

OKI 本庄工場 H1 棟

～生産施設におけるゼロエネルギーファクトリー「ZEF」の実現～

OKI Honjo Plant H1 Factory -Achieving a Zero Energy Factory in Production Facilities-

大成建設株式会社
TAISEI Corporation
信藤 邦太
Kunita Shindo

キーワード：工場(Factory)、ZEF(Net Zero Energy Factory)
運用実績(operational performance)、クリーンルーム(cleanroom)、負荷予測(load forecasting)

1. はじめに

埼玉県本庄市に位置する OKI 本庄工場は、システムソリューションおよび EMS（Electronics Manufacturing Services：電子機器受託製造サービス）事業関連製品の製造拠点として、60 年にわたり地域と共に歩み、成長を遂げてきた。この地に新たに建設した H1 棟では、3 つのつながる（人・地域とつながる、環境とつながる、経営とつながる）をキーワードに、地域の歴史・文化・風土といった多様な魅力を積極的に取り込み、地域とより強く結びつきながら、共に成長する地産地消型の新たな工場モデルに挑戦した。さらに、環境負荷の低減や働く人々の安全に配慮した計画を推進し、工場の生産エリアを含むエネルギー消費量をゼロにする ZEF（Net Zero Energy Factory：ゼロエネルギーファクトリー）という新たな構想を実現した。時代のニーズや技術の進化に柔軟に応え続ける、フレキシブルかつスマートな工場のあり方を提示する。施設概要を表-1 に、建物外観・内観を写真-1,2 に示す。

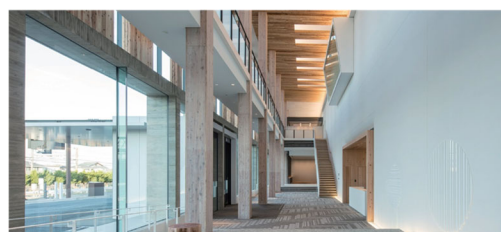
表－1 建物概要

建物名称	OKI 本庄工場 H1 棟		
所在地	埼玉県本庄市小島南 4 丁目 1-1		
敷地面積	124,156.89m ²	建築面積	9,789.21m ²
延床面積	18,837.72m ²	最高高さ	14.71m
階数	2 階、塔屋 1 階	構造	鉄骨造、免震
工場用途	精密機器・部品組立工場		
工期	2021 年 6 月 1 日～2022 年 4 月 18 日		
設計	大成建設株式会社一級建築士事務所		
施工	大成建設株式会社関東支店		
検証・開発	慶應義塾大学 准教授 川久保俊		
環境性能	BELS★★★★、『ZEB』(BEI= -0.33) CASBEE S ランク(BEE=5.2)		

・BELS は、建設中の 2021 年 8 月 16 日に認証を取得した。
・CASBEE は、埼玉県建築物環境配慮制度（CASBEE 埼玉県）にて評価および届出を行った数値である。



写真－1 建物外観



写真－2 内観(エントランス)

2. 生産施設におけるゼロエネルギーファクトリーZEF の構築

近年、ZEB/ZEH の実績数が増加する一方で、2050 年にカーボンニュートラルを実現するためには、エネルギー多消費施設である生産施設（工場）が果たす役割は極めて重要である。一方で、建築物省エネ法では、生産エリアを除いた一次エネルギー消費量を評価しているため、生産エリアのエネルギー消費を計画時に把握できないという課題がある。

この課題を解決するために、空調・換気・照明などを含む生産エリア全体を対象とした新たな評価指標「ZEF」を構築した。図-1 に示すように、生産設備を除いた生産エリアの全ての設備を評価の対象

に加えることで、工場でのエネルギー消費量を適正に評価することが可能となる。図-2には、ZEFチャートを示している。これはZEBチャートを踏襲したもので、基準値（既存実績値など）に対して、省エネルギーおよび創エネルギーによる一次エネルギー消費量の削減割合を評価する。単に評価の枠を生産エリアにまで広げ、本施設のエネルギー評価を行ったという一過性の取り組みにとどまらず、本計画は、ZEFの将来像を視野に入れた刷新性・波及性・持続性・協働性を兼ね備えたプロジェクトの位置づけである。国内の製造業界および建築設備業界におけるパラダイムシフトを促す可能性を持つ取り組みであると考える。図-3に、BELS認証によるZEB評価とZEF評価それぞれの基準値と計画値（太陽光発電による創エネルギー量を除く）の比較を示す。なお、算出した一次エネルギー消費量を除する建物全体の延床面積18,837.72㎡は共通である。ZEBの基準値313MJ/(㎡・年)に対して、ZEFの基準値は約4.4倍の1,389MJ/(㎡・年)であることから、ZEFの評価対象が包括的であり、工場全体のエネルギー消費量を評価可能であることが示された。ZEF評価では空調設備のエネルギー消費量が大幅に削減され合計で56%の省エネルギーを達成した。太陽光発電を含むと343.5MJ/(㎡・年)となり、BEI=0.25のNearly ZEFとなる。導入技術を図-4に示す。

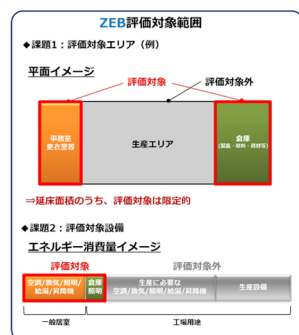


図-1 ZEBとZEFの定義の違い

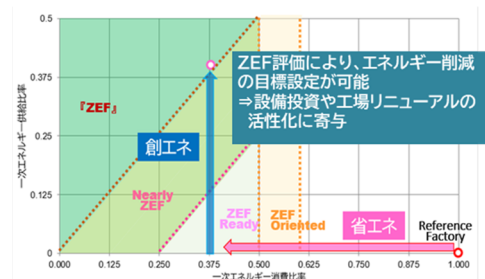


図-2 ZEFチャートによる生産施設の評価

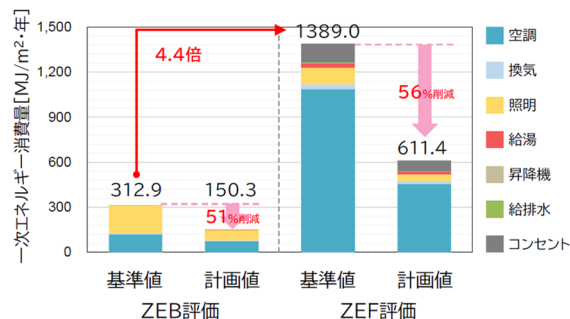


図-3 ZEB評価・ZEF評価の基準値・計画値

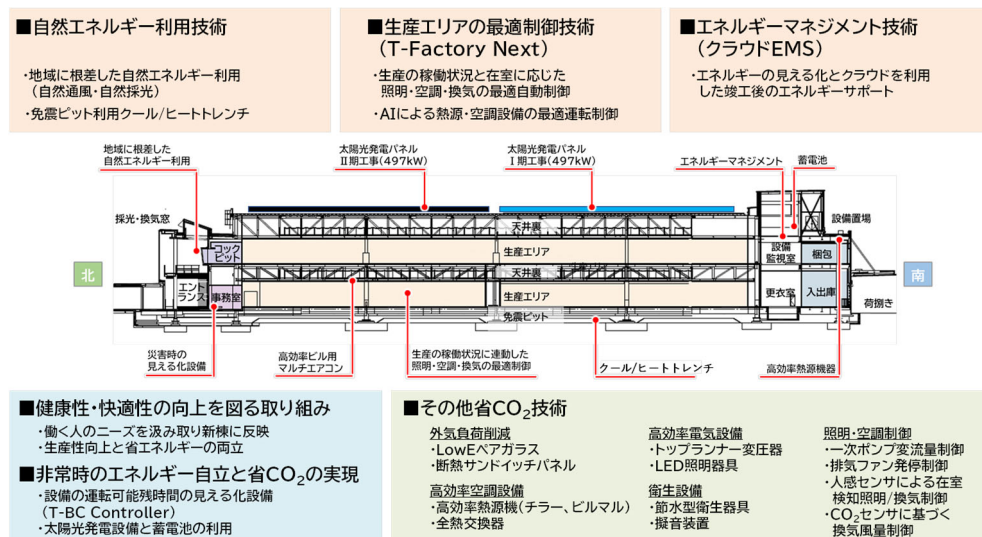


図-4 本施設に導入している技術

3. ZEFを実現するための開発・導入技術

3.1 生産エリアの最適自動制御

従来の生産施設では、機器の最大発熱量や換気回数に基づいて設計風量を設定し、空調・換気設備を常時運転することで、結果的に多くのエネルギーを消費していた。また、清浄度が求められるクリーンルームでは、性能を優先するあまり過剰な設計スペックとなりがちで、安全側に寄った空調設備が選定される傾向がある。

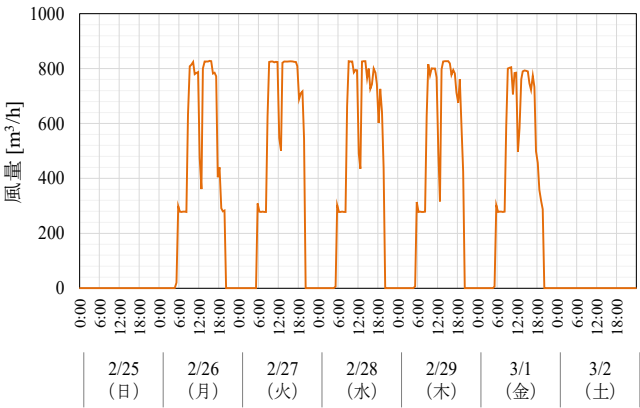
本施設では、製品の品質や生産量に影響を与えず、かつ作業者の安全性・快適性・生産性を維持しながら、エネルギー消費量の大幅な削減を目指した。表-2 に導入したシステムの入力情報と制御対象を示す。画像センサによって人の在・不在（在室人数）を検知する。クリーンルームにはパーティクルカウンターを設置し、清浄度を監視している。これらの情報を基に、照明・換気・空調の制御を行う。

運転データの一例として、図-5 に 2024 年 2 月 25 日（日）～3 月 2 日（土）の作業室 2 の換気風量の推移を示す。早朝や昼休憩時間（12:00～13:00）を中心に風量が低減している。これにより、作業室 2 の外調機の電力消費量は約 41%の削減効果があった。さらに、排気ファンにおいては約 83%の削減効果があった。当該制御により、大幅なエネルギー消費量の削減を図ることができた。また、風量の低減によって熱源のエネルギー消費量の低減も確認した。

表－2 入力情報と制御対象

入力情報 (センサー)	検知項目	制御		適用エリア			備考
		対象設備	内容	クリーンルーム	作業室1	作業室2	
画像センサ	エリアごとの 在室人数	照明	減光制御	○	○	○	在室時300lx、不在時消灯（不在時50lxなどに設定変更可）
		一般換気(VAV)	換気風量制御	—	○	○	25m3/h×在室人数にて風量を演算し、さらにCO2濃度を計測し、それを満足する場合風量低減
		空調 (ビル用マルチ エアコン)	設定温度緩和・ 運転モードの切 替制御	—	○	○	「設定温度」→「2.0℃緩和」→「送風」→ 「停止」のモード切替
			冷媒蒸発 温度制御	—	○	○	必要除湿量から蒸発温度を 1℃→9℃→14℃に可変
パーティクル カウンター	クリーンルーム の清浄度	空調 (設備用PAC)	循環風量制御	○	—	—	クラス100,000を下回り、かつクリーン ルーム内の設定温度の範囲で風量低減
生産設備	生産設備の 稼働状況	局所排気(VAV)	局所排気制御	△	△	△	生産設備の状況に応じて局所排気の ON/OFFおよび風量可変
—	生産 スケジュール	外調機	スケジュール 運転制御 (中央監視)	○	○	○	生産稼働スケジュールに応じて外調機の 運転を制御

<凡例>○:適用、△:将来対応工事、—:適用していない



図－5 作業室 2 の換気風量（実績値）

3.2 クリーンルームの空調設備の省エネルギー対応

図-6 にクリーンルームでの省エネルギーに関する取り組みを示す。本施設のクリーンルームの要求清浄度はクラス 8（クラス 100,000）であり、用途や製造プロセス、製品に応じて異なるものの、HEPA フィルタを使用し循環風量は換気回数 15～20 回/h 以上は確保するのが通常である。省エネルギーを

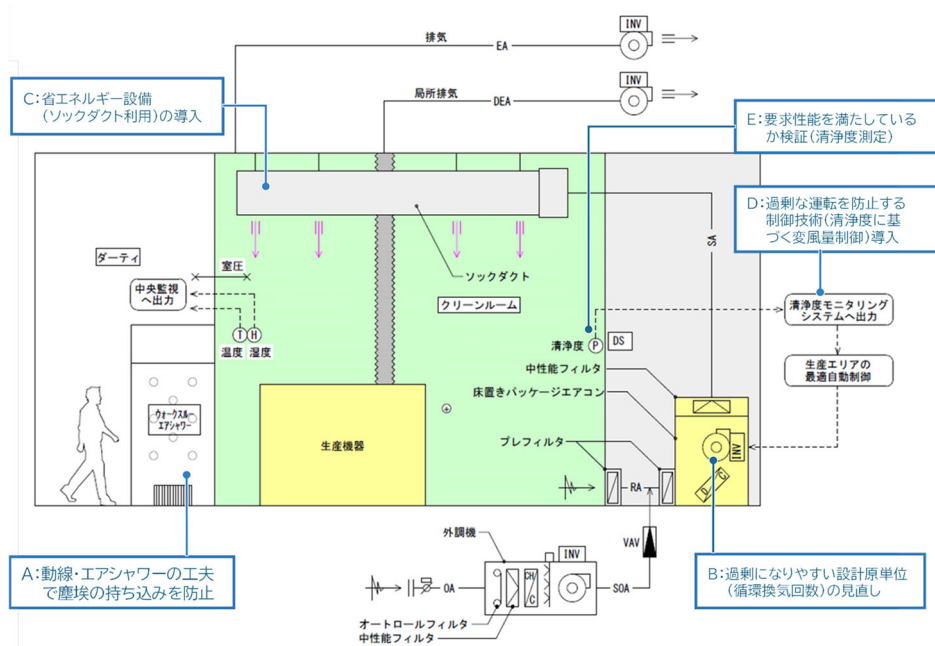


図-6 クリーンルームでの取り組みとシステム構成図

目的に、机上計算や大成建設技術センターにおけるクリーンルーム実績値から、循環風量は換気回数 10 回/h に設定した。

クリーンルームは通常 HEPA フィルタによってフィルトレーションされた空気を室内に送風することでクリーンルームの清浄度を確保する。一方、HEPA フィルタの圧力損失は非常に大きく搬送動力の増加に直結する。搬送動力を削減することを目的に、HEPA フィルタは取り止め、ソックダクトによる方式を採用した。設計時、複数案の方式を検討し、省エネルギーのみでなく、製造時の運用やフレキシビリティも優先させながら、省エネルギー性の高い方式としている。ソックダクトの素材はポリプロピレン 100%の電石不織布としている。フィルタ材と補強材を熱エンボス加工で溶着しているので、通常使用において破損の起こりにくい 2 層構造になっている。捕集効率は $0.3\mu\text{m}$ で 96.44%のため、通常の HEPA フィルタの 99.97%には劣るものの、クラス 100,000 を十分確保できることを確認している。さらに、圧力損失は HEPA フィルタに比べて 50%以下であることから、ファンの消費エネルギーを大幅に削減することが可能となっている。

さらに、前述の通り、清浄度監視を行いながら循環ファンの風量制御を行う制御技術を導入している。清浄度は常時モニタリングを行っており、デジタルサイネージで表示も行うことで、来館者にクリーン度の高い空間で製造していることをアピールしている。

以上、高い清浄度が求められるクリーンルームにおいて、従来はそれを維持するために高スペックな空調設備を長時間稼働させる必要があるが、本施設においては、設計段階からさまざまな工夫を取り入れ、竣工後も継続的に運用状況の検証を行っている。

3.3 AIによる熱源・空調設備の最適運転制御

本システムは、気象データ、生産機器稼働スケジュールや過去の運用実績値などからエネルギー消費量や発電量を機械学習により予測し、その予測負荷から自動的に最適解になるように空調制御する技術（以下、オートチューニング）を開発し、導入した。また、年間運用データを蓄積して PDCA を繰り返すことで、より高精度な予測を行うことが可能となる（図-7）。負荷予測は、複数の統計解析手法を組み合わせることで、精度を高めている（図-8）。予測の間隔は 30 分ごとであり、当日から翌々日の最大 72 時間先までが対象期間である。

一般的な冷熱源においては冷水送水温度を高く設定した場合、熱源の運転効率が上がり、消費電力は下がる。一方で、冷水送水温度の上昇に伴い空調機コイルの熱交換効率が低下することにより、冷

水流量が増加するため冷水ポンプにおける搬送動力は増加する傾向となり、冷水送水温度による熱源単体の消費電力と搬送動力はトレードオフの関係にあるといえる。

このように、冷水送水温度と熱源系統の消費エネルギーのトレードオフ関係を定量化した効率モデルを作成し、本システムに導入した。負荷予測値をもとに、熱源システム全体として最小の消費電力となる送水温度を算出し、それを目標値として制御をかけている。例えば、需要が少ない場合には冷水出口温度が高い方向にシフトし、需要が多い場合には低い方向にシフトする。これにより、冷熱源システム全体の COP を向上させることができる。

図-9 に、2022 年 8 月と 2023 年 8 月の空気熱源モジュールチラー（以下、チラー）廻りの温度と温度差を示す。オートチューニングを使用していない 2022 年 8 月のチラーの出口温度は 9℃で概ね一定であった。通常、熱源設備の送水温度は可変させないため、オートチューニングの導入前は一般的な運転であったことが確認できる。

なお、設計温度は 7℃送水であったが、工場の設備管理者の判断によって 9℃設定での運転となっていた。そのため、チラーの出入口の温度差は平均で 3℃程度となっており、設計当初の想定よりも冷水出入口温度差が小さい状態であった。

一方、オートチューニングによって 2023 年 8 月のチラーの出口温度は、運用の上限/下限として設定した 7～14℃の間で可変していた。この間、設備管理者による設定温度の変更は無く、機械学習による負荷予測に基づく制御を自動で行っていた。チラーの冷水出入口温度差は平均で約 5.7℃であり、2022 年 8 月の約 2 倍の温度差であった。冷水出入口温度差を大きく取りながら運転することで送水量を低減させることが可能になり、結果としてオートチューニングによってポンプ搬送動力の低減に寄与していることが確認された。

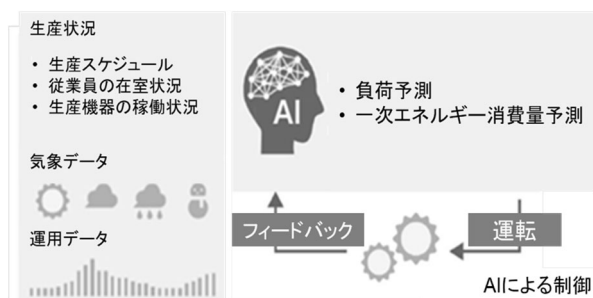


図-7 負荷予測と制御のイメージ

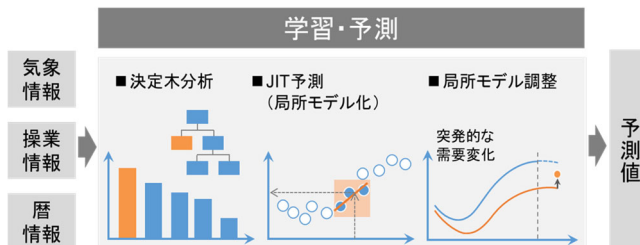


図-8 負荷の予測手法

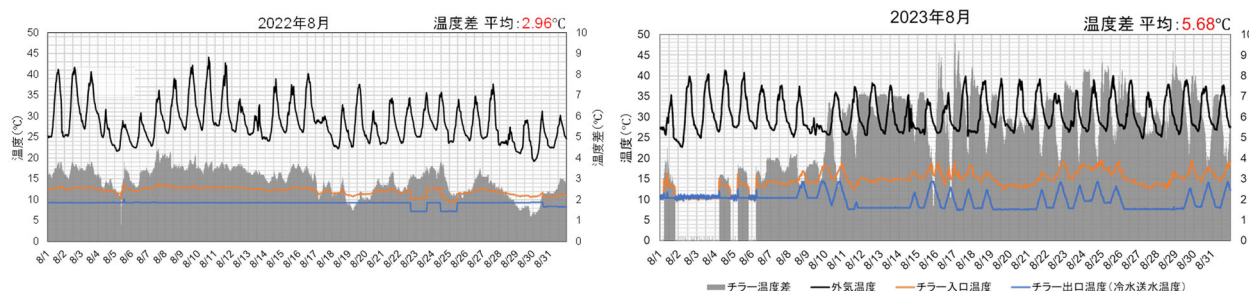


図-9 チラー出入口温度と温度差(左:2022 年 8 月、右:2023 年 8 月)

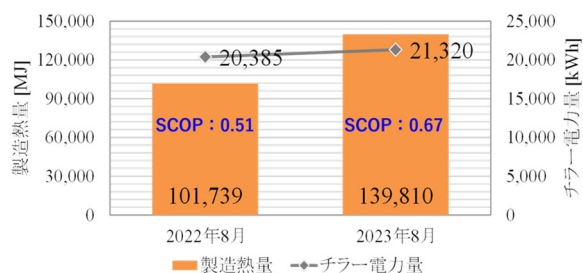


図-10 チラー製造熱量と消費電力量(8月)

図-10 に、2022 年 8 月と 2023 年 8 月の月間のチラー製造熱量とポンプなどの補機類も含む消費電力量をそれぞれ示す。特に 2023 年の 8 月は、2022 年よりも外気温度が平均で約 2.1℃高かったことや生産稼働状況の違いにより単純な比較は難しいものの、製造熱量が約 37.4%増加したことに對して、チラーの消費電力量は約 4.6%の増加に留まり、システム COP は 0.51 から 0.67 に向上した。

4. 継続的なデータ分析と ZEF の達成

4.1 クラウド EMS の導入とエネルギーサポート

ZEF の本質的な達成には、設計や施工だけでなく、運用開始後の継続的なデータ分析と運用改善が不可欠である。本施設では、クラウド EMS やデジタルサイネージを活用し、エリア・設備ごとの詳細なエネルギーデータの収集・分析を実施している。日々データを建築主および大成建設の専門スタッフが遠隔監視している（図-11）。また、建築主も含めた全ての関係者がリアルタイムに情報を共有できる「ZEF」モニターを運用 2 年目に開発し、チューニングや運転改善を取り組み続けた結果、運用 3 年連続 Nearly ZEF を達成している。

図-12 に年間の一次エネルギー消費量の基準値と計画値、実績値の内訳と基準値に対する削減割合を示す。基準値に対しては、運用 3 年目の実績値は約 51%のエネルギー削減となり、運用 2 年目の実績値 53%を下回った。ZEF 実現に向けた創エネルギー強化策として、運用 2 年目にⅡ期工事により太陽光発電パネルを屋根北面へ増設し、発電能力を約 2 倍に拡張した。その結果、運用 3 年目の太陽光パネルによる創エネルギーは、基準値に対して約 39%の創エネルギーとなった。太陽光による創エネルギーを含む年間の合計では、142.9MJ/(㎡・年)となった。

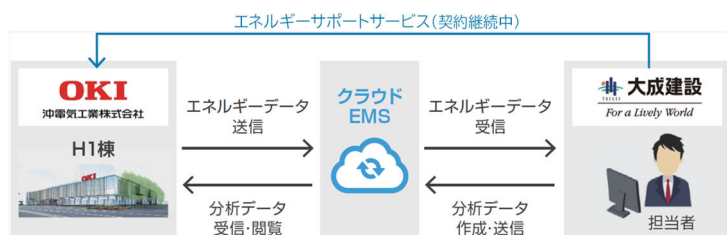


図-11 エネルギーデータの遠隔監視（エネルギーサポート）

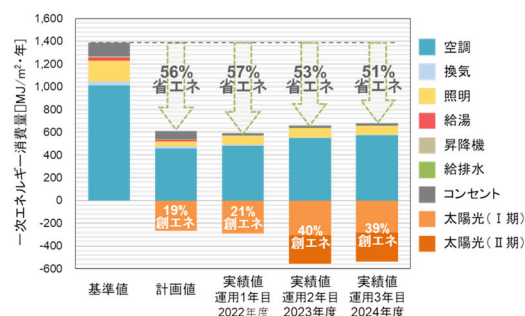


図-12 年間一次エネルギー消費量の削減率

4.2 エネルギー消費量削減に向けた取り組み

運用開始以降に取り組んだ、エネルギー消費量の削減に向けた取り組みの内容について 2 点ほど詳述する。

(1)クリーンルーム不使用时の空調・換気の停止による電力量の削減効果の検証

クラス 100,000 のクリーンルームにおけるエネルギー消費量は工場全体の 36%を占める。空調はその 95%を占めており、削減の余地があった。運用 2 年目までは、土休日において製造が稼働していない時間帯が一部あったものの、空調・換気を停止せず連続して運転していた。これは従来、クリーンルームは、定められた清浄度を維持する必要があるため、24 時間 365 日空調を稼働させる運用が一般的であるためである。

そこで、運用 3 年目の 2024 年度では、製造が稼働していない時間帯において、空調・換気（外調機、排気ファン、設備用 PAC）を停止する運用とした。図-13 に示すように、空調を停止した時間帯の消費電力量は 0kWh となっている。この停止した時間帯においては、クリーンルームはブレイクするものの、清浄度のデータなどから運用上問題ないことを常時確認し（図-14）、施設管理者の了解を得たうえで空調による一次エネルギー消費量の削減に踏み切った。

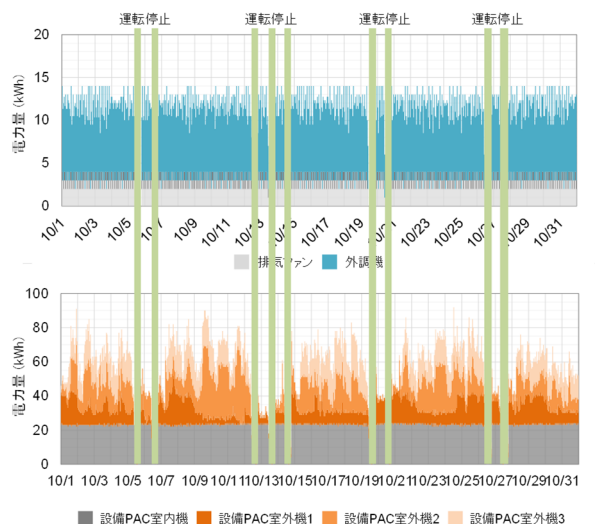


図-13 クリーンルーム系統の外調機などの消費電力量

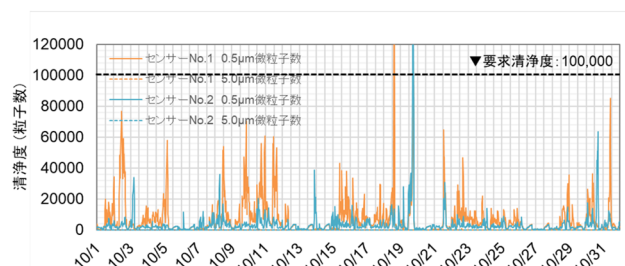


図-14 クリーンルームの清浄度

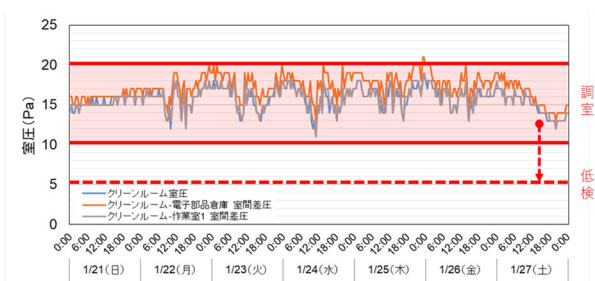


図-15 クリーンルームの室圧

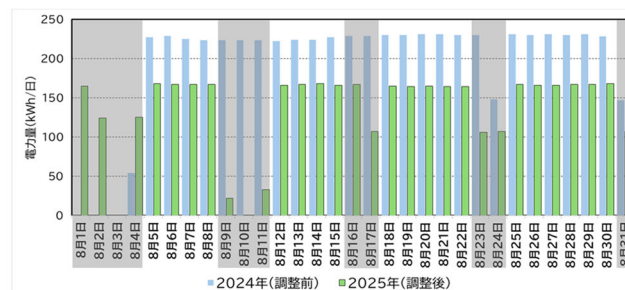


図-16 クリーンルーム用外調機のファン消費電力量

(2) 過剰な加圧風量の低減による電力量の削減効果の検証

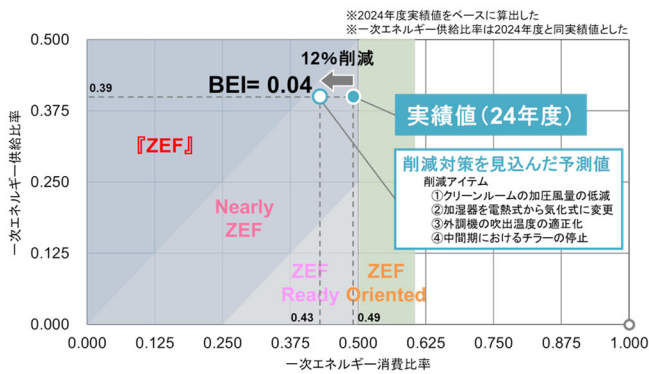
図-15 にクリーンルームの室圧の推移を示す。循環風量は変動させているものの、加圧外気量は一定であるため、10～20Pa 程度の陽圧が維持されていることがわかる。なお、目標値は 5Pa 以上であることから、やや大きい数値であり加圧外気量の低減によってファン搬送動力の低減、および外気量低減による外気負荷の削減の可能性が示唆される。クラス 100,000 という清浄度は確実に維持しつつ、陽圧を保つことを念頭に 5Pa を目標に室圧を低減した。2025 年 6 月 7 日に室圧変更のための試運転調整を行った。風量を 14%低減させることができた。図-16 に室圧調整前後のクリーンルーム系統の外調機のファン電力量を示す。調整前（2024 年）と調整後（2025 年）の稼働日が異なるため平日の稼働日を抜粋（グレー網掛け以外）して比較すると、27%の削減効果が得られた。さらに、風量低減に伴い、チラーの電力量も削減できた。清浄度を維持するために過剰に陽圧を保持していたクリーンルームに対し、最低限の加圧風量に設定することで、無駄な空調エネルギーの削減を図ることができた。

4.3 今後の展望

(1) 削減策を踏まえた年間エネルギー収支の計画

更なるエネルギー削減および『ZEF』の達成に向けて、複数の削減策を試行中、あるいは検討中である。これらの施策を実施した場合の結果を、図-17 に示す。算出には 2024 年度の実績値を基準として用いた。①クリーンルームの加圧風量の低減については、2025 年 6 月よりすでに実施しており、実際の削減効果に基づいて算出した。②加湿に要するエネルギー消費量が多いことから、電熱式蒸気加湿から気化式加湿に変更した場合の効果は、想定値として評価している。③外調機吹出温度の適正化については、今後の検証が必要であるが、想定値に基づいて評価している。④中間期におけるチラーの停止による待機電力の削減効果については、実績値に基づいて算出した。

これらの施策を総合的に全て取り入れた場合、約 12%の省エネルギーが見込まれ、BEI は 0.04 となった。しかしながら、依然として『ZEF』に到達していないため、今後は生産稼働に応じた局所排気の



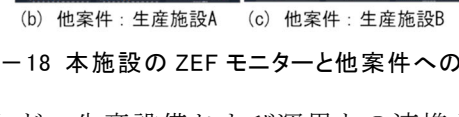
図－17 各種削減策を見込んだ年間予測



(a) 本施設



(b) 他案件：生産施設A



(c) 他案件：生産施設B

図－18 本施設の ZEF モニターと他案件への展開

風量制御や、生産スケジュールに応じた空調設定値の変更など、生産設備および運用との連携が不可欠であると考えられる。

(2)ZEF の水平展開

ZEF モニターは竣工後に新たに開発された。ZEF の分析を進める中で、表示すべき画面の構成について沖電気工業および大成建設の協働により設計・開発を行った。この画面は、ZEF の達成を目指す他のプロジェクトにも適用可能な汎用性を有している。一方で、生産施設におけるエネルギー消費の傾向は、運用形態や製造品目、施設の用途によって大きく異なる。そのため、ZEF の標準化を進めると同時に、複数のバリエーションを検討している（図-18）。現在、ZEF 関連のプロジェクトはすでに複数進行しており、標準化を基本としつつ、施設ごとの特性に応じた一部カスタマイズを加えることで、多様な生産施設において ZEF をスタンダードとして定着させる取り組みを継続している。

5. まとめ

本計画のポイントは、第一に、生産施設におけるゼロエネルギーファクトリー「ZEF」を構築し、実現したことが大きな成果である。従来の省エネルギー評価では対象外であった生産エリアも含め、工場全体の一次エネルギー消費量を評価する新指標「ZEF」を導入した。カーボンニュートラル社会に向けた新しい基準を示した点は、社会的な価値が高い取り組みとなる。

第二に、ZEF 達成のために独自の開発・導入技術を展開した点である。画像センサや AI による設備の最適運転制御、クリーンルームの清浄度監視、省エネルギー設備の工夫、頁数の都合で割愛した CFD・エネルギーシミュレーションの連成解析、クール・ヒートトレンチの採用など、工場用途に特化したさまざまな先進技術を融合し、高効率なエネルギー管理を実現している。

第三に、継続的なデータ分析と運用改善による ZEF の達成である。クラウド EMS やデジタルサイネージによるエネルギーデータの収集・分析、関係者による PDCA サイクルの運用、実績値の蓄積と標準化を通じて、3 年連続 Nearly ZEF を達成し、持続可能な省エネ推進体制を構築した。

これら三つの成果は、工場用途における省エネルギー・創エネルギーの新たなモデルケースとして、社会的意義が大きいものである。