

寒冷地における地下水熱ヒートポンプシステムを核とした ZEB に関する検討 (その2) 年間実績とシミュレーションによる最適運転方法の検討 Investigation of ZEB integrated with Ground Water Heat Pump System in cold region (Part2) Annual results and examination of optimal operation method by simulation

学生会員 ○福岡 拓真 (北海道大学) 正会員 長野 克則 (北海道大学)
 正会員 佐藤 英樹 (三建設備工業)

Takuma FUKUOKA*1 Katsunori NAGANO*1 Hideki SATO*2

*1 Hokkaido University *2 Sanken Setsubi Kogyo Co. Ltd.

Ground water heat pump system (GWHP) significantly reduce much energy consumption for heating. The purpose of this study is to verify and evaluate the energy performance about office building aiming for ZEB integrated with GWHP in cold region. First, the authors evaluated the annual energy consumption. After that a calculation model was built to seek for optimal control method for heating. Using this model, we compared with performance between continuous operation and intermittent operation.

はじめに

年間の一次エネルギー消費量が正味ゼロまたはマイナスの建築物であるゼロ・エネルギー・ビル (ZEB) を寒冷地で実現させるためには、高断熱化による負荷抑制や地中熱や太陽光などの再生可能エネルギーを利用したシステムが必要である。

そこで本研究では、寒冷地における 2018 年 11 月に竣工した地下水を熱源としたヒートポンプシステムを用いた事務所ビルを対象として、寒冷地における ZEB 建造物の可能性について検討を行う。既報¹⁾では冬季での室内環境とエネルギー消費量の評価を行い、冬季における運用方法の検討を行った。本報では年間実績とシミュレーションによる暖房の最適運用方法に関して検討を行った。

1. 年間の運転実績

1.1 エネルギー消費量評価

表-1 に 2018 年 12 月から 2019 年 11 月までの ZEB 評価に関わる空調・換気・照明・給湯・昇降機での月別電力消費量・年間電力消費量に加え太陽光発電システムの月別・年間の電力消費量を示す。さらに太陽光発電システムの月別の発電量についても示す。また図に年間の ZEB に関わる一次エネルギー消費量を比較したものを示す。年間の ZEB 関連での一次エネルギー消費量は 598 GJ であり、基準建物における基準エネルギー消費量よりも 69%低い値になったことが明らかとなった。太陽光発電も含めた一次エネルギー消費量では 74%低い値となり Nearly ZEB に近いことがわかった。

夏季は地下水を図-2 に示すプレート型熱交換器 1 を介して天井放射空調をおこなうため、空調のエネルギー消



図-1 建物外観

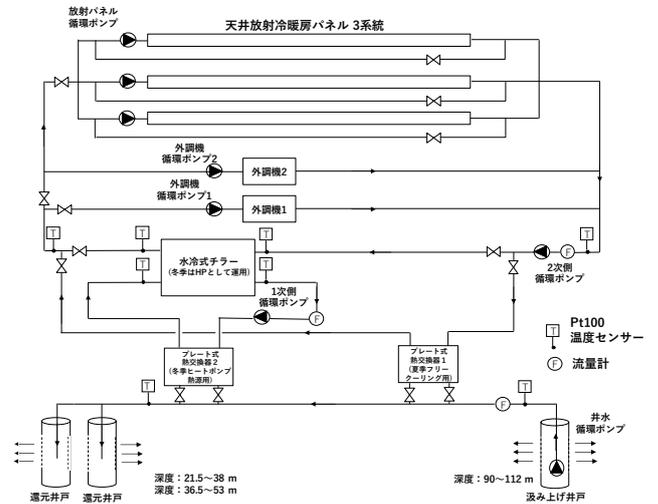


図-2 放射空調システム熱源系統図

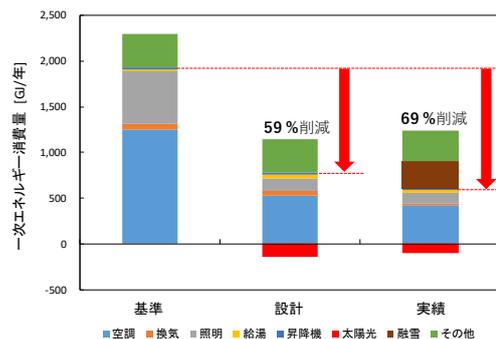


図-3 年間エネルギー消費量の比較

表-1 月別エネルギー消費量

年月	電力消費量 [kWh]										太陽光	① - 太陽光
	空調	換気	照明	給湯	昇降機	電力消費量小計①	その他 (融雪分)	電力消費量合計②				
2018年12月	6,420	50	1,057	245	79	7,851	11,855 8,732	36,288	775	7,076		
2019年1月	8,350	59	1,067	266	86	9,828	12,865 9,616	42,137	1,252	8,576		
2月	7,824	54	1,157	237	79	9,351	11,502 8,549	38,752	1,418	7,933		
3月	5,676	63	1,222	247	89	7,297	4,742 1,600	20,935	1,114	6,183		
4月	3,096	59	1,032	230	83	4,500	3,042	12,041	728	3,772		
5月	828	87	993	208	86	2,202	2,767	7,171	335	1,867		
6月	932	163	1,086	192	83	2,456	2,710	7,622	520	1,936		
7月	1,550	147	1,147	200	86	3,130	2,800	9,060	676	2,454		
8月	1,772	183	942	200	86	3,183	2,700	9,065	825	2,358		
9月	1,179	189	1,039	200	86	2,693	2,800	8,187	909	1,784		
10月	1,600	170	1,000	200	86	3,056	2,800	8,912	821	2,235		
11月	4,570	32	880	191	87	5,760	4,837 3,065	19,422	999	4,761		
年間[kWh]	43,796	1,255	12,623	2,616	1,016	61,306	65,420 31,562	219,594	10,372	50,934		
年間[GJ]	427	12	123	26	10	598	638 308	2,143	101	497		

費量削減に大きく貢献をしている。一方冬季は地下水をプレート型熱交換器 2 に介して、水冷式チラーを用いることで天井放射暖房を行う。冬季の空調部分でのエネルギー消費量は 35,936kWh と大きくこの部分でのさらなる削減が必要不可欠となる。²³⁾

南面の壁面に設置されている太陽光パネルでの発電量は 10,372 kWh であり、設計段階で想定した発電量の約 7 割程度であった。今後対象建物で Nearly ZEB や ZEB を目指す場合、太陽光による創エネ部分はあまり変化がないことが予想できるため、空調部分を中心により一層の省エネ化が必要である。

1.2 地下水熱ヒートポンプシステムの運転状況

地下水熱ヒートポンプの運転状況を確認するために電力消費量や2次側・1次側・井水の行き還り温度等はBEMSに記録されている1分値データを用いた。ただし、BEMSでは熱源系消費電力として水冷式チラーや各種循環ポンプの合算値が測定されていることやBEMSで蓄積されているいくつかのデータに不具合が生じている。このため2019年12月に高精度クランプを持つ電力計を設置し水冷式チラー単体・地下水循環ポンプ・1次側循環ポンプ電力の測定を行い、チラー単体のCOPとSCOPの算出を行った。図-4に2019年12月17日を代表日とした運用2年目の暖房運転状況を示す。暖房運転は7時～21時において、1時間のサーモオフで停止する部分を除いて13時間運転されていた。水冷式チラーの放熱量は約40kWであり、単体COPは約6.5、SCOPは約5.5であり高効率かつ適切に運転されていることが明らかとなった。また室温・湿度も快適域で維持されていることが示された。一方で運転開始直後の2次側流量の挙動や地下水循環流量の値が過少気味にBEMSデータに現れるという課題も生じた。これらの課題に関しては2次側循環ポンプ用インバータ制御のチェックを行う必要がある。

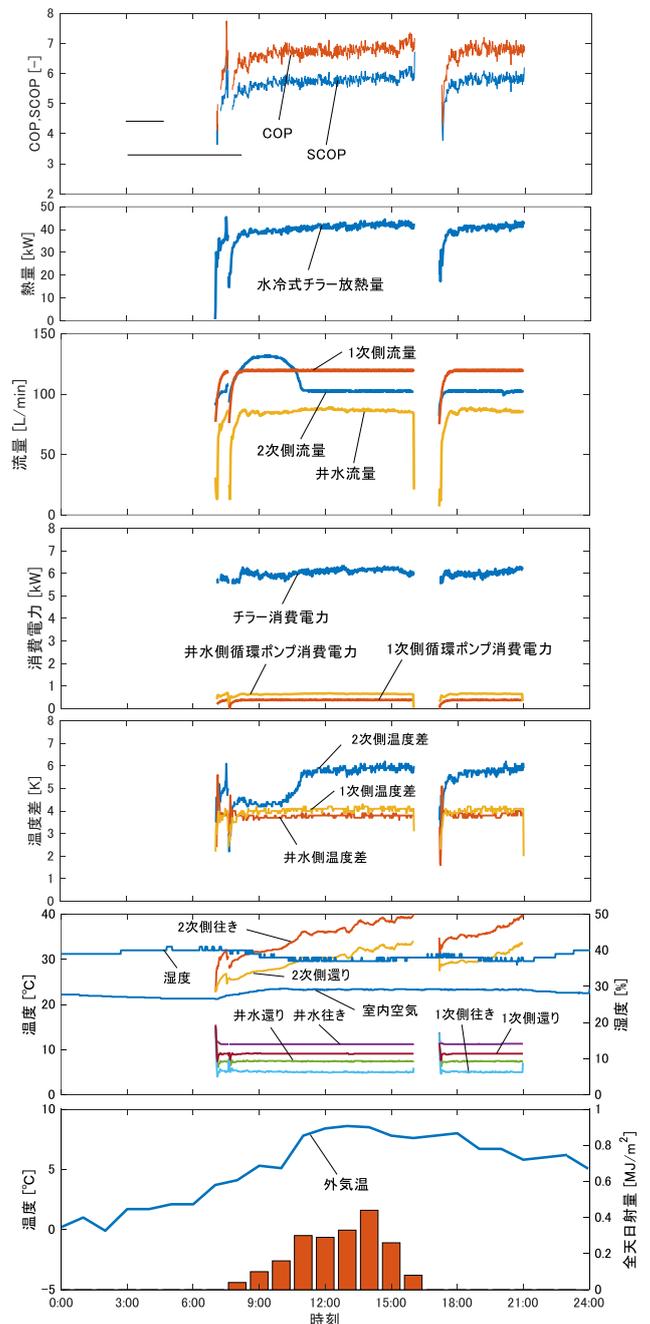


図-4 暖房代表日の運用状況 (2019年12月17日)

2. シミュレーションによる最適運転方法の検討

1章の年間実績でも記したが、対象建物において ZEB を目指すためには空調部分での電力消費量削減が不可欠であり、適切な運転方法の検討が必要である。そのため本研究室が開発した ZEB シミュレータをもとに、新しく天井放射空調を導入したモデルを作成し最適運転方法の検討を行った。⁴⁾

2.1 建物と暖房システムのモデル化

本報で検討するシステムの概要を図-5 に示す。システムは室内、熱源機（水冷式チラー）、室内放熱器（天井放射パネル）の3つのモデルで構成される。

室内モデルでは室温 T_{room} を、壁・床・天井・窓からの熱損失、換気負荷、日射熱取得、内部発熱の各熱負荷と室内放熱器からの放熱量を求め、式(1)の差分式で算出する。

$$c_p \rho_{air} V_{room} \left(\frac{dT_{room}}{dt} \right) = q_{wall} + q_{roof} + q_{floor} + q_{window} + q_{venti} + q_{sun} + q_{gen} + q_{roofradi} \quad (1)$$

熱源機モデルでは熱源機器の動作判定を行い、運転条件に合致する場合は、熱源機が稼働する。稼働時には熱源機の熱出力、消費電力や二次側行き温度などを計算する。

天井放射空調での供給熱量を求めるモデルには宇都宮大学の塩谷らが開発したモデルを使用して算出した。⁵⁾

2.2 計算概要

作成した制御システムを用いて、対象建物と同等な規模と断熱性能を有する建物を想定し、天井放射暖房の最適運用方法の検討を行った。計算期間は助走期間として2018年1月1日から10月31日までの計算を行った後の、2018年11月1日から3月31日までの5ヵ月を暖房運転の代表期間とした。計算を行った後、各ケースの室温やヒートポンプの放熱量などに関して比較を行った。また各ケースの運転状況を比較するために連続運転時に室温が22℃を大きく超え外気温が高い2019年3月9日を代表日として1日の運転結果を示した。

2.3 計算条件

比較ケース条件を表-2 に示す。また計算フローチャートを図-6 に示す。ON-OFF 制御は設定室温を $22^\circ\text{C} \pm 0.5^\circ\text{C}$ とし設定温度を超えるとときにヒートポンプを OFF とし、下回るときは ON となるように設定した。

対象建物は2階建てであり天井放射冷暖房を行っているのは2階のみであるが、今回の計算では対象建物と同様な断熱性能を持つ1室モデルのものを想定した。

水冷式チラーの成績係数 (COP) は対象建物に設置されている水冷式チラーの特性式ではなく、るすつポッケセンターにて使用されている S 社の出力 28 kW タイプ GSHP-3003URF のものを使用した。

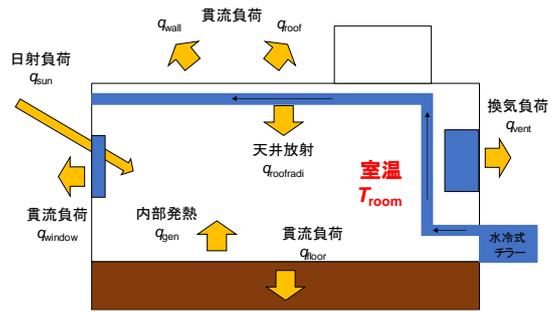


図-5 建物と暖房システムのモデル化

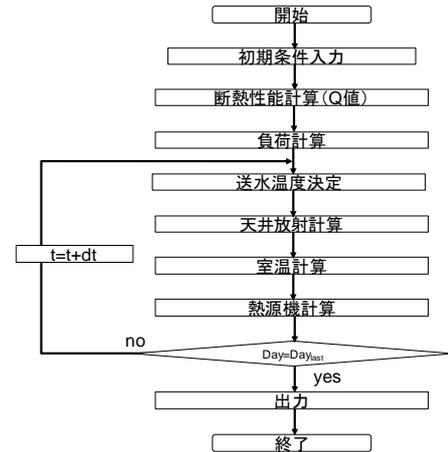


図-6 計算フロー

表-2 各ケースの設定条件

CASE	制御	送水温度	平均室温	最高室温	最低室温
1-1	制御なし (一定送水)	32℃	22.0℃	25.6℃	17.5℃
1-2	制御なし (一定送水)	34℃	23.7℃	27.0℃	19.8℃
1-3	ON-OFF 制御	34℃	22.0℃	23.0℃	19.7℃
1-4	ON-OFF 制御	36℃	22.4℃	23.0℃	21.0℃

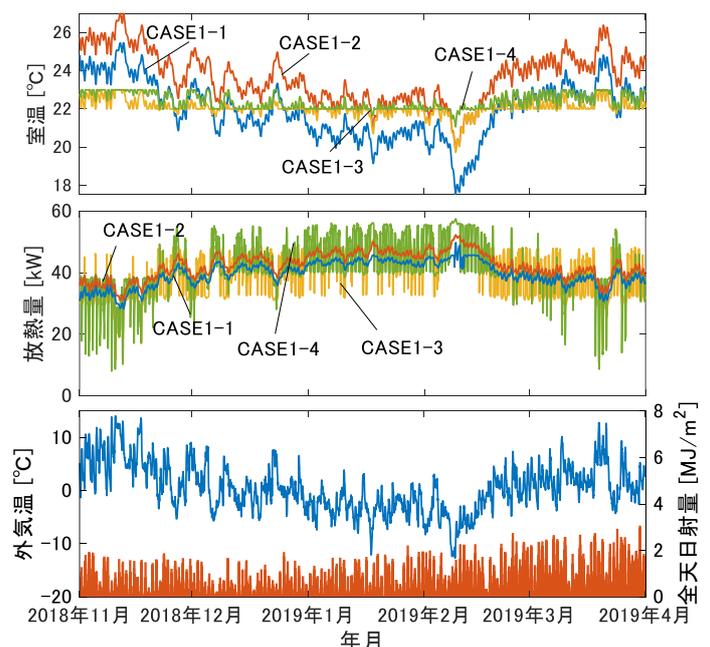


図-7 冬季(2019年1月1日~3月31日)の計算結果

表-3 各ケースの暖房性能比較

	CASE1-1	CASE1-2	CASE1-3	CASE1-4
放熱量 [kWh]	901	963	862	839
消費電力 [kWh]	209	232	200	194
COP	4.31	4.15	4.31	4.32
室温23°C以上の時間 [h]	884	2328	6	62
室温21.5°C以下の時間 [h]	1470	137	209	17

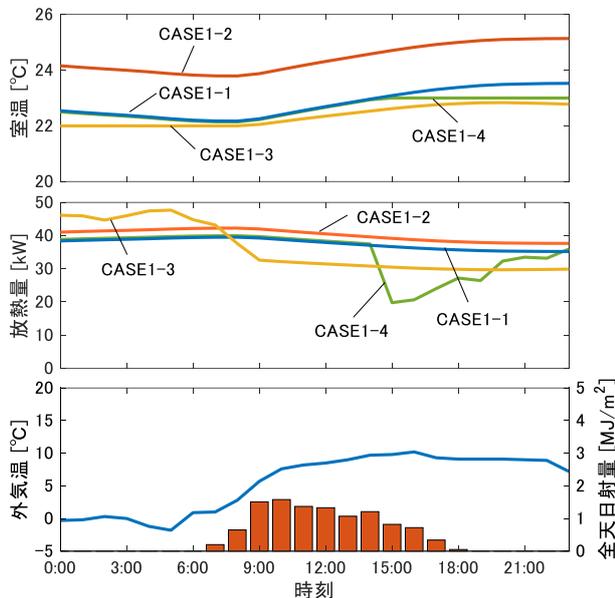


図-8 冬季代表日 (2019年3月9日) の計算結果

2.4 計算結果と考察

冬季の計算結果を図-7、冬季代表日の計算結果を図-8、各ケースの熱源機の比較を表-3に示す。

図-7から連続運転を行うCASE1-1、1-2ともに室温が設定温度の22°Cを超えて運転される日が多く存在した。特に外気温が高い3月で顕著であった。一方で外気温が低い2月ではCASE1-1では室温を適切に維持することが難しく、最低室温で17.5°Cまで下がってしまった。CASE1-2ではCASE1-1に比べ2月でも室温を設定室温に維持することができたが、外気温が-10°C近くになると室温を22°Cに維持することはできなかった。

ON-OFF制御運転のCASE1-3、1-4では室温を22°C±0.5°Cを維持する運転結果となった。ヒートポンプの放熱量が時間の経過とともにCASE1-3ではピーク時に約50kW、CASE1-4では約55kWとCASE1-1、1-2と比較して大きかった。

CASE1-3、1-4ともに11月や3月の外気温が高い時期にON-OFF制御ができていないために余分に暖房するのを防いでいる。また送水温度を36°Cとすることで対象建物の活動時間中に室温が22°C以下になることも防ぐことができた。また表-3からCASE1-3、1-4では室温が23°C以上の時間がCASE1-1、1-2と比べて大幅に減っていることが明らかになった。

今後の課題として今回の計算は最も簡単な制御方法で行っているため、季節ごとに送水温度を変化させる運転

方法や室温に応じて適切な送水温度を設定するといった運転方法で計算を行う必要がある。また計算モデルも建物を多室モデルにしたり、熱源機計算を実際に使用されている水冷式チラーの特性に変更したりすることで計算の精度を高める必要がある。

まとめ

- 1) 寒冷地における地下水熱ヒートポンプシステムを核としたZEBを目指す建物の年間実績の評価と暖房の最適運転方法に関して検討を行った。
- 2) 年間のZEBに関する一次エネルギー消費量は598GJであり基準段階から69%削減されていた。太陽光まで含めると74%の削減であった。
- 3) 2年目の冬季代表日での暖房の運転状況を確認した。ヒートポンプ単体のCOPは約6.5、SCOPは5.5であり高効率で運転されていることが明らかとなった。一方でBEMS上に2次側流量の挙動や地下水循環流量が過少に表示される課題も生じた。
- 4) 本研究室が開発したZEBシミュレータに天井放射空調計算を組み込みシミュレーションによる暖房運転方法の検討を行った。
- 5) 計算の結果、連続運転ではCASE1-1・1-2ともにピーク時以外で室温が22°Cを超える日数が多く存在したが、外気温が低い日では室温が22°Cを下回る日が発生した。また送水温度36°CによるON-OFF制御を行うCASE1-4で室温を22±0.5°Cで保てることが明らかとなった。

参考文献

- 1) 福岡拓真：寒冷地における地下水熱ヒートポンプを核としたZEBに関する検討(その1)、空気調和衛生工学会北海道支部学術講演会論文集,2019
- 2) 長野克則、阪田義隆、福岡拓真、佐藤英樹：積雪寒冷地に建つ地下水熱ヒートポンプシステムを核としたZEBの評価 三建設備工業(株)技術報告 2020
- 3) 三建設備工業(株)：EU 三建技報,pp.10-17,No58 2019
- 4) 井島拓也：寒冷地における地中熱を核としたZEBのあり方と遺伝的アルゴリズムを用いた暖房システムの最適運用計画に関する研究、空気調和衛生工学会北海道支部学術講演会論文集,2016
- 5) 塩谷正樹：スリットを有する天井放射パネルユニットの熱性能に関する研究、日本建築学会論文集,No683/Vol.78, pp31~37 (2013)

記号

$c_{p,air}$: 空気の比熱[J/(kg·K)]、 ρ_{air} : 空気の密度[kg/m³]

T_{room} : 室温[°C]、 q_{wall} : 壁面貫流負荷[kW]、 q_{roof} : 天井面貫流負荷[kW]、 q_{floor} : 床面貫流負荷[kW]、 q_{window} : 窓面貫流負荷[kW]、 q_{venti} : 換気負荷[kW]、 q_{sun} : 日射負荷、 q_{gen} : 内部発熱 [kW]、 $q_{roofradi}$: 天井放射熱供給量[kW]