

台灣第一座 零碳綠建築

■ 林憲德

以拯救地球的「諾亞方舟」為旗幟，
綠色魔法學校確定可以達成節能**65%**的世界頂級水準，
這大樓將成為台灣綠色建築教育訓練的示範重鎮和
地球環保的教育基地。

諾亞方舟啓航

台灣環保界注目的焦點，號稱世界第一座「亞熱帶綠建築教育中心」的「綠色魔法學校」，也是台灣第一座「零碳建築」，2009年已順利取得台灣「鑽石級綠建築候選證書」的認證，未來預計取得美國綠建築協會「白金級綠建築」的認證，目前已乘風破浪，順利啓航。它是台達電子文教基金會鄭崇華董事長捐贈新臺幣1億元、成大研究發展基金會出資6千萬元，同時募集台灣二十多家企業捐贈最尖端綠色科技所共同打造的奇蹟，已於2011年初落成於成功大學力行校區。

這大樓是地上3層、地下1層，樓板面積4,800平方米，內設一間300人國際會議廳、6間中小型會議室和辦公室，未來將由成大研究發展基金會和部分規劃設計學院的辦公室進駐其中。大樓內部也會設置一間「亞熱帶綠建築博物館」，儼然是一個充滿趣味的建築教育基地。2009年底探索（Discovery）頻道追蹤本工程3個月，並拍攝紀錄片，2010年開始在全球各頻道播出，已引起國際媒體的關注。



成功大學綠色魔法學校的外形

以拯救地球的「諾亞方舟」為旗幟，由成功大學林憲德教授和石昭永建築師設計的「綠色魔法學校」，史無前例地動員了成功大學3位教授，帶領12位博、碩士生為多項建築設計效益進行科學實驗研究。它不使用昂貴的高科技，而以「適當技術」、「本土科技」、「四倍數效益」為號召，當時預計要達到節能40%、節水50%、耐久100年的高難度目標。

到了2010年初，經過兩年的努力，成功大學團隊已經確定可以達成節能65%的世界頂級水準，更進而達到「零碳綠建築」的最高理想。這項輝煌的環保成果，將以監測儀器和看板展示於大樓中，節能減碳的效益也會由實際用電、用水資料來印證。

把「綠色魔法學校」喻為「諾亞方舟」，是呼應環保名著《世界又熱、又平、又擠》作者佛裡

曼所提：「我們需要一百萬個諾亞，一百萬艘方舟，才能拯救這時代的全部物種。」因此成功大學設計團隊把大量「船」的印象貫徹於造形中。

為了符合方舟的印象，把「綠色魔法學校」的外觀打造成一艘就像星際大戰中的飛船，飛船屋頂上有一面葉狀活動式太陽光電板，像是飛船的舵。屋頂的通風塔做成像是附有煙囪的輪機指揮艙，所有欄杆、扶手、陽台也做成有艦艇設施的感覺。甚至調節太陽光電板角度的控制器，也特地以舊船貨店買來的一個日本商船的大輪盤做成，控制輪盤的平台也以鋼架做成一艘「鐵達尼號」的樣子，好讓情侶爭相來這裡拍照。

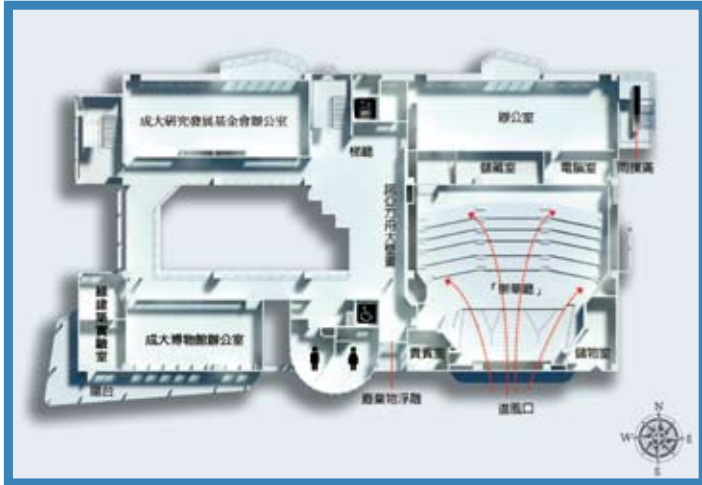
這飛船帶有一片很壯觀像「拿破崙軍帽」的屋面，屋面出挑很深，形成深邃的遮陽，可擋掉大部分進入室內的直接日射，因而減少許多空調耗電。這「拿破崙軍帽」屋頂做成階梯狀花園，花園



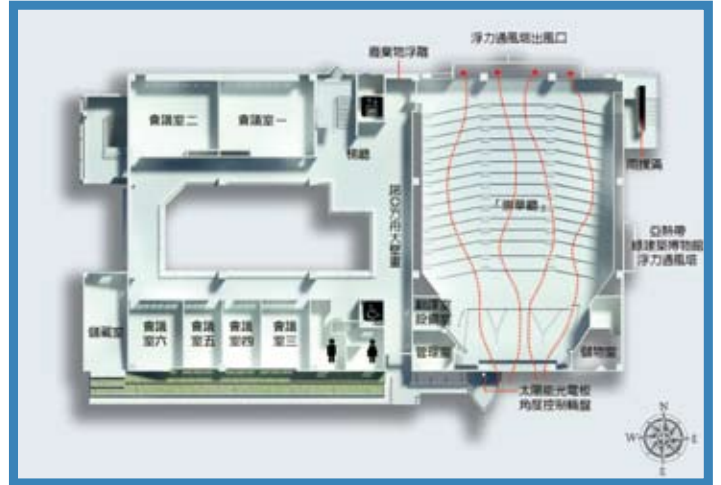
綠色魔法學校的正面透視圖



綠色魔法學校一樓的平面圖



綠色魔法學校二樓的平面圖



綠色魔法學校三樓的平面圖

中種滿由台灣各地特選的景天科耐旱植物，強烈顯現出自然生態和現代科技的對比。希望這是一艘經濟實惠、可拯救全人類的「諾亞方舟」，而不是電影〈2012〉中，需要10億歐元的船票才能搭上的貴族式方舟。

野生花園

「綠色魔法學校」最引人注目的焦點，莫過於鋪在屋頂上那一大片五彩繽紛的「野生花園」。所謂「野生花園」，就是一種節水、低維護、不施肥、無農藥、模仿自然演替的粗放花園。現在市面上流行的屋頂花園太過於人工化，不是草花草坪，就是薄層綠化，多是一些又耗水又有農藥污染的景觀，根本違反植物生態原則。

成功大學團隊藉由兩年的戶外實驗，由十數種耐旱植物中，篩選出9種耐瘠、耐風、耐鹽、耐汙染的多年生本土草灌木，建構這「野生花園」。這些草灌木包括多肉植物類的彩虹竹蕉、錫蘭葉下珠、彩虹棒蘭、黃邊短葉虎尾蘭、迷你麒麟花，以



「野生花園」一景

及非多肉型植物的黃金露花、矮仙丹、翠竹草、馬櫻丹。在色彩計畫上，特選出紫、黃、綠、紅、粉紅等五顏六色的草灌木，編織出一大片井然有序的彩色大衣。

減緩都市熱島效應、節約空調耗能，是屋頂綠化最被期待的功能之一。

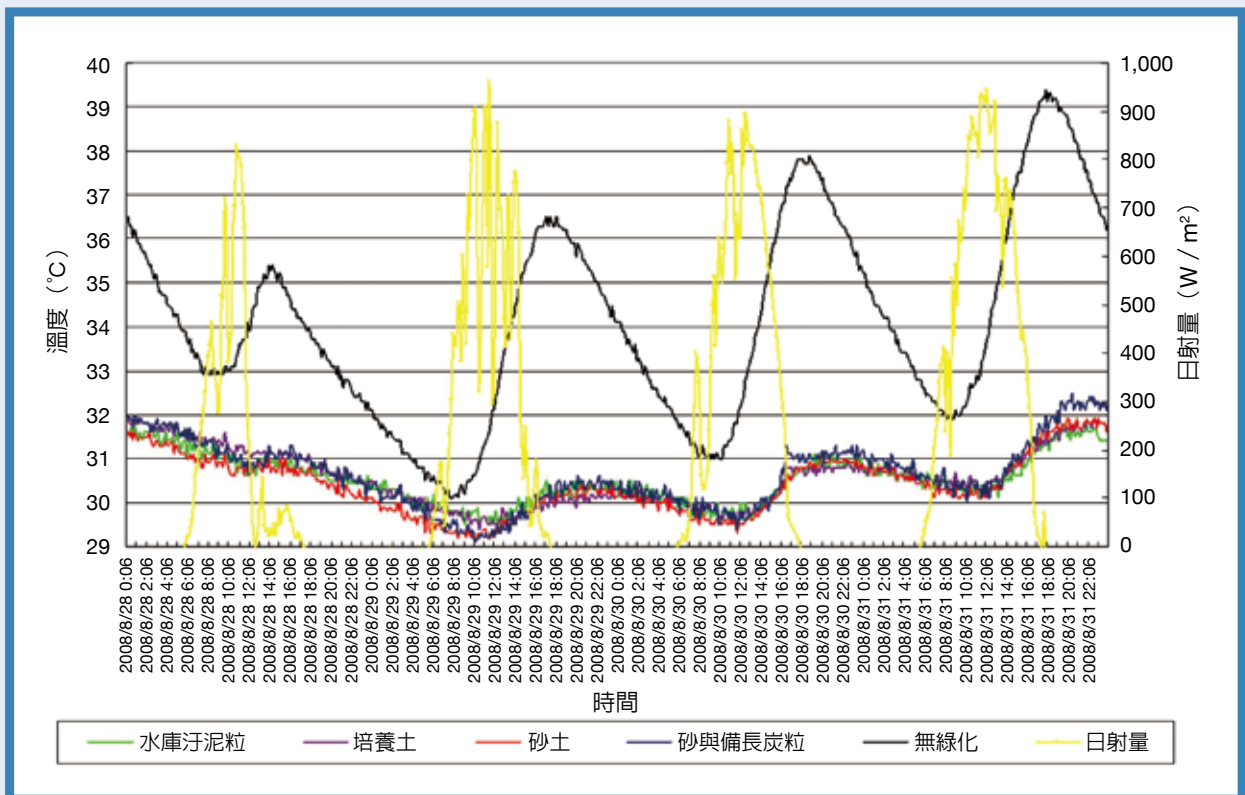
減緩都市熱島效應、節約空調耗能，當然是屋頂綠化最被期待的功能之一，熱流實驗也證實了這項功能。兩年來對9種植栽在屋頂樓板上的熱流解析發現，不論何種植栽或土壤，在盛夏之日，當室外氣溫變動在攝氏7~10度的條件下，這屋頂花園可讓頂層樓板表面溫度變動維持在攝氏3度以內，證實對於室內降溫有優越的效果。

在南台灣，強烈太陽照射下的屋頂表面可達到攝氏70度以上，經過這屋頂花園冷卻後，室內頂層樓板的表面溫度可維持在攝氏32度以下。也就是說，頂層空間全年幾乎可以不用空調，能減少莫大的空調耗電量。

百分之百使用綠色建材

「綠色魔法學校」最大的賣點，在於獲得許多環保企業捐贈最尖端的綠色科技，尤其是採用了百分百的綠色建材，成為不可思議的建築魔法表演。首先，利用中國鋼鐵公司捐贈的高爐水泥技術，一下子減少了30%的水泥用量和10%的CO₂排放量，同時增加混凝土最終強度40%。接著，採用阿公店水庫的汙泥所燒製成的陶粒，做為隔間牆的骨材以及屋頂花園的土壤，不但減輕結構負荷、延長水庫的壽命，同時因為是多孔性材質，可為花園保水、保溼，達到良好的節水功能。

在這裡更可發現一些不可思議的綠色建



屋頂花園的熱流實驗證實隔熱節能的效果

材，例如，採用具環保標章、完全不使用鹵性塑膠的電線，燃燒時不產生戴奧辛、鹵酸氣體等有害物質；採用由回收尼龍所做的環保地毯，以及由回收寶特瓶抽紗製成的窗簾；採用的「克儼樂健康塗料」，有防黴抗菌、防汙自潔、調溼的功能。

此外，採用的環安水性木器漆，不含甲醛和重金屬，擁有台灣的健康綠建材標章的認證；採用「抗菌健康環保鋼板」做為空調系統的風管，可長久有效抑制細菌生長繁殖，保證最健康的空氣品質；把大量的「備長炭」埋入國際會議廳的雙層牆面中，可大量吸附臭氣和有害氣體，並消毒殺菌，使室內空氣永保清新。

假如能盡量採用本土建材、產品，可以減少很多碳足跡。根據調查，在台灣本土生產的水泥、玻璃、木材等建材，平均花費52.7、74.1、122.9公里的公路運輸距離就能送到使用者手中，各相當於排放了35.6 kg / ton、0.05 kg / kg、41.5 kg / m³的CO₂。這些建材假如改用國外進口的建材，運輸過程的CO₂排放量將增加數百倍。「綠色魔法學校」除了極少數產品外，從玻璃、油漆到光電板，都採用本土建材，這也是一種減少碳足跡的環境教育。

空調與吊扇並用系統

「綠色魔法學校」強調順應自然的設計，除了最基本的自然通風開窗設計之外，特別引入長期被遺忘的「吊扇」設計，可讓辦公室的全年空調時間減少9成以上。「吊扇」是既便宜又有效的消暑工具，過去兩百年來由寒帶芝加哥到熱帶印尼的辦公建築，完全以它來支撐夏日的工作效率，如今卻幾乎被現代人遺忘，十分可惜。

在這棟建築內，設定外氣溫大於攝氏31度時才能使用空調，在攝氏27~31度時只能使用吊扇通風，在攝氏27度以下則打開窗戶通風即可。根據筆者研究室對一般家庭使用空調的行為調查，發現台灣人在氣溫低於攝氏31度時大都不會開空調，唯有

當氣溫大於攝氏32度時才會陸續啟動家裡的冷氣機，這與公家機關動不動就開空調是不同的。

許多人擔心這違反了冷凍空調界舒適度在攝氏24~26度的原則，可能引來反彈。但經Givoni、林子平、黃瑞隆等教授的研究，確認亞熱帶國家的人在攝氏32度的通風條件下還是感覺舒適的。後來也證實這堅持是對的，因為問卷調查指出，這棟大樓所有人員都認為這種通風、吊扇、空調並用的系統是健康又舒適的。這當然也證明了市面上全年恆溫恆溼控制的空調方式，是既浪費又不健康、不環保的。



綠色魔法學校辦公區空調與風扇通風並用的設計

只是裝一些吊扇，這花小錢而立大功的節能祕訣，不但可讓所有上班者一點也不以為苦，甚至可享受更健康、更愉悅的氣流變化和充滿負離子的環境。實驗解析也證實，它的全年空調時間可降至1個月，空調節能可高達76%。這「吊扇空調並用設計」的前提，必須同時設計細長和雙向通風的建築平面，這是數千年來建築設計的常識，只是被空調設備和現代建築造形所遺忘而已。

「綠色魔法學校」最引以為豪的，就是以自然通風設計的大型國際會議廳，祕訣來自一種古老的「灶窯通風系統」。

灶窯通風系統

「綠色魔法學校」最引以為豪的，就是以自然通風設計的大型國際會議廳—崇華廳，祕訣來自一種古老的「灶窯通風系統」。以前家家戶戶都有的「灶窯」，由一個磚泥塑成的保溫灶台和一根長長的排煙煙囪所構成，氧氣由底部入薪口進入，廢氣由頂部煙囪快速排出，是一種燃燒效率很好的烹飪設備。

為了讓「崇華廳」能利用「灶窯」的原理，在冬天達到完全自然通風、不用空調的境界，在主席台後面挖了一排開口以引進涼風，同時在最高客席的後牆上設計了一個壁爐式的大煙囪，創造出一個由低向高的流場，以有效排出廢氣。為了加強浮力，在煙囪南面開了一個透明玻璃大窗，窗內裝了一個黑色烤漆鋁板，以吸收由玻璃引進的太陽輻射熱。如此便形成有如「灶窯」燃燒的層流風場，由下而上橫掃3百人的觀眾席，讓「崇華廳」在冬天可完全不靠電力，就形成舒適的通風環境。

即使在冬天，想要讓一個3百人用的大會議廳不需使用空調的設計，在亞熱帶氣候是史無前例的，因為大空間不採用機械通風幾乎不能讓人存活。為此，成功大學工程科學系周榮華教授指導一位博士生進行流體力學模擬和風洞實驗，把「崇華廳」設計成一個超級節能的現代化「灶窯通風系統」。經過計算流體力學模擬（CFD模擬），在草圖階段就預知，在台灣11至3月的冬天，即使不開空調，「崇華廳」內部的風速可維持在每秒0.1~0.6公尺的舒適範圍，新鮮外氣的換氣次數可達5至8次的健康水準。

另外，為了讓氣流通過觀眾席不會受到太大阻力，「崇華廳」不採用笨重而密不通風的

一般觀眾席座椅，特別選用了最輕巧、風阻抗最小的金屬座椅，只在接觸人體的最小的面積上縫有最薄的柔軟靠墊，讓座椅四周留出很多間隙，以容許最大的氣流通過。

為了確認CFD計算無誤，也建立了一個1:20的縮尺模型，在周榮華教授的指導下，以煙流實驗證明通風氣流可均勻地到達每一客席，保證了一個十分完美的通風環境。另外，博士生蘇梓靜也進行動態空調耗能模擬分析，確認當外氣溫低於攝氏28度時，就可執行這不需空調的「灶窯通風系統」，室內最高溫度可維持在攝氏30.5度。這在風速每秒0.5公尺下可保證是舒適範圍，同時全年可節省27%的空調耗電量。

以經濟投資效益而言，這通風塔和閘門控制設備一共花了20萬元，回收年限約為3年，但節能效益幾乎領先現有大部分空調節能設備系統。

「崇華廳」的音響性能則由成功大學建築系展開最佳餘響時間的模擬評估，決定室內每一片建材的吸音率，確保最清晰、溫潤的演講效果。為了防止噪音隨外氣入口引入室內而干擾演講，在進風風室四周釘上玻璃棉，並在入口處裝設幾排消音板以解決這問題。同時，特別加強空調箱、空調出入風口、通風塔、門扇的隔音、吸音設計，讓「崇華廳」的隔音效能夠確實達到高水準的境界。

這套「灶窯通風系統」在採取自然通風時，新鮮外氣由一片森林引入，可帶入充分的氧氣和芬多精；同時在入風口處鋪上一層「備長炭」，提供了吸溼、除臭、殺菌和淨化空氣的功能。這自然通風系統不但可提供多變化的風速，氣流和物體的磨擦也會產生大量負離

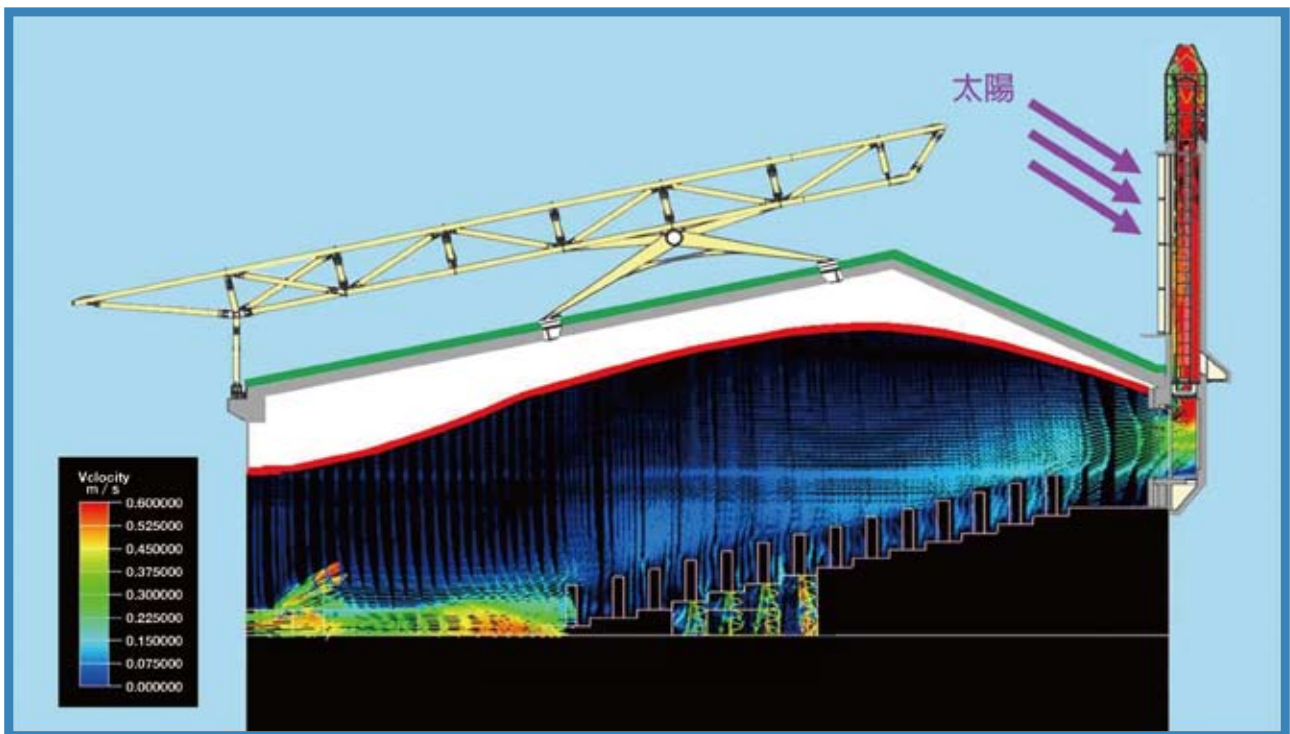
子，因而可帶來愉悅無比的通風環境。在4至10月的溫熱期間，「灶窯通風系統」以閘門控制改成一般密閉空調方式，以高效率主機、變頻空調來節能。

節能效果

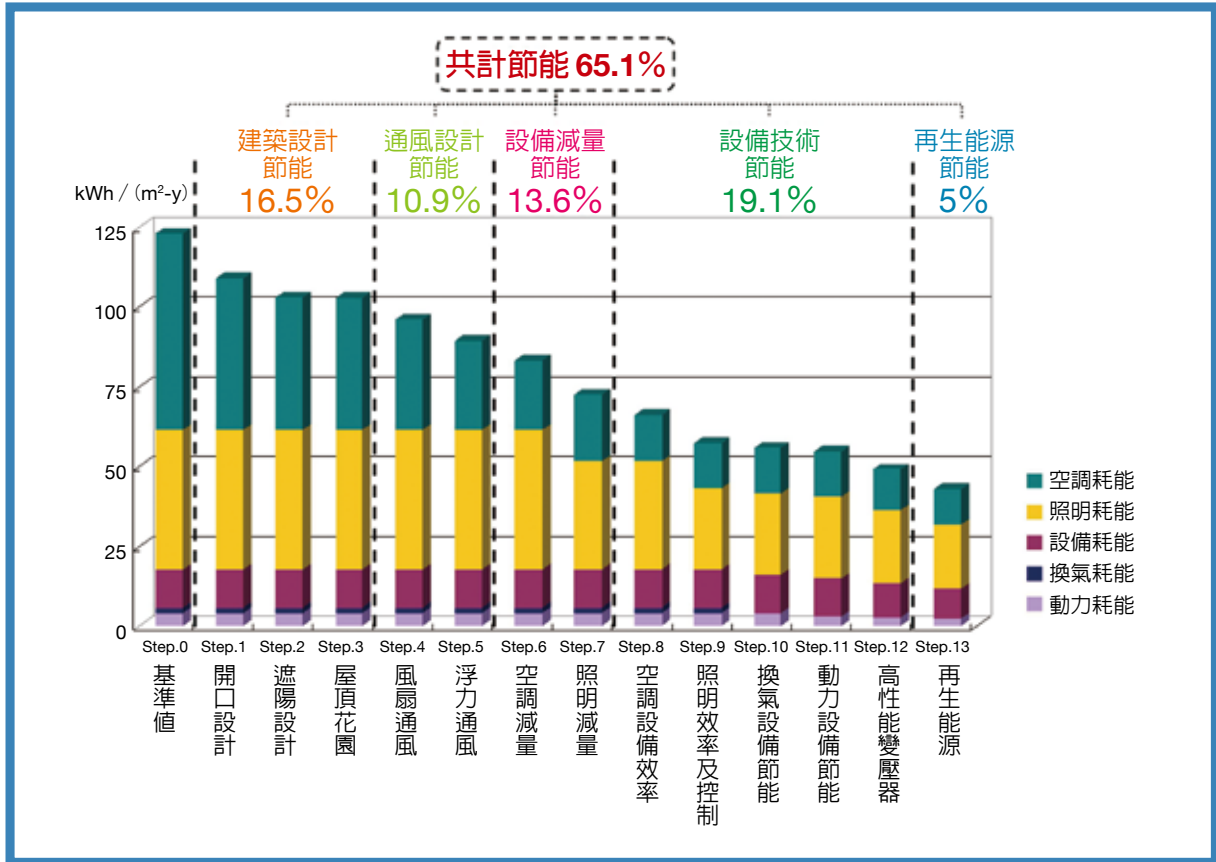
如今，「綠色魔法學校」已確信能達成節能65%的目標。也就是說，一般3層樓辦公建築每平方米樓板面積每年平均耗電125度，「綠色魔法學校」則能達到只耗電43度的水準。筆者研究室曾以美國能源部的動態程式，對於這建築採用的13種綠建築節能對策，做了最嚴謹的耗能解析評估。

把這13種節能技術分為3部分：設計節能、設備節能、再生能源。第一部分是不花錢或花少錢，以建築和設備的專業來達成的節能設計，包括由開口、遮陽、屋頂隔熱等建築外觀的節能設計，由平面、通風塔、吊扇等自然通風的節能設計，以及由空調、照明等設備的減量設計，這部分總共可節能41.0%；第二部分是以高效率變頻空調、全熱交換器、高效率燈具、照明控制、高效率受電變壓器等方面的設備硬體節能，這部分總共可節能19.1%；第三部分是太陽能與風力的「再生能源」部分，可節能5.0%。

由這些節能成效可發現一種拯救地球的原



綠色魔法學校灶窯通風系統的计算流體力學模擬



綠色魔法學校13種節能技術的效益分析

理，那就是越簡單越自然的技術，越能拯救地球。例如，第一部分的節能技術，只是動動腦筋、畫畫設計圖、買些吊扇，甚至是把大機器換成小機器而已，幾乎不需動用貴重的設備，節能效益卻很高，累積節能效益高達41.0%，簡直是一本萬利的投資。

另外，第二部分的空調、照明、變壓器的設備節能技術，是一些不複雜但有很高效率的

節能技術，硬體投資雖然貴了一點，但總節能效益高達19.1%，回收年限約為3年，也是值得推薦的綠建築技術。唯一較不划算的投資就是第三部分的太陽能技術，它只節能5.0%，卻花不少錢。雖然設計了隨季節而調整角度的光電板，使用了國內最高效率的單晶光電板，以及全世界最高效率的台達電子直交流轉換器（效率97%以上），但回收年限還是高達20年以上。

「綠色魔法學校」利用「碳中和」的祕訣，
 也就是以造林增加光合作用，來吸收建築物排放的二氧化碳，
 而達到「零碳建築」的目標。

■ 許多人常誤認綠色建築是高科技的、昂貴的，但「綠色魔法學校」卻強調「經濟實惠」、「適當技術」、「本土科技」的口號。

邁向零碳建築

然而，節能65%尚未滿足我們，因為我們想追求人類最高理想的「零碳建築」。所謂「零碳建築」，就是完全不使用地球能源，完全不排放二氧化碳的建築物。「綠色魔法學校」利用「碳中和」的祕訣，也就是以造林增加光合作用，來吸收建築物排放的二氧化碳，而達到「零碳建築」的目標。

上述節能65%的努力，已讓「綠色魔法學校」每年的總用電量縮小到113.2萬度（包括地上2,632m²與地下室1,197m²的用電），假如能設法增加4.7公頃的造林，以每公頃人造林每年吸收15.0公噸二氧化碳來計算，剛好可以吸收總耗電量所排放的二氧化碳排放量71.3公噸，就可達成「零碳」的理想。為此，成功大學特別撥出「綠色魔法學校」旁0.7公頃的綠地，以及成大安南校區內4.0公頃的邊緣荒地，做為造林的永久綠地。

造林措施既便宜又簡單，它只是改變原有花錢的人工綠地，改成粗放雜生、自然演替的野生森林而已。我們計劃在面臨海邊的成功大學安南校區4.0公頃的邊緣荒地，遍插耐鹼、耐旱、耐風的小苗，並經短期的簡單澆灌養護，再放任成為自然雜生林地。

為了快速培育多樣化植物群落，並減少引進不適當物種，只利用貧瘠的土壤來栽種小苗木，也就是既不用引入肥沃的表土，也不用施肥，不必移植大喬木，如此可減少大量建設費用。在演化期間，適當地間伐密植的樹林，並偶爾予以除草，最後期待成為自然生長演替的穩定植生林相，管理維護費遠低於一般田園風光的公園。從此，台灣就能擁有一座「零碳綠建築」的招牌。

許多人常誤認綠色建築是高科技的、昂貴的，但「綠色魔法學校」卻強調「經濟實惠」、「適當技術」、「本土科技」的口號。在這「綠色魔法學校」中，許多專家建議採用歐美最流行的雙層帷幕窗（double skin，一種中間有通風與遮陽效果的雙層窗），或電致變色玻璃（利用電致變色材料的調旋光性能以反射太陽輻射），來展現「綠色魔法學校」的高科技夢想。但筆者堅持使用便宜的技術，絕不接受這種先讓陽光曬在玻璃上，再花錢把熱量排出去的做法，我們要的是釜底抽薪、源頭治理的智慧。

我們只用了最本土、最普通、最無污染的膠合清玻璃，價格只相當於雙層帷幕窗或電致變色玻璃的數十分之一而已，但加上外遮陽設計之後，節能效果卻有過之而無不及。有些外商爭相來找，希望能捐給「綠色魔法學校」一些高科技的玻璃薄膜，以展示對空調的節能效益。但我們都婉謝說：「我們的玻璃已設計在陰影下，完全沒有直達輻射熱，不必再讓您破費了。」誰說綠建築一定更貴？

為了地球環保教育，台灣第一座「零碳建築」的「綠色魔法學校」所投下的建築科學實驗研究，例如音響實驗、計算流體力學模擬、風洞實驗、耐旱植物實驗等，已為台灣建築科技史寫下歷史新頁。目前，不但成功大學信心滿滿，連媒體界也引頸而盼，期待這艘「諾亞方舟」能順利帶動拯救地球行動的熱潮。

林憲德

成功大學建築系