

中華民國第 64 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國中組 生活與應用科學(一)科

佳作

032811

廢熱！啟動！節能從廚房開始！

學校名稱： 新北市立溪崑國民中學

作者： 國二 李芷樂	指導老師： 高國慶 李星黎
-------------------	-----------------------------

關鍵詞： 廢熱、熱交換、物聯網

摘要

根據本研究問卷調查結果，顯示本學區內約有 58% 家庭藉由將水煮沸再放涼的模式來製造飲用水，因此從節能減碳的角度上，探討如何回收熱水降溫所釋放出的熱量將有助於環保。本研究運用熱水散失於環境中的廢熱來提高冷水煮沸前的溫度，以減少後續加熱所需能量。於實驗中發現縮小容器體積與熱管長短搭配，並在隔熱裝置及冷熱水鍋之間加上鋁箔罩效果最好，可在 1 小時內節省超過 43% 的能源！甚至只需 15 分鐘就可節能 30%！最後，利用能源採集技術設計可自我供電的低功耗 IoT 使用者介面，實時監測水溫狀況，再透過機器學習方法，提供預估的熱交換等待時間的功能，最後將訊息以 Wi-Fi 傳至手機 APP 中顯示。

壹、前言

一、研究動機

每天家裡燒好開水，都需要等上一段時間才有溫度剛好的水可喝，因此我總想著要如何讓熱水放涼的時間縮短，而且熱水降溫過程中廚房好溫暖，夏季時廚房會因此更悶熱。晚餐時刻家人將冰箱裡的料理拿出來要加熱食用時，為了不消耗過多的能源，總會在室溫下回溫後再做加熱的動作。因此我思索能否「回收剛煮沸的熱水降溫過程中所釋放的熱量」，幫助食材回溫快些，或者讓準備用來料理晚餐的冷水提高溫度，節省後續烹調所需的能源，進而達成節能的效果，連帶也能讓熱水加速降溫，不用等太久就有溫水可喝。由於先前有人探討利用有限的成本與材料設計出能在一般家庭廚房中操作的設備，並且達到了 30% 的節能效果(李芷樂、李芷蘋，2023)。激發了我的好奇心，我想挑戰目前所學的知識與能力，熱交換的極限在哪裡？如何能讓裝置更實用？如果可以預估所需時間就更棒了。

二、研究目的

設計出可將剛煮沸熱水與室溫中待加熱冷水進行熱交換的裝置，並且期望達到下列成效：

(一)利用熱水降溫所釋放的熱量，有效率提高冷水溫度，節省後續加熱冷水所需的能量。

(二)使用者可以經由介面掌握熱交換的進度。

三、文獻回顧

全球暖化與氣候變遷是當今人類無法迴避的議題，人類活動所排放的二氧化碳是造成暖化的因素之一。去年第 28 屆聯合國氣候變遷大會(COP28)中，達成擺脫化石燃料的歷史性決議(陳奕偉，2023)。此外，在 2022 年，台灣的能源有 97.3% 仰賴進口(經濟部能源署，2023)，自產能源比例極低。因此，能源轉型是必要的趨勢，除了發展替代能源外(開源)，減少能源消耗也必須同時進行(節流)。而廢熱回收再利用可以同時達成這兩個方向。

一般而言，廢熱回收需要大溫差(200°C 以上)才有價值(吳世國，2019)，因此關於廢熱回收的應用大多是工業方面。針對一般家庭所產生廢熱回收再利用的資料很少。熱電效應方面也是如此，需要大溫差(600°C~700°C)時才有 10% 的轉換效率(黃振東、徐振庭，2013；吳世國，2019；郭雅欣，2021)，同樣少見於一般家庭中。

然而根據李芷樂與李芷蘋(2023)的研究，在隔熱環境中，用少量水為工作流體主動循環於冷熱水鍋外進行熱交換，可以達成 30% 的節能效率。我認為家庭廢熱雖然能量少，但如果能

有效回收利用，仍然可以發揮聚沙成塔之效。

四、實驗裝置設計原理

為了讓本研究效能提升(包括廢熱回收比例與回收的時效)，本研究必須設計出「減少散熱的隔熱裝置」與「有效率的熱交換裝置」兩種裝置。兩者的設計原則是相反的，而設計原則可以從傳導、對流與輻射三個面向來思考。

(一)隔熱裝置的設計(原則：抑制傳導、對流與輻射)

1.表面顏色的選擇

表面顏色會影響熱輻射，根據熱輻射公式

$$P=\epsilon\sigma AT^4$$

物體的輻射功率：P (W)
物體的輻射係數： ϵ
斯特凡-波茲曼常數： $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ (W/m}^2 \text{ K}^4)$
物體的絕對溫度：T (K)
物體的表面積：A (m ²)

原則上，淺色或亮面的熱輻射係數低，也就是不容易經由輻射散失熱量。李芷樂與李芷蘋(2023)使用白色保麗龍箱為隔熱

	白色保麗龍	亮面鋁箔
輻射係數	0.6	0.05

裝置，然而亮面的鋁箔輻射係數更低，是否可以減少散熱？

2.隔熱材質的選擇

我們生活中常見到以保麗龍或是泡棉為材質製作而成的隔熱裝置。它們的導熱係數低以及內部有許多孔洞分別可以抑制熱的傳導與對流。然而不耐高溫是它們的共同問題。李芷樂與李芷蘋(2023)也有在報告書中提及保麗龍在熱交換操作過程中有異味。本實驗裝置未來希望能真正落實於生活中，在不影響隔熱效果的前提下，選擇耐熱的隔熱材質。經比較後決定使用厚度約 2.5 公分的陶瓷纖維毯，其特性是耐高溫、熱傳導效率差。

(二)熱交換裝置的設計(原則：熱傳導快、並利用液體對流的特性輔助熱傳播)

熱交換裝置的功能是要快速將熱量從高溫送往低溫。李芷樂與李芷蘋(2023)已經發現利用水為介質(以下稱為介質水)，快速傳播熱，並且要減少介質水以避免被介質水吸收太多熱量，如此節能效率才會高。此外，液體還可以利用對流方式進行熱交換，介質水設置在適當位置，對效率的提升有幫助。本研究在構思與嘗試的階段，曾參考李芷樂與李芷蘋(2023)的方法加以改良，以水為介質，利用銅管捲繞在熱水鍋外 2 圈，位置為液面高度下，冷水鍋維持用淺鍋盛裝介質水，再用抽水馬達使介質水在冷、熱

水鍋外循環進行熱交換，如圖 1。測試結果雖然節能效果超過 30%，然而檢討分析發現這個模式是有問題的：運作時，抽水馬達持續消耗能量；且須要一定量的介質水才能運作，水的比熱大，會嚴重影響熱量回收與交換效率。所以我認為必須找更適合的導熱材料進行實驗。

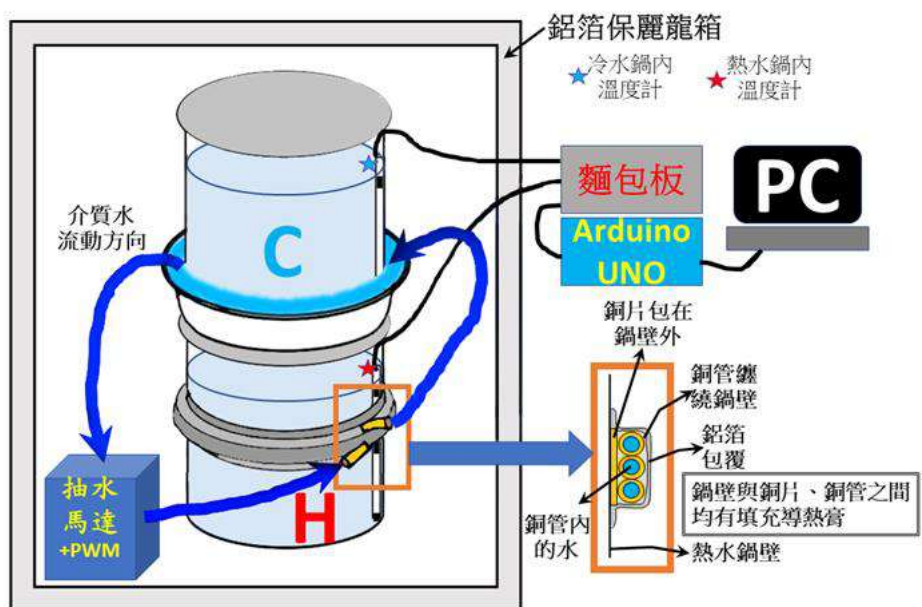
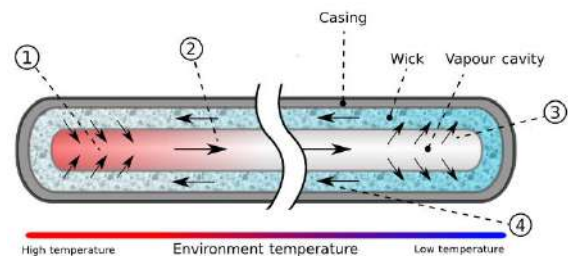


圖 1. 利用抽水馬達使介質水在冷、熱水鍋外循環進行熱交換的裝置

「熱管(Heat pipe)」(圖 2)是中空的封閉金屬管體(例如銅)，內部為低壓狀態並填入適當工作流體(例如水)。利用低壓下液體容易汽化吸收大量汽化熱的原理，迅速將熱端的熱量運送到冷端，水汽在冷端冷卻凝結成液態水後再利用重力與毛細現象回流到熱端。具有質輕，且導熱快速(導熱速度可達純鋁的 50~100 倍)，不額外耗能特性，非常適合做為本研究的導熱介質(高柏科技，2024)。



Heat pipe thermal cycle
 1) Working fluid evaporates to vapour absorbing thermal energy.
 2) Vapour migrates along cavity to lower temperature end.
 3) Vapour condenses back to fluid and is absorbed by the wick, releasing thermal energy
 4) Working fluid flows back to higher temperature end.

圖 2.熱管說明圖

(圖片來源：維基百科，授權說明詳見「貳、研究設備及器材」)

(三)冷熱水鍋的擺設

在李芷樂與李芷蘋(2023)中有提到只需「熱鍋在下」與「冷鍋在上」相疊，在適當的隔熱環境中，就可以因鍋具本身傳播熱量而達到超過 20%的節能效果(須耗時 4

小時)，顯示鍋具的導熱也是有助於熱交換。所以本研究中的鍋具均透過熱下冷上的堆疊方式進行實驗。同時使用 2mm 圓形平面鋁板為鍋蓋，增加冷、熱水鍋接觸面積。但為了操作上的方便，熱水鍋蓋與冷水鍋底接觸面不塗抹導熱膏。

(四)使用者介面的設計

在探討熱交換裝置實驗過程中，因為要隨時監測冷熱水熱交換的狀況，所以放置溫度感測器於鍋內水中。然而以飲用水衛生考量，在實用階段，鍋內不宜有溫度感測器，而使用者將如何得知熱交換是否完成，因此有另外設計使用者操作介面負責鍋外溫度偵測與顯示模組的必要。

基於節能的立場，我希望使用者介面可以利用「能源採集」(Energy Harvesting)自我供電。能源採集是一種從周遭環境中收集能量(光能、熱能或動能)並轉變成電能的技術。雖然獲得能量不多，但可以持續為低耗電量的裝置供電，應用在物聯網(IoT)裝置上，可以不需額外的供電，長期下來，也能減少不少碳排與成本(Maurizio, 2020; Stephen, 2021; Maurizio, 2022)。

李芷樂與李芷蘋(2023)已有嘗試利用熱水鍋與環境溫差進行小規模的發電，若能將此電能經由適當方式儲存，再供給裝置偵測溫度並顯示目前熱交換的狀況，相信能讓使用者更方便掌握。

Maurizio(2020)在文章中提到 BQ25570 晶片適合用於能量採集;能收集熱電晶片與太陽能板所產生的微瓦(microwatts)至毫瓦(milliwatts)的能量，還具備一個電源管理系統提高電壓輸出。

由於所能採集到的電能不多，設計使用者介面使用的電子元件也須以低功耗為考量。控制器我使用 ESP32-WROOM-32，特點是低成本，低功耗，整合了 Wi-Fi 和藍牙。更重要的是，在系統等待的時間中，可以設定為睡眠模式，最低僅需 10 μ A 的電流(趙英傑，2021)。

儲能元件我選擇超級電容，具有內電阻小、電路設計簡單、無過度放電、循環壽命長等優點(金碗國際，2024)。

顯示元件使用電子紙(ePaper)，電子紙是使用電泳式電子墨水(Electronic Ink)塗在屏幕表面上形成超輕薄的顯示屏，其原理是以帶正電或負電的有色小球，當外加電場改變時，小球會根據其電性與外加電場上下移動，以此顯現出不同的圖樣(圖 3)。更重要的是電子紙僅有在更改資訊時需要耗電，更新顯示資訊後即可切斷電源，螢幕訊息不會消失。

由於 ESP32 內建 Wi-Fi 功能，所以可以很輕易地開發物聯網裝置，將即時的熱

交換資訊透過網路傳到智慧手機上，讓使用者可以掌握進度，不必在裝置旁邊等待，也更能適合現在人的生活習慣。

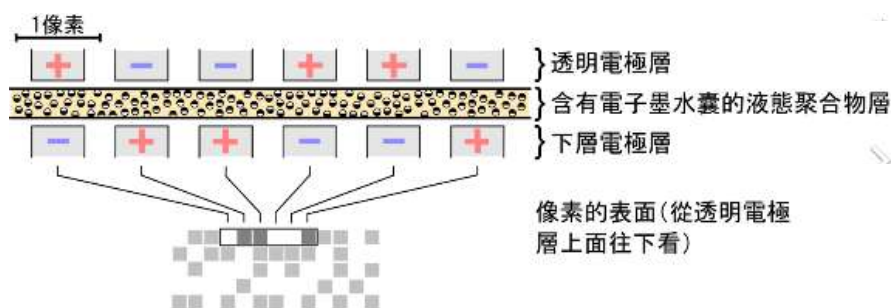


圖 3.電子紙原理說明圖 (圖片來源：維基百科，授權說明詳見「貳、研究設備及器材」)

五、實驗中使用到的名詞定義、代號與圖例符號說明

(一)名詞定義

名詞	定義
冷水鍋	直接從室溫中水龍頭流出的水，盛裝 2000 公克於直徑 16cm 或 14cm 的不鏽鋼鍋中
熱水鍋	燒水壺盛裝 2000 公克的水，置於瓦斯爐加熱到沸騰後倒入直徑 16cm 或 14cm 的不鏽鋼鍋中，此鍋即為熱水鍋

(二)代號說明

名詞	代號	說明
冷水鍋初溫	T_{Co}	冷水鍋的水在熱交換前，鍋內 2 支溫度感測器讀數的平均值
冷水鍋最大溫差	ΔT_{CMAX}	熱交換後，冷水鍋內 2 支溫度感測器平均的最大值減去 T_{Co} ，須持續超過 1 分鐘
冷水鍋達最大溫差所需時間	t_{CMAX}	熱交換後，溫差到達 ΔT_{CMAX} 所需的時間

(三)圖片代號或圖例符號說明

圖片代號	代表物品	圖例符號	代表意思	圖例符號	代表意思	圖例符號	代表意思
H	熱水鍋	H_{top}	熱水鍋的表層溫度	H_{mid}	熱水鍋的中層溫度	H_{bot}	熱水鍋的底層溫度
C	冷水鍋	C_{top}	冷水鍋的表層溫度	C_{bot}	冷水鍋的底層溫度	PC	負責處理數據記錄與分析的電腦

(四)節能百分比計算公式 (公式與圖片均引用李芷樂、李芷蘋(2023))

節能百分比

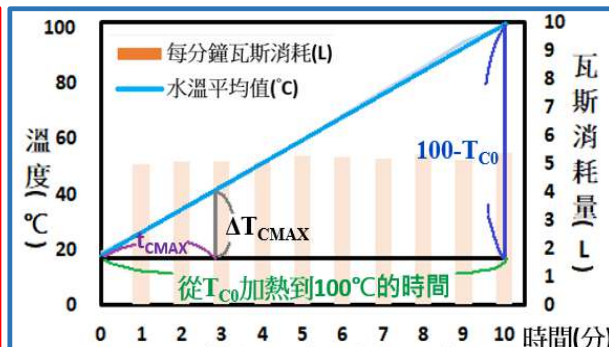
$$= \frac{\text{節省的能量}}{\text{總能量}} \times 100\%$$

$$= \frac{\text{單位時間瓦斯流量} \times \text{從 } T_{Co} \text{ 加熱到 } T_{CMAX} \text{ 的時間} \times \text{瓦斯熱值}}{\text{單位時間瓦斯流量} \times \text{從 } T_{Co} \text{ 加熱到 } 100^{\circ}\text{C} \text{ 的時間} \times \text{瓦斯熱值}} \times 100\%$$

$$= \frac{\text{從 } T_{Co} \text{ 加熱到 } T_{CMAX} \text{ 的時間}}{\text{從 } T_{Co} \text{ 加熱到 } 100^{\circ}\text{C} \text{ 的時間}} \times 100\%$$

$$= \frac{t_{CMAX}}{\text{從 } T_{Co} \text{ 加熱到 } 100^{\circ}\text{C} \text{ 的時間}} \times 100\%$$

$$= \frac{\Delta T_{CMAX}}{100 - T_{Co}} \times 100\%$$



廢熱！啟動！ 節能從廚房開始！

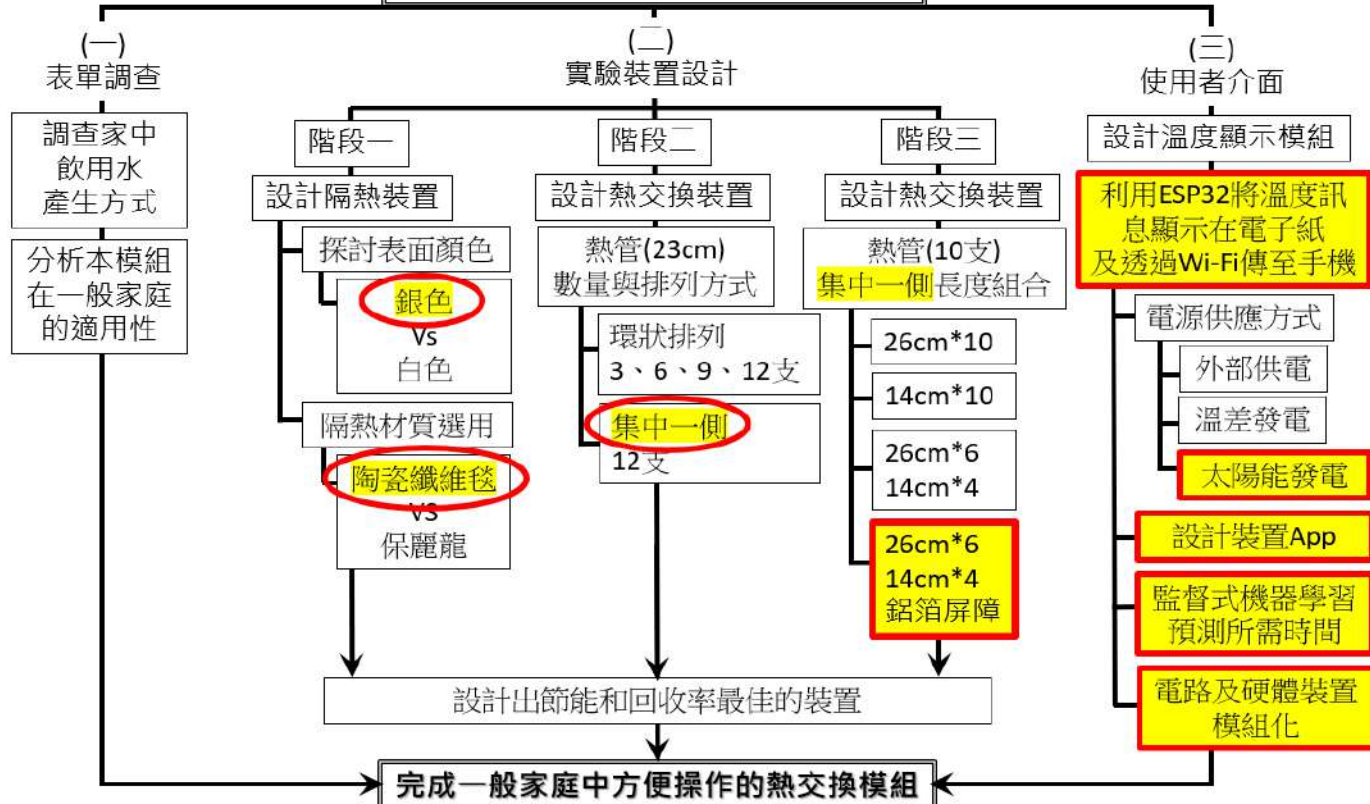


圖 4.本研究的架構圖，分為問卷調查、實驗裝置設計與使用者介面三個部分，圖中紅色框和黃底的部分為經實驗或測試後決定採用的方式。

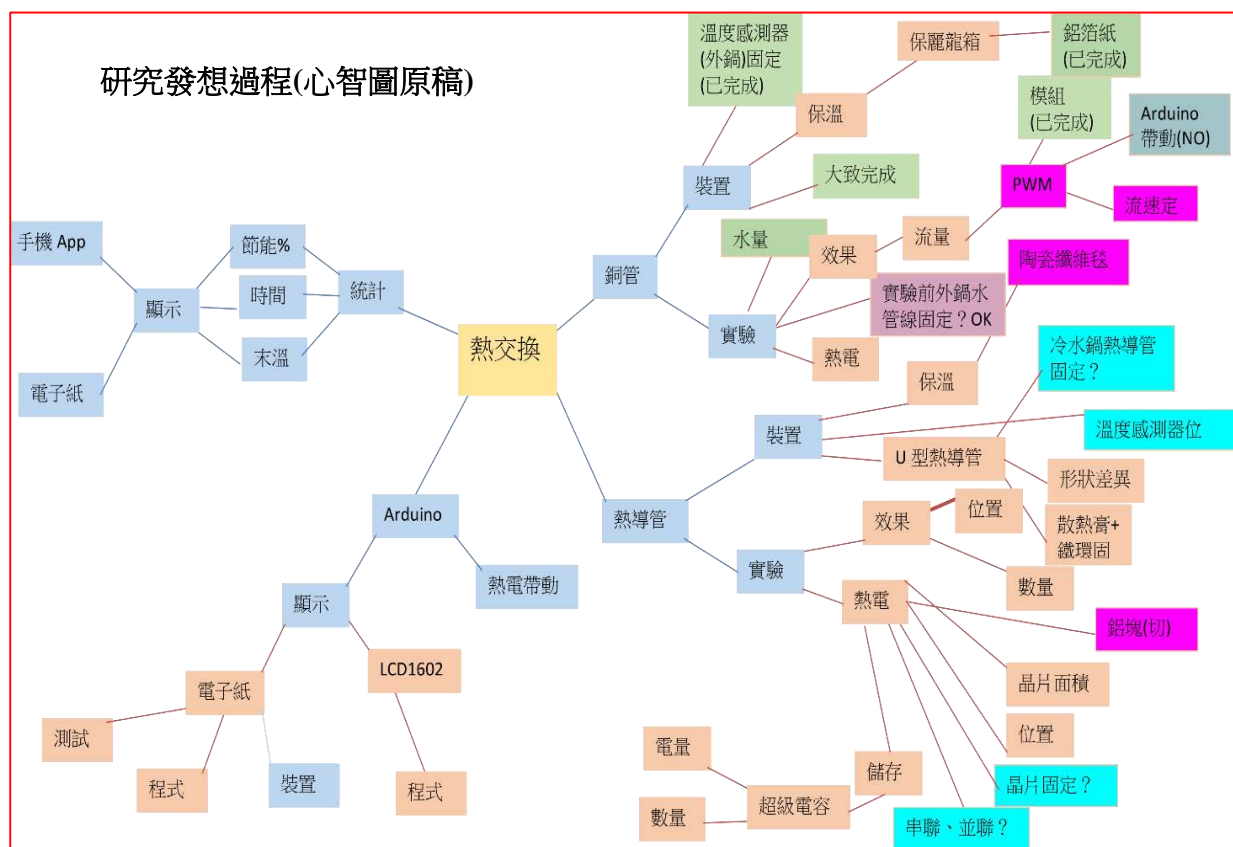


圖 5.本研究由生活的經驗與參考李芷樂、李芷蘋(2023)的研究開始發想。因為是最初的想法，所以內容和圖 4 實際的研究架構圖略有差異。

貳、研究設備及器材

一、硬體

Arduino UNO 板、ESP32 WROOM 32 開發板、溫度感測器 DS18B20、玻璃管溫度計(註 1)、熱電晶片(127200)、太陽能板、超級電容(5.5V, 5F 與 20F)、BQ25570、白色保麗龍箱、鋁箔保麗龍箱、隔熱裝置(註 1)、鋁條、熱管、LCD1602、電子紙 (1.52 吋、2.9 吋)、熱顯像儀(Seek thermal compact Pro)、DC-DC 升壓模組 (0.9V~5V)、示波器(DS-100)

註 1.自製溫度計與隔熱裝置的製作過程

1.玻璃管溫度計(圖 6A)自製方式：

利用玻璃管改造，以電鑽鑿洞並嵌入 DS18B20，再封口防水。

2.隔熱裝置(圖 6B)自製方式：

(1)使用厚紙板製造模型，表面貼上防水且耐高溫的鋁箔玻璃纖維布(溫度範圍 -70°C~300°C)，隔熱裝置的壁內填充 2.5cm 厚的陶瓷纖維毯。

(2)整體裝置分為三個部份：盛裝熱水鍋的下半部筒狀部分、包圍冷水鍋的可活動上半部分，以及最上方的蓋子，外圍以白色魔鬼氈束帶固定。

(3)隔熱裝置的內側直徑 18.2cm，高度 35.7cm。冷水鍋和熱水鍋堆疊在內進行實驗，與 PC 連接的訊號傳輸線可從上、下半部的裝置接縫處伸出。

二、軟體

Arduino IDE、Excel、PLX-DAQ release 2.0、LINE Notify、APP Inventor、Python

三、本研究拍攝的器材照片均由作者 / 第一、第二指導老師拍攝。

四、本研究實驗裝置繪製圖均由作者 / 第一、第二指導老師使用 Powerpoint、小畫家 3D、Photoshop、Excel 及 Python 製作而成。

五、圖 2、圖 3 取自維基百科，影像已經由創作者與原始版權持有者釋出至公有領域。此授權適用於全世界。因此，重製、創作衍生或合適地商業使用，不需創作者同意。

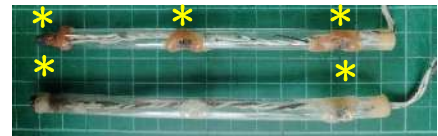


圖 6A.本研究自製的玻璃管溫度計
「*」是溫度感測器 DS18B20 的位置

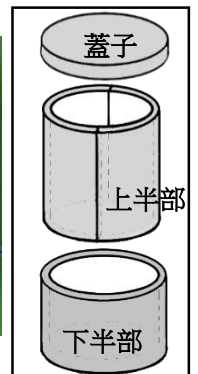


圖 6B.本研究自製的隔熱裝置

參、研究過程、方法與結果

一、表單調查家中飲用水的產生方式

目的：了解本研究製作出來的模組適用於多少比例的家庭

(一)實驗步驟：

- 1.設計 GOOGLE 表單 (圖 7)
- 2.發送給本校八年級同學作答

家中飲用水製造方式

各位同學大家好，[redacted] 研究主題是「如何利用熱水降溫所釋放的廢熱？」。

在日常生活中，我們經常需要製造飲用水，但每個家庭製造飲用水的方式都不太一樣，有些家庭是將自來水或過濾水煮沸後放涼飲用，這些家庭就會有熱水降溫所釋放出來的「廢熱」需要利用，否則就是浪費；有些家庭則是在家中裝設開飲機或淨水器，飲用水不需煮沸便可飲用，而這些家庭就不會有「廢熱」需要利用。

因此想要了解各位家中如何製造飲用水(冷開水)？


請各位幫我填寫這份問卷，感謝您~~


[redacted]


Not shared


* Indicates required question

家中的飲用水(冷開水)是如何製造出來？(可複選) *


 燒水壺(自來水或過濾水以瓦斯或電煮沸後放涼)

 燒水壺(自來水或過濾水插電煮沸後放涼)

 開飲機

 淨水器(直接流出，無額外加熱)

Other: _____

 購買瓶裝礦泉水(直接飲用，無額外加熱)

Submit Clear form

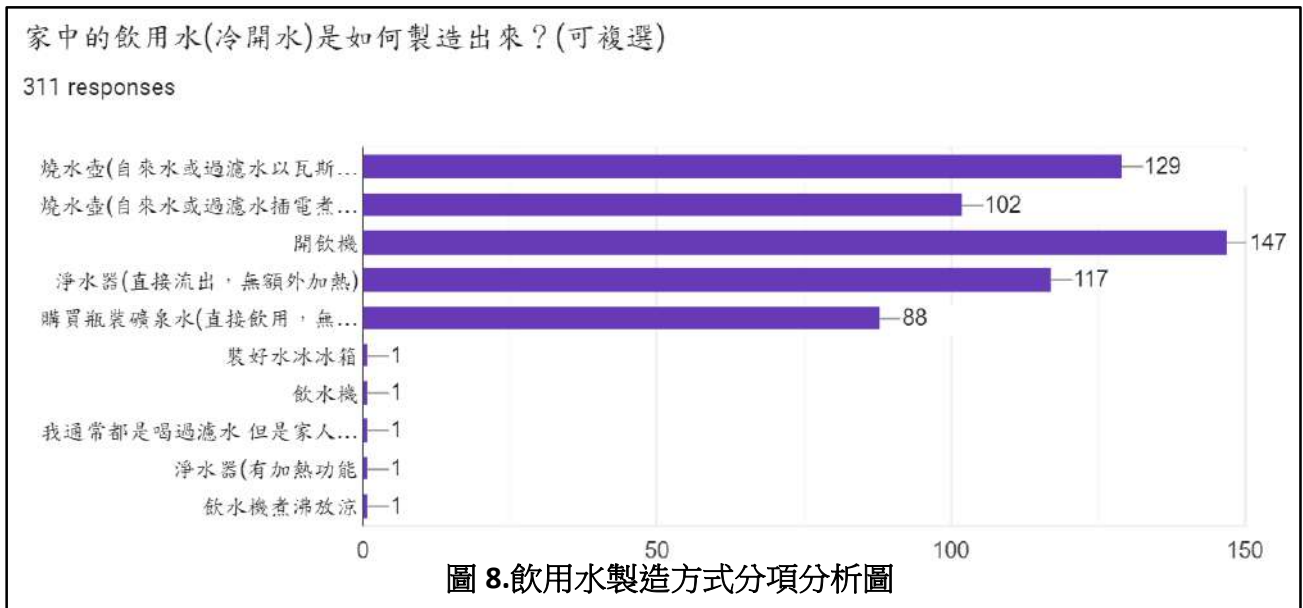
Never submit passwords through Google Forms.

This content is neither created nor endorsed by Google. [Report Abuse](#) - [Terms of Service](#) - [Privacy Policy](#)

Google Forms

圖 7.Google 表單製作的問卷

(二)結果：



如圖 8 所示，本次有效樣本數為 311 人，分項分析家中的飲用水的製造方法，其中與本研究高度相關的方式一(使用燒水壺以瓦斯煮沸者)有 129 人，和方式二(使用燒水壺以電能加熱煮沸者)有 102 人，扣除掉同時選擇這兩項的人數 48 人，得到以燒水壺煮沸再放涼的方式合計 183 人，佔 58.8%，因此本研究裝置適用本校學區半數以上的家庭。

二、實驗裝置的設計與改良

(一)隔熱裝置(此處以保麗龍箱模擬)表面顏色(亮面鋁箔與白色保麗龍)成效之探討

目的：亮面鋁箔的熱輻射係數低，但減少熱量散失的效果是否明顯？

1.實驗步驟：

- (1)選擇 2 個相同的保麗龍箱，其中一個在內外側均貼覆亮面鋁箔，另一個保持原本白色保麗龍箱。
- (2)為了避免室溫的影響，同時準備 2 組實驗器材(直徑 16cm 不鏽鋼鍋含蓋、電腦、Arduino UNO 開發版、溫度感測器×3)進行操作。
- (3)將 2 個 16cm 鍋分別裝 2000mL 水，同時加熱，調整火力使兩鍋同時沸騰。
- (4)沸騰後，將此 2 鍋分別置入 2 個保麗龍箱內，封閉保麗龍箱(圖 9)。

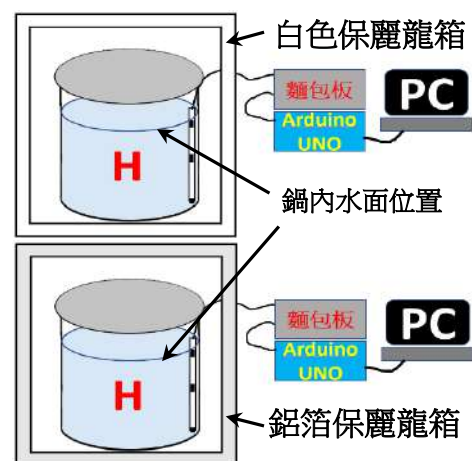
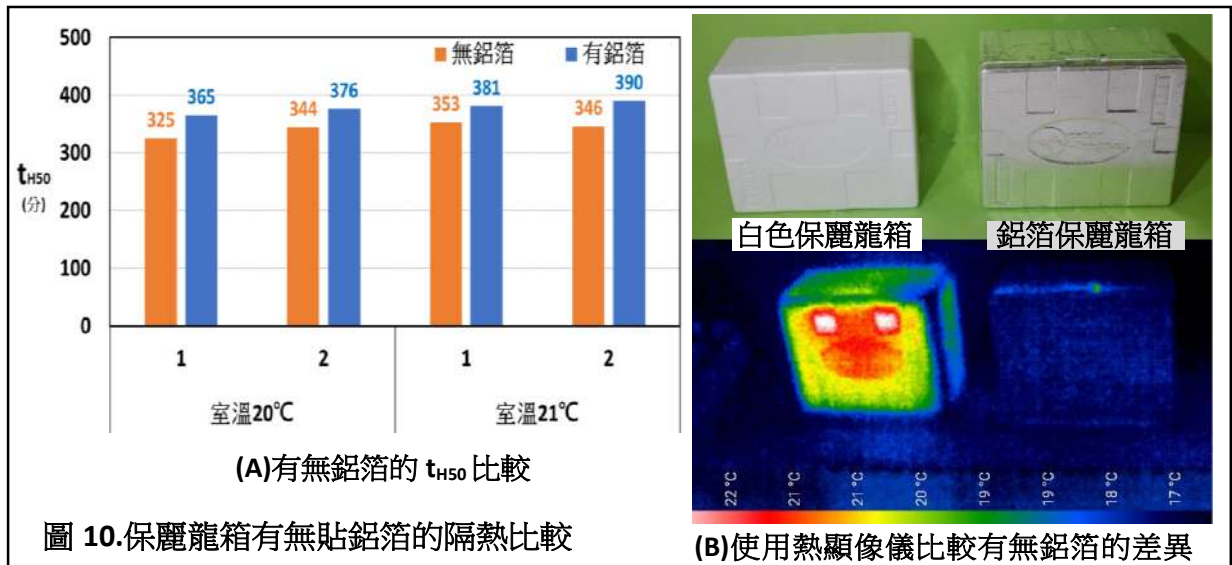


圖 9.比較鋁箔效果實驗示意圖

(5)利用 Arduino UNO 及 PLX-DAQ 程式，每分鐘自動記錄鍋內水溫一次，傳送到電腦於 Excel 試算表中記錄。

(6)再重複步驟 2~5 三次，每一次都將兩個保麗龍箱的位置互換但其他裝置不變，以排除溫度感測器的差異或裝置擺設位置有未知的干擾。

2.結果：如圖 10(A)，鋁箔保麗龍箱 4 次實驗熱水降到 50°C 的時間(t_{H50})都較長，表示隔熱效果較好。從熱顯像儀中看出鋁箔保麗龍箱抑制熱輻射的效果較好。(拍攝時保麗龍箱中水溫為 85°C)



3.檢討：鋁箔保麗龍箱在各次實驗中隔熱效果均優於白色保麗龍箱，表示在本研究的條件下表面顏色會影響保溫效果，因此決定隔熱裝置內外側的表面均採用亮面鋁箔。

(二)測試隔熱裝置的效果

目的：利用鋁箔與陶瓷纖維毯所製作的隔熱裝置(圖 6)與鋁箔保麗龍箱(圖 10(B)右上)，在模擬實際熱交換的狀況下，比較耐熱與節能效果的差異。

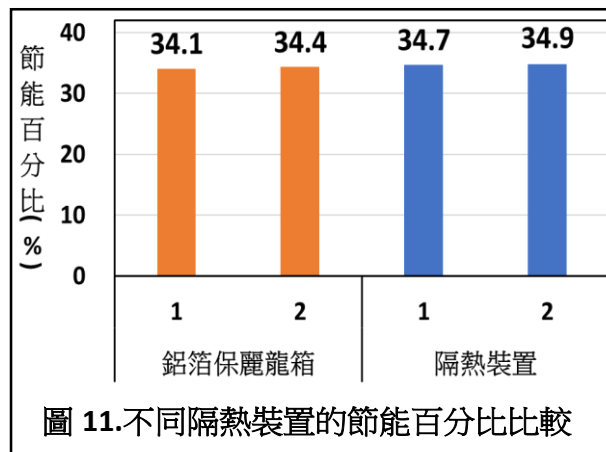
1.實驗步驟：

(1)挑選室溫 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 的條件下進行實驗。

(2)分別使用鋁箔保麗龍箱與隔熱裝置進行「熱鍋在下」與「冷鍋在上」相疊的實驗。
每次實驗重複 2 次。

(3)利用 Arduino UNO 及 PLX-DAQ 程式，每分鐘自動記錄冷熱水鍋內水溫及室溫一次，顯示於 LCD1602 即時監控實驗狀況並傳送到電腦於 Excel 試算表中記錄。

2.結果：如圖 11 所示，本研究設計的隔熱裝置節能效果高於鋁箔保麗龍箱。



3.檢討：

(1)使用本研究的隔熱裝置打開後無異味，耐熱程度明顯優於鋁箔保麗龍箱(打開裝置後有異味)。

(2)本研究的隔熱裝置節能效果略優於鋁箔保麗龍箱。推測原因可能是：

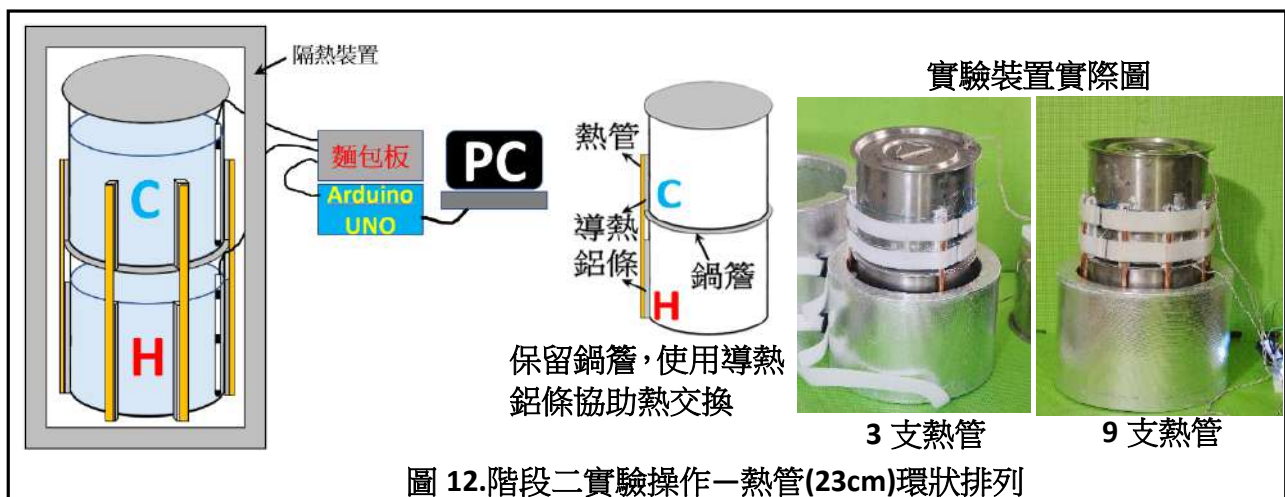
a.厚度的差異：陶瓷纖維毯和保麗龍的導熱係數差不多，但隔熱裝置容器總厚度為 2.67cm，鋁箔保麗龍箱的厚度為 2.32cm，所以前者隔熱效果較好。

b.表面積(不含底面)的差異：鋁箔保麗龍箱外側表面積約為 7293 cm²，隔熱裝置表面積約 3459cm²。

(3)基於上述 2 點，本研究使用此隔熱裝置；另外，本次實驗隔熱裝置的部分所收集之數據亦作為下個實驗的對照組(表 1 與圖 13 中 0 支熱管的數據來源)。

(三) 階段二實驗操作—不同數量的 23cm 熱管環狀排列(圖 12)

目的：熱管具有優異的熱傳導特性，嘗試不同數量的熱管對熱交換效果的影響。



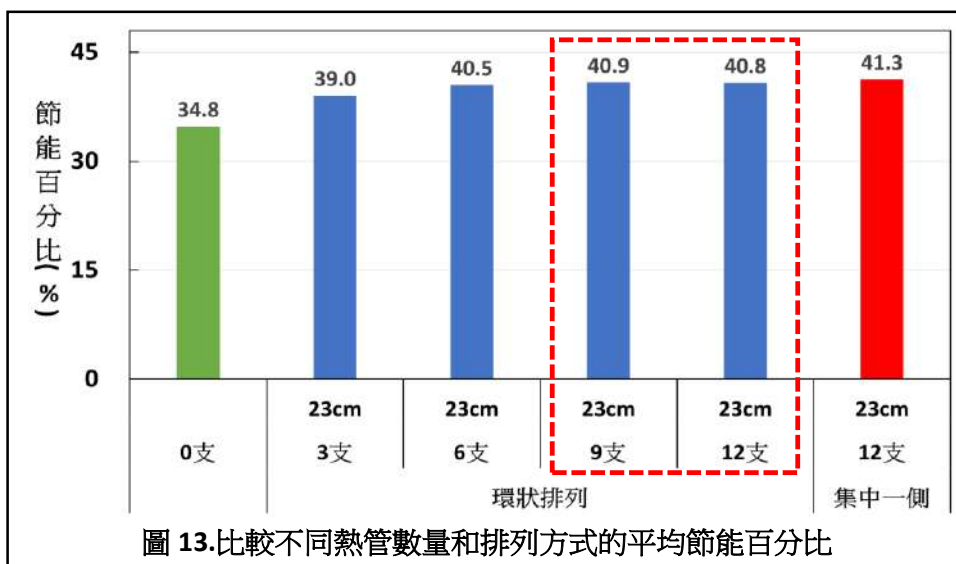
1. 實驗步驟：

- (1) 使用 23cm 熱管(寬×厚：0.7cm×0.4cm)3 支，平均分配在 16cm 熱水鍋外部，由於鍋簷向外突出約 0.7cm，所以熱管和熱水鍋之間加上鋁條(寬×厚：1.1cm×0.7cm)，介面處均塗抹適量導熱膏協助導熱，熱管以魔鬼氈綁緊加壓固定。
- (2) 熱管上方 8cm 內側(將來會和冷水鍋內冷水重疊的部分)預先抹上導熱膏，冷水鍋外熱管預計和熱管接觸部分也預先固定 8cm×1.1cm×0.7cm(長×寬×厚)鋁條，和鍋壁接觸處抹適量導熱膏。
- (3) 冷水鍋加入 2000mL 室溫水，蓋上鍋蓋備用。
- (4) 利用燒水壺將熱水煮沸後，迅速倒入熱水鍋並蓋上鍋蓋。
- (5) 將冷水鍋疊放在熱水鍋上，熱管和鋁塊對齊後，以魔鬼氈圈繞加壓固定後，封閉隔熱裝置。
- (6) 利用 Arduino UNO 及 PLX-DAQ 程式，每分鐘自動記錄冷熱水鍋內水溫及室溫一次，顯示於 LCD1602 即時監控實驗狀況並傳送到電腦於 Excel 試算表中記錄。
- (7) 將熱管數量改成 6 支、9 支、12 支，重複步驟 1~6，各數量至少重複操作 2 次。

2. 結果：如表 1 和圖 13 藍色部分，可見熱管數量增加，節能百分比也隨之提升，但增幅漸少。12 支熱管節能百分比的平均甚至略低於 9 支。 $t_{C_{MAX}}$ 則隨熱管數量遞減，減少幅度也是漸少(表 1 紅色框框處)。

表 1. 階段二-不同支數的 23cm 熱管環狀排列相關數據

實驗	數量(支)	實驗次數	室溫(°C)	T_{C0} (°C)	$\Delta T_{C_{MAX}}$ (°C)	$\Delta T_{C_{MAX}}$ 時熱水鍋溫度(°C)	$t_{C_{MAX}}$ (分)	節能百分比(%)
16cm 鍋 23cm 熱管 環狀排列	0	1	21	20.7	27.6	56.3	174	34.7
		2	20	18.8	28.3	55.3	173	34.9
	3	1	19	17.5	32.1	54.5	108	38.8
		2	20	19.5	31.6	55.7	107	39.3
	6	1	20	19.2	32.7	55.2	81	40.4
		2	21	19.5	32.7	56	75	40.6
	9	1	19	18.3	33.5	54.9	62	40.9
		2	19	17.8	33.6	54.4	66	40.8
	12	1	22	20.3	32.4	55.3	64	40.7
		2	21	20.7	32.4	55.8	57	40.8
		3	18	18.5	33.3	55.4	52	40.9



3.檢討：

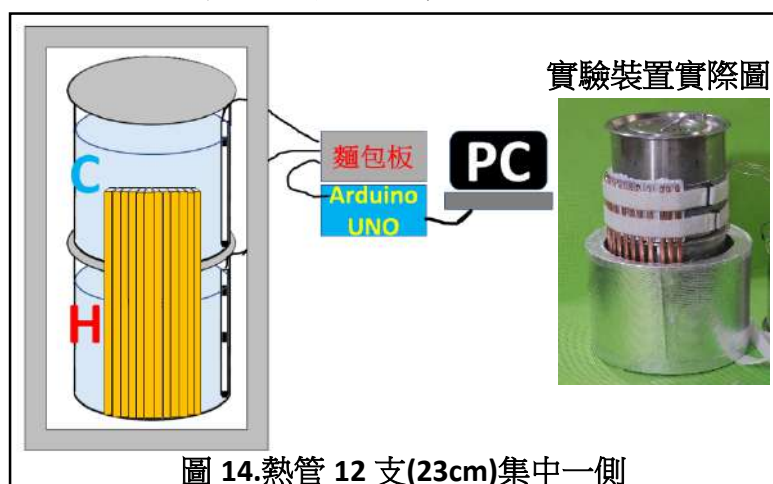
(1)隨著熱管數量增加，節能百分比並沒有隨之明顯增加。甚至於 12 支熱管比 9 支的節能百分比略低(兩者的比較請見圖 13 的虛線框框處)。推測可能原因為增加熱管時鉛塊數量也增加，導致熱量散失。

(2)對流是液態水重要的熱傳導方式。熱管環狀排列，使鍋壁平均受熱，鍋內水溫對稱分布；若熱管集中一側，是否可增加冷水鍋中兩側的溫差，鍋內水理論上會因水溫不對稱而造成更強的對流，進而提高熱交換效率？

(3)實驗操作時發現，隨著熱管數目增加，冷水鍋不易疊放在熱鍋上，有改良的必要。

(四) 階段二實驗操作—23cm 熱管(12 支)集中一側(圖 14)

目的：熱傳播有傳導、對流、輻射，先前的實驗已減少輻射，增加傳導的效率，因此本研究將熱管集中在一邊，增加鍋內水兩側的溫差，期望可以增加對流，提升熱交換效率。並且能改良熱管環狀排列時操作不便的缺點。



1.實驗步驟：除「使用 23cm 熱管 12 支，集中在 16cm 熱鍋外部的一側」外，其餘步驟和第(四)部分的步驟 1~7 相同，共實驗 5 次。

2.結果：

表 2.階段二-12 支熱管(23cm)集中一側相關數據

實驗	實驗次數	室溫(°C)	T _{CO} (°C)	ΔT _{CMAX} (°C)	ΔT _{CMAX} 時熱水鍋溫度(°C)	t _{CMAX} (分)	節能百分比(%)
16cm 鍋 23cm 熱管×12 集中一側	1	22	19.0	33.4	55.5	61	41.2
	2	22	19.2	33.3	56	55	41.2
	3	20	19.9	33.3	56	57	41.6
	4	20	19.0	33.7	55.2	63	41.6
	5	21	20.0	32.6	55.9	58	40.7

實驗結果如表 2，平均節能百分比為 41.3%，平均 t_{CMAX} 為 58.8 分鐘。此部分與 12 支熱管環狀排列的結果對照(圖 13)，節能百分比增加了約 0.5%，但 t_{CMAX} 增加約 1.1 分鐘(與表 1 比較)。

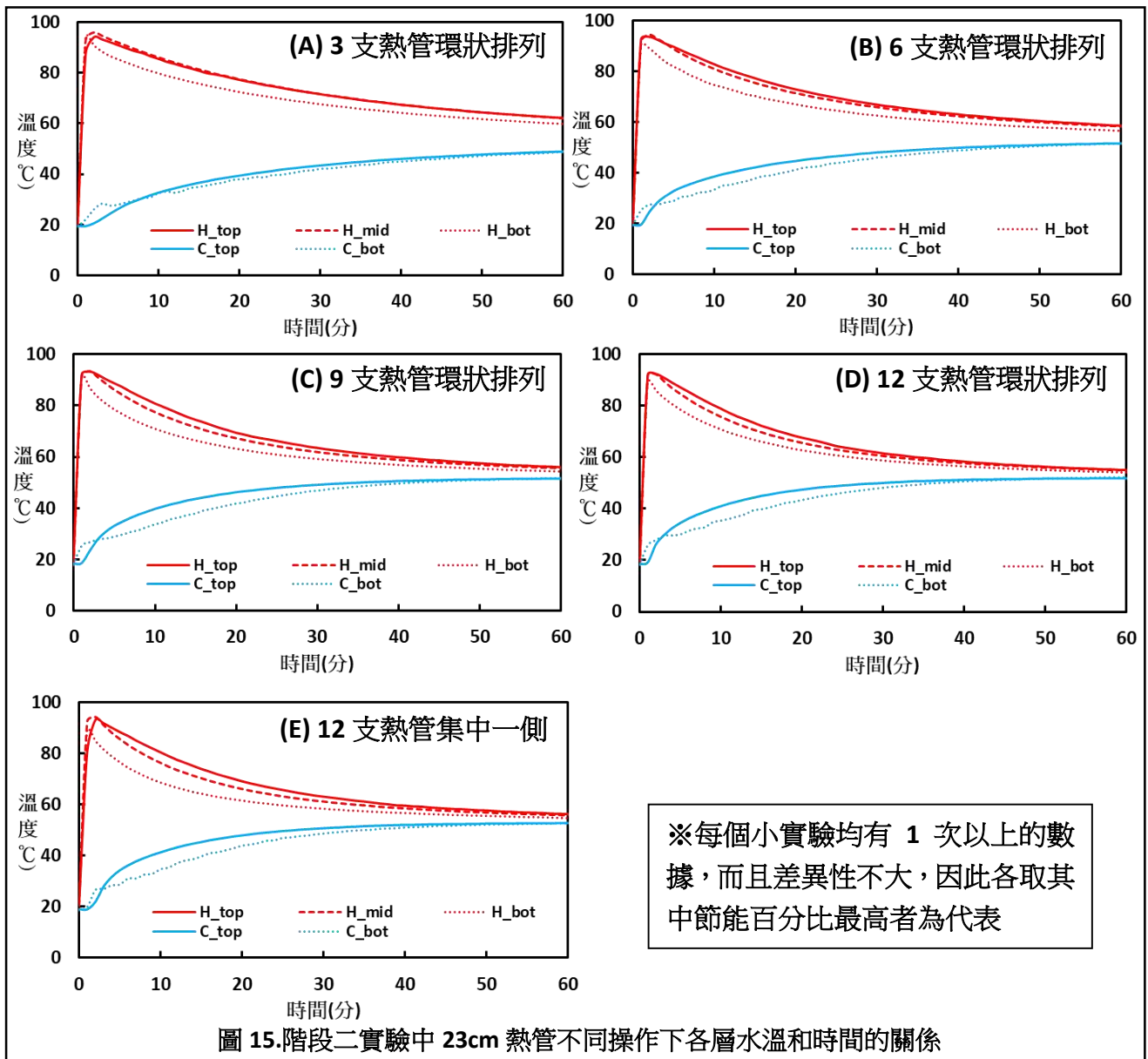
3.檢討：

(1)效能提升，但冷、熱水有分層

水溫分層的情形，在階段二的熱管環狀排列實驗中就已經存在(圖 15A~D)，原本以為熱管集中於一側即可改善，但比較圖 15E 幾乎無差異。所以此處節能百分比的增加，是否能歸因於對流，不得而知。但這個實驗還是有一個很重要的結論：
熱管集中擺放的節能效果比分散擺放好！。

(2)階段二的實驗到此似乎遇到瓶頸，所以在此對實驗裝置做了一次總檢討，做為未來實驗的方向：(此處假設冷水升溫ΔT=32°C計算)

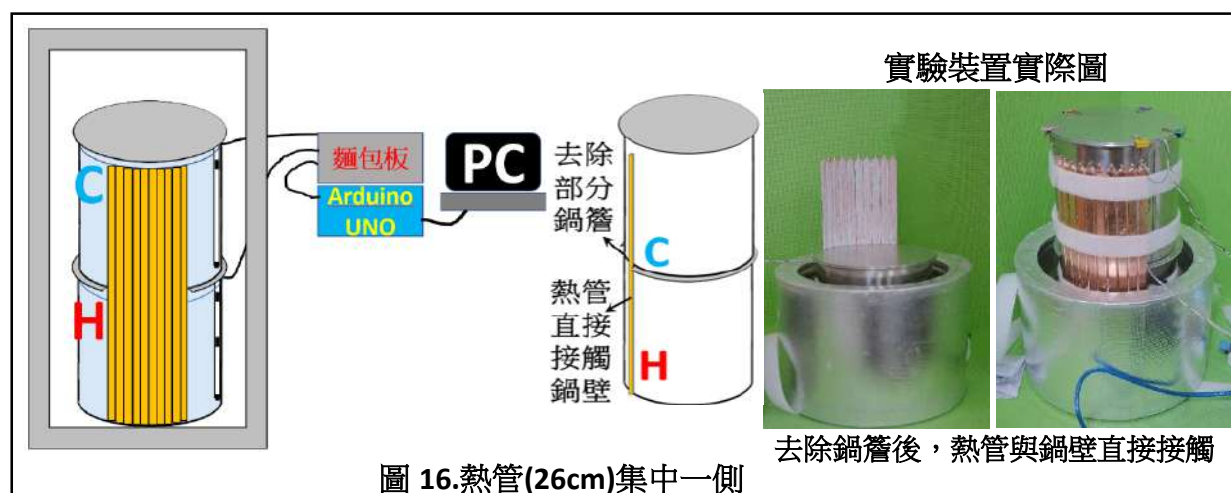
a. 鍋具：原為 16cm 鍋，鍋的質量 320g，利用熱量公式 $H=M \times S \times \Delta T$ 計算鍋吸收熱量得知，1 個鍋吸收了 $320 \times 0.12 \times 32 = 1228.8 \text{ cal}$ ，未來將換成 202g 的 14cm 鍋吸收的能量約為 $202 \times 0.12 \times 32 = 775.68 \text{ cal}$ ，可減少 2 個鍋吸收的熱量約 906 cal，預估可讓冷水多上升 0.45°C；鍋徑變小使水面高度更接近鍋蓋，除了增加熱管的接觸面積外，也可加快水氣蒸發在鍋蓋內側凝結的速度，期望能提升熱交換效率。此外，16cm 鍋子重疊後外部的表面積約 1004.8cm²，而 14cm 鍋為 769.3cm²，也可以減少因輻射而散失的熱量。另外，原本 16cm 的鍋子底部圓弧較大，最下方約有 1cm 無法和熱管接觸到。此時我挑選鍋壁和鍋底轉折較直角的鍋，希望改善底部僅能由熱水鍋蓋加熱的問題。



- b. 鋁條：原本因為鍋簷突出，所以加了鋁條夾在熱管與鍋壁之間協助導熱。但鋁條也會吸收熱量。利用熱量公式 $H=M \times S \times \Delta T$ 計算一組鋁條 ($M=38g$ 、 $S=0.21cal/g^{\circ}C$) 吸收熱量為 255.36 卡 (約影響冷水水溫上升 $0.13^{\circ}C$)，若能去除鋁條，應該可以減少額外熱量的消耗，提升熱交換效率。
- c. 熱管：原熱管為長 23cm，寬 0.7cm、厚 0.4cm，由於接觸鍋壁的實際接觸面積較小 (約 $0.6 \times 20.9 = 12.54 cm^2$)，而接觸面積是影響熱管的導熱效率的因素之一，因此後續實驗改採寬度較寬的熱管 (寬 \times 厚： $1.1cm \times 0.3cm$)，期望可以提高熱交換效率並減少時間。

(五) 階段三實驗操作—26cm 熱管集中一側(圖 16)

目的：綜合(五)的檢討，本研究減少了鍋、鋁條吸收的熱量，並更換較寬扁的熱管，以增加熱管和鍋壁接觸面積，期望能增加熱交換效率。



1.實驗步驟：

- (1)實驗用冷熱水鍋改用直徑 14cm 鍋，並將熱水鍋的鍋簷部分去除約 1/4 圈，讓熱管直接與鍋壁接觸，不再使用鋁條傳熱。使用 26cm 熱管 10 支(規格為 26cm×1.1cm×0.3cm)，集中排列在 14cm 熱鍋外部，介面處均塗抹適量導熱膏協助導熱。熱管以魔鬼氈綁緊加壓固定。
- (2)熱管上方 12cm 內側(實驗中會和冷水鍋內冷水重疊的部分)預先抹上導熱膏，冷水鍋鍋壁對應處也抹適量導熱膏。
- (3)冷水鍋加入 2000mL 室溫水，蓋上鍋蓋備用。
- (4)利用燒水壺將 2000mL 水煮沸後，迅速倒入熱水鍋並蓋上鍋蓋。
- (5)將冷水鍋疊放在熱水鍋上，以魔鬼氈圈繞熱管加壓固定。封閉隔熱裝置。
- (6)利用 Arduino UNO 及 PLX-DAQ 程式，每分鐘自動記錄冷熱水鍋內水溫及室溫一次，顯示於 LCD1602 即時監控實驗狀況並傳送到電腦於 Excel 試算表中記錄。
- (7)重複步驟 1~6 二次。

2.結果：實驗結果如表 3，平均節能百分比為 42.7%，平均 t_{CMAX} 為 53 分鐘。和第(四)、(五)部分的結果對照(表 1、表 2)，節能百分比增加了約 2%， t_{CMAX} 減少約 5 分鐘。

表 3.階段三-10 支熱管(26cm)集中一側相關數據

實驗	實驗次數	室溫 (°C)	T _{CO} (°C)	ΔT _{C_{MAX}} (°C)	ΔT _{C_{MAX}} 時熱水鍋溫度(°C)	t _{C_{MAX}} (分)	節能百分比 (%)
14cm 鍋 26cm 熱管×10 集中一側	1	19	17.8	35.0	54.7	52	42.5
	2	19	17.8	35.2	54.8	53	42.7
	3	18	17.3	35.5	54.4	54	42.8

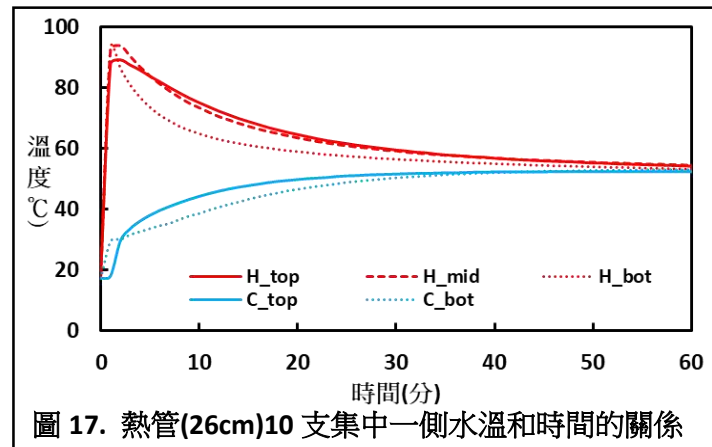


圖 17. 熱管(26cm)10 支集中一側水溫和時間的關係

3.檢討：

(1)和階段二最後 12 支熱管集中一側相比，**節能百分比增加約 2%，平均 ΔT_{C_{MAX}} 也增加了 1.98°C，算是非常大的突破。**根據階段二最後 12 支熱管集中一側的檢討中所提到：**縮小鍋子預估可增加 0.45°C，減少鋁條可增加 0.13°C(共 12 組)，兩者合計 2.01°C。和實驗數據蠻接近的！**

(2)26cm 熱管較長較扁，加上縮小鍋子提高了水位，均增加接觸面積，也如預期地提高了熱交換的速度，數據上的確縮短了 t_{C_{MAX}}。

(3)分析冷、熱水鍋上下層的溫度變化(圖 17)，發現有溫度仍有分層的情形。造成原因可能是熱管太長且導熱效率太高，很快地就把熱水底部的熱送到冷水頂部。或許縮短熱管長度可以改善，以增加鍋內水的上下對流。

(六) 階段三實驗操作—14cm 熱管集中一側(圖 18)

目的：為了增加對流，將熱管縮短為長度 14cm，期望能增加鍋中水的對流。

1.實驗步驟：除「使用 14cm 熱管 10 支，集中在 14cm 熱鍋的一側。及熱管上方 6cm 內側預先抹上導熱膏」外，其餘步驟和第(六)部分的步驟 1~7 相同。

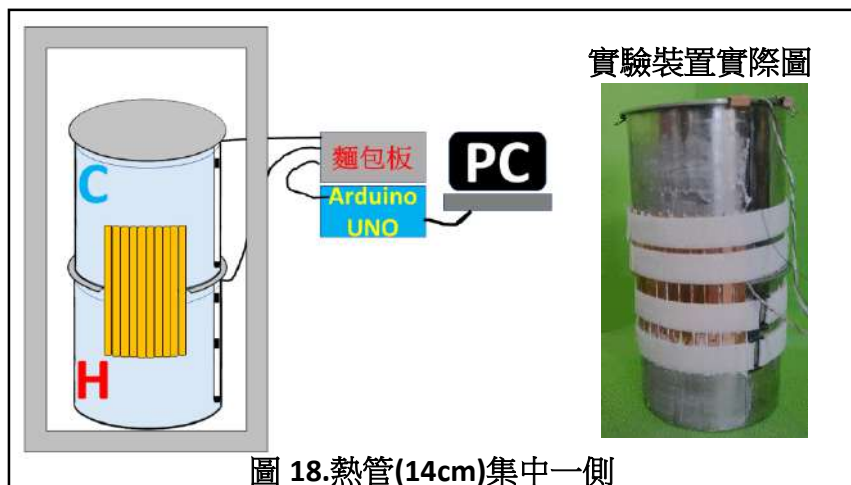


圖 18.熱管(14cm)集中一側

2.結果：由表 4 可知平均節能百分比為 41.8%，平均 $t_{C_{MAX}}$ 為 82.6 分鐘；從水溫分層圖(圖 19)可見冷水的分層狀況比第(四)~(六)部分少(和圖 15、圖 17 比較)。

表 4.階段三-10 支熱管(14cm)集中一側相關數據

實驗	實驗次數	室溫(°C)	T_{C_0} (°C)	$\Delta T_{C_{MAX}}$ (°C)	$\Delta T_{C_{MAX}}$ 時熱水鍋溫度(°C)	$t_{C_{MAX}}$ (分)	節能百分比(%)
14cm 鍋 14cm 熱管×10 集中一側	1	19	18.8	33.8	54.1	95	41.6
	2	20	18.5	34.1	55.6	75	41.8
	3	19	18.5	34.3	55.2	78	42.0

3.檢討：由於冷、熱水鍋中上下都幾乎沒有溫差(圖 19)，顯示熱管只接觸熱水上半與冷水鍋下半部時，鍋內的水均能充分對流，符合預期。但因為縮短熱管減少了熱傳導，而對流傳播熱量的效率遠低於熱管的熱傳導，所以 $t_{C_{MAX}}$ 增加 20 多分鐘。

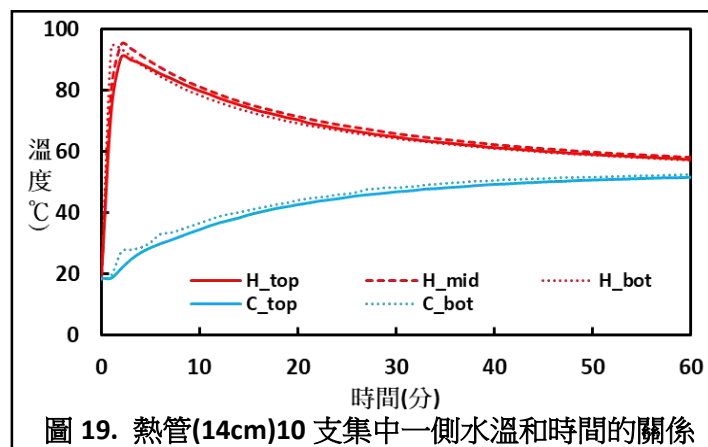
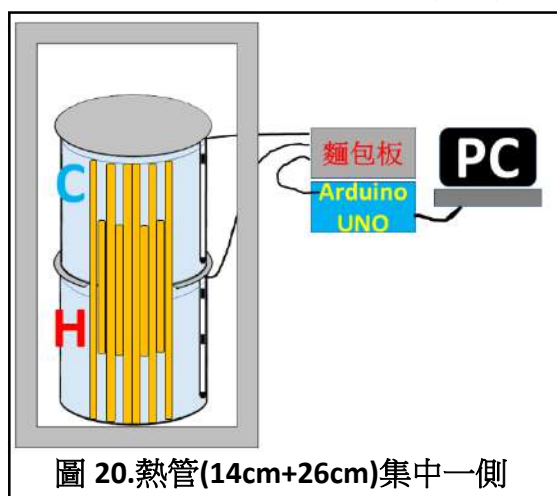


圖 19. 熱管(14cm)10 支集中一側水溫和時間的關係

(八) 階段三實驗操作—14cm 熱管和 26cm 熱管集中一側(圖 20)

目的：從前面第(六)部分結果發現 26cm 熱管可以增加傳導的方式提升熱交換效率，而第(七)部分結果發現，14cm 熱管可以增加對流的方式提升熱交換效率，因此本實驗綜合 26cm 熱管及 14cm 熱管，期望能綜合兩者的特點，提升熱交換效率。



- 1.實驗步驟：除「使用 26cm 熱管 6 支及 14cm 熱管 4 支，集中在 14cm 熱鍋外部」外，其餘操作與第(六)部分的步驟 1~7 相同，但重複次數較多。
- 2.結果：由表 5 可知平均節能百分比為 42.8%，平均 $t_{C_{MAX}}$ 為 55 分鐘；從水溫分層圖(圖 21)可見冷水的分層狀況比第(四)~(六)部分少(和圖 15、圖 17 比較)。

表 5.階段三-10 支熱管(14cm+26cm)集中一側相關數據

實驗	實驗次數	室溫(°C)	T_{C0} (°C)	$\Delta T_{C_{MAX}}$ (°C)	$\Delta T_{C_{MAX}}$ 時熱水鍋溫度(°C)	$t_{C_{MAX}}$ (分)	節能百分比(%)
14cm 鍋 14cm 熱管×4 + 26cm 熱管×6 集中一側	1	20	18.6	35.1	55.7	54	43.1
	2	20	18.9	34.6	55.7	54	42.7
	3	21	20.3	34.1	57	49	42.7
	4	19	19.0	34.5	55.7	54	42.6
	5	21	20.4	34.0	56.3	54	42.7
	6	21	20.5	34.2	55.9	65	43.0

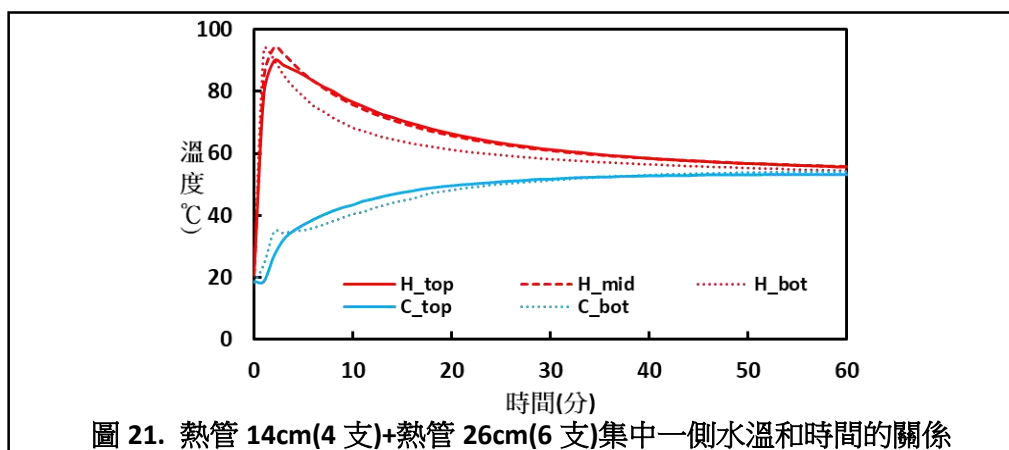


圖 21. 熱管 14cm(4 支)+熱管 26cm(6 支)集中一側水溫和時間的關係

3.檢討：

(1)雖然減少了熱管的總面積，卻略微提升了節能百分比，且時間平均只增加 2 分鐘。

從冷、熱水鍋上下層的溫差也變小(圖 21)，顯示傳導與對流對熱交換都重要。

(2)接下來也許可以再從改變熱管長短的數目及位置，探討最佳的組合。或是再思索其他的實驗方式。但受限於時間，只能止步於此了。

(九) 階段三實驗操作—14cm 熱管和 26cm 熱管集中一側並加鋁箔罩(圖 22)

目的：利用雙層隔熱，希望再減少熱量散失，提升熱交換效率。

1.實驗步驟：同第(八)部分，但在封閉隔熱裝置前，先用雙面鋁箔的玻璃纖維布簡單包覆於熱交換裝置外。

2.結果：實驗結果如表 6，平均節能百分比為 43.3%，平均 t_{CMAX} 增加為 60 分鐘。

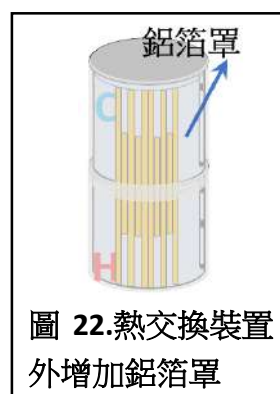


圖 22.熱交換裝置外增加鋁箔罩

表 6.階段三-10 支熱管(14cm×4+26cm×6)集中一側並加鋁箔罩相關數據

實驗	實驗次數	室溫(°C)	T _{C0} (°C)	ΔT _{CMAX} (°C)	ΔT _{CMAX} 時熱水鍋溫度(°C)	t _{CMAX} (分)	節能百分比(%)
14cm 鍋 14cm 熱管×4 + 26cm 熱管×6 集中一側 加鋁箔罩	1	22	20.6	34.5	56.3	65	43.4
	2	20	19.2	34.7	55.5	67	42.9
	3	20	20.1	34.7	56.5	57	43.4
	4	19	20.2	34.7	56.8	54	43.4

3.檢討：本研究使用多層隔熱的想法，是來自於某次的中研院參觀，他們使量子電腦維持在接近絕對零度的方法是利用一層一層的真空罩，達到隔熱的效果。增加鋁箔罩雖然無法真空狀態，但仍然能反射輻射熱，以減少熱量散失到環境中並提升熱交換效率，而最後的結果也顯示出這樣做不但是有效的，而且大幅增加了節能百分比 0.5%！但因並沒有提高導熱的效率，所以 t_{CMAX} 增加。

三、使用者介面

為了讓使用者能掌握熱交換的狀況，必須有一個監測並顯示冷、熱水溫的裝置。此裝置稱為使用者介面，包括二個部分：1.溫度監測模組(含軟硬體與供電)與 2.手機顯示介面。

另外，因考慮裝置的衛生與實用性，此階段亦將溫度感測器改到冷、熱水鍋外。

(一)溫度監測模組的設計(由 USB 供電)

目的：透過 ESP32 將溫度資訊顯示於電子紙(“ESP32 教學系列(九),”2024)，並透過 Wi-Fi 傳送到手機，透過 LINE Notify 通知使用者(曹永忠、許志成、蔡英德，2023)，初步測試此模組的可行性。

1.實驗步驟：

(1)使用 2 個 DS18B20 分別固定在冷、熱水鍋外，連接於 ESP32 開發版。

(2)將電子紙與 ESP32 連接。

(3)自行撰寫程式與調整相關設定，使 ESP32 每 5 分鐘讀取溫度資訊，顯示於電子紙上，並透過 Wi-Fi 將訊息傳到 LINE Notify 通知使用者。

(4)在等待時間，將 ESP32 設定為休眠狀態減少耗電量。

2.結果：

(1)溫度訊息順利傳送到電子紙與手機，如(圖 23A、23B)。

(2)進一步分析，使用 USB 供電(5V)，ESP32 開機後，抓

Wi-Fi 訊號耗時 9 秒，電流 122mA，；更新電子紙資訊 7 秒，電流 33mA，；其餘時間休眠，電流 7mA。

3.檢討：很高興裝置能正常運作，訊息也能順利顯示於電子紙與發送到手機，消耗電量也不多。因耗電量不大，進一步研究自我供電模式。

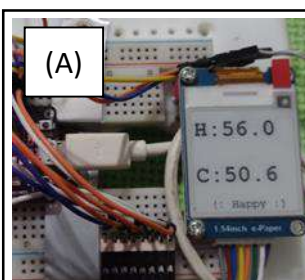


圖 23.USB 供電使用者介面實際工作結果
(A)電子紙顯示溫度 (B)訊息傳到 LINE Notify

(二)溫度監測模組的設計(利用冷、熱水鍋溫差發電供電)

目的：使用冷熱水鍋的溫差發電，測試溫度監測模組是否可以自我供電。

1.實驗步驟：

(1)在冷水鍋底部與熱水鍋鍋蓋間放置熱電晶片 6 片，由於採用的能量收集晶片 BQ25570 輸入電壓最高為 5.1V，為了避免高壓燒毀，但又要能產生裝置足夠工作的電量。經多次測試，將 3 個熱電晶片串聯後，再將兩組並聯輸入 BQ25570 進行能源採集，最後將電能儲存於 5.5V、5 法拉的超級電容儲存。

(2)使用三用電表監測超級電容的電壓，當電壓超過 5V 時，手動切換開關，讓超級電容供電。

(3)由於超級電容的電壓不是恆定的，所以使用升壓模組將電壓升高為 5V 後，透過 USB 接口供電給 ESP32。

(4)自行撰寫程式與調整相關設定，使 ESP32 每 20 秒讀取溫度資訊，顯示於電子紙上，並透過 Wi-Fi 將訊息傳到 LINE Notify 通知使用者。

(5)在等待時間，將 ESP32 設定為休眠狀態，以減少耗電量。整個流程如(圖 24)。

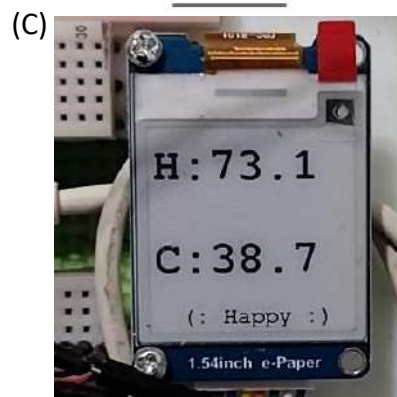
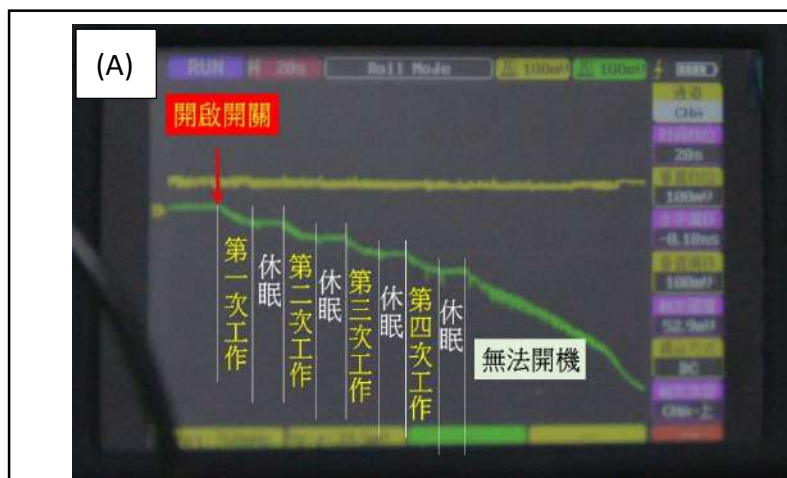
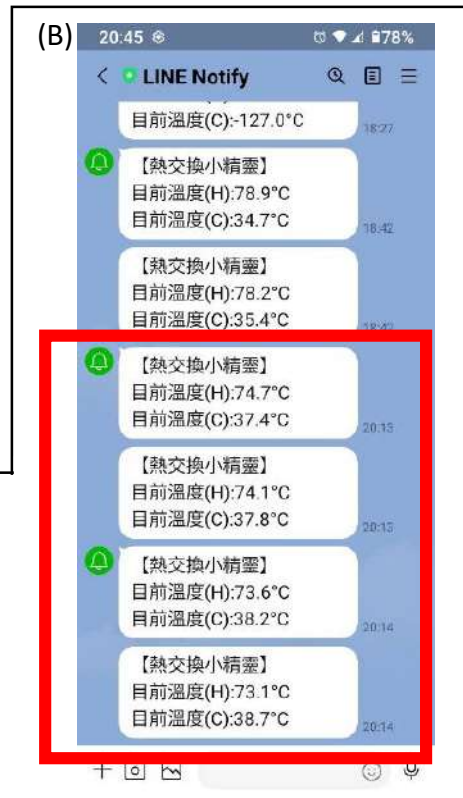
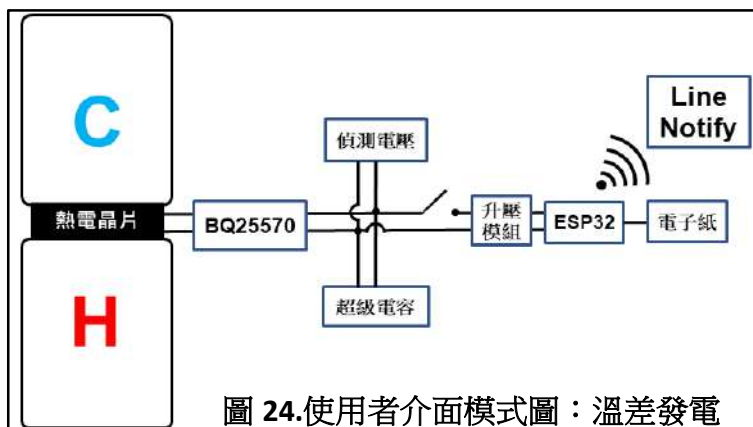


圖 25.使用者介面利用溫差發電供電的實際工作結果

- (A)示波器(綠線)顯示超級電容放電電壓下降情形
- (B)ESP32 將溫度傳送到 LINE Notify(最後四則訊息)
- (C)即使斷電後，電子紙仍正常顯示最後一筆資料

2.結果：

- (1)實驗結果，一次熱交換可以使 5 法拉超級電容電壓增加 2~3V。
- (2)當電壓在 5V 時，手動開啟開關，由示波器可見(圖 25A)，ESP32 啟動與工作時，超級電容電壓下降；ESP32 休眠時，電壓持平(事實上仍在下降，稍後討論)。訊號除顯示在電子紙上(圖 25C)，也成功地傳送到手機(圖 25B)。經過四個循環後，超級電容電壓降至約 3V 時，即無法有效供電了！

3.檢討：

- (1)「這個實驗雖然成功，但不能算成功」。雖然能自我供電完成指定的工作，但使用者需要等待電壓到 5V 時手動切換開關裝置才能運作。因為超級電容前次工作後，大約會殘存 1~2V 的電壓。所以即使每次熱交換裝置只能提升電壓 2~3V，

「但還是有機會到達 5V」。也因為不穩定，不能算是一個成功的設計，必須再尋求其他適合能量來源。

(2)超級電容的電壓會隨電力的輸出而下降，我使用升壓模組將電壓穩定在 5V。再透過 USB 供電給 ESP32(圖 24)。我發現 ESP32 在深度睡眠狀時，電流為 7mA，不如規格書上的 $10\mu A$ (趙英傑，2021)(差 1000 倍!)，導致超級電容電壓持續下降。嘗試各種方法解決，但均未成功。且在過程中意外發現升壓模組的耗電量相對偏高，需移除。

(3)綜合以上，我計畫改採用太陽能板預先進行能量收集，超級電容增加為 20 法拉，以增加儲存電量，並直接將電源由 ESP32 的 Vin 腳位(可接受 3.3~5V)輸入。

(三)溫度監測模組的設計(利用太陽能發電預先儲存電能)

目的：針對(二)的檢討進行改良，測試溫度監測模組是否可以穩定的自我供電。

1.實驗步驟：

實驗前利用太陽能板經 BQ25570 進行能源採集，儲存於 20 法拉超級電容中(圖 26)。

2.結果：

(1)明亮的陽台(漫射光)條件下。

可在半天左右將 20 法拉的超級電容從 1V 充電到 5V 以上。

(2)超級電容在 5V 以上時，手動開啟開關，可持續更新電子紙及透過 Wi-Fi 傳送訊息到 Line Notify 超過 30 次以上(間隔 1 分鐘)！

3.檢討：

(1)BQ25570 原本就是設計來微弱能源蒐集，使用太陽能的效果比想像中好！裝置只要放置在家中窗邊白天光線明亮處，即可充分充電並提供使用者介面多次運作。

(2)溫度監測模組因為需要放置在明亮處，所以未來設計溫度監測模組時，應具有體積小、易移動的特性。

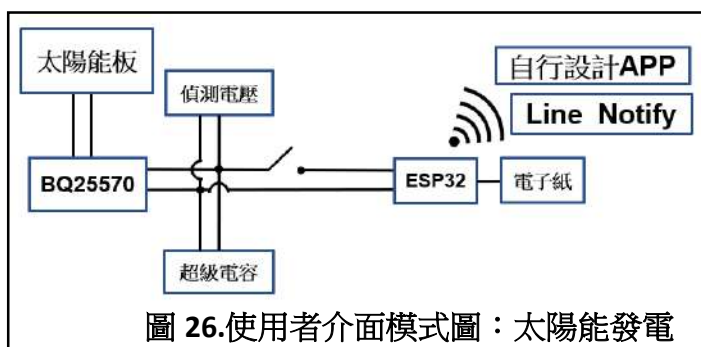


圖 26.使用者介面模式圖：太陽能發電

(四)完成溫度監測模組的設計

目的：針對(三)的檢討進行改良，設計出溫度監測模組的完成品。

1.實驗步驟：

將(三)所用到的電子元件、模組，規劃焊接於萬用電路板(洞洞板)，並完成布線。完成電路板後安裝於透明壓克力盒中，成品如圖 27。

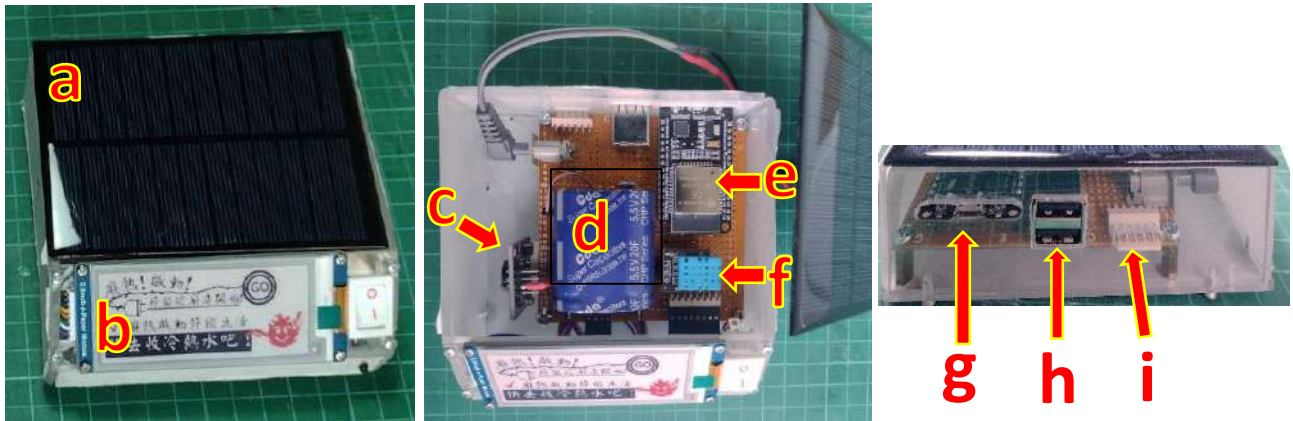


圖 27.溫度監測模組 (左)正面 (中)內部圖 (右)背面

- a.太陽能板 b.電子紙 c.BQ25570 能源收集模組 d.超級電容 5.5V 20 法拉
 e.ESP32-WROOM-32 開發版 f.DHT-11 溫溼度感應器(測量室內溫、濕度)
 g.ESP32 的 USB 埠，裝置可由此外部供電或更新程式
 h.USB 母座，DS18B20 訊號由此進入，利用 USB 接頭的目的是方便裝置插拔
 i.電子接腳：可由此監測裝置太陽能、超級電容的電壓(非供使用者使用)

(五)手機顯示介面的設計

目的：設計出讓使用者覺得方便好用的介面與功能。

1.實驗步驟：

1.利用 Arduino IDE 與 APP Inventor 分別設計 ESP32 端(“ESP32 DHT11/DHT22 Web Server,”2024)與手機端的程式，使 ESP32 可以將溫度訊息透過 Wi-Fi 傳到手機端，手機端除了顯示冷熱水溫度外，還額外增加到達使用者定義之冷熱水溫差，預估需要多少時間的功能，並且在熱交換完成時，主動通知使用者。

2.現在是機器學習 AI 的時代，預測時間功能的部分，我透過監督式機器學習方式，以過往實驗中的數據為基準，利用現在熱門的 Python 函式庫，使用曲線擬合 (curve fitting)方法，找出在此裝置中能代表熱平衡的曲線，此曲

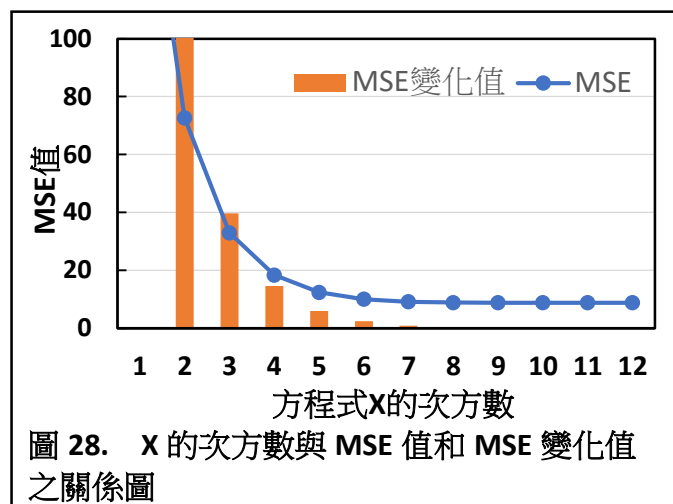


圖 28. X 的次方數與 MSE 值和 MSE 變化值之關係圖

線同時考量熱水放熱、冷水吸熱以及裝置中各物質的吸放熱情形，因為此曲線同時考量多項因素，所以其方程式較為複雜。

3.我透過 MSE(mean-square error)來找出最好的擬合曲線，其結果如圖 28。如結果所示，可以看出在次方數為 8 時，其 MSE 變化值最小，故以次方數 8 為結果。

4.最後透過曲線擬合找出方程式為下列：

$$f(x) = 2.34840955 \times 10^{-10}x^8 - 5.92984278 \times 10^{-8}x^7 + 6.22665486 \times 10^{-6}x^6 - 3.52591136 \times 10^{-4}x^5 + 1.16929151 \times 10^{-2}x^4 - 2.31746843 \times 10^{-1}x^3 + 2.71758601x^2 - 18.9997913x + 94.33138$$

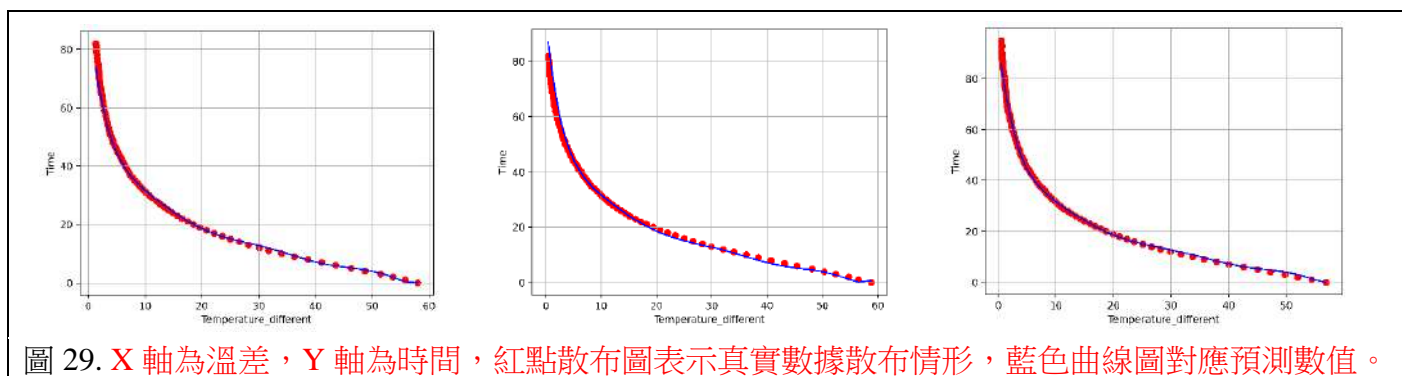
x 為溫差， $f(x)$ 為預估剩餘時間。

5.以想要的溫差輸入，可得所需預估時間，若扣除當下溫差所產生的時間，即可得從需等待時間，即可得到需要等待的時間，其公式如下：

$$WT = f(x_{want}) - f(x_{now})$$

WT 為等待時間， x_{want} 為使用者想要溫差， x_{now} 為現在溫差。

6.再以階段三第(九)部分的三次實驗數據作為測試資料，測試公式實際應用情形，其結果如下圖 29 所示，可觀察到公式擬合結果良好，與真實數據結果差異小。



7.根據步驟 4、5 所得函式，寫入手機程式，最後做出的手機 app 完成品如圖 30，可提醒使用者冷熱水溫度和等待時間，最後提醒使用者熱交換完成，符合生活所需。



肆、討論

一、「保麗龍箱內外貼亮面鋁箔」的實驗，在探討熱輻射的影響。雖然理化課本上講到熱輻射時，都會提到淺色、亮面的熱輻射較低。但是我很好奇這些「理論上的因素」是否真的會影響實驗結果？又會影響多少？

實驗結果鋁箔保麗龍箱隔熱效果較好，與理論相符，除了做為後續實驗表面使用亮面鋁箔的參考依據外，也讓我見識了理論與生活現象的結合。

二、從「熱量回收率」的角度分析本研究

本研究的目標是「節能」，所以一直以「節能百分比」作為指標。而影響節能百分比的因素則是「熱量回收率」，也就是「熱水降溫釋放出的能量被冷水吸收的比例」。我們取達到 T_{CMAX} 時冷熱水溫度變化來討論。依據熱量公式 $H=M \times S \times \Delta T$ 推導熱量回收率，可得公式如下：

$$\text{熱量回收率} = \frac{\Delta T_{\text{CMAX}}}{\text{熱水初溫} - \text{冷水達 } T_{\text{CMAX}} \text{ 時的熱水溫度}} \times 100\%$$

以表 6 第 4 筆數據來看：若熱水初溫以 100°C 計算，熱量回收率= 80.3%。但本研究因為熱水鍋外有裝置不能直接加熱，所以是將熱水煮沸後再倒入「室溫下的熱水鍋」。熱水倒入「室溫下的熱水鍋」中，熱水鍋及裝置內部便立即吸收熱量並達高溫後，才會將熱傳遞到冷水鍋。這部分的熱量是無法回收的。如果修正熱水初溫為「熱水倒入熱水鍋後的溫度(實測為 94°C)」計算，得到熱量回收率達 93.3%！

這個數據還能增加嗎？答案應該是肯定的！分析不同時間熱量回收率發現，隨著實驗時間的增加，熱量回收率會緩慢下降(資料未呈現)，原因是裝置本身的散熱(單位時間散失熱量*時間)。所以，「再加強隔熱裝置與再增加熱交換速度即可」。

三、本研究的節能裝置，究竟能節省多少錢？

李芷樂與李芷蘋(2023)的報告書中有提到：在大火加熱的狀態下，將 19°C 的水加熱到沸騰，需要消耗 51.8L 的天然瓦斯。平均水溫每增加 1 度需要 51.8/81 L 的瓦斯。假設冷水初溫 20°C ，以本研究最後的節能效果 43% 估算，可上升 34.4°C ($(100-20) \times 0.43\%$)，也就是可以節省天然瓦斯約 22L。瓦斯每度(1000L)費用為 10.38 元，所以每次燒水 2 公升，可以節省瓦斯費用為 $22 \times 10.38 / 1000 = 0.228$ 元。如果四口之家，每天燒水 2 次，可以節省 0.456 元，一年累計約 166 元。就金錢的角度，是否划算見仁見智；但就節能與環境永續的角度而言，相信是值得的。

另外，還有一些隱形的價值，例如熱水可因熱交換快速降溫到 55°C 左右，可以適合飲用(這也是本研究最初的動機之一：讓熱水快速降溫)。在隔熱裝置中可以長時間保持熱水適合飲用，也可以減少熱水降溫散熱而造成室內悶熱，而增加室內空調的耗電量。

雖然冷水到達最高溫需要大約一小時左右，可是絕大部分的熱交換都是在最初半小時內就完成了。以「階段三-10 支熱管(14cm+16cm)+加鋁箔罩」來看，冷水的 t_{cMAX} 平均需要 60.4 分鐘(節能 43.3%)，但到裝置 9 成的效果(節能約 38.9%)僅需 26 分鐘，而裝置的八成效果(節能約 34.4%)更只需要 17.8 分鐘。再搭配溫度顯示自行設計的手機 APP 通知，使用者能隨時查看熱交換進度，等待的時間可以做其他事情，所以這樣的時間應該是可以接受的。

四、本研究與李芷樂、李芷蘋(2023)研究的比較

比較項目	本研究	李芷樂、李芷蘋(2023)
題目	廢熱！啟動！節能從廚房開始！	廢熱不廢，節能 30%靠你了！
相似點： 動機與目的	探討如何有效回收熱水降溫所釋放的熱能，使待加熱的冷水升溫，達成節能的目的是。	
相異點： 1.實驗設計	表單調查，確認此研究可適用於本校學區半數以上家庭。	僅考慮作者家庭的需求。
	導熱介質採導熱係數極高的熱管，利用調整熱管數量與分布提高效能	採用水為導熱介質，最後使用抽水馬達循環加速熱交換
	設計使用者介面(軟體與硬體)，使用者可從此介面或手機了解熱交換狀況與預計等待時間。	無
	利用太陽能進行能源收集，使用者介面為自我供電的物聯網裝置。	嘗試利用溫差發電，但因能源轉換效率不佳，僅能 USB 風扇轉動或 LED 照明。熱交換過程需額外消耗電能推動抽水馬達。
相異點： 2.實驗結果	從隔熱裝置、熱交換裝置等方面，有系統地改進，最後達成超過 43.5%的節能效果(實際熱量回收率超過 90%，詳見討論)	作品著重於提高廢熱回收方法的探索與模式建立，最後達成約 30%的節能效果。
	成功設計出使用者介面，透過 IoT 傳訊經由電子紙即時顯示熱交換進度。設計手機 APP，並利用 AI 預測，且裝置能自我供電(太陽能發電)	無

伍、結論

2023 年第 28 屆聯合國氣候變遷大會中，歐盟和世界領導人同意在 2030 年將全球排放量減少 43%(與 2019 年的水準相比)(林良齊，2023)。本研究中利用熱學原理，設計出可以有效回收家庭廢熱的裝置！另外也完成可自我供電的物聯網(IoT)使用者介面設計，並設計手機 APP 程式，讓使用者方便了解熱交換狀況與預估收水時間，這可讓使用者更有效率得規劃行程，這整套模組可適用於許多家庭，期許幫助更多人。節能不能只是口號，希望大至政府企業、小至家庭個人，大家一起啟動節能生活，讓減碳從廚房中開始。

陸、未來展望

一、硬體：改善操作上的便利性

將來有考慮將冷、熱水鍋加裝入、出水口及閥門，再將整個熱交換裝置封閉，使用者可以方便地直接從外面操作(類似開飲機)，操作起來可非常容易。

二、軟體：增加預測熱交換結果的功能

經過多次實驗發現裝置條件相同的狀況下，熱交換時間與節能百分比大致是相同的。未來可以持續累積大量資料，再藉由大數據分析，應該可以根據冷熱水初溫及當時室溫，預估在當時條件下熱交換的結果—包括等待時間與最後溫度。讓溫度顯示與通知部分不只是顯示溫度，還可以更準確地預告等待時間與預計節能結果，讓使用者能更有效的掌握熱交換進度及熱交換後的冷熱水使用時機。

柒、參考文獻資料

- 李芷樂、李芷蘋(2023)。廢熱不廢！節能 30%靠你了！中華民國第 63 屆中小學科學展覽會。
- 曹永忠、許志誠、蔡英德(2023)。ESP32 物聯網基礎 10 門課。崧燁文化事業有限公司。初版。
- 趙英傑(2021)。超圖解 ESP32 深度實作。旗標科技股份有限公司。初版。
- 黃振東、徐振庭(2013 年 6 月)熱電材料。科學發展。486 期。48~53 頁
- Maurizio di Paolo Emilio(2020 年 4 月 15 日)結合熱能與 RF 能量採集為超低功耗裝置供電，電子工程專輯 2020 年 4 月號
- Maurizio di Paolo Emilio(2022 年 12 月 27 日)能讓感測裝置擺脫電池的熱能採集技術。電子工程專輯。2022 年 12 月號
- 林良齊(2023 年 12 月 21 日)。2030 年前溫室氣體減排 43% 環盟籲真節能、轉型、減碳。取自工商時報，網址 <https://www.ctee.com.tw/news/20231221701171-431401>
- 經濟部能源署(2023 年 12 月 20 日)111 年能源供給概況，取自經濟部能源署網站 https://www.moeaea.gov.tw/ECW/populace/content/Content.aspx?menu_id=14435
- 陳奕偉(2023 年 12 月 14 日)COP28 氣候峰會首提擺脫化石燃料 能源轉型分析成果展望一次看，取自中央通訊社。<https://www.cna.com.tw/news/aopl/202312140182.aspx>
- 吳世國(2019 年 10 月 21 日)。淺談工業廢熱回收。能源教育資源總中心。<https://learnenergy.tw/index.php?inter=knowledge&caid=4&id=435>
- 郭雅欣(2021 年 8 月 23 日)。你今天用熱發電了嗎？把廢熱變能源的魔術師——熱電材料。研之有物。<https://research.sinica.edu.tw/thermoelectric-materials-cheny2/>
- 高柏科技(搜尋日期 2024 年 1 月 20 日)。熱導管。<https://www.tglobalcorp.com/tw/product/heat-pipe>
- Stephen Evanczuk(2021 年 2 月 16 日)使用能源採集微控制器就無需更換 IoT 電池 DigiKey 網站。<https://www.digikey.tw/zh/articles/use-an-energy-harvesting-microcontroller-to-eliminate-iot-battery-replacement>
- 金碗國際(搜尋日期 2024 年 1 月 20 日)超級電容。https://www.pactw.com.tw/support/applications_txt?id=35
- ESP32 教學系列(九)：實戰 SPI ePaper 電子紙模組(搜尋日期 2024 年 1 月 30 日)<https://www.circuspi.com/index.php/2024/01/15/esp32-spi-epaper-module/>
- ESP32 DHT11/DHT22 Web Server – Temperature and Humidity using Arduino IDE(搜尋日期 2024 年 1 月 30 日)<https://randomnerdtutorials.com/esp32-dht11-dht22-temperature-humidity-web-server-arduino-ide/>

【評語】 032811

1. 本作品探討將煮沸的熱水在冷卻過程中的廢熱回收利用，達到節能環保的目標，與社會對環保的需求相契合，值得嘉許。
2. 本作品構思清晰，實驗方法遵循科學原則，且實驗結果顯示了其實際效益。
3. 若能進一步探討，熱交換所使用的流體容器、導熱材質、隔熱材質、所需的時間等各項參數，可使作品更加完善。

作品簡報

廢熱！啟動！



節能從廚房開始！

摘要

根據本研究問卷調查結果，顯示本學區內約有 58% 家庭藉由將水煮沸再放涼的模式來製造飲用水，因此從節能減碳的角度上，探討如何回收熱水降溫所釋放出的熱量將有助於環保。本研究運用熱水散失於環境中的廢熱來提高冷水煮沸前的溫度，以減少後續加熱所需能量。於實驗中發現縮小容器體積與熱管長短搭配，並在隔熱裝置及冷熱水鍋之間加上鋁箔罩效果最好，可在 1 小時內節省超過 43% 的能源！甚至只需 15 分鐘就可節能 30%！最後，利用能源採集技術收集太陽能，設計出可自我供電的低功耗 IoT 使用者介面，實時監測水溫狀況，再透過機器學習方法，提供預估的熱交換等待時間的功能，最後將訊息以 Wi-Fi 傳至手機 APP 中顯示。

壹、前言

一、研究動機

晚餐時刻家人將冰箱裡的料理拿出來要加熱食用時，總會在室溫下回溫後再做加熱的動作。因此我思索能否「回收剛煮沸的熱水降溫過程中所釋放的熱量」，幫助食材回溫快些，或者讓料理晚餐的冷水提高溫度，節省後續烹調所需的能源，達成節能的效果，連帶也能讓熱水加速降溫。先前有人探討利用有限成本與材料設計在一般家庭廚房中操作的設備，並達到了 30% 的節能效果(李芷樂、李芷蘋，2023)。因此，我想挑戰熱交換的極限，並設計可預估所需時間的實用裝置。

二、研究目的

- (一) 設計出更高效且容易操作的熱交換裝置，達到最佳的節能效果。
- (二) 應用太陽能發電、儲能啟動溫度監測模組，方便使用者操作並掌握熱交換進度。

貳、研究原理與器材

一、實驗裝置硬體器材

溫度感測器 DS18B20、熱電晶片(TEG-127112)、鋁條(8×1.27×0.65cm、10×1.27×0.65cm)、熱管(23×0.7×0.4cm)、26×1.1×0.3cm(長)與 14×1.1×0.3cm(短)

二、實驗數據記錄與分析軟、硬體

Arduino UNO 板、超級電容(5.5V、5F 及 20F)、BQ25570(能源收集)、ESP32(使用者介面控制板)、0.9V-5V 升壓模組、電子紙(使用者介面顯示溫度)、LCD1602(實驗裝置顯示溫度)、熱顯像儀、示波器(顯示電壓變化)、Arduino(撰寫記錄程式)、PLX-DAQ release 2.0(將數據傳送到 Excel)、Excel(記錄與分析)

三、本海報的圖表，除節能百分比引用前人研究並標註出處之外，其餘皆由作者與第一、第二指導老師繪製或拍攝而成。

四、節能百分比計算公式

$$\text{節能百分比} = \frac{\text{節省的能量}}{\text{總能量}} \times 100\%$$

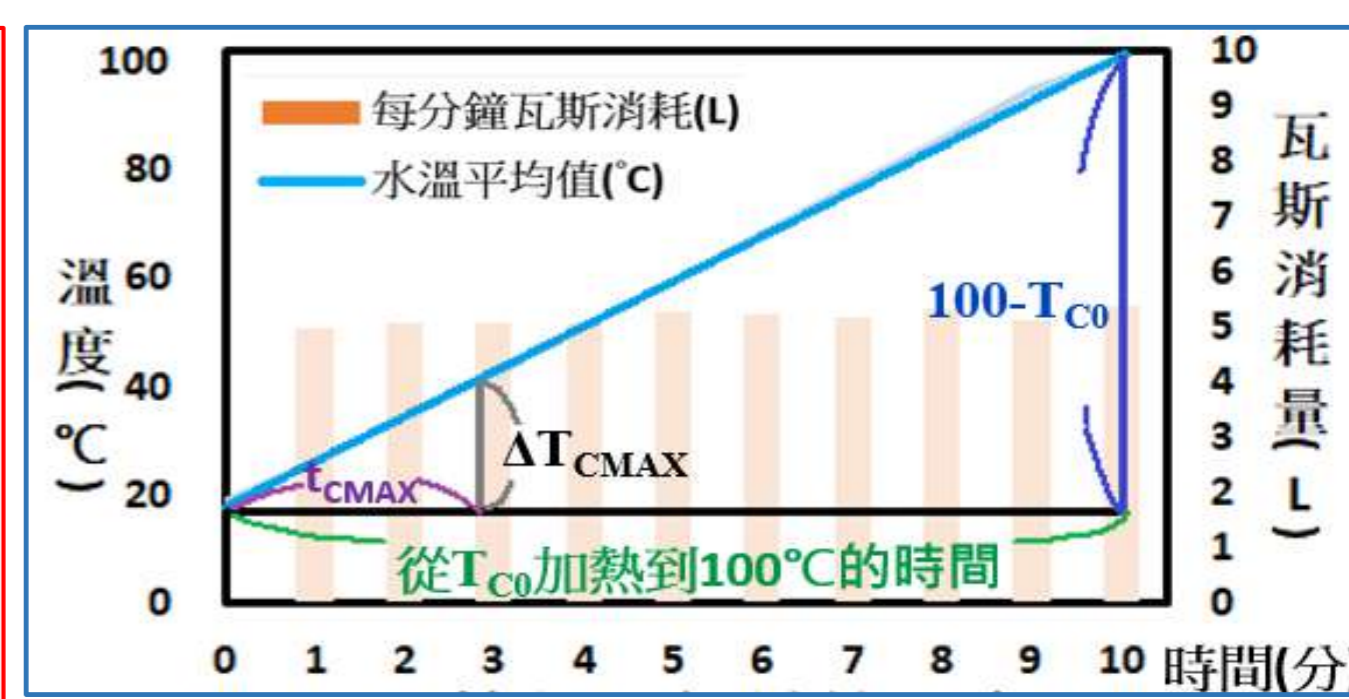
$$= \frac{\text{單位時間瓦斯流量} \times \text{從 } T_{Co} \text{ 加熱到 } T_{CMax} \text{ 的時間} \times \text{瓦斯熱值}}{\text{單位時間瓦斯流量} \times \text{從 } T_{Co} \text{ 加熱到 } 100^{\circ}\text{C} \text{ 的時間} \times \text{瓦斯熱值}} \times 100\%$$

$$= \frac{\text{從 } T_{Co} \text{ 加熱到 } T_{CMax} \text{ 的時間}}{\text{從 } T_{Co} \text{ 加熱到 } 100^{\circ}\text{C} \text{ 的時間}} \times 100\%$$

$$= \frac{t_{CMax}}{\text{從 } T_{Co} \text{ 加熱到 } 100^{\circ}\text{C} \text{ 的時間}} \times 100\%$$

$$= \frac{\Delta T_{CMax}}{100 - T_{Co}} \times 100\%$$

註：本實驗中節能百分比最高值為 50%



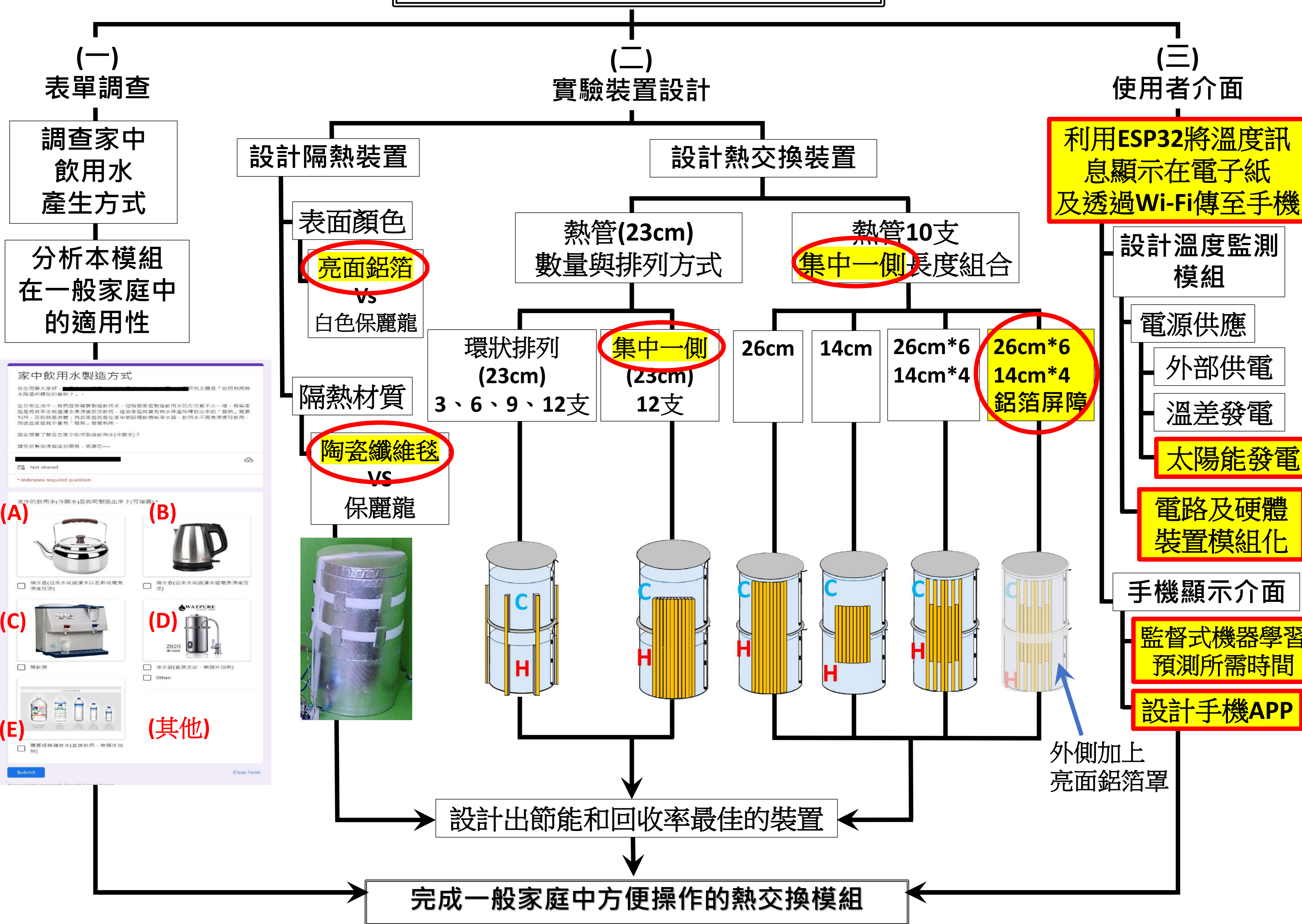
(引用李芷樂、李芷蘋(2023))

T_{CMax} 定義：冷水鍋的最高溫

t_{CMax} 定義：冷水鍋到達最高溫所需時間

參、研究方法

廢熱！啟動！節能從廚房開始！



肆、研究結果

(一) 表單調查家中飲用水的產生方式

目的與方法：製作google表單，並請老師協助於上課時邀請同學填寫，以利了解本實驗裝置適用於多少比例的家庭

結果：如表1，本次有效樣本數為311人，與本實驗高度相關的以燒水壺煮沸再放涼的方式，包括瓦斯(右表A)與電力(右表B)加熱方式共佔58.8%(已扣除重複的人數)。因此本實驗裝置適用本校學區半數以上的家庭。

表 1. 調查家中飲用水產生方式的結果

方式(可複選)	人數
A 燒水壺(瓦斯) ✓	129
B 燒水壺(電) ✓	102
C 開飲機	147
D 淨水器	117
E 購買瓶裝水	88
其他	
喝過濾水、裝水冰冰箱、飲水機、飲水機煮沸放涼、淨水器(有加熱功能)	每項各 1 人

A-1 隔熱裝置

(A) 實驗裝置

(B) 使用者介面

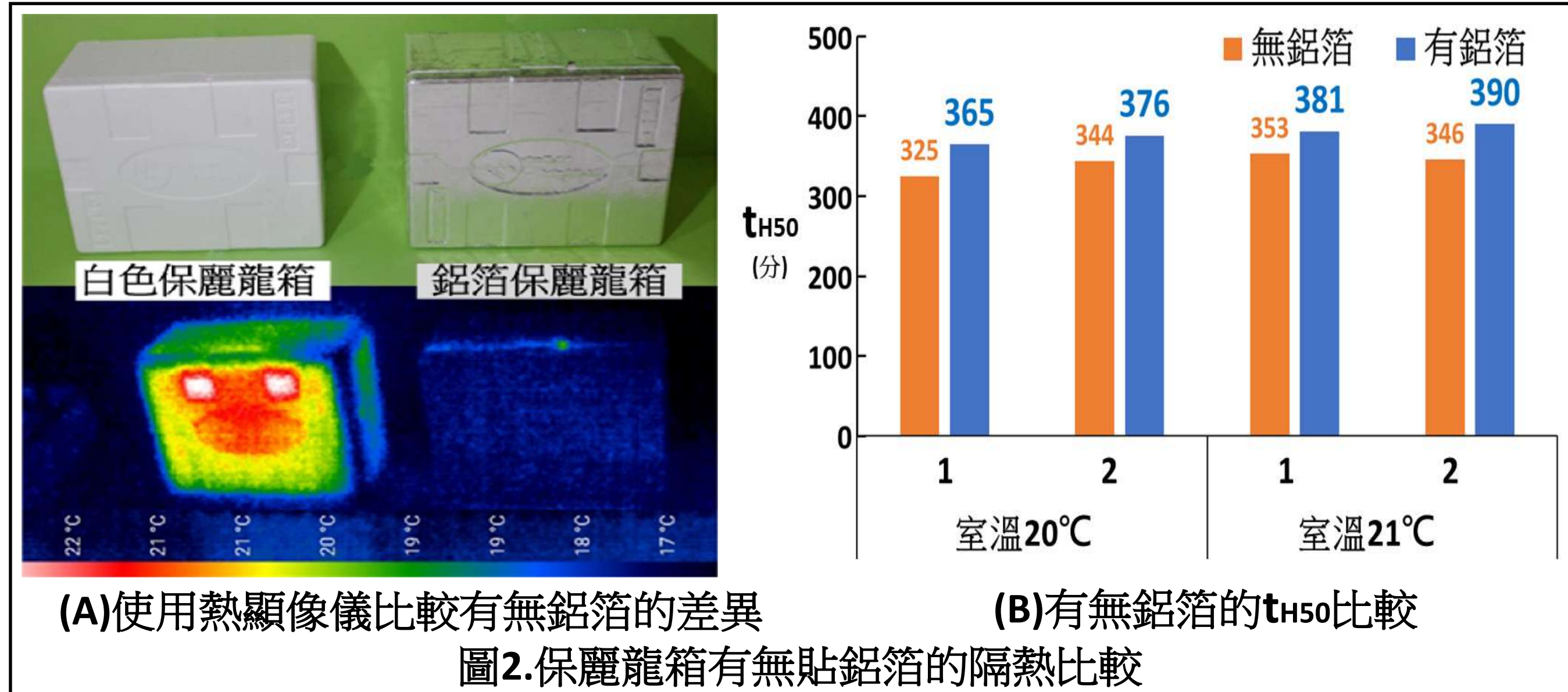


圖1. 裝置完成圖

(二) 實驗裝置設計

設計隔熱裝置

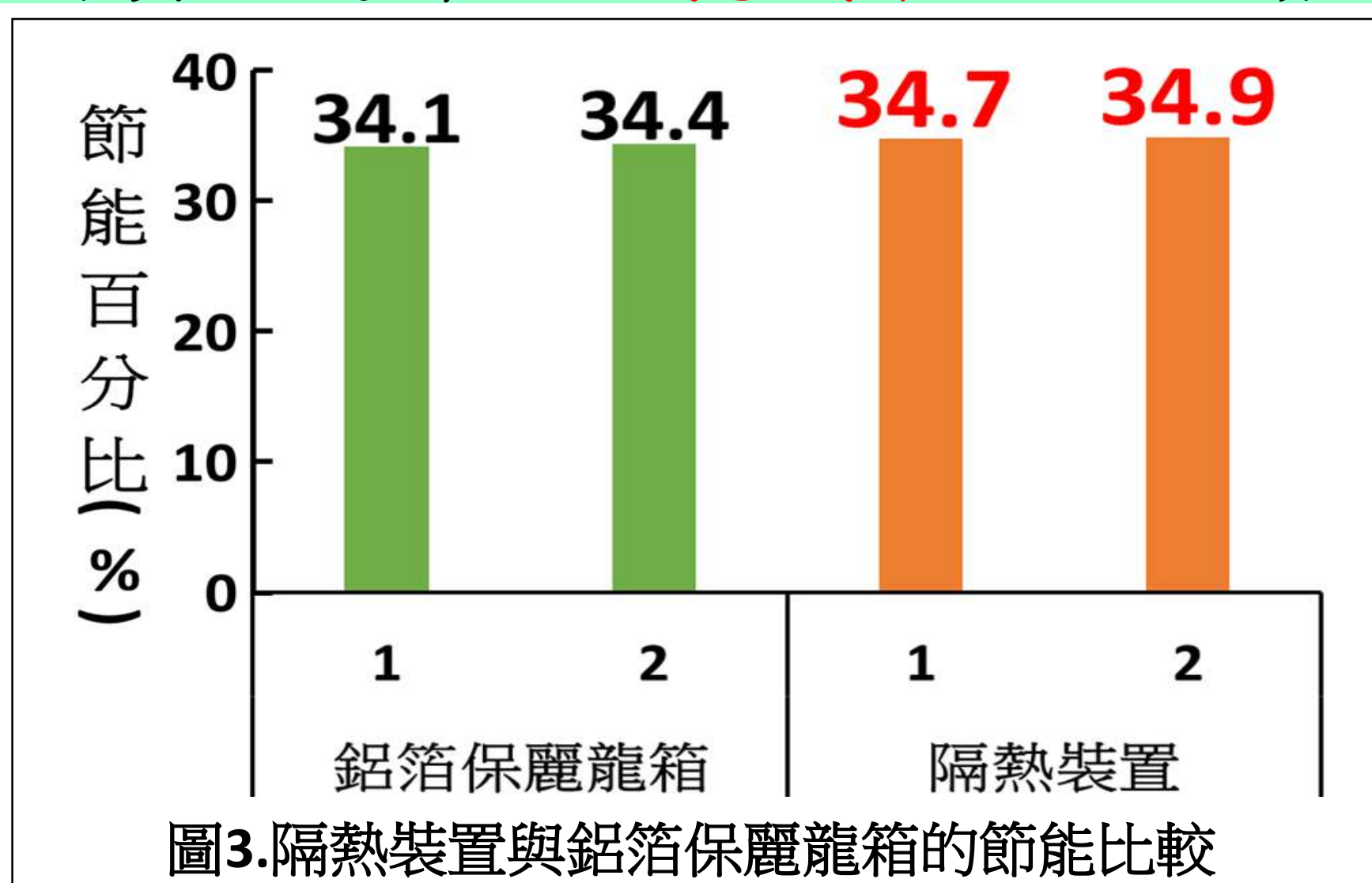
1. 表面顏色的選擇：亮面鋁箔 vs. 白色保麗龍



將2個16cm鍋裝2L沸水分別放入白色保麗龍箱與表面貼鋁箔的保麗龍箱中，記錄溫度降至50°C所需時間(t_{H50})。

結果：如圖2A，熱顯像儀顯示鋁箔保麗龍箱抑制熱輻射的效果優於白色寶麗龍箱；從圖2B可見鋁箔保麗龍箱的 t_{H50} 較長，表示隔熱效果較好。因此本實驗設計的**隔熱裝置**在內外側均加上鋁箔。

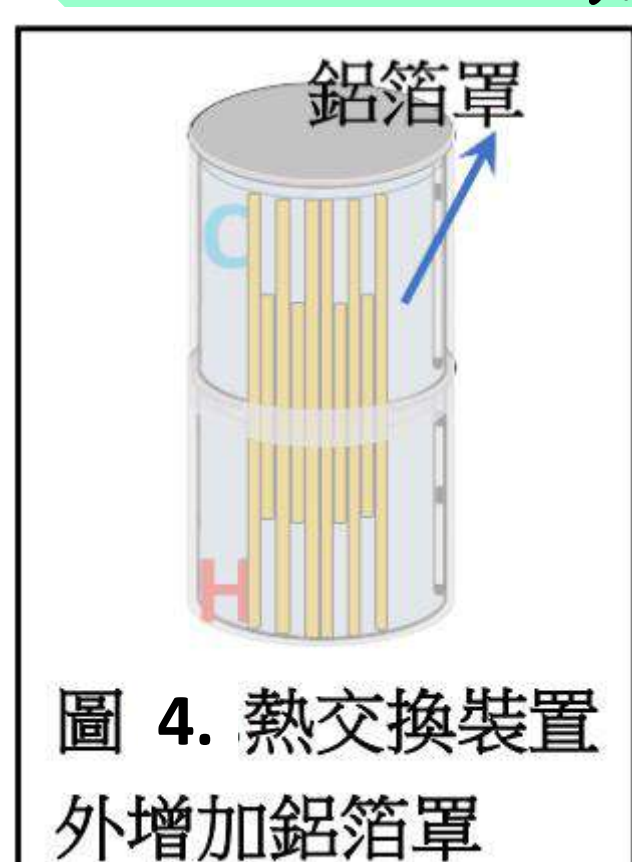
2. 內側隔熱材質的選擇：陶瓷纖維毯 vs. 保麗龍



因為保麗龍在高溫下會因為不耐高溫而產生異味，因此我採用陶瓷纖維毯填充於自製的隔熱裝置中，並與鋁箔保麗龍箱分別進行熱交換實驗。

結果：如圖3，顯示陶瓷纖維毯的**隔熱裝置更耐高溫，且節能百分比高於鋁箔保麗龍箱**。推測原因：a.陶瓷纖維毯與保麗龍的導熱係數差不多，但厚度較厚，因此隔熱效果較好；b.本隔熱裝置是依鍋子大小製作，表面積小，熱輻射也較少。

3. 熱交換裝置外添加鋁箔罩的影響

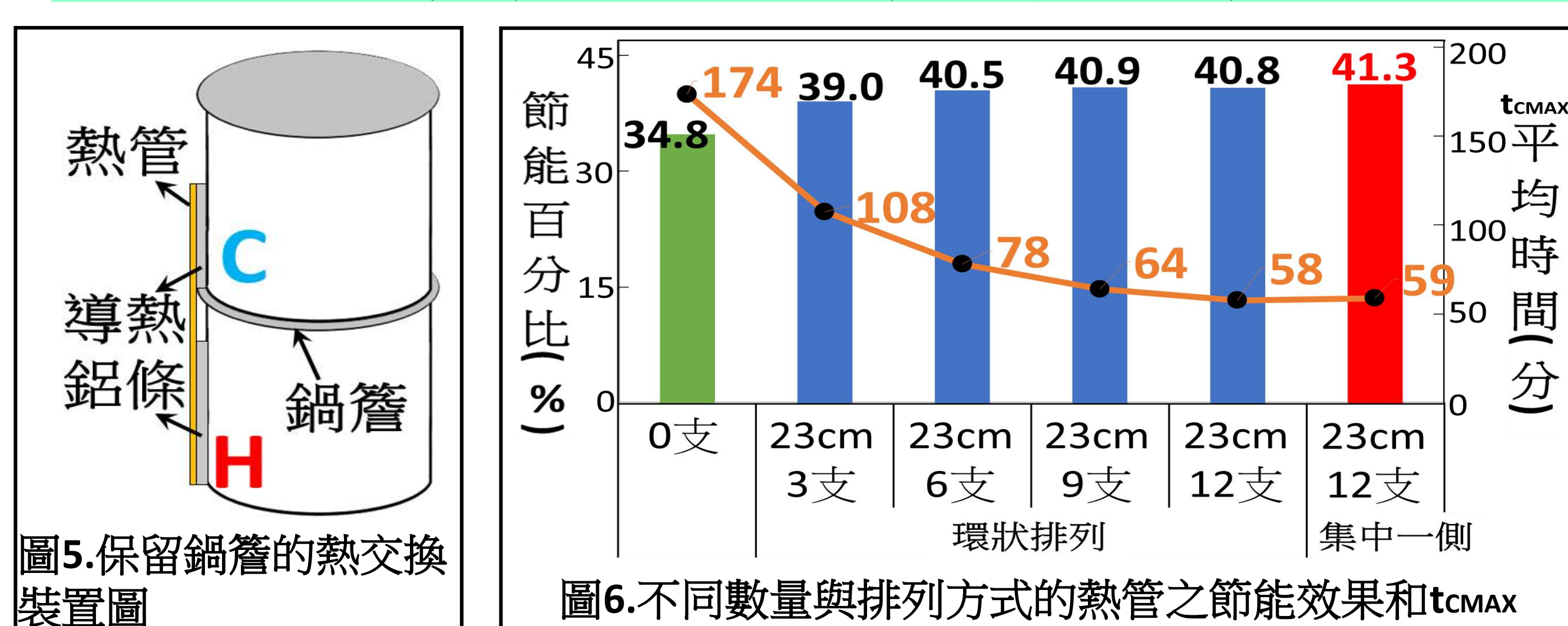


結果：利用亮面鋁箔，製作出簡單門字型罩子，罩在冷熱水鍋外(但仍在隔熱裝置內)(圖4)，利用鋁箔罩**反射輻射熱，達到雙層隔熱的效果**，使本裝置能再增加節能百分比**0.5%，達到43.3%**！(表2)

實驗	$t_{C_{MAX}}$ (分)	節能百分比(%)
26cm 熱管×10	53.0	42.7
14cm 熱管×10	82.7	41.8
26cm×6 + 14cm×4	55.0	42.8
26cm×6 + 14cm×4 + 鋁箔罩	60.8	43.3

設計熱交換裝置

1. 熱管數量與排列方式的探討

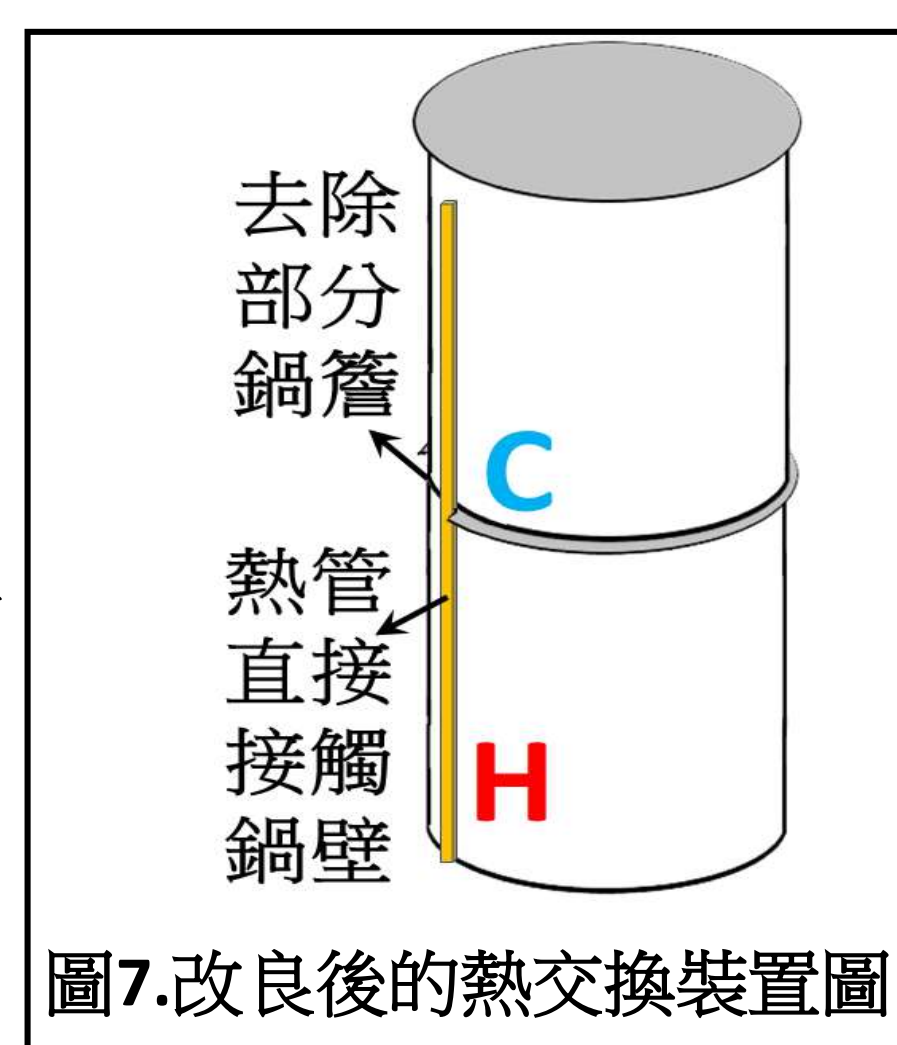


將長*寬*厚23*0.7*0.4cm熱管(以下簡稱23cm熱管)3,6,9,12支環狀排列於16公分鍋外，因為有鍋簷，所以使用鋁條墊於鍋壁與熱管之間(圖5)，交接處均塗抹適量導熱膏。最後再進行12支熱管集中於一側進行實驗。

結果：如圖6，(1)熱管數量增加，原則上可縮短熱交換時間，並提高節能百分比；(2)必須減少不必要的裝置；(3)熱管集中一側可提高節能百分比，並使操作便利。

2. 熱管10支集中一側，長短組合的探討

裝置改良：依前述結果調整，使用14cm鍋，並且去除掉1/4的鍋簷(圖7)，讓熱管直接與鍋壁接觸，不須使用鋁條傳熱。縮小鍋子可減少鍋子吸收的熱，也使鍋內水高度接近鍋蓋，縮短熱傳播距離。



熱管長短組合的探討結果：

(此處使用長度26與14cm二種熱管，寬度和厚度皆分別為1.1與0.3cm)

(1)使用10支26cm熱管：節能百分比為42.7%(表2)，冷熱水鍋中水溫分層明顯(圖8A)

(2)使用10支14cm熱管：和(1)相比，節能百分比減少0.9%， $t_{C_{MAX}}$ 增加29.7分鐘(表2)推測是熱管縮短，有效接觸面積僅約1/2，影響導熱效果但短熱管有效地促進水的對流，水溫分層不明顯(圖8B)

(3)6支26cm+4支14cm熱管：雖然減少熱管總面積但利用了傳導與對流的特性，和(1)比較，節能百分比增加0.1%(表2)，水溫略有分層(圖8A、C)

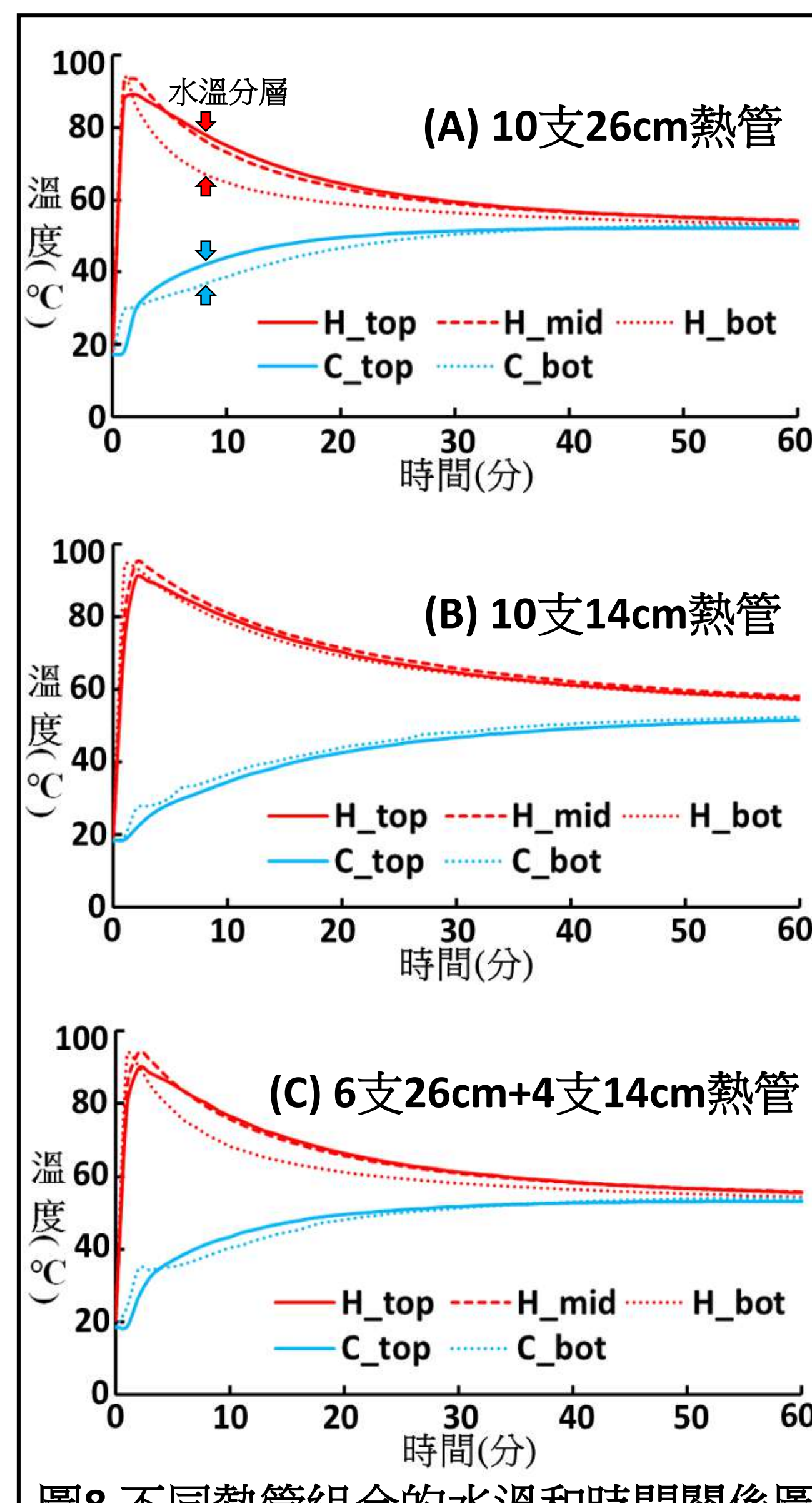


圖8. 不同熱管組合的水溫和時間關係圖

綜合本頁結果，熱管長短組合可兼顧熱的傳導與水的對流，再用鋁箔罩加強隔熱裝置，可達到最佳效果。

(三)使用者介面設計

使用者介面可方便掌握冷、熱水溫度，並預測所需時間。包括1.溫度監測模組(含軟硬體與供電)與2.手機顯示介面。限於篇幅，此處僅呈現最終成果

溫度監測模組

1. 太陽能發電並自我供電

裝置模式如圖9與圖10

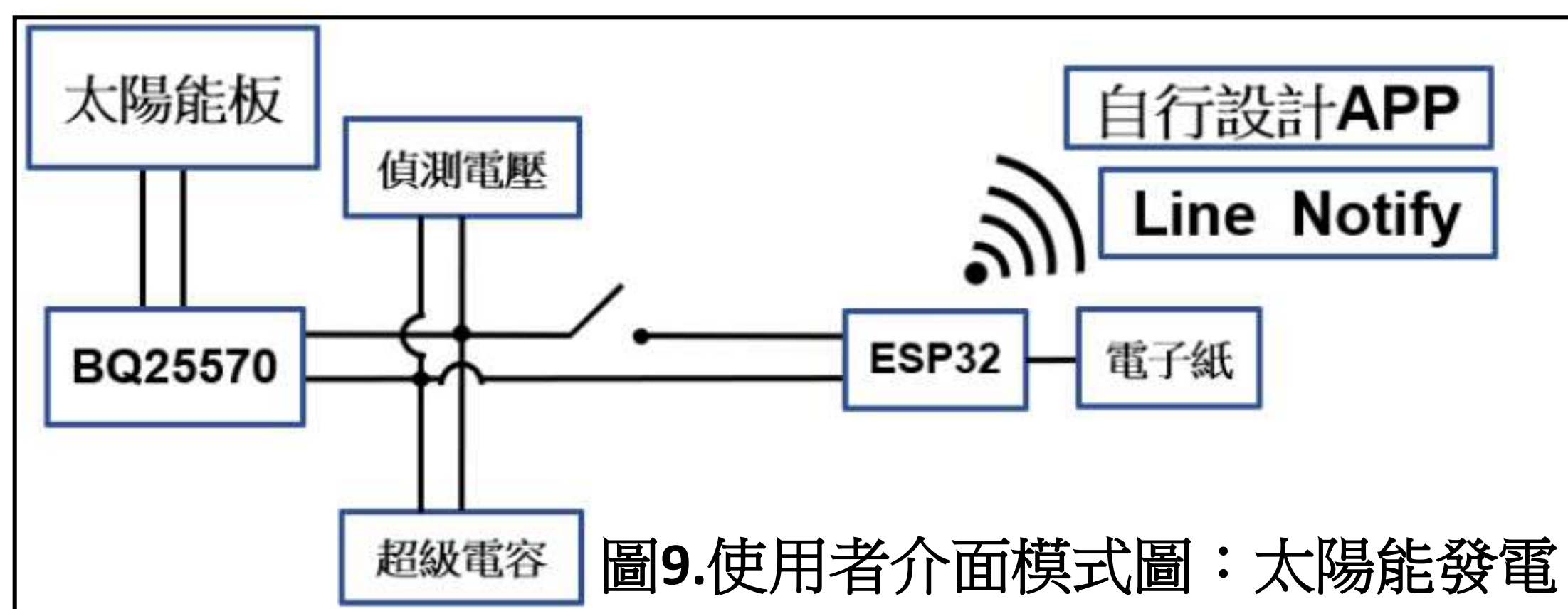


圖9.使用者介面模式圖：太陽能發電

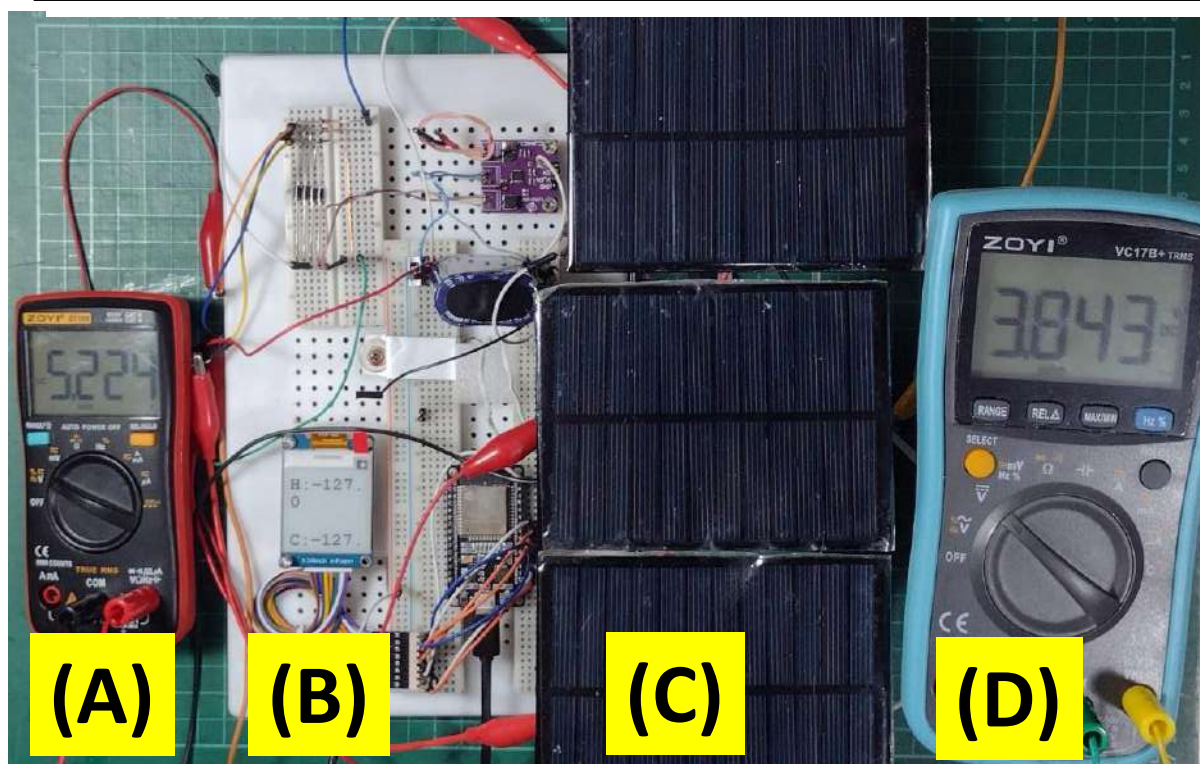


圖10.使用太陽能供電

- A 超級電容的電壓
 - B 使用者介面模組
 - C 太陽能板
 - D 太陽能板輸出電壓
- ※即使太陽能板輸出電壓低於超級電容，仍可為超級電容充電

結果：(1)裝置放置在明亮的陽台(漫射光)條件下，半天左右可將 20 法拉的超級電容從 1V 充電到 5V 以上。(2)超級電容在 5V 以上時，手動開啟開關，可持續更新電子紙及透過 Wi-Fi 傳送訊息到 Line Notify 超過 30 次以上(間隔 1 分鐘)！

2. 硬體模組化設計

溫度監測模組因為需要經常移動到明亮處充電，所以我設計出體積小、易插拔的裝置。將所需的電子元件、模組，規劃焊接於萬用電路板，並完成布線。最後將電路板安裝於透明壓克力盒中，成品如圖1B-1和圖11。

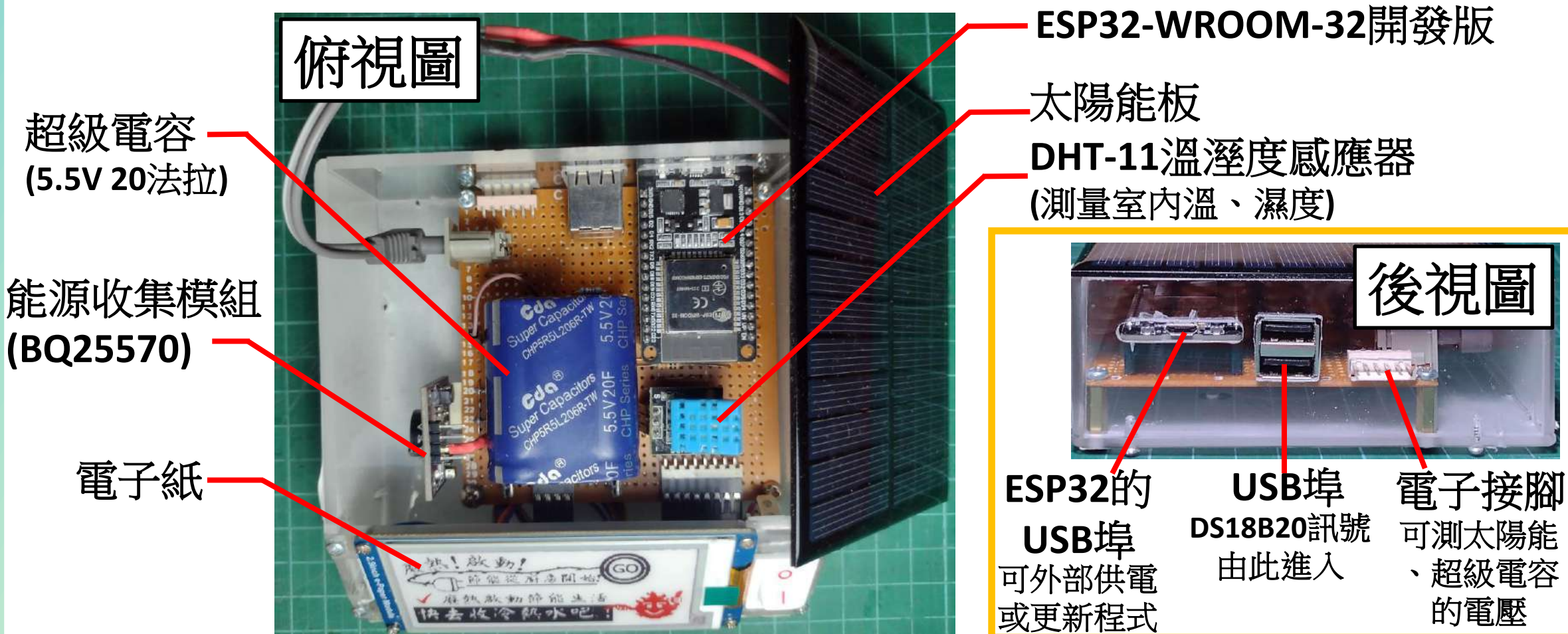


圖11.溫度監測模組：(左)內部構造(右)背板接孔

手機顯示介面

APP設計與

利用監督式機器學習預測熱交換所需時間

- 1.使用者除可透過溫度監控模組了解熱交換進度外，我也利用Arduion IDE設計程式使ESP32將溫度訊息透過Wi-Fi傳到手機自行設計的APP端(利用App Inventor設計)，使用者即使不在現場也可透過手機掌握目前冷熱水溫度。
- 2.此外，我還利用監督式機器學習方式，增加預測熱交換完成時間的功能，讓使用者知道何時可收取適當溫度的水。

(1)利用Python函式庫，以先前實驗的數據為基準，使用多項式擬合(Polynomial Fitting)方法，找出能代表溫差與時間關係的函數。

(2)我透過均方誤差(MSE, mean-square error)找出最好的擬合曲線，結果如圖12，可以看出在次方數 ≥ 8 ，MSE變化值不明顯，故以次方數8為結果。

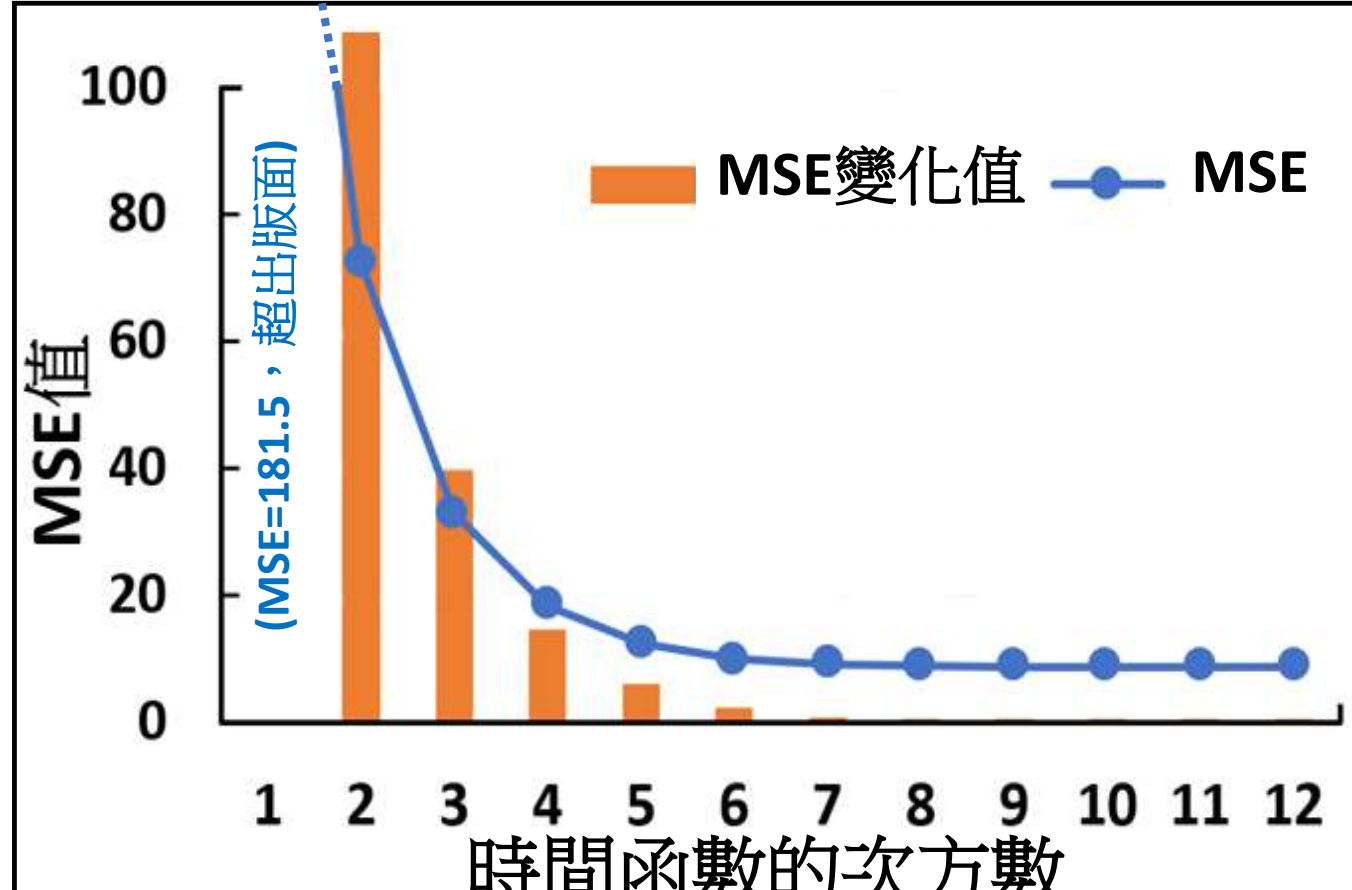


圖12.時間函數的次方數與MSE值和MSE變化值(取絕對值)之關係圖

(3)透過曲線擬合找出溫差與時間的函數如下：

$$f(x) = 2.34840955 \times 10^{-10}x^8 - 5.92984278 \times 10^{-8}x^7 + 6.22665486 \times 10^{-6}x^6 - 3.52591136 \times 10^{-4}x^5 + 1.16929151 \times 10^{-2}x^4 - 2.31746843 \times 10^{-1}x^3 + 2.71758601x^2 - 18.9997913x + 94.33138$$

x 為溫差， $f(x)$ 為預估剩餘時間。(x=0~60°C)

4.程式設計流程圖如圖13，實際的手機APP顯示畫面如圖1B-2，提醒使用者冷熱水溫度和剩餘時間，最後提醒熱交換完成，符合生活所需。

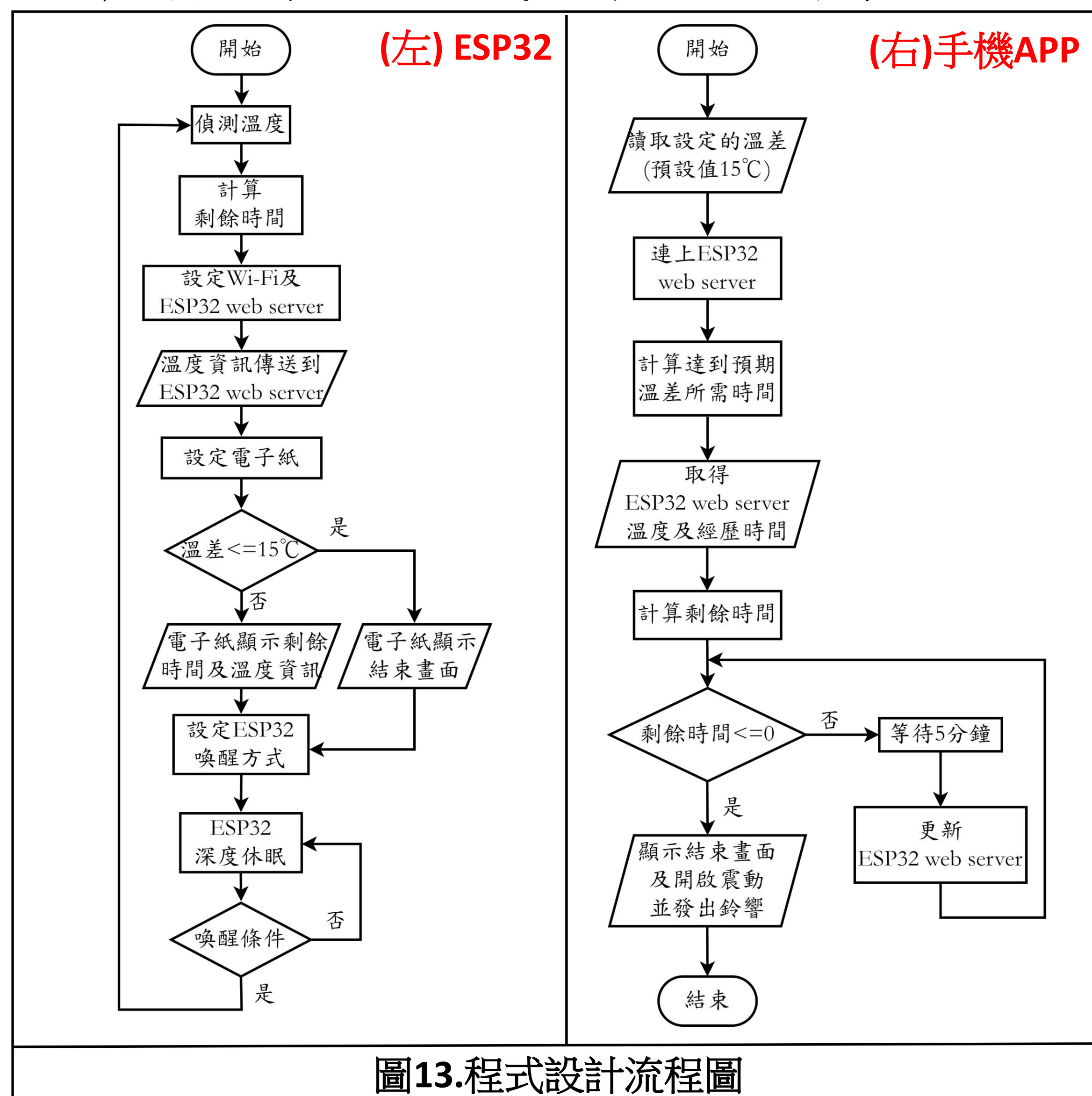


圖13.程式設計流程圖

伍、討論

(一)從「熱量回收率」的角度分析本實驗

本實驗的目標是「節能」，所以一直以「節能百分比」作為指標。而影響節能百分比的因素則是「熱量回收率」，也就是「熱水降溫釋放出的能量被冷水吸收的比例」。取達到 T_{CMAX} 時冷熱水溫度變化來討論。依據熱量公式 $\Delta H = M \times S \times \Delta T$ 推導熱量回收率，得公式：

$$\text{熱量回收率} = \frac{\Delta T_{CMAX}}{\text{熱水初溫} - \text{冷水達} T_{CMAX} \text{時的熱水溫度}} \times 100\%$$

本實驗熱水初溫均以 100°C 計算，**熱量回收率=80.3%**。但因為熱水鍋外的裝置吸收熱量並達高溫後，才會將熱傳遞到冷水鍋。如果修正熱水初溫為「**熱水倒入熱水鍋後的溫度(實測約為 94°C)**」計算，得到**熱量回收率達93.3%**！

(二)本實驗的節能裝置的價值

- 1.經濟方面的價值：根據前人報告書中「瓦斯消耗與水溫上升關係」的數據，搭配本研究最佳的節能效果來計算，每次燒水 2 公升可以節省瓦斯費用為**0.228 元**。
- 2.環境方面的價值：從節能與環境永續的角度而言減少化石燃料，就可減緩暖化相關問題。
- 3.生活便利的價值：例如加速熱水降溫，適合飲用**減少室內熱源，可減少空調負擔；熱交換後的冷水若用來洗碗，可增加油脂流動性，減少清潔劑使用**等等。

雖然冷水到達最高溫需要大約1小時，可是絕大部分的熱交換都是在最初半小時內完成。以「長短熱管搭配並加鋁箔罩」為例，冷水的 t_{CMAX} 平均需要 60.4 分鐘(節能 43.3%)，但到裝置 9 成的效果(節能約 38.9%)僅需 26 分鐘，而裝置的8成效果(節能約 34.4%)更只需要 17.8 分鐘。搭配溫度顯示與手機通知，使用者能隨時查看熱交換進度，進一步利用等待時間，進行其他活動。

陸、結論

2023 年第 28 屆聯合國氣候變遷大會中，歐盟和世界領導人同意在 2030 年將全球溫室氣體排放量減少 43%(與 2019 年的水準相比)(林良齊, 2023)，本實驗中充份利用熱學原理回收家庭廢熱且達標！並且實現自我供電的物聯網裝置(IoT)的設計。節能不能只是口號，希望大至政府企業、小至家庭個人，大家一起用廢熱啟動節能生活，讓減碳從廚房中開始。

柒、參考文獻

李芷樂、李芷蘋(2023)。廢熱不廢！節能30%靠你了！中華民國第63屆中小學科學展覽會。林良齊(2023年12月21日)。2030年溫室氣體減排43% 環盟籲真節能、轉型、減碳。取自工商時報網址https://www.ctee.com.tw/news/20231221701171-431401