



國立臺灣大學工學院土木工程學系

碩士論文

Department of Civil Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Master's Thesis

教學型大樓生命週期功能單元探討

Exploration of the Functional Unit

of the Lifecycle of Educational Buildings

丁嘉靖

Chia-Ching Ting

指導教授：詹瀅潔 博士

Advisor: Ying-Chieh Chan

中華民國 113 年 7 月

July. 2024



誌謝

在面對新的問題與任務時，我的視野與格局只停留在趕快解決、趕快找出答案，導致常常會忽略一些重要的資訊，無法看到一件事情的根本問題，在某些瑣碎的資訊裡打轉，無法突破自己思維上的迷思。加上可能是基於我的指導老師詹瀩潔副教授的敬畏之心，常常老師問我問題時，在表達上面我都會沒有自信的回答，十分感謝詹老師的包容，即便知道可能有些事情我做的不夠理想，還是願意讓我嘗試與參與，沒有詹老師的指導、給我機會嘗試與試錯，我無法改變我做事情的態度與思維，從一位只想著解決問題的人，變成更注重在釐清事情、過程的嚴謹、梳理脈絡和連結邏輯，盡心在我能掌握的事情與過程中下功夫，即便問題最後沒有被解決，做一位啟發者，讓更多人一起參與，去創造機會跟平台讓更多人去探討，非常感恩詹老師一路上給予的建議與專業指導。特別感謝正在就讀國立台北科技大學土木工程系博士班的陳煜文學長，每當我研究遇到瓶頸時，都很有耐心的跟我一起解決與探討，還有台大土木系營建管理組的老師們以及口試委員紀乃文老師不吝提供多元觀點，讓我在撰寫與修改論文時，擁有各方想法與幫助。另外，特別感謝台大土木系營管組兼任助理教授林培元老師與耕薪建設黃張維董事長，除了跟我分享土木建築上的專業，在我碩士生涯教會我透過跑步與公益，培養良好的體態與身心靈的平衡，用自己所能與人分享善良與愛，讓這個世界更美好。謝謝台大的同學與學長姐們以及業界前輩們，在我求學的過程給予過我的指導與協助，你們都是我成長過程很好的養分與學習對象。最後，我想分享一本啟發我很深的書《我可能錯了-森林智者的最後一堂人生課》中影響我很深的一句話：「我可能是錯的。」，來勉勵進入下一個階段的自己，相信只要保持謙卑的不斷學習、看待所發生的一切，未來就能獲得更多可能性。

丁嘉靖 2024.08.06



中文摘要

近年來由於全球暖化議題，國際標準組織 (ISO) 提出生命週期評估 (Life-cycle assessment, LCA) 評估產品環境因素和影響的相關依據，由於建築產業是高度複雜的且代表著重大的社會責任和資源投資，使得建築業有別於其他工業化產業，對於標準量化生命週期具有相當大的挑戰。

在 LCA 中比較兩個或多個不同的產品系統時，功能單元的定義和評估邊界的選擇困難，導致建築業內實施的功能單元 (Functional unit, FU) 有顯著差異。

本研究透過不同教學大樓碳排放結果分析，找出可能適用的教學型大樓功能單元，及設計相關問卷探討大眾對於教學型大樓功能單元的需求，整合探討與分析教學型大樓 LCA 中適合使用的功能單元狀態，提供教學型大樓的功能單元最佳依據，提出教學型大樓所有 LCA 的功能單元的潛力。

結果顯示用基礎功能單元比較去描述一棟教學型建築物的碳排放量，是無法描述以及看出建築物提供的服務質量，教學大樓的功能單元定義很難被量化，但要適度的量化才能確保比較的基準。

關鍵字：建築生命週期、功能單元、教學型大樓

Abstract



In recent years, due to the issue of global warming, the International Organization for Standardization (ISO) has proposed life-cycle assessment (LCA) as a basis for evaluating the environmental factors and impacts of products. The construction industry, being highly complex and representing significant social responsibility and resource investment, faces considerable challenges in standardizing lifecycle quantification compared to other industrial sectors.

In Life Cycle Assessment (LCA), comparing two or more different product systems can be challenging when defining the functional unit and selecting the assessment boundaries. This challenge often leads to significant variations in the implementation of functional units (FU) within the construction industry. The objective of this study is to identify potentially applicable functional units for educational buildings by analyzing carbon emissions from three educational buildings. Additionally, the study aims to design questionnaires to investigate user preferences for the functional units of educational buildings. By integrating and analyzing appropriate functional units in the LCA of educational buildings, this study aims to establish an optimal foundation for functional units and highlight the potential of LCAs for educational buildings.

The results indicate that using basic functional units to describe the carbon emissions of an educational building does not effectively represent the quality of services provided by the building. The definition of functional units for educational buildings is challenging to quantify, but it must be appropriately quantified to ensure a basis for comparison.

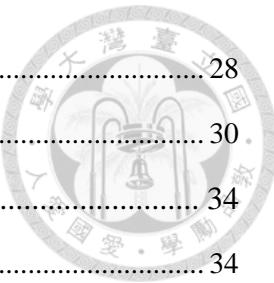
Keywords: Building Lifecycle, Functional Unit, Educational Buildings



目次



誌謝	ii
中文摘要	ii
Abstract.....	iii
目次	v
圖次	vii
表次	viii
第 1 章 緒論	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 研究動機.....	1
1.3 研究目的.....	2
第 2 章 文獻回顧	4
2.1 建築業生命週期評估	4
2.2 文獻中常被使用之建築功能單元.....	5
2.3 建築業功能單元的狀態	6
2.4 教學型大樓功能回顧.....	7
2.4.1 定義特殊功能單元的困難.....	7
2.5 碳排放計算方法	8
第 3 章 研究方法	12
3.1 研究架構.....	12
3.2 資料收集與處理	14
3.2.1 評估對象.....	14
3.2.2 功能等效.....	18
3.2.3 系統邊界	18
3.2.4 建築模型	22
3.3 碳排計算	26



3.4 功能單元選擇	28
3.5 問卷設計	30
第 4 章 研究結果	34
4.1 案例分析	34
4.1.1 空間配置與碳排放之間的影響	36
4.1.2 空間配置與用電量之間的影響	37
4.2 問卷分析	43
4.3 整合探討與分析	45
第 5 章 討論	48
5.1 現代趨勢的演化	48
5.2 不同蘊含碳計算方法對於結果可能存在差異	50
第 6 章 結論	53
6.1 研究結論	53
6.2 研究範圍與限制	54
參考文獻	56

圖次

圖 2-1 EN 15978 第 5 條中定義建築物生命週期評估流程與步驟	5
圖 3-1 研究架構	13
圖 3-2 建材碳排係數邊界[44].....	19
圖 3-3 BIM 模型計算蘊含碳排的研究步驟與過程	27
圖 4-1 三棟教學型大樓 BIM 模型	34
圖 4-2 教學型大樓戶外露臺空間 BIM 模型示意圖	45
圖 4-3 博雅教學館與綜合教學館挑高空間 BIM 模型示意圖	46





表次

表 2-1 各國使用的碳排放計算方式，改繪製自[42].....	9
表 3-1 三棟教學型大樓基本資料	14
表 3-2 三棟教學型大樓空間配置	15
表 3-3 本研究所評估三棟教學型大樓的建築物部分	17
表 3-4 本研究建材碳排係數邊界與其選擇原因	19
表 3-5 本研究所提取進行碳排計算的結構元件與材料	20
表 3-6 材料排放係數邊界碳排係數選取	20
表 3-7 本研究假設台電 50 年後碳排係數參數表.....	21
表 3-8 BIM 技術公制標準表	23
表 3-9 模型構件命名表	23
表 3-10 BIM 建築建模導則	24
表 3-11 BIM 結構建模導則	25
表 3-12 本研究建築使用人數的假設方法	29
表 3-13 使用者心得問卷	31
表 4-1 三棟教學型大樓蘊含碳排、使用碳排與總碳排進行基礎功能單元比較	34
表 4-2 新生教學大樓室內使用空間面積占比	36
表 4-3 2022 年 2023 年綜合教學館與新生教學館每個月的平均的用電情形.....	37
表 4-4 博雅教學館與綜合教學館挑高空間使用情形.....	39
表 4-5 三棟教學型大樓冷氣使用面積說明與使用碳結果分析	40
表 4-6 使用者問卷調查後的結果.....	43
表 5-1 三棟教學大樓碳排放與功能單元比較結果倍數差異	49
表 5-2 建研所主結構回歸公式[44].....	50
表 5-3 主結構碳排密度計算參數以及各教學大樓計算參數結果	50



表 5-4 BIM 模型進行元素提取所計算的主結構蘊含碳排放量與建研所上部主結構
回歸公式結果比較

51



第1章 緒論

1.1 研究背景

近年來隨著人們對氣候變遷的日益關注，歐盟對於建築物全生命週期碳排放，通過引入和修訂一些法規和政策，歐盟分類法(The European Union Taxonomy)、碳邊界調整機制(Carbon Border Adjustment Mechanism)等多項法規和政策的制定，其中修訂內容也強調了減少歐盟建築物全生命週期碳排放的重點。因此在工程相關產業特別加強關注建築整體生命週期中的碳排放管理，這涉及的量化範圍包含各種流程的碳足跡及可減少碳排放機會之生命週期評估。生命週期評估(Life cycle assessment, LCA)是一種用於評估產品或系統從原料提取到處置整個生命週期對環境影響的方法[1]，功能單元(Functional unit, FU)定義了分析或比較的單元，對於相同的產品系統，不同的功能單元可能會導致不同的結果[2][3]，定義適當的功能單元可能具有挑戰性，特別是在比較具有不同功能或性能特徵的產品或系統時[4]。

1.2 研究動機

全球範圍內尚未就建築物 LCA 中應使用的功能單元達成一致[5]。建築產業是個多樣化的產業，根據不同工程需求功能可能有很大差異，例如建築物、道路、橋樑或基礎設施。每項工程都有不同的功能，功能單元定義的選擇會使結果產生偏差[6]。國外建築類型碳足跡基數據庫基準，如歐盟 Zenodo 開放科學的資料倉儲庫[7]以及美國碳領導力論壇[8]都是用樓地板面積為功能單元的基準，多數建築類型為教育、辦公大樓以及住宅，還是有許多類型的建築只有少數的樣本資料，不同功能的建築大樓使用同樣的功能單元比較，會使環境影響結果產生偏差[9]。教學型建築不僅可以透過減少自身的碳足跡目標，還可以透過教育與研究對



政策產生影響[10]。透過在教學建築型大樓的設計規劃、營運管理中優先考慮永續性和碳管理，學校能在減少碳排放方面發揮至關重要的影響力[11]。傳統教學型建築在設計時考慮了以下因素[12]:

1. 確定教育基礎設施的投資優先順序，並透過計畫和方案組織其應用
2. 作為實施教育的工具和社會經濟發展計劃
3. 提供合適的物理手段標準化、通用化，實踐教育變數源於教育規劃
4. 設計教育設施中聲音的使用和範圍

而近年來空間設計與配置、空間利用率與房間佔用和使用率頻率以及物理環境舒適度也成為教學型大樓重要的討論議題，空間利用率將影響物理環境的指標與學生活動與其表現性[13]，不論在照明[14]、隔音[15]、日光與熱舒適性[16]將影響學生學習品質，都必須在設計教學型建築時將其納入考慮。

1.3 研究目的

根據上述研究背景與動機，本研究嘗試將建築物基礎功能單元與教學型大樓功能做一個全面性的探討，希望提供具參考價值之資料以利後續功能單元相關研究，提供設計者在進行教學型大樓設計時所需功能與合理的功能單元選擇，促進當前我國在教學型大樓碳管理的成效。故本研究目的歸納如下：

1. 透過分析不同教學型大樓的碳排放情況，以及調查使用者對於教學型大樓的功能使用心得，找出不同教學型建築生命週期適用的功能單元（Functional unit definition）比較基準。
2. 分析不同類型案例在設計及後續計算時的影響，推斷影響教學型大樓碳排放以及功能單元選擇的潛在因素。

3. 提出更多可能適用的教學型建築功能定義單元，提供日後設計者進行適用的功能參考。





第2章 文獻回顧

2.1 建築業生命週期評估

全球表面溫度的持續上升，將超過《巴黎協定》設定的 2°C 目標，為了實現《巴黎協定》設立的目標，除非在 2050 年前將碳排放量降低至零。二氧化碳 2022 年建築運作和施工的排放量創下新高，佔全球二氧化碳排放總量的 37%[17]，這是氣候變化的主要原因，由於排放來自建築物運營和材料生產，因此在建築行業的低碳材料與低碳建築將對於減少建築業碳排放擁有重要的影響。

自 2006 年以來，LCA 已通過 ISO 14040 和 ISO 14044 在國際上標準化，成為一種全球使用的材料、產品、建築服務和整體建築的環境評估工具。歐盟委員會通過 CEN 技術委員會（CEN / TC 350）制定了 EN15804 和 EN15978 標準，以促進建築環境影響的透明溝通，並試圖減少建築行業應用中的障礙和限制。這一方面方法增強了對環境影響的認識和了解，推動設計師、製造商、利益相關者和政策制定者做出更負責任的選擇和行為。生命週期評估的實施通常遵循 ISO 14040 / 14044 標準，在建築物層面上則遵循 EN 15978 標準。

歐洲標準 EN 15978 提供了計算建築物生命周期環境影響的標準化框架，此外，EN 15978:2011 描述了建築的全生命周期碳評估，在其生命周期內完全實現蘊含碳與營運碳，可以精確分類碳排放，以加強減排策略的效果[18]。EN 15978 標準為評估建築物的環境績效提供了一個全面的框架，透過採用該標準，利害關係人可以確保其評估的一致性和可靠性。該標準至關重要，因為它允許在共同的基礎上比較不同的建築設計和材料，促進選擇更永續的選擇。故本研究利用 EN 15978 作為建築物生命週期評估流程，下圖為 EN 15978 第 5 條中定義的流程步驟，這些步驟是執行和完成評估建築物環境績效所需的計算所必需的。

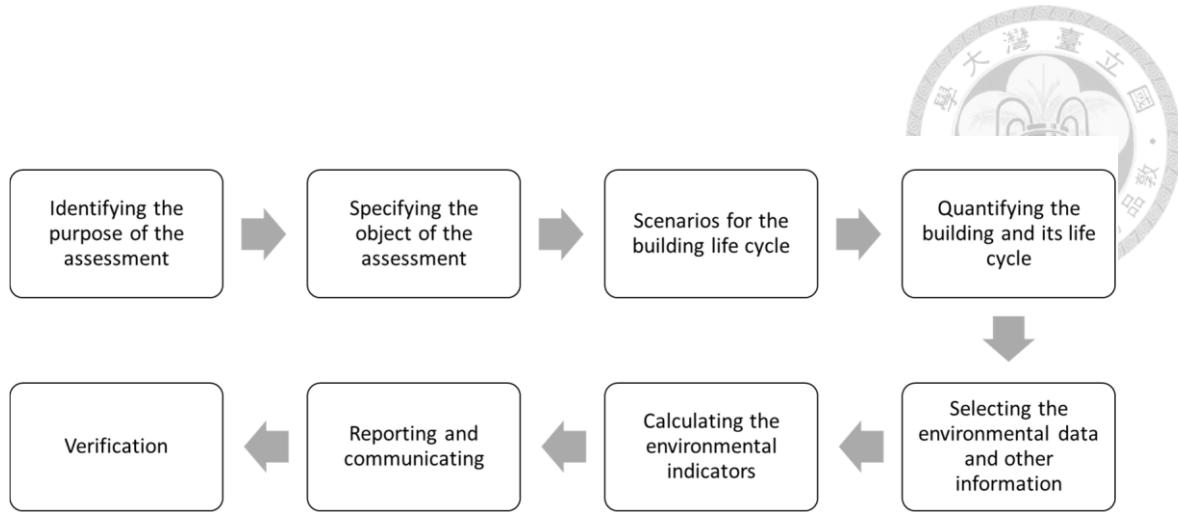


圖 2-1 EN 15978 第 5 條中定義建築物生命週期評估流程與步驟

2.2 文獻中常被使用之建築功能單元

根據國際 LCA 標準 ISO 14040/44，功能單位（Functional Unit, FU）被定義為“用作參考單位的產品系統的量化性能”[18]它是所有計算的比例因子，對 LCA 的結果至關重要。在建築工程生命週期評估 EN 15978 第三章說明功能單元是基於 LCA 的建築物或資產比較的參考單位，是建築產品功能的量化描述，它作為所有環境影響評估相關計算的參考基礎。功能單元可以基於所研究產品的不同特徵，如功能、美學、技術質量、額外服務、成本等，因此 FU 必須明確定義、可測量，並與研究的目標和範圍一致。如果所研究的產品或過程的任何功能未在 FU 中反映出來，則必須對所省略的功能進行解釋和記錄[19]。

除了這些規定之外，ISO 14040/44 以及 EN 15978 對定義的 FU 沒有進一步的要求，這使得解釋具有很大的靈活性，一旦定義了 FU，就必須選擇相應的參考流（Reference Flow, RF）。RF 被定義為“在給定產品系統中為滿足 FU 所表達的功能所需的過程輸出的度量”[19]。這是指為實現 FU 中的功能所需的材料或能源的類型和數量。RF 的精確定義允許在 LCA 的範圍內比較多種產品，建築工程 LCA 的結果強烈受到功能單元選擇的影響，功能單位必須有等效性，以便在比較



產品時，所比較的數量具有相同的效用[20]。為了可比性，FU 不應過度簡化，因為這可能會嚴重扭曲 LCA 結果[21][22]。

2.3 建築業功能單元的狀態

全球範圍內尚未就建築物 LCA 中考慮的功能單元 FU 達成一致[23]，當涉及建築時，不同的使用方式以及數據收集、計算和服務生命周期預測的困難，導致了對結果的不同解釋，增加了實現全面分析的挑戰。由於這種複雜性，建築行業尚未能夠像其他行業一樣充分利用 LCA 的潛力，顯示出簡化和統一性的需求[24]。

建築 LCA 文獻中最常使用的 FU 是建築面積的平方公尺 (m^2)[25]。從國外建築類型碳足跡基數據庫基準也可以看出此現象，如歐盟 Zenodo 開放科學的資料倉儲庫[7]以及美國碳領導力論壇[8]都是用樓地板面積為功能單元的基準。

一些研究使用了替代 FU，如整棟建築、人當量（當建築物的功能是為多人提供庇護所時）[26]、立方米（每人更多的空間往往會提供更高品質的服務）和居住舒適度[27]、使用壽命(使用壽命與普遍的經濟狀況有關)、服務維度，還有建築物的入住率。有文章強烈建議進行敏感度分析，因為服務的數量和持續時間是建立 LCA 的關鍵參數[28]。

根據文獻統計[29]，2017 年到 2022 年五月總共 72 篇，關於功能單元的定義以及使用的生命週期影響評估 (LCIA) 方法論的文章，有 75% 的文章是用基本的功能單元，比如材料的體積、面積或重量。使用參數、使用措施，例如車輛行駛里程和乘客公里數則為 4.2 %。分離元件、特定的建築元素，包括梁、板、混凝土塊、立面等則佔 9.7 %。熱參數、建築材料的絕緣功能，R 值 ($(m^2 K)/W$) 和 U 值 ($W/(m^2 K)$) 佔 13.9 %。整體結構，如住宅和辦公大樓則佔 11.1 %。



2.4 教學型大樓功能回顧

學校建築是學生活動的孵化器。它包括一系列不同的空間，使學習過程得以發生：教室、講座空間、圖書館、社交和聚會空間、大廳和其他非正式學習空間[30]。考慮到學校作為教育機構的主要目的，是優化其空間利用以最大程度地提升學生的教育表現，將建築空間用於教育目的的需要，對教育結果有顯著的影響[31]。

物理環境可能會影響學生的行為和態度[32]。學習環境與學習成果之間存在著一定的關係，研究結果顯示物理環境與教學和學習的舒適度之間存在高度正相關[33]。

物理環境設計取決於建築物的功能要求，空間的配置與設計以及空間舒適感，是否提供熱舒適性、視覺舒適度、聲音舒適度以及課桌椅是否符合人體工學，都將是影響物理舒適度的關鍵[34]。除此之外，有文獻提到空間利用率與使用頻率，將影響物理環境的指標與學生活動與其表現性[35]。

2.4.1 定義特殊功能單元的困難

每棟建築展示了一組新的工程需求，並且必須滿足獨特的功能，建築物還具有不可移動性、高度複雜性，並代表了重大的社會責任和資源投資。這使得建築行業與其他工業化部門有所不同，並對標準化提出了相當大的挑戰[36]。特別是在比較具有不同功能或性能特徵的產品或系統時[4]。這導致建築業內實施的 FU 有顯著差異，這一問題在文獻中得到了充分的了解[37][38]。

因此，建築行業中的 LCA 也面臨著這一挑戰，因為每個建築的生命週期都基於其特定的技術需求與規格，根據不同工程需求可能有很大差異，例如建築物、道路、橋樑或基礎設施。每項工程都有不同的功能，功能單元定義的選擇會使結果產生偏差[6]。評估每個建築組件或材料的環境影響不僅耗時，而且可能導



致評估者僅適用於該單一產品的結果。此外，在建築行業實施 LCAs 的高度標準化方法的缺乏，使得很大程度上依賴於個人評估者的主觀觀點與論述，導致了結果質量和可比性的巨大變化。

有些文章嘗試使用不同定義的功能單元去做相關的比較，盡可能完善功能單元的解釋，有篇文章選擇了三種類型的功能單元定義進行比較：比較了四種不同建築類型的典型巴西住宅建築的「從搖籃到墳墓」的環境績效。結果和討論功能單元定義的選擇被發現會使結果產生很大的偏差[39]。地下室對建築物運作和結構設計的 LCA 結果的影響，被呈現為不同功能單元的函數，計算了兩種不同能源標準，結果顯示用兩種不同的功能單元函數結果略有不同[40]。在建材方面，透過生命週期評估方法評估 57 種混凝土產品的環境影響，並進行原生骨材混凝土、再生骨材混凝土和 CO₂ 混凝土在不同功能單元條件下的比較分析，結果顯示，功能單元的選擇導致 LCA 的不同解釋，這項研究的結果強調了更多維度的重要性[41]。

2.5 碳排放計算方法

有相關文章整理出各國使用的碳排放計算方式，分別是排放因子法、質量平衡法以及測量方法[42]，使用碳排放因子法計算碳排放的優點在於過程簡單易懂，操作性強。更重要的是，各國和各行業已建立豐富的碳排放因子數據庫供查詢使用，然而，這種方法的缺點也顯而易見，這些數據庫中的碳排放因子高度依賴地區性，且具有較高的不確定性。質量平衡法優點在於對生產過程中碳排放進行系統和詳細的研究，更具科學性和嚴謹性，但缺點是需要對生產過程有全面的理解。碳排放因子法是基於質量平衡法，將每個產品的碳排放總結成一個係數，以便快速計算類似產品的碳排放，碳排放因子法的核心優勢在於其簡單、快速和低成本。實際測量方法的測量結果最直觀和準確，但數據采集困難且成本高昂，



因此通常用於樣本檢測。下表顯示三種碳排放量的優缺點：

表 2-1 各國使用的碳排放計算方式，改繪製自[42]

方法	輸入參數	優點	限制	適用範圍	應用
碳排放因子法	活動水平，碳排放因子。	簡單明瞭，易於理解。一個成熟的公式、活動數據和排放因子數據庫。有大量可供參考的應用實例。	受技術水平、生產狀況和工藝流程等因素的影響，排放因子具有區域性和不確定性。	宏觀尺度；中尺度；微觀尺度	這適用於社會經濟排放源變化穩定的行業，或者其他兩種方法不適用的情況。
質量平衡法	輸入材料的量及其碳含量；輸出材料的量及其碳含量。	這項研究系統性和全面性強，科學性高，實施效果顯著。能捕捉各種設施和設備之間的差異。	需要對生產過程、化學反應、不良反應及管理等有全面的理解；工作量大；對數據的需求高。	宏觀尺度；中尺度；	適用於數據基礎良好的行業，例如化工和鋼鐵行業。
測量方法	流速，濃度；單位轉換因子。	較少的中間環節；準確的結果。	人力和物資消耗大，成本高；數據難以獲得；樣本的代表性差	微觀尺度	這種方法適用於小範圍和簡單的排放源，例如工業煙囪或自然排

			或需要更高的樣本代表性。	放源的小區域，能夠獲得第一手的檢測數據。
--	--	--	--------------	----------------------

根據上述總結，質量平衡法和測量方法都不適用於建築行業，因此全球建築行業主要採用碳排放因子法來計算碳排放，也是目前最廣泛使用的碳排放核算方法[43]。

碳排放因子法最早提出的是在 1996 年，IPCC 編制並發布了《國家溫室氣體排放清單編制指南》的第一版。該方法的核心思想是根據碳排放清單中每個排放源的活動數據 (A) 和排放因子 (EF)，將兩者的乘積作為估算的碳排放量 (E)，即：

$$E = A \times EF - (1)$$

根據公式 (1) 所示，其中 E 代表溫室氣體排放（如 CO₂、CH₄ 等）；A 代表活動數據（單個排放源直接與碳排放相關的具體使用量），也就是建材的材料數量；EF 代表碳排放因子，即排放源每單位使用量釋放的溫室氣體量。數據來源可以在各種碳排放因子數據庫中找到，例如國際氣候變化專門委員會 (IPCC) 的排放因子數據庫 (EFDB)，以及各國產品碳足跡因子數據庫。此方法同時是內政部建研所低碳評估手冊所提供的其中一個建築低蘊含碳計算方法[44]。

為了精確的計算建築物材料的用量，使用 BIM (Building Information Modeling, BIM) 建築資訊模型模型去進行元素提取(Quantity take-offs, QTO)，提取出建築物的材料用量乘上材料的碳排放係數因子可以增加計算準確性[45][46]，也是各國標準所提倡的建築生命週期碳排放計算方法[47][48]。



我國內政部建築研究所低碳手冊所，還提供了結構回歸公式去計算建築物上部結構的蘊含碳排放量，建研所結構回歸公式主結構包含柱、樑、樓板、外牆、結構內牆、樓梯等結構體工程，公式如以下所示[44]:

$$Cu = Afu \times C \times W — (2)$$

建研所結構回歸公式主結構包含柱、樑、樓板、外牆、結構內牆、樓梯等結構體工程。其中 Afu 為地上層樓地板面積， C 全案地上主結構單位碳排密度， W 構造係數。但文獻提到回歸公式來估算碳排可能會出現估算結果的偏差，天津市住宅建築碳排放情況，使用四種不同碳排放計算進行成果比較時，在分析多因素模型時，發現回歸方程式簡單、方便，僅適合進行初步分析，如果回歸方程的假設不夠嚴格，在無法知道所有導致因變數變化的解釋變數，很容易出現「偽回歸」的問題[42]。



第3章 研究方法

3.1 研究架構

根據 EN 15978 提供了計算建築物生命周期環境影響的標準化框架，本文透過對建築物進行生命週期評估，本研究確定了教學型大樓碳排放（以 kg CO₂e 為單位）的比較值，可用於比較和評估不同的建築物。建築物的 LCA 比較依照標準遵循 ISO 14040 / 14044 標準進行，該標準定義了建築物 LCA 的計算方法。該方法按以下順序執行。

- (1) 定義功能等價物。將台大三棟教學型大樓進行碳排放計算。
- (2) 比較不同功能單元的碳排結果。
- (3) 顯示教學型建築的碳排放量。初步確定不同功能單元的對教學型大樓碳排放影響變數。
- (4) 透過問卷調查，整理出學生們對於教學型大樓須具備什麼樣的功能單元與第三步的結果進行綜合型討論。

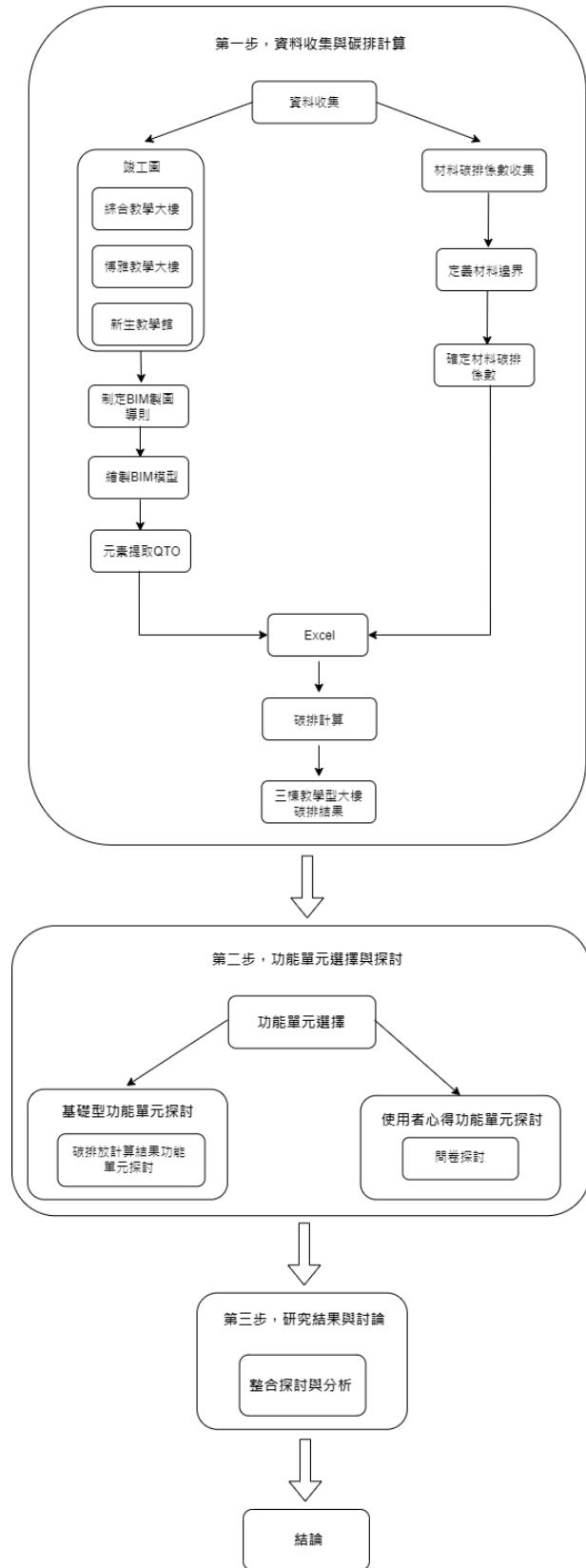


圖 3-1 研究架構



3.2 資料收集與處理

根據 EN 15978 建築物環境績效評估的流程步驟，第二步是明確評估對象，確定評估的建築物部分。

3.2.1 評估對象

本研究將對台灣大學三棟教學型大樓進行研究與探討，分別是博雅教學館、新生教學大樓以及綜合教學館。研究內會選擇此三棟教學型建築物為研究對象，因為這三棟建築物雖然都同為教學型大樓，但在空間配置上有許多不同之處，博雅教學館是作為辦公與教學功用的綠建築，新生教學大樓是純上課用的教學型大樓，綜合型大樓擁有許多學生可以自行運用的研習空間與可容納最多人的大講堂，因此可以研究同為教學型大樓，不同用途之間是否會影響碳排放以及在選用功能單元上會產生影響，表 3-1 顯示了三棟教學型大樓基本資料。

表 3-1 三棟教學型大樓基本資料

教學大樓示意圖	名稱	上部結構 總面積	啟用時間	結構	樓層
	博雅教學館	7717.59 m ²	2011年	鋼筋混凝土	地上五層、地下一層
	新生教學大樓	5200.95 m ²	1968年， 2009年進行 結構補強	鋼筋混凝土	地上五層

	綜合教學館	7854.13 m ²	2018年	鋼筋混凝土	地上七層、地下四層
---	-------	------------------------	-------	-------	-----------

博雅教學館興建計畫為行政院於 2004 年提出五年新臺幣五百億元的發展國際一流大學計畫（現改為「邁向頂尖大學計畫」）下，國立臺灣大學校方的一個子計畫。目標為改善學校長期教學空間不足的窘境，規劃設置大型教室及研討教室等教學空間，提供通識及共同科目課程大班授課與小組討論使用，解決大型教室不足之情況；另配合學校發展（邁向頂尖大學計畫中子計畫：教學卓越）需要，提供教學行政所需之空間，包含教學發展、通識教育中心等教學單位，是三棟教學型大樓中提供最多功能的一棟教學大樓。

綜合教學大樓在 2012 年初，進行綜合教學舊館現址重建之教學大樓第 2 期工程。校方預計規劃有更多中、大型教室，一間能容納六百人的臺大講堂，地下室作為密集藏書區以紓解台大圖書館的藏書空間不足之壓力，並預計規劃一間新的學習開放空間，較現有兩間學習開放空間多了許多間中小型的會議室，供學生課業、社團、跨領域交流等等。

新生大樓啟用於 1968 年，全棟皆作教室使用，供學生上通識課、共同必修、選修課等不需特殊教室的科目。現有 20 間教室，提供 1932 個座位，254 人大教室 1 間，141 人教室 2 間，110 人教室 6 間，70 人教室 6 間，64 人教室 5 間。表 3-2 為三棟教學型大樓空間配置情形。

表 3-2 三棟教學型大樓空間配置

教學大樓名稱	上課用教室	辦公空間	學生自我學習空間	其他空間
博雅教學館	教室、電腦教室、多媒	教學發展中心辦公空	一樓學習開放空間、外	電氣、空調、電資機



	體製作室、微型教學室	間、職員室、統計學程辦公室、生命教育中心、全國夏季學院辦公室、教學發展中心、組長室、研究室、共同教育中心、主任辦公室、控制室	聘教師辦公室、會議室、討論室、露臺與陽台	房、儲藏室、器材儲藏室、男廁、女廁、行動不便廁所、掃具間、茶水間、殘障廁所、清潔間、更衣室
新生教學大樓	一般教室	管理員室	走廊陽台	儲藏室、機房、男廁、女廁、殘障廁所、掃具間、茶水間
綜合教學館	一般教室、綜合大講堂	中控室、國際學院辦公室、華語文推展辦公室、教師辦公室	開放學習空間、自動化書庫服務中心、專題討論室、貴賓室、討論室、教師休息室、學習匯所、會議室	男廁、女廁、行動不便廁所、掃具間、茶水間、殘障廁所、清潔間、更衣室、電氣、電腦、資訊機房、儲藏室

由於未能取得三棟教學型大樓的結構圖，對於地下空間有許多無法掌握的資訊，除了綜合教學大樓的電表涵蓋面積比上部結構總面積少了 224.97 平方公尺，博雅教學大樓與新生教學大樓在上部結構的電表含蓋的面積與上部結構總面積相符，幫助研究在算蘊含碳排與使用碳排時有較統一的比較基準，加上擁有地下四



層樓的綜合教學大樓地下室為書庫，平常學生也能使用，所以決定只用較多人使用到的上部結構去進行碳排計算與功能單元探討。

根據 EN 15978 建築物環境績效評估的流程步驟，在建築 LCA 研究中，評估的對象是建築物及其場地，基於 RICS2 的新測量規則 (New Rules of Measurement, NRM, NRM) 將建築的不同面向組織成由“元素”組成的“組”，而“元素”又由“子元素”組成。下表為本研究所評估三棟教學型大樓的建築物部分：

表 3-3 本研究所評估三棟教學型大樓的建築物部分

組	元素	子元素
上部結構	柱/梁	鋼、混凝土、木材、其他 檑/柱支撐系統
	樓板	RC 樓板 鋼層板 陽台
	外牆	外部 RC 牆 玻璃帷幕牆
	窗戶	外牆窗戶
	內牆	內部隔間牆
	樓梯和坡道	樓梯、坡道（結構和裝修）



3.2.2 功能等效

根據 EN 15978: 2012，等效功能描述了建築物或複合材料組件的定性和技術要求，本研究中的所有建築物都滿足相同的結構穩定性和承載能力要求，以及根據中華民國耐震設計規則要求，目標地表加速度應達 $A\gamma = 0.4$ SDS，一般校舍用途係數 I 取 1.25，即本建物之極限側推強度 V_{max+} 滿足地震地表加速度 0.24g。

在本研究中，作為參考單元的功能等價是指教學型的建築結構。將同樣是教學型大樓碳排分析結果與功能相當的教學型大樓進行比較。探討不同功能單元是否會影響分析結果，並且找出最適合教學型大樓功能單元的潛力。

功能等效描述：

- 建築類型：建築面積 5000 平方公尺以上的教學型大樓。
- 相關技術和功能要求：中華民國耐震設計規範建物之極限側推強度 V_{max+} 滿足地震地表加速度 0.24g 之教學型建築物。
- 材料邊界：蘊含碳邊界 A1-A3，使用碳 B6
- 所需使用壽命：50 年。
- 功能單元：每平方公尺的蘊含碳排放量，每平方公尺的使用碳排放量，每人所使用到的蘊含碳排放量，每平方公尺的使用碳排放量

3.2.3 系統邊界

評估對象為建築物及其場地，根據下圖 3-2 所示的建築物生命週期階段設定研究系統邊界。這些生命週期階段對應於 EN 15804+A1 中所描述的用於呈現建築產品環境資料的模組化結構，圖 3-4 為 EN 15978 建議蘊含碳排之計算範疇，研究所計算的建材生命週期皆採用原物料製造階段到資材運送階段(A1-A3)。在使用碳排的部分，是採用營運耗能(B6)。

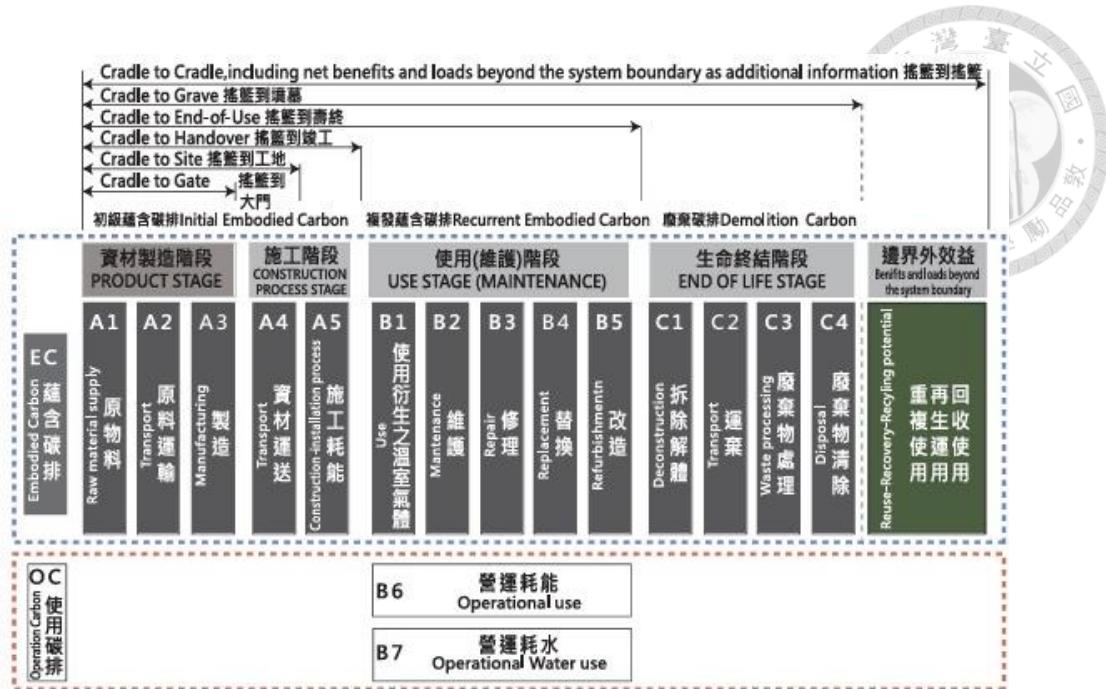


圖 3-2 建材碳排係數邊界[44]

表 3-4 本研究建材碳排係數邊界與其選擇原因

碳排類型	材料邊界	原因
蘊含碳排	A1-A3	由於在建造圖中，無法掌握材料的製造商、出產地與施工情形，因此只採用建材資料庫的資材製造階段。
使用碳排	B6	台大校園在各系館有裝置智慧電錶，112 年與 113 年都有完整的年度用電資料，後續如要更精確的資料，日後可增加統計年限

根據 3.2.1 節所說明的評估對象說明，本研究僅對上部結構進行碳排放的計算與功能單元的比較，由於根據三棟教學大樓可以掌握的竣工圖資訊，本研究進行碳排計算的建築元素有主結構工程結構元件、隔間牆、戶外露臺材料、坡道、



外牆窗戶、帷幕牆以及帷幕豎框與窗戶鋁料，表 3-5 顯示了本研究所提取進行碳排計算的結構元件以及所對應的材料：

表 3-5 本研究所提取進行碳排計算的結構元件與材料

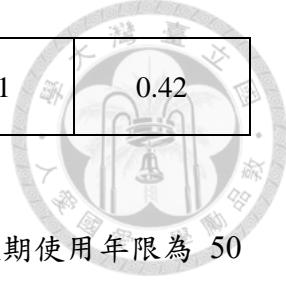
建築元素	元件材料
1. 主結構元件：結構柱、結構梁、結構牆、樓板、樓梯	1. 預拌混凝土 4000psi
2. 隔間牆	2. 型鋼
3. 戶外露臺材料	3. 鋼筋
4. 坡道	4. 鐵件
5. 外牆窗戶，帷幕牆	5. 玻璃，普通平板玻璃
6. 鋁料(窗戶、帷幕豎框)	6. 磷酸鈣板
	7. 防火石膏板
	8. 岩棉板
	9. 紅磚

本研究所選擇的材料邊界碳排係數為建研所建築材料碳足跡資料系統，系統有提供許多材料完整的材料邊界從原料開採到成品運輸階段的碳排放係數，可以幫助研究依據材料邊界需求進行較完整的產品碳足跡選取，表 3-6 為本研究材料排放係數邊界碳排係數選取：

表 3-6 材料排放係數邊界碳排係數選取

材料名稱	單位	原料開採	原料運輸	產品生產	總碳排量
預拌混凝土 4000psi	m ³	4.8	17.42	343.09	365.31
型鋼	kg	0.954		0.185	1.139
鋼筋	kg	0.954		0.168	1.123
鐵件	kg	0.954		0.168	1.123
玻璃，普通平板玻璃	kg		1.12		1.12
矽酸鈣板	m ²	0.01	0.046	1.81	1.87
防火石膏板	m ²	0.02	0.046	2.33	2.4
岩棉板	m ²	0.015	0.19	0.828	1.03

紅磚 (20*9.5*5cm)	塊	0.01	0	0.41	0.42
--------------------	---	------	---	------	------



在使用碳邊界 B6 的材料碳排係數上，本研究建築物生命週期使用年限為 50 年，我們將 2005 年到 2024 年二十年台電年度的碳排係數下降 0.062 除以 20，得到每年台電年度的碳排係數平均下降 0.003。假設 2024 年以後呈現線性下降的趨勢，每年台電年度的碳排係數下降 0.003，推算到 50 年後的使用年限 2071 年的碳排係數為 0.343。表 3-7 是本研究假設台電 50 年以後的碳排係數下降幅度參數表：

表 3-7 本研究假設台電 50 年後碳排係數參數表

年份	台電年度 碳排係數 (kgCO ₂ e/k Wh)	年份	台電年度 碳排係數 (kgCO ₂ e/ kWh)	年份	台電年度 碳排係數 (kgCO ₂ e/k Wh)	年份	台電年度 碳排係數 (kgCO ₂ e/ kWh)
2005	0.555	2022	0.495	2039	0.445	2056	0.391
2006	0.562	2023	0.494	2040	0.442	2057	0.388
2007	0.558	2024	0.493	2041	0.439	2058	0.385
2008	0.555	2025	0.490	2042	0.436	2059	0.381
2009	0.543	2026	0.487	2043	0.433	2060	0.378
2010	0.534	2027	0.484	2044	0.429	2061	0.375
2011	0.534	2028	0.481	2045	0.426	2062	0.372
2012	0.529	2029	0.477	2046	0.423	2063	0.369
2013	0.519	2030	0.474	2047	0.420	2064	0.365
2014	0.518	2031	0.471	2048	0.417	2065	0.362

2015	0.525	2032	0.468	2049	0.413	2066	0.359
2016	0.53	2033	0.465	2050	0.410	2067	0.356
2017	0.554	2034	0.461	2051	0.407	2068	0.353
2018	0.533	2035	0.458	2052	0.404	2069	0.349
2019	0.509	2036	0.455	2053	0.401	2070	0.346
2020	0.502	2037	0.452	2054	0.397	2071	0.343
2021	0.509	2038	0.449	2055	0.394		

3.2.4 建築模型

在 EN 15978 對於比較建築評估，LCA 研究的目標和範圍定義應考慮現有數據的適用性，以便能夠量化所評估建築物的品質和能量流（稱為建築模型）。建築模型必須反映可用的詳細程度，因此研究使用 BIM (Building Information Modeling, 建築資訊模型)為三棟教學型大樓計算碳排放的依據，並且制訂 BIM 模型製圖導則，在繪製 BIM 模型的時候，有統一的規格與標準，確保元素提取時的正確性。

一、BIM 建模導則

本研究將導入 BIM 概念，以符合未來使用之需求，落實 BIM 以作為日後營運維護與能源使用情況查核。主要目標如下：

- (一) 制定統一的視圖規則和建模標準，並針對後續營運需求進行詳細規劃，方可提供後續維運管理單位使用，以提升永續管理的維運效能。
- (二) 提供視覺化與模擬性，BIM 可以對設計上需要進行類比的一些東西進行模擬實驗，例如：工料提取模擬，幫助研究進行建築生命週期碳排放量計算，也可以幫助學校後期運營階段可以類比能源使用情形以及日常緊急情況的處理方式的



類比，例如地震人員逃生模擬及消防人員疏散模擬等。

(三) 提供優化性，沒有準確的資訊做不出合理的優化結果，BIM 模型提供了建築物的實際存在的資訊，包括幾何資訊、物理資訊、規則資訊，還提供了建築物變化以後的實際存在。運用 BIM 導入碳排放計算與能源管理，以模擬設計、施工，輔助設計至竣工之各工程階段應用可能產生的建築蘊含碳排放，有效協助設計整合、減少能源過度使用之情形產生，輔助產出相關圖說，深化模型作為未來建築物維修與改建之依據，持續修正協調紀錄及現場尺寸，並完成元件維運資訊資料庫。

(1) 計量標準：本專案中，計量將統一採用公制標準，單位設定如下：建築、結構：mm

常用的一些單位如下：

表 3-8 BIM 技術公制標準表

類別	單位
長度	除標高外，統一採用毫米 (mm)
面積	平方公尺 (m^2)
體積	立方公尺 (m^3)
角度	度 ($^\circ$)
密度	kg/m^3
力	千牛頓 (kN)
重量	千牛頓 (kN)

(2) 模型構件命名：專案實施前，為統一實施管理，應制定模型構件命名方式，模型中的構件命名應包括：構件類別、構件名稱、構件材料、構件尺寸，構件名稱應與設計或實際工程命名一致。

表 3-9 模型構件命名表

專業	構件分類	命名原則	舉例
----	------	------	----

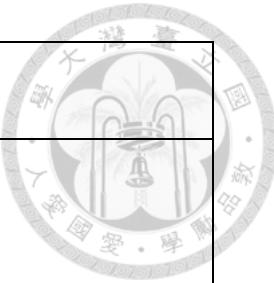


主結構工程	結構柱	柱類型名-材料-尺寸	結構柱-RC-800X800
	結構梁	梁類型名-材料-尺寸	結構梁-RC-600X300
	承重牆	牆類型命名-材料-牆厚	承重牆-磚牆-300
	剪力牆		剪力牆-RC-300
	樓、地面板	樓板類型名-材料-板厚	混凝土板-RC-200
	型鋼	型鋼類型-結構材料-斷面尺寸	RH-SN490B-194x150x6x9
	鋼筋	鋼筋編號-單位重	#8 - 3.98
	樓梯	與設計圖一致	與設計圖一致
建築	帷幕牆	牆類型命名-材料-牆厚	金屬帷幕-鋁板-3mm
	內填充牆		內填充牆-矽酸鈣板-150mm
	外填充牆		外填充牆-空心磚-14cm
	隔斷牆		隔斷牆-玻璃-3mm
	門、窗	與設計圖紙一致	與設計圖紙一致
	屋面板	屋面板-材料-板厚	屋面板-不鏽鋼-150mm
	坡道、電梯、扶梯	與設計圖紙一致	與設計圖紙一致

(3) BIM 建築建模導則

表 3-10 BIM 建築建模導則

元件	建模導則	材質設定
一般需求	以正確的尺寸及材料建模。	必要
牆	各種牆建置高程(如磚牆、輕隔間牆、RC 牆等)，所有牆的高度範圍，皆由SFL 開始，階置上層版/梁之底面。依據牆類型參數區分為內外牆。	必要

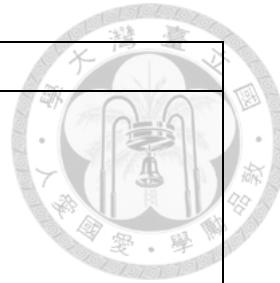


	具有牆面裝修各層厚度、材料。	
門	將基本設計模型加入細設參數後更新，建議也區分門的不同用途，例如：防火門。	必要
1. 窗 2. 百葉窗	將基本設計模型中的窗更新為細設所需，例如：加入配件及安裝資訊。	必要
帷幕牆	帷幕牆依其全幅面高建置(不須區分樓層)大部分的建模工具可在帷幕牆加入門或窗。	必要
1. 陽台 2. 雨棚	以物件或牆、版、梁及圍欄建置，核對各自的建模導則。	必要

(4) BIM 結構建模導則

表 3-11 BIM 結構建模導則

元件	建模導則	材質設定
一般需求	<p>所有元件皆需以正確的尺寸建模。</p> <p>以 BIM 建模工具提供的物件，建立接頭/繫件及構件的細部模型。特殊設計工具製作的構件，若與建模工具無法協作，可將其輸出的 2D 詳細圖，直接以 2D 圖面併入 BIM 工具中做為補充說明。</p>	依情況設定
1. 樓版	<p>樓板元件之建立包含：元件之整體尺寸及幾何外型、坡面。</p> <p>與模型元件相關之必要非圖形資訊至少包含：混凝土強</p>	必要



	度。	
1. 梁 2. 柱 3. 牆	元件之建立包含：元件之整體尺寸及幾何外型。 與模型元件相關之必要非圖形資訊至少包含：混凝土強度。	必要
3. 樓梯 4. 梯段 5. 斜面	僅需建立樓梯、梯段及斜面的結構部分。若沒有適當的工具，則以元件建置。 樓梯平台和接樓梯版的梯段，可視需求用版建置，此時應將該版的類型定義為「樓梯」。	必要
所有結構元件	需在備註加入碳排係數	

3.3 碳排計算

綜合 2.5 節的文獻回顧，本研究使用 BIM 模型進行元素提取，乘上材料碳排放因子的排放因子法去得到三棟教學型大樓的蘊含碳排，圖 3-3 中，圖例 A、B、C、D、E、F 是本研究使用 BIM 模型進行元素提取計算出三棟教學型大樓蘊含碳排的研究步驟與過程，以下是本研究使用 BIM 模型進行元素提取計算出三棟教學型大樓蘊含碳排的文字說明：

1. 在 BIM 模型中建立材料明細表(圖例 A)
2. 在明細表中選取材料品類(圖例 B)
3. 選取明細表欄位所需要的材料參數資訊(圖例 C)
4. 完成 BIM 模型裡面的明細表建置(圖例 D)
5. 將 BIM 模型裡面所建置的明細表匯出到 Excel 表格進行後處理，將 BIM 模型所提取出的材料用量乘上相對應的材料碳排放因子，得到各元件的蘊含碳排放量(圖例 E)

6. 完成教學型大樓蘊含碳計算(圖例 F)

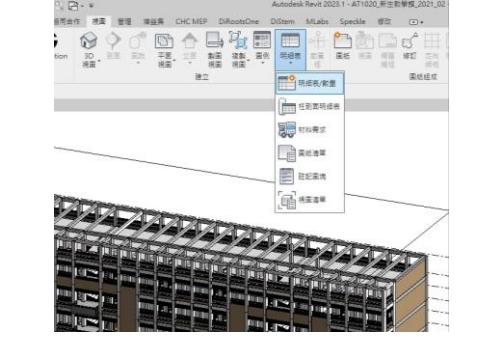
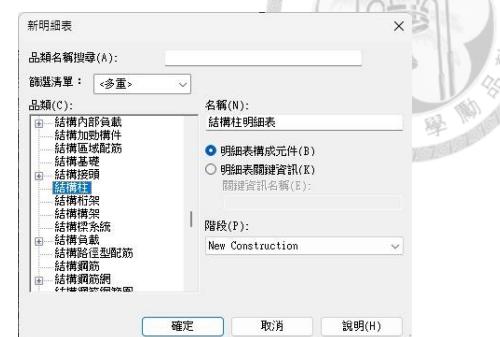
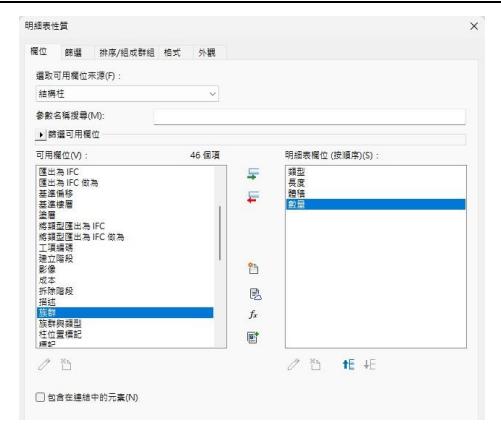
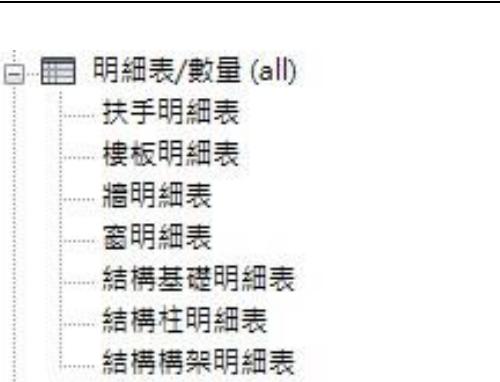
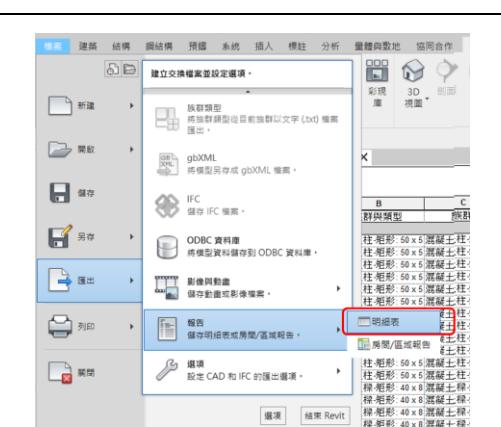
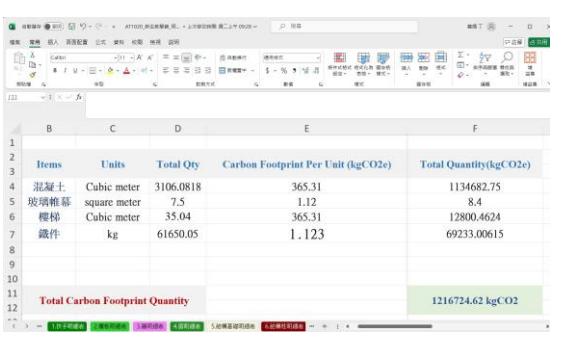
 <p>圖例 A</p>	 <p>圖例 B</p>
 <p>圖例 C</p>	 <p>圖例 D</p>
 <p>圖例 E</p>	 <p>圖例 F</p>

圖 3-3 BIM 模型計算蘊含碳排的研究步驟與過程

同時本研究也會使用內政部建築研究所所提供的結構回歸公式去計算三棟建築物的上部結構蘊含碳排放量，與 BIM 模型去做上部結構物的蘊含碳排計算有何



差異，會在本文第六章進行計算結果的討論。

本研究假設三棟建築物的使用年限為 50 年，在使用碳計算方法上將三棟教學型大樓各自 2022 與 2023 年的用電量取平均，乘上本研究推算到 50 年後的使用年限 2071 年的碳排係數 0.343 各年份的台電碳排係數所得到的五十年使用年限的使用碳排放量。但綜合教學大樓因為電表配置的面積比起蘊含碳的上部結構總面積少了 224.97 平方公尺，博雅教學大樓與新生教學大樓在上部結構的電表含蓋的面積與上部結構總面積相符，綜合教學館上部結構總面積是電表所占的面積的 1.0295 倍，為了幫助本研究可以在算蘊含碳排與使用碳排時有較統一的比較基準，本研究將綜合教學館的所算得的使用碳排再乘上 1.0295 得到最後綜合教學大樓的使用碳排。最後，本研究還會計算三棟建築物在經過 50 年後的建築物全生命周期碳排放情形。

3.4 功能單元選擇

在先前文獻回顧有提到目前各國文獻比較多人使用的用基本的功能單元，比如材料的體積、面積或重量，因此也將選擇一些基本的功能單元作為研究內文獻的比較，如：建築物的面積與體積，但是由於這三棟教學館的陽台與露臺，都設有課桌椅以及可觀景的園藝景觀，都是學生平常會去自習與使用的空間，因此特別將三棟建築物的陽台與露台空間納入可用面積與體積進行比較。除此之外也將使用人數作為功能單元的選擇，教學型建築可容納的學生人數也是一個值得探討與比較的功能。以下說明相關功能單元的選擇與其原因：

一、上部結構總面積

二、上部結構總面積加戶外可使用面積：上部結構總樓地板面積 + 露臺與陽台面積



三、室內可使用體積：室內各可使用空間 \times 該空間樓地板到天花板垂直高度

四、室內可使用體積加戶外空間體積：戶外可使用體積(開放區域面積 \times 人的高度 (170 公分)

五、建築使用人數：

由於每個室內空間所可容納的人數不同，研究將使用人數做了以下的假設：

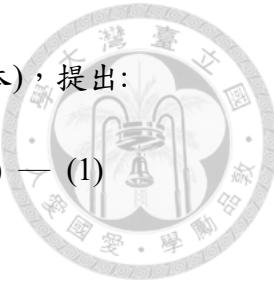
建築使用人數 = 教室可容納最大人數 + 辦公空間可容納人數。— (1)

表 3-12 本研究建築使用人數的假設方法

參數名稱	參數說明
教室可容納最大人數	設計圖有提供
辦公空間可容納人數	將各館各間教室樓地板面積/各館各間教室可容納人數所得到的平均數， 博雅教學館: $1.48 \text{ m}^2/\text{人}$ 綜合教學館: $1.56 \text{ m}^2/\text{人}$ 新生教學館: $1.40 \text{ m}^2/\text{人}$ 將各館所得平均數再相除，得到 $1.48 \text{ m}^2/\text{人}/\text{辦公空間面積}$ ，將各館辦公室的面積除以 $1.48 \text{ m}^2/\text{人}$ ，得到各館辦公室空間使用人數。

雖然辦公空間不會像教室一樣容納那麼多人，但是這個算法可以將戶外與公共空間使用人數抵銷，所概估出整體的人數。

本研究除了使用上述五個功能單元作為比較基準，還額外使用用電指標 (Energy Usage Index, EUI) 去評估建築物的節能指標，EUI 值較高可能較不具有



用電效率，根據政府機關及學校用電效率管理計畫(行政院核定本)，提出：

$$\text{EUI} = \text{年度總用電量} / \text{總樓地板面積} (\text{單位: kWh/m}^2 \cdot \text{year}) \quad (1)$$

因此根據公式(1)，本研究所使用的 EUI 公式如下：

$$2022 \text{ 與 } 2023 \text{ 的各館年度用電平均度數} / \text{總面積} \quad (2)$$

3.5 問卷設計

博雅教學館興建計畫為改善學校長期教學空間不足的窘境，規劃設置大型教室及研討教室等教學空間，提供通識及共同科目課程大班授課與小組討論使用，解決大型教室不足之情況；另配合學校發展需要，提供教學行政所需之空間，包含教學發展、通識教育中心等教學單位。綜合教學大樓規劃有更多中、大型教室，擁有全新的學習開放空間，較現有兩間學習開放空間多了許多間中小型的會議室，供學生課業、社團、跨領域交流等等。以及一間能容納六百人的臺大講堂，地下室作為密集藏書區以紓解台大圖書館的藏書空間不足之壓力。新生大樓全棟皆作教室使用，供學生上通識課、共同必修、選修課等不需特殊教室的科目。

由於這三棟建築在設計規劃時都各自有其使用需求及其獨特性，以下是三棟教學型大樓的特色說明：

一、博雅教學館：

有別於一般教室，博雅教學館擁許多挑高的階梯教室，並且規劃許多陽台與露台的使用空間，讓學生可以自行運用。

二、新生教學大樓：

新生教學大樓就是一棟純粹作為上課使用的教學型大樓，雖然也擁有階梯教室，但並未使用挑高設計，同樣在陽台放置桌椅讓學生自行使用。



三、綜合教學館：

綜合教學館擁有全台大校園最大的大型演講廳，總共可以容納 600 位學生，並且在各樓層都有規劃給學生自我學習的空間，純上課使用的教室是三棟教學型大樓裡面最少的。

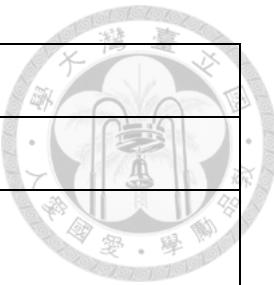
綜合以上三棟教學型大樓的特點，總結出下列三點可以進一步探討的功能單元：

1. 假設總碳排量沒變動，但由於擁有許多戶外可以使用的露台面積，計算面積與體積放大了，代表計算式之比較方式就會產生偏差，因此必須進一步探討使用者心得及問卷統計，去使用這個戶外露臺環境是否為必要之空間。
2. 由於階梯教室在規劃上面存在的有挑高與未挑高的差異，研究如只單純探討 EUI，當教室的空間高度若有不同時，例如：明亮度、舒適度、能源、配線用量，是否間接影響使用碳排計算偏差，使用者對於空間的感受度是否有差異。
3. 是否需要進一步將空間拆分為不同使用區，比如室內可使用空間、辦公室使用空間與學生自習空間，探討細化的可能性，找出設計時多餘的空間，比如學生自我學習空間，或是平常較少使用的教師休息室空間與外聘教師休息空間，用問卷方式詢問使用者該空間的必要性，避免做過度設計，減少碳排用量。

因此研究設計以下的問題讓使用過這三棟教學型大樓的使用者詢問他們對於三棟教學型大樓空間的配置與舒適度的感受，表 3-13 為本研究使用者心得問卷。

表 3-13 使用者心得問卷

教學型大樓使用者心得調查		
本研究將針對台大三棟教學型大樓博雅教學館、綜合教學館、新生街學大樓的空間配置的滿意度與舒適度進行使用者心得調查，調查範圍為曾經使用過以上三棟教學型大樓的老師與學生，每題 1-10 分，分數越高代表越重要		
題號	題目	回答



一	請問您的年紀?	簡答
二	所就讀與曾經就讀的學院?	簡答
三	請問您是否有曾經使用過博雅教學館、綜合教學館、新生街學大樓其中一棟戶外空間?	是/否
四	不論在三棟教學型大樓的戶外露臺與陽台空間，都有擺設桌椅或是景觀造景供大家使用，您是否覺得戶外空間是教學型大樓必要的配置?	(1-10 分)
五	請問您是否有曾經使用過博雅教學館、綜合教學館、新生街學大樓其中一棟學生自習空間?	是/否
六	三棟教學型大樓擁有許多學生自習的空間，是否覺得讀書空間有占掉大樓空間必要性?	(1-10 分)
七	請問您是否有曾經使用過博雅教學館、綜合教學館、新生教學大樓其中一棟教師休息室與外聘教師休息室?	是/否
八	是否覺得教師休息室與外聘教師休息室是有必要存在的空間?	(1-10 分)
九	請問您是否有曾經使用過博雅教學館、綜合教學館、新生街學大樓其中一棟階梯教室?	是/否
十	階梯教室挑高的設計是否有比一般教室沒有挑高的空間舒適?	(1-10 分)
十一	是否有其他覺得教學型大樓有必要增設的空間，或是覺得多餘的空間?	詳答



如表所示，主要想針對使用者使用三棟教學型大樓相關空間配置的心得感想，調查教學型大樓是否應該存在戶外露臺使用空間、學生自我學習空間、教師休息室以及挑高階梯教室的必要，以及調查使用者是否對於教學型大樓空間配置是否有改善或是覺得要增加的功能，將使用者的反饋心得結合案例分析的碳排放功能單元，探討出最適合教學型大樓的功能單元。

第4章 研究結果



4.1 案例分析

本研究經過三棟建築型大樓 BIM 模型建置(如圖 4-1 所示)，透過元素提取 (Quantity take-offs, QTO) 提取出建築物的材料用量乘上材料的碳排放係數得到三棟教學型大樓的蘊含碳排放量，將基礎功能單元與三棟教學大樓蘊含碳進行初步比較。

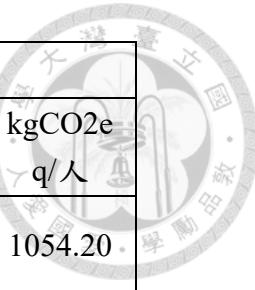


圖 4-1 三棟教學型大樓 BIM 模型

本研究三棟教學大樓碳排放與基礎功能單元進行初步比較，如下表所示：

表 4-1 三棟教學型大樓蘊含碳排、使用碳排與總碳排進行基礎功能單元比較

功能單元	蘊含碳排/ 上部結構 總面積	蘊含碳排/ 上部結構 總面積+ 戶外可使	蘊含碳排/ 室內可使 用體積	蘊含碳排/ 室內可使 用體積+ 戶外可使	蘊含碳 排/人
------	----------------------	-------------------------------	----------------------	-------------------------------	------------



		用面積		用體積	
單位	kgCO ₂ eq/ m ²	kgCO ₂ eq/ m ²	kgCO ₂ eq/ m ³	kgCO ₂ eq/ m ³	kgCO ₂ e q/人
博雅教 學館	328.79	293.52	107.13	100.45	1054.20
新生教 學大樓	301.19	296.58	96.75	96.47	815.45
綜合教 學館	408.90	373.04	131.48	124.91	1655.46
功能單 元	使用碳/上 部結構總 面積	使用碳/冷 氣使用面 積	使用碳/人	使用碳/室 內可使用 體積	EUI
單位	kgCO ₂ eq/ m ²	kgCO ₂ eq/ m ²	kgCO ₂ eq/ 人	kgCO ₂ eq/ m ³	kWh/m ² . year
博雅教 學館	1769.36	4200.80	5673.03	576.53	84.02
新生教 學大樓	1250.87	2538.24	3386.85	401.81	59.40
綜合教 學館	1065.83	2636.66	4316.63	342.70	49.16
功能單 元	總碳排/上 部結構總 面積	總碳排/上 部結構總 面積+戶 外可使用 面積	總碳排/室 內可使用 體積	總碳排/室 內可使用 體積+戶 外可使用 體積	
單位	kgCO ₂ eq/ m ²	kgCO ₂ eq/ m ²	kgCO ₂ eq/ m ³	kgCO ₂ eq/ m ³	
博雅教 學館	2098.15	1873.06	683.66	640.99	
新生教 學大樓	1552.06	1528.30	498.55	497.11	
綜合教 學館	1474.74	1345.39	474.17	450.50	

根據案例分析所得到的三棟教學型大樓蘊含碳排、使用碳排與總碳排進行基



基礎功能單元比較，從表 4-1 中可以觀察到：

4.1.1 空間配置與碳排放之間的影響

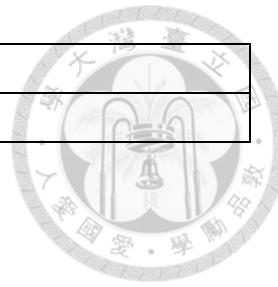
1. 假設總碳排量沒變動，但計算面積與體積增加了戶外露臺空間，卻在每單位平方公尺與每單位立方公尺蘊含碳排放量減少了，代表加入戶外露臺空間會導致計算式之比較方式產生偏差。
2. 綜合教學館的蘊含碳排比起兩棟教學型大樓來的高，博雅教學館次之，而在使用碳排上博雅教學館遠高於其他兩棟教學型大樓，博雅教學館與綜合教學館都是綜合型的教學型大樓，除了擁有一般的上課教室，還擁有多間挑高的教室，以及辦公室與研究中心，多用途的教學型大樓在建材上的使用會較高，導致蘊含碳排的增加，在用電上教室的挑高與較多辦公空間的空間配置，也將導致用電量增加。
3. 較多功能的教學型大樓每人所使用的蘊含碳排較高，博雅教學館與綜合教學館每人所使用的蘊含碳排皆高於只作為純教室使用的新生教學大樓。

由前面三點案例分析結果可以得知，不同的空間配置將會影響教學型大樓的碳排放量，原始數據新生教學館室內可使用空間碳排放量：1566485.821 kgCO₂eq，研究以新生教學館為測試拆分案例，將新生教學館學生與教師休息空間所佔的面積比例 1.99 % 扣除，得出 1535309.75 kgCO₂eq，總共減少 31176.07 kgCO₂eq 的蘊含碳排。由數據得知，若將教學大樓功能單元細化比較，更能凸顯在設計階段多餘的空間使用之重要性。

表 4-2 新生教學大樓室內使用空間面積占比

新生教學館室內使用空間	面積占比 (%)
1. 上課用教室	49.09
2. 辦公空間	0.2
3. 學生與教師休息室	1.99

4 其他空間	48.72
總面積	100



4.1.2 空間配置與用電量之間的影響

原本綜合教學館的每平方公尺蘊含碳比新生教學大樓還高，但是經過加入五十年的使用碳後，每平方公尺樓地板面積總碳排竟然比新生教學館來的低，代表空間配置與使用模式不同會影響到建築物生命週期的碳排放量，綜合教學型大樓與新生教學館在空間配置上存在很大的差異，新生教學館是一棟純上課使用的教學大樓，而綜合教學大樓是一棟新型的教學大樓，每一層樓只有兩三間上課用的教室，在頂部樓層有幾間辦公室，反而多了很多學生自我使用空間以及一間全校最大跨樓層的挑高演講廳，因此進一步查閱 2022 年 2023 年度綜合教學館與新生教學館的用電情形，表 4-3 顯示 2022 年 2023 年綜合教學館與新生教學館每個月的平均的用電情形：

表 4-3 2022 年 2023 年綜合教學館與新生教學館每個月的平均的用電情形

月份	綜合教學大樓	新生教學館
	用電量(度)	用電量(度)
一月	12052.21	12821.58
二月	21335.47	12909.72
三月	31233.605	18436.2
四月	30969.955	21101.365
五月	35460.935	19645.66
六月	33080.355	20184.455
七月	30600.865	25289.045



八月	34386.24	26170.35
九月	46211.64	44050.34
十月	38349.435	33780.295
十一月	33631.07	26784.235
十二月	27301.87	17833.54
總計	374613.65	279006.785

由表 4-3 可以觀察出綜合教學館雖然上部結構面積比新生教學大樓多了 1.51 倍，但是在用電量上面卻只比新生教學大樓多 1.34 倍，經過五十年後的使用，建築物生命週期的每平方公尺總碳排反而是綜合教學館比新生教學館來的低，而且從表上可以發現，在寒假時段的一月份用電量，綜合教學館的用電量還比新生教學大樓低。除此之外本研究還發現一個有趣的現象，兩館的用電量差距比較大的月份在三、六、十二月，剛好是台大期中考與期末考的月份，可能是因為較多學生使用自我學習空間導致用電量增加，相反的，在暑假時沒有學生使用反而用電會下降，在後面的章節會統整使用者心得問卷結果，得知是否使用者認為自我學習空間是教學型大樓必要存在的空間，如果分數越高就代表學生會在接近期中考與期末考的時間大量使用學生自我學習空間，導致用電量的增加。

反觀之，同樣是具備多功能的教學型大樓，博雅教學館在在每個人所使用到的蘊含碳量低於綜合教學館，但是在使用碳上博雅教學館遠高於綜合教學館，導致最後生命週期總碳排博雅教學館高於綜合教學館，兩棟教學館都有挑高的空間，博雅館擁許多間挑高型的階梯教室以及較多的辦公室與研究中心，而綜合教學館則是擁有一間全校最大的綜合演講廳以及較多學生自我學習空間，作為辦公室與研究中心的空間比起博雅大樓少上許多，而從每個人所使用到的使用碳結果來看，博雅教學館卻比綜合教學館高上許多，本研究從 112 學年度挑高教室與



大型綜合演講廳的上課時間與使用頻率得知，挑高教室的使用時間遠高於大型綜合演講廳，表 4-4 顯示了同樣具有挑高空間的博雅教學館與綜合教學館使用情形。

表 4-4 博雅教學館與綜合教學館挑高空間使用情形

	使用碳/上 部結構總 面積	挑高教 室面積	挑高教室面 積概述	挑高教 室可使 用體積	112 學年上 學期每周上 課使用時數	112 學年下 學期每周上 課使用時數
	kgCO ₂ eq/ m ²	m ²		m ³	hr	hr
博雅教 學館	1769.36	1170.30	博雅 101、 博雅 102、 博雅 103、 博雅 201、 博雅 202	5346.46	154.00	133.00
綜合教 學館	1065.83	422.96	綜合大講堂	4314.15	11.00	18.00

從表 4-4 得知，同樣是擁有挑高空間的博雅教學館與綜合教學館的挑高空間，在不同需求的空間規劃下，博雅教學館挑高教室不論在室內可使用體積、使用頻率與時間都高於綜合教學館的大型演講空間，進而導致挑高教室的使用碳上遠高於大型演講空間。

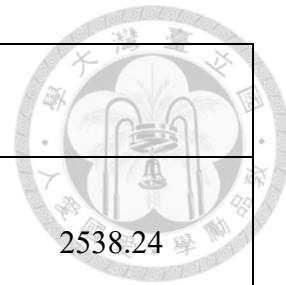
本研究進一步去探討使用碳與冷氣使用面積之間的影響，發現擁有較多辦公空間的博雅教學館，在每單位面積使用碳上遠高於其他兩棟教學型大樓，表 4-5



顯示了三棟教學型大樓使用碳排與冷氣使用面積之關聯。

表 4-5 三棟教學型大樓冷氣使用面積說明與使用碳結果分析

	上課用教室面 積	上課用教室 面積概述	辦公空間面 積	辦公空間面積概 述
	m^2		m^2	
博雅教學館	2238.81	一般上課教 室、未來教 室、 電腦教室、 多媒體製作 室、微型教 學室	743.28	教學發展中心辦 公空間、職員 室、統計學程辦 公室、生命教育 中心、 全國夏季學院辦 公室、教學發展 中心、組長室、 研究室、共同教 育中心、主任辦 公室、控制室
新生教學大樓	2552.91	一般上課教 室	10.17	管理員室
綜合教學館	2510.90	一般上課教 室	167.67	中控室、國際學 院辦公室、 華語文推展辦公 室、教師辦公室
	學生自我學習 空間面積	學生自我學 習空間面積 概述	冷氣使用面 積	使用碳排/冷氣使 用面積
	m^2		m^2	$kgCO2eq/m^2$
博雅教學館	268.53	一樓學習開 放空間、外 聘教師辦公 室、	3250.62	4200.80



		會議室、討論室		
新生教學大樓	0	無	2563.08	2538.24
綜合教學館	496.35	開放學習空間、自動化書庫服務中心、專題討論室、貴賓室、討論室、教師休息室、學習匯所、會議室	3174.92	2636.66

表 4-5 觀察到擁有相近的冷氣使用面積的博雅教學館與綜合教學館，具有較多辦公空間的博雅教學館的每單位冷氣使用面積的使用碳是最高的，擁有較多學生自我學習空間的綜合教學館在使用碳上反而沒有因此而提升，本研究推測與上述案例分析當中所得到的結果相符合，自我學習空間的使用頻率將影響用電量有一定的關聯，辦公室空間使用的時間與頻率大於學生自我學習空間，導致辦公空間在使用碳上高於學生自我學習空間，學生自我學習空間的節能減碳，將對於使用碳排放的結果有很大的影響。

由上述結果得知，教學型大樓空間配置擁有較多的挑高教室、辦公室以及研究中心，將大大提升使用階段的碳排放量。經過三棟建築型大樓 BIM 模型建置進行元素提取得到三棟碳教學大樓的碳排放量，與基礎功能單元比較數據，總結出下列兩點小結：

一、空間配置與碳排放之間的影響



假設碳排量計算了露臺空間的材料碳排，在進行功能單元比較時把戶外露臺空間一併納如探討，但在碳排放量沒有變動下，加入戶外露臺面積與體積導致分母增加了，代表計算式之比較方式就會產生偏差，因此必須進一步比對使用者心得問卷統計結果，去得知使用者認為戶外露臺環境是否為必要之空間，如果使用者認為露臺空間是教學型大樓必要的空間，那就要考慮其他碳排放較為公平的比較方式，如果使用者認為教學型大樓沒有必要存在露臺的使用空間，那單純用樓地板面積為功能單元比較是沒問題的。如較多功能的教學型大樓在碳排放的用量會有所增加，若將教學大樓功能單元細化比較，更能凸顯在設計階段多餘的空間使用之重要性。因此需要從使用者心得回饋，透過使用者反饋是否認為有什麼多餘功能與設計空間，避免做過度設計，在設計規劃階段就能減少碳排用量。

二、空間配置與用電量之間的影響

不同教學型大樓在空間配置上會影響碳排放的差異，尤其在挑高型的教室會導致使用碳排的增加，當教室的空間高度變高，將提高建材的使用與用電量的增加，需要進一步調查使用者心得，從問卷結果了解使用者對於挑高的空間感受度是否能提高使用者的舒適度，是否有挑高的設計必要。研究內從案例分析當中得知，自我學習空間的使用頻率將影響用電量，透過問卷結果了解使用者是否認為自我學習空間是教學型大樓必要存在的空間，如果分數越高就代表學生會在接近期中考與期末考的時間大量使用學生自我學習空間，導致用電量的增加。



4.2 問卷分析

針對台灣大學使用過博雅教學館、綜合教學館以及新生教學館的使用者進行三棟教學型大樓使用心得調查，在 70 份有效回傳資料當中，填寫的使用者分別來自工學院、管理學院、電資學院、社會科學院、法律學院、醫學院、機電學院以及生農學院，年齡從 22 到 58 歲不等。從使用者回饋當中可以看到，教學型大樓的空間配置不論在戶外露臺空間、階梯教室挑高配置舒適度都有相當高的分數，再來就是學生自我學習空間與教師休息室在滿分 10 分的分數下，都有超過 7 的分數，表 4-6 是使用者問卷調查後的結果：

表 4-6 使用者問卷調查後的結果

教學型大樓使用者心得調查	
本研究將針對台大三棟教學型大樓博雅教學館、綜合教學館、新生街學大樓的空間配置的滿意度與舒適度進行使用者心得調查，調查範圍為曾經使用過以上三棟教學型大樓的老師與學生，每題 1-10 分，分數越高代表越重要	
題目	分數
不論在三棟教學型大樓的戶外露臺與陽台空間，都有擺設桌椅或是景觀造景供大家使用，您是否覺得戶外空間是教學型大樓必要的配置？	7.9
三棟教學型大樓擁有許多學生自習的空間，是否覺得讀書空間有佔掉大樓空間必要性？	7.4
是否覺得教師休息室與外聘教師休息室是有必要存在的空間？	7.2
階梯教室挑高的設計是否有比一般教室沒有挑高的空間舒適？	8

<p>是否有其他覺得教學型大樓有必要增設的空間，或是覺得多餘的空間？</p>	<p>規劃適宜，不需要調整。</p> <p>電腦教室、影印室 傳統教室如新生大樓的插座數量太少，不利使用平板、筆電作筆記，會沒電。</p> <p>感覺戶外空間似乎可以增添一些遮擋雨水的設計。</p> <p>室內討論空間與會議室可以多一點。</p>
--	---

從調查結果得知，目前三棟教學型大樓的空間配置對於使用者來說，戶外露臺使用空間、學生與教師使用空間以及階梯教室挑高帶來的舒適性對於使用者的反饋都好的，對於目前教學大樓的空間配置給予正向的回饋。



4.3 整合探討與分析

本研究經過三棟建築型大樓 BIM 模型建置，透過元素提取建築物的材料用量，乘上材料的碳排放係數得到三棟教學型大樓的蘊含碳排放量，將基礎功能單元與三棟教學大樓蘊含碳進行初步比較，搭配針對台灣大學使用過博雅教學館、綜合教學館以及新生教學館的使用者進行三棟教學型大樓使用心得調查，綜合案例分析與使用者心得問卷調查分兩項結果較明顯之現象說明：

一、空間配置與碳排放之間的影響：

由問卷調查結果得知，戶外空間在使用者調查中是教學型大樓重要的空間，因此認為教學型大樓的面積與體積在進行功能單元比較時，應考慮戶外露台空間，為了避免在擁有許多戶外可以使用的露台面積，計算的每單位分母面積與體積放大了，導致計算式之比較方式產生偏差，應將露台空間之材料碳排扣除，如：樓地板、花圃造景之圍籬或扶手欄杆，才是碳排放基準，再除上總面積做為功能單元比較才合理。

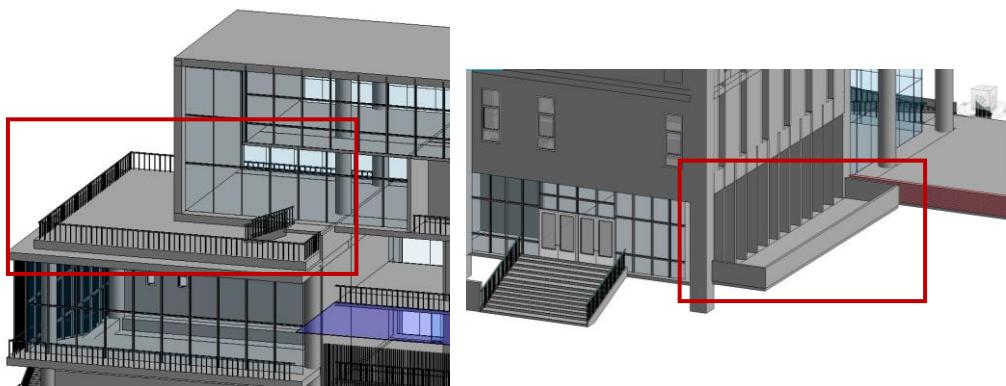


圖 4-2 教學型大樓戶外露臺空間 BIM 模型示意圖

除了基礎型功能單元，使用人數也是教學型大樓可以使用的功能單元，本研究發現功能較單一的教學型大樓在每人所排放的蘊含碳是最低的，而功能最多且擁有最多挑高空間的博雅教學型大樓，在每人所排放的使用碳是最高的，因此使



用人數可以一定程度反映一棟教學型大樓的功能性。

於使用者方面，多數認為空間挑高的學習空間較為舒適，欲提高上課空間的舒適度，挑高設計是有必要存在的空間規劃，因此可以從使用層面探討碳排放的用量，同樣是挑高空間，博雅教學館擁有較多的階梯教室，綜合教學館擁有全校最大的演講廳，在使用碳排放量上，博雅教學館的碳排放遠高於綜合教學館，同樣是挑高的空間設計，在階梯教室的碳排放量相對較高，因為在材料使用上增加、使用頻率較高以及使用時間也較長，照明與冷氣使用也連帶增加用電量，同為大型演講廳的挑高空間在碳排放量就相對於一般階梯教室來的少，因為在同樣的空間下材料使用量相對少，並且需要用到此空間需求比起一般上課教室的使用度相對少，從較多階梯教室的博雅教學館與擁有全校最大演講廳的綜合教學館碳排放量可以觀察到此現象。

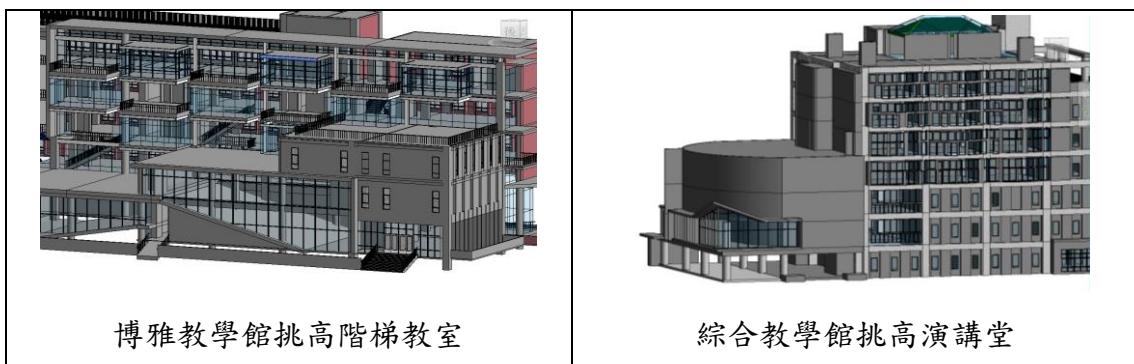


圖 4-3 博雅教學館與綜合教學館挑高空間 BIM 模型示意圖

二、空間配置與用電量之間的影響:

使用者認為學生自我學習空間是教學型大樓必要存在的空間，從案例分析當中本研究得知自我學習空間的使用頻率將影響用電量，在接近期中考與期末考的時間的月份擁有較多使用學生自我學習空間的綜合教學型大樓用電量的增加，是因為學生會去使用學生自我學習空間所導致。雖然有些人會認為學生自我學習空間沒有去使用還刻意設計規畫此空間也會提升蘊含碳的排放，但是對於教學型大



樓來說，使用者是會去使用自我學習空間的，且在沒有人使用時用電量也會隨之下降，對於建築物全生命週期的碳排放來說，未必是增加的，還有可能比設定為其他空間還來的減碳，所以學生自我學習空間對於教學型大樓來說是有必要的空間配置。

教師休息室在使用者問卷調查結果得知也是有教學型大樓會使用到的空間，所以在空間規畫設計時，在教學型大樓上是有需要存在的空間，況且在使用者心得回饋大多數認為目前教學型大樓的空間配置大多數的使用者都認為規畫事宜、無須調整，因此較無法在設計階段就減少碳排用量，而是探討施工與使用階段是否能夠使碳排放用量更精簡。研究內與一些文獻都有發現，使用碳對於建築物生命週期的碳排放影響是最大的，尤其在多功能型建築的使用碳會比單一功能建築物的使用碳來的高，因此如何執行運營階段的節能減碳，將對於建築物生命週期碳排放量的減少有著至關重大的影響關鍵。

第5章 討論



5.1 現代趨勢的演化

可以從博雅教學館與新生教學館兩棟建築物的空間配置碳排放量觀察到，博雅教學館啟用於2011年是一棟比較新的教學型大樓，目標為改善學校長期教學空間規劃設置大型教室及研討教室等教學空間，解決大型教室不足之情況，加上配合學校發展提供教學行政所需之空間，包含教學發展、通識教育中心等教學單位，並且擁有許多露臺開放空間供學生使用，由於其特殊的設計以及多功能性，入圍2017「遠東建築獎：傑出建築獎」。而新生教學大樓啟用於1968年，是一棟僅作為教室使用的教學型大樓，設計挑高以及多功能使用空間。

以新生教學大樓的數值為基準去看三棟教學大樓碳排放與功能單元比較之間倍數結果的差距，同樣是地上五層的建築物在每平方公尺蘊含碳的排放量博雅教學館比新生教學館多了約1.09倍，在每平方公尺使用碳排放量博雅教學館卻高於新生教學館1.41倍(如表5-1所示)，從此現象可以看出隨著教學型大樓的多功能性以及教室舒適度提升，碳排放量也會隨之提升，尤其在使用碳方面的差異甚大。從一些文獻統計得知，運營階段對於建築生命週期碳排放影響是最大的，基於不同工法對南京某公共建築進行了全生命週期碳排放評估，發現運營階段、施工階段和拆除階段的碳排放比例分別為85.4%、12.6%和2%[49]。香港建築物在建造過程中的碳排放量，結果統計，83%的碳排放來自建築材料的生產，而只有8%和9%的碳排放來自建築材料運輸和建築設備[50]。因此在使用階段的節能減碳對於教學型大樓的減碳效果擁有顯著的成效。

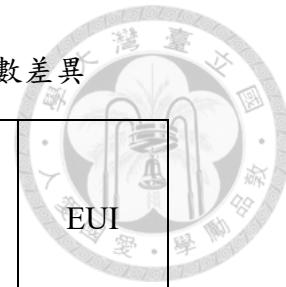


表 5-1 三棟教學大樓碳排放與功能單元比較結果倍數差異

功能單元	蘊含碳排/上部結構總面積	蘊含碳排/室內可使用體積	蘊含碳排/人	使用碳/人	EUI
單位	kgCO2e q/m ²	kgCO2e q/m ³	kgCO2eq /人	kgCO2eq/人	kWh/m ² . year
新生教學大樓	1.00	1.00	1.00	1.00	1
博雅教學館	1.09	1.41	1.29	1.68	1.41
綜合教學館	1.36	0.85	2.03	1.27	0.83
功能單元	使用碳/上部結構總面積	使用碳/室內可使用體積	總碳排/上部結構總面積	總碳排/室內可使用體積	
	kgCO2e q/m ²	kgCO2e q/m ³	kgCO2eq /m ²	kgCO2eq/m ³	
新生教學大樓	1.00	1.00	1.00	1.00	
博雅教學館	1.41	1.43	1.35	1.37	
綜合教學館	0.85	0.85	0.95	0.95	

另外可能導致新生教學大樓在使用碳方面遠低於博雅教學館的原因，是因為舊式建築在設計插座數量時比起新型的教學型大樓來的少上許多，由於現在的學生基本上都有使用平板與筆記型電腦的習慣，從使用者心得問卷就有使用者指出，新生教學大樓的插座數量明顯不足，這也可能是導致新生教學大樓用電量遠低於博雅教學館的原因。



5.2 不同蘊含碳計算方法對於結果可能存在差異

本研究除了使用 BIM 模型建置進行元素提取，提取出建築物的材料用量乘上材料的碳排放係數的方法，得到三棟教學型大樓的蘊含碳排放量，還有使用建築研究所低碳手冊所提供的結構回歸公式去算三棟教學型大樓上部結構的蘊含碳排放量，建研所結構回歸公式主結構包含柱、樑、樓板、外牆、結構內牆、樓梯等結構體工程，表 5-2 是建研所主結構回歸公式：

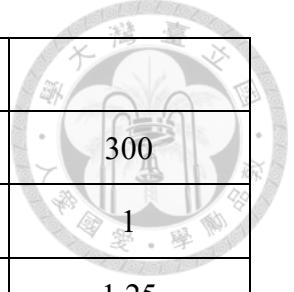
表 5-2 建研所主結構回歸公式[44]

地上主結構總碳排公式	
地上主結構總碳排 C_u	$C_u = A_{Fu} \times C \times W$
全案地上主結構單位碳排密度 C	$C = (224 + 4.11 \times (S - 10) + 300 \times (I \times S_a D / F_u - 0.192) + 68.74 \times (S_p - 1.0) + 0.17 \times (D_0 - 300) + 0.13 \times (L - 300) + 1.05 \times (B_H - 3.5)) \times R_s \times F, \text{且 } C \geq 165$

主結構碳排密度計算參數以及各教學大樓計算參數結果如表 5-3 所示，其他詳細參數計算方式請參閱[44]。

表 5-3 主結構碳排密度計算參數以及各教學大樓計算參數結果

類別	參數名稱	博雅教學館	綜合教學館	新生教學大樓
基本資料	地上層樓地板面積 A_{Fu} (m^2)	7717.6	7854.13	5200.95
	地上樓層數 S (層)	5	7	5
	主地面樓層高 B_H	5	5.6	4.95



	(m)			
	內部隔間 D_0 (kg/m^2)	300	300	300
	W 構造係數	1	1	1
結構 計算 報告 參數	地震力用途係數 I	1.25	1.25	1.25
	工址設計水平嘉速度反應譜係數 SaD	0.6	0.6	0.6
	結構系統地震力折減係數 Fu	1.79	1.79	1.79
	活載重 L	250	250	250
	靜力折減分析 Rs	0.95	0.95	0.95
結構 設計 參數	跨距變化 Sp	1.49	1.29	1.58
	整體建築形狀係數 F	1.08	1.03	1.03
	低碳混凝土減碳率 LCCR	1	1	1
	舊建築再利用率 RN	1	1	1

本研究將 BIM 模型進行元素提取所計算的主結構蘊含碳排放量與建研所上部主結構回歸公式結果做比較，發現在蘊含碳排放量有些許差異。

表 5-4 BIM 模型進行元素提取所計算的主結構蘊含碳排放量與建研所上部主結構回歸公式結果比較

系館	BIM 結構蘊含碳計算結果($\text{kgCO}_2\text{eq}/\text{m}^2$)	建研所回歸公式($\text{kgCO}_2\text{eq}/\text{m}^2$)
博雅教學館	326.84	307.902



新生教學大樓	299.30	298.507
綜合教學館	406.84	289.447

從表中可以發現對於啟用時間較新的教學型建築物，建研所回歸公式所計算出的蘊含對於較新的建築上部主結構碳排放相近，但對於最新的教學型大樓綜合教學館的建築類型過於低估，本研究內觀察到的可能原因，無法反映結構斷面的差異，由於新生教學大樓是在 1968 年就啟用的建築，在結構耐震方面比起兩棟較新的教學型大樓來的不足，從結構斷面就可以看出材料用量的差異，新生教學大樓的結構柱斷面尺寸是 45×80 公分，博雅教學館是 80×80 公分，而綜合教學館的結構柱斷面尺寸是 100×100 公分，新生教學大樓在結構柱的斷面尺寸明顯小上許多，因此整體混凝土材料的使用也會少上許多，而三棟教學型大樓裡最新的綜合教學館的斷面尺寸是最大的，這點在結構回歸公式裡面是無法看出其差異。本文推測，可能是當初在收集不同建築相關資料時，較新的建築圖資並未取得，導致在統計回歸公式時，在新型建築的數據相對缺乏。

第6章 結論



6.1 研究結論

透過本研究發現很多教學型大樓功能單元是不能被定義的，必須透過更細部建模標準和影響評估方法，應詳細描述建築物提供的服務質量，比如使用目的以及其他使用者的調查與感受，並在相關時將其納入功能單元中以供比較，才能減少缺乏有關建築物的信息，以減少參數不確定性。

從文獻回顧當中也可以發現，如何有效定義功能單元仍然是目前建築業所尚未達成一致的標準，不同的建築類型使用方式以及數據收集、計算和建築物本身所提供的服務都不盡相同，導致生命周期預測的困難，對於結果的不同解釋，增加了實現全面分析的挑戰性。本研究單純從基礎功能單元對於教學型大樓進行功能單元比較，會發現每公尺平方蘊含碳排放最低的是新生教學大樓，但是新生教學大樓僅僅作為教室使用，無提供其他多元的服務需求。

教學型大樓適用的功能單元除了基礎功能單元，使用人數也是一個可以使用的功能單元，本研究發現功能較單一的教學型大樓在每人所排放的蘊含碳是最低的，而功能最多且擁有最多挑高空間配置的博雅教學型大樓在每人所排放的使用碳是最高的，因此使用人數作為教學型大樓功能單元進行比較，可以反映一棟教學型大樓的功能性。如果教學型大樓有配置戶外露臺空間，在計算碳排放量時應將露台空間之材料碳排扣除，避免建築物算入的面積與體積增加，導致每單位平方公里與每單位立方公尺蘊含碳排放量減少了，造成計算式之比較方式產生偏差。

經過案例分析與使用者使用心得問卷探討得知，透過使用者心得問卷分析觀察到，使用者認為教學型大樓目前的空間配置適宜，因此無法在設計階段就先將多餘的空間剷除減少碳排用量，本研究觀察到使用階段的節能減碳會大大影響建



建築物生命週期的碳排放量，雖然綜合教學型大樓在每平方公尺的蘊含碳比起新生教學大樓的來的高，但是經過五十年後的建築物生命週期每平方公尺所排放的總碳排放量卻比新生教學館來的低，根據用電資料得知，在學生自我學習空間較多的綜合教學型大樓，除了在學生自我學習空間使用機會較高的期中考與期末考得月份有較高的用電量產生，較多功能的綜合型教學大樓每個月的用電度數卻沒有比純教學用的新生教學大樓高上許多，因此使用空間的節能減碳是可以大大影響建築生命週期的碳排放量。

在滿足使用者多功能與舒適度需求的博雅教學館，相較於其他兩棟教學型大樓在建築生命週期碳排放量上面卻高於其他兩棟教學型大樓，尤其是在使用碳排放量更是擁高於其他兩棟教學型大樓。結果顯示單純用基礎功能單元比較去描述一棟教學型建築物的碳排放量，是無法描述以及看出建築物提供的服務質量。綜合以上結論得知教學大樓的功能單元定義很難被量化，但要適度的量化才能確保比較的基準。

6.2 研究範圍與限制

本研究在取得相關建築圖資時，並未取得完整的結構圖說，因此未獲得上部結構以下的連續壁與基礎資訊，所以僅計算三棟教學型大樓上部結構的碳排放量與其適用的功能單元，所以在地下室的教學型大樓功能單元，比如：綜合教學館的圖書存放空間以及博雅教學館的腳踏車停放區，並未納入教學型大樓的功能探討。

本研究在計算建築物生命週期碳排放量時，並未計算完整的生命週期，在蘊含碳方面僅計算資材製造階段 A1-A3，並未計算施工、使用維護以及最終處置階段，加上沒有結構詳圖無法掌握建築結構細部的情形與材料的精確資訊，只能透過現場實地觀察取得三棟教學型大樓上部結構的資訊，新生教學館在 2009 年有



進行一次結構補強，無法獲取補強內容資訊，所以並未探討建築生命週期在修繕與補強階段的碳排放情形，在碳排放計算上可能跟實際建築物生命週期的碳排放量可能會有些許的誤差。

此外，學校智慧型電表的建置，在 2023 年以後許多館舍才有當日的用電資訊，因此在使用碳方面僅計算 B6 營運耗能的部分，用三棟教學型大樓 112 年及 113 年平均用電度數，乘上本研究假設的往後五十年的台電用電系數，得到五十年的使用碳情形，目前的研究還無法有較多的資料，進行更細部的探討各館在使用碳排與使用者之間的關聯。

雖然從使用者心得問卷得知，目前教學型大樓空間配置使用者認為皆是會使用到的空間，但這些空間是否配置合理並不在本研究所討論的範圍，日後的研究可以再進行相關的探討，教學型大樓有這些空間規劃的需求，但是否一定要存在教學型大樓中，是日後可以再進行研究的議題。

參考文獻

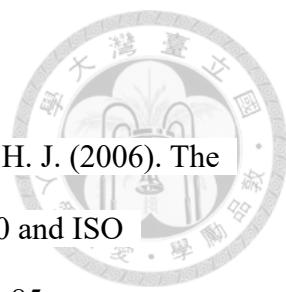


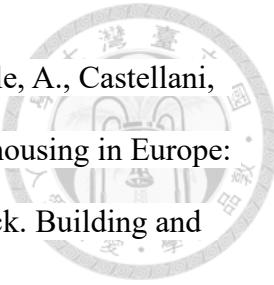
- [1] Chirjiv, A. K., & Ben, A. (2017). Recent Developments, Future Challenges and New Research Directions in LCA of Buildings: A Critical Review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 67, 408-416.
- [2] Hischier, R., & Rechert, I. (2003). Multifunctional electronic media-traditional media: The Problem of an Adequate Functional Unit A case study of a printed newspaper, an internet newspaper and a TV broadcast. The International Journal of Life Cycle Assessment, 8, 201-208.
- [3] Kim, S., & Dale, B. (2006). Ethanol fuels: E10 or E85—life cycle perspectives (5 pp). The International Journal of Life Cycle Assessment, 11, 117-121.
- [4] Reap, J., Roman, F., Duncan, S., & Bras, B. (2008). A survey of unresolved problems in life cycle assessment: Part 2: impact assessment and interpretation. The International Journal of Life Cycle Assessment, 13, 374-388.
- [5] Cabeza, L. F., Rincón, L., Vilariño, V., Pérez, G., & Castell, A. (2014). Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review. Renewable and sustainable energy reviews, 29, 394-416.
- [6] Backes, J. G., & Traverso, M. (2021). Application of life cycle sustainability assessment in the construction sector: A systematic literature review. Processes, 9(7), 1248.
- [7] Röck, M., Sørensen, A., Tozan, B., Steinmann, J., Horup, L. H., Le Den, X., & Birgisdottir, H. (2022). Towards embodied carbon benchmarks for buildings in Europe:# 2 Setting the baseline: A bottom-up approach.
- [8] Simonen, K., Rodriguez, B. X., & De Wolf, C. (2017). Benchmarking the embodied carbon of buildings. Technology| Architecture+ Design, 1(2), 208-218.



- [9] Backes, J. G., & Traverso, M. (2021). Life cycle sustainability assessment—a survey based potential future development for implementation and interpretation. *Sustainability*, 13(24), 13688.
- [10] Gamarra, A. R., Istrate, I. R., Herrera, I., Lago, C., Lizana, J., & Lechon, Y. (2018). Energy and water consumption and carbon footprint of school buildings in hot climate conditions. Results from life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 195, 1326-1337.
- [11] Mónus, F. (2022). Environmental education policy of schools and socioeconomic background affect environmental attitudes and pro-environmental behavior of secondary school students. *Environmental Education Research*, 28(2), 169-196.
- [12] Almeida, R. (1985). Handbook for educational buildings planning (No. 11). Unesco/Unicef Co-operative Programme.
- [13] Wijayasundara, M., Zhang, L., & Duffield, C. (2020). Relating building space to performance outcomes—A methodology to explore the relationship. *Journal of Building Engineering*, 32, 101662.
- [14] Winterbottom, M., & Wilkins, A. (2009). Lighting and discomfort in the classroom. *Journal of environmental psychology*, 29(1), 63-75.
- [15] Marchand, G. C., Nardi, N. M., Reynolds, D., & Pamoukov, S. (2014). The impact of the classroom built environment on student perceptions and learning. *Journal of Environmental Psychology*, 40, 187-197.
- [16] Politi, S., Antonini, E., & Wilkinson, S. J. (2018, January). Overview of building LCA from the sustainability rating tools perspective. In Proceedings of the ZEMCH 2018 International Conference, Melbourne, Australia (pp. 237-250).
- [17] Tirelli, D., & Besana, D. (2023). Moving toward net zero carbon buildings to face

Global Warming: A narrative review. Buildings, 13(3), 684.

- 
- [18] Finkbeiner, M., Inaba, A., Tan, R., Christiansen, K., & Klüppel, H. J. (2006). The new international standards for life cycle assessment: ISO 14040 and ISO 14044. *The international journal of life cycle assessment*, 11, 80-85.
- [19] Julia, M. B., Finkbeiner, M. (2018). Organizational LCA. *Life Cycle Assessment: Theory and Practice*: 481-498.
- [20] Global, B. R. E. (2018 Jan 1)."BRE Global Methodology for the Environmental Assessment of Buildings Using EN 15978: 2011.
- [21] Panesar, D. K., Seto, K. E., & Churchill, C. J. (2017). Impact of the selection of functional unit on the life cycle assessment of green concrete. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 22, 1969-1986..
- [22] De Simone Souza, H. H., de Abreu Evangelista, P. P., Medeiros, D. L., Albertí, J., Fullana-i-Palmer, P., Boncz, M. Á., ... & Gonçalves, J. P. (2021). Functional unit influence on building life cycle assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 26, 435-454.
- [23] Cabeza, L. F., Rincón, L., Vilariño, V., Pérez, G., & Castell, A. (2014). Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 29, 394-416.
- [24] Politi, S., Antonini, E., & Wilkinson, S. J. (2018, January). Overview of building LCA from the sustainability rating tools perspective. In *Proceedings of the ZEMCH 2018 International Conference*, Melbourne, Australia (pp. 237-250).
- [25] Saade, M. R. M., Guest, G., & Amor, B. (2020). Comparative whole building LCAs: How far are our expectations from the documented evidence?. *Building and environment*, 167, 106449.

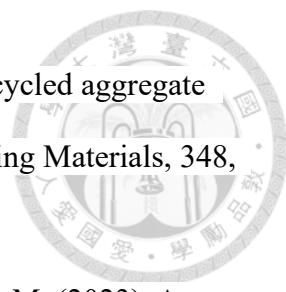


- [26] Lavagna, M., Baldassarri, C., Campioli, A., Giorgi, S., Dalla Valle, A., Castellani, V., & Sala, S. (2018). Benchmarks for environmental impact of housing in Europe: Definition of archetypes and LCA of the residential building stock. *Building and Environment*, 145, 260-275.
- [27] De Larriva, R. A., Rodríguez, G. C., López, J. M. C., Raugei, M., & i Palmer, P. F. (2014). A decision-making LCA for energy refurbishment of buildings: Conditions of comfort. *Energy and Buildings*, 70, 333-342.
- [28] De Souza, L. L. P., Lora, E. E. S., Palacio, J. C. E., Rocha, M. H., Renó, M. L. G., & Venturini, O. J. (2018). Comparative environmental life cycle assessment of conventional vehicles with different fuel options, plug-in hybrid and electric vehicles for a sustainable transportation system in Brazil. *Journal of cleaner production*, 203, 444-468.
- [29] Backes, J. G., Hinkle-Johnson, R., & Traverso, M. (2023). The influence of the functional unit on the comparability of life cycle assessments in the construction sector: A systematic literature review and attempt at unification for reinforced concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 18, e01966.
- [30] Oblinger, D. (2006). Learning spaces (Vol. 444). Washington, DC: Educause.
- [31] Wijayasundara, M., Zhang, L., & Duffield, C. (2020). Relating building space to performance outcomes—A methodology to explore the relationship. *Journal of Building Engineering*, 32, 101662.
- [32] Weinstein, C. S. (1979). The physical environment of the school: A review of the research. *Review of educational Research*, 49(4), 577-610.
- [33] Puteh, M., Che Ahmad, C. N., Mohamed Noh, N., Adnan, M., & Ibrahim, M. H. (2015). The classroom physical environment and its relation to teaching and

learning comfort level. International Journal of Social Science and Humanity, 5(3), 237-240.

- 
- [34] Saraiva, T. S., De Almeida, M., Bragança, L., & Barbosa, M. T. (2018). Environmental comfort indicators for school buildings in sustainability assessment tools. *Sustainability*, 10(6), 1849.
- [35] Fisher, K. (2001). Building Better Outcomes: The Impact of School Infrastructure on Student Outcomes and Behaviour. *Schooling Issues Digest*.
- [36] Saxe, S., & Kasraian, D. (2020). Rethinking environmental LCA life stages for transport infrastructure to facilitate holistic assessment. *Journal of Industrial Ecology*, 24(5), 1031-1046.
- [37] Bahramian, M., & Yetilmezsoy, K. (2020). Life cycle assessment of the building industry: An overview of two decades of research (1995–2018). *Energy and Buildings*, 219, 109917.
- [38] Furberg, A., Arvidsson, R., & Molander, S. (2022). A practice-based framework for defining functional units in comparative life cycle assessments of materials. *Journal of Industrial Ecology*, 26(3), 718-730.
- [39] Evangelista, P. P., Kiperstok, A., Torres, E. A., & Gonçalves, J. P. (2018). Environmental performance analysis of residential buildings in Brazil using life cycle assessment (LCA). *Construction and Building Materials*, 169, 748-761.
- [40] Hartmann, C., Özdemir, Ö., & Hafner, A. (2022, September). What is the impact of a basement on a building LCA and what role does the functional unit play?. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1078, No. 1, p. 012094). IOP Publishing.
- [41] Xing, W., Tam, V. W., Le, K. N., Butera, A., Hao, J. L., & Wang, J. (2022). Effects

of mix design and functional unit on life cycle assessment of recycled aggregate concrete: Evidence from CO₂ concrete. *Construction and Building Materials*, 348, 128712.

- 
- [42] Gao, H., Wang, X., Wu, K., Zheng, Y., Wang, Q., Shi, W., & He, M. (2023). A review of building carbon emission accounting and prediction models. *Buildings*, 13(7), 1617.
 - [43] Yona, L., Cashore, B., Jackson, R. B., Ometto, J., & Bradford, M. A. (2020). Refining national greenhouse gas inventories. *Ambio*, 49, 1581-1586.
 - [44] 林憲德，低碳（低蘊含碳）建築評估手冊 2023 版，內政部建築研究所
 - [45] Hongman S, (2020). "Direct and highly selective conversion of captured CO₂ into methane through integrated carbon capture and utilization over dual functional materials." *Journal of CO₂ Utilization* 38: 262-272.
 - [46] Zhou, S., Zhou, L., Zhang, Y., Sun, J., Wen, J., & Yuan, Y. (2019). Upgrading earth-abundant biomass into three-dimensional carbon materials for energy and environmental applications. *Journal of Materials Chemistry A*, 7(9), 4217-4229.
 - [47] Hammond, Jones (esperto LCA.), Lowrie, & Tse. (2011). Embodied Carbon: The Inventory of Carbon and Energy (ICE). BSRIA.
 - [48] Crawley, D., & Aho, I. (1999). Building environmental assessment methods: applications and development trends. *Building Research & Information*, 27(4-5), 300-308.
 - [49] Peng, S., Piao, S., Bousquet, P., Ciais, P., Li, B., Lin, X., ... & Zhou, F. (2016). Inventory of anthropogenic methane emissions in mainland China from 1980 to 2010. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(22), 14545-14562.
 - [50] Yan, H., Shen, Q., Fan, L. C., Wang, Y., & Zhang, L. (2010). Greenhouse gas

emissions in building construction: A case study of One Peking in Hong Kong. Building and Environment, 45(4), 949-955.

