

## タイ・バンコクにおける地中熱ヒートポンプ導入のエネルギー・環境評価

Energy and Environmental Evaluation of Introduction of Geothermal Heat Pump  
in Bangkok, Thailand○島田佑太郎\*<sup>1)</sup>、栗島英明<sup>1)</sup>

Yutaro Shimada, Hideaki Kurishima

1) 芝浦工業大学

\* ab13040@shibaura-it.ac.jp

## 1. 研究背景

タイなどの熱帯地域では冷房負荷が大きく、空調システムの改善が CO<sub>2</sub> 排出量削減につながる。

地中熱ヒートポンプ(GSHP)システムは、日本やヨーロッパなどの中緯度・高緯度地域では、従来の空調システムに比べて小さい温度差の環境で働くため、消費電力量が少ないという長所がある。

一方、熱帯地域では地下温度が高いため、一般的に GSHP システムには不適とされてきたが、バンコクなどでは、地下水流れの影響により地下温度が外気温度よりも低いことが明らかとなった<sup>1)</sup>。また、タイでの実証実験では、従来の空調システムよりも電力消費量が削減された<sup>2)</sup>。

しかし、熱帯地域での GSHP システムの有効性を論じるためには、さらなる検証が必要である。

## 2. 研究目的

本研究では、タイ・バンコクの商業施設への GSHP システムの導入を想定し、その有効性を評価する。評価では、LC-CO<sub>2</sub>、LC-NO<sub>x</sub>、LC-SO<sub>2</sub> とエクセルギー効率から、現状との比較、考察を行う。

## 3. 研究方法

## 3.1. 対象施設の空調負荷シミュレーション

対象施設の建物モデルを作成し、建築物総合エネルギーシミュレーションソフトウェア BEST<sup>3)</sup>を用いて、1 時間ごとの空調負荷を算出した。Fig.1 に延床面積 3,200m<sup>2</sup> の建物モデルの空調負荷の年間推移を示した。タイ・バンコクでは、1 年を通して冷房運転するため、空調負荷の値が負となっている。

同様に、延床面積 1,600m<sup>2</sup>~20,000m<sup>2</sup> の建物モデルについても空調負荷を算出した。

## 3.2. 使用段階におけるエネルギー消費

使用段階のエネルギー消費量を把握するため、GSHP 性能予測プログラムである Ground Club<sup>4)</sup>に対象施設の空調負荷と GSHP システムの諸元を入力し、年間電力消費量を算出した。また、比較対象は空気熱源ヒートポンプ(ASHP)とし、Ground Club によって年間電力消費量を算出した。Table.1 に空調システムの諸元

を示した。

算出された年間空調負荷と電力消費量の関係について、熱交換器長さごとに分析を行った結果が、Fig.2 である。空調負荷に対して熱交換器熱容量が不足する場合には、熱源水温度が外気温度より高くなり、GSHP システムの効率が低下する結果となった(SI.1 参照)。

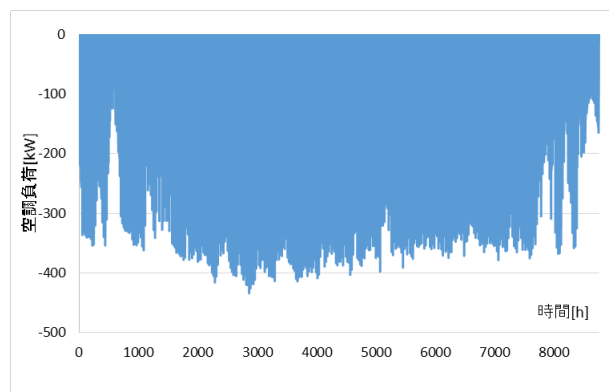


Fig.1 Annual air-conditioning load

Table.1 Specification of air-conditioning system

| 種類           | GSHPシステム                | ASHPシステム |
|--------------|-------------------------|----------|
| 空調システム       | セントラル型ヒートポンプチラー         |          |
| 定格冷却COP      | 4.5                     | 2.4      |
| 地中熱交換井種類     | クローズドループ方式<br>ダブルUチューブ型 | —        |
| 地中熱交換井長さ[m]  | 5,000~20,000            | —        |
| 土壌熱伝導率[W/mK] | 1.6                     | —        |

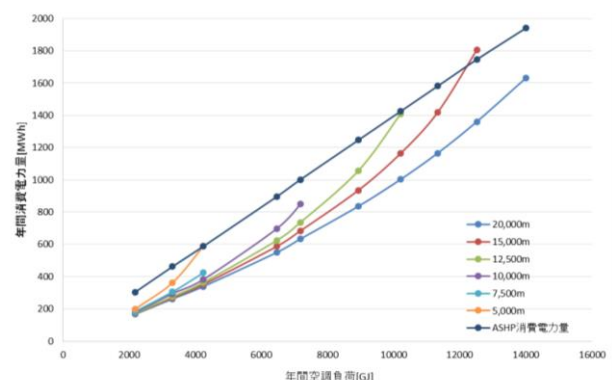


Fig.2 The relation between air-conditioning load and electricity consumption load

## 3.3. 対象施設のエネルギー評価

平野ら(2013)<sup>5)</sup>のモデルに倣い、室内への供給熱量から化石燃料まで遡るようにエクセルギー量を 1 時間ごとに計算し、エクセルギー効率を算出した(SI.2 参照)。

### 3.4. 対象施設的环境評価

システム境界は、原料調達段階から処分段階までのライフサイクル全体とした。評価項目は、LC-CO<sub>2</sub>、LC-NO<sub>x</sub>、LC-SO<sub>2</sub>である。

システムのライフタイムは、地中熱交換器を50年と設定し、それ以外の設備は20年と設定し、各段階の環境負荷排出量を1年間に割り戻した。

プロセスデータは、環境省(2012)<sup>6)</sup>を参考にし、必要に応じてタイ実証実験チーム<sup>2)</sup>、空調設備メーカーなどにヒアリング調査を行った。年間電力消費量と収集したプロセスデータにIDEA v.2<sup>7)</sup>をタイの電源構成に入れ替えたインベントリデータに乗り、積算することで年間LC-CO<sub>2</sub>、LC-NO<sub>x</sub>、LC-SO<sub>2</sub>排出量を算出した。

## 4. 研究結果

### 4.1. エクセルギー効率

Table.2 に延床面積 3,200m<sup>2</sup>、熱交換器長さ 15,000m の場合のエクセルギー効率算出結果を示した。

Table.2 The result of exergy efficiency

| エクセルギー効率 | 1月1日の積算値 | 1年間の積算値 |
|----------|----------|---------|
| GSHP     | 2.74%    | 3.97%   |
| ASHP     | 0.55%    | 0.78%   |

タイにおけるGSHPでは、熱源水温度が外気温度よりも高くなることが多く、ASHPより必要となるエクセルギー量が多いことが分かった。しかし、HP自体の効率がASHPより高いため、見かけ上でエクセルギー効率が高くなる結果となった。HP自体の性能が等しい場合、エクセルギー効率はGSHPの熱交換器熱容量に影響されると考えられる。

### 4.2. 環境評価

延床面積 3,200m<sup>2</sup>、熱交換器長さ 15,000m の場合の年間LC-CO<sub>2</sub>排出量をFig.3に示した。LC-NO<sub>x</sub>、LC-SO<sub>2</sub>排出量についてはFig.SI4、Fig.SI5に算出結果を示した。

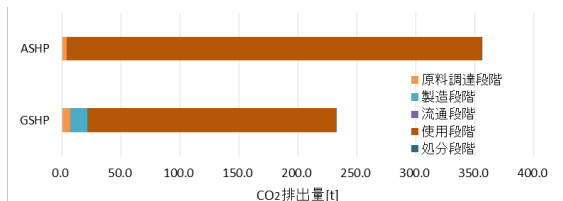


Fig.3 The result of LC-CO<sub>2</sub>

GSHPは地中熱交換器を設置するため、原料調達段階、製造段階での環境負荷がASHPに比べて大きい。しかし、ライフサイクル全体で見ると、本研究で対象としている商業施設は、使用段階での環境負荷が85~90%と大部分を占めるため、GSHPの環境負荷はASHPの環境負荷よりも小さくなった。

また、本研究のモデルでは対象施設の空調負荷が大きく、地中熱交換器設置により生じる環境負荷が相対的に小さくなった。空調負荷の小さい小規模な施設の場合、地中熱交換器設置により生じる環境負荷が相対

的に大きくなる可能性がある。

そこで、本研究では延床面積を1,600~5,000m<sup>2</sup>に変化させた場合、熱交換器長さを7,500~20,000mに変化させた場合について分析を行った。分析結果の一部をFig.4、Fig.5に示した(SI.3参照)。

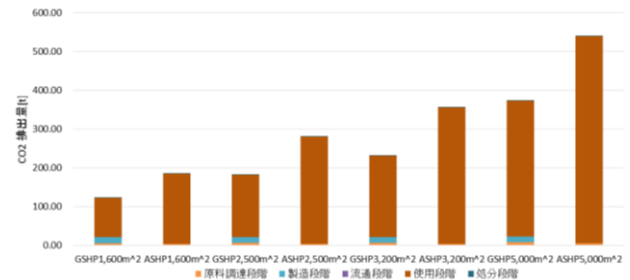


Fig.4 The sensitivity analysis about the scale of building

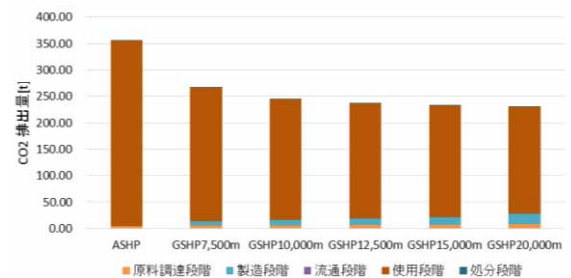


Fig.5 The sensitivity analysis about the length of well

## 5. 結論と今後の展望

GSHPシステムは環境負荷、エクセルギー効率の面で、ASHPシステムよりも良好な結果が得られた。したがって、タイ・バンコクにおいてもGSHPシステム導入による環境負荷低減に効果があると考えられる。一方、本研究のモデルでは地下水流動の影響を考慮していないため、熱源水温度が高温になった。

今後は、地下水流動の影響を踏まえた更に正確なモデルの作成や、熱源水のカスケード利用モデルの作成により高温になる熱源水温度への対策が必要である。

## 6. 引用文献

- 1) 安川ほか, Bulletin of the Geological Survey of Japan, vol.60(9/10),(2009), pp459-467.
- 2) Chokchai et al., Thematic Session “Geoscience for the Society”, 52<sup>nd</sup> CCOP Annual Session, Bangkok, Thailand, (2016)
- 3) 一般財団法人 建築環境・省エネルギー機構
- 4) ゼネラルヒートポンプ工業株式会社
- 5) 平野ほか, 環境科学会誌, 26-4, (2013), pp388-396
- 6) 環境省, “地中熱利用システムの温室効果ガス排出削減効果に関するLCAガイドライン ver1.0”, (2012)
- 7) 産業技術総合研究所安全科学研究部門, インベントリデータベース (IDEA v2), <https://www.aist-riss.jp/software/40166/>, (2015), (参照 2018-1-3)

## Supporting Information(SI)

### SI.1 熱源水温度と HP システムの効率の関係

Fig.SI1 に延床面積 3,200m<sup>2</sup>、熱交換器長さ 15,000m の場合の外気温度と熱源水温度の年間推移を示した。この図から分かるように、熱源水温度は 1 年を通して 35~40℃となり外気温度よりも高くなった。

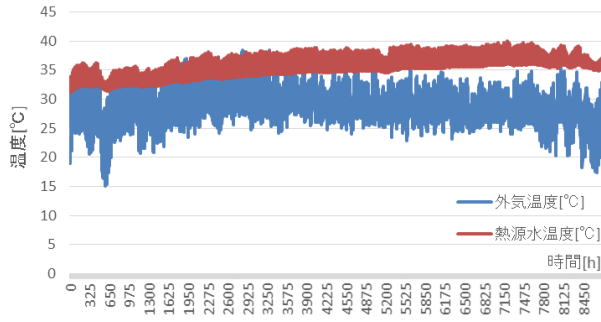


Fig.SI1 yearly transition of brine temperature and atmospheric temperature

Fig.SI2 に空調負荷(延床面積)を変化させた場合の熱源水最高温度と GSHP システムの COP の関係を示した。この図から分かるように、空調負荷が大きくなり熱源水最高温度が高くなると、GSHP システムの平均 COP は低下した。これは、空調負荷に対して熱交換器熱容量が不足し、熱源水温度が上昇したことを表している。

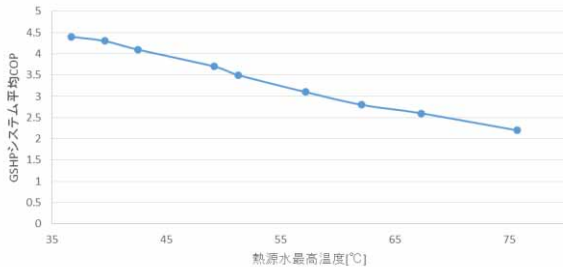


Fig.SI2 The relation between GSHP system's COP and maximum heat brine temperature

ASHP システムが外気温度と室内環境の間で働くことを考えると、GSHP システムにおいては、熱源水温度が外気温度より低くなることが望ましい。

### SI.2 エクセルギー量とエネルギー量の推移

Fig.SI3 に 1 月 1 日のエクセルギー量とエネルギー量の推移を示した。

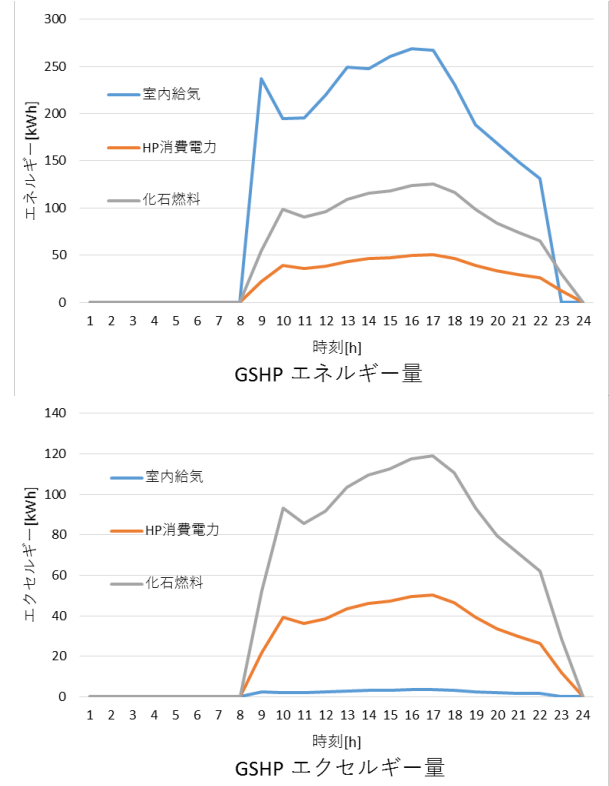


Fig.SI3 Transition of exergy and energy consumption

室内への供給熱量から化石燃料まで遡るようにエクセルギー量、エネルギー量を 1 時間ごとに計算し、エクセルギー効率を算出した。

空調システムは COP が 1 を超える場合、見かけ上エネルギー効率が 100%を超えてしまう。したがって、エネルギー保存則に反してエネルギー量が増加したように見えてしまった。

しかし、エクセルギー量で評価した場合、化石燃料から室内に供給される段階まで、順を追ってエネルギーが消費されて減少していることが分かる。また、エクセルギー量の減少を評価することにより、どの段階でどれほどのエネルギーが消費されているのか把握が容易になる。

### SI.3 年間 LC-CO<sub>2</sub>, LC-NO<sub>x</sub>, LC-SO<sub>2</sub> 排出量の感度分析

延床面積 3,200m<sup>2</sup>、熱交換器長さ 15,000m の場合の年間 LC-NO<sub>x</sub>, LC-SO<sub>2</sub> 排出量を Fig.SI4, Fig.SI5 に示した。

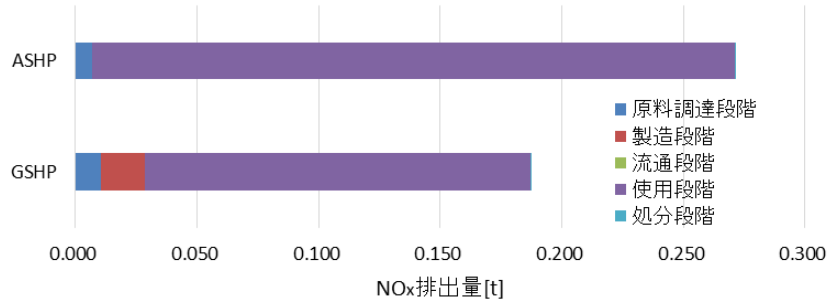


Fig.SI4 The result of LC-NO<sub>x</sub>

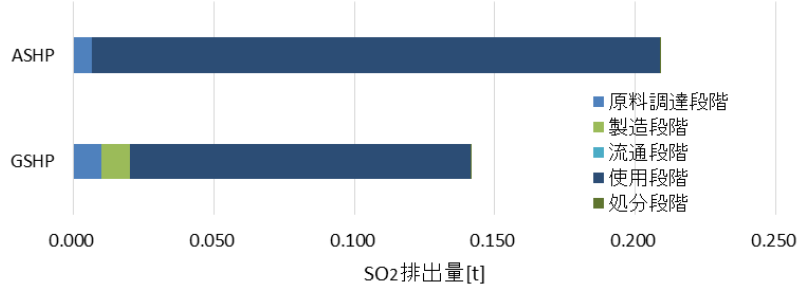


Fig.SI5 The result of LC-SO<sub>2</sub>

年間 LC-NO<sub>x</sub>, LC-SO<sub>2</sub> 排出量についても、GSHP は原料調達段階、製造段階での環境負荷が ASHP に比べて大きいですが、使用段階の環境負荷が大部分を占めるため、GSHP の環境負荷は ASHP の環境負荷よりも小さくなった。

延床面積を 1,600~5,000m<sup>2</sup> に変化させた場合、熱交換器長さを 7,500~20,000m に変化させた場合の年間 LC-NO<sub>x</sub>, LC-SO<sub>2</sub> 排出量分析結果を Fig.SI6、Fig.SI7 に示した。

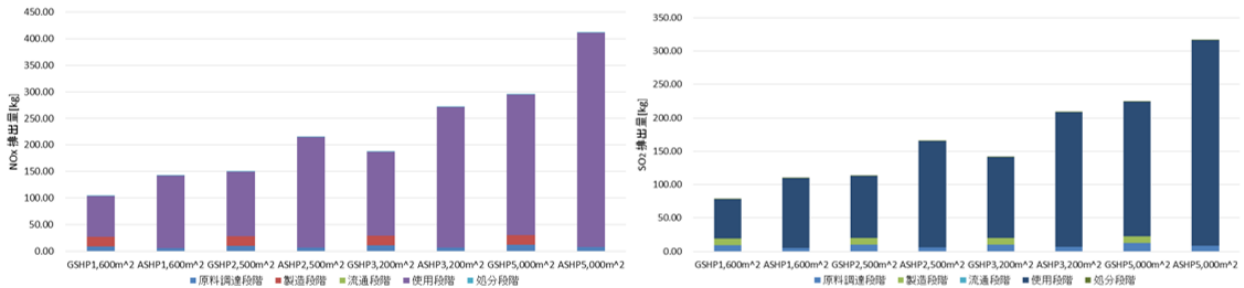


Fig.SI6 The sensitivity analysis about the scale of building

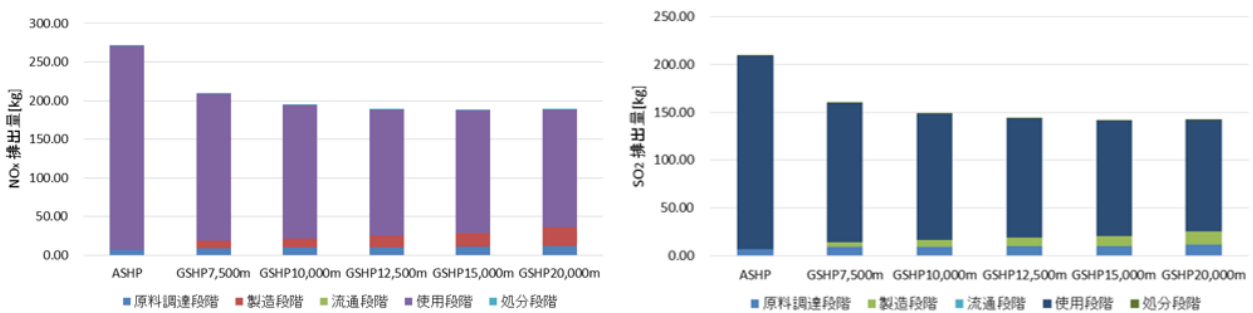


Fig.SI7 The sensitivity analysis about the length of heat exchange well

その結果、GSHP システムの環境負荷は、空調負荷が 1,600~5,000m<sup>2</sup> のいずれの場合も ASHP システムの環境負荷を下回った。また、熱交換器長さを 7,500~20,000m に変化させた場合も同様であった。

したがって、GSHP システムは、使用段階の環境負荷に比べて熱交換器設置の環境負荷が小さいこと、ASHP システムに比べてライフサイクル環境負荷が小さいことが、感度分析によって分かった。しかし、使用段階の環境負荷が小さく、効率が低い ASHP システムの場合には、ライフサイクル環境負荷が GSHP を上回ると予想される。