

地域冷暖房プラントにおけるシステム効率向上の取組み (第3報) 密閉式冷却加熱塔最適運転の改善検討と効果検証

○山川 莉加 (新菱冷熱工業) 福井 雅英 (新菱冷熱工業)
矢島 和樹 (新菱冷熱工業) 呉 楊駿 (新菱冷熱工業)
丸尾 敬仁 (東武エネルギー・マネジメント)

本研究では、ヒーティングタワーヒートポンプシステムの効率向上のため、ブライン温度の最適化に取り組んでいる。既報にて、外気乾球温度に応じてブライン温度を決定する制御方法を考案し、実在の地域冷暖房プラントの自動制御に導入した結果を報告した。本報ではさらなる効率向上に取り組んだ結果を述べる。

ブライン温度の設定値は外気乾球温度を変数とする一次式から算出され、一次式の係数は様々な条件におけるシミュレーション結果から導き出している。そのための確かな設定値を算出するためにはシミュレーションモデルの精度向上が重要となる。

既報で報告したモデルはヒーティングタワーファンの少風量域のデータが少ない状況で構築され、精度には改善の余地が残っていた。考案した制御方法の運用により増えた少風量域のデータを反映させ、モデルを修正した。修正モデルは実績値に対し誤差が0.3%となった。

修正モデルを用いて新たに求めた係数を導入し、運用データからエネルギー削減効果を確認したところ、ファンを定格風量で運用する従来制御に比べ4.4%減、モデル修正前の係数による制御に比べ1.5%減であった。本取り組みによりシステムの効率向上が実現できた。

1. はじめに

本研究では、ヒーティングタワーヒートポンプシステム(以下、HTHPシステム)におけるブライン温度の最適化に取り組んでいる。第1報¹⁾にて、外気乾球温度の一次式による制御方法を考案したことを報告した。第2報²⁾では、実在の地域冷暖房プラント(以下、対象施設)に考案した制御方法を導入し、エネルギー削減効果を示した。

本報では、さらなる効率向上に向けて一次式を修正し、その修正方法とエネルギー削減効果について、報告する。

2. ブライン温度の制御方法の概要

対象施設のHTHPシステムの概略フローを図-1に示す。HTHPシステムは、ヒートポンプチラー(以下、HP)、ヒーティングタワー(以下、HT)、ブラインポンプ(以下、PCD)から構成される。最適化を導入する前の制御(以下、従来制御)では、HTのファンを常に定格周波数で運転し、できる限り高いブライン温度となるよう運用していた。

第1報では、エネルギーシミュレーションを基にブライン温度とHTHPシステムの消費電力の関係を求め、外気乾球温度の一次式によって、ブライン温度を最適に制御する方法を考案した。制御方法を式(1)～(3)に示す。なお、式(2)に示す外気露点温度による制約条件については、ブライン温度を下げ過ぎるとHTのコイルフィンに着霜しやすくなるため、着霜の対策として設けた。また、式(1)の係数a,bを表-1に示す。係数は、HPとHTの運転組合せに応じて、異なる値を適用した。運転組合せ

$$T_{B1} = aT_{DB} + b \quad (1)$$

$$T_{B2} = \begin{cases} T_{DP} + c & (T_{DP} < 0) \\ c & (T_{DP} \geq 0) \end{cases} \quad (2)$$

$$T_{B3} = \max(T_{B1}, T_{B2}) \quad (3)$$

T_{B1} : ブライン出口温度設定値(制約なし) [°C]

T_{B2} : ブライン出口温度(制約条件) [°C]

T_{B3} : ブライン出口温度設定値(制約あり) [°C]

T_{DB} : 外気乾球温度 [°C]

T_{DP} : 外気露点温度 [°C]

a, b : 定数 [-]

c : 定数(具体的な設定例、c=1) [°C]

については、基本的に、R6の運転時はHT71-78とHT81-84を使用し、R7やR8の運転時はHT51-56とHT61-68を使用する。ただし、R8の運転時のみは、バルブA,Bの開閉によりHT71-78とHT81-84を使用することも可能になっている。

第2報では、式(1)～(3)と表-1の係数を導入した運用データから、HTのブライン温度制御の導入効果を報告した。しかし、導入効果は、シミュレーションで推定された効果より小さかった。その原因を調査したところ、外気乾球温度が高い場合に、ブライン温度が設定値に達していないことがあると判明した。この場合、係数aを小さくすることで改善できる可能性がある。このように運用データの分析に基づき、一時的な措置として、係数を仮に設定することとした。変更した係数を表-2に示す。

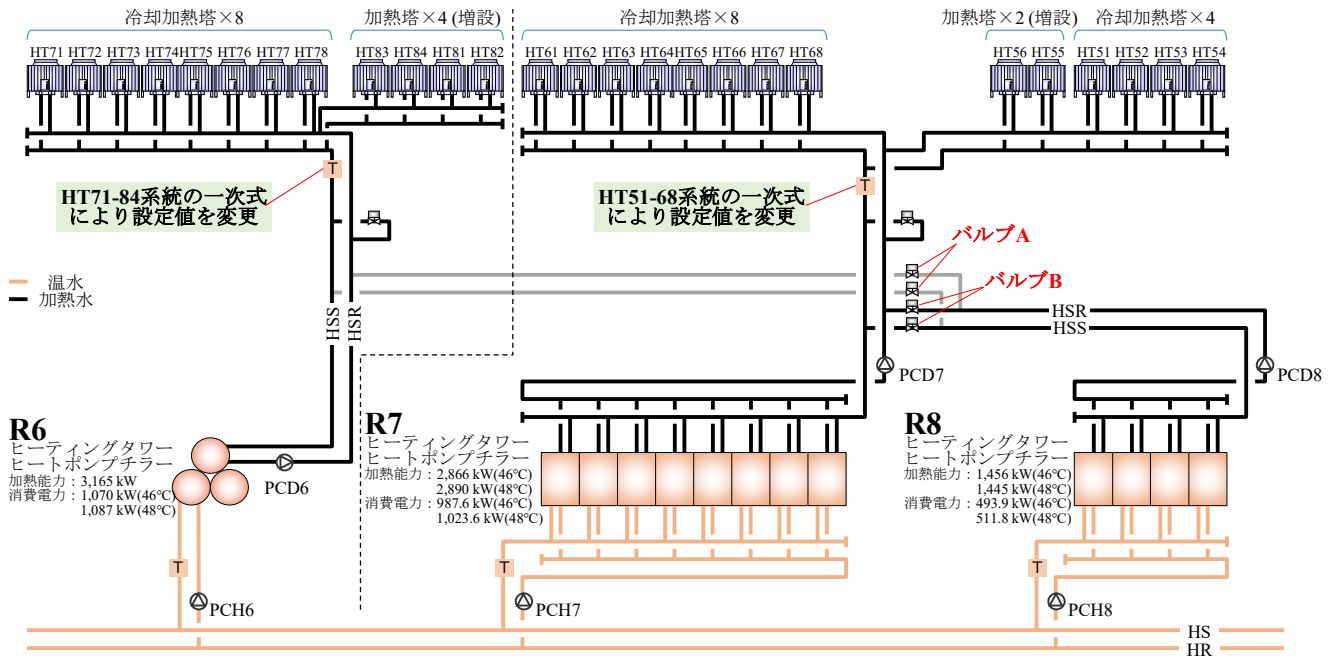


図-1 HTHP システムの概略フロー

表-1 ブライン設定温度を求める一次式 (2020年度変更前)

運転台数	R6	R7	R8	バルブ A	ブライン温度を決定する一次式
	運転:1 停止:0	運転:1 停止:0	運転:1 停止:0	開:1 閉:0	
HT71-84 系統	1 0	- -	0 1	- 1	$1.093 \times T_{DB} - 10.443$ $1.205 \times T_{DB} - 8.453$
HT51-68 系統	- -	1 0	1 1	1 0	$1.072 \times T_{DB} - 8.340$ $1.072 \times T_{DB} - 8.340$ $1.144 \times T_{DB} - 7.449$ $0.962 \times T_{DB} - 8.738$

† T_{DB} : 外気乾球温度

表-2 ブライン設定温度を求める一次式 (2020年度変更後)

運転台数	R6	R7	R8	バルブ A	ブライン温度を決定する一次式
	運転:1 停止:0	運転:1 停止:0	運転:1 停止:0	開:1 閉:0	
HT71-84 系統	1 0	- -	0 1	- 1	$1.093 \times T_{DB} - 10.443$ $1.205 \times T_{DB} - 8.453$
HT51-68 系統	- -	1 0	1 1	1 0	$0.930 \times T_{DB} - 8.340$ $0.930 \times T_{DB} - 8.340$ $1.144 \times T_{DB} - 7.449$ $0.962 \times T_{DB} - 10.738$

† 表-1 からの変更点を太字で示す。

3. ブライン設定温度を求める一次式の改善

3.1 シミュレーションモデルの修正と精度向上

シミュレーションで求めた係数(表-1)を、分析に基づき仮に設定した係数(表-2)に変更することで、エネルギー削減効果が向上した。その原因の一つは、シミュレーションモデル(以下、モデル)の精度にあると考えられる。表-1の係数を求める際に使用したモデルは、2018年度の運用データに基づき、作成された。2018年度を含む運用データのHTファン周波数の頻度を図-2に示す。

■ HT51~68 ファン周波数 ■ HT51~68 ファン周波数
 ■ HT71~84 ファン周波数 ■ HT71~84 ファン周波数

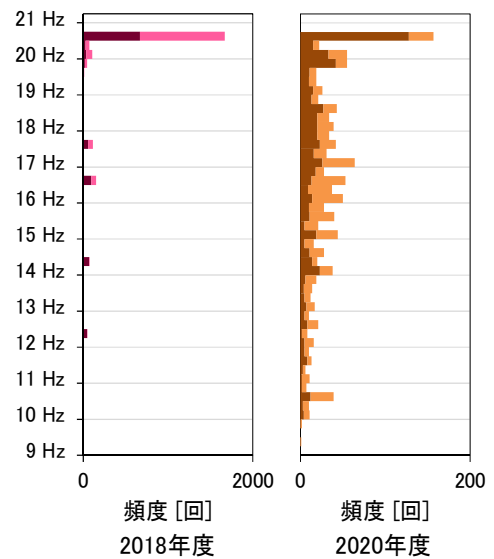


図-2 運用データにおけるHTファン周波数の頻度

なお、2018年度は試験的に、厳寒期(12月から2月)は定格周波数(20.75 Hz)とし、その他の期間は周波数を段階的に下げる運転を行っていた。しかし、結果として低い周波数で運転したデータは少なかった。そのため、作成されたHTのモデルは変風量時の精度が低いことが懸念される。モデルに基づき求めた表-1の係数も、改善の余地があると考えられる。

2020年度の運用では、式(1)~(3)と表-1や表-2による自動制御が導入され、低い周波数で運転したデータが蓄積された。運用データのHTファン周波数の頻度について、2018年度と2020年度の比較を図-2に示す。

そこで、本報では2020年度のデータを用い、モデルの精度向上とシミュレーションに基づく係数の修正を行った。

そのうえで、意図したとおりにモデルの精度が向上していることを確認するため、修正前後のモデルにおいて精度検証を行った。精度検証には、2021年度の運用データを用いた。運用データの一部（設定温度や流量等）を入力条件とし、実際の運用を再現するシミュレーションを行い、算出された消費電力量と、実績の消費電力量を比較した。2021年度10月～3月期間合計消費電力量に関して、実績値とシミュレーション結果の比較を、**図-3**に示す。なお、シミュレーション結果は、修正前のモデルによる結果を「Sim 旧モデル」、修正後のモデルによる結果を「Sim 新モデル」とした。HTHPシステム全体の消費電力量では、旧モデルや新モデルの結果と実績値の差は、それぞれ-1.7%、-0.3%となった。モデルの修正によりシミュレーション精度が向上していることを確認できた。また、新モデルの結果と実績値の差が-0.3%であることから、新モデルの精度は十分に高いと考えられる。

3.2 ブライン流量の変化を考慮した一次式の作成

対象施設のHPは、ブライン温度に応じて2段階の流量（多いほうの運転を「増流量あり」、少ないほうの運転を「増流量なし」とする）に切り替える制御を行っている。2020年度までの取り組みでは、常に「増流量あり」の状態として一次式の係数を算出していた。流量の変化を考慮して一次式の係数を修正することにより、より実態に合った最適運転ができる可能性がある。

そこで、3.1節で修正したモデルを用いて、「増流量あり」と「増流量なし」のそれぞれの場合の最適なブライン温度を求めた。それらから、新たに一次式の係数を算出した。算出した一次式を**表-3**に示す。

4. 運用データにおける効果検証

(1) 検証条件

3章に記載した一次式の修正の効果と第1報からの一連の取り組みの効果を調査するため、運用データの分析を行った。2017年度、2020年度、2021年度のHTを使用する暖房期間にてエネルギー削減効果を比較した。考案した制御方法で運転したのは2020年度以降である。比較対象の各年度で運転方法が異なるため、その内容を次に示す。

2017年度 : 従来制御

(HTファンは常に定格周波数とする)

2020年度

～2月15日 : 式(1)～(3)、表-1による自動制御

2月17日～ : 式(1)～(3)、表-2による自動制御

2021年度 : 式(1)～(3)、表-3による自動制御

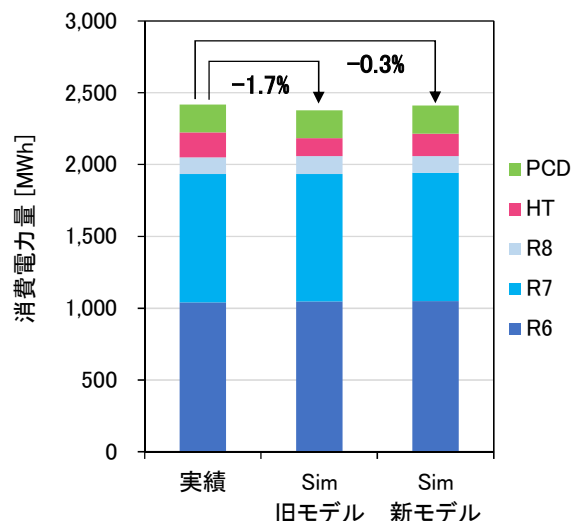


図-3 実績値とシミュレーション結果の比較

表-3 ブライン設定温度を定める一次式 (2021年度)

運転台数	R6	R7	R8	バルブ A	ブライン温度を決定する一次式
	運転: 1 停止: 0	運転: 1 停止: 0	開: 1 閉: 0	開: 1 閉: 0	
HT71-84 系統	1	-	0	-	$1.100 \times T_{DB} - 11.769$
	0	-	1	1	$0.930 \times T_{DB} - 7.284$
HT51-68 系統	-	1	1	1	$0.972 \times T_{DB} - 9.327$
	-	1	0	-	$0.972 \times T_{DB} - 9.327$
	-	0	1	0	$1.064 \times T_{DB} - 8.526$
	-	1	1	0	$0.878 \times T_{DB} - 9.770$

各年度の期間は、2021年度と条件を揃えるため、1月6日～3月31日とした。なお、2020年度は期間中に表-1による制御から表-2による制御に変更されたため、それぞれの制御の導入効果と、表-3による制御の導入効果を比較するためには、期間を分けて集計を行う必要がある。したがって、1月6日～2月15日を期間A、2月17日～3月31日を期間Bとし、それぞれの期間において各年度を比較した。

(2) 一次エネルギー原単位の比較

運用データでの比較のため、外気や負荷、その他の条件を統一することは難しいが、できる限り条件を揃えてHTブライン温度制御の効果に限定した比較を行った。期間A、Bにおける各年度の一次エネルギー原単位を**図-4**、**5**に示す。なお、一次エネルギー原単位は、分子がHP、HT、PCDの電力量を一次換算（換算係数：9.76MJ/kWh）したものであり、分母がHPの温熱製造熱量[GJ]である。また、外気乾球温度の頻度を**図-6**、**7**に示す。外気乾球温度は、期間Aは4.5～8.5℃のデータ、期間Bは7.5～12℃のデータ（**図-6**、**7**に黒線で示す）を集計対象とした。両期間とも、温水出口温度は45～47℃のデータを対象とし、対象施設で行われた他の取組み（水質改善等によるHP単体COPの向上³⁾の影響を加味して補正を行った。

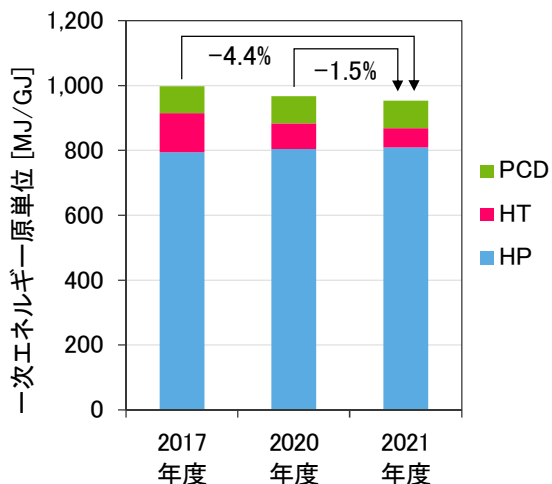


図-4 一次エネルギー原単位の比較 (期間 A)

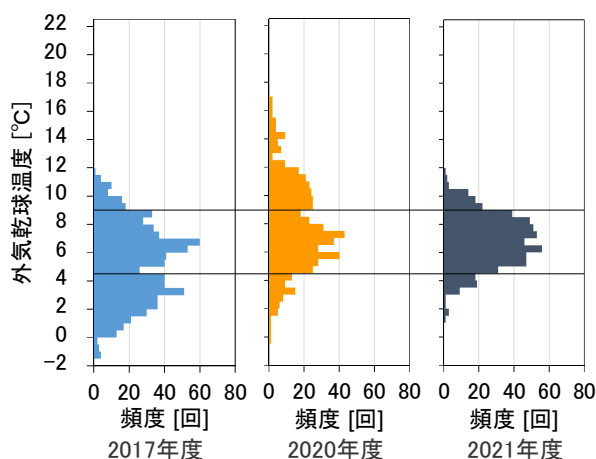


図-6 各年度の外気乾球温度の頻度 (期間 A)

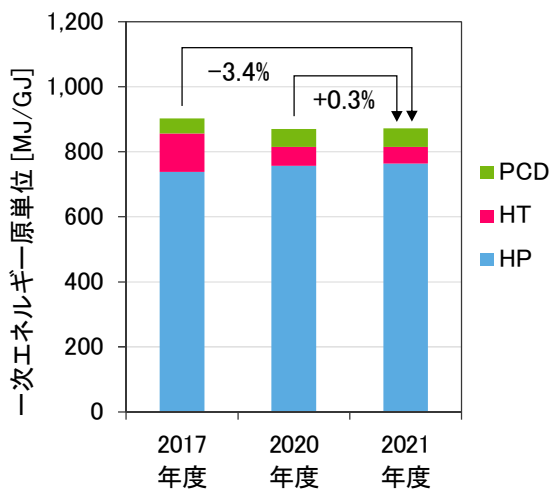


図-5 一次エネルギー原単位の比較 (期間 B)

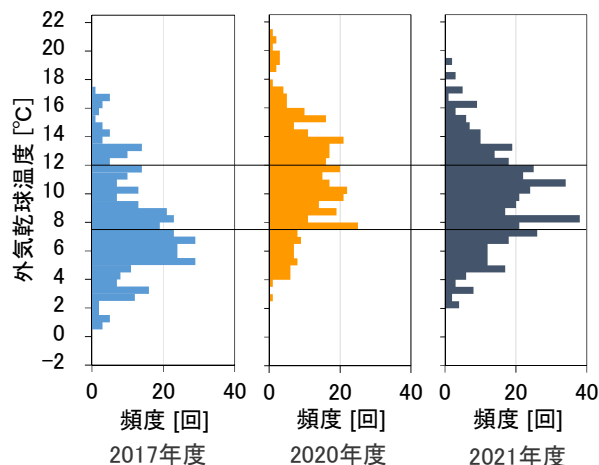


図-7 各年度の外気乾球温度の頻度 (期間 B)

2020 年度に対して 2021 年度の一次エネルギー原単位は、期間 A では 1.5 % の減少となり、期間 B では 0.3 % の増加となった。2021 年度の一次式 (表-3) は、2020 年度修正前の一次式 (表-1) と比較してエネルギー削減効果が向上し、2020 年度修正後の一次式 (表-2) と同程度のエネルギー削減効果がみられた。また、2017 年度に対して 2021 年度の一次エネルギーは、期間 A では 4.4 % の減少、期間 B では 3.4 % の減少となり、一連の取り組みによる効果が確認できた。

5. まとめ

HTHP システムにて運用中であるブライン温度の最適自動制御において、さらなる効率向上のための取り組みを行った。

まず、ブライン温度を制御する一次式の係数を求めるシミュレーションモデルの精度を改善した。また、修正したモデルは実績値に対する誤差が 0.3 % 程度であり、高い精度を有していることを確認した。そのうえで、ブライン

流量の変化を考慮し、一次式の係数を修正した。

つぎに、修正した一次式の係数を運用に導入し、運用データからエネルギー削減効果を確認した。その削減効果は、従来制御に比較して 4.4 %、シミュレーションモデルの修正を行う前に比較して 1.5 % であった。

今後も、定期的にシミュレーションモデルの精度検証を行い、必要に応じて一次式を精査し、高いエネルギー効率を維持していく必要がある。

参考文献

- 1) 矢島, 他. (2020). 地域冷暖房プラントにおけるシステム効率向上の取り組み (第 1 報). 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, 第 9 巻. pp. 169-172
- 2) 矢島, 他. (2021). 地域冷暖房プラントにおけるシステム効率向上の取り組み (第 2 報). 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, 第 9 巻. pp. 33-36
- 3) 丸尾, 他. (2021). 無薬注型防食システムによる既設地域冷暖房施設の腐食対策 (第 6 報). 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, 第 2 巻. pp. 213-21