

デシカント法による空調実験 (I)

冷房及び除湿

The Experiment of Desiccant air Conditioning (I)

Cooling and Dehumidification

埤田博史*・小坂岑雄**

Hiroshi TAODA

Mineo KOSAKA

朝比奈正**・野口哲男***

Tadashi ASAHINA

Tetsuo NOGUCHI

Abstract

The desiccant cooling experiment using zeolite adsorbent (zeolum A-4 and zeolum F-9) was carried out. It was found that the cooling output depends on the humidity of the draft as well as the adsorption capacity of adsorbent. In order to increase the cooling output, it is necessary that the adsorption capacity of adsorbent increase and the humidity of a draft is reduced.

To improve the energy efficiency of desiccant cooling, the following cautions are needed.

- (1) The reduction of the heat capacity of the adsorption tower vessel and the adsorbent
- (2) The improvement of the heat losses through the exit and the side of the adsorption tower
- (3) The development of the adsorbent having small heat of adsorption for water

The requirement of adsorbent for cooling of a drawing room (62.5 m³) of a apartment house was estimated, so that it was calculated about 17 kg of zeolite per hour was needed in order to cool the room to 28°C at 33°C of ambient temperature.

It was also found that the amount of zeolite in the dehumidification experiment was much smaller than that in cooling.

1. ま え が き

我が国では、冷暖房用電力需要のため、春季・秋季に比べて夏季・冬季の電力需要が大きく、特に夏の昼間は冷房により電力需要が最大となる。この最大需要電力に見合う十分な供給を維持するため、発電設備の増設や送配電設備の増強が行われるが、夜間などのピーク以外の時間に電力が過剰となり、発電設備の効率が悪くなる。従って、電力需要を平準化することができれば、発電設備の定常運転が可能となり、大きな経済効果をあげることができるわけである。現在、ガス冷房など、電気以外のエネルギーによる冷房が研究されてきているが、最近、吸着材を用いるデシカント法による空調が注目されている。

現在、利用されている空調機は多くの場合電気エネルギーに依存し、機械的に冷媒ガスを高圧で圧縮する工程を含んでいる。当然ながら、このような空調機では、機械が重量化・高コスト化すると同時に、その製

作と運転に特別な技術が必要となっている。

これに対し、デシカント法は

- 高圧部を含まず、安価かつ容易に製作できる。
- 無害な乾燥材、空気及び水を用いるだけであり、安全かつ衛生的である。
- 腐食や公害（フロンガス関連）の問題がない。
- 運転・保守が容易である。
- 乾燥材は蓄エネルギー効果を有し、エネルギーの長期保存もできる。
- 太陽熱のほか多様な熱源を使用でき、電力の消費が少ない。

* 工業技術院名古屋工業技術試験所 第2部第2課
Government Industrial Research Institute, Nagoya
Researcher

** 工業技術院名古屋工業技術試験所 第2部第2課(主任研究官)
Government Industrial Research Institute, Nagoya
Chief Researcher

*** 工業技術院名古屋工業技術試験所 第5部第3課長
Government Industrial Research Institute, Nagoya
Chief of solar laboratory

など、いくつかの特長を有している。

デシカント空調の初期の仕事はオーストラリア (CSIRO) と米国 (IGT) で始められたが、1977年にはDOEの援助のもとに初の専門家会議¹⁾が持たれるようになり、近年、急速な発展をみせる気運にある。

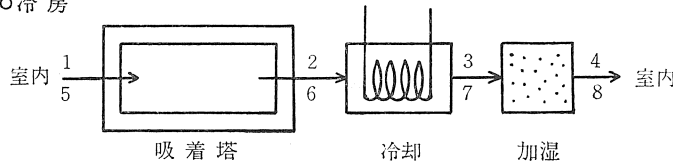
世界でも有数の多湿帯である本邦でのデシカント法の適用には、それなりの問題点があると考えられるものの、資源に恵まれない本邦にとっては、新エネルギー

の活用、省エネルギーの見地から、早急な技術開発と適用性の検討が待望されている。

著者らは、既に、塩化マグネシウム・6水塩を乾燥材として用いた空調実験を行い、その結果を報告した²⁾。その中で我々は、本邦の梅雨から夏期における不快感は、多く空気湿度の過大さに起因しており、屋内空氣の湿度を下げうるならば、多少、温度は高くても、快適な空氣条件が得られることを示唆した。本報

は上記に引続いて、乾燥材を積極的に空調の目的に活用するため、主としてゼオライト乾燥材について行ったベンチ・スケールの空調実験のうち、冷房及び除湿実験の結果について述べたものである。

○冷房



○再生

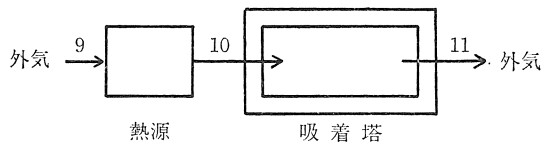


図1 デシカント空調法による冷房プロセス

2. デシカント空調法による冷房の原理

図1は、デシカント空調法による冷房プロセスを示したものである。デシカント空調法では、乾燥材により除湿された空氣をいったん冷却した後、加湿すると、水が空氣から蒸

発熱を奪って (断熱) 蒸発するため、冷たい空氣が得られるので、これを室内に流すことによって冷房を行うことができる。これを空氣線図上の変化で表わすと、図2のようになる。まず、1の状態の室内空氣が除湿され、かつ、吸着熱によって加熱されて2の状態になり、外気または水で

冷却されて3の状態となる。これが加湿されると同時に水の蒸発熱によって冷却されて4の状態となり、室内に流される。室内の空氣は1の状態から、しだいに5の状態になり、最終的には図3に示すように、5→6→7→8→5のサイクルが成立する。水を吸着した乾燥材は冷房運転の後、図1に示すように、太陽熱、工場廃熱あるいは電気ヒーターのような熱源によって、加熱された空氣を吹き込むことにより、再生される。

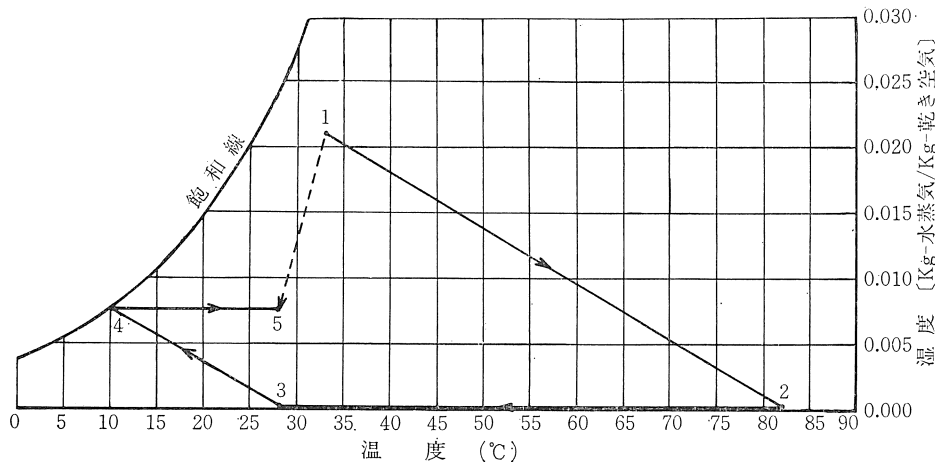


図2 空氣線図上の変化

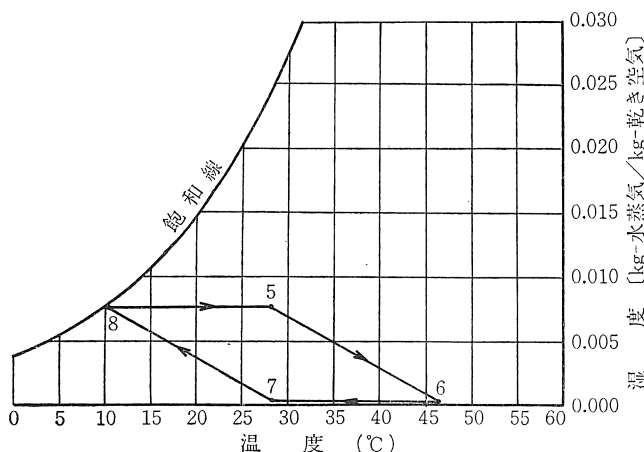


図3 空氣線図上での冷房サイクル

3. 乾燥材

デシカント空調法に用いられる乾燥材として、ゼオ

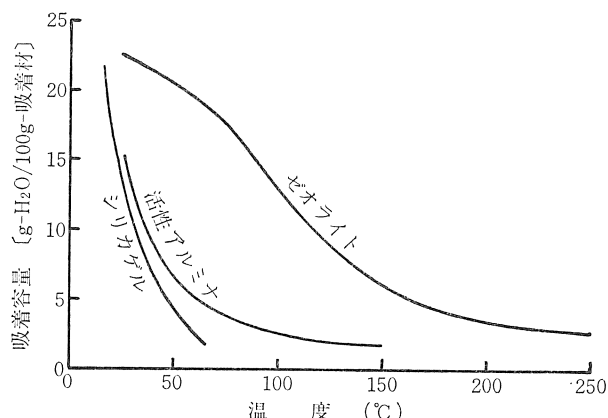


図4 ゼオライト、シリカゲル及び活性アルミナの温度に対する水の吸着容量（水蒸気分圧 10 mmHg）

ライト・シリカゲル、活性アルミナなどの固体吸着材が挙げられる。固体吸着材は他の乾燥材と比べて、無害、安全かつ衛生的であり、水を吸着しても固体のまま液体にならず、腐食の問題がないなど、多くの利点を持っている。図4に、ゼオライト・シリカゲル及び活性アルミナの温度に対する水の吸着容量を示す。これらの吸着材のうち、図4にみられるように、シリカゲルと活性アルミナは温度が上がると水の吸着容量が激減するのに対し、ゼオライトはそれほど減少しない。従って、シリカゲルと活性アルミナを用いた場合、水を吸着して吸着熱により温度が上昇すると吸着容量が抑えられるが、時間がたつにつれて温度が低下すると再び水分吸着量が増加し、発熱量が増加するというように、吸着能力と温度が一定のバランスを保ちながら吸着を行うので、吸着が終了するのに長い時間がかかり、時間当りの吸着能力が小さい。これに対してゼオライトはほぼ一定の吸着を行い、時間当りの吸着能力が大きい。システムの操作上、時間当りの吸着量の大きい方が有利であるので、本実験では主としてゼオ

ライトを使用した。実験に使用した吸着材は、ゼオラム A-4、ゼオラム F-9（東洋曹達工業製、粒径 3 mm、柱状品）及びシリカゲル（富士デヴィソン化学製、粒径 6 mm、球状品）で、市販品をそのまま用いた。ゼオライトは最近、りん酸塩の代わりとして洗剤に使用されてきており、需要の伸びとともに、しだいに価格が下がる傾向にある。

4. 実験方法

実験は、図5に示すような実験装置を試作して行った。吸着塔は内径 40cm、高さ 80cm の円筒形で上部に 4 本の電気ヒーターを設置し、流量計と 4 本のフレキシブル・パイプで接続して送風機で空気を送った。吸着塔内の底部には吸着材が落ちないように目の細かい金網を張り、吸着材を再生する際の熱損失を抑えるため、吸着塔にグラスウールを巻いて断熱を施した。冷却器は自動車用ラジエーターを 4 個並べて使用した。温度測定は C A シース熱電対を用いて行い、湿度は湿度センサーを用いて測定した。

実験では、冷却器出口の空気温度と加湿後の空気温度から冷房出力を求め、これと吸着材の再生に要した電力量から冷房のエネルギー効率（ E ）を求めた。また、吸着材を再生する際の空気温度及び流量を変えて冷房出力との関係を調べた。冷房出力及び冷房のエネルギー効率（ E ）の計算は次式により行った。

$$\text{冷房出力} = (\text{空気流量}) \times (\text{空気密度}) \times (\text{空気の比熱}) \times (\text{冷却器出口温度} - \text{加湿出口温度}) \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{エネルギー効率 (E)} = \frac{\text{冷房出力}}{\text{電気ヒーターの消費電力量}} \times 100 (\%) \dots\dots\dots (2)$$

このほか、吸着塔出口温度と入口温度から吸着熱による発熱量も求めた。

$$\begin{aligned} \text{吸着熱による発熱量} = & (\text{空気流量}) \times (\text{空気密度}) \\ & \times (\text{空気の比熱}) \times \\ & (\text{吸着塔出口温度} - \text{入口温度}) \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

5. 実験結果と考察

吸着材として、ゼオラム A-4 (21.4 kg) を使用した冷房実験の結果を表1に、ゼオラム F-9 (19.3 kg) を使用した実験結果

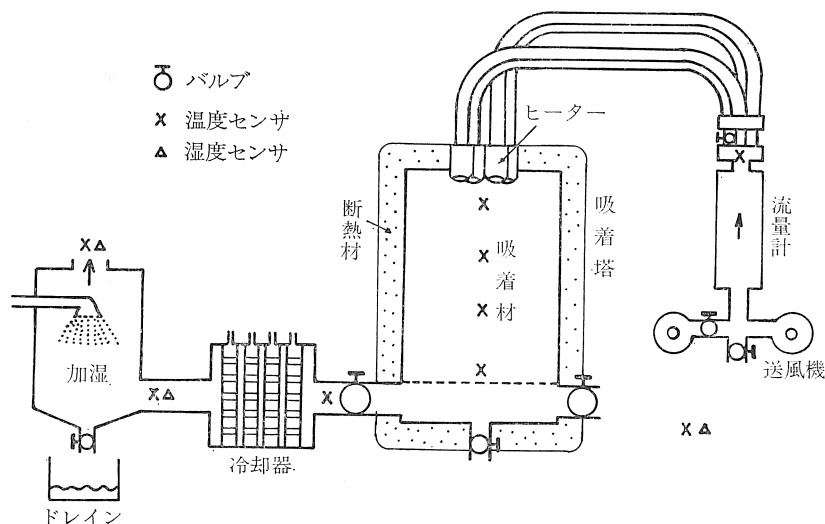


図5 試作した実験装置

表1 ゼオラムA-4 (21.4 kg) を用いた実験結果

実験 No.	再 生				冷 房				
	再生温度 (°C)	消費電力 (kcal)	風 量 (m³/hr)	運転時間 (hr)	冷房出力 (kcal)	風 量 (m³/hr)	運転時間 (hr)	効率(E) (%)	吸 着 熱 (kcal)
1	183	10,100	81	3.0	1,410	42	24.0	14.0	2,850
2	183	10,100	81	3.0	2,530	42	21.5	25.1	2,920
3	215	7,800	81	2.0	2,740	42	24.0	35.1	2,880

表2 ゼオラムF-9 (19.3 kg) を用いた実験結果

実験 No.	再 生				冷 房				
	再生温度 (°C)	消費電力 (kcal)	風 量 (m³/hr)	運転時間 (hr)	冷房出力 (kcal)	風 量 (m³/hr)	運転時間 (hr)	効率(E) (%)	吸 着 熱 (kcal)
4	180	9,600	81	3.0	2,280	21	27.5	23.8	2,180
5	204	9,800	120	2.0	1,330	188	3.0	13.6	2,630
6	187	9,600	120	2.0	2,040	184	3.0	21.3	2,630
7	195	9,400	120	2.0	1,450	188	4.0	15.4	2,540
8	200	9,500	120	2.0	2,290	190	5.3	24.1	2,750

表3 ゼオラムF-9 (19.3 kg) + シリカゲル (8 kg) を用いた実験結果

実験 No.	再 生				冷 房				
	再生温度 (°C)	消費電力 (kcal)	風 量 (m³/hr)	運転時間 (hr)	冷房出力 (kcal)	風 量 (m³/hr)	運転時間 (hr)	効率(E) (%)	吸 着 熱 (kcal)
9	63~234	6,760	54	2.4	820	54	10.2	12.1	3,260
10	180~232	7,210	54	2.6	1,260	81	8.0	17.5	3,350
11	63~128	3,290	81	1.8	740	81	5.0	22.5	1,410
12	65~110	3,210	54	2.8	430	81	4.0	13.5	1,350
13	153~220	6,590	81	1.7	890	81	6.0	13.5	2,700

を表2に、ゼオラムF-9 (19.3 kg) 及びシリカゲル (8 kg) を使用した実験結果を表3に示す。吸着熱による発熱量は吸着材の吸着量にほぼ比例しているのであるが、実験結果をみると冷房出力は吸着熱による発熱量と比例していない。これは、冷房出力は加湿操作によって蒸発した水の量に比例しているのであるが、この蒸発した水の量と吸着材が吸着した水の量が等しくないからである。冷房出力は次のように表わされる。

$$\begin{aligned} \text{冷房出力} &= (\text{水の蒸発熱}) \times (\text{蒸発した水の量}) \\ &= (\text{水の蒸発熱}) \times (\text{加湿後の空気} \\ &\quad \text{絶対湿度} - \text{室内の絶対湿度}) \times \\ &\quad (\text{風量}) \cdots \cdots \cdots (4) \end{aligned}$$

これに対して、吸着による発熱量は次のように表わされる。

$$\begin{aligned} \text{吸着熱による発熱量} \\ &= (\text{水 1 g 当りの吸着熱}) \times (\text{吸着した水の量}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= (\text{水 1 g 当りの吸着熱}) \times (\text{蒸発した水の量} \\ &\quad + \text{すきま風に含まれた水の量} + \text{実験開始} \\ &\quad \text{時の室内の湿気の量} - \text{実験終了時の室内} \\ &\quad \text{の湿気の量}) \cdots \cdots \cdots (5) \end{aligned}$$

冷房実験の代表的な例である No. 8 及び No. 10 の実験結果を図6 (a) (b) (c) 及び図7 (a) (b) (c) に示す。(a) は冷却器出口温度と加湿出口温度との温度差を求めたものであり、これと(1)式から冷房出力が求められる。(b) は吸着塔内の温度変化及び部屋の湿度を示したものである。(c) は室温と吸着による発熱を示したものであり、(A-C) が吸着による発熱であり、(A-B) はそれに送風機による発熱を加えたものである。(A-C) と(3)式から吸着熱による発熱量が求められる。表2、表3から、No. 10 の実験の方が吸着材の量が多く、吸着能力が大きいのに、冷房出力が小さくなっていた。そこで、No. 8 及び No. 10 の実験で吸着された水の量とそ

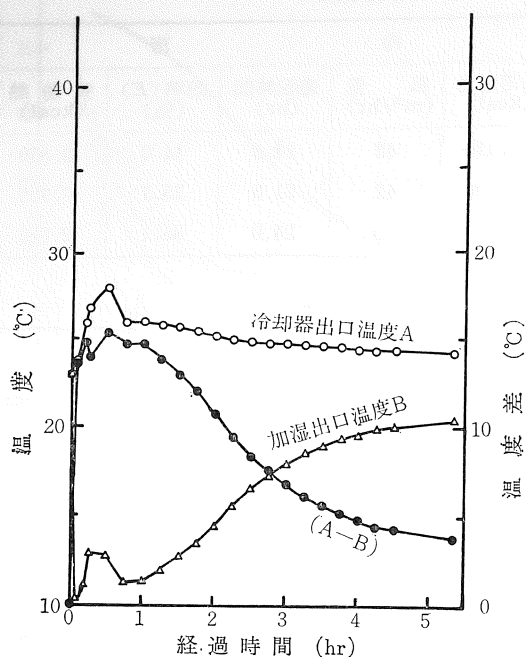


図 6 (a)

No.8 の実験結果

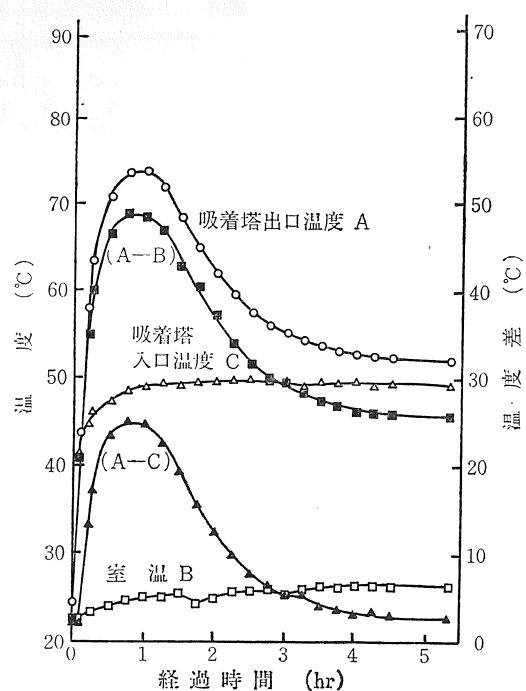


図 6 (c)

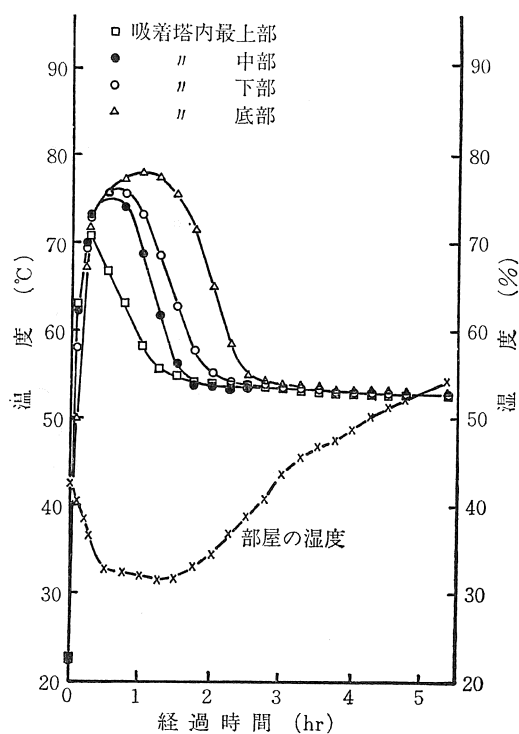


図 6 (b)

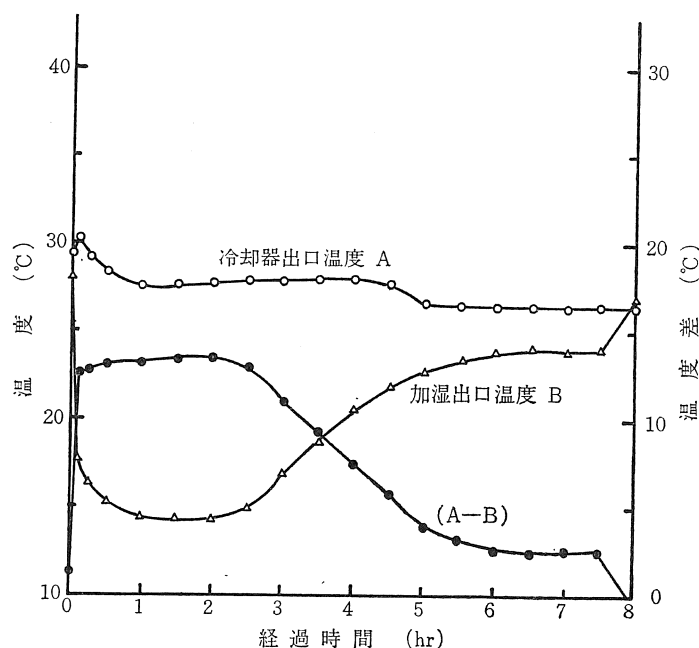


図 7 (a)

の水の出所を計算すると次のようになる。この実験に使用した吸着材における水 1 g 当りの吸着熱は約 750 cal/g, 吸着材 1 g 当りの水の吸着量は 0.2 g であった。水の蒸発熱は 582.8 cal/g を用いた。No. 8 の実験では実験開始時の温度と湿度は 22.5°C, 42% (絶対湿度 7.00 g/kg) で, 実験終了時は 26°C, 54% (絶対湿度 11.50 g/kg) であった。一方, No. 10 の実験

では, 実験開始時, 29°C, 58% (絶対湿度 14.75 g/kg) で, 実験終了時, 29.6°C, 73% (絶対湿度 19.25 g/kg) であった。また, 実験を行った部屋の容積は 114m³ であった。これらの数値をもとに計算した結果を表 4 に示す。この表から No. 10 の実験の冷房出力が No. 8 のよりも小さいのは, すきま風に含まれた湿気を大量に吸着したためであることがわかる。No. 10 の実験では

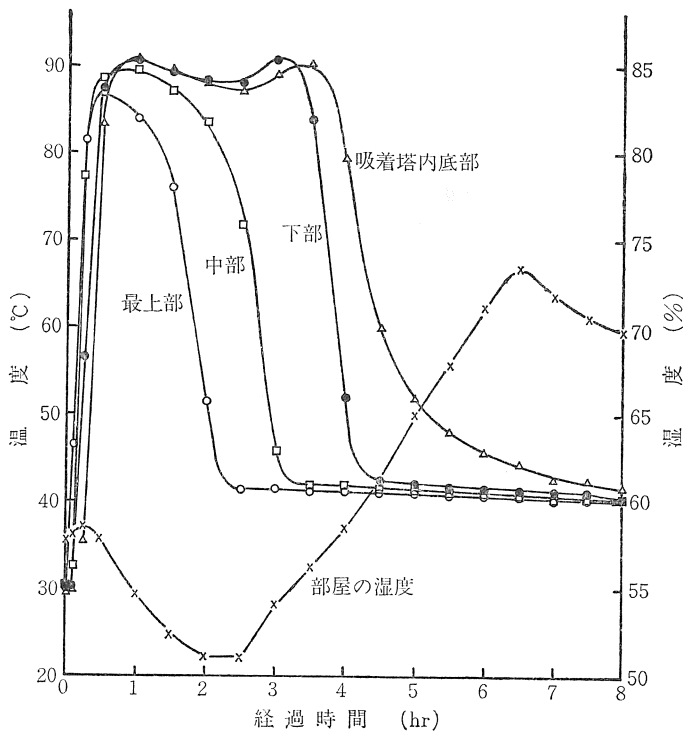
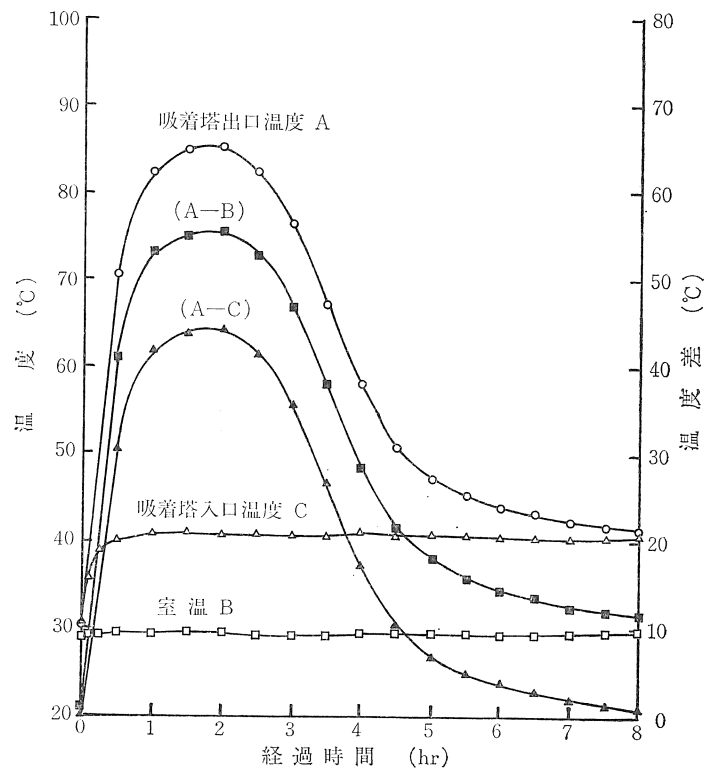


図 7 (b)



No.10 の実験結果

図 7 (c)

表 4 吸着された水の量とその出所

実 験 No.	8	10
冷房出力 (kcal)	2,290	1,260
吸 着 熱 (kcal)	2,750	3,350
運転時間 (hr)	5.3	8.0
吸着した水の量 (kg)	3.67	4.47
蒸発した水の量 (kg)	3.93	2.16
すきま風に含まれた水量 (kg)	0.30	2.87
実験開始時と終了時との 室内の湿気の量の差 (kg)	-0.56	-0.56

すきま風の絶対湿度が高く、そのため、すきま風に含まれた湿気の量が大きくなっていた。従って、冷房出力を上げるには、すきま風の量を減少させることが必要である。

図 8 は、冷房運転開始後 2 時間でいったん運転を停止し、一日放置しておいてから運転を再開したときの実験結果である。これを途中で運転を停止しなかった図 6 (a) の実験結果と比べてみると、図 8 では運転再開時に少々ロスがあるが、途中で停止して再開しても冷房運転が可能ながわかる。従って、冷房運転を行う場合、断続的な運転が可能である。

6. デシカント空調法による冷房のエネルギー収支

入力したエネルギーに対し、冷房に利用できるのは

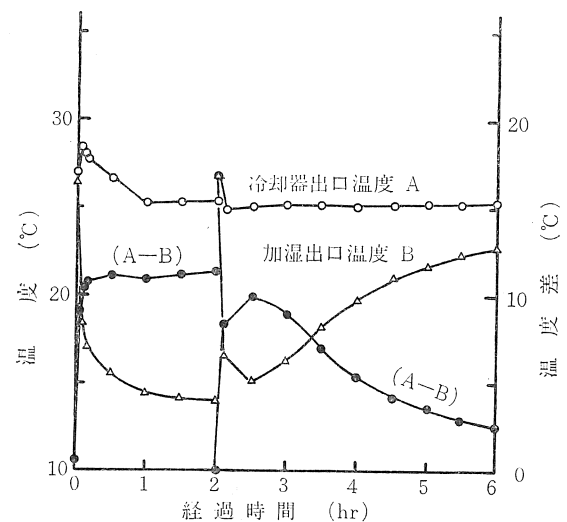


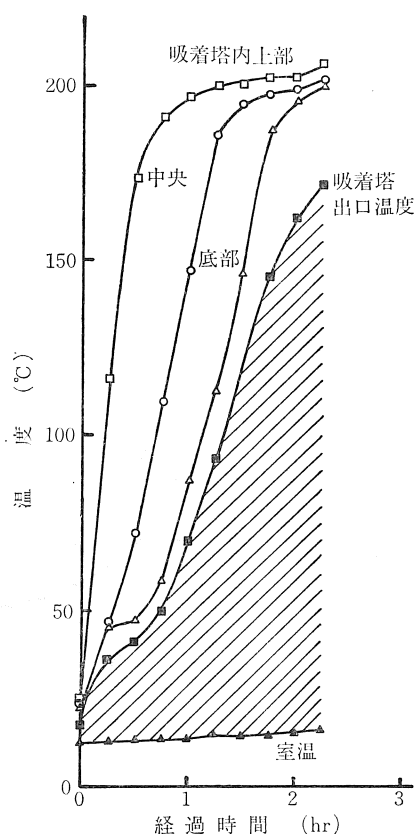
図 8 いったん運転を停止した後再開したときの実験結果

蒸発した水の蒸発熱である。(2) 式の冷房のエネルギー効率 (E) は次のように表わされる。

$$E = \frac{(\text{蒸発した水の量}) \times (\text{水の蒸発熱})}{\text{消費電力 (熱に換算)}} \times 100 (\%) \dots\dots\dots (6)$$

ここで、消費電力は次のように表わされる。

$$\begin{aligned} \text{消費電力} &= \text{吸着塔容器の顕熱} + \text{吸着材の顕熱} \\ &\quad + \text{吸着材の潜熱} + \text{吸着塔出口及び側面からの熱損失} \\ &= \text{吸着塔容器の顕熱} + \text{吸着材の顕熱} \\ &\quad + (\text{蒸発した水の量} + \text{すきま風に} \end{aligned}$$


 図9 吸着材再生時の吸着塔内の温度分布
及び吸着塔出口からの熱損失

含まれる湿気(量)×(水1g当りの
吸着熱) + 吸着塔出口及び側面
からの熱損失

従って、冷房のエネルギー効率(E)を上げるためには消費電力を減少させなければならず、そのためには、吸着塔容器及び吸着材の顕熱の低減、吸着塔出口及び側面からの熱損失の抑制、すきま風の抑制を行えば良いことがわかる。吸着塔容器の顕熱を減少させる方法としては、①容器材料に比熱の小さなものを使う、②容器の厚さを薄くして重量を減らす、③泡金属のような軽量の構造材を使用する、④吸着材の再生温度を下げる、などがある。吸着材再生時の吸着塔内の温度分布は図9のようになっており、斜線の部分が熱損失となっている。従って、熱損失を減少させるためには、①吸着塔の出口温度が上昇する前に再生を停止する、②吸着塔の出口部分に再生温度の低い吸着材を充填して、熱を回収する、などの方法が考えられる。No. 10の実験では、吸着塔出口部分に再生温度の低いシリカゲルを充填して熱の回収を行ったが、外気の絶対湿度が非常に高かったため、表2、表3に示すように、No. 8の実験よりもエネルギー効率(E)が悪い。しかし、表4でみるようにNo. 10の方が吸着した水の量が多く、もし、すきま風をNo. 8の実験と同じ0.3kg

まで抑えることができれば、エネルギー効率(E)を33.7%まで上げることができる。ところで、もし、吸着塔容器及び吸着材の顕熱、すきま風、熱損失をほぼ0にしたとすると、エネルギー効率(E)は次のようになる。

$$E = \frac{(\text{蒸発した水の量}) \times (\text{水の蒸発熱})}{(\text{蒸発した水の量}) \times (\text{水1g当りの吸着熱})} \times 100 (\%)$$

$$= \frac{\text{水の蒸発熱}}{\text{水1g当りの吸着熱}} \times 100 (\%) \dots (7)$$

水の蒸発熱 582.8 cal/g, 水1g当りの吸着熱 750 cal/g を代入すると $E=77.7\%$ が得られる。従って、これがこの実験の冷房のエネルギー効率(E)の限界値であり、これをもっと上げるには、水1g当りの吸着熱の小さい吸着材を開発する必要があることがわかる。

冷房の際には、送風機の運転に伴う発熱の問題があるので、冷房を行う部屋に送風機を設置することは避けた方がよい。また、冷房運転の場合には、水の吸着熱や再生のときの吸着材のもつ顕熱や脱着した水の顕熱及び潜熱を捨てているわけであるが、これらの熱を給湯などに利用すれば、冷房のエネルギー収支はもっと改善される。

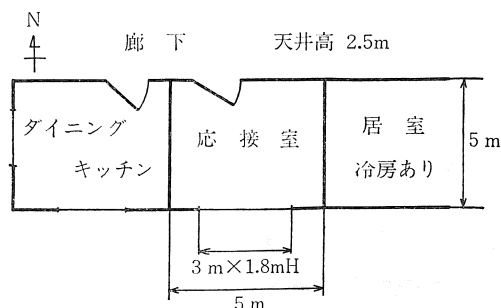
7. 冷房に必要な吸着材量の見積り

表5に示すような空調系を仮定して吸着材料の必要量の見積りを行った。室内顕熱負荷は表6のようにな

 表5 吸着材料の見積りを行うために
仮定した空調系

・建物	マンション
・対象室	応接室
・空調条件	温度 28°C
・内部発熱	照明 40W 蛍光灯 × 4 人間 5人
・外気条件	温度 33°C 湿度 65%RH
・壁構造	外壁 コンクリート 150mm 内部モルタルプラスタ仕上 間仕切 コンクリート 100mm 両面モルタルプラスタ仕上 窓 3m×1.8m 普通ガラス 日除なし アルミ製引違い窓

上階・下階ともに冷房あり



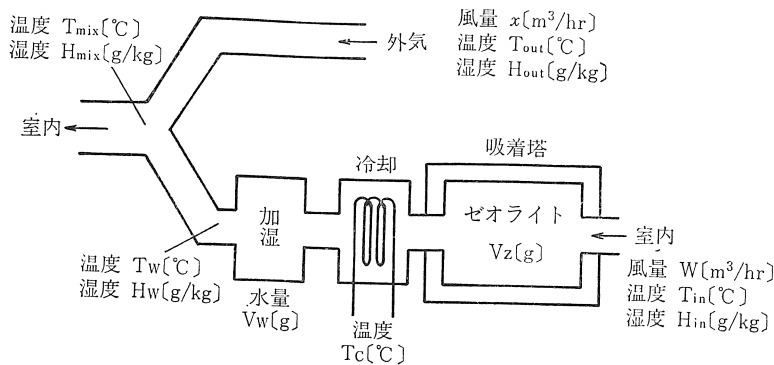


図10 冷房システム

表6 室内顕熱負荷

冷 房					
項 目	面積・量	輻射熱 温度差	係 数	kcal/hr	
太陽輻射熱	ガラス南	5.4m ²	120	1.0	648
輻射・伝導熱	外壁南	7.1m ²	9.0	3.2	204
	屋根	—	—	—	—
伝導熱	ガラス	5.4m ²	5	5.1	138
	天井	25m ²	0	—	—
	床	25m ²	0	—	—
	間仕切	25m ²	2	2.9	145
内部発生熱	人 間 (頭熱)	5 人	42	—	210
	螢光灯	40W×4 =160W	—	1.08	173
小 計					1,518
安 全 率 10%					152
室内顕熱負荷					1,670

る。冷房は図10に示すように、室内の空気を吸着塔に吹込んで乾燥し、冷却水で冷却した後、加湿して温度を下げ、外気と混合して室内に流す方式をとる方が、ゼオライトの量が少なくて済む。夏季は絶対湿度が非常に大きいので、外気を吸着塔に吹き込んで室内に流す方式は、ゼオライトを大量に必要とし、再生のための熱量も大きくなるので良くない。

吸着塔への送風量を W [m³/hr]、冷却水温度を T_c [°C]、加湿後の空気の温度を T_w [°C]、加湿後の空気の絶対湿度を H_w [g/kg]、外気温を T_{out} [°C]、外気の絶対湿度を H_{out} [g/kg]、外気の入取れ量 x [m³/hr] をとすると、加湿した空気と外気を混合した後の空気の温度 T_{mix} [°C] は、

$$T_{mix} = \frac{x \cdot T_{out} + W \cdot T_w}{x + W} \quad \dots\dots\dots (8)$$

となり、これが冷房のために室内に流される空気の温度となる。従って、室温を T_{in} [°C]、室内顕熱負荷

を U [kcal/hr]、空気の 1 m³ 当りの比熱を 0.29 [kcal/m³・°C] とすると、次式が成り立つ。

$$W + x = \frac{U}{0.29(T_{in} - T_{mix})} \quad \dots\dots\dots (9)$$

次に、室内に送り込まれる湿気の量と、ゼオライトが吸着する湿気の量が等しいので、人間 1 人当たり排出する湿気の量を 63.7 g/hr・人、部屋にいる人の数を m [人]、空気の密度を 1.2 kg/m³ とすると、次式が成り立つ。

$$1.2W \cdot H_{in} = 1.2W \cdot H_w + 63.7m + 1.2x \cdot H_{out} \quad \dots\dots\dots (10)$$

また、温度 T_c [°C]、湿度 0 % の 1 kg の空気に絶対湿度が H_w [g/kg] になるように加湿して空気の温度が T_w [°C] になったとすると、空気の比熱を 0.24 cal/g・°C、水の蒸発熱を 582.8 cal/g として、次式が成立する。

$$1,000 \times 0.24(T_c - T_w) = 582.8 H_w$$

整理して

$$T_c - T_w = 2.43 H_w \quad \dots\dots\dots (11)$$

このとき、 H_w は飽和水蒸気量以下であるので、次式が成り立つ。

$$H_w \leq 22.75 \exp \left[-5,455 \left(\frac{1}{T_w + 273} - \frac{1}{300} \right) \right] \quad \dots\dots\dots (12)$$

加湿した空気と外気を混合した後の空気の絶対湿度

$$H_{mix} = \frac{W \cdot H_w + x \cdot H_{out}}{W + x} \quad \dots\dots\dots (13)$$

についても同様に次の式が成り立つ

$$H_{mix} \leq 22.75 \exp \left[-5,455 \left(\frac{1}{T_{mix} + 273} - \frac{1}{300} \right) \right] \quad \dots\dots\dots (14)$$

加湿して蒸発する水の量 V_w [g/hr] は空気の密度を 1.2 kg/m³ とすると、次式によって求められる。

$$V_w = 1.2 W \cdot H_w \quad \dots\dots\dots (15)$$

冷房を 1 時間行うために必要なゼオライトの量 V_z [g/hr] は、ゼオライト 1 g 当りに吸着する水の量を y [g/g-ゼオライト] とすると、次式によって求められる。

$$V_z = \frac{1.2 W \cdot H_{in}}{y} \quad \dots\dots\dots (16)$$

ここで、ゼオライトの量及び送風量を最小にするために外気の入取れ量 x を 0 に、加湿後の空気の温度 T_w を露点温度に、加湿後の空気の絶対湿度 H_w を飽和水蒸気量とすると、(12) 式は次のようになる。

$$H_W = 22.75 \exp \left[-5.455 \left(\frac{1}{T_W + 273} - \frac{1}{300} \right) \right] \quad \dots\dots\dots (12)'$$

これらの式に、室内の温度 $T_{in}=28^{\circ}\text{C}$ 、外気温 $T_{out}=33^{\circ}\text{C}$ 、外の湿度 $H_{out}=21\text{ g/kg}$ 、冷却水で冷却した後の空気の温度 $T_c=28^{\circ}\text{C}$ 、室内顕熱負荷 $1,670\text{ kcal/hr.}$ 、室内の人数 $m=5$ 人、ゼオライト 1 g 当りの吸着水量 $y=0.2\text{ g/g}$ -ゼオライトを代入して解を求めると、

$$\begin{aligned} T_{mix} &= T_W = 9.5^{\circ}\text{C}, & H_{mix} &= H_W = 7.5\text{ g/kg} \\ W &= 348\text{ m}^3/\text{hr.}, & H_{in} &= 8.26\text{ g/kg} \\ V_W &= 3,132\text{ g/hr.}, & V_Z &= 17,247\text{ g/hr.} \end{aligned}$$

が得られる。従って、外気温 33°C 、湿度 65% の時、室内を 28°C に冷房するためには、温度 9.5°C 、湿度 100% の空気を 1 時間に 348 m^3 流せば良く、そのためには、 1 時間に 3.13 kg の水を加湿して蒸発させる必要があり、 1 時間分の冷房にゼオライトが 17.2 kg 必要である。

冷房開始時には室内の湿度が高いので、次式で表わされる量のゼオライト $V_Z'[\text{g}]$ が余分に必要である。ここで、 V_R は部屋の容積であり、空気の密度を 1.2 kg/m^3 とした。

$$V_Z' = \frac{1.2 V_R (H_{out} - H_{in})}{y} \quad \dots\dots\dots (17)$$

これは、冷房開始時に室内に存在する水蒸気量から冷房中の室内に存在する水蒸気量を差引いた量の水蒸気を吸着するために必要なゼオライトの量であり、 $V_R=62.5\text{ m}^3$ 、 $H_{out}=21\text{ g/kg}$ 、 $H_{in}=8.26\text{ g/kg}$ 、 $y=0.2\text{ g/g}$ -ゼオライトを代入すると、 $V_Z'=4,780\text{ g}$ が得られる。従って、冷房開始から 1 時間のゼオライトの必要量は $V_Z + V_Z' = 22.0\text{ kg}$ となる。

8. 除湿実験

温度が高くても湿度が低ければ、水の蒸発が促進され、熱の発散が行われるので、除湿のみを行っただけでもかなり不快感が軽減される。そこで、図5のシステムで加湿を行わずにそのまま空気を流して、室内の空気の除湿実験を行ってみた。その結果を図11に示す。吸着材はゼオラム F-9 (19.3 kg) 及びシリカゲル (8 kg) を用いた。実験開始時の室温は 28°C 、湿度 84% 、絶対湿度 20.2 g/kg であったが、実験開始の 3 時間後には部屋の湿度が約 50% 、絶対湿度で 13.5 g/kg まで減少し、湿度を減らしただけでもさわやかな感じになった。実験開始の 9 時間後には、絶対湿度が実験開始時とほぼ等しくなった。その間の吸着材の吸着熱量が $2,880\text{ kcal}$ であったので、これを水 1 g 当り

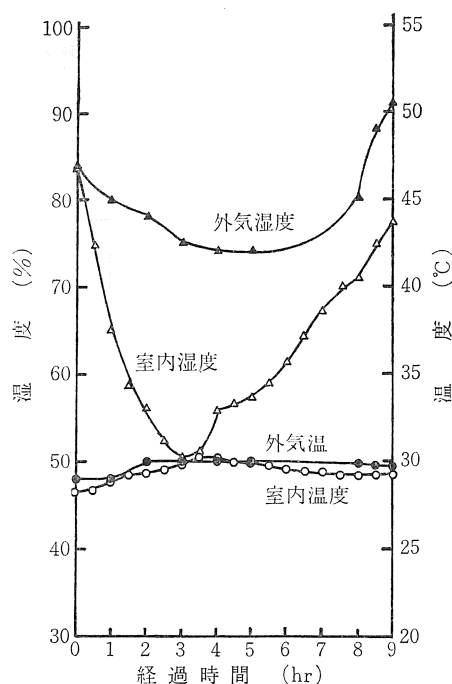


図11 除湿実験の結果

の吸着熱 750 cal/g で割ると吸着した水の量 3.84 kg が得られる。従って、 1 時間当り 427 g の水を吸着したことになり、実験開始時と終了時の室内の絶対湿度がほぼ等しいことから、これだけの水がすきま風と室内の水の蒸発及び人の排出する水蒸気によって、もたらされたと考えられる。このうち、実験中は室内に人があまり居らず、水も使わないので、室内の水の蒸発及び人の排出する水蒸気はあまり多くないが、室内への出入りのためのドアの開閉などにより、すきま風の寄与が非常に大きい。そこですきま風の風量を計算すると、外気の絶対湿度がほぼ 20 g/kg であるから、 $24.8\text{ m}^3/\text{hr}$ となる。この実験の送風量 $54\text{ m}^3/\text{hr}$ と比べるとかなりの量であることがわかる。このような一定量のすきま風があったとすると、室内の湿度が 50% にまで減少した時点で吸着した水の量は、 $427[\text{g/hr}] \times 3[\text{hr}]$ に部屋の絶対湿度の減少分に相当する水の量 $V[\text{g}]$ を加えたものである。 $V[\text{g}]$ は、開始時の絶対湿度を H 、 3 時間後の絶対湿度を H' 、部屋の容積を $V_R[\text{m}^3]$ 、空気密度を 1.2 kg/m^3 とすると次式で求められる。

$$V = 1.2(H - H')V_R \quad \dots\dots\dots (18)$$

$H=20.2\text{ g/kg}$ 、 $H'=13.5\text{ g/kg}$ 、 $V_R=94\text{ m}^3$ を代入すると $V=756\text{ g}$ となる。従って、最初の 3 時間で 2.04 kg の水を吸着したことになり、その後、部屋の湿度を 50% に保つには一定量の水分を吸着するように送風機の風量をしだいに多くしていって、 1 時間当り 427 g の水を吸着すれば良い。そうすると、まだ後 4.2

時間、湿度を50%に保つことができることになり、この吸着材の量で計7.2時間、除湿運転ができる。

9. 除湿に必要な吸着材量の見積り

冷房に必要な吸着材量の見積りのときに仮定した表5の空調系で、空調条件だけを33°C、50%RHとすると、室内の湿度を50%に下げするために必要なゼオライトは(17)式によって求められ、1,880gが得られる。人間1人が1時間に排出する水蒸気量は63.7gであるので、5人では319gになる。これを吸着するために必要なゼオライトは1,600gとなる。従って、すきま風や室内からの他の水の蒸発がないとすると、必要なゼオライトは除湿開始の1時間で3.48kg、その後、部屋の湿度が50%になってからでは1時間当たり1.60kgで済み、冷房のときの見積り量、22.0kg及び17.2kgに比べて、はるかに少なく済む。換気のために、1時間当たり125m³の空気を取入れるとすると、除湿に必要なゼオライトの量は、さらに3.75kg必要となるが、それでも除湿開始から1時間で7.25kg、その後で5.35kgである。

10. ま と め

ゼオラムA-4及びゼオラムF-9を用いて冷房実験を行った結果、冷房出力は吸着材の吸着容量だけでなく、すきま風に含まれる湿気の方に大きく依存するこ

とが明らかになった。従って、冷房出力を上げるためには、吸着材の吸着容量を増やすとともに、すきま風に含まれる湿気量を減少させることが必要である。また、吸着材を再生するために入力したエネルギーに対する冷房のエネルギー効率の計算から、冷房のエネルギー効率を上げるためには、吸着塔容器及び吸着材の顕熱の低減、吸着塔出口及び側面からの熱損失の抑制、すきま風の抑制を行う必要があり、また、水1g当りの吸着熱の小さい吸着材を開発する必要があることがわかった。冷房に必要な吸着材の量の見積りをマンションの25m²の応接室について行った結果、外気温が33°Cのとき、室内を28°Cに冷房するためには、1時間当たり17kgのゼオライトが必要であることが計算された。また、冷房せずに除湿だけを行う場合には、わずかな量のゼオライトで済むことがわかった。

参 考 文 献

- 1) B. Shelpuk ed. "Proc. Desiccant Cooling Conf. Nov. 16, 1977" DOE., EG-77-C-01-4042, (SERI-22) (1978)
- 2) 埴田博史, 小坂岑雄, 朝比奈 正, 小木曾史朗, 蓄熱の研究(その6) 塩化マグネシウム水和塩による屋内脱湿器の試作, 名工試報告, 29-2, 48-52 (1980)

(昭和56年10月15日原稿受理)

