

屋頂隔熱對策全尺度節能實證之研究

內政部建築研究所委託研究報告

中華民國 105 年 12 月

(本報告內容及建議，純屬研究小組意見，不代表本機關意見)

PG10501-0820

105301070000G0020

屋頂隔熱對策全尺度節能實證之研究

受 委 託 者：國立臺灣大學

研究主持人：黃國倉 博士

協同主持人：黃瑞隆 博士

研究助理：曾毅振、翁堉騰

研究期程：中華民國 105 年 1 月至 105 年 12 月

研究經費：新臺幣 153.78 萬元

內政部建築研究所委託研究報告

中華民國 105 年 12 月

(本報告內容及建議，純屬研究小組意見，不代表本機關意見)

目次

表次.....	III
圖次.....	V
摘要.....	IX
第一章 緒論.....	1
第一節 研究緣起與背景.....	1
第二節 本研究計畫之重要性.....	1
第三節 國內外相關文獻回顧.....	2
第四節 國內屋頂節能法規.....	19
第二章 實驗設計.....	23
第一節 研究方法.....	23
第二節 屋頂隔熱策略實驗規劃.....	26
第三節 歸零實驗.....	37
第四節 實驗配置與測點規劃.....	38
第三章 電腦模擬實驗.....	41
第一節 電腦動態解析工具說明.....	41
第二節 模擬條件假設.....	43
第三節 模擬結果與討論.....	44
第四章 實測實驗結果與討論.....	49
第一節 隔熱性能.....	49
第二節 室內熱舒適效益.....	52
第三節 空調耗能比較.....	54
第五章 屋頂隔熱技術改善建議.....	57
第六章 結論與建議.....	59
第一節 結論.....	59
第二節 建議.....	60
附錄一 期初審查會議委員意見回覆.....	61

附錄二 期中審查會議委員意見回覆	63
附錄三 期末審查會議委員意見回覆	65
附錄四 工作會議記錄	67
參考書目	69

表次

表 1-1 台灣各行政區之氣候分區	20
表 2-1 各式屋頂之熱性能	29
表 2-2 使用儀器及其規格一覽表	39
表 3-1 各屋頂構造自然通風情況下室內過熱分析	48
表 4-1 實驗期間空調啟用時間統計	49
表 4-2 各式屋頂時滯現象分析	51
表 4-3 各式屋頂用平均耗電量比較(09/06-09/30).....	55
表 5-1 薄層綠化屋頂構造熱傳透率計算表	57
表 5-2 密集型綠化屋頂構造熱傳透率計算表	57
表 5-3 雙層通風屋頂構造熱傳透率計算表	58
表 5-4 冷屋頂構造熱傳透率計算表	58

圖次

圖 1-1	位於希臘的辦公建築屋頂綠屋頂試驗	3
圖 1-2	位於高雄的薄層綠屋頂實驗	4
圖 1-3	臺大生物環境系統工程系實驗屋	5
圖 1-4	一篇於高雄的雙層屋頂研究實驗配置	6
圖 1-5	新加坡以一真實屋頂進行與熱傳模式之比對	7
圖 1-6	屋面反射率、雙層屋頂有無通風與總熱阻對室內熱取得影響	7
圖 1-7	一般雙層屋頂與結合冷屋頂之雙層屋頂之實驗配置	8
圖 1-8	國內雙層通風屋頂之實測研究	8
圖 1-9	一篇希臘針對通風屋頂之實測研究配置	9
圖 1-10	一篇於義大利的屋頂流動空氣層研究	9
圖 1-11	不同屋頂配置對室內溫度與冷房負荷之影響	10
圖 1-12	於馬來西亞的 MAC 與 TIC 研究	10
圖 1-13	使用 DOE 軟體評估台灣氣候條件下冷屋頂之節能效益	11
圖 1-14	一篇位於美國針對反射式屋頂之研究配置	12
圖 1-15	一篇於英國倫敦的冷屋頂實驗	13
圖 1-16	模擬結果搭配 ASHREA 55 之埃及地區的熱舒適範圍	13
圖 1-17	於義大利之 12 幢建物屋頂表面實照及冷屋頂塗料特性實驗 ..	14
圖 1-18	分別位於中國重慶與廣東之冷屋頂實驗	15
圖 1-19	義大利利用實驗屋探討屋頂蓄熱能力對室內熱舒適之影響	16
圖 1-20	一篇斯里蘭卡的研究以縮尺與全尺度實驗屋探討屋頂隔熱	16
圖 1-21	縮尺與全尺度實驗屋探討屋頂隔熱之結果	16
圖 1-22	不同隔熱材對建築總熱負荷之影響	17
圖 1-23	隔熱層厚度與節省成本之關係圖	17
圖 1-24	位於立陶宛進行反射率、通風屋頂實驗之全尺度實驗屋	18
圖 2-1	研究架構與流程	25
圖 2-2	全尺度實驗屋的詳細地理位置	26

圖 2-3 實驗屋配置圖.....	27
圖 2-4 全尺度實驗屋尺寸示意圖	27
圖 2-5 實驗屋改裝情形.....	28
圖 2-6 六組實驗屋頂完工情形	28
圖 2-7 屋頂隔熱完工情形	28
圖 2-8 薄層屋頂綠化構造大樣示意	29
圖 2-9 屋頂綠化滴灌系統施工過程	30
圖 2-10 屋頂綠化植栽種植施工過程	30
圖 2-11 薄層型(15cm 覆土)屋頂綠化完工照片	30
圖 2-12 密集型屋頂綠化之構造大樣示意	31
圖 2-13 密集型屋頂(40cm 覆土)完工照片	32
圖 2-14 雙層通風屋頂之構造大樣示意	32
圖 2-15 雙層通風屋頂完工照片	33
圖 2-16 冷屋頂構造大樣示意	34
圖 2-17 冷屋頂完工照片.....	34
圖 2-18 PS 板隔熱屋頂之構造大樣示意.....	35
圖 2-19 PS 板隔熱屋頂完工照片	35
圖 2-20 傳統五腳磚屋頂構造示意	36
圖 2-21 五腳磚屋頂完工照片	36
圖 2-22 實驗屋歸零實驗步驟	37
圖 2-23 室內熱舒適環境測點分佈	38
圖 2-24 屋頂隔熱量測之測點分佈	39
圖 3-1 EnergyPlus 軟體架構圖.....	43
圖 3-2 EnergyPlus 裡擁許多模組單元可模擬運算各種系統.....	43
圖 3-3 EnergyPlus 模擬建築幾何尺寸與方位	44
圖 3-4 台南典型夏季日(7/21)之逐時冷房負荷量分佈	45
圖 3-5 典型夏季日之逐時屋頂下表面熱流量	45

圖 3-6 全空調運轉下全年冷房負荷量比較	46
圖 3-7 自然通風下典型夏季日屋頂下表面熱流量變化線圖	47
圖 3-8 自然通風狀態夏季典型日屋頂下表面溫度變化	47
圖 4-1 室內屋頂下表面溫度變化(9/11-9/13 有空調期間).....	50
圖 4-2 混凝土樓板上表面溫度變化(8/31-9/1).....	52
圖 4-3 室內平均輻射溫度(MRT)變化	53
圖 4-4 室內空氣溫度變化	54
圖 4-5 全日空調平均用電量(09/06-09/30 平均).....	55
圖 4-6 日間(7:00-17:00)空調平均用電量(09/06-09/30 平均).....	56
圖 4-7 夜間(19:00-5:00)空調平均用電量(09/06-09/30 平均).....	56

摘要

關鍵詞：全尺度實驗屋、屋頂隔熱技術、空調節能效益、室內熱舒適

一、研究緣起

屋頂樓版之隔熱性能對位於頂層之室內熱得影響甚鉅，係由於水平面之日射輻射比垂直牆面來得多，日射熱之取得最終將反應於空調之耗能量。我國之建築節能設計規範以構造之熱傳透率(U 值)作為評估屋頂隔熱性能之指標，雖屋頂之隔熱性能要求更甚於立面外牆。然而，U 值僅能反應建築之熱傳透，單一的 U 值指標無法評估壁體或屋頂表面之熱反射、構造熱蓄熱以及雙層屋頂通風等效果。今日業界上常見之建築隔熱工法、材料眾多，然而其隔熱之原理亦各異，無法僅以 U 值來評估之，有必要進行各工法間對建築節能之效果比較，以獲得整體性之評估。

二、研究方法及過程

本研究以內政部建築研究所於台南歸仁所屬之實驗群用地，應用六座新建置之全尺度實驗屋，透過夏季熱季之長期實測，同步探討六種屋頂隔熱工法、材料間之空調節能與室內熱舒適性之改善效益，包括薄層屋頂綠化、密集型屋頂綠化、雙層通風屋頂、屋頂隔熱漆(或冷屋頂)、傳統 PS 隔熱版隔熱以及傳統五腳磚隔熱屋頂。本研究成果期能建立符合臺灣熱濕氣候區本土化之量化數據，以為業界進行屋頂隔熱策略選擇之參考。

三、重要發現

透過現場實驗屋實測實驗所得重要結論如下：

1. 雙層通風屋頂雖然透過中間空氣層而在整體頂構造熱傳透率上得以符合法規之規定，然而如構造中無隔熱材料，日間之屋頂下表面溫度將比傳統五腳磚或 PS 版隔熱屋頂來得高。因此建議採用雙層通風屋頂之構造，混凝土樓板仍需設置隔熱層為佳。
2. 實驗結果在有屋頂綠化之二組於日間皆呈現相對低溫，顯示具有良好的隔熱效果，但在夜間由於土壤層與蓄排水版間蓄水導致於日間蓄熱量亦高之故，使得夜間散熱不易而致屋頂下表面溫度較其他組別稍高。而冷屋頂構造，由於日間反射了大部分之日射量因此混凝土樓板之日射取得較少，在夜間降溫較快速而呈現最低之表面溫度。
3. 室內熱舒適之效益：不論是日間或夜間，雙層通風屋頂、冷屋頂、薄層綠化屋頂與密集型綠化屋頂在對室內空氣溫度或平均輻射溫度之控制上，皆較傳統之五腳磚隔熱屋頂與 PS 板隔熱屋頂表現來得優良。尤其在日間以綠屋頂最具改善室內熱舒適效果，然而也由於綠屋頂高蓄熱能力，在夜間反而呈現較高之室內溫度。

4. 在空調連續運轉下，相較於五腳磚隔熱屋頂，雙層通風屋頂、冷屋頂、PS 版隔熱屋頂、薄層綠化屋頂與密集型綠化屋頂全日分別空調省能約 33.1%、42.6%、5.2%、29.5%與 34.3%。然而，應用冷屋頂技術尚須考量表面塗層會隨時間因氣候而劣化、灰塵汙染等情形而降低其節能效益，此議題因時間因素未能於本研究中探討，於引用本研究數據時應注意冷屋頂可能會有此劣化現象。
5. 本研究同時提出薄層屋頂綠化構造、密集型屋頂綠化構造、冷屋頂構造與雙層通風屋頂構造之各層建材熱阻計算表以供業界參考選用。

四、主要建議事項

根據本研究成果發現，提出下列具體建議，分別從立即可行建議及中長期建議加以列舉如下：

建議一

推廣宣導屋頂綠化構造：立即可行建議

主辦機關：台灣綠屋頂暨立體綠化協會、財團法人台灣建築中心

協辦機關：內政部建築研究所、台灣建築學會

本實證研究顯示，屋頂綠化有較佳之室內熱舒適改善與空調節能效果。以屋頂綠化而言，薄層屋頂綠化在 15 公分之覆土厚度下即有明顯之日間降溫效益，然而仍需視既有建築之屋頂層結構承载力搭配適合之土壤層厚度。

建議二

辦理屋頂綠化補助改善之示範案例：立即可行建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：財團法人台灣建築中心

內政部建築研究所過去辦理之「建築節能與綠廳舍改善補助計畫」成效卓著，惟針對屋頂綠化改善之節能效益，過去多引用模擬或推估資料，缺乏直接之實測量化資料作為實證依據。本研究所完成之屋頂綠化空調節能實測，相較於五腳磚隔熱屋頂(U 值約 0.8)，顯見屋頂綠化具有相當大之空調節能潛在效益，值得後續納入擴大辦理示範改善。

建議三

辦理屋頂綠化針對屋頂近表層戶外環境空氣降溫之實測驗證：中長期建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：

本研究以符合法規低限之屋頂構造熱傳透觀點，透過二組實驗屋實測驗證屋頂綠化構造之初步節能效益。然而屋頂綠化對居住環境之影響尚有對都市熱島降溫之貢獻，過去國外許多城市常以屋頂綠化作為減緩都市熱島增溫之手段，然而國內針對各式不同型態之屋頂綠化對近屋頂表層之降溫量化效益則較為缺乏。綠化植栽種類(灌木或草本植物)、葉面密度、覆土厚度、以及屋頂綠化工法上蓄排水版之有無等皆會影響近表層之空氣溫度。實有需要透過不同屋頂綠化型態、種類之實驗組合下進行同步實驗，以定量化與找尋具較佳降溫效益之屋頂綠化組合，俾便未來政府作為降低都市熱島效應技術選用之參考。

ABSTRACT

Keywords: Full-scale experiment chamber, roof insulation technique, cooling energy saving benefit, indoor thermal comfort

1. Introduction

The thermal insulation of a roof slab is of crucial influence on indoor heat gain because the horizontal solar radiation is relatively larger than the vertical wall. The solar heat gain will eventually contribute to the cooling load, hence increasing the cooling energy. The coefficient of conductivity (U-value) is an index used for the insulation performance of building roof compliance in Taiwan. However, solely U-value is incapable of evaluating some advanced roof insulation constructions such as reflective roof, ventilated double roof etc. To synthesis assessing the cooling energy saving benefit and the indoor thermal comfort improving capability, it is necessary to simultaneously conduct experiments among various roof constructions.

2. Methods

Six full-scale experimental chambers located at Tainan, south Taiwan, were used for in-situ experiments of six different types of roof construction including thin-layered extensive green roof, thick-layered intensive green roof, cool roof, ventilated double roof, PS insulated roof and traditional concrete tile roof. The experiment was performed in hot season to simultaneously investigate the indoor thermal comfort as well as their cooling energy benefits. The purpose of this study is hope to quantify the above benefits in the context of local climate. The results of the study could be useful and applicable for construction industries.

3. Significant findings

The following findings have been achieved through the in-situ experiments in this research:

- (1) Although the insulation performance of the construction of ventilated double roof is comply to the regulation, we found that the surface temperature of the interior side of the roof slab is higher than that observed in cases of concrete tile roof and PS-insulated roof because of the none existence of insulation layer of the ventilated double roof. Therefore, it is highly suggested that an additional layer of insulation material should be layered in the concrete slab for using such construction.

- (2) The sub-surface temperatures of the roof slab of both green roof cases are relatively lower than the other roof constructions, revealing good thermal insulation performance. However, due to their high capability of thermal storage of the soil as well as the module of water retention and drainage layer, the heat seemed difficult to dissipated outwards resulting slightly higher temperature than the other roof constructions. As for the cool roof, lower surface temperature is observed at night and decrease rapidly because that the high reflectivity of the exterior layer of the cool roof reflects large amount of solar radiation resulting less solar heat absorb in the concrete.
- (3) The indoor thermal comfort benefits: The indoor temperatures and the mean radiant temperatures of double roof, cool roof, extensive and intensive green roof are both lower than traditional concrete tile roof and the PS insulated roof either in the daytime or at night. Especially for both green roof constructions, the diurnal indoor thermal comfort is satisfactory, however, due to their high thermal mass, slightly higher indoor temperature is observed as opposed to other cases.
- (4) The cooling energy saving benefits of double roof, cool roof, PS insulated roof, extensive green roof and intensive green roof against concrete tile roof under continuously operation of air-conditioning are 33.1%、42.6%、5.2%、29.5% and 34.3%. However, the weathering of cool roof coating is another factor that will influence its radiation reflective capability. Due to the time constraint, we are unable to quantify this effect in this study, therefore, the actual long-term energy saving benefit of cool roof may be gradually deteriorated over times.
- (5) Practical construction suggestions complying to current roof insulation regulation were proposed in this study for references and application purpose for the construction and architectural design industries.

4. Recommendations

- (1) The research results reveal a promising benefits of green roof on cooling energy saving, therefore, propaganda of this passive design strategy is encouraged.
- (2) Based on the results of the quantified benefits of indoor thermal comfort and cooling energy saving, promotions and incentives for continuously adopting green roof as a means to improve roof thermal insulation performance through governmental projects is suggested.
- (3) The ambient temperature cooling effect is another contributing factor of a green roof. Many countries have considered green roof as a means to counteract urban heat island. However, seldom studies regarding the outdoor temperature reduction effect of various types of green roof had been conducted. It is suggested to establish quantified benefits of green roof by in-situ experiments using experimental test cells.

第一章 緒論

第一節 研究緣起與背景

屋頂樓版之隔熱性能對位於頂層之室內熱得影響甚鉅，係由於水平面之日射輻射比垂直牆面來得多，日射熱之取得最終將反應於空調之耗能量。我國之建築節能設計規範以構造之熱傳透率(U 值)作為評估屋頂隔熱性能之指標，雖屋頂之隔熱性能要求更甚於立面外牆，然而，U 值僅能反應建築之熱傳透，單一的 U 值指標無法評估壁體或屋頂表面之熱反射、構造熱蓄熱以及雙層屋頂通風等效果。國內許多既有建築因過去較為寬鬆之節能規範，因而導致屋頂隔熱性能不佳，造成建築耗能之現象，亦急需屋頂隔熱之改善。

今日業界上常見之建築隔熱工法、材料眾多，然而其隔熱之原理亦各異，無法僅以 U 值來評估之，有必要進行各工法間對建築節能之效果比較，以獲得整體性之評估。過去常以電腦動態模擬之方式進行分析，實證研究較為缺乏。因此，本研究擬以內政部建築研究所於台南成大歸仁校區所屬之實驗群用地，應用新建置之全尺度實驗屋，同步探討各種屋頂隔熱工法、材料間之空調節能與室內熱舒適性之改善效益，期能建立符合臺灣熱濕氣候區本土化之量化數據，以為業界進行屋頂隔熱策略選擇之參考。

第二節 本研究計畫之重要性

本計畫探討除了構造熱傳透率對節能之效果外，另外探究雙層通風屋頂、冷屋頂、屋頂綠化等特殊屋頂隔熱技術之節能效益與對室內熱舒適改善之程度，建立實測的量化數據。使得過去難以量化評估之特殊屋頂隔熱技術得以評估，並增入建築外殼節能設計之構造規範內，有助於推廣屋頂隔熱構造。建立並印證熱容量、表面反射率、通風空氣層等構造建材性質與設計手法對節能之影響，以推廣應用上述特性開發新穎建築屋頂隔熱建材或構造系統，有助於綠建築日常節能之應用。

1.2.1 研究計畫內容

本計畫利用全尺度實驗屋，進行六種不同屋頂隔熱策略之節能實驗，其中包括薄層屋頂綠化、密集型屋頂綠化、雙層通風屋頂、屋頂隔熱漆(或稱冷屋頂)、傳統 PS 隔熱版隔熱與傳統保利龍五腳磚隔熱屋頂等，進行室內空調節能與室內熱舒適之效益比對實驗。六項隔熱技術分別施作於六個同規模與座向之實驗屋進行同步實測。預計將比對炎熱夏季時包括室內空調耗能、室內空氣溫濕度及屋頂下表面溫度等物理量之變化，再依據熱舒適理論求得室內熱舒適程度。最後提出較佳之屋頂隔熱方案，以為業界參考。

1.2.2 本研究目的

1. 建立各式屋頂隔熱策略之空調節能效果。
2. 獲知各式屋頂隔熱策略之室內熱舒適改善效益。
3. 提出合乎法令規範之屋頂隔熱技術改善建議。

第三節 國內外相關文獻回顧

本節有關國內外文獻之探討區分為屋頂綠化、雙層通風屋頂、冷屋頂與 PS 版隔熱屋頂等之文獻分別進行文獻回顧。

過去國內外有關以綠化屋頂作為屋頂隔熱之研究眾多。屋頂綠化的實測方面：(Liang and Huang 2011)分別在種有植株和沒有植株的屋頂，量測室外和室內的環境，發現有植株的屋頂相較沒有種植的，在室外表面溫度低了 9.12°C (全天平均值)、在室內空間的溫度則低了 1.22°C (全天平均值)，因此可以得知，屋頂綠化對於室外環境舒適度的提升和節約室內空調用量，是很有貢獻的。而(Lin, Yu et al. 2013)探討台灣南北二大氣候區應用薄層屋頂綠化對室內與戶外近表面之降溫效果，發現於南台灣熱帶氣候區日間的降溫效果顯著，而屬於亞熱帶氣候區的台灣北部則於夜間有較佳之隔熱效益。另外，(Karachaliou, Santamouris et al. 2016) 在希臘一處面積達 $10,000\text{m}^2$ 之辦公建築屋頂實施大規模的綠屋頂實驗(如圖 1-1)，使用 14 種不同的希臘原生香草作為綠屋頂植栽。發現高葉面密度、低日照吸收率的植物，較能降低屋頂表面溫度，另外，低灌溉需求的植物有較佳的利用價值。綜合所有實驗結果，綠屋頂在夏季平均能降低室內溫度 $0.1\sim 0.8$ 度，且能同時減少 19% 的全年冷房負荷與 11% 的全年暖房負荷。



圖 1-1 位於希臘的辦公建築屋頂綠屋頂試驗
(資料來源：Karachaliou, Santamouris et al. 2016)

而於屋頂綠化的建築節能模擬方面。Sailor 將 EnergyPlus 屋頂綠化的能量平衡模型，和實測的數據進行整合和比對。模型主要包含了生長介質的特性(如熱傳係數、深度等)和植物特性(如高度、葉面積指數等)，經過適當的變數設定進行模擬，和 Florida 屋頂綠化的實際觀測數據比較後，發現建築物能源使用與這些變數有顯著的關係，此外，亦與建築物當地的氣候條件關係密切(Sailor 2008)。Theodosiou 為了研究屋頂綠化的效率，結合已建立的模型和電腦的模擬工具，成為一套可以模擬屋頂綠化的方法，在經過實際狀況的數據驗證後，進行了各變數對屋頂綠化的影響力分析。發現眾變數中最重要的是葉片的密度，葉面積指數(LAI)即是能反映葉子密度的指數，越高代表有越多的葉片能抵擋太陽輻射、也會有更旺盛的蒸散作用，因此能紓解屋頂的熱環境(Theodosiou 2003)。Wong 等人(Wong, Chen et al. 2003, Wong, Cheong et al. 2003)，利用 DOE-2 模擬五層的商用建築，在其屋頂進行屋頂綠化，討論土壤厚度、土壤的含水量和屋頂植栽種類這些變數，對年度能源消耗量的影響。最後得到的模擬結果顯示，在這個模擬的案子中，在年度能源消耗量上可以節省 1-15%，而在屋頂熱傳導(RTTV, roof thermal transfer value)則可以減少 17-81%，另外，在植栽的選擇上，灌木的節能效果為最佳，而介質則是選擇乾黏土為最佳。在薄層屋頂的植栽選擇部分，一份位於台灣北部的調查研究(張采依 2012)，顯示在台北的綠屋頂使用現況中，植栽的選擇有垂盆草(*Sedum sarmentosum*)、怡心草(*Tripogandra cordifolia*)、麒麟花(*Euphorbia milii*)、芳香萬壽菊(*Tagetes lemmonii*)、松葉景天(*Sedum mexicanum*)、小花馬齒牡丹(*Portulaca oleracea*)和小松葉牡丹(*Portulaca gilliesii*)、藍星花(*Evolvulus nuttallianus*)、台北草(*Zoysia matrella*)以及黃金萬年草(*Sedum acre*)等。然而，上述的植物在不同的季節與應

用策略上有不同的節能表現，且維護成本亦不盡相同。綜合氣候、維護成本與節能效益等考量，此研究指出於台灣北部的薄層綠屋頂綠化之植栽選擇，應選用耐熱、耐旱之植物種類，並搭配育苗、馴化和灌溉系統，以降低維護管理成本。亦有一份於高雄的研究(林怡君 2012)，以一棟位於校園內的四層樓建築之屋頂做薄層屋頂節能效益研究，針對四個栽培介質、三種灌溉頻率以及四種 CAM 植物作為分析對象(如圖 1-2)，研究結果顯示使用燒結淤泥、灌溉頻率以夏季一週一次與冬季一週兩次為佳，植栽部分亦建議選擇耐熱與耐旱植物，以達到最佳節能效益與較低的維護管理成本。而(余文元 2013)於臺灣大學應用兩個全尺度實驗屋進行室內植栽牆對室內溫熱環境及空調節能效益之研究，在僅有二組實驗屋的情況下，同一時間僅能進行一組實驗(如圖 1-3)。因此有必要透過六組實驗屋以同步進行本研究所欲探討之五種屋頂隔熱技術之比較。

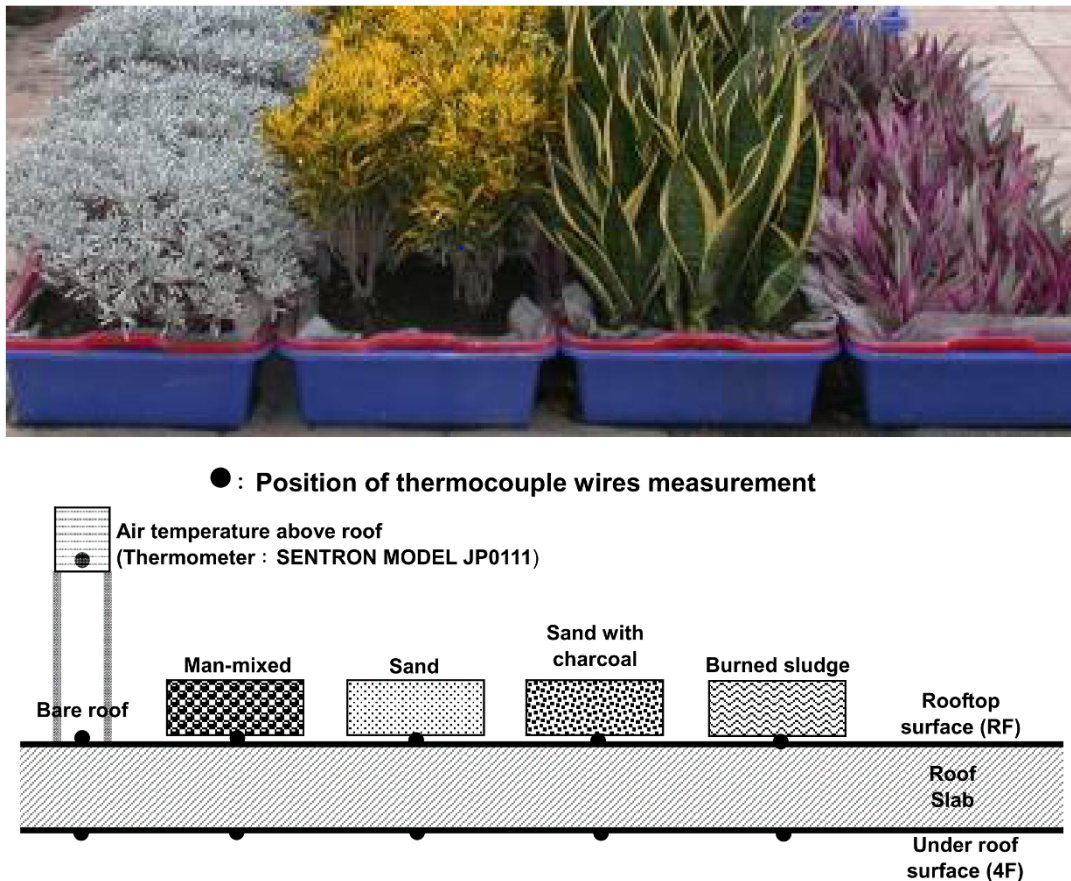


圖 1-2 位於高雄的薄層綠屋頂實驗
(資料來源：林怡君 2012)



圖 1-3 臺大生物環境系統工程系實驗屋
(資料來源：余文元 2013)

此外，另一篇於台灣以直交表實驗計畫法針對植草屋頂之植草種類、覆土深度與覆土介質進行其當量熱阻之實驗，以建立植草薄層綠化屋頂之熱阻，作為計算屋頂構造整體熱傳透率之依據。以使植草屋頂構造可納入現行綠建築之建築外殼耗能指標(ENVLOAD)計算。實驗結果發現，在覆土 6cm 至 18cm，採用介質為泥炭土、一般砂土、砂土與珍珠石混合三種介質，以及台北草、地毯草與玉龍草三種植草種類，在 3cm 珍珠石排水層下，其平均當量熱阻為 $0.127 \text{ (m}^2\text{K/W)}$ 。若應用於熱傳透率為 0.99 之五腳磚隔熱屋頂時，可增加隔熱性能約 11.2%。(黃國倉 2010)

在雙層屋頂通風方面，游立偉以實驗裝置進行實體改善及戶外模型兩項試驗(游立偉 2004)，分別針對構造施作前後與其不同型態之組合模式，進行建築物理環境參數(包括溫度、風速、溼度、熱流與太陽輻射強度等)之實測，了解其隔熱表現並據以進行隔熱性能之評估。實驗結果發現建築物的屋頂外殼若只有 RC 結構體時，其隔熱性能不佳。而應用此研究所設計提出平屋頂形式之雙層通風屋頂構造，能移除相當程度經屋頂面所吸收之太陽輻射熱量，有助於提升整體屋頂構造之隔熱性能。在全白晝時段中，通過雙層 RC 屋頂之熱傳透量可降至原有 RC 裸面的 11%，同時，在室內冷房負荷最大的時段中，雙層 RC 屋頂之熱傳透量亦僅為 RC 裸面的 16%。

葉仲哲於高雄第一科技大學實測雙層屋頂組合板之隔熱效能(葉仲哲 2014)，並以田口實驗設計法，設置 27 組不同的屋頂配置組合，實驗不同因子水準的組合對於熱能

傳導的影響。實驗結果顯示，隔熱厚度、表面性質、空氣層氣密性對室內外溫差影響顯著，且上層屋頂之反射率亦會影響屋頂層熱流。結果分析呈現，中間空氣層分別為 7 公分、10 公分及 13 公分時，室內外平均溫差分別為 1.63°C 、 1.54°C 與 1.76°C 。而所有實驗組合與單層屋頂對照，平均可降低室內溫度達 3.43°C (如圖 1-4)。

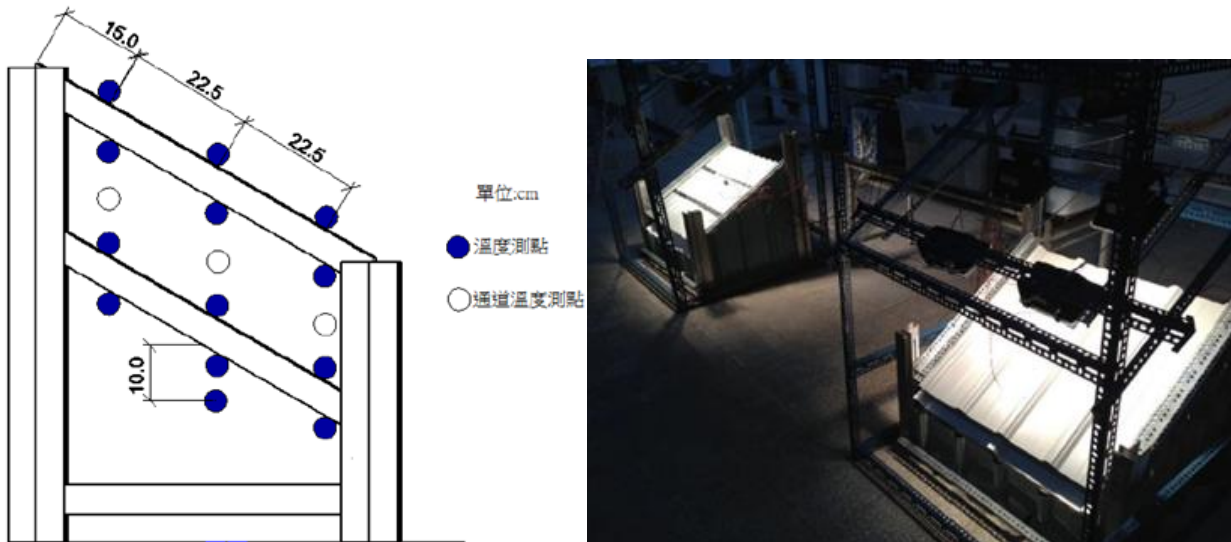


圖 1-4 一篇於高雄的雙層屋頂研究實驗配置
(資料來源：葉仲哲 2014)

在冷屋頂方面，根據美國冷屋頂性能評估協會(Cool Roof Rating Council, CRRC)的資料，設置冷屋頂能降低 7-15% 的平均空調冷房成本。冷屋頂的節能效率與建築物方位、屋頂傾斜角度、組成材料種類、施作工法以及氣候有相當大的關連性。其中，對於氣候因素而言，在高緯度寒帶國家，雖然冷屋頂能有效地降地夏季冷房負荷，但是在冬季時卻是會相對增加暖房負荷。冷屋頂的優點包含可降低屋面表面溫度、能節省建築耗能、增加室內人員熱舒適度等。一篇位於熱帶地區新加坡的研究(Tong, Li et al. 2014)，應用傅立葉轉換法建立屋頂熱傳透之解析公式並與一真實之屋頂實測比對驗證(如圖 1-5)，該研究透過敏感度分析發現屋頂日射反射率每增加 10%，通風屋頂比無通風雙層屋頂之室內熱取得減少約 11%，此外具通風之雙層屋頂與 2.5cm EPS 隔熱層亦比無通風屋頂分別減少 42% 與 68% 之熱傳透量(如圖 1-6)。



圖 1-5 新加坡以一真實屋頂進行與熱傳模式之比對
(資料來源：Tong, Li et al. 2014)

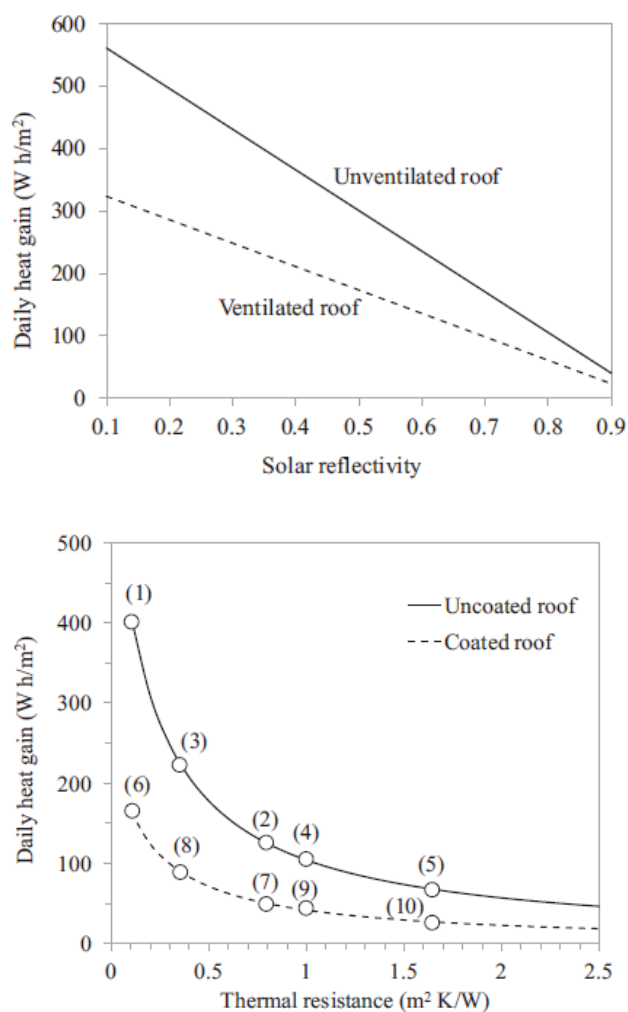


圖 1-6 屋面反射率、雙層屋頂有無通風與屋頂總熱阻對室內熱取得之影響
(資料來源：Tong, Li et al. 2014)

同樣在新加坡所進行的冷屋頂與雙層屋頂節能效益之模擬研究(Zingre, Wan et al. 2015)，發現雙層屋頂在白天有著相當好的節能效果，每日平均可以減少 0.21 kWh/m²

的熱取得，且在晴天時能降低室內溫度約 2.4°C。同時，提出冷屋頂熱轉換模型 (cool roof heat transfer, CRHT) 用以評估冷屋頂與雙層屋頂之節能效益，發現冷屋頂與雙層屋頂之節能效果相當，若將兩者結合，可以進一步降低雙層屋頂的表面溫度約 14.7°C，如圖 1-7。

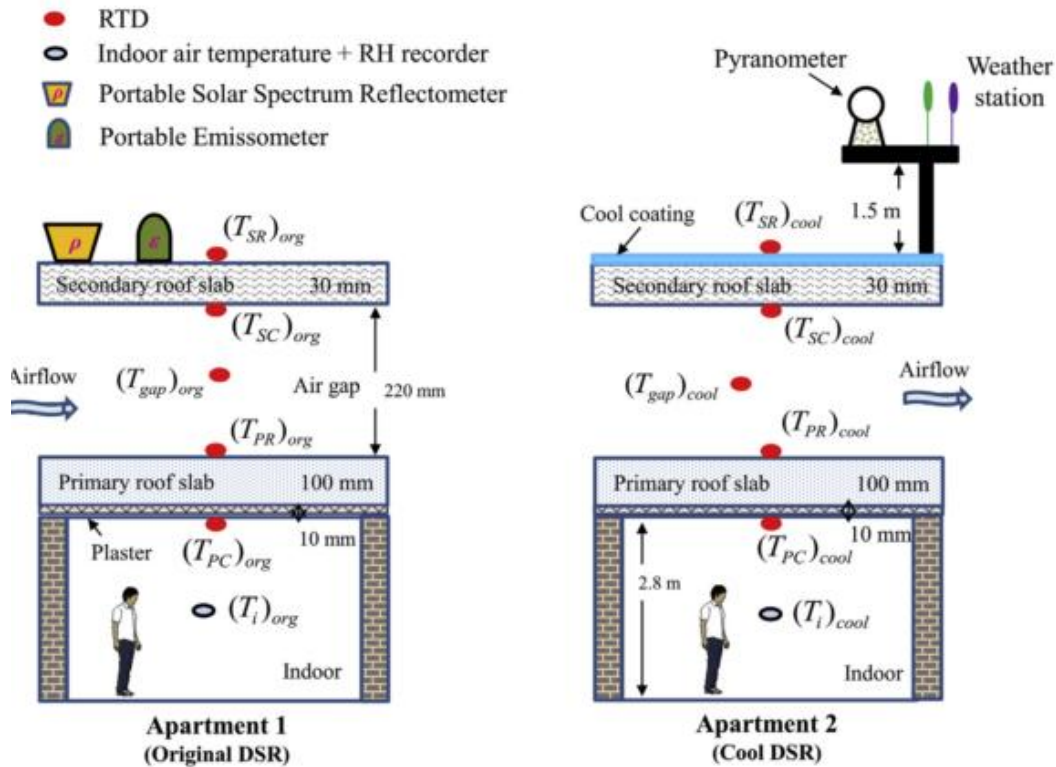


圖 1-7 一般雙層屋頂與結合冷屋頂之雙層屋頂之實驗配置
(資料來源：Zingre, Wan et al. 2015)

而國內(周鼎金、邱繼哲 2007)亦曾藉由實測一棟雙層屋頂案例於改造前後之差異探討雙層屋頂之節能效益，然而礙於改造前後時間上之差異，氣候上無法同步，如圖 1-8。

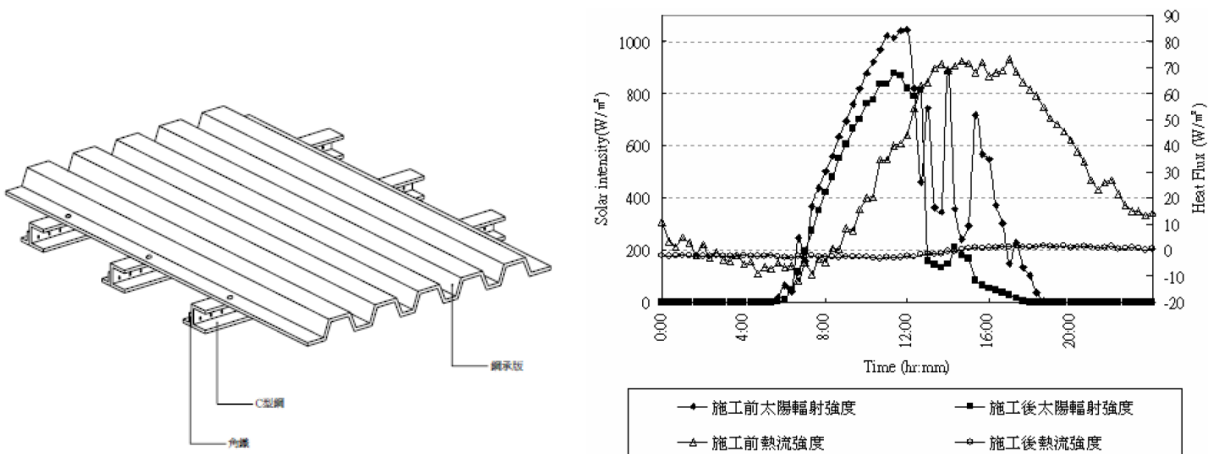


圖 1-8 國內雙層通風屋頂之實測研究
(資料來源：周鼎金、邱繼哲 2007)

在希臘，(Dimoudi, Androutsopoulos et al. 2006)應用全尺度實驗屋進行通風屋頂與一般屋頂之實測比較(如圖 1-9)，發現通風屋頂對於節能而言適合應用於地中海氣候區，同時也發現在通風屋頂空氣層內襯輻射反射塗層時，於白天有助於減少室內熱取得，但相反的由於其亦阻礙了建築物向外的散熱性能，於夜間反而不利於節能。

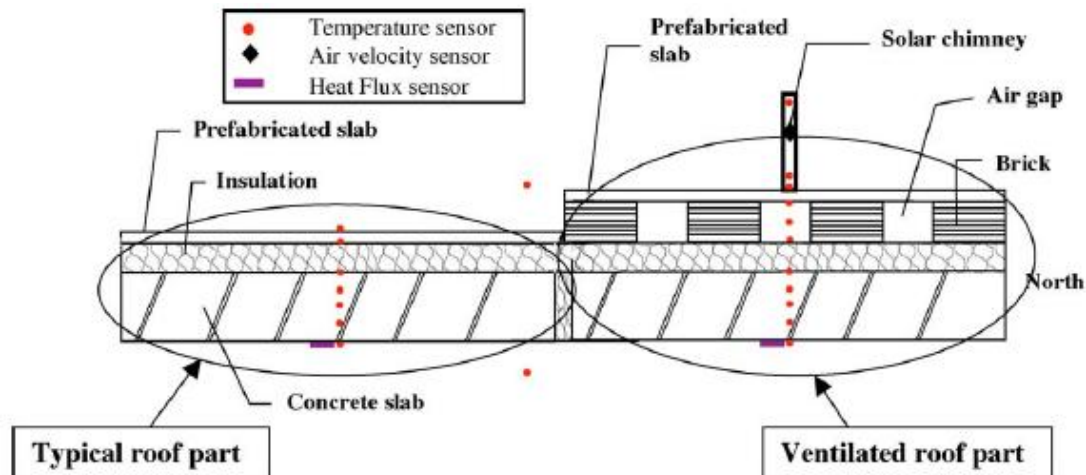


圖 1-9 一篇希臘針對通風屋頂之實測研究配置
(資料來源：Dimoudi, Androutsopoulos et al. 2006)

而根據歐洲建築能源指標(European Directive)，許多歐洲國家都致力於發展低能耗建築，尤其是位於有較高日射取得地區的國家，如義大利。(Gagliano, Patania et al. 2012)在研究中指出，夏季時，於屋頂增加流動空氣層作為太陽輻射屏障，能夠顯著降低屋頂熱流量，根據不同的通風設備配置，平均可以降低約 50% 之熱流量(如圖 1-10)。

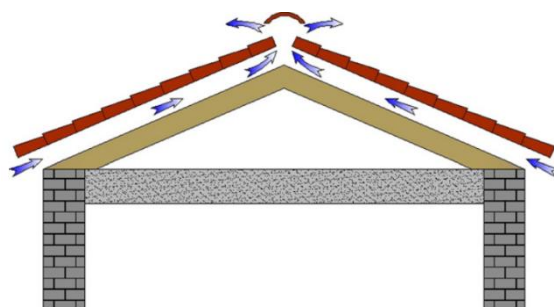


圖 1-10 一篇於義大利的屋頂流動空氣層研究
(資料來源：Gagliano, Patania et al. 2012)

亞洲地區的自然通風屋頂研究(Susanti, Homma et al. 2011)，利用日本的氣候資料，探討單層屋頂與通風屋頂的熱負荷差異性。結果顯示，若工廠中設置自然通風屋頂，可較單層屋頂建築降低 4.4°C 之室內操作溫度或提高 7.6°C 的空調恆定溫度；若在夏季

使用相同的空調起停溫度 26°C ，則自然通風屋頂能夠降低 50% 之空調負荷量。說明通風屋頂能有效節省因屋頂熱負荷造成之能源支出(如圖 1-11)。

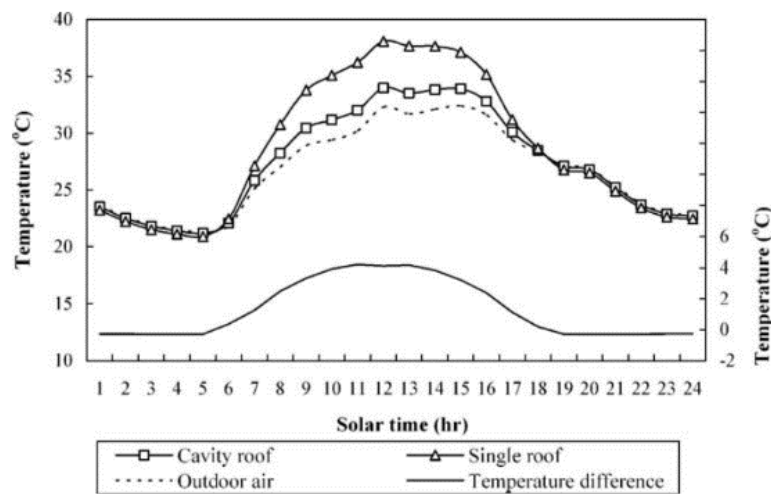


圖 1-11 不同屋頂配置對室內溫度與冷房負荷之影響
(資料來源：Susanti, Homma et al. 2011)

冷屋頂在過去諸多文獻上已被證實可降低室內之熱取得以達節能之目的(Simpson and McPherson 1997, Akbari, Levinson et al. 2005, Xu, Sathaye et al. 2012, Virk, Jansz et al. 2015)，對應用自然通風之建築而言可提升室內熱舒適減少室內過熱情形之發生(Virk, Jansz et al. 2014)。

(Yew, Ramli Sulong et al. 2013)於馬來西亞研究流動通風管(moving-air-cavity, MAC)與隔熱塗層(thermal insulation coating, TIC)對閣樓降溫之影響(如圖 1-12)。研究分別測試一般屋頂、冷屋頂(使用 TIC)以及混和使用 MAC 與 TIC 之屋頂，結果顯示於屋頂表層施用 TIC 之冷屋頂能有效降低屋頂表面溫度，並進一步發現在室外溫度 27.5°C 的環境下，混合使用 MAC 與 TIC 能將閣樓室內溫度由 42.4°C 降至 29.6°C 。

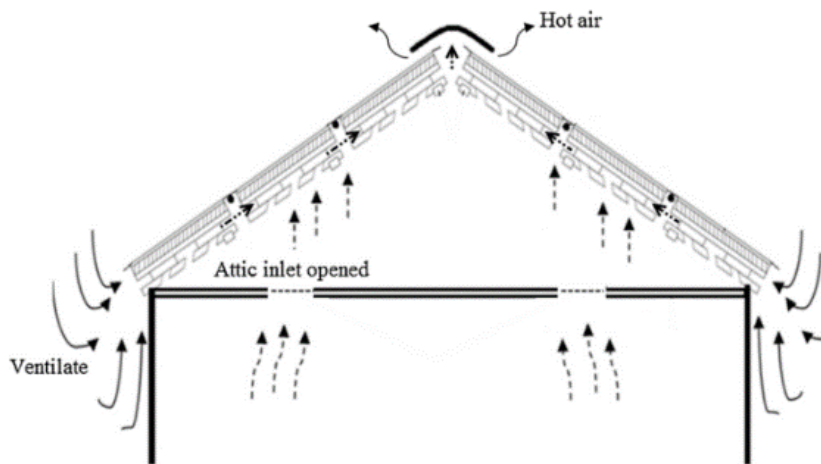


圖 1-12 於馬來西亞的 MAC 與 TIC 研究
(資料來源：Yew, Ramli Sulong et al. 2013)

在國內屋頂反射率之實測研究，洪照坤測試在相同熱源下，比較反射及隔熱效能(洪照坤 2012)。經低溫實測隔熱塗料添加填充材料後，塗佈在鐵皮建築物外表比未塗佈者，可有效降低屋內溫度由 43.7°C 降至 35.2°C，降幅達 19.45%；高溫實測結果，添加填充材料之隔熱塗料比未添加者，屋內溫度由 64.1°C 降至 59.6°C，可降低 4.5°C，節能可達 6.6% 至 27%。證實本研究隔熱塗料添加填充材料可提升隔熱性能，有效改善建築物屋內溫度，達到節能效果目的。楊冠雄等人(楊冠雄, 李訓谷 et al. 2011)分析各國使用冷屋頂的情形以及法令規範，並透過 DOE 軟體評估在臺灣氣候條件下設置冷屋頂之節能效益，結果顯示在台北、台中與高雄分別施作反射率為 0.1、輻射率為 0.1 之冷屋頂，可以分別節省 76.9%、84.1% 及 78.8% 之建築能源使用，更進一步指出建材之反射率與輻射率越佳，節能效果越良好(如圖 1-13)。亦有一篇利用 eQUEST 建築能耗模擬軟體之模擬研究(蘇煌文 2012)，評估台北、新竹、台中、花蓮、台南、台東與高雄七大城市之冷屋頂的節能效益。其結果顯示屋頂反射率、輻射率與熱傳導率皆會影響屋頂熱取得，且進一步探究對於屋頂熱取得之影響程度，發現對屋頂熱取得之影響為反射率>輻射率>熱傳導率。而對於屋頂形式的分析指出，施用冷屋頂在平屋頂的節能效益大於斜屋頂的節能效益。

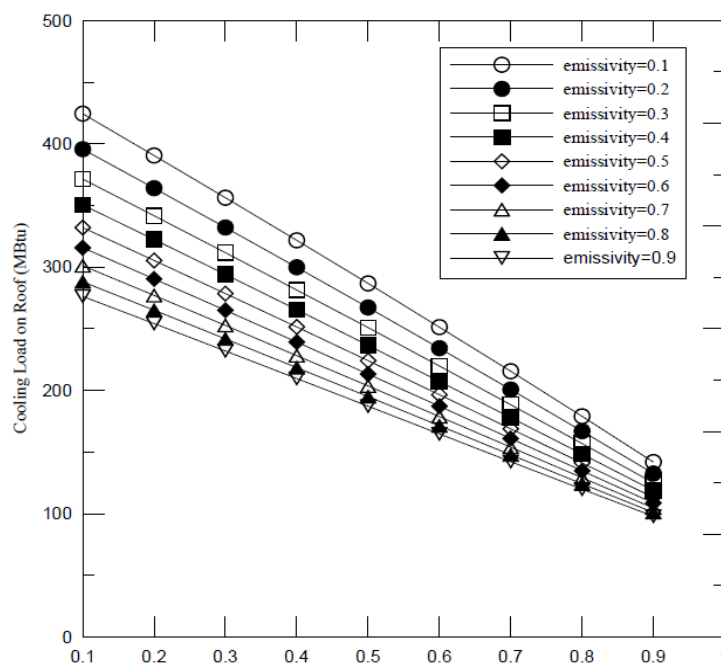


圖 1-13 使用 DOE 軟體評估台灣氣候條件下冷屋頂之節能效益
(資料來源：楊冠雄、李訓谷等 2011)

國外研究的部分，一份位於美國佛羅里達州之研究(Parker and Barkaszi Jr 1997)，透過前後實測九棟住宅在屋頂塗佈高反射漆之實驗發現，在夏季平均節能率約 19%，同時對於空調尖峰負載高反射率之冷屋頂可降低約 22%，冷屋頂對夏季節能有正向之貢獻。此外，同樣在美國南部屬熱帶氣候區針對被動式反射屋頂之縮尺模型的實測研究(Alvarado, Terrell Jr et al. 2009)發現，浪版式反射屋頂比起傳統屋頂可減少 65-88%的熱傳透，且具有延遲熱傳透之效用(如圖 1-14)。

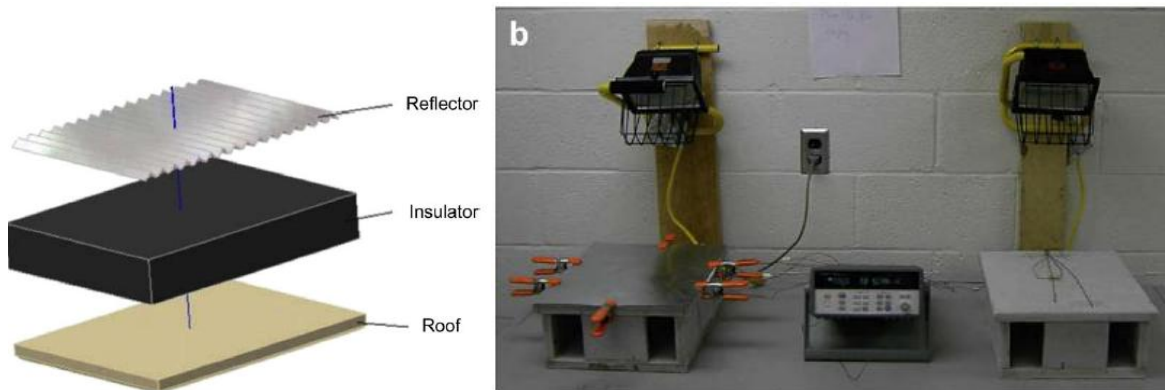


圖 1-14 一篇位於美國針對反射式屋頂之研究配置
(資料來源：Parker and Barkaszi Jr 1997)

(Kolokotroni, Gowreesunker et al. 2013)在倫敦的冷屋頂實測研究中發現，影響建築物整體能耗需求的條件包含：(i) 建築構造；(ii) 氣候條件；(iii) 建築用途。研究結果指出，設定不同的空調起停溫度搭配不同的表面反射率(albedo)，能達到 1~8.5%的節能效益。更進一步的結果分析發現，將表面反射率由 0.1 調整至 0.6，可以提高 2.5°C 之空調設定溫度；夏季時，在表面反射率極端值 0.1 與 0.9 的過熱時數比較中，表面反射率為 0.9 時，可以減少 30%的過熱時數；考慮到夏季與冬季，此研究也指出表面反射率介於 0.6~0.7 之間，能得到較佳的全年節能效果。另外，透過數據分析亦發現，表面反射率分別為 0.1 與 0.7 時，提升外殼隔熱性能反而會提高能源需求(如圖 1-15)。

在埃及，(Dabaieh, Wanas et al. 2015)於一篇探討如何降低熱旱氣候區之冷房需求的研究中，設計了 37 種不同屋頂配置之住宅建築，並進行研究模擬，發現提高表面反射率對於減少室內熱不舒適有較佳的效果(如圖 1-16)，能夠減少夏季 53%的熱不舒適時數，並降低 826kWh 的冷房耗能。

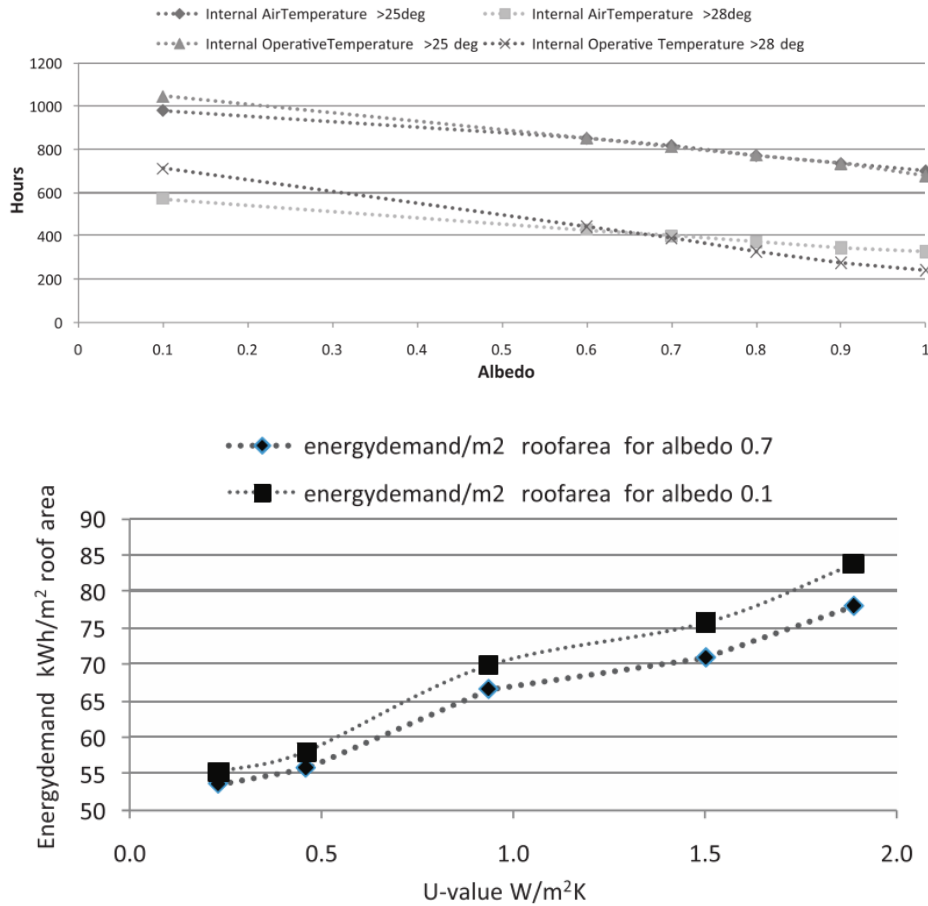


圖 1-15 一篇於英國倫敦的冷屋頂實驗
(資料來源：Kolokotroni, Gowreesunker et al. 2013)

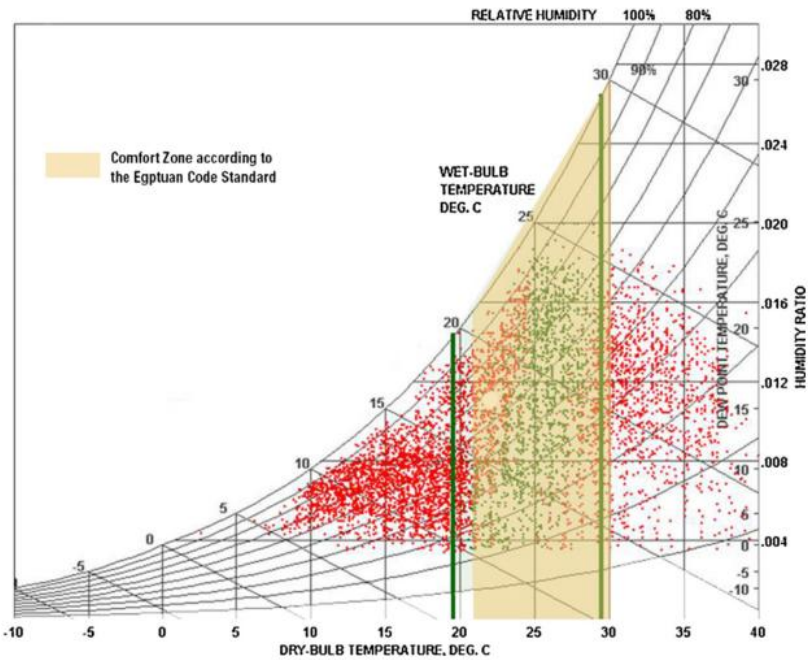


圖 1-16 模擬結果搭配 ASHREA Standard 55 所計算出之埃及地區的熱舒適範圍
(資料來源：Dabaieh, Wanas et al. 2015)

在義大利，(Paolini, Zinzi et al. 2014)提出對於冷屋頂的反射率變化與所抵消之都市熱島效應相關性之研究(如圖 1-17)，調查了 12 幢位於羅馬與米蘭的建築物，12 幢建物均設有原反射率均大於 0.8 之冷屋頂，再經過不同的使用年限後，重新測量其反射率以及現今之年冷房負荷量。發現反射率每下降 0.1，每年會折損 4.1~7.1MJ/m² 的冷房節能量。同時也透過屋頂特性之實測得知，屋頂反射率維持在 0.8 以上時，表面溫度較屋頂反射率為 0.5~0.6 之屋頂低 16°C。

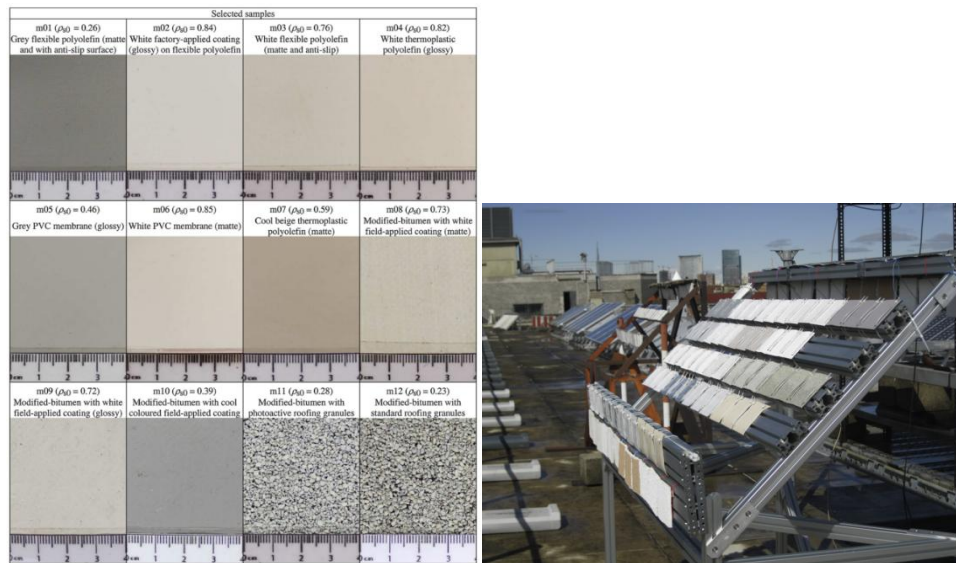


圖 1-17 於義大利之 12 幢建物屋頂表面實照及冷屋頂塗料特性實驗
(資料來源：Paolini, Zinzi et al. 2014)

中國近來對冷屋頂做出一系列研究，(Gao, Xu et al. 2014)調查了中國七大城市，發現一處位於重慶的辦公建築實驗案，其屋頂漆上表面反射率約為 0.65 白色塗料，使表面溫度較鄰近建築 (albedo 為 0.1) 降低約 20°C，室內溫度降低 1°C 且節省 9% 的空調能耗。另一個位於廣東佛山的工業用建築，屋頂漆上表面反射率為 0.65 白色塗料，相較於周圍屋頂漆上表面反射率為 0.3 藍色塗料之建築，表面溫度下降 17°C，室內溫度約降低 1~3°C，且減少 66% 之屋頂淨熱流量 (如圖 1-18)。



圖 1-18 分別位於中國重慶與廣東之冷屋頂實驗
(資料來源：Gao, Xu et al. 2014)

屋頂隔熱材的國內研究，楊國祥(楊國祥 2013)利用普通混凝土隔熱磚搭配不同厚度隔熱材料，進行隔熱性能差異之比較。研究材料為普通混凝土隔熱磚搭配三種隔熱材：空氣層、保利龍板及高密度 PS(聚苯乙烯)板。隔熱磚混凝土厚度分別為 1.5cm 及 3.0cm，隔熱材厚度亦分別為 1.5cm 及 3.0cm。實驗設計為將混凝土隔熱磚和空氣層、保利龍板材層、PS 板材層作為試驗材料，規劃 12 組試體做隔熱性能之試驗。實驗結果顯示，搭配 PS 板材 1.5 公分與混凝土厚度 1.5 公分為隔熱表現較佳之隔熱磚。

利用木質構造作為隔熱材之國內研究(王松永、陳昶源等 2000)，得知牆壁以實木及水泥板為材料試驗之熱流密度值會隨著材料厚度的增加而減少，其熱阻值則反之。當木質屋頂材料與水泥板相同厚度比較時，隔熱效果較佳。另外，研究結果顯示，於隔熱材中加一塊玻璃纖維棉或加一塊 PU 板，可達到完全隔熱保溫效果。

同樣探討木質與混凝土構造隔熱材的研究(廖志中、王松永 2002) 中，對木質內裝組合壁體之隔熱性及各日照方向壁體間熱流動之狀態進行實測，並計入日射量、熱流量、室外溫度、室外綜合溫度等之相互關係作為室內熱環境綜合評價。實驗結果發現，木材內裝屋之屋頂全日累積流入室內之總熱流量約僅為無內裝屋屋頂的 63~70%，由室內熱環境各因子相互間之關係均可看出木材內裝屋之隔熱效果明顯優於無內裝屋。此外，混凝土壁體使試驗屋內外壁溫差達最高值之時間與熱流量最大値之時段產生約 3 小時的延遲效應。

在溫帶氣候區之研究利用屋頂高蓄熱材以達到節能與增進室內熱舒適方面，一篇位於義大利的文獻(D'Orazio, Di Perna et al. 2014)透過對一棟全尺度實驗屋之實測(如

圖 1-19) , 指出於屋頂安裝適當的蓄熱材料有助於提升室內熱舒適性同時可降低暖房之需求。

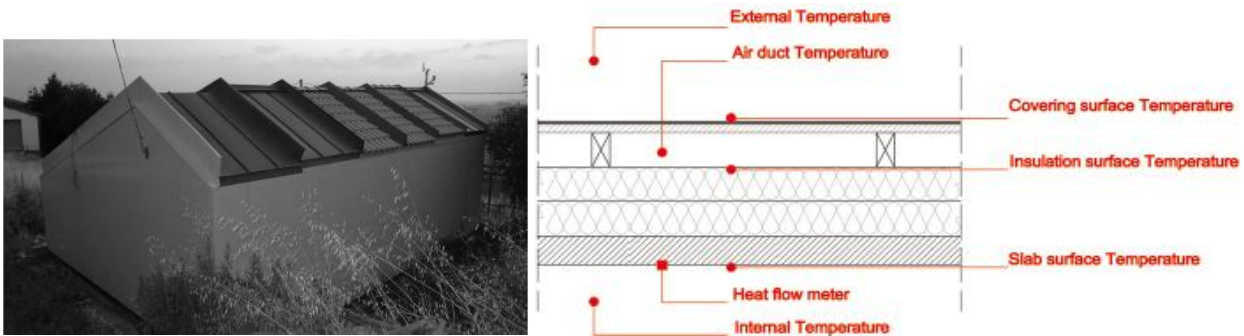


圖 1-19 一篇義大利的研究利用實驗屋探討屋頂蓄熱能力對室內熱舒適之影響
(資料來源：D'Orazio, Di Perna et al. 2014)

一篇位於熱帶氣候區之斯里蘭卡之研究(Halwatura and Jayasinghe 2008) , 應用縮尺與全尺度實驗屋進行屋頂隔熱的實驗研究發現 2.5cm 的 PS 隔熱層即可大幅改善熱帶地區應用自然通風住宅室內之熱舒適性，同時延緩室內之高溫發生時間(如圖 1-21 所示)。



圖 1-20 一篇斯里蘭卡的研究以縮尺與全尺度實驗屋探討屋頂隔熱
(資料來源：Halwatura and Jayasinghe 2008)

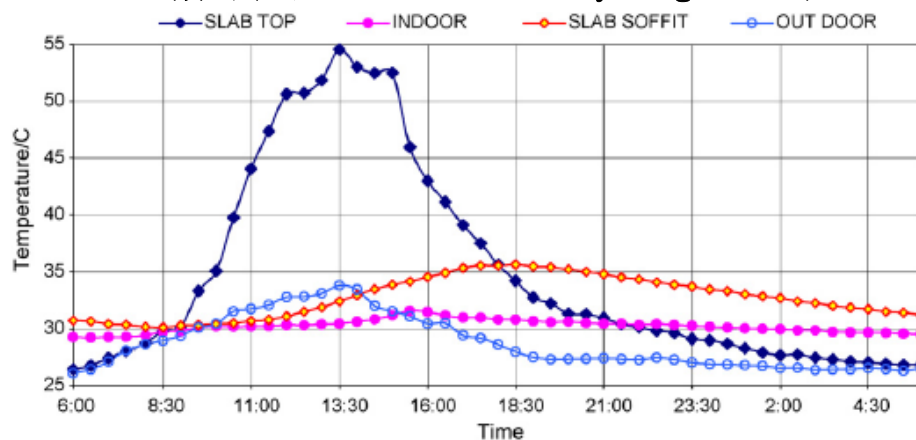


圖 1-21 縮尺與全尺度實驗屋探討屋頂隔熱之結果
(資料來源：Halwatura and Jayasinghe 2008)

位於西非乾燥之熱帶氣候區的布吉納法索，為解決一般住宅的冷房能耗需求，提出了使用當地資源製造之屋頂隔熱材對冷房負荷之研究。(Toguyeni, Coulibaly et al. 2012)利用當地的黏土與稻稈之混和物與杉木作為建材與隔熱材，發現利用黏土稻稈建造之建築物較只用黏土之建築降低 8% 之冷房負荷量，若屋頂再加裝 1.5 公分紅衫木與混凝土之隔熱材，可以再節省 6.2%~12.1% 的能源消耗。此研究指出，利用當地資源製造之隔熱材亦能有效降低建築熱負荷(如圖 1-22)。

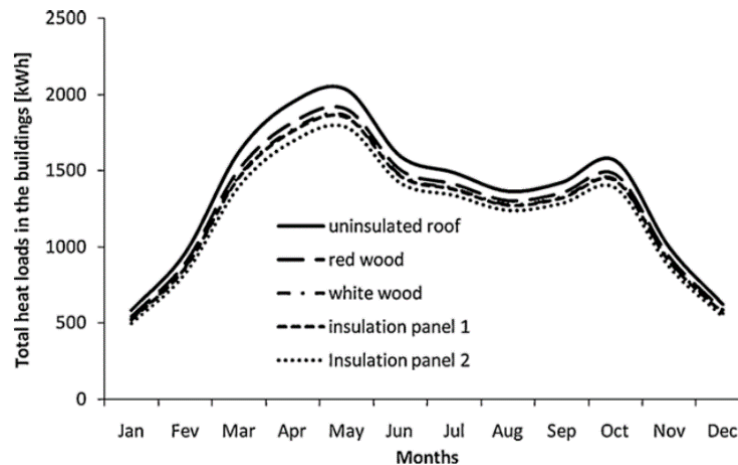


圖 1-22 不同隔熱材對建築總熱負荷之影響
(資料來源：Toguyeni, Coulibaly et al. 2012)

(Ramamurthy, Sun et al. 2015)提出普林斯頓屋頂模型的修正模型，並結合美國東北部的氣象資料，進行隔熱與反射率對屋頂熱性能表現的研究。模擬結果發現其修正模型 R8.4 (含 4.6 公分厚之隔熱材及大於 0.6 的反射率) 可有效降低暖房與冷房負荷。並計算出在隔熱材 5.08 公分 (2 吋)、albedo 約 0.45 的現有建築上，增加 2 倍、3 倍或 4 倍的隔熱材，所需要的成本回收年限分別是：13、17 與 19 年(如圖 1-23)。

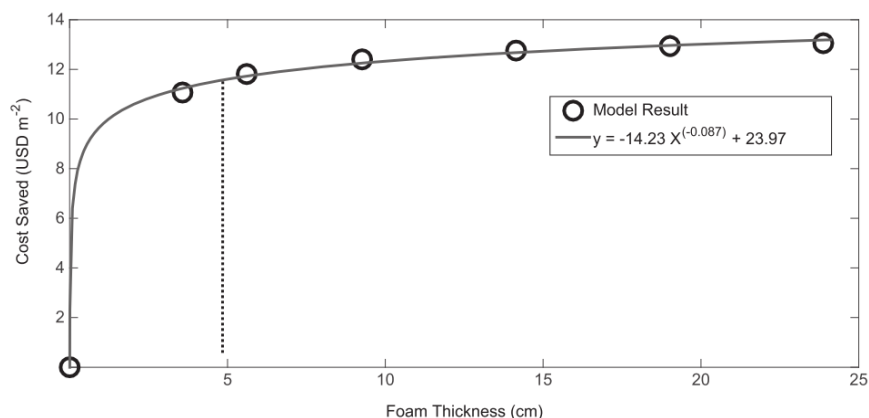


圖 1-23 隔熱層厚度與節省成本之關係圖
(資料來源：Ramamurthy, Sun et al. 2015)

(Banionis, Monstvilas et al. 2012)於立陶宛一處全尺度實驗屋(如圖 1-24)，進行反射率對通風屋頂之熱流量影響之研究，結果顯示選擇低放射率之反射塗料，於夏季時可以減低通風屋頂每日的平均熱流量約 23%~25%。另外，此研究也實驗了通風屋頂外層搭配 14mm 水泥木屑聚合板作為隔熱層，可以較傳統水泥屋頂降低 4%~6%之每日平均熱流量。



圖 1-24 位於立陶宛進行反射率、通風屋頂實驗之全尺度實驗屋
(資料來源：Banionis, Monstvilas et al. 2012)

綜合以上之文獻分析，除薄層屋頂綠化外，大多數對於密集型屋頂綠化、雙層通風屋頂、冷屋頂與隔熱屋頂等應用全尺度實驗屋之實證研究多位於溫帶與熱帶氣候區，屬於亞熱帶熱濕氣候區台灣之本土性實證研究則缺乏，同時國內外文獻上亦無同時探討上述五種屋頂隔熱系統相互間之比較實驗。此外，大多數之研究礙於實驗屋之數量，同一屋頂隔熱策略之實驗僅能同時改變一項參數以與對照組比對，無法同步進行多種策略之實測以排除非同步實驗時，因氣候上之差異所產生之實驗誤差。因此，本計畫擬以位於台南市歸仁區，內政部建築研究所於 104 年所新建置之六組 20 呎長之全尺度實驗屋以同步同時量測之方式，探討薄層綠化屋頂、密集綠化屋頂、雙層通風屋頂、高表面反射率冷屋頂、PS 版隔熱屋頂與五腳磚隔熱屋頂等六種屋頂隔熱手法互為比較，每種屋頂隔熱技術之隔熱性能皆符合現行建築外殼節能法令之低限，藉以探討相互間之空調節能效益與室內熱舒適性。

第四節 國內屋頂節能法規

我國於建築節能之發展可追溯至 1970 年代的全球性能源危機，為配合國家能源政策的落實，內政部使著手於建築節約能源之研究，加強建築皆能管理工作的推動。內政部營建署於 1983 年參酌新加坡之 OTTV 基準，研擬「建築技術規則建築節約能源編」，再於 1990 年由內政部建築研究所籌備處研擬本土化之建築節能評估指標與基準，建立「建築外殼耗能量精算法(ENVLOAD)」，以做為我國建築物節約能源設計之依據，並於 1995 年將其正式納入建築技術規則中。

隨著綠建築科技於國際發展的潮流，內政部建築研究所亦於 1997 年至 2001 年間，進行綠建築與居住環境科技計畫，積極進行敷地、生態環境、建築汙染管制、建築節約能源、建築資源利用、室內環境控制及綠建築推廣與示範計畫等研究發展。於此背景下，1999 年台灣建立了綠建築標章制度，實施綠建築解說與評估手冊的七大指標與評估系統，內容包括：綠化量指標、基地保水指標、水資源指標、二氧化碳減量指標、日常節能指標、廢棄物減量指標與污水及垃圾改善指標，更於 2003 年進一步納入室內舒適環境與生物多樣性指標，成為生態、節能、減廢、健康四大指標群的九項評估指標。2004 年，為加強民間配合落實綠建築政策，制定綠建築專章納入建築技術規則第 17 章，更加完備我國建築節能及綠建築規範。

本研究欲探討屋頂隔熱工法對空調節能與室內熱舒適性之改善效益，且欲利用全尺度實驗屋，進行五種不同屋頂隔熱策略之節能實驗，因此，為做實驗設計之參考依據，擷取各類建築物節約能源技術規範與綠建築指標評估中對於屋頂設計之評估規範，作為屋頂設計基準。

1.4.1 建築物節約能源技術規範

根據建築技術規則建築設計施工編第 315 條之第二項規定，建築物節約能源技術規範由中央主管機關定之，因此內政部營建署為促進能源有效利用，並在不妨礙建築物使用環境之安全、衛生與舒適條件下，提出建築物節約能源設計之基準，並依照不同建築使用用途設計指標計算法與評估標準。建築物節約能源技術規範根據建築物用途，分為住宿類、辦公廳類、醫院類、百貨商場類、旅館餐飲類以及學校等大型空間類，分別規範不同建築使用型態。由於建築節能設計標準會隨著地區與氣候的不同而

有所差異，因此，規範中所使用氣象資料按照建築技術規則建築設計施工編第 308 條所規定，依據建築物所在之計算點氣候分區，將台灣分為北部、中部與南部三個主要氣候區，再依據行政區進行細分。台灣各地區之氣候分區如表 1-1 所示。

表 1-1 台灣各行政區之氣候分區

基準值氣候分區	計算點氣候分區	氣候分區範圍行政區
北部氣候區	北宜金馬地區	臺北市、新北市、宜蘭縣、基隆市、福建省連江縣、金門縣
	桃竹苗地區	桃園縣、新竹縣、新竹市、苗栗縣
中部氣候區	中彰南雲地區	臺中市、彰化縣、南投縣、雲林縣
	花蓮地區	花蓮縣
南部氣候區	嘉南澎地區	嘉義縣、嘉義市、臺南市、澎湖縣
	台東地區	臺東縣
	高屏地區	高雄市、屏東縣

(資料來源：建築物節約能源技術規範)

另外，本研究欲探討屋頂隔熱工法對空調節能與室內熱舒適性之改善效益，故擷取各類建築物節約能源技術規範中，對於屋頂設計之評估準則，作為實驗設計之參考依據。各類建築物節約能源技術規範中，建築外殼節能設計主要依五項指標來評估，分別為：屋頂溫度差熱傳、外牆溫度差熱傳、屋頂透光天窗之日射遮蔽、外殼玻璃反射率與外殼玻璃之日射取得，其中與屋頂有關之評估標準為屋頂溫度差熱傳與屋頂透光天窗之日射遮蔽兩部分，兩者之相關計算公式如下

$$U_{ar} = \frac{\sum(A_{ri} \times U_{ri} + A_{gi} \times U_{gi})}{\sum(A_{ri} + A_{gi})} \quad (1-1)$$

$$HW_s = \frac{\sum((1.0 - K_{hi}) \times K_{si} \times \eta_i \times A_{gi})}{\sum(A_{gi})} \quad (1-2)$$

而依照建築技術規則建築設計施工編第 308-1 及第 310 條所定之標準，屋頂平均熱傳透率 U_{ar} 與屋頂天窗平均日射透過率 HW_s 需符合下列規定：

$$U_{ar} < 0.8 [W/(m^2 \cdot K)] \quad (1-3)$$

$$HW_s < HW_{sc} \quad (1-4)$$

而依照天窗之水平投影面積不同，天窗平均日射透過率標準值亦有所區別：

天窗之水平投影面積 $< 30 \text{ m}^2$ 時， $HW_{sc} = 0.35$

天窗之水平投影面積 $\geq 30 \text{ m}^2$ 且 $< 230 \text{ m}^2$ 時， $HW_{sc} = 0.35 - 0.001 \times (HW_a - 30.0)$

天窗之水平投影面積 $\geq 230 \text{ m}^2$ 時， $HW_{sc} = 0.15$

其中

U_{ar} 為屋頂構造平均熱傳透率，單位為 $W/(m^2K)$ 。

HW_s 為透光天窗之平均日射透過率，無單位。

HW_{sc} 為屋頂天窗平均日射透過率標準值。

HW_a 為屋頂天窗水平投影面積，單位為 m^2 。

U_{ri} 為屋頂不透光部位熱傳透率。

U_{gi} 為屋頂透光部位熱傳透率。

A_{ri} 為屋頂不透光部位水平投影面積。

A_{gi} 為屋頂透光部位水平投影面積。

K_{hi} 為外遮陽或固定內遮陽之遮蔽率。

K_{si} 為傾斜外殼日射輻修正係數。

η_i 為 i 部位之玻璃日射透過率。

故根據上述之規範所規定，本研究設計屋頂隔熱方案之屋頂平均熱傳透率約小於 $0.8 W/(m^2K)$ 。

1.4.2 綠建築規範

台灣自 1999 年建立綠建築標章制度以來，綠建築政策已成為我國永續發展中最重要的一環，綠建築評估體系中將建築使用類型分為基本型、住宿類、廠房類、社區類與舊建築改善類。建築之外殼節能除可依「建築節能設計技術規範」來檢討外，內政部更於 102 年發佈「建築物強化外殼部位熱性能節約能源設計技術規範」，因此以現行之法令架構而言，建築外殼節能之檢討有二種途徑。以「建築節能設計技術規範」而言，可見於目前的九大評估指標中，關於建築外殼設計之規定被包含於日常節能評估指標內，該評估指標要求對於建築外殼設計之節能標準需通過兩項評估標準，分別為強化水平透光開窗之日射遮蔽指標與強化建築外殼節能指標，屋頂的構造熱傳透率(U 值)需小於 $0.8 W/m^2K$ 之水準。

強化水平透光開窗之日射遮蔽指標同 1.4.1 中所述，惟評估標準較建築技術規則建築設計施工編更嚴格，其檢討依據如下所示

$$HWs = \sum((1.0 - Khi) \times Ksi \times \eta_i \times Agi) / \sum(Agi) < HWsc \quad (1-5)$$

上式中，當：

天窗之水平投影面積 $< 30 \text{ m}^2$ 時， $HWsc = 0.30$

天窗之水平投影面積 $\geq 30 \text{ m}^2$ 且 $< 180 \text{ m}^2$ 時， $HWsc = 0.30 - 0.001 \times (HWA - 30.0)$

天窗之水平投影面積 $\geq 180 \text{ m}^2$ 時， $HWsc = 0.15$

其中

HWs 為透光天窗之平均日射透過率，無單位。

$HWsc$ 為屋頂天窗平均日射透過率標準值。

HWA 為屋頂天窗水平投影面積，單位為 m^2 。

Agi 為屋頂透光部位水平投影面積。

Khi 為外遮陽或固定內遮陽之遮蔽率。

Ksi 為傾斜外殼日射輻修正係數。

η_i 為 i 部位之玻璃日射透過率。

針對外殼節能評估準則在於強化建築外殼節能的三項設計水準，第一項要求建築外殼節能指標之計算值 Req 或 SF 比現行法令合格基準值 $Reqc$ 或 SFc 強化 20%，此項為基本合格門檻。第二、三項在要求外牆與窗之保溫性能強化，且要同時符合節能與舒適之需求，並無額外對於屋頂節能性能強化之相關規定。

第二章 實驗設計

第一節 研究方法

本研究探討六種國內常見之屋頂隔熱工法，包括薄層屋頂綠化、密集型屋頂綠化、冷屋頂、雙層通風屋頂與聚合乙烯板(或稱高密度保利龍板、PS板)隔熱屋頂，以及台灣常見之傳統五腳隔熱磚屋頂，探討其空調節能效益與增進室內熱舒適之效果。以下敘述這六種屋頂隔熱手法之節能原理：

目前國內綠建築常見之屋頂綠化應用，可分為薄層綠化與密集型綠化，薄層綠化之土壤層多為 15cm 左右，植栽層多栽種景天科或地衣類低矮型植物；而密集型屋頂綠化多種植灌木或小喬木，依現行綠建築綠化量之規範其覆土層往往大於 40cm。不論是薄層或密集型屋頂綠化，其對建築節能之原理在於覆土層(或介質)具高蓄熱能力與低熱傳導係數之特性、植栽葉面之蒸發散效果及其葉面所帶來之遮蔭效果，而覆土層內之含水量亦可增加熱容量延緩熱的向室內傳遞，此外一些屋頂綠化由於具模組化之排水層，排水模組與樓版間之間隙亦可形成良好的空氣層熱阻。

雙層通風屋頂為在屋頂完成面上再附加一鐵皮構造物，使得鐵皮與混凝土屋頂面間形成一非密閉式通風空氣層，此通風空氣層有助於帶走蓄積於鐵皮下之熱量，同時形成有效之通風空氣層。而最外層的鐵皮屋面則提供混凝土屋面遮蔭，以直接阻絕混凝土屋面之日曬，在太陽輻射熱經由建築物屋頂構造進入室內前，就以自然通風空氣層將太陽輻射熱導出，有效降低屋頂熱傳透量而達節能之效果。

冷屋頂之原理係將屋頂表面塗佈高反射率(high albedo)或高發射率(high emissivity)之塗料或屋面使用具此二特性之建材以減少日射輻射之吸收進而降低室內之熱傳透量，其應用在國內已廣見於鐵皮屋或鐵皮廠房之隔熱工程，在鋼筋混凝土構造建築之屋頂應用則較為少數，國外有許多研究指出冷屋頂不但有助於室內節能，對於降低戶外都市熱島效應亦同樣有其效益。

PS板隔熱屋頂則是利用高密度保利龍板之高熱阻性能降低屋頂面之熱傳透量，應用PS板作為屋頂之隔熱層已是工程上應用普遍之隔熱工法之一。由於此種隔熱工法

其原理係仰賴 PS 板的低熱傳透係數特性，其隔熱之能力將取決於 PS 板材之厚度，常見之厚度應用為 2.5cm。此外，為探討此六種屋頂隔熱手法之效益，本研究所選取之比較對象將以符合現行建築技術規則綠建築專章規定屋頂之構造熱傳透率(U 值)低於 $0.8 \text{ W/m}^2\text{K}$ 作為實驗對象，同時以之五腳磚隔熱屋頂作為實驗之對照組。

本研究以六組實驗屋同步進行六種屋頂隔熱技術對建築空調耗能與室內熱舒適性之探討，其中一間作為對照組(一般傳統五腳磚隔熱屋頂)。其原因在於同時同步實驗可避免因實驗組數量不足而需分批實驗，於各組實驗期間氣候上之不連續情況而導致之誤差。同步實驗之結果將更為精確，可將實驗之效果與差異完全歸結於所欲實驗之屋頂外殼變因。

本研究同時考量屋頂構造的隔熱與蓄熱作用在穩態傳熱的情況下，僅用熱阻這項參數便可以詳盡的描述牆體的傳熱特性。然而在實際情況中，牆體的傳熱現象是複雜的不穩定傳熱過程。屋頂的隔熱能力是指阻止或減緩熱量通過屋頂樓版的能力。屋頂構造或材料的隔熱能力是以熱阻 R 值(單位為 $\text{m}^2\text{K/W}$)來衡量測量。R 值為熱傳導率(U 值)的倒數，其計算式如式(2-1)，與厚度(L)和材料的傳導係數(k)有關。而屋頂構造的蓄熱能力通常慣稱為熱質量，它對通過屋頂的熱量具延時與削弱作用。中國的建築節能標準中所使用的熱惰性指標(D 值)即是其中一種描述熱質量的指標。在熱惰性指標中熱阻反映介質或介質間的傳熱能力的大小，蓄熱係數表達吸收和釋放熱能的能力。因此，熱惰性指標表達了壁體對於溫度變化和傳熱變化的抵抗能力；熱惰性指標越大，壁體越不易改變其溫度。當壁體的熱阻相同而組成材料不同時，室外溫度對室內環境的影響不同，壁體材料的蓄熱係數愈大，則對室內環境的影響也就愈大；所以在實際的建築牆體中，也會採用壁體的熱阻與材料的蓄熱係數的積，即建築壁體的熱惰性指標(D)，來評價屋頂壁體的傳熱、蓄熱性能，該指標為一無因次之指標。壁體熱惰性指標的計算公式如下式 2-2：式中 S 為壁體材料的蓄熱係數 $\text{W/m}^2\text{K}$ ，計算方式如式 2-3，其中 ρ 為材料的密度(kg/m^3)；c 材料的比熱(KJ/kg-K)；k 為材料的導熱係數(W/m.K)。

$$R = \frac{1}{U} = \frac{L}{k} \quad (2-1)$$

$$D = \sum_i^n R_i \cdot S_i \quad (2-2)$$

$$S = 0.51 \sqrt{\rho ck}$$

(2-3)

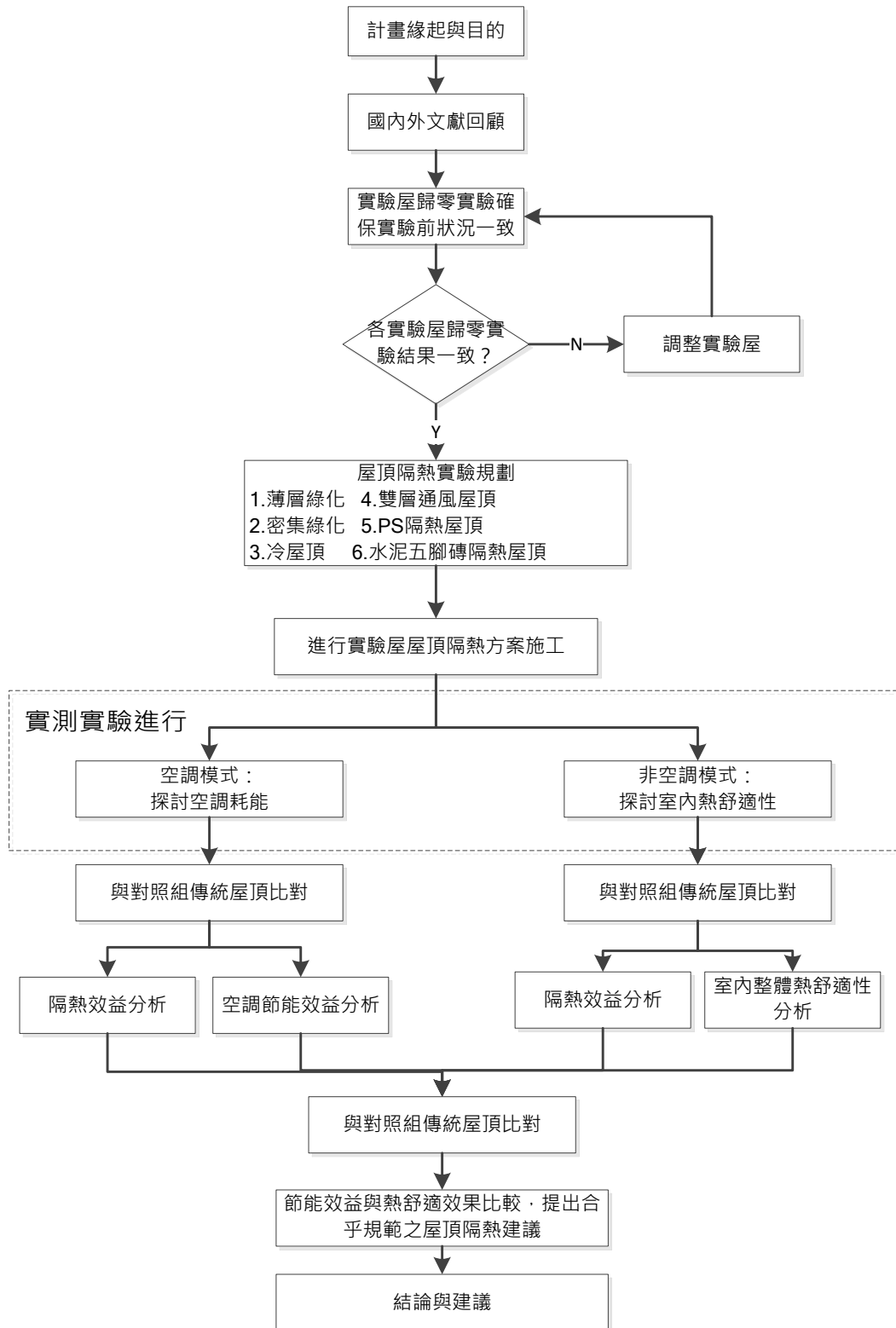


圖 2-1 研究架構與流程

(資料來源：本研究整理)

第二節 屋頂隔熱策略實驗規劃

本研究所擬使用之全尺度實驗屋位於台南歸仁內政部性能實驗群基地內，其位置如圖 2-2 內方框之範圍所示。除一個實驗屋作為儀器設備中央監控室外，一共有六組規模大小、外殼構造性能、面向方位皆一致實驗屋，可同時供六組實驗同步進行實測。六座實驗屋為相連並排配置開口部開窗面面向西方，如圖 2-3 所示。六間實驗屋為 20 呎貨櫃改裝，長 5.89m、寬 2.35m、高 2.38m 開門於東側，西側全為一大面積玻璃其餘北向與南向立面皆無開窗，如圖 2-4 所示。其外牆構造現況皆為 2mm 鐵板內加 2.3cm 的 PE 隔熱層。以下說明為了進行相異各式屋頂隔熱技術之實測實驗，必須將既有六組實驗屋進行改裝工程以符符合實驗所需。

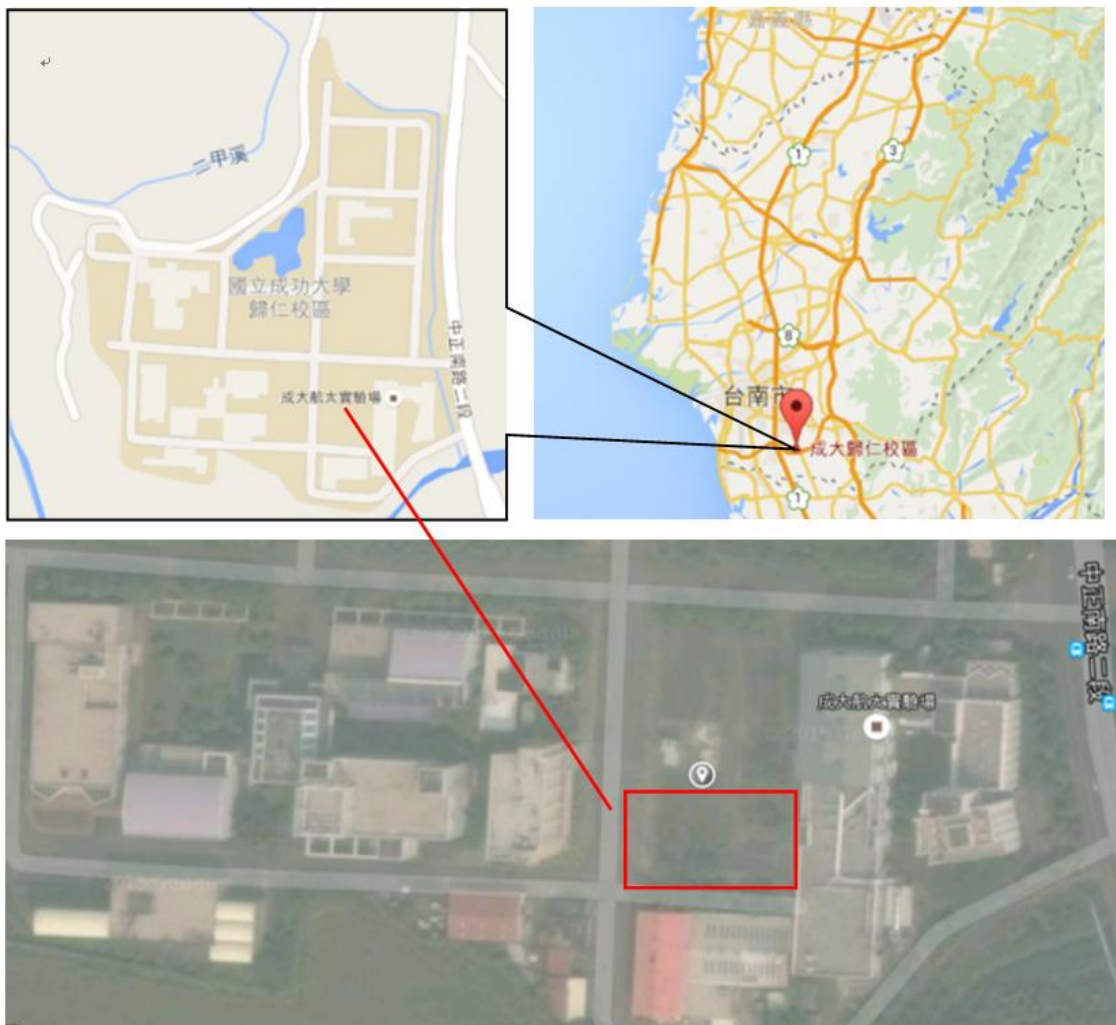


圖 2-2 全尺度實驗屋的詳細地理位置

(資料來源：本研究整理)

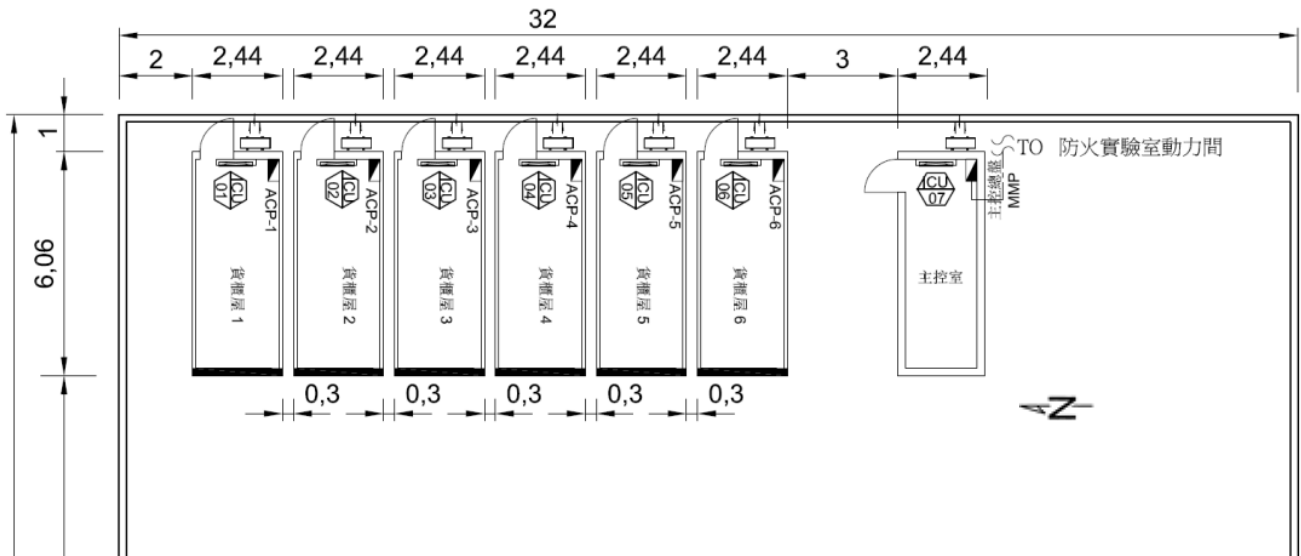


圖 2-3 實驗屋配置圖

(資料來源：本研究整理)

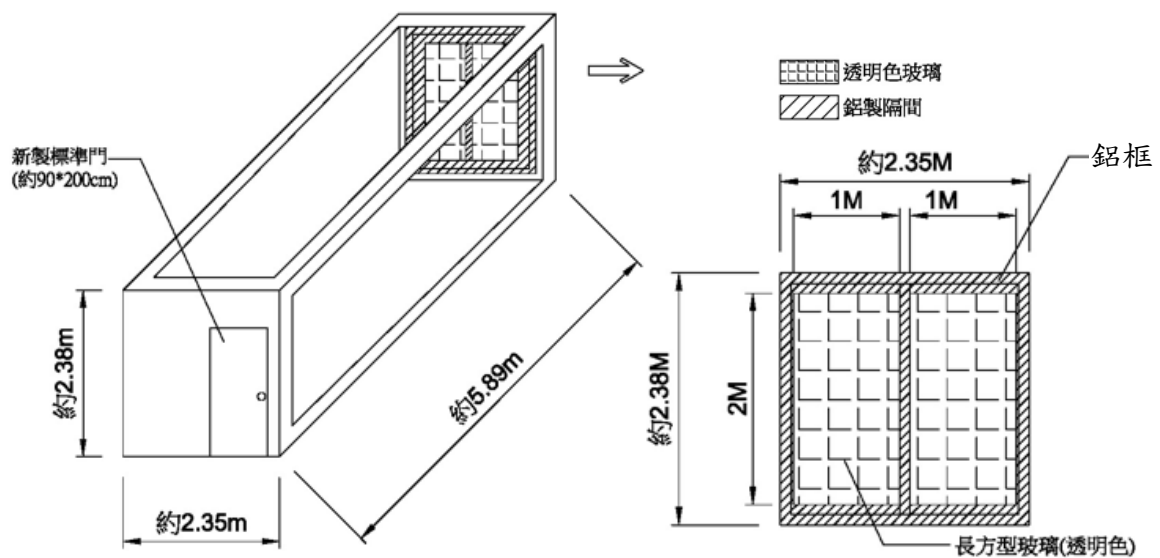


圖 2-4 全尺度實驗屋尺寸示意圖

(資料來源：本研究整理)

由於實驗現場之實驗屋係以半個(20 呎)灰色貨櫃改裝組成，每一實驗屋內部牆面皆鋪設約 2.3 公分厚之 PE 隔熱版。因此，實驗上為了類比真實之 RC 樓地板，需事先將屋頂改裝為 RC 構造，以確保其熱性能與真實樓板相當。本研究擬於每一實驗屋屋頂面首先鋪設一層木心板，並於上方澆置混凝土之方式改裝之。此外，原實驗屋於西側面是一大面積之玻璃開窗，未避免日射輻射熱大幅影響室內之熱取得，因此擬將西側之玻璃外側封以 5 公分厚之保利龍板阻絕開口部之熱傳透，如圖 2-5 所示。



圖 2-5 實驗屋改裝情形

(資料來源：本研究拍攝)



圖 2-6 六組實驗屋頂完工情形

(資料來源：本研究拍攝)



圖 2-7 屋頂隔熱完工情形

(資料來源：本研究拍攝)

各實驗屋改裝後之屋頂構造熱傳透率(U 值)與代表構造蓄熱之熱惰性指數(D 值)整理如下表 2-1 所示。

表 2-1 各式屋頂之熱性能

屋頂構造	構造熱傳透率 U(W/m ² K)	構造熱惰性指數 D
薄層綠化屋頂(15cm 覆土)	0.80	5.55
密集型綠化屋頂(40cm 覆土)	0.67	9.79
雙層通風屋頂	0.80	2.69
冷屋頂	0.79	3.17
PS 版隔熱屋頂	0.77	3.54
五腳磚屋頂	0.80	3.56

(資料來源：本研究整理)

2.2.1 薄層綠化屋頂構造

薄層屋頂綠化構造如圖 2-8 所示，屋頂構造由外至內分別為植栽層、約 15 公分之培養土下鋪窯燒陶質煉石、不織布、排水版、混凝土樓板，並以底層木合底板飾平實驗屋之鐵皮，其整體構造之熱傳透率為 0.80 W/m²K，如再加上考量整體構造之蓄熱換算其熱惰性指數(D 值)則約為 5.55。植栽層以波士頓腎蕨密植，以使葉片全部覆蓋介質層。薄層綠化屋頂之施工過程如圖 2-9 與圖 2-10 所示，澆灌系統在薄層綠化以及覆土較厚之密集型綠化皆以滴灌為之以減少水資源之飛濺與浪費。完工照片如圖 2-11 所示。

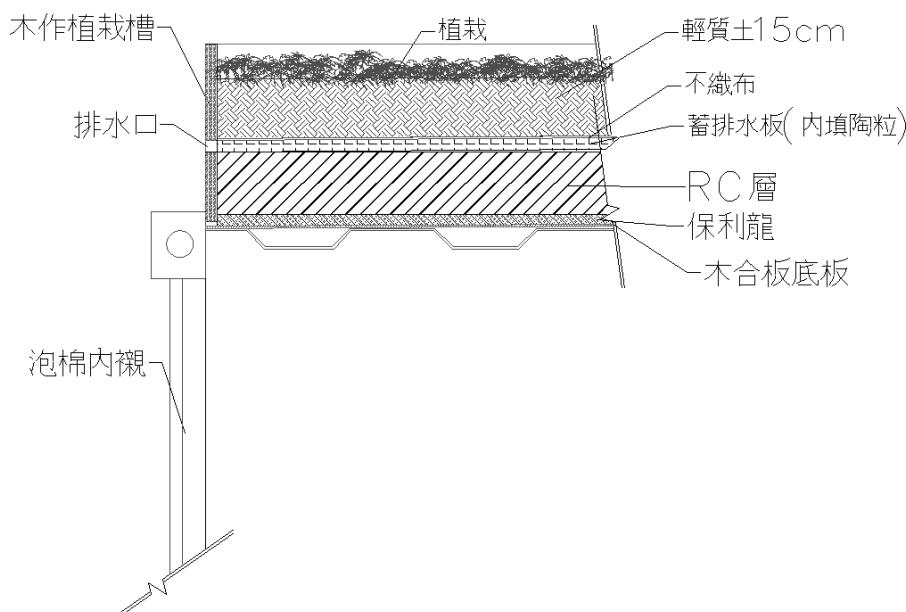


圖 2-8 薄層屋頂綠化構造大樣示意
(資料來源：本研究整理)



圖 2-9 屋頂綠化滴灌系統施工過程
(資料來源：本研究拍攝)



圖 2-10 屋頂綠化植栽種植施工過程
(資料來源：本研究拍攝)



圖 2-11 薄層型(15cm 覆土)屋頂綠化完工照片
(資料來源：本研究拍攝)

2.2.2 密集型屋頂綠化構造

密集型綠化與薄層綠化不同的是土壤介質層的厚度較厚(本案預計覆土 40cm)，且選種之植栽種類其葉面積指數(LAI)較高。此外，為了摒除植栽種類之差異植栽同樣選種與薄層綠化相同之波士頓腎蕨，種植之密度與薄層綠化情形相同，皆以密植至葉片全部覆蓋土壤表層為原則。其構造如圖 2-12 所示，由外至內各層分別為植栽層、約 40 公分之培養土下鋪窯燒陶質煉石、不織布、排水版與底層木合底板，其整體構造之熱傳透率為 $0.67 \text{ W/m}^2\text{K}$ ，整體構造之 D 值則約為 9.79，其蓄熱能力幾乎是覆土 15 公分薄層綠化的 1.74 倍。密集型屋頂綠化完工照片如圖 2-13 所示。

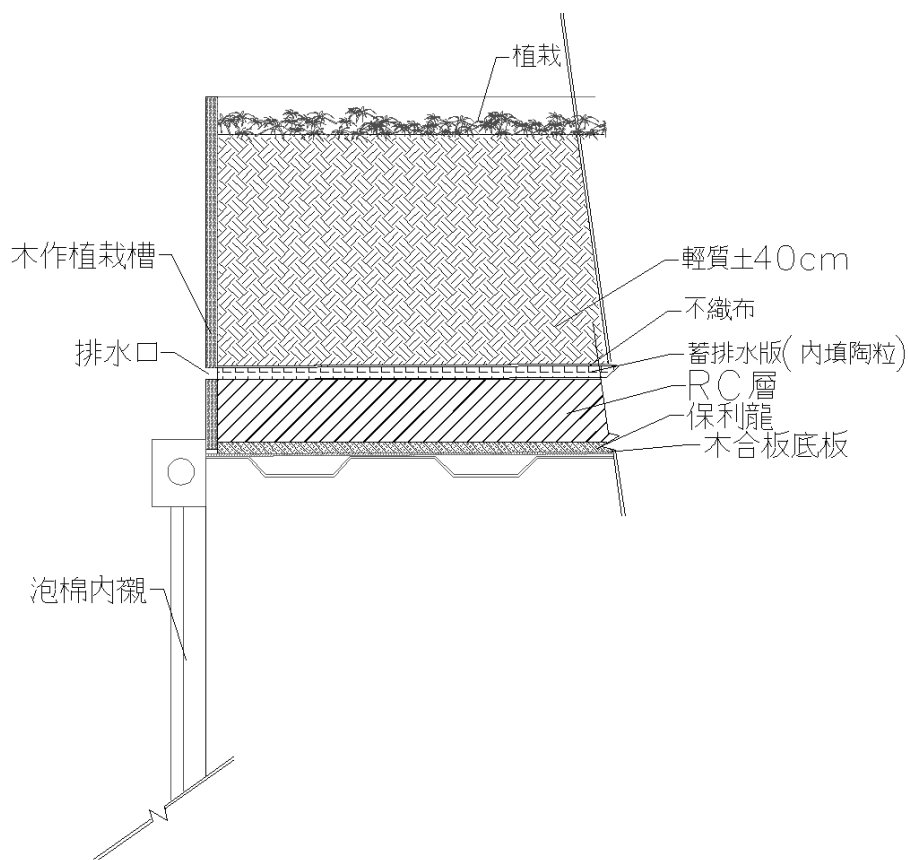


圖 2-12 密集型屋頂綠化之構造大樣示意

(資料來源：本研究整理)



圖 2-13 密集型屋頂(40cm 覆土)完工照片
(資料來源：本研究拍攝)

2.2.3 雙層通風屋頂構造

雙層通風屋頂之改造方法為在既有之屋頂面上，以 C 型鋼構材局部點焊後作為上層鋼浪板之支撐以創造中間約 25 公分之通風空氣層，而為了實現雙層屋頂中間空氣層之空氣流通，屋頂四周不進行封填，其構造大樣如圖 2-14，整體構造之熱傳透率為 $0.80 \text{ W/m}^2\text{K}$ 。由於構造中僅 RC 部分為蓄熱材，因此整體構造之蓄熱換算其熱惰性指數(D 值)則約為 2.69。雙層通風屋頂完工照片圖 2-15 所示。

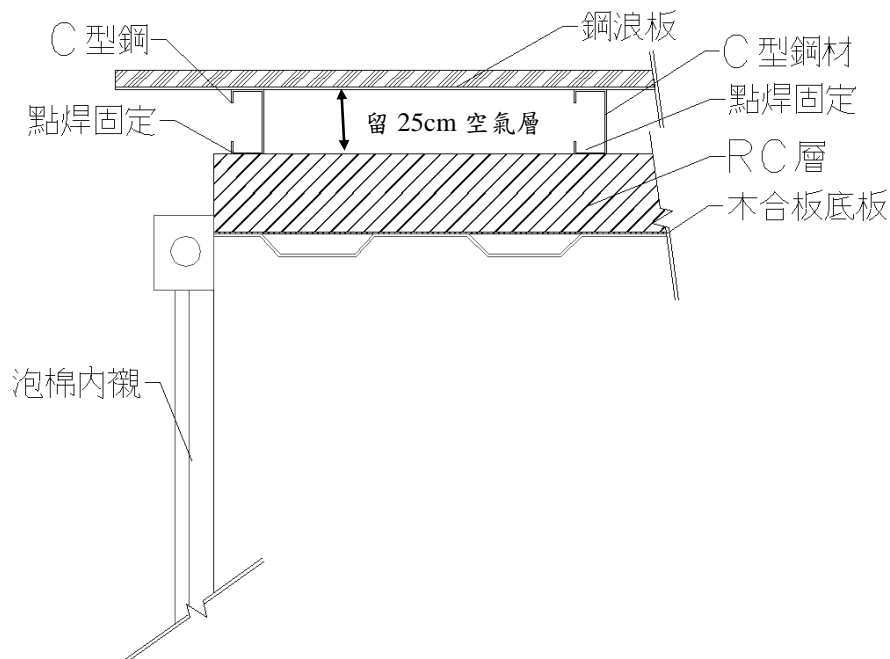


圖 2-14 雙層通風屋頂之構造大樣示意
(資料來源：本研究整理)



圖 2-15 雙層通風屋頂完工照片

(資料來源：本研究拍攝)

2.2.4 冷屋頂構造

冷屋頂的定義是指具有高反射率(solar reflectance)與高發射率(thermal emittance)之屋頂。此類屋頂能阻擋大量原本要進入建築物內的太陽輻射，而且因為高的熱發射率使得屋頂表面溫度較低。冷屋頂構造基本上是透過於屋頂面塗佈高反射率塗料而達成，市面上常以隔熱漆稱之。隔熱漆為液狀塗料，直接塗附屋頂表面上。隔熱漆本身具有高度太陽輻射反射率、高表面輻射率之特性，能有效阻絕熱量進入室內以及降低屋頂表面溫度。本計畫擬先於 RC 樓板外表面以平光白色漆進行底漆一度底塗，上層再以具高反射率(albedo 約 0.83)與高發射率(emittance 約 0.87)之白色隔熱漆二度塗覆形成冷屋頂構造，其構造大樣如圖 2-16 所示，整體構造之熱傳透率為 $0.79 \text{ W/m}^2\text{K}$ 。整體構造之蓄熱換算其熱惰性指數(D 值)則約為 3.17。冷屋頂完工照片如圖 2-17 所示。

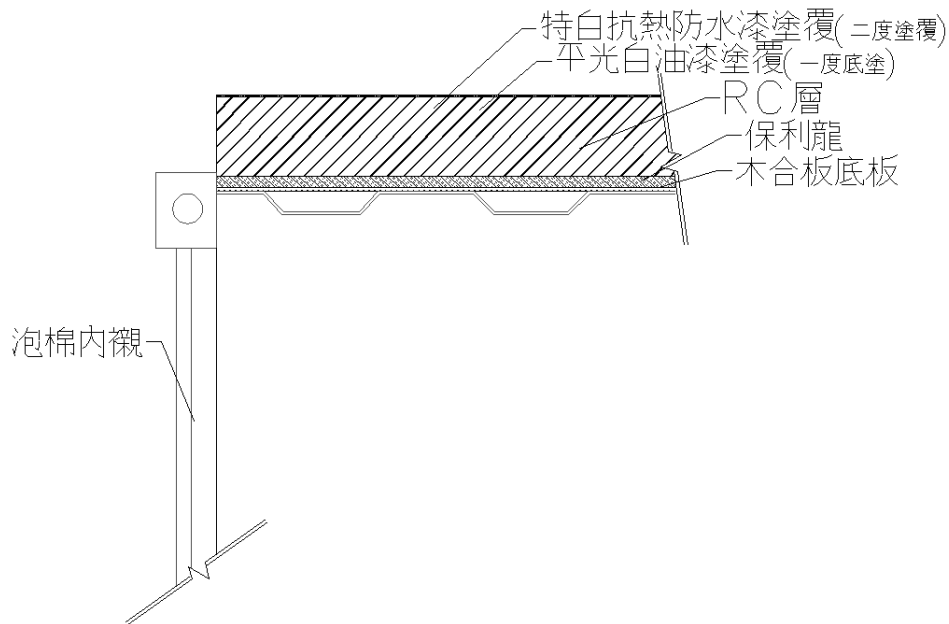


圖 2-16 冷屋頂構造大樣示意

(資料來源：本研究整理)



圖 2-17 冷屋頂完工照片

(資料來源：本研究拍攝)

2.2.5 PS 板隔熱屋頂構造

為建構 PS 板隔熱層，首先需先將不平整的實驗屋頂以木合板整平，木合板四周以木作邊框收邊同時作為澆置輕質混凝土之邊界，木合板上方再密鋪 PS 隔熱板作為隔熱層，其上方再披覆以水泥砂漿整平。其構造大樣如圖 2-18，整體構造之熱傳透率

為 $0.77 \text{ W/m}^2\text{K}$ 。整體構造之蓄熱換算其熱惰性指數(D 值)則約為 3.54。PS 板隔熱屋頂完工照片如圖 2-19 所示。

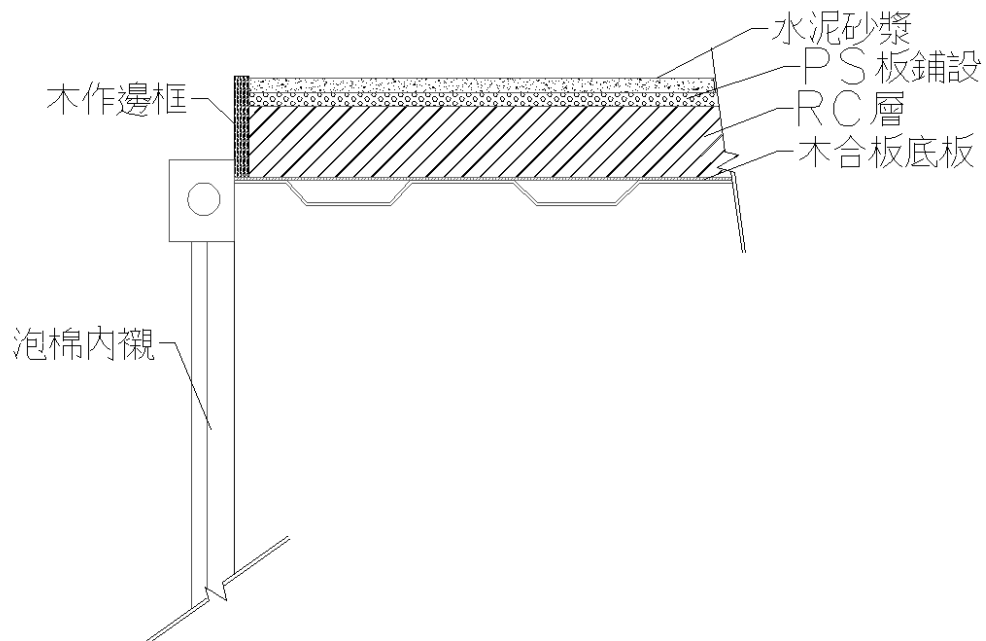


圖 2-18 PS 板隔熱屋頂之構造大樣示意

(資料來源：本研究整理)



圖 2-19 PS 板隔熱屋頂完工照片

(資料來源：本研究拍攝)

2.2.6 傳統五腳磚屋頂構造

傳統五腳磚隔熱屋頂是作為實驗比對用途，以代表業界常見之屋頂隔熱構法，本研究將以此構造作為節能效益之比較對象。施工作法上於實驗屋頂面以 RC 飾平後於上方以水泥砂漿固定五腳隔熱磚，其構造大樣如圖 2-20，整體構造之熱傳透率為 $0.80 \text{ W/m}^2\text{K}$ 。整體構造之蓄熱換算其熱惰性指數(D 值)則約為 3.56。五腳磚隔熱屋頂屋頂完工照片如圖 2-21 所示。

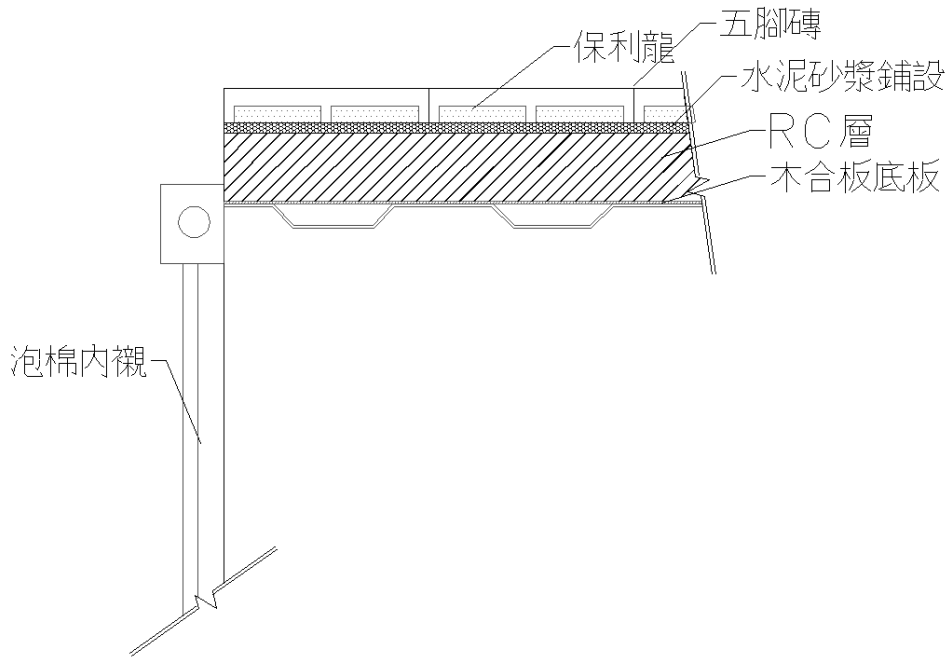


圖 2-20 傳統五腳磚屋頂構造示意
(資料來源：本研究整理)



圖 2-21 五腳磚屋頂完工照片
(資料來源：本研究拍攝)

第三節 歸零實驗

實測實驗前首先必須針對六個實驗屋進行現況校準以使六個實驗屋之熱性能皆一致，此即歸零實驗之意義。歸零實驗(Null Test)為實驗前的各實驗屋的測試與調整。經過歸零實驗方能保證各實驗屋的性能是一致的，以確保後續實驗結果的準確性與可靠度。所以每次進行各項實驗前，歸零實驗為不可忽略的重要步驟。項目包括儀器之校準與實驗屋之歸零試驗。整個歸零之步驟如下圖 2-22 所示。以本實驗屋之歸零實驗為例，為確保各實驗屋在相同之氣候條件與同一時段內其表現皆大致相同，所需測試之物理量包括室內之溫度是否一致、空調耗能量是否一致以及在空調開啟使用下室內溫度之分佈均勻度測試。如發生不一致之情形則需要反覆調整實驗屋之外殼性能，以達每一實驗屋之熱性能一致。

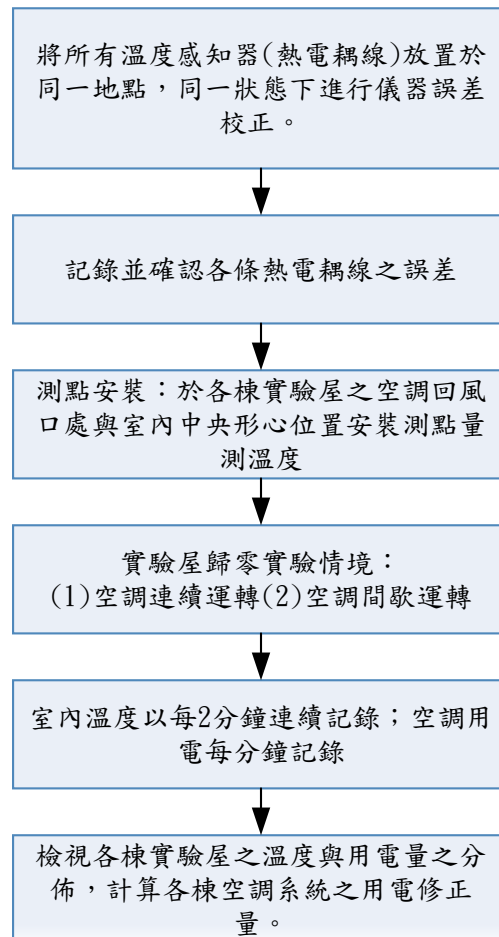


圖 2-22 實驗屋歸零實驗步驟

(資料來源：本研究整理)

第四節 實驗配置與測點規劃

實驗之進行將選取夏季連續數日晴朗，日射量充足之日期為施測日期且連續為期至少三日之實測，所有儀器之資料記錄間隔以每 2 分鐘為一筆進行記錄。為進行空調節能與室內熱舒適實驗，所需測得之物理量包括屋頂上下表面之表面溫度、屋頂下表面之熱流量、室內空氣溫度、室內黑球溫度、室內平均風速、空調回風口溫度。其中室內環境之測點配置如圖 2-23 所示，測量空調回風口溫度是要確保每間實驗屋之空調溫度一致；而對於熱舒適之探討區分為陽光區域與內部無日射直達之區域，因此二區域各配置一組溫度探針(T_a)與 15cm 直徑之黑色銅球溫度計(T_g)，同時於室型平面中心配置熱線式風速計(v)，藉以換算平均輻射溫度(T_r)，並透過下式(2-4)與(2-5)換算室內操作溫度(T_{ot})與 PPD 以描述室內熱舒適情況。其中當風速 <0.2 m/s 時， $A=0.5$ 。

$$T_{ot} = A \cdot T_a + (1 - A) \cdot \overline{T_r} \quad (2-4)$$

$$\overline{T_r} = [(T_g + 273)^4 + 2.5 \cdot 10^8 \cdot v^{0.6} (T_g - T_a)^{0.25}] - 273 \quad (2-5)$$

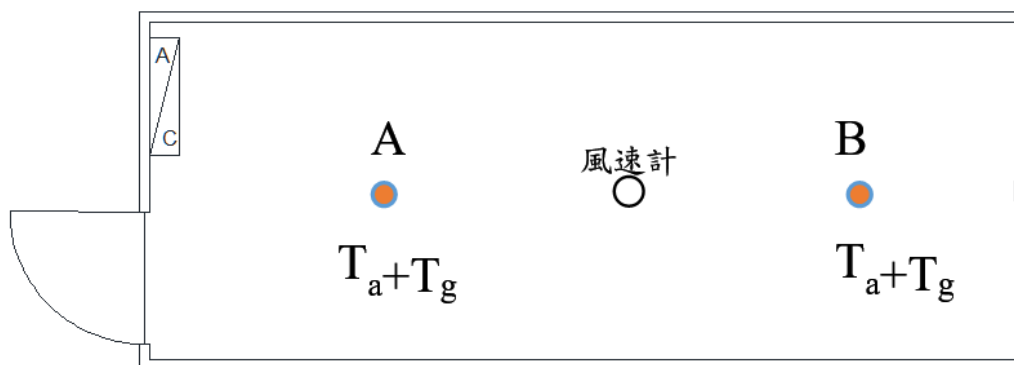


圖 2-23 室內熱舒適環境測點分佈

(資料來源：本研究整理)

此外為探討屋頂隔熱之性能，本研究擬實測每一實驗屋室內側之屋頂下表面溫度與熱流量，以解釋進入室內熱流之多寡以及提供屋頂下表面溫度，再輔以地板面表面溫度數據以進行輻射不對稱分析。表面溫度以熱電耦線(K-type 或 T-type)感測而熱流量則以薄型熱流計(HeatFlux)貼附於屋頂下進行量測。屋頂熱流量之分析將區分日間與夜間探討有無日射情況下屋頂之隔熱效益。測點之分佈如圖 2-24 所示。

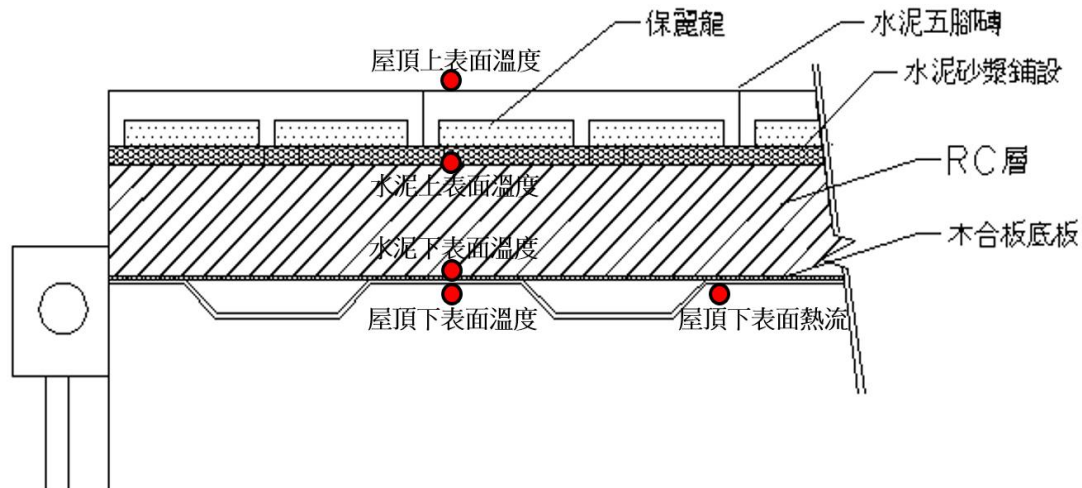





圖 2-24 屋頂隔熱量測之測點分佈
(資料來源：本研究整理)

本計畫所採用之儀器設備如表 2-7 所示。

表 2-2 使用儀器及其規格一覽表

儀器照片	名稱型號	靈敏度	說明
	Centre 314 溫濕度計與資料記錄器	1. 測量範圍： 相對溼度：0~100% 溫度：-20°C~60°C 2. 精度： 相對溼度：0~100%... ±2.5% 溫度：-20°C~60°C...± 0.7°C 3. 解析度： 相對溼度：0.1% 溫度：0.1°C	用於量測室內空氣溫度與作為黑球溫度與空氣溫濕度之資料記錄器使用
	標準 15cm 黑色銅球	搭配 K-type 熱電耦線使用，靈敏度取決於所使用之熱電耦線。	量測室內黑球溫度

	<p>Onset HOBO U023 自計式溫濕 度計</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 測量範圍： 相對溼度：0~100% 溫度：-40°C~70°C 2. 精度： 相對溼度：10~90%... ±2.5% 溫度：0°C~50°C...± 0.21°C 3. 解析度： 相對溼度：0.03% 溫度：0.02°C 	<p>量測空調回風口溫 度以確認各間空調 溫度之一致性</p>
	<p>K-type 熱電耦線</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 測量範圍： 溫度：0°C~1370°C 2. 精度： 溫度：±0.7°C 3. 靈敏度： 溫度：41 μV/°C 	<p>量測各種被測物表 面之表面溫度</p>
	<p>OMEGA HFS-3 熱流貼片</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 測量範圍： 溫度：-200°C~150°C 2. 靈敏度(電壓值)： 3.0μV/Btu/ft²-hr 	<p>作為量測各屋頂下 表面熱流量</p>
	<p>Grphicteck GL-820 資料連續 記錄器</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 取樣區間： 10 毫秒~1 小時 2. 精度： 電壓值：±0.1% 溫度：±0.05% 	<p>作為各種熱電耦線 與熱流計之熱流量 與溫度之記錄器</p>

(資料來源：本研究整理)

● 空調耗能實驗

為瞭解不同屋頂隔熱下實際空調之節能量，本計畫將區分二種情況(1)空調連續運轉與(2)空調不運轉等二種情況進行實驗，再與對照組比對空調節能效益與室內熱環境。空調連續運轉係模擬空調 24 小時連續不間斷運轉之情形。本案所安裝之空調系統為變頻式且節能一級之分離式空調，空調耗能量之量測則透過位於每棟實驗屋內之冷氣電表以每 2 分鐘記錄一筆用電量。

第三章 電腦模擬實驗

有鑑實測實驗於本年八至十月進行僅有熱季之實測，為了同時探討各種屋頂構造在全年以及冷季之性能表現，此章以電腦動態模擬之方式進行分析，較有效率並節省實測時間以期獲致可茲應用之結論。本章所探討之現象包括二種情境(1)空調全時運轉與(2)複合式空調運轉。所謂複合式空調運轉，亦即室內一般以開窗自然通風為主，當室內溫度達熱舒適上限時則關窗改以空調運轉以維持室內之熱舒適性，此亦為台灣一般住宅常見之建築室內環境控制方式。

第一節 電腦動態解析工具說明

本研究採用之電腦動態解析熱負荷計算工具為 EnergyPlus，以此工具進行由外界氣候狀態計算至室內熱取得以至於空調熱負荷，同時可分析室內之熱環境狀態。EnergyPlus 是在美國能源部(Department of Energy, DOE)的支持下，由勞倫斯·伯克利國家實驗室(Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL)、伊利諾斯大學(University of Illinois)、美國陸軍建築工程實驗室(U. S. Army Construction Engineering Research Laboratory)、奧克拉荷馬州立大學(Oklahoma State University)及其他單位共同開發的，是一個全新的軟體，它不僅整合了建築能耗分析軟體 DOE-2.2 和 BLAST 的優點，並且具備許多新的功能，被認為是用來替代 DOE-2.2 的新一代的建築能耗分析軟體 (Crawley, Lawrie et al. 2001)。

建築耗能分析軟體可以用來模擬建築及空調系統全年逐時的負荷及耗能，有助於建築師和工程師從整個建築設計過程來考慮如何節能。大多數的建築耗能分析軟體是由四個主要模組構成：負荷模組(loads)、空調系統模組(systems)、空調設備模組(plants)和經濟模組(economics)。這四個模組相互關連形成一個建築系統模型。其中負荷模組模擬建築外殼及其與室外環境和室內負荷之間的相互影響。在負荷模組中有多種計算牆體傳熱和負荷的方法，如反應係數法(response factor)和熱傳導傳遞函數法(conduction transfer functions, CTF)用來計算牆體傳熱；傳遞函數法(transfer function method, TFM)、熱平衡法(heat balance method)和熱網路法(thermal net work method)等用

來將來自窗、牆之熱得及內部負荷轉變為冷房或暖房負荷。系統模組模擬空調系統的空氣輸送設備、風機、盤管以及相關的控制裝置。設備模組模擬冷凍主機、鍋爐、冷卻塔、能源儲存設備、發電設備、泵等冷熱源設備。經濟模組計算為滿足建築負荷所需要的能源費用。目前世界上比較流行的建築全能耗分析軟體主要有: Energy-10, HAP, TRACE, DOE-2.2, BLAST, EnergyPlus, TRNSYS, ESP2r, DeST 等。這些軟體具有各自的特點,例如,Energy-10 只能用來模擬 1000m² 以下的小型建築,DOE-2.2 能夠準確地模擬較複雜的外殼結構負荷,TRNSYS 則在模擬空調系統時能夠提供最大的靈活性,等等。

EnergyPlus 具有以下主要特點(DOE 2009)：

1. 採用同步計算的負荷/系統/設備的模擬方法。
2. 在計算負荷時，使用者可以定義小於 1 小時的時間；在系統模擬中，時間間距將自動調整，以加快收斂。
3. 採用熱平衡法(Heat Balance Method)來模擬負荷。
4. 採用 CTF(Conduction Transfer Factor)模擬牆體、屋頂、地板等的瞬間熱傳。
5. 採用三維有限差分土壤模型和簡化的解析方法對土壤傳熱進行模擬。
6. 採用聯立的傳熱和傳質模型，以對牆體的傳熱和傳濕進行模擬。
7. 採用基於人體活動量、室內溫濕度等參數的熱舒適模型模擬熱舒適度。
8. 採用各向差異化的天空模型以改進傾斜表面的天空散射強度。
9. 先進的窗戶傳熱計算，可以模擬包括可調控的遮陽裝置、可調光的電鍍相變化玻璃等。
10. 日光照明的模擬，包括室內照度的計算、眩光的模擬和控制、人工照明的減少對負荷的影響等。
11. 基於回路概念的空調系統模擬，使用者可以模擬典型的系統，而無需修改來源程式。
12. 可與一些常用的模擬軟體連結，如 WINDOW-5, COMIS, TRNSYS, SPARK 等，以便使用者對建築系統作更詳細的模擬。
13. 原始程式碼開放，使用者可以根據自己的需要加入新的模組或功能。

雖然 EnergyPlus 具備以上的特點，但現今它僅是一個模擬引擎，而缺乏有友善的使用者輸入介面，其介面有待開發。EnergyPlus 裡擁有許多模組單元可模擬運算各種系統，其中包括天空模組、遮陰計算模組、晝光利用計算模組、窗玻璃計算模組、構

造傳導係數計算模組、氣流網絡計算模組、太陽光電計算模組，以及空調設備系統方面計有空氣側循環模組、室內側模組、熱源側模組與冷凝側模組等，其系統組成如圖 3-1 與圖 3-2 所示。

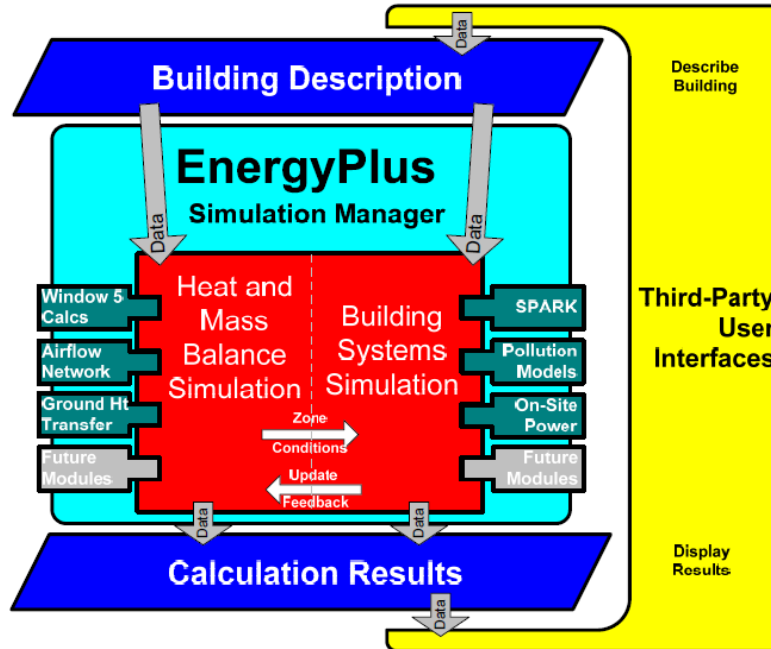


圖 3-1 EnergyPlus 軟體架構圖
(資料來源：EnergyPlus Input and Output Reference)

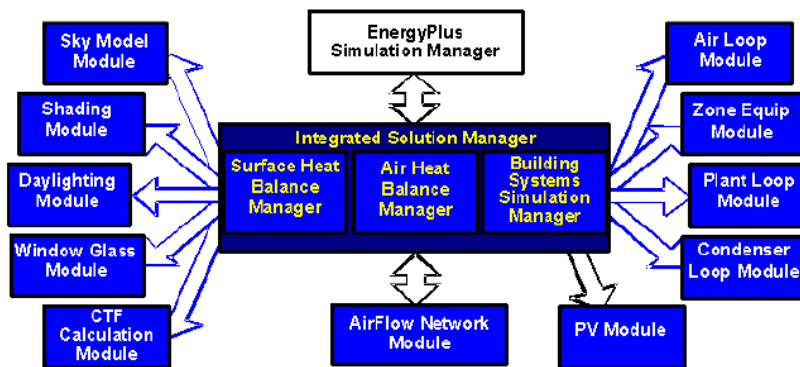


圖 3-2 EnergyPlus 裡擁有許多模組單元可模擬運算各種系統
(資料來源：EnergyPlus Input and Output Reference)

第二節 模擬條件假設

本研究假設空間之使用性質為一般辦公空間，幾何尺寸與實驗現場之實驗屋相當為一長、寬、高分別為 5.89m、2.35m 與 2.38m，室內面積 13.84m² 之空間，建築平面長軸為東西向，如圖 3-3 所示。在室內發散熱源方面為了與實驗屋現場一致，假定無室內發散熱。模擬空調運轉時，每日空調時間為上午 9 時至下午 5 時止每日共 8 小時

運轉。由於實際實測實驗場地位於台南市歸仁區，因此在模擬時之外界氣候資料以過去內政部建築研究所委託研究所產製之台南 TMY3 標準氣象年(何明錦 and 黃國倉 2013)進行氣候之模擬，該氣象年以 1998-2012 台南氣象局之原始氣象數據製作而成，可代表當地近期之氣候變動狀態。

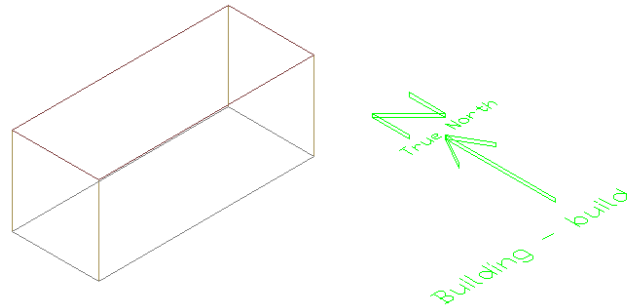


圖 3-3 EnergyPlus 模擬建築幾何尺寸與方位
(資料來源：本研究整理)

第三節 模擬結果與討論

在討論空調耗能與室內熱舒適之議題時，需先定義建築使用類別與空調設備在建築使用階段之運轉情形，始可以互相比較屋頂隔熱之差異。因此，本研究在模擬實驗之空調運轉情境假以下二種情況討論：(1)全年空調運轉，藉以模擬全年中央空調使用之辦公建築物，空調每日運轉自 9 時至 17 時；(2)複合式通風模式，模擬當實驗屋常時以開窗自然通風為主，當自然通風無法維持室內之熱舒適時，則啟動空調運轉之情形。

此外，本研究由台南 1998-2012 年間所建立之平均標準氣象年氣候資料挑選夏季熱季典型日 7 月 21 日至 22 日作為探討對空調耗能與室內熱舒適之影響。

3.3.1 空調運轉情境

台南的典型夏季取 7 月 21 日當日晴朗高溫之天氣作為逐時變化之探討，當日逐時之冷房負荷量逐時歷線圖如圖 3-4 所示。在每日空調運轉時間為每日九時至下午五時止之情況下，各案例皆在 9-10 時有一空調負荷高峰，係因空調全負荷運轉以移除前一晚蓄積之室內熱，屋頂綠化組由於前一晚之室內蓄熱較多，因此空調第一小時之高峰現象明顯，此後日間當日射量逐漸增加時，綠屋頂之空調耗能即隨即下降。而傳統五腳磚隔熱屋頂與 PS 版隔熱屋頂之累積單日冷房負荷量為最大，此乃因五腳磚隔熱屋

頂與 PS 版隔熱屋頂之屋頂面熱流量在日間流入較大有關，如圖 3-5 所示。如以全年總空調冷房熱負荷觀之，模擬結果以冷屋頂之總冷房負荷量為最小最節能、密集型綠化屋頂次之；而以 PS 版隔熱屋頂與五腳磚隔熱屋頂為最高，如圖 3-6 所示。由模擬結果顯示，相較於五腳磚隔熱屋頂而言，薄層屋頂綠化、密集型屋頂綠化、雙層通風屋頂、冷屋頂與 PS 板隔熱屋頂其全年總冷房負荷量則分別比五腳磚屋頂低了約 6.7%、11.1%、7.3%、11.8% 與 1.1%。冷屋頂在全年空調運轉下之空調負荷節能量表現與覆土較厚之密集型屋頂綠化相當；而雙層通風屋頂之節能效益則與薄層屋頂綠化約略相同。

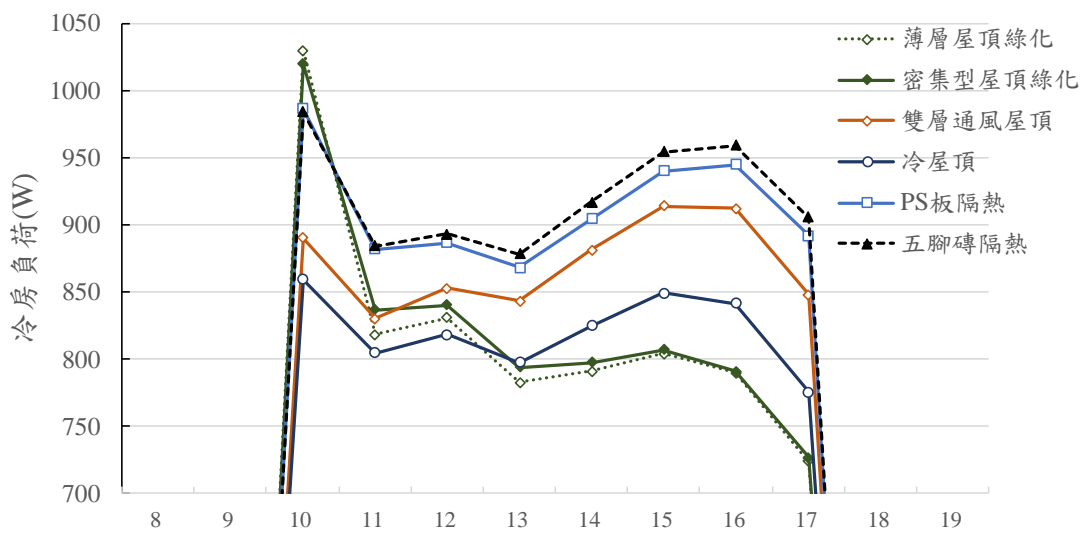


圖 3-4 台南典型夏季日(7/21)之逐時冷房負荷量分佈
(資料來源：本研究整理)

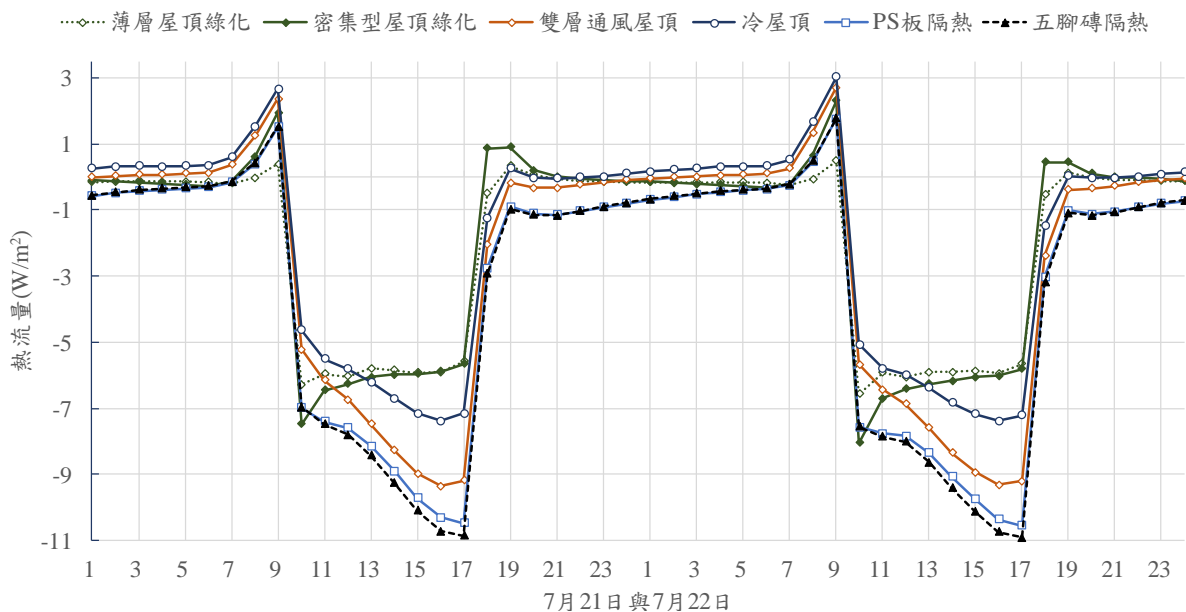


圖 3-5 典型夏季日之逐時屋頂下表面熱流量(負值代表向室內流入，日間空調運轉)
(資料來源：本研究整理)

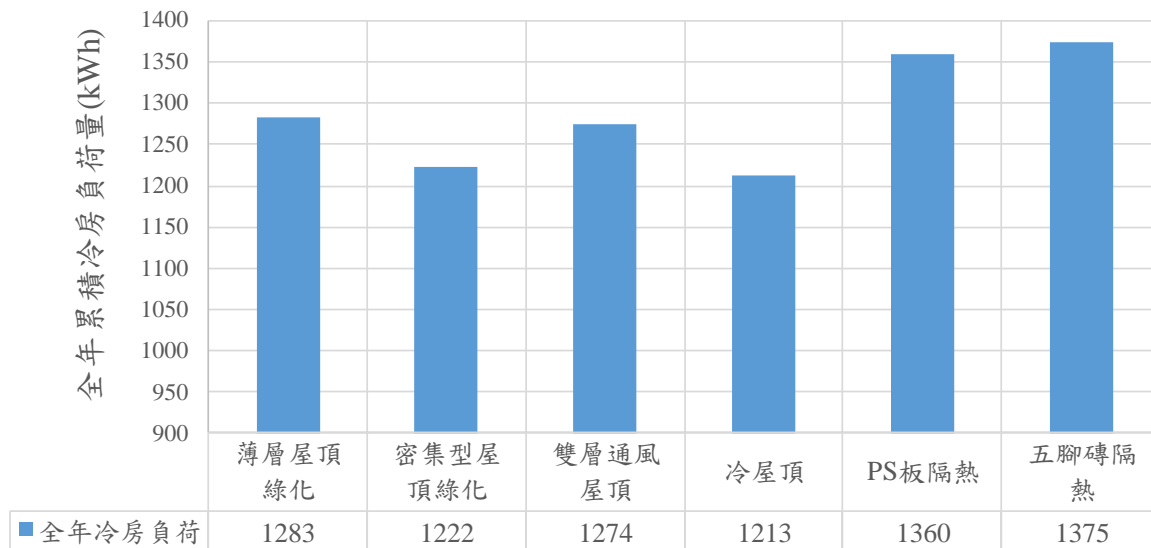


圖 3-6 全空調運轉下全年冷房負荷量比較

(資料來源：本研究整理)

3.3.2 複合式通風情境

本節進一步探討複合式通風之情境，所謂複合式通風之建築其平常是以自然通風利用為主，當室內過熱時才開啟空調以降溫之運轉方式。由於複合通風運轉是模擬建築在自然通風與空調並用下之使用情況，空調之啟停本研究以 ASHRAE Standard 55 所定義之熱適應模型 80% 熱舒適上限作為依據。該熱適應模型以室內操作溫度 (operative temperature) 作為室內過熱判斷之基礎，同時考量了室內溫度與壁面(含屋頂面)之周壁輻射對人體熱舒適之影響。分析方法為透過逐時之室內操作溫度模擬值與熱適應模型所定義之熱舒適上限比對，當室內操作溫度高於熱適應模型上限時，則判定為需啟用空調以維持室內之熱舒適，否則以開窗通風為主。採用複合式通風運轉分析冷房負荷量，較能貼切模擬與類比台灣一般自然通風利用同時輔以空調運轉之行為。

首先探討當空調不運轉全自然通風模式下之室內熱環境情況，圖 3-7 是於典型夏季日之屋頂下表面熱流量變化，在非空調的環境下，兩種屋頂綠化構造、雙層通風屋頂與冷屋頂在日間有相對較小的熱流量進入室內，尤以屋頂綠化者之室內熱流量最小。屋頂綠化在一整天不論日間或夜間其熱流量之變動範圍皆相對小很多，顯示擁有很好的熱阻絕性能。圖 3-8 是夏季典型日各構造屋頂下表面溫度之變化模擬結果，顯示屋頂綠化者日間具有較小的表面溫度，然而在夜間時段，由於覆土綠化層的蓄熱效果，

使得在沒有空調的情況下，其屋頂下表面溫度呈現相對較高的狀態。此外，冷屋頂與雙層通風屋頂由於構造具低熱容量之故，夜間降溫快速而呈現相較為低溫之情況。

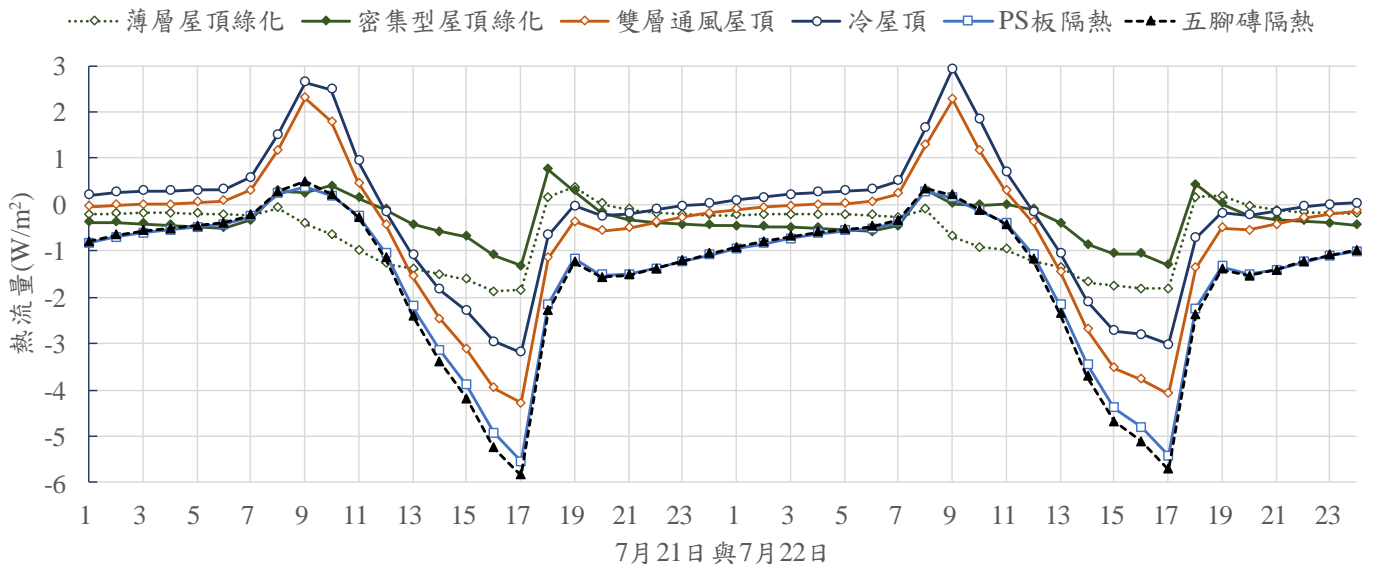


圖 3-7 自然通風下典型夏季日屋頂下表面熱流量變化線圖(負值為向室內流入)
(資料來源：本研究整理)

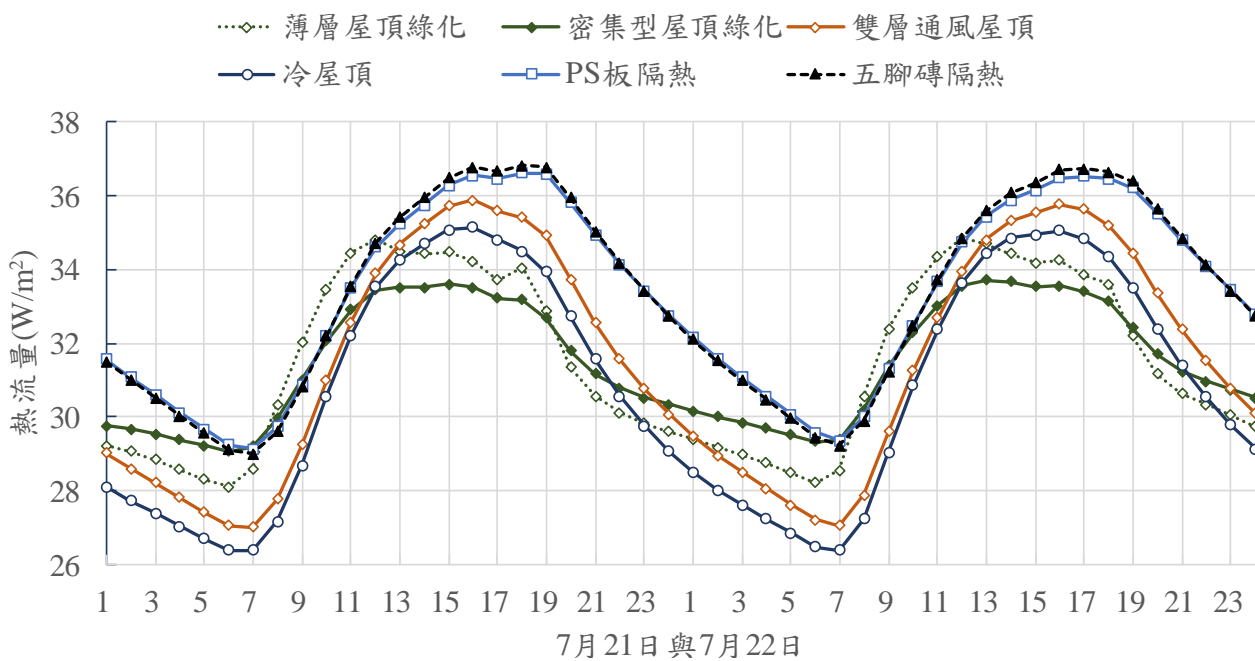


圖 3-8 自然通風狀態夏季典型日屋頂下表面溫度變化
(資料來源：本研究整理)

如以全年總冷房負荷量之觀之，其節能趨勢與全年中央空調密閉式辦公建築相當，皆是以雙層通風屋頂最為節能，冷屋頂次之；而以 PS 版隔熱屋頂與五腳磚隔熱屋頂較為耗能。相較於雙層通風屋頂而言，薄層屋頂綠化、密集屋頂綠化、冷屋頂、PS 版

隔熱屋頂與五腳磚隔熱屋頂其全年總冷房負荷量分別高了約 15%、17%、5%、29% 與 29%。

在室內熱舒適性之維持方面，其評估除了分析室內發生過熱之頻率外，尚須評估過熱情況下之嚴重程度，國際上常以 ISO 7730 標準內有關長期熱不舒適之評估法作為評定室內過熱嚴重程度之指標。就過熱發生頻率而言，採用綠屋頂構造者室內發生過熱之頻率較低，且其過熱嚴重程度亦較低；反之 PS 版隔熱屋頂與五腳磚隔熱屋頂不論過熱發生頻率或過熱嚴重度都較高。顯示屋頂綠化較能維持室內之熱舒適性，原因之一是綠化屋頂因隔熱較佳有較低之屋頂下表面溫度，然而，相對地由於綠化屋頂土壤層的高蓄熱能力，使的全年空調負荷量較雙層通風屋頂與冷屋頂來得高。表 3-1 整理了各屋頂構造在自然通風情況下室內過熱發生頻率及其過熱嚴重程度之模擬結果之分析，其中以傳統之五腳磚隔熱屋頂過熱情形最為嚴重，其餘薄層屋頂綠化、密集型屋頂綠化、雙層通風屋頂、冷屋頂與 PS 板隔熱屋頂之在室內熱舒適之改善效益相對於五腳磚隔熱屋頂而言，分別為 20%、26%、18%、23% 與 1%。

表 3-1 各屋頂構造自然通風情況下室內過熱分析

	薄層屋頂綠化	密集型屋頂綠化	雙層通風屋頂	冷屋頂	PS 板隔熱	五腳磚隔熱
過熱頻率	22%	21%	22%	21%	27%	27%
過熱嚴重度(K.hr)	3162	2951	3245	3052	3938	3976
熱舒適嚴重度改善效益	20%	26%	18%	23%	1%	-

(資料來源：本研究整理)

第四章 實測實驗結果與討論

本研究之實驗屋屋頂隔熱改造於7月底至8月初進行，並於8月13日起完成所有測點之佈點開始實測。各時段內實驗屋之空調啟停狀態如下表 4-1 所示，空調使用期間之室內設定溫度每一單元皆為 24°C。綠屋頂澆灌以自動滴灌之方式於每日上午五時與下午九時每次滴灌十分鐘，以使土壤含水達飽和為原則。在實測結果之呈現上，分為屋頂隔熱性能、室內熱舒適效益與空調節能效益三方面探討，分述如下各節。

表 4-1 實驗期間空調啟用時間統計

開始時間	結束時間	空調啟停狀態註記
8月13日	9月2日	空調啟用
9月3日	9月5日	無空調
9月6日	9月17日	空調啟用
9月18日	9月25日	無空調
9月26日	10月5日	空調啟用
10月6日	10月10日	無空調

註：本表統計至期末撰寫報告(10月10日)時為止

(資料來源：本研究整理)

第一節 隔熱性能

圖 4-1 顯示連續二日(9月11日與12日)各實驗組室內側屋頂下表面溫度之歷線圖，此二日室內皆為有空調之狀態，因此在室內氣溫無變動之情況下，屋頂下表面溫度之變動可單純歸納為來自屋頂構造上方熱傳透之影響而得以互為比較。實驗結果在有屋頂綠化之二組於日間皆呈現相對低溫，顯示具有良好的隔熱效果，但在夜間由於土壤層與蓄排水版間蓄水導致於日間蓄熱量亦高之故，使得夜間散熱不易而致屋頂下表面溫度較其他組別稍高。而冷屋頂構造，由於日間反射了大部分之日射量因此混凝土樓板之日射取得較少，在夜間降溫較快速而呈現最低之表面溫度。此外，雙層通風屋頂雖然透過中間空氣層而在整體屋頂構造熱傳透率上得以符合法規之規定，然而由於本實驗之樓板構造部分無隔熱材料(如 PS 或 PE 版)，因此在日間測得之屋頂下表面溫度比傳統五腳磚或 PS 版隔熱屋頂來得高，然而當外氣溫下降時，其散熱也較五腳磚屋

頂來得快。因此建議採用雙層通風屋頂之構造，其混凝土樓板仍應設置隔熱層為佳，始能發揮雙層屋頂之空氣層通風以帶走蓄積之熱量之效益。由圖 4-1 觀察屋頂下表面溫度變動之範圍，顯示屋頂構造內若無隔熱層，其屋頂下表面溫度之變動亦趨較大，而二種土壤厚度下之屋頂綠化組，整日之變動範圍皆約在 1.2°C 之內，幾乎不受外界氣溫與日射量變動之影響，顯示屋頂綠化具良好之隔熱效益尤以密集型屋頂綠化者表現最佳，依次為薄層屋頂綠化、冷屋頂、PS 版隔熱屋頂、雙層通風屋頂與五腳磚隔熱屋頂。

各式屋頂之時滯現象以 9 月 12 日為例分析如表 4-2 所示，本研究所定義之時滯係為屋頂下表面最高溫發生時刻與最高外氣溫度發生時刻之時間差。可預見的密集型綠屋頂由於覆土達 40 公分厚，有最佳之時滯效果達 6.3 小時，五腳磚屋頂與薄層綠化屋頂次之亦有 5.2 與 5.1 小時。而雙層通風屋頂與冷屋頂，由於缺乏蓄熱材，因此室內屋頂下表面最高溫度發生時刻僅與最高外氣溫延遲約 2.8 與 3.5 小時。此外，如以整日之溫度變動範圍觀之(所謂溫度變動範圍為當日最高溫與最低溫差之意)，綠屋頂之單日溫度變動最小僅為外氣溫之 7-8% 之譜，顯示具良好之熱阻絕性能。

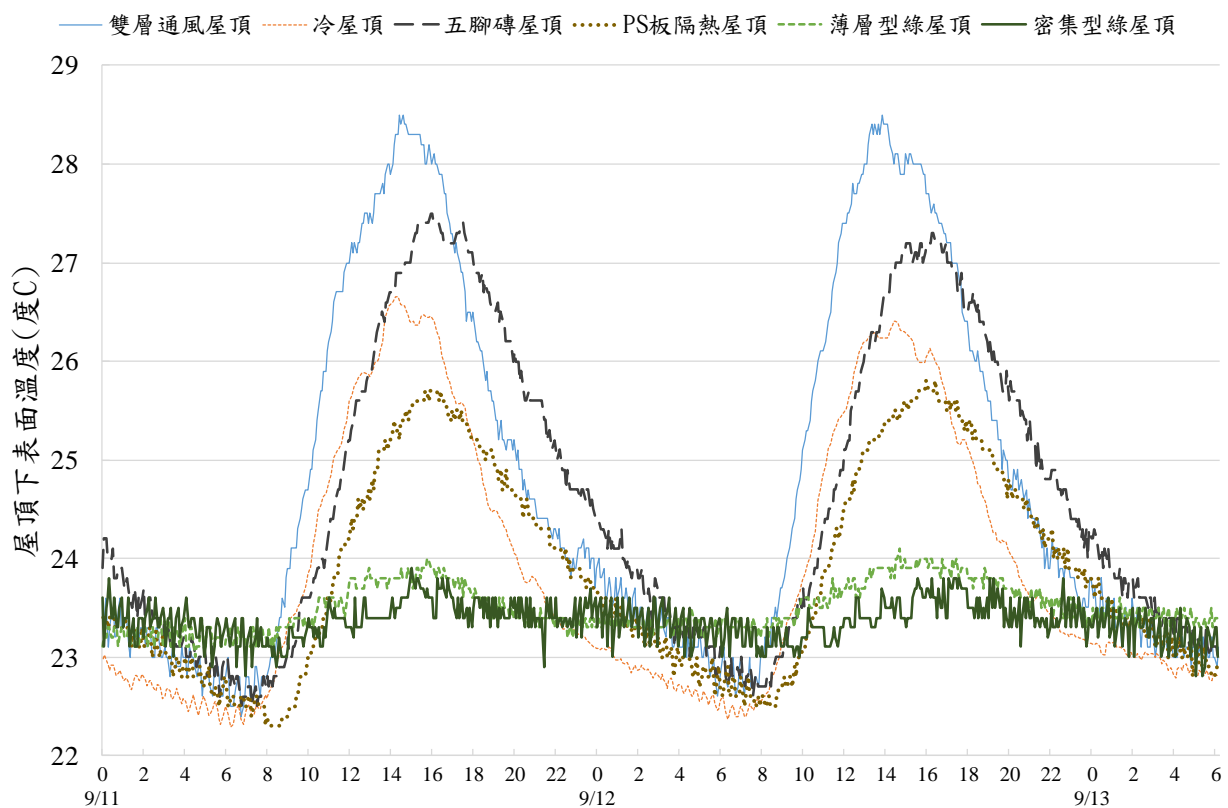


圖 4-1 室內屋頂下表面溫度變化(9/11-9/13 有空調期間)

(資料來源：本研究整理)

表 4-2 各式屋頂時滯現象分析

項目	平均溫度(°C)	最高溫度(°C)	最低溫度(°C)	時滯(小時)	最高溫發生時刻	最低溫發生時刻	溫度變動範圍(°C)	溫度波動比率註 ¹
戶外氣溫	29.8	35.3	25.5	-	11:06	05:26	9.74	-
雙層通風屋頂	25.0	28.4	22.7	2.8	13:50	07:40	5.66	55%
冷屋頂	24.0	26.4	22.4	3.5	14:30	06:56	3.96	38%
五腳磚屋頂	24.7	27.2	22.7	5.2	16:10	08:00	4.54	44%
PS 板隔熱屋頂	24.0	25.7	22.5	4.8	15:50	08:20	3.20	31%
薄層型綠屋頂	23.6	24.0	23.3	5.1	16:06	05:16	0.78	8%
密集型綠屋頂	23.4	23.8	23.0	6.3	17:16	07:56	0.72	7%

註 1：溫度波動比率定義為屋頂下表面溫度之變動範圍除以外氣溫之溫度變動範圍。

(資料來源：本研究整理)

如單就混凝土樓板上表面之溫度變化觀之，如圖 4-2 所呈現的是 8 月 31 日至 9 月 2 日之量測結果，圖中的冷屋頂、五腳磚屋頂與 PS 隔熱屋頂之混凝土樓板上表面溫度代表的是其外表面溫度。以雙層通風屋頂為例，由於混凝土樓板上方有另一鐵皮屋頂以約 20 公分之空氣層覆蓋其上，因此樓板本身全日皆位於陰影下，使得其混凝土樓板上表面溫度較傳統屋頂構造來得低；而冷屋頂之情況如前段所述因為反射了日射量亦呈現較低溫之狀態。值得注意的是兩種屋頂綠化構造，由於混凝土上表面有一蓄排水層且又有土壤介質覆蓋其上，加上研判蓄排水層內有多餘之水體蓄積其內，高比熱之水體與覆土之雙重影響下，導致整日下來混凝土樓板本身之上表面溫度幾乎維持在約上下 1°C 之變動範圍。

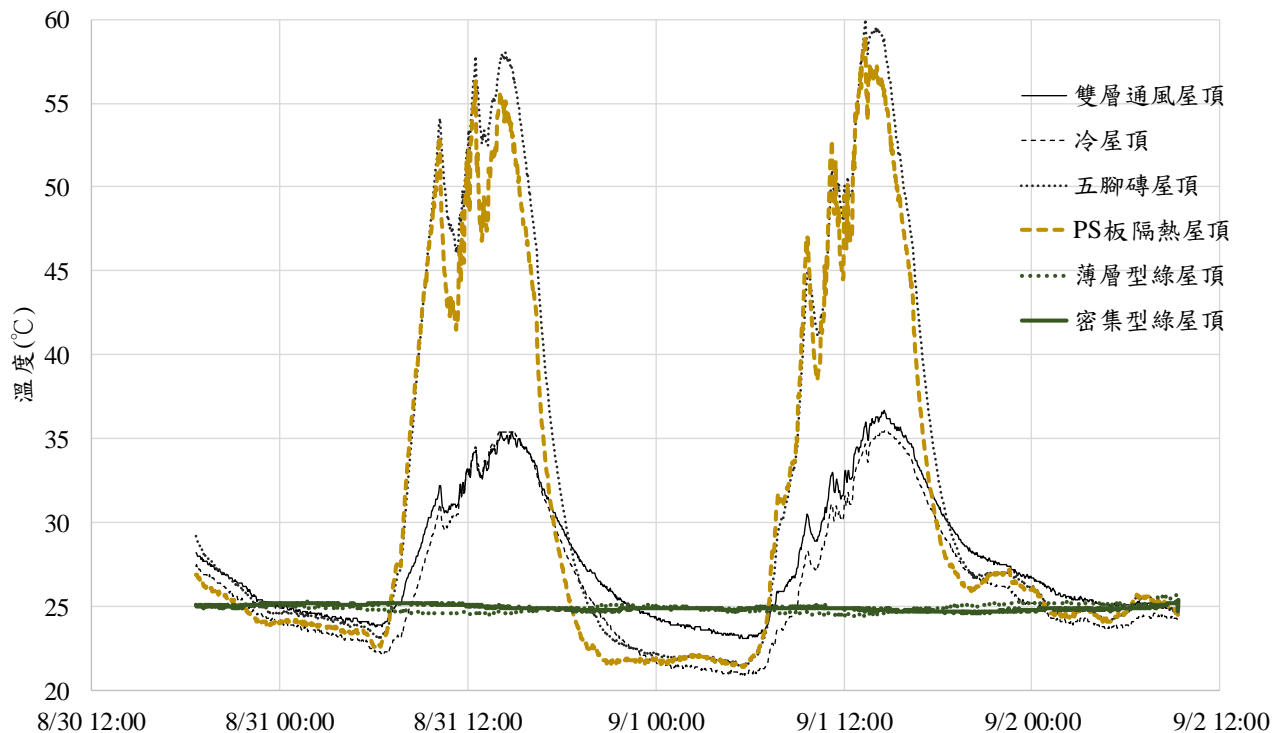


圖 4-2 混凝土樓板上表面溫度變化(8/31-9/1)

(資料來源：本研究整理)

第二節 室內熱舒適效益

在室內熱舒適之比較上，本研究以室內平均輻射溫度(MRT)與室內空氣溫度來探討。室內平均輻射溫度可由黑球溫度計測得黑球溫度後，再以公式(2-5)計算而得，因為本實驗室內無開窗，因此在空調未啟用下可假定風速幾近為零，因此此時之平均輻射溫度將等於黑球溫度。本研究在室內熱舒適效益之探討上，以空調未運轉時之狀態來討論。圖 4-3 呈現了 10 月 6 日至 10 月 7 日連續二日室內平均輻射溫度之變化，此二日各實驗屋內之空調為未開啟狀態。圖 4-4 則為同期間室內空氣溫度之分布情形。

以日間之情況而言，原則上有屋頂綠化者由於屋頂下表面溫度較低之故其 MRT 亦較其他構造為低，而雙層通風屋頂、五腳磚隔熱屋頂與 PS 板隔熱屋頂之 MRT 較高，然而六種屋頂隔熱構造之 MRT 縱使在日間最熱之時段其 MRT 差異皆約在 1.5 度以內，顯示在 U 值約 0.8 左右各案例皆有一定之室內熱舒適水準，且以有屋頂綠化者表現最佳。如以夜間無日射量之情況觀察，有屋頂綠化者由於屋頂層擁有較高之蓄熱能力使得室內降溫較慢，此現象同時反映在平均輻射溫度上；相反地，雙層通風屋頂與冷屋頂在夜間之降溫則相對的較為快速，然而兩者降溫較快之原因卻各異。推測雙層通風

屋頂由於屋頂樓板少了隔熱材料，使得室內熱在夜間較容易逸散；而冷屋頂則是因為由於日間反射了絕大多數日射量之緣故，使得日射熱較少蓄積於屋頂樓板內，缺少了樓板內蓄熱的影響也因此使得夜間能有較低溫度與平均輻射溫度之表現。然而，不論是日間或夜間，雙層通風屋頂、冷屋頂、薄層綠化屋頂與密集型綠化屋頂在對室內空氣溫度或平均輻射溫度之控制上，皆較傳統之五腳磚隔熱屋頂與 PS 板隔熱屋頂表現來得優良。

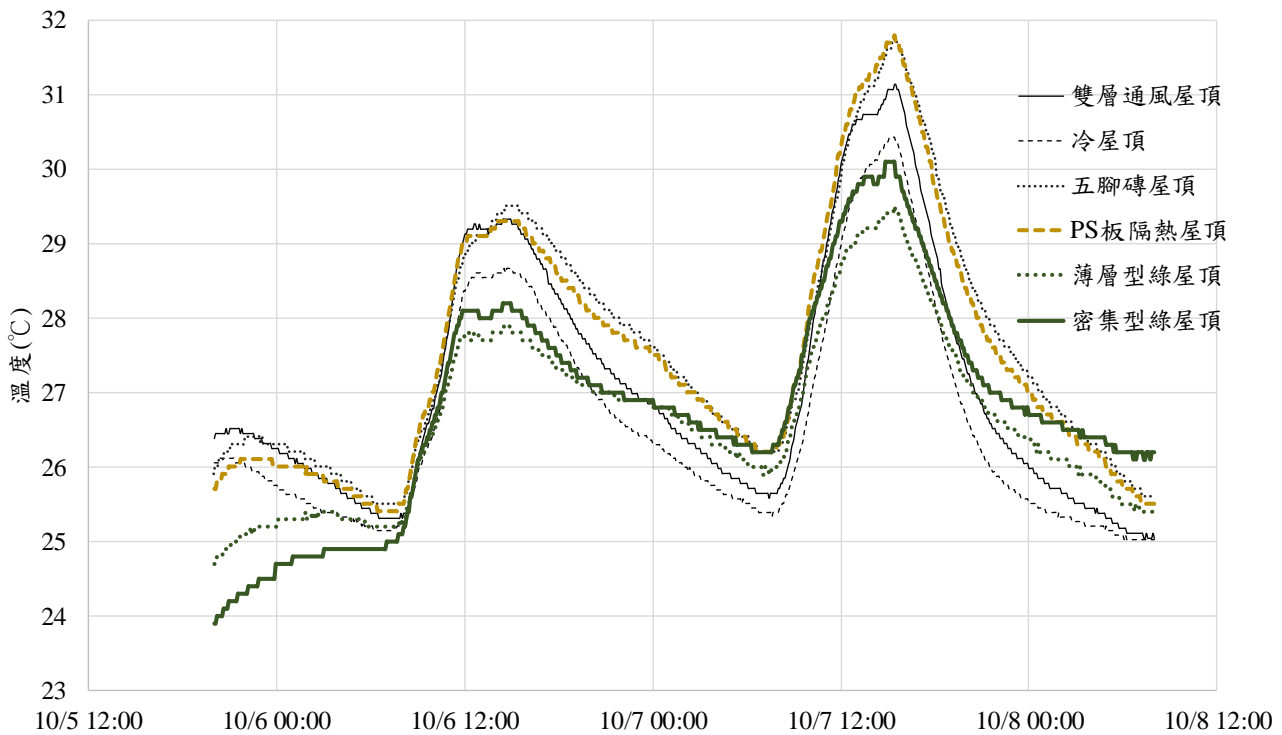


圖 4-3 室內平均輻射溫度(MRT)變化
(資料來源：本研究整理)

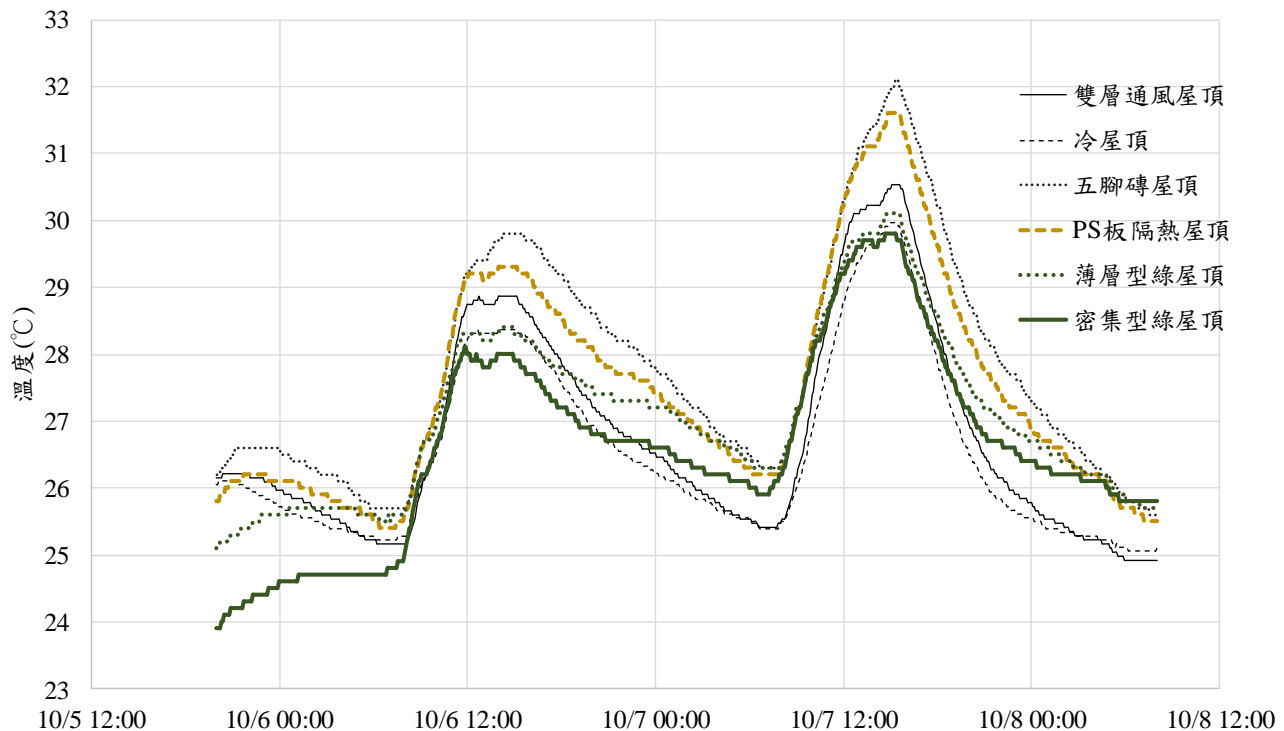


圖 4-4 室內空氣溫度變化

(資料來源：本研究整理)

第三節 空調耗能比較

空調耗能之實驗乃藉由每間實驗屋內之空調用電電表之比流計，以每二分鐘一筆記錄其空調使用功率與其電量累積值，空調耗能實驗之期間為9月6日至9月17日以及9月26至9月30日共18日為空調連續開啟時間，室內空調溫度設定為24°C。表4-3顯示了空調耗能實驗之實測結果，表中數值係空調開啟時間內每日之空調用電量(以用電度 kWh 表示)。為了類比辦公(日間使用居多)與住宅(日間使用居多)使用時各種屋頂隔熱技術對此二種建築類型之影響，表中分別以日間與夜間呈現以分別代表辦公與住宅之節能潛力。全日的每日平均用電量比較如圖4-5所示；日間與夜間之每日平均用電量如圖4-6以及圖4-7所示。由這些圖表之比較下，可知冷屋頂具最佳之省能效果而密集型綠化屋頂次之、雙層通風屋頂再次之，其次依序為屋頂綠化，而代表傳統屋頂隔熱的五腳磚與PS版隔熱工法則顯示較高之空調耗能。相較於五腳磚隔熱屋頂，雙層通風屋頂、冷屋頂、PS版隔熱屋頂、薄層綠化屋頂與密集型綠化屋頂全日分別省能約33.1%、42.6%、5.2%、29.5%與34.3%。然而如將日夜間分別觀之，於夜間時雙層通風、冷屋頂與二種綠化屋頂之耗能量相當。冷屋頂由於可能是因為日間直接將日

射量反射之故，以及雙層通風屋頂由於混凝土樓板面日間皆在陰影下，使得蓄積於混凝土樓板內之熱量相對較少，使得其空調耗能量亦較低。然而，由於雙層通風屋頂之混凝土樓板並無隔熱材料，因此熱傳透量亦較冷屋頂來得多，導致比冷屋頂之空調耗電量稍大。

表 4-3 各式屋頂用平均耗電量比較(09/06-09/30)

	雙層通風屋頂	冷屋頂	五腳磚屋頂	PS 板隔熱屋頂	薄層型綠屋頂	密集型綠屋頂
日間(7時-17時)	9.5	8.0	13.9	13.9	10.5	9.5
夜間(19時-5時)	6.3	5.8	10.0	8.6	6.1	6.0
全日	18.5	15.9	27.7	26.2	19.5	18.2
相較於五腳磚隔熱屋頂之節能比例	33.1%	42.6%	--	5.2%	29.5%	34.3%

單位：kWh/day

(資料來源：本研究整理)

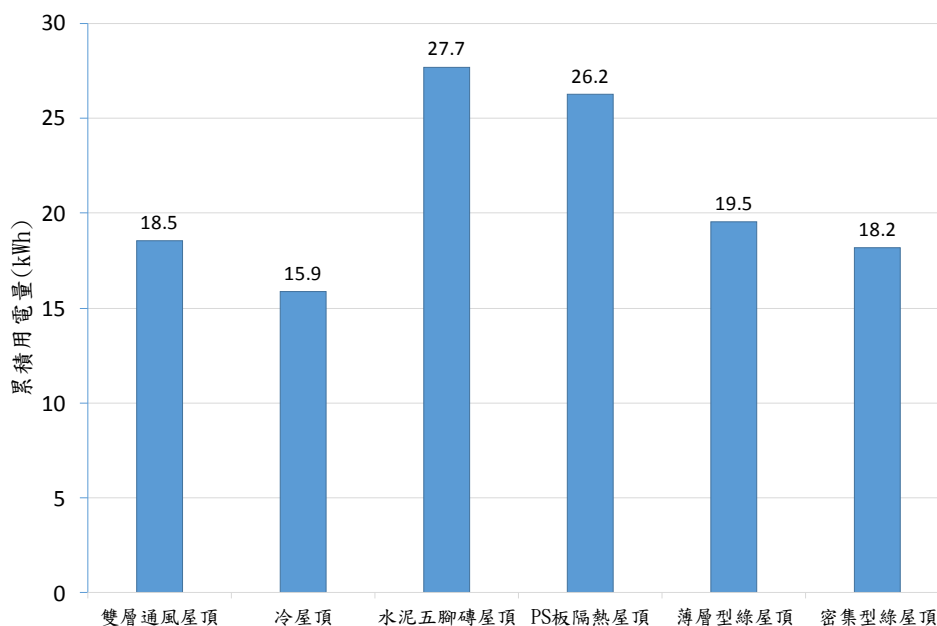


圖 4-5 全日空調平均用電量(09/06-09/30 平均)

(資料來源：本研究整理)

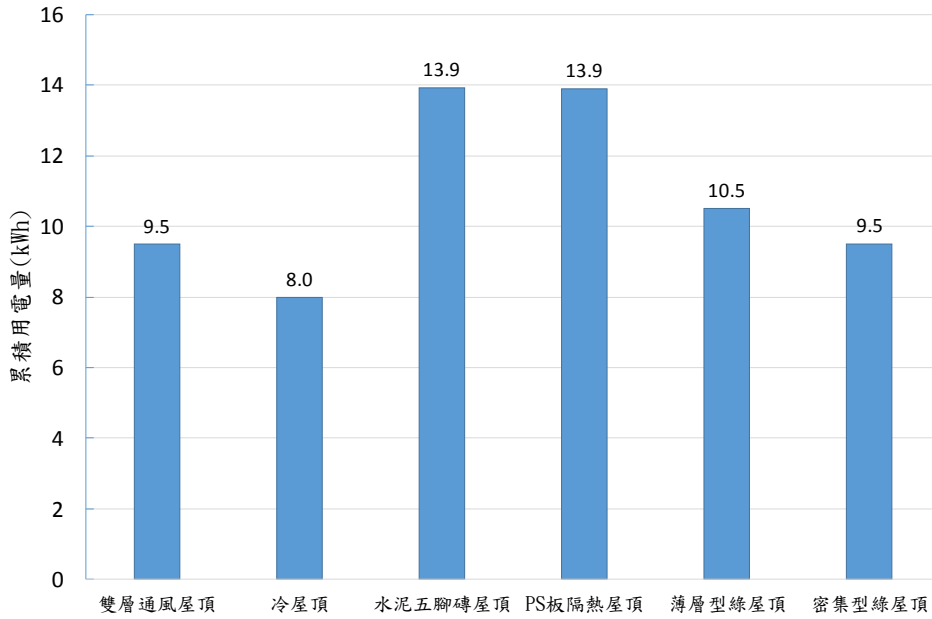


圖 4-6 日間(7:00-17:00)空調平均用電量(09/06-09/30 平均)
(資料來源：本研究整理)

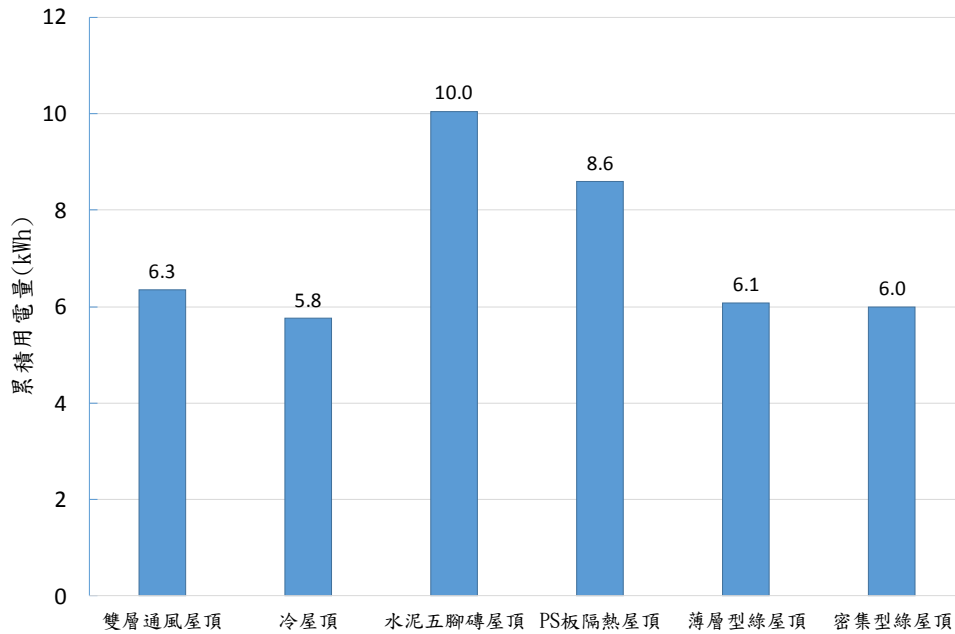


圖 4-7 夜間(19:00-5:00)空調平均用電量(09/06-09/30 平均)
(資料來源：本研究整理)

第五章 屋頂隔熱技術改善建議

綜合以上分析之結果，顯示除了傳統常見之五腳磚隔熱與 PS 隔熱屋頂外，雙層通風屋頂、冷屋頂與綠化屋頂皆有一定之節能改善效益。由於第二章所呈現之屋頂構造乃是為了遷就現場實驗屋改裝而設計之屋頂構造，與實務應用時不盡然相同，因此以下以鋼筋混凝土構造之建築為例，建議實務上可行且合於現行建築技術規則綠建築規範之屋頂構造各層材料範例與 U 值計算表，以供業界參考與採用。

表 5-1 薄層綠化屋頂構造熱傳透率計算表

	構造層	厚度 dx	熱傳導係數 kx	1/kx	熱阻 R=dx/kx	U 值
		(m)	(m.K/W)		[m ² -K/W]	
薄層綠化屋頂	外氣膜	-	23	-	0.04348	0.80
	覆土層	0.18	1.05	0.9524	0.17143	
	不織布	0.01	0.19	5.2632	0.05263	
	蓄排水板(空氣層)	0.09			0.08600	
	阻根橡膠防水毯	0.0015	0.19	5.2632	0.00789	
	水泥砂漿	0.015	1.5	0.6667	0.01000	
	PS 板	0.025	0.04	25.0000	0.62500	
	鋼筋混凝土(RC)	0.15	1.4	0.7143	0.10714	
	水泥砂漿	0.015	1.5	0.6667	0.01000	
	內氣膜	-	7	-	0.14286	

(資料來源：本研究整理)

表 5-2 密集型綠化屋頂構造熱傳透率計算表

	構造層	厚度 dx	熱傳導係數 kx	1/kx	熱阻 R=dx/kx	U 值
		(m)	(m.K/W)		[m ² -K/W]	
密集型綠化屋頂	外氣膜	-	23	-	0.04348	0.62
	覆土層	0.55	1.05	0.9524	0.52381	
	不織布	0.01	0.19	5.2632	0.05263	
	蓄排水板(空氣層)	0.09			0.08600	
	阻根橡膠防水毯	0.0015	0.19	5.2632	0.00789	
	水泥砂漿	0.015	1.5	0.6667	0.01000	
	PS 板	0.025	0.04	25.0000	0.62500	
	鋼筋混凝土(RC)	0.15	1.4	0.7143	0.10714	
	水泥砂漿	0.015	1.5	0.6667	0.01000	
	內氣膜	-	7	-	0.14286	

(資料來源：本研究整理)

表 5-3 雙層通風屋頂構造熱傳透率計算表

構造層	厚度 dx	熱傳導係數		熱阻 R=dx/kx	U 值	
	(m)	kx (m.K/W)	1/kx	[m ² -K/W]	[W/(m ² .K)]	
雙層通風屋頂	外氣膜		23	0.0435	0.04348	0.68
	鍍鋅鋼浪板	0.002	45.01	0.0222	0.00004	
	C 型鋼+對流空氣層	0.2	----		0.46000	
	水泥砂漿	0.015	1.5	0.6667	0.01000	
	PS 板	0.025	0.04	25.0000	0.62500	
	水泥砂漿	0.005	1.5	0.6667	0.00333	
	PU 防水層	0.003	0.05	20.0000	0.06000	
	鋼筋混凝土(RC)	0.15	1.4	0.7143	0.10714	
	水泥砂漿	0.015	1.5	0.6667	0.01000	
	內氣膜		7	0.1429	0.14286	

(資料來源：本研究整理)

表 5-4 冷屋頂構造熱傳透率計算表

構造層	厚度 dx	熱傳導係數 kx		熱阻 R=dx/kx	U 值	
	(m)	(m.K/W)	1/kx	[m ² -K/W]	[W/(m ² .K)]	
冷屋頂	外氣膜		23	0.0435	0.04348	0.73
	白色隔熱漆	0.003	0.068	14.7059	0.04412	
	水泥砂漿	0.015	1.5	0.6667	0.01000	
	PS 板	0.04	0.04	25.0000	1.00000	
	水泥砂漿	0.005	1.5	0.6667	0.00333	
	鋼筋混凝土(RC)	0.15	1.4	0.7143	0.10714	
	水泥砂漿	0.015	1.5	0.6667	0.01000	
	內氣膜		7	0.1429	0.14286	

(資料來源：本研究整理)

第六章 結論與建議

第一節 結論

本計畫為探討相異之屋頂隔熱之熱性能與空調節能效益，以內政部建築研究所建置位於台南歸仁區一系列之全尺度實驗屋，進行於熱季期間之實測。本計畫在八月初完成各式屋頂隔熱構造施工與建置後，實際開始實測之時間為8月13日，此時尚能涵蓋台灣夏季炎熱之季節。本研究獲致之重要結論如下：

1. 雙層通風屋頂雖然透過中間空氣層而在整體頂構造熱傳透率上得以符合法規之規定，然而由於本實驗之樓板構造部分無隔熱材料(如 PS 或 PE 版)，因此在日間測得之屋頂下表面溫度比傳統五腳磚或 PS 版隔熱屋頂來得高。因此建議採用雙層通風屋頂之構造，混凝土樓板仍應設置隔熱層為佳。
2. 實驗結果在有屋頂綠化之二組於日間皆呈現相對低溫，顯示具有良好的隔熱效果，但在夜間由於土壤層與蓄排水版間蓄水導致於日間蓄熱量亦高之故，使得夜間散熱不易而致屋頂下表面溫度較其他組別稍高。
3. 對時滯效應之影響：密集型綠屋頂由於覆土達 40 公分厚，有最佳之時滯效果達 6.3 小時，五腳磚屋頂與薄層綠化屋頂次之亦有 5.2 與 5.1 小時。而雙層通風屋頂與冷屋頂，由於缺乏蓄熱材，因此室內屋頂下表面最高溫度發生時刻僅與最高外氣溫延遲約 2.8 與 3.5 小時。
4. 室內熱舒適之效益：不論是日間或夜間，雙層通風屋頂、冷屋頂、薄層綠化屋頂與密集型綠化屋頂在對室內空氣溫度或平均輻射溫度之控制上，皆較傳統之五腳磚隔熱屋頂與 PS 板隔熱屋頂表現來得優良。尤其在日間以綠屋頂最具改善室內熱舒適效果，然而也由於綠屋頂土壤層擁有較高之蓄熱能力，在夜間反而呈現較高之室內溫度，但都能控制在舒適範圍內。
5. 在空調節能方面：在空調連續運轉下，相較於五腳磚隔熱屋頂，雙層通風屋頂、冷屋頂、PS 版隔熱屋頂、薄層綠化屋頂與密集型綠化屋頂全日分別空調省能約 33.1%、42.6%、5.2%、29.5%與 34.3%，以冷屋頂之效益為最佳。屋頂綠化組研判由於夜間散熱不易之故，使得實際空調耗能量略比冷屋頂來得高。然而，應用冷屋頂技術時尚須考量此類高反射率之屋頂外表面塗層會隨時間因氣候而劣化、灰塵汙染等情形而大幅降低其對日射輻射之反射，因此日後如無法持續進行冷屋頂表面之維護或重新粉刷，日久不見得尚可維持高節能之效益，於引用本研究數據時應予注意。
6. 在推廣綠屋頂時，由於覆土層之荷重，需進一步考量與評估建築結構體之負載是否足夠。此外，就綠建築之精神而言，屋頂綠化施作時應以密集型綠化為主，種植灌木或小喬木以利創造生物之棲地始有生態上之效益，一般薄層綠屋頂則由於栽種植栽之種類則較難有生態上之效益，亦值得注意。

7. 本研究同時提出薄層屋頂綠化、密集型屋頂綠化、冷屋頂與雙層通風屋頂構造之各層建材熱阻計算表以供業界參考選用。所建議提出之構造皆符合現行綠建築規範內有關屋頂隔熱性能規定，能直接應用於實務綠建築設計與檢討上。

第二節 建議

建議一：

推廣宣導屋頂綠化構造：立即可行建議

主辦機關：台灣綠屋頂暨立體綠化協會、財團法人台灣建築中心

協辦機關：內政部建築研究所、台灣建築學會

本實證研究顯示，屋頂綠化有較佳之室內熱舒適改善與空調節能效果。以屋頂綠化而言，薄層屋頂綠化在 15 公分之覆土厚度下即有明顯之日間降溫效益，然而仍需視既有建築之屋頂層結構承载力搭配適合之土壤層厚度，此外值得注意的是，本研究發現屋頂綠化亦同時具較高之蓄熱能力，使的夜間室內之散熱較不易，若應用於具高室內發散熱之建築類型同時又是 24 小時空調運轉之情況時，應考量在夜間時室內發散熱不易透過屋頂壁體逸散之情形。

建議二：

辦理屋頂綠化補助改善之示範案例：立即可行建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：財團法人台灣建築中心

內政部建築研究所過去辦理之「建築節能與綠廳舍改善補助計畫」成效卓著，惟針對屋頂綠化改善之節能效益，過去多引用模擬或推估資料，缺乏直接之實測量化資料作為實證依據。本研究所完成之屋頂綠化空調節能實測，相較於五腳磚隔熱屋頂（U 值約 0.8），顯見屋頂綠化具有相當大之空調節能潛在效益，值得後續納入擴大辦理示範改善。

建議三：

辦理屋頂綠化針對屋頂近表層戶外環境空氣降溫之實測驗證：中長期建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：

本研究以符合法規低限之屋頂構造熱傳透觀點，透過二組實驗屋實測驗證屋頂綠化構造之初步節能效益。然而屋頂綠化對居住環境之影響尚有對都市熱島降溫之貢獻，過去國外許多城市常以屋頂綠化作為減緩都市熱島增溫之手段，然而國內針對各式不同型態之屋頂綠化對近屋頂表層之降溫量化效益則較為缺乏。綠化植栽種類(灌木或草本植物)、葉面密度、覆土厚度、以及屋頂綠化工法上蓄排水版之有無等皆會影響近表層之空氣溫度。實有需要透過不同屋頂綠化型態、種類之實驗組合下進行同步實驗，以定量化與找尋具較佳降溫效益之屋頂綠化組合，俾便未來政府作為降低都市熱島效應技術選用之參考。

附錄一 期初審查會議委員意見回覆

委員	審查委員意見(依發言順序)	廠商回應
陳委員宗鶴	<ol style="list-style-type: none"> 1. 本研究整合台灣常見屋頂隔熱工法及效益，供台灣業界使用，值得肯定。 2. 台灣既有建築數量龐大，研究結果建議考慮業界應用及開發。 3. 於本案5種實驗型態中，薄層綠化建議考量綠化植栽種類以符應用。另雙層通風屋頂採用之彩色鋼板測試條件，如能考慮有進出風口，或有角度屋頂，或顏色、反光性等，對隔熱效果將有不同結果，建請予以考量。 4. 服務建議書部分內容文字請再潤飾，另英文部分請再檢視語法。 	<p>感謝委員建議，本案針對平屋頂進行探討，斜屋頂不在討論之列。實驗之雙層屋頂非為密閉式中空層，具通風功能。建議納入後續研究。</p>
徐委員益梁	<ol style="list-style-type: none"> 1. 服務建議書中第1頁及第23頁之行政管理費用金額不一致，請修正。 2. 建議納入各項實驗工法之單位造價分析。 3. 有關本實驗可能遭遇之困難，除氣候因素外，是否應還有其他因素?請說明其困難及解決方式。 4. 本案要求之5種屋頂隔熱工法進行實驗，請說明其妥適性?有無增加或修正實驗組之必要? 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 感謝委員提醒，已修正。 2. 由於實驗地點位處偏遠，施做之規模亦小，實際之造價恐比實際造價高。 3. 實驗中遭遇之困難可能還有儀器之因素、工期配合等因素，本案擬將視實際遭遇問題，尋找解決對策，期能順利完成計畫。 5. 4.五種隔熱屋頂係招標文件之需求，本團隊需如質如期完成恐無增加之空間，然而本研究會依研究進行與研究分析之必要，進行實驗組小幅修正，以符合所需。
李委員魁鵬	<ol style="list-style-type: none"> 1. 建議本案實驗組採用之U值範圍可以更寬廣，以觀察更低U值(比照國際同氣候區)之效能。 2. 建議後續研究成果，應針對各實驗組詳細計算U值及熱質量效應之相關參數，以利準確比較。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 感謝委員建議。本案實驗屋數量有限，恐無法同時探討多變因，建議納入後續研究。 2. 後續之研究將依實際之屋頂構造方式計算實際之U值。
呂委員文弘	<ol style="list-style-type: none"> 1. 依服務建議書第33頁研究進度所示，項次6期中報告前僅能完成儀器校正及歸零、實驗屋改裝施工，期中審查完成始開始進行實測實驗，進度規劃是否能對應本委託研究進行之目的? 2. 本研究除以全尺度實驗屋進行實驗 	<ol style="list-style-type: none"> 4. 本案應用貴所歸仁性能實驗群基地之實驗屋進行實測，本年度同時有另案研究同時進行。本計畫將與另案協調實驗屋實驗期間，由於節能實驗皆希望在熱季進行以達實驗目的，目前先以另案進行實測，本案期中報告恐無實測

	<p>外，是否考量將實驗規劃之構造條件另以軟體進行耗能模擬，俾比較實測與模擬之差異。</p> <p>3. 簡報第 13、14 頁圖例所示之實驗組構造選定原則為何?另依圖例所示之實驗屋本體之屋頂浪型鋼板空隙是否以何種建材填實，其影響如何評估?</p>	<p>資料，將於期末報告補足呈現。</p> <p>5. 本案將協助所內相關研究案，以電腦模擬進行探討。</p> <p>6. 簡報內所提構造為示意圖，本案將視實際現場情形與研究之需要調整施做之屋頂構造。</p>
<p>陳委員伯勳</p>	<p>1. 今年本所實驗屋預計進行兩項委託研究實驗案，如本研究團隊獲選通過，請協調另一委託研究實驗案，於實驗時程、設備使用等方面互相協調，以利兩案均能順利進行。</p> <p>2. 費用編列方面，應無須租用實驗屋，請予以調整。</p> <p>3. 本研究案如簽約時間在 2 月份，則研究時程無 12 個月，請配合調整服務建議書相關內容。</p>	<p>1. 感謝委員建議，本案會時常與另案協調實驗之期程、儀器設備之使用等事宜，期能如期完成研究。</p> <p>2. 感謝委員提醒，會將經費再以調整。</p> <p>3. 為配合簽約後 11 個月之計畫期程，將調整服務書相關內容為 11 個月。</p>

附錄二 期中審查會議委員意見回覆

委員意見	回覆
<p>電機技師公會(吳永村):</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. P15 最後第二行:「(含 46 公分厚之隔熱材及…)」。=>隔熱材厚度達 46 公分,似不切實際。 2. P23 方程式(2-3)之出處?等號兩邊的單位似不相同。 3. P26 實驗屋雖然東西牆受熱相同,但最南方的實驗屋南面牆將接受較多陽光,如何補償其差異? 4. P27~33 表 2-1~表 2-6,熱傳導係數 k_x 的單位似為 W/mK,而 $1/k_x$ 的單位似為 mK/W,請澄清。 5. P28 第一行「(本案預計覆土 50cm)」,但表 2-2 顯示土層厚度為 0.4m,哪一個對? 6. P31 表 2-4,PE 厚度 0.046m,與其他實驗屋 0.023m 厚不同,是筆誤還是刻意加厚?將來如何評估這項變數的影響? 7. P32、P33 表 2-5、2-6,RC 厚度 0.010m,與其他實驗屋 0.012m 厚不同,是筆誤還是刻意加厚?將來如何評估這項變數的影響? 8. 圖 2-11,本圖似乎誤貼,以致與圖 2-10 相同。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 感謝委員意見,厚度已修正。 2. 係數 0.51 已內含單位之換算。 3. 由於實驗屋內有 PE 隔熱層,經實驗屋歸零實驗後發現差異不大,因此無須補償。 4. 單位經確認無誤。 5. 應為覆土 40 公分。 6. PE 厚度統一皆為 0.023 公尺,原為誤植已修正。 7. 部分構造隨水泥砂漿厚度而調整 RC 厚度,以使各案例水泥總厚度相同。 8. 感謝委員提醒,原為誤植已修正。
<p>周教授鼎金:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 本實驗以貨櫃屋為屋頂面,底層均有 PE 板,因此研究內容是否符合實際大樓之屋頂,請說明。 2. 冷屋頂 U 值計算 0.63,採用 PE 板之厚度為其他屋頂 PE 板厚度之兩倍,其原因為何,請說明。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. PE 板在原實驗屋即已附加,本實驗屋頂構造之總 U 值經反算 RC 厚度後,將與一般屋頂構造 U 值雷同。 2. PE 厚度統一皆為 0.023 公尺,原為誤植已修正。
<p>陳旻儀:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 若以 C/P 值衡量,綠屋頂、雙層及冷屋頂分析,何種為優?俾便推動較為容易。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 屋頂構造將隨使用之材料等級、性能不同,同一構造亦有差異不小成本,因此本研究僅以節能之觀點提出建議,而無成本與效益分析之考量。
<p>張矩墉建築師:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. P8 希臘的通風屋頂與一般屋頂的實測比較段落中,提到在空氣層內襯反射圖層在白天有助於減少熱得,但夜間反而不力節能。在其他的反射塗料應用上是否也有同樣的現象? 2. 節能的成效要看全年的效益,不是只看夏季尖峰,是否在其他季節、冬季仍有實質效益,甚至反效果,要全面評估。第一章第三節的國內外回顧這些談論到的案例,都有一些不是很全面陳述的感覺。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 初步研判係因希臘氣候夜間溫度較低,夜晚室內向外散熱所致,然,本案僅討論鄰外氣側之反射率。 2. 感謝委員建議,實測實驗礙於計畫執行時程,僅能就夏季實驗結果予以討論,其他季節則僅能以電腦模擬輔助說明。 3. 感謝委員建議,本案將斟酌調整章節之順序。 4. 防水層經考慮後已不施做。感謝委

<p>3. 第二章才開始定義介紹各種隔熱手法，但其實於第一章就已經陸續重複提到這些名詞，建議於第一章就先行介紹。</p> <p>4. P27 薄層綠化與 p28 密集型綠化的防水層位置在 RC 樓板之下較不符工程慣例。P31 PS 板上作 2cm 之水泥砂漿，根本壓不住 PS 板的變形起翹。 p32 圖 2-11 與 p31 圖 2-10 相同? p30 鋼浪板及鐵皮厚度請再複核。冷屋頂的隔熱漆面層厚度因其為塗布式，如何確認施作厚度? 其實六種作法的最下緣 PE 板和鐵皮間應存在一個空氣層 $r=0.086$，另外為何不列內外氣膜?</p> <p>5. 隔熱漆是以非熱阻式反射方式，目前是用哪種方式計算計算其 U 值?</p> <p>6. 模擬案中實驗屋 $13.84m^2$，照明只取 58W，與一般辦公用途 $15W/m^2$ 相差頗大，是何原因?</p> <p>7. 綠化無法列入屋頂 U 值的評估，因為它是活的是變動的，尤其如果是要能符合法令規定必須要能夠確保一直永遠有效，變動的部分只能不列入評估。</p>	<p>員建議。鐵皮厚度部分會再予以確認。原則上隔熱漆之節能效果將來自於反射率上，因此塗布均勻與否將較厚度之檢核來得重要。另，內外氣膜將列入計算並呈現於表格中。</p> <p>5. 隔熱漆之反射率隔熱效果無法反應在 U 值上，此乃需要透過實驗以獲知其節能效益，此亦為實驗之目的之一。</p> <p>6. 此乃因現場實驗屋內僅安裝 2 只 T5 燈管，總用電功率為 58W。</p> <p>7. 感謝委員建議。</p>
<p>黃秀莊：</p> <p>1. 今天的研究係以平屋頂研究為主，是否考慮到以雙層樓板為研究。我認為隔熱效果應該最好。</p>	<p>1. 感謝委員建議。然，礙於實驗屋數量限制，雙層樓板並未在本研究中探討。</p>
<p>李有田：</p> <p>1. 實驗綠屋頂作法與實際不同，是否採用正確工法以做合理比較?</p> <p>a. 薄層綠屋頂厚度應在 15 公分覆土以上，種植植物一般為草皮，採用蓄排水板，防水層上直接放蓄排水板，介質直接放不織布上，不用發泡煉石區隔介質保水效率應有 50%，目前設計之介質保水率不足。</p> <p>b. 密集型植栽應至少採用木本灌木，如鵝掌藤、杜鵑等，採用排水板，直接放排水層上，不用發泡煉石介質保水率 $>50\%$，覆土深度應至少 70 公分才能算密集型綠屋頂。</p> <p>c. 根據日本方面資料，隔熱塗料效果及光害皆是顧慮。</p>	<p>1. 感謝委員建議，實際構造將視現場實際情形參考委員之建議修正。至於覆土深度問題，將考量實驗屋頂之荷重能力斟酌辦理。隔熱塗料之反射率所造成光害問題並非本研究討論之列，感謝委員提醒。</p>

附錄三 期末審查會議委員意見回覆

委員意見	回覆
<p>黃建築師秀莊：</p> <ol style="list-style-type: none"> 若採用雙層屋頂加冷屋頂時，其隔熱效果是否更好？並請說明本研究雙層屋頂案例於改善前後之差異性。 請補充本研究有哪些結論可透過政府提供民間參考。 	<ol style="list-style-type: none"> 感謝委員建議，理論上應該會更好，然而礙於實驗屋數量限制，無法進行此類實驗。 本案最後提出屋頂構造大樣熱傳透率之參考，可直接讓業界應用於現今之建築節能法規之檢討上。
<p>李理事長有田：</p> <ol style="list-style-type: none"> 本研究實際現場量測時段僅有夏季約 2 個多月，惟臺灣近年來冬季越來越冷，建議本研就可持續於冬季時段，進行各種屋頂手法對於室內保暖效益之數據量測，可增進本研究之貢獻。 本研究之密集型綠屋頂採用波士頓腎蕨（花草類）並非最佳選擇，若採用木本類植物較為適合，惟隔熱效益量測結果仍與國外其他相關研究成果大致相符。 冷屋頂之隔熱塗料雖可把太陽輻射熱反射約七成以上，惟若在都市建築密集地區，其反射之熱量將會以鄰為壑造成周遭地區熱能蓄積，將會加重都市熱島效應，且反射之太陽光容易造成光害，故不建議應用在都會人口密集地區，較適合應用於空曠之郊區或鄉下等地區。 	<ol style="list-style-type: none"> 感謝委員建議，如無其他實驗之衝突，將持續進行量測。 二屋頂綠化構造採用相同植栽是為了減少因植物種類之差異所造成之影響。在本實驗第二階段，密集型綠化屋頂擬採粗放低維護之綠化，隨自然演替而繁衍出高度較高之植栽，再進行此類議題之探討。 冷屋頂所反射的短波輻射由於是水平面上的反射，被周圍鄰棟較高樓層建築所吸收之比例相對小很多大部分還是反射回大氣。然而，冷屋頂如係應用於相當密集之高層建築街谷內的低樓層建築才有較大量之短波日射輻射被建築吸收變成長波輻射而劣化都市熱島效應。
<p>中華民國冷凍空調技師公會全國聯合會(陳常務理事匯中)：</p> <ol style="list-style-type: none"> 本案實驗場地有 6 組實驗屋，分別由北至南開口部面西排列，每組間距 30 公分，惟最北與最南側之兩座實驗屋皆有一側為有鄰屋，請說明其日照環境對於數據量測比較時是否有造成影響？ 	<ol style="list-style-type: none"> 本案各實驗屋內皆內襯 2.5 公分之隔熱材，且位於南側日射量較鉅之邊間整面外牆亦有以遮蔭網鋪設以盡量與其他各實驗屋之熱工情況一致。
<p>黃技師克修：</p> <ol style="list-style-type: none"> 冷屋頂塗料是否會因外部天候等因素造成其效益衰減？請補充修正。 請說明用電量測之儀器是否有作儀器誤差校正動作？應注意量測誤差對於定量分析時所造成之影響，包括量測儀器、空調設備之 COP 等。 	<ol style="list-style-type: none"> 冷屋頂的確會隨時間而劣化，擬於結論章節補充說明。 測量儀器餘實驗前有經過誤差校正，而本案各實驗組所採用之空調機型、容量大小皆相同，以減少設備本身之誤差。
<p>李教授魁鵬：</p> <ol style="list-style-type: none"> 本研究目前提出冷屋頂之節能效果最好，後續應再進一步檢討釐清。 	<ol style="list-style-type: none"> 擬於結論章節補充說明。 感謝委員建議。 原為誤植，已更正。

<ol style="list-style-type: none"> 2. 建議可進一步將各種屋頂之成本納入，以比較其節能之 CP 值哪種最好。 3. 報告書中之外氣膜有錯字請修正。 	
<p>陳所長瑞鈴：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 請業務單位會後再與研究單位討論研究結論是否妥適，避免造成與本部推動綠建築之相關政策相左。 2. 請說明各組實驗屋採用 U 值齊頭式平等方式來比較，是否符合一般實務情境需求？ 3. 研究結論中冷屋頂節能率高達 40%，遠高於其他類型屋頂，容易造成外界誤解以為僅施作冷屋頂就好，無須採用其他屋頂隔熱改善措施，請再檢討修正。 4. 請說明本研究採用之實驗條件，與國外相關實驗研究案例之異同？ 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 遵照辦理。 2. 各實驗屋頂之 U 值相同是實驗之控制因子，實驗時是以現行法規最低限為參考基礎，設計相應之屋頂構造。倘採相異之 U 值，則各實驗組皆可任意增加或減少其隔熱或蓄熱性能，將難以決定各屋頂構造應如何配置，在缺少參考的前提下，難以比較各屋頂構造之節能原理而難以獲致有效結論。 3. 結論擬將補充實驗狀態之說明。 4. 國外既有之實驗屋實驗多僅針對單一變因進行探討，且實驗條件將隨所欲探討之議題而異。
<p>陳組長伯勳：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 報告書未符本部要求格式，請確實依照規定修正並撰寫成果報告。 2. 第 2 章、第 4 章部分圖、表未註明資料來源，請補充修正。 3. 實驗結果顯示屋頂綠化於夜間散熱不易，請說明其改善建議為何？ 4. 請加強冷屋頂的應用限制說明，例如因耐久性、污染失效等，以避免造成誤導。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 遵照辦理。 2. 已修正。 3. 於中間涼爽季節應可輔以夜間通風，以排除屋頂綠化造成室內夜間散熱較不易之問題。 4. 期末成果報告對於實驗結果之闡釋擬將加註實驗條件說明與實驗限制等，以避免產生結果應用上之誤解。

附錄四 工作會議記錄

內政部建築研究所 105 年度

「屋頂隔熱對策全尺度節能實證之研究」協同研究計畫案

第一次工作會議

日期：2016/07/19 (二) 上午 10：00

地點：內政部建築研究所 13 樓第一會議室

參加人員：黃國倉、陳麒任、周鼎金、王文安、李有田、翁堉騰、許閔涵

內容：

本次工作會議召開之目的為在實驗場址之實驗屋屋頂改裝施工前，再次確認屋頂設計與施工細項，並邀請國內屋頂節能策略研究之專家學者們提供設計建議。

壹、 討論議題：

● 議題 1：實驗內容簡介

1. 研究內容與目標：本研究使用全尺度實驗屋進行六種不同的屋頂隔熱策略實測，包括薄層屋頂綠化、密集型屋頂綠化、雙層通風屋頂、冷屋頂及傳統隔熱版隔熱與傳統五腳磚隔熱屋頂進行室內空調節能與室內熱舒適之效益比對實驗。預期建立各式屋頂隔熱策略之空調節能效果，並希望得知各式屋頂隔熱策略之室內熱舒適改善效益，最後提出合乎法令規範之屋頂隔熱技術改善建議。
2. 國內外文獻回顧：以眾多國內外研究屋頂節能策略之研究論文為參考，國內對於屋頂綠化及雙層通風屋頂有研究實證節能效果；另外，同屬熱溼氣候區的新加坡、印度斯里蘭卡及美國佛羅里達，對於雙層通風屋頂、冷屋頂及屋頂蓄隔熱材等，亦有諸多應用與實證。
3. 實驗場址介紹：本研究使用之全尺度實驗屋位於國立成功大學歸仁校區之內政部性能實驗群基地。
4. 實驗設計：實驗屋總共七棟，其中一個實驗屋作為儀器設備中央監控室，另外六組規模大小、外殼構造性能、面向方位皆一致，為 20 呎貨櫃改裝，長 5.89m、寬 2.35m、高 2.38m 開門於東側，西側全為一大面積玻璃，其餘北向與南向立面皆無開窗。因此，本場址可同時供六組實驗同步進行實測。六座

實驗屋彼此相連並排，且進行屋頂隔熱研究時，會將窗戶玻璃封閉，實驗屋配置如第 2 章第 2 節所示。

● **議題 2：屋頂施工設計**

1. 屋頂綠化設計修正：欲以台北草、沿階草作為綠化植栽，更改土壤深度為薄層型 15cm、密集型 40cm，以及修改構造層配置與更新 U 值計算。
2. 其他屋頂設計：修正構造層與內氣膜及外氣膜，並更新 U 值之計算。

● **議題 3：專家學者建議與問題**

1. 綠屋頂的配置中，建議加設灌溉設施。
2. 植栽種類的選擇，由於沿階草與台北草皆屬於禾本科植物，建議密集型綠屋頂可以選擇鵝掌藤或金露花等木本植物，一平方米應至少 36 株，以 49 株為佳。另外，薄層型也可選擇地毯草。
3. 園藝輕質培養土的保水性能較不佳，建議加入人工介質，以增加保水與排水性能。
4. 希望綠屋頂之施作方法能與業界慣用之施作方法相同，如此獲得之實測資料，於業界之參考價值較高。
5. 若擔心使用木本植物作為密集型綠屋頂植栽，會有根系破壞排水板的問題，建議可使用排水板並於下層加入斷根防水毯。若再加入一層蓄排水板，可以降低澆灌成本。
6. 建議冷屋頂所設置的 PE 隔熱板更改為 0.023cm，較符合實際設計。
7. 在對照組的部分應更接近實際建築設計，建議外牆 U 值建議設計為 3.5，屋頂 U 值設計為 0.8。
8. 建議實驗可以進行春夏秋冬四季。
9. 關於綠屋頂植栽選擇，是否也考慮外來種或當地植物？
10. 雙層通風屋頂之上層可否改為太陽能光電板？
11. 實驗屋之間的時間可否改變？或是最外側的兩個實驗屋是否會與中間之實驗屋的鄰棟遮蔭狀況不同或輻射不對稱？
12. 不同空調使用策略與日間、夜間的溫溼度穩定狀態如何控制？
13. 若遇風災等，該如何防災？例如：綠化植栽保護、雙層屋頂加固。

參考書目

- [1] Akbari, H., R. Levinson and L. Rainer (2005). "Monitoring the energy-use effects of cool roofs on California commercial buildings." *Energy and Buildings* 37(10): 1007-1016.
- [2] Alvarado, J. L., W. Terrell Jr and M. D. Johnson (2009). "Passive cooling systems for cement-based roofs." *Building and Environment* 44(9): 1869-1875.
- [3] Banionis, K., E. Monstvilas, V. Stankevičius, R. Bliūdžius and K. Miškinis (2012). "Impact of heat reflective coatings on heat flows through the ventilated roof with steel coatings." *Journal of Civil Engineering & Management* 18(4): 505-511.
- [4] Crawley, D. B., L. K. Lawrie and F. C. Winkelmann (2001). "EnergyPlus : creating a new generation building energy simulation program." *Energy and Buildings* 33(4): 319-331.
- [5] D'Orazio, M., C. Di Perna and E. Di Giuseppe (2014). "A field study of thermal inertia of roofs and its influence on indoor comfort." *Journal of Building Physics* 38(1): 50-65.
- [6] Dabaieh, M., O. Wanas, M. A. Hegazy and E. Johansson (2015). "Reducing cooling demands in a hot dry climate: A simulation study for non-insulated passive cool roof thermal performance in residential buildings." *Energy and Buildings* 89: 142-152.
- [7] Dimoudi, A., A. Androutsopoulos and S. Lykoudis (2006). "Summer performance of a ventilated roof component." *Energy and Buildings* 38(6): 610-617.
- [8] DOE (2009). *EnergyPlus Manual v.3.1*, United States Department of Energy.
- [9] Gagliano, A., F. Patania, F. Nocera, A. Ferlito and A. Galesi (2012). "Thermal performance of ventilated roofs during summer period." *Energy and Buildings* 49: 611-618.
- [10] Gao, Y., J. Xu, S. Yang, X. Tang, Q. Zhou, J. Ge, T. Xu and R. Levinson (2014). "Cool roofs in China: Policy review, building simulations, and proof-of-concept experiments." *Energy Policy* 74: 190-214.
- [11] Halwatura, R. U. and M. T. R. Jayasinghe (2008). "Thermal performance of insulated roof slabs in tropical climates." *Energy and Buildings* 40(7): 1153-1160.
- [12] Karachaliou, P., M. Santamouris and H. Pangalou (2016). "Experimental and numerical analysis of the energy performance of a large scale intensive green roof system installed on an office building in Athens." *Energy and Buildings* 114: 256-264.
- [13] Kolokotroni, M., B. L. Gowreesunker and R. Giridharan (2013). "Cool roof technology in London: An experimental and modelling study." *Energy and Buildings* 67: 658-667.

- [14] Liang, H.-H. and K.-T. Huang (2011). "Study on rooftop outdoor thermal environment and slab insulation performance of grass planted roof." *International Journal of the Physical Sciences* 6(1): 65-73.
- [15] Lin, B. S., C. C. Yu, A. T. Su and Y. J. Lin (2013). "Impact of climatic conditions on the thermal effectiveness of an extensive green roof." *Building and Environment* 67: 26-33.
- [16] Paolini, R., M. Zinzi, T. Poli, E. Carnielo and A. G. Mainini (2014). "Effect of ageing on solar spectral reflectance of roofing membranes: Natural exposure in Roma and Milano and the impact on the energy needs of commercial buildings." *Energy and Buildings* 84: 333-343.
- [17] Parker, D. S. and S. F. Barkaszi Jr (1997). "Roof solar reflectance and cooling energy use: field research results from Florida." *Energy and Buildings* 25(2): 105-115.
- [18] Ramamurthy, P., T. Sun, K. Rule and E. Bou-Zeid (2015). "The joint influence of albedo and insulation on roof performance: A modeling study." *Energy and Buildings* 102: 317-327.
- [19] Sailor, D. J. (2008). "A green roof model for building energy simulation programs." *Energy and Buildings* 40(8): 1466-1478.
- [20] Simpson, J. R. and E. G. McPherson (1997). "The effects of roof albedo modification on cooling loads of scale model residences in Tucson, Arizona." *Energy and Buildings* 25(2): 127-137.
- [21] Susanti, L., H. Homma and H. Matsumoto (2011). "A naturally ventilated cavity roof as potential benefits for improving thermal environment and cooling load of a factory building." *Energy and Buildings* 43(1): 211-218.
- [22] Theodosiou, T. G. (2003). "Summer period analysis of the performance of a planted roof as a passive cooling technique." *Energy and Buildings* 35(9): 909-917.
- [23] Toguyeni, D. Y. K., O. Coulibaly, A. Ouedraogo, J. Kouliadiati, Y. Dutil and D. Rouse (2012). "Study of the influence of roof insulation involving local materials on cooling loads of houses built of clay and straw." *Energy and Buildings* 50: 74-80.
- [24] Tong, S. S., H. Li, K. T. Zingre, M. P. Wan, V. W. C. Chang, S. K. Wong, W. B. T. Toh and I. Y. L. Lee (2014). "Thermal performance of concrete-based roofs in tropical climate." *Energy and Buildings* 76: 392-401.
- [25] Virk, G., A. Jansz, A. Mavrogianni, A. Mylona, J. Stocker and M. Davies (2014). "The effectiveness of retrofitted green and cool roofs at reducing overheating in a naturally ventilated office in London: Direct and indirect effects in current and future climates." *Indoor and Built Environment* 23(3): 504-520.

- [26] Virk, G., A. Jansz, A. Mavrogianni, A. Mylona, J. Stocker and M. Davies (2015). "Microclimatic effects of green and cool roofs in London and their impacts on energy use for a typical office building." *Energy and Buildings* 88: 214-228.
- [27] Wong, N. H., Y. Chen, C. L. Ong and A. Sia (2003). "Investigation of thermal benefits of rooftop garden in the tropical environment." *Building and Environment* 38(2): 261-270.
- [28] Wong, N. H., D. K. W. Cheong, H. Yan, J. Soh, C. L. Ong and A. Sia (2003). "The effects of rooftop garden on energy consumption of a commercial building in Singapore." *Energy and Buildings* 35(4): 353-364.
- [29] Yew, M. C., N. H. Ramli Sulong, W. T. Chong, S. C. Poh, B. C. Ang and K. H. Tan (2013). "Integration of thermal insulation coating and moving-air-cavity in a cool roof system for attic temperature reduction." *Energy Conversion and Management* 75: 241-248.
- [30] Zingre, K. T., M. P. Wan, S. K. Wong, W. B. T. Toh and I. Y. L. Lee (2015). "Modelling of cool roof performance for double-skin roofs in tropical climate." *Energy* 82: 813-826.
- [31] 王松永, 陳昶源 and 林振榮 (2000). "木質構造建築複合壁體及屋頂之隔熱效應." *林產工業* 19(2): 195-207.
- [32] 何明錦 and 黃國倉 (2013). 臺灣建築能源模擬解析用逐時標準氣象資料TMY3之建置與研究. 台北, 內政部建築研究所.
- [33] 余文元 (2013). 室內植栽牆對室內溫熱環境及空調節能效益之研究. 碩士, 國立臺灣大學碩士論文.
- [34] 周鼎金 and 邱繼哲 (2007). "建築物雙層通風屋頂構造隔熱性能之研究." *建築學報* 59: 79-92.
- [35] 林怡君 (2012). 永續型容器薄層屋頂綠化之研究, 成功大學博士論文.
- [36] 洪照坤 (2012). "隔熱塗料應用於建築物節能改善之研究." 國立彰化師範大學碩士論文.
- [37] 張采依 (2012). "薄層屋頂綠化植物選擇與應用之研究." 國立臺灣大學碩士論文.
- [38] 游立偉 (2004). "建築物雙層通風屋頂之隔熱性能研究—以平屋頂構造為例." 國立臺北科技大學碩士論文.
- [39] 黃國倉 (2010). 植草屋頂熱性能與對綠建築日常節能指標計算修正之探討, 國家科學委員會期末報告.
- [40] 楊冠雄, 李訓谷, 蘇煌文 and 戴奇甫 (2011). "冷屋頂設計於我國氣候條件下之建築節能應用分析與驗證.", 內政部建築研究所.
- [41] 楊國祥 (2013). "屋頂隔熱磚隔熱效能之研究.", 中國科技大學碩士論文.
- [42] 葉仲哲 (2014). "屋頂板雙層組合之隔熱效能研究.", 國立高雄第一科技大學碩士論文.
- [43] 廖志中 and 王松永 (2002). "Thermal Insulation of Interior Wood-based Composite Wall in the Reinforced Concrete House." *林產工業* 21(3): 167-179.
- [44] 蘇煌文 (2012). 冷屋頂於建築物之節能設計應用分析, 國立中山大學碩士論文.

屋頂隔熱對策全尺度節能實證之研究

出版機關：內政部建築研究所

電話：(02) 89127890

地址：新北市新店區北新路3段200號13樓

網址：<http://www.abri.gov.tw>

編者：黃國倉、黃瑞隆、曾毅振、翁堉騰

出版年月：105年12月

版次：第1版

ISBN：978-986-05-0928-1（平裝）