

新宮市庁舎の空調設備計画とエネルギーマネジメントの取り組み

The Air-Conditioning System Plan of Shingu City Office Building Considered in Energy Conservation and the Approach of Energy Management

株式会社 佐藤総合計画 関西オフィス 技術・環境
AXS Satow Inc Architectural Environment
土岐 達美
Tatsumi Doki

キーワード：地中熱ヒートポンプシステム(Ground source heat pump system)、アースチューブ(Ground tube)、居住域空調(Occupied zone air-conditioning)、エネルギーマネジメント(Energy management)、性能検証(Performance verification)、

1. はじめに

1.1 新宮市地球温暖化対策実行計画

新宮市は2011年度から2015年度に「第1次新宮市地球温暖化対策実行計画」を策定し、地球温暖化問題に対して取り組んできた。その実績を受けて、2016年度からの5年間で「第2次新宮市地球温暖化対策実行計画」に取り組んでいる。

この実行計画に基づいて、新庁舎建設にあたっては、省CO₂を目指した設備システムの構築が必須であった。設備手法の中で、この地特有の岩盤地質による有効熱伝導率の高さから、CO₂およびランニングコストの削減に優れた地中熱システムの提案を行い、新宮市として一般住宅を除く施設への初の導入であり、和歌山県下の公共施設については初の導入となった。

地元業者育成の観点から、市発注工事において積極的に地元業者に発注を行い、技術の普及に努めた。また、市のホームページで地中熱利用の仕組みや工事概要を紹介して、普及促進に努めている。

1.2 本業務の主眼点

新宮市庁舎は、和歌山県南部の鉄道駅に近い既設市庁舎敷地内、市街地のほぼ中心に位置し、仮設庁舎や別館などと隣接して建設され、2017年3月に竣工した。

計画時のコンセプトとして、①「防災拠点となる安心安全の要となる庁舎」、②「分かりやすい見通しのよいオフィス構成」、③「地域性・建築・設備が一体となった徹底的な省エネルギー」を掲げている。省エネルギー性及びエネルギーのベストミックス、地域特性を生かした熱源システムを構築する観点から、地中熱ヒートポンプシステムに加えてガス吸収冷温水機を採用した。

2. 計画概要

2.1 建築概要

本建物は、市街地のほぼ中心に位置している。配置計画では、敷地の最も高い既存庁舎の位置に新庁舎を設けた。建設にあたり、隣接する職業訓練センターを仮庁舎に改修引越し、庁舎機能と市民サービスを継続した。

基準階プランは、執務室に対して垂直に空調機械室をレイアウトし、床吹出しが効率良く床下を通るようにした。空調機械室と隣接させて倉庫を配し、騒音にも考慮した。OAとEAについては、各空調機械室にコンクリートシャフトを設け、スペースの有効化を図った。図-1に基準階平面図、図-2に環境断面図を示す。

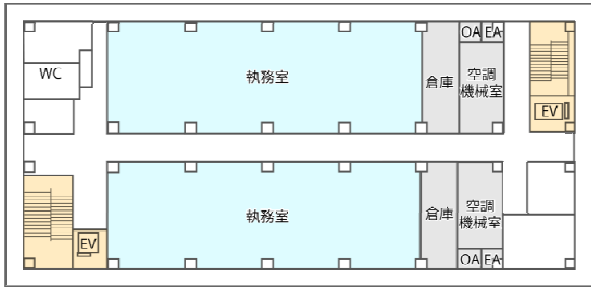


図-1 基準階平面図

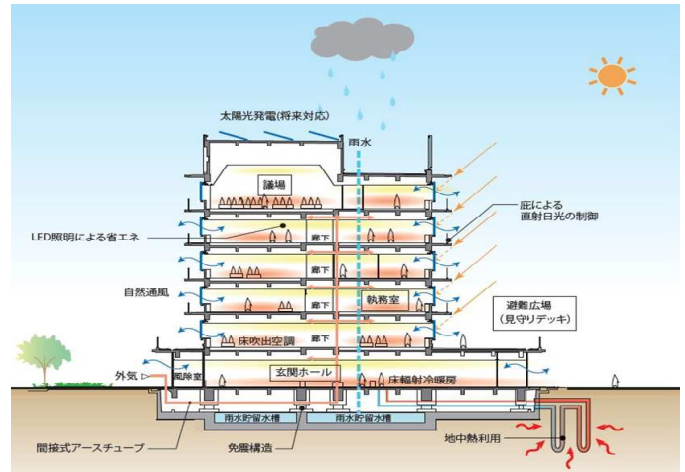


図-2 環境断面図

2.2 空調設備概要

熱源は、大規模災害時のリスク分散にも配慮し、電気、ガス熱源のベストミックス方式とした。電気熱源は、地盤特性を利用した地中熱ヒートポンプを採用し、バックアップとして空気熱交換器も設置した。

空調機は、各階及び南北の方位別に系統分けして設置した。1階エントランスは冷温水を用いた床放射冷暖房、各階は床吹出しによる居住域空調とした。議場や会議室系統は空冷ヒートポンプパッケージ方式とした。

2.3 主な省エネルギー・環境配慮システム

(1) 地中熱ヒートポンプシステム

本建物の周辺地盤は岩盤であり、熱交換効率の高い敷地条件であることから、地中熱ヒートポンプシステムを採用し、ボアホール方式熱交換井を隣地市駐車場に敷設した。

地中熱工事施工の前年に実施した熱応答試験では、地盤の有効熱伝導率が $2.13\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ となっており、高い熱交換性能を発揮できることを確認している。また、地中熱を利用することにより、地球温暖化の要因となる二酸化炭素の排出量を $8\text{t-CO}_2/\text{年}$ 削減でき、地球環境の保全に寄与する。

(2) アースチューブ方式

図-3 に本庁舎の概略ダクト系統図を示す。免震ピットをダクトルートに利用し、各階空調機の外気を供給する計画とした。地下の安定した温度により、特に夏期・冬期の外気負荷の約21%削減を見込んでいる。

アースチューブの方式には、ピット内に直接外気を導入して冷却・加熱する「直接方式」と、ピット内をダクトルートとして間接的な熱交換を行う「間接方式」があるが、ピット内の結露やカビ等の発生リスクを考慮して、「間接方式」を採用した。図-4 にアースチューブの設置状況写真を示す。

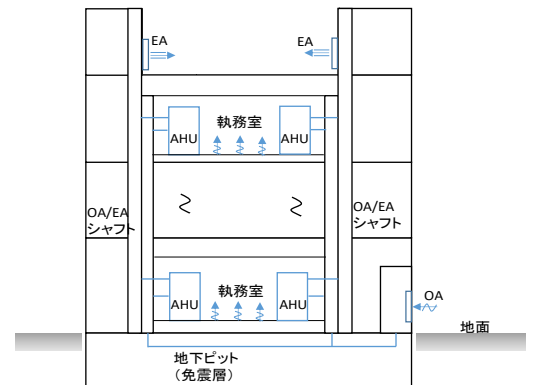


図-3 概略ダクト系統図



図-4 アースチューブ設置状況写真

(3) 床吹き出し空調システム

執務室からの空調システムは、省エネルギー性の観点から居住域付近の温湿度調整を重点的に行う床吹き出し方式を採用した。このシステムにより、夏期・冬期とも足元と頭の温度差が2℃以内となり、快適性を確保できる。机や棚の配置を踏まえて、吹出口の配置を最終決定した。

一方、足元の冷えによる不快感を防止するため、冷房時の空調機吹出温度に下限値を設定するとともに、二重床の床下空間に均等な静圧が得られるよう、設計時の検証及び施工時の試運転調整を行った。

空調機械室を執務室に直角に設けることにより、床吹き出しがスムーズに供給される様に計画した。図-5に空調機械室断面図を示す。

1階における床面付近での空調機よりの吹出しから最遠端で28.5mあるが、直近、最遠端とも均等な吹き出し風量が確保されているのが分かる。図-6に1階床吹き出し平面図を示す。

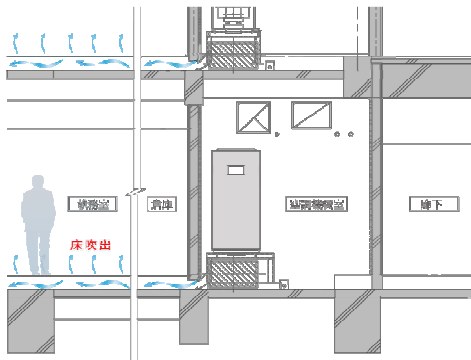


図-5 空調機械室断面図

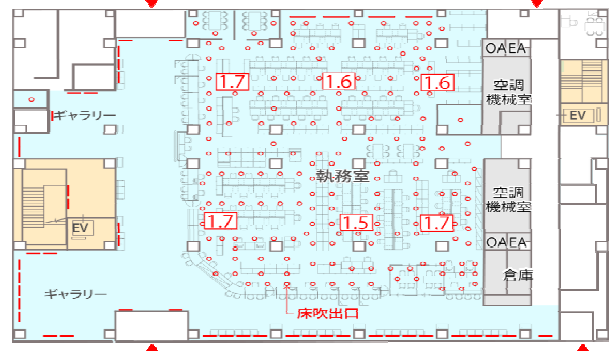


図-6 1階床吹き出し平面図

2.4 地中熱ヒートポンプシステムの計画と設計について

(1) 地中熱ヒートポンプシステムの概要

- ・地中熱ヒートポンプ ——— 冷房能力：106kw(参考 COP：3.97)
冷水条件：12℃→7℃
(熱源水条件：25℃→30℃)
暖房能力：108.5kw(参考 COP：3.14)
温水条件：45℃→50℃
(熱源水条件：10℃→5℃)
- ・地中熱交換器 ——— ボアホール方式
(深さ 100m×16 箇所、4.5m間隔)
高密度ポリエチレン管
(ダブルU字管)
空気熱交換器と切り替え可能

(2) 地質分析結果

建設地の土質分類は、新生統第三紀層であるシルト及び粘土質、砂利等の堆積物が地殻変動等の影響で隆起し、台地状の小山を形成したものと推定される。この台地状の山は一部分を除いて洪積層であり、熊野川等の上流より洪水等で流出された硬砂岩・頁岩・石英斑岩等を混じえた堆積土砂である。地盤調査で深さ18mまでの掘削を行った結果、地表面近くからGL-13mまでN値60以上の砂礫層が存在し、その下部に玉石の混じったN値60以上の礫層が互層になっていることが確認出来た。これらのことから、地盤の熱伝導率は高いと判断し、ボアホール方式の地中熱交換器を採用した。

図-7 に熱応答試験と施工時の地質・地下水賦存状況を示す。特徴として、砂礫・泥岩の地質であること、孔内水位が 3.8m と高いこと、地中温度が 20℃前後と高いこと、有効熱伝導率が 2W/(m・K)前後と高い値を示していることが挙げられる。

3) 熱応答試験の概要と結果

自然状態の地中温度分布を把握するため、敷地東側に設置した地中熱交換器において深度 1m 毎の温度を測定した。その後、地盤の有効熱伝導率と地中熱交換器の熱抵抗を推定するため、熱応答試験を実施した。

地中温度の測定結果を図-7 に示す。深度 10m より浅い範囲は外気の影響を受けて温度が大きく変化しているが、それ以深は温度変化が小さく、年間を通してほぼ一定の温度であると考えられる。温度が安定する深度 10m~103m の測定結果を平均すると 18.8℃であった。

熱応答試験結果と施工時の地質・地下水賦存状況

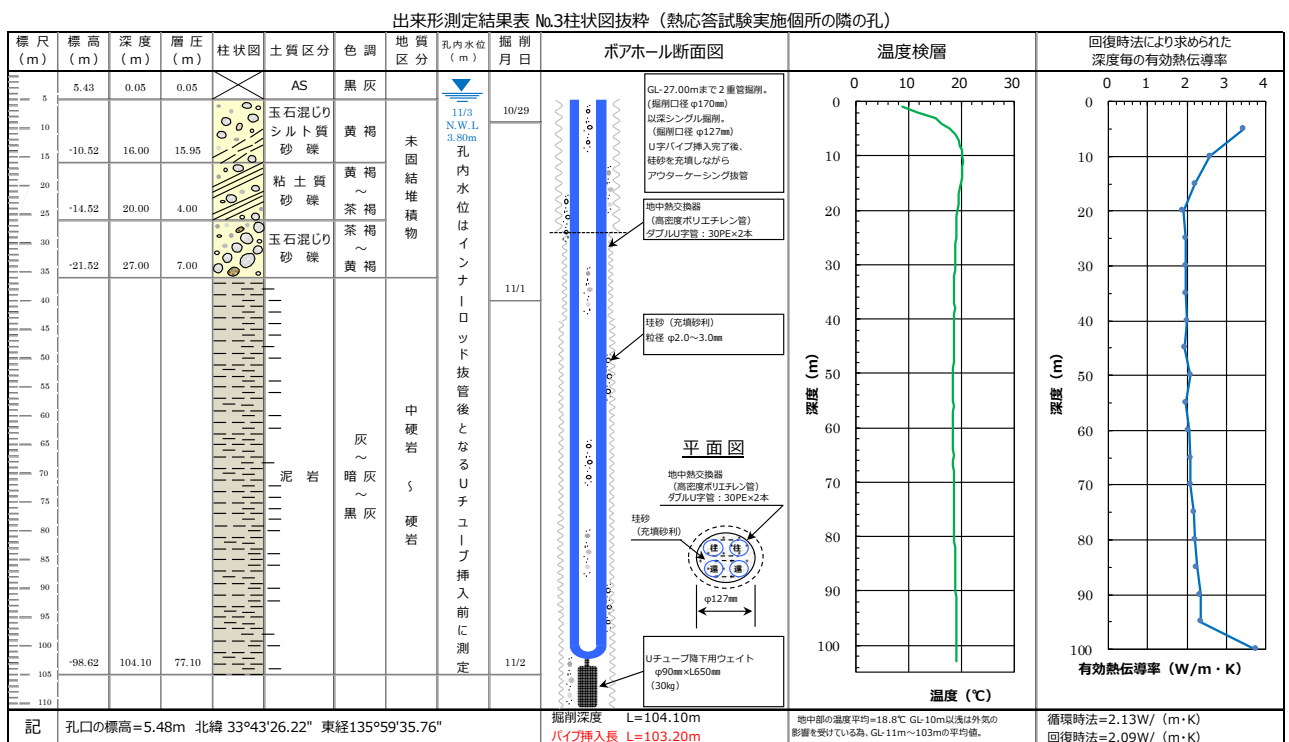


図-7 熱応答試験結果と施工時の地質・地下水賦存状況

熱応答試験は電気ヒーターで加熱した循環水を地中熱交換器に循環し、循環水の温度変化を元に全層にわたる地盤の有効熱伝導率を推定する循環時法と、加熱終了後の地盤温度の回復状況を元に深度毎の地盤の有効熱伝導率を推定する回復時法を実施した。循環時法による解析の結果、地盤の有効熱伝導率は 2.13W/(m・K)と判定された。

また、回復時法による解析の結果推定された深度 5 m 毎の地盤の熱伝導率を図-7 に示す。各深度の地盤の有効熱伝導率を平均すると、2.09W/(m・K)となった。なお、建設地の地質である粘性土と頁岩の一般的な熱伝導率はそれぞれ 1.2W/(m・K)および 1.4W/(m・K)程度と推定される。熱応答試験ではこうした一般的な熱伝導率よりも高い数値が確認されており、地下水の流動により見かけ上の熱伝導率が向上した結果と考えられる。

熱交換器の選定については、ソフトウェアによる計算の結果、必要な地中熱交換器の総延長は 1,561m となり、設計値の総延長 1,600m で必要な能力が得られることを確認した。

3. エネルギーマネジメントの取り組みについて

3.1 エネルギー使用状況の見える化

本庁舎では、省エネルギー化を進めるために、PDC Aサイクルに基づく継続的なエネルギーマネジメント活動を行っている。本活動では、エネルギーマネジメント月報によりエネルギーの使用状況を見える化し、設計者とエネルギー会社の専門技術者が、建物利用者である新宮市の建物担当者とのコミュニケーションを図りながら、省エネ対策を立案・実施し、効果の検証も行っている。また、機器運転状況の見える化は、設備初期不具合の早期発見や原因究明・改善にも役立っている。活動の実施体制を図-8に、エネルギーマネジメント月報を図-9に示す。

月報の1ページ目には、施設全体の電力消費量・ガス消費量を表示し、2ページ目に施設の時刻別電力消費量や照明コンセントの電力消費量、デマンドを見える化している。3ページ目以降には熱源の生成熱量やCOP、WTF等の機器運転状況に関する各種指標を示し、空調システムの運転性能を効率的に評価できるツールになっている。1~2ページには専門知識を持たない人でも理解し易いコンテンツを集め、運用改善提案も合わせ表示している。

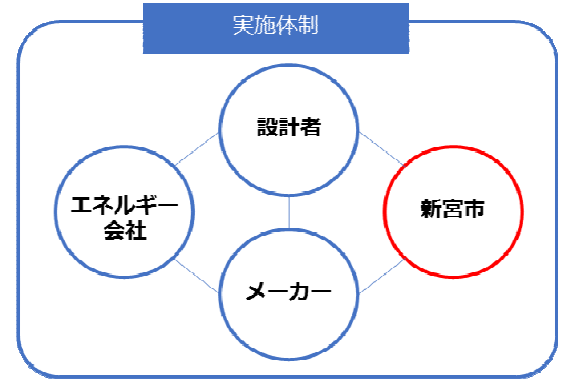


図-8 エネルギーマネジメント実施体制

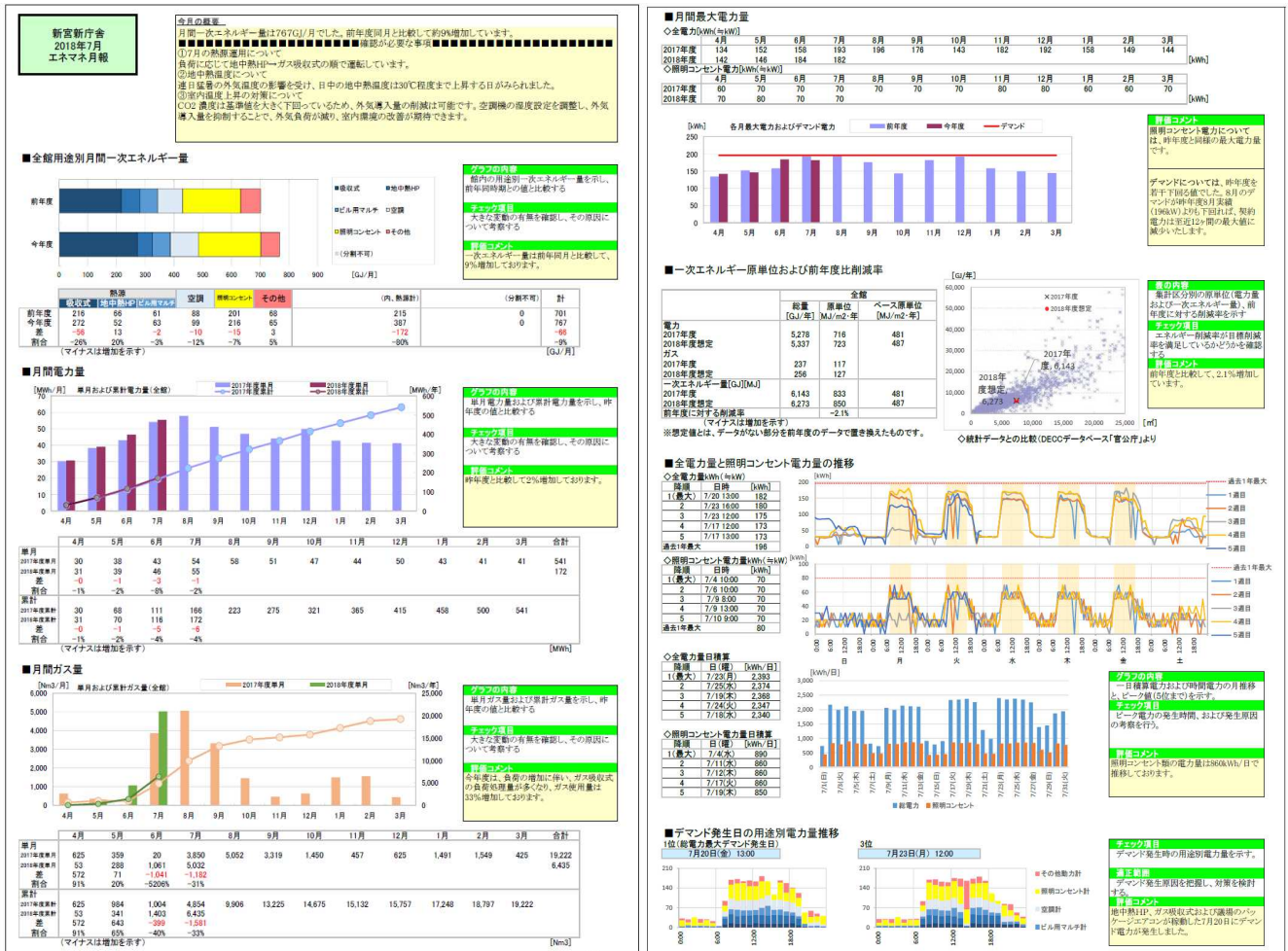


図-9 エネルギーマネジメント月報の例

3.2 運転性能評価と運用改善事例

月報を活用してエネルギー消費量削減や室内環境改善に成功した事例を示す。

(1) 冷房初期の室内温度の改善

2017年6月下旬から7月中旬にかけて、室内温湿度が上昇する問題が発生した。月報で室内環境と空調機の運転データを確認したところ、冷水温度が高く、空調機で十分な除湿ができていない可能性があることが分かった。ガス吸収冷温水機の冷水設定温度が10℃となっていたため、メーカーと協議の上、7℃に変更した結果、室内温湿度を改善することが出来た。

(2) 夜間や休日の熱源消し忘れ対策

休日や夜間勤務時には熱源を手動で起動する運用となっているが、最終退室者が停止操作を忘れ、不必要な熱源運転が生じる日が時折見られた。そこで、中央監視装置のスケジュールに休日・夜間のOFF設定を追加し、熱源の消し忘れ防止を図った。

(3) 議場空調運用の工夫によるデマンド抑制

2018年度の年間最大デマンド発生日(2019年2月15日9:00~9:30、201kW)の用途別電力消費量を示す。2017年度の分析の結果、ビル用マルチエアコンがデマンド発生要因の一つであり、特に、議会エリアのパッケージエアコン起動時にデマンドが上昇する傾向が分かっている。そこで、2018年度冬期には、建物担当者に、議会エリアのパッケージエアコンを起動させる際にはピーク時を避けること、暖房起動時には設定温度を低めに設定して急激なデマンド上昇を抑えることを提案した。2月15日の電力データにはその効果が明確に表れている。以降、当該建物は、夏・冬期とも概ね200kW弱のデマンドで運用されており、対策により平準化が実現できたと言える。

(4) 中間期のガス吸収冷温水機の停止

図-10に冷房中間期のガス吸収冷温水機の運転状況を示す。ガス吸収冷温水機は、低負荷時には間欠運転を繰り返し非効率な運転となる。特に冷房中間期には待機運転を繰り返し、冷熱を生成しない時間帯にもガスを消費する傾向がある。このため、冷房負荷が小さい中間期は原則として地中熱ヒートポンプのみで冷熱を生成する運用とすることを提案した。現在は、年間スケジュール設定において中間期の台数制御を無効とし、地中熱ヒートポンプのみが起動する設定としている。

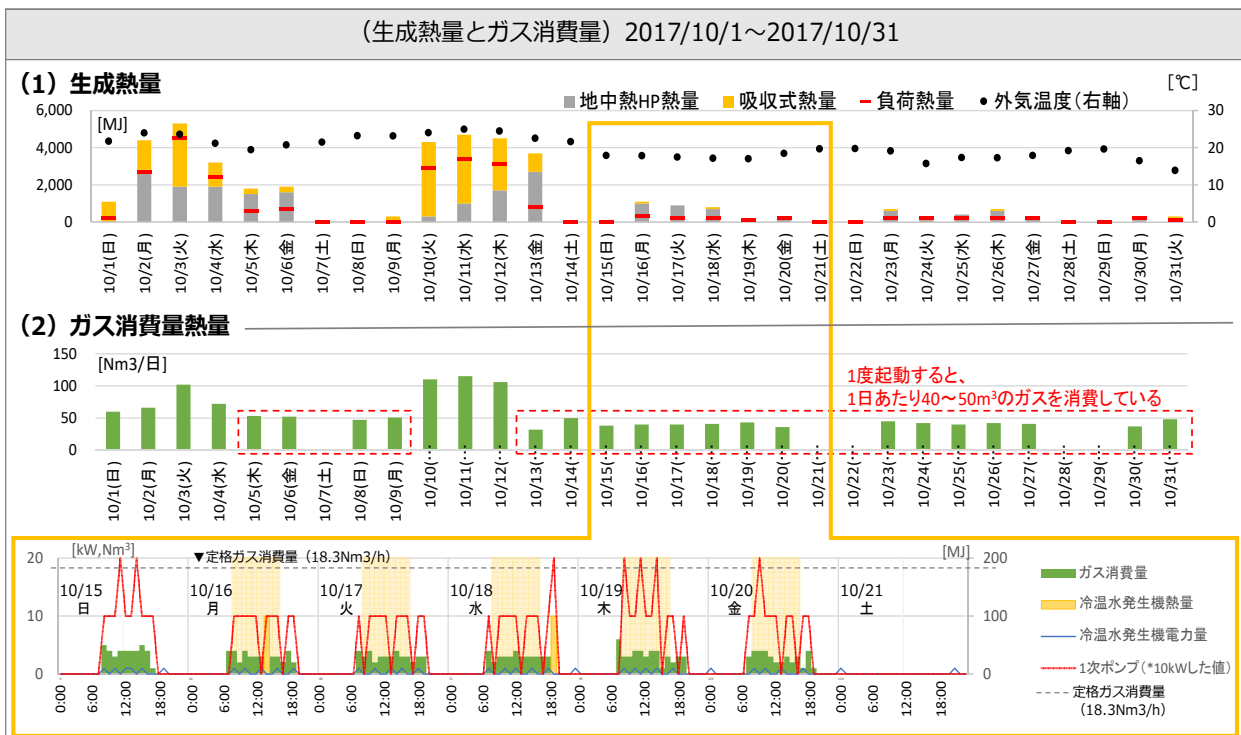


図-10 冷房中間期のガス吸収冷温水機運転状況

(5) 休日出勤時の空気熱交換器利用

休日の冷房負荷は小さく、ガス吸収冷温水機は図-10と同様に間欠運転を繰り返す傾向がある。そこで、冷房期の休日には地中熱ヒートポンプを故障時バックアップ用の空気熱交換器に切り替えて運転することを提案した。これにより、地中温度の回復と効率向上の両立が可能となる。暖房期は、週末の地中温度の低下が見られないため、土日も地中熱ヒートポンプを活用する方針とした。

(6) 夏期執務室の外気導入量抑制対策

執務室は床吹き出し方式となっており、設定されたファンの周波数に応じて一定風量で吹き出しを行う。給気温度は冷温水コイル二方弁による比例制御とするが、室内ペリメータ温度または還気温度の要求が高い場合には、カスケード制御により給気温度の設定値を調整する。冷房期の高湿度時には、還気バイパスを開き除湿を図る除湿制御が機能する。一方、除湿が必要無い場合においては、室内CO₂濃度に応じて外気ダンパー及び排気ダンパー開度を通常の25%から最小の10%まで制御する。除湿制御とCO₂制御の共存は出来ず、除湿制御が優先される。なお、冬期は還気バイパスを制御せず、常にCO₂制御が働く。

2018年7月下旬より、各階執務室の室温が上昇し、設定温度(26℃)に到達しない事象が見られた。除湿制御による外気負荷の増大が原因の一つであると考え、2018年8月10日に、湿度設定をあえて高めに設定し、CO₂制御へ切り替えることで外気量削減を図った。図-11に2018年8月の室内温熱環境の推移を示す。1階は床放射空調の影響もあり大きな変化が見られなかったが、2階から5階の温熱環境は大きく改善された。なお、外気導入量を低減した結果、室内の絶対湿度についても各階で若干の減少傾向が見られた。各階執務室のCO₂濃度は700~800ppmで推移した。

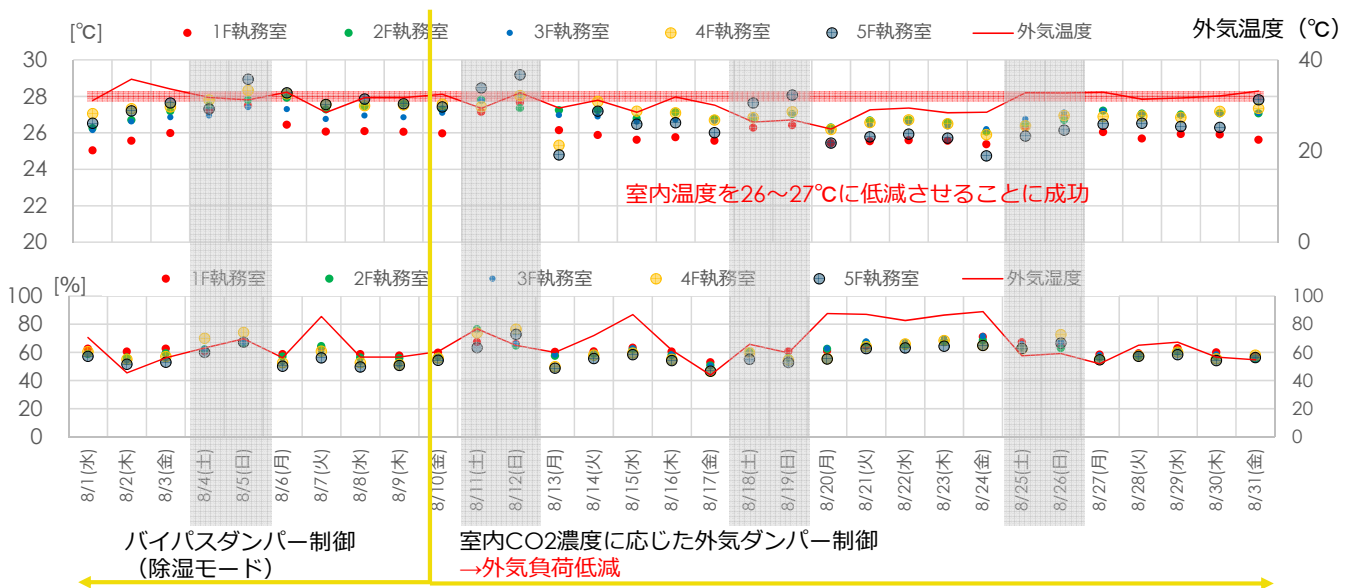


図-11 2018年8月の執務室内平均室温・湿度

(7) シーズン切り替え時の確実な設定変更

シーズン切り替え時には、中央監視装置の各室設定温湿度を季節に応じた数値に変更する必要があるが、夏期の室温設定のまま暖房運転に移行し、11月の暖房負荷が増加する事例が見られた。そこで、専門技術者がシーズン切り替え時の設定変更を容易に行えるよう、各月の空調制御設定管理表を作成し、共有を図った。その後も、月報を通じた設定状況の確認は継続し、季節に応じた適切な運用を確実に実施している。

3.3 地中熱ヒートポンプシステムの運転性能評価と最適運転計画の立案

(1) 夏期の地中熱ヒートポンプシステムの運転状況

2018年8月の地中温度を図-12に示す。地中温度は、22~28℃で推移している。採熱量が大きい8月後半には、週末に向けて徐々に地中温度が上昇したが、土日に地中熱ヒートポンプを停止させたことで、22℃程度に回復した。地中熱ヒートポンプの採熱量は、200~400MJ/hで推移しており、採熱量が300MJ/hを超える日が続くと地中温度が上昇する傾向が見られた。

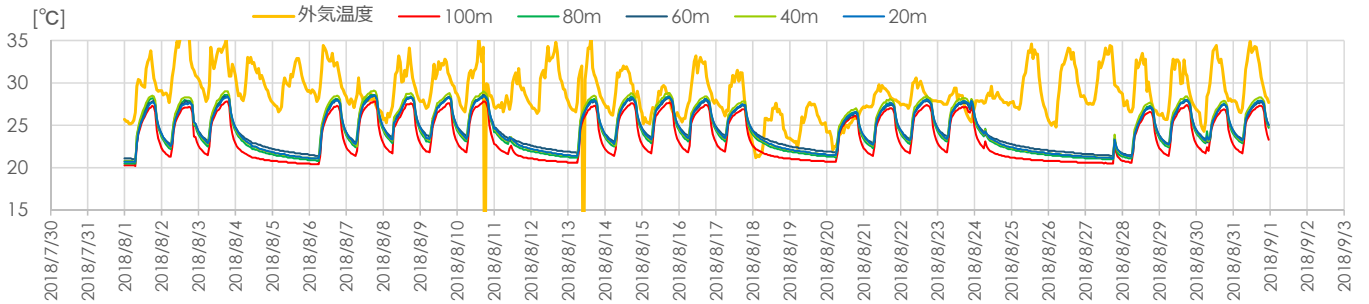


図-12 2018年8月の地中温度

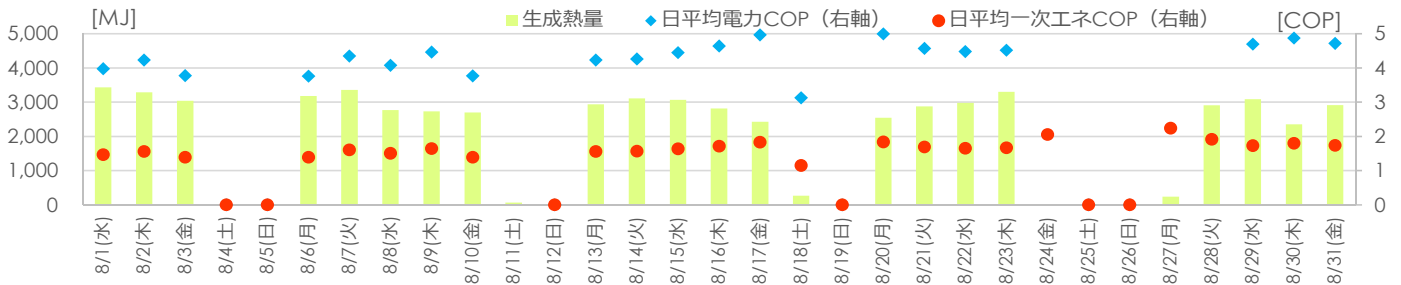


図-13 2018年8月の地中熱ヒートポンプの生成熱量と日平均COP

図-13に2018年夏期の地中熱ヒートポンプの生成熱量と日平均COPを示す。2018年8月における熱源単体の平均COPは4.37、搬送動力を含むシステムCOPは3.91であった。7月後半~8月末まで、地中温度の上昇に伴い、COPが低下する傾向が見られた。負荷率と地中熱ヒートポンプCOPの関係をメーカー特性(冷水出口温度7℃、熱源水出口温度27℃条件)とあわせて図-14に示す。竣工後1年目の2017年度と同様に、70%以下の負荷率でCOPが上昇する傾向が見られた。

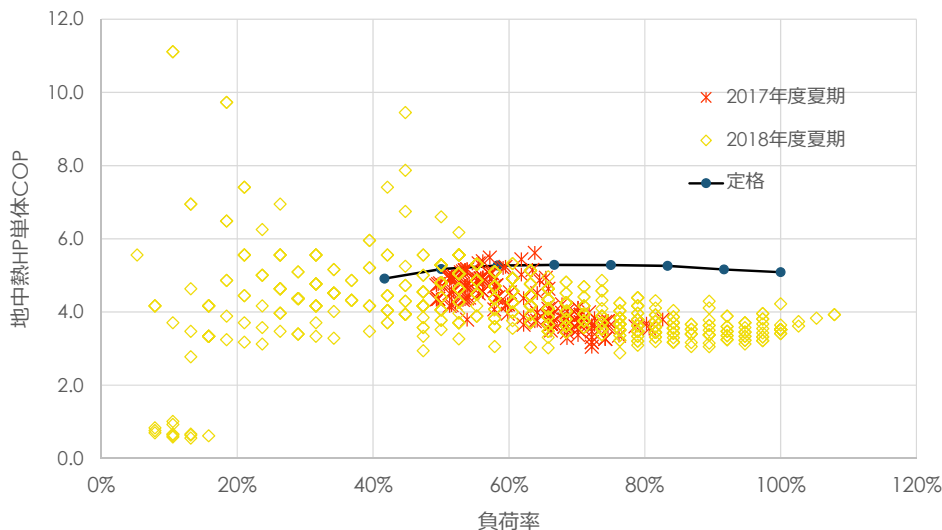


図-14 夏期の負荷率と熱源単体COP

(2) 冬期の地中熱ヒートポンプシステムの運転状況

図-15 に 2018 年 12 月の地中温度を示す。地中温度は概ね 14~20℃を推移している。2017 年度と同様に、冬期には週末にかけて地中温度が低下する傾向が見られなかった。温水生成時の採熱量は概ね 200~300MJ/h と、夏期に比べて小さいことが、この要因と考えられる。図-16 に 2018 年度冬期の地中熱ヒートポンプの平均 COP の推移を示す。2018 年 12 月の熱源単体での平均 COP は 4.07、システム COP は 3.70 であり、2018 年度と概ね同様の傾向を示した。

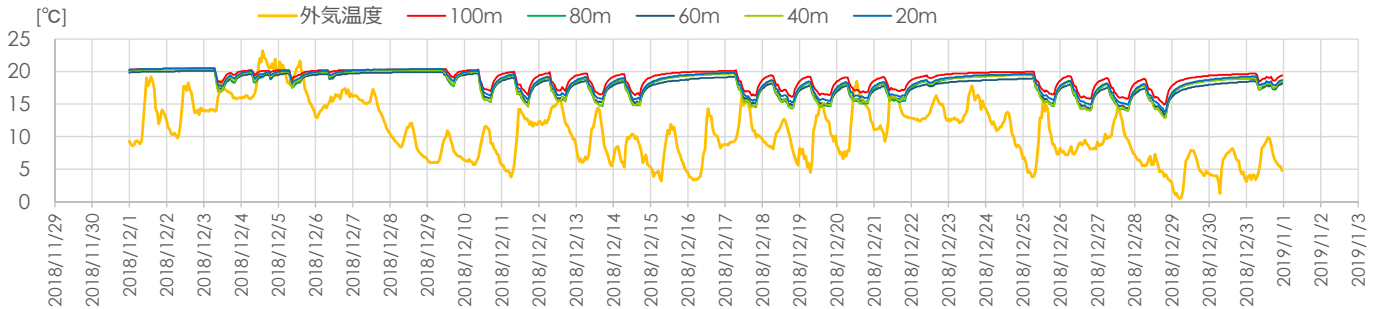


図-15 2018 年 12 月の地中温度

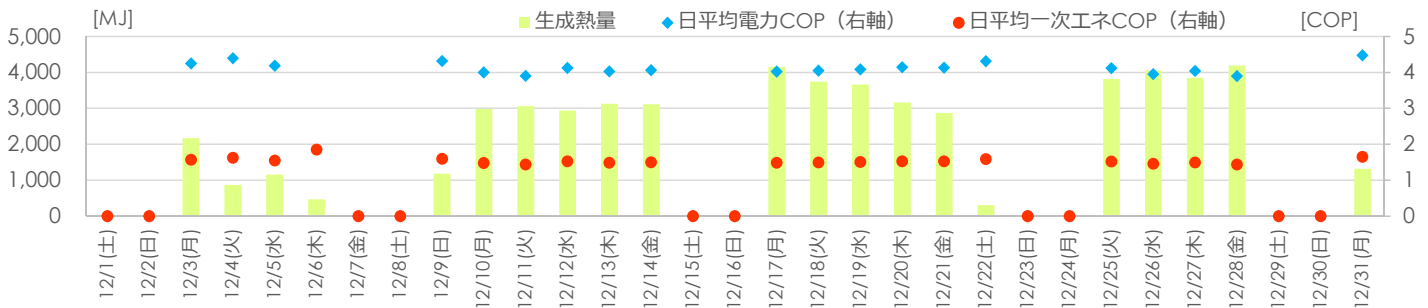


図-16 2018 年 12 月の地中熱ヒートポンプの生成熱量と日平均 COP

負荷率と地中熱ヒートポンプ COP の関係をメーカー特性 (温水出口温度 50℃、熱源水出口温度 14℃条件) と合わせて、図-17 に示す。COP は 2017、2018 年度で同様の傾向を示しており、能力低下や劣化傾向は特に見られなかった。

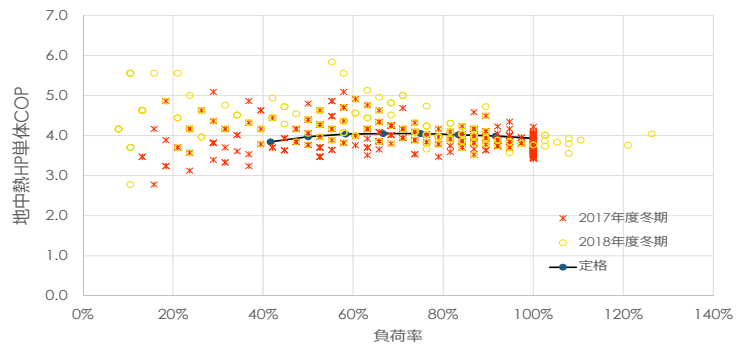


図-17 冬期の負荷率と熱源単体 COP

(3) 空気熱交換器の活用に関する試験結果

本建物の地中熱ヒートポンプシステムは空気熱交換器を有しており、同一圧縮機で空気熱交換器—地中熱交換器の切り替えが可能である。熱交換器故障時のバックアップを目的としたものであるが、地中温度回復のために使用できないか検討した。

図-18 に 2月6日~8日の熱源水熱量及びヒートポンプシステムの生成熱量の推移を示す。空気熱交換器運転に切り替えた 2月7日の 10時~19時には、熱源水熱量が 0 となり、意図通りの運転を確認できた。

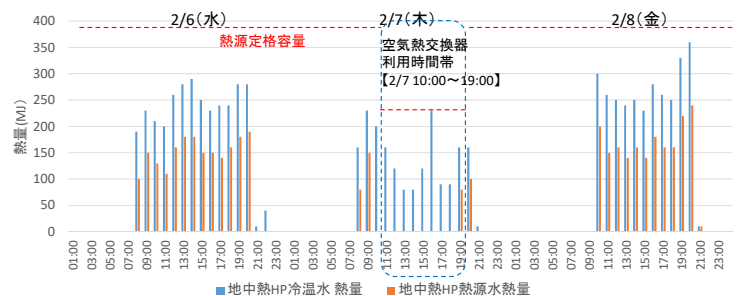


図-18 ヒートポンプシステム生成熱量及び熱源水熱量

図-19 に 3 日間の地中温度の推移を示す。空気熱交換器への切り替えを行なった 2月7日には、19時までに概ね 1℃、地中温度が上昇した。

地中温度を回復する目的で、空気熱交換器に切り替えを行うことの有効性が確認された。

熱源システム COP (生成熱量 / (熱源電力消費量 + 熱源水ポンプ電力消費量)) の評価結果を図-20 に示す。地中熱交換器を利用した 2 月 6 日、2 月 8 日の熱源システム COP はいずれも 3.3 だったのに対して、空気熱交換器へ切り替えを行った際の COP は 2.7 であった。冬期においては地中熱交換器を活用した方が効率の高い運転が期待できる。今後、夏期冷房運転における効果を実証したい。

3.4 年間エネルギー性能評価結果

エネルギーマネジメントの取り組みを通じて、2017 年度、2018 年度の 2 年にわたり各種運用改善を継続的に実施してきた。初年度 12 ヶ月の一次エネルギー消費量は 898MJ/m²・年と、基準値と比較して 50%以上の削減を達成した。2018 年度には、災害対応等で休日や残業時間帯の利用が多く見られたため、電灯コンセントの電力消費量が対前年度比で 12.9%増加した。熱源についても、冬期室内温度設定の緩和による暖房負荷の増加や、夏期の猛暑の影響で若干増加したが、一次エネルギー消費量は 954MJ/m²・年と、基準値と比較して 47.5%の削減実績を上げることができた。

4. おわりに

新宮市庁舎を設計するにあたり、市としての地球温暖化対策への取り組み姿勢に感銘を受けた。どうかそれに答え、二酸化炭素排出削減に寄与出来るかを考えた。幸い、地盤特性から再生可能エネルギーである地中熱システムが適していることが分かり、補助金取得を含め運用面での多大なご協力のもと、ZEB Oriented クラスの運用上での性能を発揮することが出来た。

エネルギーマネジメント活動では、市役所の担当者とエネマネ月報を通じた運転状態の双方向の共有により、様々な改善を実現した。今回の改善事例の多くは、専門技術者が常駐している事業所では当たり前の対策であるが、エネルギーの見える化を通じて建物担当者が納得しながら改善対策を自ら導入していくプロセスは、多くの専門技術者が不在の建物においてモデル事例となり得る。

今後も、エネルギーマネジメント活動を通じて、継続的に市庁舎の省エネルギー及び良好な環境実現に向けた活動を続けていく予定である。

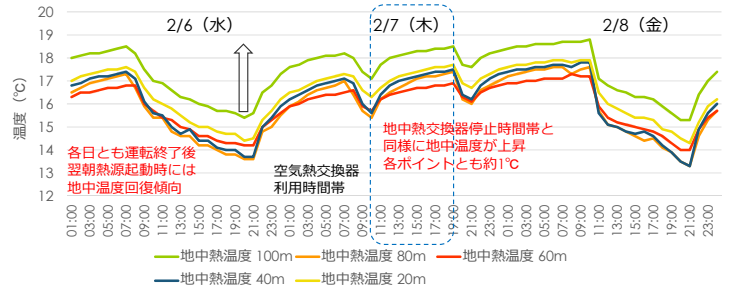


図-19 地中温度の推移 (2月6日～8日)

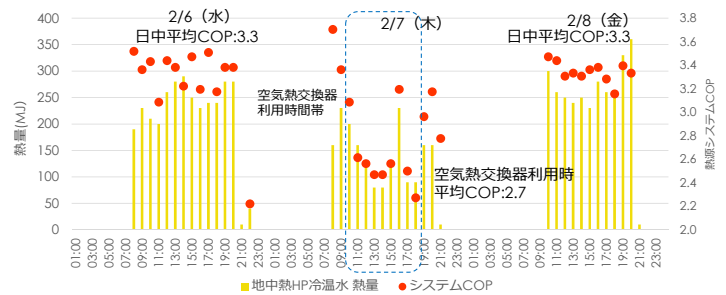


図-20 ヒートポンプシステム COP の推移 (2月6日～8日)

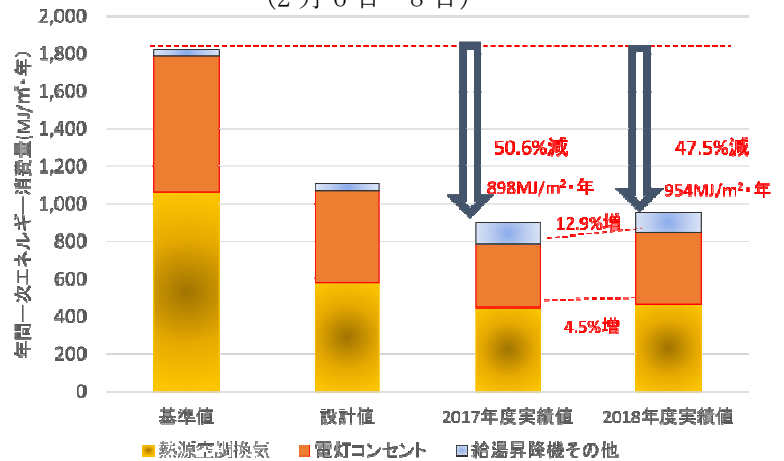


図-21 一次エネルギー消費量実績