

行政院原子能委員會
委託研究計畫研究報告

環保沸石吸附式製冷循環特性研究計畫

An Experimental Study on the Zeolite Adsorption Cooling System

計畫編號：1062001INER004

受委託機關(構)：國立中央大學能源工程研究所

計畫主持人：楊建裕

聯絡電話：03-4267347

E-mail address：cyyang@ncu.edu.tw

研究期程：中華民國 106 年 1 月至 106 年 12 月

研究經費：新臺幣 78 萬元

核研所聯絡人員：李恆毅、陳昱任

報告日期：106 年 12 月 20 日

目錄

目錄.....	i
中文摘要.....	1
Abstract.....	2
壹、計畫緣起與目的	3
貳、研究方法與過程	8
一、吸附式製冷機構.....	8
二、實驗系統.....	31
三、系統洩漏測試.....	34
參、主要發現與結論	36
肆、參考文獻	36

中文摘要

本研究預訂應用核能所開發之沸石為吸附劑，完成整體吸附式製冷系統之設計製作。期能提高吸附式系統製冷性能，縮小系統體積，以達到實際商業化之目的。整體計畫期限為二年，第一年進行吸附性能曲線實驗，得出沸石-水間之吸/脫附性能，第二年設計製作微熱交換器吸附床，以及蒸發/冷凝器，組裝完成小型吸附式空調系統，進行系統之測試改良，並考慮吸附劑及冷媒之搭配選擇。本年度為第二年，以核能所自行開發的鋁渣回收環保沸石作為吸附材料，製作吸附床試體，完成雙床吸附式製冷系統，評估環保沸石作為固體吸附式製冷系統吸附床材料的可行性，以為後續研究之依據。

Abstract

This study is proposed to apply the zeolite fabricated by INER from waste slag on the adsorption bed of an adsorption cooling system. It is expected the adsorption rate will increase, entire system volume and therefore cost will be reduced. This is a two-year research project. In the first year, the adsorption/ desorption performance of the zeolite fabricated by INER will be measured. The adsorption bed by using micro heat exchanger will be designed and a high performance evaporator/condenser will be designed and fabricated, a double bed adsorption cooling system will be assembled in the second year. This will be used for evaluating the feasibility of applying the zeolite from recovered waste slag in the adsorption cooling systems.

壹、計畫緣起與目的

在各項由熱能直接轉換製冷，而非使用電力蒸汽壓縮式空調系統中，液體吸收式以及固體吸附式系統為常用之轉換方式。液體吸收式系統雖然轉換效率較高，但其工作流體（LiBr、LiCl）多具毒性，且需較高之熱水溫度（100 °C 以上），較不適合低溫工作流體之使用。固體吸附式系統工作流體（水）無毒性顧慮，且工作溫度較低（約 80 °C），但現行商業化系統體積龐大，很難直接應用小型系統。

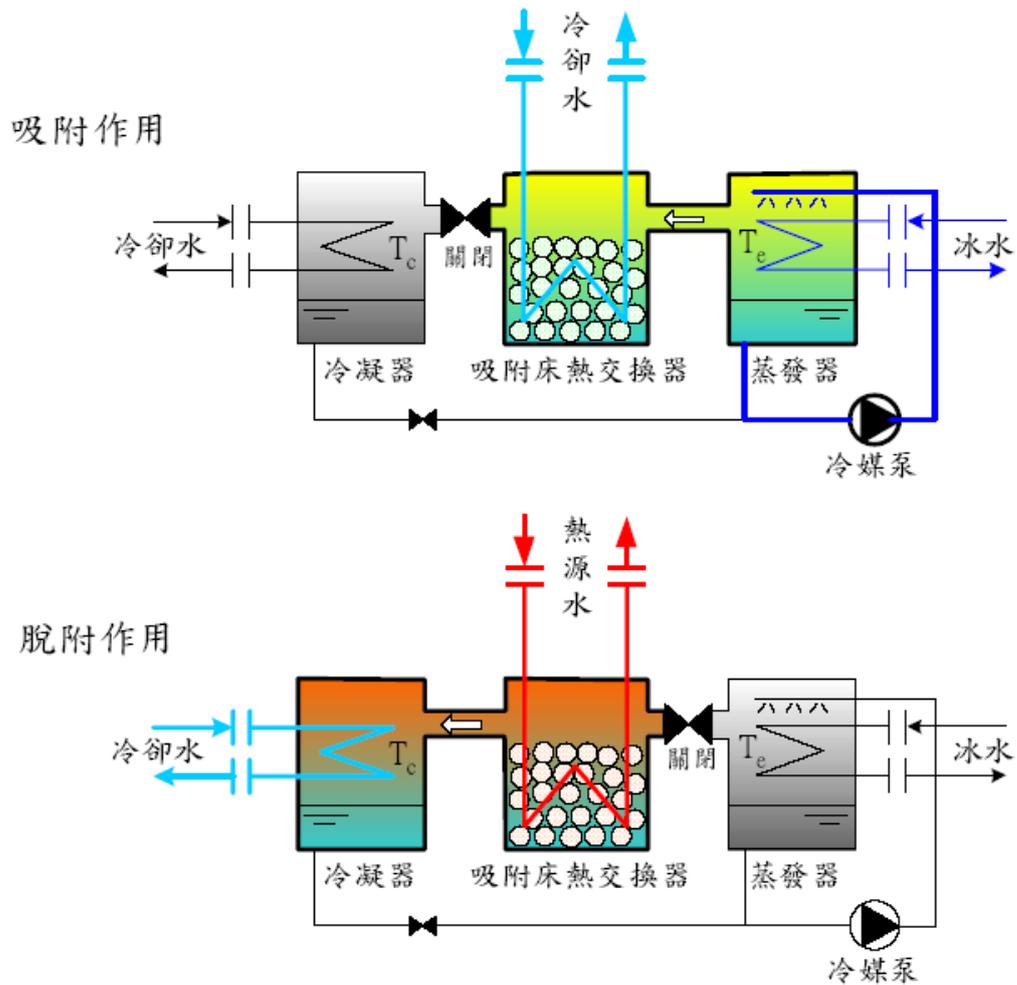
一固體吸附式空調系統構造如圖一所示[1]，主要包括吸附床、蒸發器及冷凝器等三部份，其基本原理為利用吸附劑對於冷媒的吸附量，隨溫度不同而異，利用熱水及冷卻水使吸附床升溫或降溫，使冷媒在吸附床產生脫附及吸附作用，再導引至蒸發器及冷凝器進行吸熱及放熱。在吸附過程時，將冷卻水通過高溫吸附床，將吸附劑（一般為矽膠、沸石、活性碳等）冷卻使其吸附冷媒（一般為水、甲醇、乙醇或氨等），同時造成汽相冷媒壓力降低，而使相連之蒸發器內之冷媒蒸發，因此吸熱而製冷。在脫附過程時，將高溫熱水通過吸附床，提高吸附劑溫度，使原吸附於其中之冷媒脫附，再流至冷凝器，由冷卻水冷卻而凝結成液態冷媒。如此於吸附床中交互通入冷熱水，使冷媒重複吸附及脫附，因而使冷媒在蒸發器蒸發，以及在冷凝器內凝結，而完成冷凍空調循環。

為配合吸附材料及工作流體之選擇，吸附及脫附過程都需在真空壓力下進行，因此各部元件及連接管路皆須耐高壓，而且體積極為龐大。為減少空間需求，近期設計多將此三部分整合於一真空腔體內(如圖二所示[1])，使吸附、脫附及蒸發、冷凝在同一低壓環境中進行。其中蒸發器及冷凝器和一般蒸汽壓縮式空調系統類似，可依傳統方法進行設計。在吸附床方面，則是將吸附劑填塞於圓形或扁平鰭管外之鰭片間(如圖三所示[1])，由於吸附及脫附分別為放熱及吸熱反應，將熱水或冷卻水通於管中進行熱交換，利用鰭片增加其熱傳及吸、脫附質傳面積，減少整體熱交換器所需之體積。此種吸附式空調系統研究，已有很長的歷史，國內工研院能資所已進行該項研究近二十年，所製作產品性能和國外產品相當，但由於成本太高及體積太大等因素，仍無法實際應用。

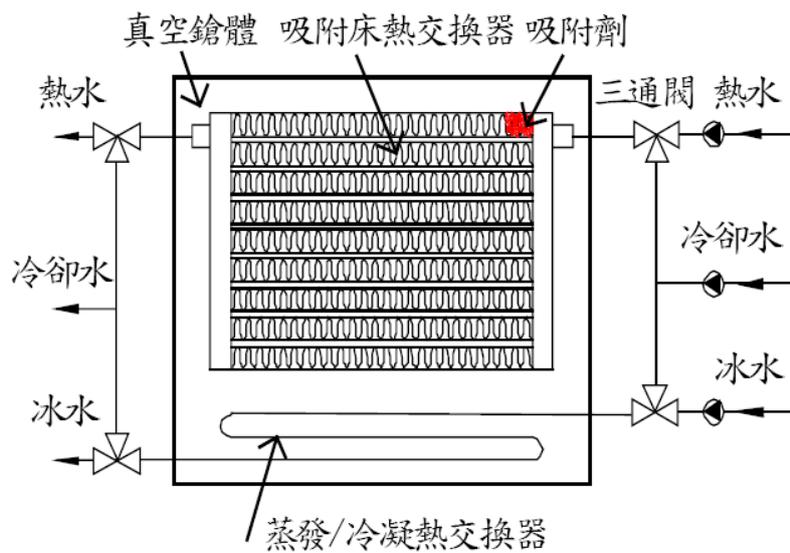
由於在整體吸附製冷循環中，最大阻抗在於吸附劑對冷媒吸、脫附之質傳限制。尤其是圖二所示之整合型吸附床中，冷媒蒸汽流動之動力僅為吸、脫附所產生之壓差，流動阻力之增加，會嚴重影響冷媒流動，因而降低系統效率。因此吸附床之設計，為整體系統性能好壞之關鍵。國內外對於吸附式製冷的研究，已有相當多年的歷史。目前無論國外業者或國內工研院能資所設計之吸附床，皆基於傳統空調系統之尺寸觀念，管徑約 1 ~ 10 mm，鰭距約 1 ~ 2 mm，所用吸附劑-

矽膠粒徑約 0.3 ~ 1 mm。但由於矽膠為熱的不良導體，當其表面與水蒸汽進行吸附、脫附反應時，反應熱需經過矽膠層再傳至管內冷卻或加熱流體，若矽膠層厚度大，相對熱阻高，反應效率差。另外，當表層矽膠吸/脫附飽和時，蒸汽須穿過矽膠顆粒間縫隙，與下層之矽膠進行吸/脫附。由於矽膠之吸/脫附壓力並不大，若其顆粒太小，造成蒸汽不易穿過矽膠顆粒間縫隙，而嚴重影響其效率。相反若其顆粒過大，則可能造成僅有表面完成吸附，而內部吸附不易之現象。楊等人[2]利用薄膜鍍層，在微熱交換器上製作出薄矽膠層，提高反應速率以縮小系統體積。實驗結果顯示在相同時間下，越薄之矽膠層，吸附重量百分比越高。因此欲提高系統性能，需使用較薄之矽膠層，使其能於短時間內完成吸附及脫附過程。但依目前系統所使用熱交換器管徑，若矽膠層太薄，所能填充之矽膠量有限，冷凍能力不足。因此需要擺脫傳統冷凍空調熱交換器之設計觀念，重新進行吸附床之設計。

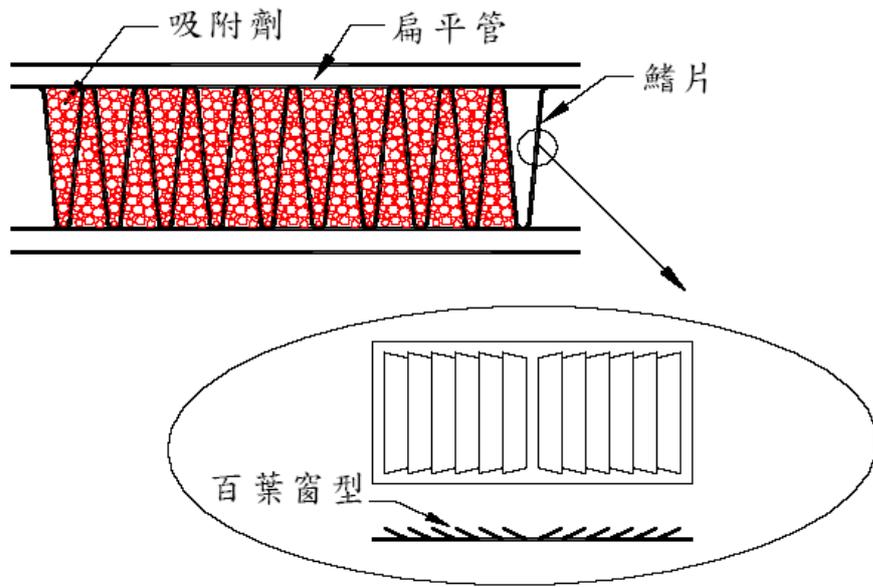
本研究預訂應用核能所開發之沸石為吸附劑，從基本吸附性能曲線實驗開始，得出沸石-水間之吸/脫附性能，據以設計最佳性能之吸附床，最後完成整體吸附式製冷系統之設計製作。期能提高吸附式系統製冷性能，縮小系統體積，以達到實際商業化之目的。



圖一、固體吸附式空調系統工作原理示意圖[1]



圖二、整合型固體吸附式製冷系統[1]



圖三、吸附劑填塞示意圖[1]

貳、研究方法與過程

一、吸附式製冷機構

A. 三腔體式真空腔體

本實驗參考 Wang [3] 三腔體吸附式系統，兩個上腔體中各裝有吸附床及冷凝器之一體式吸附腔體，下腔體為一蒸發器。此設計減少腔體間之連接管路、簡化結構、降低成本並減少管路洩漏風險。本實驗設計之三腔體式吸附製冷系統如圖四所示，上下腔體間由熱虹吸作為隔板，熱能藉由水於蒸發器蒸發至熱虹吸下表面凝結放熱，熱傳至上表面再由上腔體的水蒸發至吸附床進行吸附，因三個腔體內的冷媒互不混合，減少了蒸發器的冷媒熱容，但也增加熱虹吸下表面凝結熱阻、隔板傳導熱阻、上表面蒸發熱阻，系統熱阻如圖六所示。

真空腔體使用不鏽鋼為材料，分成六個部分所示，上腔蓋、上腔 Frame、腔體本體、中腔 Frame、側腔 Frame 與側腔蓋詳細尺寸如圖七~十二所示，腔體本體用焊接組成，上腔蓋與吸附床、冷凝器水側出入口連接，鎖入腔體本體並利用上腔 Frame 中的 O 型環密封，熱虹吸隔板所在中腔 Frame 利用 O 型環密封，蒸發器鎖在側腔蓋水側出入口，放入下腔體利用側腔 Frame 中的 O 型環密封，組合後腔體外觀尺寸為 1330 mm×424 mm× 690 mm。

B. 吸附床

依據工研院綠能所製作矽膠-水為工作配對之等溫吸附平衡曲線如圖十三估算製冷所需之矽膠用量，據此設計吸附床熱交換器。

脫附過程吸附床通入 80°C 熱水，使矽膠脫附出水氣至冷凝器冷凝，冷凝器通入 35°C 冷卻水，將腔體內水氣飽和壓力控制在 42.1 torr，觀察吸附平衡曲線圖，可得知脫附過程結束點的平衡吸附率 X_1 為 0.065。

$$X_1 = X(T = 80^\circ\text{C}, P = P_{\text{sat}@31.8\text{torr}}) = 0.065$$

吸附過程吸附床通入 35°C 冷卻水，使剛結束脫附之高溫吸附床及矽膠降溫，矽膠開始吸附腔體內水氣，使腔體壓力低於飽和壓，冷媒開始蒸發，蒸發器持續通入 7°C 冰水，水氣飽和壓力控制在 7.8 torr，依據等溫吸附曲線圖，得知吸附過程結束點的平衡吸附率 X_2 為 0.115。

$$X_2 = X(T = 35^\circ\text{C}, P = P_{\text{sat}@7.8\text{torr}}) = 0.115$$

脫附結束與吸附結束之吸附率差為 $\Delta X = X_2 - X_1 = 0.05$ 。

假設吸附系統製冷量為 5 kW，乘上吸附時間(約 9 分鐘)，為吸附過程所製冷的熱量，將此熱量除上水的蒸發潛熱 2454 (kJ/kg) (採平均溫度 20°C)，得到所需吸附之水量 1.1 kg。把水量除上吸附率差，可得到所需之矽膠量為 22 kg，除上矽膠密度 600 (kg/m³)，得到矽膠體積為 0.036 m³，依據體積設計吸附床大小。

吸附床設計採用扁平鰭管，材質為鋁，如圖十四所示，每支扁平

管尺寸為 478×19×1.9 mm，且內有 8 個微流道，每支扁平管間距 11 mm，28 支扁平管組成一片，本組熱交換器共由 14 片組成。矽膠與熱交換接合方式採用膠合塗布方式固定於每支扁平管間，如圖十五所示，吸附床實際塗佈矽膠總量 22.3 kg。

C. 蒸發器

蒸發腔體內冷媒蒸氣遇到較冷的熱虹吸下表面冷凝，液態冷媒受重力滴落至蒸發器，此時腔體內壓力低於飽和壓力，使液態冷媒蒸發帶走蒸發器內水側熱量得到製冷，讓蒸發器水側出口達到所需之低溫，設計加熱量 5 kW，蒸發器熱阻如下。

$$R_l = R_w + R_{\text{tube}} + R_e = \frac{1}{h_w A_w} + R_{\text{tube}} + \frac{1}{h_e A_e}$$

R_l 為蒸發器總熱阻， R_w 為水側熱阻， R_{tube} 為管壁熱阻， R_e 為蒸發熱阻。其中熱阻可進一步表示為熱傳係數與熱傳面積的形式， h_w 管內水側熱傳係數， A_w 為管內水側熱傳面積， A_e 為管外蒸發熱傳面積。

經下列 Dittus-Boelter 經驗公式，求得水側熱傳係數 $h_w = 3123$ (W/m²·K)。

$$\text{Nu} = 0.023 \text{Re}^{4/5} \text{Pr}^{0.4}$$

另經由下列 Cooper [1984] 的平板經驗公式求得管外蒸發熱傳係數 $h_e = 196$ (W/m²·K)。

$$h = 55 q''^{0.67} P_r^{0.12 - \log R_p} (-\log P_r)^{-0.55}$$

其中 q'' 為熱通量 (W/m^2)、 P_r 為簡約壓力 (reduced pressure)、 R_p 為表面粗糙度 (μm)，管壁熱阻小而可忽略。由於蒸發熱傳係數小於水側熱傳係數，因此在蒸發器上加裝鰭片增加熱傳量。

蒸發器使用扁平鰭管，材料為鋁，詳細尺寸如圖十六所示，每支扁平管間距為 11 mm，鰭片間距為 1.5 mm，鰭片高度為 9.1 mm，每支扁平管尺寸為 580×19×1.9 mm，內有 8 個微流道，28 支扁平管組成一排，本組熱交換器共由 2 片串聯組成，總熱傳面積為 10.4 m^2 。

D. 冷凝器

當吸附床通熱水進行脫附時，脫附出的氣態冷媒碰到低溫冷凝器冷凝，放出的熱量由冷卻水帶走，設計製冷量 5 kW，冷凝器的熱阻如下。

$$R_{cond} = R_{w'} + R_{tube} + R_c = \frac{1}{h_{w'} A_{w'}} + R_{tube} + \frac{1}{h_c A_c}$$

其中 R_{cond} 為冷凝器總熱阻， $R_{w'}$ 為水側熱阻， R_{tube} 為管壁熱阻， R_c 為冷凝熱阻。其中熱阻可進一步表示為熱傳係數與熱傳面積的形式， $h_{w'}$ 為管內水側熱傳係數， $A_{w'}$ 為管內水側熱傳面積， h_c 為管外冷凝熱傳係數， A_c 為管外冷凝熱傳面積。

經 Dittus-Boelter 經驗公式求得水側熱傳係數 $h_{w'} = 11715$ ($W/m^2 \cdot K$)。

$$Nu = 0.023 Re^{4/5} Pr^{0.3}$$

以及 Nusselt [1918] 冷凝經驗公式求得管外冷凝熱傳係數 $h_c = 7044$ (W/m²·K)。

$$h_c = 0.665 \frac{\rho_f (\rho_f - \rho_g) i_{fg} k_f^3}{\mu_f q'' d}$$

其中 q'' 為熱通量(W/m²)， d 為管徑(m)。

冷凝器使用扁平管，材料為鋁，詳細尺寸如圖十八所示，每層扁平管尺寸為 500×17×1.9 mm，內有 8 個微流道，每支扁平管間距為 11 mm，鰭片間距為 2 mm，鰭片高度為 9.1 mm，28 支扁平管組成一層，本組熱交換器共由 4 層組成。

E. 熱虹吸腔

進行吸附時，上腔體冷媒蒸發使熱虹吸隔板溫度降低，下腔體的冷媒蒸氣遇到低溫的熱虹吸隔板下表面時凝結成液態冷媒，再藉由重力滴落至蒸發器，再進行蒸發，熱阻公式如下。

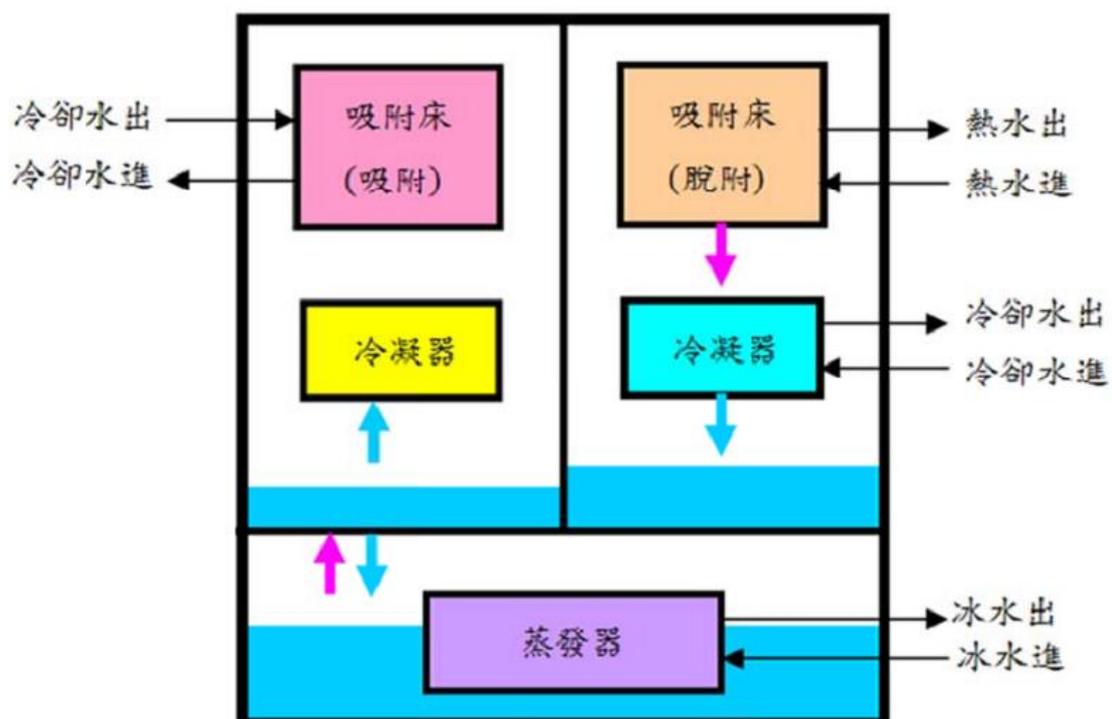
$$R = R_{c'} + R_{wall} + R_{e'} = \frac{1}{h_{c'} A_{c'}} + R_{wall} + \frac{1}{h_{e'} A_{e'}}$$

R 為熱虹吸總熱阻， $R_{c'}$ 為冷凝熱阻， R_{wall} 為板壁熱， $R_{e'}$ 為蒸發熱阻。其中熱阻可進一步表示為熱傳係數與熱傳面積的形式， $h_{c'}$ 為冷凝熱傳係數， $A_{c'}$ 為熱虹吸下表面冷凝面積， $h_{e'}$ 為蒸發熱傳係數， $A_{e'}$ 為熱虹吸上表面蒸發面積。

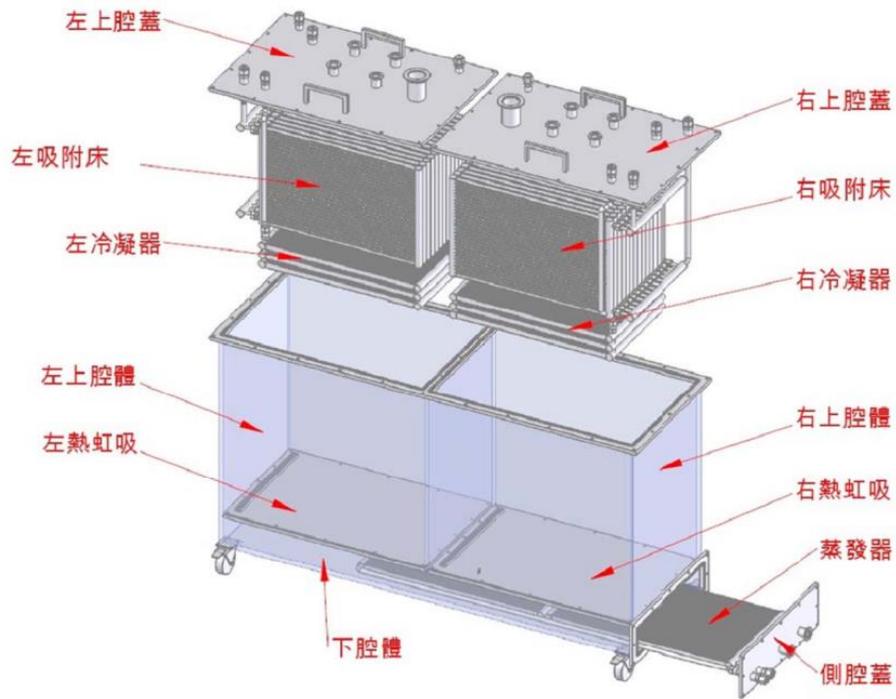
經 Nusselt [1916]公式及 Gorenflo [1990]求得冷凝熱傳係數 6,379 (W/m²·K)與蒸發熱傳係數 189 (W/m²·K)，得知蒸發熱傳係數遠低於冷凝熱傳係數，因此必須在熱虹吸上表面加設鰭片以增加熱傳量。

熱虹吸隔板使用鋁作為材料製作尺寸如圖二十，厚度設計為 2 mm 厚減少金屬傳導之熱阻，但由於製冷循環過程中上下腔體有壓力差，容易造成隔板的變形，產生漏氣問題，於是將熱虹吸隔板分成兩片裝入腔體中，中間用補強板(尺寸如圖二十一)支撐，連接如圖二十二所示，達到增加強度減少變形的效果。

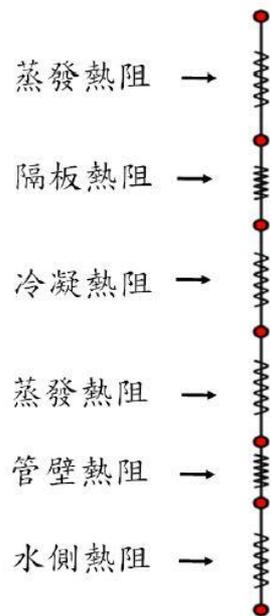
整體吸附式製冷機裝配完成如圖二十三所示，為進行系統洩漏測試，此時尚未進行保溫材包覆。



圖四、三腔體吸附系統示意圖



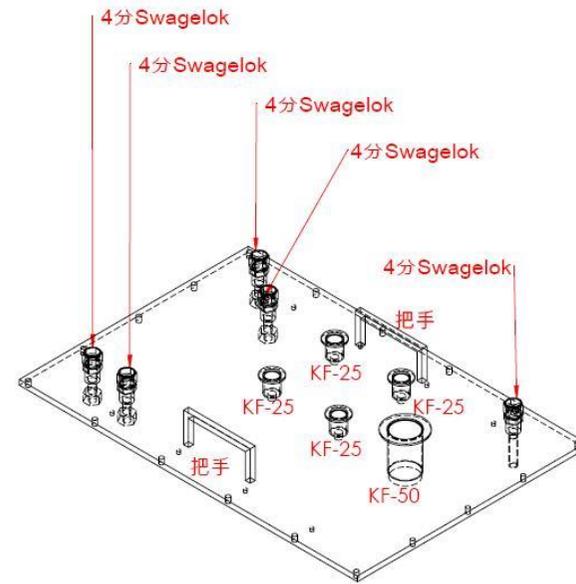
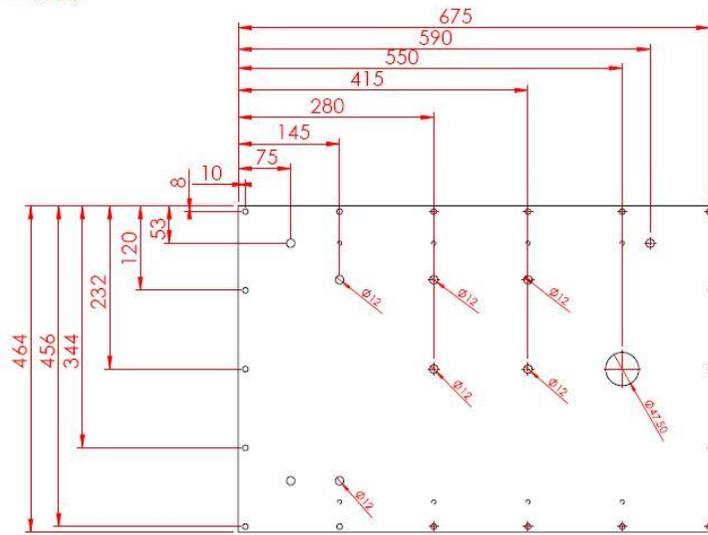
圖五、系統組合圖



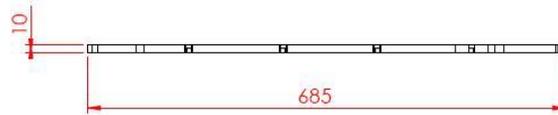
圖六、三腔體熱阻分佈

1 - 上腔蓋尺寸圖

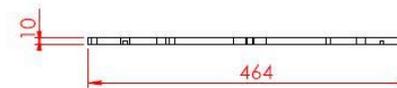
上視圖



前視圖

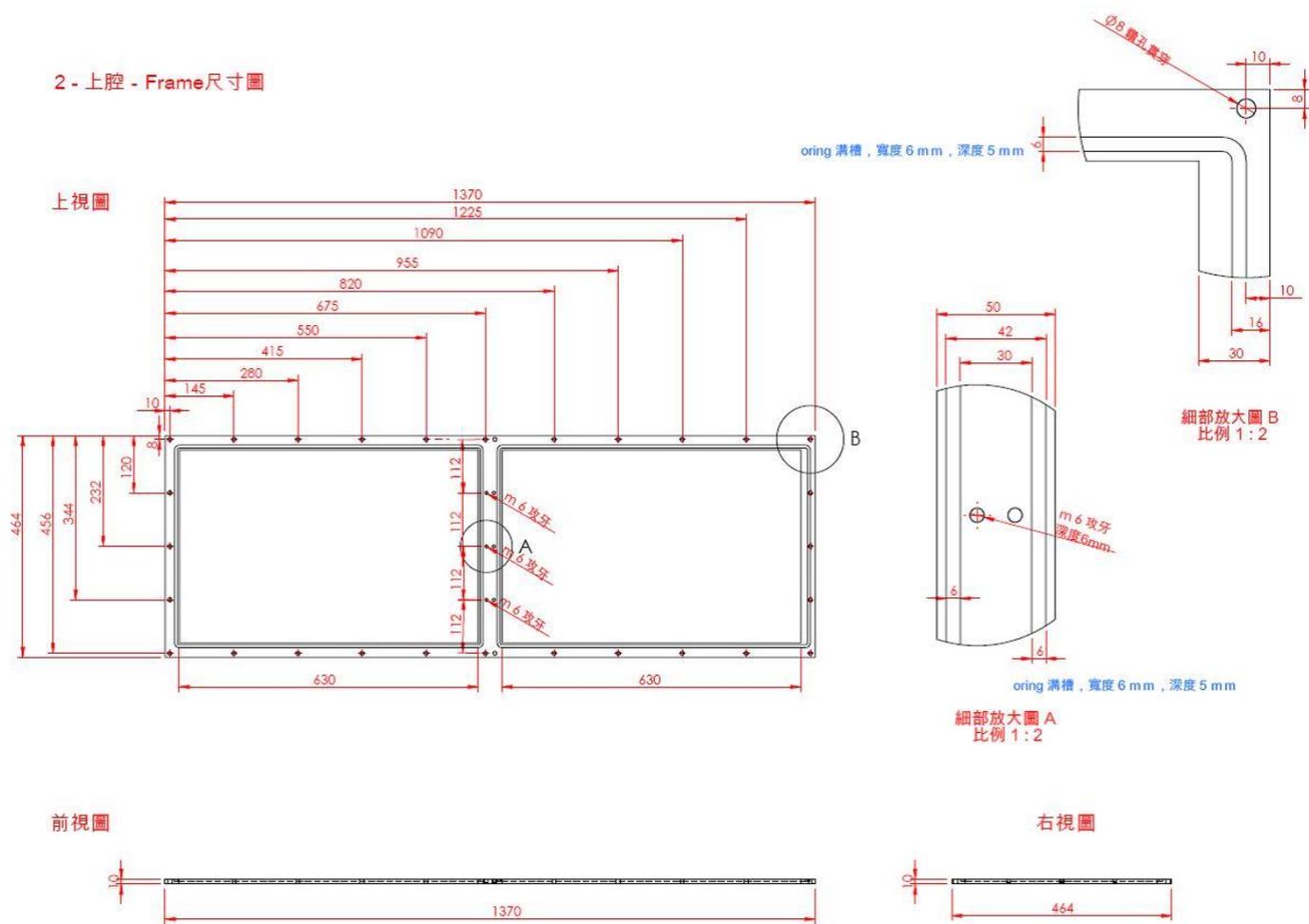


右視圖



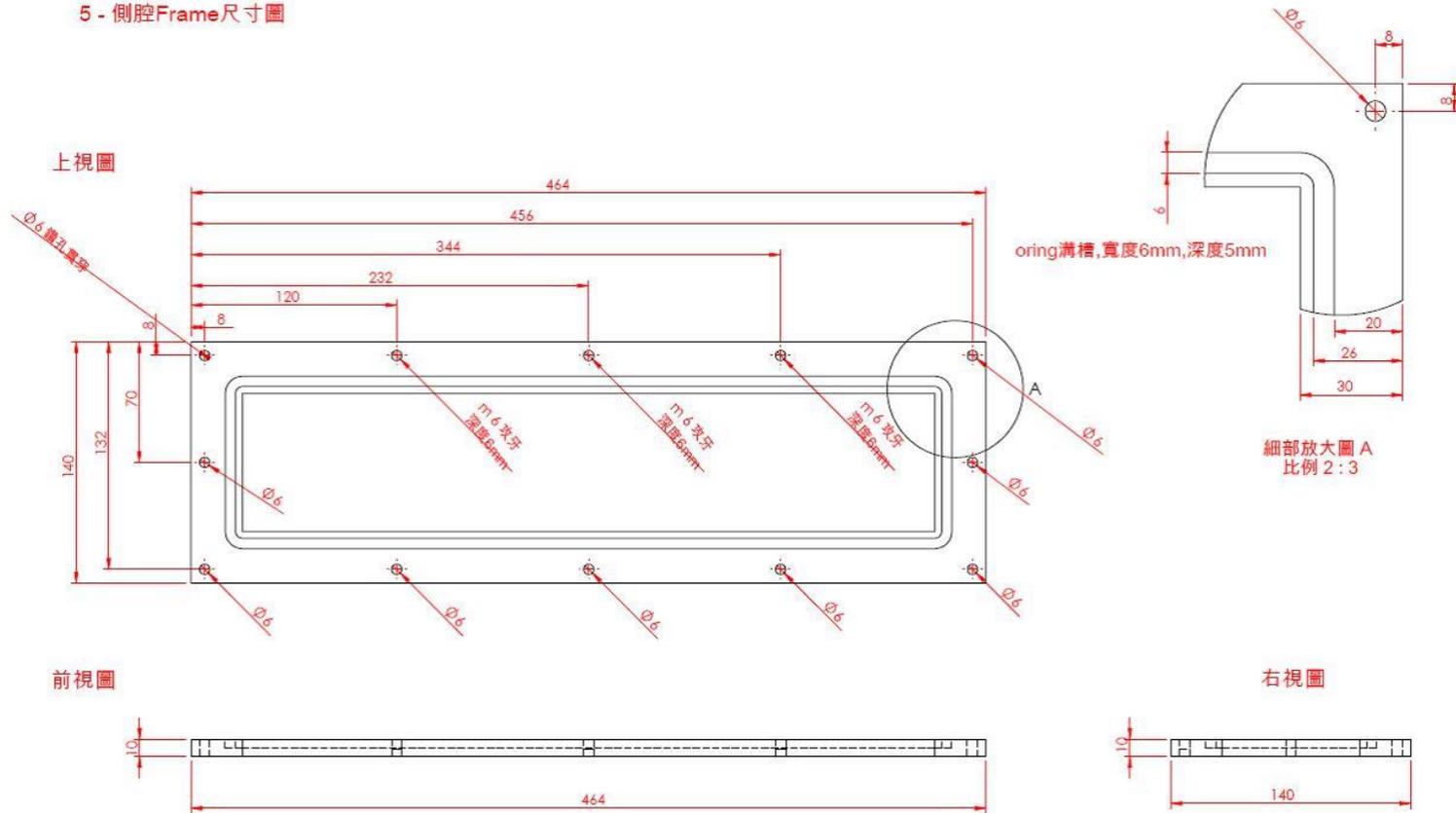
圖七、上腔蓋尺寸圖

2 - 上腔 - Frame尺寸圖



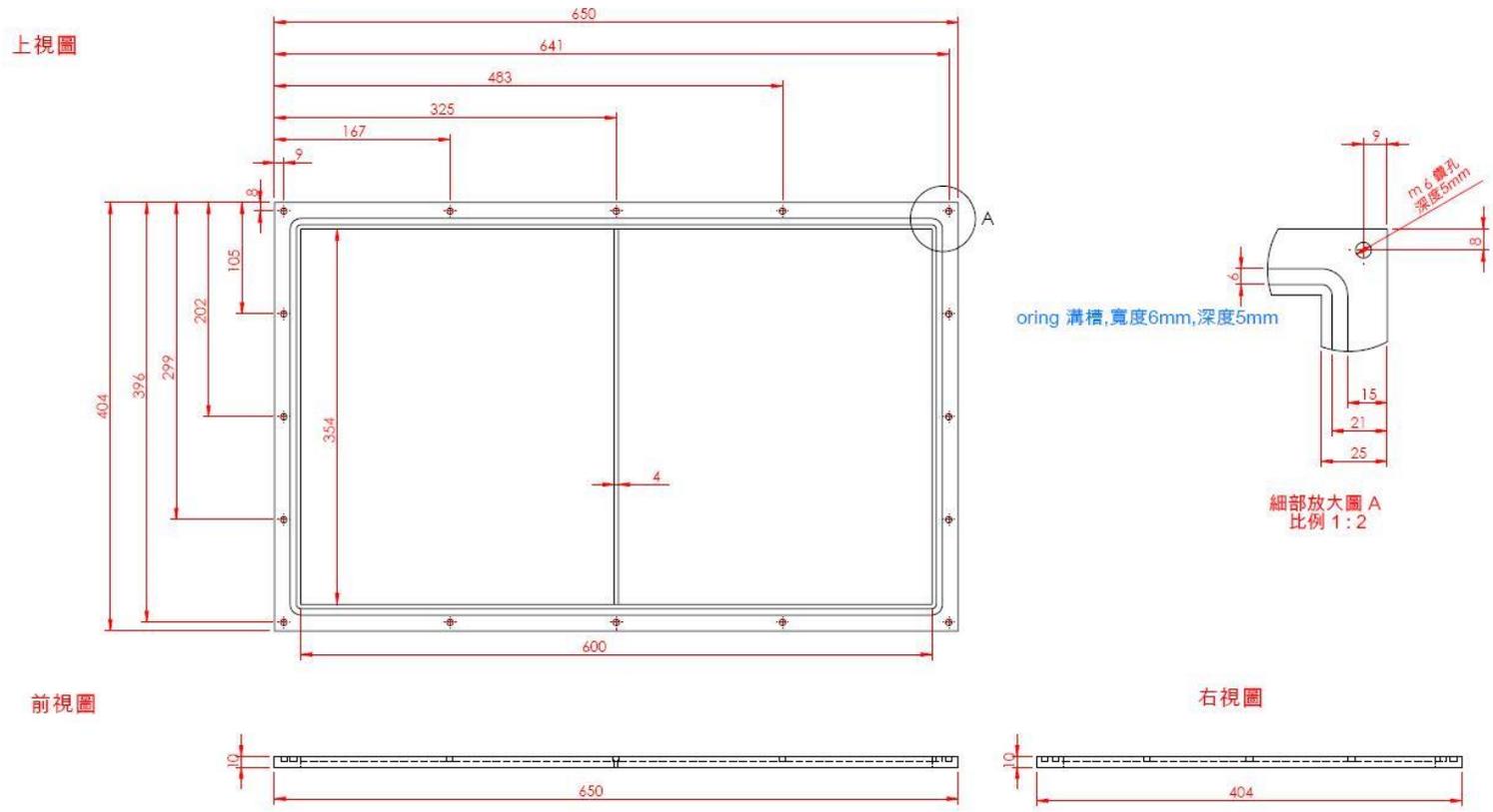
圖八、上腔外框尺寸圖

5 - 側腔Frame尺寸圖



圖九、側腔外框尺寸圖

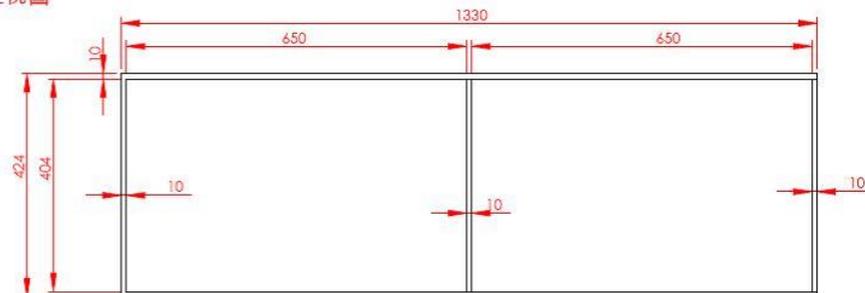
4 - 中腔Frame尺寸圖



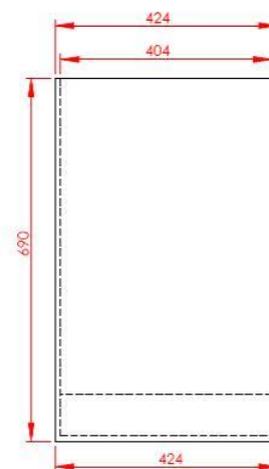
圖十一、中腔外框尺寸圖

3 - 腔體本體尺寸圖

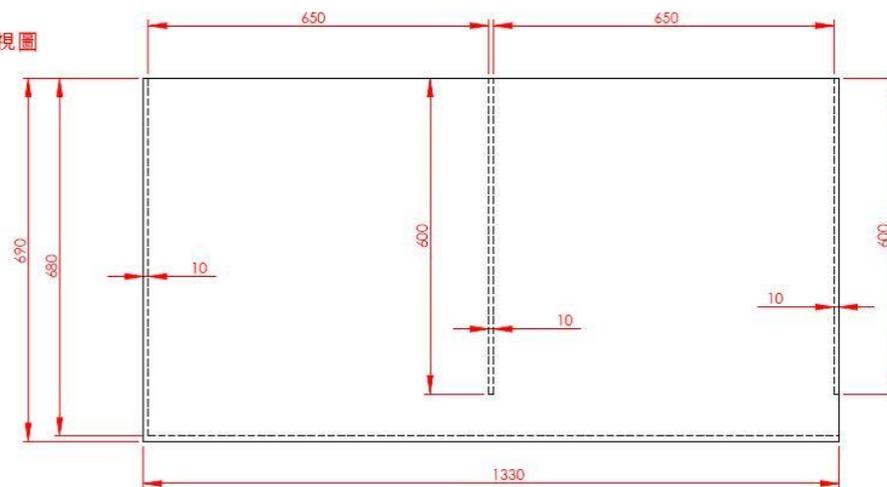
上視圖



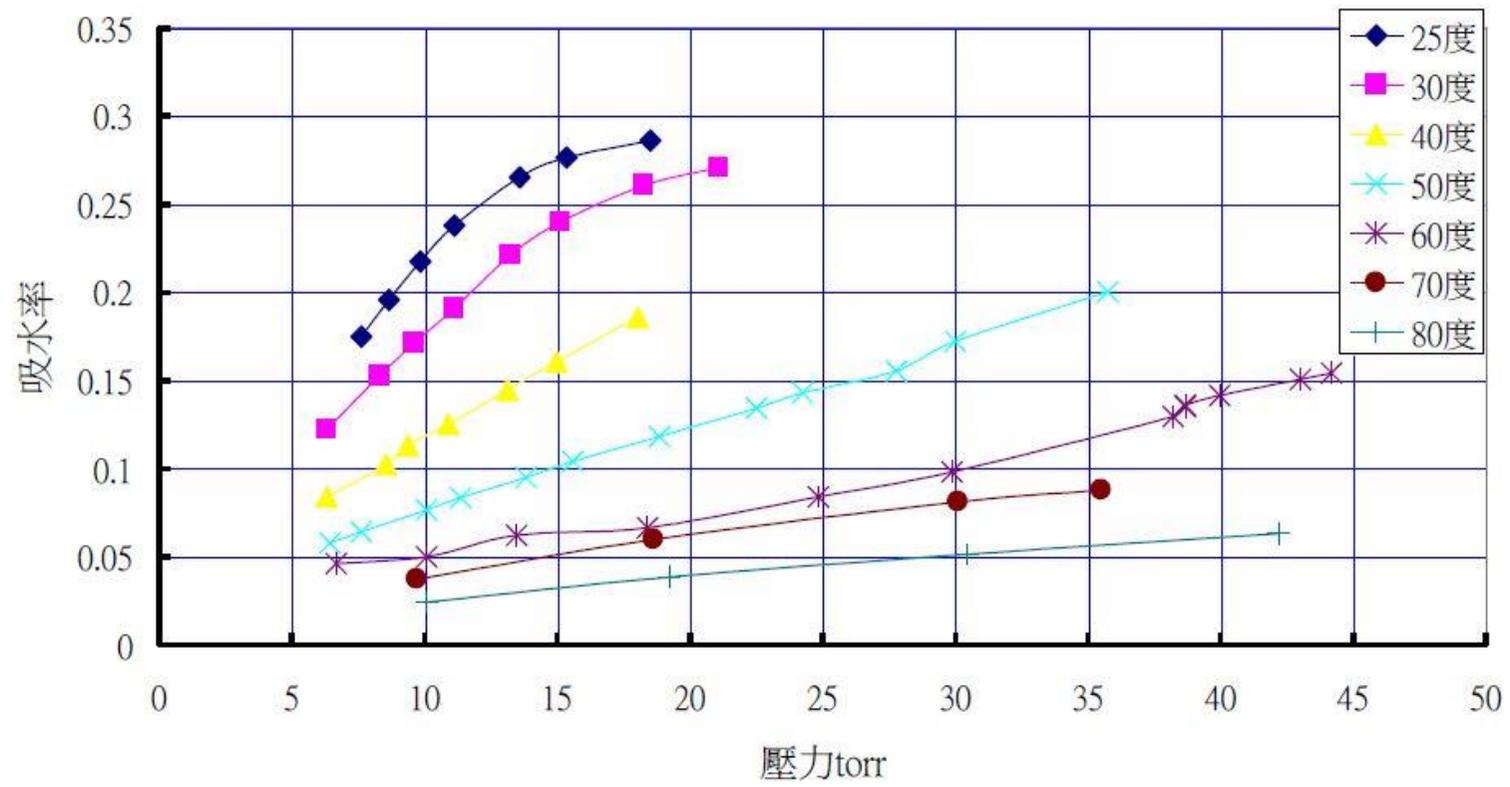
右視圖



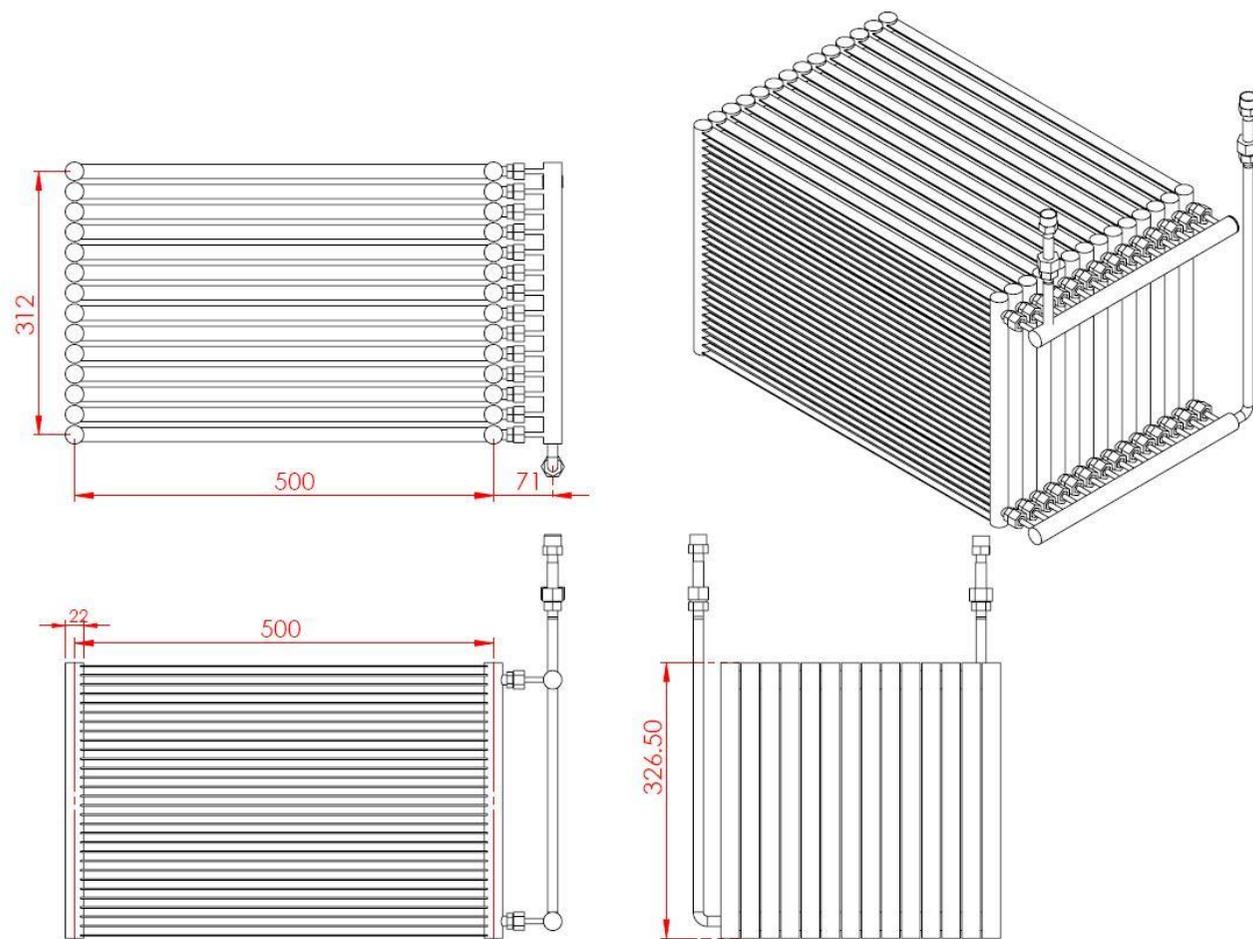
前視圖



圖十二、腔體本體尺寸圖



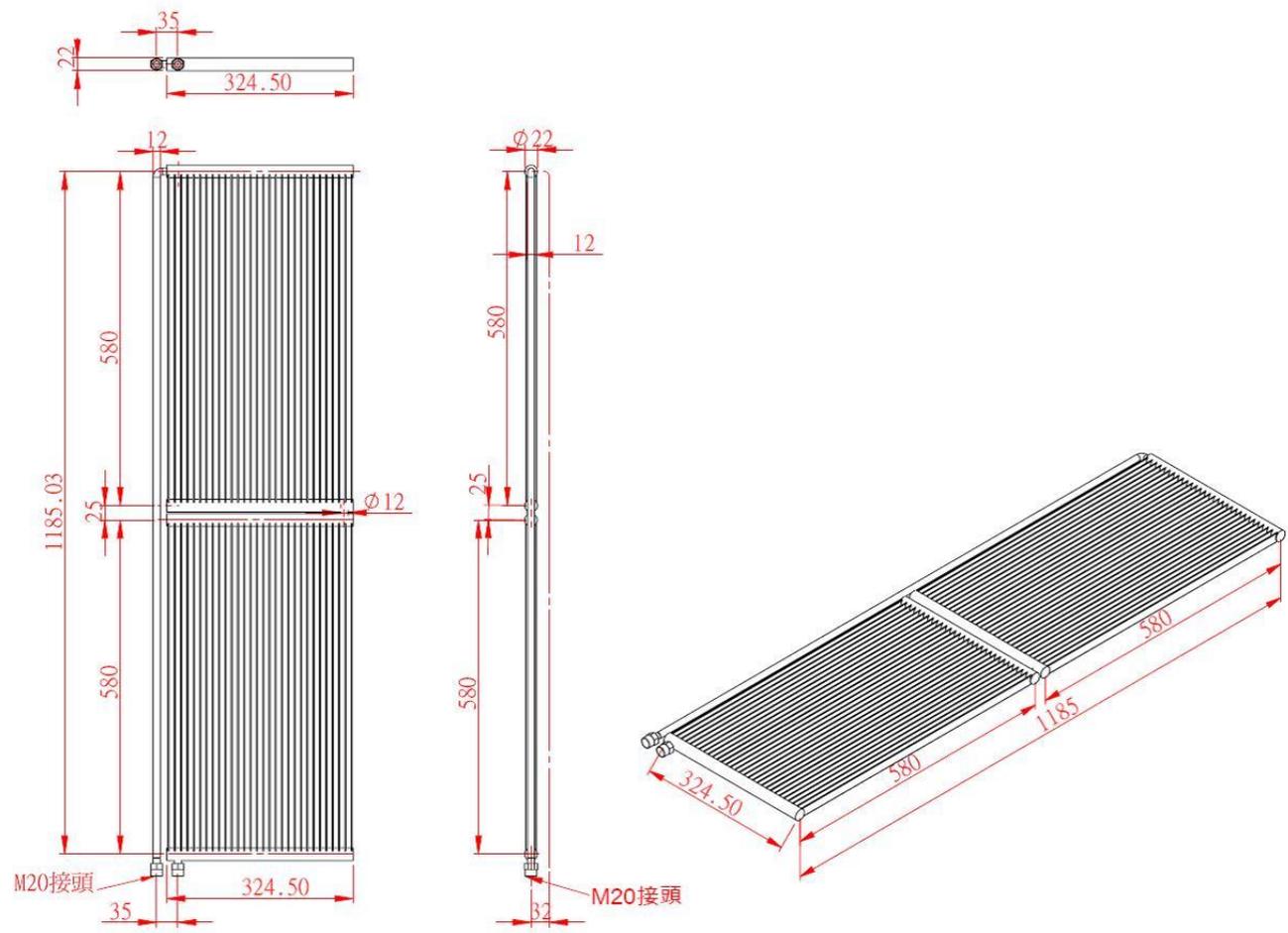
圖十三、矽膠-水等溫平衡吸附曲線(工研院)



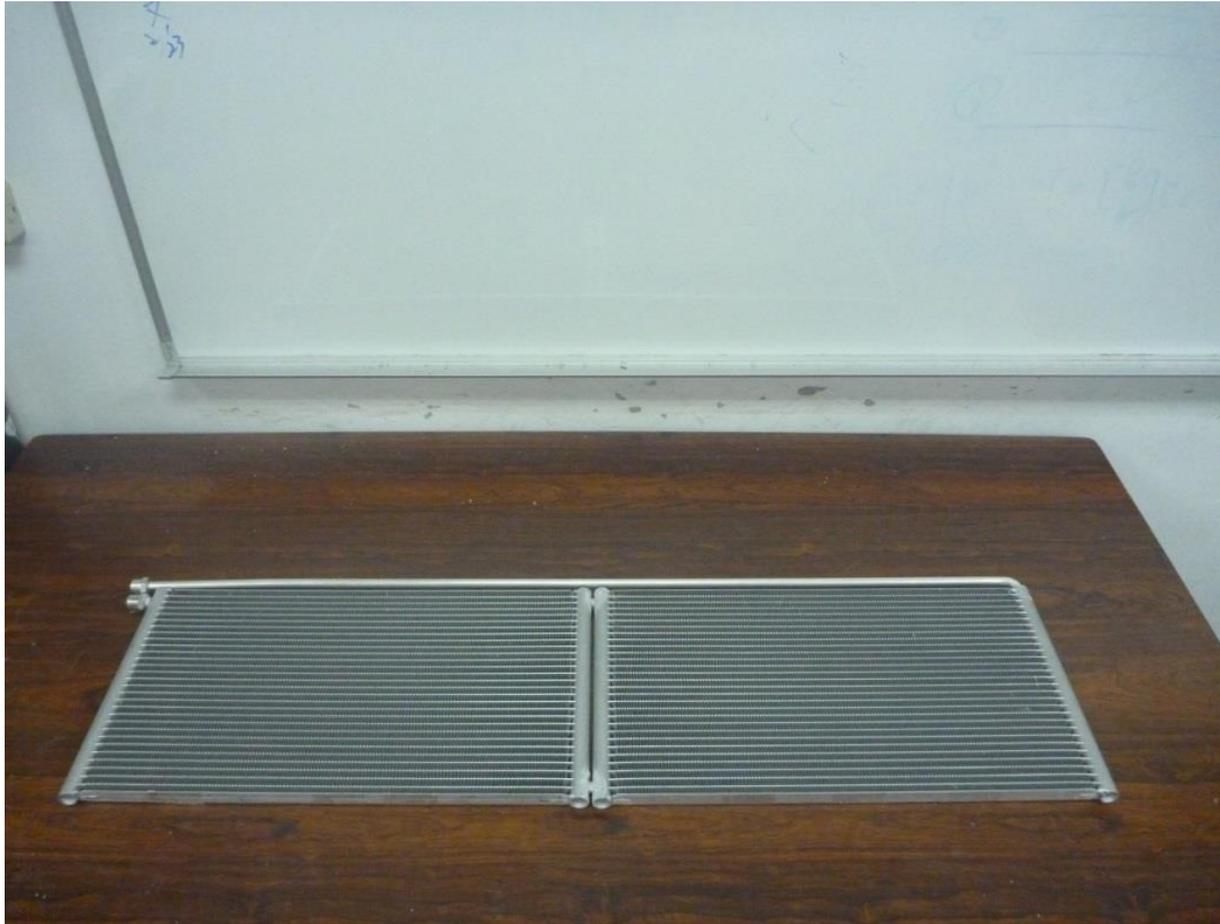
圖十四、吸附床尺寸圖



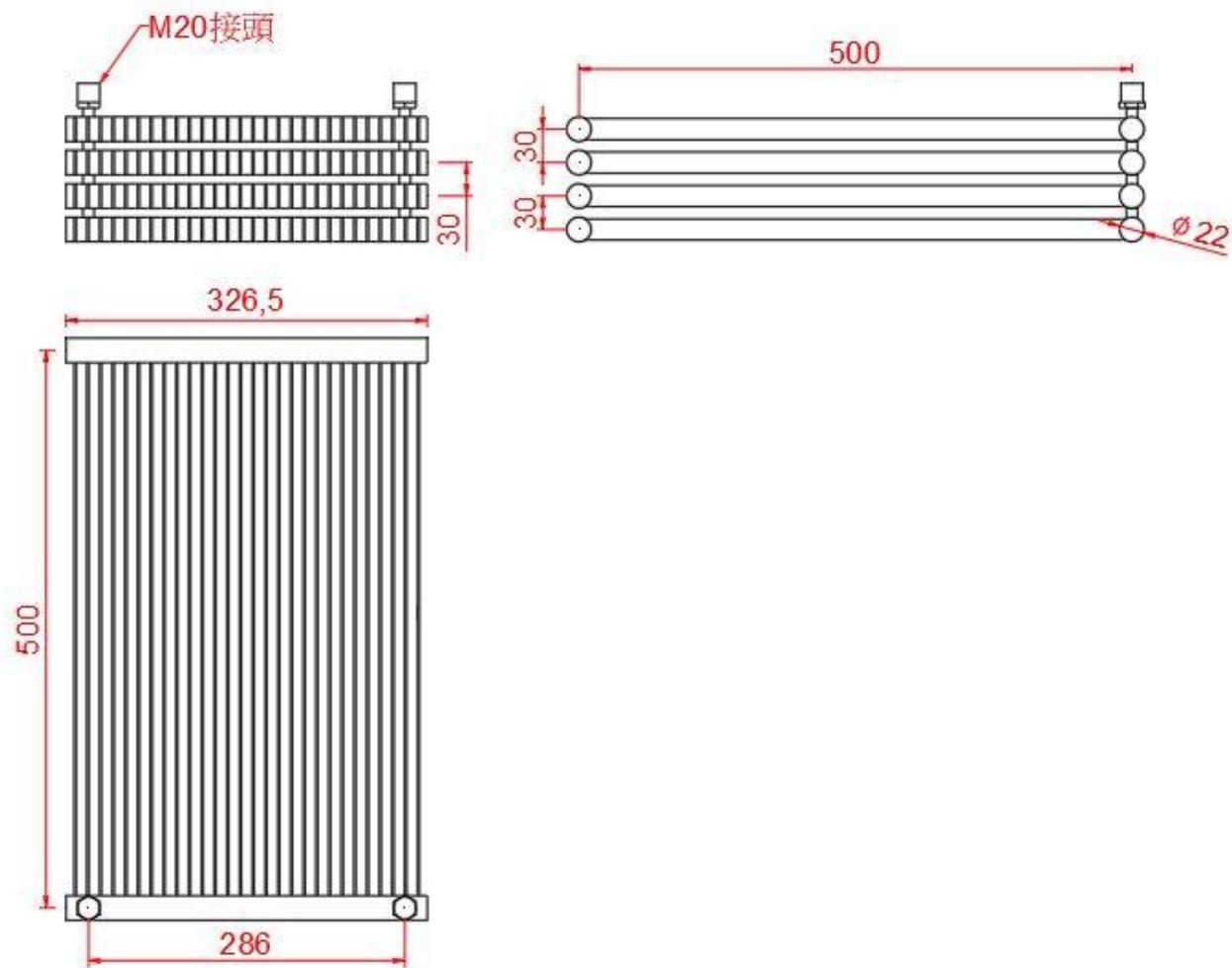
圖十五、吸附床實體圖



圖十六、蒸發器尺寸



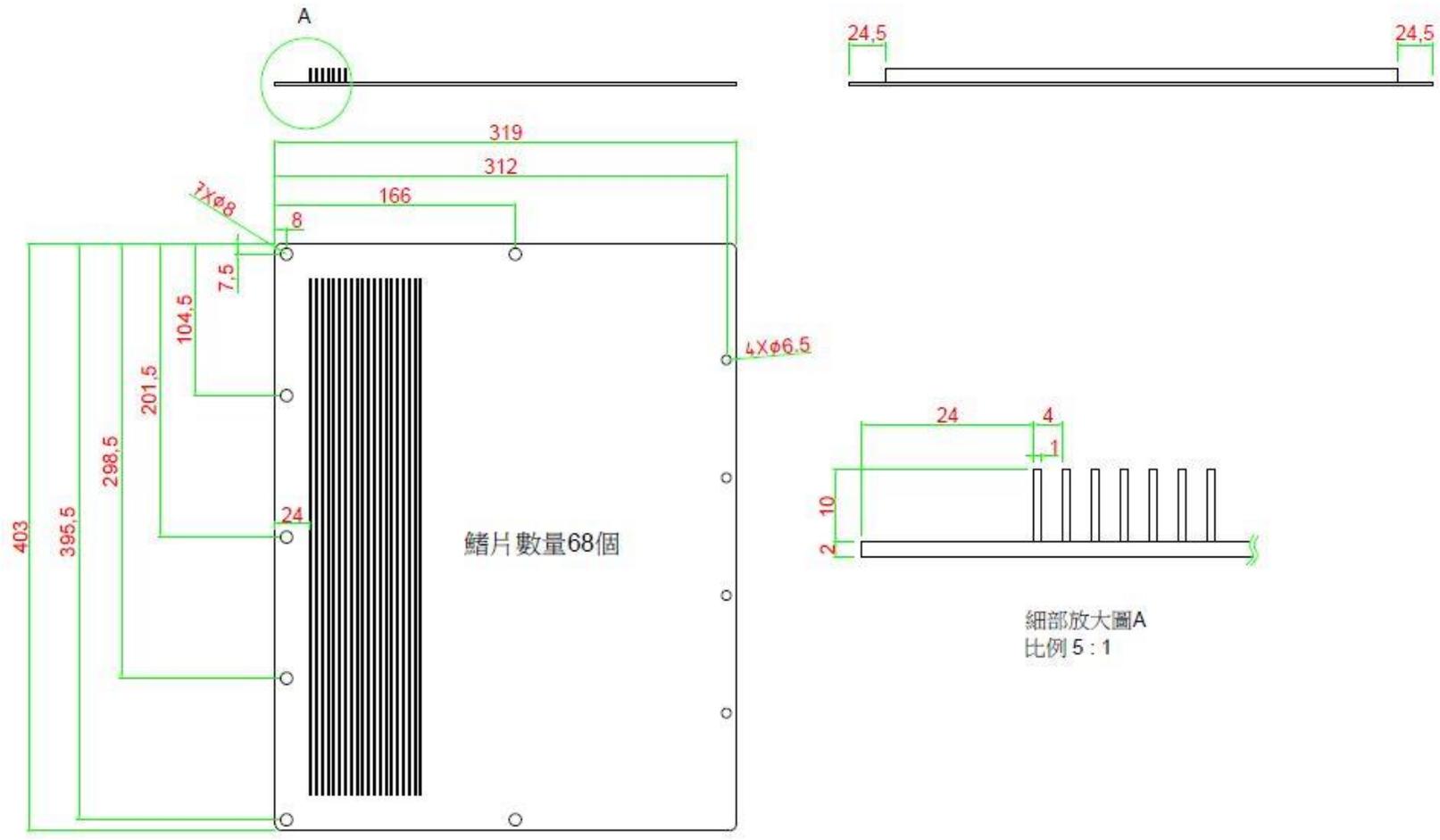
圖十七、蒸發器實體圖



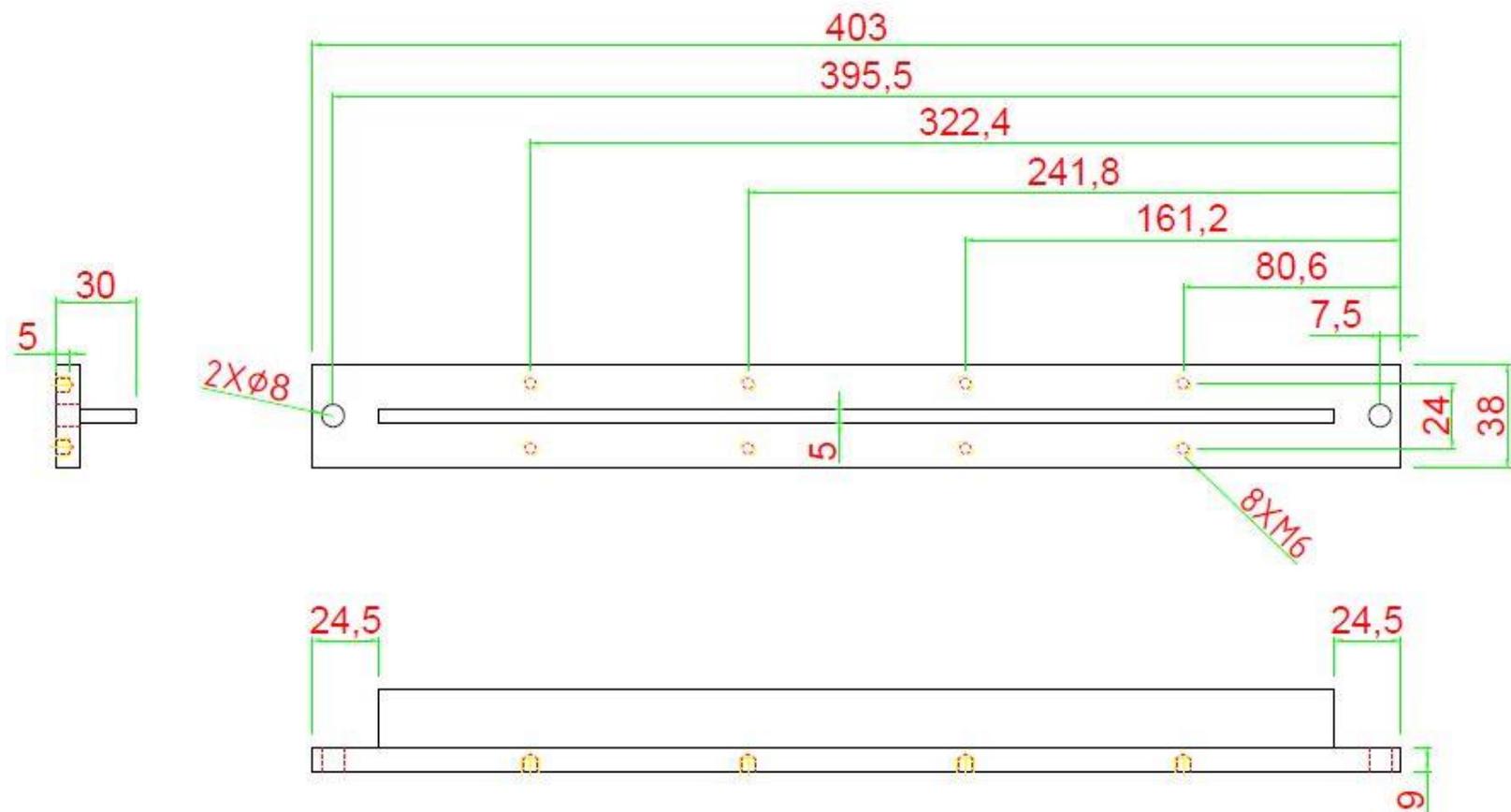
圖十八、冷凝器尺寸圖



圖十九、冷凝器實體圖



圖二十、熱虹吸隔板尺寸圖



圖二十一、補強板尺寸圖



圖二十二、熱虹吸補強板組合圖



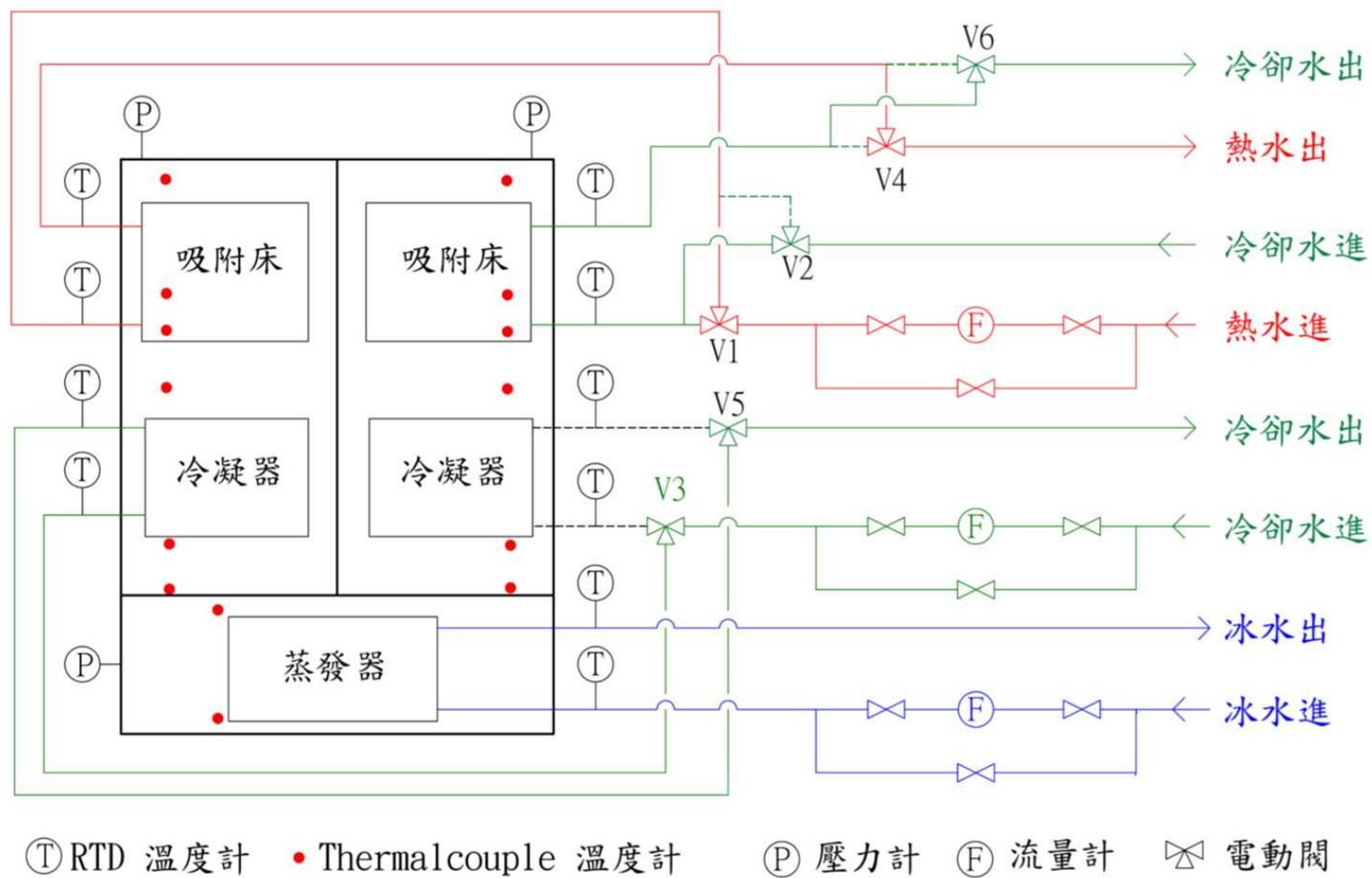
圖二十三、系統實體圖(未保溫)

二、實驗系統

本吸附式製冷機之實驗系統主要包括三個水路循環系統，熱水循環系統、冷卻水循環系統以及冰水循環系統。冰水持續通入蒸發器，藉由吸附過程降溫，使出口達到低溫。左床及右床的冷卻水及熱水循環系統由六個 PLC 電磁控制水閥(V1~V6)控制水迴路如圖二十五，V1、V4 控制通入吸附床之熱水進、出口方向，V2、V6 控制通入吸附床之冷卻水進、出口方向，V3、V5 控制通入冷凝器之冷卻水進、出口方向。

PLC 控制面板上旋鈕 one、two、three (如圖二十五)分別控制水閥切換時間 3 分鐘、6 分鐘、9 分鐘，當設定時間一到，自動切換水閥

V1~V6，通入左右吸附床之冷、熱水迴路交換，冷卻水通入進行脫附過程之腔體內的冷凝器，使左右床交換吸、脫附過程，以雙床循環達到連續製冷。



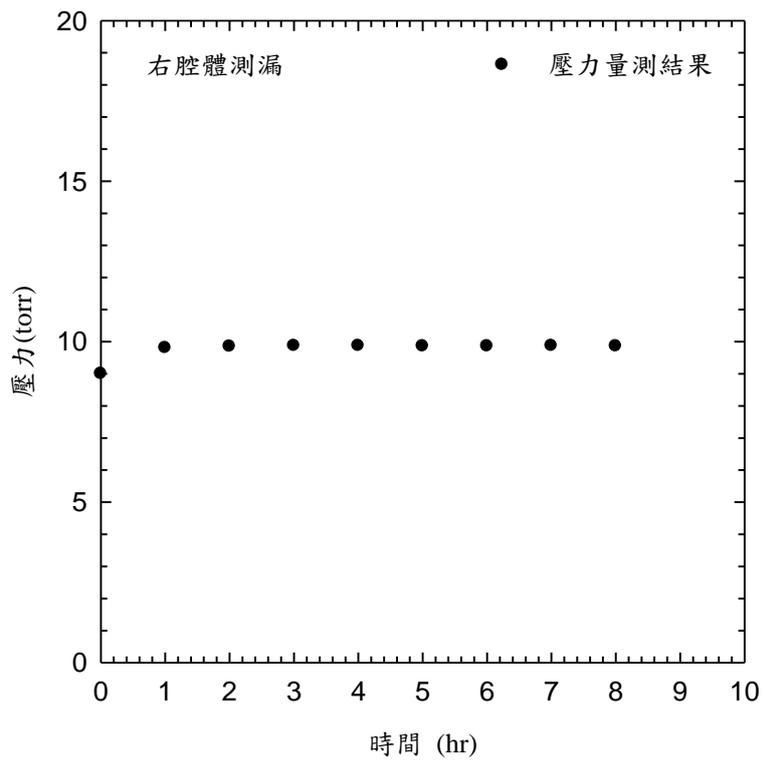
圖二十四、實驗系統水迴路圖



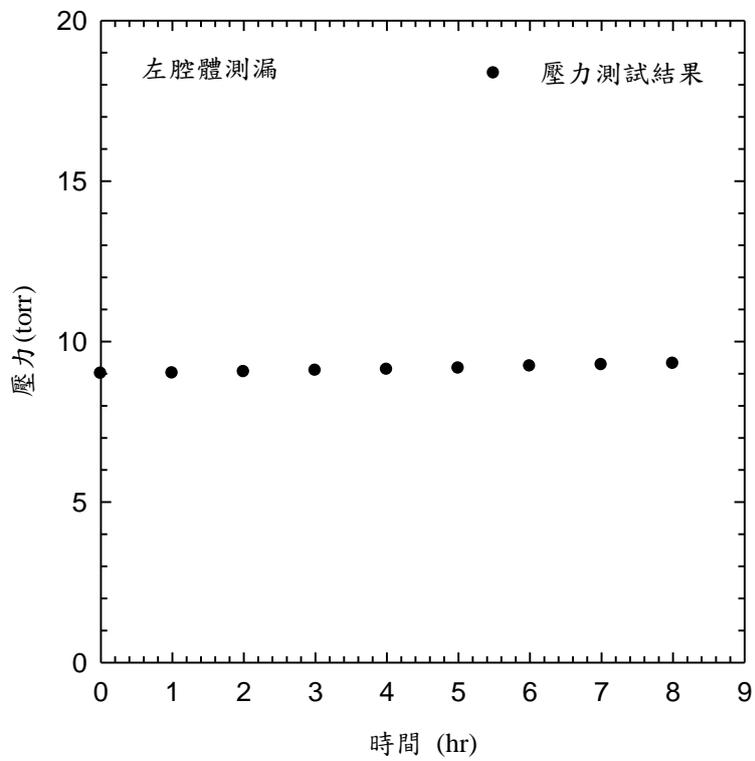
圖二十五、PLC 控制面板實體圖

三、系統洩漏測試

完成之吸附式製冷機經分別對左、右各腔體進行洩漏測試，測試結果如圖二十六及圖二十七所示。右腔體及左腔體在壓力 10 torr 之情況下，經過 8 小時之後，洩漏壓力分別為 0.3 以及 0.06 torr 左右，顯示出密封狀況良好。在未來一般測試期間內，所洩漏值對系統制冷性能之影響，皆可忽略。



圖二十六、右腔體洩漏測試結果



圖二十七、左腔體洩漏測試結果

參、主要發現與結論

本研究預定以核能所自行開發的鋁渣回收環保沸石作為吸附材料，製作吸附床試體，完成製冷能力 2 kW 之雙床吸附式系統。目前整體吸附式系統皆已裝置完成，並經洩漏測試，結果顯示密封狀況良好，對系統製冷性能不造成影響。由於核能所製作完成之沸石量尚不足，因此本系統先以一般商用系統之矽膠為吸附材。未來將利用核能所所建置之吸附性能測試系統，進行不同工作流體溫度之製冷性能測試。

肆、參考文獻

- [1] 王智正、謝鎮州、張文師、唐震宸，2004，「熱能驅動之固體吸附式製冷實驗研究」，中國機械工程學會第二十一屆全國學術研討會，高雄，台灣。
- [2] 楊建裕、黃威智、陳又維、蔣政栓，2008，「小型太陽能吸附式空調系統研究期末報告」，國科會專題研究計畫（NSC 96-ET-7-008-001-ET）。
- [3] Wang, D. C., Xia, Z. Z., Wu, J. Y., Wang, R. Z., Zhai, H., Dou, W. D., 2005, “Study of a novel silica gel-water adsorption chiller, Part I. Design and performance prediction,” International Journal

Refrigeration, Vol. 28, pp.1073-1083.