

## 自前の再生可能エネルギー熱を活用する ZEB シミュレーターの開発

北海道大学 ○長野 克則 1\*  
北海道大学 叶 敏之 2\*\*  
北海道大学 三浦 広成 3\*\*\*

ZEB 放射冷暖房 躯体蓄熱  
外断熱 室内温熱環境 建物シミュレーション

### 研究の目的

本研究の目的は再生可能エネルギー熱の一つである地中熱ヒートポンプシステム(GSHP)による蓄熱型放射冷暖房最適運用プログラムの開発とその効果の検証、およびパラメーター解析による運用方法と断熱水準の検討である。

### 研究の内容

#### 1. ZEB ready 庁舎建物のエネルギー消費構造

対象建物は北海道古平町に建つ図書館、集会所などの要素を兼ね備えた複合庁舎建物である。地上3階建てで建築面積は1320 m<sup>2</sup>、延床面積は3880 m<sup>2</sup>である。図1に外観写真を、図2に各階平面図を示す。



図1 対象建物の外観 (古平町役場 HP から)

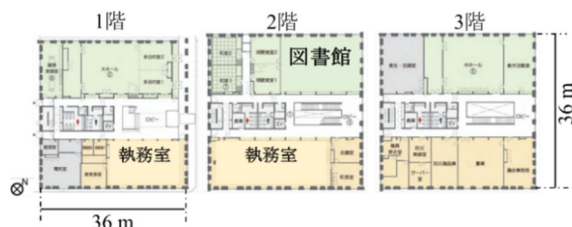


図2 各階平面図 (古平町役場から提供)

本建物は2019年2月にZEB Readyを取得した。導入した主な環境配慮技術は以下である。

- 1) 断熱：高断熱外断熱工法 (外壁の熱貫流率は0.242 W/(m<sup>2</sup>·K))、2) 暖冷房：地中熱ヒートポンプシステム (定格暖房能力10 kW×8台) による執務室は躯体蓄熱型天井・床・壁放射冷暖房 (深度75mのポアホール型地中熱交換器×36本)、3) 換気：アースチューブ (直径800φ×延長50 m×2系統) とクールピットによる導入空気予冷・予熱+熱交換器付き外調機、中間期は自然換気、4) 照明：タスクアンビエント照明、ハイサイドライトによる自然光導入、5) 創エネ：2,3階の南東・南西窓にガラ

スー一体型 PV モジュール 12.4 kW (開口率 50%) を採用

図4に2022年5月~2023年4月までの月別単位面積当たりの一次消費エネルギー量、表1に年間一次消費エネルギー量を示す。基準値に対する実績の一次エネルギーは太陽光発電量も加味すれば1380 GJであり、削減率は78%となった。主にGSHPなどによる空調・換気エネルギー消費量の削減によりnearly ZEBとなっている。

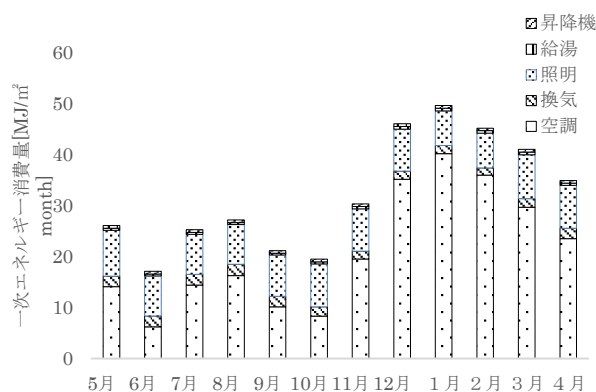


図3 月別単位面積当たり一次消費エネルギー量<sup>1)</sup>

表1 年間一次消費エネルギー量 [GJ]<sup>1)</sup>

対象項目	基準値	実績値	実績値削減率[%]
空調	4238.4	985.5	77
換気	641.5	87.2	86
照明	1291.4	377.1	71
給湯	166.2	20.6	88
昇降機	48.0	24.3	49
効率化設備(太陽光)		▲114.6	
合計	6385.6	1380.1	78

#### 2. 蓄熱型放射冷暖房最適運用計算プログラムの開発

2階執務室の蓄熱型放射冷暖房最適運用のために図4に示す熱回路網(RC)モデルによるGray Box Modelを開発した。本Modelにおける各パラメーター、R(熱抵抗)とC(熱容量)の値は実測の室温を忠実に再現できるTRNSYSモデルの計算結果を利用して信頼領域アルゴリズムによる最小二乗近似により定めた。

次に、Gray Box Modelを用いて蓄熱型放射冷暖房の送水温度を変化させて式(1)に示す目的関数Jが最小となる暖房期間の最適運転パターンを求める。右辺第1項目は設定

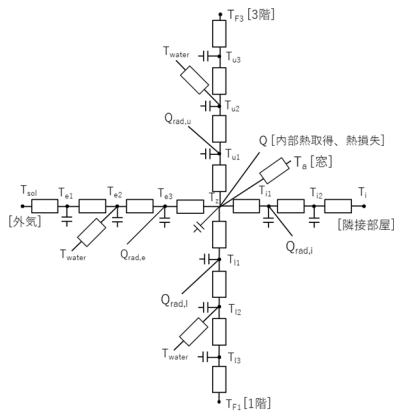


図4 熱回路網(RC)モデルによる Gray Box Model

室温  $T_{set}$  からのずれ (すなわち室内温熱環境を表す)、第 2 項目は地中熱ヒートポンプシステムの消費電力  $E_{GSHP}$  である。ここで、 $m, n$  は単位の異なる 2 変数をスケールリングするための係数である。今回は便宜上、 $m=6, n=1$  を用いた。

$$J = m(T_z - T_{set})^2 + nE_{GSHP} \quad (1)$$

まず、ケーススタディとして設定室温となる様に送水温度を変化させて 24 時間連続的の運転する場合 (連続運転) と 06:00~20:00 の 1 日 12 時間、 $40^{\circ}\text{C}$  一定で送水する場合 (間欠運転) を 2 ケースを計算した。図 4 は代表日として 1 月 21 日~23 日の 3 日間の室温と送水温度の変化を、表 2 に GSHP 消費電力量と電力料金の計算結果を示す。ただし、電力料金は時間別電力価格 (昼:  $35.60$  円/kWh、夜:  $29.68$  円/kWh) を用いた。上段から連続運転時の送水温度は  $27\sim 35^{\circ}\text{C}$  であることがわかる。下段から室温変動は連続運転の場合夜昼  $23^{\circ}\text{C}$  台で変動しているのに対し、間欠運転では昼間に室温のオーバーシュートが見られた。表 2 をみると連続運転の電力量は間欠運転の場合とほぼ同じであるが電力料金は小さい。実績値に対しては最適化により電力量、電力料金は約 15% 削減が見込める結果となった。

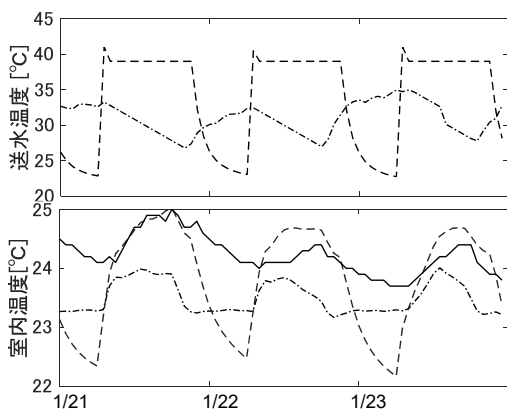


図5 代表日 1 月 21~23 日の送水温度と室温変動

表 2 GSHP 消費電力量と電力料金の比較

実測・計算 ケース	GSHP 消費電力量 [GJ] (kWh)	電力料金 [円]
実測値	9.56 (2660)	86,279
連続運転	8.11 (2250)	72,925
間欠運転	8.15 (2260)	75,929

次に断熱材と窓ガラスの熱性能を代えた場合の初期コストと 60 年間の空調コストを合算したライフサイクルコスト (LCC) を計算した。図 6 の縦軸は 60 年間の LCC、横軸は外壁の断熱材厚さ、パラメーターは窓の熱貫流率  $U_w$  値である。これより、断熱材厚さは  $150$  mm、窓の  $U_w$  値は  $1.6\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  以下が良いことがわかる。

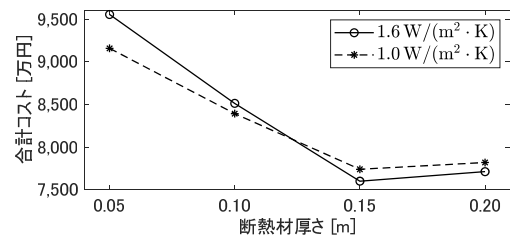


図6 60年間のライフサイクルコスト (LCC)

### 研究の成果、新発見

北海道古平町役場庁舎を対象に BEMS データによる ZEB 評価を行った。主に GSHP などによる空調・換気エネルギー消費量の削減により nearly ZEB で運用されていたことを明らかにした。次に熱回路網(RC)モデルによる Gray Box Model を用いた放射冷暖房最適運用計算プログラムを開発した。その結果、連続運転の室温安定性、また実績値に対して約 15% の GSHP 消費電力の削減が見込める結果が示された。今回の計算条件における 60 年間の LCC は断熱材厚さが設計・施工時と同等な  $150$  mm、窓の熱貫流率が  $1.6\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  以下が良いことが示された。

### 今後の予定

まずは、最適化運用に関して気象予測、熱負荷予測を逐次自動更新できるものとする。一方、複数の再エネ熱源と再エネ電力供給を有し、自前の再エネ発電電力を最大限利用して運用時の  $\text{CO}_2$  排出量を最小化するのクラウド型最適アルゴリズム搭載 BEMS の開発、およびこれを導入した場合の効果について検討を行う予定である。

### 謝辞

古平町役場殿、大成建設(株) 熊谷智夫氏、山本進氏には実測、および BEMS データ取得などで多大なる協力をいただいた。ここに深々なる謝意を表します。

1) 村上正吾, 山本進, 梶山隆史, 大木泰祐, 長野克則: 寒冷地における地中熱利用躯体放射冷暖房の効果検証に関する研究 第 2 報 運用段階でのエネルギー収支実績, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集 (2023.8.25)

1\* 大学院工学研究院環境工学部門・教授  
2\*\* 大学院工学院空間性能システム専攻・博士課程 3 年  
3\*\*\* 同 修士課程 2 年

1\* 北海道大学  
2\*\* 同  
3\*\*\* 同