

タイ王国省エネルギー計画アフターケア調査

エネルギー診断技術ワークショップテキスト

---

## 9. 工業炉運転の省エネルギー

---

1994年3月

国際協力事業団 (JICA)  
財団法人 省エネルギーセンター (ECCJ)



## 1. 炉壁放散熱損失の位置づけ

炉壁放散熱損失以外の代表的な熱損失の項目について、相互の関連から次に挙げる。

### 1.1 排ガスの持ち去る熱量

工業炉の熱損失のうちで最も高い比率を占めているもので、その有効な回収、利用が炉効率向上面で大きく影響してくる。排ガス顕熱の回収および有効利用の方策としては、次のようなものが代表例として一般的に採用されている。

- 1) 空気予熱器，排熱ボイラー，れんが構造による蓄熱器などの設置により，他のエネルギーへの転換および熱交換された予熱空気の燃焼への利用。
- 2) 排ガス循環による被加熱，焼成的の乾燥，予熱仮焼などへの利用。

排ガス顕熱を有効に回収するためには，回収機器の性能はもとより連絡ダクト，煙道など排ガス循環経路においても断熱強化を行い，放散熱を極力抑制する必要がある。

### 1.2 開口部より熱の放射，リークおよび冷気の侵入。

バッチ型の炉などにおいては，被加熱，焼成物の装入および抽出工程で蓋，扉等を開閉する場合外気侵入，炉内熱ガス放出，放射などの熱損失が考えられる。これらに対しては，開口部の形状，大きさの工夫，扉の構造（二重扉など），炉圧調整，燃焼コントロール等の工夫改善が必要である。

また，連続操業炉においても炉の気密保持が不完全な場合など，開口部の隙間からの冷気の吸引，熔解炉天井などのれんが目地からのリーク，炉壁，天井ジョイント部および膨張目地等の充填材部分からのリークなど工業炉の設計，施工，保守などの不備による熱損失が発生する。最近では，ヒートパターンの改善がなされるとともに，炉設計時において，適切な炉形，炉構造の採用や，繊維質断熱材をはじめ用途に応じた充填材の発達と適切な使用により炉の気密保持が行われるようになり，これらの熱損失を軽減している。

### 1.3 炉体耐火物への蓄熱損失

バッチ型の鍛造加熱炉，熱処理炉等のいわゆる雰囲気炉に，耐火れんが（又は不定形耐火物）を使用している場合，加熱，冷却サイクルにおいて，被加熱物を抽出し，一定時間空炉状態にしておき，炉温がある程度低下後，新たに被加熱物を装入し再加熱する場合，初期の加熱エネルギーは炉体耐火物の加熱に費やされる。すなわち炉壁耐火物が定常温度になるまでは，蓄熱ロスとして炉壁に吸収されることとなる。さらに，内張耐火物の熱的スポーリングに対する配

慮から急速加熱には制約があり、一定の昇温時間を余儀なくされるなど過去においてはエネルギー節約上問題が多かった。

炉体蓄熱に要する熱量は経験的に次の式で表される。

$$Q \propto \sqrt{P \cdot C_p \cdot \lambda \cdot H (T - T_0) \cdot F}$$

ここでQ：蓄熱に必要な熱量 (kcal)

P：構成耐火物の密度 (kg/m<sup>3</sup>)

C<sub>p</sub>：構成耐火物の比熱 (kcal/kg °C)

λ：構成耐火物の熱伝導率 (kcal/mh °C)

T, T<sub>0</sub>：設定温度ならびに初期温度 (°C)

F：有効炉内面積 (m<sup>2</sup>)

H：昇温時間 (hours)

この式において明らかなように耐火物の具備特性のうち、P、C<sub>p</sub>、λ、を低下させる手段が蓄熱量Qを低減させることになる。バッチ型炉の熱精算値において、炉体蓄熱損失の占める割合は、れんが構成炉では30～35%に達している。その原因である炉体構成材質量を低減する方策がそのまま熱損失軽減につながるといえる。

最近では、各種の高温用断熱材が開発されており、例えば、既設炉の耐火物表面に繊維質断熱材を使用した例、又、新設炉では繊維質断熱材のみを使用した例、においては炉壁蓄熱損失が大幅に減少するとともに急速加熱、冷却が可能となるなど操炉の改善に寄与し、省エネルギーが一段と進展している。又、連続加熱炉においても同様の施工により、耐火物内への蓄熱の減少とともに、外壁温度低下にも寄与している。

#### 1.4 冷却部設置による熱損失

炉の操業温度が極めて高い場合、内張の耐火物の熔損、侵食を抑制し耐用を維持するために、炉殻鉄皮側に水冷ジャケットを設置し、耐火物の背部を強制的に冷却する方法がとられる。また、炉体構造維持上、耐火物のみでは強度的に不十分で金属構造材で補強が必要な場合、冷却方法の鋼材を芯に構成するなど熱損失を犠牲にしても必要不可欠の炉体構成が採用される場合がある。

前者は高炉、熔解炉等の水冷機構、後者は加熱炉のスキッドパイプ、抽出口部等が代表的なものであるが、その他の各種焼成炉等においても、空冷機構が有機的に採用されている例も多い。この冷却熱損失と耐火物損傷抑制とは相反する関係にあり、耐火物熔損、侵食抑制効果と熱損失の経済的バランスにおいて決定される。これら熱損失回避策はその目的からやむを得ない場合が多いが、操業方法の改善、冷却を行わずにその条件に耐え得る耐火物の研究開発など

今後の課題である。

以上の主な熱損失因子は既設炉においてすでにかかなりの改良がなされているが、エネルギー価格高騰の折から、分析値の損失比率の高い排ガス損失、炉壁放散熱損失については排熱回収設備の増設、付設的な断熱強化などきめ細かく改善を施し、総合的な熱効率を高めていく必要がある。

## 2. 各種断熱材の種類および諸特性

### 2.1 定形耐火・断熱材

#### 2.1.1 耐火れんが

Table 1 Typical quality of refractory bricks

Material Item	Fire clay			High alumina			Silica	Basic				Silicon carbide
	①	②	③	①	②	③		①	②	③	④	
Refractoriness (SK)	32	34	34	35	38	40 <	33	40 <	40 <	40 <	40 <	
Apparent porosity (%)	23.0	21.5	18.0	23.0	22.5	18.0	19.0	11.0	20.0	17.0	18.0	15.0
Bulk density	2.00	2.15	2.25	2.20	2.75	2.95	2.31	3.15	2.90	3.00	2.85	2.70
Cold crushing strength (kg/cm <sup>2</sup> )	350	450	500	400	700	900	450	500	400	450	700	1270
Refractoriness under load T <sub>2</sub> (°C)	1345	1440	1470	1470	1530	1700 <	1620	1610	1615	1650	1620	1700 <
Thermal expansion at 1000°C	0.5	0.6	0.6	0.6	0.5	0.6	1.4	0.6	1.0	1.2	1.3	0.4
Permanent linear expansion (%)	0	0	0	0	0	0	+0.1	+0.4	+0.2	+0.1	-0.1	0
Chemical composition (%)	SiO <sub>2</sub>						96.6					
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	32.5	38.8	40.9	48.0	84.8	90.5	0.5				
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.5	2.0	1.6	2.0	1.8	0.4	1.0				0.3
	MgO								34.7	71.3	78.6	94.8
	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>								25.8	9.9	8.6	
	SiC											

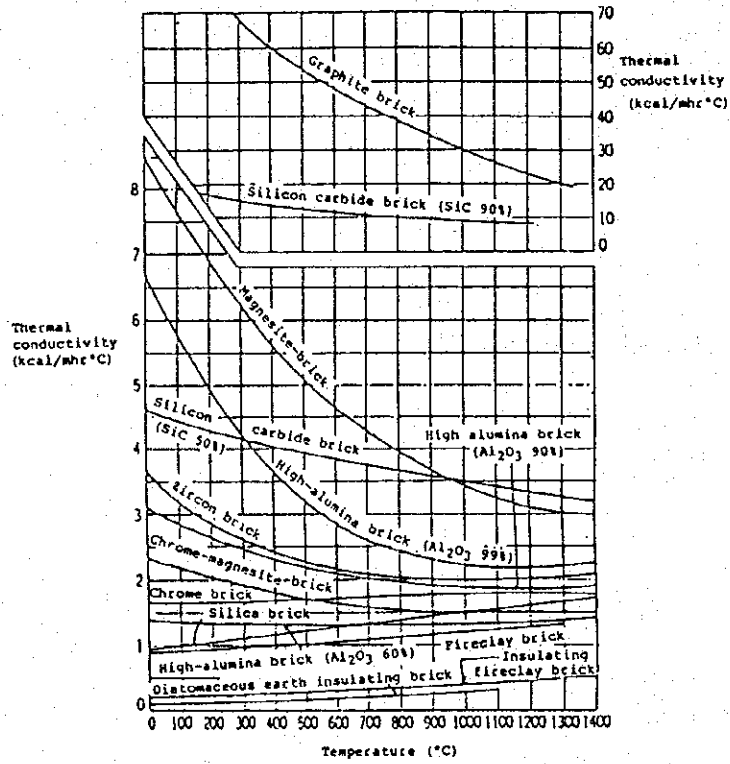


Figure 1 Thermal conductivity of refractory bricks (example)<sup>1)</sup>

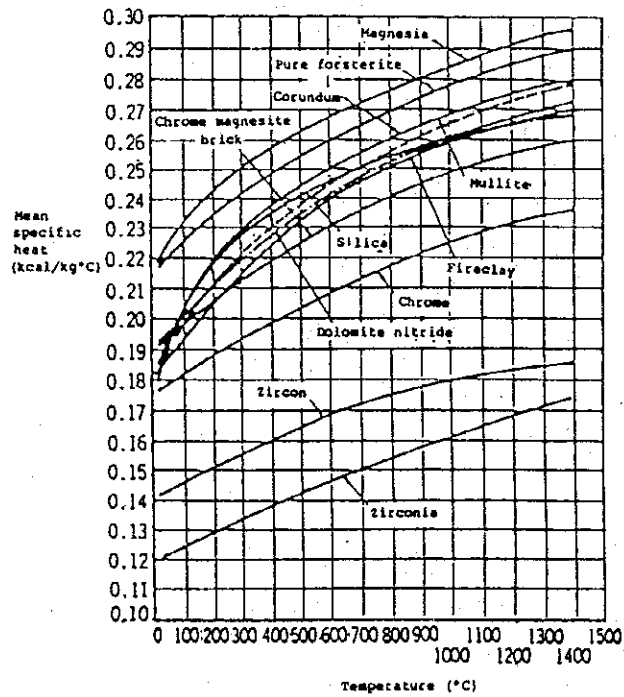


Figure 2 Mean specific heat of refractory bricks

## 2.1.2 耐火断熱れんが

日本の耐火断熱れんがは表2のように、JIS R2611によって規格化されている。A類は熱伝導率の低いことを特徴としており、C類は圧縮強度に重点をおいたれんがである。B類はこの間で熱伝導率も小さく、圧縮強度もある程度大であるもので最も一般的に使用されている。

Table 2 JIS on insulating firebricks (JIS R2611)

Type		Temperature not exceeding reheat shrinkage 2% (°C)	Bulk density	Cold crushing strength (kgf/cm <sup>2</sup> ) MPa	Thermal conductivity (mean temperature 350 ±10°C) (kcal/mhr°C) W/(m·K)
Group A	Class 1	900	0.50 or less	5 or more [0.49]	0.13 or less [0.15]
	Class 2	1000	0.50 or less	5 or more [0.49]	0.14 or less [0.16]
	Class 3	1100	0.50 or less	5 or more [0.49]	0.15 or less [0.17]
	Class 4	1200	0.55 or less	8 or more [0.78]	0.16 or less [0.19]
	Class 5	1300	0.60 or less	8 or more [0.78]	0.17 or less [0.20]
	Class 6	1400	0.70 or less	10 or more [0.98]	0.20 or less [0.23]
	Class 7	1500	0.75 or less	10 or more [0.98]	0.22 or less [0.26]
Group B	Class 1	900	0.70 or less	25 or more [2.45]	0.17 or less [0.20]
	Class 2	1000	0.70 or less	25 or more [2.45]	0.18 or less [0.21]
	Class 3	1100	0.75 or less	25 or more [2.45]	0.20 or less [0.23]
	Class 4	1200	0.80 or less	25 or more [2.45]	0.22 or less [0.26]
	Class 5	1300	0.80 or less	25 or more [2.45]	0.23 or less [0.27]
	Class 6	1400	0.90 or less	30 or more [2.94]	0.27 or less [0.31]
	Class 7	1500	1.00 or less	30 or more [2.94]	0.31 or less [0.36]
Group C	Class 1	1300	1.10 or less	50 or more [4.90]	0.30 or less [0.35]
	Class 2	1400	1.20 or less	70 or more [6.86]	0.38 or less [0.44]
	Class 3	1500	1.25 or less	100 or more [9.81]	0.45 or less [0.52]

耐火断熱れんがは一般的に原料面より、①珪藻土を主にするもの、②耐火粘土を主にするもの、③その他の耐火性原料を主にするもの、に分類することができる。

### (1) 珪藻土質耐火断熱れんが

低温用耐火断熱れんがの主流をなすものであり、珪藻土を細かい粒状にして、これに鋸屑を添加して製造する珪藻土単味れんがと、珪藻土に可塑性耐火粘土を加えて製造する耐火断熱れんがとがある。

**Table 3 Physical properties of diatomaceous earth single-fired bricks (example) 2)**

Type	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	H <sub>1</sub>	H <sub>2</sub>
Temperature not exceeding reheat shrinkage 2.0% (°C)	900	1000	900	1000	900	1000
Reheat shrinkage (%)	0.50	0.66	0.57	0.56	0.40	0.58
Bulk density	0.47	0.46	0.65	0.65	0.80	0.75
Cold crushing strength (kg/cm <sup>2</sup> )	9	11	34	33	92	95
Modulus of rupture (kg/cm <sup>2</sup> )	4	5	15	18	39	43
Thermal conductivity (kcal/mhr°C) at 350°C	0.12	0.13	0.16	0.17	0.19	0.23
Porosity (%)	80	80	71	72	65	65
Coefficient of linear expansion/shrinkage at temperature (%) at 1000°C	at 900°C 0.10	0.30	at 900°C 0.10	0.26	at 900°C 0.17	0.23

(2) 粘土質耐火断熱れんが

比較的高温の領域で炉壁よりの放散熱量と炉壁よりの蓄熱損失を低減させ、省エネルギー、作業環境の改善、設備の効率化を目的として使用されるものである。

一般的にはカオリナイト、ハロイサイト系の粘土のシャモットやろう石などを主原料とし、これに可塑性耐火粘土と鋸屑等を加えて製造する。

**Table 4 Physical properties of insulating firebricks using fireclay (example) 2)**

Type	A <sub>6</sub>	A <sub>7</sub>	B <sub>5</sub>	B <sub>6</sub>	C <sub>1</sub>
Temperature not exceeding reheat shrinkage 2.0% (°C)	1400	1500	1300	1400	1300
Reheat shrinkage (%)	0.55	0.71	0.53	0.54	0.57
Bulk density	0.68	0.73	0.78	0.86	1.06
Cold crushing strength (kg/cm <sup>2</sup> )	14	14	28	35	63
Modulus of rupture (kg/cm <sup>2</sup> )	7	7	17	20	25
Thermal conductivity (kcal/mhr°C) at 350°C	0.19	0.21	0.22	0.24	0.28
Coefficient of linear expansion/shrinkage at temperature (%) at 1000°C	0.37	0.38	0.50	0.43	0.51



**Table 5 Physical properties of fireclay bricks using lightweight grain (example) <sup>2)</sup>**

Type	A	B	C	D	
Temperature not exceeding reheat shrinkage 2.0% (°C)	1450	1300	1400	1300	
Max. temperature for safe use (°C)	—	—	—	—	
Reheat shrinkage (%)	0.35	at 1300 × 8 hr 1.16	—	—	
Bulk density	1.42	1.53	1.5 ≥	1.60	
Cold crushing strength (kg/cm <sup>2</sup> )	130	120	120 ≤	150	
Modulus of rupture (kg/cm <sup>2</sup> )	61	—	—	—	
Thermal conductivity (kcal/mhr°C) at 350°C	0.47	0.51	0.55 ≥	0.60 ≥	
Porosity (%)	44	42	47	33	
Coefficient of linear expansion/shrinkage at temperature (%) at 1000°C	0.42	0.53	0.52	0.60	
Refractoriness under load (1 kg/cm <sup>2</sup> · T <sub>2</sub> °C)	1340	1310	1340	—	
Chemical composition (%)	SiO <sub>2</sub>	59	66	57	64
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	37	27	42	24
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.9	1.5	2	—

**Table 6 Physical properties of insulating firebricks using form styrol or pearlite (example) <sup>3)</sup>**

Type	A	B	C	D	E
Temperature not exceeding reheat shrinkage 2.0% (°C)	1300	1300	1400	1400	1300
Max. temperature for safe use (°C)					1500
Reheat shrinkage (%)	0.02	0.05	0.08	0.10	0.5 >
Bulk density	0.52	0.53	0.65	0.67	1.10–1.20
Cold crushing strength (kg/cm <sup>2</sup> )	16	15	30	29	80–200
Modulus of rupture (kg/cm <sup>2</sup> )	10	9	17	15	
Thermal conductivity (kcal/mhr°C) at 350°C	0.14	0.15	0.17	0.19	0.30–0.35
Porosity (%)	81	80	76	77	56.2–62.6
Coefficient of linear expansion/shrinkage at temperature (%) at 1000°C	0.41	0.38	0.42	0.44	—
Refractoriness (SK)	—	—	—	—	35
Refractoriness under load (1 kg/cm <sup>2</sup> · T <sub>1</sub> C)	—	—	—	—	1250 <

(3) 高アルミナ・アルミナ質耐火断熱れんが

バブルアルミナを用いるものと、高アルミナ原料を用いるものの2種に大別することができる。バブルアルミナを用いたものは、バブルアルミナに結合材を加え加圧成形した後高温焼成する。高アルミナ原料を用いるれんがは、電融、焼結アルミナ・ムライトなどを主原料とし、粘土質耐火断熱れんがと同様な方法により製造される。

Table 7 Physical properties of high-alumina, alumina insulating firebricks (example) 2, 4)

Type	A	B	C	D	E	
Temperature not exceeding reheat shrinkage 2.0% (°C)	1800	1800	—	1600	1650	
Max. temperature for safe use (°C)	—	—	—	—	—	
Reheat shrinkage (%)	0.30	0.10	—	0.38	0.24	
Bulk density	1.28	1.53	0.48	0.87	0.86	
Cold crushing strength (kg/cm <sup>2</sup> )	65	184	10	22	45	
Modulus of rupture (kg/cm <sup>2</sup> )	33	72	9	17	28	
Thermal conductivity (kcal/mhr°C) at 350°C	0.61	0.77	—	0.29	0.30	
Porosity (%)	63	55	—	—	—	
Coefficient of linear expansion/ shrinkage at temperature (%) at 1000°C	0.66	0.79	—	0.48	0.54	
Refractoriness (SK)	40 <	40 <	—	—	—	
Refractoriness under load (1 kg/cm <sup>2</sup> · T <sub>2</sub> °C)	1600 <	1500 <	—	—	—	
Chemical composition (%)	SiO <sub>2</sub>	13.6	0.4	0.1	—	—
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	85.7	99.2	99.3	—	—
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.1	0.1	0.13	0.55	0.51

## (4) 珪酸質耐火断熱レンがの品質例

Table 8 Physical properties of silicic acid insulating firebrick (example) 5)

Type	A	B	C	
Temperature not exceeding reheat shrinkage 2.0% (°C)	1550	—	—	
Max. temperature for safe use (°C)	—	—	1500	
Reheat shrinkage (%)	0.02	—	-0.53	
Bulk density	0.96	1.18 or less	1.18	
Cold crushing strength (kg/cm <sup>2</sup> )	42	40 or more	50	
Modulus of rupture (kg/cm <sup>2</sup> )	25	—	19	
Thermal conductivity (kcal/mhr°C) at 350°C	0.32	0.4 or less	0.37	
Porosity (%)	—	Apparent porosity 48 or more	51	
Coefficient of linear expansion/shrinkage at temperature (%) at 1000°C	1.18	1.2 or less	1.09	
Refractoriness (SK)	—	31	28	
Refractoriness under load (1 kg/cm <sup>2</sup> · T <sub>2</sub> °C)	—	—	1350	
Chemical composition (%)	SiO <sub>2</sub>	9.24	88 or more	88.8
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	1.7 or less	0.4
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	2.5 or less	0.2
	CaO	—	—	5.7

(5) 耐火断熱レンガ (JIS. A. B. C. 類) の熱伝導率

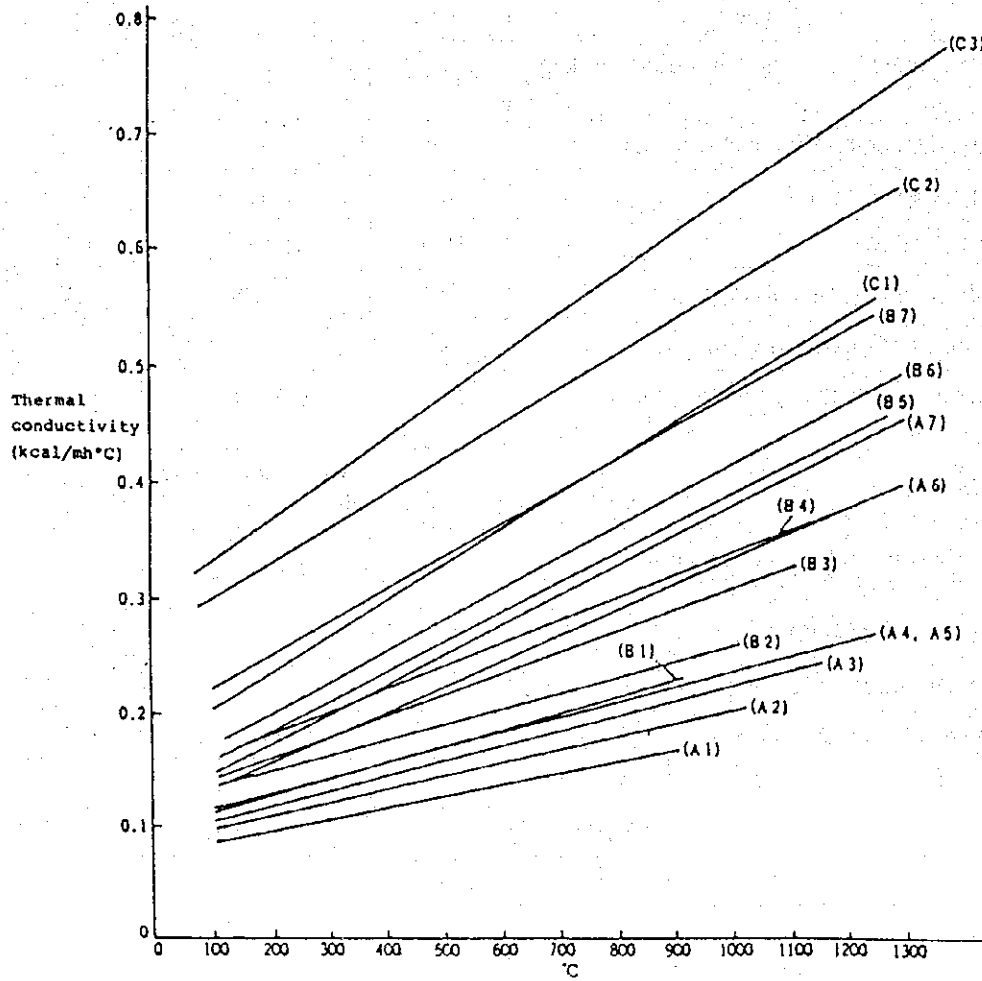


Figure 3 Thermal conductivity of insulating firebricks (JIS Classes A, B, and C) (example)

## 2.2 不定形耐火・断熱材

### 2.2.1 耐火キャストブルおよび耐火プラスチック

#### (1) 各種耐火キャストブルの品質例

Table 9 Physical properties of castable refractories (example)<sup>9)</sup>

Item	Material	High-alumina		Fireclay	
		①	②	①	②
Max. temperature for use (°C)		1800	1650	1550	1450
Execution required quantity (kg/m <sup>3</sup> )		2850	2200	2050	1900
Linear change after heating (%)	110°C - 24 h	0	0	0	0
	1000°C - 3 h	-0.06	-0.20	-0.25	-0.15
	1350°C - 3 h	-0.09	-0.50	+0.50	-0.20
	1500°C - 3 h	-0.20	-0.40	-0.60	—
Crushing strength after heating (kgf/cm <sup>2</sup> )	110°C - 24 h	450	200	260	250
	1000°C - 3 h	340	180	180	150
	1350°C - 3 h	450	200	300	300
	1500°C - 3 h	500	600	650	—
Modulus of rupture after heating (kgf/cm <sup>2</sup> )	110°C - 24 h	80	40	60	50
	1000°C - 3 h	55	25	35	30
	1350°C - 3 h	40	40	50	65
	1500°C - 3 h	80	155	110	—
Thermal conductivity (kcal/mh°C)	at 260°C	0.93	0.65	0.64	0.52
	at 540°C	0.99	0.75	0.73	0.59
	at 800°C	1.04	0.86	0.80	0.63
Chemical composition (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	95	61	47	37
	SiO <sub>2</sub>	—	33	43	51

(2) 各種耐火プラスチックの品質例

Table 10 Physical properties of plastic refractories (example) 9)

Item	Material	High-alumina		Fireclay	
		①	②	①	②
Max. temperature for use (°C)		38	37	34-35	32
Execution required quantity (kg/m <sup>3</sup> )		1800	1750	1650	1400
Linear change after heating (%)	110°C - 24 h	2900	2600	2300	2250
	1000°C - 3 h	-0.20	-0.55	-0.70	-0.70
	1350°C - 3 h	-0.25	-0.70	-0.55	-0.90
	1500°C - 3 h	+0.15	-0.75	0	-1.20
Crushing strength after heating (kgf/cm <sup>2</sup> )	110°C - 24 h	+0.50	-0.65	-0.10	—
	1000°C - 3 h	170	90	40	45
	1350°C - 3 h	280	210	170	200
	1500°C - 3 h	600	440	320	320
Modulus of rupture after heating (kgf/cm <sup>2</sup> )	110°C - 24 h	800	450	380	380
	1000°C - 3 h	35	30	10	5
	1350°C - 3 h	45	40	20	20
	1500°C - 3 h	120	100	40	40
Thermal conductivity (kcal/mh°C)	at 260°C	150	130	95	95
	at 540°C	1.21	1.15	0.84	0.81
	at 800°C	1.36	1.30	0.91	0.89
Chemical composition (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	92	73	44	38
	SiO <sub>2</sub>	6	24	49	54

2.2.2 耐火断熱キャストブルおよび耐火断熱プラスチック

耐火断熱キャストブルは断熱性の高い軽量骨材として、仮焼珪藻土、膨張珪石、膨張パーライト、粘土質軽量シャモット、アルミナバブル等が用いられ、また結合材としてアルミナセメントが多く用いられている。

耐火断熱プラスチックは、軽量骨材と粘土、粘結剤等を加え少量の水を加えて混練し、練り土状にした断熱材である。

Table 11 Physical properties of Insulating castable refractory and plastic refractory (example )6)

Test item	Insulating castable								Insulating plastic			
	800	900	1000	1200	1500	1800	1200	1400	1600			
Max. temperature for use (°C)												
Bulk density	After drying	0.44	0.91	0.90	1.22	1.48	1.14	--	--	--	--	--
	After 500°C firing	0.40	0.85	0.84	1.15	1.44	1.10	--	--	--	--	--
	After max. temperature burning	0.89	0.88	0.84	1.10	1.56	1.11	--	--	--	--	--
Cold crushing strength (kg/cm <sup>2</sup> )	After drying	4.0	34	28	57	50	59	39	58	104		
	After 500°C firing	3.0	31	28	43	26	40	--	--	--		
	After max. temperature burning	3.0	28	30	55	179	1700°C	48	104	135	1400°C	
Linear change (%)	After drying	-0.08	-0.20	-0.25	-0.18	-0.06	-0.06	-0.35	-0.14	-0.18		
	After 500°C firing	-0.65	-0.60	-0.65	-0.30	-0.20	-0.10	--	--	--		
	After max. temperature burning	-0.93	-0.97	-0.95	-0.48	-0.90	-0.83	-0.73	-1.03	-0.07	1400°C	
Thermal conductivity (kcal/mh°C) at 350°C	500°C burned product	0.1	0.19	0.19	0.23	0.29	0.74	400°C	400°C	400°C	0.38	0.41
								0.25	0.38	0.41		
Chemical composition (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	29.5	25.9	25.4	39.4	65.2	93.9	31	42	72		
	SiO <sub>2</sub>	30.1	55.9	56.3	32.8	30.2	1.0	67	45	25		
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.6	5.2	4.9	0.1	2.2	0.2	--	--	--		
Aggregate material	Vermiculite	Diatomaceous earth	Vermiculite	Fire-clay	High-alumina	High-alumina	High-alumina	Lightweight insulating	Fire-clay	Bubble alumina		

### 2.2.3 纖維質不定形複合材料

セラミックファイバーの耐熱性，施工性，耐風速性等の向上に対して，ファイバーと既存の耐火断熱材料との複合品である。キャストブル複合材料はアルミナセメントをバインダーとし，これにセラミックファイバー，耐火骨材を配合したものであり，プラスチック複合材料は，セラミックファイバーに水，増粘剤，硬化剤，耐火骨材も加え練り土状にしたものである。

Table 12 Physical properties of fibrous composite material (example 7)

		Castable composite material		Plastic composite material		
Max. temperature for use (°C)		1200	1300	1000	1000	1400
Bulk density	After 105°C drying	0.81	0.76	0.35	0.35	0.89
	After max. temperature burning	0.70	0.63	0.34	0.34	0.87
Modulus of rupture (kg/cm <sup>2</sup> )	After 105°C drying	15	12	4.0	6.0	8.0
	After max. temperature burning	6	4	0.5	1.2	10.0
Cold crushing strength (kg/cm <sup>2</sup> )	After 105°C drying	17	16	—	—	—
	After max. temperature burning	7	5	—	—	—
Heating shrinkage (%)	1000°C	0.6	0.4	1.2	1.3	—
	1200°C	1.0	—	—	—	0.6
	1300°C	—	0.6	—	—	—
	1400°C	—	—	—	—	1.3
	1500°C	—	—	—	—	2.2
Thermal conductivity (kcal/mh°C) at normal temperature		0.15	0.14	0.069	0.071	0.16
Chemical composition (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	53.5	65.2	47	41	65
	SiO <sub>2</sub>	29.6	25.4	52	58	34
	CaO	14.8	9.1	—	—	—



## 2.3 繊維質断熱材

### 2.3.1 セラミックファイバー

#### (1) アルミナ・シリカ質ファイバー

アルミナ・シリカ質ファイバーは、カオリン仮焼物、ボーキサイト、アルミナあるいは珪砂、珪石粉などのアルミナ・シリカ原料にホウ酸ガラス、ジルコニア、酸化クロム等を加え、 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ をほぼ1:1となるように配合し、電気炉で2000℃以上の高温で熔融し、これを細流として流出させて繊維化したものである。繊維化する方法には、圧縮空気又は、スチームジェットを吹きつける Blowing Process と高速回転するローターの遠心力を利用する Spinning Process とがある。

Table 13 Physical properties of commercially available ceramic fiber <sup>8)</sup>

Maker	A		B	C	D	E	F	G
	(Short fiber)	(Long fiber)						
Fiber diameter (m)		2.3-2.5	2.8	2-3.5	3.6	3	2.9	—
Fiber length (mm)	< 38	13-254	Mean 100	< 38	Max.length 250	5-30	75	—
True specific gravity ( $\text{g/cm}^3$ )	2.73	—	2.56	2.6	2.73	2.65	3.1	—
Melting point (°C)		>1,760	1,760	1,760	> 1,760	1,800	1,825	—
Temperature for use (°C)		1,260	1,260	1,260	1,300	1,260	1,400	1,480
Chemical composition (%)								
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	50.9	51.3	50.1	45.5	51.8	52-53	60.2	40.4
SiO <sub>2</sub>	46.8	45.3	49.3	54.0	47.9	45-46	38.7	55.1
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	—	0.1	0.2	0.1	0.1-0.15	0.2	—
TiO <sub>2</sub>	—	—	0.1	0.5	tr.	1-1.5	0.2	—
CaO	—	—	0.1	—	tr.	—	0.1	—
MgO	—	—	tr.	—	tr.	—	0.1	—
Na <sub>2</sub> O	0.8	—	0.3	0.2	0.2	0.1-0.2	0.4	—
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.2	—	—	—	—	0.1-0.2	—	—
ZrO <sub>2</sub>	—	3.4	—	—	—	—	—	—
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	—	—	—	—	—	—	3.5

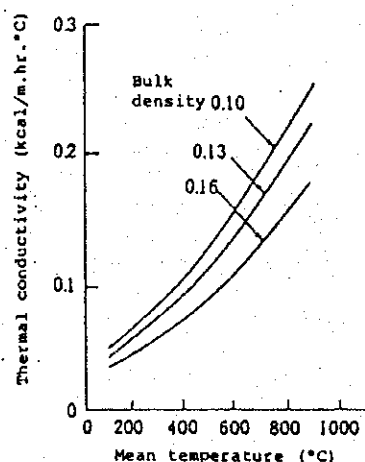


Figure 4 Thermal conductivity of alumina silica fiber

アルミナ・シリカ質ファイバーは基本となる“バルクファイバー”をもととして、ブランケット、フェルト、成形品ペーパー、ロープ、ブレイド、吹き付け品など各種の2次製品があり、用途はきわめて広く、今後ますます拡大される傾向にある。

(2) アルミナ質ファイバー

セラミックファイバーは熱処理炉などの比較的低温の雰囲気炉に使用され省エネルギー用断熱材として注目されてきたが、圧延用連続加熱炉や鍛造用加熱炉など1300°C内外の加熱炉では耐熱性、耐久性が不十分であり、超高温用断熱材としてアルミナ質ファイバーが開発された。

Table 14 Physical properties of alumina fiber <sup>8)</sup>

Fiber density	3.4 g/cm <sup>3</sup>
Melting point	>2,000°C
Max. temperature for use	>1,600°C
Specific heat	0.25 cal/g°C
Tensile strength	1 × 10 <sup>2</sup> MN/m <sup>2</sup>
Specific tensile strength	40 × 10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> S <sup>2</sup>
Young's modulus	1 × 10 <sup>4</sup> MN/m <sup>2</sup>
Specific modulus of elasticity	4 × 10 m <sup>2</sup> S <sup>2</sup>
Fiber diameter	3 μ (mean)
Surface area	3 m <sup>2</sup> /g
Mohs's hardness	6
Composition	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 95%, SiO <sub>2</sub> 5%

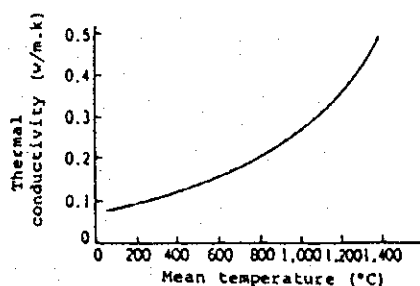


Figure 5 Thermal conductivity of alumina fiber

(3) ジルコニア質ファイバー

ジルコニア質ファイバーは、セラミックファイバーの中で現在最も高温まで使用できる可能性がある。

Table 15 Characteristics of zirconia fiber 9)

Appearance	White short fiber		
Fiber diameter	Mean 5 $\mu$		
Fiber length	Mean 20–30 mm		
Melting point	2600°C		
True specific gravity	5.8		
Bulk density	80–100 kg/m <sup>3</sup>		
Thermal conductivity (kcal/mh° C)		(Bulk density 100)	(Bulk density 400)
	500°C	0.10	0.12
	1000°C	0.26	0.17
	1500°C	0.75	0.23

2.4 高温および低温断熱材料

日本工業規格 (JIS) は7種類の高温および低温断熱材料を指定している。ロックウール、グラスウール、牛毛フェルト、珪酸カルシウム、フォームポリスチレン、撥水性パーライトおよび硬質ウレタンフォームである。

この内、牛毛フェルト、フォームポリスチレン、および硬質ウレタンフォームは最高常用温度が70°Cないし10°Cであるから、低温断熱に主として使用される。ロックウール、珪酸カルシウム、および撥水性パーライトは最高常用温度が比較的高いので、高温の炉の耐火物をライニングするためにもまた使用されることが多い。セラミックファイバーは熱伝導性が低く最高常用温度が高いが、他の高低温断熱材料に比べて非常に高価であるから、1000°Cよりも高い温度の断熱材として使用され、上記の高低温断熱材としては使用されない。

### 2.4.1 ロックウール断熱材

ロックウール断熱材は安山岩のような岩石にスラグや石灰石を加え、1300℃ないし1600℃の高温でその混合物を溶解し、更に繊維を形成するために、高圧水蒸気または圧縮空気によってそれを吹きつけ或いは遠心力によってそれを散らすことによって調製される。それぞれの目的や適用に合わせて、色々な高温断熱材がロックウールから製造される。ロックウールの断熱材は、グラスウール断熱材のように、低い密度の範囲では密度の減少に従って熱伝導性が急に上がる。この現象は、主としてその断熱層が放射に転移するために起こり、その熱伝導性が最小となる密度が存在する。高密度の範囲では、ロックウールの熱伝導性は殆ど温度に関して直線的に上昇するが、低密度の範囲では、その関係は二次方程式で表される曲線を示す。

Table 16 Kinds and main physical properties of rock wool insulators

Material standard No. and name	Kind		Bulk density (kg/m <sup>3</sup> )	Maximum working temperature (°C)	Thermal conductivity W/m·K (kcal/m·h·°C)
JIS A 9504 (Rock Wool Insulators)	Rock wool	—	150 or less	650	(Average temperature 70±5°C) 0.044 {0.038} or less
	Heat insulating board	No.1	100 or less	600	0.044 {0.038} or less
		No.2	160 or less	600	0.043 {0.037} or less
		No.3	300 or less	600	0.044 {0.038} or less
		No. 4a	350 or less	650	0.055 {0.047} or less
		No. 4b	350 or less	400	0.055 {0.047} or less
	Felt	—	70 or less	400	0.049 {0.042} or less
	Pipe cover	—	200 or less	600	0.044 {0.038} or less
	Heat insulating belt	No.1	100 or less	600	0.052 {0.045} or less
		No.2	160 or less	600	0.049 {0.042} or less
	Blanket	No. 1	100 or less	600	0.044 {0.038} or less
No.2		160 or less	600	0.043 {0.037} or less	

### 2.4.2 グラスウール断熱材

製造方法はロックウール断熱材と殆ど同じであるが、一般的にフェノール樹脂がバインダとして使用されることが多い。それ故、グラスウール断熱材はロックウール断熱材よりも有機物の割合が高く、高温での使用には余り適していない。

Table 17 Kinds and main physical properties of glass wool insulators

Material standard No. and name	Kind		Bulk density (kg/m <sup>3</sup> )	Maximum working temperature (°C)	Thermal conductivity	
					W/m·K	(kcal/m·h·°C)
JIS A 9505 (Glass Wool Insulators)	Glass wool	No.2	—	400	(Average temperature 70±5°C) 0.042 {0.036} or less	
		No.3	—	400	0.049 {0.042} or less	
	Heat insulating board	No.2 24 k	24±2	300	0.049 {0.042} or less	
		No.2 32 k	32±4	300	0.047 {0.040} or less	
		No.2 40 k	40+4, -3	350	0.044 {0.038} or less	
		No.2 48 k	48+4, -3	350	0.043 {0.037} or less	
		No.2 64 k	64±6	400	0.042 {0.036} or less	
		No.2 80 k	80±7	400	0.042 {0.036} or less	
		No.2 96 k	96+9, -8	400	0.042 {0.036} or less	
		No.2 120 k	120±12	400	0.042 {0.036} or less	
		No.3 80 k	80±7	400	0.047 {0.040} or less	
		No.3 96 k	96+9, -8	400	0.047 {0.0340} or less	
		No.3 120 k	120±12	400	0.047 {0.040} or less	
	Blanket	b	24 or more	350	0.048 {0.041} or less	
		c	40 or more	400	0.043 {0.037} or less	
	Heat insulating belt	24 k, 32 k	24, 32 or more	300	0.052 {0.045} or less	
		40 k, 48 k	40, 48 or more	350	0.052 {0.045} or less	
		64 k or more	64 or more	400	0.052 {0.045} or less	
Pipe cover	—	45 or more	350	0.043 {0.037} or less		

### 2.4.3 牛毛フェルト

これは JIS には指定されているが、余り一般には使用されていない。

Table 18 Kinds and main physical properties of cattle hair felt

Material standard No. and name	Kind		Bulk density (kg/m <sup>3</sup> )	Maximum working temperature (°C)	Thermal conductivity	
					W/m·K	(kcal/m·h·°C)
JIS A 9508 (Cattle hair Felt)	No.1	Thickness (mm) Less than 15	130 or more	100	(Average temperature) (70±5°C) (0°C)	
		15 or more	130 or more	100		
	No.2	Less than 15	130 or more	100	0.053	0.042
		15 or more	130 or more	100	{0.046} or less	{0.036} or less
	No.3	Less than 15	100 or more	100		
		15 or more	100 or more	100		

#### 2.4.4 珪酸カルシウム断熱材

この断熱材は珪藻土のような珪酸質の粉末に石灰と補強繊維を加え、化学反応を起こして珪酸カルシウムの結晶をすることによって調製される。作られた結晶組織によって、性能の異なる製品が得られる。最高常用温度が1000℃のゾノトライト系および650℃のトバモライド系である。

用途の違いに応じて、高熱断熱板およびパイプ・カバーが入手できる。

Table 19 Kinds and main physical properties of calcium silicate insulators

Material standard No. and name	Kind	Bulk density (kg/m <sup>3</sup> )	Maximum working temperature (°C)	Thermal conductivity W/m·K (kcal/m·h·°C)
JIS A 9510 (Calcium Silicate Insulators)				(Average temperature 70±5°C)
	Heat insulating board No. 1-13	130 or less	1000	0.049 {0.042} or less
	Pipe cover No. 1-13	130 or less	1000	0.049 {0.042} or less
	Heat insulating board No. 2-17	170 or less	650	0.055 {0.047} or less
	Pipe cover No. 2-17	170 or less	650	0.055 {0.047} or less
	Heat insulating board No. 1-22	220 or less	1000	0.062 {0.053} or less
	Pipe cover No. 1-22	220 or less	1000	0.062 {0.053} or less
	Heat insulating board No. 2-22	220 or less	650	0.062 {0.053} or less
Pipe cover No. 2-22	220 or less	650	0.062 {0.053} or less	

#### 2.4.5 フォームポリスチレン断熱材

この断熱材はポリスチレン樹脂に発泡剤と難燃剤を加え、発泡のためにその混合物を過熱することによって調製される。

**Table 20 Kinds and main physical properties of polystyrene foam insulators**

Material standard No. and name	Kind	Bulk density (kg/m <sup>3</sup> )	Maximum working temperature (°C)	Thermal conductivity W/m·K (kcal/m·h·°C)
JIS A 9511 (Polystyrene Foam Insulators)				(Average temperature 20±5°C)
	Class A heat insulating board special	27 or more	70	0.034 {0.029} or less
	Class A heat insulating board No. 1	30 or more	70	0.036 {0.031} or less
	Class A heat insulating board No. 2	25 or more	70	0.037 {0.032} or less
	Class A heat insulating board No. 3	20 or more	70	0.040 {0.034} or less
	Class A pipe cover No. 1	35 or more	70	0.036 {0.031} or less
	Class A pipe cover No. 2	30 or more	70	0.036 {0.031} or less
	Class A pipe cover No. 3	25 or more	70	0.037 {0.032} or less
	Class B heat insulating board type 1	—	70	0.040 {0.034} or less
	Class B heat insulating board type 2b	—	70	0.034 {0.029} or less
	Class B heat insulating board type 2a	—	70	0.034 {0.029} or less
	Class B heat insulating board type 3	—	70	0.028 {0.024} or less
	Class B pipe cover type 1	—	70	0.040 {0.034} or less
	Class B pipe cover type 2	—	70	0.034 {0.029} or less
Class B pipe cover type 3	—	70	0.028 {0.024} or less	

#### 2.4.6 撥水性パーライト断熱材

パーライトや黒曜石のような、揮発成分が固体に溶解している天然ガラスで出来た岩を砕いて、穀粒の大きさに整え、1000℃以上に加熱して、熔融状態とし、揮発成分を揮発させた場合、それらは発泡して多孔質のガラスの粒状物を形成する。補強繊維とバインダをそのガラスの粒状物に加えて、その混合物をプレスで断熱製品に成形する。

**Table 21 Kinds and main physical properties of water repellent perlite insulators**

Material standard No. and name	Kind	Bulk density (kg/m <sup>3</sup> )	Maximum working temperature (°C)	Thermal conductivity W/m·K (kcal/m·h·°C)
JIS A 9512 (Water Repellent Perlite Insulators)				(Average temperature 20±5°C)
	Heat insulating board No. 1	250 or less	900	0.072 {0.062} or less
	Heat insulating board No. 2	180 or less	650	0.056 {0.048} or less
	Heat insulating board No. 1	250 or less	900	0.072 {0.062} or less
	Heat insulating board No. 2	180 or less	650	0.056 {0.048} or less

### 2.4.7 硬質ウレタンフォーム断熱材

この断熱材は、炭酸ガスまたはフロロカーボンの膨張によって高ポリマのウレタン樹脂を发泡させることによって得られる。熱伝導性が非常に低い。

Table 22 Kinds and main physical properties of hard urethane foam insulators

Material standard No. and name	Kind	Bulk density (kg/m <sup>3</sup> )	Maximum working temperature (°C)	Thermal conductivity W/m·K (kcal/m·h·°C)
JIS A 9514 (Hard Urethane Foam Insulators)				(Average temperature 20±5°C)
	Heat insulating board type 1 No. 1	45 or more	100	0.024 {0.021} or less
	Heat insulating board type 1 No. 2	35 or more	100	0.024 {0.021} or less
	Heat insulating board type 1 No. 3	25 or more	100	0.025 {0.022} or less
	Heat insulating board type 2 No. 1	45 or more	100	0.023 {0.020} or less
	Heat insulating board type 2 No. 2	35 or more	100	0.023 {0.020} or less
	Heat insulating board type 2 No. 3	25 or more	100	0.024 {0.021} or less
	Pipe cover No. 1	45 or more	100	0.024 {0.021} or less
	Pipe cover No. 2	35 or more	100	0.024 {0.021} or less
Pipe cover No. 3	25	100	0.025 {0.022} or less	

### 2.4.8 他の断熱材

他の断熱材には且って JIS に指定されていた石綿断熱材、珪藻土断熱材および炭酸マグネシウム断熱材が含まれる。しかしながら、それらは発癌性の石綿を含んでいるので、それらの使用が禁止され、対応する規格が改定された時に JIS から削除された。

## 3. 炉壁断熱構成について

炉壁の断熱構成を検討する場合、炉の操業条件を十分把握して行う必要がある。すなわち、炉内温度条件、内容物の性状（気、固、流体のいずれの状態であるか）、内容物との接触の有無、炉体自身が固定されたものか、あるいは回転、傾動を伴うものか等により断熱方式は異ってくる。また「工場におけるエネルギー使用の合理化に関し、定量的に示された判断基準」に照らし合せながら、採用する耐火および断熱材の特性の把握、より熱伝導率の低い断熱材の活用、高温用断熱材の適所配材について十分検討を行い、基準値を満足できるもの、満足できないものを見極め



がら、総合的な経済効果を得る断熱構成を考えることが肝要である。

### 3.1 伝熱計算

炉壁の温度分布、放散熱量、蓄熱量を求めこれらの値から炉壁の構成厚みの検討・断熱材の選定、燃料消費量の計算等を行うため、伝熱計算は炉の設計上重要な項目である。

#### 3.1.1 熱伝達のメカニズム

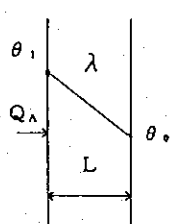
熱の伝達は次の三つの作用で起こる。

- 1) 伝導：物質を構成する分子の連続的な運動として、熱が隣の分子に移動する作用を言う。固体においては、熱は常に伝導によって伝達し、液体および気体においては、熱は伝導は勿論対流および放射によって伝達する。
- 2) 対流：液体の流れる部分と共に熱が液体内を移動する作用を言う。液体内に温度差が生じた場合、比重の違いによって流れが起こり、このような流れは全体の液体内で同じ温度に達するまで起こり続ける。
- 3) 放射：熱を有する物体はどれでもその表面から熱エネルギーを放射する。この熱エネルギー（電磁波）が他の物体によって吸収される場合、それは再び熱に転換して、その物体の温度を上昇させる。この熱の移動作用を放射と呼ぶ。

#### 3.1.2 伝導による熱伝達の基本公式

安定した状態において、伝導によって固体の壁の中を動く熱量は加熱面の面積と温度差に比例し、熱の移動距離（壁の厚さ）に反比例する。

図示したように、固体壁の厚さを $L$ とし、両端の温度を $\theta_1$ および $\theta_0$ とし、単位面積当たりの伝達する熱量を $Q_A$ とすると、

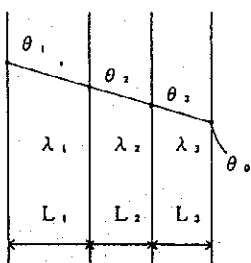


$$Q_A = \lambda \frac{\theta_1 - \theta_0}{L} \quad (\text{kcal/m}^2\text{h}) \quad \dots\dots\dots (3-1)$$

となる。

但し、 $\lambda$ は熱の伝達条件を表す比例定数であって、熱伝導率と呼ばれる。  
(kcal/mh °C)

多層の平壁の熱条件は次の式によって表され、それぞれの層を通る熱量は等しい。



$$Q_A = \frac{\theta_1 - \theta_0}{\frac{L_1}{\lambda_1} + \frac{L_2}{\lambda_2} + \frac{L_3}{\lambda_3}} \quad (\text{kcal/m}^2\text{h})$$

$$= \frac{\theta_1 - \theta_2}{\frac{L_1}{\lambda_1}} = \frac{\theta_2 - \theta_3}{\frac{L_2}{\lambda_2}} = \frac{\theta_3 - \theta_0}{\frac{L_3}{\lambda_3}} \quad \dots\dots\dots (3-2)$$

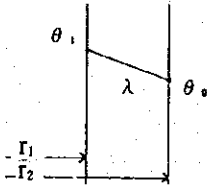
但し、 $L/\lambda$ は伝熱抵抗と呼ばれ、 $R$ で表される。

伝熱抵抗を使用すると、上記の式は

$$Q_A = \frac{\theta_1 - \theta_0}{R_1 + R_2 + R_3} \dots\dots\dots (3-3)$$

と表すことができる。

円筒形の壁の熱条件は単位長さ当たり次の式で表される。



$$Q_A = \frac{2\pi\lambda(\theta_1 - \theta_0)}{l_n(r_2/r_1)} \text{ (kcal/mh)} \dots\dots\dots (3-4)$$

ユニットの外側表面に関してこの式を考えるには、外側表面の面積  $2\pi r^2$  で割れば良い。

$$Q_A = \frac{\lambda(\theta_1 - \theta_0)}{r_2 l_n(r_2/r_1)} \dots\dots\dots (3-5)$$

となる。

これは、 $r_2 \ln(r_2/r_1)$  によって置き換えられた壁を漏った平壁に対する熱伝達の式に対応する。

また多層の円筒形は、同様に

$$Q_A = \frac{2\pi(\theta_1 - \theta_0)}{\frac{1}{\lambda_1} l_n \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\lambda_2} l_n \frac{r_3}{r_2} + \dots + \frac{1}{\lambda_n} l_n \frac{r_{n+1}}{r_n}} \text{ (kcal/mh)} \dots\dots\dots (3-6)$$

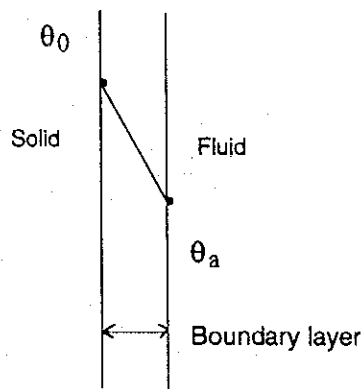
ユニットの外側表面の面積に関しては、

$$Q_A = \frac{(\theta_1 - \theta_0)}{\frac{r_{n+1}}{\lambda_1} l_n \frac{r_2}{r_1} + \frac{r_{n+1}}{\lambda_2} l_n \frac{r_3}{r_2} + \dots + \frac{r_{n+1}}{\lambda_n} l_n \frac{r_{n+1}}{r_n}} \text{ (kcal/m}^2\text{h)} \dots\dots\dots (3-7)$$

### 3.1.3 対流による熱伝達に対する基本公式

流体が固体に沿って移動する時、移動速度は流体の粘性によって壁の表面に近い程遅くなり、壁の表面では0となる。

流体は乱流または層流で流れる。しかし、乱流の一部が壁の表面の近くにある場合でさえ、その流れは層流となり、流速が非常に遅くなる。それは境界層または境膜と呼ばれる。



境界層における熱の伝達はその層の熱的条件による。境界層の厚さは壁面の平滑度と流速および流体の性質による。

境界層の厚さを  $l$ 、流体の熱伝導率を  $\lambda$  とすると、対流によって伝達する熱量は、

$$Q_c = (\lambda / l) (\theta_0 - \theta_a) \dots\dots\dots (3-8)$$

で表すことができる。

しかし、境界層の厚さを決定することは困難なため、対流熱伝達率と呼ばれる  $\alpha_c$  (kcal/m<sup>2</sup>h℃) で  $\lambda / l$  を代用する。

$\alpha_c$  の値については、色々な経験式があるが、次の式が一般的に採用されている。

1) 空気による自然対流

$$\alpha_c = h_c (\theta_0 - \theta_a)^{0.25} \dots\dots\dots (3-9)$$

但し、 $h_c$  は壁の表面の位置による係数であって、垂直な板に対しては2.2、上向きの板に対しては2.8、下向きの板に対しては1.5とする。

$$\alpha_c = 2.1 \{ (\theta_0 - \theta_a) / d \}^{0.25} \dots\dots\dots (3-9')$$

2) 空気による強制対流

$$\alpha_c = 6.122 V_c^{0.775} + 4.41 \text{ EXP } (-0.6 V_c) \dots\dots\dots (3-10)$$

但し、 $V_c$  は空気の流速である (m/s)。

3) 水冷却の場合では、

$$X = \theta_a + 0.1 (\theta_0 - \theta_a)$$

$$\alpha_c = 2830 (1 + 0.215 X - 0.00007 X^2) V_w^{(0.91 - 0.00115X)} \dots\dots\dots (3-11)$$

但し、 $V_w$  (m/s) は水の流速である。

3.1.4 放射による熱伝達に対する基本公式

放射によって伝達する熱量は次の式によって表される。

$$Q_r = 4.88 \cdot \left\{ \left( \frac{273 + \theta_0}{100} \right)^4 - \left( \frac{273 + \theta_a}{100} \right)^4 \right\} \dots\dots\dots (3-12)$$

これは次のように放射熱伝達率によって表現することができる。

$$\alpha_R = Q/\Delta t = Q/(\theta_i - \theta_e)$$

式(3-12)において、 $\epsilon$ は黒度または放射率と呼ばれ、固体の表面の材料に大きく依存し、煉瓦に対しては0.95、金属の塗装した表面に対しては0.8ないし0.95である。

### 3.1.5 総合的な熱の伝達

一般的な工業炉の壁の熱伝達は次のように考えることができる。

炉の内側→炉壁の内面 : 対流+放射による熱の伝達

炉壁の内部 : 伝導による熱の伝達

炉壁の外側表面→外側の空気 : 対流+放射による熱の伝達

したがって、炉の内側から外側の大気への熱の伝達は次の式によって相対的な熱の伝達として表される(多層平面板)。

$$Q_r = \frac{\lambda_s - \theta_s}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{L_1}{\lambda_1} + \frac{L_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{L_n}{\lambda_n} + \frac{1}{\alpha_0}} \quad (\text{kcal/m}^2\text{h}) \quad \dots\dots\dots (3-13)$$

しかし、炉内のガスの温度を正確に測定して炉壁の内面の温度と比較することは困難なことが多いので、「炉内のガスの温度」＝「炉壁の内側表面の温度」と仮定し、炉内の対流熱伝達率を無視して計算を行うことが多い。

この場合の総合的な熱伝達は次式の通りである。

$$Q_r = \frac{\theta_1 - \theta_s}{\frac{L_1}{\lambda_1} + \dots + \frac{L_n}{\lambda_n} + \frac{1}{\alpha_0}} \quad (\text{kcal/m}^2) \quad \dots\dots\dots (3-14)$$

多層筒形の場合には、次式のようになる。

$$Q_r = \frac{\theta_1 - \theta_s}{\frac{1}{\lambda_1} l_n \frac{r_2}{r_1} + \dots + \frac{1}{\lambda_n} l_n \frac{r_{n+1}}{r_n} + \frac{1}{\alpha_0}} \quad (\text{kcal/m}^2\text{h}) \quad \dots\dots\dots (3-15)$$

略記号

$\theta_1$  : 炉壁内側表面の温度, °C

$\theta_2 \dots \theta_n$  : 炉壁の各境界の温度, °C

$\theta_0$  : 炉壁外側表面の温度, °C

$\theta_a$  : 外側空気の温度, °C

$\theta_g$  : 炉内のガスの温度, °C

- $\theta_w$  : 冷却水の温度, °C
- $\lambda_1 \dots \lambda_n$  : 各耐火材の平均温度での熱伝導率, kcal/mh°C
- $R_1 \dots R_n$  : 各耐火材の伝熱抵抗
- $L_1 \dots L_n$  : 各耐火材の厚さ, m
- $r_1 \dots r_n$  : 各筒状体の内径, m
- $V_a, V_w$  : 空気冷却または水冷却の流速, m/s
- $\alpha_c$  : 対流熱伝達率, kcal/m<sup>2</sup>h°C
- $\alpha_r$  : 放射熱伝達率, kcal/m<sup>2</sup>h°C
- $Q_A$  : 伝導によって伝達された熱量, kcal/m<sup>2</sup>h
- $Q_c$  : 対流によって伝達された熱量, kcal/m<sup>2</sup>h
- $Q_r$  : 放射によって伝達された熱量, kcal/m<sup>2</sup>h
- $Q_T$  : 総合的に伝達された熱量, kcal/m<sup>2</sup>h
- ln : 自然対数

### 3.1.6 計算の手順

前に述べたように、もし炉内のガス温度が炉壁の内面の温度と等しいと、炉壁の熱の伝達は炉壁の内面から外面への伝導として、および炉壁の外面から外側の空気への対流+放射として起こる。伝達されるそれぞれの熱量は  $Q_A$ ,  $Q_c$ ,  $Q_r$  で表され、計算は次の関係を用いて行われる。

$$Q_T = Q_A = Q_c + Q_r \quad \dots\dots\dots (3-16)$$

ここで耐火材料の熱伝導率が温度によると言うことが問題となるが、この場合、計算のためには二つの未知数がある。したがって、計算のために次の手順に従う。

- 1) 炉の内部温度  $\theta_1$  と、外側の空気の温度  $\theta_2$  に基づき、それぞれの境界の温度  $\theta_2$  ないし  $\theta_n$  を推定する。
- 2) その推定した温度から耐火材料の平均の温度を見つけ、その平均温度からそれぞれの耐火材料の熱伝導率  $\lambda_1$  ないし  $\lambda_n$  を仮に決定する。
- 3) 仮定した炉壁の外側の温度に基づき  $Q_c$  と  $Q_r$  を見つける。  
 $Q_c + Q_r$  の適切な値は図6と図7を使用して得ることができる。
- 4)  $Q_A = Q_c + Q_r$  より、それぞれの境界の温度、 $\theta_2$  ないし  $\theta_n$  を見出すための変換式 (3-2) は次のようになる。

$$\theta_2 = \theta_1 - \frac{Q_A L_1}{\lambda_1}$$

$$\theta_3 = \theta_2 - \frac{Q_A L_2}{\lambda_2}$$

$$\theta_{n+1} = \theta_n - \frac{Q_A L_n}{\lambda_n}$$

- 5) 計算によって得られた境界の温度が仮定した温度に近づくまで、比較のために仮定と計算を繰り返す。もし仮定した温度が合理的であれば、仮定した値と計算した値の間の差は4, 5回の反復の後では2℃ないし3℃の範囲内になる。このように、それぞれの境界の概略の温度と概略の放散する熱量を得ることができる。

### 3.1.7 炉壁外面の温度の基準値

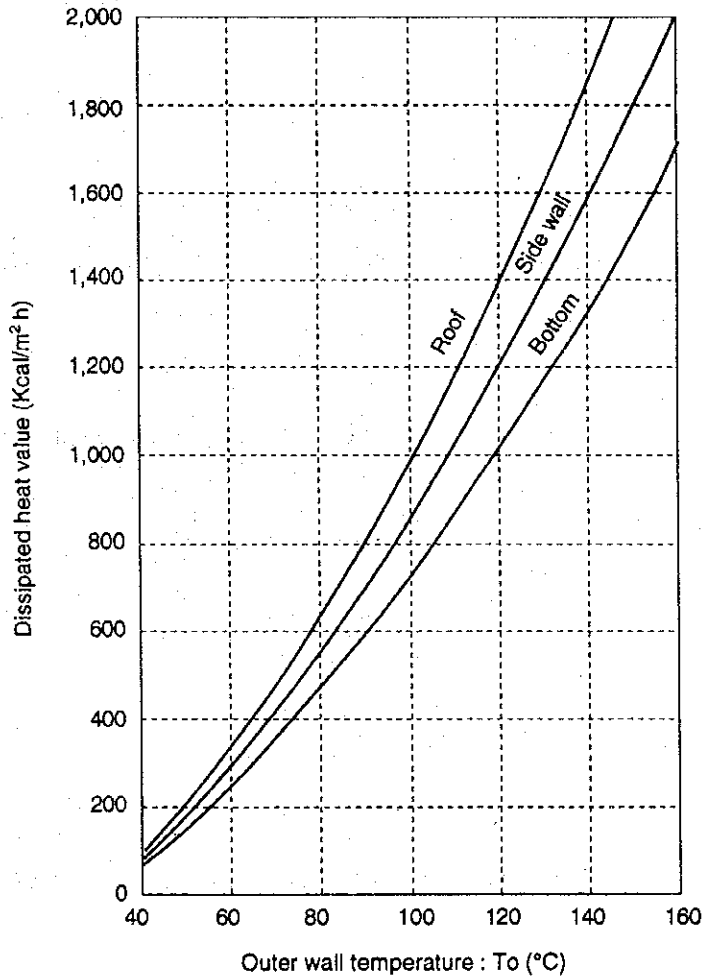
工業的な炉の炉壁外面の温度は、関係する炉の内部温度に対して表23に示された温度よりも高くならないように JIS によって定められている。

Table 23 Standard furnace wall outer surface temperature

Furnace temperature (°C)	Standard furnace outer surface temperature (°C)	
	Roof	Side wall
1,300	140	120
1,100	125	110
900	110	95
700	90	80

Outside air temperature: 30°C Emissivity: 0.8

Figure 6 Furnace wall outer surface temperature vs. dissipated heat value - 1



### 3.2 炉壁を構成する耐火材料に蓄積された熱量

蓄積された熱量=次の式から得ることができる。

$$\begin{aligned}
 H = & L_1 \rho_1 C_1 \left( \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} - \theta_s \right) + L_2 \rho_2 C_2 \left( \frac{\theta_2 + \theta_3}{2} - \theta_s \right) + \dots \\
 & + L_n \rho_n C_n \left( \frac{\theta_3 + \theta_n}{2} - \theta_s \right) \quad (\text{kcal/m}^2) \quad \dots \dots \dots (3-17)
 \end{aligned}$$

〔記号〕

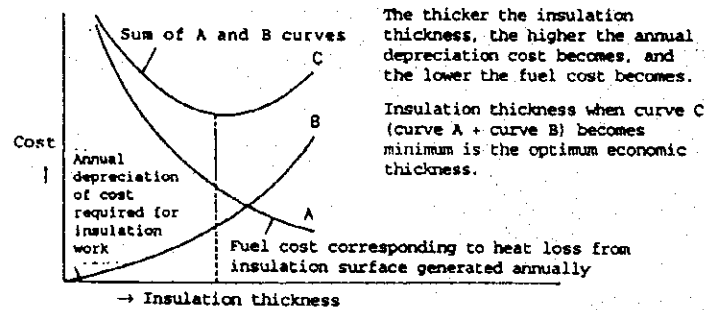
- $L_1 \sim L_n$  : 各炉材の厚さ, m
- $\rho_1 \sim \rho_n$  : 各炉材の密度, kg/m<sup>3</sup>
- $C_1 C_2 C_3$  : 各炉材の比熱, kcal/kg°C
- $\theta_1$  : 内壁温度, °C

- $\theta_{t_0}$  : 外壁温度, °C
- $\theta_2 \sim \theta_3$  : 各境界温度, °C
- $\theta_{t_s}$  : 炉壁の加熱前温度, °C

### 3.3 経済的な保温厚さ

保温工事の場合、保温厚さが増せば、次第に放散熱量を減ずるが、保温工事費は増大する。したがって、二者を考慮した経済的な保温厚さは（施工費）+（保温後の放散熱量価格）に年間の償却を考慮して両者の和が最小になるように選ぶことが肝要である。

Figure 7 Relationship between insulation thickness and cost 11)



#### 3.3.1 保温工事に使用される断熱材の厚さと放散される熱量を計算するための式を立てる。(経済的な保温の厚さ)

放散される熱量を計算するための式は、略号が異なっているが、式 3-14 と 3-15 と同じ式である。

- (1) パイプの場合には、使用される断熱材の厚さおよび放散される熱量は次の式から計算される。

断熱材の厚さ：断熱材の厚さは次の式から計算し、 $F_1$  の値を最小にする。

$$F_1 = \frac{\pi}{4} (d_1^2 - d_0^2) aN \times 10^3 + bhQ \times 10^{-3} \quad \dots \dots \dots (3-18)$$

$$X = \frac{d_1 - d_0}{2} \quad \dots \dots \dots (3-19)$$

放散される熱量：放散される熱量は次の式から計算する。

$$Q = \frac{2\pi (\theta_0 - \theta_s)}{\frac{1}{\lambda} \ln \frac{d_1}{d_0} + \frac{2}{\alpha d_1}} \quad \dots \dots \dots (3-20)$$



(2) 平らな表面

平らな表面に対して使用される断熱材の厚さおよび放散される熱価は次の式から計算する。

断熱材の厚さ：断熱材の厚さは次の式から計算し、 $F_2$ の値を最小にする。

$$F_2 = XaN \times 10^3 + dhQ \times 10^{-3} \quad \dots\dots\dots (3-21)$$

放散される熱量：放散される熱量は次の式から計算する。

$$Q = \frac{\theta_0 - \theta_1}{\frac{X}{\lambda} + \frac{1}{\alpha}} \quad \dots\dots\dots (3-22)$$

$$N = \frac{n(1+n)^m}{(1+n)^m - 1} \quad \dots\dots\dots (3-23)$$

但し、

$F_1$  : パイプに対する保温工事の年間総費用 (円/月)

$F_2$  : 平らな表面に対する保温工事の年間総費用 (円/月)

$a$  : 断熱装置の建設価格 (千円/m<sup>3</sup>)

$b$  : 熱量の価格 (円/千wh) [円/860kcal]

$n$  : 年間利子

$m$  : 使用年数

$N$  : 減価率

$d_1$  : 断熱の外径 (m)

$d_0$  : 断熱の内径 (パイプの外径に基づく) (m)

$h$  : 年間使用時間

$x$  : 断熱の厚さ (m)

$Q$  : 放散される熱量 (パイプの場合) (W/m) [kcal/mh]

(平たい表面の場合) (W/m<sup>2</sup>) [kcal/m<sup>2</sup>h]

$\lambda$  : 断熱材の熱伝導率 (w/m k) [kcal/mh℃]

$\alpha$  : 表面の熱伝達率 (W/m<sup>2</sup>k) [kcal/m<sup>2</sup>h℃]

$\theta_0$  : 内部温度 (℃)

$\theta_1$  : 外側空気の温度 (℃)

$l_n$  : 自然対数

### 3.3.2 経済的な断熱の厚さと放散される熱量

次の条件に対する経済的な断熱の厚さと放散される熱量は参考として表24から表30に示されている。

外側の空気の温度（室温）	:	20℃
表面の熱伝達率	:	12W/m <sup>2</sup> k [10.32 kcal/m <sup>2</sup> h℃]
年間の利子	:	0.07
使用年数	:	10年
断熱材の施工価格	:	1.2(12000X <sub>0</sub> -k +100)10 <sup>3</sup> 円/m <sup>2</sup>

但し、X<sub>0</sub>：断熱材の厚さ（mm）

k：定数

関係するパイプの外径に対する値は次のものから選択する。

15A	—	20A	K=1.09
25A	—	50A	K=1.13
65A	—	150A	K=1.17
200A	—	300A	K=1.21
350A	—	平たい表面	K=1.13

しかし、断熱材の厚さが150mm以上になる場合には、施工価格を算定するために150mmを使用する。

熱量価格        : 5 円/10<sup>3</sup>Wh [5.81円/103kcal]

年間の使用時間: 3000時間, 7300時間

[Reference] Tables of Economical Insulation Thicknesses

Table 24 Insulation thicknesses and dissipated heat values of rock wool insulators

(Insulation thickness in mm, dissipated heat value in W/m<sup>2</sup>, and  $\theta$  temperature in °C)

Annual hours of use (hour)		Thermal conductivity (W/m·K)		-20°C ≤ $\theta$ < 100°C		0.031 4 + 0.000 174 $\theta$		100°C ≤ $\theta$ ≤ 600°C		0.038 4 + 7.13 × 10 <sup>-5</sup> · $\theta$ + 3.51 × 10 <sup>-7</sup> · $\theta^2$		(Insulation thickness in mm, dissipated heat value in W/m <sup>2</sup> , and $\theta$ temperature in °C)											
		A	B	15	20	25	32	40	50	65	80	100	125	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600
100	IT	25	25	1	1 1/4	1 1/2	2	2 1/2	3	4	5	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24		
	DHV	16	19	22	25	28	30	35	34	37	44	50	57	69	80	81	91	101	111	121	131		
150	IT	25	30	35	35	40	45	45	45	50	55	55	60	60	60	60	65	65	65	65	65		
	DHV	29	31	32	37	40	43	46	51	57	67	71	88	98	113	124	130	145	159	173	187		
200	IT	35	35	40	45	45	45	50	55	60	60	65	65	70	70	75	75	75	80	80	80		
	DHV	38	43	45	48	52	60	65	68	77	89	95	117	131	151	157	176	194	202	219	237		
250	IT	40	40	45	50	50	55	60	60	65	70	70	80	80	85	85	85	90	90	90	90		
	DHV	50	56	59	64	69	74	92	90	102	111	126	140	165	181	198	222	234	256	278	299		
300	IT	45	45	50	55	60	60	70	70	75	80	80	90	90	95	95	100	100	100	100	105		
	DHV	63	70	75	81	83	94	99	110	123	136	153	171	201	222	242	259	286	312	325	351		
350	IT	50	55	60	65	65	70	75	80	85	90	90	95	100	105	110	110	110	110	115	115		
	DHV	77	83	89	96	103	112	123	131	147	162	182	213	240	265	279	311	342	360	390	420		
400	IT	55	60	65	70	70	75	85	85	90	95	100	105	110	115	120	120	125	125	130	130		
	DHV	94	100	108	117	125	136	145	159	179	198	214	250	283	313	330	366	390	425	445	479		
450	IT	60	65	70	74	80	85	90	95	100	105	110	115	125	125	130	135	140	140	140	140		
	DHV	112	120	129	140	145	158	174	185	208	230	249	291	320	364	385	414	455	481	520	558		
500	IT	65	70	80	85	85	90	100	100	110	115	120	125	135	140	140	145	150	150	150	150		
	DHV	132	142	148	161	171	187	201	219	240	265	288	336	370	409	445	480	512	557	601	645		
550	IT	70	75	85	90	95	100	105	110	120	125	130	140	145	150	150	150	150	150	150	150		
	DHV	155	166	174	189	196	213	236	251	276	304	330	376	425	470	510	564	618	671	706	758		
600	IT	80	85	90	95	100	105	115	120	125	135	140	150	150	155	155	155	160	165	165	165		
	DHV	175	188	202	220	228	249	268	285	322	347	376	429	495	561	594	657	702	745	803	861		

Note\*: The nominal designation of pipe is in conformity with JIS G 3452 (Carbon Steel Pipes for Piping).

Remark: The thicknesses of this table are expressed in 5 mm steps, and do not always agree with the thicknesses of the products actually sold.

IT: Insulation thickness; DHV: Dissipated heat value

**Table 25 Insulation thicknesses and dissipated heat values of rock wool insulators**

Rock wool heat insulating boards Nos. 1, 2 and 3, and felt		(Insulation thickness in mm, dissipated heat value in W/m <sup>2</sup> , and $\theta$ temperature in °C)			
Internal temperature (°C)	Kind	Heat reserving board No. 1	Heat reserving board No. 2	Heat reserving board No. 3	Felt
		Annual hours of use (hour)	Annual hours of use (hour)	Annual hours of use (hour)	Annual hours of use (hour)
Thermal conductivity (W/m.K)		-20°C ≤ $\theta$ < 100°C 0.033 7 + 0.000 151 $\theta$ 100°C ≤ $\theta$ ≤ 600°C 0.039 5 + 4.71 × 10 <sup>-5</sup> · $\theta$ + 5.03 × 10 <sup>-7</sup> · $\theta^2$	-20°C ≤ $\theta$ < 100°C 0.033 7 + 0.000 128 $\theta$ 100°C ≤ $\theta$ ≤ 600°C 0.040 7 + 2.52 × 10 <sup>-5</sup> · $\theta$ + 3.34 × 10 <sup>-7</sup> · $\theta^2$	-20°C ≤ $\theta$ < 100°C 0.036 0 + 0.000 116 $\theta$ 100°C ≤ $\theta$ ≤ 600°C 0.041 9 + 3.28 × 10 <sup>-5</sup> · $\theta$ + 2.63 × 10 <sup>-7</sup> · $\theta^2$	-20°C ≤ $\theta$ < 100°C 0.034 9 + 0.000 186 $\theta$ 100°C ≤ $\theta$ ≤ 600°C 0.033 7 + 1.63 × 10 <sup>-5</sup> · $\theta$ + 5.03 × 10 <sup>-7</sup> · $\theta^2$
	100	60	55	60	60
	150	54	57	54	58
	200	75	75	75	80
250	DHV	78	74	76	80
	IT	90	90	90	95
	DHV	99	92	94	106
	IT	110	105	105	115
300	DHV	115	108	110	126
	IT	125	120	120	135
	DHV	137	125	125	147
	IT	145	130	130	150
350	DHV	155	147	146	174
	IT	150	150	145	155
	DHV	192	160	162	215
	IT	160	150	150	-
450	DHV	226	196	190	-
	IT	180	160	155	-
	DHV	249	223	221	-
	IT	200	175	170	-
550	DHV	275	245	240	-
	IT	220	190	185	-
	DHV	302	269	260	-
	IT	-	-	-	-

Remark: The thicknesses of this table are expressed in 5 mm steps, and do not always agree with the thicknesses of the products actually sold.

IT: Insulation thickness; DHV: Dissipated heat value

**Table 26 Insulation thicknesses and dissipated heat values of glass wool insulators**

**Glass wool pipe cover and heat insulating board No. 2.48 K**

(Insulation thickness in mm, dissipated heat value in W/m<sup>2</sup>, and  $\theta$  (temperature in °C))

Thermal conductivity (W/m·K)		-20°C ≤ $\theta$ ≤ 350°C																					
		0.032 8 + 8.44 × 10 <sup>-5</sup> · $\theta$ + 5.84 × 10 <sup>-7</sup> · $\theta^2$																					
Pipe inside temperature (°C)	Nominal designation of pipe*	Annual hours of use (hour)																					
		3 000		15	20	25	32	40	50	65	80	100	125	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600
	A	1 1/2	25	25	25	30	30	30	30	35	35	40	40	45	45	50	50	50	50	50	50	50	50
	B	1 1/2	3/4	1	1 1/4	1 1/2	2	2 1/2	3	4	5	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	24	
100	IT	25	25	25	30	30	30	35	35	35	40	40	45	45	50	50	50	50	50	50	50	50	
	DHV	16	18	21	24	24	27	29	33	40	42	48	55	66	77	78	87	97	107	117	126	126	
150	IT	25	30	30	35	35	40	45	45	50	50	50	55	60	60	60	65	65	65	65	65	65	
	DHV	29	30	34	36	39	42	45	50	56	65	74	86	95	110	121	127	141	155	169	183	183	
200	IT	35	35	40	45	45	45	50	55	60	60	65	65	70	70	75	75	75	80	80	80	80	
	DHV	38	43	45	49	53	60	66	69	77	89	96	118	132	152	158	177	196	203	221	238	238	
250	IT	40	40	45	50	50	55	60	65	70	70	75	80	80	85	85	90	90	90	95	95	95	
	DHV	52	58	62	66	72	77	85	90	101	116	125	146	172	189	206	220	243	266	276	298	298	
300	IT	45	50	55	60	60	60	65	70	75	75	80	85	95	95	100	100	105	105	105	110	110	
	DHV	68	72	77	83	83	90	97	107	113	133	146	158	208	239	251	279	296	323	350	363	363	
350	IT	50	55	60	65	70	70	80	80	85	90	95	100	105	110	115	115	120	120	120	125	125	
	DHV	86	92	99	107	110	124	132	145	164	181	195	228	258	285	300	334	355	387	419	436	436	

Remark: The thicknesses of this table are expressed in 5 mm steps, and do not always agree with the thicknesses of the products actually sold.

IT: Insulation thickness; DHV: Dissipated heat value

**Table 27 Insulation thicknesses and dissipated heat values of calcium silicate insulators**

**Calcium silicate pipe cover and heat insulating board No. 1-13**  
 (Insulation thickness in mm, dissipated heat value in W/m, and  $\theta$  temperature in °C)

Thermal conductivity (W/m·K)		$0^\circ\text{C} \leq \theta \leq 300^\circ\text{C}$ $0.0407 + 1.28 \times 10^{-4} \cdot \theta$															$300^\circ\text{C} < \theta \leq 800^\circ\text{C}$ $0.0555 + 2.05 \times 10^{-5} \cdot \theta + 1.93 \times 10^{-7} \cdot \theta^2$															Flat surface																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
Annual hours of use (hour)	Pipe inside temperature (°C)	3 000															3 000															600		550		500		450		400		350		300		250		200		150		125		100		80		65		50		40		32		25		20		15																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
		Nominal designation of pipe*		15	26	34	1	1 1/4	1 1/2	2	2 1/2	3	4	5	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125	130	135	140	145	150	155	160	165	170	175	180	185	190	195	200	205	210	215	220	225	230	235	240	245	250	255	260	265	270	275	280	285	290	295	300	305	310	315	320	325	330	335	340	345	350	355	360	365	370	375	380	385	390	395	400	405	410	415	420	425	430	435	440	445	450	455	460	465	470	475	480	485	490	495	500	505	510	515	520	525	530	535	540	545	550	555	560	565	570	575	580	585	590	595	600	605	610	615	620	625	630	635	640	645	650	655	660	665	670	675	680	685	690	695	700	705	710	715	720	725	730	735	740	745	750	755	760	765	770	775	780	785	790	795	800	805	810	815	820	825	830	835	840	845	850	855	860	865	870	875	880	885	890	895	900	905	910	915	920	925	930	935	940	945	950	955	960	965	970	975	980	985	990	995	1000	1005	1010	1015	1020	1025	1030	1035	1040	1045	1050	1055	1060	1065	1070	1075	1080	1085	1090	1095	1100	1105	1110	1115	1120	1125	1130	1135	1140	1145	1150	1155	1160	1165	1170	1175	1180	1185	1190	1195	1200	1205	1210	1215	1220	1225	1230	1235	1240	1245	1250	1255	1260	1265	1270	1275	1280	1285	1290	1295	1300	1305	1310	1315	1320	1325	1330	1335	1340	1345	1350	1355	1360	1365	1370	1375	1380	1385	1390	1395	1400	1405	1410	1415	1420	1425	1430	1435	1440	1445	1450	1455	1460	1465	1470	1475	1480	1485	1490	1495	1500	1505	1510	1515	1520	1525	1530	1535	1540	1545	1550	1555	1560	1565	1570	1575	1580	1585	1590	1595	1600	1605	1610	1615	1620	1625	1630	1635	1640	1645	1650	1655	1660	1665	1670	1675	1680	1685	1690	1695	1700	1705	1710	1715	1720	1725	1730	1735	1740	1745	1750	1755	1760	1765	1770	1775	1780	1785	1790	1795	1800	1805	1810	1815	1820	1825	1830	1835	1840	1845	1850	1855	1860	1865	1870	1875	1880	1885	1890	1895	1900	1905	1910	1915	1920	1925	1930	1935	1940	1945	1950	1955	1960	1965	1970	1975	1980	1985	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055	2060	2065	2070	2075	2080	2085	2090	2095	2100	2105	2110	2115	2120	2125	2130	2135	2140	2145	2150	2155	2160	2165	2170	2175	2180	2185	2190	2195	2200	2205	2210	2215	2220	2225	2230	2235	2240	2245	2250	2255	2260	2265	2270	2275	2280	2285	2290	2295	2300	2305	2310	2315	2320	2325	2330	2335	2340	2345	2350	2355	2360	2365	2370	2375	2380	2385	2390	2395	2400	2405	2410	2415	2420	2425	2430	2435	2440	2445	2450	2455	2460	2465	2470	2475	2480	2485	2490	2495	2500	2505	2510	2515	2520	2525	2530	2535	2540	2545	2550	2555	2560	2565	2570	2575	2580	2585	2590	2595	2600	2605	2610	2615	2620	2625	2630	2635	2640	2645	2650	2655	2660	2665	2670	2675	2680	2685	2690	2695	2700	2705	2710	2715	2720	2725	2730	2735	2740	2745	2750	2755	2760	2765	2770	2775	2780	2785	2790	2795	2800	2805	2810	2815	2820	2825	2830	2835	2840	2845	2850	2855	2860	2865	2870	2875	2880	2885	2890	2895	2900	2905	2910	2915	2920	2925	2930	2935	2940	2945	2950	2955	2960	2965	2970	2975	2980	2985	2990	2995	3000	3005	3010	3015	3020	3025	3030	3035	3040	3045	3050	3055	3060	3065	3070	3075	3080	3085	3090	3095	3100	3105	3110	3115	3120	3125	3130	3135	3140	3145	3150	3155	3160	3165	3170	3175	3180	3185	3190	3195	3200	3205	3210	3215	3220	3225	3230	3235	3240	3245	3250	3255	3260	3265	3270	3275	3280	3285	3290	3295	3300	3305	3310	3315	3320	3325	3330	3335	3340	3345	3350	3355	3360	3365	3370	3375	3380	3385	3390	3395	3400	3405	3410	3415	3420	3425	3430	3435	3440	3445	3450	3455	3460	3465	3470	3475	3480	3485	3490	3495	3500	3505	3510	3515	3520	3525	3530	3535	3540	3545	3550	3555	3560	3565	3570	3575	3580	3585	3590	3595	3600	3605	3610	3615	3620	3625	3630	3635	3640	3645	3650	3655	3660	3665	3670	3675	3680	3685	3690	3695	3700	3705	3710	3715	3720	3725	3730	3735	3740	3745	3750	3755	3760	3765	3770	3775	3780	3785	3790	3795	3800	3805	3810	3815	3820	3825	3830	3835	3840	3845	3850	3855	3860	3865	3870	3875	3880	3885	3890	3895	3900	3905	3910	3915	3920	3925	3930	3935	3940	3945	3950	3955	3960	3965	3970	3975	3980	3985	3990	3995	4000	4005	4010	4015	4020	4025	4030	4035	4040	4045	4050	4055	4060	4065	4070	4075	4080	4085	4090	4095	4100	4105	4110	4115	4120	4125	4130	4135	4140	4145	4150	4155	4160	4165	4170	4175	4180	4185	4190	4195	4200	4205	4210	4215	4220	4225	4230	4235	4240	4245	4250	4255	4260	4265	4270	4275	4280	4285	4290	4295	4300	4305	4310	4315	4320	4325	4330	4335	4340	4345	4350	4355	4360	4365	4370	4375	4380	4385	4390	4395	4400	4405	4410	4415	4420	4425	4430	4435	4440	4445	4450	4455	4460	4465	4470	4475	4480	4485	4490	4495	4500	4505	4510	4515	4520	4525	4530	4535	4540	4545	4550	4555	4560	4565	4570	4575	4580	4585	4590	4595	4600	4605	4610	4615	4620	4625	4630	4635	4640	4645	4650	4655	4660	4665	4670	4675	4680	4685	4690	4695	4700	4705	4710	4715	4720	4725	4730	4735	4740	4745	4750	4755	4760	4765	4770	4775	4780	4785	4790	4795	4800	4805	4810	4815	4820	4825	4830	4835	4840	4845	4850	4855	4860	4865	4870	4875	4880	4885	4890	4895	4900	4905	4910	4915	4920	4925	4930	4935	4940	4945	4950	4955	4960	4965	4970	4975	4980	4985	4990	4995	5000	5005	5010	5015	5020	5025	5030	5035	5040	5045	5050	5055	5060	5065	5070	5075	5080	5085	5090	5095	5100	5105	5110	5115	5120	5125	5130	5135	5140	5145	5150	5155	5160	5165	5170	5175	5180	5185	5190	5195	5200	5205	5210	5215	5220	5225	5230	5235	5240	5245	5250	5255	5260	5265	5270	5275	5280	5285	5290	5295	5300	5305	5310	5315	5320	5325	5330	5335	5340	5345	5350	5355	5360	5365	5370	5375	5380	5385	5390	5395	5400	5405	5410	5415	5420	5425	5430	5435	5440	5445	5450	5455	5460	5465	5470	5475	5480	5485	5490	5495	5500	5505	5510	5515	5520	5525	5530	5535	5540	5545	5550	5555	5560	5565	5570	5575	5580	5585	5590	5595	5600	5605	5610	5615	5620	5625	5630	5635	5640	5645	5650	5655	5660	5665	5670	5675	5680	5685	5690	5695	5700	5705	5710	5715	5720	5725	5730	5735	5740	5745	5750	5755	5760	5765	5770	5775	5780	5785	5790	5795	5800	5805	5810	5815	5820	5825	5830	5835	5840	5845	5850	5855	5860	5865	5870	5875	5880	5885	5890	5895	5900	5905	5910	5915	5920	5925	5930	5935	5940	5945	5950	5955	5960	5965	5970	5975	5980	5985	5990	5995	6000	6005	6010	6015	6020	6025	6030	6035	6040	6045	6050	6055	6060	6065	6070	6075	6080	6085	6090	6095	6100	6105	6110	6115	6120	6125	6130	6135	6140	6145	6150	6155	6160	6165	6170	6175	6180	6185	6190	6195	6200	6205	6210	6215	6220	6225	6230	6235	6240	6245	6250	6255	6260	6265	6270	6275	6280	6285	6290	6295	6300	6305	6310	6315	6320	6325	6330	6335	6340	6345	6350	6355	6360	6365	6370	6375	6380	6385	6390	6395	6400	6405	6410	6415	6420	6425	6430	6435	6440	6445	6450	6455	6460	6465	6470	6475	6480	6485	6490	6495	6500	6505	6510	6515	6520	6525	6530	6535

**Table 28 Insulation thicknesses and dissipated heat values of calcium silicate insulators**

**Calcium silicate pipe cover and heat insulating board No. 2-17**

(Insulation thickness in mm, dissipated heat value in W/m, and  $\theta$  temperature in °C)

Thermal conductivity (W/m·K)		Annual hours of use (hour)																	Flat surface				
0°C ≤ $\theta$ ≤ 200°C		3 000																	600				
200°C < $\theta$ ≤ 600°C		3 000																	600				
0.046 5 + 1.16 × 10 <sup>-4</sup> · $\theta$		0.057 0 - 9.36 × 10 <sup>-6</sup> · $\theta$ + 3.74 × 10 <sup>-7</sup> · $\theta^2$																	24				
Annual hours of use (hour)		3 000																	24				
Pipe inside temperature (°C)	Nominal designation of pipe*	A	15	20	25	32	40	50	65	80	100	125	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	
		B	1 1/2	3/4	1	1 1/4	1 1/2	2	2 1/2	3	4	5	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	
100	IT																						
	DHV		25	25	25	30	30	35	35	40	40	45	45	50	50	50	55	55	55	55	55	55	65
150	IT																						
	DHV		21	23	27	28	31	32	38	39	47	50	58	66	79	92	94	105	117	128	140	152	62
200	IT																						
	DHV		30	30	35	40	40	40	45	50	50	55	55	60	65	65	70	70	70	70	70	70	80
250	IT																						
	DHV		32	37	38	41	44	51	56	58	69	75	85	99	110	128	148	165	180	180	196	211	87
300	IT																						
	DHV		35	35	40	45	45	50	55	55	60	65	65	65	75	75	80	80	80	85	85	85	100
350	IT																						
	DHV		44	49	52	56	61	65	72	79	89	97	110	128	144	166	173	193	214	223	242	261	102
400	IT																						
	DHV		40	45	50	50	55	55	60	65	70	70	75	80	85	85	90	90	90	95	95	95	115
450	IT																						
	DHV		55	59	63	71	73	83	91	96	108	125	134	157	177	203	212	237	250	274	297	320	121
500	IT																						
	DHV		45	50	55	55	60	65	70	70	75	80	85	90	95	95	100	100	105	105	105	110	130
550	IT																						
	DHV		60	72	77	88	90	98	108	119	134	147	159	186	210	240	252	281	298	325	353	365	158
600	IT																						
	DHV		50	55	60	65	65	70	75	80	85	90	90	100	105	105	110	110	115	115	120	120	145
650	IT																						
	DHV		81	87	93	101	108	117	130	137	155	171	191	216	244	279	294	327	347	379	396	426	155
700	IT																						
	DHV		55	60	65	70	70	75	85	85	90	95	100	110	115	115	120	125	125	125	130	130	150
750	IT																						
	DHV		96	103	110	119	128	139	148	163	184	203	219	248	281	320	338	364	400	435	456	491	185
800	IT																						
	DHV		60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125	130	135	135	140	140	140	155
850	IT																						
	DHV		112	120	129	140	145	158	174	185	209	231	250	292	330	365	386	416	456	482	521	560	217
900	IT																						
	DHV		65	70	75	80	85	90	95	100	110	115	120	125	130	135	140	145	145	150	150	150	170
950	IT																						
	DHV		130	139	150	163	169	184	203	216	237	261	283	331	374	414	438	472	548	592	635	635	238
1000	IT																						
	DHV		70	75	80	90	90	95	105	110	115	120	125	135	140	145	150	150	150	150	150	150	185
1050	IT																						
	DHV		150	161	173	183	195	212	228	243	274	302	328	373	422	467	494	547	599	651	702	754	260
1100	IT																						
	DHV		75	80	90	95	100	105	110	115	125	130	135	145	150	150	150	155	155	160	160	165	200
1150	IT																						
	DHV		172	184	194	210	218	238	263	279	308	339	368	420	474	537	583	629	688	730	787	824	284

Remark: The thicknesses of this table are expressed in 5 mm steps, and do not always agree with the thicknesses of the products actually sold.  
IT: Insulation thickness; DHV: Dissipated heat value

**Table 29 Insulation thicknesses and dissipated heat values of water repellent perlite insulators**

**(a) Water repellent perlite pipe cover and heat insulating board No. 1**

(Insulation thickness in mm, dissipated heat value in W/m, and  $\theta$  temperature in °C)

Pipe inside temperature (°C)	Thermal conductivity (W/m·K)		Annual hours of use (hour)																Flat surface				
	A	B	15	20	25	32	40	50	65	80	100	125	150	200	250	300	350	400		450	500	550	600
100	IT	1 1/2	1	1 1/4	1 1/2	2	2 1/2	3	4	5	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	60	60	70
	DHV	26	30	31	36	42	45	50	56	65	69	80	95	110	113	127	141	155	169	183	75	75	90
150	IT	30	35	40	45	55	60	65	70	84	91	104	121	135	156	162	181	201	209	227	245	245	101
	DHV	41	44	46	53	54	61	67	70	84	91	104	121	135	156	162	181	201	209	227	245	245	90
200	IT	40	40	45	50	55	60	70	75	85	95	105	125	135	155	165	185	205	215	235	255	275	110
	DHV	53	59	63	68	73	80	87	92	109	119	129	150	177	195	213	227	251	274	285	307	307	95
250	IT	45	45	50	55	60	70	75	85	95	105	125	135	155	165	185	205	215	235	255	275	295	121
	DHV	67	75	80	87	89	101	107	118	133	146	158	184	208	239	251	279	296	323	350	377	377	142
300	IT	50	55	60	65	70	80	85	95	105	125	135	155	165	185	205	215	235	255	275	295	315	145
	DHV	82	87	94	101	109	118	130	138	156	172	193	217	246	281	296	329	350	381	413	429	429	157
350	IT	55	60	65	70	75	85	85	95	105	125	135	155	165	185	205	215	235	255	275	295	315	150
	DHV	96	103	111	120	128	140	149	164	185	204	221	258	292	322	340	378	402	438	459	494	494	186
400	IT	60	65	70	75	80	90	90	100	110	125	135	155	165	185	205	215	235	255	275	295	315	155
	DHV	111	119	128	139	149	162	173	184	208	229	249	290	329	363	384	426	454	494	519	557	557	216
450	IT	65	70	75	80	85	95	95	105	115	130	140	155	165	185	205	215	235	255	275	295	315	165
	DHV	127	136	146	159	165	179	198	210	237	262	284	334	365	404	428	473	505	549	578	620	620	239
500	IT	70	75	80	85	90	100	100	110	120	135	145	160	170	185	205	215	235	255	275	295	315	180
	DHV	143	153	165	179	186	202	223	237	261	288	312	365	402	445	483	521	571	620	669	719	719	254
550	IT	75	75	85	90	95	100	105	110	120	135	145	160	170	185	205	215	235	255	275	295	315	195
	DHV	159	175	184	199	207	226	249	265	292	322	349	398	450	498	540	597	653	692	747	802	802	269
600	IT	75	80	90	95	100	105	115	120	130	145	155	170	180	195	215	225	245	255	275	295	315	205
	DHV	180	193	203	221	229	250	270	287	323	357	387	441	498	564	612	660	706	766	807	865	865	291
650	IT	80	85	95	100	105	110	120	125	130	140	155	165	180	190	210	220	240	250	270	290	310	220
	DHV	198	212	224	243	243	275	297	316	356	384	417	485	560	620	657	710	776	823	868	930	930	305
700	IT	85	90	100	105	110	115	125	130	140	150	165	175	190	200	220	230	250	260	280	300	320	230
	DHV	216	232	244	265	276	300	325	346	381	420	456	542	612	677	703	775	829	880	948	994	994	326
750	IT	90	95	105	110	115	120	130	135	145	155	165	180	190	210	220	240	250	270	290	310	330	245
	DHV	235	252	266	288	300	327	353	376	415	457	506	589	665	736	764	826	884	957	1010	1081	1081	340
800	IT	95	100	110	115	120	125	135	140	150	160	170	180	190	210	220	240	250	270	290	310	330	255
	DHV	254	272	288	312	325	354	383	407	450	505	558	637	705	780	812	894	957	1016	1072	1147	1147	361

Remark: The thicknesses of this table are expressed in 5 mm steps, and do not always agree with the thicknesses of the products actually sold.

IT: Insulation thickness; DHV: Dissipated heat value



**Table 30 Insulation thicknesses and dissipated heat values of water repellent perlite insulators**  
**Water repellent perlite pipe cover and heat insulating board No. 2**

(Insulation thickness in mm, dissipated heat value in  $W/m^2$ , and  $\theta$  temperature in  $^{\circ}C$ )

Thermal conductivity ( $W/m \cdot K$ )		$0^{\circ}C \leq \theta \leq 600^{\circ}C$ $0.0483 + 1.27 \times 10^{-4} \cdot \theta + 3.70 \times 10^{-8} \cdot \theta^2$																					
Annual hours of use (hour)		3 000																					
Pipe inside temperature ( $^{\circ}C$ )	Nominal designation of pipe*	A	15	20	25	32	40	50	65	80	100	125	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	Flat surface
		B	$1\frac{1}{2}$	$3\frac{1}{4}$	1	$1\frac{1}{4}$	$1\frac{1}{2}$	2	$2\frac{1}{2}$	3	4	5	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	
100	IT		25	25	25	30	30	35	35	40	40	45	45	50	50	50	55	55	55	55	55	55	65
	DHV		21	24	28	29	32	34	40	41	49	53	60	59	83	96	96	110	122	134	146	159	65
150	IT		30	30	35	40	40	45	45	50	55	55	55	60	65	65	70	70	70	70	70	70	85
	DHV		34	38	40	43	47	50	58	61	68	79	90	104	116	134	139	156	172	189	206	210	87
200	IT		35	40	45	45	50	50	5	60	60	65	70	75	75	80	80	80	85	85	85	85	100
	DHV		46	49	52	59	60	69	76	79	94	103	111	129	167	167	183	205	215	236	256	276	108
250	IT		40	45	50	50	55	60	65	65	70	75	75	85	85	90	90	95	95	95	100	100	115
	DHV		59	62	67	76	77	84	92	102	115	126	142	159	187	206	225	241	265	290	302	325	128
300	IT		45	50	55	60	60	65	70	75	80	80	85	90	95	100	100	105	105	110	110	110	130
	DHV		72	76	82	88	95	103	114	120	135	155	167	196	221	244	266	285	314	330	358	386	146
350	IT		50	55	60	65	65	70	80	80	85	90	95	100	105	110	110	115	115	120	120	120	145
	DHV		85	91	97	105	113	123	130	143	162	178	193	225	255	281	306	329	362	382	413	445	162
400	IT		55	60	65	70	75	75	85	85	95	100	100	110	115	120	120	125	125	130	130	130	150
	DHV		98	105	113	123	127	143	152	167	183	201	255	255	288	319	347	373	410	433	469	504	190
450	IT		60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125	130	135	135	140	140	140	155
	DHV		113	121	130	141	146	159	175	186	210	232	251	293	332	367	388	418	458	485	524	563	218
500	IT		65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	125	130	135	140	140	145	150	150	150	170
	DHV		127	136	147	159	165	180	199	211	238	263	285	324	366	406	429	475	507	537	580	622	233
550	IT		70	75	80	85	90	95	100	105	115	120	125	135	140	145	150	150	150	150	150	150	180
	DHV		143	153	165	179	185	202	223	237	261	288	312	355	402	445	471	521	570	620	669	718	254
600	IT		75	80	85	90	95	100	110	110	120	125	130	140	145	150	150	150	150	150	155	160	195
	DHV		159	170	183	199	207	225	243	264	291	321	348	396	448	496	538	595	652	690	745	780	268

Remark: The thicknesses of this table are expressed in 5 mm steps, and do not always agree with the thicknesses of the products actually sold.

IT: Insulation thickness; DHV: Dissipated heat value

### 3.4 各種斷熱構成例

#### 3.4.1 一般構成例と関連諸元比較

Table 31 Furnace wall thickness: 344 mm;  
furnace wall surface temperature: 900°C 12)

Atmospheric temperature: 25°C  
emissivity: 0.85

Furnace wall structure						
	Emission calorific value Q (kcal/m <sup>2</sup> h)	868	538	380	465	615
Heat accumulation value H (kcal/m <sup>2</sup> )	91,310	33,990	20,190	2,880	71,180	
Continuous operation 6000 h/year	Emission calorific value (kcal/m <sup>2</sup> .year)	5,208 × 10 <sup>1</sup>	3,228 × 10 <sup>1</sup>	2,780 × 10 <sup>1</sup>	2,790 × 10 <sup>1</sup>	3,690 × 10 <sup>1</sup>
	Rate (%)	100	62.0	43.8	53.6	70.9
	Fuel saving (kg/m <sup>2</sup> .year)	-	360	532	440	276
*Batch operation 40weeks/year	Total heat loss (kcal/m <sup>2</sup> .year)	7,428 × 10 <sup>1</sup>	3,700 × 10 <sup>1</sup>	2,461 × 10 <sup>1</sup>	2,138 × 10 <sup>1</sup>	5,523 × 10 <sup>1</sup>
	Rate (%)	100	49.8	33.1	28.8	74.4
	Fuel saving (kg/m <sup>2</sup> .year)	-	678	903	962	346

Note: Ceramic fiber suffix A indicates blanket. Ceramic fiber suffix B indicates block.

\* Operation days = 5 days/week, operation hours = 1 batch, steady state = 15 h/day, 75 h/week, temperature rise stop = 9 h/day, 45 h/week, cooling down = 2 days

Table 32 Furnace wall thickness: 344 mm;  
furnace wall surface temperature: 1100°C

Atmospheric temperature: 25°C  
emissivity: 0.85

Furnace wall structure						
	Emission calorific value Q (kcal/m <sup>2</sup> h)	1,188	771	677	623	946
Heat accumulation value H (kcal/m <sup>2</sup> )	111,830	48,000	36,920	4,110	95,860	
Continuous operation 6000 h/year	Emission calorific value (kcal/m <sup>2</sup> .year)	7,128 × 10 <sup>1</sup>	4,626 × 10 <sup>1</sup>	4,062 × 10 <sup>1</sup>	3,738 × 10 <sup>1</sup>	5,676 × 10 <sup>1</sup>
	Rate (%)	100	64.9	57.0	52.4	79.4
	Fuel saving (kg/m <sup>2</sup> .year)	-	582	713	788	338
*Batch operation 40weeks/year	Total heat loss (kcal/m <sup>2</sup> .year)	9,641 × 10 <sup>1</sup>	5,274 × 10 <sup>1</sup>	4,422 × 10 <sup>1</sup>	2,875 × 10 <sup>1</sup>	7,950 × 10 <sup>1</sup>
	Rate (%)	100	54.7	45.9	29.6	82.4
	Fuel saving (kg/m <sup>2</sup> .year)	-	1,016	1,214	1,573	393

Note: Ceramic fiber suffix A indicates blanket. Ceramic fiber suffix B indicates block.

\* Operation days = 5 days/week, operation hours = 1 batch, steady state = 15 h/day, 75 h/week, temperature rise stop = 9 h/day, 45 h/week, cooling down = 2 days

**Table 33 Furnace wall thickness: 344 mm;  
furnace wall surface temperature: 1300°C 12)**

Atmospheric temperature: 25°C  
emissivity: 0.85

Furnace wall structure						
Emission calorific value Q (kcal/m²h)		1.651	1.188	988	807	1.335
Heat accumulation value H (kcal/m²)		131,630	138,510	57,550	10,980	114,770
Continuous operation 6000 h/year	Emission calorific value (kcal/m²·year)	9,918 × 10 <sup>4</sup>	7,128 × 10 <sup>4</sup>	5,928 × 10 <sup>4</sup>	4,842 × 10 <sup>4</sup>	8,010 × 10 <sup>4</sup>
	Rate (%)	100	71.9	59.8	48.8	80.8
	Fuel saving (kg/m²·year)	-	930	1,330	1,692	636
Batch operation 10 weeks/year	Total heat loss (kcal/m²·year)	12,456 × 10 <sup>4</sup>	10,708 × 10 <sup>4</sup>	6,600 × 10 <sup>4</sup>	3,950 × 10 <sup>4</sup>	10,398 × 10 <sup>4</sup>
	Rate (%)	100	86.0	53.0	31.7	83.5
	Fuel saving (kg/m²·year)	-	581	1,952	2,335	686

Note: Ceramic fiber suffix A indicates blanket. Ceramic fiber suffix B indicates block.

\* Operation days = 5 days/week, operation hours = 1 batch, steady state = 15 h/day, 75 h/week, temperature rise stop = 9 h/day, 45 h/week, cooling down = 2 days

**Table 34 Furnace wall thickness: 460 mm;  
furnace wall surface temperature: 900°C 12)**

Atmospheric temperature: 25°C  
emissivity: 0.85

Furnace wall structure						
Emission calorific value Q (kcal/m²h)		851	532	487	548	625
Heat accumulation value H (kcal/m²)		127,380	60,540	45,450	4,690	116,460
Continuous operation 6000 h/year	Emission calorific value (kcal/m²·year)	5,166 × 10 <sup>4</sup>	3,192 × 10 <sup>4</sup>	2,922 × 10 <sup>4</sup>	3,288 × 10 <sup>4</sup>	3,750 × 10 <sup>4</sup>
	Rate (%)	100	61.8	56.6	63.6	72.6
	Fuel saving (kg/m²·year)	-	499	522	437	329
Batch operation 10 weeks/year	Total heat loss (kcal/m²·year)	8,841 × 10 <sup>4</sup>	4,736 × 10 <sup>4</sup>	3,937 × 10 <sup>4</sup>	2,527 × 10 <sup>4</sup>	7,377 × 10 <sup>4</sup>
	Rate (%)	100	53.6	44.5	29.1	83.4
	Fuel saving (kg/m²·year)	-	955	1,140	1,458	340

Note: Ceramic fiber suffix A indicates blanket. Ceramic fiber suffix B indicates block.

\* Operation days = 5 days/week, operation hours = 1 batch, steady state = 15 h/day, 75 h/week, temperature rise stop = 9 h/day, 45 h/week, cooling down = 2 days

### 3.4.2 水冷スキッドの熱損失比較

水冷スキッドパイプの断熱方式を示したもので水冷部からの熱損失が二重断熱の場合は水冷面積の大きいウォーキングビーム炉では約10%近い燃料節減が達せられる。

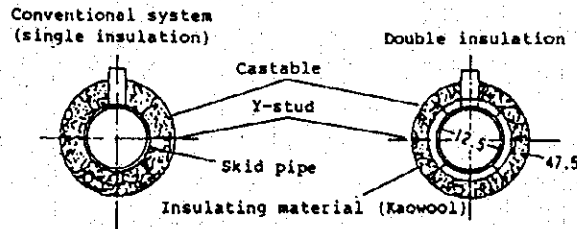


Figure 8 Skid lining <sup>13)</sup>

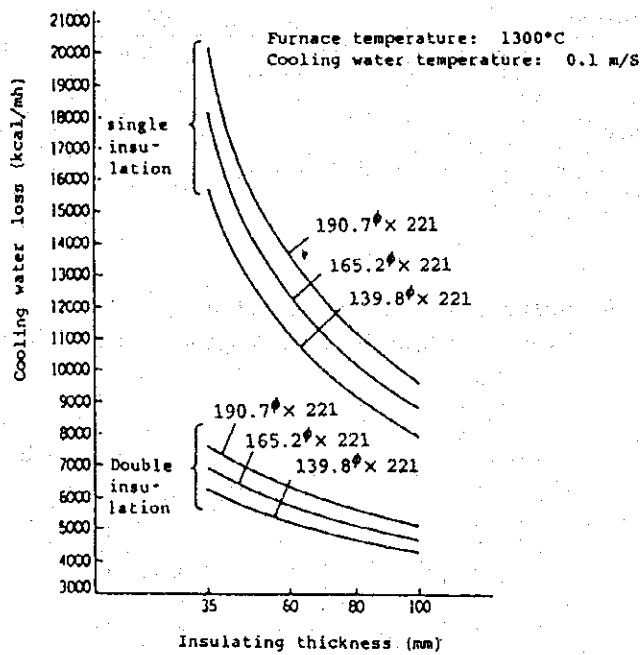


Figure 9 Water cooling heat loss comparison (calculated value) <sup>14)</sup>

## 4. 工業用の炉における省エネルギー

表35から表40は色々な炉に対する一般的な熱効率を示している。この表から現在の状況は、炉間の効率の差ばかりでなく、平均効率の点においてもまた、未だ満足な状態ではないと言うことがわかる。

表41は改善のための要素である。出来る限りの対策を新たに設置する炉に適用することが望ましい。現存する炉に対しては、効率を劣化させる可能性のある各要素を研究し、最終的には部分的に改修することが有用である。

### 4.1 煙道ガスからの熱の回収

#### 4.1.1 燃焼空気または燃料の予熱

空気の予熱と、燃料の予熱に関係する最も現実的な熱の回収方法において、燃焼空気の予熱は燃料の予熱よりもむしろもっと広範に採用されている。燃料を予熱する時、安全性と熱分解の危険性に注意すべきであり、良好な噴霧化を得るための予熱を除いて、省エネルギーの意図のみで燃料油を決して予熱してはならない。

レキュペレーターは排気ガスと燃焼空気の間での熱交換を行うための機械である。それは顕熱を伝達する金属のエレメントまたはセラミックのエレメントで造られている。表42はレキュペレーターの設計の一覧である。図10および11はレキュペレーターの配置と例をそれぞれ表している。図11の(a)は製鉄所の高負荷の加熱炉で利用される大規模なレキュペレーターに関するものである。この中では、対流による熱伝達が支配的である。図11の(b)はレキュペレーター(a)におけるよりも放射による熱伝達を高めるもっと高い排気ガス温度に適用するように設計されている。図11(c)と(d)は更に高い温度に耐えることが出来るタイル(セラミック)のエレメントによって構成されている。

これら(c)と(d)が実際には(a)と直列に接続されていることに注目すると面白い。しかし、モルタルの剥がれによって長期に使用しているセラミックの間から漏洩が起り勝ちであるので、空気と排ガス間の圧力差を出来るだけ小さく保つように注意することが使用寿命に決定的な役割を演ずる。図11(e)は集積車輪が常に回転している連続集積熱交換装置である。

図12は、空気の予熱システムが燃焼システムに導入された時、最適のエネルギー効率を維持するための良好な精度を保証する制御システムを示している。

次の記述は空気または燃料を予熱する時の省エネルギー効果を計算することと関連している。図13を参照すると、利用可能な熱 $H$ は燃料 $F$ のカロリー値と煙道ガスの顕熱損失 $Q$ を使用

して簡単に計算することができる。

$$H = F - Q \text{ kcal/kg燃料}$$

ここで、空気の子熱と燃料の子熱による回収熱量PAおよびPFをそれぞれ考慮して、それらの合計Pを仮定すると、それは次の通り表される。

$$P = PA + PF \text{ kcal/kg燃料}$$

こうして、補正した利用可能な熱H'は次のようになる。

$$H' = F + P - Q = (F - Q) + P = H + P \text{ kcal/kg燃料}$$

もし炉が正味の熱としてx (kcal/h)を必要とするならば、燃料の消費率は、子熱しない時はx/H (kg/h)、子熱した時はx/(H+P) (kg/h)となる。

したがって、省エネルギー効果Spは次のように計算される。

$$Sp = \frac{\frac{x}{H} - \frac{x}{H+P}}{\frac{x}{H}} = \frac{P}{H+P} \times 100\%$$

〔例〕

300℃の子熱した空気と共に空気比1.2の中で灯油を使用し炉部分の出口からの煙道ガスの温度が900℃である時、煙道ガスの熱損失Q (kcal/kg燃料)と燃料節約率Sp(%)を計算する。

1. 灯油の火炎から出る理論的な燃焼生成物

CO <sub>2</sub>	1.59m <sup>3</sup> N/kg燃料
H <sub>2</sub> O	1.56m <sup>3</sup> N/kg燃料
SO <sub>2</sub>	0/00m <sup>3</sup> N/kg燃料
N <sub>2</sub>	9.02m <sup>3</sup> N/kg燃料

2. 過剰空気

O <sub>2</sub>	11.4* × 0.2 × 0.21 = 0.48m <sup>3</sup> N/kg燃料
N <sub>2</sub>	11.4 × 0.2 × 0.79 = 1.80m <sup>3</sup> N/kg燃料

\*灯油 (m<sup>3</sup>N/kg燃料) に対する理論空気量

(1+2)が究極的な煙道ガスの流量であり、表43に示した平均の定圧比熱のデータを取って、Qは次の通りの合計となる。

CO <sub>2</sub>	1.59 × 0.523 × 900 = 748
H <sub>2</sub> O	1.56 × 0.387 × 900 = 543
N <sub>2</sub>	10.82 × 0.331 × 900 = 3,223
O <sub>2</sub>	0.48 × 0.351 × 900 = 152

---

$$Q = 4,666 \text{ kcal/kg燃料}$$

灯油の低いカロリー値が10,400kcal/kgと分かると、Hは次のように計算される。

$$H=10,400-4,666=5,734\text{kcal/kg燃料}$$

空気の子熱による熱の回収量は次の通り計算される。

燃焼空気の流れ量：

$$11.4 \times 1.2 = 13.68\text{m}^3\text{N/kg燃料}$$

熱の回収量：

$$P = 13.68 \times 0.315 \times 300 = 1,293\text{kcal/kg燃料}$$

したがって、

$$Sp = P / (H + P) = 1,293 / (5,734 + 1,293) = 18.4\%$$

図14は省エネルギーへの効果の推定を容易にするための空気の子熱の程度の範囲を取り扱っている。

#### 4.1.2 高温冷却システム、廃熱ボイラおよびレキュペレーターを備えた連続鋼スラブ加熱炉

図15と16は、空気の子加熱のためのレキュペレーターと排熱ボイラと共に、炉内にあるスキッド・パイプに対して高温冷却システムを組み込んだ最も先進的な連続鋼片加熱炉の一つを図示している。高温冷却システムは炉の内側からの熱放射に対してスキッド・パイプを冷却するために、冷水に代えて100℃を越える高温の蒸気と水の混合物を使用するものである。

#### 4.1.3 加熱した製品からの熱の回収

ガラス工業においては、レーアと呼ばれる炉を使用して型に入れたガラス製品を450℃-600℃まで加熱し、続いて或る一定期間均熱してそれから徐々に冷却する工程を取っている。

この熱処理によって、製品の機械的強度が改善され、同時にガラス表面の塗装や蛍光物質が焼かれる。炉の区画は加熱、均熱、徐冷および急冷のゾーンから成っており、それらを通じて製品は網ベルトの上に連続的に搬送される。

最近まで、製品を冷却するために冷却ゾーンに注入された空気は排熱として排出されていた。図17に示したように、今日では、空気は冷却ゾーンにある冷却チューブの中に注入され、こうして200℃にまで予熱された空気がバーナに供給されている。

[応用例]

燃焼方法	：	直接燃焼式
炉の温度	：	550℃
燃料消費	：	改善前400,000kcal/h 改善後365,000kcal/h

省エネルギー効果 : 9%

#### 4.2 過剰空気の制御

経済的な観点から化学量論的燃焼が理想的であることは良く知られている。しかし、実際には、完全燃焼のために理論的な空気の必要量に僅かに余分な空気を加えるのが普通である。これは限られた時間内での空気と燃料の間の不完全な混合に対する解決策である。空気比は理論的な空気の必要量に対する実際の燃焼空気の流量の割合として定義される。

即ち、

$$\text{空気比} = \frac{\text{実際の燃焼用空気量 (m}^3\text{N/kg燃料)}}{\text{理論空気量 (m}^3\text{N/kg燃料)}}$$

表44は空気比に関する提案のガイドラインを示しており、それは日本の工業の殆どの分野で現在参考にされている。

表45はバンカーAの燃料油を焚く時、空気比の最適化によって達成出来る燃料の節約率を示している。例えば、炉の温度が1,300℃の時、空気比を1.5から1.2に削減することによって40%の燃料が節約できる。過剰空気の調節の前後の $H_1$ と $H_2$ それぞれで得られる熱(kcal/kg燃料)を仮定すると、一般的に $H_2$ が $H_1$ よりも大きい。炉の熱入力 $x$ (kcal/h)に対する燃料消費率は $x/H_1$ から $x/H_2$ (kg/h)に減少する。

したがって、省エネルギー効果 $S_A$ は次のように表される。

$$S_A = \frac{\frac{x}{H_1} - \frac{x}{H_2}}{\frac{x}{H_1}} = \left(1 + \frac{H_1}{H_2}\right) \times 100\%$$

$H_1$ と $H_2$ は次のように定義される。

$$H_1 = F - Q_1$$

$$H_2 = F - Q_2 \text{ (3.1.1を参照のこと)}$$

#### 4.3 予熱と過剰空気の制御の複合効果

燃料消費率を $I$ 、予熱による省エネルギー効果を $S_p$ (%)および過剰空気の制御による省エネルギー効果を $S_A$ (%)と仮定すると、両方の対策を講じた時の燃料の消費率は次のように簡単に計算される。

$$\left(1 - \frac{S_p}{100}\right) \left(1 - \frac{S_A}{100}\right)$$

総合的な省エネルギー効果 $S_T$ は次のように表される。



$$S_T = \frac{1 - \left(1 - \frac{S_P}{100}\right) \left(1 - \frac{S_A}{100}\right)}{1}$$

$$= \left(S_P + S_A - \frac{S_P \cdot S_A}{100}\right) \%$$

但し、

$$S_P = \frac{P}{H+P} \times 100\% \quad \text{and}$$

$$S_A = \left(1 - \frac{H_1}{H_2}\right) 100\%$$

したがって、

$$S_T = \left\{1 - \frac{H_1 \cdot H}{H_2 (H+P)}\right\} \times 100\%$$

ここで、予熱と空気比の両方に対策が講じられているので、利用できる熱  $H$  は  $H_2$  と全く同じになる。

したがって、 $S_T$  は次のように纏められる。

$$S_T = \left(1 - \frac{H_1}{H+P}\right) \times 100\%$$

図18はバンカBの重燃料油を焚く場合、総合的な省エネルギー効果に関し、上記のように計算した結果を表している。

空気の子熱レベルは炉の負荷および炉の温度に対して変わることが認識しなければならない。このことは空気比が変わらないように保つために或る一定のシステムがその工場に必要であることを示唆している。図19は予熱レベルを変える時、最初に調整された1.1から空気比を変える方法を示している。この解決策として、図11は完全なシステムを示しており、一方図20と21は費用は余り掛からないが余り高い精度の制御はできない、簡単なシステムに関するものである。

#### 4.4 炉圧の制御

##### 4.4.1 炉圧制御の必要性

###### (1) 直接燃焼式炉の圧力制御

ここでは、連続鋼スラブ加熱炉を一例として述べる。

図22(a)に示したようなプッシャー炉はスラブが炉の内部を通過して前に押されるタイプのものである。これとは対照的に、図22(b)に示したように、ウォーキング・ビーム炉は炉内に可動ビームと固定ビームが載っており、可動ビームが上前進—下降—後退の運動を繰り返す。

しその運動によってスラブを炉の出口に向けて移送するタイプのものである。

炉は煙道のダクト内にあるダンパーによって圧力が自動的に制御されている。炉出口の炉床系統から検出した圧力信号が上記のダンパーを作動させることになっている。省エネルギーの観点から、炉の入口では $+0\text{ mm H}_2\text{O}$ の炉床系統の圧力を目標とし炉の出口での最終的な炉床系統の圧力は炉の区画を通じた通風損失を考慮に入れて予めセットされている。代表的な通風損失は $0.1$ ないし $0.5\text{ mm H}_2\text{O}$ の範囲内にある。

図23は炉圧と炉の開口を通る空気の浸透の関係を示している。この図は炉底の圧力を $+0\text{ mm H}_2\text{O}$ かまたは僅かに正圧にセットすることが好ましいことを示している。炉圧が負圧に制御される時には、浸透空気が製品の品質と熱効率の両方に対して逆の影響を与える要素として作用する。反対に、過剰に高い炉圧では、高温の燃焼生成物が炉の開口を通して吹き出し勝ちであり、炉の外殻の過熱かまたは熱の不足を招き、究極的に耐火物の使用寿命が短くなると言う損失を伴う。

図24は炉圧の関数としての空気の浸透率を表し、図25は熱効率と保守の面から推奨する炉圧を提示している。

## (2) 熱処理炉のバッチ・タイプに対する圧力制御

大気ガスを送り込む熱処理炉には正の炉圧が必須であり、出来れば $10$ ないし $20\text{ mm H}_2\text{O}$ が望ましい。従って、大気の流量率はガス調整バルブの調整によって手動で調節する。エア・シールが実施されているので、炉の扉は空気駆動のシリンダによって炉の構造体にしっかりと押し付けられている。このように使用寿命を伸ばし、費用の掛からないより経済的な運転の両方を達成するために、その間には柔らかなパッキンが使用されている。

また、ウォーター・シール装置が炉圧を制御する目的で大気ガスの供給パイプの上に採用されている。ガスの再循環用ファンを採用している熱処理炉では、炉圧を乱す可能性のあるファンの回転に応じて大気ガスの供給流量を制御することが一定の炉圧を保持するために不可欠である。このために、ウォーター・シール装置の水位をファンの起動時にガスの供給流量を増加させるために上げ、その後ファンの回転が安定した時その水位を元に戻す。

## (3) 連続熱処理炉に対する炉圧の制御

大気ガスは、例えば、コールド・ミル・ストリップの焼鈍炉にもまた同様に供給される。この場合、炉の入口と出口に設けられたシール・ローラからの大気ガスの漏洩は避け難いように思われる。この問題を解決するために、或る一定量の追加のガスを炉の色々な部分から供給すると、その結果炉圧を $10$ ないし $20\text{ mm H}_2\text{O}$ に保つように制御することができる。実際には、ガスの供給流量は炉の運転状態によってモニタされて制御される。

#### 4.4.2 炉圧の制御方法

##### (1) 燃料燃焼炉における圧力制御

燃料燃焼炉には自然通風型と強制通風型がある。制御システムは圧力検出器（センサ）、圧力送信機、圧力制御装置、燃料ダクトにある制御ダンパーと作動装置から成る。装入と排出のために反復して扉を開く連続炉においては、扉の動きが制御システムに対して妨害要素として作用する。これに対する対策として、予想制御の概念に関する最近の発展が評価されてきた。マイクロ-DDCシステムの制御能力を計算する多機能の利用が発見され、運転条件の変動に対して前以て制御するための必須の道具として役立つようになった。

##### (2) 炉圧に対するコンピュータを使用した制御方法

特殊合金鋼用複区画炉では、経済的に燃料を使用するために回収熱交換装置が各区画に採用されているが、更に炉の全長に亘る均一な温度分布が必要とされる。（図26を参照のこと）そのため、各煙道のダクト中のダンパーの開きを、ダンパーの間のバランス制御は勿論リアル・タイムの燃焼率を計算することによって、制御している。燃料の流量、空気の流量率および炉の温度の出力信号に基づいてダンパーの開きを決定するために各区画の煙道ガスの量を計算するマイクロ-DDC制御装置を採用することによって、達成された。

##### (3) 炉圧制御の特殊な例

ガラス熔融炉は苛性ソーダと珪酸を取り扱い、省エネルギーのために炉圧の制御が必要である。普通の機械的なダンパーは機械的なために生じる機能不全のために熔融ガラスの凝固を起こすので、図27(a)に示したようにエア・ジェット・カーテンが圧力制御装置として採用されている。図27(b)は別個に設計された機械的なダンパーを示している。しかし、どちらの装置も応答性に弱点を抱えている。

#### 4.4.3 ダンパーの機構と作動機

バタフライ型およびスライド型が機械的なダンパーとして広く使用されており、制御ループの中の構成要素として良好な応答性を保証することは勿論、高い温度と熱応力に耐えるように慎重に設計されるべきである。

これらの面は頻繁に開閉する炉の扉にとって特に重要である。図28(a)はプーリ、ワイヤおよびパワー・シリンダの組み合わせで駆動されるスライド式のダンパを示している。

設備投資金額は高出力のパワー・シリンダと重いカウンタ・ウェイトを採用することによって改善される応答時間に反比例する。

図28(b)は、重量に関してはスラストローラベアリングで、バルブペーンを通じた差圧によって発生した半径方向の力に関してはラジアルローラベアリングで支持されるバタフライダ

ンパーを示している。したがって、後者のダンパーは最初のものよりも作動力を余り必要とせず、応答時間と気密性において他のものよりも確かに優れている。作動力源として、油圧式が応答時間の点から推奨されている。表46と47は色々なダンパーの特性を要約したものである。

#### 4.5 炉の設計面からの省エネルギー

##### 4.5.1 連続炉の有効な炉の長さや形状

ウォーキング・ビーム式加熱炉を代表的な例として述べる。燃料消費率を削減するため有効な炉の長さに関する設計見直しを行っている。煙道ガスの顕熱が熱損失の主要な部分を占めており、損失のこの部分を削減することが燃料消費の削減を支配する。研究に準拠すれば、図29に示したように500乃至600kg/m<sup>2</sup>hの常用熱負荷が最適の値と今日では見做されており、その値から有効な炉の長さが決定される。これは、見方を変えれば、石油危機の時期以前に取られた900kg/m<sup>2</sup>hを越える設計基準と比べて長さが1.5ないし1.8倍も長くなったことを意味する。長くなった炉の長さは設備投資金の増加と言う悪い影響を与えるが、燃料経済の改善によって2-3年の内に確実に回収される。

図29に示された燃料消費率は二重に断熱したスキッド・パイプを備えた加熱炉について比較されている。燃料消費率が熱負荷を600kg/m<sup>2</sup>hに指定した時の340×1000kcal/tonに較べて、熱負荷を900kg/m<sup>2</sup>hに指定した時に400×1000kcal/tonとなっている。しかし、400kg/m<sup>2</sup>h未満にまで過剰に減少した熱負荷ではむしろ燃料消費が増加することを示している。

図30は石油危機の時期の前と後で造られたウォーキング・ビーム式加熱炉の有効な長さの比較している。注目すべき違いは、新しい加熱炉はバーナを装備していない予熱ゾーンを組み込んでおり、その長さが全有効長の25%に達していることである。

##### 4.5.2 鋼スラブの連続加熱炉へのセラミック繊維の適用

(1) 鋼スラブ圧延の連続加熱炉の背景と炉材に対して必要なこと。

- 1) 省エネルギー対策を更に強化することが必要である。
- 2) 鋼スラブの連続鋳造のため、温片装入(600°-1,000°C)が主流である。しかし冷片装入が鋼のグレードによっては尚使用されている。したがって、加熱炉が温片と冷片装入の両方を取り扱うために必要である。
- 3) 連続加熱炉におけるスラブの抽出温度は900°Cの低い温度設定から、圧延される鋼鉄のグレードによっては1,000°Cにまでの範囲にわたる。炉材は高い温度の抽出条件を基準にして選定しなければならない。
- 4) 加熱炉は冷片または温片の何方の装入条件の下でも鋼鉄のグレードに従って温度設定を

容易に変え、追従することが要求される。

- 5) ある鉄鋼工場の場合には、スラブ圧延の連続加熱炉は1基だけ連続鋳造機に対する前処理工程において使用されるようである。このような場合には、炉を止めることは不可能である。

#### 4.5.3 カテナリ型に対する炉設計の歴史的变化

図31はカテナリ型に対する炉設計の歴史的变化を示している。このタイプの炉は連続メッキラインまたはステンレス・スチールの連続焼鈍および酸洗ラインに対して使用される。

最初炉は高温からローラを保護するために支持ローラによって二つの部分に分割されていた。その後、水で冷却されたローラによって、炉は一つに統合された。

次に、炉には廃ガス放射伝熱帯としてバーナを設置しなかった。上記に加えて、炉には排ガスの再循環ファンを備えた対流による予熱帯も設置した。

最終的に、レキュペレーターと排ガスボイラが装備された。

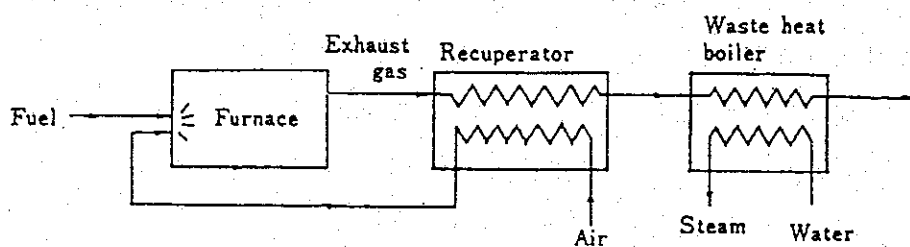
図32は最新式の連続焼鈍ラインを示している。この炉は廃ガス再循環予熱帯を有している。

図33は最新の焼鈍酸洗ラインを示している。勿論、それは放射式および対流式の予熱ゾーンを装備しており、それに加えて水冷却による損失を削減するためにローラに代えてフロータを使用している。

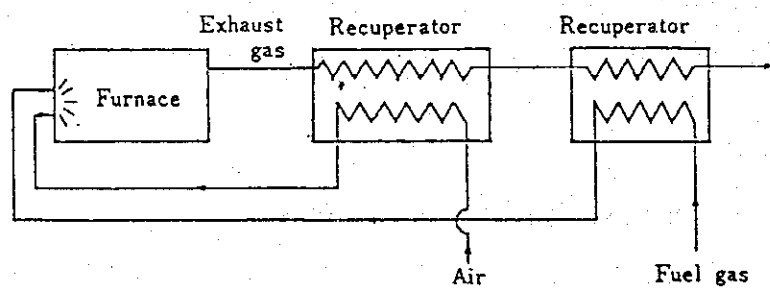
#### 4.5.4 水素ガスの雰囲気をもったバッチ・タイプの焼鈍炉

一般にベル型焼鈍炉と呼ばれているバッチ・タイプの焼鈍炉は普通窒素ガスの雰囲気の下で運転されている。しかし水素の熱伝導率は窒素よりも大きい。そこで水素を窒素に代えて処理雰囲気として使用すると焼鈍中の全エネルギーが低くなる。

図34は代表的な水素式バッチ型焼鈍炉を示している。

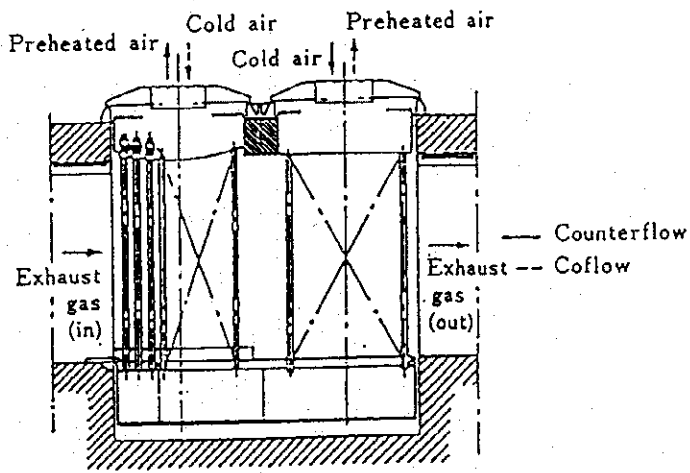


(a) Preheating of combustion air and generation of steam by waste heat boiler

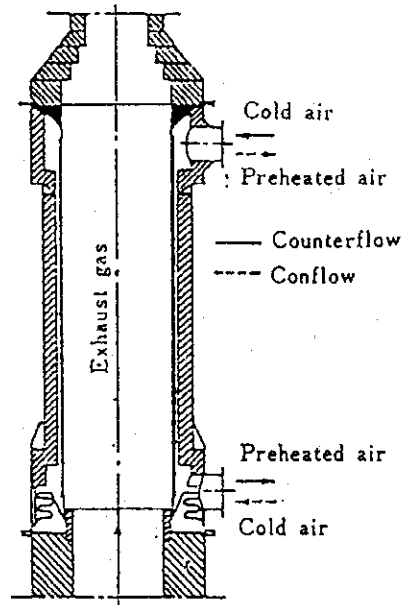


(b) Preheating of combustion air and fuel

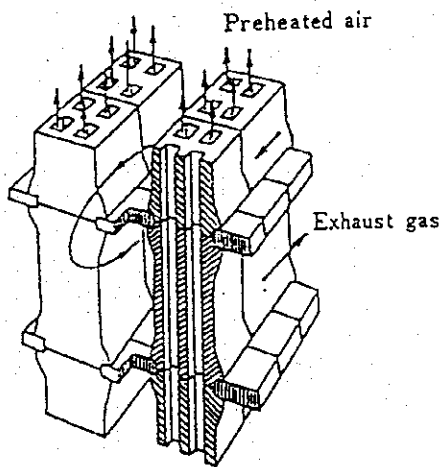
Fig. 10 Layout examples of waste heat recovery by recuperator



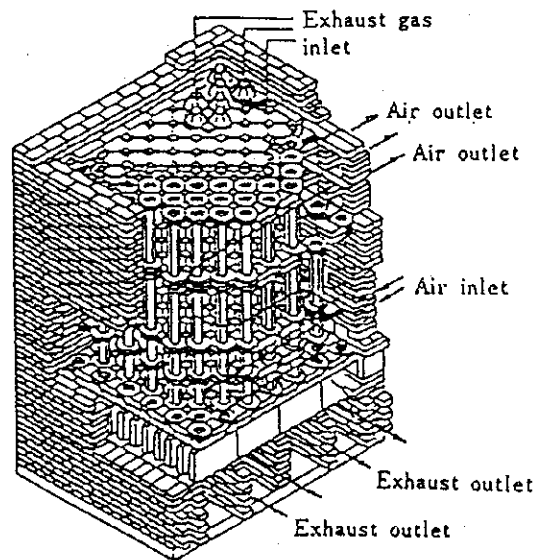
(a) Tube type recuperator



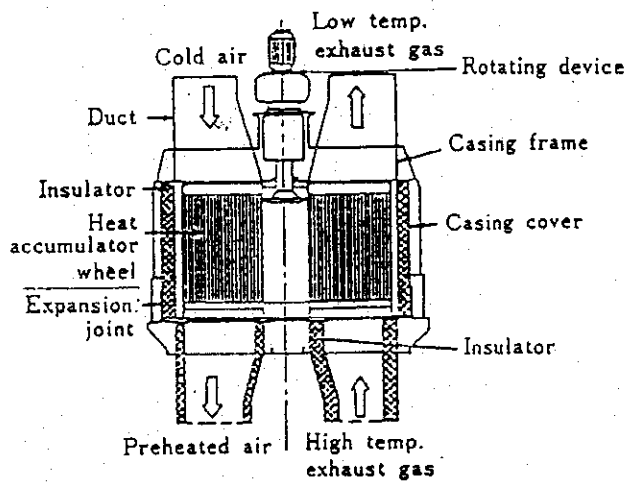
(b) Radiation type recuperator



(c) Stein tile recuperator



(d) Armco type tile recuperator



(e) Heat wheel

Fig. 11 Examples of recuperators

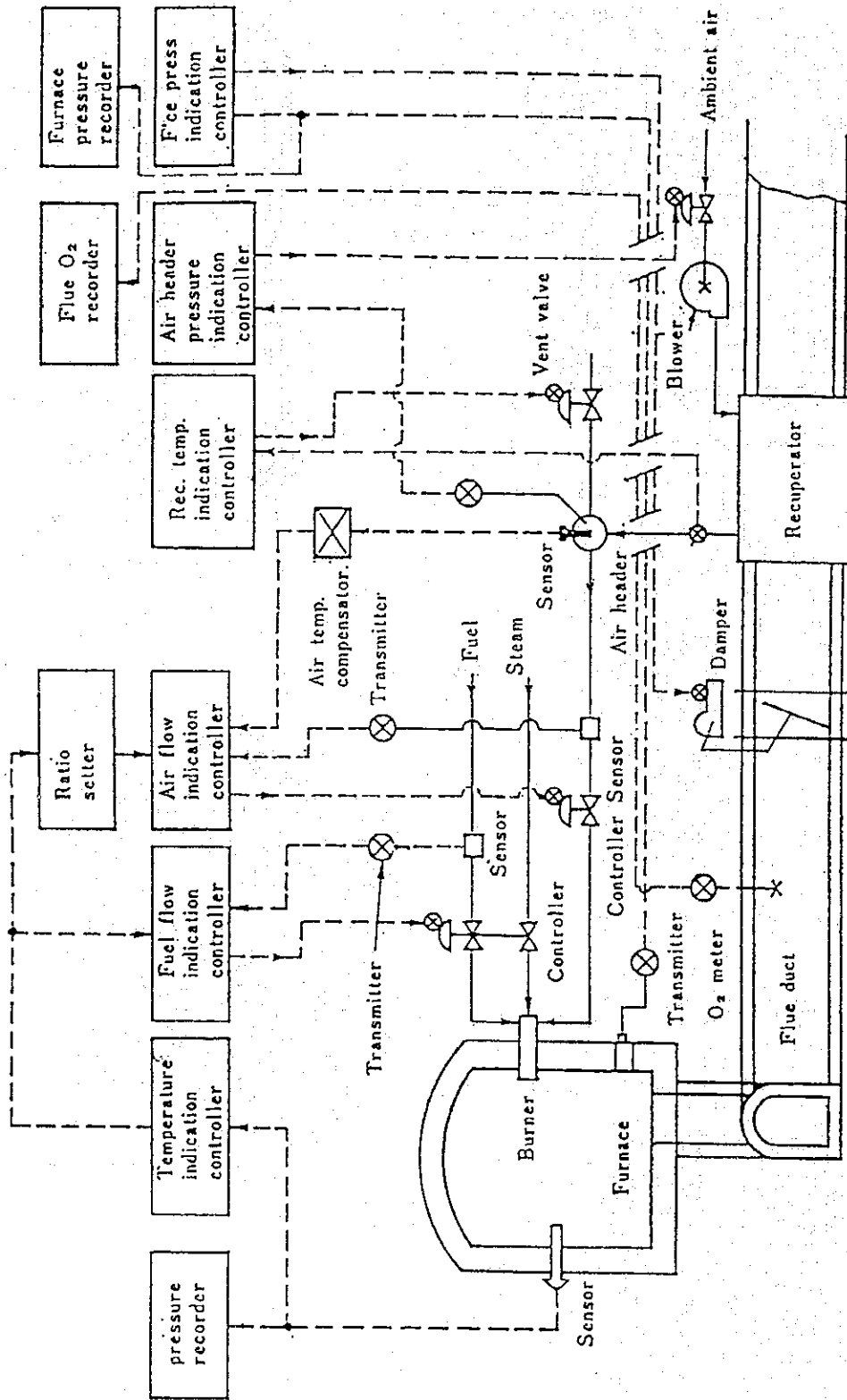


Fig. 12 Air Fuel Ratio Control System for the Case Preheating Combustion Air



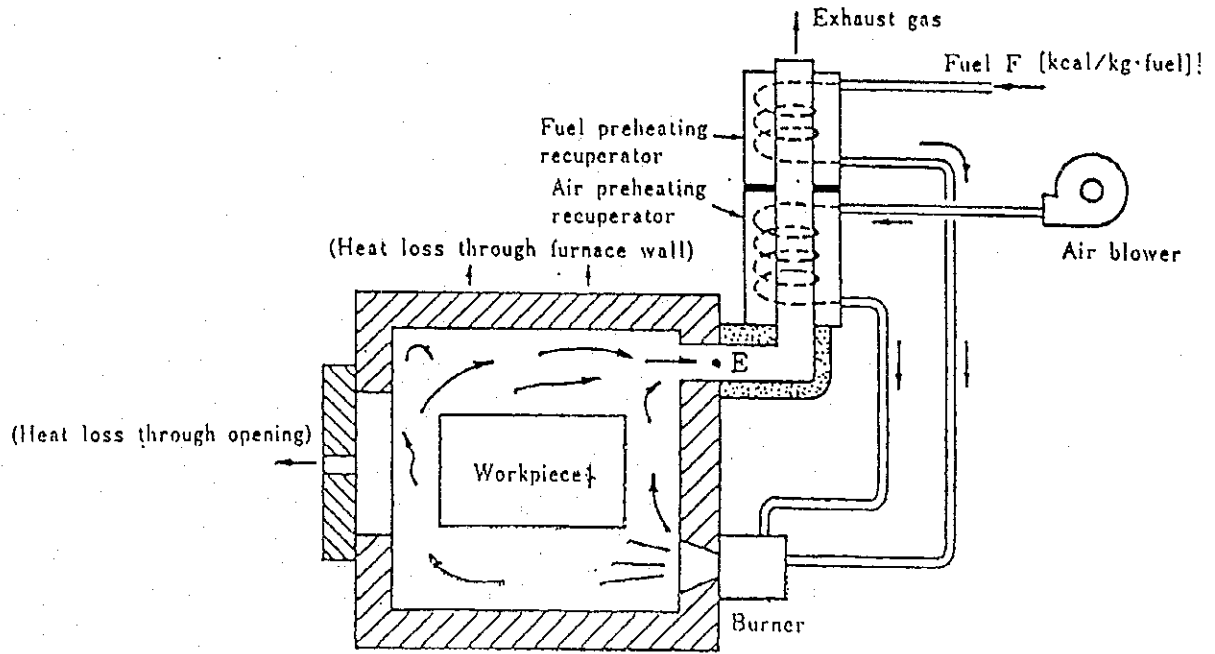


Fig. 13 Basic conceptual diagram of waste heat utilization

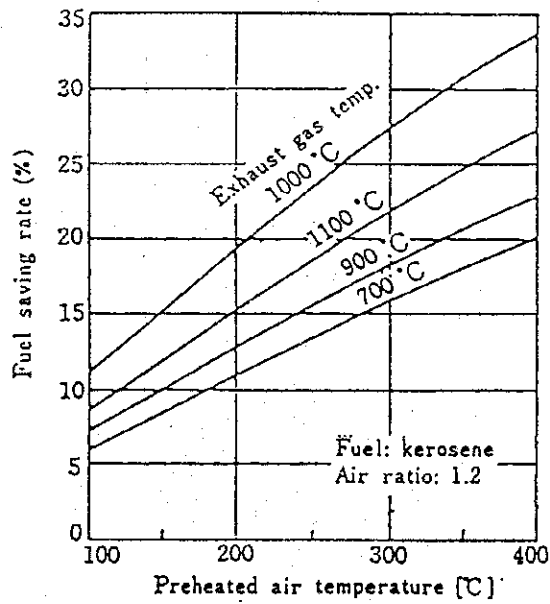


Fig. 14 Fuel saving rate through air preheating

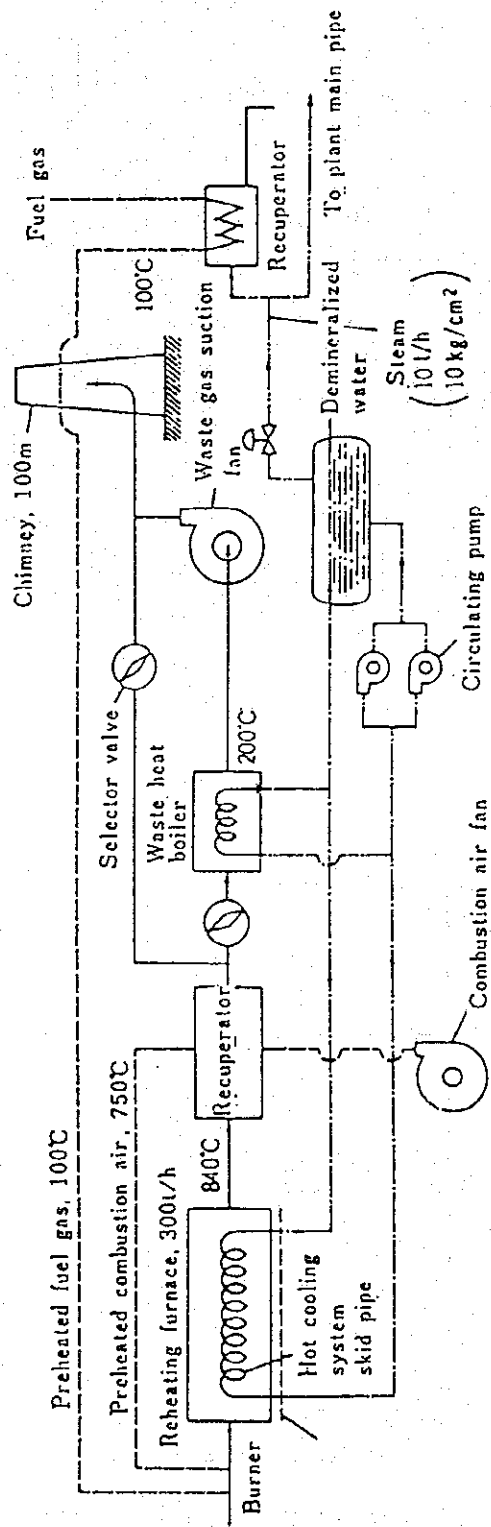
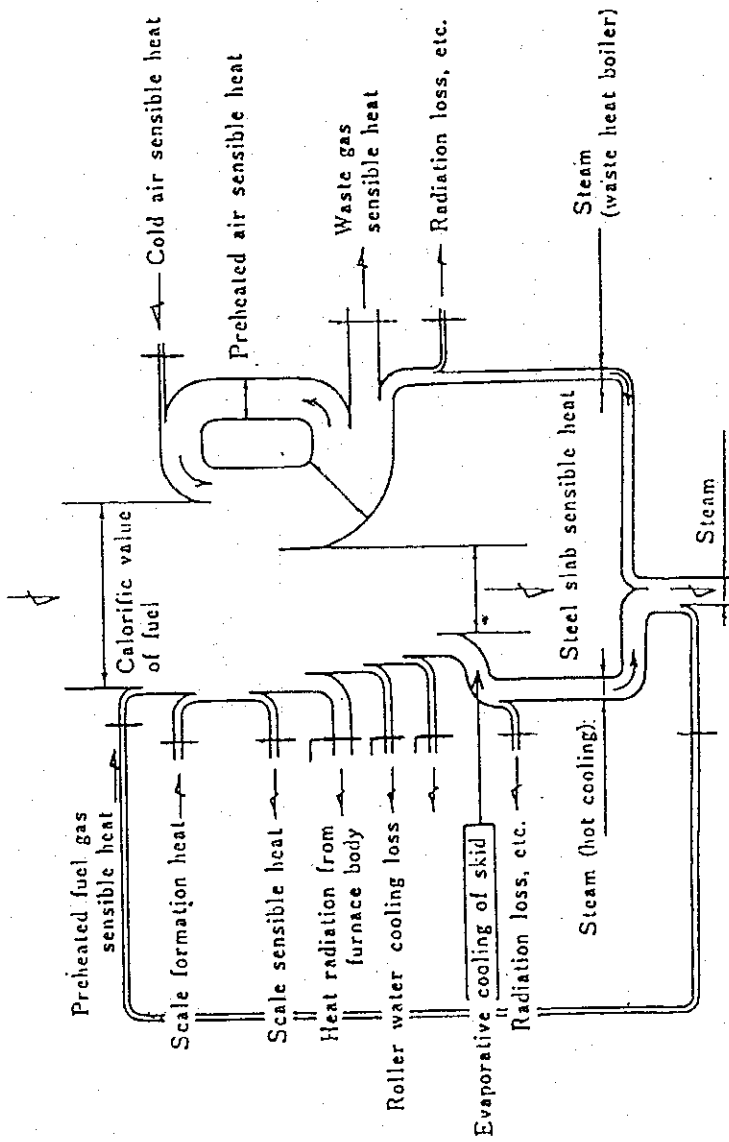


Fig. 15 System diagram of hot cooling system



Heating capacity: 300t/h  
 Fuel consumption:  $12.1 \times 10^4 \text{kcal/t}$  ( $2.0 \times 10^4 \text{kcal/t}$  for steam)  
 Fuel: COG (5,000kcal/Nm<sup>3</sup>)  
 Steel slab charge temperature: 770°C average  
 Steel slab discharge temperature: 1,250°C

Fig. 16 WB type reheating furnace heat balance (calculated value)

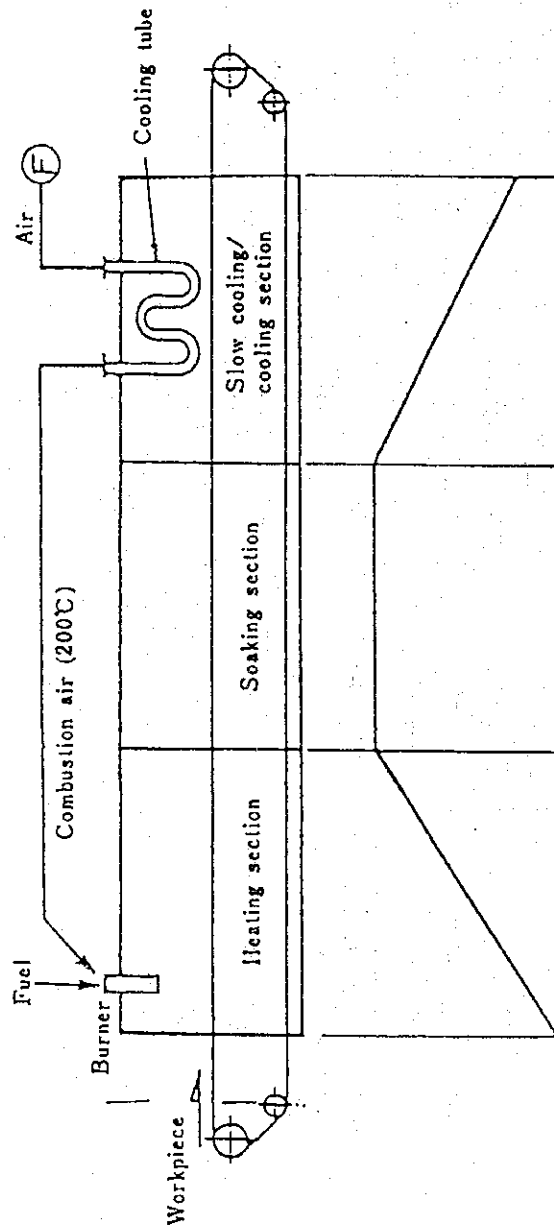


Fig. 17 Heating curve in glass lehr

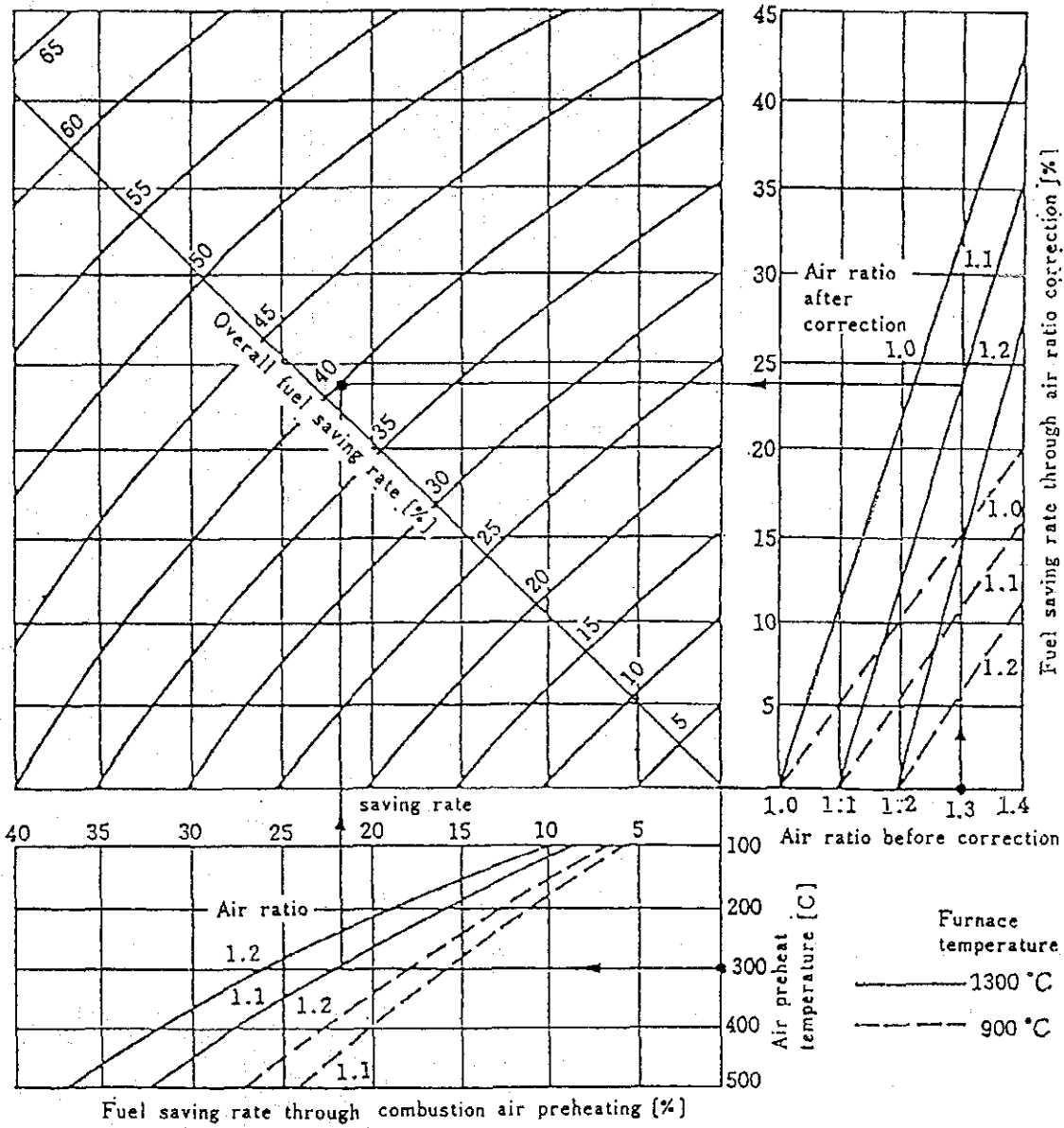


Fig. 18 Overall fuel saving rate through combustion air preheating and air ratio correction (Fuel oil B)

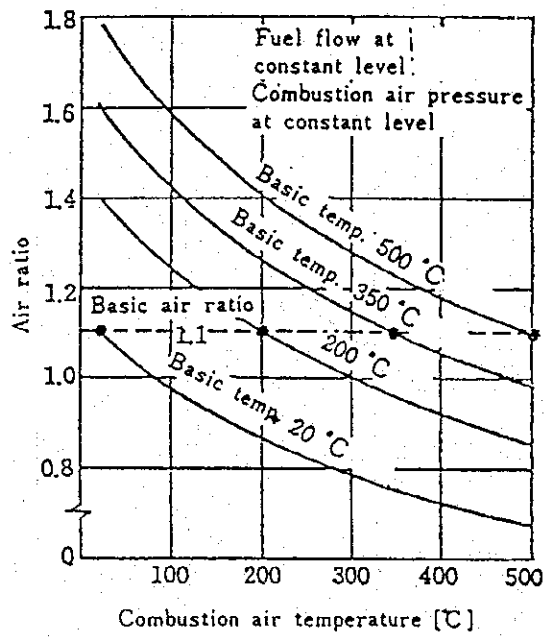


Fig. 19 Air ratio variation against combustion air temperature variation

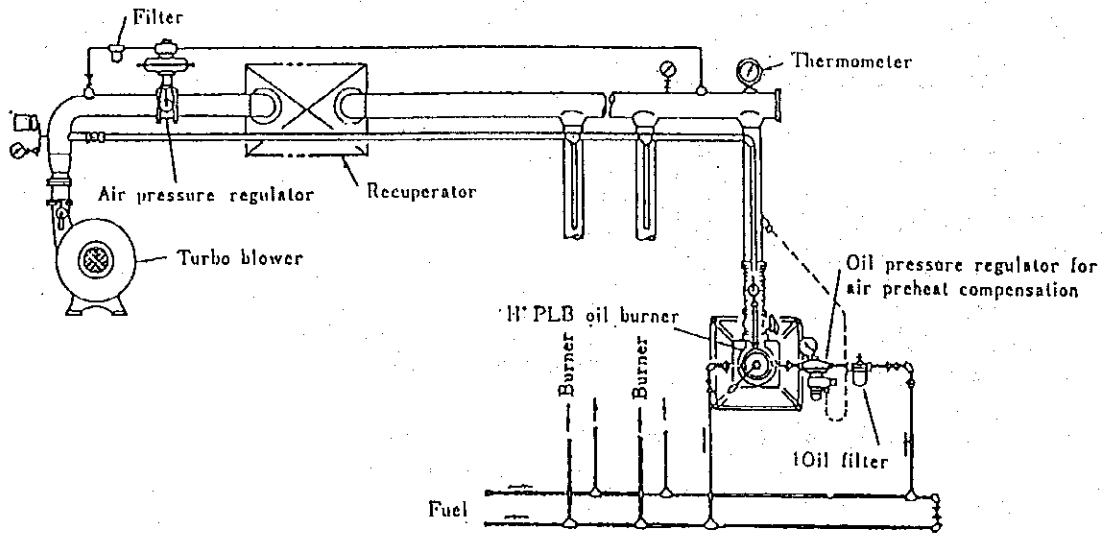


Fig. 20 System diagram of proportioning oil burner piping with air preheat compensator

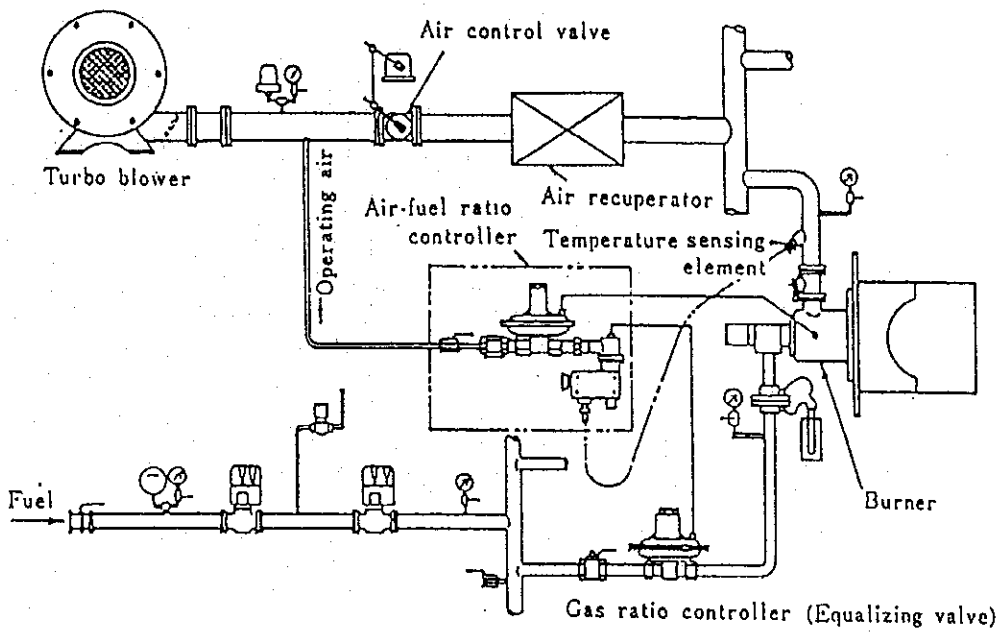


Fig. 21 System diagram of gas burner piping with air preheat compensator

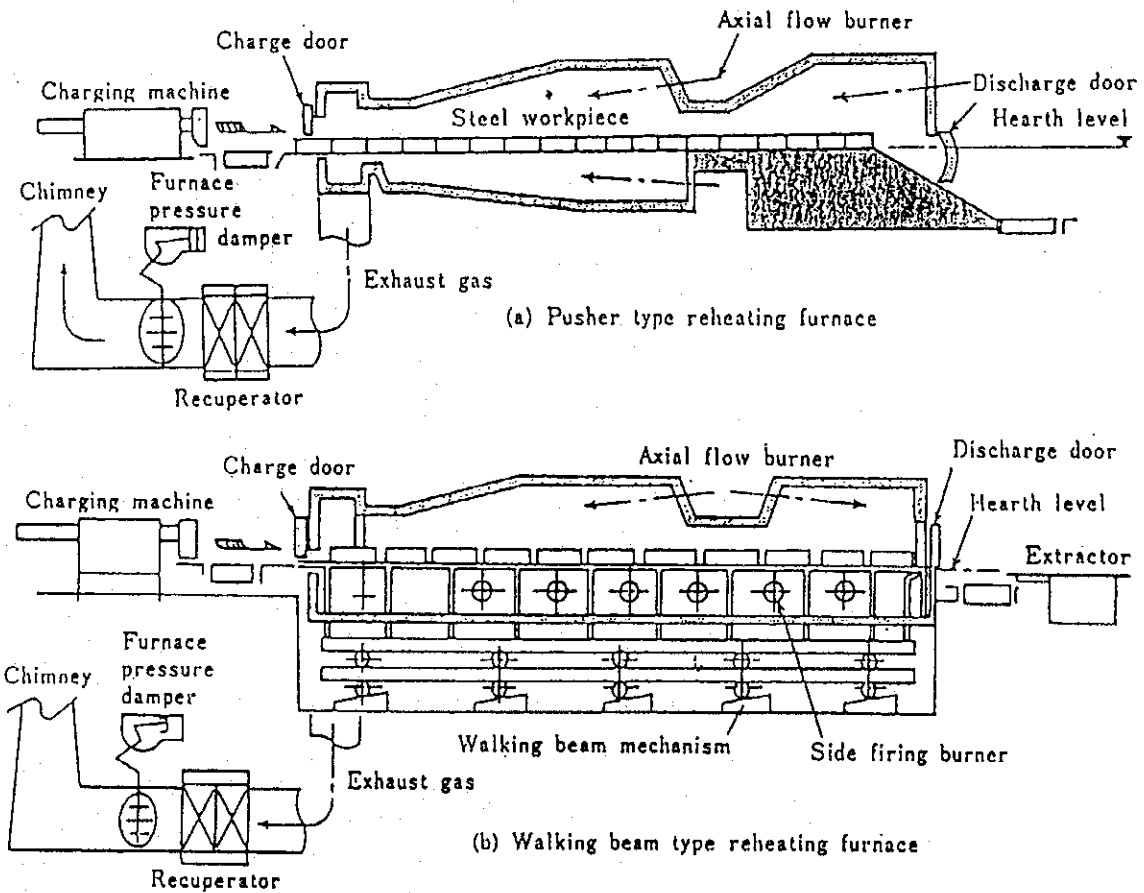


Fig. 22 Furnace pressure control

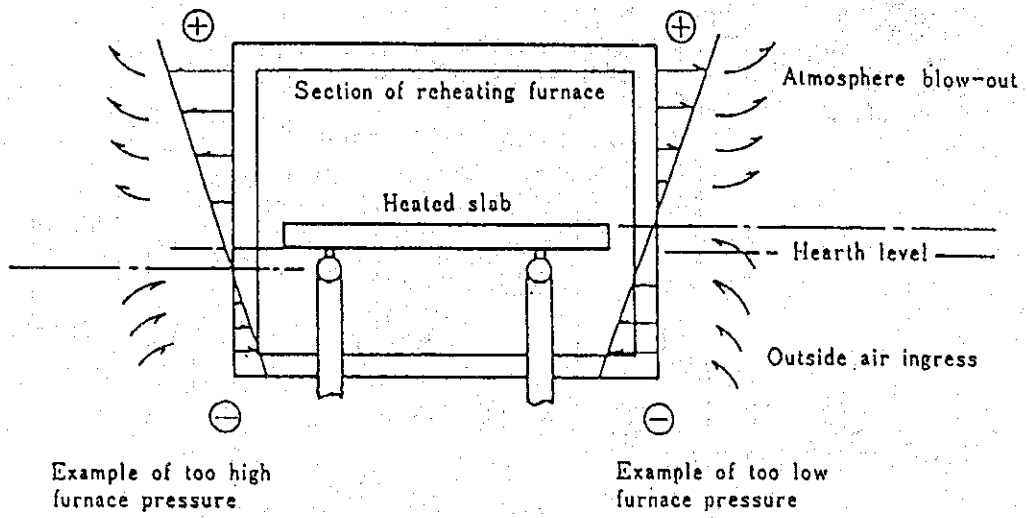


Fig. 23 Air ingress during reheating furnace operation

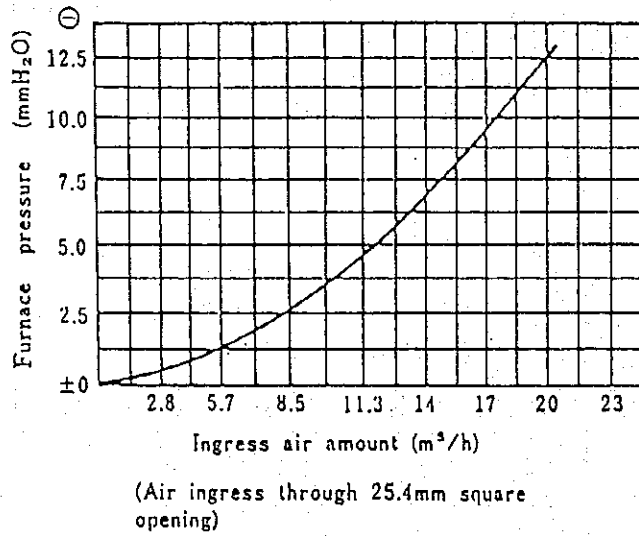
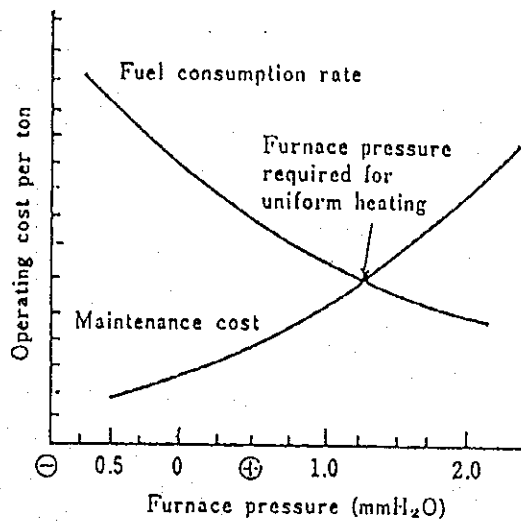


Fig. 24 Furnace pressure vs. ingress air amount





Measuring point: furnace ceiling  
(1.5m from hearth level)

Fig. 25 Optimum furnace pressure in view of fuel consumption rate and furnace maintenance

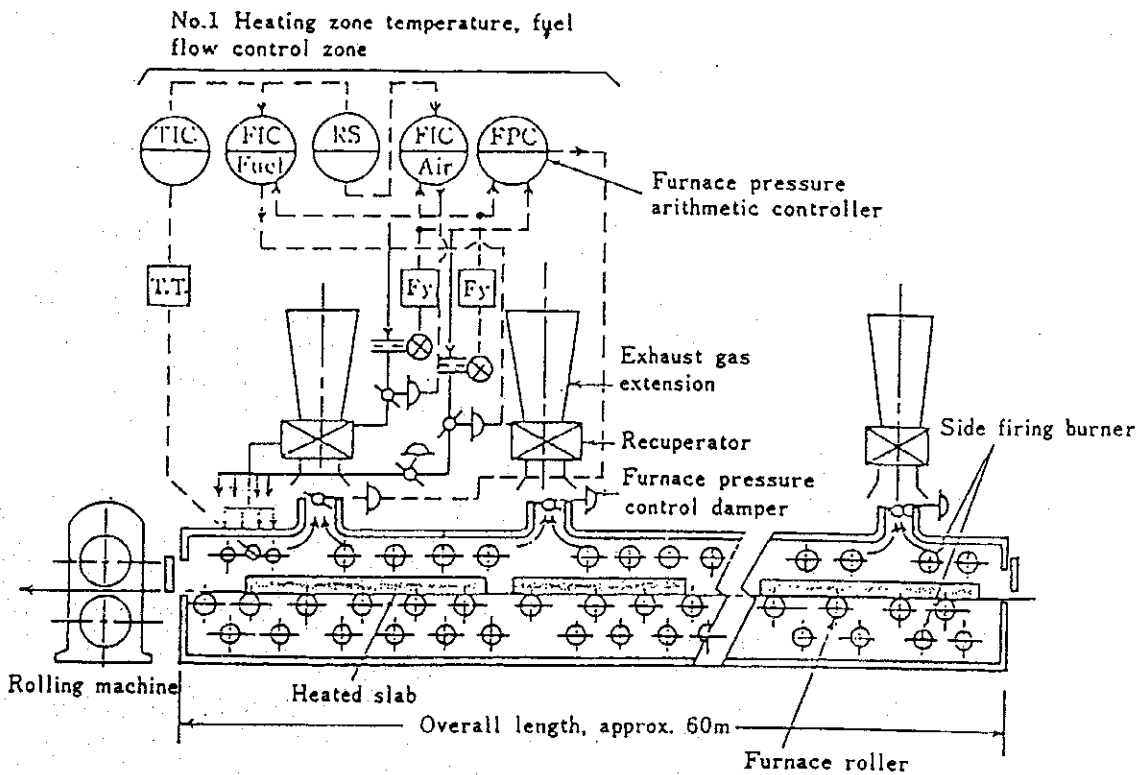


Fig. 26 Continuous reheating furnace with furnace pressure arithmetic control system

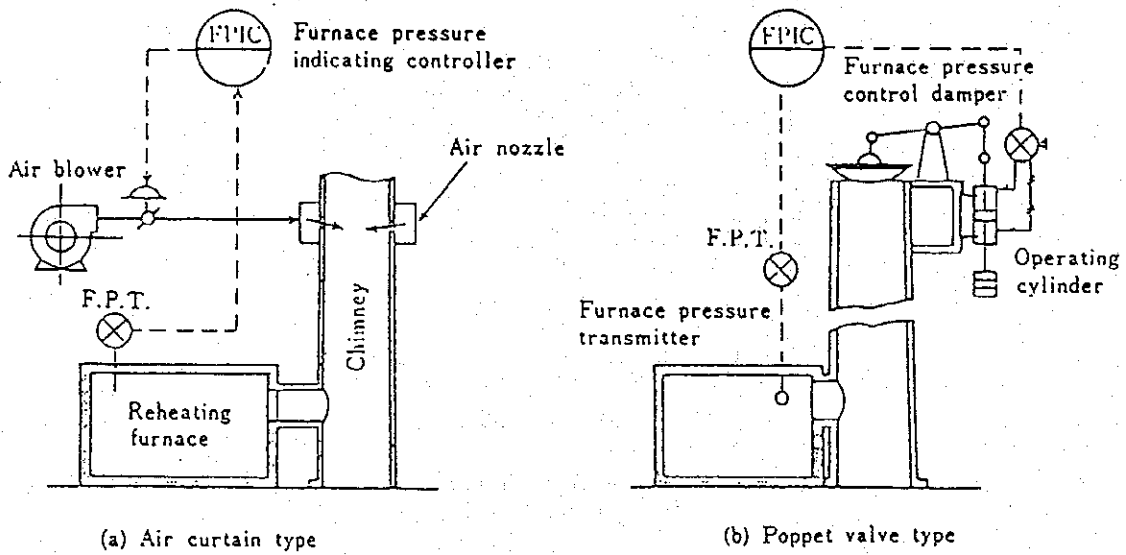


Fig. 27 Damper for pressure control

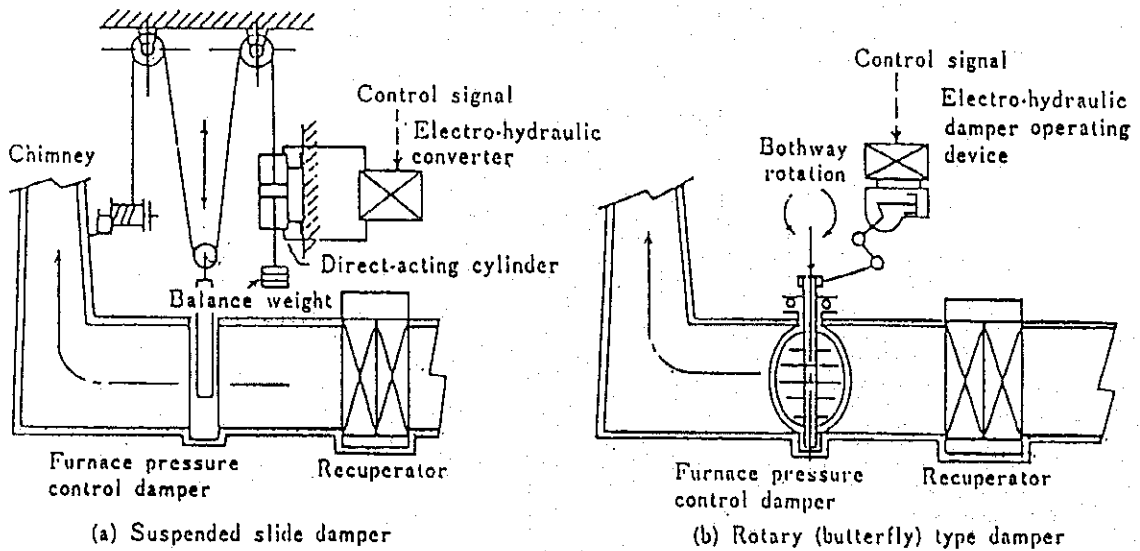


Fig. 28 Damper configuration

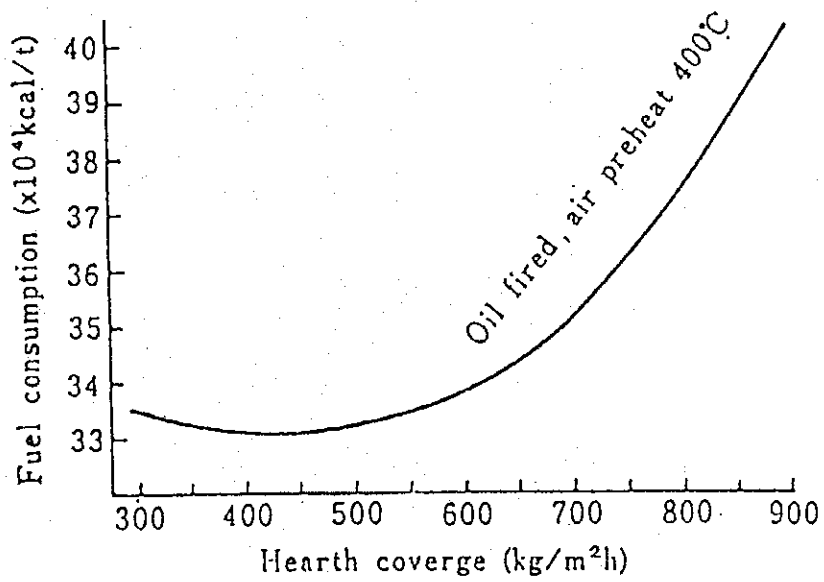


Fig. 29 Hearth coverage and fuel consumption of WB furnace provided with double insulation method

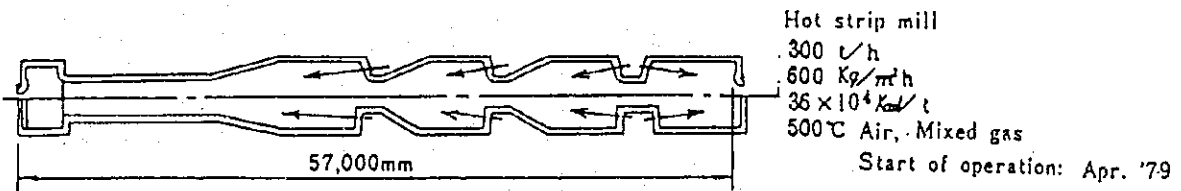
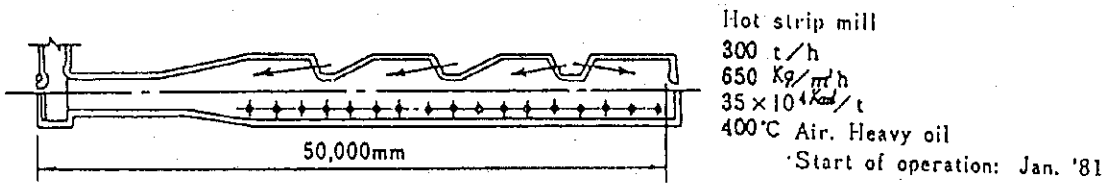
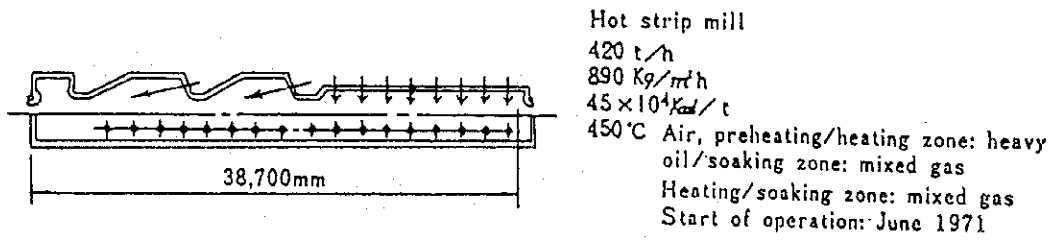


Fig. 30 Examples of hearth coverage (effective furnace length)

Fig. 31 Historical change of furnace design for catenary type

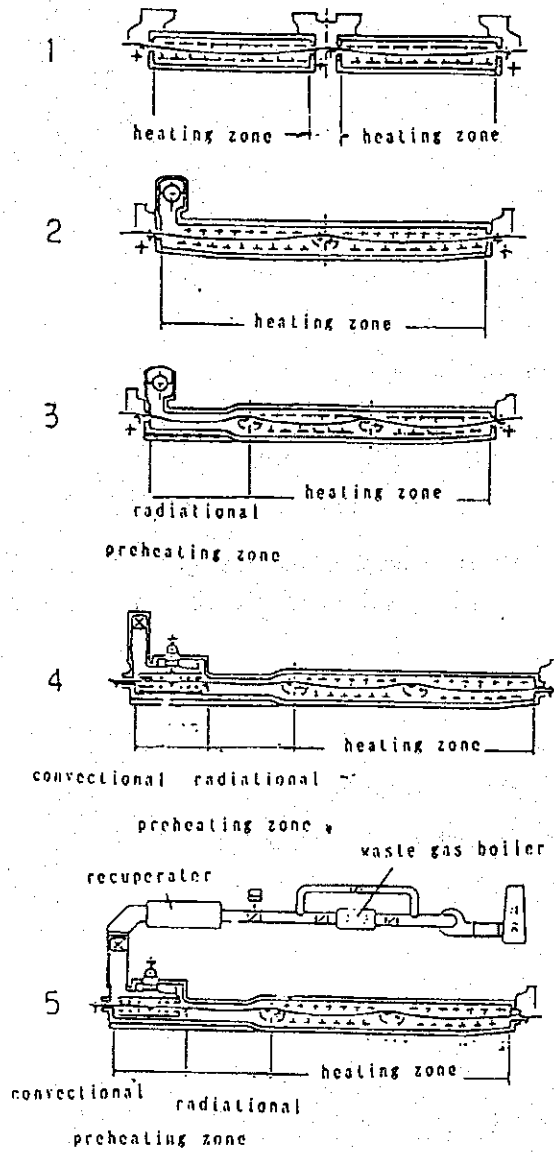


Fig. 32 H<sub>2</sub> type batch annealing furnace

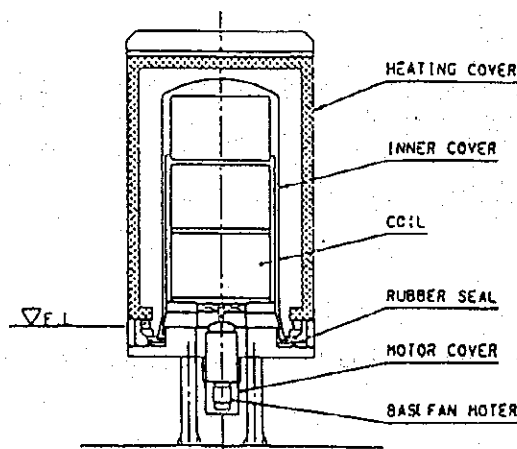


Fig. 33 Update continuous annealing line

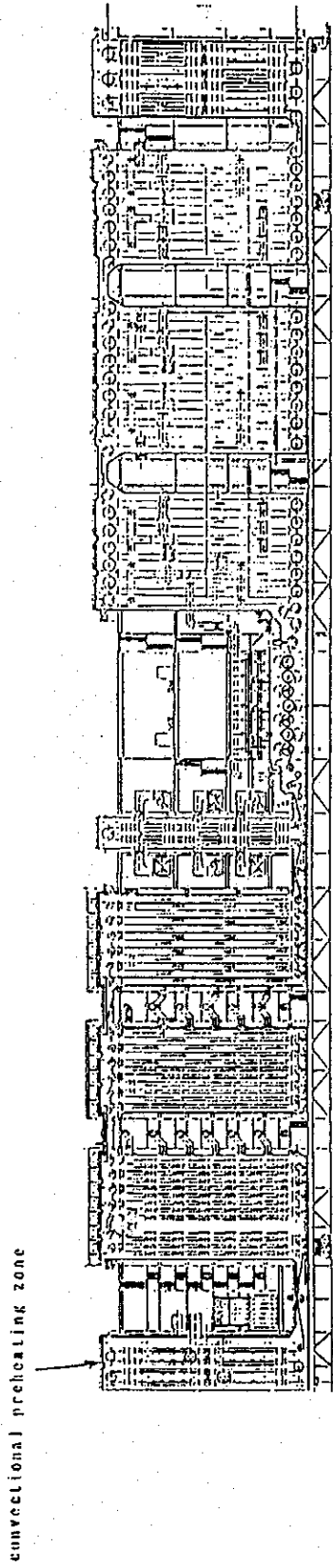


Fig. 34 Update annealing and pickling line for stainless steel

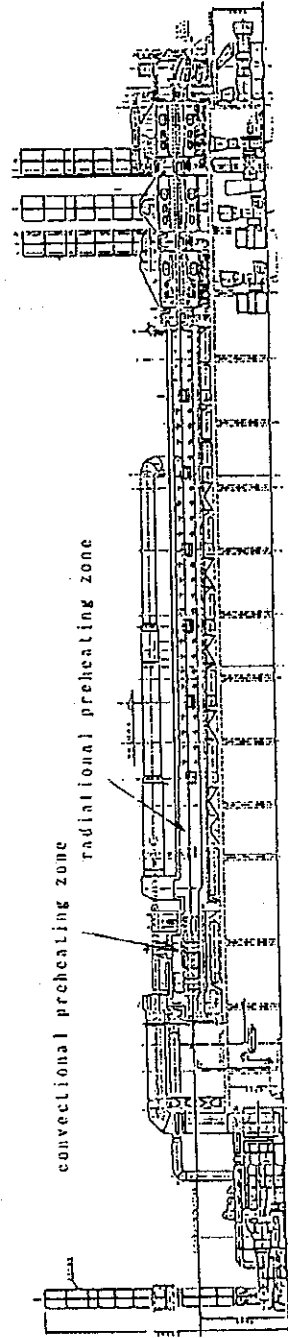
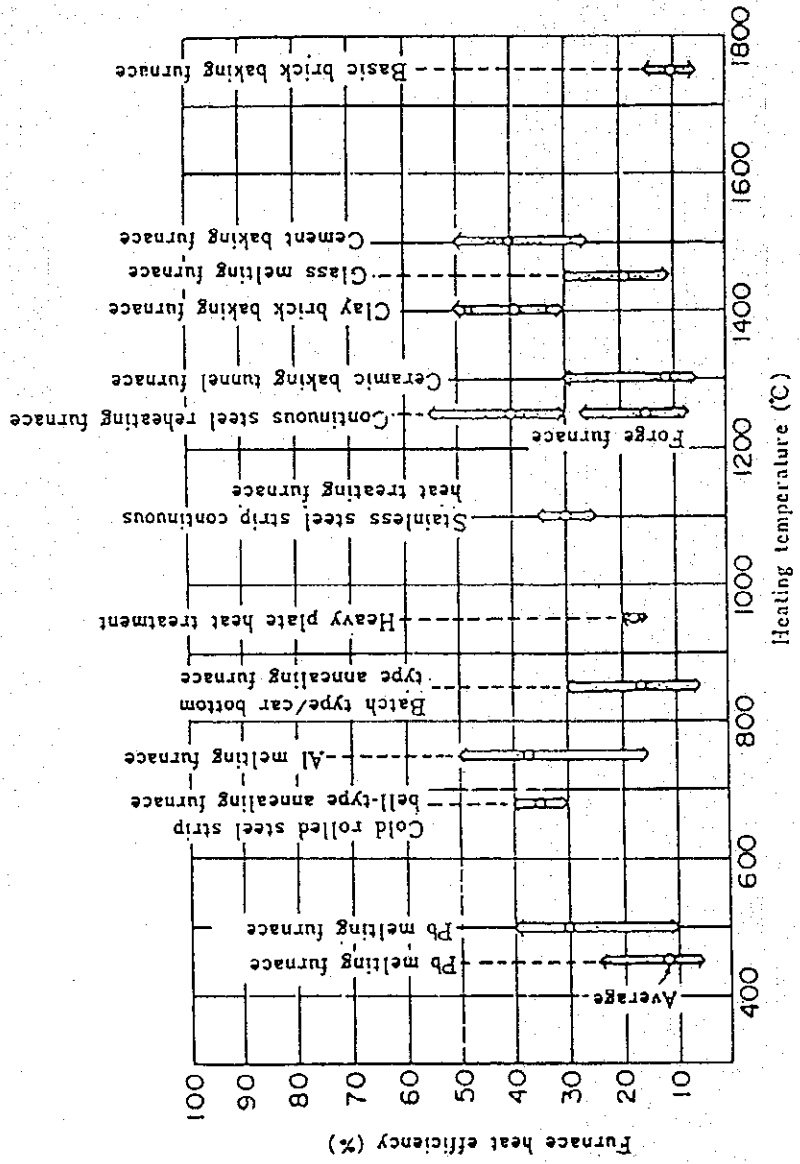


Table 35 Thermal efficiency of industrial furnaces



Furnace type Item	Continuous type furnace					Batch type furnace			
	Tray pusher type	Roller hearth type	Conveyor type	Bottom car type	Walking beam type	Bottom car type	Box type	Pit/pot type	Bell type
Fuel consumption (10 <sup>4</sup> kcal/t)	40-300	20-70	20-300	30-250	20-100	20-800	30-500	50-400	20-60
Thermal efficiency (%)	10-40	20-45	10-45	10-30	10-50	10-350	10-40	10-30	10-360
Heat treating capacity, continuous type (t/h)	0.1-70	0.1-15	0.1-10	0.1-10	0.1-10	0.1-100	0.1-20	0.1-10	0.1-10
Heat treating capacity, batch type (t/ch)	0.1-7.0	0.1-7.0	0.1-7.0	0.1-7.0	0.1-7.0	0.1-7.0	0.1-7.0	0.1-7.0	0.1-7.0
Heat treating temperature (°C)	400-900	400-900	400-900	400-900	400-900	400-900	400-900	400-900	400-900
Sample number (n)	42	25	29	22	11	109	52	15	7

Table 36 Fuel consumption and thermal efficiency of heat treating furnace

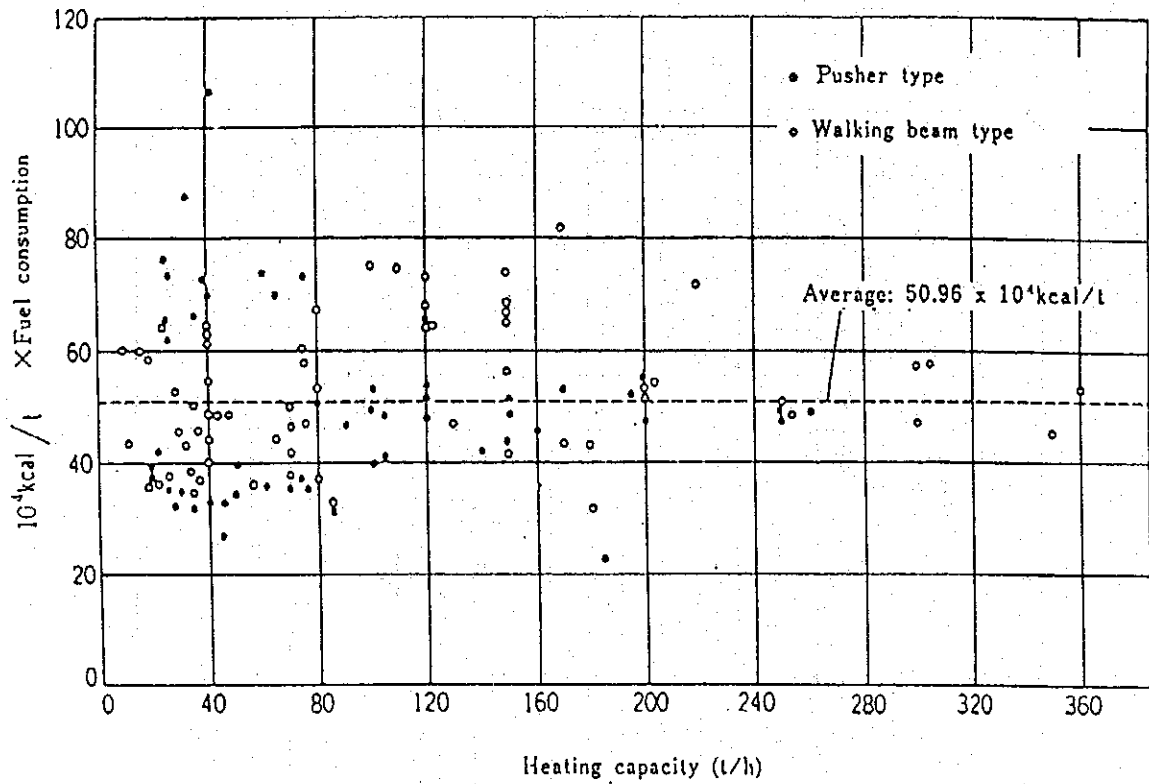


Table 37 Heating capacity and actual fuel consumption of steel slab continuous reheating furnace

Plant	Kind of forging	Fuel consumption litre/t(product)	Heat efficiency %
A	Closed die forging	340	8.8
B		355	8.5
C		240	12.5
D		270	11.0
E		205	14.6
F		238	12.6
G	Open die forging	240	8.9
H		380	5.6

Table 38 Fuel consumption and thermal efficiency in forge furnace



Kind of furnace	Number of furnaces	Fuel consumption (10 <sup>4</sup> kcal/t)		Melting capacity (t/d)	Melting temperature (°C)	Fuel
		Average	Range			
Aluminum melting furnace	43	134.7	81~216	6~200	(Tap hole) 630~900	Heavy oil,
Copper melting furnace (continuous type)	8	88.9	57~140	35~1,320	1,100~1,300	Heavy oil,
" (quarter type)	4	74.8	55~100	5~1,295	1,000~1,200	Heavy oil,
Glass melting furnace (plate, bottle, electric)	101	272.0	132~700	10~430	1,400~1,650	Heavy oil, light oil, kerosene, LPG

Note: Only cold charge is used for aluminum melting

Table 39 Fuel consumption of melting furnace

Table 40 Fuel consumption of tunnel kiln

Kind of furnace	Temp (°C)	No. of furnaces	Fuel consumption (10 <sup>4</sup> kcal/t)		Capacity (Product) (t/h)	Temp. (°C)	Fuel
			Average	Range			
Tunnel kiln for fire brick	970~1,200	28	99.5	36~330	5~72	970~1,200	Heavy oil
	1,250~1,550	70	142.2	75~576	2~72	1,250~1,550	Heavy oil, LPG, Kerosene
	1,600~1,850	24	373.3	150~710	8~49	1,600~1,850	Heavy oil, Kerosene
Tunnel kiln for tile		50	213.2	64~505	2~220	1,000~1,330	Heavy oil, Diesel oil

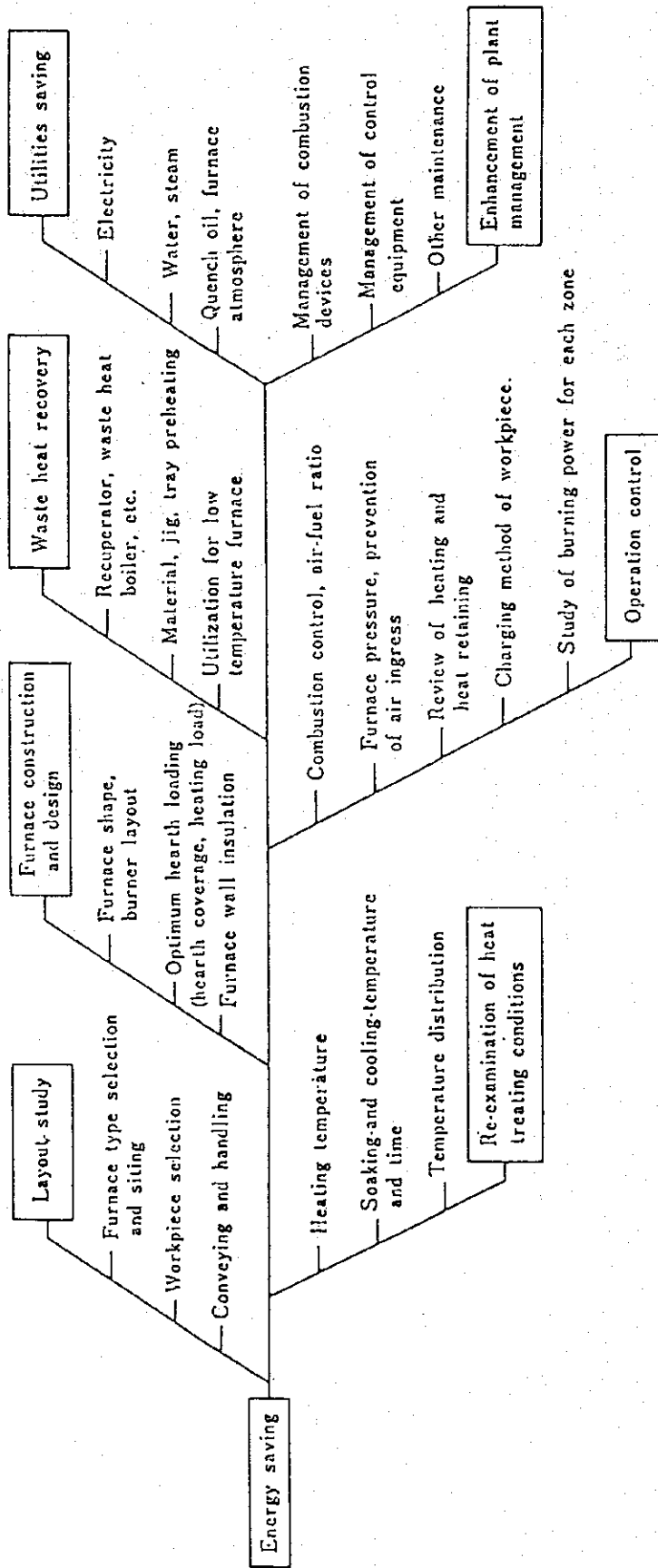


Table 41 Factor of energy-saving measures

Table 42 Outline of air preheater

		Type		Exhaust gas temp. limit	Preheated air temp.	Applied furnace
Recuperator	Regenerator	Metallic recuperator	Flue type			
			Convection type, multi-tube type, etc.	1,000°C max.	300~600°C	Reheating furnace, heat treating furnace, other industrial furnaces
			Chimney type	1000~1300°C		
		Ceramic (tile) recuperator	Arimco type Stein type	1200~1400°C	400~700°C	Soaking furnace, glass oven
		Conventional type		1000~1600°C	600~1300°C	Coke oven, hot blast furnace, glass oven (melter)
		Rotary regenerating type		600°C max.	100~300°C	Boiler, hot blast furnace, Oil refinery heater

Table 43 Average isopiestic specific heat of gas

Temp. (°C)	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	Air
0	0.305	0.311	0.312	0.311	0.341	0.387	0.424	0.310
100	0.307	0.311	0.315	0.312	0.344	0.412	0.445	0.311
200	0.309	0.312	0.320	0.313	0.348	0.432	0.464	0.312
300	0.309	0.313	0.325	0.315	0.352	0.450	0.481	0.315
400	0.310	0.316	0.330	0.318	0.537	0.466	0.494	0.318
500	0.311	0.319	0.334	0.321	0.363	0.480	0.507	0.321
600	0.312	0.321	0.339	0.325	0.369	0.493	0.518	0.324
700	0.313	0.325	0.343	0.329	0.375	0.504	0.527	0.328
800	0.314	0.329	0.347	0.332	0.381	0.515	0.535	0.331
900	0.316	0.331	0.351	0.335	0.387	0.523	0.542	0.334
1,000	0.317	0.334	0.354	0.338	0.393	0.532	0.548	0.338
1,100	0.319	0.338	0.356	0.341	0.400	0.540	0.554	0.340
1,200	0.321	0.340	0.359	0.344	0.406	0.547	0.559	0.343
1,300	0.323	0.342	0.362	0.346	0.411	0.553	0.563	0.345
1,400	0.325	0.345	0.361	0.348	0.418	0.559	0.567	0.348
1,500	0.326	0.347	0.366	0.351	0.423	0.565	0.570	0.350
1,600	0.328	0.350	0.368	0.353	0.428	0.570	0.573	0.353
1,700	0.330	0.351	0.370	0.355	0.433	0.575	0.576	0.354
1,800	0.332	0.353	0.372	0.357	0.439	0.579	0.579	0.356
1,900	0.334	0.354	0.374	0.358	0.443	0.583	0.581	0.358
2,000	0.336	0.356	0.376	0.360	0.448	0.587	0.583	0.359

Table 44 Standard air ratio

## (1) Boiler

Classification	Load (%)	Standard air ratio				
		Solid fuel	Liquid fuel	Gaseous fuel	Blast furnace gas, other by-product gas	
Electric utility use	75 ~100	1.2 ~1.3	1.05 ~1.1	1.05 ~1.1	1.2	
Others	Evaporation over 30t/h	75 ~100	1.2 ~1.3	1.1 ~1.2	1.1 ~1.2	1.3
	Evaporation over 10t/h and below 30t/h)	75~ ~100	—	1.2 ~1.3	1.2 ~1.3	—
	Evaporation below 10t/h	75 ~100	—	1.3	1.3	—

## (2) Industrial furnace

Classification	Standard air ratio
Melting furnace for metal casting	1.3
Steel slab continuous reheating furnace	1.25
Metal reheating furnace other than steel slab continuous reheating furnace	1.3
Continuous heat treating furnace	1.3
Gas generator and gas reheating furnace	1.4
Petroleum refinery furnace	1.4
Pyrolyzer and reformer	1.3
Cement baking furnace	1.3
Alumina baking furnace and lime baking furnace	1.4
Continuous glass melting furnace	1.3

Table 45 Calculated values of SA (fuel oil A) %

Furnace temperature [°C]	Air ratio before correction	Air ratio after correction				
		1.40	1.30	1.20	1.10	1.00
700	1.70	11.6	14.9	17.9	20.8	23.4
	1.60	7.72	11.1	14.3	17.3	20.1
	1.50	3.86	7.43	10.7	13.8	16.7
	1.40	—	3.76	7.27	10.5	13.5
	1.30	—	—	3.65	7.01	10.1
	1.20	—	—	—	3.48	6.74
	1.10	—	—	—	—	3.38
900	1.70	18.7	23.5	27.7	31.5	34.9
	1.60	12.5	17.6	22.2	26.3	29.9
	1.50	6.23	11.7	16.6	21.0	25.0
	1.40	—	5.94	11.3	16.0	20.2
	1.30	—	—	5.66	10.7	15.2
	1.20	—	—	—	5.29	10.1
	1.10	—	—	—	—	5.06
1100	1.70	30.8	37.3	42.6	47.1	51.0
	1.60	20.6	28.0	34.1	39.3	43.7
	1.50	10.3	18.6	25.6	31.4	36.4
	1.40	—	9.43	17.3	23.8	29.4
	1.30	—	—	8.67	15.9	22.1
	1.20	—	—	—	7.91	14.7
	1.10	—	—	—	—	7.36
1300	1.70	55.0	61.9	67.1	70.9	74.0
	1.60	36.7	46.5	53.6	59.1	63.4
	1.50	18.3	31.0	40.2	47.3	52.9
	1.40	—	15.7	27.2	35.9	42.7
	1.30	—	—	13.7	23.9	32.1
	1.20	—	—	—	11.9	21.3
	1.10	—	—	—	—	10.7

Table 46 Types and characteristics of furnace pressure control damper

Characteristic	Type	(1) Suspended type (slide type)	(2) Rotary type (butterfly type)	(3) Poppet valve type	(4) Air nozzle type
1. Control characteristic		Better flow characteristic than (2) in low flow range. Response speed is slow with pulley and rope linkage method.	Same characteristic as butterfly type valve	Flow variation is big with valve lift. Control range is narrow.	Response is inferior as compared to (1),(2) and (3).
2. Necessary considerations in high temperature operation		Valve and sliding grooves cause great friction loss. Thermal distortion of valve is likely to cause valve sticking in sliding grooves. Water cooling should be considered.	In manufacturing of valve, consideration must be given to thermal distortion and expansion. Shaft needs water or air cooling.	Same as (2)	No great problem, but thermal shock of air blow nozzle must be considered.
Power for damper operation, etc.		Extremely big driving cylinder is required for faster operating speed. Quick response speed is not possible because of heavy damper weight. Hydraulic cylinder driving is preferable.	Driving torque is small because damper shaft is supported by external rolling bearing. Horizontal support of damper is not desirable because it causes bending moment of damper weight to be applied to the shaft. (small damper excepted)	Linkage is located in low temperature area. Forced lifting and lowering of the valve is possible by driving cylinder. Driving power is small next to (2).	Only small power is required to drive air nozzle blow control valve.
Equipment cost (in order of cost from left to right)		High			Low

Table 47 Driving units for damper and their features

Item	Electro-hydraulic system	Pneumatic cylinder	Motor-driven system
1 Operating power	Big output with compact unit	Bigger unit is required than hydraulic system.	The unit can be made relatively compact.
2 Response	Quick. Effective for damper with big inertia.	Substantially slower than hydraulic system. Unfit for damper with big inertia.	Quick. (with servo motor used)
3 Operating speed	Quick	Slow	Quick (servo motor output increases)
4 Maintenance	Inferior to the other two systems in that hydraulic oil needs maintenance.	Easy	Easy
5 Contingency measures for power failure	Can stop at current position at power failure. To move to full open or close position, accumulator or direct current backup power supply is required.	Cannot readily stop at current position at power failure. To move to full open or close position, receiver tank or backup power supply is required.	Stops at current position at power failure. To move to full open or close position, separate power supply is required.
6 Equipment cost	High	Low	Medium
7 Backup power supply	Accumulator. Direct current. Uninterruptive power supply	Receiver tank Direct current uninterruptive power supply	Separate power supply
8 Adaptability to automatic control system	(1) (Excellent)	(3) With small, light weight damper, adaptability is good.	



## REFERENCES

- 1) Refractory Handbook edited by Refractory Eng. Society
- 2) ISOLITE Catalog
- 3) E. Horie, Kogyo Zairyo 27 (2) 24-33 (1979)
- 4) S. Saito, Ceramics 7 (3) 154 (1972)
- 5) S. Saito, Ceramics Data Book, '71, pp. 273-280
- 6) T. Hayashi, Kogyo Kanetsu 13 (5) 18 (1976)
- 7) T. Kazunami "High Temperature Insulating Materials and Their Applications"
- 8) Industrial Furnace Handbook edited by Nihon Kogyoro Kyokai
- 9) Shinagawa Refractories Catalog
- 10) Kogyo Kanetsu Vol.16, No.5, p.38
- 11) Kogyo Kanetsu '81/1, Vol. 18, No. 1, p.24
- 12) Industrial Furnace Energy Saving Handbook, edited by Nihon Kogyoro Kyokai
- 13) Kogyo Kanetsu, Vol. 11, No. 3 (74/5) pp.11-12
- 14) Refractories No. 178, Vol. 24, 1972 (24-517)



タイ王国省エネルギー計画アフターケア調査

エネルギー診断技術ワークショップテキスト

---

## 10. 電気取扱の省エネルギー

---

1994年3月

国際協力事業団 (JICA)  
財団法人 省エネルギーセンター (ECCJ)



## 1. 電気取扱の省エネルギー

### 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。

#### 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

要所要所に測定計器を置き、毎時間、電力使用量を測定する。その結果から日負荷状況、最大電力量、電力原単位を把握し、問題があれば速やかに処置を行う。

##### (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。電気設備の故障は運転休止、設備破損、人身事故につながる危険性があり、特に注意を要する。

##### (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押し進める。

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)

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

$\phi$ ：電圧と電流の位相差

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

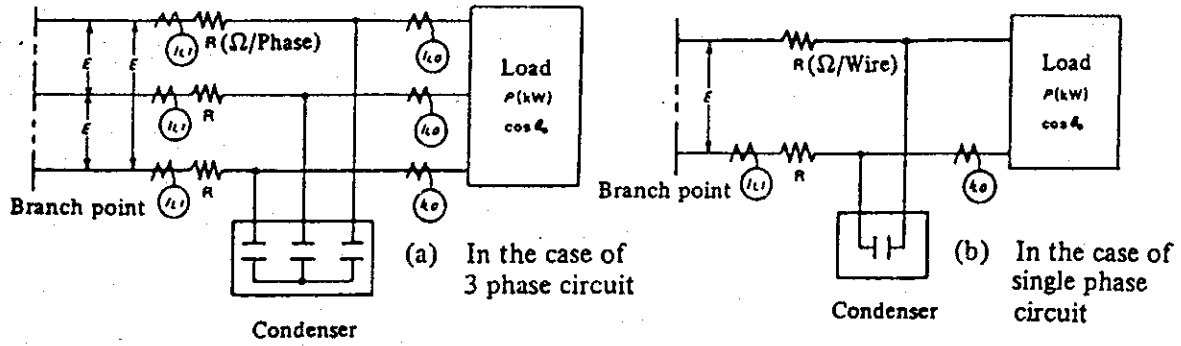
すなわち，一定の出力を得るためには，力率低下分だけ余分に電流を供給しなければならぬ。この力率を改善するには，一般に進相コンデンサを取り付けるが，このことによる省エネルギー効果は，すべてこの余分の電流を減らし，配電線又は変圧器の抵抗損が減少するために得られるものである。

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，Figure 1 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<sub>L</sub>)は，次の各式で求められる。

Figure 1 Reduction effect of distribution loss



A) 三相回路のときの計算式

$$P_L = 3 \times (I_{L0}^2 - I_{L1}^2) \times R \times 10^3 \text{ (kW)} \dots\dots\dots(4)$$

ここで

改善前  $I_{L0}^2 = \left( \frac{P}{\sqrt{3} \times E \times \cos \theta_0} \right)^2 = \frac{P^2}{3 E^2} \cdot \frac{1}{\cos^2 \theta_0}$

改善後  $I_{L1}^2 = \left( \frac{P}{\sqrt{3} \times E \times \cos \theta_1} \right)^2 = \frac{P^2}{3 E^2} \cdot \frac{1}{\cos^2 \theta_1}$

$$I_{L0}^2 - I_{L1}^2 = \frac{P^2}{3 E^2} \left( \frac{1}{\cos^2 \theta_0} - \frac{1}{\cos^2 \theta_1} \right)$$

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,

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

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,

$$\frac{P^2}{E^2} = 3 \cos^2 \theta_0 \cdot I_{L0}^2$$

であるから,

$$P_L = 3 \times (I_{L0} \times \cos \theta_0)^2 \times k_l \times R \times 10^{-3} \text{ (kW)} \dots\dots\dots(7)$$

B) 単相回路のときの計算式

$$P_L = 2 \times (I_{L0}^2 - I_{L1}^2) \times R \times 10^{-3} \text{ (kW)} \dots\dots\dots(8)$$

ここで、

改善前  $I_{L0}^2 = \left(\frac{P}{E \cos \theta_0}\right)^2$

改善後  $I_{L1}^2 = \left(\frac{P}{E \cos \theta_1}\right)^2$

$$I_{L0}^2 - I_{L1}^2 = \frac{P^2}{E^2} \left(\frac{1}{\cos^2 \theta_0} - \frac{1}{\cos^2 \theta_1}\right)$$

従って、

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

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

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

ただし、

P (kW) : 負荷電力

I<sub>L0</sub> (A) : 現在の負荷電流

I<sub>L1</sub> (A) : 改善後の負荷電流

E (kV) : 線間電圧

cos θ<sub>0</sub> : 現在の力率

cos θ<sub>1</sub> : 改善後の力率

C) 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 1 に示す。



**Table 1 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 m	0.60	131A	87.3A	82.7A	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

(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

Figure 2 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 ( $P_t$ ) 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。

$$P_t = \left( \frac{100}{\eta} - 1 \right) \times \frac{4}{5} \times \left( \frac{P}{L_0} \right)^2 \times \left( \frac{1}{\cos^2 \theta_0} - \frac{1}{\cos^2 \theta_1} \right) \times L_0 (\text{kW}) \dots (12)$$

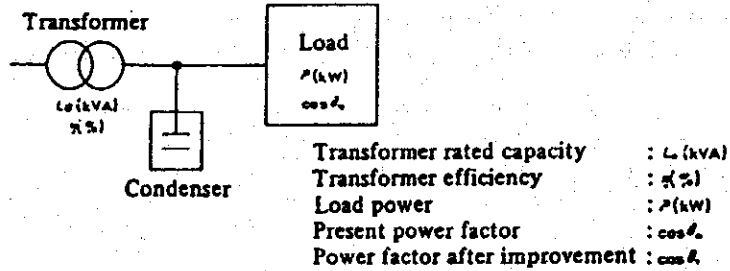
$$= \left( \frac{100}{\eta} - 1 \right) \times \frac{4}{5} \times \left( \frac{P}{L_0} \right)^2 \times k_1 \times L_0 (\text{kW}) \dots (13)$$

$$= k_2 \times k_1 \times L_0 (\text{kW}) \dots (14)$$

ただし、

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

Figure 2 Reduction effect of transformer loss



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 2 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、電圧降下により発生する次のような諸問題が、力率改善により解消されるからである。

- 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 2 Calculation example of reduction effect of transformer loss**

Transformer specification	$L_0=300\text{kVA } \eta=98\%$			$L_0=500\text{kVA } \eta=98.5\%$			$L_0=1,000\text{kVA } \eta=99\%$		
$P/L_0$	0.5	0.6	0.7	0.5	0.6	0.7	0.5	0.6	0.7
$\cos\theta_0 \rightarrow \cos\theta_1$	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)

$L_0$ : Transformer rated capacity (kVA)

2. Loss reduction ( $P_l$ ) is determined from equation (14).

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)

C) 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。

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

#### (4) 配電設備容量の余裕増加

力率改善により線路電流が減少し、変圧器や配電線の配電設備が軽くなる。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  $K_3$  を求める。

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

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、

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

$$\therefore k_3 = \frac{\cos \theta_1}{\cos \theta_0} - 1 \quad \dots \dots \dots (16)$$

<例>

100 kW、力率 70% の負荷を 90% に力率改善すると、 $K_3 = 0.36$  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で増やせることになる。

#### (5) 電気料金の軽減

一般に電力料金制度には受電力率に対するボーナス、ペナルティ制度が含まれている。

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。

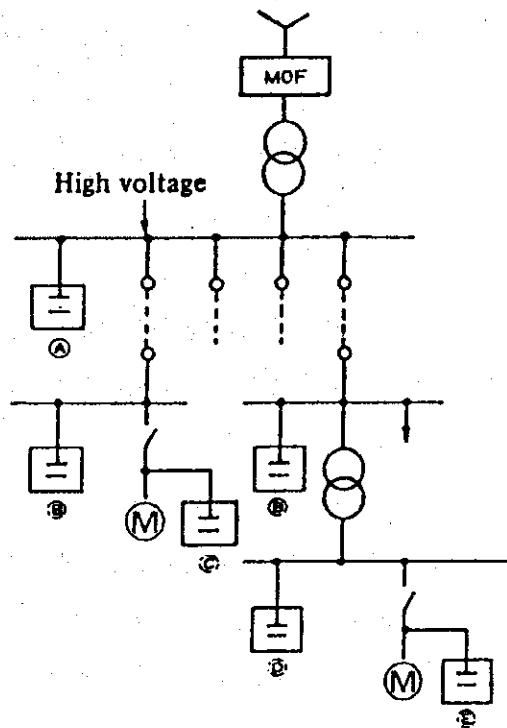
以上、(1)から(5)まではコンデンサの設置による効果を述べてきたが、以下にコンデンサ接続箇所の選定上の問題及び自動開閉制御について述べる。

(6) コンデンサ接続箇所の選定

A) 接続箇所と効果

Figure 3 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。

Figure 3 Connection points of condenser



- (A) Incoming high voltage bus
- (B) Sub s/s high voltage bus
- (C) High voltage load direct
- (D) Low voltage bus lump
- (E) Low voltage load direct

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 Figure 3 において、(A)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、㊸～㊾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。

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 3, ㊸, ㊾参照)。

b. 小容量負荷の集合箇所には、とりまとめて一括設置する ( Fig 3, ㊹, ㊿ 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 3, ㊿)。

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

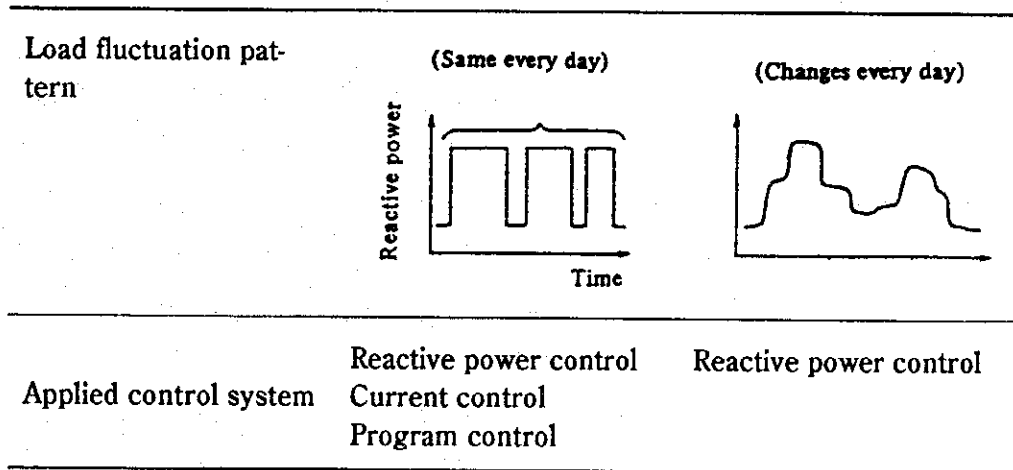
不必要なコンデンサを運転すると、母線電圧の上昇による問題点の他に、コンデンサ電流による配電線や変圧器の損失が発生し、せっかくの省エネルギー効果を相殺することになるため、開閉制御が必要となる。特に工場末端におかれたコンデンサは、手動制御は困難と考えられ、自動開閉制御の採用を奨めたい。

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 Figure 4 に示す。

Figure 4 Capacitor control system



### 1.3 負荷率の改善

負荷率は(17)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。

$$\text{負荷率} = \frac{\text{平均電力 (kW)}}{\text{最大電力 (kW)}} \times 100 (\%) \quad \dots\dots\dots (17)$$

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、設備投資が少なくすむ。
- (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、デマンド料金の低減を図ることができる。

負荷率の向上方法は次の通り

- (1) 日負荷曲線の作成、検討

使用電力量の時間ごとの移り変わりをグラフにかいて日負荷曲線をもとめ、1日の負荷

が出来るだけ平均化するような負荷移行を検討する。

(2) 操業時間の延長

設備の機械化、自動化などにより、設備稼働時間の延長をはかり、1日中平均的に稼働するよう工夫する。

(3) 深夜など軽負荷時への負荷移行

蓄熱槽の設置による冷暖房機器の深夜運転、深夜電力機器の使用などのほか、大容量設備や試験用機器などの運転を軽負荷時に移行したり、時差運転することによりピークを抑制する。

(4) 適切な設備保全の実施

設備故障を出来るだけなくすとともに、負荷の平準化を図るため、適切な予防保全、生産保全を推進する必要がある。

(5) 運搬、準備作業などの改善

手待ち時間、空転時間の減少を図り、作業が円滑に運ぶように、運搬、準備作業、レイアウトなどの改善を図るとともに適切な作業管理を行なうことが必要である。

(6) 負荷管理、負荷制御装置の導入

デマンドコントローラや、各種負荷制御装置の採用により、最大電力の抑制や負荷管理を行なうことも一方法である。

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。

#### 1.4 高調波の発生とその制御方法

(1) 発生原因

- a. パワーエレクトロニクス技術の進歩により、サイリスタはOA機器から産業機器まで広く利用されるようになった。サイリスタの制御は容易で応答が早いですが、点弧角を加減して波形をカットするため、波形に歪を生じて高調波が発生する。
- b. 製鋼用アーク炉の溶解初期に、電極用が屑鉄で短絡する度に電圧フリッカが生じて電圧波形がくずれ高調波が発生する。
- c. リアクトルおよび回転機など磁気回路をもつ機器は、鉄芯のヒステリシス現象によって励磁電流の波形がくずれ、磁気飽和によって高調波が発生する。



## (2) 高調波の影響

- a. 高調波による電流実効値の増大によりコンデンサが過熱し、焼損の原因となる。
- b. 高調波電磁力によってコンデンサ用直列リアクトルなどに異音を生じる。
- c. 誘導電動機では高調波電流により振動トルクが発生し、振動や異音の原因となる。
- d. 高調波電磁誘導ノイズが増大し、調光器付き蛍光灯のチラツキが生じる。
- e. 波形歪による商用電力周波数の周期ずれが発生し、制御回路の位相ずれにより下記のような誤動作を起こす原因になる。
  - ・コンピュータの停止
  - ・NC機器の停止
  - ・圧延機などの回転機の停止

## (3) 高調波の制御対策

高調波をコンピュータの許容歪率以下に抑えるためには次のような対策がとられる。

### a. アクティブフィルタ

方形波電流の場合、基本波と各種高調波により合成された方形波電流と基本正弦波電流との差が高調波電流となる。アクティブフィルタはこの高調波電流と極性が反対の電流を外部から瞬時に供給することによって、高調波成分を打ち消す働きをする。

### b. 交流フィルタ

5～13次の高調波発生源に対してR、C、Lの直列単一分路フィルタを用いる。さらに、高次の周波数に対応する分路フィルタとしては、L、Rの並列回路をCと直列にして用いる。

### c. 電力変換機器の多相化

例えば、相数を3相から12相にすると、リップが小さくなり、高調波を抑制する効果がある。

## 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、その効率的運転基数
- (3) 変圧器のタップ選定

### 2.1 変圧器の選択

- (1) 変圧器の効率は、次式で表わされる。

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

- $\eta$  ; 効率 (%)
- $n$  ; 負荷率
- $P$  ; 定格容量 (kVA)
- $\cos \phi$  ; 負荷力率
- $W_i$  ; 鉄損
- $W_c$  ; 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、また微小であるので無視する。

また定格負荷時の銅損 $W_c$ と鉄損 $W_i$ の比を損失比 $\alpha$ と呼ぶ。

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

損失比は Table 3 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を超えるものである。

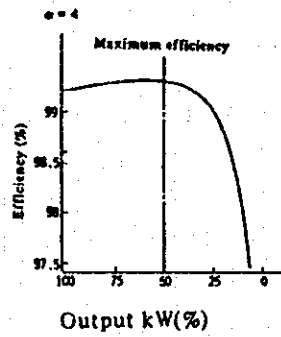
**Table 3 Efficiency of 3 phase high voltage medium capacity transformer**

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

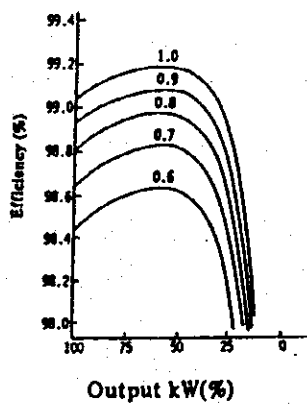
(1)式から、変圧器の効率が最大となるのは、 $n = \sqrt{W_i/W_c}$  のとき、すなわち、鉄損とその時の銅損が等しくなるときの出力である。出力に対する効率の変化の一例を図示すれば Figure 5 のようである。

**Figure 5 Transformer efficiency (Example)**



また変圧器の効率は、(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 Figure 6 に示す。

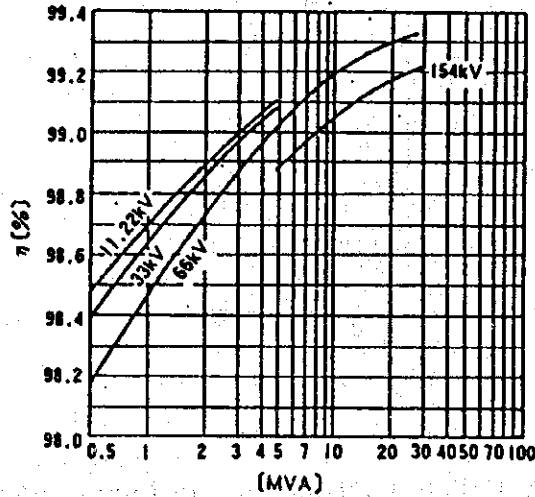
**Figure 6 Relation between power factor and efficiency**



Note: Figure indicates power factor.

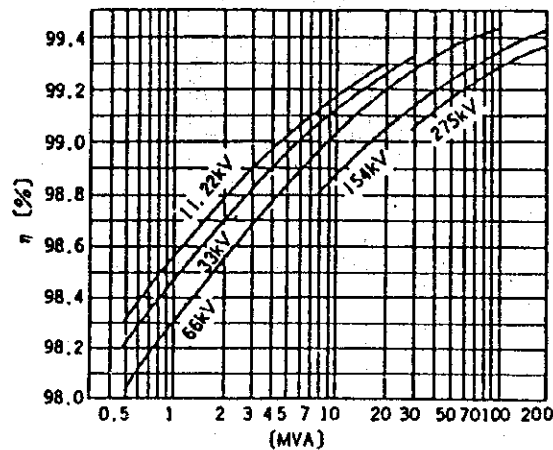
変圧器の容量による効率の差を Figure 7 に示す。

Figure 7 Example of efficiency of 50 Hz transformer (1/2)



Example of efficiency of 50 Hz single oil immersed transformer

Figure 7 Example of efficiency of 50 Hz transformer (2/2)



Example of efficiency of 50 Hz 3 phase oil immersed transformer

(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。

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

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

変圧器の、鉄心材料にレーザー処理した薄板珪素鋼帯などを使用し、巻鉄心構造として鉄損を従来の40%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。

2.2 変圧器の効率的運転

(1) 軽負荷変圧器の停止

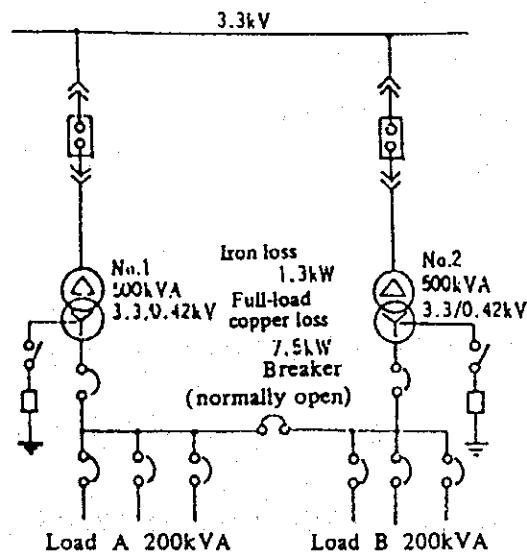
複数の変圧器があり、おのおのの負荷率が低い場合は負荷率の低い変圧器を停止し、負荷を統合する方が省電力となる。

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

Figure 8 のような電源設備において、おのお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 3 のA社を使う。

Figure 8 Method to use two 50 kVA transformer



現状ではNo.1変圧器、No.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、

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

No.1変圧器停止後では、

$$\text{No.2変圧器の鉄損} = 1.3 \text{ (kW)}$$

$$\text{No.2変圧器の銅損} = \text{全負荷銅損} \times \left(\frac{\text{負荷率}}{100}\right)^2 = 7.5 \times \left(\frac{80}{100}\right)^2 = 4.8 \text{ (kW)}$$

$$\text{全損失} = 1.3 + 4.8 = 6.1 \text{ (kW)}$$

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) 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。

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

$W_N$  : 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。

### (3) 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。

## 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 % 負荷程度のもが多い。電圧変動と誘導電動機の負荷状態との関係は Table 4, Table 5 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 4 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 5 Relation between Voltage Fluctuation and Loading State of Induction Motor**

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

### 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規模な改造によって、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。

#### 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ってよい。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 6 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書を参考にされたい。

Table 6 Basic and Practical Expressions Relating to Motor Application

Formulation Item	Basic expression	Practical expression	Description of symbols
1 Power and torque	$P = \omega T$	$\begin{cases} Pk[kW] = P \times 10^{-3} \\ N[rpm] = \frac{60}{2\pi} \omega \\ Tg[kg-m] = \frac{T}{g} = \frac{T}{9.81} \\ Pk[kW] = \frac{N[rpm]}{973} \times Tg[kg-m] \end{cases}$	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	$t = \int_0^{\omega_0} \frac{J}{Ta} d\omega [sec]$	$\bar{Ta} = \frac{\int_0^{\omega_0} Ta(\omega) d\omega}{\omega_0}$ $ta[sec] = \frac{1}{365} \frac{GD^2 N_0^2 [rpm]}{P[W]}$	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。

Table 7 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。

Table 7 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 7 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。

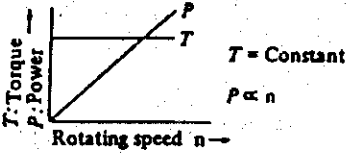
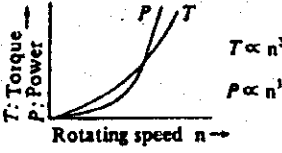
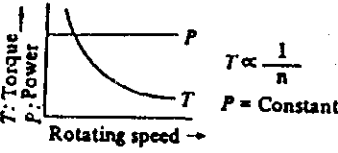
(3) 負荷のトルク特性

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 8 は、これらの関係をまとめたものである。

Table 8 Class of load and torque speed characteristic

Load characteristic	Typical load
Constant torque load 	Gravity load, Friction load [Example] Crane, Wind- ing machine, Conveyor, Paper machine, Mixer
Increasing torque load 	Fluid load [Example] Blower, Pump
Constant output load 	Special load [Example] Winder, Con- stant 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  $GD^2$

負荷の慣性  $GD^2$  (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  $T_L$  (kg · m), 電動機トルクを  $T_M$  (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,

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

従って始動時間は、

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

ただし、 $N_0$  ; 全負荷回転数

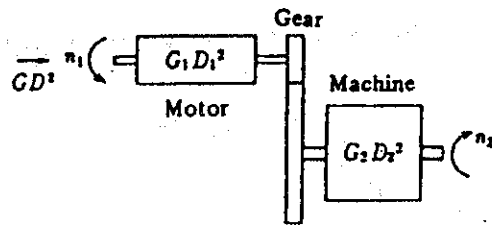
となり、 $GD^2$ に比例する。 $t$ が長いと電動機が異常加熱するので、どの電動機にも負荷の許容 $GD^2$ が定めてある。逆に $GD^2$ が大きい場合には、それに合った電動機を選定する必要がある。

なお、Figure 9 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。

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

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。

Figure 9 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： $A$ ，とすれば，

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

$t = 0$ で $\theta = 0$ とすると，

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

ただし， $T = \frac{C}{A}$

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

Figure 10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 9のようになる。

Figure 10 Temperature rise curve of motor

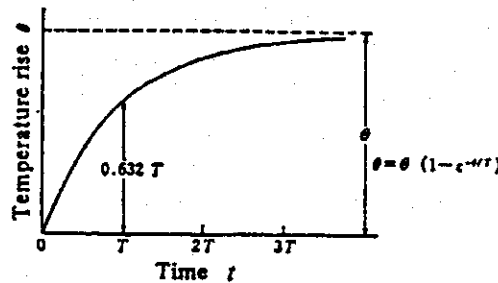


Table 9 Example of thermal time constant

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、 $T' = \frac{C}{A'}$

$T'$  : 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べばよい。

#### 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 10 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。

Table 10 Frame number application table

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

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、 $T = t_1 + t_2 + \dots + t_n$

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

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。

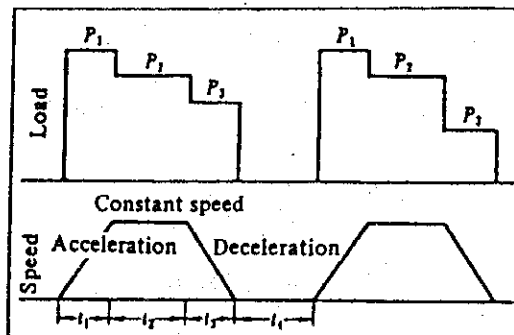
また断続負荷の場合は、始動がひんぱんであるので始動、停止時の発熱、冷却も考慮して等価負荷を決定する必要がある。

例えば、Figure 11 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。

$$P_a = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + P_3 t_3}{t_1 \alpha_1 + A_2 \alpha_2 + t_3 \alpha_3 + t_4 \alpha_4}} \dots \dots \dots (7)$$

ただし、 $\alpha$  は冷却係数であり、おおよそ Table 11 のような値をとる。

Figure 11 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 11 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、Figure 11. 12のような連続運転において、

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

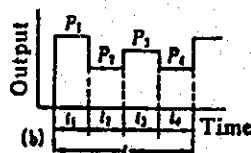
$$P_2 = 50 \text{ kW} \quad t_2 = 15 \text{ 分}$$

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

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

とすると、(6)式から所要の電動機出力Pは、

Figure 12 Example of load curve (1)



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

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 Figure 13 のような反復使用のクレーン電動機では、

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

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

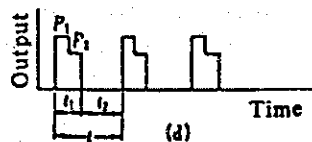
$$t_1 = 1.5 + 1.5 = 3 \text{ 分} \quad t_2 = 7 \text{ 分}$$

の場合、運転中の 2 乗平均負荷は、

$$P = \sqrt{\frac{50^2 \times 1.5 + 30^2 \times 1.5}{3}} = 41.2 \text{ kW}$$

従って電動機としては、Table 10 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。

Figure 13 Example of load curve (2)



#### (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、Figure 14 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。

Figure 14 Comparative example of efficiency for Induction and DC motor

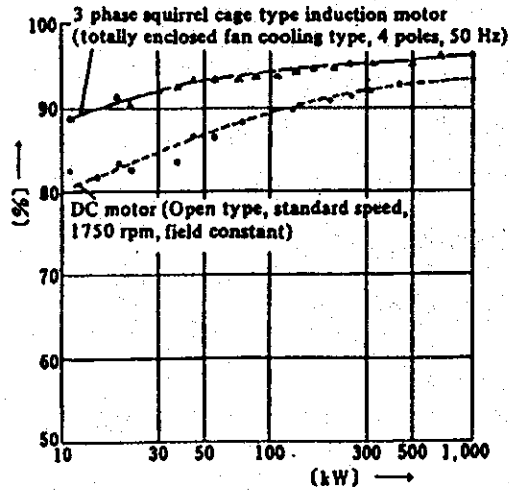
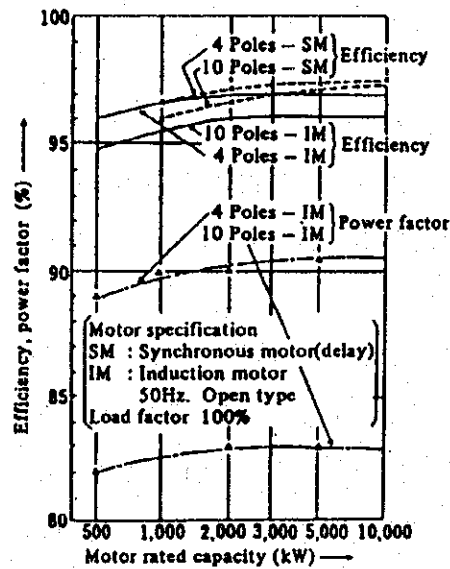


Figure 15 Comparative example of efficiency and power factor between synchronous and induction motors



B) 同期機と誘導機

同期機と誘導機の効率の比較を Figure 15 に示す。

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制御を行ったり、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

Figure 16 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。