

地中熱ポテンシャルマップ利用マニュアル

(一部公開版)

平成 31 年 (2019 年) 3 月

佐賀県 産業労働部 新エネルギー産業課

はじめに

地球温暖化防止を目指すパリ協定や国連の持続可能な開発目標（SDGs）^{エスディージーズ}を受け、環境等への取り組みを重視したE S G投資が世界的に広がっています。これにより、^{イーエスジー}低炭素化に有効な再生可能エネルギー等に関連する産業分野は、長期的に拡大していくことが予想されます。

こうした流れに対応するため、県では、昨年3月に「佐賀県再生可能エネルギー等先進県実現化構想」を策定しました。この構想では、「県内発や県にゆかりある人・企業・技術・製品等で日本そして世界の再生可能エネルギー等の普及拡大に貢献」することを目指しており、取組方針の一つとして、「多様な再生可能エネルギー資源の活用」を掲げ、推進しています。

なかでも、地中熱は、天候や時間帯に左右されない安定した再生可能エネルギーであり、冷房や暖房に利用することで、電力消費量とともにCO₂排出量を削減し、SDGsのゴール7「エネルギーをみんなにそしてクリーンに」の達成にも貢献することができます。

佐賀平野は、地盤が軟弱で均質なことから掘削しやすく、また、地下水位が高く熱交換の能力も高いことから、地中熱の利用に適しています。

さらに、県内には、地中熱の利用に関する技術を有する企業も多く、県内企業が大きく貢献できる分野でもあることから、地中熱の利用が進むことで、SDGsのゴール8「働きがいも 経済成長も」の達成にも繋がるものと考えられます。

そこで県では、佐賀平野における地中熱利用の普及を目指し、「佐賀平野の地中熱ポテンシャルマップ」を作成するとともに、ポテンシャルマップを活用して地中熱の利用を検討するためのツールとして、「佐賀平野の地中熱ポテンシャルマップ利用マニュアル」を作成しました。このマニュアルでは、地中熱のポテンシャル評価結果やポテンシャルマップの利用方法を示すとともに、地中熱に関する基礎知識や実際に導入した事例等を紹介しています。

このマニュアルを利用することで、地中熱を導入しようとする施設に適した設備の容量を定め、導入に必要なコストを試算することが出来ます。

本マニュアルを参考に、県内で地中熱の導入検討が盛んになり、多くの事例が創出されることを願っております。



佐賀県 産業労働部 新エネルギー産業課

目 次

第 1 章 地中熱利用施設の導入に向けて.....	1
1.1 地中熱とは？.....	1
1.2 地中熱の利用用途と普及状況.....	3
1.3 地中熱利用施設導入までの流れ.....	5
第 2 章 ポテンシャルマップの利用方法.....	6
2.1 地中熱ポテンシャルマップとは.....	6
2.2 佐賀平野の地中熱ポテンシャルマップ.....	6
2.3 マップ作成条件.....	15
2.4 利用上の注意.....	19
第 3 章 用語集.....	20
第 4 章 参考となる文献・情報.....	22

第1章 地中熱利用施設の導入に向けて

1.1 地中熱とは？

「地中熱」と似た言葉に、「地熱」という言葉があります。九州では、八丁原発電所など、地熱発電所が複数ありますので、なじみがある方も多いのではないのでしょうか。地熱とは、地下数キロメートルまで掘削して、マグマだまりにより熱せられた地下水を高温の蒸気として取り出し直接タービンを回すという発電技術です(図 1-1)。一方で、地中熱は、浅層(20m~200m程度)の地盤の温度が、外気温と比較して年間を通して変化しないことを利用した省エネ技術になります(図 1-2、図 1-3)。

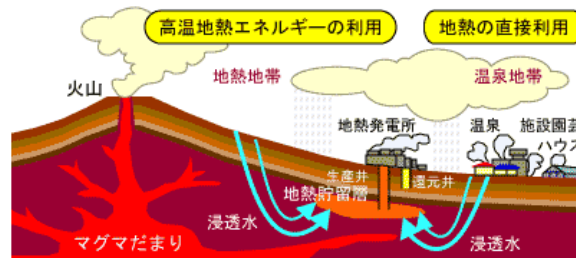


図 1-1 地熱発電の概略図¹

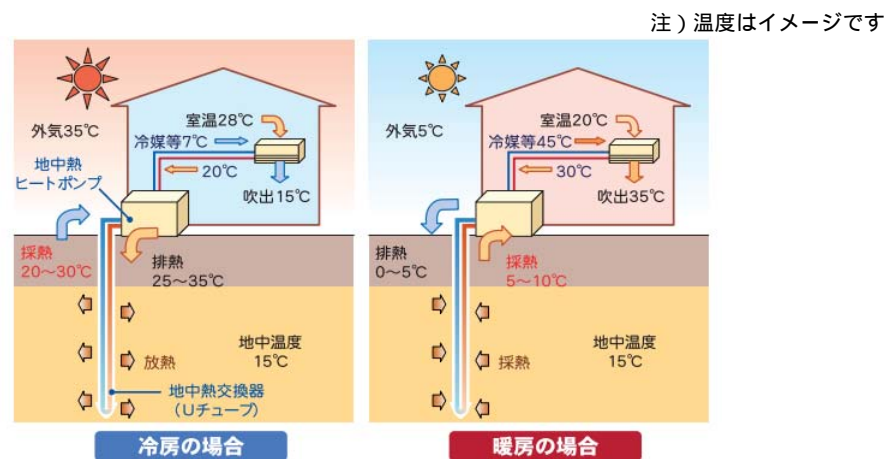


図 1-2 地中熱利用の仕組み²

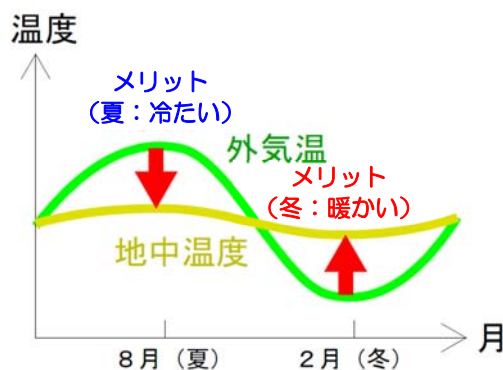


図 1-3 外気温と地中温度の温度差

¹ 経済産業省 資源エネルギー庁 ホームページ <http://www.enecho.meti.go.jp>

² 環境省 水・大気環境局土壌環境課地下水・地盤環境室：パンフレット「地中熱利用システム」

地中熱利用では、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ため、空気を熱源とするエアコンよりも効率的にエネルギーを利用することができます（図 1-4、図 1-5）³

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。

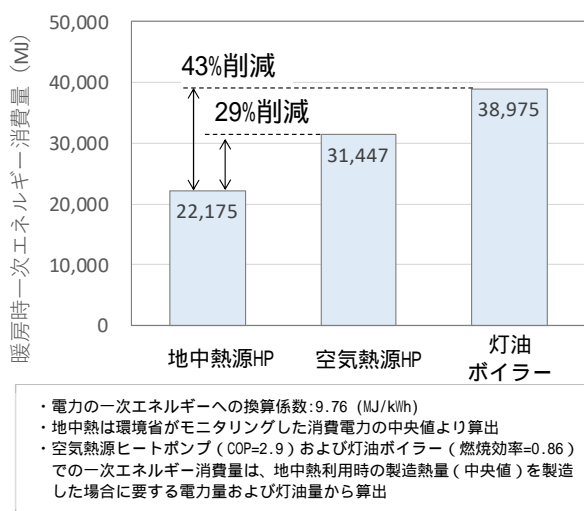


図 1-4 暖房時の省エネ効果
(ヒートポンプ定格能力 10kW 程度)

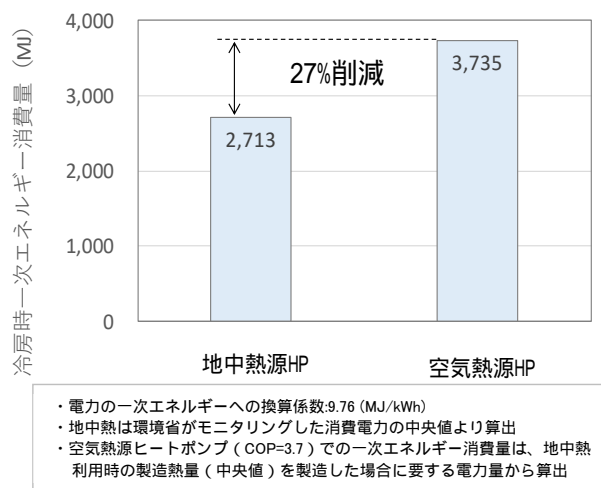


図 1-5 冷房時の省エネ効果
(ヒートポンプ定格能力 10kW 程度)

環境省が補助事業によりモニタリングしたデータをもとに集計したところ、地中熱利用により、従来方式の熱利用施設よりも暖房で 4 割程度、冷房で 3 割程度の省エネと CO₂ 削減がなされることが確認されています。

³環境省、「地中熱利用にあたってのガイドライン 改訂増補版」(平成 30 年 3 月)

1.2 地中熱の利用用途と普及状況

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。その他にも工場、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 1-6）。

2015 年度末までに地中熱ヒートポンプシステムを導入した施設件数は累計で 2,230 件となっております（図 1-7）。地中熱利用の方式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とオープンループ方式に分

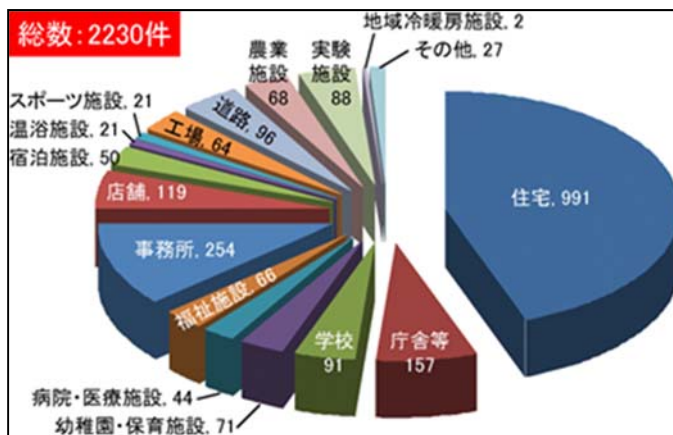


図 1-6 国内でのヒートポンプを用いた地中熱の利用用途

けられます。地域別で見ると、北海道が 598 件と最も多く、本州では、秋田県、東京都、岩手県、長野県、青森県、新潟県等で導入件数が多くなっています（図 1-8）。九州や沖縄でも、徐々に普及が始まっています（コラム参照）。

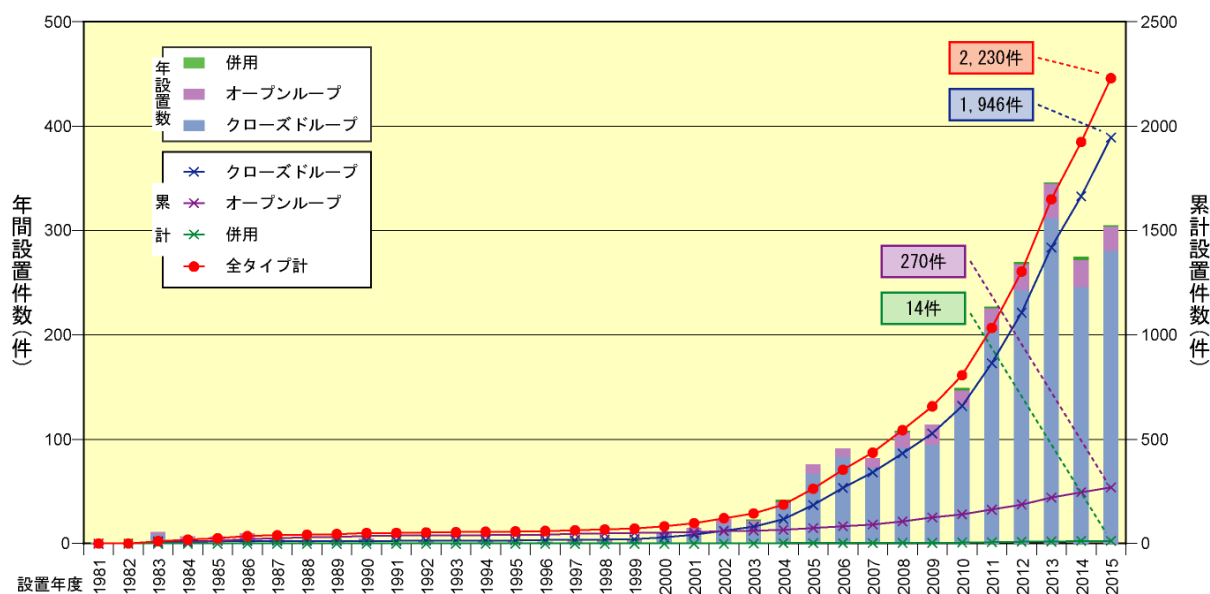


図 1-7 地中熱利用ヒートポンプ設備の国内設置件数⁴

⁴ 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

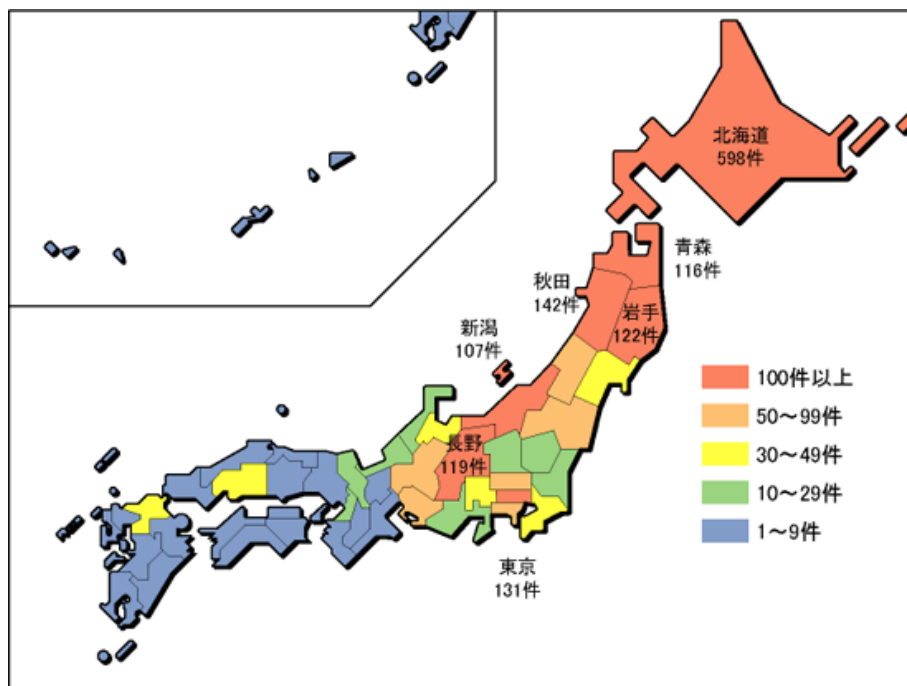


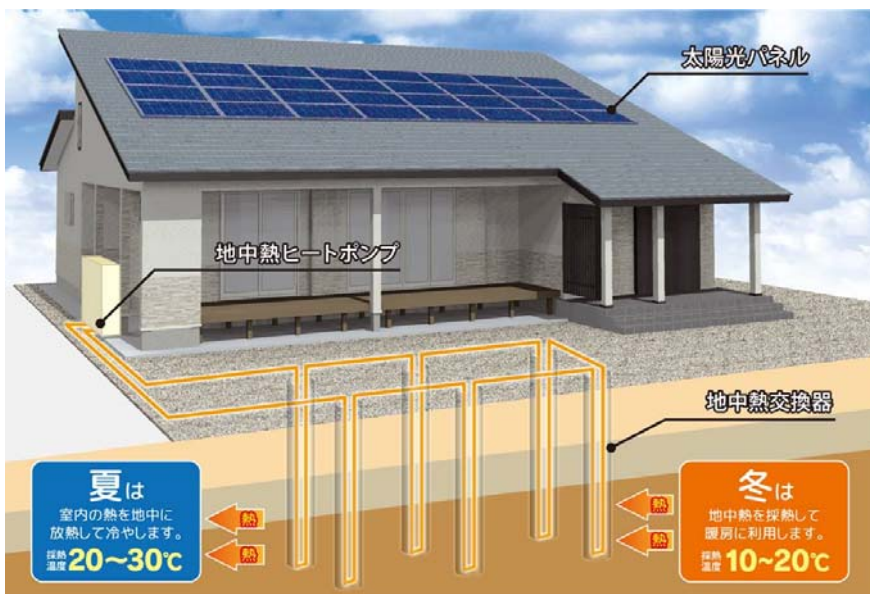
図 1-8 都道府県別の地中熱ヒートポンプ施設件数（2015年度末）（環境省、2017）⁴

コラム：佐賀県での導入事例⁵

平成 27 年 3 月に、佐賀県内初のアクティブ型地中熱利用空調システムを導入した一般住宅のモデルルームが佐賀県小城市に建設されています。

本施設では、縦型の熱交換器（30m 程度）を 6 本設置しており、地中熱ヒートポンプを介して夏は室内から地中に放熱することにより冷房し、冬は地中から採熱することで暖房を行っています。

また、このモデルルームには、地中熱源ヒートポンプだけでなく、5.81kW の太陽光発電、蓄電池、創蓄連携システム、ハイブリッド給湯機が導入されています。



⁵ 一般社団法人有明未利用熱利用促進研究会ホームページ <https://arimiri.com/dounyu/modelroom/>

1.3 地中熱利用施設導入までの流れ

地中熱は場所を選ばず導入可能な省エネ技術です。ただし、地盤の熱の伝わり方や地下水の流れの状況により、熱交換の効率は異なってきます。熱交換の効率が高いところでは、熱交換器の規模を小さくすることができ、イニシャルコストを圧縮することが可能です。

このため、地中熱利用施設の導入にあたっては、場所ごとに費用対効果に基づく導入可能性を事前に把握することが重要となります。

地中熱利用施設を導入する際のおおまかな手順を右図に示します。このうち、「初期段階の取り組み」では導入目的や検討対象施設を決定します。

なお、これはあくまでも一般的な流れであり、場合によってはより少ない手順で行うことも可能です。

佐賀県では、地中熱の普及を目指して、下記の研究会が発足されています。地中熱利用施設の設置には、専門的な知識が必要となりますので、施設導入を検討される際には、まずは同研究会にご連絡いただくことをお勧めします。

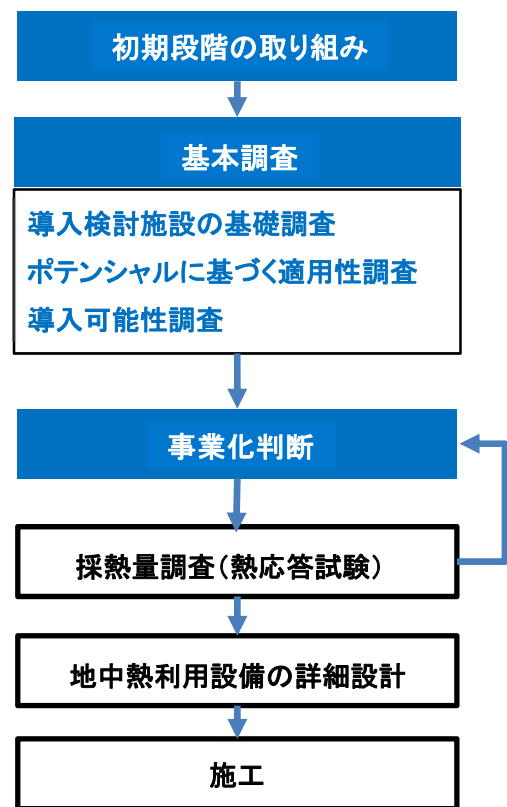


図 1-9 地中熱利用施設導入までの流れ

一般社団法人 有明未利用熱利用促進研究会



ホームページ URL : <https://arimiri.com/>

第2章 ポテンシャルマップの利用方法

2.1 地中熱ポテンシャルマップとは

地中熱は場所を選ばず導入可能な技術ですが、地盤の熱の伝わり方や地下水の流れの状況により、熱交換の効率が異なります。このような地中での熱交換の効率を地中熱ポテンシャルと呼びますが、地域による地中熱ポテンシャルの違いを面的に示したものが地中熱ポテンシャルマップです。

地中熱ポテンシャルマップは、地中熱利用施設の導入を検討する際に、どの程度の規模の施設になるかを想定する目安を提供することを目的として作成されています。本マップは、下記に示す4つのタイプの施設について、佐賀県における一般的な冷暖房を地中熱で行うために必要となる地中熱利用施設の規模(熱交換器の本数、総延長)を面的に示したものです。

2.2 佐賀平野の地中熱ポテンシャルマップ

本地中熱ポテンシャルマップは、クローズドループ方式の地中熱利用システムを想定しています。佐賀県にある一般的な戸建て住宅、医療福祉施設、屋内運動施設、農業用ビニールハウスの冷暖房を地中熱で行うことを想定しています。各施設における冷暖房による一般的な熱負荷量は佐賀大学理工学部小島教授に計算していただきました。

次ページ以降に、各冷暖房のパターンにおける熱負荷量と、その負荷に対応できる施設規模を示した地中熱ポテンシャルマップを示します。なお、1mあたりの可能採熱量、可能排熱量については、個別にお問合せください。

(1) 戸建て住宅の場合

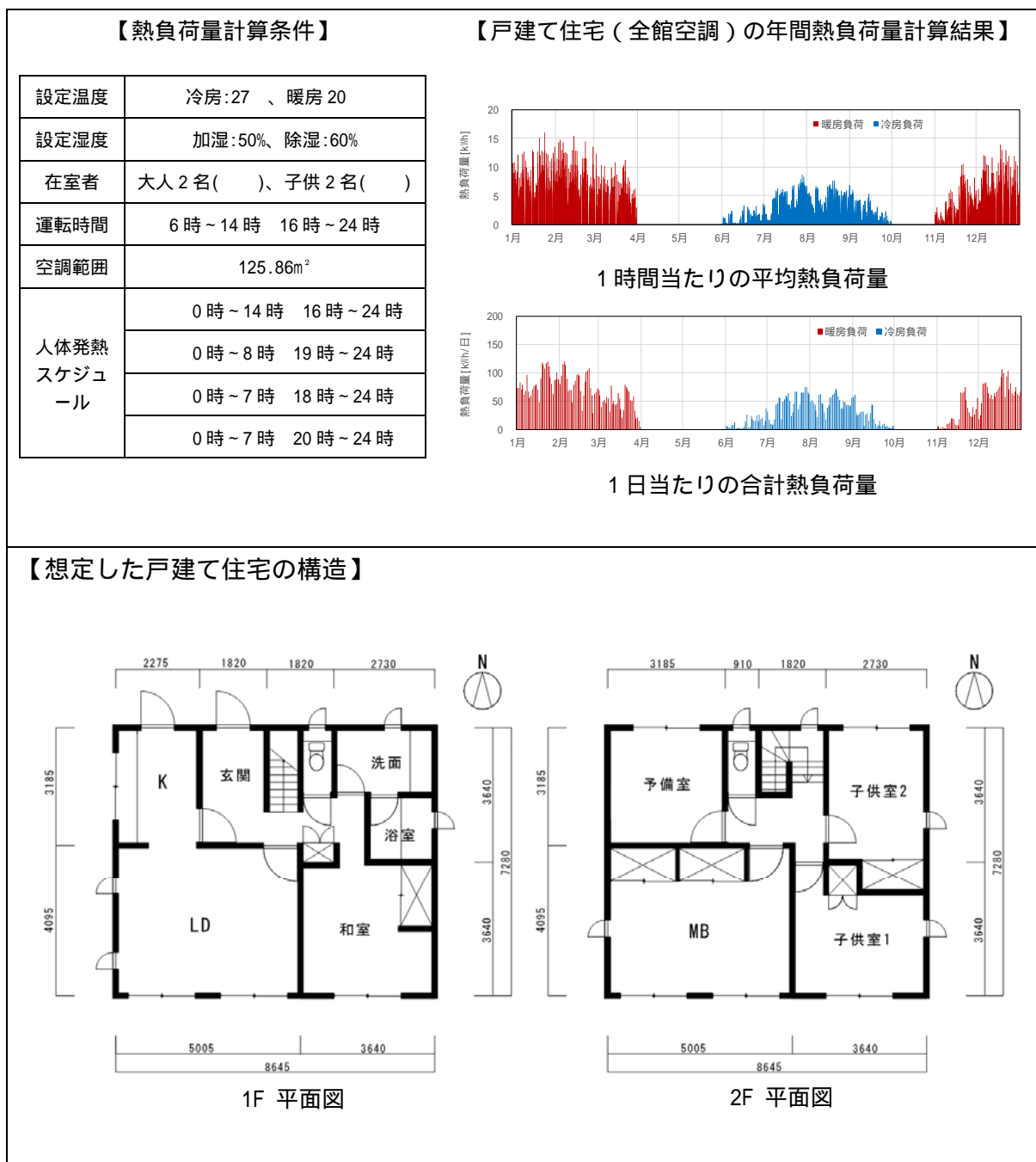
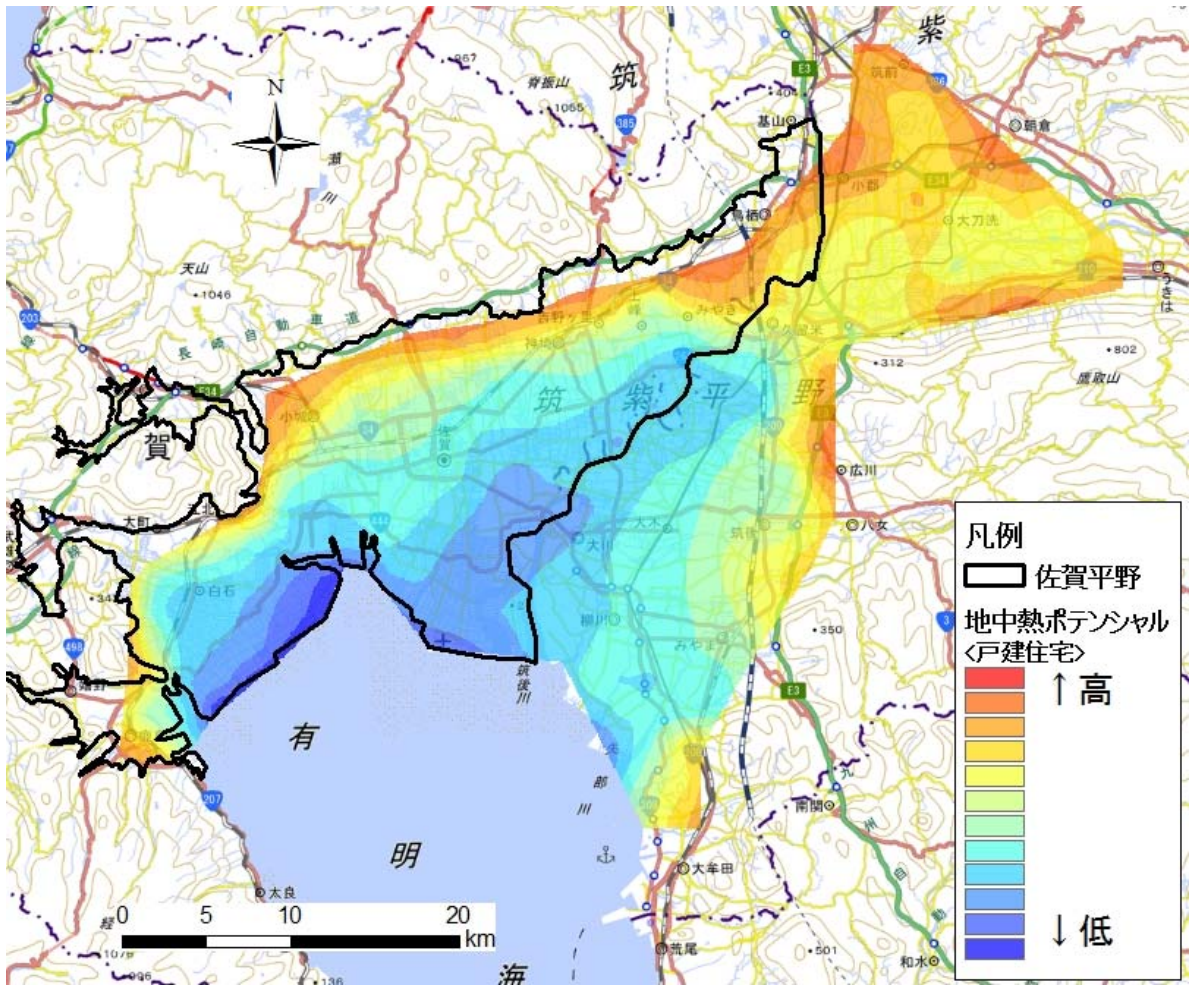


図 2-1 ポテンシャル計算の熱負荷条件（戸建て住宅）

【戸建て住宅のポテンシャルマップ】



地図出典：国土地理院

【マップの説明】

佐賀平野の北部で地中熱ポテンシャルが高く、有明海に近い南部ではややポテンシャルの低い傾向がみられました。現在公開されている他都県のポテンシャルマップと比較すると、佐賀平野には高い地中熱のポテンシャルがあることが伺えます。

図 2-2 地中熱ポテンシャルマップ（戸建て住宅）

(2) 福祉施設の場合

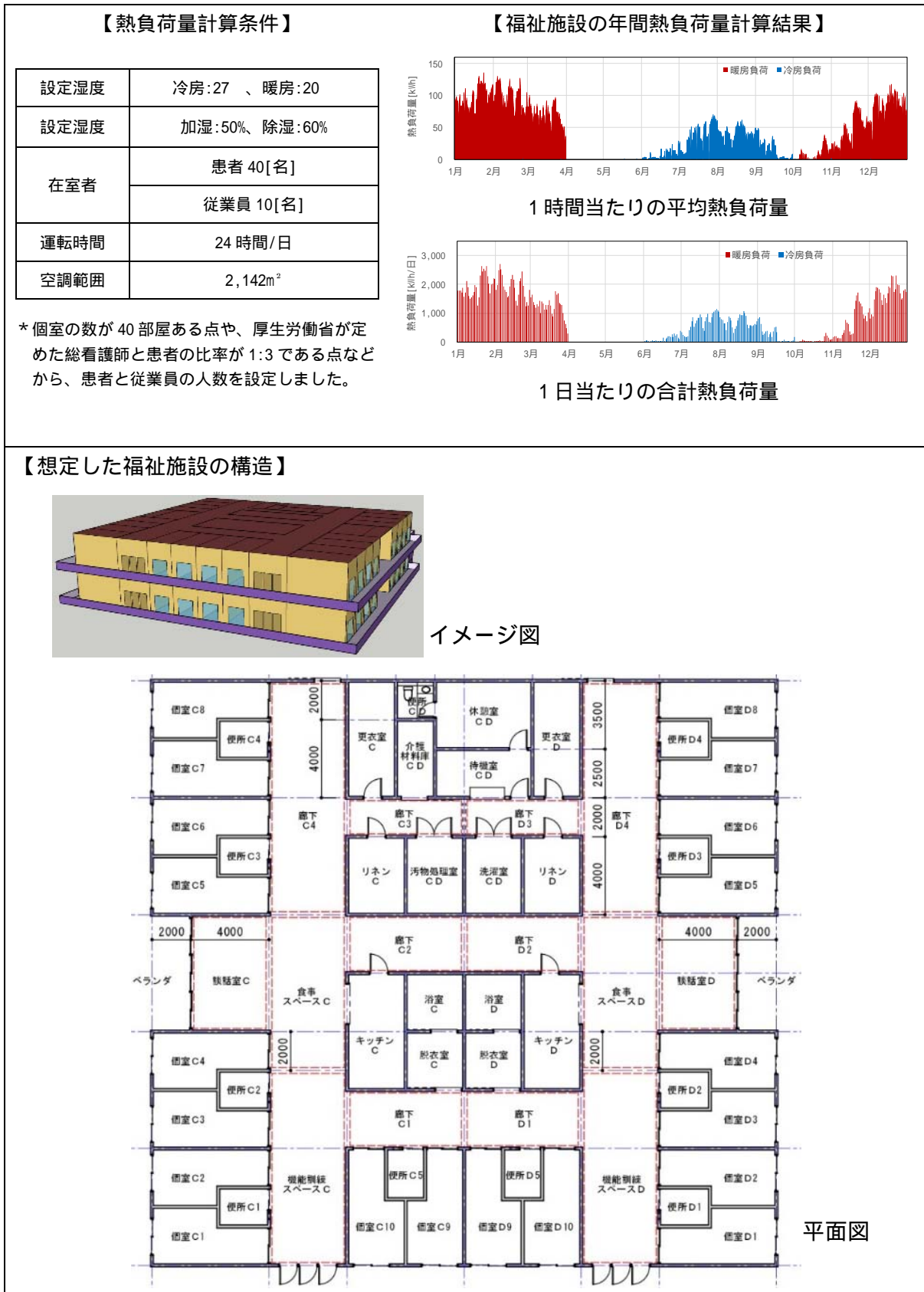
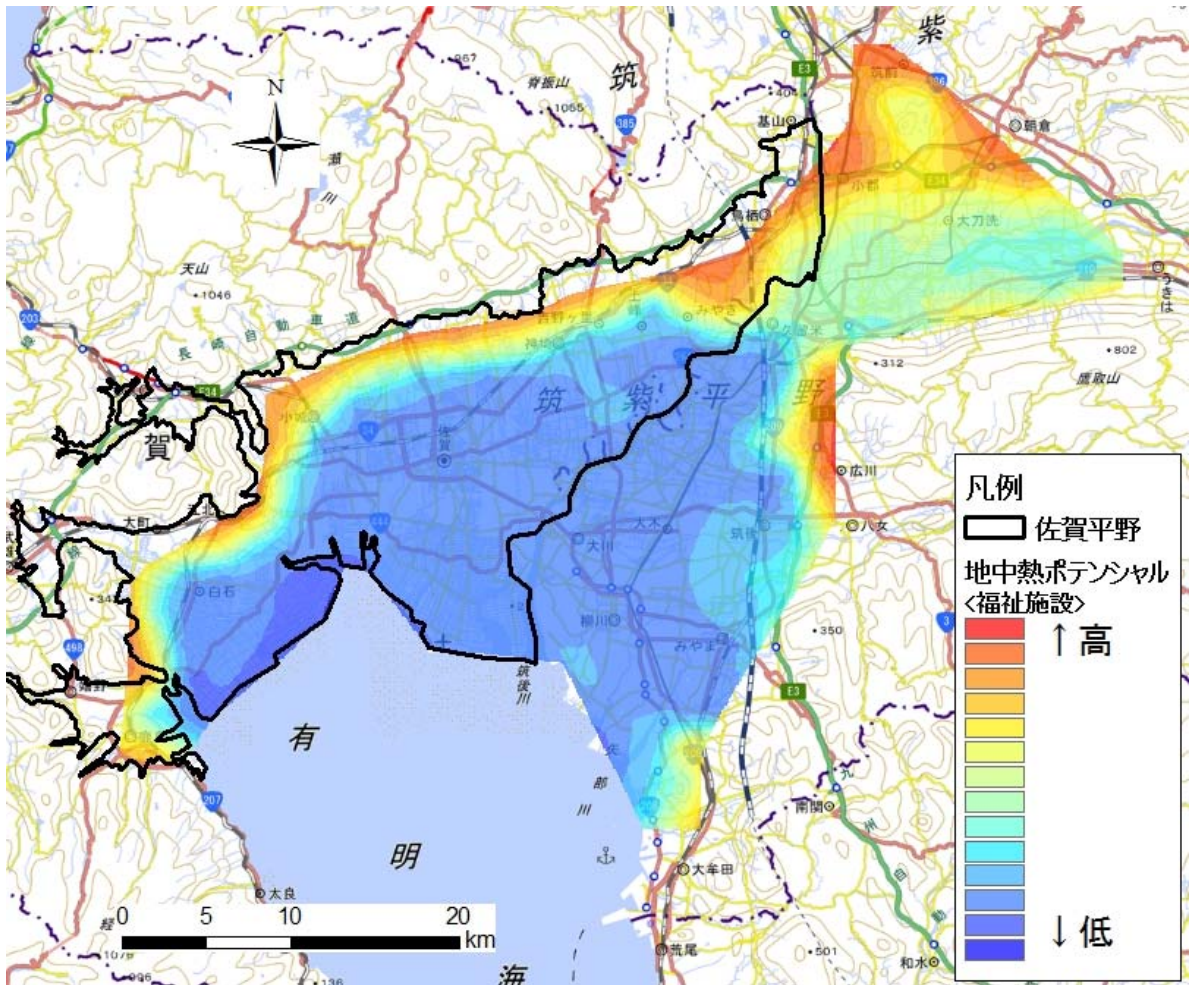


図 2-3 ポテンシャル計算の熱負荷条件（福祉施設）

【福祉施設のポテンシャルマップ】



地図出典：国土地理院

【マップの説明】

佐賀平野の北部などで地中熱ポテンシャルが高い地域がみられます。

図 2-4 地中熱ポテンシャルマップ（福祉施設）

(3) 屋内運動施設の場合

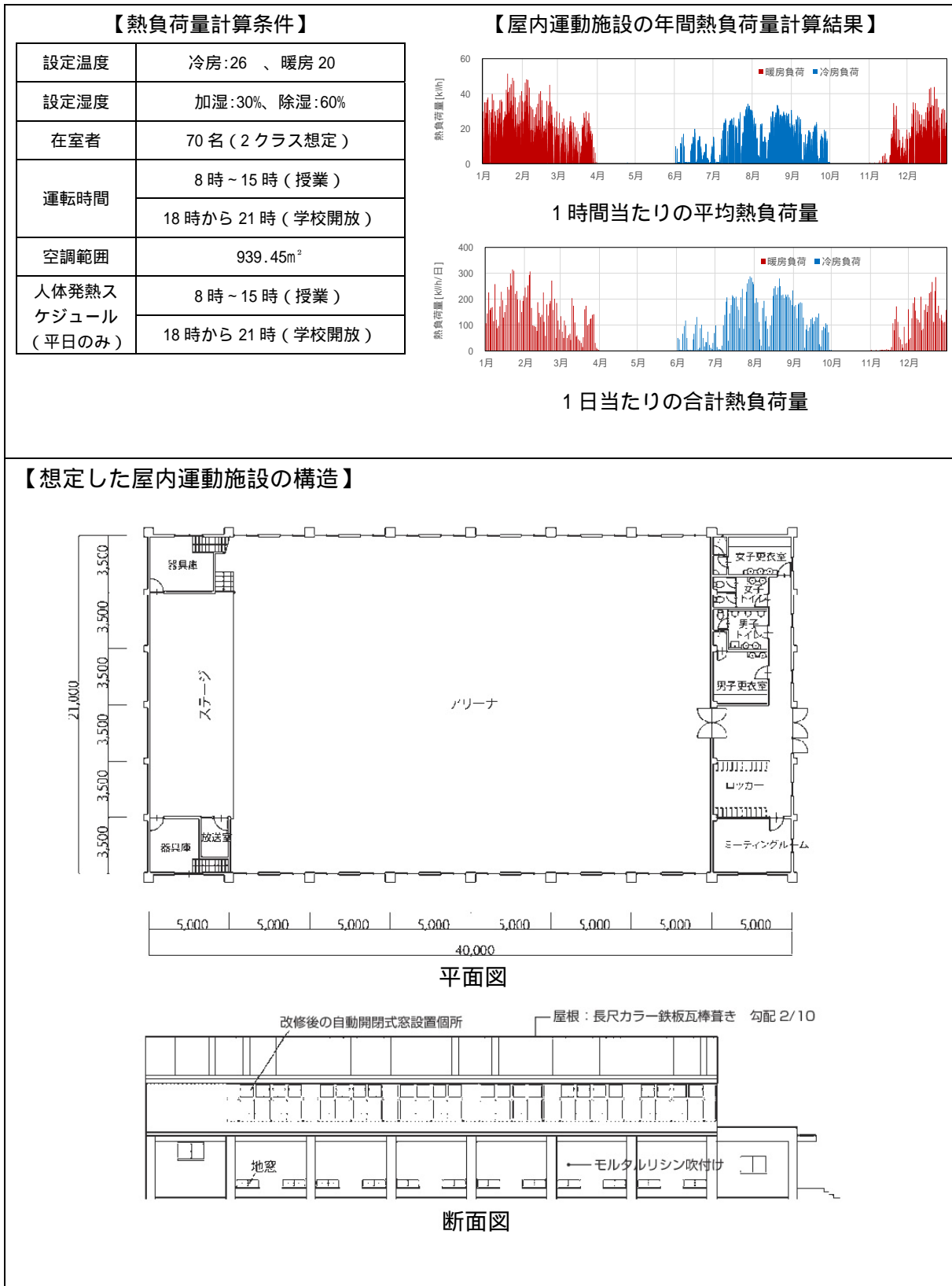
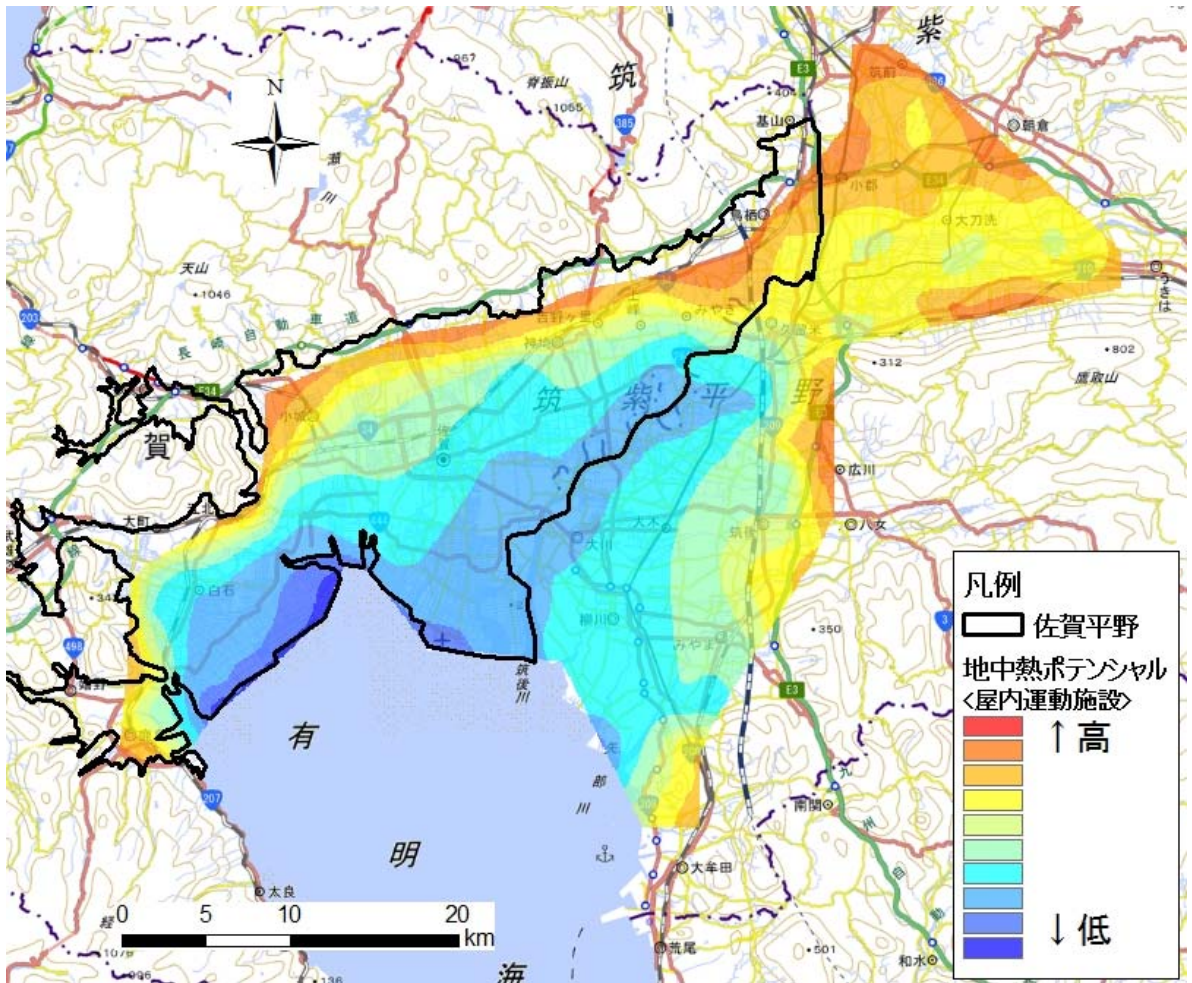


図 2-5 ポテンシャル計算の熱負荷条件(屋内運動施設)

【屋内運動施設のポテンシャルマップ】



地図出典：国土地理院

【マップの説明】

佐賀平野の北部で地中熱ポテンシャルが高く、有明海に近い南部や筑後川沿いではややポテンシャルの低い傾向がみられました。

図 2-6 地中熱ポテンシャルマップ（屋内運動施設）

(4) 農業用ビニールハウスの場合

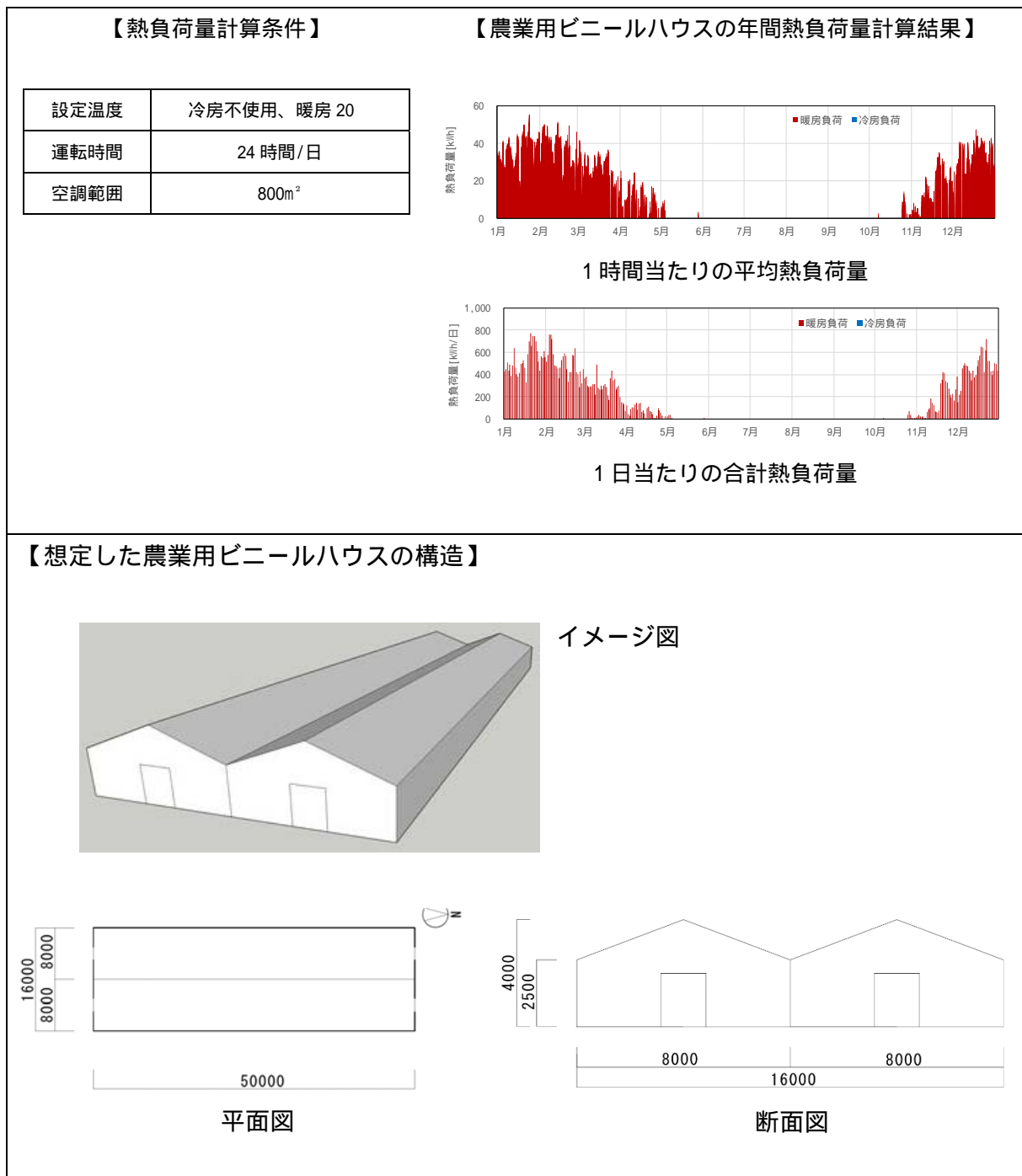
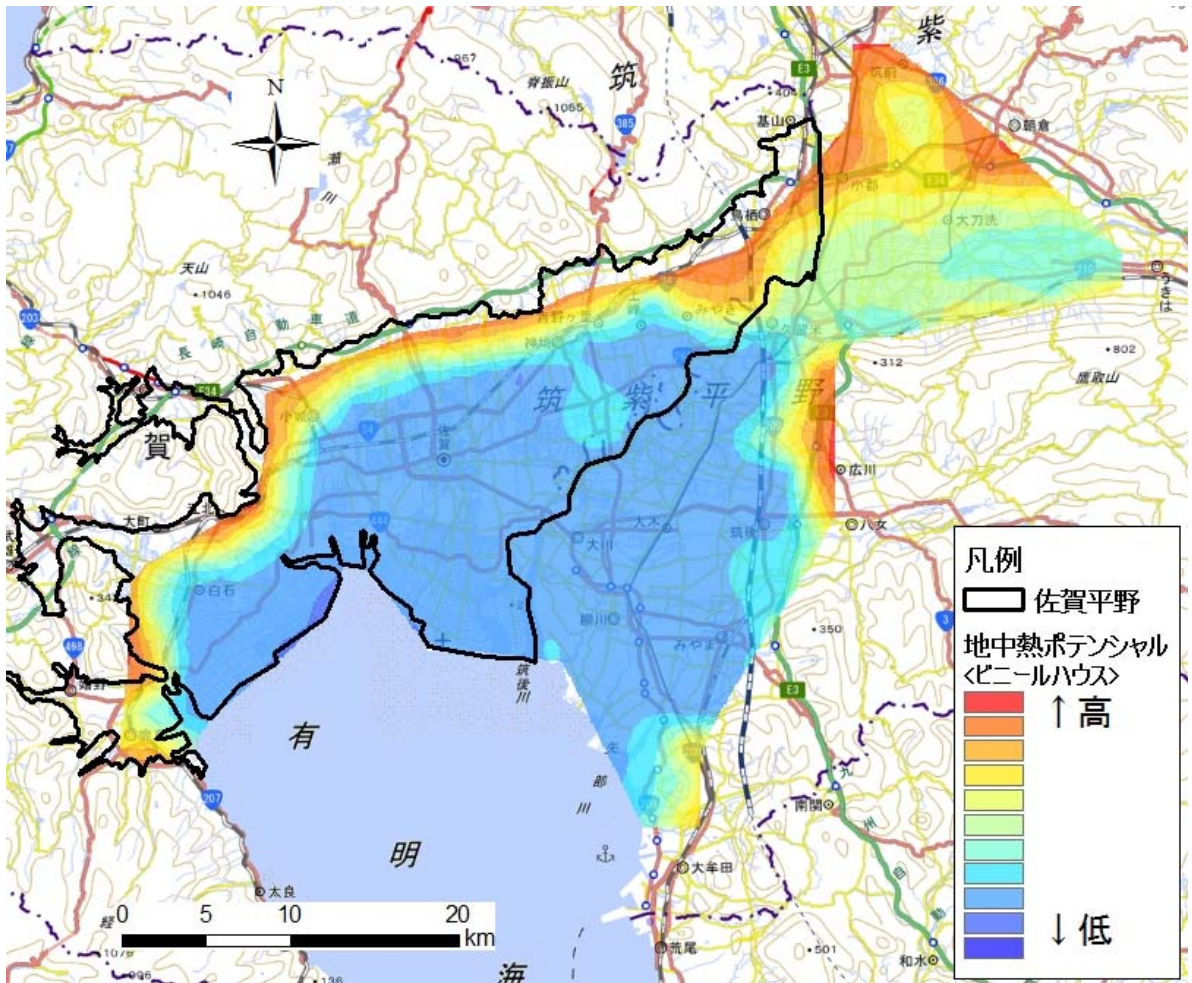


図 2-7 ポテンシャル計算の熱負荷条件（農業用ビニールハウス）

【農業用ビニールハウスのポテンシャルマップ】



地図出典：国土地理院

【マップの説明】

佐賀平野の北部など一部で地中熱ポテンシャルが高い地域がみられます。

図 2-8 地中熱ポテンシャルマップ（農業用ビニールハウス）

2.3 マップ作成条件

ポテンシャルマップの作成方法および作成条件は、以下のとおりです。

<ポテンシャルマップの作成フロー>

図 2-99 にポテンシャルマップの作成フローを示します。マップの作成は、以下の手順に従って行いました。

マップの作成にあたっては、まず、地下水流動・熱輸送解析ソフトである「FEFLOW」を用いて、佐賀平野を包括する範囲についてモデルを作成し、三次元的な地下水流動および温度分布の再現を行いました（広域シミュレーション）。この際、過去に実施された研究⁶の成果を利用し、地質情報、地下水位などを考慮しています。

次に、対象地域内に 21 地点の代表点を設定し、それぞれの熱負荷量を設定した際に必要となる熱交換器の長さ（地中熱ポテンシャル）を、先ほどの「FEFLOW」を用いて小規模なモデルを別途作成し、計算しました（詳細シミュレーション）。

上記と同様の地点およびモデルを用いて、一定条件の熱負荷を与えた場合の平均可能採排熱量を計算しました。

代表点における熱交換器の長さ（地中熱ポテンシャル）および平均可能採排熱量を統計的に内挿補間し、地中熱ポテンシャルマップを作成しました。

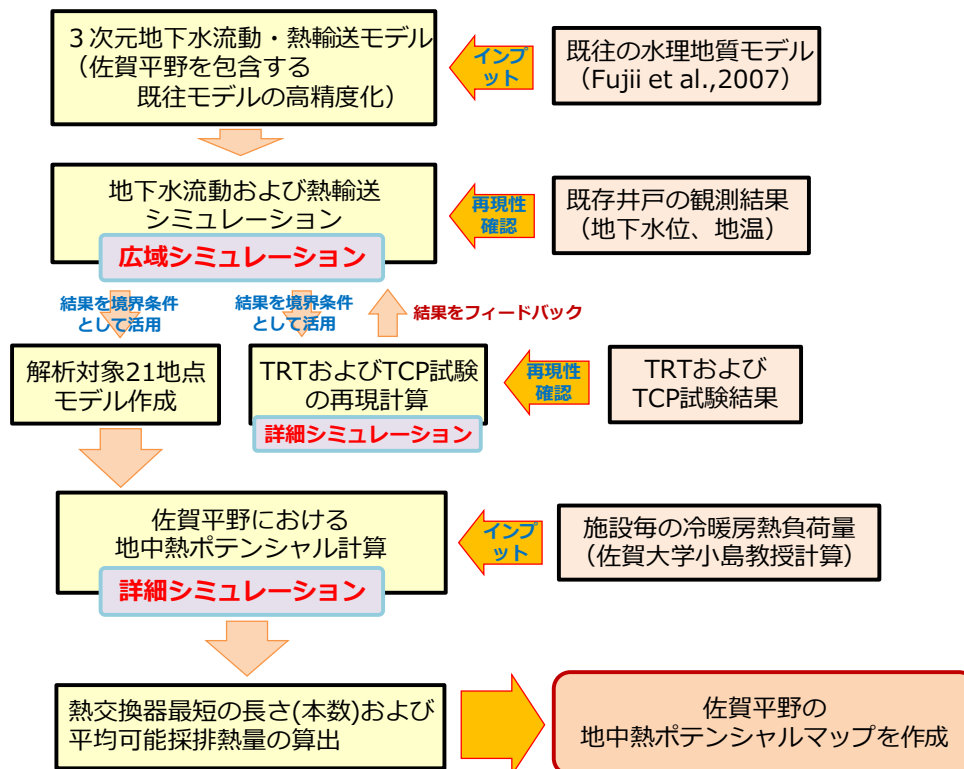


図 2-99 地中熱ポテンシャルマップの作成フロー

⁶ Fujii ら、Development of suitability maps for ground-coupled heat pump systems using groundwater and heat transport models、Geothermics、2007、Vol136、5号、p459～p472

< 地中熱交換量の算出方法 >

冷暖房熱負荷量をモデルに反映させるに当たり、想定されるヒートポンプの COP を考慮した地中熱交換量の算出を行いました。想定する機器の COP は、表 2-1 に示す値としました。

表 2-1 ヒートポンプ能力毎の設定 COP

ヒートポンプ能力	冷房運転	暖房運転
10kW程度 (戸建て住宅)	4.6	3.3
20kW以上 (戸建て住宅以外)	4.7	3.9

冷房運転時および暖房運転時の地中熱交換量は、以下の式により求めました。

(1) 冷房運転時の計算方法

$$Q_{E,c} = Q_c + \frac{Q_c}{COP} \quad (\text{式 1})$$

(2) 暖房運転時の計算方法

$$Q_{E,h} = Q_h - \frac{Q_h}{COP} \quad (\text{式 2})$$

ここで、

$Q_{E,c}$: 冷房運転時の地中熱交換量[W]

$Q_{E,h}$: 暖房運転時の地中熱交換量[W]

Q_c : 冷房熱負荷量[W]

Q_h : 暖房熱負荷量[W]

上記により求められた地中熱交換量を、施設毎にシミュレーションモデルに与え、地中熱ポテンシャルの計算を行いました。

< 熱交換器長さの算出方法 >

地中熱ポテンシャルとして、必要となる熱交換器の長さを計算する際の設定条件は表 2-2 のとおりです。

表 2-2 熱交換器最短長さ計算時のモデル設定条件

項目名	設定値・設定方法	
熱交換器システム設定	ボアホール径	150 mm
	熱交換器仕様	ダブルU字管
	熱交換器の設定	
	外径	32 mm
	厚さ	2.9mm
	パイプ距離	40 mm
	パイプ熱伝導率	0.42 W/m/K
	充填材熱伝導率	1.23 W/m/K
	延長 (100m 以下)	熱交換器出入口温度をキャリブレーションターゲットとして、地中熱交換器の延長を 5m 毎に変化させた。
	延長 (100m 以上)	熱交換器の延長を 100m で固定して、地中熱交換量を熱交換器の本数で除算して計算した。
	熱媒体の設定	
	熱媒体材	プロピレングリコール 15%
	熱容量	4.1 MJ/m ³ /K
	熱伝導率	0.51 W/m/K
	粘度	3.7 × 10 ⁻³ kg/m/s
密度	1.016 × 10 ³ kg/m ³	
運転条件設定	熱媒体流量	運転時のみ 35m ³ /day
	地中熱交換量	各施設の熱負荷量に COP を与えて算出した。

ここで、必要となる熱交換器長さは、各施設の熱交換量を与え 3 年間の稼働シミュレーションを行い、計算時に以下の基準値（^{しきい値} 閾値）を満たす最短の長さとししました。

暖房時は、地中熱交換器入り口の熱媒体温度の平均値が -2 よりも下がらないこと
冷房時は、地中熱交換器への入口熱媒体温度が 35 よりも高くないこと

- 上記の閾値を満たす熱交換器の長さが 100m 以内の場合は、地中熱交換器の延長を 5m 毎に変化させ、相当する最短の熱交換器長さを算出しました。
- 熱交換器最短長さが 100m を超える場合は、施工性などを考慮して熱交換器 1 本の長さは最大 100m で固定して、モデルに与えている地中熱交換量を、想定する熱交換器の本数で除した値で稼働シミュレーションを行いました。この時、想定する熱交換器の本数は 0.1 本（熱交換器長さ 10m）毎に変化させ、閾値を超過しない最小の熱交換器必要本数を 0.1 本単位で算定しました。

<平均可能採排熱量について>

平均可能採排熱量とは、10年間一定の稼働条件で採排熱を繰り返した場合に、10年目の冷暖房のそれぞれのシーズンにおいて採熱・排熱可能な熱量を、地中熱交換器の長さで除し、1mあたりの熱交換量として算出した値です。詳細な算出方法を以下に示します。

平均可能採排熱量の算出方法は、地中熱交換器の長さを30m、および100mと設定し、地中熱交換器の入口温度を暖房期は5、冷房期は35、流量20L/min、期間中は24h/day運転と固定した条件で10年間の稼働シミュレーションを実施し、10年目の採熱量および排熱量を集計してそれぞれの平均値を算出することとしました。その他の、熱交換器システム設定は表2-2と同様の設定を用いています。

また、可能採排熱量計算時の冷暖房稼働期間は図2-10に示すとおりです。冷房期間は日平均気温(2010年)が26以上、暖房期間は14以下となる日を対象として、この期間は24時間連続で運転を行う設定としました。

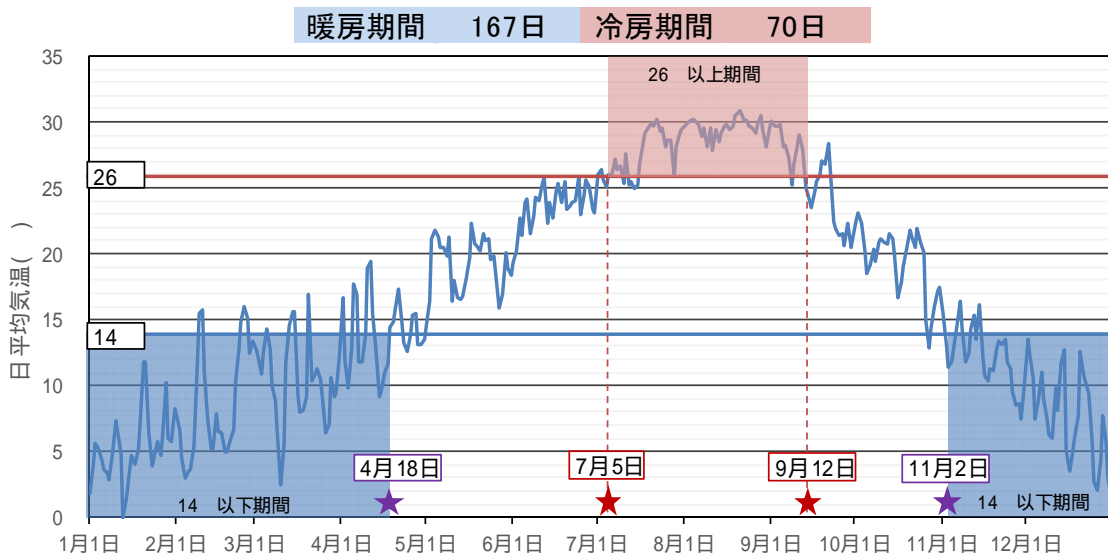


図 2-100 可能採排熱量計算時の冷暖房稼働期間

2.4 利用上の注意

地中熱利用について、現状では、認知状況が十分でないことに加え、初期投資における掘削費用の検討や地中熱採熱管の設計などが専門的であることが原因で、建物建設時や空調設備の再設置時の基本設計において空気熱源のエアコン等との比較検討案として採用されにくいことが課題となっています。そこで、本地中熱ポテンシャルマップでは、設計技術者の利用しやすさを考えて、建物種別ごとの採熱管長さ（本数）の分布図と採排熱量の分布図を提供しています。これまでに地中熱ポテンシャルマップの一つとして作られてきた有効熱伝導率の分布図では、初期投資における重要な項目である採熱管を設置するための掘削費用（主に掘削長さと掘削数が費用に影響する）がわかりにくいという課題がありました。そこで、建物種別ごとの採熱管長さ（本数）や採排熱量の分布図を（平均的な条件を想定した計算ではあるものの）図示することによって、大まかな初期投資を計算するための目安として利用することができます。

ただし、本地中熱ポテンシャルマップは、地層モデルや地下水流動解析モデルにより推定した見かけの有効熱伝導率を基にした計算結果であるため、地中熱ヒートポンプを利用した空調システム設計の概略計画段階で、他の空調システムとの比較検討を行う際の目安として利用することを想定しています。

したがって、空調システムの詳細設計を行う段階では、十分な採排熱量を確実に確保できるよう、現地での熱応答試験（TRT）のデータを利用するなどにより、正確なデータを取得して、現地地盤で測定した有効熱伝導率を用いた設計を行うことが望まれます。

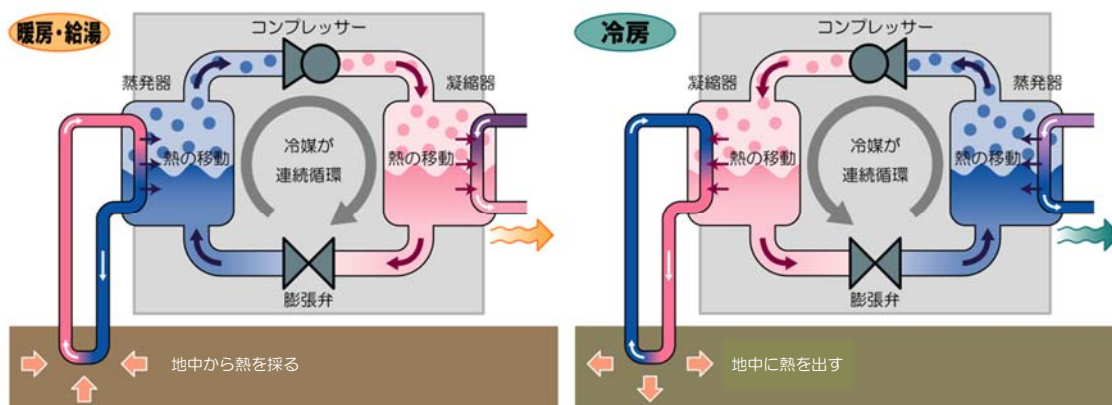
また、採熱管本数については、マップ上では空調システム全体を地中熱利用で賄うという考えで計算されていますが、実際には、敷地条件を考慮すると数十本の採熱管を狭い敷地に設置することが不可能な場合が想定されます。

したがって、実際の設計では、空気熱と地中熱をバランスよく利用するなど、ハイブリッドな空調システムを採用することが現実的と考えられます。特に、熱需要の大きな施設などを設計する場合には、マップで示される必要本数だけを見て導入が困難と判断せず、共有部分への部分的な導入などの可能性を検討していくことが重要です。

第3章 用語集

(1) ヒートポンプ

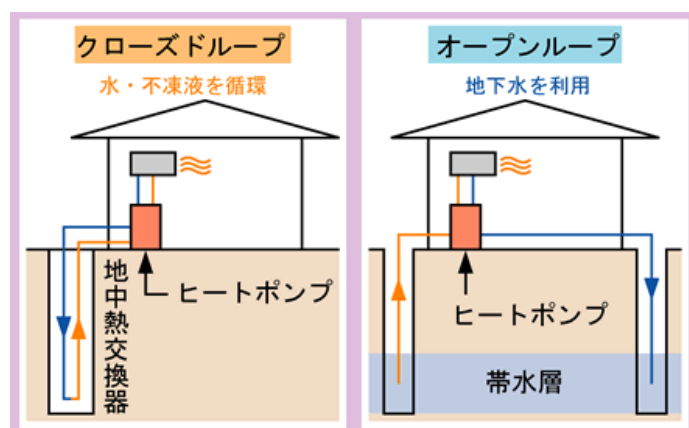
ヒートポンプとは、水や不凍液等の熱媒体を循環させて低い温度の物体（空気、水、地中等）から熱を奪い、高い温度の物体（空気、水、地中等）に伝える装置です(下図)。家庭のエアコンや冷蔵庫は一般的にこの技術を用いて空気との間で熱をやりとりしています。地中熱利用ヒートポンプは地中との間で熱交換を行う点が異なりますが、技術的には同じものです。図示した以外に、蒸発器または凝縮器の部分を地中に配管して直接熱交換を行う直膨式のヒートポンプもあります。



ヒートポンプで地中と熱をやりとりする仕組み

(2) クローズドループ方式

地中熱ヒートポンプシステムにおける熱交換方式の一つ。熱交換器をU字管(Uチューブ)と呼ばれる密閉された管を地下に埋設し、U字管の中にヒートポンプで熱交換された高温(冷房時) または低温(暖房時)の熱媒を通すことにより、周辺地盤と熱交換を行う。また、熱媒として、揚水した地下水を用いるオープンループ方式もある。



クローズドループ方式とオープンループ方式の概略図⁷

⁷ NPO 法人地中熱利用促進協会 ホームページ <http://www.geohpaj.org/>

(3) 熱交換

物質の移動を伴わずに高温側から低温側へ熱が伝わる移動現象のこと。また、物質の中の熱の流れやすさを示す物性を熱伝導率と呼ぶ。地中熱利用システムの設計で用いる「見かけの熱伝導率」とは、地下水流動の影響により、地層本来よりも高い熱伝導効果が得られる際に、便宜的に移流の効果を見込んだ熱伝導率として評価したもの。

(4) 地中熱ポテンシャル

地中熱利用システムの導入域の判断材料として、理論的に推計されるエネルギー量（熱交換量など）を指標化したもの。ただし、あくまで推計値のため、システム設計の際には熱応答試験により正確な熱交換量を把握することが望ましい。

(5) 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。

(6) TRT

「Thermal Response Test」（熱応答試験）の頭文字をとって「TRT」と略す。実際の地中熱交換器に熱媒（水あるいは不凍液）を循環させ、循環水の水温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である。

(7) TCP

「Thermal Conductivity Profiling」（熱伝導率プロファイリング）の頭文字をとって「TCP」と略す。ボーリング孔を用いて、地中を電熱加熱し、深度毎の温度を測定することで有効熱伝導率の鉛直分布を計測する手法である。

第4章 参考となる文献・情報

【地中熱について】

- ✚ 環境省水・大気環境局土壌環境課地下水・地盤環境室：パンフレット「地中熱ヒートポンプシステム」
(https://www.env.go.jp/water/jiban/heatpump-sys_pamph.pdf)
- ✚ NPO 法人地中熱利用促進協会 web サイト (<http://www.geohpaj.org/>)
- ✚ 一般財団法人有明未利用熱利用促進研究会 web サイト (<https://arimiri.com/>)

【地中熱利用システム全般】

- ✚ 環境省水・大気環境局：地中熱利用にあたってのガイドライン改訂増補版（H30.3）
(<http://www.env.go.jp/press/files/jp/108674.pdf>)
- ✚ 国土交通省大臣官房官庁営繕部設備・環境課：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) (<http://www.mlit.go.jp/common/001016159.pdf>)
- ✚ NPO 法人地中熱利用促進協会監修、内藤春雄著：地中熱利用ヒートポンプの基本がわかる本、オーム社
- ✚ 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
- ✚ NPO 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
- ✚ 内藤春雄著：事例に学ぶ地中熱利用ヒートポンプシステム、オーム社