地中熱利用にあたってのガイドライン

改訂増補版

環境省水・大気環境局

はじめに

我が国では、省エネルギーとエネルギーの有効利用が推進されており、再生可能エネルギーの導入が今後のエネルギー利用の柱の一つとして注目を集めています。太陽光や風力と並び大気中の熱その他自然界に存在する熱（地中熱など）が再生可能エネルギー源と定義され、東日本大震災で生じた原子力発電所の事故を契機に、その役割は一層高まっています。

「気候変動に関する政府間パネル（IPCC）第 5 次評価報告書」では、地球温暖化の影響への適応（第 2 作業部会、平成 26 年 3 月）とともに、再生可能エネルギーの普及拡大による温室効果ガス排出削減等の緩和策（第 3 作業部会、平成 26 年 4 月）の重要性が指摘されました。また、平成 26 年 4 月に示された「エネルギー基本計画」では、地中熱等の再生可能エネルギーをより効果的に活用していくことも、エネルギー需給構造をより効率化する上で効果的な取組とされ、さらに、熱が賦存する地域の特性を活かした利用の取組を進めていくことが重要とされています。

地中熱は、再生可能エネルギー源の中でも「太陽光や風力と異なり天候や地域に左右されない安定性」、「空気熱利用と異なり大気中へ排熱を出さない」、「省エネルギーで CO_2 の排出量を削減できる」などのメリットを有し、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。

地中熱利用ヒートポンプは、近年大幅に設置件数が増加傾向を示しているものの、ようやく累計設置件数が 1,500 件を越えた段階であり（クローズドループ：約 1,300 件、オープンループ：約 200 件）、長期間利用したときの環境影響等については未解明の部分が多いといえます。また、これまで経験していないような大規模な施設への導入に伴う地盤環境への影響等については、その実態は把握されていないのが現状です。

不適切な設計あるいは不適切な運転を行うと地盤中に熱負荷が蓄積し、熱利用効率の低下、更には、地下水・地盤環境に影響を及ぼす可能性があり、そのような影響の定量評価や因果関係の研究が進められています。

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うと共に地中熱利用の普及促進を図ることを目的に、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・地盤環境に影響を及ぼす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。また、改訂にあたり、導入検討において参考となる技術や運用上の工夫、事例等を新たに示しました。

本ガイドラインが、今後の地中熱利用の普及・拡大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、コスト低減技術等の新たな知見や情報に基づいて、適宜、更新・改訂されることをご理解の上で利用され、地中熱利用普及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、地中熱利用の普及方策の構築検討会（座長：田中 正 筑波大学名誉教授）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。

平成 27 年 3 月　　環境省 水・大気環境局土壌環境課 地下水・地盤環境室

増補版にあたって

地中熱は、再生可能エネルギーの中でも、天候や地域に左右されず安定している、大気中へ排熱を出さない、省エネルギーで CO2 の排出量を削減できるなどのメリットを有し、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。

このため、環境省では、平成 27 年３月に「地中熱利用にあたってのガイドライン 改訂版」を取りまとめ、地中熱利用の認知度向上と普及促進を図ってきました。

その後、平成 28 年 5 月、我が国の 2030 年度の温室効果ガス排出削減目標を 2013 年度比で 26.0%減とする「地球温暖化対策計画」が閣議決定され、これを実現するための対策として、再生可能エネルギーの最大限の導入が盛り込まれました。

今般、地下水・地盤環境の保全に留意しつつ、地中熱利用の一層の普及・拡大を図るため、地中熱利用に伴う地盤への熱影響について新たに得られた知見を追加しました。また、環境省の補助事業等を通じて得られた地中熱ヒートポンプの稼働状況のモニタリングデータ等から、地中熱利用による環境負荷の低減効果（省エネルギー効果、CO2 排出削減効果、ヒートアイランド現象の緩和効果）を示すとともに、様々な場所・用途での地中熱利用の稼働事例を拡充し、改訂増補版として取りまとめました。

さらに、改訂版において、「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、現時点では知見が十分ではなく、今後考慮すべき留意点として研究が始められています」とされていた地中熱利用による地下微生物への影響についても、実証事業を通じて得られた結果を新たに追加し、地盤温度変化による地下微生物への影響に関する新たな知見を増補いたしました。

これらの情報を、地中熱利用導入に役立つ情報として活用いただくとともに、現在、すでに地中熱ヒートポンプを利用されているユーザーが効率的な稼働のための運転改善に繋がる情報を得るための契機になることを期待しています。

今回の改訂増補版の作成にあたり、田中　正 筑波大学名誉教授を座長として検討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。

平成 30 年 3 月　　環境省 水・大気環境局土壌環境課 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 地中熱利用ヒートポンプの仕組み 2

1.2 主な地中熱利用方式 3

1.3 普及状況 4

第 2 章 地中熱利用ヒートポンプによる省エネ効果等および事例紹介 8

2.1 省エネルギー効果 8

2.2 CO_2 排出削減効果 14

2.3 省コスト効果 17

2.4 ヒートアイランド現象の緩和効果 22

第 3 章 地中熱利用ヒートポンプの導入・利用に関する配慮事項 24

3.1 地中熱利用ヒートポンプの導入条件 24

3.2 地中熱利用ヒートポンプの導入および利用における留意点 28

第 4 章 地中熱利用による効果・影響とモニタリング方法 37

4.1 考えられる影響項目 39

4.2 モニタリング項目と方法 42

4.3 モニタリング機器の選定・配置等 64

4.4　モニタリングデータの取り扱い方法 70

第 5 章 地中熱利用に関する新技術等の紹介 72

5.1 技術面 72

5.2 運用面 90

おわりに 101

参考資料 103

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手法のうち、主に地中熱利用ヒートポンプを用いた手法を対象に解説しており、その他の方式は対象外としています。

(2)　ガイドラインの構成

第 1 章では、主な地中熱利用方式の概要と普及状況を紹介し、第 2 章で、地中熱利用ヒートポンプの導入による各種効果について、環境省が実施したクールシティ推進事業や既存文献などに基づき整理しています。

第 3 章で、地中熱利用ヒートポンプの導入に適した条件や導入検討における留意点等を示し、また、利用にあたり考えられる地下水・地盤環境への影響項目や、これに対応したモニタリング方法および各種効果の評価方法を第 4 章に記載しています。

最後に、地中熱利用の導入を検討する際に参考となる各種情報・事例等について第 5 章で紹介しています。

第 1 章.　地中熱利用ヒートポンプの概要

地中熱利用ヒートポンプの仕組み、主な地中熱利用方式、地中熱利用の方式別・施設別の普及状況等について概要を記載しています。

第 2 章.　地中熱利用ヒートポンプによる省エネ効果等および事例紹介

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、CO_2 排出削減効果、省コスト効果、ヒートアイランド現象の緩和効果について記載しています。効果は、環境省が実施したクールシティ推進事業やその他の事例・試算例を踏まえ、現状の目安として示したものです。

第 3 章.　地中熱利用ヒートポンプの導入・利用に関する配慮事項

導入場所での条件に適した地中熱利用ヒートポンプの利用方式の考え方、導入検討における各方式の留意点等について記載しています。

第 4 章.　地中熱利用による効果・影響とモニタリング方法

地中熱利用ヒートポンプを用いることにより周辺の地下水・地盤環境に及ぼす可能性のある影響項目、システムそのものや周辺環境をモニタリングする項目と方法、モニタリング機器の選定・配置の考え方と事例、および得られたデータによる各種効果の評価方法を記載しています。

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、およびコスト縮減等の運用面に関する各種情報・事例等を紹介しています。

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

ヒートポンプとは、水や不凍液等の熱媒体を循環させて低い温度の物体（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 1-1)。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やりとりしています。地中熱利用ヒートポンプは地中との間で熱交換を行う点が異なりますが、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。

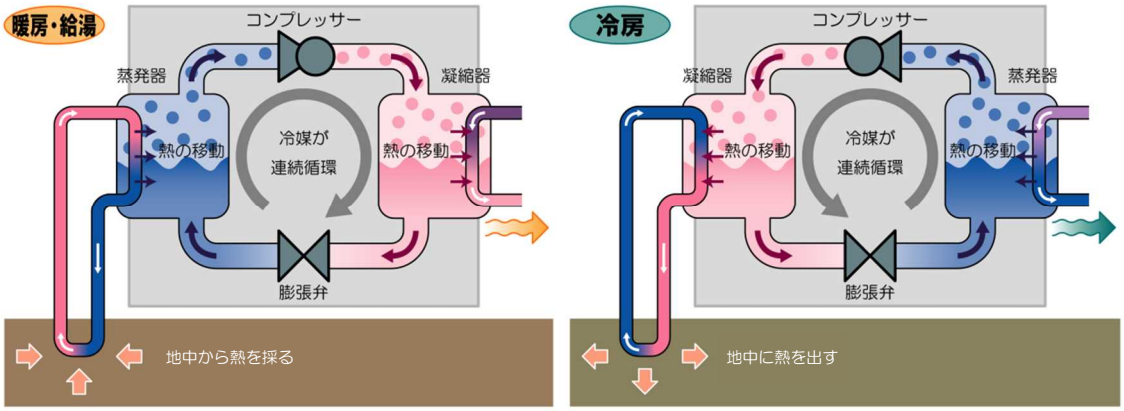


図 1-1　ヒートポンプで地中と熱をやりとりする仕組み

(2)　地中熱の利用

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 1-2)。

外気温と地中の温度差が大きいこと、空気よりも熱容量の大きな地下水や地盤と熱をやりとりすることにより、空気を熱源とするエアコンよりも効率的(10～25%程度)にエネルギーを利用できます。

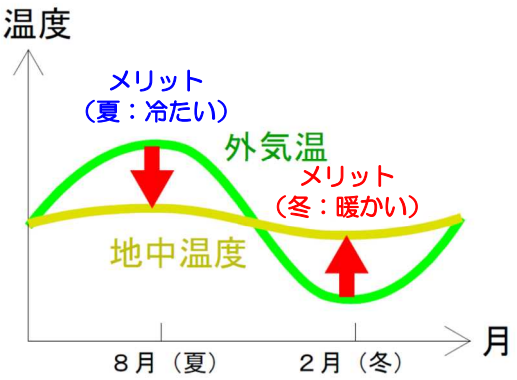


図 1-2　外気温と地中温度の温度差

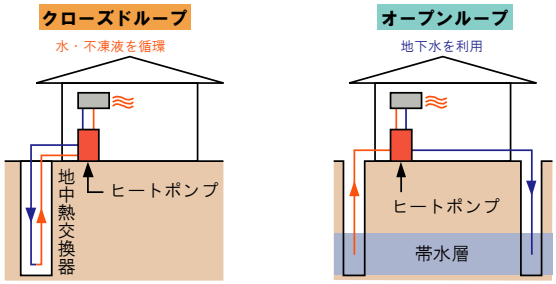
また、空気を熱源とするエアコンの冷房とは異なり、外気に熱を放出しないので、ヒートアイランド現象の緩和にも貢献できます。

1.2　主な地中熱利用方式

地中熱利用ヒートポンプは地中との熱のやりとりの方法によって、クローズドループ方式、オープンループ方式に分けられます。なお、地中熱利用方式にはヒートポンプを介さずに地中熱を直接利用する方式も普及しています。

ヒートポンプを使用しない地中熱利用の例として、直接的な熱伝導や、空気や水、熱媒体を地中に循環させる手法があります(図 1-3)。

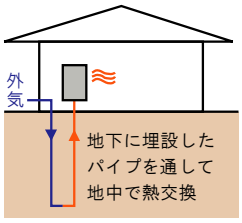
ヒートポンプシステム



ヒートポンプの熱源として空気熱の代わりに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に不凍液等を循環させ、ヒートポンプで熱交換させるもので、設置場所を問わない。
オープンループ方式では、井戸から揚水した地下水をヒートポンプで熱交換させるもので、水質が良く、地下水障害の恐れがない場合に適用できる。

◇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

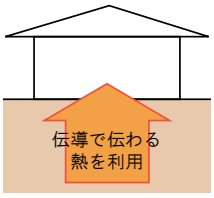
空 気 循 環



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・ビル等の保温・換気

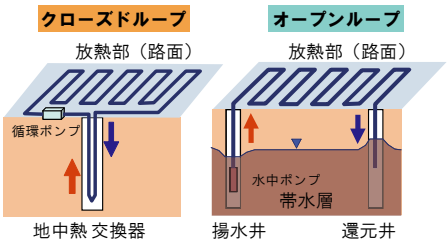
熱 伝 導



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、暖房や除湿についてはエアコンを併用して行われる。

◇住宅の保温

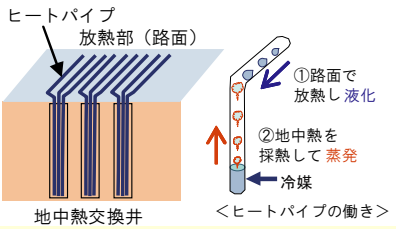
水 循 環



クローズドループ（地中熱交換）方式は、地中熱交換井に熱交換器を挿入し、これと路面に埋設した放 熱管との間に不凍液等を循環させ、路面の融雪・凍結 防止を行う(放射冷房等、融雪以外の利用例もあり)。
オープンループ（地下水循環）方式は、地下水を揚水し、それを路面に埋設した放熱管に通水させ、その地下水の持つ熱により路面の融雪・凍結防止を行う(放射冷房等、融雪以外の利用例もあり)。

◇路面の融雪・凍結防止　◇住宅・ビル等の冷房

ヒートパイプ



冷媒の蒸発と凝縮で熱を移流させるシステムで、深さ15～20mの熱交換井に冷媒が封入されたヒートパイプを数本挿入し、その上部を路面下に放熱管として埋設する。
降雪時など路温が低下すると冷媒が自然に液化と蒸発を繰り返し、地中熱が路面へ運ばれ融雪・凍結防止が行われる。

◇路面の融雪・凍結防止

図 1-3　地中熱利用の様々な形態

1.3　普及状況

地中熱は、国内では主に住宅・事務所・庁舎等での冷暖房・給湯や道路融雪に利用されていますが、その他に工場、学校、店舗、農業施設（温室など）等にも幅広く利用されています（図 1-4）。

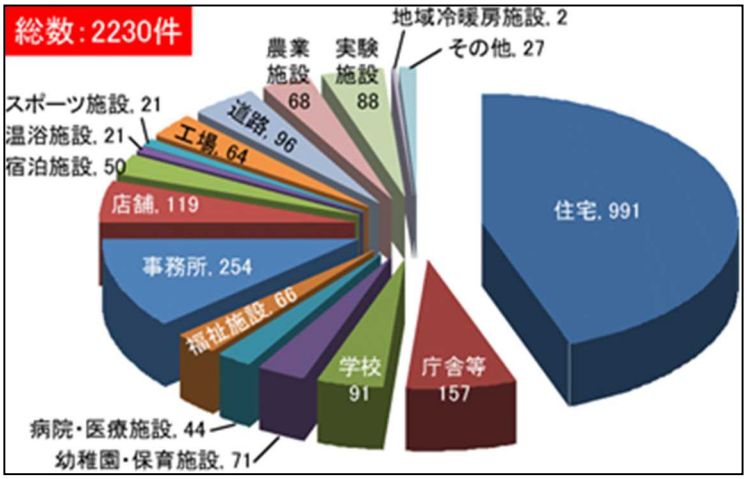


図 1-4　国内でのヒートポンプを用いた地中熱の利用用途

海外では日本に比べて地中熱利用ヒートポンプ普及が進んでいます（図 1-5）。日本と同程度の面積のドイツや、面積の小さいスイス等でも日本の 10 倍以上の設備容量が導入されており、これらの国と比較して、日本でもさらなる普及の余地は大きいといえます。近年は国内の設置件数も急速に増加しています（図 1-6）[1]。

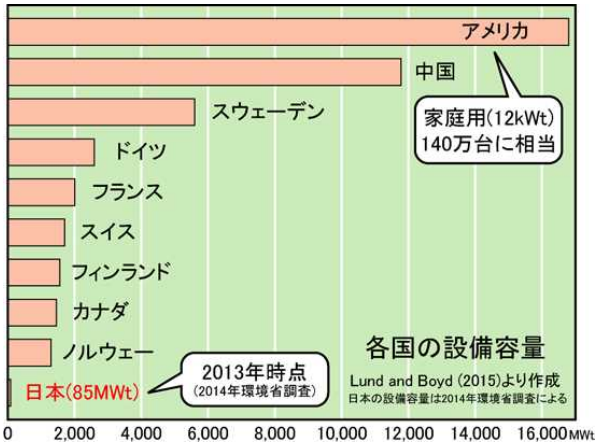


図 1-5　地中熱利用ヒートポンプ設備容量（海外との比較）[2]

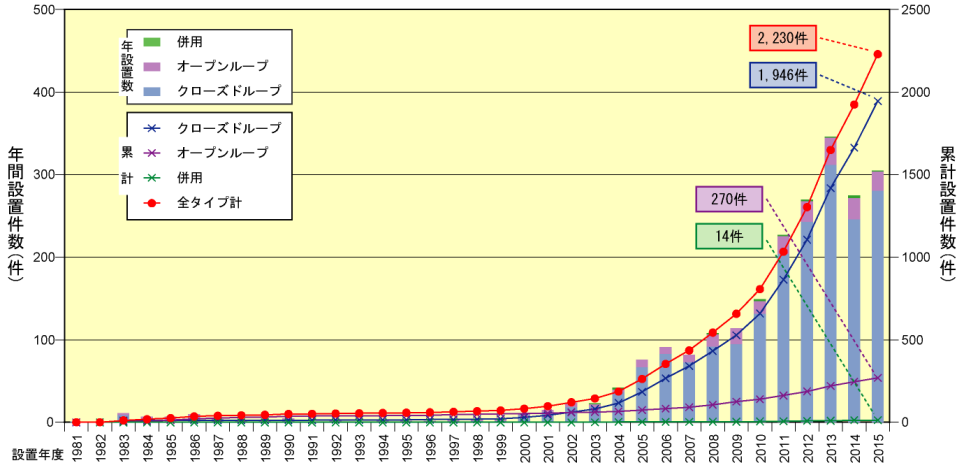


図 1-6　地中熱利用ヒートポンプ設備の国内設置件数 [1]

[1]環境省，平成 28 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
[2]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）

2015 年度末までの地中熱利用施設数は以下のとおりであり、ヒートポンプを使用した施設はこのうち 32%程度を占めています（図 1-7）。

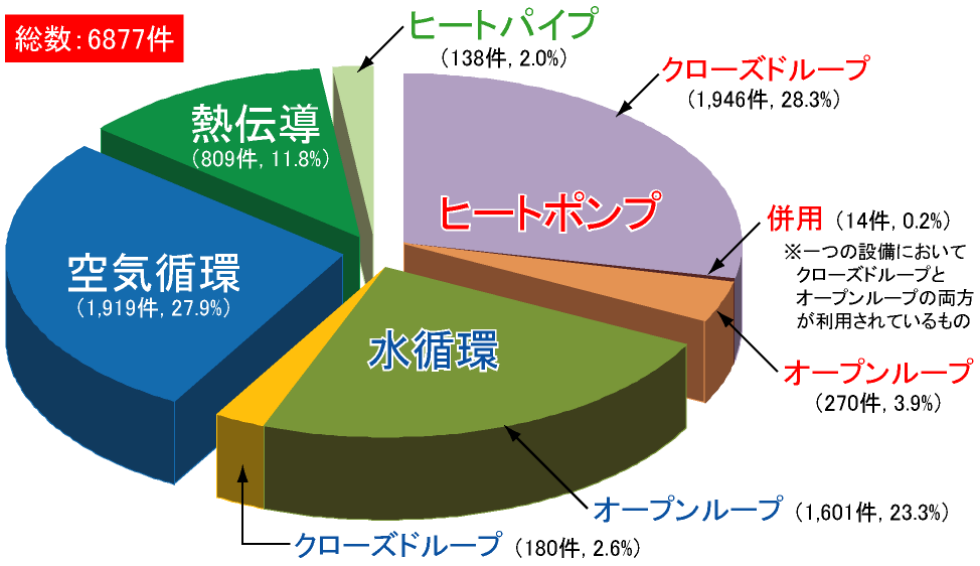


図 1-7　地中熱利用の利用方法別設置件数 [1]

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備容量および設置件数は図 1-8、図 1-9 に示すとおりであり、北海道における累計設備容量・設置件数が非常に大きい分布となっています。その他の地域については、近畿地方以東に多く分布しており、中国・四国・九州地方で導入されている累計設備容量・設置件数は小さい結果となっています。

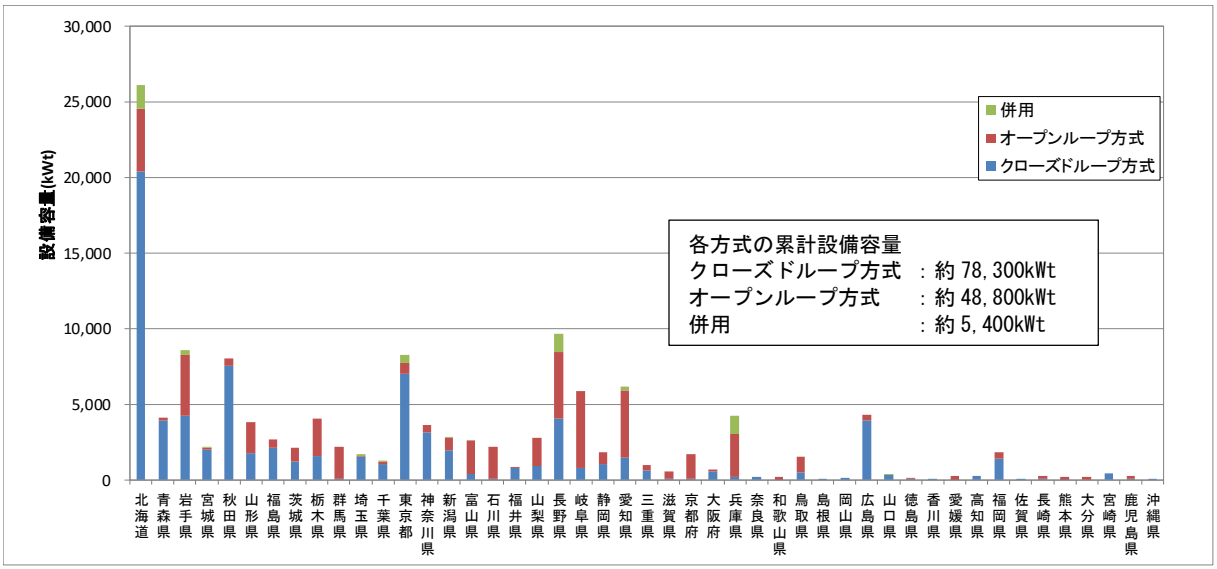


図 1-8 都道府県別の累計設備容量(2015 年度末時点)[1]
※kWt（キロワットサーマル）は熱出力の単位

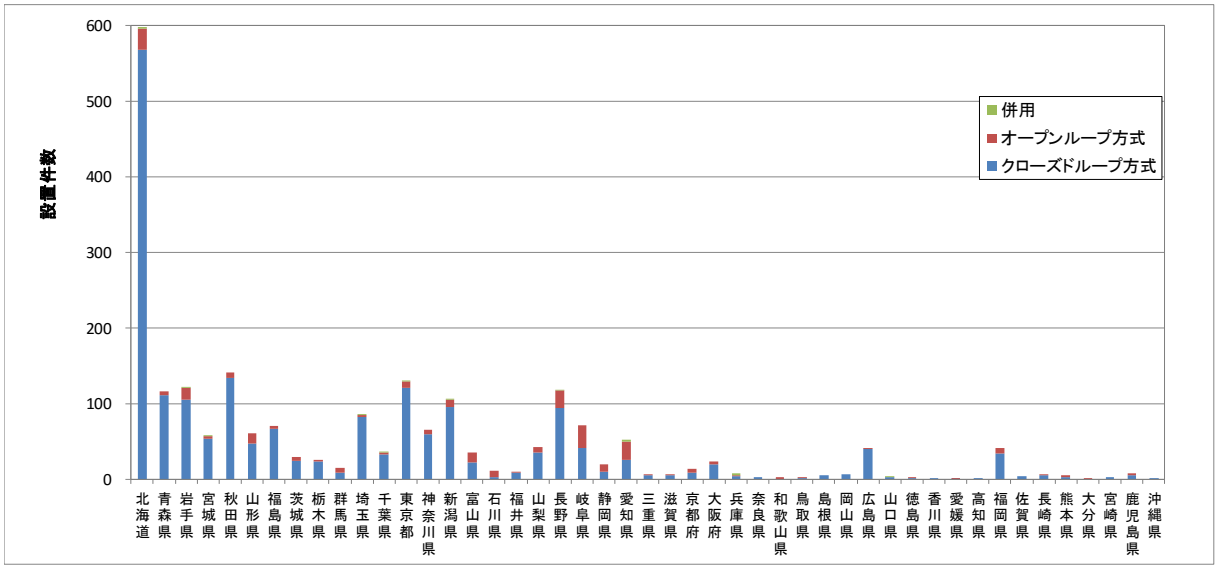


図 1-9 都道府県別の累計設置件数(2015 年度末時点)[1]

施設別の累計設備容量および設置件数は図　1-10、図　1-11 に示すとおりであり、設備容量は道路・庁舎等・事務所等で多い一方、設置件数は住宅が多く、住宅において小規模なシステムが多数設置されている結果となっています。

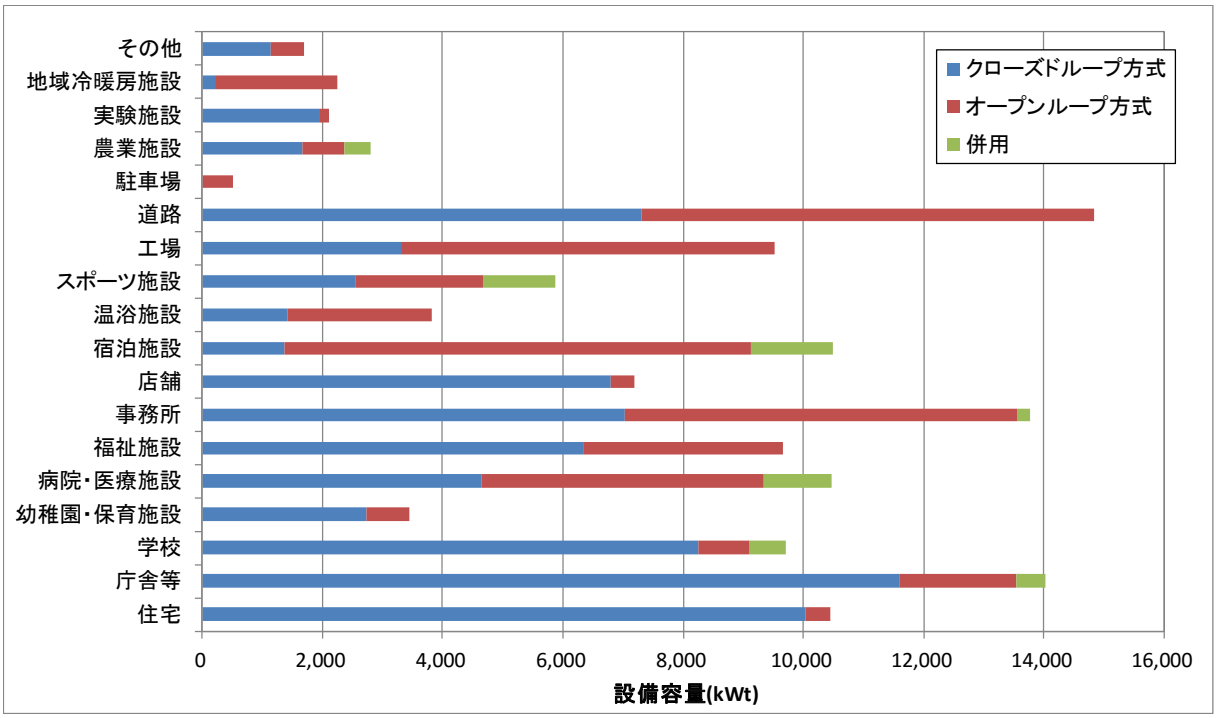


図　1-10　施設別の累計設備容量(2015 年度末時点)[1]
※kWt（キロワットサーマル）は熱出力の単位

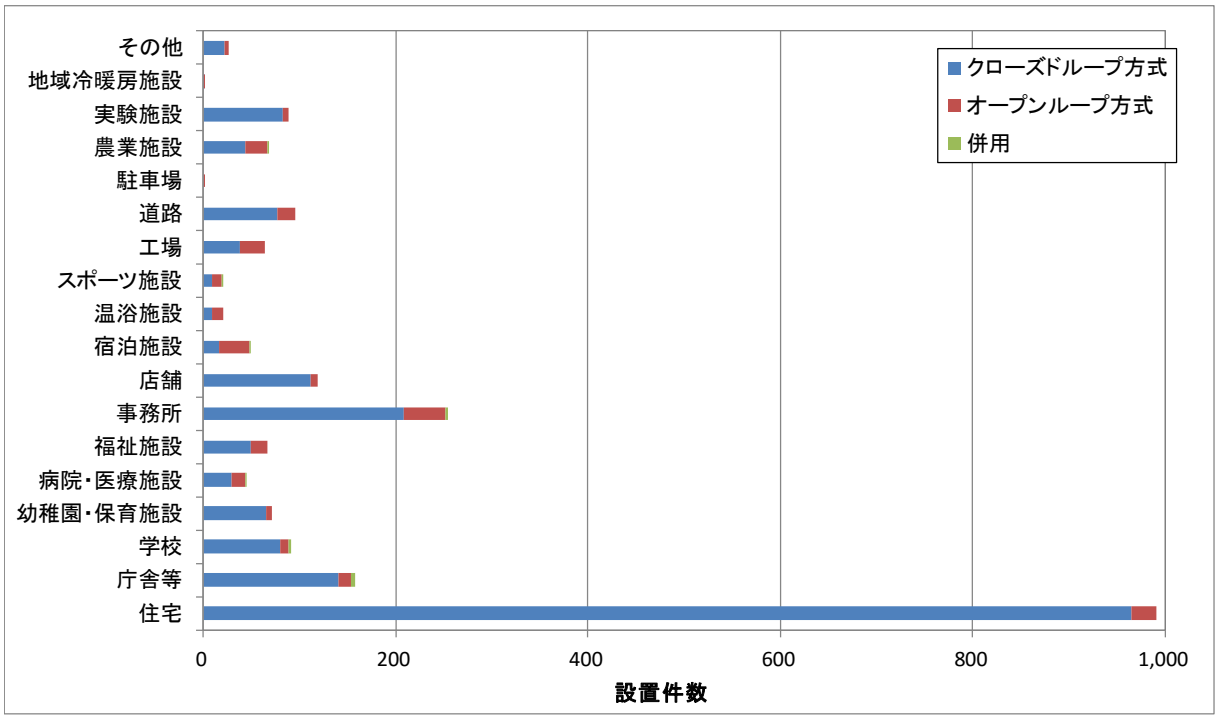


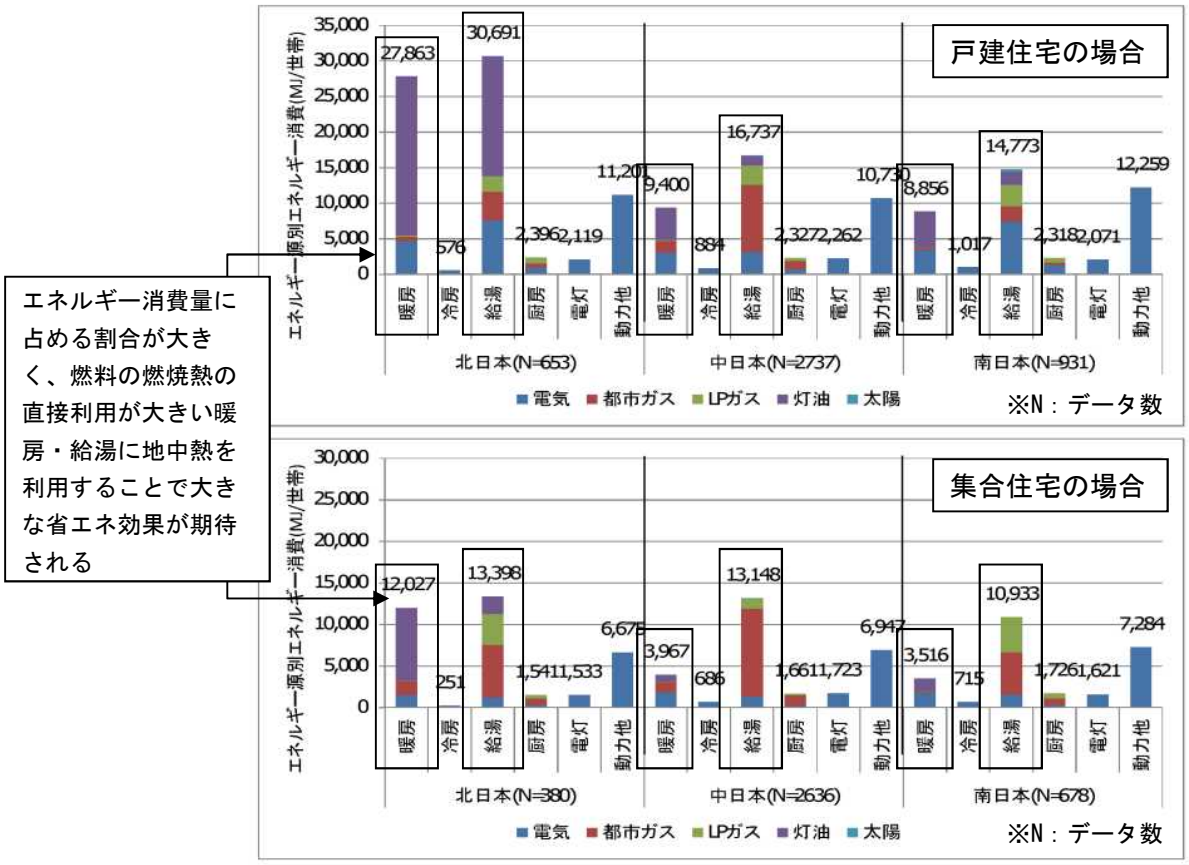
図　1-11　施設別の累計設置件数(2015 年度末時点)[1]

第2章　地中熱利用ヒートポンプによる省エネ効果等および事例紹介

2.1　省エネルギー効果

地中熱利用ヒートポンプを導入すると、冷暖房などの熱を交換するシステムが高効率化し、省エネルギーの効果が得られます。これは、地中熱の温度が通年で安定しており、地中熱と外気との夏冬の温度差があること、また、熱源温度が同じ場合でも、同じ容積の空気に対して水は約3500倍の熱を蓄える、つまり小さな容量でより多くの熱を蓄えること等によります。このことから、地中熱ヒートポンプは熱効率が高く、従来の空気熱源ヒートポンプと同等以上の成績係数(COP)[3]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、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・給湯について、小さな電力量で済む地中熱ヒートポンプを利用することで、大きな省エネルギー効果を得ることができます。



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[4]

[3]成績係数（Coefficient Of Performance）：エアコン、冷凍機などのエネルギー消費効率を表す指標の一つで、消費エネルギー（kW）に対する施される冷房能力（kW）、または暖房能力（kW）の比率として計算される無次元の数値。この数値が大きいほど、定格条件におけるエネルギー消費効率がよいと言える。（公益社団法人 日本冷凍空調学会ホームページより）

[4]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.

また、冷房時については、地中熱ヒートポンプシステムと空気熱源ヒートポンプは、地中熱と空気という熱源の違いのほかに、運転時の室温・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、省エネ効果を一元的に比較するのが困難です。

両者の省エネ効果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%程度の省エネ効果があるという報告があります[5]。

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全空気熱源ヒートポンプの消費電力 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[6]。加えて、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効果も期待されます[6]。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[6]。

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）」）のうち、クローズドループ方式（温室利用を除く）では従来の冷暖房方式に比べて約 10～30%程度、オープンループ方式では、事例は少ないものの 20～30%程度の省エネルギー効果がありました（図 2-2、表 2-1）。本ガイドラインでは、一次エネルギー削減効果を省エネルギー効果としています。

施設規模（冷暖房床面積またはヒートポンプ出力）と省エネルギー効果の対応をみると、施設規模に関わらず、空気熱源ヒートポンプに対して 10～25%、灯油ボイラー等に対して 30%程度の効果が期待されるとの結果が得られています（図 2-2）。

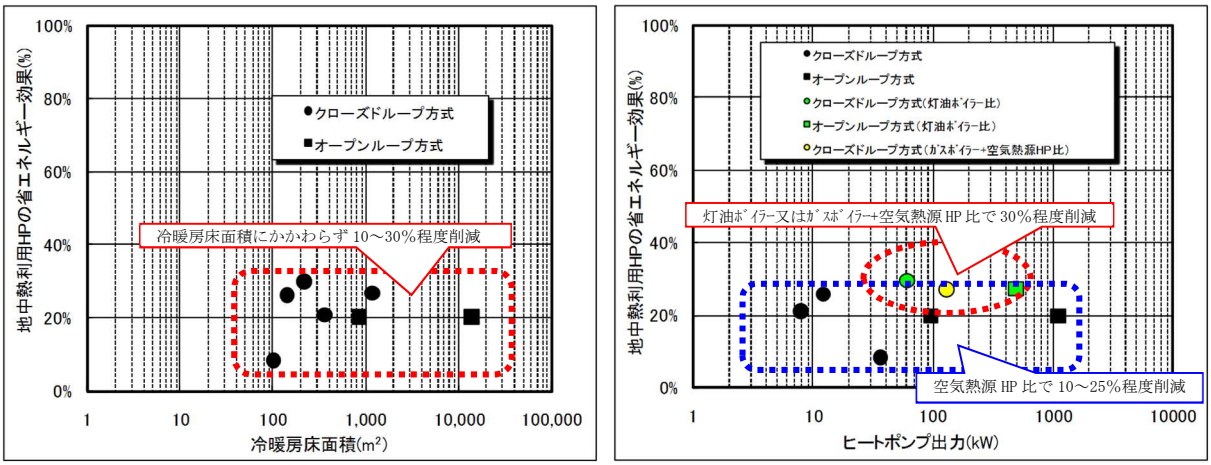


図 2-2　省エネルギー効果の目安

[5]例えば、中村ら，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，No.86，p.27-30，2013.、または、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.等

[6]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（http://grsj.gr.jp/proposal/proposal110405b.html）

表 2-1　クールシティ推進事業等での省エネルギー効果事例（太字の事業名は推進事業）

種別	事業名等(地域)	利用形態	冷房	暖房	給湯	他	HP 出力[注3][注4] (kW)	冷暖房等面積 (m^2)	省エネルギー効果	CO_2 削減量[注5] ($t\text{-}CO_2$/年)
クローズドループ	**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**(福岡県福岡市)	住宅	●	●			12	140	26%	―
	地中放熱による土壌内生態系への影響調査(青森県弘前市)	融雪				●	8	370 (道路)	21% (2.86GJ 削減)	0.3 (21%削減)
	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(岩手県盛岡市)	オフィス	●	●			62	222	29.7% (62.7GJ 削減)	7.6 (52.7%削減)
	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(宮城県仙台市)	オフィス	●	●			4	145	―	6.1
	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(北海道赤平市)	温室	●	●			648	5,400 (温室)	―	270 (28%削減)
	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(大阪府吹田市)	オフィス	●	●			21.7～36.2	約 100	8.2% (4.4GJ 削減)	0.3 (約 8.2%削減)
	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(神奈川県横浜市)	ﾌﾟｰﾙ	●	●		●	131	1,200	27% (310GJ 削減)	17.05 (31.5%削減)
	地中熱利用ヒートポンプシステム過負荷運転実証試験(栃木県芳賀町)	オフィス	●	●			2,4,12	90	―	―
	都心での地中熱利用[注1] (東京都千代田区)	オフィス	●	●			63	303	49% 冷房時は 69%	―
	戸建て住宅の実施例[注2] (北海道富良野市)	住宅		●			6.2	129	約 30% 約 10GJ 削減)	1.9 (50%削減)
オープンループ	**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**(岐阜県岐阜市)	オフィス	●				1,124	14,000	20～50% (26.0GJ 削減)	26 (20%削減)
	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(長野県立科町)	温泉施設		●	●	●	165.6×2	-	27.4% (1,263.4GJ 削減)	141.8 (45.6%削減)
	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 (山形県山形市)	オフィス	●	●	●	●	90～100	840	20% (126GJ 削減)	6.1 (20%削減)

注 1：出典：応用地質,第 51 巻,第 6 号,P.265-272,2011
注 2：出典：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，オーム社，平成 19 年 9 月，p.122
注 3：ヒートポンプの略記
注 4：冷房、暖房、給湯、加熱で出力が異なる場合は、出力の大きい方を記載した。
注 5：CO_2 削減量は以下の CO_2 排出量原単位を用いて算定している。
（クローズドループ）
青森県弘前市での実証事業：0.378 kg-CO_2/kWh
岩手県盛岡市の実証事業：0.41 kg-CO_2/kWh、2.5t-CO_2/灯油消費量(kL)
宮城県仙台市での実証事業：0.44 kg-CO_2/kWh
北海道赤平市の実証事業：0.517 kg-CO_2/kWh（北海道電力 2007 年度実績より）、2.489t-CO_2/灯油消費量(kL)
大阪府吹田市の実証事業：0.555 kg-CO_2/kWh（地球温暖化対策推進法施行令より）
神奈川県横浜市での実証事業：0.425 kg-CO_2/kWh、2.08 kg-CO_2/都市ガス消費量(m^3)
（オープンループ）
岐阜県岐阜市の実証事業：過年度報告書及び検討会資料には未記載
長野県立科町の実証事業：0.41 kg-CO_2/kWh、2.5t-CO_2/灯油消費量(kL)
山形県山形市での実証事業：0.469 kg-CO_2/kWh（東北電力の実排出係数(2008 年度実績)より）、2.49t-CO_2/灯油消費量(kL)、2.08t-CO_2/ガス消費量(1,000Nm^3)

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は、1 世帯あたりで約 39GJ（2008 年度）となっており、このうち、給湯（29.5%）、暖房（24.3%）、冷房（2.1%）が約 56%（約 22GJ）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、地中熱ヒートポンプに切り替えて冷暖房・給湯を行うことにより、冷暖房・給湯の消費エネルギーを 10～30%（約 2～7GJ）程度、全体では 6～17%程度削減できると期待できます。

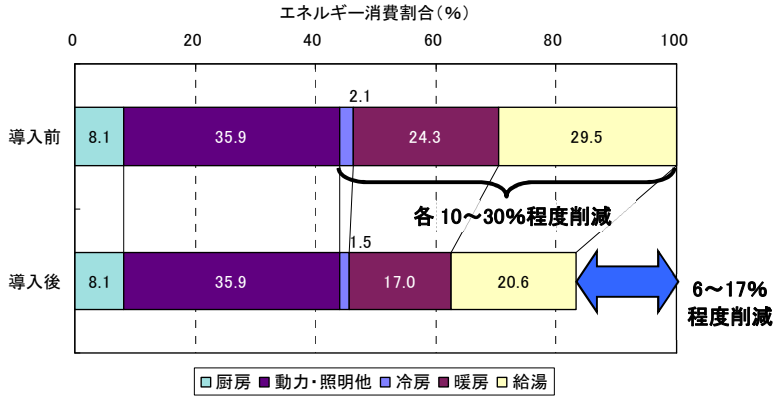


図 2-3　家庭における地中熱利用ヒートポンプ導入による省エネルギー効果の試算例[7]

一方、オフィスビルでのエネルギー消費は、冷温水機などの熱源（31.1%）、空調機などの熱搬送（12%）、給湯（0.8%）でビル全体の約 44%を占めています[8]。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ヒートポンプに切り替えて冷暖房・給湯を行うことにより、エネルギー消費を 4～13%程度低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を、暖房、冷房、給湯、厨房、動力・照明の 5 用途別に延べ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・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、建物の断熱強化や冷暖房効率の向上なども必要です。冷暖房・給湯を従来方式から地中熱ヒートポンプに切り替えれば、冷暖房・給湯の消費エネルギーを導入前の 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%程度に低減できると期待できます。

[7]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、世帯当たりの消費エネルギー（2008 年度）に対する地中熱ヒートポンプの省エネ効果（対象：冷房、暖房、給湯）を従来比 30%削減として作成

[8]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

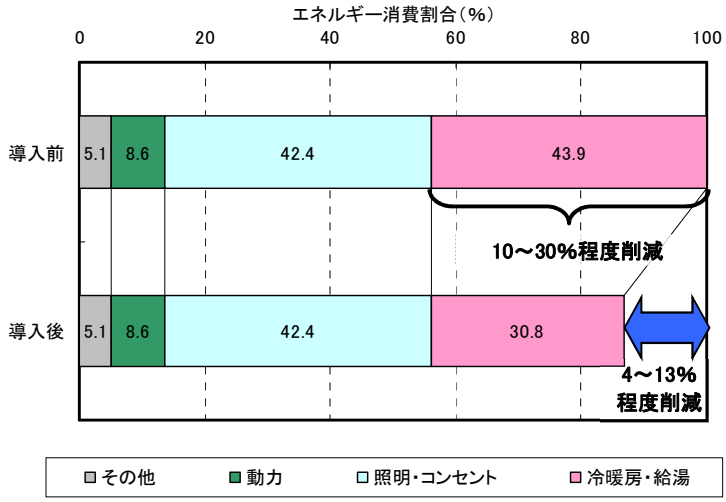


図 2-4　オフィスビルにおける地中熱利用ヒートポンプ導入による省エネルギー効果の試算例[9]

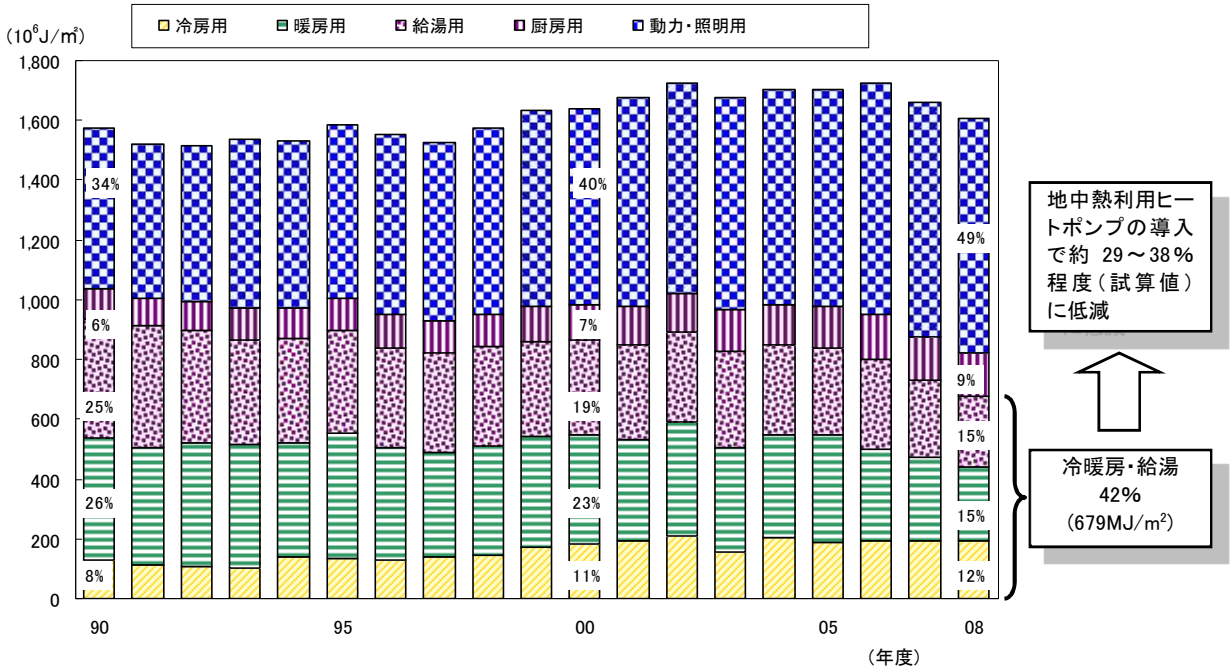


図 2-5　業務用エネルギー消費原単位の推移[10]

環境省では、エネルギー起源二酸化炭素排出の削減を目標に、平成 25 年度から、地中熱ヒートポンプ導入等に対して補助事業[11]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。

[9]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

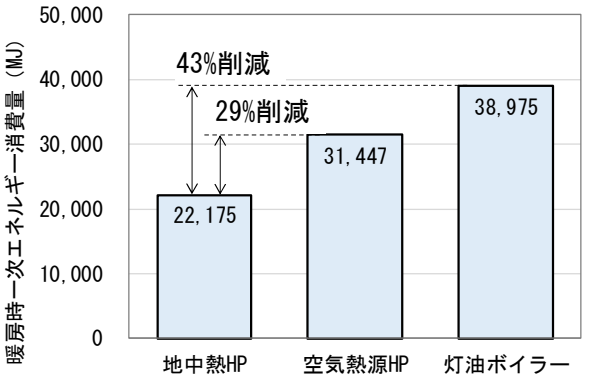
[10]経済産業省，エネルギー白書 2010

[11]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、その殆どが空調利用で、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 20kW 未満）と、中・大規模施設（中規模施設：ヒートポンプ定格能力 20kW 以上 150kW 未満、大規模施設：ヒートポンプ定格能力 150kW 以上)に分けて示しています。

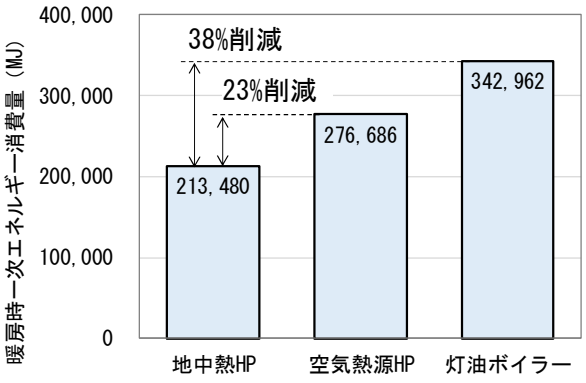
地中熱ヒートポンプでは、空気熱源ヒートポンプや灯油ボイラーを用いた場合と比較し 23～43%の省エネ効果があることが確認できました（図 2-6～図 2-9)。特に、化石燃料を利用する灯油ボイラーに比べると大幅な省エネルギー効果が見られます。

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・灯油）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。



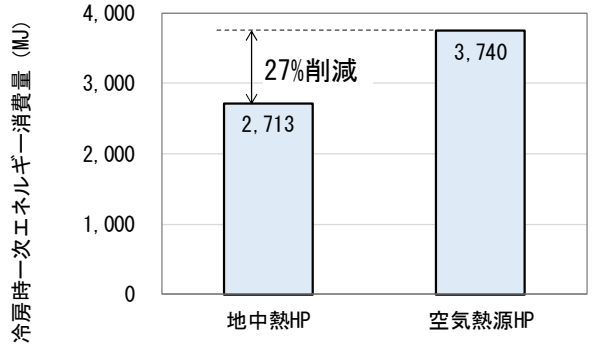
・電力の一次エネルギーへの換算係数:9.76（MJ/kWh）
・地中熱は消費電力の代表値より算出
・空気熱源ヒートポンプ（COP=2.9）および灯油ボイラー（燃焼効率=0.86）での一次エネルギー消費量は、地中熱利用時の生成熱量（代表値）を生成した場合に要する電力量および灯油量から算出

図 2-6　暖房時の省エネ効果
（ヒートポンプ定格能力 20kW 未満）



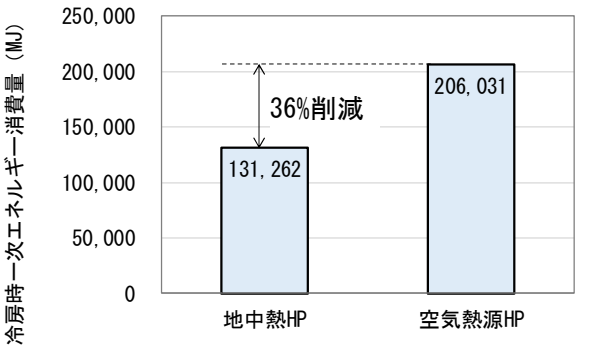
・電力の一次エネルギーへの換算係数:9.76（MJ/kWh）
・地中熱は消費電力の代表値より算出
・空気熱源ヒートポンプ（COP=2.9）および灯油ボイラー（燃焼効率=0.86）での一次エネルギー消費量は、地中熱利用時の生成熱量（代表値）を生成した場合に要する電力量および灯油量から算出

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

2.2　CO_2 排出削減効果

石油やガスを用いた暖房や給湯と比べた場合、地中熱利用ヒートポンプは電力のみで稼働するため、地球温暖化の原因となる CO_2 を直接排出しないこと、空気熱源ヒートポンプよりも高効率で消費電力が少ないことから、温室効果ガス（CO_2）の排出削減にも寄与します。

図 2-10 の例では、CO_2 オフセット・クレジットの価格を 1,500 円/t-CO_2※とした場合、空気熱源ヒートポンプに対しては約 2.0 万円/年、ガスヒートポンプに対しては約 3.8 万円/年に相当します。

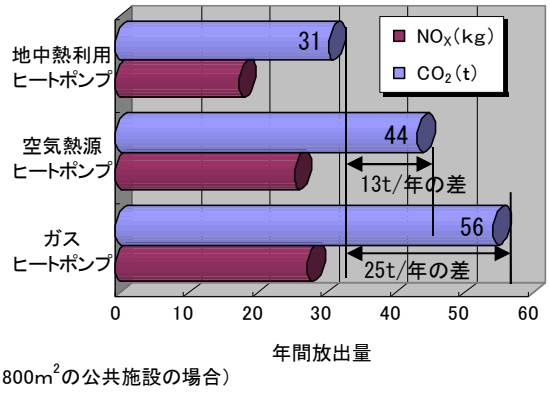


図 2-10 温室効果ガス排出削減効果の例

（出典：地中熱利用促進協会パンフレット）

※国内における CO_2 オフセット・クレジットは相対取引であり、2015 年 2 月現在は概ね 1,500 円～2,000 円程度で取引されています。

また、クールシティ推進事業の例で施設規模（冷暖房床面積）に対する CO_2 排出削減効果の対応をみると、施設規模に関わらず、空気熱源ヒートポンプに対しては 20%程度、灯油ボイラー等に対しては 30～55%程度の CO_2 排出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）。

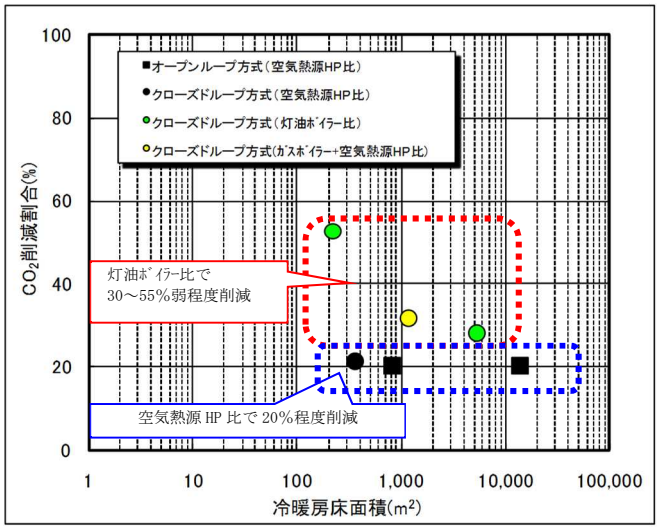


図 2-11　クールシティ推進事業に基づく CO_2 排出削減効果の目安

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[12]」の対象技術の CO_2 排出削減効果を試算した例では、灯油と比較して約 26～55%、都市ガスと比較して約 0%～43%の CO_2 排出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 CO_2 排出削減効果

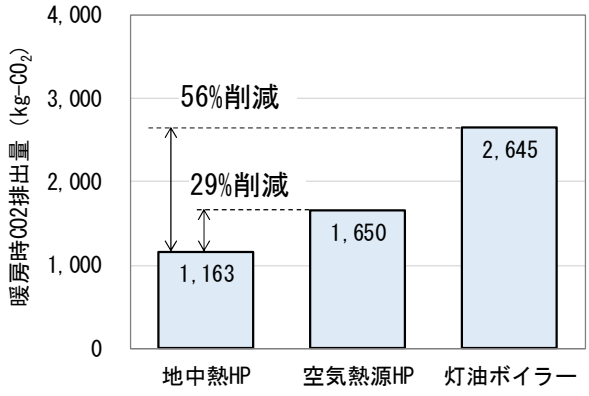
環境技術実証事例			MJ あたり CO_2 排出量[13] ($kg\text{-}CO_2/MJ$)			他の熱源と比較した CO_2 排出削減率	
実証番号	施設名	システムエネルギー効率(室内機を含む)	地中熱利用 HP	灯油	都市ガス	灯油	都市ガス
052-0901	川崎市　南河原こども文化センター	3.10	0.047	0.085	0.062	45%	25%
052-1001	三菱マテリアル株式会社大宮新館	4.09	0.035			58%	43%
052-1002	株式会社秀建コンサルタント本社事務所	3.36	0.043			49%	31%
052-1003	学校法人森村学園	2.70	0.053			37%	14%
052-1101	川田工業株式会社富山本社	2.80	0.063			26%	0%

[12]環境省 環境技術実証ホームページ（http://www.env.go.jp/policy/etv/index.html）
[13]電気：電気事業者別の CO_2 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、CO_2 排出削減効果を算定しました。

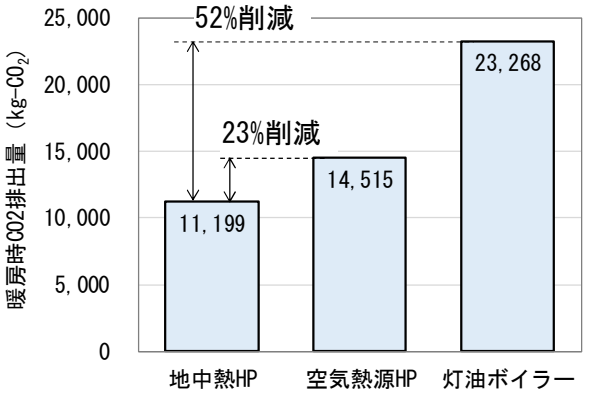
地中熱ヒートポンプでは、CO_2 排出量が空気熱源ヒートポンプに比べ 23～36%削減でき、灯油ボイラーに比べ 52～56%削減できることが確認できます（図 2-12～図 2-15）。この CO_2 排出削減効果を樹木による CO_2 吸収効果[14]に換算すると、例えば、暖房時のヒートポンプ定格能力 20kW 以上の場合には、年間で杉の木 377～1,371 本分の吸収量に相当します。

このように、地中熱ヒートポンプを導入することで、大幅な CO_2 削減効果が得られます。



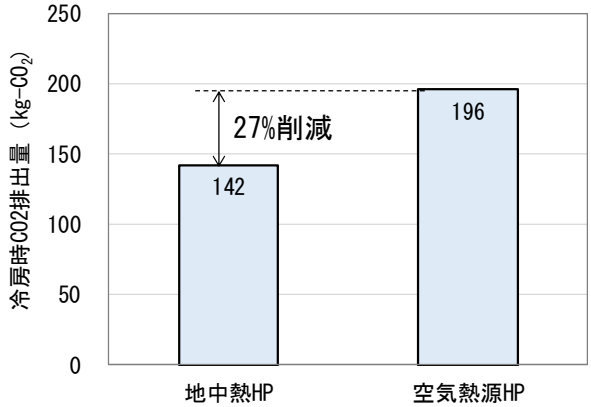
・CO_2 排出係数
電力：0.512（kg-CO_2/kWh）灯油：2.49(kg-CO_2/L)
・地中熱は消費電力の代表値より算出
・空気熱源ヒートポンプ（COP=2.9）および灯油ボイラー（燃焼効率=0.86）での CO_2 排出量は、地中熱利用時の生成熱量（代表値）を生成した場合に要する電力量および灯油量から算出

図 2-12　暖房時の CO_2 削減効果
（ヒートポンプ定格能力 20kW 未満）



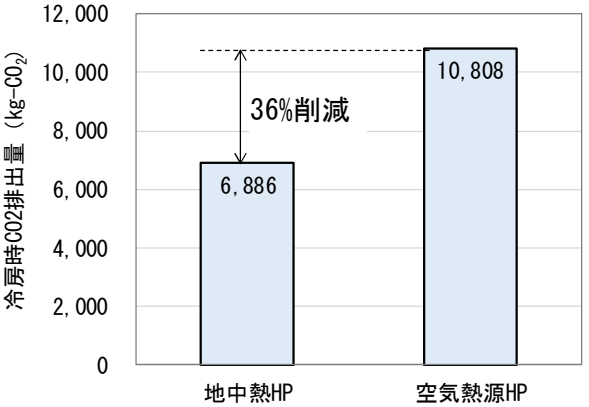
・CO_2 排出係数
電力：0.512（kg-CO_2/kWh）灯油：2.49(kg-CO_2/L)
・地中熱は消費電力の代表値より算出
・空気熱源ヒートポンプ（COP=2.9）および灯油ボイラー（燃焼効率=0.86）での CO_2 排出量は、地中熱利用時の生成熱量（代表値）を生成した場合に要する電力量および灯油量から算出

図 2-13　暖房時の CO_2 削減効果
（ヒートポンプ定格能力 20kW 以上）



・CO_2 排出係数
電力：0.512（kg-CO_2/kWh）灯油：2.49(kg-CO_2/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 CO_2 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　冷房時の CO_2 削減効果
（ヒートポンプ定格能力 20kW 未満）



・CO_2 排出係数
電力：0.512（kg-CO_2/kWh）灯油：2.49(kg-CO_2/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 CO_2 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　冷房時の CO_2 削減効果
（ヒートポンプ定格能力 20kW 以上）

[14]林野庁，樹木による CO_2 吸収量：35～40 年生の杉の木 1 本あたり、2.4kg-C/y（= 8.8 kg-CO_2/y)。

2.3　省コスト効果

国内では、近年急速に地中熱利用ヒートポンプの普及が進み始めた段階ですが、現状においても、適切な設計・運用や助成制度の活用により省コスト効果が得られる例があり、今後更に効果の増大が期待されています。

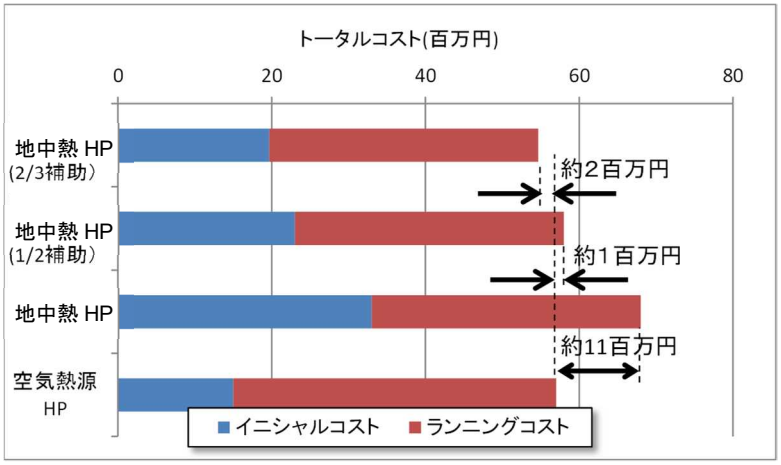
省コスト効果は地中熱利用ヒートポンプの普及に伴うコストダウンによって増大する可能性があり、また、現地条件による幅も大きく一概に単価等を議論できないため、ここでは参考として「オフィス等の冷暖房・給湯」、「戸建住宅の冷暖房・給湯」、「道路融雪」、「農業用用途」、「温水プール」における省コスト効果（コスト回収）の試算例を紹介します。

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、「第 5 章.　地中熱利用に関する新技術等の紹介」でヒートポンプの出力 kW あたりのイニシャルコストの実績や、参考資料 11 で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 2-16)[15]。

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。



＜試算条件＞
地中熱利用ヒートポンプ
　暖房出力 45kW
　冷房出力 40kW
地中熱交換器
　ダブルUチューブ 100m×6本
建物供用時間：24 時間/日（全日）
（消費税 5%含む）

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 2-16　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

[15]横浜市泉区役所総務部区政推進課・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.

＜戸建住宅の冷暖房・給湯＞

寒冷地の戸建住宅(冷暖房面積約 130㎡)の冷暖房・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%程度の省コスト効果が得られるとの試算例があります(図 2-17)[16]。

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 2-18)[17]。

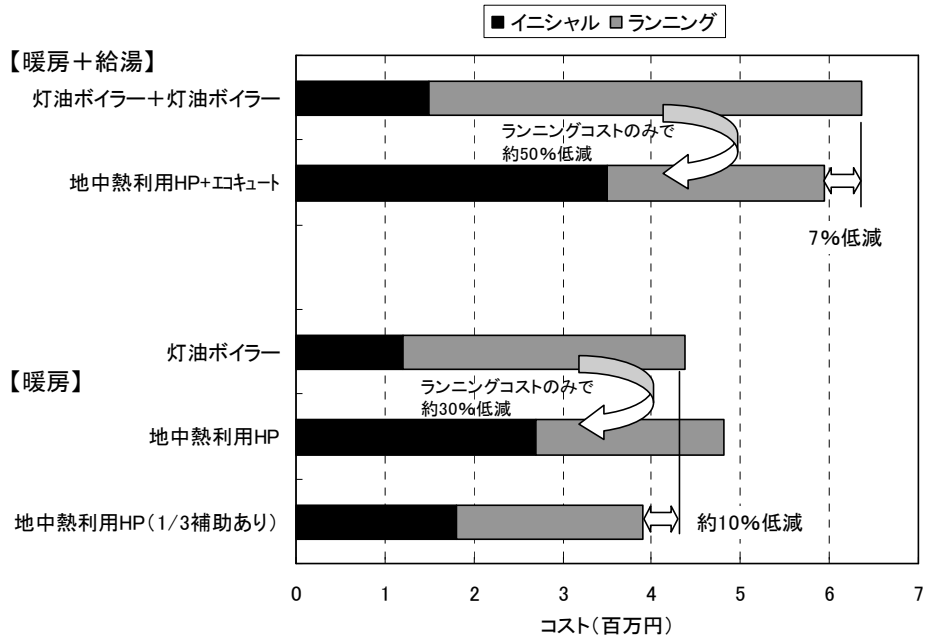
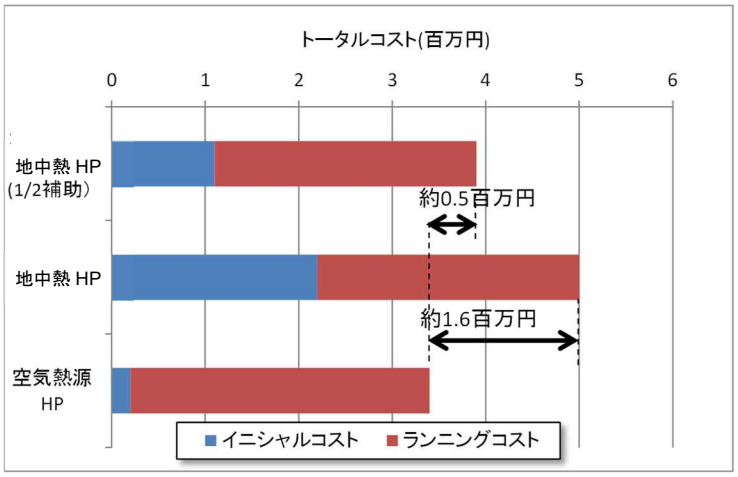


図 2-17　寒冷地の戸建住宅の冷暖房・給湯における省コスト効果の試算例 [16]



＜試算条件＞
地中熱ヒートポンプ
　暖房出力 5kW
　冷房出力 4kW
地中熱交換器
　ダブル U チューブ 80m×１本
建物供用時間：18 時間/日
　11～3 月、6～9 月は毎日運転
　4，5，10 月は半月運転
（消費税 5%含む）

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 2-18　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 [17]

[16]青森県，青森県地中熱利用推進ビジョン，　2008. 2.
[17]横浜市泉区役所総務部区政推進課・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 400m^2 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[18,19]、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[18]、ガスボイラーに比べて 30%程度、石油ボイラーに比べると 45%程度の省コスト効果が得られるとの試算があります(図 2-19)[19]。

道路融雪(青森県弘前市)

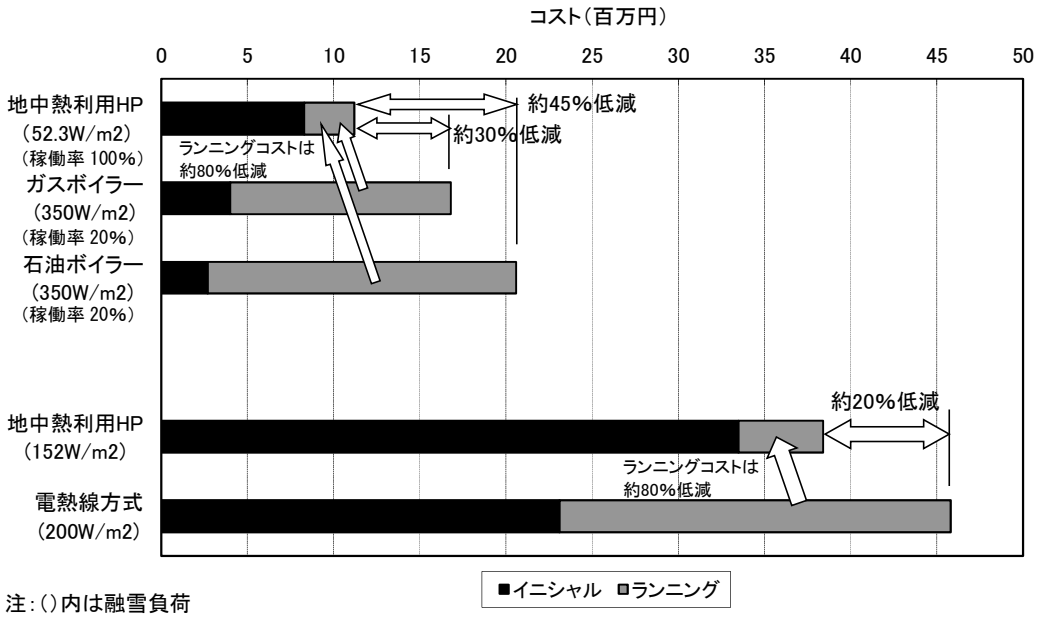


図 2-19　道路融雪の省コスト効果の試算例（融雪面積約 400m^2）[18,19]

また、融雪面積 1,650m^2、2,200m^2（双方とも融雪負荷 300W/m^2）のランニングコストでは、電熱線方式に比べては約 70%の省コストになり[20]、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、イニシャルコストが高いために電熱線方式に比べると 10～20%程度コストアップするものの、助成制度の活用により 20～35%程度の省コスト効果が得られるとの試算もあります（図 2-20）[20]。

[18]青森県，青森県地中熱利用推進ビジョン，p. 76，2008. 2. のイニシャルとランニングのコストを用いて試算
[19]省エネ・新エネマッチング会，2010. 3. 10.，㈱日伸テクノ提供資料のイニシャルとランニングのコストを用いて試算
[20]倶知安町，地中熱利用融雪・暖房システム詳細ビジョン報告書，2007. 3.

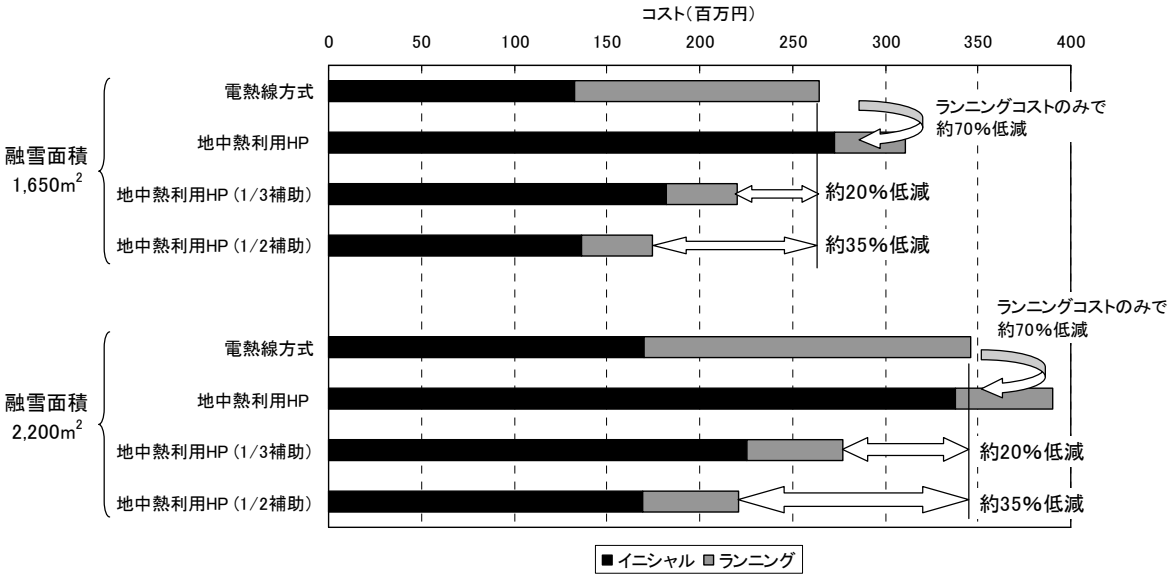


図 2-20　道路融雪の省コスト効果の試算例（融雪負荷 300W/m^2）[20]

＜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[18]。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。

ハウスの加温（山梨県甲府市）

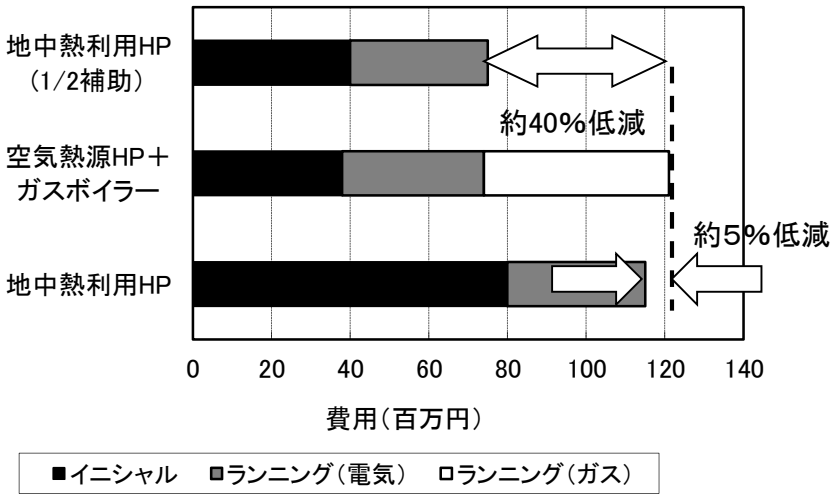
ハウスの加温（北海道赤平市）

赤平オーキッド㈱のホームページより引用
http://akabira-orchid.jp/business/orchid/index.html

＜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、25m×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 1,200m^2）の冷暖房に、地中熱利用ヒートポンプ（暖房能力 131kW、冷房能力 116kW、プール加熱能力 175kW）または従来システム（空気熱源ヒートポンプ（暖房能力 162kW、冷房能力 160kW）＋ガスボイラー（加熱能力 186kW、燃費 19.0m^3/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 58%の省コスト効果が得られました[21]。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、従来システムに比べると約 5%程度、助成制度を活用すると約 40%程度の省コスト効果が得られると試算されます(図 2-21)[22]。

渋谷本町学園の温水プール（東京都渋谷区）



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、モニタリンク機器（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 2-21　温水プールの場合の省コスト効果（運転費用）の試算例

[21]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」のシステム運転費より

[22]「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」の事業者にイニシャルコスト試算値をヒアリングして試算

2.4　ヒートアイランド現象の緩和効果

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に置き換えた場合、最高気温で 1.2℃程度、住宅街では 0.3℃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 2-22)[23]。

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℃、夜間の気温が約 1.5℃低下するという試算があります[24]。

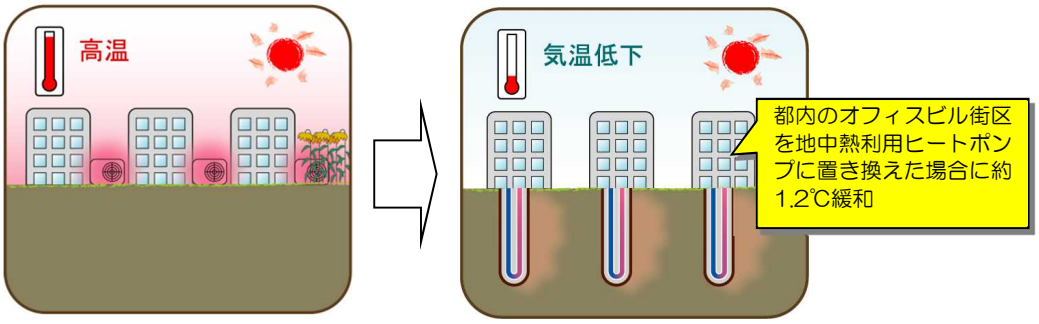


図 2-22　ヒートアイランド現象の緩和効果の試算例

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 1㎡ 当たりで 0.1～0.2GJ（原油換算で約 4～7L、電力換算で約 28～56kWh）程度の人工排熱を削減できました（図 2-23)。

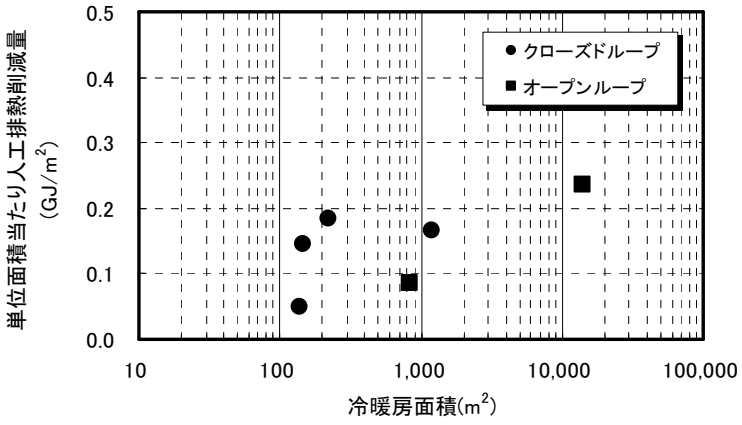


図 2-23　クールシティ推進事業での人工排熱削減量（単位面積当たり）の例

[23]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.
[24]下堂薗ら，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.

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、476GJ(200L の浴槽で約 21,000 杯の熱量に相当※)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[25]。

※15℃の水を 42℃まで加温した場合を想定し、以下の式により試算しています。
476(GJ)÷200(L)÷(42-15)(℃)÷4.2(J/(g・K))×10^6≒21,000(杯)

地中熱利用ヒートポンプ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 6mm/日・m^2 の水が必要と試算されています[26]。10,000m^2（100m 四方）の街区でも 1 日 60m^3 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。

[25]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.
[26]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.

第3章　地中熱利用ヒートポンプの導入・利用に関する配慮事項

地中熱利用ヒートポンプは空気中への排熱削減やエネルギー消費の削減など、様々な点で環境保全に寄与しますが、一方で地中等への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は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・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・暖房のいずれかに偏った利用がされる地域等については、地中の熱環境の変化や近隣の地下水・地中熱利用への影響に適切に配慮、あるいは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、過度な熱負荷を蓄積することなく、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・モニタリング項目等について示します。

3.1　地中熱利用ヒートポンプの導入条件

「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」、「利用可能な深さ（概ね深度 0～100m）での地下水の有無」に留意する必要があります（図 3-1）。

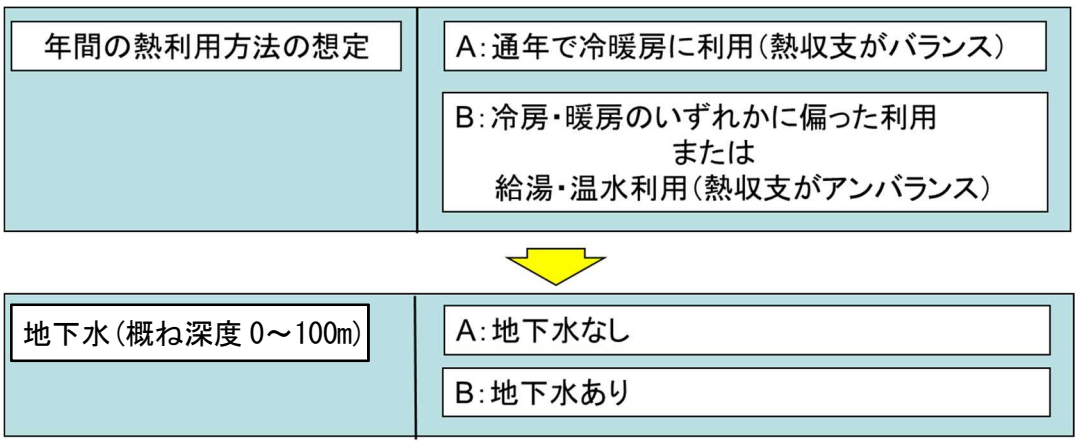


図 3-1　地中熱利用ヒートポンプ利用方式の選定フロー

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ました。これらは概ね 150kW 未満の小規模～中規模の施設であり、大きな環境影響の変化は確認されませんでした。

普及状況をみると、出力規模 150kW 未満は、住宅用を除く導入実績のうち、クローズドループの約 80%超（図 3-2）、オープンループの約 60%（図 3-3）に相当します。

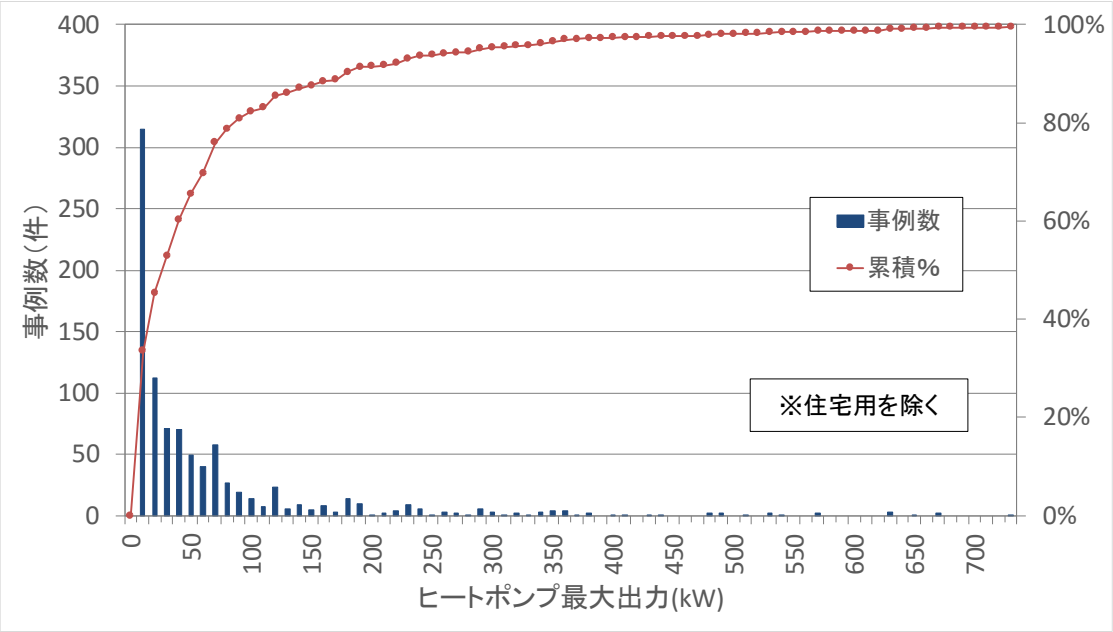


図 3-2　既往事例の出力規模別ヒストグラム（クローズドループ）

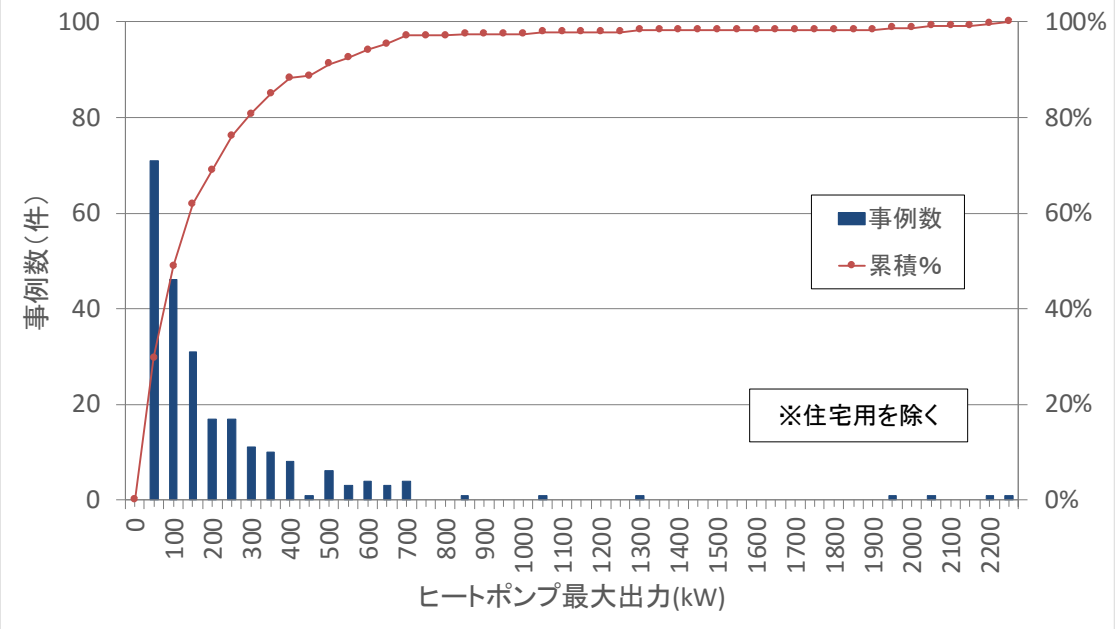


図 3-3　既往事例の出力規模別ヒストグラム（オープンループ）

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り、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　適用できる地中熱ヒートポンプの方式

年間の熱利用	地下水の有無	地中熱 HP 利用方式		
		クローズドループ方式	オープンループ方式・還元型	オープンループ方式・放流型
A 冷暖房(年間熱収支がバランス)	A なし	◎	―	―
	B あり	◎※1	○※1,3	△※3
B 冷房・暖房に偏りまたは給湯・温水	A なし	◎	―	―
	B あり	◎※1,2	○※1,2,3	△※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(3)	・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(4)	・地下水の水質 ・地下水揚水に関する規制 ・定期点検 ・放流先の排水基準等 ⇒詳細は 3.2(4)

◎：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
△：適用可能、ただし法令等の規制により適用できない地域あり
－：適用不可能（地下水がないため）

※1　熱交換量が大きい場合や隣地との境界付近に地中熱交換井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、周辺の地下水利用や放流先水質への影響等に留意する必要がある。

例えば次の例１では地下水の有無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・還元型、オープンループ方式・放流型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。

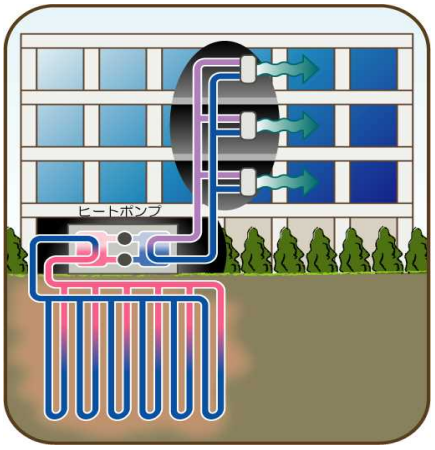
例１：A(通年冷暖房利用)－A(地下水なし)

⇒ **採用方式：クローズドループ方式**

利用可能な深さ(概ね深度 0～100m)に地下水がない地域では、クローズドループ方式を採用することとなります。

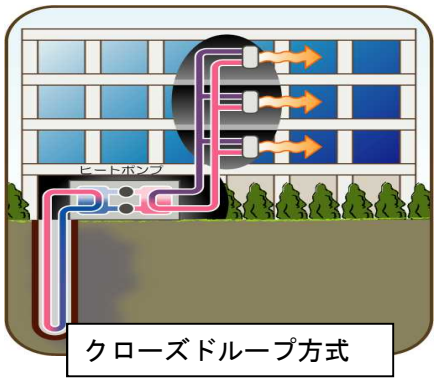
通年で冷房・暖房の両方に使用する場合、『夏期に温熱を蓄熱し冬期に暖房使用⇔冬期に冷熱を蓄熱し夏期に冷房使用』といった蓄熱型の運転による運転効率の向上が期待できます。

一方、冷房・暖房のいずれかに偏った利用をすると、(冷)熱塊を生じて、長期的に運転効率が低下する場合があります。

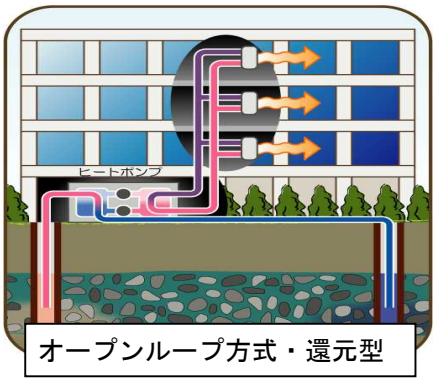


例２：B(暖房主体)－B(地下水あり)

⇒ **採用方式：クローズドループ方式、オープンループ方式・還元型、オープンループ方式・放流型のいずれも可**



クローズドループ方式



オープンループ方式・還元型

利用可能な深さに地下水がある場合、クローズドループ方式とオープンループ方式・還元型が、また、放流先への支障や地盤沈下等のおそれ、および法令等の規制が無い場合にはオープンループ方式・放流型も適用対象となります。

クローズドループ方式またはオープンループ方式・還元型を採用する場合、熱負荷の蓄積による(冷)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。

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、(冷)熱塊を軽減する地中熱交換井の設置間隔や、地下水流動方向を考慮した配置との配慮が必要です。

また、オープンループ方式・放流型の採用については、地下水の必要量、公共用水域や下水道への放流の可否・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。

3.2　地中熱利用ヒートポンプの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を持続的に良好な熱効率で利用するためには、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、地中熱ヒートポンプ設備の設計や施工管理、運転管理等の詳細は、以下のマニュアル等に紹介されています。

- 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, オーム社, 2007
- 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, オーム社, 2014
- 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)　設計時の調査

地中熱利用ヒートポンプ施設の設計にあたり、必要に応じて以下のような項目の事前調査・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形態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。

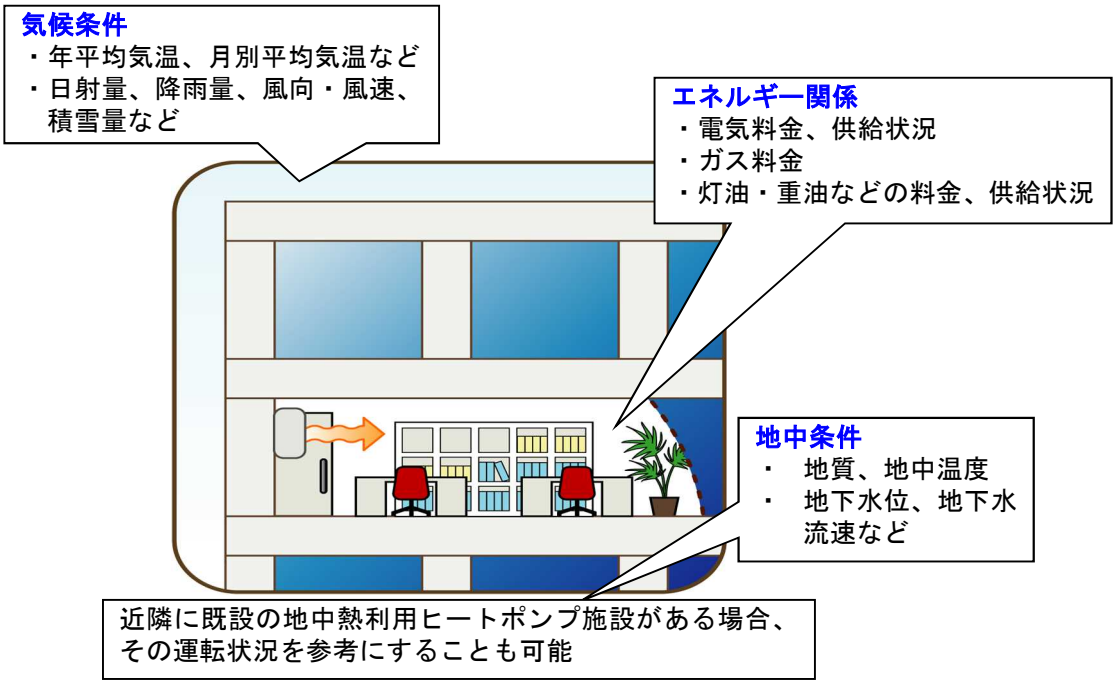


図 3-4　設計時の調査事項

(2)　適切な設備規模の設定

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設備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 3-5)。

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)設計時の調査」に同じ)

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）により、地中熱交換井の深さ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ための事前調査として熱応答試験を実施する場合があります（熱応答試験の概要は「(3)　クローズドループ方式の留意点」を参照)。

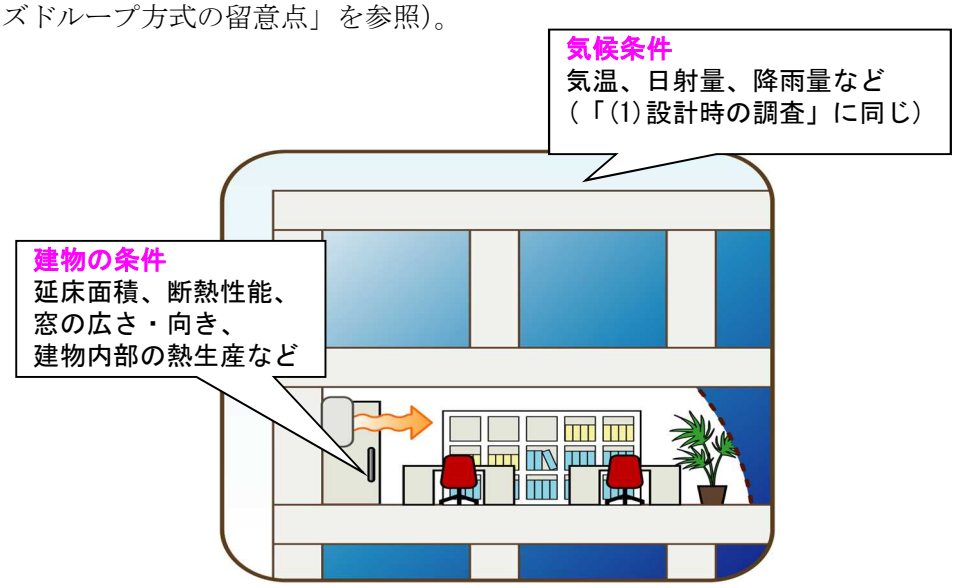


図 3-5　必要な冷暖房能力に影響する各項目

また、過剰な採熱により地盤温度が低下すると、ヒートポンプ入口温度が低くなり、地中熱ヒートポンプの効率低下だけではなく、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（参考資料4)。そのため、施設導入時には、利用する際の熱負荷を適切に想定した設備を設計することが重要であるとともに、計画の想定を大幅に上回るような稼働をしないように留意する必要があります。

(3) クローズドループ方式の留意点

1) 熱交換量

地中熱交換井深さ 1m 当たりの可能熱交換量は、報告によると 40w/m 程度と言われていますが[27]、実際は大きな幅があり、地質構成、地下水の有無、熱交換器のサイズ、熱媒体循環チューブの素材、地中熱交換井の充填材の有無・素材、温度条件等に左右されます。

出力規模に応じた必要な地中熱交換井の深さを定めるため、対象地点における可能熱交換量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)があります(図 3-6)。

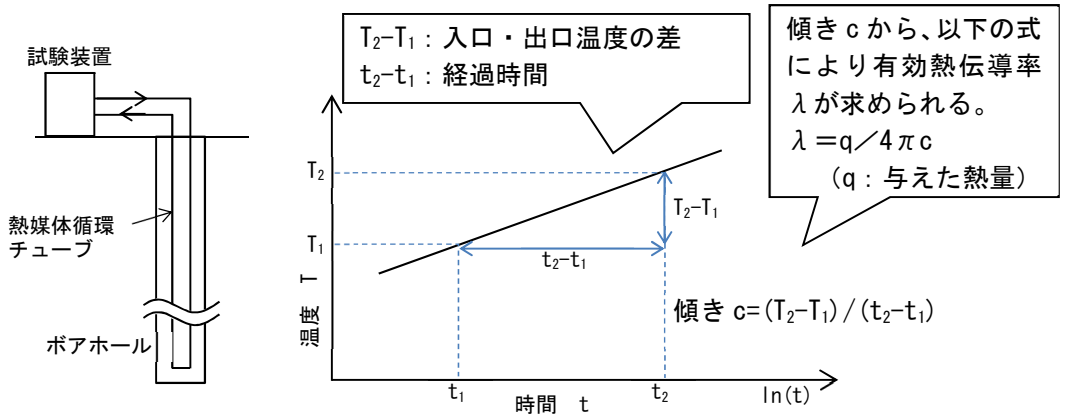


図 3-6 熱応答試験の実施方法

熱応答試験は、地中に実際に熱媒体を循環させ、そ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井が必要かを予め調査する場合等に有効です。

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 3-2)。

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。

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。

[27]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，オーム社，2007.

表 3-2　熱媒体の性状 [27]

		腐食耐性（金属）	低粘性	不燃性	低毒性（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	酢酸カリウムなど	△	○	○	○	○

凡例：○：適用可，△：設備や周辺の条件により適用可，×：適用不可

3)　凍結

暖房時においては、地中から過度に採熱してしまうと地盤温度が低下し、土中の温度が0℃以下となり、凍結を引き起こす可能性があります。

これを防ぐには、熱媒体が 0℃以下とならないような適切な設計・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、地中熱交換井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り、断熱材で覆う等の措置が必要な場合があります。

4)　定期点検項目

以下の項目を定期的・継続的に確認することが、熱効率を持続的に低下させることなく運用するためには有効です。

熱媒体温度　：設計上の温度と大きく異なる温度になっていないことを確認します。

熱媒体循環量：設計上の循環量と大きく異なっていないことを確認します。また、熱媒体温度と循環量により、地中への排熱量を把握することもできます。

機械・電気設備の定期点検：熱媒体循環ポンプやヒートポンプ設備を点検します。

特に採排熱負荷の大きな施設では、運転に支障が生じた場合の損失が大きくなるため、定期的な点検管理や点検システムにより熱効率を確認することは有用です。また、それは同時に過剰な熱負荷を防ぎ、地下水・地盤環境の保全にも寄与します。

(4) オープンループ方式の留意点

1) 地下水に関する規制

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(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。

また、揚水しようとした地下水の水質には注意が必要です。水質汚濁防止法[28]では、平成 30 年 3 月末現在、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確認する必要があります。

オープンループ方式の適用可能な条件として、主に 3 つの場合が想定されます(表 3-3)が、設計時に定めた必要揚水量や地下水質から、どの条件で利用が可能かを確認する必要があります。

表 3-3　地下水利用が可能な場合

利用条件	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** **・地下水還元の場合、公共用水域等への排水の水質** **・確実に還元できる還元井と還元水の水質**

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。

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、最大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最大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。

[28]水質汚濁防止法施行令第二条

3) 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 3-4)。

表 3-4　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[29]

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	スケール生成
基準値項目	pH（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	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	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	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	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	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	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	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	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	0.3 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	0.1 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	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	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	0.3 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	4.0 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。

[29]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.

4) 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 3-7)[30]。

配置：還元された水が揚水井へ戻り、熱効率を低下させることのないよう、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、必要に応じた逆洗浄等を行います。

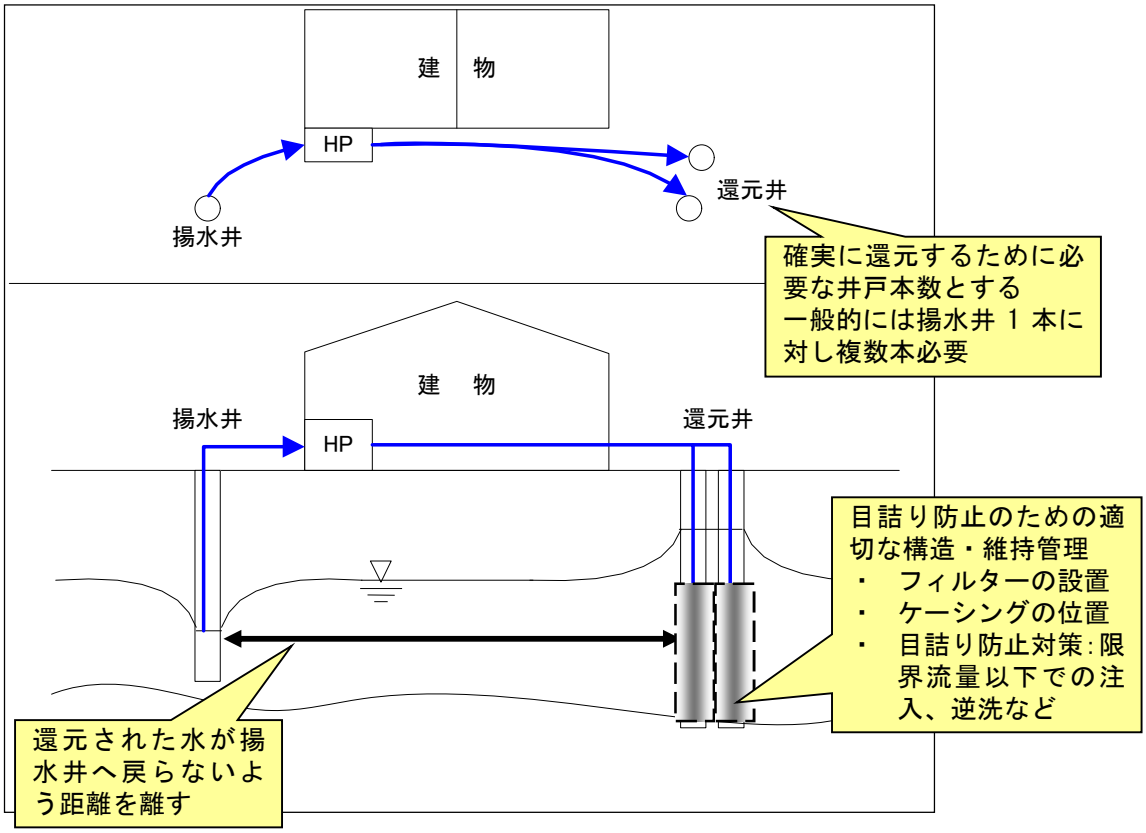


図 3-7　還元井戸に関する留意事項

[30]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）

5)　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
- 50m^3/日以上の汚水(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、オープンループ方式・放流型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 3-8)[31]。

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。

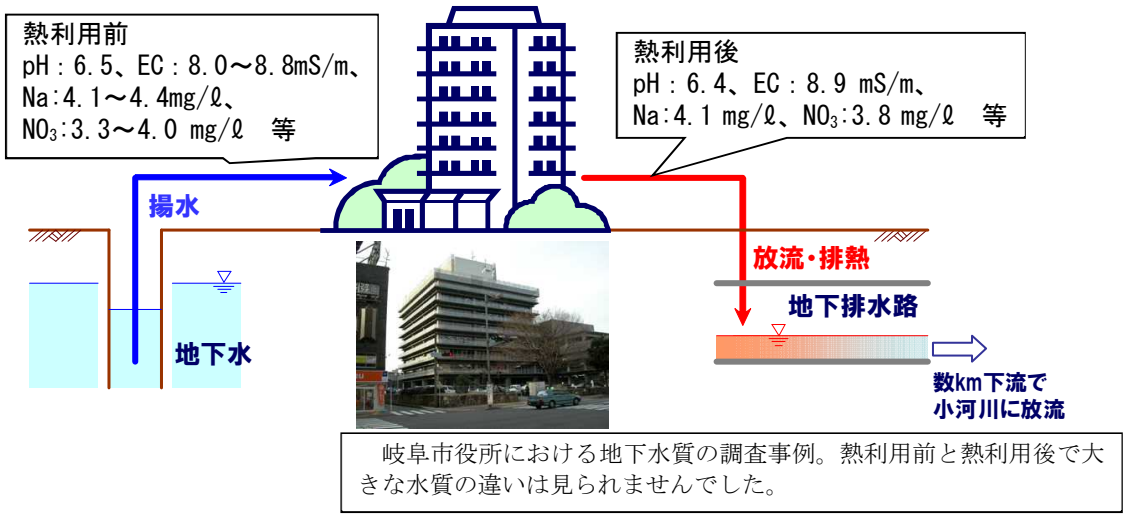


図 3-8　熱利用前後の地下水質の調査事例

[31]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.

6) 定期点検項目

定期的・継続的に以下の項目を確認することが、熱効率を低下させることなく持続的に運用するために有効です。

揚水(放流)量：設計上の揚水(放流)量を大きく超える水量でないことを確認します。

地下水位：地下水位が導入前と比べて同程度で維持されていること、または稼働時に低下していても揚水停止後に速やかに回復することを確認します。

放流(還元)温度：設計上の放流温度と大きく異ならないことを確認します。

機械・電気設備の定期点検：揚水ポンプやヒートポンプ設備の定期点検を行います。

特に採排熱負荷の大きな施設では、運転に支障が生じた場合の損失が大きくなるため、定期的な点検管理や点検システムにより熱効率を確認することは有用です。また、それは同時に過剰な揚水や熱負荷を防ぎ、地下水・地盤環境の保全にも寄与します。

第4章　地中熱利用による効果・影響とモニタリング方法

地中熱利用ヒートポンプの利用にあたり、「省エネルギー・CO_2 排出量削減効果の把握（環境効果）」、「適切な運転管理（環境負荷）」、「地下水・地盤環境への影響分析（環境影響）」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。

○環境効果：省エネルギー効果、CO_2 排出量削減効果、ヒートアイランド緩和効果等の把握

第 2 章に示したとおり、地中熱利用ヒートポンプは他の冷暖房方式に比べ省エネルギー効果、CO_2 排出削減効果、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、どの程度の効果があるかを把握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につながったかを把握することができます。

○環境負荷：適正な運転管理

地中熱利用ヒートポンプは、オープンループ方式を除き基本的にメンテナンスフリーですが、適切な利用範囲を超え、熱利用対象の地下水・地盤温度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・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。これにより地中熱利用環境を一定に保ち、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。

○環境影響：地下水・地盤環境への影響分析

資源消費の視点やライフサイクル全体での CO_2 排出量等、環境影響としては様々なスケール・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。

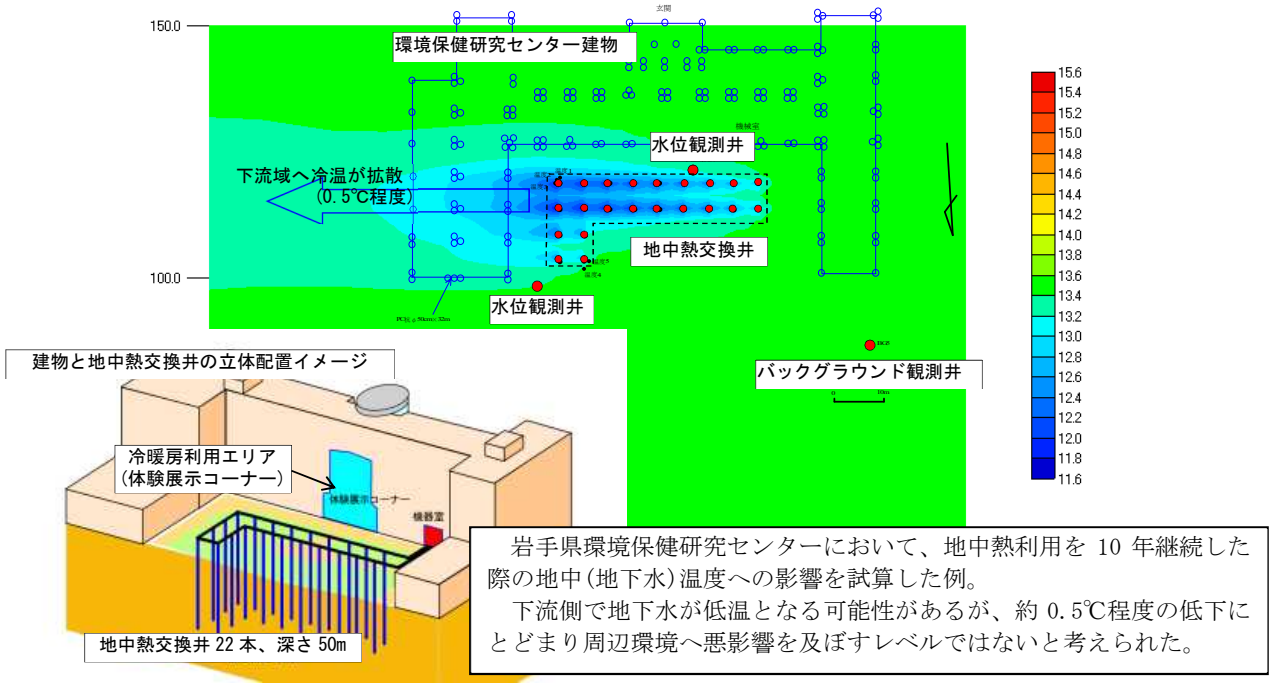
地中熱利用ヒートポンプによる地下水・地盤環境への影響は「環境負荷の発生」⇒「環境状態の変化」まである程度把握できているものの、「環境影響として発現」する事象の定量化や「環境状態の変化」との因果関係を十分把握できていません。どの程度の環境負荷があれば、環境の状態が変化し、地下水・地盤環境への影響が生じるのかを明らかにし、安心して普及促進を図るためには、継続的なデータ蓄積･分析が有用です。

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 4)。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。

（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の発生等、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、地中熱交換井を 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も、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。



岩手県環境保健研究センターにおいて、地中熱利用を 10 年継続した際の地中(地下水)温度への影響を試算した例。

下流側で地下水が低温となる可能性があるが、約 0.5℃程度の低下にとどまり周辺環境へ悪影響を及ぼすレベルではないと考えられた。

図 4-1　地中熱利用ヒートポンプによる地中（地下水）温度への影響の試算例[32]

[32]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.

4.1　考えられる影響項目

これまでの地中熱利用ヒートポンプ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・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はあります。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)。

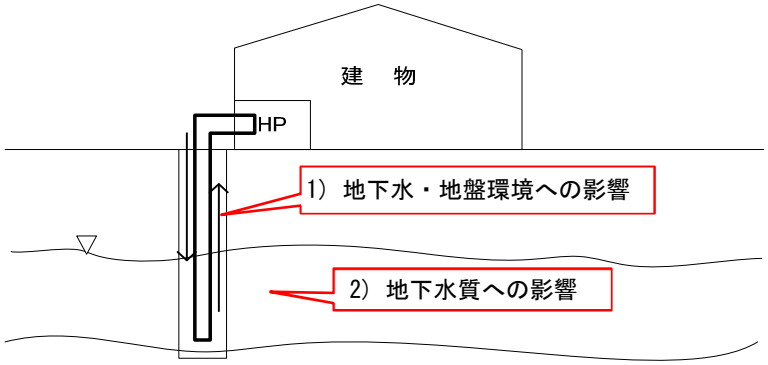


図 4-2　クローズドループ方式の地下水・地盤環境への影響項目

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・食品産業における製品品質への影響等が考えられます。

小規模施設におけるモニタリング事例では、約 3mの離隔で設けられた観測井への温度影響は見られませんでした。また、中規模施設での事例では、地中熱交換井（孔井間距離 3.5m）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。これらの結果や既存の文献[27]の情報も参考にすると、熱干渉を避けるためには、約 4m以上距離を置くことが望ましいと言えます。さらに、施設の稼働から 20 年間にわたる長期的な影響をシミュレーションにより解析した結果では、地盤温度影響は地中熱交換井周辺に限られ、長期的な温度変化はわずかでした（参考資料 4)。

クールシティ推進事業では、地下水の流速が約 300m/年と大きな地域において、ヒートポンプ出力 60kW 程度の施設で暖房主体の運転を 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、低温域が下流側約 1.5km の範囲で広がるものの、0.5℃程度の変化にとどまり周辺環境へ影響が生じるレベルではないとの結果になりました。ただし、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) 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[33]、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溶媒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 5）。近年の遺伝子解析技術の進捗は著しく、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います。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」、「放流先水域への水温・水質への影響」、「地下水の還元による水温・水質への影響」に留意が必要です(図 4-3)。

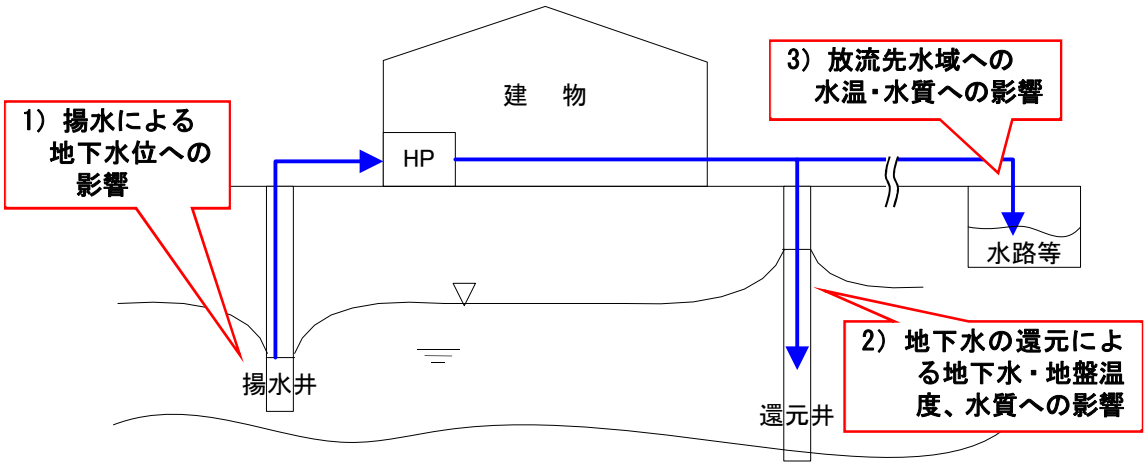


図 4-3　オープンループ方式の地下水・地盤環境への影響項目

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・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。

[33]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

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・食品産業における製品品質への影響等を生じ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 2.5m/年と小さい地域において、ヒートポンプ出力 30kW 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 40m 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。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[34]。

3) 放流先水域の水温・水質への影響

個々の施設からの放流水量が少量でも、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・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、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大き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。

[34]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

4.2　モニタリング項目と方法

モニタリングは、下記および 37 ページに示すとおり、地中熱利用ヒートポンプによってどの程度の省エネルギー・CO_2 排出削減効果、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・CO_2 排出削減効果」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、CO_2 排出削減効果、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。

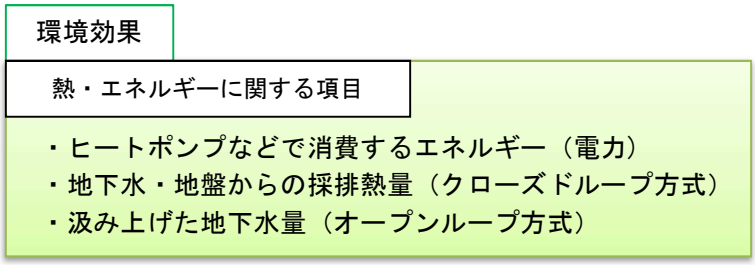


図 4-4　環境効果に関する計測項目

「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。

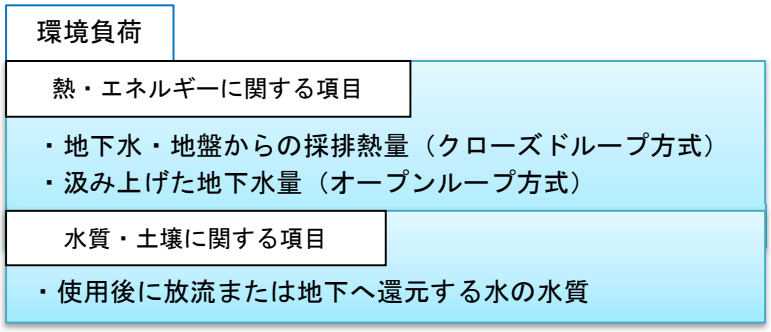


図 4-5　環境負荷に関する計測項目

「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・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。

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・CO_2 排出削減効果」「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井を設置する場合、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・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・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・運転調整に役立つ」、「省エネルギー・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・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。

なお、地中熱利用ヒートポンプ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。

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・CO_2 排出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については、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

表 4-2 モニタリング項目(クローズドループ、基本項目)

主な計測目的			項目	実施時期、頻度	内容	計測位置、配置など
効果	負荷	影響				
○			消費電力	定期的に計測	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に対する冷暖房に使用した熱量の比により、地中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・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	定期的に計測	循環している熱媒体の入口・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井への入口および出口に配置
○	○		一次側熱媒体循環量	定期的に計測	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。

システム全体の消費電力に対し、地中熱の採排熱量の比により、地中熱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

表 4-3　モニタリング項目(クローズドループ、補足項目)

主な計測目的			項目	実施時期、頻度	内容	計測位置、配置など
効果	負荷	影響				
○			消費電力	常時計測	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に対する冷暖房に使用した熱量の比により、地中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・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	常時計測	自動計測式の温度計により、循環している熱媒体の入口・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)の地中熱交換井への入口および出口に配置
○	○	○	一次側熱媒体循環量	常時計測	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	定期計測 または 常時計測	地中熱交換井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。	地中熱交換井 帯水層を中心に深度 10～20m 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。

システム全体の消費電力に対し、地中熱の採排熱量の比により、地中熱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

地中熱交換井に温度計を設置(帯水層を中心に深度 10～20m 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、地中熱交換井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と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	実施時期、頻度	内容	計測位置、配置など
周辺域の 地下水・地盤温度	定期的に計測	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	地中熱交換井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、深さ方向および地中熱交換井からの距離など、適正な配置になるよう配慮する必要があります（図 4-7）。

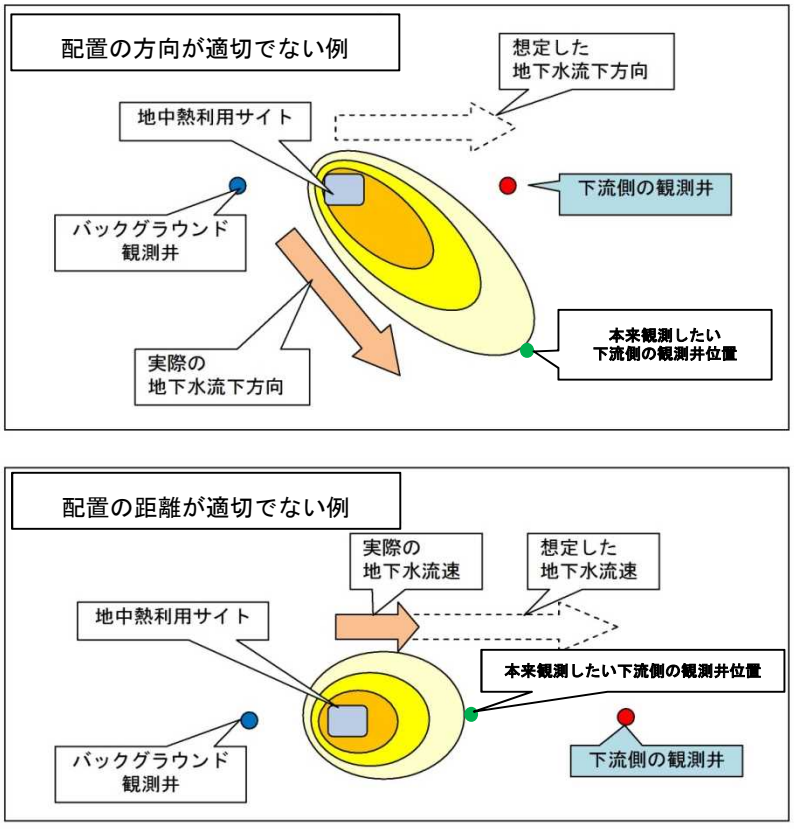


図 4-7　正しい配置でないモニタリングのイメージ

（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、地中熱交換井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、地中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[35]。

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[36]

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	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	シス 1,1-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	時期、頻度	内容	計測位置、配置など
地下水質	導入前に測定	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井付近に採水用に設けた井戸
地下水質	簡易項目を定期的に計測	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。	地中熱交換井付近に採水用に設けた井戸

[35]Ueki,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.

[36]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 改正平 28 環告 31）および土壌の汚染に係る環境基準（平成 3.8.23 環告 46 改正平 28 環告 30）

（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、地中熱交換井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と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	時期、頻度	内容	計測位置、配置など
周辺地下水質	簡易項目を定期的に計測	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。	地中熱交換井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・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。

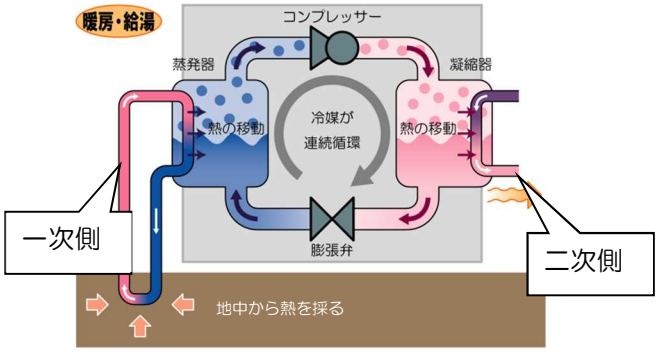


図 4-8　ヒートポンプの「一次側」と「二次側」

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・CO_2 排出削減等の各種効果(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・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参考資料 6 に紹介しました。

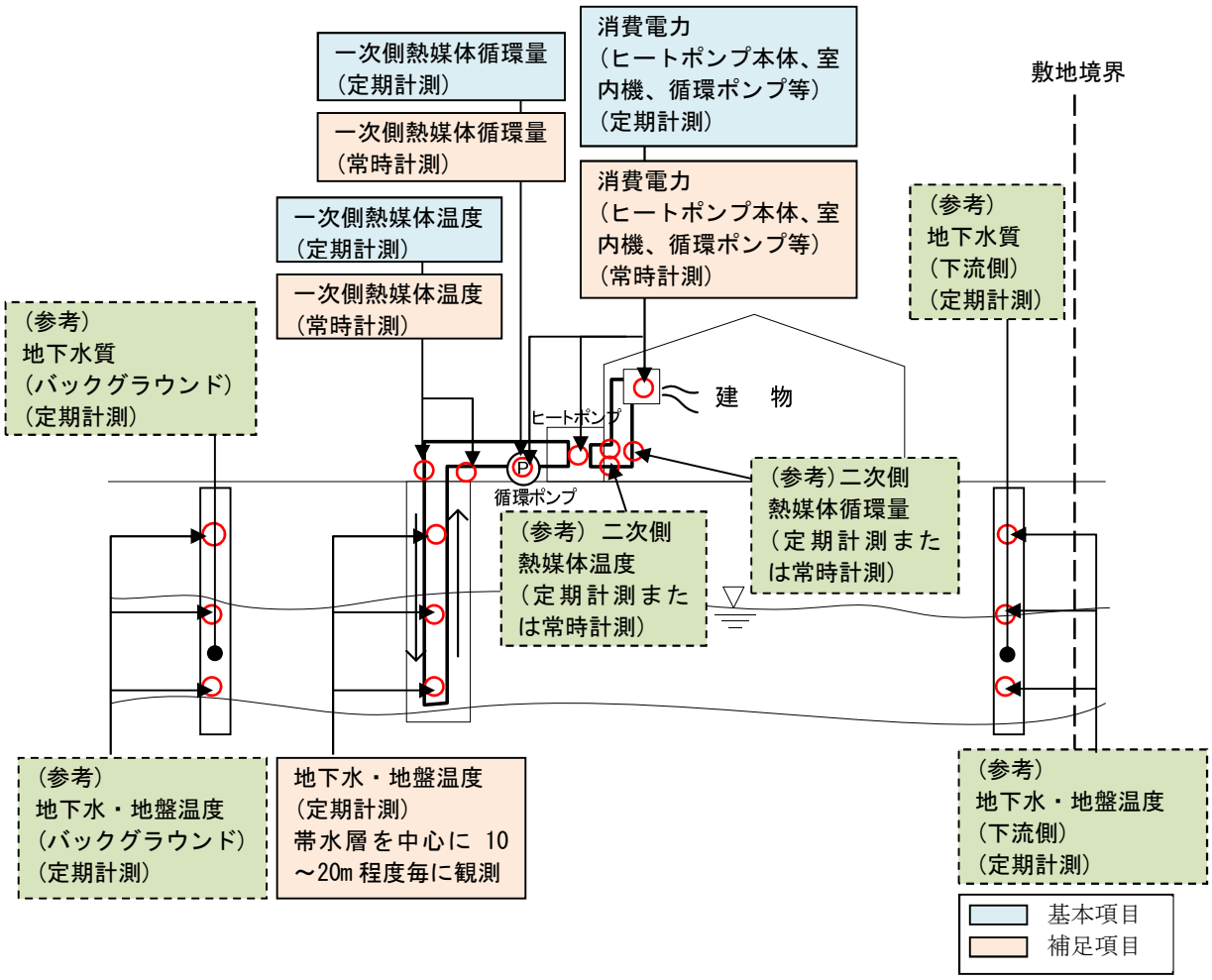


図 4-9　クローズドループ方式のモニタリングイメージ

(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) オープンループ・還元型

a) 基本項目

表 4-8　モニタリング項目(オープンループ・還元型、基本項目)

主な計測目的			項目	実施時期、頻度	内容	計測位置、配置など
効果	負荷	影響				
	○	○	履歴	導入前に確認	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・処置の状況を確認します。	―
	○	○	揚水井水位	定期的に計測	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	定期的に計測	還元井の水位がどの程度変動しているか確認します。 還元井水位が徐々に上昇してくる場合、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	定期的に計測	揚水・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に対する冷暖房に使用した熱量の比により、地中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・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	定期的に計測	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	定期的に計測	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	定期的に計測	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	定期的に計測	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	導入前に測定 簡易項目は定期的に計測	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用です。

○ **還元井水位**

還元井の目詰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・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。

システム全体の消費電力に対し、地下水の採排熱量の比により、地中熱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・スケール防止に関する項目(p.33 「3.2 (4) 3) 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(p.35 「3.2 (4) 5) 利用後の地下水の放流」および「参考資料 9. 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。

b) 補足項目

表 4-9 モニタリング項目(オープンループ・還元型、補足項目)

主な計測目的			項目	実施時期、頻度	内容	計測位置、配置など
効果	負荷	影響				
	○	○	揚水井水位	常時計測	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	常時計測	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	定期的に計測	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	常時計測	揚水・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に対する冷暖房に使用した熱量の比により、地中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・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	常時計測	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	常時計測	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	常時計測	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	常時計測	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	簡易項目を常時計測	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。

システム全体の消費電力に対し、地中熱の採排熱量の比により、地中熱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と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	実施時期、頻度	内容	計測位置、配置など
地盤沈下	定期的に計測または常時計測	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・水質

地下水還元による水温・水質への影響を直接把握するには、施設の下流側で水温・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・水質への影響が過大でないと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・水質)

項目	実施時期、頻度	内容	計測位置、配置など
還元先地下水の水温・水質	定期的に計測	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

c)　モニタリングのシステム

オープンループ方式・還元型では、「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・CO_2 排出削減等の各種効果（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。

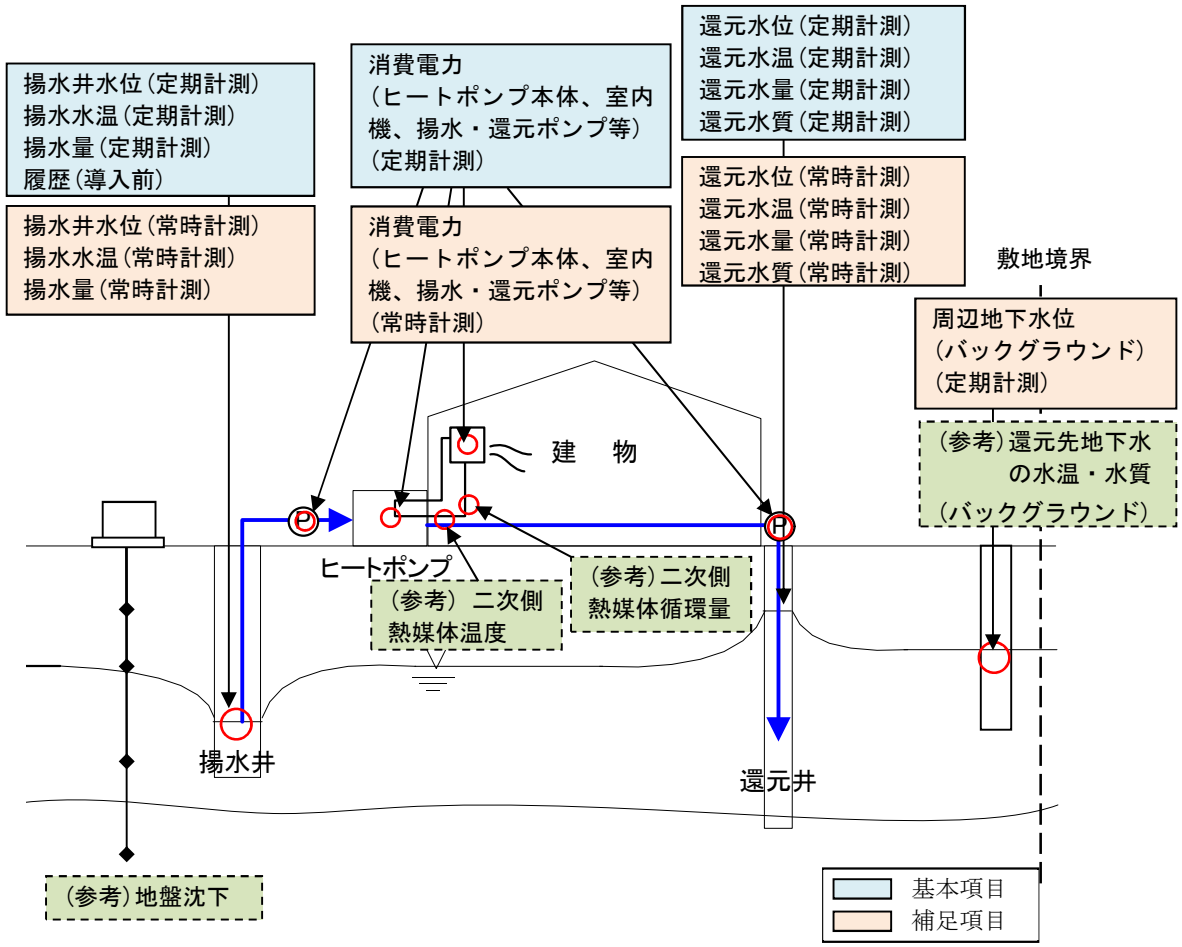


図 4-10　オープンループ方式・還元型のモニタリングイメージ

2) オープンループ・放流型のモニタリング項目

a) 基本項目

表 4-12　モニタリング項目(オープンループ・放流型、基本項目)

主な計測目的			項目	実施時期、頻度	内容	計測位置、配置など
効果	負荷	影響				
	○	○	履歴	導入前に確認	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・処置の状況を確認します。	―
○			消費電力	定期的に計測	揚水ポンプ、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に対する冷暖房に使用した熱量の比により、地中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	定期的に計測	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
○	○		放流水温	定期的に計測	放流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。	放流地点
○	○		揚水水量	定期的に計測	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
○	○		放流水量	定期的に計測	放流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。	放流地点
	○	○	放流水質	導入前に測定 簡易項目は定期的に計測	汲み上げた地下水の水質が水質汚濁防止法や条例に定める排水基準を満たしていることを確認します。 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。	放流地点 (導入前測定は近隣井戸や新設井戸)
	○	○	揚水井水位	定期的に計測	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

＜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用です。

○ **消費電力**

揚水ポンプ、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。

システム全体の消費電力に対し、地下水の採排熱量の比により、地中熱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。

○ **放流水温**

放流地点において、温度計を用いて水温を直接計測します。

○ **放流水量**

放流水量が少量の場合は、定量の容器が満杯になる時間を計測することにより概ねの流量を把握することができます。

流量が大きい場合は、揚水側を停止した貯水タンクの水位変動や、放流ポンプの消費電力等から流量の推定を行います。

○ **放流水質**

地中熱利用ヒートポンプの導入前に、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・スケール防止に関する項目(p.33 「3.2 (4) 3) 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(p.35「3.2 (4) 5)利用後の地下水の放流」および「参考資料 9. 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。

b) 補足項目

表 4-13　モニタリング項目(オープンループ・放流型、補足項目)

主な計測目的			項目	実施時期、頻度	内容	計測位置、配置など
効果	負荷	影響				
	○	○	揚水井水位	常時計測	揚水井の水位がどの程度変動しているか確認します。 自動計測機器により、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
	○	○	周辺 地下水位	定期的に計測	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観測を行います。	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	常時計測	揚水ポンプ、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に対する冷暖房に使用した熱量の比により、地中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	常時計測	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
○	○		放流水温	常時計測	放流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。	放流地点
○	○		揚水水量	常時計測	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
○	○		放流水量	常時計測	放流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。	放流地点
	○	○	放流水質	簡易項目を常時計測	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。	放流地点

＜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。

○ 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計測します。

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。

システム全体の消費電力に対し、地中熱の採排熱量の比により、地中熱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。

○ **放流水温**

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

○ **放流水量**

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

○ **放流水質**

基本項目で示した放流水質(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。

c)　モニタリングのシステム

オープンループ方式・放流型では、「消費電力」、「揚水量」、「揚水水温」、「放流水温」、「放流水量」を計測することで、省エネルギー・CO_2 排出削減等の各種効果(効果項目)と、放流先の水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 4-11)。

また、導入前の「履歴」の確認および、「揚水井水位」、「放流水質」を計測することで、地下水・地盤環境や放流先の水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。

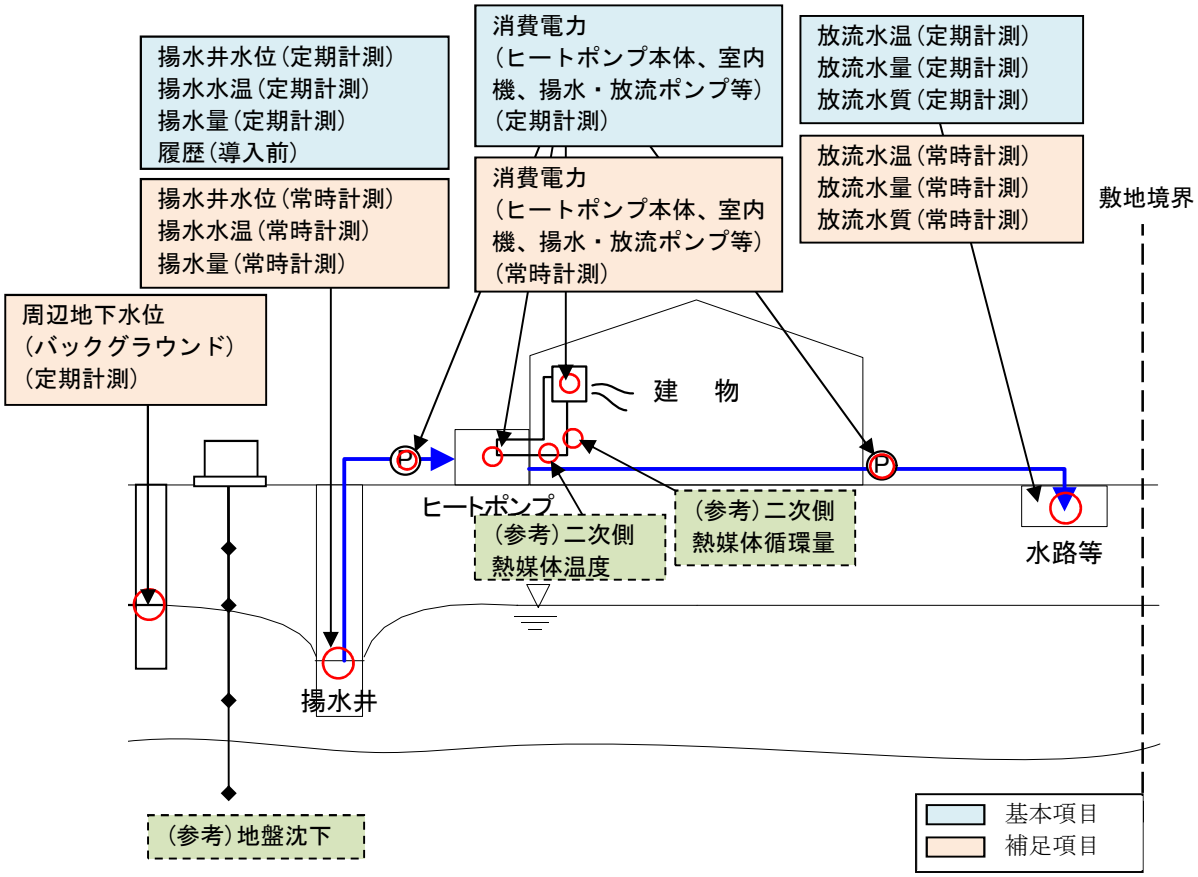


図 4-11　オープンループ方式・放流型のモニタリングイメージ

＜参考＞各利用方式のモニタリング項目と頻度の一覧

表 4-14　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	時期、頻度	項目	時期、頻度
省エネ・CO_2排出削減効果 地下水・地盤温度への影響	消費電力	定期的に計測	消費電力	常時計測
	一次側熱媒体温度	定期的に計測(入口・出口)	一次側熱媒体温度	常時計測(入口・出口)
	一次側熱媒体循環量	定期的に計測	一次側熱媒体循環量	常時計測
	—	—	地下水・地盤温度	定期的に計測
	—	—	(参考)二次側熱媒体温度	定期的に計測または常時計測(入口・出口)
	—	—	(参考)二次側熱媒体循環量	定期的に計測または常時計測
	—	—	(参考)周辺域の地下水・地盤温度	定期的に計測 バックグラウンドも
地下水質への影響	—	—	(参考)地下水質	導入前に測定 簡易項目(pH、EC※)を定期的に計測
	—	—	(参考)周辺域の地下水質	定期的に計測 バックグラウンドも

表 4-15　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	時期、頻度	項目	時期、頻度
揚水による地下水位への影響	履歴	導入前に確認	—	—
	揚水井水位	定期的に計測	揚水井水位	常時計測
	—	—	周辺地下水位	定期的に計測
	—	—	(参考)地盤沈下	定期的に計測 または常時計測
省エネ・CO_2排出削減効果 地下水の還元による水温・水質への影響 (還元型の場合)	消費電力	定期的に計測	消費電力	常時計測
	揚水水温	定期的に計測	揚水水温	常時計測
	揚水水量	定期的に計測	揚水水量	常時計測
	還元井水位	定期的に計測	還元井水位	常時計測
	還元水温	定期的に計測	還元水温	常時計測
	還元水量	定期的に計測	還元水量	常時計測
	還元水質	導入前に地下水質を確認 簡易項目(pH、EC※)は定期的に計測	還元水質	簡易項目(pH、EC※)を常時計測
	—	—	(参考)還元先地下水の水温・水質	定期的に計測
	—	—	(参考)二次側熱媒体温度	定期的に計測または常時計測(入口・出口)
	—	—	(参考)二次側熱媒体循環量	定期的に計測または常時計測
省エネ・CO_2排出削減効果 放流先水域の水温・水質への影響 (放流型の場合)	消費電力	定期的に計測	消費電力	常時計測
	揚水水温	定期的に計測	揚水水温	常時計測
	揚水水量	定期的に計測	揚水水量	常時計測
	放流水温	定期的に計測	放流水温	常時計測
	放流水量	定期的に計測	放流水量	常時計測
	放流水質	導入前に地下水質を確認 簡易項目(pH、EC※)は定期的に計測	—	—
	—	—	(参考)二次側熱媒体温度	定期的に計測または常時計測(入口・出口)
	—	—	(参考)二次側熱媒体循環量	定期的に計測または常時計測

※ EC:電気伝導率

4.3　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・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 4-12 にモニタリング機器配置の参考を示します。

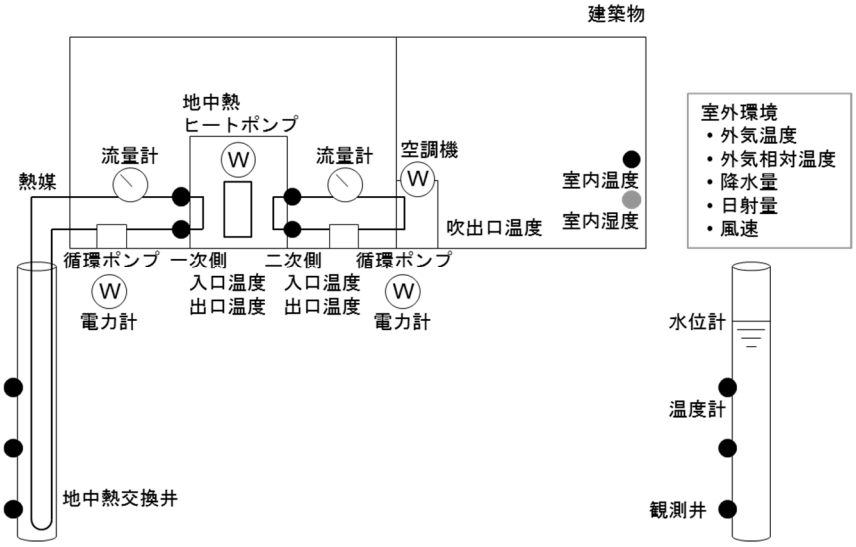


図 4-12　モニタリング機器の配置の例(効果項目、負荷項目)[37]

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・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 4-13 に示します。

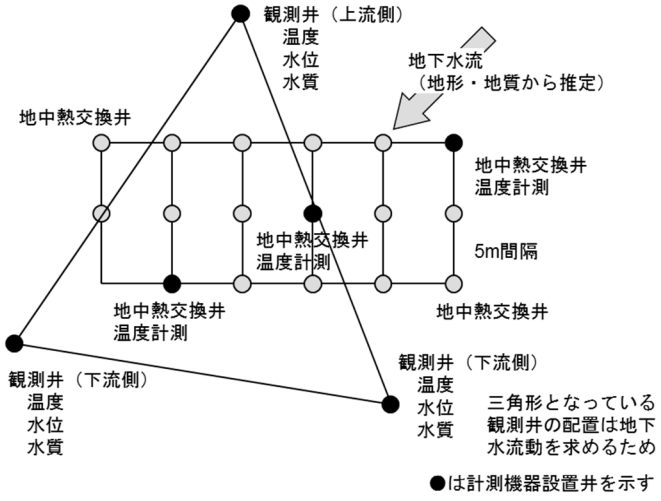


図 4-13　モニタリング機器の配置の例 [37]
(参考項目、下流側やバックグラウンドも含む)

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・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（地中熱利用促進協会編、オーム社)、第 7 章 モニ

[37]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)

タリングとシステム評価」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 4-14）。

省エネルギー効果、CO_2 排出削減効果、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。

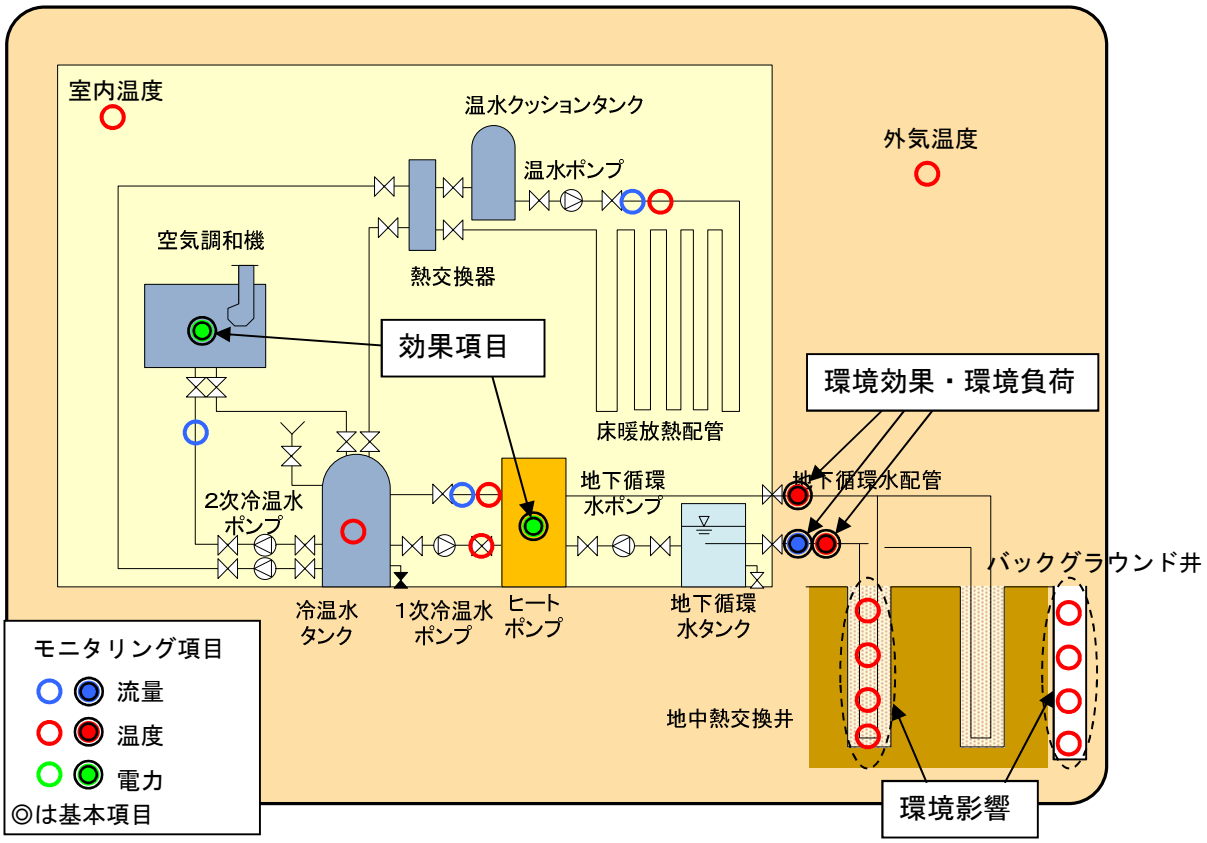


図 4-14　クールシティ推進事業におけるクローズドループ方式のモニタリング事例[38]

[38]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・還元型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 4-15)。

省エネルギー効果、CO_2排出削減効果、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。

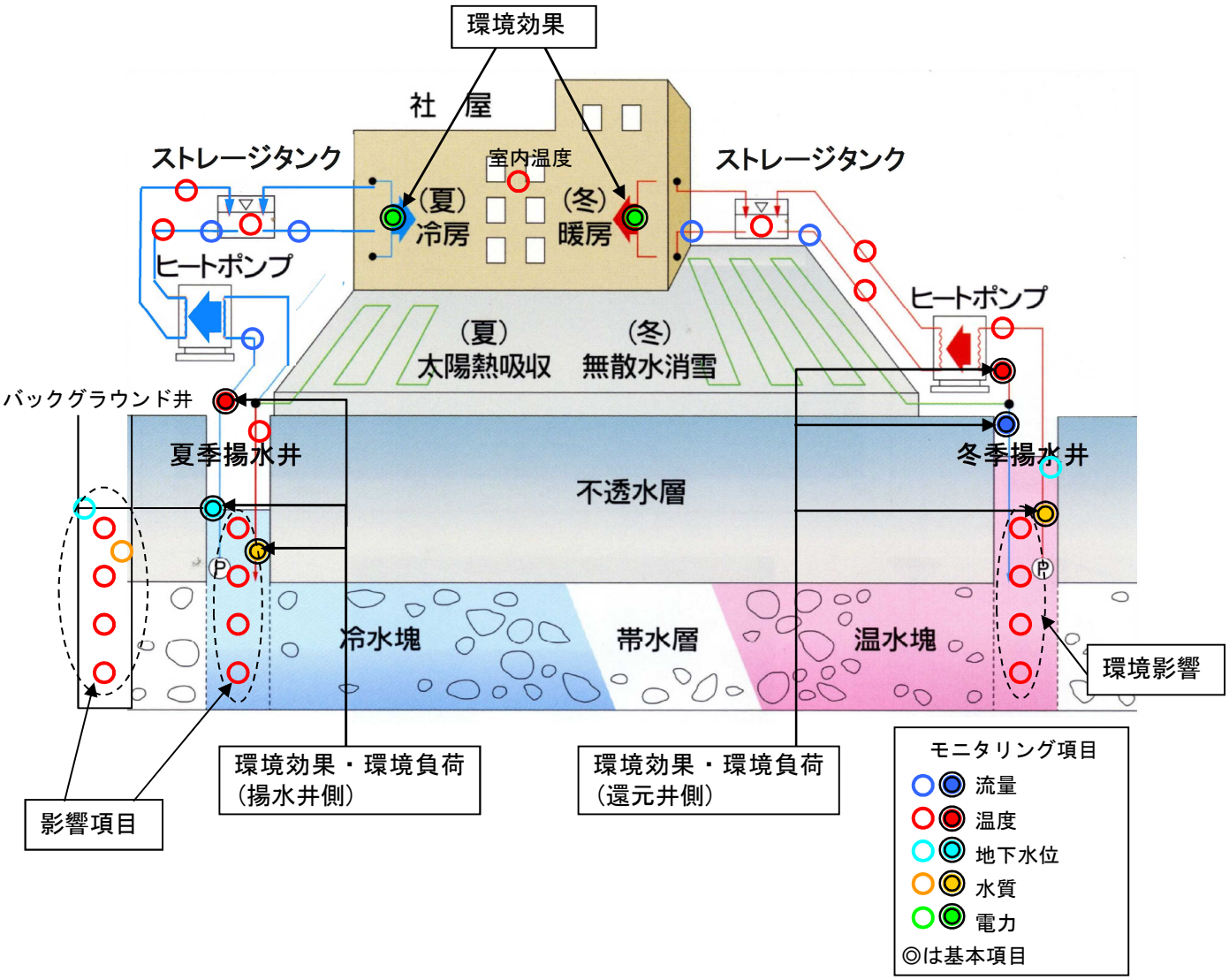


図 4-15　クールシティ推進事業におけるオープンループ方式・還元型のモニタリング事例[39]

[39]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[40]を以下に示します(図 4-16、表 4-16)。

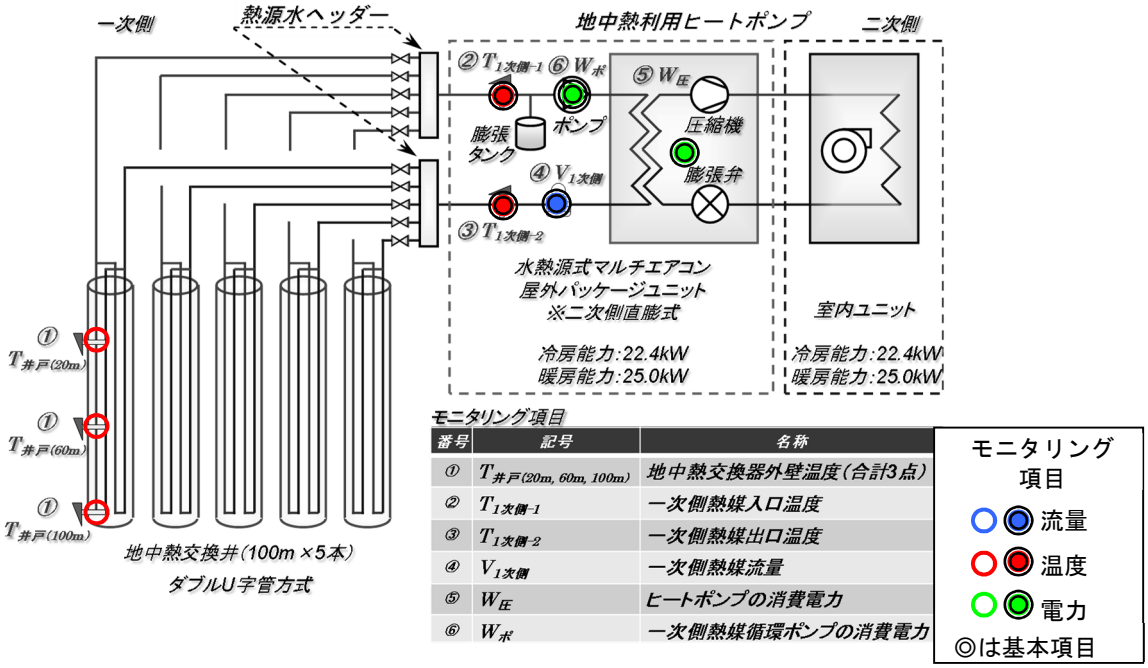


図 4-16　モニタリング機器の設置状況

表 4-16　環境効果等の評価結果

項目		結果	条件・備考
必須項目	a.冷房期間のシステムエネルギー効率[—]*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消費電力[kW]	3.98	
	c.冷房期間の地中への排熱量[kW]*1	17.69	
任意項目	d.冷房・暖房期間のシステムエネルギー効率*1	3.92	
	e.暖房期間のシステム消費電力[kW]	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採熱量[kW]	17.53	
その他の項目	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システムエネルギー効率で評価され、地中への排熱量が当該技術の性能の高さを必ずしもしめすものでない。ヒートアイランド抑制に関する性能は、「冷房期間のシステムエネルギー効率」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。

[40]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[41]を以下に示します(図 4-17、表 4-17)。

この事例では揚水井・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。

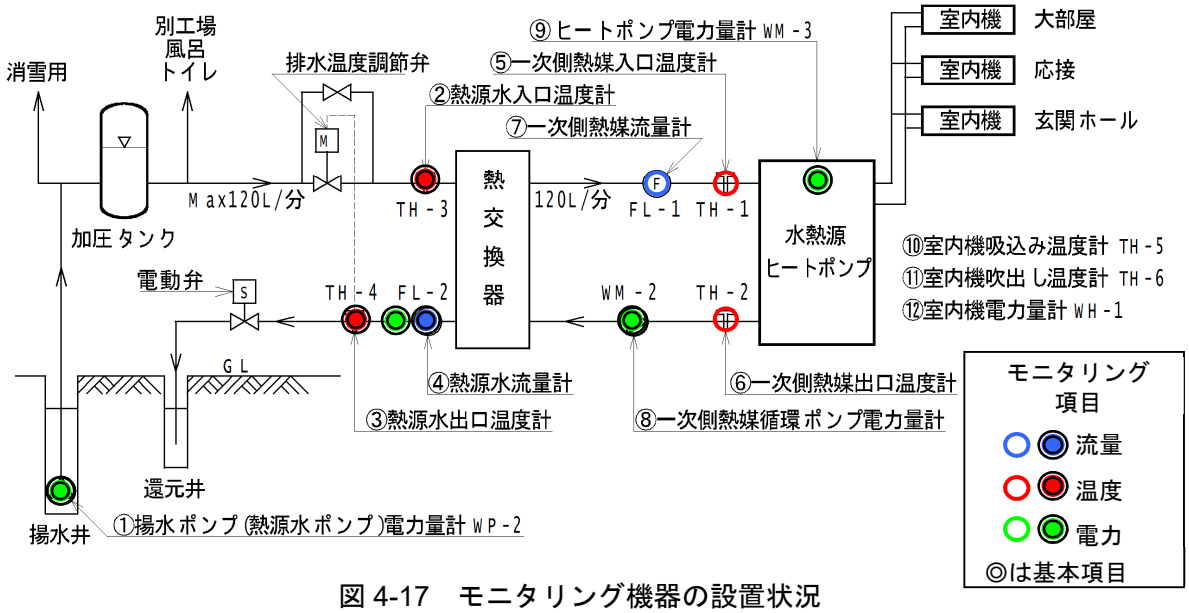


図 4-17　モニタリング機器の設置状況

表 4-17　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.冷房期間のシステムエネルギー効率（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消費電力（ヒートポンプ、循環ポンプ、揚水ポンプ電力を含む）	3.70kW
		実測値	c.冷房期間の地中への排熱量	11.3kW
	任意項目	参考値*1	d.冷房・暖房期間のシステムエネルギー効率(ヒートポンプ、循環ポンプ、揚水ポンプ電力を含む)	2.89
			e.冷房期間のシステムエネルギー効率(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消費電力	7.73kW
		実測値	g.暖房期間の地中からの採熱量	17.3kW
			h.冷房期間のシステムエネルギー効率(ヒートポンプ、循環ポンプを含む)	3.02
			i.暖房期間のシステムエネルギー効率(ヒートポンプ、循環ポンプを含む)	3.01

[41]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・低誤差かつ、地中熱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 4-18)。

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。

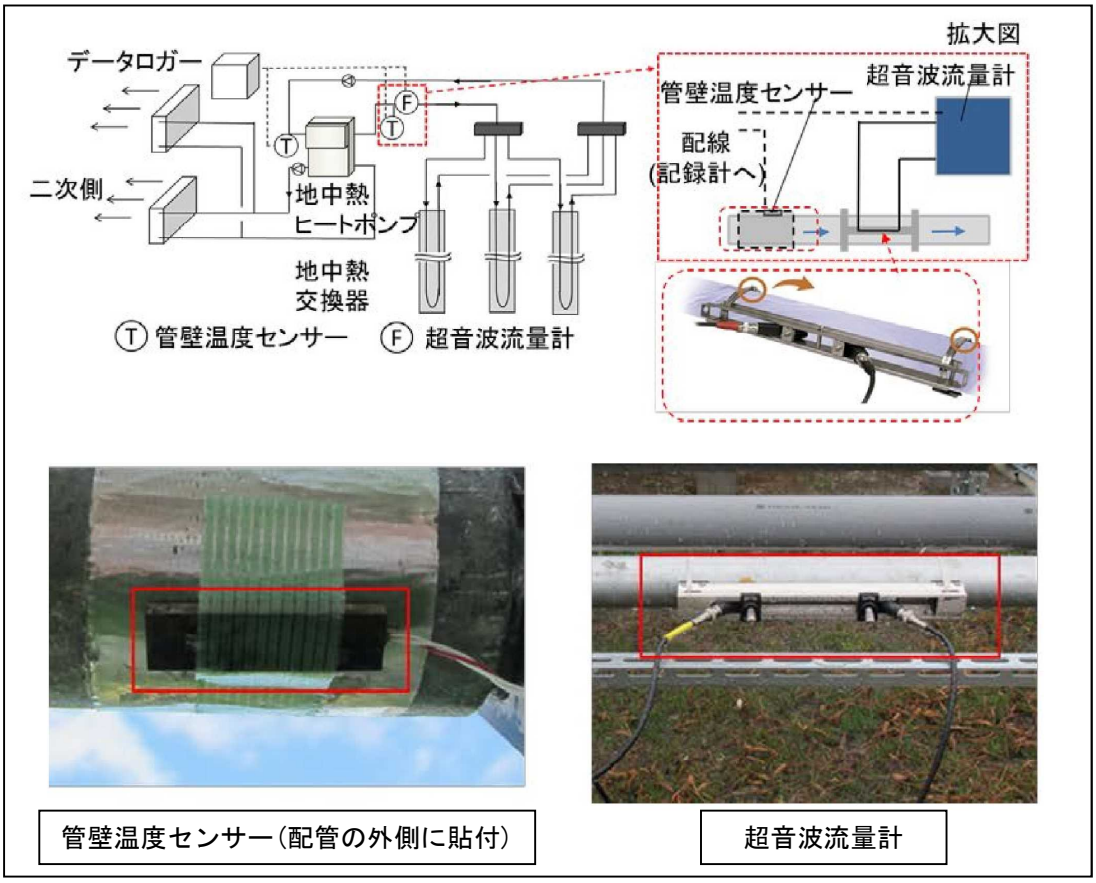


図 4-18　簡易モニタリング機器の開発例[42]

[42]NEDO，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.

4.4 モニタリングデータの取り扱い方法

(1) 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）

採熱量（冷房の場合は排熱量）は以下の式で算出できます。

[採排熱量(kWh)]＝60×L×ρ×（T_1－T_2）×c×t

T_1：熱媒体入口温度(℃)、T_2：熱媒体出口温度(℃)、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(hr)

時系列データを自動記録している場合、上記の計算を累積して行うことで評価対象とする期間(年間、季節等)の総採排熱量を算出できます。

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。

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。

[成績係数]＝[ヒートポンプ生成熱量(kWh)]／[消費電力量(kWh)]

ここで、[ヒートポンプ生成熱量]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・CO_2 排出削減効果

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 CO_2 排出原単位を乗じることで、省エネルギー効果や CO_2 排出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 CO_2 排出原単位の例を表 4-18 に示します。

表 4-18　エネルギー種別換算係数および CO_2 排出源単位

種別	電力	都市ガス	灯油
燃料単位	kWh	Nm^3	L
換算係数[43]	9.76[MJ/kWh]	44.8 [MJ/Nm^3]	36.7[MJ/L]
CO_2 排出原単位[44]	0.512[kg-CO_2/kWh]※	2.23[kg-CO_2/ Nm^3]	2.49[kg-CO_2/L]

※電力の CO_2 排出源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

(2)　モニタリングおよび評価データの活用

既往のモニタリング事例として、各モニタリング機器から得られたデータを自動記録し、計算を行う計測演算装置を用いて一括管理している事例もあります(図 4-19)。

得られたリアルタイムデータや演算結果をディスプレイ表示することで、地中熱利用ヒートポンプシステムの稼働状況の監視や、建物利用者等へのアピールにも役立ちます。

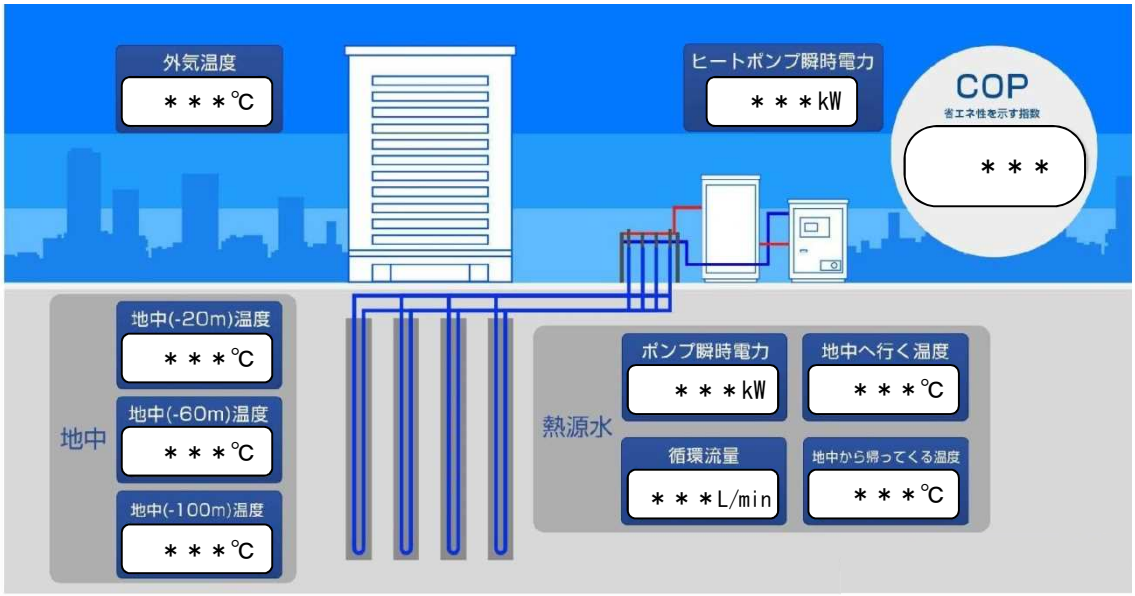


図 4-19　地中熱利用システムのディスプレイの例

[43]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，オーム社，2014.
[44]電気：電気事業者別の CO_2 排出係数（2017 年度実績）　（平成 29 年 12 月 21 日公表）
灯油および都市ガス：算定・報告・公表制度（平成 29 年 7 月）

第5章　地中熱利用に関する新技術等の紹介

5.1　技術面

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。

(1)　クローズドループ方式における工夫

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、地中熱交換井の効率を高めたり、熱交換器の形状を工夫したりして、イニシャルコストを低減する新たなクローズドループ方式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井の機能を持たせることができ、別途に地中熱交換井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 5-1)。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。

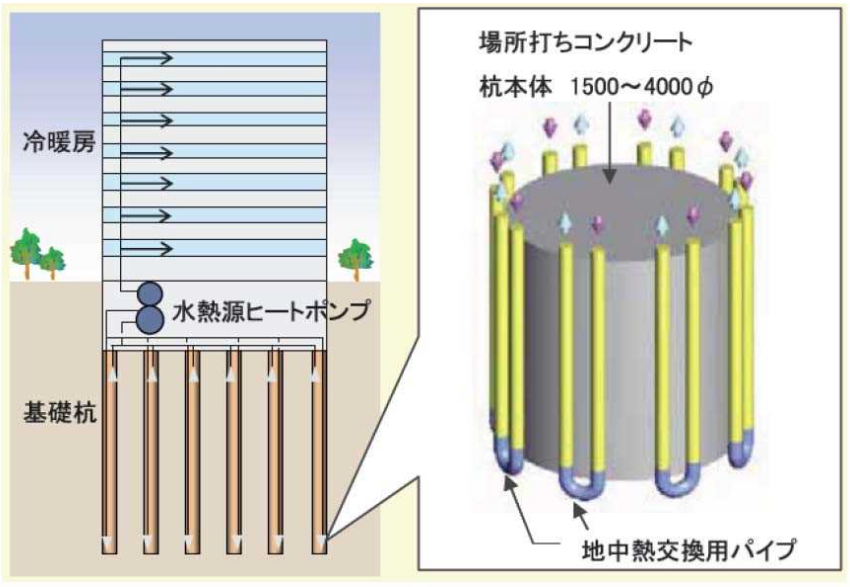
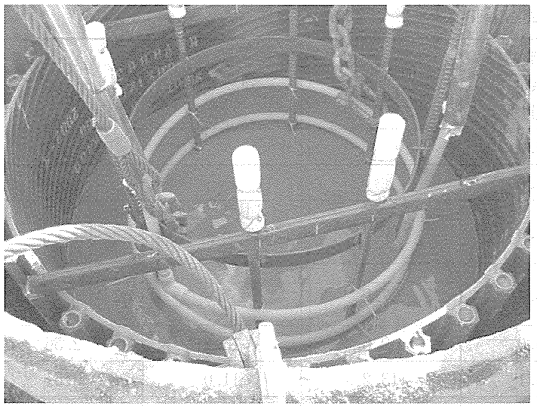


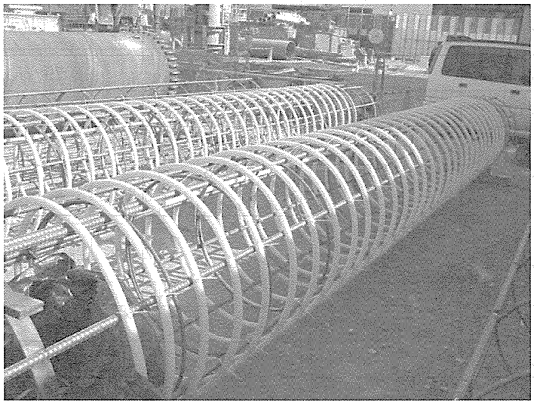
図 5-1　地中熱交換用の配管を杭の外周に垂直に配置する方法の例[45]

[45]NEDO，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.

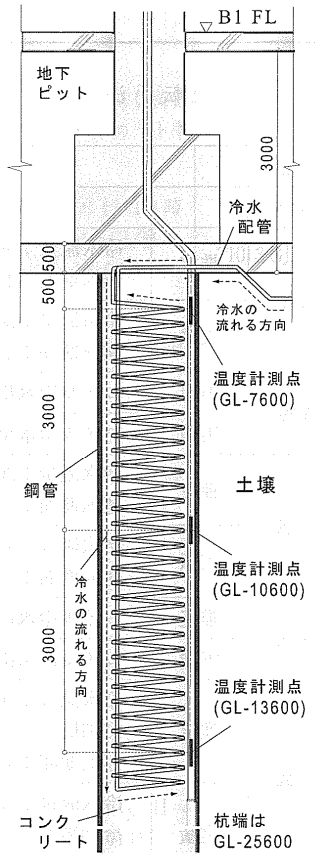
地中における熱媒体の循環距離を長くしてより効率的な採熱を行うため、熱媒体循環チューブを杭基礎内にらせん状に配管する手法が開発されています(図 5-2)。



杭基礎内らせん配管敷設



架橋ポリエチレン配管巻付



杭基礎内らせん配管

図 5-2　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[46]

[46]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 5-3)[47]。

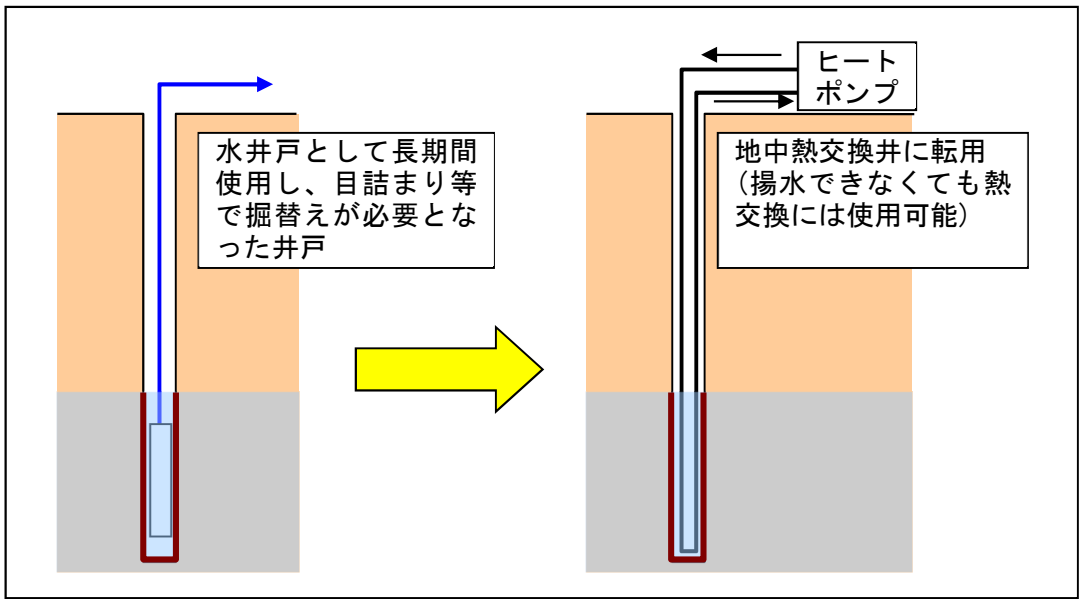


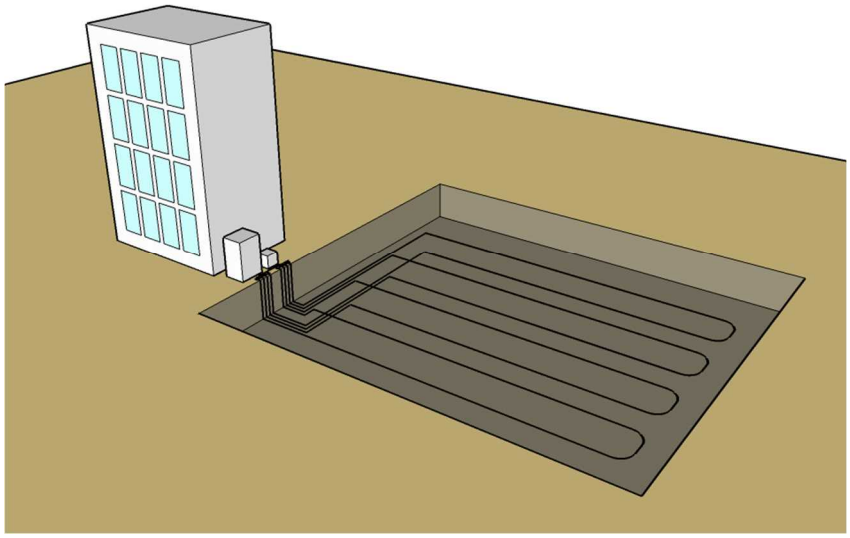
図 5-3　既設井戸の転用のイメージ

[47]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，雪氷研究大会発表資料，2011.（https://www.jstage.jst.go.jp/article/jcsir/2011/0/2011_0_172/_pdf）

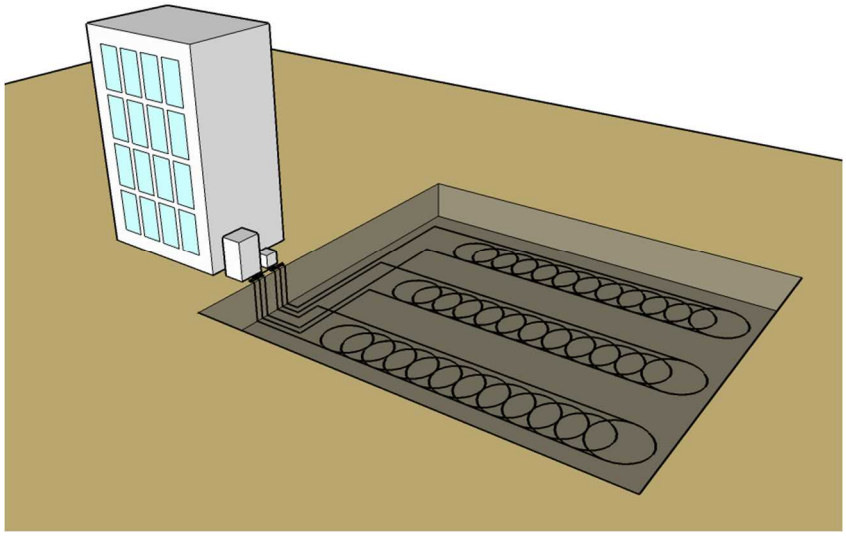
3) 地中熱交換用配管の浅層設置（水平設置など）

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 5-4、図 5-5、写真 1)。

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 5-4　地中熱交換用配管の水平設置のイメージ

図 5-5　シート状の熱交換器を浅層に埋設して熱交換を行う方式[48]

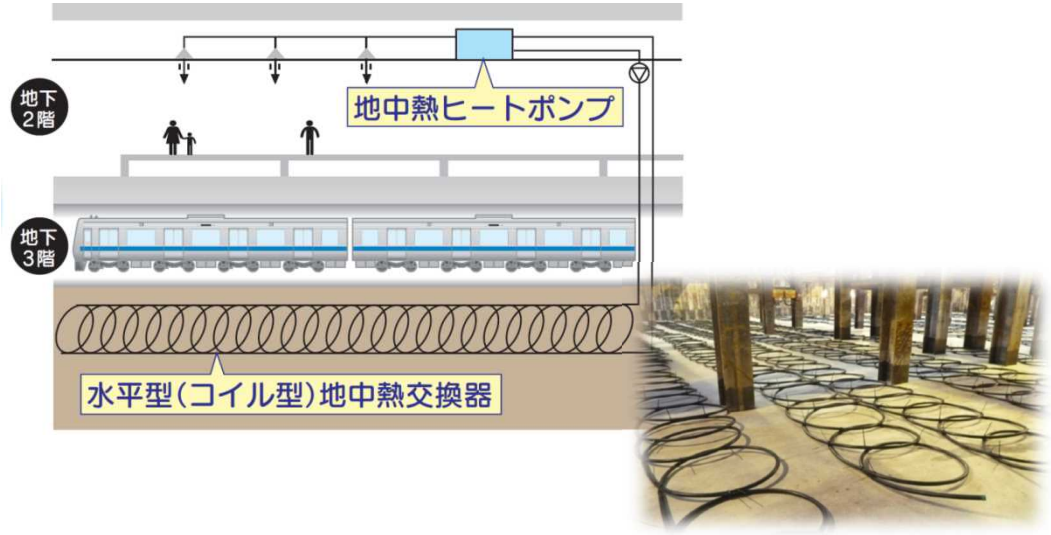


写真 1　国内における地中熱交換用配管の水平設置例[49]

[48]クリモトポリマー株式会社ホームページ（http://www.kuripoly.jp/product/g_carpet/）
[49]小田急線地下工事情報誌シモチカナビⅡ,vol.2（http://www.shimochika-navi.com/99_backnumber/pdf/vol200-02.pdf）及び三菱マテリアル株式会社ホームページ（http://www.mmc.co.jp/corporate/ja/news/press/2013/13-0717.html）

4) 地中熱交換井内の配管（U チューブ）の工夫

地中熱交換井で用いられている U チューブやダブル U チューブは、還り側と送り側の配管本数が同じになっています（図 5-6 の左側）。

この配管の還り側を 1 本、送り側を 3 本とすることで（図 5-6 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、還り側は、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、地中熱交換井の延長を低減し、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[50]。

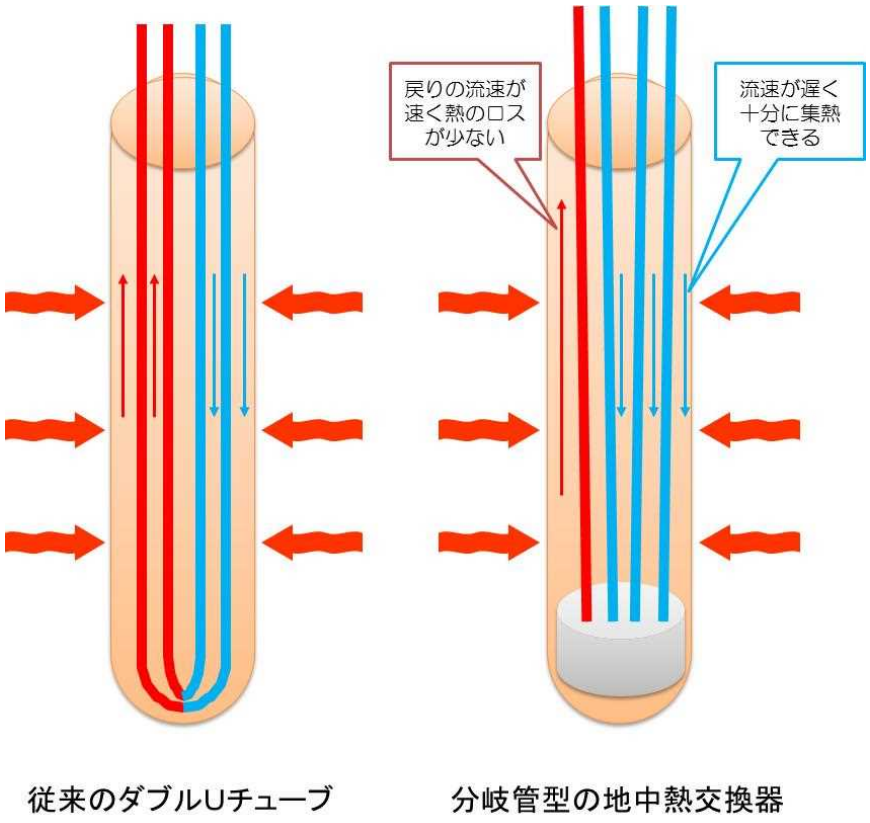


図 5-6　地中熱交換器の工夫例

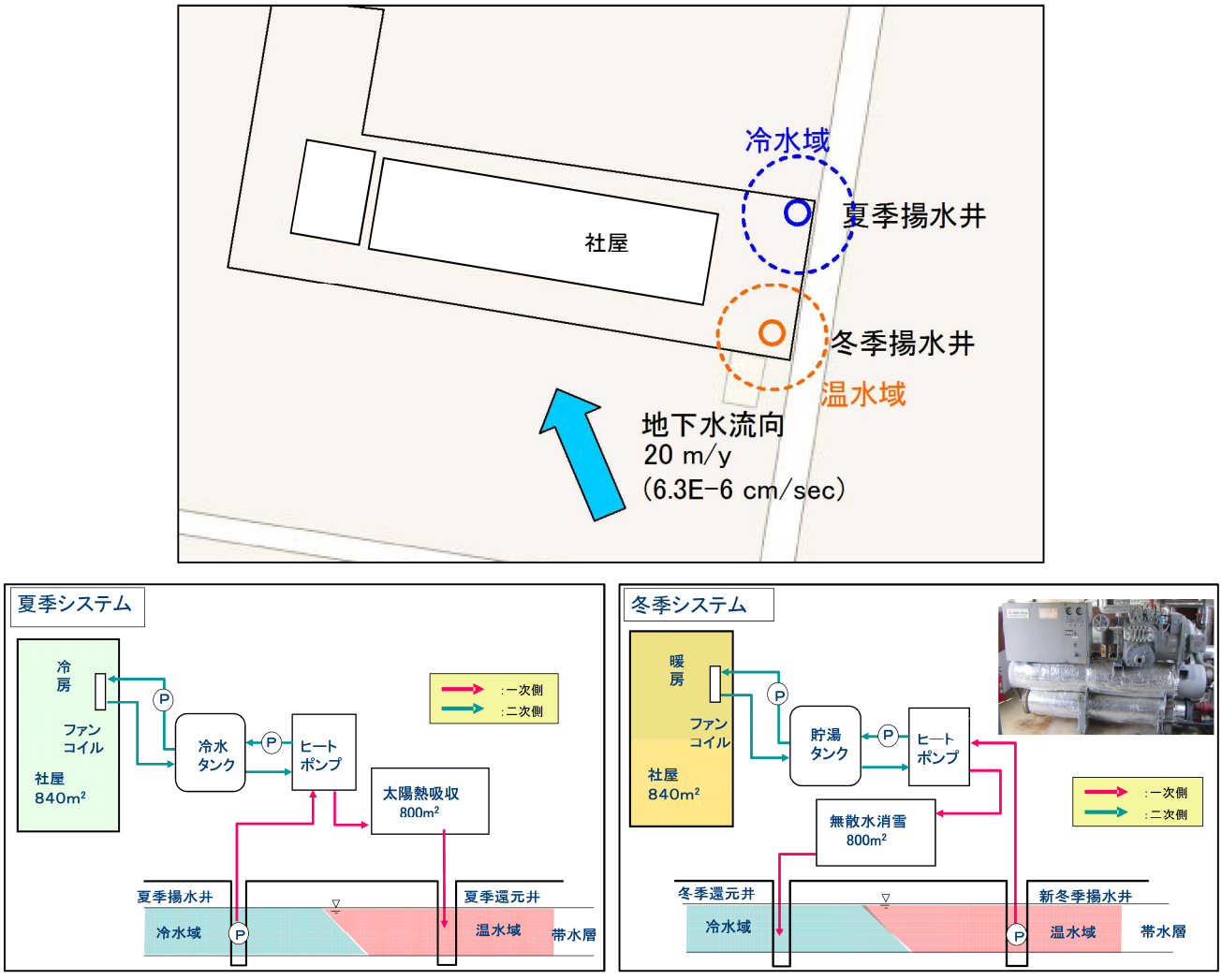
[50]高効率地中熱利用システムに関する実証研究（https://www.env.go.jp/earth/ondanka/cpttv_funds/pdf/prod2014/p20140204.pdf）

(2) オープンループ方式における工夫

1) 帯水層蓄熱利用

地下水流速が遅い地域では、適切な地中熱交換井の配置により、夏の温排熱を冬の暖房熱源に、冬の冷排熱を夏の冷房熱源として帯水層で蓄熱し季節間利用することで、地中熱利用の効率向上を図ることができます。

地下水流動がある地域においても、遮水壁で取り囲んで流れの無い地中空間を作り、帯水層蓄熱利用を図る方法がありますが、その場合は、地下水流動の上流側における地下水位上昇や、下流側における地下水位低下等、流動阻害による周辺影響を生じる可能性があることから、地下水流動保全への十分な配慮が求められます(図 5-7)。



地下水流速が遅い地域において、夏季は冷水域から揚水して温水域へ還元し、冬季は温水域から揚水して冷水域へ還元することで蓄熱利用している例。

図 5-7　帯水層蓄熱利用の例[51]

[51]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) データベース

地中熱利用を図る際に、その地点における採熱量のポテンシャルを把握することは最適なシステム設計上重要であるとともにコスト低減のためにも有用です。

地域の地下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。

従来から整備されている地下環境情報データベースの例、および海外における地中熱利用をテーマとしたデータベースの例を示します。

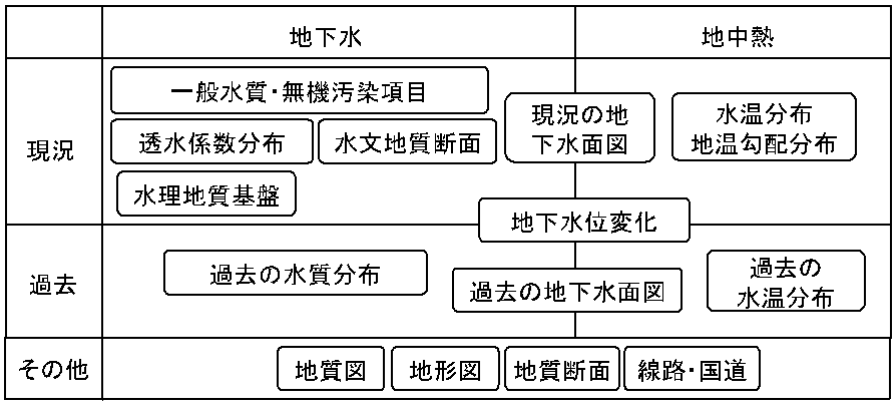
1) 水文環境図

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 2002 年から 2015 年までに 8 つの地域で出版されています(2015 年 3 月現在では関東平野、熊本地域、石狩平野のみ販売中)(図 5-8)。

水文環境図は地下水資源の保全と有効利用に資することを目的としていますが、特に将来的な地中熱利用を見越し、地下水温情報を重点的に編集しています。

水文環境図で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を編集しています(表 5-1)。

表 5-1 水文環境図の中心的な編集項目[52]



[52]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.

図 5-8　水文環境図の例(関東平野、水理水頭の深度別平面図（50m～100m）)[53]

[53]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.

2) 地下環境データベース

近年、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、青森県エネルギー開発振興課は弘前大学と共同で、掘削の事前情報として、既往のボーリング調査の結果(地下水位、土質、N 値など)を閲覧できるデータベース(地下環境データベース)を作成・公表しています(図 5-9)。

図 5-9 地下環境データベースの例（青森県）[54]

[54]弘前大学ホームページ（http://njrise.cc.hirosaki-u.ac.jp/ioka/ugdb/gtr2/aomori_map.html）

(4) 周辺技術

1) 掘削機

地中熱利用ヒートポンプのイニシャルコストにおいて、掘削費の占める割合は大きなものとなります。掘削予定位置の地理的条件(重機の搬入可否や騒音対策の必要性など)や地質、掘削深度などにより適用できる工法も異なるため、現地条件に合った施工方法の選定が必要となります(表 5-2)。

表 5-2　掘削工法の比較表[55]

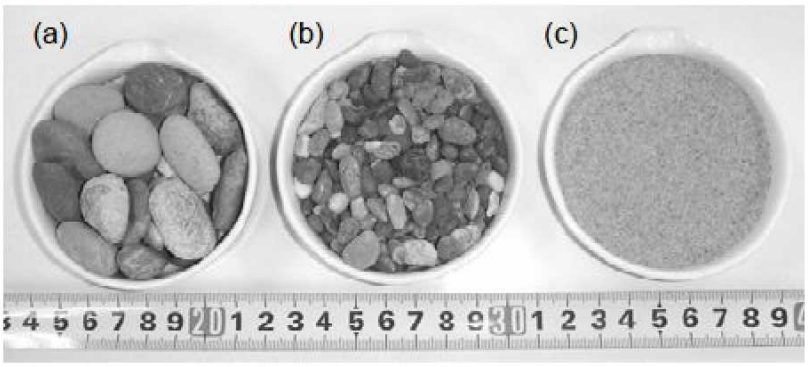
掘削工法 / 項目	回転振動式（高速振動）	ﾛｰﾀﾘｰﾊﾟｰｶｯｼｮﾝ式(油圧ﾄﾞﾘﾌﾄ)	ﾀﾞｳﾝｻﾞﾎｰﾙﾊﾝﾏ式（エアハンマ）	ﾛｰﾀﾘｰ式	ﾊﾟｰｶｯｼｮﾝ式（綱掘り）
掘さく作用	ﾘﾝｸﾞﾋﾞｯﾄ・ｲﾝﾅﾋﾞｯﾄで振動破砕	ﾘﾝｸﾞﾋﾞｯﾄ・ｲﾝﾅﾋﾞｯﾄで打撃破砕	ﾊﾝﾏﾋﾞｯﾄで打撃破砕	ﾛｯｸﾋﾞｯﾄで回転切削・破砕	椀ﾋﾞｯﾄで打撃破砕
泥水材料	主にﾎﾟﾘﾏ類	ﾍﾞﾝﾄﾅｲﾄ・ﾎﾟﾘﾏ	（潤滑油）	主にﾍﾞﾝﾄﾅｲﾄ	主に粘土
掘さく深度	150m 程度	100m 程度	200m 程度	350m（水井戸）	300m
掘さく孔径	Max 283mm	Max 225mm	Max 350mm	Max 660mm	Max 750mm
適用地質	未固結層・岩盤	未固結層・岩盤	安定岩盤	未固結層・岩盤	未固結層・軟岩
備考	あらゆる地層に適合する 岩盤掘さくにはｲﾝﾅﾋﾞｯﾄを使用	振動・騒音問題が生じる場合は、打撃破砕を止めてロックビットを使用したロータリー式に切り替える	未固結・強風化岩盤の掘さくの場合は、ｹｰｼﾝｸﾞ併設工法を採用	玉石・転石層の場合の掘さくは難航する	玉石・転石層の掘さくに最適な工法
主な用途	クローズド方式	クローズド方式	クローズド方式 オープン方式	オープン方式 クローズド方式	オープン方式

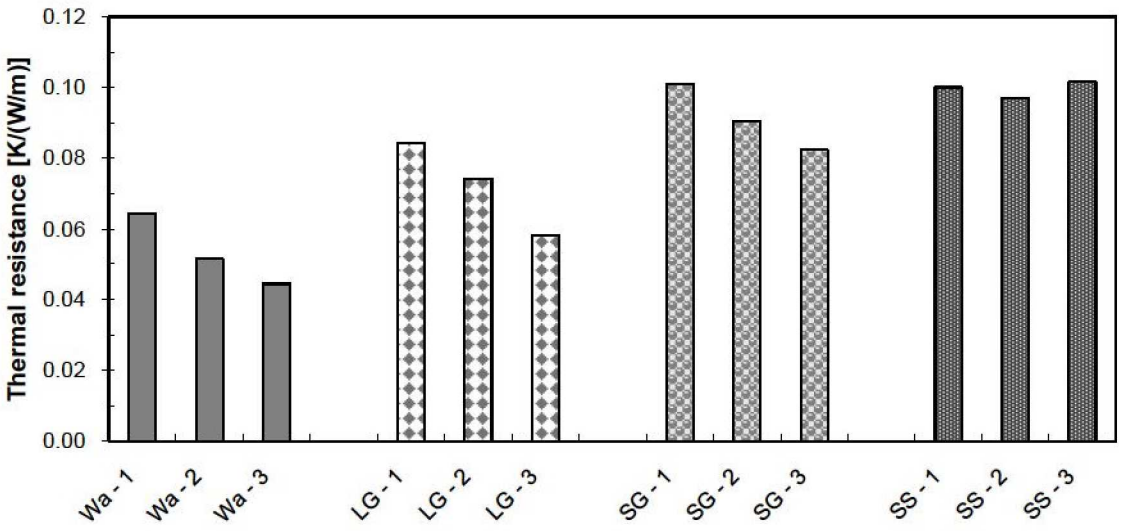
[55]吉田ら，地下熱利用技術　6.地下熱利用のための水文地質調査とさく井技術，地下水学会誌，第 53 巻，第 3 号，p.293-308，2011．に基づいて作成

2) 地中熱交換井の充填材

クローズドループ型の地中熱交換井では、熱媒体循環チューブの支持および地層と熱媒体循環チューブの伝熱特性の向上等の目的で、チューブと孔壁との間に充填材を詰める場合がありますが、充填材の伝熱特性が熱効率に影響します。

以下は充填材として砂利を用いた場合の、砂利の粒径と伝熱特性(熱抵抗)との関係を調査した例です（図 5-10)。





※Wa：水充填、LG：大粒径、SG：小粒径、SS：珪砂、1～3 は熱抵抗調査時の温度変化の違い

図 5-10　充填材の砂利の粒径と熱抵抗の関係[56]

[56]駒庭ら，砂利充填された地中熱交換井の熱交換能力に関しての室内実験による評価，日本地熱学会誌，第 33 巻，第 4 号，p. 169-178，2011.

3) 少水量対応高効率ヒートポンプシステム

ヒートポンプを高効率に運転する技術として、冷暖房の低負荷運転時に循環流量を適度に絞る熱源水変流量制御により、熱源水のポンプ搬送動力を大幅に削減した例があります。この例では、通常の地中熱ヒートポンプと比較して消費電力量を78%に低減しています(図5-11)。

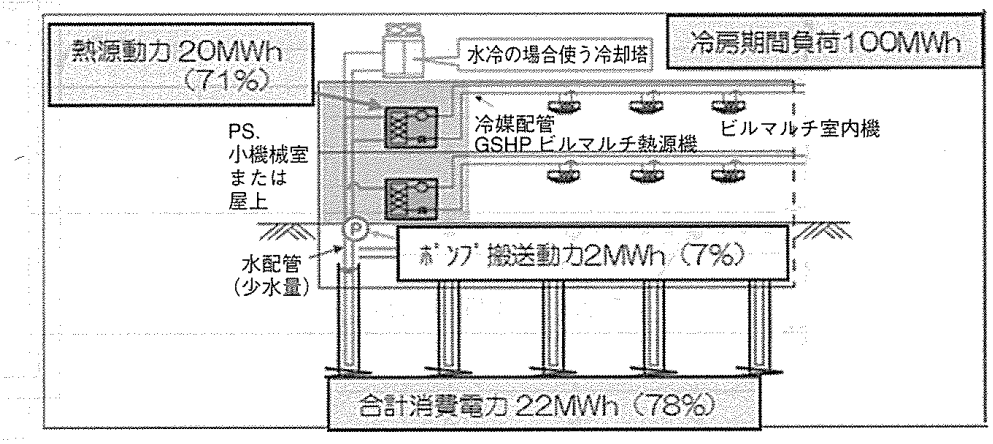


図 5-11　少水量地中熱ヒートポンプシステムの例[57]

[57]中村，地中熱ヒートポンプシステムの事例紹介（オフィスビル・寮），空気調和・衛生工学会誌，第 86 巻，第 8 号，p. 751–762，2012.

4) 間接熱交換器

オープンループ型のヒートポンプにおいて、地下水の水質特性による配管内のスケール発生の懸念がある場合、スケール除去が可能な間接熱交換器の併用やクローズド型のシステムを検討する必要があります。一般に、地中熱ヒートポンプでは管内にスケールが付着した場合に除去することが困難であるため、水質条件が悪い場合にはスケールの除去が可能な間接熱交換器が併用されます。間接熱交換器にはプレート式や多管式があり、揚水井戸とヒートポンプ間に設置され、間接的な熱交換が行われます(図 5-12)。

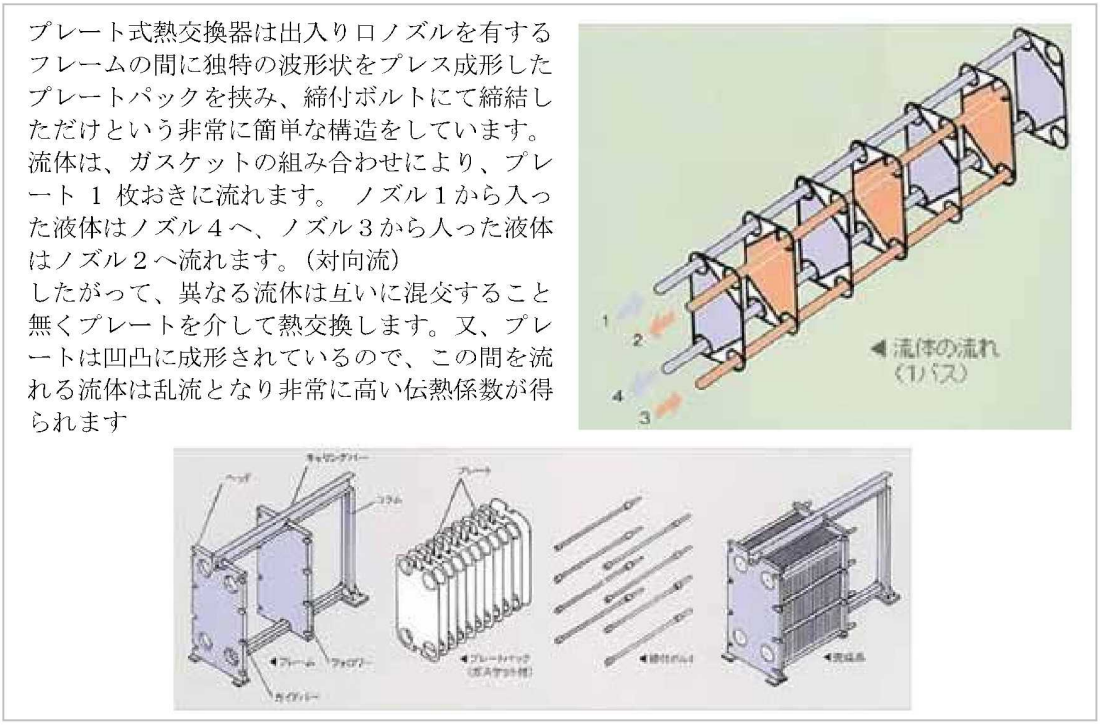


図 5-12　プレート型間接熱交換器[58]

[58]岐阜県・岐阜市・帝国建設コンサルタント，地中熱利用可能性調査報告書（「緑の分権改革」推進事業），2011.2.

(5) 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・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

クローズドループ型の地中熱利用システム導入時に、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 5-13)。TCP は Thermal Conductivity Profiling の略であり、数 m ごとに TRT の温度変化を計測し、層別の熱特性を評価する方法です。

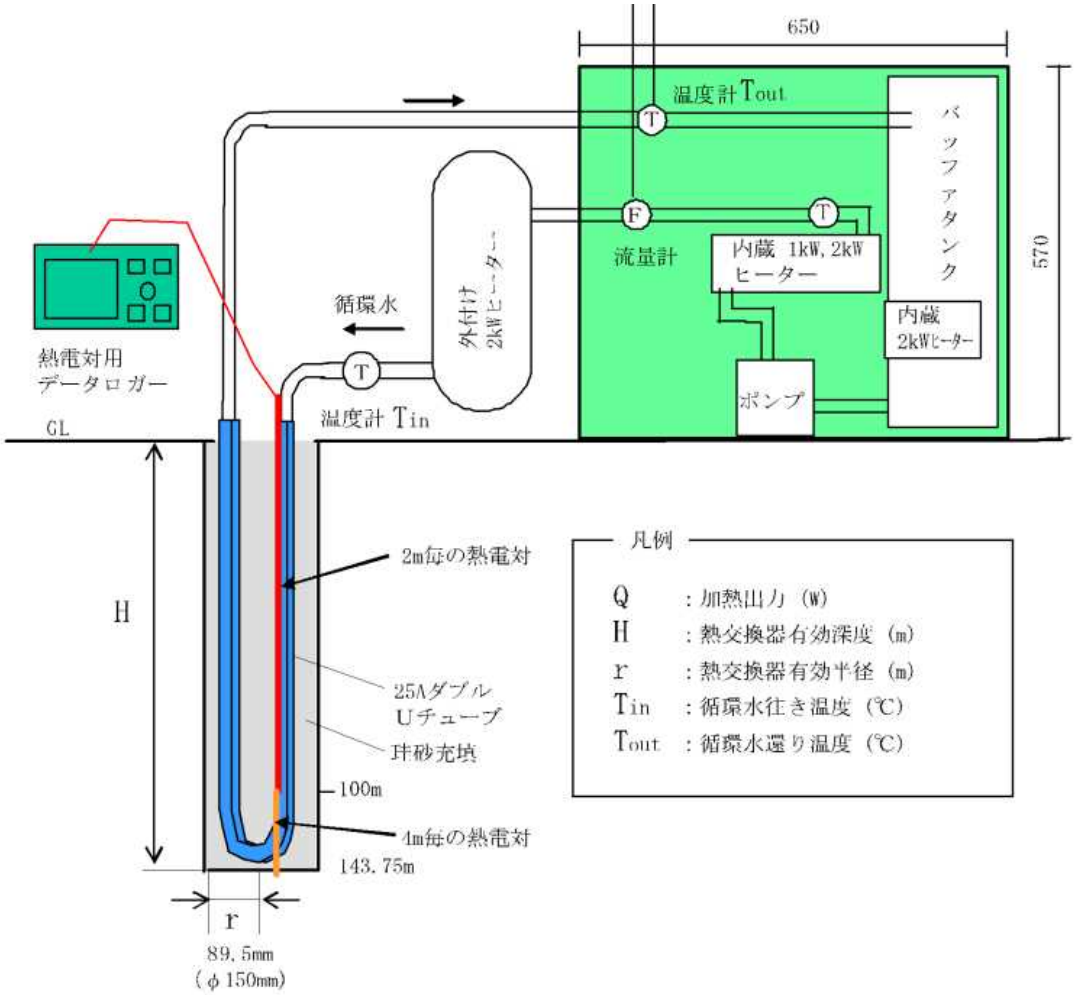


図 5-13　TCP/TRT 機器ユニット[59]

[59]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・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 5-14)。

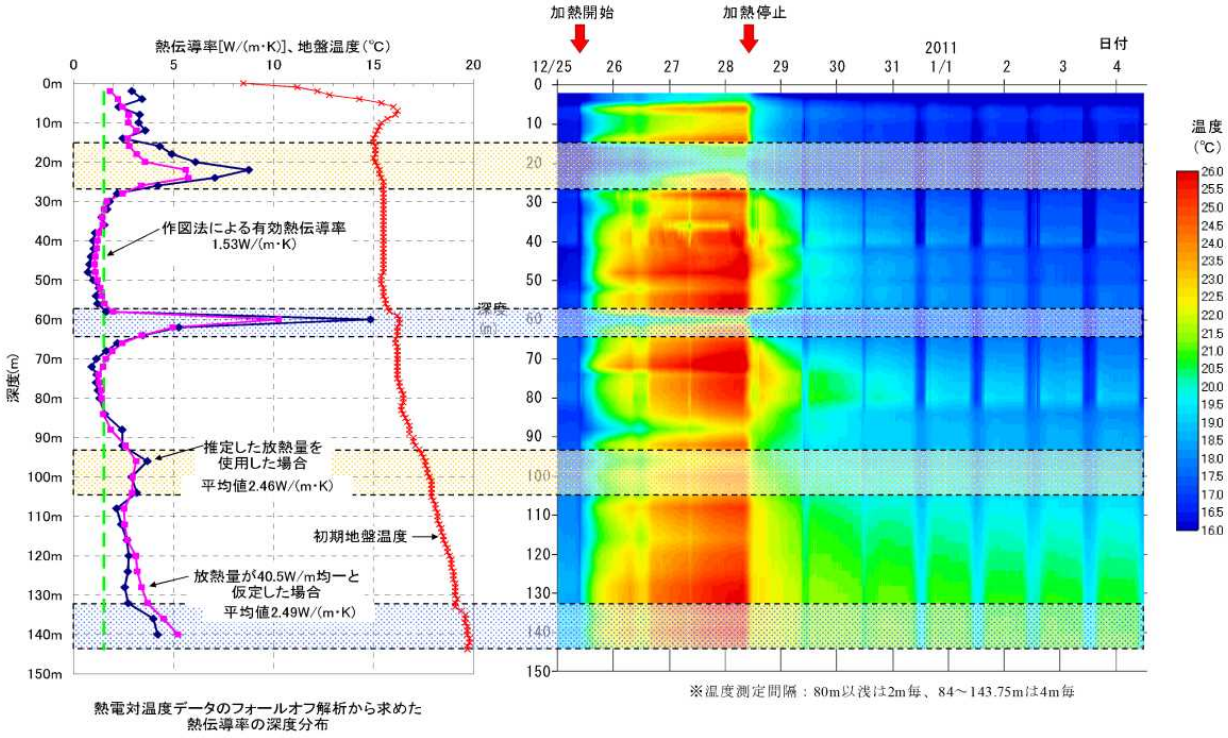


図 5-14　熱伝導率の深度分布の評価例[60]

[60]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.

2)　Ground Club

クローズドループ型の地中熱ヒートポンプの設置にあたり、年間性能予測や環境性評価を行うためのツールとして、例えば『Ground Club』が用いられています(図 5-15)。使いやすい GUI (graphical user interface) で、高速計算により性能評価、消費電力量、LCC、$LCCO_2$ 等の評価が可能です。

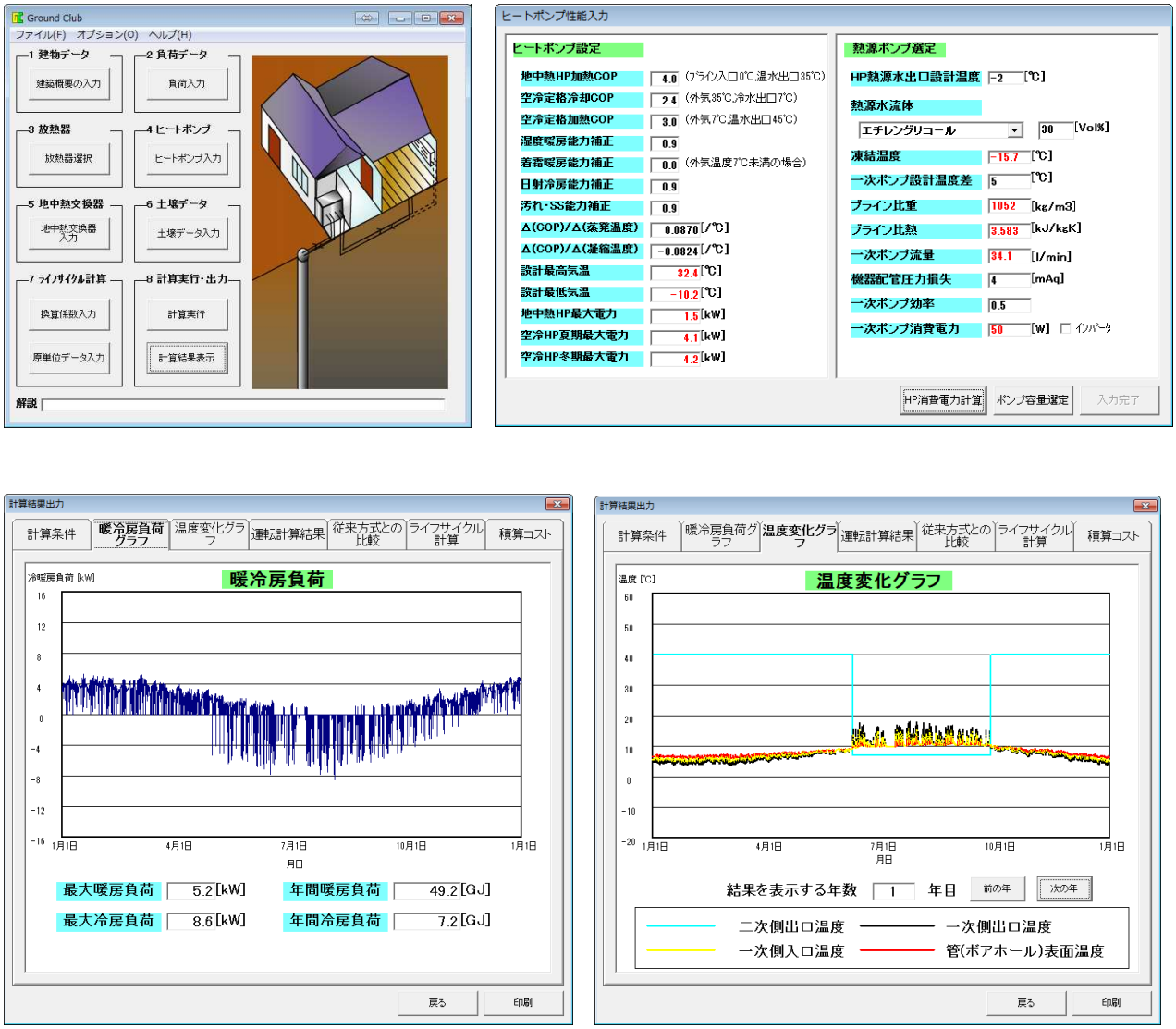


図 5-15　GroundClub の操作画面および計算例

3) FEFLOW

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』などの地下水流動・熱輸送解析モデルが挙げられます(図 5-16)。

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。

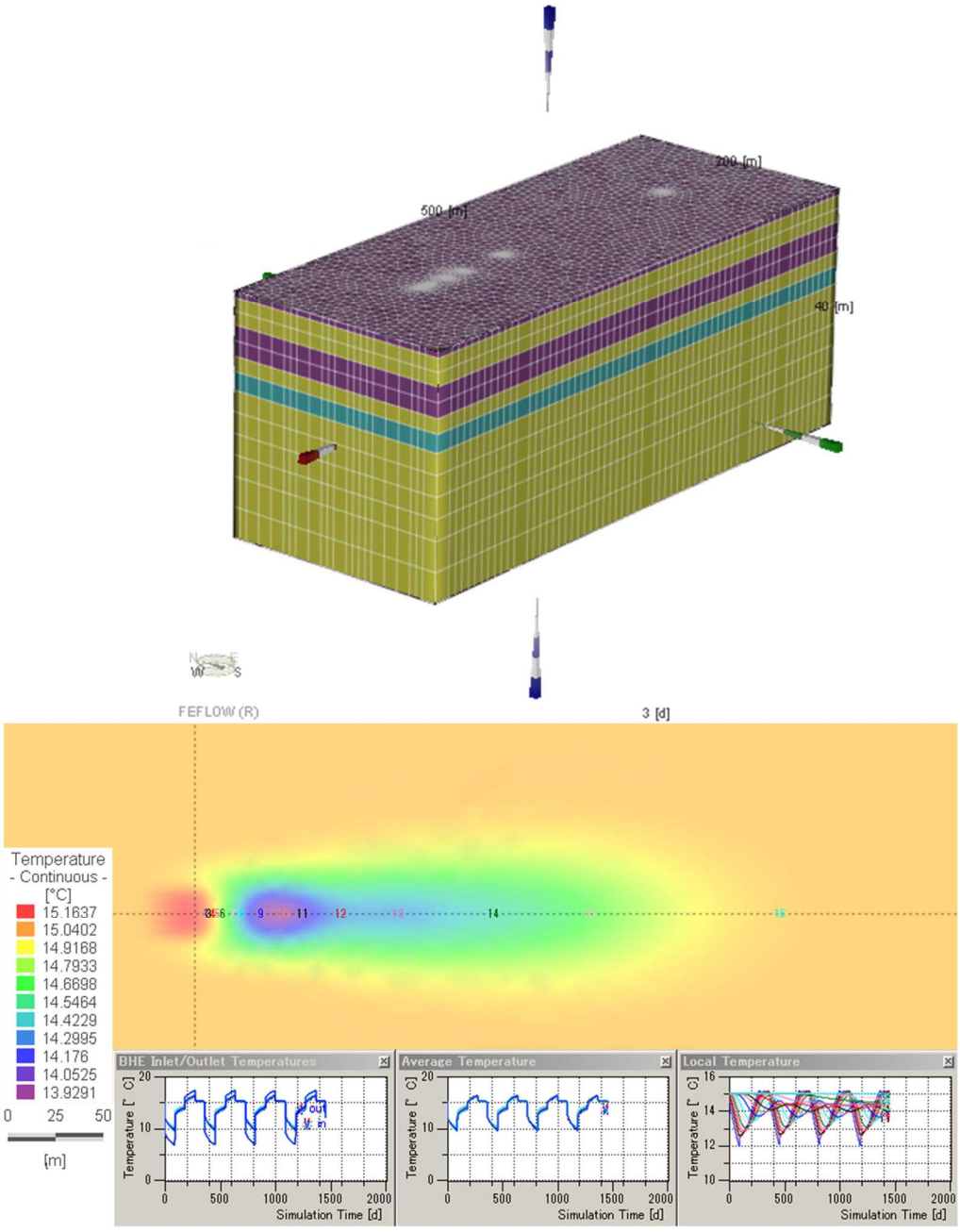


図 5-16 FEFLOW による解析モデルおよび結果の表示例[61]

[61]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.

5.2　運用面

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（イニシャルコスト）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設備の導入においては、地中熱交換井の掘削に費用がかかるため、通常の冷暖房システムよりもイニシャルコストが高くなる傾向があります（図 5-17～図 5-19）。

一方で、熱源となる燃料や電力が不要であること、基本的にメンテナンスフリーで耐用年数も長いことから、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（図 5-17）。また、設備導入に関して様々な助成制度（参考資料 11 参照）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全体のコストを抑えることができます。

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・給湯や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。

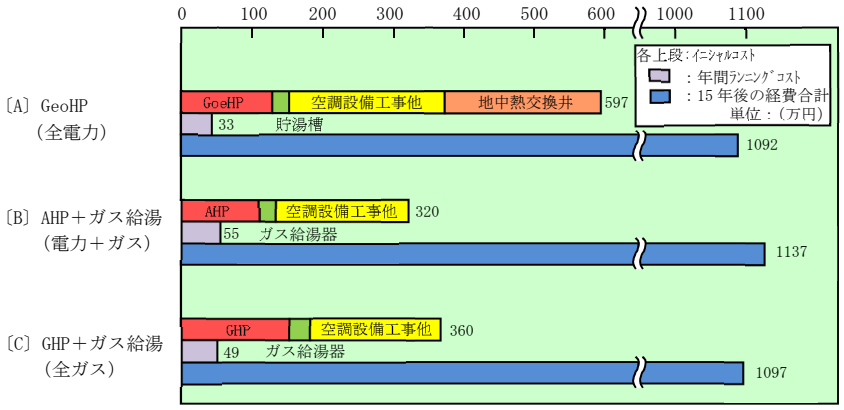


図 5-17　戸別住宅の冷暖房・給湯コストの比較例(助成金を含まない比較)[62]

[62]NEDO，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.

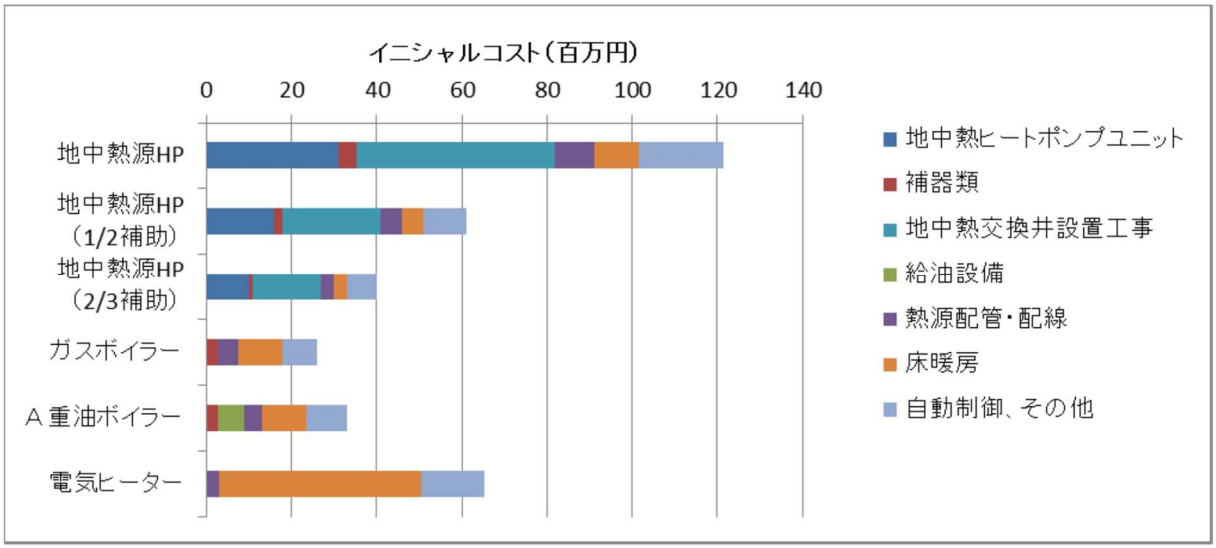
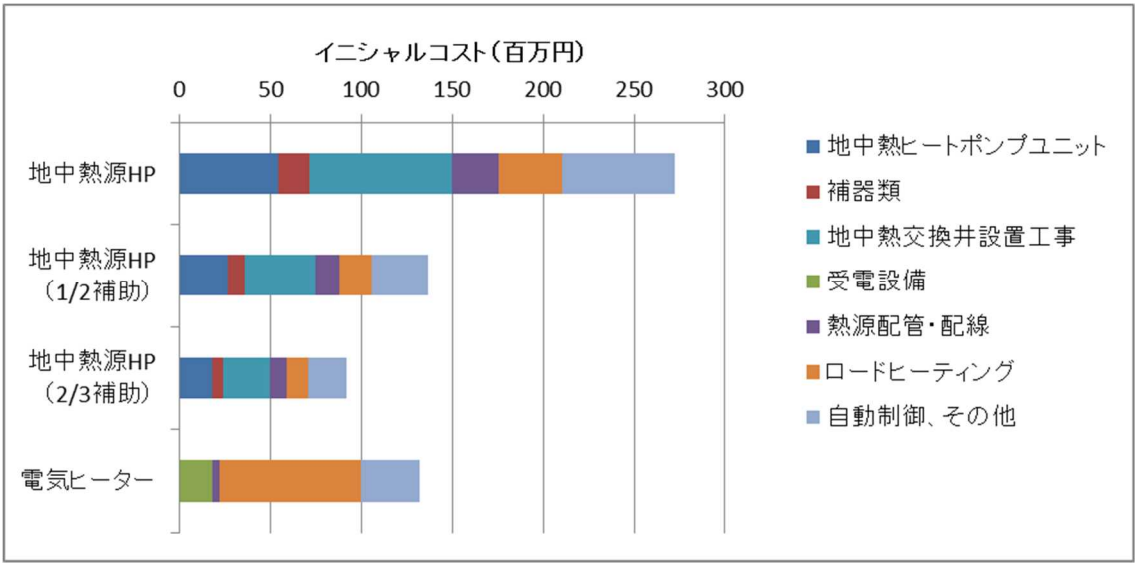


図 5-18　公共施設の暖房のみのイニシャルコストの構成例[63]



＜試算条件＞

歩道融雪
融雪面積：1,650m^2（延長 600m×幅 1.5m、延長 500m×幅 1.5m の 2 箇所）
融雪方式：ロードヒーティング
設計熱量：300W/m^2
平均気温：11 月 3.2℃、12 月-5.7℃、1 月-5.9℃、2 月-4.6℃、3 月-0.7℃、4 月 3.0℃
（11～4 月-1.8℃）
最低気温：-21.4℃
融雪時間：8 時間/日（想定値：年間降雪量÷降雪日数）
地中温度：12.0℃（町の実績）

図 5-19　融雪イニシャルコストの構成例[63]

[63]倶知安町，地中熱利用融雪・暖房システム詳細ビジョン報告書，2007. 3.

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 あたり概ね 25～60 万円程度(図 5-20)、オープンループ方式では出力 kW あたり概ね 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かかる場合もあるので、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。

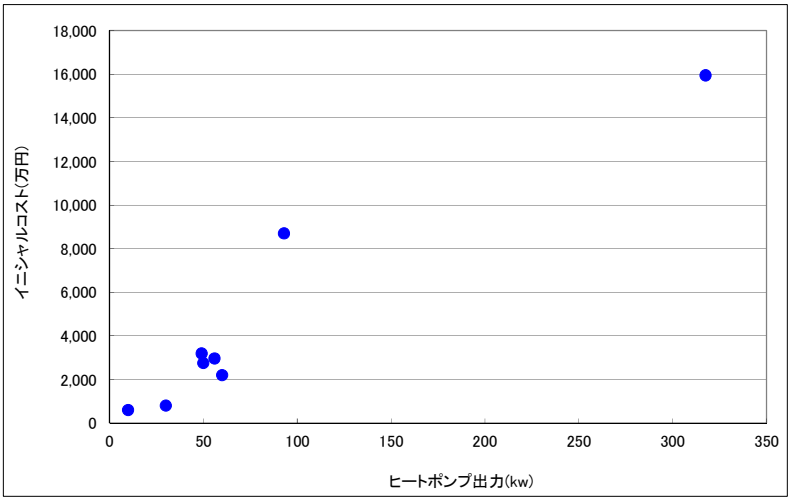


図 5-20　ヒートポンプ出力あたりのイニシャルコストの事例（クローズドループの例）[64]

(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（参考資料 11)。

(2)　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て、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。

[64]設備事業者へのヒアリングによる

(3) 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、リースを活用することで、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、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[65]。

(4) 地中熱利用ヒートポンプのグリーン熱証書導入

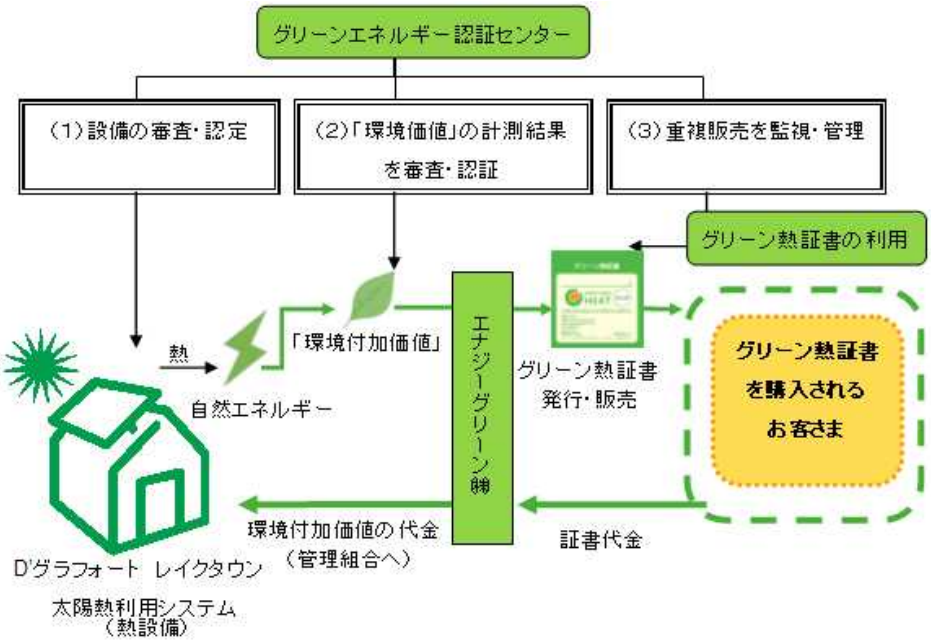
“再生可能エネルギーによって生成された熱は、「熱そのものの価値」に加えて、地球温暖化及びエネルギー枯渇の防止に貢献する価値、すなわち「環境価値」を有している。グリーン熱証書は再生可能エネルギー熱利用施設から生成されるエネルギー量（熱量）を証書化したもので、その環境価値を売却することにより、その対価として一定の収入が得られる。この制度の活用により、再生可能エネルギー熱利用施設の導入にあたっての初期投資の早期回収や運転維持費の充当に貢献することができ、再生可能エネルギーの熱利用を促進させることが期待できる[66]。”との提言があります。

太陽熱に関しては平成 21 年 4 月からグリーン熱証書の認証が開始され、修繕積立金に充てられている例があります（図 5-21）。平成 23 年 1 月からは雪氷エネルギー、バイオマス熱によるグリーン熱証書の認証が開始[67]され、平成 26 年 6 月末現在で、太陽熱 15 件、雪氷エネルギー 5 件、バイオマス熱 7 件が認定されています。

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。

[65]某県の信用組合本店担当者からの電話ヒアリングより
[66]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
[67]財団法人日本エネルギー経済研究所，グリーンエネルギー認証センター，雪氷エネルギー，バイオマス熱によるグリーン熱証書の認証開始について， 2011 年 1 月 25 日プレスリリース（https://eneken.ieej.or.jp/press/press110125.pdf）



大和ハウス工業株式会社が開発・分譲した D'グラフォートレイクタウン(埼玉県越谷市)では、太陽熱を利用した街区住棟セントラルヒーティングシステムを導入し、全 500 戸の給湯および暖房(床暖房)で使用されるエネルギーの一部を補うために屋上に総面積約 950m² の太陽熱パネルを設置。
本設備で生じた熱から日本で初めてグリーン熱証書が発行された(証書熱量(利用実績量)は 40,000MJ、証書発行事業者はエナジーグリーン株式会社)。当該熱証書は、2010 年 10 月 23 日～31 日に開催された第23回東京国際映画祭(主催:公益財団法人ユニジャパン)において使用されたエネルギーに充当。証書により得られた代金は D'グラフォートレイクタウンの修繕積立金等にあてられている。

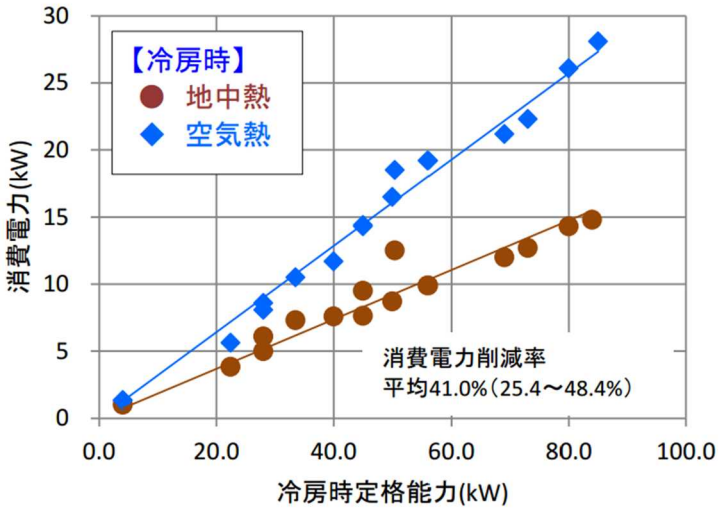
図 5-21　グリーン熱証書の事例[68]

(5)　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・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 25～48%(平均 41%)の消費電力が抑えられるとの試算があります(図 5-22)[69]。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。

[68]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.jimin.jp/eco/condition/files/02.pdf）および（https://www.daiwahouse.co.jp/release/20101027110646.html）
[69]横浜市泉区役所総務部区政推進課・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.

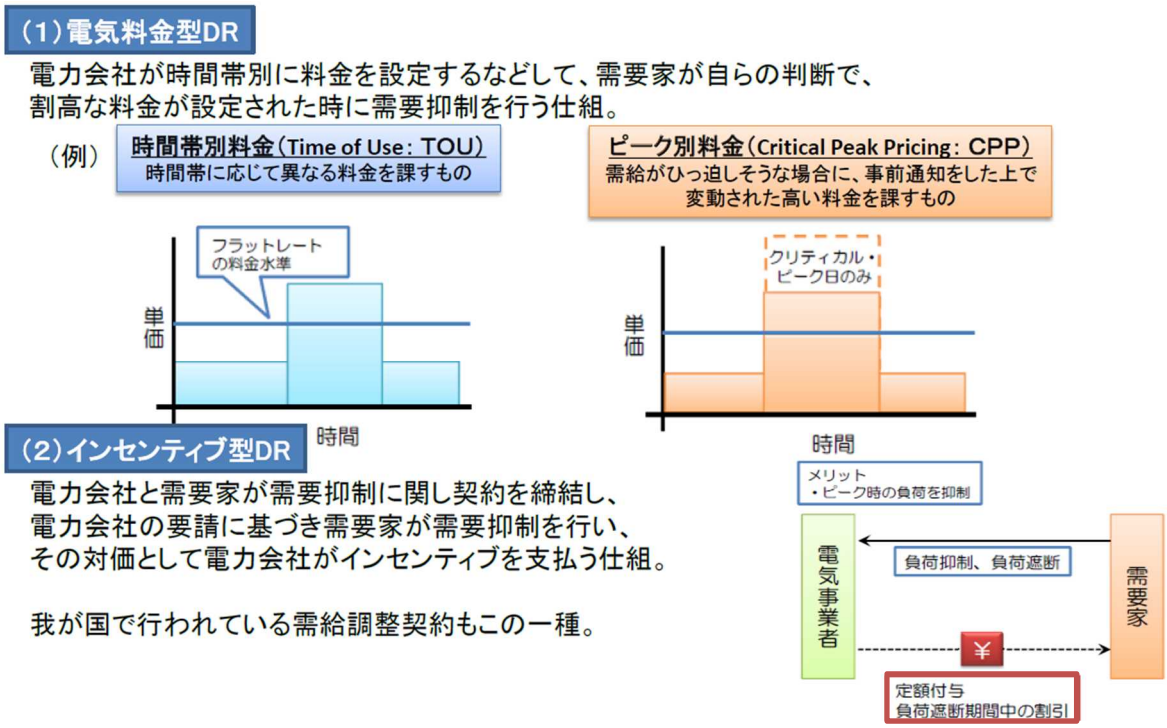


※：C社、Z社、J社のカタログをもとに作成

図 5-22　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 [69]

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 5-23)。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（ただし、一般家庭での TOU の普及率は約 5%）[70]。

[70]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）



【時間帯別料金メニューの例（東京電力の一般家庭向けメニュー）】

メニュー名	概　要
従量電灯	時間帯や曜日に関係なく、使用量に応じて料金を設定したスタンダードなメニュー
おトクなナイト8	夜11時から翌朝7時までの時間帯の料金を割安に設定したメニュー
おトクなナイト10	夜10時から翌朝8時までの時間帯の料金を割安に設定したメニュー
朝得プラン	深夜1時から朝9時までの時間帯の料金を割安に設定したメニュー
夜得プラン	夜9時から翌朝5時までの時間帯の料金を割安に設定したメニュー
半日お得プラン	夜9時から翌朝9時までの時間帯の料金を割安に設定したメニュー
土日お得プラン	土日の料金を割安に設定したメニュー
ピークシフトプラン	夏季は3つ、その他季は2つの時間帯に分けて、夏のピーク時（昼1時から4時）を高めに、夜間（夜11時から翌朝7時まで）を割安に料金を設定したメニュー
電化上手	「季節」と「時間帯」で細かく料金を設定し、夜11時から翌朝7時までの時間帯の料金を割安に設定したメニュー
深夜電力	夜11時から翌朝7時までの時間に、温水器などの機器を使用する場合のメニュー

【出所】 東京電力HPより作成

図 5-23　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）[70]

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[70]。

(6) 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 5-3 に複合利用方式（例）を、表 5-4～表 5-6 に複合利用方式の先行事例を示します。

表 5-3　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ヒートポンプを加えて給湯利用する　など

表 5-4　複合利用方式の先行事例の紹介（1）

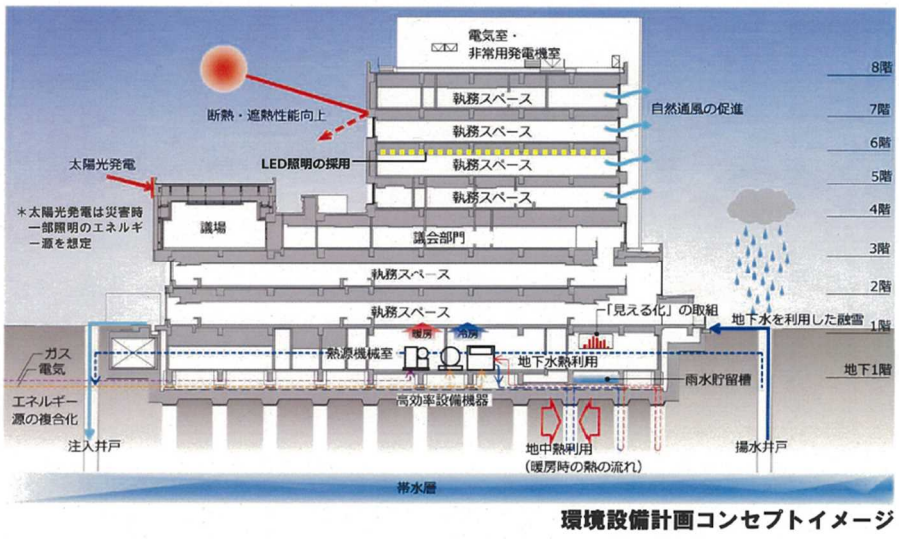
施設名	酒田市庁舎（酒田市）
技術導入の動機	・ 従来から融雪用に地下水を利用している例が多い土地柄 ・ 新庁舎建設の設計業務について、自然エネルギーの活用(地中熱利用)をテーマとしてプロポーザル形式で募集し提案を採用
上位計画との関係	酒田市総合計画、酒田市再生可能エネルギービジョン
システム概要	 システム概要図 出典：酒田市より
設備概要	地中熱交換杭：50m×75 本(新庁舎建設に必要な杭と合わせて施工) 地下水利用井戸：150m(帯水層)×1 組
エネルギーの複合利用	複合利用形態　：組み合わせ方式 地中熱＋地下水帯水層蓄熱 （不足分は電力、ガスの順で補う） 用途　：空調と冬期の駐車場融雪
補助等の利用	特になし

表 5-5　複合利用方式の先行事例の紹介（2）

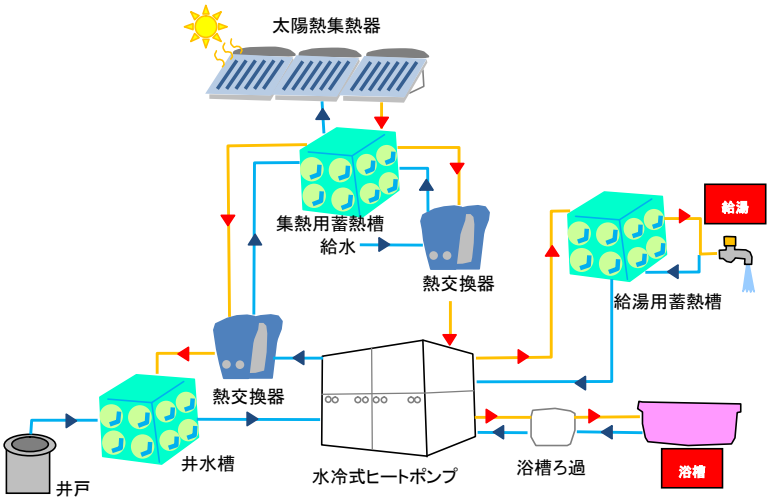
施設名	介護老人保健施設　わかくさ（医療法人社団　再生会）
技術導入の動機	・ もともと地下水をろ過して飲料水や生活用水として利用している ・ 経営者が新しい技術への関心が高い ・ ガス給湯設備の入れ替えに伴い新たなエネルギーの導入を検討 ・ コスト回収が可能と判断
上位計画との関係	特になし
システム概要	 システム概要図 出典：平成 23 年度　再生可能エネルギー熱利用加速化支援対策事業　導入事例集 一般社団法人　新エネルギー促進協議会　をもとに作成
設備概要	太陽集熱器　　：276㎡、集熱量 485GJ/年 地中熱交換井　　：120m×1 本 ヒートポンプ能力　：加熱　164kW
エネルギーの複合利用	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 5-6　複合利用方式の先行事例の紹介（3）

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チラー：冷却 527kW、加熱 530kW 空冷ヒートポンプモジュールチラー：冷却 475kW、加熱 500kW
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）

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。

地中熱利用技術は地盤に熱負荷を与えるため、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とする必要があります。

このような意味では、地中熱利用は未だ新しい技術の範疇にあり、また、認知度も十分とはいえません。よって、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る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。

技術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一般的ではなく、この点からも認知度の向上が求められます。

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、地中熱利用技術の普及促進のため、都市の低炭素化の促進に関する法律（エコまち法）や地球温暖化対策の推進に関する法律（温対法）等に基づく自治体の上位計画や取り組みへの地中熱利用技術の位置づけ、あるいは民間事業者への広報・周知が重要と考えられます。

また、モニタリングあるいは事前予測により導入効果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 R○-○○，表 R○-○○とした。
R は Reference の頭文字である。

参考資料　目次

1. 用語集 106

2. 地中熱利用方式の種類の区分について 109

3. 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 18～22 年度）事例一覧 110

4. モニタリングデータによる地盤温度影響解析等 120

5. 地中熱利用による地下微生物への影響評価事例
（環境配慮型地中熱利用システムの構築実証事業） 124

6. 稼働事例 129

7. モニタリングデータの確認方法 134

8. 地下水に関する規制 142

9. 水質に関する規制 145

10. その他関連法規 145

11. 助成制度 145

12. 関連するガイドライン等 146

検討委員会 147

1. 用語集

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）

（地下水の）還元

いったん汲み上げ、利用した地下水を元の帯水層へ戻すこと。

サーマルレスポンステスト（熱応答試験）

実際の地中熱交換器に熱媒を循環させ、循環温度や地中温度の推移によって地盤の熱特性や熱交換能力を予測する手法。（地中熱ヒートポンプシステム）

再生可能エネルギー

有限で枯渇の危険性を有する石油・石炭などの化石燃料や原子力と対比して、自然環境の中で繰り返し起こる現象から取り出すエネルギーの総称。

具体的には、太陽光や太陽熱、水力（ダム式発電以外の小規模なものを言うことが多い）や風力、バイオマス（持続可能な範囲で利用する場合）、地熱、波力、温度差などを利用した自然エネルギーと、廃棄物の焼却熱利用・発電などのリサイクルエネルギーを指し、いわゆる新エネルギーに含まれる。（EIC ネット・環境用語集）

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

消費電力 1kW あたりの冷却・加熱能力を表した値のことで、「Coefficient Of Performance」（成績係数）の頭文字をとって「COP」と略す。COP の大きいものほど省エネ効果が高くなる。（NEDO ホームページ・用語解説）

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 秒あたり 1 ジュールの仕事率が 1 ワットである。（大辞林に一部加筆）

地中熱

おおよそ地下 200m 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)

熱伝導率・有効熱伝導率

静止している媒体中を高温側から低温側に熱が移動する現象を熱伝導といい、熱伝導による熱フラックス（単位時間に単位断面積を通過する熱量）は温度勾配に比例し（フーリエの法則)、その比例係数を熱伝導率という。土や岩石の熱伝導率はその構成成分（固相、液相、気相）の体積割合に依存し、体積含水率の増加に伴って大きくなる。不飽和状態では、気相中で潜熱輸送による熱移動が生じるため、見かけ上熱伝導率が大きくなる。潜熱輸送を含めた場合、有効熱伝導率(見かけの熱伝導率)といい、これは温度にも依存する。(地下水用語集)

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)

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)

ヒートポンプ

「熱を汲み上げる」という意味で、「熱を移動させること」によって熱を取り出して利用するしくみのこと。物質は液体から気体に「気化」する際に周囲から熱を奪い、気体から液体に「凝固」する際には周囲に放熱する。この自然現象を利用して空気熱を効率よく汲み上げ、加熱・冷却することでエネルギーを効率的に利用するシステム。(NEDO ホームページ・用語解説)

ヒートアイランド現象

都市部によく発生する局所的な高温の地域のこと。等温線の形状が、海に浮かぶ島の形に似ている。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、エネルギー使用量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、大気汚染物質濃度の上昇、生態系のバランスがくずれるなどが挙げられる。(NEDO ホームページ・用語解説)

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容量。単位はJ/(kg・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)

モニタリング

地下水の状況（水位、水質、水温、地下水流向・流速）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いて地下水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)

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)

参考文献(50 音順)

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/

金融・経済用語辞典　http://www.finance-dictionay.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

大辞林、三省堂、2006 年 10 月(第三版)、全 2976 頁

地下水用語集、日本地下水学会編、理工図書、2011 年 10 月、全 143 頁

地中熱ヒートポンプシステム、北海道大学地中熱利用システム工学講座著、オーム社、全 167 頁

土木用語大辞典、土木学会編、1999 年 2 月、技報堂出版、全 1678 頁

NEDO ホームページ・用語解説　http://www.nedo.go.jp/

2. 地中熱利用方式の種類の区分について

ガイドラインの策定に向け、平成 18 年度～22 年度に実施したクールシティ推進事業では、地中熱の利用方式を「地中熱利用型（クローズドループ）」と「地中熱利用型（オープンループ）」に分け、さらにクローズドループは地下水流動により 2 種、オープンループは地下水の利用方式により 3 種に区分していました(表 R2-1、図 R2-1 参照)。

本ガイドラインでは、地中熱利用ヒートポンプ施設の運用面で共通するものを再分類してまとめ、オープンループは放流型・還元型の 2 種、クローズドループは区分なしの 1 種としています。

表 R2-1　対策技術の体系区分

分類	技術種別	技術の概要	本ガイドラインでの区分
クローズドループ◎ （地下水以外の熱媒体を利用）	地下水流動型 （地下水の流動がある）	・地下水は使用せず、熱媒体の循環により地中熱のみ利用する。 ・地下水流動により熱交換効率の向上（熱拡散）が考えられる。	クローズドループ方式
	地下水停滞型 （地下水の流動がない、又は流動が緩やか）	・地下水は使用せず、熱媒体の循環により地中熱のみ利用する。 ・季節間の蓄熱的な効果が期待できる。	
オープンループ◎ （地下水を熱媒体として揚水）	地下水採熱型	・揚水した地下水から採熱、空調等に用いた後、河川・水路等へ放流する。	オープンループ方式 ・放流型
	地下水循環型	・揚水した地下水から採熱し、空調等に用いた後、涵養池や井戸を通して地下へ還元させる。	オープンループ方式 ・還元型
	帯水層蓄熱型	・温熱井、冷熱井の 2 つの熱交換用の井戸を設置する。 ・夏期には冷熱井から地下水等を揚水し、採熱後、温熱井より地下へ還元し温熱として地下へ蓄熱する。この温熱を冬季には温熱井から揚水し、暖房用の熱として利用し、冷熱井より地下へ還元する。	

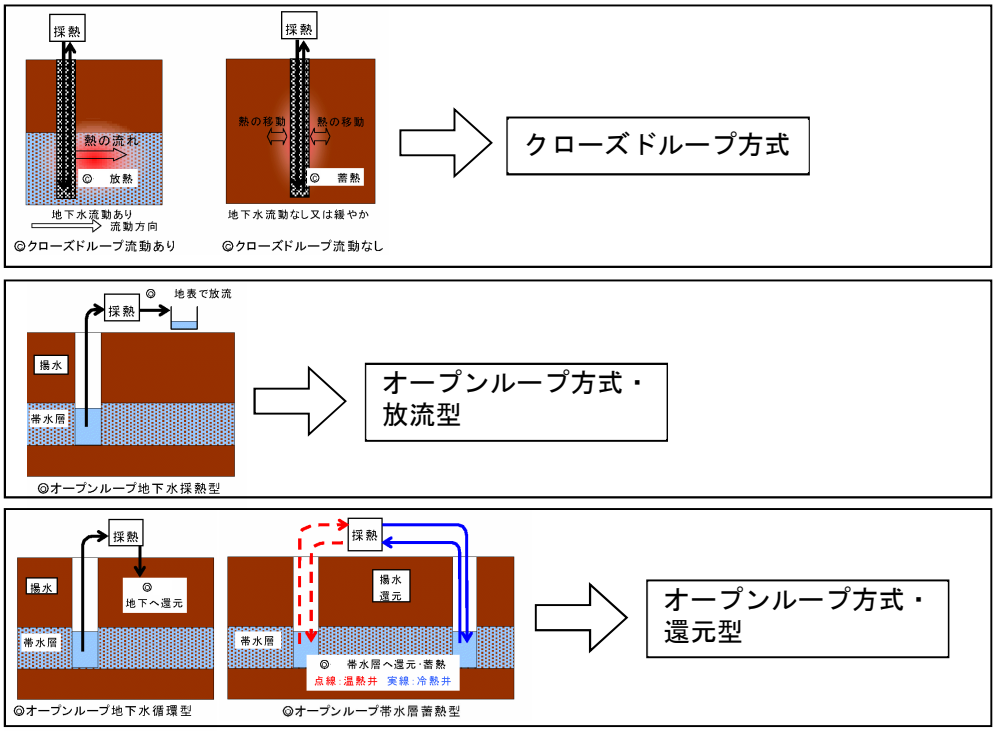


図 R2-1　対策技術の区分の模式図

3. 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 18～22 年度）事例一覧

技術種別		実証事業名	地域	事業者	用途				ヒートポンプ設置時期
					冷房	暖房	給湯	他	
クローズドループ型	地下水流動あり	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	福岡県福岡市	九州大学大学院工学研究院	●	●			H17.2
		地中放熱による土壌内生態系への影響調査	青森県弘前市	三菱マテリアルテクノ株式会社				● 融雪システムを冷却運転もできるように改良	H19
		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	岩手県盛岡市	ジオシステム株式会社	●	●			H13.2
		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	宮城県仙台市	東北大学未来科学技術共同研究センター	●	●			H19.11
		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	北海道赤平市	株式会社日伸テクノ	●	●			H20.12
	地下水流動なし又は流動が緩やか	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	大阪府吹田市	財団法人大阪府みどり公社	●	●			H17.4
		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	神奈川県横浜市	ミサワ環境技術株式会社	●	●		● プール加温	H21
		地中熱利用ヒートポンプシステム過負荷運転実証試験	栃木県芳賀町	ジオシステム株式会社	●	●			H21.7
オープンループ型	地下水採熱型	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	岐阜県岐阜市	岐阜大学	●				—
	地下水循環型	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	長野県立科町	ジオシステム株式会社		●	●	● 源泉及び浴槽昇温	H20.12
	帯水層蓄熱型	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	山形県山形市	日本地下水開発株式会社	●	●	●	● 集熱	H21.6

※1：地下放熱用
※2：281×4基
※3：出力×COPより推定

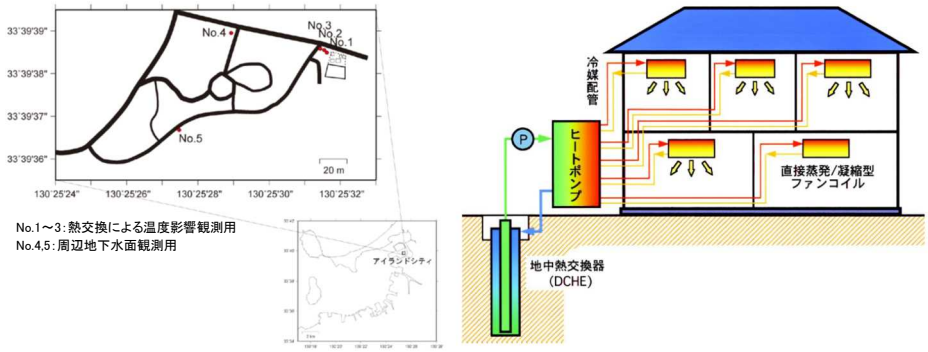
冷暖房面積	ヒートポンプ能力		採水量または地中熱交換器			地質	成績係数(COP)		
	冷房	暖房	深さ	本数	間隔		冷房時	暖房時	その他
m^2	kW	kW	m	本	m		—	—	—
140	12	12	60	1	—	埋土9m/沖積層9m/風化花崗岩8m/未固結花崗岩34m	4.5	3.4	
370 (道路)	※1 8.0	—	60	1	—	33～63m:砂礫混じりシルト～粘土層 63m 以深:粘土～砂礫層	3.49		
222	50.4	62	50	22	5	礫主体	1.64 ～ 2.93	2.77 ～ 3.46	
145	4	4	50	3	5	GL-25m 程度まで礫混ざり粘土、以深は凝灰質細～中粒砂岩	3.75	3.17	
5400 (温室)	648	640	85	78	3.5	15～20m:砂礫層 20m 以深:泥岩層			
約100	19.1-31.1	21.7-36.2	60	8	2	洪積粘土・砂質土の互層	3.0	2.8	
1,200	116	131	100	23	5	泥岩層・泥がら互層一部に砂層、礫、砂、泥互層	5.04	4.02	
90	2,4,12	2,4,12	20	9	5	表土層3m/関東ローム層12m/砂質粘土層/砂礫層23m	システム 1.3～1.6	システム 0.9～3.0	
14,000	※2 1,124	—	550m^3/日			礫質土主体 およそT.P.-15～-45m(G.L.-30～60m)の範囲の礫質土が揚水の対象となる帯水層	0.85	—	—
—	—	給湯 165.6×2 加熱 83.2×2	500～700m^3/日程度			鮮新世～前期更新世	—	2.8	—
840	※3 90～100	※3 90～100	夏期 約100m^3/日 冬期 約260m^3/日			凝灰岩を基盤岩とし、竜山泥流堆積物、沖積層が分布	2.34	2.64	—

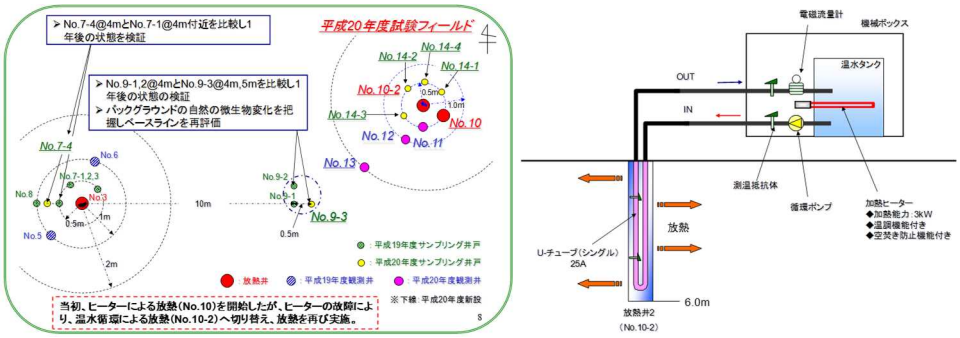
技術種別		実証事業名	有効 熱負荷 熱伝導率 W/m・K	流速 (or 透水係数) m/s	計測深度ピッチ
クローズドループ型	地下水流動あり	地中熱利用冷暖房システム稼働に伴う地盤環境・地下環境への影響評価	1.55～2.25 熱応答試験による実測値	1.49×10^{-5}	1m毎
		地中放熱による土壌内生態系への影響調査	1.2～1.78 掘削コアと水飽和の状態にしたカッティングスを迅速型プローブ式熱伝導率型により測定	GL-26.5m の流速 約 1.68×10^{-4} GL-61.0m の流速 約 1.33×10^{-5}	地層毎で3 深度、観測井の内1 本は10m毎(浅部は1.5～2.0m毎チ)
		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	2.4 シミュレーションモデルのマッチングにより設定	GL0～-24m:約2.54×10^{-5} GL-24～-50m:約2.54×10^{-6}	5m毎(浅部は1.5m毎)
		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	1.46 5.18 (地下水影響)熱応答試験による実測値	GL-35m 以深の流速は測定限界以下 透水係数は10^{-5}のオーダー	熱交換井は3深度、観測井は10m毎(浅部はGL-1m を追加)
		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	2.4 TRTによる値	GL約-5.0m 約2.5×10^{-5} GL約-10.0m 約1×10^{-8}	
	地下水流動なし又は流動が緩やか	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	1.65 シミュレーションモデルのマッチングにより設定	地下水なし	10m毎(浅部10m は2～5m毎)
		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	1.72 熱応答試験による実測値	地下水なし	10m毎(浅部10m は2～5m毎)
		地中熱利用ヒートポンプシステム過負荷運転実証試験	0.7～1.0 TCPによって調査	地下水なし	基本的に1m毎(TCP観測井は2m毎)
オープンループ型	地下水採熱型	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	—	—	—
	地下水循環型	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	—	—	50,60,70,80,90,100,105,110m
	帯水層蓄熱型	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	加熱試験:2.1 回復試験:1.9 熱応答試験による実測値	2.75×10^{-5}	10,20,40,60,80,90m

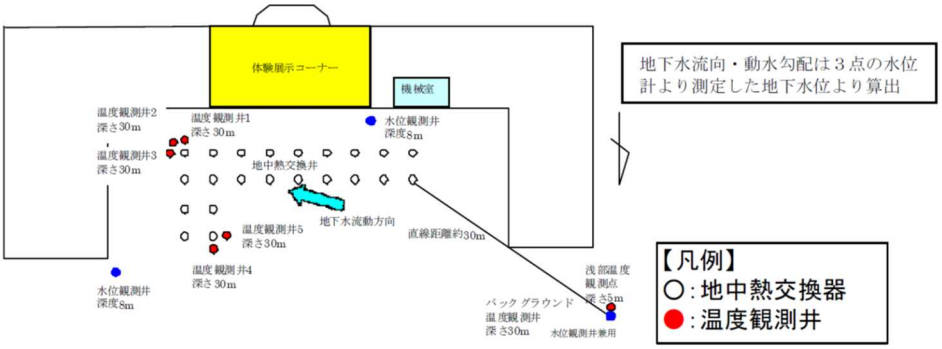
※4：出典 平成 18 年度地下水活用型ヒートアイランド対策推進基礎調査報告書, 平成 19 年 3 月, 国立法人九州大学, p. 42
※5：HP 導入前の空調機と比べて、2 年間で 0.677t 削減（一般家庭 5 世帯分), 出典 環境省平成 19 年度クールシティ推進事業「地中放熱による土壌内生態系への影響調査」報告書, 平成 20 年 3 月 28 日, 三菱マテリアル資源開発株式会社, p. 34
※6：出典 平成 19 年度クールシティ推進事業「地中放熱による土壌内生態系への影響調査」報告書, 平成 20 年 3 月 28 日, 三菱マテリアル資源開発株式会社, p. 31 より、15,365kWh 削減(1GJ=278kWh)で換算
※7：出典 平成 19 年度地下水活用等利活用型実証事業 岩手県環境保険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報告書, 平成 20 年 3 月, ジオシステム株式会社, p. 32-42
※8：出典 平成 20 年度クールシティ推進事業 地中熱利用型実証事業 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最終報告書, 平成 21 年 3 月, 国立大学法人 東北大学未来科学技術共同研究センター, 大気への人工排熱削減量は p. 7 より(1GJ=278kWh で換算), CO2 削減量は p. 9 より
※9：出典 平成 22 年度クールシティ推進事業 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 業務報告書, (株)日伸テクノ, p. 55-
※10：出典 平成 18 年度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報告書, 平成 19 年 3 月, 財団法人大阪府みどり公社, p. 30-33
※11：出典 平成 21 年度クールシティ推進事業[地下水等活用型・地中熱利用型]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報告書, 平成 22 年 3 月, ミサワ環境技術株式会社, p. 21-31 一次エネルギー削減量は原油削減量を 38.2GJ/kL で換算した。※12：出典 平成 19 年度大型施設での地下水揚水型冷房機器の長期稼働に伴う地下水・地盤環境への影響評価事業, 平成 20 年 3 月, 国立大学法人 岐阜大学, p. 23-42
※13：出典 立科温泉地下水利用ヒートポンプシステム実証事業, 平成 22 年 3 月, ジオシステム株式会社, p. 23-26 より。CO2 削減量は 2009/8/27～2010/2/28 の期間
※14：(暖房 COP：4.5、冷房 COP：6.5 の場合) 空気熱源 HP と比較して 20%ほど削減される (696GJ→570GJ), 平成 21 年度 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 報告書, 平成 22 年 3 月, 日本地下水開発株式会社, p. 95
※15：(暖房 COP：4.5、冷房 COP：6.5 の場合) 空気熱源 HP と比較して 20%ほど削減される(33.5t-CO2→27.4t-CO2, 6.1t-CO2 削減), 平成 21 年度 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 報告書, 平成 22 年 3 月, 日本地下水開発株式会社, p. 90
※16：平成 21 年度 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 報告書, 平成 22 年 3 月, 日本地下水開発株式会社, p. 87

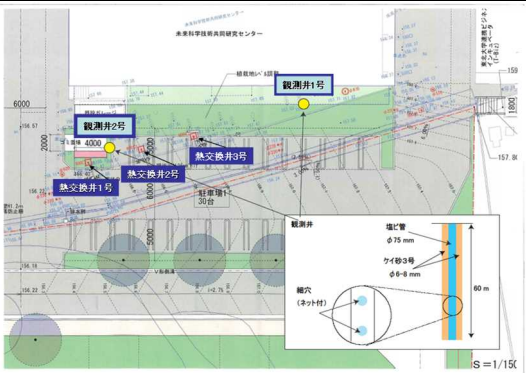
冷暖房熱負荷（累積実績）		熱交換器への有効熱負荷		一次エネルギー削減量		CO_2 削減量		大気への人工排熱削減量等
冷房	暖房	冷房	暖房					
kWh	kWh	kWh	kWh	従来方式比の削減率 %	GJ	%	t-CO_2/年	GJ
—	—	—	—	※4 26	—	—	—	冷房期間中に約7GJ 放熱（冬季吸熱は約5.3GJ）
—	—	—	—	※5 空気熱源HP 21	※5 2.86	※5 空気熱源HP 21	※5 0.3	約55GJ 放熱（放熱期間63.1 日）微生物への影響調査のための放熱実験もあり ※6
—	—	—	—	灯油焚吸収式冷温水発生機 29.7※7	※7 62.7	灯油焚吸収式冷温水発生機 52.7※7	※7 7.6	2001～2008 の期間で284[GJ]を排熱するため、これを全て削減できる
5,890.4	7,951.9	5,257.4	11,609.5	—	—	空気熱源HP 約50	※8 6.1	※8 約21GJ 放熱（2008/5 月-10 月） 約29GJ 採熱（2007/11 月-08/5 月）
				—	—	※9 灯油ﾎﾞｲﾗｰ 28	※9 270	※9 約41GJ （熱交換器1mあたり135kWh削減、実証事業の熱交換器の長さは85m、1GJ/278kWhで計算）
9,275	8,350	13,061	5,461	既存空調機 8.2 ※10	※10 4.4	※10 約8.2	※10 0.3	夏季放熱最大0.449GJ/日 ※10 冬季採熱最大0.359GJ/日
40,129	160,554	—	—	ｶﾞｽﾎﾞｲﾗｰ＆空気熱源HP 27※11	※11 310	※11 ｶﾞｽﾎﾞｲﾗｰ＆空気熱源HP 31.5	※11 17.05	※11 約200GJ 削減（2009/5 月～10 月）
1，190～1，978	480～944	—	—	－	－	－	－	－
—	—	—	—	ｸｰﾘﾝｸﾞﾀﾜｰ（屋上）50 ﾋｰﾄﾎﾟﾝﾌﾟ 20 ※12	※12 26.0	ｸｰﾘﾝｸﾞﾀﾜｰ（屋上）約20 ﾋｰﾄﾎﾟﾝﾌﾟ 20増加※12	※12 26	平均気温が高めの日で1時間あたり6GJ/hr、低めの日で5GJ/hr 程度であり、気温によって1GJ ほど異なる1 日あたりの地下排水路への人工排熱量は、50～60GJ/day ※12
—	—	—	—	※13 灯油ﾎﾞｲﾗｰ 27.4	※13 1,263.4	※13 灯油ﾎﾞｲﾗｰ 45.6	※13 141.8	2009/8/27～2010/2/28 の期間で887[GJ]を排熱するため、これを全て削減できる ※13
12,867	36,169	—	—	※14 20	※14 126	※15 20	※15 6.1	※16 夏季:71GJ/シーズン（52 日） 冬季:140GJ/シーズン（91 日）

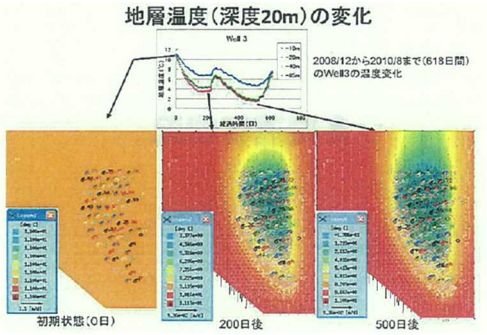
●クローズドループ

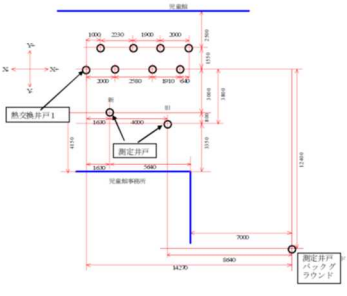
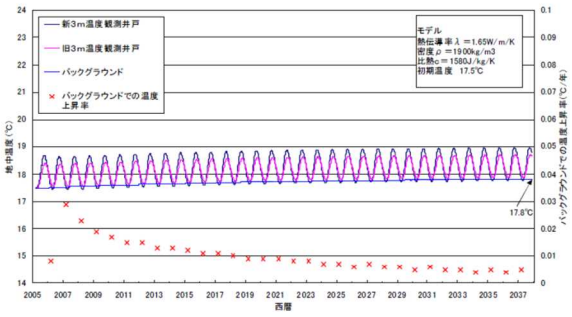
実証事業名	地中熱利用冷暖房システム稼働に伴う地盤環境・地下環境への影響評価
事業の主な目的	地中温度変化の範囲および経年累積影響を調査しました。
施設の概要等	【名称】九州大学地中熱利用住宅用冷暖房システム（実験用レンガ造住宅） 【冷暖房面積】140m^2 【ヒートポンプ規模】冷暖房 12kW（4 室対応 8kW+1 室対応 4kW）
	 建物施設と観測井の配置図および施設概要図
事業の主な成果	実測値：温度観測井が地下水の流れの上流側に位置しているため、ほとんど温度の変化は見られませんでした。 シミュレーション：下流側の温度変化を予測すると、**3m の地点で冷暖房時ともに 2℃の変化が起きましたが 10m 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。

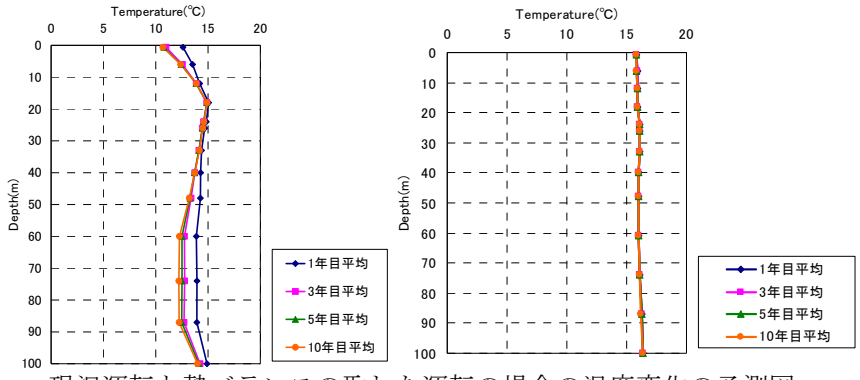
実証事業名	地中放熱による土壌内生態系への影響調査
事業の主な目的	地中への過負荷な放熱による生物生息環境の変化を調査しました。
施設の概要等	【融雪面積】370m^2 【ヒートポンプ規模】8kW
	 放熱井と観測井の配置図および施設概要図
事業の主な成果	30～35℃（現場試験）において**土壌微生物相が元に戻り、環境影響が認められませんでした。**通常の地中熱ヒートポンプによる冷房運転では，35～40℃程度に加熱された熱媒体が地中熱交換井を循環して，土壌温度が 30℃程度まで上昇しますが，このような条件では微生物への影響は認められないといえます。それ故，**地中熱ヒートポンプシステムの優位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。

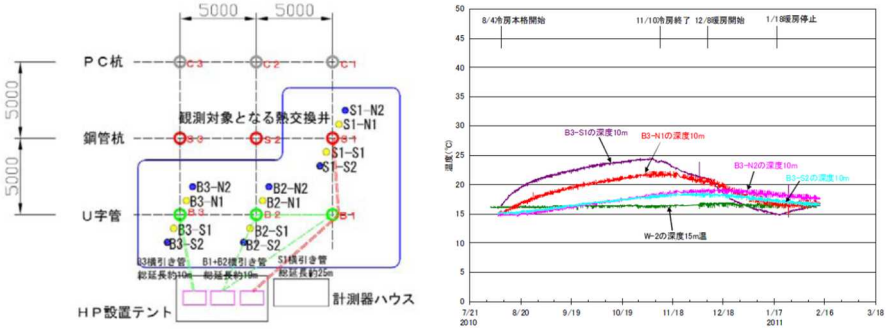
実証事業名	岩手県環境保健研究センター地中熱利用ヒートポンプ冷暖房システム実証事業
事業の主な目的	地下水の流動が大きい地域において、大規模な地中熱利用ヒートポンプによる周辺への熱的影響を調査しました。
施設の概要等	【名称】岩手県環境保健研究センター 【冷暖房面積】222m^2 【ヒートポンプ規模】冷房 50.4kW、暖房 62.0kW
	 建物施設と地中熱交換井の配置図
事業の主な成果	暖房使用時に、地中熱交換井から 1m 下流側で最大 2℃の地中温度低下がみられました。 また、10 年間のシミュレーション結果では、**影響範囲は数 km におよぶものの温度変化幅は 0.5℃以内であり、周辺の地下水・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】145m^2 【ヒートポンプ規模】冷暖房 4kW
	 建物施設と地中熱交換井・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 **3.6m 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 6m 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。

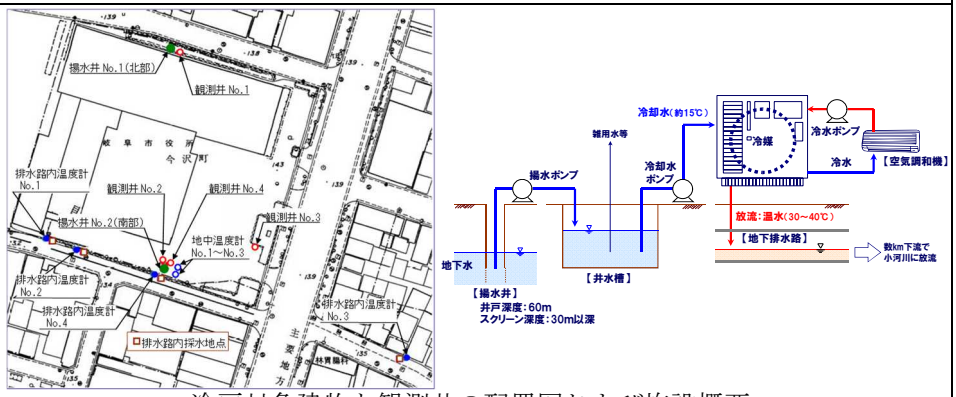
実証事業名	大規模の垂直型地中熱交換器群をもつ地中熱ヒートポンプ冷暖房システムにおける地盤温度環境変化の評価業務
事業の主な目的	群孔方式の地中熱交換器を用いた大規模な地中熱利用ヒートポンプ施設(出力 648･640kW)において、運転状況や周辺への熱的負荷の評価を行いました。
施設の概要等	【名称】赤平オーキッド株式会社　地中熱ヒートポンプ利用栽培温室 【冷暖房面積】5400m^2 【ヒートポンプ規模】冷房 648kW、暖房 640kW
	   温室写真と地層温度の変化のシミュレーション結果図
事業の主な成果	10 月 1 日から 12 月末までの観測において、地盤温度は 9℃程度から 4℃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 度以下への低下、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。

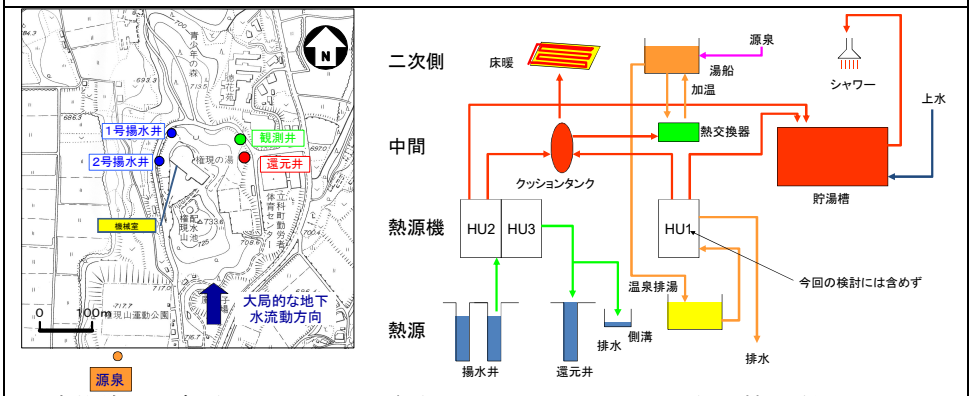
実証事業名	大阪府立国際児童文学館地中熱ヒートポンプシステム実証事業
事業の主な目的	地下水の流動がほとんどない地域において、冷房に偏った運転を行う地中熱利用ヒートポンプ施設による地盤温度への影響や運転効率について調査しました。
施設の概要等	【名称】大阪府立国際児童文学館 【冷暖房面積】約 100m^2 【ヒートポンプ規模】冷暖房 31.1kW、暖房 36.2kW
	 観測機器等の配置図  30 年間の温度変化の予測図
事業の主な成果	地中熱交換井から 1m の地点において、深度 20m 以深の地下部はほぼ一定の温度でした。 またシミュレーションによると、30 年後の地中熱交換井からの距離が 3m 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。

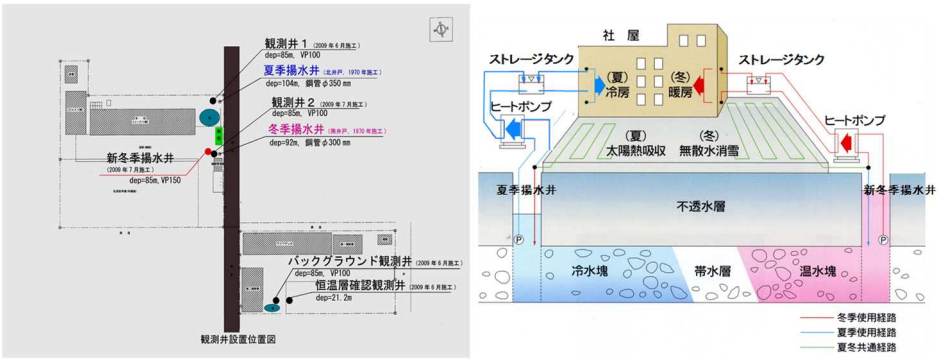
実証事業名	地下水欠如地域における地中熱ヒートポンプシステム実証事業
事業の主な目的	地下水の流動がほとんどない地域において、大規模な地中熱利用ヒートポンプによる周辺への熱的影響を調査しました。
施設の概要等	【名称】学校法人森村学園　屋内プール・幼稚園遊戯室 【冷暖房面積】1200m^2 【ヒートポンプ規模】冷房 116kW、暖房 131kW
	 現況運転と熱バランスの取れた運転の場合の温度変化の予測図
事業の主な成果	本施設では暖房・給湯およびプール加温用として、採熱に大きく偏った運転がされていますが、シミュレーション結果では 10 年後の地中温度の変化はわずかであり、**周辺の地中温度や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】90m^2 【ヒートポンプ規模】冷暖房 10kW
	 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、CO_2 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】14,000m^2 【ヒートポンプ規模】冷房 281kW×4 基,【地下水揚水量】約 800m^3/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 165.6kW×2 基，加熱 83.2kW×2 基 【地下水揚水量】500～700m^3/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 22m 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 30m 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 100m 離れた地点で **10 年後に 3℃程度の変化**という結果でした。

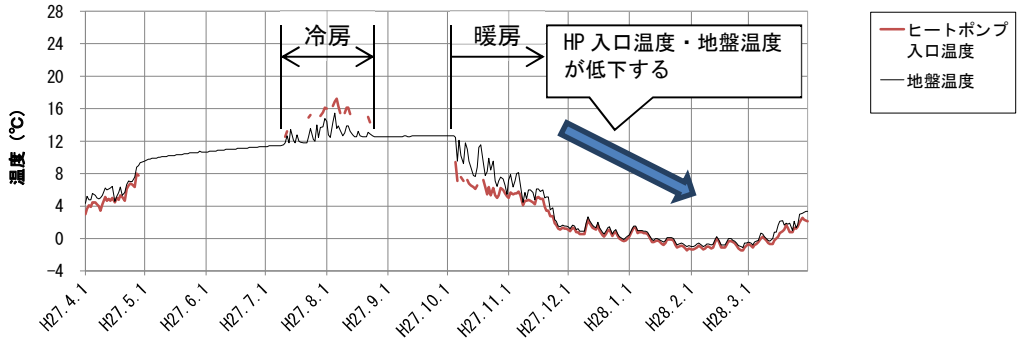
実証事業名	帯水層蓄熱による地下水利用ヒートポンプ冷暖房システム実証事業
事業の主な目的	大規模な地下水揚水を行なうオープンループ方式の地中熱利用ヒートポンプによる地下水・地盤への温度並びに地下水質の影響を調査しました。
施設の概要等	【冷暖房面積】840m^2 【ヒートポンプ規模】冷房 90～100kW、暖房 90～100kW 【地下水揚水量】夏期 約 100m^3/日、冬期 約 260m^3/日
	 冷暖房建物と地中熱交換井の配置図および施設概要図
事業の主な成果	【地下水温への影響】 ・実測値：地下水温度は年間を通じてほぼ一定でした。このため、周辺井戸利用者への影響は無いと考えられます。 ・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 65m** 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。

4. 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。

4.1 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 20kW 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 R4-1～図 R4-3）。なお、本施設の概要や稼働状況は 6.2 にも示します。



※地盤温度は、地中熱交換井地盤温度(5 深度測定)の平均値。

図 R4-1 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

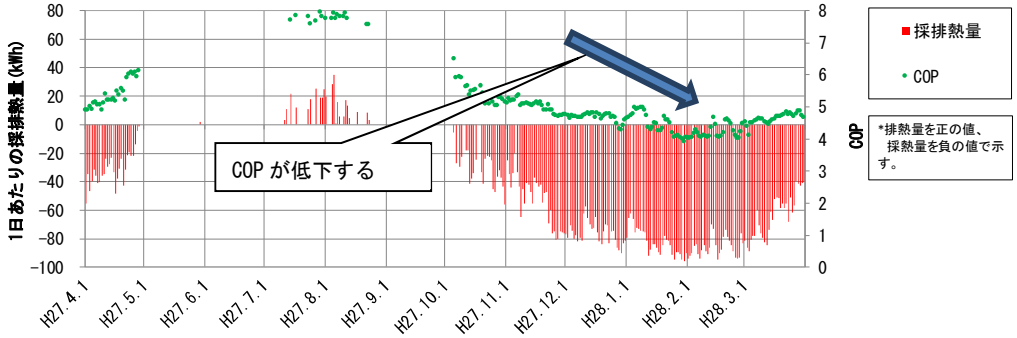


図 R4-2 暖房利用が中心の小規模施設での採排熱量と COP 変化事例

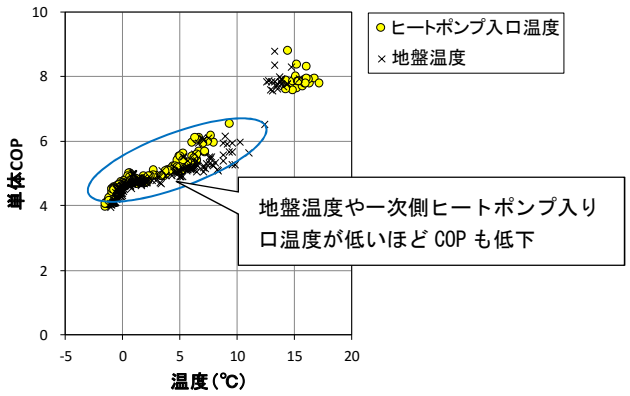
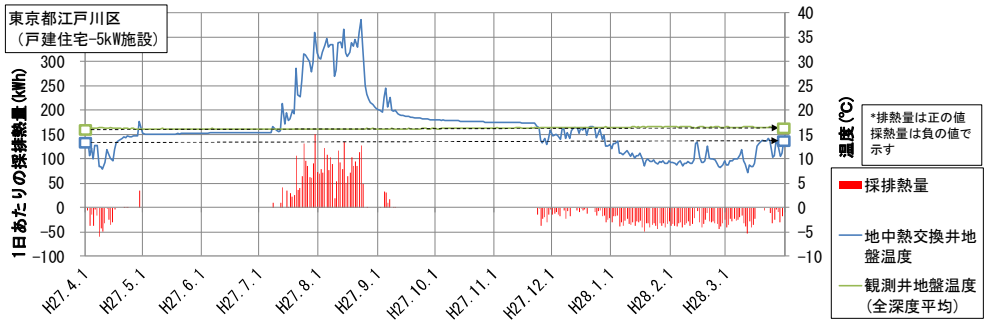


図 R4-3 暖房利用が中心の小規模施設での COP と地盤温度および HP 入口温度との関係

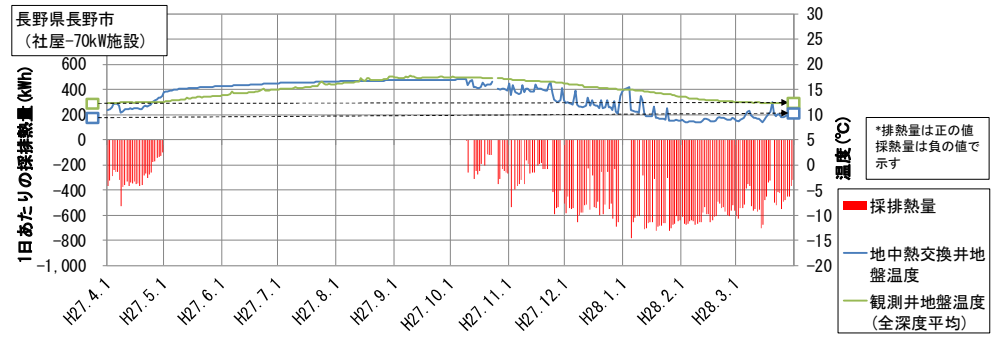
4.2　設備稼働による地盤温度への影響

別の例では、地中熱交換井から約 3mの離隔に設けられた観測井（30m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 R4-4）。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 3.5m）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 R4-5）。



※観測井地盤温度は、5 深度（地下 10m～30m、5m 間隔）で測定された温度の平均値。

図 R4-4　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 R4-5　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

4.3　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と、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 R4-6）。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 R4-7）。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 4m以上距離を置くことが必要”との文献※17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。

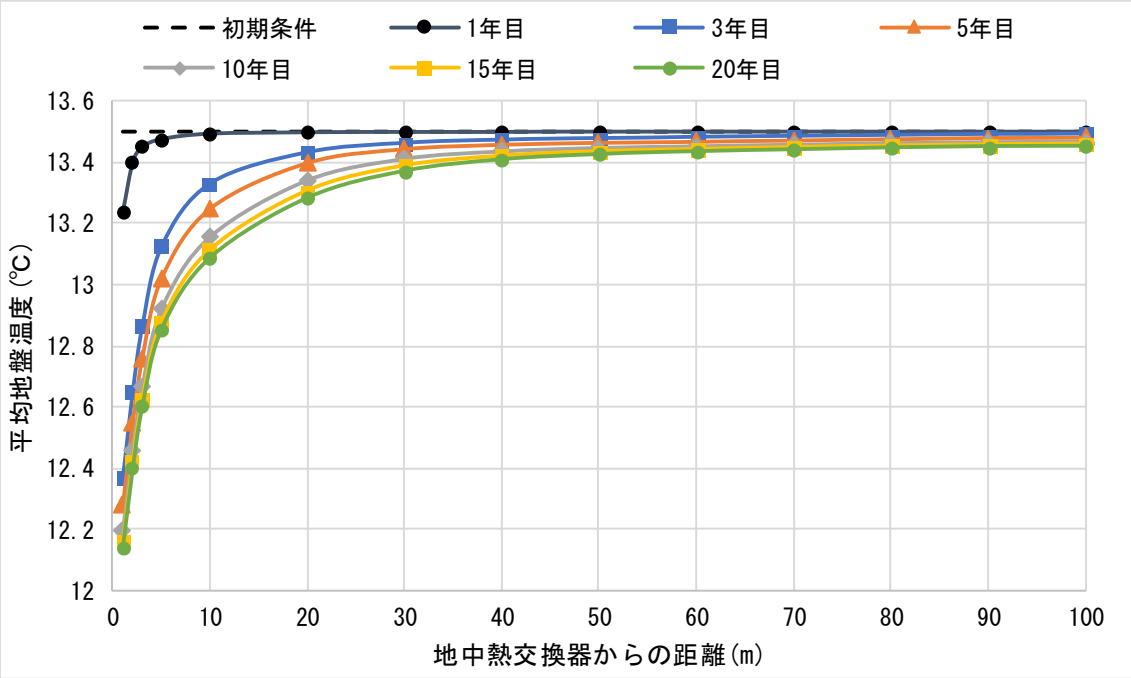


図 R4-6　シミュレーション結果に基づく地中熱交換器からの距離と平均地盤温度の関係（各年稼動最終日の温度）

※17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，オーム社，2007.

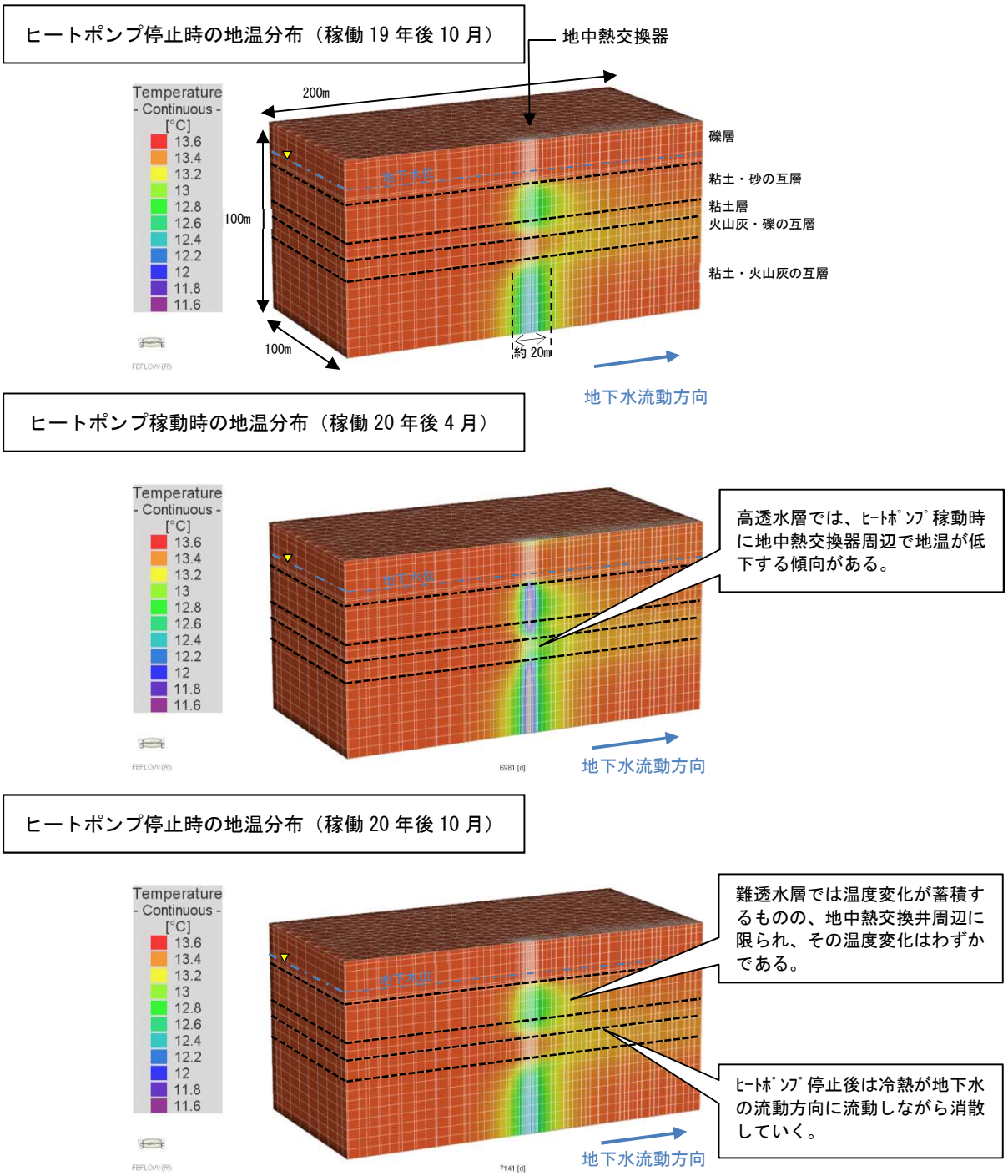


図 R4-7　シミュレーションモデルによる試算例

5. 地中熱利用による地下微生物への影響評価事例（環境配慮型地中熱利用システムの構築実証事業）

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 R5-1 には実験フィールド平面図を、図 R5-2 には、実証試験の調査フロー図を示しています。

図 R5-1 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 2m の深さに敷設した加熱エリアと、何も手を加えていないバックグラウンドエリアに分けられます。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。

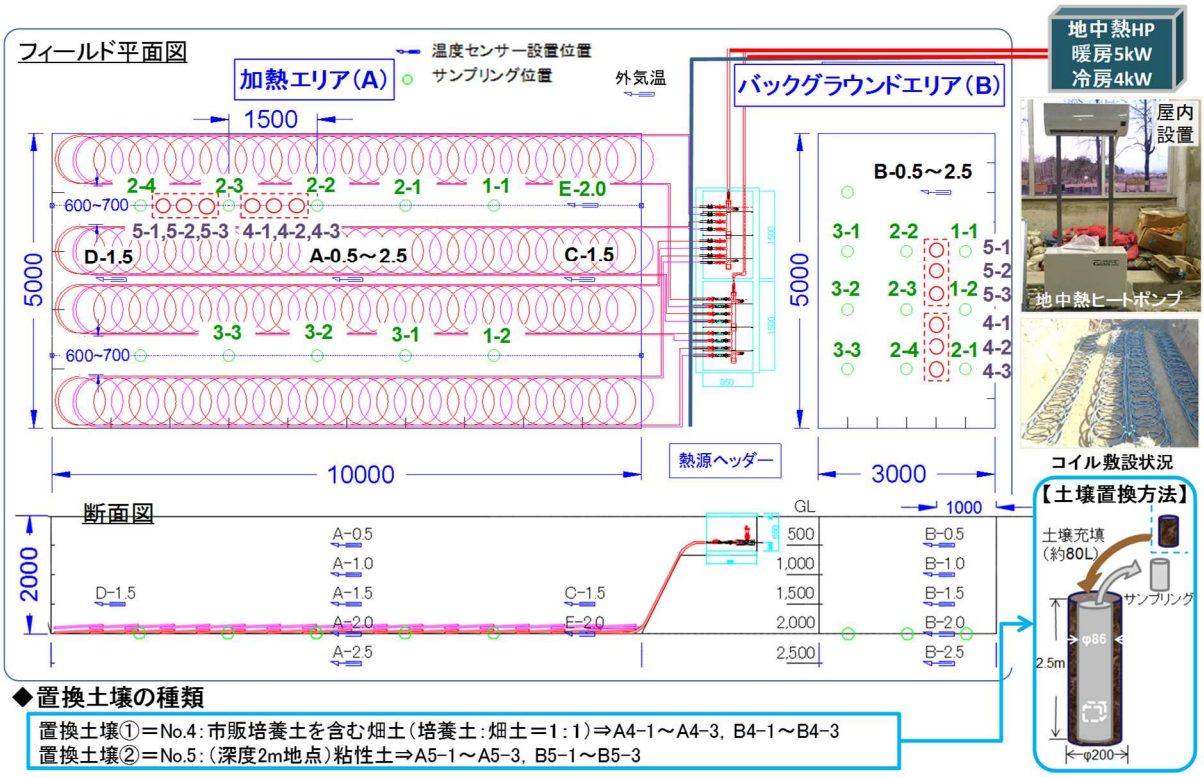


図 R5-1　実証事業フィールドの平面図

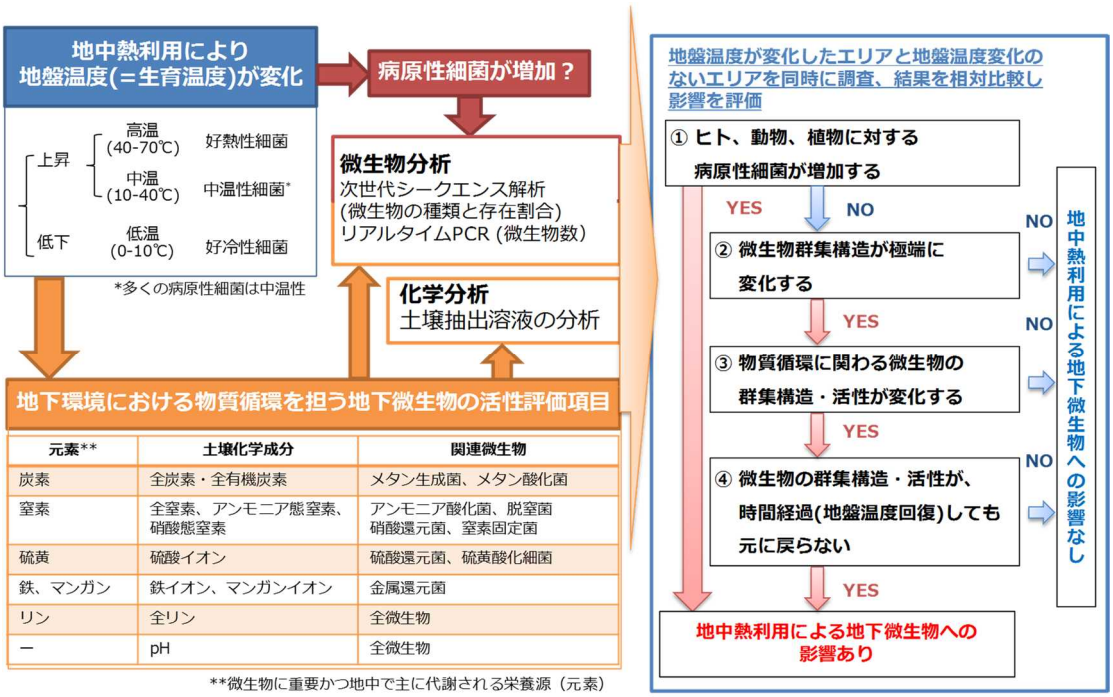


図 R5-2　実証試験の調査フロー

実際の試験では、図 R5-3 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 法や次世代シークエンス解析※18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。特に、試料中の病原性細菌種を含む細菌属（病原性を持つ可能性がある細菌）の存在割合の変化、微生物群集構造の変化、物質循環に関わる微生物数および試料からの溶出成分濃度の変化に着目し、調査を行いました。

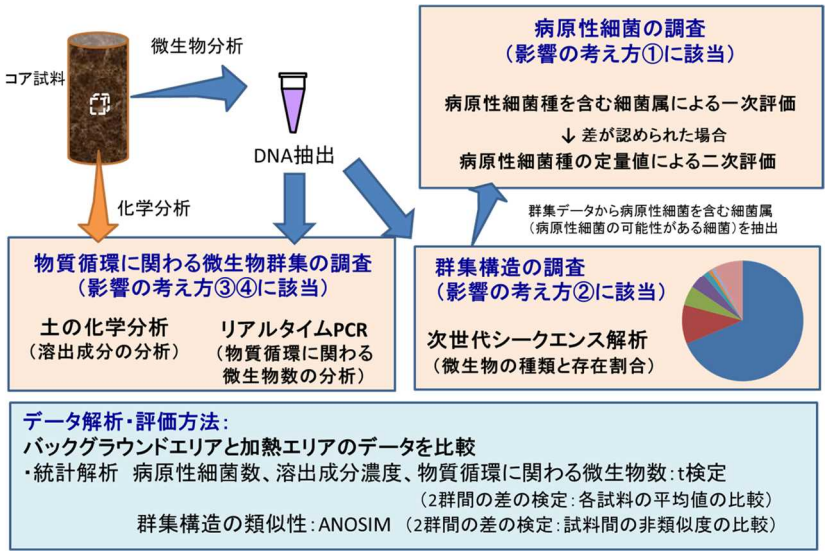


図 R5-3　実証事業の調査概要

※18 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。次世代シークエンス解析：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。

図　R5-4 に試料中の病原性細菌種を含む細菌属（病原性を持つ可能性がある細菌）の細菌数の経時変化、表 R5-1 に物質循環に関わる微生物数・化学分析の調査結果を示します。この結果から地中熱利用箇所(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。

図　R5-5 に示す 1 本のバーは 1 つのサンプルに対応し、微生物の種類の違いを色の違いで示しています。この試験で、地中熱利用箇所（加熱エリア、左側）の微生物群集構造に経時的な変化が確認されましたが、その変化量は非利用箇所（バックグラウンドエリア、右側）のものとほぼ同等であり、地中熱利用箇所と非利用箇所で微生物群集構造の経時変化に有意な違いがあるとは言えません。

また、置換土壌についても同様の結果が得られており、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、今回の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。

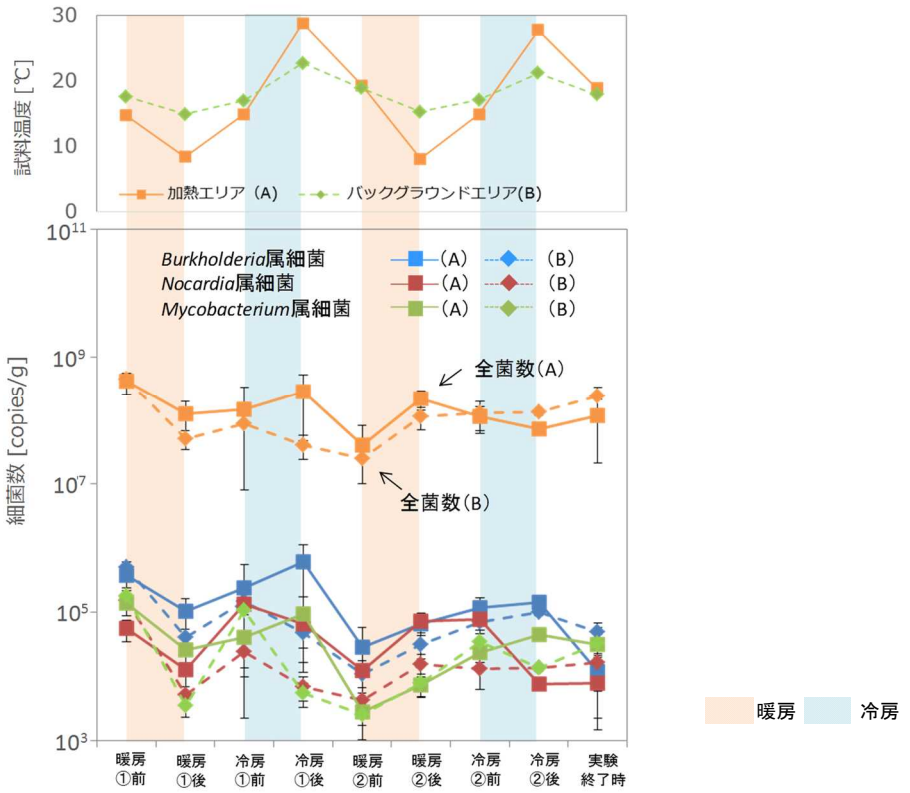


図 R5-4　細菌数の経時変化（実証試験結果の一例）

表 R5-1　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。

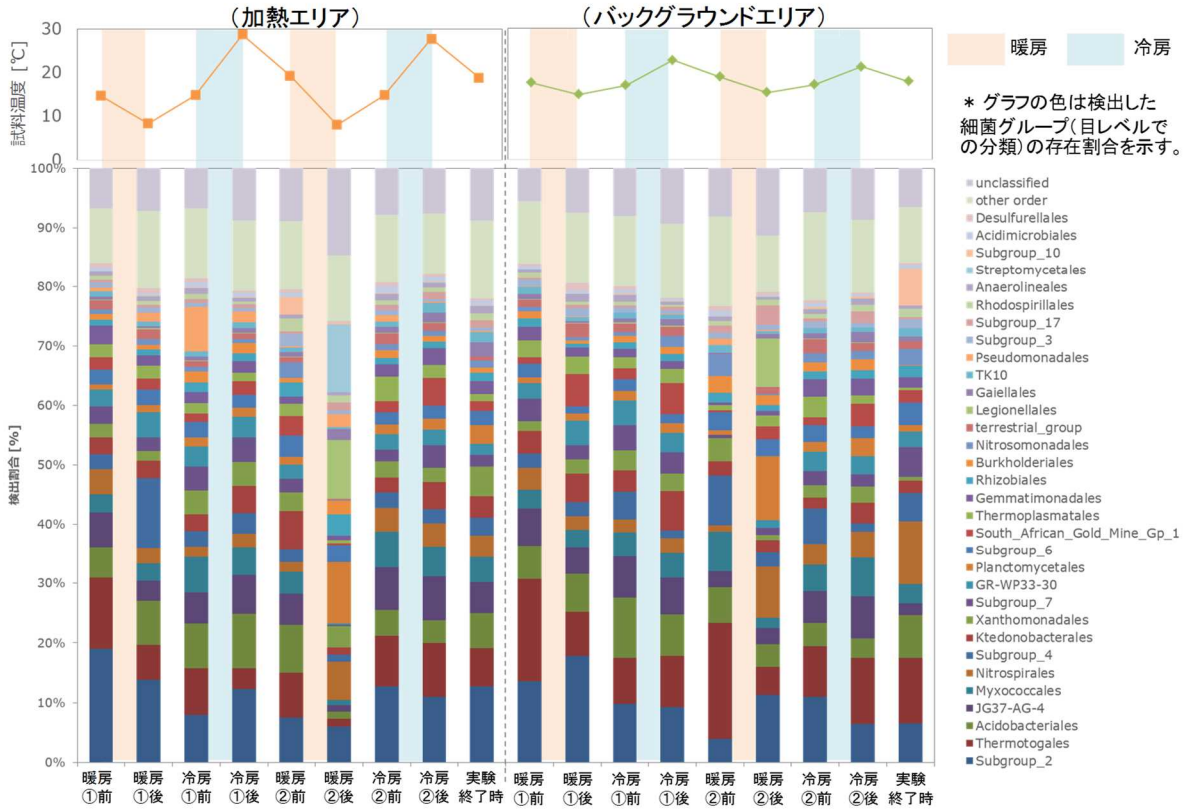


図 R5-5　微生物群集構造の調査結果

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を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こと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クエ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※19。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 世代シークエ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※20。

※19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.

※20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.

6. 稼働事例

地中熱ヒートポンプの設備規模や用途（空調・融雪）、年間の採熱・排熱量の観点から特徴的な事例を紹介します。

6.1 事例 1（小規模施設・空調利用）

(1) 施設概要

採熱･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 R6-1)。

表 R6-1 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	105m	1 本	φ146mm
地質	有効熱伝導率	地中熱交換器	ヒートポンプ仕様	
主に泥岩	2.13 [W/(m・K)]	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
			10.0kW／3.1kW ×1 台	10.0kW／3.4kW ×1 台

(2) モニタリング結果

地盤温度（地中熱交換井内）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 0mを除いて大きく変化する状況は見られません（図 R6-1)。この事例は、採熱・排熱がほぼバランスした稼働をしています（図 R6-2)。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。

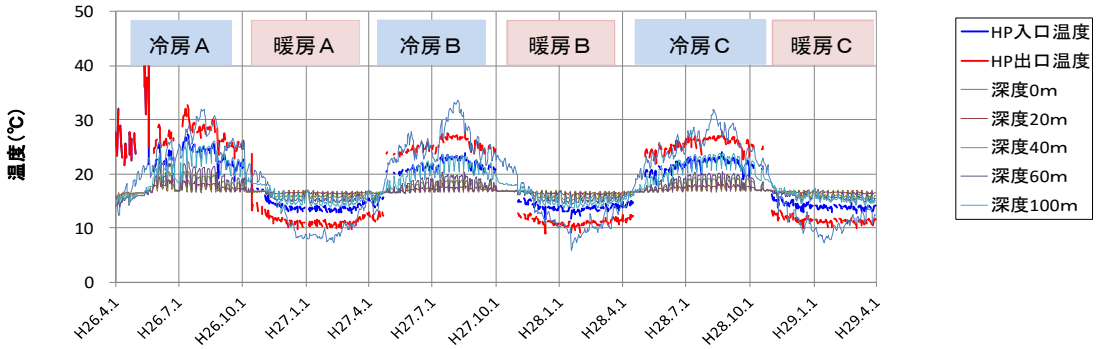


図 R6-1 ヒートポンプ出入口温度と地盤温度（事例 1）

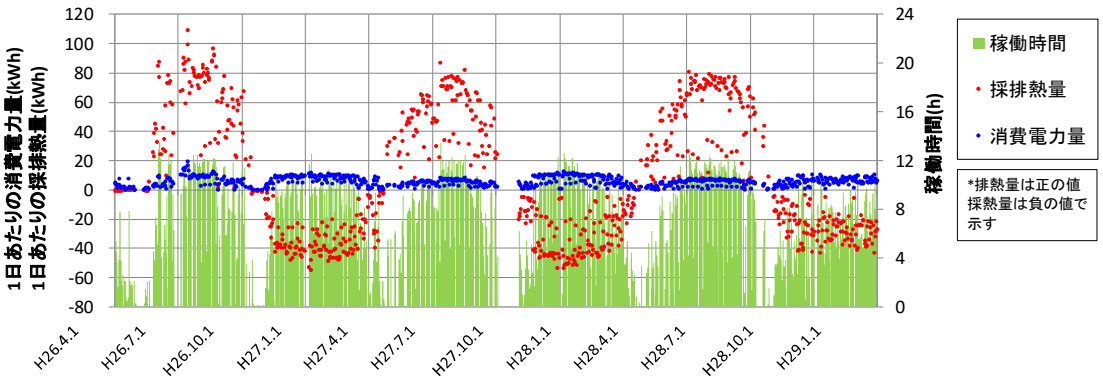


図 R6-2 消費電力量、採排熱量、稼働時間（事例 1）

6.2　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 R6-2）。

表 R6-2　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	戸建住宅での冷暖房	100m	1 本	φ120mm
地質	有効熱伝導率	地中熱交換器	ヒートポンプ仕様	
粘土・火山灰の互層	2.26［W/(m・K)］	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
			10.0kW／3.08kW ×1 台	10.0kW／3.38kW ×1 台

(2)　モニタリング結果

地盤温度（地中熱交換井内）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、同様に、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 R6-3、図 R6-4）。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。

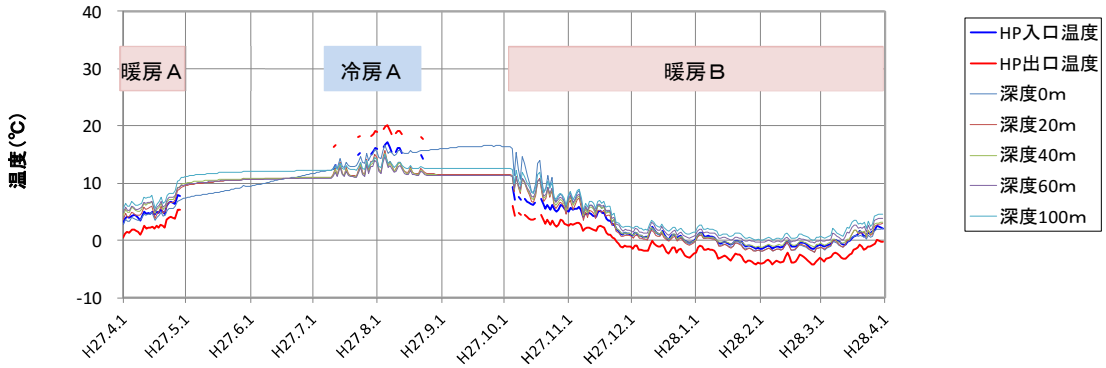


図 R6-3　ヒートポンプ出入口温度と地盤温度（事例 2）

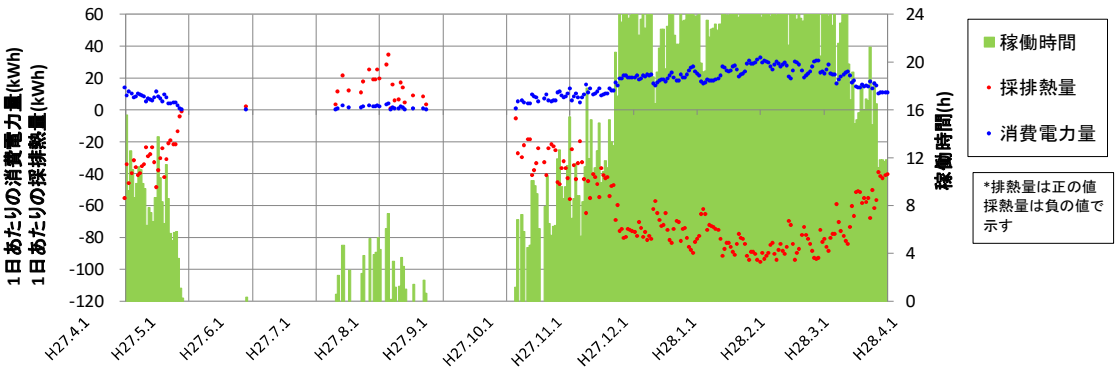


図 R6-4　消費電力量、採排熱量、稼働時間（事例 2）

6.3　事例 3（中規模施設・空調利用）

(1)　施設概要

採熱･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 R6-3)。

表 R6-3　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	市庁舎での冷暖房	100m	14 本	φ130mm
地質	有効熱伝導率	地中熱交換器	ヒートポンプ仕様	
主に泥岩	2.56 [W/(m・K)]	ダブル 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
			102.6kW／28.8kW ×1 台	115.2kW／23.4kW ×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（地中熱交換井内）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 R6-5)。地盤温度によって採排熱量が変動する状況も見られますが、安定的に稼働できたものと考えられます（図 R6-6)。

この事例では、2 シーズンの稼働結果が見られますが、一日の稼働時間が同じでも、空調負荷に応じて、採排熱量が変化することが見られます。

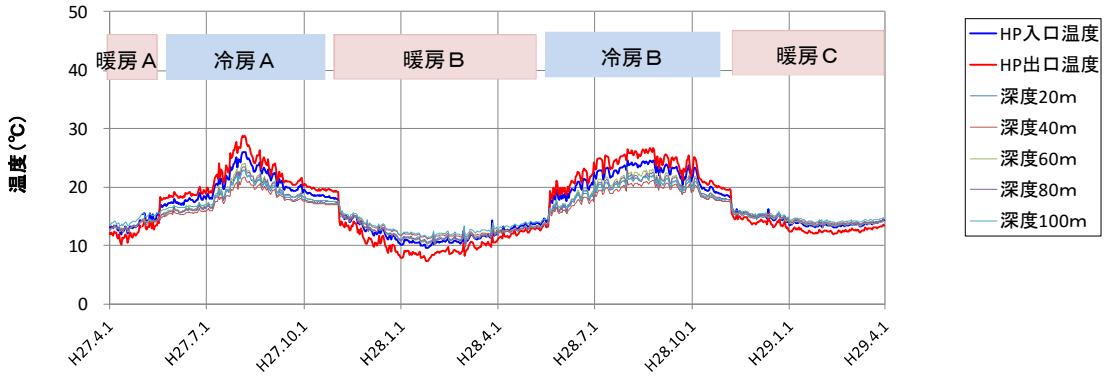


図 R6-5　ヒートポンプ出入口温度と地盤温度（事例 3）

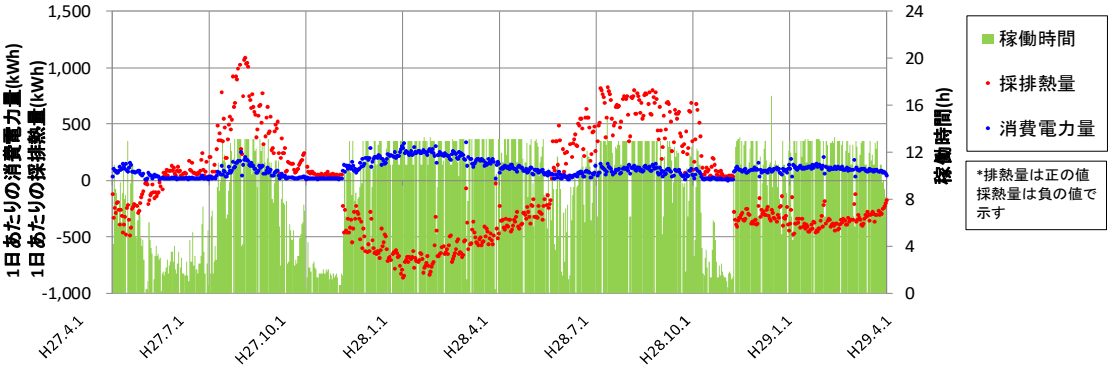


図 R6-6　消費電力量、採排熱量、稼働時間（事例 3）

6.4　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 R6-4）。

表 R6-4　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	100m	8 本	φ179mm
地質	有効熱伝導率	地中熱交換器	ヒートポンプ仕様	
泥岩	1.87［W/(m・K)］	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
			45.3kW／9.5kW ×1 台	43.8kW／13.1kW ×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（地中熱交換井内）は大幅に低下する状況は見られません（図 R6-7、図 R6-8）。暖房Ｃ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。

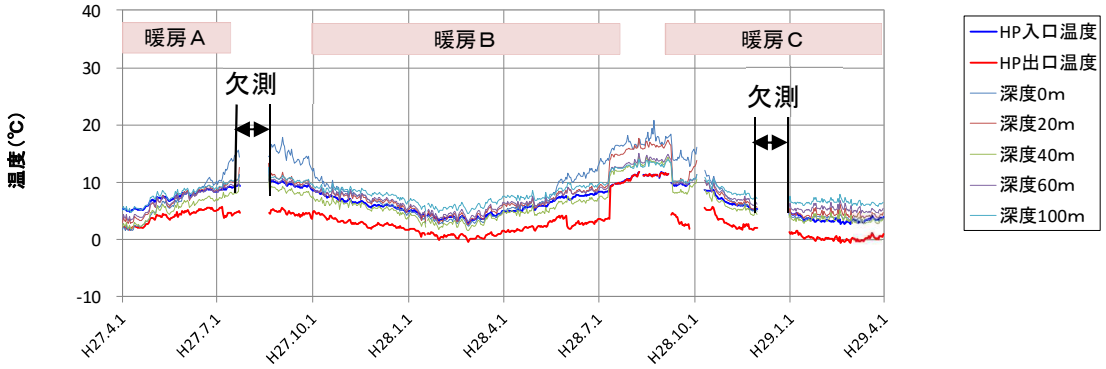


図 R6-7　ヒートポンプ出入口温度と地盤温度（事例 4）

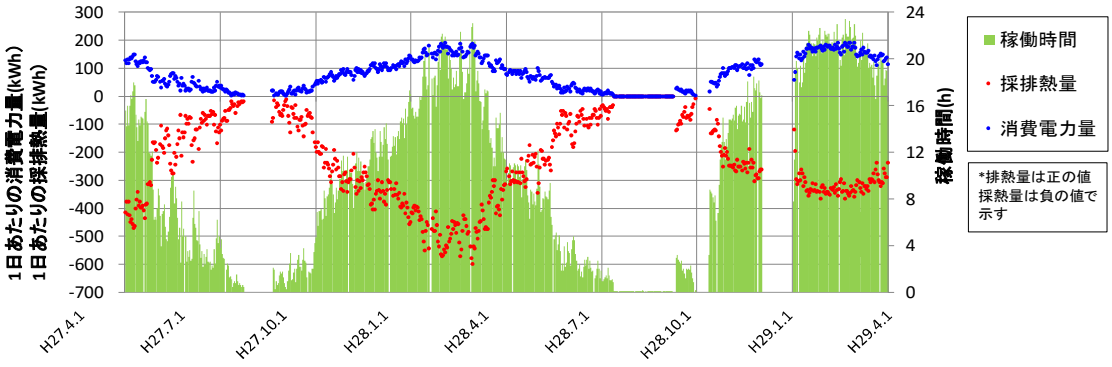


図 R6-8　消費電力量、採排熱量、稼働時間（事例 4）

6.5　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、500m^2 程度の駐車場融雪に利用されている事例です（表 R6-5）。

表 R6-5　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	100m	6 本	φ139mm
地質	有効熱伝導率	地中熱交換器	ヒートポンプ仕様	
主にシルト	1.65［W/(m・K)］	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
			26.5kW／5.9kW ×2 台	28.0kW／6.5kW ×2 台

(2)　モニタリング結果

地盤温度（地中熱交換井内）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 R6-9、図 R6-10）。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も、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。

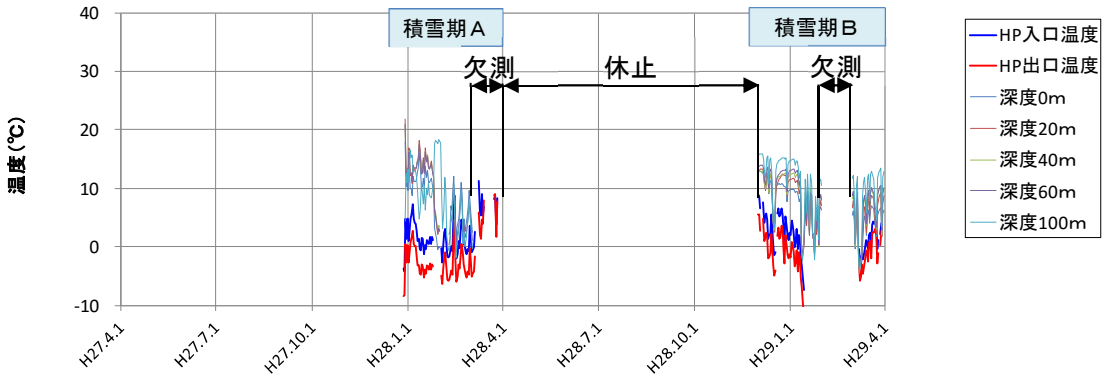


図 R6-9　ヒートポンプ出入口温度と地盤温度（事例 5）

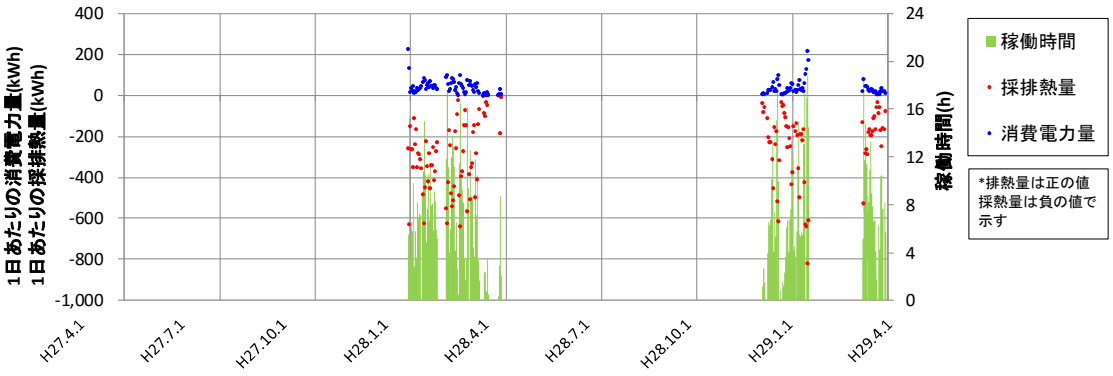


図 R6-10　消費電力量、採排熱量、稼働時間（事例 5）

7. モニタリングデータの確認方法

7.1 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・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。

様 式

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	H○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

（自由記入欄）

(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、放流水量、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。

様　式

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○

モニタリング実施日	H○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)	ＨＰ稼働時	ＨＰ停止時
水温(℃)	揚水井	放流口(還元井)
放流(還元)水質	ｐＨ	電気伝導率(μS/cm)
放流(還元)水量(L/s)		
ＨＰ稼働時間(時間)		

基本項目

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)	ＨＰ稼働時	ＨＰ停止時

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

（自由記入欄）

7.2　採排熱量の概算

地中への排熱量や採熱量については、クローズドループ・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次節を参照ください。

① 入口温度 T_1　：＿＿＿＿℃
② 出口温度 T_2　：＿＿＿＿℃
③ 熱媒体循環量 L　：＿＿＿＿L/min
④ 熱媒体密度 ρ　：＿＿＿＿kg/L（水の場合　1.0）
⑤ 熱媒体比熱 c　：＿＿＿＿kJ/kg・K（水の場合　4.19）
⑥ 稼働時間 t　：＿＿＿＿時間

これらから、

採熱量※(kWh)＝$60 \times L \times \rho \times (T_1 - T_2) \times c \times t$

※暖房利用の場合。冷房利用の場合は①と②が逆転し、排熱量となります。

7.3 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

地中熱利用システムの効率を知るためには、地盤からの採熱量・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。

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

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[※21]。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。

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

ここで、L_i　：一次側熱媒体循環量　（m^3/s）

C　：熱媒の比熱（kJ/（kg・K））

ρ　：熱媒の密度（kg/m^3）　　（水の場合 1,000 kg/m^3）

Δt　：一次側熱媒体温度差　（℃）　（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。

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

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

ここで、T_i　：ヒートポンプ入口温度（℃）

T_o　：ヒートポンプ出口温度（℃）

[※21]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 0.1L/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、1L/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とします。

(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。

採熱時：$Q_{total} = Q_h + W_{hp}$ ····· （式 5）

排熱時：$Q_{total} = Q_h - W_{hp}$ ····· （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※22。

単体 $COP = \dfrac{Q_{total}}{W_{hp}}$ ····· （式7）

$SCOP = \dfrac{Q_{total}}{W_{hp}+W_p}$ ····· （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）

※22地中熱利用システムで必要なエネルギーには、地中熱交換井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 削減効果の検討を正確に行うことが出来ます。

(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。

$$E_c = E_f - E_{hp} \cdots\cdots (式9)$$

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の一次エネルギー消費量をそれぞれ求めます。

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

空気熱源ヒートポンプで暖房の場合

$$E_{f\_ah} = \frac{9.76 \cdot Q_{total}}{C_{heat}} \cdots\cdots (式11)$$

灯油ボイラーで暖房の場合

$$E_{f\_oil} = \frac{3.6 \cdot Q_{total}}{C_{oil}} \cdots\cdots (式12)$$

空気熱源ヒートポンプで冷房の場合

$$E_{f\_ac} = \frac{9.76 \cdot Q_{total}}{C_{cool}} \cdots\cdots (式13)$$

ここで、係数 9.76 ：電力の一次エネルギーへの換算係数※23（単位 MJ/kWh）

W_{hp} ：ヒートポンプ消費電力量（kWh）

Q_{total} ：地中熱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 2.9※24

C_{oil} ：灯油の燃焼効率 0.863※25

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 3.7※24

※23資源エネルギー庁，省エネ法の概要，2014 年 2 月の値を用いた。

※24 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

※25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 2017 冬

(6) CO_2 削減効果の算出方法

CO_2 削減効果は、地中熱ヒートポンプ使用時の CO_2 排出量と、従来型熱源を利用した場合の CO_2 排出量を比較することで求めます。ここで、地中熱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 CO_2 排出量を求めます。

電力使用時の CO_2 排出量

$$G_{hp} = 0.512 \cdot W_{hp} \quad \cdots\cdots \text{（式14）}$$

灯油使用時の CO_2 排出量

$$G_{oil} = 2.49 \cdot V_{oil} \quad \cdots\cdots \text{（式15）}$$

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 0.512 ：電力使用時の CO_2 排出係数（kg-CO_2/kWh）

式 15 の係数 2.49 ：灯油使用時の CO_2 排出係数（kg-CO_2/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

$$W_{f\_ah} = \frac{Q_{total}}{C_{heat}} \quad \cdots\cdots \text{（式16）}$$

灯油ボイラーによる暖房時の灯油消費量

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

空気熱源ヒートポンプによる冷房時の消費電力量

$$W_{f\_ac} = \frac{Q_{total}}{C_{cool}} \quad \cdots\cdots \text{（式18）}$$

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）

(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

$$Q_{f\_ac} = Q_{total} + W_{f\_ac} \quad \cdots\cdots \text{（式 19）}$$

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）

8. 地下水に関する規制

8.1 工業用水法（昭和 31 年制定）

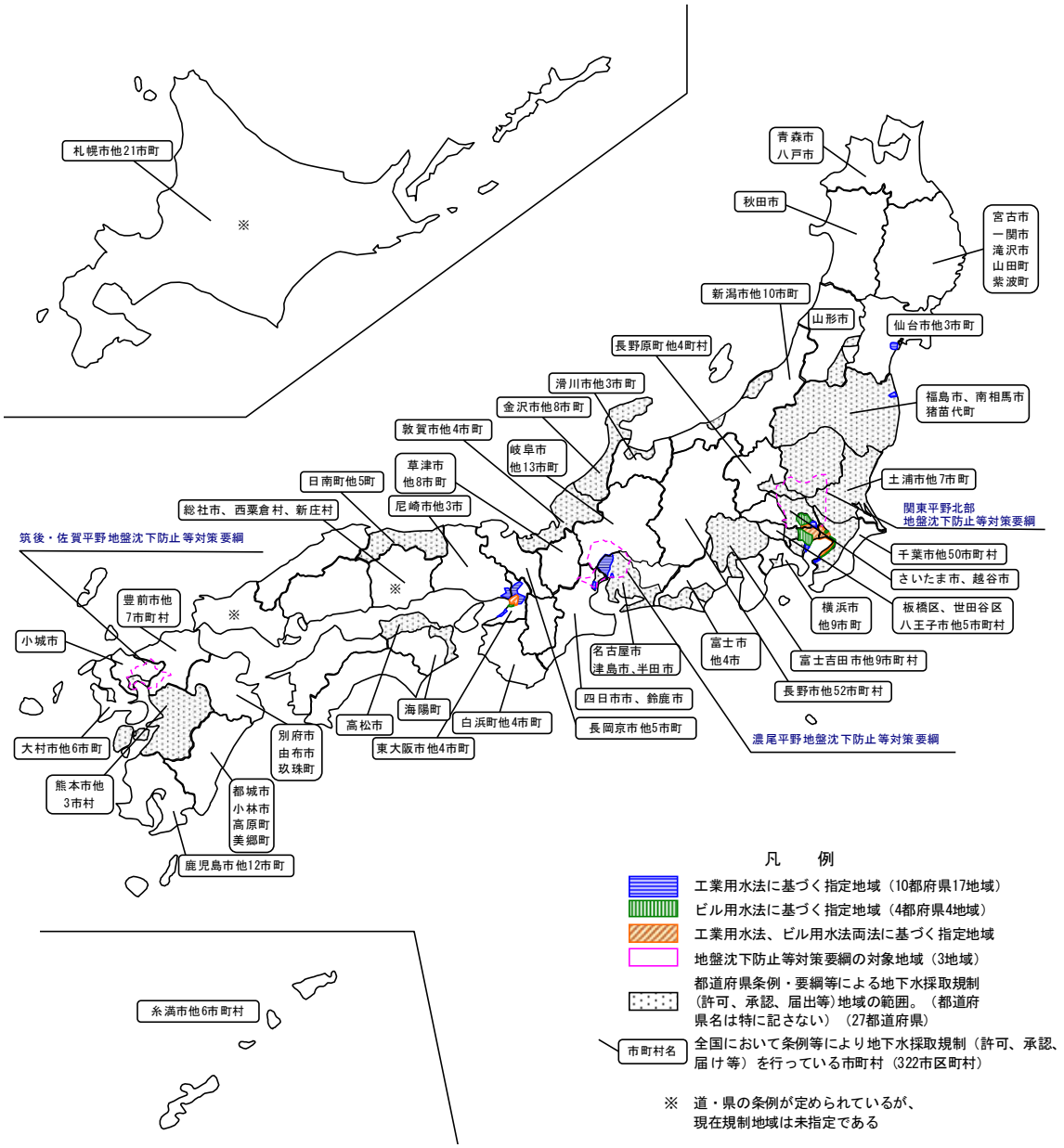
地下水の採取により地盤沈下等が発生し、かつ工業用水としての地下水利用量が多く、地下水の合理的な利用を確保する必要がある地域（工業用水道の整備前提）において、政令で地域指定し、その地域の一定規模以上の工業用井戸について許可基準（ストレーナー位置、吐出口の断面積）を定めて許可制にすることにより地盤沈下の防止等を図っている。平成 29 年 4 月現在までに宮城県、福島県、埼玉県、千葉県、東京都、神奈川県、愛知県、三重県、大阪府、兵庫県の 10 都府県 17 地域において地域指定されている。

8.2 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）

建物用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揚水設備について許可基準（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る。平成 29 年 4 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る。

8.3 条例等に基づく規制等

多くの地方公共団体（平成 29 年 4 月現在、27 都道府県・322 市区町）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る（図 R8-1)。



※各指定地域の図示については、簡略化して表示している。

図 R8-1　地下水採取に関する規制等の状況※26

※26　環境省調べ（平成 29 年 7 月）

8.4 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る(表 R8-1)。

表 R8-1 地盤沈下防止等対策要綱の概要

<table>
<tr><td></td><td colspan="2">濃尾平野</td><td colspan="3">筑後佐賀平野</td><td colspan="2">関東平野北部</td></tr>
<tr><td>名称</td><td colspan="2">濃尾平野
地盤沈下防止等対策要綱</td><td colspan="3">筑後佐賀平野
地盤沈下防止等対策要綱</td><td colspan="2">関東平野北部
地盤沈下防止等対策要綱</td></tr>
<tr><td>決定年月日</td><td colspan="2">昭和60年4月26日</td><td colspan="3">昭和60年4月26日</td><td colspan="2">平成3年11月29日</td></tr>
<tr><td>一部改正年月日</td><td colspan="2">平成7年9月5日</td><td colspan="3">平成7年9月5日</td><td colspan="2">―</td></tr>
<tr><td>評価検討年度</td><td colspan="2">平成16年・平成21年・平成26年</td><td colspan="3">平成16年・平成21年・平成26年</td><td colspan="2">平成16年・平成21年・平成26年</td></tr>
<tr><td>目的</td><td colspan="7">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。</td></tr>
<tr><td>要綱の項目</td><td colspan="7">1. 要綱の目的
2. 要綱地域の現況
3. 要綱の対象地域
4. 地下水採取に係る目標量
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</td></tr>
<tr><td rowspan="4">地下水採取量
(規制・保全地域)
m3/年</td><td colspan="2">濃尾平野
(規制地域)</td><td></td><td>佐賀地区
(規制地域)</td><td>白石地区
(規制地域)</td><td colspan="2">関東平野北部
(保全地域)</td></tr>
<tr><td>昭和57年</td><td>4.1億</td><td>昭和57年</td><td>700万</td><td>1,200万</td><td>昭和60年</td><td>7.3億</td></tr>
<tr><td>平成24年</td><td>1.4億</td><td>平成24年</td><td>300万</td><td>100万</td><td>平成24年</td><td>4.9億</td></tr>
<tr><td>目標量</td><td>2.7億</td><td>目標量</td><td>600万</td><td>300万</td><td>目標量</td><td>4.8億</td></tr>
<tr><td>対象地域</td><td colspan="2">岐阜県、愛知県及び
三重県の一部地域</td><td colspan="3">福岡県及び佐賀県の
一部地域</td><td colspan="2">茨城県、栃木県、
群馬県、埼玉県及び
千葉県の一部地域</td></tr>
<tr><td colspan="8">「地盤沈下防止等対策要綱に関する関係府省連絡会議」 (平成22年3月30日)確認事項
①地下水採取目標については、地盤沈下を防止し、合わ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維持すること。
②渇水時の地盤沈下に進行に対応するため、地下水の管理方策について調査・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取るものとすること。
④関係府省連絡会議は、概ね5年毎に地盤沈下防止対策等について評価検討を行うこと</td></tr>
</table>

※平成 27 年 2 月 17 日に「地盤沈下防止等対策要綱に関する関係府省連絡会議」を開催し、要綱が策定された 3 地域については、今後も地下水採取に係る目標量を現行のとおりとすること、概ね 5 年毎に地盤沈下防止対策等について評価検討を行うこと等について確認された。

9. 水質に関する規制

9.1 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る。

水質汚濁防止法では、第 12 条第 1 項で「排出水を排出する者は、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出水を排出してはならない」と定めている。

排出基準は、水質汚濁防止法第 3 条第 1 項に規制しており、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）で定めている。

また、地下への浸透については、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」と規定されている。

9.2 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 で定めている。

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「上乗せ基準」があるので、注意されたい。

10. 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（http://www.jdhc.or.jp/propose/law/）を参照ください。

11. 助成制度

環境省が実施する助成制度は環境省ホームページ（http://www.env.go.jp/earth/ondanka/biz_local.html）を御確認下さい。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/subsidy/index1）。

12. 関連するガイドライン等

国土交通省から、官庁施設に導入する際の下記ガイドラインが公表されています。また、文部科学省から、学校における新エネルギー活用ガイドブックなどが公表されています。この他に参考となる図書が、環境省のホームページや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/information/index1）で紹介されています。

- 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

- 建築設備設計基準（平成 27 年版），国土交通省 大臣官房 官庁営繕部 設備・環境課
  （http://www.mlit.go.jp/common/001157904.pdf）

- 公共建築工事標準仕様書（平成 28 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
  （http://www.mlit.go.jp/common/001157917.pdf）

- 再生可能エネルギーに関するゾーニング基礎情報整備報告書
  （http://www.env.go.jp/earth/zoning/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
  （http://www.env.go.jp/earth/ondanka/lca/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，平成 25 年 3 月
  （https://www.env.go.jp/earth/ondanka/lca/）

- 非住宅建築物に関する省エネルギー基準に準拠したプログラム及び技術情報，平成 29 年 3 月，国立研究開発法人建築研究所
  （http://www.kenken.go.jp/becc/）

検討委員会

初版（平成 24 年 3 月）における検討委員会

(1) クールシティ推進事業[地下水等活用型・地中熱利用型] 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) クールシティ推進事業[地下水等活用型・地中熱利用型] 過年度実証事業一覧

年度	事業名	事業実施者
H18	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	財団法人大阪府みどり公社
	地下水を活用した地表面散水の効果検証及び地下水・地盤環境への影響評価検討事業	財団法人大阪府みどり公社
	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	九州大学大学院 地球資源システム工学部門
H19	地下水の散水による環境影響とヒートアイランド現象緩和効果の検討	東京大学大学院 工学系研究科
	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	ジオシステム株式会社
	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	岐阜大学
	地中放熱による土壌内生態系への影響調査(2 年間の継続事業)	三菱マテリアルテクノ 株式会社
H20	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	東北大学未来科学技術共同研究センター
	排水性舗装冷却システムにおける節水と省エネルギー化による環境負荷低減の実証事業	株式会社興和
H21	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	日本地下水開発株式会社
	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	ジオシステム株式会社
	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	ミサワ環境技術株式会社
H22	地中熱利用ヒートポンプシステム過負荷運転実証実験	ジオシステム株式会社
	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	株式会社日伸テクノ

改訂版（平成 27 年 3 月）における検討委員会

(3) 地中熱利用の普及方策の構築検討会

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

改訂増補版（平成 30 年 3 月）作成に係る検討委員会

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