

# 地中熱利用ヒートポンプシステムの普及戦略とその展望 —千代田区へ、もうひとつの CO<sub>2</sub>削減策の提案—

河井政人、蜂谷憲、松菌崇、横田海斗  
(大森正之 環境経済学ゼミナール3年)

## 【目次】

### はじめに

#### 第1章 地中熱利用ヒートポンプシステムの現状

- 1-1 地中熱利用ヒートポンプシステムの概要
- 1-2 地中熱利用ヒートポンプシステムの特徴と普及課題
- 1-3 千代田区の地球温暖化対策と地中熱利用ヒートポンプシステム

#### 第2章 地中熱利用ヒートポンプシステム導入の現状と千代田区における可能性

- 2-1 教育施設への導入の現状と千代田区への導入可能性
  - 2-1-1 小・中学校の温水プール・体育館
  - 2-1-2 幼稚園・保育園
- 2-2 未利用熱エネルギー活用の現状と可能性
  - 2-2-1 災害対策井戸
  - 2-2-2 地下鉄湧出水
- 2-3 中小ビルへの導入の現状と可能性

#### 第3章 地中熱利用ヒートポンプシステム導入の経済性と環境性

- 3-1 経済性・環境性の評価方法
- 3-2 教育施設に導入した場合
  - 3-2-1 小・中学校
  - 3-2-2 幼稚園・保育園
- 3-3 未利用熱エネルギーを活用した場合
  - 3-3-1 災害対策井戸
  - 3-3-2 地下鉄湧出水
- 3-4 中小ビルに導入した場合

#### 第4章 千代田区での地中熱利用ヒートポンプシステム導入促進案

- 4-1 区内の教育施設への積極的導入
- 4-2 未利用熱エネルギーの活用
  - 4-2-1 災害対策井戸の利用推進

4-2-2 地下鉄湧出水を活用した駅構内冷暖房の利用推進

4-3 中小ビルへの導入の提案

### おわりに

#### 【注釈】

#### 【参考文献・資料】

#### 【参考 URL】

#### 【調査協力企業・団体】

### はじめに

現在、地球温暖化が進んでいる。2011年3月に起きた東日本大震災以降、日本の原子力発電所が停止したことを受け、火力発電所の発電量が増加し CO<sub>2</sub>排出量も増加した。

日本の都市部においては、建物の屋上と壁面の緑化や太陽光発電の導入が進められるなどの施策が行われている。しかし、建物の電気使用量のなかでも大きな割合を占める<sup>1</sup>空調機器への対策は進んでいないのが現状である。都市部では今後もビルや学校などの増改築に伴う空調面積の増加が予想され、空調機器への施策を考えていく必要がある。

こうした中で CO<sub>2</sub>排出量削減の施策として、再生可能エネルギーである地中熱が注目され始めている。地中熱を利用した空調は従来の空調に比べ電気使用量と CO<sub>2</sub>排出量を削減できる。現在、建物のエネルギー消費で大きな割合を占めている空調利用の問題を解決するため、地中熱利用ヒートポンプシステム(以下「GSHP」「Ground Source Heat Pump」と表記)に私たちは着目した。本稿ではオフィスの増改築が盛んに行われ空調面積が増加している千代田区を例にとり、GSHPの普及策を提案する。

まず第1章ではGSHPの概要、千代田区の地球温暖化対策とGSHPとの関係について説明する。第2章では、文献調査とヒアリング調査をふまえて、現在のGSHP導入状況とそこから考えられる千代田区における導入の可能性について述べる。第3章では第2章で述べた導入可能性について、具体的な導入モデルを示し、GSHPの経済性と環境性について検討する。第4章では第3章で述べたモデルを前提に、千代田区におけるGSHPの導入促進策を提案する。

## 第1章 地中熱利用ヒートポンプシステムの現状

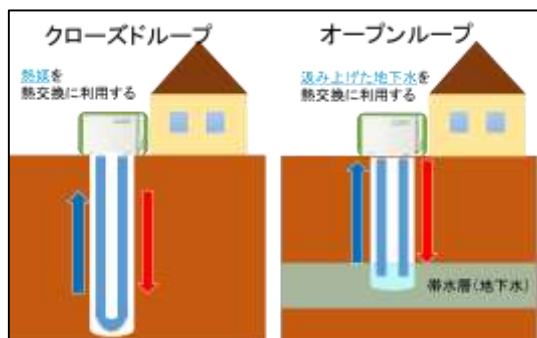
### 1-1 地中熱利用ヒートポンプシステムの概要

地中熱とは、地下約10～150mの比較的浅い地盤に存在する低温の再生可能エネルギーである。年間を通じてその土地の平均気温とほぼ同じであるため、外気に比べ夏は冷たく、冬は暖かい。

この地中熱を利用した空調・給湯システムがGSHPである。地中熱を利用したシステムにはヒートポンプを用いない方法(空気循環やヒートパイプなど)もあるが、ヒートポンプを用いる方法の方が温度の調節が容易なため、最も空調に適している。また、技術的にも他の方法に比べて確立されていることから、ヒートポンプを用いたシステムのみを本稿の対象とした。

GSHPには2つの採熱方法が存在する。図1を参照してほしい。1つは、水や不凍液といった熱媒を地中に循環させて、地盤と熱を交換するクローズドループ方式である。地中熱交換器を埋設する掘削スペースが確保できるならば、どこでも利用可能になる。もう1つは、帯水層から地下水を汲み上げ、その水を熱媒とすることで熱交換し、地下水を地中に戻す、もしくは地上に放流するオープンループ方式である。しかし、ビル用水法と環境確保条例<sup>2</sup>により、東京都では地下水汲み上げの規制が課されているため、使用に制限がかかる場合がある。またクローズドループ方式に比べ熱効率は良いが、定期的なメンテナンスが必要となる。

図1 地中熱利用ヒートポンプシステムの方式



※地中熱利用促進協会HPをもとに作成

GSHPは欧米を中心に普及している一方で、日本では普及が遅れている。その原因として、以下の3点が挙げられる。

- ①地中熱交換器の設置にかかるコストが高いこと
- ②地中熱に対する認知が広まっていないこと
- ③行政が地中熱に対し再生可能エネルギーとしての適切な位置づけを行っておらず、導入を推し進める政策がとられてこなかったこと

しかし、日本では2011年度から国の補助金制度<sup>3</sup>が始まったことや東日本大震災以降の再生可能エネルギーへの関心の高まりから、導入件数が増加傾向にある。

「地中熱ヒートポンプシステム」(環境省2014)によるとGSHPが普及している地域は北日本に多い。その理由として寒冷地域ではもともと暖房需要が高く、燃料費の高い石油ストーブよりも経済的であること、降雪期の融雪にも利用できることが挙げられる。またGSHPが導入されている施設の種類の種類でみると、住宅が全体の43%を占め最も多く、次は事務所(11%)、公共施設(7%)、その他施設と続く。しかし、エネルギー消費量が多くGSHPの導入効果が高いと考えられる病院・医療施設(2%)や福祉施設(1%)などでは少ない。

### 1-2 地中熱利用ヒートポンプシステムの特徴と普及課題

GSHPの導入にはメリット・デメリットが様々な面で存在する。まずは最も重要な特徴であるデメリットから述べたい。デメリットとして以下のものが挙げられる。経済的デメリットとしては、イニシャルコスト<sup>4</sup>が高いことが挙げられる。空調面積が300㎡(100㎡×3階)の中小ビルの場合、従来システムのイニシャルコスト約630万円に対し、GSHPを利用した場合は、ほぼ4倍の約2,610万円となる。環境的デメリットとしては、地域によっては地下水の汲み上げによる地盤沈下の危険がある(そのため地域によっては規制が設けられている)ことや、採熱・放熱によって地中温度が変化することに伴う地下環境への影響の懸念がある。その他のデメリットとしては、施工時かなり長期の工事期間と

掘削場所が必要であることが挙げられる。

他方、メリットとして以下のものが挙げられる。経済的メリットとしては、年間ランニングコスト<sup>5</sup>が安いことが挙げられる。前述の規模のビルの場合、従来システムの年間ランニングコスト約190万円に対し、GSHPを利用した場合は約130万円である。地中熱を利用し、電力消費量を抑えることで、一年間でランニングコストは約60万円の差が出る。環境的メリットとしては、従来の空気熱を利用した空調よりもCO<sub>2</sub>排出量を削減できることと、ヒートアイランド化の緩和に貢献できることが挙げられる。その他のメリットとしては、地面があればどのような場所でも利用できることも挙げられる。

普及の課題は、イニシャルコストをいかに抑えるかである。地中熱利用ヒートポンプシステムは従来の空調システムに比べてランニングコストが安いため、ある期間を経るとGSHPのランニングコストの安さから、導入者にメリットが生じる。しかし、メリットが生じるまで、補助金を適用しなければ50年、適用しても25年ほど時間がかかる場合も存在し、導入時の大きな障害となっている。よって、その期間が短くなるような場所に導入していく必要がある。

### 1-3 千代田区の地球温暖化対策と地中熱利用ヒートポンプシステム

地中熱は「千代田区環境モデル都市第2期行動計画」（2014年～2018年）において、千代田区における数少ない導入可能性の高い再生可能エネルギーとして位置づけられている。CO<sub>2</sub>排出量の削減効果が期待されており、現在は建替えや大規模改修が見込まれる建物に対する導入の検討・調査が行われている最中である。しかし、現状では具体的な導入案や導入促進策を考える前段階で、普及はほとんどしていない<sup>6</sup>。

2007年に制定された「千代田区地球温暖化対策条例」では、2020年までに区内の年間CO<sub>2</sub>排出量を1990年度比で25%削減するという目標を掲げている。しかし同計画では、2012年度は1990年度比で約5.7%減にとどまり、未だに目標には届いていない。そのため今後のCO<sub>2</sub>排出量削減には策を講じる必要がある。

そこで、GSHPを千代田区で活用することは条

例に掲げる目標を達成するための有効な手段となり、地球温暖化対策への貢献が期待できる。GSHPは、省エネ効果が大きく、従来の空調よりもCO<sub>2</sub>排出量を約30%削減できるからだ。それにより、建物の空調が多い千代田区において、エネルギー使用量を削減するのに効果的である。

## 第2章 地中熱利用ヒートポンプシステム導入の現状と千代田区における可能性

### 2-1 教育施設への導入の現状と千代田区への導入可能性

#### 2-1-1 小・中学校の温水プール・体育館

現在、GSHPを利用している学校施設として、渋谷区立渋谷本町学園がある。温水プールの加温、プールの床暖房、シャワーの給湯にGSHPを利用している。学校がプールを使用しない時間帯は一般に開放しており、GSHPの長時間運転による理想的な運用を行っている。また、他にも学校法人森村学園などがGSHPの導入をしている。これらの例をふまえ、小・中学校に相応しいGSHP導入箇所を2つ提示する。

1つ目は温水プールである。現在プールの水の温度調節には、ガス焚きボイラーまたは従来のエアコンにも利用されている空気熱利用ヒートポンプ（以下「ASHP」[Air Source Heat Pump]とする）が使われている。特にボイラーを利用する場合には数百℃以上の燃焼熱から40℃前後の水を作り出すため、非常に熱効率が悪い。一方GSHPを利用する場合には15℃前後の地中熱から40℃の水を作ることになるため、熱効率が良く、コストの削減になる。また機器への負担が少なく、機器の寿命も長くなることから導入箇所としては最適であると考えられる。

2つ目は体育館である。体育館は熱中症を発症しやすい場所である。空調設備の無い体育館では、熱が館内にこもり、気温や湿度が上昇する。加えて、授業で使われるほか、中学校を中心に夕方以降に一般にも開放されていることが多く、エネルギー需要が多い場所でもある。よって空調コストは教室などに比べて高くなる。上記の熱中症対策とコスト削減の点からGSHPを導入する必要性が高いと考えた。

以上の2点から、小中学校にGSHPを導入する場合、屋内の温水プール、体育館、掘削が可能な校庭のすべてが存在することを条件とする。2014年現在、千代田区には区立の小学校が8校、中学校が3校<sup>7</sup>、私立の小学校は3校、中学校は12校存在する。そのうち条件に合致する学校は区立小・中学校では6校あった。しかし私立では1校もなく、私立では導入が困難であると判断した。

### 2-1-2 幼稚園・保育園

幼稚園や保育園は、園庭を含む広い敷地がありながら比較的空調面積は小さいため、GSHPの導入がしやすいと考えた。2014年現在、千代田区内には区立幼稚園が8園、私立幼稚園が4園、区立保育園が4園、私立保育園が3園存在する。

千代田区内には区立幼稚園が8園中4園(こども園含む)<sup>8</sup>、私立幼稚園が4園中3園<sup>9</sup>の計7園で導入できる。

千代田区内の保育園の多くはビルを施設として使用しており、園庭がない。そのため、掘削するスペースの確保が困難であることから、導入可能性は極めて低いと考えた<sup>10</sup>。

## 2-2 未利用熱エネルギー活用の現状と可能性

### 2-2-1 災害対策井戸

千代田区において災害対策井戸は区立小・中学校に12箇所、公園に7箇所設置されているが、災害時以外は使われていないのが現状である。そこで未利用の資源を活用する手段としてGSHPの導入が考えられる。その際の導入方式としては地中熱交換器を井戸水に浸すクローズドループ方式と、井戸水を汲み上げてその水を熱源として利用するオープンループ方式が考えられる。株式会社アサノ大成基礎エンジニアリングへのヒアリング調査によると、深さ100mの災害対策井戸を活用した際の空調面積は、クローズドループでは約40㎡、オープンループでは最大約100㎡である。そのため、効率の良いオープンループ方式での導入が適している。

今後、防災という点から災害対策井戸は注目されていくと考えられる。災害時には救護拠点での空調の必要性が高いため、教育機関の保健

室などに導入するのが適当と考えられる。また災害によって、ライフラインが途絶える可能性を考慮し、災害対策井戸を使った空調と太陽光発電を組み合わせる事を視野に入れる必要もある。

### 2-2-2 地下鉄湧出水

現在、都内では地中熱を駅で利用している場所がある。小田急線東北沢駅・世田谷代田駅の一部の空調と、新御茶ノ水駅の地下鉄湧出水を利用した御茶ノ水Sola Cityのエントランス空調である。Sola Cityでは空調に使用した湧出水を中水として利用している。前者はクローズドループ方式、後者はオープンループ方式である。本稿ではクローズドループ方式より熱効率が良いオープンループ方式で使える未利用エネルギーである地下鉄湧出水に着目した。

千代田区には、地下を通る路線が14路線<sup>11</sup>あり、地下鉄湧出水が存在する。地下鉄湧出水とは、地下の帯水層からトンネルへ漏れ出している地下水のことである。湧出する地下水の温度は地盤の温度とほとんど同じであるため、GSHPの熱源として利用できる。大成建設株式会社へのヒアリング調査によると、本来地下水を汲み上げる場合には規制がかかるが、湧出水には汲み上げ規制がかからないためオープンループ方式での利用が可能である。しかしその多くは利用されずに下水道に流されており、多額の下水料金を鉄道会社が支払っているのが実態である。そこでGSHPの熱源として利用することで、空調にかかる電気料金を抑えることが可能となる。加えて中水利用することで上水道料金も抑えられる利点もある。その一方で湧出水の水質は悪く、利用できる水質にするためにはコストがかかってしまう欠点もある。また、表1で示したように千代田区には、地下鉄湧出水の排出地点が10箇所存在しており理論上約10万㎡もの面積の空調が可能である<sup>12</sup>。Sola Cityのように地下鉄湧出水をGSHPに使える可能性は十分ある。

表1 地下鉄湧出水の利用可能な水量と空調可能面積

湧出水排出地点 付近の駅	水量	空調可能面積
新御茶ノ水駅	112m <sup>3</sup>	1,093m <sup>2</sup>
東京駅	4,500m <sup>3</sup>	43,613m <sup>2</sup>
大手町駅	232m <sup>3</sup>	2,283m <sup>2</sup>
有楽町駅	2,500m <sup>3</sup>	24,229m <sup>2</sup>
国会議事堂駅	100m <sup>3</sup>	977m <sup>2</sup>
溜池山王駅	168m <sup>3</sup>	1,628m <sup>2</sup>
市ヶ谷駅	86m <sup>3</sup>	837m <sup>2</sup>
九段下駅	110m <sup>3</sup>	1,066m <sup>2</sup>
水道橋駅	1,830m <sup>3</sup>	17,740m <sup>2</sup>
秋葉原駅	230m <sup>3</sup>	2,256m <sup>2</sup>
合計	9,868m <sup>3</sup>	約100,000m <sup>2</sup>

※資料12をもとに作成

### 2-3 中小ビルへの導入の現状と可能性

千代田区には中小ビルが密集している地域が多くある。特に神田地区、神保町地区、飯田橋地区、水道橋地区、麴町地区に多く密集している。これらの中小ビルにGSHPを導入することで地球温暖化対策に貢献できると考えられる。そのため、GSHPが導入できるかどうかの検討をする必要がある。

中小ビルにGSHPを導入することで得られる効果として以下が見込まれる。1つ目は空調にかかる費用を削減できることである。オフィスにおける消費電力の約50%を空調が占めている。そのため消費電力が少ないGSHPの導入効果が大きい。2つ目は環境にやさしい空調を採用しているという環境価値をアピールすることで他のビルとの差別化を図れる。

現在、千代田区における中小ビルへの導入例は一番町笹田ビルのみであり、年間電力消費量を約49%削減することに成功している。それにもかかわらず、区内に導入例が1つしかない背景としては、以下の3点が考えられる。

- ① 敷地面積のほぼすべてを使ってビルが建てられており、地中熱交換器を埋設するための掘削スペースを確保できない。
- ② 幅が狭い道路が多く、掘削機を持ち込むことが難しい。
- ③ 狭いスペースに掘削することが多くなり、掘削費用が高くなりやすい。そのため、

イニシャルコストが高くなり、投資回収に時間がかかる。

以上のことから、私たちは既存の中小ビルにGSHPを導入することは現実的ではないと考える。したがって、新築や建て替えの際に掘削し地中熱交換器を埋設するなどの方法で導入を進めるべきだと考えた。

## 第3章 地中熱利用ヒートポンプシステム導入の経済性と環境性

### 3-1 経済性・環境性の評価方法

経済性は「単純投資回収年数」で表すこととする。単純投資回収年数は、ASHPのイニシャルコストとGSHPのイニシャルコストの差額を、ASHPからGSHPに更新した際のランニングコストの削減額で除して計算する。

ヒアリング調査で得られたデータとインターネット上で公開されているデータを集計したところ、イニシャルコストはGSHPの機器能力とほぼ比例の関係にあることがわかった。そこで機器能力1kWあたりのイニシャルコストを求めたところ、クローズドループ方式は約58万円/kW、オープンループ方式は約23万円/kWであった<sup>13</sup>。この値をイニシャルコストの算出に用いる。

ランニングコストは年間電気料金に、ヒートポンプ更新費用を耐用年数で除した金額を加えたものとする。GSHPの耐用年数は20年とし、ASHPの耐用年数は10年とする。前述のとおり、GSHPの消費電力量および電力料金はASHPのそれらを30%削減する。電力単価は26円/kWh(「平成25年度小売物価統計調査」を参照)として計算する。

環境性はCO<sub>2</sub>排出量で評価する。なお中小ビルモデルについては、千代田区全体の中小ビルの棟数と規模の把握が困難なため、環境性についての評価を見送った。単純投資回収年数が耐用年数を下回る場合、導入へのインセンティブが働くものと評価する。

### 3-2 教育施設に導入した場合

#### 3-2-1 小・中学校

##### ①公立校の場合

渋谷区立渋谷本町学園へのヒアリング調査をもとに経済性、環境性を評価するためのモデルを設定した。

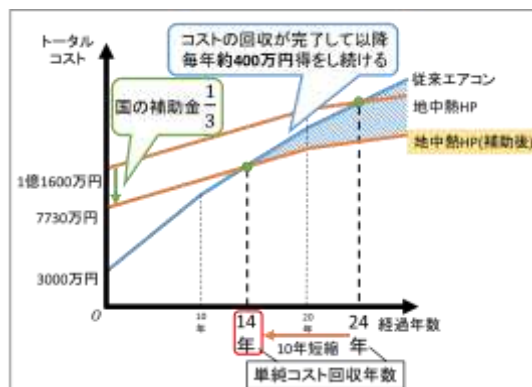
#### ボックス1 公立の小・中学校への導入モデル (モデル1)

用途：体育館の冷暖房と温水プールの加温  
 体育館の大きさ：424 m<sup>2</sup>  
 プールの大きさ：25m×15m×1.2m  
 機器能力：200kW  
 年間稼働日数：347日  
 冷暖房の運転時間：8:00～21:00の13時間  
 プール加温の運転時間：22:00～7:00の9時間  
 補助金：イニシャルコストの1/3  
 採熱方式：クローズドループ方式

※渋谷区立渋谷本町学園へのヒアリング調査をもとに作成

冷暖房は学校の授業がある9時～15時の6時間と予備運転の8時～9時、放課後利用のための15時～21時の計13時間を想定した。温水プールの温度調整は夜間に行い、昼間は行わないこととし、運転時間は22時～7時の9時間とする。学校の授業日は平日のみであるが、休日にも施設が区民に開放されていることを想定する。また、施設の点検によって使われない日を毎月1日設け、年末年始(12月29日～1月3日)の計18日間は稼働しないものと想定し、347日稼働するものとする。体育館・プールの大きさは千代田区にあるそれらの施設を平均した。モデル1における経済性は以下のとおりである。

グラフ1 モデル1における単純投資回収年数



※注釈4・5を参照

グラフ1に示したように、GSHPでは毎年約400万円のランニングコストを抑えられる。すなわち、単純投資回収を終えた後、従来エアコンに比べ、年間約400万円得をするということがわかる。補助金がない場合、単純投資回収年数は24年だが、国の補助金により14年にまで縮めることができる。つまり、補助金を使用した場合の単純投資回収年数は機器の耐用年数の20年を下回るため、導入のインセンティブが働くといえる。また、第2章で述べた、GSHPの導入が可能なら小・中学校6校すべての体育館・温水プールにGSHPを導入できれば、年間約260トンのCO<sub>2</sub>を削減できる<sup>13</sup>。

##### ②私立校の場合

公立校と同様に、渋谷区立渋谷本町学園へのヒアリング調査をもとに経済性、環境性を評価するためのモデルを設定した。

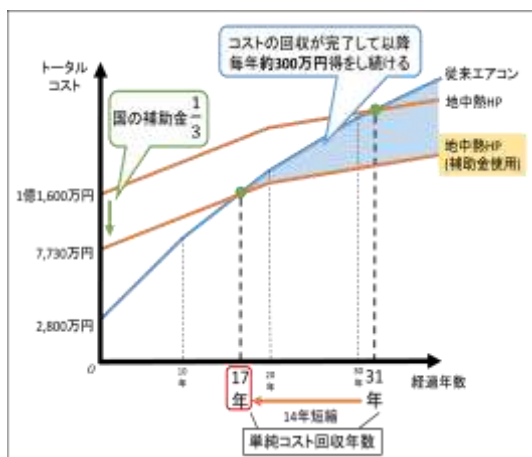
#### ボックス2 私立の小・中学校への導入モデル (モデル2)

用途：体育館の冷暖房と温水プールの加温  
 体育館の大きさ：424 m<sup>2</sup>  
 プールの大きさ：25m×15m×1.2m  
 機器能力：200kW  
 年間稼働日数：250日  
 冷暖房の運転時間：8:00～21:00の13時間  
 プール加温の運転時間：22:00～7:00の9時間  
 補助金：イニシャルコストの1/3  
 採熱方式：クローズドループ方式

※渋谷区立渋谷本町学園へのヒアリング調査をもとに作成

冷暖房と加温の時間は公立校と同一であるが、区民への開放がないため、授業日約 200 日(週休 2 日を想定)とクラブ活動がある夏休み期間などの計 250 日間運転するものとした。その他の条件は、公立校と同様である。モデル 2 における経済性は以下のとおりである。

グラフ 2 モデル 2 における単純投資回収年数



※注釈 4・5 を参照

グラフ 2 に示したように、単純投資回収年数が 31 年と公立校の 24 年より長くなる。インシヤルコストは公立校と同額であるが、稼働日数が少ないため年間ランニングコストが安くなる。単純投資回収年数は、補助金を使うことによって 17 年にまで短縮される。つまり、補助金を使用した場合の単純投資回収年数は機器の耐用年数の 20 年を下回るため、導入のインセンティブが働くといえる。しかしながら、千代田区の私立校には地中熱交換器を設置する十分な広さの敷地を持つ学校は少ないため、導入できる学校はない。そのため千代田区では導入は困難だが、本モデルに適合する学校は他自治体にはかなり多くあると考えられる。また、このモデルにおいては、1 校につき年間 43.3 トンの CO<sub>2</sub> 排出を削減できる<sup>14</sup>。

### 3-2-2 幼稚園・保育園

幼稚園・保育園の遊戯室に GSHP を導入する経済性、環境性を評価するためのモデルを想定した。

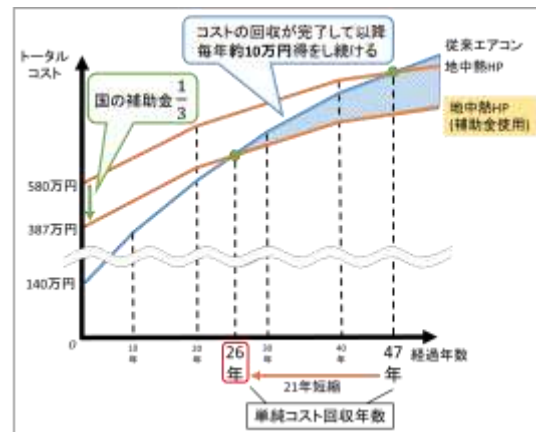
#### ボックス 3 幼稚園・保育園への導入モデル (モデル 3)

用途:遊戯室の冷暖房  
 遊戯室の大きさ:100 m<sup>2</sup>  
 機器能力:10kW  
 年間稼働日数:250 日  
 冷暖房の運転時間: 8:00~20:00 の 12 時間  
 補助金: インシヤルコストの 1/3  
 採熱方式:クローズドループ方式

※独自に作成

冷暖房は保育時間と延長保育を合わせた 12 時間とした。また、土日・祝日は保育園が休園しているものとし、年間稼働日数を 250 日とした。モデル 3 における経済性は以下のとおりである。

グラフ 4 モデル 3 における単純投資回収年数



※注釈 4・5 を参照

グラフ 4 に示したように、1 日の稼働時間が短いため、単純投資回収年数が 47 年と長い。インシヤルコストの 1/3 相当の補助金を使ったとしても、26 年の単純投資回収年数は耐用年数の 20 年を上回るため、現時点では導入が難しいことが分かる。導入を促進するにはさらなる補助、減税などの措置が必要だといえる。さらなる補助金が支給され、単純投資回収年数が 20 年以下に短縮された場合に限り、モデル 3 では 1 園に

つき年間約1.2トンのCO<sub>2</sub>排出量を削減できる。千代田区において導入可能な7園全体では約8.3トンの削減ができる<sup>14</sup>。

### 3-3 未利用熱エネルギーを活用した場合

#### 3-3-1 災害対策井戸

災害対策井戸を利用したGSHPを保健室と、保健室に隣接する部屋に導入する経済性、環境性を評価するためのモデルを設定した。

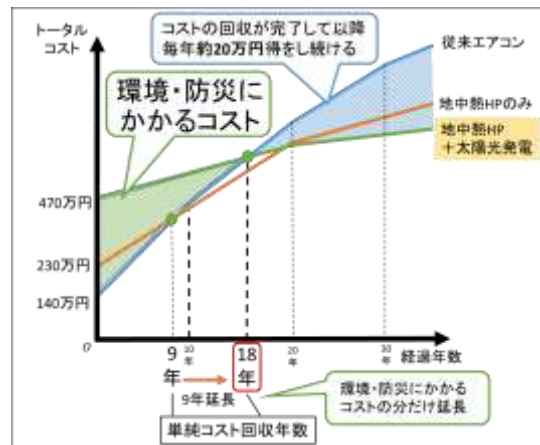
#### ボックス4 災害対策井戸への導入モデル(モデル4)

用途:保健室と、保健室に隣接する部屋の空調  
 部屋の大きさ:100 m<sup>2</sup>  
 機器能力:10kW  
 年間稼働日数:250日  
 冷暖房の運転時間:毎日7:00~19:00の12時間  
 追加条件:GSHP稼働のための電力は太陽光発電から得ることとし、太陽光発電機器の相場価格は30万円/kWとする  
 採熱方式:オープンループ方式  
 汲み上げ量:10m<sup>3</sup>/日(汲み上げた水は中水利用し下水に流すこととする)

※独自に作成

モデル4におけるGSHPのインシヤルコストはヒートポンプのインシヤルコスト<sup>4</sup>と太陽光発電機器のインシヤルコスト<sup>14</sup>の合計とし、ランニングコストは太陽光発電のできない日にのみかかるものとした。気象庁HPによると、2012年の年間降水日は121日である。これは1年の約1/3の日数に相当するので、降水日は外部電力でGSHPを運転するものとする。また、太陽光発電機器に対する補助金は考慮していない。モデル4における経済性は以下のとおりである。

グラフ5 モデル4における単純投資回収年数



※注釈4, 5, 14を参照

グラフ5に示したように、GSHPと太陽光発電を組み合わせた場合、補助金なしでも単純投資回収年数は18年である。つまり、単純投資回収年数は、耐用年数の20年を下回るため、導入のインセンティブが働くといえる。また、GSHPと太陽光発電を組み合わせた場合、毎年約20万円のランニングコストを抑えられる。すなわち、単純投資回収年数を終えた後、従来エアコンと比べ、年間約20万円得をするということがわかる。また、環境性については導入可能施設が12件<sup>15</sup>あるので、年間14.175トンのCO<sub>2</sub>排出量が削減できる<sup>13</sup>。

#### 3-3-2 地下鉄湧出水

経済性については、駅は半永久的に利用できることから必ず投資回収ができると考えた。そのため本節では環境性を評価する。すでに表1で示したように、地下鉄湧出水の排出地点は千代田区内に10ヶ所存在し、その総湧出量は約1万m<sup>3</sup>/日にもなる。この湧出量すべてが空調に利用できた場合、年間1,700万トンのCO<sub>2</sub>排出量を削減できる<sup>13</sup>。湧出量が多く、活用による環境効果も非常に高いことから、千代田区は鉄道事業者に対し地下鉄湧出水の活用を働き掛ける必要がある。既築の中小ビルにGSHPを導入する経済性、環境性を評価するためのモデルを設定した。



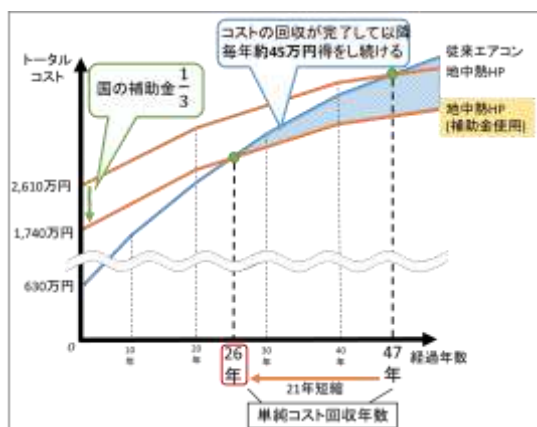
## ボックス5 中小ビルへの導入条件(モデル5)

用途: オフィスフロアの冷暖房  
オフィスフロアの大きさ: 約 300 m<sup>2</sup>  
機器能力: 45kW  
年間稼働日数: 250 日  
冷暖房運転時間: 8:00~20:00 の 12 時間  
補助金: インシヤルコストの 1/3  
採熱方式: クローズドループ方式

※一番町笹田ビルへのヒアリング調査をもとに作成

テナント収入からインシヤルコストを回収するものとする。また、土日・祝日はオフィスを休業とし、年間稼働日数を 250 日とした。モデル5における経済性は以下のとおりである。

グラフ6 モデル5における単純投資回収年数



※注釈4・5を参照

図6に示したように、1日の稼働時間が短く、コスト回収年数が47年と長くなっている。インシヤルコストの1/3相当の補助金を使ったとしても、単純投資回収年数は26年である。この年数は、耐用年数の20年を上回るため、現時点では導入が難しいことが分かる。中小ビルへの導入を促進するにはさらなる補助、減税などの措置が必要だといえる。

## 第4章 千代田区での地中熱利用ヒートポンプシステム導入の促進案

### 4-1 区内の教育施設への積極的導入

環境モデル都市の取り組みとして、教育施設を環境に配慮した先進的な施設とするために、区立小・中学校の体育館や温水プール、幼稚園へGSHPを導入することを提案する。区立小・中学校は工事期間を確保でき、校庭に地中熱交換器を埋設できるため、GSHPを導入しやすい。稼働時間が長い体育館の空調と温水プールの加温にGSHPを利用すれば、導入効果が大きくなる。また、第2章で述べたように保育園での導入は困難であるが、小・中学校や幼稚園は千代田区において掘削スペースを確保できる数少ない場所である。しかし、第3章で述べたようにインシヤルコストの1/3相当の補助金を使ったとしても、単純投資回収年数は耐用年数の20年を上回るため、現時点では幼稚園への導入が難しいことが分かる。導入を促進するにはさらなる補助、減税などの施策が必要だといえる。

### 4-2 未利用熱エネルギーの活用

千代田区に存在する未利用熱エネルギーを利用するため、GSHPへの利用に適するものとして地下鉄湧出水と災害対策井戸の活用を提案する。

#### 4-2-1 災害対策井戸の利用推進

災害対策井戸をGSHPの熱源として使用し、環境と防災に配慮した空調を提案する。今まで平時は使われていなかった災害対策井戸にGSHPを導入することで、平時から冷暖房の熱源として有効活用することができる。汲み上げた水は植物への散水やトイレでの中水利用をすることで環境に配慮できる。また、上水料金の削減にもつながる。災害時には、太陽光などの独立した電源を使用することで、GSHPを導入した部屋は救護拠点となり得る。そして空調の熱源として使った水は、避難所の生活用水に使用できる。

東日本大震災以降、災害対策井戸について東京都で急速に関心が高まっているため、今後、設置数の増加が期待できる。既存のものだけではなく、災害対策井戸の増設に伴い地中熱利用ヒートポンプシステムを導入していけば、平時

から井戸を無駄にすることなく利用でき、環境と防災の両立が可能となる。

#### 4-2-2 地下鉄湧出水を活用した駅構内冷暖房の利用推進

地下鉄湧出水を駅構内の冷暖房に利用することを提案する。第2章では、地下鉄湧出水が下水道に流されているという現状、ビルの冷暖房の熱源として活用されていることに触れた。湧出水という公共の資源はより広範な人々のために使用されるべきである。そのため、駅という全ての人々に開放された公共性の高い施設に導入することを提案する。また、駅構内で使用すれば地下からビルに湧出水を汲み上げるよりも、汲み上げルートの確保が容易でコストを削減できると考えた。駅は存在している限り、GSHPを半永久的に使用できるため、必ず投資回収ができる。

#### 4-3 中小ビルへの導入の提案

中小ビル建て替え時または新築時に中小ビルへGSHPを導入することを提案する。中小ビルにGSHPを導入していくことで、区のCO<sub>2</sub>排出量削減目標の達成に貢献できると考えられる。第2章で述べたように千代田区では中小ビルが密集していることに加え、狭い道が多く掘削機を持ち込みにくいという状況であるため、既存のビルへ導入することは難しい。また、中小ビルでは地中熱交換器を設置するスペースが確保できない場合が多い。そのため、GSHPを建て替え時または新築時に導入することが現実的である。したがって、建物の着工前にGSHPの導入を働きかける必要があるだろう。

#### おわりに

本稿に残された課題としては以下の3点が挙げられる。1点目は病院・福祉施設への導入を検討することである。病院・福祉施設は冷暖房のほかにも給湯の利用が多く、施設全体の熱需要が大きいため、GSHPの効果を得やすい。しかし、これらの施設では熱需要の把握が困難であり、経済性を算出するための情報が不足していたため検討を見送った。2点目はGSHPを地域冷暖房の熱源機器として利用する可能性を検討す

ることである。多くの建物に熱を供給する地域冷暖房は、供給熱量が大きく、GSHPの導入による経済的・環境的效果が大きいと考えられる。しかし、地域冷暖房の熱供給事業の料金体系が複雑であることから経済性の算出が困難であるため検討を見送った。3点目はGSHPの高額なイニシャルコストの資金調達の方法を検討することである。2011年から補助金制度が確立されているが、補助金を利用しても依然としてイニシャルコストが高く、GSHPの導入の障害となっていると考えられる。しかし、本稿では、GSHPの効果が大きいと考えられる導入場所の提案を主としているため検討を見送った。

また、本研究は「千代田区内大学と千代田区の連携協力に関する基本協定」に基づき、平成16年度から、各大学が行う千代田区に関する様々な事象を一つの学問として学ぶ「千代田学」の一環として行われた。

最後に、この論文の作成にご協力いただいた各企業・団体の方々に感謝の意を述べ、この論文を結ぶ。

【注釈】

<sup>1</sup> 資源エネルギー庁ホームページによると、オフィスビルにおける電気使用量のうち空調機器が48%を占めている。また、照明が24%、OA機器が16%、エレベーターが5%、その他が7%を占めている。

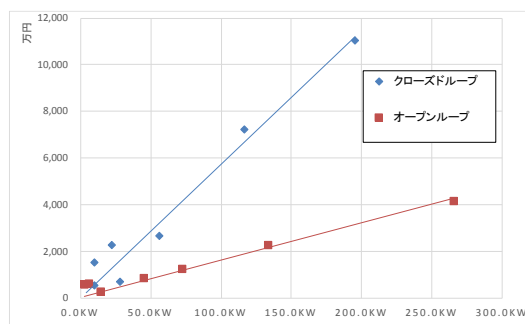
<sup>2</sup> ビル用水法：地下水を汲み上げるパイプの吐出口断面積が6cm<sup>2</sup>以下の場合、法対象外で利用が可能である。また、6～21cm<sup>2</sup>ではストレーナー(不純物除去装置)を400～650m以深に設置する義務があり、21cm<sup>2</sup>を超える場合は汲み上げが禁止されている。

環境確保条例(東京都)：地下水を汲み上げるパイプの吐出口断面積が6cm<sup>2</sup>以下では、揚水機出力2.2kW、揚水量最大20m<sup>3</sup>/日以下、平均揚水量10m<sup>3</sup>/日以下という条件で利用可能である。6～21cm<sup>2</sup>ではストレーナーを400～650m以深に設置する義務があり、21cm<sup>2</sup>を超える場合は汲み上げが禁止されている。

<sup>3</sup> 経済産業省では2011年度から「再生可能エネルギー熱利用加速化支援対策事業」として補助金が出されている。また、環境省では2013年度は「先進的地中熱利用ヒートポンプシステム導入促進事業」、2014年度は「地熱・地中熱等の利用による低炭素社会推進事業」として補助金が出されている。

<sup>4</sup> ヒアリング調査で得られたデータとインターネット上で公開されているデータを集計したところ、グラフ7のようになり、イニシャルコストはGSHPの機器能力とほぼ比例の関係にあることがわかった。

グラフ7 GSHPのイニシャルコストの傾向



※訪問調査や一般公開データをもとに作成

そこで、機器能力1kWあたりのイニシャルコストを求めたところ、クローズドループ方式は約58万円/kW、オープンループ方式は約23万円/kWであった。この値をイニシャルコストの算出に用いる。また、株式会社セツビコムHP・株式会社ミタデンHPによると、45kWの従来エアコンの販売価格の平均は約250万円であった。ヒアリング調査によると、ASHP設置にかかる総工事費は約380万円である。そのため、設備費の250万円と総工事費の380万円を合わせると、イニシャルコストは630万円となる。この価格を1kWあたりに換算すると、ASHPのイニシャルコストの相場価格は、14万円/kWとした。よって、イニシャルコストの算出式は以下のとおり定義する。

数式1 イニシャルコストIC<sub>i</sub>の算出

$$IC = p \times J$$

IC<sub>A</sub> : ASHPのイニシャルコスト[円]  
 IC<sub>G</sub> : GSHP(クローズドループ)のイニシャルコスト  
 IC<sub>g</sub> : GSHP(オープンループ)のイニシャルコスト  
 p : 相場価格[円/kW]  
 J : 機器能力[kW]

<sup>5</sup> ランニングコストRCは以下の方法で算出する。  
 (1) ASHPの年間消費電力は以下のように算出する。

数式2 ASHPとGSHPの年間消費電力Eの算出

$$E_A = C \times \frac{1}{COP_A} \times t \times d$$

$$E_G = E_g = 0.7E_A$$

E<sub>A</sub> : ASHPの年間消費電力[kWh/年]  
 E<sub>G</sub> : GSHP(クローズドループ)の年間消費電力  
 E<sub>g</sub> : GSHP(オープンループ)の年間消費電力  
 COP<sub>A</sub> : ASHPのCOP COP<sub>A</sub> = 4とする  
 t : 一日の運転時間[時間/日]  
 d : 年間運転日数[日/年]

(2)年間電気料金は以下のように算出する。

**数式3 年間電気料金 EC の算出**

$$EC = E \times e$$

EC : 年間電気料金[円/年]  
e : 電力単価(=26) [円/kWh]

(3)更新費用 RF について

機器には耐用年数がある。当試算では ASHP は 10 年、GSHP は 20 年とした。耐用年数に差が生じるのは、GSHP よりも ASHP の方がつくりだす温度の差が大きく、機器に負担がかかるからである。また、クローズドループ方式を導入する際に必要な地中熱交換器は基本的にメンテナンスフリーであるとされているため、更新費用には算入しない。当試算ではクローズドループ方式について、地中熱交換器設置に関わる費用をイニシャルコスト全体の半分とした。その7割が本体価格と考え(3割は配管などの工事費とした)、この考え方を、更新費用を算出するための基準とした。クローズドループ方式と同様のヒートポンプを用いるオープンループ方式の更新費は、クローズドループ方式と同額とした。また、ASHP についてはイニシャルコストをそのまま更新費用を算出するための基準とした。

さらに、機器の価格は時間が経つと逓減すると考えられる。当試算ではこの逓減率を年率 0.5% とした。また、建物のオーナーは機器の耐用年数が訪れ、更新費用がかかると予想できる。そのため、毎年更新費用のためのお金を積み立てると考えた。以上をまとめると、更新費用 RF は以下の式で表す事ができる。

**数式4・5 更新費用 RF の算出**

$$RF_A = \frac{IC_A \times 0.95^n}{10}$$

$$RF_G = RF_g = \frac{IC_G \times 0.5 \times 0.7 \times 0.95^{2m}}{20}$$

RF<sub>A</sub>: ASHP の更新費用を耐用年数で除して求められる1年あたりの更新費用  
RF<sub>G</sub>: GSHP(クローズドループ) の更新費用を耐用年数で除して求められる1年あたりの更新費用  
RF<sub>g</sub>: GSHP(オープンループ) の更新費用を耐用年数で除して求められる1年あたりの更新費用  
n : ASHP の機器更新回数  
m : GSHP の機器更新回数

(4)年間ランニングコスト RC

(1)~(3)より、年間ランニングコスト RC は以下の式で表すことができる。

**数式6 年間ランニングコスト RC の算出**

$$RC = EC + RF$$

RC:年間ランニングコスト[円/年]

<sup>6</sup>現在千代田区内で GSHP を導入しているのは、一番町笹田ビル、JP タワーKITTE、大和ハウス Try 家 Lab、御茶ノ水ソラシティの4ヶ所のみである。

<sup>7</sup>導入できる小学校は麴町小学校、麴町中学校、神田一橋中学校、御茶ノ水小学校、九段小学校、富士見小学校の6校である。

<sup>8</sup>区立幼稚園・こども園は区立小学校と同一の建物のところが多く、導入の可否は小学校のグラウンドに地中熱交換器を設置できるかによって決定した。よって導入できる幼稚園は麴町幼稚園、九段幼稚園、番町幼稚園、富士見こども園の4園である。

<sup>9</sup>私立幼稚園は千代田区内に4園あるが、うち神田寺幼稚園は屋上を園庭として利用しており、導入は不可能であると考えられる。よって導入できる幼稚園は暁星幼稚園、白百合学園幼稚園、双葉小学校附属幼稚園の3園である。

<sup>10</sup>保育園は区立4園、私立3園があるが、どこも園庭がなく、私立についてはすべてがビルのテナントであった。保育所も千代田区内にはあるが、こちらもすべてがビル内に入居して開園しており、導入は不可能であると考えられる。

<sup>11</sup>千代田区内に地下トンネルをもつ路線は、JR2路線、東京地下鉄9路線、東京都交通局2路線、首都圏新都市鉄道1路線の14路線である。

<sup>12</sup> オープンループにおける空調可能面積は次のように求められる。

#### 数式7 オープンループの空調可能面積Sの算出

$$S = \frac{LdcK}{at} \times 1.163$$

S: 空調面積[m<sup>2</sup>]  
 L: 使用水量[m<sup>3</sup>/日]  
 d: 水の密度(=1) [t/m<sup>3</sup>]  
 c: 水の比熱容量(=1) [kcal/g・K]  
 K: 水と空気の温度差[K] (K=10 と仮定)  
 a: 必要熱量(=0.1) [kW/m<sup>2</sup>]  
 t: 空調の使用時間[時間/日]

千代田区内の地下鉄湧出水の排出量の合計は約10,000m<sup>3</sup>である。よってL=10,000、t=12を代入すると、S≒100,000が得られる。

<sup>13</sup> 区全体の年間CO<sub>2</sub>排出削減量AC [t-CO<sub>2</sub>]は以下の式で表せる。

#### 数式8 区全体の年間CO<sub>2</sub>排出削減量ACの算出

$$AC = (E_A - E_G \text{ (or } g)) \times 0.000525 \times N$$

AC: 区全体の年間CO<sub>2</sub>排出削減量  
 N: 対象施設数  
 また、杉の木1本の年間CO<sub>2</sub>吸収量を14kg/年として換算した。

<sup>14</sup> 東京においてGSHPを稼働させるために必要な太陽光発電容量SLは以下の式で求めることができる。なお設置箇所の温度環境による発電ロスとその他の原因による発電ロスをそれぞれ15%とした。

#### 数式9 必要な太陽光発電の容量SLの算出

$$SL = \frac{E}{3.73 \times d \times 0.85 \times 0.85}$$

SL: 必要な太陽光発電の容量  
 3.73[kW/m<sup>2</sup>・日]は東京の一日の平均日射量である

また、太陽光発電機器の発電容量1kWあたりの相場価格を30万円とすると、太陽光発電機器のインシヤルコストSCは次の式で表せる。

#### 数式10 太陽光発電機器のインシヤルコストSCの算出

$$SC = SL \times 300,000$$

SC: 太陽光発電機器のインシヤルコスト[円]

<sup>15</sup> 千代田区へのヒアリング調査によると、区内に災害対策井戸は20箇所存在し、うち13箇所が小・中学校(廃校活用施設含む、うち2箇所は番町小学校に存在)、残り7本は公園に設置されている。

#### 【参考文献・資料】

1. 岡山大学スポーツ教育センター「熱中症予防対策マニュアル第4版」
2. 神谷弘志・加藤正二・千田丈吾(2003)「総武トンネル湧水活用による都市河川の環境改善事業について」
3. 環境省(2004)「平成15年度 都市における人工排熱抑制によるヒートアイランド対策調査報告書」
4. 環境省(2012)「平成24年度版 ヒートアイランド対策ガイドライン 改訂版」
5. 環境省(2014)「地中熱利用システム」
6. 千代田区(2010)「千代田区低炭素型社会形成指 針」
7. 東京都環境局(2005)「ヒートアイランド対策ガイドライン」
8. 東京都土地整備局(2011)「東京都土地利用現況図[建物用途別]」
9. 東京都都市整備局(2011)「東京の土地利用[平成23年東京都区部]」
10. 内藤春雄(2012)『地中熱利用ヒートポンプの基本が分かる本』, オーム社
11. 浜川匠(2007)「都心部における既存中小ビルの連結手法研究-東京都、内神田一丁目におけるケーススタディ-」
12. 布田知康・篠田友博・深山尚央・増田幸宏・高橋信之・尾島俊雄(2007)「東京都心部におけるトンネル湧水活用に関する調査研究」
13. 北海道大学地中熱利用システム工学講座(2007)『地中熱ヒートポンプシステム』, オーム社

【参考 URL】

1. 環境省  
(<http://www.env.go.jp/>、  
閲覧日 3月28日)
2. 千代田区  
(<http://www.city.chiyoda.lg.jp/>、  
閲覧日 3月29日)
3. 経済産業省 資源エネルギー庁  
(<http://www.enecho.meti.go.jp/>、  
閲覧日 4月16日)
4. 気象庁  
(<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>、  
閲覧日 4月24日)
5. 東京都  
(<http://www.metro.tokyo.jp/>、  
閲覧日 5月5日)
6. 群馬県  
(<http://www.pref.gunma.jp/>、  
閲覧日 5月26日)
7. 青森県  
(<http://www.pref.aomori.lg.jp/>、  
閲覧日 6月15日)
8. 長野県  
(<http://www.pref.nagano.lg.jp/>、  
閲覧日 7月21日)
9. 地中熱利用促進協会  
(<http://www.geohpaj.org/>、  
閲覧日 8月1日)
10. 港区  
(<http://www.city.minato.tokyo.jp/>、  
閲覧日 8月16日)
11. 渋谷区  
(<http://www.city.shibuya.tokyo.jp/>、  
閲覧日 8月24日)
12. 岐阜市  
(<http://www.city.gifu.lg.jp/>、  
閲覧日 9月1日)
13. 横浜市  
(<http://www.city.yokohama.lg.jp/>、  
閲覧日 9月11日)
14. 群馬県吉岡町  
(<http://www.town.yoshioka.gunma.jp/>、  
閲覧日 9月21日)
15. 特定非営利活動法人 地中熱利用促進協会  
(<http://www.geohpaj.org/>、  
閲覧日 10月1日)
16. 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)  
(<http://www.nedo.go.jp/>、  
閲覧日 10月6日)
17. NPO 法人 北関東産官学研究会 地中熱利用研究会  
(<http://www.hikalo.jp/GeoHeat/>、  
閲覧日 10月12日)
18. 東京都市サービス株式会社  
(<http://www.tts-kk.co.jp/>、  
閲覧日 10月18日)
19. 株式会社エネルギーアドバンス  
(<http://www.energy-advance.co.jp/>、  
閲覧日 10月25日)
20. 東日本旅客鉄道株式会社  
(<http://www.jreast.co.jp/>、  
閲覧日 11月3日)
21. 東京地下鉄株式会社  
(<http://www.tokyometro.jp/index.html>、  
閲覧日 11月8日)

【調査協力企業・団体】

1. Day HEATING & COOLING  
(訪問日 2014年3月14日)
2. 特定非営利活動法人 地中熱利用促進協会  
(訪問日 2014年3月20日)
3. 一番町笹田ビル  
(訪問日 2014年4月9日)
4. 地中熱利用促進協会 笹田 政克 様  
(講演 2014年5月15日)
5. 渋谷区立渋谷本町学園  
(訪問日 2014年5月19日)
6. 前田建設工業株式会社  
(訪問日 2014年5月22日)
7. 有限会社 かなや設計  
(訪問日 2014年5月26日)
8. ゼネラルヒートポンプ株式会社  
(質問票回答日 2014年6月10日)
9. サンポット株式会社  
(質問票回答日 2014年6月23日)

10. 株式会社建設技術研究所 金盛 高之 様  
(講演 2014年6月26日)
11. 関西電力株式会社  
(質問票回答日 2014年7月1日)
12. 株式会社アサノ大成基礎エンジニアリング(訪問日 2014年7月10日)
13. 横浜市泉区 区政推進課  
(質問票回答日 2014年7月14日)
14. 東京都市サービス株式会社  
(訪問日 2014年7月17日)
15. 群馬県庁 企画部  
(訪問日 2014年7月14日)
16. 大成建設株式会社  
(訪問日 2014年7月22日)
17. 千代田区 環境安全部  
(質問票回答日 2014年8月25日)
18. ジオシステム株式会社 高杉 真司 様  
(講演 2014年10月15日)
19. 東京地下鉄株式会社  
(質問票回答日 2014年11月13日)
20. 千代田区ヒートアイランド対策構想会議  
にご出席の皆様