

中華民國第 63 屆中小學科學展覽會
作品說明書

國小組 生活與應用科學科(二)

第三名

082930

以水換電—節能室內空間水冷降溫系統設計與
效能探究

學校名稱：新北市泰山區同榮國民小學

作者： 小六 翁煦翔 小六 郭丞凱 小六 李承叡 小六 胡守德 小五 林煜宸	指導老師： 姜文斌
---	------------------

關鍵詞：水冷降溫系統、熱傳現象、節能建築

摘要

如何以最少的碳排放量，讓悶熱的室內空間迅速降溫？本研究結合熱傳理論及節能建築理念，設計以冷水循環來降低室溫的節能系統，並以空間比例 1/6 的模擬屋進行降溫實驗。從實驗結果發現：冷卻水管接觸面積越大、彎折越少流速越快，降溫效果越好，其中以回字型排列中央出水的冷卻水管，30 分鐘內可將內部溫度降低 8.5°C。同管徑的銅管與矽膠管降溫效果，因冷卻水溫高低而改變，低溫時銅管效果較佳。三種循環水桶冷卻方式中，採用冰磚冷卻即可保持冷卻水處於低溫狀態，達到良好的降溫效果，可整合綠能或河水、地下儲水系統等低碳排自然資源，進行冷卻水的降溫及更換，降低冰磚的使用量，以減少系統電能消耗，達到節能減碳的目的。

壹、前言

一、研究動機

去年（2022 年）暑假時，學校總務處在各班教室裝設了 2 台冷氣機，讓我們夏天上課時能有個涼爽的環境。開學後由於天氣炎熱，教室內氣溫曾高達 33 度，因此各班級紛紛打開冷氣機來降溫，全校同時間用電量大幅提升，而冷氣機室外機排出的熱氣，也造成教室外溫度更為提升。對於國家整體用電吃緊，碳排放量增加，並造成自然環境溫度上升的影響，令人非常憂心。我們思考—「除了使用冷氣機來降低室內空間溫度外，是否可以利用低碳的自然資源取代電力，以最少的碳排放量來達到良好的降溫效果？」為了證明這個想法是否可行？我們研讀熱傳播相關知識，並參考國內外相關研究案例，利用自然環境中可循環再生且比熱高的水資源作為冷卻劑，嘗試設計不同排列、材質及循環方式的冷卻管線，並透過環境模擬的實驗驗證，來找到一套可以減少碳排放量且冷卻效果良好的室內空間降溫系統。

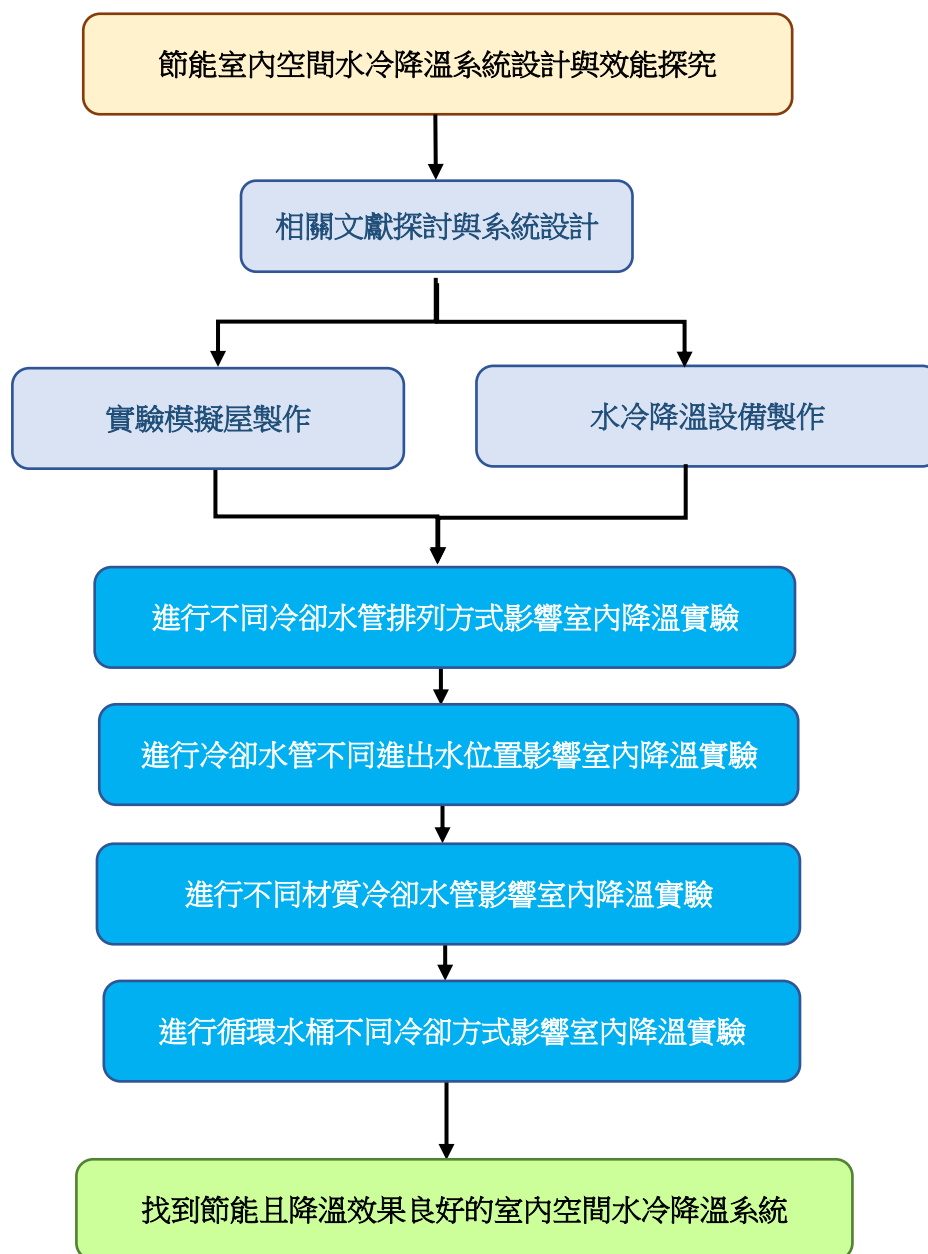
二、研究目的

依據上述動機，我們進行文獻探討、實驗與結果分析，以完成下列研究目的：

- （一）比較不同冷卻水管排列方式對降低室內空間溫度的差異。
- （二）比較冷卻水管不同進出水位置對降低室內空間溫度的差異。
- （三）比較不同材質的冷卻水管對降低室內空間溫度的差異。

- (四) 較不同冷卻方式的循環水桶對降低室內溫度的差異。
- (五) 找到節能且降溫效果良好的室內空間水冷降溫系統。

研究架構圖



三、研究範圍與限制

本研究主要在探討：如何於室內空間中，安裝具節能且能有效降低室內空間溫度的水冷系統。因此有關建物使用的建材、室外及頂樓隔熱方式對室內空間溫度的影響，不列入本研究探討範圍。另外，本研究以實際空間高度 300cm 縮小為 1/6 比例

(40cm*40cm*50cm) 的模擬屋進行實驗，取得的數據與結果可用來判斷：哪些因素會影響室內空間的降溫效果，但無法將實驗溫度變化值，直接套用至實體空間中，仍須調整設備配置規模及進行實體空間的降溫實驗，方能找到更精確的結果。而各變因實驗於不同日期進行，環境溫溼度及水溫略有差異，無法進行多變因間實驗結果的比較，只能就單一變因實驗取得的數據進行分析。

四、文獻探討

(一) 室內空間水冷降溫系統相關案例

1. 巴黎地下都市供冷系統：

整套系統的運作是引賽納河河水過濾後用綠電冷卻，再注入地下水網，輸送到巴黎地下 700 多處，包含羅浮宮、奧賽美術館、皮勒耶音樂廳、巴黎大堂商圈、醫院、辦公大樓、數據中心、市政廳、國會大樓；透過熱交換器，吸走建築的熱，讓室內溫度低於戶外 5 至 8 度，再將升溫至 12°C 的水，回頭排進賽納河（圖 1）。它冷卻的樓地板面積相當於 128 個東京巨蛋，能源效率也是一般空調的兩倍；碳排放量減少一半，省下 35% 的電、65% 的水、80% 的化學產品，並在 2018 年實現碳中和。

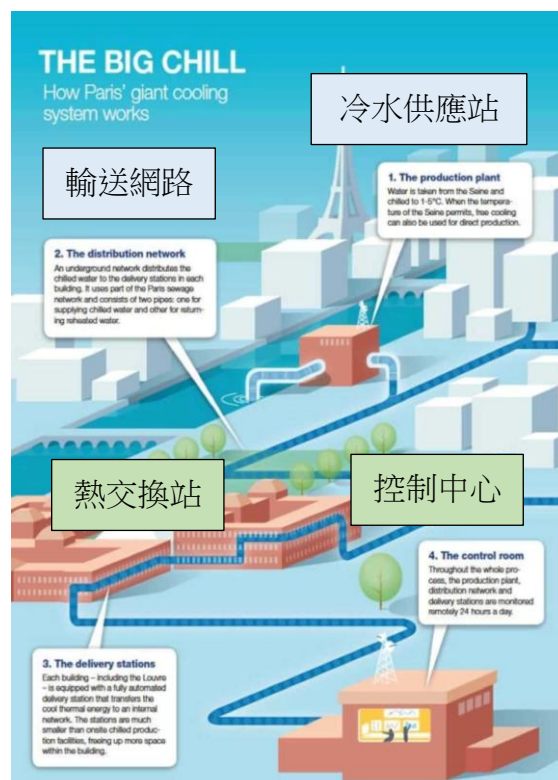


圖 1 巴黎地下都市供冷系統示意圖
(資料來源：Alfa Laval Corporate AB)

2. 新加坡 ETH 研究中心未來城市實驗室室內空調系統：

捨棄原有一般大樓的中央空調，導入用水傳導的空調系統，透過建築立面或樓層結構，去整合這套系統（圖 2）。將原本天花板上方將近 1 公尺的中央空調管道間完全省下來，改裝設體積較為扁平的冷水管冷卻裝置，並透過攝氏 16 度的循環冷水，將室內上升的熱空氣冷卻，變成冷空氣後再回到地面，達到降溫的效果，而這套系統比一般使用中央空調的大樓節電 40%，並因為空調管道間縮減，使得原本只能容納兩層樓的樓層高度，變成可以容納三層樓，讓大樓的空間使用率更為提升。

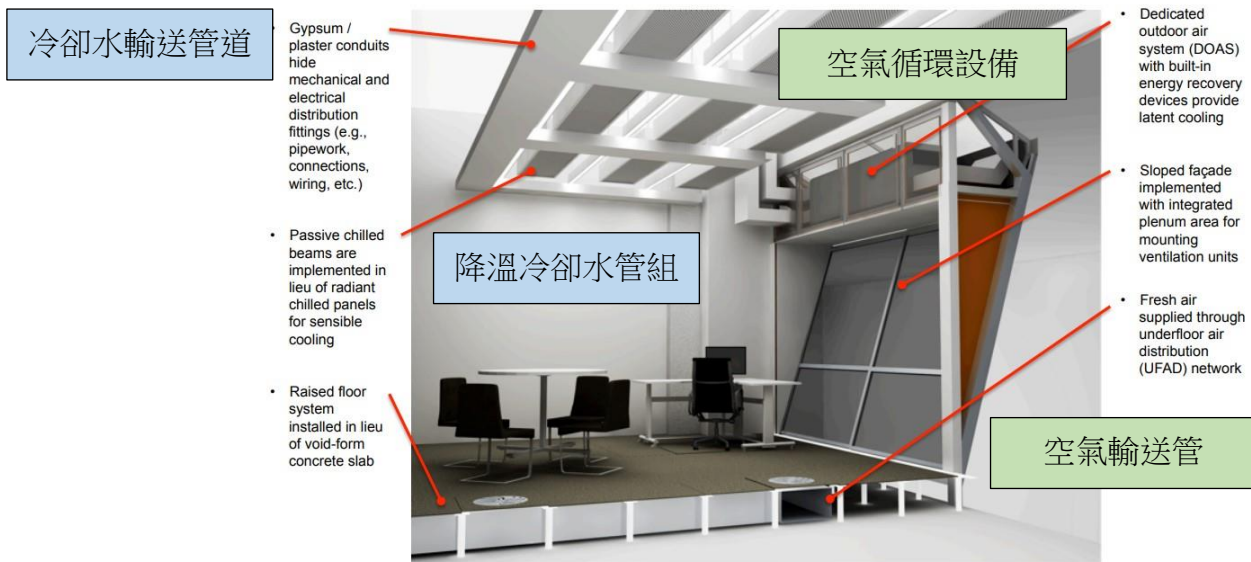


圖 2 新加坡 ETH 研究中心室內空調系統示意圖
(資料來源：CTBUH Journal)

(二) 用於降溫的科學理論—熱傳現象

溫度是用以測量分子運動能量的度量標準，分子運動能量愈大則此分子的溫度愈高，在人類生存的環境中，溫度的高低會直接影響到人體的舒適度。而熱傳現象是指以各種形式熱能轉移現象的總稱。(邱繼哲，2002)

根據物理機制的不同，熱傳的方式可分為「傳導」、「對流」和「輻射」三種。而一般自然界物體的熱量流動，依狀態可分為「熱傳導」、「熱傳遞」及「熱傳透」三種情形(圖3)。(賴榮平等，1991；周鼎金，1995) 以下分別說明：

1. 「熱傳導」是指固體內部的熱流動狀態，物體內部溫度有差異時，內部與接觸物質不經物質運動，即可產生熱的移動現象。
2. 「熱傳遞」是指固體與流體間的傳熱狀態，即由傳導、對流與輻射三種方式所組成的傳熱現象。在工程學上則將固體及其表面接觸的流體相互間的熱能交換，稱為熱傳遞。
3. 「熱傳透」是指熱傳導與熱傳遞的綜合過程，即固體所遮斷的兩面流體間熱流動狀態。室內熱環境中主要的問題是穿透牆面進入室內的熱量，通過類似牆壁的固體物，自一側流體向另一側流體傳熱的現象。

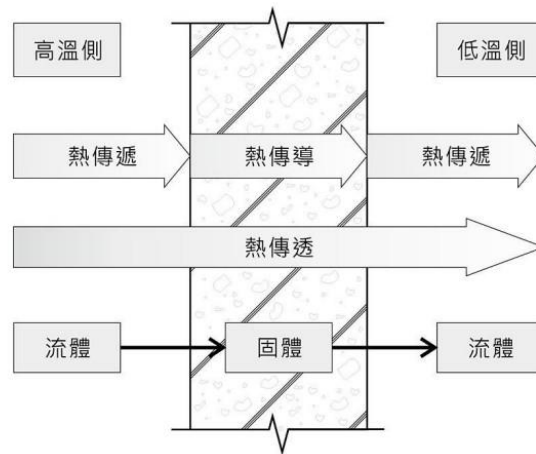


圖 3 熱傳導、熱傳遞、熱傳透示意圖

(資料來源：賴榮平等，1991；周鼎金，1995；許克維，2013)

根據上述相關理論，本研究將運用「傳導」、「對流」和「輻射」三種熱能交換原理，來設計室內空間水冷降溫系統的各项裝置，並進行相關實驗來觀察系統在「熱傳透」狀態下，對於室溫的改變情形，以設計出降溫效果良好且具節能的系統。

(三) 相關研究成果分析

在近 15 年全國科展歷屆作品中，以水冷裝置為建物降溫的作品共有 3 件，為了解這些作品研究的成果及差異，以下列表（表 1）進行比較分析，以從中獲得本研究所需要的專業知識，並了解尚未深入研究的範圍。

表 1 全國科展水冷降溫相關研究比較表

屆別	組別	作品名稱	探究主題與研究成果
48	國中	節能建築之水冷散熱系統設計與改進	<ol style="list-style-type: none"> 1. 利用日夜溫差的現象，在夜間儲存冷卻水體，而於日間將低溫水送入建築結構裏的冷卻管路中，降低來自天花板和牆面的輻射熱。 2. 視不同房間之需要，於各個受熱的地方，彈性配置冷卻管路，可以主動移除特定位置之熱量。
50	國小	涼快一「夏」	<ol style="list-style-type: none"> 1. 單一隔熱降溫措施以屋頂定時灑水效果最好。 2. 在教室旁種樹或是在教室外牆種植攀沿植物都能使教室內達到降溫的效果，但

			<p>效果並不特別顯著。</p> <p>3. 若想要以空中花園或頂樓定期灑水來達到隔熱降溫的目的，也可以同時建置太陽能板、蓄電池、馬達與灑水器，利用太陽能抽取水撲滿的水灌溉空中花園，完成自給自足系統。</p>
57	國中	牆壁裡的魔法-儲水袋溫度調節再利用系統	<p>1. 水的比熱大，溫度不會有劇烈的變化，適合用來隔熱，讓建築物冬暖夏涼。</p> <p>2. 於牆壁內裝設儲水袋，引入雨水補充，加熱後的水，可以當作廁所用。水。</p> <p>3. 利用太陽能加熱蝸牛式循環加熱器，減少瓦斯或電能。</p>

由上表分析結果可知：以自然冷卻的水，透過牆壁內管線傳導或液體噴灑，可以降低建築溫度，但有關本研究所提問題—「如何於既有室內空間中，架設熱傳透效果良好的管線，並因應區域環境差異來冷卻循環水，以建置低碳排且節能的水冷降溫系統？」目前尚無相關研究，因此本研究將參考巴黎地下都市供冷系統及新加坡 ETH 研究中心未來城市實驗室室內空調系統之設計理念，並運用熱傳現象的熱能交換原理，深入探究「系統中各型冷卻水管排列、材質及循環水桶冷卻方式的差異，是否會對降低室內空間溫度的效能產生影響？」以做為未來相關研究或實際建置系統之參考。

貳、 研究設備及器材

一、模擬屋製作：10mm 厚風扣板、透明塑膠板、熱熔槍、10W 鹵素燈*2、PP 板。

二、測量儀器：定時偵測溫度感測器、溫溼度計、計時器、紅外線熱影像儀。

三、水冷降溫系統：PLA 3D 列印線材、4mm 矽膠水管、4mm 銅管、8mm 矽膠水管、

8mm 轉 4mm 接頭、束線帶、12V 揚水泵補、1570c.c.循環水桶、保麗龍箱、500gw

保冷冰磚、12V 製冷晶片、25c.c.冷卻水排、散熱鰭片及風扇、12V 電源供應器。

參、 研究過程及方法

一、 比較不同冷卻水管排列方式對降低室內空間溫度的差異

(一) 製作降溫實驗模擬屋：

1. 為模擬高溫下的室內空間環境，本研究使用厚度為 10mm 的風扣板，製作了長 40cm、寬 40cm、高 50cm 的模擬屋（圖 4），並在立面牆上分別挖出 25cm*20cm 的窗口，並貼上透明塑膠板，以方便進行內部觀察。
2. 在模擬屋底部安裝兩盞鹵素燈來加熱內部（圖 5），塑造高溫下的環境。
3. 為測得內部溫度變化情形，在模擬屋同一側的頂部、中部、底部各裝上一組可定時偵測的溫度感測器，以紀錄模擬屋內部各高度溫度。（圖 6、7）



圖 4 製作模擬屋

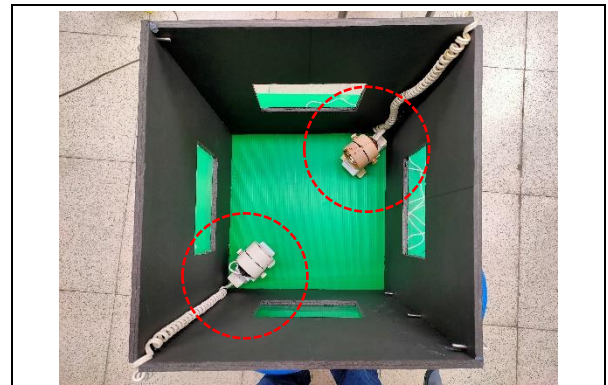


圖 5 於模擬屋內部架設鹵素燈

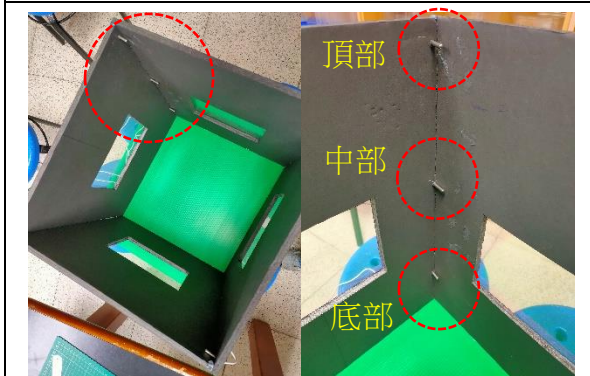


圖 6 於頂、中、底部安裝溫度感測器



圖 7 溫度感測器主機固定模擬屋外

(二) 製作各型不同排列方式的冷卻水管及循環水桶：

1. 以 Tinkercad 3D 建模軟體設計尺寸大小 20cm*20cm，間格為 1.5cm 的方格版，以做為固定冷卻水管的固定架，並以 3D 列印機印製。（圖 8）
2. 依照各型冷卻水管排列方式，將管徑 4mm 的矽膠水管以束線帶固定於固定架上。（圖 9）

3. 共分為 S1 型間隔 6 格、S2 型間隔 3 格、S3 型間隔 2 格和回字型冷卻水管四種。(圖 10~13)
4. 將製作完成的各型冷卻水管，以熱熔膠黏合於尺寸大小為 50cm*70cm，厚度為 1cm 的風扣板上，以完全封閉模擬屋頂部。
5. 採用 1570c.c.循環水桶、8mm 矽膠水管及電壓 12V 的揚水泵補，組成冷卻水循環水桶，並以轉接頭連接至各型冷卻水管。(圖 15)
6. 於冷卻水管進出口各接上流速計，測量冷卻水的流速變化情形。(圖 14)

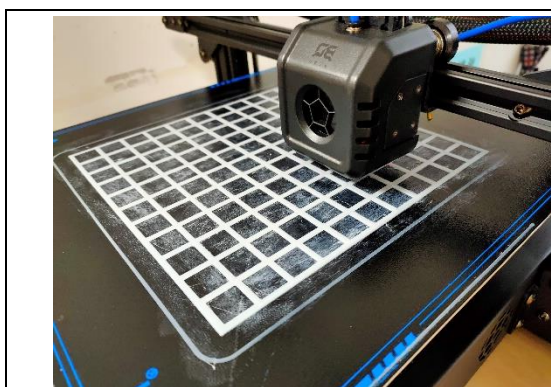


圖 8 列印冷卻水管固定架



圖 9 固定矽膠冷卻水管

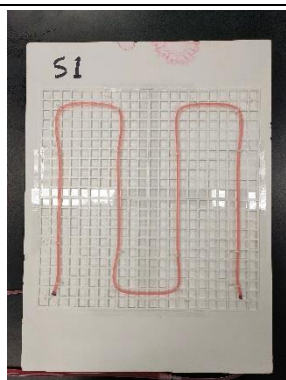


圖 10 S1 型間隔 6 格冷卻水管

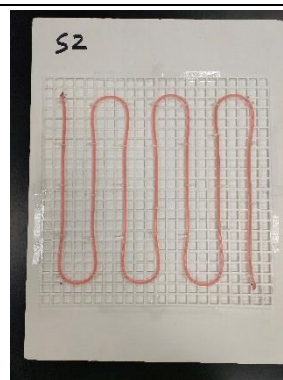


圖 11 S2 型間隔 3 格冷卻水管

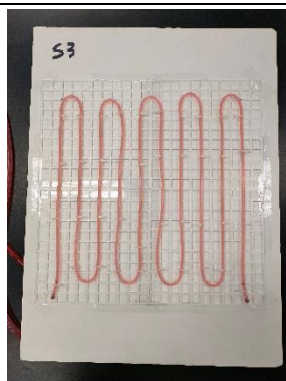
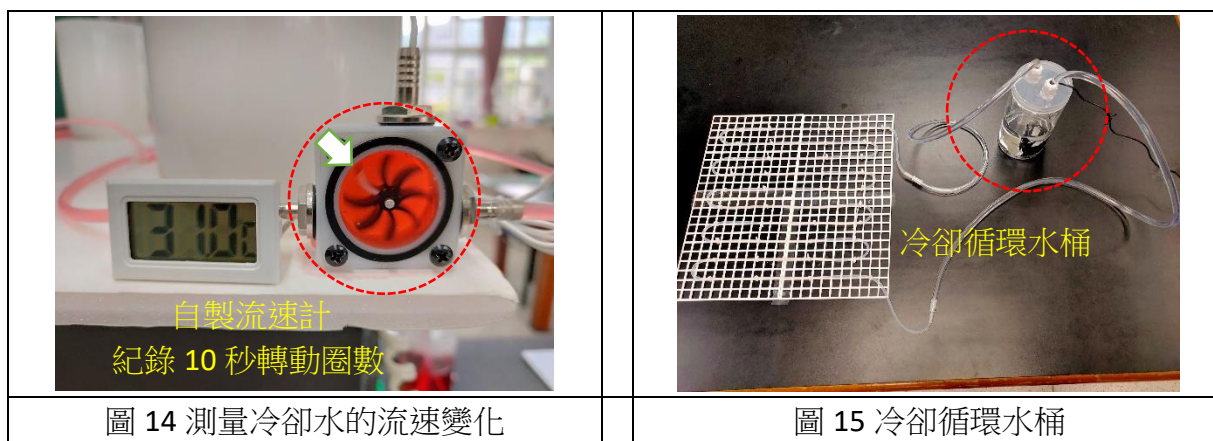


圖 12 S3 型間隔 2 格冷卻水管



圖 13 回字型冷卻水管



(三) 進行不同排列方式冷卻水管對室內空間溫度影響實驗

1. 安裝好模擬屋內部加熱鹵素燈，檢視各高度溫度感測器運作正常後，蓋上**無安裝冷卻水管**的風扣板。
2. 打開加熱鹵素燈開始加熱 30 分鐘，並以溫度感測器紀錄內部溫度變化，以了解無冷卻系統時內部的溫度變化狀況。→**對照組**
3. 完成模擬屋無冷卻系統溫度測量後，取下上方風扣版，打開模擬屋四面觀察窗，並以電扇吹向內部，排出其中的熱氣。
4. 待內部溫度回復到室溫時，將 S1 型間隔 6 格冷卻水管蓋板放置於模擬屋頂部 →**實驗組**。
5. 打開鹵素燈開始加熱，並啟動循環水桶揚水泵補，紀錄流速。(圖 16)
6. 啟動各高度溫度感測器，設定每 1 分鐘自動紀錄內部各高度溫度數值。
7. 每間隔 5 分鐘檢查實驗設備及溫度感測器運作是否正常，並記錄循環水桶水溫。(圖 18)
8. 以紅外線熱影像儀拍攝模擬屋內部空間高低溫分布情形。
9. 持續觀測 30 分鐘後關閉加熱鹵素燈。
10. 取下溫度感測器主機，並與電腦連接後下載紀錄檔，進行相關數據分析。
11. 重複步驟 1~10，分別進行 S2 型間隔 3 格、S3 型間隔 2 格和回字型三種冷卻水管的實驗 →**實驗組**。(圖 19~21)

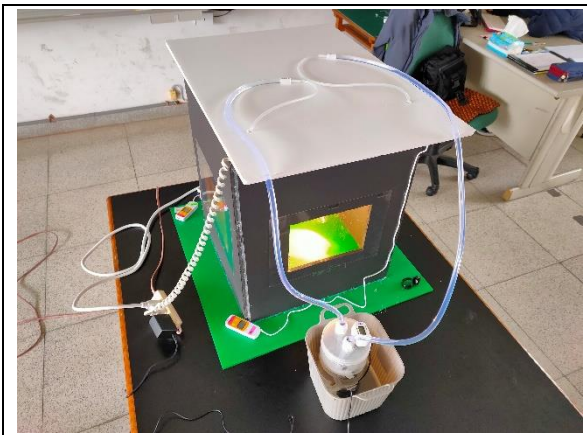


圖 16 各型冷卻水管固定於頂部

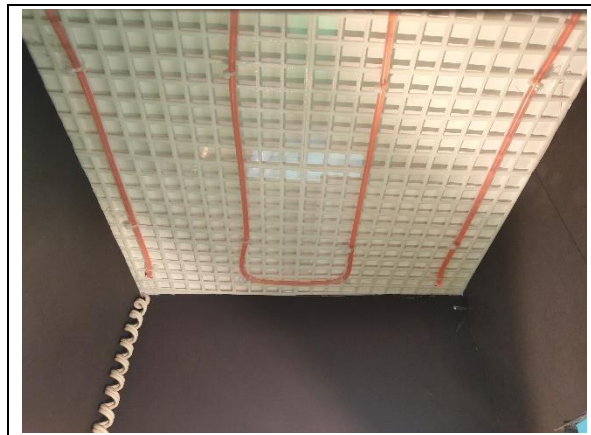


圖 17 S1 型冷卻水管實驗狀況



圖 18 檢查實驗設備運作狀況

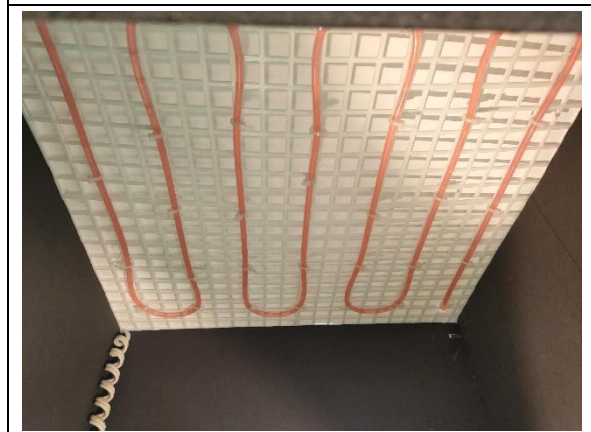


圖 19 S2 型冷卻水管實驗狀況

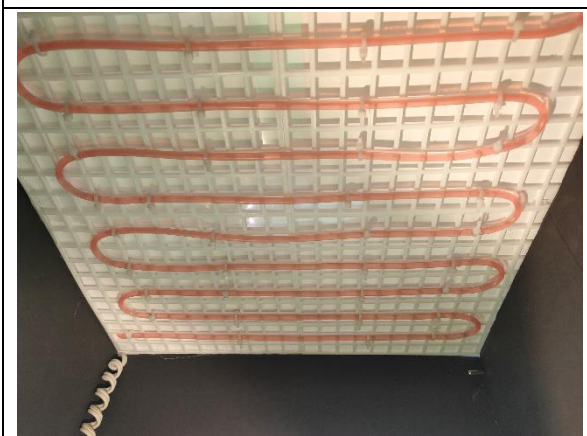


圖 20 S3 型冷卻水管實驗狀況



圖 21 回字型冷卻水管實驗狀況

二、比較冷卻水管不同進出水位置對降低室內空間溫度的差異

在進行各型冷卻水管降溫實驗時，發現冷卻水流經內部空間時，因吸收了熱空氣的熱能，導致冷卻水溫會逐漸上升。因此可以推論—冷卻水在剛進入內部空間時溫度較低，而流經各管線離開內部空間時溫度較高。為證明此一推論是否正確？本研究以前一實驗中冷卻效果良好的回字型排列水管，進行冷卻水進水與出水位置改變的實驗，以比較其差異。

(一) 進行回字型中央進水對室內空間降溫影響實驗

1. 先完成當日模擬屋無冷卻系統溫度測量後→**對照組**，取下上方風扣版，打開模擬屋四面觀察窗，並以電扇吹向內部，排出其中的熱氣。
2. 待內部溫度回復到室溫時，將回字型中央進水冷卻水管蓋板放置於模擬屋頂部→**實驗組**。(圖 22)
3. 打開鹵素燈加熱，並啟動揚水泵補及各高度溫度感測器。
4. 每間隔 5 分鐘檢查實驗設備運作是否正常，並記錄循環水桶水溫。
5. 持續觀測 30 分鐘後關閉加熱鹵素燈。
6. 取下溫度感測器主機下載紀錄檔，進行相關數據分析。

(二) 進行回字型中央出水對室內空間降溫影響實驗

1. 待內部溫度回復到室溫時，將回字型中央出水冷卻水管蓋板放置於模擬屋頂部→**實驗組**。(圖 23) 重複前項實驗步驟 3~5。
2. 取下溫度感測器主機下載紀錄檔，進行相關數據分析。

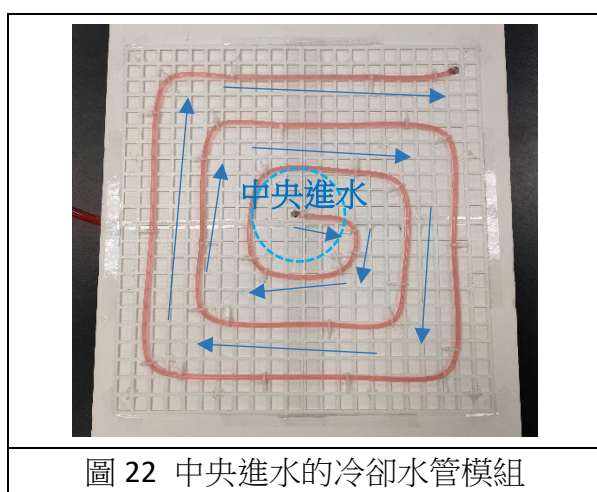


圖 22 中央進水的冷卻水管模組

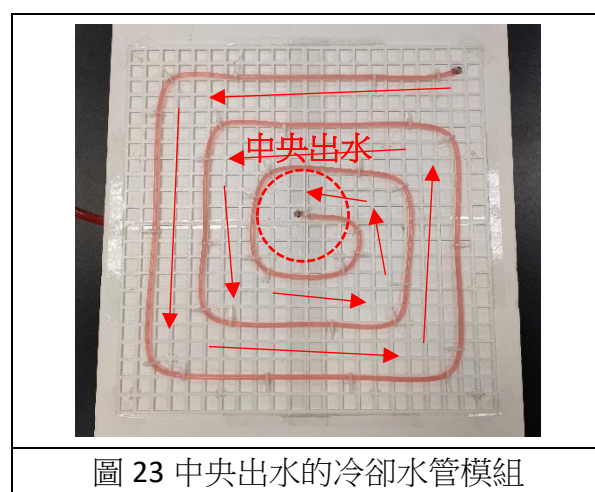


圖 23 中央出水的冷卻水管模組

三、比較不同材質的冷卻水管對降低室內空間溫度的差異

在完成冷卻水管不同排列及進出水位置實驗後，本研究發現以回字型中央出水的降溫效果最好，但除了採用矽膠材質的冷卻水管外，其他材質的冷卻水管降溫效果是否會更好？從相關文獻及研究中，**發現銅管的熱傳導效果良好，已使用於電腦的散熱系統結構中**，據此推測若將冷卻水管材質改為銅管，是否會有更好的降溫效果？為證明此一推論是否正確？以下採用銅及矽膠兩種材質的冷卻水管進行不同水溫的冷卻實驗，以比較其差異。

(一) 進行銅冷卻水管在不同水溫下對室內空間降溫影響實驗

1. 依回字型冷卻水管排列方式，將管徑 4mm 銅管固定於架上。(圖 24)
2. 將已製作完成的銅冷卻水管，以熱熔膠黏合於尺寸大小為 50cm*70cm，厚度為 1cm 的風扣板上，以完全封閉模擬屋頂部。(圖 25)
3. 調配溫度為 28°C 及相同容量的循環冷卻水。(圖 26、27)
4. 接上循環水桶、啟動揚水泵補及流速計。
5. 打開加熱鹵素燈開始加熱，持續觀測 30 分鐘後關閉。
6. 取下溫度感測器主機，下載紀錄檔，進行相關數據分析。
7. 待模擬屋內部溫度回復到室溫時，重新調配 21°C 及 17°C 的循環水，依照步驟 4~6 分別測量模擬屋內部溫度的變化。



圖 24 製作回字型銅管冷卻水管

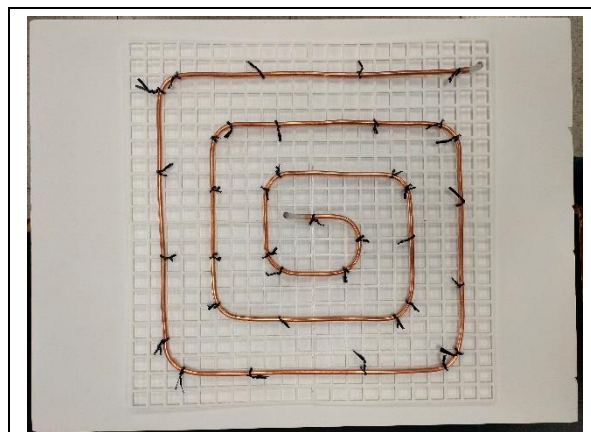


圖 25 回字型銅管冷卻系統

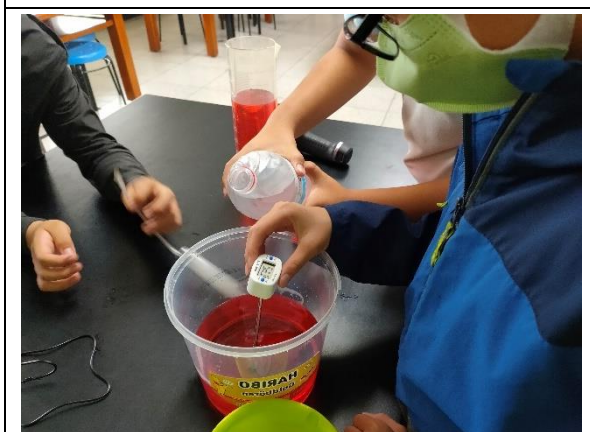


圖 26 調配固定水溫的循環水



圖 27 加入固定的循環水量

(二) 進行矽膠冷卻水管在不同水溫下對室內空間降溫影響實驗

1. 以矽膠管冷卻模組進行 28°C、21°C、17°C 的循環水，分別進行實驗。
2. 步驟同前項實驗步驟 4~7。

3. 紀錄模擬屋內部溫度及循環水桶水溫變化。

四、比較循環水桶不同冷卻方式對降低室內空間溫度的差異

從本研究前述實驗結果中發現一循環水桶的水溫升溫狀況，也會影響模擬屋內部降溫的效能。因此後續實驗將嘗試以冰磚、致冷晶片及複合式冷卻三種方法，來降低循環水桶的溫度，比較何種方式對降低室內空間溫度的效果最佳。

(一) 製作各型循環水桶冷卻裝置

1. **冰磚冷卻型**：將單循環水桶放入保麗龍箱中，並在循環水桶旁放入 2 塊 500gw 保冷冰磚，以降低循環水桶溫度。(圖 28)
2. **致冷晶片冷卻型**：將回字型中央出水冷卻出水管接上單致冷晶片模組，再利用一段矽膠水管將冷卻水注入單循環水桶中，後續再以揚水泵補將冷水注入冷卻水管進水孔。(圖 29)
3. **複合式冷卻型**：在致冷晶片冷卻型的循環水桶中，放入 2 塊 500gw 保冷冰磚，以加強冷卻效果。(圖 30)



圖 28 放置 2 塊保冷冰磚於循環水桶中

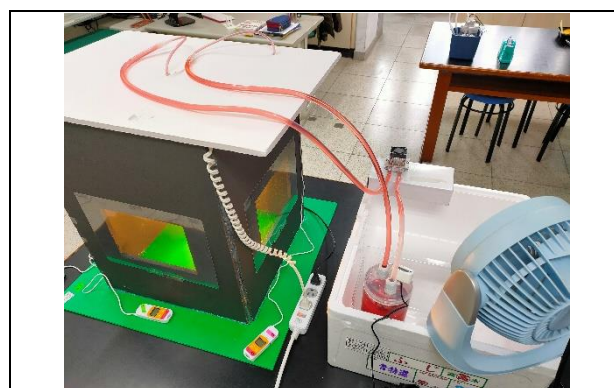


圖 29 致冷晶片冷卻型裝置安裝情形

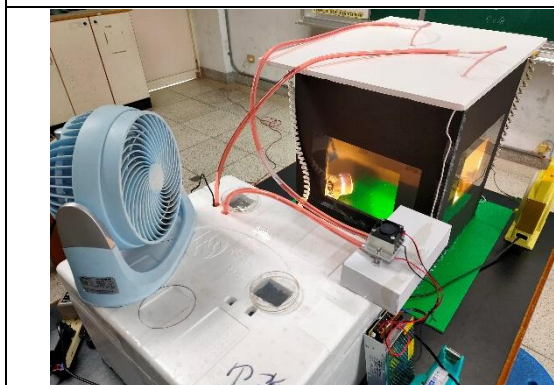


圖 30 複合式冷卻型裝置安裝情形



圖 31 於循環水桶中放置溫度計

(二) 進行循環水桶各型冷卻裝置對室內空間降溫影響實驗

1. 先完成當日模擬屋無冷卻系統溫度測量後，取下上方風扣版，打開模擬屋四面觀察窗，並以電扇吹向內部，排出其中的熱氣。
2. 待內部溫度回復到室溫時，將回字型中央出水冷卻水管蓋板放置於模擬屋頂部，並連接好冰磚冷卻型單循環水桶。
3. 打開鹵素燈加熱，啟動揚水泵補及各高度溫度感測器。
4. 間隔 5 分鐘檢查實驗設備運作是否正常，並記錄循環水桶水溫。(圖 31)
5. 持續觀測 30 分鐘後關閉鹵素燈。(模擬白天太陽持續照射時的室內環境)
6. 持續記錄關閉鹵素燈後 60 分鐘內模擬屋內部溫度及循環水溫度。(模擬太陽下山後的室內環境)
7. 取下溫度感測器主機，下載紀錄檔，進行相關數據分析。
8. 重複步驟 1~8，分別進行致冷晶片及複合式冷卻型單循環水桶實驗。

肆、 結果與討論

一、 比較不同冷卻水管排列方式對降低室內空間溫度的差異

(一) 實驗結果

1. S1 型間隔 6 格冷卻水管降溫效能實驗

從測量之數據及統計圖變化情形可以發現：

- (1) 無冷卻狀態下模擬屋頂部所測得的溫度最高，可達 33.1°C，中部溫度為 32.7°C，底部溫度為 30.5°C，內部溫度都處於高溫狀態。
- (2) 開啟 S1 型間隔 6 格冷卻水管降溫 30 分鐘後，頂部溫度為 30.7°C，中部溫度為 31.0°C，底部溫度為 30.4°C，內部溫度仍處於高溫狀態，但整體空間已平均降溫 1.4°C。(圖 32)

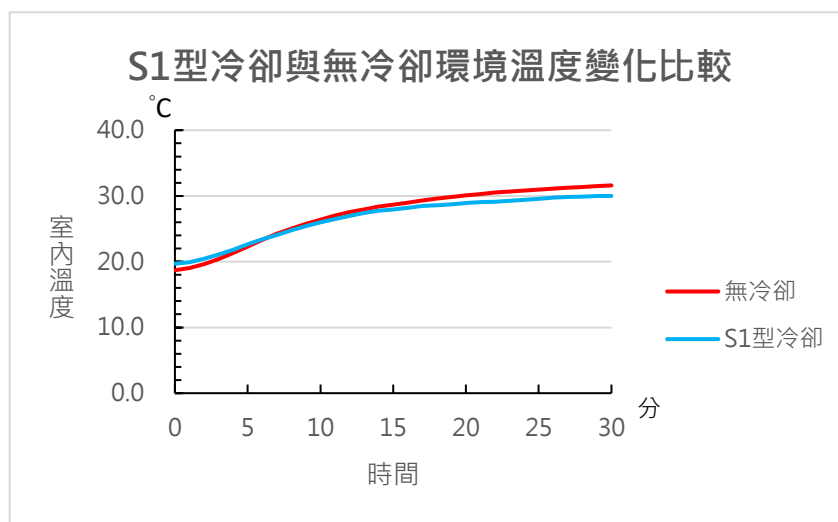


圖 32 S1 型冷卻水管與無冷卻環境溫度變化比較

- (3) 循環水桶溫度變化情形如圖 33，水溫由最初 **18.6°C** 升高至 **22.6°C**，升高了 **4°C**，冷卻過程中，循環冷水因接觸內部高溫空氣，在熱傳透狀態下吸收了熱能，再流回循環水桶中，導致水溫上升。(圖 33)

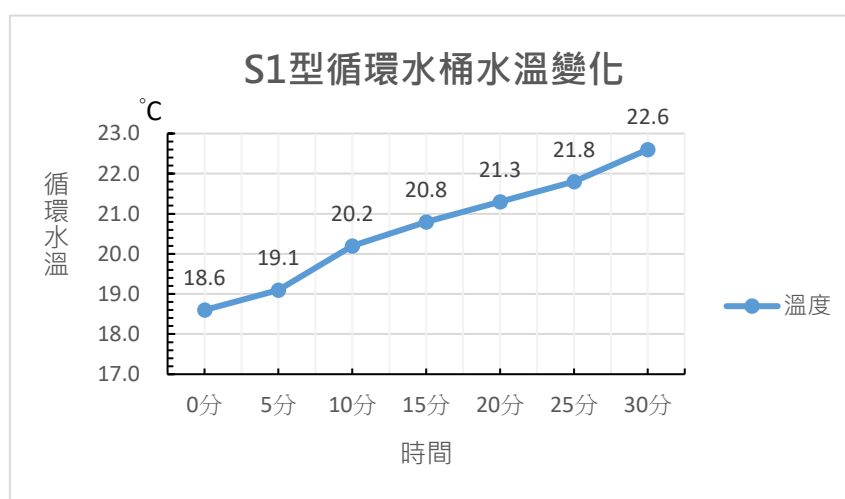


圖 33 S1 型冷卻水管循環水桶溫度變化

2. S2 型間隔 3 格冷卻水管降溫效能實驗

測量之數據及統計圖變化情形可以發現：

- (1) 無冷卻狀態下模擬屋頂部所測得的溫度最高，可達 **32.8°C**，中部溫度為 **32.5°C**，底部溫度為 **30.3°C**，內部溫度都處於高溫狀態。
- (2) 開啟 **S2 型間隔 3 格冷卻水管**降溫 30 分鐘後，頂部溫度為 **29.1°C**，中部溫度為 **29.1°C**，底部溫度為 **28.0°C**，內部溫度已降至 **30°C** 以下，整體空間已平均降溫 **3.1°C**。(圖 34)

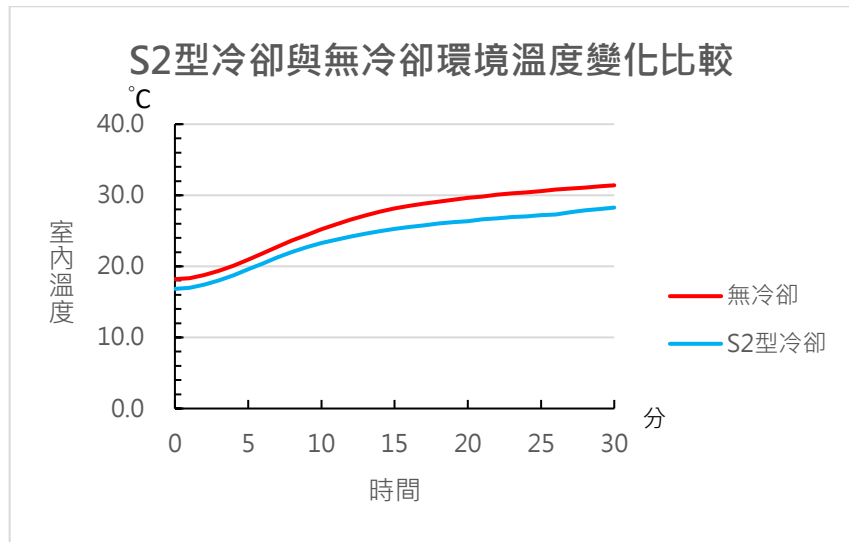


圖 34 S2 型冷卻水管與無冷卻環境溫度變化比較

- (3) 循環水桶溫度變化情形如圖 35，水溫由最初 16.8°C 升高至 20.5°C ，升高了 3.7°C ，水溫升高較 S1 型低。(圖 35)

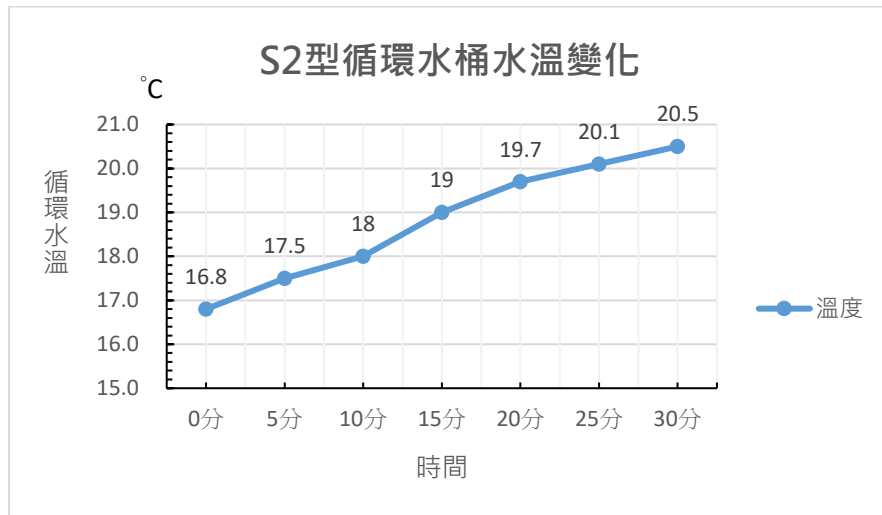


圖 35 S2 型冷卻水管循環水桶溫度變化

3. S3 型間隔 2 格冷卻水管降溫效能實驗

從測量之數據及統計圖變化情形可以發現：

- (1) 無冷卻狀態下模擬屋頂部所測得的溫度最高，可達 32.2°C ，中部溫度為 32.2°C ，底部溫度為 29.6°C ，內部頂部及中部溫度已超過 30°C 。
- (2) 開啟 S3 型間隔 2 格冷卻水管降溫 30 分鐘後，頂部溫度為 30.9°C ，中部溫度為 30.3°C ，底部溫度為 30.0°C ，內部溫度尚未降至 30°C 以下，整體空間平均降溫 0.9°C 。(圖 36)

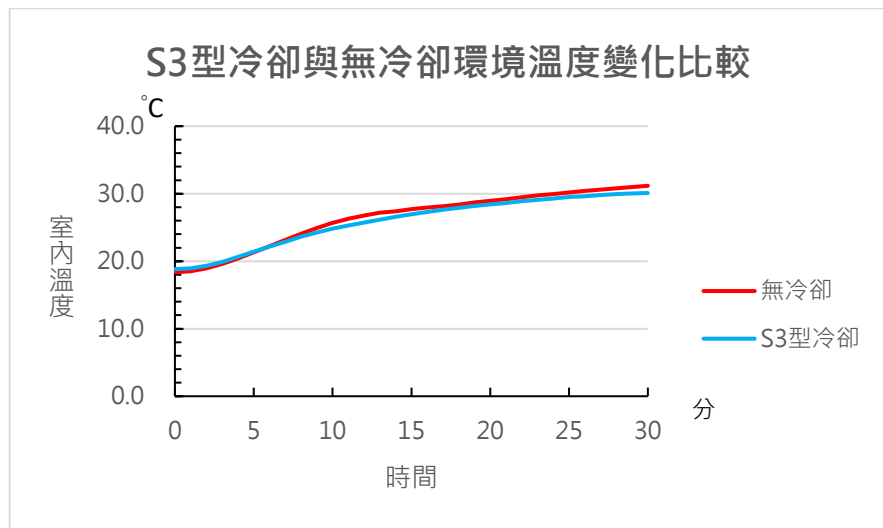


圖 36 S3 型冷卻水管與無冷卻環境溫度變化比較

- (3) 循環水桶溫度變化情形如圖 37，水溫由最初 **18.6°C** 升高至 **23.9°C**，升高了 **5.3°C**，水溫升高比 S1 型、S2 型高。(圖 37)

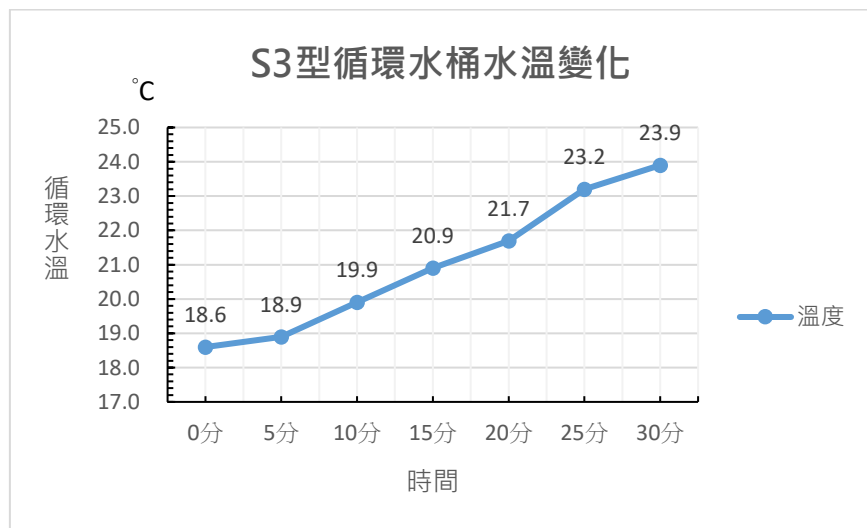


圖 37 S3 型冷卻水管循環水桶溫度變化

4. 回字型冷卻水管降溫效能實驗

從測量之數據及統計圖變化情形可以發現：

- (1) **無冷卻狀態**下模擬屋頂部所測得的溫度最高，可達 **35.3°C**，中部溫度為 **34.7°C**，底部溫度為 **32.9°C**，內部溫度已超過 **30°C**。
- (2) **開啟回字型冷卻水管降溫 30 分鐘後**，頂部溫度為 **27.8°C**，中部溫度為 **25.8°C**，底部溫度為 **24.9°C**，內部溫度已降至 **28°C** 以下，**整體空間平均降溫 8.2°C**。(圖 38)

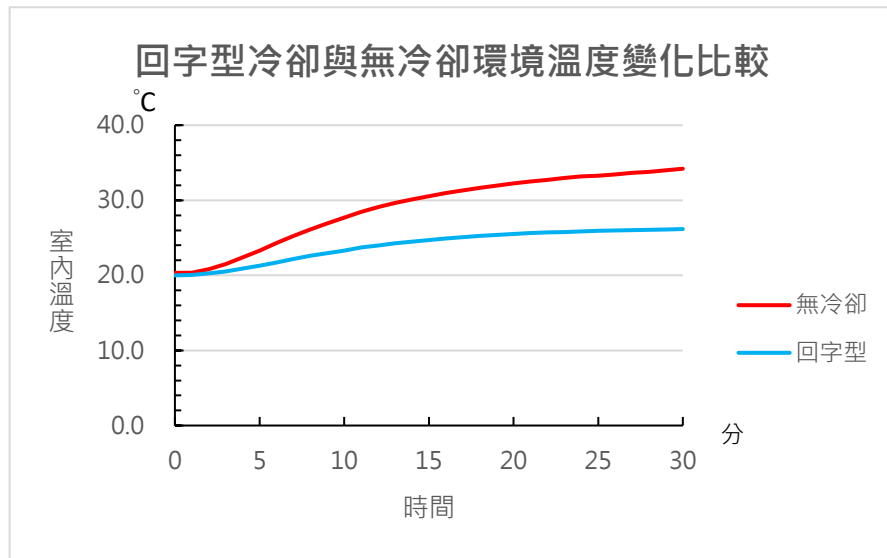


圖 38 回字型冷卻水管與無冷卻環境溫度變化比較

(3) 循環水桶溫度變化情形如圖 39，水溫由最初 19.6°C 升高至 22.4°C，升高了 2.8°C，水溫升高比 S1 型、S2 型、S3 型低。(圖 39)

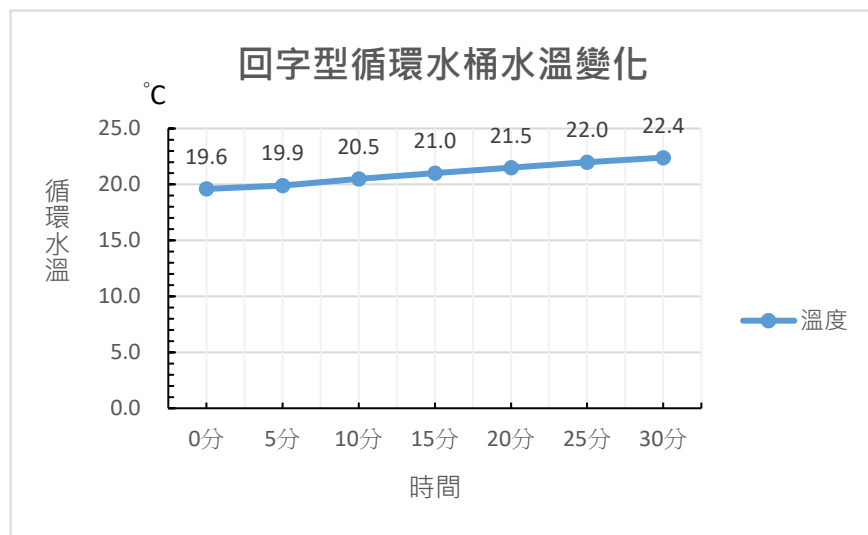


圖 39 回字型冷卻水管循環水桶溫度變化

(二) 討論

從各型冷卻水管降溫前後最高溫及循環水溫變化的比較統計圖中 (圖 40、41)，本研究發現四型冷卻水管中，以回字型降溫最多，最高溫可降至 26.17°C，其次為 S2 型，最差的是 S3 型。為了解其中變化因素，本研究算出各型冷卻水管接觸熱空氣的表面積 (如表 2)，及冷卻水管入水與出水的流速 (如表 3)，並比較之間的差異。我們發現以接觸面積為 180cm² 的降溫效果最好，S1 型接觸面積太少，導致降溫效能不足；而 S3 型接觸面積最大，但因冷卻水管長度最長，且管線彎折過

多，反而讓冷卻水流速減慢，被內部的熱空氣加熱，導致循環冷水快速升溫，無法產生冷卻的效果。因此當冷卻水管愈密集時，也需加強揚水泵補的推力，讓流速增快，才能可好的降溫效果，在配置室內冷卻管線時，需同時考量降溫空間容積大小與冷卻水管接觸面積配比，以及減少管線彎折，調整較快的流速，方可達到良好的降溫效果。以本研究模擬屋內部面積為 $40\text{cm} \times 40\text{cm} = 1600\text{cm}^2$ ，搭配冷卻水管接觸面積為 180cm^2 的降溫效果最好，在每秒 2.1 圈的流速下，接觸面積 10cm^2 的冷卻水管循環 30 分鐘後，可讓 89cm^2 的室內面積降低至 28°C 以下，本研究後續實驗將採用回字型冷卻水管排列方式，作為降溫系統的頂部冷卻結構，並調整系統其他可變因素來提升效能。

表 2 各型冷卻水管表面積《矽膠水管管徑 $0.4\text{cm} \times 3.14 \times \text{長度 cm} = \text{接觸面積}$ 》

類型	S1 型	S2 型	S3 型	回字型
長度	95cm	144cm	200cm	144cm
表面積	119cm^2	180cm^2	251cm^2	180cm^2

表 3 各型冷卻水管入、出水流速《流速計 10 秒內轉動圈數，單位：圈/每秒》

類型	S1 型	S2 型	S3 型	回字型
入水流速	2.2	2.2	2.2	2.2
出水流速	1.9	1.85	1.7	2.1

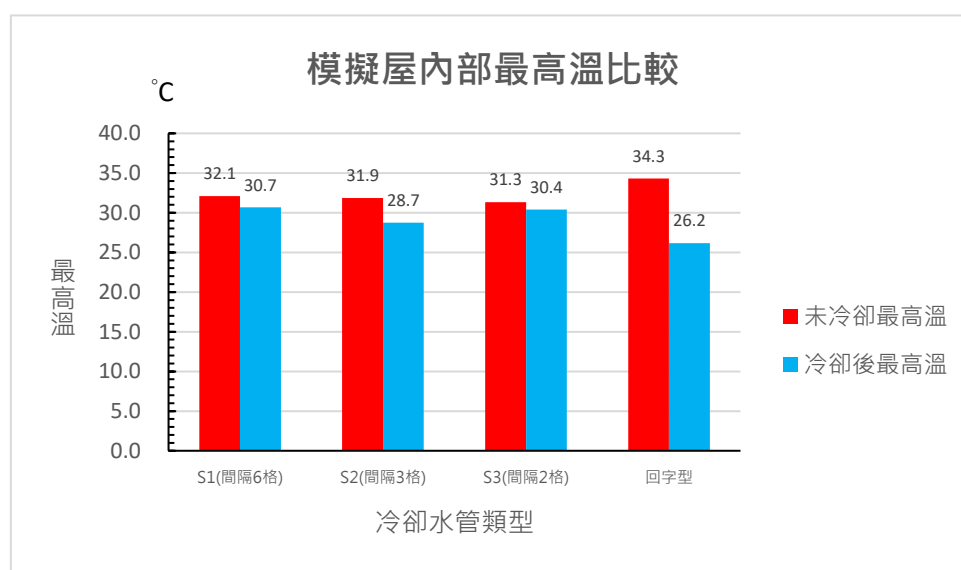


圖 40 各型冷卻水管降溫前後最高溫比較

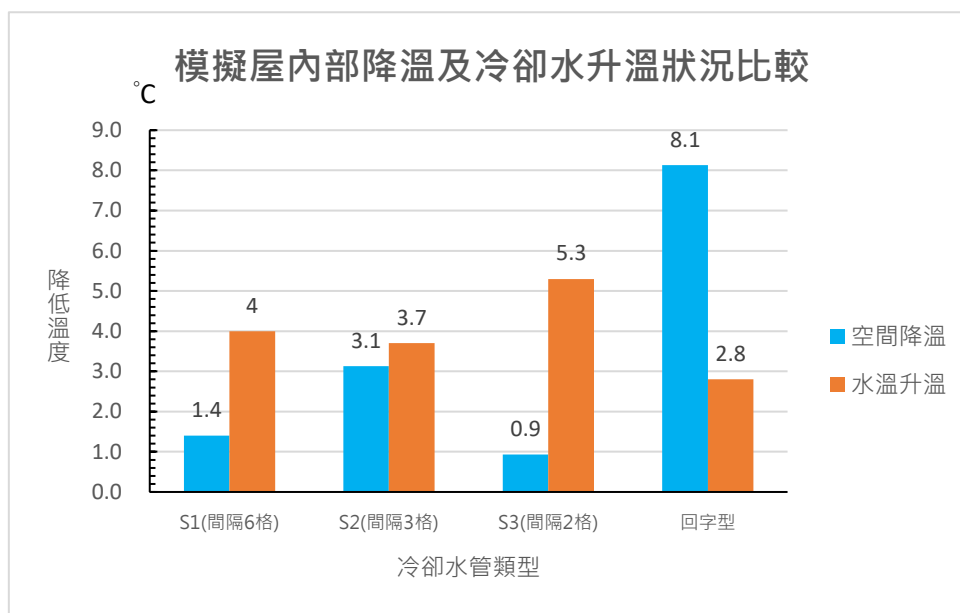


圖 41 各型冷卻水管降溫效果比較

二、比較冷卻水管不同進出水位置對降低室內空間溫度的差異

(一) 實驗結果

1. 無冷卻狀態下模擬屋頂部所測得的溫度最高，可達 35.3°C ，中部溫度為 34.7°C ，底部溫度為 32.9°C ，內部溫度已超過 30°C 。
2. 開啟回字型中央進水冷卻水管降溫 30 分鐘後，頂部溫度為 27.8°C ，中部溫度為 25.8°C ，底部溫度為 24.9°C ，內部溫度已降至 28°C 以下，整體空間平均降溫 8.2°C 。(圖 42)
3. 開啟回字型中央出水冷卻水管降溫 30 分鐘後，頂部溫度為 27.4°C ，中部溫度為 25.7°C ，底部溫度為 24.3°C ，內部溫度已降至 28°C 以下，整體空間平均降溫 8.5°C 。

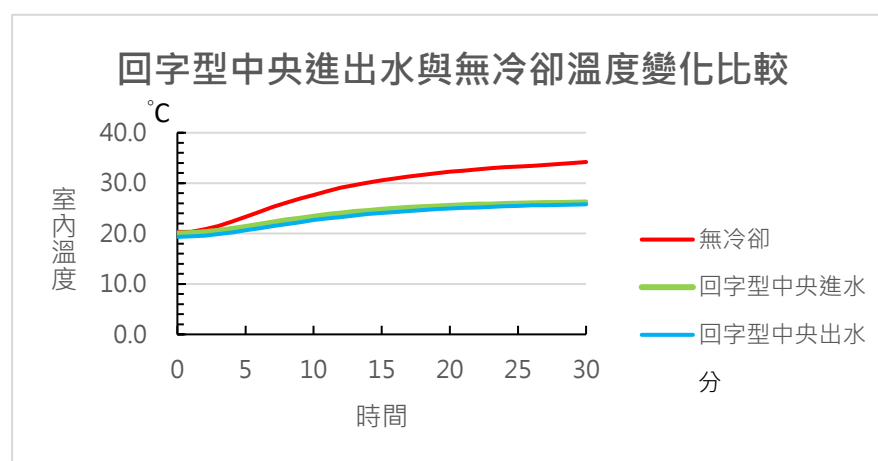


圖 42 回字型中央進出水冷卻水管與無冷卻溫度變化比較

4. 回字型中央進水循環水桶溫度變化情形如圖 46，水溫由最初 19.6°C 升高至 22.4°C，升高了 2.8°C。(圖 43)

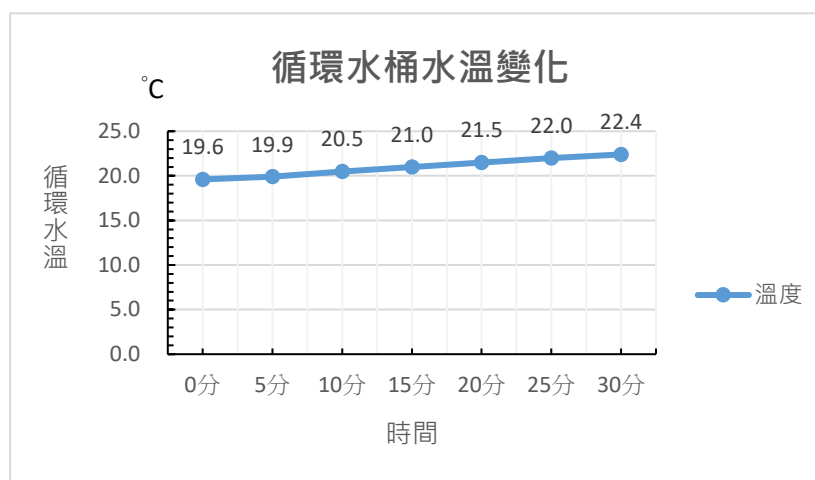


圖 43 回字型中央進水冷卻水管循環水桶溫度變化

5. 回字型中央出水循環水桶溫度變化情形如圖 47，水溫由最初 21.3°C 升高至 23.0°C，升高了 1.7°C。(圖 44)

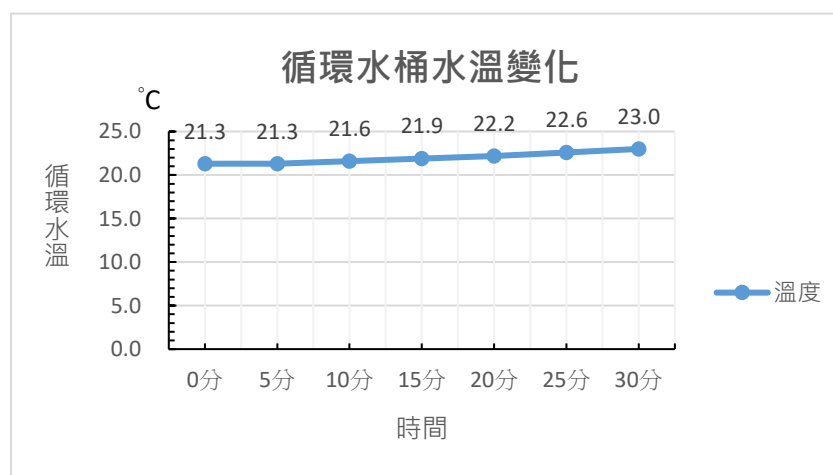


圖 44 回字型中央出水冷卻水管循環水桶溫度變化

(二) 討論

從回字型中央進出水冷卻水管降溫前後最高溫之比較，本研究發現回字型中央出水降溫效果較中央進水冷卻水管多 0.37°C，雖無明顯差異，但從圖 45 的循環水桶水溫比較中，發現回字型中央出水型水溫上升較回字型中央進水型少，相差 1.1°C，表示回字型冷卻水管進水口若由模擬屋立面周圍注入，流經各管線後再由中央流出，可減少循環水桶冷水的消耗，增加冷卻系統的使用時間，減少置換冷卻水所需的電力或動能，達到節能的目的，在設計回字型冷卻管線時應考量到這項影響因素。

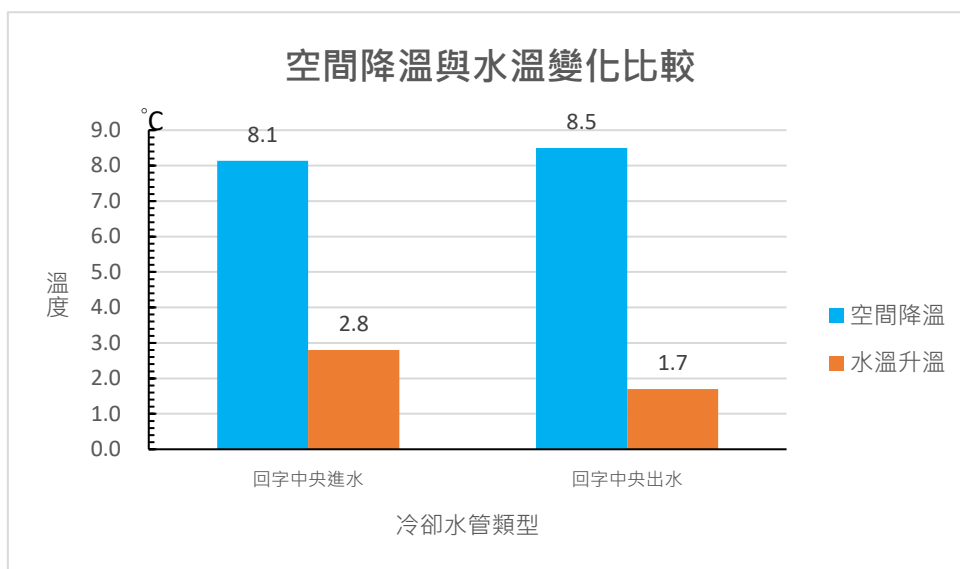


圖 45 回字型冷卻水管降溫效果比較

三、比較不同材質的冷卻水管對降低室內空間溫度的差異

(一) 實驗結果

1. 水溫 28°C 下銅管與矽膠管降溫效能實驗

- (1) 使用與室溫相同溫度的循環水時，模擬屋內部空間加熱 30 分鐘後，銅管冷卻型內部空間溫度上升較高，較矽膠管冷卻型升高 0.7°C。(圖 46)
- (2) 與無安裝冷卻系統的狀態相比，銅管與矽膠管冷卻型皆可讓模擬屋內部空間降溫，銅管型降溫 2.67°C，矽膠管型降溫 3.73°C。(圖 47)

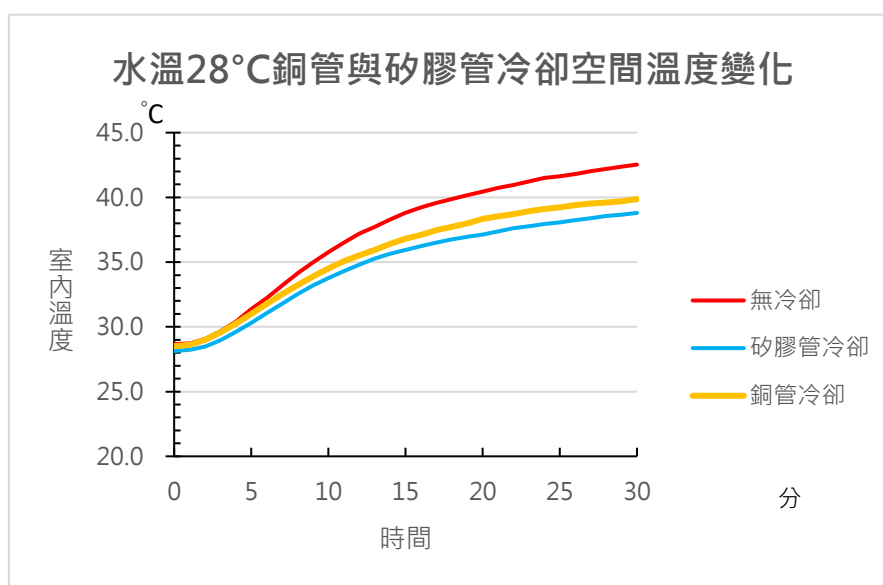


圖 46 循環水溫 28°C 銅管與矽膠管冷卻空間溫度變化

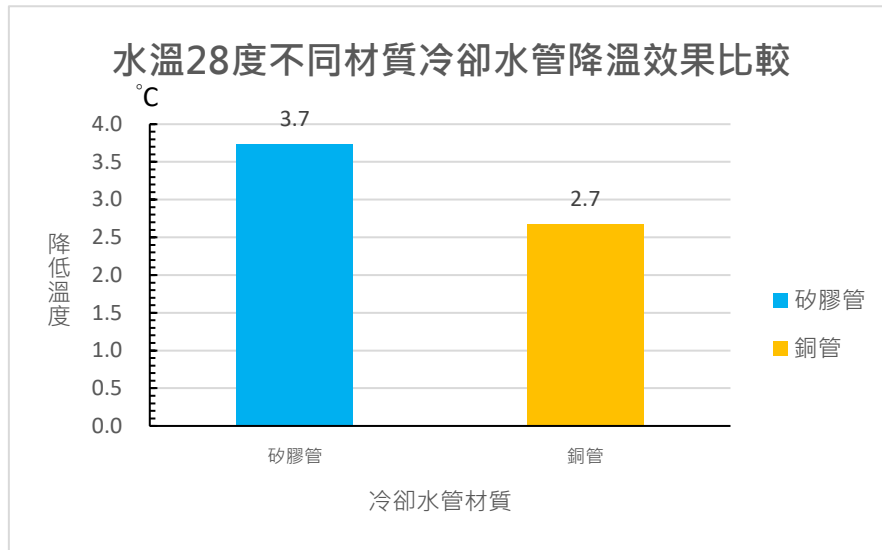


圖 47 循環水溫 28°C 銅管與矽膠管降溫效果比較

2. 水溫 21°C 下銅管與矽膠管降溫效能實驗

- (1) 使用低於室溫 7°C 的循環水時，模擬屋內部空間加熱 30 分鐘後，矽膠管冷卻型內部空間溫度上升較高，較銅管冷卻型升高 0.1°C。(圖 48)
- (2) 與無安裝冷卻系統相比，銅管與矽膠管冷卻型皆可讓模擬屋內部空間降溫，銅管冷卻型降溫 2.7°C，矽膠管冷卻型降溫 2.4°C。(圖 49)

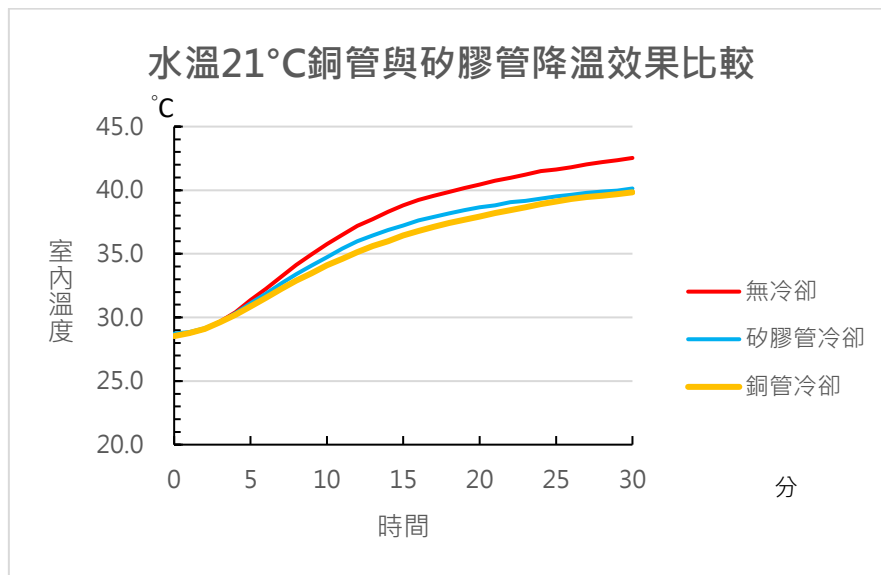


圖 48 循環水溫 21°C 銅管與矽膠管冷卻空間溫度變化

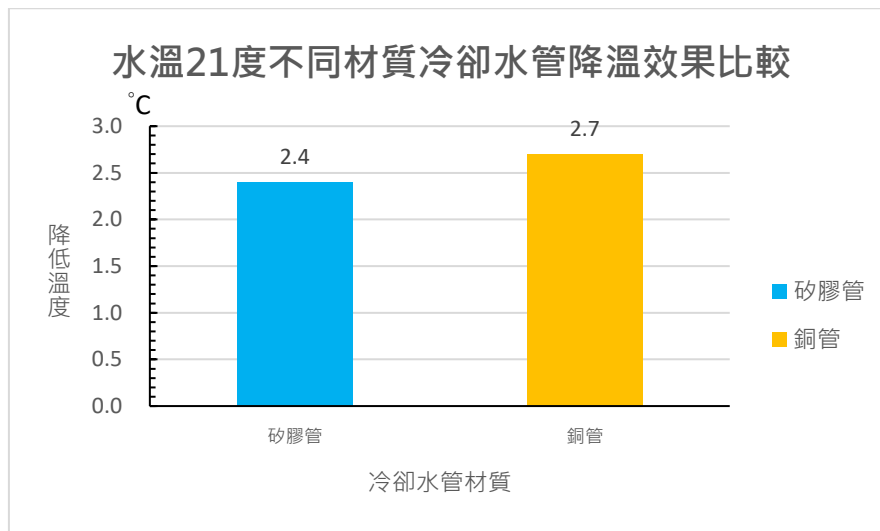


圖 49 循環水溫 21°C 銅管與矽膠管降溫效果比較

3. 水溫 17°C 下銅管與矽膠管降溫效能實驗

- (1) 使用低於室溫 11°C 的循環水時，內部空間加熱 30 分鐘後，矽膠管冷卻型內部空間溫度上升較高，較銅管冷卻型升高 0.33°C。(圖 50)
- (2) 與無安裝冷卻系統相比，銅管與矽膠管冷卻型皆可讓模擬屋內部空間降溫，銅管冷卻型降溫 3.53°C，矽膠管冷卻型降溫 3.2°C。(圖 51)

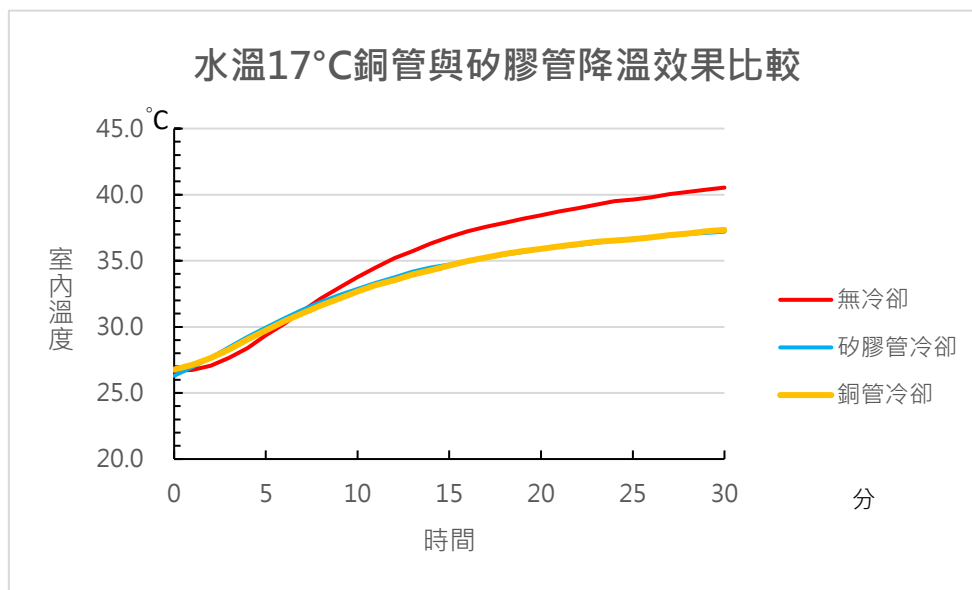


圖 50 循環水溫 17°C 銅管與矽膠管冷卻空間溫度變化

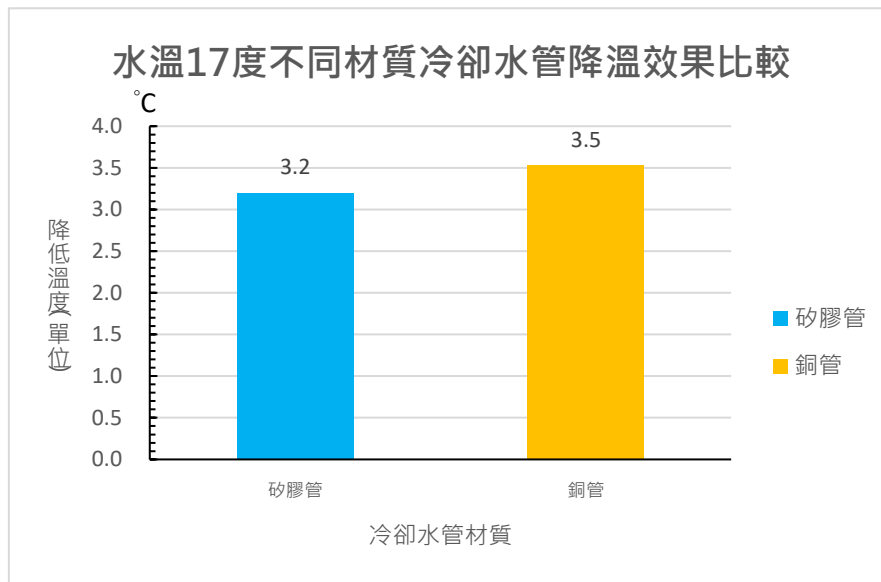


圖 51 循環水溫 17°C 銅管與矽膠管降溫效果比較

(二) 討論

從不同溫度循環冷卻水的銅管與矽膠管冷卻型降溫比較統計圖中（圖 52），發現雖然銅的熱傳導效能較矽膠管佳，但在使用與室溫相同的冷卻水時，銅管較容易受到模擬屋內部熱空氣影響，讓 28°C 的冷卻水溫度更為上升，導致銅管冷卻型降溫效果較矽膠管冷卻型差。但當使用低於室溫的冷卻水時，低溫的水透過銅管的熱傳遞，冷卻效能已有提升，降溫效果已略優於矽膠管冷卻型，但溫度相差在 0.33°C 以內，並無明顯的差異。依據上述結果，安裝環境若能取得較低溫的循環水，則可採用銅管模組作為冷卻水管，但若低溫冷卻水較難取得，則可採用矽膠管模組作為冷卻水管，在設計冷卻系統時，可根據環境資源及施工技術難易度綜合考量。

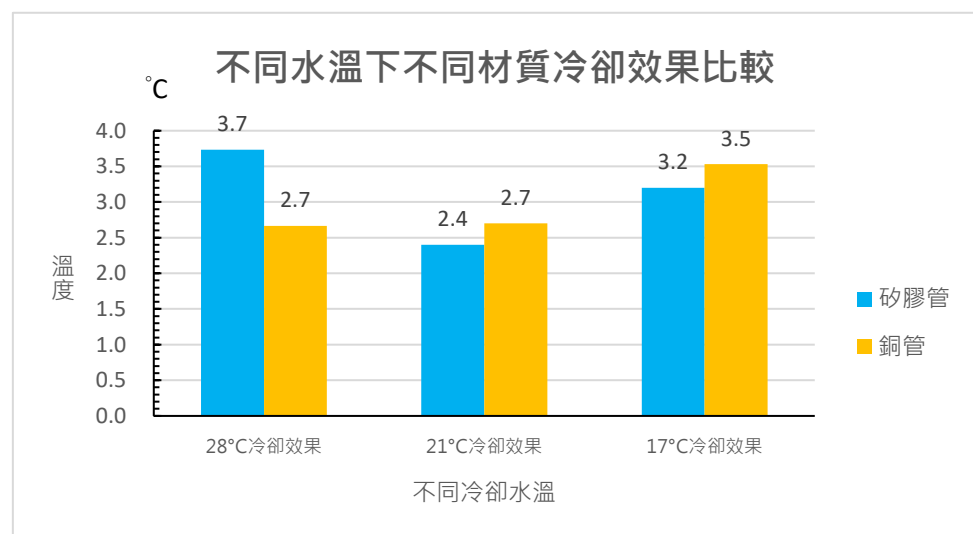


圖 52 不同循環水溫銅管與矽膠管降溫效果比較

四、比較循環水桶不同冷卻方式對降低室內空間溫度的差異

(一) 實驗結果

1. 鹵素燈持續加熱 30 分鐘→模擬白天太陽持續照射時的室內環境

(1) 經各型循環水桶冷卻後的溫度變化如圖 53。

(2) 冰磚冷卻型對模擬屋內部空間降溫較多，可降溫達 5.77°C ，致冷晶片冷卻型降溫較少，可降溫 5.2°C ，但三種冷卻型循環水桶之間降溫數值非常接近。(圖 53)

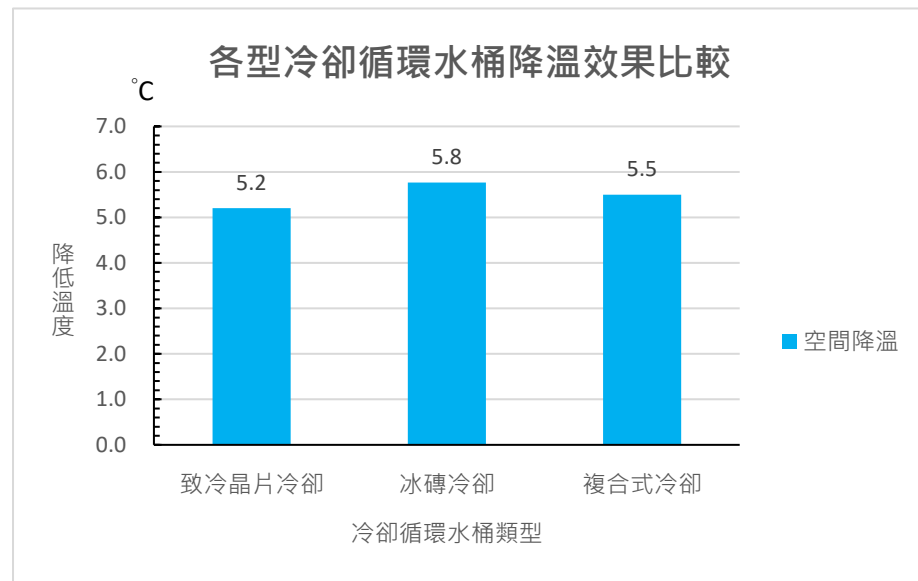


圖 53 各型冷卻循環水桶降溫狀況比較

2. 鹵素燈停止加熱 60 分鐘→模擬太陽下山後的室內環境

(1) 於鹵素燈停止加熱後，各型冷卻循環水桶對模擬屋內部空間降溫後的變化如圖 54。

(2) 以冰磚冷卻型對模擬屋內部空間降溫較多，可降溫達 11.4°C ，而複合式冷卻型降溫較少，可降溫 11.13°C ，但三種冷卻型循環水桶之間降溫數值非常接近。(圖 54)

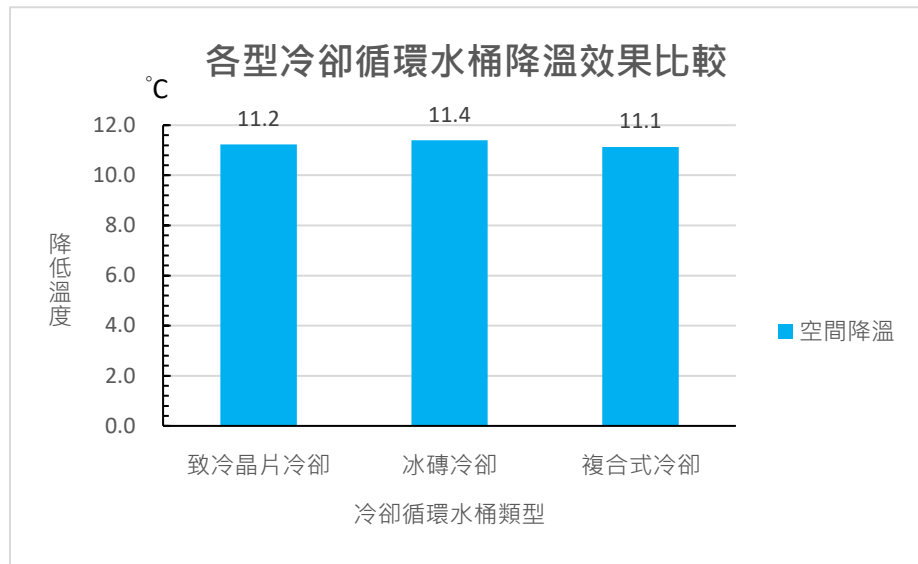


圖 54 各型冷卻循環水桶降溫狀況比較

(二) 討論

從持續加熱時及停止加熱時各型冷卻方式與內部空間最高溫比較統計圖中（圖 55），本研究發現：三種循環水桶冷卻方式對降低模擬屋內部溫度的效能並無顯著差異。在相同降溫條件下，若以致冷晶片進行冷卻，則須再消耗電力來驅動致冷晶片模組。而採用冰磚冷卻循環水桶，可在隔熱良好的環境中讓冷卻水長時間處於低溫狀態，達到良好降溫效果。在模擬屋內部停止加熱時，三種循環水桶冷卻方式只需要 30 分鐘即可發揮最佳降溫效果（圖 56）。因此利用系統最佳運作時間進行降溫，將可節省系統用電。除此之外，若能結合綠能或河水、地下水等自然資源來冷卻或更換冷卻水，則可替代冰磚降溫功能，降低系統用電，減少更多電能消耗及廢熱排放，達到節能減碳的目的。

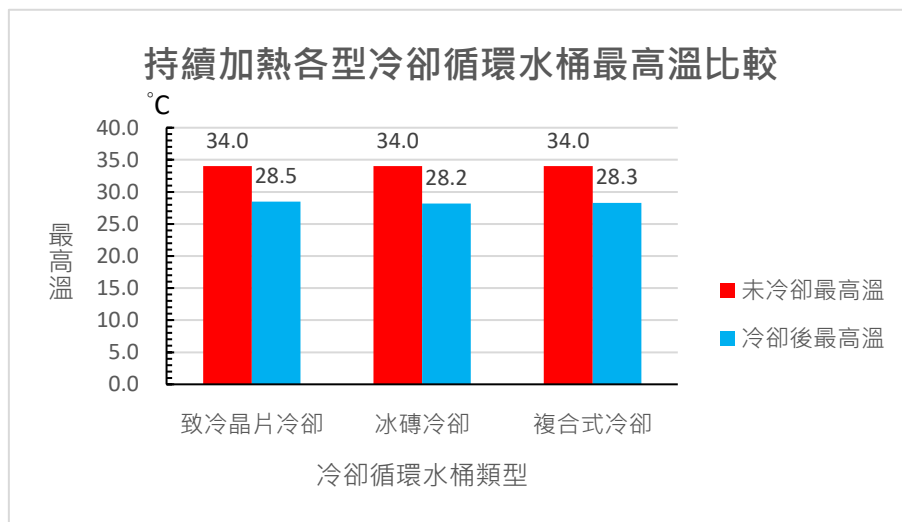


圖 55 持續加熱時各型冷卻方式與內部空間最高溫比較

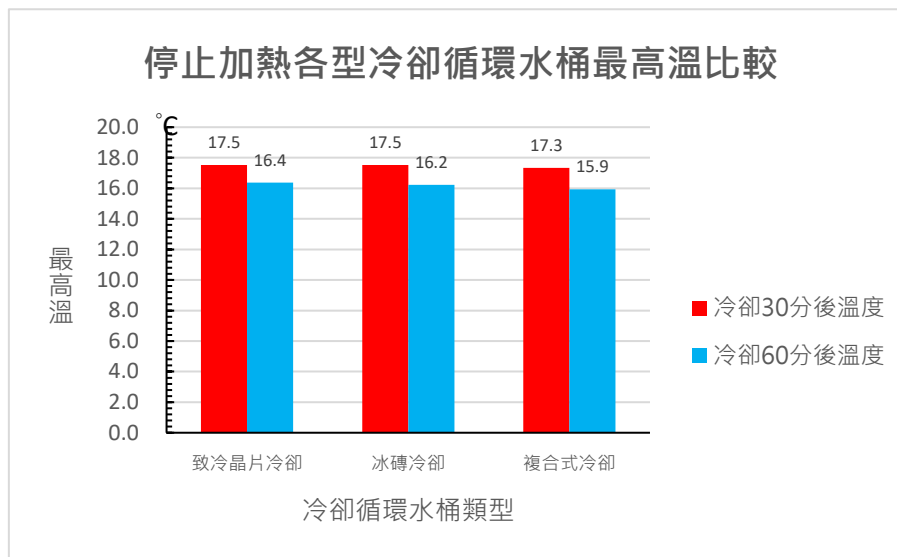


圖 56 停止加熱時各型冷卻方式與內部空間最高溫比較

伍、 結論與未來建議

- 一、 四型不同排列方式的冷卻水管中，以回字型降溫最多，最高溫可由 35.3°C 降至 26.17°C。配置冷卻水管時應考量降溫空間容積大小與接觸面積配比，減少管線轉彎，維持較高流速，方可發揮冷卻水管降溫的效果。
- 二、 若將回字型冷卻水管的進水口改由牆面周圍注入，流經冷卻管線後再由中央流出，可減少循環水桶冷水的消耗，增加冷卻系統的使用時間，減少置換冷卻水所需的電力或動能，達到節能的目的，對於內部空間降溫的效果最好。
- 三、 冷卻水管材質採用銅管的降溫效果略優於矽膠管冷卻型，但溫度相差在 0.33°C 以內，安裝環境若能取得較低溫的循環水，則可採用銅管模組作為冷卻水管，降溫效果較佳，在設計冷卻系統時，可根據環境資源及施工技術難易度綜合考量。
- 四、 三種循環水桶冷卻方式對降低模擬屋內部溫度的效能並無顯著差異，在相同降溫條件下，採用冰磚冷卻循環水桶，即可保持冷卻水處於低溫狀態，達到良好降溫效果。
- 五、 未來系統若能整合綠能或河水、地下儲水系統等低碳排的自然資源，進行冷卻水的降溫或更換，達到與冰磚相同的冷卻效果，可減少用電和廢熱排放，達到環保與節能的目的。(圖 57)

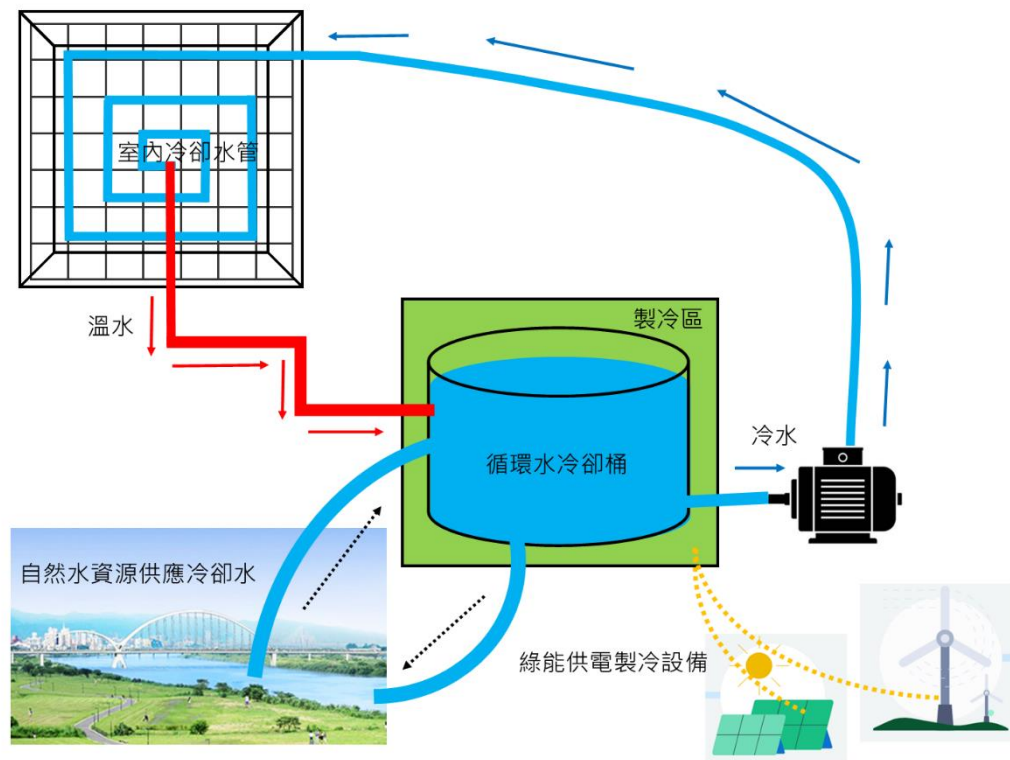


圖 57 整合綠能及河水等低碳排的自然資源的室內空間水冷降溫系統

陸、 參考文獻資料

- 一、邱繼哲（2002）。建築物及生物成長設施之誘導式通風冷卻研究—以雙層外殼內置流動空氣層構造為例。國立臺灣大學生物環境系統工程學研究所碩士論文。臺北市。
- 二、周鼎金（1995）。建築物理。旭營文化事業公司。臺北市。
- 三、賴榮平等（1991）。建築物理環境。六合出版社。臺北市。
- 四、許克維（2013）。永續校園局部改造計畫之屋頂隔熱效益研究—以臺中市學校為例。朝陽科技大學建築系碩士論文。臺中市。
- 五、黃世宇等（2008）。節能建築之水冷散熱系統設計與改進。中華民國第 48 屆科學展覽會報告（編號：030815）。
- 六、彭雅莉等（2010）。涼快一「夏」。中華民國第 50 屆科學展覽會報告（編號：080808）
- 七、林容合（2017）。牆壁裡的魔法—儲水袋溫度調節再利用系統。中華民國第 57 屆科學展覽會報告（編號：030822）。

- 八、Arno, S., Adam, R., Clayton, M., Jovan, P., Forrest, M., Matthias, M., Marcel, B., & Chen, K. W. (2016). 3for2: Realizing Spatial, Material, and Energy Savings through Integrated Design. *CTBUH Journal*, 42-45.
- 九、Future City @天下。羅浮宮幾乎沒冷氣，蒙娜麗莎如何微笑？解密巴黎地下歐洲最大都市供冷系統。2022 年 11 月 28 日取自 <https://futurecity.cw.com.tw/article/2697>
- 十、Alfa Laval Corporate AB。Paris' coolest attraction。2022 年 11 月 28 日取自 <https://www.alfalaval.com/media/stories/district-cooling/paris39-coolest-attraction/>

【評語】 082930

本作品探討以不同排列方式及材質的管路，於模型屋內進行冷水循環降溫，期望能達到節能減碳成效。研究顯示回字型的排列及冰磚冷卻循環水有較佳效果。

1. 此系統概念上與用於高精密實驗室（如超高解析度穿透式電子顯微鏡室）所使用的「輻射式空調系統」。此種空調系統因沒有風扇產生的強制對流，對精密儀器的干擾較少，但也因為沒有強制性的空氣流動，體感溫度較高，實務上需要設定較低的環境溫度，故整體而言有可能反而造成能源的浪費。文獻回顧中如巴黎，直接將熱水放流而非循環，故帳面上能耗較低，但加熱河水對環境的影響並未考慮。
2. 除了水管盤繞外，實務上多會結合熱交換鰭片，增加表面積以增加加熱交換率。
3. 實驗結果發現，S3 型水溫升高最多，照說應該從模型屋內獲取最多熱能，且若給模型屋的熱能在各實驗中為定值，依據能量守恆，屋內升溫應該最少。對回字形，水溫升高最少但模型降溫多，熱

能似乎有所耗散。為了能更好的評估能量的移轉情形，建議將整個作品放置於絕熱的環境內測試。

4. 各實驗重複次數為何？相同條件的結果差異如何？
5. 為何入水與出水流速不同？對於一個沒有漏水的循環系統，單位時間多少水進去就應該有多少出來，即進出水應有相同流速。有沒有可能是自製兩個流量計的差異性？建議能以碼表與量筒校正流量計，或是將兩個流量計位置對調，以釐清流速是否確實有差異。
6. 使用冰磚雖能良好降溫，但亦需要消耗能量製冰，與使用制冷晶片相同，都要額外耗能，整體不一定較環保。
7. 建議可以增加實驗時間，以了解水冷降溫系統在較長時間的降溫效果以及冰磚維持時間，較符合日常使用性質。
8. 保冷冰磚作為循環桶冷卻，在模型屋小範圍可行，但長時間或較大環境，還需思考替代冷卻方式。

作品海報

以水換電 -- 節能室內空間 水冷降溫系統設計與效能探究

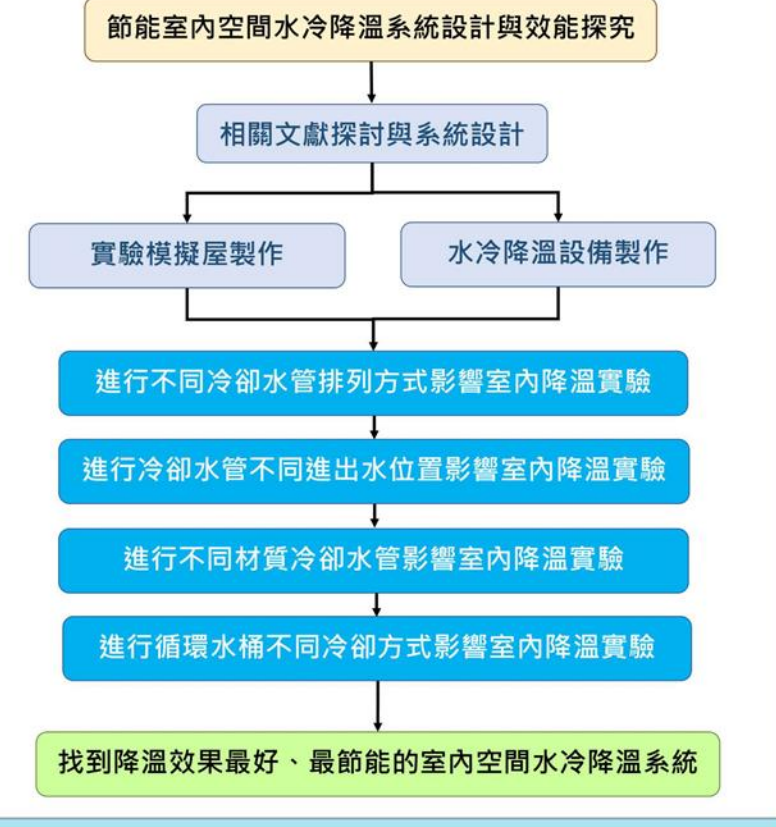
【摘要】

如何以最少的碳排放量，讓悶熱的室內空間迅速降溫？本研究結合熱傳理論及節能建築理念，設計以冷水循環來降低室溫的節能系統，並以空間比例 1/6 的模擬屋進行降溫實驗。從實驗結果發現：冷卻水管接觸面積越大、彎折越少流速越快，降溫效果越好，其中以回字型排列中央出水的冷卻水管，30 分鐘內可將內部溫度降低 8.5°C。同管徑的銅管與矽膠管降溫效果，因冷卻水溫高低而改變，低溫時銅管效果較佳。三種循環水桶冷卻方式中，採用冰磚冷卻即可保持冷卻水處於低溫狀態，達到良好的降溫效果，可整合綠能或河水、地下儲水系統等低碳排自然資源，進行冷卻水的降溫及更換，降低冰磚的使用量，以減少系統電能消耗，達到節能減碳的目的。

【研究動機】

去年暑假時，學校在各班教室裝設了冷氣機，讓我們夏天上課時能有個涼爽的環境。開學後由於天氣炎熱，教室內氣溫曾高達 33 度，因此各年級紛紛打開冷氣機來降溫，全校同時用電量大為提升，而冷氣機室外機排出的熱氣，也造成教室外溫度更為提升。對於國家整體用電吃緊，碳排放量增加，並造成自然環境溫度上升的影響，令人非常憂心。我們思考——「除了使用冷氣機來降低室內空間溫度外，是否可以利用低碳的自然資源取代電力，以最少的碳排放量來達到良好的降溫效果？」為了證明這個想法是否可行？我們研讀熱傳相關知識，並參考國內外相關研究案例，利用自然環境中可循環再生且比熱高的水資源作為冷卻劑，嘗試設計不同排列、材質及循環方式的冷卻管線，並透過環境模擬的實驗驗證，來找到一套可以減少碳排放量且冷卻效果良好的室內空間降溫系統。

【研究目的與架構】

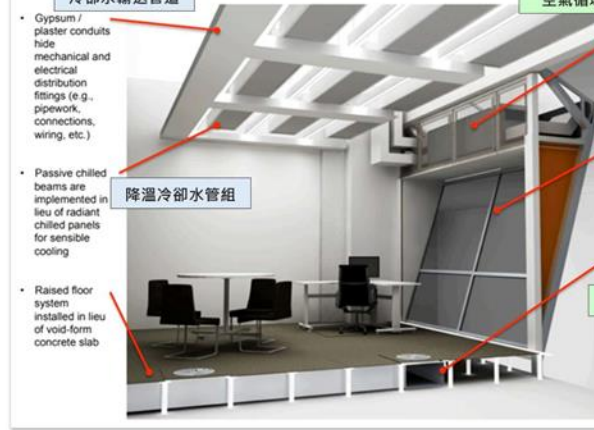


【文獻探討】

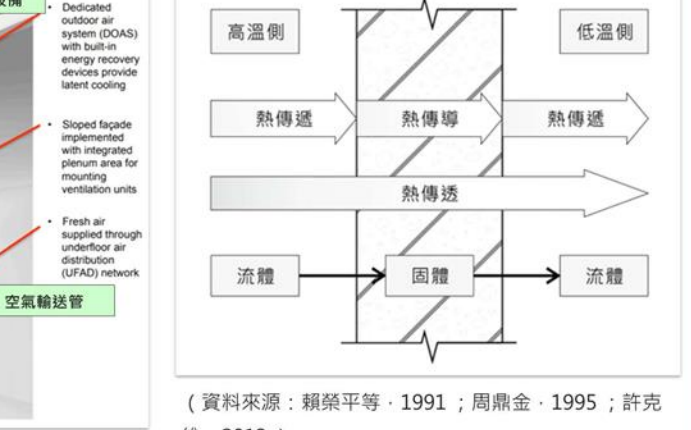
巴黎地下都市供水系統



新加坡 ETH 研究中心室內空調系統



熱傳現象

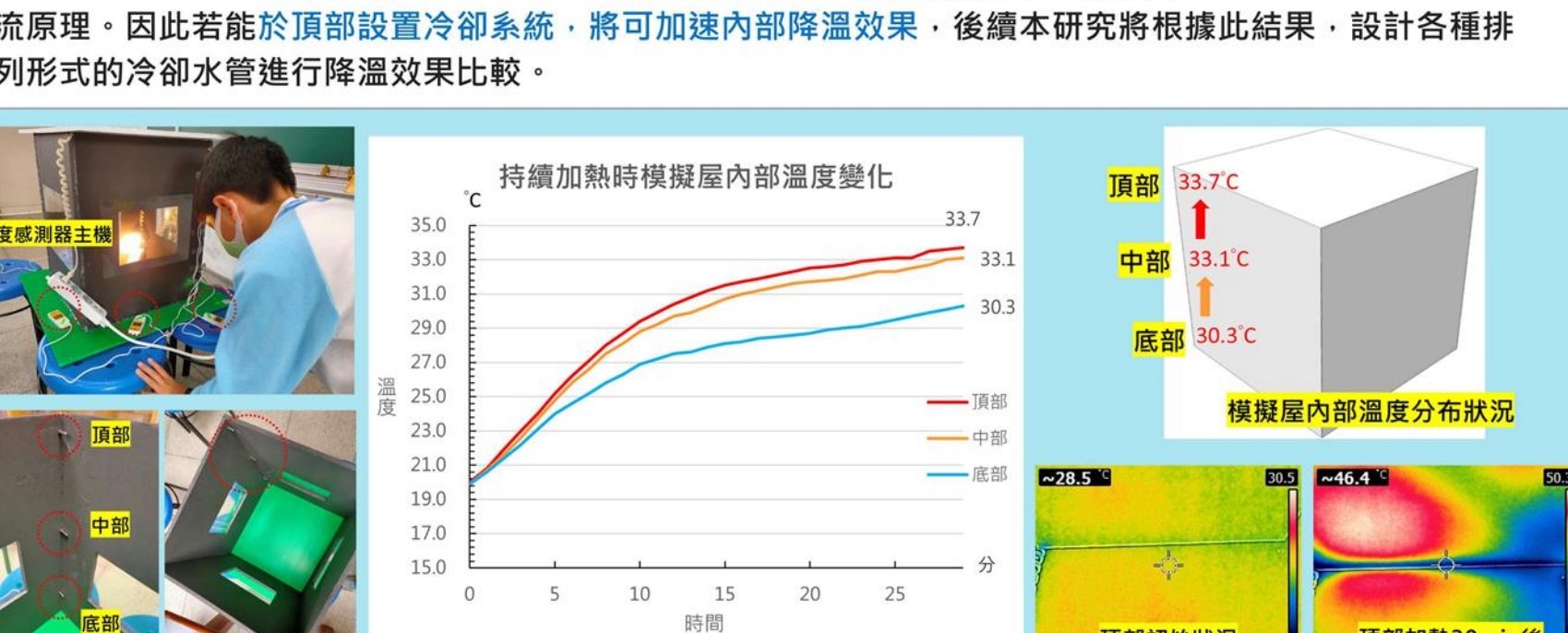


【研究過程與結果討論】

模擬屋製作與吸熱時溫度變化測試

首先為了瞭解建物在無設置降溫系統時，室內空間在吸熱時溫度的變化情形，本研究使用 10 mm 厚的風板板製作了六分之一比例的實驗模擬屋，並將溫度感測器分別裝在模擬屋的頂、中、底部，以偵測內部溫度變化。而後在內部放置鹵素燈，持續加熱 30 分鐘後關閉，並於內部溫度降至室溫時並取下溫度感測器，以電腦讀取紀錄進行分析。

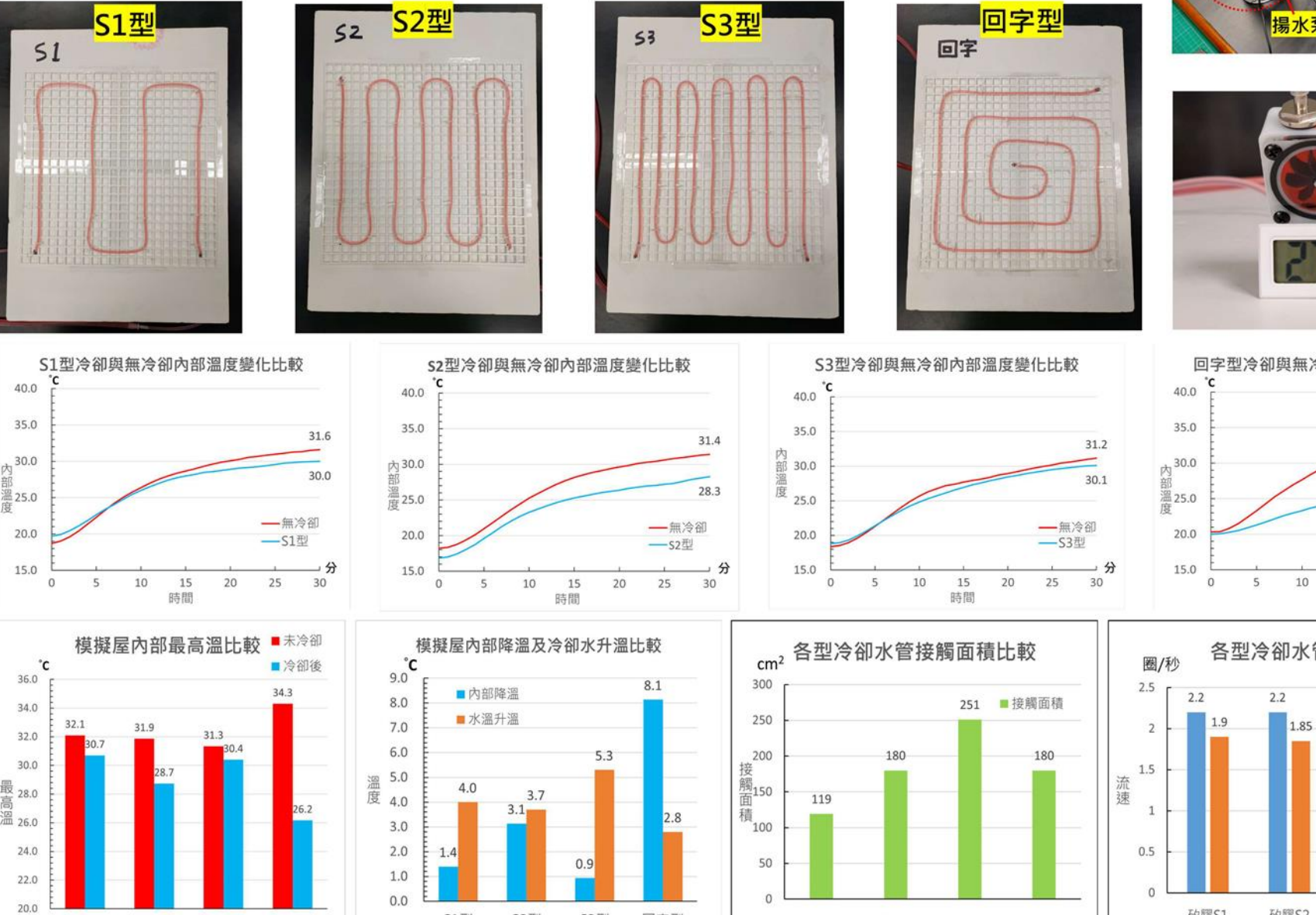
從實驗結果可以得知：模擬屋內部在無設置降溫系統時，鹵素燈加熱 30 分鐘後，頂部溫度從 19.8°C 升高為 33.7°C、中部升高為 33.1°C、底部升高為 30.3°C，屋內最熱的區域在頂部，符合熱空氣上升的對流原理。因此若能於頂部設置冷卻系統，將可加速內部降溫效果，後續本研究將根據此結果，設計各種排列形式的冷卻水管進行降溫效果比較。



比較不同冷卻水管排列方式對降低室內空間溫度的差異

本研究參考新加坡 ETH 研究中心室內空調系統，以 3D 列印固定架，並用管徑 4mm 矽膠管、揚水泵補和自製流速計，設計了四種不同排列方式的冷卻水管，分別為：S1 型、S2 型、S3 型和回字型。實驗步驟：1.於模擬屋頂部安裝各型冷卻水管。2.內部以鹵素燈加熱 30 分鐘。3.量測內部溫度、冷卻水流速及水溫。

從結果可以得知：回字型冷卻效果最好，最高溫可由 34.3°C 降至 26.2°C，且冷卻水只升溫 2.8°C，其次為 S2 型，最差的是 S3 型。為了解其中影響因素，本研究測量各型冷卻水管的流速，並算出冷卻水管接觸熱空氣的表面積，以比較之間的差異。我們發現以 180cm²、流速每秒 2.1 圓的回字型排列水管降溫效果最好；而 S3 型雖然接觸面積最大，但因管線彎折過多，流速變慢，被模擬屋內部的熱空氣加熱，導致循環水降溫不及，無法產生最佳冷卻效果。後續本研究採用降溫效果最好的回字型排列水管，進行各項裝置改良與實驗。

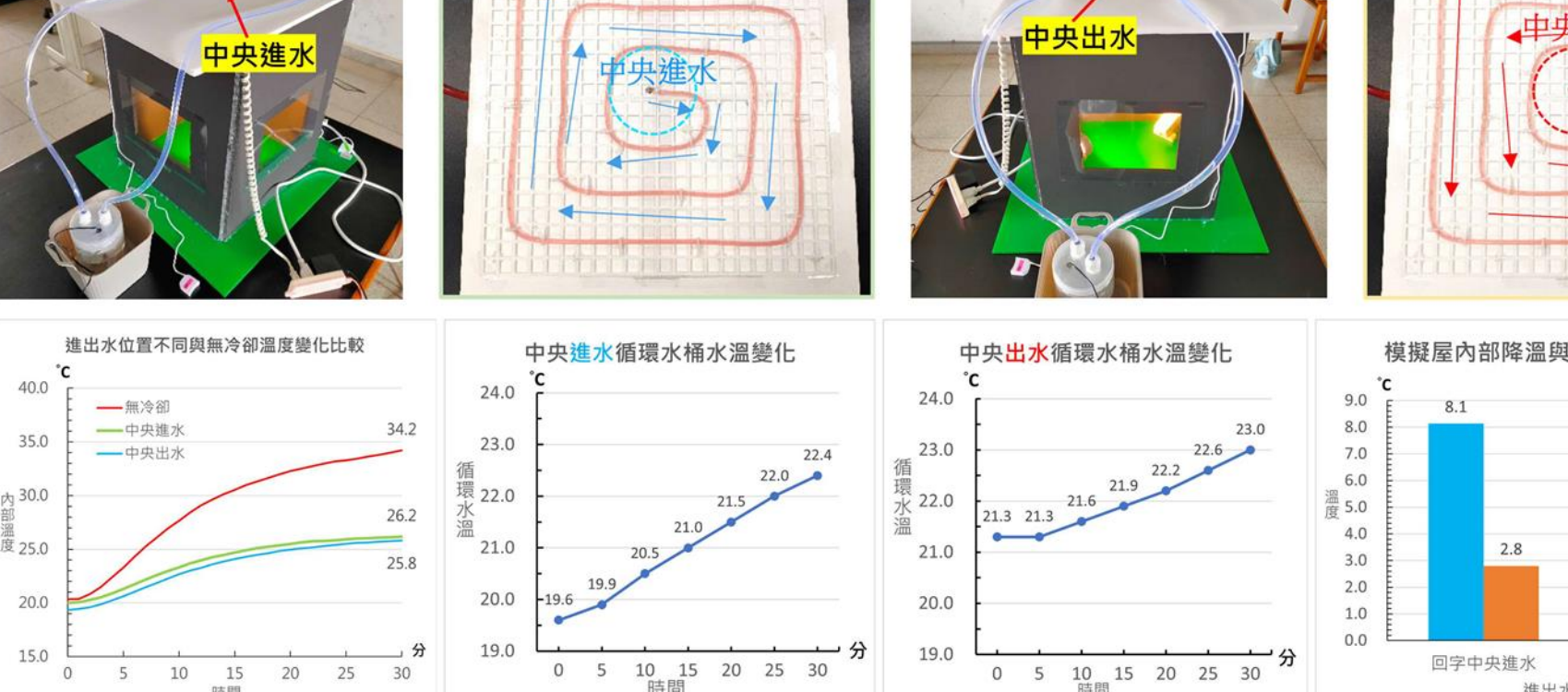


比較冷卻水管不同進出水位置對降低室內空間溫度的差異

在進行各型冷卻水管降溫實驗時，發現冷卻水流經內部空間時，因管線接觸內部高溫，會導致水溫上升，且出水比進水時溫度更高。因此冷卻水進水與出水的位置若不同，也可能影響降溫效果。為證明此一推論，本研究進行不同進出水位置對降溫效果影響的實驗。

實驗步驟：更換回字型冷卻水管進出水位置，並依前述實驗步驟量測內部溫度、冷卻水流速及水溫。

從實驗結果可以得知：回字型中央出水的降溫效果比中央進水好，可多降溫 0.4°C，而且中央出水的循環水溫上升較少，相差 1.1°C，在設置冷卻管線時，應採用中央出水的冷卻循環，以降低循環冷水的升溫，增加系統的冷卻時間，才能產生較佳的降溫效果。

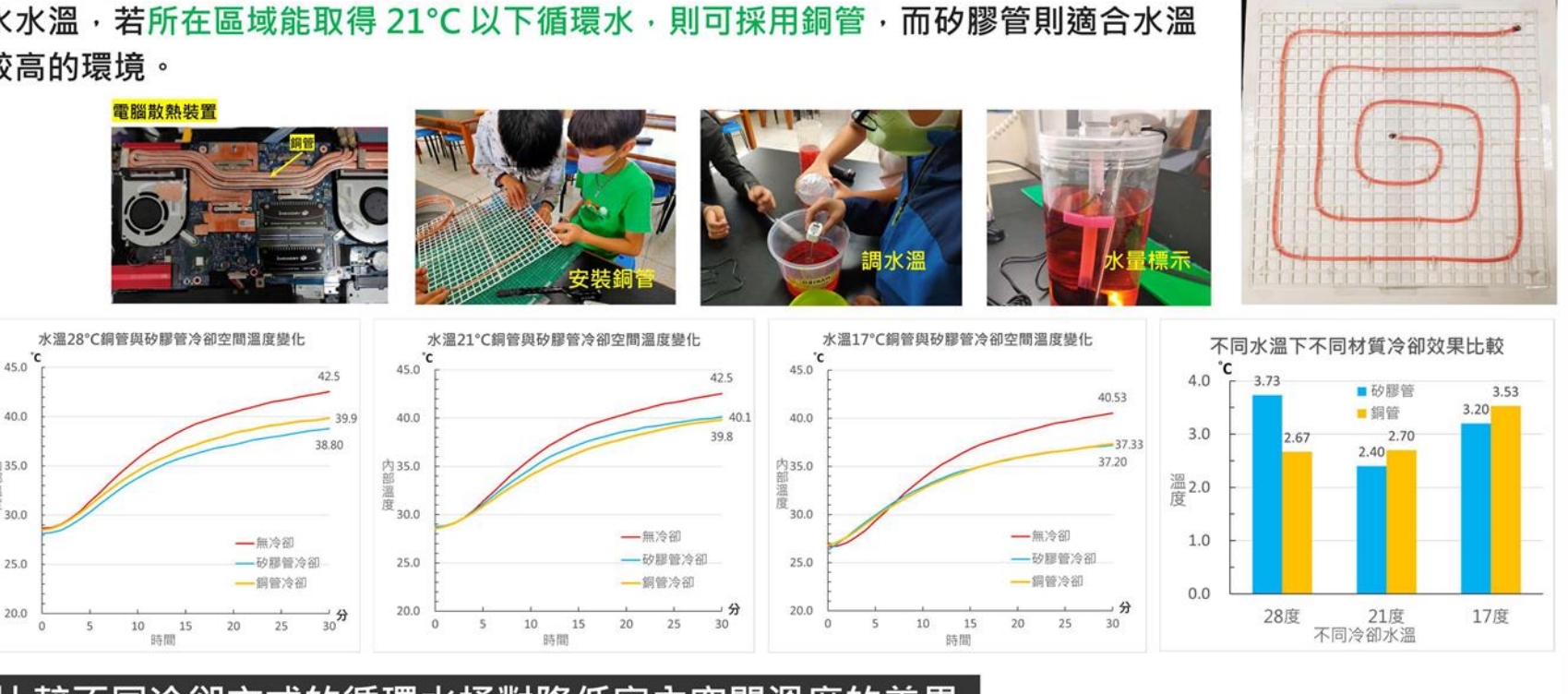


比較不同材質的冷卻水管對降低室內空間溫度的差異

除了採用矽膠材質的冷卻水管外，從相關文獻及研究中，發現銅管熱傳導效果良好，已使用於電腦的散熱系統中，因此本研究另外以銅管製作一組回字型冷卻水管，並進行降溫實驗。

實驗步驟：更換銅管及矽膠冷卻水管，並依前述實驗步驟量測內部溫度、冷卻水流速及水溫。

從實驗結果發現：使用室溫 28°C 的冷卻水時，由於銅管熱傳導效果較佳，容易受到內部熱空氣影響，讓冷卻水升溫較多，導致降溫效果較矽膠管差。但當使用 21°C 及 17°C 的冷卻水時，降溫效果則優於矽膠管。建議在設計冷卻管線時應考慮冷卻水溫度，若在區域能取得 21°C 以下循環水，則可採用銅管，而矽膠管則適合水溫較高的環境。

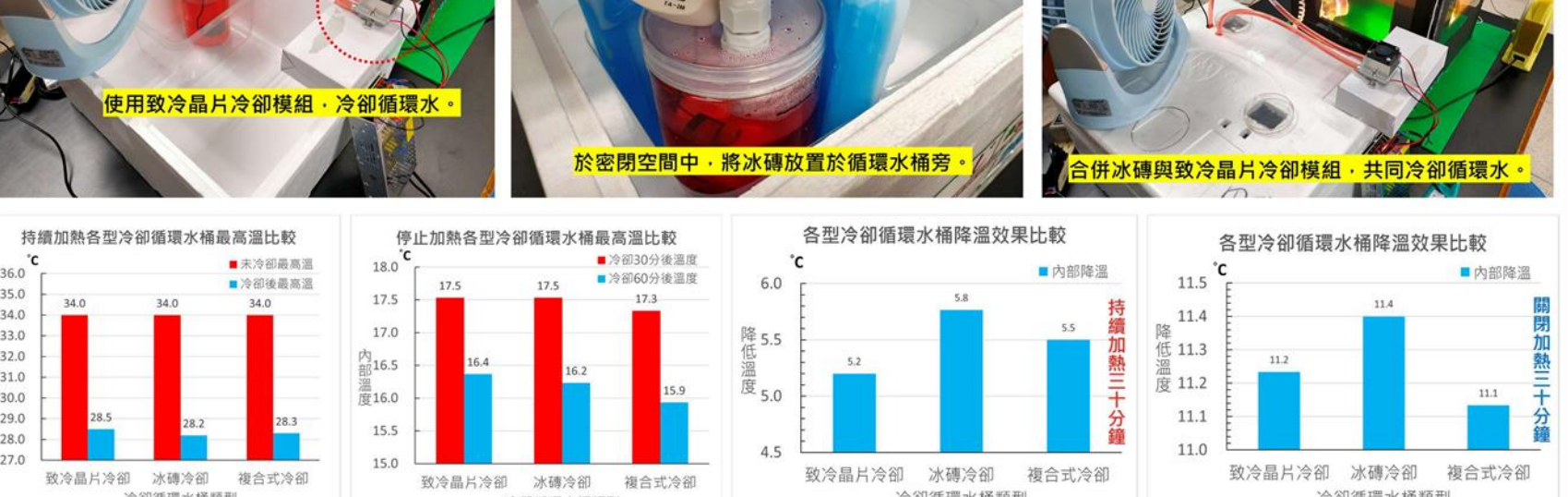


比較不同冷卻方式的循環水桶對降低室內空間溫度的差異

為提高循環水降溫速率，本研究參考各種儲冷設備之架構，分別採用冰磚、制冷晶片、及複合式冷卻三種方法來冷卻循環水桶，並進行降溫實驗。

實驗步驟：將循環水桶分別以冰磚、致冷晶片及合併兩種冷卻方式，進行冷卻水降溫，並依前述實驗步驟量測內部溫度、冷卻水流速及水溫。

從實驗結果發現，三種方法對降低模擬屋內部溫度並無顯著差異，在鹵素燈持續加熱下，皆可降溫 5°C 以上；在關閉鹵素燈 30 分鐘後，可降溫 11°C。採用冰磚冷卻，因循環水桶與冰磚同置於密閉空間中，不易受到外部空氣影響，冷卻效果較佳，可達到良好的降溫效果。而使用制冷晶片須顧及散熱問題，無法與循環水桶放置於同一密閉空間中，導致降溫效果略微降低。



肆、結論

從以上各實驗結果得知：若要安裝一套降溫效果良好的水冷降溫系統，可於空間頂部安裝回字型排列、中央出水、材質為銅的冷卻水管模組，即可在使用最少電能的條件下，達到最佳的降溫效果。

如果要再提升循環水降溫速率，則可以結合綠能，在離峰用電時間，使用儲冷設備，製造冰磚來冷卻循環水；或以附近環境可取得的河水、地下水等自然資源來更換冷卻水，降低系統用電。

地球內用於發電的地下水資源有限，如能更深入研究與運用「以水換電」的技術，將可減少資源的消耗，並達到節能減碳的目的。

