

地下熱利用ヒートポンプシステム
Ground Source Heat Pump System

ゼネラルヒートポンプ工業株式会社 開発部
Zeneral Heatpump Industry Co.,Ltd., Dept of Development
柴 芳郎
Yoshiro SHIBA

キーワード：ヒートポンプ(Heat Pump)、地中熱 (Geothermal, Ground Source)、地下水 (Ground Water)、温泉(Hot Spring)、熱回収 (Heat Recovery)

1. はじめに

1. 1 再生可能エネルギー「ヒートポンプ」

太陽光、風力などは再生可能エネルギーとして有名であるが、近年、ヒートポンプについても再生可能エネルギーとして日本を含めて国際的に認識されるようになった。2008年、欧州議会は「再生可能エネルギー推進に関する指令案」を採択し、それによれば、投入した一次エネルギーをはるかに上回る最終エネルギーが得られる場合、ヒートポンプによって汲み上げられた空気、地中、水の熱エネルギーを再生可能エネルギーとして計算するというものである。また、わが国においても2009年に政府が公式的に「最終エネルギー消費に対する再生可能エネルギー導入比率（ヒートポンプ等を含む）として2020年頃に20%程度を目指す」と発表された。ヒートポンプは太陽光や風力などの他の再生可能エネルギーに比べて導入コストが低いため、将来的には再生可能エネルギーの中でも最大の導入割合となると予想されている。

2. ヒートポンプの熱源

ヒートポンプは冷たいところから熱いところに熱を汲み上げる（移動させる）装置であり、物を冷やしたい場合は熱を捨てる（放熱する）場所が必要であり、物を暖める場合は熱を吸収する（吸熱する）場所が必要である。エアコンの室内機と室外機がその一例である。エアコンで部屋を冷房する場合は室内機から冷風が出るが、室外機からは温風が出る。このとき放熱する場所が屋外でありその媒体が空気である。一方、暖房の場合は室内機から温風が出て、室外機から冷風が出るが、このとき、吸熱する場所は同じく屋外でありその媒体は同じく空気である。このようにヒートポンプで物を冷やしたり暖めたりする際に反対側で吸熱や放熱を行う場所や媒体は「熱源」と呼ばれる。つまり、エアコンの熱源は屋外の空気である。

EUの再生可能エネルギー推進に関する指令によれば、「再生可能エネルギー」とは再生可能な非化石源から生じるエネルギー、すなわち、風力、ソーラー、地熱（地中熱）、空気熱、水の熱および海洋エネルギー、水力、バイオマス、埋立ガス、下水処理場ガス、およびバイオガスなどであるとされている。このうち、地中熱、空気熱、水の熱がヒートポンプの「熱源」として利用可能である。

日本では空気を熱源としたエアコンが普及しており、2008年で累計約758万台に達している。また、空気熱源ヒートポンプ給湯機であるエコキュートも174万台に達している。（出展 冷凍空調工業会）それに対して、地中熱を利用したシステムは大小含めても約300件程度であり、増えてはいるがまだまだ導入が少ないのが現状である。一方、欧米では地中熱を熱源としたヒートポンプが普及しており、数百万件の導入実績があるとされている。

水の熱としては海水、河川水、湖水、池水、地下水、温泉水などがあるが、地下水、温泉水について

ては地中熱の一種とみなされる場合もある。これらを用いた事例は空気熱源や地中熱源に比べると導入可能な場所は限られている。

ここでは、日本でも導入が少ない地中熱、地下水、温泉水（これらをまとめて「地下熱」と呼ぶ）を熱源として利用したヒートポンプシステムについてのそれぞれの特長を述べる。

3. 地中熱ヒートポンプ

3. 1 地中熱ヒートポンプのメリット

地中熱ヒートポンプシステムとは、ヒートポンプによって地中の熱を吸収して加熱を行い、または、地中へ熱を放熱することにより冷却を行うシステムである。地中の温度は年間を通じて安定しており、夏は外気に比べて温度が低く、冬は外気に比べて温度が高いため、冷暖房を行う場合、空気熱源ヒートポンプに比べて地中熱ヒートポンプの方が有利となる（図1）。これは、ヒートポンプは熱を汲み上げる「熱のポンプ」であり、水のポンプは揚程が小さいと効率が高いのと同様に、ヒートポンプは熱源と使用側の温度差が小さいと効率が高いためである。

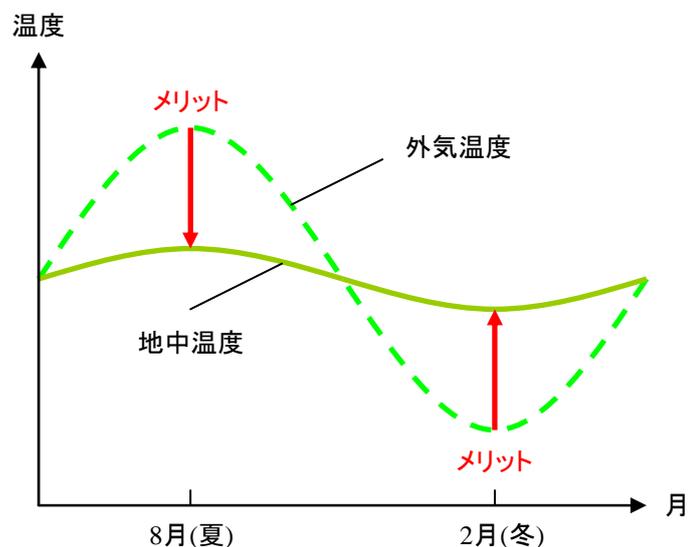


図1 外気温度と地中温度のグラフ

外気温度が低いときに空気熱源ヒートポンプを暖房で用いた場合は外気温度が低いため能力低下と、さらに空気熱交換器に霜が付着することによる能力低下と除霜（デフロスト）による運転停止や負荷増大が発生するが、地中熱ヒートポンプの場合はそれらが起こらない。

一方、外気温度が高いときに空気熱源ヒートポンプで冷房を行う場合は室外機から熱を放熱するが、屋外に設置するため日射の影響でさらに高温となりヒートポンプの性能低下を招く。また、室外機が集中的に設置されている場合はヒートアイランド現象の一因ともなっている。地中熱ヒートポンプは地中に熱を放熱するため、日射の影響がなく、ヒートアイランド影響もない。

また、地中熱ヒートポンプは空気熱源ヒートポンプに比べて空気熱交換器がないため屋内設置が可能であり、雪や日射などの影響もなく空冷よりも長寿命であり、また、建物の景観に悪影響を与えないという効果もある。

寒冷地の場合、冷房がなく暖房は灯油やガスを燃料とした燃焼式暖房機を用いている場合が多いが、地中熱ヒートポンプを用いることによりランニングコスト削減と二酸化炭素排出量が削減できる。また、火を用いず排ガスが出ないため、クリーンで安全である。

3. 2 地中熱ヒートポンプのデメリット

空気熱源ヒートポンプは空気熱交換器がヒートポンプに組み込まれているが、地中熱ヒートポンプは熱源として地中熱交換器が別途必要である。また、地中熱交換器は掘削（ボーリング）工事が必要である。そのため、地中熱ヒートポンプシステムは空気熱源ヒートポンプに比べてかなり割高になる。日本では地中熱ヒートポンプシステムの掘削コストは深長1 m当たり1～1.5万円程度であるが、欧米では掘削コストは3～5千円程度と言われている。これは欧米では地中熱ヒートポンプシステムが普及しており、人材や掘削機の稼働率が高く人件費や機器損料を小さくできるのに加えて、地層が単純で掘削しやすいということもある。日本においては、地中熱がまだ普及していないため人件費や機器損料が高いが、普及すればコストが小さくなると考えられる。また、日本の地層は複雑であるが、地下水流動が見込める地域が多く、地下水流動がある場合は採放熱できる熱量が増え、総掘削深長を短くすることができると考えられる。

3. 3 地中熱ヒートポンプシステムの仕組み

図2に地中熱ヒートポンプの概略図を示す。地中とヒートポンプとの熱のやりとりは配管内に封入された不凍液（ブラインとも呼ぶ）を介して行われる場合が多いが、凍結しないことが確実な場合は水が用いられることもある。地中と不凍液の間の熱のやりとりは地中熱交換器によって行われ、不凍液とヒートポンプの間の熱のやりとりはヒートポンプ内の熱交換器によって行われる。地中熱交換器として最も代表的なものはシングルUチューブであり、これは、ポリエチレン管2本を1対としてU字に加工された先端部を融着したものである。ボーリング工事により、直径100 mm程度、深長50 m～100 m程度のボアホールを施工し、その中にUチューブを挿入する。一本のUチューブは工場出荷時にはロール状になっており、曲がっているチューブをまっすぐに伸ばしつつボアホールに挿入する。ボアホールとしてUチューブを挿入した後はボアホールとUチューブの隙間に掘削した土、ペントナイト、珪砂等を封入する。Uチューブ熱交換器が複数必要な場合は、地面に対して格子状に5 m程度の間隔で配置する。それよりも間隔が狭いと熱干渉を起こし、地中熱交換器の平均の単位深長当たりの採熱量が低下する。複数のUチューブ熱交換器は並列、直列、または直列と並列を併用して接続し、ヒートポンプへの接続は入口側と出口側のそれぞれ1本にまとめられる。

地中熱交換器で採放熱できる熱量は、土質や地下水流動の有無や流速、土壤の温度によって異なり、30～100 W/mと範囲が広い。したがって、採放熱量によって必要な地中熱交換器の合計深長が大きく変化するため、事前の調査は重要である。

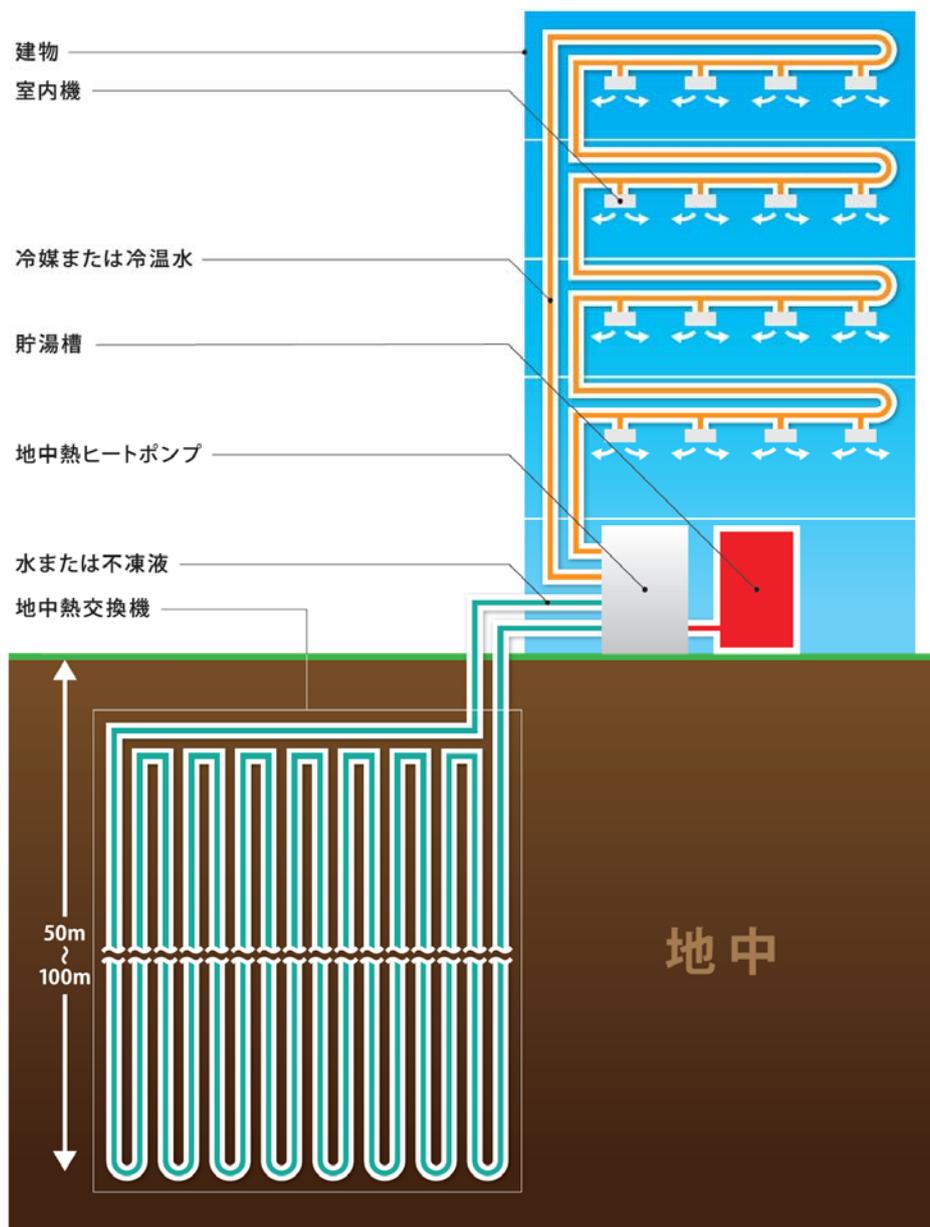


図2 地中熱ヒートポンプシステム外略図

3. 4 サーマルレスポンステスト

事前調査の方法としてはサーマルレスポンステストという方法がある。サーマルレスポンステストは土壌の平均熱伝導率を求める方法である。その方法の概要を述べる。地中熱交換器の上部配管をポンプと電気ヒータをつないでループ状にして水を封入し、地中熱交換器の地上配管部の入口、出口には温度計を設置する(図3)。流量計も設置しておくことで地中への投入熱流量を正確に把握することができるが、電気ヒータの電力計でも代用できる。電気ヒータとポンプを稼働させて地中を2～4日程度加熱し続け、計測時刻と地中熱交換器入口と出口の水の温度と投入熱流量を記録する。計測開始時刻からの経過時間の対数をとったものと地中熱交換器の平均温度は比例するため、その比例係数より土壌の平均熱伝導率が求まる。この平均熱伝導率を用いて地中熱のシミュレーションソフト等により地中熱交換器の総深長などを決定する。地中熱シミュレーションソフトは Ground Club や EED (Earth Energy Designer, 海外製品) などが市販されている。

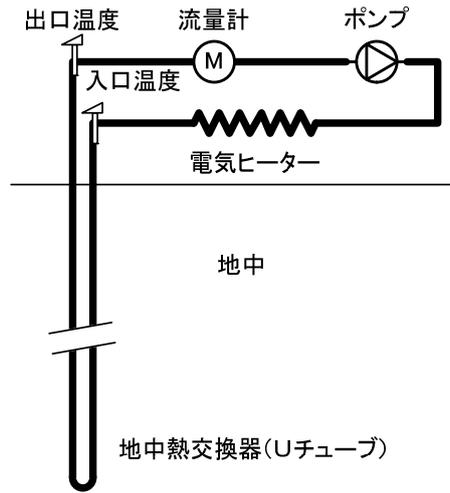


図3 サーマルレスポンステスト

3. 5 地中熱交換器の種類

図4に地中熱交換器の種類を示す。地中熱交換器にはボアホール方式と杭方式があり、ボアホール方式は建物の外で地中熱交換器を新たに設置する方法であり、杭方式は建物の基礎杭と熱交換器を兼用する方式である。シングルUチューブはボアホール方式でも杭方式でも両方に使われるが、ボアホールの場合Uチューブの周りに杭はない状態であり、杭方式の場合は杭の中か外に設置される。シングルUチューブを2本重ねたダブルUチューブが用いられることもあり、シングルUチューブに比べて採放熱量は約1.1倍となるといわれている。

地中熱交換器の中にはUチューブを用いない二重管というものがあり、これは外管と内管から成り、外管は下端で密閉されている。外管の径がかなり大きい場合、採熱するときは、不凍液を内管の中に入れて下に送り、下端部から外管の内側かつ内管の外側を通して上に送る。放熱するときは、不凍液は外管の内側かつ内管の外側に入れて下に送り、下端部で内管の中を通して上に送る。こうすることにより、温度成層蓄熱槽のように二重管地中熱交換器の外管の内側と内管の外側の領域で上部は温度が高く、下部は温度が低いという状況になり、ヒートポンプの冷却と加熱で使い分けることにより効率の高い運転が可能である。ただし、外管の径がそれほど大きくない場合や、地温勾配がある場合、もしくは簡単のため、採熱も放熱も同じ方向とする場合もある。内管は外管との同心円とすることが多いが、架橋ポリエチレン管を自由に垂らすという事例もある。二重管はボアホール方式と杭方式の両方で用いられる。

ただし、杭方式の二重管方式では建物の荷重が杭にかかり、外管にひびが入り不凍液が地中に漏れる危険性もあるため、杭の中にはUチューブを入れるという方法が今では一般的である。

また、現場施工杭（場所打ち杭）を利用する方法もあり、鉄筋かごの周りにUチューブを何対か垂直方向に這わせることによって熱交換器と杭を兼用させる方法であり、杭長1m当たり100～300W程度採放熱が可能である（図5）。

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

図4 地中熱交換器の種類

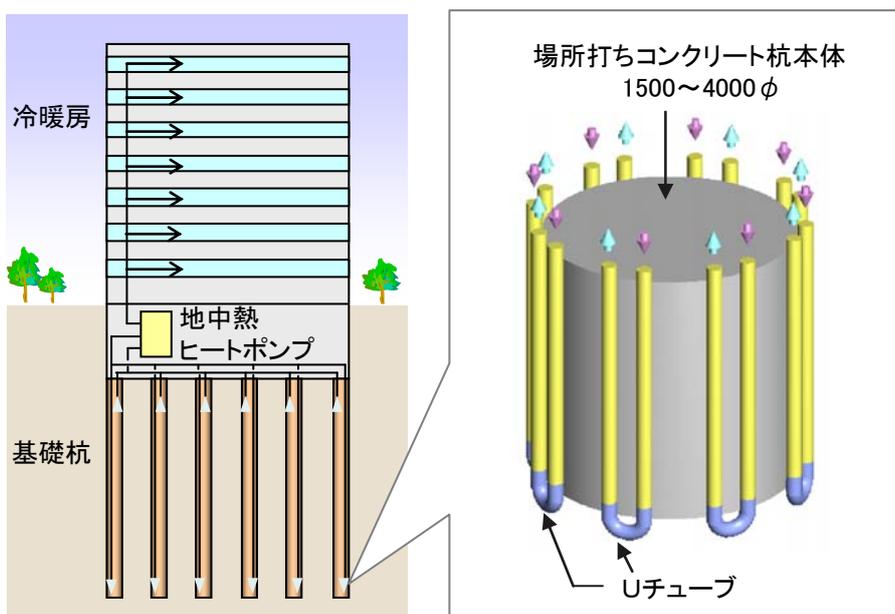


図5 現場施工杭を利用した地中熱交換器

4. 地下水利用ヒートポンプシステム

4. 1 地下水利用ヒートポンプシステムのメリット

地下水利用ヒートポンプシステムは地中熱ヒートポンプの一種とも呼ばれているが、地中熱ヒートポンプは地中熱交換器を介して採放熱するのに対して、地下水利用ヒートポンプは地下水を直接汲み上げて熱源として利用する方式である（図6）。地中熱交換器を介さずに直接安定した温度の地下水を利用することができるため、地中熱ヒートポンプよりもさらに効率的なシステムを構築することができる。また、地中熱交換器が不要であり、ボーリングは井戸数本で良いため、地中熱ヒートポンプシステムよりも安価にシステムを構築することができる。

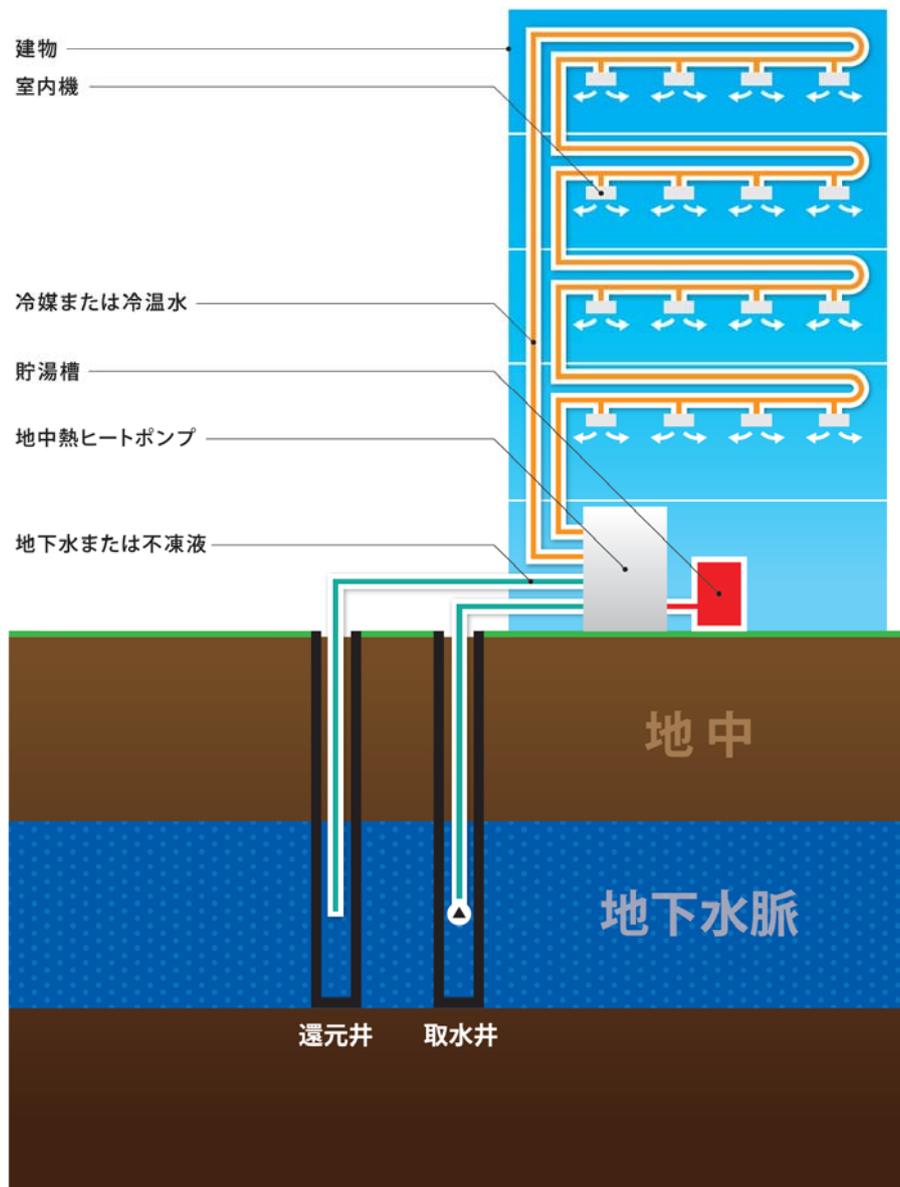


図6 地下水利用ヒートポンプシステム

4. 2 地下水利用ヒートポンプのデメリットとその対策

地下水保全の観点から、熱源として採放熱した後の地下水は下水や川に放流せず、元の地下水脈に

還元すべきである。ただし、地下水を還元する場合は長時間還元すると還元井のストレーナに目詰まりが発生する。水質により還元開始から目詰まりを起こすまでの間隔は異なるが、短いものでは数日、長いものでは10年近くのものもある。いずれにしても還元井の目詰まり対策は必要であり、詰まった場合は還元井に水中ポンプを設置して逆洗をする必要がある。あらかじめ還元井にも水中ポンプを設置しておき、逆に、還元井から地下水を汲み出して取水井に還元できるようにしておき、交互に取水井と還元井を入れ替えるという方法がある。これを定期的に行うことにより、目詰まりを起こさずに連続的に運転でき、また、目詰まりを起こしたとしてもすぐに切り替えができる。

還元井は取水井とは別に必要なので、その分のコストが発生する。これに対して、井戸1本で済む単管還元方式という方法もあり、1本の井戸の中に上下の水の行き来を遮断する仕切り（パッカー）を設けておき、パッカーの上から取水して、パッカーの下へ還元する、または、パッカーの下から取水して、パッカーの上へ還元するという方法である。

また、地下水の水質によってはヒートポンプに直接地下水を入れるとヒートポンプ内の熱交換器内部にスケールが付着してさまざまな悪影響を及ぼすことがある。地下水を直接ヒートポンプに入れてもよい水質基準としては日本冷凍空調工業会標準規格である冷温水・冷却水の水質基準値JRA-G L-02-1994を満たすことが必要である。これを満たさない場合は、地下水とヒートポンプの間に熱交換器を設置し、ヒートポンプには水質基準を満たす水またはブラインを循環させることによりシステムを構築することができるが、熱交換器の地下水側にはスケールが付着するため定期的に熱交換器の洗浄をする必要がある。水質による問題は次の温泉排湯利用でも同様である。

5. 温泉排湯利用ヒートポンプ

5. 1 温泉排湯利用ヒートポンプの利点

25℃以上の地下水、または有効成分が含まれている地下水は温泉と呼ばれている。温度の高い温泉を加熱用ヒートポンプの熱源として利用すれば効率が高いシステムが実現できるが、温泉のほとんどが浴用として利用されるため、温泉を直接ヒートポンプの熱源とするのはまれである。したがって、温泉をヒートポンプの熱源とするには、浴用で使用後の温泉排湯を利用することになる。浴用で使用する温泉の温度は40℃前後であるため、温泉排湯は多少放熱して35℃前後となる。この温度は外気に比べて年間を通して温度が高いため、空冷ヒートポンプに比べて給湯、源泉昇温、暖房などの熱源として有効である（図7）。ただし、採熱量は源泉量に比例するため、源泉量が多い場合は熱源が豊富で源泉昇温、給湯、暖房、融雪などさまざまな用途に利用できるが、源泉量が少ないと熱源として不足することになるため、源泉昇温のみなど限定した利用となる。源泉掛け流し温泉は源泉量が多いため、源泉掛け流し温泉を保有している旅館、ホテル、温浴施設などでの利用が有効である。

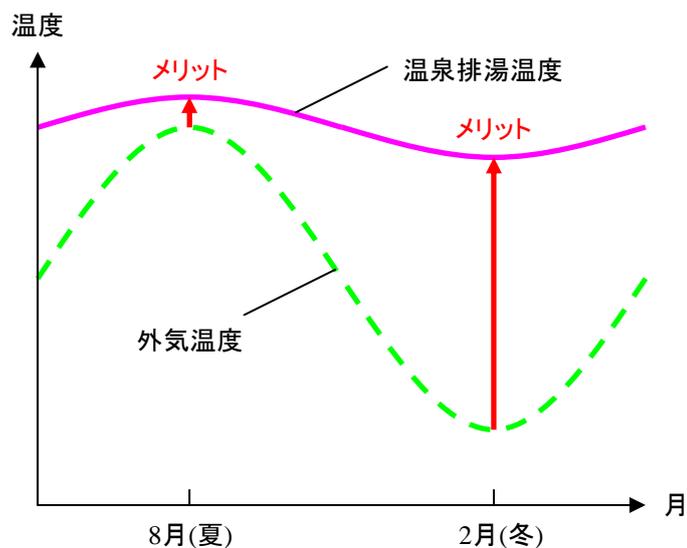


図7 外気温度と温泉排湯温度のグラフ

5. 2 温泉排湯利用ヒートポンプの欠点

前述のように源泉量が少ないと十分な熱源量が得られないため、熱源量の把握を十分に行う必要がある。そのため、排湯槽を設けて温泉排湯をためておくことにより、多少の負荷変動にも対応が可能である。ただし、源泉供給が時間帯によって停止するような場合は排湯槽の温度低下を考慮して排湯槽の大きさを設計する必要がある。熱源が不足する場合は、シャワー・カランのある洗い場の排水も利用することも可能であるが、洗い場の排水は利用人数に影響されるため量が安定せず、また、皮脂や石鹸水で熱交換器にスケールが付きやすいため熱交換器が詰まって熱が取れなくなることが多く、熱交換器の清掃も頻繁に発生する。したがって、洗い場の排水を熱源として利用することは望ましくない。したがって、掛け流した温泉排湯と洗い場排水は分流していることが望ましい。

5. 3 温泉排湯利用ヒートポンプシステムの例

図8は岐阜県中津川市にある日帰り温泉温浴施設である付知峽倉屋温泉おんぼいの湯の温泉排湯利用ヒートポンプシステムフロー図である。温泉排湯熱源ヒートポンプ（120馬力相当）により、源泉加熱、給湯、空調、床暖房を行い、浴槽で掛け流しにされた温泉排湯を排湯槽に貯め、排湯槽から熱源を取り出している。図に記載はないが、排湯槽からの採熱はプレート式熱交換器を介して行っている。当システムにより従来の温浴施設でよく用いられていたボイラーと吸収式冷水発生機と比べて年間270トンの二酸化炭素排出削減を実現している。

ここではプレート式熱交換器としてステンレス製のプレートを用いているが、温泉の水質によってはチタン製を用いる場合もある。また、プレート式熱交換器ではなく、シェルアンドチューブ熱交換器、架橋ポリエチレン管熱交換器などが用いられる場合もある。プレート式熱交換器やシェルアンドチューブ熱交換器は定期的に洗浄しなければならないが、架橋ポリエチレン管熱交換器の場合は排湯が管外となりスケールが付きにくいというメリットはある反面、熱効率が悪いため多くの熱交換器を排湯槽内に設置しなければならないというデメリットがある。



図8 温泉排湯熱源ヒートポンプシステムの例

6. 地下熱に対応したヒートポンプ

地下熱に対応したヒートポンプには大きく分けて水冷式ヒートポンプチラーと水冷式ビル用マルチの2種類がある。

水冷式ヒートポンプチラーはヒートポンプの一次側（熱源側）は地下熱（または地下熱と熱交換した不凍液または水）であるが、ヒートポンプの二次側（負荷側）が冷水または温水となる（図9）。一方、水冷式ビル用マルチはヒートポンプの一次側（熱源側）は水冷式ヒートポンプチラーと同様に地下熱であるが、ヒートポンプの二次側は冷媒となる（図10）。水冷式ヒートポンプチラーは中央熱源方式（セントラル方式）で利用され、水冷式ビル用マルチは個別空調方式（直膨方式）で利用される。

また、水冷式ヒートポンプチラーや水冷式ビル用マルチは排熱回収機能が付加されていることもあり、冷房時の排熱を地下熱に放熱せずに給湯として利用することが可能であり、このときは事実上給湯が無償で得られる。温泉排湯利用ヒートポンプは冷房にメリットがないため、この排熱回収機能を用いて冷房需要を賄うことが多い。もちろん排熱回収運転だけでなく、単独で冷房、暖房、給湯も可能である。

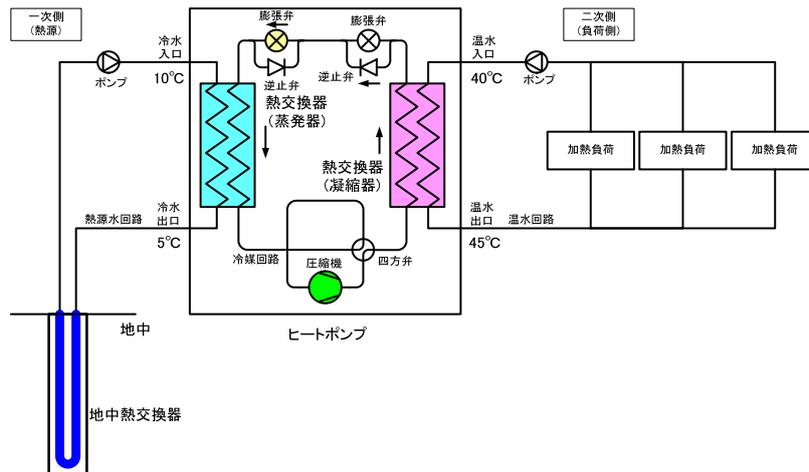


図9 水冷式ヒートポンプチラー（セントラル方式）

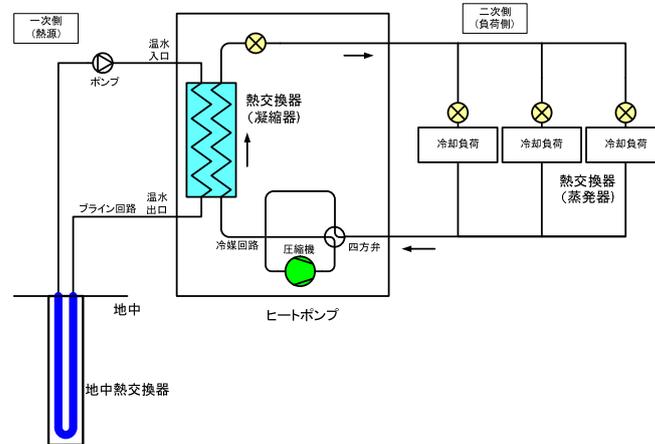


図10 水冷式ビル用マルチ（直膨方式）

また、空冷式と水冷式の両方の機能を有する空水冷式ヒートポンプというタイプもある。空水冷式ヒートポンプは2種類の目的で利用される。1つ目の目的としては、基本的には水冷モードで運転するが、地下熱が何かしらの原因で一時的に使用できなくなった場合のバックアップとして空冷モードに切り替えるというものである。地下水利用で還元井に目詰まりが発生した時や、温泉排湯利用でプレート式熱交換器が詰まって清掃しなければならないときなどに利用が可能である。二つ目としては、地中熱や地下水利用で、中間期に地下熱よりも外気の方が有利となる場合があり、そのときに空冷に切り替えるというものである。これによりさらにエネルギー消費を削減することが可能となる。ただし、空水冷式は熱交換器が余分にあるために若干割高となる。

7 最後に

地下熱利用ヒートポンプシステムは高効率なシステムを実現できるが、設計上の注意点がいくつかあり、正しい知識がないままに設計、施工を行うと熱源不足やシステム停止などのトラブルが発生する可能性が高い。顧客にはコストメリットだけでなく発生しうるリスクについて事前に十分な説明を行う必要がある。

しかし、正しい設計に基づく地下熱利用ヒートポンプシステムは、化石燃料を直接利用せず、太陽光や風力などの自然エネルギーで生成される電力を用いることが可能であるため、今後の地球環境保護のための1つの技術であることは間違いない。