

地中熱利用と ZEB

— 地中熱の ZEB 導入事例と計算方法 —

(N)地中熱利用促進協会理事長

笹田 政 克

1. はじめに

ZEB はエネルギーの消費を抑え、再エネを活用することにより、年間通してのエネルギー収支をゼロにするという建築物であり、持続可能な社会であるべき姿を提示している。本稿では、再生可能エネルギーである地中熱を用いた高効率な地中熱ヒートポンプシステムを中心に、その他の地中熱利用方法にも触れながら、地中熱の ZEB 導入事例を紹介するとともに、地中熱ヒートポンプの設計について、設計手順と省エネ基準による計算方法などについて紹介する。そして最後に地中熱の普及に向けての課題について少し述べさせていただきます。

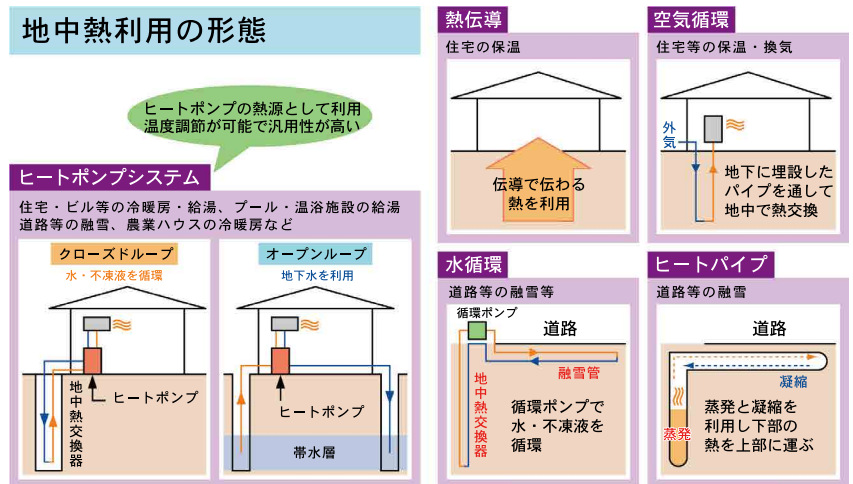
地中熱は国レベルで見ると、エネルギー基本計画、環境基本計画に再生可能エネルギーの熱利用の一つとして位置づけられている。また、パリ協定に基づく成長戦略の中でも、カーボンニュートラルなくらしや地域づくりに向けて、「外気温に影響されにくい地中熱、バイオマス熱等についても、地域の特性に応じて利用モデルを構築し、住宅・建築物への普及を促進する」と明記されている。

このような政策的な位置づけがなされてはいるものの、地中熱の建築分野での認知度はまだそれほど高くないので、本論にはいる前に簡単に地中熱利用の仕組みを振り返ってみたい。地中熱は主に太陽熱に由来する地中の浅いところにある再生可能エネルギーであり、年間通して一定の温度（年平均気温にほぼ等しい）のエネルギーである。従って温熱として使えるだけでなく、夏は冷熱としても活用できるのが特長である。地中熱の利用方法は、図-1 に示すような5つの方法に集約できる。これらのうち ZEB で活用されているのは、ヒートポンプシステムのクローズドループ（地中熱交換器を用いる）、オープンループ（地下水を利用することから、井水熱ヒートポンプとも

呼ばれる）、空気循環（クールチューブなどが相当）、水循環（地下水を放射冷房に利用）などがある。この5つの方法での地中熱利用の設備は、環境省（2019）の調査によると総計7,748件で、このうちヒートポンプシステムでの利用が最も多く2,662件（設備能力16万3千kW）である¹⁾。

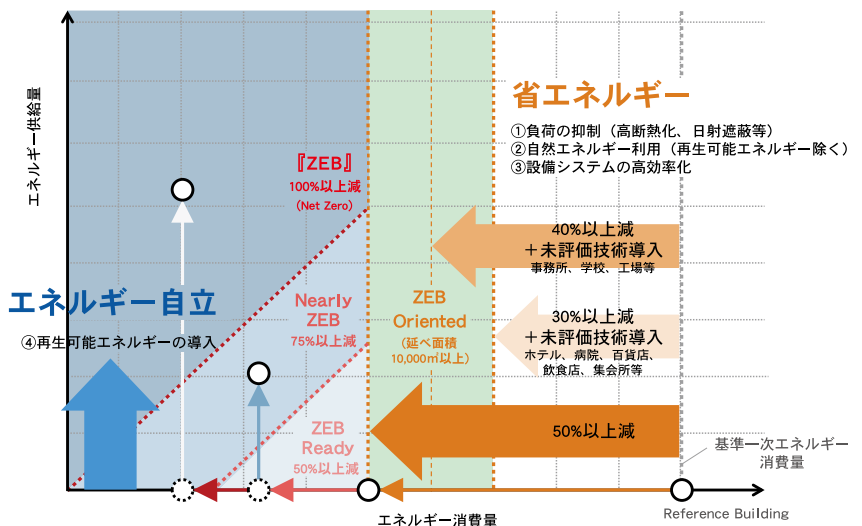
2. 地中熱の導入事例

ZEB はエネルギー削減率が100%以上の『ZEB』から、削減率75%以上の Nearly ZEB、50%以上の ZEB Ready、さらには削減率40%以上あるいは30%以上の ZEB Oriented（1万㎡以上の建物、削減率は建物用途により異なる）を含むものの名称となっている（図-2）。こ



資料：(N)地中熱利用促進協会

図-1 地中熱の利用形態



資料：経済産業省

図-2 ZEBの定義（イメージ）

表-1 ZEBリーディング・オーナーとして公開されている地中熱の導入事例

ZEB ランク	建築物の名称	建物用途	都道府県	地中熱利用				一次エネルギー削減率		
				空調	換気	給湯	パッシブ	備考	創エネ 含まず	創エネ 含む
『ZEB』	藤崎建設工業(株)本社ビル	事務所等	茨城県	○				井水熱HP	52%	108%
	(株)アリガプランニング事務所ビル	事務所等	北海道	○				地中熱HP・井水熱HP	56%	106%
	ダイダン(株)四国支店 エネフィス四国	事務所等	香川県	○			○	地中熱HP・クールチューブ	53%	101%
Nearly ZEB	MK-Tオフィスビル	事務所等	茨城県	○			○	井水熱利用高効率統合熱源システム	51%	100%
	竹中工務店	事務所等	千葉県	○				地中熱HP	56%	85%
	大和ハウス佐賀ビル	事務所等	佐賀県	○				井水熱利用空調システム	52%	81%
	開成町新庁舎	事務所等	神奈川県	○				地中熱HP	55%	79%
	金山精機製作所本社ビル	事務所等	京都府		○			地中熱利用	54%	77%
	東急コミュニティ技術研修センターNOTIA	事務所等	東京都	○				地中熱	69%	75%
	白鷺電気工業(株)本社ビル	事務所等	熊本県		○			地中熱利用換気システム	54%	75%
ZEB Ready	テラル(株)本社事務所棟	事務所等	広島県	○		○		井水利用システム	53%	75%
	江別葛屋書店C棟	物販店舗等	北海道	○				地中熱利用	67%	69%
	下地島空港旅客ターミナル	集会所等	沖縄県	○			○	井水熱利用空調・クールトレンチ	68%	68%
	札幌SBビル	事務所等	北海道	○				井水利用システム	60%	67%
	ダイダン(株)九州支社・スマートエネルギーラボ	事務所等	福岡県				○	クールトレンチ	52%	67%
	愛知学院大学名城公園キャンパス事務棟	学校等	愛知県	○				地中熱利用空調システム	56%	63%
	清水建設(株)四国支店社屋	事務所等	香川県	○				地中熱HP	55%	63%
	ゆめタウン廿日市	物販店舗等	広島県	○				地中熱HP	58%	59%
	すばる保育園	学校等	福岡県		○			地中熱利用換気システム	54%	60%
	特別養護老人ホーム愛の村	病院等	沖縄県				○	クールチューブ	52%	55%
	特別養護老人ホームかりゆしぬ村	病院等	沖縄県				○	クールチューブ	52%	54%
	やえせAssemble Garden	病院等	沖縄県	○				地中熱利用(クールチューブ)	52%	52%
	介護老人保健施設オー・ド・エクラ・介護付有料老人ホームオー・ド・エクラ	病院等	宮城県	○		○		地中熱HP	51%	51%

これらのうちZEB Orientedは2018年度に加わった新しいランクであるので、ここでは当初から定義されている3つのランクの建築物について地中熱の利用状況を述べる。

環境共創イニシアチブから「ZEBリーディング・オーナー」として公開されている導入事例217件のうち、地中熱に関連するキーワードが書かれている事例を拾うと、2019年9月時点で『ZEB』が4件、Nearly ZEBが7件、ZEB Readyが12件の計23件となる(表-1)。実際にはこの制度に登録されていない事例もあるので、地中熱を利用したZEBの実数は23件よりは多い。ここではリーディング・オーナー制度の事例集から、地中熱がどのように使われているかを概観してみた。

地中熱利用設備のある23事例を対象にして、地中熱の利用方法についてみるとヒートポンプによる空調が15件と最も多く、ついでパッシブ(クールチューブ)が7件となっている。またアクティブなシステムとして地中熱を換気に用いている事例が3件あり、ヒートポンプを空調だけでなく給湯にも用いている事例が2件ある。建物用途では事務所が14件と最も多く、次いで福祉施設(病院等の区分)、物販店舗、学校、空港ビル(集会所等の区分)となっている。地域的には全国に散らばっているが、冷房負荷の大きい沖縄県が4件(うち3件はパッシブ)、暖房負荷の大きい北海道が3件(全て空調)と、南北の両端で多い

のが特長といえるかもしれない。

空調での地中熱利用は、ヒートポンプの熱源に地中熱交換器(ボアホール方式、水平埋設方式)を用いるクローズドループと、地下水(井水)を用いるオープンループ(リーディング・オーナーの事例集では井水熱と記載されている)の2つの方式が採用されている。これらの地中熱利用システムの建物側には、床吹き出し空調、放射空調、潜熱顕熱分離システムなどの高効率で快適な室内空間をつくるシステムが採用されている事例が多い。ヒートポンプを介した地中熱利用では、利用側の温度と熱源との温度の差が、空気熱利用のシステムに比べて小さいので、エネルギーの利用効率が高く、大幅な省エネが実現できる。また、建物によってはヒートポンプを用いずに地下水を熱交換した冷水を放射空調に用いており、さらに大きな省エネが実現できている。

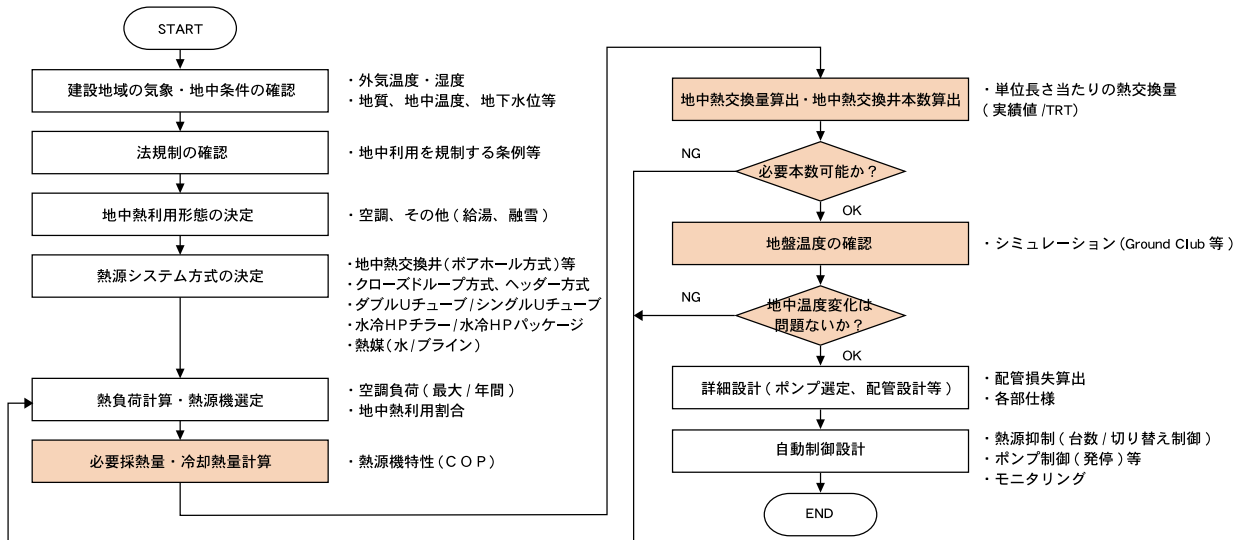
また、地中熱ヒートポンプの特長として、高い省エネ性とともピーク電力の低減効果がある。後者の特長はBCPで活用できる。エネルギーの持続的利用を考える時に、地球環境の保全は重要な視点になるが、わが国のような自然災害が多発する国の場合は、災害時に自立的に機能が持続できることも重要な要素である。このような視点から地中熱利用を採用している建物に大和ハウス佐賀ビルがある。

3. 計画段階で考慮すること

地中熱はどこでも利用できる再生可能エネルギーであるが、計画段階で考慮す

べきことがいくつかある。地中熱ヒートポンプは一般にオープンループ(井水熱)の方がクローズドループに比べて経済性が高いので、計画段階での優先順位が高くなるが、地盤沈下を経験した東京、大阪などの大都市圏では揚水規制があり導入は難しい。また、水質に問題があるところは避けた方よい。一方、扇状地で砂礫層中に多量の地下水が流れているような地域は、一般にオープンループの適地といえる。ZEBではないが伊東豊雄氏設計の「ぎふメディアコスモス」や坂茂氏設計の「静岡県富士山世界遺産センター」はオープンループでの地中熱利用事例である。

一方、地中熱交換器を用いるクローズドループは制約のある区域は少なく、ほぼ全国どこでも利用できる。ただし、地盤条件により採放熱効率が異なるので、この点は留意すべきである。地盤の有効熱伝導率が高い地域に施設を計画すれば、より効率的に地中熱が利用できる。一般に花崗岩などの岩盤は有効熱伝導率が高い。都市が立地していることが多い沖積層は岩盤に比べて有効熱伝導率は低いが、地下水流がある場合は採放熱効率が高くなり、地中熱利用に有利になる。これは地下水流による熱の移流効果による。建築予定地の有効熱伝導率は、サーマルレスポンス試験を実施することにより求めることができるが、計画段階では自治体などが作成している地中熱ポテンシャルマップで、有効熱伝導率や地下水流の概要を知ることができる。



資料：(N)地中熱利用促進協会空調設備講座テキスト

図-3 地中熱を利用した空調熱源設備の設計フロー

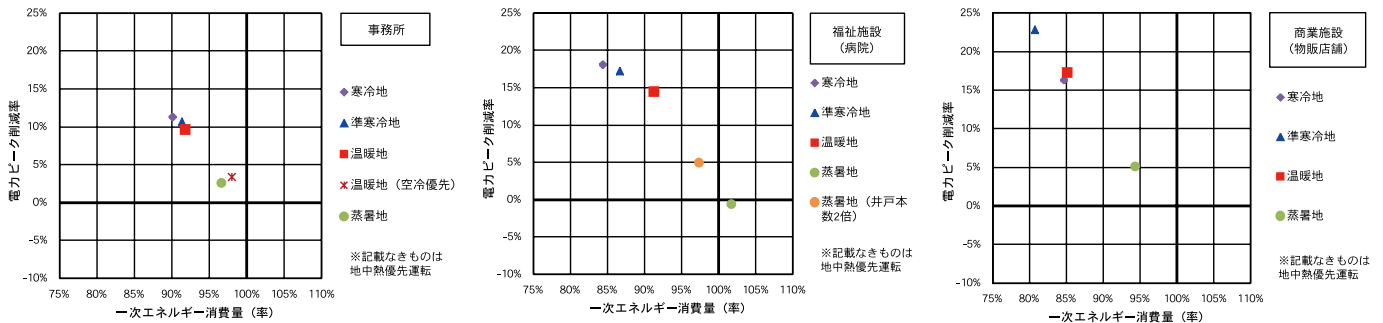


図-4 地中熱ヒートポンプ（複合システム）と空気熱ヒートポンプの比較電力ピーク削減と省エネルギー効果²⁾

4. 設計手順と留意点

オープンループの場合は、地下水の温度を熱源水温度として設計するが、クローズドループの場合は、利用に伴い熱源水の温度が変化するので、その計算ができる設計ソフトが必要となる。海外のものを含めるといくつかのソフトがあるが、国内で開発されたものとしては、北海道大学の Ground Club と国土交通省の LCEM が利用できる。クローズドループの地中熱ヒートポンプシステムでの空調熱源設備を設計する場合の手順を図-3に示す。

ここで、クローズドループで地中熱利用する場合の、設計時の留意点について述べたい。地中熱利用では、冬は温熱が夏は冷熱が利用できるため、ヒートポンプが高効率に運転できるが、どちらかに偏重した利用を続けると地中熱交換器周辺の地温が低下あるいは上昇し、その変化幅が大きいと運転効率の低下を招く。設計時にはこのような事態にならないよう熱源水温度の長期にわたる変化をシミュレーションで確認し、適切な地中熱

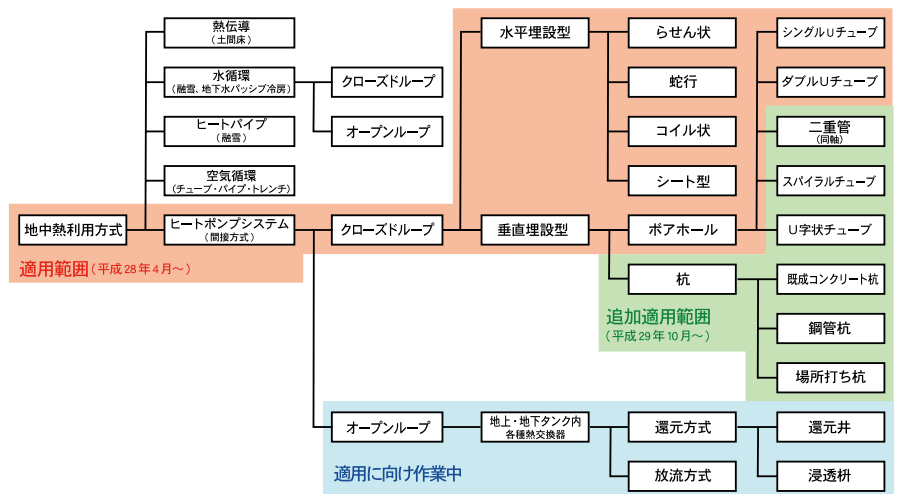


図-5 エネルギー消費性能計算プログラムの適用範囲（国土政策技術総合研究所・建築研究所の資料³⁾に基づき、(N)地中熱利用促進協会にて編集）

交換器の長さを求めているが、一般的には冷房と暖房のバランスがよい運転が望ましいといえる。一方、現実を見ると例えば6地域にある大型ビルは冷房過多である。このようなケースでは地中熱ですべての熱負荷を賄うのではなく、空気熱ヒートポンプなどの他の熱源機と組み合わせで運転し、地中での採放熱の balan

スをとることが望ましい。熱源機の運転順位で省エネ性の高い地中熱を優先させ、ベースロード熱源として性格を持たせて計画的に運転することができれば、省エネ性の向上とともに地中熱設備のライフサイクルコストの向上にも役立つ。

地中熱を優先にして地中熱ヒートポンプと空気熱ヒートポンプを運転させ、空

本計算方法における地中熱交換器の分類	シングルUチューブ	ダブルUチューブ	大口径固体充填	間接型水充填	直接循環型水充填
充填材	珪砂、豆砂利、コンクリート等(固体)			水等(液体)	
単一熱交換器中のパス数 [※]	1パス	2パス以上	1パス以上		熱交換器中の充填水と直接交換
ポアホール孔径 杭径	200mm以下		200mm超		—

地中熱交換器の例

名称	シングルUチューブ	ダブルUチューブ	スパイラルチューブ	U字状チューブ	既成コンクリート杭 (固体充填)	鋼管杭 (固体充填)	場所打ち杭	既成コンクリート杭 (水充填)	鋼管杭 (水充填)	二重管 (同軸)
方式	ポアホール	ポアホール	ポアホール	ポアホール	杭	杭	杭	杭	杭	ポアホール
水平断面図 (例)										
垂直断面図 (例)										
材質 孔径・杭径 (例)	高密度ポリエチレン (Uチューブ) 孔径100~200mm	高密度ポリエチレン (Uチューブ) 孔径110~200mm	高密度ポリエチレン 孔径約500mm以上	架橋ポリエチレン管 孔径約300mm以上	杭：コンクリート 内管：高密度ポリエチレン(Uチューブ) 孔径約500mm以上	杭：スチール 内管：高密度ポリエチレン(Uチューブ) 孔径約200mm以上	杭：鉄筋コンクリート 内管：高密度ポリエチレン(Uチューブ) 孔径約500mm以上	杭：コンクリート 内管：高密度ポリエチレン(Uチューブ) 孔径約500mm以上	杭：スチール 内管：高密度ポリエチレン(Uチューブ) 孔径約200mm以上	外管：スチール 内管：ポリエチレン、 塩ビなど 孔径約200mm以下
充填 熱媒	珪砂、豆砂利、 コンクリート 水・不凍液	珪砂、豆砂利、 コンクリート 水・不凍液	珪砂、豆砂利 水・不凍液	珪砂、豆砂利、 コンクリート 水・不凍液	珪砂 水・不凍液	珪砂 水・不凍液	コンクリート 水・不凍液	水 水・不凍液	水 水・不凍液	水 水

※パス数：一つの中熱交換器の中の熱媒を通す経路数をここでは「パス数」と呼ぶ。例えばシングルUチューブでは、地上から地中熱交換器に入り地表に戻る配管は「経路」であることから「1パス」となる。このときに水平断面では2つの配管断面が現れることになる。

図-6 垂直埋設型地中熱交換器³⁾

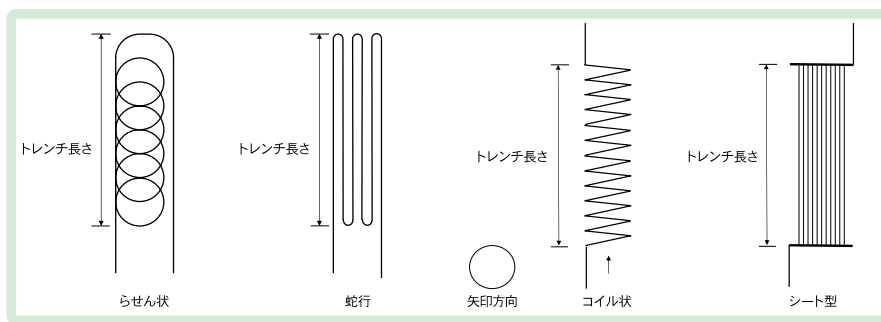


図-7 水平埋設型地中熱交換器³⁾

タイプのもので、杭方式では既成コンクリート杭（固体充填・水充填）、鋼管杭（固体充填・水充填）、場所打ち杭が選択できる。また、水平埋設型では、らせん状、蛇行、コイル状、シート型が選択できる。これらの形状については図-6、7を参照していただきたい。

また、地盤の有効熱伝導率については、以下の3つの方法のどれかで確認した値を用いることができる。

- ①サーマルレスポンス試験（TRT）による計測値を使う方法
- ②敷地内の地盤調査により得られた土質柱状図から算定する方法
- ③デフォルト値を使う方法

これらのうち望ましいものはサーマルレスポンス試験（TRT）で求めた現地の値である。この値を用いるには、データの品質確保の視点から、(N)地中熱利用促進協会が認定した装置を用い、同協会が作成したTRT技術書に従った手順により測定したものに限定することとなっている。

さて、このように地中熱交換器と地中熱ヒートポンプのデータを入力すると、計算設定ファイルの作成が行われ、地中熱交換器の熱交換能力が5段階で表示される。タイプ1が熱交換能力が最も低い区分で、能力が30W/m未満のもの（代表値20W/m）、タイプ5が熱交換能力が最も高い区分で、能力が90W/m以上のもの（代表値100W/m）である。この熱交換器のタイプ1~5を、地中熱交換器タイプ確認シートに記入し、建物関連

気熱100%の運転と比較するシミュレーションを国土技術政策総合研究所が行っている（図-4）。寒冷地、準寒冷地、温暖地、蒸暑地での建物種別ごとの計算が行われており、これにより地中熱利用の省エネ効果と電力ピークの削減効果の概略が見えてくる²⁾。

以上はクローズドループについての設計時の留意点であり、オープンループの場合は基本的には熱源水の温度変化はないので、エネルギー利用の効率性は持続できる。一方、オープンループの留意点として、揚水に用いるポンプ動力がある。ポンプ動力はクローズドループの場合も循環ポンプの消費電力が省エネ性の課題となるが、オープンループの場合はより比重が大きい。その対策として、必要以上にポンプを動かさないようにする熱源水の変流量制御などの方法がある。

5. エネルギー消費量の計算

設計確認ツールとしてのエネルギー消費性能計算プログラム（Webプログラム）には、省エネ基準が改訂された2013年には地中熱の計算プログラムがなかったが、クローズドループのうちポアホール方式と水平方式の計算が2016年に可能になり、さらに2017年には杭方式の計算もできるようになっている（図-5）³⁾。

エネルギー消費性能計算プログラムにおいて、地中熱ヒートポンプシステムを空調設備の「熱源機種」として選択した場合、入力に必要な項目は、地中熱交換器については種類、地中熱交換器長、地盤の有効熱伝導率 λ であり、地中熱ヒートポンプ（補機を含む）については、定格能力、定格消費電力の入力が必要である。

ここで地中熱交換器の種類については、垂直埋設型のポアホール方式ではシングルUチューブ、ダブルUチューブほか3

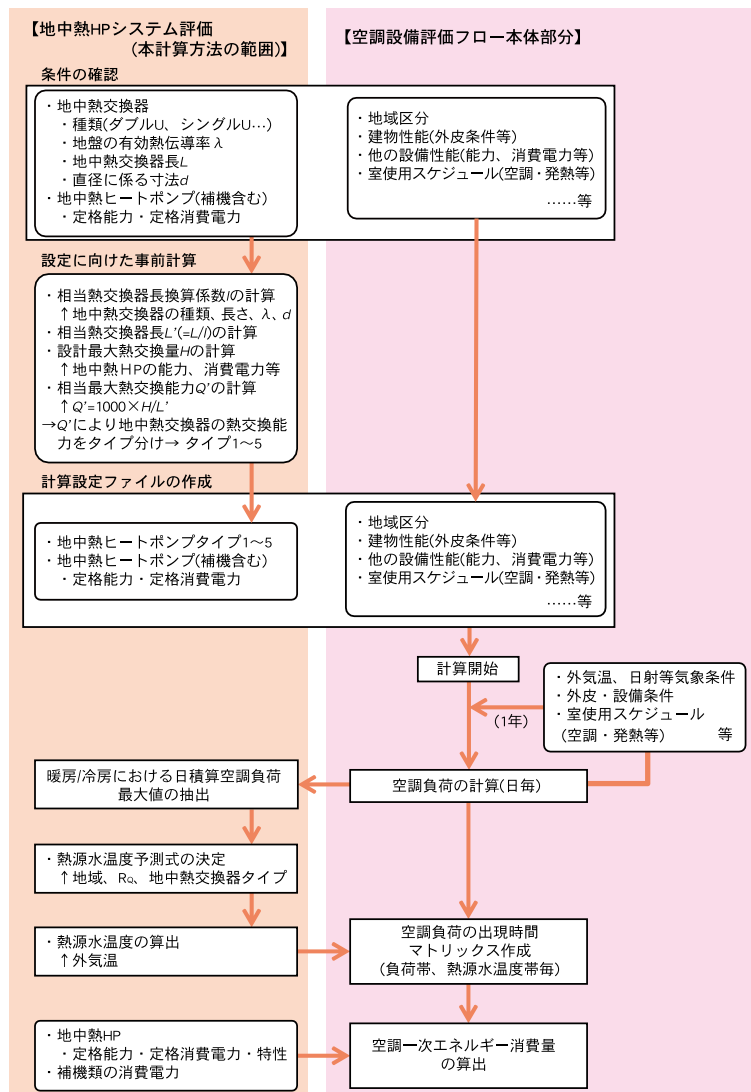


図-8 地中熱ヒートポンプの一次エネルギー消費量の計算フロー³⁾

られたエネルギー供給量は評価されていない。

一方、横軸のエネルギー消費量でも、地中から汲み上げられたエネルギーが使われていることが表示されるべきであるが、現実には表示はされていない。これは省エネ法で消費されるエネルギーに再生可能エネルギーが含まれないことによるものと考えられる。つまり、地中熱はいくら使おうと、ZEBの定義の図では縦軸と横軸の値が相殺される形になるので、まったく姿を現さない。強いて言うなら、横軸の値が通常の空気熱ヒートポンプより小さいという形で表現されているに過ぎない。脱炭素社会における再生可能エネルギーの重要性を鑑みたときに、地中熱利用の見える化が必要ではないだろうか。

もう一つ課題となるのが、地中熱ヒートポンプで利用されている再生可能エネルギー利用量の算定がオーソライズされていないことである。EUではヒートポンプの再エネ量が算定される仕組みができているが、日本の場合は空気熱同様この算定がされていない。これも政策上の課題である。

本稿で述べてきたように地中熱はZEBの中の活用が進んできている再生可能エネルギーであり、省エネ法的には、大きな省エネ効果がある。地中熱利用が初めて政策に取り上げられたのが、2009年のエネルギー供給構造高度化法であり、2010年の第3次エネルギー基本計画である。そろそろ発電に供される再生可能エネルギーのように地中熱についても利用状況が見える制度的枠組みができてよいのではないだろうか。

【参考文献】

- 1) 環境省：平成30年度地中熱利用状況調査の結果について <https://www.env.go.jp/press/106636.html>
- 2) 国土技術政策総合研究所：「電力依存度低減に資する建築物の評価・設計技術の開発」国総研プロジェクト研究報告 第53号
- 3) 国土技術政策総合研究所・建築研究所：平成28年省エネルギー基準（非住宅建築物）地中熱ヒートポンプシステムの熱源水温度計算方法 <https://www.kenken.go.jp/becc/building.html>

のデータとともに計算を行うことにより、図-8にある計算フローに従い、地中熱ヒートポンプを用いた場合の空調の年間一次エネルギー消費量が算出される。

6. 省エネ基準の整備

省エネ基準の計算の枠組みの中で、地中熱関係の計算プログラムの整備が進んできており、2019年9月の時点で、非住宅建築物に関しては、前述のようにクローズドループでは現在使用されている地中熱交換器の多くに適用できる計算プログラムができているが、地中熱交換器の計算モデルの作成は代表的な形状のものを対象にしているため、新規に開発された地中熱交換器や既存の地中熱交換器でもより複雑な構造をしているものについて、その性能が十分評価できない場合がある。そのような地中熱交換器の性能をより高い精度で評価する枠組みとして任意評定という制度が設けられており、すでに任意評定により評価された地中熱

交換器がある。

非住宅建築物のプログラムでは、現在オープンループの計算プログラムの作成が進んできている。住宅についてはヒートポンプの性能についてのより詳細なデータに基づいた計算プログラムの作成作業が進んできており、まず暖房を対象にした計算プログラムが利用可能になるものと期待している。

7. ZEBと再エネ量に関する課題

(公社)空気調和・衛生工学会によるZEBの「定義と評価方法」には、エネルギー供給量のところで評価される再エネについては、エネルギー供給構造高度化法の定義によると書かれている。地中熱はこの法律の施行令にある「大気中の熱その他の自然界に存する熱」の中に含まれるものであるため、本来ZEBの定義の図(図-2)の縦軸での評価があつてしかるべきであるが、現実には地中から汲み上げ