

## 低温熱交換システムの現状・地中熱

ゼネラルヒートポンプ工業株式会社 柴 芳郎

1. はじめに
2. ヒートポンプとは?
3. 地中熱利用
4. 地中熱ヒートポンプシステム
5. まとめ

### 1 はじめに

地熱の低温熱交換システムとして地中熱が利用されることが近年増えてきている。地中熱システムとは地中の熱を空気や水などの流体と熱交換して利用する技術であり、

- ・クールチューブ
- ・地中熱利用
- ・井水利用
- ・温泉利用
- ・帯水層蓄熱システム

などがある。

利用用途としては熱交換した流体をそのまま使うか、または、熱交換した流体を熱源としたヒートポンプを利用することによる冷暖房・空調・給湯・プール加温・浴槽加温・融雪・工場プロセス・農業・養殖など多岐にわたる。

地中熱は、

- ・マグマの熱伝達の低温部（マグマの影響を受ける地中熱）

という側面と、

- ・外気に比べて熱容量的に安定している熱溜（マグマの影響を受けない地中熱）

という側面がある。地中温度が高い温泉地帯を除くと、地表から深さ20～100m程度までの地中の温度は年間の平均外気温に近いと言われており、地熱の影響というよりもむしろ地表面の影響を大きく受ける。一方温泉地帯の場合は地中温度が高く、マグマ自体やマグマによって加熱された地下水（温泉）の影響を大きく受けている。

また、井水利用や温泉利用は地中の熱の影響を大きく受けているので広義の地中熱と呼ぶことができる。（井水はマグマの影響を受けない地中熱、温泉はマグマの影響を受ける地中熱と言える。）温泉については直接温浴水として利用することが多いが、温浴で使用後の温泉（温泉排湯）をヒートポンプの熱源として利用することも可能である。

地中熱利用には直接方式と間接方式があり、地下水（井水、温泉、帯水層等）を直接利用する方式が直接方式であり、地中熱交換器により地中の土壌と熱交換する方法や水-水熱交換器を用いて地下水（井水、温泉等）と熱交換する方式を間接方式と呼ぶ。

ただし、地中熱のみを利用する場合は取り

しば よしろう      ゼネラルヒートポンプ工業株式会社 開発部 次長  
〒459-8001 愛知県名古屋市緑区大高町巳新田121 TEL 052(624)6368

出しができる温度域が非常に狭く、利用方法が限られている。そこで、より広い温度域に対応するためにはヒートポンプを利用する必要がある。そこで、本文では地中熱利用ヒートポンプシステムについての解説を行う。

## 2 ヒートポンプとは？

ヒートポンプとは熱ポンプとも呼ばれ、文字通り熱を汲み上げる、すなわち、低温部から熱を奪い高温部へ熱を移動する装置である。逆に、同じことであるが、高温に熱を捨てて低温を生み出す装置もヒートポンプと呼ばれる。実は、我々の身の回りには、

- ・冷蔵庫（家庭用、業務用、ショーケース等）
- ・エアコン（家庭用、業務用、カーエアコン等）
- ・チラー（ターボ冷凍機、スクリーン冷凍機等）
- ・ヒートポンプ給湯機
- ・冷水器、ビールサーバー

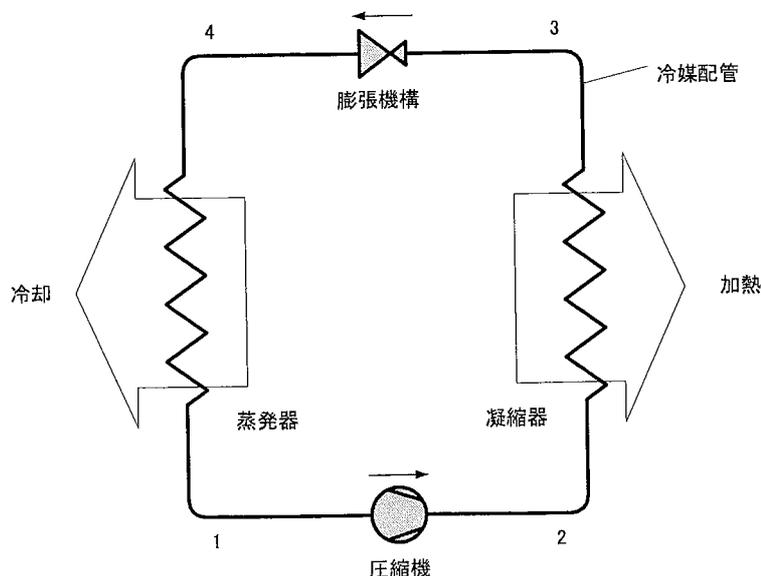
といったヒートポンプ技術製品が多く用いられている。

ヒートポンプの基本構成要素は

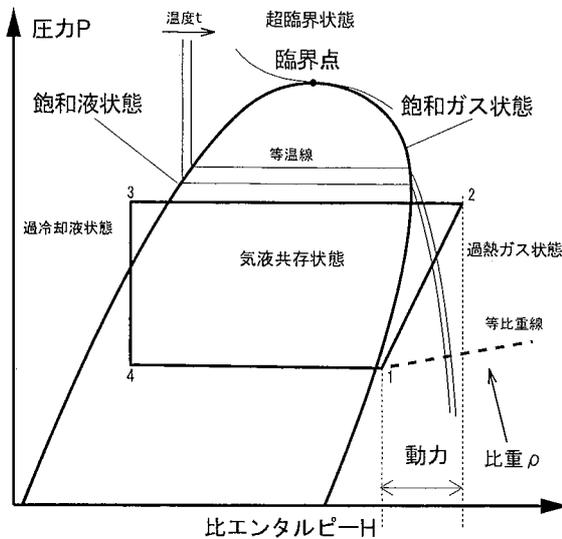
- ・圧縮機
- ・凝縮器（熱交換器）
- ・膨張機構
- ・蒸発器（熱交換器）
- ・配管
- ・冷媒

で構成され、外部動力により圧縮機を稼働させ、外部との熱のやりとりは凝縮器と蒸発器によって行う（第1図）。圧縮機、凝縮器、膨張機構、蒸発器は順に配管でつながっており、その回路内には冷媒が封入されている。冷媒は一般的にはフロンガス（フルオロカーボン）が用いられるが、近年はオゾン層破壊、地球温暖化影響の問題が明らかになってからは、二酸化炭素、アンモニア、炭化水素などの自然冷媒が用いられることもあるが、高圧、毒性、可燃性の問題から、現在のところ家庭用冷蔵庫やヒートポンプ給湯機をのぞいて主流にはなっていない。

回路中に封入された冷媒ガスは圧縮機で圧縮され高温高圧のガスとなり、凝縮器にて外部へ熱を放熱して冷媒は凝縮（液化）して高温高圧の液となる。高温高圧の液は膨張機構で減圧膨張し低温低圧の液ガス混合状態となり、蒸発器で外部から熱を吸収して冷媒液が



第1図 ヒートポンプサイクル



第2図 P-H線図 (モリエ線図)

蒸発し、再び圧縮機へ送られる。このサイクルを繰り返すことにより連続的に蒸発器で奪った熱を凝縮器で放熱する。

その蒸発→圧縮→凝縮→膨張→蒸発のサイクルの冷媒の状態を示す線図がP-H線図（またはモリエ線図とも呼ばれる）である（第2図）。Pは冷媒の圧力、Hは冷媒のエネルギー量を示す比エンタルピーである。第1図、第2図に示す1～4の数字は

- ・ 1：蒸発後、圧縮前
- ・ 2：圧縮後、凝縮前
- ・ 3：凝縮後、膨張前
- ・ 4：膨張後、蒸発前

を示している。

ここで、蒸発器で吸熱した熱を $Q_{EV}$ 、凝縮器で放熱した熱を $Q_{CO}$ とすると、

$$Q_{EV} = Q_{CO}$$

となるわけではなく、圧縮機動力（正確には若干のロスがあるため、圧縮機により冷媒に加えられたエネルギーと言った方が正しいが、簡単のために圧縮機動力と呼ぶ）を $W$ とすると、

$$Q_{EV} + W = Q_{CO}$$

となる。つまり、蒸発器で吸熱した熱と圧縮機動力分の熱を合計したものが凝縮器で放熱

される。これは熱力学第一法則、すなわちエネルギー保存則を表しており、ヒートポンプシステムの全体のエネルギー収支が合致することを示している。

凝縮器や蒸発器のほとんどは冷媒-水熱交換器または冷媒-空気熱交換器が用いられているが、形状や構造は様々である。冷暖房用途の場合は冷媒回路中に四方弁を設置して、冷房と暖房で四方弁の向きを切り替えて凝縮器と蒸発器の機能を交換させる。

例えば、寒冷地以外でもっとも生活で慣れ親しんでいる冷暖房機器であるエアコンは、室内機と室外機に分かれておりそれぞれが冷媒-空気熱交換器タイプの凝縮器兼蒸発器を主体としており、圧縮機と膨張機構である膨張弁は通常室外機内に設置されている。（膨張弁は室内機に設置されている場合もある。）冷房時は室内機が蒸発器、室外機が凝縮器として作用し、室内から奪った熱を圧縮機動力分の熱とともに室外へ放熱する。逆に、暖房時は室外機が蒸発器、室内機が凝縮器として作用し、室外から奪った熱を圧縮機動力分の熱とともに室内へ放熱する。

### 3 地中熱利用

#### 3.1 地中熱交換器の種類

地中熱利用とは地中熱交換器により土壌と水またはブラインを熱交換し、その水またはブラインを利用する方法である。(希に、ヒートポンプサイクル中の冷媒と土壌を直接熱交換する方式や、ヒートパイプを用いる方式もあるがここではそれらの説明を割愛する。)

地中熱交換器は垂直型(第1表)と水平型

(第3図)のものがある。

垂直型地中熱交換器は大きく分けて

- ・ボアホール方式
- ・杭方式

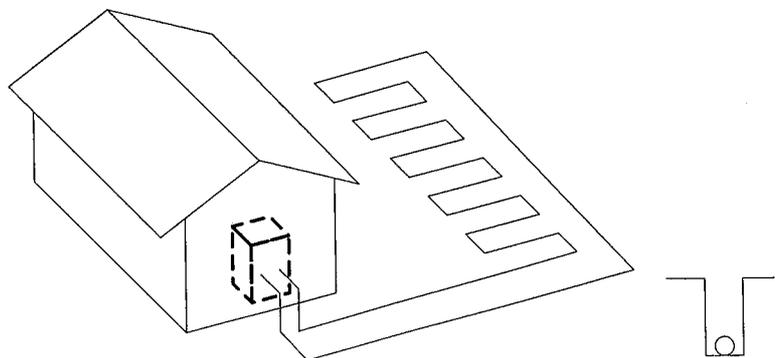
があり、ボアホール方式は地中熱交換器を設置するために空き地にボーリングを行う方式であり、杭方式は建物の基礎杭と地中熱交換器を兼用する方式である。

ボアホール方式には

第1表 垂直型地中熱交換器の種類

名称	シングル Uチューブ	ダブル Uチューブ	二重管	杭二重管	杭+ Uチューブ	現場施工杭 (場所打ち杭)
方式	ボアホール方式			杭方式		
断面図						
立面図						
材質	ポリエチレン、銅、ステンレス		外管: スチール、コンクリート 内管: ポリエチレン、塩ビ、スチール	杭: スチール、コンクリート 内管: ポリエチレン、スチール	杭: スチール、コンクリート 内管: ポリエチレン、銅、スチール、ステンレス	杭: 鉄筋コンクリート Uチューブ: ポリエチレン
流体	水、不凍液、冷媒		水、不凍液		水、不凍液、冷媒	
封入	管外: 土、グラウト材※		なし		グラウト材※、水	コンクリート

※グラウト材: コンクリート、ベントナイト、珪砂、豆砂利等



第3図 水平型地中熱交換器

- ・シングルUチューブ
- ・ダブルUチューブ
- ・二重管

がある。Uチューブとは高密度ポリエチレンパイプ2本の先端部をU字接続したものである。シングルUチューブ方式(写真1)は1本のボアホールに1セットのUチューブを入れる方式であり、ダブルUチューブ方式(写真2)は1本のボアホールに2セットのUチューブを入れる方式であり、二重管方式は鋼管またはコンクリート管を外管として、内管をその内部に設ける方式である。単位長さ当たりの採熱量は

シングルUチューブ < ダブルUチューブ  
< 二重管

と言われているが、コスト、施工、メンテナンスを考慮して選択する必要がある。

杭方式には

- ・杭二重管
- ・杭+Uチューブ
- ・現場施工杭(場所打ち杭)

がある。杭二重管はボアホール方式の二重管方式と同様に鋼管またはコンクリート管を外管として、その内側に内管を設ける方式であるが、基礎杭として兼用することが異なる。杭+Uチューブ方式は鋼管またはコンクリート管を外管として、中部にUチューブを用いる方式である。現場施工杭(場所打ち杭)方式は、工場または現場において鉄筋かごの外周または内周にUチューブ等の配管を行い掘削孔に挿入し、その後コンクリート打設を行うという方式である。

ここで注意しなければならないのは、循環する水やブラインは密閉されているため漏れがあってはいけない。特に二重管方式は漏れに注意しなければならない。また、鋼管やコンクリート杭で二重管方式を行う場合は錆やコンクリートの溶出成分が循環する水やブラインに悪影響を与えないように工夫する必要

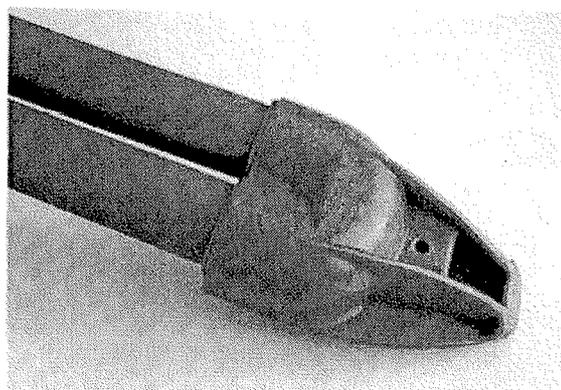


写真1 シングルUチューブ(イノアック社製)

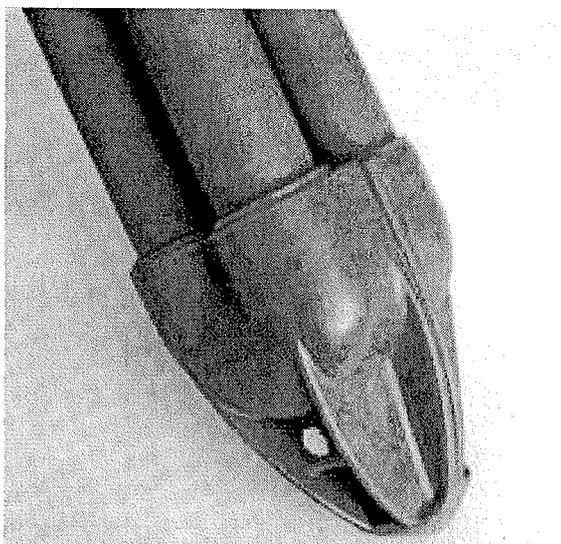


写真2 ダブルUチューブ(イノアック社製)

がある。

### 3.2 地中熱の利用

地中熱の利用としては

- ・融雪
- ・フリークーリング
- ・ヒートポンプ利用

がある。融雪は地中熱交換器で土壌と熱交換したブラインの熱を道路、駐車場、玄関口等の融雪・凍結防止として用いる。フリークーリングは夏期に冷房用として水またはブラインを循環させる。ヒートポンプ利用の場合は様々な利用方法があり、ある程度の温度範囲であれば地中熱交換器で熱交換した水またはブラインを熱源水(冷却水)として水冷式ヒートポンプによる加熱、冷却を行うこと

ができる。

## 4 地中熱ヒートポンプシステム

### 4.1 地中熱ヒートポンプシステムの種類

地中熱ヒートポンプシステムは大きく分けて

- ・水（ブライン）－水（ブライン）方式
- ・水（ブライン）－冷媒方式

が主流である。水－水方式（第4図）は水－水ヒートポンプすなわち地中熱対応水冷式ヒートポンプチラーを用いる方式であり、冷水または温水を生成するシステムである。生成された冷水、温水により様々な用途に用いられる。水－冷媒方式（第5図）は水－冷媒ヒートポンプを用いる方式であり、現状では地中熱対応水冷式マルチエアコンによる冷暖房で用いられる。

水冷式パッケージエアコンや水冷式マルチ

エアコンは一般的には水を用いる方式であり、セントラル方式の二次側冷温水の一部を熱源とするか、ボイラーと冷却塔による熱源水を熱源とするが、地中熱の場合は熱源として地中熱交換器により熱交換した水またはブラインを用いる。

水－水方式、水－冷媒方式の両方において地中熱ヒートポンプの熱源水は多くの場合、凍結や水質による腐食等を考慮して、腐食防止剤入りのブラインが用いられる。

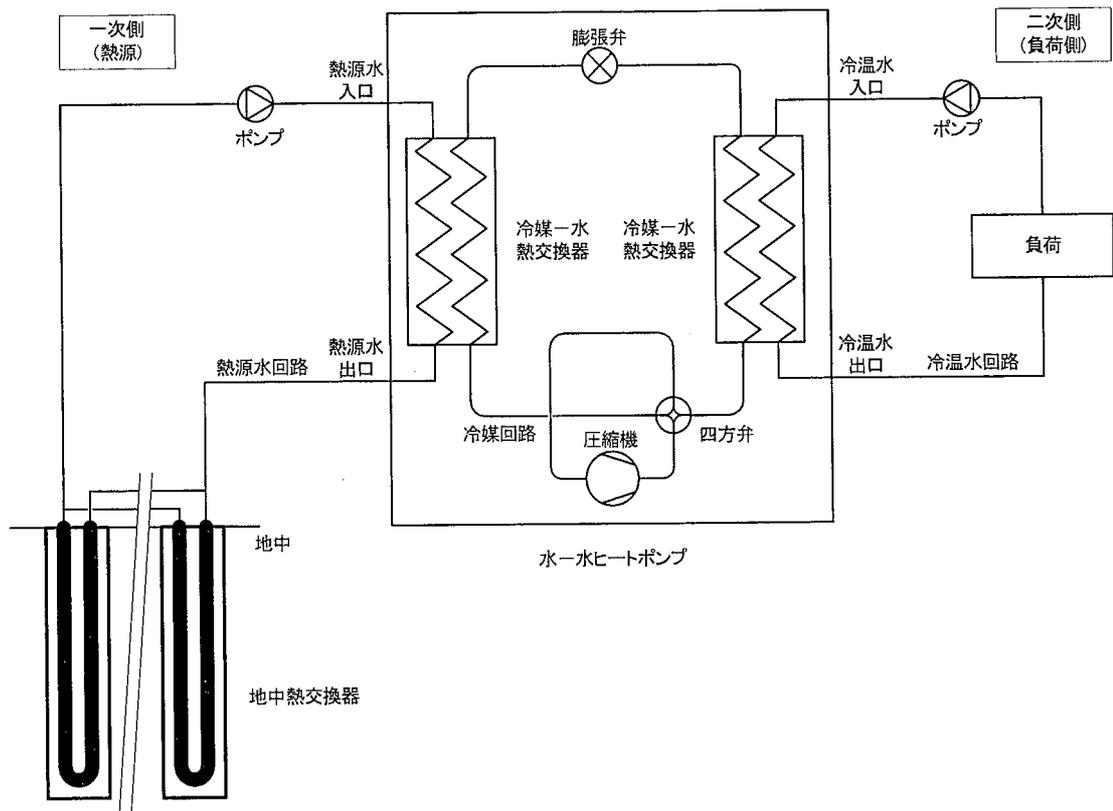
### 4.2 地中熱利用ヒートポンプシステムの利用方法

#### (1) 冷暖房

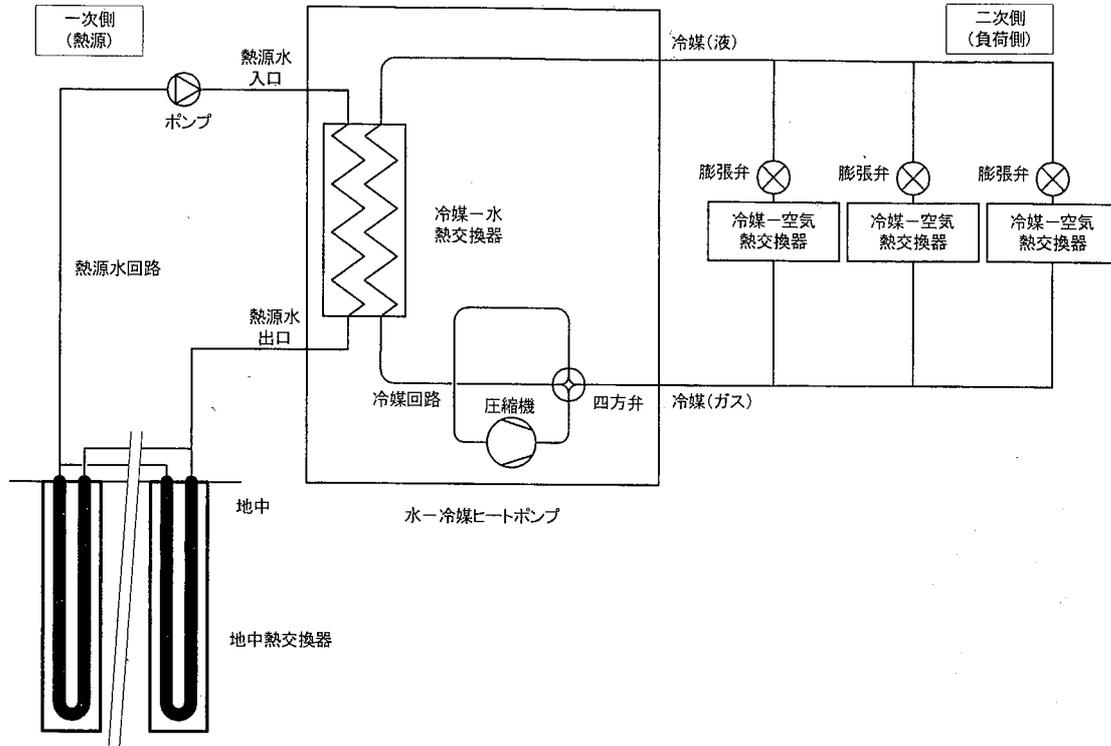
地中熱利用ヒートポンプシステムで最も利用されている用途が冷暖房である。

地中熱ヒートポンプで冷暖房を行う場合、水－水方式（第6図、第7図）と、水－冷媒方式（第8図、第9図）の2種類がある。

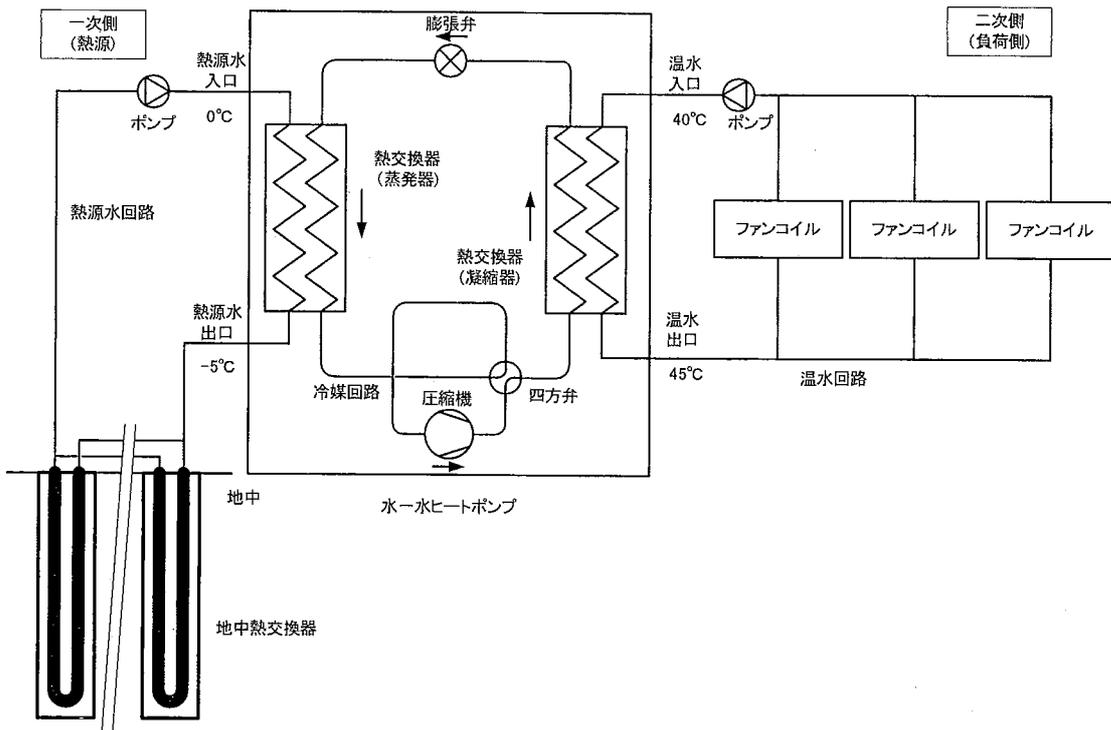
水－水方式の冷暖房の場合は、地中熱対応



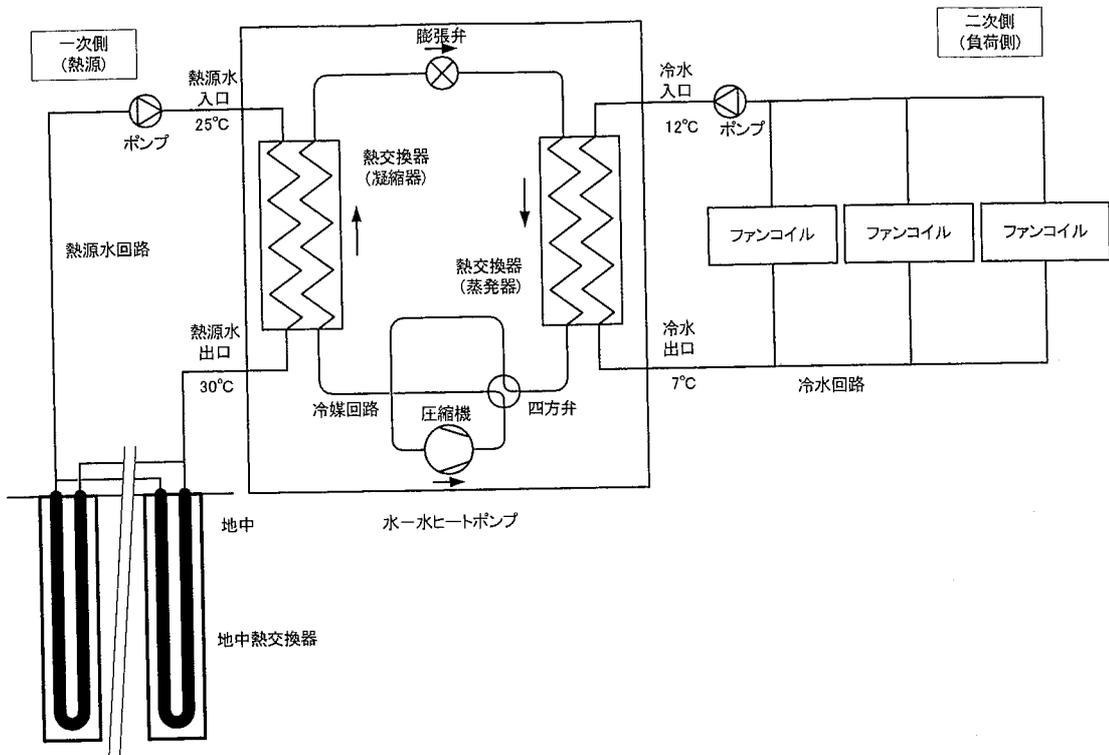
第4図 水－水ヒートポンプシステム



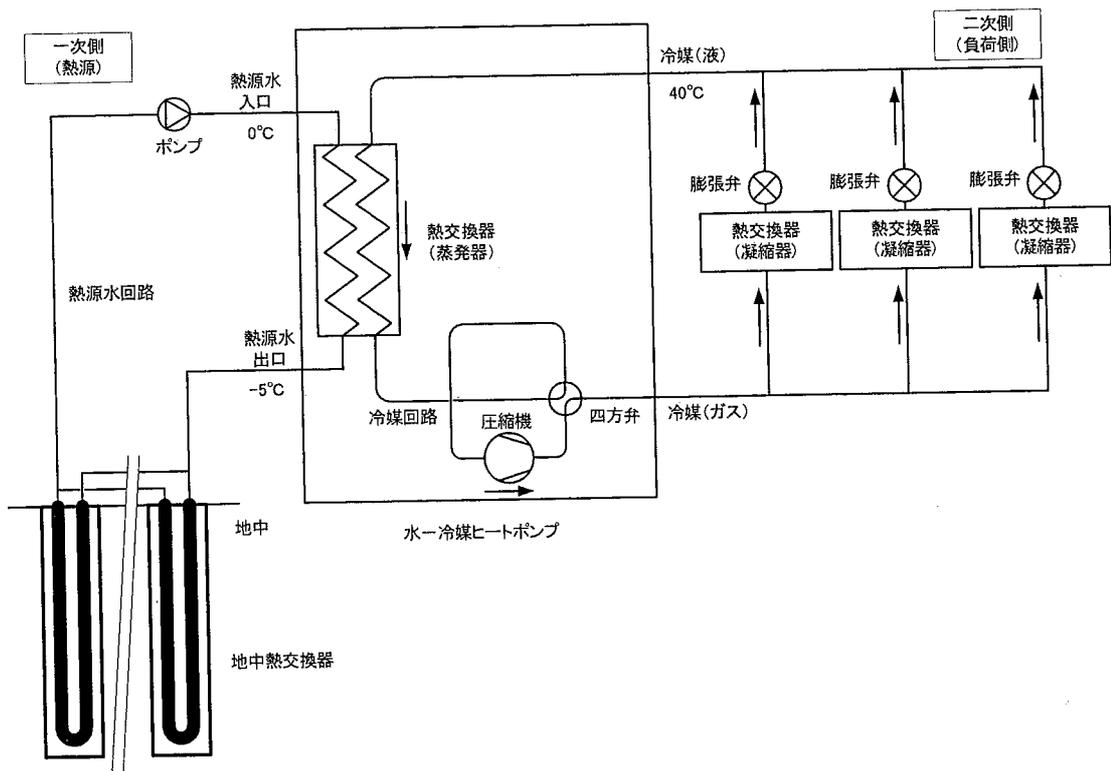
第5図 水-冷媒ヒートポンプシステム



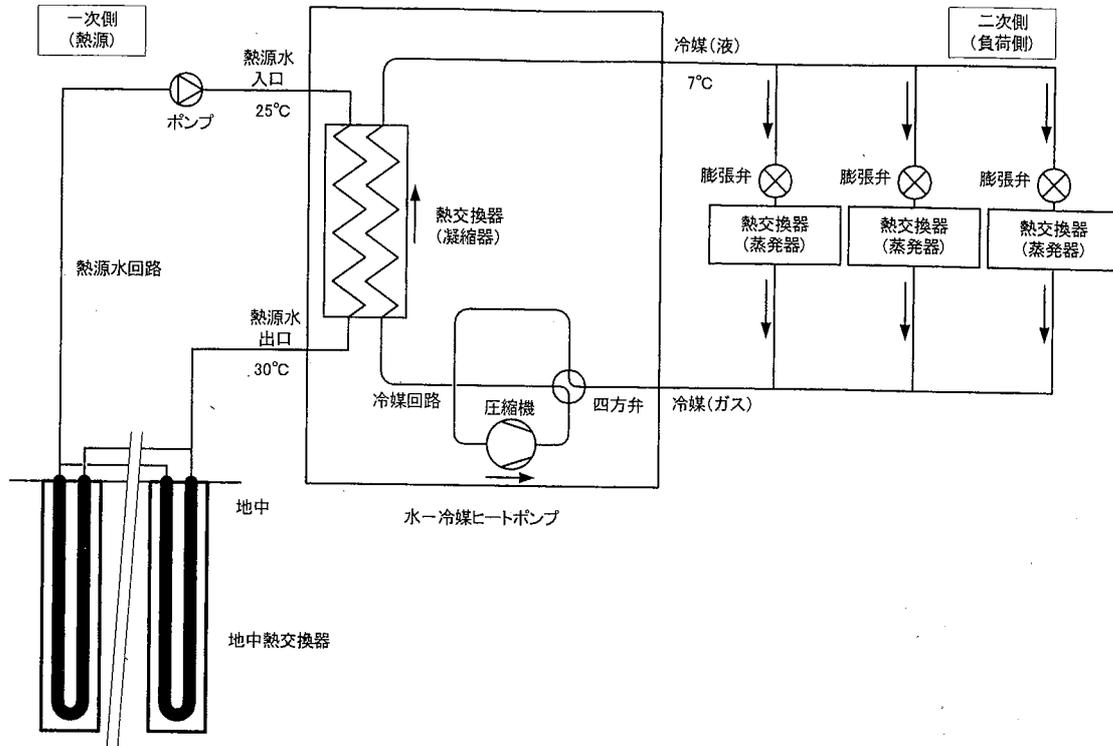
第6図 水-水ヒートポンプシステムによる暖房



第7図 水-水ヒートポンプシステムによる冷房



第8図 水-冷媒ヒートポンプシステムによる暖房



第9図 水-冷媒ヒートポンプによる冷房

水冷式ヒートポンプチラーにて冷温水を生成し、その冷温水を二次側へポンプで送り、ファンコイルまたはエアハンドリングユニットで冷風・温風を室内へ送る。通常は地中熱ヒートポンプで生成される冷温水の温度は冷房で5～10℃、暖房で40～50℃程度である。効率面を考慮すると、快適性を失わない程度で、冷房時の冷水供給温度を高くし、暖房の供給温度を低く設定した方が良い。

水-冷媒方式の冷暖房の場合は、地中熱対応水冷式マルチエアコンが用いられ、二次側配管は冷媒配管となり、専用の室内機により冷暖房を行う。マルチエアコンは室内機個別に温度設定が可能であり、スリーウェイ(3WAY)方式の場合は冷房・暖房同時運転が可能である。

## (2) 床暖房

床暖房の場合は水-水方式の地中熱対応水冷式ヒートポンプ(温水専用)が用いられる(第10図)。空冷ヒートポンプと異なり、デフロストが必要ないため、ヒートポンプには

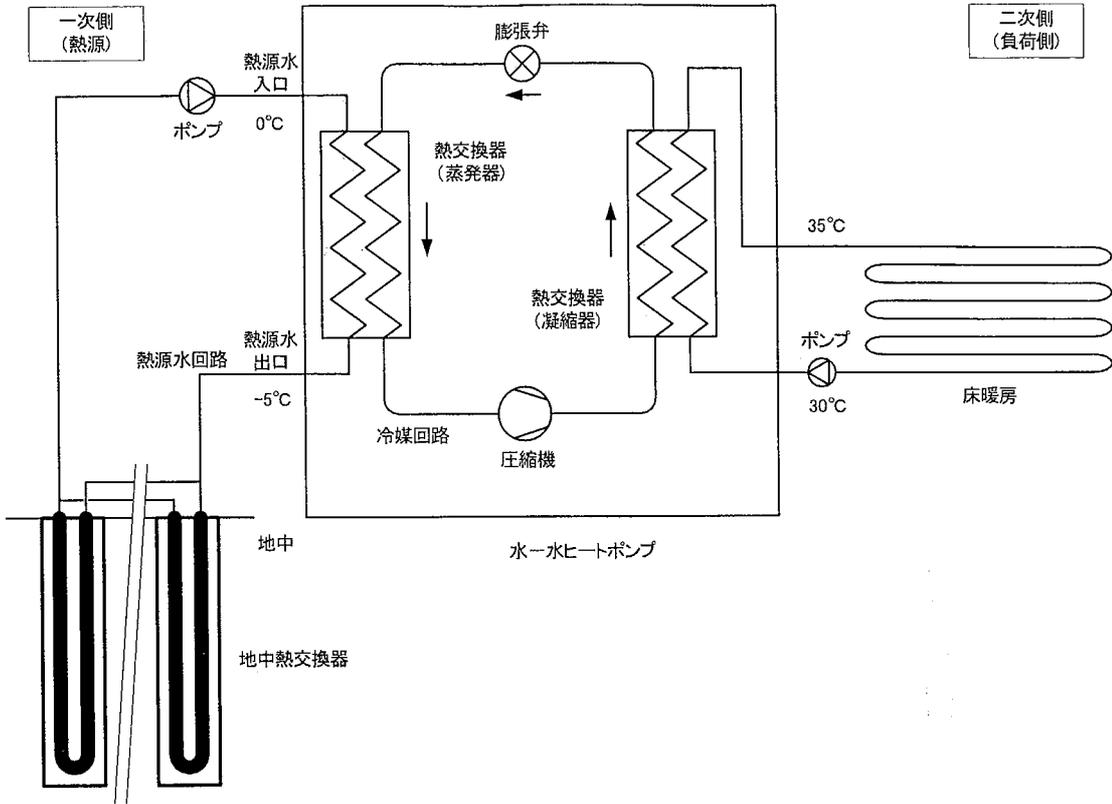
四方弁が必要ない。これは、床暖房だけでなく以下に述べる給湯、プール加熱・浴槽加熱についても同様である。

欧米では、高気密・高断熱住宅と床暖房を採用し、地中熱ヒートポンプにより床暖房への供給温水温度を35℃程度と低く設定している。こうすることにより、暖房で使用する温度40～50℃よりも低い温度となり、ヒートポンプの性能や効率が高くなり、イニシャル・ランニングコストを削減している。また、ファンコイルやエアコンの暖房よりも快適性が高い。

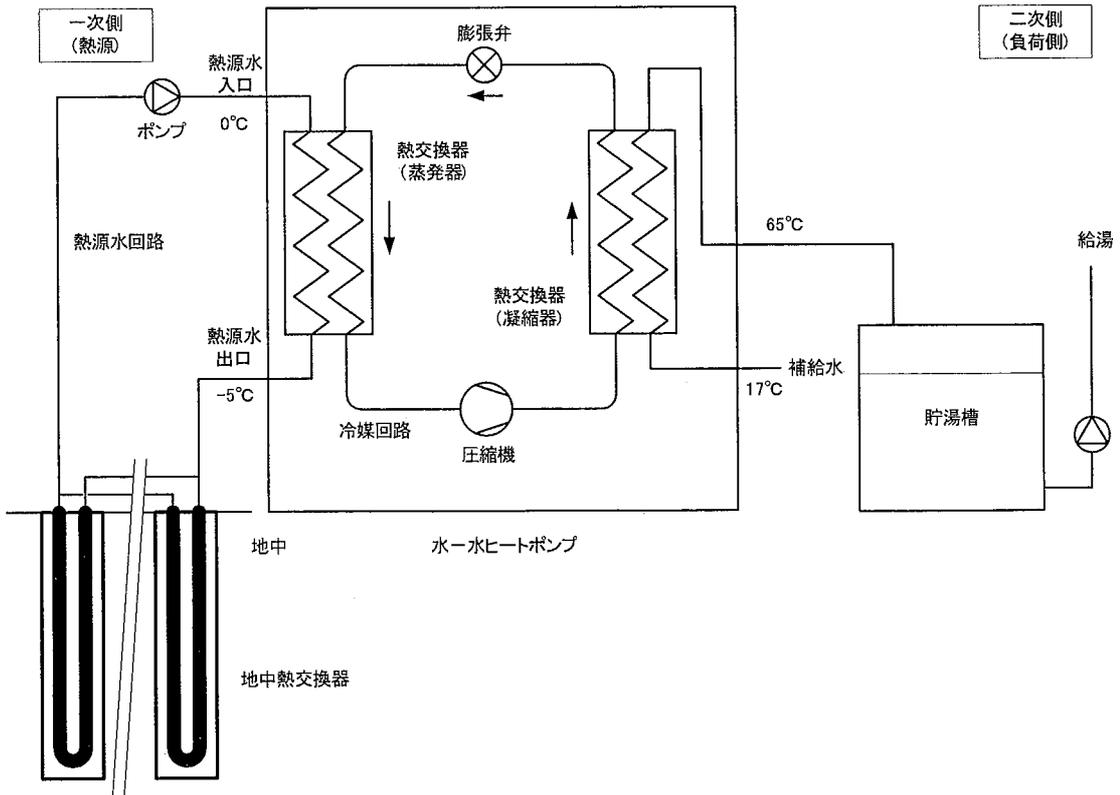
## (3) 給湯

地中熱ヒートポンプで給湯を行う場合は床暖房と同様に水-水方式の温水専用の地中熱対応水冷式ヒートポンプが用いられる(第11図)。

地中熱ヒートポンプによる給湯出口温度は40～70℃である。補給水から比較的大きな温度差により直接昇温する瞬間給湯と、5℃差程度で徐々に温度を上げてゆく循環給湯の



第10図 床暖房



第11図 給湯

2つの方式がある。特に、瞬間給湯の方は凝縮温度を低くできるため、循環給湯よりもCOPは高くなる。開放式貯湯槽に給湯を行う場合は、瞬間給湯を行い、水位により貯湯量を制御し、その貯湯槽の温度が低下したときだけ循環給湯を行う形をとると、循環給湯だけを行う場合と比較して給湯の期間COPが高くなる。また、密閉タンクを用いる場合は下部に補給水を入れ、下部からヒートポンプへ供給して大きな温度差でヒートポンプから温水を上部に供給する温度成層方式が有効である。密閉タンク方式の方が密閉回路なのでポンプ容量が小さくできるが、開放タンク方式はタンク内の温水がすべて給湯として利用できるため、大容量の給湯蓄熱が可能である。

(4) プール加熱・浴槽加熱

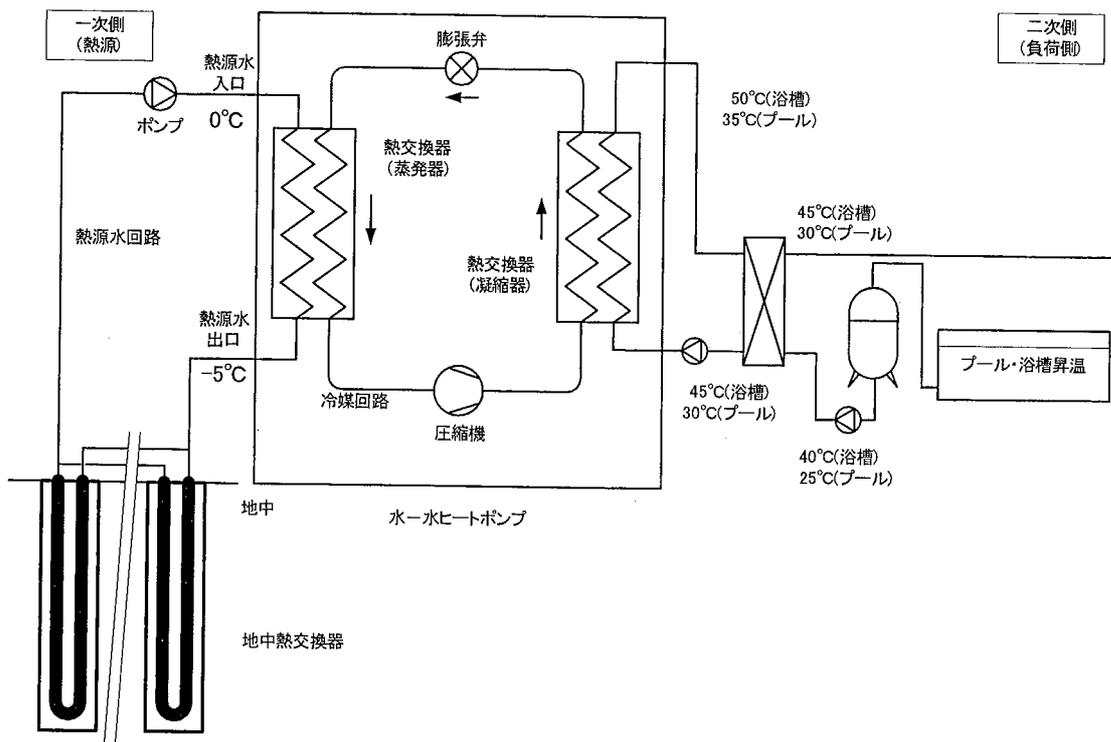
地中熱ヒートポンプでプール加熱・浴槽加熱を行う場合は床暖房、給湯と同様に水-水方式の温水専用の地中熱対応水冷式ヒートポンプが用いられる(第12図)。

温水プールの温度は25~40℃であり、ヒートポンプでの加熱に向いている。ただし、プール水は塩素注入やろ過が必要なため、ヒートポンプによる直接加熱はせず分解洗浄が可能な水-水熱交換器を介して加熱が行われる。

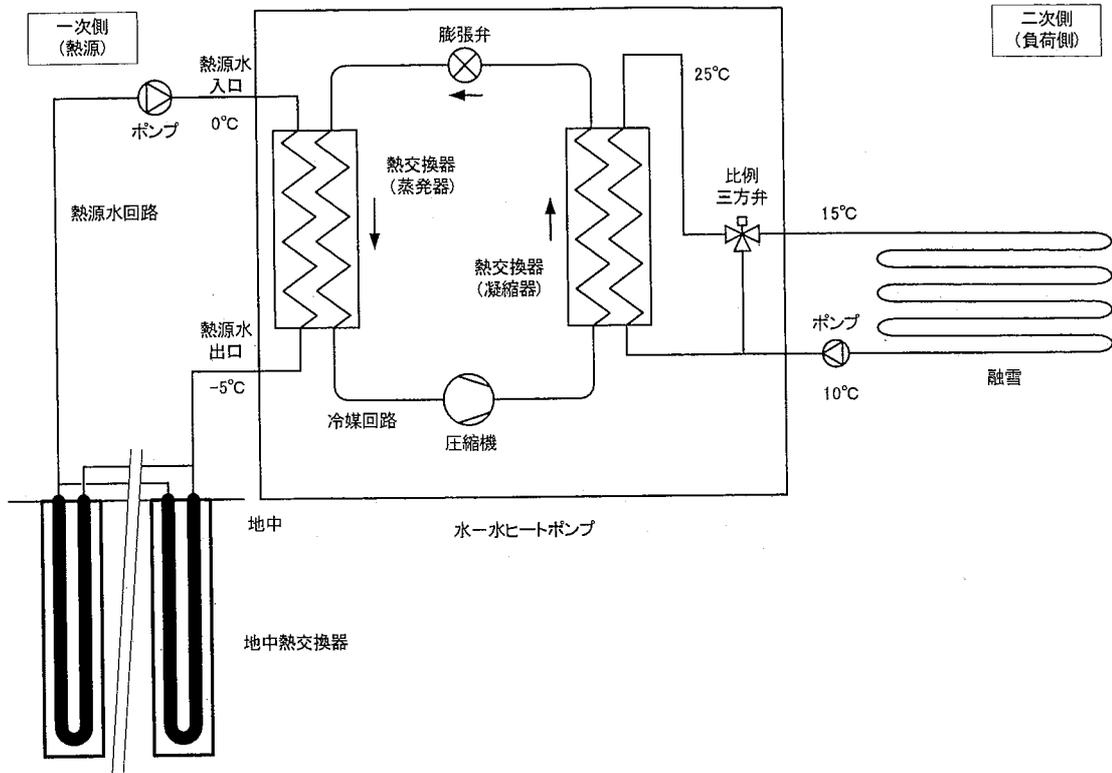
浴槽の温度は40℃前後であり、ヒートポンプでの加熱が可能である。浴槽は温泉成分や人の皮脂、頭髮等が混入しているため、プール加熱と同様にヒートポンプによる直接加熱は行わずに分解洗浄が可能な水-水熱交換器を介して加熱を行う。ヒートポンプが生成できる温水はボイラーに比べると温度が低いため、水-水熱交換器の設計温度差を小さく(熱交換器面積を大きく)選定する必要がある。

(5) 融雪

地中熱のみで融雪を行う場合、融雪への供給温度は地中温度以上にはできない。外気温度や降雪量等の設計条件で、融雪への供給温度が決まるが、供給温度が不足している場合



第12図 プール加温、浴槽加温



第13図 融雪

はヒートポンプを組み合わせることにより、供給温度を達成できる。

ヒートポンプで融雪を行う場合は床暖房、給湯、プール加熱・浴槽加熱と同様に水-水方式の温水専用の地中熱対応水冷式ヒートポンプが用いられる(第13図)。

融雪は床暖房とほとんど同じ形態をとるが、温水を循環させる温度は床暖房よりも低くなる。圧縮機には使用できる下限凝縮温度があるため、温水供給温度が低い場合は冷媒配管に凝縮圧力調整弁を取り付けるか、温水側に凝縮器とバイパスの水量を調整する比例3方弁を組み合わせる必要があり、凝縮温度(凝縮圧力)を調整する必要がある。

(6) 工場プロセス・農業・養殖等

上記利用のほかにも工場プロセスで冷却過程や加熱過程がある場合は、地中熱ヒートポンプを利用することが可能である。冷却については-20~20℃、加熱については20~70℃程度の温度域が利用できる。また、農

業や養殖についても工場プロセスと同様に地中熱ヒートポンプが利用可能である。

4.3 地中熱ヒートポンプの利点

水のポンプの場合は、くみ上げる水の高さ(揚程)に応じて動力が大きくなる。一方、ヒートポンプの場合は熱源と利用する温度の温度差が大きいほど圧縮機の動力が大きくなる。空冷ヒートポンプに対する地中熱ヒートポンプの利点は、地中温度と外気温の温度差で決まる。つまり、ヒートポンプの暖房、給湯などの加熱利用の場合は熱源温度が高いほどよく、冷房などの冷却利用の場合は熱源温度が低いほど良い。

また、空冷ヒートポンプによる暖房や給湯などの加熱利用の場合、冬季外気温が約5℃未満になるときは、室外機の蒸発器内の冷媒温度が氷点下になることから、冷媒-空気熱交換器表面に外気に含まれる水分が氷結して霜となり、時間が経つにつれて霜が成長する。霜が成長すると空気と冷媒の熱通過抵抗が増

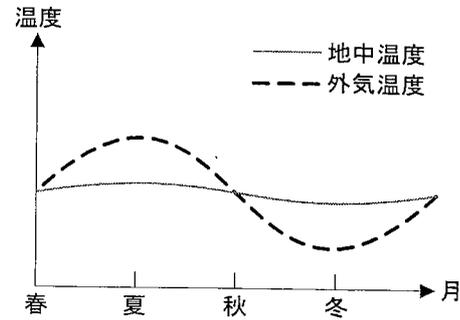
大し、冷媒の温度が低下することにより、ヒートポンプ性能が低下する。また、成長した霜は加熱しないと融けないため、ある一定の間隔（30分～1時間程度）でヒートポンプとしては冷却運転をして室外機を暖める除霜運転を（5～10分間程度）しなければならない。したがって同容量の圧縮機において、地中熱ヒートポンプに対して空冷ヒートポンプの平均能力は70～90%程度になってしまう。つまり地中熱ヒートポンプと同等の暖房能力を確保するためには空冷ヒートポンプの容量を増やさなくてはならない。つまり、コストアップとなる。

したがって、外気温度が5℃以下に低下する時間が1年を通して長い寒冷地においては、同能力の空冷ヒートポンプに比べて地中熱ヒートポンプの容量が小さくて済むため、省エネとなるとともにヒートポンプのコストを小さくすることができる。

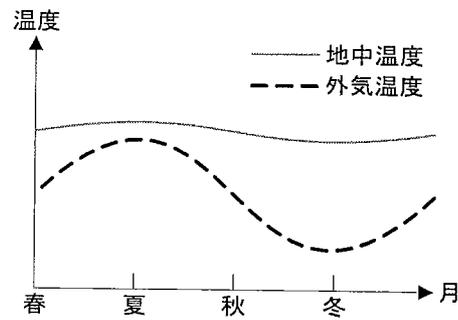
地中温度がマグマの影響を受けない場合、地中熱温度は年間を通して年平均外気温程度で一定になることから、外気温に比べて夏は低く、冬は高いために、地中熱を熱源としたヒートポンプシステムで冷暖房システムを構築すると外気を熱源とする空冷ヒートポンプに比べて高い効率を実現することが可能である（第14図）。

一方、地中温度がマグマの影響を受ける場合、年間を通して外気に比べて地中温度が高い場合がある（第15図）。この場合はヒートポンプの加熱利用が有利となるため、冷房負荷がほとんどない寒冷地の暖房利用や、給湯、床暖房、プール加温、浴槽加温等に有利となる。また、温泉排湯を熱源として利用する場合も同様である。

ただし、空冷ヒートポンプや他熱源方式（ボイラー、吸収式冷温水器、GHP、KHP等）に比べると、地中熱交換器等の設備費用が高いため地中熱ヒートポンプシステムはイニ



第14図 マグマの影響を受けない地中温度



第15図 マグマの影響を受ける地中温度

シャルコスト増となるが、そのイニシャル差を燃費でカバーできるかどうかを検討する必要がある。

また、地中熱交換器の容量が不足すると空冷ヒートポンプに対するランニングコストや環境コストのメリットが少なくなるため、地中熱交換器の容量選定には十分注意を払う必要がある。

## 5 まとめ

地中熱はマグマの影響を受けない場合は、冷暖房のヒートポンプ熱源として有利である。一方、マグマの影響を受けて地温が高い場合の地中熱や温泉排湯は寒冷地の暖房、給湯、浴槽加熱など加熱利用のヒートポンプ熱源として有利である。地中熱ヒートポンプシステムは適材適所で導入されれば省エネ効果があり、環境にやさしいシステムである。

参考文献

柴 芳郎・大岡龍三・関根賢太郎 (2004):  
地中熱源対応水冷式ヒートポンプチラーの  
開発, 空気調和・衛生工学会学術講演会講  
演論文 I, 1591-1594.  
柴 芳郎・大岡龍三・関根賢太郎 (2005):

場所打ち杭を用いた地中熱利用空調システ  
ムの普及・実用化に関する研究 (その12)  
水冷式ヒートポンプ高効率化のための性能  
計算プログラムの開発, 空気調和・衛生工  
学会学術講演会講演論文 I, 621-624.  
柴 芳郎 (2005): 講座「地下熱利用ヒート  
ポンプシステム」地中熱ヒートポンプの構  
造と特徴, 日本地熱学会誌, 27, 263-272.

# 地中熱源対応ヒートポンプ

国内出荷量シェアNo.1※1

高効率化開発※2

マルチタイプ新登場※3

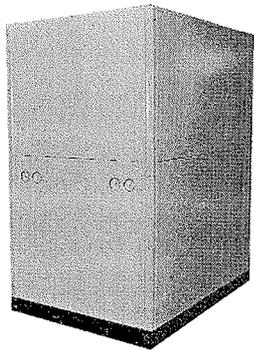
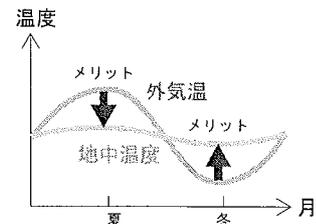
※1 地中熱対応ヒートポンプ容量合計、2007年4月現在

※2 NEDO「エネルギー使用合理化技術戦略的開発」(東京大学他と共同研究)による(水冷式ヒートポンプチャラー)

※3 2006年発売開始

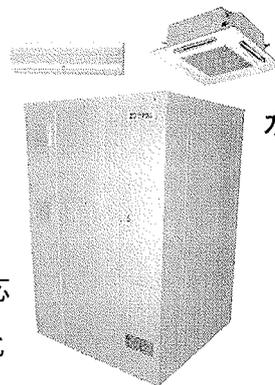
## 地中熱ヒートポンプの特徴

地中は外気に比べて夏は温度が低く、冬は温度が高いため空冷エアコンと比べて高効率となります。



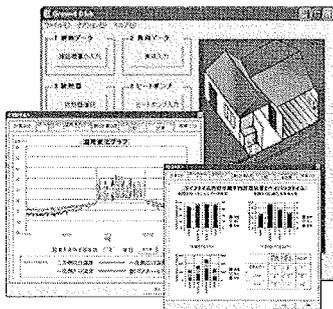
### 水冷式ヒートポンプチャラー

冷暖房・給湯・融雪  
高温型タイプ:65°C出湯  
地中熱・排湯熱源等に対応  
モジュールによる大容量化



### 水冷式マルチヒートポンプ

熱源温度-10°C対応  
冷暖同時タイプあり  
各種空調用室内機対応



### 地中熱源ヒートポンプシステム性能予測プログラム

#### 「Ground Club(グランドクラブ)」

熱源水温度変化、ヒートポンプ平均効率、コスト、環境負荷等の計算が可能

ダウンロード販売中(弊社ホームページよりリンク)

著作権 北海道大学・新日鉄エンジニアリング

地中熱ヒートポンプシステムの導入をご検討の際はご相談ください

# ZQゼネラル

製造 ゼネラルヒートポンプ工業株式会社

〒459-8001 愛知県名古屋市長区大高町巳新田121

TEL 052-624-6368 FAX 052-624-6095

<http://www.zeneral.co.jp/>



QMS  
ISO9001:2000  
JSAQ949



JAB  
QMS Accreditation  
認定番号R001