

### Ⅲ エネルギー使用合理化ガイドライン

## 8. 電 気

### 目 次

8.1 電力管理	Ⅲ-8-1
8.1.1 電力原単位の改善	Ⅲ-8-1
8.1.2 力率の改善	Ⅲ-8-2
8.1.3 負荷率の改善	Ⅲ-8-16
8.2 変圧器	Ⅲ-8-16
8.2.1 変圧器の選択	Ⅲ-8-16
8.2.2 変圧器の効率的運転	Ⅲ-8-19
8.2.3 変圧器のタップ選定	Ⅲ-8-21
8.3 電動機	Ⅲ-8-22
8.3.1 負荷及び電動機設備を新設する場合	Ⅲ-8-22
8.3.2 既設設備の小幅な改造によって省エネルギーを図る場合	Ⅲ-8-36
8.4 コンプレッサ	Ⅲ-8-47
8.4.1 吸い込み空気及び中間冷却器	Ⅲ-8-48
8.4.2 吐出圧力及び使用量	Ⅲ-8-48
8.4.3 機種を選定と運転システム	Ⅲ-8-49
8.4.4 隙間、穴等からの空気漏れ	Ⅲ-8-50
8.4.5 圧縮空気設備の管理	Ⅲ-8-53
8.5 送風機(ファン・ブロワ)	Ⅲ-8-55
8.5.1 送風機の特徴	Ⅲ-8-55
8.5.2 送風機の所要動力	Ⅲ-8-57
8.5.3 送風機の省電力	Ⅲ-8-58
8.6 照 明	Ⅲ-8-68
8.6.1 工場照明	Ⅲ-8-68
8.6.2 照明の省エネルギー	Ⅲ-8-69
8.6.3 省エネルギーの具体策	Ⅲ-8-70
8.7 電気加熱	Ⅲ-8-76
8.7.1 工業電熱装置の種類	Ⅲ-8-76
8.7.2 遠赤外線の特徴	Ⅲ-8-77
8.7.3 遠赤外線装置の産業への応用	Ⅲ-8-80
8.8 空 調	Ⅲ-8-83
8.8.1 空気調和とは	Ⅲ-8-83
8.8.2 空調システムの構成	Ⅲ-8-85
8.8.3 空調設備の省エネルギー	Ⅲ-8-87



## 8. 電 気

窯業・ガラス、紙、繊維、金属、プラスチック、化学及び食品の各業界に、ほぼ共通する電気設備のうち、省エネルギーに関係の深い項目を次に記す項目別にとりあげた。

- 8.1 電気管理
- 8.2 変圧器
- 8.3 電動機
- 8.4 コンプレッサー
- 8.5 送風機
- 8.6 照明
- 8.7 電気加熱
- 8.8 空調

工場によっては、関連の度合いの薄い項目もあると思われるが、担当技術者は将来の設備増強などの機会に備えて、一応全項目を読了されるよう望む。

### 8.1 電力管理

省電力を考える場合、電力量と最大電力の両面から電力管理することが必要である。

このうち電力量については、

- (1) 電力原単位の改善
- (2) 力率の改善

という二つの面から、また最大電力については負荷率の向上という観点から、管理することが大切である。

#### 8.1.1 電力原単位の改善

一般に電力原単位を改善しようとするとき大切なことは、この原単位の推移を十分に把握し、これを生産工程別、原材料別に分類すると共に、加工方法の変化や技術的改善の状況と関連づけて検討することである。また生産工程別に電力原単位の目標値を定め、改善できる部分から計画を立てて進めていくことも肝要である。

電力原単位を改善するのに重要な事項を具体的に述べれば、次のとおりである。

- (1) 測定計器の充実

工場毎の電力原単位が測定できるよう、要所要所に測定計器を置き、定期的に測

定する。

(2) 電力管理

各配電線の電圧、容量の適正化を図り、高効率電力機器の導入に努め、その効率的運用及び故障の低減に努める。

(3) 設備管理面

生産設備容量の適正化、高効率生産設備の導入及び運用に心掛け、保全管理の充実による故障の防止に努める。

(4) 工程管理面

作業工程を合理化し、レイアウトの改善を図る。

(5) 品質管理面

品質管理についての全社的協力体制を確立し、不良品発生率の減少に努める。

(6) 従業員意識面

生産性向上意識、コスト意識の高揚を図り、提案制度、サークル活動の充実等を積極的におし進める。

8.1.2 力率の改善

交流電力を負荷に供給する場合、そのときの電力は一般に電圧と電流の積よりも小さい値になる。この場合に、両者の比を力率という。これを式で表わすと次のようになる。

$$\text{力率} = \frac{P}{E \cdot I} \times 100 \% \dots\dots\dots(1)$$

P : 電力(W)

E : 電圧(V)

I : 電流(A)

$$P = E I \cos \phi \dots\dots\dots(2)$$

$\phi$  : 電圧と電流の位相差

$$I = \frac{P}{E \cos \phi} \dots\dots\dots(3)$$

すなわち、一定の出力をうるためには、力率低下分だけ余分に電流を供給しなければならない。この力率を改善するには、一般に進相コンデンサを取り付けるが、このことによる省エネルギー効果は、すべてこの余分の電流を減らし、配電線又は変圧器

の抵抗損が減少するために得られるものである ( Fig III-8-1 及び Fig III-8-2 参照 )。

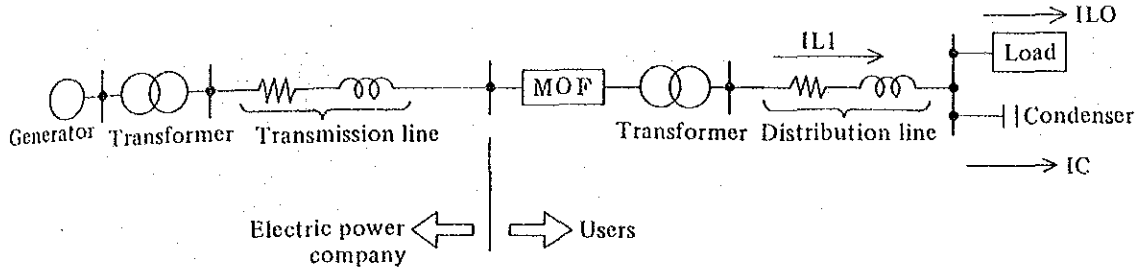


Fig. III-8-1 Diagram of electric power system

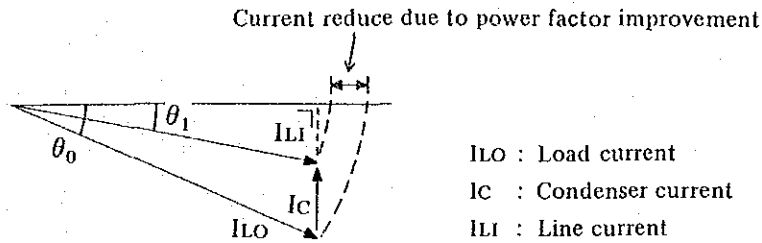
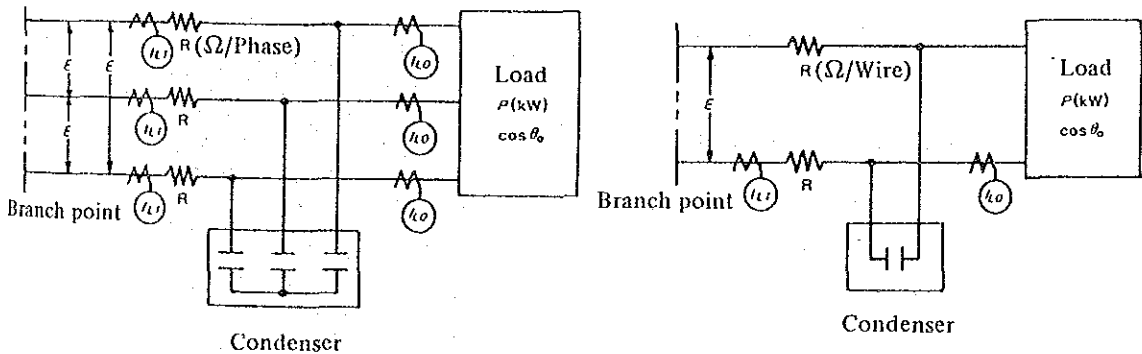


Fig. III-8-2 Reduced line current due to power factor improvement

以下、力率の改善によって得られる効果について述べる。

(1) 配電線損失の低減効果

配電線における電力損失は、(線路電流)<sup>2</sup> × (線路抵抗) で与えられるため、Fig III-8-3において、進相コンデンサを設置し、力率を改善することによって得られる配電線損失の低減量 ( $P_L$ ) は、次の各式で求められる。



(a) In the case of 3 phase circuit

(b) In the case of single phase circuit

Fig. III-8-3

A) 三相回路のときの計算式

$$P_L = 3 \times (I_{LO}^2 - I_{LI}^2) \times R \times 10^3 \text{ (kW)} \dots\dots\dots(4)$$

ここで

$$I_{LO}^2 = \left( \frac{P}{\sqrt{3} \times E \times \cos \theta_0} \right)^2 = \frac{P^2}{3 E^2} \cdot \frac{1}{\cos^2 \theta_0}$$

$$I_{LI}^2 = \left( \frac{P}{\sqrt{3} \times E \times \cos \theta_1} \right)^2 = \frac{P^2}{3 E^2} \cdot \frac{1}{\cos^2 \theta_1}$$

$$I_{LO}^2 - I_{LI}^2 = \frac{P^2}{3 E^2} \left( \frac{1}{\cos^2 \theta_0} - \frac{1}{\cos^2 \theta_1} \right)$$

従って、

$$P_L = \frac{P^2}{E^2} \times \left( \frac{1}{\cos^2 \theta_0} - \frac{1}{\cos^2 \theta_1} \right) \times R \times 10^3 \text{ (kW)} \dots\dots\dots(5)$$

(5)式においては、

$$\frac{1}{\cos^2 \theta_0} - \frac{1}{\cos^2 \theta_1} = k_1$$

とおけば、

$$P_L = \frac{P^2}{E^2} \times k_1 \times R \times 10^3 \text{ (kW)} \dots\dots\dots(6)$$

ここで、

$$\frac{P^2}{E^2} = 3 \cos^2 \theta_0 \cdot I_{LO}^2$$

であるから、

$$P_L = 3 \times (I_{LO} \times \cos \theta_0)^2 \times k_1 \times R \times 10^3 \text{ (kW)} \dots\dots\dots(7)$$

B) 単相回路のときの計算式

$$P_L = 2 \times (I_{LO}^2 - I_{LI}^2) \times R \times 10^3 \text{ (kW)} \dots\dots\dots(8)$$

ここで、

$$I_{LO}^2 = \left( \frac{P}{E \cos \theta_0} \right)^2$$

$$I_{LI}^2 = \left( \frac{P}{E \cos \theta_1} \right)^2$$

$$I_{LO}^2 - I_{LI}^2 = \frac{P^2}{E^2} \left( \frac{1}{\cos^2 \theta_0} - \frac{1}{\cos^2 \theta_1} \right)$$

従って、

$$P_L = 2 \times \frac{P^2}{E^2} \times \left( \frac{1}{\cos^2 \theta_0} - \frac{1}{\cos^2 \theta_1} \right) \times R \times 10^{-3} \quad (\text{kW}) \dots (9)$$

$$= 2 \times \frac{P^2}{E^2} \times k_1 \times R \times 10^{-3} \quad (\text{kW}) \dots (10)$$

$$= 2 \times (I_{L0} \times \cos \theta_0)^2 \times k_1 \times R \times 10^{-3} \quad (\text{kW}) \dots (11)$$

ただし、

$P$  (kW) : 負荷電力

$I_{L0}$  (A) : 負荷電流

$I_{L1}$  (A) : 線路電流

$E$  (kV) : 線間電圧

$\cos \theta_0$  : 現在の力率

$\cos \theta_1$  : 改善後の力率

なお、

$$\text{係数 } k_1 = \frac{1}{\cos^2 \theta_0} - \frac{1}{\cos^2 \theta_1}$$

は、現在の力率  $\cos \theta_0$  を知るにより、Table III-8-1 または Fig III-8-4 から求めることができる。

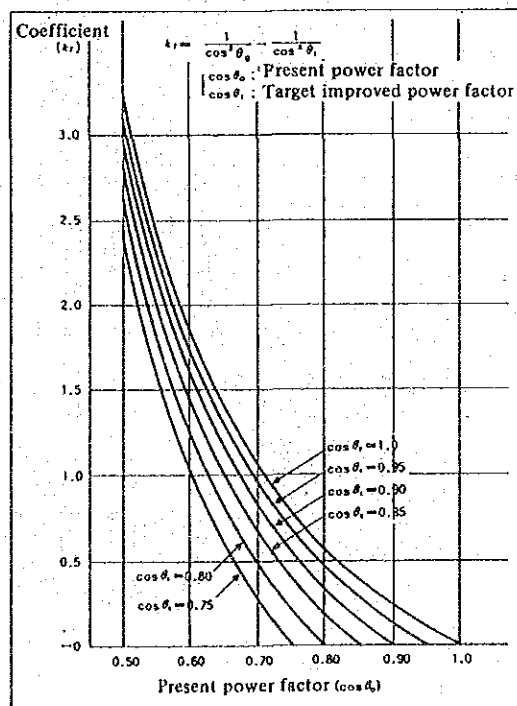


Fig. III-8-4 Coefficient ( $k_1$ )





(1) 計算例

前出の(7)式を用いて計算した、三相配電線モデル系統における損失低減量を Table III-8-2 に示す。

Table III-8-2 Calculation example of reduction effect of loss in 3 phase distribution line due to power factor improvement

Resistance value of distribution line and cable R: (Size of electric wire)	Length of wiring $l$	Present power factor ( $\cos \theta_0$ )	Present load current	Load current after improvement		Reduction of loss in wiring	
				$\cos \theta_1 = 0.90$	$\cos \theta_1 = 0.95$	$\cos \theta_1 = 0.90$	$\cos \theta_1 = 0.95$
$\Omega / \text{km}$ 0.20(100sq or equivalent)	500	0.60	131 A	87.3 A	82.7 A	2.87 kW	3.10 kW
		0.70	131	102	96.5	2.04	2.30
0.13(150sq or equivalent)	500	0.60	219	146	138	5.18	5.61
		0.70	219	170	161	3.68	4.26
0.10(200sq or equivalent)	500	0.60	262	175	165	5.74	6.21
		0.70	262	104	193	4.08	4.72
0.08(250sq or equivalent)	500	0.60	306	204	193	6.25	6.76
		0.70	306	238	225	4.44	5.14
0.06(325sq or equivalent)	500	0.60	350	233	221	6.12	6.62
		0.70	350	272	258	4.35	5.04

- Note: 1.  $\cos \theta_1$  in the table indicates power factor after improvement.  
 2. Reduction of loss (PL) is determined by equation (7). However, coefficient,  $k_1$  has the following values from Table III-8-1.

$\cos \theta_0$	$\cos \theta_1$	$k_1$
0.60	0.90	1.543
	0.95	1.670
0.70	0.90	0.806
	0.95	0.933

(2) 変圧器損失の低減効果

変圧器における電力損失のほとんどが鉄心内に生じる「鉄損」と、コイルに生じる「銅損」であるが、このうちの「銅損」が、力率に大きく影響を受ける。

A) 計算式

Fig III-8-5 のように変圧器 2 次側において、進相コンデンサで力率を改善した場合の変圧器損失の低減量 ( $P_L$ ) は、次の各式で求められる。

ただし、変圧器の全負荷損：銅損 = 1 : 0.8 とする。。また単相、三相共に同一の式となる。

$$P_t = \left( \frac{100}{\eta} - 1 \right) \times \frac{4}{5} \times \left( \frac{P}{L_0} \right)^2 \times \left( \frac{1}{\cos^2 \theta_0} - \frac{1}{\cos^2 \theta_1} \right) \text{ (kW)} \dots\dots 02$$

$$= \left( \frac{100}{\eta} - 1 \right) \times \frac{4}{5} \times \left( \frac{P}{L_0} \right)^2 \times k_1 \times L_0 \text{ (kW)} \dots\dots 03$$

$$= k_2 \times k_1 \times L_0 \text{ (kW)} \dots\dots 04$$

ただし、

$$k_2 = \left( \frac{100}{\eta} - 1 \right) \times \frac{4}{5} \times \left( \frac{P}{L_0} \right)^2$$

ここで係数  $k_1$  は、前出のとおりで Table III-8-1, 又は Fig III-8-4 で求められる。

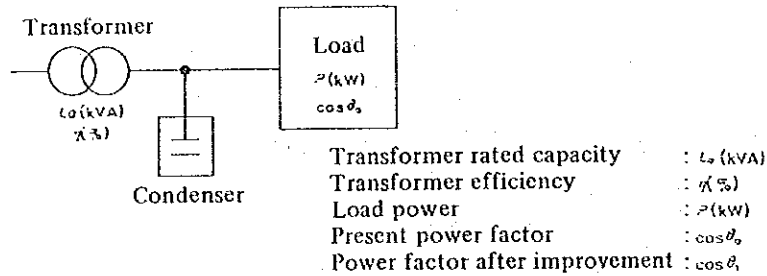


Fig. III-8-5 Reduction effect of transformer loss

また  $k_2$  は、変圧器効率  $\eta$ , 負荷電力  $P$ , 変圧器定格容量  $L_0$  を調査確認することにより、Table III-8-3, 又は Fig III-8-6 により求められる。

Table III-8-3 Coefficient  $k_2$

$\frac{P}{L_0}$	Transformer efficiency $\eta$ (%)											
	96.75	97.0	97.25	97.50	97.75	98.0	98.25	98.50	98.75	99.0	99.25	99.50
	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-3}$
0.40	4.30	3.96	3.62	3.28	2.95	2.61	2.28	1.95	1.62	1.29	0.97	0.64
0.45	5.44	5.01	4.58	4.15	3.73	3.31	2.89	2.47	2.05	1.64	1.22	0.81
0.50	6.72	6.19	5.66	5.13	4.60	4.08	3.56	3.05	2.53	2.02	1.51	1.01
0.55	8.13	7.49	6.84	6.21	5.57	4.94	4.31	3.69	3.06	2.44	1.83	1.22
0.60	9.67	8.91	8.14	7.39	6.63	5.88	5.13	4.39	3.65	2.91	2.18	1.45
0.65	11.35	10.45	9.56	8.67	7.78	6.90	6.02	5.15	4.28	3.41	2.55	1.70
0.70	13.17	12.12	11.09	10.05	9.02	8.00	6.98	5.97	4.96	3.96	2.96	1.97
0.75	15.12	13.92	12.73	11.54	10.36	9.18	8.02	6.85	5.70	4.55	3.40	2.26
0.80	17.20	15.84	14.48	13.13	11.79	10.45	9.12	7.80	6.48	5.17	3.87	2.57
0.85	19.42	17.88	16.34	14.82	13.30	11.80	10.30	8.80	7.32	5.84	4.37	2.91

- Note 1: Calculated from  $k_2 = \left( \frac{100}{\eta} - 1 \right) \times \frac{4}{5} \times \left( \frac{P}{L_0} \right)^2$   
 2: Assumed as full-load loss of transformer: copper loss = 1 : 0.8.  
 3:  $L_0$ : Transformer rated capacity (kVA)     $P$ : Load power (kW)

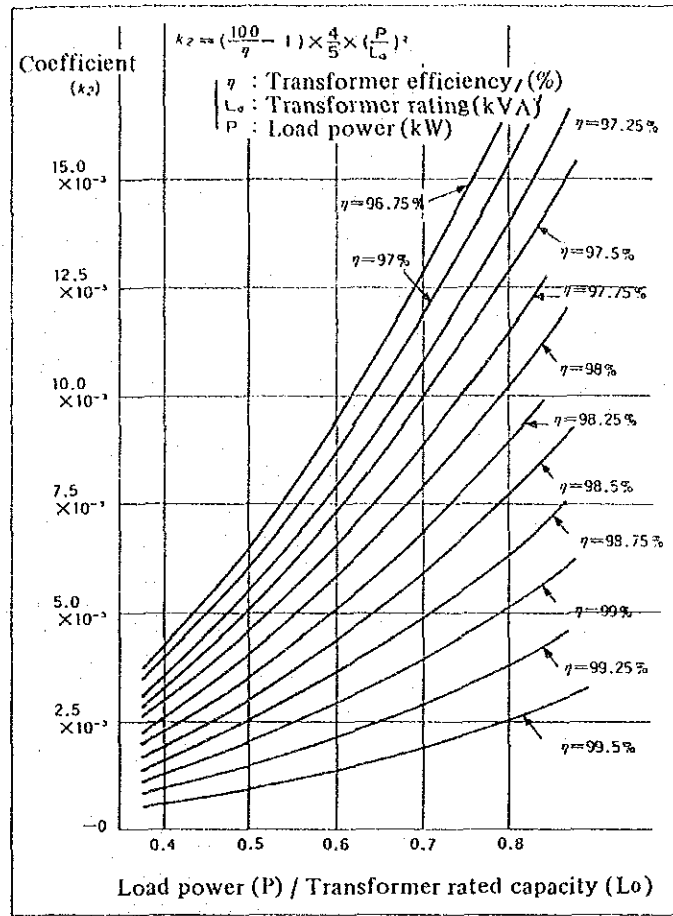


Fig. III-8-6 Coefficient ( $k_2$ )

B) 計算例

前出の(4)式を用いた，変圧器損失低減量の計算例を Table III-8-4 に示す。

(3) 母線電圧降下の軽減効果

A) 母線電圧降下と省エネルギー

力率を改善すると，線路電流が減少するため配電線路中の電圧降下を軽減できるが，これも大きな意味での省エネルギー効果といえる。

すなわち，負荷稼働に伴う電圧降下により発生する次のような諸問題が，

- a. けい光灯，水銀灯などの寿命低下や明るさの低下をきたす。
- b. ジュール熱を利用する電気加熱装置においては，電圧の2乗に比例して熱量が低減するため，運転効率の低下をきたす。
- c. 誘導電動機においては，電圧の2乗に比例して発生トルクが減少するため，定負荷状態では負荷電流が増大し，効率が悪くなり，かつ配電線損失も増大する。

Table III-8-4 Calculation example of reduction effect of transformer loss

Transformer specification		$L_o=300\text{kVA } \eta=98\%$			$L_o=500\text{kVA } \eta=98.5\%$			$L_o=1,000\text{kVA } \eta=99\%$		
$P/L_o$		0.5	0.6	0.7	0.5	0.6	0.7	0.5	0.6	0.7
	$\cos\theta_o \rightarrow \cos\theta_1$	kW	kW	kW	kW	kW	kW	kW	kW	kW
	0.60 $\rightarrow$ 0.90	1.89	2.72	3.70	2.35	3.39	4.61	3.12	4.49	6.11
	0.60 $\rightarrow$ 0.95	2.04	2.95	4.01	2.55	3.67	4.99	3.37	4.86	6.61
	0.70 $\rightarrow$ 0.90	0.99	1.42	1.93	1.23	1.77	2.41	1.63	2.35	3.19
	0.70 $\rightarrow$ 0.95	1.14	1.65	2.24	1.42	2.05	2.79	1.88	2.72	3.69

- Note: 1.  $P$  : Load power (kW)  
 $L_o$ : Transformer rated capacity (kVA)  
 2. Loss reduction (Pt) is determined from equation (14). However, coefficient,  $k_1$  and  $k_2$  have the following values from Table III-8-1 and Table III-8-3:

$\cos\theta_o$	$\cos\theta_1$	Coefficient $k_1$
0.60	0.90	1.543
	0.95	1.670
0.70	0.90	0.806
	0.95	0.933

$P/L_o$	Coefficient $k_2$		
	$\eta = 98\%$	$\eta = 98.5\%$	$\eta = 99\%$
0.5	$4.08 \times 10^{-3}$	$3.05 \times 10^{-3}$	$2.02 \times 10^{-3}$
0.6	$5.88 \times 10^{-3}$	$4.39 \times 10^{-3}$	$2.91 \times 10^{-3}$
0.7	$8.00 \times 10^{-3}$	$5.97 \times 10^{-3}$	$3.96 \times 10^{-3}$

力率改善により解消されるからである。注意すべきことは休日、夜間などの軽負荷時間帯に必要以上の進相コンデンサが運転されていると、逆に母線電圧が上昇し過ぎるため、コンデンサ自身のみならず電動機、照明器具など電気機器全体の寿命低下につながるの、後述の自動制御方式などにより、不要なコンデンサを開放することを忘れてはならない。

B) 計算式

進相コンデンサによる電圧降下軽減値(すなわち電圧上昇値)  $\Delta V$  は、概略次式で求められる。

$$\Delta V = \frac{Q_c}{R.C.} \times 100 (\%) \dots\dots\dots (15)$$

R.C.: コンデンサ接続母線の短絡容量 (kVA)

$Q_c$ : コンデンサ容量 (kVA)

(3) 計算例

短絡容量 125 MVA の母線に、500 kVA の進相コンデンサを接続したときの母線電圧上昇値  $\Delta V$  を求めてみる。

$$\Delta V = \frac{500 \text{ (kVA)}}{125 \times 10^3 \text{ (kVA)}} \times 100 = 0.4 \text{ (\%)}$$

(4) 配電設備容量の余裕増加

Fig III-8-1 及び Fig III-8-2 において、力率改善により減少した線路電流の通過する変圧器や配電線の配電設備の負荷が軽くなる。すなわち、設備に余裕が生じることになる。このため、

- a. 既存設備においては、配電線の張り替えや変圧器増量などの設備増強を伴うことなく、負荷増設が可能となる。
- b. 新規設備については、電気設備の小容量化によるコストダウンが図れる。などの利益を得ることができる。

力率改善により、現有の配電設備において負荷をどれだけ増やせるかは、改善前力率 ( $\cos \theta_0$ )、改善後力率 ( $\cos \theta_1$ ) の他、増設負荷の力率によって異なる。

一例として、増設負荷の力率がコンデンサ設置後の負荷力率と同一とした場合の増設可能負荷容量  $P_1$  (kW) と、現有負荷容量  $P_0$  (kW) の比を Fig III-8-7, Fig III-8-8 及び Table III-8-5 に示す。

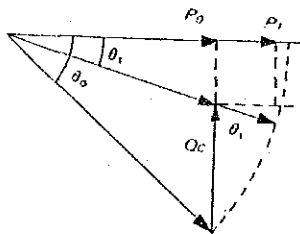


Fig. III-8-7  
Increased surplus capacity for distribution equipment due to power factor improvement

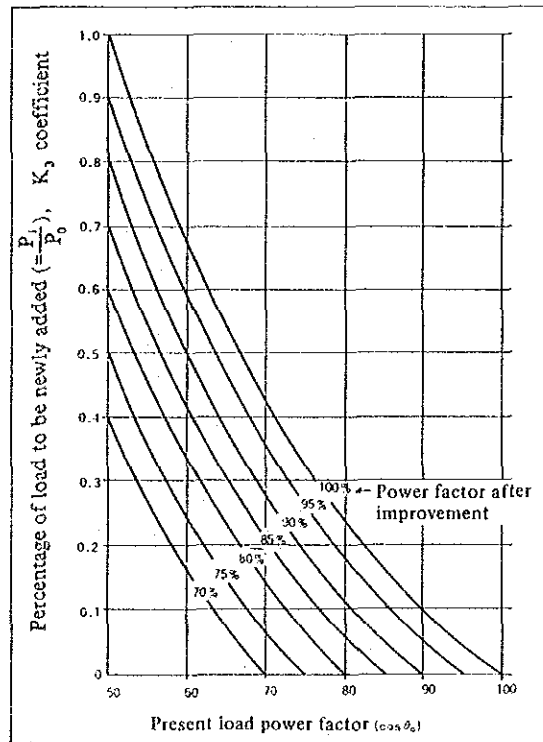


Fig. III-8-8

Table III-8-5 Coefficient  $K_3$

Present power factor $\cos \theta_0$	Power factor after improvement $\cos \theta_1$						
	0.7	0.75	0.8	0.85	0.9	0.95	1.00
0.50	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
52	0.346	0.442	0.538	0.635	0.731	0.827	0.9231
54	0.296	0.389	0.481	0.574	0.667	0.759	0.8519
56	0.25	0.339	0.429	0.518	0.607	0.696	0.7857
58	0.207	0.293	0.379	0.466	0.552	0.638	0.7241
0.60	0.167	0.25	0.333	0.417	0.5	0.583	0.6667
62	0.129	0.210	0.290	0.371	0.452	0.532	0.6129
64	0.094	0.172	0.25	0.328	0.406	0.484	0.5625
66	0.061	0.136	0.212	0.288	0.364	0.439	0.5152
68	0.029	0.103	0.176	0.25	0.324	0.397	0.4706
0.70		0.071	0.143	0.214	0.286	0.357	0.4286
72		0.042	0.111	0.181	0.25	0.319	0.3889
74		0.014	0.081	0.149	0.216	0.284	0.3514
76			0.053	0.118	0.184	0.25	0.3158
78			0.026	0.090	0.154	0.218	0.2821
0.80				0.063	0.125	0.188	0.25
82				0.037	0.098	0.159	0.2195
84				0.012	0.071	0.131	0.1905
86					0.047	0.105	0.1628
88					0.023	0.080	0.1364
0.90						0.056	0.1111
92							
94							
96							
98							

Fig III-8-7で

$$k_3 = \frac{P_1}{P_0}$$

とする、ここで、

$$\frac{P_0}{\cos \theta_0} = \frac{P_0 + P_1}{\cos \theta_1} = \frac{P_0 + k_3 \cdot P_0}{\cos \theta_1}$$

従って、

$$P_0 (1 + k_3) = P_0 \cdot \frac{\cos \theta_1}{\cos \theta_0}$$

$$\therefore k_3 = \frac{\cos \theta_1}{\cos \theta_0} - 1 \dots \dots \dots (10)$$

<例>

100 kW, 力率 70 % の負荷を 95 % に力率改善すると, Fig III-8-8 より,  $k_3 = 0.36\%$  となる。すなわち,  $100 \text{ kW} \times 0.36 = 36 \text{ kW}$  (力率 95 %) の負荷を現有設備のまま増やせることになる。

(5) 電気料金の軽減

現在, M E A から電力を受けている需要家は, 最大無効電力が最大電力の 63 % を超えると kVAR 当たり 15 Bt のペナルティを払うことになっている。最大電力と最大無効電力が同時に現れるとすれば, これは力率約 85 % に相当する。

従って, 力率が悪い工場では, 力率を改善することが電気料金の軽減につながる。

以上, (1) から (5) まではコンデンサの設置による効果を述べてきたが, 以下にコンデンサ接続箇所の選定上の問題及び自動開閉制御について述べる。

(6) コンデンサ接続箇所の選定

A) 接続箇所と効果

Fig III-8-9 に示すように, 進相コンデンサを接続する箇所は種々考えられる。

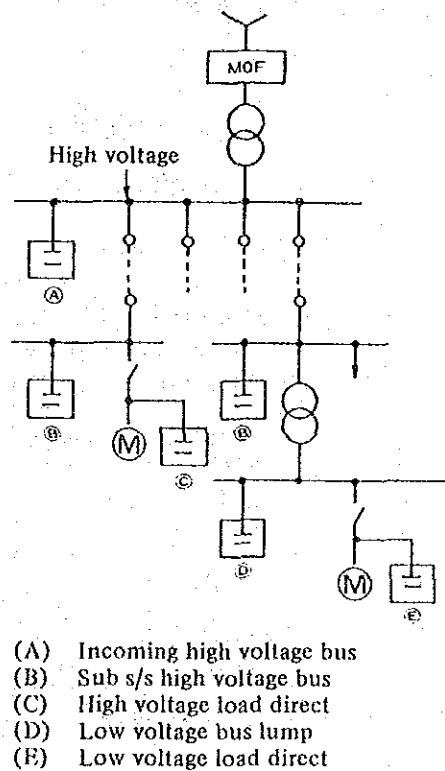


Fig. III-8-9 Connection points of phase advancing condenser.

a. 受電力率改善効果

これは進相コンデンサの接続箇所にはほとんど無関係である。

b. 所要コンデンサ容量

一般的に、進相コンデンサを分散するほどその使用率（運転時間）は少なくなるため、所要コンデンサの総容量が大きくなる。これは Fig III-8-9において、④に一括する場合、構内全負荷の平準化されたものに対して所要コンデンサ容量を算出すればよいが、⑤～⑧に分散すれば、それぞれに限定された範囲の負荷に見合ったコンデンサ容量とする必要が出てくるからである。

c. 電力損失低減効果

当然のことながら、配電線の末端にコンデンサを取り付けるほど効果は大きいし、またその効果は、線路亘長が長いほど大きくなる。

d. 設備余力の増加

進相コンデンサ設置による設備余力の増加は、コンデンサ接続箇所から受電点までの直列に挿入された配電線やケーブル、変圧器に生じる。このため、効果そのものは末端に接続するほど大であるといえる。しかし、例えば工場のスペースや、将来とも負荷増設の予定のないところで余力を増してもあまり意味がないので、広い視野で考える必要がある。

e. 電圧降下軽減効果

進相コンデンサによる電圧降下軽減の効果は、接続点からみた電源インピーダンスによって決まるので、末端に接続する方が効果は大となる。

以上の項目を表にまとめれば、Table III-8-6のようになる。

Table III-8-6 Comparison between collective installation of power receiving station and decentralized installation of ends

Item	Collective installation of power receiving stations	Decentralized installation of ends
Reduction effect of basic charge	(the same)	(the same)
Total capacity of required condenser	Minimum	Generally maximum
Loss reduction effect of distribution line and transformer	Small	Large
Reduction effect of voltage drop	Small	Large
Maintenance and inspection	Simple	Troublesome
Initial cost	Small	Generally, large (especially for low voltage)



B) コンデンサ接続箇所の決定

省エネルギー効果を最大とするには、進相コンデンサをすべての末端に接続すればよいが、投資効果などの他の条件を考慮すると、実際上の決め方としては、

- a. 比較的大容量の負荷には直結する ( Fig III-8-9, ㉔, ㉕参照 )。
- b. 容量負荷の集合箇所には、とりまとめて一括設置する ( Fig III-8-9, ㉖, ㉗参照 )。
- c. 総合的な受電力率改善用コンデンサは、受電高圧母線に接続する ( Fig III-8-9, ㉘ )。

などの方法が考えられ、これを参考にして、各需要家の状況に応じて決定するべきである。

(7) コンデンサの自動開閉制御

不必要なコンデンサを運転すると、母線電圧の上昇による問題点の他に、コンデンサ電流による配電線や変圧器の損失が発生し、せっかくの省エネルギー効果を相殺することになるため、開閉制御が必要となる。特に工場末端におかれたコンデンサは、手動制御は困難と考えられ、自動開閉制御の採用を奨めたい。

自動開閉制御には、

- a. 負荷の開閉信号に同期して開閉する方式
- b. 負荷電流の増減により開閉する方式 ( 電流制御 )
- c. 線路無効電力の増減により開閉する方式 ( 無効電力制御 )
- d. タイムスイッチにより開閉する方式 ( プログラム制御 )

等があるが、各制御方式の選定に関しては、負荷の変動パターンにより適したものを採用することが必要である。選定の1例を Fig III-8-10 に示す。

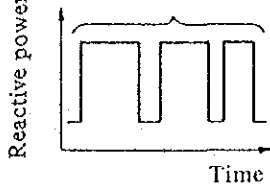

	(Same every day)	(Changes every day)
Load fluctuation pattern		
Applied control system	Reactive power control Current control Program control	Reactive power control

Fig. III-8-10

### 8.1.3 負荷率の改善

負荷率は(10)式のように定義されるので、これを改善するには、適切な工場運営あるいは操業の管理により、特定の時間帯に生産が集中しないようにして最大電力を抑制する。

$$\text{負荷率} = \frac{\text{平均電力 (kW)}}{\text{最大電力 (kW)}} \times 100 (\%) \quad \text{.....(10)}$$

負荷率の改善により、次のような利益を得ることができる。

- (1) 受電設備、配線設備等の容量が有効に使用でき、設備投資が少なくなる。
- (2) 負荷曲線及び負荷率をチェックすることにより、工場・機械設備の稼働状態を知り無駄を省くことができる。
- (3) 最大電力の引き下げにより、契約電力を減少させ、基本料金の低減を図ることができる。

なお、契約電力を引き下げた結果、最大電力がこれを超過する恐れがある場合は、デマンド監視制御装置（デマンドコントローラ）が必要になる場合がある。

デマンドコントローラは通常、監視部と制御部からなり、監視部は電力量計から送られてくる計量パルスを受けてデマンド管理に必要な演算、判定を行うほか、現在のデマンド値、予想デマンド値の表示、警報、制御指令、記録等を行う。また制御部は監視部からの指令を受けて、予め定めてあった負荷の停止、復帰などを行うものである。

## 8.2 変圧器

変圧器の省エネルギーを図るには、次のことに留意することが必要である。

- (1) 変圧器の効率
- (2) 変圧器が複数基ある場合、その効率的基数運転
- (3) 変圧器のタップ選定

### 8.2.1 変圧器の選択

- (1) 変圧器の効率は、次式で表わされる。

$$\eta = \frac{n p \cos \phi}{n p \cos \phi + W_i + n^2 W_c} \times 100 (\%) \quad \text{..... (1)}$$

$\eta$  ; 効率 (%)

$n$  ; 負荷率

P ; 定格容量 (kVA)

cos φ ; 負荷力率

W<sub>i</sub> ; 鉄損

W<sub>c</sub> ; 銅損

なお、変圧器には上記鉄損と銅損のほかに、誘電体損や漂遊負荷損があるが、測定困難であり、また微少であるので無視する。

また定格負荷時の銅損W<sub>c</sub>と鉄損W<sub>i</sub>の比を損失比αと呼ぶ。

$$\alpha = \frac{W_c}{W_i} \dots\dots\dots(2)$$

損失比は Table III-8-7 に示すように、一般に 2~5 である。ただし、後述の省電力形変圧器では 10 を超えるものもある。

Table III-8-7 Efficiency of 3 phase high voltage medium capacity transformer

Primary 6.6/3.3 kV, Secondary 400/200 V

	Company A				Company B			
	Efficiency (%)	Iron loss (kW)	Copper loss (kW)	Loss ratio	Efficiency (%)	Iron loss (kW)	Copper loss (kW)	Loss ratio
300	98.2	0.9	4.6	5.1	97.9	2.2	4.2	1.9
500	98.27	1.3	7.5	5.8	98.1	2.7	7.0	2.6
750	98.36	2.0	10.5	5.3	98.2	3.2	10.6	3.3
1,000	98.52	2.5	12.5	5.0	98.2	3.5	14.8	4.2
1,500	98.62	4.5	16.5	3.7	-	-	-	-
2,000	98.69	6.0	20.5	3.4	98.3	7.3	27.3	3.7

(1)式から、変圧器の効率が最大となるのは、 $n = \sqrt{W_i/W_c}$  のとき、すなわち、鉄損とその時の銅損が等しくなるときの出力である。出力に対する効率の変化の一例を図示すれば Fig III-8-11 のようである。

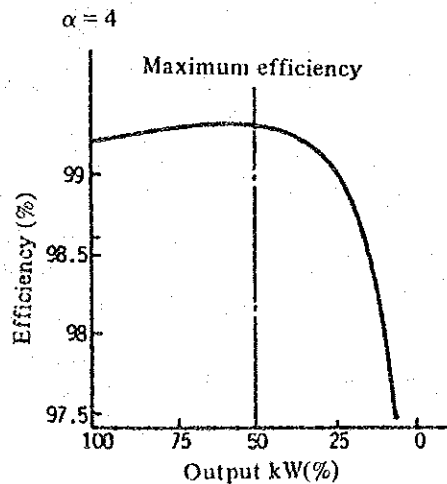
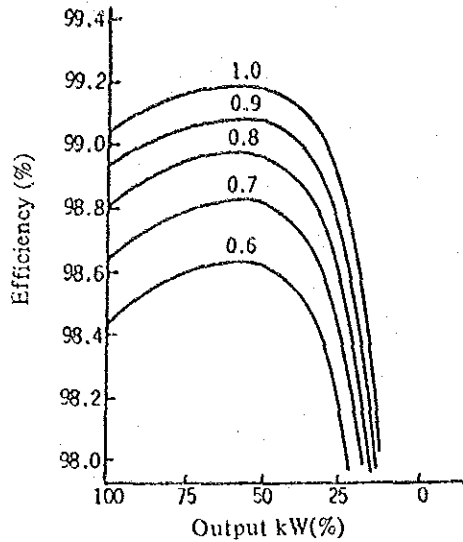


Fig. III-8-11 Transformer efficiency (Example)

また変圧器の効率、(1)式から負荷の力率によっても変わり、力率が悪くなると効率は低下する。この一例を Fig III-8-12 に示す。



Note: Figure indicates power factor.

Fig. III-8-12 Relation between power factor and efficiency

(2) 変圧器の全日効率

変圧器の最高効率点を考えて変圧器を購入したり、運用することももちろん大切であるが、変圧器の負荷は時々刻々変化するので、一日当たりの効率も無視してはいけない。(3)式に示すものを全日効率と呼ぶ。

$$\text{全日効率} = \frac{\text{1日の出力電力量 [kWh]} \times 100 \%}{\text{1日の出力電力量 [kWh]} + \text{1日の損失電力量 [kWh]}} \dots\dots(3)$$

毎日の負荷変動のパターンがほぼ同じならば、全日効率が最高となるような運転方法を考えれば、損失電力量は少なくなる。

(3) 省エネルギー形変圧器

従来の変圧器は、鉄心材料に珪素鋼板を使用し、積鉄心構造であったため、鉄損が0.5～0.3%程度であった。

最近これを改善し、鉄心材料に珪素鋼帯（冷間圧延板）を使用し、巻鉄心構造として鉄損を従来の1/2程度とした省エネルギー形変圧器が製造されている。変圧器を購入する際には参考とすべきである。

Table III-8-8 に従来形と省エネルギー形の比較を示しておいた。

Table III-8-8 Improvement example of transformer no-load loss  
(a certain manufacturer, 50 Hz)

Rated capacity (kVA)	Conventional type		Energy conservation type	
	Power loss (W)	Power loss Rated capacity (%)	Power loss (W)	Power loss Rated capacity (%)
500	2,200	0.44	1,100	0.22
300	1,500	0.50	700	0.23
200	1,200	0.60	600	0.30
150	500	0.33	420	0.28
100	400	0.40	350	0.35
75	350	0.47	300	0.40

8.2.2 変圧器の効率的運転

(1) 軽負荷変圧器の停止

複数の変圧器があり、おのおのの負荷率が低い場合は負荷率の低い変圧器を停止し、負荷を統合する方が省電力となる。

ただし場合によっては、停止した変圧器の損失減よりも負荷が増えた方の変圧器の損失が増えて、逆効果となる場合があるので、その都度、次の(例)に示すような計算をして、確める必要がある。

(例) 500 kVA の変圧器が 2 台ある場合

Fig III-8-13 のような電源設備において、おのおのの変圧器の負荷率が 40 % の場合、1 台の変圧器を停止した場合のメリットを計算する。特性は Table III-8-7 の A 社を使う。

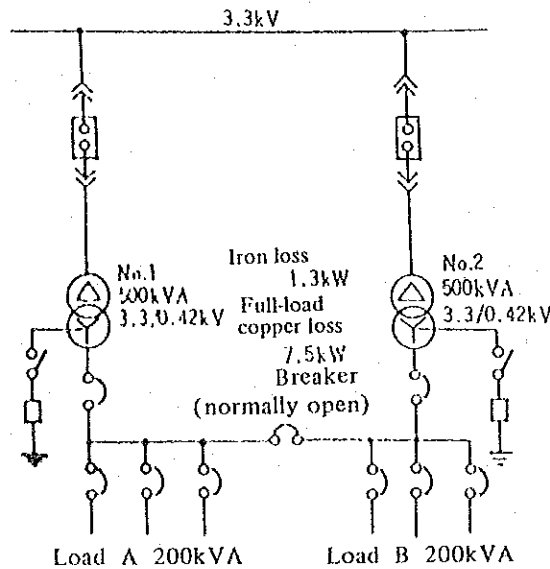


Fig. III-8-13

現状ではNa 1 変圧器, Na 2 変圧器とも,

$$\text{鉄損} = 1.3 \text{ [kW]}$$

$$\text{銅損} = \text{全負荷銅損} \times \left( \frac{\text{負荷率}}{100} \right)^2 = 7.5 \times \left( \frac{40}{100} \right)^2 = 1.2 \text{ [kW]}$$

従って,

$$\text{全損失} = 2 ( 1.3 + 1.2 ) = 5 \text{ [kW]}$$

Na 1 変圧器停止後では,

$$\text{Na 2 変圧器の鉄損} = 1.3 \text{ [kW]}$$

$$\text{Na 2 変圧器の銅損} = \text{全負荷銅損} \times \left( \frac{\text{負荷率}}{100} \right)^2 = 7.5 \times \left( \frac{80}{100} \right)^2 = 4.8 \text{ [kW]}$$

$$\text{全損失} = 1.3 + 4.8 = 6.1 \text{ [kW]}$$

となり, 1 台の変圧器を停止したほうが 1.1 kW 損失が多くなる。

(2) 夜間, 休日の変圧器の停止

夜間や休日に操業しない設備や工場などでは, 夜間や休日でも停電できない負荷だけのある変圧器にまとめ, 不用の変圧器を停止することにより省電力を図ることができる。しかし, 昼間と夜間の電力差があまりない場合はメリットはない。

(3) 変圧器の台数制御

同じ定格の変圧器を並列運転している場合には, 負荷の大小によって運転台数を増減することにより, 総損失を軽減することができる。

いま, N 台の変圧器を並列運転したときの総合損失は, 次の式で表わされる。

$$W_N = N \left\{ W_i + \left( \frac{P_L}{N Q} \right)^2 W_c \right\} \text{ (kW)}$$

$W_N$  : 総合損失 (kW)

$W_i$  : 1 台の変圧器の鉄損 (kW)

$W_c$  : 1 台の変圧器の銅損 (kW)

$P_L$  : 負荷容量 (kVA)

$N$  : 台数

$Q$  : 1 台の変圧器容量 (kVA)

(N-1) 台の変圧器を並列運転したときの総合損失は, 次の式で表わされる。

$$W_{(N-1)} = (N-1) \left\{ W_i + \left( \frac{P_L}{(N-1) Q} \right)^2 W_c \right\} \text{ (kW)}$$

(N-1) 台の変圧器の並列運転の方が損失が少ない条件は、 $W_N > W_{(N-1)}$  である。ゆえに  $P_L$  は次の式で表わされる。

$$P_L < \sqrt{\frac{N(N-1)}{\alpha}} \times Q \text{ (kVA)}$$

ただし、

$$\alpha = \frac{W_c}{W_i}$$

$\alpha$  : 損失比

例えば、損失比  $\alpha = 3$  で 500 kVA の変圧器 3 台を運転している場合、

$$\sqrt{\frac{N(N-1)}{\alpha}} \times Q = \sqrt{\frac{3 \times 2}{3}} \times 500 = 707 \text{ kVA}$$

すなわち、負荷が 707 kVA 以下になったら、変圧器の運転台数を 1 台減らして、2 台にした方が省エネルギーになる。

同様の計算を  $\alpha$  の値を変えて行えば、次の Table III-8-9 に示すようになる。

Table III-8-9 Number of operating transformers required to get minimum loss when transformers (same capacity and characteristics) are connected in parallel.

Loss ratio Number of transformers	$\alpha = 2$		$\alpha = 3$		$\alpha = 4$		$\alpha = 5$	
	2	3	2	3	2	3	2	3
Threshold load (%)								
Two and one unit	100	—	81	—	70	—	63	—
Three and two units	—	173	—	141	—	122	—	109

(Example): When 3 transformers (same capacity) of loss ratio of 3 are operated in parallel, operation of 2 units is less in loss if total load is less than 141% of transformer capacity (1 unit) and operation of a single unit is less in loss if the total load is less than 81%.

### 8.2.3 変圧器のタップの選定

低圧用変圧器及び幹線には多くの負荷があり、負荷のいずれにも定格に近い電圧を供給することは容易ではないが、変圧器のタップの適正化を図って、これにできるだけ近づくよう努力することが大切である。

また工場において電動機が使われている状態をみると、全負荷運転の場合は少なくおおむね 50% から 80% 負荷程度のものが多い。電圧変動と誘導電動機の負荷状態との関係は Table III-8-10, Table III-8-11 に示すとおりである。変圧器の負荷

がすべて電動機である場合、これらを参考にしてタップを選定するのが望ましい。

Table III-8-10 Effect of voltage fluctuation on induction motor

	Voltage fluctuation	
	90% Voltage	110% Voltage
Starting torque, Maximum torque	-19%	+21%
Synchronous speed	Remain unchanged	Remain unchanged
% Slip	+23%	-17%
Full-load speed	-15%	+1%
Efficiency (Full-load)	-2%	Slightly increased
Power factor (Full-load)	+1%	-3%
Full-load current	+11%	-7%
Starting current	-10 ~ -12%	+10 ~ +12%
Full-load temperature rise	+6 ~ +7°C	-1 ~ -2°C
Magnetic noise	Slightly decreased	Slightly increased

Table III-8-11 Relation between voltage fluctuation and loading state of induction motor

		Voltage fluctuation	
		90% Voltage	110% Voltage
Efficiency	Full load	-2%	Slightly increased
	¾ Load	Remain unchanged	Remain unchanged
	½ Load	+1 ~ +2%	-1 ~ -2%
Power factor	Full load	+1%	-3%
	¾ Load	+2 ~ +3%	-4%
	½ Load	+4 ~ +5%	-5 ~ -6%

### 8.3 電動機

電動機の省エネルギーは、その対応する方法として次の二つのケースが考えられる。

- (1) 負荷及び電動機設備を新設あるいは大幅に改造して、省エネルギーを図る場合。
- (2) 既設設備の管理面の強化あるいは小幡な改造によって、省エネルギーを図る場合。

以下、それぞれの場合について述べる。

#### 8.3.1 負荷及び電動機設備を新設する場合

電動機の応用設備に限らず一般の設備全般にいえることであるが、エネルギーの使



用量は設備の計画段階である程度決まるといい。設備容量が過大であったり、負荷設備に不適合である場合は、合理的なエネルギーの使い方はできない。そこで、新設設備の計画、あるいは導入段階で考えなくてはならない事項をあげると、次のとおりである。

(1) 電動力応用に関する基本式

電動機の省エネルギーを考える場合、まず理解しなければならない基本式を Table III-8-12 に示す。紙幅の都合上、説明は省略するが、詳細については専門を参考にされたい。

Table III-8-12 Basic and practical expressions relating to motor application

Formulation Item	Basic expression	Practical expression	Description of symbols
1 Power and torque	$P = \omega T$	$\begin{cases} Rk[kW] = P \times 10^{-3} \\ N[rpm] = \frac{60}{2\pi} \omega \\ Tg[kg-m] = \frac{T}{g} = \frac{T}{9.81} \end{cases}$ $Pk[kW] = \frac{N[rpm]}{973} \times Tg[kg-m]$	P : Power (watt) Pk: Power (Kilo watt) T : Torque (N-m) Tg: Torque (Gravity unit Kg-m) W: Angular velocity (rad/sec) N : Rotating speed (rpm)
2 Moment of inertia and acceleration torque	$J \frac{d\omega}{dt} = T$	$GD^2 = 4J$ $Tg[kg-m] = \frac{1}{375} GD^2 \cdot \frac{dN}{dt}$	J : Moment of inertia (kg m <sup>2</sup> ) GD <sup>2</sup> : Flywheel effect
3 Acceleration time	$t = \int_0^{\omega_0} \frac{J}{Ta} d\omega [sec]$	$\frac{t}{Ta} = \frac{\int_0^{\omega_0} Ta(\omega)}{\omega_0} d\omega:$ $ta[sec] = \frac{1}{375} \frac{GD^2 N_0^2 [rpm]}{P [W]}$	t : Time required for acceleration (sec) ta: Time required for completion of acceleration (sec) Ta: Acceleration torque (Kg-m) $\bar{Ta}$ : Mean acceleration torque (Kg-m)

(2) 電動機選定上の負荷条件

最適な電動機を選ぶためには、まず負荷の条件を知る必要がある。

Fig III-8-13 に示したのは、負荷の種々の条件によって、電動機はいかにあるべきか、あるいは許される条件は何であるのかをまとめたものである。ここで示したような条件が明確になって、はじめて電動機の選定が可能となり、それに伴う制御装置の選定も可能となる。

Fig III-8-13 では、電動機システムとして直流機、誘導機及び同期機として

分類してあるが、ここでの誘導機と同期機については、商用電源による定速駆動系を考えている。同期機を用いたサイリスタモータとか、誘導機を用いた周波数制御法などを考える場合、これらはシステムとしては直流機に類似する。

Table III-8-13 Conditions for motor selection

Conditions of load		Motor system		
		DC machine	Induction machine	Synchronous machine
Starting conditions	Necessary frequency for starting		Study heat capacity of motor	
	Necessary starting torque • Moment of inertia of load • Possibility of no-load starting	Application of series motor	Application of wound-rotor type IM Study starting current and time according to the above items	
	Necessity of smooth starting	Acceleration restriction	Reactor starting, soft starter, etc.	Low frequency starting, etc.
Stop conditions	Necessity and its degree of emergency stop (quick stop)	Regeneration system, dynamic braking, etc.	Reversing-phase braking	Brake, etc.
	Necessity of precise stop position	Position control	Difficulty	
	Necessity of holding the stop position	Presence of brake		
Operating conditions	Necessity and its conditions of reverse rotation	Field switching Armature switching	Main circuit switching	
	Rating of load (Continuous, time)	Possibility of reducing frame No. for hourly rating		
	Special function	Restriction is comparatively small.	Restriction is large.	
Speed control	Constant speed or variable speed?	For variable speed	For constant speed Variable speed in conjunction with control equipment	
	Speed control range	Scope of application is large.	Study combination with control equipment.	
	Necessity of speed control	Suitable	Change by amount of slip	Synchronize with the power source frequency.
Ambient conditions, etc.	Temperature and humidity conditions	Study motor construction.		
	Necessity of explosion-proof construction	Possible, but difficult	Possible	
	Whether good atmosphere or not	Problem on brush commutator	Squirrel cage type is for improper circumstance.	Brushless exciting is possible.
	Problem on personnel for maintenance	Maintenance is important.	In the case of brushless, easy maintenance.	
	Power source condition	Problem on higher harmonics and power factor	Starting current large, Delay power factor.	Leading power factor is possible.

第(3)項以下に、電動機選定のための主な項目について記す。

(3) 負荷のトルク特性

電動機はほとんどの場合、負荷と結合された状態で零速度から始動し、所定の速度まで加速して一定速度運転に入る。負荷は固有のトルク特性を持っているので、

電動機は全速度範囲にわたって、負荷の必要とするトルク以上のトルクを発生できるものでなければならない。

一般に負荷と電動機のトルク特性が似ているほど、電動機は経済的な設計ができる。

代表的なトルク速度特性の例としては、速度にかかわらずトルクが一定な定トルク負荷、トルクが速度の1乗、2乗、3乗に比例するトルク漸増負荷、速度と必要トルクとが逆比例し、トルク×速度が一定な定出力負荷などがある。Table III-8-14は、これらの関係をまとめたものである。

Table III-8-14 Class of load and torque speed characteristic

Load characteristic		Typical load
Constant torque load	<p> <math>T = \text{Constant}</math>  <math>P \propto n</math> </p>	Gravity load, Friction load [Example] Crane, Winding machine, Conveyor, Paper machine, Mixer
Increasing torque load	<p> <math>T \propto n^2</math>  <math>P \propto n^3</math> </p>	Fluid load [Example] Blower, Pump
Constant output load	<p> <math>T \propto \frac{1}{n}</math>  <math>P = \text{Constant}</math> </p>	Special load [Example] Winder, Constant cutting machine, Log barker

一般に三相誘導電動機や、同期電動機のような定速度電動機では始動時のトルク、最大負荷がかかったときのトルク、それに同期電動機では、同期引き込み時のトルクが負荷の要求するトルク以上あるかどうかが必要となる。

(4) 負荷のGD<sup>2</sup>

負荷の慣性GD<sup>2</sup>（はずみ車効果）の大小は始動時間の大小、始動時の発熱の大小に関係し、電動機選定上重要な要素である。

負荷トルクをT<sub>L</sub> (kg・m)、電動機トルクをT<sub>M</sub> (kg・m)、負荷と電動機のは

ずみ車効果の和を  $GD^2$  (kg・m<sup>2</sup>) とすれば、

$$T_M = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dN}{dt} + T_L \quad \dots\dots(1)$$

従って始動時間は、

$$t = \int_0^{N_0} \frac{GD^2 \cdot dN}{375 (T_M - T_L)} \quad (\text{秒}) \quad \dots\dots(2)$$

ただし、 $N_0$  ; 全負荷回転数  
 となり、 $GD^2$  に比例する。 $t$  が長いと電動機が異常加熱するので、どの電動機にも負荷の許容  $GD^2$  が定めてある。逆に  $GD^2$  が大きい場合には、それに合った電動機を選定する必要がある。

なお、Fig III-8-14 に示すように、電動機の  $GD^2$  ;  $G_1 D_1^2$ 、機械の  $GD^2$  ;  $G_2 D_2^2$ 、減速比 ;  $n_1 / n_2 = n$ 、のとき電動機側に換算した  $GD^2$  は、次のようになる。

$$GD^2 = G_1 D_1^2 + \frac{1}{n^2} G_2 D_2^2 \quad \dots\dots(3)$$

産業用の負荷には減速機を使用することが多いため、上式の結果は重要である。

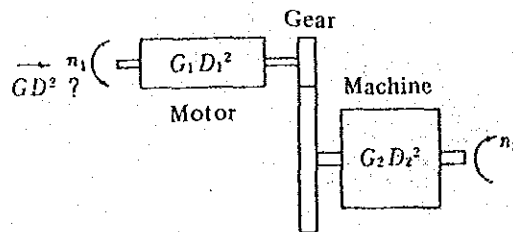


Fig. III-8-14 Conversion of flywheel effect

(5) 負荷の時間特性

電動機の使用状況には、連続使用、短時間使用、断続使用など各種の使用方法があり、このような時間的な使用責務を Duty という。

電気機器は一定の使用条件で使用された場合、許容最高温度を超えないように設計されており、これを機器の定格という。

定格には定格出力、定格回転数、定格電圧、定格電流、定格周波数などがあり、使用時間に対しては連続定格、短時間定格、反復定格などの種類がある。

A) 連続定格

24時間連続運転の場合はもちろん連続定格の電動機を選定する。また容量にもよるが、一般に2~3時間以上連続使用する場合には、価格的にほとんど差が

なくなるため、連続定格のものが採用されることが多い。

連続使用状態において電動機は、銅損、鉄損などにより内部から発熱する一方、表面からの放熱によって冷却され、両者のバランスした値で運転される。

いま毎秒の発熱量： $Q$ ，電動機と周囲温度との差（温度上昇値）： $\theta$ ，電動機の熱容量： $C$ ，熱放散係数： $\Lambda$ ，とすれば，

$$C \frac{d\theta}{dt} + \Lambda\theta = Q \quad \dots\dots\dots(3)$$

$t = 0$  で  $\theta = 0$  とすると，

$$\theta = \frac{Q}{\Lambda} \left( 1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) \quad \dots\dots\dots(4)$$

ただし， $T = \frac{C}{\Lambda}$

上式の  $T$  を熱時定数という。また(4)式で  $t = \infty$  とすれば  $\theta = \frac{Q}{\Lambda}$  となり，最終温度上昇が求まる。

Fig III-8-15 は，これをグラフにしたものである。また熱時定数は，おおよそ Table III-8-15 のようになる。

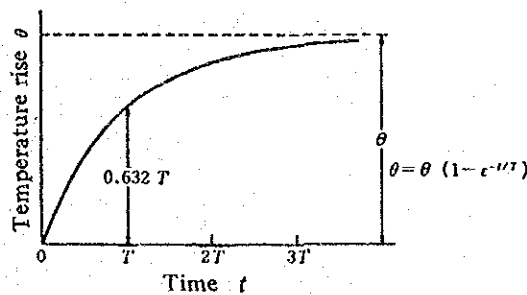


Fig. III-8-15 Temperature rise curve of motor

Table III-8-15 Example of thermal time constant

Type	Thermal time constant (minute)
Open type	20 ~ 40
Totally enclosed fan cooling type	50 ~ 150
Totally enclosed self cooling type	90 ~ 180

次に，電動機を電源から切り離して停止させるときは，(3)式において， $Q = 0$ ，また， $t = 0$  において  $\theta = \theta_0$  とおけば，

$$\theta = \theta_0 e^{-\frac{t}{T}}$$

ただし、 $T' = \frac{Q}{A'}$

$T'$  : 冷却時の熱時定数

$A'$  : 冷却時の放熱係数

$\theta_0$  : 冷却開始時の温度

となる。

他力通風電動機では、停止時も冷却風の量は変化しないから熱時定数は運転時と同じであるが、自己通風形電動機では運転時の約3倍程度になる。

#### B) 短時間定格

短時間定格には標準の時間として5分、10分、15分、30分、60分、120分などがあるので、その中から実際の負荷状況に最も近いものを選ばよ。

#### C) 反復定格

反復負荷とは、一定の負荷と休止の期間が周期的に繰り返されるような負荷をいう。この代表的なものがクレーンであり、クレーン用電動機には、%ED表示された定格の電動機が使用される（Table III-8-17 参照）。

40%EDとは、10分間に平均して4分間だけ定格容量で使用され、残りの時間は停止しているような使用状態をいう。

#### D) 二乗平均法による出力の算出

電動機の定格出力は、負荷の時間的特性から選ばれるが、負荷が不規則に変化したり、不規則な使用を行う場合には、電動機出力の決定がかなり困難となる。しかし、負荷が連続して周期的に変化する場合は簡略な出力算出法として、二乗平均法がよく使用される。

誘導電動機や、直流分巻電動機では端子電圧が一定ならば出力は近似的に負荷電流に比例する。電動機の発熱源としては、銅損と鉄損があるが、鉄損に比べて銅損はずっと大きい。また銅損は負荷電流の二乗に比例するので、結局、損失は出力の二乗にほぼ比例するといえる。

負荷電流を  $I(t)$ 、そのときの出力を  $P(t)$  とおけば、

$$\{ I(t) \}^2 R = k \{ P(t) \}^2$$

一周期に  $P_1, P_2, \dots, P_n$  の負荷がそれぞれ  $t_1, t_2, \dots, t_n$  時間だけかかったとすると、このときの等価負荷を  $P_a$  として損失が等しいとおけば、

$$k \{ P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + \dots + P_n^2 t_n \} = k P_a^2 \cdot T$$

ただし、 $T = t_1 + t_2 + \dots + t_n$

$$\text{ゆえに, } P_a = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + \dots + P_n^2 t_n}{T}} \dots\dots\dots (6)$$

この  $P_a$  が、周期的に変動する負荷  $P$  の損失と同一の損失を生じる、等価な連続負荷である。

また断続負荷の場合は、始動がひんぱんであるので始動、停止時の発熱、冷却も考慮して等価負荷を決定する必要がある。

例えば、Fig III-8-16 のような、断続負荷に連続定格の電動機を使用する場合の等価出力は、次のようにして求める。

$$P_a = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + P_3 t_3}{t_1 \alpha_1 + t_2 \alpha_2 + t_3 \alpha_3 + t_4 \alpha_4}} \dots\dots\dots (7)$$

ただし、 $\alpha$  は冷却係数であり、おおよそ Table III-8-16 のような値をとる。

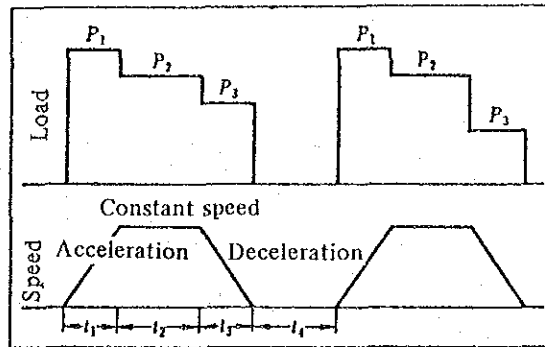


Fig. III-8-16 Example of periodic load

また、

$$T = t_1 \alpha_1 + t_2 \alpha_2 + t_3 \alpha_3 + t_4 \alpha_4$$

の  $T$  は、冷却係数を考慮した等価周期である。

Table III-8-16 Example of cooling coefficient values

Type of motor	During stop	During acceleration	During operation	During deceleration
Open type AC motor	0.2	0.5	1	0.5
Enclosed type AC motor	0.3	0.6	1	0.6
Totally enclosed fan cooling type AC motor	0.5	0.75	1	0.75
Separately-cooling AC motor	1	1	1	1

E) 電動機容量の決定

電動機の定格出力を算定する場合、最大負荷で決めている場合が意外と多いが、前項で述べたように、等価負荷を算定して決定すべきである。

例えば、Fig III-8-17のような連続運転において、

$$P_1 = 100 \text{ kW} \quad t_1 = 10 \text{ 分}$$

$$P_2 = 50 \text{ kW} \quad t_2 = 15 \text{ 分}$$

$$P_3 = 80 \text{ kW} \quad t_3 = 10 \text{ 分}$$

$$P_4 = 50 \text{ kW} \quad t_4 = 20 \text{ 分}$$

とすると、(6)式から所要の電動機出力  $P$  は、

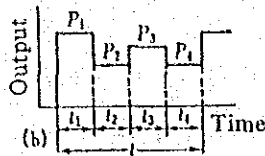


Fig. III-8-17

$$P = \sqrt{\frac{100^2 \times 10 + 50^2 \times 15 + 80^2 \times 10 + 50^2 \times 20}{10 + 15 + 10 + 20}} = 67.6 \text{ kW} \approx 70 \text{ kW}$$

となる。従って電動機としては 75 kW を選定すればよい。この場合最大負荷では  $\frac{100}{75} = 1.33$ 。すなわち、133%の過負荷となるが、電動機の最大トルクは200%以上あり問題はない。これを最大出力 100 kW で電動機を選定した場合は、省エネルギーにとって大きなマイナス要因となる。

また Fig III-8-18 のような反復使用のクレーン電動機で、

$$P_1 = 50 \text{ kW} \quad 1.5 \text{ 分}$$

$$P_2 = 30 \text{ kW} \quad 1.5 \text{ 分}$$

$$t_1 = 1.5 + 1.5 = 3 \text{ 分} \quad t_2 = 7 \text{ 分}$$

の場合、運転中の 2 乗平均負荷は、

$$P = \sqrt{\frac{50^2 \times 1.5 + 30^2 \times 1.5}{3}} = 39.3 \text{ kW} \approx 40 \text{ kW}$$

従って電動機としては、Table III-8-17 の枠番号適用表から選んで 40% ED、45 kW のものを採用すればよい。

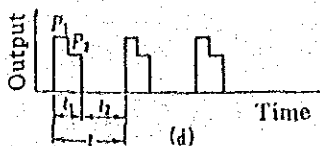


Fig. III-8-18



Table III-8-17 Frame number application table

Frame number	Load time factor	15%ED	25%ED	40%ED	60%ED	100%ED	Number of pole
	Output	kW	kW	kW	kW	kW	
132 M	3	2.5	2.2	1.8	1.5	6	
	5	4	3.7	3	2.8	6	
160 M	7.5	6.3	5.5	4.5	4	6	
	10	8.5	7.5	6.3	5.5	6	
160 L	15	13	11	9	7.5	6	
180 L	20	17	15	13	11	6	
200 L	30	25	22	18.5	15	6	
225 M	40	33	30	25	22	6	
250 M	50	40	37	30	25	6	
	63	50	45	37	33	6	
280 M	75	63	55	45	37	8	
315 M	100	85	75	63	50	8	
	125	100	90	75	63	8	
355 L	150	125	110	90	75	10	
	185	150	132	110	90	10	
400 L	220	185	160	132	110	10	
	280	220	220	160	132	10	

(6) 電動機の種類と効率、力率

代表的な直流電動機，誘導電動機及び同期電動機の効率，力率について，一番多く使用されている誘導電動機と比較してみることにする。

A) 直流機と誘導機

まず，Fig III-8-19は，直流電動機と誘導電動機との効率の比較を示したものである。図から明らかなように，直流電動機の効率は誘導電動機に比べて，100 kW以下の小容量機で5～8%程度低く，300～1000 kWで2～3%程度，低い。この直流電動機は他力通風形であるため，本来は冷却用の送風機の損失を含めて評価しなければならないが，この値が省略してあるので，実際は更に効率が低下する傾向がある。

直流電動機は，励磁の方式によって種々の特性が簡単に得られ，負荷の特性に適合した運転ができると共に，回転速度又はトルクを容易に制御できる特徴がある。反面，効率が誘導電動機，同期電動機などの交流電動機に比較して低いこと，

整流子・ブラシによる機械的集電機構を有するので保守面、耐環境性に難点があること、更に、Fig III-8-21 に示すように、出力限界が交流機に比較し、2桁以上も低く、大容量、超高速用途には適さないという欠点がある。

B) 同期機と誘導機

同期機と誘導機の効率の比較を Fig III-8-22 に示す。

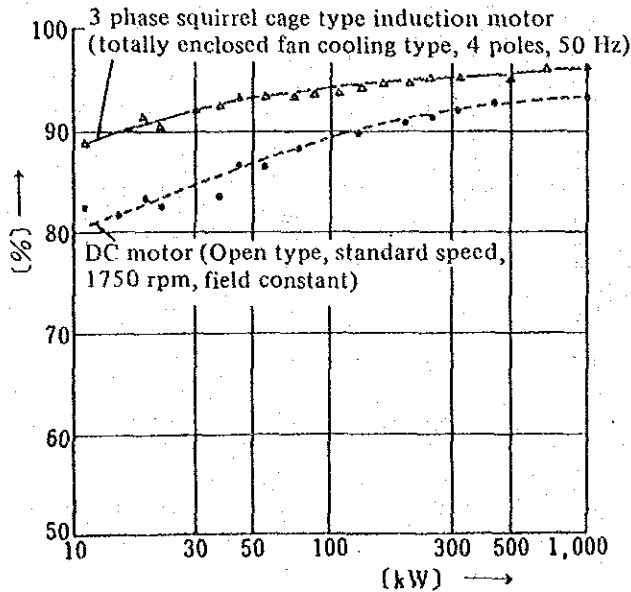


Fig. III-8-19  
Comparative example of efficiency for induction and DC motors

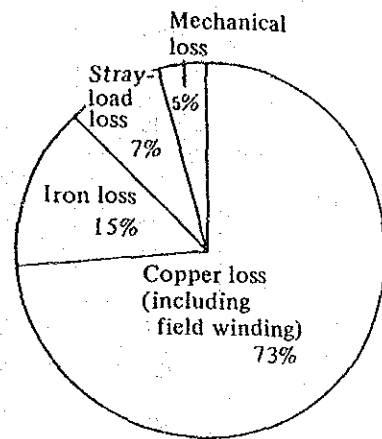


Fig. III-8-20  
Analysis example of DC motor loss

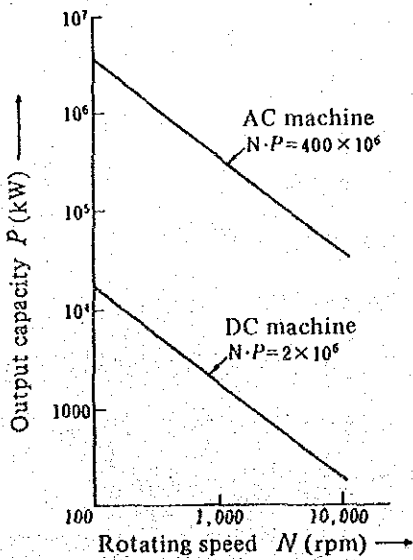


Fig. III-8-21  
Marginal output of motor

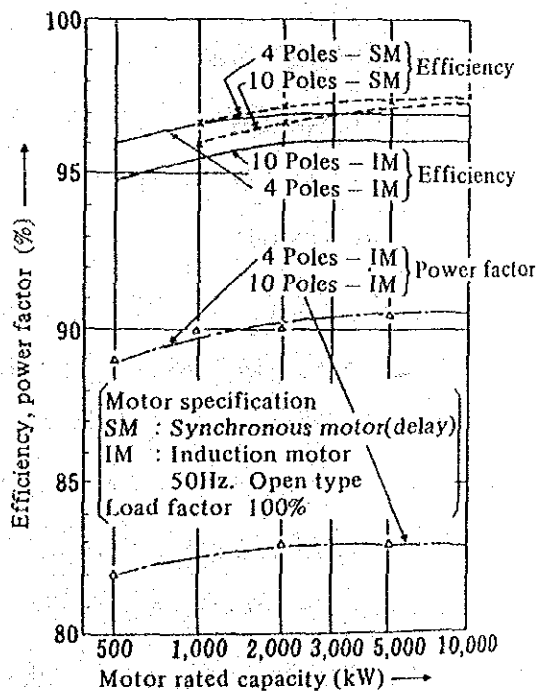


Fig. III-8-22  
Comparative example of efficiency and power factor between synchronous and induction motors

一般に同期電動機の効率は、誘導電動機より良く、しかもその傾向は極数の大きい低速機において顕著である。例えば 10 MW クラスの場合、4 極同期電動機と誘導電動機では効率が約 0.5 % 程度の差に対し、10 極の場合は同期電動機の効率が約 1 ~ 1.5 % 程度も高い例がある。

また、同期電動機の最大の特徴は力率を自由に選定できることで、力率 1.0 あるいは進み力率にすることも可能であり、この点が誘導電動機とも最も異なる点である。しかも、同期電動機を界磁制御により進み運転にして系統の力率一定例を行ったり、又は端子電圧一定制御を行うことによって、系統の電圧変動を抑制することも可能である。図から明らかなように、誘導電動機は大容量機でも極数の大きい低速機では力率が相当低下するので、この面でも同期電動機に比して不利である。

しかし、同期電動機は界磁の励磁電源装置を含めてコスト的に高価となるので、一般的には次の点を目安に選定を検討すべきである。

- a. 10 MW 以上は、効率の面で同期電動機を採用することを検討する。
- b. 10 MW 以下でも極数の大きい低速機では、同期電動機の採用を検討する。
- c. 系統の力率制御、電圧制御を行う必要がある場合は同期電動機の採用を検討する。ただし、電動機の容量が系統の無効電力 (Var) を供給できる程度の大きい場合に限る。
- d. 一般には 5 MW 以下は、始動及び電源の構成の簡単な誘導電動機が有効である。
- e. 一般に突極形の同期電動機は、誘導電動機に比較してあまり大きな始動トルクをとれないので、慣性モーメントの大きい負荷、あるいはトルクの大きい負荷では始動が困難であるので注意が必要である。

### C) 誘導電動機とその極数

Fig III-8-23 に全閉外扇形の三相かご形誘導電動機を例に出力容量をパラメータとして、極数と効率及び力率の関係を示した。図において、効率は極数に対しあまり大きな差は見られない。これは、各出力容量において、極数が変わっても効率があまり変化しないように設計が図られているためである。

ただし、力率については励磁電流が極数に比例するので、極数が大きくなるにつれて著しく悪化する。その傾向は負荷電流成分に比べて、励磁電流成分の大きい小容量機ほど顕著である。

電動機の極数は、所望する相手機械の回転数により選定されるが、一般に同一出力の電動機に対し、極数が大きくなるにつれて容積、重量が大きくなる。

Fig III-8-24 は4極電動機の重量を1としたときの極数と電動機の重量比の関係の1例を表した図であり、重量は素材の使用量、素材加工の費用と密接な関係があるから、コストの傾向を表すと考えてよい。従って、極数が大きくなると一般にコストは高くなるとみてよいから、理由なく極数を大きくすることは、初期投資額が大きくなり不経済である。

また、電動機は相手負荷の機械に直結される場合はまれであり、この間に通常、変速機が介在することが多い。

変速機に関連で4極機が選定できれば、コスト及び力率の面で問題はないが、極数の大きい電動機を選定する場合、変速機を含めた駆動系の効率メリットと電動機の投資金額増の兼ね合いで決定すべきである。

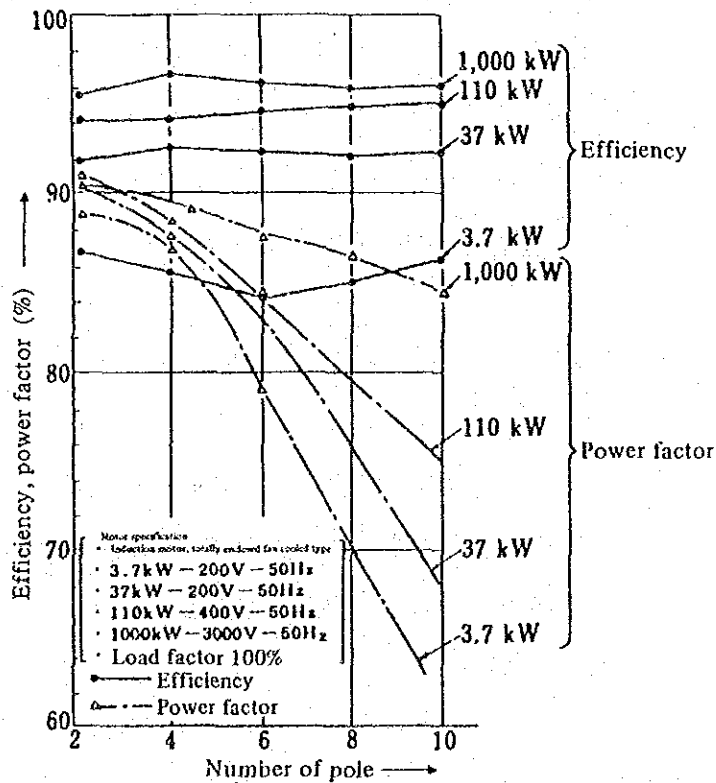


Fig. III-8-23 Relation between number of pole, efficiency and power factor of induction motors

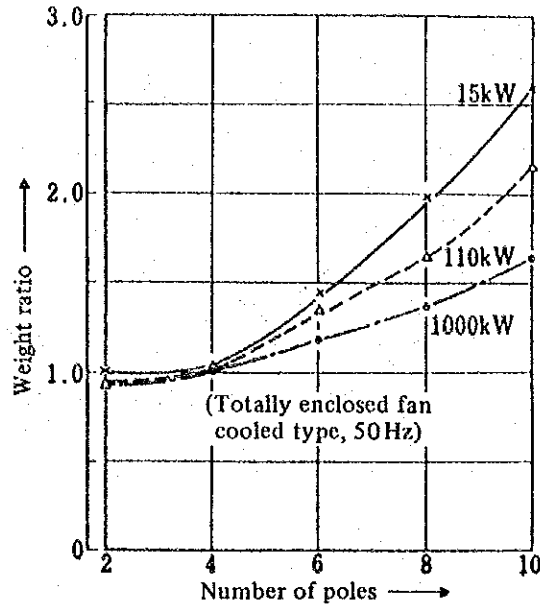


Fig. III-8-24  
Relation between number of poles and weight of induction motor

(7) 電動機の電圧の選定

電動機の電圧は、その効率及び経済性と深い関係があるので配電電圧を決定するのは、省エネルギーにとって重要な要素である。小容量の電動機にことさら高い定格電圧を選んだり、あるいは逆に大容量機に低い電圧を選定することは好ましくない。

Fig III-8-25は、電動機の電圧別の容量範囲を技術上の問題と経済性を考慮して表したものである。この図で白枠で示した範囲は比較的経済的な範囲で、かつ製造技術上問題点の少ない範囲であり、斜線で示した範囲はある程度経済性を無視して製作すれば、技術的には製造可能な範囲である。

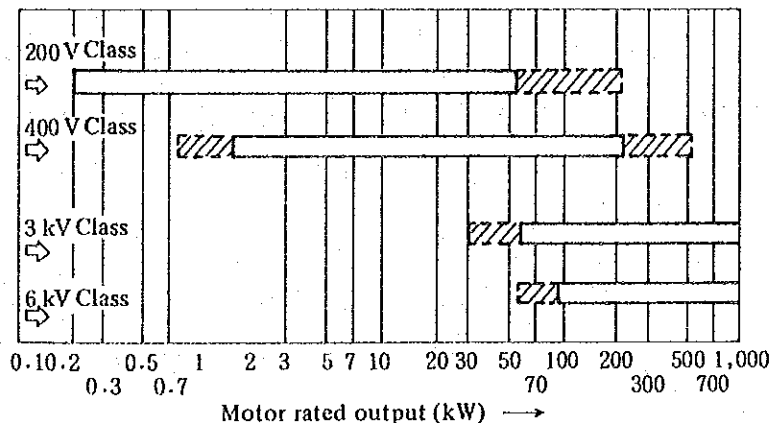


Fig. III-8-25 Optimum output range of motor each voltage

(8) 高効率電動機の採用

生産設備で広範囲に使われている低圧かご形誘導電動機で、高級鋼板の採用及び設計の適正化により、枠番及び外形寸法を現行の標準機のままで鉄損及び銅損を20～30%減少させた高効率電動機が近年市販されている。多少初期投資は高くなるが、長時間運転する電動機には、採用を検討すべきであろう。

Fig III-8-26 及び Fig III-8-27 に現在、生産されている高効率機と標準形機の効率の比較を示す。Fig III-8-27 で注目すべき点は、高効率機は軽負荷時の効率の改善が著しいということである。

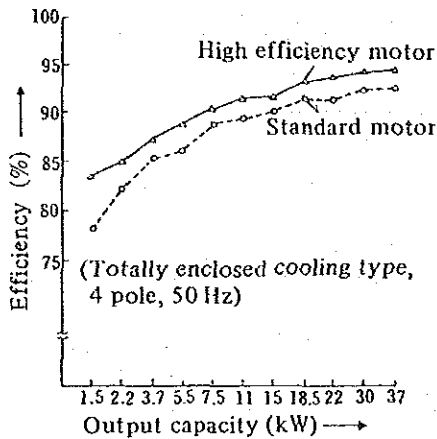


Fig. III-8-26  
Efficiency comparison of 3 phase squirrel cage type induction motor

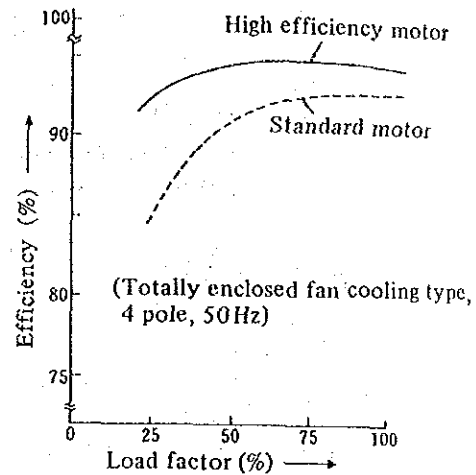


Fig. III-8-27  
Efficiency comparison of 3 phase squirrel cage type induction motor

8.3.2 既設設備の小幅な改造によって省エネルギーを図る場合

(1) 誘導電動機と電圧管理

誘導電動機は取り扱いが簡単でコストも安いことから、最も多く使用されているが、一方では、電源電圧の影響を最も大きく受ける電動機であるため注意が必要である。

Fig III-8-28 は、比較的容量の小さい三相誘導電動機の損失の1例を示したものである。この図から明らかなように、損失の大部分は銅損と鉄損で全体の86%を占めている。従って電源電圧の変動の誘導電動機に対する影響も、この二つを調べることで判明する。

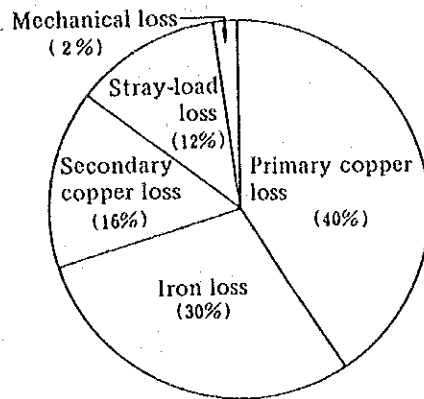


Fig. III-8-28  
Loss analysis example of standard 3 phase induction motor

さて銅損は、誘導電動機の固定子巻線（1次巻線）と回転子（2次巻線）に電流が流れることにより発生する抵抗損で、負荷電流の2乗に比例するから負荷率の依存性の強い損失成分である。

$$W_c = 3 ( r_1 + r_2' ) I_2'^2 \text{ [W]} \dots\dots\dots(8)$$

$W_c$  : 銅損

$r_1$  : 毎相の1次巻線の抵抗 [Ω]

$r_2$  : 毎相の2次巻線の抵抗（1次損算値）[Ω]

$I_2$  : 負荷電流 [A]

電動機が同期速度近辺の定格速度で運転されている時の2次電流は、誘導電動機の基本式から、

$$I_2 \doteq \frac{w_0 T}{3 V_1} \text{ (A)} \dots\dots\dots(9)$$

である。ただし、 $w_0$  : 同期角速度

$V_1$  : 電源電圧

$T$  : 負荷トルク

(8)式と(9)式から、電源電圧と銅損の関係は

$$W_c \doteq ( r_1 + r_2' ) \frac{w_0^2 T^2}{3 V_1^2} \text{ [W]} \dots\dots\dots(10)$$

すなわち、負荷トルクが電源電圧の変動の前と後で変化しないとすると、銅損は電圧の2乗に反比例することとなる。

一方、鉄損 $W_i$ は、回転磁界により鉄心中の磁束が変化するとき発生する損失で、過電流損 $W_c$ とヒステリシス損失 $W_h$ とからなる。渦電流損失は、鉄心の鉄板の厚

み  $d$  の 2 乗、及び磁束密度  $B$  の 2 乗に比例し、ヒステリシス損失はスタインメッツの研究によれば、周波数  $f$  に比例し磁束密度の 1.6 乗に比例するといわれている。しかし、最近の鉄板は珪素銅板が使用されるので、相当高い磁束密度が取られるから、ヒステリシス損失も磁束密度の 2 乗に比例するとみるのが实际的である。

ここで、 $B \cdot f$  は電圧に比例するから、鉄損  $W_i$  は、

$$W_i = W_e + W_h = k_1 (d f B)^2 + k_2 f B^2 = V_1^2 \left( k'_1 + \frac{k_2}{f} \right) [W] \dots\dots (10)$$

$k_1, k'_1$  : 渦電流損を表す定数

$k_2, k'_2$  : ヒステリシス損を表す定数

となる。

電動機の損失の大部分が鉄損と銅損であることから、仮に全損失を鉄損  $W_i$  と銅損  $W_c$  の和とすると全損失  $W$  は、式(10)と式(9)から次式となる。

$$W = \left( k'_1 + \frac{k'_2}{f} \right) V_1^2 + (r_1 + r'_2) \frac{\omega_0^2 T^2}{3 V_1^2} [W] \dots\dots (11)$$

全損失  $W$  が最小となる電源の電圧  $V$  は、式(11)を  $dW/dV_1 = 0$  の条件で求められ次式となる。

$$V = \sqrt[4]{\frac{(r_1 + r'_2) \omega_0^2}{3 \left( k'_1 + \frac{k'_2}{f} \right)}} \cdot \sqrt{T} [V] \dots\dots (12)$$

上式から、損失最小となる電源電圧は  $\sqrt{T}$  に比例するから、負荷率が低くなるにつれて低下する。

Fig III-8-29 は、電源電圧に対する銅損と鉄損の特性の概念図を表したものである。トルクは負荷の反抗トルク  $T_1$  と釣り合っているから負荷率とみてよい。従って、銅損曲線  $W_c$  は負荷率と共に上昇し、鉄損は負荷率に無関係な値となる。損失最小点は、鉄損曲線  $W_i$  と銅損曲線  $W_c$  の交点であるから、負荷率が大きい場合は電源電圧を上昇した点になり、逆に負荷率が小さい場合は電圧を低下させた点となる。

Fig III-8-30 は、実際の電動機で電源電圧を変化させた場合の効率曲線の例である。図に示すように、電圧変動時の効率は負荷率によって異なった傾向を示す。負荷率が高い場合は、定格電圧で最高の効率を示し、逆に負荷率が低い場合は電圧が上昇するにつれて効率が低下する。

Fig III-8-31 は、電源電圧が変動した場合の誘導電動機の力率変化を示した



ものである。誘導電動機の励磁電流は電源電圧に比例するので、電圧が低下するほど力率は上昇する。

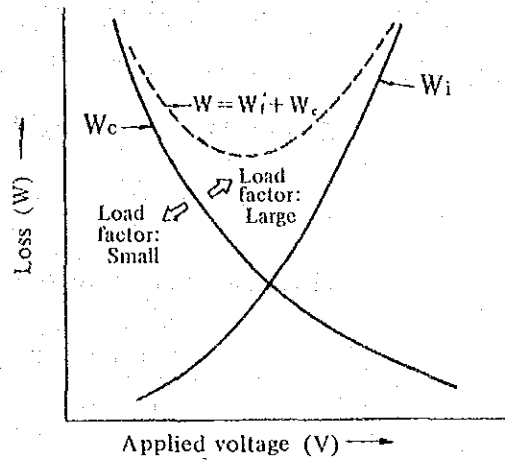


Fig. III-8-29 Tendency of loss against applied voltage

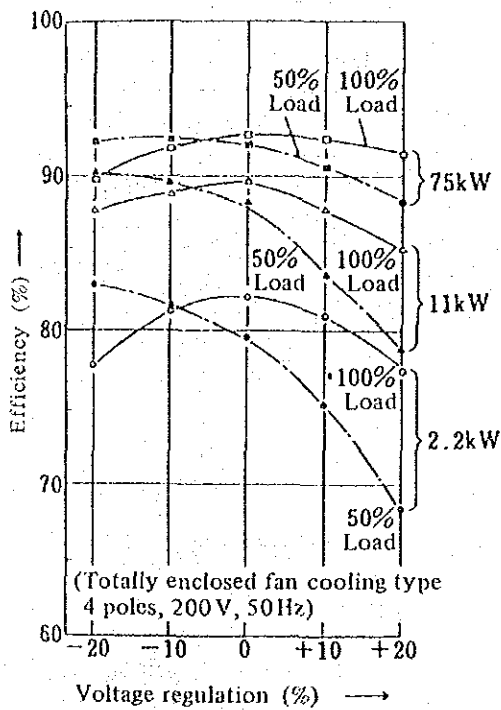


Fig. III-8-30 Example of efficiency during voltage fluctuation of induction motor

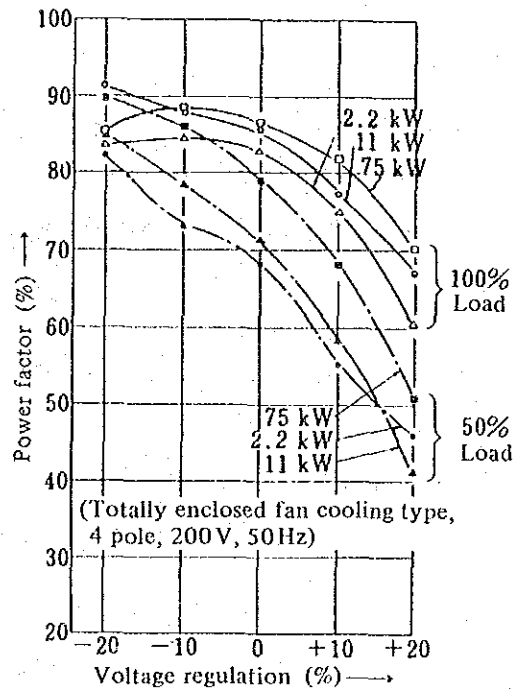


Fig. III-8-31 Example of power factor during voltage fluctuation of induction motor

Table III-8-18 は、いままで述べたことを一覧表にまとめたものである。

以上、電源電圧の変動時の効率及び力率に着目して述べてきたが、実際に現場で運転されている電動機に適用するときは、次の点を併せて検討すべきである。

a: 電源電圧を下げる場合の検討

電源電圧を定格電圧より下げて運転する場合は、Table III-8-18 に示すと

おり、始動トルク、最大トルクも電圧の2乗で減少するので、始動時の加速トルク及びピーク負荷の値をチェックする必要がある。

負荷電流は全損失が減少しても、電圧に反比例して増加するから、電動機の銅損が増加して巻線の温度上昇、配電線の線路損失の増加等があるので、注意が必要である。このことから、電源電圧の下限は電動機の定格電流を超えない範囲で決定すべきである。

Table III-8-18 Effect of voltage fluctuation on induction machine

	Voltage fluctuation			
	90% Voltage	Proportional relation	110% Voltage	
Starting torque Stalling torque	-19%	$V^2$	+21%	
Synchronous speed	Remain unchanged	Constant	Remain unchanged	
% slip	+23%	$1/V^2$	-17%	
Full-load speed	-1.5%	-	+1%	
Efficiency	Full load ¾ Load ½ Load	-2% Actually no change +1 ~ 2%	- - -	Slightly increased Actually no change -1 ~ 2%
Power factor	Full load ¾ Load ½ Load	+1% +2 ~ 3% +4 ~ 5%	- - -	-3% -4% -5 ~ 6%
Full-load current		11%	-	-7%
Starting current		-10 ~ 12%	$V$	+10 ~ 12%
Full-load temperature rise		+6 ~ 7°C	-	-1 ~ 2°C
Magnetic noise		Slightly decrease	-	Slightly increase

b. 電源電圧を上げる場合の検討

一方電源電圧を定格電圧より上げて運転すると、磁束の飽和により励磁電流が著しく増大し、力率悪化、磁気騒音の異常発生と鉄損の増加による鉄心の異常加熱が発生するなどの問題がある。また電動機の実出力トルクも電圧の2乗で増加するので、過大トルクで機械が壊れないかチェックする必要がある。

c. 設備全体の検討

通常、電動機は同一配電統に多数接続し運転され、しかも個々の電動機は同じ負

荷条件で運転されていることはまれである。ある電動機は定格負荷近辺で運転されており、他の電動機は50%以下の負荷で運転されている場合も有り得る。このような状態では、一義的に電源電圧を決定することはできないので、設備全体の検討が必要である。

- ① 軽負荷で運転されている電動機が圧倒的に多い場合は、配電電圧を下げて、数の少ない重負荷の電動機を1ランク上の容量に取り替える。この場合、遊休電動機があればそれを適用するか、又は設備相互間での入れ替えを検討する。
- ② 重負荷で運転されている電動機が圧倒的に多い場合は、配電電圧は電動機の定格電圧値を保ち、数の少ない軽負荷電動機の出力容量を1ランク下げる。この場合も、遊休電動機の適用、設備相互間の入れ替えを検討する。
- ③ 大容量機が重負荷で運転されていて、他の小容量機が軽負荷で運転されている場合は、大容量機の配電系統を別に分けて、軽負荷電動機群の電源電圧を下げる。

以上の他に、いろいろの組み合わせが考えられるので、ケースバイケースで検討する必要がある。いずれにしても、取り替えの費用、及び一部の電動機の新設を伴う場合は、その投資額と効率改善による省電力料金との兼ね合いで決定すべきである。

なお、電圧管理の面でいま一つ気をつけねばならないのは、電圧の不平衡の問題である。

3相交流電動機に不平衡電圧が加えられると、零相分電流、正相分電流及び逆相分電流の不平衡電流が流れる。このうち、零相分電流はその合成起磁力が零となるので、2次巻線には誘起電圧を発生せず、このためトルクも発生しないが、逆相分による磁界は正相分電流による磁界と反対の方向に同期速度で回転する。このため2次巻線には $\omega_0(2-S)$ の周波数を持つ電圧を誘起し、電流が流れてトルクを発生する。このトルクを逆相分トルクという。

この逆相分トルクは、電動機を逆方向に回転させようとするので、銅損が著しく増加する。この結果、電動機の効率が低下する。

このことから、電源電圧の不平衡率は極力小さくする必要があり、1~2%以内で管理すべきである。不平衡電圧は3相交流の電源で、単相負荷をとるため各相の電流がアンバランスとなり、各相の電圧降下が異なるため発生する。このため、単相負荷は各相がバランスするように、うまく電氣的に配置することが大切である。

(2) 空転の防止と起動損失の低減

電動機は必ず相手機械と連絡されているので、空運転で消費される電力は電動機単体の場合の約2～3倍になる。従って、不要時電動機を停止することは省電力のため、重要なことである。またこの場合、電動機の冷却ファンや直流機の界磁なども止めるのが望ましい。この際注意すべきことは、以下のとおりである。

a. 多ひん度始動による電動機の劣化、出力低下があまり問題とされない範囲に限ること。

100 kW以上の大容量機や、大きいGD<sup>2</sup>を負荷に持つ(例えば、送風機等)電動機の場合は、電動機のメーカーに相談した方がよい。

b. 始動時の電力量が、空転時の電力量を上まわらないこと。

一般に電動機を再始動する際には、始動方法によっては、相当大きな損失を発生するので注意が必要である。以下、誘導電動機の起動損失とその低減対策について述べる。

① 三相誘導電動機の起動損失

滑りS<sub>1</sub>の状態からS<sub>2</sub>の状態まで加速するときの電動機の内部損失W<sub>ℓ</sub>は、一般に次式で表わされる。

$$W_{\ell} = \frac{1}{2} \cdot \frac{GD^2}{4} \omega_0^2 (S_1^2 - S_2^2) \left(1 + \frac{r_1}{r_2'}\right) \frac{T_m}{T_m - T_e} \dots\dots\dots (14)$$

停止の状態から同期速度に達するまでの損失はS<sub>1</sub>=1, S<sub>2</sub>=0として、

$$W_{\ell} = \frac{1}{2} \cdot \frac{GD^2}{4} \omega_0^2 \left(1 + \frac{r_1}{r_2'}\right) \frac{T_m}{T_m - T_{\ell}} \dots\dots\dots (15)$$

r<sub>1</sub> : 誘導電動機の1次抵抗(Ω)

r<sub>2</sub>' : 誘導電動機の2次抵抗(1次側換算値)(Ω)

T<sub>m</sub> : 誘導電動機の加速トルク(平均値)(N-m)

T<sub>ℓ</sub> : 加速中の負荷の平均トルク(N-m)

ω<sub>0</sub> : 同期角速度

② 起動損失の低減法

(14)式から分かることは、次のようにすれば起動損失が低減するということがある。

- ・ 電動機の発生トルクを大きくして、始動する。
- ・ 運転効率の面からみた場合は、電動機の発生トルクをできるだけ大きくして

始動することが望ましい。始動電流を抑制するために減電圧始動，あるいは減電流始動を行うと，発生トルクが低下してかえって損失が増大する。

従って，電源の事情の許す限り直入起動を行うことが望ましい。

- 始動時 2 次抵抗を大きくする。

巻線形誘導電動機を使用して，始動時に大きな外部抵抗を挿入すると，外部抵抗を含む電動機全体の損失が大幅に低減されるだけでなく，回転子側の発熱及び始動電流を抑制することができる。

- 同期角速度  $\omega_0$  を変化させる。

誘導電動機の同期角速度  $\omega_0$  を電動機の上昇と共に変化させると，始動時の損失を大幅に低減できる。

この  $\omega_0$  を変えるには，極数変換電動機を使用して同期角速度をステップ状に切り換える方法と，電源の周波数を速度と共に連続的に変化させる方法がある。

以下，2 段の極数変換誘導電動機を例にとり，これを説明する。まず最初に低速側巻線で始動して低速巻線（極数： $P_L$ ）の同期角速度  $\omega_{OL}$  まで加速し，次に高速巻線側に切り換えて高速巻線（極数： $P_H$ ）同期角速度  $\omega_{OH}$  まで加速する。この間の電動機的全損失  $W_{2\ell}$  を求めてみる。簡単のため(4)式において， $r_i = 0^2$ ， $T_\ell = 0$  とする。

$$W_{2\ell} = \frac{1}{2} \cdot \frac{GD^2}{4} \omega_{OL}^2 (1^2 - 0^2) + \frac{1}{2} \cdot \frac{GD^2}{4} \omega_{OH}^2 \left\{ \left( \frac{\omega_{OH} - \omega_{OL}}{\omega_{OH}} \right)^2 - 0^2 \right\} \quad [J] \quad \dots\dots\dots (16)$$

となる。ここで，極数比  $n = \frac{P_L}{P_H} = \frac{\omega_{OH}}{\omega_{OL}}$  とすると，

$$W_{2\ell} = \frac{1}{2} \cdot \frac{GD^2}{4} \cdot \omega_{OH}^2 \left( 1 + \frac{2}{n^2} - \frac{2}{n} \right) \quad [J] \quad \dots\dots\dots (17)$$

となる。初めから高速巻線のみで始動した時の損失に対する低減率を  $K_a$  とすると， $K_a$  は次式で表わされる。

$$K_a = \frac{\text{極数変換で始動した時の損失}}{\text{高速巻線でのみ始動した時の損失}} = 1 + \frac{2}{n^2} - \frac{2}{n} \quad \dots\dots\dots (18)$$

上式で損失が最小となる極数比は， $dk_a/dn = 0$  の条件で求められ， $n = 2$  の時に損失が  $1/2$  となる。Fig III-8-32 に  $K_a$  と  $n$  の関係を示す。更に極数切り換えの段数を多くすれば，損失は更に低減する。

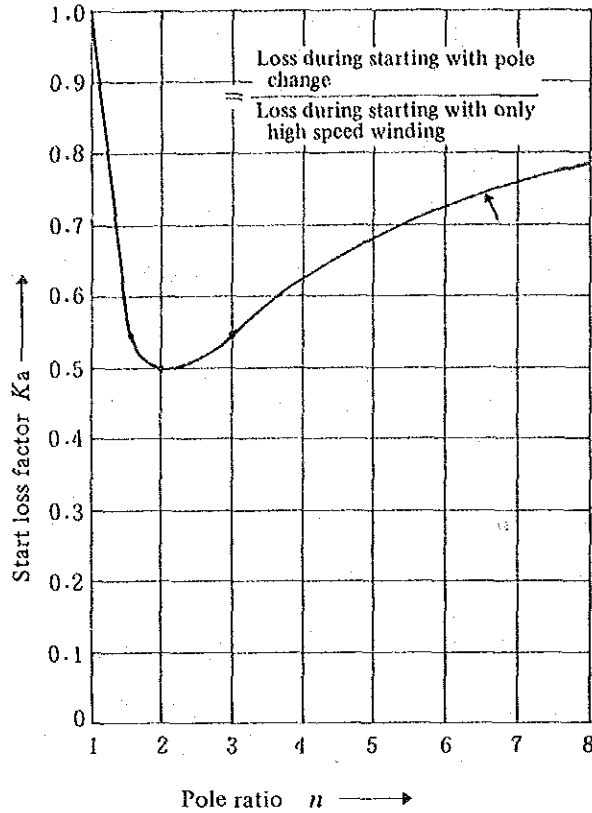


Fig. III-8-32 Loss during starting with pole change

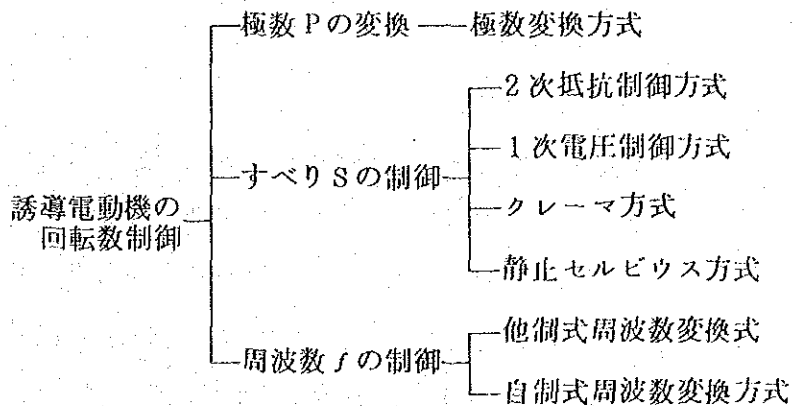
(3) 誘導電動機の回転数制御

誘導電動機の回転数制御は、ポンプ、ファン、ブロー及びクレーン用電動機の省エネルギーに広く採用されている。一般に誘導電動機の回転数は次式で示される。

$$N = \frac{120 f}{P} (1 - S) \quad \dots\dots\dots (19)$$

上式で明らかなように、誘導電動機の回転数制御は、極数  $P$  を変えるか、すべり  $S$  を変えるか、電源周波数  $f$  を変えるかのいずれかの要素により行われる。

この制御要素別に分類した回転数制御方式を記せば次のようになる。



このうち、既設設備の改造という観点からみた場合、実現性のあるのは、1次周波数制御方式(VVVF)であるので、これについて説明しておく。

1次周波数制御方式は、周波数変換器(インバータ)を使用して電動機の1次電圧と周波数を同時に制御し、同期速度を変える方式である。

この制御方式は大別すると他制式と自制式があり、このうち他制式は、電動機の回転速度、トルク等の状態変化に無関係に設定器の周波数指令に基づいて変換器の周波数が決定される開ループ制御をいう。一方、自制式は電動機の状態変化に応じて、変換器の周波数が規制される閉ループ制御をいう。

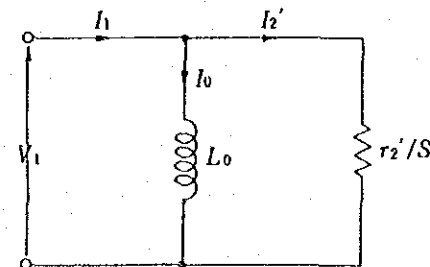
他制式には、電動機の1次電圧 $V$ と周波数 $f$ の比( $V/f$ )を一定とする $V/f$ 一定制御がある。自制式にはすべり周波数制御、あるいはベクトル制御がある。

誘導電動機の1次周波数制御時の特性式は、次の点に注目すれば近似式と簡単な等価回路が得られる。

励磁回路は励磁インダクタンス $L_0$ で代表する。

又この方式では、全回転速度制御領域で同期速度近辺で運転されているから、 $S \approx 0$ の条件で特性式を近似する。

この条件で作成した簡易等価回路を Fig III-8-33 に示す。



Equivalent circuit during operation near synchronous speed.

Fig. III-8-33 Simple equivalent circuit of induction motor at slip  $\approx 0$

以上のことから、特性式の近似式は次式で表すことができる。

$$I_1 = I_0 + I_2' \quad [\text{A}] \quad \dots\dots\dots (20)$$

$$I_0 = \frac{V_1}{\omega_0 L} \quad [\text{A}] \quad \dots\dots\dots (21)$$

$$I_2' = \frac{S V_1}{\gamma_2'} = \frac{S \omega_0}{\gamma_2'} \frac{V_1}{\omega_0} \quad [\text{A}] \quad \dots\dots\dots (22)$$

$$T = \frac{3 S V_1^2}{\omega_0 \gamma_2'} = 3 \frac{S \omega_0}{\gamma_2'} \left( \frac{V_1}{\omega_0} \right)^2 \quad [\text{N} \cdot \text{m}/\text{rad}] \quad \dots\dots\dots (23)$$

一方、磁束  $\phi$  は電圧係数を  $K_v$  とすると、

$$\phi = \frac{V_1}{K_v \omega_0} = K_1 I_0 \quad [Wb] \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 $K_1 = \frac{L_0}{K_v}$

の関係となる。

上式の特徴式から電圧  $V_1$  と周波数  $\omega_0$  の比を一定とする制御 ( $V/f$ 一定制御) を行うと、電動機の発生トルク、電流  $I_0, I_2$  及び磁束  $\phi$  は共にすべり周波数  $S\omega_0$  一定の基で一定となる。Fig III-8-34 はこの時のトルク速度特性曲線を示したものであり、最大トルク  $T_{max}$  は速度  $\omega_0$  に対し一定となる。

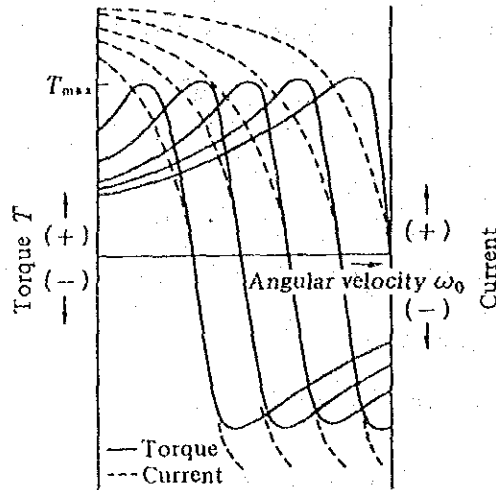


Fig. III-8-34 Torque-speed characteristic of  $E_2/\omega_0$  constant control

また、このVVVF方式には大別して電圧制御形と電流制御形の2方式がある。両方式にはそれぞれ特徴があり、その詳細な比較は専門書に譲るが、構成図を Fig III-8-35 に示しておく。

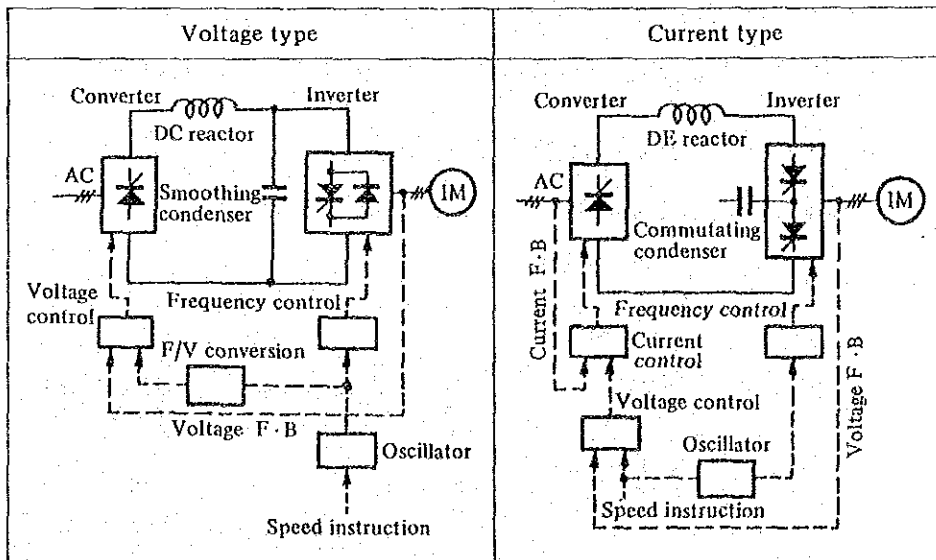


Fig. III-8-35 Comparative diagram of VVVF



なお、このVVVF方式を起主機用に使った場合、在来の巻線形電動機の抵抗制御方式と比較すると、だいたい次のような利点がある。

- a. 2次抵抗器の熱損失が無くなるので、省エネルギー効果が大きい。
- b. スリップリングや、ブラシがなくなるので、保全が楽である。
- c. 速度制御装置を付加することにより、精度の高い制御が可能となる。
- d. 操作性が非常によくなる。特に低速における寸動運転などの操作性がよくなる。

(4) その他の対策

現在の設備能力の診断を行ってみて、設備能力が生産規模に比べ過大であるときに、回転機や設備出力を落すことも省エネルギーとして重要である。例えば、電動機はそのまま使用して動力伝達機構（プーリの径、あるいはギヤの変速比等）を変えることにより、負荷を動かす動力を低減することができる。また予備電動機がある場合には、より小形の電動機、あるいは回転数の低い電動機に取り替えることによっても省エネルギーを図ることができる。

8.4 コンプレッサ

空気圧システムの省エネルギーの対策は、空気圧縮機、配管、空気圧使用機器での対策に大別される。

一般に圧縮機の使用動力は次式で与えられる。

$$L = \frac{(a+1)K}{K-1} \cdot \frac{P_s Q_s}{6120} \cdot \left[ \left( \frac{P_d}{P_s} \right)^{\frac{K-1}{K(a+1)}} - 1 \right] \cdot \frac{\phi}{\eta_c \eta_t} \dots\dots\dots(1)$$

上式において、 $L$ 、 $P_s$ 、 $P_d$ 、 $Q_s$ 、 $a$ 、 $K$ 、 $\eta_c$ 、 $\eta_t$  及び  $\phi$  は、それぞれ次の値を表わすものとする。

- $L$  所要動力（単位 キロワット）
- $P_s$  吸入空気の絶対圧力（単位 重量キログラム毎平方メートル）
- $P_d$  吐出空気の絶対圧力（単位 重量キログラム毎平方メートル）
- $Q_s$  吸入状態に換算した単位時間当たりの空気量（単位 立方メートル毎分）
- $a$  中間冷却器の数
- $K$  空気の断熱指数
- $\eta_c$  圧縮機の全断熱効率
- $\eta_t$  伝達効率
- $\phi$  余裕率

$\eta_c$  及び  $\eta_t$  の値は、製作者から提示された値とする。また、 $\phi$  の値は、次の表の値とする。

往復動圧縮機	給油式スクリー ュー圧縮機	無給油式スク リーュー圧縮機	ターボ圧縮機
1.10	1.10	1.15	1.20

従って、コンプレッサの使用動力を減ずるためには、

- (1) 吸込空気の温度を低下させること。また中間冷却器での冷却効果を上げること。
- (2) 吐出圧力を低減すること。また空気の使用量を削減すること。
- (3) 圧縮機及びシステムに効率のよいものを選ぶこと。
- (4) コンプレッサ本体及び配管等からの空気漏れを防ぐこと。
- (5) 圧縮空気のシステム全体の管理を強化すること。

が大切である。以下、それぞれの項目について説明を加える。

#### 8.4.1 吸い込み空気及び中間冷却器

一般に吸い込み温度が上がると空気密度が小さくなり、同じ動力で吸い込める実風量は減少する。この関係は、吸い込み空気の絶対温度に反比例するので、例えば吸込側温度を 35℃ から 25℃ に変更すれば、3.3% 動力費が減少する。

以上のことから空気の吸い込み口はできるだけ直射日光の当たらない、涼しい場所を選ぶべきである。

また中間冷却器での冷却不足は、空気の圧縮がより断熱圧縮に近づき、2 段階以降の圧縮動力を増加させる。中間冷却器の効率低下の原因には、スケールやスライムの付着等による伝熱効率の低下、あるいは冷却水量の不足が考えられるので、冷却器の洗浄、その他の適切な対策を立てる必要がある。

#### 8.4.2 吐出圧力及び使用量

式(1)から、コンプレッサの吐出圧力を低減すれば軸動力は大幅に減少する。

Table III-8-19 は実際に使用されているコンプレッサの実験例を示したものであり、使用圧力を  $1 \text{ kg/cm}^2$  下げることにより、所要動力は約 4% 低減できている。

一般に同じ作業をする際、同一能力を持ちながら必要とする空気の圧力が異なる機械や工具は多いので、十分に検討してできるだけ工場全体の機械や工具の使用圧力を低い方に統一し、所要電力の減少を図ることが大切である。

Table III-8-19 Actual measurement example of compressor performance

(1) Discharge pressure and motor input (kW)

Pressure (kg/cm <sup>2</sup> G)	7	6	5	4	3
Load (%)					
100	226	216	205	190	166
50	156	150	144	134	120

(2) Load (flow rate) and motor input

Load (%)	0	50	100
Discharge amount (m <sup>3</sup> /min)	0	20	40
Input (kW)	44	132	220

(3) Compressor specification

Discharge pressure (kg/cm <sup>2</sup> C)	7
Discharge amount (m <sup>3</sup> /min)	40
Capacity adjustment (%)	0, 50, 100 3 stage
Motor	3.3 kV 220 kW

工場の中にどうしても高い圧縮空気を必要とするプレス機のような設備がある場合は、専用の昇圧機（ブースタ）を取り付けるのが経済的である。

また、使用空気量の削減はほぼ比例して動力費の削減につながるのので、人体冷房や掃除等への圧縮空気の使用はできるだけやめると共に、使用場所のノズル口径の見直し等も行い、使用状況の管理を徹底すべきである。

8.4.3 機種を選定と運転システム

空気圧縮機を効率の観点からみると、次のような傾向があるので、機種を選定する際は考慮に入ることが大切である。

- (1) 圧縮機の容量が大きいほど、効率は高くなる。
- (2) 圧縮段数が多いほど、効率は高くなる。
- (3) 負荷率を100%に近く運転するほど、効率は高くなる。

従って、休日なども小規模な作業を行う工場では、大容量の圧縮機を運転すると大きな動力損失となるので、休日に100%近くの負荷で稼働できる小容量の圧縮機を別に設けるのがよい。

また圧縮機の設備台数が複数であり、これらを並列に運転している場合は、稼働している圧縮機の負荷率ができるだけ高くなるような台数制御を行うことが大切である。

負荷が変動する場合は、回転形の圧縮機をベースロードで運転し、往復動形圧縮機を変動負荷に対応するように運転するのが、両機種の効率の点から省エネルギーになる。  
 なお、空気圧縮機を圧力範囲で分類すると、Table III-8-20のようになる。

Table III-8-20 Classification of air compressor

Type	Class	Main pressure range (kg/cm <sup>2</sup> )		Applications
Reciprocating compressor	General purpose compressor	7~8.5		2 stage compressor for 100 kW or more Standard type for 1,000 kW or less
	Intermediate pressure compressor	10~100		For petroleum refining, petrochemical and general chemical industry processes
	High pressure compressor	150~1,000		For synthetic chemistry such as ammonia, methanol and hydrogenation. Mostly large scale such as several thousand kW.
	Superhigh pressure compressor	1,500~3,500		Mainly, ethylene compressor for synthesis of polyethylene and ethylene.
	Oilless compressor	7~8.5		Oxygen gas, air for food processing industry and instrumentation, etc.
Rotary compressor	Movable profile compressor Screw compressor	1 Stage 2 Stage	3 8.5 7 7~8.5	Air capacity 2~60 m <sup>3</sup> /min.

8.4.4 隙間、穴等からの空気漏れ

(1) 空気漏れ量

P<sub>1</sub>の圧力を内部に持つ容器から、圧力P<sub>2</sub>の空間へ空気が流出する場合の流出量は、ベルヌーイの式から、

$$Q = S \sqrt{\frac{2g(P_1 - P_2)}{\gamma}} \quad \text{[m}^3/\text{S]} \quad \dots\dots\dots(2)$$

- ただし、 g : 重力の加速度 9.8 [m/S<sup>2</sup>]
- γ : 空気の比重量 [kg/m<sup>3</sup>]
- S : 有効断面積 [m<sup>2</sup>]
- P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>: 容器内外の絶対圧力 [kg/m<sup>2</sup> abs]

となる。

実際には、圧縮性や断熱膨脹が問題となり、実用式では、

$$Q = C \epsilon S \sqrt{\frac{2g(P_1 - P_2)}{\gamma}} \quad [\text{m}^3/\text{S}] \quad \dots\dots\dots(3)$$

ただし, C : 流量係数

$\epsilon$  : 膨脹による修正係数

を用いる。

この漏れ空気による損失は、非常に大きいので配管や漏れ箇所を調査し、空気漏れがある場合は、直ちに修理補修する必要がある。また、(3)式から漏れ量は $\sqrt{P_1 - P_2}$ に比例するので、使用圧力を低減すれば漏れ量は確実に減少する。Fig III-8-36に小口径オリフィスからの吹き出し量を示す。

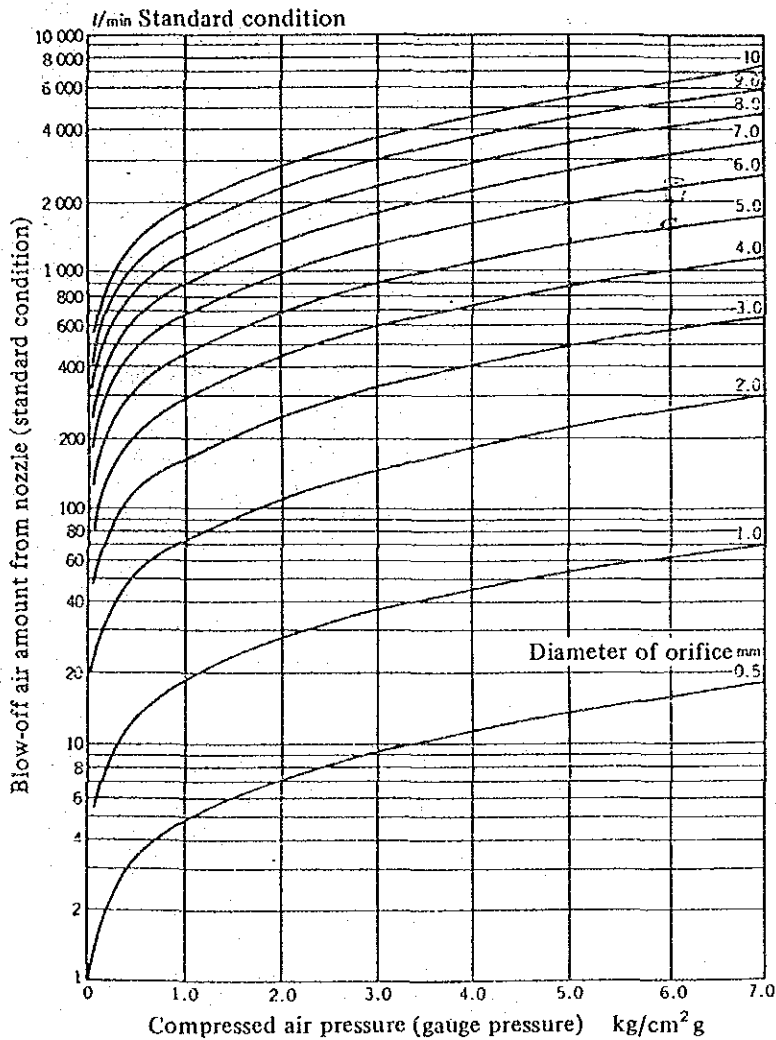


Fig. III-8-36 Compressed air pressure and blow-off air amount from nozzle

Fig III-8-36 は、吹き出しノズルの大きさに比較して、十分大きな容量のレシーバータンク及び配管がある場合のエアの吹き出し量を求めるもので、タンク及び配管の圧力は吹き出し中変化しないものとし、温度は常温とする。また吹き出しエア量は、標準状態（20℃，1気圧）に換算したものである。

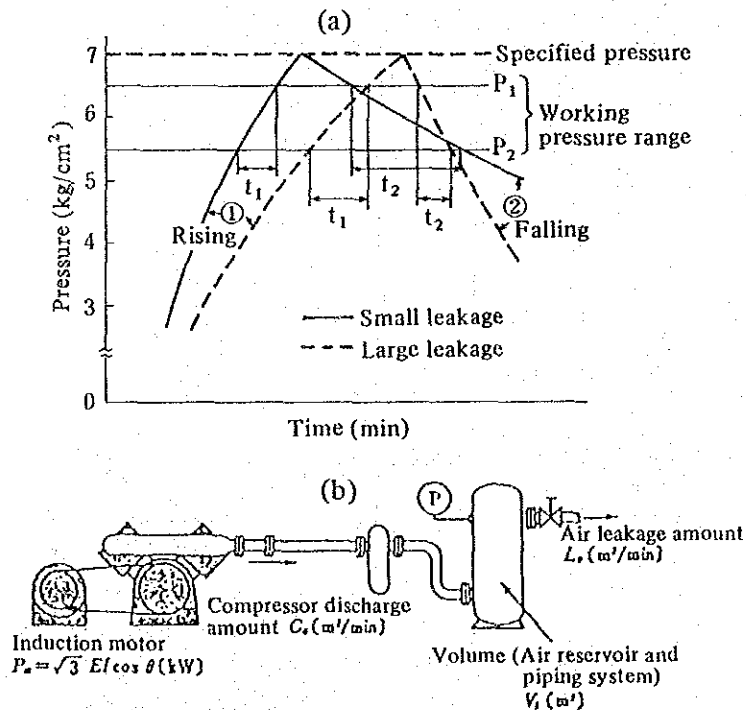
なお、Fig III-8-36 の値は、流量係数  $c = 1$  の場合であるから、実際に使用する場合は、0.97 ~ 0.65 の値を選択使用すること（Fig III-8-37 参照）。



Fig. III-8-37 Shape of orifice and value of discharge coefficient

(2) 空気漏れ量の測定

空気漏れ率の測定は次のようにする。まず末端を閉じた状態で圧縮機を稼働させると、Fig III-8-38 (a)の①のように漸次圧力が上昇する。規定圧力で圧縮機を停止させ、そのまま放置すれば、空気漏れのために圧力は②のように下降していく。



- Ca : Compressor discharge amount
- Ly : Air leakage amount
- t<sub>1</sub> : Time required for pressurizing
- t<sub>2</sub> : Time required for lowering

Fig. III-8-38 Pressure-time curve

(a)の場合は、点線より実線のほうが漏れが少ないことを示している。

ここで、圧力範囲 ( $P_1 \sim P_2$ ) は実際使用する圧力とし、 $0.5 \sim 1 \text{ kg/cm}^2$  にとり、 $t_1$ 、 $t_2$  を図のようにすれば、次式が成立する。

圧縮機設備、配管系統などの容積を  $V_t$  とすれば、

$$V_t = t_1 (C_a - L_y) = L_y t_2 \quad (\text{m}^3)$$

空気漏れ量  $L_y$  を上記式より求めると、

$$L_y = \frac{C_a t_1}{t_1 + t_2} \quad (\text{m}^3/\text{min})$$

$V_t$  : 圧縮機設備、配管系統などの容積 ( $\text{m}^3$ )

空気漏れ率  $L_p$  (%) は

$$L_p = \frac{L_y}{C_a} \times 100 = \frac{t_1}{t_1 + t_2} \times 100 \quad (\%)$$

次に、電力損失量  $P_1$  は、次式から求められる。

$$P_1 = \frac{P_m Q_t L_p}{100} \quad (\text{kWh})$$

$P_1$  : 圧縮機  $t_1$  時間の電力損失量 (kWh)

$P_m$  : 圧縮機  $t_1$  時間の平均電動機入力電力 (kW)

$Q_t$  : 圧縮機運転時間 (h)

空気漏れの測定は、圧縮機設備 (圧縮機本体、中間冷却器、空気槽など)、配管系統、空気機械、制御回路などを群単位で測定するとより明確となる。

#### 8.4.5 圧縮空気設備の管理

圧縮空気システムで管理上注意すべきことは、以下のとおりである。

##### (1) コンプレッサの管理

コンプレッサを常に安定した状態で運転するために、日常チェックする項目は次のとおりである。

- a. コンプレッサ、アフターラー等への冷却水は確実に供給されているか。
- b. コンプレッサの発熱は異常に高くなっていないか。
- c. アンローダ用圧力スイッチは正常に作動しているか、また圧力スイッチの設定値は適正か。
- d. コンプレッサが異常音を発していないか。また振動は正常範囲内か。

- e. 潤滑油量は正常か、正規の潤滑油を使用しているか。
- f. 吸い込み側フィルタの目詰まりはないか。
- g. 安全弁は正常に作動するか、安全弁の設定値は正常か。
- h. 圧力計の指示圧力は正常か、また圧力計にくるいはないか。
- i. 空気タンクのドレン排出器は正常に作動しているか。
- j. 中間冷却器は正常に作動しているか。

(2) 圧力の管理

圧力を管理する上で、次の点について知っておかねばならない。

- a. ラインの最低作動圧力はどれほどか：安定した制御をするための最低圧力
- b. ラインの最高圧力はどれほどか：安定した制御をするための最高圧力
- c. ラインの耐圧力はどれほどか：これ以上になると制御機器装置の故障をまねく圧力

以上のことを確認した上で圧力スイッチ、安全弁、リリーフ弁を設定することになる。チェック事項を次に示す。

- a. 空気タンク、配管中の圧力スイッチ、安全弁、リリーフ弁の設定値は正しいか、正常に作動するかどうか。
- b. 空気の逆流を防ぐ逆止め弁は正常に作動しているかどうか。
- c. レギュレータは正常に作動しているか。
- d. ラインに使用している圧力計は正常か、表示に狂いはないかどうか。

(3) ドレンの管理

ドレンのたまる場所に設けられたドレンバルブは、少なくとも1日に1回(できれば装置を運転する朝がよい)、必ずドレンを排出しておく。

〈チェック項目〉

- a. 空気タンク・配管の立下がり部・配管の末端・エアフィルタに付いているドレンバルブでドレンを排出する。
- b. 自動排水器具が正常に働いているかどうか。
- c. エアフィルタ、自動排水器などは定期的に内部エレメントの掃除を行う。

(4) パイプの管理

空気漏れはエネルギーの損失と圧力降下をまねくため、できるだけ漏れのないようにしなければならない。



〈チェック項目〉

- a. 継手類のゆるみによる空気漏れはないか。
- b. パイプ、ホース、チューブ類の破れによる空気漏れはないか。
- c. ストップバルブなどは確実に閉じることができるかどうか。

8.5 送風機（ファン・ブロウ）

8.5.1 送風機の特徴

送風機も圧縮機も原理は同じであるが、通常吐出圧力により 1 mAq 未満をファン 1 mAq 以上 10 mAq ( 1 kg / cm<sup>2</sup> ) 未満をブロウ、10 mAq 以上をコンプレッサという。種別としては、作動原理によりターボ形と容積形とに大別され、ターボ形は更に軸流式と遠心式に分類される。

Table III-8-21 に送風機の分類を、Table III-8-22 にその特性を、また Fig III-8-39 にその特性図を示す。

Table III-8-21 Classification of blowers




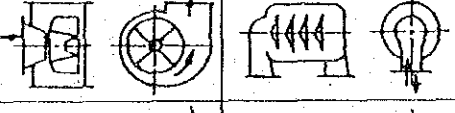
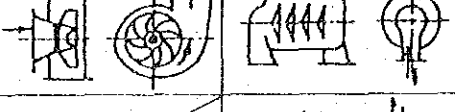

Name	Blower	
	Fan	Blower
	1,000 mmAq or below	1 to below 10 mAq
Pressure Type	Axial flow type	
	Axial flow	
Turbo type	Multivane	
	Centrifugal type	
	Radial	
	Turbo	
Displacement	Roots	
	Rotary type	
	Movable vane	
Reciprocating type	Screw	
	Reciprocating	

Table III-8-22 Characteristic comparison of blowers

System	Axial flow system	Turbo system	Multivane system	Radial system
Item				
Range of use	Air capacity 1~10,000 m <sup>3</sup> /min Static pressure 1 mmAq~1 kg/cm <sup>2</sup>	Air capacity 1~10,000 m <sup>3</sup> /min Static pressure 1 mmAq~1 kg/cm <sup>2</sup>	Air capacity 1~10,000 m <sup>3</sup> /min Static pressure 1 mmAq~1 kg/cm <sup>2</sup>	Air capacity 1~10,000 m <sup>3</sup> /min Static pressure 1 mmAq~1 kg/cm <sup>2</sup>
Efficiency (%)	80~92	70~85	50~60	60~70
Efficiency curve	When varied from the planned air capacity, rapidly decreases.	Shows no rapid decrease.	Comparatively smooth	Shows no rapid decrease.
Starting	Fully open damper.	Fully close damper.	Fully close damper.	Fully close damper.
Noise (dB)	39~55	32~44	22~41	28~42
Limit surging air capacity (%) (against air capacity at maximum efficiency point)	70~80	30~60	60~80	50~70
Applications example	For ventilation fan (buildings, architecture, tunnel), for boiler forced draft, for induced exhaust, for mine blower	For various blowers for steel mills, for dust collecting tunnel ventilation, for boiler forced draft, for induced exhaust, for cement kiln exhaust	For various blow and exhaust for steel mills, for boiler forced draft, for building and tunnel ventilation,	For various blow and dust collection for steel mills, for boiler induced draft, exhaust for gas re-circulation, for cement kiln exhaust

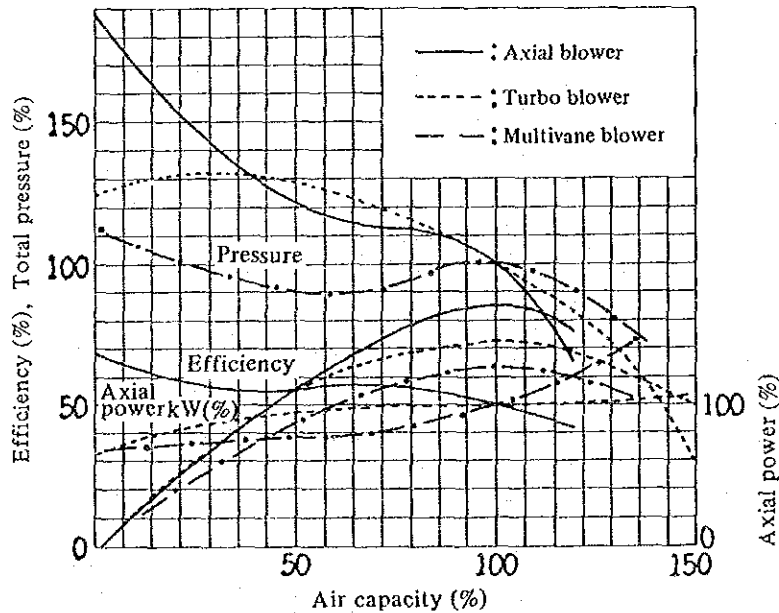


Fig. III-8-39 Characteristic curve for various blowers

(1) ターボ形

ケーシング内に納められた羽根車の回転に伴う遠心力によって、気体に速度のエネルギーを与える遠心式と、翼断面を持つ羽根を直管内で回転させ、気体を回転方向に流動させながら、圧力と速度のエネルギーを与える軸流式とがあり、これを総称してターボ形送風機という。

(2) 容積形

一定容積の室に気体を吸い込み、次に吸込口を閉じて、その室を押し縮めて圧縮しながら、別に設けられている吐出口へ押し出すことを繰り返し行う形式であり、押し出す方法にはピストンの往復運転によるものや、まゆ形（ルーツ形）ロータの回転運動によるものなどがある。

8.5.2 送風機の所要動力

(1) 空気動力〔L<sub>T</sub>〕

空気動力とは、送風機が単位時間に空気に与える有効エネルギーをいう。

$$L_T = \frac{K}{K-1} \cdot \frac{P_{t_1} \cdot Q}{6,120} \left\{ \left( \frac{P_{t_2}}{P_{t_1}} \right)^{\frac{K-1}{K}} - 1 \right\} \quad [\text{kW}] \quad \dots\dots\dots(1)$$

ただし、P<sub>t<sub>1</sub></sub>：吸込側絶対全圧（kg / m<sup>2</sup> abs）

P<sub>t<sub>2</sub></sub>：吐出側絶対全圧（kg / m<sup>2</sup> abs）

Q：風量（m<sup>3</sup> / min）

K：比熱比（空気の場合 1.4）

圧力比が 1.03 以下の場合は、次式で計算してよい。

$$L_T = \frac{Q P_T}{6,120} \quad [\text{kW}] \quad \dots\dots\dots(2)$$

ただし、P<sub>T</sub>：送風機全圧〔mm Aq〕

(2) 軸動力〔L〕

軸動力は、空気動力を送風機の効率（η<sub>F</sub>）で除したものである。

$$L = \frac{L_T}{\eta_F} \quad (\text{kW}) \quad \dots\dots\dots(3)$$

効率は Fig III-8-39 に示すように風量によって変わるが、表示するときには一般に定格風量時のそれをいう。Table III-8-22 に示す値はその概数である。

(3) 電動機出力

送風機に使用される電動機は、一般に構造が簡単で安価な誘導電動機が多く用いられる。比較的小容量のものには、かご形誘導電動機が使用されるが、この場合、送風機の羽根車の慣性（GD<sup>2</sup>）が大きいので、十分注意して選定する必要がある。

電動機の出力量（L<sub>M</sub>）は、次式による。

$$I_{EM} = L \times \phi \frac{1}{\eta_t} \quad (\text{kW}) \dots\dots\dots (4)$$

ただし、 $\phi$  : 余裕率

$\eta_t$  : 伝達効率

$\phi$  及び  $\eta_t$  の値は、Table III-8-23 及び Table III-8-24 による。

Table III-8-23 Value of  $\eta_t$

1 stage parallel shaft type gear reducer with transfer power of 55 KW or less	1 stage parallel shaft type gear reducer with transfer power of 55 KW or more	Constant speed type fluid coupling with transfer power of 100 KW or less	Constant speed type fluid coupling with transfer power of 100 KW or more
0.95	0.96	0.94	0.95

V-belt	Flat belt	Direct-coupled
0.95	0.90	1.00

Table III-8-24 Values of  $\phi$

Propeller fan	Disk fan	Multivane fan	Turbo fan	Plate fan	Profile type fan
1.30	1.50	1.30	1.15	1.25	1.15

8.5.3 送風機の省電力

送風機の省電力にかかわる要素を図で示すと、Fig III-8-40 のようになる。

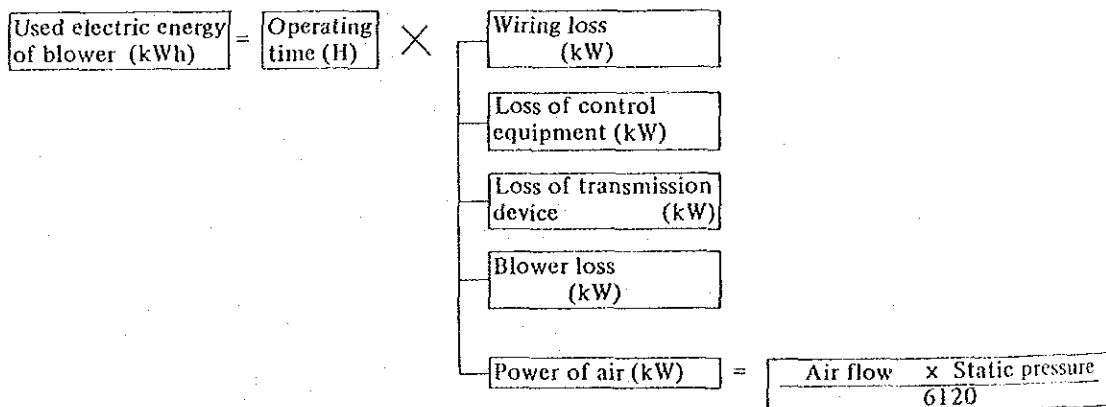


Fig. III-8-40 Factors for blower electric power conservation

すなわち、省電力の基本的な考え方としては、

- 運転時間を減らす。
- 効率のよい機器を採用する

- ・空気動力を減らす。

となる。以下これらについて述べる。

(1) 運転時間を減らす

工場の稼働開始から大幅に速い送風機のスタート、あるいは稼働終了から大幅に遅い送風機のストップは、省エネルギーに関心の低い工場によく見掛ける現象である。また、故障等で工場は停止しているにも拘らず、送風機だけは運転しているということも一般の工場によく見掛けることである。このような送風機のムダ運転は、省エネルギーにとって大きなマイナス要因であるので、工場の管理者は特に注意を払う必要がある。

さて、この送風機の無駄運転をなくすために最も直接的に行えるのが、送風機のオン・オフ運転である。電動機の一般的空転防止の対策及び注意事項については、既に電動機の章で述べてあるが、送風機は一般に $G D^2$ が大きいので、これからオン・オフ運転をしようとする場合、特に注意を要する項目は以下のとおりである。

A) 電動機の機械的、電氣的寿命のチェック

設備を新設する場合には、一日の始動回数を条件として提示し、それに耐えるような機器を発注すればよいから問題はないが、現在ほぼ連続して運転している送風機をこの方式で運転する場合には、頻繁な起動に伴う電動機の機械的強度、発熱の問題等を慎重に検討する必要がある。

B) 電源の電圧降下

今まで、他の負荷が停止している時送風機を起動していたので、その起動電流による電圧降下が問題にならなかった場合でも、他の負荷が運転中にオン・オフを繰り返すとなれば、電源の電圧降下の問題が発生する。

電気機械器具は、普通 10 % 程度の電圧低下でも機能を発揮するように設計されているが、それ以上の電圧低下では問題が発生するおそれがある。従ってこの場合には、リアクトル起動あるいは VVVF を採用する等の適切な対策が必要となる。

C) 始動装置の寿命

始動用リアクトルや始動補償器は一般的に短時間定格であり、これをこれから多頻度使用に変更する場合は、これら機器の巻線の温度が上昇し、絶縁劣化や焼損事故にいたる恐れがある。従って、多頻度使用する場合は、温度上昇について予めよく検討しておく必要がある。

D) その他

今まで述べてきたこと以外に注意すべきことは、電源ケーブルの発熱、開閉器の寿命の問題等である。

Table III-8-25 に、送風機に誘導電動機を使用した場合の各種始動方式の比較を、また Table III-8-26 に、開閉器の一般的寿命について記す。

Table III-8-25 Comparison of various starting systems

Starting system	Composition diagram	Starting current	Starting torque	Voltage when starting	Electromagnetic force	Armature heating capacity	Problems when starting at multi-frequency
Direct starting		100 (6 to 7 times full-load current)	100 (About 150% on rated torque)	100	100 (In proportion to square of current)	$100 \left( \frac{GD^2 \cdot N_s^2}{730} \cdot I \right)$	Power voltage drop, Motor life, Breaker life
Reactor starting		50, 65, 80	25, 42, 64	50, 65, 80 (Standard tap)	25, 42, 64	100	Reactor heating capacity, motor life, breaker life
Closed circuit transition auto-transformer starting		25, 42, 64	25, 42, 64	50, 65, 80 (Standard tap)	25, 42, 64	100	Starting compensator heating capacity, motor life, breaker life
VVVF Starting		17 or less (Any value below rated current)	70 or less (Any value below rated torque)	0-100 (In proportion to speed)	2-3 (Large when there is inrush current)	Hardly any	Transient torque (when switched from VVVF to main power source), inrush current (when switched from VVVF to main power source), effects from higher harmonic (motor temperature rise, occurrence of shaft voltage, resonance of pulsating torque and shaft torsion, surging voltage when commutating)
Secondary side resistor starting (limited to wound-rotor type)		18-40 (Optional)	80-200 (Optional)	100	3-16	Hardly any (Consumed by external resistance)	External resistance heating capacity, breaker life, slip ring heating capacity, mechanical life of brush lifting mechanism, life of motor for brush lifting

(Note) (1) Value at direct starting is regarded as 100%. (2) Starting torque is generated torque of motor and shall be (Starting torque + Stalling torque)/2.

Table III-8-26 Life of switch (When not repaired)

	Mechanical life	Electrical life (rated current opening and closing)
Oil breaker	10,000 times	2,000~5,000 times
Vacuum breaker	10,000 times 10,000 times Possible also for 50,000 times	10,000 times
Gas (SF.) breaker		10,000 times
High voltage electromagnetic contactor	5 million times (Class 1)	500 thousand times (Class 1)

(2) 効率のよい機器を採用する

この場合、着目すべき点は、

a. 送風機の効率

b. 動力伝達装置の効率

c. 電動機の効率

である。特に送風機については、風量、圧力、温度の変動範囲をよく認識した上で、最適の形式のものを選定する必要がある。また、最近は同じ型式のものでも、羽型が、改良されて効率を高くした製品が開発されている。

(3) 空気動力を減らす

コンプレッサの章でも述べたように、風量、圧力、吸い込み温度を下げれば、所要の空気動力は減少する。一般的に送風機の場合でみると、過風量で使っているものが多い。例えば、集塵機では風量を下げても集塵効果は十分であるのに、適正風量が分からないから全能力で回したり、冷却用で季節によって風量を下げても問題がないのに、フル運転したりしている例は多い。

すなわち、風量を下げるには、

- a. 適正風量はどれくらいか。
- b. この適正風量を得るのには、どのような方法をとるのが最も効率的か。
- c. 配管及び使用場所で漏風はないか。

等を検討していく必要がある。

風量を下げる方法には、固定式と可変式とがある。

A) 固定式

Table III-8-27 に固定式の一覧表を示す。以下この内の主な項目について説明する。

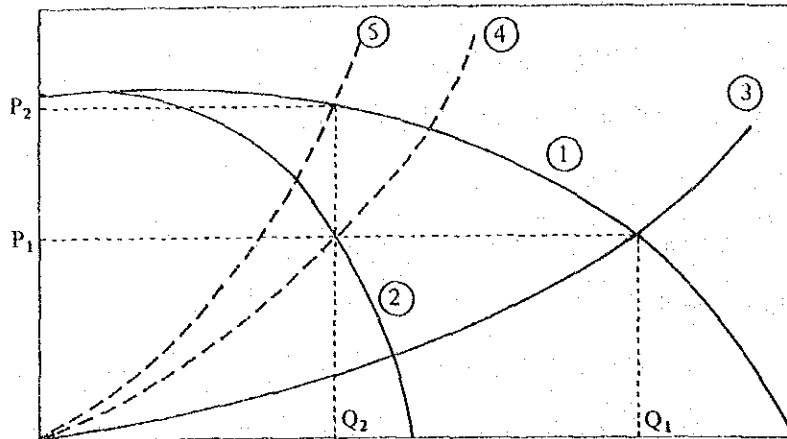
Table III-8-27 Method to reduce blower air capacity (Fixed system)

Main classification	Sub-classification
Reduction in blowing capacity	When blowers are operated, reduce the number. Replace blower. Blower impellers (replace or cut)
Damper, vane opening adjustment	Reducing damper opening Reducing vane opening
Change in rotating speed	Replace motor. Replace belt-driven pulley. Insert or replace reducer.

a. 台数減

同じ仕様の送風機を2台並列運転している場合に、Fig III-8-41 に示すように所要風量を  $Q_1$  から半分の  $Q_2$  に変更する場合、ダンパを含む配管系の抵抗

曲線を、③から⑤に変更する必要がある。この時の所要動力は  $P_2 \times Q_2$  に比例する。



- (1) Static pressure curve when two units are operating
- (2) Static pressure curve when one unit is operating
- (3) Resistance curve to obtain required air capacity,  $Q_1$  (When two units are operating)
- (4) Resistance curve to obtain required air capacity,  $Q_2$  (When one unit is operating)
- (5) Resistance curve to obtain required air capacity,  $Q_2$  (When two units are operating)

Fig. III-8-41 Performance curve during parallel operation

一方、このとき運転台数を1台に減じ抵抗曲線を④に変更したとすれば、所要動力は  $P_2 \times Q_2$  に比例する。すなわち、2台運転と1台運転の送風動力の差は、 $P_2 \times Q_2 - P_1 Q_2 = Q_2 (P_2 - P_1)$  に比例し、大きな省エネルギー効果を与えることになる。実際には、これに効率の差が加わるので、この効果は更に大きくなる。

b. 羽根車の交換

空気使用量が減った結果送風機の出力が大きくなり過ぎ、ダンパを極端に絞っている場合や、ガス比重が大きくなり、風圧がですぎて、電動機が過負荷になるような場合に行われる。

羽根車の直径を  $D$ 、風量を  $Q$ 、圧力を  $P$ 、軸動力を  $L$  とすれば、一般に次のような関係がある。

$$\begin{aligned}
 Q &\propto D^2 \\
 P &\propto D^2 \dots\dots\dots(5) \\
 L &\propto D^4
 \end{aligned}$$

従って羽根車の直径を必要に応じて小さくすることは、非常に大きな省エネルギーになる。この場合加工後のバランス調整はもちろん必要である。多段階



ロックの場合で加工量が多い場合は、1段又は2段の羽根を抜いてしまってもよい。ただ、これらの方法で行える送風量の調整は大体20%が限度である。

c. ダンパ、ベーン開度調整

ダンパは Fig III-8-42 のように、風道軸方向に直角に取り付けて開度を変えられるもので、出口側に設けた場合はその開度により抵抗曲線が、また入口側に設けた場合は静圧曲線が変わってくる。

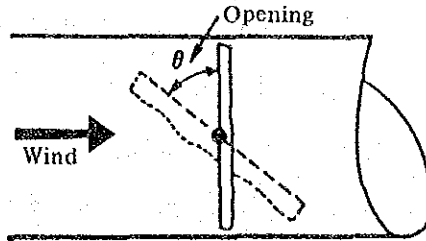


Fig. III-8-42 Principle of damper adjustment

次に、ベーンとは可動静翼のことであり、これは送風機の入口に取り付けられて、送風機の羽根車に入る気体に回転方向の旋回を与える。従って、ベーンを調整すれば、風圧-風量曲線が変わる。

Table III-8-28 にこれらの方法の特徴を示す。比較のために回転数制御の方式も記載してある。

Table III-8-28 Damper, vane opening adjustment

Method	Discharge damper opening adjustment	Intake damper opening adjustment (discharge side piping)	Intake vane control	Changing the rotating speed
Principle	Change blower resistance curve by intentionally increasing resistance of the piping system.	Since damper resistance is provided on intake side, it serves as a negative pressure and pressure curve slightly changes. Axial power curve also changes slightly.	Reduce the impeller work done by intentionally changing gas flowing angle against blower impellers, thus changing the pressure and power curves at the same time.	Air capacity is in proportion to the rotating speed, the pressure to square of the rotating speed, and the axial power to cube of the rotating speed.
Diagram of principle	<p>When damper is closed, resistance increases and operating point changes from <math>(P_1, L_1, Q_1)</math> to <math>(P_2, L_2, Q_2)</math>. Note; Operating point is a point of intersection of pressure and resistance curves.</p>	<p>When damper is closed, pressure curve falls and operating point changes from <math>(P_1, L_1, Q_1)</math> to <math>(P_2, L_2, Q_2)</math>.</p>	<p>Reducing vane lowers pressure and axial power curves. Operating point changes from <math>(P_1, L_1, Q_1)</math> to <math>(P_2, L_2, Q_2)</math>. Reduction in axial power is far larger than damper opening adjustment.</p>	<p>Changing the rotating speed from <math>N_1</math> to <math>N_2</math> shifts the pressure and axial power curves from (1) to (2), and the operating point from <math>(P_1, L_1, Q_1)</math> to <math>(P_2, L_2, Q_2)</math>.</p>
Special features	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Surging area is wide and effective air capacity control cannot be performed.</li> <li>2) Axial power does not lower much even in low air capacity area.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Surging area is narrower than for discharge damper.</li> <li>2) Axial power lowers almost in proportion to air capacity.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Same as at left.</li> <li>2) Axial power lowers almost in proportion to air capacity and tends to lower much more than the intake damper.</li> </ol>	Axial power lowers most and this is the best method for electric power conservation.

d. 回転数の変更（電動機又はプーリ径の変更）

送風機の回転数を  $N$  とすれば、

$$Q \propto N$$

$$P \propto N^2 \dots\dots\dots(6)$$

$$I \propto N^3$$

の関係があるので、回転数の低い電動機に取り替えることが可能な場合、大幅な省エネルギーになる。ただし、この方式の場合、いったん変更してしまえばダンパ調整のように簡単には、元に戻せないで、負荷の抵抗曲線等をよく調査し、取り替えた後風量が不足することのないよう注意すべきである。また、ベルト駆動の場合、プーリ径を変更して回転数を低減させるのも、効果的方法の一つである。

e. 可変式

風量の可変制御方式には、Table III-8-29 に示すような方式がある。

Table III-8-29 Method to control air capacity (Variable system)

Discharge damper control (Variable)	Intake damper control (Variable)
Intake vane control (Variable)	Change in number of poles
Eddy current joint control	Secondary resistance control
VVVF control	Scherbius control
	Others

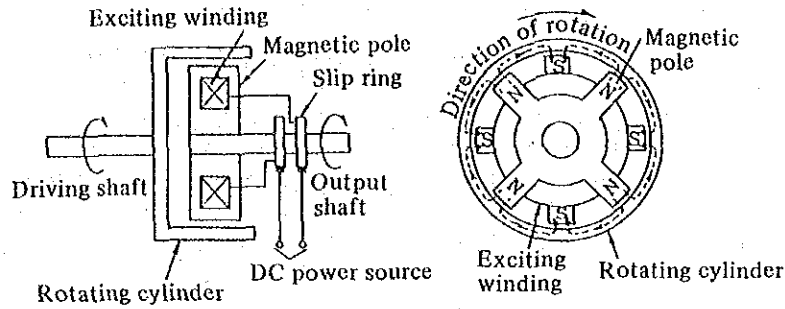
以下、Table III-8-29 の記載事項のうち、いままで説明しなかった渦電流継手制御とセルビウス制御について記す。

f. 渦電流継手制御

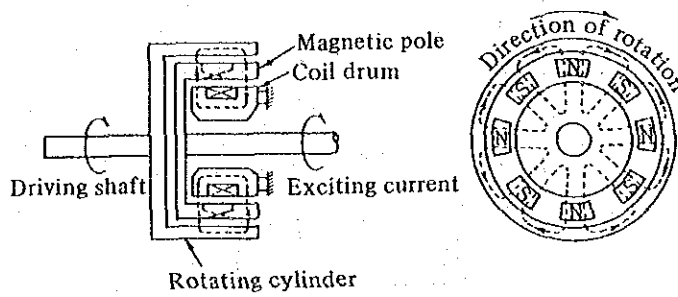
渦電流継手電動機は、原動機を一定の回転速度で運転しておいて、原動機の出軸に渦電流継手を直結し、その入力軸と出力軸の回転速度のすべりを変えて回転速度を変える方法である。

Fig III-8-43 (a) は渦電流継手の原理図を示したもので、内側に励磁巻線を備えた突極磁極が出力軸に直結され、その外側に小空隙を隔てて設けた回転円筒から構成されている。この回転円筒は原動機の出軸に直結されて、一定の回転速度で回転させておくと、励磁巻線により発生する磁束を切ることで渦電流が流れる。この渦電流と磁束との間に働く電磁力によって伝達トルクが発生

し、負荷に直結した磁極は回転円筒と同一方向に回転する。



(a) With slip ring



(b) Slip ring-less

Fig. III-8-43 Principle of eddy current joint

励磁電流は磁極が回転子であるため、スリップリングを通して供給されることになるが、(b)に示すように励磁巻線を固定子側に設けて小空隙を介して突極磁極を構成させると、スリップリングをなくすることができる。

発生トルクの大きさは、励磁電流及び回転円筒との相対速度の大きさによって変化するので、励磁電流を変えれば出力トルク又は速度を任意に変えることができる。外側の回転子は通常は鉄製の円筒構造であるために、Fig III-8-44に示すようにハイスリップ特性となる。

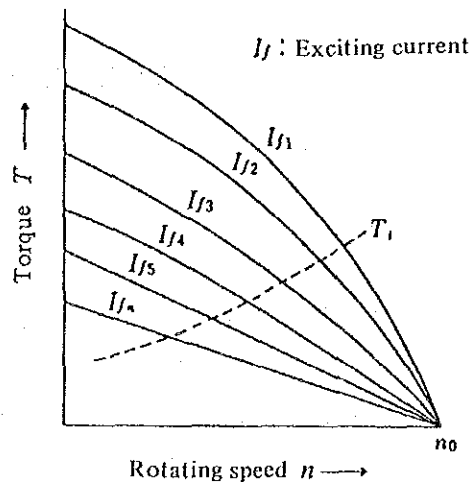


Fig. III-8-44 Torque characteristic of eddy current joint

Fig III-8-45は、原動機に誘導電動機を使用した場合の回転数制御の系統図を示す。この制御は最初に負荷を運転する前に、開閉器 88 を投入して誘導電動機を運転しておく。負荷を運転する時に、自動制御を働かせて速度設定器 SRH で希望する値に設定すれば、速度基準信号  $e_{sr}$ 、速度帰還信号  $e_{sf}$  を速度制御回路で比較・増幅し、位相制御回路を介してサイリスタ変換の制御遅れ角  $\alpha$  を制御する。渦電流継手の励磁電流を制御して回転速度が制御される。

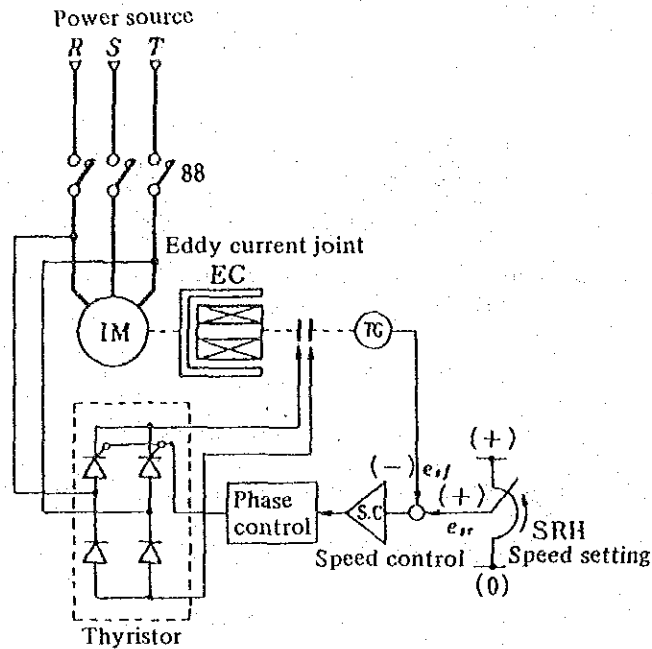


Fig. III-8-45 Distribution diagram of rotating speed control by means of eddy current joint

渦電流継手は、入力と出力軸との間のすべりを  $S$ 、原動機の効率を  $\eta_M$  とすると、システム効率  $\eta_s$  は誘導電動機の 2 次抵抗制御と全く同じとなり、低速領域の効率が著しく低下する。

$$\eta_s = (1-S) \eta_M \times 100. \quad [\%] \quad \dots\dots\dots(7)$$

すべり電力は、回転円筒内の渦電流損として発熱するため、55 kW 程度以上の渦電流継手では水冷構造となるのが普通である。

g. セルビウス制御

巻線形誘導電動機の 2 次電流  $I_2$  [A] は 2 次側誘導起電力を  $E_2$ 、2 次巻線の 1 相当あたりの抵抗を  $r_2$ 、すべり  $s=1$  時のリアクタンスを  $x_2$  とすれば、

$$I_2 = \sqrt{\frac{s E_2}{r_2^2 + (s x_2)^2}} \quad \dots\dots\dots(8)$$

となる。2 次巻線に外部から同一位相、同一周波数の起電力  $E_c$  を供給してや

れば,

$$I_2 = \sqrt{\frac{s E_2 + E_c}{r_2^2 + (s x_2)^2}} \dots\dots\dots (9)$$

となる。ここで  $E_2$  は一定であり、負荷が一定ならば、 $I_2$  は一定である。従って、 $E_c$  を変えてやればすべり  $s$ 、すなわち速度は変わらざるを得ない。これがセルビウス制御の原理である。Fig III-8-46 に原理図を示す。図では 2 次銅損に相当する電力をスリップリングを介して取り出し、DC-AC 変換器により変圧器を介して電源に返還してやるものである。返還電力を調整することにより速度が変わる。

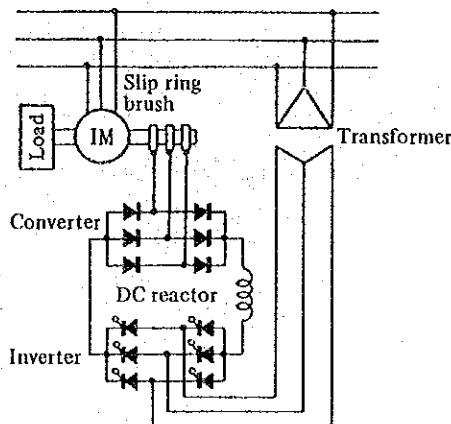


Fig. III-8-46 Principle of scherbius control

2 次抵抗制御方式は、2 次銅損に相当する電力を外部抵抗で消費しており、効率の悪い制御であったが、本制御方式では、その電力を回収するので、極めて効率のよい可変制御方式となる。なお、Table III-8-29 に記載した各種の可変式風量制御方法の電動機入力(%)を示せば Fig III-8-47 のようになる。

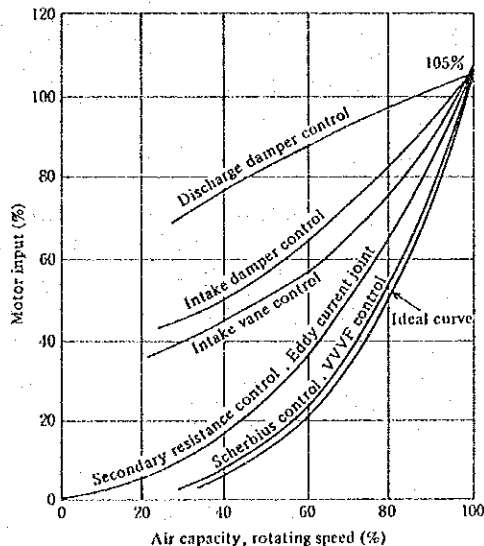


Fig. III-8-47 Comparison of blower motor's input

## 8.6 照明

### 8.6.1 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) 作業士物の向上

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 III-8-30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。

Table III-8-30 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.
2,000		
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.
1,000		
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.
500		
300	Electricity room and air conditioning machine room	Rough visual operation such as ○ packing a, ○ wrapping b, ○ restricted operation
200		
150	Entrance/exit, corridor, passage, warehouses involving operation, staircases, lavatories	Very rough visual operation such as ○ wrapping c, ○ packing b, ○ restricted operation
100		
75	Indoor emergency staircases, warehouses, outdoor power equipment	Operation such as ○ loading, unloading, load transfer, etc.
50		
30	Outdoor (for passage and safety guard within compound)	
20		
10		

(Remarks)

1. Similar operation 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.

8.6.2 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。

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

ここで、E ; 照度 (lx)

A ; 室の面積 (m<sup>2</sup>)

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。

(1)式を変形して、照明に要する消費電力量を求めれば、

$$WH = \frac{N \times P}{\eta} \times t = \frac{A \times E \times t}{U \times M \times \eta} \quad (\text{Wh}) \dots\dots\dots (2)$$

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。

### 8.6.3 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、いずれにしても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。

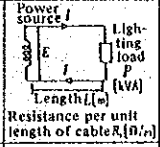
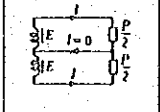

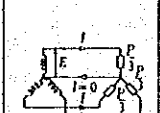
#### (2) 配電線の損失を減らすこと

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 III-8-31



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。

Table III-8-31 Comparison of loss by wiring system

Wiring system	Connection	Loss calculation	Loss ratio
Single phase two wire system		$P = EI \times 10^{-1} \text{ [kVA]}$ $\text{Loss } W = I^2 \times 2LR_1 = \left(\frac{P}{E} \times 10^3\right)^2 \times 2LR_1 = \frac{2P^2LR_1}{E^2} \times 10^4 \text{ [W]}$	100%
Single phase three wire system		$\frac{P}{2} = EI \times 10^{-1} \text{ [kVA]}$ $W = 2I^2LR_1 = \left(\frac{P}{2E} \times 10^3\right)^2 \times 2LR_1 = \frac{P^2LR_1}{2E^2} \times 10^4 \text{ [W]}$	25%
Three phase three wire system		$\frac{P}{3} = E \times \frac{I}{\sqrt{3}} \times 10^{-1} \text{ [kVA]}$ $W = 3I^2LR_1 = \left(\frac{P \times 10^3}{\sqrt{3}E}\right)^2 \times 3LR_1 = \frac{P^2LR_1}{E^2} \times 10^4 \text{ [W]}$	50%
Three phase four wire system		$\frac{P}{3} = EI \times 10^{-1} \text{ [kVA]}$ $W = 3I^2LR_1 = 3 \left(\frac{P \times 10^3}{3E}\right)^2 LR_1 = \frac{P^2LR_1}{3E^2} \times 10^4 \text{ [W]}$	16.7%

NOTE: Each cable size is same

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。

(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 III-8-32 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 III-8-33 及び Table III-8-34 は各種ランプの特徴と用途を示したものである。

Table III-8-32 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)	When starting	5.7	4.0	2.3	Normal	Dimmed	Normal	Dimmed
	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 III-8-33 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"> <li>• Stable light color</li> <li>• Possible to light as-is.</li> <li>• Instantaneous lighting high luminance</li> </ul>	Several W ~ Several kW	100W				Residence, store, office
			15	2,850	100	1,000	
Tungsten halogen lamp	Small-size, high efficiency and long life lamp	Several 10W ~ Several kW	For general use 500W				For floodlamp, for automobiles, for projection, for photography, for copying machine, studio
			21	3,000	100	2,000	
Fluorescent lamp	<ul style="list-style-type: none"> <li>• High efficiency and long life</li> <li>• A wide variety of light colors</li> <li>• Little glare</li> </ul>	4 ~ 220W	White 40W				Residence, office, store
			82	4,500	69	10,000	
Mercury lamp	High efficiency, long life, high luminance lamp	40 ~ 2kW	400W				For floodlamp (baseball ground, golf course)
			51	5,800	23	12,000	
Fluorescent mercury lamp	Mercury lamp with luster improved	40 ~ 1kW	400W				Roads, factory, street lighting, arcade lighting
			56	4,100	44	12,000	
Choreless mercury lamp	Mercury lamp requiring no stabilizer	160,250 500W	500W				For works, stores
			27	3,000	42	6,000	
Halide lamp	Higher efficiency and lustrous lamp than mercury lamp	250 ~ 1kW	400W				Gymnasium, factory, shopping street, open space, park
			80	4,500	65	9,000	
High lustrous halide lamp	High lustrous, high luminous lamp	250 ~ 400W	400W				Gymnasium, lobby, hall
			50	5,000	92	6,000	
Low pressure sodium lamp	Highest efficiency, yellow, luminous lamp	35 ~ 180W	180W				Tunnel, high-way, switchyard
			175	-	-	9,000	
High pressure sodium lamp	Highest efficiency, luminous lamp for general lighting	150 ~ 1,000W					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 III-8-34 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	Low 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 III-8-35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 III-8-35 Example of coefficient of utilization table

Ceiling	80 %									50 %								
	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	Coefficient of utilization																	
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	.36	.35	.34	.33	.51	.48	.47	.39	.38	.37	.34	.33	.33
1.00	.63	.57	.55	.47	.45	.44	.41	.40	.39	.57	.53	.52	.45	.44	.43	.40	.39	.38
1.25	.71	.63	.60	.55	.52	.50	.46	.46	.45	.64	.59	.57	.52	.50	.49	.46	.45	.44
1.50	.76	.68	.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	.74	.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	.88	.75	.72	.78	.72	.70
5.00	1.09	.88	.82	.96	.82	.77	.91	.79	.78	.91	.82	.79	.88	.78	.78	.82	.76	.73
10.00	1.13	.93	.86	1.06	.90	.84	1.06	.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。

Fig III-8-48 に、ランプ自体の光束の減少傾向を、また Fig III-8-49 に器

具にほこりが累積した場合の光束の低下状態を示す。

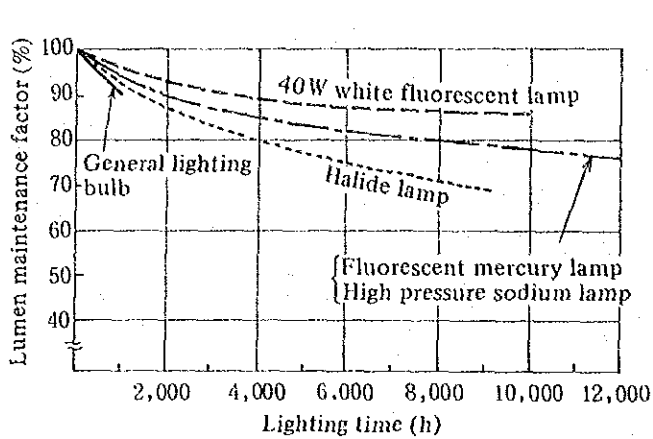


Fig. III-8-48  
Lumen maintenance characteristic of various light source

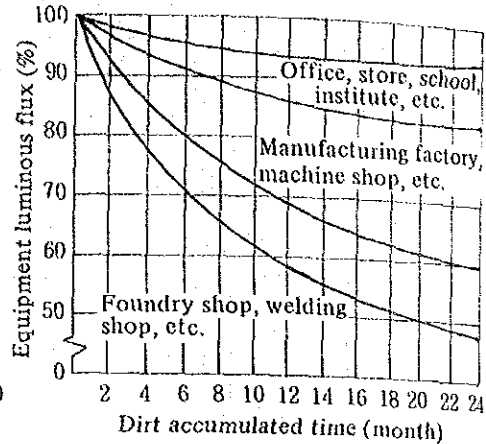


Fig. III-8-49  
Lowered lumen when dirt accumulated on lamp and lighting equipment

(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。

8.7 電気加熱

8.7.1 工業電熱装置の種類

工業電熱装置を分類する方法はいろいろあるが、加熱方式から分類すると次のようになる。

(1) アーク炉

アークによって発生する熱によって加熱する方法で、製鋼用アーク炉、真空アーク炉などがある。

(2) 誘導炉

電磁誘導によって発生するジュール熱を利用し、被加熱物を直接あるいは間接的

に加熱するもので、電源周波数により高周波炉及び低周波炉に分れる。

(3) 抵抗炉

抵抗体中に発生するジュール熱によって被加熱物を加熱するもので、発熱体に通電し被加熱物を間接的に加熱するものと、被加熱物に直接通電して加熱するものと二つの方式がある。

(4) 赤外線加熱炉

熱エネルギーが主に赤外線放射によって伝達されるもので、比較的低い温度の加熱用あるいは塗料の乾燥用などに使用される。

(5) 誘導加熱装置

交番電界中における誘電体損によって加熱が行われる。電源としては高周波が使われ、容量は比較的小さい。

本稿では、このうちの赤外線加熱、その中でも近年特に注目されている、遠赤外線加熱について説明する。

8.7.2 遠赤外線の特徴

(1) 赤外線

赤外線は0.75 μmから1,000 μmの範囲、つまり可視光よりも長く、マイクロ波よりも短い波長を持つ電磁波である。

赤外線は更に Fig III-8-50 に示すように、0.75 μm ~ 4 μm までが近赤外線、5.6 μm ~ 1000 μm が遠赤外線と区分される。

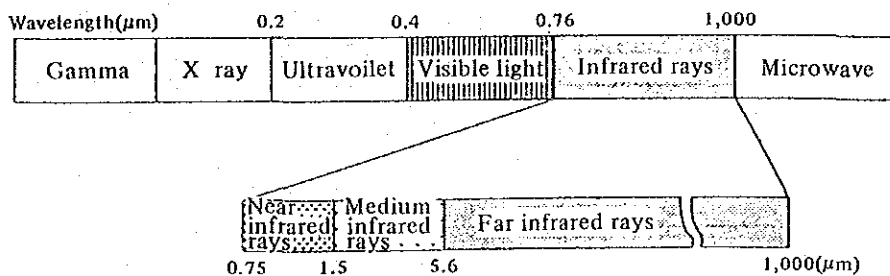


Fig. III-8-50 Position of infrared light in electromagnetic wave spectrum

(2) 赤外線加熱の原理

物質が他の熱源によって熱せられる方法には対流、伝導、輻射の3通りあるが、赤外線は電磁波であるから熱の伝達は輻射である。すなわち、熱源から放射した赤外線が直接被射体に吸収されて熱を伝える。

物質を構成するいろいろな分子は、その原子の種類や配列の状態、並びに分子内の結合力の違いから、それぞれ特有の振動と回転の周波数を持っている。入射赤外線線の周波数がこれらの振動又は回転の固有周波数に合致するときは、分子は赤外線のエネルギーを吸収して、振動又は回転が一層激しくなり発熱が起こる。この現象は共鳴吸収として知られる。

入射赤外線の波長が物質の吸収波長帯の範囲に入っていない場合は、赤外線は吸収されないまま分子間を通過し、発熱は起こらない。

Fig III-8-51は、塩化ビニール樹脂の赤外線吸収スペクトルで、 $3.5\ \mu\text{m}$ の中赤外線領域に一部吸収波長帯がある他は、ほとんど遠赤外線領域に強い吸収波長帯がある。

このように、高分子材料などの有機物及び無機物の一部は吸収波長帯の大部分が中遠赤外線領域にあり、近赤外線領域の吸収波長帯はほとんど0に近いものが多い。

遠赤外線加熱は、このような高分子化合物に対して効果的であり、近赤外線領域にエネルギーピークを有する赤外線電球などを使用した場合に比べて、短時間の加熱ですみ、省エネルギーとなる。

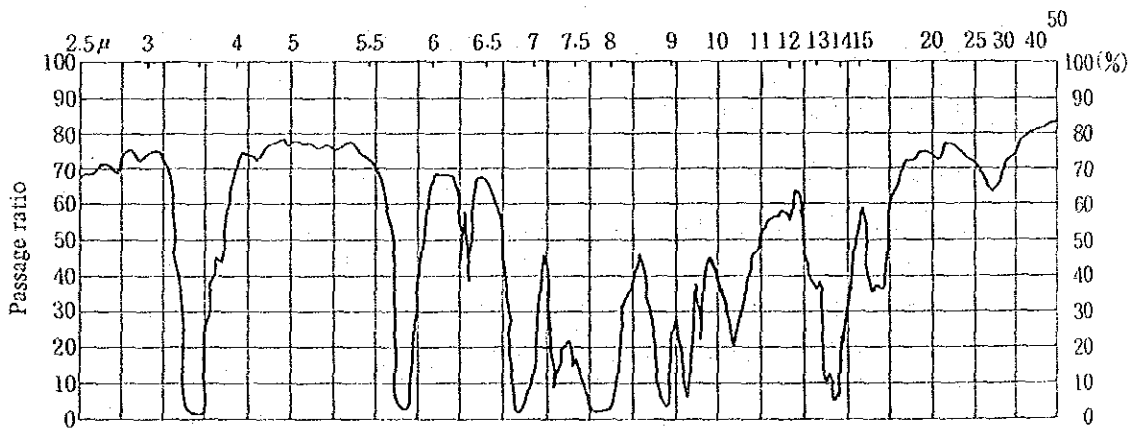


Fig. III-8-51 Vinyl chloride infrared absorption spectrum



Fig III-8-52は、赤外線電球と遠赤外線ヒータの分光放射特性の1例であるが、長波域における遠赤外線ヒータの優れた放射特性がよく理解できる。

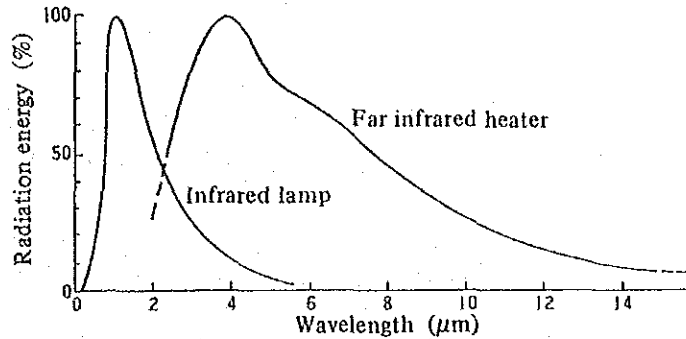


Fig. III-8-52 Spectral radiation characteristic of infrared lamp and far infrared heater (Example)

### (3) 遠赤外線加熱の特徴

赤外線加熱が他の方法、例えば熱風加熱、高周波加熱などの方法に比べ有利であると思われる点は、次のとおりである。

- a. 操作が簡単である。
- b. 伝熱のための媒介物を必要とせず、直接被加熱物を加熱できるので、応答が速く、省エネルギーとなる。
- c. 加熱制御が容易である。
- d. 場所をとらず、移動が比較的容易である。
- e. 設備費が安い。
- f. 被加熱物の監視が容易である。

また、遠赤外線加熱が在来の赤外線加熱に比べ優れていると思われる点は、次のとおりである。

#### A) 乾燥の仕上りがよい

遠赤外線ヒータは、長波長により物質の内心部まで均一に加熱するので、物質表面を必要以上に加熱する必要がなく、乾燥した品物は優れた物性が得られる。

従って、塗装の乾燥の場合など、発泡を生ぜず、塗膜の内部硬化性も良好である。

- B) 色の差による加熱ムラが起こらない。
- C) 熱処理時間が短縮され、省エネルギーとなる。
- D) 寿命が長い。

遠赤外線ヒータの発熱体はシールされて、空気との接触はしゃ断されているため、性能低下の度が少ない。

また水滴の当たる場所、振動の激しい場所に配置しても破損の心配はなく、数年以上の寿命を保つことができる。

#### (4) 遠赤外線加熱の適用上の注意点

遠赤外加熱熱装置の適用に当たり留意すべき点は、次のとおりである。

##### A) 効果的な対象物の選定

処理対象物は、赤外線吸収特性の適切な材質であることが必要で、事前に文献又は実験によりその吸収特性を把握しておくことが大切である。

##### B) 装置の構造

被加熱物にできるだけ影を作らないことが必要である。このためには、できるだけ複雑な構造の対象物は避けた方がよい。ただ若干の影は、ヒータの配置あるいは内壁面に反射笠を配置するなどして補完できる。

##### C) 炉内の換気

一般的には自然換気で十分であるが、水蒸気や炭酸ガスが多く発生する場合は強制換気が必要である。なお、強制換気を行う場合は、ヒータ温度を低下させない工夫が必要である。

##### D) 温度測定

被加熱物の温度は、炉内雰囲気温度より高くなることが多いので注意を要する。

##### E) 反射笠

反射笠の汚れや傷は反射効率を著しく低下させる。汚れた場合は傷をつけないよう空気などを吹き付けて清掃すること。

##### F) 照射条件の見直し

被加熱物が不変でも、長期間の使用により反射効率の変化等により加熱効率が低下する。処理内容に変化がみられた場合は、その原因を調べ、必要により照射距離、ヒータ電圧、コンベアスピード等を調整し、照射条件を見直すことが大切である。

### 8.7.3 遠赤外線装置の産業への応用

既に述べたように遠赤外線加熱は、対流や伝導加熱と異なり、ヒータそのものが省エネルギー熱源であり、今後ますます研究開発が進むと共にその応用分野も広がって

いくものと考えられる。

Table III-8-36 は、現在考えられている産業面における応用例である。また Table III-8-37 は各産業における実用化の例である。これをみても、遠赤外線の省エネルギー効果の大きいことがわかる。

Table III-8-36 Applicable industrial fields of far infrared rays heating

Type of industry	Examples of applications
Manufacture of machinery and appliances	Automobile body paint drying, Motorcycle marking drying, Automobile frame primer drying, Casting paint drying, Home electrical appliances paint drying, Transformer case paint drying, Injection molding heating, Furnitures paint baking, Dental cream tube and beer can print drying, Condenser paint drying, Pulverulent body paint drying
Chemical industry	Printed circuit board drying, Vinyl chloride resin gelatinization, Chemicals drying, Acrylic sheet softening, Printing ink drying
Lumber, wooden product, building material, paper pulp	Furniture and batt plywood drying, Plywood adhesive drying and hardening, Lacquer ware drying, Half-split chopsticks drying, Plywood paint drying, Gypsum board drying, Slate roofing primer and finish coat drying, Mirror surface letters baking, Fire board resin processing, Laminated paper baking and drying, Wall paper processing and drying
Textile industry	Sizing and drying, Printing and drying, False twister
Food manufacture and processing	Boiled fish paste, a kind of fish paste baking and drying equipment, Rice cake baking, Ripening SAKE, Frozen food thawing, Meets drying, Smoked fish drying.
Agricultural and marine products	Heating for pig breeding, Brooder, incubation, Plant forcing culture, Raising (Laying eggs acceleration, fry breeding, baits multiplication)

Table III-8-37 Example of practical use of far infrared rays heating

Classi- fication	Name of process	a. Conventional heat source	Outline of processing	b. Effect of application of far infrared rays (b/a)				Scale of practical use
				Consumed energy (%)	Fuel cost (%)	Processing time (%)	Others	
Textiles-related	Narrow fabrics manufacture	LPG direct flame	Sizing, finishing and drying of narrow fabrics contain- ing rubber in use for training ware, trousers and underwares.	46	73	100	Improved quality. Omission of water washing process	16.8 kW x 14 unit
	Resin treatment of textile pro- ducts	Schwung burner for LPG	Heat and set vinyl chloride on gloves, socks, entrance mats, car seat, etc. and provide non-slip processing	43	85	67	Improvement of oper- ating circumstance, homogenizing and quality improvement of products	154 kW
	Yarn-dyeing woven textile	Infrared lamp	Sizing and drying fabric yarn (nylon) for umbrellas	71	71	100	Preventing damage to bulbs, etc. Improve- ment of equipment and operation safety	8 kW x 2 unit
	Sewing and dyeing	Quartz pipe heater	Athletic shirts print drying	32	32	67	Improvement of operational circum- stances	1.5 kW x 3 unit
	Crepe dyeing	Schwung burner for LPG	Crepe 80% dyeing (brush- ing) drying	71	68	100	Improvement of operational circum- stances	6 kW
	Manufacture of printing screen	Kerosene warm air	Drying after coating high class printing screen with developing solution	16	27	20	Quality improvement	12 kW
	Manufacture of insect screening	Fuel oil steam warm air	Heat set of vinyl chloride, polypropylene insect screening	60	56	100	Improvement of operational circum- stances	16 kW
	Sizing, woven textile	Infrared lamp	Beaming process, sizing and drying of woven textile warp (polyester)	24	24	33	Improvement of operational circum- stances	2 kW
Electric and construction machinery, home appliances, others	Manufacture of construction machine parts	Fuel oil steam warm air	Cast iron products paint drying	50	80	33	Reduced equipment area 1/4	26 kW
	Water heater, hot water feeding machine manu- facture	Schwung burner for LPG	Armored portion paint drying	20	28	25	Reduced equipment area 1/3 Quality improvement	25.2 kW
	Manufacture of large-sized crests and nameplates	Fuel oil steam or natural	Drying ground of hard porcelain and large-sized crests before calcination	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Natural drying 30 to 40 days, steam drying 20 days -- Far infrared 3 to 4 days</li> <li>• Fuel cost for drying process unknown</li> </ul>		Yield 30 → 100% Improvement of operational circum- stances	1.5 kW x 3 unit	
	Manufacture of aluminum home appliances	Electrical heat	Heating in glazing process of aluminum pans and kettles, etc.	14	23	38	Furnace efficiency 30 → 78% Equipment capacity 37% Improvement of operational circum- stances	16.5 kW x 3 unit
	Sale of herb	Natural	Drying to keep herb from getting moldy during storing herb	—	—	(3 ~ 5 minutes)	Quality improvement Preventing occurrence of mold and insects	12 kW

## 8.8 空調

### 8.8.1 空気調和とは

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いう。

制御すべき室内の空気条件には、次の四つの要素がある。

(1) 温度

室内の空気を冷却又は加熱して、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

空気中の塵埃を除くと共に、煙、炭酸ガス、臭気、有毒ガスなどが許容される濃度を超えないように維持する。

(4) 分布

調整された空気が、室内に分配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

在室者あるいは室内で作業をする人に適した空気状態に室内空気を保持することで、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。Fig III-8-53 は日本の夏季、冬季における快感帯を示したものである。

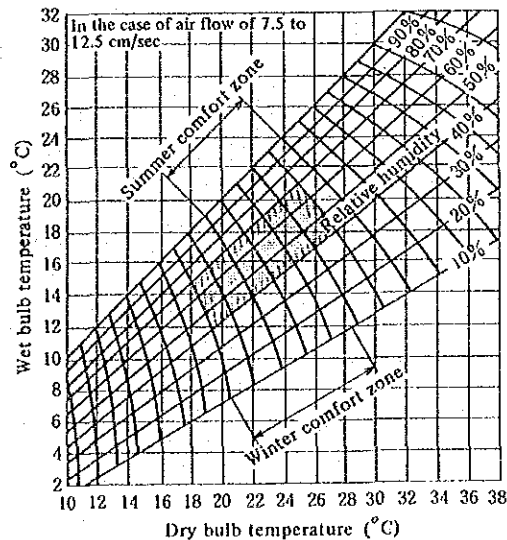


Fig. III-8-53 Comfort zone

またこの図とは別に、冷房ショックをなくすためには、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いわれている。室内外の温度差は5~7℃がよいとされている。

B) プロセス空調

各種の工業生産プロセスでは、原料から製品完成に至るまでの各工程で、周囲空気の温湿度や清浄度について、それぞれ独自の条件を必要とするものが多い。

Table III-8-38 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。

Table III-8-38 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	"		Coffee substitute	24~27	40~45	
	Printing room	24~27	"		Milling	"	60	
Printing	Book binding	21~24	45		Macaroni	21~27	38	
	Form	24~27	45~50		Mayonnaise	24	40~50	
	Printing room	"	"		Mushroom growing room	14~27	75	
	Web press	"	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		
Optics	Melting room	24	45	Beer fermentation room		3~4	50~70	
	Abrading room	27	80	Beer malthouse		10~15	80~85	
Plywood	Manufacture	-	55~60	Confectionery	Chewing gum	Cooling	22	50
	Gluing	-	"		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	"		Cooling	24~27	40~45	
	Manufacture	32	-		Product storage	16~24	45~55	
	Sulfurization	26~28	25~30		Dry fruits storage	10~13	50	
Laboratory	Animal laboratory	24~27	40		Chocolate	Bar manufacture	18	45~50
	General analysis room	23	50			Center cream manufacture	24~29	50
Photograph	Manufacture of ordinary film	23~24	24~40			Nougats	18	50
	Printing	"	65~70			Starch room	24~29	50
	Finished product storage	16~27	45~50			Wrapping	18	50
Bakery	Developing	21~24	60	Product storage	16~24	40~50		
	Base mixing	24~27	45~55	Tobacco	Cigarette	Raw material storage	27	75~78
	Base fermentation	27	70~80		Cutting	24~27	80	
	Bread cooling	21	"		Cut tobacco storage	27~29	60~65	
	Bread wrapping	18~24	50~65		Manufacturing room	21~27	55~65	
	Powder storage	21~27	50~60		Wrapping room	27~29	50	
Cake freezing	"	45~50	Truck removing room		27	70~75		
Precision machinery	Gear cutting	24~27	45~55	Sweating	49	80		
	Precision parts	24	"	Cotton spinning	Roving	21~24	50~55	
	Precision assembly	20~24	40~50		Spinning	"	55~65	
	Precision test room	24	45~50		Drawing	"	55	
Pharmacy	Capsuling	24~27	35~40		Picker	"	45~50	
	Colloid	21	30~50		Roving	"	50~60	
	Deliquescent salt	27~32	15~40		Warp spinning	24~27	50~65	
	Gelatin capsule	26	40~50		West spinning	"	"	
	Powder product	24~27	5~35		Cotton reel	"	60~70	
	Tablet forming	21~27	35~40	Twister	21~24	65		
	Tablet finish coating	24~27	"	Woven textile	24~27	70~85		
	Serum	23~26	45~50	Fabric storage	24~27	65~75		
Electricity	Powder material drying	54~71	20	Jute spinning	Fabric conditioning room	24~27	90~95	
	General pharmacy room	21~27	10~50		Spinning	24~27	60	
	Match	Manufacture of thermostat	24		50~55	Woven textile	26~27	80
		Manufacture of insulating material	24		65~70	Preparation	18~20	80
	Assembly of electron tubes	20	40		Roving and spinning	24~27	60	
Cable insulation	40	5	Match	Manufacture	22~27	45~50		
Transformer coil winding	16~24	15~35		Storage	15	50		

8.8.2 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的には吹出口から適当な温度、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には、いろいろなものが考えられるが、Fig III-8-54には、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を加える。

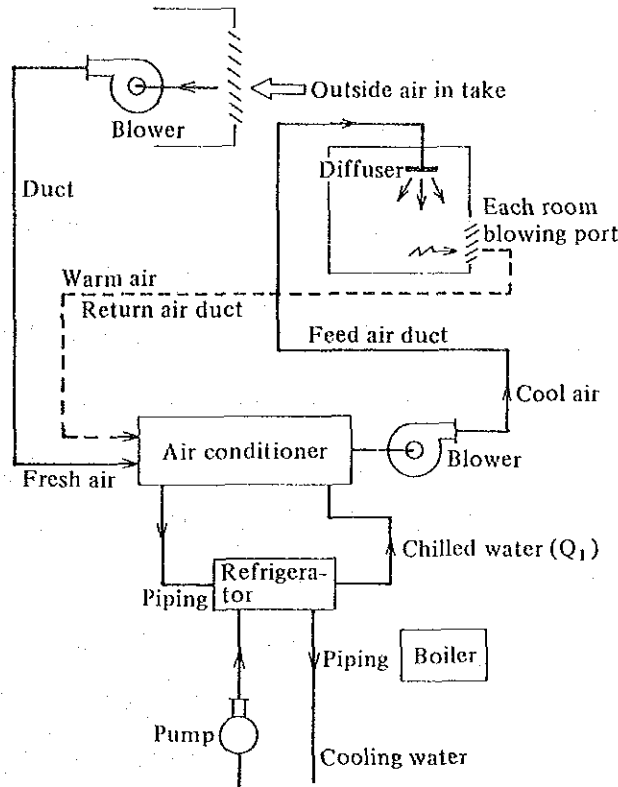


Fig. III-8-54 Composition example of large scale air conditioning system (during cooling)

(1) 熱源装置（冷凍機）

空気調和機に温水（熱媒）や冷水（冷媒）を供給するものであり、熱媒を作るものとしてはボイラ、蓄熱槽、ヒートポンプなどがあり、冷媒を供給するものとして冷凍機がある。その他、熱交換器や付属装置としてポンプ又送風機、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、湿度状態、及び洗浄度にする装置をいう。

従って空気調和機内には空気の浄化、冷却、減湿、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。例えば、空気調和機で調和された給気は送風機でダクトを経て冷房しようとする室へ送られる。また室内の温かい空気は、送風機の負圧によって吸い込まれ空気調和機に入っている。

(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、吹出口、吸込口、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すべてで1ユニットを構成している場合もある。

なお、Fig III-8-54 での各機器の容量は次のようになる。

A) 給気送風機の容量 (Q)

室内の顕熱負荷を  $q_s$  (kcal/h) とすれば、

$$\begin{aligned}
 Q &= \frac{q_s}{\text{空気の比重量 (kg/m}^3\text{)} \times \text{空気の比熱 (kcal/kg} \cdot \text{°C)} \times (t_1 - t_2)} \\
 &= \frac{q_s}{1.2 \times 0.24 (t_1 - t_2)} \\
 &= 3.47 \frac{q_s}{t_1 - t_2} \text{ [m}^3\text{/hr]} \dots\dots\dots(1)
 \end{aligned}$$

ただし、 $t_1$  [°C]; 室内乾球温度 (設定温度)

$t_2$  [°C]; 吹出口乾球温度

B) 空調機の冷房能力 (q)

$$\begin{aligned}
 q &= \text{空気の比重量} \times Q \times (i_1 - i_2) \\
 &= 1.2 Q (i_1 - i_2) \text{ [kcal/hr]} \dots\dots\dots(2)
 \end{aligned}$$

ただし、 $i_1$  [kcal/hr]; 空調機入口空気エンタルピー

$i_2$  [kcal/hr]; 空調機出口空気エンタルピー



c) 冷凍機の能力

上記の冷房能力  $q$  を達成するために、冷凍機から空調機へ送られる冷却水量  $Q_c$  は、空調機熱効率を  $\eta_1$  とすれば、

$$Q_c = \frac{q \times 10^{-3}}{\eta_1 (t_{w1} - t_{w2})} \quad [\text{m}^3/\text{hr}] \quad \dots\dots\dots(3)$$

ただし、 $t_{w1}$ 、 $t_{w2}$ ；空調機入・出冷却水温度〔℃〕

また、圧縮機の動力  $P$  は、圧縮機の効率を  $\eta_2$ 、冷凍機の成績係数を  $\epsilon$  とすれば、

$$P = \frac{q}{860 \eta_2 \cdot \epsilon} \quad [\text{kW}] \quad \dots\dots\dots(4)$$

である。

8.8.3 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機及び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(改善)することが大切である。以下これらについて説明する。

(1) 冷房負荷の種類

冷房機の負荷には Table III-8-39 に示すようなものがある。すなわち、総冷房負荷はこれらの和となる。

なお、Fig III-8-55 に工場事務室の冷房負荷の例をあげておく。これの建物構造は Fig III-8-56 のとおりである。これをみると、熱伝導による負荷が最も大きく、次いで外気、照明、日射、人間の順となっている。

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

(a) During cooling

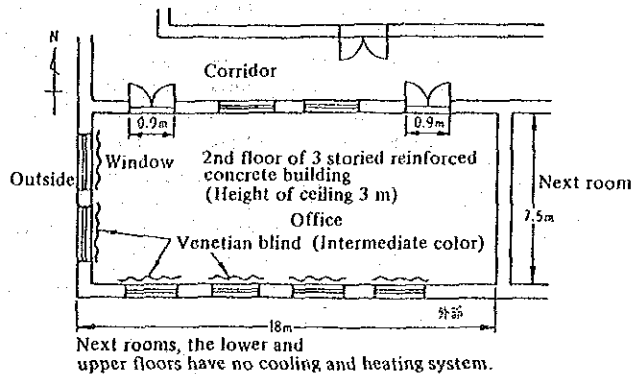


Fig. III-8-55 Example of air conditioning load in factory office

Fig. III-8-56 Example of office

Table III-8-39 Class of cooling load

Main classification	Sub-classification	Outline											
Indoor acquisition heat capacity	Heat capacity from wall by heat transfer $q_w$ (kcal/h)	<p>This is infiltration heat capacity from wall by heat transfer and varies according to thickness of the wall, the material, inner wall, outer wall, etc.</p> $q_w = A_w \cdot K \cdot \Delta t$ <p>Where <math>A_w</math> : Area of wall (<math>m^2</math>), <math>K</math> : Heat once-through factor (<math>kcal/m^2 \cdot h \cdot ^\circ C</math>), <math>\Delta t</math> : Equivalent temperature difference (<math>^\circ C</math>)</p> <p>Note (1) Difference between wall surface temperature and indoor side temperature is called "Equivalent temperature difference".</p> <p>(2) Heat once-through factor varies according to material of wall (Ceiling, floor, side wall, window, etc.), combination and thickness.</p>											
	Infiltration heat capacity from window glass $q_g$ (kcal/h)	<p>(1) <math>q_{gr}</math> : Radiation heat capacity = Radiation amount passing through glass (<math>kcal/m^2 \cdot h</math>) <math>\times</math> Shielding coefficient <math>\times</math> Area of window (<math>m^2</math>) <math>\times</math> Radiation decrease ratio for double glass</p> <p>(2) <math>q_{gc}</math> : Heat capacity infiltrating from inner surface of glass by convection (including heat transfer) = Convection heat capacity coefficient (<math>kcal/m^2 \cdot h</math>) <math>\times</math> Area of glass window (<math>m^2</math>)</p> $q_g = q_{gr} + Q_{gc}$											
	Load due to draught (Infiltrating outside air), $q_i$ (kcal/h)	<p>This has sensible load (<math>q_{is}</math>) and latent load (<math>q_{il}</math>).</p> $q_{is} = 0.29 \times \text{Amount of draught (m}^3/\text{h)} \times \text{Difference between inside and outside temperature (}^\circ\text{C)} = 0.29 \times nV \times \text{Difference between inside and outside temperature (}^\circ\text{C)}$ <p>Where <math>n</math> : Number of times for ventilation hourly  <math>V</math> : Volume of room (<math>m^3</math>)</p> $q_{il} = 720 \times \text{Amount of draught (m}^3/\text{h)} \times \text{Difference between inside and outside absolute humidity (kg/kg)}$											
	Heat capacity from human body $q_h$ (kcal/h)	<p>This varies according to his or her age, distinction of sex, operating conditions, indoor temperature and humidity, etc. Heating capacity of a Japanese adult male during rest at normal temperature is 45 in sensible heat and 35 in latent heat, totaling 80 kcal/h, and in the case of a clerk in an office, 50 in sensible heat and 45 in latent heat, totaling about 95 kcal/h. For female and the aged or little one, their heat capacity are assumed as 80 to 90%, and 50 to 80% respectively. Total heat capacity is obtained by multiplying by the number.</p>											
	Heating capacity from indoor appliances, $q_e$ (kcal/h)	<p>This is heat capacity from various appliances such as lighting appliances, electric heater, appliances for motor, production equipment and appliances for cooking, etc.</p> <p>Heat capacity from lighting appliances = kW number of All lighting (Stabilizer input base) <math>\times</math> 860 <math>\times</math> Use ratio of lighting appliances <math>\times</math> Net heat release ratio*<sup>1</sup> of lighting appliances (kcal/h)</p> <p>Heat capacity from motor = Motor rated output (kW) <math>\times</math> Load factor <math>\times</math> Following coefficient*<sup>2</sup></p> <p>*<sup>1</sup> This is used when a portion of heat capacity has been arranged not to discharge inside the room (for example, it is purged from the ceiling).</p> <p>*<sup>2</sup></p> <table border="1" style="margin-left: 20px;"> <thead> <tr> <th>Place of Motor</th> <th>Place of Machine</th> <th>Coefficient</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Inside air-cooled room</td> <td>Inside air-cooled room</td> <td>1/motor efficiency</td> </tr> <tr> <td>Outside</td> <td>"</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>Inside</td> <td>Outside</td> <td>(1 - motor efficiency)/motor efficiency</td> </tr> </tbody> </table>	Place of Motor	Place of Machine	Coefficient	Inside air-cooled room	Inside air-cooled room	1/motor efficiency	Outside	"	1	Inside	Outside
Place of Motor	Place of Machine	Coefficient											
Inside air-cooled room	Inside air-cooled room	1/motor efficiency											
Outside	"	1											
Inside	Outside	(1 - motor efficiency)/motor efficiency											
Fresh air load	Acquisition heat capacity from intake outside air (forced intake), $q_o$ (kcal/h)	<p>Sensible heat load <math>q_{os} = 0.29 \times \text{Amount of intake outside air (m}^3/\text{h)} \times (\text{Outside temperature} - \text{Indoor temperature}) (^\circ\text{C})</math> (kcal/h)</p> <p>Latent heat <math>q_{ol} = 720 \times \text{Amount of intake outside air (m}^3/\text{h)} \times (\text{Outside absolute humidity} - \text{Indoor absolute humidity (kg/kg)})</math> (kcal/h)</p> <p>In general air conditioning, this load is not necessary when the required fresh air is sufficiently supplemented by draught.</p> <p>Amount of intake outside air = Number of times for ventilation hourly <math>\times</math> Volume of room (<math>m^3</math>) (<math>m^3/h</math>)</p>											
Miscellaneous heat		<p>This means once-through heat load receiving from the outside when feed and return ducts are passing through the place where are not cooled, and exothermic heat from fan and compressor, etc. are included, and it shall be 3 to 7% of the indoor acquisition heat capacity.</p>											
Others		<p>When some allowance is considered for cooling capacity, it shall be 8 to 20% of the total load.</p>											

(2) 省エネルギーの方法

A) 外気負荷の軽減と断熱の強化

外気負荷には、隙間風による負荷  $q_i$  と、新鮮空気負荷  $q_o$  の二つがある。

隙間風による負荷  $q_i$  は自然換気によるもので、窓、扉の隙間や開閉により、外部の高温空気が侵入するものであるが、次式で表わされる。

$$q_i = \text{顕熱負荷} + \text{潜熱負荷} \quad [\text{kcal/hr}] \approx 0.29 NV (t_1 - t_2) + 720 NV \times (x_1 - x_2) \dots\dots\dots (5)$$

ただし、 $N$  (回 / hr) ; 自然換気回数 (Table III-8-40 参照)

$V$  [m<sup>3</sup>] ; 室容積

$t_1, t_2$  [°C] ; 屋外、屋内の温度

$x_1, x_2$  [kg/kg]; 屋外、屋内の絶対湿度

Table III-8-40 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	½ ~ ¾

For air-tight window, ½ of this table shall be used. However, n shall be more than ½ in any case.

隙間負荷を軽減するには窓、扉の密閉を行い、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、夜間において屋外の気温が室温より下がった場合は  $t_1 - t_2$  は負となり、これは冷房負荷軽減を意味し、このような場合は窓や扉を開いて外気を導入する方が、当然のことながら冷房効果はよくなる。

新鮮空気負荷  $q_o$  は強制換気によるもので、取り入れ外気量を  $Q$  [m<sup>3</sup>/hr] とすれば、 $q_o$  は(5)式において、 $NV$  を  $Q$  に置き替えることにより求まる。換気量  $Q$  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 人当たりの必要外気量は約 30 m<sup>3</sup>/hr となる。

いずれにしろ、外気負荷を軽減するためには、炭酸ガス濃度が 0.1% を超えない範囲で極力換気数を減らすことが大切である。

また Fig III-8-57 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開度を大きくし、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、外気取入量を小さくする。

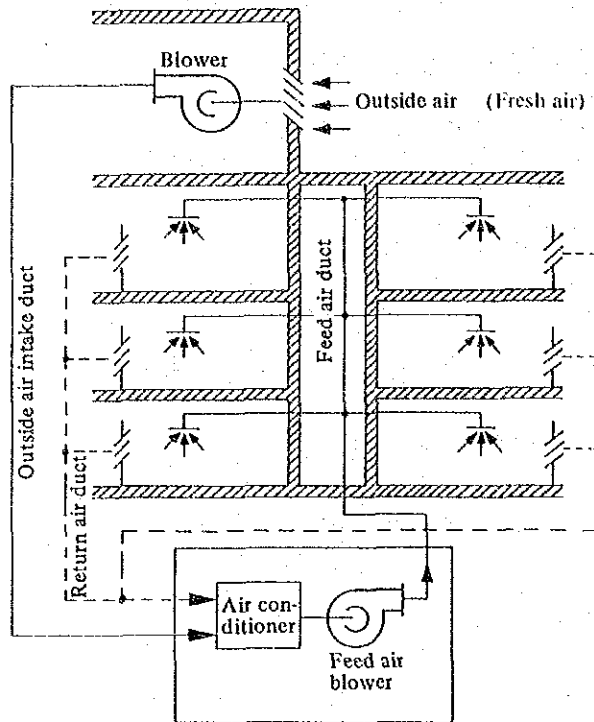


Fig. III-8-57 Air conditioning system when return air is available

このとき注意すべきことは、還気量を多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、 $0.1 \text{ mm Aq} \sim 1 \text{ mm Aq}$  程度正圧にするのが望ましい。

次に、熱伝導による負荷を軽減するためには、建物の断熱を強化することはもちろんであるが、これは専門書に譲るとして、ここで注意したいのは、冷房用配管及びダクトの保冷のことである。保温の場合は、配管内の流体の温度が周囲空気の露点温度より高いため結露しないが、保冷の場合は、配管内の流体温度が低いので、周囲空気の露点温度より低いと結露を起こす。一度結露を起こすと保冷材が吸湿して増々熱伝導率は高くなり結露を早めることになるので注意を要する。

#### B) 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。Fig III-8-55 の場合の例では設定温度を  $26^\circ\text{C}$  から  $27^\circ\text{C}$  に上げることにより、冷房負荷が約  $100 \text{ kcal/hr}$  減と

なった。

また、(1)式において  $q_s$  減、 $t_1$  増となるから  $t_2$  を一定とすれば給気量を減らすことができ、送風機の軸動力を減らすことができる。これにより圧縮機出力、冷却水温度の軽減が可能となる。

C) 室内器具発熱量の減少

必要やむを得ない場合を除いて、発熱を伴う器具は空調室内に置かないことが望ましい。Fig III-8-55 をみると、照明負荷は全負荷の15%を占めているが、この対策としては、効率のよい照明灯の採用など照明の省電力を行うほか、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等の対策が望ましい。

D) 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。あ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、Fig III-8-58 のとおりである。

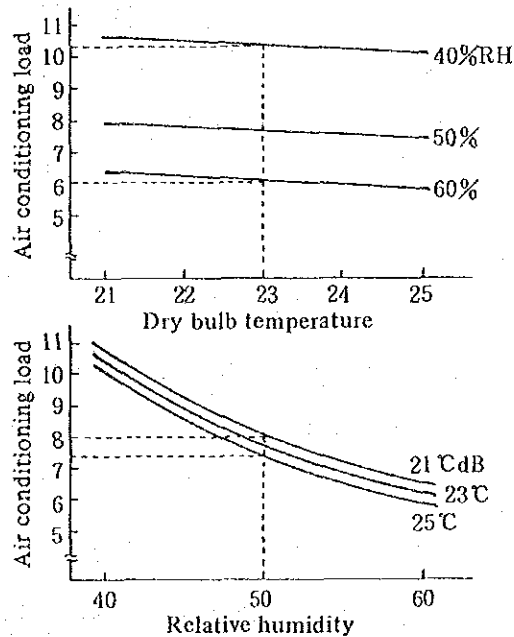


Fig. III-8-58 Energies required for temperature and humidity changes (Trial calculation on a certain conditions)

これによれば温度を23°Cとし、湿度を40%RHから60%RHに緩和すれば約4.2 kcal/hrの負荷軽減になるが、相対湿度50%RHで温度を21°Cから25°Cに緩和した場合、約0.7 kcal/hr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倍大きい。しかし、あま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。

#### E) 制御方法の改善

(1)式及び(3)式に示すように、冷却媒体が運搬する熱負荷は流量と温度差に比例する。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、既に述べたようにダンパ制御やベーン制御、各種の可変速制御があるが消費電力は、一吐出ダンパ制御>入口ベーン制御>可変速制御の順となる。従って許される範囲内で極力効率のよい方式を選定すべきである。特に、V V V F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、効果も大きいので既設を改造しようというときは、まず第一に検討の対象にするのがよい。詳しくは「電動機」及び「送風機」の項を参照されたい。

#### F) 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。従って水質の管理が必要である。その管理基準の参考値をTable III-8-41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 t 当た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。いうまでもなく、フィルタの目詰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度位の清掃が必要となる。

#### G) 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の見直し、廊下などの空調レベルの見直し等を季節毎に行い、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時には、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等、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 III-8-41 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	6.0~8.0	○	○
	Conductivity (μv/m)	200 or less	500 or less (1,000 or less)	○	
	Chlorine ion Cl (ppm)	50 or less	200 or less	○	
	Sulfuric acid iron SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (ppm)	50 or less	200 or less	○	
	Total iron Fe (ppm)	0.3 or less	1.0 or less*2	○	○
	M Alkalinity CaCO <sub>3</sub> (ppm)	50 or less	100 or less		○
	Total hardness CaCO <sub>3</sub> (ppm)	50 or less	200 or less		○
Reference item	Sulfur ion S <sub>1</sub> (ppm)	Not be detected	Not be detected	○	
	Ammonium iron NH <sub>4</sub> (ppm)	Not be detected	Not be detected	○	
	Silicon oxide SiO <sub>2</sub> (ppm)		50 or less		○

\*1. Cooling water means water passing through condenser for both transient 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.

