

11.6.3 ポンプ所要動力と電動機

(1) 所要動力

ポンプの理論動力は次式で示される。

$$P = 0.163 \cdot \gamma \cdot Q \cdot H \quad (\text{kW}) \quad (2)$$

γ : 液体の単位体積当りの重量 (kg/L)

Q : ポンプの吐出量 (m³/min)

H : ポンプの全揚程 (m)

実際に電動機に要求される出力 (軸動力) は機械の効率と裕度とを見て次式となる。

$$p = 0.163 \cdot \gamma \cdot Q \cdot H \frac{100}{\eta} (1 + \alpha) \quad (3)$$

η : ポンプの効率 (%)

α : 裕度

η と α の大略数値を Figure 11.37 と Table 11.25 に示す。

Figure 11.37 Standard efficiency of general purpose pumps

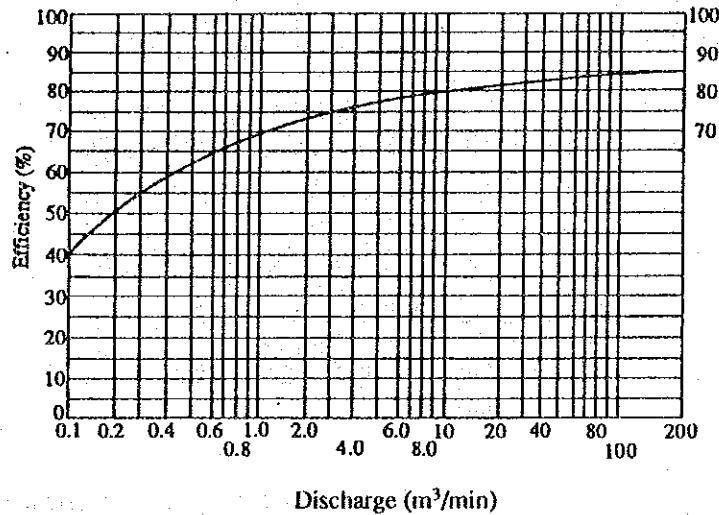


Table 11.25 Tolerance of pumps

Pump type	Tolerance (%)	
	Fluctuation of head is relatively small.	Fluctuation of head is relatively large.
Volute pump { High head	15	20
{ Medium, low head	10	15
Mixed flow pump	15	20
Axial flow pump	20	25

(2) ポンプ駆動電動機

電動機の選定に当たりポンプの始動・加速時のトルク特性，運転方式を知る必要がある。静止しているポンプを回し始めるには軸受け部の静止摩擦トルクに打ち勝たなければならないが，回転すると静止摩擦より小さな動摩擦になりポンプが加速されるに伴って負荷トルクが現れてくる。

ポンプの回転速度と負荷トルクとの関係はポンプの種類及び吐出弁の開閉状態によって異なる。特に吐出弁の開閉状態によって始動トルク特性が異なることを忘れてはならない。

吐出弁締切状態でのポンプの軸動力はNsが650以下の機種では最小となり，650以上の機種では100%を超え200%にも達する。遠心ポンプはNsが100~700くらいであり，始動時弁全閉の方が始動トルクが小さく，斜流ポンプはNsが700~1,200のため吐出弁全閉の始動トルクは150~200%になる。

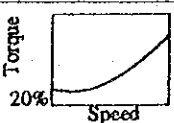
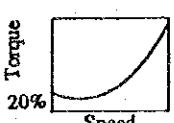

従って遠心ポンプは吐出弁締切状態からの始動が有利であり，斜流・軸流の場合は締切運転不能のため始動には特別の配慮が必要となる。小容量の軸流ポンプでは始動の初めは吐出弁を閉め回転速度の上昇と共に吐出弁を開き定格速度でトルク100%に達する方法をとる。

大容量軸流ポンプの場合は水量調節をかねて可動翼形を採用し吐出弁を締め切り状態にしてトルク100%で始動できるようにする場合もある。従って始動時定格速度でのポンプトルクが遠心ポンプでは40~80%，斜流・軸流ポンプで100%と考えればよい。

なおポンプでは立形が使用される場合が多いが，立形ポンプはスラスト軸受けによる静止摩擦が大きく，40%トルクに近いものがある。

以上を図示すると Figure 11.38 のようになる。

Figure 11.38 Start characteristics of pumps

Pump type		Start torque characteristics	GD ²
Centrifugal pump	$N_s \leq 300$		Small
	$300 < N_s \leq 450$		Small
Mixed flow pump Axial flow pump			Small

ポンプ駆動用電動機は前述の始動条件を考慮して選択しなければならない。一般にかご形電動機が多く用いられており、直入始動の場合には始動渋滞などの不具合は起きないが電源条件のためリアクトル始動などの減電圧始動をする場合はトルク低下によって加速途中で停留して始動不能になる場合がある。

しかし巻線形誘導電動機を用いる場合は始動不能の状態は生じない。同期電動機の場合100%近い同期引き入れトルクを要求されることがある。

11.6.4 送水管の抵抗

一般に送水管の抵抗は送水管が短い場合にはダーシ氏公式式(4)を使用して計算する。

$$H_f = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (4)$$

H_f : 送水管抵抗 (m)

λ : 抵抗係数

L : 送水管長 (m)

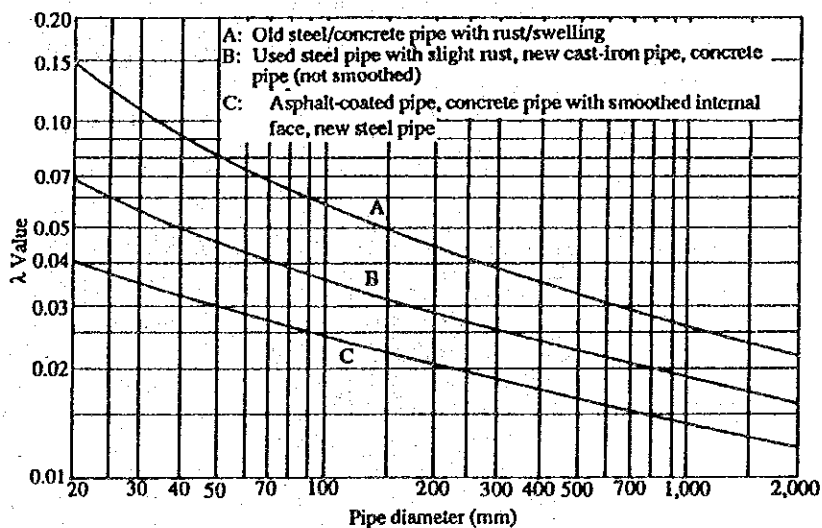
D : 管内径 (m)

v : 管内流速 (m^3/s)

g : 重力加速度 $9.8 m/s^2$

λ の値は通常 $\lambda = 0.02 + 1/2,000D$ とし、これに送水管内面の平滑の程度によって決まる係数を乗ずる。これには Figure 11.39 に示す コルブロックの実験式による損失係数を使うと便利である。

Figure 11.39 λ Values by colebrook



11.6.5 羽根車の外径を加工した場合のポンプ性能

渦巻ポンプは電動機の枠番と同様にある流量と揚程の範囲を一個の胴体としポンプの仕様に合わせて羽根車を製作している。従って前述のように将来を見込んで仕様を作成，当面の運転に性能の余裕がありすぎる場合は羽根車をFigure 11.40の破線のように製作しておき，将来送水管の抵抗増大によって流量が足りなくなったときに羽根車を新製する方法が経済的である。

また同じ実揚程で現在の送水管での抵抗曲線が R_1 のとき送水管を太くして抵抗曲線を R_2 にし，ポンプ羽根車を改造すれば，ポンプ運転点を A_1 から A_3 にすることができるので $(L_1 - L_3)$ の電力節減となることを意味する。

稼働中のポンプの羽根車外径 D_1 をFigure 11.41のように D_2 に加工した場合の性能の変化

Figure 11.40 Pump performance and resistance curve

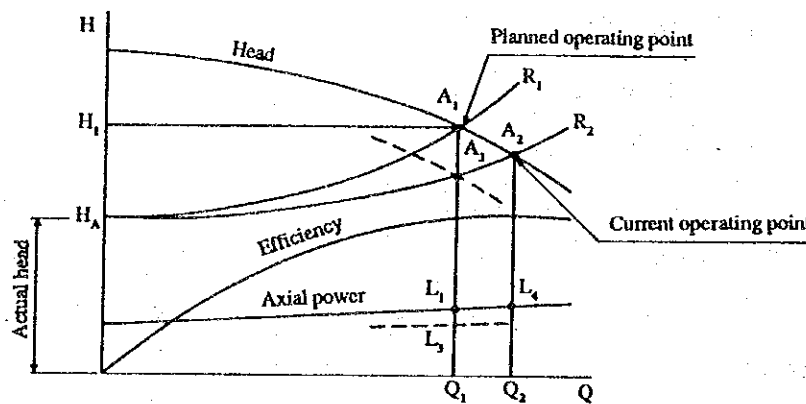
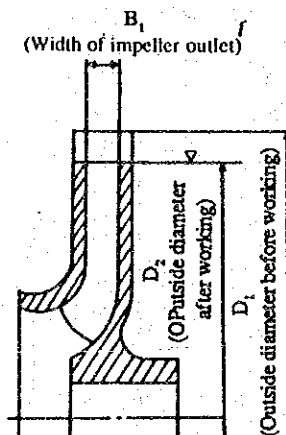


Figure 11.41 Working the impeller of its outside diameter



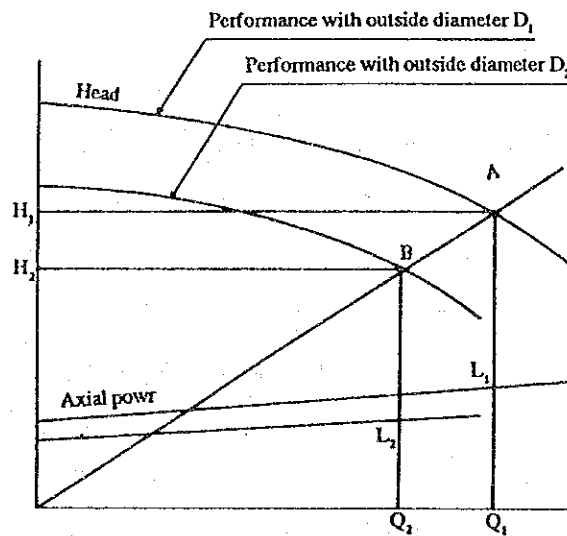
をFigure 11.42にしめす。羽根車外径 D_1 を D_2 に加工した場合の流量・揚程・動力は次式(5), (6), (7)のようになる。

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^2 \quad (5)$$

$$\frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^2 \quad (6)$$

$$\frac{L_2}{L_1} = \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^4 \quad (7)$$

Figure 11.42 Change of performance by working on Impeller diameter



外径 D_1 の $Q-H$ 曲線上の任意の点 A と座標の原点を直線で結び、 $H_2 = (D_2/D_1)^2 \times H_1$,
あるいは $Q_2 = (D_2/D_1)^2 \times Q_1$ から直線上に B 点を求める。このような方法で外径 D_2 の性能
を数点求めこれらを曲線で結び外径 D_2 の $Q-H$ 曲線を作成する。

同様に動力も $L_2 = (D_2/D_1)^4 \times L_1$ で計算し垂直線 BQ_2 上に L_2 として記入する。この方法
で数点を求め、これらを結んで動力の曲線を作成する。

(羽根車の外径加工で注意すべき点)

- ① 羽根車は製作時に釣り合わせを行っているので加工後再度釣り合わせをしなければなら
ない。
- ② 羽根車外径の加工率 $\{(D_1 - D_2) / D_1 \times 100 (\%)$ が20%を超えるような大きい値の時は
式(5), (6), (7)が適用できなくなり揚水不能となるケースがある。
- ③ 羽根車の材質によっては外径加工できないものがあるので注意を要する。例, ステン
レス製プレス品

11.6.6 ポンプの回転数制御

プロセス制御，ポンプの流量制御あるいは省エネルギーの目的などで回転数制御が採用される場合がある。ポンプ駆動用電動機を回転数制御する方法としては11.3.2の(3)項で述べたような種々の方法がある。回転数制御を行う場合，ポンプの回転速度を N_0, N_1 ，その時のポンプ流量を Q_0, Q_1 ，ポンプ揚程を H_0, H_1 ，ポンプの軸動力を L_0, L_1 とすると次式の関係が成立する。

$$\frac{Q_1}{Q_0} = \frac{N_1}{N_0} \quad (8)$$

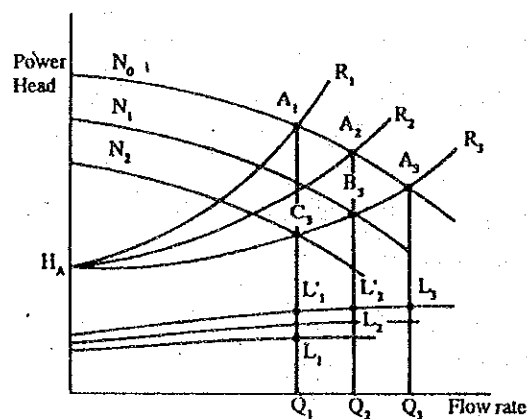
$$\frac{H_1}{H_0} = \left(\frac{N_1}{N_0} \right)^2 \quad (9)$$

$$\frac{L_1}{L_0} = \left(\frac{N_1}{N_0} \right)^3 \quad (10)$$

Fig 11-43 はポンプの回転速度を変えた場合の特性の変化を示したもので流量，揚程，軸動力は回転数の変化に対して式(8)，(9)，(10)の関係で変化している。Figure 11.43で送水管の抵抗曲線が R_3 であったとき，ポンプの回転速度を N_0, N_1, N_2 と変化されるとポンプの運転点は A_3, B_3, C_3 と変わり流量が Q_3, Q_2, Q_1 となる。

必要とする流量が Q_1 の場合にポンプの回転速度を N_1 のままにしておくとなれば弁で絞り抵抗曲線を R_3 から R_1 にしなければならず，このときのポンプの運転点は A_1 ，軸動力は L_1' である。ポンプの回転速度を N_2 にすれば抵抗曲線が R_3 のままで運転点が C_3 ，軸動力が L_1 となるので相当量の電力節減が可能である。

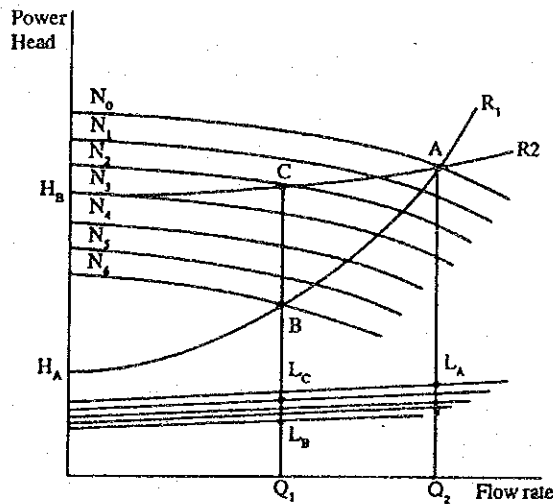
Figure 11.43 Changes of characteristics by change of rotational speed



ただしここで注意しなければならないことはFigure 11.44の H_A のように実揚程が小さく送水管抵抗が大きい場合には上記のことが言えるので、送水管抵抗が小さく実揚程が H_B であるような場合には回転数制御を行ってもあまり電力の削減にはならない。

(流量 Q_0 から流量 Q_2 に流量変更する場合に回転速度を求める方法)

Figure 11.44 Difference of axial power by actual head power



現在 Figure 11.45上の運転点Aで(流量 Q_0 , 全揚程 H_0) ポンプが運転しているとする。抵抗曲線は実揚程 H_A と全揚程 H_0 から求めることが出来る。抵抗曲線上で吐出量 Q_2 時の全揚程を H_2 とし、運転点をCとする。

曲線CBは原点を通る2次曲線であり、この曲線は次のように求める。

2次曲線を

$$H = a \times Q^2$$

とするとC点より係数 a は

$$a = H_2 / Q_2^2$$

Fig 11-45の緒元を代入すると

$$a = 22.5 / (1.5)^2 = 10$$

となり曲線CBは

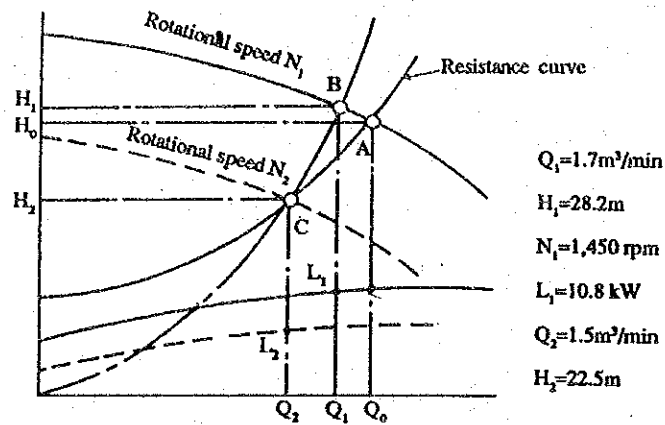
$$H = 10 \times Q^2$$

と表される。この曲線と回転速度 N_1 時のポンプ性能曲線との交点がB点となる。図よりB点の吐出量 $Q_1 = 1.7 \text{ m}^3/\text{min}$, 全揚程 $H_1 = 28.2 \text{ m}$, 軸動力 $L_1 = 10.8 \text{ kW}$ と読み取れたとする。

設備が要求する運転点Cにするためのポンプ回転速度を求めると、式(9)より

$$N_2 = \frac{N_1}{(H_1/H_2)^{1/2}} = \frac{1,450}{(28.2/22.5)^{1/2}} = 1,295 \text{ rpm}$$

Figure 11.45 Change of pump performance by rotational speed



となる。

このときの軸動力は式(10)より

$$L_2 = L_1 \times \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^3 = 10.8 \times \left(\frac{1,295}{1,450} \right)^3 = 7.7 \text{ kW}$$

となる。Figure 11.45のA点に置ける軸動力は11.0 kWであり回転速度を変えることにより7.7 kWに低減されることになる。

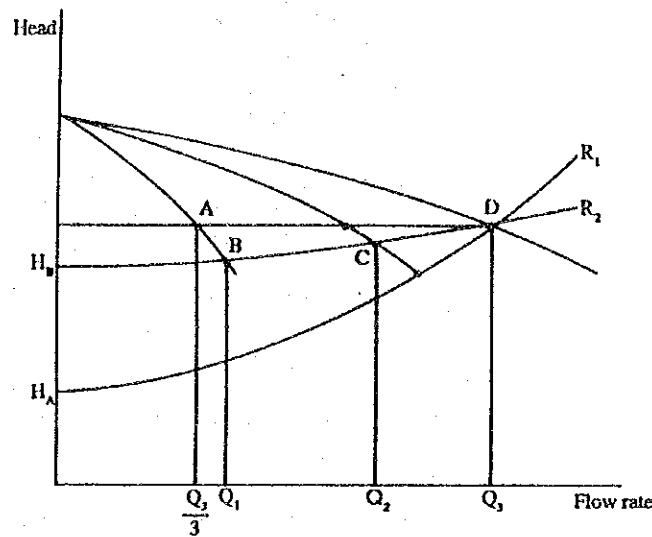
11.6.7 ポンプの台数制御

必要水量が年間で時期により変動する場合やあるいは1日の内でも日中と夜間というように時刻で変化する場合に大容量のポンプ1台を弁で流量制御したり、可変速電動機で回転数制御してもFigure 11.36に示すようにポンプの最高効率点は流量の大きい領域にあり流量が小さい領域では効率が低い。この場合にはFigure 11.46のようにポンプを数台に分割して大水量を必要とするときは並行運転を行い小水量でよいときは1台のポンプを運転するようにすれば、常時ポンプ効率のよい領域での運転が出来る、電力の節減が出来る。但し小水量時に電動機が過負荷になることがあるので運転点を確認する必要がある。

実揚程が H_b 、送水管の抵抗曲線が R_2 であればポンプが3台運転で流量 Q_3 であるから1台のポンプは流量 $Q_3/3$ で運転されなければならない。しかしポンプ1台運転では流量が少ないため送水管の抵抗も小さく、ポンプの運転点がBとなりそのときの流量は Q_1 で $Q_3/3$ よりも多くなる。従って流量 Q_1 で運転した場合でも電動機が過負荷にならないように検討しておく必要がある。

また実揚程が H_a 、送水管の抵抗曲線が R_1 のように実揚程が小さいものではポンプ1台の運転をしようするとポンプの最大流量以上になってしまうので、吐出弁を絞って抵抗を付

Figure 11.46 Parallel operation characteristics of pump



加しなければならない。

11.6.8 ポンプの電力削減対策

気体も液体も流体であり、基本理論は同じであるから、送風機で述べた方法がそのまま適用できる。但し、弁制御では吸い込み側の弁コントロールは行われず吐き出し側のみである。吐き出し側の弁コントロールは消電力としては最悪の方法であり、むしろ流量制御に主眼をおいた方法である。

ポンプの省電力フローをFigure 11.47に示す。

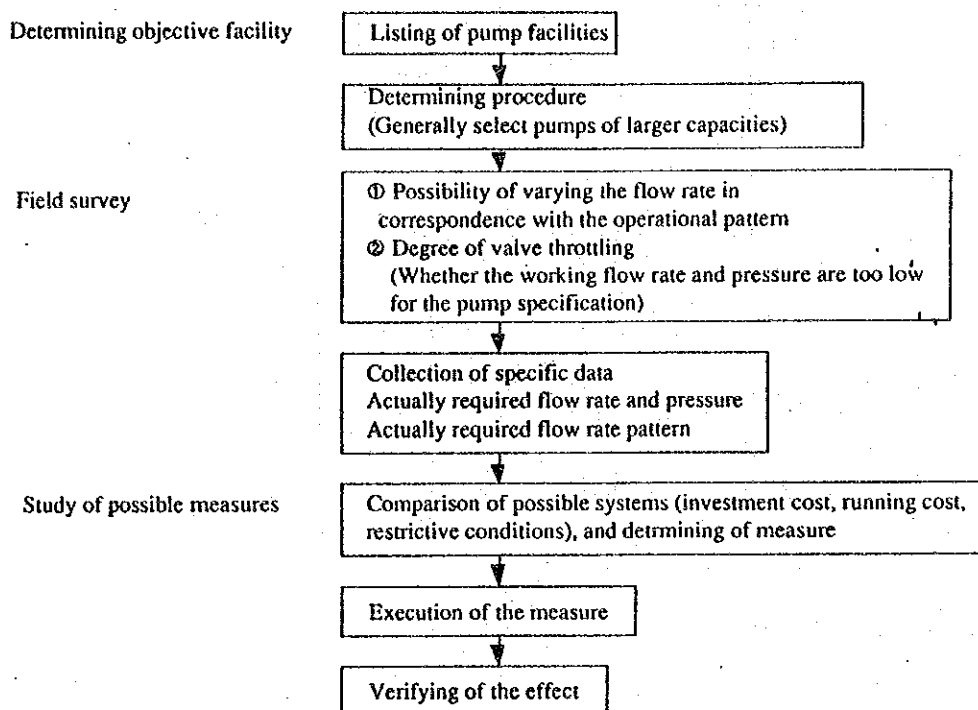
ポンプの電力削減の3要素は①必要流量の低減 ②管路抵抗の減少 ③効率のよい流量制御である。

(1) 必要流量の低減

必要流量をまず削減すること、これが第一である。各種設備に使用されているポンプは需要水量に見合ったポンプ設備になっているはずであるが現実には以下にあげる理由により実際に必要とする揚程、水量よりもポンプの持つ性能の方が大きい場合が大半である。

- ① 配管設備の経年による管路損失の増大を見込んで、全揚程に相当量の余裕を持ったポンプを設置している場合が多い。
- ② 将来の送水量や排水量の増加を見込んで、水量に余裕をもたせた設備が多い。
- ③ 現在の JIS 試験規格では実際の流量・揚程曲線がポンプ仕様として決めた流量で規定の揚程を下回らないことになっているのでユーザに納入されるポンプはそのほとんどが仕様として決めた流量・揚程以上に水の出るものとなっている。

Figure 11.47 Electric power saving flow of pumps



(2) 管路抵抗の減少

管路抵抗は設備建設時点ではほぼ決まってしまうものであり既設改造は難しいが抵抗となるものを以下に列挙する。

① 直管の摩擦損失

ダーシ氏の式(式(4))によれば直管の摩擦損失は 管材の抵抗係数×(流速)²×管の長さ/管径 に比例する。

② 配管要素の損失

吸い込み口, 曲がり部, 急拡大部, 急収縮部, オリフィス部, 分流部, 合流部, 放流部 など

③ バルブ類の損失

単純に言えば配管を極力直管に近くし, 径を大きく, 長さを短く, 配管に余計なものをできるだけつけないことが抵抗を小さくすることになる。

(3) 効率のよい流量制御

必要流量が低減可能となったとしてポンプの省電力方法を述べる。

① 間欠運転

水利用が必要時と不必要時にはっきり分かれる場合, 不必要時にポンプ停止を行う。

すなわちポンプを断続運転する。簡単な方法ではあるが水撃作用があるのであまり短期の入り切りは避けるべきである。

② 台数制御

使用水量の変化に応じてポンプの運転台数を増減する方法で、ポンプ性能を設備の水量変化範囲に合わせてポンプ効率が比較的良好な部分で運転できるようにポンプの台数を分割しポンプの軸動力を低減させる。

制御方式が簡単で台数を増やすことにより危険分散が出来るが、吐出量が段階的变化になる。抵抗曲線が急勾配の場合には台数を増やしても吐出量の増加が少ないなどの問題がある。

③ 回転数制御

初期投資費が高いという欠点はあるが電力費の低減効果が大きく、低流量でもポンプに無理のない運転が出来る特長があり、大容量ポンプの場合、揚程の変動範囲が大きい場合等に有効である。

④ ポンプの取り替え

定流量負荷で流量が以前より低下した場合、あるいは流量に季節的変動がある場合などにポンプを必要流量にあったものに変更する方法で簡単ではあるが流量制御は出来ず、取り替えに時間を要するといった問題がある。

また回転数を変更し流量を低減することを目的として電動機の取り替えのみを行う場合もある。

⑤ 羽根車の交換

渦巻きポンプで定流量負荷に適用でき効率のよいポンプ性能変更が可能である。但しポンプの分解、組立が必要である。

11.7 照 明

11.7.1 工場照明

(1) 工場照明の目的

よい照明は、各種の視作業を容易にし、次のような効果がある。

A) 作業能率の向上

適正な照度は神経の疲労を少くし、不良品を減少させ、作業能率が向上する。

B) 作業安全の向上

物がはっきり見え、視界が広くなり、作業に対する注意が行きとどき、誤認などによる災害を防止することができる。

C) 職場管理の徹底

作業並びに職場内の欠陥が指摘しやすくなり、整理整頓と環境衛生の気風が高まり、作業・設備などの管理の徹底ができる。

D) 作業者士気の向上

照明をはじめ、作業環境の整った職場は、従業員の誇りと使命感を高め、働く意欲を喚起する。

(2) よい工場照明

工場照明の良否には、次の要素があげられる。

- 適正な照度及び照度分布であること。
- ちらつき、まぶしさの無いこと。
- 光源の演色性が極端に悪くないこと。
- 経済性がよいこと。

このうち適正な照度とは、作業の内容、対象物の大小、色彩などによって必要な値が決まってくる。日本では照度の基準値として、Table 11. 26の値が推奨されている。なお高年齢者に対しては、この基準値は若干増加させる必要がある。

また、ちらつき、まぶしさは目の疲労の原因となり、作業に支障をきたし能率を低下させる。演色性についても、作業の内容によっては支障をきたすことがある。

11.7.2 照明の省エネルギー

工場や事務所などの全般照明の式として、次の式がよく知られている。

$$E = \frac{N \times F \times U \times M}{A} \quad (\text{l x}) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、E ; 照度 (lx)

A ; 室の面積 (m²)

N ; ランプ数

F ; 1個のランプの発する光束 (lm)

U ; 照明率 (注1参照)

M ; 保守率 (注2参照)

(注1) 照明率U ランプから出る全光束に対し作業面に入る光束の比で、器具の配光、取り付け位置、室の条件などによって違ってくる。

(注2) 保守率 使用時間の経過と共に初期照度が低下する割合を予測した数字で、これは設備の保守をどの程度に実施するかによって変わるので、設計段階において定める。

Table 11.26 Illumination Standard

Illumination [lx]	Place	Operation
3,000	Instrument panel and control panel in control room, etc.	Exceedingly fine visual operation in manufacture of precision machines and electronic parts, printing factory, etc., such as ◦ assembly a, ◦ inspection a, ◦ test a, ◦ selection a, ◦ design, ◦ drawing.
1,500	Design and drawing rooms	Fine visual operation in selection and inspection in textile mills, typesetting and proofreading in printing factory, analysis, etc. in chemical industry, such as ◦ assembly b, ◦ inspection b, ◦ test b, ◦ selection b.
750	Control room	Ordinary visual operation in general manufacturing processes, etc., such as ◦ assembly c, ◦ inspection c, ◦ test c, ◦ selection c, ◦ packing a, ◦ desk work in warehouses.
300	Electricity room and air conditioning machine room	Rough visual operation such as ◦ packing a, ◦ wrapping b, ◦ restricted operation
150	Entrance/exit, corridor, passage, warehouses involving operation, staircases, lavatories	Very rough visual operation such as ◦ wrapping c, ◦ packing b, ◦ restricted operation
75	Indoor emergency staircases, warehouses, outdoor power equipment	Operation such as ◦ loading, unloading, load transfer, etc.
30	Outdoor (for passage and safety guard within compound)	
20		
10		

(Remarks)

1. Similar operations are divided into the following three according to the object to view and nature of the operation:
 - (1) a in the above table indicates fine, dark colored, weak-contrasted, specially expensive, hygiene-related ones and when high precision is required or when long working hours are required, etc.
 - (2) b in the above table indicates an intermediate between (1) and (3).
 - (3) c in the above table indicates coarse, light-colored, strong-contrasted, robust, not so expensive ones.
2. For dangerous operation, double above shall be required.
3. For places for operation marked ◦, this illumination may be obtained by local lighting. It is desirable that illumination for general lighting in this case is more than 1/10 of illumination by local lighting.

(1)式を変形して、照明に要する消費電力量を求めれば、

$$W \cdot H = \frac{N \times F}{\eta} \times t = \frac{A \times E \times t}{U \times M \times \eta} \quad (\text{Wh}) \quad \dots\dots\dots (2)$$

W・H ; Watt-Hour

η ; ランプ効率

t ; 点灯時間 (時間)

となる。実際に消費される照明用電力は、この(2)式に照明用配電線の損失を加えたものになるので、照明の省エネルギーとは次のように考えることができる。

- ・点灯時間を減らす。
- ・配電線の損失を減らす。
- ・照度を適正に保つ。
- ・効率の高い器具を使用する。
- ・照明率を上げる。
- ・保守率を上げる。

11.7.3 省エネルギーの具体策

(1) 点灯時間を減らすこと

具体策としては、次のことがとりあげられる。

- a. 昼休みを含め、不用時の消灯
- b. 窓際照明の個別消灯
- c. こまめに消灯できるようスイッチを多く設ける。
- d. 人通りの少ない地帯の消灯
- e. 屋外灯に自動点滅器あるいはタイマスイッチの採用

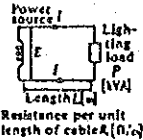
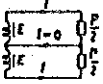


などであるが、いずれにしろこれらの対策は従業員の節電意識による所が大きいので、その高揚に努める必要がある。

(2) 配電線の損失を減らすこと

配線方式によって、配電線の損失には相当の差異があるので (Table 11. 27 参照), 設備新設時にはよく比較検討して決定することが望ましい。

この他、配電電圧の格上げ、力率の改善等も検討すべき項目である。

Table 11.27 Comparison of loss by wiring system

Wiring system	Connection	Loss calculation	Loss ratio
Single phase two wire system	 <p>Power source E, Lighting load P, Resistance per unit length of cable LR₁ (Ω/m)</p>	$P = EI \times 10^{-3} [\text{kVA}]$ $\text{Loss } W = I^2 \times 2LR_1 = \left(\frac{P}{E} \times 10^3 \right)^2 \times 2LR_1 = \frac{2P^2 LR_1}{E^2} \times 10^6 [\text{W}]$	100%
Single phase three wire system		$\frac{P}{2} = EI \times 10^{-3} [\text{kVA}]$ $W = 2I^2 LR_1 = \left(\frac{P}{2E} \times 10^3 \right)^2 \times 2LR_1 = \frac{P^2 LR_1}{2E^2} \times 10^6 [\text{W}]$	25%
Three phase three wire system		$\frac{P}{3} = E \times \frac{I}{\sqrt{3}} \times 10^{-3} [\text{kVA}]$ $W = 3I^2 LR_1 = \left(\frac{P \times 10^3}{\sqrt{3}E} \right)^2 \times 3LR_1 = \frac{P^2 LR_1}{E^2} \times 10^6 [\text{W}]$	50%
Three phase four wire system		$\frac{P}{3} = EI \times 10^{-3} [\text{kW}]$ $W = 3I^2 LR_1 = 3 \left(\frac{P \times 10^3}{3E} \right)^2 \times LR_1 = \frac{P^2 LR_1}{3E^2} \times 10^6 [\text{W}]$	16.7%

NOTE: Each cable size is same.

(3) 照度を適正に保つ

作業上必要な照度の確保はもちろん大切なことであるが、通路やあまり人の立ち入らない所、屋外照明等は照明レベルの見直しや、局所化を行うことが、省エネルギーのために大切である。

また工場新設時には、自然採光の取り入れも積極的に考えるべきである。

(4) 効率の高い器具を使用する

ここでいう器具とは、安定器、ランプ及び反射笠についてである。

Table 11. 28 は安定器の特性の1例を示したものである。配電線のサイズを小さくするためには始動時の電流が小さい方がよく、配電線の損失軽減のためには力率がよい方がよい。しかし、これに反比例して重量、価格が増加していくので、機種を選定には経済性の検討が必要である。

Table 11. 29 及び Table 11. 30 は 各種ランプの特徴と用途を示したものである。

Table 11.28 Example of stabilizer characteristic (for 400W mercury lamp)

		Non-dimming type			Dimming type			
		Low power factor type	High power factor type	Constant power type	Constant power type		General type	
Input voltage (V)		200	200	200	200		200	
Voltage tap (V)		200, 220	200, 220	200	200		200, 220	
Input current (A)					Normal		Dimmed	
	When starting	5.7	4.0	2.3	2.3	—	3.8	—
	When stabilized	3.3	2.3	2.3	2.3	1.3	2.4	1.3
Input power (W)		425	425	435	435	255	432	255
Power factor (%)		64	90	95	95	95	90	95
Weight (kg)		4.6	5.2	10.0	13.5		7.0	
Volume ratio (%)		100	160	270	340		220	
Price ratio (%)		100	150	240	310		260	

Table 11.29 Special features and applications of various lamps

Class of lamps	Special features	Scope of size (W)	Main performance of standard quality				Applications
			Efficiency (lm/w)	Color temperature (K)	Color rendering index (Ra)	Life	
Incandescent lamp	<ul style="list-style-type: none"> • Stable light color • Possible to light as-is. • Instantaneous lighting high luminance 	Several W	100 W				Residence, store, office
		Several kW	15	2,850	100	1,000	
Tungsten halogen lamp	Small-size, high efficiency and long life lamp	Several 10 W ~	For general use 500 W				For floodlamp, for automobiles, for projection, for photography, for copying machine, studio
		Several kW	21	3,000	100	2,000	
Fluorescent lamp	<ul style="list-style-type: none"> • High efficiency and long life • A wide variety of light colors • Little glare 	4 ~ 220 W	White 40 W				Residence, office, store
			82	4,500	69	10,000	
Mercury lamp	High efficiency, long life, high luminance lamp	40 ~ 2 kW	400 W				For floodlamp (baseball ground, golf course)
			51	5,800	23	12,000	
Fluorescent mercury lamp	Mercury lamp with luster improved	40 ~ 1 kW	400 W				Roads, factory, street lighting, arcade lighting
			56	4,100	44	12,000	
Choreless mercury lamp	Mercury lamp requiring no stabilizer	160, 250, 500 W	500 W				For works, stores
			27	3,000	42	6,000	
Halide lamp	Higher efficiency and lustrous lamp than mercury lamp	250 ~ 1 kW	400 W				Gymnasium, factory, shopping street, open space, park
			80	4,500	65	9,000	
High lustrous halide lamp	High lustrous, high luminous lamp	250 ~ 400 W	400 W				Gymnasium, lobby, hall
			50	5,000	92	6,000	
Low pressure sodium lamp	Highest efficiency, yellow, luminous lamp	35 ~ 180 W	180 W				Tunnel, high-way, switch-yard
			175	—	—	9,000	
High pressure sodium lamp	Highest efficiency, luminous lamp for general lighting	150 ~ 1,000 W					Gymnasium, high-ceiling factory, warehouse, roads, open space
			120	2,100	29	12,000	

Note: Efficiency of fluorescent and mercury lamps is of 100 hrs value.

Table 11.30 Selection of lamps from standpoint of typical applications

Class of lamps		Incandescent lamp			Fluorescent lamp			Mercury lamp			Halide lamp		Sodium lamp		Xenon lamp
		General lamp	Reflector lamp	Halogen lamp	General fluorescent lamp	High color rendering properties	High output type	Transparent mercury lamp	Fluorescent mercury lamp	Reflector mercury lamp	Stabilizer built-in type	General type	High lustrous type	High pressure	
Residence		⊙	○	△	⊙	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×
Office	General office	△	△	△	⊙	△	○	×	×	×	×	△	△	×	×
	High-ceiling office, lobby	○	○	○	○	△	○	×	○	○	△	⊙	○	×	×
	Single room, drawing room	○	○	△	⊙	○	×	×	△	×	×	△	△	×	×
Store	General stores	⊙	⊙	○	⊙	⊙	○	×	○	△	△	△	△	×	×
	High-ceiling stores	○	○	○	○	○	⊙	×	○	○	○	⊙	○	△	△
	Exhibits, showcase	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	○	×	△	△	○	○	○	×	×
Factory	Low-ceiling factory	△	△	○	⊙	○	○	×	△	△	△	△	△	△	×
	High-ceiling factory	△	△	○	△	△	⊙	×	⊙	○	○	⊙	○	○	×
	Warehouse	○	△	○	⊙	△	○	△	⊙	○	○	○	△	○	×
School	Class room	△	△	△	⊙	○	△	×	△	×	×	△	△	×	×
Hospital	Operating room	○	○	△	⊙	⊙	△	×	×	×	×	×	×	×	×
Theater, hall	Spectator's seats	⊙	⊙	⊙	⊙	○	△	×	△	△	△	○	○	×	×
	Stage	⊙	⊙	⊙	⊙	○	○	×	△	△	△	△	△	×	×
Art museum, museum	General	⊙	⊙	○	○	⊙	△	×	△	△	△	○	○	×	×
	Exhibits	⊙	⊙	○	○	⊙	△	×	×	×	×	○	○	×	×
Roads	Automobiles exclusive roads	×	×	×	△	×	×	△	⊙	×	×	△	×	○	△
	Automobiles exclusive tunnel	×	×	×	△	×	×	△	○	×	×	△	×	○	×
	Streets	△	×	×	○	×	×	△	⊙	△	△	△	△	○	△
	Shopping streets	○	×	○	○	△	⊙	×	⊙	△	△	⊙	△	○	×
	Roads in resident area	○	×	×	○	×	×	△	⊙	△	×	△	×	○	×
Parking zone	Indoor	△	△	△	⊙	×	○	×	○	△	△	△	△	○	×
	Outdoor	△	△	△	○	×	×	△	⊙	○	△	△	△	○	△
Open space, park, garden		○	△	△	○	△	×	△	⊙	△	△	○	△	○	△
Floodlight lighting	Structure	○	○	○	×	×	×	△	⊙	⊙	○	○	○	△	○
	Advertisement, signboards	○	⊙	⊙	○	○	○	△	⊙	⊙	△	○	○	△	×
Sports	Indoor	○	○	⊙	○	○	○	△	⊙	○	△	⊙	○	△	×
	Outdoor	○	○	○	×	×	×	△	⊙	○	△	⊙	○	⊙	×

(5) 照明率の向上

照明率とは、ランプから出る全光束に対し作業面に入る光束の比で、器具の配光取り付け位置、室の条件などによって違ってくる。Table 11.31 に照明率表の例を示す。この表における室指数 R I は次式で算出する。

Table 11.31 Example of utilization factor

Ceiling	80%						50%											
Wall	60%		30%		10%		60%		30%		10%							
Floor surface	40%	20%	10%	40%	20%	10%	40%	20%	10%	40%	20%	10%	40%	20%	10%	40%	20%	10%
Room index	Utilization factor																	
0.60	.45	.42	.40	.31	.30	.30	.26	.25	.25	.41	.39	.38	.30	.29	.29	.25	.25	.25
0.80	.56	.51	.49	.41	.39	.38	.35	.34	.33	.51	.48	.47	.39	.38	.37	.34	.33	.33
1.00	.63	.57	.55	.47	.45	.44	.41	.40	.35	.57	.53	.52	.45	.44	.43	.40	.39	.38
1.25	.71	.63	.60	.55	.52	.50	.48	.46	.45	.64	.59	.57	.52	.50	.49	.46	.45	.44
1.50	.76	.66	.64	.61	.56	.54	.54	.51	.50	.68	.63	.61	.57	.54	.53	.52	.50	.49
2.00	.85	.75	.70	.71	.65	.62	.64	.59	.57	.76	.70	.67	.66	.62	.60	.60	.58	.56
2.50	.91	.79	.74	.78	.70	.66	.71	.65	.62	.80	.73	.70	.71	.67	.65	.66	.63	.61
3.00	.95	.82	.76	.83	.74	.70	.77	.69	.66	.84	.76	.73	.76	.70	.68	.71	.67	.65
4.00	1.01	.86	.80	.91	.79	.75	.85	.76	.71	.88	.80	.77	.78	.75	.72	.78	.72	.70
5.00	1.09	.88	.82	.96	.83	.77	.91	.79	.78	.91	.82	.79	.88	.78	.78	.82	.76	.73
10.00	1.13	.93	.86	1.08	.90	.84	1.05	.89	.82	.97	.87	.83	.94	.85	.81	.92	.84	.80

Light output ratio: 83% Light source: FL 40 SW 3,400 lm Fluorescent lamp reflector used

$$R I = \frac{W \times L}{H (W + L)} \dots\dots\dots(3)$$

ここで、W ; 室の間口 (m)

L ; 室の奥行 (m)

H ; 作業面からの光源高さ (m)

室指数は四角い室ほど大きな値となる。また照明率は内壁及び床の反射率の高いほど、また室指数が大きいほど高い値となる。

(6) 保守率の向上

保守率とは、使用時間の経過と共に器具の汚れ等により初期照度が低下する割合を予測した数字である。

従って保守率を向上させるためには、まず第一に、経年的な器具効率の低下割合の少ない器具を採用することであり、第二に、器具の定期清掃とランプの定期交換

である。しかし、工場の実情をいうと人件費の上昇もあって球切れのときに、ランプの交換と器具の清掃を行うのがやむを得ぬ現実であろう。従って、器具効率の経年低下割合の少ない器具を使用するのが第一の対策となる。

Figure 11. 48 に、ランプ自体の光束の減少傾向を、また Figure 11. 49 に器具にはこりが累積した場合の光束の低下状態を示す。

Figure 11.48 Lumen maintenance characteristic of various light sources

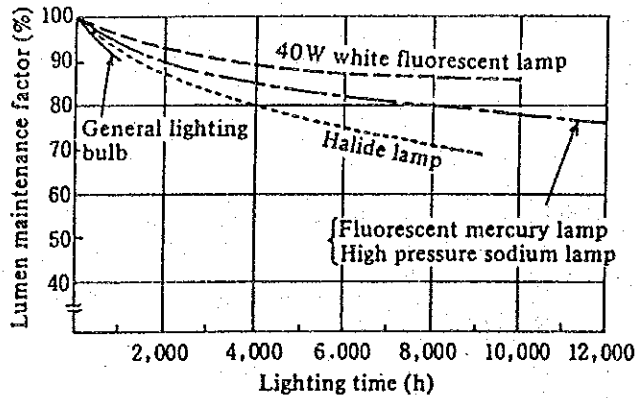
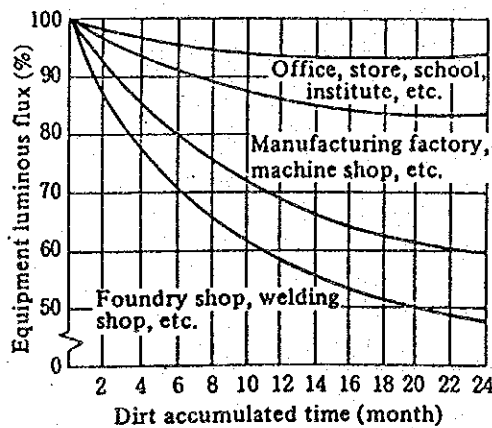


Figure 11.49 Lowered lumen when dirt accumulated on lamp and lighting equipment



(7) その他

照明に関してその他注意すべきことは、電源電圧を変動させないことである。

電動機などは±10%の変動でも支障なく運転できるが、ランプは定格電圧でその機能が最高度に発揮され、また寿命も最も長くなるように作られている。従って照明回路は、一般の動力回路とは分離し、かつ±5%以内の電圧変動に押えるようにすることが望ましい。

また周囲温度に関しても、メーカーの指定値を外れないように、注意することが大切である。

11.8 電気加熱

11.8.1 電気加熱方式の種類

電気加熱方式を分類すると Table 11. 32 のようである。

一般的な特徴としては次のような点が挙げられる。

a. 高温度が得られる

アーク加熱や直接通電によれば2000℃以上の高温に加熱することも可能である。

b. 加熱効率が低い

被加熱物自体が発熱する場合があることや排ガス損失が無いことから、加熱効率が低い。ただし、発電段階での熱損失や入力の変換効率を含めて、総合的に判断する必要がある。

c. 急速加熱が可能である

被加熱物内で直接電力を熱に転換でき、電力密度を高めることにより急速加熱ができ

d. 温度制御が容易である

自動制御、遠隔操作が容易で、精密な制御が行える。

e. 雰囲気制御が容易である

燃焼を伴わないので、雰囲気制御が容易である

11.8.2 電熱システムの省エネルギーの方法

(1) 熱源の転換

電熱の場合発電までさかのぼって考えると熱エネルギーを電気エネルギーに変換する火力発電、原子力発電の場合送配電のロスを含め、エネルギー効率は約35%であり他の熱源に比較し極めて不利である。極端な言い方をすれば前述の電熱を使用すべき理由がなければ他の熱源（石油、石炭、ガス、蒸気など）を使用すべきである。

また同じ電熱であっても加熱方式の転換（例えば 間接加熱→直接加熱）が可能であれば熱効率の工場が期待できる。

(2) 設備容量の適正化

電熱設備の運転としては連続かつ一定負荷の運転が望ましい。断続的な運転は加熱冷却

Table 11.32 Type and Main Applications of Electric Heating Systems

Heating method	System for converting electric energy to heat		Main applications and examples of units
	Conversion system	Heating system	
Utilization of Joule heat and arc heat	Resistance heating	Indirect resistance heating (50/50 Hz)	Various types of heat treatment furnaces using resistance heating means, sintering furnace, diffusion furnace, brazing furnace, salt bath furnace, and fluid bed heating
		Direct resistance heating (50/60 Hz) (DC)	Direct energizing heating of metal, graphitizing furnace, glass melting furnace, and ESR furnace
	Infrared ray heating	Proximate infrared ray heating (0.76 - 2.5 m)	Baking of painted surface, drying, and molding and processing of plastics
		Remote infrared ray heating (2.5 - 2.5 m)	Heating at 650°C or less, drying of painting, braking, resin hardening and processing, bread baking, heating, plant rearing
	Arc heating	Arc heating (50/60 Hz)	Steel making, dissolution of fire resisting materials, and dissolution of vacuum arc
		Plasma arc heating (DC)	Dissolution of heat resisting steel, Ni alloy steel, high melting point metal and alloy, dissolution of high melting point compound, production of single crystal, and high temperature thermochemical processing of other materials
Utilization of electromagnetic induction	Surface leather heating	High frequency induction heating (50/60 Hz - 450 kHz)	Dissolution of metal and alloy, heating for thermal processing, heat treatment of metal, welding, and brazing
		Low frequency induction heating	Dissolution of cast steel and heating of large-sized steel
	Transverse flux heating		Heating of sheets such as non-ferrous metal and stainless steel
	Short-circuit heating	For metal dissolution	Groove-shaped blast furnace and temperature rise of molten bath
		For metal heating	Interference of metal parts
	Utilization of high frequency electric field	Induction heating (3 - 40 MHz)	Drying of lumber, drying and heat treatment of food, leather, textile, chemicals and synthetic resin, bonding of lumber, and welding of synthetic resin
Heat developed by the impact of electronic and ion flow	Electron beam heating	Evaporation of metal, dissolution of high melting point metal, and fine processing of metal	
	Ion and ion beam heating and processing	Ion carburizing, heat treatment such as nitriding, surface coat treatment, etching of semiconductor, implantation, and other surface treatment	
	Glow discharge heating	Surface heat treatment of metal and metal heating	
Utilization of electromagnetic wave	Laser heating and processing (1 - 11mm)	Drilling processing of process-resistant material, welding, heat treatment and cutting of metal material, welding and processing of electronic parts, etc.	
	Microwave heating (915, 2,450 MHz)	Preparation (electronic oven), drying and thawing of food, heating and vulcanization of rubber, and sterilization of food and chemicals	
Utilization of electric mechanical power	Heat pump system	For household use	Air conditioning, hot water supply, and building air conditioning
		For industrial use	Drying of food, lumber and leather, effective utilization of exhaust heat, and others

を繰り返すので、電力を無駄に消費することが多く連続運転に比較して熱効率に相当の開きがでてくる。生産工程や作業方法を再検討し連続操作になりうる設備容量を選定する必要がある。

とくに電熱設備は大は小を兼ねる式の使い方に陥りやすく、1回の処理電力量も大きいので十分消費電力量を計算し、最小の損失で運転できるような方法を見出すことが必要である。

(3) 保温の強化

電熱設備は電動機や変圧器などと比べて各種の熱損失が多くその保温性能の如何によって熱効率に違いがでてくる。設備各部の温度測定、熱流計などで熱損失を測定し、熱損失の多い部分の保温強化によって熱効率を高める必要がある。

11.9 Heat pump

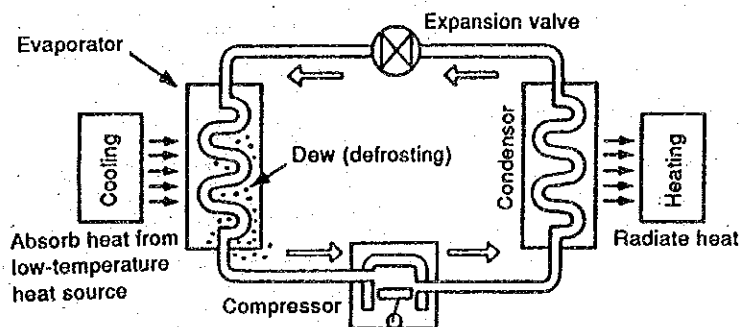
11.9.1 Heat pump system

ヒートポンプシステムにおいて電気は直接熱に変換するものではなく、熱を運ぶ動力源として使用するものである。したがって、常に熱源が必要となる。

本来、熱は高いところから低いところへ移動する。同様に水も高いところから低いところへ移動するが、ポンプを利用することによって低いところから高いところへ汲み上げることができる。このポンプの役目をするところからヒートポンプと呼ばれる。

ヒートポンプシステムには、Figure 11.50に示すように圧縮機・凝縮器・蒸発器・膨脹弁が必要であり、このシステムは凝縮器の加熱作用により空気や水を温めて、加熱運転を行う。

Figure 11.50 Configuration of heat pump system



また、冷媒回路を切り替えて蒸発器の冷却作用により空気や水を冷やし、冷却運転を行うことが可能である。つまり放熱側と吸熱側の使い分けにより加温及び冷却を行うことができるシステムである。

吸収ヒートポンプは熱エネルギーを駆動源とするもので、作動媒体の蒸発と凝縮を利用する点では蒸気圧縮式と同じで蒸気を高圧にするのに吸収液を用い、これに蒸気を吸収させて高圧部に送り、ここで外から熱を加えて再び蒸気の形に戻す方法をとる。吸収液は再び低圧部に戻し循環使用する。したがって、基本的には吸収ヒートポンプは圧縮機の代わりに吸収器と溶液ポンプおよび発生器が加わったものである。

11.9.2 ヒートポンプシステムの特長

(1) ヒートポンプシステムの特長

- 1台の機械で加温、冷却などが可能である。
- エネルギーの利用効率が非常に高く効率的である。
- 制御しやすく取り扱い操作が簡単で省力化できる。
- 燃焼を伴わないため安全性が高く、クリーンである。
- ボイラーのように付帯設備（煙突、貯油槽など）が不要なため、設置スペースも小さくてすむ。
- ユーティリティーとしてのエネルギーは電力だけでよい。

(2) 成績係数 (COP) について

ヒートポンプの熱出力とヒートポンプの所要動力の関係を表すのに成績係数またはCOP (Coefficient of Performance) と呼ばれる数値を用いる。

$$\text{成績係数 } (\varepsilon) \text{ (COP)} = \frac{\text{熱出力 (kcal/h)}}{\text{所要動力 (kWh/h)} \times 860 \text{ (kcal/kWh)}}$$

これはヒートポンプの効率の良否の判断、また必要な熱量を得るためのヒートポンプの所要動力を求めるのに用いられる。

ヒートポンプ運転のための電力を発電するのに必要な燃料消費熱量は、直接燃焼の場合より大きくては意味がない、1 kWhの発電のための燃料消費量、一般に2,250 kcalとなっている。

成績係数 ε のヒートポンプの熱出力は所要動力 1 kWh について考えると 860ε (kcal/kWh) となる。ここで数値860は1 kWhの電熱器の熱出力である。

ヒートポンプが省エネルギーになるには、少なくとも以下の式が成立する必要がある。

$$860 \epsilon > 2,250$$

$$\epsilon > 2.62$$

(例)ヒートポンプ技術開発センターによる産業用ヒートポンプ運転実態調査 (S63.3) の報告書によれば実際に運転されているヒートポンプの成績係数は3～20の範囲にあり、すべて2.62を越えており、省エネルギーに役立っていることになる。

11.9.3 ヒートポンプの利用分野

(1) 蓄熱式ヒートポンプによるビルの冷暖房

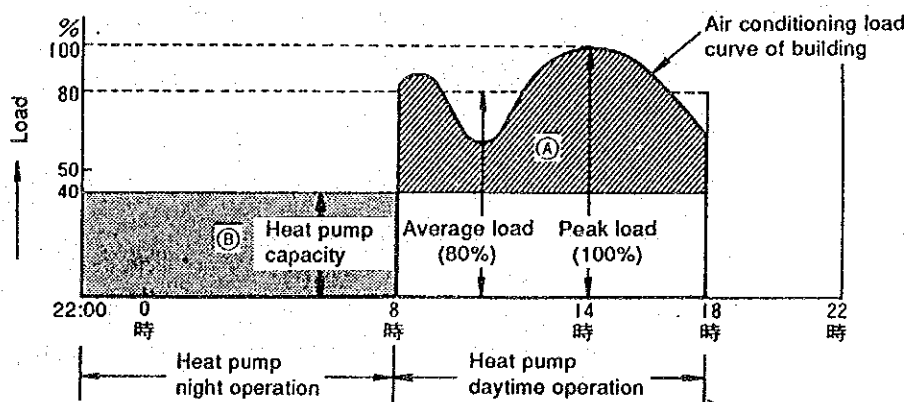
1日の冷暖房の負荷が Fig 11-51 の太線部分で囲まれる形であったとする。これまでのビル冷暖房における設備容量は、最も負荷の大きい時間 (図の場合14時) に合わせて決められてきた。しかし蓄熱式の場合、例えば冷暖房負荷の約50%を夜間に蓄えて昼間活用することにより、設備容量を小さくするとともに設備を常に高負荷域で運転できるため効率が良い。

Figure 11.51に示すとおり、22時～翌朝8時の間にヒートポンプを運転し、熱負荷の約50% (図④部分) に相当する温水・冷水を蓄熱槽に蓄え、昼間はヒートポンプを運転すると同時に蓄熱槽に蓄えられている温水または冷水 (図④部分) を汲み上げて空調機に送り、温風または冷風をつくり、暖房及び冷房を行う。

このようにするとヒートポンプ容量は縮小でき、設備費が軽減できるとともに、設備稼働率が向上し、より効果的な運転ができる。また主なメリットとしては、

- 設備容量の縮小に伴い契約電力が減少でき基本料金が低減される。また安価な夜間電力が利用できるため運転費も低減できる。
- 屋上等に設置することができ、建物面積を有効利用できる。

Figure 11.51 Cooling load characteristics curve



- 自動化が容易であり省力化が図れる。
- 燃料を伴わず安全・防災面に優れ、環境保全上も有効である。

(2) ヒートポンプによる地域冷暖房

都市部に存在する未利用エネルギー源（都市排熱）は年々増加の傾向にある。これは都市に供給されるエネルギーの大半が最終的には排熱となるからである。その大部分は50℃以下の低温排熱であり、その発生源は地下鉄、下水処理場、ごみ焼却場、発電施設、住宅、工場等さまざまな都市施設から発生する。

これからの排熱をヒートポンプの熱源として利用することにより、多くのメリットを得ることができる。

(2)-1 地域冷暖房の利点

- 燃焼設備による大気汚染や排熱による熱汚染の低減が図れ、環境の改善に寄与する。
- ヒートポンプの熱源に都市排熱や大気、河川、海水等の保有する熱をリサイクル利用することにより、省エネルギー効果の大きい利用システムの構築が可能である。また、蓄熱システムの導入や熱負荷の合成による熱源設備容量の合理化やコストの低減が可能となる。
- 石油燃料等の危険物の取扱いや貯蔵が不要となり、集中管理化により設備の安全性が高められる。

(2)-2 地域冷暖房システムの方式

① 集中式

Figure 11.52(a)に示すように、需要サイドの利用温度に近い温度の熱を中央プラントで作って各需要地に送る方式で、負荷密度が高く、地域配管が比較的短い都心部に適した方式である。

② 分散式

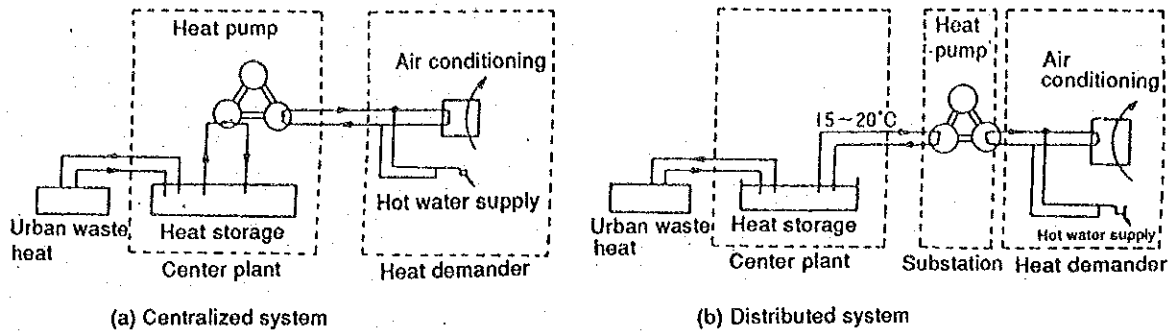
Figure 11.52(b)に示すようにヒートポンプの熱源水の温度を低く（15～20℃程度）して供給熱源水の熱損失の低減を図ることによる断熱工事費の低減が可能となる。この方式は熱負荷密度が低く、需要箇所が広域にわたる地域に適した方式である。

③ 集中式+分散式

集中式の区域内に高い温度を必要とする需要家がある場合に、そうした需要家内のサブステーションで熱源水から昇温する。また需要箇所が近い場合はセンタープラントから直接専用ラインを設けて熱を送る。

以上、述べたヒートポンプ式地域冷暖房システムは、大量に発生する都市部の排熱リサイクルに大きく貢献できるものである。

Figure 11.52 Heat-pump-type local air conditioning system



(3) 産業分野へのヒートポンプ応用

生産プロセスおよびその周辺へのヒートポンプの適用に際して、既存プロセスのどのようなところに適用することが望ましいか、あるいはまた、プロセスの計画・設計に際して、いろいろな機能をもつヒートポンプを必要不可欠な要素システムとして組み入れるか、など同じプロセスでも導入のスタンスで期待できる効果に大きな違いがある。

民生用の場合には、空調、給湯などでの利用温度はほぼ一定の決まった値であることから、ヒートポンプのシステム構成も比較的シンプルとなる。それに反して産業用のヒートポンプは、主として生産プロセスに対応したシステムとして、いろいろなところに適応させる必要があり、業種や生産工程の違いによりヒートポンプシステムの計画・設計も千差万別である。

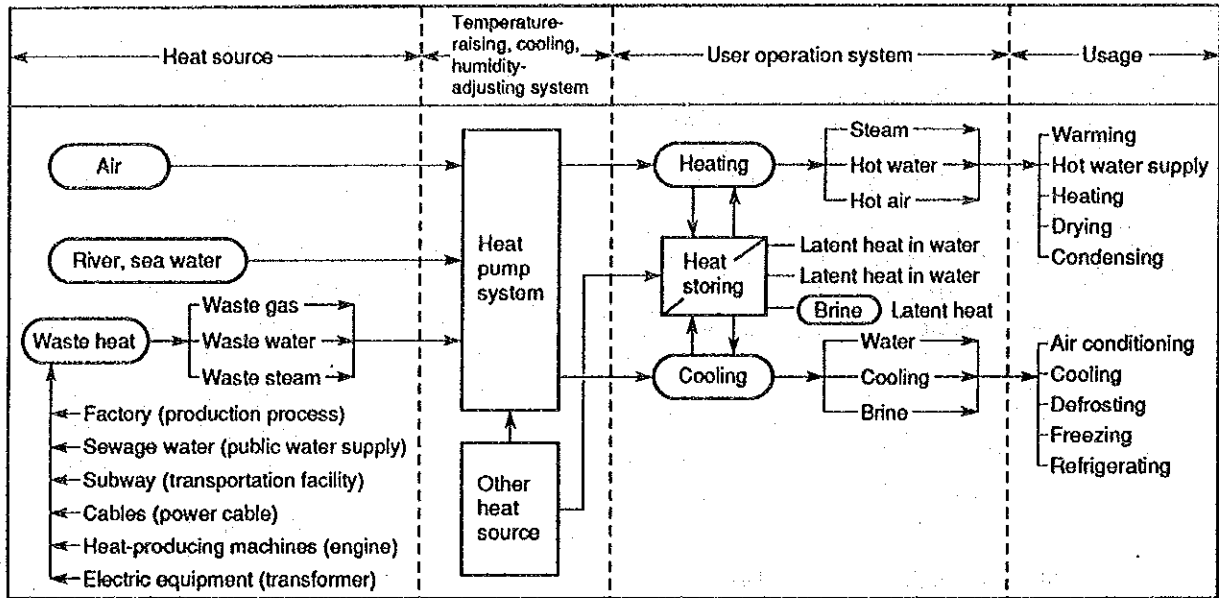
したがって、産業分野における業種別の熱エネルギー利用動向を知ることが大切であるが、実際のヒートポンプシステムの導入に際しては、生産工程における具体的な適用箇所を見つけ出し、工程全体のバランスの上にエネルギーおよび生産にかかわる物質収支（ユーティリティの経済的配分など）の見直し、およびエネルギーの品質管理精度の向上による製品の質の向上メリットなどを含む綿密な計画を立てなくてはならない。

Fig 11-53 に、ヒートポンプシステムを中心とした熱利用のフローを示す。

ヒートポンプの使われ方の特徴としては、一般空調のように室内空気温度、湿度制御を主とするものから、産業用に用いられる潜熱再利用型ヒートポンプにみられるように、溶液類の蒸発分離に用いてエネルギー利用効率を著しく高めて経済効果を発揮しているシステム、また、燃焼加熱からヒートポンプ加熱に置き換えて環境の改善に資するものなど、多様な用途に対応できるものが出現している。

Table 11. 33 に「ヒートポンプシステムの性能」の概略を示す。システムのかなめとな

Figure 11.53 Flow diagram of heat using a heat pump system



る圧縮機についてみると、小型の空調用には、ロータリー型やレシプロ型が、大型のものにはターボ型、スクリー型などが用いられている。

熱媒体は、フロン系が一般的であるが、高温（100℃以上）の領域では、特殊な物質（水、炭化水素系物質など）も使われる。

Table 11. 34 は、ヒートポンプシステムの利用分野と適用箇所の主なものを具体的に、利用技術別に整理したものである。

Figure 11. 54は、業種別排熱利用温度分布を示したもので、排熱の温度は、40～100℃前後の工程が多く、その性状は、水蒸気、温水、空気、ガス（溶剤やゴミなどを含んだ気体など）等で、工程排出物を混入しているものなどさまざまである。

利用温度についても、50～60℃から160℃の工程が多い。石油化学工業と鉄鋼業は、特に500～1,500℃の高温域にも排熱源をもち、これらの有効利用は、今後の技術開発課題である。

Table 11. 35 に、一部の業種について、各温度レベルと熱需要比率を示した。表からわかるように、化学工業とゴム製品製造を除くほとんどの業種は、100℃～150℃レベルの熱が用いられていることがわかる。

Table 11. 36 に、現在使われ始めている各種ヒートポンプの適用例とその省エネルギー効果、システムの熱効率（COP）、適用箇所、利用温度などを示す。

表から明らかなように、特に潜熱を熱源として利用する VRC システムでは、COP が4.5から、26という非常に高い値を示し、大きな省エネルギー効果が得られる。

Table 11.33 Performance of heat pump

Type of heat pump	General-purpose heat pump			Latent heat recycling heat pump		Super-heat pump
				Direct	Indirect	
Heat source	Air (sensible heat)	Air (sensible heat)	Waste heat, etc.	Waste heat (latent heat)	Waste heat (latent heat)	Waste heat, etc.
Application	Air conditioning, hot water supply, etc.	Air conditioning, hot water supply, etc.	Warming, hot water supply, drying, heating	Food, chemical factory	Food, medicine, photos, plating factory	Various factories, local heat supply
Heat media	Freon (R-22, R-12, etc.)	Freon (R-22, R-12, etc.)	Freon (R-22, R-114, etc.)	Water, etc.	Water, hydrocarbon, freon, etc.	Non-azotropic mixture
Applied temperature	20 ~ 60°C	20 ~ 60°C	60 ~ 110°C	80 ~ 120°C	15 ~ 185°C	150 ~ 300°C
COP	About 3	About 4	About 4 - 5	About 10 - 20	About 2.5 - 6	About 6 - 8
Compressors	Rotary, reciprocating, screw, turbo, etc.	Reciprocating, screw, turbo, etc.	Reciprocating, screw, turbo, etc.	Turbo, roots, screw, etc.	Turbo, screw, reciprocating, etc.	Multi-stage turbo, etc.
Characteristics	For air conditioning use		For high temperature and heat recovery	High temperature, high efficiency, evaporation separation, concentration.	High temperature, high efficiency, heat recovery, low-temperature concentration, etc.	Under development

Table 11.34 Application and Installation fields

Technology	Application field
Air conditioning	Houses, buildings, housing complex (department store, school, hospital, public facilities), factories, clean room, public plantation, plant farming facility, etc.
Hot water supply	Pool, public bath, hotel, golf field, dying factory, ham factory, broiler factory, road heating, snow melting, etc.
Heating, cooling	Wine production, plantation facility, fish breeding, dairy farming, chemicals production, food, plating, etc.
Drying, humidity adjustment	Wood, fish, vegetables, fibers, gelatine, printed matters, peat, sewage, rubber products coating, etc.
Condensing, vaporization separation	Saccharated liquid, milk, glycerine, amino acid, antibiotic substance, agricultural chemicals, pulp, beat sugar, rayon fiber liquid, various waste liquid, etc.
Heat recycle	Organic solvent distillation, inorganic chemicals distillation, ethanol distillation, propylene, propane distillation

生産工程に導入されるこれらのヒートポンプシステムは、一般に熱源として用いられる石油（重・原油、ナフサ、軽油など）やガス（LPG、LNG）などの価格により投資効率に差を生ずるので、ヒートポンプシステム導入によるメリットを最大にするための投資タイミングを選ぶことが重要とされている。

また加温、冷却に用いられるヒートポンプシステムは、高温蓄熱（温水蓄熱、水和化合物蓄熱）や低温蓄熱（氷蓄熱、無機塩類と水など）のシステムと組み合わせて総合システム化することにより、エネルギー利用率の合理化が一層高められ、イニシャルコスト、ランニングコストの低減、省力化、省スペース化など、いろいろと有利な使い方が可能となる。また、エネルギー利用面でのメリットより大きな効果として、製品の品質面の向上や歩留まりの改善、生産スピードの向上、排熱や排出物のリサイクル化による環境の改善など、利用面での範囲はますます増大の方向にある。

Figure 11.54 Heat utilization temperature distribution by sector

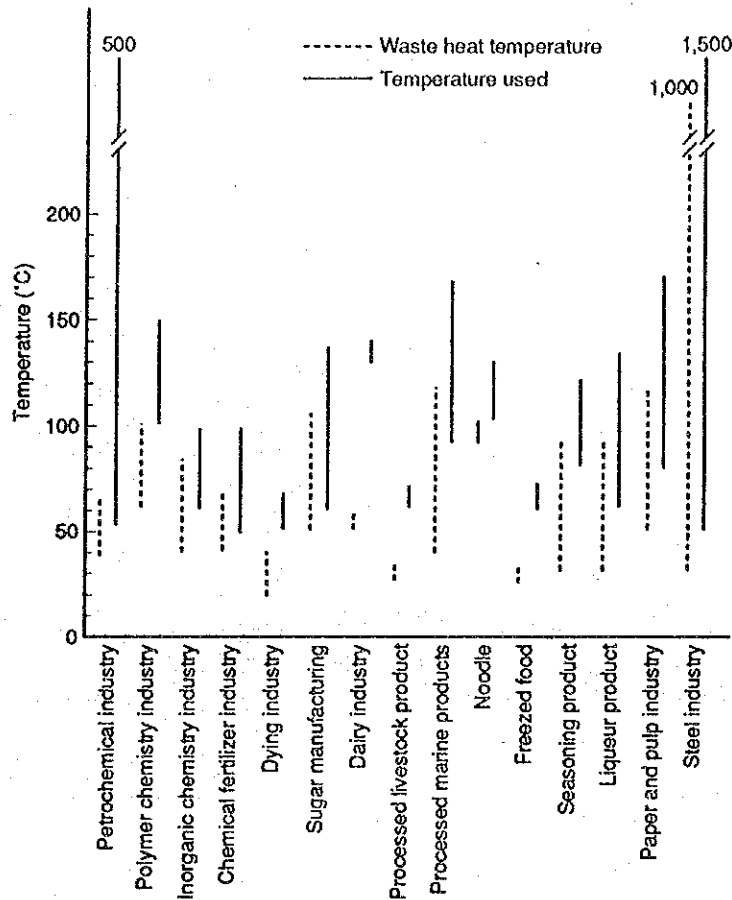


Table 11.35 Temperature level used by sector (%)

Sector	Temperature	Less than 100°C	~ 150°C	~ 183°C	More than 183°C
Food, tabaco industry		2.5	62.3	16.6	18.6
Fiber industry		0.4	50.3	49.3	0
Wood, wooden product manufacturing		1.1	9.3	6.6	83.0
Pulb paper processing industry		0	85.9	4.1	0
Chemical industry		4.8	26.9	50.0	18.8
Rubber product manufacturing		0	26.3	53.4	20.4
Leather product		0	100.0	0	0
Ceramic and stone manufacturing		0	85.6	14.4	0

Table 11.36 Heat pump system application and advantages of energy conservation effect

	Applied place	Type	Temperature used (°C)	COP	Energy conservation effect	Comments
Drying and concentration	Drying of peat	VRC	130-180	4.5	About 75% reduction	4-stage turbo: Water content 60% → 10%, 3 → 14kg/cm ² g
	Drying of gelatin	C	30-40	--	About 50% reduction	Quality: Water content 67% → 13%
	Drying of laminated processed paper	C	40-50	About 4	About 50% reduction	Improved controllability of capacity
	Drying of golf balls	C	H40 C15	6.24 (2.56 3.68)	About 50% reduction	Quality
	Drying of fruits and vegetables	VRC	100		About 56% reduction	Quality: Water content 90% → 12%
	Drying of seaweed	C	20-30		About 14% reduction	Quality: Safety
	Calcination of beer malt	C	65-	4	About 58% reduction	Quality
	Concentration of oil raw materials	VRC	100	15	About 93% reduction	Density: 10% → 50%
	Concentration of pulp	VRC	100	21	About 90% reduction	Density: 8% → 40% (3EF 40% → 70%)
	Concentration of wheat juice	VRC	100	7	About 50% reduction	About 10% vaporized
	Concentration of waste whisky	VRC	100	20		Density: 3% → 35% 1 Æ 1.23kg/cm ³ g
	Concentration of amino acid	VRC	88-90	21-25	About 90% reduction	Density: 35%wt → 60%wt
	Concentration of gelatin	VRC	60-70	19		
	Concentration of anti-biotic substance	IVRC	25-30	18		Improvement of controllability and productivity
	Concentration of coarse phosphoric acid	IVRC	20	6	About 50% reduction	Density: 25% → 48%
Concentration of sugar liquid	VRC	93	21-26	About 66-75% reduction	Density: 7% → 48%	
Distillation	Ethyl alcohol purification	VRC	73-105	5.6	About 66% reduction	
	Organic solvent purification	VRC	100	15	About 90% reduction	
	BTX purification	VRC	145	6		Demonstration plant
Heating and cooling	Preprocess before coating	C	52	5	About 30% reduction	Closing, quality
	Tofu production process	C	0			Ice heat storage, quality
	Eel breeding pond heating	C	3		About 33% reduction	Use of nighttime power service
	Dying hot water supply	C	50		About 60% reduction	Production speed: 4 times/day → 5 times/day
	Hot water supply for broiler	C	65	4.8	About 56% reduction	Refrigerating waste heat recycling

Note: VRC: Vapour recompression, C: compress-type, IVRC: Indirect type, Quality: quality improvement, 3EF: Mie-type can

11.10 空調

11.10.1 はじめに

空気調和とは室内の空気条件をその部屋あるいは工場の用途、目的に応じて最も適した状態に制御することを言う。このような室内環境の良否を判定する他の指標として、音感、視感、解放感などがあるが、空気調和はその設備要素がこれらに悪影響を与えない限り関連はしない。

制御すべき室内の空気条件には次の4つの要素がある。

(1) 温度

室内の空気を冷却または加熱してその乾球温度を所定の値に制御する。

(2) 湿度

室内の空気を所定の快適な相対湿度に制御する。

(3) 清浄度

空気中の塵埃を除き粉塵濃度を許容濃度以下にするとともに煙、炭酸ガス、臭気、有毒ガスなどが許容濃度を越えないように維持する。

(4) 分布

調整された空気が室内に分布されるように適度の気流を作り室内各所の温湿条件を一定にする。

この空気調和の目的は

A) 保健空調 B) プロセス空調の二つに大別される。

A) 保健空調

保健空調とは人体の保健的環境を維持しかつ快適感を与える、すなわち在室者あるいは室内で作業する人に適した空気状態に室内空気を保持することであり、最適な空気状態を左右する二大要素は温度と湿度である。Figure 11.55は日本の夏季、冬季における快感帯を示したものである。

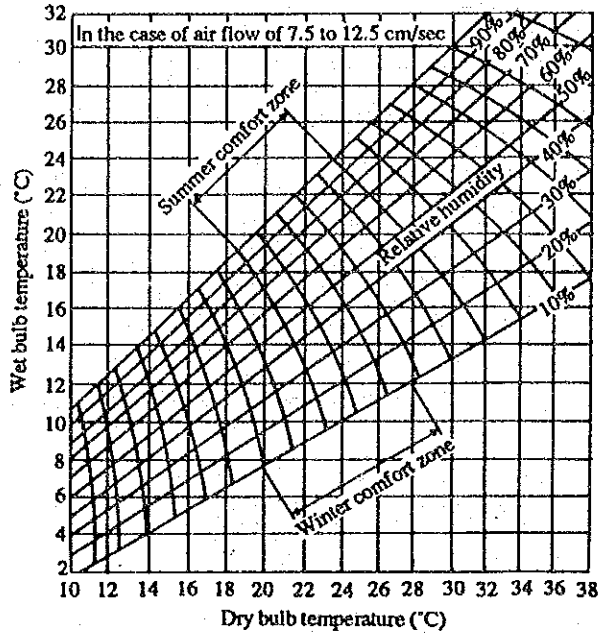
またこの図とは別に冷房ショックをなくするためには室内外の温度差をあまり大きくせず、湿度を低くするのがよいと言われており、室内外の温度差としては5～7℃が適当とされている。

一般の事務作業の場合は暖房時18～22℃、30～50% (R.H) を、冷房時25～28℃、50～60% (R.H) を設計条件としている。省エネルギーを重視するときは上記の下限値付近すなわち冬季18℃、40%、夏季28℃、50%などを採用する。

B) プロセス空調

各種工場生産プロセスでは、原料から製品の完成貯蔵に至までの各工程で周囲空気の

Figure 11.55 Comfort zone



温湿度や清浄度について、施設保持、品質保持のためそれぞれ独自の条件を必要とするものが多い。プロセス空調においても作業者が併存する場合が多く、保健空調要素をも考慮する必要がある。一般にはプロセス空調を優先し、人体のためには局所的な空調その他の方法で保健性を保証している。

Table 11. 37 は各種工業プロセスの代表的な設計空調条件を示したものである。ただし、この表の値は一応の目安に過ぎず、個々の設計に当たっては十分に調査をした上で決定する必要がある。

11.10.2 空調システムの構成

空調を行う手段は、最終的には空気であり一般には吹き出し口から適当な温度、湿度、清浄度を持った空気を室内に吹き出すことにより空調を行っている。従ってこれを達成するための方式としてはいろいろなものがあるが、Figure 11.56に比較的大規模な空調システムの構成例を示した。以下これを基に冷房を主眼として説明する。

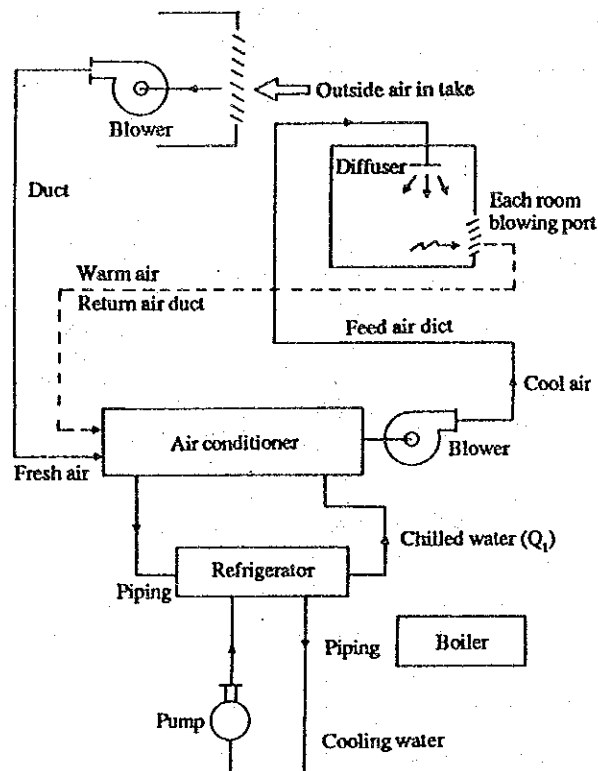
冷房時には熱負荷が室外より室内に流入し、空気調和機において空気から冷却に移換されて熱源装置（冷凍機）まで搬送され、冷凍機で組み上げられ冷却塔を經由して大気に放出される。

暖房時はボイラで油・ガスなどを燃焼し、この温熱を温水に移換、空気調和機まで搬送し、空気調和機により室に送り込む。

Table 11.37 Example of process air conditioning

Classification	Process	Temperature (°C)	Relative humidity (%)	Classification	Process	Temperature (°C)	Relative humidity (%)	
Color printing	Bronze plating room	24-27	45-50	Food	Manufacture of butter	16	60	
	Plate preparation	24	45-50		Coffee substitute	24-27	40-45	
	Printing room	24-27	45-50		Milling	—	60	
Printing	Book binding	21-24	45	Macaroni	Macaroni	21-27	38	
	Form	24-27	45-50		Mayonnaise	24	40-50	
	Printing room	24-27	45-50		Mushroom growing room	14-27	75	
	Web press	24-27	50-55	Brewing	Storage of grains	16	35-40	
	Paper storage	20-23	50-60		General manufacture	16-24	45-65	
	Photographic printing	21-23	40-50		Aging room	18-22	50-60	
			Beer fermentation room		3-4	50-70		
Optics	Melting room	24	45	Beer malthouse	10-15	80-85		
	Abrading room	27	80					
Plywood	Manufacture	—	55-60	Confectionery	Chewing gum	Cooling	22	50
	Gluing	—	55-60			Drying	49-60	50
Rubber	Storage	14-24	40-50	Candy	Wrapping and storage	21-24	45-60	
	Cementing	27	25-30		Manufacture	18-27	35-50	
	Dipping	24-27	25-30		Cooling	24-27	40-45	
	Manufacture	32	—	Product storage	16-24	45-55		
	Sulfurization	26-28	25-30	Dry fruits storage	10-13	50		
				Chocolate	Bar manufacture	18	45-50	
			Center cream manufacture		24-29	50		
			Nougats		18	50		
			Starch room		24-29	50		
Laboratory	Animal laboratory	24-27	40	Wrapping	18	50		
	Central analysis room	23	50	Product storage	16-24	40-50		
Photograph	Manufacture of ordinary film	23-24	24-40	Tobacco	Cigarette	Raw material storage	27	75-78
	Printing	23-24	65-70			Cutting	24-27	80
	Finished product storage	16-27	45-50		Cut tobacco storage	27-29	60-65	
	Developing	21-24	60		Manufacturing room	21-27	55-65	
Bakery	Base mixing	24-27	45-55		Wrapping room	27-29	50	
	Base fermentation	27	70-80		Truck removing room	27	70-75	
	Bread cooling	21	70-80		Sweating	49	80	
	Bread wrapping	18-24	50-65		Cotton spinning	Roving	21-24	50-55
	Powder storage	21-27	50-60	Spinning		21-24	55-65	
	Cake freezing	21-27	45-50	Drawing	21-24	55		
	Precision machinery	Gear cutting	24-27	45-55	Picker	21-24	45-50	
Precision parts		24	45-55	Roving	21-24	50-60		
Precision assembly		20-24	40-50	Warp spinning	24-27	50-65		
Precision test room		24	45-50	Wet spinning	24-27	50-65		
Pharmacy	Capsuling	24-27	25-40	Cotton reel	24-27	60-70		
	Colloid	21	30-50	Twister	21-24	65		
	Deliquescent salt	27-32	15-40	Woven textile	24-27	70-85		
	Gelatin capsule	26	40-50	Fabric storage	24-27	65-75		
	Powder product	24-27	5-35	Jute spinning	Fabric conditioning room	24-27	90-95	
	Tablet forming	21-27	35-40		Spinning	24-27	60	
	Tablet furbish coating	24-27	35-40		Woven textile	26-27	80	
	Serum	23-26	45-50		Preparation	18-20	80	
	Powder material drying	24-71	20	Roving and spinning	24-27	60		
	General pharmacy room	21-27	10-50	Match	Manufacture	22-27	45-50	
Electricity	Manufacture of thermostat	24	50-55		Storage	15	50	
	Manufacture of insulating material	24	65-70					
	Assembly of electron tubes	20	40					
	Cable insulation	40	5					
	Transformer coil winding	16-24	15-35					

Figure 11.56 Composition example of large scale air conditioning system (during cooling)



(1) 熱源装置

空気調和機 (Air conditioner) に温水 (熱媒) や冷水 (冷媒) を供給するもので、熱媒を作る熱源装置としてはボイラ、蓄熱槽、ヒートポンプなどがあり、冷媒を供給する熱源装置としては冷凍機がある。その他熱交換器や付属装置としてポンプおよび送風機、配管類がある。

(2) 空気調和機

室内への送風空気を室内条件に適した温度、湿度及び清浄度にする装置を言う。従って空気調和機内には空気の浄化、冷却、減温、加熱、加湿、送風などの機能を果たす各種の機器を内蔵している。

(3) 輸送装置

液体や気体の輸送を行うものであり、送風機、ポンプ、ダクト、配管設備などからなる。すなわち、空気調和機で調和された給気は送風機でダクトを經由して冷房しようとする室に送られる。また室内の暖められた空気は送風機の負圧によって吸い込まれ空気調和機へと送られる。

(4) 空気分布装置

輸送装置の出口や入口に設けられるもので、吹き出し口、吸い込み口、消音器、ダンパなどがある。

(5) 配電盤、制御盤、監視盤

空調システムを運転、制御、監視するための電気設備である。

以上の装置は必ずしも別個に設置されるわけではない。空調装置の規模によって数個が1ユニットになっている場合や、パッケージ型空気調和機のように全てで1ユニットを構成している場合もある。

11.10.3 空調システムの熱負荷及び計算法

Figure 11.57に対する熱負荷の流入部位を示す。

Table 11.38はFigure 11.57と対応する熱負荷の種類と構成、並びに計算式を列記したものである。なお蓄熱負荷は通常の間欠運転において発生する負荷で、夜間など運転中止中に外界から侵入した熱量が建物躯体に蓄熱され、運転再開後に徐々に負荷として流失するものである。夜間運転中停止に伴っては暖房負荷が、昼間運転停止に伴っては冷房負荷が、蓄熱の影響を大きく受ける。

Figure 11.57 Type of heat load and inflow sections (cooling)

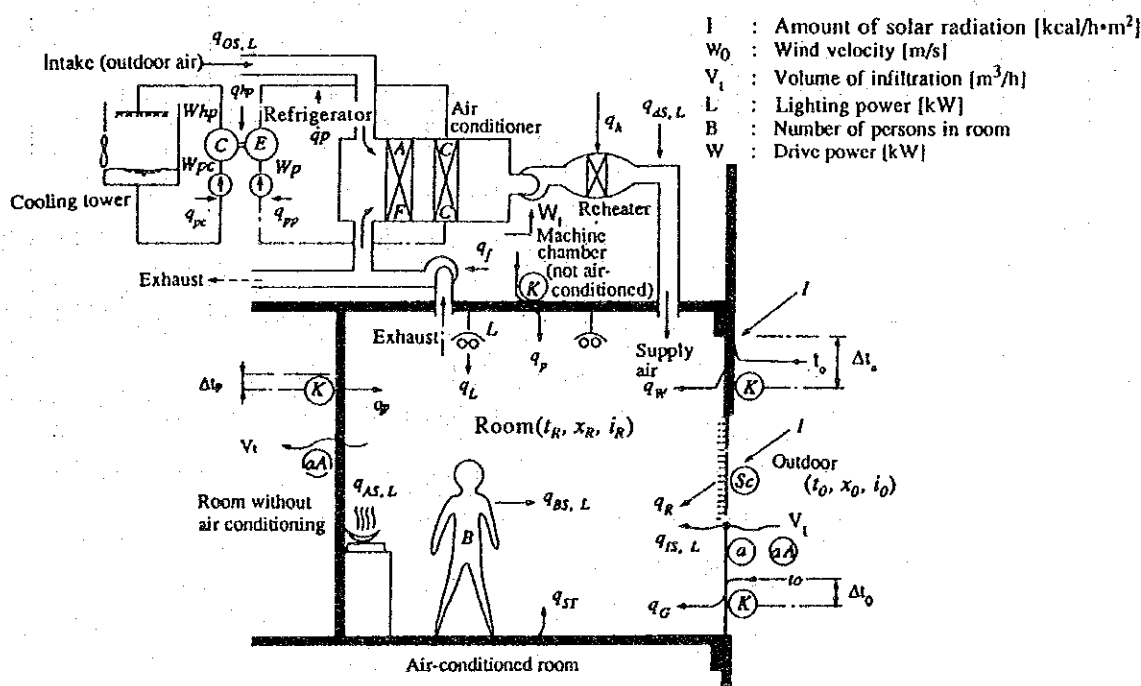


Table 11.38 Types and composition of air conditioning heat loads, and calculation formulas

Type of load	Calculation formula		Remarks
	Symbol	Sensible heat load Latent heat load	
Glass-transmitted solar radiation	q_R	$S_c \cdot A \cdot I$	S_c : Shield modulus, A: Area, I: Standard solar radiation gain
Transfer through external wall and roof	q_w	$K \cdot A \cdot \Delta t_c$	K: Heat transfer coefficient $\frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_i} + \sum \frac{d_j}{\lambda_j} + \frac{1}{\alpha_o}$
Transfer through external wall glass	q_c	$K \cdot A \cdot \Delta t_c$	α_i : Indoor heat transfer rate - 8 kcal/h·m ² ·°C α_o : Outdoor heat transfer rate - 20 (summer), 30 (winter) [kcal/h·m ² ·°C]
Infiltration	$q_{s,l}$	$715V_i \cdot \Delta t_c$	d: Thickness of layer of component member, λ_j : Thermal conductivity [kcal/m·h·°C]
Accumulated heat load	q_{st}		For all-day air conditioning Δt_c : Effective temperature difference (°C) $ST=0$
Lighting	q_L	$860b \cdot L$	b: Ballast coefficient, incandescent lamp b=1.0, fluorescent lamp b=1.2, L: Lighting power [kW]
Human body	$q_{hs,l}$	$h_t \cdot B$	h_t : Sensible heat and latent heat generated from a human body, B: Number of persons
Equipment	$q_{es,l}$	q_{eL}	Use measured value (facility capacity % load factor)
External air load	$q_{os,l}$	$0.28V_o \cdot \Delta t_b$	V_o : Amount of air intake $\Delta t_b = t_o - t_r$, $\Delta t_c = t_o - t_r$
Duct heat reception and leakage	$q_{ds,l}$	$(K \cdot A \cdot \Delta t) (0.28V_p \cdot \Delta t_b)$	V_p : Amount of leaked air
Fan heat	q_f	$860W_f$	W_f : Fan drive power [kW]
Re-heat load	q_h	q_h	Use measured value of reheat quantity
Piping heat reception	q_p	$(K \cdot A \cdot \Delta t)$	Δt : Difference between water temperature and ambient temperature
Pump heat	q_{pp}	$860W_p$	W_p : Pump drive power
Accumulator tank loss	q_{ta}	$(K \cdot A \cdot \Delta t)$	5-15% of HACL (Total 1-day value)
Refrigerator drive power	q_{hp}	$860W_{hp}$	For heat pump, it is included as part of heat source (during heating)
Cooling water pump heat	q_{pc}	$860W_{pc}$	W_p : Pump drive power [kW]
Boiler waste heat	q_c	$\left(\frac{1}{\eta} - 1 \right) \text{HACL}$	η : Boiler efficiency

Heat source (oil, etc.) and heat sink (cooling tower-atmospheric air) load

Heat source unit (Boiler, refrigerator, etc.) load HACL

Air conditioner load ACL

Room load RL

Outdoor load

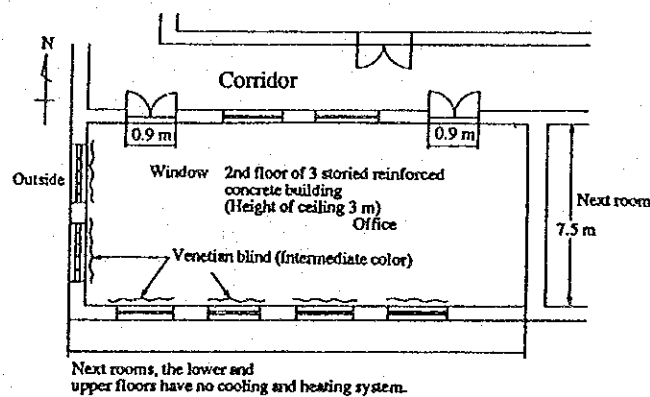
Figure 11.58に工場事務室の冷房負荷の例を示す。この建物構造は Figure 11.59の通りである。

これを見ると熱伝導による負荷が最も大きく、ついで照明、外気、日射、人間の順となっている。

Figure 11.58 Example of air conditioning load in factory office (during cooling)

Load due to human body	11%	
Load due to sunlight	15%	
Load due to outside air	15%	
Load due to lighting	16%	
Load due to heat transfer	43%	Total 17,045 kcal/h

Figure 11.59 Example of office



11.10.4 空調設備の省エネルギー

空調機ではまず空調すべき負荷を決定する。次にこの負荷に対して適当な空調システムを選定する。従って空調設備の省エネルギーを考える場合、第1ステップとして冷房負荷をまず軽減すること、第2ステップとして残った冷房負荷に対して省エネルギー的な空調機あるいはシステムを選定することが大切である。以下に主として既設の建物を対象として対策を考える。

(1) 断熱化

貫流熱負荷は $K \cdot A \cdot \Delta t_e$ で示される。面積 A と実効温度差 Δt_e は建物の形、気象条件、

熱容量により決まるものでこれが変えられないときは熱貫流率Kを変えるすなわち断熱することが最も容易である。断熱の方法としては次の3つがある。

① 壁や窓まわりの改造，断熱化

外断熱か，内断熱かが問題になるが外断熱は障害物無しで外からすっぽりと断熱できる利点を持ち，内断熱の場合は家具の制約あるいは部屋の面積が減るなどの欠点がある。

② 屋根や床の改造，断熱化

③ 窓ガラスの断熱化

窓ガラスの断熱化はガラスの複層化とサッシュそのものの複数化とがある。熱貫流率そのものではガラス枚数が同一であればその差はあまりない。

(2) 遮光

ガラス透過日射負荷は $Sc \cdot A \cdot I$ で示される。標準日射熱取得は気象条件，建物の配置により決まり，遮へい係数，窓面積を変える方法が行われる。

① ブラインドやカーテンの取り付け

遮へい効果はその前提となっているブラインド等の開閉の確実な実行が守られた場合にあるということに注意しなければならない。また昼光利用との関連があり，冷暖房エネルギーと照明エネルギーの合計が最小になるような方法を求めることが必要である。

② ルーバや庇の取り付け

夏季の日射の遮へいを行い，しかも冬季には日射を遮らないように工夫して固定の庇，ルーバなどを窓外に設ける。

③ 窓ガラスの改修

サッシュを取り替えずに熱線吸収ガラスや反射ガラスへの取り替え，日照調整フィルムの接着などにより窓ガラスの日射透過量を減らし冷房負荷を軽減する。

(3) 隙間風の防止

隙間風による負荷 q_i kcal/h は自然換気によるもので窓，扉の隙間や開閉により外部の空気が侵入するもので次式で表される。

$$\begin{aligned} q_i &= 0.28 V_i \cdot \Delta t_0 + 715 V_i \cdot \Delta x_0 \\ &= 0.28 n \cdot V \cdot \Delta t_0 + 715 n \cdot V \cdot \Delta x_0 \end{aligned}$$

ここで n : 自然換気回数 (Table 11-39 参照)

V : 部屋容積 (m³)

隙間負荷を軽減するには窓，扉の密閉化を行い，またできるだけ自動扉を採用して開閉回数を少なくするのがよい。しかし夜間に屋外の気温が室温より下がった場合は Δt_0 は

Table 11.39 Number of times for natural ventilation (n)

Class of room	n
1 wall surface facing outside air and having window or door	1
2 walls surface facing outside air and having window or door	1.5
3 walls surface facing outside air and having window or door	2
4 walls surface facing outside air and having window or door	2
Room without window facing the outside air or door	1/2 - 3/4

負となり、これは冷房負荷軽減を意味するのでこのような場合は窓や扉を開いて外気を導入するほうが冷房効果は良くなる。

(4) 室内機械器具発熱量の減少

必要やむを得ない場合を除いて、発熱を伴う機械器具は空調室内に置かないことが望ましい。照明についても局部照明の実施、高効率ランプの採用、灯具の改造などによる照明の高効率化を図るほか、照明器具の発熱部分をまとめて別系統で換気する方式をとるなどの対策が望ましい。

(5) 外気負荷

外気負荷 q_o は強制換気によるもので次式で表される。

$$q_o = 0.28 V_o \cdot \Delta t_0 + 715 V_o \cdot \Delta x_0$$

換気量 V_o は主として人間の安全、衛生上から規定されるが、許容炭酸ガス濃度を0.1%とすると在室人員1人当りの必要外気量は約30 m³/hとなる。

いずれにしろ外気負荷を軽減するために炭酸ガス濃度が0.1%をこえない範囲で極力換気量を減らすことが大切である。

またFigure 11.60のような還気系がある場合は、極力還気系の再循環を図り外気導入を少なくする。具体的には還気系のダンパを大きくし還気量を大きくすると共に外気取り入れ系のダンパ開度を小さくし、外気取り入れ量を小さくする。

このとき注意すべきことは換気量を大きくし過ぎると室内が室外に対して負圧となり、塵埃が侵入しやすくなるので室内圧は屋外に対して0.1mm Aq～1 mm Aq程度正圧にするのが望ましい。

(6) 室内設定温度の緩和

冷房時、設定温度を上げることにより、室内外温度差に比例する壁面からの熱伝導による冷房負荷が大幅に軽減される。Figure 11.61の例では設定温度を26℃から27℃に上げることにより、冷房負荷が約100 kcal/h減となった。

Figure 11.60 Air conditioning system when return air is available

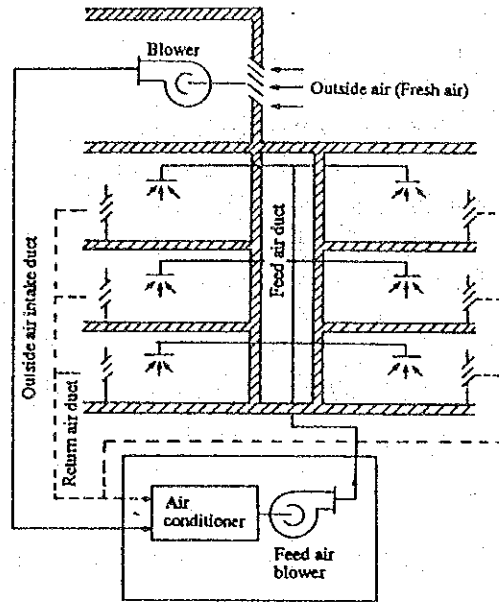
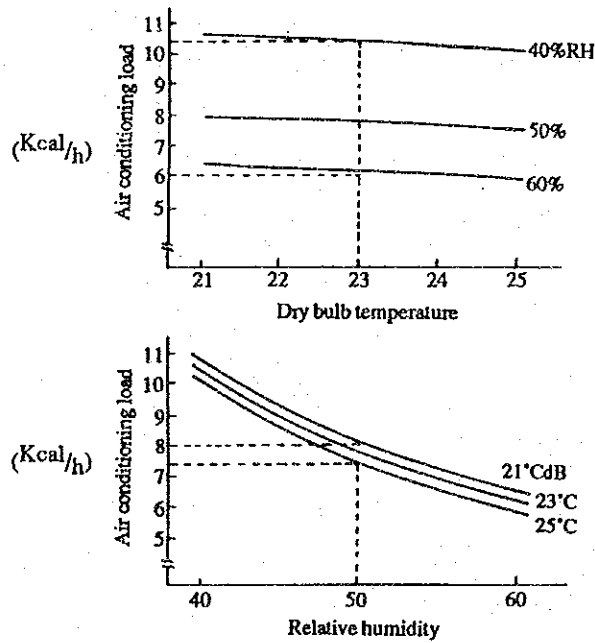


Figure 11.61 Energies required for temperature and humidity changes



(7) 室内湿度の見直し

除湿能力のある空調機においては湿度条件を緩和することが有効な省エネルギーとなる。試算例では湿度を変えた場合と、温度を変えた場合の空調負荷の変化は Figure 11.61のとおりである。

これによれば温度を23℃で湿度を40% RHから60% RHに緩和した場合約4.2 Kcal/hの負荷軽減になるが、相対湿度50% RHで温度を21℃から25℃に緩和した場合には、約0.7 Kcal/hの負荷軽減となるに過ぎず、湿度緩和の方がエネルギー節減としては約6倍効果が大きい。しかし余り湿度を高くすると人間に不快感を与えたり、製品の品質に影響を与えたりするので注意が必要である。

(8) 制御方法の改善

先に述べたように熱負荷を制御する場合流量を変える方法と流量一定で設定温度を変える方法があるが、前者の方が送風機やポンプ動力の軽減が大きくより省エネルギーとなる。

流量の制御方法としてはすでに述べたようにダイバ制御やベーン制御、各種の可変速制御があるが消費電力は吐出ダンパ制御>入口ベーン制御>可変速制御の順になる。従って許される範囲で極力効率のよい方式を選定すべきである。とくにVVVFによる可変速度制御は既設の電動機設備に容易に取り付けられ効果も大きいのでまず第一に検討の対象にするとよい。

(9) 定期的保守管理

a. 冷却水配管

配管系のスケール、スラッジの付着は抵抗増大を招き、同じ流量を送るのにポンプ出力の増大をきたす。水質が悪い場合は当然スケール、スラッジの付着がひどくなる。従って水質管理が必要である。その管理基準の参考値を Table 11.40 に示す。

b. 熱交換器

蒸発器や凝縮機では冷却水によりスケールやスラッジ、微生物が発生し、これらが付着堆積し、熱交換効率が低下すると共に冷凍に当りの消費電力が増大する。従って定期的に洗浄することが必要である。

c. 送風ダクト

空気浄化のためにフィルタを用いている場合は定期的清浄が必要である。言うまでもなくフィルタの目づまりは圧力損失を増大させ、風量が減少して冷却能力を低下させる。環境条件の悪い場所のエアコンは汚れの進行度が早いので1週間に1度くらいの清掃が必要となる。

d. その他

各室の過冷、過熱のアンバランスの検討による空調ゾーン見直し、廊下などの空調レベルの見直しなどを季節的に行い、極力空調負荷の低減に努めることが望ましい。

また新たに空調システムを設けるときには、蓄熱槽設置の可否、排熱利用の可否、最

も効率的な空調ダクトシステムの選定など、運転コストの低減を主眼において慎重に検討する必要がある。

Table 11.40 Quality Standard of Cooling Water
(Japan Refrigeration and Air Conditioning Industrial Association Standard)

Item	Standard value for makeup water	Standard value for cooling water *1	Tendency *3	
			Corrosion	Scale
Standard item	PH (25°C)	6.0 ~ 8.0	○	○
	Conductivity (mv/m)	200 or less	○	
	Chlorine ion Cl (ppm)	50 or less	○	
	Sulfuric acid ion SO ₄ (ppm)	50 or less	○	
	Total iron Fe (ppm)	0.3 or less	○	○
	M Alkalinity CaCO ₃ (ppm)	50 or less		○
	Total hardness CaCO ₃ (ppm)	50 or less		○
Reference item	Sulfur ion S (ppm)	Not be detected	○	
	Ammonium ion NH ₄ (ppm)	detected	○	
	Silicon oxide SiO ₂ (ppm)			○

*1 Cooling water means water passing through condenser for both once through and circulation systems.

*2 Standard value for plastic piping shall be 0.5 ppm or below.

*3 Mark ○ in "Tendency" column indicates a factor concerning either corrosion or scale tendency.

12. パソコンによる保温計算

12. パソコンによる保温計算

(1) 概要

ここに述べるパソコン計算シートでは、スチーム配管などの表面からの放熱量の計算は、伝熱工学の理論に基づいて行われている。伝熱の形態には、熱伝導・対流・放射の三種の種類があり、実際にはこれらが単独で、あるいは組み合わせられて現われている。

放熱量の計算は、次の二つの方法で行われている。

①内面の温度と保温材の厚みから放熱量を求める方法

②表面の温度から放熱量を求める方法

また保温材の厚さの選定は、経済的保温厚さの考え方によって行われている。

これらの計算はパソコンを利用して、スプレッドシート --- Lotus 123 --- の上で省エネルギーセンターが開発した計算シートによって行われる。ここでは、その考え方とパソコン計算シートの使い方について説明する。

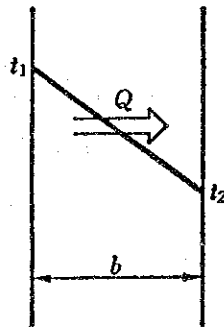
(2) 熱伝導

2-1 基礎式

Figure 12.1 に示すように、厚さ b (m) の固体壁があり、壁の両側の温度が t_1 (°C) および t_2 (°C) に保たれているとすれば、この壁を通して単位時間内に通過する熱量は式(1)で表される。

Figure 12.1 Heat conduction

78



$$Q = \lambda A \frac{t_1 - t_2}{b}$$

[kcal/h]

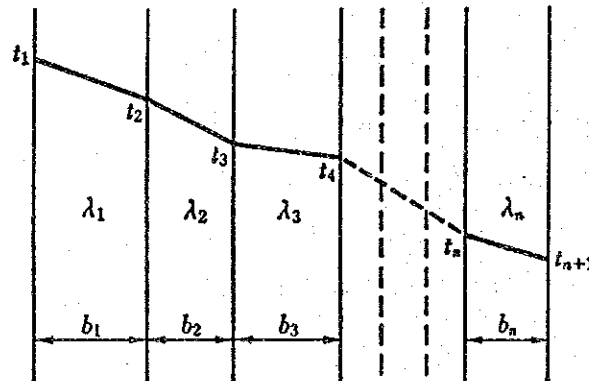
Equation (1)

ただし、 A (m²) は壁の面積である。

式(1)で λ は“熱伝導率”と呼ばれ、保温材などの物質に固有の値であるが、物質の温度によって変化する場合が多い。

Figure 12.2 のように壁の構成が多層である場合は、各層における温度勾配が連続であること、および各層を通過する熱量が等しいことから式(2)のように表される。

Figure 12.2 Heat conduction of a multilayer wall



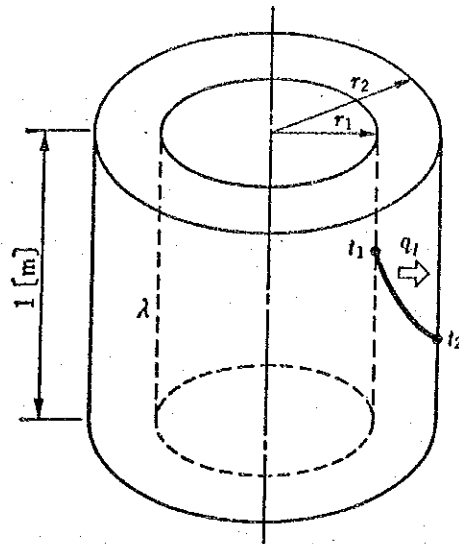
$$q = \frac{t_1 - t_{n+1}}{\frac{b_1}{\lambda_1} + \frac{b_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{b_n}{\lambda_n}} \quad [\text{kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})] \quad \text{Equation (2)}$$

式(2)で分かるように、中間の壁の接触面の温度を計算する必要はなく、両端の壁の表面温度と、各々の壁の材料の熱伝導率およびその厚さが与えられれば、伝熱量を計算することができる。

2-2 円筒壁の熱伝導

Figure 12.3 のように壁面が円筒の場合には、半径方向の距離の増加とともに、断面積が変化する。したがって、各半径の位置における伝熱量が一定であっても、単位面積当りの伝熱量は半径の位置によって異なる。円筒壁の場合の単位長さ当りの伝熱量は式(3)で表される。

Figure 12.3 Heat conduction of a cylindrical wall

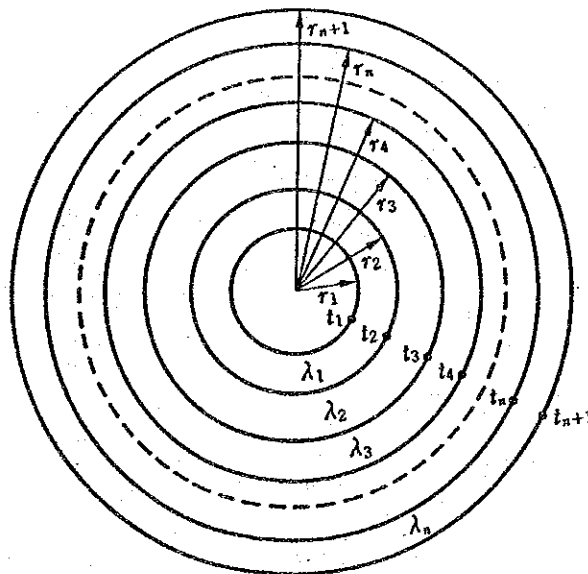


$$q_1 = \frac{2\pi\lambda}{\ln \frac{r_2}{r_1}} (t_1 - t_2) \quad [\text{kcal/m}\cdot\text{h}] \quad \text{Equation (3)}$$

ただし、式(3) で \ln は自然対数である。

Figure 12.4 のような多層円筒の場合の伝熱量は式(4)で与えられる。

Figure 12.4 Heat conduction of a multilayer cylindrical wall



$$q_1 = \frac{2\pi(t_1 - t_{n+1})}{\frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{r_3}{r_2} + \dots + \frac{1}{\lambda_n} \ln \frac{r_{n+1}}{r_n}} \quad [\text{kcal/m}\cdot\text{h}] \quad \text{Equation (4)}$$

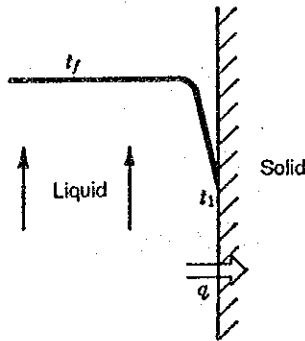
この場合も平面の場合と同様に、伝熱量の計算のためには各円筒の境界の温度は必要ではなく、多層円筒の内表面温度と外表面温度が分かれば十分である。

(3) 対流による伝熱

気体や液体が固体表面との間で行う熱の授受は、固体内での熱伝導とは様相が異なり、“対流による伝熱”と呼ばれる。この場合には、熱は熱伝導によって流体内を移動するだけでなく、運動する流体によっても運ばれるため、伝熱量は熱伝導に比べて非常に大きくなる。また、伝熱量は流れの影響を受け易く、流体の速度が大きいほど伝熱量が大きくなる。

Figure 12.5 のような対流伝熱において、流体の流れ方が同じであれば温度差と伝熱量は比例するので、伝熱量は式(5)で表される。

Figure 12.5 Heat transfer by convection



$$q = \alpha (t_f - t_s)$$

[kcal/(m²·h)] Equation (5)

式(5)において、 α は“熱伝達率”と呼ばれる係数で、流体の種類や流れの状態で変化する値であって、実験をもとにいろいろな計算式が提示されている。

また、式(6)で定義される無次元数を用いて、流れや伝熱の状態が表されている。

$$\left. \begin{aligned} \text{Nu} &= \frac{\alpha L}{\lambda} & \text{Nu: (Nusselt number)} \\ \text{Re} &= \frac{wL}{v} & \text{Re: (Reynolds number)} \\ \text{Pr} &= \frac{v}{a} & \text{Pr: (Prandtl number)} \end{aligned} \right\} \text{Equation (6)}$$

α : 熱伝達率 [kcal/(m²·h·°C)]

L : 代表長さ [m] (管では直径、板では先端からの距離)

λ : 流体の熱伝導率 [kcal/(m²·h·°C)]

w : 流体の速度	[m/h] または	[m/s]	
ν : 流体の動粘性係数	[m ² /h] または	[m ² /s]	
a : 流体の温度伝導率	[m ² /h] または	[m ² /s]	$(=\frac{\lambda}{c\gamma})$
c : 流体の比熱	[kcal/(kg·°C)]		
γ : 流体の比重	[kg/m ³]		

3-1 自然対流

ファンやポンプによるものでなく、固体に接する部分の流体の温度上昇に起因する密度差による流体の流れは、“自然対流”と呼ばれる。自然対流における熱伝達率は、次のように定義される Grashof 数を用いて表現される。

$$Gr = \frac{L^3 g \beta (t_w - t_0)}{\nu^2} \quad \text{Equation (7)}$$

g : 重力の加速度	[m/s ²]
β : 流体の体膨張係数	[1/K]
t_w : 表面温度	[°C]
t_0 : 流体の温度	[°C]

これらの式において、流体の熱伝導率、動粘性係数、Prandtl 数は流体の種類および温度によって値が変わるが、それぞれの流体に対して温度の関数として式で表すことができる。すなわち、水に対しては温度の 4 次式、

$$a + bt + ct^2 + dt^3 + et^4$$

空気に対しては温度の 3 次式、

$$a + bt + ct^2 + dt^3$$

で表され、式中の係数は次表で与えられている。

Substance	Property value	a	b	c	d	e
Water	Thermal conductivity kcal/(mh°C)	0.4465	3.172 $\times 10^{-3}$	-2.581 $\times 10^{-5}$	9.593 $\times 10^{-8}$	-1.549 $\times 10^{-10}$
	Dynamic viscosity coefficient (m ² /s)	1.234 $\times 10^{-6}$	-2.021 $\times 10^{-8}$	1.619 $\times 10^{-10}$	-6.347 $\times 10^{-13}$	9.790 $\times 10^{-16}$
	Prandtl number	8.179	-0.1345	1.017 $\times 10^{-3}$	-3.663 $\times 10^{-6}$	5.148 $\times 10^{-9}$
Air	Thermal conductivity kcal/(mh°C)	0.02071	6.856 $\times 10^{-5}$	-3.414 $\times 10^{-8}$	1.567 $\times 10^{-11}$	
	Dynamic viscosity coefficient (m ² /s)	1.378 $\times 10^{-5}$	8.916 $\times 10^{-8}$	1.355 $\times 10^{-10}$	-1.566 $\times 10^{-13}$	
	Prandtl number	0.7177	-1.705 $\times 10^{-4}$	-4.403 $\times 10^{-7}$	2.924 $\times 10^{-9}$	

これらの無次元数を用いて、Nusselt 数が次のような実験式で表わされている。

a) 水平円管の場合

$$Nu_m = 0.53(Gr \cdot Pr)^{1/4} \quad \text{Equation (8)}$$

b) 垂直平板の場合

$$Nu_m = 0.13(Gr \cdot Pr)^{1/3} \quad \text{Equation (9)}$$

c) 水平上向き平板の場合

$$Nu_m = 0.14(Gr \cdot Pr)^{1/3} \quad \text{Equation (10)}$$

d) 水平下向き平板の場合

$$Nu_m = 0.27(Gr \cdot Pr)^{1/4} \quad \text{Equation (11)}$$

3-2 強制対流

強制対流では、Grashof 数の代わりに Reynolds 数を用いることによって、Nusselt 数は以下のように表わされる。

a) 流体が管外を直行して流れる場合（単一円管で、流体が空気の場合）

$$Nu=cRe^n \quad \dots\dots\dots\text{式(12)}$$

ただし、c、nの値は、次の表の値である。

Re	n	c
1 to 4	0.330	0.891
4 to 40	0.385	0.821
40 to 4,000	0.466	0.615
4,000 to 40,000	0.618	0.174
40,000 to 250,000	0.805	0.0239

b) 流体が平面に並行して流れる場合

$$Nu=0.037 Re^{0.8} Pr^{1/3} \quad \dots\dots\dots\text{式(13)}$$

これらの式で、熱伝導率、動粘性係数、Prandtl数は、自然対流の場合と同様、温度の多項式で与えられる。

対流伝熱では、熱伝達率として各種の実験式が提示されており、以上に記載した対流伝熱の熱伝達率の計算式は、高村助教授の著書から引用した。

(4) 放射

固体表面からはさきに記した対流の他に、放射による伝熱が行われる。室内に設置されたスチーム管などのように、大きな空間に小さな物体が置かれた場合に、物体からの放射による伝熱量は式(14)で表される。

$$q = 4.88 \varepsilon \left\{ \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right\} \quad [\text{kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})] \quad \text{式(14)}$$

ただし、 T_1 は物体の絶対温度、 T_2 は周囲空間の絶対温度である。式(14)で、 ε は物体（物体とその表面性状）及び物体の温度に関する係数で、放射率と呼ばれている。放射の伝熱量は式(14)のように、絶対温度の4乗の差に比例する。実用上は、放射が対流や熱伝導と同時に起こることが多いので、放射による伝熱量も温度の差に比例する式の形で表現される。すなわち、放射による熱伝達率は式(15)で表現される。

$$h_r = \frac{4.88 \varepsilon \left\{ \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right\}}{t_1 - t_2} \quad [\text{kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})] \quad \text{式(15)}$$

このように放射による熱伝達率を定義すると、対流と放射による合計の伝熱量は式(16)で表される。

$$q = (h_r + h_c) (t_1 - t_2) \quad [\text{kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})] \quad \text{式(16)}$$

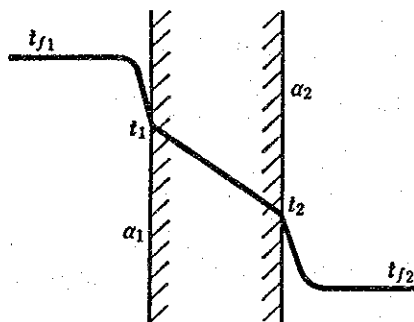
式(16)において、 h_c は対流による熱伝達率、 h_r は放射による熱伝達率である。

(5) 熱通過

5-1 考え方

Figure 12.6のように固体壁を隔てて2種類の流体が流れており、高温側から低温側への伝熱量は、以上に説明した関係式を組み合わせることによって、次のように表される。

Figure 12.6 Overall heat transfer



$$q = \frac{t_{f1} - t_{f2}}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{b_1}{\lambda_1} + \frac{b_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{b_n}{\lambda_n} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad [\text{kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})] \quad \text{Equation (17)}$$

ただし、 α_1 、 α_2 は高温流体および低温流体と固体壁との間の熱伝達率である。bは固体壁の厚さ、 λ は固体壁の熱伝導率である。

また固体壁の表面温度は計算で求めた伝熱量を用いて、式(18)(19)で与えられる。

$$t_1 = t_{f1} - \frac{q}{\alpha_1} \quad \text{Equation (18)}$$

$$t_2 = t_{f2} + \frac{q}{\alpha_2} \quad \text{Equation (19)}$$

円筒壁の場合には、伝熱量と表面温度は式(20)(21)(22)のように表される。

$$q_1 = \frac{2\pi(t_{f1} - t_{f2})}{\frac{1}{r_1 \cdot \alpha_1} + \frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{r_3}{r_2} + \dots + \frac{1}{\lambda_n} \ln \frac{r_{n+1}}{r_n} + \frac{1}{r_{n+1} \cdot \alpha_2}} \quad [\text{kJ}/\text{m} \cdot \text{h}] \quad \text{Equation (20)}$$

$$t_1 = t_{f1} - \frac{q_1}{2\pi r_1 \cdot \alpha_1} \quad \text{Equation (21)}$$

$$t_2 = \frac{q_1}{2\pi r_{n+1} \cdot \alpha_2} + t_{f2} \quad \text{Equation (22)}$$

5-2 熱通過の計算シート

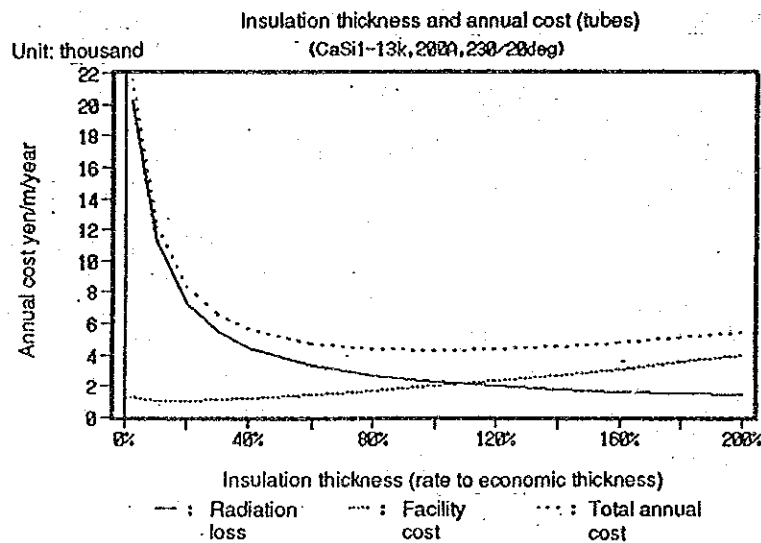
実際の計算では、物質の熱伝導率と対流・放射の熱伝達率の値が温度によって変化するので、伝熱量を簡単に求めることができない。たとえば、表面の熱伝達率は表面温度に依存し、また表面温度は表面の熱伝達率によって計算される。多層保温の計算シートでは、まずはじめに表面温度を仮定して、熱伝達率と材料の熱伝導率を求める。次に、この熱伝達率と熱伝導率を用いて伝熱の計算を行い、表面温度を算出する。こうして求めた表面温度が、仮定した温度にある程度接近するまで、計算を繰り返す。このような計算の手順は、Lotus 123のマクロと呼ばれるプログラミング機能を利用して、ワークシート上に記述されていて、キーボードからの指示によって実行される。したがって、計算シートの利用者求められる作業は、各種の前提条件を設定した後に、計算実行の指示を機械に与えることのみである。計算シートでは、3層までの保温の計算を行うことができるようになっている。

(6) 経済的保温厚さ

6-1 考え方

スチーム管の保温等の場合において、保温の厚さには最も経済的な厚さが存在する。すなわち、保温の厚さを大きくすれば、熱経済の面からは経済的であるが、施工費の負担が増加する。また、逆に保温の厚さを小さくすれば、施工費の負担は小さいが、熱損失が大きくなる。理論的には、熱損失と施工費負担の合計を最小にする保温厚さが存在し、これを経済的保温厚さと呼ぶ。Figure 12.7に、保温厚さを変えた場合の熱損失と、施工費負担の変化の一例を示す。

Figure 12.7 Insulation thickness and yearly expenses



この図のように、熱損失と施工費負担の合計を最小にする保温厚さが存在することがわかる。日本の工業規格 (JIS) には、経済的保温厚さの計算式が記載され、またある前提条件のもとで、各種の保温材について経済的保温厚さを計算した結果が記載されている。省エネルギーセンターでは、JIS の考え方をもとにして、各種の前提条件のもとで経済的保温厚さを計算するワークシートを開発した。今回の調査ではこの計算シートを利用して、保温の計算を行った。

6-2 計算シートの解説

a) 放熱損失金額の計算

放熱による熱損失の量は、伝熱の計算式を用いて計算する。保温材料の熱伝導率は温度の三次式で表現されており、材料を選択することによってこの三次式の係数が読み込まれ

る。損失金額は、放熱量と熱量単価の積として計算される。

熱量単価は、燃料の熱量単価ではなく、例えばスチーム管の場合には、放熱によって失われるスチームの熱量単価である。

b) 施工費負担額の計算

施工費の負担額は、施工費用に年間の償却率を乗じて求められる。また保温工事の施工費は、JIS では式(23)で与えられている。

$$P = 1.2 (12000X^{-k} + 100) \quad [1000\text{¥}/\text{m}^3] \quad \text{式(23)}$$

ここに、 X：保温材の厚さ (mm)

k：次表の値をとる

Tube outer diameter (Inch)	k
1/2 to 3/4	1.09
1 to 2	1.13
2½ to 6	1.17
8 to 12	1.21
14 to flat surface	1.28

6-3 計算の方法

ワークシート上では、以上の計算で求めた放熱損失金額と、年間の施工費負担額の合計額の式を、保温材の厚さで微分する。そしてこの微係数の値がゼロとなる保温厚さが、求める経済的保温厚さである。しかしこの値を数式の解として求めることができないので、ワークシートでは繰り返し計算によって、近似的に解を算出している。

a) 計算シートの使い方

最初に各種の前提条件を設定し、その後にマクロによって計算を実行させる。設定すべき条件は、Figure 12.8 に示したワークシートの画面で、太い枠で囲まれた数値である。管の外径と保温材料はメニューから選択することによって設定される。

Figure 12.8 Setting screen for the economical insulation calculation

Economically optimum insulation SI (Wh unit)

<Premises---Pipe/Surface> <Pipe> (¥R:calc) 03/24 16:24

Inside temp	th.0	150	Eco thickness	Xp	0.055 m
Room temp	th.r	20	O.D of insulation	do	0.275 m
Heat transfer *alpha		12	I.D of insulation	di	0.1652 m
Heat price *	b	5	Annual expense	Fp	2439 ¥/year
Annual interest	n	0.07	Heat loss / hour	Qp	78.4 /m/h
Working year	m	10	Surface temp	th.pc	27.5 deg C
Working hour	hr	3000	H. conduct'y (avg) ramda.p		0.0521
Deprec'tn rate dep		14.2%	Insul'n work pric	ap	233 th. ¥/m ³
			Insul'n material		Calcium silicate 1-13

* : Be aware of unit

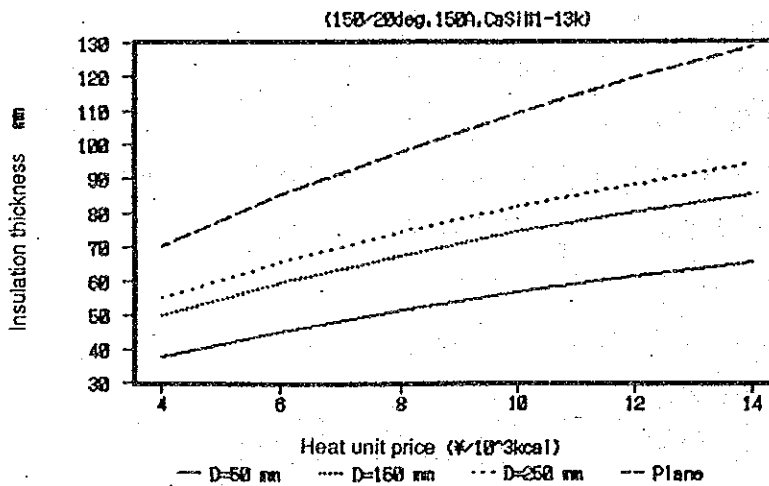
<Plane surface> (¥S:calc) 03/24 16:24

Macro command:		Eco thickness	Xs	0.078 m
¥A Menu		Annual expense	Fs	3170 ¥/year
¥U Unit select	¥P Print	Heat loss / hour	Qs	82.0 /m ² /h
¥G Graph call	¥X Line	Surface temp	th.sc	26.8 deg C
		H. conduct'y (avg) ramda.s		0.0520
¥L Protect	Free	Insul'n work pric	as	174 th. ¥/m ³
		Insul'n material		Calcium silicate 1-13

6-4 計算の方法

Lotus 123 のパラメータスタディを容易に行う機能 --- What-if study --- を利用して、特性解析表が各種用意されている。特性解析のなかで、最も関心の高いものの一つは熱量単価と経済保温厚さの関係であって、その計算の一例を Figure 12.9 に示す。

Figure 12.9 Heat unit price and economical Insulation thickness



(7) 表面温度から放熱量の計算

物体の表面の温度が分かっている場合には、放熱量を式(24)によって計算することができる。

$$q = \alpha (t_f - t_i) \quad [\text{kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})] \quad \text{式(24)}$$

物体の表面からは、対流による伝熱と放射による伝熱が行われているので、式(24)の熱伝達率は、対流と放射の熱伝達率の和である。報告書では、さきに説明した対流熱伝達率および放射熱伝達率の式を用いて、表面温度が与えられた場合の放熱量を計算している。

(8) 付表

1ケの弁またはフランジの表面積と等しくなる同一径の管の長さを付表に示す。例えば、20 bar用の2" Globe Valveの表面積は、2" 管 1.28 mの表面積と等しい。

Equivalent pipe length to valve or flange (Unit: m)

Piping Parts	$\frac{1}{2}$	$\frac{3}{4}$	1	$1\frac{1}{2}$	2	$2\frac{1}{2}$	3	4	5	6	8
Flanged Globe Valve (10bar)	1.15	1.06	1.22	1.11	1.11	1.23	1.25	1.27	1.40	1.50	1.68
Flanged Globe Valve (20bar)	1.24	—	1.21	1.20	1.28	1.50	1.56	1.58	—	1.78	1.87
Flanged Sluice Valve (10bar)	1.12	0.98	1.15	1.31	1.22	1.16	1.31	1.20	1.27	1.35	1.52
Flanged Sluice Valve (20bar)	1.29	1.13	1.32	1.23	1.53	—	1.63	1.50	—	1.92	—
Pressure Reducing Valve (10bar)	1.96	1.71	1.67	1.49	1.55	1.60	1.66	1.58	1.91	1.76	1.81
Control Valve (10bar)	—	1.72	1.84	1.56	1.60	—	1.54	—	—	1.48	—
Flange (10bar)	0.50	0.46	0.53	0.47	0.44	0.42	0.42	0.39	0.44	0.45	0.44
Flange (20bar)	0.51	0.46	0.54	0.47	0.49	0.46	0.50	0.46	—	0.56	0.51

JICA