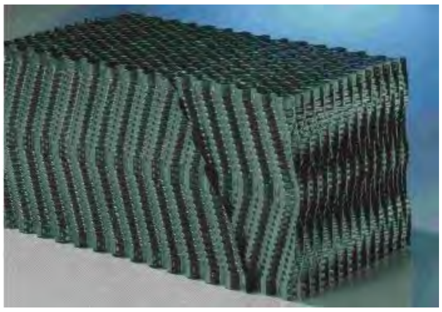
冷水塔、ガス冷却塔
エンタルピ移動の理論と実際

第一エンジニアリング株式会社
高橋伸好
下井洋一

§１はじめに



ミラックス C－312

充填塔を用いる操作には､ガス吸収/放散などの物質操作の他にエンタルピ移動操作がある。
両者はアナロジカルに対比させることができ、エンタルピ計算においてもＨＴＵ、ＮＴＵの概念でデータをまとめ、充填高を計算することができる。
エンタルピ移動操作には冷水塔、ガス冷却塔があり、物質移動における放散と吸収に夫々対応している。
この他、顕熱が潜熱に断熱的に変化する急冷塔（クエンチャー）操作があるがこれはエンタルピ移動操作ではなく、そのため急冷塔は通常経験に基づいて設計される。
物質移動がｘ－ｙ線図を用いるのに対して、エンタルピ移動にはｔ－ｈ線図（エンタルピチャート：図２）が用いられる。
本文では冷水塔をおよびガス冷却に関する、理論と実際についてミラックスＣ（写真）を例にとって説明する。
冷水塔では物質移動のようにHTUとNTUを用いて充填高を計算することよりも、むしろ充填高は規定条件として与えられ、端末効果（エンドエフェクト）を含む、冷水塔全体の性能をシミュレーション計算行うことが主体となり、ある条件下でどれだけの冷水量が得られるか、シミュレーション計算されることが多い。
このために冷水塔設計には充填高が予め含まれたKaV/Lが重要となる。(V は体積であり、充填高である)
その理由は冷水塔では充填高が例えば１ｍのように低く、端末効果が支配的になるからである。(図８参照)
しかしプロセスの中には高温のガス冷却のように充填高が10ｍにもなるような例があり、端末効果を含まない、HTU値が必要となる。
本文ではミラックスC-312のKaV/L実験値からHTUの抽出計算を行い、ガス冷却塔の計算を行う。
（尚筆者はkjに慣れておらず、旧単位kcalを使ったことを冒頭にお断りしたい）

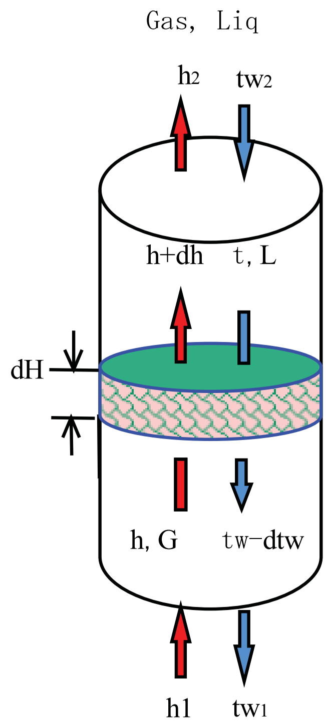


図１
エンタルピ移動
微分方程式

§２KaV/L、Me数、HTU、NTUの相関

KaV/Lの単位は次の通りである。
Ka：Kcal／〔m^3・hr・(Kcal/kg)〕
（Kcal/kg)はエンタルピ移動のための推進力であり､kg空気中のエンタルピ Kcal を表す。
m^3は充填体積である。
V：充填体積(m^3)　塔断面積Ｓが１m^2の時 V=S
L：液負荷 kg/m^2hr
KaV/L：(m^2)
ここで結論を先に述べると、KaV/LとHTUには次のような関係がある。

$$\frac{G}{Ka} = HTU \qquad (1)$$

$$\text{単位：}\ \frac{G(Kg/(m^2 * hr)}{Ka\,(\mathrm{Kcal/(hr*m^3*(Kcal/Kg)})} = HTU(m)$$

$$HTU = \frac{V}{\left(\frac{KaV}{L}\right)\times(L/G)} = \frac{H}{\left(\frac{KaV}{L}\right)\times(L/G)} \qquad (2)$$

これら（１）、（２）式の導入を次に行なう。
図１の微小充填高 dH においてエンタルピ移動速度 N は(3)式で表される。

N = Ka×dH×S×(hw－ha)
　= Ka×dH×(hw－ha)　(kcal/hr)　　（３）

dH：充填高(m)
S：塔断面積(m^2) = 1m^2
(hw－ha)　：推進力（kcal/kg dry air)
推進力は図２において平衡線から操作線を差し引いた値である。
hw：ある温度における水－空気系の平衡エンタルピ
hw＝0.24×t＋H×(595+0.46t)（kcal/kg dry air)
t：温度（℃）
0.24：空気の比熱(kcal/（℃・kg dry air）)
0.46：水蒸気の比熱(kcal/（℃・kg H2Ovapor））
H：湿度（kgH2O/kg dry air）
ha：空気のエンタルピ(kcal/kg dry air)
hw、ha は夫々図２における平衡線、操作線である。
微小充填高 dH におけるガス側のエンタルピ微小変化 dh は物質収支より（４）式となる

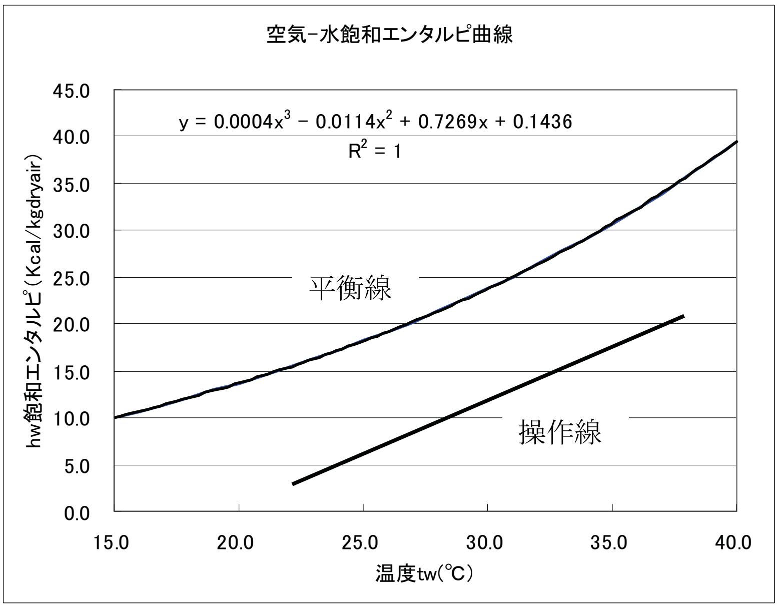


図２　冷水塔
エンタルピ平衡線と操作線

　N= G×dh×S　= G×dh　(kcal/hr)
（４）

G：ガス（空気）質量速度(kg/m^2/hr)
dh：エンタルピ微小変化(kcal/kg dry air)
（３）＝（４）

Ka×dH×(hw－ha) = G×dh　　（５）

$$dH = \frac{G}{Ka}\times\frac{dh}{(hw-ha)} \qquad (6)$$

両辺を積分すると

$$\int dH = H = \frac{G}{Ka}\times\int_{ha2}^{ha1}\frac{dh_a}{(hw-ha)} \qquad (7)$$

ここで次のように定義づけを行なう。

$$\frac{G}{Ka} = HTU$$

$$\frac{G(Kg/(m^2 * hr)}{Ka\,(\mathrm{kcal/(hr * m^3 * (kcal/kg)})} = HTU(m) \qquad (8)$$

$$\int_{ha2}^{ha1} \frac{dh_a}{(hw - ha)} = NTU \qquad NTU\ is\ \mathrm{dim}\ ensionless \qquad (9)$$

充填高は(10)式で求められる。

H = HTU(m)×NTU(−)　　　(m)　　　　　　　　　(10)

(10)式は物質移動でお馴染みの式であり、エンタルピ移動とアナロジーが成り立つことが分かる。一方、エンタルピ移動（冷水塔）ではメルケルの式が一般的に用いられる。

メルケルの式(11)式は一見、NTU と同じ式に見えるが、NTU は推進力 1/(hw－ha)を dh で積分しているため、無次元となるが、メルケルの式では 1/（hw－ha)を dt で積分しているために、無次元にはならない。

$$Me = \int_{tw2}^{tw1} \frac{dt_w}{(hw - ha)} \qquad (11)$$

ガス側と液側のエンタルピ収支から

G(kg/m²hr)×dha(kcal/kg)=C(kcal/kg・℃)×L(kg/m²hr)×dtw(℃)=1×L×dtw　(12)

dtw=dh×(G/L)　　　　　　　　　　(13)

ここで L/G=dha／dtw は図２における操作線の勾配を表す。

$$Me = \int \frac{dt_w}{(hw - ha)} = (G/L) \times \int \frac{dh}{(hw - ha)} = (G/L) \times NTU \qquad (14)$$

以上の式をまとめると、KaV/L、Me 数、HTU、NTU の相関が得られる。

$$H = \frac{G}{Ka} \times (L/G)(Me) = \frac{L}{Ka} \times Me \qquad (15)$$

$$HTU = \frac{V}{\left(KaV/L\right) \times (L/G)} = \frac{H}{\left(KaV/L\right) \times (L/G)} \qquad (16)、\quad (2)$$

$$NTU = (L/G)(Me) \qquad (17)$$

§３KaV/L、NTU の計算例

〔例題１〕

次の条件で KaV/L と NTU で計算し、結果が同一であることを確認せよ。但し Me 数計算には Tchebycheff の式を用い、NTU 計算には直線の式を用いよ

○　温水＝104.7F（41.9℃）

○　冷水＝79.3F(26.3℃)

○　空気湿球温度＝73.1F(22.8℃)

○　L/G=0.815

Tchebycheff の式

$$KaV/L = \int_{tw2}^{tw1} \frac{dtw}{h_w - h_a} \cong \frac{tw_1 - tw_2}{4}\left[\frac{1}{\Delta h_1} + \frac{1}{\Delta h_2} + \frac{1}{\Delta h_3} + \frac{1}{\Delta h_4}\right] \qquad (18)$$

(18)式は表１のようになる。

表 1

t （F)	hw	ha	(hw-ha)	1／Δh
t2=79.3	42.94	h1=36.83		
t2+0.1(t1-t2)=81.8	45.67	h1+0.1(L/G)(t1-t2)=38.90	Δh1=6.77	0.1477
t2+0.4(t1-t2)=89.5	55.23	h1+0.4(L/G)(t1-t2)=45.11	Δh2=10.12	0.0988
t1-0.4(t1-t2)=94.5	62.54	h2-0.4(L/G)(t1-t2)=49.25	Δh3=13.29	0.0752
t1+0.1(t1-t2)=102.2	75.82	h2+0.1(L/G)(t1-t2)=55.46	Δh4=20.36	0.0491
t1=104.7	80.72	h2=57.53		

$$KaV/L = \frac{(104.7-79.3)}{4} \times (0.1477+0.0988+0.0752+0.0491) = 2.355$$

一方 NTU の計算は操作線と平衡線が共に直線の場合(19)式で計算できる。

$$NTU = \int \frac{dh}{(h_w - h_a)} = (h_1 - h_2) \times \frac{\Delta h_1 - \Delta h_2}{\ln\left(\Delta h_1 / \Delta h_2\right)} \qquad (19)$$

操作線と平衡線のいずれか、或いは両方曲線の場合でも、区分すれば曲線は直線の集合であるから、(19)式を用いて(20)式のように加算すればよい。

◇区分法による NTU 計算式

$$\sum_{n=1}^{n=N} NTU = \sum_{n=1}^{n=N} \frac{(h_{n-1} - h_n)}{\dfrac{\{(hw_{n-1} - ha_{n-1}) - (hw_n - ha_n)\}}{\ln\left(\dfrac{hw_{n-1} - ha_{n-1}}{hw_n - ha_n}\right)}} = \frac{(h_{n-1} - h_n)}{\Delta h_{lm}} \qquad (20)$$

N=20(20 分割)で通常は充分であり、それ以上分割しても値は変わらない。

ここでは Tchebycheff の式に合わせて 4 分割すると、表を得る。

表 2

① T	② h_w	③ h_a	④ Δhn=h_w－h_a	⑤ dh=$h_{w(n)}$－$h_{w(n-1)}$	⑥ (Δhn-Δh(n-1))/LN(Δhn/Δh(n-1))	dNTU ⑤/⑥
79.3	42.94	36.83	6.11	2.500	6.434	0.388539067
81.8	45.67	38.9	6.77	7.700	8.333	0.924028908
89.5	55.23	45.11	10.12	5.000	11.633	0.4298079
94.5	62.54	49.25	13.29	7.700	16.574	0.464570644
102.2	75.82	55.46	20.36	2.500	21.744	0.114972579
104.7	80.72	57.53	23.19			
					Σ dNTU＝NTU	1.933380032
	L/G	0.815			KaV/L=NTU/(L/G)	2.372245438

〔例題１〕の解答

Tchebycheff 法　KaV/L=2.355

NTU 法　　　　KaV/L=2.372

両者は一致する。

§４ミラックスＣ－312 のシミュレーション計算

〔例題２〕

ミラックスＣ－312 を 1200ｍｍ充填した場合次の条件下における冷却水量（m^3/m^2hr）を求む。

- ○　空気湿球温度＝27℃
- ○　冷水温度－湿球温度＝5℃
- ○　冷水温度＝32℃
- ○　温水－冷水温度差＝5℃
- ○　温水温度＝37℃
- ○　空気速度＝2.5（m/sec）

→　◇冷水量＝26.3　（m^3/m^2hr）

〔例題２〕の解答

本計算は非線形であるために、L/G を変化させてパソコンを用いて試行錯誤法で解く。NTU は(20)式の区分法で 20 分割する。

計算結果

KaV/L=1.602

L/G=2.46

従って

冷水量＝26.3（m^3/m^2hr）

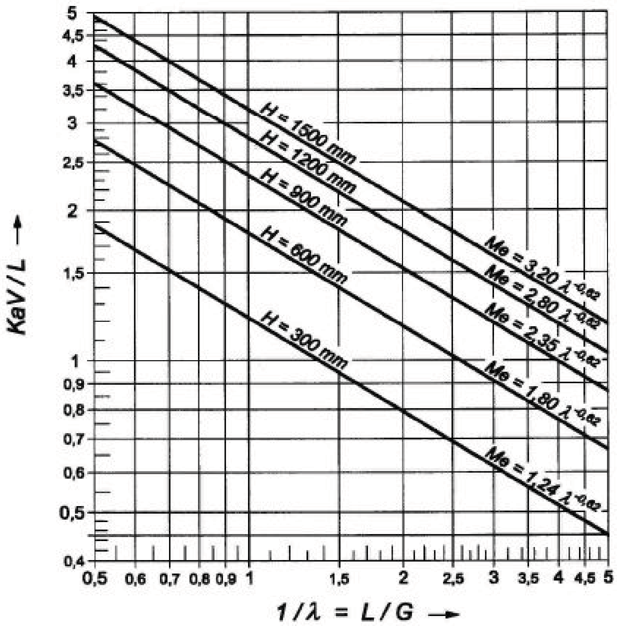


図３　ミラックス C-312 の KaV/L 値

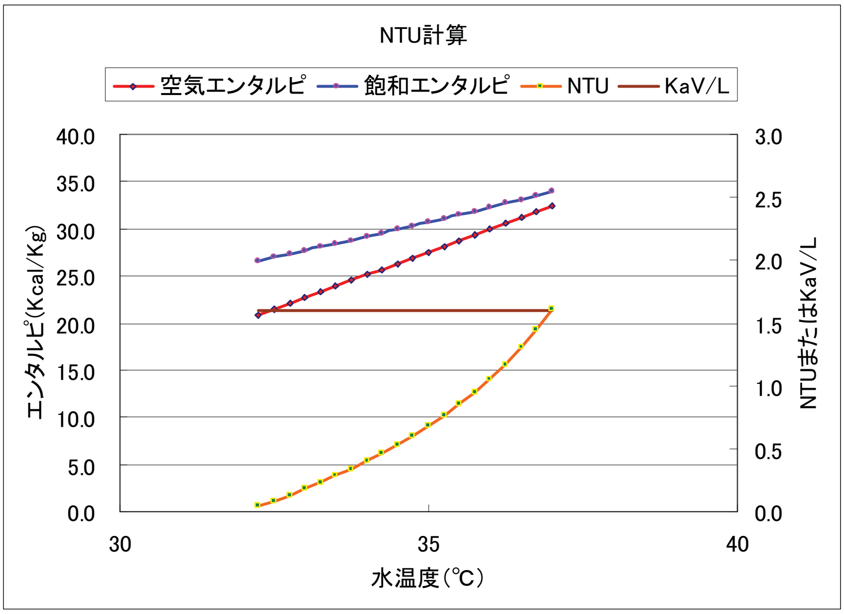


図４　例題２　ミラックス C-312　1200ｍｍH
L/G=2.46　KaV/L=1.602

§５ガス冷却塔への応用

〔例題３〕

次の条件でミラックス Ｃ－312 の充填高を計算せよ。

- ○　入口空気温度＝73℃
- ○　入口空気断熱飽和温度＝73℃（水分飽和）
- ○　入口冷水温度＝35℃
- ○　出口温水温度＝47.2℃
- ○　入口空気量＝10000Kg/m^2hr
- ○　入口水量＝83（m^3/m^2hr）
- ○　L/G=8.3
- ○　NTU=3.42

まず HTU を計算する。

ミラックスＣのデータは冷水塔のデータである。

冷水塔操作とガス冷却操作は逆操作であるが、両者のエンタルピ移動係数はほぼ同一であり、若干ではあるが、ガス冷却の方がエンタルピ移動係数は大きい。(HTU は小さい)

従って冷水塔データを用いれば安全側である。KaV/Lデータには充填高が含まれているから、(16)式を用いて、HTU に変換する。

$$HTU=\frac{V}{\left(KaV/L\right)\times(L/G)}=\frac{H}{\left(KaV/L\right)\times(L/G)} \qquad (16)$$

さらに端末効果を含むからこれを引去しなくてはならない。
そのためには各充填高における、HTU を計算して、充填高＝∞における HTU が端末効果フリーの真の HTU である。
これを図に示すと図 6 のようになる。充填高＝無限における漸近値が真の HTU である。

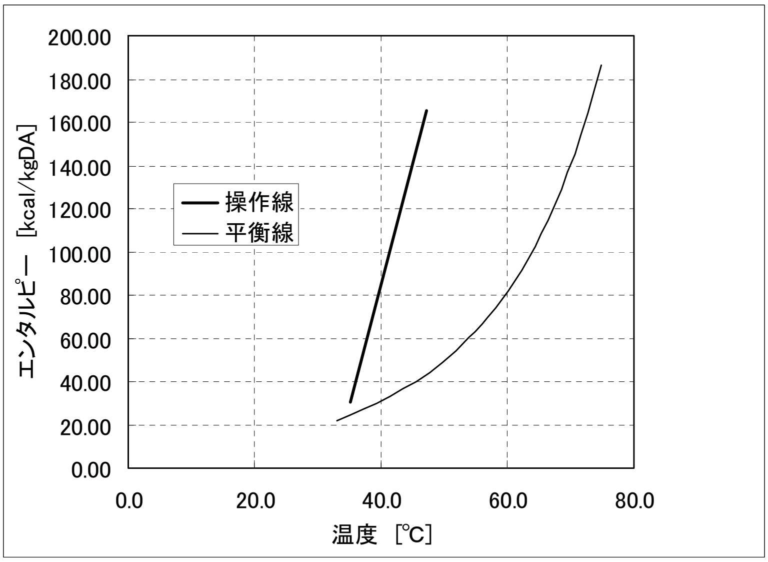


図５　例題３　ガス冷却塔
エンタルピ平衡線と操作線

例題 3 の条件 L/G=8.3 の各充填高におけるミラックス C−312 の HTU を計算する。
H=300
$KaV/L=1.24\times(L/G)^{-0.62}$ （図３参照）

$$HTU=\frac{H}{\left(KaV/L\right)\times(L/G)}=\frac{0.3}{1.24\times(L/G)^{-0.62}\times(L/G)}=\frac{0.3}{1.24\times(L/G)^{0.38}}=\frac{0.3}{1.24\times8.3^{0.38}}=0.108m$$

H=600

$$HTU=\frac{0.6}{1.8\times8.3^{0.38}}=0.149m$$

H=900

$$HTU=\frac{0.9}{2.35\times8.3^{0.38}}=0.171m$$

H=1200

$$HTU=\frac{1.2}{2.8\times8.3^{0.38}}=0.192m$$

H=1500

$$HTU=\frac{1.5}{3.2\times8.3^{0.38}}=0.210m$$

以上の計算結果を充填高と HTU の関係でプロットすると、図６を得る。

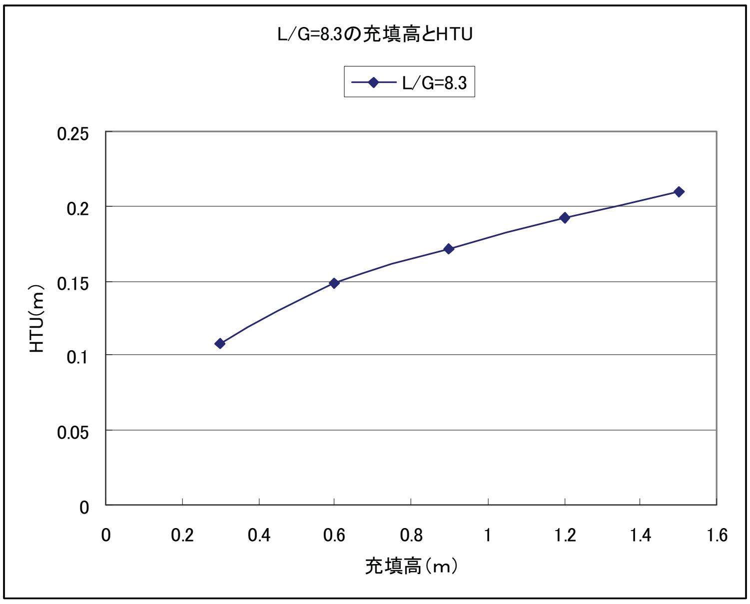


図６　端末効果フリーの HTU

〔例題３〕の解答
図 6 の H=∞における漸近値から端末効果フリーの HTU は 0.25m であることが分かる。
従って
充填高＝3.42×0.25＝0.855m
充填高が低く計算されたが、これは特殊な例であり、高さ制限のために液量を大きくした。
従って L/G が通常の範囲では充填高＝数mということが一般的である。

§６資料

6-1）計算チャート

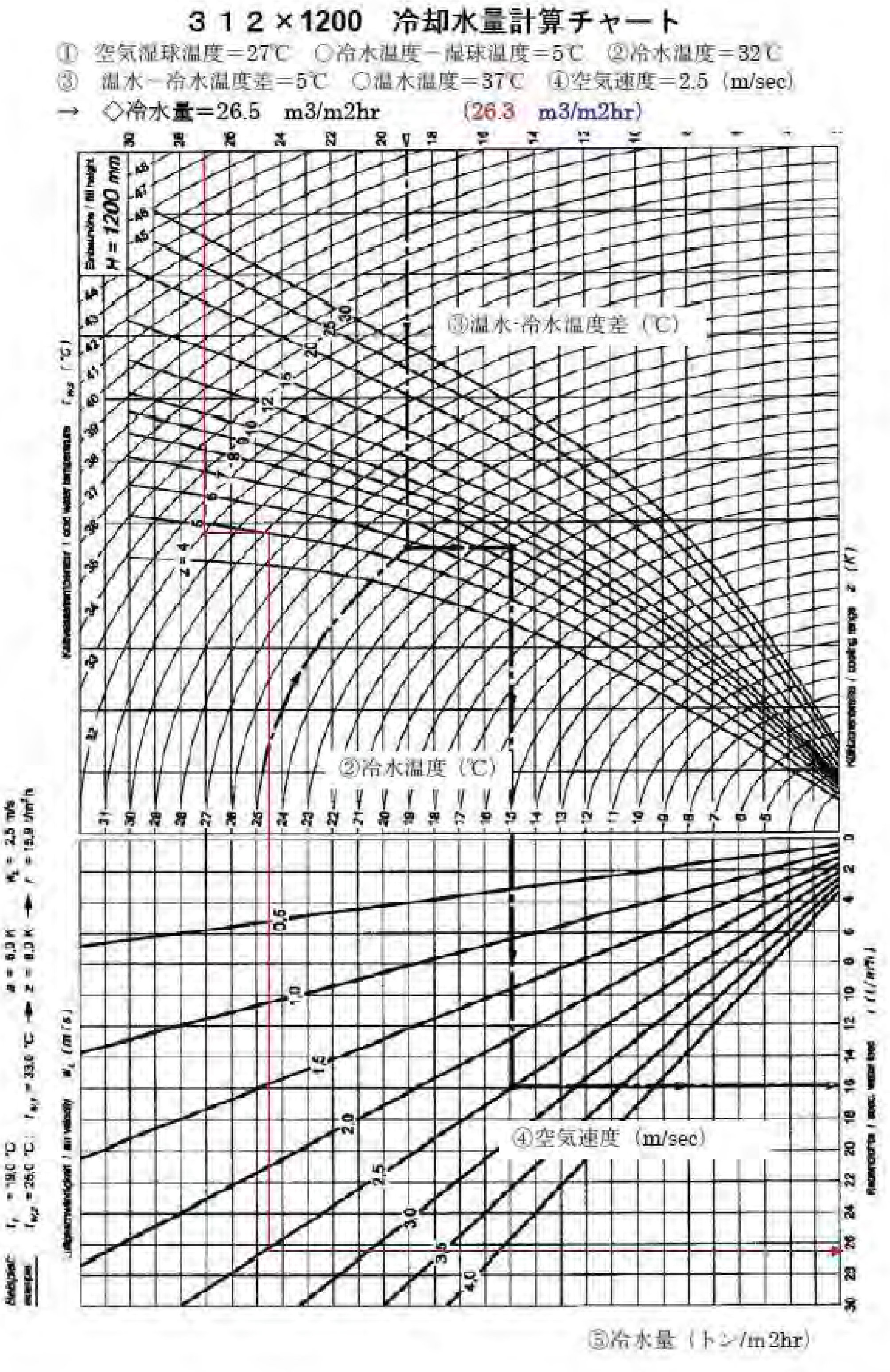


図７　例題２　のチャート C-312　1200ｍｍH

L/G=2.46　L=26.3　m^3/m^2hr

6-2）冷水塔図面

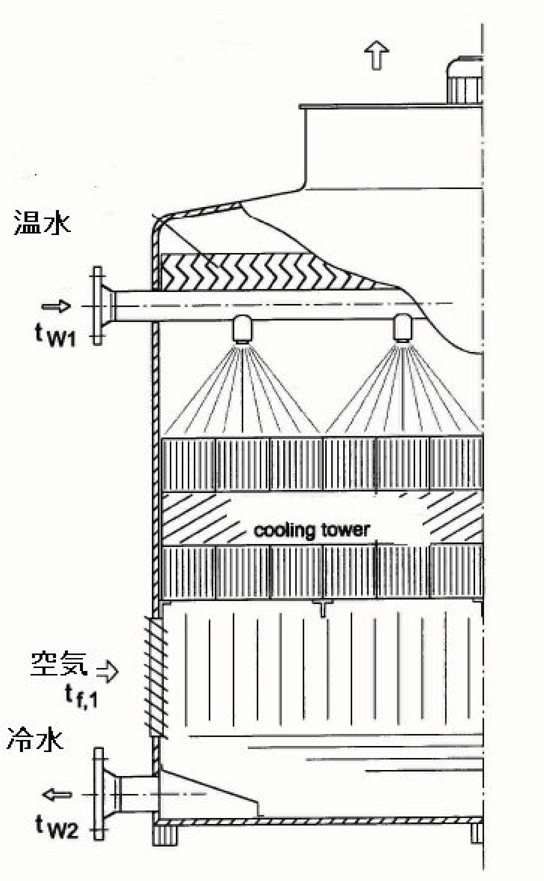


図８　ミラックスＣ充填の冷水塔

以上