

ゼロ・エネルギー・スクール 瑞浪北中学校 Net Zero Energy School – Mizunami Kita Junior High School

(株) 日建設計 エンジニアリング部門 設備設計グループ
NIKKEN SEKKEI LTD, Engineering Department, Building Services Design Section
佐藤孝広, 田中宏明
Takahiro SATO, Hiroaki TANAKA

キーワード：ZEB（Net Zero Energy Building），教室内環境（Indoor Environment of Classroom），実測調査（Actual Survey），環境教育（Environmental Education），POE 評価（Post Occupancy Evaluation）

1. はじめに

1-1. 経緯と概要

本建物は、瑞浪市内にある公立中学校の既存 3 校の統合を目的として校舎および屋内運動場が建設された。「学校施設のゼロエネルギー化」及び「環境教育の推進」に取り組み、国内でも有数の暑い地域である岐阜県東濃西部地域から、次世代の学校施設や環境教育の在り方について情報発信することを目指した建物である（図 1）。

従来の学校建築において課題となっていた、換気不足による空気質悪化やムラのある温熱・光環境など学校環境衛生の改善点にも配慮して、「エネルギー消費の削減」と「健康で快適な学習環境の実現」を両立させ、学習効率向上にも寄与する教室の環境づくりに取り組んだ。

平成 26 年度文科省のスーパーエコスクール実証事業に認証され、日本の学校施設（幼稚園を除く）で初めてのゼロ・エネルギー・スクールを達成した。ここでは 2019 年 4 月の開校以降行った、実測およびエネルギー使用実態調査の結果を報告する¹⁾。

【建物概要】

所在地：岐阜県瑞浪市
建築面積：4,572.34m²
延床面積：8,090.07m²
構造：鉄筋コンクリート造，一部木造，鉄骨造
階数：地上 3 階



図 1 建物全景

1-2. 日本における学校施設のエネルギー消費実態

小中高校のエネルギー消費量原単位は 400[MJ/m²年]と、他の建物用途と比較すると小さい（図 2）。しかしながら、日本においては中学校の学校数は約 10,000 校を数え、エネルギー消費量としては業務ビル全体の 8%にもものぼる（図 3）。学校建築における技術の普及・波及は影響度が大きく、ロールモデルとなる学校が必要となる。



図 2 建物用途別の一次エネルギー消費量
DECC 非住宅建築物の環境関連データベース、
H19 年度データより作成

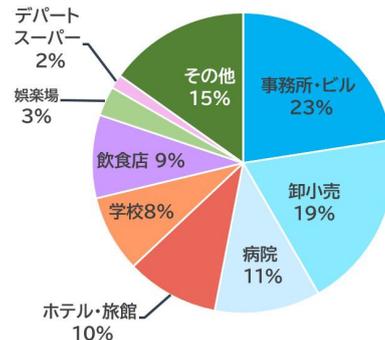


図 3 建物用途別の最終エネルギー消費内訳（2018 年）
出典：建物用途別の床面積あたり日本エネルギー経済研究所
「エネルギー・経済統計要覧」より作成

2. 自然と共生する建築・環境・設備技術の融合による ZEB の実現

2-1. 建物配置計画

本建物は中庭を囲む 3 棟に分散した校舎棟と屋内運動場からなる。中庭に対しては屋内運動場の壁面を流線型のフォルムとし、南棟は約 10° 南東方向に開く配棟計画とした。昼間の卓越風（南西風）に対し、校舎棟および屋内運動場の軸線を正形に配置した場合と比較し、南棟と屋内運動場を開いた校舎配置案が中庭の風通しが改善する様子を確認した（図 4）。

南西方向の卓越風を中庭に呼び込み、中庭の木々による蒸散作用により冷やされた涼しい風を校舎内に取り込むことで、冷房負荷の削減に寄与し、また、中庭へ風を呼び込む入り口の位置に風力発電を設置し、効果的に発電できるよう図っている。

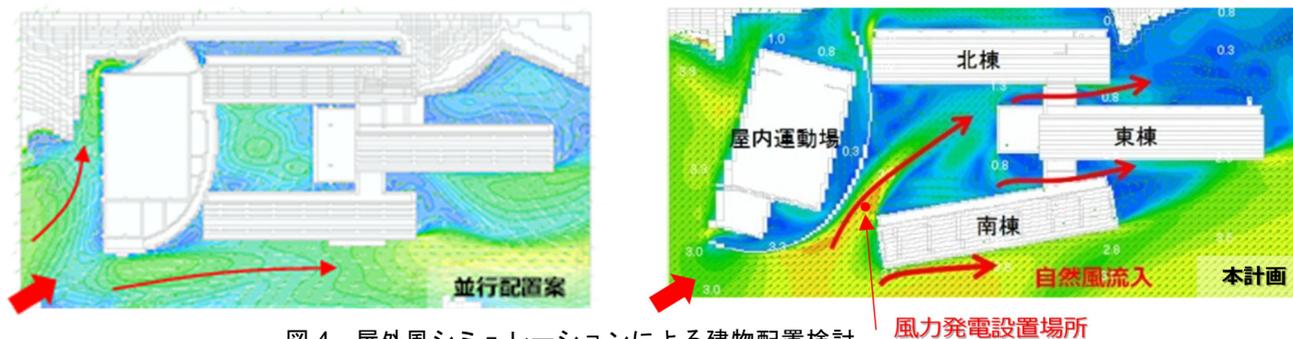


図 4 屋外風シミュレーションによる建物配置検討

2-2. 自然換気

校舎棟を縦横断する中央階段を中心としたコミュニケーションスペースでは、焼き物のまちとして知られる地域の歴史的な遺産である「登り窯」の熱機能を模倣し、高低差と温度差の浮力効果による自然換気を行う計画とした。昇降口や中庭を通して校舎内に入った空気が、建物内を巡り、「登り窯」の最頂部に設けた排気塔から外へ抜ける風の道を設けた。初夏や中間期の自然換気に加え、クールヒートトレンチから教室を經由し廊下、「登り窯」へとつながる一連の空気のルートを利用したナイトパーージにも活用している。

各校舎棟をつなぐ中央階段ホールの自然換気の効果について換気回数にて評価するため、メインホール頂部の換気窓において排気風速を計測し換気窓の面積を乗ずることで、換気量とみなした。換気回数は、算出した換気量をホールの空間の容積で除することで算出した。中間期（2019 年 4 月～10 月末）の期間では、換気回数が最大 15 回/h を超える時間もあった。平均でも 5 回/h 程度であり、自然換気が有効に機能していることが分かった（図 6）。



図 5 ホール

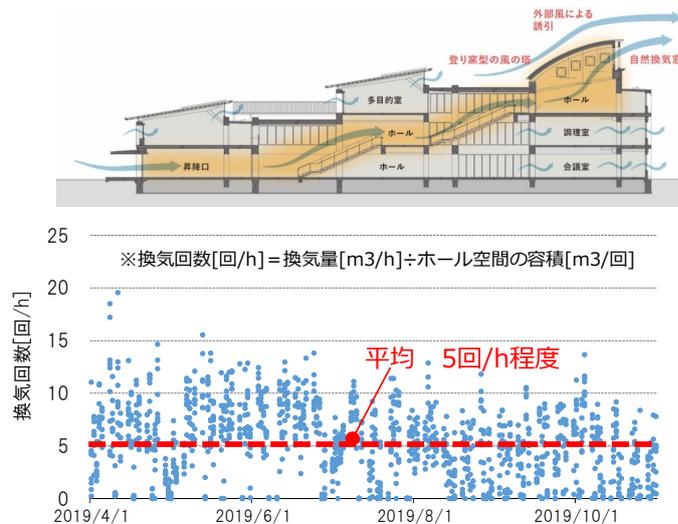


図 6 自然換気によるホールの換気回数

2-3. 太陽集熱

本建物では、普通教室の外壁の腰壁に太陽集熱壁が設置されている。図 7 に詳細を示す。コンクリート躯体の外側に日射吸収率を高めるために黒く塗装されたガルバリウム鋼板を設け二重壁とし、集熱を図っている。教室後方のロッカー内に設置された太陽集熱用ファンにより、教室内の空気を二重壁内に取り入れ、回収した太陽熱をクールヒートトレンチと同様にロッカー上部のスリットから吹き出すことで教室内に戻し、暖房負荷軽減に有効利用する。

2020年2月の代表日における、校舎棟における太陽集熱利用の効果を図9示す。普通教室の二重壁内温度は日の出とともに温度上昇を開始し、11時にピークとなった後、以降は温度低下していった。教室の室温が15°C前後であったことに対して、ピーク時には二重壁内温度が30°Cまで上昇した。冬季午前中の採熱に有効であると考えられるが、午後は室温と二重壁内の温度差が小さくなっていくため、ファンの消し忘れを徹底することで、より省エネが図れる見込みがあると考えられる。

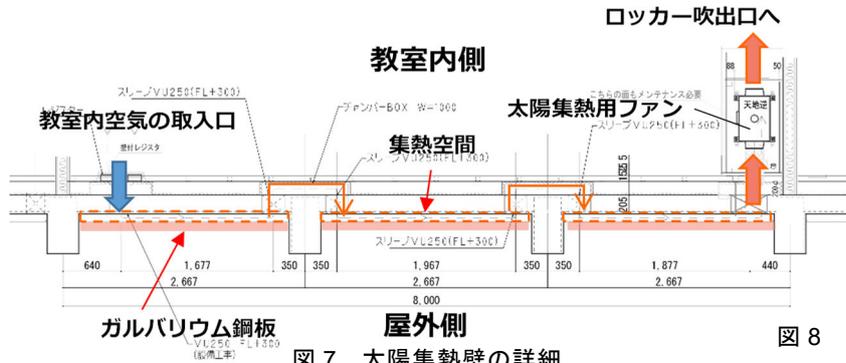


図7 太陽集熱壁の詳細

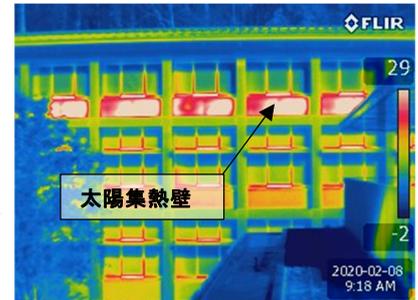


図8 サーモカメラによる太陽集熱壁の様子

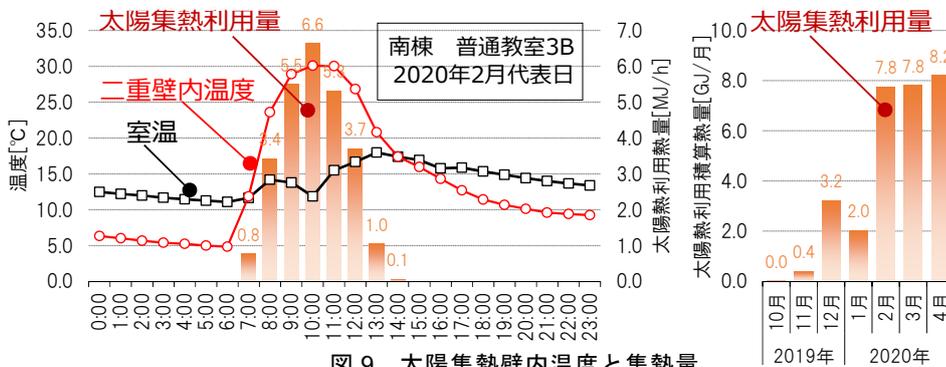


図9 太陽集熱壁内温度と集熱量

2-4. クールヒートトレンチ

本建物において、校舎棟および屋内運動場のピット部分を利用したクールヒートトレンチが設けられ、いずれのルートも外気取り入れから末端まで100mを超す長さを確保している(図10)。断面が小さくなる大梁下の箇所でも通過風速が1.0[m/s]を下回り、ピット底面との熱交換が十分になされるよう計画されている。トレンチ経由で取り入れた外気は、各棟最上階の普通教室および南棟1階の特別支援教室において吹き出す計画としている。

2019年の7~9月および11~12月における、取り入れ外気温とクールヒートトレンチの経路末端部における温度の相関を図11に示す(平日8~16時に限る。土日除く)。7~9月では、外気温が20~40°C近くまで変動していたが、トレンチ出口温度は21~25°C付近で安定していた。外気温より下回る空気を得ることが可能となり、普通教室においてルームエアコンを用いずトレンチファンのみによる涼房が有効となる期間があることが分かった。11~12月においても、外気温の変動に対して、トレンチ出口温度はおおむね17~21°C付近で推移しており、トレンチにより温度が緩和された空気を取り入れることが可能となる期間があることがわかった。

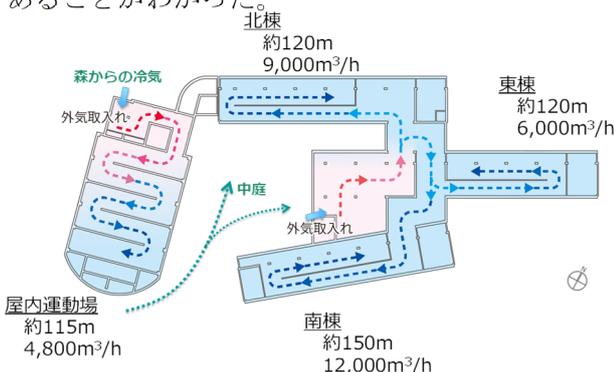


図10 クールヒートトレンチのルート

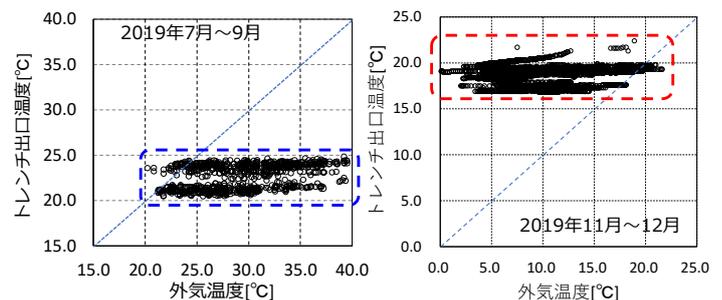


図11 クールヒートトレンチ内温度と外気温の相関

かったが、以降値は下がっていった。また、基準を満たさなかった時間帯にはばらつきがあり、時間との相関は見られなかった。

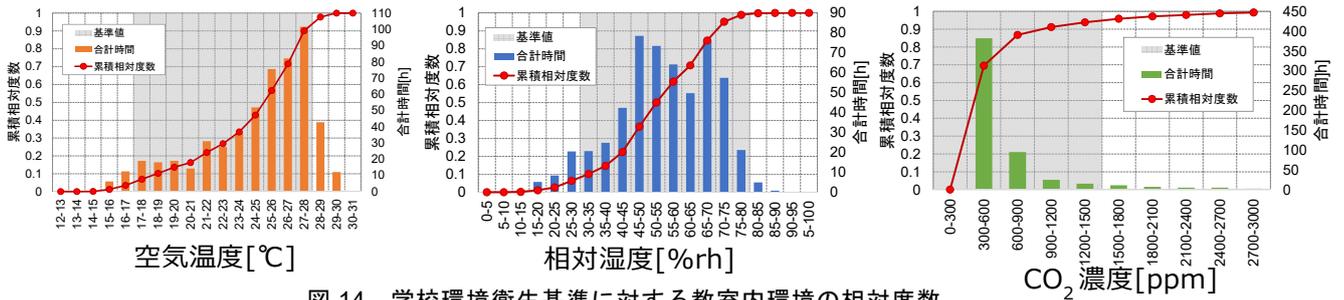


図 14 学校環境衛生基準に対する教室内環境の相対度数

(2) 光環境

学校施設における用途別の消費エネルギーにおいて、照明に費やす比率が大きく²⁾、ZEB化を目指すうえで、照明エネルギーの削減のため採光計画が重要となる。最上階に設置した普通教室は屋根面を傾斜させ、北高窓より積極的に自然採光を図っている(図15)。天井面には連続調光可能型LED照明と明るさセンサーを設け、連続自動調光で必要照度確保に追従できるようにしている。また、生徒自身が手動で調光操作できるよう、ボタン一つでのモード切り替えも可能とした。教室内の点灯区分は、南側・中央と北側に分け、さらには無段階での調整ができる、よりきめ細やかな調光を可能とした。

勾配屋根とならない中間階・最下階に配置される特別教室では、南窓面上部にライトシェルフを設置し、光拡散フィルムを貼った欄間から自然光を教室へ導き、均一な照度環境の形成に努めた(図16)。

2019年8月20~22日に普通教室における照度実測を行った。水平面(床上+700mm)と黒板立面の教室内分布について、自然調光、全灯100%、無点灯時(自然光利用)の3パターンで計測を行った。図17に各条件の最も照度比が大きい時間帯の照度分布を示す。

最小照度に関しては、無点灯時のみ水平面、黒板立面ともに基準を下回る時間帯が見られた。また、最大照度比に関しては、望ましいとされる10:1以下をすべての計測時間が満たしていた。これより、無点灯時のみ最小照度が基準を下回る時間帯が見られたが、他の時間帯においては良好な光環境が形成されていたと認められる。基準不適合の時間は、照明、カーテンの操作などにより大幅に減らせると考えられる。

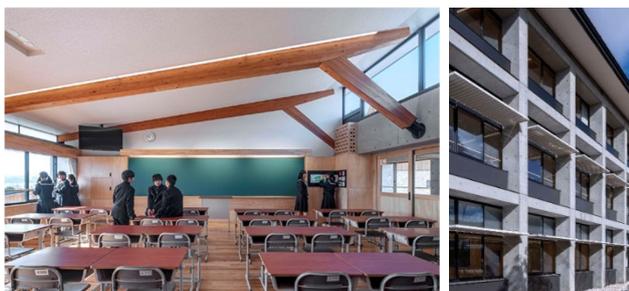


図 15 普通教室内部

図 16 ライトシェルフ

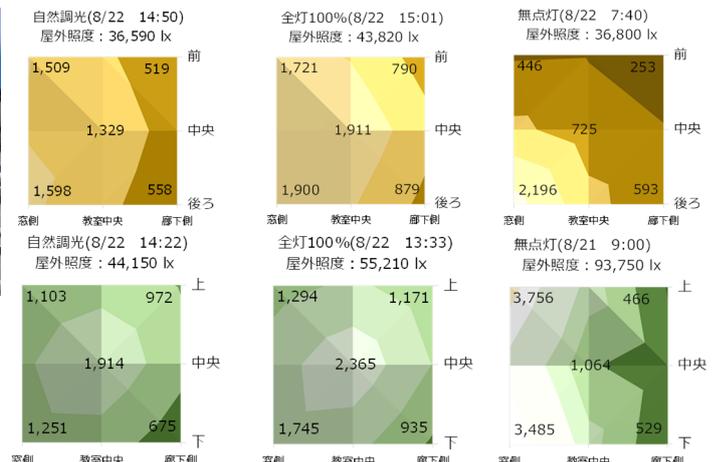


図 17 普通教室内部照度分布(上段:水平面, 下段:黒板面)

4. 生徒に自発的な環境行動を促す環境学習への取り組み

設備を手動で使うことが多い学校において、ゼロ・エネルギー・スクールを達成するためには、生徒と先生による省エネ活動が不可欠となる。瑞浪北中学校では自動化されたシステムでエネルギー消費の最適化を図るのではなく、生徒の環境体験を通してゼロエネルギー化を実現した。生徒たちが深く考え、学校に設けられた環境技術をコントロールすることで環境学習を行う、それが未来の地球環境保護意識の高まりにつながると思う。

4-1. 環境教育教材としての校舎

SDGsを実現するための持続可能な環境教育(ESD: Education of Sustainable Development)の重要性が益々

高まりつつあり、体験の機会を提供することが重要である。生徒自身が考え、試行錯誤しながら運用していることが、この学校の最大の特徴となっている。学校生活で生徒が肌で感じた環境体験は家庭や地域で展開され、やがて地域全体に連鎖して環境行動へとつながる、そのことに期待を込め「五感で育む環境体験」のための校舎内に多くの仕掛けを導入した（図 18）。

熱と風の見える化：クールトレンチ内部の空気の流動を視覚的にわかりやすく伝えるための床に観察窓を設け、温度と風の流れを見える化した。

熱に触れる：理科室の換気ダクトは、4 種類（段ボール、ガラスウール、ステンレス、スチール）の材質を使い分け、建築設備の仕組みが感じられるものとした。壁面には断熱観察扉を設け、断熱材の有無・種類の違いによる効果を感じて体感できる設えを設けた。クールヒートトレンチから上階の普通教室へ至るダクトに対し、保護外装および保温材を一時的に取り外し、直接ダクトおよびクールヒートトレンチの効果を体感できる設えを設けた。

光の効果の見える化：理科室では、ライトシェルフによる昼光導入効果が季節や時間によって変動することを学ぶために、天井面に目盛りを設け、視覚的に効果が分かる工夫とした

4-2. エコモニター

屋外環境の状況や教室内の温湿度状態等を表示する「エコモニター」を教室に設置した（図 19）。生徒はエコモニターによる情報から判断して教室の窓を開けたり、照明を ON/OFF したりしながら、エネルギー利用の適正化に生かす仕組みとした。

生徒が使いやすいように、エコモニターはタブレット端末のようなタッチパネル式とし、生徒が興味を持って一目でわかるグラフィックデザインを目指し、「使いやすく、美しい」画面となるよう、工夫を凝らした。各教室や学校全体のエネルギー利用状況も見ることができ、他のクラスと競い合いながら、我慢ではなく興味を持って、より省エネルギーになるような活動に取り組めるように配慮した。

エコモニターに表示される項目としては、温度・湿度・CO₂濃度・電力消費量（時刻別・週間・月間・年間データの統計グラフ表示）等多岐にわたる。特にトップページには教室のあらゆる環境情報を集約して表示をしている。教室内のデータ（温湿度・CO₂濃度・照明消費電力、コンセント消費電力）に関してはリアルタイム表示となり、生徒が教室内の状況を一目で把握できるようにした。加えて、学校行事やお知らせ掲示板も設け、パワーポイントソフトで生徒と先生が簡単に活用可能とした。



図 18 各種環境教材の例



図 19 エコモニター

4-3. 運用マニュアル

新たに入学・転入した生徒、および赴任してきた新規の教員に対して、本建物で採用している環境配慮手法に対する理解と使い方を把握してもらうことが必要となる。そこで、学校の取扱説明書となる詳細な運用マニュアル『スーパーエコスクール瑞浪北中学校の使い方』を作成し、より快適な室内環境の形成や省エネルギーのための環境行動の参考として利用できるよう各教室に配付し、誰でも気軽に閲覧できるようにした。環境配慮手法のしくみや各設備の操作方法の説明の他、環境学習のヒントについても記載し、環境学習の教材としても役立つものとした。

様々な工夫により得たノウハウは今後書き加えられ、将来の生徒たちに引き継ぐ環境教育の教科書となることも期待している。

4-4. アンケート結果

開校から半年以上経過した 2019 年 11 月、エコモニターの利用状況を調査するため、教員 23 名、生徒 22 名（各学年各クラスより 2 名ずつ）にアンケートを実施した（図 20）。

(1) エコモニターの利用頻度

生徒と比較して教員の利用頻度が高かった。これは空調や照明のスイッチ類を操作するのが主に教員となるため、操作の判断基準として利用されていることが考えられる。また、利用頻度の高い生徒も少なからず確認でき、環境教育の一助として利用されていることが分かった。

(2) 日常のエコ活動に対する意識・行動への影響

教員の 70%、生徒の 86%が「意識するようになった」という回答であった。エコモニターによる普通教室を含めた学内の温湿度・CO₂濃度・電力消費量や、各環境配慮手法に関する情報提供により、少なからず環境配慮に対する意識の変化に寄与しているという結果であった。

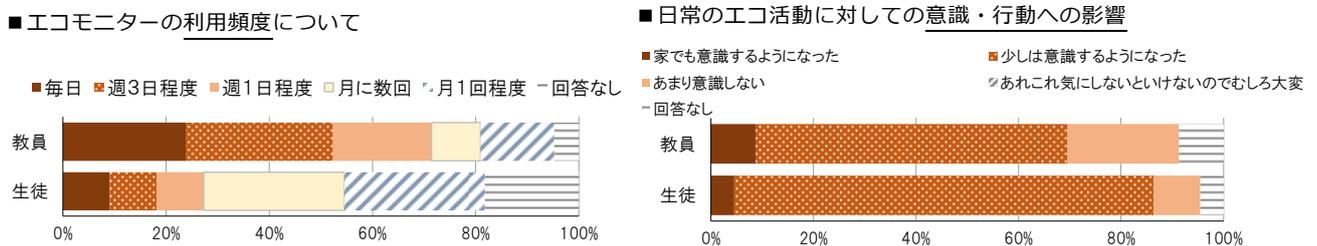


図 20 教員・生徒へのアンケート結果

5. 本建物におけるエネルギー実態調査（一次エネルギー消費量）

本建物における一次エネルギー消費量及び基準モデルとの比較結果を図 21 に示す。設計段階にて設定した基準モデル（本建物形状にて各種環境配慮手法を採用しなかった場合のケース）に対して、1 年目では省エネで 50%削減、創エネを利用して 72%削減しており、敷地外へ太陽光発電電力を逆潮流するオフサイトへの供給を効果に含めるとトータルで 101%の削減となり、ネット・ゼロ・エネルギーを実現した。2 年目はコロナ禍の影響により窓を開放したままのエアコン利用等、当初の想定から異なる使われ方により消費エネルギーは大きくなったが、97%のエネルギー削減を達成した。

新型コロナウイルスの感染拡大により、2020 年 3 月～5 月中旬の間は休校となり、同年 5 月 22 日から分散登校開始、6 月 8 日より通常の登校再開となった。図 22 にコロナ禍による影響が表れると考えられる期間（9 月～3 月）で前年同月と比較した結果を示す。コロナ対策として換気を確保すべく、窓を開放したままのエアコン利用となったため、換気量に伴う外気負荷増大の影響を受け、大幅に消費が増加している。9 月～3 月の累積消費量は、13.7%増加しているが、今後、コロナの収束を受けて運用改善など継続的なエネルギーマネジメントを実践していく予定である。

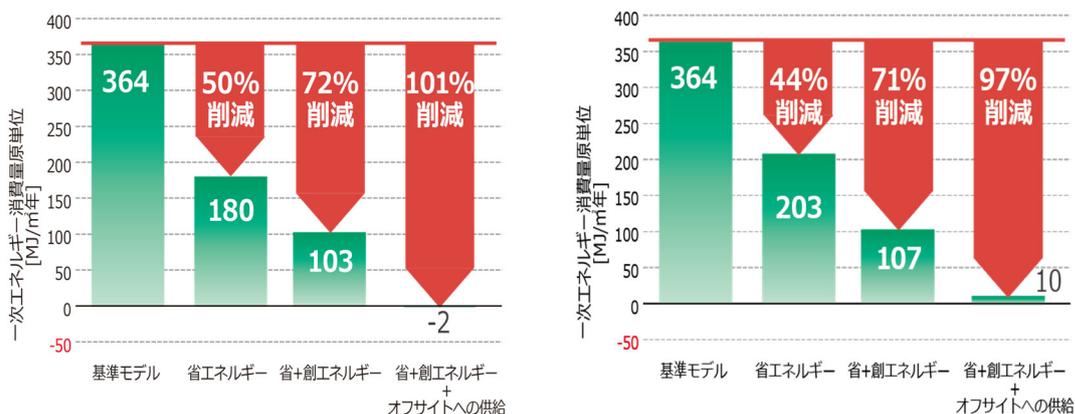


図 21 年間一次エネルギー消費量実績値（左：1 年目、右：2 年目）

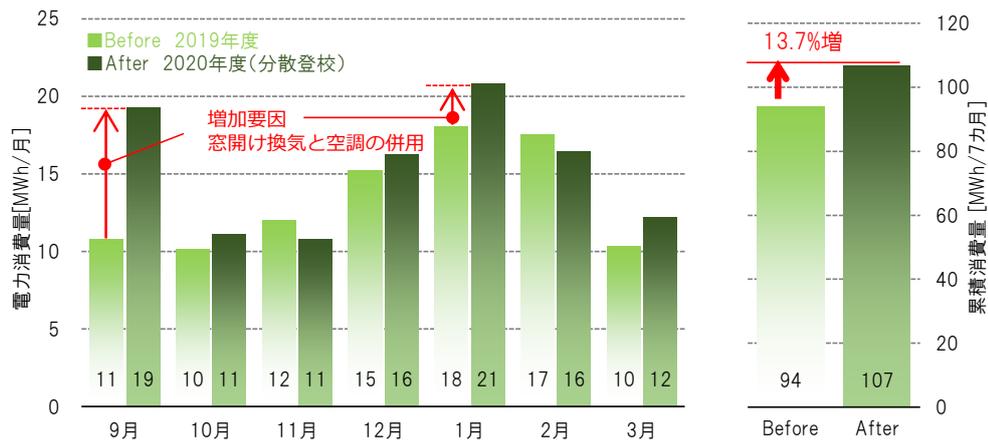


図 22 コロナ禍におけるエネルギー消費傾向の変化

6. おわりに

昨今の脱炭素へ向けた社会的動向が加速する中、脱炭素の基盤となる重点対策の創意工夫事例として、本校が今後の学校建築におけるロールモデルの一つとなると考えている。

本報に関する現地実測およびデータ解析に関して、瑞浪市関係者の皆様、名古屋市立大学 尹教授、工事関係者の皆様には多大なご尽力を頂きました。厚く御礼申し上げます。

7. 参考文献

- 1) 佐藤, 田中, 小池, 河野, 尹ら: ZEB を志向した公立中学校の計画と実証 (第 1 報~第 3 報), 空気調和・衛生工学会大会梗概集, 2019~2021
- 2) 文部科学省・国土交通省『学校ゼロエネルギー化に向けて』, p.2, 2014