

臺灣第一座 零碳綠建築—— 成功大學 綠色魔法學校

The First Zero Carbon
Green Building in Taiwan

The NCKU Magic School
of Green Technology

建築系教授 林憲德

綠色魔法學校外觀





一、「諾亞方舟」啟航

臺灣環保界最注目的焦點，號稱世界第一座「亞熱帶綠建築教育中心」的「綠色魔法學校」，2011年1月正式落成於成功大學力行校區。它是臺達電子文教基金會董事長鄭崇華捐贈新臺幣一億元，成大研究基金會出資六千萬元，同時募集臺灣二十多所企業捐贈最尖端綠色科技所共同打造的奇蹟，此大樓為地上三層、地下一層，樓板面積4800平方米，內設一間300人國際會議廳、六間中小會議室及行政研究辦公室，由成大研究發展基金會、成大能源研究中心、規劃設計學院進駐其中，內部設有一間「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。

設計者林憲德教授把「綠色魔法學校」譽為「諾亞方舟」，是呼應環保名著《世界又熱、又平、又擠》作者佛理曼所提：「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」，因此把大量「船」的印象貫徹於此造型中。為了方舟的印象，「綠色魔法學校」的外觀被打造成一艘星際大戰的飛船，飛船屋頂上有一面葉狀活動式太陽光伏，像是此飛船的舵。屋頂的通風塔被做成像是附有煙囪的輪機指揮艙，所有欄杆、扶手、陽臺也被做成艦艇的感覺。甚至調節太陽能光電版角度的控制器，特地以舊船貨店買來的一個日本商船的大輪盤做成，控制輪盤的平臺也以鋼架做成一艘「神鬼奇航」海盜船的樣子，讓參觀者爭相來此拍照。

這飛船帶有一片像「拿破崙軍帽」的屋面，很是壯觀。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，因而可減少許多空調耗電。這「拿破崙軍帽」屋頂被做成階梯狀花園，花園上種滿由臺灣各地特選的景天科耐旱植物，強烈顯現出自然生態與現代科技的對比。我們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》中需要十億歐元的船票，才能搭上的貴族式方舟。



葉片狀的太陽能光電板，像是「綠色魔法學校」的飛船船舵

「綠色魔法學校」從設計起即屢創佳績，2009年獲得Discovery頻道對設計施工的全程報導；2011年3月在「世界屋頂綠化大會」獲頒「世界立體綠化零碳建築傑出設計獎」；2012年被收錄進美國《世界最綠的建築（*The World's Greenest Building*）》書中，成為代表亞洲的10個案例之一。

此大樓於2011年已同時取得臺灣EEWH系統「鑽石級綠建築標章」與美國LEED系統「白金級綠建築標章」之認證，是全世界唯一獲得臺美雙方最高綠建築認證的作品。美國的LEED系統較強調綠色科技與綠色採購，臺灣的EEWH系統較強調設備減量與自然設計，兩者迥然不同的綠建築評估工具，能同時通過雙方最嚴苛的評鑑，是「綠色魔法學校」最傲人的成就。

「綠色魔法學校」在「節能」、「節水」與「創新設計」三方面，均取得LEED滿分的評價。它採用了世界最高效率的直流變頻離心冰水主機與變頻變冷媒空調，同時也引入變風量、變水量、全熱交換器等設計，是取得「節能」滿分評估的原因，而採用省水器材、雨中水利用、人工濕地則是取得「節水」最高評估的關鍵，加上它設有浮力通風煙囪設計、綠建築博物館、教育導

覽解說等設施，使之成為「創新設計」最高奪標的武器。

另一方面，「綠色魔法學校」在臺灣EEWH系統的評估上，則在九大指標均獲得頂尖的評估，它節能65%、節水50%、綠建材使用率100%，已達到史無前例的綠建築水準。尤其強調經濟實用的「四倍數技術」，盡量採用本土技術、恰到好處的設備投資，其造價包含捐贈費用每坪才8.7萬元，僅為一般市面行情之造價，是「平價綠建築」的最佳寫照，也是臺灣推動綠建築平民化運動的里程碑示範。

二、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

「綠色魔法學校」屋頂平面圖



- | | |
|-------------------|-------------|
| 1.香格里拉航空母艦探照燈 | 15.原有金龜樹 |
| 2.中庭浮力通風塔 | 16.孫運璿紀念碑 |
| 3.屋頂花園景觀台 | 17.噴水景觀雕塑 |
| 4.諾亞花園 | 18.主要入口 |
| 5.廁所管道間暨通風塔 | 19.力行校區新校門 |
| 6.參觀走道 | 20.生態池 |
| 7.紙飛機涼亭 | 21.木棧道 |
| 8.水塔 | 22.亂石濃縮自然 |
| 9.小型風力發電塔 | 23.人工溼地 |
| 10.崇華廳浮力通風塔 | 24.地下室採光通風井 |
| 11.瓢蟲 | 25.雨撲滿 |
| 12.太陽能光電板 | |
| 13.太陽能光電板角度控制輪盤 | |
| 14.亞熱帶綠建築博物館浮力通風塔 | |

入長期被遺忘的「吊扇」設計，這樣就可讓辦公室的全年空調時間減少九成以上。「吊扇」是既便宜又是有效的消暑工具，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，但如今卻被現代人完全遺忘，十分可惜。

我們設定外氣溫大於30°C時才能使用空調，在27~30°C時只能使用吊扇通風，在27°C以下則打開窗戶通風即可。根據筆者研究室對一般家庭開空調的行為調查，發現臺灣人在氣溫低於30°C時跟本不會開空調，唯有當氣溫大於31°C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。今年此大樓尚放任其自由使用空調，還未嚴格執行此溫控計畫，不過根據現場實測證明：此大樓已經比成大其他大樓空調啟動晚一個月，預計全年空調節能達四分之一以上，同時所有人員均認為這

種通風、吊扇、空調並用系統是健康又舒適的。

事實上，地球上大部分城市在夏季超出30°C真正需要空調的時間並非很長，只要善用這種「空調與吊扇並用系統」，地球上大部分的辦公建築物約只需要兩三個月的冷房空調即可。只是裝一些吊扇，這花小錢而立大功的「四倍數」魔法，不但可讓所有上班者一點也不以為苦，甚至可享受更健康、更愉悅的氣流變化與充滿負離子的環境。這「吊扇空調並用設計」的前提，必須同時設計細長與雙向通風的建築平面，這是數千年來建築設計的常識，只是被空調設備與現代建築造型所遺忘而已。

三、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」，其秘訣來自一種古老的「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臺，與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，因此我們在主席臺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之流場，以有效排出廢氣。為了加強浮力，在此煙囪南面開了一個透明玻璃大窗，煙囪完全噴漆成黑色，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，橫掃三百人的觀眾席，讓「崇華廳」在冬天可完全不靠電力，而達到舒適的通風環境。

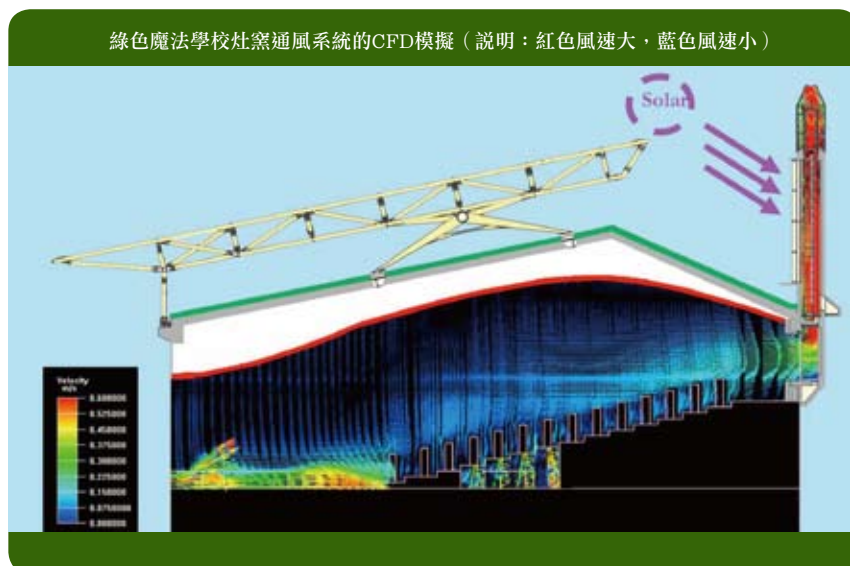
即使在冬天，想要讓一個三百人用的大會議廳達到不使用空調的設計，在亞熱帶氣候是史無前例的，因為大空間不採用機械通風幾乎不能讓人存活。為此，成大工科系周榮華教授指導一位博士生簡君翰進行CFD模擬與風洞實

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CFD模擬，我們在草圖階段就預知：在臺灣的冬天十一月至三月，即使不開空調，「崇華廳」內部的風速可維持於0.1~0.6m/s的舒適範圍，新鮮外氣的換氣次數可達五至八次的最健康水準。由於氣候變熱、室內人數增多時會增加煙囪效應的熱流動力，同時也會增強室內風速與通風量，正符合通風衛生上的需求。

「崇華廳」風場的不均勻與擾流是最大挑戰，我們現在主席臺下設計風道分流，並把煙囪進風做成附有三個大風口的壁爐，以便平均誘導層流，並避免局部強風。另外，為了讓氣流通過觀眾席不會受到太大阻力，「崇華廳」不採用笨重而封閉的一般觀眾座椅，我特別選用了最輕巧、風阻抗最小的金屬座椅，只在與接觸人體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，我們同時建立了一個1:20的縮尺模型，在

周榮華教授指導下，以煙流實驗確認了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，博士生蘇梓靜也採用了DOE程式進行動態空調耗能模擬分析，確認了：當外氣溫低於28°C以下時，即可執行此不空調的「灶窯通風系統」，其室內最高溫度可



維持於 30.5°C ，這在風速 0.5m/s 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，此通風塔與閘門控制設備一共花了二十萬元，其回收年限約為三年，其節能效益幾乎領先現有大部分空調節能設備系統。

此「灶窯通風系統」在採自然通風時，新鮮外氣由一片森林引入，可帶入充分的氧氣與芬多精，我們同時在入風口處鋪上一層「備長碳」，提供了吸濕、除臭、殺菌與淨化空氣之功能。此自然通風系統不但可提供多變化的風速，其氣流與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。在四至十月的溫熱期間，此「灶窯通風系統」以閘門控制改成一般密閉空調方式，其節能另外以高效率主機、變頻空調來處理。此空調的新鮮外氣量特別要求必須高於一般水準，其外氣的耗能則以全熱交換器回收。

四、節能世界第一

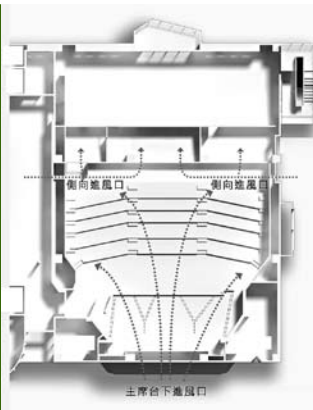
「綠色魔法學校」在模擬階段，已確信能達成節能65%的目標，亦即在一般三層樓辦公建築每平方米樓版面積平均耗電 $125\text{度}/(\text{m}^2\cdot\text{年})$ ，達到 $43.7\text{度}/(\text{m}^2\cdot\text{年})$ 之水準，同時今年前半的用電監測已證明實際可能會超越此水準，這在亞熱帶的建築物基本耗能量就很小之情況下，這幾乎是全世界最節能的建築。以國際相同建築類型之耗電水準而言，英國、美國、香港、新加坡、中國辦公大樓的EUI約404、390、304、217、 $111.2\text{ kWh}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ ，可見「綠色魔法學校」達成 $\text{EUI}=43\text{ kWh}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 確實是世界第一的水準。況且我們並沒增加預算，也沒有依賴太多昂貴的設備，簡直完成了

一項不可能之任務。

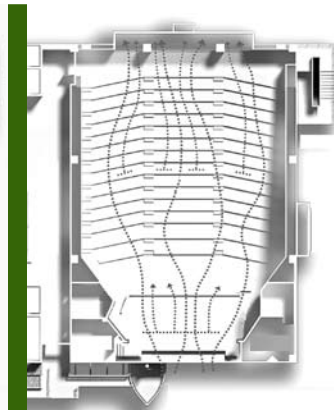
筆者研究室以美國能源部的動態程式DOE，對於此建築採用的13種綠建築節能對策進行最嚴謹的耗能解析評估。我們刻意把這13種節能技術分為三部分來看，那就是（1）設計節能、（2）設備節能、（3）再生能源。第一部分是「不花錢、或花少錢」，以建築與設備的專業來達成的節能設計，包括由開口、遮陽、屋頂隔熱等建築外觀的節能設計，由平面、通風塔、吊扇等自然通風的節能設計，以及由空調、照明等設備的減量設計，這部分總共可達節能41.0%；第二部分是「以高效率變頻空調、全熱交換器、高效率燈具、照明控制、高效率受電變壓器等方面的設備硬體節能」，這部分總共可達節能19.1%，第三部分是「以太陽能與風力的「再生能源」部分，可達節能5.0%。

由這些節能成效可發現一種拯救地球的原理，那就是越簡單越自然的技術越能拯救地球的原理。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，幾乎不動用貴重的設備，但節能效益卻很高，其累積節能效益高達

「崇華廳」的通風路徑示意圖



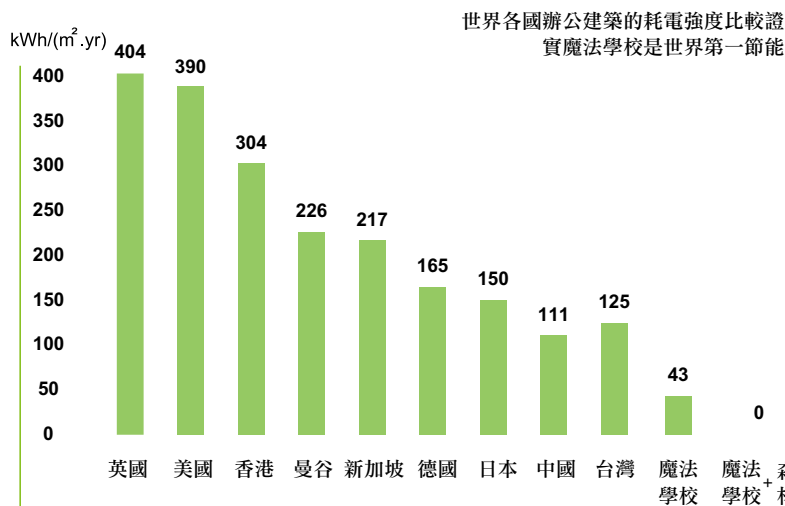
2樓通風路徑



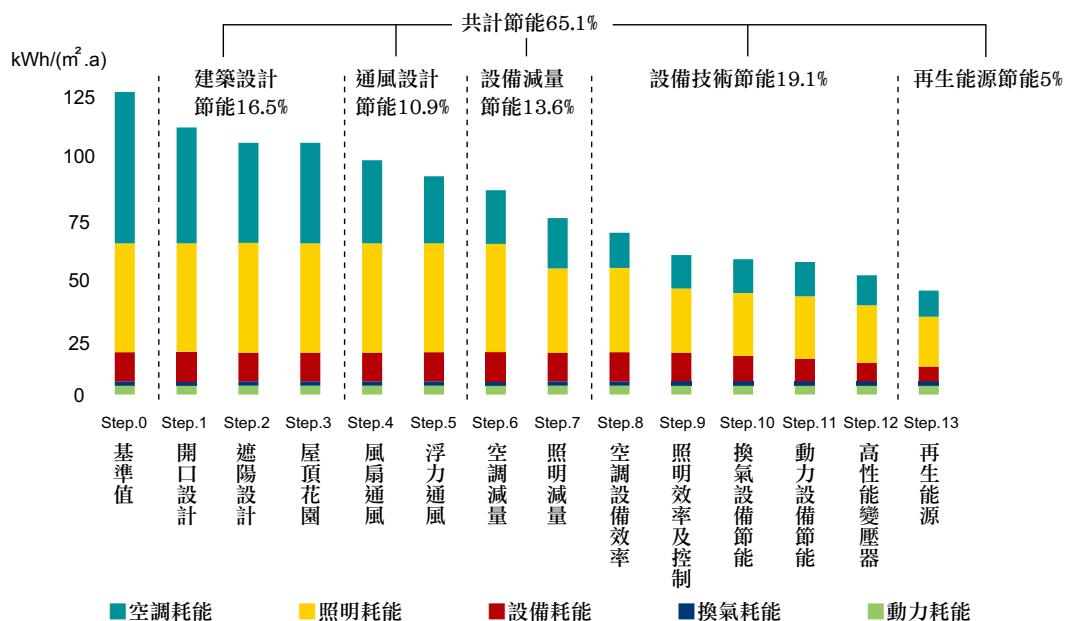
3樓通風路徑

41.0%，簡直是一本萬利的投資。另外，第二部份的空調、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，其硬體投資雖然貴了一點，但其總節能效益高達19.1%，回收年限約為三年，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

分的太陽能與風力發電技術，它只節能5.0%，但卻花不少錢。我們雖然設計了隨季節而調整太陽角度的光電版，使用了國內最高效率的單晶光電版，以及全世界最高效率的直交流轉換器（效率95%以上），但回收年限還是高達20年以上。



中庭的側牆自然採光與夜間陶瓷複金屬燈照明，採用天花板擴散反射方式，光線柔美、氣氛優美。



主編的話

校長的話

大事記

合力寫校史

觀點

發現成大

夢想成大

榕園記事

五、小結：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」的秘訣，亦即以造林增加光合作用來吸附建築物排放二氧化碳來達到「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11.3萬度（包括地上2632m²與地下室1197m²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，其光合作用剛好可以吸附其總耗電量所排放的二氧化碳排放量71.3公噸，即可達成「零碳」的理想。為此，成功大學已經撥出「綠色魔法學校」旁0.2公頃的綠地，以及成大安南校區內4.5公頃的邊緣荒地，即將展開造林工作，希望能順利達成「零碳建築」的理想。

