

吸着式冷凍機の冷水出口温度一定化のための自動制御に関する検討

山下 哲生

情報技術課

1 はじめに

温室効果ガス削減のため、自然エネルギーや低温排熱などの未利用エネルギーの有効活用が求められている。吸着式冷凍機は、低温の温水(50~80℃)から冷水を作ることができるため、太陽熱をはじめ、生産工程で発生する熱、燃料電池の排熱等の様々な低温排熱の利用が可能であり、その有効利用に対する期待は大きい。しかし、図1に示すように吸着式冷凍機の特長として機器出力である冷水出口温度が一定化しないことが分かっている¹⁾。そのため吸着式冷凍機で作られた冷水を空調用熱交換器や温度成層型蓄熱層に直接送ることが困難で、これらの手前に冷水バッファータンクを設置しなければならず、設備増設、スペース増大がその普及の阻害要因の1つとなっている。

これまで、冷水出口温度一定化のため装置の稼働に必要な30℃前後の冷却水の温度を一定値とし、冷水出口温度をフィードバックしながら、冷却水量のPID制御を行い、その有効性を確認した。しかし、実用運転時には外気条件に応じて、冷却水をつくる冷却塔の能力が変化し、冷却水温度に変動が生じる。又、熱交換器の熱容量による装置顕熱によっても冷却水温度が変動する。そこで本報では、実用運転時と同様に、冷却水温度に変動を与えて冷却水量のPID制御を行い、冷却水温度変動時においても冷水出口温度一定化のためのPID制御が有効であることを確かめる。

2 吸着式冷凍機の駆動原理

図2に吸着式冷凍機の概要を示す。吸着式冷凍機の内部は真空ポンプにより稼働開始前に真空状態とする。内部は吸着剤が塗布されている熱交換器(2基)、蒸発器、凝縮器で構成されている。

駆動は2つの主プロセス(A,B)に分けられる。図2はプロセスAの状態である。プロセスAではダンパーD1, D4が開いており、蒸発器で蒸気となった冷媒が熱交換器2に吸着される。冷媒が蒸発する際に、蒸発器内を流れる水から蒸発潜熱を奪うことにより冷水が生成される。熱交換器2では、吸着量を減少させる吸着熱を除去するために冷却水を流す。この熱交換器内における吸着熱の除去を冷却水量でコント

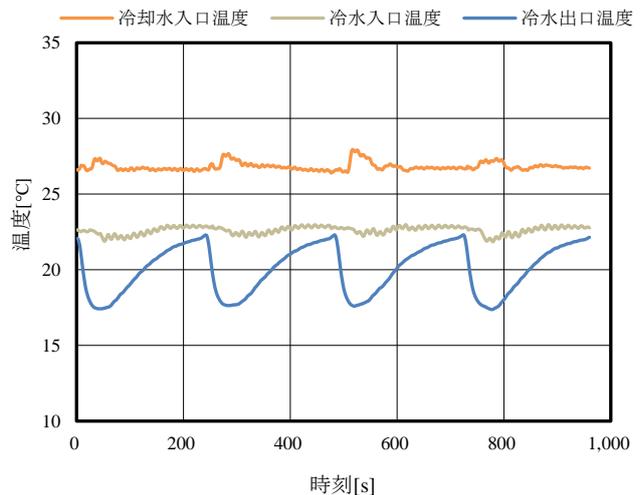


図1. 定格時の冷却水温度、冷水出入口温度の時間推移 (冷却水温度 27℃)

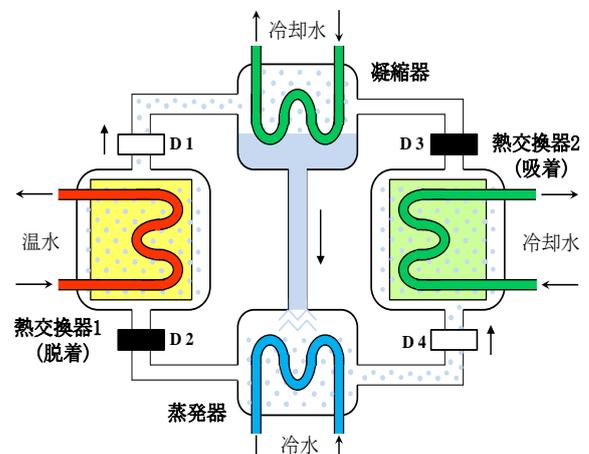


図2. 定吸着式冷凍機 (プロセス A) ¹⁾

ロールすることで、吸着速度を制御することが可能となる。熱交換器 1 では既に吸着されている冷媒が温水により脱着され、冷却水が流れる凝縮器において凝縮する。この時の温水が吸着式冷凍機の駆動熱源となる。プロセス B は、プロセス A の逆工程である。ダンパー D2, D3 が開き、熱交換器 1 で吸着、熱交換器 2 で脱着が行われる。プロセス B 終了後、プロセス A に戻り再び一連の工程を繰り返す。このプロセスに要する時間をサイクルタイムと呼び、サイクルタイム毎に同波形の出力の冷水が生成される。常にどちらか一方の吸着材熱交換器が吸着を行うことで、連続的に冷水を生成する仕組みになっている。

以上のように、吸着式冷凍機は 2 つの熱交換器を用いて吸脱着交互運転を行うため、出力が変動する。

3 実験概要

3.1 実験装置の概要

図 3 に吸着式冷凍機の外観、図 4 に実験システムの概要を示す。図 4 中の T は温度測定点、M は流量測定点を表している。一点鎖線で囲まれた部分は吸着式冷凍機の試作機(820×1340×1450mm, 定格 8.6kW)である。この場合、熱交換器 1 が吸着、熱交換器 2 が脱着を行っている。ヒーターにより加熱された温水が熱交換器 2(脱着)に供給された後、温水槽を通じてヒーターが内蔵された温水循環装置に戻る。冷却水は冷却塔により熱交換器 1(吸着)に供給された後に凝縮器を通じて冷却塔に戻る。模擬負荷用の冷水は冷却塔により蒸発器に供給され冷却塔に戻る。

また、熱交換器が脱・吸着から吸・脱着に移る準備工程では、熱交換器入口側の 2 つの三方弁が切り替わり、その後一定時間経過後に熱交換器出口側の 2 つの三方弁が切り替わることで配管内の温水と冷却水を入れ替える。

さらに熱交換器内の冷却水量に対して、冷水出口温度をフィードバックした PID 制御を行うため、熱交換器前に電動三方弁を設置した。電動三方弁は制御コントローラの信号により稼働する。冷水出口温度のモニターには测温抵抗体 Pt100 を使用した。PID 制御では、制御コントローラに実際の冷水出口温度と目標温度設定値を与え、冷水出口温度が設定値になるように電動三方弁で冷却水量の自動制御が行われる。熱交換器迂回用のバイパス配管に流れる冷却水量を調整することで、熱交換器へ流れる冷却水量を増減させることが可能である。バイパス配管を設けることにより、凝縮器への供給水量は低減させることなく定格値を保持することが可能である。これらより、熱交換器内の冷却水量を調整し、吸着速度を制御して冷水出口温度一定化を行う仕組みとなっている。



図 3. 吸着式冷凍機の外観

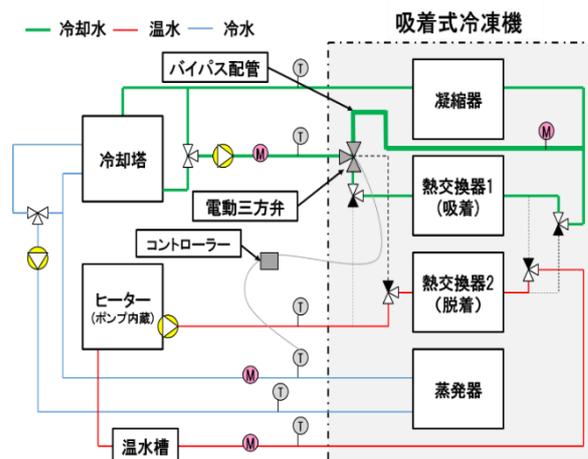


図 4. 実験システムの概要

3.2 実験方法

吸着速度は吸着材からの熱除去量に比例するため、熱交換器を通過する冷却水量を増減させ吸着速度を制御することにより冷水出口温度の一定化を試みる。

図5は、冷却水量と冷凍能力及び冷水出口温度の平均偏差との関係を示す。冷却水量が減少するにつれて、冷凍能力、冷水出口温度の平均偏差ともに減少する。20%以下になると冷凍能力が急激に落ちるが、平均偏差は比較的緩やかに減少する傾向にある。よって、冷水出口温度の一定化にあたり、冷凍能力の高いサイクルタイム内の序盤に冷却水量を絞り吸着を抑制させ、中盤以降に冷却水量を増加させ出力を保持する制御体系が有効である。これらの制御をPID制御により行い、冷却水量を自動制御する。尚、各サイクル終了時点から次サイクル開始時までの微小時間内に出力を大きく抑制するため、冷却水量を100%(定格値 127 l/min)近傍から10%台へと大きく変化させる制御が想定される。そのため、この微小時間内に電動三方弁の開度を全開から全閉近くまで変化させるが、電動三方弁の駆動速度の限界により、サイクル開始時に開度の補正を加える必要がある。

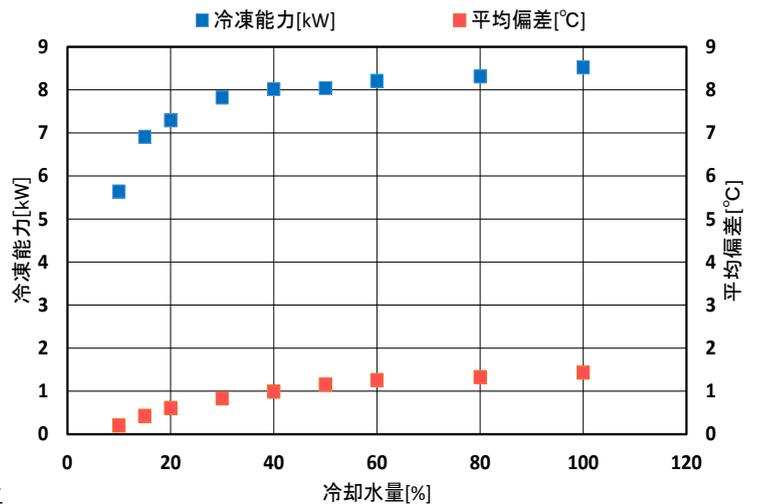


図5. 冷却水量と冷凍能力及び冷水出口温度の平均偏差との関係

3.3 実験条件

表1に実験条件を示す。基準冷却水温度 27, 30, 32°Cそれぞれの場合について冷却水温度変動なしの場合、冷却水温度にサイクルタイム(240s)内で1.0°C刻みで変動を与えた変動パターン1の場合、1.5°C刻みで変動を与えた変動パターン2の場合の計9条件について冷水出口温度一定化を試みる。冷却水流量はPID制御により自動的に調整される。尚、本吸着式冷凍機は潜熱・顕熱分離空調の室内顕熱負荷処理用の熱源機として使用することを想定しているため、冷水温度は一般の冷凍機に比べて高い値に設定した。

表1. 実験条件

冷却水温度 (°C) 基準値	冷却水温度 (°C) 変動なし	冷却水温度 (°C) 変動パターン1 (ΔT=1.0°C)			冷却水温度 (°C) 変動パターン2 (ΔT=1.5°C)		
	0~4分	0~1分	1~2分	2~4分	0~1分	1~2分	2~4分
27	27.0	29.0	28.0	27.0	30.0	28.5	27.0
30	30.0	32.0	31.0	30.0	33.0	31.5	30.0
32	32.0	34.0	33.0	32.0	35.0	33.5	32.0

*温水入口温度・定格流量 55(°C)・64.5(l/min),
冷水入口温度・定格流量 22(°C)・54(l/min), サイクルタイム 240(s)

3.4 性能評価指標

性能評価に用いる冷凍能力[W]と冷水出口温度の平均偏差[°C]は以下の式(1), (2)により定義した。

$$\text{冷凍能力} = \frac{\int_{t_c} m_{ch} c_{pw} (T_{ch, in} - T_{ch, out}) dt}{t_c} \dots\dots (1)$$

$$\text{平均偏差} = \frac{\sum_{i=0}^{t_c} |X_i - \bar{X}|}{t_c} \dots\dots (2)$$

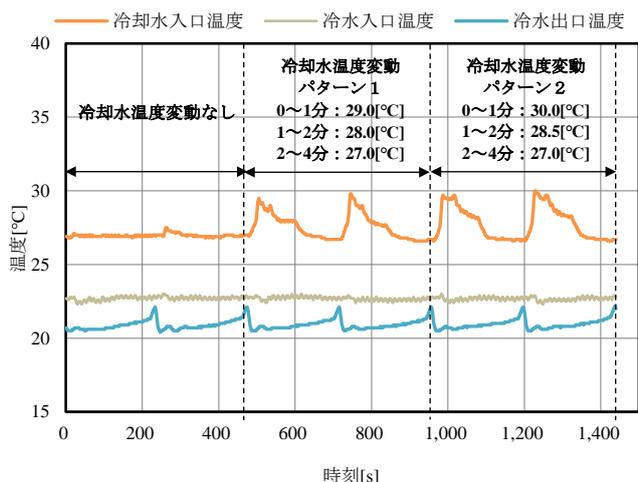
- c_{pw} : 水の比熱 [J/kg・K]
- m_{ch} : 冷水流量 [kg/s]
- $T_{ch, in}$: 冷水入口温度 [°C]
- $T_{ch, out}$: 冷水出口温度 [°C]
- X_i : 一秒毎の冷水出口温度 [°C]
- \bar{X} : 1サイクルの平均冷水出口温度 [°C]
- t : 時間 [s]
- t_c : サイクルタイム [s]

4 実験結果及び考察

図 6~8 に基準冷却水温度 27, 30 及び 32°C 時における冷却水量 PID 制御時の冷却水入口温度, 冷水出入口温度の時間推移を①冷却水温度変動なし, ②冷却水温度変動パターン 1, ③冷却水温度変動パターン 2 の 3 条件の比較で各 2 サイクル毎に示す. 各図の下の表に各サイクルにおける冷凍能力, 熱 COP, 冷水出口温度の平均偏差, 平均冷却水温度, 平均冷却水量の値を示す. 一般的に冷却水温度が上昇すると, 冷凍能力は低下するが, 基準冷却水温度 27, 30, 32°C のいずれの場合においても, 冷却水温度変動なし, 変動パターン 1, 変動パターン 2 の冷凍能力及び熱 COP はほぼ同等の値となった. また, 基準冷却水温度 27, 30, 32°C のいずれの場合においても, 冷却水温度変動なしの場合, 変動パターン 1 の場合, 変動パターン 2 の場合の平均偏差はほぼ同等の値となった. 冷却水温度変動なしの場合と変動有の場合とで, ほぼ同等の平均偏差が得られた.

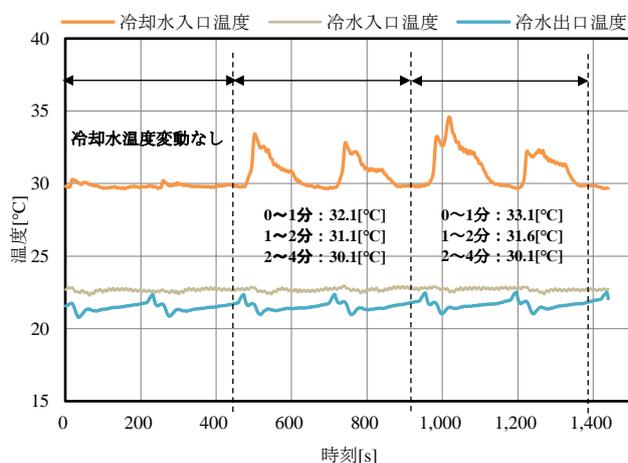
冷却水温度に変動を与えても装置の性能にほぼ変化がなかったのは, 冷却水入口温度の上昇に対し, 冷却水量を増加させる制御が行われたことで熱交換器の徐熱量の低下を防ぎ, 性能が保持されたためと考えられる.

図 9 に基準冷却水温度 27°C の場合のサイクルタイム前半 2 分間の平均冷却水量及び後半 2 分間の平均冷却水量を, ①冷却水温度変動なし, ②冷却水温度変動パターン 1, ③冷却水温度変動パターン 2 の 3 条件の比較を示す. 各条件の 1 サイクル目において吸着速度の速いサイクルタイム前半 2 分に着目すると, 冷却水温度変動なしの場合は平均冷却水量 17.9L/min に対し, 変動パターン 1 の場合 20.4L/min, 変動パターン 2 の場合 20.8L/min となり, それぞれ約 13%, 14% の増加がみられた. 各条件の 2 サイクル目においても同様の結果が見られる. PID 制御により, 冷却水入口温度が高い変動時の前半において, 冷却水量を増加させる制御が行われたものと考えられる. 図は省略するが基準冷却水温度 30, 32°C においても同様に, サイクル序盤の冷却水量を増加させる制御が行われていた. 基準冷却水温度が高くなるにつれ, 冷却水量の増加量が多くなっていた. 同じ冷



	冷却水温度変動なし		冷却水温度変動パターン 1 ($\Delta T=1.0^\circ\text{C}$)		冷却水温度変動パターン 2 ($\Delta T=1.5^\circ\text{C}$)	
	サイクル 1	サイクル 2	サイクル 1	サイクル 2	サイクル 1	サイクル 2
冷凍能力[kW]	6.8	6.9	6.9	6.5	6.6	6.4
熱 COP	0.43	0.43	0.45	0.42	0.44	0.42
平均偏差[°C]	0.26	0.26	0.24	0.23	0.23	0.26
平均冷却水温度[°C]	26.9	27.0	27.6	27.5	27.7	27.8
平均冷却水量 [L/min]	27.1	28.3	29.0	27.9	28.9	30.2
(サイクル前半 2 分)	(17.9)	(18.7)	(20.4)	(20.1)	(20.8)	(21.6)
(サイクル後半 2 分)	(36.3)	(37.9)	(37.6)	(35.6)	(37.0)	(38.9)

図 6. PID 制御時の冷却水入口温度, 冷水出入口温度の時間推移 (基準冷却水温度 27°C)



	冷却水温度変動なし		冷却水温度変動パターン 1 ($\Delta T=1.0^\circ\text{C}$)		冷却水温度変動パターン 2 ($\Delta T=1.5^\circ\text{C}$)	
	サイクル 1	サイクル 2	サイクル 1	サイクル 2	サイクル 1	サイクル 2
冷凍能力[kW]	4.3	4.4	4.4	4.3	4.3	3.8
熱 COP	0.35	0.36	0.39	0.39	0.38	0.33
平均偏差[°C]	0.23	0.21	0.19	0.24	0.20	0.23
平均冷却水温度[°C]	29.8	29.9	30.8	30.7	31.5	30.8
平均冷却水量 [L/min]	26.1	25.2	25.8	30.2	33.5	35.6
(サイクル前半 2 分)	(18.1)	(17.4)	(20.0)	(21.3)	(23.8)	(24.0)
(サイクル後半 2 分)	(34.2)	(33.0)	(31.6)	(39.1)	(43.3)	(47.2)

図 7. PID 制御時の冷却水入口温度, 冷水出入口温度の時間推移 (基準冷却水温度 30°C)

却水量では、冷却水温度が高いほど熱交換器の除熱量は小さくなるため、冷却水量を増加させることにより、除熱量を維持したものと考えられる。

5 まとめ

低温排熱駆動型吸着式冷凍機の冷却水温度に変動を与えた場合において、冷却水量を PID 制御により自動調整することによって冷水出口温度の一定化を図った。実測及び解析により以下の知見を得た。

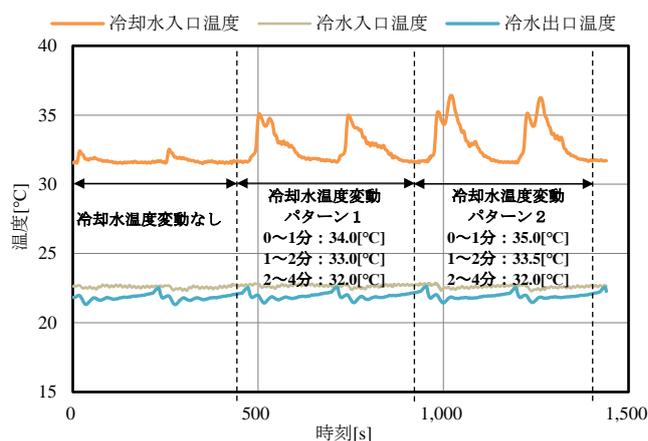
- 1) 基準冷却水温度 27, 30, 32°Cの各条件において、冷水出口温度の平均偏差は、冷却水温度に変動を与えた場合も変動を与えない場合とほぼ同等の値となった。その値はいずれの条件でも 0.26°C以下となった。この平均偏差は一般空調において高精度と言える。
- 2) 基準冷却水温度 27, 30, 32°Cの各条件において、冷凍能力と熱 COP も、冷却水温度に変動を与えた場合と変動を与えない場合とで、ほぼ同等の値となった。
- 3) 基準冷却水温度 27, 30, 32°Cの各条件において、吸着速度の速いサイクル前半 2 分間の平均冷却水量を比較すると、冷却水温度に変動を与えた場合の方が、変動を与えない場合より増加していた。PID 制御により冷却水量が増加し、吸着熱の除熱量低下を抑制し、冷凍機の性能が保持できたものと考えられる。
- 4) 本実験により、冷却水温度に変動を与えた場合でも、PID 制御による冷水出口温度一定化が有効であることが確認できたため、外気条件や装置顕熱により冷却水温度が変動する実運転時においても、PID 制御による冷水出口温度一定化が可能であると考えられる。

謝 辞

本報は、NEDO(独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構)「戦略的省エネルギー技術革新プログラム／実用化開発／業務用ビル液冷空調システムの開発」(技術開発責任者 故松縄堅)による開発の成果を活用して発展させたものである。関係各位に深謝申し上げます。

参考文献

- 1) 弘中ら:低温再生型吸着材を用いた吸着式冷凍機の開発 第1報 試作機による基本性能の把握及び吸着材熱交換器増設の検討, 空気調和衛生工学会論文集, No.223(2015-10), pp.45-53



	冷却水温度変動なし		冷却水温度変動パターン1 ($\Delta T=1.0^{\circ}\text{C}$)		冷却水温度変動パターン2 ($\Delta T=1.5^{\circ}\text{C}$)	
	サイクル1	サイクル2	サイクル1	サイクル2	サイクル1	サイクル2
冷凍能力[kW]	2.8	2.7	2.9	2.7	2.7	2.4
熱 COP	0.28	0.27	0.30	0.28	0.28	0.26
平均偏差[°C]	0.17	0.18	0.17	0.17	0.15	0.15
平均冷却水温度[°C]	31.7	31.7	32.7	32.6	33.0	33.0
平均冷却水量 [L/min]	31.3	38.3	38.3	42.0	36.3	38.5
(サイクル前半2分)	(19.7)	(19.0)	(23.9)	(25.4)	(25.4)	(25.4)
(サイクル後半2分)	(42.8)	(42.9)	(52.6)	(58.6)	(46.9)	(51.5)

図 8. PID 制御時の冷却水入口温度、冷水出口温度の時間推移
(基準冷却水温度 32°C)

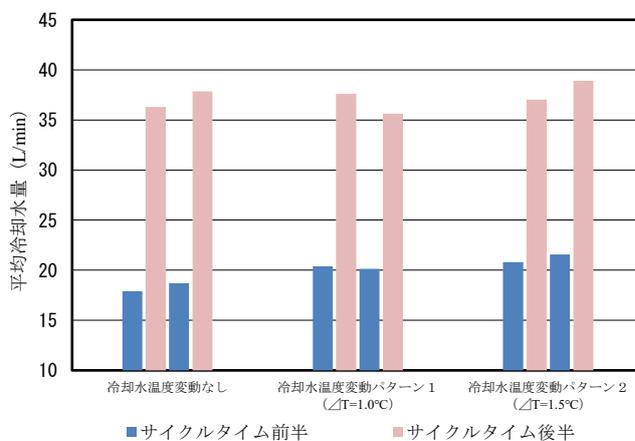


図 9. 平均冷却水量の変化
(基準冷却水温度 27°C)