 効率改善技術

3.1 効率悪化の要因と課題

空調設備をはじめ生産設備においても、水を使用した熱交換器は多く存在している。その中で、主に冷房用(冷却)に使用する冷水を製造する冷凍機・冷却塔での効率低下の大きな要因は、熱交換部分に付着するスケールやスライムであり、このうち空調設備の水系設備の汚れはスライムが支配的である。スライムとは、バクテリアや真菌が形成する粘液状のもので、触るとヌルヌルした感触がある。スライム層による効率低下の主な要因は、水と熱交換器の間の熱伝導を阻害すること、また管路内の流れを減衰させ通水量が減少することである。したがって、定期的なメンテナンスや洗浄、水質の管理など適切な環境づくりで、まずはスライムを抑制することが重要である。

3.2 効率改善の課題と取り組み

冷凍機・冷却塔の能力低下について、これまでもスライムを除去することで効果を確認してきたが、従来の代表的な洗浄方法には以下の課題があった。

- ①高圧洗浄：高圧洗浄機を使って充填剤表面や水槽内のスライム(泥・藻)を洗浄する。この方法は比較的簡単で安価であるが、充填剤内部に詰まった汚れまで落とすことが困難である。
- ②薬品洗浄：薬品を使って充填剤や水槽内の汚れを落とす。この方法は充填剤内部まで効果的に洗浄できるが、冷凍機・冷却塔、それらを結ぶ配管まで含めた一括での洗浄が必要であり、大量の薬品投入や、洗浄後の廃液処理にバキューム車による対応が必要でコストが掛かり、大きな課題があった (Fig. 3)。

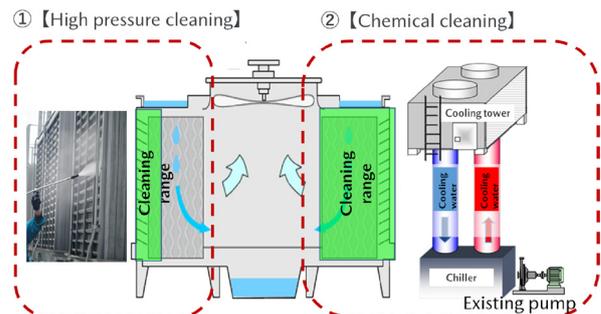


Fig. 3 General Cooling Tower Cleaning

更に、近年 35°C を超える猛暑日の増加（地球沸騰化の時代に突入）による影響で冷却水温度が下がらず冷却効率が低下し、設備が停止するなど冷却水温度の上昇が新たな課題として加わった。冷凍機・冷却塔の経年汚れに、外的要因も加わったことで冷凍機の熱交換器内部のブラシ洗浄のみでは能力維持が難しく、熱交換器内部を流れる「冷却水」自体の温度を下げる対策が必要であった。冷却塔充填剤内部の汚れを落とし能力を回復させるためには、大量の薬品を使用せず、少量の薬品で洗浄を可能にすることが重要な課題であり、冷却塔のみで薬品を循環させる方法に着目した。

(1) 新しい洗浄方式の基本原理解や技術的な詳細

今回、洗浄効果の高い薬品洗浄を採用し、洗浄範囲を限定させることで、洗浄効果と作業コスト低減が両立できる方式を検討し、単体で洗浄薬品を循環させる「冷却塔局所洗浄」技術を開発した。この局所洗浄技術については、冷却塔の下部水槽を循環槽として使用して、水中ポンプを用いて散水槽まで送水する。洗浄薬品は、散水槽の底に開けられた無数の小さな穴から充填材に散水し、汚れを落としながら下部水槽へと戻ることによって冷却塔内のみで循環を可能にした (Fig. 4)。

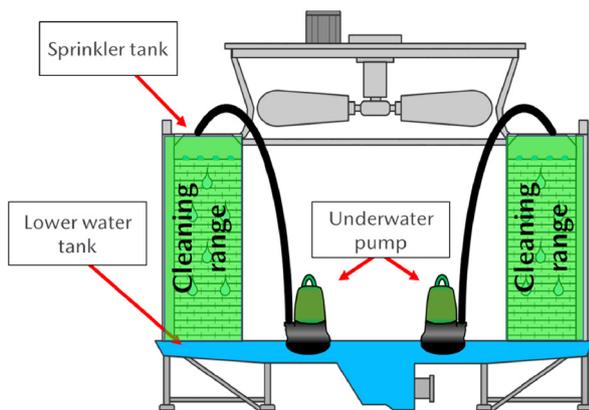


Fig. 4 Localized Cleaning of Cooling Towers

角形冷却塔については、最大規模の散水槽を想定して水中ポンプを選定した。能力は 10.8m³/h あり、上部水槽からの散水は 10.0m³/h のため、1 ユニットのの場合、水中ポンプ 2 台で満遍なく散水可能である。また、冷却塔の大きさ（ユニットの増加）については、水中ポンプを増やすことで臨機応変に対応できる。

スライム除去に使用する薬品については、過酸化水素 30% 洗浄液を採用した。過酸化水素は強力な酸化剤であり、有機物や微生物を分解する作用がある。スライム（バクテリアや真菌が生成する粘性物質）や、汚れが付着した設備や器具を洗浄する際に、スライムを分解し除去する効果的な洗浄剤として利用できる。更に、安全性が高く、分解された後は水と酸素になるため、多くの産業分野で広く使われている。洗浄後の廃液は過酸化水素処

理剤（酵素）で無害化することができ、排出する前には試験紙で過酸化水素残存濃度「0」を自ら確認することで、安全かつ容易に排水処理が可能となった。

この新しい局所洗浄技術は、従来の洗浄方法では解決できなかった課題を解決し、冷却塔充填剤内部の汚れを落とし能力を回復させることができる技術である。

(2) 冷却塔局所洗浄方式の効果

マツダでは、100 台以上の冷却塔に、この技術を導入しており、2022 年は冷却塔 22 台、冷凍機・モジュールチラー・空調機など 80 台に局所洗浄技術の水平展開を実施し、蒸気・電力などエネルギー消費量を算出した結果、原油換算で前年比 1904kL/年 (CO₂ 削減：6047t) 改善した。2023 年は 30 台の冷却塔洗浄に、その他熱交換設備の洗浄で早期刈り取りを計画している。

一方「冷却塔局所洗浄」では、熱交換に関係ない中間の配管は洗浄対象から除外でき、必要な薬品量や排水量を 90% 削減したことでコストも抑え、廃液処理も安全に行えるようになった。

(3) 冷却塔局所洗浄方式の適用展開

今回開発した冷却塔の局所洗浄を、自社保有の火力発電所の大型冷却塔に適用した。今まで空調用の冷却塔では保有水量 3m³ 程度の冷却塔で局所洗浄技術を磨いてきた。その施工方法を使って西浦工場にある自家発電 (25000kW) の冷却塔 (保有水量 395m³) へ水平展開を行った。規模は大きいですが、流入槽を循環槽として使用することで、保有水量を 22m³ まで下げることができ、薬品 2840kg (従来は 39500kg) で冷却塔局所洗浄作業を安全に施工できた。

効果については、机上計算上ではあるが冷却水温度を 2°C 低下させることで、タービン復水器の真空度が -94.5kPa から、設計値である -96.5kPa に近づき、冷却効率が上がることで発電量が年間 40320kW 増加となる。今後は、実機での確認を行い評価する (Fig. 5)。



Fig. 5 Monthly Electric Power Generation Increase Effect by Cooling Tower Cleaning

(4) 効率改善技術のまとめ

今回開発した冷却塔局所洗浄技術は、熱交換設備の効率を高めるために重要なメンテナンス方法である。この

技術は、冷却塔や冷凍機など設備の熱交換器のみに洗浄薬品を循環させて汚れを除去するもので、定期的に行うことで省エネ効果を持続させることができる。また、この洗浄技術は冷水・冷却水など、水を循環させ熱交換器で冷却する設備について、設備構造が同様であり展開可能である。具体的には冷凍機・モジュールチラーなど「熱源製造設備」や、空調機・ファンコイルなど「空調設備」、コンプレッサーに金型温調器・プレート熱交換器など「生産設備」にも展開可能である。また、サプライヤーにもこの技術の展開を進めており、設備更新時には熱交換器入口・出口配管それぞれに洗浄用の取り出し口設置を標準化している。

このように、「局所洗浄技術」は、容易に熱交換設備のメンテナンスを行うことができる技術である。省エネは一度ではなく、継続的かつ計画的に行うことが重要であり、スピード感をもって展開していきたいと考えている。

4. 運用改善技術

4.1 空調運用の問題点と課題

空調運用は、室内の人やOA機器などの熱負荷に対し、冷温風を適正に送風することで室内全体の温度を目標値に制御することである。しかし、近年の気候変動による外気温の変化や、働き方改革による室内の熱負荷分布の変化などによって、室内環境にもばらつきが生じて、都度調整しないと空調品質の維持が難しくなっている。その状況の中、マツダは創意と工夫で運用の改善を進めてきたが、現在の設備優先から、人優先のきめ細かい制御に変更することや、中間期自然エネルギーの有効活用が重要な課題となる。

4.2 空調シミュレーションによるばらつき改善

空調運用においては、室内の温度・湿度や風量などの制御が重要となる。しかし、現場では室内レイアウトの問題や人員、窓からの入熱が影響して温度や湿度にばらつきが生じている。このような状況では、快適な環境を維持するために多くのエネルギーが必要となり、コスト増加の問題を引き起こすこともある。しかし、現場で温度を確認しながら調整することは手間が掛かり現実的ではない。そこで、机上で室内の温度と気流環境を再現することができる空調シミュレーション解析（以下空調SIM）により、実際の状況に合わせた最適な空調制御方法を検討することが可能であり、室内温度や湿度など、ばらつきを特定することもできる。例えば、各部屋の断熱性能の違いや、冷風・温風の送り方による風量の違いなどの情報を基に、空調設備の改善策を提案することが可能である。実際に空調SIMを活用してばらつき改善を行い、コスト削減にもつながった事例を紹介する。

4.3 熱源エネルギー最小化に向けた最適制御

(1) 冷温水温度の最適化

一般的なビルでは、熱源設備で製造された冷温水を冷房時8℃、暖房時50℃一定で送水しているため、季節の変わり目にはエネルギーロスが生じている。猛暑日は、昼の外気も上昇するため、冷房時の水温を上げるのが難しいが、冬は室内負荷や外気温度も始業と同時に上昇するため、比較的溫度を制御し易く、暖房時の水温を1℃下げることによって、約3～10%の電力削減効果がある。温水温度を1日の時間帯で必要な温度に管理できれば、更に効果が上がる。ビル空調の暖房運転で、一番熱負荷が集中するのは朝の始業時で、その後は室内温度が落ち着き始め熱源設備の熱負荷も安定する（Fig. 6）。

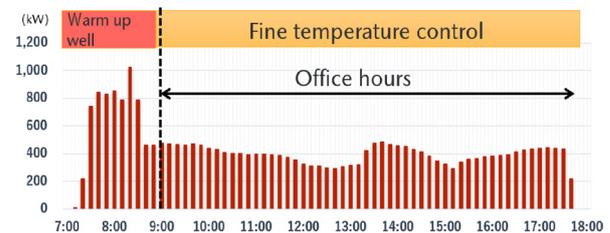


Fig. 6 Heating Heat Amount Over Time

次に、空調SIMを活用し、暖房時の温水温度を実機で検証した。改善前は黒線で示すように35℃一定に設定していたが、10時前には室内温度が目標温度帯を越えていることが分かる。これに対し、赤線で示すように、時間帯でのきめ細かい制御を行うことで、室内温度を目標温度帯に保つことができ、この問題を解消した。その結果、エネルギー使用量を前年比で電力10%、蒸気22%削減した（Fig. 7）。

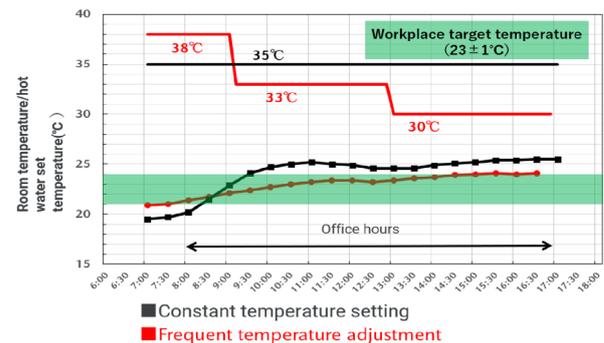


Fig. 7 Set Temperature and Temperature Change

(2) 中間期における外気エネルギーの最大活用（加湿冷房）

春秋の期間（中間期）は、20℃以下の外気を室内に送風することで、室内温度は24℃付近になることが多い。しかし、外気が20℃を超えると内部発熱の影響で暑くなる傾向にあり、冷凍機を運転している。短時間の運転時間ではあるがエネルギー増加の原因となっていたため、冷凍機の運転を最小限とする「気化熱」を利用した温・

湿度制御方法を開発した。具体的な内容としては、空調機には加湿器があり水を使用しているため、この加湿器を使用することで、「気化熱」を活用して空調機の吹き出し温度を下げることをねらった。しかし、加湿器はインターロックにより暖房時しか運用できない課題があったため、季節に関係なく加湿できるように改善することで解消した。更に机上で、加湿による室内の温度変化を検証した。中間期の温湿度基準 $24^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ 、 $50\% \pm 5\%$ で管理するためには、過去の運用実績から空調機の吹き出し温度を 21°C 以下に保つ必要がある。一方、加湿器の仕様より能力を確認した結果、気化熱の利用で、約 3°C 温度が下がることが分かった。併せて、空気線図 (Fig. 8) を用い、気化熱を利用できる範囲を検証した結果、青く囲んだ目標値の範囲で運用するには、外気は 24°C が上限、その時の湿度が 50% 以下であれば赤い斜線、気化熱の利用が可能なエリアに入ることが明確になった。

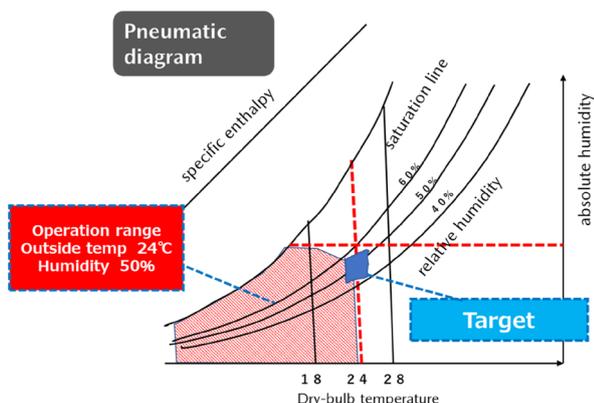


Fig. 8 Psychrometric Chart

そこで、限界値を基に気化熱利用の有無について、空調 SIM で解析した結果、室内温度を基準値の $24^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ 以内で管理可能であることが確認できた (Fig. 9)。更に各フロア複数点の温度・湿度を実測し、空調 SIM との整合性も確認した結果、外気 24°C 、 50% までは、「気化熱」を冷房として使用可能で、これまでカン・コツに頼っていたが、誰でも同じ運用が可能となった。また、中間期の湿度も制御可能となり快適性も向上した。その結果、エネルギー使用量を前年比で電力 18%、蒸気 30%削減した。

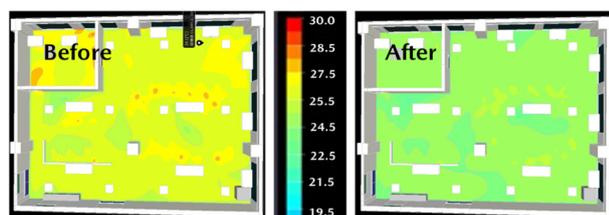


Fig. 9 Comparison Before and After Humidification Operation

このように、運用改善での空調 SIM は有効であり、結果を基に管理することで、年間通じて安定した室内環境の提供が実現でき、快適性の向上と省エネの両立が可能である。

5. 効果の見える化

省エネ改善の PDCA サイクルを回すためには、Check (効果確認) が重要であるが、これまでの章で取り上げてきた熱源設備の省エネ取組では、定量的な効果確認が行えないためにサイクルが回らない事例が多かった。そこで、熱源設備における省エネ取組の効果を定量的に「見える化」する手法を考案した。

5.1 熱源設備のエネルギー使用量の特徴, 課題, 対策

熱源設備でのエネルギー使用量は、運転時の外気条件 (温度, 湿度等) や稼働条件 (生産量, オフィスの使用時間等) などの要因によって変動する。これまで、熱源設備の省エネ取組の評価は、前年同月比較で行っていたが、外気/稼働条件の違いが考慮できておらず、一般的に数%程度とされる省エネ取組によるエネルギー削減量を定量評価できる精度は有していなかった。そこで、前年における熱源設備のエネルギー使用量と外気/稼働条件の相関を数式化することで、これらの影響を補正し省エネ効果のみを定量評価できる指標を作成した。

5.2 オフィスビル空調設備での見える化事例

Fig. 10 に 2018 年と 2019 年の 9 月における当社オフィスビル空調設備における日ごとの電力使用量と平均気温の推移を示す。9 月 10 日の平均気温に注目すると、2018 年の 23°C に対し、2019 年は 30°C と 7°C 高く、この日の電力使用量は、2018 年の $10\text{MWh}/\text{日}$ に対し、2019 年は $13\text{MWh}/\text{日}$ と約 30% 多い。稼働条件として平日と休日の電力使用量に着目すると、両者には 3 倍程度の差があり、休日の寄与は小さい。平均的な 1 か月間の平日数は約 20 日であるので、曜日の関係で平日数が 1 日増減した場合、月間エネルギー使用量には約 5% 程度の増減が生じると考えられる。

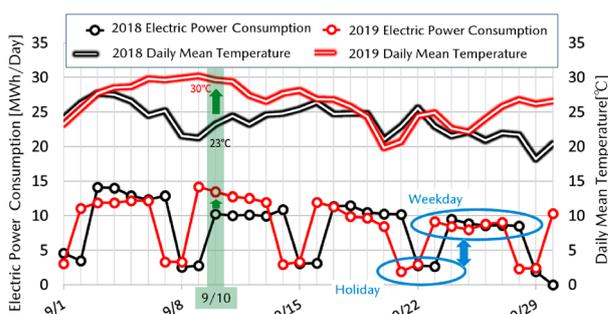


Fig. 10 Changes in Daily Electric Power Consumption and Mean Temperature of Office Building Air Conditioning Equipment in September 2018 and 2019

これらの条件の違いによる変動を補正するため、以下手順でベンチマークを算出する。なお、本事例のオフィスビル熱源設備では、電力と蒸気を併用している。そこで、電力使用量と蒸気使用量それぞれについて同様の分析を行う。

- ① 2018年の1日ごとのエネルギー使用量データを平日と休日に分類する。
- ② 1日ごとのエネルギー使用量を縦軸 y 、外気条件を示す物理量（最高/平均/最低気温、不快指数等）を横軸 x として散布図を描き (Fig. 11), 最も良い相関を示す物理量を探す。本事例では不快指数を採用した。
- ③ ②で描いた散布図の相関を説明できるモデル式 $f(x)$ を考える。電力、蒸気ともに不快指数が60の所で折れ曲がるV字型になっている。これを再現する式として Fig. 11 内のモデル式を考えた。電力には換気設備による固定消費電力があるため、外気不快指数に依存しない定数を仮定している。また、不快指数 > 60 の領域で運転する冷熱源機器には、成績係数が不快指数の上昇に伴い低下するという特性があるため、エネルギー使用量が非線形に増大する式を仮定した。
- ④ 最小二乗法により、2018年の実績を最もよく再現するパラメーター ($a \sim m$) を決定する。求めたモデル式を Fig. 11 内に実線で示す。
- ⑤ ④で求めた数式 $f(x)$ に2019年の外気条件 x' を代入し、ベンチマークを算出する。

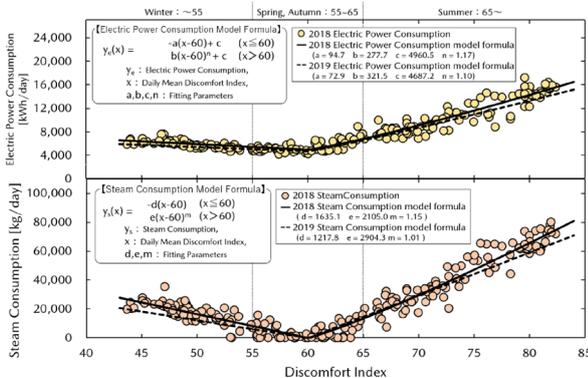


Fig. 11 Dependence of Power/Steam Consumption on Weekdays on Discomfort Index

2019年9月は、2018年9月に比べて月間平均気温が2.6℃高く、平日数は1日多かった (Fig. 12)。単純な月間エネルギー使用量の比較では、原油換算量で12kL/月の増加であり (Fig. 13)、従来の評価方法では、2019年に各種省エネ取組を行ったものの運転効率は悪化という評価結果となる。一方、ベンチマークと比較すると11kL/月の省エネ改善という結果となる。このように、前年からの外気/稼働条件の変化の影響を補正し、省エネ効果を定量的に評価することが可能になった。

また、Fig. 11 に2019年度のモデル式を破線で示す。いずれの不快指数でも2018年のモデル式よりも下方に位置しており、運転効率が向上したことが分かる。

	2018	2019	year on year change
Monthly Mean Temperature[℃]	23.7	26.3	+ 2.6 ℃
Working Days[Days/Month]	20	21	+ 1 Day

Fig. 12 Comparison between September 2018 and September 2019

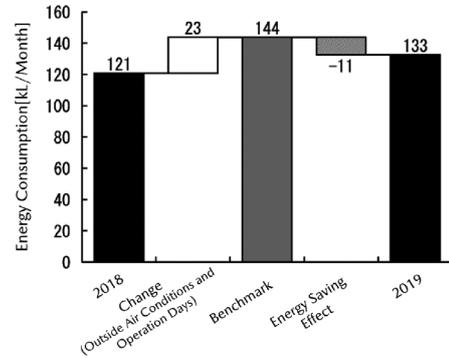


Fig. 13 Comparison of September 2018 Energy Consumption, Benchmarks, and September 2019 Energy Consumption

5.3 生産設備での見える化事例

プラスチックバンパー成型機や金型温調器などの生産に使用する熱源設備では、エネルギー使用量は生産量に大きく影響され、外気条件の影響は相対的に小さいと考えられる。そこで、以下手順でベンチマークを算出した。

- ① 2021年の月間電力使用量を月間生産量で割り、月ごとの台当たり電力使用量を算出する。
- ② ①で求めた台当たり電力使用量に2022年の月間生産量を掛けることでベンチマークを算出する。

Fig. 14 に金型温調器における2022年の月間電力使用量、ベンチマーク、4月からの累積削減電力量の推移を示す。本設備では、金型の冷却に冷却塔を用いている。省エネ取組として4月に冷却塔の薬品洗浄を、7~8月にかけて温調器熱交換器の薬品洗浄を実施した。7月頃から省エネ効果が表れ始め、年間の電力削減量は675MWhという評価結果となった。

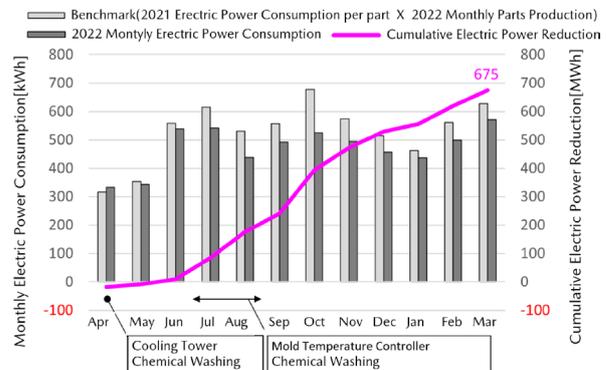


Fig. 14 Changes in Electric Power Consumption, Benchmarks, and Cumulative Reduction in Electric Power Consumption in 2022 for Mold Temperature Controllers

これらの評価指標を導入した職場では、「前月の省エネ成果の評価」と「翌月の運用改善アイデア出し」を行う定例会議を開催し、省エネ改善取組を継続的に進化させている。活動の成果が定量的に評価できるようになったことでメンバーのモチベーションが高く保たれ、さまざまな省エネ改善施策に意欲的に挑戦する風土が実現している。

6. おわりに

2035年グローバル自社工場でのCN実現を目標として定め、「省エネ」「再エネ導入」「CN燃料導入」を3本柱として段階的に進めている中で、「汚れを落とすだけで省エネ・CO₂削減」につながるこの取り組みは、あらゆる熱交換設備に適用できるため汎用性が高く、CN実現に向けて大きな効果を上げることができた。効率を追求する技術を核に、効率改善で生まれたエネルギーを必要な時に、必要な場所に、必要な量だけ使うことで、更なる省エネ・CO₂削減も可能である。

省エネは一度ではなく、継続的かつ計画的に行うことが重要であることを忘れずに、技術のアップデートやスピード感を持って全社、サプライヤー、地域のみならずへ展開していきたいと考えている。

■著者■



二宮 仁



三好 滋



安井 尚志



松下 洋



山根 克之



田中 博己



藤下 祐司