

スマートエネルギーラボ「エネフィス九州」

Smart Energy Laboratory 「enefice kyushu」

ダイダシ株式会社 エンジニアリング本部 ZEB 推進部

DAI-DAN Co.,Ltd. Engineering Division ZEB Promotion Department

杉浦 聡

Satoshi SUGIURA

キーワード: 地中熱(Underground heat)、放射空調(Radiant air conditioning)、躯体蓄熱(Body heat storage)、ZEB(Zero energy building)、運用改善(Operation improvement)

1. はじめに

九州支社・スマートエネルギーラボ「エネフィス九州」(以下、本建物)の建設にあたり、エネルギーの有効利用と快適さを実現する、「人と地球が共存できるオフィスの実現」をコンセプト¹⁾とし、地中熱を利用した放射空調及び躯体蓄熱による空調システムで計画を行った。

2. 設備概要

地中熱利用設備の概要を表1に、空調フローを図1に示す。

表1 地中熱利用設備の概要

設備	内容(設計値)
躯体蓄熱	架橋ポリエチレン配管埋設 敷設面積 500 m ² (ピッチ 150 mm)
放射パネル	1.2 m × 0.6 m × 216 枚
ボアホール (採熱井)	172φ, 100 m 深さ × 4 本 ダブルU字型配管方式
鋼管杭 (密閉式採熱鋼管杭)	400φ × 10 m × 2 基 二重管: SUS 32 A
水平熱交換器	コイル型 溝長さ 260 m, 5 系統
地中熱ヒートポンプ (地中熱 HP)	暖房能力 45.2 kW (熱源側 35.7 kW) * 冬期のみ使用

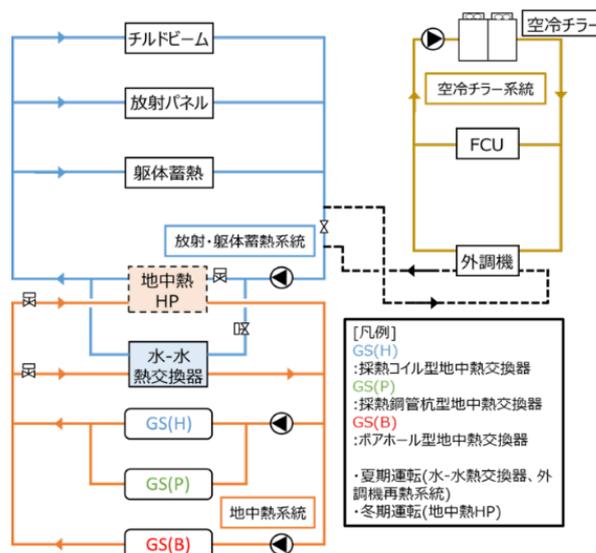


図1 空調フロー

2. 1 地中熱利用設備

本建物では、水平コイル型地中熱交換器、ボアホール地中熱交換器、密閉式地中採熱杭熱交換器の3種類の地中採熱源を採用している(図2)。年間を通じて20°C前後に安定した地中熱を、夏期は直接放射空調の中温冷水として、冬期はヒートポンプの採熱源として利用している。

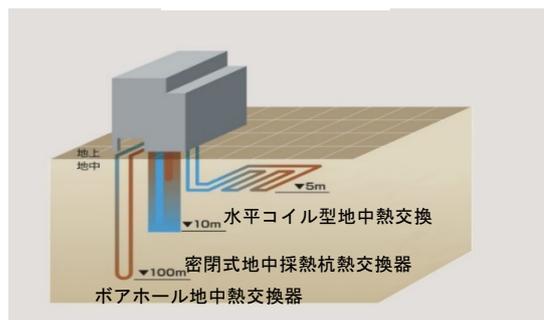


図2 地中熱採熱源

水平コイル型地中熱交換器（図3）は、GL-5m程度の深さの地下階耐圧盤下部捨てコンクリート内に敷設されている。地下構造物がある場合には建築の掘削工事を活用できるためボアホール方式に比べ省コストで施工が可能となる。本建物では耐圧盤下部ほぼ全面に配置し、約50mごとに5系統をヘッダー方式で接続した。期待される採熱量は、メーカー実績値（60W/m）より15kWとした。



図3 水平コイル型地中熱交換器

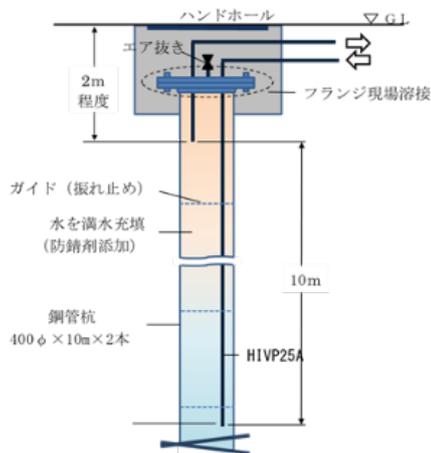


図4 密閉式地中熱探熱杭熱交換器

ボアホール地中熱交換器は一般に用いられるダブルUチューブ方式を採用し、深度約100m×4本を設置した。期待される採熱量は、メーカー実績値（60W/m）より24kWとした。

さらに実験的取り組みとして、地中に埋め込んだ鋼管杭（400φ×10m×2本）を満水にし、地中と管内の水を熱交換させ採熱する密閉式地中探熱杭熱交換器を設置している（図4）。

2.2 躯体蓄熱（躯体放射）

本建物では、建物の持つ熱容量を活用した TABS（Thermo Active Building System）と呼ばれる躯体蓄熱（躯体放射）を採用し、機器のダウンサイジングを目指した。

躯体蓄熱（躯体放射）は、床スラブ等の建築躯体の熱容量を利用することで室内の温度変化を安定させ、負荷側空調機器の最大容量を抑えた設計が可能となる。躯体蓄熱（躯体放射）の要領図を図5に示す。

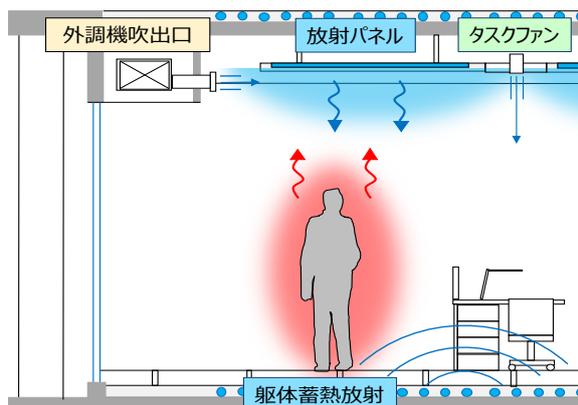


図5 躯体蓄熱（躯体放射）要領図



図6 躯体蓄熱架橋ポリエチレン管敷設状況

表2 躯体蓄熱からの放射能力

	室内 温度 ℃	送水 温度 ℃	表面 温度 ℃	放射 能力 W/m ²	対流 能力 W/m ²	合計 能力 W/m ²
冷房	27.0	23.0	25.0	16.0	0.3	16.3
暖房	22.0	35.0	27.3	43.1	19.2	62.3

躯体蓄熱(躯体放射)は、一般的な床暖房に用いられる架橋ポリエチレン管を軽量コンクリート内に埋め込む方式とし、1階エントランスホールと、2・3階事務室を対象とした(図6)。

夏期は地中より採熱した中温冷水を送水し、冬期は地中熱ヒートポンプから温水供給している。架橋ポリエチレン管の埋設ピッチを150mm、送水流量を4L/minとした時の放射能力を表2に示す。

2. 3 天井放射空調

放射空調は、空気よりも熱容量の大きい水を熱媒として利用とすることで、搬送動力の削減に寄与することができる。また、気流感や静穏性など快適性に優れた空調方式である。

天井放射パネルに照明器具、防災設備、パーソナル空調ファン等をユニット化し、「設備天井」として計画した(図7)。



図7 天井放射パネルとパーソナル空調ファン

放射空調は、結露防止の観点から中温域の冷水が用いられることが多い。本建物では、夏期は地中と熱交換した冷水を熱源を介さずそのまま利用することで、エネルギー効率の高い空調システムを目指した。送水温度23℃、往還温度差0.8℃、送水流量0.63L/(min・m²)のときの放射パネル能力を表3に示す。

表3 天井放射パネル能力

	室内 温度 ℃	送水 温度 ℃	往還 温度差 ℃	室内側 能力 W/m ²	天井側 能力 W/m ²	合計 能力 W/m ²
冷房	27.0	23.0	0.8	24.4	10.8	35.2
暖房	22.0	35.0	3.0	72.1	61.4	133.4

2. 4 外気処理

一般に放射空調はデシカント空調機などと組み合わせて使用され、潜顕分離処理による省エネルギー空調システムとして注目されているが、本建物では過冷却除湿外調機を採用した。ただし、一般的な熱源を用いた再熱は行わず、過冷却空気をそのまま室内に給気し、室内の負荷処理に利用している。低負荷時の室温低下には、23℃程度の中温冷水還りを再熱源とするコイルを外調機に組み込み、排熱利用できるシステムとした。また、外気取り入れ部にはクール・ウォームピットを介して外気の子冷、予熱を行った。

3. 運用

3. 1 運用方針

使用開始当初の運用データを分析し²⁾ZEB Ready相当のエネルギー消費量を目標とした運用方針を次のように決定し運用改善を行った。

- ・夏のピークに有効利用するため、ピーク前に使いすぎない。
- ・放射パネルおよび躯体蓄熱への往還温度差を監視し低負荷時は停止する。
- ・最小限の予熱時間とする。
- ・残業・土日出勤時は即効性のある空気側(空冷HP)で対応する。
- ・中間期には自然通風を有効利用する。

3. 2 空調システムの運用方式

運用改善後の空調運転方式は、夏期 2 パターン、冬期 3 パターン、中間期 1 パターンとした。

(1) 夏期の夜間(予冷運転)

夏期の夜間(図 8)は、地中からの採熱を利用して躯体に冷蓄熱する予冷運転を行うことで、空調の立上げ負荷を軽減する。冷蓄熱は時間経過に伴い放熱するため、空調の立上げ時間直前に行う。負荷側(放熱対象となる室内温度)と採熱側(地中温度)の温度差が付き易い夜半過ぎから予熱運転を開始することで、搬送熱量を比較的大きく出来る。搬送熱量は採熱温度が低いほど多く、また、夜間の外気温度が高いほど、日中の日射量が大きいほど、大きくなる。

一方で、8 月後半から 9 月になると、採熱温度が上昇し、夜間の外気温度も低下するので、搬送熱量および躯体へ冷蓄熱できる量が減り、低負荷・低効率運転となり易いため、往還温度差を監視し、低負荷での地中熱の送水を自動制御にて停止する。

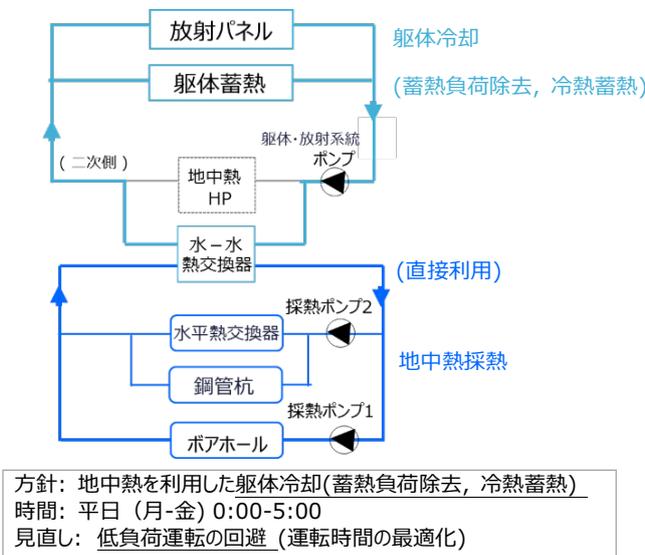


図 8 空調システムの運転（夏期 夜間）

地中採熱ポンプの運転効率を採熱効率とし、採熱量÷ポンプ動力で定義した。図 9 に、夏期の地中採熱ポンプの採熱効率を示す。本施設の 2017 年度の運用では 7 月時点では地中熱の採熱温度が 21.5℃程度であり、8 月上旬では 23℃と推移した。採熱は、躯体・放射パネルへ送水し、最終的には室内との熱交換となる。夏期・夜間(空調停止時)の室内温度は 28℃程度であった。採熱ポンプは定流量運転のため、利用できた熱量と採熱効率が比例する。そのため、採熱温度の上昇に伴い採熱効率(二次基準)が低下している。採熱効率の目標値は、5.0 とした。

(2) 夏期の日中

夏期の日中は図 10 に示すように、外調機で外気を 15℃程度に過冷却除湿し、再熱コイルにより 20-22℃程度として、処理外気を室内に供給する。再熱コイルから熱回収を行い躯体・放射パネルへの送水に利用して、躯体の熱容量を活かした顕熱処理空調を行う。これにより、処理外気による潜熱処理と躯体・放射パネルによる顕熱処理を分離した空調方式となる。

処理外気からの再熱量と、顕熱処理負荷のバランスが取れることが求められるが、本施設では、室内負荷が大幅に削減されているため、顕熱処理(室内負荷)に必要な熱量が再熱で賄っていた。また、再熱後の空気温度は、20-22℃程度であるため、室内に露出する放射パネル面での結露発生が回避できた。躯体・放射パネルへの送水温度としても、室内を快適とするための適切な温度範囲(18-23℃)に維持できていた。つまり、本



図 9 夏期の(6-8月)の地中熱の採熱効率(二次基準)

施設では結果的に総合的なバランスが取れた空調方式を実現できていた。補足として、本施設では外気処理負荷の削減として、CO₂による変风量制御とクールピットによる処理負荷低減を取り入れている。

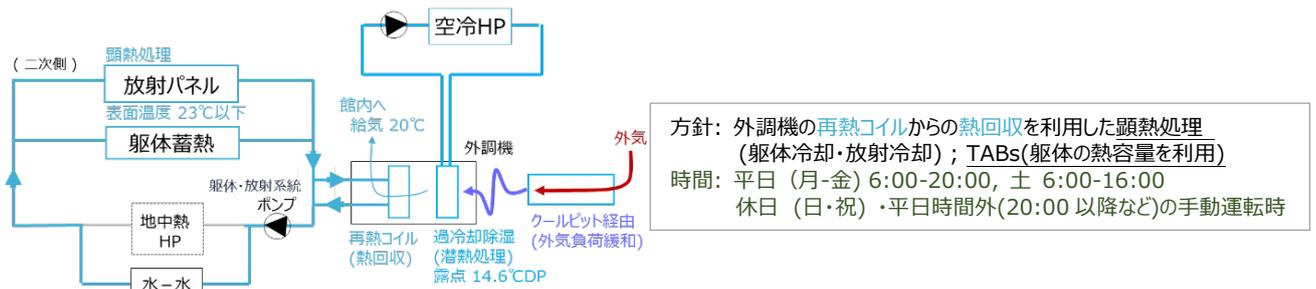


図10 空調システムの運転（夏期 日中）

(3) 冬期の早朝（予熱運転）

躯体蓄熱を行う場合、運転開始直後から躯体温度が設計で予定している温度となるまでに一定の時間を要する。そのため、使用する時間帯に先立って予熱運転が必要になる。本施設の場合、平日は1時間（朝6時台に出勤者がいるため、朝5時より）、週明けは4時間（朝2時より）とした（図11）。参考として本施設では、空調運転を停止後の躯体温度の変化は、夏期 1℃/day、冬期 2℃/day 程度であった。外調機の運転開始時刻はいずれも朝6時とした。

長期休暇明けは朝7時に躯体温度（躯体からの還温度）の目標値を20℃と決め、前日18時に運転開始とした。ただし、外調機の運転開始時刻は朝3時とした。

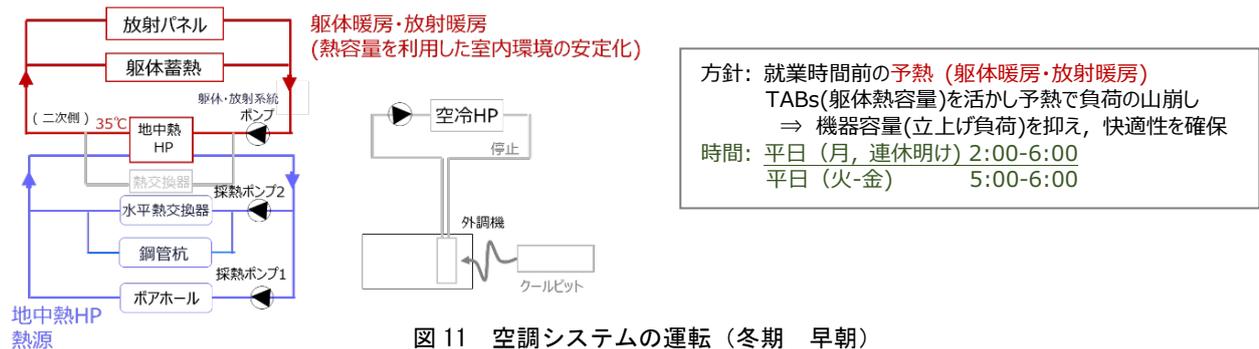


図11 空調システムの運転（冬期 早朝）

(4) 冬期の日中

冬期の日中は地中熱HPを熱源とした躯体・放射パネルへの送水（35℃）による暖房運転と、外調機からの処理外気送風（22℃）とした（図12）。快適性の面からは、厳寒日などは、立上げ運転時のみ処理外気の温度設定（室内への供給温度）は28℃などとするなどの工夫を行うと、運転時間の短縮となりよりエネルギー効率が高められ、不測の状況でも早急な対応が可能である。このような対応は、支社の運用管理者の手腕により実行した。

また、本施設では、絶対湿度が夜間に低下するため、立上げ運転時でも加湿を行う必要があった。ウォーミングアップ運転時に加湿禁止とすると、朝に相対湿度が著しく低下する可能性がある。

躯体・放射パネルによる熱容量を活かした空調方式では、躯体・放射パネルへの送水停止後も含め、室内の温度変化は非常に少ない。本施設では、室内温度が設定条件に達した場合は、同日の以降の時間は、半日程度であれば躯体・放射パネルへの送水を停止しても、室内は快適範囲の温熱環境となることを確認できた（図13）。そのため、地中熱HPは、往還温度差が1℃以下となる低負荷条件に入ると運転を自動制御により停止するものとした。

この様な低負荷運転を回避する工夫により、地中熱HPの運転効率を高めることができた。地中熱HPの2

月の運用状況(1時間毎のプロット)を図14に示す。定格45.2kWに対して、平均負荷率90%程度であり、機器単体のエネルギー効率(COP)は、2月の累積平均で5.56(機器定格値4.5)であり、採熱ポンプの動力を加味しても4.52と高い値で運用できた。

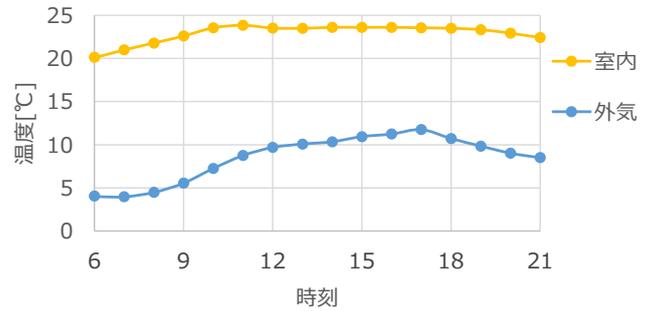
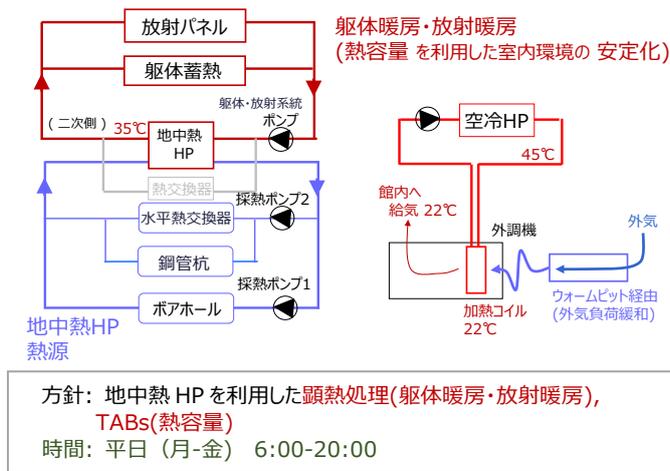


図13 空調システムの運転(冬期 日中)

図12 空調システムの運転(冬期 日中)

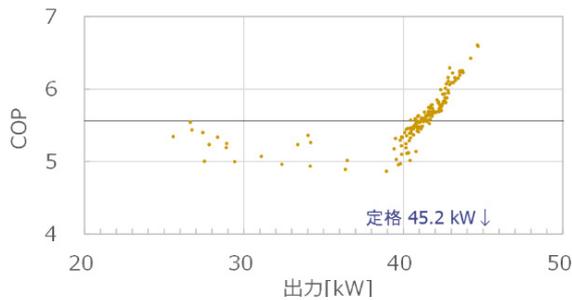


図14 地中熱HPの運転状況(2月)

(5) 冬期の日中(低負荷時)

冬期の日中に地中熱HPを自動制御により停止した以降の時刻でも、躯体・放射パネルからは、成り行きの放熱が行われる。空調設備の稼働としては、外調機からの処理外気送風(22°C)のみ行う(図15)。

(6) 中間期

中間期は2F、3Fの執務室(各200m²)は自然換気(窓明け通風)を行うと共に、外調機から熱処理を行わず送風を行う。ただし、自然換気が行えない応接室や会議室などのみ、FCUによる空調運転とする。

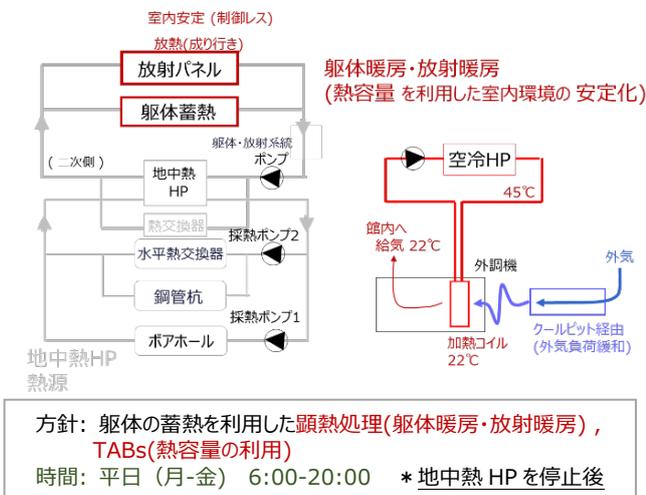


図15 空調システムの運転(冬期 日中 低負荷時)

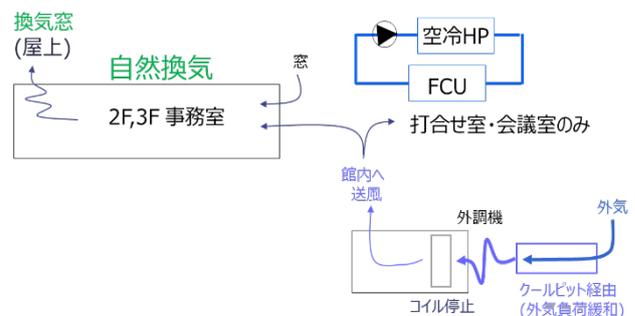


図16 空調システムの運転(中間期)

4. 運用実績

4. 1 エネルギー評価

2016年6月より運用開始をした結果、WEBプログラム上の稼働時間と比較して少なくとも1.3倍の執務室の稼働時間となっており、基準同様コンセント負荷を除いて626 MJ/(m²年)であり、運用上のZEB Ready相当を満足できなかった。2017年1月より、前述の運用改善を開始した。目標値をZEB Ready相当とし、542 MJ/(m²年)以下とした。

運用改善の結果、創エネ含まずに507 MJ/(m²年)となり、残業等の業務形態があるにもかかわらず、目標である運用上でのZEB Ready相当を達成した。また、執務室の稼働時間をWEBプログラム相当に補正した場合は、創エネを含んで246 MJ/(m²年)となりNearly ZEB相当となった。

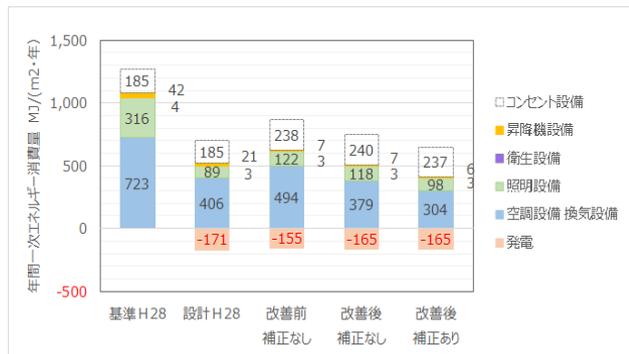


図 17 エネルギー消費量（項目別）

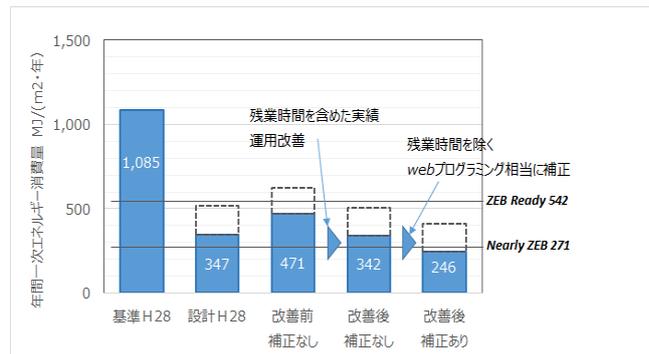


図 18 エネルギー消費量（全体）

4. 2 室内環境評価

夏期及び冬期の上下方向(図 19、図 20)の温度分布を示す。夏期はFL. 100mm~1500mmにおいていずれの時刻も温度差は1℃以下であった。冬期もFL. 100mm~1500mmにおいて1.4℃以内と快適な範囲となった。

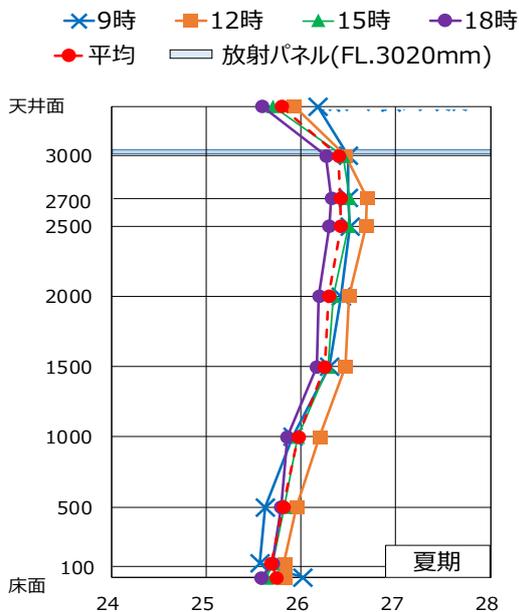


図 19 上下温度分布（夏期）

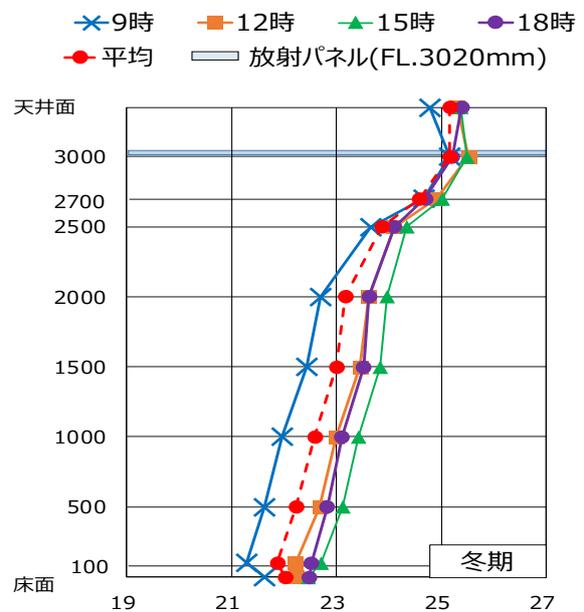


図 20 上下温度分布（冬期）

夏期及び冬期の水平方向(図 21、図 22)の温度分布を示す。夏冬共に温度差は1℃以下となり、良好な室内環境となった。

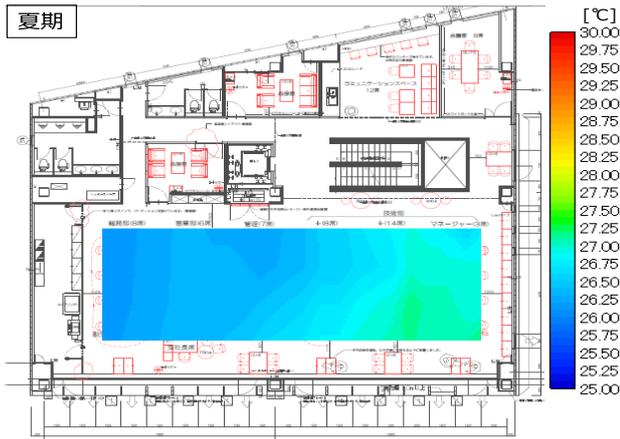


図 21 水平温度分布（夏期）



図 22 水平温度分布（冬期）

同敷地にあった旧支社とエネフィス九州での温熱環境（図 23）および空気環境（図 24）についてのアンケート結果³⁾を示す。おおむね、旧支社と比較して環境は改善し、不満も減少した。

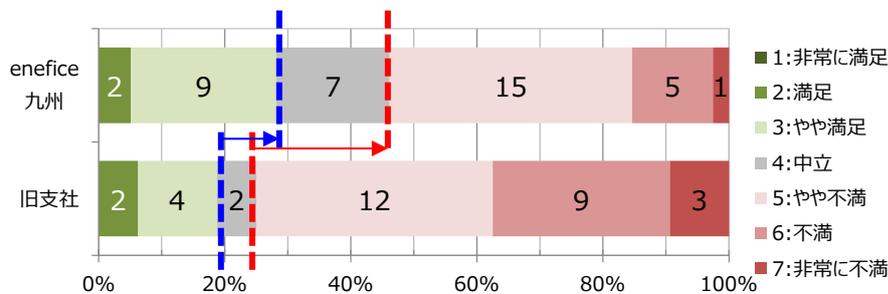


図 23 温熱環境アンケート結果

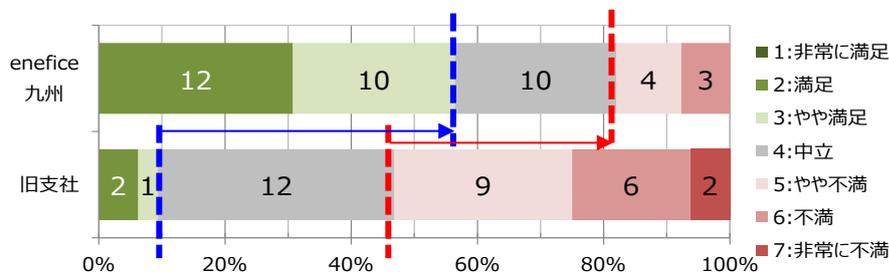


図 24 空気環境アンケート結果

5. おわりに

オフィス環境を適切に維持しながら、建物内の消費エネルギーを極限まで少なくする建物を構築するには、設備面では、更なる工夫が求められる。計画・設計上の工夫も必要であるが、運用開始後からの工夫も不可欠である⁴⁾。エネフィス九州は、支社としての機能を中心としているが、様々な取り組みを実証するラボとしての機能を併せ持つ。当社の社員が自ら使い、検証し、改善していくことで、ZEB、省エネルギービルに対する技術を蓄積し、ZEBの普及と社会の低炭素化に貢献していく。

参考文献

- 1) 山口太朗, 立石賢太, 藤原 勇, 松江正, 中村真, 野部達夫, 田辺新一, 佐藤真由美, 田窪高蔵, 「スマートビルへの改修に適用したゼロ・エネルギー化技術の紹介」, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集(2016), pp. 301-304.
- 2) 山口 太朗, 藤原 勇, 井澤 知, 青木 隆哉, 杉浦 聡, 川口 豪紀, 後藤 圭佑, 柳 享一, 松田 侑樹, 野部 達夫, 富樫 英介, 「スマートエネルギービルに適用する技術に関する研究(その2)」, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集(2017), pp. 193-196.
- 3) 香取尚樹, 安田光秀, 鶴飼真成, 花園新太郎, 山田正也, 野部達夫, 「スマートエネルギービルに適用する技術に関する研究(その3)」, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集(2017), pp. 197-200.
- 4) 山口太朗, 「ZEB化技術で構築したオフィスビル(スマートエネルギーラボ)の紹介」, 空気調和衛生工学(2017.12), Vol.91, No. 12, pp. 23-28.