

建築物生命週期之排碳量模擬與環境成本分析：混凝土預鑄與場鑄工法之比較

周瑞生*

國立臺灣科技大學 營建工程系 教授

葉冠志

國立臺灣科技大學 營建工程系 研究助理

摘要

營建產業對於地球環境造成的環境負荷多樣且複雜，其中又以 CO₂ 排放影響最大，在過去數十年營建業主要決策皆以經濟成本為考量，並無環境保護之概念，然近年來各企業逐漸體認，在追求獲利的同時，須兼顧建築物生命週期對於環境的衝擊。本研究之目的主要為提供建築物生命週期 CO₂ 排放量評估系統及環境成本計算方法，以供決策者進行建築物施工初期環境風險評估及工法使用選擇依據。分析中，藉由化石燃料、電力及水資源耗用量等估計公式模擬建築物生命週期 CO₂ 排放量，最後以簡化公式推估環境成本。研究結果發現，若以建築物使用年限 50 年計算，排碳量平均值分別為全預鑄工法 7100.79 kg-CO₂/m² 及場鑄工法 7222.42 kg-CO₂/m²。若根據本研究課徵碳稅之方法進行賦稅，以本案例總樓地板面積為 37411.72 m² 進行試算，利用場鑄工法進行建築物施工的環境成本較運用全預鑄工法進行結構體施工符合環境成本效益。

關鍵字：建築物生命週期評估、CO₂ 排放量、蒙地卡羅模擬、預鑄工法、場鑄工法、能源消耗

LIFE-CYCLE CARBON EMISSION SIMULATION AND ENVIRONMENTAL COST ANALYSIS FOR BUILDING CONSTRUCTION: A COMPARISON OF PREFABRICATION AND CAST-IN-PLACE WORK

Jui-Sheng Chou*

Professor, Department of Construction Engineering, National Taiwan University of Science and Technology, Taiwan

Kuan-Chih Yeh

Graduate Research Assistant, Department of Construction Engineering, National Taiwan University of Science and Technology Taiwan

ABSTRACT

The construction industry has a myriad of complex influences on the environment, most notable being the effect of CO₂ emissions. Over the past decade, decisions in the construction industry have been based on economic costs, with no consideration for environmental protection. However, in the past few years, companies have slowly recognized the importance of the effects of building lifecycles on the environment in addition to the original focus of maximizing profit. Thus, in this study, we propose a CO₂ emission evaluation system and an environmental cost calculation method for building lifecycles to provide a reference for policymakers when conducting primary environment risk evaluations for building construction. Fossil fuel, electricity, and water use were employed used to simulate the confidence interval range of CO₂ emissions in building lifecycles. At the end of this paper, we present a simplified evaluation method of environmental costs. The analysis results show that if a building has an estimated usage limit of 50 years, its carbon dioxide emission rate will reach an average prefabrication rate of 7110.79kg-CO₂/m² and cast-in-place rate of 7222.42 kg-CO₂/m². For total construction floor area of 37411.72 m², the environmental cost of cast-in-place work exceeds the prefabrication work using present value method. Therefore, the prefabrication work for the construction of the structure is more in line with the environmental cost-effectiveness.

Keywords: Building life cycle assessment, CO₂ emissions, Monte Carlo simulation, Prefabrication, cast-in-place,

Energy consumption.

一、緒論

隨著全球許多輕重工業蓬勃發展的同時，人類對於能源的需求也日益提升，如煤、石油等能源之消耗，導致大氣中的二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)、氟氯碳化物(CFCs)等溫室氣體(GHG)含量增加，大氣溫度逐漸上升，更加速地球的暖化現象。營建產業活動對於地球環境造成的環境負荷多樣且複雜，其中又以造成地球溫室效應之溫室氣體 CO₂ 影響最甚，約占溫室氣體排放量 82.9%(張又升，2002)，而大氣中各種氣體也以 CO₂ 對地球增溫效應貢獻比例 55% 為最高(行政院環境保護署)，根據國內相關研究統計指出營建業排碳量約為全國年總排碳量的三分之一占國內傳統產業之大宗(林憲德，2007)。

評估一棟建築物對於環境之負荷最準確的方法為詳細調查建築物全生命週期包括建材生產運輸、建造施工、建築物使用維護、拆除階段對於環境造成負荷的影響因子(Guggemos and Horvath, 2005)，因此本研究即以建築物生命週期的 CO₂ 排放量轉換成環境成本做為評估營建產業對於地球造成的環境負荷量。

國內營建業的主要決策在過去數十年皆以經濟成本為主要考量，期望盡可能地將成本降低，並無環境保護之概念。然近年來各企業逐漸體認，在追求獲利的同時，也必須兼顧建物生命週期對於環境的衝擊，因此如何使決策者在專案規劃初期選擇使用生命週期環境成本花費較低之工法即成為研究的重要課題。

目前國內建築物構造形式主要係以鋼筋混凝土(reinforced concrete)構造為主，以台北市為例，依據民國 98 年核發建築物使用執照之資料顯示，鋼筋混凝土建築物總樓地板面積為 2,638,667 m²(內政部營建署，2009)占其他構造別建築物總樓地板面積的 79.4%，而預鑄工法與場鑄工法為建造鋼筋混凝土構造建築物較常使用之工法。

在過去研究中生命週期 CO₂ 排放量的計算係依已完工建築物設計圖內所記錄的建材耗用資訊進行計算，基於建築成本及利潤的關係難再改變設計以

符合減少 CO₂ 排放量的最佳方案(Zabalza Bribián, Aranda Usón et al., 2009)，因此本研究之目的主要提供一個計算能源耗用量及 CO₂ 排放量的評估系統，利用蒙地卡羅模擬法(Monte Carlo Simulation)模擬排碳量結果，使決策者於專案初期即可推估 CO₂ 排放量之機率分佈範圍，供決策者進行環境風險評估及作為工法的選擇依據。

本研究首先收集資源及能源耗用之相關文獻，彙整計算水資源、電力、燃料之耗用估算公式並引入生命週期之概念。其次，以預鑄及場鑄工法 CO₂ 排放量為計算例，因考量變數具有不確定性，因此須定義變數之分佈類型，運用蒙地卡羅模擬對環境負荷量進行評估，建構在不同的信心水準，建築物於生命週期各階段 CO₂ 排放量及機率分佈曲線。最後，以碳稅及碳交易為基礎概念，將 CO₂ 排放量轉換為環境成本，以貨幣單位型式呈現，以利決策者進行比較，作為工法選擇之衡量依據。

二、文獻探討

文獻探討先針對預鑄及傳統場鑄工法的特性進行回顧與瞭解，再藉由前人研究環境污染因子排放量為基礎，闡述 CO₂ 排放量為環境負荷量指標之主要緣由。接著，回顧文獻估算 CO₂ 排放量之方法，輔以探究生命週期概念在評估營建產業環境負荷量之情形，確立本文之研究架構與方法，最後蒐集碳稅與碳交易之相關文獻做為計算環境成本的依據。

2-1 鋼筋混凝土構造建築物施工工法

現今鋼筋混凝土構造之建築工程依不同施工方法分類，主要可分為傳統場鑄工法(cast-in-place)及預鑄工法(prefabrication)(劉慶禧，2010)。場鑄工法為於現地施工，包含預拌混凝土運輸、現地澆鑄混凝土以至混凝土養護等一系列過程；而預鑄工法係經系統化規劃、設計之建築物，以規格化、標準化方式將之分割成許多單元構件(如柱、梁、牆、版)，在工廠以工業化方式生產製造單元構件，待其硬化後，運輸至工地加以組裝成結構體或建築物稱之(內政部建築研究所，1999)。

過去研究多以場鑄鋼筋混凝土建築或是其他構

造類別建築物進行環境分析及比較；例如 Suzuki 等人 (2005) 針對鋼骨鋼筋混凝土 (steel reinforced concrete, SRC) 構造、木造建築 (wooden structure) 及輕鋼結構建築 (lightweight steel structure) 在建造階段的能源消耗量及所產生之 CO₂ 排放量進行量化比較。分析結果顯示木造建築建造階段之能源消耗量分別為鋼骨鋼筋混凝土建築的 33.3% 及輕鋼結構建築的 60%，在 CO₂ 排放量方面則是鋼骨鋼筋混凝土建築的 30% 及輕鋼結構建築的 62.5%。由此可知，木造建築在建造階段之環境負荷量為最少，對於環境所造成之衝擊亦為最小 (Suzuki, Oka et al., 1995)。

Guggemos (2005) 列出 CO₂ 及其他包含重金屬等九項環境負荷因子進行場鑄建築及鋼構建築環境負荷量多寡之比較，其中場鑄建築因其工法型態採用大量模板及預拌混凝土建材，使得運輸工具數量增加及工期延長，CO₂、CO、SO₂、NO_x、粉塵顆粒及碳氫化合物 (hydrocarbon) 等環境負荷因子的排放皆較鋼結構建築為多。鋼結構建築則因施工時鋼構件必須進行切割、焊接、塗料等步驟，因此有較多揮發性物質 (volatile organic compound) 及重金屬 (Cr, Ni, Mn) 的污染 (Guggemos and Horvath, 2005)。

回顧文獻評估環境負荷量相關研究，甚少針對預鑄工法進行環境負荷量評估，無法得知預鑄或場鑄工法所建造之建築物在其生命週期中產生的環境負荷影響量，故本研究以預鑄工法及場鑄工法施工的混凝土建築物為例，提出一系統化之生命週期 CO₂ 評估方法。

2-2 環境負荷量指標

環境負荷因子 (environmental load factor) 指的是因為人類的行為或活動對環境造成的負擔，以致於對環境保護產生阻礙的因子例如 CO₂、SO₂ 等溫室氣體 (張又升, 2002)。營建業造成環境負荷的因子繁多，Junnila, S. (2003) 等人即針對位在芬蘭南部一棟 5 樓層，樓地板面積為 15,600 m² 之場鑄型式辦公室建築物之生命週期 CO₂、SO₂、H₂C₄、PO₄、Pb 等五項汙染因子作量化評估，其排放總量結果分別為 48,000、130、24、16、0.15 ton，CO₂ 排放量相較於 SO₂ 達 370 倍，更遠超過 Pb 環境負荷因子達 32 萬倍之多，研

究指出 CO₂ 排放所造成的環境衝擊不可被忽視 (Junnila and Horvath, 2003)。

Sihabuddin and Ariaratnam (2009) 則針對地下工程進行時之施工機具的使用情況評估 HC、CO、氮氧化合物 NO_x、CO₂ 及 SO₂ 等環境負荷因子的排放量。分析顯示，利用水平定向鑽掘技術 (horizontal directional drilling) 挖掘一孔徑為 300 mm 長度 152 m 之地下孔道所使用機具產生之環境負荷因子排放量分別為 HC：0.112 kg、CO：0.574 kg、NO_x：1.539 kg、CO₂：65.7 kg、SO₂：0.205 kg，其中 CO₂ 排放量亦占整體環境負荷因子排放的 98.7% (Sihabuddin and Ariaratnam, 2009)。

Dimoudi (2008) 等人針對位在希臘雅典內 2 棟不同規模的 RC 辦公建築將其構造分為屋頂、內外牆、梁柱構件及內部地板等部分，利用建材使用量盤查分析結果進行案例環境負荷量 CO₂ 及 SO₂ 之評估。其中，案例一為一棟地上、下層分別為 5 層和 2 層，樓地板面積為 1891 m² 之建築，屋頂及梁柱構件為混凝土建材，內外牆是以厚度 0.27 cm 磚及 5cm 厚聚苯乙烯隔熱層所組成，內部地板則由瓷磚及大理石磚所構成；案例二為地上、下層分別為 3 層和 1 層，樓地板面積為 400 m² 之建築，建材使用種類大致上與案例一相同，差別在於內外牆隔熱材使用礦棉作為材料及外牆除以磚及隔熱材組成外，另並以鋁板覆蓋。盤查分析結果顯示案例一建造完成後之 CO₂ 及 SO₂ 排放總量為 378 ton 及 1.5 ton，案例二之 CO₂ 及 SO₂ 排放總量則為 116 ton 及 0.5 ton，CO₂ 相較於 SO₂ 排放量差異最高可達 252 倍 (Dimoudi and Tompa, 2008)。

綜合上述研究結果，不論在建築物生命週期任何階段或是機具設備使用，CO₂ 排放量遠超過其他負荷因子排放量，依據重點式管理觀點，本研究選擇 CO₂ 排放量作為環境負荷量主要指標，未來研究可考慮評估其他環境負荷因子增添完整性。

2-3 二氧化碳排放量估算模式

估算生命週期 CO₂ 排放量的方法主要可分為經濟投入產出 (economic input-output based LCA) 及過程導向 (process-based LCA) 兩種估算模式。經濟投入

產出是以產業部門間財務數據為基礎，追蹤各產業間能源需求並進行環境負荷量化，其以 EIO-LCA 資料庫內每項資源或是能源例如水泥、鋼筋、煤等項目所對應之金錢為單位，衡量資源直接或間接的投入所造成環境負荷量產出。

而過程導向估算模式主要根據分解流程圖確認一項產品或建物生產過程中所有資源與能源的投入對於環境的衝擊，衡量建材生產、建築物建造或人類活動所伴隨之 CO₂ 排放量，從產品製造、使用至廢棄等生命週期階段過程中所有造成環境衝擊的影響因子加以系統化並具全面性的彙整(Chen, Burnett et al., 2001, Weisser, 2007)。但由於蒐集資料過程中必須考慮到資料可及性、時間效率及高成本問題，必須使其過程簡化，因此可依據歷史資料建構出之估計公式進行概略估算，其結果為單一值(single-value)，亦稱特定值(deterministic value)，然而在 CO₂ 的排放過程中，排放量通常會因前述因素而有所變動，具有高度不確定性(uncertainty)。

在專案初期規劃階段充滿不確定性的情況下，使用機率推估較單一值為佳，因其機率分佈範圍反映的結果可彌補單一值估計無法考慮潛在風險的缺憾，藉以提高評估對象估算結果的可靠性(reliability)及精確度(accuracy)(Elkjaer, 2000, Chou, 2011)，因此本研究即利用機率估算法(probabilistic estimation)概念以燃料、電力、水資源數量推估公式為基礎進行 CO₂ 排放量模擬。

2-4 生命週期概念應用

在營建產業相關研究中，生命週期之概念主要被應用於成本及環境評估兩方面，將建築物或建築材料視為產品，對其生命週期進行成本或環境衝擊的評估，例如 Singh 與 Tiong (2005)針對公路橋梁生命週期成本(life cycle cost, LCC)進行評估，探討如何以最低成本達到建物結構效用最佳化(Singh and Tiong, 2005)。

在環境評估方面，Suzuki 與 Oka (1998)收集 10 棟樓地板面積界於 1,253 至 22,982 m² 間辦公室建築物之相關營建資料，將其生命週期分為建造階段、使用維修階段及拆除階段並以建築物 40 年使用年限

進行 CO₂ 排放量計算，結果顯示 10 棟建築在全生命週期所產生之 CO₂ 排放總體平均量為每平方公尺(m³)樓地板排放 4,430 kg-CO₂，其中建築物使用維護階段 CO₂ 排放量為 3,480 kg/m²，佔整體將近八成，由此得知建築物使用維護階段之排碳量不容忽略(Suzuki and Oka, 1998)。

Kellenberger 與 Althaus(2009)將建築物生命週期中，從建材製作至建築物拆除之環境負荷量進行盤查分析，包含建材運輸至施工現地、建造機具燃料耗用、建材施工報廢率、輔助建材使用(連接器、黏合劑)及完工後剩餘建材等相關參數也一併納入考量，利用 Eco-indicator 99 生命週期衝擊評估模式，針對化石燃料、核能、水資源、風力、地熱及生質能源之耗用，描述不同的建材組件對環境的衝擊影響和資源利用效率(Kellenberger and Althaus, 2009)。

由上述文獻可知以生命週期概念評估環境負荷量是目前廣泛採用且嚴謹的方法，但過去研究鮮少針對預鑄建築物生命週期由最初的建材製造至最終拆除階段作一完整性的評估，因此本研究即以場鑄與預鑄建築物之生命週期(建材製造及運輸、建造施工、使用維護、拆除)過程中所消耗之燃料、電力、水資源量轉化之 CO₂，以實際工程為例進行情境分析。

2-5 碳稅與碳交易

目前最常被各國使用作為課環境稅的方式主要有碳稅及碳交易二種。碳交易(carbon trading)的概念係由政府訂定碳排放之總量目標，在訂立總量目標後，政府將排放權以配額或者拍賣的方式發放給企業單位，各企業間碳排放減量的能力不盡相同，會產生某些企業之碳排放量超過配額之情形，因此未超過總量配額之企業可將排放權出售給減量成本較高且對於達到減量目標有困難之企業，對減量能力較好的廠商而言，可以減少環境成本之花費，對整體碳排放之控管亦達成減量效果(Henrik, 2003)。然而目前國內減碳政策之方向與碳交易的概念相差較遠，因此本研究暫不深予討論。

碳稅(carbon taxes)則是為鼓勵再生能源的發展使得 CO₂ 排放減量達到減少污染及地球溫室效應減

緩等目的而對能源相關產品進行課徵稅金，碳稅係針對一般常見能源如油品、煤碳、電力及天然氣等，按其碳含量的比例徵稅亦稱為二氧化碳稅(Zhang and Baranzini, 2004；陳弘芩, 2006)。

目前國內較偏向採取能源稅徵收的課稅制度，在 2006 年由財政部所提出之能源稅條例草案中，內容主要是以年為單位採用漸進提高稅額的方式對各種化石燃料課徵能源稅。所謂能源稅即是指針對各類形式的能源產品所課徵的稅，以汽油為例，在能源稅條例草案中規定 2009 年後以每年增稅 1 元/l 對使用汽油者進行課稅，能源稅在性質上接近碳稅，差別在於課徵對象的不同，碳稅是以化石燃料本身含碳量及碳排放量進行課稅，而能源稅課徵的對象則是各種化石燃料之耗用包含進口關稅、空汙稅、汽車燃料稅等為基礎進行課稅而達到減碳的目的，並沒有如同碳稅可真實反應碳排放的環境成本，因此本研究基於目前國內稅制發展方向及課徵碳稅可

反應 CO₂ 排放環境成本之特性，採取計算碳稅的方式對模擬建築物生命週期排碳量的結果進行環境成本的轉換。

三、研究方法

3-1 碳排放量推估模型

營建產業是高耗能的產業，建築物生命週期自建材生產階段至最後拆除階段所會耗用的能源種類繁多，常使用的能源大致可分為水資源、電力及化石燃料等三類。因此本研究以營建業經常使用的三類能源項目作為環境負荷量主要來源，藉由表(1)估算模式分別計算三種能源之消耗量經係數轉換及加總後得建築物生命週期總 CO₂ 排放總量如下式 1 所示。

$$Total_{CO_2} = P_{CO_2} + W_{CO_2} + F_{CO_2} \quad (1)$$

$Total_{CO_2}$ = 生命週期總 CO₂ 排放量； P_{CO_2} = 電力耗用所排放之 CO₂； W_{CO_2} = 水資源耗用所排放 CO₂； F_{CO_2} = 化石燃料耗用所排放 CO₂。

表 1、生命週期耗能源量評估矩陣

	化石燃料消耗(F)	電力消耗(P)	水資源消耗(W)
建材生產 (manuf)		$\sum_{i=1}^n m_i \times \left(1 + \frac{w_i}{100}\right) \times M_i + \sum_{i=1}^n m_i \times \left(1 + \frac{w_i}{100}\right) \times d_i \times V_c$	$\sum_{i=1}^n Q_i \times \left(1 + \frac{w_i}{100}\right) \times N_i \times K_2 + \sum_{i=1}^n Q_i \times \left(1 + \frac{w_i}{100}\right) \times d_i \times V_w$
建築施工 (erect)	$\sum_{n=1}^s \left[\sum_{i=1}^m (F_i \times F_{cc}) - \sum_{i=1}^m (F_i \times F_{cc} \times F_{cs}) \right]$	$\sum_{j=1}^{c_s} q_j \times Q_j$	$\sum_{j=1}^{c_s} e_j \times E_j \times K_1 + \sum_{i=1}^s m_i \times M_i \times T \times K_3$
使用階段 (occup)		$P_{occup-year} \times BL$	$BL \times \sum_1^{365} P \times U \times K_6$
維護階段 (renov)		$\sum_{i=1}^n m_i \times \left(1 + \frac{w_i}{100}\right) \times M_i \times \left(\frac{BL}{Li} - 1\right)$	$\sum_{i=1}^n Q_i \times N_i \times K_2 \times \left(\frac{BL}{Li} - 1\right)$
拆除階段 (demol)		$\sum_{j=1}^{R_c} \gamma_j \times R_j + \sum_{i=1}^n m_i \times \left(1 + \frac{w_i}{100}\right) \times K_c \times V_c$	$\sum_{d=1}^x m_d \times M_d \times t \times K_3$

(1) 電力消耗

電力消耗所產生 CO₂ 排放量之計算方法，主要為參考文獻(Adalberth, 1997, Chen, Burnett et al., 2001)建築物生命週期電力消耗估計模式，文獻中將生命週期分為建材生產運輸、建築施工、建築物使用、維護、拆除五階段分別計算在各階段的電力消耗量，然而要計算各階段的電力消耗所產生 CO₂ 則必須再與電力排放係數相乘轉化後而獲得，電力排

放係數參考如表 2，建築物生命週期電力消耗產生之 CO₂ 總排放量可經由式 2 估算而得：

$$P_{CO_2} = \left[P_{manuf} + P_{erect} + P_{occup} + P_{renov} + P_{demol} \right] \times \delta \quad (2)$$

δ = 電力排放係數(kg-CO₂/kWh)。

表 2、電力排放係數

年度	電力排放係數(kg-CO ₂ /kWh)
94	0.626
95	0.637
96	0.632
97	0.631
98	0.616
99	0.612

(2) 燃料消耗

燃料消耗係根據 IPCC(聯合國政府間氣候變遷委員會)所提出的估算方法,針對建築物生命週期過程中機具或設備使用的化石燃料種類含碳量及其使用量計算化石燃料消耗所排放之 CO₂ 總量。以一公升柴油為例,首先將其轉換為熱值單位,各種燃料熱值單位換算如表 3 所示,每公升柴油為 8800 kcal,而後再將千卡轉換成 10¹²J 單位以便與碳排放係數(參考表 4)進行相乘而得消耗一公升柴油之碳含量為

3.68×10⁻³ kg。由於化石燃料消耗過程中會有燃燒不完全的情況,造成碳含量有所折減,故必須將初步計算的碳含量 3.68×10⁻³ kg 與柴油的碳固定化比率(參考表 5) 0.5 相乘,求得在考慮折減後一公升柴油消耗之碳含量為 1.84×10⁻³ kg,最後將其乘上 CO₂ 及 C 的莫耳數比值(44/12)轉換為 CO₂ 排放量為 6.75×10⁻³ kg,燃料消耗排放之 CO₂ 量可由式 3 估算而得,其只需生命週期各階段機具燃料的使用數量即可進行推算,各階段計算方式並不會有太大差異,故適用全生命週期。

$$F_{CO_2} = \sum_{n=1}^5 \left[\sum_{i=1}^m (F_i \times F_{ec}) - \sum_{i=1}^m (F_i \times F_{ec} \times F_{cs}) \right] \quad (3)$$

F_{CO_2} = 燃料消耗之 CO₂ 排放量; m = 燃料種類數; i = 燃料類別; F_i = i 種燃料使用量 = $F_U \times F_{kt}$; F_U = 機具單位耗燃料量(l/kml/hr); F_{kt} = 運輸距離或機具運轉時間; F_{ec} = 燃料之碳排放係數 F_{cs} = 燃料之碳固定化率。

表 3、各項燃料熱值單位換算對照表

項目	單位	熱值(千卡)
自產煤	kg	6200
進口煤	原料煤	6800
	燃料煤	6400
焦炭	kg	7000
煤氣	m ³	5000
高爐氣	m ³	713
原油	l	9000
液化油	l	8900
煉油氣	m ³	9000
液化石油氣	l	6635
丙烷混合氣	m ³	12750
天然汽油	l	6700
航空汽油	l	7500
車用汽油	l	7800
航空燃料	l	8000
煤油	l	8500
柴油	l	8800
燃料油	l	9200

表 3、各項燃料熱值單位換算對照表(續)

項目	單位	熱值(千卡)
潤滑油	l	9600
柏油	l	10000
溶劑油	l	8300
石油腦	l	7800
烯烴	l	5600
芳香烴	l	8800
其他石油品	l	9000
液化天然氣	m ³	9900
天然氣	m ³	8900

表 4、碳排放係數

燃料種類		能源種類	碳排放係數 (噸碳/10 ¹² J)
液體燃料	初級能源	原油	20.0
		天然汽油	17.2
	次級能源/產品	汽油	18.9
		航空燃油	19.5
		煤油	19.6
		柴油	20.2
		殘餘燃料油	21.1
		液化石油氣	17.2
		乙醇	16.8
		石油腦	20.0
		柏油	22.0
		潤滑油	20.0
		石油焦	27.5
		石化原料	20.0
		其他油品	20.0
		固體燃料	初級能源
原料煤	25.8		
其他煙煤	25.8		
次煙煤	26.2		
次級能源/產品	褐碳		27.6
	泥煤		28.9
	煤球		25.8
	焦炭		29.5
氣體燃料		天然氣	15.3

表 5、碳固定化比率

原料/製品	碳固定化比率
石油腦	0.80
煤焦油	0.75
柏油	1.00
天然氣	0.33
柴油及潤滑油	0.50
液化石油氣	0.80

(3) 水資源消耗

生命週期過程中水資源的消耗大致上可分為建材生產、施工、施工機具及建築物使用期間居民日常生活等用水，分別在生命週期各階段耗用。然而建築物生命週期中在建材生產、施工過程及居民日常生活用水量計算方面可能因某些原因而導致額外不可預見之用水，用水量難以正確被計算，為避免不可預料用水的消耗所造成之誤差，初步計算完用水量後需乘上用水不均衡修正係數，如表 6 所示。最後將建材生產至建築物拆除之用水量加總後乘上

轉換係數即可得建築物生命週期水資源消耗所排放之 CO₂ 量，計算方法如式 4 所示，轉換係數可由臺灣自來水公司網站中查得，其代表意義為自來水公司在處理每度用水過程中耗費能源所排放之 CO₂ 約當量。舉例來說，根據該公司計算結果顯示在 99 年度每公升用水排放 CO₂ 約當量為 0.193kg。最後，本文將生命週期耗能源量評估矩陣內各階段碳排放估算模型之相關參數定義彙整如表 7。

$$W_{CO_2} = (W_{manuf} + W_{erect} + W_{occup} + W_{renov} + W_{demol}) \times \rho \quad (4)$$

ρ = 水資源 CO₂ 排放係數(kg-CO₂/l)

表 6、用水不均衡係數

	用途	係數
K_1	施工工程用水	1.5
K_2	生產用水	1.25
K_3	施工機具運輸機具	2.00
K_4	動力設備	1.05~1.10
K_5	施工現場生活用水	1.30~1.50
K_6	居民生活用水	2.00~2.50

表 7、碳排放估算模型相關參數

代數	單位	定義說明
電力		
i	-	材料名稱
n	種	材料種類數
m_i	kg, m ² , m ³	材料使用量
M_i	kWh/建材單位	產材料 i 單位耗電能
w_i	%	材料報廢之比率
C_m	種	施工工法種類
j	-	施工(拆除)工法之類型
q_j	kg, m ² , m ³	每種工法類型施工單位
Q_j	kWh/施工單位	該工法單位耗電能
d_i	km	材料運輸之距離
V_c	kWh/建材重-km	載運(廢)建材單位耗電
BL	year	建築物使用期限
K_c	km	運送廢棄物之距離
Li	year	建材使用年限
R_m	種	拆除工法種類數
γ_j	kg, m ² , m ³	拆除工法類型施工單位
R_j	kWh/拆除單位	拆除工法之單位耗電能

表 7、碳排放估算模型相關參數(續)

	代數	單位	定義說明
燃料	M	種	燃料種類數
	F_i	l	i 種類燃料使用量
	F_{ec}	ton/TJ	燃料碳排放係數
	F_{cs}	-	燃料碳固定化率
水	Q_i	kg,m ² ,m ³	建材生產數量
	N_i	l/建材生產量	建材生產單位用水量
	V_w	l/材料重-km	運輸工具耗水量
	e_j	kg,m ² ,m ³	每種工法類型施工單位
	E_j	l/施工單位	施工工程單位用水量
	$T; t$	hr	機具運轉時間
	m_s	台(部)	施工機具數量
	m_d	台(部)	拆除機具數量
	M_s	l/台 · hr	施工機具用水量
	M_d	l/台 · hr	拆除機具用水量
	U	l/personal · day	每人每天用水量

3-2 生命週期評估法

生命週期評估包含四大步驟(圖 1)，第一步驟為目標範疇之界定，其主旨乃是明確定義系統邊界範圍及功能單位；盤查分析包括數據資料收集與計算量化系統之各類投入與產出並加以彙整；衝擊評估則利用盤查分析之結果，進行生命週期各投入與產出對於環境衝擊的評估；最後結果闡釋即是將評估之結果歸納整理，作為決策依據。

生命週期評估的第一步驟為明確制定或指定評估之目標及其範疇，首先必須清楚定義欲評估目標及其系統功能、功能單位、系統界限(system boundary)等項目，並對其作適當假設(assumption)及限制(limitation)，使相異系統在比較其資源投入與產出(input and output)時能在同一基準點上，並確認各個生命週期評估結果均屬於相同功能條件。因此，當對不同系統進行評估時，可確保此等比較乃依據共同之基準。此外，讓評估程序更加清楚簡化亦是目標範疇界定之目的。

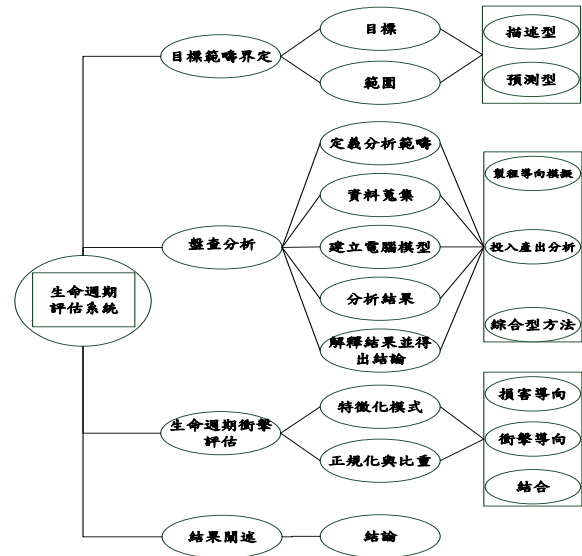


圖 1、生命週期評估架構

目標與範疇界定後，接著進行盤查分析(inventory analysis)，此階段主要作業為資料蒐集與計算程序，藉以了解一系統內部之資源、能源的投入與其對於造成空氣、水資源、土壤等相關環境污染之產出，對其量化後進入衝擊評估階段，可視為進行環境衝擊評估前置作業。在進行盤查分析作業時對系統內部每一個過程皆應予以收集資料此即為過程導向(process-oriented)之分析方法，再配合系統

外部投入與產出之資源及能源資料蒐集結合而成一具有完整性之綜合型盤查分析方法(hybrid approach)。隨著對系統的逐漸瞭解，資料亦應反覆的進行確認及調整，以使數據具有可靠性，盤查分析架構如圖 2 所示。

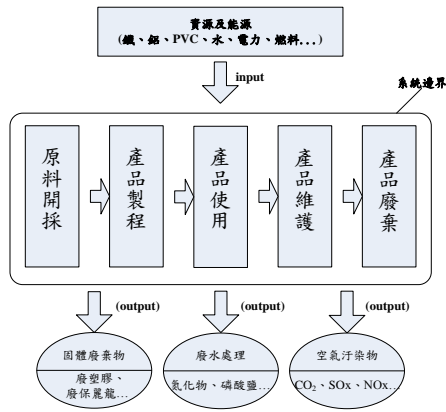


圖 2、盤查分析架構

衝擊評估(impact assessment)乃根據盤查分析結果進行潛在環境衝擊評估作業，其評估過程首先必須選定衝擊類別及類別指標，假設欲評估地球暖化對於環境之衝擊，則地球暖化為衝擊類別，而影響暖化效應最劇的氣體 CO₂ 則可選為類別指標，因造成暖化之原因也可能與甲烷(CH₄)、氧化亞氮(N₂O)、六氟化硫(SF₆)及其他氣體之排放有關，因此必須對盤查分析之結果進行分類(classification)，接著針對選定之類別指標 CO₂ 進行特徵量化(characterization)計算，最後針對量化結果融入衝擊及損害導向之概念進行特定潛在環境衝擊評估過程如圖 3 所示。

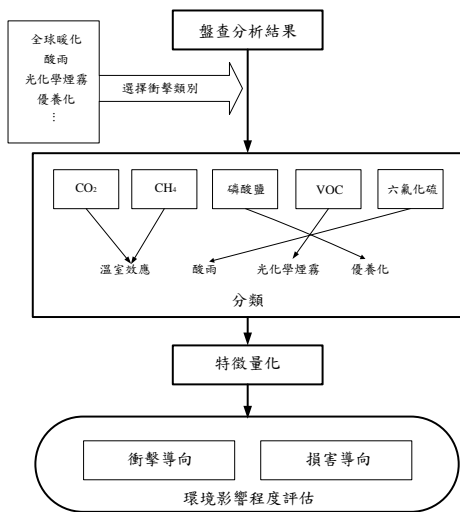


圖 3、衝擊評估架構

經過盤查分析及衝擊評估後將兩階段整合解釋，稱為結果闡釋(interpretation)，其目的為能提供決策者作為選擇低環境負荷量方案之依據。

3-3 蒙地卡羅模擬法

蒙地卡羅模擬法(Monte Carlo simulation)是最常被作為工程初期之風險評估及分析預測具有不確定性(uncertainty)性物理量的工具之一，在工程初期資料不足及具有高風險高不確定性的情況下，蒙地卡羅模擬法可將工程之不確定性納入考量並藉由過去的歷史資料透由多次模擬而獲得與真實數值接近之機率函數值(Rezaie, Amalnik et al., 2007)。

在環境負荷量評估方面，不確定性的存在會影響生命週期評估(LCA)結果，因此應用蒙地卡羅模擬法於具不確定性生命週期評估環境負荷量漸被重視，評估之結果由單一函數值轉化為函數值的機率分配(probability distribution)，此種呈現方式使決策者可相對理解 LCA 結果之不確定性(Sonnemann, Schuhmacher et al., 2003；楊英賢，2008)，減少決策者因誤判情勢而做出錯誤決定的情境發生機率。

蒙地卡羅模擬法經由隨機抽取變數機率分配的過程評估及計算欲求得函數之機率分配，其本質建立在數值的積分上，假設 Y 值為欲求得函數值(例如:CO₂排放量或專案成本)，其累積分配曲線 F_Y(y) 之計算如式 5 所示，g(x)是 Y 值反應函數(response function)：Y=g(x)；X={X₁, X₂, ..., X_n}為反應函數內組成之各變數，變數之機率分配則以 f_X(X) 表示之。

$$F_Y(y) = P(Y \leq y) = \int_{\{g(\vec{x}) \leq y\}} \dots \int f_{X_1, \dots, X_n}(x_1, \dots, x_n) dx_1 \dots dx_n$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int I[g(\vec{x}) \leq y] f_{X_1, \dots, X_n}(x_1, \dots, x_n) dx_1 \dots dx_n \approx \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N I[g(\vec{x}_k) \leq y]$$

其中, $I[g(\vec{x}) \leq y] = 1 \quad g(\vec{x}) \leq y$ (5)

$I[g(\vec{x}) \leq y] = 0 \quad g(\vec{x}) > y$

模擬過程如圖 4 所示，在各個變數之機率分配 f_X(X) 中對變數 X 進行反覆抽取 N 次，每次模擬之情境可記作 X_k，g(X_k) 即為第 k 次模擬後函數所對應數值。進行多次模擬程序後，每次模擬得 g(X_k) 值，

可根據其數值分佈情形，經統計彙整後，繪製成 Y 值之累積分佈曲線。

此外，Y 值的平均值亦可經由模擬而得，如式 6 所示，Y 值的期望平均值 E(Y) 是經由每次運行模擬程序後之 g(X̄) 值，進行模擬 N 次之後會有為數 N 個 g(X̄) 值，經累加後取平均而得 E(Y)。

$$E(Y) = \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} [g(\bar{X})] f_{X_1, \dots, X_n}(X_1, \dots, X_n) dx_1, \dots, dx_n$$

$$E(Y) \approx \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [g(\bar{X}_k)] \quad (6)$$

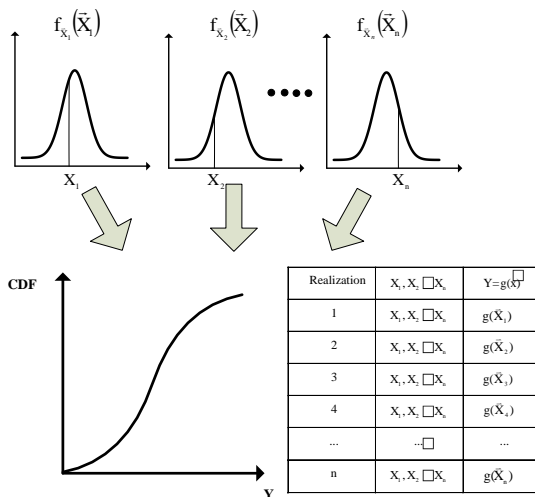


圖 4、蒙地卡羅模擬隨機抽取過程

四、工程案例分析

案例建築規模為地下一層、地上三層(屋突一層)的批發賣場，各樓層高度分別為 B1F 高 5.3m、1F 高 5.3m、2F 高 4.15m、3F 高 3.8m 及屋突高 4.6m。結構體構造型式主要由預鑄柱、預鑄梁及澆置預拌混凝土之樓地板所組成，外牆採用三明治複合金屬板進行施工，預鑄構件由預鑄工廠生產製造，施工基地的運輸距離為 196km。建築物完工日期由最初規劃至取得使用執照約為 180 天，基礎開挖至軀體工程完工約 120 個工作天，其中基礎開挖工程花費工期約為 25 天開挖面積為 12,676.49 m²，深度 6.5 m，結構體工程施工則約 85 個工作天。基地面積總計 21,026 m²，建築面積總計 11,251.8 m²，總樓地板面

積 37,411.72 m²。

4-1 研究案例限制與基本假設

本研究主要為比較場鑄工法與預鑄工法環境負荷量，採用相同案例，假設建築物軀體工程分別以場鑄工法及全預鑄工法建造進行建築物生命週期環境負荷量評估。首先，必須清楚的界定評估系統邊界範圍及了解 CO₂ 排放主要來源為何，建立比較基準。評估系統邊界如圖 5 所示，研究案例之生命週期分成建材生產、建造、建築物使用維護、拆除等五個階段，藉由盤查分析各階段電力、燃料、水資源使用情況後經轉化得 CO₂ 排放量。

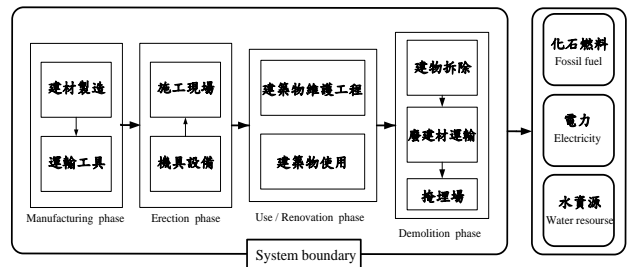


圖 5、生命週期資源評估系統邊界

CO₂ 排放來源包含，混凝土及其他各式建材生產製造過程中所耗費的燃料、電力及水資源；建造階段運送建材至現地之運輸工具及現地基礎開挖直至建築物軀體結構工程完工過程中使用之施工機具設備所消耗燃料、電力、水資源；建築物使用及維護階段以 50 年為建築物的使用年限，在這 50 年間包含所有的建材維護修復或因人類活動所耗費的電力、水資源皆被納入評估範圍內；拆除階段的 CO₂ 排放則來自於拆除機具運作及廢建材運輸至掩埋場過程所耗費的燃料、電力、水資源，本研究各階段 CO₂ 排放來源整理如表 8。

在明確定義系統邊界範圍及 CO₂ 來源後，即可進行歷史資料蒐集以作為後續評估 CO₂ 排放量之參考資訊。然而，某些資訊無法藉由案例之歷史資料得知，因此必須對無法取得之資訊進行假設或限制，如表 9 所示(行政院環境保護署，內政部建築研究所，1999；交通部統計處，2000；張又升，2002，楊英賢，2008；潤弘精密工程事業股份有限公司，2008；內政部營建署，2009)。

表 8、建築物生命週期各階段 CO₂ 排放量來源

		CO ₂ 排放來源
電力	建材生產	建材生產及運輸建材工具
	建築施工	現地施工機具設備
	使用階段	建築物使用期間日常用電量(度)
	維護階段	維護建材生產耗費電力
	拆除階段	拆除機具設備及運送廢材工具
燃料	建材生產	運輸建材工具
	建築施工	現地施工機具設備燃料
	使用階段	-
	維護階段	-
	拆除階段	拆除機具設備及運送廢材工具
水	建材生產	混凝土建材生產
	建築施工	施工工程及施工機具設備
	使用階段	建築物使用期間年用水量(公升)
	維護階段	維護建材生產耗費水資源
	拆除階段	拆除機具設備

表 9、研究案例之假設與限制

	預鑄建築	場鑄建築
構造類型		RC:軀體工程
運輸車輛		
小容量:		載重 8~15 噸
大容量:		載重 15~35 噸
施工(拆)機具數		2 台(部)
機具運轉時間		8hr/day
年用電量(度)		7352,250(度)
耗水量(升/日)		1250~5000
廢材處理	預鑄構件全丟棄	混凝土塊為主
建物使用年限		50year

4-2 資料蒐集與變數處理

預鑄工法施工時各種建材或機具種類的採用資料可由設計圖取得，包含預鑄混凝土構件支數及混凝土使用方數(m³)，分別為預鑄柱 381 支，混凝土使用方數為 1441.4m³、大梁 654 支 2462.03 m³、小梁 827 支 1495.24 m³，樓地板混凝土用量 5611.758m³。預鑄構件運輸方式係採 40 ft 板車，由楊梅廠運輸至工地，運輸距離約 196km。

由於該建築實際尚未拆除，故採用專家訪談方

式，訪談對象為一專營房屋拆除工程、橋梁拆除及各式建築物拆除的專業工程公司。根據建築物規模推估拆除作業耗費時間在 2 台大鋼牙破壞機及 2 台推土機同步進行拆除作業下為 960 hr，而拆除後之廢建材則運往距離現場 27.3 km 的嘉義斗南廢料處理廠丟棄。

在場鑄工法部分，由於該建築物並非以場鑄工法施作，建材使用種類無從得知，故假設建材種類使用上與預鑄工法之差別除混凝土是以現地澆置預

拌混凝土外，其餘建材種類皆相同，機具使用方面則參考施工機械相關書籍，彙整施工常使用的機具種類。建材及機具的使用種類清單如表 10 所示，分

別就預鑄與場鑄工法施工所使用的建材與機具種類清楚列出作為後續比較及評估兩者工法在 CO₂ 排放量差異之基礎。

表 10、預鑄場鑄建材機具比較表

材料用途	材料名稱
結構工程	水泥砂漿
	木模板
	預鑄混凝土
	預拌混凝土
	鋼筋
	鋼承板
外牆	三明治複合板
內部隔間	矽酸鈣牆
玻璃	平板玻璃
	膠合玻璃
機具用途	機具名稱
開挖工程	引擎挖土機
	鏟斗機
	推土機
運輸	運輸貨車
	混凝土拌合車
	曳引、拖板車
構件安裝	400T、500T 起重機
澆置混凝土	車載式泵送機
拆除工程	大鋼牙破壞機
	推土機

(1) 電力

模擬建築物生命週期排碳量所需資料涵蓋電力、燃料、水資源三部分，其中表 11(D.J, 1999, Chen, Burnett et al., 2001, González and Navarro, 2006, Dimoudi and Tompa, 2008, Kellenberger and Althaus, 2009)彙整建築工程常用建材種類與建材生產運輸及維修耗電量相關係數，包含建材生產單位耗電能(M_i)單位為千瓦小時(kWh)、材料生產時之報廢率(w_i)及維修頻率(τ)。表 12 列出運輸建材距離(d_i)等參數， d_i 係根據民國八十九年台灣地區汽車貨運調查報告統計在該年度全台灣各類貨品建材的運貨量及運貨距離，在此作為估算累積運輸里程數之用(交通部統計

處，2000)。本研究僅以公路運輸工具之運輸每單位材料之耗電能(v_c)參數進行計算， v_c 表示每單位建材運輸一公里路程該運輸工具所需消耗之電力。

另外，在建築物建造過程中從基礎開挖直至完工會利用到許多不同工法進行施作，從施工初始階段地基開挖及土方清運、整地、結構體施工之混凝土澆置或構件吊裝單位耗電量(Q_j)到最後進行建築物拆除作業之單位耗電量(R_j)，表示在運用該工法進行施工或拆除作業時所利用的機具設備單位耗電量，參數彙整如表 13(Adalberth, 1997, Chen, Burnett et al., 2001, Guggemos and Horvath, 2005)

表 11、建材製造耗電量

工程/材料	材料名稱	M_i	分佈類型	w_i	分佈類型	τ	分佈類型
結構體	骨材(kg)	0.028~0.183	Triangular	2	Uniform	0	Uniform
	鋁(kg)	53.055~58.61	Triangular	2.5	Uniform	0	Uniform
	1:3 水泥砂漿(m ³)	4.2	Uniform	2.5~10	Triangular	0	Uniform
	預拌混凝土(kg)	0.194、0.319、 0.348、0.361、0.56	Extvalue	2.5、 3、20	Triangular	0	Uniform
	預鑄混凝土(kg)	0.556、0.72	Triangular	2.5	Uniform	0	Uniform
	木材(kg)	0.161~0.333	Triangular	2.5~10	Triangular	0	Uniform
	鋼製品(鋼筋鋼承 版)(kg)	2.750、8.889、9.72	Triangular	2~5	Triangular	0	Uniform
	鋼筋(recycled)(kg)	2.806	Uniform	4	Uniform	0	Uniform
假設工程	木模板(m ²)	0.238~0.556	Triangular	1~3	Triangular	0.4	Uniform
屋頂建材	混凝土磚(kg)	0.222、0.269、0.3	Triangular	2~2.5	Triangular	0.3	Uniform
	陶瓷磚(kg)	0.694	Uniform	2~2.5	Triangular	0.3	Uniform
	水泥纖維瓦(kg)	2.639	Uniform	2~2.5	Triangular	0.3	Uniform
	紅磚(kg)	0.75	Uniform	2~2.5	Triangular	0.3	Uniform
外牆建材	金屬複合板(kg)	0.392~1.41	Triangular	2.5	Uniform	0	Uniform
	磁磚(kg)	2	Uniform	2.5	Uniform	0.3	Uniform
	玻璃纖維(kg)	8.417	Uniform	0	Uniform	0.3	Uniform
	聚酯纖維(kg)	14.917	Uniform	0	Uniform	0.3	Uniform
玻璃	平板玻璃(kg)	4.417、5	Triangular	0~1	Triangular	0.2	Uniform
	膠合玻璃(kg)	4.528、5	Triangular	0~1	Triangular	0.2	Uniform
內部隔間	石膏牆板(kg)	0.389、1.694、2.4	Triangular	5~10	Triangular	0.3	Uniform
	合板(kg)	5.25	Uniform	2.5	Uniform	0.3	Uniform
	矽酸鈣牆面(m ²)	6.13	Uniform	5	Uniform	0.3	Uniform
塑膠材	聚氯乙烯(kg)	14.33、18.33、 19.44	Triangular	5	Uniform	0.2	Uniform
	聚乙烯(kg)	24.17、25、28.61	Triangular	5	Uniform	0.2	Uniform
	聚苯乙烯(kg)	29.167	Uniform	3~5	Triangular	0.2	Uniform
	電力排放係數(0.626、0.637、0.632、0.631、0.616、 0.612)		Weibull				

表 12、建材平均運輸距離

工程/材料	材料名稱	di (km)	分佈類型
結構體	骨材(kg)	38.98	Uniform
	鋁(kg)	71.32	Uniform
	1:3 水泥砂漿(m ³)	14.81~32	Triangular
	預拌混凝土(kg)	14.81~32	Triangular
	木材(kg)	34.03	Uniform
	鋼筋、鋼承版(kg)	61.17	Uniform
	回收鋼筋 (kg)	61.17	Uniform
假設工程	木模板	61.17	Uniform
屋頂建材	混凝土磚(kg)	37.02	Uniform
	陶瓷磚(kg)	37.02	Uniform
	水泥纖維瓦(kg)	37.02	Uniform
	紅磚(kg)	25.78	Uniform
外牆建材及隔熱材	金屬複合板(kg)	47.39	Uniform
	磁磚(kg)	37.02	Uniform
	玻璃纖維(kg)	94.68	Uniform
	聚酯纖維(kg)	97.51	Uniform
玻璃	平板玻璃(kg)	74.08	Uniform
	膠合玻璃(kg)	74.08	Uniform
內部隔間	石膏牆板(kg)	25.78	Uniform
	合板(kg)	47.39	Uniform
	矽酸鈣牆面(m ²)	47.39	Uniform
塑膠材	聚氯乙烯(kg)	85.18	Uniform
	聚乙烯(kg)	85.18	Uniform
	聚苯乙烯(kg)	85.18	Uniform

表 13、施工工法及運輸機具單位耗電量

工法類別	單位耗電量	分佈類型
開挖及土方清運	32 (kWh/ m ³)	Uniform
整地	3 (kWh/ m ²)	Uniform
現地混凝土澆置	0.044 (kWh/kg)	Uniform
預鑄構件施工吊裝	0.025 (kWh/ kg)	Uniform
拆除作業	8.2 (kWh/m ²)	Uniform
運輸工具	kWh 料單位-km	分佈類型
預拌混凝土車 6m ³	0.00028~0.00075	Triangular
運輸貨車(小容量)	0.00028~0.00075	Triangular
曳引車、拖板車(大容量)	0.00075~0.00175	Triangular

(2) 化石燃料

欲計算施工機具之化石燃料耗用所產生之排碳量，必須先求出各施工機具在運轉過程中單位時間內之耗油量(F_U) 如表 14 所示，運輸機具之 F_U 代表單位運輸距離(km)所耗費之燃料量(l)。施工機具之 F_U 計算方法如下式 7 所示，各類施工機具依型號及用途不同，引擎馬力亦有所區別，引擎耗用率則因引擎動力來源種類不同而有差異，主要可分為汽油

及柴油，汽油引擎之引擎耗用率介於 0.2625~0.33 (l/hp/hr)；柴油引擎則介於 0.1575~0.195(l/hp/hr)，引擎負荷率方面則依作業量情況區分為輕易作業、普通作業及繁重作業，引擎負荷量介於 20%~80%之間，在取得上述資訊後即可代入式 7 進行燃料耗用量的估算。

$$\text{機具燃油耗用量} = \text{引擎耗用率} \times \text{馬力} \times \text{引擎負荷率} \quad (7)$$

表 14、運輸與施工機具單位耗燃料量

機具用途	機具名稱	馬力	F_U	分佈類型
開挖機具	履帶式挖土機	330	10.4~51.48	Triangular
	鏟斗機	125	3.938~19.5	Triangular
	整地推土機	300	9.45~46.8	Triangular
	輪型及履帶式裝載機	150	4.725~23.4	Triangular
運輸機具	運輸貨車	-	0.156	Uniform
	混凝土拌合車	-	0.156	Uniform
	曳引車	-	0.385	Uniform
	拖板車	-	0.385	Uniform
施工機具	車載式泵送機	300	9.45~46.8	Triangular
	400T 輪吊	200	6.3~31.2	Triangular
	500T 輪吊	450	14.175~70.2	Triangular
拆除機具	大鋼牙	330	10.4~51.48	Triangular
	推土機	300	9.45~46.8	Triangular

(3) 水資源

建築工程中水資源之耗用主要是來自混凝土的製造及混凝土之施工過程，包含澆置及養護等，少部分則來自砌磚、砌石、粉刷等裝修工程或是施工現場的清洗作業，表 15 列出在製造不同種類混凝土材料每單位立方公尺之耗水量(N_i)及在建築物施工過程中所消耗的用水量(E_j)，兩者單位皆為公升。

施工機具用水量如表 16 所示，現地施工機具之

耗水量並無考慮運輸工具，機具耗水量可依用途區分為建造施工機具耗水量(M_s)及拆除機具耗水量(M_d)，其意義為每台(部)機具運轉每一小時耗費之水量。在拆除機具部分，由於現今拆除業者多以挖土機裝配大鋼牙及推土機進行建築物拆除作業，因此在大鋼牙單位耗水量等同於挖土機之單位耗水量介於 200~300l/hr。

表 15、建材製造及施工單位用水量

材料名稱	N_i	分佈類型	w_i	分佈類型	τ
攪拌普通混凝土	250	Uniform	2.5、3、20	Triangular	0
攪拌輕質混凝土	300~350	Triangular	2.5、3、20	Triangular	0
攪拌泡沫混凝土	300~400	Triangular	2.5、3、20	Triangular	0
攪拌瀝青混凝土	300~350	Triangular	2.5、3、20	Triangular	0

表 15、建材製造及施工單位用水量(續)

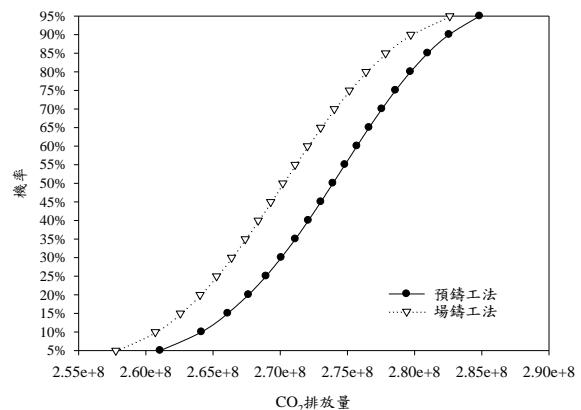
材料名稱	N_i	分佈類型	w_i	分佈類型	τ
攪拌水泥砂漿	300	Triangular	2.5~10	Triangular	0
施工工程	E_j	分佈類型			
澆鑄混凝土	1,700~2,400	Triangular			
模板沖洗	5	Uniform			
(自然養護)	200~400	Triangular			
(蒸氣養護)	500~700	Triangular			
攪拌機清洗	600	Uniform			

表 16、施工機具設備用水量

施工機具	M_s	分佈類型	M_d	分佈類型
引擎挖土機	200~300	Triangular	-	-
引擎輪吊	15~18	Triangular	-	-
蒸氣起重機	300~400	Triangular	-	-
蒸氣打樁機	1,000~1,200	Triangular	-	-
蒸氣壓路機	100~150	Triangular	-	-
引擎(直流水)	120~300	Triangular	-	-
焊接設備	100~350	Triangular	-	-
大鋼牙	-	-	200~300	Triangular

4-3 案例排碳量模擬結果與敏感度分析

本研究首先應用生命週期評估之概念對案例的研究範圍進行假設限制及對案例建築物施工過程中所會使用到的機具、物料實施盤查分析接著再輔以蒙地卡羅模擬法以@Risk 軟體隨機模擬 30 萬次，進行案例生命週期各階段 CO₂ 排放量的不確定性分析，模擬結果之累積分佈曲線如圖 6 所示，兩者工法在全生命週期階段之 CO₂ 排放總量平均值及信心水準 95% 值分別為全預鑄工法：273,564,489kg-CO₂ 及 284,838,156.6 kg-CO₂；場鑄：270,202,664.6 kg-CO₂ 及 282,623,196.2 kg-CO₂，若以每單位樓地板面積 CO₂ 排放量作為衡量單位，則全預鑄：7312.26 kg-CO₂/m² 及 7,613.61kg-CO₂/m²；場鑄：7,222.41kg-CO₂/m² 及 7,554.40 kg-CO₂/m²。全預鑄及場鑄建築物生命週期各階段 CO₂ 排放量之差異百分比分別為建材生產運輸階段 138%；施工階段-286%；使用維護-0.0018%；拆除階段-0.00177%。

圖 6、總 CO₂ 排碳量模擬累計分佈曲線比較

由上述賣場案例分析結果可得知應用預鑄與場鑄工法進行建築物施工時其排碳量之差異主要來自於建材生產運輸及施工階段，然因賣場案例主要係因預鑄構件運輸路途長而導致 CO₂ 的排放量轉顯著，屬於特殊案例，比較結果並無法清楚了解預鑄工法的應用對 CO₂ 的減量是否有幫助。因此，為更進一步瞭解建築工法的 CO₂ 的減量影響因子，本研究進行敏感度分析，以預鑄工法施工比例及建材運輸距

離差異進行情境分析。如表 17 所示，情境 1 至情境 4 針對工程案例使用預鑄構件於結構體施工的比例進行 CO₂ 排放量之敏感度分析，依照預鑄之比例大致上可分為全預鑄工法(100%)、W-PC 工法(58%)、梁柱式積層工法(42%)及場鑄工法(0%) 4 種工法。

情境 5 至 16 之部分則是針對混凝土預鑄構件運輸距離作敏感度分析，將預鑄構件運輸距離分別假設為等同於場鑄工法之預拌混凝土運輸距離 14.81~32km 之間($d_A = d_B$; $d_C = d_B$; $d_D = d_B$)、兩倍距離($d_A = 2d_B$; $d_C = 2d_B$; $d_D = 2d_B$)、三倍距離($d_A = 3d_B$; $d_C = 3d_B$; $d_D = 3d_B$)及四倍距離($d_A = 4d_B$; $d_C = 4d_B$; $d_D = 4d_B$)進行 CO₂ 排放量差異性之比較並探討預鑄工廠應位於施工現地多少距離內，相較於預拌廠才可達到減少 CO₂ 排放目的。

模擬結果擷取 CO₂ 排放量平均值及信心水準 95% 值進行 CO₂ 排放量趨勢分析，如圖 7 所示。在預鑄構件運輸距離與場鑄預拌混凝土建材運輸距離相同的情況下(情境 1~4)，場鑄工法 CO₂ 排放量平均值

及信心水準 95% 值為最高，而後依序為梁柱式積層工法、W-PC 工法與全預鑄工法。在扣除排碳量無明顯差異的使用維護及拆除階段之後，其場鑄工法之排碳量分別高出其他工法 8.9%、12.7% 及 24.4%。敏感度分析結果顯示，在採用預鑄構件比例每增加 1% 情形下 CO₂ 排放量以約 45,505 kg-CO₂ 遞減。

接著，則針對預鑄構件運輸距離之係數進行調整，結果如圖 7 情境 5 至 16 所示。CO₂ 排放量模擬結果以情境 7(採全預鑄施工且構件運輸距離 14.82~32km)為最低，與情境 1(採用場鑄工法施工)相差近 24.4%，顯示在預鑄構件與預拌混凝土建材運輸距離相同的情況下全預鑄工法較場鑄工法 CO₂ 排放量為低，且隨著場鑄工法施工比例增加，CO₂ 排放量亦隨之增加。值得注意的是，當預鑄構件運輸距離以倍數增加時排碳量則以 5% 遞增，而當構件運輸距離達 128 km 以上時，CO₂ 排放量將超越場鑄工法，相較之下無法達到節能減碳之效益。

表 17、情境分析彙整

場鑄工法(A)；梁柱式積層工法(B)； W-PC 工法(C)；全預鑄工法 (D)。預鑄構件運輸距離:場鑄工法(d_A)；梁柱式積層工法(d_B)；W-PC 工法(d_C)；全預鑄工法(d_D)。

Scenario 1	A	A	Scenario 9	C	$d_C = 2d_A = 29.62 \sim 64$
Scenario 2	B	$B = 0.42 D + 0.58 A$	Scenario 10	D	$d_D = 2d_A = 29.62 \sim 64$
Scenario 3	C	$C = 0.58 D + 0.42 A$	Scenario 11	B	$d_B = 3d_A = 44.43 \sim 96$
Scenario 4	D	D	Scenario 12	C	$d_C = 3d_A = 44.43 \sim 96$
Scenario 5	B	$d_B = d_A = 14.81 \sim 32$	Scenario 13	D	$d_D = 3d_A = 44.43 \sim 96$
Scenario 6	C	$d_C = d_A = 14.81 \sim 32$	Scenario 14	B	$d_B = 4d_A = 59.24 \sim 128$
Scenario 7	D	$d_D = d_A = 14.81 \sim 32$	Scenario 15	C	$d_C = 4d_A = 59.24 \sim 128$
Scenario 8	B	$d_B = 2d_A = 29.62 \sim 64$	Scenario 16	D	$d_D = 4d_A = 59.24 \sim 128$

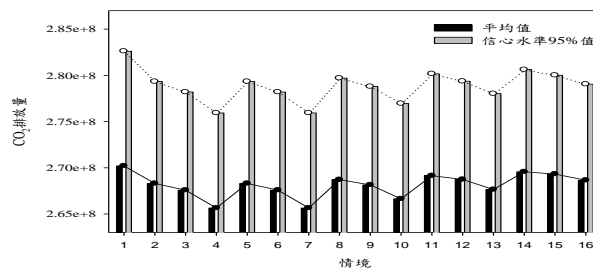


圖 7、排碳量敏感度分析趨勢圖

4-4 建築工法環境成本分析

國內碳稅制度目前仍處萌芽階段，課徵碳稅的最適稅率訂定尚無法達成共識，然而營造業屬於營利事業，因此本研究即參考國內課徵營利事業所得稅採用累進稅率的計算方式針對建築物生命週期模擬 CO₂ 排放總量的結果進行環境成本的轉換，課稅級距及累進稅率參考表 18 所示。

表 18、碳排放環境成本速算公式列表

級距	稅率	速算公式
模擬平均以下	0%	
模擬平均以上	17%	Q 在(平均*1.51515)=217 以下者 $T=(Q-模擬平均) \times 1/2$ Q 在 217 以上者, $T=P \times 17\%$

由於本文僅是初探舉例，故課稅級距之基準訂定係以工法建造之 CO₂ 排放量平均值取年平均而得； $T=$ 應繳碳稅額 (元/year-m²)； $Q=$ CO₂ 排放量 (kg-CO₂/year-m²)。課徵方式以年為單位每年課徵一次，因此本研究建築物之環境成本以 50 年進行計算，採用財政部稅物入口網公布之速算公式估計，將全年 CO₂ 排放量以樓地板面積為單位進行計算，CO₂ 排放平均值在 143.23(kg-CO₂/year-m²) 以下者，免徵碳稅。全年 CO₂ 排放量超過平均值者，就其全部 CO₂ 排放量課徵 17%，但其應繳碳稅額不得超過 CO₂ 排放量超過平均值的半數，表 19 為本案例利用預鑄及場鑄工法施工其建築物生命週期能源耗用不考慮貼現率所造成 CO₂ 排放之環境成本計算結果。

表 19、環境成本計算結果列表

信心水準	全預鑄工法			場鑄工法		
	kg-CO ₂ /m ²	Q	(T)	kg-CO ₂ /m ²	Q	(T)
5%	6791.84	135.84	0	6889.60	137.79	0
10%	6868.50	137.37	0	6967.45	139.35	0
15%	6918.35	138.37	0	7017.91	140.36	0
20%	6956.03	139.12	0	7058.00	141.16	0
25%	6988.69	139.77	0	7091.25	141.83	0
30%	7016.46	140.33	0	7120.93	142.42	0
35%	7041.87	140.84	0	7147.65	142.95	0
40%	7066.14	141.32	0	7173.40	143.47	0.12
45%	7088.73	141.77	0	7198.13	143.96	0.37
50%	7110.83	142.22	0	7222.35	144.45	0.61
55%	7132.79	142.66	0	7246.37	144.93	0.85
60%	7154.56	143.09	0	7271.58	145.43	1.10
65%	7176.71	143.53	0.15	7297.55	145.95	1.36
70%	7199.97	144.00	0.38	7324.80	146.50	1.63
75%	7224.58	144.49	0.63	7354.48	147.09	1.93
80%	7251.68	145.03	0.90	7387.34	147.75	2.26
85%	7282.55	145.65	1.21	7426.28	148.53	2.65
90%	7320.85	146.42	1.59	7476.90	149.54	3.15
95%	7375.65	147.51	2.14	7554.24	151.08	3.93
平均值	7100.79	142.02	0	7222.42	144.45	0.61

全預鑄及場鑄工法進行施工其建築物生命週期能源耗用所造成 CO₂ 排放之環境成本分析結果(不考慮構件運輸距離之差異，僅針對工法建材及機具設備使用情況不同所造成之排碳量差異進行比較)，以 CO₂ 排放量平均值進行說明，全預鑄工法及場鑄工法之 Q 值分別為 142.22 及 144.45(kg-CO₂/year-m²)，應課徵碳稅分別為 0 及 0.61(元/year-m²)，若按照本案例規模為 37411.72 m² 進行計算則利用場鑄工法進行建築物施工的環境成本會比使用全預鑄工法每年多出將近 22,821 元。若將其用現值法(present value)轉換，現值法公式如式 8 所示：

$$P = A \left[\frac{(1+i)^N - 1}{i(1+i)^N} \right] = A(P/A, i, N) \quad (8)$$

P=環境成本現值；A=每年支付的環境成本；i=貼現率 1.875% (中央銀行網站)；N=建築物使用年限。採 N=50 年計算，場鑄工法之環境成本為 735,608 元，相較於全預鑄工法較不符合環境成本效益。

五、結論與建議

基於研究分析與成果，可歸納下列結論與建議：

1. 生命週期 CO₂ 排放量評估

本研究 CO₂ 排放量模擬結果，以建築物總樓地板面積 37,411.72 m² 為例，使用年限 50 年計算，CO₂ 排放量平均值分別為全預鑄 7312.26 kg-CO₂/m² 及場鑄 7,222.41 kg-CO₂/m²，全預鑄高於場鑄約 1.24%，構件運輸距離過長是導致此模擬結果的主要因素。

全預鑄建築在各階段 CO₂ 排放量佔總排碳量比例，依序為使用維護階段 89.0%；建材生產運輸階段 8.44%；拆除階段 1.29%及施工階段 1.28%。場鑄建築在各階段 CO₂ 排放量，依序為使用維護階段 90.1%；施工階段 5.02%；建材生產運輸階段 3.57%及拆除階段 1.31%。研究顯示建築物施工法雖有異同，整體 CO₂ 排放量均以使用維護階段為最高，意味著即便營建業背負環境溫室效應責任，在建築物使用期間執行節能減碳策略方能發揮最大效益。

此外，全預鑄與場鑄工法 CO₂ 排放量差異百分比則為建材生產運輸階段 138%；施工階段-286%；使用維護-0.0018%；拆除階段-0.00177%，使用維護

及拆除階段 CO₂ 排放量並無明顯差異，若決策者想藉由兩者施工法之建築物 CO₂ 排放量差異作為評量依據，可簡化透由建材生產運輸及施工階段的排碳量比較建築專案。

2. 預鑄工法施工比例及構件運輸距離與 CO₂ 排放

根據敏感度分析結果顯示，佔建築物建材使用量最大宗的混凝土建材，其生產方式及其運輸距離是影響 CO₂ 排放量變化最為顯著的因素。在本研究案例，預鑄構件運輸距離為 14.82~32 km 的情況下場鑄工法 CO₂ 排放量平均值及信心水準 95% 值為最高而後依序為梁柱式積層工法、W-PC 工法與全預鑄工法，差異百分比分別為 8.9%、12.7% 及 24.4%。採用預鑄構件比例與 CO₂ 排放量成反比，每增加 1% 情形下 CO₂ 排放量以約 45505 kg-CO₂ 遞減。

若針對預鑄構件運輸距離進行調整，在預鑄構件與預拌混凝土建材運輸距離相同的情況下，全預鑄工法較場鑄工法 CO₂ 排放量為低，相差近 24.4%，且隨著場鑄工法施工比例增加，CO₂ 排放量亦隨之增加。另外，預鑄構件運輸距離以倍數增加時 CO₂ 排放量則亦以 5% 遞增，當預鑄構件運輸距離達預拌混凝土運送距離 4 倍，CO₂ 排放量將超越場鑄工法無法達到節能減碳之效益。故決策者欲選擇採用預鑄工法於建築物結構體工程時須將上述預鑄工法施工比例及構件運輸距離兩因素納入考量，擬定環境衝擊程度較低之最佳化方案。

3. 環境成本評估比較結果

將模擬後總 CO₂ 排放量結果轉換為每單位樓地板面積(m²)每年排放之 CO₂ 量(kg-CO₂)，全預鑄與場鑄工法分別為 142.02 及 144.45 kg-CO₂/year-m²。根據本研究初探課徵碳稅之方法進行賦稅，則全預鑄與場鑄工法分別為 0 及 0.61 元/year-m²，若依本案例規模為 37411.72 m² 進行計算則利用場鑄工法進行建築物施工的環境成本會比使用全預鑄工法每年多出將近 22,821 元；若環境成本以 50 年服務年限計算，依現值法轉換則環境成本會比全預鑄工法多 735,608 元，換言之，每一公斤 CO₂ 對環境衝擊影響成本多 0.16 元。因此，應用全預鑄工法進行結構體施工是較符合環境成本效益。然而，需注意的是，CO₂ 環境

衝擊影響成本的絕對值計算，會因賦稅假設的不同而有所差異。

4. 未來研究方向與建議

本研究以生命週期評估之概念結合蒙地卡羅模擬法，以盤查法(inventory analysis)評估預鑄建築及場鑄建築物環境成本。為強化評估方法對於營建業之效益應用，提出後續研究方向與建議。

本研究所建立的建材及機具設備單位耗能量資料庫因受限於時間及資料可及性，目前只針對使用量最多及常見的機具設備進行盤查分析及探討。至於其他進行內外部裝修工程施工之機具設備及建材例如油漆瓷磚等，目前無法做詳盡的盤查有待後續研究持續發展朝更完整的建築物生命週期環境成本分析及評估。

針對拆除工程部分，預鑄構件的拆除便利性及其可回收再利用之特點是預鑄在拆除工程方面優於場鑄的一項重要指標。但使用舊建築物的預鑄構件再作為新建築的元件仍有安全性及可靠度之爭議，且國內對廢建材回收制度規範及配套措施仍在啟蒙階段，故本研究並無特別針對此部分作深入探討，建議未來在研究預鑄工法相關議題時可針對拆除回收部分作進一步研析。

本研究之參數係綜合整理國外文獻查得，然而各國間建材、機具設備或者工法與其他改良技術不盡相同，結果仍有所差異，後續研究可致力於排碳量參數本土化，建構適用於國內的環境成本評估系統。

最後，本文僅考量建築物生命週期環境影響，對建築專案本身之經濟效益及對社會發展效應並未探究，未來可藉由管理科學方法承續本研究之系統化分析流程進行建築物全生命週期之經濟成本、社會衝擊及環境影響優化，以達最佳化決策分析。

六、誌謝

本研究承蒙行政院國家科學委員會多年期研究計畫「隨機模擬於項目制專案成本信度區間推求與風險評估」、「產學合作計畫—永續建築生命週期評估系統之研發」及國立臺灣科技大學建築科技中心頂尖大學計畫於研究執行期間的支持與協助，特此

致謝。

七、參考文獻

1. Adalberth, K., 1997, "Energy use during the life cycle of buildings: a method," *Building and Environment*, Vol. 32, No. 4, pp. 317-320.
2. Bribián, I. Z., Usón A. A. and Scarpellini, S., 2009, "Life cycle assessment in buildings: State-of-the-art and simplified LCA methodology as a complement for building certification," *Building and Environment*, Vol. 44, No. 12, pp. 2510-2520.
3. Chen, T. Y., Burnett, J. and Chau, C. K., 2001, "Analysis of embodied energy use in the residential building of Hong Kong," *Energy*, Vol. 26, No. 4, pp. 323-340.
4. Chou, J.-S., 2011, "Cost simulation in an item-based project involving construction engineering and management," *International Journal of Project Management*, Vol. 29, No. 6, pp. 706-717.
5. Harris, D.J, 1999, "A quantitative approach to the assessment of the environmental impact of building materials," *Building and Environment*, Vol. 34, No. 6, pp. 751-758.
6. Dimoudi, A. and Tompa, C., 2008, "Energy and environmental indicators related to construction of office buildings," *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 53, No. 1-2, pp. 86-95.
7. Elkjaer, M., 2000, "Stochastic budget simulation," *International Journal of Project Management*, Vol. 18, No. 2, pp 139-147.
8. González, M. J. and Navarro, J. G., 2006, "Assessment of the decrease of CO2 emissions in the construction field through the selection of materials: Practical case study of three houses of low environmental impact," *Building and Environment*, Vol. 41, No. 7, pp. 902-909.
9. Guggemos, A. A. and Horvath, A., 2005,

- “Comparison of Environmental Effects of Steel- and Concrete-Framed Buildings,” *Journal of Infrastructure Systems*, Vol. 11, No. 2, pp. 93-101.
10. Henrik, H., 2003, “Systems for carbon trading: an overview,” *Climate Policy* 3, Supplement 2(0), pp. S43-S57.
 11. Junnila, S. and Horvath, A., 2003, “Life-Cycle Environmental Effects of an Office Building,” *Journal of Infrastructure Systems*, Vol. 9, No. 4, pp. 157-166.
 12. Kellenberger, D. and Althaus, H.-J., 2009, “Relevance of simplifications in LCA of building components,” *Building and Environment*, Vol. 44, No. 4, pp. 818-825.
 13. Rezaie, K., Amalnik, M. S., Gereie, A., Ostadi, B. and Shakhsheniaee, M., 2007, “Using extended Monte Carlo simulation method for the improvement of risk management: Consideration of relationships between uncertainties,” *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 190, No. 2, pp. 1492-1501.
 14. Sihabuddin, S. S. and Ariaratnam, S. T., 2009, “Methodology for estimating emissions in underground utility construction operations,” *Journal of Engineering, Design and Technology*, Vol. 7, pp. 37-64.
 15. Singh, D. and Tiong, R. L. K., 2005, “Development of life cycle costing framework for highway bridges in Myanmar,” *International Journal of Project Management*, Vol. 23, No. 1, pp. 37-44.
 16. Sonnemann, G. W., Schuhmacher, M. and Castells, F., 2003, “Uncertainty assessment by a Monte Carlo simulation in a life cycle inventory of electricity produced by a waste incinerator,” *Journal of Cleaner Production*, Vol. 11, No. 3, pp. 279-292.
 17. Suzuki, M. and Oka, T., 1998, “Estimation of life cycle energy consumption and CO2 emission of office buildings in Japan,” *Energy and Buildings*, Vol. 28, No. 1, pp. 33-41.
 18. Suzuki, M., Oka, T. and Okada, K., 1995, “The estimation of energy consumption and CO2 emission due to housing construction in Japan,” *Energy and Buildings*, Vol. 22, No. 2, pp. 165-169.
 19. Weisser, D., 2007, “A guide to life-cycle greenhouse gas (GHG) emissions from electric supply technologies,” *Energy*, Vol. 32, No. 9, pp. 1543-1559.
 20. Zhang, Z. and Baranzini, A., 2004, “What do we know about carbon taxes? An inquiry into their impacts on competitiveness and distribution of income,” *Energy Policy*, Vol. 32, No. 4, pp. 507-518.
 21. 內政部建築研究所, 1999, 預鑄建築工程實務。
 22. 內政部營建署, 2009, 98 年營建統計年報。
 23. 交通部統計處, 2000, 中華民國台灣地區汽車貨運調查報告。
 24. 行政院環境保護署, <http://www.epa.gov.tw/>。
 25. 林憲德, 2007, 綠色建築解說與評估手冊。
 26. 張又升, 2002, 建築物生命週期二氧化碳減量評估, 國立成功大學, 博士論文, 台南。
 27. 陳弘芩, 2006, 淺談歐美各國環境稅, 能源報導, 11 月號, 第 11-13 頁。
 28. 楊英賢, 2008, 生命週期評估與不確定性分析應用於火力電廠與燃料選擇, 國立成功大學, 博士論文, 台南。
 29. 劉慶禧, 2010, 建築工程施工, 科技圖書, 臺北。
 30. 潤弘精密工程事業股份有限公司, 2008, 嘉義大潤發新建工程完工報告。

投稿日期：2012/12/11。

送審日期：2012/12/17。

審畢日期：2013/03/18。

修改日期：2013/03/22。

接受日期：2013/03/23。