

地中熱源対応水冷式ヒートポンプチラーの開発

The development of the water-cooled heat pump chiller applicable to the ground source

正会員 柴芳郎（ゼネラルヒートポンプ工業）正会員 大岡龍三（東京大学）正会員 関根賢太郎（大成建設）

Yoshiro SHIBA *¹ Ryuzo OOKA *² Kentaro SEKINE *³

*¹ Zeneral Heatpump Industry Co.,Ltd *² University of Tokyo *³ Taisei Corporation

The performance design program of the water-cooled heat pump chiller which can be adapted for the ground source by spreadsheet software was developed. A single stage cycle or a cycle with a liquid gas heat exchanger can be calculated by this program, and a P-H diagram and a capacity diagram can be created by inputting heat exchange area, a compressor performance, etc. into this program. The machine design based on this program showed that a development machine could expect the improvement in efficiency of the increase of about 60% as compared with the conventional machine.

1. はじめに

地中熱利用ヒートポンプは外気よりも安定した熱源である土壌を利用することができるため空気熱源式ヒートポンプよりも効率が良くとされるが、地中熱源ヒートポンプシステムは地中熱交換器に係る費用が余分にかかるため、地中熱利用ヒートポンプのイニシャルコスト低減とランニングコスト低減が普及のカギとなる。ここでは、イニシャルコストの増加を抑えつつランニングコストを大幅に削減する地中熱源対応高効率水冷式ヒートポンプの開発においての設計ツールとして、独自の設計手法を用いて簡易的に性能特性を把握するためのプログラムを開発したのでこれを紹介する。

2. 高効率化のポイント

水冷式ヒートポンプの高効率化のポイントとしては以下の3つについて検討し、プログラムのパラメータとして反映できるようにした。比較用に従来機の基本構成を表にまとめる。

表-1 従来機水冷式ヒートポンプチラー基本構成

圧縮機	スクロール式圧縮機 (圧縮機 A)
容量	15 馬力相当
熱交換器	銅多重管式
サイクル	単段サイクル
冷媒	R407C

表-2 開発機水冷式ヒートポンプチラー基本構成

圧縮機	新型スクロール式圧縮機 (圧縮機 C)
容量	13 馬力相当
熱交換器	SUS プレート式 (伝熱面積約 2 倍)
サイクル	液ガス熱交換器付きサイクル
冷媒	R407C(変化なし)

2.1 プレート式熱交換器の採用

水冷式ヒートポンプチラーの凝縮器兼蒸発器として従来は銅多重管式熱交換器を使用してきたが、性能を向上させるために機器内占有容積を大きくせずに伝熱面積を増大させることは銅多重管式熱交換器では限界がある。そこでプレート式熱交換器を採用し、従来の多重管式熱交換器の伝熱面積の約 2 倍となる面積となる容量を選定した。(写真-1)実際、伝熱面積は約 2 倍となったが従来の銅多重管式熱交換器の占有容積の約 1 / 2 となっている。



写真-1 熱交換器(左より多重管式, プレート式)

2.2 新型圧縮機の採用

従来のスクロール式圧縮機（圧縮機 A）に対して上位コンパクトとして製作されたスクロール圧縮機（圧縮機 C）の採用を検討した。新型の圧縮機は垂直方向のコンプライアンスをなくすことにより摩擦ロスを低減し、半径方向のベアリング遊びを大きくし遠心力によりシーリングを行うことにより性能向上を図っており、これにより効率向上を実現している。性能データを元にした圧縮機の圧縮機全効率（断熱効率×機械効率）と圧縮比の関係のグラフを他に検討した圧縮機 B も含めた 3 種類について示す。(写真-1, 図-1)

また、プレート式熱交換器の採用と次に述べる液ガス熱交換器付きサイクルの採用により能力アップも計れるため、圧縮機容量は 1 ランク小さい 13 馬力相当の圧縮機を採用した。



写真 - 2 圧縮機(左より A,B,C)

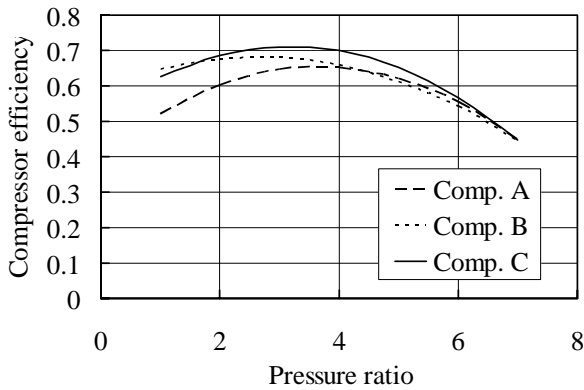


図 - 1 圧縮機全効率

2.3 液ガス熱交換器付きサイクルの採用

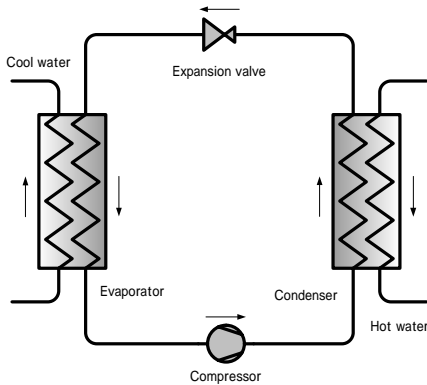


図 - 2 単段サイクル

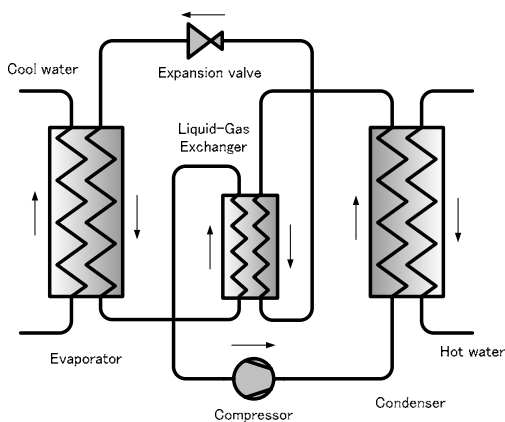


図 - 3 液ガス熱交換器付きサイクル

最も基本的な単段サイクル(図-2)から液ガス熱交換器付きサイクル(図-3)に変更することにより、蒸発温度の向上により能力とCOPの向上を見込むことができる。それは、蒸発器においてドライアウト面積がなくなり、

湿り面積が向上することによる伝熱性能の向上によるところと、非共沸混合冷媒の凝縮・蒸発過程における温度勾配を冷水・温水の温度勾配に対応でき、さらに冷媒ミストの除去ができることが理由である。また、過冷却増大により膨張弁前のフラッシュガスの防止にもなる。

3. 性能設計プログラムの概要

性能評価するためには圧縮機選定、熱交換器伝熱面積、サイクルの違い、冷温水利用温度など様々なパラメータについて計算する必要があるため、計算速度を向上させる必要がある。そこで、性能設計プログラムは表計算ソフトを用いて簡易的・近似的に行うこととした。以下にその概要を示す。

3.1 関数・パラメータ固定値

REFPROP Ver.6.02 より、冷媒(R407C)の飽和状態において、液、ガスそれぞれにおける温度に対する圧力、比重、エンタルピーと、圧力に対する温度、比重、エンタルピーについてのデータを用いて、多項式近似式を作成し、関数として飽和状態の物性値を利用できるようにした。また、圧縮機全効率を図-1 に示されるように多項式近似された特性曲線を用いて計算する。

変数は凝縮後飽和液温度と蒸発後飽和ガス温度の2つのみとし、他の状態の物性値は以下の固定パラメータを決めることにより計算によって求めた。

以下に使用した関数・パラメータ固定値をリストアップした。

- 1) 関数
 - a) 圧力(温度), 比重(温度), エンタルピー(温度)
 - b) 温度(圧力), 比重(圧力), エンタルピー(圧力)
 - c) 圧縮機全効率(圧縮機 A,B,C について多項式)
- 2) 冷媒特性・サイクル特性固定値
 - a) 比熱比
 - b) 圧力損失
 - c) 過熱度
 - d) 過冷却度(凝縮器、液ガス熱交換器)
 - e) 定圧比熱(ガス、液それぞれ 25 の値)
 - f) 熱通過率(凝縮、過冷却、蒸発、過熱域)
 - g) 冷温水入出口温度
- 3) 機器特性固定値
 - a) 圧縮機押しのけ量(電源周波数)
 - b) 熱交換器伝熱面積

3.2 式

過熱ガスを理想気体としたときの断熱圧縮の温度変化とエントロピー変化は p を圧力、 v を体積、 T を温度、 h をエンタルピー、 k を比熱比として、下付き文字 1 は圧縮前、下付き文字 2 は圧縮後とすると、

$$h_2 = h_1 + \frac{k}{k-1} p_1 v_1 \left\{ \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right\}, \quad T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}$$

と定められる。実際には圧縮機全効率 η を考慮して

$$h_2' = h_1 + \frac{(h_2 - h_1)}{\eta}, \quad T_2' = T_2 + \frac{(h_2' - h_2)}{c_p}$$

となる。ここで、現状のプログラムにおいては定圧比熱 C_p の値は簡易的に 25 における飽和ガス状態の値を固定値として用いている。

3.3 計算で求まる値

上記の関数・固定値・式より以下の値が計算される。

- 1) 能力(加熱、冷却)
- 2) 消費電力
- 3) COP(加熱、冷却)

パラメータを変更してこれらの値を計算することにより、性能評価比較を行うことができ、また、冷温水入出口温度を変えて計算することにより、定格性能の計算や性能線図の作成をすることができる。

3.4 計算方法(収束条件)

2つの変数を変動させることにより設定した熱交換器面積と冷媒温度、水温度、熱通過率、能力より逆算して求めた熱交換器面積の合計が一致した(差の絶対値が0.01m²未満になった)時に解が収束するとみなした。収束プログラムは表計算ソフトの定義済みマクロを用いた。

すべてのパラメータが適正に入力されてはじめて解が収束し、1つでも不適正なパラメータを入力すると解は発散する。

例えば、圧縮機容量と熱交換器容量が不釣り合いであるような場合収束しないため、実際にも冷凍サイクルとして不安定になり運転が不可能であると考えられる。したがって、このプログラムによって、性能を計算するだけでなく、ヒートポンプ部品の容量バランスや機器の大きさの過小・過大のチェックも行うことができる。

4. 計算結果

性能設計プログラムにより以下のような値やグラフを高速・簡易に作成することができ、機器構成の違いによる性能比較検討ができる。

4.1 定格性能

従来機と開発機のそれぞれについて定格性能の計算を行った結果を表-1、表-2に示す。

運転モードとしては冷房・暖房だけではなく氷蓄熱や融雪・給湯についても計算を行った。冷却と加熱の両方について能力とCOPが表示されているが、これは負荷側と熱源側の両方を表示することにより熱源側のポンプ流量の設計や熱回収時の合計COPを計算するために必要である。

冷却COPは3.5から5.5となっており約1.6倍のCOP向上が見込める計算結果となり、他の運転モードにおいても同様にCOP向上が見込めることがわかる。

表-1 従来機定格性能計算結果

運転モード	冷却能力[kW]	加熱能力[kW]	消費電力[kW]	冷却COP	加熱COP
冷房	44.0	56.6	12.7	3.5	4.5
暖房/熱回収	37.4	54.8	17.5	2.1	3.1
氷蓄熱	31.3	42.4	11.1	2.8	3.8
融雪	33.0	42.9	10.0	3.3	4.3
給湯/熱回収	39.7	55.3	15.7	2.5	3.5

表-2 開発機定格性能計算結果

運転モード	冷却能力[kW]	加熱能力[kW]	消費電力[kW]	冷却COP	加熱COP
冷房	45.6	53.9	8.3	5.5	6.5
暖房/熱回収	40.0	51.8	11.9	3.4	4.3
氷蓄熱	30.7	38.6	8.0	3.8	4.8
融雪	32.1	39.1	7.1	4.5	5.5
給湯/熱回収	41.6	52.4	10.9	3.8	4.8

冷房条件: 冷水 12 7 ; 温水 25 30
 暖房/熱回収条件: 冷水 12 7 ; 温水 40 45
 氷蓄熱条件: 冷水-2 -5 ; 温水 20 25
 融雪条件: 冷水 0 -5 ; 温水 20 25
 給湯/熱回収条件: 冷水 12 7 ; 温水 15 50

4.2 P-H線図

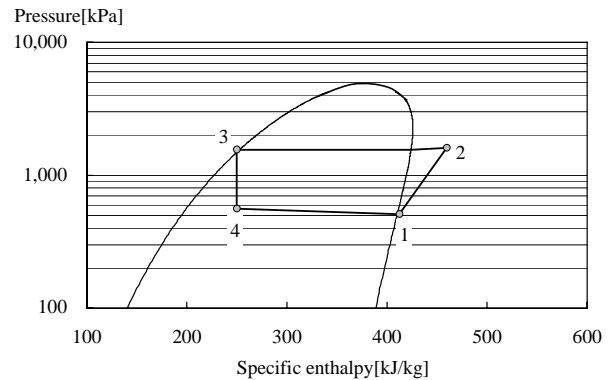


図-4 P-H線図(従来機・冷房条件・単段サイクル)

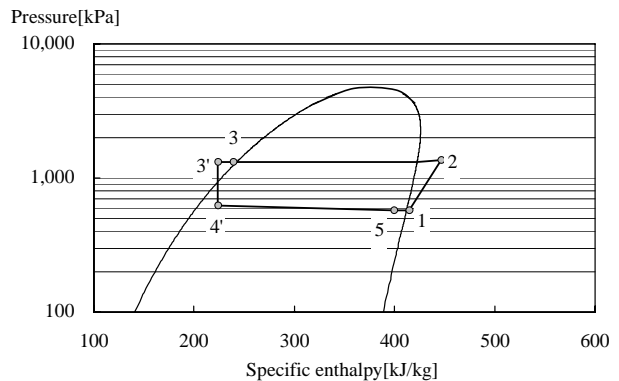


図-5 P-H線図(開発機・冷房条件・液ガス熱交換器付きサイクル)

冷凍サイクルのP-H線図の作成も表計算プログラム上で行うことができ、ここでは代表例として従来機と開発機の冷房条件における線図を紹介する。従来機は単段サイクル(図-4)であるのに対して、開発機は液ガス熱交換器付きサイクル(図-5)であり、グラフ上の3と5において液とガス(正確には液・ガス混合状態)が熱交換されていることが示される。

4.3 能力線図・COP線図

地中熱源対応水冷式ヒートポンプシステムを設計する場合、利用する冷温水温度は地中熱交換器の容量や土壌温度、負荷とのバランス等に応じて変化するため、それに応じた能力、消費電力、COPの算定が必要になり、能力線図・COP線図が不可欠となる。

ここでは代表例として性能計算プログラムで作成された開発機の能力線図(図-6, 図-7, 図-8)・COP線図(図-9, 図-10)を示す。

なお、能力線図・COP線図の作成の計算時間はCPU: Intel Pentium4 2.4GHz、メモリ: 512MBの環境で合計約20秒弱であった。

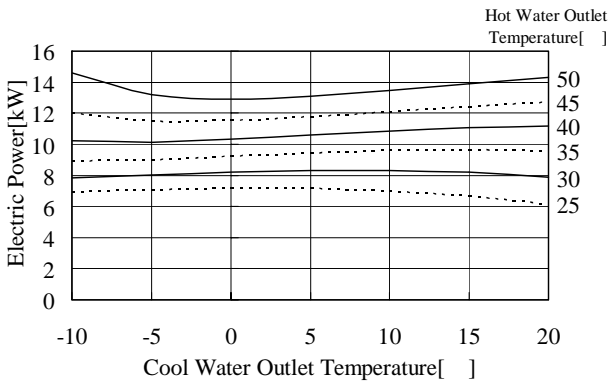


図-6 能力線図(開発機・消費電力)

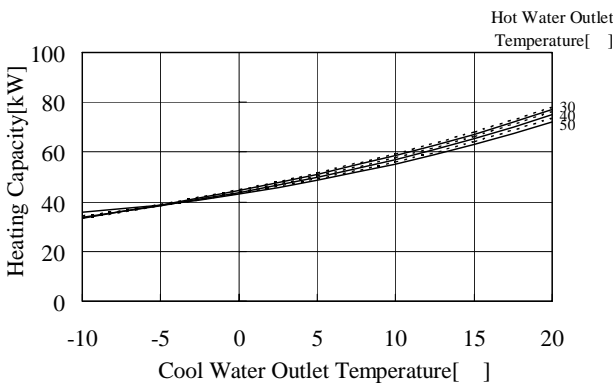


図-7 能力線図(開発機・消費電力)

5. おわりに

性能計算プログラムによる簡易シミュレーションは地中熱源対応水冷式ヒートポンプの性能向上のための良い設計指針となる。

今後は、計算結果と実機による計測結果と比較して妥当性を検証するとともに、近似の精度を高めることが望まれる。

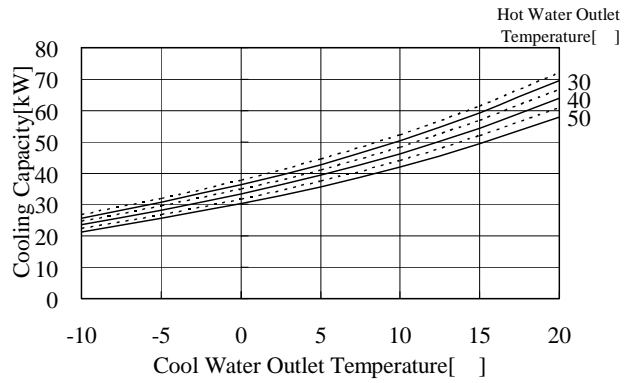


図-8 能力線図(開発機・消費電力)

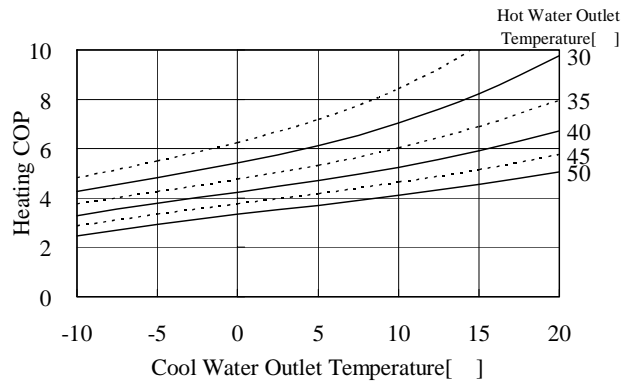


図-9 能力線図(開発機・消費電力)

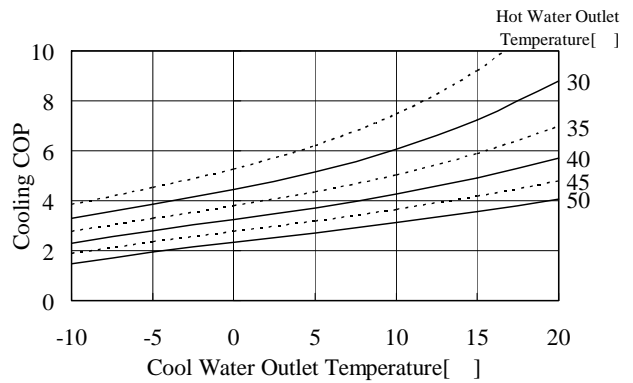


図-10 能力線図(開発機・消費電力)

本研究の一部は、2003年10月より平成15年度(独新エネルギー・産業技術総合開発機構『エネルギー使用合理化技術戦略的開発 エネルギー使用合理化技術実用化開発 大都市における基礎杭を利用した地中熱空調システムの普及・実用化に関する研究(研究代表者 東京大学 大岡龍三助教授)』)によった。

参考文献

- 1) 「冷凍機および熱ポンプ」(山田治夫著・養賢堂)
- 2) 「冷凍機の理論と性能」(源生一太郎著・日本冷凍協会)
- 3) 「熱交換器設計ハンドブック」(尾花英朗著・工学図書)