

《解説》

ゼオライトを用いたヒートポンプ

名古屋工業技術試験所金属部

田尻耕治，朝比奈 正，小坂岑雄

1. はじめに

工業廃熱など温度レベルの低い熱の有効利用といった省エネルギーの見地から、また太陽熱利用技術に不可欠な蓄熱器の開発という見地から、ゼオライトなどの吸着材を用いた吸着式ヒートポンプの開発が1973年の石油危機以降活発に進められている^{1,2)}。吸着式ヒートポンプは可逆吸着反応の吸着熱を利用するもので、可逆化学反応の反応熱を利用するケミカルヒートポンプと原理的には同じであり、種々の温度レベルに対応が可能で、ヒートポンプ機能と蓄熱機能を併せ持ち、長期蓄エネルギー可能といった特長を持っている。さらに、吸着材は無害、非腐食性で吸着反応において体積変化がなく、長期使用における安定性も高いので、吸着式ヒートポンプは他の化学物質を用いるものに比べ、構造、構成を簡単にできる等の特長を持ち、実用化が最も近いと考えられる。実際、シリカゲルを用いる吸着式ヒートポンプが国内でも市販され始めている。

本稿では、ゼオライト等吸着材を用いたヒートポンプの原理、開発状況、問題点などについて記述したい。

2. 吸着式ヒートポンプの原理

図1に吸着式ヒートポンプの基本的構成図を示す。吸着材を充填した容器Aと、水などの凝縮性の被吸着物質(以下、水で代表させる)を入れた容器Bをバルブを介して結合した構成である。容器A、B上の平衡水蒸気圧-温度線図が図2のように模式的に表

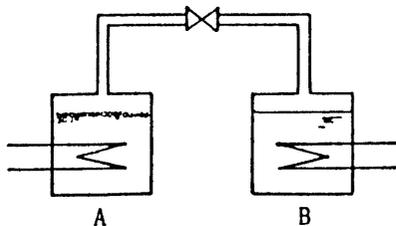


図1 吸着式ヒートポンプの基本的構成

わされるとする。バルブを開くと両容器の水蒸気圧が等しくなるように水蒸気が移動し、各容器で吸着、気化反応が進行して吸着熱、気化熱がそれぞれ放出、吸収され、A、B容器間に温度差を生じる。熱の供給、取出し場所、温度レベルにより次の4種類の運転が可能である。

(1) 蓄熱(図2(a))

A側に温度 T_H の熱を加え、B側で温度 T_L (=周囲温度)で放熱させる。吸着材に吸着されていた水はBへ移動し、吸着剤は再生される(蓄熱操作)。次にB側に温度 T_L の熱を供給すると、A側で水の吸着反応が進み、温度 T_H の熱が得られる(放熱操作)。

(2) 増熱[第1種ヒートポンプ](図2(b))

熱源温度 T_H が供給先必要温度 T_M より高い場合、吸着材の再生時には、A側に温度 T_H の熱を加えB側から放出される温度 T_M の熱を供給する。再生完了後B側に温度 T_L (=周囲温度)の熱を与えると、A側から温度 T_M の熱が供給される。熱源からの熱量より大量の熱が供給されることになる。

(3) 冷凍(図2(c))

熱源から温度 T_H の熱をA側に加え、B側で温度 T_L (=周囲温度)で放出させて吸着材を再生する(再生操作)。次に、A側を温度 T_L に保つよう熱を放出させながら吸着反応を進めさせると、B側では水の気化が進み、温度は T_C に下がって周囲から熱を奪う(冷凍操作)。

(4) 昇熱[第2種ヒートポンプ](図2(d))

熱源温度 T_M の場合、吸着材の再生時には温度 T_M の熱をA側に加え、B側で T_L (=周囲温度)の熱を放出させる。再生完了後、B側に温度 T_M の熱を加えることにより、A側で温度 T_H という熱源よりも高い温度の熱が供給される。

これらいずれの運転でも、吸着材側から見ると、吸着水を脱離させる再生操作と水を吸着する(吸着)運転操作とをバッチ的に繰り返すことになり、連続運転を行うためには複数の吸着材槽を並置し、再生

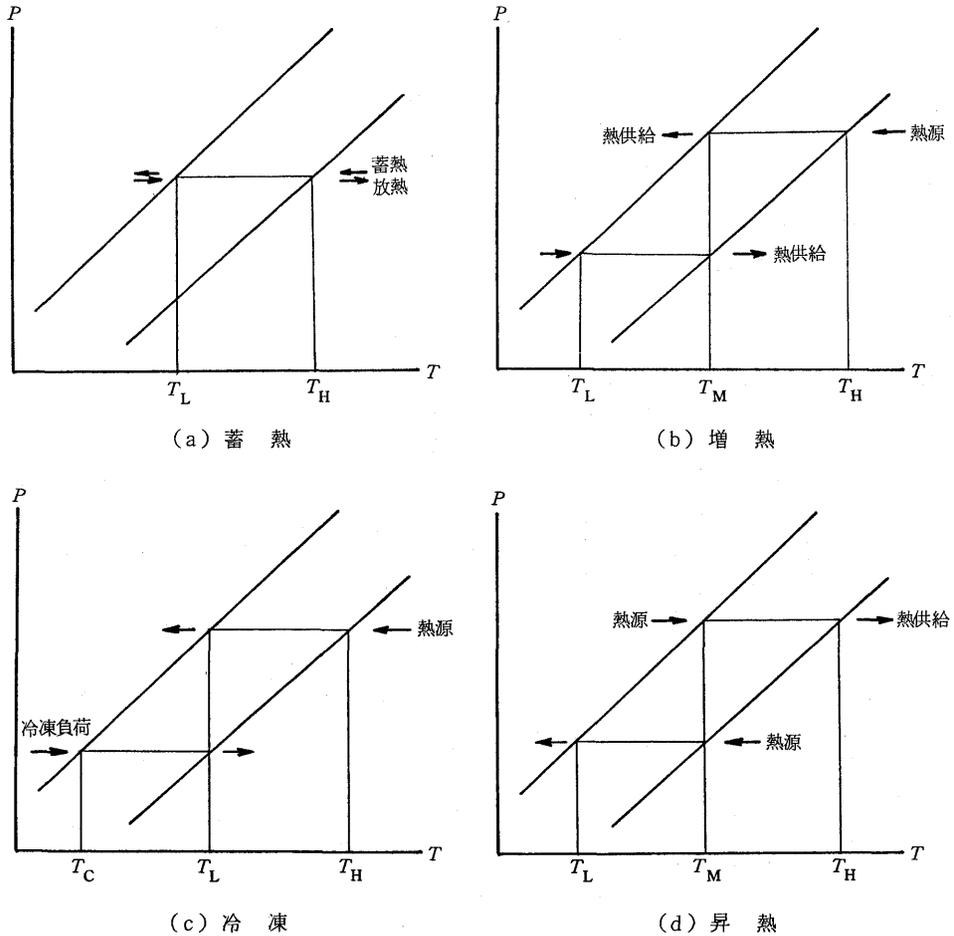


図2 吸着式ヒートポンプの運転法

・運転操作を交互に切替えて使用する必要がある。

3. 吸着材の物性

ゼオライト等各種吸着材の熱物性値を表1¹⁾に示す。また、室温における水の平衡吸着量と相対湿度との関係を図3²⁾に、水蒸気圧24Torrにおける水の平衡吸着量と温度との関係を図4³⁾に示す。これ

らの図表から、ゼオライト以外の吸着材は水の凝縮熱(約44 kJ/mol)と同程度の吸着熱を示すが、ゼオライトはそれよりかなり大きいこと、表示ゼオライト中では13Xが吸着量が最大であること、ゼオライト以外の吸着材は同一温度では平衡吸着量は相対湿度に対し比例的に増加し、温度が上昇すると平衡吸着量は急激に減少するのに比べて、ゼオライトでは平衡吸着量は相対湿度がごく低い場合を除いて相対湿度に対しほぼ一定であり、温度上昇による平衡吸着量の減少もゆるやかであることなどがわかる。ゼオライトとそれ以外の吸着材の間のこれらの物性の違いは、ゼオライトではその構造中の空間に水がほぼ単分子の形で吸着されるのに対し、その他の吸着材では多孔体の孔径が広く分布し、水分子が多層吸着されるためと考えられる。

表1 吸着剤の熱物性

| | 活性炭 | 活性炭ナ | シカゲリル | ゼオライト | | |
|--------------------------|------|------|-------|-------|------|------|
| | | | | 4A | 5A | 13X |
| 水の吸着熱(平均) kJ/mol | 41.8 | 44.7 | 46.0 | 79.4 | 75.2 | 79.4 |
| 水の最大吸着量 (水-kg/吸着剤-kg) | 0.4 | 0.10 | 0.37 | 0.22 | 0.22 | 0.30 |
| 蓄熱量(kJ/kg) | 920 | 472 | 945 | 970 | 920 | 1330 |
| 比熱(kJ/kg℃) | 1.09 | 1.00 | 0.88 | 1.05 | 1.05 | 0.92 |

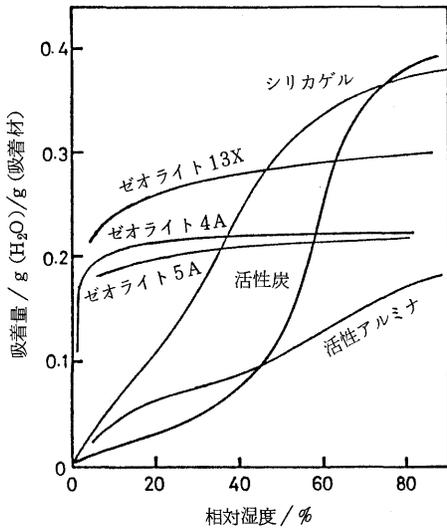


図3 各種吸着材の相対湿度と吸着量の関係 (室温における代表値)

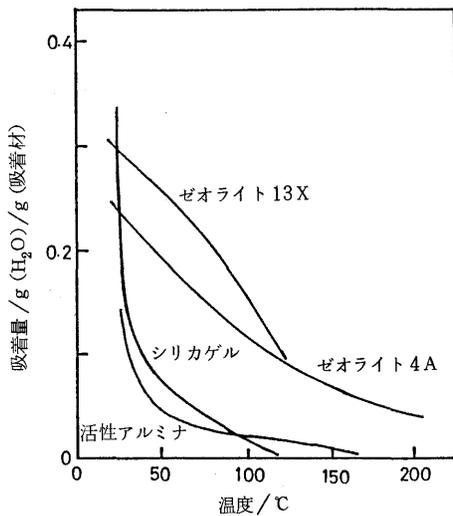


図4 各種吸着材の温度と吸着量の関係 (水蒸気圧 24 Torr)

吸着熱と最大吸着量は1回のバッチ操作で所要の熱量を出し入れするのに必要な吸着材量を定め、大きいほうが望ましい。相対湿度と平衡吸着量の関係は直接的にはないが吸着速度と関係し、相対湿度が低くても高い吸着量を示すゼオライトのほうが吸着反応が速く進み好ましい。平衡吸着量と温度との関係では、運転温度と再生温度での吸着量の差が大きいほうが1回のバッチ操作で出し入れされる熱量が大きくなるので好ましく、用いる温度レベルによ

って最適な吸着剤は異なる。

4. 吸着式ヒートポンプの熱効率

2で述べた各運転法について被吸着物質が水の場合の熱効率を求める。

$|\Delta H_i^a|$, $|\Delta H_i^w|$ をそれぞれ吸着熱、水の凝縮熱 (単位 kJ/mol H₂O), W_i を平衡吸着量 (mol H₂O/kg 吸着材), C_p^l , C_p^g をそれぞれ水、水蒸気の比熱 (kJ/mol), C_p^a , C_p^i をそれぞれ吸着材単体, W_i だけ水を吸着した吸着材の比熱 (kJ/kg 吸着材)とする。ここで添字 i は温度 T_i ($i=H, M, L, C$, 図2参照)における値を示す。また、荒い近似となるが以下の〔仮定1〕を用いた計算を行い、熱効率の概略値、傾向をつかむ。

〔仮定1〕

吸着熱 $|\Delta H_i^a|$ は、吸着量、温度にかかわらず一定値 $|\Delta H^a|$ とする。水の凝縮熱、各比熱も温度にかかわらず一定。そこで水と水蒸気の比熱は同じ ($C_p^l = C_p^g$)。水を吸着した吸着材の比熱は吸着材単体の比熱と吸着水の熱容量の和すなわち $C_p^i = C_p^a + W_i C_p^l$ とする。また吸着、脱離は完全に行われ、再生完了時は $W_i = 0$, 吸着完了時は $W_i = W_{MAX}$ (W_{MAX} : 表1に示した水の最大吸着量)とする。

(1) 蓄熱 (図2 (a)参照)

蓄熱・放熱サイクルが短く、顕熱が失われない場合、吸着材側温度 T_H , 水側温度 T_L は維持されるが、このままではサイクルが作動しないため、吸着材温度は蓄熱時は $T_H + \Delta T$, 放熱時は $T_H - \Delta T$ とし、それぞれの平衡吸着量を $W_{H+\Delta}$, $W_{H-\Delta}$ とする。蓄熱時は吸着材に $|\Delta H_H^a| (W_{H-\Delta} - W_{H+\Delta})$ の熱が供給され、温度 T_H の水蒸気が $(W_{H-\Delta} - W_{H+\Delta})$ 脱離し、水側容器で温度 T_L まで冷却され凝縮する。放熱時は温度 T_L の水蒸気が $(W_{H-\Delta} - W_{H+\Delta})$ 供給され、吸着反応により吸着熱を発生するが、その一部は水蒸気を T_L から T_H に加熱するのに用いられる。従って取り出される熱は $|\Delta H_H^a| (W_{H-\Delta} - W_{H+\Delta}) - C_p^g (W_{H-\Delta} - W_{H+W})(T_H - T_L)$ であり、熱効率 η_{st} は、

$$\eta_{st} = \frac{|\Delta H_H^a| - C_p^g (T_H - T_L)}{|\Delta H_H^a|} \quad (1)$$

となる。(1)式から消えてしまうが、 $(W_{H-\Delta} - W_{H+\Delta})$ は蓄熱密度を定めるので大きくする必要はある。後述するオープンシステムとして蓄熱時は吸着材容器出口を相対湿度の小さい外気に開放して水側温度を T_L より下げると同じ効果を与え、放熱時は T_L での飽和蒸気圧の水蒸気を供給することな

どが考えられる。

次に長期蓄熱等で顕熱が失われ、各操作開始時に吸着材温度も T_L になっている場合には、蓄熱時、放熱時ともそれぞれ顕熱分の熱量 $C_p^{H-d}(T_H - T_L)$ 、 $C_p^{H+d}(T_H - T_L)$ が必要となる。この場合の熱効率 η'_{st} は、

$$\eta'_{st} = \frac{\begin{aligned} &|\Delta H_H^a|(W_{H-d} - W_{H+d}) \\ &- C_p^g(W_{H-d} - W_{H+d})(T_H - T_L) \\ &- C_p^{H+d}(T_H - T_L) \end{aligned}}{|\Delta H_H^a|(W_{H-d} - W_{H+d}) + C_p^{H-d}(T_H - T_L)} \quad (2)$$

〔仮定1〕を用い、表1の熱物性値、 $|\Delta H^w| = 44$ kJ/mol、 $C_p^g = C_p^l = 0.04$ kJ/mol \cdot °Cを用いて $T_H = 200$ °C、 $T_L = 20$ °Cとしてゼオライト5A、シリカゲルについて計算を行うと、

$$\begin{array}{lll} \text{ゼオライト5A} & \eta_{st} = 0.90 & \eta'_{st} = 0.53 \\ \text{シリカゲル} & \eta_{st} = 0.84 & \eta'_{st} = 0.51 \end{array}$$

という値が得られる。顕熱が維持される場合は、吸着熱の大きいゼオライトのほうが水蒸気昇温に用いられる熱量の相対比が減少し、熱効率は高くなる。顕熱が失われる場合は、最大吸着量も効率に影響を与え、両者間の熱効率の差は小さくなる。

(2) 増熱 (図2(b)参照)

再生操作開始時、吸着材温度 T_M 、水の吸着量 W_M とし、水側容器は空であるとする。再生操作において熱源から温度 T_H の熱が供給され、吸着材は T_H に加熱され水を脱離して吸着量は W_H となる。熱源から供給される熱量は $C_p^M(T_H - T_M) + |\Delta H_H^a|(W_M - W_H)$ である。この時水側容器では発生した水蒸気が T_M まで冷却され凝縮する。放出される熱量は $C_p^g(W_H - W_M)(T_H - T_M) + |\Delta H_M^w|(W_M - W_H)$ である。次いで吸着操作を行うと、吸着材は T_H から T_M へ温度が下がり、 T_L の水蒸気の供給を受けて吸着熱を放出する。このとき放出される熱量は $C_p^H(T_H - T_M) + |\Delta H_M^a|(W_M - W_H) - C_p^g(W_M - W_H)(T_M - T_L)$ である。従って熱効率 η_{hp} は、

$$\eta_{hp} = \frac{\begin{aligned} &|\Delta H_M^w|(W_M - W_H) \\ &+ C_p^g(W_M - W_H)(T_H - T_M) \\ &+ |\Delta H_M^a|(W_M - W_H) + C_p^H(T_H - T_M) \\ &- C_p^g(W_M - W_H)(T_M - T_L) \end{aligned}}{|\Delta H_H^a|(W_M - W_H) + C_p^M(T_H - T_M)} \quad (3)$$

となる。〔仮定1〕を用いると(3)式は

$$\eta_{hp} = \frac{\begin{aligned} &|\Delta H^w|W_{MAX} + C_p^gW_{MAX}(T_H - T_M) \\ &+ |\Delta H^a|W_{MAX} + C_p^a(T_H - T_M) \\ &- C_p^gW_{MAX}(T_M - T_L) \end{aligned}}{|\Delta H^a|W_{MAX} + C_p^a(T_H - T_M) + C_p^lW_{MAX}(T_H - T_M)} \quad (4)$$

となる。 $T_H = 200$ °C、 $T_M = 80$ °C、 $T_L = 20$ °Cとし、その他蓄熱の計算例と同じ条件を用いて(4)式で計算を行うと次の値が得られる。

$$\text{ゼオライト5A} \quad \eta_{hp} = 1.46$$

$$\text{シリカゲル} \quad \eta_{hp} = 1.74$$

また、連続運転のために吸着材容器が複数あり、吸着・再生を交互に行っていて各操作完了時に吸着材の顕熱を完全に熱交換できるとすれば、その時の熱効率 η'_{hp} は分子、分母にある $C_p^a(T_H - T_M)$ の項を消去したものとなる。同じ条件で計算を行うと、

$$\text{ゼオライト5A} \quad \eta'_{hp} = 1.52$$

$$\text{シリカゲル} \quad \eta'_{hp} = 1.82$$

となり、若干効率は改善される。

この運転法では、水の凝縮熱と吸着熱の比が小さいほど効率は高くなり、これがシリカゲルがゼオライトより高い効果を与える原因となっている。

(3) 冷凍 (図2(c)参照)

前と同様の計算により熱効率 η_{ref} は、

$$\eta_{ref} = \frac{\begin{aligned} &|\Delta H_C^w|(W_L - W_H) \\ &- C_p^l(W_L - W_H)(T_L - T_C) \end{aligned}}{|\Delta H_H^a|(W_L - W_H) + C_p^l(T_H - T_L)} \quad (5)$$

で表わされる。〔仮定1〕を用いると式(5)は、

$$\eta_{ref} = \frac{|\Delta H^w|W_{MAX} - C_p^lW_{MAX}(T_L - T_C)}{|\Delta H^a|W_{MAX} + C_p^a(T_H - T_L) + C_p^lW_{MAX}(T_H - T_L)} \quad (6)$$

となる。 $T_H = 200$ °C、 $T_L = 20$ °C、 $T_C = 0$ °Cとし、その他は前と同じ条件で計算を行うと、

$$\text{ゼオライト5A} \quad \eta_{ref} = 0.44$$

$$\text{シリカゲル} \quad \eta_{ref} = 0.71$$

という値が得られる。

増熱の項で述べたのと同様に複数の吸着材容器間で熱交換が完全に行われれば、(6)式の分母の $C_p^a(T_H - T_L)$ 項が消去されるので、熱効率 η'_{ref} は、

$$\text{ゼオライト5A} \quad \eta'_{ref} = 0.52$$

$$\text{シリカゲル} \quad \eta'_{ref} = 0.81$$

まで改善される。

この運転方法でも水の凝縮熱と吸着熱の比が小さい

いほど熱効率は高くなるので、シリカゲルのほうが高い熱効率が得られている。

(4) 昇熱 (図 2 (d) 参照)

熱効率 η_{up} は、

$$\eta_{up} = \frac{| \Delta H_M^a | (W_H - W_M) - C_p^M (T_H - T_M) - C_p^g (W_H - W_M) (T_H - T_M)}{| \Delta H_M^a | (W_H - W_M) - C_p^H (T_H - T_M) + | \Delta H_M^w | (W_H - W_M) + C_p^l (W_H - W_M) (T_M - T_L)}$$

(7)

と表わされる。〔仮定 1〕を用いると (7) 式は

$$\eta_{up} = \frac{| \Delta H^a | W_{MAX} - C_p^a (T_H - T_M) - C_p^g W_{MAX} (T_H - T_M)}{| \Delta H^a | W_{MAX} - C_p^a (T_H - T_M) - C_p^l W_{MAX} (T_H - T_M) + | \Delta H^w | W_{MAX} + C_p^l W_{MAX} (T_M - T_L)}$$

(8)

となる。 $T_H = 200^\circ\text{C}$ 、 $T_M = 100^\circ\text{C}$ 、 $T_L = 20^\circ\text{C}$ とし、前と同様の条件で計算を行うと、

ゼオライト 5A $\eta_{up} = 0.57$

シリカゲル $\eta_{up} = 0.44$

の値が得られる。この運転法ではゼオライトのほうが高い熱効率が得られる。

このように運転法によって適当な吸着材の種類は変わる。但し、ここで求めた熱効率は容器の熱容量、熱損失、水蒸気の移動に必要な圧力差などを無視した理想的な場合の値である。また、吸着材は完全な吸脱着を行うと仮定しているが、実際には図 4 に示されているような平衡吸着量の温度変動分しか吸着反応は進行しない。このため実際の熱効率はより低い値となる。

$(T_H - T_M)$ などの温度差を小さくすれば、いずれの運転でも熱効率は向上するものの、吸脱着量が減少しないような温度巾を維持する必要がある。再生操作に必要な熱源温度は、一般的にはゼオライトで 200°C 程度、シリカゲルで $100 \sim 150^\circ\text{C}$ である。

ところで、このように温度等の条件を適切に設定しても、水の吸着熱、凝縮熱という物性値で熱効率は上限を定められ、機械式ヒートポンプなどの値に比べて低い値しか得られない。しかし、投入する熱量の大部分は吸着材の再生に要している熱であり、その熱源は低い温度レベル、間欠的あるいは変動があるものでもよいので、今まで捨てられている熱で再生用に使用可能な熱源がある時、吸着式ヒートポンプの価値は大きくなる。

5. オープンシステムについて

ここまでは系を密閉し、熱交換器を通して熱を出し入れするクロードシステムを例として説明したが、実際には、熱源となる熱風あるいは乾燥した温風を通して吸着材を再生して発生する水蒸気を外界に捨て、吸着操作時は新たに水蒸気を含んだ外気を通して発熱反応を起こさせるオープンシステムの研究開発も多い。この方法では水蒸気を送り込む空気にかんがりの熱で奪われるが、暖冷房など熱の供給先が空気である場合はその問題がなく、熱交換器の必要もなくなり装置を簡単にできる。また、湿度の異った空気を流すことで温度変化と同様の効果も与えられる。このため、冷暖房空調システムの開発などにオープンサイクルが主に用いられている。

6. 研究開発例

(1) 暖房

図 5 に Alefeld ら⁸⁾ の提案した給湯暖房システムを示す。これはクロードシステムで増熱運転を行うもので、深夜電力あるいは排熱により $180 \sim 280^\circ\text{C}$ でゼオライトを再生し、その際の水の凝縮熱を給湯暖房に使用する (図 5 (a) Desorption の過程)。次いで、ゼオライトの顕熱 (図 5 (b) Cooling)、水の吸着熱 (図 5 (c) Adsorption) を給湯暖房に利用する。このシステムは間欠的運転であり、熱源が得られない時間帯に熱を供給する蓄熱システムとしても働いている。

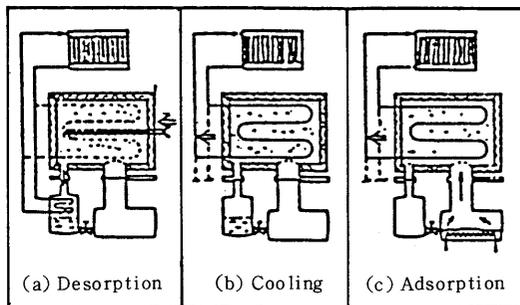


図 5 Alefeld らの給湯暖房システム

(2) 冷房

吸着材を用いたオープンシステムの冷房はデシカント冷房の一種で、いくつかの実験が行われて来た。これは、吸着材層を通し外気と熱交換させて得た常温乾燥空気に加湿を行うと、水の気化熱により空気の温度が下がることを利用したものである。

図 6 に IGT (Institute of Gas Technology) の

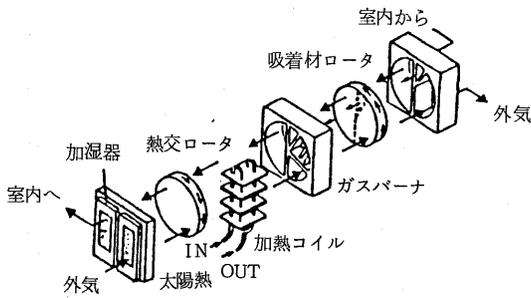


図6 Solar-MECシステム

solar-MECシステム⁴⁾を示す。シリカゲルを用い、回転ロータで連続的な吸着、再生を可能としている。このシステムでは吸着材層での圧力損失が問題点として指摘されている。

また、名工試ではゼオライト塔を2塔交互に使用して連続運転を行う空調装置を試作し、冷暖房実験を行った⁵⁾。熱源は試験装置のため電力としている。所定の空調性能を得たが、装置容積の大きさ、冷房時の加湿の方法(気化しない戻り水が冷熱を奪う)等の問題点が残されている。

(3) 冷凍

国内で水/シリカゲル吸着冷凍機が実用化された⁶⁾。系は空気を排気したクローズドシステムで、そのシステム図を図7に示す。これはシリカゲル容器を複数個持ち、数分間隔で吸着・再生操作を交互に繰り返す運転方法であり、吸着・再生操作の切

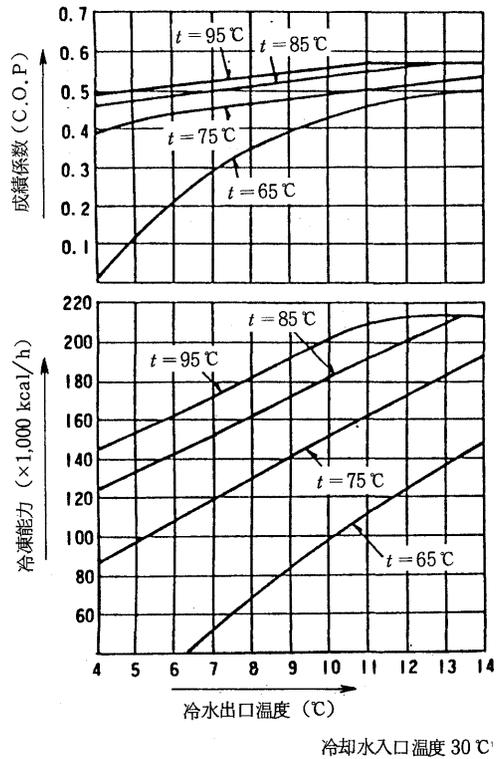


図8 性能曲線(1)

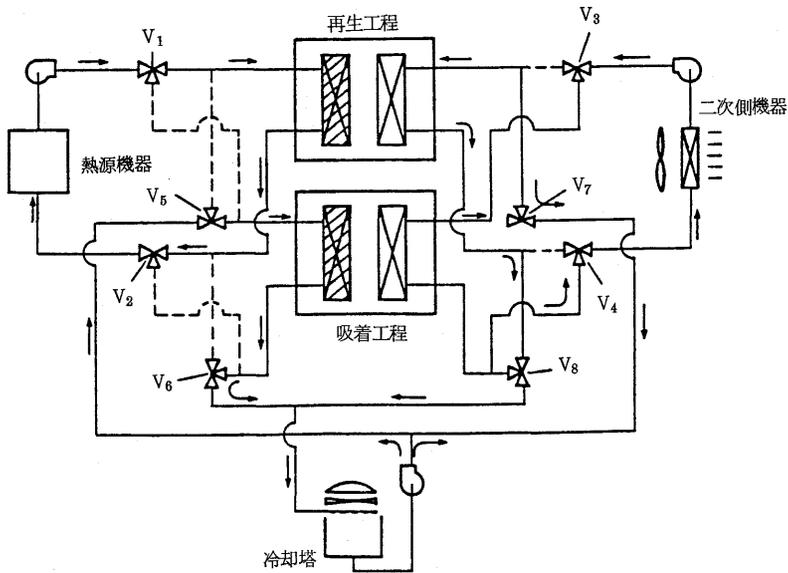


図7 水/シリカゲル系吸着冷凍機のシステム・フロー図

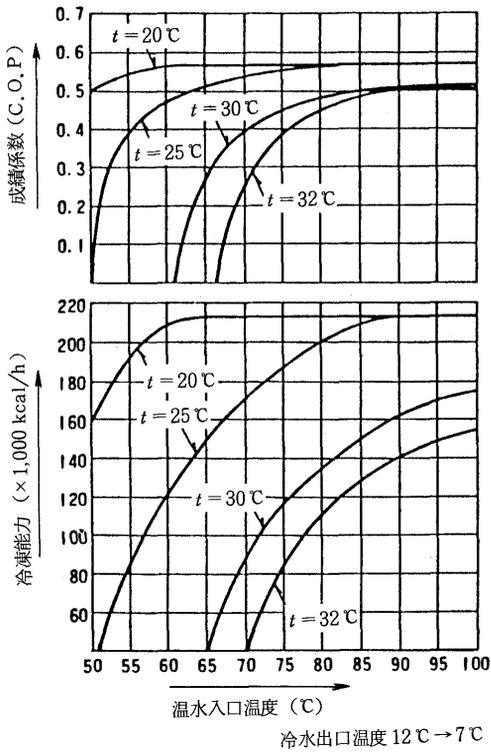


図9 性能曲線(2)

えの間に数十秒間の顕熱回収操作が設けられている。約65°Cの低い熱源温度で冷熱を発生でき、熱源温度が変動しても安定した運転ができるという。図8、図9にこの冷凍機の性能曲線を示す。

また、MITのThernev⁷⁾は天然ゼオライトを太陽集熱器に入れ、日中に太陽熱によりゼオライトを再生し、夜間に水を吸着させて、その時の水の蒸発潜熱を冷蔵庫の冷却に利用する太陽熱冷蔵庫を開発し、Zeopower社へ移って実用化させた。その原理図を図10に示す。これは砂漠地帯での使用を見込んでいる。

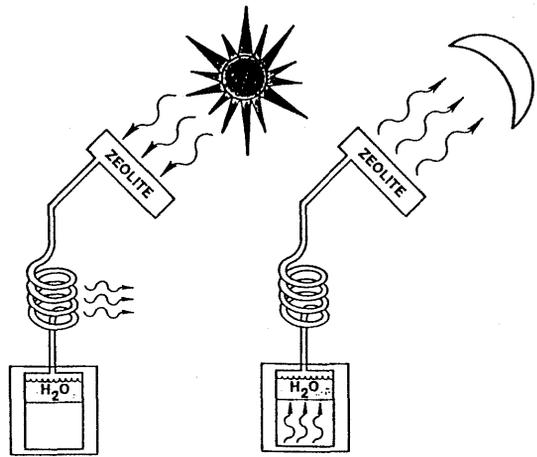
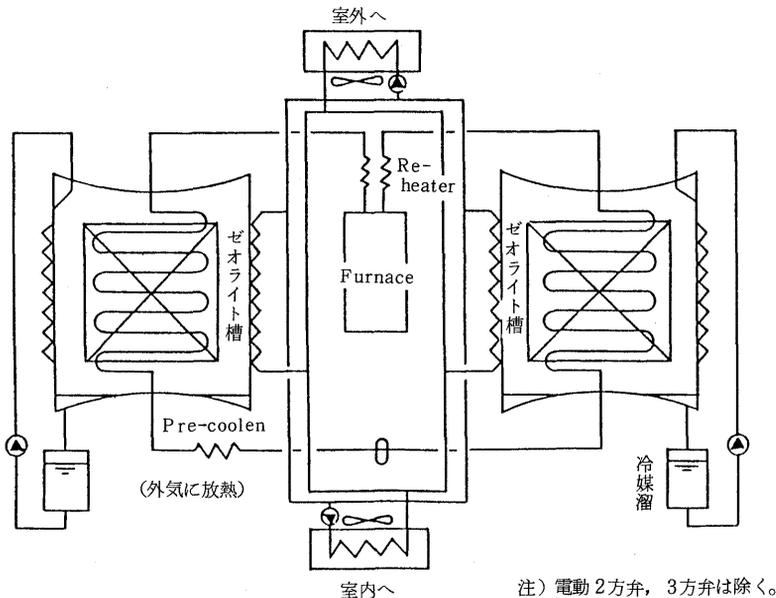


図10 太陽熱冷蔵庫の原理図



注) 電動2方弁, 3方弁は除く。

図11 Zeopower社のゼオライト吸着冷凍機概念図

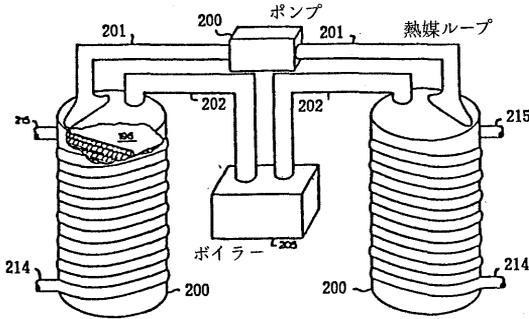


図 12 Zeopower社のゼオライト吸収冷凍機の模式的な外観

その後、Zeopower社では、同様にゼオライト/水を用いるが、熱源にガスを用いて連続運転を可能とした吸着式ヒートポンプの開発を進めている。図 11 にそのシステム図を、図 12 に模式的な外観図を示す。このシステムの最大の特長は、吸着熱を回収して効率を向上させるため、伝熱媒体の槽内の流れの方向に温度差をつけ、槽内のゼオライト上の吸脱着が異った温度で起こるようにしていることである⁸⁾。

(4) 昇熱

利用価値の少ない低圧スチームをゼオライト中に送り、得られた高温の熱で高温スチームを発生させるオープンシステムが廃熱利用の立場から検討、実験されている⁹⁾。概念図を図 13 に示す。

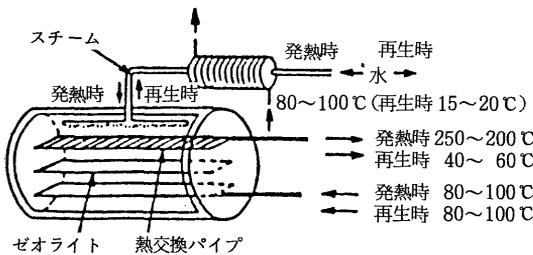


図 13 スチーム昇熱装置 (模式図)

7. 水以外の被吸着物質について

水以外の被吸着物質の使用については、まだ熱物性測定段階であると言える。冷凍運転で0℃以下の温度を得るため名工試で行ったゼオライト、活性アルミナ、シリカゲルを吸着材とし、アルコールを被吸着物質とした予備的実験では-20℃以下が得られるという結果を得た¹⁰⁾。

また、常温付近での水の蒸気圧の低さによる装置設計などの問題点を解消する一案として、名工試で

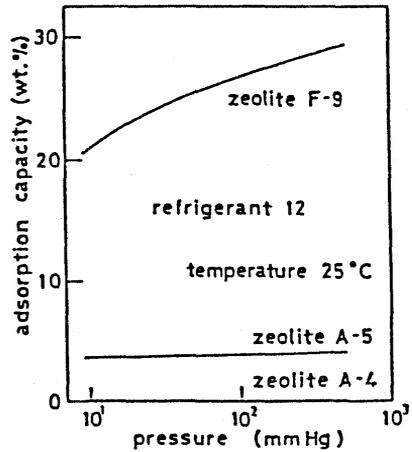


図 14 R12の吸着量のゼオライト種依存性

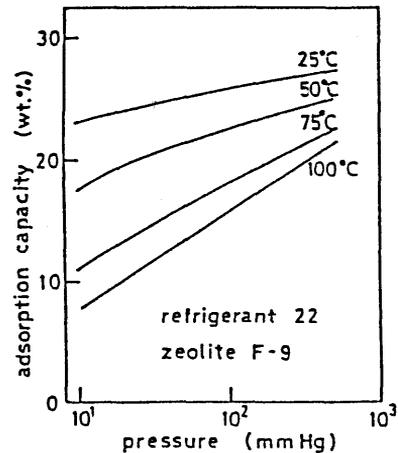


図 15 ゼオライト F-9 への R 22 の吸着等温線

はフロンの使用について検討し、各種フロンのゼオライトへの吸着量を測定した。結果を図 14、図 15 に示す。図 14 でフロン 12 に対するゼオライト種の選択吸着性が明らかに認められる。フロンの吸着量は水とあまり変わらず、フロンの凝縮熱は水に比べはるかに小さいので、フロンの使用は効率を低下させ好ましくないとされる^{11,12)}。

8. おわりに

標題と異って吸着材を用いるヒートポンプ全般の記述となったことをお詫びしたい。

本文中では述べなかったが、吸着材は固体で熱伝導が悪いため、実際の開発には、固体間の熱伝導を促進するための工夫も、特に熱交換を必要とするクローズドシステムでかなり必要となる。

化学ヒートポンプに比べ、材料の安全性、取り扱い易さ、長期安定性などの面で優れている吸着式ヒートポンプが、化学ヒートポンプや吸収式ヒートポンプを圧倒するような状況とならないのは、吸着材の吸着量が少なく、水和塩などに比べて蓄エネルギー密度が小さいことによる。熱効率の項で述べたように、吸着式ヒートポンプの性能は吸着材の吸着物性で大きく限定され、現状のゼオライト、シリカゲル等の使用では既に限界に達していると言える。安価で吸着性能のよい新しい吸着材の開発が望まれるところである。

参考文献

- 1) D. J. Close et al.: *Solar Energy*, **19**, 233 (1977).
- 2) R. A. Shigeishi et al.: *Solar Energy*, **23**, 489 (1979).
- 3) M. Rothmeyer, P. Maxier-Laxhuber, G. Alefeld: 16th International Congress of Refrigeration in Paris, p.306
- 4) Institute of Gas Technology: COO-4495-15 (1979)
- 5) 小坂ら：サンシャインジャーナル, **5** (No. 1&2), 49 (1984), **5** (No. 4), 28 (1984).
- 6) 西淀空調機(株)：省エネルギー, **39** (No. 10), 96 (1987).
- 7) D. L. Chernev: "Natural Zeolites" ed. by L. B. Sand, Pergamon Press (1978) p. 479
- 8) 特許, 昭61-502008.
- 9) 三輪：化学工学, **46**, 347 (1982).
- 10) 小坂ら：第29回工試研究発表会予稿 (1980).
- 11) T. Asahina et al.: The Third Japan Symposium on Thermophysical Properties 1982, p. 49.
- 12) T. Asahina et al.: The Fifth Japan Symposium on Thermophysical Properties 1984, p. 97.