

二重管式熱交換器の熱伝達とエネルギー収支 (伝熱)

目 的

エネルギーの変換・交換は化学工学の単位操作では重要な工程である。そこで、「化学工学入門」の講義で学んだ伝熱論ならびに流動論を検証することを目的に、蒸気ボイラより発生した水蒸気を利用して二重管式熱交換器のエネルギー収支を検証する。

キーワード(事前調査事項)

潜熱と顕熱、熱量と比熱(容量)との関係、水蒸気および水の定圧比熱、圧力と沸点・エンタルピー変化(日本機械学会「蒸気表」による)、水の温度と密度、熱エネルギー収支と熱損失、平均温度差と平均伝熱面積、フーリエの式、熱貫流係数(総括伝熱係数)、蒸気ボイラ、二重管式熱交換器、向流と並流

実験概略

図 1 に二重管式熱交換器の概略、ならびに高温・低温熱媒体の温度変化の様子を示す。

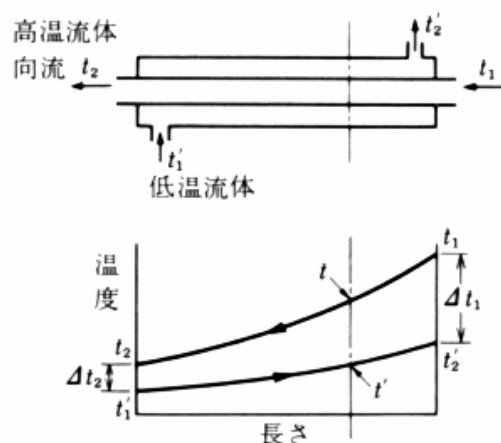


図 1 向流操作における熱交換

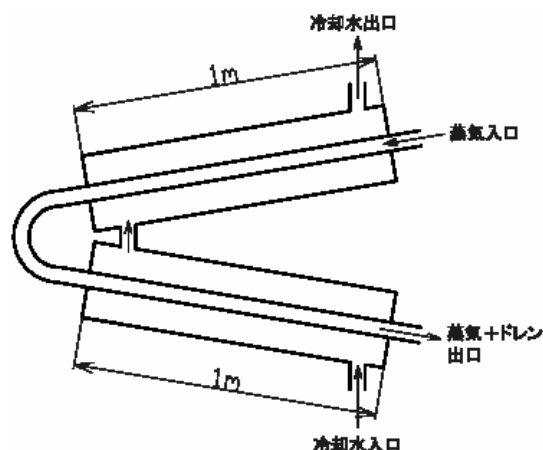


図 2 本実験で利用する熱交換器の概略

本実験では、図 2 に示す二重管式熱交換器を用いる。高温熱媒体である水蒸気は、熱交換器の内管(呼び径 1/2 B (15A) の鋼管: 外径 $D_2=0.0217\text{m}$ 、管の肉厚 $t=0.0028\text{m}$ 、内径 $D_1=0.0161\text{m}$ 、熱交換部の管長 $L=1+1=2\text{m}$)を通り、その外側(外套: ジャケット)に低温熱媒体である水(冷却水)を通じ、向流操作により高温側から低温側へと熱を移動する(熱貫流)。

実験操作

1. 実験前点検と確認・・・各部分のドレンコックを開き、ドレンを排出しておく→ [全コック閉]

軟水器 給水弁・検水コック・出水弁が閉じていること、食塩が入っていることを確認する。

ボイラ 給水・排水弁、ガス供給弁、蒸気仕切弁ならびに主電源が「閉」であることを確認。

熱交換器 冷却水給水弁と調節弁ならびに蒸気供給弁が閉じていることを確認する。

2. 蒸気ボイラの起動

軟水器の給水バルブを開き、圧力が 0.15 ~ 0.5MPa の範囲内であることを確認する。
 つづいて検水コックを開いてカップに採水し、指示薬(EBT)を1滴入れて液の色が赤くならないことを確認する(硬水の場合、軟水器の再生操作が必要となる)。
 軟水であることを確認した後、軟水器の出水バルブならびにボイラの給水バルブを開く。また、ボイラよりドレン再生装置に接続された配管のバルブを開く。
 ボイラ用主電源ならびに燃料ガス供給弁を開き、ボイラを起動する。
 蒸気の発生を確認した後、蒸気整圧タンクの玉形弁(入口側・出口側)→圧力調節器の玉形弁(1次側・2次側)の順に弁を開く。このとき2次側圧力が0.04MPa以下であることを確認する。

3. 熱交換実験・・・実験開始・終了時に大気圧を記録しておく!

冷却水排水ポンプを電源に接続(アースの接続を確認)し、排水ポンプを起動する。
 電子式温度計の電源を入れる。ドレン出口にバケツを置く。
 蒸気供給弁を開き、供給弁を開いてから蒸気が放出するまでの時間を計測する。

注意 蒸気出口には高温の蒸気や水が排出される! 事故・やけどに充分注意すること!

蒸気入口温度が 100 以上となるまで待ち、蒸気放出時の全ての温度を記録する。
 冷却水給水弁を開き、続いて冷却水調節弁を開き、熱交換器に冷却水を流す。
 冷却水を指定された流量(6, 8, 10[L/min])に設定する(変動があるため注意する)。
 指定された冷却水流量に設定後、最初の 20 分間は「ならし運転」を行い、5 分ごとに全箇所の温度・冷却水流量・ボイラの状態[起動・停止]を測定・記録する。
 20 分経過後、**定常状態**とみなして、20 ~ 30 分間、および 30 ~ 40 分間のドレンをそれぞれバケツに受けて、「単位時間あたり」のドレン重量[kgf/10min]を求める。
 (この際も5分ごとに全箇所の温度・冷却水流量・ボイラの状態を測定・記録する)

4. 蒸気ボイラの停止

実験終了後ボイラを停止し、蒸気整圧タンクの玉形弁(入口側・出口側)→圧力調節器の玉形弁(1次側・2次側)→熱交換器の蒸気供給弁の順に弁を閉じる。
 蒸気整圧タンクのドレンコックを開き、蒸気供給圧力が 0MPa G (ゲージ圧)となるまでドレンの排出とブローを行う。続いて電子式温度計の電源を切り、以下の操作と確認を行い、後片付けをする。

熱交換器 蒸気供給弁ならびに冷却水調節弁と給水弁を閉じる。続いて冷却水排水ポンプの電源を外し(アースは接続したままにしておく)、ポンプを停止する。

ボイラ 主電源ならびにガス供給弁・給水弁・排水弁を閉じる。

軟水器 出水弁・検水コック・給水弁を閉じる。

実験結果の整理と各実験値の計算・・・特に有効数値・単位の表記に注意せよ。

実験当日

○各冷却水流量における実験結果(ならし～定常運転)を表にまとめる(表1を参照)。

次回の実験日までに

各冷却水流量の定常時(開始後20～40分)における実験結果($t_1, t_2, w_d, t_1', t_2', V_w$)をまとめる(以降の計算に利用する)。以降の計算のために、単位換算も行っておく。

教員より提示された実験時の大気圧における沸点 b.p.と凝縮潜熱 ΔH_c 、水蒸気ならびに水の定圧比熱(c_{ps} と c_{pw})を用い、冷却水流量8L/minにおける以下の計算を行う

水蒸気側 (a) (q_s/m_d) [kcal/kg] = $c_{ps}(t_1 - \text{b.p.}) + \Delta H_c + c_{pw}(\text{b.p.} - t_2)$ を算出する。

(b) ドレン重量流量 w_d [kgf/10min] を質量流量 m_d [kg/h] に換算する。

$$w_d [\text{kgf/10min}] \times g_c \div g_k \rightarrow m_d [\text{kg/h}] \quad (g_k: \text{神奈川の重力加速度 } 9.797 \text{ m/s}^2)$$

(c) $(q_s/m_d) \times$ ドレン質量流量 m_d = 水蒸気工率 q_s [kcal/h] を求める。

冷却水側 (d) (q_w/m_c) [kcal/kg] = $c_{pw}(t_2' - t_1')$ を算出する。

(e) 冷却水体積流量 V_w [L/min] を質量流量 m_c [kg/h] に換算する。

$$V_w [\text{L/min}] \times \text{水の密度 } \rho (\text{どこの温度を利用するか?}) \rightarrow m_w [\text{kg/h}]$$

(f) $(q_w/m_c) \times$ 冷却水質量流量 m_c = 冷却水工率 q_w [kcal/h] を求める。

熱損失 q_{loss} (kcal/h) = $q_s - q_w$ を求める。

以上の計算結果を「熱の仕事当量」を利用して工学単位からSI単位に変換する。

レポート作成時

自班の全ての冷却水流量における実験結果(0～40分)を表にまとめる(表1を参照)。

各冷却水流量において、代表的な

水蒸気: 入口・出口温度、ドレン質量流量、放熱量(工率)
 冷却水: 入口・出口温度、冷却水質量流量、吸熱量(工率)
 対数平均温度差、 A_1 面基準の熱貫流係数、熱損失(工率)

を算出する(代表的な一条件でよいから、具体的な計算例を記述する)と共に、SI単位への換算も行い、これらの結果を表にまとめる(表2を参照)。

北・南両班に共通の冷却水流量条件(8L/min)についても同様の計算・単位変換を行い、自班・他班の区別が付くように表にまとめる。

考 察

実験・計算結果をもとに、他班の実験結果(各温度や水蒸気放熱量・冷却水吸熱量、熱損失や総括伝熱係数など)との対比や、熱損失が生じる要因について検討せよ。

課 題

蒸気ボイラの種類(水管・貫流など)と構造について調査し、図示して説明せよ。

(自分らが利用した蒸気ボイラはどのような種類・構造であるかも必ず記せ。)

蒸気ボイラの安全性や操作上・管理上の問題点について調査し、説明せよ。

ボイラに軟水器を用いる理由・軟水化の方法(原理)と装置構造を図示して説明せよ。

表の例

表 1 冷却水体积流量 $V_w = \text{xx} [\text{l/min}]$ における実験結果

経過 時間 [min]	冷却水 体積流量 $V_w [\text{l/min}]$	水蒸気 入口 t_1 []	冷却水 出口 t_2' []	Δt_1 [K]	水蒸気 出口 t_2 []	冷却水 入口 t_1' []	Δt_2 [K]	ドレン重量 流量 w_d [kg f10min]
0								
5								
10								
15								
20								
25								
30								
35								
40								

表 2 冷却水体积流量 $\text{xxx} [\text{l/min}]$ (20 ~ 30min) における工率算出結果 (自班) 他班]

加熱側	水蒸気温度[]		ドレン質量流量 m_d		水蒸気放熱量 (工率) q_s	
	入口 t_1	出口 t_2	[kg/h]	[kg/s]	[kcal/h]	[W]
冷却側	冷却水温度[]		冷却水質量流量 m_w		冷却水吸熱量 (工率) q_w	
	入口 t_1'	出口 t_2'	[kg/h]	[kg/s]	[kcal/h]	[W]
対数平均温度差 ? t_{lm} [K]		A_1 面基準の総括伝熱係数 U_1		熱損失 (工率) q_{loss}		
		[kcal/(m ² ・h・K)]	[W/m ² ・K]	[kcal/h]	[W]	