

地中熱利用にあたってのガイドライン

(第4版)

令和5年3月

環境省 水・大気環境局
水環境課 地下水・地盤環境室

はじめに

我が国は、地球温暖化対策としてパリ協定に定める目標を踏まえ、2050 年カーボンニュートラルの実現に向けて、2030 年度に温室効果ガスを 2013 年度から 46%削減することを目指し、さらに、50%の高みに向けて挑戦を続けることを宣言しました。これに伴い関係法令・計画が改正され、再生可能エネルギーの最大限の導入が重要な施策となっています。

平成 27 年のパリ協定以降、気候変動に関する政府間パネル(IPCC)の 1.5℃特別報告書(平成 30 年)では、将来の世界平均気温上昇を 1.5℃に抑える排出経路では 2050 年前後に世界の人為起源の二酸化炭素排出量を正味ゼロとする必要があることや、第 6 次評価報告書第 1 作業部会報告書(令和 3 年)では「人間の影響が大气、海洋及び陸域を温暖化させてきたことには疑う余地がない。」との見解が示され、世界各国が次々と 2050 年カーボンニュートラルの実現に向けた目標を宣言するようになりました。

パリ協定採択後に初めて策定された環境基本計画である第五次環境基本計画(平成 30 年 4 月 17 日閣議決定)では、持続可能な開発目標(SDGs)の考え方も活用しながら、分野横断的な6つの「重点戦略」を設定しました。環境政策による経済社会システム、ライフスタイル、技術などあらゆる観点からのイノベーションの創出や、経済・社会的課題の「同時解決」を実現し、将来に渡って質の高い生活をもたらす「新たな成長」に繋げていくこととしています。また、地域の活力を最大限に発揮する「地域循環共生圏」の考え方を新たに提唱し、各地域が自立・分散型の社会を形成しつつ、地域の特性に応じて資源を補完し支え合う取り組みを推進していくこととしています。その中で、再生可能エネルギーの最大限の導入とともに、地域性の高いエネルギーである再生可能エネルギー熱(地中熱等)供給設備の導入支援も位置づけられています。

第六次エネルギー基本計画(令和 3 年 10 月 22 日閣議決定)では、「再生可能エネルギーの主力電源化を徹底し、再生可能エネルギーに最優先の原則で取り組み、国民負担の抑制と地域との共生を図りながら最大限の導入を促す」と記載されるとともに、「我が国の最終エネルギー消費の過半は熱利用を中心とした非電力部門が占めており、2050 年カーボンニュートラルを見据え、省エネルギーや燃料転換などにより、更に熱を効率的に利用する必要がある」としています。さらに「地域の特性を活かした太陽熱、地中熱、バイオマス熱、雪氷熱、温泉熱、海水熱、河川熱、下水熱等の再生可能エネルギー熱をより効果的に活用していくことも重要である」と位置づけられています。

このような中、地球温暖化対策の推進に関する法律の改正(令和 3 年法律第 54 号)が行われ、令和 4 年 4 月 1 日に施行されました。同法は、2050 年までの脱炭素社会の実現、環境・経済・社会の統合的向上、国民を始めとした関係者の密接な連携等を基本理念としています。そして、地方公共団体実行計画に、施策の実施に関する目標を追加するとともに、市町村は、地域の再生可能エネルギーを活用した脱炭素化を促進する事業(地域脱炭素化促進事業)に係る促進区域や環境配慮、地域貢献に関する方針等を定めるよう努めることとされています。

また、地球温暖化対策計画(令和 3 年 10 月 22 日閣議決定)においては、我が国の地球温暖化対策の目指す方向に、徹底した省エネルギーや再生可能エネルギーの最大限の導入を進めることが明記され、再生可能エネルギー熱等の供給設備の導入支援を図るとともに、様々な熱エネルギーを地域において有効活用するモデルの実証・構築等を行うことで、再生可能エネルギー熱等の導入拡大を目指すこととしています。地域資源である再生可能エネルギーは、その活用の仕方によって、地域経済の活性化や地域の防災力の向上など、地域を豊かにしうるものとなりえるとあり、例えば、地域熱供給の導入等の

面的な取り組みから、都市のコンパクト化、公共交通網の再構築、居心地が良く歩きたくなる空間の形成、スマートコミュニティの構築等の広域的な取り組みまで、地方公共団体が中心となって進めることが強く期待されています。

また、地域脱炭素ロードマップ(令和 3 年 6 月 9 日国・地方脱炭素実現会議決定)では、地域脱炭素は地域課題を解決し地域の魅力と質を向上させる地方創生に資するものであり、2025 年度までの 5 年間に政策を総動員して人材・技術・情報・資金を積極的に支援することとなっています。また、2050 年を待つことなく、前倒しでカーボンニュートラル達成を目指す「脱炭素先行地域」を 2030 年度までに少なくとも 100 か所創出することとなっており、再生可能エネルギー熱(地中熱含む)についても、脱炭素先行地域を実現するための取り組みの1つとして位置づけられています。

地中熱は、再生可能エネルギーの中でも「太陽光や風力と異なり天候に左右されない」といった安定性があり、「空気熱利用と異なり大気中へ排熱を出さない、年間を通して一定の温度であり外気温との温度差を活用できる」など省エネルギーで CO₂ の排出量を削減できるメリットを有しており、ヒートアイランド現象の緩和や地球温暖化対策への効果が期待されています。この地中熱を利用したヒートポンプシステムは、高い省エネルギー性や環境負荷低減効果を有した技術であり、認知度向上や普及促進を一層図っていく必要があります。

一方、我が国は、“環境資源を利用する際は長期的な負荷蓄積に伴う潜在的リスクに留意すべき”との教訓を、地下水過剰揚水に伴う地盤沈下から学びました。

水循環基本法(平成 26 年 7 月 1 日施行)では、その基本理念において「水が国民共有の貴重な財産であり、公共性の高いものであること」、「水の利用に当たっては、水循環に及ぼす影響が回避され又は最小となり、健全な水循環が維持されるよう配慮されなければならない」ことが示され、地下水の適正な保全及び利用を図ることも明記されています。

そこで本ガイドラインでは、環境共有資源である地下水・地盤環境の持続可能な利用を行いながら地中熱利用の普及促進を図ることを目的として、現在得られている知見・研究に基づいて、地中熱利用ヒートポンプのメリットとともに、想定される地下水・地盤環境への影響の可能性と技術の導入における留意点を提示し、熱利用効率の維持や地下水・地盤環境の保全に資するモニタリング方法等についての基本的な考え方を整理しました。

今回の改訂では、平成 24 年のガイドライン策定以降、平成 27 年の改訂版、平成 30 年の改訂増補版を経て 5 年が経過したことに加えて、近年の著しい国際・国内動向の変化を踏まえて、地中熱利用の一層の普及促進を図るために、新たに得られた知見・事例等を追加することにより、内容をより充実させました。

本ガイドラインが、今後の地中熱利用の普及促進によって得られる地下水・地盤環境への潜在的な影響の定量的な評価やコスト低減技術等の新たな知見・情報に基づいて、適宜、更新・改訂されることをご理解の上で利用され、地中熱利用の一助となることを期待しています。

最後に、本ガイドラインの改訂にあたり、地中熱利用ガイドライン改訂検討会(座長:大谷 具幸 岐阜大学教授)の委員の方々からご指導・ご助言を頂きました。ここに改めてお礼申し上げます。

令和 5 年 3 月 環境省 水・大気環境局 水環境課 地下水・地盤環境室

目 次

序 ～本ガイドラインの適用範囲と構成～	1
第1章 地中熱利用ヒートポンプの概要	2
1.1 地中熱利用の種類	2
1.2 地中熱利用ヒートポンプの仕組み	4
1.3 地中熱の普及状況	8
第2章 地中熱利用ヒートポンプシステムによる省エネルギー効果等	12
2.1 省エネルギー効果の試算	12
2.2 CO ₂ 排出量削減効果の試算	18
2.3 省コスト効果の試算	24
2.4 ヒートアイランド現象の緩和効果の試算	31
2.5 ZEB および ZEH への地中熱導入事例	32
第3章 地中熱利用ヒートポンプシステムに関する配慮事項	44
3.1 導入における条件	44
3.2 導入および利用における留意点	48
3.3 導入における工夫	75
第4章 地中熱利用による効果・影響とモニタリング方法	92
4.1 モニタリングの必要性	92
4.2 考えられる環境影響	95
4.3 モニタリング項目と方法	98
4.4 モニタリング機器の選定・配置等	115
4.5 モニタリングデータの確認・取り扱い方法	126

第 5 章 地中熱利用に関する新技術等の紹介.....	136
5.1 地中蓄熱に関する技術	136
5.2 分析・解析ツール	143
5.3 その他の新技術	147
おわりに.....	154
参考資料.....	155
1. 地中熱関連用語集.....	158
2. 地中熱利用ヒートポンプシステムの事例データ集	165
3. モニタリングデータによる地盤温度影響解析等	173
4. 地中熱利用による地下微生物への影響評価事例.....	177
5. 地中熱利用ヒートポンプシステムにおけるパッケージ化の推進.....	184
6. 地下水に関する規制.....	197
7. 水質に関する規制.....	201
8. その他関連法規.....	201
9. 関連するガイドライン等	202
10. 検討委員会メンバー	204

序 ～本ガイドラインの適用範囲と構成～

(1) 適用範囲

本ガイドラインは、地中熱利用に関する方式のうち、主に地中熱利用ヒートポンプシステムを用いた手法を対象に解説しています。

(2) ガイドラインの構成

第1章. 地中熱利用ヒートポンプの概要

地中熱利用の種類、地中熱利用ヒートポンプの仕組み、地中熱利用の方式別・都道府県別・施設別の普及状況等について概要を紹介しています。

第2章. 地中熱利用ヒートポンプシステムによる省エネルギー効果等

従来の冷暖房や給湯などの方式と比べた場合の省エネルギー効果の試算、CO₂ 排出量削減効果の試算、省コスト効果の試算、ヒートアイランド現象の緩和効果の試算について、目安として紹介しています。また、新たに ZEB・ZEH の導入事例を追加しています。

第3章. 地中熱利用ヒートポンプシステムに関する配慮事項

地中熱利用ヒートポンプシステムを導入する際の条件、留意点、工夫などを充実させ紹介するとともに、前回ガイドライン第5章の一部(工夫、情報、制度等)をこちらに移動しています。

第4章. 地中熱利用による効果・影響とモニタリング方法

モニタリングの必要性、考えられる環境影響を紹介するとともに、モニタリング項目と方法、モニタリング機器の選定・配置等の事例を掲載しています。また前回ガイドライン参考資料の一部(稼働事例、モニタリングデータの確認方法)をこちらに移動しています。

第5章. 地中熱利用に関する新技術等の紹介

地中熱利用の導入を検討する際に参考となる技術情報を紹介するとともに、新たに地中蓄熱の追記、分析・解析ツール等の充実を行っています。

参考資料

地中熱関連用語集、補助事業の主な成果、地下微生物への影響評価事例、地下水・水質に関する規制、関連するガイドライン名等の充実を行い、新たにパッケージ化の推進を追加しています。

第1章 地中熱利用ヒートポンプの概要

1.1 地中熱利用の種類

(1) 地中熱の特徴

地中の温度は外気温に比べると年間を通して変化が小さいため、夏は冷熱源、冬は温熱源として利用できます(図 1-1)。地中熱利用ヒートポンプはこのような地中を熱源として利用するため、空気を熱源とするよりも効率的にエネルギーを利用できます。また空気を熱源とする場合とは異なり、外気に排熱することがないので、ヒートアイランド現象の緩和にも貢献できます。

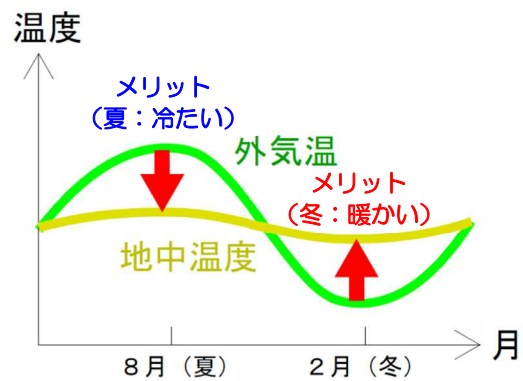


図 1-1 外気温と地中温度の季節変化

(2) 地中熱利用の種類

地中熱利用とは、地中を熱源として空調・給湯・融雪等に利用することです。地中熱利用にはさまざまな種類があり(図 1-2)、ヒートポンプの熱源として利用する方式の他に、地中に埋設した熱交換パイプに外気を導入させて通気する空気循環、地中から伝わる熱を利用する熱伝導、地中と放熱管との間で水や不凍液等を循環させる水循環、冷媒の蒸発と凝縮を繰り返すことで地中熱を路面へ運ぶヒートパイプという方式があります。

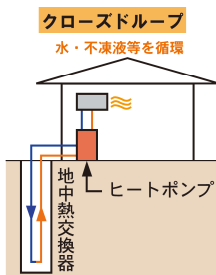
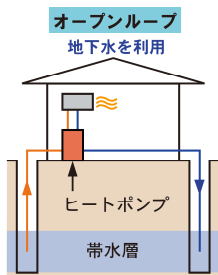
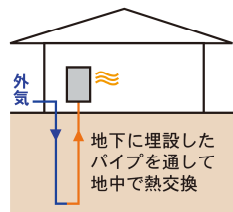
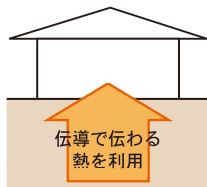
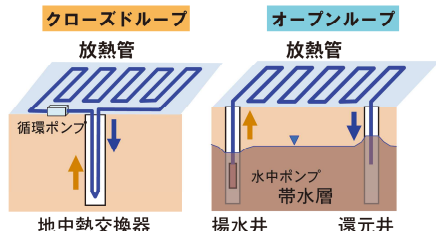
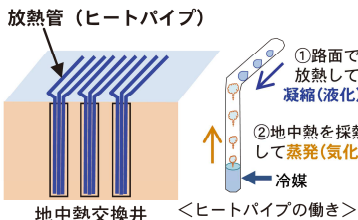
ヒートポンプシステム		空気循環
 クローズドループ 水・不凍液等を循環	 オープンループ 地下水を利用	 外気 地下に埋設したパイプを通して地中で熱交換
ヒートポンプの熱源として空気熱ではなく地中熱を利用する方法。 クローズドループ方式は深度100m程度までの地中熱交換器とヒートポンプの間で水・不凍液等を循環させて熱を利用するもので、地下水を揚水しないため地盤沈下の恐れがない。 オープンループ方式は井戸から揚水した地下水をヒートポンプに通水させて熱を利用するもので、帯水層に蓄熱する方式もあり、地下水・地盤環境への影響がない場合に適用できる。		地中に埋設した熱交換パイプ、あるいはダクトに外気を導入・通気し、熱交換された空気を室内に取り込む。
◇住宅・ビル等の冷暖房・給湯 ◇プール・温浴施設の加温 ◇農業施設の空調 ◇路面の融雪・凍結防止		◇住宅・ビル等の保温・換気
熱伝導	水循環	ヒートパイプ
 伝導で伝わる熱を利用	 クローズドループ 放熱管 オープンループ 放熱管 循環ポンプ 地中熱交換器 揚水井 水中ポンプ 帯水層 還元井	 放熱管 (ヒートパイプ) ①路面で放熱して凝縮(液化) ②地中熱を採熱して蒸発(気化) 冷媒 地中熱交換井 ＜ヒートパイプの働き＞
土間床を介した利用方法で、地中から伝わる熱によって、住宅内の保温を行う。 一般に、エアコンを併用して空調を行うことが多い。	クローズドループ方式は地中熱交換器と放熱管の間で不凍液等を循環させて熱を利用するもので、地下水を揚水しないため地盤沈下の恐れがない オープンループ方式は井戸から揚水した地下水を放熱管に通水させて熱を利用するもので、地下水・地盤環境への影響がない場合に適用できる。	路面に埋設した放熱管（ヒートパイプ）を深さ15～20mの地中熱交換井に複数本設置し、放熱管内の冷媒が自然に蒸発と凝縮を繰り返すことで地中熱が路面へ運ばれ融雪・凍結防止を行う。
◇住宅の保温	◇路面の融雪・凍結防止 ◇住宅・ビル等の冷房	◇路面の融雪・凍結防止

図 1-2 地中熱利用の種類

1.2 地中熱利用ヒートポンプの仕組み

(1) ヒートポンプの「熱を移動する」仕組み

ヒートポンプは低い温度の物体(空気、水、地中等)から熱を奪い、高い温度の物体(空気、水、地中等)に伝える装置です(図 1-3)。家庭のエアコンや冷蔵庫は一般的にこの技術を用いて空気との間で熱を交換しています。地中熱利用ヒートポンプは水や不凍液等の熱媒体を循環させて地中との間で熱交換を行う点異なりますが、技術的には同じものです。図示した以外に、蒸発器または凝縮器の部分を地中に配管して直接熱交換を行う直膨式のヒートポンプもあります。

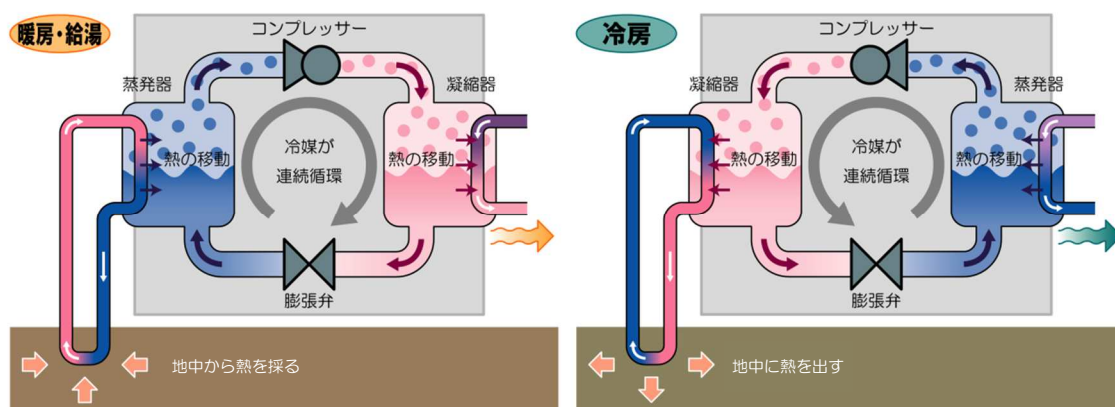


図 1-3 ヒートポンプで地中と熱を交換する仕組み

(2) 地中熱利用ヒートポンプシステムの種類

地中熱利用ヒートポンプシステムには、クローズドループ方式とオープンループ方式があります(図 1-4)。クローズドループ方式は、地中に埋設した熱交換器(地中熱交換器)に水や不凍液などを循環させて、地上のヒートポンプとの間で熱交換します。これは地中熱交換器の埋設形態の違いによって垂直埋設型と水平埋設型に大別されます。さらに、垂直埋設型は一般的に深度数十～百メートル程度の掘削孔に U チューブ等を挿入して熱交換器とするボアホール方式と、建造物の杭を熱交換器としても利用する杭方式に分類されます。水平埋設型は深度数メートルに熱交換器を設置し、不凍液等を循環させるチューブの設置形態の違いによってらせん状、蛇行、コイル状、シートに分類されます(表 1-1)。

オープンループ方式は、地下水を汲み上げて地上のヒートポンプで熱交換を行うものであり、熱交換後の地下水を地下に戻す還元方式と、下水などへ放流する放流方式に大別されます。なお、オープンループ方式の詳細については、下記をご参照下さい。

特定非営利活動法人地中熱利用促進協会、一般社団法人全国さく井協会 (2017)

「地中熱ヒートポンプシステムオープンループ導入ガイドライン 第 1 版」

<http://www.geohpaj.org/project/document/document02>

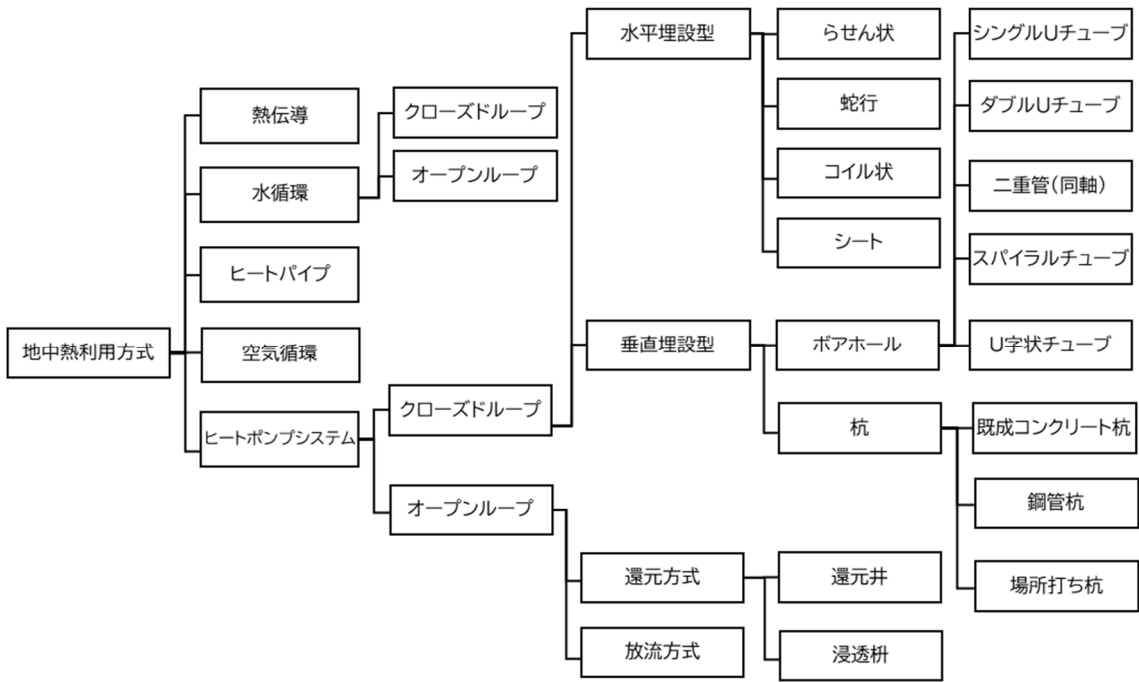


図 1-4 地中熱利用方式の分類¹

表 1-1 地中熱交換器の種類²

種類	垂直埋設型		水平埋設型			
	ボアホール方式	杭方式	らせん状	蛇行	コイル状	シート
水平断面図 (例)	【例:シングルUチューブ】 	【例:鋼管杭】 				
垂直断面図 (例)						

¹特定非営利活動法人地中熱利用促進協会,「地中熱ヒートポンプシステム 施工管理マニュアル(改訂版)」,2022 をもとに作成
²国土交通省国土技術政策総合研究所・国立研究開発法人建築研究所「平成 28 年省エネルギー基準(非住宅建築物)地中熱ヒートポンプシステムの熱源水温度計算方法」をもとに作成

(3) システムの構成

熱媒体(水、不凍液など)を介して地中との間で採放熱を行うシステムを一次側システム(地中熱交換器など)、熱源機器(地中熱利用ヒートポンプ)で生成した冷温熱を用いて建物等の空気調和等を行うシステムを二次側システム(室内機など)として区分します。一次側システム、熱源機器、二次側システムを総称して地中熱利用ヒートポンプシステムと言います(図 1-5)。

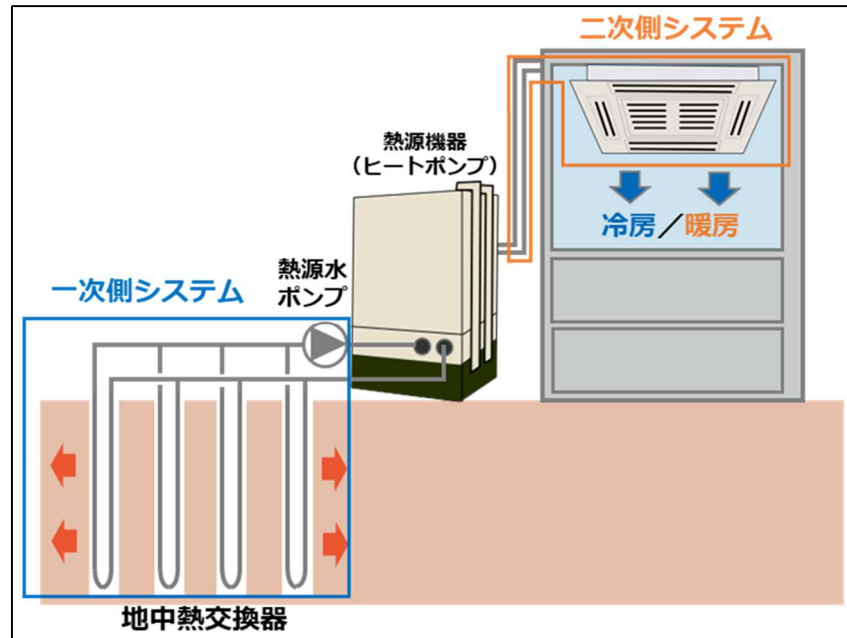


図 1-5 地中熱利用ヒートポンプシステムにおける
一次側システム・熱源機器・二次側システムの一例
(クローズドループ方式、水-空気ヒートポンプの場合)

一次側システムは地中とヒートポンプの間で熱媒体である水や不凍液を循環させて地中との採放熱を行います。また、二次側システムは空調対象のヒートポンプと室内の間で熱媒体に水や空気等を用いて空調を行います。このうち、ヒートポンプと室内の空気の間で水を介して熱交換を行うものは水-水ヒートポンプ、ヒートポンプの冷媒と室内の空気の間で直接熱交換を行うものは水-空気ヒートポンプと呼びます(図 1-6)。(空調システムについては 3.2(2) 1)設備規模の設定もご参照ください)。

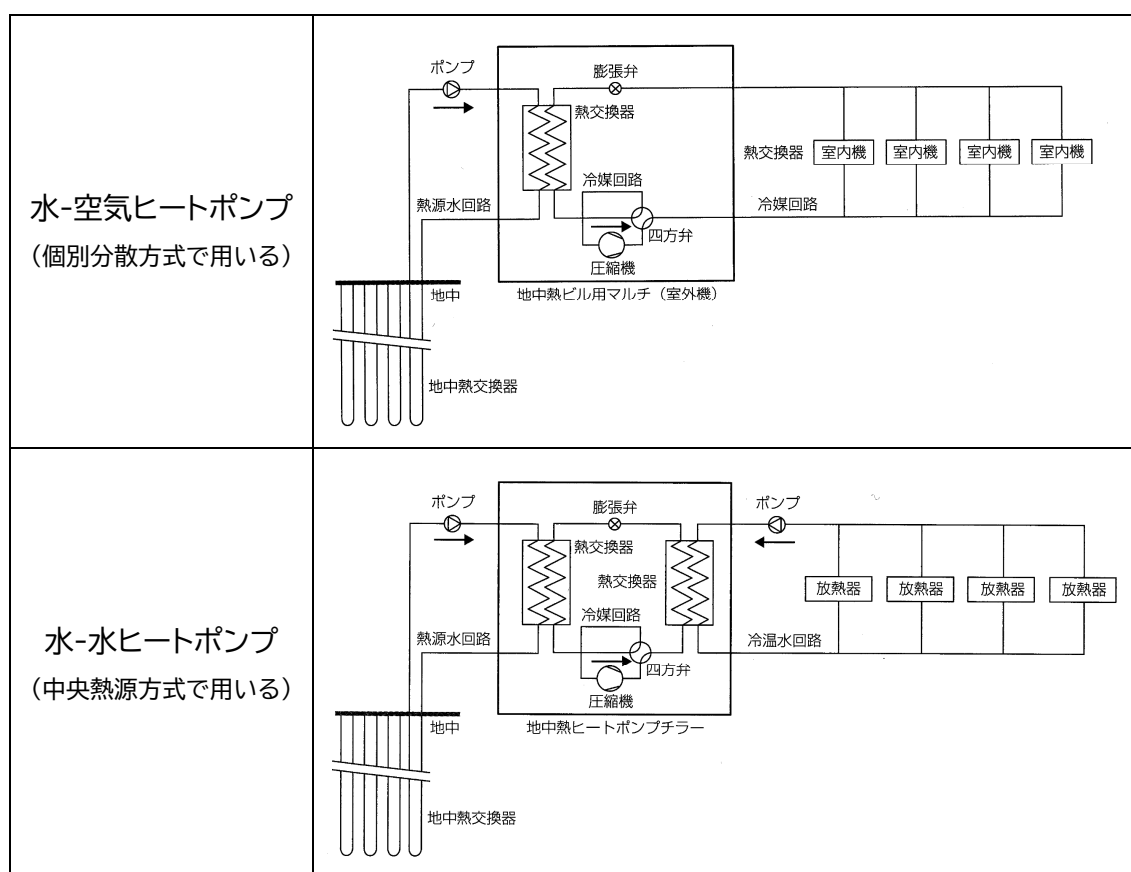


図 1-6 一次側システムと二次側システムの構成例の模式図³

³特定非営利活動法人地中熱利用促進協会,「地中熱ヒートポンプシステム 施工管理マニュアル(改訂版)」, 2022

1.3 地中熱の普及状況

2021年度末時点における地中熱の利用方法別累計設置件数では、ヒートポンプを利用した件数が約37%を占めており、続いて、空気循環が約26%、水循環が約25%となっています。ヒートポンプの内訳では、クローズドループが約83%を占めており、オープンループは約16%となっています(図 1-7)。

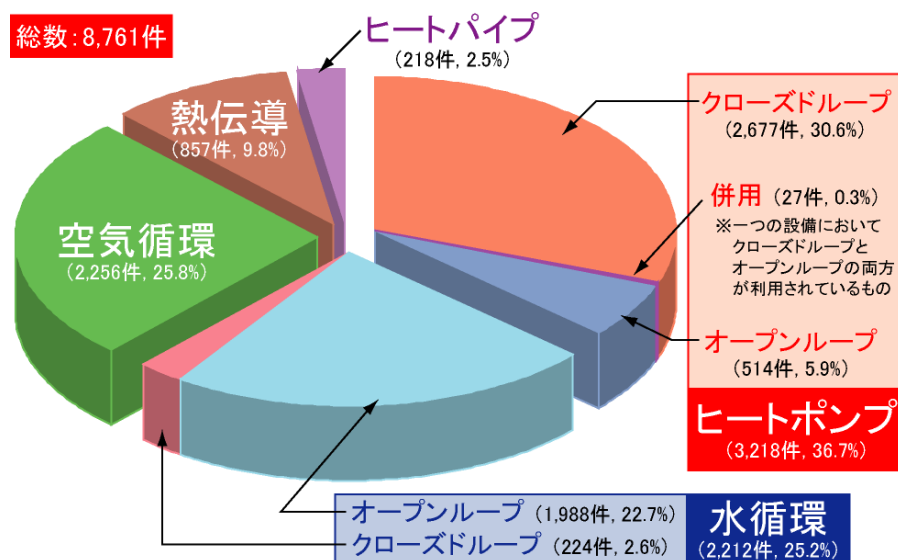


図 1-7 地中熱利用の利用方法別累計設置件数(2021年度末時点)⁴

地中熱利用ヒートポンプは、国内では主に戸建住宅・事務所・庁舎等で冷暖房や給湯、道路融雪等に利用されている事例が多く、その他には農業施設(温室など)、店舗、学校、道路・駐車場等、さまざまな施設にも幅広く利用されています(図 1-8)。近年の国内年間設置件数は、2013年のピーク時から減少したものの年間約100件程度で推移しています(図 1-9)。

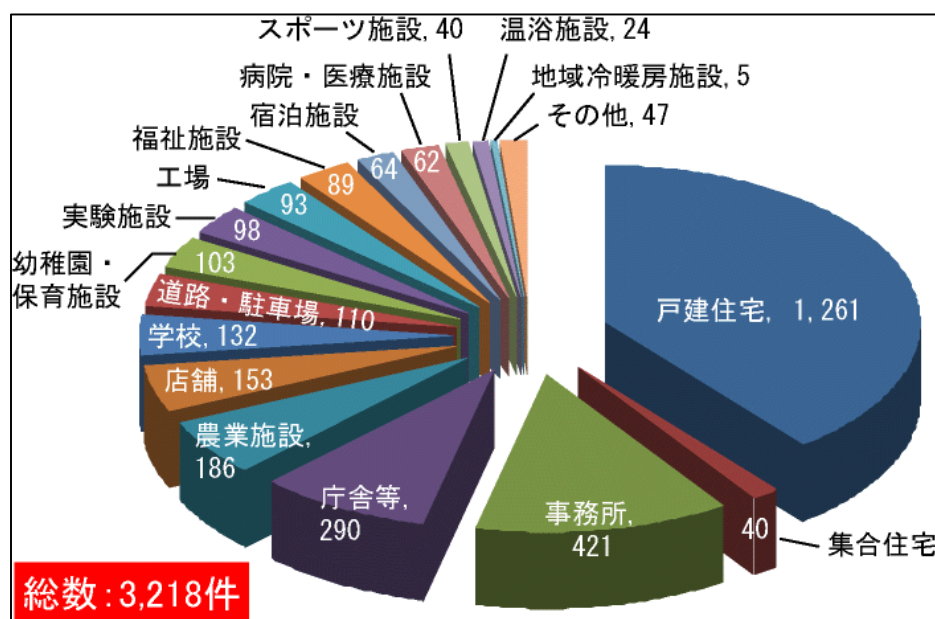


図 1-8 地中熱利用ヒートポンプを用いた施設別累計設置件数(2021年度末時点)⁴

⁴環境省、令和4年度 地中熱利用状況調査委託業務 における調査データより

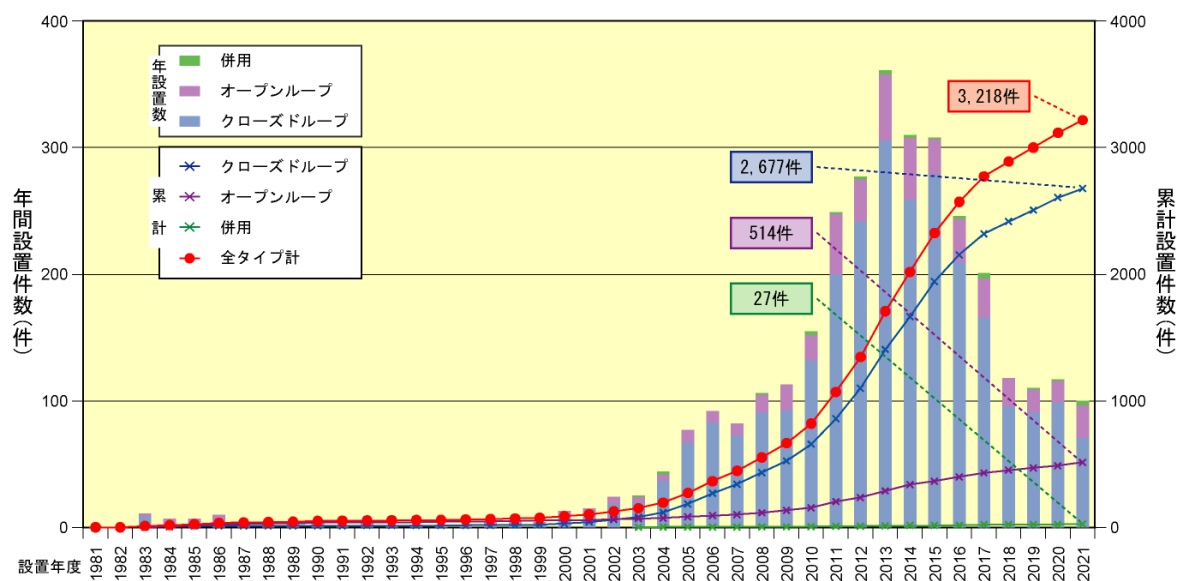


図 1-9 地中熱利用ヒートポンプの年間設置件数(2021年度末時点)⁴

海外では日本に比べて地中熱利用ヒートポンプの導入が進んでいます(図 1-10)。近年、めざましく増えているのは中国で、アメリカと並んで他の国々より多くの地中熱が利用されています。日本と同程度の国面積であるドイツやフィンランドでも日本の約10倍以上の地中熱が利用されており、国面積の小さいスイスやオランダでも日本の約7倍以上の利用がされています。日本でもさらなる地中熱利用に向けた普及を進める必要があるといえます。

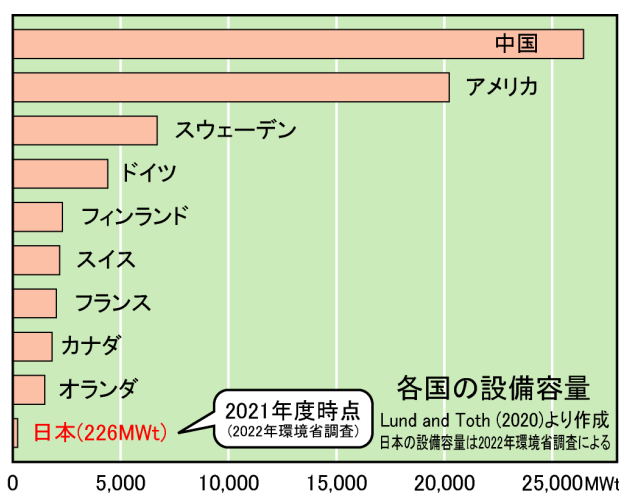


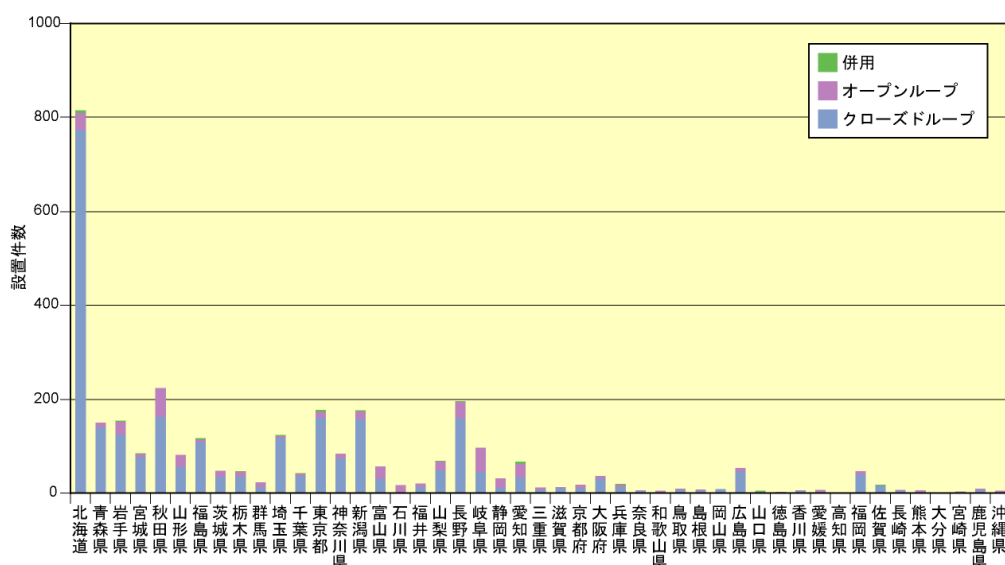
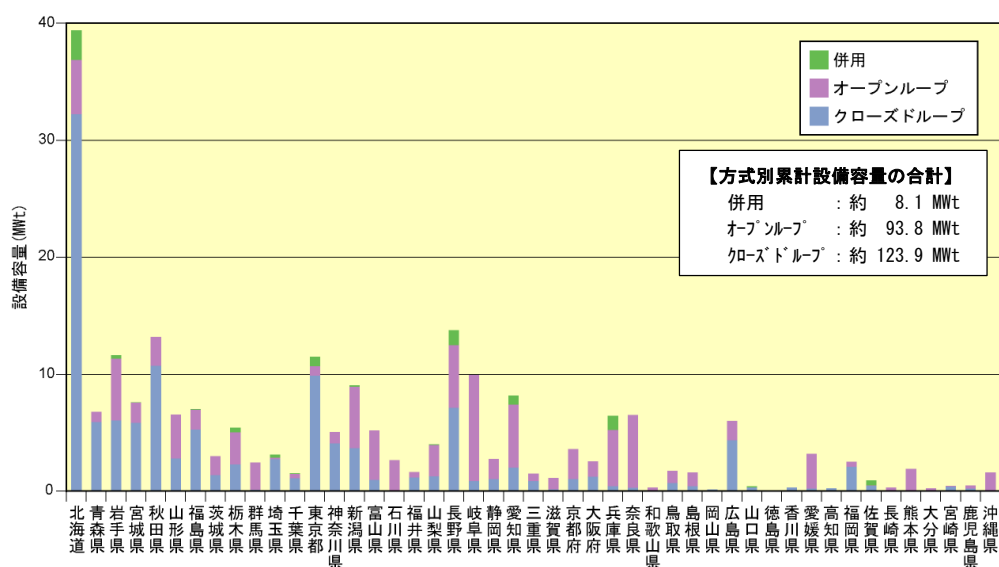
図 1-10 地中熱利用ヒートポンプの国別累計設備容量(海外との比較)⁵

⁵特定非営利活動法人 地中熱利用促進協会ホームページ(<http://www.geohpaj.org/introduction/index1/disadv>)

(1) 都道府県別

都道府県別の地中熱利用ヒートポンプシステムの累計設置件数および累計設備容量は、以下に示すとおりです(図 1-11、図 1-12)。累計設置件数と設備容量ともに、依然として北海道が他の都府県より大きくなっています。北海道を除くと、累計設置件数は中部地方を含む東日本で多く、西日本で少ない傾向にあります。累計設備容量は累積設置件数とほぼ同様な傾向を示すものの、西日本の一部の府県では累計設置件数は少ない割に累計設備容量が多く、1件当たりの設備容量が大きいことが分かります。

また全国的には累計設置件数ではクローズドループが多い傾向ですが、累計設備容量ではオープンループと同程度であることから、オープンループの1件当たりの設備容量が大きいことが分かります。

図 1-11 都道府県別の累計設置件数(2021年度末時点)⁴図 1-12 都道府県別の累計設備容量(2021年度末時点)⁴

※MWt(メガワットサーマル)は熱出力の単位

(2) 施設別

施設別の累計設置件数および累計設備容量は、以下に示すとおりであり、累計設置件数は戸建住宅がもっとも多く、2番目に多い事務所の約3倍となっています(図1-13)。一方で、累計設備容量で見ると庁舎等がもっとも多く、2番目に事務所、3番目に病院・医療施設となっており、戸建住宅は8番目となっています(図1-14)。

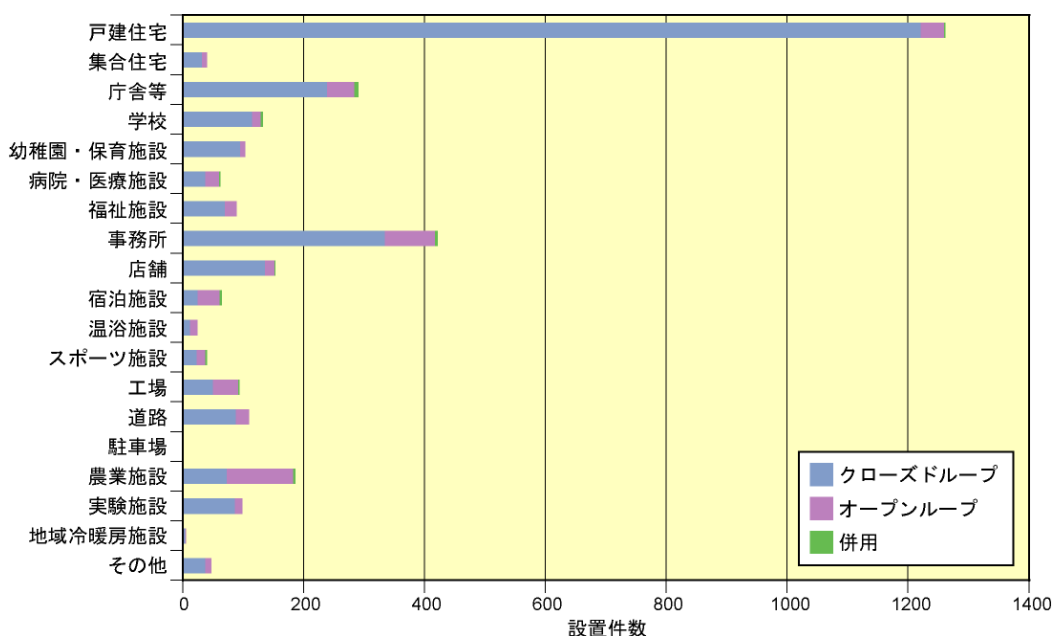


図 1-13 施設別の累計設置件数(2021年度末時点) 4

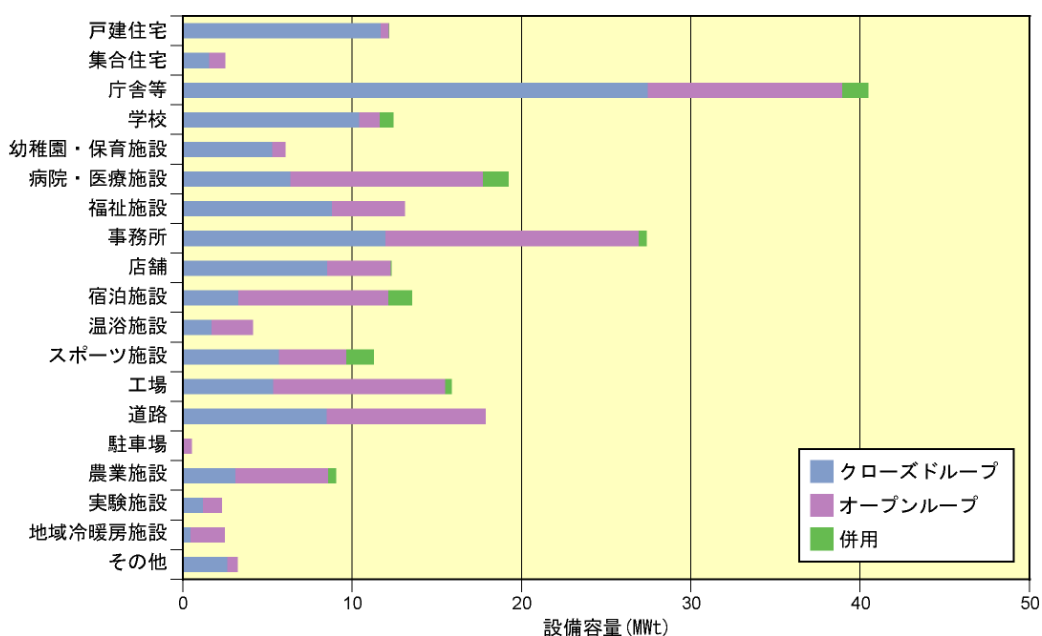


図 1-14 施設別の累計設備容量(2021年度末時点) 4

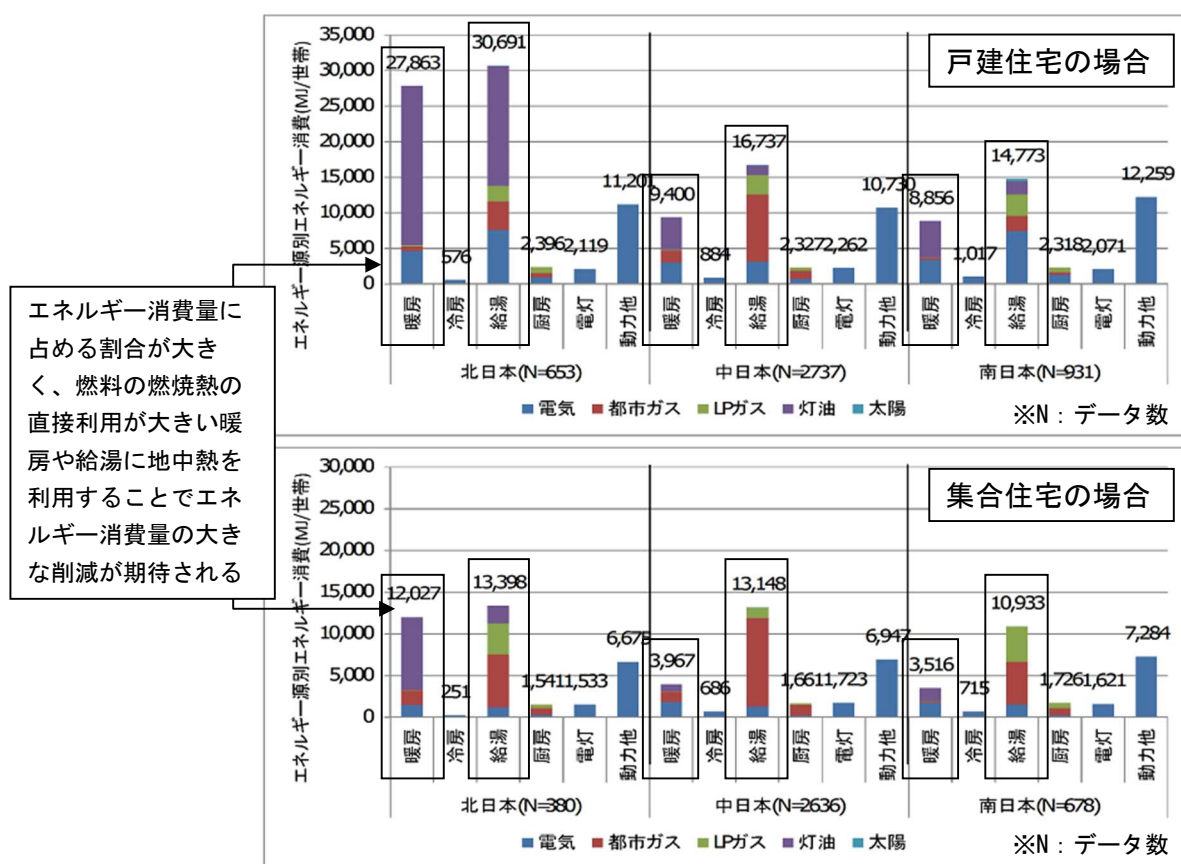
※MWt(メガワットサーマル)は熱出力の単位

第2章 地中熱利用ヒートポンプシステムによる省エネルギー効果等

2.1 省エネルギー効果の試算

地中熱利用ヒートポンプシステムを導入すると、冷暖房などの熱を交換するシステムが高効率化し、省エネルギー効果が得られます。このことから、地中熱利用ヒートポンプシステムでは空気を熱源とするヒートポンプよりエネルギー消費量の削減が期待できます。

図 2-1 に示すように、エネルギー消費量に占める割合が大きく、かつ灯油や都市ガス等の燃焼熱を直接熱源として使用することが多い暖房や給湯について、小さな電力量で済む地中熱利用ヒートポンプシステムを利用することで、エネルギー消費量の大幅な削減が期待できます。



北日本：北海道・東北・北陸、中日本：関東・東海・関西、南日本：中国・四国・九州・沖縄

図 2-1 地域別・用途別・エネルギー源別のエネルギー消費原単位⁶

⁶資源エネルギー庁，平成 24 年度エネルギー消費状況調査(民生部門エネルギー消費実態調査)報告書，2013.3.

地中熱利用ヒートポンプシステムと空気熱源ヒートポンプは、地中と空気という熱源の違いの他に、運転時の室温や気温、ヒートポンプ自体の性能、定格出力などの様々な要素が関係し、エネルギー消費量の削減量や削減率を一元的に比較するのが困難です。

冷房に関して両者のエネルギー消費量を実験的に比較した例では、一般的に使用される空気熱源ヒートポンプと比較して、30～70%程度のエネルギー消費量を削減できるという報告があります^{7,8}。

また、地中熱利用ヒートポンプは空気熱源ヒートポンプに比較して消費電力を1/3程度削減可能と仮定することにより、東京電力管内のピーク時間帯において空調に係わる消費電力1,000万 kW のうち330万 kW を節約できると試算した例もあります⁹。加えて、外気に排熱しないためヒートアイランド現象の緩和効果も期待されます⁹。これにより仮に都内のオフィスビル街区の気温を1℃下げることができれば170万 kW の節約ができ、両者の効果によって夏のピーク負荷を500万 kW 低減させることが可能と試算されています⁹。

地中熱利用ヒートポンプシステム(クローズドループ及びオープンループを含む)のこれまでの導入事例¹⁰のうち、平成18～22年度の8事例ではエネルギー消費量¹¹削減率が約20～30%の実績が多いのに対して、平成23～令和2年度の15事例では約20～60%と削減率の高い実績も増え、最大で71%の実績もあります(図 2-2)。近年では以前と比較してより高いエネルギー消費量削減率が得られる事例も見られるようになっていきます。地中熱利用技術は向上中であり、今後も実績を積み重ねることによってエネルギー消費量削減率が高い事例が増えていくことが期待されます。図 2-2で紹介した事例の概要は、参考資料2を参照してください。

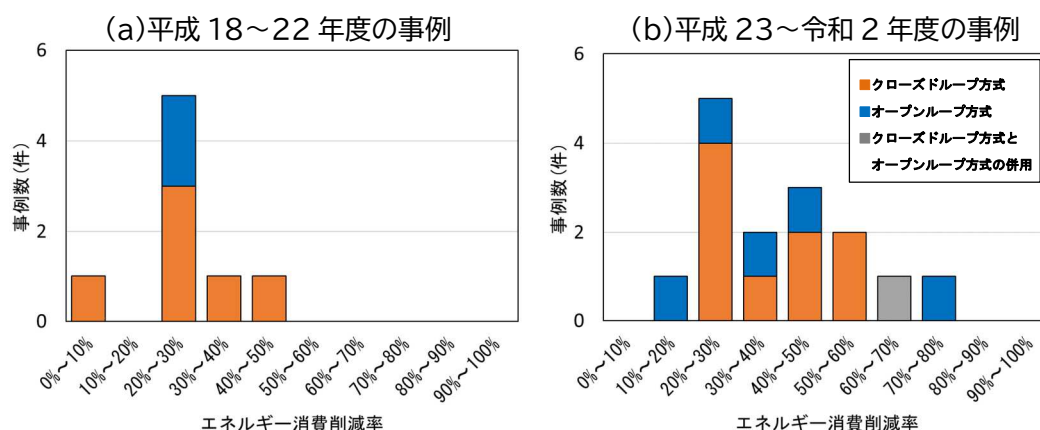


図 2-2 エネルギー消費量削減率の推移

⁷ 特定非営利活動法人地中熱利用促進協会、福島県猪苗代町庁舎での導入事例 (http://www.geohpaj.org/wp/wp-content/uploads/achievement_105_202202.pdf)

⁸ 笹田ら、都心での地中熱利用 -小規模オフィスビルへの地中熱ヒートポンプシステムの導入-, 応用地質, 第 51 巻, 第 6 号, p.265-272, 2011.

⁹ 日本地熱学会地中熱利用技術専門部会, 電力ピーク負荷低減のための地中熱利用ヒートポンプの導入促進の提言, 2011.4.6, 日本地熱学会 (<https://grsj.gr.jp/activity/proposal/proposal110405b/>)

¹⁰ 環境省の補助金事業 (平成18～22年度に実施の「クールシティ推進事業(地下水等活用型・地中熱利用型)」, 平成28～令和2年度に実施の「再生可能エネルギー電気・熱自立的普及促進事業」の一部)、環境技術実証 (ETV) 事業の一部、地中熱利用促進協会が公表している事例 (<http://www.geohpaj.org/introduction/index1/achievement/>) を対象としている。

¹¹ 本ガイドラインでは、一次エネルギーの消費量をエネルギー消費量と表している。

エネルギー消費量削減率には様々な要因が関係しますが、今回の紹介事例でエネルギー消費量削減率が高い事例では、以下に示す要因が考えられます。

表 2-1 エネルギー消費量削減率が比較的高い事例とその要因

事業名や地域等	方式	エネルギー消費量削減率 (年度)	要因
岐阜市明德公民館での事例	オープン ループ	71% (平成 29～30 年度)	扇状地地域で地下水温の年変化が特異である(地下水温が夏季に低下し冬季に上昇する)地点に設置することに加えて、地下水逆洗運転システム、地下熱交換ユニットを用いることにより、きわめて高い削減率を実現した。
アリガプランニング 本社(札幌市)での事例	併用	64% (令和2年度)	ZEB の中に取り入れ、建物の断熱性能を高めたことでエネルギーの消費を抑えたことや、フリークーリング運転を行ったことで高い削減率が得られた。

更に利用形態別にみたところ、例えば家庭でのエネルギー消費量は、1世帯当たりで約39 GJとなっており、このうち、給湯(29.5%)、暖房(24.3%)、冷房(2.1%)が55.9%(約22 GJ)を占めています(図2-3)。これらの空気熱源ヒートポンプによる冷暖房やガスボイラーによる給湯を、地中熱利用ヒートポンプに切り替えて冷暖房や給湯を行うことにより、冷暖房や給湯のエネルギー消費量を10~30%(約2~7 GJ)程度、全体では6~17%程度削減できると期待できます。

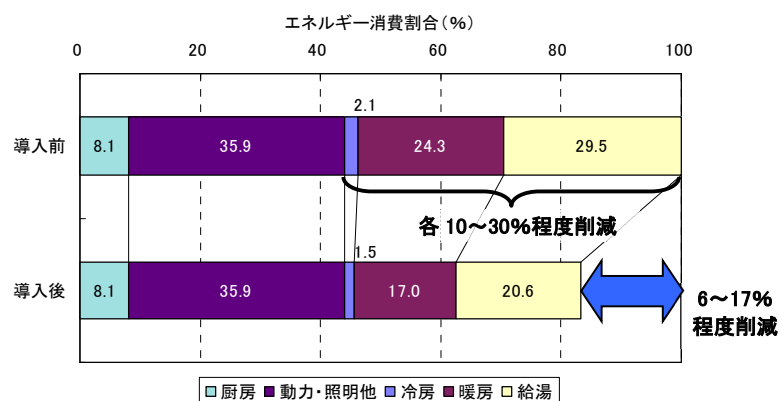


図2-3 家庭における地中熱利用ヒートポンプによるエネルギー消費量削減率の試算例¹²

一方、オフィスビルでのエネルギー消費量は、冷温水機などの熱源(31.1%)、熱搬送(12%)、給湯(0.8%)でビル全体の43.9%を占めています¹³。これらの空気熱源ヒートポンプによる冷暖房やガスボイラーによる給湯を地中熱利用ヒートポンプに切り替えて冷暖房や給湯を行うことにより、エネルギー消費量を4~13%程度削減できると期待できます(図2-4)。

また業務用のエネルギー消費量を、暖房、冷房、給湯、厨房、動力・照明の5用途別に延床面積当たりのエネルギー消費原単位でみた場合、冷暖房や給湯は空調機器の省エネルギー化やビルの断熱対策が進んだことなどから減少傾向ですが、それでも全体の42%を占めています(図2-5)。エネルギー消費原単位の合計としては横ばい傾向にあるため、さらなる省エネルギー化には動力・照明の省エネルギー化はもちろん必要ですが、さらなる空調機器の省エネルギー化や建物の高断熱化なども必要です。冷暖房や給湯を従来方式から地中熱利用ヒートポンプに切り替えれば、冷暖房や給湯のエネルギー消費量を導入前の10~30%程度削減して、業務用のエネルギー消費原単位全体に占める割合を29~38%程度に削減できると期待できます。

¹²財団法人 日本エネルギー経済研究所, エネルギー・経済統計要覧、および 資源エネルギー庁, 総合エネルギー統計 をもとに、世帯当たりのエネルギー消費量(2008年度)に対する地中熱利用ヒートポンプによるエネルギー消費量削減率(対象:冷房、暖房、給湯)を従来比30%削減として作成

¹³財団法人 省エネルギーセンター, オフィスビルの省エネルギー, 2009,より, レンタブル比(一般オフィス面積/当該オフィスビルの延床面積)60%以上(熱源有)のテナントビルの場合のエネルギー消費の比率

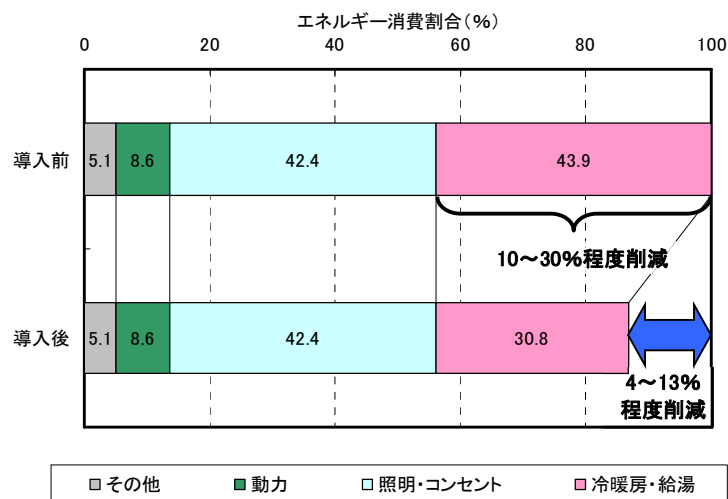


図 2-4 オフィスビルにおける地中熱利用ヒートポンプによる
エネルギー消費量削減率の試算例¹⁴

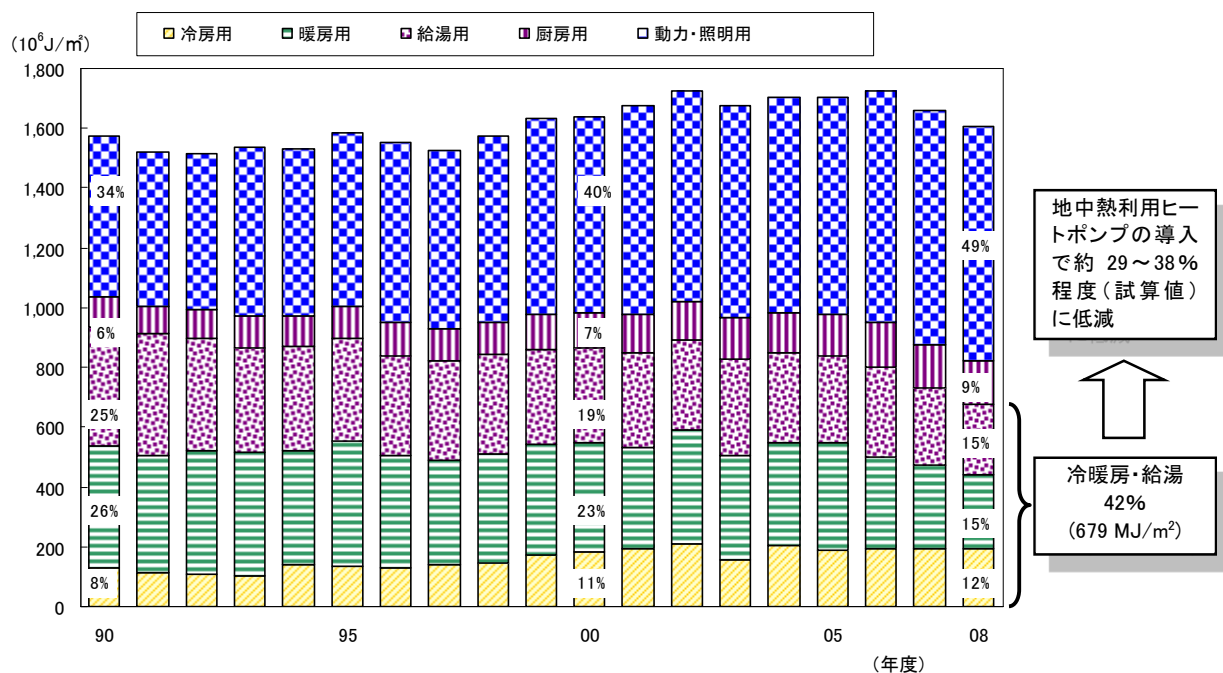


図 2-5 業務用エネルギー消費原単位の推移¹⁵

環境省では、エネルギー起源の CO₂ 排出量の削減のために、平成 25 年度から地中熱利用ヒートポンプ導入等に対して補助事業¹⁶を実施しています。これらの事業で多くの事例が得られたクローズドループ方式についてのモニタリングデータを活用し、省エネルギー効果を紹介します。

¹⁴財団法人 省エネルギーセンター，オフィスビルの省エネルギー，2009. より，オフィスビルの用途別エネルギー消費割合に、地中熱ヒートポンプの省エネ効果(対象:熱源、熱搬送、給湯)を従来比 30%削減として作成

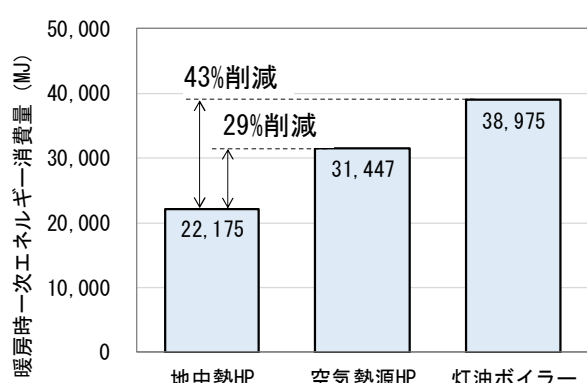
¹⁵経済産業省，エネルギー白書 2010

¹⁶平成 25 年度先進的地中熱利用ヒートポンプシステム導入促進事業、H26 地域面的地中熱促進事業、H26 地中熱 HP システムにおけるモニタリング機器等設置事業、H27 地域面的地中熱促進事業、H27 地中熱 HP システムにおけるモニタリング機器等設置事業、H28 地域面的地中熱促進事業、H28 地中熱 HP システムにおけるモニタリング機器等設置事業

モニタリングデータを分析して求めた代表値をもとに他熱源システムと比較しました。モニタリングデータは、そのほとんどが空調利用で、特に北海道や東北地方を中心に設置された設備から取得されています。本書では戸建住宅規模である小規模施設(ヒートポンプの定格能力が 20 kW 未満)と、中・大規模施設(中規模施設:ヒートポンプ定格能力 20 kW 以上 150 kW 未満、大規模施設:ヒートポンプ定格能力 150 kW 以上)に分けて示しています。

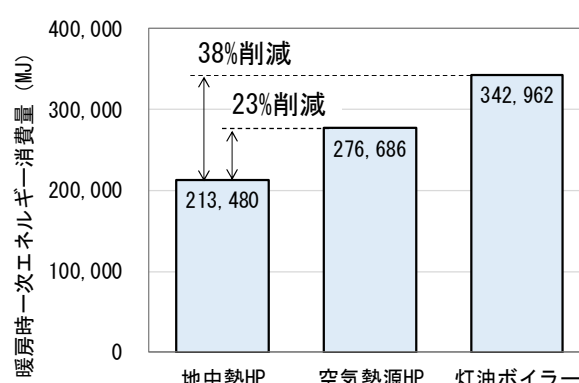
地中熱利用ヒートポンプは、空気熱源ヒートポンプや灯油ボイラーを用いた場合と比較し 23～43%のエネルギー消費量削減率があることが確認できました(図 2-6～図 2-9)。特に、化石燃料を利用する灯油ボイラーに比べると大幅な省エネルギー効果が見られます。

このように地中熱利用ヒートポンプを導入することは、消費するエネルギー(電気や灯油)量を削減できるというメリットがあり、省エネルギー効果に優れることがわかります。



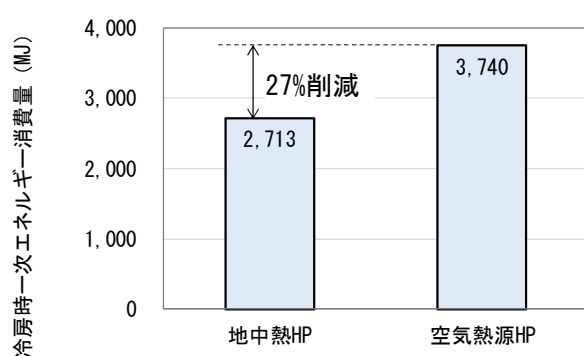
- ・電力の一次エネルギーへの換算係数: 9.76 (MJ/kWh)
- ・地中熱は消費電力の代表値より算出
- ・空気熱源ヒートポンプ (COP=2.9) および灯油ボイラー (燃焼効率=0.86) での一次エネルギー消費量は、地中熱利用時の生成熱量 (代表値) を生成した場合に要する電力量および灯油量から算出

図 2-6 暖房時の省エネルギー効果
(ヒートポンプ定格能力 20 kW 未満)



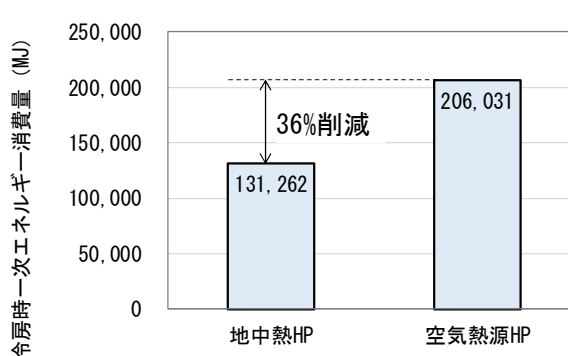
- ・電力の一次エネルギーへの換算係数: 9.76 (MJ/kWh)
- ・地中熱は消費電力の代表値より算出
- ・空気熱源ヒートポンプ (COP=2.9) および灯油ボイラー (燃焼効率=0.86) での一次エネルギー消費量は、地中熱利用時の生成熱量 (代表値) を生成した場合に要する電力量および灯油量から算出

図 2-7 暖房時の省エネルギー効果
(ヒートポンプ定格能力 20 kW 以上)



- ・電力の一次エネルギーへの換算係数: 9.76 (MJ/kWh)
- ・地中熱は消費電力の代表値より算出
- ・空気熱源ヒートポンプ (COP=3.7) での一次エネルギー消費量は、地中熱利用時の生成熱量 (代表値) を生成した場合に要する電力量から算出

図 2-8 冷房時の省エネルギー効果
(ヒートポンプ定格能力 20 kW 未満)



- ・電力の一次エネルギーへの換算係数: 9.76 (MJ/kWh)
- ・地中熱は消費電力の代表値より算出
- ・空気熱源ヒートポンプ (COP=3.7) での一次エネルギー消費量は、地中熱利用時の生成熱量 (代表値) を生成した場合に要する電力量から算出

図 2-9 冷房時の省エネルギー効果
(ヒートポンプ定格能力 20 kW 以上)

2.2 CO₂ 排出量削減効果の試算

地中熱利用ヒートポンプシステムは高効率で消費電力量が小さいことから、温室効果ガスである CO₂ の排出量削減にも寄与します。

また再生可能エネルギー等の利活用による CO₂ 排出量の削減については、使用時のみに着目するのではなく、ライフサイクル全体を考慮した排出量及び削減量を評価することも重要視されてきています。

(1) 効果的な CO₂ 排出量削減

一般的に、CO₂ 排出量は経済統計などで用いられる「活動量(ガソリン・ガス・電気など)」に「排出係数」をかけて算出します。

$$\text{「CO}_2\text{ 排出量}=\text{活動量(生産量・使用量・焼却量など)}\times\text{CO}_2\text{ 排出係数」}$$

なお CO₂ 排出係数とは、様々な事業活動での単位生産量や消費量等当たりの CO₂ 排出量を表す数値です。地中熱利用ヒートポンプシステムの運転に伴う CO₂ 排出量を求める場合には活動量は消費電力量であり、CO₂ 排出係数は電力会社が電力を作り出す際に単位電力量当たりの CO₂ 排出量を指し示す数値となります。

CO₂ 排出量削減のためには、新たな設備の導入や設備更新等の際に極力 CO₂ 排出量が少ない設備にすることが重要です。そして、運転状況をモニタリングすることにより排出量を定量化し、排出量削減の状況が見える化することによって、効率のよい運転ができ、さらなる排出量削減が可能となります。

以下、地中熱利用ヒートポンプシステムの導入について、具体的に考えてみましょう。

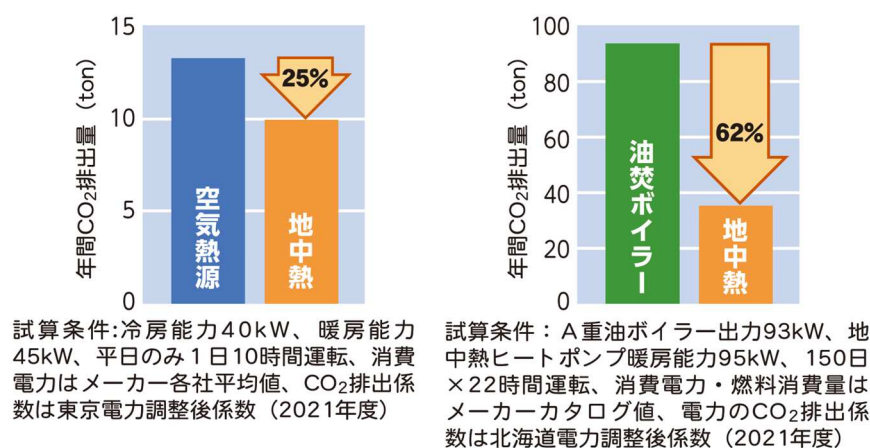
・CO₂ 排出量削減のための効果的なシステム導入

建築物の新築または改築時の企画などの早い段階で、地中熱利用ヒートポンプシステムの導入について検討することが必要であり、設備設計事業者が所有者に地中熱のメリットを伝え、企画および提案することが重要です。

また、企画および提案時は CO₂ 排出量削減効果の考え方を所有者へ伝え、定量的に捉えて削減効果の高い設備導入の検討を促すことが必要です。実際は比較対象となる設備機器の使用電力量(あるいはガス使用量や重油使用量など)と CO₂ 排出原単位から算出した CO₂ 排出量を同等規模の地中熱利用システムと比較して CO₂ 排出量削減効果を把握します。なお、CO₂ 排出原単位は検討時の電気事業者別に公表されている値を利用してください。

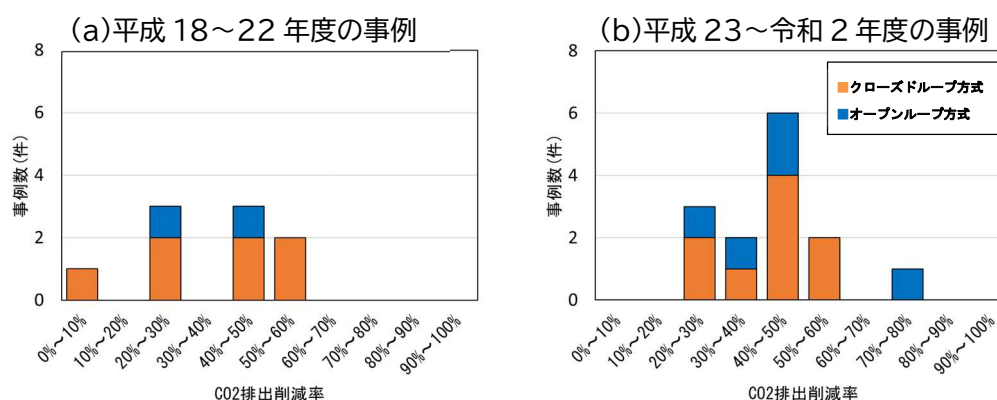
(2) 削減効果の例

地中熱利用ヒートポンプシステムの導入による CO₂ 排出量削減効果の例として、空気熱源ヒートポンプと比較した場合には CO₂ 排出量削減率 25%、油焚ボイラーと比較した場合には CO₂ 排出量削減率 62%という試算があります(図 2-10)。図 2-10 の例において CO₂ 排出量の削減に対して CO₂ オフセット・クレジットの価格を 3,000 円/t-CO₂¹⁷とした場合、空気熱源ヒートポンプに対する事例では約 1 万円/年、油焚ボイラーに対する事例では約 17 万円/年に相当します。

図 2-10 CO₂ 排出量削減効果の例

(出典:環境省「地中熱利用システム 2023 年版」)

また、これまでの導入事例¹⁸に基づく、20～50%程度の CO₂ 排出量削減効果が期待されるとの結果が得られています(図 2-11)。

図 2-11 CO₂ 排出量削減効果の目安

¹⁷国内における CO₂ オフセット・クレジットは相対取引であり、2022 年 4 月現在は概ね 3,000 円台で取引されており、上昇傾向にあります。

¹⁸事例の概要等は、参考資料 2 をご参照ください。

また、環境省において、先進的環境技術の評価試験を行う「環境技術実証事業¹⁹」の対象技術の CO₂ 排出量削減効果を試算した例では、灯油と比較して 37～58%、都市ガスと比較して 14～43%の CO₂ 排出量削減効果があるという結果になりました。

表 2-2 地中熱利用ヒートポンプシステムの CO₂ 排出量削減効果

環境技術実証事例			MJ 当たり CO ₂ 排出量 ²⁰ (kg-CO ₂ /MJ)			他の熱源と比較した CO ₂ 排出量削減率	
実証番号	施設名	システムエネルギー効率(室内機を含む)	地中熱利用 HP	灯油	都市ガス	灯油	都市ガス
052-0901	川崎市 南河原こども文化センター	3.10	0.047	0.085	0.062	45%	25%
052-1001	三菱マテリアル株式会社大宮新館	4.09	0.035			58%	43%
052-1002	株式会社秀建コンサルティング本社事務所	3.36	0.043			49%	31%
052-1003	学校法人森村学園	2.70	0.053			37%	14%

¹⁹環境省 環境技術実証ホームページ(<http://www.env.go.jp/policy/etv/index.html>)

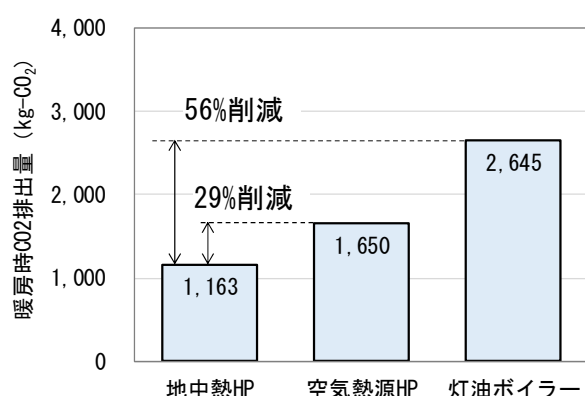
²⁰電気：電気事業者別の CO₂ 排出係数(2013 年度実績) (平成 26 年 12 月 5 日公表)

灯油および都市ガス：算定・報告・公表制度(平成 25 年 5 月)における算定方法・排出係数一覧より算出

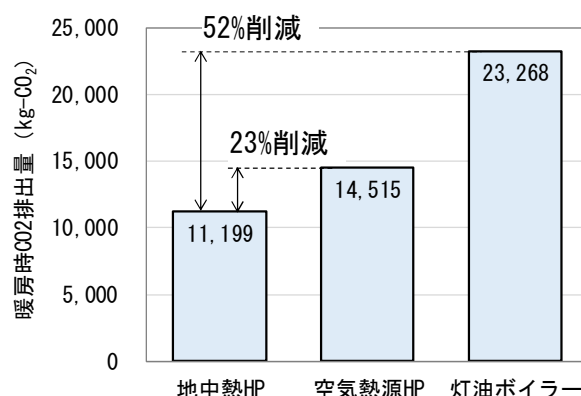
さらに、環境省が実施した補助事業により得られたモニタリングデータを分析して求めた代表値をもとに、CO₂排出量削減効果を算定しました。

地中熱利用ヒートポンプシステムでは、CO₂排出量を空気熱源ヒートポンプに比べ 23～36%削減でき、灯油ボイラーに比べ 52～56%削減できることが確認できます(図 2-12～図 2-15)。この CO₂排出量削減効果を樹木による CO₂吸収効果²¹に換算すると、例えば、暖房時のヒートポンプ定格能力 20 kW 以上の場合には、年間で杉の木 377～1,371 本分の吸収量に相当します。

このように、地中熱利用ヒートポンプシステムを導入することで、大幅な CO₂排出量削減効果が得られます。



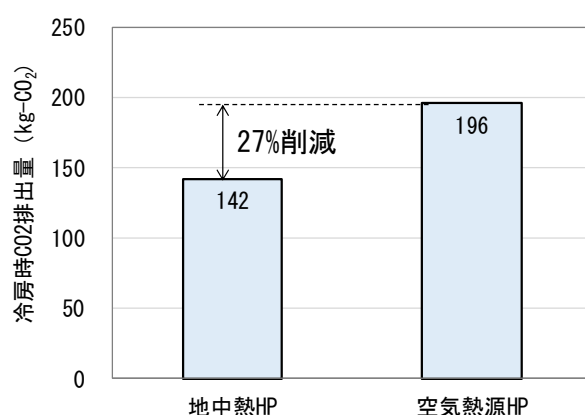
- ・CO₂排出係数
電力：0.512 (kg-CO₂/kWh) 灯油：2.49(kg-CO₂/L)
- ・地中熱は消費電力の代表値より算出
- ・空気熱源ヒートポンプ (COP=2.9) および灯油ボイラー (燃焼効率=0.86) でのCO₂排出量は、地中熱利用時の生成熱量 (代表値) を生成した場合に要する電力量および灯油量から算出



- ・CO₂排出係数
電力：0.512 (kg-CO₂/kWh) 灯油：2.49(kg-CO₂/L)
- ・地中熱は消費電力の代表値より算出
- ・空気熱源ヒートポンプ (COP=2.9) および灯油ボイラー (燃焼効率=0.86) でのCO₂排出量は、地中熱利用時の生成熱量 (代表値) を生成した場合に要する電力量および灯油量から算出

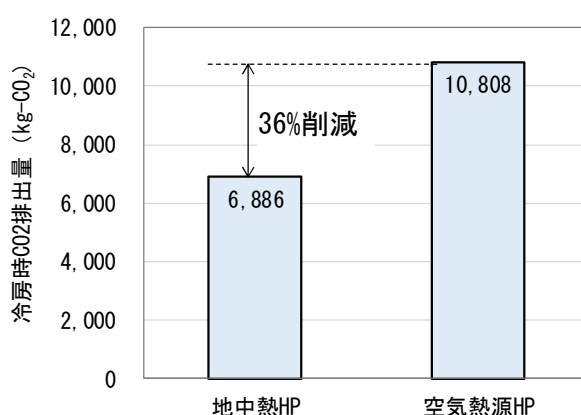
図 2-12 暖房時 CO₂ 排出量削減効果
(ヒートポンプ定格能力 20 kW 未満)

図 2-13 暖房時 CO₂ 排出量削減効果
(ヒートポンプ定格能力 20 kW 以上)



- ・CO₂排出係数
電力：0.512 (kg-CO₂/kWh) 灯油：2.49(kg-CO₂/L)
- ・地中熱は消費電力の代表値より算出
- ・空気熱源ヒートポンプ (COP=3.7) でのCO₂排出量は、地中熱利用時の生成熱量 (代表値) を生成した場合に要する電力量から算出

図 2-14 冷房時 CO₂ 排出量削減効果
(ヒートポンプ定格能力 20 kW 未満)



- ・CO₂排出係数
電力：0.512 (kg-CO₂/kWh) 灯油：2.49(kg-CO₂/L)
- ・地中熱は消費電力の代表値より算出
- ・空気熱源ヒートポンプ (COP=3.7) でのCO₂排出量は、地中熱利用時の生成熱量 (代表値) を生成した場合に要する電力量から算出

図 2-15 冷房時 CO₂ 排出量削減効果
(ヒートポンプ定格能力 20 kW 以上)

²¹林野庁、樹木による CO₂吸収量:35～40 年生の杉の木 1 本当たり、2.4 kg-C/y (= 8.8 kg-CO₂/y)。

(3) ライフサイクルアセスメント (LCA) の概念

再生可能エネルギー等の利活用による CO₂ などの温室効果ガス排出量の削減については、使用時のみに着目するのではなく、ライフサイクル全体を考慮した排出量及び削減量を評価するライフサイクルアセスメント(LCA: Life Cycle Assessment)を導入することが望まれます。

建築物のライフサイクル「調達、施工、運用、修繕、解体」に係る CO₂ 排出量(ライフサイクル CO₂)やその削減効果を建築物の初期計画段階からライフサイクルに応じて算出することは、今後の脱炭素社会の構築においてますます重要となります。

・再生可能エネルギー等の温室効果ガス削減効果に関する LCA ガイドライン

環境省は、多様な再生可能エネルギー等の製造事業者や導入事業者が、LCA の観点から自らの事業を評価する際に活用することを想定し、平成 25 年 3 月に「再生可能エネルギー等の温室効果ガス削減効果に関する LCA ガイドライン」を策定しました。本ガイドラインには、再生可能エネルギーのうち「熱利用」の1つとして「地中熱利用システム」が対象となっています。なお近年では、令和 3 年 7 月に改訂されています。

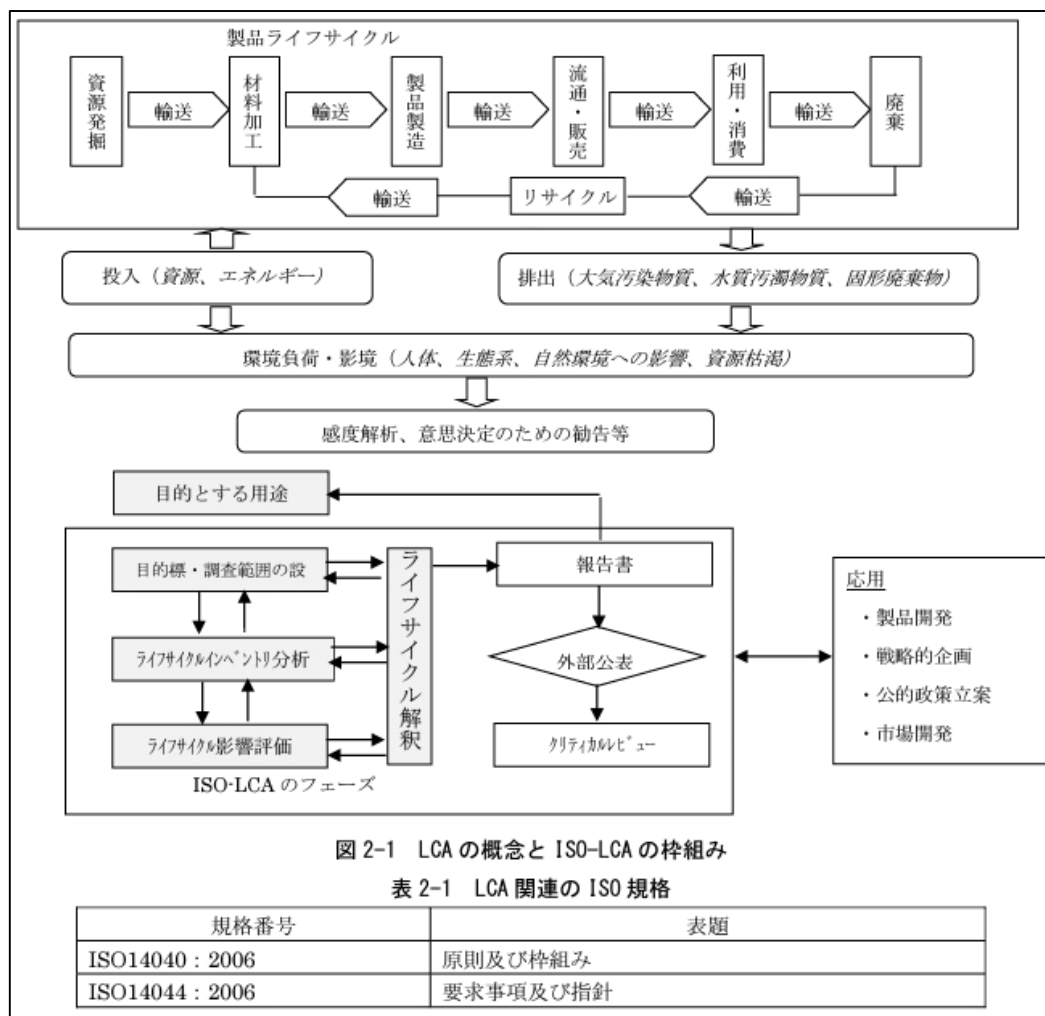


図 2-16 LCA の概念と ISO-LCA の枠組み及び LCA 関連の ISO 規格²²

²²環境省「再生可能エネルギー等の温室効果ガス削減効果に関する LCA ガイドライン」

詳しくは、以下の環境省ホームページをご覧ください。

<https://www.env.go.jp/earth/ondanka/lca/>

・再生可能エネルギー等の温室効果ガス削減効果に関する LCA ガイドライン(令和 3 年 7 月)

2.3 省コスト効果の試算

地中熱利用ヒートポンプシステムは、適切な設計がされていれば多くの場合は省コスト効果が得られます。ここでは、さまざまな事例における省コスト効果の実績例や試算例を紹介します。

(1) ランニングコスト削減効果

コストは設備の導入に関わるイニシャルコスト、電気代などのランニングコスト、維持管理費などのメンテナンスコストなどに分類されます。地中熱利用ヒートポンプシステムの導入による省コスト効果は特に、従前設備と比較してランニングコストが削減されることによって得られます。

地中熱利用ヒートポンプシステムによるランニングコストの削減効果事例として、クローズドループ方式とオープンループ方式の事例を紹介します。

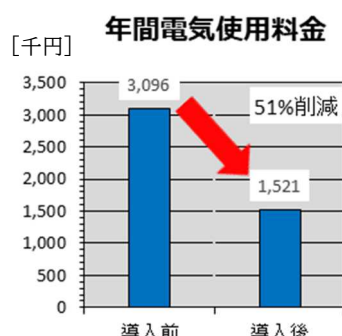
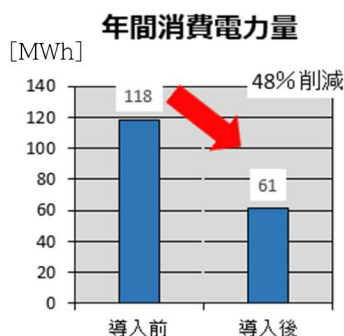
<空気熱源ヒートポンプとクローズドループ方式(地中熱)の比較>

環境省の「再生可能エネルギー電気・熱自立的普及促進事業」の1つで北海道内の町民会館への導入事例では、空気熱源ヒートポンプと電気パネルヒーターを併用した場合と比較して地中熱利用ヒートポンプシステムの導入により年間の消費電力量を48%削減できました。また、ピーク時の電力使用量（デマンド量）も少なくなるため電力の基本料金が下がりました。このことが上乗せされ、地中熱利用ヒートポンプシステムの導入によって年間の電気料金を51%削減できました。

(事例①) クローズドループ方式（ヒートポンプ定格能力 106 kW）の導入事例

単位：年当たり

1年間あたり（2019年4月～2020年3月）	消費電力量	一次エネルギー消費量	電気使用料金
導入前（電気PH+空気熱源HP）	118.3MWh	1,179GJ	3,096千円
導入後（地中熱利用HP）	61.0MWh	608GJ	1,521千円
年間削減量	57.3MWh	571GJ	1,575千円
年間削減率	48%	48%	51%



※1 導入前の値は、導入後のデータを基に推計した。

※2 電気 PH：電気パネルヒーター の略

※3 HP：ヒートポンプ の略

※4 電力使用量単価: 17.35 円/kWh

基本料金 : 1263.6 円/kW としている。

図 2-17 北海道内の町民会館への導入におけるランニングコスト削減例

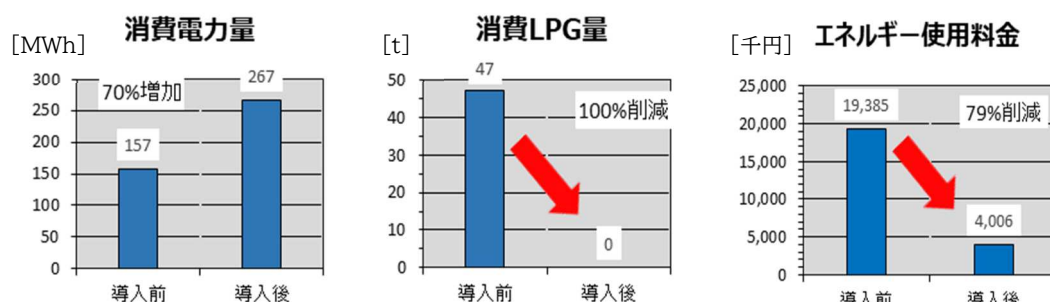
<化石燃料を使用する設備とオープンループ方式(地中熱)の比較>

山梨県内の病院に導入した事例では、ガスボイラーと空気熱源ヒートポンプを併用した場合と比較して、地中熱利用ヒートポンプシステムの導入により年間の消費一次エネルギー量を32%削減できました。さらに、年間のエネルギー使用料金は79%削減できました。これは地中熱利用ヒートポンプシステムの導入前は、単価が高い液化石油ガス(LPG)を使用していたのですが、地中熱利用ヒートポンプシステムの導入によりLPGの使用を止めることができたためです。

(事例②) オープンループ方式(ヒートポンプ定格能力 101.7 kW) の導入事例

単位:年当たり

1年間あたり(2018年4月～2019年3月)	消費電力量	消費LPG量	一次エネルギー消費量	エネルギー使用料金
導入前(ガスボイラー+空気熱源HP)	157.4MWh	47.3t	3,943GJ	19,385千円
導入後(地中熱利用HP)	267.0MWh	0t	2,662GJ	4,006千円
年間削減量	-109.7MWh	47.3t	1,281GJ	15,379千円
年間削減率	-70%	100%	32%	79%



※1 導入前の値は、導入後のデータを基に推計したものである。

※2 HP：ヒートポンプの略

※3 電力使用量単価: 15 円/kWh、ガス使用量単価: 360 円/kg としている。

図 2-18 山梨県内の病院の導入事例におけるランニングコスト削減例

(2) トータルコスト削減効果

地中熱利用ヒートポンプシステムはイニシャルコストが他の設備と比べて高いものの、ランニングコストが低くなることによって長期的にはトータルコストを低減できる可能性があります。

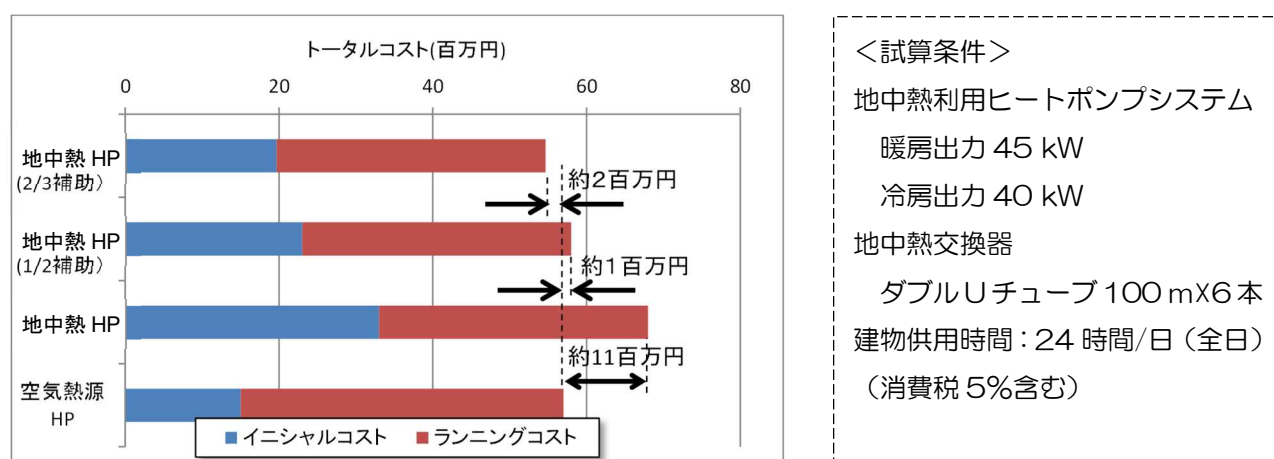
省コスト効果は地中熱利用ヒートポンプシステムの普及に伴うコストダウンや使用エネルギーの料金単価などによって変化する可能性があり、また、現地条件による幅も大きく一概に単価等を議論できないため、ここでは参考として「オフィス等の冷暖房や給湯」、「戸建住宅の冷暖房や給湯」、「道路融雪」、「農業用用途」、「温水プール」における省コスト効果(コスト回収)の試算例を紹介します。

ここでは導入による経済的なメリットとして省コスト効果の試算例を紹介していますが、導入に際しての概算費用を把握するために、「3.3(3)各種制度の活用」でヒートポンプの出力 kW 当たりのイニシャルコストの実績や助成制度を紹介しています。

＜稼働率の高い公共用施設や民間施設の冷暖房＞

比較的温暖な地域で、稼働率の高い公共用施設(病院など)や民間施設(店舗など)に導入した場合の試算例では、公的機関等の補助(補助割合 1/2 または 2/3)を受けると、15 年間の冷暖房のトータルコストが空気熱源ヒートポンプと概ね同程度となります(図 2-19)²³。

この場合、イニシャルコストと 15 年間のランニングコストを合わせても、施工方法の工夫(例:基礎杭を利用した熱交換方式など)や助成制度の活用によってイニシャルコストを低減させることにより、空気熱源ヒートポンプよりも省コストとなります。



注1: 補助率 1/2、2/3 でイニシャルコストが 1/2、2/3 になっていないのは、補助の対象とならない室内機などの費用が含まれることと、本事例が既存建物の設備更新によるものであり、補助の対象とならない既設撤去費用が含まれるため。

注2: モニタリング機器費用は含まれていない。

図 2-19 稼働率の高い公共施設の冷暖房におけるトータルコストの試算例

＜戸建住宅の冷暖房や給湯＞

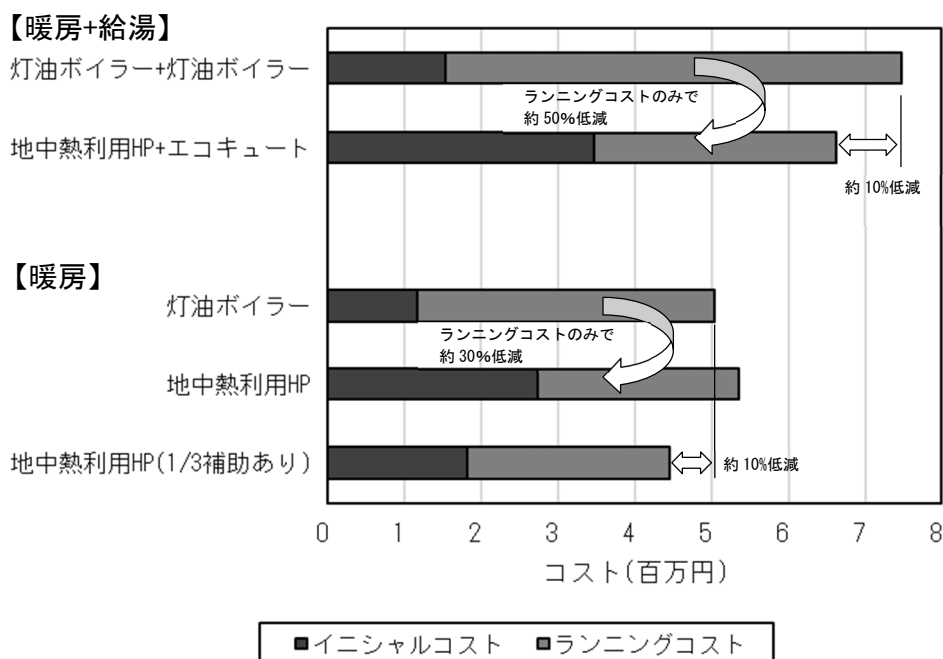
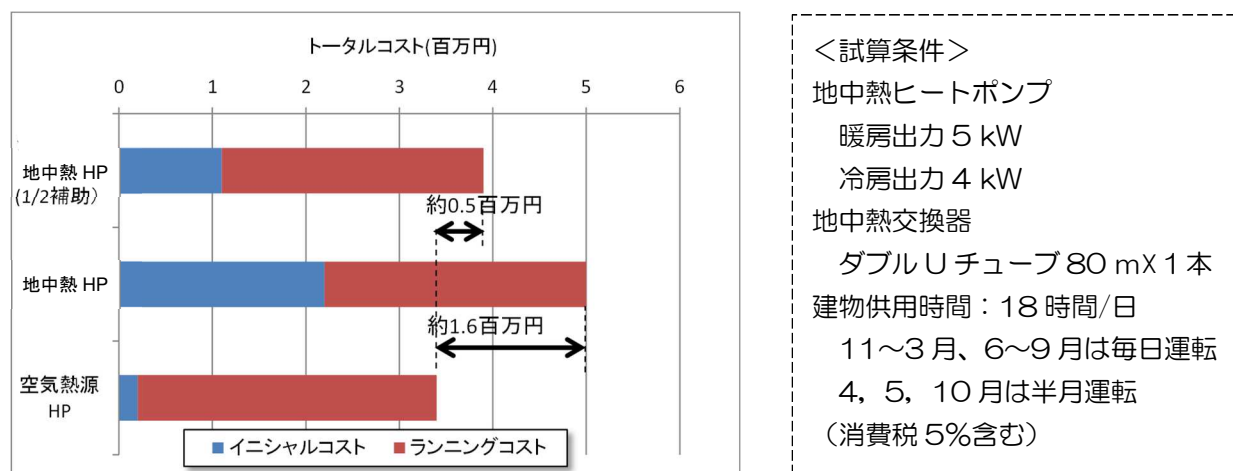
寒冷地の戸建住宅(冷暖房面積約 130 m²)の冷暖房や給湯の場合、ランニングコストで 30～50%、イニシャルと 20 年間のランニングコストを合わせると 10% 程度のコスト削減率が得られるとの試算例があります(図 2-20)²⁴。

温暖な地域の戸建住宅への導入する場合の試算例では、公的機関等の補助(補助割合 1/2)を受けると 15 年間の冷暖房のトータルコストが空気熱源ヒートポンプと概ね同程度となります(図 2-21)²⁵。

²³ 横浜市泉区役所総務部政推進課・特定非営利活動法人地中熱利用促進協会、平成 24 年度泉区地中熱利用普及可能性調査報告書、2013.2.

²⁴ 青森県、青森県地中熱利用推進ビジョン、2008.2.

²⁵ 横浜市泉区役所総務部政推進課・特定非営利活動法人地中熱利用促進協会、平成 24 年度泉区地中熱利用普及可能性調査報告書、2013.2.

図 2-20 寒冷地の戸建住宅の冷暖房や給湯における省コスト効果の試算例²⁶

注：ランニングコストは 15 年間分、モニタリング機器費用は含まれていない。

図 2-21 温暖な地域における戸建住宅の冷暖房トータルコストの比較²⁷

²⁶青森県、青森県地中熱利用推進ビジョン，p.76，2008.2. のイニシャルコストとエネルギー使用量を用いて試算した。ランニングコストの試算では令和4年 12 月現在の単価条件を用いた。

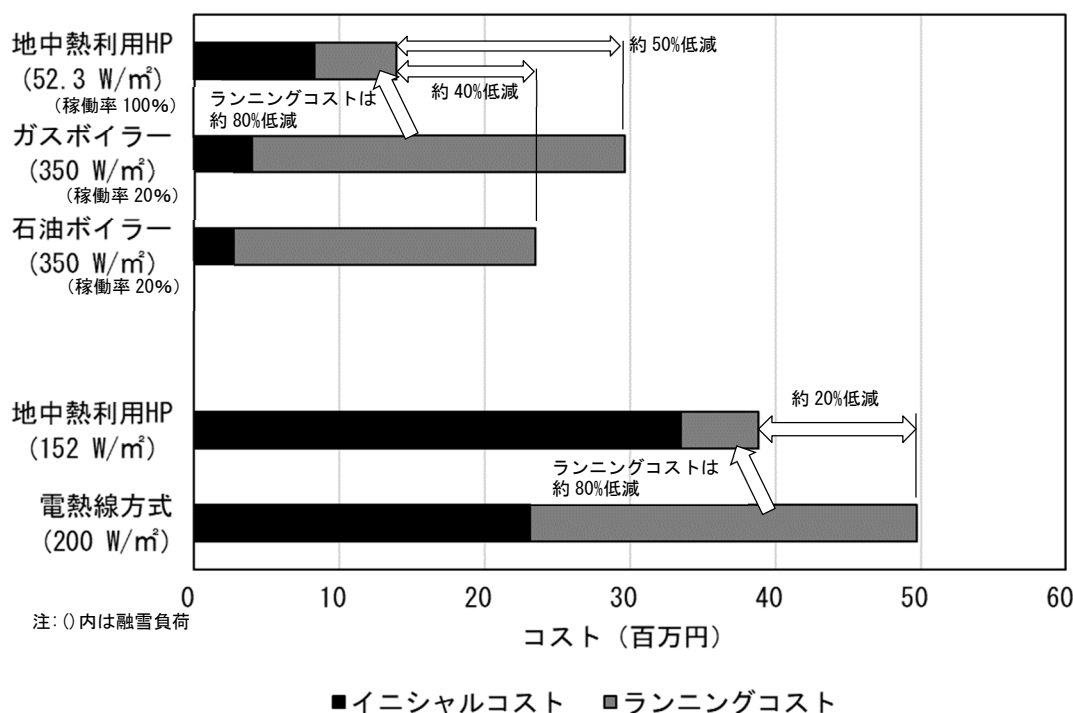
²⁷横浜市区役所総務部政推進課・特定非営利活動法人地中熱利用促進協会，平成 24 年度泉区地中熱利用普及可能性調査報告書，2013.2.

<道路融雪>

融雪面積約 400 m² 程度のランニングコストでは、電熱線方式に比べて約 80%の省コストになり^{28,29}、イニシャルコストと 20 年間のランニングコストを合わせると、電熱線方式に比べて 20%程度²⁸、ガスボイラーに比べて 50%程度、石油ボイラーに比べると 40%程度のコスト削減率が得られるとの試算があります(図 2-22)²⁹。



道路融雪(青森県弘前市)

図 2-22 道路融雪の省コスト効果の試算例(融雪面積約 400 m²)^{28,29}

<農業用用途>

農業用用途(ハウスの加温等の農作物の温度管理)は、比較的低温、一定温度、昼夜間で連続利用といった条件で用いる場合は、地中熱利用の利点を最大限に活用することができます。地中熱利用による光熱費の削減だけでなく、加温による出荷時期の調整(単価が高い時期の出荷)や農作物の品質向上できる可能性があることから、導入事例が増えてきています。

寒冷地でのハウスの加温に用いられるランニングコストでは、灯油ボイラーによる加温に対して、20%程度低減するとの試算があります²⁸。助成制度を活用すると 10 年以内にコスト回収できる見通しとなります。

²⁸青森県, 青森県地中熱利用推進ビジョン, p.76, 2008.2. のイニシャルコストとエネルギー使用量を用いて試算した。ランニングコストの試算は令和 4 年 12 月時点の単価条件を用いた。

²⁹省エネ・新エネマッチング会, 2010.3.10, (株)日伸テクノ提供資料のイニシャルコストとエネルギー使用量を用いて試算した。ランニングコストの試算は令和 4 年 12 月時点の単価条件を用いた。

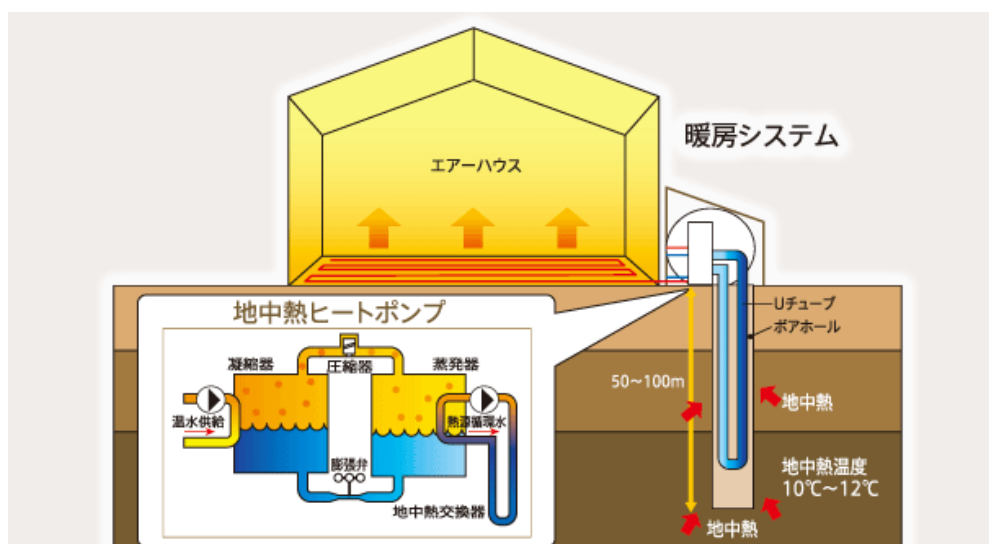


図 2-23 栽培ハウスへの地中熱利用ヒートポンプシステムの導入例³⁰

<温水プール>

「地下水の流動がほとんどない地域における実証事業(実施場所:神奈川県横浜市)」の結果では、25 m×5 コースのプールの加温、プール室・更衣室・ロビーの暖房、遊戯室(合計約 1,200 m²)の冷暖房に、地中熱利用ヒートポンプシステム(暖房能力 131 kW、冷房能力 116 kW、プール加熱能力 175 kW)または従来システム(空気熱源ヒートポンプ(暖房能力 162 kW、冷房能力 160 kW)+ガスボイラー(加熱能力 186 kW、燃費 19.0 m³/h))を用いた場合のランニングコストを比較すると、11 ヶ月間(4/1~2/23)の電気料金とガス料金の合計と比べて約 40%程度のコスト削減率が得られました³¹。イニシャルコストの試算額とこのランニングコストの 20 年間分のトータルコストでは、助成制度を活用すると約 20%程度のコスト削減率が得られると試算されます(図 2-24)³²。

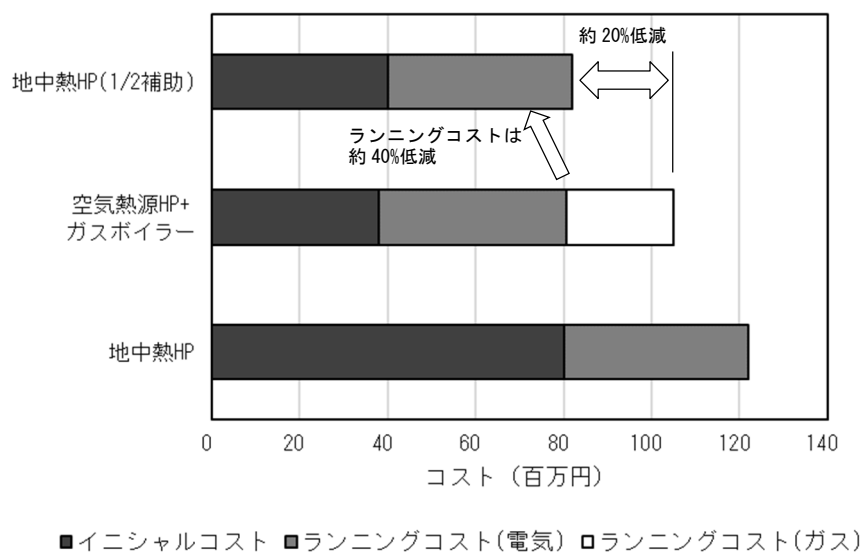


渋谷本町学園の温水プール(東京都渋谷区)

³⁰赤平オーキッドホームページ, <http://www.akabira-orchid.jp/eco/index.html>, 2023 年 2 月 8 日閲覧

³¹環境省, 平成 21 年度 地下水等活用型・地中熱利用型ヒートアイランド対策評価業務報告書, 2010.3. 「地下水欠如地域における地中熱ヒートポンプシステム実証事業」のエネルギー使用量を用いて試算した。ランニングコストの試算では令和 5 年 1 月現在の単価条件を用いた。

³²「地下水欠如地域における地中熱ヒートポンプシステム実証事業」の事業者者にイニシャルコスト試算値をヒアリングして試算



注：ランニングコストにモニタリング（熱媒体温度計測）費用が含まれるが、微々たる電気代（電気の負荷）であり分けて表示はできない。また、モニタリング機器（センサー）はシステムに組込済みの軽微なものでありイニシャルコストとしても分けることはできない。熱媒体流量や地中熱交換井の水温等は計測していない。

図 2-24 温水プールの場合の省コスト効果(運転費用)の試算例

(3) イニシャルコストに関する情報

地中熱利用ヒートポンプシステムの課題として、(2)トータルコスト削減効果の事例においても見られるように従前設備のガスボイラーや石油ボイラー、空気熱源ヒートポンプよりもイニシャルコストが高い傾向があります。特に、地中熱交換器や揚水井および還元井を設置するためのボアホール掘削費用は、イニシャルコストのうち大きな割合を占めています。掘削費用はクローズドループ方式かオープンループ方式であるかに加え、施設規模、地盤や地質条件、掘削口径や機材(マシン)の性能、現地の作業条件等様々な要因で変わってきます。

近年では、掘削マシン自体の高性能化および小型化や地中熱交換器の採排熱を高効率化させて地中熱交換器の長さを短くするなどの技術開発が行われており、これらの技術が普及することで、イニシャルコストが低減されていくものと想定されます。また、作業の効率化、省力化を図ることもイニシャルコストの低減につながります。

地中熱ヒートポンプシステムならびに地中熱関連資機材のメーカー公表価格情報は、一般財団法人経済調査会が発行する「積算資料」、一般財団法人建設物価調査会が発行する「建設物価」などに掲載されているので、参考としてください。

2.4 ヒートアイランド現象の緩和効果の試算

地中熱利用ヒートポンプは夏には排熱を外気に放出しないため、ヒートアイランド現象の緩和が期待されます。例えば、都内のオフィスビル街区を地中熱利用ヒートポンプシステムに置き換えた場合、最高気温で 1.2°C 程度、住宅街では 0.3°C 程度の気温低減効果が期待できるとの試算があります(図 2-25)³³。また別の事例では、人工排熱を削減することで、夏期の日中の気温が 0.5°C 、夜間の気温が約 1.5°C 低下するという試算があります³⁴。

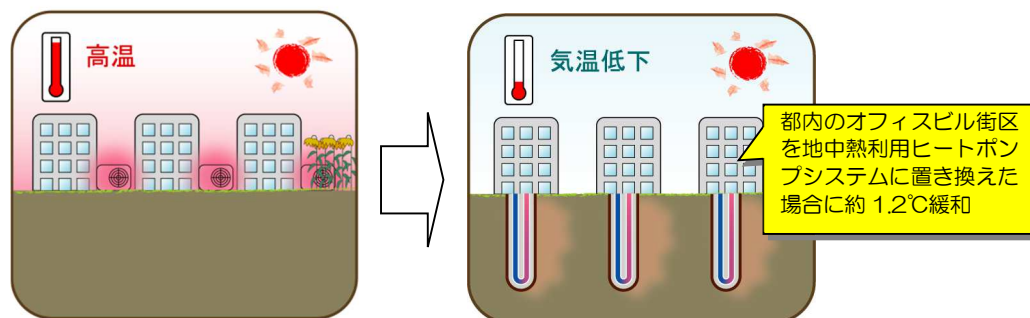


図 2-25 ヒートアイランド現象の緩和効果の試算例

夏期に冷房利用しているクールシティ推進事業の事例では、冷暖房の床面積 1m^2 当たりで $0.1\sim 0.2\text{ GJ}$ (原油換算³⁵で約 $3\sim 5\text{ L}$ 、電力換算で約 $28\sim 56\text{ kWh}$)程度の人工排熱を削減できました(図 2-26)。

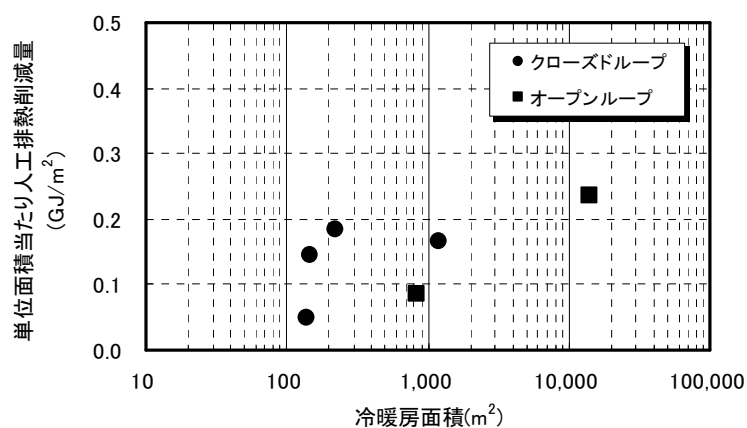


図 2-26 クールシティ推進事業での人工排熱削減量(単位面積当たり)の例

³³ 玄地, ヒートアイランドの緩和方策 -地域熱供給システム, 地盤蓄熱, 地下ヒートシンク -, エネルギー・資源 22(4), p.306-310, 2001.

³⁴ 下堂蘭ら, 土地利用および人間活動の都市気候へのインパクト評価 -東京 23 区を例として-, 環境システム研究, Vol.23, p.347-351, 1995.

³⁵ 原油への換算係数は $0.0258\text{ kL}/\text{GJ}$ である。

その他の例では、東京スカイツリーにおいて 2013 年夏期におけるヒートアイランド緩和効果として、476 GJ(原油換算で約 12.3 kL)を地中へ排熱することで、空気中への排熱が削減されたという報告があります³⁶。

地中熱利用ヒートポンプシステム以外の方法で気温を 1℃下げるには、例えば打ち水等の散水の場合は 6 mm/日・m²の水が必要と試算されています³⁷。10,000 m²(100 m 四方)の街区でも 1 日 60 m³の水が必要となり、更に新たな散水、給水用の施設整備とエネルギーが必要となることを考えれば、地中熱利用ヒートポンプシステムの普及促進は、ヒートアイランド現象の緩和に有効な対策の一つと考えられます。

2.5 ZEB および ZEH への地中熱導入事例

ZEB (Net Zero Energy Building) および ZEH (Net Zero Energy House)とは、快適な室内環境を実現しながら、建物で使うエネルギー量を減らす「省エネルギー」とエネルギーを自ら創り出す「創エネルギー」によって建物で消費する年間の一次エネルギーの収支を正味でゼロとすることを目指した建物や住宅のことを言います³⁸。ZEB は建物の省エネルギー性能と創エネルギー性能のバランスによって 4 段階に分類されます(表 2-3)。

ZEB の定量的な定義については、経済産業省資源エネルギー庁の ZEB ロードマップ検討委員会³⁹では、再生可能エネルギーを除いた基準一次エネルギー消費量から 50%以上の一次エネルギー消費量削減に適合した建物を「ZEB Ready」以上として評価することとしています。例えば、再生可能エネルギーを含む一次エネルギー消費量の削減率が 75%以上の場合は「Nearly ZEB」、同 100%以上で『ZEB』となります(図 2-27、図 2-28)。また「ZEB Oriented」では、WEBPRO において現段階では評価されていない技術(未評価技術)を採用することが求められますが、未評価技術で地中熱利用に関連するものにクール・ヒートトレンチシステム等があります。また、ZEH についても ZEB と同様にエネルギー消費量の削減率の他に、建物の外皮基準に応じて段階が分類されます(図 2-29)。

表 2-3 ZEB の分類³⁹

名称	定義
『ZEB』	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のこと。
Nearly ZEB	『ZEB』に限りなく近い建築物として、ZEB Ready の要件を満たしつつ、再生可能エネルギーにより年間の一次エネルギー消費量をゼロに近付けた建築物のこと。
ZEB Ready	『ZEB』を見据えた先進建築物として、外皮の高断熱化及び高効率な省エネルギー設備を備えた建築物のこと。
ZEB Oriented	ZEB Ready を見据えた建築物として、外皮の高性能化及び高効率な省エネルギー設備に加え、更なる省エネルギーの実現に向けた措置を講じた建築物のこと。

³⁶環境省、平成 25 年度 地中熱利用の普及方策の構築検討委託業務報告書、2014.3.

³⁷平野ら、打ち水によるヒートアイランド緩和効果のシミュレーション評価、水工学論文集、53, p.307-312, 2009.

³⁸環境省ホームページ「ZEB PORTAL」<https://www.env.go.jp/earth/zeb/index.html> (2023 年 1 月 24 日閲覧)

³⁹経済産業省資源エネルギー庁「ZEB ロードマップ検討委員会とりまとめ」(平成 27 年 12 月)および、「ZEB ロードマップフォローアップ委員会とりまとめ」(平成 31 年 3 月)

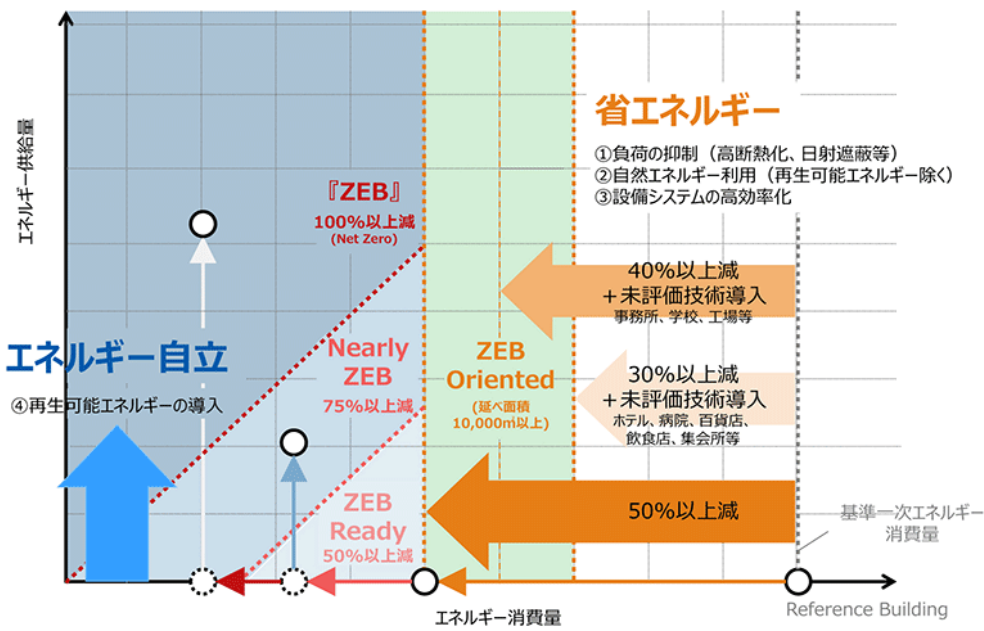


図 2-27 エネルギー消費量および供給量と ZEB の分類の関係³⁹

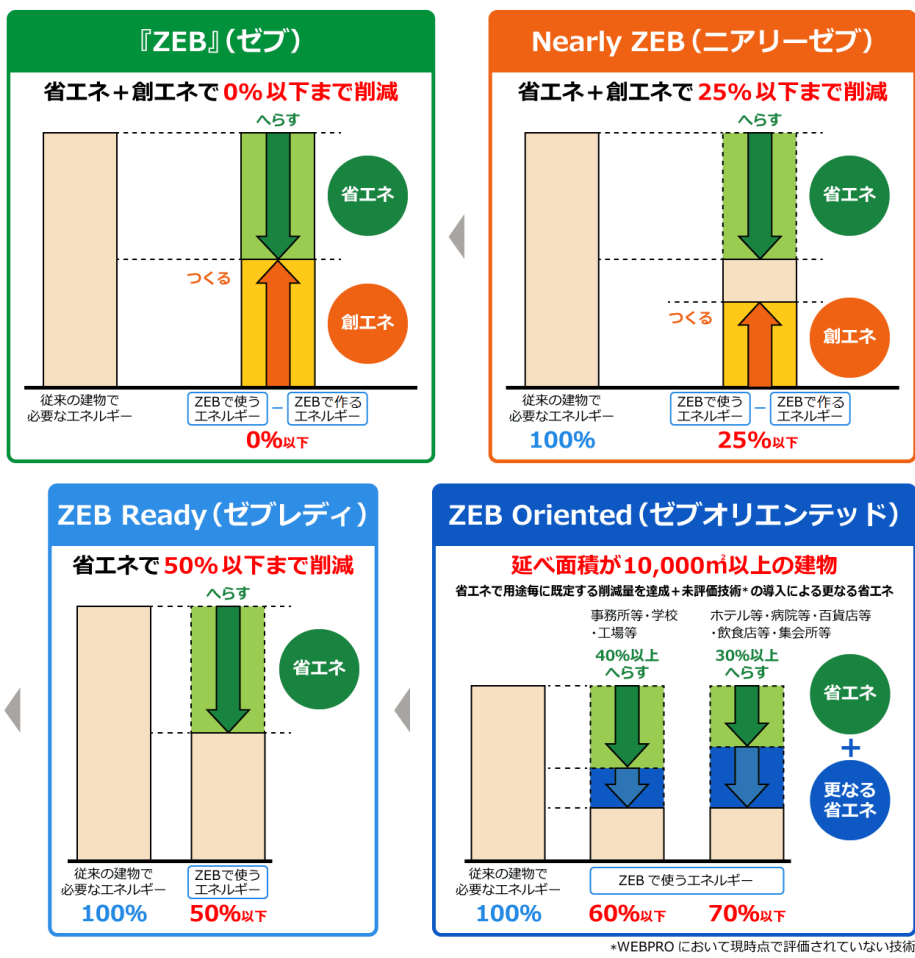
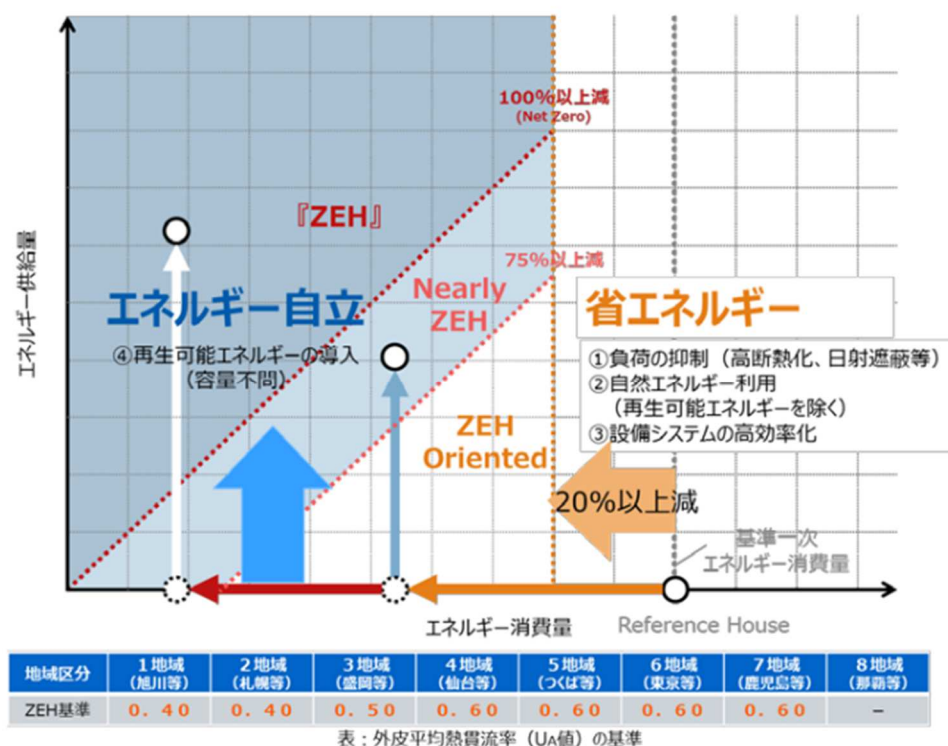


図 2-28 ZEB の定量的な定義³⁸⁾

図 2-29 エネルギー消費量および供給量と ZEH の分類の関係⁴⁰

地中熱は地域によらず通年で安定して利用することができるため、他熱源との併用や建物の断熱性能が高い建物と組み合わせることで地中熱利用を取り入れた ZEB/ZEH の普及が期待されます。次ページ以降に地中熱利用を取り入れた ZEB リーディング・オーナー⁴¹事例と ZEH の事例を紹介します。

建物の一次エネルギー消費量を設備別で比較すると、各事例の「⑥特徴など」にある「(2)省エネルギー性能の内訳」において空調設備の一次エネルギー消費量が大きく、ZEB/ZEH 実現に向けて空調設備の一次エネルギー消費量を大きく削減する必要があります。紹介する事例は空調用途で地中熱利用を取り入れている事例が多く、各事例とも空調設備の高い省エネルギー効果を見込んでいます。ここで紹介している省エネルギー効果には併用している他の高効率空調システムや高断熱性能の効果も含まれていることに留意する必要がありますが、地中熱利用が ZEB/ZEH 実現に向けて貢献していることが伺えます。なお「⑥特徴など」にある「(2)省エネルギー性能の内訳」において、BPI（Building PAL* Index）は外皮基準指標である PAL*（パルスター）⁴²により算出される年間熱負荷の基準のことを指します。BEI（Building Energy Index）はエネルギー消費性能計算プログラムに基づく、基準建築物と比較した時の設計建築物の一次エネルギー消費量の比率を示しています。

⁴⁰経済産業省資源エネルギー庁「ZEHの定義(改訂版)＜戸建住宅＞」(平成31年2月)

⁴¹一般財団法人環境共創イニシアチブホームページ(https://sii.or.jp/zeb/leading_owner/search/owner/)でも事例をご覧ください。

⁴²PAL*（パルスター）は、建物の屋内周囲空間の床面積当たりの年間熱負荷で示される外皮基準の指標のこと

BPI と BEI は以下の式で求めることができます。

$$\text{BPI}^{43} = \text{設計年間熱負荷係数(設計 PAL}^*) / \text{基準年間熱負荷係数(基準 PAL}^*)$$

$$\text{BEI}^{44} = \text{設計一次エネルギー消費量} / \text{基準一次エネルギー消費量}$$

⁴³BPI は ZEB の定量的な定義に含まれませんが、経産省の補助事業などの申請時には BPI の要件を満たさなければならない場合があります。

⁴⁴BEI における再生可能エネルギーの対象は敷地内(オンサイト)かつ自家消費分に限定された評価であるのに対し、ZEB の計算・評価方法では、売電分も対象に含めることとされている点にご留意ください。

詳しくは、資源エネルギー庁「ZEB について」のホームページをご覧ください。

https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saving/enterprise/support/index02.html

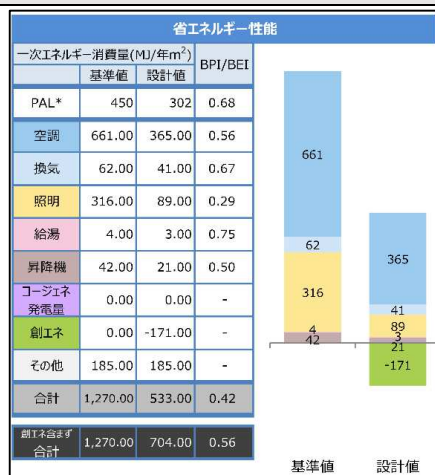
表 2-4 ZEB における地中熱利用の事例紹介(1)

①施設名(所在地)	ダイダン株式会社九州支社 「エネフィス九州」(福岡県福岡市)	省エネルギーと創エネルギーの関係 創エネルギー率 (%) 「ZEB」 Nearly ZEB ★ZEB Ready 一次エネルギー削減率 (%) (創エネ・その他含まず)
②地中熱の用途	空調、換気	
③地中熱利用設備概要	地中熱利用ヒートポンプ (暖房 45.2 kW) クールウォームピット	
④エネルギー消費量削減率	空調設備において、45%削減 (設計値)	
⑤ZEB への登録年度	2017 年度	
⑥特徴など		

出典:一般財団法人環境共創イニシアチブ HP



(1)建屋の外観



(2)省エネルギー性能の内訳



(3)創エネルギー・省エネルギー設備全体の概要図

<出典> (1):花園新太郎(2018), ダイダン九州支社「エネフィス九州」における ZEB と快適性の両立に関する取組, ヒートポンプとその応用, 92, p.40-43
 (2):一般財団法人環境共創イニシアチブ HP <https://sii.or.jp/file/zeb/zeb.leading.owner/ZEB29L-00012-P.01.pdf> (2022 年 11 月 7 日閲覧)
 (3):ダイダン株式会社 HP <https://www.daidan.co.jp/tech/solution/enefis-kyusyu/> (2022 年 10 月 13 日閲覧)に一部加筆

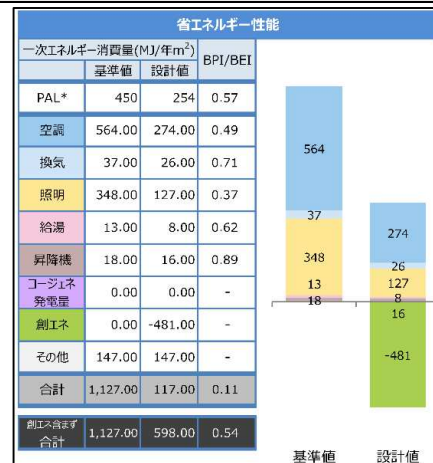
- ・クローズドループ方式を採用し、長さ 100 m のボアホール 4 本、10 m の鋼管杭 2 本および地中 5 m に配置したらせん状の水平埋設型地中熱交換器により、採排熱を行う。また、外気を地下にあるピットを通して屋内に取り入れている。
- ・冬季はヒートポンプで製造した温水を建物躯体内の配管に流し、建物自体を加温する。夏季はヒートポンプで熱交換を行わずに冷水を躯体内の配管に流し、躯体の冷却を行う。

表 2-5 ZEB における地中熱利用の事例紹介(2)

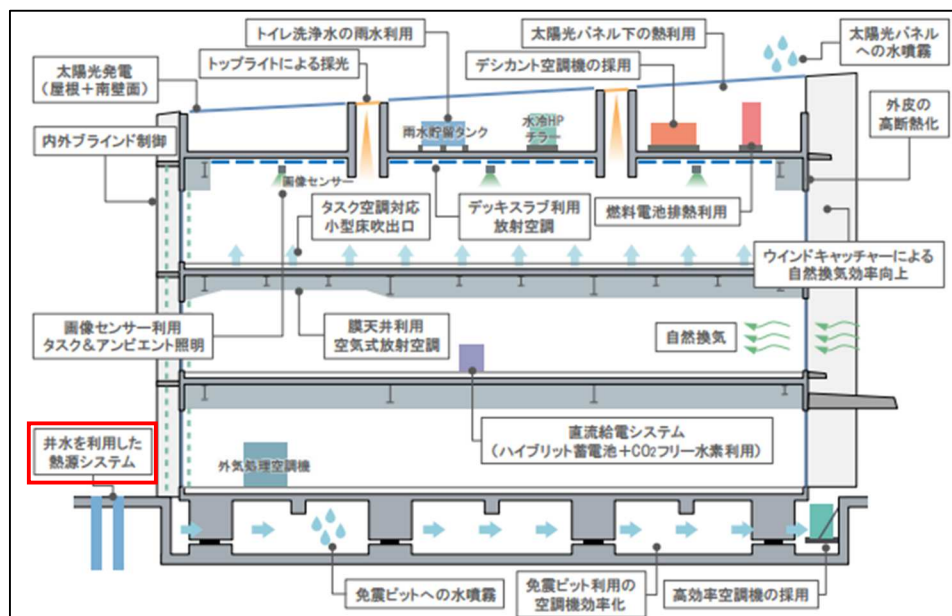
①施設名(所在地)	前田建設工業株式会社 新技術研究所 (茨城県取手市)	省エネルギーと創エネルギーの関係 創エネルギー率 (%) 『ZEB』 Nearly ZEB ZEB Ready 一次エネルギー削減率 (%) (創エネ・その他含まず) 出典:一般財団法人環境共創イニシアチブ HP
②地中熱の用途	空調	
③地中熱利用設備概要	地中熱利用ヒートポンプ (冷房 13.4 kW / 暖房 9.5 kW)※×9 台	
④エネルギー消費量削減率	空調設備において、51%削減 (設計値)	
⑤ZEB への登録年度	2018 年度	
⑥特徴など		



(1)建屋の外観



(2)省エネルギー性能の内訳



(3)創エネルギー・省エネルギー設備全体の概要図

<出典> (1)(3):仲井ほか (2022), 令和4年度空調調和・衛生工学会大会(神戸)学術講演論文集に一部加筆

(2) :一般財団法人環境共創イニシアチブ HP https://sii.or.jp/file/zeb/leading_owner/ZEB29L-00003-P_01.pdf (2022年11月7日閲覧)

- ・オープンループ方式を採用し、汲み上げた井水を冷房時には外気処理空調機の予冷と天井放射パネルに送水した後に地中熱利用ヒートポンプの冷却水としてカスケード利用している。
- ・暖房時は、外気処理空調機の予熱および地中熱利用ヒートポンプの採熱水として井水を利用し、放射パネルへは地中熱利用ヒートポンプより温水を供給する。

※使用時の熱源水の想定温度から算定

表 2-6 ZEB における地中熱利用の事例紹介(3)

①施設名(所在地)	開成町庁舎（神奈川県開成町）	省エネルギーと創エネルギーの関係 出典：一般財団法人環境共創イニシアチブ HP
②地中熱の用途	空調、換気	
③地中熱利用設備概要	・地中熱利用ヒートポンプチラー （冷房 27.7 kW / 暖房 31.9 kW） ・クールヒートトレンチ	
④エネルギー消費量削減率	空調設備において、48％削減（設計値）	
⑤ZEB への登録年度	2018 年度	
⑥特徴など		



(1)建屋の外観

省エネルギー性能			
一次エネルギー消費量(MJ/年m ²)		BPI/BEI	
	基準値	設計値	
PAL*	470	325	0.70
空調	773.63	399.74	0.52
換気	23.36	14.35	0.62
照明	402.05	101.26	0.26
給湯	12.99	25.83	1.99
昇降機	5.37	5.37	1.00
コージェネ発電量	0.00	0.00	-
創エネ	0.00	-291.37	-
その他	189.50	189.50	-
合計	1,406.90	444.68	0.32
創エネ含まず合計	1,406.90	736.05	0.53

(2)省エネルギー性能の内訳

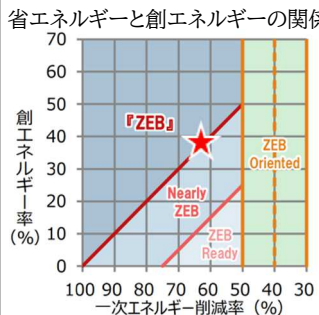


(3)創エネルギー・省エネルギー設備全体の概要図

<出典> (1)(3): 伊藤安里ほか(2019), 空調調・衛生工学会大会 令和元年度大会(札幌)学術講演論文集 第8巻性能検証・実態調査編に一部加筆
 (2): 一般財団法人環境共創イニシアチブ HP https://sii.or.jp/file/zeb_leading_owner/ZEB30L-00001-G_01.pdf (2022年11月7日閲覧)

- ・クローズドループ方式を採用し、空気熱源ヒートポンプとの併用で空調を行う。
- ・空調設備の他にも、照明部門の省エネルギー化や、創エネルギー設備を導入することによって、庁舎としては全国初となる ZEB 認証(Nearly ZEB)を取得した事例である。

表 2-7 ZEB における地中熱利用の事例紹介(4)

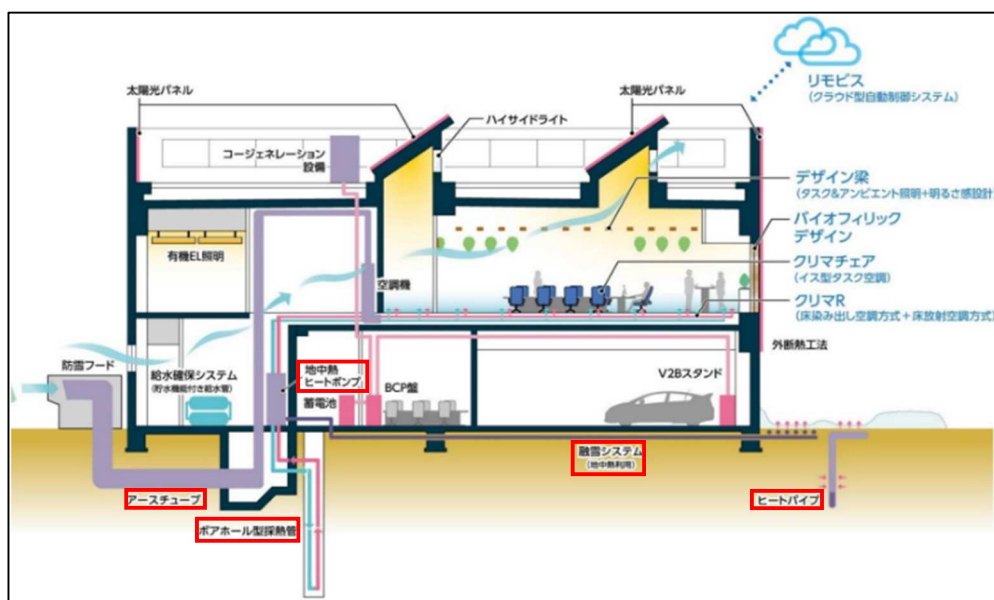
①施設名(所在地)	ダイダン株式会社北海道支店 「エネフィス北海道」(北海道札幌市)	省エネルギーと創エネルギーの関係  省エネルギーと創エネルギーの関係図。縦軸は創エネルギー率(%), 横軸は一次エネルギー削減率(%)(創エネ・その他含まず)。ZEB Ready, Nearly ZEB, ZEB Oriented, ZEBの領域が示されている。
②地中熱の用途	空調(暖房のみ)、融雪※	
③地中熱利用設備概要	地中熱利用ヒートポンプ (暖房 37.7 kW) アースチューブ、ヒートパイプ	
④エネルギー消費量削減率	空調設備において、55%削減 (設計値)	
⑤ZEB への登録年度	2020 年度	
⑥特徴など	出典:一般財団法人環境共創イニシアチブ HP	



(1)建屋の外観

省エネルギー性能			
一次エネルギー消費量(MJ/年m ²)	基準値	設計値	BPI/BEI
PAL*	480	277	0.58
空調	508.67	229.41	0.46
換気	74.53	20.40	0.28
照明	257.80	43.71	0.17
給湯	0.00	0.00	-
昇降機	22.14	19.68	0.89
コージェネ発電量	0.00	0.00	-
創エネ	0.00	-333.69	-
その他	131.49	131.49	-
合計	995	111	0.12
創エネ含まず合計	995	444	0.45

(2)省エネルギー性能の内訳



(3)創エネルギー・省エネルギー設備全体の概要図

<出典> (1)(3):ダイダン株式会社 HP <https://www.daidan.co.jp/tech/solution/enefis-hokkaido/> (2022 年 10 月 13 日閲覧)に一部加筆

(2) :一般財団法人環境共創イニシアチブ HP https://sii.or.jp/file/zeb/leading_owner/ZEB29L-00012-P_03.pdf (2022 年 11 月 7 日閲覧)

- ・クローズドループ方式を採用し、長さ 100 m の地中熱交換器10本から採熱している。ヒートポンプは排熱回収機能も併せ持ち施設の排熱を有効活用している。また中間期と夏季の間ヒートポンプはフリークーリングで運転を行っている。
- ・外気をアースチューブで予冷や予熱して屋内に取り込むことで、熱負荷を下げている。
- ・融雪用の 4 本の地中熱交換器とヒートパイプで、建物周囲の融雪を行っている。

※ZEB の評価項目には、地中熱の融雪利用は含まれない。

表 2-8 ZEB における地中熱利用の事例紹介(5)

①施設名(所在地)	日本環境科学株式会社 JESC-ZEB 棟 (山形県山形市)	省エネルギーと創エネルギーの関係
②地中熱の用途	空調、給湯、融雪	
③地中熱利用設備概要	・地中熱利用ヒートポンプ (冷房 30.0 kW / 暖房 30.1 kW) ・帯水層蓄熱システム	
④エネルギー消費量削減率	空調設備において、53%削減(設計値)	
⑤ZEB への登録年度	2021 年度	

⑥特徴など

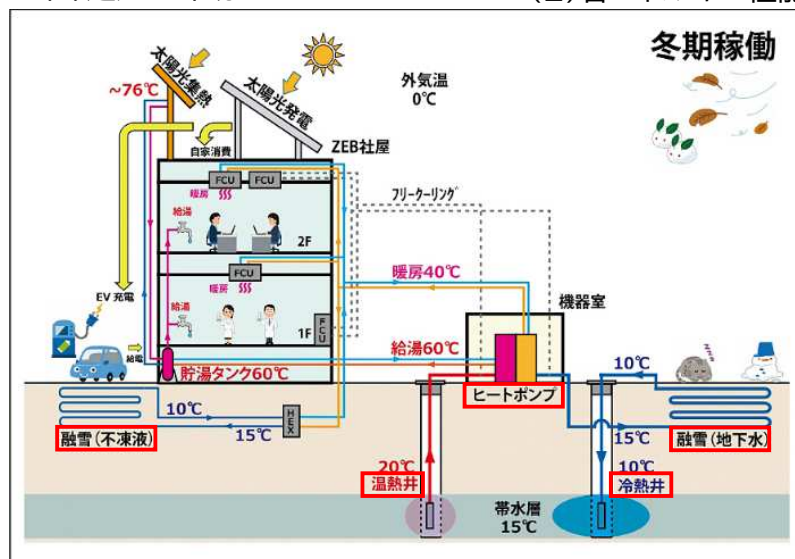
出典:一般財団法人環境共創イニシアチブ HP



(1)建屋の外観

省エネルギー性能			
一次エネルギー消費量(MJ/年m ²)		BPI/BEI	
基準値	設計値		
PAL*	470	257	0.55
空調	798.98	372.61	0.47
換気	30.84	5.80	0.19
照明	429.26	140.13	0.33
給湯	0.00	0.00	-
昇降機	0.00	0.00	-
コージェネ発電量	0.00	0.00	-
創エネ	0.00	-523.22	-
その他	362.68	362.68	-
合計	1,622	358	0.23
創エネ含まず合計	1,622	882	0.55

(2)省エネルギー性能の内訳



(3)創エネルギー・省エネルギー設備全体の概要図

<出典> (1)(3):環境省 HP「ZEB PORTAL」 https://www.env.go.jp/earth/zeb/case/new_11.html (2022 年 11 月 9 日閲覧)(2) :一般財団法人環境共創イニシアチブ HP https://sii.or.jp/file/zeb_leading_owner/ZEB2021L-00002-P_01.pdf (2022 年 11 月 9 日閲覧)

- ・ヒートポンプでは、冷暖房需要と同時に太陽熱との複合利用で給湯需要も賄うことができる。
- ・冬季には、駐車場の融雪にも活用できる。
- ・夏季は、冬季に冷熱蓄熱した地下水を直接ファンコイルに送って冷房として利用するフリークーリングにより、ヒートポンプレス冷房を実現している。
- ・太陽熱集熱器(無散水融雪施設)で夏期は温熱を、冬期は冷熱を井戸に注入することで、効率の高い帯水層蓄熱システムとなっている。

表 2-9 ZEB における地中熱利用の事例紹介(6)

①施設名(所在地)	愛知学院大学名城公園キャンパス事務棟 (愛知県名古屋市)	省エネルギーと創エネルギーの関係 創エネルギー率 (%) 一次エネルギー削減率 (%) (創エネ・その他含まず) 『ZEB』 Nearly ZEB ZEB Ready
②地中熱の用途	換気	
③地中熱利用設備概要	クールヒートトレンチ	
④エネルギー消費量削減率	換気設備において、58%削減（設計値）	
⑤ZEB への登録年度	2018 年度	
⑥特徴など		

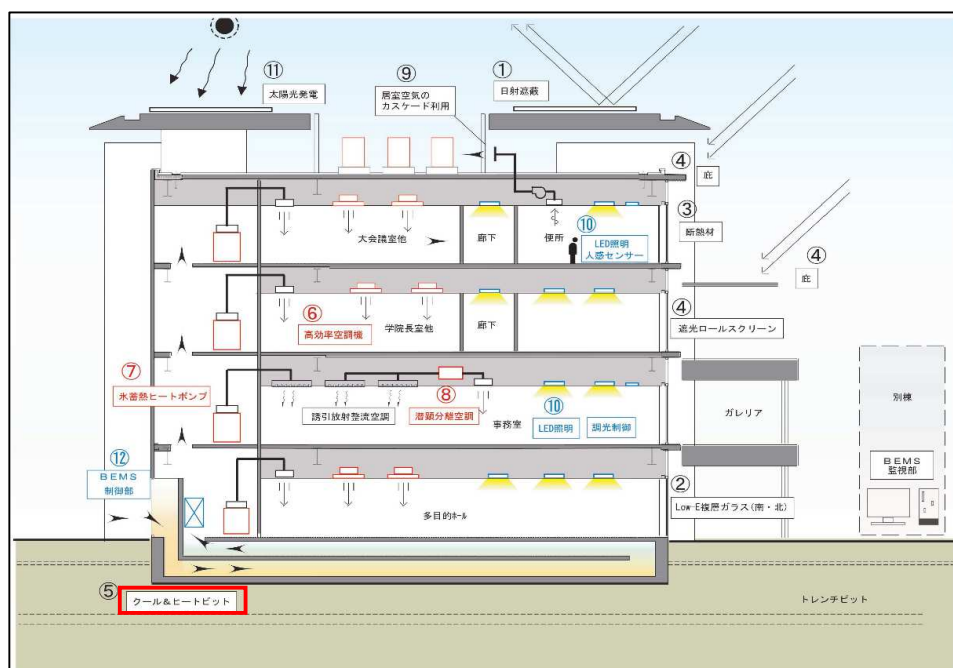
出典:一般財団法人環境共創イニシアチブ HP



(1)建屋の外観

省エネルギー性能			
一次エネルギー消費量(MJ/年m ²)	基準値	設計値	BPI/BEI
PAL*	470	283	0.61
空調	776.23	326.98	0.43
換気	23.29	9.84	0.43
照明	255.44	74.40	0.30
給湯	20.56	40.67	1.98
昇降機	29.44	26.17	0.89
コージェネ発電量	0.00	0.00	-
創エネ	0.00	-72.03	-
その他	76.69	76.69	-
合計	1,181.65	482.72	0.41
創エネ含まず合計	1,181.65	554.75	0.47

(2)省エネルギー性能の内訳



(3)創エネルギー・省エネルギー設備全体の概要図

<出典> (1)(2): 一般財団法人環境共創イニシアチブ HP https://sii.or.jp/file/zeb_leading_owner/ZEB30L-00017-P.01.pdf (2022年11月7日閲覧)
 (3): 愛知学院大学 HP [https://www.agu.ac.jp/topics/平成30年度%E3%80%80ネット・ゼロ・エネルギー・ビル\(zeb-2/](https://www.agu.ac.jp/topics/平成30年度%E3%80%80ネット・ゼロ・エネルギー・ビル(zeb-2/) (2022年10月14日閲覧)

・夏はクールスポットである名城公園からの涼風を地下のピットを経由させて各階に送り込む。冬場は外気を地下のピットを経由させて加温することで、換気と同時に空調の熱負荷を低減させている。

(参考) クールヒートトレンチによる地中熱利用

外気を地下空間にあるクールヒートトレンチを通してから空調機などで処理することで、外気を直接空調機に取り込む時よりも熱負荷が低減されエネルギー消費量の削減効果が得られます。モデル建物を想定して省エネルギー効果を予測した事例では、クールヒートトレンチにより夏季は外気より-5℃程度、冬季は外気より 3℃程度の予冷と予温効果があり、熱負荷が大きい季節のエネルギー消費量の削減効果が期待されるという予測があります。

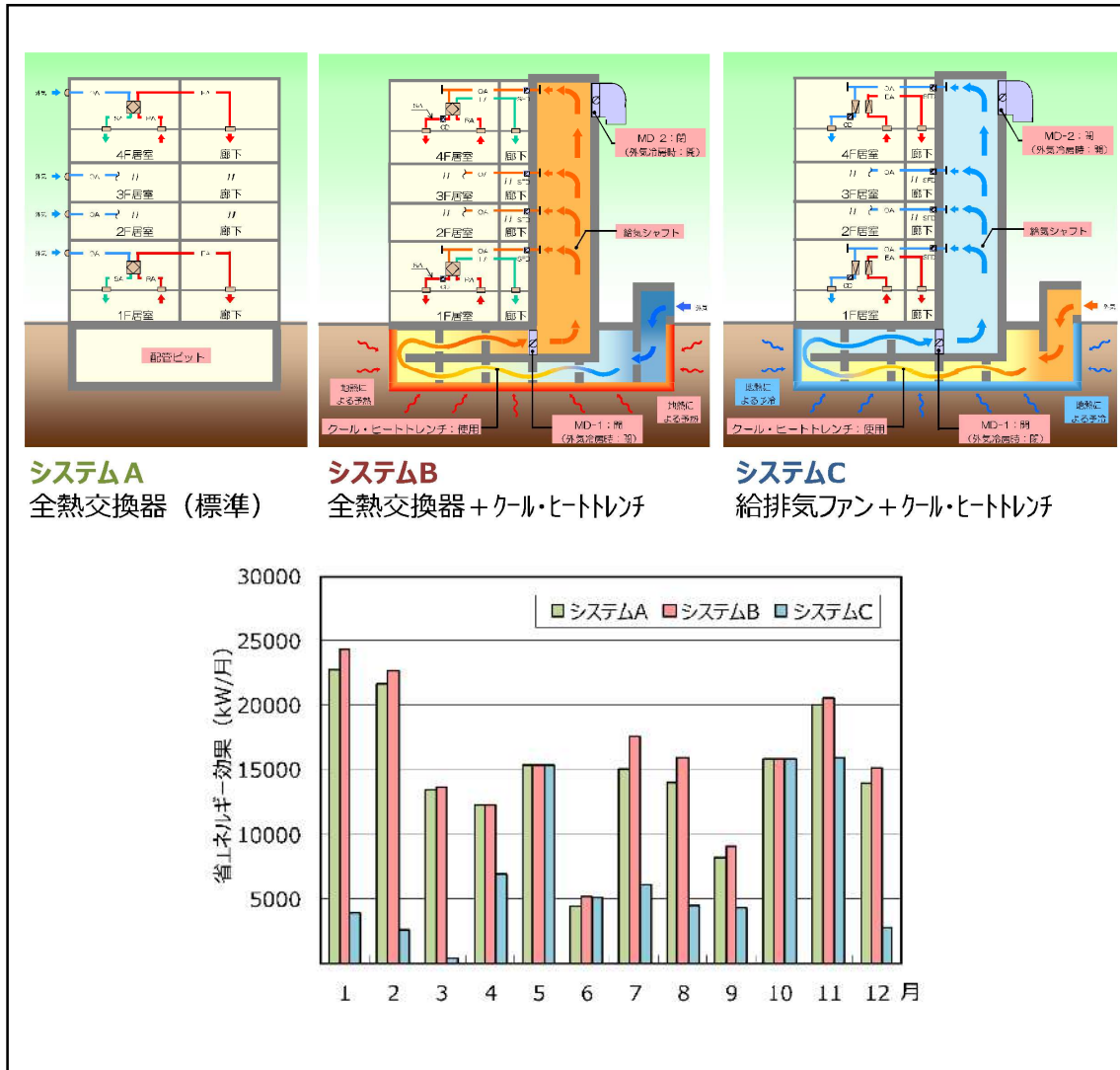


図 2-30 クールヒートトレンチ導入による省エネルギー効果予測⁴⁵

⁴⁵村江行忠, クールヒートトレンチなどによる外気負荷低減, ENEX2021 地中熱セミナー(2020年12月9日開催) 公表資料

表 2-10 ZEH における地中熱利用の事例紹介

①施設名(所在地)	個人宅(岩手県花巻市)
②地中熱の用途	空調
③設備概要	地中熱利用ヒートポンプ 10 kW×1台
④エネルギー消費量削減率	空調設備において、31%削減(2021年度実績)
⑤特徴など	



※BELS 評価ラベルは任意のため当該事例では取得していません。

第3章 地中熱利用ヒートポンプシステムに関する配慮事項

地中熱利用ヒートポンプシステムはエネルギー消費量の削減や空気中への排熱量の削減など、様々な点で環境保全に寄与しますが、一方で地中へ熱負荷を伴う点には留意する必要があります。地中熱利用ヒートポンプシステムは中国・アメリカ・北欧などの海外で多数の実績があり、これまで地中への排熱などによる大きな環境影響や事故などの報告例はなく、ほぼ安全に使用できています。しかし今後、国内の市街地が高度に密集している地域での普及や商業ビルや再開発区域における採排熱負荷の大きな地中熱利用が進むと、狭い範囲に地中への熱負荷が集中する可能性があります。

このため採排熱負荷の大きな施設を設置し地中熱利用を図る地域、また採排熱負荷の小さな施設でも高い密度で設置したり、冷房または暖房のいずれかに偏った利用がされる地域等では、地中の熱環境の変化や近隣の地下水や地中熱利用への影響に適切に配慮し、モニタリングによる監視を行うことが求められます。また効率のよい熱利用を持続するためにも地中温度を大きく変化させることなく、地下水・地盤環境が保全されている状況が重要であり、「地下水・地盤環境の保全」と「熱利用効率の維持」の視点から導入に適した利用方式の考え方や利用規模に応じて留意点、チェック項目やモニタリング項目等について示します。

3.1 導入における条件

「地下水・地盤環境の保全」や「熱利用効率の維持」の視点による適切な利用方式の選定には、主に「年間の熱利用方法の想定」、「概ね深度 100 m までにある地下水の利用可否(地下水の流速や水質、揚水に関する規制状況等に基づいて判断する必要があります)」に留意する必要があります(図 3-1)。

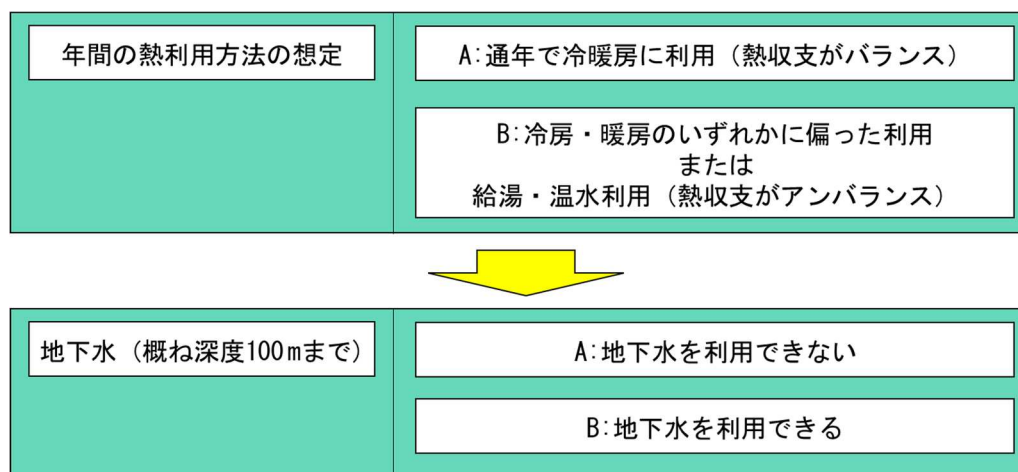


図 3-1 地中熱利用ヒートポンプシステムの利用方式の選定フロー

利用方式を選定する際は、表 3-1 の選択肢から当てはまる組合せを選び、該当する利用方式を確認します。

ただし、利用方式や設置地域の条件(熱交換量、地下水の有無・水質・揚水規制など)によっては、周辺の地中熱利用や地下水・地盤環境への影響に留意する必要がある、これを考慮した適切な施設設計や運転管理が必要です。

表 3-1 適用できる地中熱利用ヒートポンプシステムの方式

年間の熱利用	地下水利用	地中熱利用 HP 方式	
		クローズドループ方式	オープンループ方式
A 冷暖房 (年間熱収支が バランス)	A 不可	◎	—
	B 可能	◎※1	○※1,3
B 冷房・暖房に 偏り または 給湯・温水	A 不可	◎	—
	B 可能	◎※1,2	○※1,2,3
各利用方式の 適用上の留意点		・熱交換量 ・定期点検 ・熱媒体種類 ・凍結 ⇒詳細は 3.2(4)	・地下水の水質 ・地下水揚水に関する規制 ・定期点検 ・還元井等の設置 ⇒詳細は 3.2(5)

◎:適用可能
○:適用可能、ただし揚水した地下水を元の帯水層に戻す必要あり
—:適用不可能(地下水を利用できないため)

- ※1 熱交換量が多い場合や隣地との境界付近に地中熱交換器を設置する場合などは、周辺の地中熱利用における熱交換効率の低下や、地下水・地盤環境への影響の可能性に留意する必要がある。
- ※2 熱交換量が大きくない場合であっても、年間熱収支に偏りがある場合は、周辺の地中熱利用における熱交換効率の低下や、地下水・地盤環境への影響等を長期的に生じる可能性に留意する必要がある。
- ※3 クローズドループ方式が地中の熱利用であるのに対してオープンループ方式は地下水利用に該当するため、国・自治体における揚水規制等の地下水利用に関わる法令等を遵守し、周辺の地下水利用への影響等に留意する必要がある。

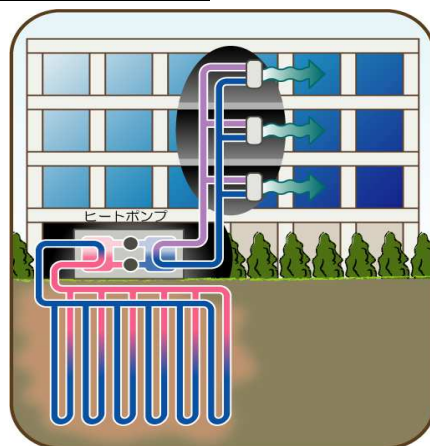
例えば次の例 1 では地下水の利用可否の点からクローズドループ方式が選定され、例 2 ではクローズドループ方式、オープンループ方式の各方式が選定対象になりますが、地下水の揚水や放流の可否などの制約や周辺影響にも留意する必要があります。

例 1:A(通年冷暖房利用)－A(地下水を利用できない)

⇒ 採用方式:クローズドループ方式

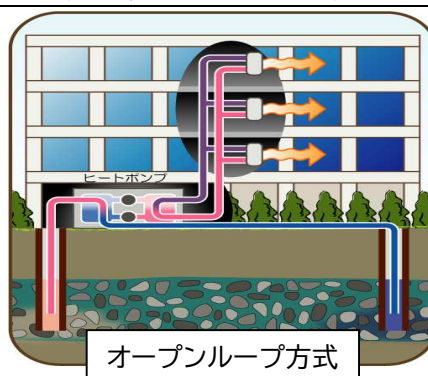
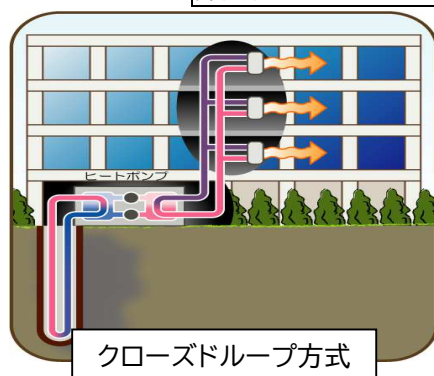
概ね深さ 100 m までの地下水を利用できない地域では、クローズドループ方式を採用することとなります。

通年で冷暖房の両方に使用する場合、『夏期に温熱を蓄熱し冬期に暖房使用⇔冬期に冷熱を蓄熱し夏期に冷房使用』といった蓄熱型の運転による運転効率の向上が期待できます。



例 2:B(暖房主体)－B(地下水を利用できる)

⇒ 採用方式:クローズドループ方式、オープンループ方式のいずれも可



地下水を利用できる場合、クローズドループ方式とオープンループ方式が適用対象となります。周辺への影響が懸念される場合は、採排熱量の低減や熱収支バランス、地中温度の変化を軽減する地中熱交換器の設置間隔や、地下水流動方向を考慮した配置が必要です。

クローズドループ方式またはオープンループ方式を採用する場合、地中温度の変化による冷熱塊や温熱塊を生じると、地下水流速に応じて遅い場合は数年で早い場合は同一シーズンの間に、周辺の地中熱利用における熱交換効率の低下や地下水・地盤環境への影響を生じる可能性があります。このような場合に他の熱源と併用のシステムであれば地中熱利用ヒートポンプシステムへの負荷を低減させることができ、熱交換効率の低下を抑制することができます。

他の熱源との併用や複数台制御の運転では、地中熱利用に関して一定の知識を持った管理者(施工管理サービス会社など)が採熱状況に応じて計画的かつ定期的に運転管理を行うことにより、熱交換効率の高い、年間を通じたバランスの良い運転管理が可能となります。

またオープンループ方式で熱交換後の地下水を帯水層に還元させずに外部に放流する可能性がある場合には、地下水の必要量、公共用水域や下水道への放流の可否や要件、揚水規制などを踏まえて適用可能性を判断する必要があります。

なお、環境省が平成18～22年度に実施した「クールシティ推進事業(地下水等活用型・地中熱利用型)」では、「クローズドループ方式またはオープンループ方式」、「地下水流動型または停滞型(クローズドループ方式)」、「地下水採熱型、循環型または蓄熱型(オープンループ方式)」といった現場条件を網羅的に組み合わせて実証を行い、大きな環境影響の変化は確認されませんでした。これらは概ねヒートポンプ最大出力が150 kW未満の小規模～中規模の施設です。ここで2021年度末時点の戸建住宅を除いた出力規模150 kW未満の小規模～中規模の設置件数は、クローズドループ方式の約85%(図3-2)、オープンループ方式の約67%(図3-3)を占めています。よって、より規模の大きな施設では、地中の熱環境の変化や近隣の地下水や地中熱利用への影響に適切に配慮することやモニタリングによる監視を行うことが求められます。

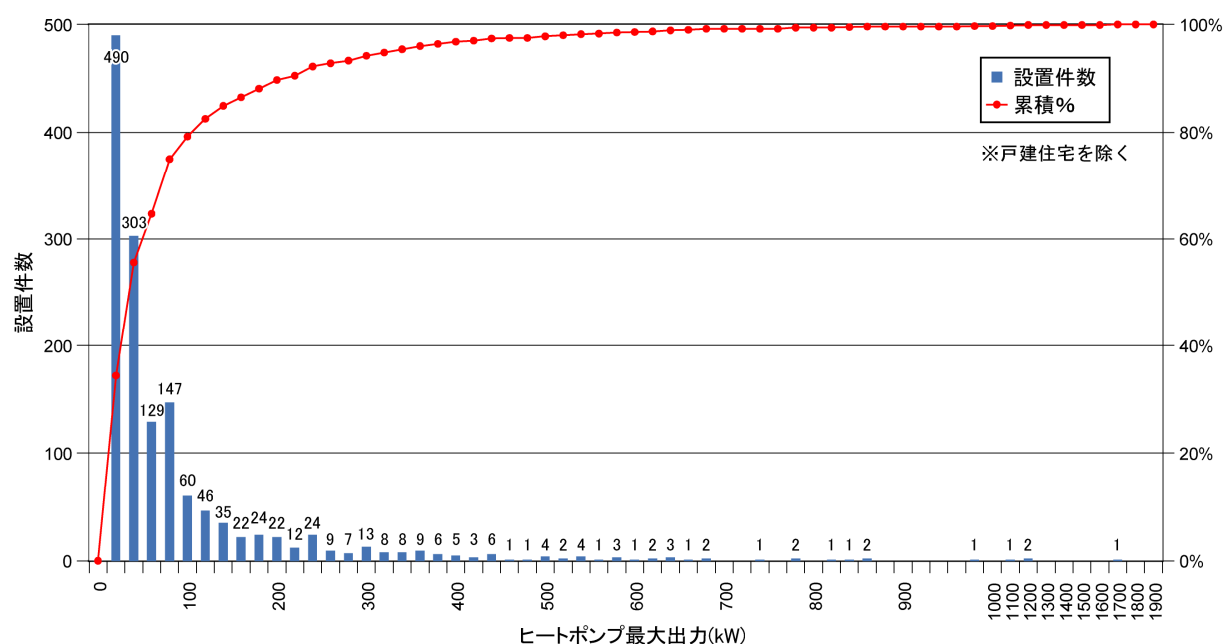


図3-2 クローズドループ方式における地中熱利用ヒートポンプの最大出力別設置件数
(2021年度末時点)⁴⁶

⁴⁶環境省、令和4年度 地中熱利用状況調査委託業務 における調査データより

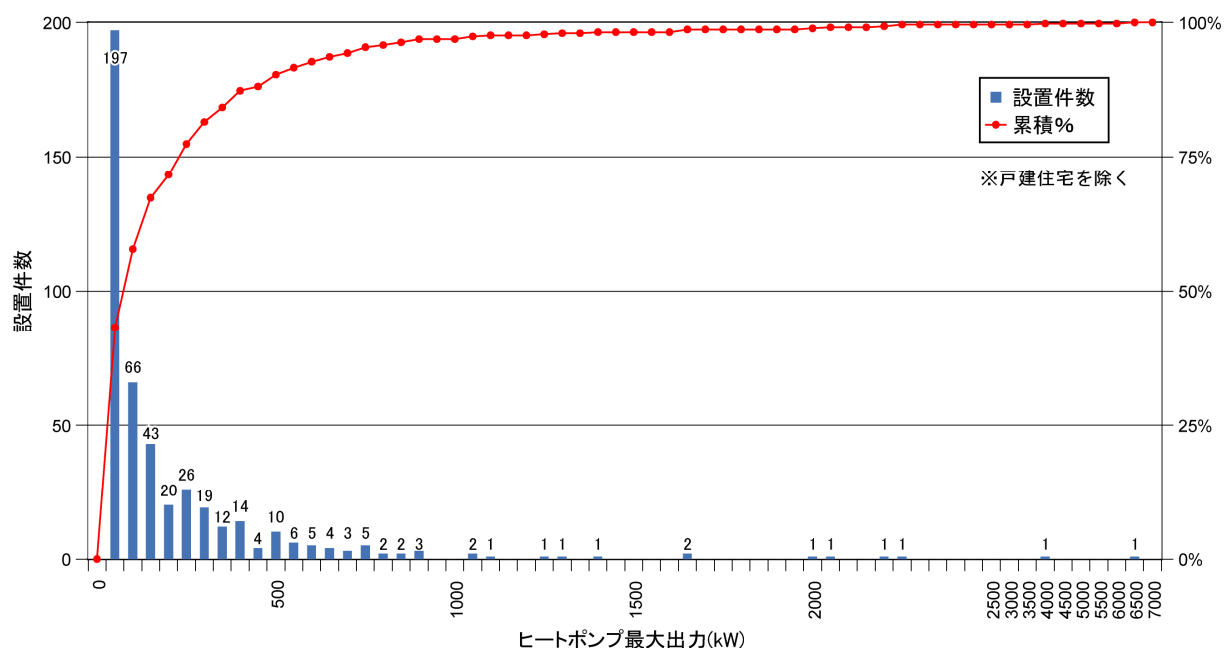


図 3-3 オープンループ方式における地中熱利用ヒートポンプの最大出力別設置件数
(2021年度末時点)⁴⁶

3.2 導入および利用における留意点

地中熱利用ヒートポンプシステムを持続的に良好な熱効率で利用することにより、エネルギー消費量の低減が図られるとともに、地盤環境の保全へと繋がることになります。このことから、建物に合った設備規模の設定や導入前の基礎調査、運転管理への留意が必要となります。本ガイドラインではこれらについて、概要を紹介します。なお、地中熱利用ヒートポンプシステムの設計や施工管理、運転管理等の詳細は、以下の書籍等に紹介されています。

- ・北海道大学環境システム工学研究室編，地中熱ヒートポンプシステム(改訂2版)，オーム社，2020
- ・特定非営利活動法人地中熱利用促進協会編，地中熱ヒートポンプシステム施工管理マニュアル改訂版，地中熱利用促進協会，2022
- ・特定非営利活動法人地中熱利用促進協会・一般社団法人全国さく井協会編，地中熱ヒートポンプシステムオープンループ導入ガイドライン第1版，2017
(http://www.geohpaj.org/wp/wp-content/uploads/openloop_guide01.pdf)

(1) 設計時の事前調査

地中熱利用ヒートポンプシステムの設計にあたり、必要に応じて以下のような項目の事前調査と確認を行います(図 3-4)。

気候条件:冷暖房を使用する期間や冷暖房温度等、通年の空調使用状況の推定のため、気温や日射量等の気候条件を調査します。

地中条件:場の条件に適した地中熱利用方式や規模を選定するため、地質や地中温度、地下水の有無、地下水汚染の有無等を調査します。

エネルギー関係:地中熱利用ヒートポンプシステムとの経済性の比較のため、当該地域で一般的に用いられるエネルギー項目(電気、ガス、灯油等)について調査します。

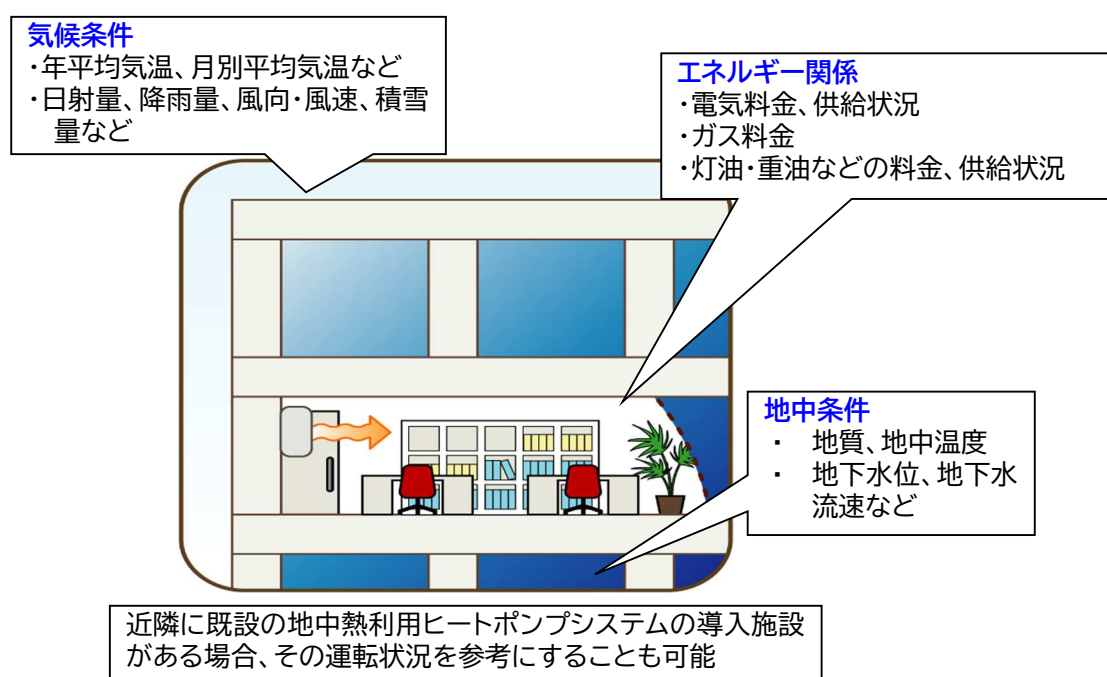


図 3-4 設計時の調査事項

地中条件の事前調査や確認の際には既に公開されているデータベースを活用することで、その地点における採熱量のポテンシャルや地盤情報を得ることができ、最適なシステム設計やコスト低減のためにも重要です。地域の地盤環境について一般的な地質情報や柱状図等の資料を確認できるデータベースは各種整備されつつありますが、地中熱利用に関しては熱特性を情報として含むことが有用となります。データベースには次のようなものがあります。

1) 地中熱のポテンシャルマップ

地域の地盤環境(地質、地下水流速、地下水位、温度など)の情報を基に、潜在的な地中熱の利用可能性(ポテンシャル)が高い地域、低い地域を示した「地中熱ポテンシャルマップ」及び「地中熱適地マップ」が公開されています(表 3-2)。(以下、「地中熱ポテンシャルマップ等」とい

う)。地中熱ポテンシャルマップ等は、地層モデルや地下水流動解析モデルなどにより推定されたポテンシャルを地図上で表したものであるため、実際のポテンシャルとは差異があります。また熱需要の大小などの施設側の条件により、ポテンシャルが高い地域であっても地中熱利用ヒートポンプシステムの導入が困難な場合や、ポテンシャルが低い地域でも導入できる場合があります。

したがって、地中熱ポテンシャルマップ等を目安として活用することに加えて、熱応答試験を実施して現地の正確なデータを把握した上で、地中熱利用ヒートポンプシステムの導入検討、設計を行うことが重要です⁴⁷。

表 3-2 日本における地中熱ポテンシャルマップ等の整備状況

マップ 対象地域	マップ名 (掲載先 URL)	出所	公表年
日本全域	再生可能エネルギー情報提供システム「REPOS」 (https://www.renewable-energy-potential.env.go.jp/RenewableEnergy/gis.html?energy=geothermal)	環境省	令和 2 年 (2020 年)
日本全域	CO ₂ 排出量削減ポテンシャルマップ(戸建住宅相当) ^{注1}	北海道大学	令和元年 (2019 年)
日本全域	必要地中熱交換器長さマップ(戸建住宅相当) ^{注2}	北海道大学	令和 2 年 (2020 年)
日本全域	必要地中熱交換器長さ・本数マップ(事務所相当) ^{注3}	北海道大学	令和 3 年 (2021 年)
青森県 全域	有効熱伝導率マップ、地下水の自然水位マップ (青森県地中熱・温泉熱利用ポテンシャル調査事業報告書) (https://www.pref.aomori.lg.jp/soshiki/energy/enerugi/files/201103_midorinobunken_aomoriken.pdf)	青森県 弘前大学	平成 23 年 (2011 年)
津軽平野	クローズドループの地中熱ポテンシャルマップ、オープンループ(帯水層蓄熱)の地中熱利用適地マップ NEDO 事業 (https://unit.aist.go.jp/georesenv/product/GSHP/Tsugaru.html)	産総研	平成 31 年 (2019 年)
秋田平野	クローズドループの地中熱ポテンシャルマップ、オープンループ(帯水層蓄熱)の地中熱利用適地マップ NEDO 事業 (https://unit.aist.go.jp/georesenv/product/GSHP/Akita.html)	産総研	平成 31 年 (2019 年)
山形盆地	クローズドループの地中熱ポテンシャルマップ、オープンループ(帯水層蓄熱)の地中熱利用適地マップ NEDO 事業 (https://unit.aist.go.jp/georesenv/product/GSHP/Yamagata.html)	産総研	平成 31 年 (2019 年)
仙台平野	クローズドループの地中熱ポテンシャルマップ、オープンループ(帯水層蓄熱)の地中熱利用適地マップ NEDO 事業 (https://unit.aist.go.jp/georesenv/product/GSHP/Sendai.html)	産総研	平成 31 年 (2019 年)
会津盆地	会津盆地 ポテンシャルマップ 自噴井を利用したシステムの適地マップ (https://unit.aist.go.jp/georesenv/product/GSHP/Aizu.html)	産総研	平成 30 年 (2018 年)
郡山盆地	クローズドループの地中熱ポテンシャルマップ、オープンループ(帯水層蓄熱)の地中熱利用適地マップ NEDO 事業 (https://unit.aist.go.jp/georesenv/product/GSHP/Koriyama.html)	産総研	平成 31 年 (2019 年)

⁴⁷ ポテンシャルマップの活用方法等については下記参照。

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合機構『地中熱ポテンシャルマップ・空調熱源設計のためのガイダンス』平成 31 年 2 月 <https://www.nedo.go.jp/content/100894107.pdf> 2023 年 2 月 6 日閲覧

栃木県 平野部	栃木県 地中熱交換量マップ (https://www.pref.tochigi.lg.jp/d01/eco/kankyou/ondanka/tityuunetsu.html)	栃木県	平成 29 年 (2017 年)
埼玉県 全域	埼玉県 地中熱ポテンシャルマップ(地中熱採熱予測図) (https://cessgis.maps.arcgis.com/home/index.html)	埼玉県	平成 30 年 (2018 年)
東京都 全域	東京地中熱ポテンシャルマップ (https://www3.kankyo.metro.tokyo.lg.jp/)	東京都	平成 28 年 (2016 年)
神奈川県 全域	神奈川県地中熱ポテンシャルマップ (http://www.pref.kanagawa.jp/docs/e3g/cnt/f535689/)	神奈川県	平成 28 年 (2016 年)
甲府盆地	山梨県郡内地域総合地中熱マップ (山梨県地中熱利用推進協議会 作成) (http://www.ygha.jp/地中熱ヒートポンプ一般利用状況.html)	山梨県 地中熱協	不明
福井平野	福井平野 ポテンシャルマップ (https://unit.aist.go.jp/georesenv/product/GSHP/Fukui.html)	産総研	平成 22 年 (2010 年)
諏訪市内 平坦部	諏訪市地中熱利用潜在量マップ (https://www.city.suwa.lg.jp/soshiki/10/2096.html)	諏訪市	平成 27 年 (2015 年)
富士山 周辺地域	富士山周辺地域における地下水熱利用適地マップ (https://www.pref.shizuoka.jp/_res/projects/default_project/_page/001/016/163/tekitimap.pdf)	静岡県	平成 27 年 (2015 年)
安部川 下流域	安部川下流域における地下水熱利用適地マップ (https://www.pref.shizuoka.jp/_res/projects/default_project/_page/001/016/163/abekawa.pdf)	静岡県	平成 30 年 (2018 年)
大井川 下流域	大井川下流域における地下水熱利用適地マップ (https://www.pref.shizuoka.jp/_res/projects/default_project/_page/001/016/163/ooigawa_map.pdf)	静岡県	令和 3 年 (2021 年)
濃尾平野	濃尾平野におけるオープンループ型 地中熱利用システムの ポテンシャルマップ NEDO 事業 (https://openloopgifu.jp/atfirst/)	岐阜大学	平成 31 年 (2019 年)
大阪平野	大阪府 地中熱ポテンシャルマップ(クローズドループ)、 地中熱適地マップ(オープンループ) (https://www.pref.osaka.lg.jp/eneseisaku/sec/chichunetsu_map.html)	大阪府 産総研	令和元年 (2019 年)
大阪市 全域	大阪市常水層蓄熱情報マップ (https://www.mapnavi.city.osaka.lg.jp/osakacity/Portal)	大阪市	平成 28 年 (2016 年)
筑紫平野	佐賀県 地中熱ポテンシャルマップ (https://www.pref.saga.lg.jp/kiji00369057/index.html)	佐賀県	平成 31 年 (2019 年)
熊本平野	熊本平野 ポテンシャルマップ (https://unit.aist.go.jp/georesenv/product/GSHP/Kumamoto.html)	産総研	平成 24 年 (2012 年)

注 1 阪田義隆・葛隆生・長野克則, 地中熱利用ヒートポンプシステム導入による CO₂ 排出量削減の全国評価: 戸建住宅への暖房利用を例として, 土木学会論文集 G(環境), 74(5) 1359-1367, 2018.

注 2 阪田義隆・葛隆生・長野克則, 地中熱ヒートポンプシステムの間接型地中熱交換器必要長さ全国 500m グリッド算定と評価, 土木学会論文集 G(環境), 75(5) 1177-1183, 2019.

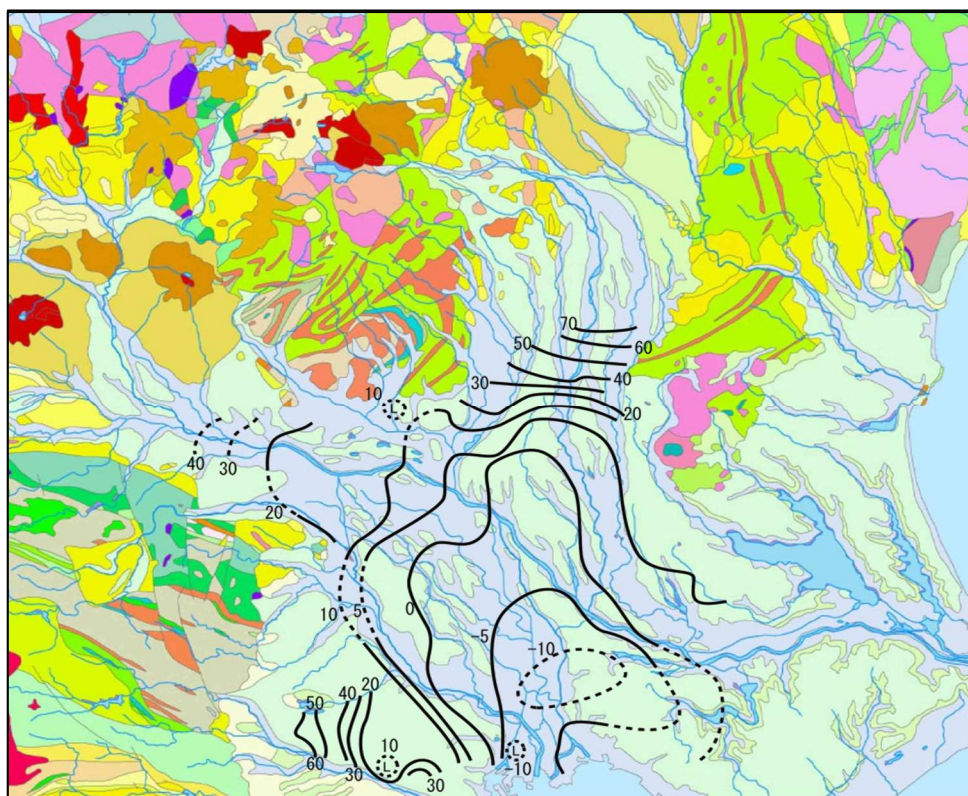
注 3 Yoshitaka Sakata, Takao Katsura, Katsunori Nagano, Nationwide Determination of Required Total Lengths of Multiple Borehole Heat Exchangers under Variable Climate and Geology in Japan, *International Journal of Geo-information*, 10(4), 205-220, 2019.

2) 水文環境図

産業技術総合研究所において日本水理地質図の後継として考案された水文環境図が作成されており、2022 年12月現在で 9 つの地域の水文環境図が公開されています⁴⁸ (図 3-5)。水文環境図の目的は地下水資源の保全と有効利用に資することであり、特に将来的な地中熱利用を見越して地下水温情報が重点的に収録されています。これは複数の地盤沈下観測井を用いた地下水温鉛直プロファイルの実測結果に基づいています(表 3-3)。

表 3-3 水文環境図の中心的な編集項目⁴⁹

	地下水	地中熱
現況	一般水質・無機汚染項目 透水係数分布 水文地質断面 水理地質基盤	現況の地下水水面図 水温分布 地温勾配分布
過去	過去の水質分布 過去の地下水水面図	過去の水温分布
その他	地質図 地形図 地質断面 線路・国道	

図 3-5 水文環境図の例(関東平野、水理水頭の深度別平面図(50m~100m))⁵⁰

⁴⁸産業総合技術研究所地質調査総合センターホームページ <https://www.gsj.jp/Map/JP/environment.html> 2022 年 12 月 9 日閲覧

⁴⁹町田, 地下水に関する基盤情報 - 水文環境図のねらいと今後の展望 -, 独立行政法人産業技術総合研究所 地圏資源環境研究部門 研究成果報告誌 Green Report 2010, p.23-26, 2010.

⁵⁰独立行政法人 産業技術総合研究所 地質調査総合センター, 水文環境図(関東平野), 2005.

3) 国土地盤情報検索サイト「KuniJiban」

近年、各省庁や多くの地方公共団体等において地盤情報等のデータベースが整備されています。例えば、国土交通省は国立研究開発法人土木研究所および港湾空港技術研究所と共同運営により、過去の地質、土質調査の成果を「KuniJiban」で公表しています。既往のボーリング調査の結果(地下水位、土質、N 値など)を閲覧することが可能で掘削の事前情報として活用できます(図 3-6)。



図 3-6 KuniJiban の例⁵¹

⁵¹国土地盤情報検索サイト「KuniJiban」ホームページ, <https://www.kunijiban.pwri.go.jp/jp/index.html>, 2022 年 12 月 16 日閲覧

4) 再生可能エネルギー情報提供システム「REPOS」

REPOSでは、再生可能エネルギーの導入促進を支援することを目的として各種再生可能エネルギーのポテンシャル情報を提供しています。地中熱については、全国の導入ポテンシャルが500 mメッシュ単位で地図上に示されています。REPOSの詳細は以下で確認できます。

<https://www.renewable-energy-potential.env.go.jp/RenewableEnergy/index.html>

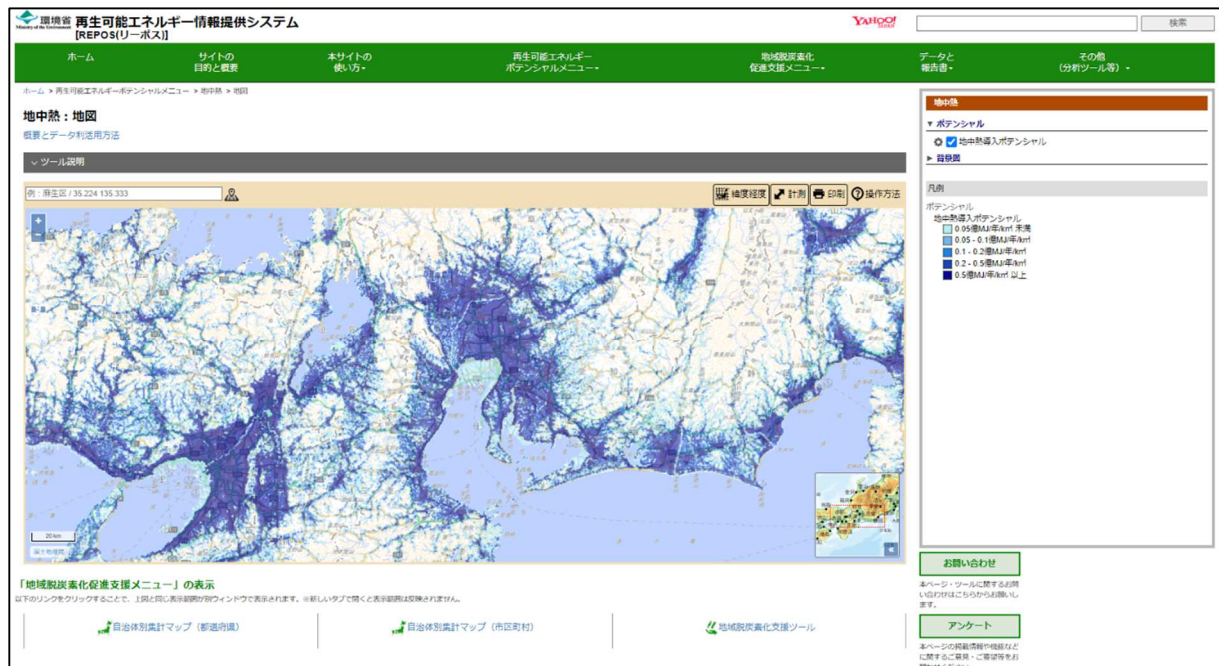


図 3-7 REPOS の例

(2) 適切な設備規模の設定と運転管理

1) 設備規模の設定

建物設計時には以下の項目等を影響因子とする空調負荷計算を行い、必要な冷暖房出力を算出します。

空調負荷計算は地中熱利用の有無に関わらず行われますが、地中熱利用ヒートポンプシステムの必要規模についても、空調負荷計算の結果を基に設定します(図3-8)。

建物条件:空調対象部分の延床面積、建物の断熱性能、空調設備の利用条件、内部の熱生産、窓等の外部からの熱負荷

気候条件:気温、日射量等(「(1)設計時の事前調査」に同じ)

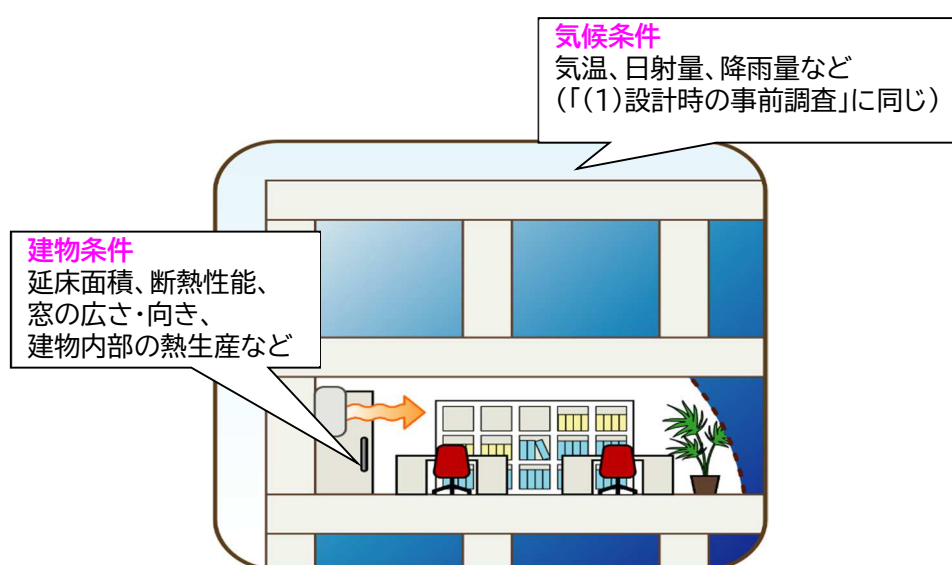


図3-8 必要な冷暖房能力に影響する各項目

クローズドループ方式の場合、地下水の有無や地盤の種類(熱特性)によって、地中熱交換器長1m当たりでどれだけ熱交換できるかが異なるため、熱交換器を適切な規模に設計する観点が重要です。

また空調方式も考慮すべき事項の一つです。空調方式は中央熱源方式(セントラル空調方式)と個別分散方式の2つに分かれます。中央熱源方式とは、機械室など1か所に設置された熱源機器で建物全体の空調を集中管理で制御することができる方式です。個別分散方式は、各部屋、系統毎に空調機を設置し、各々の空調機で稼働を制御することができる方式です。空調方式によって、熱源機器と二次側の間の配管を冷温水か空気が循環するかが異なります(1.2(3)システムの構成もご参照下さい)。

一般的に、中央熱源方式は大規模建物で採用されることが多く、個別分散方式は小規模建物で採用されることが多い方式です。なお、地中熱利用ヒートポンプシステムは中央熱源方式、個別分散方式を問わず導入可能であるため、建物の利用条件に応じて適切な方式を選択する必要があります。次ページでは、中央熱源方式と個別熱源方式を採用した地中熱利用ヒートポンプシステムの事例をそれぞれご紹介します(表3-4、表3-5)。

表 3-4 中央熱源方式を採用している事例

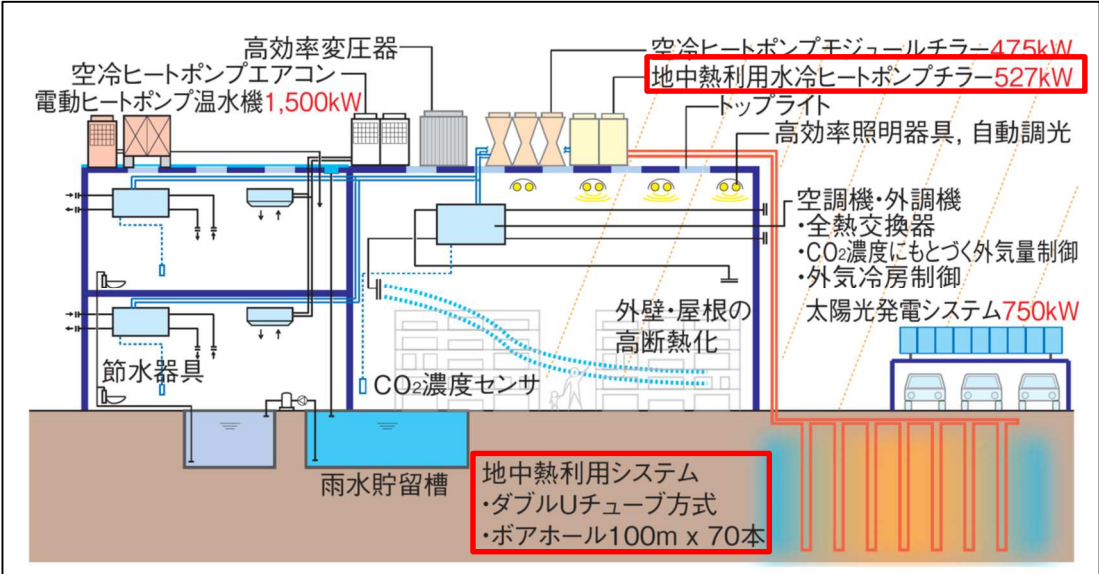
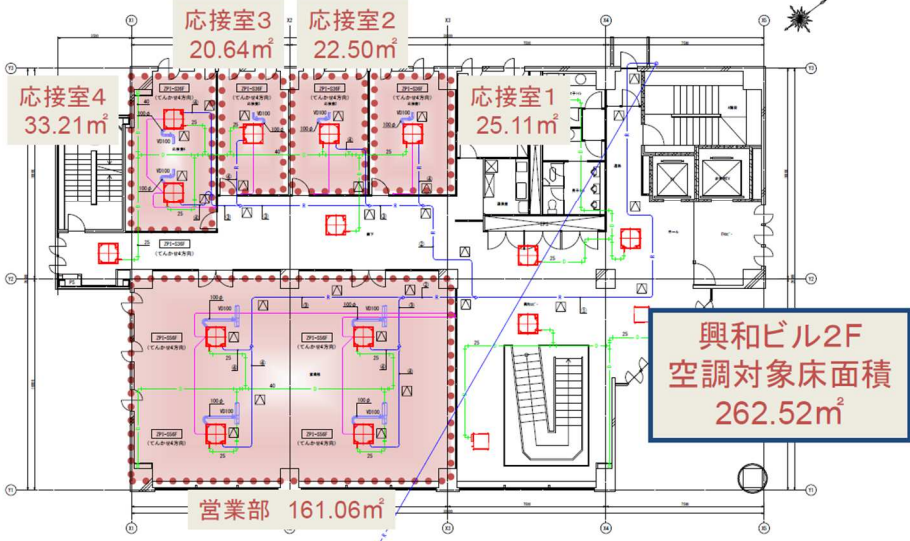
①施設名(所在地)	IKEA 福岡新宮 (福岡県糟屋郡新宮町)
②地中熱の用途	空調
③地中熱利用設備概要	地中熱利用ヒートポンプ(水-水ヒートポンプ)1台 (冷房 527 kW / 暖房 530 kW)
④エネルギー消費量削減率	44% (2014 年度実績)
⑤竣工年	2012 年
⑥特徴など	 出典:中村導彦・堀池瞬(2013), IKEA 福岡新宮における国内最大級の地中熱利用空調システム, ヒートポンプとその応用, 86, pp.27-30 ・1階のセルフサーブ・ウェアハウスの空調負荷およびマーケットホール・ショールーム・レストランの外気負荷を処理する熱源として、地中熱利用水冷ヒートポンプと空冷ヒートポンプモジュールを併用したシステムを導入した。

表 3-5 個別分散方式を採用している事例

①所在地	興和ビル（新潟県新潟市）
②地中熱の用途	冷暖房、融雪
③地中熱利用設備概要	地中熱利用ヒートポンプ(水－空気ヒートポンプ)1台 (冷房 40 kW / 暖房 45 kW)
④エネルギー消費量削減率	52% (2013 年度実績)
⑤竣工年	2012 年
⑥特徴など	  空調更新対象 - 既設室外機1台の同一系統分を入れ替え  出典：新潟県地中熱利用研究会 再生可能エネルギー熱シンポジウム資料 第二部：新潟県内における地中熱利用施設導入事例の発表「興和ビルの地中熱利用設備の導入と運営状況」、および株式会社興和提供資料 2階の執務室と応接室合わせて 5 部屋の空調設備を地中熱源ビル用マルチエアコン(水－空気ヒートポンプ)に更新した。 - 更新した空調設備は、地中熱交換器(ダブルUチューブ)8 本と地中熱利用ヒートポンプ 1 台、室内ユニット 9 台で構成されている。

2) 運転管理

運転管理では、採熱量などの計画値を上回る運転は行わないように留意する必要があります。例えば、冬季暖房時に過剰な採熱により地中温度が低下すると、ヒートポンプ入口温度が低くなり、地中熱利用ヒートポンプの効率低下だけでなく、地下水・地盤環境に対する負荷の増大を引き起こす可能性があります。通常の稼働状況では問題になることはほとんどないものの、過剰な採熱を行うと地中熱利用ヒートポンプの効率が低下する場合があるため留意が必要です（「4.4(6)モニタリング結果の事例」および参考資料3もご参照ください）。そのため、設備導入時には建物側の熱負荷に対応して一次側システムを適切に設計することが重要であるとともに、運用時のモニタリングやEMS（エネルギーマネジメントシステム）等を用いた運転管理が求められます。次ページにEMSを活用して運転管理を行っている事例を紹介します。

表 3-6 EMS を活用している事例

①施設名(所在地)	中部電力岐阜支社ビル(岐阜県岐阜市)
②地中熱の用途	空調
③地中熱利用設備概要	地下水熱用水冷ヒートポンプ(1台)、 空冷ヒートポンプ(2台)、井水槽(3槽)
④エネルギー消費量削減率	37% (2008年7月～10月実績)※
⑤竣工年	2001年
⑥特徴など	・地下1階、地上11階建、延床面積約24,000 m²。 ・1階～10階は事務所スペース(主要系統に井水槽水蓄熱システムを採用)。11階は会議室、福利厚生スペース。地階は、機械室、倉庫。 ・熱源システムである井水槽は、水深1.5 mの低水深・多層・温度成層型井水槽。 ・COP6.6(出口温度 9℃、入口温度 18.6℃)の地下水熱利用高効率水冷ヒートポンプ1台、空冷ヒートポンプ2台の熱源機計3台で構成。 ・完工後3年間の初期運転調整、完工後7年目の運用上の課題分析による運転改善の実行、運転管理の効率化を検討した BEMS の導入など、運転後管理の取組みについてモニタリングデータの分析を行った。 ・それ以降、不具合箇所の改善、設備管理者を常駐させることでシステムの現状を把握し、調整を行って施設稼働を続けている。



<出典>

- ・一ノ瀬他(2010)「高効率空調システムの省エネルギー化に向けた実践研究 (第1報)空調システムの概要と完工後3年間の省エネルギー化に向けた取り組み」空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集
- ・中井他(2010)「高効率空調システムの省エネルギー化に向けた実践研究 (第2報)中央監視データを利用した運転改善の結果」空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集
- ・合田他(2010)「高効率空調システムの省エネルギー化に向けた実践研究 (第3報)運転管理の効率化に向けた BEMS での見える化」空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集

※2007年7月～10月の当該施設における空調機の消費電力量に対しての削減率を示している。

2008年にモニタリングデータを活用した運転改善を行ったことでエネルギー消費量を削減することができた。

3) システムの性能予測

地中熱利用ヒートポンプシステムの設計やシミュレーションを行えるツールや、システムを導入した建物において省エネルギー性能等を把握できるツールを紹介します。

① Ground Club

クローズドループ型の地中熱利用ヒートポンプシステムの設置にあたり、地中熱交換器の長さの決定や年間性能予測、環境性評価を行うためのツールとして用いられています(図3-9)。使いやすいGUI(graphical user interface)と高速計算により建物や地中熱交換器の仕様、地盤条件に基づいて、必要な地中熱交換器の長さを計算することができます。また Ground Club では性能評価、消費電力量、ライフサイクルコスト(LCC)、ライフサイクルCO₂(LCCO₂)等の評価が可能です。

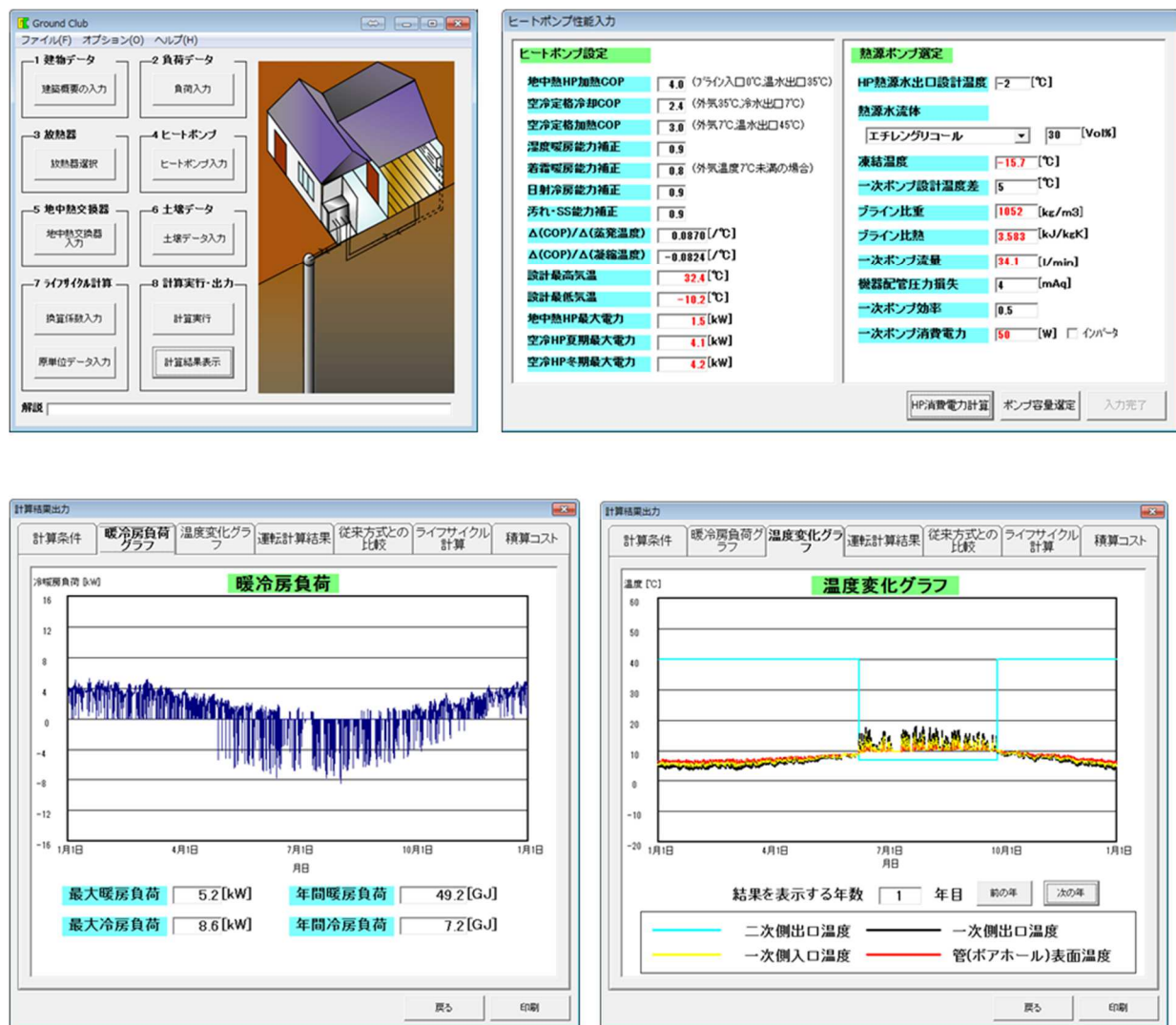


図 3-9 Ground Club の操作画面および計算例

② LCEM (ライフサイクルエネルギーマネジメント) ツール

ライフサイクルを通じたエネルギーマネジメントの枠組みの中で、空調システムを対象に開発されたシミュレーションツールで、地中熱利用ヒートポンプシステムにも対応しています。設計段階においては、機器の性能(消費電力や、冷温水温度等)の予測や、地中の温度変化を予測することができます。システム運用時には、エネルギー性能の検証や運用改善の効果検証において活用することもできます。

詳細については、国土交通省のホームページに情報があります。

https://www.mlit.go.jp/gobuild/sesaku_lcem_lcem.html

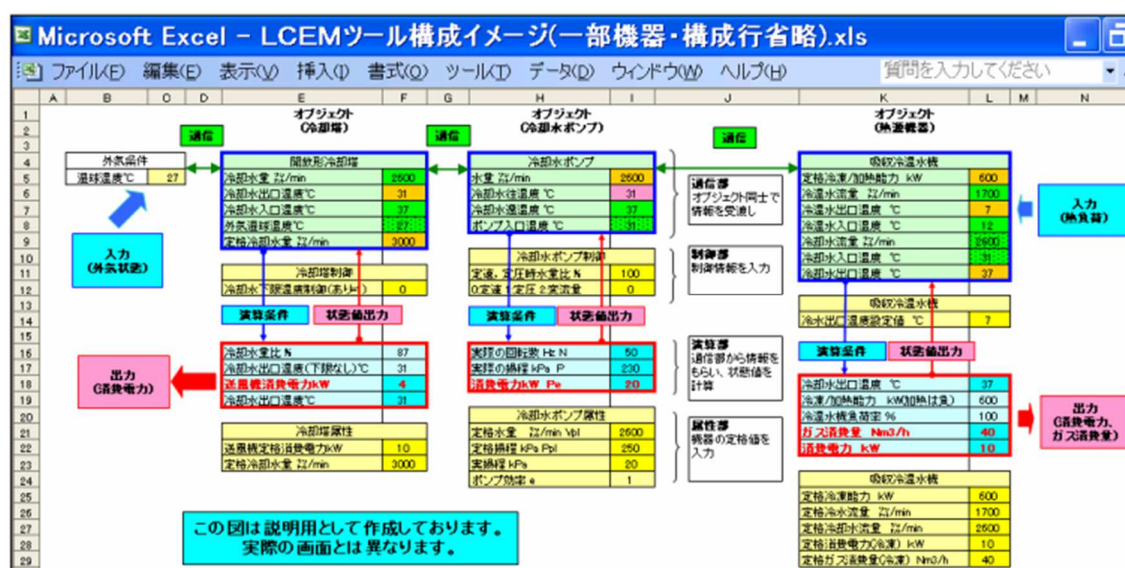


図 3-10 LCEM ツールの構成イメージ⁵²

③ WEBPRO (建築物のエネルギー消費性能計算プログラム)

国立研究開発法人建築研究所が開発したエネルギー消費性能計算ツールであり、地中熱を空調利用した建築物全体の省エネルギー基準への適合性を判定することができます。建築物の一次エネルギー消費量を把握することで省エネルギー効果やCO₂排出量削減効果を予測することが可能です。このツールはクローズドループ方式、オープンループ方式を問わず利用可能です。ツール上では導入する地中熱利用ヒートポンプシステムの概要や、その他の設備の情報を入力することで、建築物の省エネルギー性能を自動的に計算することができます。なお、平成27年7月に「建築物のエネルギー消費性能の向上に関する法律」が公布され、住宅以外で一定規模以上の建築物については省エネルギー性能の基準への適合義務等が課されています。

⁵²国土交通省大臣官房官庁営繕部設備・環境課「LCEM 手法及びツールの概要」,
<https://www.mlit.go.jp/common/001027171.pdf>, 2022 年 12 月 9 日閲覧

WEBPRO については、以下に情報やツールが公開されています。

- ・建築物のエネルギー消費性能計算プログラム(非住宅版)ver.3.3.2
<https://building.app.lowenergy.jp/>
- ・建築物のエネルギー消費性能に関する技術情報(国立研究開発法人建築研究所)
<https://www.kenken.go.jp/becc/>
- ・エネルギー消費性能の算定プログラム(標準入力方法)の計算仕様書
<https://www.kenken.go.jp/becc/building.html#1-3>

表 3-7 WEBPRO を活用して地中熱利用ヒートポンプシステムの設計を行った事例

①施設名(所在地)	オー・ド・エクラ(宮城県仙台市)
②地中熱の用途	空調、給湯
③地中熱利用設備概要	地中熱利用ヒートポンプ 3 台 (冷房 446 kW / 暖房 468 kw)
④エネルギー消費量削減率	52% (設計値)
⑤竣工年	2018 年
⑥特徴など	・外皮性能を強化したパッシブ設計を取り入れ、地中熱利用ヒートポンプシステムを利用した空調および給湯設備を採用し、エネルギー負荷低減を図っている。 ・制御付き LED 照明設備や BEMS 装置や高効率熱源を導入し、ZEB 化の実現を目指しており、一次エネルギー消費量の削減率は 52%を達成している。また、ZEB Ready として、ZEB リーディング・オーナーの認定を受けている。

システム系図

高断熱化
単層ウレタン断熱インサレーションフォーム
断熱性能: 0.23 W/(m・K)
厚さ: 50mm

高性能ガラス (空気層)
FLSA12+LowE2
(9+12+5+9 構造)

高性能窓
ワンシ・ガラス
熱貫流率: 2.63 (W/ m²・K)
(9+12+5+9 構造)

高性能熱源
地中熱ヒートポンプ 合計 3 台
冷房能力: 446.6kW
暖房能力: 468.2kW
定格 COP=3.76
定格 COP=3.76

高性能空調機 -1
ビル用全熱交換機 3 台
冷房能力: 94.5kW
暖房能力: 94.5kW
定格 COP=3.66
定格 COP=3.67

高性能空調機 -2
ルームエアコン 合計 170 台
冷房能力: 2.25kW
暖房能力: 2.25kW
定格 COP=4.18
定格 COP=4.06

高効率給湯システム
地中熱ヒートポンプによる給湯
冷房能力: 162.8kW
定格 COP=4.28
暖房能力: 162.8kW

制御付き LED 照明
471 台
人感制御
タイマースケジュール
431 台

太陽光発電システム
外装型・単結晶
合計 14250m²/h
運転効率: 75%
エネルギー変換効率: 70%
合計 6.2 台

トランスラナー変圧器
1台 200kVA1台
3台 300kVA1台
3台 500kVA1台

地中熱利用ヒートポンプ
地中熱利用ヒートポンプ
1台 446.6kW
1台 468.2kW

給湯槽
給湯槽

熱源自動制御装置
熱源自動制御装置

出典:ゼネラルヒートポンプ工業株式会社パンフレット「ヒートポンプ活用事例集 オー・ド・エクラ様」

(3) 複数の帯水層を貫通する場合の留意点

1) 地下水環境への影響

複数の帯水層を貫通させて地中熱交換器あるいは井戸を設置する場合は、異なる帯水層の地下水が混じりあい、周辺の地下水質環境に影響を与える可能性があります。例えば土壌や地下水に含まれる有害物質の濃度が環境基準を超えている場合は、地下水を通して汚染の拡散に繋がる恐れがあります。また異なる帯水層を流れる地下水の流動量と水収支が変化し、地下水と繋がる河川や海岸などの流出先にその影響が及ぶ可能性があります。さらには異なる帯水層では、地下水中の溶存成分や酸化還元電位が異なる場合があるため、pH や温度や酸化還元電位の変化に伴って生成物(水酸化鉄や酸化鉄等)が生じる可能性があり、それがストレーナーの目詰まりなどにつながります。

2) 井戸や採熱孔の仕上げ方

複数の帯水層を貫通して地中熱交換器あるいは井戸を設置する場合には、各帯水層に止水を行う、あるいは帯水層と非帯水層との境界部に遮水材を施工するなどの検討が必要です。

遮水方法にはベントナイトペレット方式やパッカー方式等があります。

ベントナイトペレット方式の施工は、難透水層部に遮水材(ベントナイトやセメントミルク等)を充填します。また、複数の帯水層がある場合は、帯水層毎に遮水材で止水されていることを確認する必要があります。確認する項目は、一般的には pH(水素イオン濃度)及び EC(電気伝導度)です。

また沿岸部では地下水が塩水化している場合があり、一般に用いられる遮水材(ベントナイトやセメントミルク等)では十分に膨潤しないため、遮水効果が低く別の帯水層に地下水が混入してしまったり、塩水と淡水の混合により液体中に分散しているコロイド微粒子などが凝集沈殿することで、著しく地下水が濁ってしまったりするなどの事例が確認されています。近年では、塩水内での遮水に有効な改良型遮水材の開発が進んでいるため、地下水の塩水化が確認される場合には今後、改良型遮水材を採用できる可能性があります。

パッカー方式は、パッカーに拡張媒体を注入するチューブを接続し、ロッドを連結してボーリング孔内に設置するものが一般的です。施工としては、対象とする帯水層の上部と下部にパッカーでスクリーン区間を遮水し、上部と下部パッカー間にスリットを設置してスクリーン区間のみを揚水します。パッカーの膨張と収縮は窒素ガスを使用し、窒素ガスは地上から上部パッカーまでテフロンチューブで接続して注入および排出を行います。パッカー方式を採用する際の留意点として材料の選定、品質管理を始めとして、施工後の劣化調査を含めて長期的な止水性の管理が必要です。

(4) クローズドループ方式の留意点

1) 地盤の有効熱伝導率と熱応答試験

地中熱交換器長 1 m 当たりの可能熱交換量は、40 W/m 程度とされています⁵³。実際には、地質の構成とそれらの熱物性および地下水流れの有無によって変化します。

⁵³北海道大学環境システム工学研究室編, 地中熱ヒートポンプシステム(改訂 2 版), オーム社, 2020.

また、地中熱交換器の仕様(口径や U チューブの素材や配置、充填材等)に応じた熱抵抗によって地盤と熱媒体の間に温度差が生じます。

出力規模に応じた必要な地中熱交換器長を定めるため、対象地点における地盤の有効熱伝導率(地下水流れがある場合には見掛け熱伝導率)とボアホール熱抵抗を把握する方法として、熱応答試験(サーマルレスポンステスト:TRT)があります(図 3-11)。

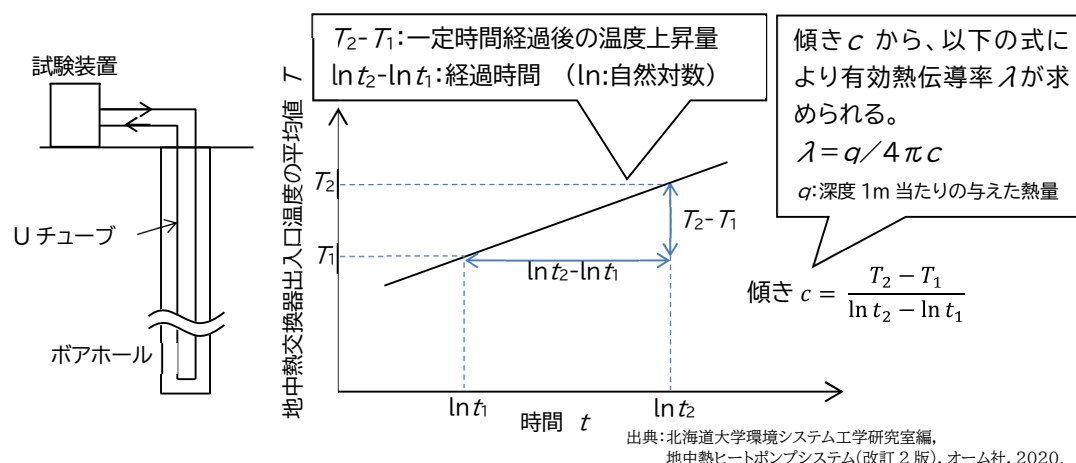


図 3-11 熱応答試験の実施方法

熱応答試験は、地中熱交換器等を用いて地中に熱を与え、循環水等の温度変化から地盤の有効熱伝導率等を推定する方法です。熱応答試験を実施するためには、試験孔の掘削が必要ですが、適切なシステム設計のために地盤の熱特性を把握したい場合や、採排熱負荷の大きな施設の建設時に何本の地中熱交換器が必要かをあらかじめ調査する場合等に有効です。

以下に一般的な熱応答試験と簡易的な熱応答試験をそれぞれご紹介します。また、研究開発中の熱応答試験を 5.2(2)開発中の TRT 手法に掲載しています。

① 一定加熱・温水循環方式

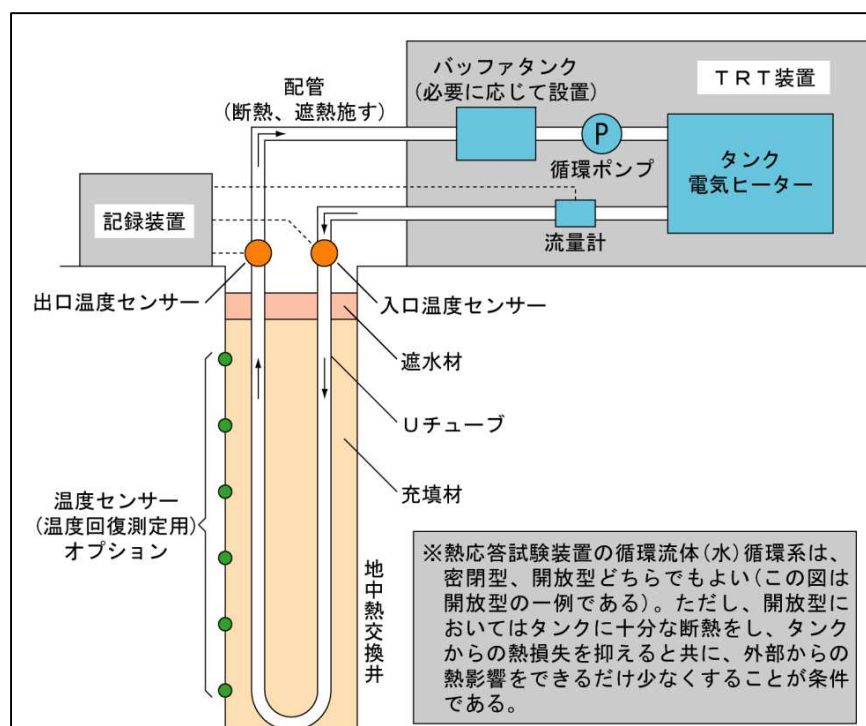
一般的な熱応答試験である「一定加熱・温水循環方式」は、地中熱交換器に熱媒体(水や不凍液など)を加熱して循環させ、熱媒体や地中の温度変化から有効熱伝導率などを求めるものです(図 3-12)。なお、地中熱利用ヒートポンプシステムを導入する建築物において省エネルギー基準への適合性を判断する際に、熱応答試験から有効熱伝導率を求める場合には規格に適合した試験装置や方法を用いる必要があります。これらの詳細については、特定非営利活動法人 地中熱利用促進協会のホームページや「一定加熱・温水循環方式熱応答試験(TRT)技術書」を参照してください。

- ・特定非営利活動法人 地中熱利用促進協会ホームページ「TRT 装置認定」

<http://www.geohpaj.org/project/trt>

- ・特定非営利活動法人 地中熱利用促進協会編, 「一定加熱・温水循環方式熱応答試験(TRT)技術書」, 2018 年 8 月

http://www.geohpaj.org/wp/wp-content/uploads/trt_draft_20180830.pdf

図 3-12 一定加熱・温水循環方式の模式図⁵⁴

② 一定加熱・ケーブル方式（簡易版）

設置地点の地質柱状図や地下水位情報等がない場合は、「一定加熱・ケーブル方式」の熱応答試験で簡易的に熱伝導率を測定することもできます（図 3-13）。この方式は地質調査を行った小口径のボーリング孔で試験を行うもので、試験に必要な時間も短く比較的安価であるという特徴があります。基本的な原理は、ベントナイトや砂等で充填した状態のボーリング孔に、ケーブル状ヒーターと光ファイバーケーブルを設置してヒーターで加熱させ、与えた熱量と孔内の温度変化の関係から有効熱伝導率を求めるものです⁵⁵。なお地質調査とセットで行う試験であるため、最大測定深度が50 m程度までに限られてしまうという課題があります。

⁵⁴特定非営利活動法人 地中熱利用促進協会，一定加熱・温水循環方式熱応答試験（TRT）技術書，2018

⁵⁵神宮司元治・高屋 正・青野泰大・宮本重信，ボーリング孔を利用した非定常線状熱源法による熱伝導率検層法 日本地熱学会誌 32(3)，pp.185～191，2010。

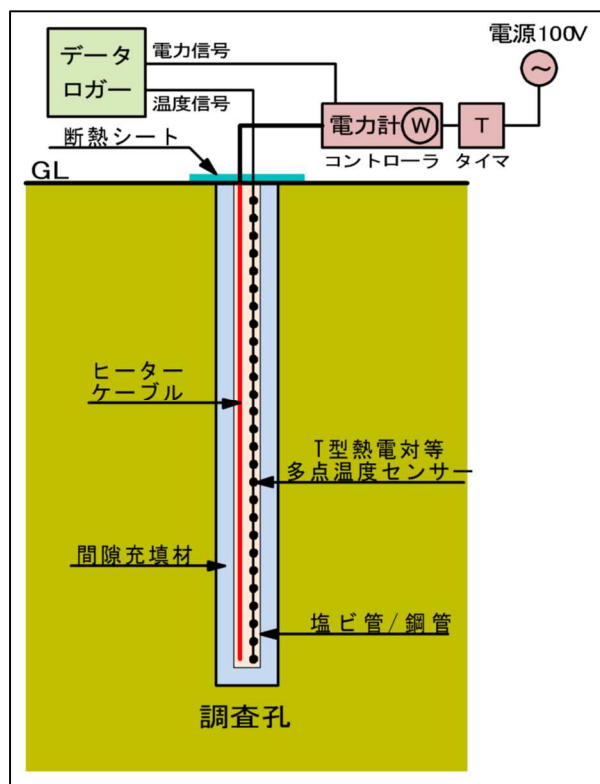


図 3-13 一定加熱・ケーブル方式による熱応答試験の模式図⁵⁶

2) 熱媒体

地中との熱交換を行う熱媒体は、以下の項目に留意し、必要な性状を満たす素材を選定する必要があります(表 3-8)。

使いやすさ：価格、入手の難易、不燃性、腐食耐性、低粘性など

熱的特性：比熱、熱伝導率、凍結温度、熱安定性など

環境影響：毒性がない、生分解性など

熱媒体には様々な素材がありますが、腐食耐性、不燃性から、国内ではエチレングリコール、プロピレングリコールが広く用いられています。

これらのうち、エチレングリコールは人体に対して毒性があるため、漏えいリスクの観点から海外では法的規制や使用の制限がある国もあります。また、プロピレングリコールは生物に対し無害ですが、エチレングリコールよりも高価格であることや、低温になると粘性が高くなるといった面もあります。有害な熱媒体を用いる場合には熱媒体が漏えいしないように管理する必要があります。特に、近くに水道水源がある場合に漏えいが生じると水道水の一時的な供給停止が生じる可能性があるため注意が必要です。

また冷房運転が主体の場合、熱媒体として水を使用することもあります。

⁵⁶ジオンシステム株式会社, TCP に関するパンフレット

表 3-8 熱媒体の性状⁵⁷

種類		腐食耐性 (金属)	粘性	不燃性	毒性 (対人)	環境 (分解性)
塩 類 系	塩化カルシウムなど	×	○	○	○	○
アルコール系	エタノールなど	○	○	×	○	○
グリコール系	エチレングリコール	○	○	△	×	×
	プロピレングリコール	○	×	△	○	○
有機酸塩系	酢酸など	△	○	○	○	○

凡例:○:適用可, △:設備や周辺の条件により適用可, ×:適用不可

3) 地中熱交換器の離隔距離

クローズドループ方式における地中熱交換器の離隔距離については地質条件、地下水条件、設置する敷地の制約条件及びヒートポンプ能力などにより変わるため、画一的に定めることはできませんが、これまでの実証実験、モニタリング、文献等をいくつか紹介致します。

① 実証実験

地下水流動が比較的大きい地域では、地中熱交換器の離隔距離を6 mにすれば、相互の温度干渉が小さくなる、という研究結果があります。(参考資料2.地中熱利用ヒートポンプシステムの事例データ集の「東北大学青葉山新キャンパスへの地中熱利用ヒートポンプシステム導入の原位置実証事業」)

② 海外事例

冷房時における地中熱交換器周辺の温度上昇に伴う含水比の変化も考慮した場合には、6 mの間隔を必要とする報告があります⁵⁸。

③ 官庁施設における地中熱システム導入ガイドライン(案)での記載例

地中熱交換器の設置間隔は、「孔芯間隔で 4 m以上(5 mを標準)とする。」という記載があります。

これらの事例を総合すると、地中熱交換器の離隔距離は、少なくとも 4 mは確保することが望ましく、安全側で考えると6 m以上となります。

⁵⁷北海道大学環境システム工学研究室編, 地中熱ヒートポンプシステム(改訂2版), オーム社, 2020.

⁵⁸Steve Kavanaugh, Kevin Rafferty(2014)『Geothermal Heating and Cooling: Design of Ground-Source Heat Pump Systems』pp.84-85,
American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers(2019)『ASHRAE HANDBOOK 2019 Heating, Ventilating, and Air-Conditioning Applications: SI edition』pp. 35-11

4) 寒冷地における凍結について

① 地盤の凍結

クローズドループ方式で寒冷地の場合、冬季に地盤の凍結が発生する恐れがあります。例えば暖房時においては、地中から過度に採熱してしまうと地中温度が低下して 0℃以下となり、凍結を引き起こす可能性があります。

地盤が凍結する場合、水が氷となることにより体積が膨張するとともに、地下水位が高い場所などは融雪後に氷が昇華あるいは融解することによって空隙が生じ、陥没を引き起こす事例が報告されています⁵⁹。

これを防ぐには、地中の温度が継続的に 0℃以下とならないような適切な設計および運用や、過度な連続暖房運転を避けることが重要です。

また、地中熱交換器からの横引き配管部分では、凍結してしまうと地面の隆起(凍上)が発生する可能性があるため、地下水位から上の地盤を止水目的のためセメンチングするなど状況に応じた材料を用いて凍結防止を施したり、配管等を断熱材で覆う等の措置が必要な場合があります。

② 熱媒体の凍結

熱媒体の凍結による漏水などを防ぐために、熱媒体に不凍液を用いる、配管等に断熱を施す、配管を寒冷地仕様にするなど注意が必要です。

5) 地中熱交換器の新設・廃止に関する留意点

土地の所有権移転等に際し、更地が原則という慣習に基づいて多額の費用をかけて地中熱交換器を撤去することは、施設の有効利用や環境配慮の観点から望ましいものとはいえません。地中熱交換器は 50 年以上⁶⁰の耐用年数があるとされており、所有者が変わる場合も引き続き、地中熱交換器を熱源として有効利用することが期待されます。

① 新設時の留意点

新たに地中熱交換器を設置する際は、将来的に所有者が移転しても資産として活用できるよう規格や品質などを示した図面等の納品書類はすべて残すようにしてください。

借地に新たに地中熱交換器を設置する場合には、土地所有者と事前に協議し、施設の利用終了時や借地返還時の取り扱いについて合意形成を図っておく必要があります。なお採熱専用鋼管杭または基礎杭を活用した地中熱交換器の場合には、ボアホール型に比べて撤去が有利になる可能性があります。

⁵⁹環境省 水・大気環境局 土壤環境課 地下水・地盤環境室「地中熱の普及促進に係るアンケート調査」令和 4 年実施

⁶⁰特定非営利活動法人地中熱利用促進協会による <http://www.geohpaj.org/introduction/qa/1-7>

② 現所有者が廃止措置を行う場合の留意点

土地の所有権移転等に伴い地中熱利用ヒートポンプシステムを撤去する場合には、関係者間で地中熱交換器の有効利用について協議する必要があります。

熱源として再利用する可能性がある場合には、U チューブ先端をキャップでふたをするともに、正確な位置を記しておくことを勧めます。

再利用せず関係者間の協議で残置が認められた場合には、U チューブを途中で切断することがあります。不凍液は漏洩すると土壌・地下水汚染の原因となる可能性があるため、すべて抜き取るとともに、無害である上水やモルタル等に入れ替え、先端をキャップでふたをする等の処理を行ってください。

(5) オープンループ方式の留意点

1) 地下水に関する揚水規制

オープンループ方式では地下水をくみ上げて使用するため、地域や揚水量によっては、地下水揚水に関する規制(工業用水法、建築物用地下水の採取の規制に関する法律(ビル用水法)、地方公共団体の条例等)の対象となる可能性があります。地下水の採取規制がある地域では、揚水の可否、運用条件、許可申請手続き等を地方自治体に確認する必要があります。(詳細については、参考資料「6.地下水に関する規制」を参照)

2) 可能揚水量の確認

地下水位の大幅な低下を生じない範囲での可能揚水量について、以下の①～③の試験等により確認できます。可能揚水量の確認方法については、一般社団法人 全国さく井協会「さく井工事施工指針(2021年版)」もご参照ください。

一般社団法人 全国さく井協会, 「さく井工事施工指針(2021年版)」, 2021年6月
https://www.sakusei.or.jp/sakusei_shishin.pdf

① 段階揚水試験

揚水量を段階的に増加させながら、揚水量と地下水位の低下の関係を調査し、限界揚水量を算出します。

② 連続揚水試験

段階揚水試験の結果に基づく適正揚水量を連続的に揚水し、地下水位が安定することを確認します。

③ 回復試験

揚水を停止後、水位の回復状況の確認をします。

3) 有害物質を含む地下水の地下浸透規制

水質汚濁防止法⁶¹では、令和5年2月現在、ひ素、鉛等の28項目の有害物質が定められており、これらが地下水に含まれている場合、排水の河川等の公共用水域への放流や、地下水の還元について地方自治体によっては公害防止条例等により、地下浸透を禁止している場合があります。

一方で、地球温暖化対策としての地下水の利活用形態が多様化していることから、自治体によっては条例により柔軟な対応を行っています。例えば宮城県では、令和4年1月に「揚水した帯水層と同一の帯水層に水質を変化させることなく還元する場合は、帯水層を流れている状態と変わりはないことから地下浸透に該当しないもの」と運用通知を改正しました。ただし水質に変化がないことを担保させるため、揚水及び還元水の水質測定を行い、その結果を3年間保存するよう指導することが定められています。

このように、地下水を利用する場合は地方公共団体の条例等を確認の上、水質汚濁に留意するとともに、地盤環境への影響についても留意することが重要となります(表3-9)。

表3-9 地下水利用が可能な場合

利用地域	利用に向けて留意すること
揚水規制の対象地域外	・公共用水域等への排水の水質
揚水規制の対象地域	・規制範囲内(揚水量、ストレーナー位置、吐出口断面積等)での地下水の採取 ・公共用水域等への排水の水質 ・確実に還元できる還元井

⁶¹水質汚濁防止法施行令第二条

4) 設備の腐食・スケール生成の防止

オープンループ方式においては、地下水をヒートポンプの熱媒体として直接使用する利用方式もあり、この場合は、地下水質に起因する配管等の設備の腐食やスケール生成を防止するために以下の水質基準に適合する必要があります(表 3-10)。

表 3-10 地下水を熱媒体として直接使用する場合の冷却水・冷水・温水・補給水の水質基準値⁶²

項 目		冷 却 水 系		冷 水 系		温 水 系				傾向	
		循 環 水				一過式	低位中温水系		高位中温水系		
		循環水	補給水	一過式	循環水 (20℃以下)	補給水	循環水 (20～60℃)	補給水	循環水 (60～90℃)	補給水	腐食
基準 値 項 目	p H (25.0℃)	6.5～8.2	6.0～8.0	6.8～8.0	6.8～8.0	6.8～8.0	7.0～8.0	7.0～8.0	7.0～8.0	○	○
	電気伝導率 (mS / m)	80 以下	30 以下	40 以下	40 以下	30 以下	30 以下	30 以下	30 以下	○	○
	塩化物イオン (mg / l)	200 以下	50 以下	50 以下	50 以下	50 以下	50 以下	30 以下	30 以下	○	
	硫酸イオン (mg / l)	200 以下	50 以下	50 以下	50 以下	50 以下	50 以下	30 以下	30 以下	○	
	Mアルカリ度 (mg / l)	100 以下	50 以下	50 以下	50 以下	50 以下	50 以下	50 以下	50 以下		○
	全硬度 (mg / l)	200 以下	70 以下	70 以下	70 以下	70 以下	70 以下	70 以下	70 以下		○
	カルシウム硬度 (mg / l)	150 以下	50 以下	50 以下	50 以下	50 以下	50 以下	50 以下	50 以下		○
	イオン状シリカ (mg / l)	50 以下	30 以下	30 以下	30 以下	30 以下	30 以下	30 以下	30 以下		○
参考 項 目	鉄 (mg / l)	1.0 以下	0.3 以下	1.0 以下	1.0 以下	0.3 以下	1.0 以下	0.3 以下	1.0 以下	○	○
	銅 (mg / l)	0.3 以下	0.1 以下	1.0 以下	1.0 以下	0.1 以下	1.0 以下	0.1 以下	1.0 以下	○	
	硫化物イオン (mg / l)	検出されないこと	検出されないこと	検出されないこと	検出されないこと	検出されないこと	検出されないこと	検出されないこと	検出されないこと	○	
	アンモニウムイオン (mg / l)	1.0 以下	0.1 以下	1.0 以下	1.0 以下	0.1 以下	0.3 以下	0.1 以下	0.1 以下	○	
	残留塩素 (mg / l)	0.3 以下	0.3 以下	0.3 以下	0.3 以下	0.3 以下	0.25 以下	0.3 以下	0.1 以下	○	
	遊離炭酸 (mg / l)	4.0 以下	4.0 以下	4.0 以下	4.0 以下	4.0 以下	0.4 以下	4.0 以下	0.4 以下	○	
	安定度指数	6.0～7.0	—	—	—	—	—	—	—	○	○

- 1) 項目の名称とその用語の定義及び単位はJIS K 0101による。
- 2) 欄内の○印は腐蝕又はスケール生成傾向に関する因子であることを示す。
- 3) 温度が高い場合(40℃以上)には一般的に腐食性が著しく、特に鉄鋼材料が何の保護被膜もなしに水と直接触れるようになっていいる時は防食薬剤の添加、脱気処理など有効な防食対策を施すことが望ましい。
- 4) 密閉冷却塔を使用する冷却水系において、閉回路循環水及びその補給水は温水系の、散布水及びその補給水は循環式冷却水系の、それぞれの水質基準による。
- 5) 供給・補給される源水は、水道水(上水)、工業用水及び地下水とし、純水、中水、軟水処理水などは除く。
- 6) 上記15項目は腐食及びスケール障害の代表的な因子を示したものである。

一方、還元井戸でも細粒分、地下水中の化学成分によるスケール(水酸化物など)、酸化還元電位の変化に伴う微生物活動等による目詰まりが問題となることもあります。しかし、井戸の目詰まりリスクを評価する分析項目と基準についてはまだ定まっていないのが現状です。

⁶²社団法人 日本冷凍空調工業会, 冷凍空調機器用水質ガイドライン, JRA-GL02, 1994.

5) 還元井

地下水の利用にあたっては、水循環に及ぼす影響を回避あるいは最小とするための配慮が必要(水循環基本法第三条第3項)であることから、熱利用後の地下水の全水量を元の帯水層に還元することを目標に、以下に留意して還元井を設置します(図3-14)⁶³。

配置:還元された水が揚水井へ戻り、地下水温度が変化することのないよう、距離を離します。

井戸本数:確実に還元するために必要な井戸本数とします。一般的には揚水井1本に対し複数本の還元井が必要となります。

構造:対象の帯水層へ還元できるよう正しいケーシングの位置に調整します。また、目詰まりの防止のためフィルターを設置するなど、適切な構造とします。

維持管理:目詰まり防止のため、過大な圧力をかけない注入や、必要に応じた逆洗運転等を行います。

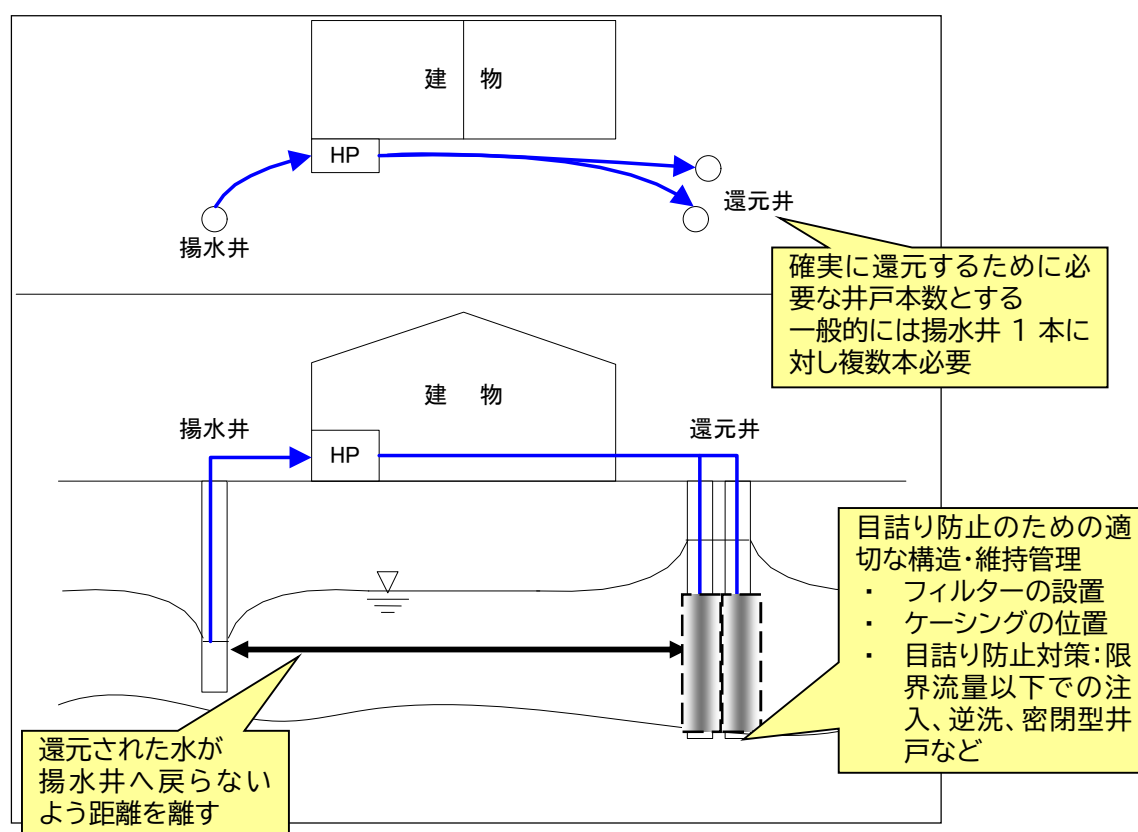


図3-14 還元井戸に関する留意事項

オープンループ方式における還元井の目詰まり原因は、帯水層中の細粒分が井戸周辺に蓄積される物理的な目詰まり、地下水中に含まれる溶存鉄が地下水の揚水に伴い外部の空気に触れて酸化されることで水酸化鉄が沈殿する化学的目詰まりや⁶⁴、その酸化過程で生じるエネ

⁶³遠藤, 還元井の技術課題, 『地中熱利用ヒートポンプシンポジウム』講演資料 (http://www.geohpaj.org/old_information/doc/endo.pdf)

⁶⁴井岡聖一郎・若狭幸(2020), 地下水中における溶存鉄の分布と熱利用のための地下水の鉄分除去, 日本水文科学会誌, 50(2), p.95-97

ルギーを利用する鉄酸化細菌が還元井内で繁殖する生物化学的目詰まり等が原因と考えられています^{65,66}。このような細かい土粒子や水酸化鉄や鉄酸化細菌によって構成された目詰まり物質の生成が進行すると、地下水の地中への還元が出来なくなるという事象が発生する可能性もあります。目詰まりを防ぐ方法を下記にご紹介します。

- ・密閉型井戸を用いて地下水を外部の空気に触れさせない構造とする方法⁶⁷
- ・ブラッシングやスワビングといった還元井を洗浄する方法
- ・逆洗運転という目詰まり物質を還元井から取り除く方法
- ・薬品を使用して目詰まり物質を溶かす方法
- ・還元井に気体の窒素を送り込んで鉄酸化細菌の繁殖を抑制する方法⁶⁸

ここでは逆洗運転システムの具体的な事例をご紹介します。このシステムでは還元井への累積注水時間が 72 時間を超えない範囲で逆洗を行うことを目標として、システムでは累積注水時間が目標の24時間前である 48 時間を超えた翌日の午前3時に逆洗運転を行うようにプログラムされています(図 3-15)。この運転で、自動的に還元井から地下水を揚水することで一緒に目詰まり物質も揚水し、外部へと排出するシステムとなっています。定期的な逆洗運転によって還元井内の目詰まり物質を取り除くことで、目詰まりの発生を抑えています。

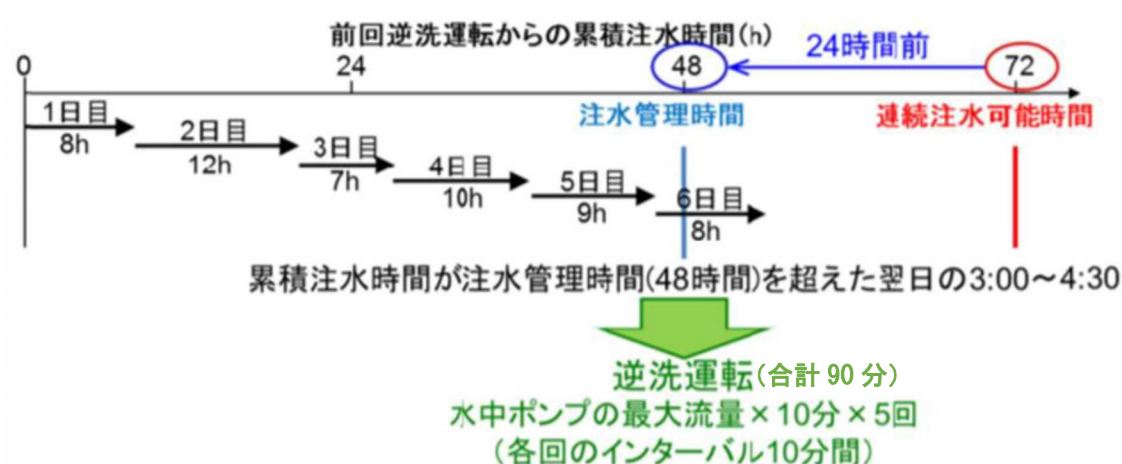


図 3-15 自動逆洗運転開始までの流れ⁶⁹

⁶⁵大谷具幸・米田真由(2022), オープンループ方式地中熱利用システムにおける還元井の目詰まり形成の進展, 令和4年度日本応用地質学会研究発表会講演要旨集

⁶⁶滝沢 智(2011), 地下熱利用技術 8.地下熱利用のための水質対策, 地下水学会誌, 53(4), 401-409

⁶⁷中曾康壽・中尾正喜(2021), 帯水層蓄熱システムの普及状況と大阪うめきた地区における熱源井の運用実績, 空気調和・衛生学会令和3年度大会(福島)学術講演論文集第10巻 都市・環境 編

⁶⁸結城了介・佐藤英樹(2014), オープンループ方式地中熱を直接利用した潜熱顕熱分離空調システムの運用検証, 日本地下水学会2014年秋季講演会予稿集

⁶⁹東邦地水株式会社(2022), 「自動逆洗技術により還元井の目詰まりを防止する地下水循環型地中熱利用冷暖房システム」, 令和3年度環境技術実証事業報告書 一部加筆

6) 利用後の地下水の放流

オープンループ方式は還元型が基本ですが、熱利用後の水を下水道や公共用水域等へ放流する場合は、放流先によって満たすべき水質に関する基準が異なり、基準を超えた水質の場合は処理を行う必要があります。

満たすべき主な水質に関する基準としては以下のものが挙げられますが、まずは排水の許可や条件等について放流先水域等の管理者(行政機関)への確認が必要です。

【下水道へ放流する場合】

- ・ 水質に関する基準: 下水道法
- ・ 50 m³/日以上以上の汚水(地下水)を排出する場合は都道府県や市町村に届け出が必要

【河川、海、池等へ放流する場合】

- ・ 水質汚濁防止法のほか、放流先を所管する各都道府県や市町村で定められた基準に従う

【地下へ還元する場合】

- ・ 水質汚濁防止法のほか、各都道府県や市町村で定められた基準に従う

一般的には、熱利用による地下水の水質の変化は小さく、熱利用後の地下水を排水路などに放流するオープンループ方式として実施したクールシティ推進事業においても、利用前後で有意な水質変化は見られませんでした(図 3-16)⁷⁰。

ただし、地下水に含まれる自然由来の重金属類等が放流先によって定められた基準を超える可能性もあるため、事前に地下水質をチェックし、放流先の行政機関に満たすべき基準を確認する必要があります。

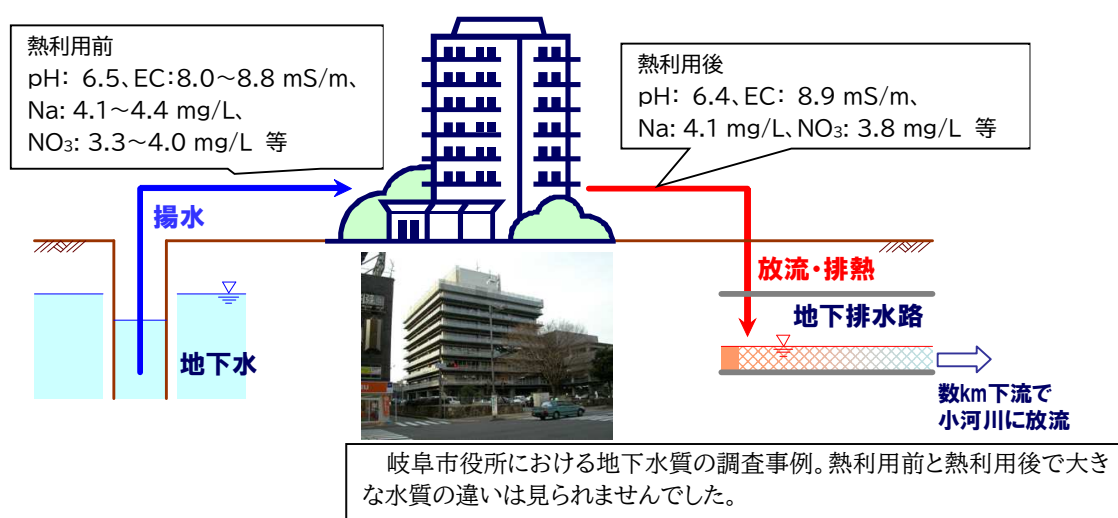


図 3-16 熱利用前後の地下水質の調査事例

⁷⁰環境省、平成 19 年度 地下水等活用型・地中熱利用型ヒートアイランド対策評価業務報告書、2008.3.

3.3 導入における工夫

(1) コスト低減に関する技術

地中熱利用ヒートポンプシステムのイニシャルコストの大部分を占める地中熱交換器の設置費用について、その費用を低減する設置方法や形状についていくつかの事例を紹介します。

1) 基礎杭の活用

建物を設置する場所の地盤が弱く基礎杭を設置する場合には、基礎杭の周囲や内部に熱交換用のチューブを設置することで、基礎杭に地中熱交換器の機能を持たせることができ、別途に地中熱交換器を設けるよりもイニシャルコストを低減できる可能性があります(図 3-17)。試算例ですが、イニシャルコストの 5 割程度を低減できるとの報告もあります。ただし杭本数が少ない場合や杭長が浅い場合などでは、熱媒体循環チューブの取り回しや施工段階での養生などの手間がかかり、必ずしもイニシャルコスト低減にならない場合もあることに留意が必要です。

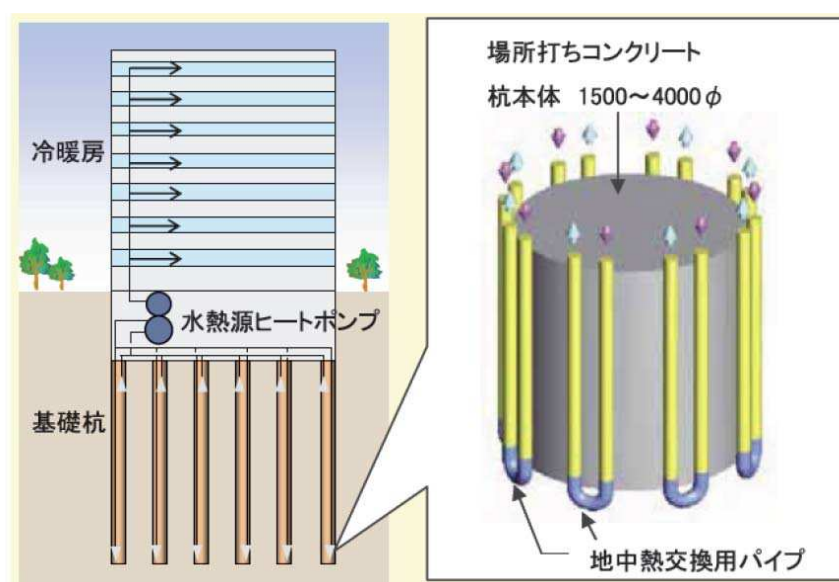


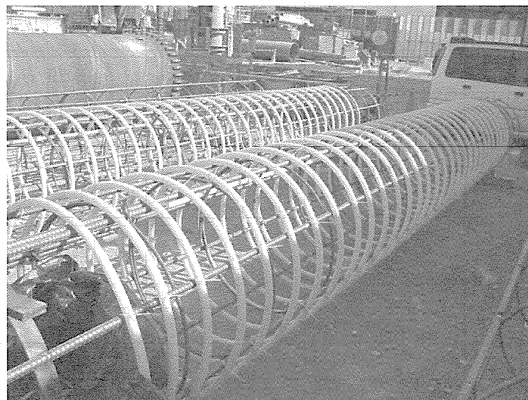
図 3-17 地中熱交換用の配管を杭の外周に垂直に配置する方法の例⁷¹

⁷¹NEDO, 地球熱利用システム 地中熱利用ヒートポンプシステムの特徴と課題, 2006.

また、地中における熱媒体の循環距離を長くしてより効率的な採熱を行うため、熱媒体循環チューブを杭基礎内にらせん状に配管する手法が開発されています(図 3-18)。



杭基礎内らせん配管敷設



架橋ポリエチレン配管巻付

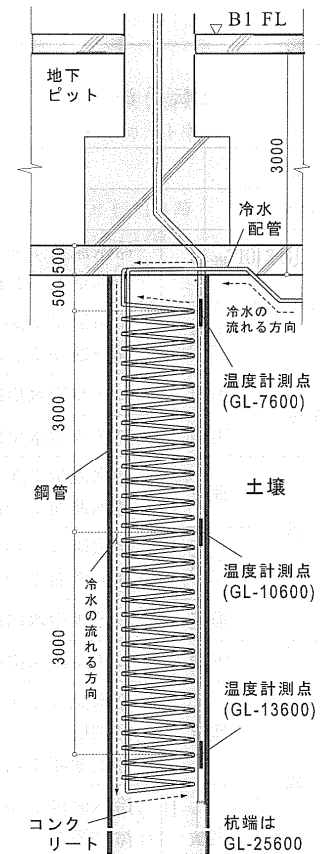


図- 基礎内らせん配管

図 3-18 地中熱交換用の配管を杭の内部にらせん状に配置する例⁷²

⁷²天野ら, 杭基礎を利用した自然エネルギーによる季節間土壌蓄熱空調システムの開発と運転実績, 空気調和・衛生工学会誌, 第 86 巻, 第 7 号, p.1080-1085, 2012.12.

2) 既存井戸の活用

長期間消雪等に使用され、掘り替えの必要が生じた既往の井戸、あるいは現在使用していない水井戸などを地中熱利用に転用または併用することにより掘削コストを低減するといった取り組みも一部で実施されています(図 3-19)⁷³。

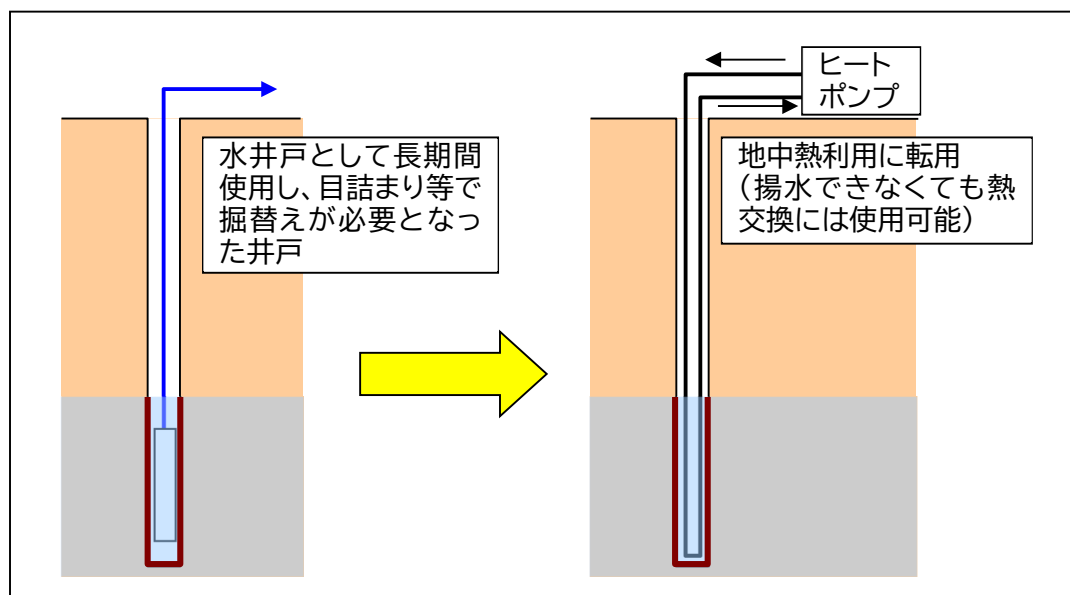


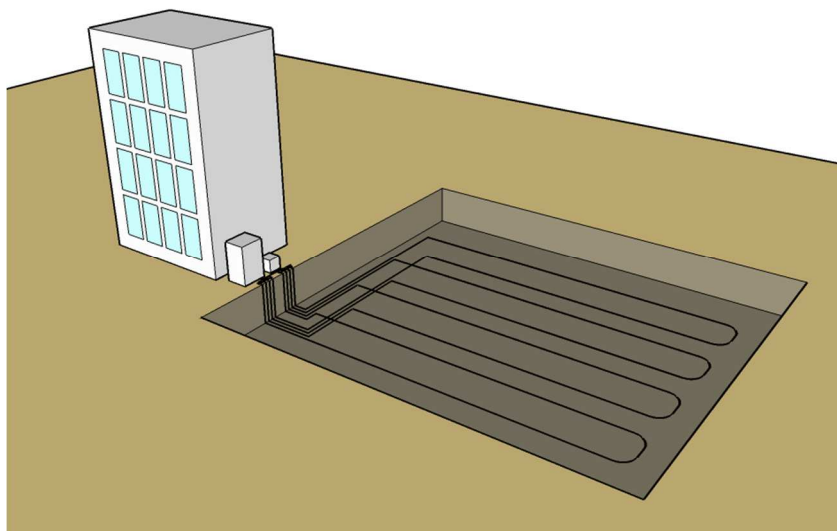
図 3-19 既設井戸の転用のイメージ

⁷³小酒ら, 新潟県管理の消雪施設における将来更新数の予測, 雪氷研究大会講演要旨集(2011・長岡), 2011.

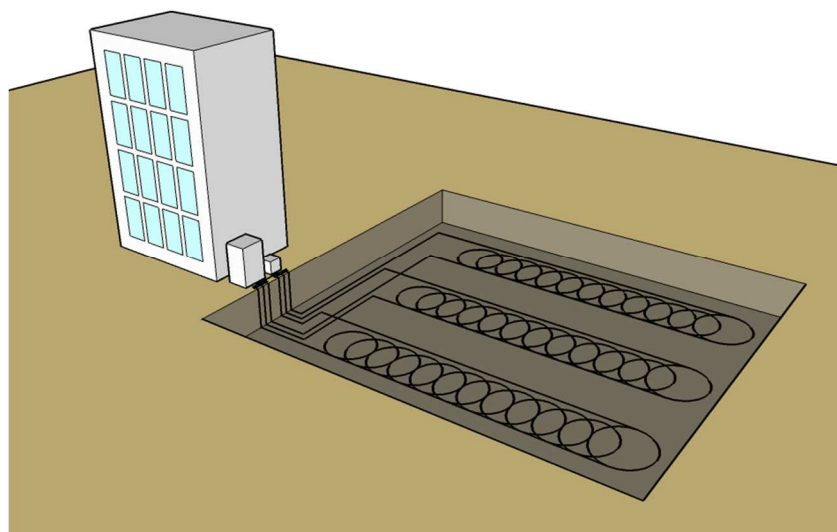
3) 地中熱交換器の浅層設置(水平設置など)

建物敷地の面積に大きな余裕がある場合は、地中熱交換器を水平に配置することで掘削費用を軽減する方法があります。水平設置する場合についても、熱媒体循環チューブをらせん型(コイル型)に配置することで効率化を図る技術や、シート状の熱交換器を浅層に埋設して熱交換を行う技術も開発されています(図 3-20～図 3-22)。

埋設深度が浅すぎると気温・日射・降雨・降雪による地表面の温度変化の影響を受けやすいことや、水平に設置する場合は大きな面積が必要となることに留意が必要です。

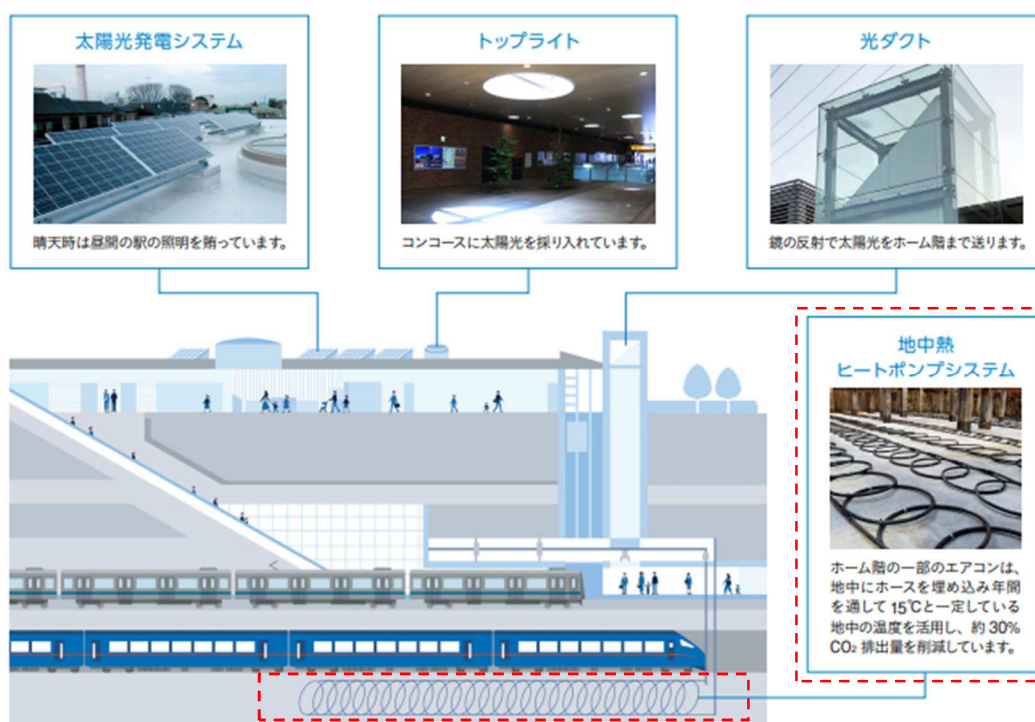


水平式地中熱交換器



コイル型水平式地中熱交換器

図 3-20 地中熱交換器の水平設置のイメージ

図 3-21 シート状の熱交換器⁷⁴図 3-22 国内における地中熱交換器の水平設置例⁷⁵

⁷⁴清水, 北海道科学大学「雪氷地中熱利用ヒートポンプ空調システム」, ヒートポンプとその応用, 52, pp.24-26, 2018.

⁷⁵小田急電鉄環境報告書 2020, https://www.odakyu.jp/company/socialactivities/environment_report/webbook/2020/book/pdf/all.pdf (2023 年 2 月 6 日閲覧)

4) 地中熱交換器内の配管(Uチューブ)の工夫

地中熱交換器で用いられている U チューブやダブル U チューブは、戻り側と送り側の配管本数が同じになっています(図 3-23 の左側)。

この配管の戻り側を 1 本、送り側を 3 本とすることで(図 3-23 の右側)、送り側の流速を遅くして、地中から十分に採熱を行います。一方、戻り側は、1 本に集約されて流速が速くなるため、送り側で得た熱の損失(ロス)が少なくなり、熱交換の効率を向上させることができます(シミュレーション及び実証試験では 20% 向上)。このため、地中熱交換器の延長を低減し、イニシャルコストを抑えることができる可能性があります。

なお本技術は、2014 年春から東京都内で実証実験が行われました⁷⁶。

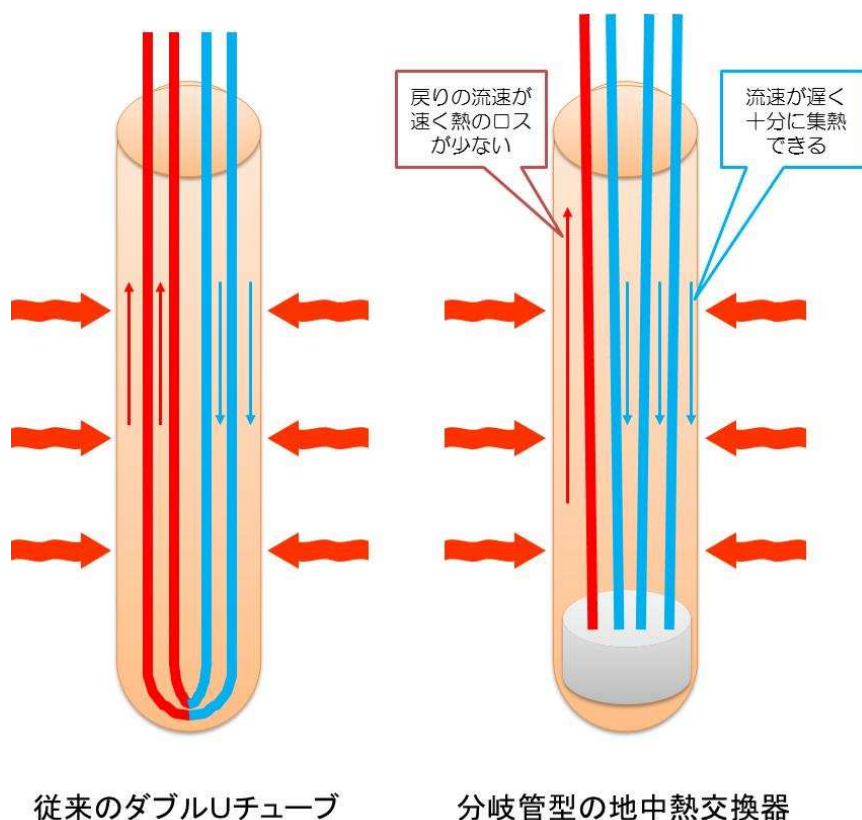


図 3-23 地中熱交換器の工夫例

⁷⁶高効率地中熱利用システムに関する実証研究(https://www.env.go.jp/earth/ondanka/cpttv_funds/pdf/prod2014/p20140204.pdf)

(2) 既存建物の有効活用

建物の新築に併せて地中熱利用システムを導入した事例が多く見られますが、既存建物の空調設備等を地中熱利用設備に置き換えた事例もあります。日本国内には、建築ストックが多数ありますが、建物の全面的な建て替えを行わずに地中熱利用設備に関わる部分だけ改修を行うことで建築ストックの有効活用につながります。以下に、既存建物の改修によって地中熱利用設備を新たに取入れた事例を紹介します。

表 3-11 既存建物の改修による地中熱利用事例（1）

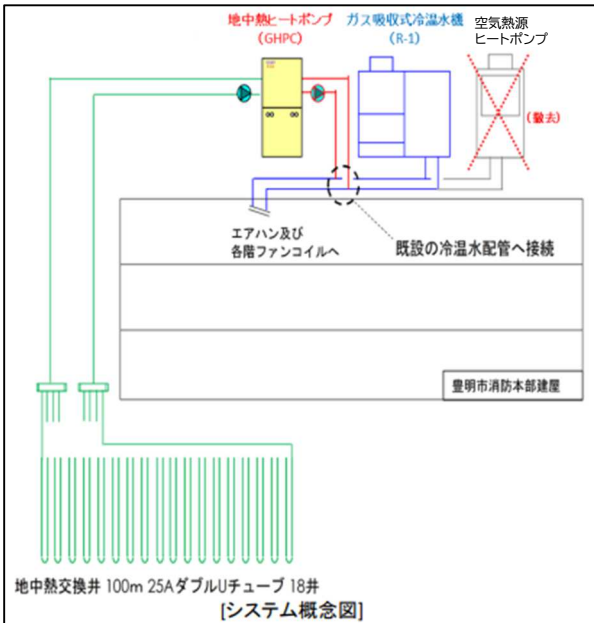
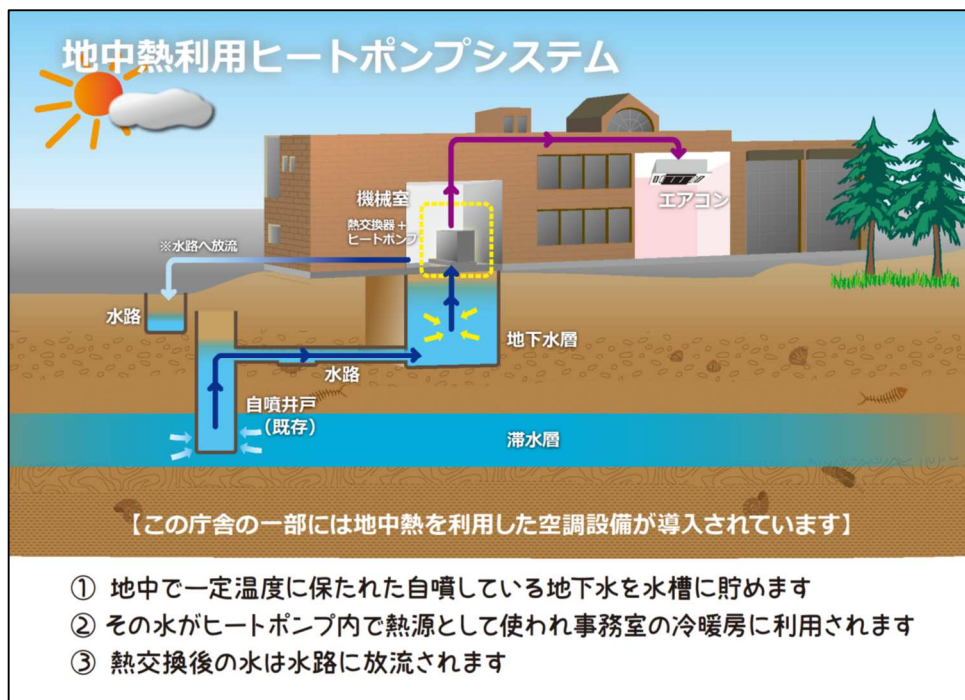
①施設名(所在地)	尾三消防本部 豊明消防署（愛知県豊明市）
②地中熱の用途	空調
③地中熱利用設備概要	地中熱利用ヒートポンプ（冷房 90.6 kW / 暖房 99.0 kW）
④エネルギー消費量削減率	54%（2016年度実績）
⑤特徴など	 (1) 建屋の外観  (2) システムの概要図 <出典> (1)ゼネラルヒートポンプ工業株式会社パンフレット (2)地中熱利用促進協会 HP http://www.geohpaj.org/wp/wp-content/uploads/achievement_108_202112.pdf（2022年10月16日閲覧）に一部加筆 ・既設のガス炊き吸収式冷温水発生機2基のうち1基と空気熱源ヒートポンプを撤去し、地中熱利用ヒートポンプを設置した。 ・また、余分な搬送動力を消費しないように熱源水循環ポンプおよび冷温水ポンプにインバータ制御を導入した。併せて運転の改善を行い、二次側の送水温度を調整した。

表 3-12 既存建物の改修による地中熱利用事例（2）

①施設名(所在地)	中央市庁舎（山梨県中央市）
②地中熱の用途	空調
③地中熱利用設備概要	地中熱利用ヒートポンプ（冷房 56.0 kW / 暖房 63.0 kW）×2台
④エネルギー消費量削減率	24%（2020 年度実績）
⑤特徴など	



(1)建屋の外観



(2)システムの概要図

<出典>

(1)中央市ホームページ

(2)経済産業省 2019 年度(平成 31 年度)二酸化炭素排出抑制対策事業費等補助金(再生可能エネルギー電気・熱自立的普及促進事業) 完了実績報告書(2020)

- ・執務エリアの約 620.9 m²を対象として、既設設備の中央熱源方式から個別分散方式の地中熱利用ヒートポンプに置き換えた。
- ・既設庁舎で利用していた自噴井戸を活用し、自噴している地下水を水槽に貯め、その水を熱源として冷暖房に利用している。熱交換後の地下水は水路に放流される。
- ・既設庁舎の自噴井戸の自噴水量については昭和62年に竣工後、井戸孔内の経年劣化の影響はあるものの安定していた。大規模改修工事の中で、既設井戸の孔内の洗浄を行い、本システムの継続的な使用を見据えた措置として自噴水量を担保した。

(3) 各種制度の活用

地中熱利用の普及促進にあたり、障害となっている要因の一つに、初期費用(インシヤルコスト)の高さがあります。本項では技術面以外に、運用の工夫によるコスト低減または早期のコスト回収を図ることができ、地中熱利用の普及促進に資する方法等を紹介します。

地中熱利用ヒートポンプシステムの導入においては、地中熱交換器の設置に費用がかかるため、通常の冷暖房システムよりもインシヤルコストが高くなる傾向があります(図 3-24)。

一方で地中熱利用ヒートポンプは化石燃料を直接使用しないことや消費電力が小さいことから、他の冷暖房設備に比べランニングコストが低減できます。また、設備導入に関して様々な助成制度もあり、これを活用することにより他の冷暖房システムに比べてトータルコストを抑えることができます(図 3-24)。

なお他のエネルギーと地中熱とのトータルコストの比較検討を行う場合は、検討対象地域において従来から一般的に用いられているエネルギー※を対象とし(※:例えば、資源エネルギー庁が公表する、エネルギー消費状況調査報告書などが参考となります)、冷暖房・給湯・融雪等において同程度の効果を得られる出力や稼働率となるような機器仕様で行います。また比較検討においては、地中熱が得意とする、低温域で長時間一定稼働する用途について比較検討することが有効といえます。広域的に検討する場合は、全国的に一般的に広く使用されているガス・石油・空気熱源を比較対象とする方法もあります。

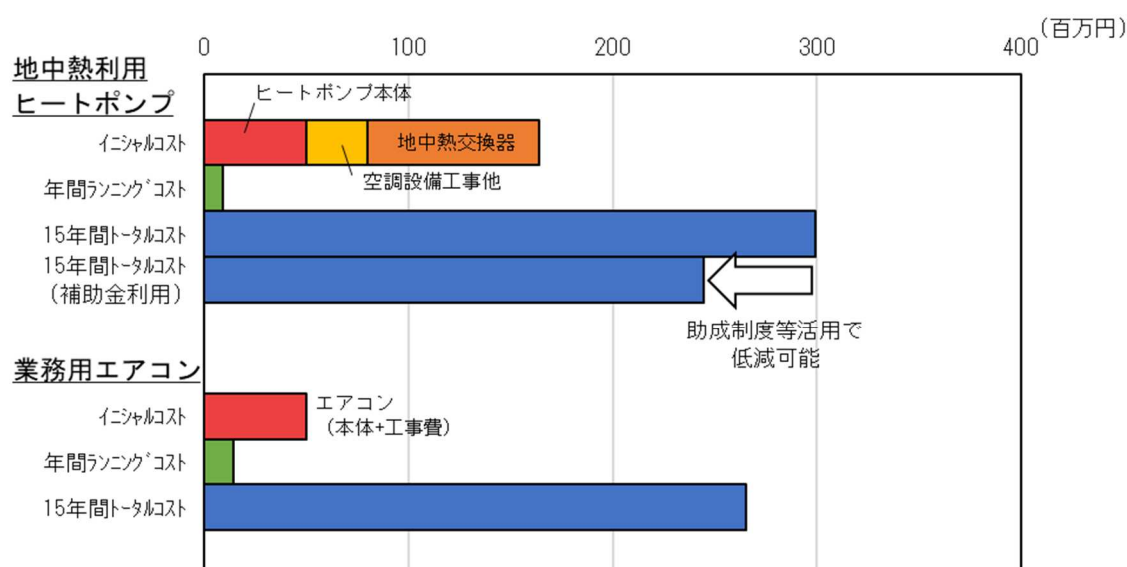


図 3-24 業務用の地中熱利用ヒートポンプと空気熱源エアコンのコストの比較例⁷⁷

⁷⁷NEDO, 平成 29 年度成果報告書再生可能エネルギー熱利用技術開発/再生可能エネルギー熱利用システムの普及に向けた技術開発に関する調査 報告書, 2018. より、地中熱利用ヒートポンプのヒートポンプ設置・配管費用と二次側設備費用を合わせて「空調設備工事他」とした。また、地中熱交換器費用と掘削・設置費用を合わせて「地中熱交換器」とした。補助金利用時の 15 年間トータルコストは、インシヤルコストの 3 分の 1 を補助金で賄った場合の事業者の実負担額を示している。

イニシャルコストを考える上での参考として、地中熱利用ヒートポンプの出力規模とイニシャルコストの関係は、事例によって幅はあるものの、クールシティ推進事業の事業者のヒアリングによるとクローズドループ方式では出力 kW 当たり概ね 25～60 万円程度(図 3-25)、オープンループ方式では出力 kW 当たり概ね 10～30 万円程度となっています。オープンループ方式のイニシャルコストはクローズドループよりも安価となっていますが、組み上げた地下水を地下に還元しなければならない場合や公共用水域へ放流する際に排水処理が必要となる場合にはランニングコストが高くなり、結果的にトータルコストが多くなる場合もあるので、全体を俯瞰する必要があります。

ただし、イニシャルコストは普及状況や新たな技術の開発によって年々低下しており、また地域の地下水・地盤条件や発注形態等によっても大きく変わります。

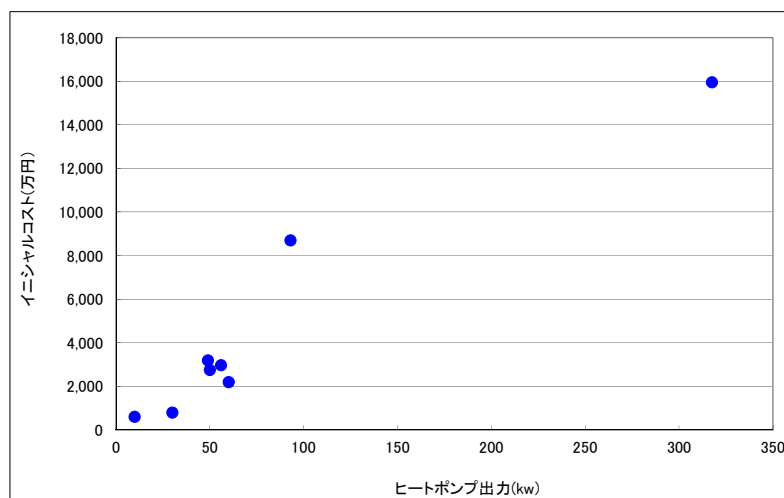


図 3-25 ヒートポンプ出力当たりのイニシャルコストの事例(クローズドループの例)⁷⁸

1) 助成制度

地中熱利用ヒートポンプの普及のため、様々な団体・地方公共団体等が助成制度を設けています。このうち環境省が実施する助成制度は環境省ホームページ(<https://www.env.go.jp/earth/earth/ondanka/enetoku/>)をご確認下さい。これらの多くは単年度の補助制度であり、公募期間などについては適宜お問合せください。また、その他の省庁や様々な地方公共団体が実施している助成制度もあり、特定非営利活動法人 地中熱利用促進協会によって一覧が紹介されています(<http://www.geohpaj.org/info/subsidy1/index3>)。

2) 金融商品(リース)の活用によるイニシャルコストの平準化

地中熱利用の普及促進のネック(導入のハードル)となっているのが、イニシャルコストの高さですが、トータルコストでメリットが得られることがわかっているのであれば、リースの活用によってイニシャルコストを平準化し、導入初期からコストメリットを享受することが可能となります。

他の再生可能エネルギーの例では太陽光発電ローンや、雪国の場合では融雪ローンなどの金融商品があります。地中熱利用の現状に関してはパッケージ商品にするほどの需要はないが、

⁷⁸設備事業者へのヒアリングによる

再生可能エネルギー導入支援には力をいれて取り組んでいる金融機関もあり、個別に相談に応じている状況があります⁷⁹。

3) 地中熱利用ヒートポンプのグリーン熱証書導入

“再生可能エネルギーによって生成された熱は、「熱そのものの価値」に加えて、地球温暖化及びエネルギー枯渇の防止に貢献する価値、すなわち「環境価値」を有している。グリーン熱証書は再生可能エネルギー熱利用施設から生成されるエネルギー量(熱量)を証書化したもので、その環境価値を売却することにより、その対価として一定の収入が得られる。この制度を活用することで、再生可能エネルギー熱利用施設の導入にあたっての初期投資の早期回収や運転維持費の充実に貢献することができ、再生可能エネルギー熱の利用を促進させることが期待できる⁸⁰。”との提言があります。

地中熱に関しては、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)から、再生可能エネルギー熱利用計測技術実証事業(地中熱利用計測技術)を民間企業が受託し、地中熱を利用した空調の有効性と将来の「グリーン熱証書」活用に向けた実証が行われました。

地中熱利用についてもグリーン熱証書の活用が行われれば、維持管理費やイニシャルコストの回収にあてることができる可能性もあり、今後の動向を注視することが必要です。

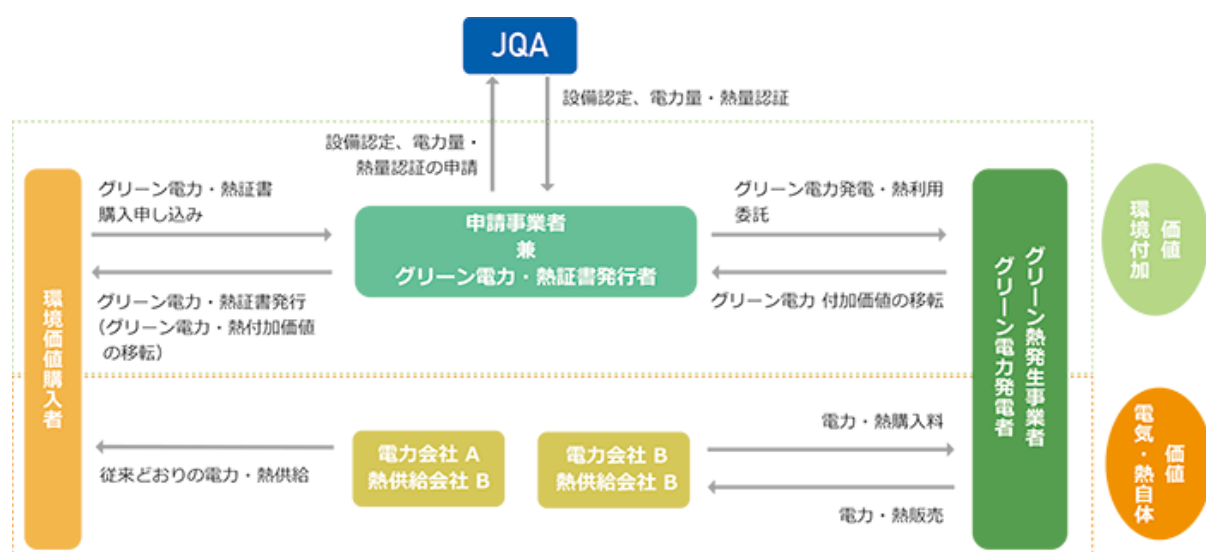


図 3-26 グリーン熱証書の事例⁸¹

⁷⁹ 某県の信用組合本店担当者からの電話ヒアリングより

⁸⁰ 特定非営利活動法人 地中熱利用促進協会、地中熱利用ヒートポンプのグリーン熱認定に向けて、2013.5.13

⁸¹ 一般財団法人日本品質保証機構ホームページ、https://www.jqa.jp/service_list/environment/service/greenenergy/flow.html、2023 年 2 月 6 日閲覧

4) コスト縮減の工夫

① 生産物の高付加価値化によるコスト回収

農業用用途での地中熱利用の例が主なものとなります。

地中熱利用の特性である恒温管理の容易さ、ボイラーのような湿度管理の不安定さがないことから、農作物の品質向上が期待できることや、農作物の出荷時期をずらして販売単価をアップさせることで従来よりも高収益を得て、早期にランニングコスト回収ができるとの試算例があります。

② 夏季の電力ピークカットによる電力費の低減

平成25年に省エネ法が改正され、今後の重点領域として、電気の需要の平準化の推進が追加されました。従来の省エネ対策に加え、夏期や冬期の昼間の電気の使用量を削減する取組を行った場合にプラスに評価できる体系にするとされ、具体的な電気需要平準化に資する措置(工場等における電気の需要の平準化に資する措置に関する事業者の指針)として電気需要平準化時間帯における電気の使用から燃料又は熱の使用への転換(チェンジ)が掲げられています。

地中熱利用ヒートポンプメーカーのカタログから、同じメーカーの空気熱源ヒートポンプとの消費電力を比較したところ、地中熱を利用することにより冷房時には約55%の消費電力が抑えられるとの試算があります(図3-27)。このように冷房時に消費電力を大幅に抑えられるということは、夏の電力ピークカットに貢献できることが考えられます。

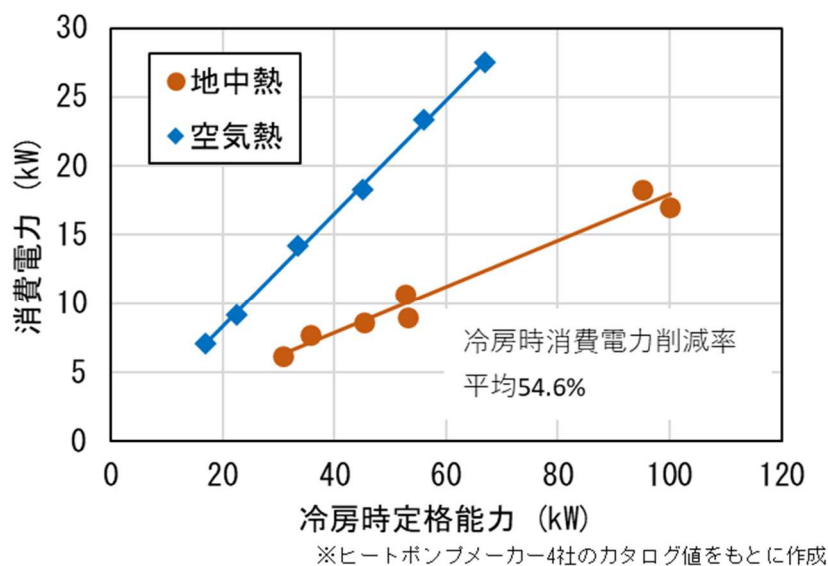


図3-27 地中熱利用ヒートポンプと空気熱源ヒートポンプの消費電力の比較

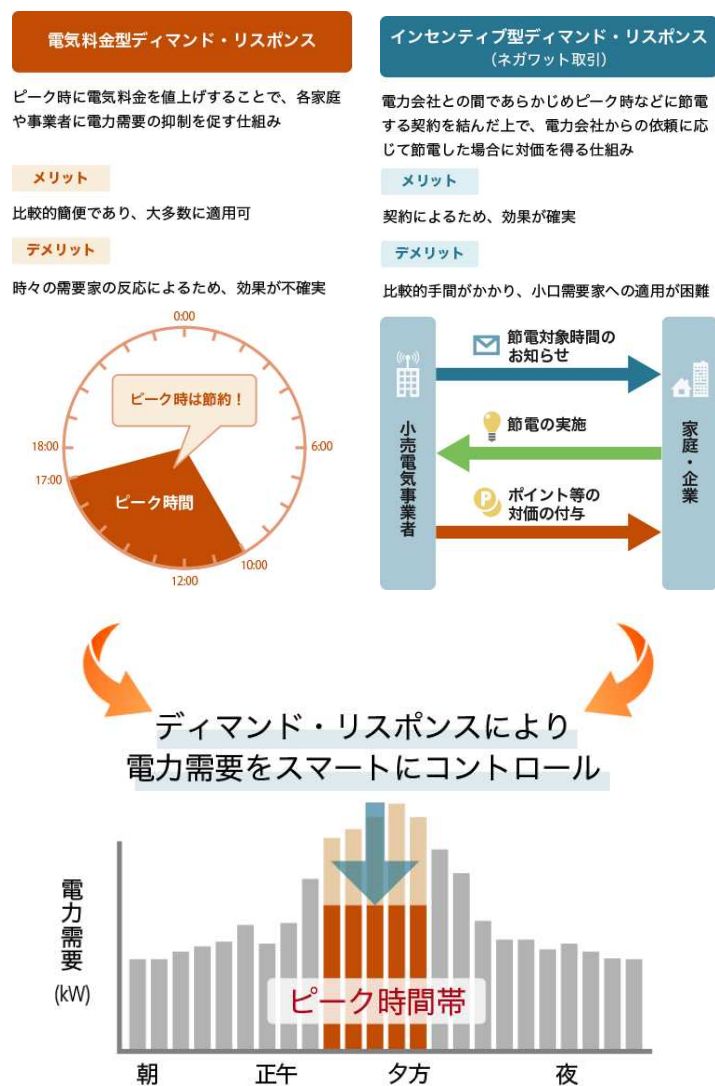
エネルギーの供給状況に応じてスマートに消費パターンを変化させるための手段として、料金の設定方法の多様化や需要抑制を行うことに対する報酬の支払いによって、需要家サイドの消費パターンを変化させる、デマンド・レスポンス(Demand Response:DR)というものがあります(図 3-28)⁸²。たとえば、各電力会社は、時間帯等にかかわらず一律の料金を課す電気料金メニューだけでなく、季節や時間帯に応じて異なる料金を課す時間帯別料金メニュー(Time of Use:TOU)を提供しています(図 3-29)。

デマンド・レスポンス(DR)の効果を定量的に把握するため、国内 4 地域(横浜市、豊田市、けいはんな学研都市(京都、大阪、奈良の三府県にまたがる京阪奈丘陵にある関西文化学術研究都市の愛称)、北九州市)において、幅広い住民の参画を得て、実証実験が実施されています。たとえば北九州市の実証実験では、通常料金 15 円/kWh、夜間料金 6 円/kWh で供給する一方(※通常の電気料金約 23 円/kWh に比べて安い)、ピーク時間帯に、翌日の需要予測に応じて電気料金を最大 150 円/kWh まで変動させたところ、2012 年度の結果で、電気料金の変動(電気料金型 DR)によって 2 割のピークカットが可能であることが確認されています⁸³。

地中熱利用ヒートポンプは蓄熱槽などと組み合わせることで空調や給湯の熱需要を効率的にコントロールするのに有効であり、将来的にはデマンド・レスポンスへの貢献も期待されます。

⁸²経済産業省資源エネルギー庁、「ディマンド・リスポンス(DR)について」、
https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/electricity_measures/dr/dr.html

⁸³総合資源エネルギー調査会基本政策分科会 第 6 回会合資料 2, 需要サイドからみた今後のエネルギー政策の方向性について, p. 34-37, 2013.10. (http://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/006/pdf/006_011.pdf)

図 3-28 デマンド・レスポンスの概要⁸²

【電力プランの一例】

メニュー名	概要
スタンダードS/L	さまざまなライフスタイルに合った標準的なプラン
プレミアムS/L	一定の使用量までは定額で、それ以上は従量料金となるプラン
夜トクプラン	夜間（午後9時～翌午前9時）の電力量料金が日中より安いプラン
スマートライフプラン	夜間（午前1時～午前6時）の電力料金が日中より安く、主にオール電化住宅向けのプラン
くらし上手S/L/X	毎日のくらしを太陽光発電でまかないながら、足りない時も安心して電気を使えるプラン
アクアエナジー100	水力で発電された電気を利用するプラン

出所：東京電力HPより作成

図 3-29 エネルギーの供給状況に応じた料金設定方法(東京電力の例)

③ 他の再生可能エネルギー等との複合利用

対象となる施設、技術の特徴、場の環境などを考慮して地中熱と他の再生可能エネルギー等との効果的な組み合わせを行うとともに、補完機能を持つようにすることも重要です。検討しやすい方式として、従来のエネルギー源の一部を地中熱技術で置き換える「部分的な導入」や「組み合わせ方式」があります。価格高騰のリスクがある灯油あるいは重油炊きボイラーの一部を地中熱利用ヒートポンプに置き換えるという部分的導入も有効です。将来は「最適制御方式」や「ハイブリッド方式」のような高度な技術も普及していくと考えられます。

表 3-13 に複合利用方式の例を示し表 3-14 および表 3-15 に複合利用方式の先行事例を紹介します。

表 3-13 複合利用方式の例

部分的な導入	高稼働率が期待できる場所に限定的に導入する など
組み合わせ方式	地域や施設内において必要なエネルギーの最適な組み合わせを考えて技術導入する など
最適制御方式	その時の気温に応じて空気熱と地中熱を使い分ける など
ハイブリッド方式	太陽熱で加温された温水に地中熱利用ヒートポンプを加えて給湯利用する など

表 3-14 複合利用方式の先行事例の紹介(1)

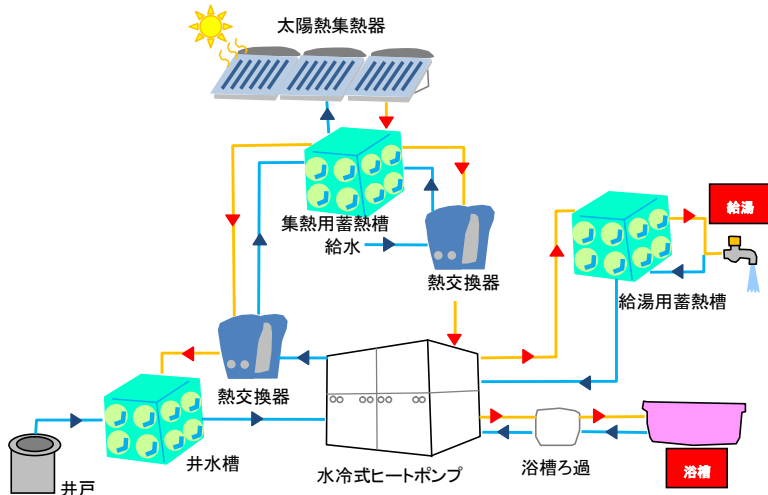
施設名	介護老人保健施設 わかくさ(医療法人社団 再生会)
技術導入の動機	・ もともと地下水をろ過して飲料水や生活用水として利用している ・ 経営者が新しい技術への関心が高い ・ ガス給湯設備の入れ替えに伴い新たなエネルギーの導入を検討 ・ コスト回収が可能と判断
上位計画との関係	特になし
システム概要	 システム概要図 出典:平成 23 年度 再生可能エネルギー熱利用加速化支援対策事業 導入事例集 一般社団法人 新エネルギー促進協議会 をもとに作成
設備概要	太陽熱集熱器 :276 m ² 、集熱量 485 GJ/年 地中熱交換器 :120 m×1 本 ヒートポンプ能力 :加熱 164 kW
エネルギーの複合利用	複合利用形態 :ハイブリッド方式 地中熱(メイン) + 太陽熱(補助) 用途 :給湯
補助等の利用	地域再生可能エネルギー熱導入促進対策事業 (経済産業省、窓口:一般社団法人 新エネルギー導入促進協議会)

表 3-15 複合利用方式の先行事例の紹介(2)

施設名	IKEA 立川(イケア・ジャパン株式会社)
技術導入の動機	・ 社の環境戦略である People & Planet Positive(ピープル・アンド・プラネット・ポジティブ)にしたがって順次技術導入 ・ イケアストアで使用するエネルギーをイケア内で生産する再生可能エネルギーで可能な限りまかなうという目標を持っている
上位計画との関係	特になし
システム概要	 イメージ図(福岡新宮店) 出典:平成 23 年度 再生可能エネルギー熱利用加速化支援対策事業 導入事例集 一般社団法人 新エネルギー促進協議会
設備概要	地中熱利用水冷ヒートポンプ:冷却 527 kW、加熱 530 kW 空冷ヒートポンプモジュール :冷却 475 kW、加熱 500 kW
エネルギーの複合利用	複合利用形態 :組み合わせ方式 地中熱+空冷式 用途 :空調
補助等の利用	地域再生可能エネルギー熱導入促進対策事業 (経済産業省、窓口:一般社団法人 新エネルギー導入促進協議会)

第4章 地中熱利用による効果・影響とモニタリング方法

4.1 モニタリングの必要性

地中熱利用ヒートポンプシステムを利用するにあたって地下水・地盤環境に大きな影響を与えないとともに効率よく運転するためには、モニタリングを行うことが重要です。モニタリングは「環境効果」「環境負荷」「環境影響」の3つの観点から、事業者の自主的な判断の基にモニタリングの実施が求められます。

(1) 環境効果

地中熱利用ヒートポンプシステムは他の冷暖房方式に比べ省エネルギー効果やCO₂排出量削減効果、ヒートアイランド緩和効果に優れたシステムであり、地下水・地盤からの採排熱量と消費電力量をモニタリングすることで、環境への効果を評価することができます。

また、同じ効果を得るのに必要となる、他の冷暖房方式における電力や灯油などの資源の消費量を試算し比較することで、どの程度の省コスト効果が得られたかを把握することができます。

(2) 環境負荷

地中熱利用ヒートポンプシステムは、適切な利用範囲を超え、熱利用対象の地下水・地盤環境に大きな変化をもたらすような運転を継続すると、運転効率の低下につながる可能性があります。運転効率に影響する項目を定期的かつ継続的にモニタリングすることにより、地下水・地盤環境に過剰な負荷をかけていないかをチェックすることができます。これにより地下水・地盤環境を一定に保ち、システムの熱効率を落とさない持続的な運用に役立ちます。

(3) 環境影響

資源消費の視点やライフサイクル全体でのCO₂排出量等、環境影響としては様々なスケールや視点での捉え方がありますが、本ガイドラインでは主に地下水・地盤環境への直接的な影響を対象とします。

環境影響は、「環境負荷の発生」⇒「環境状態の変化」⇒「環境影響として発現」の流れで捉えることができます。地中熱利用ヒートポンプシステムによる地下水・地盤環境への影響は「環境負荷の発生」⇒「環境状態の変化」まである程度把握できているものの、「環境影響として発現」する事象の定量化や「環境状態の変化」との因果関係を十分把握できていません。どの程度の環境負荷があれば、環境の状態が変化し、地下水・地盤環境への影響が生じるのかを明らかにし、安心して普及促進を図るためには、継続的なデータ蓄積および分析が有効です。

環境省が補助事業により取得したモニタリングデータの解析によれば、戸建住宅で通常利用される小規模な地中熱利用では地盤温度環境への熱影響は非常に小さく、地盤温度影響に関わるモニタリング設備は必ずしも必要ではないと言えます(参考資料3)。一方、出力規模の大きな施設等を導入する場合には、モニタリングにより地下水・地盤環境への影響に配慮することが環境共有資源である地下水・地盤環境の持続可能な利用において求められます。

オープンループ方式では地下水を揚水および還元するため地盤沈下や地下水質への配慮が求められます。地盤沈下の監視を目的とした標準的な監視項目については、環境省が「地盤沈下監視ガイドラインについて(H17.6.29)」を公表し、地盤沈下監視にあたってのモニタリング項目、頻度について定めています。また、地域の地盤沈下状況については、環境省において毎年「全国の地盤沈下地域の概況」を公表していますので、そちらを参考としてください。

近年は地下水質の管理についても学会等で重要性が指摘されています⁸⁴。規模の大きいシステムについては、地下水質の状況を把握し、水質が異なる帯水層の地下水を混合させる、海水を混合させる、地層中の汚染物質を拡散させる、という事象を起こさないための施工の重要性が指摘されており、水質モニタリングの必要性が増しています。

環境省「地盤沈下監視ガイドラインについて(H17.6.29)」

<https://www.env.go.jp/houdou/gazou/6132/6914/2356.pdf>

「全国の地盤沈下地域の概況」

<https://www.env.go.jp/water/jiban/chinka.html>

⁸⁴益田ら(2022)「大都市圏での地中熱利用における水質監視の重要性—大阪平野における事例—」 日本地質学会日本地質学会第129年学術大会(2022年9月)

(参考)未解明な環境影響への備え

地下水の過剰な揚水による地盤沈下やフロンガスの使用によるオゾンホールが発生等、利用開始時点では不明だった環境への影響が、広く利用が普及した後で判明した例があります。

地中熱利用ヒートポンプシステムの利用が大きな影響をもたらした例は今のところ報告されていません。例えば、図4-1に示すように、地中熱交換器を20本程度設置して、10年間利用した場合の試算例では、影響が小さなものでした。影響の予兆を捉えたり、また万が一影響が生じた場合の原因究明や対策に備えておく観点から、特に大規模な施設を導入する場合には、環境共有資源を持続的に利用する観点から、最低限のモニタリングが必要となります。これらのモニタリングにより基礎的なデータを継続的に取得することが、将来万が一、未解明な事象が発生した場合の原因究明に役立ちます。

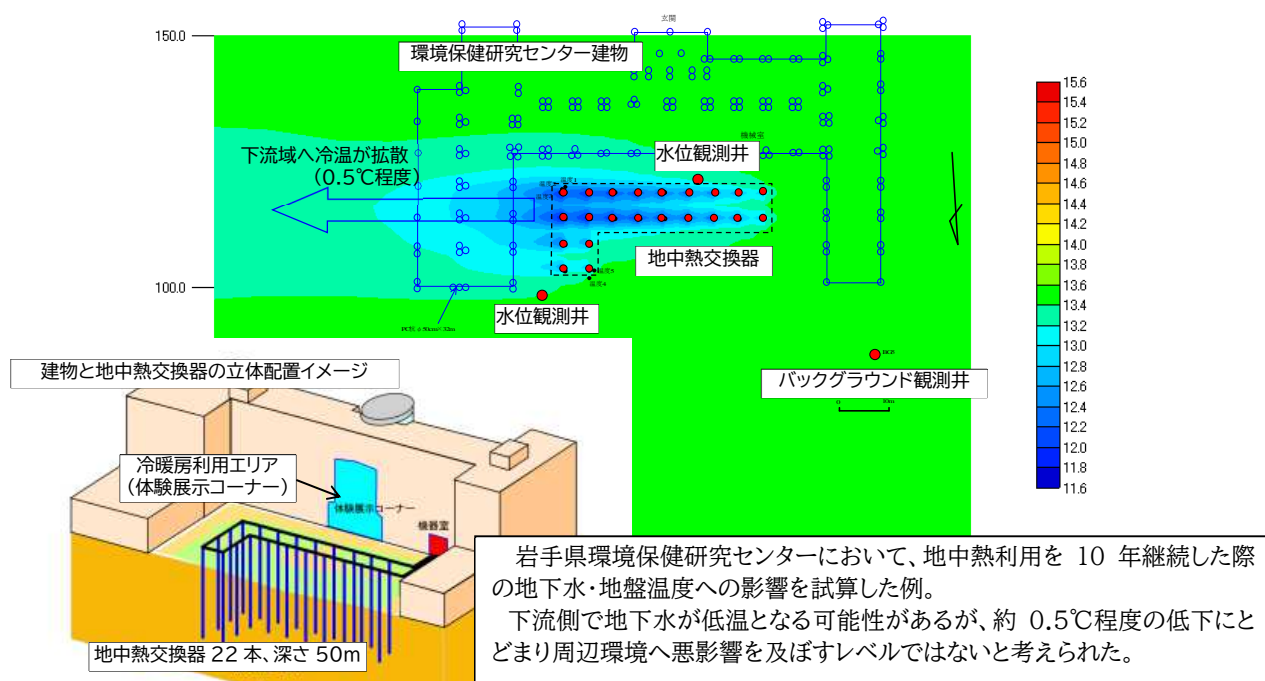


図4-1 地中熱利用ヒートポンプシステムによる地下水・地盤温度への影響の試算例⁸⁵

⁸⁵環境省，平成19年度 地下水等活用型・地中熱利用型ヒートアイランド対策評価業務報告書，2008.3.

4.2 考えられる環境影響

これまでの地中熱利用ヒートポンプシステムの導入事例や実証試験では、大きな環境影響は報告されておらず、適正な規模や運用による利用がなされていれば深刻な環境影響が発生する可能性は小さいと考えられます。

しかしながら、大規模な施設や密集市街地での普及が進んだ場合、現地条件や運用状況により将来的に影響が生じる可能性があります。そのような場合に、「クローズドループ方式」と「オープンループ方式」の各利用方式の負荷により環境に生じうる変化と、それにより発現する可能性がある地下水・地盤環境への影響について、以下の項目に留意する必要があります。

(1) クローズドループ方式

クローズドループ方式においては、地下における熱の移動に関して、主に「地下水・地盤温度への影響」と「地下水質への影響」に留意が必要です(図 4-2)。

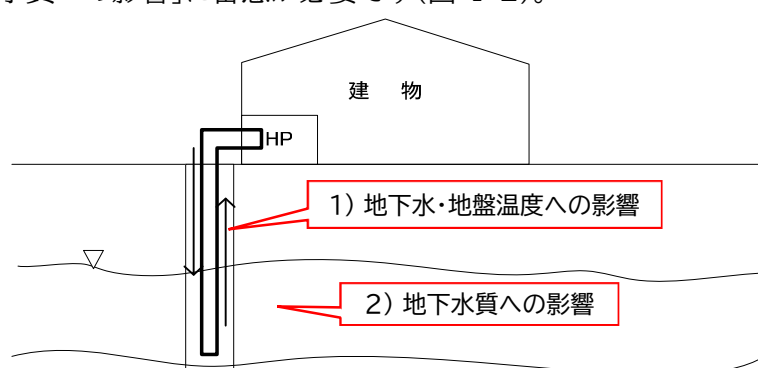


図 4-2 クローズドループ方式の地下水・地盤環境への影響項目

1) 地下水・地盤温度への影響

冬期の暖房使用では地下水・地盤温度は下がり、夏期の冷房使用では上がるため、地下水の流速が大きな場所では下流側へ熱が伝わってしまう可能性があります。

この場合、下流側の熱利用施設の効率低下、農業用水として利用している場合の生育影響、地下水を使用する飲食店や食品産業における製品品質への影響等が考えられます。

2) 地下水質への影響

地中の温度と地下水質の関係について、温度変化に伴い地下水質および土壌の重金属等の吸着特性が変化するという研究事例もありますが⁸⁶、現時点で地中熱利用に起因する大きな水質事故等は報告されていません。

またクローズドループ方式では、熱媒体の漏えいによる地下水質への影響に留意する必要があり、使用する熱媒体は、水や毒性のない分解しやすい不凍液が望ましいといえます。

なお地盤温度の変化による地下の微生物生態系への影響については、環境省が実施した実証試験においては特段の問題は認められませんでした(参考資料 4)。近年の遺伝子解析技術

⁸⁶例えば、Gupta et al, Immobilization of Pb(II), Cd(II) and Ni(II) ions on kaolinite and montmorillonite surfaces from aqueous medium, Journal of Environmental Management, vol.87, p.46-58, 2008. 等

の進捗は著しく、これまで評価が難しかった微生物の遺伝子解析が可能となっており、こうした解析技術を活用し、さらに知見を蓄積するための研究が進められています。

(2) オープンループ方式

オープンループ方式においては地下水のくみ上げや放流、還元に関して、主に「揚水による地下水位への影響」、「放流先水域の水温や水質への影響」、「地下水の還元による水温や水質への影響」に留意が必要です(図 4-3)。

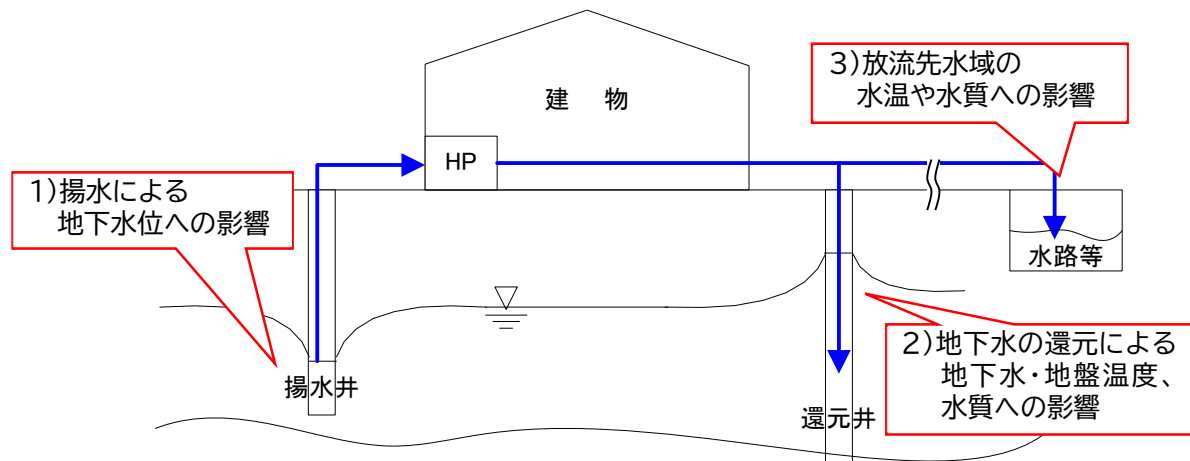


図 4-3 オープンループ方式の地下水・地盤環境への影響項目

1) 揚水による地下水位への影響

オープンループ方式では、地下水をいったん汲み上げ、熱源水として使用するため、可能揚水量を超えた揚水を行うと、井戸周辺で大幅な地下水位の低下を引き起こします。広範囲で長期間にわたり低下すると、周辺井戸利用の妨げになり、地下水・地盤条件によっては地盤沈下を生じる恐れもあります。

2) 地下水の還元による地下水・地盤温度、水質への影響

採熱を行った後の地下水を地下へ還元する場合、還元先の地下水や地盤の温度、地下水質に変化をもたらす場合があります。

① 地下水・地盤温度

冬期に暖房に用いた地下水は低温に、夏期に冷房に用いた地下水は高温になっているため、地下へ還元することにより、地下水や地盤の温度に変化が生じ、地下水の流速が大きな場所では下流側へ熱が伝わってしまう可能性があります。

この場合、下流側の熱利用施設の効率、農業用水として利用している場合は農産物の生育、地下水を使用する飲食店や食品産業における製品品質等へ影響を与える可能性があります。

クールシティ推進事業では、地下水の流速が約 2.5 m/年と小さい地域において、ヒートポンプ出力 30 kW の施設での冷暖房運転を 10 年続けた場合を想定したシミュレーションを実施したところ、地下水温が 1℃以上変化する範囲は井戸から約 40 m の範囲にとどまると

の結果になりました。ただし、地下水の流速の大きな地域で大規模な施設や複数の施設が集中した場合や地下水・地盤条件によっては影響を生じる可能性があることから留意すべき影響項目です。

② 水質

オープンループ方式でいったん汲み上げて利用した地下水は、空気に触れると地中での状態から水質組成が変化する可能性があります。地下水は一般的に溶存酸素濃度が低く、還元的な状態になっていますが、汲み上げて空気に触れることにより溶存酸素濃度が上昇します。これを地下へ戻すことにより地下水質に影響する場合があります。

これを回避するために、空気に触れさせない方法で運用を行っている事例もあります。

なお、地下水温や水質の変化による地下の微生物生態系への影響については、今後考慮すべき留意点として研究が進められています⁸⁷。

3) 放流先水域の水温や水質への影響

個々の施設からの放流量が少量でも、施設が集中している場合や、小規模な水域へ放流する場合に、放流先水域の水温や水質に変化をもたらす可能性があります。

① 水温

冬期に暖房に用いた地下水は低温に、夏期に冷房に用いた地下水は高温になっているため、多量に放流すると放流先の水温に変化をもたらす場合があります。

これにより、生息生物の変化などの生態系への影響や、農業用水路へ放流する場合には農作物の生育への影響等が生じる可能性があります。

② 水質

揚水元と放流先の水質が大きく異なる場合、多量に放流すると放流先の水質組成が変わる場合があります、生態系等への影響が生じる可能性があります。

また、地下水は一般的に酸素濃度が低く、還元的な状態になっていることが多く、汲み上げて空気に触れることにより酸化されます。鉄分やマンガン等の含有量が多い場合はこれが析出し、放流水に着色や濁りを生じる場合があります。

⁸⁷例えば、地下水を利活用した高効率地中熱利用システムの開発とその普及を目的としたポテンシャルマップの高度化、平成 28 年度 NEDO 新エネルギー成果報告会【熱利用分野】、2016.(http://www.nedo.go.jp/events/FF_100080.html.) 等

4.3 モニタリング項目と方法

モニタリングは、下記および「4.1 モニタリングの必要性」に示すとおり、地中熱利用ヒートポンプシステムによってどの程度の省エネルギーや CO₂ 排出量削減効果、地下水・地盤環境への負荷(環境負荷の発生)や影響(環境状態の変化)を生じているかを確認することを目的とし、これらの把握に必要な計測項目について実施します。

「環境効果」: 負荷項目と消費したエネルギーを比較し「省エネルギーや CO₂ 排出量削減効果」を概略的に把握することを目的とする

「環境負荷」: 主に日常の適正な運転管理のため、「システムが環境に与える負荷」を概略的に把握することを目的とする

「環境影響」: 特に大規模施設において実施することが望ましいものとして、環境負荷の結果生じる「環境状態の変化」をできるだけ直接把握することを目的とする

モニタリングの目的と各計測項目との関係を以下に示します。

「環境効果」に該当する項目は、地中熱の利用により、通常の冷暖房方式と比べてどのような効果(省エネルギー効果、CO₂ 排出量削減効果、地中排熱によるヒートアイランド緩和効果)があったかを把握することを目的とします(図 4-4)。したがって、消費したエネルギーとそれに対して得た熱量を計測します。

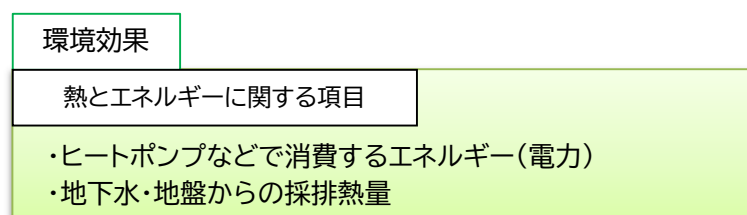


図 4-4 環境効果に関する計測項目

「環境負荷」に該当する項目は、地中熱の利用により地下水・地盤環境にどのような環境負荷(熱的負荷、質的負荷)がかかったかを計測することを目的とします(図 4-5)。熱的負荷は環境効果の項目にも含まれます。

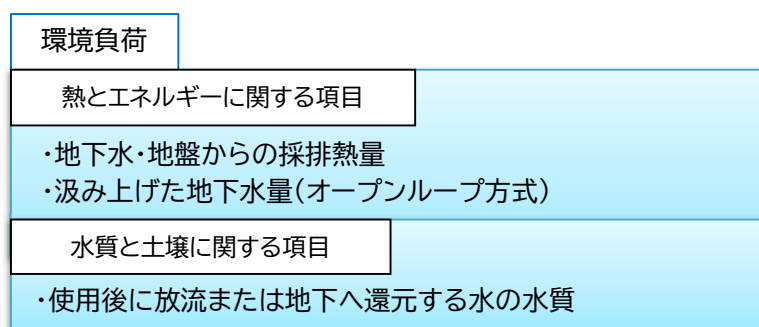


図 4-5 環境負荷に関する計測項目

「環境影響」に該当する項目は、地下水・地盤環境に対する熱的および質的負荷により、どのような影響が生じたかを計測することを目的とします(図 4-6)。したがって、負荷項目と合わせ、地下水・地盤環境に生じた変化も把握します。

環境影響
熱とエネルギーに関する項目
・地下水・地盤の温度変化
水質と土壌に関する項目
・地下水・地盤の質的变化 ・地下水位の変化

図 4-6 環境影響に関する計測項目

また、モニタリング項目と方法を、「基本項目」「補足項目」に分類して示します。

「基本項目」: 日常の運転管理を主な目的としつつ、同時に「省エネルギーや CO₂ 排出量削減効果」「環境負荷の発生」を概略的に把握するための項目

「補足項目」: 採排熱量が大きい施設等で実施することが望ましいものとして、負荷の結果生じる「環境状態の変化」をできるだけ直接計測することを目的とする項目

規模等に応じた望ましいモニタリング項目を確認するため、「基本項目」のモニタリングの実施が望ましい施設と、「基本項目」に加えて「補足項目」も含めたモニタリングの実施が望ましい施設を、モニタリングの目的も考慮して 2 つに区分します(表 4-1)。

表 4-1 出力規模等によるモニタリングの実施区分

モニタリングの実施区分	基本項目	基本項目および補足項目
目的	環境効果の把握、熱効率の維持	環境効果の把握、熱効率の維持 地下水・地盤環境の保全
施設の条件	採排熱量が小さい施設、採排熱量の年間熱収支がバランスした冷暖房利用等を行う場合など、周辺の地中熱利用や地下水・地盤環境への影響の可能性が低いと推定されるもの	採排熱量が大きい施設、隣地との境界付近に地中熱交換器を設置する場合、採排熱量のバランスが取れていない場合など、周辺の地中熱利用や地下水・地盤環境への影響の可能性に留意する必要があるもの

規模等によっては、従来の運転や維持管理における定期点検以上のモニタリングが必要となることもあり、その場合、専用機器の設置や計測およびデータ管理等の負担も伴います。

一方、モニタリングは「熱利用効率の維持や効率低下時の原因分析や運転調整に役立つ」、「省エネルギーや省コスト効果を確認できる」等のメリットや、更には「具体的な省エネルギーや省コスト効果データに基づき、一層の普及促進の PR に寄与する」面もあることから、積極的な実施を推奨するものです。近隣において既存の観測井(例えば、自治体の地下水観測井など)

がある場合には、その所有者に協力を依頼してデータを活用することも検討してください。なお、地中熱利用ヒートポンプシステムによる地下水温や地下水位、水質の変化を正確に把握するには、地中熱利用ヒートポンプシステムによる影響のない状態(バックグラウンド)と比較し、どの程度の差があるか分析することや、下流域への影響の広がりを確認することも重要です。

既存の観測井が近隣に見当たらない場合は、新たな観測井の設置等の手間やコストが生じますが、特にモニタリングの実施を前提とした補助制度により地中熱利用ヒートポンプシステムを導入した公共施設等において、周辺へ与える可能性のある影響を正確に把握したい場合は、バックグラウンドおよび下流地点における計測を行うことを推奨します。

バックグラウンドおよび下流側の計測に適した地点を選定するには、対象施設周辺の地下水流動場の把握が必要となります。

バックグラウンドや下流地点における計測項目および、省エネルギーやCO₂排出量削減効果や環境状態の変化についてより詳しく把握するための計測項目は、参考として示します。

(1) クローズドループ方式

1) 基本項目

クローズドループ方式では以下のモニタリング項目を基本項目とします(表 4-2)。

表 4-2 モニタリング項目(クローズドループ、基本項目)

計測目的			項目	実施頻度	内容	計測位置、 配置など
効果	負荷	影響				
○			消費電力	定期的	熱媒体循環ポンプ、ヒートポンプ本体、室内機等の消費電力を計測します。システム全体の消費電力量に対する冷暖房に使用した熱量の比により、地中熱利用ヒートポンプシステムの効率(成績係数)を把握することができます。	熱媒体循環ポンプ(一次側と二次側)ヒートポンプ本体室内機に電力計を設置
○	○		一次側熱媒体温度	定期的	循環している熱媒体の入口および出口温度を定期的に確認します。熱媒体循環システムに温度計を追加する必要があります。	熱媒体循環チューブの地中熱交換器への入口および出口に配置
○	○		一次側熱媒体循環量	定期的	熱媒体の循環量を定期的に確認します。循環ポンプの流量を計測するには、流量計を追加するか、ポンプの消費電力から流量を推定する必要があります。	熱媒体循環チューブに流量計を設置または循環ポンプの電力計を設置

<項目の解説>

○ 消費電力

熱媒体循環ポンプ、ヒートポンプ本体、室内機等、システム全体で消費する電力を計測します。

4.5(4)の方法でシステム全体の消費電力量を求め、それに対する地中熱の採排熱量の比により、地中熱利用ヒートポンプシステムの効率(成績係数)を把握することができます。

○ 熱媒体温度

ヒートポンプの熱媒体の温度を、地中熱交換器の入口部と出口部で計測します。この温度差と後述の熱媒体循環量により、地中への排熱量を把握することができます。

ただし、熱媒体温度は外部からの計測はできないため、計測するには温度計及び、温度値を読み出すシステムを追加する必要があります。

○ 熱媒体循環量

熱媒体循環チューブに流量計を設置して熱媒体の循環量を計測するか、または、循環ポンプに電力計を設置して消費電力から流量を推定することにより、熱媒体循環量を把握する必要があります。

2) 補足項目

クローズドループ方式では以下のモニタリング項目を補足項目とします(表 4-3)。

表 4-3 モニタリング項目(クローズドループ、補足項目)

計測目的			項目	実施頻度	内容	計測位置、 配置など
効果	負荷	影響				
○			消費電力	常時	熱媒体循環ポンプ、ヒートポンプ本体、室内機等の消費電力を計測します。システム全体の消費電力量に対する冷暖房に使用した熱量の比により、地中熱利用ヒートポンプシステムの効率(成績係数)を把握することができます。	熱媒体循環ポンプ(一次側と二次側)ヒートポンプ本体室内機に電力計を設置
○	○	○	一次側熱媒体温度	常時	自動計測式の温度計により、循環している熱媒体の入口および出口温度を常時計測します。熱媒体循環システムに温度計を追加する必要があります。	熱媒体循環チューブ(一次側)の地中熱交換器への入口および出口に配置
○	○	○	一次側熱媒体循環量	常時	自動計測式の流量計または電力計により、熱媒体の循環量を常時計測します。	熱媒体循環チューブ(一次側)に流量計を設置または循環ポンプの電力計を設置
		○	地下水・地盤温度	定期的または常時	地中熱交換器に温度計を設置して地下水・地盤の温度変化を定期的または常時計測します。	地中熱交換器帯水層を中心に深度 10～20 m 毎程度に設置

<項目の解説>

○ 消費電力

基本項目で示した消費電力について、自記電力計の設置により自動計測を行います。

4.5(4)の方法でシステム全体の消費電力量を求め、それに対する地中熱の採排熱量の比により、地中熱利用ヒートポンプシステムの効率(成績係数)を把握することができます。

○ 熱媒体温度

基本項目で示した熱媒体温度について、自記温度計の設置により自動計測を行います。

○ 熱媒体循環量

基本項目で示した熱媒体循環量について、自記流量計の設置により自動計測を行います。

○ 地下水・地盤温度

地中熱交換器に温度計を設置(帯水層を中心に深度 10～20 m 毎程度に設置)し、地下水・地盤の温度変化を定期的または常時計測します。

(参考 1)地下水・地盤温度(下流側、バックグラウンド)

クローズドループ方式による地下水・地盤温度への影響を直接把握するには、近隣へ大きな温度変化をもたらしていないことを確認するため、地中熱交換器から離れた箇所でも地下水や地盤の温度を観測することが有効です(表 4-4)。ただし、地下水流動の上流側(影響を受けないバックグラウンドの確認)と下流側(影響の確認)に観測用の井戸を設ける必要があり、地下水の流動方向の確認や観測用井戸の掘削など、他のモニタリング項目に比べ測定の手間や費用が大きくなります。

このため、通常は、熱媒体の状態把握により地下水・地盤温度への影響が過大でないことを確認することを想定しています。

表 4-4 モニタリング内容(下流側・バックグラウンドの地下水・地盤温度)

項目	実施頻度	内容	計測位置、配置など
周辺域の 地下水・地盤温度	定期的	観測井に温度計を設置して 地下水・地盤の温度変化を 定期的に計測	地中熱交換器の地下水 流動上流側および下流側 の敷地境界

バックグラウンドや下流側のモニタリングを実施するにあたっては、有効なモニタリングデータを取得するために、地中熱利用サイトからの方向や距離、対象とする深度、観測井や観測機器を適切に配置にする必要があります(図 4-7)。

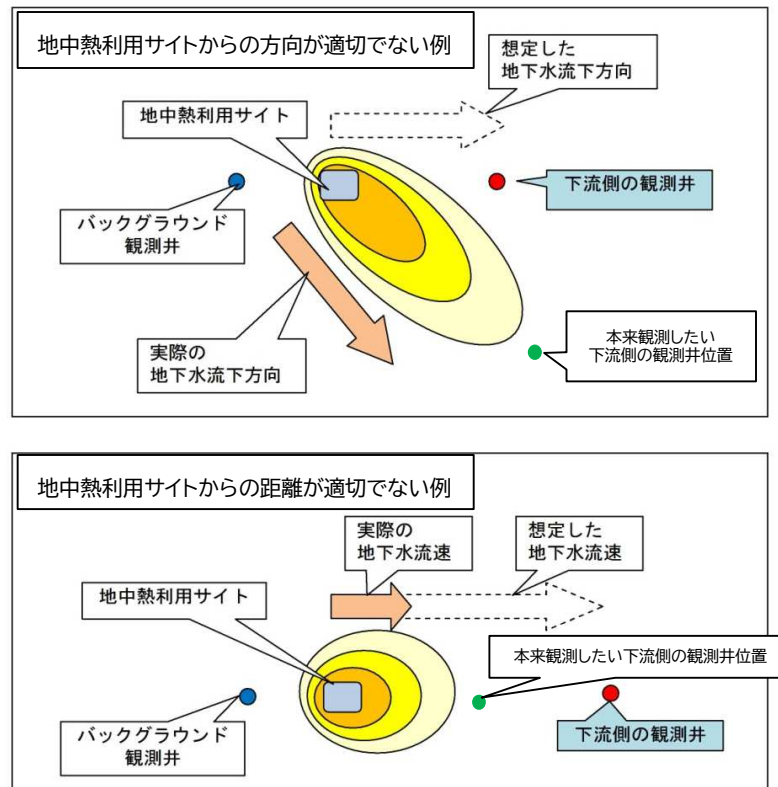


図 4-7 観測井が適切に配置されていない場合のイメージ

(参考2)クローズドループ方式における地下水質のモニタリング

クローズドループ方式における地下水質については、温度の変化に伴う土壌への吸着特性等の変化により、現場条件によっては環境基準値を超過する可能性がある点に留意する必要があります。

ただし、地中熱交換器とは別に採水用の井戸の設置など、継続的な観測には手間やコストが発生すること、現時点で大きな影響等が報告されていないことから、環境基準値に対して十分に余裕のある現場、あるいは温度変化が小さいと予想される施設でモニタリングを行う必要性は低いと考えられます。

(参考3)測定すべき水質項目

クローズドループ方式の導入前に採水用井戸から採水し、関連する水質項目の分析を行う場合、地下水・地盤環境に関する項目として、表4-5に示す環境基準項目等が調査対象として挙げられます。

クローズドループの熱負荷と各種水質項目との関連を調査した研究例としては、DOC、ケイ素、カリウム、アンモニウム、ナトリウム等の項目で、地盤温度の上昇に伴う土壌からの溶出量の増加が確認されています⁸⁸。

使用開始後は、簡易に計測が可能な水温、pH、電気伝導率を定期的に計測して大きな変化がないことを確認し、大きく変動した場合、再調査を行います。またDOC(溶存酸素濃度)やORP(酸化還元電位)等も簡易に計測が可能であり、金属イオンの溶出状況等を把握するための計測項目として適しています(表4-6)。

表4-5 地下水の水質汚濁および土壌汚染に係る環境基準項目⁸⁹

環境基準項目			
カドミウム	PCB	1,1,2-トリクロロエタン	セレン
全シアン	銅	トリクロロエチレン	ふっ素
有機燐(りん)	ジクロロメタン	テトラクロロエチレン	ほう素
鉛	四塩化炭素	1,3-ジクロロプロペン	クロロエチレン (別名塩化ビニル又は 塩化ビニルモノマー)
六価クロム	1,2-ジクロロエタン	チラウム	硝酸性窒素
砒(ひ)素	1,1-ジクロロエチレン	シマジン	亜硝酸性窒素
総水銀	1,2-ジクロロエチレン	チオベンカルブ	1,4-ジオキサン
アルキル水銀	1,1,1-トリクロロエタン	ベンゼン	

表4-6 モニタリング内容(地下水質)

項目	実施頻度	内容	計測位置、配置など
地下水質	導入前	試掘時において、地下水の水質を把握します。	近隣井戸または地中熱交換器付近に採水用に設けた井戸
地下水質	簡易項目を定期的	簡易に計測できる水温、pH、電気伝導率等を定期的に計測し、水質に大きな変動がないことを確認します。	地中熱交換器付近に採水用に設けた井戸

⁸⁸Ueki,T., Saito,T. et al., Effects of subsurface temperature increase on groundwater quality in alluvial sediment of Arakawa low-land, Japan, 5th International Conference on Sustainable Built Environment p.37, 2014.

⁸⁹環境省、地下水の水質汚濁に係る環境基準(平成9.3.13 環告10 改正令3 環告63)および土壌の汚染に係る環境基準(平成3.8.23 環告46 改正令2 環告44)

(参考 4)地下水質(下流側、バックグラウンド)

クローズドループ方式による地下水質への影響を直接把握するには、帯水層において大きな水質変化をもたらしていないことを確認するため、地中熱交換器から離れた敷地境界付近でも地下水質を観測することが有効です(表 4-7)。

ただし、地下水流動の下流側以外(影響を受けないバックグラウンドの確認)と下流側(影響の確認)において観測用の井戸を設ける必要があり、地下水の流動方向の確認や観測用井戸の掘削など、他のモニタリング項目に比べ測定の手間や費用が大きくなります。

このため、近隣井戸や採水用に設けた井戸の調査から、周辺域の地下水質への影響が生じていないか確認することを想定しています。

表 4-7 モニタリング内容(周辺地下水質)

項目	実施頻度	内容	計測位置、配置など
周辺地下水質	簡易項目を定期的	周辺井戸等において、簡易に計測できる電気伝導率および pH を定期的に計測し、水質に大きな変動がないことを確認します。	地中熱交換器の地下水流動上流側および下流側の敷地境界

(参考 5)二次側熱媒体温度、流量

「一次側」とは地中→ヒートポンプへの熱の移動システム、「二次側」とはヒートポンプ→冷暖房機器への熱の移動システムを指します(図 4-8)。

「地中から熱をどの程度採排熱しているか」を推定するには、一次側の熱媒体循環量および、入口と出口の温度差を計測しますが、二次側の熱媒体循環量、温度差を計測することで、「実際に冷暖房熱として使用した熱量」を推定することができます。

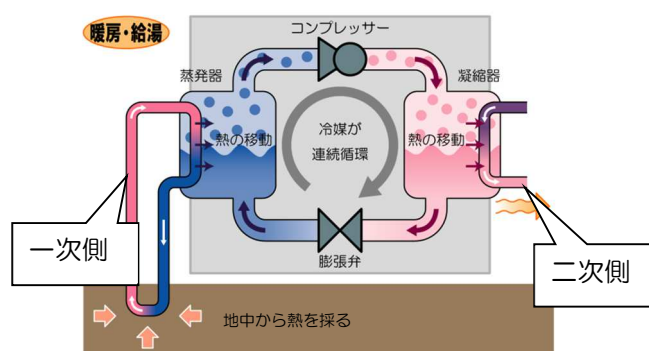


図 4-8 ヒートポンプの「一次側」と「二次側」

3) モニタリングのシステム

クローズドループ方式では、「消費電力」、「一次側熱媒体温度」、「一次側熱媒体循環量」を計測することで、省エネルギーやCO₂排出量削減等の各種効果(効果項目)と、地下水・地盤環境へ与える熱負荷(負荷項目)を把握することができます(図4-9)。

これらの項目は補足項目にも挙げていますが、補足項目として高頻度で行う場合は、自動記録機器の設置による常時計測および記録を行います。

なお、環境省が実施した補助事業により得られたモニタリングの事例を4.4(6)モニタリング結果の事例に紹介しました。

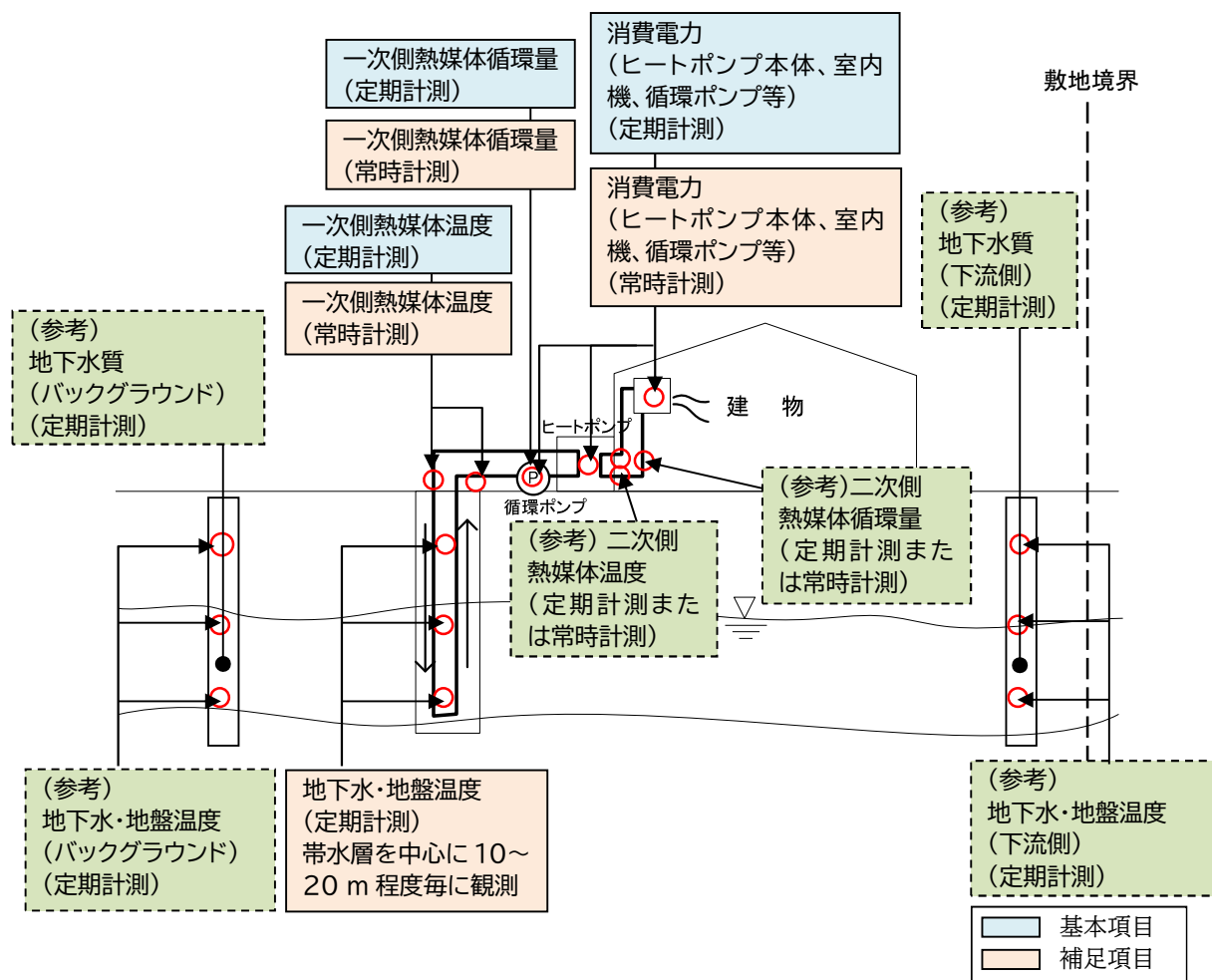


図4-9 クローズドループ方式のモニタリングイメージ

(2) オープンループ方式

熱利用を行うオープンループ方式においては、地下水・地盤環境に与える負荷や影響として、熱利用に関する項目だけでなく「地下水位」や「地下水質」、「放流先の水質(放流型の場合)」に関する項目についても考慮する必要があります。

特に水質については、地下水を汲み上げた際に空気に触れることで水質が変化する可能性があり、ヒートポンプを使用しない方式も含めて、地下水の還元や公共用水域への放流に問題のない水質となっているか、確認する必要があります。

1) 基本項目

オープンループ方式では以下のモニタリング項目を基本項目とします(表4-8)。

表4-8 モニタリング項目(オープンループ、基本項目)

計測目的			項目	実施頻度	内容	計測位置、配置など
効果	負荷	影響				
	○	○	履歴	導入前(確認)	対象地域で過去に地下水位低下や地盤沈下が起きていないか、履歴を確認します。また、過去に周辺地域において地下水汚染事故があったか否か、あった場合には対策や処置の状況を確認します。	—
	○	○	揚水井水位	定期的	揚水井の水位がどの程度変動しているか確認します。 揚水している期間と揚水していない期間のそれぞれで確認し、揚水停止時に速やかに元の地下水位へ戻っていることを確認します。	揚水井において、揚水している帯水層の水位が観測できるように配置
	○	○	還元井水位	定期的	還元井の水位がどの程度変動しているか確認します。 ある流量で還元しているときの還元井水位が長期的に上昇する場合、目詰りが発生している可能性があります。	還元井において、還元している帯水層の水位が観測できるように配置
○			消費電力	定期的	揚水および還元ポンプ、熱媒体循環ポンプ、ヒートポンプ本体、室内機等の消費電力を計測します。 システム全体の消費電力量に対する冷暖房に使用した熱量の比により、地中熱利用ヒートポンプシステムの効率(成績係数)を把握することができます。	揚水および還元ポンプ 熱媒体循環ポンプ(二次側) ヒートポンプ本体 室内機 に電力計を設置
○	○		揚水水温	定期的	揚水の水温が設計時に想定した水温から大きく乖離していないか、定期的に確認します。	揚水井
○	○		還元水温	定期的	還元水の水温が設計時に想定した水温から大きく乖離していないか、定期的に確認します。	還元井
○	○		揚水水量	定期的	揚水量が設計時に想定した水量から大きく乖離していないか、定期的に確認します。	揚水井
○	○		還元水量	定期的	還元水の水量が設計時に想定した水量から大きく乖離していないか、定期的に確認します。	還元井
	○	○	還元水質	導入前(確認) 簡易項目は定期的	近隣の井戸や試掘時において、汲み上げた地下水に有害物質が含まれていないことを確認します。 また、簡易に計測できる電気伝導率およびpHを定期的に計測し、水質に大きな変動がないことを確認します。	還元井 (導入前測定は近隣井戸や新設井戸)

<項目の解説>

○ 履歴

オープンループ方式の導入前に、対象地域近辺の地下水位や地盤の変化、過去の地下水汚染事故の有無を調査します。

地下水利用量や地下水位・地盤変化・地下水質調査等のデータは、主に地方公共団体の統計資料で確認することができます。統計資料は自治体の資料室で閲覧できるほか、ホームページ上で公開している自治体もあります。

○ 揚水井水位

揚水による地下水位への負荷の蓄積(経年的に徐々に水位低下)や過大な変化(大幅な水位低下)を防ぐため、地下水位を水位計により計測します。地下水位は降雨や季節変動による影響も受けるため、連続計測が望ましいですが、定期計測としても、計測時期の天候や季節を考慮すれば変化の傾向を評価することができます。

また揚水中と揚水停止中のそれぞれの期間で地下水位を計測し、揚水停止中に地下水位が通常時の状態まで速やかに回復するか否かを確認することも、持続的に地下水を利用するためには有効です。

○ 還元井水位

還元井の目詰まりによる地下水位の上昇等の変化を把握するため、地下水位を水位計により計測します。地下水位は降雨や季節変動による影響も受けるため、連続計測が望ましいですが、定期計測としても、計測時期の天候や季節を考慮すれば変化の傾向を評価することができます。

○ 消費電力

揚水および還元ポンプ、ヒートポンプ本体、室内機等、システム全体で消費する電力を計測します。

4.5(4)の方法でシステム全体の消費電力量を求め、それに対する地下水の採排熱量の比により、地中熱利用ヒートポンプシステムの効率(成績係数)を把握することができます。

○ 揚水水温

揚水井において温度計を用いて水温を直接計測します。

○ 揚水量

流量計の設置により流量を計測するほか、揚水ポンプに電力計を設置して消費電力から流量の推定を行います。

○ 還元水温

還元井において温度計を用いて水温を直接計測します。

○ 還元水量

流量計の設置により流量を計測するほか、還元ポンプに電力計を設置して消費電力から流量の推定を行います。

○ 還元水質

地中熱利用ヒートポンプシステムの導入前に近隣井戸や新設井戸で地下水質調査を実施します。

水質調査項目としては、設備の腐食やスケール防止に関する項目(「3.2(5) 4) 設備の腐食・スケール生成の防止」を参照)および、水質汚濁防止法や条例等で定める有害物質等(「3.2(5) 6) 利用後の地下水の放流」および「参考資料 7. 水質に関する規制」を参照)が対象となります。特に、過去に地下水汚染事故があり、対策を行った後にその地域で地下水利用を行う場合は、十分な確認が必要です。

また、使用開始後も電気伝導率および pH を定期的に計測し、大きな水質の変化がないことを確認し、大きく変動した場合、再調査を行います。

2) 補足項目

オープンループ方式では以下のモニタリング項目を補足項目とします(表 4-9)。

表 4-9 モニタリング項目(オープンループ、補足項目)

計測目的			項目	実施頻度	内容	計測位置、配置など
効果	負荷	影響				
	○	○	揚水井水位	常時	揚水井の水位がどの程度変動しているか確認します。 自動観測機器により、水位を常時計測し、揚水停止時に速やかに元の地下水位へ戻っていることを確認します。	揚水井において、揚水している帯水層の水位が観測できるように配置
	○	○	還元井水位	常時	還元井の水位がどの程度変動しているか確認します。 自動観測機器により水位を常時計測します。	還元井において、還元している帯水層の水位が観測できるように配置
	○	○	周辺地下水位	定期的	近辺の井戸や新たに設けた観測井で、揚水井と同様に水位計測を行います。	新たに観測井を設ける場合は、他者への影響を把握できるよう敷地境界付近へ設置する
○			消費電力	常時	揚水および還元ポンプ、熱媒体循環ポンプ、ヒートポンプ本体、室内機等の消費電力を計測します。 システム全体の消費電力量に対する冷暖房に使用した熱量の比により、地中熱利用ヒートポンプシステムの効率(成績係数)を把握することができます。	揚水および還元ポンプ 熱媒体循環ポンプ(二次側) ヒートポンプ本体 室内機 に電力計を設置
○	○		揚水水温	常時	揚水の水温が設計時に想定した水温から大きく乖離していないか、自動計測式の温度計により常時計測します。	揚水井
○	○		還元水温	常時	還元水の水温が設計時に想定した水温から大きく乖離していないか、自動計測式の温度計により常時計測します。	還元井
○	○		揚水水量	常時	揚水量が設計時に想定した水量から大きく乖離していないか、自動計測式の流量計により常時計測します。	揚水井
○	○		還元水量	常時	還元水の水量が設計時に想定した水量から大きく乖離していないか、自動計測式の流量計により常時計測します。	還元井
	○	○	還元水質	簡易項目は常時	簡易に計測できる電気伝導率及び pH を、自動計測式の電気伝導率計および pH 計により常時計測します。	還元井

<項目の解説>

○ 揚水井水位

基本項目で示した揚水井水位について、自記水位計の設置により自動計測を行います。

○ 還元井水位

基本項目で示した還元井水位について、自記水位計の設置により自動計測を行います。

○ 周辺地下水位

周辺への影響を確認するため、近辺(敷地内)の井戸の水位を揚水井と同様に観測します。近辺に井戸がない場合、新たに観測井を掘削します。

○ 消費電力

基本項目で示した消費電力について、自記電力計の設置により自動計測を行います。

4.5(4)の方法でシステム全体の消費電力量を求め、それに対する地下水の採排熱量の比により、地中熱利用ヒートポンプシステムの効率(成績係数)を把握することができます。

○ 揚水水温

基本項目で示した揚水水温について、自記温度計の設置により自動計測を行います。

○ 揚水水量

基本項目で示した揚水水量について、自記流量計の設置により自動計測を行います。

○ 還元水温

基本項目で示した還元水温について、自記温度計の設置により自動計測を行います。

○ 還元水量

基本項目で示した還元水量について、自記流量計の設置により自動計測を行います。

○ 還元水質

基本項目で示した還元水質(電気伝導率および pH)について、自記計測計の設置により自動計測を行い、大きく変動した場合、再調査を行います。

(参考1)地盤沈下

揚水による地盤への影響を直接把握するには、地盤沈下の発生の有無について水準測量等により実測することも有効です(表 4-10)。ただし、他のモニタリング項目に比べ測量の実施または沈下計の設置が必要となり、手間や費用が大きくなります。

このため、通常は、揚水井水位や周辺地下水位の状態把握により、地盤沈下を生じるレベルの地下水位低下を周辺域に生じていないか確認することを想定しています。

表 4-10 モニタリング内容(地盤沈下)

項目	実施頻度	内容	計測位置、配置など
地盤沈下	定期的 または 常時	水準測量により地盤沈下の有無を定期的に確認するか、沈下計を用いて常時計測を行います。	揚水井付近および他者への影響を把握できるよう敷地境界付近を対象とする

(参考2)還元先地下水の水温や水質

地下水還元による水温や水質への影響を直接把握するには、施設の下流側で水温や水質への影響が発生していないことを確認するため、還元先の帯水層で水温、電気伝導率および pH を計測し、大きく変動した場合、再調査を行います(表 4-11)。ただし、新たな観測井を設ける必要がある場合、他のモニタリング項目に比べ測定の手間や費用が大きくなります。

このため、通常は、還元水の状態把握により水温や水質への影響が過大でないか確認することを想定しています。

表 4-11 モニタリング内容(還元先地下水の水温や水質)

項目	実施頻度	内容	計測位置、配置など
還元先地下水の水温や水質	定期的	地下水放流先の水域の水質について、水温、電気伝導率および pH を定期的に計測し、水質に大きな変動がないことを確認します。	地下水流動下流側に位置する近隣井戸 新たに観測井を設ける場合は、他者への影響を把握できるよう下流側の敷地境界付近へ設置する

3) モニタリングのシステム

オープンループ方式では、「消費電力」、「揚水量」、「揚水水温」、「還元水温」、「還元水量」を計測することで、省エネルギーやCO₂排出量削減等の各種効果(効果項目)と、地下水・地盤環境へ与える熱負荷(負荷項目)を把握することができます(図4-10)。

また、導入前の「履歴」の確認および、「揚水井水位」、「還元水質」を計測することで、地下水・地盤環境へ与える質的負荷(負荷項目)を把握することができます。

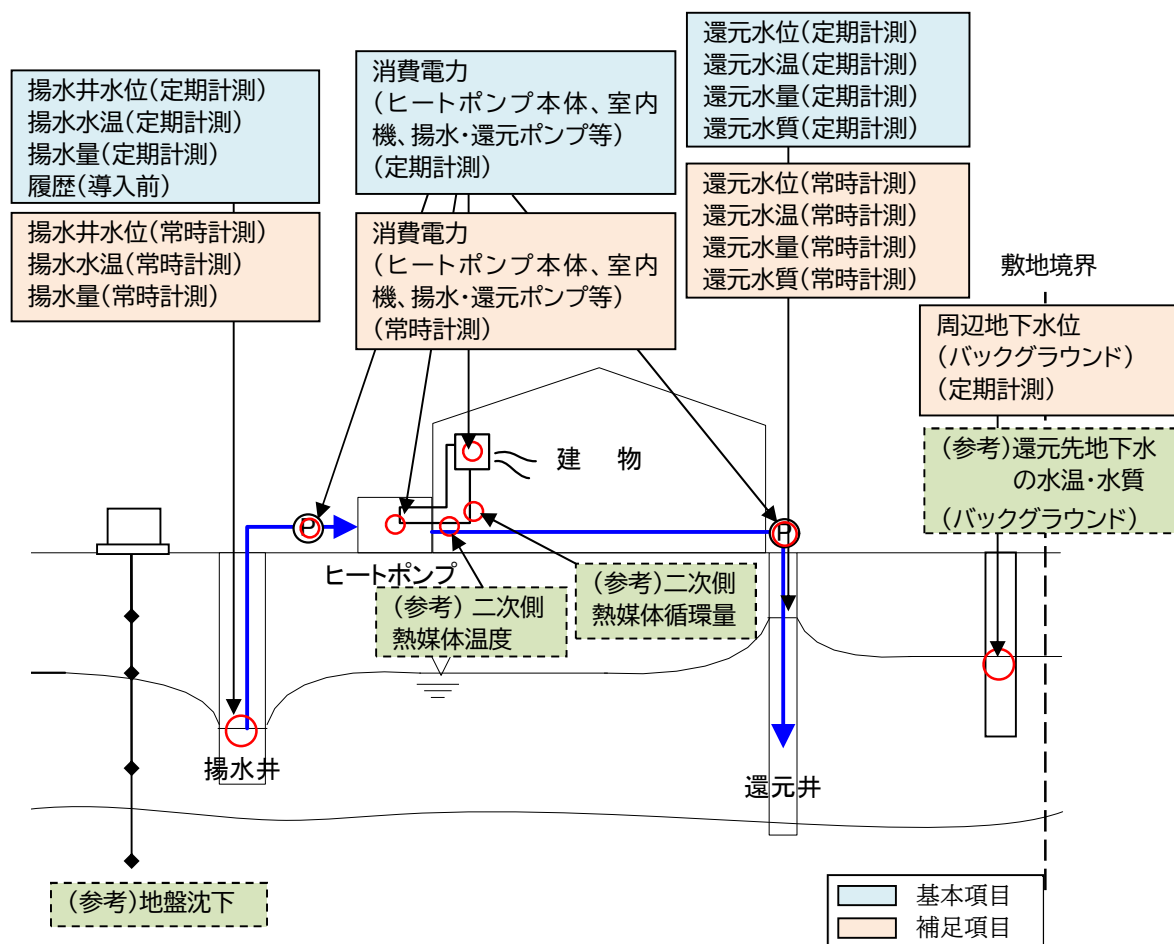


図4-10 オープンループ方式のモニタリングイメージ

<まとめ> 各利用方式のモニタリング項目と頻度の一覧

表 4-12 クローズドループ方式に関するモニタリング項目および頻度

クローズドループ方式	基本項目		補足項目	
	項目	実施頻度	項目	実施頻度
省エネルギー効果やCO ₂ 排出量削減効果 地下水・地盤温度への影響	消費電力	定期的	消費電力	常時
	一次側熱媒体温度	定期的 (入口および出口)	一次側熱媒体温度	常時 (入口および出口)
	一次側熱媒体循環量	定期的	一次側熱媒体循環量	常時
	—	—	地下水・地盤温度	定期的
	—	—	(参考)二次側熱媒体温度	定期的または常時 (入口および出口)
	—	—	(参考)二次側熱媒体循環量	定期的または常時
	—	—	(参考)周辺域の地下水・地盤温度	定期的 (バックグラウンドも)
地下水質への影響	—	—	(参考)地下水質	導入前 簡易項目(pH、EC※)は 定期的
	—	—	(参考)周辺域の地下水質	定期的 (バックグラウンドも)

表 4-13 オープンループ方式に関するモニタリング項目および頻度

オープンループ方式	基本項目		補足項目	
	項目	実施頻度	項目	実施頻度
揚水による地下水位への影響	履歴	導入前	—	—
	揚水井水位	定期的	揚水井水位	常時
	—	—	周辺地下水位	定期的
	—	—	(参考)地盤沈下	定期的または常時
省エネルギー効果やCO ₂ 排出量削減効果 地下水の還元による水温や水質への影響 (還元型の場合)	消費電力	定期的	消費電力	常時
	揚水水温	定期的	揚水水温	常時
	揚水水量	定期的	揚水水量	常時
	還元井水位	定期的	還元井水位	常時
	還元水温	定期的	還元水温	常時
	還元水量	定期的	還元水量	常時
	還元水質	導入前に地下水質を確認 簡易項目(pH、EC※)は 定期的	還元水質	簡易項目(pH、EC※) は常時
	—	—	(参考)還元先地下水の水温や水質	定期的
省エネルギー効果やCO ₂ 排出量削減効果 放流先水域の水温や水質への影響 (放流型の場合)	消費電力	定期的	消費電力	常時
	揚水水温	定期的	揚水水温	常時
	揚水水量	定期的	揚水水量	常時
	放流水温	定期的	放流水温	常時
	放流量	定期的	放流量	常時
	放流水質	導入前に地下水質を確認 簡易項目(pH、EC※)は 定期的	—	—
	—	—	(参考)二次側熱媒体温度	定期的または常時 (入口および出口)
	—	—	(参考)二次側熱媒体循環量	定期的または常時

※ EC:電気伝導率

4.4 モニタリング機器の選定・配置等

可能な限り計測誤差を小さくし、有効で適切なモニタリングデータを取得するには、計測目的に応じたモニタリング機器の選定や、適切な配置に留意する必要があります。図 4-11 にモニタリング機器配置の参考を示します。

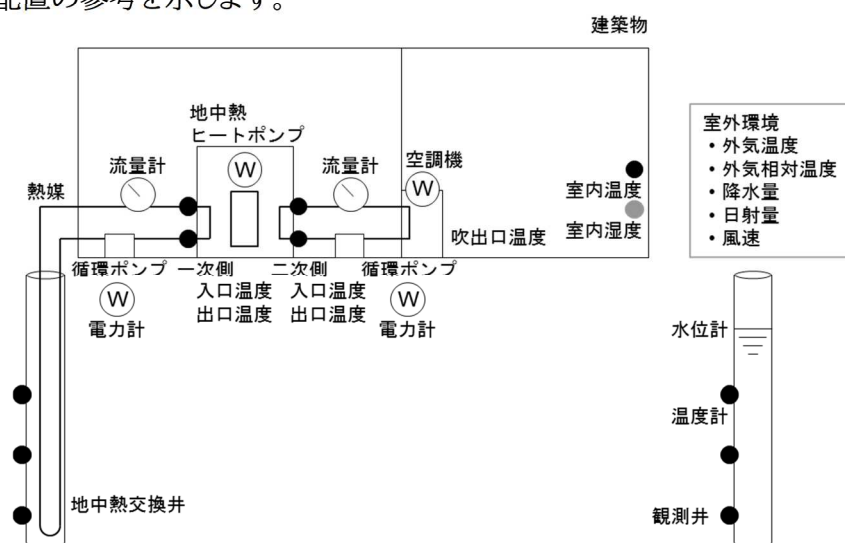


図 4-11 モニタリング機器の配置の例(効果項目、負荷項目)⁹⁰

参考項目としたバックグラウンドや下流側観測井での温度や水位等も含め、環境影響を詳細に評価するためのモニタリング機器の配置の例を図 4-12 に示します。

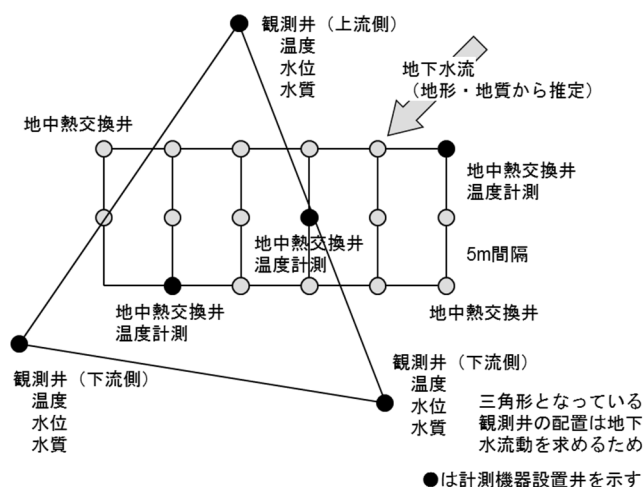


図 4-12 モニタリング機器の配置の例⁹⁰
(参考項目、下流側やバックグラウンドも含む)

⁹⁰国土交通省, 官庁施設における地中熱システム導入ガイドライン(案), 2013.10. (<http://www.mlit.go.jp/common/001016159.pdf>)

適正なモニタリング機器の選定や取り付け、計測方法、点検や維持管理等については「地中熱ヒートポンプシステム施工管理マニュアル改訂版(地中熱利用促進協会編、オーム社)、第7章 システム評価」および「官庁施設における地中熱システム導入ガイドライン(案)(国土交通省)、第7章 評価編」に機器の規格や精度等も含めて紹介されています。

モニタリングを実施した事例を紹介します。

(1) 環境省 クールシティ推進事業のモニタリング事例(クローズドループ方式)

クールシティ推進事業では、クローズドループ方式のシステムにおいて、以下の項目のモニタリングを実施した例です(図4-13)。

省エネルギー効果、CO₂ 排出量削減効果、地下水・地盤環境への影響等様々な観点から検証を行うため、水質を除く多項目のモニタリングを行いました。

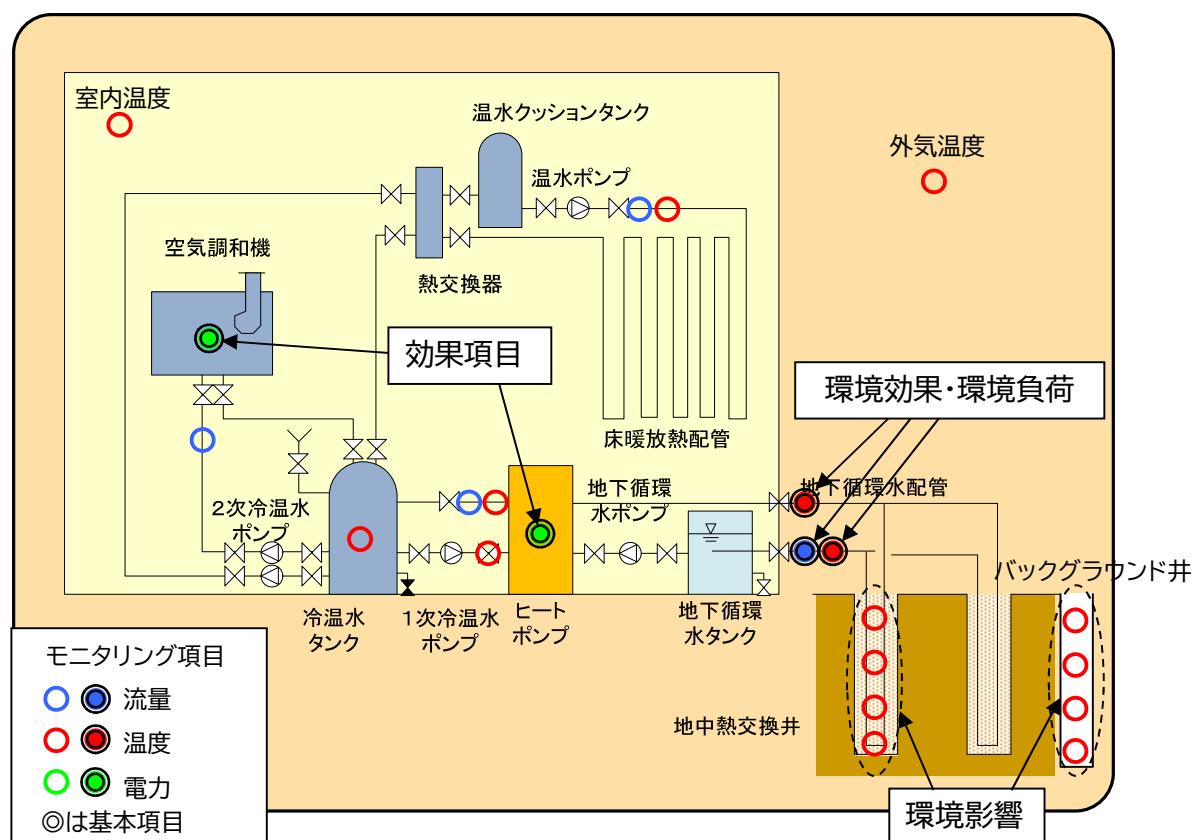


図4-13 クールシティ推進事業におけるクローズドループ方式のモニタリング事例⁹¹

⁹¹環境省、平成19年度 地下水等活用型・地中熱利用型ヒートアイランド対策評価業務報告書、2008.3.

(2) 環境省 クールシティ推進事業のモニタリング事例(オープンループ方式)

クールシティ推進事業では、オープンループ方式のシステムにおいて以下の項目のモニタリングを実施しました(図4-14)。

省エネルギー効果、CO₂ 排出量削減効果、地下水・地盤環境への影響等様々な観点から検証を行うため、多項目のモニタリングを行いました。

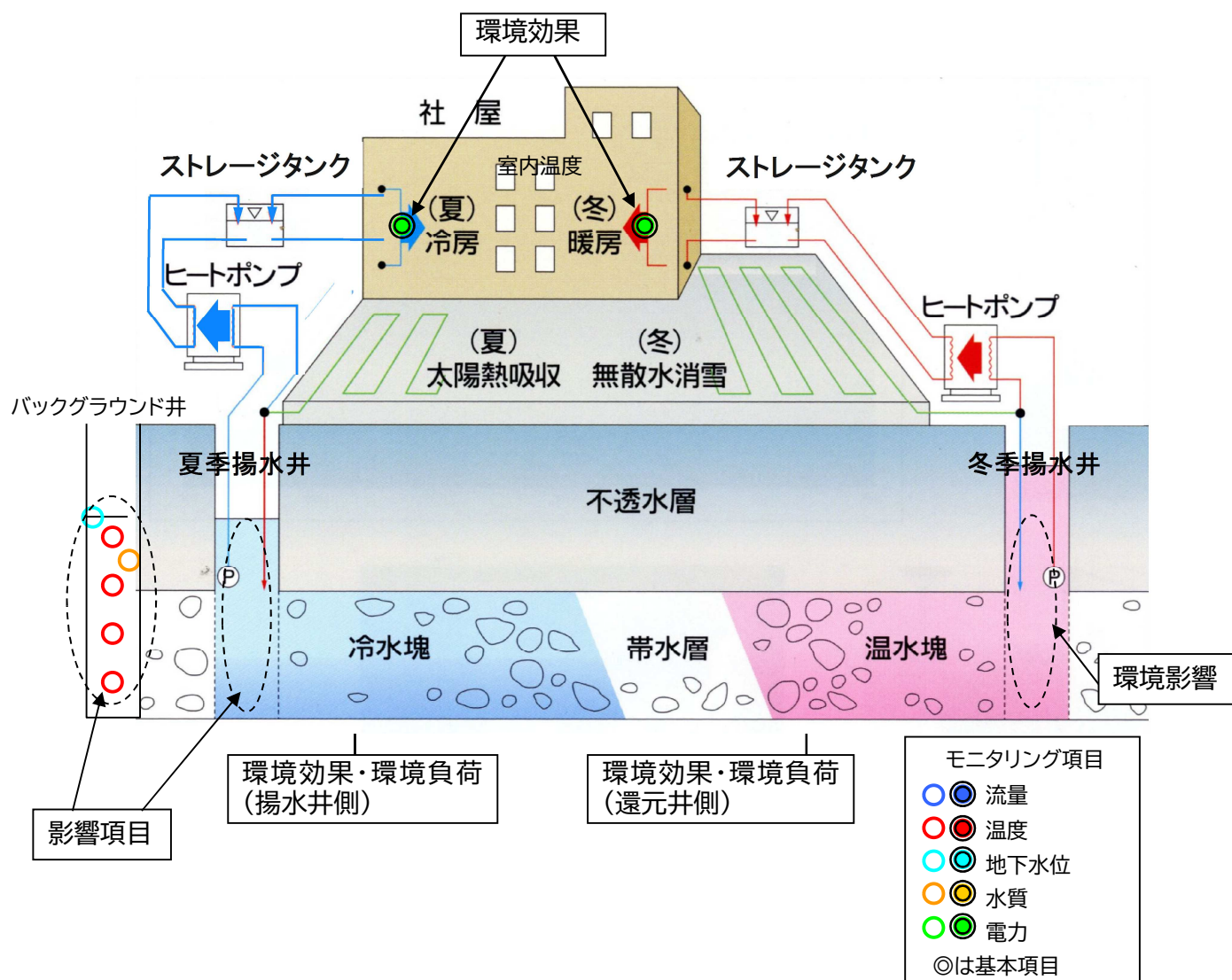


図4-14 クールシティ推進事業におけるオープンループ方式のモニタリング事例⁹²

⁹²環境省, 平成21年度 地下水等活用型・地中熱利用型ヒートアイランド対策評価業務報告書, 2010.3.

(3) 環境省 環境技術実証事業(ETV)におけるモニタリング事例(クローズドループ方式)

環境省が実施している環境技術実証事業(ETV)は有用性のある環境技術の評価試験を行い、その効果を客観的なデータとして実証する事業であり、その一項目として地中熱利用技術の評価を行っています。

ETV 事業で実施されたクローズドループ方式の評価事例⁹³を以下に示します(図 4-15、表 4-14)。

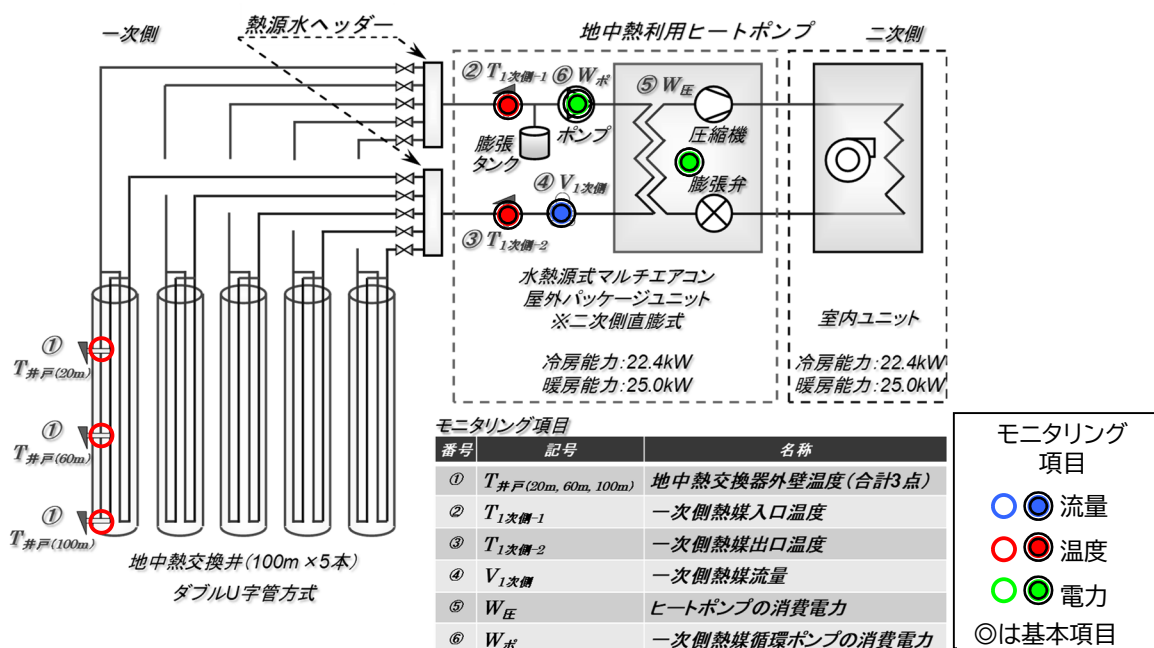


図 4-15 モニタリング機器の設置状況

表 4-14 環境効果等の評価結果

項目		結果	条件・備考
必須項目	a.冷房期間の SCOP *1	3.74	冷房試験期間:平成 22 年 7 月 18 日 ～平成 22 年 9 月 26 日
	b.冷房期間のシステム平均消費電力量 [kWh/h]	3.98	
	c.冷房期間の地中への平均排熱量 [kWh/h]*1	17.69	
任意項目	d.冷房・暖房期間のSCOP*1	3.92	
	e.暖房期間のシステム平均消費電力量 [kWh/h]	5.30	暖房試験期間:平成 22 年 10 月 2 日 ～平成 23 年 2 月 2 日
	f.暖房期間の地中からの平均採熱量 [kWh/h]	17.53	
その他項目	測定期間(冷房期間)の稼働率(%)	18.6	
	測定期間(暖房期間)の稼働率(%)	11.0	
	冷房期間のシステムの部分負荷率平均値(%)	66.5	
	暖房期間のシステムの部分負荷率平均値(%)	86.7	

*1:技術の性能の高さは SCOP で評価され、地中への排熱量が当該技術の性能の高さを必ずしも示すものでない。ヒートアイランド抑制に関する性能は、「冷房期間の SCOP」及び「冷房期間の地中への排熱量」の両値の総合で評価される。

⁹³環境省, 平成 22 年度環境技術実証事業 ヒートアイランド対策技術分野 実証試験結果報告書, 2011.3.

(4) 環境省 環境技術実証事業(ETV)におけるモニタリング事例(オープンループ方式)

ETV 事業で実施されたオープンループ方式の評価事例⁹⁴を以下に示します(図 4-16、表 4-15)。

この事例では揚水井および還元井の水位や水質等の環境影響に関する項目はモニタリング対象としていません。

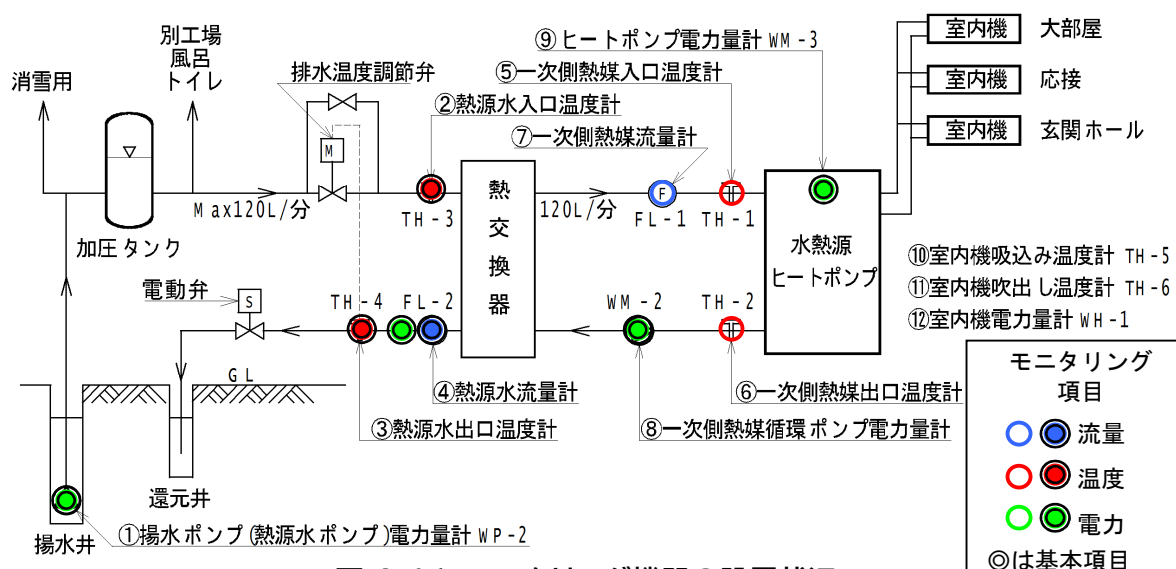


図 4-16 モニタリング機器の設置状況

表 4-15 環境効果等の評価結果

項目				試験結果
システム全体の実証項目	必須項目	参考値*1	a.冷房期間の SCOP (ヒートポンプ、循環ポンプ、揚水ポンプ電力を含む)	2.80
			b.冷房期間のシステム平均消費電力量 [kWh/h] (ヒートポンプ、循環ポンプ、揚水ポンプ電力を含む)	3.70
		実測値	c.冷房期間の地中への平均排熱量 [kWh/h]	11.3
	任意項目	参考値*1	d.冷房・暖房期間の SCOP (ヒートポンプ、循環ポンプ、揚水ポンプ電力を含む)	2.89
			e.冷房期間の SCOP (ヒートポンプ、循環ポンプ、室内機、揚水ポンプ電力を含む)	2.47
			f.暖房期間のシステム平均消費電力量 [kWh/h]	7.73
		実測値	g.暖房期間の地中からの平均採熱量 [kWh/h]	17.3
			h.冷房期間の SCOP (ヒートポンプ、循環ポンプを含む)	3.02
			i.暖房期間の SCOP (ヒートポンプ、循環ポンプを含む)	3.01

*1: SCOP を求める場合には、ヒートポンプの電力量に加えて循環ポンプや揚水ポンプの電力量を加味する。本システムでは揚水ポンプにより汲み上げる地下水を他の用途にも使っているため、この揚水ポンプの電力量をそのまま用いては適切に SCOP を算出することができない。そのため、本システム専用の揚水ポンプがあるものと仮定をした上で、揚水ポンプの電力量を推定した。なお、実測値のみで算定した数値と区別するために、推定値を用いた項目は参考値としている。

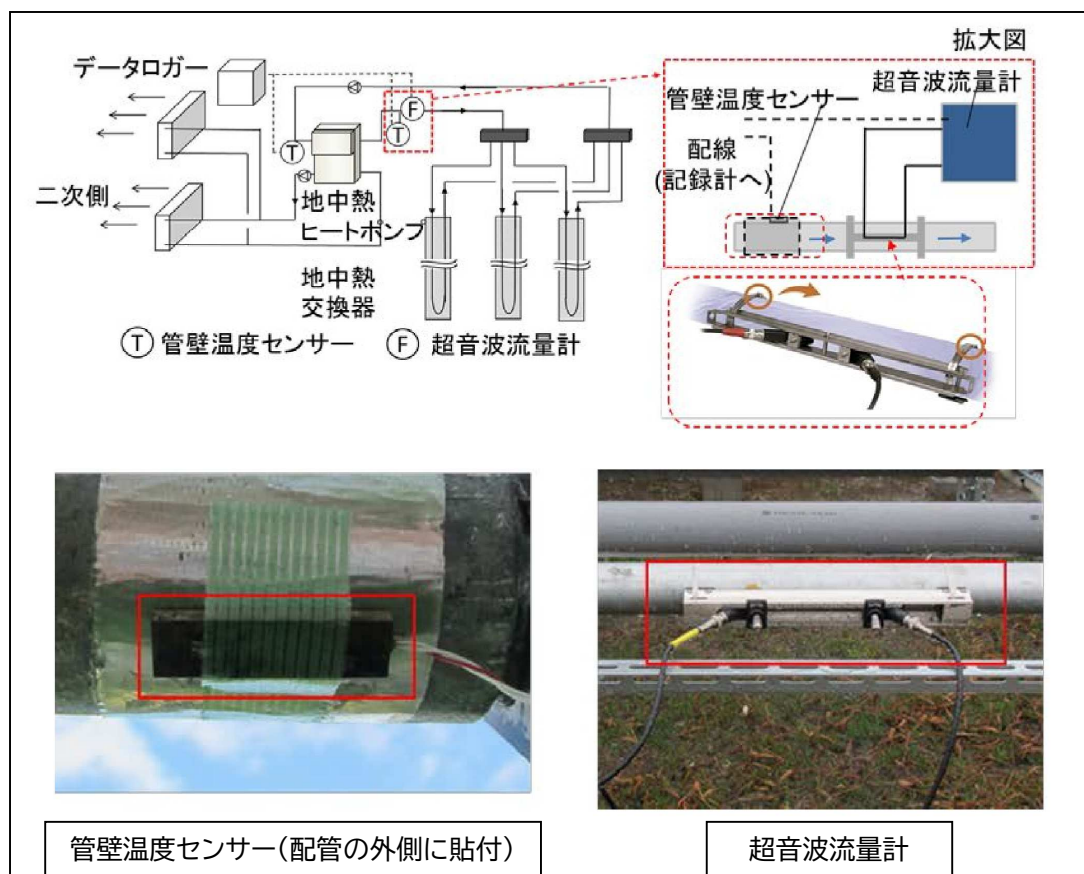
⁹⁴環境省, 平成 23 年度環境技術実証事業 ヒートアイランド対策技術分野 実証試験結果報告書, 2012.3.

(5) 地中熱利用ヒートポンプシステム導入後のモニタリング機器の設置

熱媒体の流量や温度の計測にはモニタリング機器の設置が必要ですが、地中熱利用ヒートポンプシステムを導入した後に追加でモニタリング機器を設置するのは費用も手間も必要になります。

低コストで低誤差かつ地中熱利用ヒートポンプシステムの導入後にも設置可能な熱負荷等をモニタリングする技術を確立するため、NEDO 等においてモニタリング技術の技術実証事業が実施されました(図 4-17)。

今後、これらの技術の適用により、モニタリングがより実施しやすくなると期待されます。



⁹⁵NEDO, 再生可能エネルギー熱利用計測技術実証事業 平成 23 年度～平成 25 年度成果報告書, 2015.3.

(6) モニタリング結果の事例

地中熱利用ヒートポンプシステムの設備規模や用途(空調や融雪)、年間の採排熱量の観点から特徴的な事例を紹介します。

1) 事例 1(小規模施設・空調利用)

① 施設概要

採排熱のバランスがされた小規模施設による空調利用(冷暖房)の事例です(表 4-16)。

表 4-16 施設概要(事例 1)

所在地	用途	深度	本数	掘削口径
東京都調布市	事務所での空調	105 m	1 本	φ146 mm
地質	有効熱伝導率	方式	ヒートポンプ仕様	
主に泥岩	2.13 [W/(m・K)]	クローズドループ (シングルUチューブ)	定格暖房能力／定格消費電力 10.0 kW／3.1 kW×1 台	定格冷房能力／定格消費電力 10.0 kW／3.4 kW×1 台

② モニタリング結果

地盤温度(地中熱交換器内)は、日々の稼働に伴って多少の変動が見られますが、外気温の影響を受けているとみられる深度 0 mを除いて大きく変化する状況は見られません(図 4-18)。この事例は、採排熱がほぼバランスした稼働をしています(図 4-19)。1 日のうちで地中熱を利用する時間を 8～12 時間程度に留め、地盤の温度回復をする時間を与えていることが持続的に利用できている要因の一つと考えられ、設備導入に際しての稼働計画や導入後の運転調整の面で参考になります。

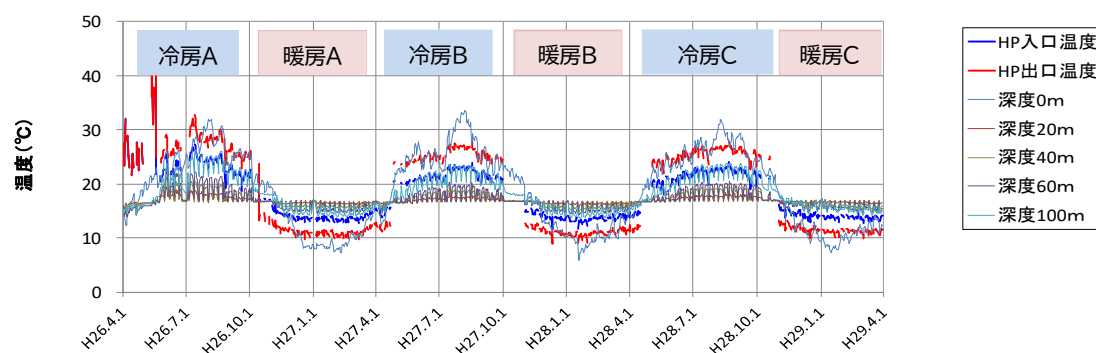


図 4-18 ヒートポンプ出入口温度と地盤温度(事例 1)

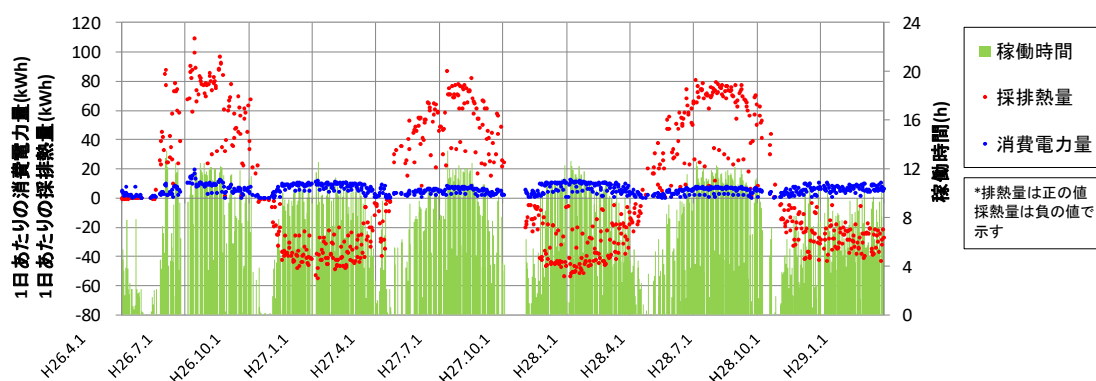


図 4-19 消費電力量、採排熱量、稼働時間(事例 1)

2) 事例2(小規模施設・空調利用)

① 施設概要

採熱を中心とした小規模施設における空調利用(主に暖房)の事例です(表 4-17)。

表 4-17 施設概要(事例2)

所在地	用途	深度	本数	掘削口径
北海道札幌市	戸建住宅での空調	100 m	1 本	φ120 mm
地質	有効熱伝導率	方式	ヒートポンプ仕様	
粘土と火山灰の互層	2.26 [W/(m・K)]	クローズドループ (シングルUチューブ)	定格暖房能力／定格消費電力 10.0 kW／3.08 kW×1 台	定格冷房能力／定格消費電力 10.0 kW／3.38 kW×1 台

② モニタリング結果

地盤温度(地中熱交換器内)は、暖房Aの暖房稼働が終了すると速やかに回復する状況が見られます。また、冷房稼働もありましたが、終了後、速やかに地盤温度は落ち着いています。暖房稼働が開始されると次第に低下し、春には上昇に転じています(図 4-20、図 4-21)。厳冬期にはほぼ終日(24 時間)の採熱が繰り返されたものの、春先には日々の稼働時間も短くなったためと考えられます。小規模施設では、暖房を中心とした稼働でも、翌年の稼働までに地盤温度が回復し、持続的に利用できる状況と言えます。

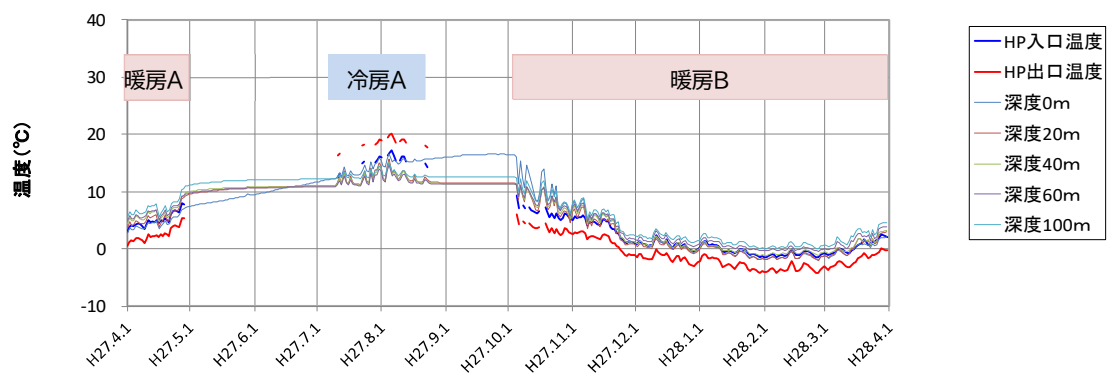


図 4-20 ヒートポンプ出入口温度と地盤温度(事例2)

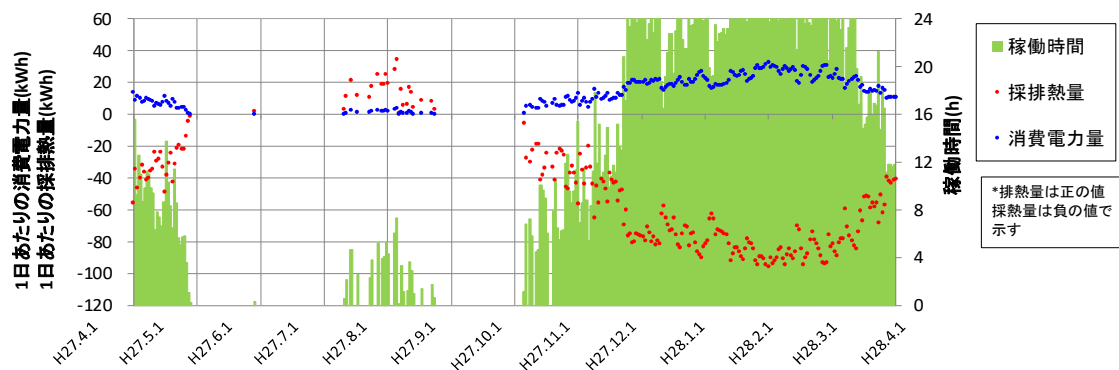


図 4-21 消費電力量、採排熱量、稼働時間(事例2)

3) 事例 3(中規模施設・空調利用)

① 施設概要

採排熱のバランスが取れている中規模施設の空調利用(冷暖房)の事例です(表 4-18)。

表 4-18 施設概要(事例 3)

所在地	用途	深度	本数	掘削口径
広島県三次市	市庁舎での空調	100 m	14 本	φ130 mm
地質	有効熱伝導率	方式	ヒートポンプ仕様	
主に泥岩	2.56 [W/(m・K)]	クローズドループ (ダブルUチューブ)	定格暖房能力/定格消費電力 102.6 kW/28.8 kW×1 台	定格冷房能力/定格消費電力 115.2 kW/23.4 kW×1 台

② モニタリング結果

この施設では、年間を通じて 1 日 12 時間程度の暖房もしくは冷房稼働されており、これに伴って地盤温度(地中熱交換器内)も変化していますが、どの深度でも概ね同様の変化傾向が見られました(図 4-22)。採排熱量に応じて地盤温度が変動する状況が見られますが、地盤温度が大きな変動を示していないことから安定的に稼働できたものと考えられます(図 4-23)。また、この事例では 2 シーズンの稼働結果を確認することができ、一日の稼働時間が同じでも、空調负荷に応じて採排熱量が変化することが見られます。

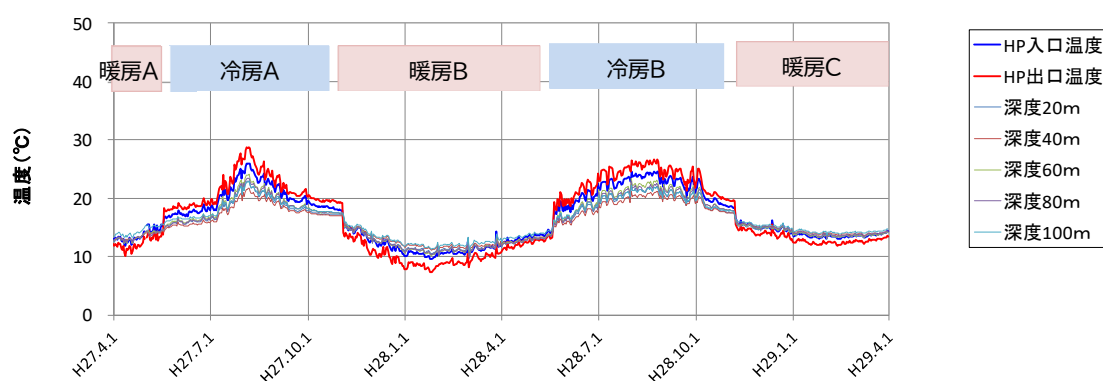


図 4-22 ヒートポンプ出入口温度と地盤温度(事例 3)

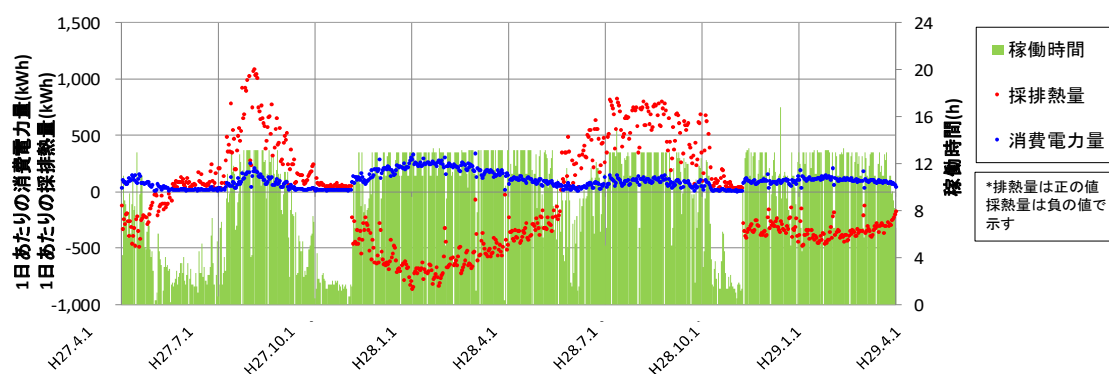


図 4-23 消費電力量、採排熱量、稼働時間(事例 3)

4) 事例4(中規模施設・空調利用)

① 施設概要

採熱を中心とした中規模施設における空調利用(主に暖房)の事例です(表 4-19)。

表 4-19 施設概要(事例4)

所在地	用途	深度	本数	掘削口径
北海道占冠村	福祉施設での空調	100 m	8 本	φ179 mm
地質	有効熱伝導率	方式	ヒートポンプ仕様	
泥岩	1.87 [W/(m・K)]	クローズドループ (シングルUチューブ)	定格暖房能力/定格消費電力 45.3 kW/9.5 kW×1 台	定格冷房能力/定格消費電力 43.8 kW/13.1 kW×1 台

② モニタリング結果

年間を通じて暖房利用されているものの、現状では地盤温度(地中熱交換器内)は大幅に低下する状況は見られません(図 4-24、図 4-25)。暖房C期間の直前に休止した時には、地盤温度が回復する様子が確認できます。これらから、現状と同様の利用状況(地盤に対する熱負荷が現状と同程度)であれば、持続的な利用が可能であることがうかがえます。

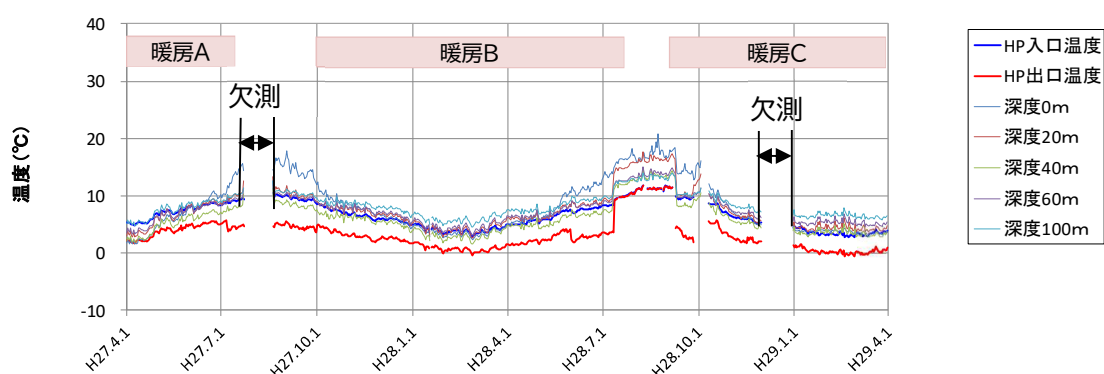


図 4-24 ヒートポンプ出入口温度と地盤温度(事例4)

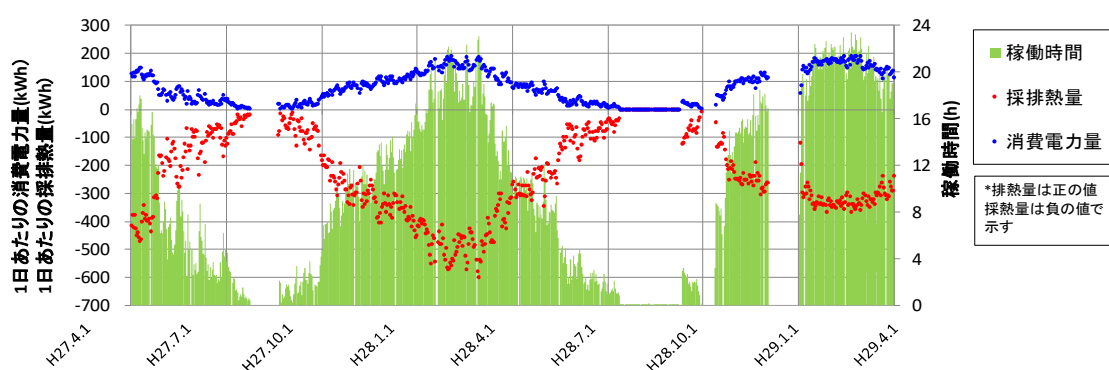


図 4-25 消費電力量、採排熱量、稼働時間(事例4)

5) 事例5(中規模施設・融雪利用)

① 施設概要

採熱を中心とした中規模施設の地中熱利用で、500 m² 程度の駐車場融雪に利用されている事例です(表 4-20)。

表 4-20 施設概要(事例 5)

所在地	用途	深度	本数	掘削口径
秋田県秋田市	社屋駐車場での融雪	100 m	6 本	φ139 mm
地質	有効熱伝導率	方式	ヒートポンプ仕様	
主にシルト	1.65 [W/(m・K)]	クローズドループ (シングルUチューブ)	定格暖房能力／定格消費電力	定格冷房能力／定格消費電力
			26.5 kW／5.9 kW×2 台	28.0 kW／6.5 kW×2 台

② モニタリング結果

地盤温度(地中熱交換器内)は、積雪期Aおよび積雪期Bともに地中熱の利用開始以後、採熱により低下して推移しています(図 4-26、図 4-27)。積雪期Aと積雪期Bの間はモニタリングされていないものの、積雪期B開始時の地盤温度は、積雪期A開始時の地盤温度と同程度にまで回復していることから、現在の利用状況(地盤に対する熱負荷が現状と同程度)であれば、持続的な利用が可能であることがうかがえます。冷暖房施設と異なり、融雪施設では施設が降雪の有無により稼働されることから、これを加味した設備計画が望ましいと言えます。

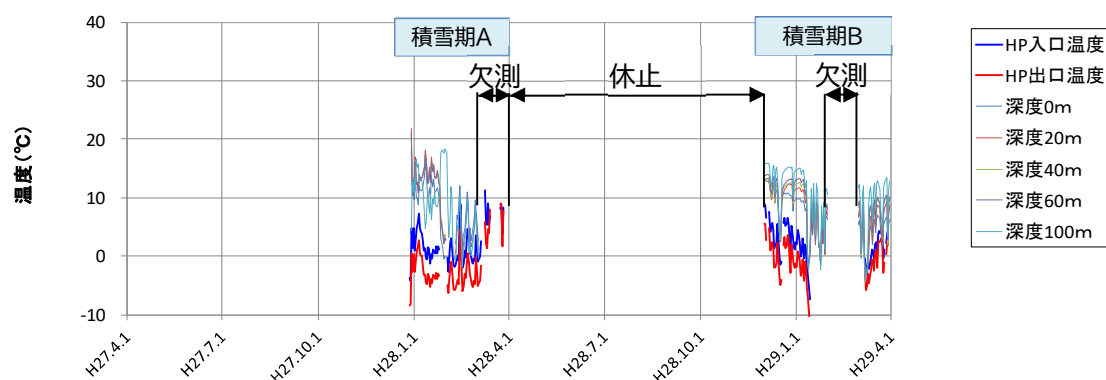


図 4-26 ヒートポンプ出入口温度と地盤温度(事例 5)

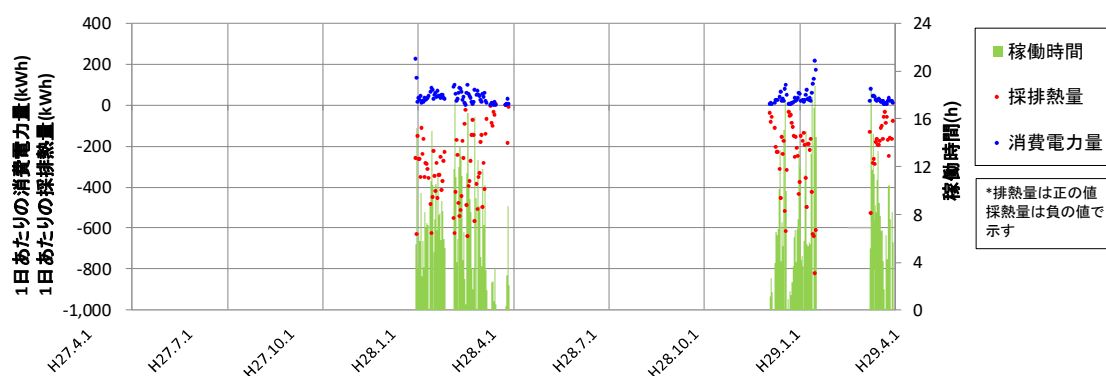


図 4-27 消費電力量、採排熱量、稼働時間(事例 5)

4.5 モニタリングデータの確認・取り扱い方法

(1) モニタリング確認シートの例

モニタリングの実施記録は、例えば以下のような確認シートに記入し保存します。補足項目で常時計測および記録を行う項目は、計測データを保存しておきます。その場合には自動計測器でデータロガーに記録されるため、この様式例に限るものではありません。

1) クローズドループ用の一例

基本項目(熱媒体温度、熱媒体循環量)と、事業者が自主的な判断で周辺の地下水・地盤環境に影響を与える可能性のある項目(揚水井やバックグラウンドおよび下流側の地下水位、地盤温度)をモニタリングするときのモニタリング確認シートの様式例を示します。これは、あくまでも一例であり、事業者の創意工夫によるこれ以外の様式設定を妨げるものではありません。

地中熱利用ヒートポンプ モニタリング確認シート (クローズドループ型)			
モニタリング実施日	R○年○月○日	天候	晴れ
実施者名	○○ ○○	日平均気温	○℃

様 式

1. 地中熱利用ヒートポンプの運転に係る項目

モニタリング項目	観測値	
熱媒体温度(℃)	熱交換井入口側	熱交換井出口側
熱媒体循環量(L/s)		
HP稼働時間(時間)		

基本項目

2. 地下水・地盤環境に係るモニタリング項目

モニタリング項目	観測値		
地下水・地盤温度(℃)	地表面からの深さ (G. L. -m)	温度(℃)	
(参考)バックグラウンド および下流側での 地下水・地盤温度(℃)	地表面からの深さ (G. L. -m)	下流側観測井での 温度(℃)	バックグラウンド観 測井での温度(℃)

補足項目
(この例では、事業者が自主的に項目と観測頻度を設定して実施する場合を想定)

3. 運転状況

2) オープンループ用の一例

基本項目(揚水井水位、揚水水温、放流水温、放流量、放流水質)と、事業者が自主的な判断で周辺の地下水・地盤環境に影響を与える可能性のある項目(周辺地下水位)をモニタリングするときのモニタリング確認シートの様式例を示します。これは、あくまでも一例であり、事業者の創意工夫によるこれ以外の様式設定を妨げるものではありません。

地中熱利用ヒートポンプ モニタリング確認シート

(オープンループ 放流型 還元型) ←該当に○

様式

モニタリング実施日	R○年○月○日	天候	晴れ
実施者名	○○ ○○	日平均気温	○℃

1. 地中熱利用ヒートポンプシステムの運転に係るモニタリング項目

モニタリング項目	観測値	
揚水井水位 (G. L. -m)	H P稼働時	H P停止時
水温 (℃)	揚水井	放流口 (還元井)
放流 (還元) 水質	p H	電気伝導率 (μ S/cm)
放流 (還元) 水量 (L/s)		
H P稼働時間 (時間)		

2. 周辺の地下水・地盤環境に係るモニタリング項目

モニタリング項目	観測値	
周辺地下水位 (G. L. -m)	H P稼働時	H P停止時

3. 運転状況

(自由記入欄)

基本項目

補足項目
 (この例では、事業者が自主的に項目と観測頻度を設定して実施する場合を想定)

(2) モニタリングデータによる評価

取得したモニタリングデータによる各種効果の評価は、以下の方法で行うことができます。

1) 採排熱量(ヒートアイランド緩和効果)

地中への排熱量や採熱量は、クローズドループとオープンループの各利用方式で以下の式を用いて概算することができます。オープンループ方式では地下水自体が熱媒体となります。

月に一度程度、モニタリングシートに以下の数値を記録しておき、年間の採排熱量を試算してみましょう。なお、本式は概算値を把握するような場合に有効ですが、(自動記録機器による連続した)モニタリングデータを処理して算定する場合には 4.5(4)を参照ください。これらのうち、夏期の冷房時の排熱量を大気中へ排熱せずに地中へ排熱することが、ヒートアイランド緩和策になると考えられます。

$$[\text{採排熱量(kWh)}] = L/60 \times \rho \times (T_1 - T_2) \times c \times t$$

T_1 : 熱媒体入口温度(°C)

T_2 : 熱媒体出口温度(°C)

L : 熱媒体循環量(L/min)

ρ : 熱媒体密度(kg/L)(水の場合 1.0)

c : 熱媒体の比熱(kJ/kg・K) (水の場合 4.19)

t : 運転時間(h)

※上記の式は、暖房利用の場合の地中からの採熱量を表します。冷房利用の場合は T_1 を熱媒体出口温度、 T_2 を熱媒体入口温度とすることで地中への排熱量を求めることができます。

2) 成績係数

地中熱利用ヒートポンプによる省エネルギー効果を示す指標として、採排熱の熱エネルギーを消費電力で除した成績係数(COP)があります。成績係数の値が大きいほど省エネルギー効果が高いと評価されます。

成績係数の算出方法は以下のとおりです。

$$\text{COP} = \frac{\text{地中熱利用ヒートポンプの製造熱量[kWh]}}{\text{地中熱利用ヒートポンプの消費電力量[kWh]}}$$

ここで、地中熱利用ヒートポンプの製造熱量は、ヒートポンプが二次側の熱媒に与えた熱量を指します。成績係数が表す効果の位置づけは採排熱量および消費電力量を積算する対象期間によって異なります。例えば、夏期の冷房期間のみを対象として冷房運転時の期間の成績係数として評価したり、年間の総採排熱量と消費電力量から年間の成績係数として評価する等の方法があります。

3) 省エネルギー効果や CO₂ 排出量削減効果

上記 1) で算出した採排熱量に対し、同等の熱量を得るために必要となる燃料(灯油、都市ガス等)の換算係数や CO₂ 排出原単位を乗じることで、省エネルギー効果や CO₂ 排出量削減効果を算出することができます。

各種燃料および電力の換算係数および CO₂ 排出原単位の例を表 4-21 に示します。

表 4-21 エネルギー種別換算係数および CO₂ 排出原単位

種別	電力	都市ガス	灯油
燃料単位	kWh	Nm ³	L
換算係数 ⁹⁶	9.76[MJ/kWh]	44.8[MJ/Nm ³]	36.7[MJ/L]
CO ₂ 排出原単位 ⁹⁷	0.441[kg-CO ₂ /kWh]*	2.23[kg-CO ₂ /Nm ³]	2.49[kg-CO ₂ /L]

※電力の CO₂ 排出原単位は電気事業者別に異なるため確認すること。上記は事業者が不明の場合等の代替値

(3) モニタリングおよび評価データの活用

1) エネルギーマネジメントシステム(EMS)の活用

エネルギーマネジメントシステム(EMS)とは、電気、ガス、熱などのエネルギーの見える化を図り、設備の最適運用などを実現するシステムをいいます。このシステムは情報通信技術(ICT)を用いてエネルギーの使用状況を適切に情報把握・管理・表現する(「見える化」する)ことで、省エネルギーおよび負荷平準化など、エネルギーの効率的な利用を実現することに寄与します。

EMS は、管理対象とする建物によって種類が分けられています。

① HEMS (Home Energy Management System)

住宅のエネルギーを管理する EMS のことをいいます。室内のエネルギー使用状況を室内モニターあるいはタブレットやパソコンの画面で確認できることが増えています。エネルギー管理だけではなく、家庭用電化製品とのネットワーク連携により、遠隔地から家庭用電化製品を操作することもできます。

② BEMS (Building and Energy Management System)

オフィスビル、商業ビルなどのエネルギーを管理する EMS のことをいいます。建物内に設置された各種センサーのデータを分析し、ビルの省エネルギーを図ります。ZEB の実現には必要なシステムになってきています。

③ FEMS (Factory Energy Management System)

工場のエネルギーを管理する EMS のことをいいます。規模が大きいため、発電設備がある場合は複数の発電設備における発電バランス最適化のための基礎データとしての活用を行ったり、生産設備におけるエネルギー管理をしたりして活用されています。

⁹⁶電気：資源エネルギー庁、省エネ法の概要、2014 年 2 月

灯油および都市ガス：温室効果ガス排出量算定・報告マニュアル(Ver4.8) (令和 4 年 1 月)

⁹⁷電気：電気事業者別の CO₂ 排出係数(令和 3 年度実績) (令和 5 年 1 月)

灯油および都市ガス：算定・報告・公表制度(平成 29 年 7 月)

これらを活用した地中熱利用ヒートポンプシステムの管理は省エネルギーや CO₂ 排出量削減の効果へ繋がるため、積極的に取り入れることをお勧めします(図 4-28)。

この他にも、マンションに取り入れた MEMS (Mansion Energy Management System)、地域エネルギーの観点から取り入れる CEMS (Community Energy Management System) など、新たな EMS が取り入れられています。

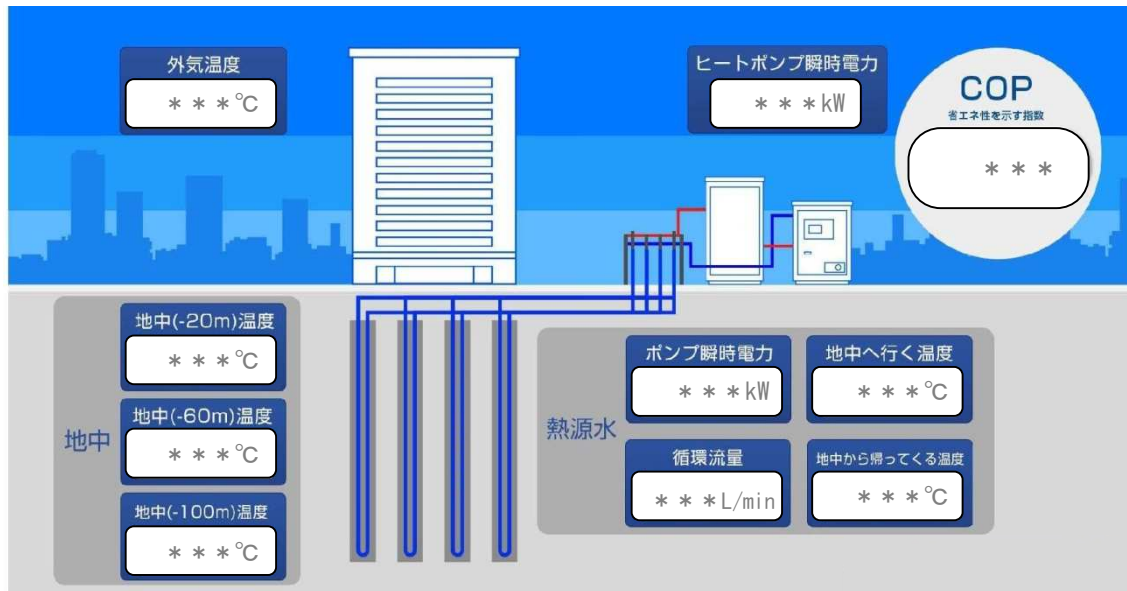


図 4-28 地中熱利用ヒートポンプシステムの EMS 表示例

(4) モニタリングデータの詳細分析法

観測データの集計や評価に関連し、以下にまとめます。

1) 消費電力量

地中熱利用ヒートポンプシステムの効率を知るためには、地盤からの採排熱量を得るために費やした電力量と比較する必要があります。ヒートポンプ消費電力量 W_{hp} (kWh) は式 1 によって求めます。また、循環ポンプ消費電力量も同様に求める事ができます。

$$W_{hp} = \sum_{i=1}^n d_i \cdot T_{int} \dots\dots\dots (式 1)$$

ここで、 d_i : 消費電力 (kW)

T_{int} : 測定間隔 (h)

2) 採排熱量

採排熱量 Q_h (kWh) は式 2 により求めます⁹⁸。その際、地盤から熱を得る場合(暖房時)の熱量を採熱量、地盤に熱を捨てる場合(冷房時)の熱量を排熱量とします。

$$Q_h = \sum_{i=1}^n L_i \cdot C \cdot \rho \cdot \Delta t \cdot T_{int} \dots\dots\dots (式 2)$$

ここで、 L_i : 一次側熱媒体循環量 (m³/s)

C : 熱媒の比熱 (kJ/(kg・K))

ρ : 熱媒の密度 ν (kg/m³) (水の場合 1,000 kg/m³)

Δt : 一次側熱媒体温度差 (°C) (水の場合 4.19 kJ/(kg・K))

T_{int} : 測定間隔 (h)

また、 Δt は、以下の式 3、式 4 により求めます。

$$\text{採熱時 } \Delta t = T_i - T_o \dots\dots\dots (式 3)$$

$$\text{排熱時 } \Delta t = T_o - T_i \dots\dots\dots (式 4)$$

ここで、 T_i : ヒートポンプ入口温度 (°C)

T_o : ヒートポンプ出口温度 (°C)

⁹⁸採排熱量は一次側熱媒体循環量と一次側熱媒体温度差の積として求めるため、一次側熱媒体循環量と、ヒートポンプ入口温度、ヒートポンプ出口温度の 3 つのデータが揃って計測されていることが重要となります。

地中熱利用ヒートポンプでは一次側熱媒体温度が時々刻々と変化し、一次側熱媒体温度差は稼働直後に大きく、次第に落ち着く状況となります。このため、採排熱量の算定にあたっては、ある一定期間(1ヶ月間など)の平均温度や循環量を用いて計算した場合には、過大/過小に評価してしまうことになる場合もあります。自動記録機器による連続したモニタリングデータから採排熱量を算定する場合には、測定間隔(1分間など)を考慮して採排熱量を計算し、これを積算することで、一定期間の採排熱量とする必要があります。

さらに実際は稼働していない間でも、計測上の誤差として 0.1 L/min 程度の一次側熱媒体循環量を検知していることがあるため、ヒートポンプ稼働状況を判断して、採排熱量を積算する必要があります。例えば、稼働状況の判断として、流量計の最小検知流量以上(例えば、1 L/min 以上)でヒートポンプ消費電力を検知した場合に稼働と判断するなどします。

3) 採排熱量とヒートポンプ生成熱量

ヒートポンプ生成熱量 Q_{total} (kWh) は、ヒートポンプ自体が消費した電力量 (W_{hp}) も加味して考えるため、以下の式 5、式 6 で求めます。

$$\text{採熱時: } Q_{\text{total}} = Q_{\text{h}} + W_{\text{hp}} \cdots \cdots \cdots \text{(式 5)}$$

$$\text{排熱時: } Q_{\text{total}} = Q_{\text{h}} - W_{\text{hp}} \cdots \cdots \cdots \text{(式 6)}$$

ここで、 Q_{h} : 採排熱量(kWh)
 W_{hp} : ヒートポンプ消費電力量(kWh)

4) ヒートポンプの効率

ヒートポンプの効率を示す指標である成績係数(COP)は式 7、およびヒートポンプの他に循環ポンプも含めたシステム成績係数(SCOP)は式 8 により求めます⁹⁹。

$$\text{COP} = \frac{Q_{\text{total}}}{W_{\text{hp}}} \cdots \cdots \cdots \text{(式 7)}$$

$$\text{SCOP} = \frac{Q_{\text{total}}}{W_{\text{hp}} + W_{\text{p}}} \cdots \cdots \cdots \text{(式 8)}$$

ここで、 Q_{total} : ヒートポンプ生成熱量(kWh)
 W_{hp} : ヒートポンプ消費電力量(kWh)
 W_{p} : 循環ポンプ消費電力量(kWh)

5) 一次エネルギー削減量の算出方法

省エネルギー効果を比較するために一次エネルギー削減量 E_{c} (MJ) は、式 9 により求めます。

$$E_{\text{c}} = E_{\text{f}} - E_{\text{hp}} \cdots \cdots \cdots \text{(式 9)}$$

ここで、 E_{f} : 従来型熱源での原油換算一次エネルギー消費量(MJ)
 E_{hp} : 地中熱利用ヒートポンプの原油換算一次エネルギー消費量(MJ)

E_{hp} は以下の式 10 により、 E_{f} は熱源等に応じて以下の式 11～式 13 により求めます。なお、地中熱利用ヒートポンプにより供給された熱量(ヒートポンプ生成熱量)と同じ熱量を従来型熱源で得られたときの一次エネルギー消費量をそれぞれ求めます。

⁹⁹地中熱利用ヒートポンプシステムで必要なエネルギーには、地中熱交換器内で熱媒を循環させるのに用いる一次側ポンプに必要な電力、ヒートポンプ自体に必要な電力、冷暖房機器等の二次側機器に必要な電力がありますが、それらを区別してモニタリングし、それぞれの消費電力量を把握することで、効率性や省エネ効果、CO₂排出量削減効果の検討を正確に行うことが出来ます。また SCOP を求める場合に循環ポンプ消費電力量として、一次側ポンプ、二次側ポンプの消費電力量のどちら(または両方)を含めるかは、事業者の判断に委ねられます。

$$E_{hp} = 9.76 \cdot W_{hp} \dots\dots\dots (式 10)$$

空気熱源ヒートポンプで暖房の場合

$$E_{f_ah} = \frac{9.76 \cdot Q_{total}}{C_{heat}} \dots\dots\dots (式 11)$$

灯油ボイラーで暖房の場合

$$E_{f_oil} = \frac{3.6 \cdot Q_{total}}{C_{oil}} \dots\dots\dots (式 12)$$

空気熱源ヒートポンプで冷房の場合

$$E_{f_ac} = \frac{9.76 \cdot Q_{total}}{C_{cool}} \dots\dots\dots (式 13)$$

ここで、係数 9.76 : 電気の一次エネルギーへの換算係数¹⁰⁰(単位 MJ/kWh)

W_{hp} : ヒートポンプ消費電力量(kWh)

Q_{total} : 地中熱利用ヒートポンプ生成熱量(kWh)

C_{heat} : 空気熱源ヒートポンプの暖房時成績係数¹⁰¹ 2.9

C_{oil} : 灯油の燃焼効率¹⁰² 0.864

式 12 の係数 3.6:kWh を MJ 単位に換算する係数(単位 MJ/kWh)

C_{cool} : 空気熱源ヒートポンプの冷房時成績係数¹⁰¹ 3.7

6) CO₂ 排出量削減効果の算出方法

CO₂ 排出量削減効果は、地中熱利用ヒートポンプ使用時の CO₂ 排出量と、従来型熱源を利用した場合の CO₂ 排出量を比較することで求めます。ここで、地中熱利用ヒートポンプにより供給された熱量(ヒートポンプ生成熱量)と同じ熱量を従来型熱源で得られた時を想定して電力使用量や灯油使用量から、式 14 や式 15 に従って CO₂ 排出量を求めます。

電力使用時の CO₂ 排出量

$$G_{hp} = 0.441 \cdot W_{hp} \dots\dots\dots (式 14)$$

灯油使用時の CO₂ 排出量

$$G_{oil} = 2.49 \cdot V_{oil} \dots\dots\dots (式 15)$$

¹⁰⁰資源エネルギー庁、エネルギーの使用の合理化等に関する法律第111条第1項又は第115条第1項に基づく定期報告書(特定荷主等)記入要領, 2022 年 4 月 より、電気(昼夜間以外)の換算係数を用いた。

¹⁰¹空気熱源ヒートポンプの成績係数は次の資料によった。環境省地球環境局, 地球温暖化対策事業効果算定ガイドブック補助事業申請者用 G 省エネ設備用, 2017 年 2 月

¹⁰²石油 FF 式暖房機の燃焼効率は、次の資料に掲載の石油 FF 式暖房機の燃焼効率の平均値を用いた。資源エネルギー庁, 省エネ性能カタログ 2022 年版

ここで、 G_{hp} : 電力使用時の CO_2 排出量 (kg-CO_2)

G_{oil} : 灯油使用時の CO_2 排出量 (kg-CO_2)

W_{hp} : ヒートポンプ消費電力量 (kWh)

V_{oil} : 灯油消費量 (L)

式 14 の係数 0.441 : 電力使用時の CO_2 排出係数 ($\text{kg-CO}_2/\text{kWh}$)¹⁰³

式 15 の係数 2.49 : 灯油使用時の CO_2 排出係数 ($\text{kg-CO}_2/\text{L}$)

従来型熱源を利用した場合の消費電力量や灯油消費量は使用する熱源等に応じて式 16～18 により求めました。

空気熱源ヒートポンプによる暖房時の消費電力量

$$W_{f_ah} = \frac{Q_{total}}{C_{heat}} \dots\dots\dots \text{(式 16)}$$

灯油ボイラーによる暖房時の灯油消費量

$$V_{oil} = \frac{3.6 \cdot Q_{total}}{36.7 \cdot Q_{oil}} \dots\dots\dots \text{(式 17)}$$

空気熱源ヒートポンプによる冷房時の消費電力量

$$W_{f_ac} = \frac{Q_{total}}{C_{cool}} \dots\dots\dots \text{(式 18)}$$

ここで、 W_{f_ah} : 空気熱源ヒートポンプによる暖房時の消費電力量 (kWh)

V_{oil} : 灯油ボイラーによる暖房時の灯油消費量 (L)

W_{f_ac} : 空気熱源ヒートポンプによる冷房時の消費電力量 (kWh)

式 17 の分子の係数 3.6 : kWh を MJ に換算する係数

式 17 の分母の係数 36.7 : 灯油発熱量 (MJ/L)

¹⁰³環境省・経済産業省「電気事業者別排出係数(令和 3 年度実績)」で代替値を用いる場合の値である。事業者によって値が異なるため確認すること。

7) ヒートアイランド現象の緩和効果算定方法

ヒートアイランド現象の緩和効果を検討するため、地中熱利用ヒートポンプの排熱量と、従来型熱源である空気熱源ヒートポンプの排熱量を求めます。ここで地中熱を利用した場合の排熱量は、排熱時の熱交換量(式 2 による Q_h)から算定されます。一方、従来型熱源である空気熱源ヒートポンプの排熱量は、地中熱利用ヒートポンプによるモニタリングデータをもとに、供給された熱量(ヒートポンプ生成熱量)と同じ熱量を空気熱源ヒートポンプで得られた時を想定して式 19 により求めます。

ここで、 Q_{total} は式 6 により、 W_{f_ac} は式 18 により求めます。

空気熱源ヒートポンプによる排熱量

$$Q_{f_ac} = Q_{total} + W_{f_ac} \cdots \cdots \cdots \text{(式 19)}$$

ここで、 Q_{f_ac} : 空気熱源ヒートポンプによる排熱量(kWh)

Q_{total} : 地中熱利用ヒートポンプ生成熱量(kWh)

W_{f_ac} : 空気熱源ヒートポンプによる冷房時の消費電力量(kWh)

第5章 地中熱利用に関する新技術等の紹介

地中熱利用の普及促進において導入検討の一助となる技術とその事例を紹介します。

5.1 地中蓄熱に関する技術

(1) 地中蓄熱の概要と利点

地中は熱伝導率が小さく熱容量が大きいため、温度が変化しにくいといった特徴があります。このため地下にある程度の期間熱を蓄える蓄熱が可能であり、特に地下水の流動がほとんどない地域であれば、蓄熱により生じる温熱塊や冷熱塊が移動して逃げていくことはありません。また水の比熱は他の物質よりも大きいため、地下水面下では単位体積当たりの蓄熱量が大きく有利な状況です。これらの特性によって地中は大量の熱を閉じ込められる空間として活用が期待されています。

蓄熱システムを単一の建物での利用に留めず、複数の建物や地域全体を包括したシステムにすることで設備に関するコストの削減やシステムの安全性の向上が可能となります。¹⁰⁴

(2) 地中蓄熱の種類

地中を利用した蓄熱には主に4つの方式があります¹⁰⁵。

- 1) 帯水層蓄熱方式(ATES)
- 2) ボアホールによる蓄熱方式(BTES)
- 3) 水タンクによる蓄熱方式
- 4) ピットによる蓄熱方式

これらのうち、1) 帯水層蓄熱方式(ATES)と 2) ボアホールによる蓄熱方式(BTES)について以下に説明します。

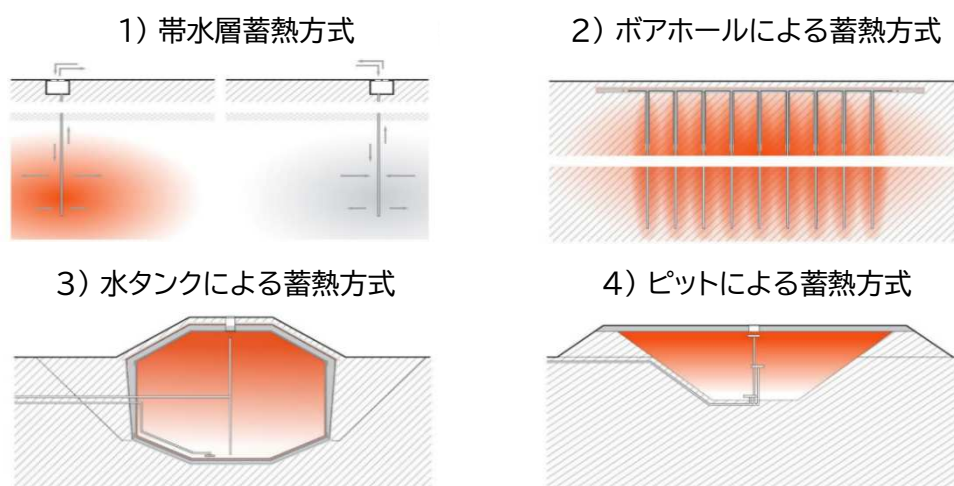


図 5-1 各蓄熱方式の概念図¹⁰⁶

¹⁰⁴NEDO, 再生可能エネルギー熱利用にかかるコスト低減技術開発/再生可能エネルギー熱利用技術を用いた熱供給の導入可能性と研究開発課題に係る調査 報告書, 2022

¹⁰⁵Universität Stuttgart, Institute for Building Energetics, Thermotechnology and Energy Storage, <https://www.igte.uni-stuttgart.de/forschung/quartierskonzepte-und-gebaeudeautomation/nahwaerme/index.html>, 2022 年 12 月 9 日閲覧

¹⁰⁶Energy Storage Technology Collaboration Programme ホームページ, <https://iea-es.org/task-39/>, 2022 年 12 月 13 日閲覧

1) 帯水層蓄熱方式 (ATES: Aquifer Thermal Energy Storage)

ATES は、揚水井と還元井を夏季と冬季で切り替えることにより地下の帯水層に温水塊と冷水塊をつくり蓄熱をする方式です。近年、日本においても ATES の導入事例が見られるようになりました。以下に特徴的な ATES の事例を紹介します。

<アミティ舞洲> 異なる帯水層を用いた ATES

表 5-1 ATES の導入事例(1)

①施設名(所在地)	アミティ舞洲 (大阪府大阪市)
②地中熱の用途	空調
③地中熱利用設備概要	・地下水熱利用ヒートポンプ (冷房能力 703 kW / 暖房能力 865 kW) ・揚水能力 約 1700 L / min × 2 層
④エネルギー消費量削減率	42% (設計値)
⑤竣工年	2020 年
⑥特徴など	

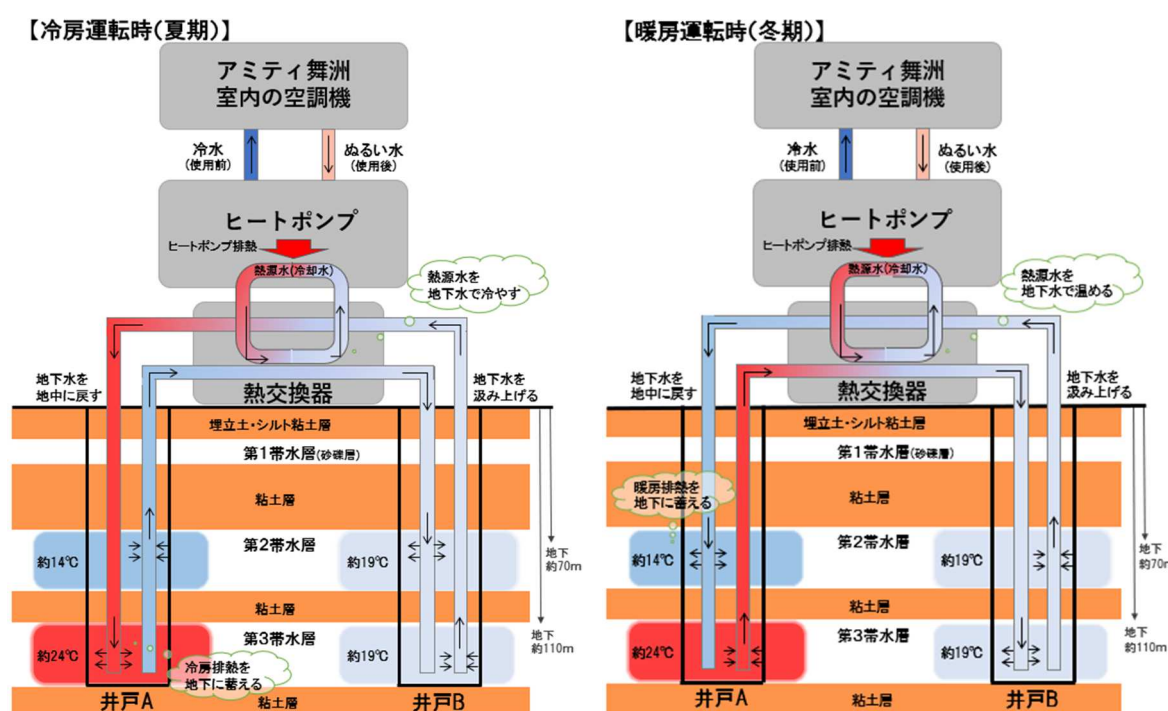


図 地下水利用熱源システムの概念図

出典: 大阪市提供

- ・井戸 1 本につき、帯水層毎に揚水管と注入管を設けることで、混水させることなく上下 2 つの帯水層に蓄熱する世界初の W-ATES システムを構築した。これにより、敷地が限られた都市部でも、大容量で効率の良い蓄熱が可能となる。
- ・密閉式井戸を用いて同一帯水層内へ全量還水しているため地盤沈下の影響はほとんどなく、地下水質等への影響も最小限にしている。
- ・図の場合では、夏季の冷房運転時は、第2帯水層の 14℃の地下水を井戸Aから揚水し、熱交換で 19℃になったものを井戸Bの第2帯水層に還水して蓄熱。同時に、第3帯水層の 19℃の地下水を井戸Bから揚水し、24℃になったものを井戸Aの第3帯水層に還元して蓄熱している。冬季の暖房運転時は、夏季とは逆に揚水と還水を行い、冷熱を蓄熱する。

＜山形県河北町新庁舎＞ 密閉式井戸によるオープンループへの工夫事例

表 5-2 ATES の導入事例(2)

①施設名(所在地)	河北町新庁舎(山形県河北町)
②地中熱の用途	空調、融雪
③地中熱利用設備概要	・地下水熱利用ヒートポンプ (冷房能力 204 kW / 暖房能力 187 kW) × 2 台 ・揚水能力 750 L/min
④エネルギー消費量削減率	44% (設計値)
⑤竣工年	2021 年
⑥特徴など	

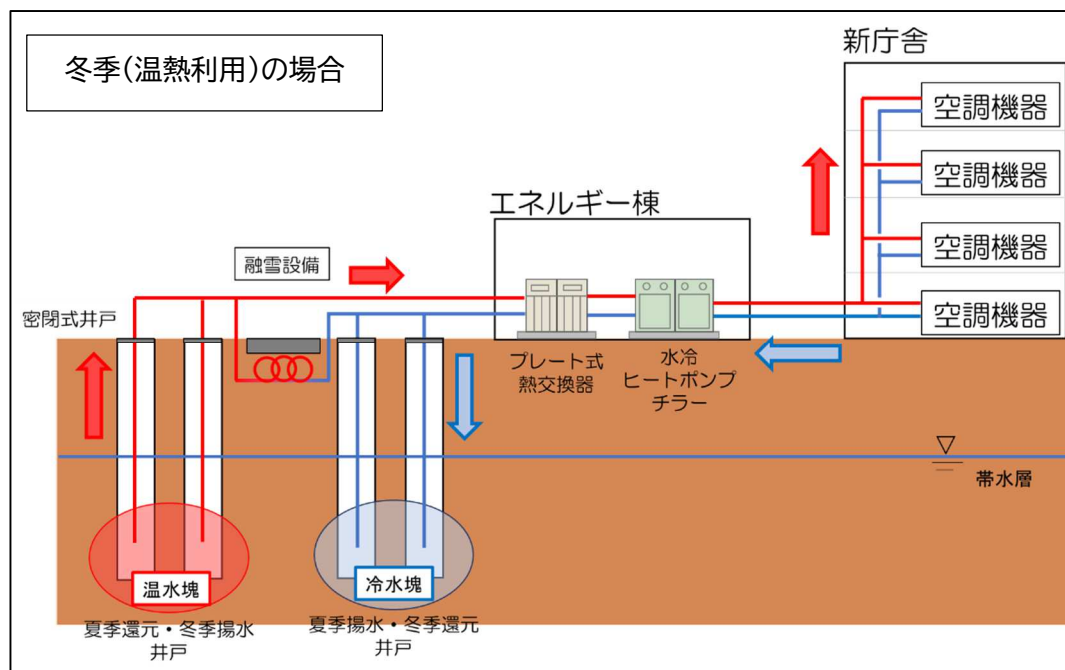


図 地下水利用熱源システムの概念図

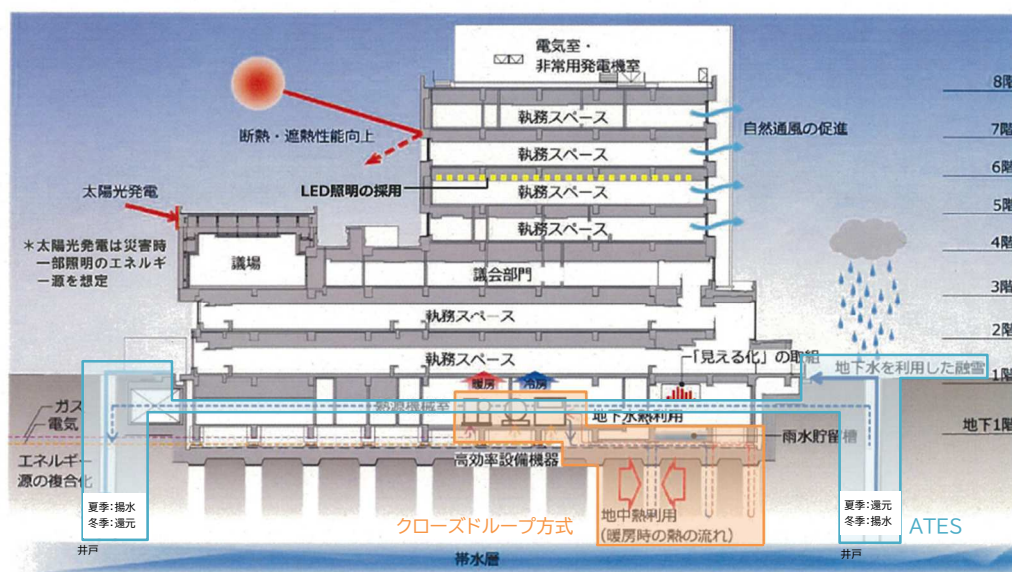
出典：羽田・安孫子特定設計業務共同体「河北町新庁舎基本設計書概要版」をもとに作成

- ・密閉式井戸は、熱交換後の地下水全量を地下に還元することが容易であり、従来の開放式井戸を用いた場合よりも蓄熱効率が向上する。また、空気に触れないことと、季節間で揚水と還元を切り替えることによる井戸の逆洗効果で目詰まりも抑制されている。
- ・密閉式井戸を用いて同一帯水層内へ地下水を全量還元しているため、地下水質や地盤沈下等への影響を最小限にしている。

<山形県酒田市庁舎> クローズドループ方式との複合利用

表 5-3 ATES の導入事例(3)

①施設名(所在地)	酒田市新庁舎(山形県酒田市)
②地中熱の用途	空調、融雪
③地中熱利用設備概要	・地下水熱利用ヒートポンプ (冷房能力 527 kW / 暖房能力 566 kW) ・揚水能力 400 L/min
④エネルギー消費量削減率	50% (2018 年実績)
⑤竣工年	2015 年
⑥特徴など	



環境設備計画コンセプトイメージ

図 地下水利用熱源システムの概念図(市庁舎)

出典：酒田市資料に一部加筆

- ・当該地盤は砂質系で地下水位が高いという特徴があり、地中熱と地下水熱利用共に有利な条件であることから、クローズドループ方式と ATES を組み合わせた方式とした。
- ・クローズドループ方式は、新庁舎の基礎杭を兼ねた地中熱交換杭(50 m×75本)を設置し、ATES は、深さ150 m の揚水井と還元井を設置し、併用とした。
- ・夏季は基礎杭方式で得た冷熱とATESにより汲み上げた地下水熱を庁舎内の冷房に利用する。冷房排熱によって温度上昇した地下水は地中に還元され、温熱として冬季の融雪に利用される。¹⁰⁷

¹⁰⁷若山ほか、酒田市庁舎における地中熱ヒートポンプシステム及び帯水層蓄熱を組み込んだ熱源システムの計画概要、日本建築学会技術報告集 第22巻 第51号、627-630、2016年6月

2) ボアホールによる地下蓄熱方式 (BTES: Borehole Thermal Energy Storage)

BTES は地盤の深さ数十 m から 200 m くらいまでに垂直に地中熱交換器を格子状に数十本から数百本埋設して地中に蓄熱、熱回収する方式です¹⁰⁸。地中熱利用ヒートポンプシステムのクローズドループ方式と同様に地中熱交換器を用いることが一般的です。海外では北欧を中心に BTES の導入が進んでいますが、日本では大規模な BTES を実運用した事例がなく、今後の普及が期待されます。

国内の実験的な導入事例の一つに群杭を利用した事例があります(図 5-2)。この事例は地表近くで集熱した夏季の太陽熱を地下に蓄熱しておき、冬季の融雪をその熱で賄うことを試みた事例です。地中熱交換器の設置間隔を狭めて意図的に熱干渉の状況を作り出すことによって、夏季の温熱を冬季まで蓄えておくことができます。

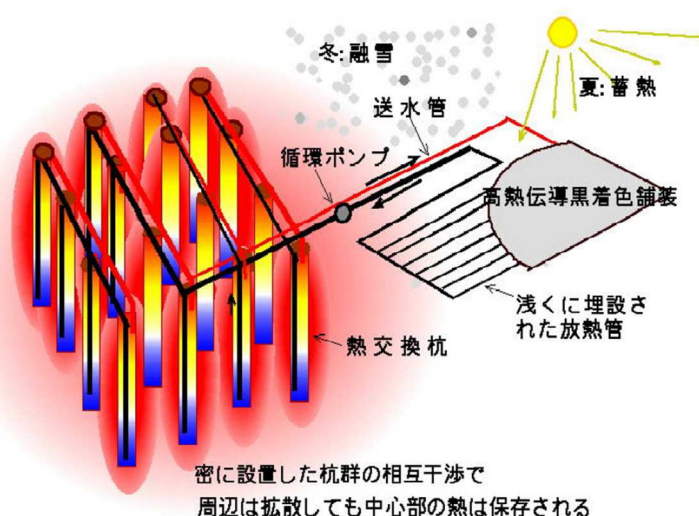


図 5-2 群杭による季節間蓄熱の概念¹⁰⁹

また基礎杭を通して冬季の冷熱を地中に蓄熱して夏季の空調の熱源に利用した事例があります(図 5-3)。この事例では冬季夜間に冷却塔とポンプを運転して外気と熱交換を行い土壌に冷熱を蓄えます¹¹⁰。蓄えた冷熱は夏季の昼間に冷水ポンプを運転して取り出され、外気の前冷に利用されます。シミュレーションと組み合わせることで運転の最適化を行うことで運用開始後3年目では蓄熱量 280.3 GJ に対して採熱量 189.9 GJ が得られ、蓄熱量、採熱量ともに運用開始後1年目より約 30%程度増加しました¹¹¹。

¹⁰⁸長野克則, 地下熱利用技術 2. 地下熱利用技術とは, 地下水学会誌 53(1), 2011.

¹⁰⁹宮本重信ほか, 群杭効果による融雪のための季節間蓄熱実験, 福井県雪対策・建設技術研究所年報「地域技術」, 19, pp.34-36, 2006.

¹¹⁰天野雄一郎ほか, ヨンデビル新館の継続的な省エネルギー・負荷平準化への取り組み(第1報)建物概要とコミッショニングの取り組みについて, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, 第8巻, pp.213-216, 2015.

¹¹¹宮田征門ほか, 季節蓄熱機能を有する空調システムのシミュレーションを利用したコミッショニング(第2報)運用開始後3年間に亘る運転最適化プロセス, 空気調和・衛生工学会論文集, 40(218), pp.19-29, 2015.

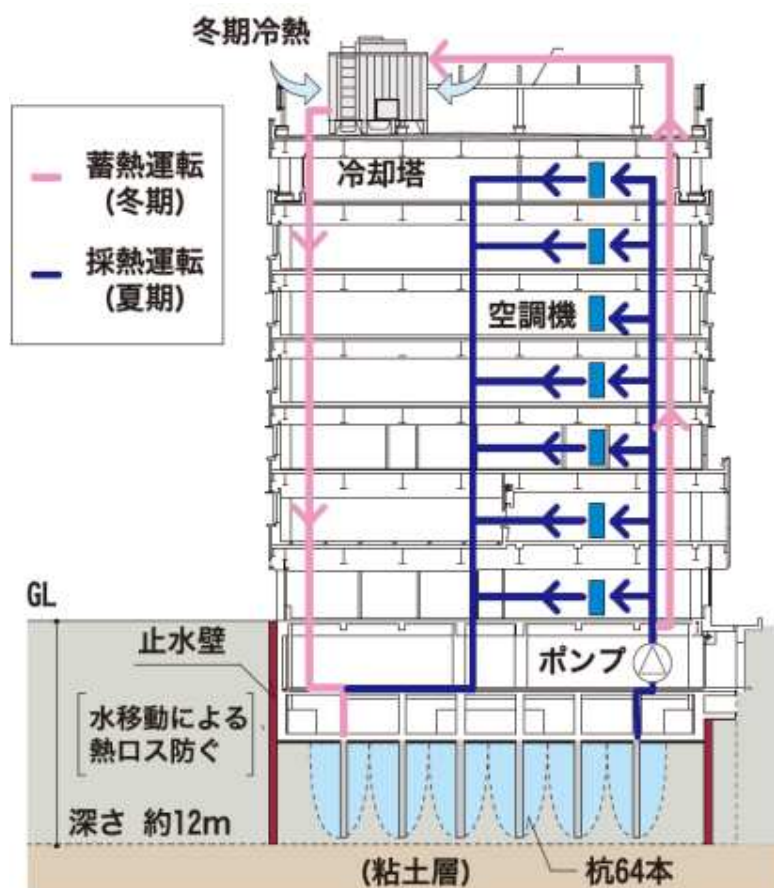


図 5-3 基礎杭を用いた地中蓄熱の概念図¹¹⁰⁾

(3) 地中蓄熱における留意点

1) 利用面からの評価

地下水の流速が速い場合には温水塊や冷水塊が移動するために、効率のよい蓄熱は難しくなります。このような場合には、温水塊や冷水塊が移動することを想定しシステムを設計する必要があります。また、気象条件やそれに対応する温熱と冷熱の需要バランスによっても蓄熱効率が左右されます。BTES の場合、蓄熱効率は地中の熱伝導率や地中熱交換器の設置間隔によっても変化します。なお蓄熱の初期段階では地中に注入した熱を回収できる割合が低く、安定的に利用できるようになるまでは時間を要することがあります¹¹²⁾。

2) 蓄熱による地盤影響

蓄熱による地盤環境への影響に関しては、ATES の場合、地下水の流動や水温の変化に伴って地盤環境における化学的、生物学的なリスクが生じる可能性があることが示唆されています¹¹³⁾。BTES の場合、地盤の温度変化による影響が地中熱交換器周辺に限定された範囲で起

¹¹²⁾ 落藤ほか、帯水層の蓄熱効果に関する長期測定とその考察、空気調和・衛生工学会論文集, 50, 1992.

¹¹³⁾ Bonte, M., Stuyfzand, P. J., Hulsmann, A., & Beelen, P. V. (2011). Underground thermal energy storage: environmental risks and policy developments in the Netherlands and European Union. *Ecology and Society*, 16.

こり得る他に、地中熱交換器の付近で地下水の混合や不凍液の漏出による影響が生じる可能性があります¹¹⁴。一方、これまで蓄熱によって地盤環境に著しく影響があったという報告は確認されていません¹¹⁵。

ヨーロッパでは地盤環境への影響に配慮し、地下水温に関する規制がなされている国もあります(表 5-4)。またオランダでは水法、水政令及び水規則に基づいて策定されたガイドライン¹¹⁶が運用されており、地下水汚染防止の観点からシステム運用時の水質モニタリング等が課されています。

表 5-4 海外における地下水温に関する規制¹¹⁷

国	揚水と還元時の 水温差 (°C)	地下水温 (°C)	
		最高	最低
オーストリア	±6	20	5
デンマーク	—	25	2
フランス※	—	<32	—
オランダ	—	25	5
リヒテンシュタイン	-3~+1.5	—	—
スイス	±3	—	—

※小規模設備である場合は還元時の水温が32 °C未満、かつ地下水流の下流側200m地点で注入水による熱影響が4 °C未満である必要がある。(2015年に変更された)

日本では地中蓄熱に関する知見が少ないため、国内外の先行事例などを参考にシステムの設計および企画段階での入念な事前調査と検討、運用時の適切な温度管理や水質モニタリング等の実施が望まれます。

¹¹⁴Guglielmetti, L., Bloemendal, M., Hahn, F., Mortensen, M. H., Koornneef, J., Epping, P. A., ... Wanner, C. (2021). HEATSTORE Environmental effects of UTES technologies in Europe. *GEOTHERMICA-ERA NET Cofund Geothermal*.

¹¹⁵Hähnlein, S., Bayer, P., Ferguson, G., & Blum, P. (2013). Sustainability and policy for the thermal use of shallow geothermal energy. *Energy Policy*, 59, 914-925.

¹¹⁶ATES の認可に関わる「Handreiking provinciale besluiten bodemenergiesystemen(BUM BE deel 1)」や ATES の運用に関わる「Handhaving Uitvoerings Methode Bodemenergiesystemen voor provinciale taken (HUM BE, deel 1)」がある。

¹¹⁷Blum, P., Menberg, K., Koch, F., Benz, S. A., Tissen, C., Hemmerle, H., & Bayer, P. (2021). Is thermal use of ground water a pollution?. *Journal of Contaminant Hydrology*, 239.

5.2 分析・解析ツール

(1) 分析・解析ツール

地中熱利用を行うにあたり地盤熱特性を詳細かつ適正に把握することで、効率的かつ効果的な施設設計や運用に資することができるようになります。そのための分析・解析ツールのいくつかを紹介します。

1) TCP/TRT

クローズドループ方式の地中熱利用ヒートポンプシステム導入時に、設置位置の地盤熱特性を評価する方法として熱応答試験(Thermal Response Test:TRT)が実施されていますが、より詳細な評価方法として TCP/TRT があります(図 5-4)。TCP は Thermal Conductivity Profiling の略であり、数 m ごとに地中の温度変化を計測し、層別の熱特性を評価する方法です。

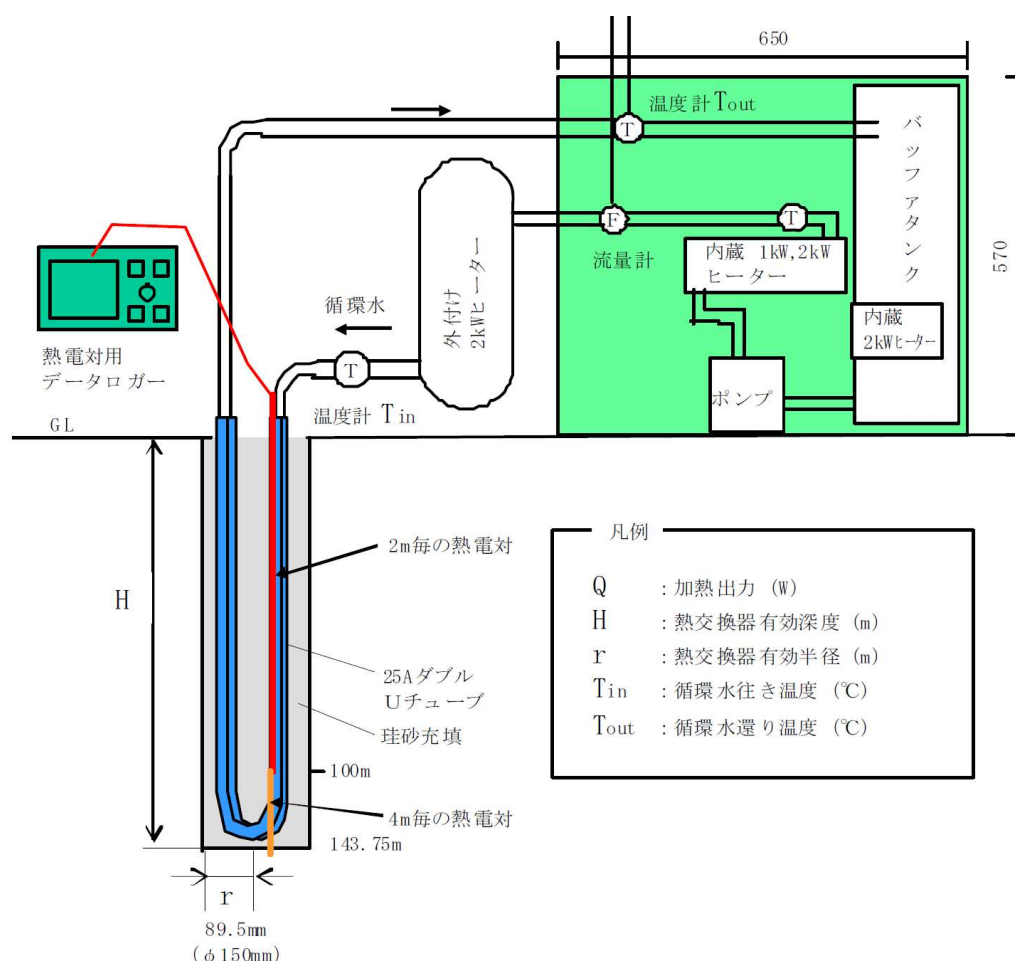


図 5-4 TCP/TRT 機器ユニット¹¹⁸

¹¹⁸長野県、「緑の分権改革」推進事業 再生可能エネルギー導入可能性調査(地下熱利用)調査報告書, 2011.3.

TCP/TRTにより、地下水流動のある深度や深度別の熱交換性能を把握することができるため、地中熱交換井の掘削深度や本数などの最適設計に有用であり、導入コスト削減に寄与できる場合もあります(図 5-5)。

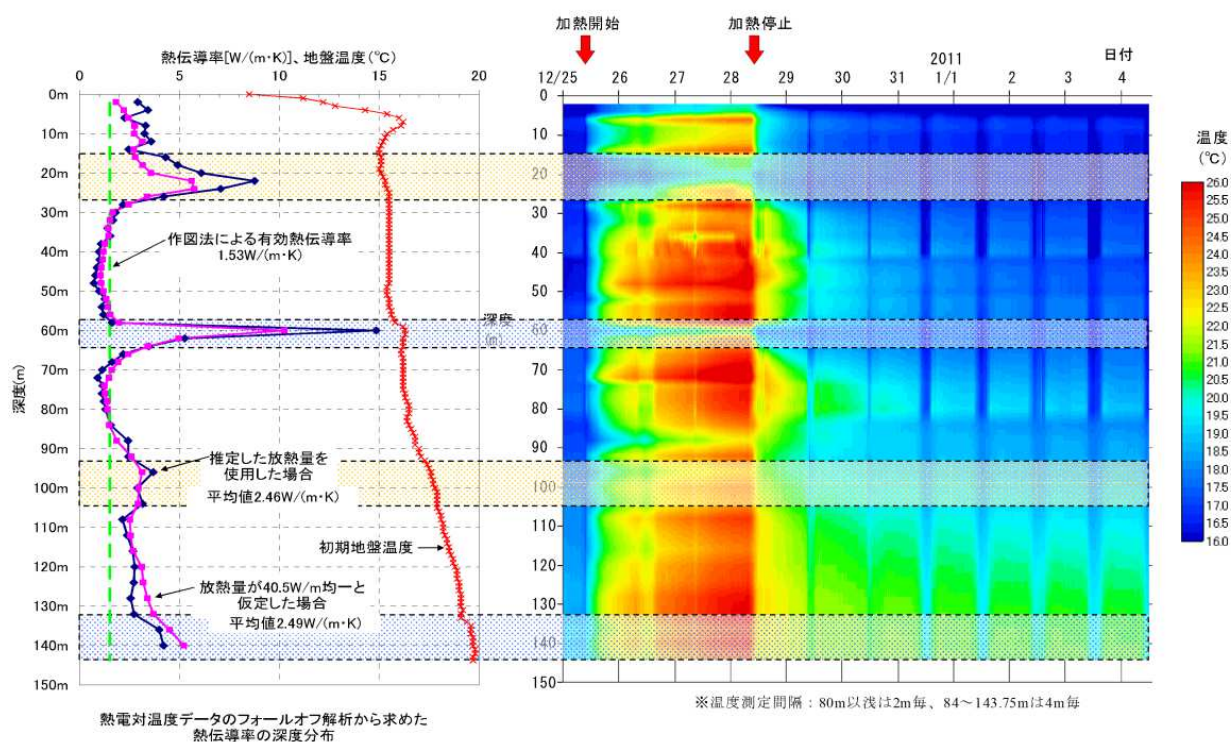


図 5-5 熱伝導率の深度分布の評価例¹¹⁹⁾

(2) 開発中の TRT 手法

「3.2(4) 1)地盤の有効熱伝導率と熱応答試験」で紹介した手法以外にも簡易化を図った手法が開発中であり、その動向を紹介します。

1) パッカー方式による有効熱伝導率測定方法

パッカー方式による有効熱伝導率の測定方法は、シート状のヒーターの内側に風船状のパッカーを取り付け孔井に挿入し、パッカーを膨らませることでヒーターを孔壁に密着させ、ヒーターを温めることで温度を測定するという方法です。この方法は埼玉県環境科学国際センターによって開発中です(図 5-6)。

¹¹⁹⁾ 長野県、「緑の分権改革」推進事業 再生可能エネルギー導入可能性調査(地下熱利用)調査報告書, 2011.3.

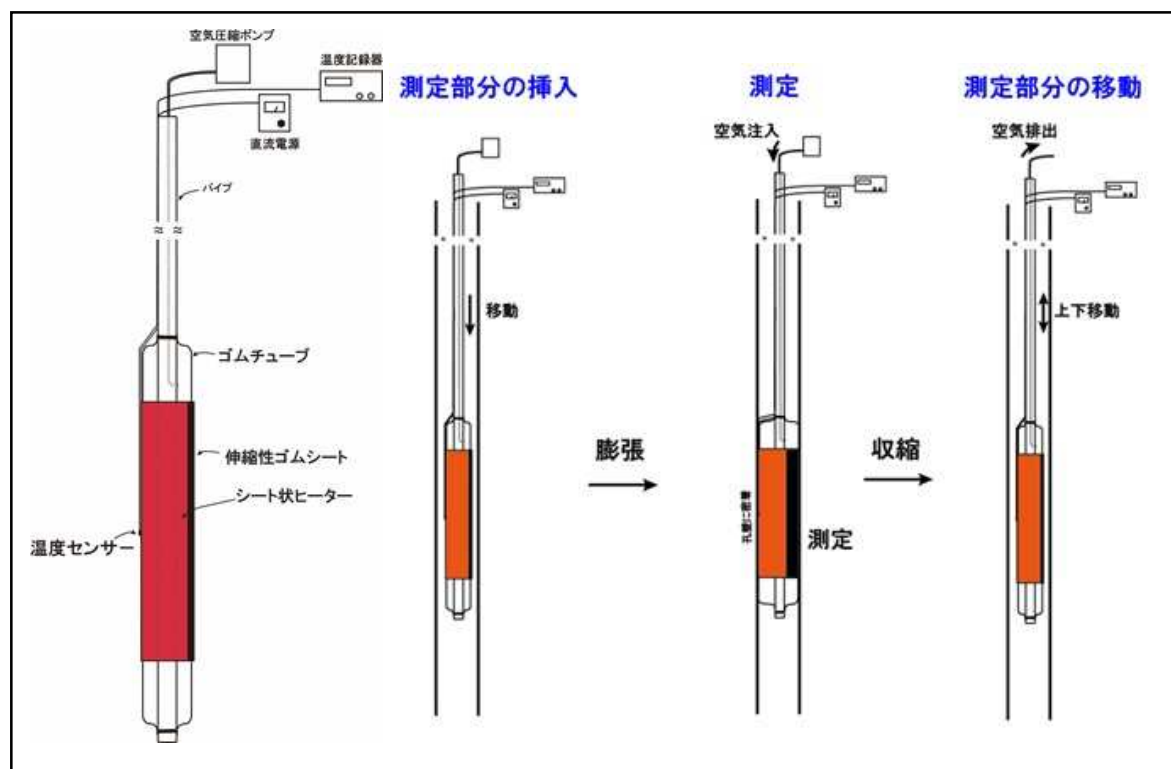


図 5-6 パッカー方式による有効熱伝導率測定方法¹²⁰

2) NEDO のプロジェクトにおける開発状況

NEDO(国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構)のプロジェクトにおいても、新たな技術が開発中です。

① 大口径水井戸に適用可能な TRT 装置の開発

あらゆる口径の既存井戸、特に大口径の水井戸で適用可能な TRT 装置

② 垂直ボアホール型地中熱交換器 (BHE) に対応可能な簡易 TRT の開発

深度数百メートルまで対応可能な発熱ワイヤーと光ファイバー温度計を組み合わせた簡易 TRT 装置

③ 地盤調査孔を用いた TRT の開発

全自動動的コーン貫入試験機(CRS)で動的コーン貫入調査を実施した後の直径 40 mm 程度の穴を用いて TRT を行う方法

¹²⁰埼玉県ホームページ「地中の熱伝導率を簡単に測定し、地中熱利用コストを削減する特許を取得！」
<https://www.pref.saitama.lg.jp/b0508/news/page/new2021080601.html> (2022 年 11 月 16 日閲覧)

(3) 地下水流動解析・熱輸送解析シミュレーション

持続可能な地中熱利用を行うため、周辺地盤環境への影響を評価するためのツールとして、例えば『FEFLOW』などのソフトウェアを用いた地下水流動・熱輸送解析シミュレーションが挙げられます(図 5-7)。

地盤の熱物性や地下水流動をモデル化し、これに地中熱利用による採排熱量等を条件として与えることで、長期間にわたる地盤や地下水の温度変化や影響範囲を試算することが可能です。

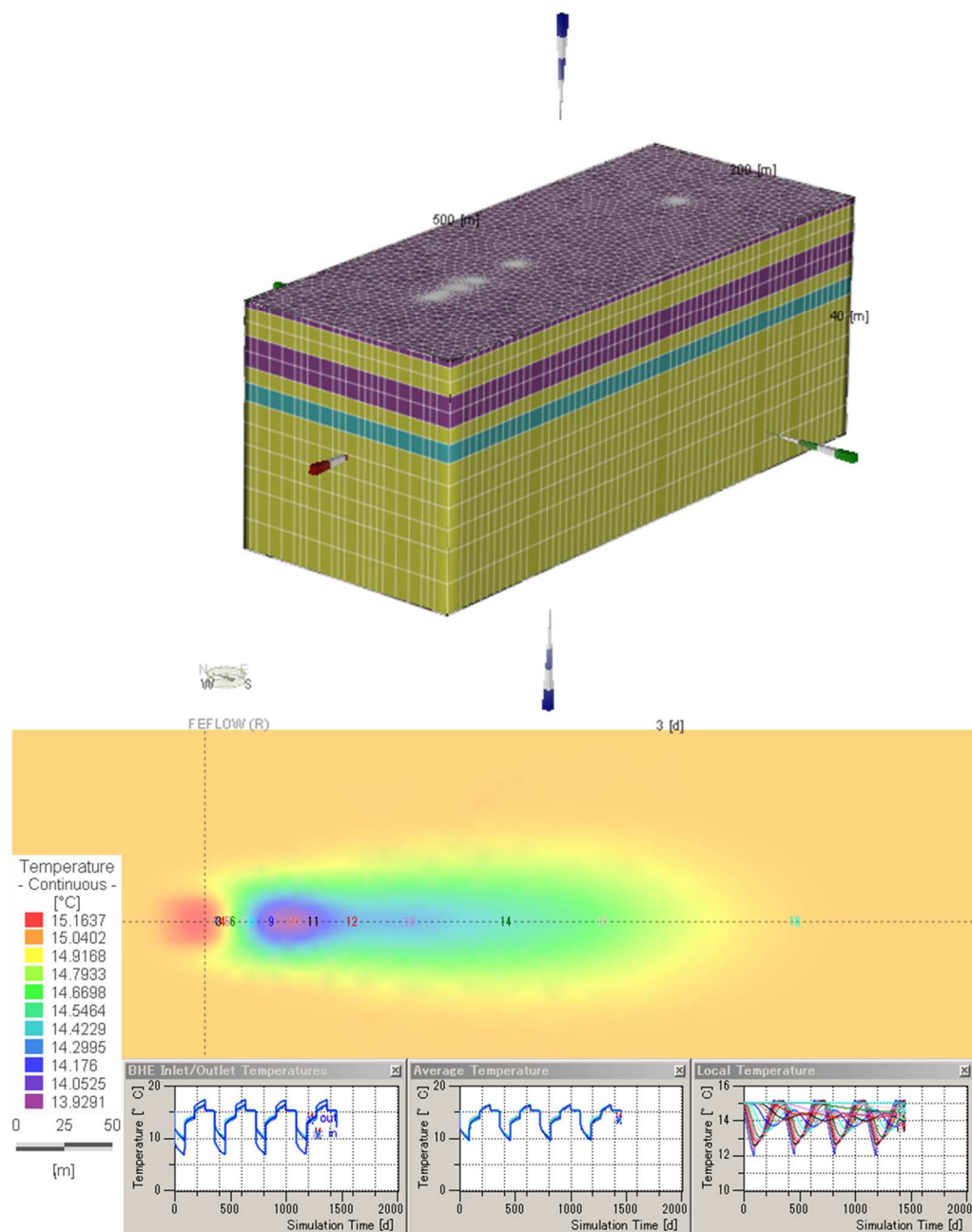


図 5-7 FEFLOW による解析モデルおよびシミュレーション結果の表示例¹²¹

¹²¹環境省, 平成 26 年度地中熱利用の普及方策の構築検討委託業務報告書, 2015.3.

5.3 その他の新技術

(1) 地域共創・セクター横断型カーボンニュートラル技術開発・実証事業：環境省 (CO₂排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業)

環境省では、地球温暖化対策、及び、地域の活性化と脱炭素社会の同時達成を行うことで、「地域循環共生圏」の構築と「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」で掲げる早期の脱炭素社会の実現に貢献することを目的とした技術開発・実証事業を行っています。

詳細は、以下のホームページに公開されています。

・地域共創・セクター横断型カーボンニュートラル技術開発・実証事業
(CO₂排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業)

https://www.env.go.jp/earth/ondanka/cpttv_funds/

なお、表はホームページ内の「事業データベース」より地中熱に関する事業を抜粋したものです。

表 5-5 地中熱が関係する「環境省 地域共創・セクター横断型カーボンニュートラル技術開発・実証事業(CO₂排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業)」一覧

課題名	代表者	実施年度
冷房負荷主体の温暖地域にも普及拡大し得る大温度差少量搬送方式 高効率地中熱利用ビル用マルチヒートポンプシステムとその設計・運用方法の技術開発	新日鉄エンジニアリング株式会社	平成18～20年度
寒冷地を含む病院における、省エネ冷暖房設備用の地下水・地中熱ハイブリッド式ヒートポンプに関する技術開発	株式会社アモウ	平成19～20年度
地中熱利用ヒートポンプシステムのインisialコスト低減と効率化に関する技術開発	三菱マテリアルテクノ株式会社	平成22～23年度
杭打ち機を用いた井戸、熱交換杭の開発と地中熱利用等への適用	福井大学	平成22～24年度
太陽熱と地中熱を利用する水循環ヒートポンプシステムに関する 技術開発	東京大学	平成22～24年度
トンネル下床面に設置した地中熱交換器による地中熱ヒートポンプシステムの開発	小田急電鉄株式会社	平成23～25年度
帯水層蓄熱冷暖房システムの地下環境への影響評価とその軽減のための技術開発	日本地下水開発株式会社	平成23～25年度
高効率地中熱利用システムに関する実証事業	株式会社大林組	平成25～26年度
地中熱、太陽熱を直接利用する躯体スラブ蓄熱放射冷暖房システムに関する技術開発	立命館大学	平成25～27年度
帯水層蓄熱のための低コスト高性能熱源井とヒートポンプのシステム化に関する技術開発	関西電力株式会社	平成27～30年度
複数帯水層を活用した密集市街地における業務用ビル空調向け新型熱源井の技術開発	三菱重工サーマルシステムズ株式会社	平成30～令和2年度

事例1 採放熱能力が高い高効率チューブ方式とフレキシブル性の高いプラスチック井戸管方式

【事業名】高効率地中熱利用システムに関する実証研究

【代表者】(会社名)株式会社大林組

(氏名)三小田 憲司

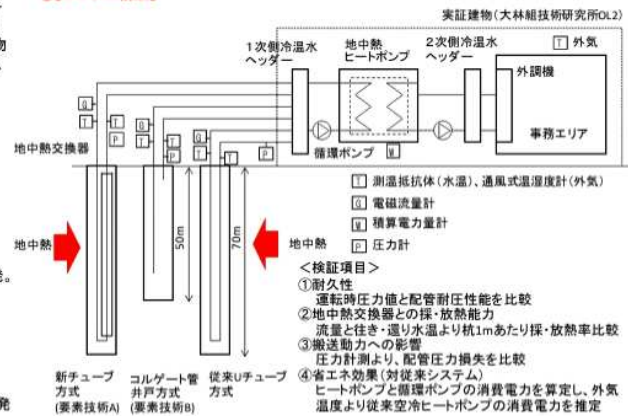
【実施年度】平成25～26年度

①【技術開発概要】

①【技術開発の概要・目的】

大気中に熱を放出せず、化石燃料消費エネルギーの少ない地中熱ヒートポンプシステムの普及を促進する目的で、採・放熱能力が高い高効率チューブ方式とフレキシブル性の高いプラスチック井戸管方式の地中熱ヒートポンプシステムを開発する。実施建物(大林組技術研OL2)を導入して、運用時の耐圧性や止水性に問題がないことを検証し、年間運用データを取得して、省エネ効果や環境保全性に関する評価を行う。

③【システム構成】



②【技術開発の詳細】

(1)要素技術Aの開発(新チューブ方式)

- ・送り管と還り管の本数が異なり、配管間隔を離れた高効率の地中熱交換器を開発。
- ・EFソケットを用いた電気融着による配管組立法など、施工技術の検証。
- ・配管摩擦損失による搬送動力の増加が懸念材料であり、実証評価により検証。

(2)要素技術Bの開発(コルゲート管井戸方式)

- ・プラスチック管製の井戸型地中熱交換器を開発。
- ・巻きクセ矯正器具等を用いた施工法の検証。
- ・耐圧性、止水性などの耐久性が課題となるため、管底・管頭の接続キャップの開発により対応し、運用実績により検証。

(3)全体システムの構築および運用評価

- ・要素技術A、Bを熱源とした地中熱ヒートポンプシステムを構築。夏期冷房期間の逆運転による地中温度回復効果について検証。
- ・上記運転最適化等により、従来システム(空冷ヒートポンプ)よりエネルギー効率を30%程度向上させ、ランニングコスト削減とCO₂排出量の削減を図る。



事例2 帯水層蓄熱の高性能熱源井の構築と地盤沈下影響解析

【課題名】帯水層蓄熱のための低コスト高性能熱源井とヒートポンプのシステム化に関する技術開発

【代表者】関西電力㈱ 小泉 正泰

【実施年度】平成27～30年度

①【課題概要】

①【課題の概要・目的】

エネルギー需要密度の高い都市域において利用者が自由に制御できる熱の再生可能エネルギー技術は限られている。その中でも多くの大都市が位置する沖積平野の帯水層と、そこに位置する地下水の熱源利用は、大きなCO₂削減効果とエネルギー貯蔵による需要シフトを可能とする。本事業において長期間安定して利用可能な熱源井の基礎技術が開発できたが、現在、都市部への導入では事前の実証試験が必要である。今後、地盤沈下影響等を監視しながら本技術の実績を積み上げること、将来的な適用地域の拡大が期待できる。なお、地盤条件は異なるが、本技術は、オランダに限り、特異的に普及しており、建築物の標準的な省エネ技術として採用されている。

②【技術開発の内容】

○重要な開発要素

A1.【長期間運用継続を可能とする蓄熱量・蓄熱水量のバックアップ維持方法】：【熱源システム・熱解析】
帯水層は保温性が高く、臨海部では地下水流れも遅いため、システムの持続可能な運用には季節ごとに拡大縮小する冷温の蓄熱塊の拡大範囲を長年にわたって同じ大きさに維持することが必須である。技術開発ではデータロガーにより実験的にデータ収集を行ったが、実運用にあたっては、熱・流量バランスを確認できるモニタリングシステムの確立が必要である。本課題については、現在、導入が検討されている実物件において実装を検討する必要がある。

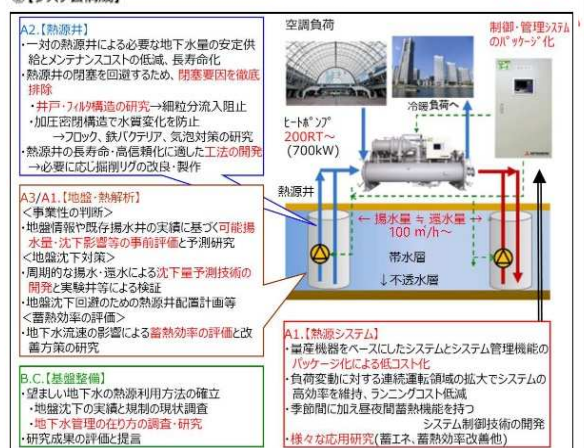
A2.【目詰まりを起こさなく、長期間安定して運用できる熱源井の構築技術】：【熱源井】

地盤沈下抑制には、揚水し熱利用した後の地下水を直ちに元の帯水層に還水することが重要である。今回、熱源井の構造や構築時の洗浄への配慮に加え、地下水系統の常時加圧状態の維持により水質変化を抑制し、目詰まりの要因を排除できたことが、成功の要因である。ただし、加圧制御機構の作動媒体に地下水を使っているため、大気中に暴露された部分で目詰まりによる動作不良が頻に発生する。本課題については、現在、別事業[※]で対策を検討中である。

A3.【地盤沈下影響を的確に把握する評価方法の開発】：【地盤解析】

本システムの運用にあたって、沈下影響のモニタリングは重要である。システム運用で得られる地下水流量や熱源井の水位変化状況の把握や沈下量の定期観測は比較的容易である。一方、今後の普及を考える上では、対象地点の粘土層に対し、圧密パラメータ等の代表値による事前評価を認められたい。本課題については、別案件[※]で特別な観測による地盤各層の沈下量や応力変化の把握と沈下影響評価を行う計画である。

③【システム構成】

**B. 開発要素のシステム統合とC. その実証：【基礎整備】**

本事業では、既にH30年12月には大阪うめきた地区の実証設備を撤去し、H30年2月末には事業を終了しているが、H30年10月から大阪舞洲地区で別事業を開始しており、上記の課題は継承されている。一方、大阪うめきた地区では、本事業の実証結果において地盤沈下影響が認められなかったため、実証設備と同規模のシステム2組が現在、計画中である。

[※]H30～R2年度CO₂排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業(複数帯水層を活用した密集市街地における業務用ビル空調向け新型熱源井の技術開発)

(2) NEDO 技術開発プロジェクト

NEDO では、コストダウンを目的とした地中熱利用技術およびシステムの開発、並びに、各種再生可能エネルギー熱の利用について、蓄熱利用等を含むトータルシステムの高効率化や規格化、評価技術の高精度化等に取り組むことで、再生可能エネルギー熱利用の普及拡大に貢献することを目的とした総合的技術開発を行っています。

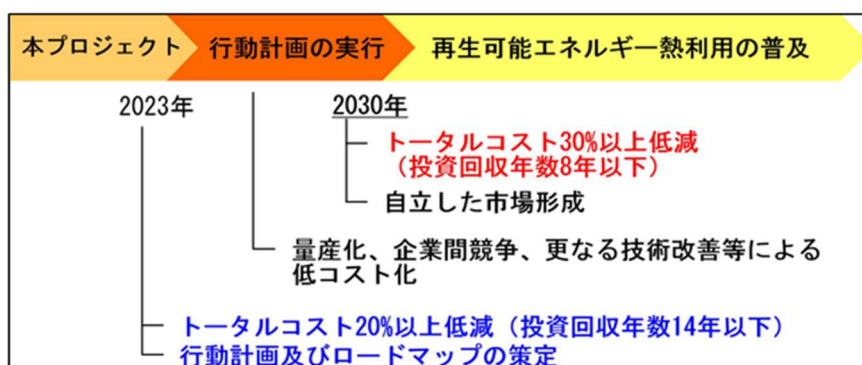


図 5-8 NEDO「再生可能エネルギー熱利用にかかるコスト低減技術開発」ロードマップ

○再生可能エネルギー熱利用技術開発(2014 年度～2018 年度)

https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100067.html

○再生可能エネルギー熱利用にかかるコスト低減技術開発(2019 年度～2023 年度)

https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100154.html

表 5-6 「再生可能エネルギー熱利用技術開発」の研究開発一覧（2014 年度～2018 年度）

研究開発項目	テーマ名	事業者名
コストダウンを目的とした 地中熱利用技術の開発	高性能ボーリングマシンの低騒音化・自動化に向けた 研究開発	株式会社東亜利根ボーリング
	戸建住宅及び小規模～中規模建築物を対象とした 地中熱配管埋設工法の研究開発	旭化成建材株式会社
	地中熱利用要素技術の開発	株式会社ワイビーエム/ 国立大学法人佐賀大学
地中熱利用トータルシス テムの高効率化技術開発及び 規格化	地下水循環型地中採熱システムの研究開発	株式会社守谷商会
	共生の大地への地中蓄熱技術の開発	国立大学法人福井大学/ 三谷セキサン株式会社
	再生可能エネルギー利用のための水循環・分散型 ヒートポンプシステムの開発	国立大学法人東京大学生産技術研究所/ 鹿島建設株式会社/ ゼネラルヒートポンプ工業株式会社
	地中熱利用システムを含む空調熱源トータルシステム シミュレーションの開発	株式会社日建設総合研究所/ 公立大学法人名古屋市立大学
	都市インフラ活用型地中熱利用システムの開発	三菱マテリアルテクノ株式会社/ 国立大学法人秋田大学/ 日本ビーマック株式会社
	地中熱・流水熱利用型クローズドシステムの技術開発	国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構/ 国立大学法人東北大学未来科学技術共同研究センター/ 八千代エンジニアリング株式会社/ ジオシステム株式会社
地中熱利用トータルシス テムの高効率化技術開発及び 規格化、および再生可能 エネルギー熱利用のポテン シャル評価技術の開発	低コスト・高効率を実現する間接型地中熱ヒートポンプ システムの開発と地理地盤情報を利用した設計・性能予測 シミュレーションツール・ポテンシャル評価システムの開発	国立大学法人北海道大学/ 株式会社日伸テクノ/ 鉱研工業株式会社/ 株式会社イノアック住環境/ サンボット株式会社/ 日鉄エンジニアリング株式会社※1/ ジーエムラボ株式会社
	地下水を活用した高効率地中熱利用システムの開発と その普及を目的としたポテンシャルマップの高度化	日本地下水開発株式会社/ 国立大学法人秋田大学/ 国立研究開発法人産業技術総合研究所
	一般住宅向け浅部地中熱利用システムの低価格化・ 高効率化の研究	学校法人日本大学工学部/ 有限会社住環境設計室/ 日商テクノ株式会社
再生可能エネルギー熱利用 のポテンシャル評価技術の 開発	地圏流体モデリング技術による国土地中熱ポテンシャル データベースの研究開発	応用地質株式会社/ 株式会社地圏環境テクノロジー
	オープンループ型地中熱利用システムの高効率化と ポテンシャル評価手法の研究開発	国立大学法人岐阜大学/ 東邦地水株式会社/ 株式会社ティコク
	都市域における、オープンループシステムによる 地下水の大規模熱源利用のための技術開発	一般財団法人地域地盤環境研究所/ 株式会社KANSOテクノス※2/ 国立大学法人岡山大学
その他再生可能エネルギー 熱利用トータルシステムの 高効率化・規格化	温泉熱地域利用のためのハイブリッド熱源水ネットワーク 構築技術の研究開発	株式会社総合設備コンサルタント/ 公立大学法人大阪市立大学
	都市除排雪を利用した雪山貯蔵による 高効率熱供給システムの研究開発	株式会社雪屋嶺山商店/ 株式会社共同通信デジタル/ NHNテコラス株式会社※3/ 株式会社環境技術センター/ 株式会社スゴージャ/ 国立大学法人室蘭工業大学
	太陽熱を利用した熱音響冷凍機による雪室冷却装置の開発	新潟県工業技術総合研究所/ 学校法人東海大学/ 新潟機器株式会社
	太陽熱集熱システム最適化手法の研究開発	一般社団法人ソーラーシステム振興協会/ 名城大学/ 国立研究開発法人建築研究所
	食品廃棄物の超臨界水ガス化による再生可能熱の創生	国立大学法人広島大学/ 株式会社東洋高圧/ 中国電力株式会社

旧社名(研究開発当時)
※1 新日鉄住金エンジニアリング株式会社
※2 株式会社環境総合テクノス
※3 株式会社データホテル

表 5-7 「再生可能エネルギー熱利用にかかるコスト低減技術開発」の研究開発一覧
(2019 年度～2023 年度)

研究開発項目	テーマ名	事業者名
コストダウンを目的とした 地中熱利用技術の開発	給湯負荷のある施設への導入を想定した 地中熱利用ヒートポンプシステムの研究開発	株式会社ワイビーエム/ 昭和鉄工株式会社
	直接膨張式地中熱ヒートポンプシステムと その施工・設置に係るコスト削減技術の開発	株式会社藤島建設/ 株式会社ハギ・ボー/ 中外テクノス株式会社/ 伊田テクノス株式会社
	ZEB化に最適な高効率帯水層蓄熱を利活用した トータル熱供給システムの研究開発	日本地下水開発株式会社/ ゼネラルヒートポンプ工業株式会社
	寒冷地のZEB・ZEHに導入する低コスト・高効率 間接型地中熱ヒートポンプシステムの技術開発	国立大学法人北海道大学/ エムズ・インダストリー株式会社/ 棟晶株式会社/ 北海道電力株式会社/ 株式会社イノアック住環境/ サンボット株式会社
太陽熱等利用システムの 高度化技術開発	天空熱源ヒートポンプ(SSHP)システムの ライフサイクルに亘るコスト低減・性能向上技術の開発	鹿島建設株式会社/ ゼネラルヒートポンプ工業株式会社
	温泉熱等の再生熱を活用した分散熱源による 熱源水ネットワークシステムのトータルコスト低減技術開発	株式会社総合設備コンサルタント/ 広沢電機工業株式会社
高度化・低コスト化のための 共通基盤技術開発	見かけ熱伝導率の推定手法と簡易熱応答試験法および 統合型設計ツールの開発・規格化	国立大学法人北海道大学/ 国立大学法人秋田大学/ 国立研究開発法人産業技術総合研究所
	オープンループ方式地中熱利用における最適設計方法の研究	国立大学法人東海国立大学機構

なお、NEDO の技術開発プロジェクト成果報告書については、以下のホームページに公開されています。

<https://seika.nedo.go.jp/pmg/PMG01C/PMG01CG01>

(3) 環境技術実証(ETV)事業：環境省 ～Environmental Technology Verification～

環境省では、既に実用化された先進的環境技術の環境保全効果、副次的な環境影響、その他環境の観点から重要な性能(「環境保全効果等」)を第三者が客観的に実証することにより、環境技術の利用者による技術の購入、導入等の際に、環境保全効果等を容易に比較および検討し、適正な選択を可能にし、もって環境技術の普及を促進し、環境保全に寄与し、中小企業の育成も含めた環境産業の発展に資することを目的とした事業を行っています。

詳細は、以下のホームページに公開されています。

環境省 環境技術実証事業

<https://www.env.go.jp/policy/etv/index.html>

なお、事業はホームページ内の「実証済み技術一覧」から、下記のカテゴリーを選択していただくことで一覧が表示されます。

- ・令和元～3年度：「気候変動対策技術領域」
- ・平成21～30年度：「052:ヒートアイランド対策技術分野(地中熱・下水等を利用したヒートポンプ空調システム)」

気候変動対策技術領域(令和元～3年度)

年度	区分	実証番号	実証済技術名	申請者
令和元年度	熱中症対策技術区分	160-1901	Viuシステム	積水樹脂株式会社
	熱中症対策技術区分	160-1902	ドリームターフ PT-RS+	積水樹脂株式会社
	ヒートアイランド対策技術区分	052-1901	長野県長野市の事務所施設での地下水循環型地中採放熱システムを用いた地中熱空調システム	株式会社守谷商会
令和2年度	地中熱利用システム技術区分	052-2001	北海道札幌市のアリガプランニング本社のZEBにおける地中熱利用システム	株式会社アリガプランニング
	—	140-2002	H種乾式アモルファス変圧器	治部電機株式会社
令和3年度	地中熱利用システム技術区分	052-2101	自動逆流技術により還元井の目詰まりを防止する地下水循環型地中熱利用冷暖房システム	東邦地水株式会社
	地中熱対策技術区分	160-2101	フィールド冷却細霧システム	日本体育施設株式会社
	—	140-2101	蒸気輸送配管用フリーフロート・スチームトラップ	株式会社ティエルビイ

①ヒートアイランド対策技術分野(地中熱・下水等を利用したヒートポンプ空調システム)(平成24～30年度)

年度	区分	実証番号	実証済技術名	申請者
平成24年度	—	052-1201	【実証単位】(C)地中熱交換部 ヒロセ株式会社東京工場における ソイルセメント杭利用の地中熱交換器	ヒロセ株式会社
	—	052-1202	【実証単位】(C)地中熱交換部 積水化学工業株式会社群馬工場における 地中熱交換器	積水化学工業株式会社、 ミサワ環境技術株式会社
	—	052-1203	【実証単位】(C)地中熱交換部 さいたま市大宮区の桜花保育園における 地中熱交換井とU字管(GLOOP32)	ダイカポリマー株式会社
	—	052-1204	【実証単位】(C)地中熱交換部 さいたま市見沼区のきらめき保育園における 地中熱交換井とU字管(GLOOP40)	ダイカポリマー株式会社
平成25年度	—	052-1301	【実証単位】(A)システム全体 埼玉県桶川市の株式会社PEC事務所における 地中熱利用冷暖房システム	株式会社PEC
	—	052-1302	【実証単位】(B)地中熱／下水等専用ヒートポンプ 地中熱ヒートポンプユニット GSHP-3003URF	サンボット株式会社
	—	052-1303	【実証単位】(C)地中熱交換部 栃木県宇都宮市の病院における 地中熱交換井とU字管GUP-25AN	株式会社イノアック 住環境
平成26年度	—	052-1401	【実証単位】(A)システム全体 山梨県中央市の道の駅「とよとみ」における液状化 対策グラベルドレーン活用の地中熱利用冷暖房シ ステム	株式会社 秀建コンサルタント
	—	052-1402	【実証単位】(A)システム全体 鹿児島県薩摩川内市の株式会社日本地下技術川 内支店における地中熱利用冷暖房システム	株式会社 日本地下技術
	—	052-1403	【実証単位】(B)地中熱／下水等専用ヒートポンプ MDI簡易ヒートポンプチラー MDIHP-L-W/W	MDI株式会社
平成27年度	—	052-1501	【実証単位】(A)システム全体 山形県山形市の日本 水資源開発株式会社 事務所における地中熱利用 冷暖房システム	日本地下水開発株式会社 日本地下資源開発株式会社
	—	052-1502	【実証単位】(B)地中熱／下水等専用ヒートポンプ 高効率大容量ヒートポンプチラー ZQHt- 45W45st	ゼネラルヒートポンプ工業 株式会社
平成28年度	—	052-1601	【実証単位】(A)システム全体 東京都練馬区の戸建 住宅におけるタンク式地下水熱交換器を使用した 地中熱空調システム	ジオシステム株式会社
	—	052-1602	【実証単位】(B)地中熱／下水等専用ヒートポンプ 水熱源ヒートポンプユニット再生可能エネルギー対 応 WDX50BA	日本ピーマック株式会社
平成29年度	—	052-1701	【実証単位】(B)地中熱／下水等専用ヒートポンプ 水熱源ヒートポンプユニット再生可能エネルギー対 応WDX14AA	日本ピーマック株式会社
	—	052-1702	【実証単位】(B)地中熱／下水等専用ヒートポンプ 水熱源ヒートポンプユニット再生可能エネルギー対 応WDX25CA	日本ピーマック株式会社
平成30年度	—	052-1801	長野県岡谷市の株式会社ダイワテック本社におけ る地中熱利用冷暖房システム	株式会社ダイワテック

②ヒートアイランド対策技術分野(地中熱・下水等を利用したヒートポンプ空調システム)(平成21～23年度)

年度	区分	実証番号	実証済技術名	申請者
平成21年度	—	052-0901	【実証単位】(A)システム全体 「川崎市 南河原こども文化センター」における 地中熱利用空調システム	JFE鋼管株式会社 JFEスチール株式会社
	—	052-0902	【実証単位】(B)地中熱／下水熱専用ヒートポンプ 水冷式ヒートポンプ (地中熱対応水冷式ヒートポンプチラー・ZQH- 18W18)	ゼネラルヒートポンプ工業 株式会社
	—	052-0903	【実証単位】(C)地中熱交換部 東京都港区 高輪福祉会館において掘削された 地中熱交換器	ミサワ環境技術株式会社
平成22年度	—	052-1001	【実証単位】(A)システム全体 三菱マテリアル株式会社大宮新館における 地中熱利用ヒートポンプ空調システム	三菱マテリアルテクノ株式会 社
	—	052-1002	【実証単位】(A)システム全体 株式会社秀建コンサルタント本社事務所における 地中熱利用ヒートポンプ空調システム	株式会社秀建コンサルタント
	—	052-1003	【実証単位】(A)システム全体 学校法人森村学園における 地中熱利用ヒートポンプシステム	ミサワ環境技術株式会社
	—	052-1004	【実証単位】(B)地中熱／下水等専用ヒートポンプ 高温型水冷式ヒートポンプチラー ZQH-12.5W12.5	ゼネラルヒートポンプ工業 株式会社
	—	052-1005	【実証単位】(B)地中熱／下水等専用ヒートポンプ 地中熱ヒートポンプユニット GSHP-1001	サンポット株式会社
	—	052-1006	【実証単位】(B)地中熱／下水等専用ヒートポンプ 地中熱ヒートポンプユニット GSHP-1002UR	サンポット株式会社
	—	052-1007	【実証単位】(C)地中熱交換部 株式会社福島地下開発本社事務所における 地中熱交換井	株式会社福島地下開発
平成23年度	—	052-1101	【実証単位】(A)システム全体 川田工業富山本社におけるヒートポンプ空調シス テム	川田工業株式会社
	—	052-1102	【実証単位】(B)地中熱／下水等専用ヒートポンプ 地中熱ヒートポンプユニットGSHP-1001F	サンポット株式会社
	—	052-1103	【実証単位】(B)地中熱／下水等専用ヒートポンプ 地中熱ヒートポンプユニットGSHP-1002URF	サンポット株式会社

おわりに

本ガイドラインは、地中熱利用を普及促進することを目的としています。

地中熱利用ヒートポンプシステムは脱炭素社会に貢献し優れた環境効果を有するとともに、環境影響(地下水・地盤環境)への配慮が必要な技術であることから、継続的なモニタリングによりデータ蓄積を行い、地中熱利用技術の導入による地下水・地盤環境への影響の有無、因果関係を検証し、持続可能な利用による普及促進を行う必要があります。

今後、脱炭素社会の実現に向けた取り組みが加速され、自治体が策定する地方公共団体実行計画に地中熱が位置づけられることにより、さまざまな施設に導入が進むことが期待されます。多くの人々が利用する公共施設や大型民間施設などを中心に、モニタリングによる環境影響の検証を行いつつ、導入実績の蓄積により認知度の向上を図り、更なる普及促進に繋げることが望ましいといえます。

さらに、地中熱利用ヒートポンプシステムの導入実績を着実に増やしていくためには、事業構想やエネルギービジョン等の上位計画に地中熱利用を明確に位置づけ、計画的に普及を図ることが重要です。しかしながら、自治体のエネルギーに関する上位計画においても、民間の事業構想においても、現状では「地中熱利用」に言及しているケースは限られており、更なる広報・周知を行い、認知度を向上させる必要があります。

また、公共施設への地中熱利用技術の導入事例では、まちづくりと一体となって検討したケースや上位計画を背景としたプロポーザル発注形式による技術提案などによるものがありますが、いずれの場合も、他の再生可能エネルギーとの比較検討や、複合利用も考慮した最適設計を図る一方で、環境影響まで考慮している例は非常に少ない状況です。

民間施設への導入事例でも、企業理念として導入可能な再生可能エネルギーを積極的に導入しているというケースや従来エネルギーとのコスト比較で優位性を判断しているケースなど経緯は様々ですが、やはり周辺環境への影響まで配慮しているケースは稀です。

以上のような状況から、モニタリングあるいは事前予測により環境効果、環境負荷や環境影響を評価することの必要性にも留意し、将来普及が進んだ際に、大規模な施設、あるいは多数の施設の集中などに伴う周辺影響等が生ずることなく、持続可能な利用による普及促進が図られる必要があります。

参 考 資 料

参考資料の図表番号は本編のそれと区別するため、図 RO-〇〇、表 RO-〇〇とした。
R は Reference の頭文字である。

参考資料 目次

1. 地中熱関連用語集.....	158
2. 地中熱利用ヒートポンプシステムの事例データ集	165
3. モニタリングデータによる地盤温度影響解析等.....	173
4. 地中熱利用による地下微生物への影響評価事例.....	177
5. 地中熱利用ヒートポンプシステムにおけるパッケージ化の推進.....	184
6. 地下水に関する規制	197
7. 水質に関する規制	201
8. その他関連法規.....	201
9. 関連するガイドライン等	202
10. 検討委員会メンバー	204

1. 地中熱関連用語集

【あ行】

○イニシャルコスト

機器や設備などを導入する際にかかるコスト(費用)のこと。設置費用・導入費用などとも呼ばれる。なお設置・導入後にかかる費用などは含まれない。対義語はランニングコスト。(金融・経済用語辞典)

○一次エネルギー

ヒートポンプなどの稼働に必要なエネルギーの形態へ変換される前のエネルギー源のこと。例えば、発電所で電気を生産するために用いられる天然ガス、製油所でガソリンを生産するために利用される原油などを指す。一次エネルギーには、天然ガス、原油、石炭の化石燃料、発電のために利用されるウラン、地熱、水力、太陽光などが含まれる。(エネルギー環境キーワード事典を一部引用)

○一次側システム

ヒートポンプに接続する熱源側のシステムをいう。⇔二次側システム

○オープンループ方式

地下水を熱源として利用する地中熱ヒートポンプシステムの熱交換方式。地下水を直接ヒートポンプに導入して熱利用するタイプと、地下水と熱交換をして熱のみを利用するタイプがある。前者のタイプは安価なシステムであるが、この場合、使用する地下水の水質によってはヒートポンプ内で目詰まりや腐食などの障害を引き起こす場合があるので、注意が必要である。

【か行】

○(地下水の)還元

帯水層から汲み上げ熱利用した地下水を再び帯水層へ戻すこと。

○還元井

地下水を帯水層に戻すための井戸のこと。

○クローズドループ方式

地下水を直接利用せず、地盤に地中熱交換器を埋設する地中熱利用ヒートポンプシステムの熱交換方式。ボアホールや杭を地中熱交換器として利用する垂直埋設型のほか、水平埋設型がある。ボアホールを利用する地中熱交換器では、U チューブを利用する方法が一般的である。杭を利用するシステムは掘削するコストが建築の工事の一環となることから、コスト低減につながる。杭には、鋼管杭、既成コンクリート杭、場所打ち杭の 3 種類がある。

【さ行】

○再生可能エネルギー

エネルギー供給事業者による非化石エネルギー源の利用及び化石エネルギー原料の有効な利用の促進に関する法律(エネルギー供給構造高度化法)においては、「再生可能エネルギー源」について、「太陽光・風力その他非化石エネルギー源のうち、エネルギー源として永続的に利用することができると認められるものとして政令で定めるもの」と定義されており、政令において、太陽光・風力・水力・地熱・太陽熱・大気中の熱その他の自然界に存する熱(地中熱、温度差エネルギー、雪氷熱、未利用熱等)・バイオマスが定められている。(経済産業省 資源エネルギー庁 HP を参考)

○採排熱

地中熱交換器等を介して地中から熱を採取する、あるいは地中に熱を排出すること。

○酸化還元電位

酸化還元反応系において電子の授受により発生する電位(電極電位)。溶液の酸化・還元能力を表す指標で、酸化還元電位が大きいほど酸化力が強く、小さいと還元力が強い。

酸化還元電位は鉄、マンガン、窒素化合物などの形態の変化の推定、水酸化物溶存地下環境下の生息微生物の予測や、汚染対策分野でのバイオレメディエーション進捗状況の推定に利用できる。(地下水用語集より一部抜粋)

○COP

地中熱利用ヒートポンプ単体の成績係数のことで、次の式で計算する。

$$\text{COP} = \frac{\text{地中熱利用ヒートポンプの製造熱量[kWh]}}{\text{地中熱利用ヒートポンプの消費電力量[kWh]}}$$

ここで、地中熱利用ヒートポンプ製造熱量[kWh]は瞬時熱量であるヒートポンプ冷房能力[kW]、または暖房能力[kW]を時間で積分した積算熱量[kWh]のことである。また、循環ポンプなど補機を加えたシステム全体の成績係数を SCOP と呼び、一次側の補機の場合と、二次側の補機も加える場合がある。

$$\text{SCOP} = \frac{\text{地中熱利用ヒートポンプの製造熱量[kWh]}}{\text{地中熱利用ヒートポンプの消費電力量} + \text{補機消費電力量[kWh]}}$$

(事例に学ぶ地中熱利用ヒートポンプシステム)

○室内機

室内に設置される機器のこと。

○J(ジュール)とW(ワット)

ジュールは仕事・熱量・エネルギーの SI 単位。1 ニュートンの力が働いて、その力の方向に 1 メートル動かすときの仕事が 1 ジュールである。また 1 秒当たり 1 ジュールの仕事率が 1 ワ

ットである。約 4.2 ジュールの熱量を 1 グラムの水に与えると、温度が 1℃上昇する。(大辞林に一部加筆)

○充填材

地中熱交換井にある熱媒体循環チューブと孔壁との間に詰める材料のこと。粒径が小さく伝熱特性の良い材料を求めることから、珪砂を充填材とすることが多い。その他、スラリー状のセメントを使うこともある。

【た行】

○帯水層蓄熱

ATES (Aquifer Thermal Energy Storage ・帯水層蓄熱システム)ともいい、オープンループ方式の一つのシステムである。広く普及している空調エアコン(空気熱源ヒートポンプ)では冷暖房の排熱を大気に放出しているが、帯水層蓄熱ではその排熱を帯水層に蓄え、熱エネルギーとして活用することで省エネ・省 CO₂・ヒートアイランド現象緩和を図るシステムである。(環境省「帯水層蓄熱の利用にあたって」を一部引用)

○地中熱

一般に地下 200 m より浅い地盤に賦存する温度が数十度以下の低温の熱エネルギーと定義できる。その起源は地表面からの太陽エネルギーと地殻深部からの熱流であるが、火山地帯をのぞくと後者の影響度合いは前者に比べて極めて小さい。(地中熱ヒートポンプシステム)

○地中熱交換器

クローズドループ方式の地中熱利用ヒートポンプシステムを利用する際に、地中に垂直、または水平に埋設し、地盤との間で熱交換をするための地下埋設設備。垂直型地中熱交換器には、一般的に地下数 10～100 m 程度を掘削するボアホール方式と、建築物の基礎杭を利用する杭方式がある。地中熱交換器は、Uチューブ等の地中熱交換パイプと充填材等から構成される。

○地中熱交換井

地中熱交換器を構築するために掘削したボーリング孔。地中熱交換井の長さは、「横引き配管埋設深度＋地中熱交換器長＋錘長」となる。

○地中熱ポテンシャルマップ

地域の地下環境(地下水流速、地下水位、温度など)の情報を基に、潜在的な地中熱利用の可能性(＝地中熱ポテンシャル)が高い地域(地中熱利用に適した地域)、低い地域を示した地図。(産総研 HP「地中熱ポテンシャルマップの作成」より一部引用)

○地中熱利用ヒートポンプ

熱源に地中熱を利用するヒートポンプのこと。

○地中熱利用ヒートポンプシステム

比較的浅部(深度約 200 m 以浅)の地中に賦存している熱エネルギー(地中熱)をヒートポンプの熱源として利用し、冷暖房や融雪などに利用するシステム。地中熱利用ヒートポンプシステムの利用に際しては、地下水を利用せず地中に熱交換器を設置するクローズドループ方式と、地下水を汲み上げて利用するオープンループ方式がある。

○地熱

地中の熱をいうが、大別して 2 つの意味に用いられている。1 つは広く地球内部に保有される熱の意味に用いられる。一方、火山や温泉などに由来する地殻中の異常な熱に対して用いられる場合がある。(地熱発電用語集)

【な行】

○二次エネルギー

ヒートポンプなどの稼働に必要なエネルギーの形態へ転換されたエネルギー源のこと。例えば、天然ガスを用いて発電所において生産される電気、原油を用いて製油所で生産されたガソリンを指す。それに対して、天然ガスや原油は一次エネルギーと呼ばれる。(エネルギー環境キーワード事典を一部引用)

○二次側システム

ヒートポンプに接続する利用側のシステムをいう。⇔一次側システム

○熱応答試験(サーマルレスポンステスト、TRT)

地盤の熱物性(見かけ熱伝導率)や熱交換能力を推定する地盤調査試験。地中熱交換器内に熱負荷を与えた循環流体を循環して得られる循環流体温度や、地中温度の経時変化を測定し解析する。試験結果は地中熱交換器の本数や長さを決定するためのデータとして利用される。熱応答試験から得られる熱物性や熱交換量は、地質や地下水流動状況によって大きく異なる。

○熱源機器

二次側に送る冷温熱を製造する機器をいい、地中熱ヒートポンプおよび補機類からなる。

○熱媒体

熱を伝える仲介物質をいい、空気調和関係では蒸気・温水・温風・油などが用いられる。(実用空調関連用語集)

【は行】

○バックグラウンド(＝リファレンス)

人為的な働きかけを受ける前にあらかじめ自然界に存在している状態。例えば放射線は自然界にもともと存在するが、放射線モニタリングなどを行う場合、自然界に存在する放射線をバックグラウンドという。(土木用語大辞典)

○ヒートアイランド現象

都市の気温が周囲より高くなる現象のこと。気温の分布図を描くと、高温域が都市を中心に島のような形状に分布することから、このように呼ばれる。都市部では、木々が少なく地面がアスファルトに覆われており、また人工排熱が多いことなどが原因となっている。ヒートアイランド現象の影響として、熱中症等の健康への被害や、感染症を媒介する蚊の越冬といった生態系の変化が懸念されている。(気象庁ホームページを一部引用)

○ヒートポンプ

低い温度の物体から熱を奪って(冷却)、高い温度の物体に熱を伝える(加熱)装置である。(地中熱利用ヒートポンプシステム改訂2版)

○ヒートポンプチラー

二次側の循環流体が水であるヒートポンプのこと。

○比熱

圧力または体積一定の条件で単位質量の物質を単位温度上昇させるのに必要な熱量。単位は $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ など。圧力一定条件のときの比熱を定圧比熱、体積一定条件のときの比熱を定積比熱と言う。(地下水用語集)

○不凍液

塩化カルシウム溶液、食塩水、塩化マグネシウム溶液、エチレングリコール水溶液など凝固点が氷点より低い溶液のこと。

○ボアホール

地面などに垂直にボーリングで空けた穴。井戸や石油・石炭などの試掘、地質調査、地震計の設置、地中熱システムなどに用いられる。(環境ビジネスオンライン 環境用語集を一部引用)

【ま行】

○見かけ熱伝導率

地下水流動の影響を含めた熱伝導率。地層中で地下水流れがある場合には、地中熱交換器周辺では熱伝導に加えて、地下水流れによる熱移流も生じるため、有効熱伝導率が見かけ上

大きくなる。地下水の流速が速いほど、見かけ熱伝導率の値は大きくなり、地中熱利用ヒートポンプシステムの運転効率が高くなる。

○モニタリング

環境効果、環境負荷、環境影響を把握するために、地下水(水位、水質、水温、地下水流向・流速)や地盤(地盤温度あるいは地中温度)の状況、システムの運転状況等を経時的に観測することをいう。一般に“モニタリング”という言葉を用いる場合には、地下水等の情報を単に取得する作業という意味のみならず、取得したデータに基づいて地下水等の客観状況を把握し、状況をコントロールしていくための対策立案を考えることを背景にしている場合が多い。(地下水用語集を一部引用)

【や行】

○有効熱伝導率

地層の伝熱性能を表す対象部分全体の平均的な熱伝導率。熱伝導率はフーリエ則における温度勾配に対する比例係数で、物体固有の物性値である。一方、地層は固相や液相、気相(不飽和帯)で構成され、固相も異なる熱伝導率のさまざまな鉱物の集合体であるため、地層の熱伝導率は、それらの異なる熱伝導率を合成した値となる。

○Uチューブ

ボアホールや基礎杭などを利用する地中熱交換器の中に挿入して、地中熱を熱媒に伝える樹脂製のパイプ。先端をU字状に接続した2本の管で、ボアホールの場合は1組または2組、基礎杭の場合は口径に応じて複数組用いられる。国内では、Uチューブの原材料として耐久性の高い高密度ポリエチレン(PE100)が一般的に用いられており、安全性・耐久性は極めて高い。

○揚水井

揚水井戸ともいう。地下水などをくみ上げるための井戸のこと。地中熱利用の場合はオープンループ方式で揚水井が作られる。

【ら行】

○ランニングコスト

設備や機器などを運用する際にかかる費用のこと。対義語はイニシャルコスト。例えばある設備を導入した際の電気代や消耗する部品のメンテナンス費用などが代表的。(金融・経済用語辞典)

【わ行】

【ん】

参考文献(50 音順)

- ・エネルギー・環境キーワード辞典 - 分野別用語一覧付 -、日本エネルギー学会編、コロナ社、2005 年 6 月
- ・金融・経済用語辞典 <http://www.finance-dictionary.com>
- ・産総研 HP「地中熱ポテンシャルマップの作成」
http://www.aist.go.jp/Portals/0/resource_images/aist_j/aistinfo/aist_today/vol11_05/vol11_05_p19.pdf
- ・実用空調関連用語集 <http://ep.daikinaircon.com/top/yogoshu/index.html>
- ・事例に学ぶ地中熱利用ヒートポンプシステム、内藤春雄著、オーム社、2014 年 12 月
- ・図解空調技術用語辞典、空調技術用語研究会編、日刊工業新聞社、1989年8月
- ・大辞林、松村明・三省堂編修所編、2019 年 9 月(第四版)
- ・「帯水層蓄熱の利用にあたって」、環境省 水・大気環境局
- ・地下水用語集、日本地下水学会編、理工図書、2011 年 10 月
- ・地中熱ヒートポンプシステム(改訂 2 版)、北海道大学環境システム工学研究室編、オーム社、2020 年 10 月
- ・地中熱ヒートポンプ施工管理マニュアル改訂版、特定非営利活動法人地中熱利用促進協会編、2022年9月
- ・土木用語大辞典、土木学会編、技報堂出版、1999 年 2 月
- ・EIC ネット・環境用語集、一般財団法人環境情報センター <http://www.eic.or.jp/ecoterm>
- ・NEDO ホームページ・用語解説 <http://www.nedo.go.jp>

2. 地中熱利用ヒートポンプシステムの事例データ集

ここでは下記の事例についてシステムの概要や、モニタリングに基づくCO2排出量削減効果などを紹介します。

- ・平成18～22年度に実施された「クールシティ推進事業 [地下水等活用型・地中熱利用型] 実証事業」
- ・平成28～令和2年度に実施された「再生可能エネルギー電気・熱自立的普及促進事業」の一部事例
- ・環境技術実証(ETV)事業のうち、地中熱利用システム技術区分として令和3年度実証認定の事業
- ・特定非営利活動法人地中熱利用促進協会のホームページにおいて公表中の事例集

(<http://www.geohpaj.org/introduction/index1/achievement>)

No.	① 所在地		② 設置施設	③ 建物種類	④ 設備用途				⑤ 工事 種類	⑥ 方式	⑦ ホアホール または 地下水深戸		⑧ 合計設備容量		⑨ ⑩ 熱交換率 (W/m ² ・K)	⑪ ⑫ 空調 対象 床面積 (m ²)	⑬ 年間 一次エネルギー 使用量削減効果		⑭ 年間 CO2排出量 削減効果		⑮ COPまたは システムCOP(SCOP)				⑯ 年度
	都道府県 名	市町村名			空調	給湯	床暖房	その他			⑦ 深度 (m)	⑧ 本数 (本)	⑨ 冷房 能力 (kW)	⑩ 暖房 能力 (kW)			⑬ 削減量 (GJ)	⑭ 削減率 (%)	⑮ 削減量 (t)	⑯ 削減率 (%)	⑰ 冷房	⑱ 暖房	⑲ 年間	⑳ 種類	
1	福岡県	福岡市	九州大学内実験用 レンガ通住宅	住宅	○				—	クロスド ループ	60	1	12	12	1.55~ 2.25	140	—	26%	—	—	4.5	3.4	—	COP	H18
2	青森県	弘前市	—	道路				融雪	—	クロスド ループ	60	1	8	—	1.2~ 1.78	370 ※1	2.86	21%	0.3	21%	3.5	—	—	COP	H19
3	岩手県	盛岡市	岩手県環境健康研究 センター	オフィス ビル	○				—	クロスド ループ	50	22	50.4	62	2.4	222	62.7	30%	7.6	53%	1.6~ 2.9	2.8~ 3.5	—	COP	H19
4	宮城県	仙台市	東北大学未来技術共 同研究センター1階	オフィス ビル	○				—	クロスド ループ	50	3	4	4	1.46	145	—	—	6.1	50%	3.8	3.2	—	COP	H20
5	北海道	赤平市	赤平オーキッド株式 会社 地中熱ヒート ポンプ利用栽培温室	農業施設	○				—	クロスド ループ	85	78	648	640	2.4	5400	—	—	270	28%	—	—	—	—	H22
6	大阪府	吹田市	大阪府立 国際児童文学館	オフィス ビル	○				—	クロスド ループ	60	8	31.1	36.2	1.65	100	4.4	8%	0.3	8%	3.0	2.8	—	COP	H18
7	栃木県	芳賀市	芳賀工業団地	オフィス ビル	○				—	クロスド ループ	20	9	18	18	0.7~1.0	90	—	—	—	—	1.3~ 1.6	0.9~ 3.0	—	SCOP	H22
8	岐阜県	岐阜市	岐阜市役所・本庁舎	庁舎	○				—	オーブン ループ	—	—	1124	—	—	14000	26	20%	26	20%	0.9	—	—	COP	H19
9	長野県	立科町	豊科温泉 権現の湯	温泉施設		○	○	浴槽 昇温	—	オーブン ループ	—	—	—	498	—	—	1263	27%	141.8	46%	—	2.8	—	COP	H21 ※2
10	愛知県	豊明市	尾三消防本部 豊明消防署	消防署	○				更新	クロスド ループ	100	18	90.6	99	2.34	2515	812	54%	39.6	53%	—	—	3.2	SCOP	H28
11	福島県	白河市	介護老人保健施設 「聖・オリーブの郷」	介護老人 保健施設	○	○			更新	クロスド ループ	100	36	258.5	271.2	1.8	—	1957	40%	164	48%	—	—	3.1	SCOP	H28
12	広島県	三次市	三次市庁舎	庁舎	○				新設	クロスド ループ	100	14	116	116	2.56	900	124	20%	8.8	20%	3.5	3.1	3.2	SCOP	H27

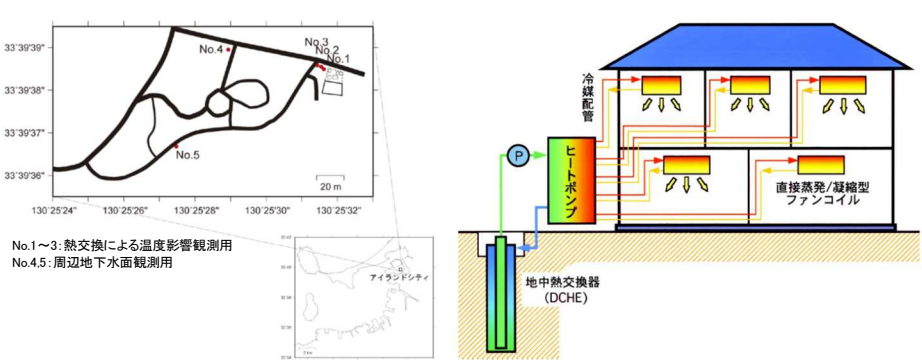
No.	① 所在地		② 設置施設	③ 建物種類	④ 設備用途				⑤ 工事 種別	⑥ 方式	⑦ ホール または 地下天井戸			合計設備容量			⑧ 有効 熱伝達率 (W/m・K)	⑨ 空間 容積 床面積 (㎡)	年間 一次エネルギー 使用量削減効果			年間 CO2排出量 削減効果			COPまたは システムCOP(SCOP)				⑩ データ 年度
	都道府県名	市町村名			空調	給湯	床暖房	その他			⑦ 深さ (m)	⑧ 本数 (本)	⑨ 冷房 能力 (kW)	⑩ 暖房 能力 (kW)	⑪ 削減率 (%)	⑫ 削減量 (GJ)			⑬ 削減率 (%)	⑭ 削減量 (t)	⑮ 削減率 (%)	⑯ 冷房	⑰ 暖房	⑱ 年間	⑲ 種類				
13	福島県	耶麻郡猪苗代町	猪苗代町庁舎	庁舎	○				更新	クロスド ループ	90	28	239	252	—	3205	—	172	27%	18.9	44%	3.9	3.1	3.2	SCOP			H26	
14	新潟県	新潟市	株式会社興和 本社ビル	事務所 テナント	○				更新	クロスド ループ	100	8	40	45	—	263	—	96	52%	5.8	52%	3.3	3.4	3.3	SCOP			H25	
15	福岡県	糟屋郡新宮町	IKEA福岡新宮	店舗	○				新設	クロスド ループ	100	70	527	530	2.18	—	1461	44%	87.4	44%	4.6	3.5	4.3	SCOP			H26		
16 ※5	神奈川県	横浜 緑区	森村学園	プール 遊戯室	○			プール 加温	新設	クロスド ループ	100	23	116.4	262	1.72	1196	—	510	28%	26.3	29%	—	—	3.4	SCOP			H23 ～ H24	
17	東京都	千代田区	一番町菅田ビル	事務所 テナント	○				更新	クロスド ループ	75	8	58	65	1.7	303	—	90	49%	3.5	49%	5.8	3.6	4.3	SCOP			H20 ～ H21	
18	秋田県	秋田市	秋田市立 山王中学校	学校	○ ※3		○		新設	クロスド ループ	50	75	130	132	1.2	780 970 ※4	—	81	25%	8.7	45%	4.9	3.5	3.9	SCOP			H22	
19	岐阜県	岐阜市	岐阜市 明徳公民館	集会所	○				更新	オープン ループ	20	2	50.4	56.5	TRT 未実施	728	—	374	71%	27	78%	5.2	3.4	—	SCOP			H29 ～ H30	
20	山形県	山形市	日本環境科学 株式会社	事務所	○				更新	オープン ループ	72	4	26.8	28.1	TRT 未実施	180	—	82	47%	4.2	47%	7.2	4.3	5.2	SCOP			H28 ～ H29	
21	福岡県	直方市	あべりあ 福岡の丘	サービス付 高齢者住宅		○	○	浴槽 昇温	新設	オープン ループ	50	2	115.5	100.2	TRT 未実施	—	—	860	39%	72	48%	3.7	3.9	3.8	SCOP			H28	
22 ※5	山形県	山形市	日本地下空間発 株式会社本社	事務所	○				更新	オープン ループ	73 54 53	3 (各1)	206	180	TRT 未実施	800	—	445	23%	39.3	30%	4.3	3.9	4.0	SCOP			H30 ～ H31	
23	北海道	釧路市 清里町	清里町情報交流 施設「さよーる」	交流施設	○				新設	クロスド ループ	80	8	53.1	52.4	1.82	562	—	112	22%	11	33%	3.7	2.7	2.9	SCOP			H31	
24	宮城県	本吉郡 前子町	前子町庁舎 ・総合支所	庁舎	○				新設	クロスド ループ	100	29	159.6	152	5.8	835	—	298	35%	25.9	46%	4.6	3.3	3.5	SCOP			H30	
25	山形県	山形市	情報コミュニケーション センター	交流施設	○				新設	オープン ループ	114	1	89.5	100.5	TRT 未実施	473	—	27	15%	2.8	24%	3.7	3.0	3.2	SCOP			H31	
26	北海道	札幌市	株式会社 アリアプランニング 本社	事務所	○		○	融雪	新設	併用	100 50 ※6	6 3 ※6	38	40	2.16	440	—	165 ※7	64% ※7	不明	不明	6.5 ※8	3.4 ※8	3.8 ※8	SCOP			R2	

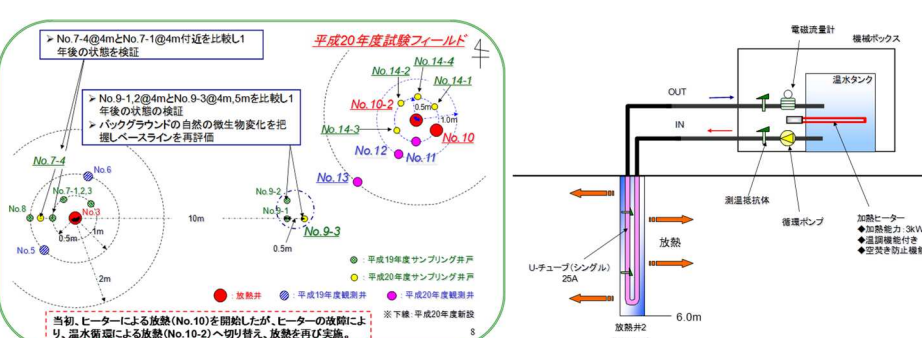
※1 設置面積としての値である。
 ※2 2009/8/27～2010/8/28の期間
 ※3 冷暖運転のみ行っている。
 ※4 上段が冷房の対象床面積で、下段が床暖房の面積である。
 ※5 クールシティ推進事業としても採択されていたが、紹介するデータは事業完了後のものである。
 ※6 1段がボアホールの深さ/本数、下段が排水井・通気井の深さ/本数である。
 ※7 建屋全体の内、空調用途の利用部分のみのエネルギー削減効果としての値である。
 ※8 2020年7月1日～2021年2月2日のデータから算出した値である。

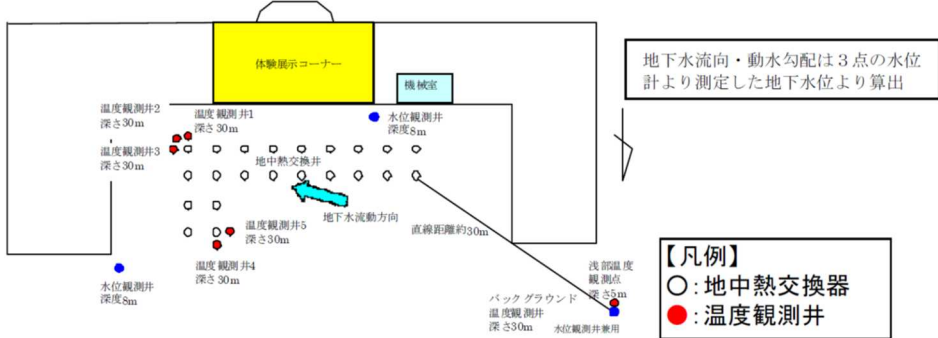
1～9：クールシティ推進事業の事例
 10～22：地中熱利用促進協会のホームページに掲載されている事例
 23～25：再生可能エネルギー・電気・熱自立的普及促進事業の事例
 26：環境技術実証(ETV)事業の事例

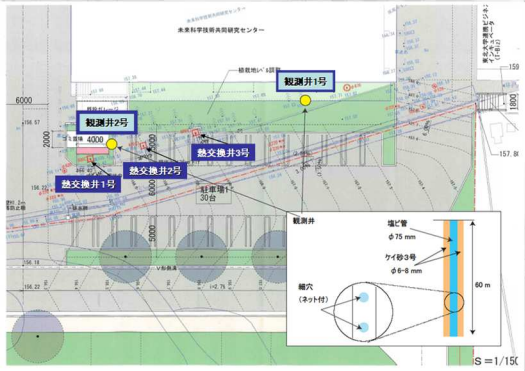
クールシティ推進事業の事例概要紹介

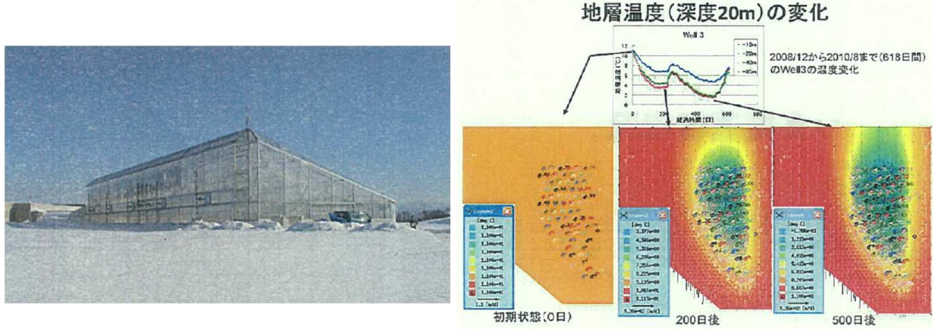
●クローズドループ

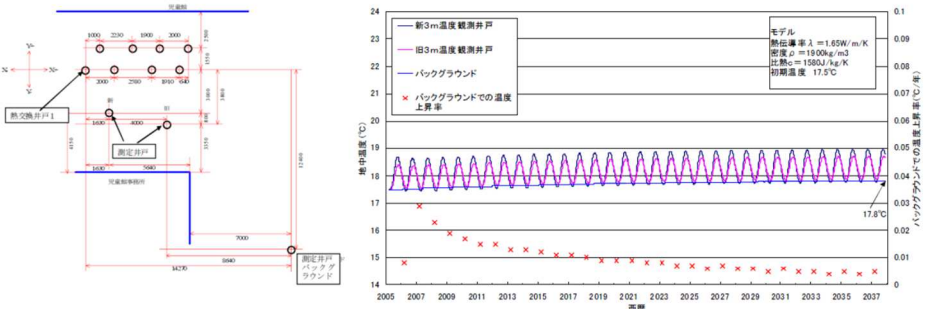
実証事業名	地中熱利用冷暖房システム稼働に伴う地盤環境・地下環境への影響評価
事業の主な目的	地中温度変化の範囲および経年累積影響を調査しました。
施設の概要等	【名称】九州大学地中熱利用住宅用冷暖房システム(実験用レンガ造住宅) 【冷暖房面積】140 m² 【ヒートポンプ規模】冷暖房 12 kW(4 室対応 8 kW+1 室対応 4 kW)  建物施設と観測井の配置図および施設概要図
事業の主な成果	実測値: 温度観測井が地下水の流れの上流側に位置しているため、ほとんど温度の変化は見られませんでした。 シミュレーション: 下流側の温度変化を予測すると、3 mの地点で冷暖房時ともに2℃の変化が起きましたが10 m離れるとほとんど影響が見られない結果でした。実証事業のシステムでは冷暖房による温度変化は休止期間でも回復せず年間を通じた温度変化の累積は最大0.4℃の温度変化であると予測されました。

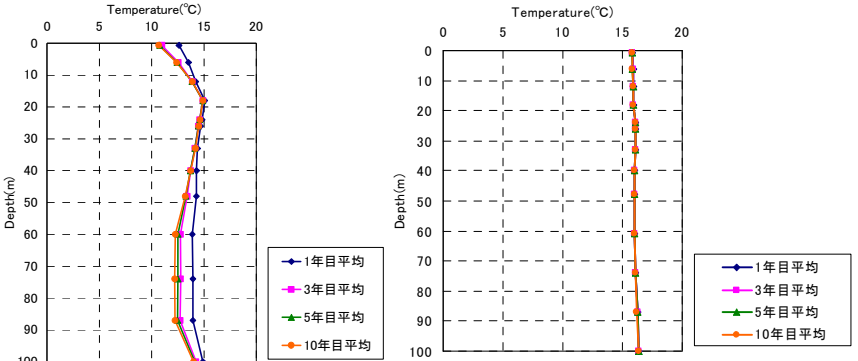
実証事業名	地中放熱による土壌内生態系への影響調査
事業の主な目的	地中への過負荷な放熱による生物生息環境の変化を調査しました。
施設の概要等	【融雪面積】370 m² 【ヒートポンプ規模】8 kW  放熱井と観測井の配置図および施設概要図
事業の主な成果	30～35℃(現場試験)において土壌微生物相が元に戻り、環境影響が認められませんでした。通常の地中熱利用ヒートポンプシステムによる冷房運転では、35～40℃程度に加熱された熱媒体が地中熱交換井を循環して、土壌温度が30℃程度まで上昇しますが、このような条件では微生物への影響は認められないといえます。それ故、地中熱利用ヒートポンプシステムの優位性を発揮する程度の温度以内であれば、問題はないとの結果が得られました。

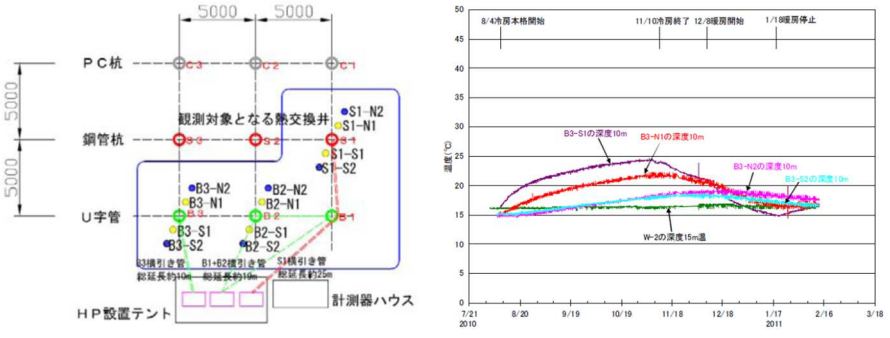
実証事業名	岩手県環境保健研究センター地中熱利用ヒートポンプ冷暖房システム実証事業
事業の主な目的	地下水の流動が大きい地域において、大規模な地中熱利用ヒートポンプによる周辺への熱的影響を調査しました。
施設の概要等	【名称】岩手県環境保健研究センター 【冷暖房面積】222 m² 【ヒートポンプ規模】冷房 50.4 kW、暖房 62.0 kW  建物施設と地中熱交換井の配置図
事業の主な成果	暖房使用時に、地中熱交換井から1 m 下流側で最大 2℃の地中温度低下がみられました。 また、10 年間のシミュレーション結果では、影響範囲は数 km におよぶものの温度変化幅は 0.5℃以内であり、周辺の地下水・熱利用への大きな影響はないという結果が得られました。

実証事業名	東北大学青葉山新キャンパスへの地中熱利用ヒートポンプシステム導入の原位置実証事業
事業の主な目的	地下水の流動が大きい地域において、地中熱利用ヒートポンプによる周辺への熱的影響を調査しました。
施設の概要等	【名称】東北大学未来科学技術共同研究センター(1F) 【冷暖房面積】145 m² 【ヒートポンプ規模】冷暖房 4 kW  建物施設と地中熱交換井と観測井の配置図
事業の主な成果	実測値：地中熱交換井から 3.6 m の地点において温度変化はほとんど無いという結果が得られました。 シミュレーション：30 年後における熱源水温度は、継続的にバランスされており、井戸間隔を 6 m にすれば、相互の温度干渉は少なくなるという結果が得られました。

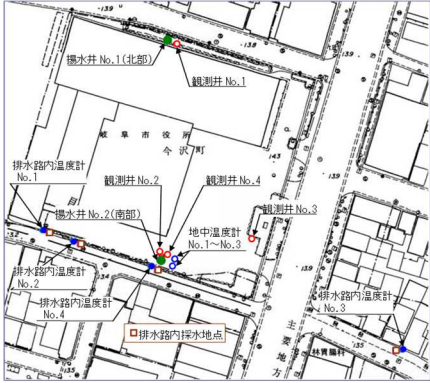
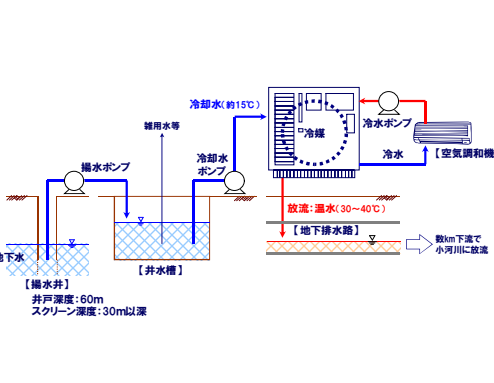
実証事業名	大規模の垂直型地中熱交換器群をもつ地中熱ヒートポンプ冷暖房システムにおける地盤温度環境変化の評価業務
事業の主な目的	群孔方式の地中熱交換器を用いた大規模な地中熱利用ヒートポンプ施設(出力 648・640 kW)において、運転状況や周辺への熱的負荷の評価を行いました。
施設の概要等	【名称】赤平オーキッド株式会社 地中熱ヒートポンプ利用栽培温室 【冷暖房面積】5400 m² 【ヒートポンプ規模】冷房 648 kW、暖房 640 kW  温室写真と地層温度の変化のシミュレーション結果図
事業の主な成果	10月1日から12月末までの観測において、地盤温度は9℃程度から4℃まで低下し、シミュレーションにおいて長期間運転した際の影響について推定しました。 本施設では、年間の冷暖房のバランスが取れた運転を行う場合は周辺地盤温度への影響は小さいという結果になりましたが、連続的な暖房により過負荷運転を行うと、運転効率の低下、地盤温度の0℃以下の低下、地下水下流側への熱的影響などの可能性があることが分かり、適正な設計規模や運転管理の重要性が確認されました。

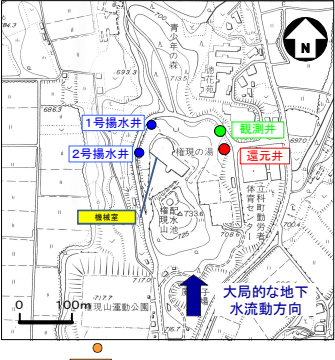
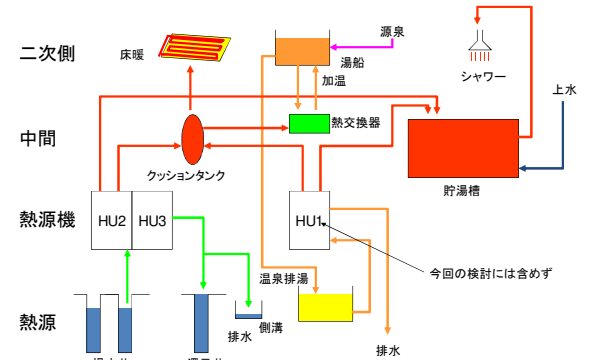
実証事業名	大阪府立国際児童文学館地中熱ヒートポンプシステム実証事業
事業の主な目的	地下水の流動がほとんどない地域において、冷房に偏った運転を行う地中熱利用ヒートポンプ施設による地盤温度への影響や運転効率について調査しました。
施設の概要等	【名称】大阪府立国際児童文学館 【冷暖房面積】約 100 m² 【ヒートポンプ規模】冷暖房 31.1 kW、暖房 36.2 kW  観測機器等の配置図 30年間の温度変化の予測図
事業の主な成果	地中熱交換井から1 mの地点において、深度20 m以深の地下部はほぼ一定の温度でした。 またシミュレーションによると、30年後の地中熱交換井からの距離が3 mの地点において、0.3℃の温度上昇という結果であり、周辺の地下水・熱利用への大きな影響はなく、また運転効率にも大きな変化はないという結果が得られました。

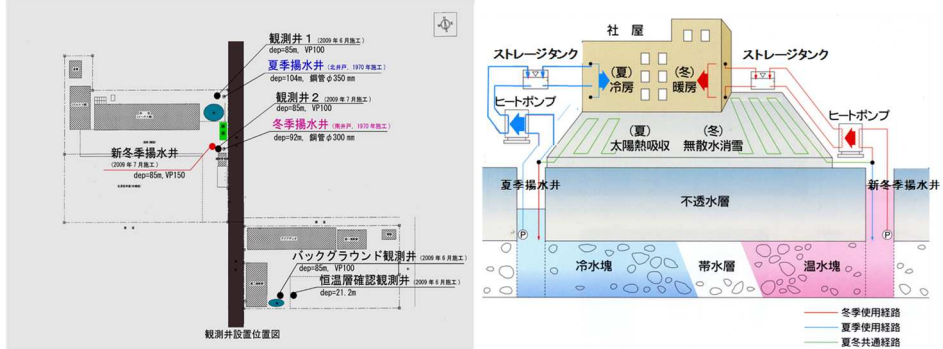
実証事業名	地下水欠如地域における地中熱ヒートポンプシステム実証事業
事業の主な目的	地下水の流動がほとんどない地域において、大規模な地中熱利用ヒートポンプによる周辺への熱的影響を調査しました。
施設の概要等	【名称】学校法人森村学園 屋内プール・幼稚園遊戯室 【冷暖房面積】1200 m² 【ヒートポンプ規模】冷房 116 kW、暖房 131 kW  現況運転と熱バランスの取れた運転の場合の温度変化の予測図
事業の主な成果	本施設では暖房・給湯およびプール加温用として、採熱に大きく偏った運転がされていますが、シミュレーション結果では 10 年後の地中温度の変化はわずかであり、周辺の地中温度や運転効率への大きな影響はないという結果が得られました。 また、採排熱がバランスした運転を行うことで地中温度の変化を小さくすることができることもシミュレーションにより確認しました。

実証事業名	地中熱利用ヒートポンプシステム過負荷運転実証試験
事業の主な目的	意図的に過負荷運転を行った場合の環境影響について調査しました。
施設の概要等	【名称】芳賀工業団地 【冷暖房面積】90 m² 【ヒートポンプ規模】冷暖房 10 kW  計測機器等の配置図と地中温度計測結果
事業の主な成果	過負荷運転により、COP および省エネ性が低下し、CO₂も空気熱源ヒートポンプよりも多く排出する結果となり、このような状況にならないようにするためには、負荷に対して適切な地中熱交換井が必要という結果になりました。 過負荷運転により、最も温度変化が大きいケースで8℃程度の温度変化があり、他の実証事業と比較すると、温度変化幅は大きい結果となりましたが、シミュレーションによると10年後の温度変化は0.4℃程度であり、この規模の施設では周辺熱利用者への障害はほとんどない結果となりました。

●オープンループ

実証事業名	大型施設での地下水揚水型冷房機器の長期稼動に伴う地下水・地盤環境への影響評価事業
事業の主な目的	大規模な地下水揚水を行なうオープンループ方式の地中熱利用ヒートポンプによる地下水位・水質および放流先地表水の水質への影響を調査しました。
施設の概要等	【名称】岐阜市役所・本庁舎 【冷暖房面積】14,000 m² 【ヒートポンプ規模】冷房 281 kW×4 基, 【地下水揚水量】約 800 m³/日   冷房対象建物と観測井の配置図および施設概要
事業の主な成果	揚水に伴い地下水位低下が生じますが、揚水が停止すると速やかに水位回復する傾向にありました。浅層では、揚水に伴い若干の水位低下が生じましたが、揚水による水位への影響は殆どありませんでした。このため、地下水の塩水化による周辺井戸利用者への障害は少ないと考えられます。温度観測井では温度変化がほとんどなく、オープンループ型[地下水採熱型]では地盤温度への影響はほとんどないと考えられます。 揚水井の水質と利用後の放流水の水質に殆ど変化はありませんでした。また、放流地点下流の排水路内の水質にも殆ど変化が認められませんでした。

実証事業名	立科温泉 権現の湯 地下水利用ヒートポンプシステム実証事業
事業の主な目的	大規模な地下水揚水を行なうオープンループ方式の地中熱利用ヒートポンプによる地下水・地盤への温度の影響を調査しました。
施設の概要等	【名称】立科温泉 権現の湯 【ヒートポンプ規模】給湯 165.6 kW×2 基, 加熱 83.2 kW×2 基 【地下水揚水量】500~700 m³/日   建物施設と揚水井・還元井・観測井の配置図および井水と熱の利用フロー
事業の主な成果	【実測値】 帯水層のある深度 22 m 以深では温度は上昇傾向にあるが、温度の変化幅は 2~3℃程度でした。ただし、還元井から温度観測井までの距離が 30 m 程度であり、周辺井戸利用者への障害を評価するのは難しい。 【シミュレーション】 還元井から 100 m 離れた地点で 10 年後に 3℃程度の変化という結果でした。

実証事業名	帯水層蓄熱による地下水利用ヒートポンプ冷暖房システム実証事業
事業の主な目的	大規模な地下水揚水を行なうオープンループ方式の地中熱利用ヒートポンプによる地下水・地盤への温度並びに地下水質の影響を調査しました。
施設の概要等	【名称】日本地下水開発株式会社 【冷暖房面積】840 m² 【ヒートポンプ規模】冷房 90～100 kW、暖房 90～100 kW 【地下水揚水量】夏期 約 100 m³/日、冬期 約 260 m³/日  冷暖房建物と地中熱交換井の配置図および施設概要図
事業の主な成果	【地下水温への影響】 ・実測値：地下水温度は年間を通じてほぼ一定でした。このため、周辺井戸利用者への影響は無いと考えられます。 ・シミュレーション：20年稼働した段階での周辺地下水温度との温度差1℃の最大影響範囲は65 m でした。周辺井戸利用者への影響はあるものの、支障が生じる程度では無いと考えられます。 【地下水質】 施設稼働に伴う継続的な水質の変化傾向は見られませんでした。

3. モニタリングデータによる地盤温度影響解析等

環境省が実施した補助事業で得られたクローズドループ方式についてのモニタリングデータを活用し「地下水・地盤環境への影響分析(環境影響)」の観点から解析した結果を紹介します。

3.1 採熱による稼働効率への影響

小規模施設(ヒートポンプ能力20 kW未満)で、主に暖房利用された場合を例に、ヒートポンプ入口温度と成績係数(COP)の関係を整理してみると、ヒートポンプ入口温度が低くなるほど、成績係数(COP)が低下することがわかります(図R 3-1～図R 3-3)。なお、本施設の概要や稼働状況は本論の4.4(6)にも示します。



図 R 3-1 暖房利用が中心の小規模施設の地盤温度とヒートポンプ入口温度変化

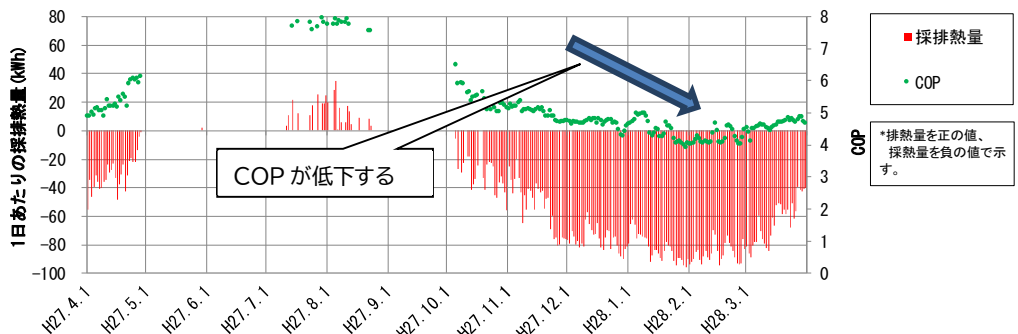


図 R 3-2 暖房利用が中心の小規模施設での採排熱量と COP 変化事例

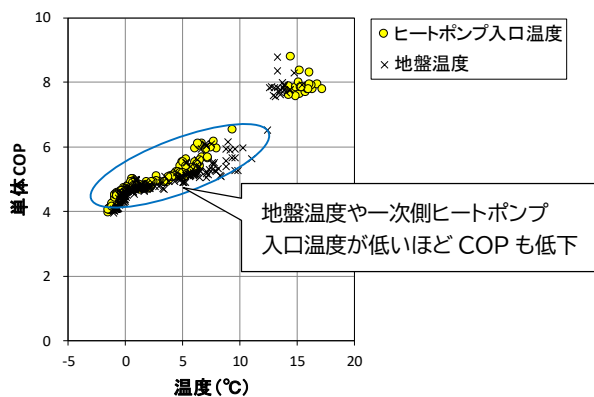
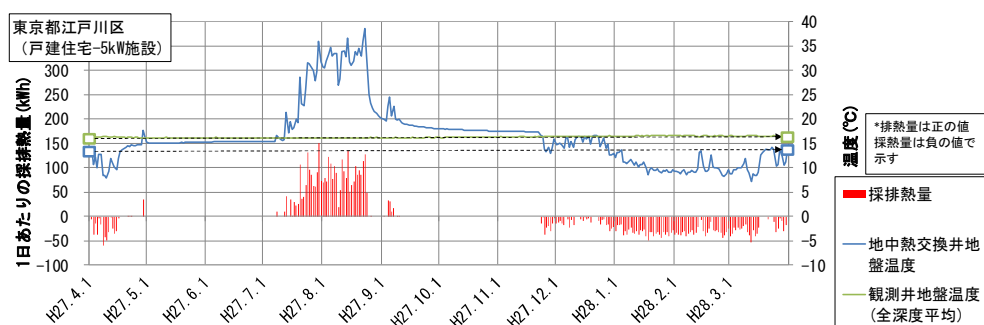


図 R 3-3 暖房利用が中心の小規模施設での COP と地盤温度および HP 入口温度との関係

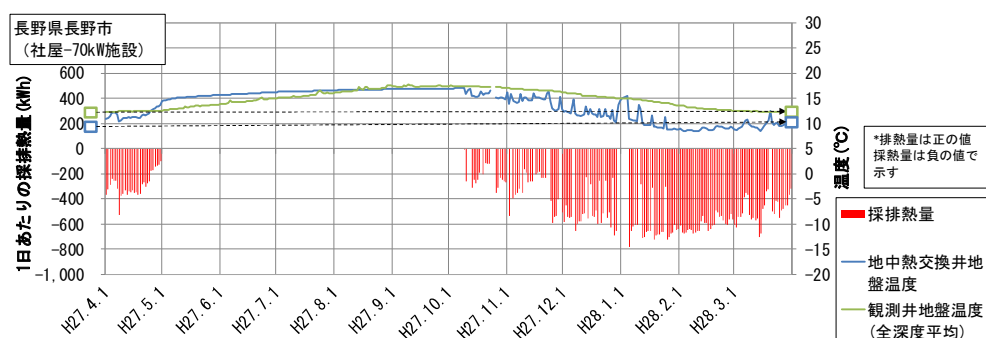
3.2 設備稼働による地盤温度への影響

別の例では、地中熱交換井から約3 mの離隔に設けられた観測井(30 m深)での地盤温度は、稼働による温度影響を受けず、年間を通じて一定で推移しました(図R 3-4)。一方、中規模施設の例では、格子状に配置された地中熱交換井(孔井間距離3.5 m)の間に設置された観測井で、季節的な変動が見られるものの、採熱時に大きく温度影響を受ける状況は見られませんでした(図R 3-5)。



※観測井地盤温度は、5 深度（地下 10～30 m で 5 m 間隔）で測定された温度の平均値。

図 R 3-4 小規模施設(東京都江戸川区:冷暖房)での採排熱量と地盤温度変化



※観測井地盤温度は、6 深度（地下 2, 5, 10, 20, 30, 40m）で測定された温度の平均値。

図 R 3-5 中規模施設(長野県長野市:暖房のみ)での採排熱量と地盤温度変化

3.3 長期的な稼働による地盤温度への影響

小規模施設(北海道札幌市の戸建住宅、暖房を中心とした稼働)を対象に、地盤温度変化の空間的な広がり、その将来予測をシミュレーションした事例です。将来予測には、この施設で取得された1年間のモニタリングデータを稼働条件として与え、これが 20 年間継続して行われた場合を想定しました。

暖房による地盤からの採熱が多いため、地中熱交換井内の平均地盤温度は、年数が経つほど低下していますが、その温度低下量はわずかで、地中熱交換井周辺に限られています(図 R 3-6)。また深度方向についての地盤温度については、難透水層では採熱による影響が残存するものの、地中熱交換井周辺に限られ、その温度変化はわずかです。一方、高透水層では、上流側からの地下水流れにより、ヒートポンプ停止後には、冷熱が下流側へ消散される状況がうかがえます(図 R 3-7)。地盤温度変化が地中熱交換井周辺に限られる結果は、“複数の地中熱交換井を設置する場合には、互いの熱干渉を避けるために 4 m以上距離を置くことが必要”との文献^{※1}とも整合しています。

このように小規模施設では、暖房中心に稼働しても、その熱影響範囲は地中熱交換器周辺に限られ、長期的な温度変化はわずかであることが分かります。

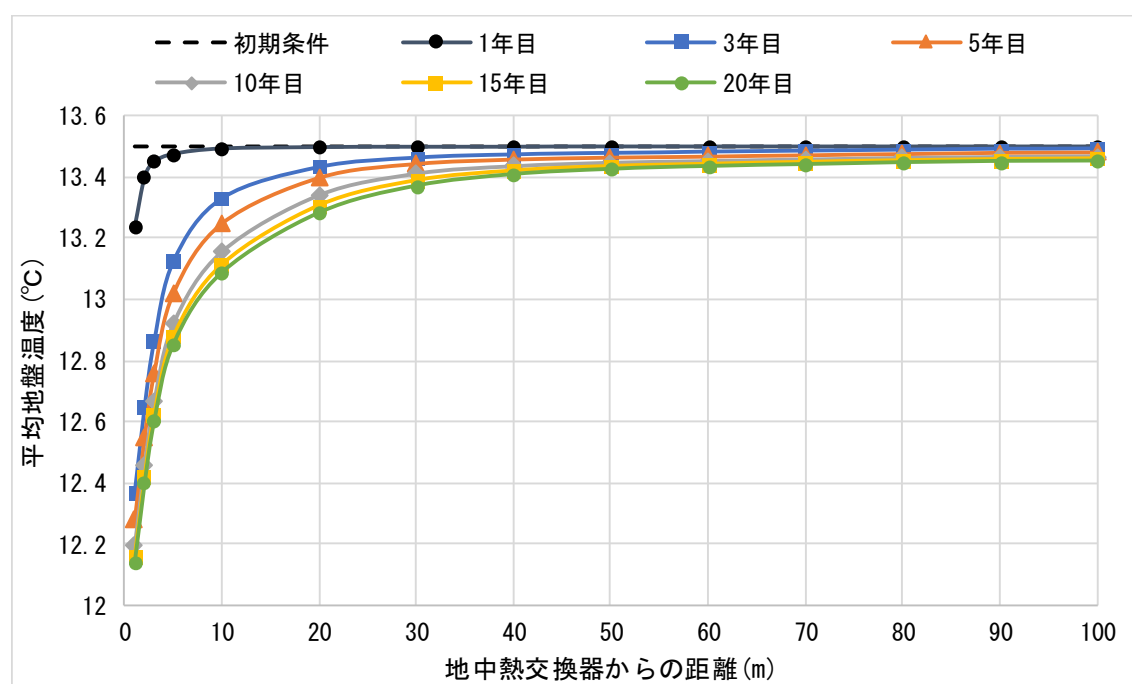


図 R 3-6 シミュレーション結果に基づく地中熱交換器からの距離と平均地盤温度の関係
(各年稼働最終日の温度)

※1北海道大学地中熱利用システム工学講座著、地中熱ヒートポンプシステム(改訂2版)、オーム社、2020。

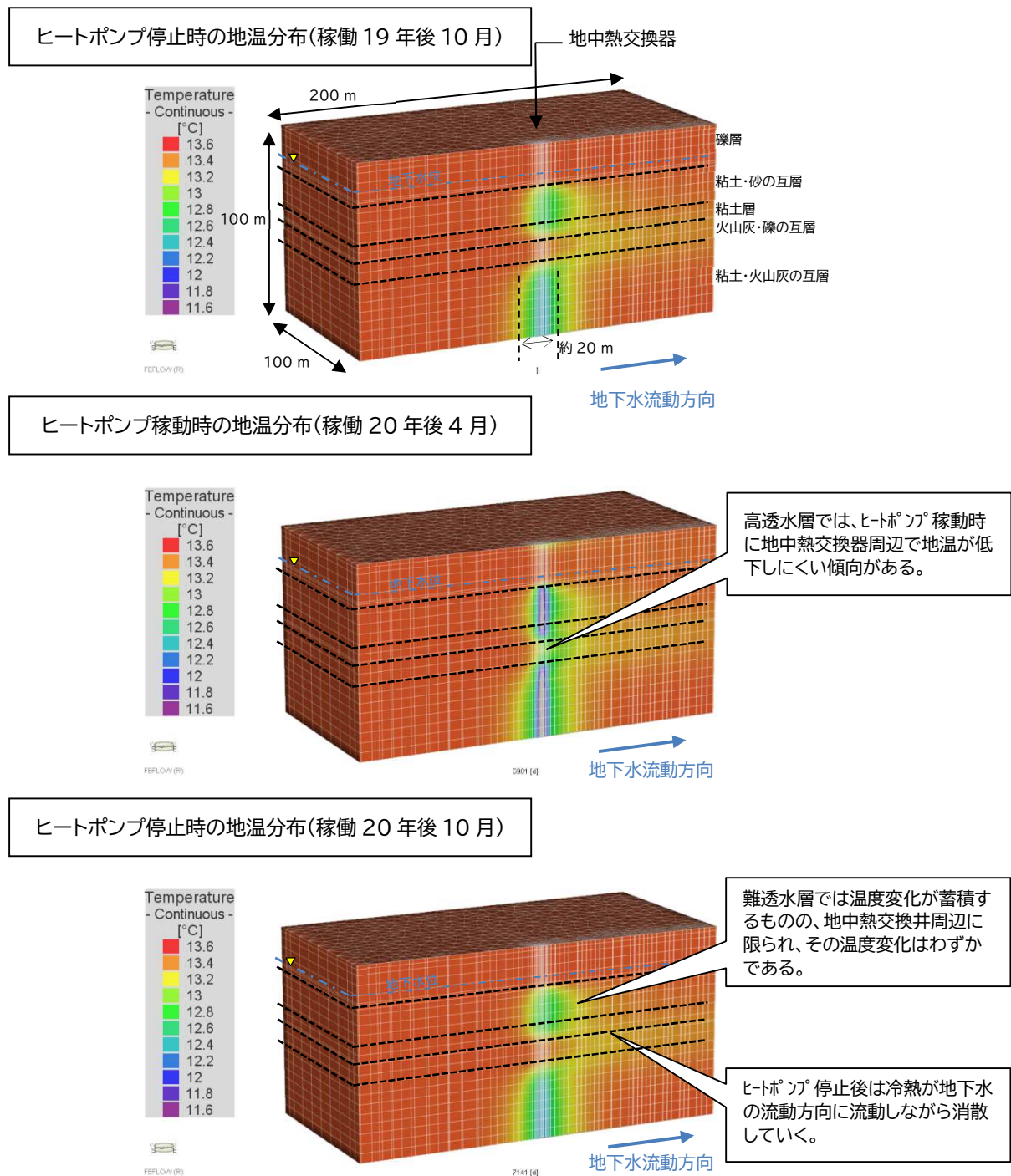


図 R 3-7 シミュレーションモデルによる試算例

4. 地中熱利用による地下微生物への影響評価事例

4.1 環境省「環境配慮型地中熱利用システムの構築実証事業」(2015～2017 年度)

本実証事業は、地中熱利用が地下の微生物生態系に与える影響について定量的に評価する手法の確立を目的として行われました。図 R 4-1 には実験フィールド平面図を、図 R 4-2 には、実証試験の調査フロー図を示しています。

図 R 4-1 に示すように、実証事業フィールドは 2 段のコイル型水平式地中熱交換器を 2 m の深さに敷設した加熱エリア(A)と、何も手を加えていないバックグラウンドエリア(B)に分けられます。実証フィールドの地盤は砂質細粒土です。加熱エリア(A)では 2 年の間、熱交換器を断続的な冷暖房運転(冷房 2 回、暖房 2 回)に用い、その際の地盤中の地下微生物群集構造の経時変化をバックグラウンドエリア(B)のものと比較しました。様々な土質について全てを確認することは難しいのですが、より多くの種類で状況をみるために、事業の最終年には、フィールドの一部を畑土(置換土壌①)および粘性土(置換土壌②)に入れ替え、砂質細粒土以外の異なる土質の地下微生物についても地中熱による影響の確認をしています。

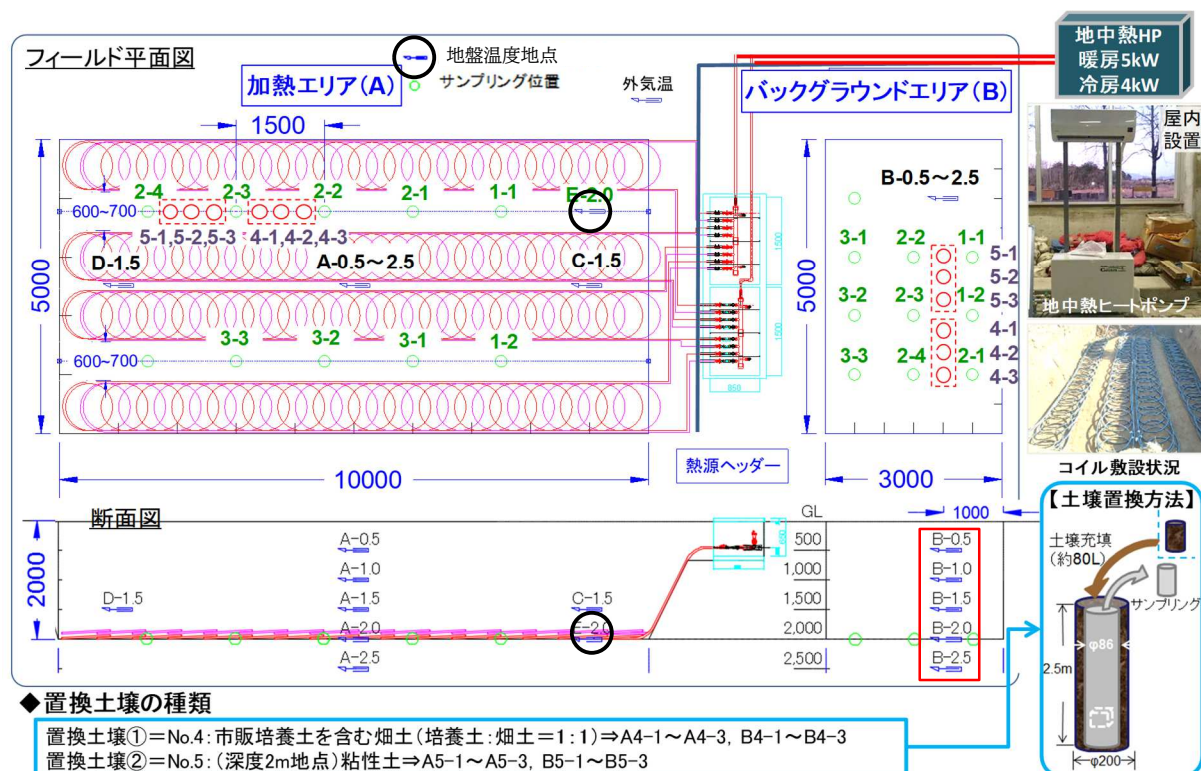


図 R 4-1 実証事業フィールドの平面図

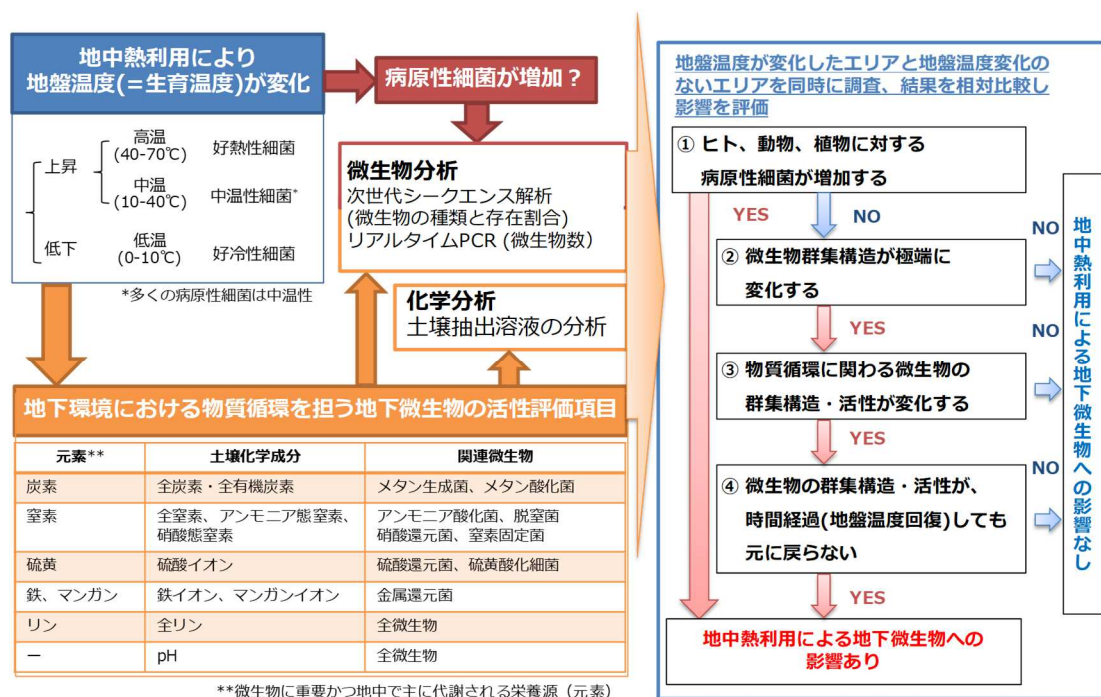


図 R 4-2 実証試験の調査フロー

実際の試験では、図 R 4-3 に示すように、現地地盤から採取した試料について、コア試料の中心部から微生物分析のための試料を採取、その他の部分の試料を化学分析に用いました。地下微生物については、試料から抽出した DNA をリアルタイム PCR 法や次世代シーケンス解析※2により調べ、統計的な検定を行うことで、地中熱利用による地下微生物への影響を調べました。調査項目は細菌数の経時変化、物質循環に関わる微生物数、試料からの溶出成分濃度の変化及び微生物群集構造の経時変化としています。

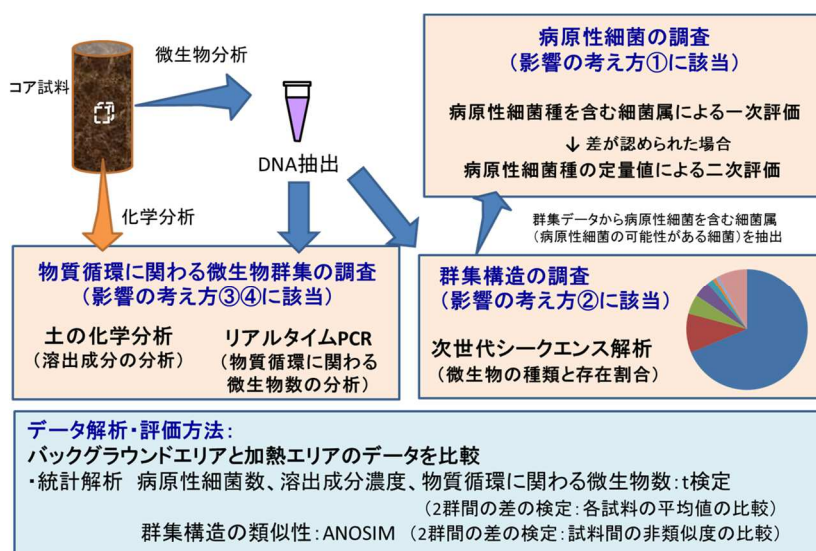


図 R 4-3 実証事業の調査概要

※2リアルタイム PCR: ポリメラーゼ連鎖反応(Polymerase Chain Reaction)による遺伝子の増幅をリアルタイムに検出して定量する方法。次世代シーケンス解析:断片化された多数の塩基配列を同時並行的に解読する解析方法。

表 R 4-1 砂質細粒土における物質循環に関わる微生物数・化学分析の調査結果

反応	調査項目・結果			
	関連物質(化学分析:10項目)		関与する細菌(リアルタイムPCR:9項目)	
鉄・マンガン還元	鉄(Fe^{2+})	検出せず(0.1mg/kg)* ¹	金属還元細菌 (鉄・マンガン)	エリア間で細菌数に差が認められない
	マンガン(Mn^{2+})	検出せず(0.1mg/kg)* ¹		
硫酸還元	硫酸(SO_4^{2-})	暖房①で、エリア間での有意差が認められた* ²	硫酸還元細菌	
			硫黄酸化細菌	
メタン生成	全炭素	エリア間で濃度に差が認められない	メタン生成菌	検出せず(3.6×10^3 copies/g)* ¹
	全有機炭素	エリア間で濃度に差が認められない	メタン酸化細菌	検出せず(8.4×10^3 copies/g)* ¹
硝酸還元 窒素固定	硝酸(NO_3^-)	検出せず(1mg/kg)* ¹	硝酸還元細菌	検出せず(8.6×10^3 copies/g)* ¹
	アンモニア (NH_4^+)	検出せず(1mg/kg)* ¹	アンモニア酸化細菌	検出せず(1.8×10^4 copies/g)* ¹
	全窒素	検出せず(2 mg/kg)* ¹	脱窒菌	検出せず(1.3×10^4 copies/g)* ¹
			窒素固定菌	検出せず(5.1×10^3 copies/g)* ¹
-	全リン	検出せず(0.1mg/kg)* ¹		
	pH	冷房②で、エリア間での有意差が認められた* ³		

*1: 定量下限値

*2 : 暖房①期間中の硫酸イオン濃度は、文献報告値の範囲内に収まることから影響は小さいと考えられる。

*3 : 冷房②期間中のpHは文献報告値の範囲内に収まることから影響は小さいと考えられる。

本実証試験の概要は以下のとおりです。

実証事業フィールドにおいて、地中熱利用ヒートポンプ(GSHP)システムによる冷房運転および暖房運転を2年間にわたり長期間実施しました。

その結果、各運転時の地中熱交換器出口温度は概ね適切な温度で推移し、地中を熱源とする優位性を外気温に対し確保できる温度範囲となりました。また、計9回行ったサンプリング地点の予想地盤温度は2年間の冷暖房期間を通じて8.1℃～28.8℃の間で推移しており、十分に加熱(採排熱)した土壌を対象にサンプリングができました。

全期間を通じた実証事業フィールドにおけるサンプリング土壌試料(砂質細粒土)を対象に微生物解析および土壌溶出溶液の化学分析を実施した結果、地中熱利用箇所(加熱エリア)と非利用箇所(バックグラウンドエリア)とで有意な違いは見られませんでした。

以上のことから本実証試験の結果では、地中熱利用による地下微生物への影響は確認されませんでした。

4.2 NEDO「再生可能エネルギー熱利用技術開発」(2014～2018 年度) 「高効率帯水層蓄熱システムの開発」

NEDO「再生可能エネルギー熱利用技術開発」(2014～2018 年度)における「高効率帯水層蓄熱システムの開発」の一部である「温度変化による帯水層蓄熱システムの運転限界評価」では、帯水層蓄熱システムによる地下環境に対する運転影響の検討を目的として、地下水温の変化が地下微生物に与える影響について調査しました。

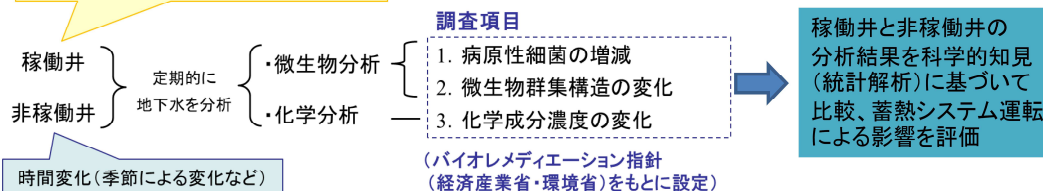
高効率帯水層蓄熱システムの開発(中外テクノス)

(再委託)

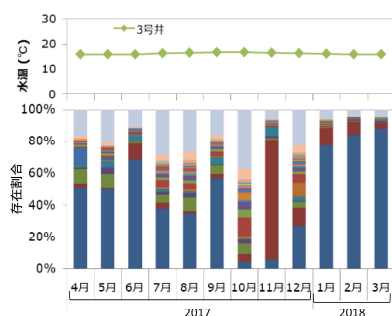
①-4)温度変化による帯水層蓄熱システムの運転影響検討

- ◆ 蓄熱システム運転による水温変化が地下水水質に及ぼす影響を調査

蓄熱システムによる温度変化+時間変化



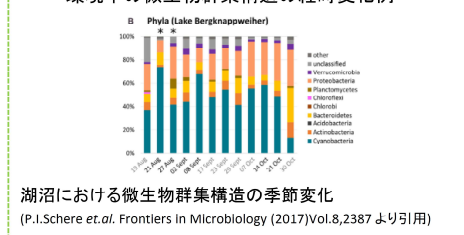
- 非稼働井(水温変化なし)における微生物群集構造の経時変化



(2017.4月～2018.3月)
水温変化にかかわらず
群集構造が変化した。

蓄熱システムによる
温度負荷以外の
影響と考えられる

- 環境中の微生物群集構造の経時変化例



- ✓ 自然環境中の微生物群集構造は時間経過に伴い変化する

稼働井と非稼働井で変動幅に著しい違いが認められない場合、蓄熱システム運転による影響はないと考えられる。

11/21

図 R 4-4 蓄熱システム運転による水温変化が地下水水質に及ぼす影響など

(出典:NEDO 2019 年度成果報告会 資料)

本研究では地下水試料を複数の温度で培養し、温度変化が地下微生物に与える影響について、①病原性細菌とその近縁細菌種、②群集構造変化、③微生物代謝に関連する化学種、に着目して分析し統計的に評価しました。

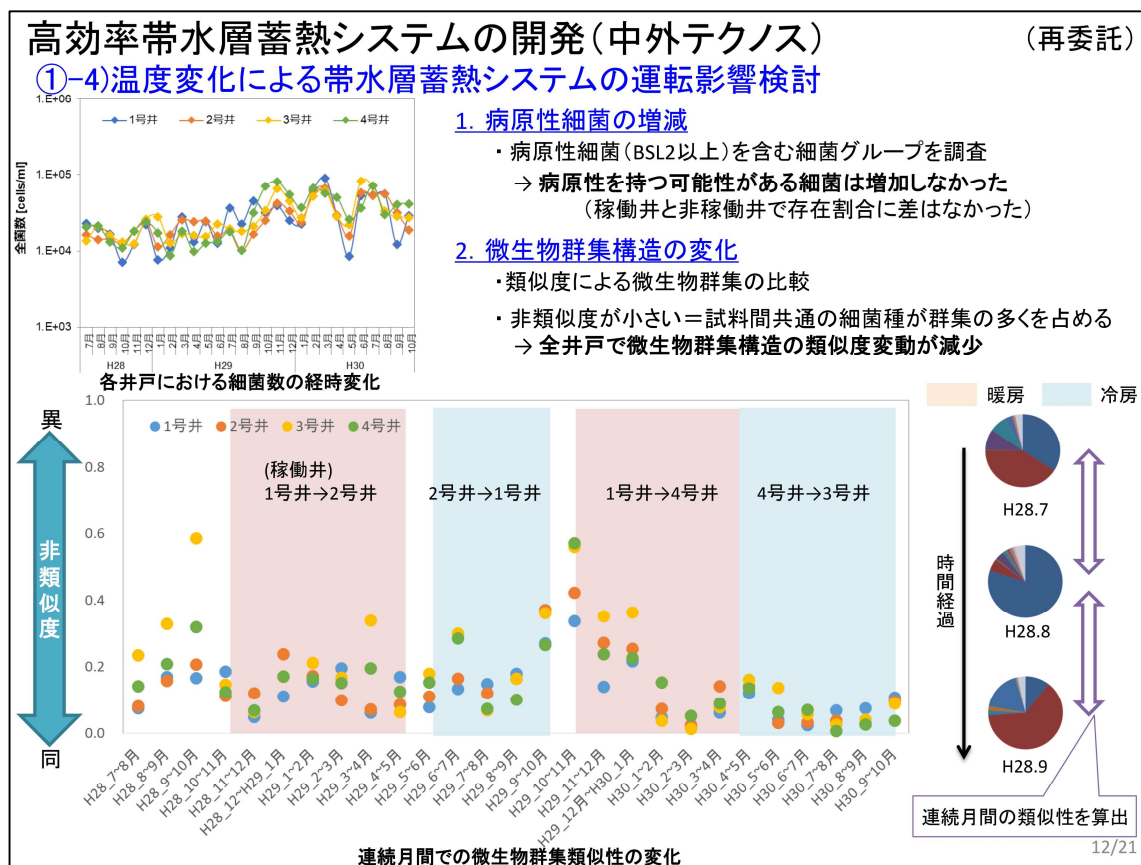


図 R 4-5 蓄熱システムの運転による微生物等の変化

(出典:NEDO 2019 年度成果報告会 資料)

病原性細菌とその近縁細菌種は環境中に普遍的に存在するため、全ての試料から極めて低頻度で検出されましたが、原位置地下水温度(15℃)とその他の培養温度における当該細菌種の経時変化は、統計的に有意な差異は認められませんでした。また、微生物群集構造の変化や微生物代謝に関連する化学種濃度の変化にも、同様に統計的な差異は認められませんでした。

この事例における培養試験結果では、「本事業の運転条件(採水時地下水水温:運転前平均地下水水温-5℃～+8℃)において、帯水層蓄熱システム稼働による地下環境への影響は認められないことが分かった」となっています。

詳しくは、NEDO「再生可能エネルギー熱利用技術開発」の事後評価公表をご覧ください。

https://www.nedo.go.jp/introducing/iinkai/ZZBF_100378.html

4.3 国立研究開発法人科学技術振興機構「戦略的創造研究推進事業」 「地圏熱エネルギー利用を考慮した地下水管理手法の開発」 (平成 22 年 10 月～平成 28 年 3 月)

国立研究開発法人科学技術振興機構の「戦略的創造研究推進事業」において行われた「地圏熱エネルギー利用を考慮した地下水管理手法の開発」(平成 22 年 10 月～平成 28 年 3 月)では、地中熱利用ヒートポンプシステムや帯水層熱エネルギー貯留などの地圏熱利用システムの実用化により地圏の熱的環境が変化し、地下水水質や地圏生態系に影響を与える恐れを背景とした「室内試験による地圏熱環境の変化が微生物叢^{※3}に与える影響-地圏熱・地下水利用による地圏環境変化の把握」研究があります。

本事業では、室内試験により地圏熱利用時の地圏の温度環境を再現し、異なる温度環境が微生物叢に与える影響を明らかにするため、3 サイトで採取した 9 種類のコア試料を異なる温度環境下(5、15、25、40 °C)で保存し、一定期間(6 ヶ月、12 ヶ月)後に DNA を抽出して、微生物叢の変化を PCR-DGGE で調べました。

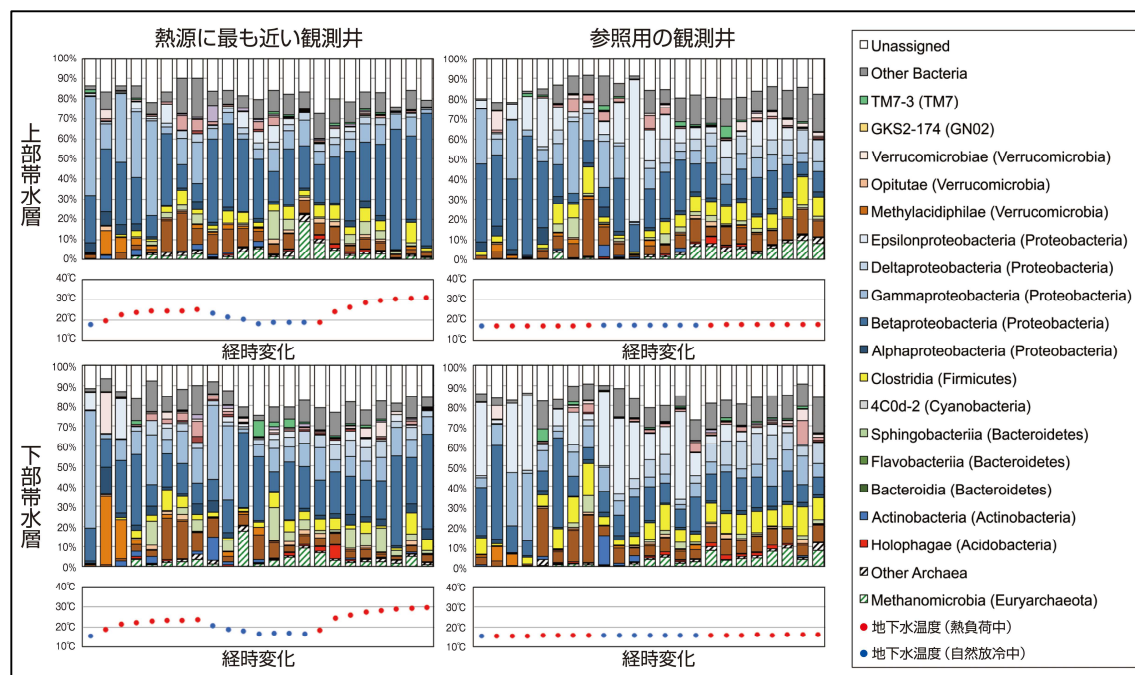


図 R 4-6 熱源に最も近い観測井(左)と参照用の観測井(右)の上部海成層と下部非海成層における微生物叢(綱レベル)と地下水温の経時的変化
(出典:CREST「地圏熱エネルギー利用を考慮した地下水管理手法の開発」報告資料)

その結果、微生物叢についての PCR-DGGE の結果をもとに、程度の差はあるものの全てのコア試料のバクテリア群集構造において、初期試料からの変化が認められました。

これらの微生物の増減は、地下水水質にすぐに大きな変化を及ぼすものではなく、また今回の実験では病原性をもつ微生物の増加も見られませんでした。

※3 微生物叢(びせいぶつそう)－多様な微生物の集合体のこと。

以上より堆積物中の微生物叢は温度変化の影響によって変化することが明らかとなりましたが、微生物叢がどのように変化するかは、初期の微生物叢や堆積物の種類によって異なることが示唆されました。

詳しくは、国立研究開発法人科学技術振興機構「戦略的創造研究推進事業」研究年次報告と成果をご覧ください。

<https://www.jst.go.jp/crest/water/publication/index.html>

参考：微生物の働きと遺伝子解析技術の進歩

腸内フローラという言葉が耳にすることがあります。これは人の腸内にいる微生物を総称する言葉で、腸内の微生物が人の健康や美容に大きな役割を果たしていることから注目されています。微生物は、動物の腸内だけでなく、土壌および地盤中にも多く存在し、動植物の遺骸や落葉等の分解に関与して、再び植物が利用できるようにする等、物質循環や環境の浄化に大きく貢献しています。

菌類などの微生物を調べる方法として、古くは培養して調べるが行われていましたが、これには多くのコスト(時間や費用)が必要でした。しかし 1990 年代より遺伝子の配列を直接読みとる解析方法が確立され、このことが微生物の研究にも大きく貢献してきました。

近年では遺伝子を定量するリアルタイム PCR や遺伝子を高速に読み取る次世代シーケンサーと呼ばれる機器や方法が汎用化されて解析コストも低下しています。例えば人の遺伝子(30億塩基対)を読み取るために必要なコストは2001年から2010年の10年間に3300分の1にまで低下してきました^{※4}。ここで紹介した地中熱利用による地下微生物への影響評価法も、このような技術革新によるところが大きいといえます。

現在では、第3世代シーケンシングと呼ばれるさらに新たな解析技術も登場し、今後の更なる応用発展が期待されています^{※5}。

※4 科学技術動向センター, 第2世代DNAシーケンサによるゲノム解析費用の大幅低減, 科学技術動向, 122巻, p.7, 2011.

※5 磯部ら, 特集記事 2016年第58回シンポジウム(シンポジウム・ワークショップ)報告 ついに来た! ゲノム解析第3世代の波, 育種学研究, 19巻, 1号, p.30-34, 2017.

5. 地中熱利用ヒートポンプシステムにおけるパッケージ化の推進

5.1 システム全体のパッケージ化

2022 年に環境省において地中熱関連事業者を対象に、パッケージ化に関するアンケート調査(回答数 29 件)を行いました。その結果、パッケージ化に前向きな回答(部分的なパッケージ化含む)が多数あり、パッケージ化の推進が重要であるという認識が浮き彫りになるとともに課題も見えてきました。

ここでは、アンケート調査の概要を紹介するとともに、パッケージ化の難しさ、パッケージ化の現状を概説することで、地中熱関連事業者の方にパッケージ化について考えていただき、今後のパッケージ化の一助になれば幸いです。

なお、パッケージという言葉は「ひとまとめにすること」を意味しており、「複数の製品を組み合わせた複合的な製品」に適用されていることから、ここでは「システム」あるいは「ユニット」と呼ばれているものに対して、大きな括りとしてパッケージという言葉を用いています。

5.2 事業者を対象としたアンケート調査結果

【アンケート結果】

(1) パッケージ化のあるべき姿

パッケージ化のあるべき姿として、システム全体がパッケージ化を目指すべきでしょうか。あるいは、現実的な範囲でのパッケージ化にとどめるべきでしょうか。業務用の地中熱利用ヒートポンプ（個別分散方式）と、家庭用の地中熱利用ヒートポンプについて、選択肢方式で意見を聞きました。

アンケート結果では、業務用は「効率的な部分のみパッケージ化」が多数で、家庭用では「熱源部分も含めてシステム全体のパッケージ化」が多数となっています。家庭用の地中熱利用ヒートポンプシステムのパッケージ化については、住宅メーカーから「全体をパッケージ化した方が住宅設計者、施主にはわかりやすいと考えます。地中熱利用ヒートポンプ機器及び地中熱交換器の設計・施工・性能保証も含めて一社が対応してくれるという意味でのパッケージ化です」という意見がありました。

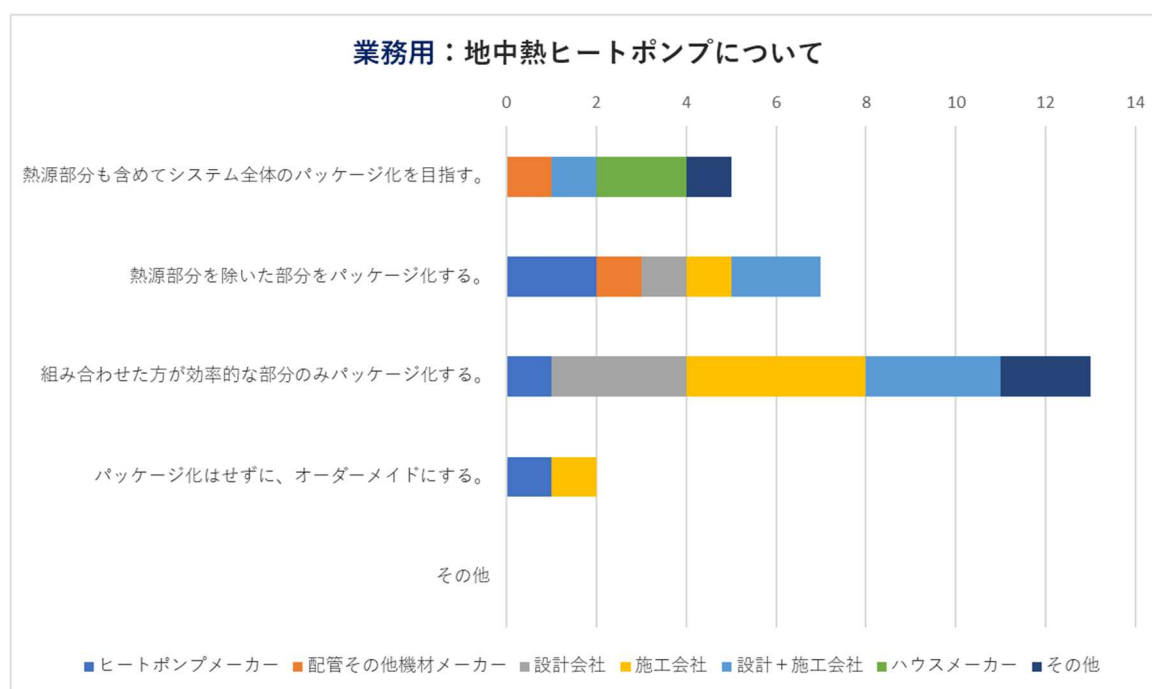


図 R 5-1 業務用(個別分散方式)の地中熱利用ヒートポンプシステムにおけるパッケージ化のあるべき姿

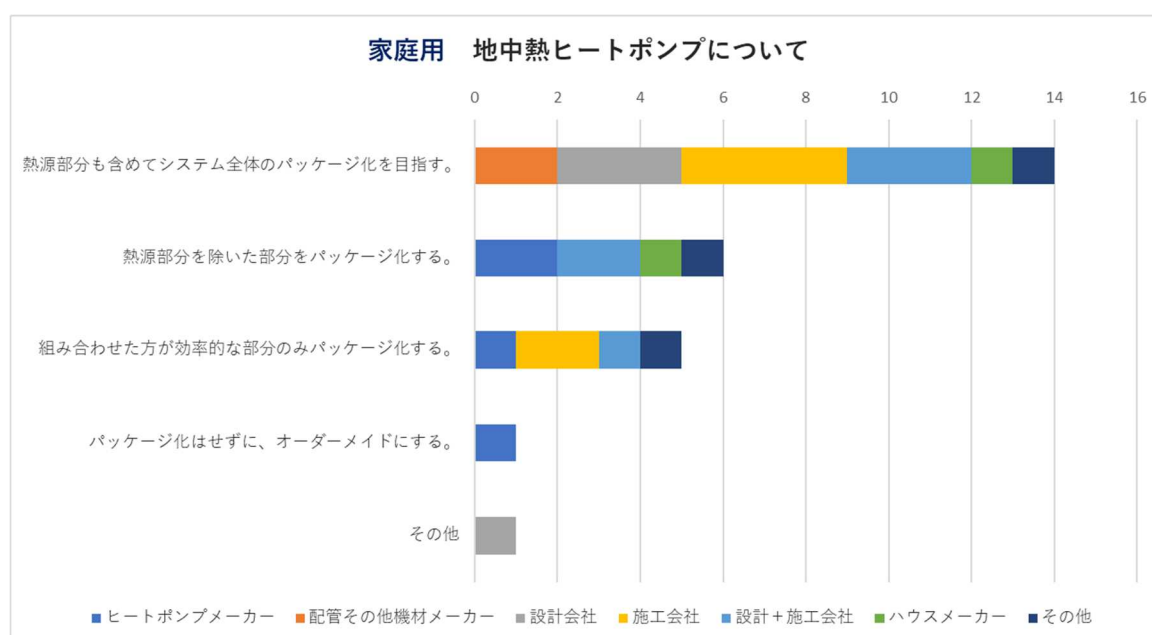


図 R 5-2 家庭用の地中熱利用ヒートポンプシステムにおけるパッケージ化のあるべき姿

(2) パッケージ化の視点

パッケージ化は、どのような視点から進めるのがよいか、7つの視点（①システムの効率化、②設計の効率化（簡素化）、③施工の効率化（簡素化）、④現場調整の最小化、⑤システムの規格化（品質の確保）、⑥コストの低減、⑦コストの見える化）について、4段階評価（1 そう思う、2 どちらかというと思う、3 どちらかいうとそう思わない、4 そう思わない）を加え選択肢方式で意見を聞きました。

アンケートの結果では、いずれの視点にも肯定的な意見が多く、特に①システム、②設計、③施工の効率化と⑥コスト低減の視点が多いことがわかりました。また、回答にはこの7つの視点以外に、責任範囲（品質保証などの分岐点）の明確化の視点も必要との意見がありました。



図 R 5-3 地中熱利用ヒートポンプシステムのパッケージ化の視点

(3) システムの規格化

システム全体の規格化について、どのように考えているか、3つの視点「業界内でかなりの作業が必要だが、いまから規格化を進めるべき」、「現状では市場規模が小さいので、まだ規格化は進めない方がよい」、「その他」について、選択肢方式で意見を聞きました。

アンケート結果では、「業界内でかなりの作業が必要だが、いまから規格化を進めるべき」に賛成する回答が多数を占める結果になりましたが、「その他」を選択した回答もかなりあり、その主なものとして、「規格化については、まずその内容を検討することから始めるべき」という意見と、「家庭用システムと業務用システムの規格化は分けて考えるべき」という意見がありました。

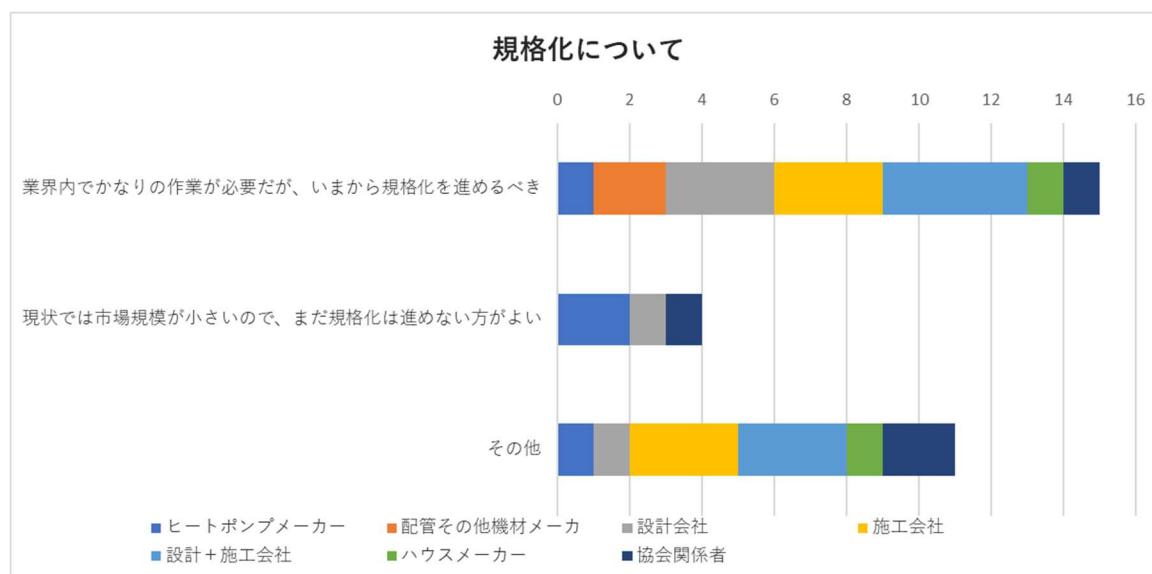


図 R 5-4 地中熱利用ヒートポンプシステムの規格化の進め方

(4) パッケージ化の課題

パッケージ化の課題について、記述式で意見を求めました。

アンケート結果では、課題として「設置場所により異なる採熱量に対応しなければならない地中熱交換器の扱い」、「パッケージ製品の責任範囲」、「地中熱の製品には JIS などの統一した規格がないこと」、「市場規模が小さいこと」などが挙げられています。以下にアンケート回答の抜粋を紹介します。

- ・地中熱交換器など設置場所により採熱量が異なるので、あらかじめ製品をシステムに組み込んでおくことが難しい。将来的には住宅などの小規模なシステムの場合は、ポテンシャルマップなど見掛け熱伝導率の違いに応じた複数の製品を準備しておくことで対応できる可能性はある。
- ・複数の製品の組合せで全体のシステムを作る場合、責任をもつ範囲を決めておく必要があるが、現状ではそのような検討がなされていない。
- ・複数の製品の接続については、統一された規格が必要であるが、現状は個別の対応になっており、地中熱利用ヒートポンプシステムとしての JIS などの規格が存在しない。
- ・地中熱利用ヒートポンプシステムの市場が小さいので、複合的な製品を作るコスト高になる場合がある。また、そのような製品を使うことが省エネ性という視点からは逆効果になる可能性がある。

(5) パッケージ化の誘導策

パッケージ化の誘導策について、どのような誘導策が望ましいか、3つの視点(補助金、税制優遇、その他)で、選択肢方式で意見を聞きました。

アンケート結果では、「税制優遇」よりも「補助金」による誘導策が多数を占めました。回答としての提示例が2事例しか無く選択式であるため、イニシャルコストが直接軽減される「補助金」が多数を占めていますが、アンケート意見の中には、「補助金や税制優遇の必要性はあるが、本質的な普及策なのか疑問がある」という意見もありました。

この他、誘導策についての意見には、「パッケージ化が認定された製品のみを対象にした補助金」、「地中熱利用ヒートポンプシステムのパッケージ化や規格化を進める取組への補助金」、「FITのような事業スキーム」、「法整備／制度による地中熱利用ヒートポンプシステムあるいは再エネ熱の導入の義務化」などがありました。

補助金については2011年度から国・自治体において多くの補助金を実施し、地中熱利用ヒートポンプシステムの設置件数も増えたという実績はあるものの、これに伴いパッケージ化が大きく進展した訳ではありませんでした。

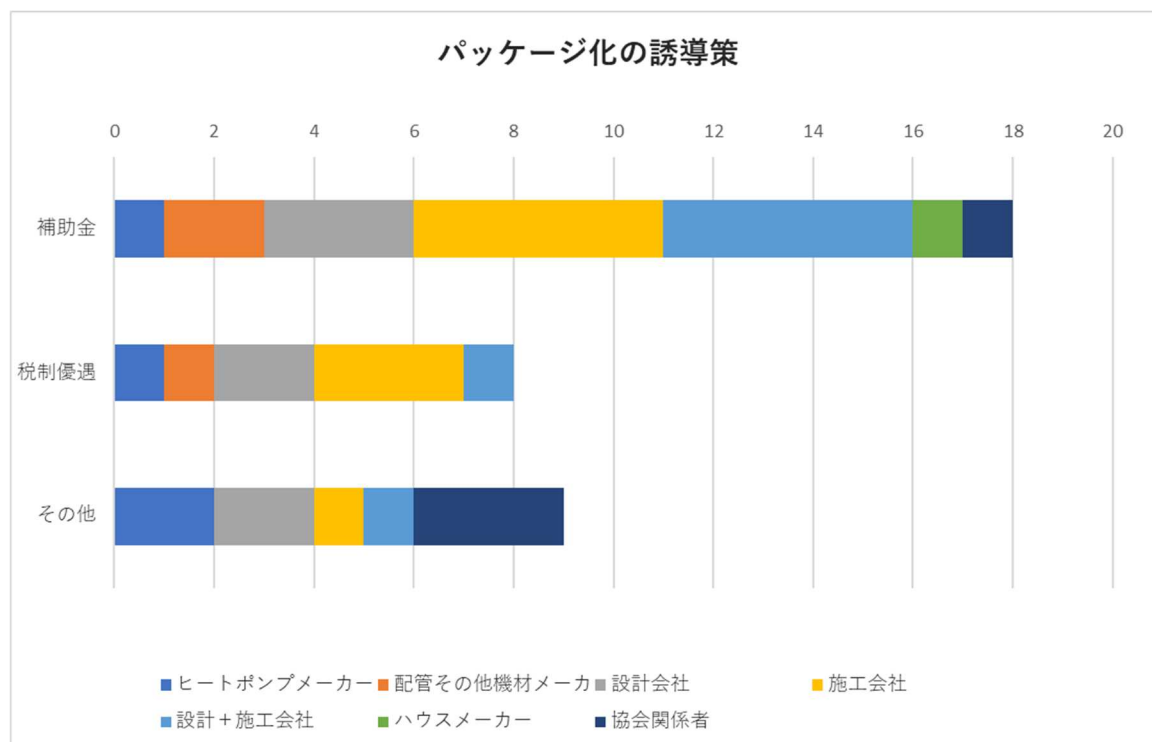


図 R 5-5 地中熱ヒートポンプシステムのパッケージ化の誘導策

5.3 パッケージ化の現状

地中熱利用ヒートポンプシステムは、パッケージ化された製品を現地で取り付けるものではなく、空調であれば建物の規模（空調面積等）によりヒートポンプ容量と地中熱交換器の本数（総延長）を求めて設計されたシステムで、熱源機器（ヒートポンプ）、一次側設備、二次側設備をそれぞれ注文生産し、個別に現地に取り付け接続するものです。地中熱利用ヒートポンプシステムは、熱応答試験（TRT）や建物の規模や土地の形状等により違うため、事前の提案がしづらいという問題があり、生産する側は需要の多様性に対応するために、製品をパッケージ化しにくいという課題があります。

このような中、現在、地中熱関連製品は、システムの効率化、設計と施工の効率化、コストの低減などの視点から、利用目的に応じていくつかの製品を連結したシステムとして販売している場合や、筐体の中に複数の製品を組み込んで一体型にしたユニットとして販売している場合があります。これらの製品は、部分的にパッケージ化されていると言えますが、地中熱利用ヒートポンプの市場においては、パッケージという言葉ではなく、「システム」または「ユニット」と呼ばれており、現状においては「パッケージ」という言葉は使用されていません。

システム全体のパッケージ化を考えるには、多数の製品から構成される地中熱利用ヒートポンプシステムの全体像を把握するとともに、現状でどの部分が「システム」または「ユニット」という名称で部分的にパッケージ化されているかを理解する必要があります。地中熱利用ヒートポンプシステムは、対象となる建物や目的（冷暖房、農業用、漁業用、融雪など）により様々なシステムがあるため、ここでは代表的な「ビルなどを対象とした冷暖房システム」、「住宅などを対象にした冷暖房システム」、「融雪を対象としたシステム」についてご紹介します。

（1）代表的な地中熱利用ヒートポンプシステム

1) ビルなどを対象にした冷暖房システム

個別分散方式における地中熱利用は、同じ建物に導入される他の空調システムから独立していますので、熱源機である地中熱利用ヒートポンプと冷媒配管で結ばれる複数の室内機が、「システム」として販売されています。また、地中熱利用ヒートポンプの周辺部分（熱源側）では「ユニット」の導入が可能であり、それに対応できる製品が入手可能です。

建物用の地中熱利用ヒートポンプシステムに関連した「システム」及び「ユニット」として扱っている事例に以下の製品、製品群があります。

システム：地中熱用ビルマルチシステム

ユニット：ポンプユニット

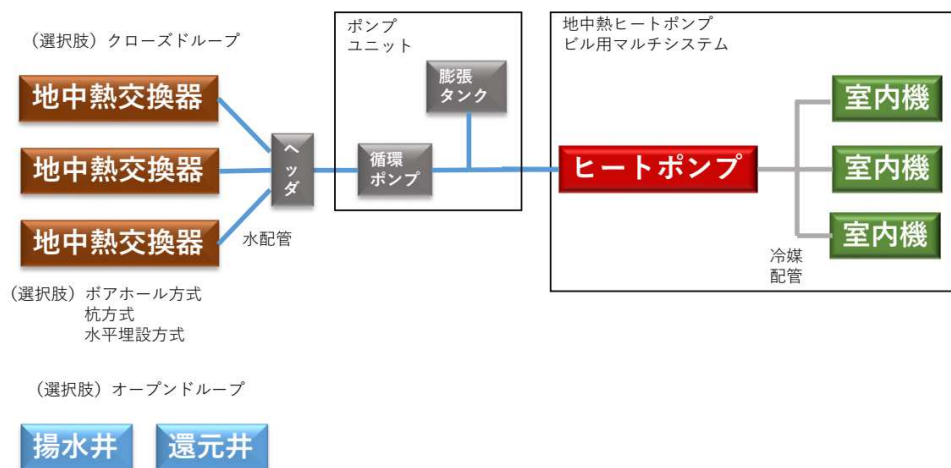


図 R 5-6 地中熱利用ヒートポンプシステム(ビル用マルチシステム)

2) 住宅などを対象にした冷暖房システム

水-水ヒートポンプの熱源機(空気熱とのハイブリッドを含む)と室内側の利用機器(ファインコイル、ファンコンベクター、ファンヒーター、放射パネル、床暖房、給湯設備、融雪設備などが選択可能)とが主要な機器については、同一会社の製品として接続できる「システム」として販売されています。地中熱交換器や揚水井などの熱源部分は含まれていませんが、熱源機から室内側の主な利用機器が同一会社製品でラインアップされており、ユニット的に取り扱うことができるようになっています。また、熱源機周辺にある膨張タンク、循環ポンプといった補機類がヒートポンプ本体とともに一つの筐体に収められ「ユニット」になっている製品もあり、設計、施工に利便性が図られています。

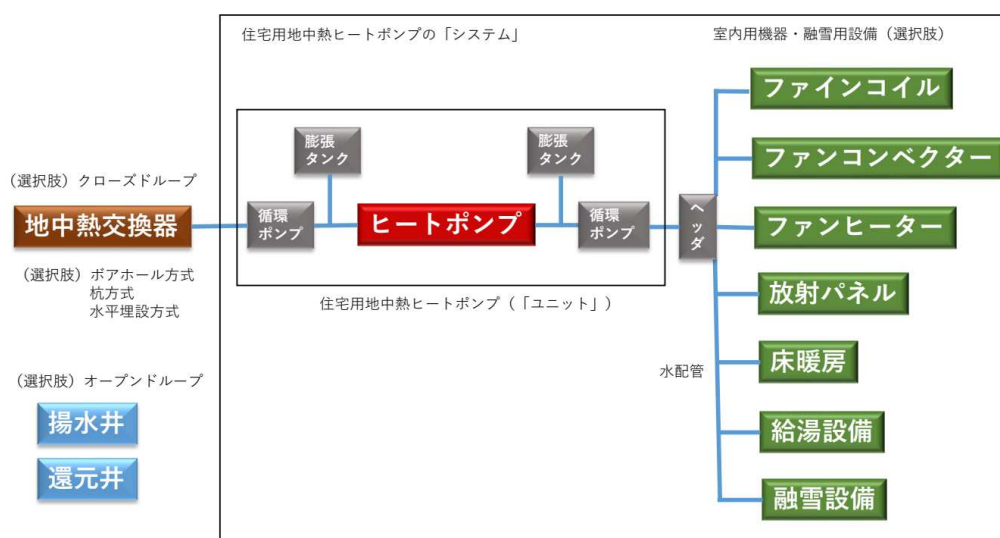


図 R 5-7 住宅用(家庭用)地中熱利用ヒートポンプシステム

3) 融雪を対象にしたシステム

融雪を対象にした地中熱利用ヒートポンプシステムは、熱源（地中熱交換器あるいは揚水井）と地中熱利用ヒートポンプ、補機類（循環ポンプなど）、と融雪用放熱管から構成されており、これらのうち地中熱利用ヒートポンプと補機類がユニット化されています。

(2) パッケージ(「システム」及び「ユニット」)として扱える製品、製品群の事例

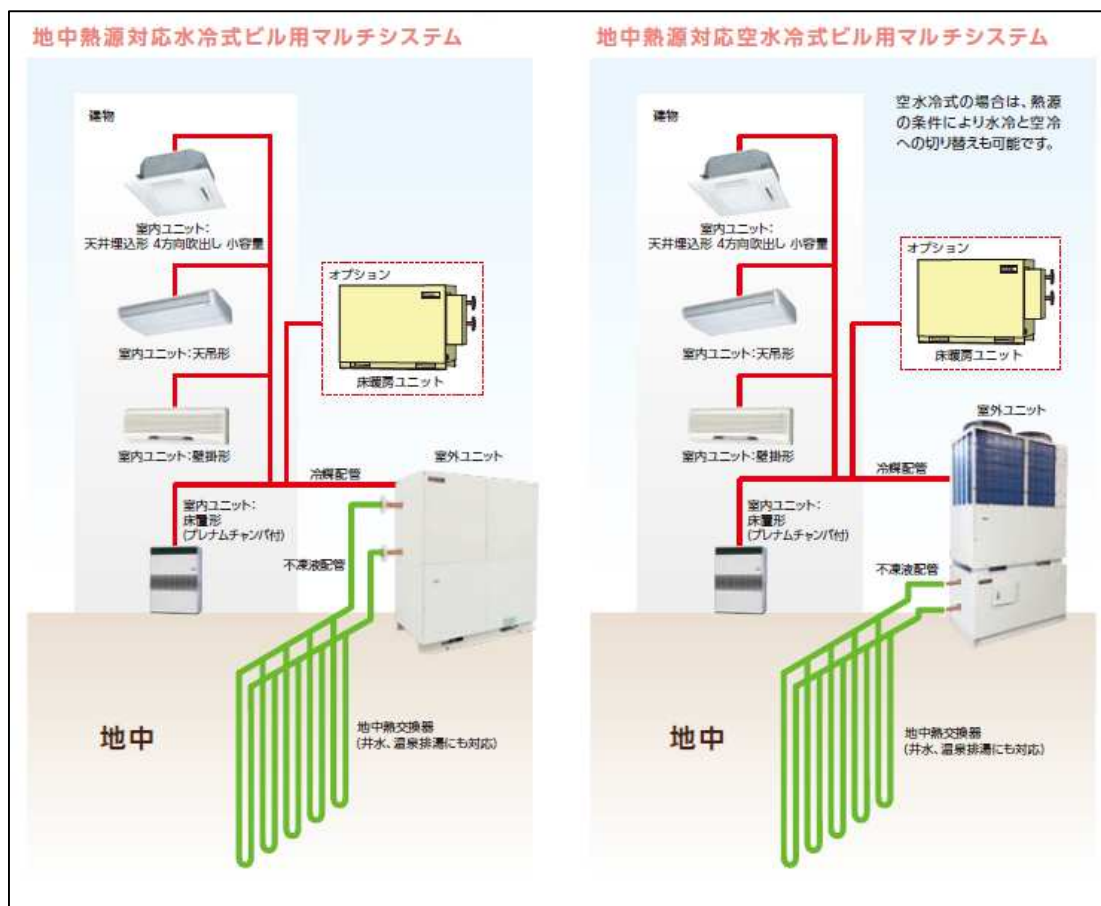
「システム」として入手可能な製品群として、建築物の個別分散方式の空調システムに対応するものがあり、水-空気ヒートポンプと室内機から構成されています(①)。一方、住宅用(家庭用)地中熱利用ヒートポンプシステムでは、複数社の製品群のラインアップがあり、その中核となるヒートポンプ(二次側が水)はユニット化されています(②、③)。また、二次側が空気の住宅用(家庭用)地中熱利用ヒートポンプでは、冷媒管で接続する室内ユニットとの「システム」ができています(④)。

地中熱利用ヒートポンプシステムの中の一部にあたる製品がユニット化されている例としては、クローズドループで熱源水の循環ポンプ(インバーター制御)と膨張タンクなどを一つ筐体に収めたポンプユニット、オープンループでの地下水とヒートポンプの一次側熱媒との熱交換器と井戸用配管類などをまとめた地下水熱交換ユニット、地下水利用ユニットなどがあります(⑤、⑥、⑦)。

また、ヒートポンプに関しては、ヒートポンプの基本形は圧縮機、膨張弁と2つの熱交換器(蒸発器と凝縮器)ですが、これに循環ポンプ、膨張タンク、送風機などを加えたユニットとした機種(②、⑧、⑨)、空気熱とのハイブリッド機種(③)などがあります。

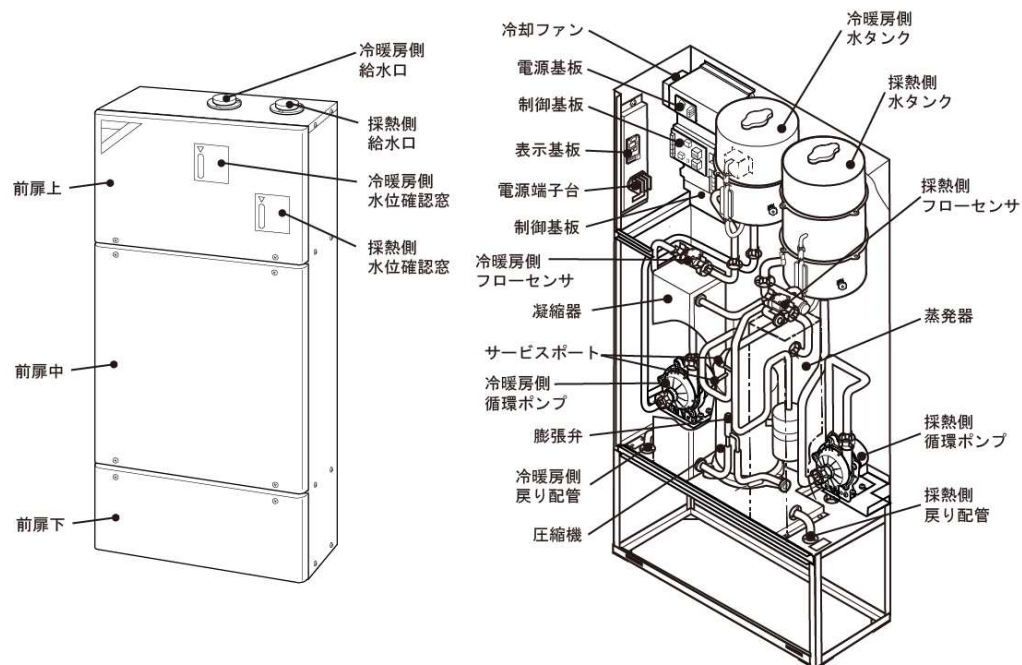
① 地中熱利用ヒートポンプ(水-空気)と室内機を連結させたシステム

地中熱を利用する水-空気ヒートポンプではヒートポンプ本体の冷媒回路が2次側の室内機と繋がっています。室内機が複数台あるビルマルチでは、それぞれの室内機がヒートポンプ本体と冷媒回路で繋がっています。室内機は取付場所の違いなどからいくつかのタイプのものがありますが、いずれもヒートポンプ本体の機種専用となっています。



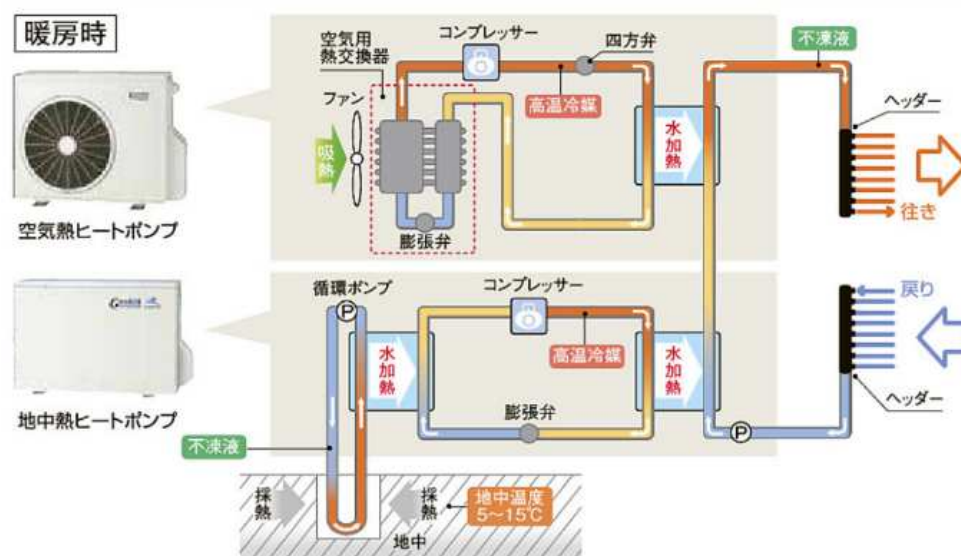
② 膨張タンク、循環ポンプ内蔵の地中熱利用ヒートポンプ

ヒートポンプ本体にあたる冷媒回路（圧縮機、膨張弁、凝縮器、蒸発器）に加え、採熱側（1次側）と冷暖房側（2次側）の水タンク（膨張タンク）と循環ポンプが一つの筐体に収められた地中熱利用ヒートポンプのユニット



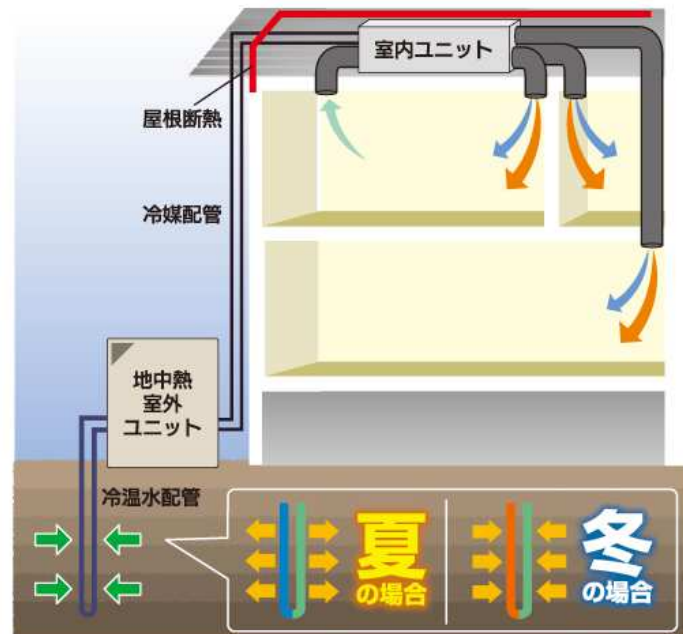
③ 地中熱源と空気熱源のヒートポンプ(ハイブリッド機種)

地中熱源と空気熱源の2つのタイプのヒートポンプを、それぞれの冷暖房側にある熱交換器の不凍液回路で連結させ、運転制御機能をもたせたハイブリッドユニット



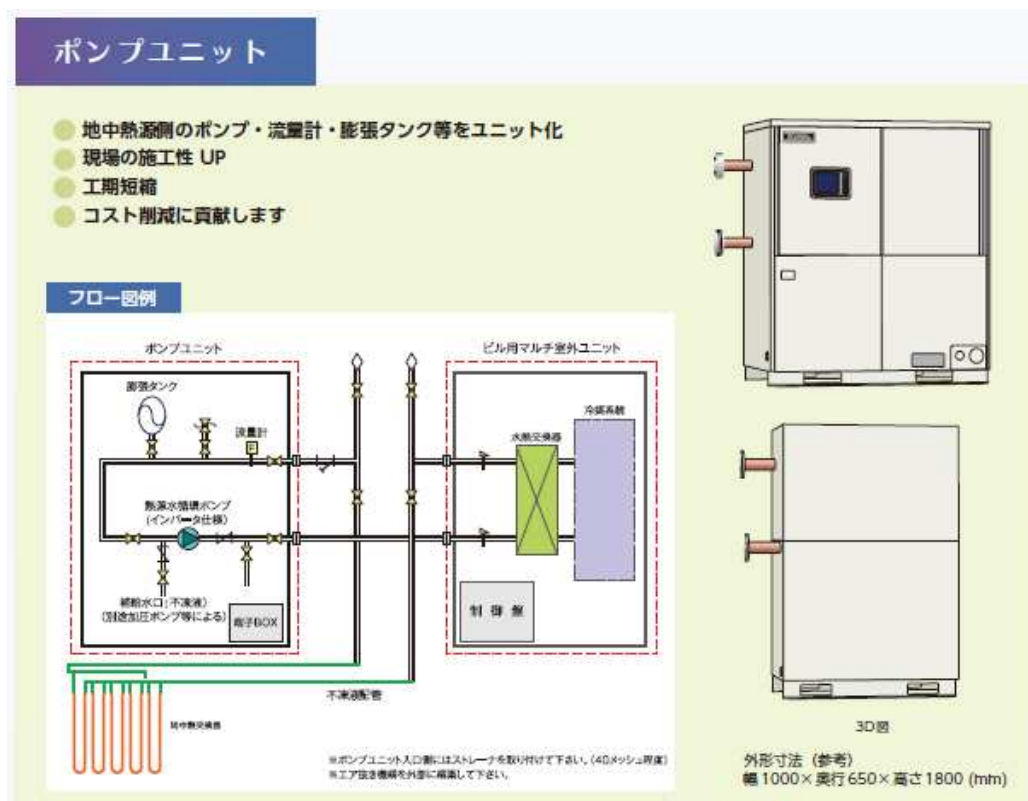
④ 地中熱利用ヒートポンプ(水-空気)と室内ユニットとのシステム

地中熱室外ユニット(水-空気ヒートポンプ)とその専用機種である室内ユニット(ダクト空調用)とが冷媒回路で繋がっています。



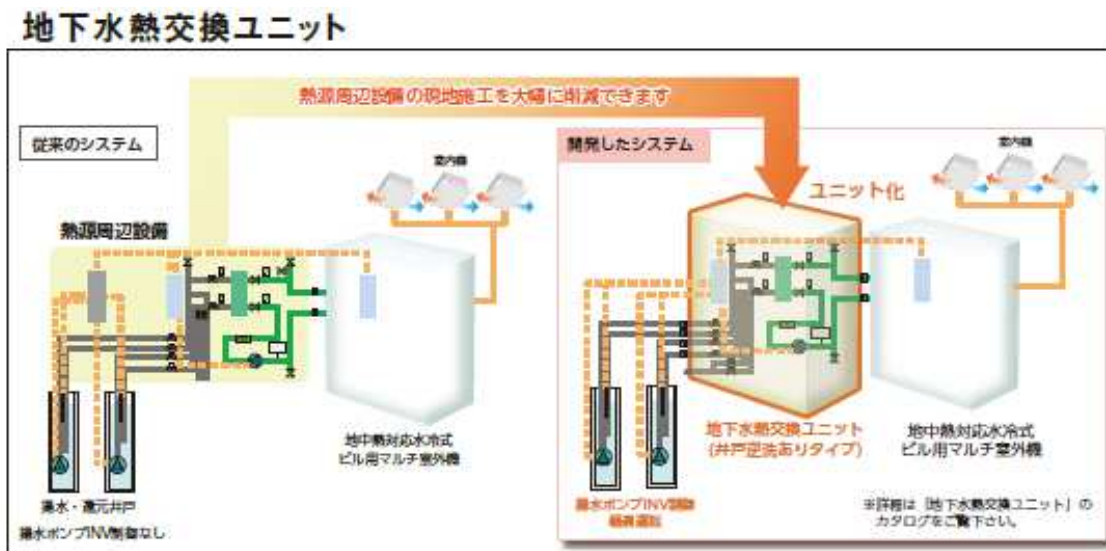
⑤ ポンプユニット

ヒートポンプの熱源側の補機である膨張タンク、循環ポンプ(インバータ制御)と流量計が一つの筐体に収められています(クローズドループ用)。



⑥ 地下水熱交換ユニット

井水と不凍液の熱交換器、不凍液回路の循環ポンプが一つの筐体に収められており、揚水井と還元井の交換を行う逆洗機能を備えています（オープンループ用）。



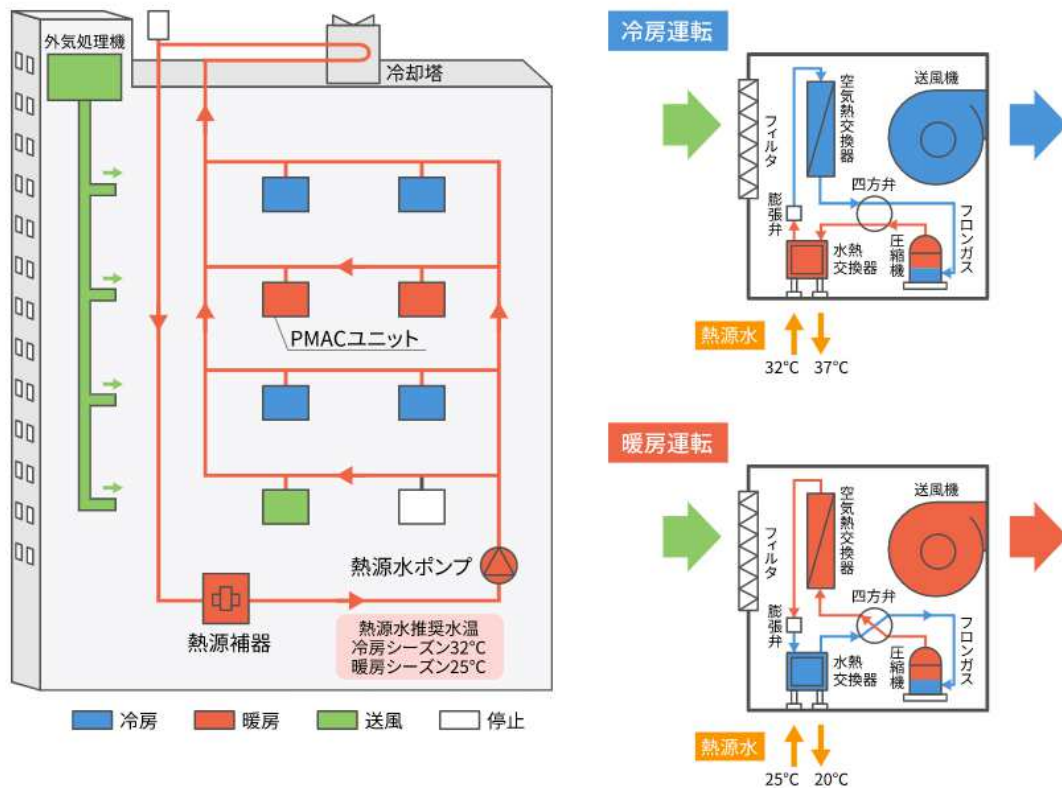
⑦ 地下水利用キット

地下水を熱源として用いる場合に通常は熱交換器を利用しますが、暖房運転で地下水から採熱する際に大きな温度低下が生じると凍結により熱交換器が損傷する可能性があります。それを防止するための温度センサーと電磁バルブがセットになったキットです（オープンループ用）。



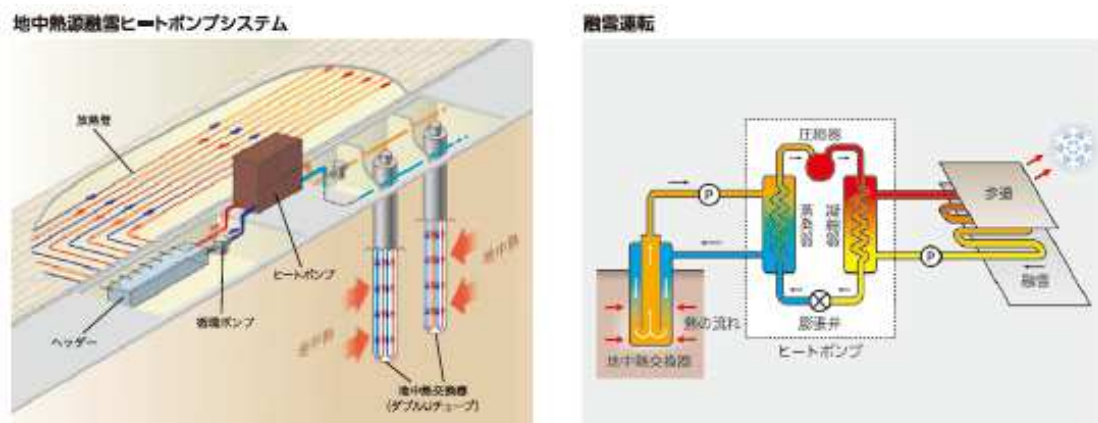
⑧ 送風機が内蔵された水-空気ヒートポンプ(一体型)

通常の水-空気ヒートポンプは、送風機能のある室内機を用いますが、この機種はヒートポンプ本体の入った筐体に送風機が組み込まれています。



⑨ 地中熱源融雪ヒートポンプシステム

地中熱を用いる融雪専用のヒートポンプシステムで、歩道融雪用にシステムができています。



6. 地下水に関する規制

6.1 工業用水法(昭和 31 年制定)

地下水の採取により地盤沈下等が発生し、かつ工業用水としての地下水利用量が多く、地下水の合理的な利用を確保する必要がある地域(工業用水道の整備前提)において、政令で地域指定し、その地域の一定規模以上の工業用井戸について許可基準(ストレーナー位置、吐出口の断面積)を定めて許可制にすることにより地盤沈下の防止等を図っています。令和5年3月現在までに宮城県、福島県、埼玉県、千葉県、東京都、神奈川県、愛知県、三重県、大阪府、兵庫県の10都府県17地域において地域指定されています(表 R 6-1)。

※工業用水法において「工業」とは、製造業(物品の加工修理業を含む)、電気供給業、ガス供給業及び熱供給業をいう。

表 R 6-1 工業用水法による指定地域(10都府県65市区町村※)※6

宮 城 県	仙台市の一部、多賀城市の一部、宮城郡七ヶ浜町の一部
福 島 県	南相馬市の一部
埼 玉 県	川口市の一部、草加市、蕨市、戸田市、鳩ヶ谷市、八潮市、さいたま市の一部
千 葉 県	千葉市の一部、市川市、船橋市、松戸市、習志野市、市原市の一部、浦安市、袖ヶ浦市の一部
東 京 都	墨田区、江東区、北区、荒川区、板橋区、足立区、葛飾区、江戸川区
神 奈 川 県	川崎市の一部
	横浜市の一部
愛 知 県	名古屋市の一部
	一宮市、津島市、江南市、稲沢市、愛西市、清須市の一部、弥富市、海部郡七宝町、同郡美和町、同郡甚目寺町、同郡大治町、同郡蟹江町、同郡飛島村
三 重 県	四日市市の一部
大 阪 府	大阪市の一部
	豊中市の一部、吹田市の一部、高槻市の一部、茨木市の一部、摂津市
	守口市、八尾市の一部、寝屋川市の一部、大東市の一部、門真市、東大阪市の一部、四條畷市の一部
	岸和田市の一部、泉大津市、貝塚市の一部、和泉市の一郡、泉北郡忠岡町
兵 庫 県	尼崎市
	西宮市の一部
	伊丹市

※平成 18 年 4 月 1 日における行政区画

※6環境省，令和3年度全国地盤沈下地域の概況，<https://www.env.go.jp/water/jiban/chinka.html>

6.2 ビル用水法(建築物用地下水の採取の規制に関する法律)(昭和 37 年制定)

地下水の採取により地盤が沈下し、それに伴い高潮、出水等による災害が発生するおそれがある地域について政令で地域指定し、その地域の一定規模以上の建築物用井戸について許可基準(ストレーナー位置、吐出口の断面積)を定めて許可制とすることにより地盤沈下の防止を図っています。令和5年3月現在までに大阪府、東京都、埼玉県、千葉県の 4 都府県 4 地域において地域指定されています(表 R 6-2)。

※ビル用水法において「建築物用地下水」とは、冷房設備、水洗便所その他政令で定める設備の用に供する地下水をいう。

表 R 6-2 建築物用地下水の採取の規制に関する法律による指定地域
(4都府県 39 市区町※)^{※6}

大 阪 府	昭和37年8月31日における大阪市の区域
東 京 都	昭和47年5月1日における東京都の区域のうち特別区の区域
埼 玉 県	昭和47年5月1日における川口市、浦和市、大宮市、与野市、蕨市、戸田市及び鳩ヶ谷市の区域
千 葉 県	昭和49年8月1日における千葉県の区域のうち千葉市(旦谷町、谷当町、下田町、大井戸町、下泉町、上泉町、更科町、小間子町、富田町、御殿町、中田町、北谷津町、高根町、古泉町、中野町、多部田町、川井町、大広町、五十土町、野呂町、和泉町、佐和町、土気町、上大和田町、下大和田町、高津戸町、大高町、越智町、大木戸町、大椎町、小食土町、小山町、板倉町、高田町及び平川町を除く。)、市川市、船橋市、松戸市、習志野市、市原市(五所、八幡、八幡北町、八幡浦、八幡海岸通、西野谷、山木、若宮、菊間、草刈、古市場、大厩、市原、門前、藤井、郡本、能満、山田橋、辰巳台東、辰巳台西、五井、五井海岸、五井南海岸、岩崎、玉前、出津、平田、村上、岩野見、君塚、海保、町田、廿五里、野毛、島野、飯沼、松ヶ島、青柳、千種海岸、西広、惣社、根田、加茂、白金町、椎津、姉崎、姉崎海岸、青葉台、畑木、片又木、迎田、不入斗、深城、今津朝山、柏原、白塚、有秋台東及び有秋台西に限る。)、鎌ヶ谷市及び東葛飾郡浦安町の区域

※指定当時の数を示す。

6.3 条例等に基づく規制等

多くの地方公共団体では地下水採取に関する条例等を定めて地盤沈下の防止等を図っています。令和3年度の調査結果では、地方公共団体の中で都道府県が施行する条例/要綱等の件数は33件で、市区町村が施行する条例/要綱等の件数は361件です(図R 6-1)。

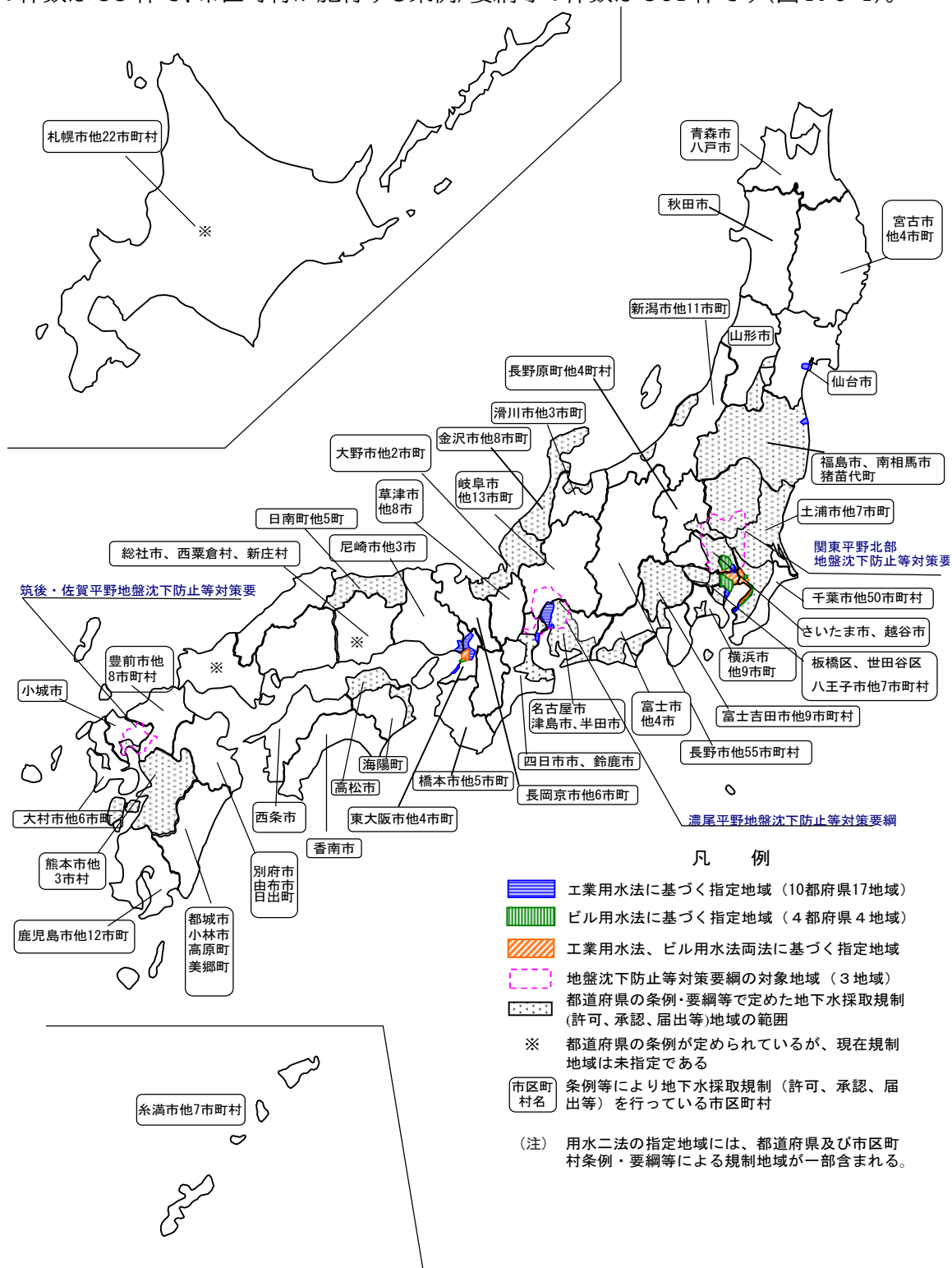


図 R 6-1 地下水採取に関する規制等の状況(概略図)※6

6.4 地盤沈下防止等対策要綱

地盤沈下の特に著しい地域について地域の実情に応じた総合的な対策を推進するため、地盤沈下防止等対策関係閣僚会議において地域ごとの地盤沈下防止等対策要綱が策定され、地盤沈下を防止するとともに地下水の保全を図ることとなっています(表 R 6-3)。

表 R 6-3 地盤沈下防止等対策要綱の概要※6

	濃尾平野		筑後・佐賀平野			関東平野北部	
名 称	濃尾平野 地盤沈下防止等対策要綱		筑後・佐賀平野 地盤沈下防止等対策要綱			関東平野北部 地盤沈下防止等対策要綱	
決 定 年 月 日	昭和60年4月26日		昭和60年4月26日			平成3年11月29日	
一部改正年月日	平成7年9月5日		平成7年9月5日			—	
評 価 検 討 年 度	平成16年度・平成21年度・平成26年度・令和元年度						
目 的	地下水の採取による地盤沈下を防止し、併せて地下水の保全を図るため、地下水の採取規制、代替水源の確保及び代替水の供給、節水及び水使用の合理化、地盤沈下による災害の防止及び復旧等に関する事項を定めることにより、同地域の実情に応じた総合的な対策を推進する。						
要綱の項目	1. 要綱の目的 2. 要綱地域の現況 3. 要綱の対象地域 4. 地下水採取に関わる目標量 5. 地盤沈下防止等対策(地下水採取規制、代替水源の確保及び代替水の供給、節水及び水使用の合理化) 6. 観測及び調査 7. 地盤沈下による災害の防止及び復旧 8. 要綱の推進						
地下水採取量 (規制、保全地域) m³/年	濃尾平野 (規制地域)			佐賀地区 (規制地域)	白石地区 (規制地域)	関東平野北部 (保全地域)	
	昭和57年度	4.1億	昭和57年度	7百万	12百万	昭和60年度	7.3億
	令和2年度	1.2億	令和2年度	3百万	1百万	令和2年度	4.6億
	目 標 量	2.7億	目 標 量	6百万	3百万	目 標 量	4.8億
対 象 地 域	岐阜県、愛知県及び三重県の一部地域		福岡県及び佐賀県の一部地域			茨城県、栃木県、群馬県、埼玉県及び千葉県の一部地域	
「地盤沈下防止等対策要綱に関する関係府省連絡会議」(令和2年2月26日)確認事項 ①地下水採取に係る目標量については、地盤沈下を防止し、併せて地下水の保全を図るために達成又は遵守させるべき目標として継続すること。 ②渇水時の短期的な地下水位低下等による地盤沈下の進行に対応するため、地下水のマネジメント方策について調査・研究を推進すること。 ③今後、各地域において、深刻な地盤沈下の発生等の問題の兆候が見られた場合には、速やかに必要な措置をとるものとする。 ④関係府省連絡会議は、概ね5年毎に地盤沈下防止等対策等について評価検討を行うこと。							

(注)国土交通省水資源部作成

7. 水質に関する規制

7.1 水質汚濁防止法(昭和 45 年制定)

工場及び事業所から公共用水域に排出される水の排出と地下に浸透する水を規制し、生活排水対策を行うことによって、国民の健康を保護し生活環境を保全することを目的としています。

水質汚濁防止法では、第 12 条第 1 項で「排水水を排出する者は、その汚染状態が当該特定事業場の排水口において排水基準に適合しない排水水を排出してはならない」と定めています。

排水基準は、水質汚濁防止法第 3 条第 1 項で規制しており、具体的には「排水基準を定める省令」(昭和 46 年 6 月 21 日 総理府令第 35 号)で定めています。

また、地下への浸透については、水質汚濁防止法第 12 条の 3 で「有害物質使用特定事業場から水を排出する者は、第 8 条の環境省令で定める要件に該当する特定地下浸透水を浸透させてはならない」と規定されています。

7.2 下水道法(昭和 33 年制定)

下水道法では、第 12 条の 2 第 1 項で「特定施設を設置する工場又は事業場から下水を排除して公共下水道を使用する者は、政令で定める場合を除き、その水質が当該公共下水道への排出口において政令で定める基準に適合しない下水を排除してはならない」と定めており、具体的な基準は、下水道法施行令第 9 条の 4 で定めています。

なお、都道府県では、国が定める全国一律の基準のほかに、各都道府県が条例で定める「上乘せ基準」があるので、注意が必要です。

8. その他関連法規

地下水環境の保全に関連して、「水循環に関する施策を総合的かつ一体的に推進し、もって健全な水循環を維持し、又は回復させ、我が国の経済社会の健全な発展及び国民生活の安定向上に寄与すること」を目的とする『水循環基本法』が平成 26 年 4 月 2 日に公布され、同年 7 月 1 日に施行されました(<http://www.mlit.go.jp/common/001048585.pdf>)。地中熱利用に際しても、健全な水循環への配慮のもと、持続可能な利用を行なうために、この法に準拠する必要があります。

その他、熱供給事業に関する主な法令は一般社団法人日本熱供給事業協会のホームページ(<https://www.jdhc.or.jp/law/>)を参照ください。

9. 関連するガイドライン等

国の機関や協会等から参考となるガイドラインや文献等が公表されていますので、下記にご紹介します。特に地中熱に関する情報が複数掲載されている環境省および地中熱利用促進協会については、こちらを参照ください。

・環境省ホームページ

(<https://www.env.go.jp/seisaku/list/thermal.html>)

・特定非営利活動法人 地中熱利用促進協会のホームページ

(<http://www.geohpaj.org/introduction/index8>)

(1) 関連するガイドライン等

- 一定加熱・温水循環方式熱応答試験（TRT）技術書，特定非営利活動法人 地中熱利用促進協会，平成 30 年 8 月
(http://www.geohpaj.org/wp/wp-content/uploads/trt_draft_20180830.pdf)
- 官庁施設における地中熱利用システム導入ガイドライン(案)，国土交通省 大臣官房官庁営繕部 設備・環境課，平成 25 年 10 月
(<https://www.mlit.go.jp/common/001016159.pdf>)
- 建築物のエネルギー消費性能に関する技術情報，国立研究開発法人建築研究所
(<http://www.kenken.go.jp/becc/>)
- 建築物のエネルギー消費性能計算プログラム(非住宅版)ver.3.3.2 (WEBPRO)，国立研究開発法人建築研究所，令和 4 年 12 月
(<https://building.app.lowenergy.jp/>)
- 公共建築工事標準仕様書(令和 4 年版) 機械設備工事編，国土交通省 大臣官房 官庁営繕部 設備・環境課
(<https://www.mlit.go.jp/gobuild/content/001472441.pdf>)
- 国土地盤情報検索サイト「Kunijiban」，国土交通省，国立研究開発法人土木研究所，国立研究開発法人港湾空港技術研究所
(<https://www.kunijiban.pwri.go.jp/jp/index.html>)
- 再生可能エネルギー等の温室効果ガス削減効果に関する LCA ガイドライン，環境省，令和 3 年 7 月
(<https://www.env.go.jp/earth/ondanka/lca/>)

- 再生可能エネルギー情報提供システム (REPOS), 環境省
(<https://www.renewable-energy-potential.env.go.jp/RenewableEnergy/index.html>)
- 地盤沈下監視ガイドラインについて, 環境省, 平成 17 年 6 月
(<https://www.env.go.jp/houdou/gazou/6132/6914/2356.pdf>)
- 地中熱ヒートポンプシステムオープンループ導入ガイドライン 第1版, 特定非営利活動法人地中熱利用促進協会・一般社団法人全国さく井協会, 平成 29 年 3 月
(<http://www.geohpaj.org/project/document/document02>)
- 地中熱ポテンシャルマップ・空調熱源設計ツール活用のためのガイダンス, 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO), 平成 31 年 2 月
(<https://www.nedo.go.jp/content/100894107.pdf>)
- ライフサイクルエネルギーマネジメント (LCEM), 国土交通省 大臣官房 官庁営繕部
(http://www.mlit.go.jp/gobuild/sesaku_lcem_lcem.html)

(2)関連する図書等

- 地中熱ヒートポンプシステム施工管理マニュアル(改訂版), 特定非営利活動法人地中熱利用促進協会編, 令和 4 年 10 月
- 地中熱ヒートポンプシステム(改訂 2 版), 北海道大学環境システム工学研究室編, オーム社, 令和 2 年 10 月
- 事例に学ぶ地中熱利用ヒートポンプシステム, 内藤春雄著, オーム社, 平成 26 年 12 月
- 地中熱利用ヒートポンプの基本がわかる本, 内藤春雄著, オーム社, 平成 24 年 10 月
- 地中熱利用ガイドブック, 特定非営利活動法人地中熱利用促進協会著 (令和 5 年 1 月現在、vol.9 まで刊行されている)
- 地中熱利用技術ハンドブック, 特定非営利活動法人地下水・地下熱資源強化活用研究会編, 令和 2 年 3 月
- 設計技術者のためのヒートポンプ空調・給湯システムの実務知識, 社団法人建築設備技術者協会編, オーム社, 平成 22 年 5 月

10. 検討委員会メンバー

(1) 地中熱利用にあたってのガイドライン（平成 24 年 3 月）検討委員会

種 別	氏 名	所 属
委 員	田中 正(座長)	筑波大学 名誉教授
	成田 健一	日本工業大学 建築学科 教授
	谷口 真人	総合地球環境学研究所 教授
	玄地 裕	独立行政法人産業技術総合研究所 安全科学研究部門 素材エネルギー研究グループ グループ長
	徳永 朋祥	東京大学大学院 新領域創成科学研究科 教授
	大谷 具幸	岐阜大学工学部 社会基盤工学科 准教授
オブザーバー	笹田 政克	特定非営利活動法人 地中熱利用促進協会 理事長

(2) 地中熱利用にあたってのガイドライン（改訂版）（平成 27 年 3 月）検討委員会

種 別	氏 名	所 属
委 員	田中 正(座長)	筑波大学 名誉教授
	藤井 光	秋田大学 国際資源学部 国際資源学科 教授
	大谷 具幸	岐阜大学 工学部 社会基盤工学科 准教授
	玄地 裕	独立行政法人 産業技術総合研究所 総務本部 人事部 人材開発企画室 室長 (兼務:安全科学研究部門素材エネルギー研究グループ)
	笹田 政克	特定非営利活動法人 地中熱利用促進協会 理事長
	渡邊 幸芳	一般財団法人 ヒートポンプ・蓄熱センター 業務部 課長

(3) 地中熱利用にあたってのガイドライン（改訂増補版）（平成 30 年 3 月）検討委員会

種 別	氏 名	所 属
委 員	田中 正(座長)	筑波大学 名誉教授
	井上 千弘	東北大学大学院環境科学研究科 教授
	内田 洋平	国立研究開発法人 産業技術総合研究所 再生可能エネルギー研究センター 地中熱チーム 研究チーム長
	大谷 具幸	岐阜大学 工学部 社会基盤工学科 教授
	笹田 政克	特定非営利活動法人 地中熱利用促進協会 理事長

(4) 地中熱利用にあたってのガイドライン(第4版)(令和5年3月)検討委員会

種 別	氏 名	所 属
委 員	大谷 具幸(座長)	岐阜大学 工学部 社会基盤工学科 教授
	内田 洋平	国立研究開発法人 産業技術総合研究所 再生可能エネルギー研究センター 地中熱チーム 研究チーム長
	北田 奈緒子	一般財団法人 地域地盤環境研究所 研究開発分部門 部門長 地形地質グループリーダー 主席研究員
	金田一 清香	広島大学大学院 先進理工系科学研究科 建築学プログラム 准教授
	阪田 義隆	金沢大学 理工学域 地球社会基盤学系 准教授
	笹田 政克	特定非営利活動法人 地中熱利用促進協会 理事長
	濱元 栄起	埼玉県環境科学国際センター 研究推進室 土壌・地下水・地盤担当 主任研究員