

■ 展 望 ■

新エネルギー時代のヒートポンプ

一 色 尚 次*
Naotugu Issiki

1. ま え が き

ここで新エネルギー時代というのは決して今までにない新しい自然エネルギー、たとえばソーラーエネルギーなどの台頭だけを指すのではない。それはむしろ、逆オイルショックなどによる最近のオイル価格の安定と、電力・ガスなどの在来エネルギーの供給能力の潤沢なことをバックにしたいわゆる在来エネルギーのカムバックを含めたエネルギー新時代を言うのである。このような時期に、ヒートポンプは、特に暖房や低温加熱用といった低温領域において、在来エネルギー（石油・ガス・電力）で駆動し、新しい自然エネルギー（ソーラー、地熱など）や工業排熱などを汲み上げるといった新旧エネルギーの結合に成功し、まさに新しいヒートポンプ時代を形成しつつある。

筆者はそれを新エネルギーと旧エネルギーの結婚というが、その最大の仲人であり、かつ申し子であるのがヒートポンプと言えよう。

ここではそのような見地から、とくに排熱や自然エネルギーの活用という点におけるヒートポンプの状況と、活躍と将来性について述べたいと思う。

2. COP と TCOP

2.1 COPの向上

ヒートポンプが台頭した大きな理由の二つとして、そのCOP (Coefficient of Power) の全般的な向上とトータルヒートポンプの台頭がある。

いま図-1 ABCDのように、作動流体が基本的なカルノーサイクルを行なうさいのCOPをCOP₀とし、カルノーサイクルからの偏差率をη_c、エバポレーターとコンデンサーにおける伝熱面の熱通過温度差をΔT_e、ΔT_cとすると、極めておおまかにいって、任意のヒートポンプのCOPは、

$$COP \approx \frac{T_1 + \Delta T_c}{\{(T_1 - T_2) + (\Delta T_e + \Delta T_c)\} \eta_c} \dots (1)$$

となって、二つの熱通過温度差が小さくかつη_cが良好なら逆カルノーサイクルのCOPに近づく。

最近ではサイクル効率のよい流体の使用、以前より高効率のコンプレッサーの採用、熱伝達率を増進させた各種の伝熱面の研究とその成果の採用等が複合されて、以前よりは極めて高いCOPのシステムが一般化している。

図-2に、常温付近での温度差を横軸にとり、縦軸にまず逆カルノーサイクルヒートポンプのCOP₀を示し、ついで最近の実際の機械での設計COPの値の範囲をハッチングで示す。後述のように、温度差15℃付近で

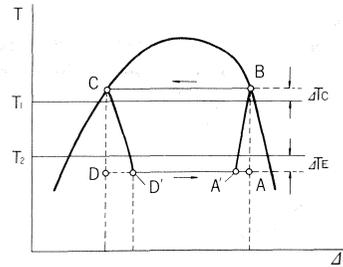


図-1 ヒートポンプサイクル

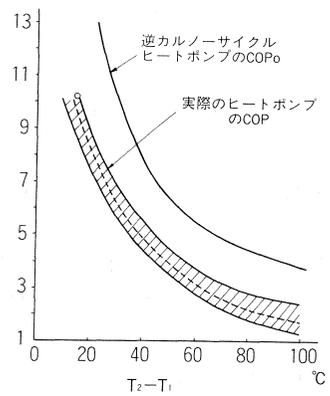


図-2 常温付近(0℃)の実際のヒートポンプのCOP

* 日本大学工学部教授 東京工業大学名誉教授
〒963 郡山市田村町徳定

COPが10を越すものも現れている。

図のようにいずれにせよ、温度差が小さいほどCOPが高くなることは、とくに低温熱利用におけるヒートポンプの優位性を示すものである。

2.2 トータルヒートポンプの台頭

よく知られており、かつ図-3に示すように、在来化

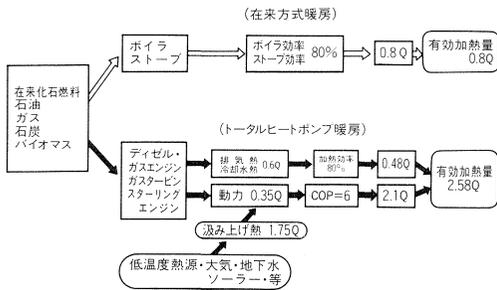


図-3 在来暖房とトータルヒートポンプ暖房の加熱量比較（数字は一例）

石燃料を暖房に使用するさい、単にストーブやボイラーで加熱する代りに、ディーゼル、ガス機関、ガスタービン、スターリングエンジン、等の熱機関をまず動かして、その動力でヒートポンプを回し、ついで熱機関の排気熱をもその加熱に加えるようにするトータルヒートポンプシステムが近年急速に台頭して来た。この実例としては後述のように多くの例があり、化石燃料以外の任意高温熱源にも適用されている。いまこのさいの排気熱も加えた全体のCOPをTCOP(トータルCOP)と書くことにすると、燃料もしくは任意熱源による高温熱源の温度を T_1 、熱を汲み上げる低温熱源の温度を T_2 、被暖房(加熱)温度を T_3 とすると、 $TCOP_0$ は、カルノー(正・逆)サイクル熱機関とヒートポンプを使用するものとして

$$TCOP_0 = \frac{Q_3}{Q_1} = \frac{T_2(T_1 - T_2)}{T_1(T_3 - T_2)} \dots\dots\dots(1)$$

となり、 T_3 と T_2 の温度差が小さいほど $TCOP_0$ は大きくなり、また熱源温度 T_1 が高いほど大きい。一例として、仮に $T_1=100^\circ\text{C}$ ないし 500°C 、 T_3 (室温) $=25^\circ\text{C}$ として、低温源温度 T_2 を横軸にとり $TCOP_0$ を示すと図-4のようになる。

それにたいし、同じ T_2 、 T_3 にたいし、実際のエンジンの熱効率 η_e を20%ないし40%とし、図-2に示した実際のヒートポンプのCOPの値を用いて計算した現在での実際的なTCOPは、排気加熱効率を0.6として

$$TCOP = 0.6 + \eta_e \cdot (COP - 0.6) \dots\dots\dots(2)$$

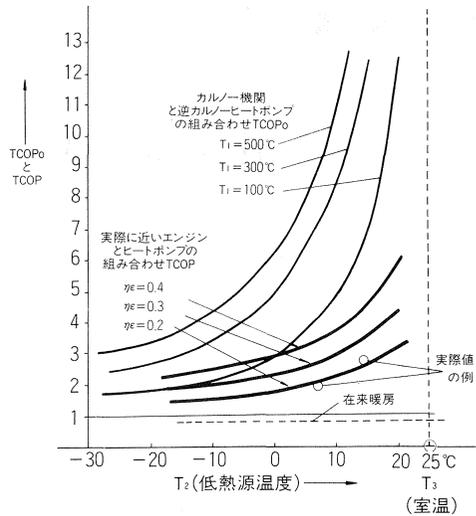


図-4 トータルヒートポンプの $TCOP_0$ と $TCOP$

で計算され図-4に示すようになる。

図-4にはさらに実際に得られている値をプロットするが、図のように理論値にくらべて不十分である。

これはまだトータルヒートポンプが開発のいとぐちについたばかりであって、まだ大きい可能性をもっていることを示すものである。まだ値は低くてもその出現の意義は大きい。

2.3 省エネルギーにおけるヒートポンプの位置

ついで、工場排熱などを再利用するときなどを念頭におき大気温度、もしくは低温源温度 T_2 、被加熱温度 T_3 の両者が固定されていて高温源の温度 T_1 (排熱物体や燃焼ガスなどの温度)が T_3 以上で高くなっていく際、排熱物体の比熱が温度によらず一定であると仮定して、同一単位重量の排熱物体が給エネルギーでできる量を次の4つの場合につき比較してみる。

(A) エンタルピー利用；これは単純に排熱で非加熱物を加熱する場合であり、排熱による空気予熱やホットチャージ、排熱ボイラ(温度 T_2)などに相当する。この給熱量を Q_A とする。

(B) エクセルギ利用；これは排熱で任意の排熱エンジンを動かして動力化することで、その出力を P_B とする。ただし、エンジンの低熱源を T_3 とする。

(C) 単純ヒートポンプ利用；これは上記Bのケースで発生した動力でヒートポンプを動かし T_2 から熱を汲み上げて T_3 に入れる場合で、この際の給熱量を Q_C とする。

(D) トータルヒートポンプ利用；これは上記Cの場合にさらにその排熱を給熱利用するトータルヒートポ

ンプの場合でこの際の給熱を Q_D とする。

いまカルノー熱機関やヒートポンプを使用する際の、以上の4ケースの給熱量の概略値を図示すると図-5のようになる。図に示すように、 T_1 が十分低いときは、ケースAのエンタルピ利用が他のB,Cよりもすぐれている。しかし T_1 が上昇するにつれて P_B と Q_C が放物線状に上昇し、高温排熱で動力化が有利でかつ単純ヒートポンプも熱量が増す。しかし図のように、Dのトータルヒートポンプは、ある程度以上の排熱温度において他のいずれよりも極めて給熱量が増すことがわかる。

このことは、逆に T_3 (被加熱温度)が排熱温度より十分低いときには、トータルヒートポンプがずば抜けて優秀であることを示すものであって、新時代のヒートポンプの出現理由はそこにあるといえる。

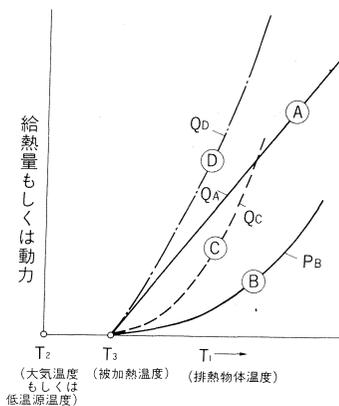


図-5 排熱で駆動する各種の給熱方式の比較の概略
(排熱物体単位重量あたり)

3. ヒートポンプの新分野

3.1 ヒートポンプの五要素

以上のように、COP, TCOP, 高温排熱利用などで高い値を示しつつあるヒートポンプの新利用形式は、極めて広域にわたるものとなる。

いまそれを分類するには、つぎの五要素がある。

- (a) 駆動エネルギー源の種類
- (b) 作動流体とコンプレッサの形式
- (c) 低温側エネルギー源の種類(熱源種類)
- (d) 利用分野

ここでは、それらについて調べてみたい。

3.2 駆動エネルギー源

3.2.1 その大分類; 駆動エネルギー源は、大別すると(x)在来電力、(y)石油系燃料(ガスを含む)、(z)その他の自然エネルギー(ソーラー、風力など)、の三者に分類されよう。

3.2.2 電力駆動ヒートポンプ; まず、在来電力によるヒートポンプは、いわゆる空気熱源標準家電冷暖房機として近年急激な発達を遂げ、夏は冷房用、冬は暖房用として広く用いられているのは、よく知られている所である、その電力利用としては最近サイリスタなどを使用したインバーターモーターによる可変速制御方式などが広く開発されている。ただし空気熱源が多いので、低温時着霜の点よりその利用北限は低い(我々国では仙台、新潟といわれている)。

3.2.3 石油系燃料とヒートポンプ; つぎの石油系燃料を利用するヒートポンプとしては、ディーゼルエンジン(軽油)、ガスエンジン(ガス)、スターリングエンジン(ガス)、ガスタービン(ガス)等を駆動するトータルヒートポンプがある。ディーゼルは効率が高いが騒音に難がある。しかし、後述のような大規模成功例がある。

ガスエンジンヒートポンプは、特に小中型用としてムーンライト計画で大規模な研究が実施されて、現在は実施試験中である。またスターリングエンジンも小中型用として、とくに静粛であることを利点として、やはりムーンライト計画の一環として六年計画の大規模な研究が開始されている。その特長については後述する。ガスタービン駆動については大型用としての構想はあるが、まだあまり実例は聞かない。

3.2.4 自然エネルギー駆動ヒートポンプ; その他の駆動エネルギー源としてはつぎのようなものがある。

- (a) 風力ヒートポンプ; 風車によるもので、単に摩擦による発熱よりもヒートポンプを駆動する場合の方が給熱量は多い、簡易ヒートポンプの開発が望まれる。
- (b) 水力ヒートポンプ; 水車によるもので、すでに我が国には後述のような例がある。とくに寒冷地における小水力利用に向いている。
- (c) ごみ焼き熱ヒートポンプ; 都市のごみ焼き熱の動力化は多いが、それを地域暖房に利用するものとして、スチームエンジン駆動のトータルヒートポンプがあり、ヒートポンプボイラとも呼ばれている。
- (d) ソーラー駆動ヒートポンプ; この形体としては冷房用としては吸収冷凍機の駆動方式があるが、暖房用としては、いわゆるサーモケミカルヒートポンプとして、夏期エネルギーを駆動源とする後述のような蓄エネルギー暖房機が各種開発されている。

3.3 作動流体とコンプレッサー

作動流体としてはフロン系のものが通常であるが、最近では二液混合形として、二種類のフロンを混ぜたものを使用することが研究されている。単液のときよりも二液の方が、エバポレーターに温度分布を作るので相手流体によりその温度効率を改善できる。

また、とくに高温領域に対しては、フロン以外の有機液体が考えられることがあり、

また、低温側が90°C以上の領域の高温ヒートポンプでは、水(蒸気)が作動流体として考えられている。これらの流体のコンプレッサーとしては小形ではロータリー式やスクロール式、中形ではスクリュウ式、大形では遠心ブロワー式等が主として使用されていて、とくに大中形高圧縮比ではレシプロ式もある。

いずれにせよ、ヒートポンプの効率の使命を制するのはコンプレッサーであり、その効率の改善がこれからの緊急課題である。

さてヒートポンプの流体としてはなにもフロン系や水のように気液領域のものばかりとはかぎらない。最近では空気そのものやヘリウムのようなガスも作動流体として考えられている。

たとえば図-6に空気を作動流体とした温水製造用ヒートポンプの案を示すが、図のものは動力源として同じ空気を分流するガスタービンを使用し、まず圧縮によって断熱温度上昇した空気を加熱源とした後ガスタービンの排気熱をも加熱に加えるもので、これはいわばガスタービン使用トータルヒートポンプといえる。本ヒートポンプは後述のような大規模消雪に向けて考えられているものである。

3.4 ヒートポンプの熱源

3.4.1 新しいヒートポンプの熱源；さてヒートポンプ成立の最も重要な要素はその熱源である。エンジンが燃料さえあれば動くのに対して、エンジンヒートポンプは燃料と熱源の両者がそろわないと成立しない。ヒートポンプの熱源としては従来から大別して水と空気があるが、新しいヒートポンプでは、単なる水と空気ではなく、ソーラーや地熱、工場排熱などと結合した組み合わせ熱源およびソーラポンドなどの蓄エネルギーシステムを応用した蓄熱熱源が急速に台頭しているのが特長である。

3.4.2. 水熱源；水熱源としては、初期のヒートポンプでは地下水汲み上げが多かったが、現在では大、中都市部では規制されている所が多く、あまり自由ではない。しかし農林業地帯ではグリーンハウス用など

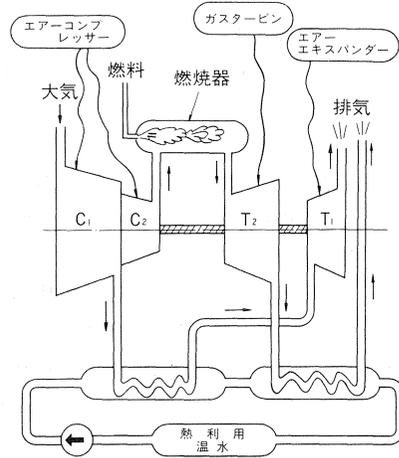


図-6 大気を作動流体とするガスタービン使用トータルヒートポンプ(温水製造案)

に多く使用されており、電力ヒートポンプとエンジンヒートポンプの熱源に多い。

最近、特に目立つのは地方の地下温水の利用で、とくに我が国では山岳地帯や温泉地帯では地下水が平均気温よりも高い、いわゆる地熱水が多いが、その利用が盛んである。

また都市では地下鉄の湧水やトンネル湧水のように汲み上げない自然湧水の利用はゆるさされていて、その利用と、工場排熱水、発電所排熱水、下水、などは極めて有力な熱源水となりうる。

また我が国では、地方によっては河川水や海水なども熱源となりうる。

また我が国の関東以西においては、ソーラーコレクターで集熱した温水をヒートポンプの熱源とすることは多く利用されていて、その蓄熱方式としては、通常温水タンク方式が多い。場合によりビルの地下に温水槽を作り、それに蓄えるのも一般化している。その方式は場合により蓄冷冷水槽ともなる。またヨーロッパでは地下に水配管を置き地熱を熱源とする水熱源方式が多いが我が国では少ない。

3.4.3 空気熱源；空気熱源は一般の家電ヒートポンプでは極めて一般化している。しかし問題は寒冷地における着霜であって、それに対してはいわゆるデフロスト加熱を合理的かつ自動的にこなす方式が進んで、かなり北限が北上した。さらに空気を一たんかなりの前置フローで圧力を上げて断熱圧縮による温度上昇で着霜を防ぎ、可能ならばその空気で排出タービンを回して動力の一部を回収する方法も考えられ、一部で実施されようとしている。

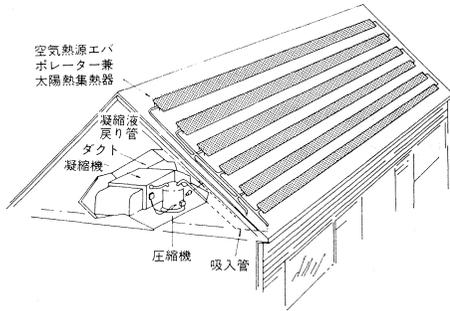


図-7 ソーラーコレクターを並用したソーラーエアークヒートポンプ（シグマリサーチ社の例）

また空気熱源の空気とソーラー加熱を組み合わせる方式としては、図-7に示す一例のように、フロンエバポレータの表面積を大きくしてそれに太陽光線と風をあてる方式と図-8のように、太陽光線で温められたカーボンフェルト薄膜などを垂直に空気を通してそれを加熱する方法の二つがある。後者は比較的に低価格でソーラーを利用する方式の最大のもので若干変形したものが今後の空気熱源ヒートポンプの主流となると思われる。

3.4.4 蓄熱システム利用熱源

蓄熱システムを利用する方式として大別してつぎの三者があると考えられる。

(a) ソーラーポンド；これは大きな水タンクの底の方に濃い塩水(MgCl₂, NaCl, CaCl₂等の水溶液)を入れて置き、上方に淡水を入れておいて太陽にさらし太陽熱を底の塩水の温度上昇として温めておくもので、塩水の比重が大きいので自然対流を生じない。この方式はアメリカ等では開放プール方式で用いられているが、我が国では日照が小さいことと夜間温度が低いことから、筆者らは反射鏡と浮き覆いをしたものを提唱し実験している。ソーラーポンドは蓄熱能力2～3日間のヒートポンプ用水熱源として極めて有用である。

(b) 地下帯水層；これは地下に自然に存在する停留帯水層を発見してそれを自然の温水タンクとして利用するもので、その一例として図-9に示すような複井方式がある。図のものは夏期には井戸Aより地下にソーラー加熱および冷房加熱した温水を押し込んで蓄熱しておき、冬期には水を逆流させて同じAから温水を取り戻してヒートポンプ熱源もしくは直接利用するもので、井戸Bは夏は冷水源に、冬には自然冷水押し込み源となる。その他単井方式もある。この方式はも

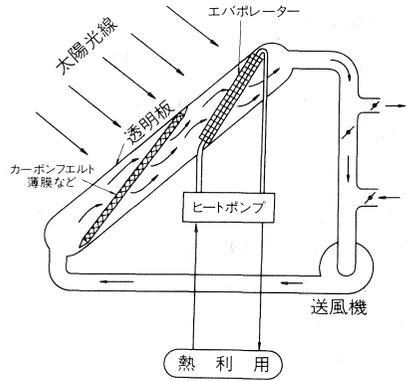


図-8 薄膜ソーラーエアヒーター利用のヒートポンプ

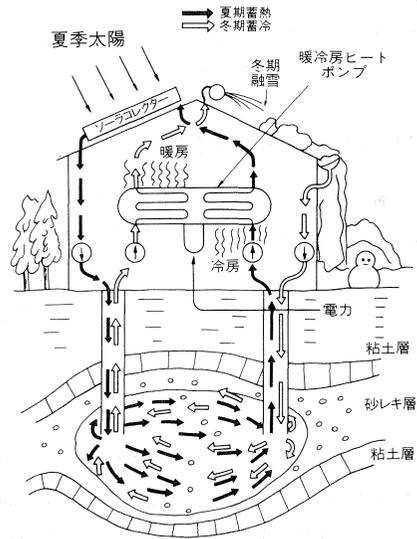


図-9 地下水層利用長期蓄熱冷暖房ヒートポンプ原理

し良好な地層と清浄な作動水が発見されたならば夏から冬へ温冷自然エネルギーを相互に蓄熱できる経済的な唯一の長期蓄熱方式として今後の開発が待たれる。

(c) サーモケミカル蓄熱；これは熱エネルギーを、水溶液の濃度差エネルギー、デシカント(脱湿剤)の水の吸着エネルギー、水素化金属の水素の吸着エネルギー等に置換して蓄エネルギーしておくもので、筆者の濃度差エネルギーカーなどと同じ種類の蓄エネルギー方式であり、例えばスエーデンのテビダスシステムは、夏期にNa₂S₂を脱湿乾燥しておき冬期に水を吸着させる際の発熱を直接にサーモケミカルヒートポンプとして作動させるものであり、その際の供給水の気化熱源としては地下水管による地熱を利用する。

最近我が国では水素収蔵合金(ランタン鉄やミッシュメタルなど)を使用する蓄エネルギーヒートポンプの

研究が開始されている。

3.5 利用分野

以上の分類により、新エネルギー時代のヒートポンプの利用分野もまた極めて多種多岐となった。

先進国向けにはソーラーと合併し、かつ発電と一緒にになったコージェネレーション暖房および工業用発熱から蒸気を作るトータルヒートポンプなどが有望である。またハウス暖房や各種養殖には極めて向いている。そしてすべて 120°C 以下の低温ボイラは、ヒートポンプに置換される時代が来るであろう。また冬期消雪ヒートポンプも期待される。

開発途上国ではヒートポンプ利用は大部先のこととなるであろうが、まずは逆ストークの逆である自然エネルギー利用の冷房より開始し、次第に各種低温加熱産業用にヒートポンプを始めから応用する考えが必要である。

4. 新しいヒートポンプの例

4.1 最上町のディーゼルヒートポンプ

本章では以上に説明した新エネルギー時代のヒートポンプと目されるもののうち、とくに代表的で、かつ筆者が開発に関連した実例を幾つか示して参考とした。

まず最上町のディーゼルヒートポンプについて示す。

ここでは、合計約750H・P、5台のディーゼルエンジンでフロンスクリーヒートポンプを駆動し、 15°C の豊富な湧水地下熱水を熱源としてそれを約 45°C に温度上昇させて、町役場、町民センター、病院、保育所、特別養護老人ホーム等の暖房もしくは給湯を行なうものであって、国と県の補助金によるモデルケースとして1982年に完成したものであり、最も大規模なディーゼルエンジンのトータルヒートポンプとして有名である。

図-10 に本システムの概略を示す。この設備の際、最も問題となったのはディーゼルエンジンの騒音であっ

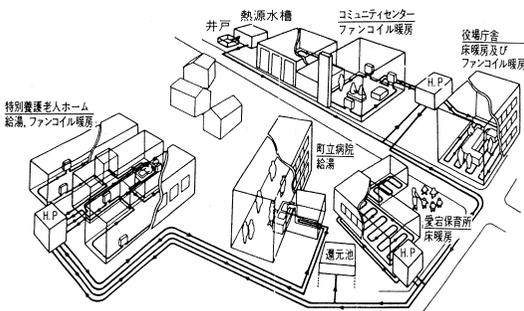


図-10 最上町エンジンヒートポンププロジェクト配置図

て、断音ケーシングとコンクリートルーム及び屈曲した給排気通路等によって解決した。

なお本システムのTCOPは約2.0であった。

4.2 新幹線の消雪ヒートポンプ

上越新幹線は、降雪対策としてスプリンクラーより約 12°C の温水を散水することによって消雪しているがその加熱のための燃料費は、ばく大なものとなる、その省エネ対策として多くの方式が提案されているが、そのうち、第一のもとして、ディーゼルエンジン駆動トータルヒートポンプが提唱されて鉄研において実験されている。

この際のエンジンは、ディーゼルカー用の中古品の160PSのもので、コンプレッサーとしてはR11を遠心ブロワーで圧縮する方式とし、温度上昇は目標 12°C 、最大 20°C 程度に止めた、このように低温度差専用のブロワー式ヒートポンプを試作して試験した結果COP=10.3、TCOP=2.7という高い値が実現した。

またこのヒートポンプの熱源として、さきに述べた地下帯水層を長岡駅構内で実験中であって、夏期に同じ消雪スプリンクラーで集めた温水を地下に入れた冬期に使用する方式を研究中である。また図-6の方式も考慮されている。

我が国は豪雪地帯が多いので、老年人口増加とあいまってこれからの家屋消雪の問題は深刻であり、小型消雪ヒートポンプの開発が緊急である。

4.3 金山町の小水力ヒートポンプ

これは図-11 に全体図を示すように、谷川より流れ出る小水力を貫流式タービンに導いて、それでスクリー式ヒートポンプを動かそうとするもので、約 40°C の既設温泉井戸水を更に加温して 60°C とし、町営集会所の暖房を行なった後排湯にて駐車場、橋上道路の両者の融雪を行なうもので、1983年度に実施され完成した。

この方式によって始めて小水力を熱に変える水力ヒートポンプの実例が生じ、地域的自然エネルギーの利用に新しい道を開いた。冬期の降雪によって水入口が閉塞することや制御方式に色々問題が生じたが解決され次年度冬での本格的な操業をまっている。

4.4 スターリングエンジンヒートポンプ

スターリングエンジンは静粛であり、かつ期待熱効率が非常に高い、また燃料種類に不感であるので小中形の家庭用ヒートポンプ駆動に向いている。

我が国では新エネルギー開発事業団が先導して3kWと30kWのスターリングエンジンの開発を6ヶ年計画(19

