

立命館中学校・高等学校長岡京キャンパス Ritsumeikan Junior and Senior High School Nagaokakyo Campus

鹿島建設株式会社 宮崎裕輔・寺西智博・小野永吉
Kajima Corporation Yusuke MIYAZAKI, Tomohiro TERANISHI, Eikichi ONO
立命館大学 理工学部 建築都市デザイン学科 近本智行
Ritsumeikan University, Dept, of Architecture and Urban Design Tomoyuki CHIKAMOTO

高砂熱学工業株式会社大阪支店 須賀工業株式会社京都支店
住友電設株式会社京都支店 株式会社アレフネット

キーワード : エコスクール (Eco School) 、自然エネルギー (Natural Energy) 、ゼロエネルギーアトリウム (Zero energy atrium) 、試す化 (Gamification) 、知的生産性 (Productivity for Learning)

建物概要

建物名称 : 立命館中学校・高等学校
長岡京キャンパス
所在地 : 京都府長岡京市
建物用途 : 教育施設
延べ面積 : 36,893.76 m²
階数 : 地下1階、地上6階



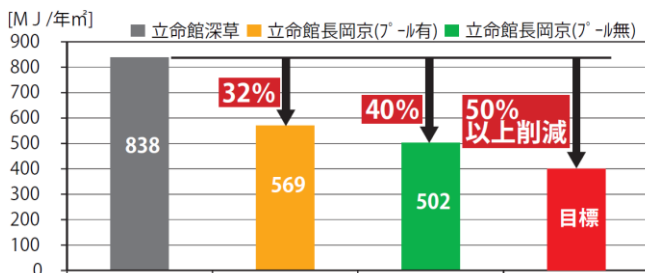
【写真1 建物全景】

1. はじめに

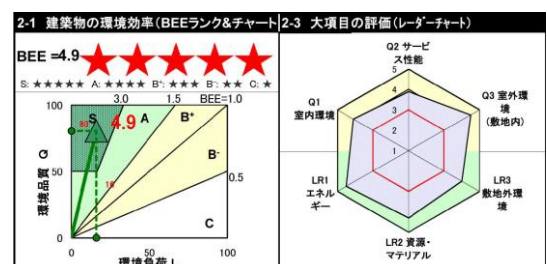
立命館中学校・高等学校長岡京キャンパスは、京都府京都市伏見区の旧キャンパスから京都府長岡京市に移転する、生徒・教員数約 2,000 人の新キャンパス整備工事である。プロジェクト推進にあたり、「日本最先端のエコスクール建設」という大きなテーマを目標に掲げた。地域ポテンシャルを活用し、利用できる自然エネルギーを最大限に利用したシステムを構築し、また生徒の自発的行動を促す仕組みを導入するなど多岐にわたる環境技術をキャンパス内に導入した。それらが環境教育の場を提供し、さらなる生徒の好奇心を満たす結果となっている。また教室空間の快適性や知的生産性(学習効果)を、キャンパス移転前後で比較するなど空間環境性能の検証も実施した。

2. エネルギー消費実態

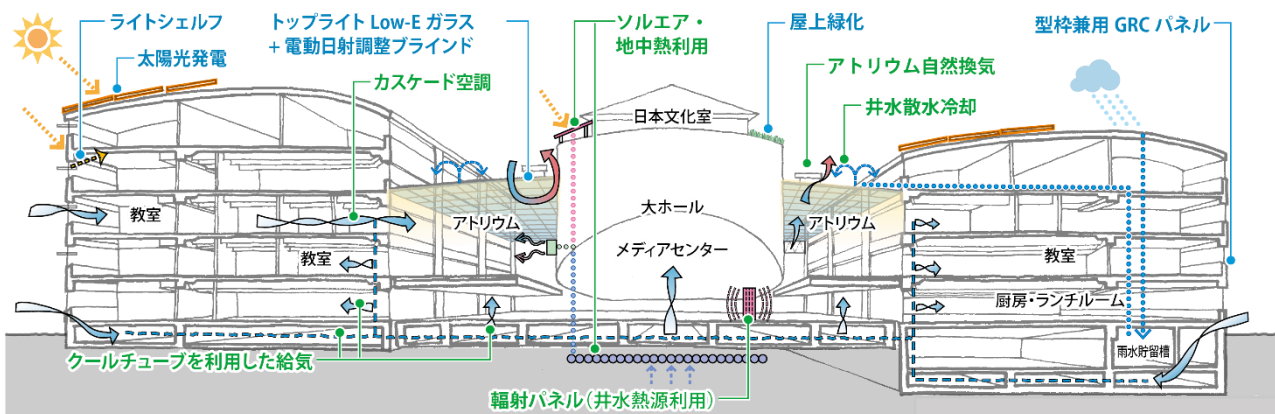
建物全体の一次エネルギー消費量を BEMS データから算出した。運用段階での省エネ性能として、2015 年度の室内温水プールを含めない実績値は、単位床面積あたり 502 [MJ/(m²・年)] となっている。これは同種の建物の統計値(出典:(財)省エネルギーセンター学校用途)1,498 [MJ/(m²・年)] から約 67%の削減を達成した値である。なお、既に省エネが進められていた既存キャンパスからは約 40%の削減となっているが、学校側は「将来的には更なる運用改善により 50%以上の省エネを図りたい」と大きな目標へ向けて進んでいる。環境配慮を評価する CASBEE では京都府においてトップクラスとなる BEE 値=4.9 を実現。当初目標とした「日本最先端のエコスクール」と呼ぶにふさわしいキャンパスとなった。



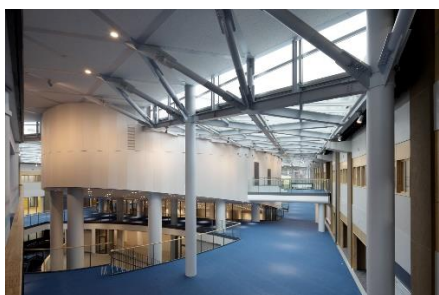
【図1 年間使用エネルギー量】



【図2 CASBEE 評価結果】



【図3 環境配慮手法】



【写真2 アトリウム】



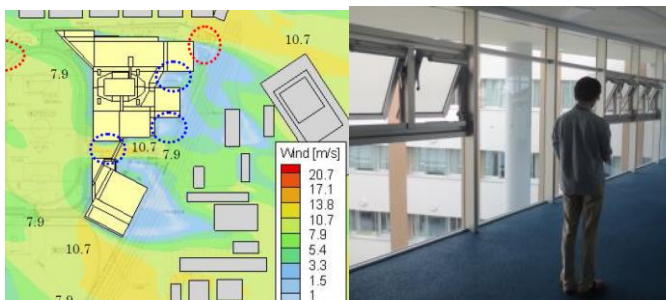
【写真3 メディアセンター】



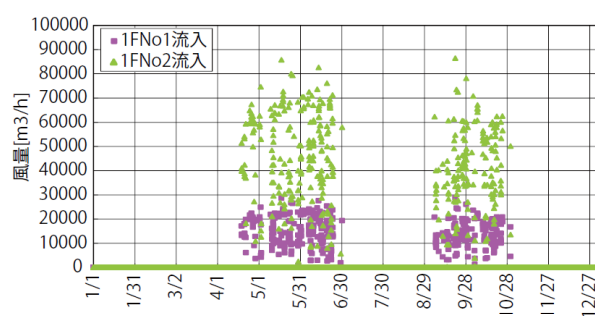
【写真4 体育棟アリーナ1】

3. 地域性を最大限活かした省エネルギー

本件では敷地の地域性というポテンシャルを利用し、自然エネルギーを最大限に活用することを第一のテーマとしている。例えば、卓越風を最大限に自然換気利用できる建物形状を計画した。敷地特性である西からの卓越風を利用するべく、敷地西側に運動場を設け、卓越風を両手で集めるような弓なり配置の校舎棟形状を計画した。またその卓越風が集まる中央にアトリウムを設け、風圧効果により自然換気能力を高めることを考えた(図4)。4層のアトリウムをフロア毎に分け自然換気の流入・流出量を計算した。アトリウムの気積は約15,000 m³であり、最大6回/hの自然換気風量が見込める計算結果となった(図5)。



【図4 風向コンタとバランス換気窓】



【図5 アトリウム自然換気シミュレーション】

また、生態系への配慮等、周辺環境への影響を最小限にしている。例えば、敷地は西山と桂川の間地点に位置しており、生物の橋渡しとなる樹木や緑があった。それら元々の敷地に生息していた土壌・緑化を仮置きしておき、新キャンパスの屋上緑化に再利用してDNAの継承と屋根断熱性能向上の両立を図る「ブラウルーフ(粗放的な自然屋上緑化)」を計画した。

4. ゼロエネルギーアトリウム

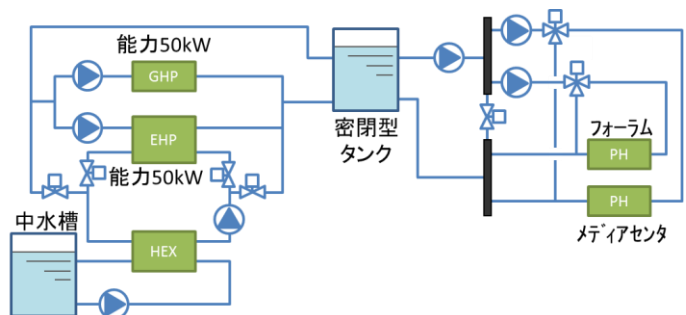
キャンパスの中心となるアトリウム空間をエコスクールの象徴として位置づけ、季節に応じた各種自然エネルギーの活用と建築的対策の組み合わせにより、年間エネルギー収支をゼロ化する「ゼロエネルギーアトリウム」を計画した。

4.1. 輻射パネル利用空調方式の導入

アトリウムに併設しているメディアセンターおよびアトリウム最下層部には、垂直型の結露型輻射パネルを設置している(写真5)。結露型輻射パネルは通常の空調機用冷水温度での送水が可能である。このシステムにおいては、ファン動力の削減を行いながら、メディアセンターの静寂性を保ちつつ、輻射パネルを生徒が実際に手を触れることのできる場所に設置することで、熱伝達の「輻射(放射)」を実感できる環境学習の狙いも併せ持つ。熱源は井水熱ヒートポンプを設置しており、散水や便所洗浄水に用いる雨水・井水水源からの冷温熱を空調熱源として利用している。また中水熱利用ができない場合、GHPチャラーを補助として運転(図6)する。湿度を極力導入しないよう、外気は外調機にて除湿後導入している。



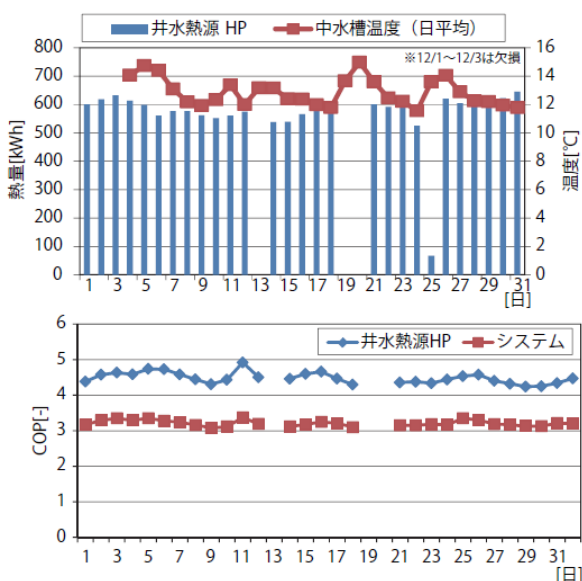
【写真5 井水熱源利用輻射パネル】



【図6 井水熱源利用輻射パネルシステム図】

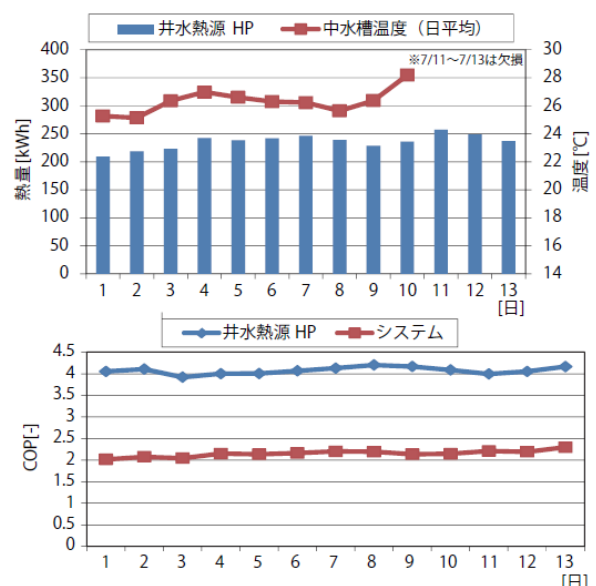
冬期の運用実績では、月積算でHP単体COPは4.47、システムCOPは3.20であり、高い効率を得られた(HPチャラーの送水温度は42℃、輻射パネルへの送水温度は34℃)(図7)。夏期の運用実績では、月積算でHP単体COPは4.07、システムCOPは2.15であった。夏期については負荷率がやや低い運用となっており、補機動力の割合が相対的に大きくなったために冬期と比べて効率が低下したと考えられる(HPチャラーの送水温度は11℃、輻射パネルへの送水温度は20℃)(図8)。

井水熱源HPの熱源である中水槽の温度については、冬期は12~15℃、夏期は25~28℃程度と安定している。冬期中水槽温度は外気温度と比べて高く、夏期は外気温度と比べて低い。空冷システムと比較して優れた条件で運用できていることが判る。



【図7 冬期運転実績(2015年12月)】

上: 処理熱量、下: 効率



【図8 夏期運転実績(2016年7月)】

上: 処理熱量、下: 効率

4.2. ReHP システム (Renewable Energy Heat Pump System)

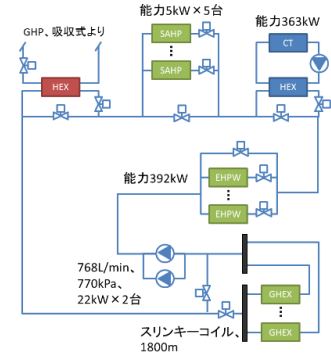
ReHP®(リヒーブ) (当社開発)は、建物周囲の太陽熱、空気熱、地中熱、水熱など複数の再生可能エネルギーを熱源利用する、高効率な水熱源ヒートポンプシステムである。当社開発のソルエアヒートポンプ® (以降 SAHP®写真 6) により、太陽熱集熱、放射冷却、空気熱交換を行い、スリンキー式地中熱コイル (写真 7) から地中熱をくみ上げる複合熱源システムを採用し、水熱源空調に利用している (図 9)。



【写真 6 ソルエアヒートポンプ外観】



【写真 7 スリンキー式地中熱コイル】

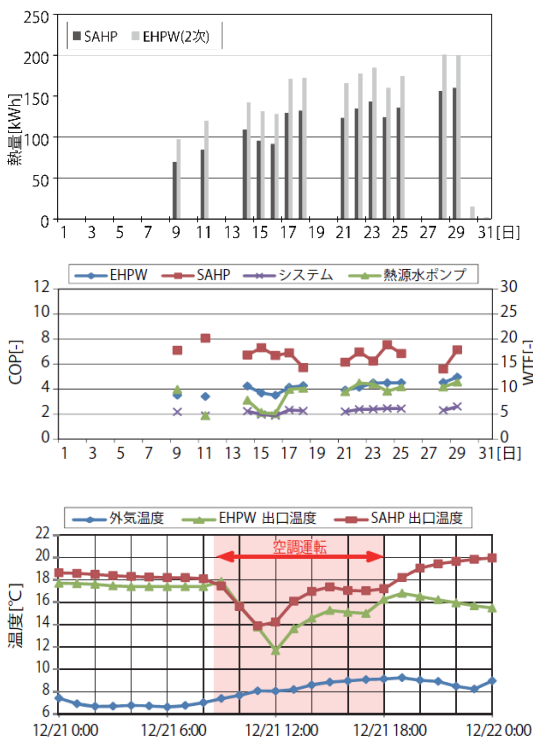


【図 9 ReHP システム系統図】

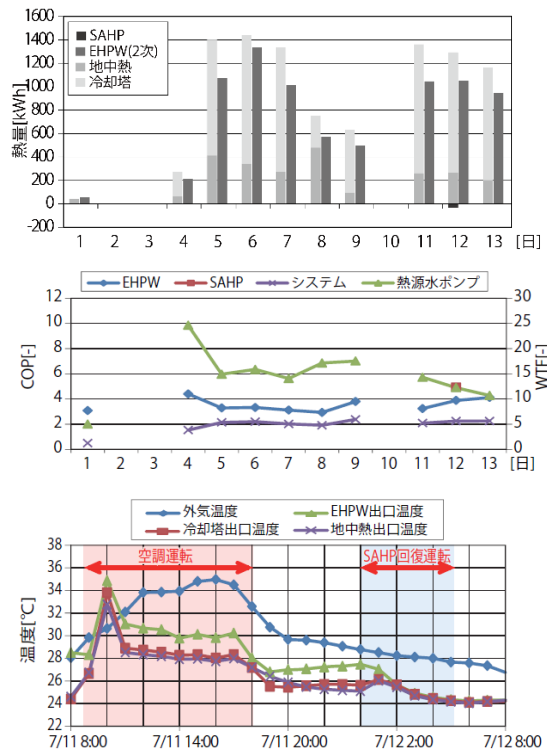
運用実績は下記である。

冬期：EHPW の単体 COP は月積算で 4.06、SAHP®の単体 COP は 6.65 と運転 COP としては非常に高い値であった。熱源水ポンプの WTF は 7.32 とやや低く、熱源水搬送動力には改善の余地がある。システム COP は 2.16 (図 10)。夏期：EHPW の単体 COP は月積算で 3.44、SAHP®の単体 COP は 4.94 と運転 COP としては非常に高い値であった。熱源水ポンプの WTF は 14 とやや低く、熱源水搬送動力には改善の余地がある。システム COP は 2.07 (図 11)。地中熱コイル：地中熱交換器の期間平均放熱性能は 13.3W/m、最大放熱性能は 56.2W/m となり予測シミュレーションを上回る結果となった。

以上のように、必ずしも高い効率とは言えないが、複数熱源を組み合わせた水熱源ヒートポンプシステムである ReHP®の計画と運用に関する知見を得た。本システムの発展のためには、補機動力 (ポンプや冷却塔) の確実な低減方策を検討するとともに、それに繋がる EHPW そのものの変流量対応、効率向上、熱源水温度範囲などの改善も望まれる。



【図 10 冬期運転実績 (2015年12月)】
上：処理熱量、中：効率 下：温度



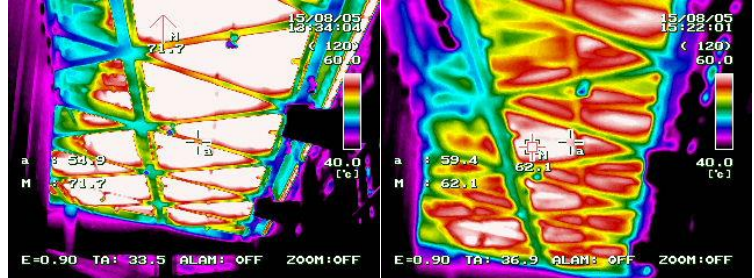
【図 11 夏期運転実績 (2016年7月)】
上：処理熱量、中：効率 下：温度

4.3. 屋根散水

アトリウム空調負荷を抑えるべく電動日射ブラインドと、中水（主に井水）を水源とするトップライト散水を導入した(写真8)。トップライト下部の温度が設定温度以上となると散水する。トップライトはLow-Eのペアガラスを採用しており、外部側の表面温度下がり幅と内部側の表面温度推移は差があるものの、平均5°C程度温度が低下する効果が期待できることがわかった(図12)。



【写真8 トップライト散水】



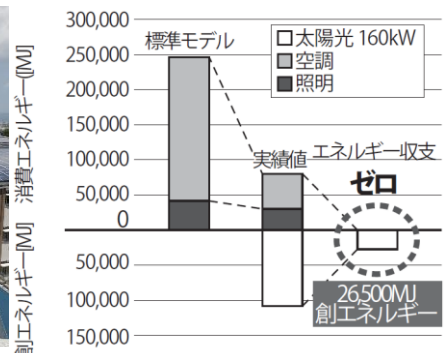
【図12 トップライトサーモカメラ (左: 散水前 右: 散水後)】

4.4. ゼロエネルギーアトリウム検証

各自然エネルギー利用や建築ルーバ一等の省エネ対策により、一般的なアトリウムと比較し空調負荷を75.4%削減することが可能となった。そこへ太陽光パネル160kWを設置し、利用しているエネルギーを創エネで年間を通してすべて賄うことができる「ゼロエネルギーアトリウム」を構築することができた。



【写真9 太陽光パネル】

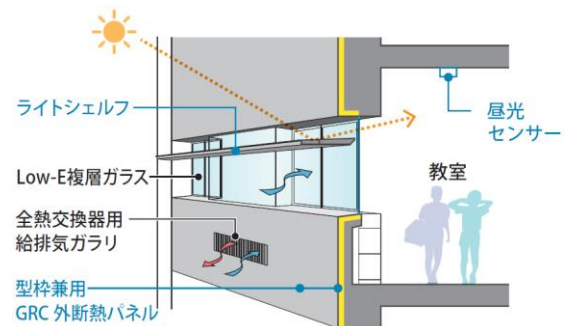


【図13 年間エネルギー収支実測 2015年度】

5. 教室における取り組み

5.1. 窓周り

常時利用される教室においては、省エネルギーの積み重ねが大きな効果を生む。外皮負荷の抑制を意図して、高断熱サッシ・高断熱ガラス（LowE ガラス）を導入し、併せて日射を防ぎながら昼光利用できるライトシェルフを計画して、窓周りの工夫を行った(図14)。

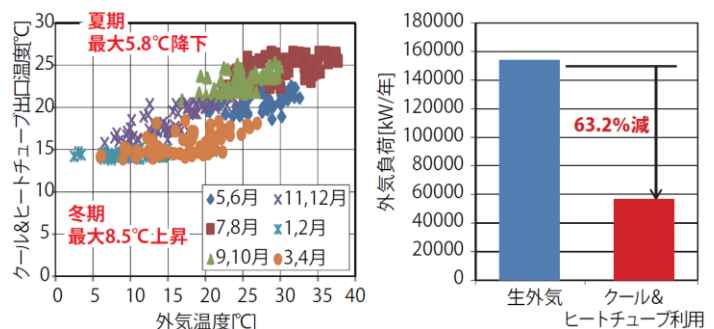


【図14 光と熱を制御する窓周り計画】

5.2. クール&ヒートチューブ

外気導入方法は全熱交換器系統及び、クール&ヒートチューブ系統に分けられる。

外気温度と出口温度の各月相関図から、夏期は最大5.8°Cの外気温度低減効果があり、冬期は最大8.5°Cの外気温度上昇効果があることを確認した。クール&ヒートチューブによる外気負荷は、概ね63.2%程度低減する結果となった(図15)。

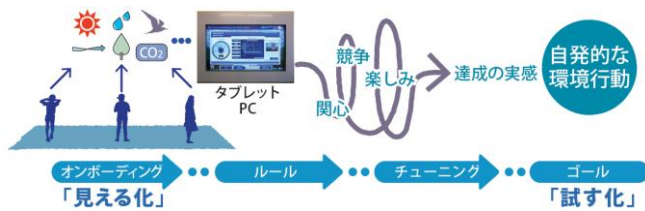


【図15 教室棟 クールチューブの温度相関図と年間負荷低減効果】

5.3. 生徒との連携

中央監視では、生徒達と協力してコンテンツの構築を行い、運用側のニーズを取り入れた。独自のテーマとしてゲーミフィケーションを誘発する「見える化」を超えた「試す化」を掲げた(図 16)。

各教室に iPad を設置し、生徒が誰でも触れることができるようにした。省エネに対する関心が増し、他クラスや 1 年前の同教室クラスと競争することで楽しみ・達成の実感を受けて、自発的な環境行動に到達する「試す化」システムが完成した。その効果を検証すべく、「ECO WEEK」と呼ばれる、生徒が自発的に行っている省エネ運動に対し、iPad を利用する企画を立てた(図 17)。この活動には、立命館大学近本研究室がサポートしている。iPad を利用しない ECOWEEK では一次エネルギーで約 8%の削減値だったのが「試す化」の iPad を用いることにより、約 14%の削減となり省エネ幅が増加する結果となった。



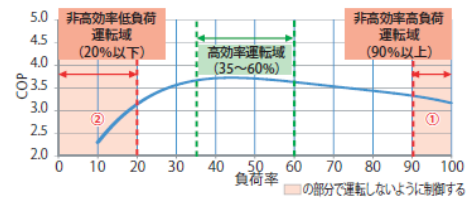
【図 16 試す化 (ゲーミフィケーション)】



【図 17 Eco Week に向けて生徒会との打ち合わせ】

5.4. GHP の回転数制御システム

パッケージは中間期などの部分負荷・低負荷運転時に効率が落ちる傾向にある。実在するビル群では、低負荷時の効率改善をコンプレッサインバータ制御に頼るしかなく、結果、低 COP で運転していることが多い。省エネルギー性の向上を目指し、今計画では積極的に低 COP 運転の状況を回避(サーモ OFF)するシステムを構築している(図 18)。



出来るだけ COP の高いところで運転
 ①最適 COP 運転制御
 ・起動時に上原(起動)で、運転出力を高 COP ポイントで頑張りにする。
 ②低負荷運転回避制御
 ・低負荷時に一旦室外機を強制停止(サーモ OFF)する。(送風モード)
 ・負荷がかかったときに、運転復帰

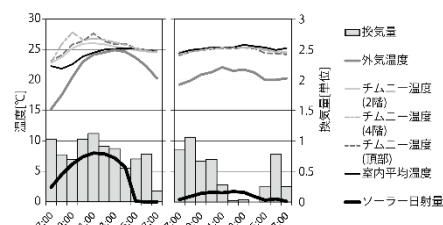
【図 18 GHP 回転数制御のイメージ】

6. 体育館における取り組み

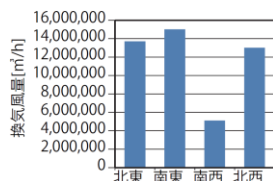
体育館では、極力空調を行わないことが省エネにつながるの、自然換気を促進する工夫として、マルチフロー・チムニーを計画(写真 10)した。曇りの日と比較し晴れの日にはチムニー内上下温度分布が生じ換気量が増える。チムニーが処理した排熱量と内外温度差を示し、効果を検証した(図 19~21)。煙突効果の利用により、地下のアリーナでも自然換気が可能となった。チムニーは内部側をガラスブロックにすることで、自然光の取り入れ効果も併せ持つ。また、体育棟にもクール&ヒートチューブを導入した。データ解析により教室棟と同等の効果を確認し、省エネルギーに寄与していることがわかった(図 23)。



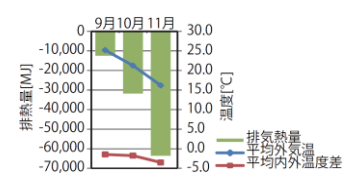
【写真 10 ソーラーチムニー】



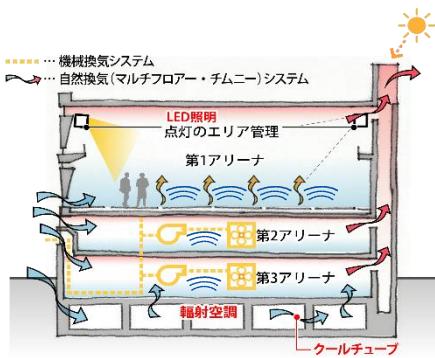
【図 19 南東チムニー内温度・換気量推移 2015 年】
 左：10/5 晴れ、右：10/1 曇り



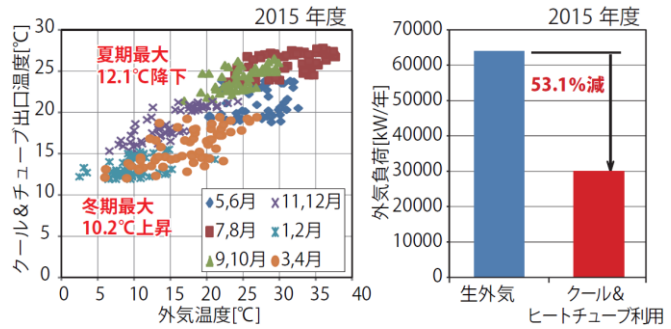
【図 20 チムニー各方位別換気量】
 2015 年秋期



【図 21 チムニー換気による外気導入効果】
 2015 年秋期



【図 22 体育館の環境配慮】



【図 23 体育棟 クールチューブの温度相関図と年間負荷低減効果】

7. 教室の環境性能の検証

本建物に求められている主機能は「学習の場」であり、その生産性(学習効率)は省エネルギーよりも当然重要である。我慢大会とならない省エネ手法が必要であり、ゼロエネルギー学校への模索の原点もそこにある。室内環境と快適性・学習効率の関係を把握することによって、環境を損なわずに省エネルギーを図る技術開発に活かせると考え、立命館大学近本研究室が主体となって検証を行った。教室内の物理環境やエネルギー消費量を実測し、生徒に対して主観評価(アンケート)や客観評価(テスト)等を行うことによって、環境と快適性・学習効果および省エネルギーの関係性を導いた。また、移転前と移転後、両方での実測を試みており、前後比較することで教室の環境がどのように変わり、学習効果についてどのように影響したかを検証した。

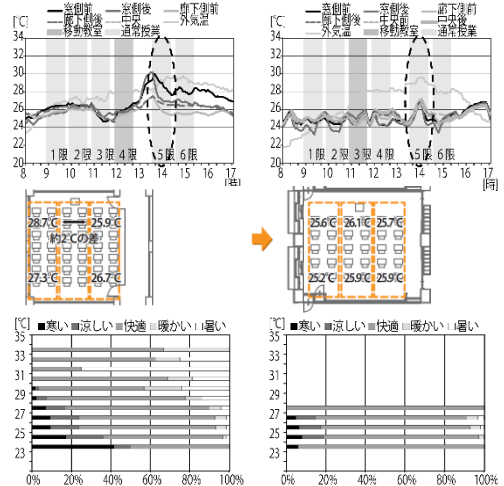
7.1. 移転前後の環境比較 (温度、CO2 濃度、照度)

移転前の校舎は築 20 年以上の建物である。ここでは、新旧建物比較により得た様々な知見を以下に示す。

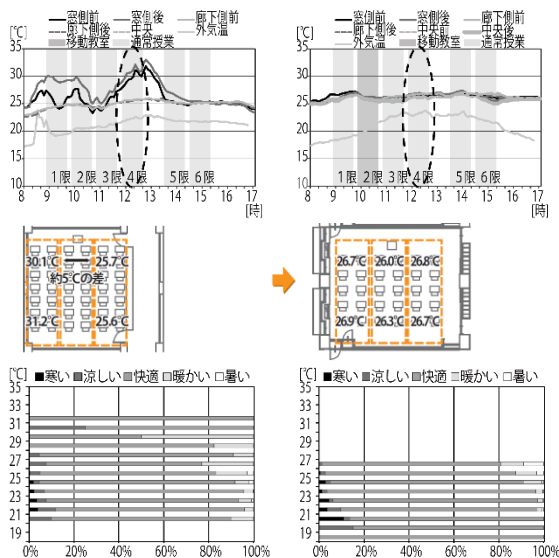
ここでは夏期、中間期、冬期の3季節において、代表教室の1日平面温度分布推移と快適性アンケートを収集し、移転前後比較を行った。移転前 2013 年度、移転後 2015 年度にて、晴天日で外部環境が類似している日を選定し、比較を実施した。

図 24 では夏期の代表日における教室内温度分布を示す。窓際と廊下側の各所における傾向を見ると、移転前は約 2°C 差の温度分布があり、窓側の方が高い温度を示した。しかし、移転後は、室の位置による温度の差がほとんど見られなかった。また温冷感としても「暑い寒い」が改善しているのがわかる。

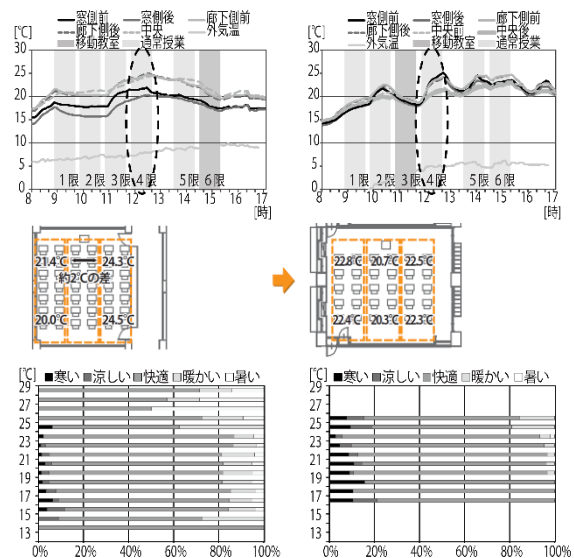
また、中間期や冬期についても、同様の傾向となっている。



【図 24 夏期における移転前後の平面温度分布と温冷感】



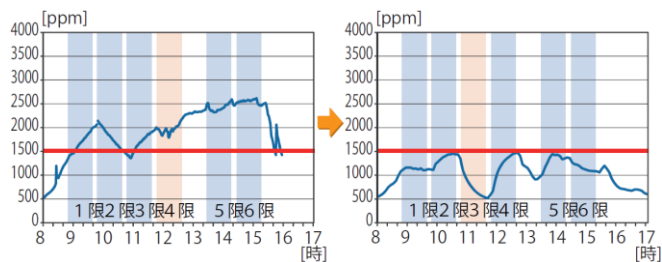
【図 25 中間期における移転前後の平面温度分布と温冷感】



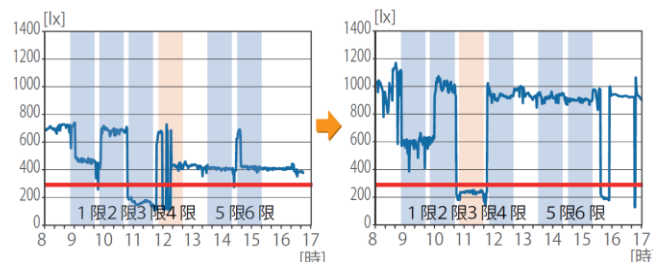
【図 26 冬期における移転前後の平面温度分布と温冷感】

平面温度分布改善の要因として考えられるのは、空調機器のセンシング技術や容量制御の技術などが発達したことや、教室窓回りの工夫によって建物が高断熱高气密化していることにより、ペリメーターレス建物として機能していることも合わせて挙げられる。建築設えの重要性を再認識した。

図 27 では移転前後の CO2 濃度について夏期に計測した結果を示す。換気ファンの老朽化と考えられるが、移転前では CO2 濃度が 2,500ppm 近くまで上昇していたが、移転後には学校環境衛生基準推奨値以内となる 1,500ppm 以下となり、良好な結果となっている。図 28 では、移転前は 300~400lx の照度がベースだが、移転後では 800~1,000lx 程度の照度をキープしている。これは移転後の照明には自動調光センサーが設定値 600lx で設置されているが、センサーの認識照度が必ずしも机上面照度と一致せず、センサー有効範囲の平均をとっていることが理由である。移転後は既存と比較し照度が高めであり、今後の省エネ余地とも考えられるが、次章に述べる環境要因と学習効率との関連を含めて判断する必要がある。



【図 27 移転前後の CO2 濃度比較（夏期）】

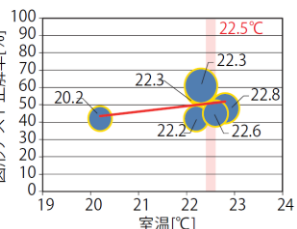
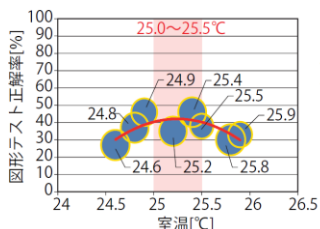


【図 28 移転前後の照度比較（夏期）】

7.2. 知的生産性と環境要因との相関

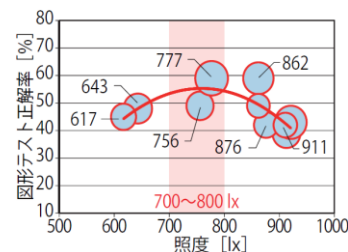
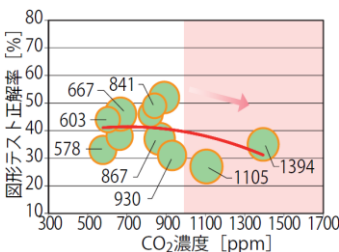
7.1 で述べた結果から、移転に伴い、温熱環境のばらつきが回避されたことがわかった。温度差が改善すると生徒の身体への負担が無くなり、さらに学習中の窓や扉の換気動作や空調操作が減り、講義への集中力の持続に繋がる。また、人体には知覚できない CO2 濃度が低減改善されたことがわかっており、それらの結果は、学習効率に影響し、かつ改善に繋がる可能性がある。

そこで、講義への集中力や知的生産性（学習効率）と、環境要因との関係について検証を行った。



【図 29 図形テスト正解率と温度の関係（移転後）】

左：夏期、右：冬



【図 30 図形テスト正解率と CO2 濃度、照度の関係（移転後）】

左：CO2 濃度、右：照度

ここで、図形テスト正解率とエリア温度との関連性を図 29 に示す。グラフはそれぞれの評価項目ごとの重心を示し、平均したプロットの数や円の大きさとしてバブル図で示している。夏期については正解率の近似曲線が表すように、25.0~25.5°C が最も正解率が高くなった。冬期は正解率の頂点を 22.3°C とし、最も正解率が高い結果となり、その前後においては正解率を下げる結果が得られた。これら結果の傾向はアンケート結果と合致しており、一般的な快適温度範囲と集中力は合致していると判断できる。

ここで CO2 濃度・照度と図形テスト正答率の関係を図 30 に示す。結果、CO2 濃度は近似線が右下がりになっており、概ね 1000ppm を超えると正解率が悪くなる傾向となった。CO2 を常に 1000ppm 未満とすることが学習環境としては良いと考えられる。また照度は 700lx~800lx において正答率が高い結果となり、暗すぎても明るすぎても正解率が下がる傾向となった。ここから、CO2 濃度を低く維持できる最小限の換気と、少し明るめの照明計画が学習環境には適していることがわかった。

上記はあくまで今回の結果からの一考察で、一般性があるかどうかは今後の更なる検証が必要である。しかし、室温、CO2 濃度、照度が、省エネしながらも知的生産性（学習効率）を維持する、もしくは向上させるための重要な要素であり、ここで得た知見を今後同様の計画に活用したい。

8. まとめ

立命館中学校・高等学校長岡京キャンパスでは、

(1)敷地の地域性というポテンシャルを利用し、卓越風を多く取り入れられるよう建物の配置計画を原点から見直しするなど、自然エネルギーを最大限活用した環境配慮項目を、学校全体計画の随所に採用した。

(2)生徒たちのエコキャンパス活動への積極的な参加を誘発する仕組みを導入し、彼らの環境意識の向上に貢献した。生徒が自発的に行動するようゲーム感覚で省エネを「試す」、「競う」などを狙った新しい環境配慮技術となる「試す化」を導入し、その効果を検証した。

(3)教室の室内環境と学習効率との関連性に着目し、環境性能実測・検証と知的生産性（学習効率）などに関するアンケート調査や図形テストを実施し、それらの関係性について考察をまとめた。特に、移転に伴い温熱環境のばらつきが回避され、学習効率が向上しやすい環境になったことや、知覚しないCO2濃度でも学習効率に差が出る結果を確認できたことは特筆すべき内容であった。

立命館は、全国各地のキャンパスでのエネルギー利用状況を全て把握し、CO2排出量を毎年比較するなど、積極的な環境配慮活動を行っており、本計画の取組みや成果を既設キャンパス等にフィードバックすることで、関連組織全体の環境の取り組みを向上させることが可能になる。

建築物省エネ法なども施行され社会から建築物に対する省エネルギー期待は益々高まっており、自然エネルギーを活用する技術はより重要になっている。本件はそれを切り拓くプロジェクトとして社会に貢献できると考える。また、環境配慮建築は、その建物自体の省エネやCO2削減だけでなく、そこで用いられた環境技術の検証と汎用化、さらに利用者が体験したエコ活動を通じて啓発され、社会的な広がりを生むことが重要である。本件はこの良い事例となっており、広く学会等に情報を公開することで、この分野の発展に寄与するものと考えている。

最後に、本建物の設計・建設・運用にあたり、建築主をはじめとする多くの方々にご指導、ご支援を頂き、紙面をお借りして厚く御礼申し上げます。

当業績に関する既発表論文他

【論文】

- 新校舎への移転前後の夏期・中間期における教室内の学習環境と学習効率の測定
深瀬ら：空気調和衛生工学会近畿支部 2016/3月
- 新校舎への移転前後の夏期・中間期における室内環境と学習効率に関する調査検証
三村ら：日本建築学会近畿支部大会 2016/6月
- 地表面からの熱移動を考慮した水平式中熱交換器の性能予測シミュレーション
小野、塩谷、荒井：日本建築学会大会近畿支部大会、2014/9月
- エネルギーネットワーク計画ツール「ENE-ST」の開発（第1～3報）
荒井、三原、小野：空気調和・衛生工学会大会（秋田）、2014/9月

【雑誌】

- 新建築 2015年6月号
- BE 建築設備 2014年9月号

【その他】

- 平成24年度 第2回住宅・建築物省CO2先導事業採択
- 平成29年度 第31回空気調和衛生工学会振興賞技術振興賞
- 平成29年度 第5回カーボンニュートラル賞支部奨励賞