



國立臺北科技大學

土木工程系土木與防災碩士班

碩士學位論文

**EPS 生產製造至使用階段之能源使用碳排
量分析研究**

**A study on the energy use and carbon
emissions of EPS production manufacturing
and usage stages**



研究生：吳峙叡

指導教授：林利國 博士

中華民國一百一十二年六月

摘要

論文名稱：EPS 生產製造至使用階段之能源使用碳排量分析研究

頁數：六十九頁

校所別：國立臺北科技大學 土木工程系土木與防災碩士班

畢業時間：一百一十一學年度 第二學期

學位：碩士

研究生：吳峙叡

指導教授：林利國 博士

關鍵詞：生命週期評估、碳排放、發泡聚苯乙烯、SimaPro

在全球經濟與科技快速發展下，導致地球上生態遭到嚴重破壞，造成二氧化碳排放量持續增加，進而引發全球暖化、氣候變遷等嚴重問題，地球上災害頻繁發生，對人民的生命及財產受到巨大威脅。目前台灣也面臨著全球氣候變遷的考驗，因此台灣政府正積極進行重大改革，改善過去的營建觀念，讓建築與自然生態能夠相互適應和融合，並致力於實現節能減碳的永續發展目標。這也是當前營建工程人員應該深思熟慮的目標之一。

發泡聚苯乙烯（EPS）是利用從石油中提取的液態苯乙烯單體，經過重合反應形成固態苯乙烯，再加入發泡劑製成塊狀形體產品。EPS 通過發泡、融合等製程，具有輕量化、高緩衝性、耐水性優、自立性佳、卓越的隔熱性能，並且施工簡單迅速。在歐美國家，人們常使用地工泡棉（Geofoam）作為土木工程中砂土回填的替代材料。地工泡棉主要由 EPS 製成，本研究的主要目的是探討 EPS 在生產和 EPS 及各種建材在現場使用階段中的碳排放情況，並經由 SimaPro 生命週期評估軟體與碳足跡評估法模擬計算後，在 $1m^3$ 的材料中，RC 之碳排放量會大於 EPS，且導致人體健康損害之衝擊效應為 17.19 Pt。

ABSTRACT

Title : A study on the energy use and carbon emissions of EPS production manufacturing and usage stages

Pages : 69

School : National Taipei University of Technology

Department : Graduate Institute of Civil and Disaster Prevention Engineering

Time : June, 2023

Degree : Master

Researcher : Zhi-Rui, Wu

Advisor : Lee-Kuo, Lin Ph.D.

Keywords: Life Cycle Assessment, carbon emissions, expanded polystyrene, SimaPro.

With the rapid development of global economy and technology, the Earth's ecosystems have suffered severe destruction, leading to a continuous increase in carbon dioxide emissions. Consequently, serious issues such as global warming and climate change have emerged, accompanied by frequent disasters that pose significant threats to human lives and properties. Taiwan is currently facing the challenge of global climate change, prompting the government to undertake major reforms aimed at improving past construction practices. The goal is to foster the adaptation and integration of buildings with the natural environment, while striving to achieve sustainable development through energy efficiency and carbon reduction. This objective should be a matter of deep consideration for construction professionals.

Expanded Polystyrene (EPS) is produced by using liquid styrene monomers extracted from petroleum, which undergo polymerization to form solid polystyrene. By incorporating a

foaming agent, EPS is shaped into block-like products. EPS manufacturing involves processes such as foaming and fusion, resulting in its lightweight nature, high buffering capacity, excellent water resistance, self-supporting structure, and superior thermal insulation properties. Additionally, EPS offers the advantage of easy and rapid construction.

In Western countries, Geofoam, commonly known as EPS, is frequently employed as an alternative material for soil backfilling in civil engineering projects. Geofoam primarily consists of EPS. The main objective of this study is to investigate the carbon emissions during the production and on-site usage stages of EPS and various building materials. By utilizing the SimaPro life cycle assessment software and carbon footprint assessment methodology, the research findings indicate that, in materials with a volume of $1m^3$, the carbon emissions from reinforced concrete are higher than those from EPS. Moreover, the impact on human health damage is estimated to be 17.19Pt.



目 錄

摘 要.....	i
ABSTRACT	ii
目 錄.....	iv
表目錄.....	vi
圖目錄.....	viii
第一章 緒論.....	1
1.1 研究背景與動機.....	1
1.2 研究目的	2
1.3 研究範圍	2
1.4 研究方法與流程	2
第二章 文獻回顧.....	4
2.1 EPS 之成分及性質	4
2.2 EPS 製程.....	5
2.2.1 EPS 樹脂	5
2.2.2 EPS 發泡與圓熟	8
2.2.3 EPS 灌模與脫模	8
2.2.4 EPS 成型品	9
2.3 EPS 國內外之應用狀況.....	10
2.3.1 EPS 於美國之工程應用	10
2.3.2 EPS 於日本之工程應用	13
2.3.3 EPS 於挪威之工程應用	14
2.3.4 EPS 於臺灣之工程應用	15
2.3.5 EPS 相關文獻回顧	20
2.4 生命週期評估概述	20
2.4.1 材料生命週期評估	21
2.4.2 生命週期評估軟體介紹	23
2.4.3 生命週期評估相關文獻回顧	24

2.5 碳足跡	24
2.5.1 國內現階段碳足跡參考標準與計算指引	25
第三章 研究方法	27
3.1 研究流程	27
3.2 碳盤查及實際案例探訪法	28
3.3 SimaPro 9.4.0.1 生命週期評估軟體簡介	29
3.3.1 ReCipe2016 衝擊評估方法	33
3.3.2 IPCC2021 GWP100 衝擊評估方法	37
3.3.3 硬體規格	39
第四章 研究成果	40
4.1 個案背景說明	40
4.2 碳盤查範圍與資料	40
4.2.1 碳盤查研究限制與假設條件	錯誤! 尚未定義書籤。
4.3 碳排分析與衝擊評估結果	43
4.3.1 ReCipe2016 衝擊評估	43
4.3.2 IPCC2021 GWP100 衝擊評估	64
第五章 結論與建議	66
5.1 結論	66
5.2 建議	67
參考文獻	68

表目錄

表 2.1 發泡聚苯乙烯粒徑規格分類表.....	7
表 2.2 發泡聚苯乙烯品級分類表.....	7
表 2.3 EPS 相關文獻.....	20
表 2.4 生命週期評估相關文獻回顧.....	24
表 2.5 我國產品與服務碳足跡計算指引計算原則(行政院環保署，2010).....	26
表 3.1 常見生命週期評估軟體之特點比較 (王慧茹，2009).....	29
表 3.2 ReCipe 特徵化之環境衝擊類別(黃瓊儀，2003).....	35
表 3.4 ReCipe 常態化因子(Goedkoop, et al, 2001).....	36
表 3.5 ReCipe 評價加權因子(Goedkoop, et al, 2001).....	37
表 3.6 其溫室氣體其 GWP 生命期及數值.....	38
表 3.7 SimaPro 建議設備規格表 (SimaPro 網站，2022)	39
表 4.1 主要盤查資料.....	41
表 4.2 108 年至 110 年之用電量.....	41
表 4.3 108 年至 110 年之用水量.....	42
表 4.4 電水費單據度數統計.....	42
表 4.5 ReCipe2016 特徵化分析 1kg 材料結果.....	43
表 4.6 ReCipe2016 特徵化分析 1kg 材料結果.....	45
表 4.7 ReCipe2016 特徵化分析 1m ³ 材料結果	47
表 4.8 ReCipe2016 特徵化分析 1m ³ 材料結果	48
表 4.9 ReCipe2016 常態化分析 1kg 材料結果.....	50
表 4.10 ReCipe2016 常態化分析 1kg 材料結果.....	52
表 4.11 ReCipe2016 常態化分析 1m ³ 材料結果	53
表 4.12 ReCipe2016 常態化分析 1m ³ 材料結果	55
表 4.13 ReCipe2016 評價加權分析 1kg 材料結果.....	57
表 4.14 ReCipe2016 評價加權分析 1kg 材料結果.....	57
表 4.15 ReCipe2016 評價加權分析 1m ³ 材料結果	58
表 4.16 ReCipe2016 評價加權分析 1m ³ 材料結果	59

表 4.17 ReCipe2016 單項得點分析 1kg 材料結果.....	60
表 4.18 ReCipe2016 單項得點分析 1kg 材料結果.....	61
表 4.19 ReCipe2016 單項得點分析 1m ³ 材料結果	62
表 4.20 ReCipe2016 單項得點分析 1m ³ 材料結果	63
表 4.21 IPCC2021 GWP100 單項得點分析 1m ³ 材料結果	65



圖目錄

圖 1.1 研究流程圖.....	3
圖 2.1 EPS 製造流程圖（林利國，2000）.....	5
圖 2.2 原油煉製過程及產物示意圖（英國塑膠協會，2005）.....	6
圖 2.3 EPS 預發泡（蘭陽開發工業股份有限公司，2020）.....	8
圖 2.4 EPS 灌模與脫模作業流程圖（林利國等，2000）.....	9
圖 2.5 EPS 成型產品作業相關流程圖（黃柏維，2004）.....	9
圖 2.6 猶他州鹽湖城 I-15 州際公路重建工程.....	11
圖 2.7 紐約州厄特縣 23A 道路工程.....	11
圖 2.8 華盛頓州 Renton City Hall 新建工程.....	12
圖 2.9 馬里斯維爾州斯諾霍涵洞工程.....	12
圖 2.10 新奧爾良機場東西向跑道整建工程（ACH Foam Technologies，2006）.....	13
圖 2.11 北海道札幌市橋梁橋台之背填工程.....	14
圖 2.12 臺北市中山大直橋（莊士賢，2008）.....	15
圖 2.13 洲美快速道路第二期新建工程示意圖（何泰源，2001）.....	16
圖 2.14 國立臺北科技大學圖書館屋頂太陽能設備暨休憩空間整建工程.....	17
圖 2.15 國內應用 EPS 於工程之案例.....	18
圖 2.16 EPS 應用於東眼山工程之案例.....	19
圖 2.17 工程生命週期各階段示意圖（低碳建築聯盟，2016）.....	22
圖 3.1 研究方法流程圖.....	28
圖 3.2 SimaPro9.4.0.1 基本架構示意圖.....	30
圖 3.3 SimaPro 9.4.0.1 軟體之產品網狀結構示意圖.....	30
圖 3.4 SimaPro9.4.0.1 權重設定介面示意圖.....	31
圖 3.5 SimaPro 9.4.0.1 樹狀圖架構示意圖.....	31
圖 3.6 SimaPro 9.4.0.1 長條圖特性描述示意圖.....	32
圖 3.7 ReCipe2016 流程概念圖.....	34
圖 4.1 ReCipe2016 特徵化分析 1kg 材料結果.....	45
圖 4.2 ReCipe2016 特徵化分析 1kg 材料結果.....	46

圖 4.3 ReCipe2016 特徵化分析 1m3材料結果	48
圖 4.4 ReCipe2016 特徵化分析 1m3材料結果	49
圖 4.5 ReCipe2016 常態化分析 1kg 材料結果	51
圖 4.6 ReCipe2016 常態化分析 1kg 材料結果	53
圖 4.7ReCipe2016 常態化分析 1m3材料結果	54
圖 4.8ReCipe2016 常態化分析 1m3材料結果	56
圖 4.8 ReCipe2016 評價加權分析 1kg 材料結果	57
圖 4.9 ReCipe2016 評價加權分析 1kg 材料結果	58
圖 4.10 ReCipe2016 評價加權分析 1m3材料結果	59
圖 4.11 ReCipe2016 評價加權分析 1m3材料結果	60
圖 4.12ReCipe2016 單項得點分析 1kg 材料結果	61
圖 4.13ReCipe2016 單項得點分析 1kg 材料結果	62
圖 4.14ReCipe2016 單項得點分析 1m3材料結果	63
圖 4.15ReCipe2016 單項得點分析 1m3材料結果	64
圖 4.16 IPCC2021 GWP100 單項得點分析 1m3材料結果	65

第一章 緒論

1.1 研究背景與動機

建築產業一直以來都為高度碳排放之產業，雖為我們人類帶來了便利與準確地改善了生活品質，但在我們改善生活品質狀況下，也對環境帶來極大的負面影響。從一開始發現溫室氣體對於大氣層帶來破壞導致全球暖化日益嚴重，其帶來的極端氣候，在近幾年全球各地都陸續出現，導致各國間都陸續在重視碳中和、淨零碳排等相關之環境議題。而建築與土木產業對於台灣來說是推動經濟的火車頭，也是推動國家大大小小建設之動力，但建築與土木產業卻也是主要碳排放之產業，因此經過國際減碳規範與台灣溫室氣體減量及管理法落實後，藉由行政院工程會「研訂公共工程計畫相關審議基準及綠色減碳指標計算規則」使得台灣對於公共工程 2013~2014 年推動「碳足跡推估前置作業」，與 2015~2019 年開始執行「碳足跡推估作業」，於 2020~2024 年開始執行「碳足跡推動作業」，於 2025 年後推動「碳中和推動作業」(行政院公共工程委員會，2012)，隨著相關法規公佈後台灣之建築產業之碳排放由上游之材料廠商開始公佈逐年之環境永續保護書，讓台灣逐漸往淨零碳排這個方向慢慢前進。

生命週期評估(Life cycle assessment；簡稱 LCA)為一種環境分析工具，多用於分析評估一項產品從生產、使用到回收利用或是廢棄等不同階段對環境造成之衝擊，包括能源使用、資源的耗用、污染排放等階段。

發泡聚苯乙烯 (Expanded Poly-Styrene；簡稱 EPS)，歐美日等國家常用於土木工程之砂土回填替代材料，故稱為地工泡棉 (Geofoam)，台灣於 111 年運用於三峽區北 113 線 0K+650 災害復建工程道路邊坡復建工程。地工泡棉具有質量輕、壓縮性好、自立性佳、施工性優及耐水性好等優點，本研究主要目的為應用虛擬模擬方法，探討將地工泡棉自塊體生產、使用到回收利用階段，以達能源使用及資源耗用並進行 LCA 分析研究。

1.2 研究目的

本研究之執行目的分別如下：

- 一、彙整國內外 EPS 工法施工案例與國內之 EPS 使用製造耗能與二氧化碳排放之數據。
- 二、應用生命週期軟體之收集，探討 EPS 生產、使用到回收利用之階段，地工泡棉在生產、使用到回收利用階段對環境產生碳排等資訊。
- 三、應用生命週期軟體之收集，探討 EPS 取代各個建材之比較現場使用階段所產生之碳排放量對環境產生碳排之優勢與劣勢。

1.3 研究範圍

本研究僅針對 EPS 製造能源使用、資源的耗用階段進行分析探討，探討 EPS 取代各個建材之比較各階段對環境產生碳排之優勢與劣勢。

1.4 研究方法與流程

本研究將採取下列研究方法進行探討以達預期之目標：

- 一、文獻回顧法：蒐集並彙整國內外 EPS 及 LCA 相關之文獻與資料。
- 二、虛擬模擬法：由分析台灣 EPS 之製造商所使用之用水量、用電量與運輸距離等資料進行碳排查，並對其 EPS 生產量與碳排放量進行比對。
- 三、實際案例調查法至台 X 化學工業股份有限公司，進行數據之採集與當面訪談與諮詢。

本研究依據所欲達成之研究目的，配合相關的研究方法，並依圖 1.1 所示之研究流程來執行。

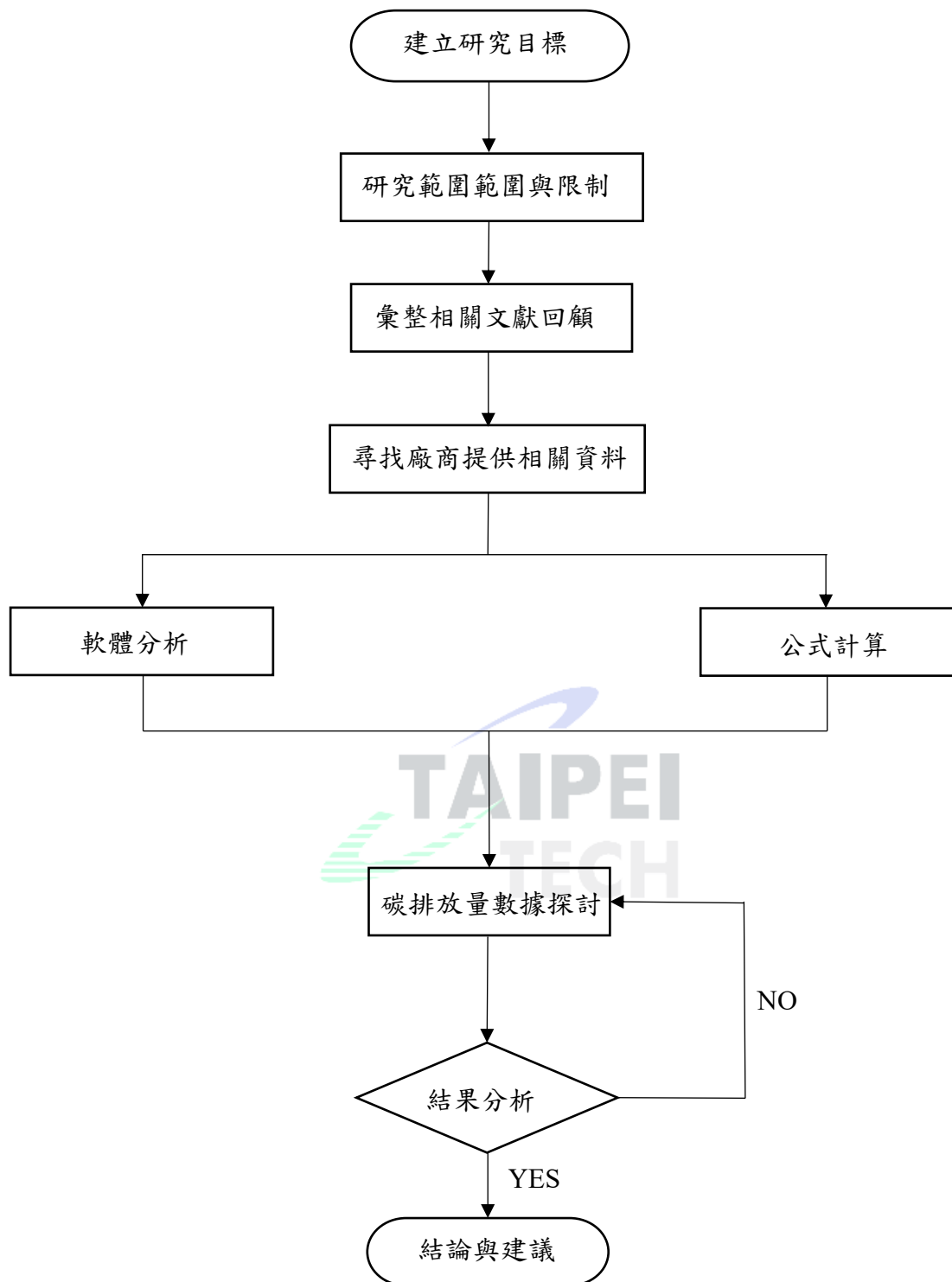
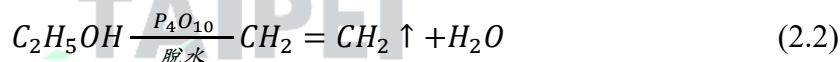
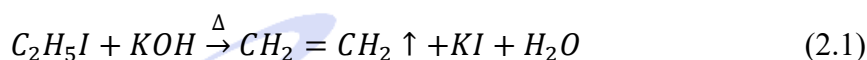


圖 1.1 研究流程圖

第二章 文獻回顧

2.1 EPS 之成分及性質

發泡聚苯乙烯 (Expanded Poly-Styrene; 簡稱為 EPS)，於工程應用時又名地工泡棉 (Geofoam)，其原料聚苯乙烯係由乙烯 (化學式：C₂H₄) 及苯 (化學式：C₆H₆) 經聚合程序製成，苯為煉爐之產品，透過觸媒反應，使乙烯透過苯得到乙苯；此乙苯具合成物劈裂分子內之氫原子，轉化為苯乙烯 (C₈H₈)，藉由聚合反應轉化為固體塑膠質 (黃柏維，2004)，乙烯為天然氣與石油之製品，為烯類中最簡單且重要之分子藉碘乙烷與氧化鉀之酒精液體共熱而製成，其反應式如方程式(2.1)所示，或以濃硫酸與五氧化二磷，促使酒精經脫水而製成，其反應式如方程式(2.2)所示。



EPS 之基本特性包括質量輕、經濟性、耐水性、施工簡便、自立性、緩衝性、耐水性、電絕緣性及隔熱隔音，其基本特性與應用，茲敘述如下 (何泰源，2006)。

- 一、經濟性佳：EPS 施工便捷，工期短、挖方少及維修費低、可作為背填材料，工程總造價經濟。
- 二、施工簡便：不需大型機械，以人力方可輕便迅速施工，其重量輕便可解決技術工人難求之困境。
- 三、質量輕：EPS 材料密度為 0.012~0.035 t/m³，密度約一般砂土 1/100，使軟弱地盤不須改良承载力，無沉陷之虞。
- 四、自立性佳：柏松比小，可有效降低側向土壓力，側方變形極小，可適用擋土之結構物背填材料。
- 五、電絕緣性佳：在可容許之操作溫度範圍內，具有良好的電絕緣性質及抗靜電性。

- 六、緩衝性優：氣泡發揮極佳緩衝性，EPS 其容許壓應力於 $2\sim 20\text{ t/m}^3$ 範圍，具減少衝擊及震動效果。
- 七、隔熱隔音佳：EPS 之組成約有 98% 為空氣，僅 2% 為實體物質，故具有隔熱隔音之效果。
- 八、耐水性好：單獨孔隙不易吸水，材料不易產生變化，材料不易吸水、變形及產生化學反應等優點。

2.2 EPS 製程

EPS 之製造流程分為原料發泡、灌模與脫模及 EPS 成型品等步驟（林利國，2000）
參考圖 2.1。

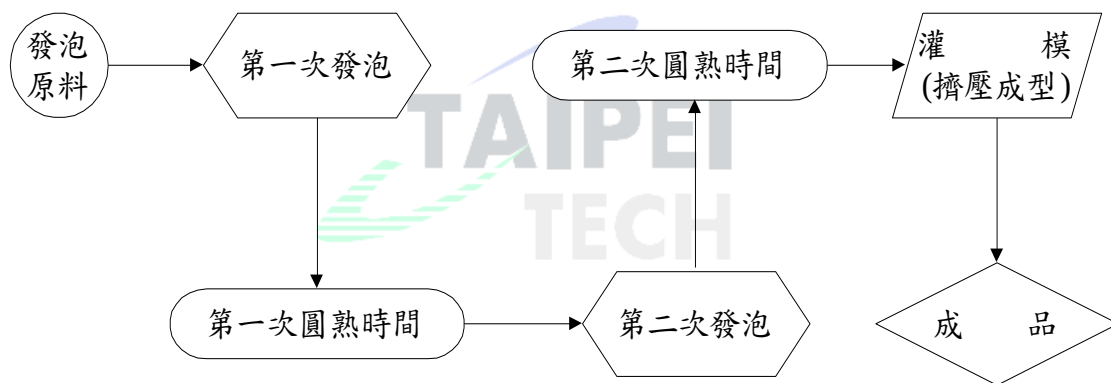


圖 2.1 EPS 製造流程圖（林利國，2000）

2.2.1 EPS 樹脂

塑化聚合物之主要原料由原油中提煉，經由蒸餾及油氣分離等程序後，可取得汽油、石蠟及乙烷等衍生品，EPS 屬其衍生產品之一。其原油提煉過程所產生之產品 96% 主要是非燃料之車輛及機械用油，4% 約為塑化物，其中 EPS 比例僅約 0.1%（鄭卓仁，2010）
參考圖 2.2。

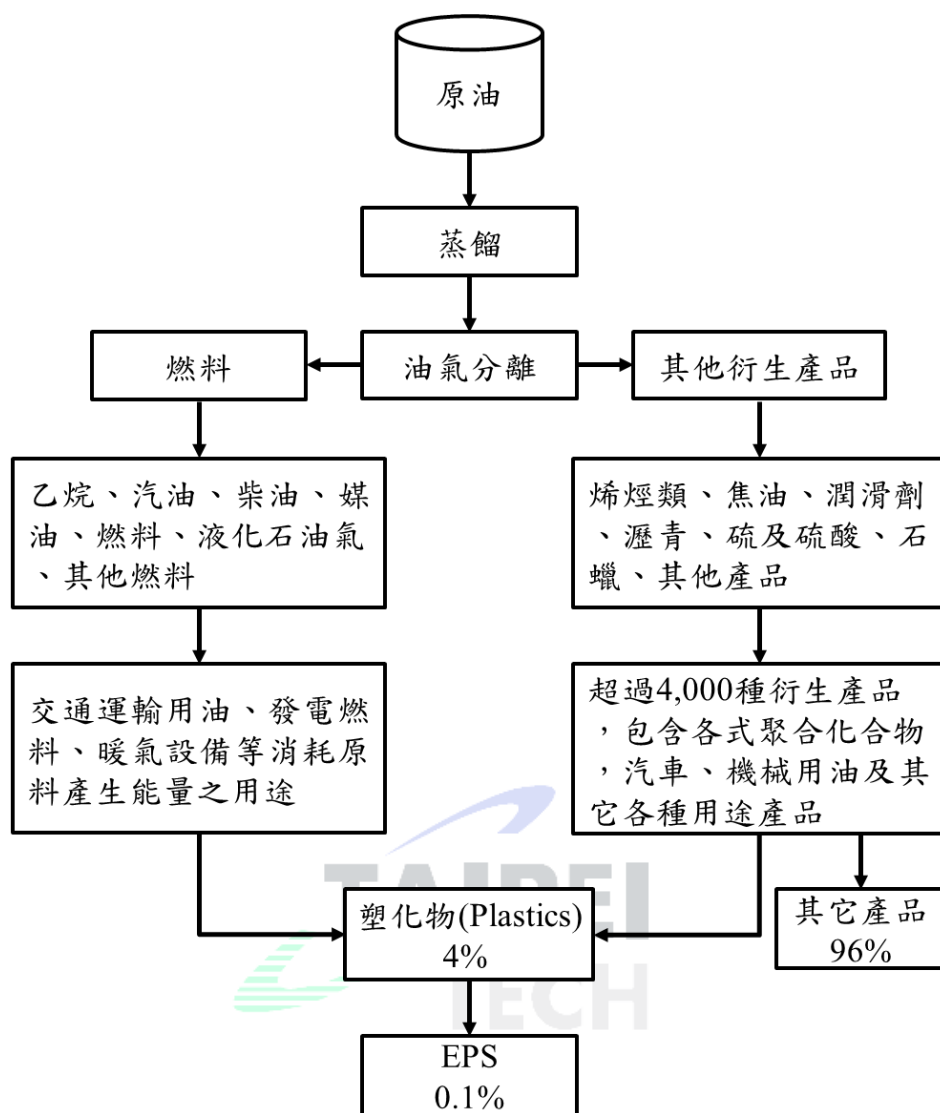


圖 2.2 原油煉製過程及產物示意圖（英國塑膠協會，2005）

國內多數產業將苯乙烯作為發泡原料，經懸浮聚合反應而產生不同粒徑大小之樹脂塑膠顆粒，將添加戊烷發泡劑之聚苯乙烯珠顆粒進行冷卻，藉由各層規格不同篩網過濾出各粒徑大小之 EPS 樹脂，其粒徑大小規格分為六種，粒徑小發泡倍率越小，反之，粒徑大則發泡倍率越大（台達化學工業股份有限公司，2020），如表 2.1、2.2 所示。

表 2.1 發泡聚苯乙烯粒徑規格分類表

粒徑規格	MM	T	S	SS	F	H
單位(mm)	1.2-1.8	1.0-1.4	0.8-1.1	0.65-0.9	0.45-0.75	0.3-0.5
發泡倍率 (倍)	70-95	65-85	60-80	60-80	50-70	20-50

表 2.2 發泡聚苯乙烯品級分類表

品級	特性	應用
一般級	- 其成型所需加熱溫度範圍較廣。 - 抗壓性較優。 - 蒸氣消耗性小，能減少成本支出，亦可節省能源之使用。	保護產品，降低衝擊、撞擊之破壞，如：玻璃、陶瓷相關易碎品；保溫材料，如：保溫板及食品包裝；建築材料；美工材料，如：佈置裝飾材。
快速成型級	- 成型所需時間短，故能縮短生產週期，降低製造成本。 - 其他特性與一般級相同。	保護產品，降低衝擊、撞擊之破壞，如：玻璃、陶瓷相關易碎品及電子產品；保溫材料，如：生鮮冷凍食品包裝、保溫板及保溫管。
難燃級	具優越耐火性。	保溫材料，如：保溫板、保溫管；建築材料，如：隔間材、複合板；輕質土材料。
非 HBCD 難燃級	通過 SGS 測試，具優良難燃性，且不含 HBCD 之持久性有機汙染物。	保溫材料，如：保溫板、保溫管；建築材料，如：隔間材、複合板；輕質土材料。
食品級	型之成品含較低苯乙烯殘留，符合國家衛生標準。	市售相關食品之包裝，如：保冰盒、杯子及盤具等。

2.2.2 EPS 發泡與圓熟

將第一階段所得之 EPS 樹脂顆粒置入發泡爐內添加發泡劑，並加熱進行預發泡程序，使蒸氣中熱含量擴及粒子內部而膨脹發泡，因不同蒸氣供應量、加熱時間、進料速度等相關因素控制其發泡顆粒之發泡倍數及粒徑大小，其發泡倍數約為 15 倍至 70 倍之間，而主要成分為空氣，佔材料總體積 90%至 95%，故具良好抗壓性及緩衝能力如圖 2.3 所示。聚苯乙烯依照不同的發泡方法，可分為以下：

一、押出發泡平板成型 (Polystyrene Paper, 簡稱 PSP)：押出發泡平板成型將聚苯乙烯加入丁烷作為發泡劑，放進押出機發泡 10~20 倍製造成保麗龍板。厚度為 2mm 至 5mm 之平板經加熱真空成型後，成為免洗餐具及托盤等產品。

二、發泡粒成型 (EPS)：又可再細分兩種發泡方式，分別為模內發泡法及擠出發泡法，主要將聚苯乙烯原料置入加壓發泡桶內，進行加壓加熱，待原料膨脹至 30 至 50 倍之預發泡顆粒；若要成型則需進行第二次發泡，將預發泡顆粒置入成型之模具中進行高溫高壓作用，達至一定熔點而形成成型品，可因不同領域需求進行裁切。



圖 2.3 EPS 預發泡 (蘭陽開發工業股份有限公司, 2020)

2.2.3 EPS 灌模與脫模

再灌模前需先將成型模具閉模預熱，待預熱完畢後，再將第二次圓熟時間所生產出之 EPS 顆粒適量由通風儲存槽中引入成型機模具中，再進行灌模之步驟，待 EPS 原料皆灌入模具後，便鎖模開始加壓加溫，以高壓高溫將所灌入之 EPS 原料在模具中擠壓成

型。擠壓成型後之成品經由適當冷卻後，即進行開模與脫模（林利國等，2000），參考圖 2.4。

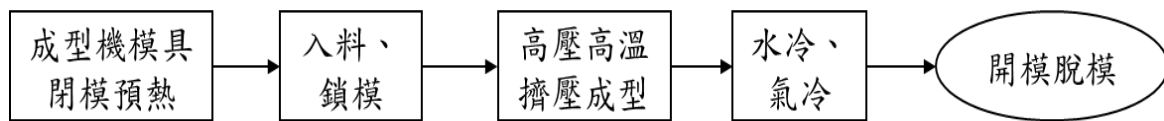


圖 2.4 EPS 灌模與脫模作業流程圖（林利國等，2000）

由 EPS 原料置入之模具大小規格固定，經蒸氣高溫高壓擠壓成型，其成型之產品應為相同密度。此外，如因壓力、溫度等因素而使得成型品擠壓不完全的話，將造成成型之產品角邊有剝落之現象。

2.2.4 EPS 成型品

將脫模後之 EPS 成品置於陰涼處使成品自然乾燥，並以目視檢查 EPS 成型品是否合格，如一切都達到所要求之標準便可進行包裝、入庫及出貨等相關後續工作（黃柏維，2004），參考圖 2.5。

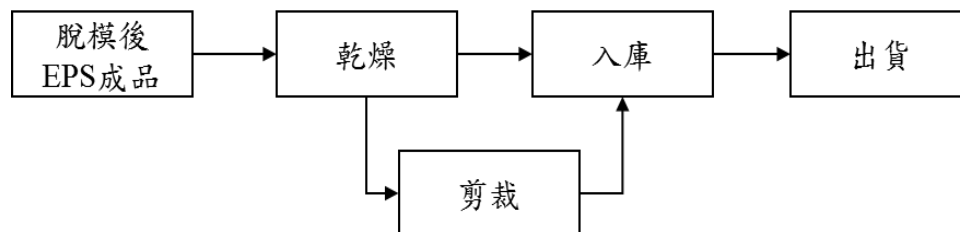


圖 2.5 EPS 成型產品作業相關流程圖（黃柏維，2004）

2.3 EPS 國內外之應用狀況

2.3.1 EPS 於美國之工程應用

美國營建工程中初次使用 EPS 作為回填材料之工程，於 1974 年於密西根州附近的一座鋼構橋樑工程，該座雙橋跨距連續樑之橋樑係使用鋼筋混凝土樁為基礎，橋樑引道回填高度較舊橋高出 1.5 公尺。於回填階段近於完工時，發現非預期之水平向快速位移，因此必須考慮其它代替材料解決，最後選擇 EPS 材料作為回填材料，該工程使用輕質 EPS 為 977 立方公尺，至今至 40 餘年，仍未發生任何重大位移狀況（鄭永欽及林利國，1998）。

除密西根州之工程案例，目前美國也陸續將 EPS 於工程應用擴及其他各州，分述如下：

一、猶他州鹽湖城 I-15 州際公路重建工程：猶他州鹽湖城因舉辦 2002 年冬季奧運，故重新規劃該州最重要的 I-15 州際公路予以拓寬重建，此工程總長約為 24 公里；在部份地區特別採用 EPS 作為回填材料，並搭配加載工法（Surcharge method）同時進行施工，藉由一面減輕沈陷量一面加速沈陷，進而達到快速施工且縮短工期之目的。此工程所使用之 EPS 回填材料總計約 95,000 立方公尺，如圖 2.6 所示，在當時已打破文獻記載於馬來西亞單一工程所使用的 80,000 立方公尺最大 EPS 使用量的記錄（鄭永欽，2000）。

除密西根州之工程案例，目前美國也陸續將 EPS 於工程應用擴及其他各州，分述如下：

二、猶他州鹽湖城 I-15 州際公路重建工程：猶他州鹽湖城因舉辦 2002 年冬季奧運，故重新規劃該州最重要的 I-15 州際公路予以拓寬重建，此工程總長約為 24 公里；在部份地區特別採用 EPS 作為回填材料，並搭配加載工法（Surcharge method）同時進行施工，藉由一面減輕沈陷量一面加速沈陷，進而達到快速施工且縮短工期之目的。此工程所使用之 EPS 回填材料總計約 95,000 立方公尺，如圖 2.6

所示，在當時已打破文獻記載於馬來西亞單一工程所使用的 80,000 立方公尺最大 EPS 使用量的記錄（鄭永欽，2000）。



圖 2.6 猶他州鹽湖城 I-15 州際公路重建工程

三、紐約州厄特縣（Jewett County）23A 道路工程：厄特縣 23A 道路因常遭受地下水側向壓力之影響，且位於順向坡地，而使得該路段之路堤每年產生約 1 英寸側向滑動，從 1979 年至 1992 年間其位移量達到 8 英寸；為解決此問題，於 1995 年開始進行坡地穩定改善工程，此工程使用之 EPS 回填材料總計為 2,800 立方公尺，如圖 2.7 所示（Geofoam Research Center，2000），以減輕原有土體易於滑動之問題，並達到施工簡便及節省工期之效果。



圖 2.7 紐約州厄特縣 23A 道路工程

四、華盛頓州蘭頓市政廳（Renton City Hall）新建工程：蘭頓市政廳為地上五層樓地下三層樓之鋼結構玻璃帷幕建築。其地層包含鬆散的沖積沙和約 12 英呎可壓縮之泥煤，總計約 34 英呎軟弱土層覆蓋於砂礫石層上；而建築物的地下

車道剛好位於該軟弱土層中，故本工程採用 EPS 進行填築以解決軟弱土層之沉陷問題；此工程因使用 EPS 而節省約 60 萬美元之工程成本，亦達到施工快速與節省成本之目的，如圖 2.8 所示（Geofoam Research Center，2000）。



圖 2.8 華盛頓州 Renton City Hall 新建工程

五、馬里斯維爾州斯諾霍涵洞工程（Snohomish Culvert）：2008 年於馬里斯維爾州斯諾霍涵洞工程中，為了避免該區域排水幹管之涵洞發生沉陷破壞，故藉由 EPS 質量輕之特性填築於涵洞上方達到保護作用，此工程總計使用 EPS 塊體為 1,883 立方公尺，如圖 2.9 所示（ACH Foam Technologies，2008）。



圖 2.9 馬里斯維爾州斯諾霍涵洞工程

六、新奧爾良（New Orleans）機場東西向跑道整建工程：此工程主要目的為拆除現有路面及整修和更換損壞之跑道，並重新澆置新的混凝土鋪面；整修過程中，施工單位發現跑道之地下土壤有不均勻沉陷，故選擇質量較輕的 EPS（16PSI）做為填土材料，以代替原有出現不均勻沉陷而破壞的現有跑道下方填土，且避免新舊跑道間產生不均勻的沉陷。此工程較特別的是，機場跑道原有的地下土壤中充滿了樹枝和樹根，也產生許多的白蟻，為防止蟲害，施

工單位於此工程所使用之 EPS 塊體中加入經核准的添加劑，進而防止潛在重大蟲害，此工程總金額達 6,400 萬美元並於 2005 年完工，如圖 2.10 所示。



圖 2.10 新奧爾良機場東西向跑道整建工程（ACH Foam Technologies，2006）

2.3.2 EPS 於日本之工程應用

日本為目前最普遍採用 EPS 施工方法的國家之一，其主要原因為：日本軟土地基較多，故利用其良好自立性，於山區的陡坡上建設路基發揮 EPS 工法專長；且日本位處於地震頻繁之板塊交界處，恰巧此設計工法已趨於成熟，故 EPS 之耐震得到充分利用。

EPS 輕質填土工法最早應用為 1972 年於挪威佛洛姆橋引道回填工程之案例成功後，日本將 EPS 材料及相關工法引進國內，於 1985 年 8 月首次將此工法應用於北海道札幌市橋梁橋台之背填工程，作為地層下沉之對策（積水化成品工業株式會社，2010），如圖 2.11 所示。



圖 2.11 北海道札幌市橋梁橋台之背填工程

EPS 於營建工程界應用已超過 50 年之歷史，而在日本亦累積超過 30 年之工程經驗（塚本英樹等，2008），截至 2018 年，日本已超過 6,718 件工程案例應用此工法，總用量共計 800 萬立方公尺。

2.3.3 EPS 於挪威之工程應用

EPS 發明於 1950 年，最早於 1960 年斯堪地那維亞國家將此材料應用於地層作為住宅的絕緣基礎，而在同一時期於斯堪地那維亞半島、加拿大及美國等國家也將此材料應用於道路鋪面下方作為防凍結之功用。1970 年於美國和挪威同時進行 EPS 輕質填土工法應用於公路工程（Horvath，1995），而最重要之里程碑為 1972 年，挪威之道路研究實驗室（Norwegian Road Research Laboratory；簡稱為 NRRL）將 EPS 成功應用於佛洛姆（Flom）橋引道回填（Aaboe，2000）；該工程施作時，工程師發現橋台地盤下為軟弱地盤，每年將產生高達 10cm 之地盤沉陷，故以 EPS 塊體取代橋台之背填土且成功應用。1972 年至 1991 年之間，挪威進行之 120 件道路工程中使用 EPS 總量共計約為 250,000 立方公尺，包括：橋梁引道回填、擋土回填及路堤等不同 EPS 應用；此材料應用已長達 40 餘年，根據使用經驗及效果評估顯示，EPS 作為回填材料之道路維護費用較傳統工法低，且未降低工程品質。時至今日，挪威道路研究實驗室於 EPS 應用於輕質回填材料之研究仍位居領先地位，世界各國普遍採用 NRRL 之研究，作為輕質回填材料之參考（NRRL，1992；鄭永欽及林利國，1998）。

2.3.4 EPS 於臺灣之工程應用

臺灣於 1995 年將 EPS 應用於工程案例，臺灣省公路局於西部濱海公路建造試驗堤一處，此工程使用密度約 25kg/m^3 之 EPS 塊體，並搭配 10cm 之 RC 板及 H 型鋼側牆，順利搭建一座長 30 公尺，寬 3 公尺，高 1.5 公尺之試驗路堤，於當年 12 月完工通車至今，皆無發生任何損壞（黃景川，1999）；此工程總工期為 10 天，如扣除天候及其他因素之影響，則實際施工約為 6 天，符合預期施工規劃進度（黃景川，1997）。

全世界第一座鈞竿式斜張橋臺北市中山大直橋，如圖 2.12 所示，於 1999 年 10 月進行改建工程，其將 EPS 填土工法應用於此計畫，主橋利用節塊推進之方式施作；並於 2000 年 9 月接續進行推進構台之興建，施作中為減少構台底部回填所造成之沉陷，故使用密度為 25kg/m^3 之 EPS 塊體，分三層進行推進中山大直橋長 29.92 公尺，寬 20.4 公尺，高 4 公尺之回填，共使用 2,440 立方公尺之 EPS 塊體，總重量與傳統重 $2,300\text{kg/m}^3$ 之回填相比較，減輕約 555 噸之重量（黃柏維，2004）。



圖 2.12 臺北市中山大直橋（莊士賢，2008）

臺灣於 2002 年首次大規模使用 EPS 工法之工程為「臺北市洲美快速道路第二期新建工程」，此工程所使用之 EPS 塊體總計約 12,105 立方公尺，如圖 2.13 所示；EPS 材料採用 D-20（模內發泡法），密度為 20kg/m^3 ，抗壓強度為 1.0kgf/cm^2 以上。此工程完工後，達耐水性佳及節省經費又不影響工期等目標（何泰源，2006）。

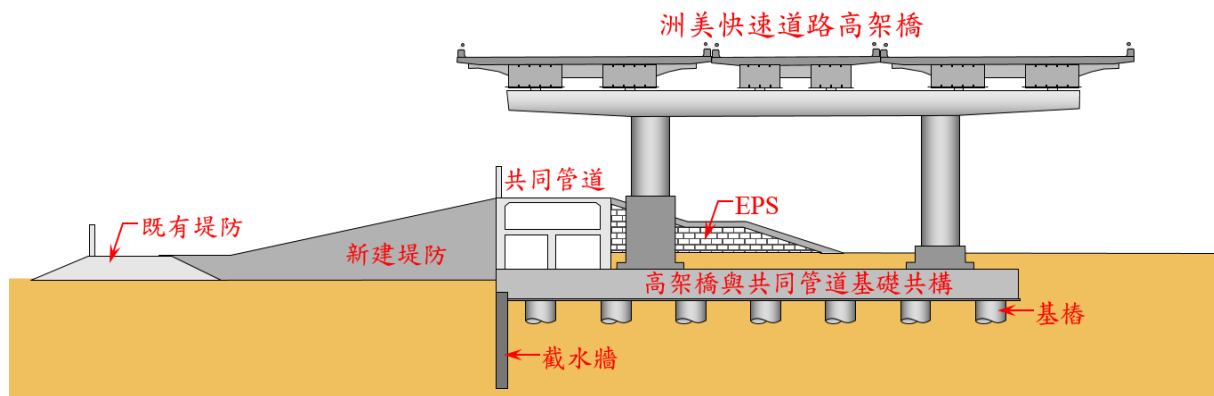


圖 2.13 洲美快速道路第二期新建工程示意圖（何泰源，2001）

國立臺北科技大學於 2020 年底完工的「圖書館屋頂太陽能設備暨休憩空間整建工程」，此工程主要施工項目有，太陽能板工程、室內大廳工程、機電照明工程、鋼構工程、屋頂板夾具工程、防水與隔熱及吸音地坪工程。其吸音隔熱工法為使用厚度 4cm 之 EPS，密度為 15kg/m^3 ，共使用 866 立方公尺之 EPS 塊體，EPS 塊體皆使用雙層點焊鋼絲網固定以防止澆置過程中移動，最下層鋪設 1.5cm PE 吸音層如圖 2.15 所示，接著進行水泥砂漿澆置。此工程總金額達 1795 萬，其中吸音隔熱工程占 276 萬。

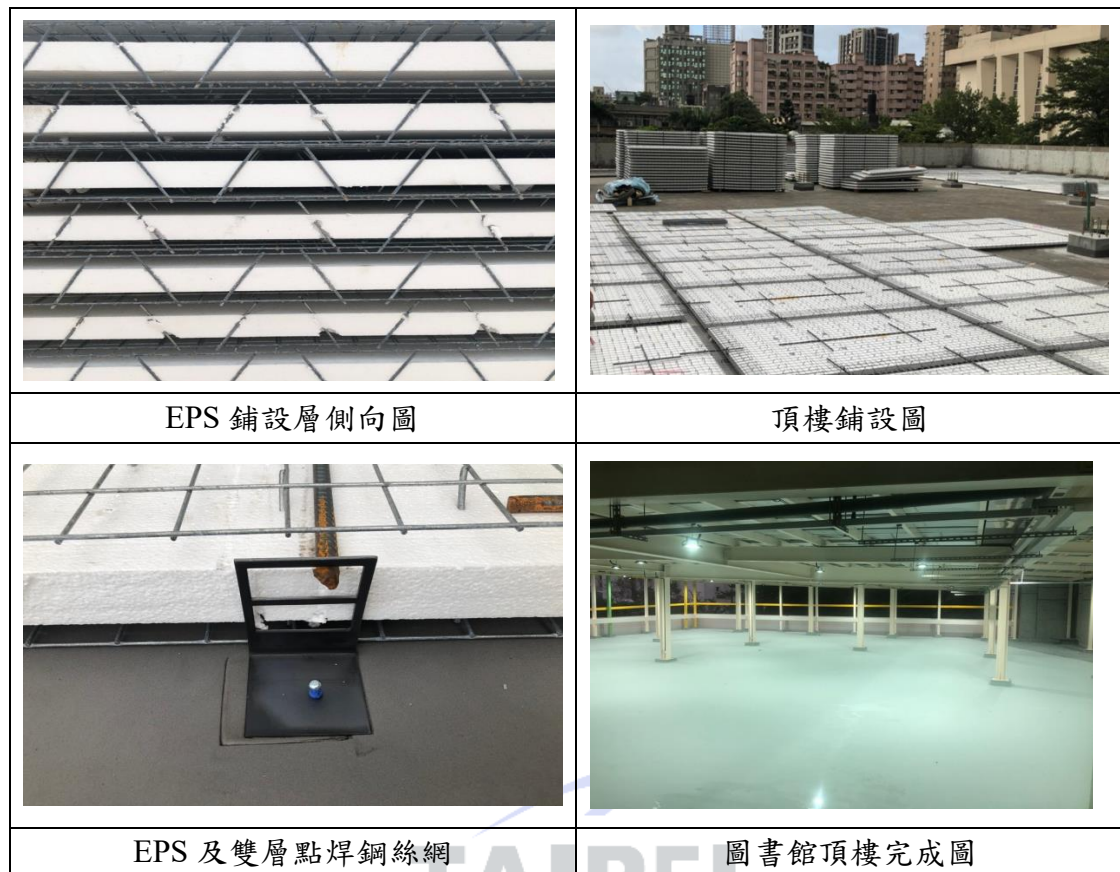


圖 2.14 國立臺北科技大學圖書館屋頂太陽能設備暨休憩空間整建工程

國內將 EPS 應用於工程上的案例顯少，如南投鹿谷小半天明隧道、南投竹山大鞍山路基、臺東太麻里大溪明隧道、三峽區大豹溪北 114 線（6K+200）處道路邊坡修復及 2018 年已完工之九曲洞景觀明隧道工程等都為我國成功將 EPS 應用於工程上之實例，如圖 2.15 所示。



圖 2.16 EPS 應用於東眼山工程之案例

2.3.5 EPS 相關文獻回顧

國內目前有關 EPS 之研究如表 2.3 所示，茲研究整理如下：

表 2.3 EPS 相關文獻

論文研究	年份	作者
地工泡棉(EPS)生產製造與再生利用之能源碳排放分析研究	2012	李宇橋
地工泡棉(EPS)應用於路基之價值分析與施工碳排比較	2013	陳瑋志
台灣發泡聚苯乙烯(EPS)回收策略之研究	2014	蘇宇傑
地工泡棉（EPS）應用於建築物外牆飾材之性質研究	2016	蔡曜謙
泡棉顆粒應用於 CLSM 粒料之可行性研究	2022	劉宇傑

2.4 生命週期評估概述

生命週期評估之想法主要應用在環境治理及管理，可由 1969 年 Coca-Cola 公司委託美國中西部研究院(Midwest research institute, MRI)對其容器之材質進行能源耗用進行評估。1980 年起，美國能源部對於每個產業製程進行能源流及物質流(Energy and Material Flows)分析。自 1990 年代以來它受到了環境科學領域個人的廣泛關注。對於這個概念，使用了許多名稱，例如生態平衡（德國、瑞士、奧地利和日本）、資源和環境概況分析（美國）、環境概況和從搖籃到墳墓的評估(Poritosh Roy，2008)。

國際標準組織(International organization for standardization, ISO)於 1996 年開始公布 ISO14040 系列標準，以製定和促進就進行生命週期清單分析和影響評估框架達成共識。然而由 2002 年世界高峰會所提出促進永續之生產及消費模式 (劉家豪，2004)。

2.4.1 材料生命週期評估

材料之生命週期評估(Life cycle assessment, 簡稱 LCA)多用於系統分析方式之一，由原料生產製造、材料運輸、材料使用至材料回收利用或是廢棄物處理等階段對環境造成衝擊之評估，亦即為「搖籃到墳墓」全方面進行系統性之環境影響評估。以生命週期評估探究材料之能源耗用，分為以下五個階段。且如圖 2.17 所示：

一、材料生產及運輸

所消耗之能源包含材料生產中所產生之消耗電力、瓦斯、煤氣、燃油等能源，及在材料運輸階段運輸車輛所產之消耗能源等。

二、材料施工階段

包含在材料施工中所使用施工機具、揚重設備、施工車輛消耗之電力及能源燃料，包含臨時工務所用水用電等能源使用。

三、材料日常使用階段

指材料施工完成後數十年間全部之使用電力、水力、瓦斯與燃料及煤油等。

四、材料維護及修繕階段

指材料在數十年內之使用期間，維護、裝修、翻新或改善等施工過程中所產生之材料生產運輸及營建施工之耗能。

五、材料廢棄物處理階段

即使是有數十年壽命之工程，亦有可能老化及經濟效益不符合現況之現象發生，需出動吊車、山貓等大型施工機具進行拆除工程，而這時耗費之能源為機器設備及廢棄物處理之損耗能源。除以上敘述五大生命週期階段，也可由工程拆除解體之建材廢料中進行材料回收利用，將鋼筋、EPS、混凝土等材料再製成可用材料，其製造過程亦會產生損耗能量。

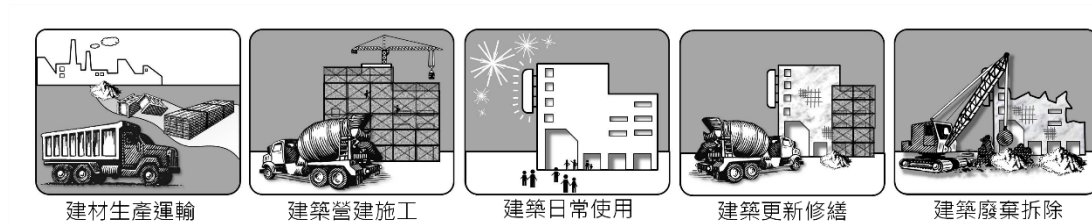


圖 2.17 工程生命週期各階段示意圖 (低碳建築聯盟，2016)

LCA 之評估架構包括目的界定、盤查之分析、衝擊評估與闡釋等四大階段，各階段內容說明如下：

一、ISO(CNS)14040 總則-目標和範圍界定(Goal and scope definition)

執行生命週期評估之首要任務為目標和範圍界定，根據文獻資料指出：「不同的研究系統和範圍，可能會導致不同的研究結果。目前生命週期分析最為人詬病的便是只要由誰出錢研究，誰的產品便較優。其實受爭議最大的原因便是在於進行評估分析之人員未能以客觀角度執行，往往以有利可圖為前提而將分析重點謬植。」所以，能夠清楚地定義目標與範圍，生命週期評估才能獲得較有意義之結果。

二、ISO(CNS)14041 生命週期盤查分析(Life-Cycle Inventory: LCI)

盤查分析步驟包括系統相關之資料收集、輸入與輸出之量化計算程序，其可分為原物料之生產製造、產銷與運輸、建築使用、維護、建築物拆解及廢棄物處理等階段；盤查範圍視研究者之目的而定，可定義為上述任一階段或其組合。

三、ISO(CNS)14042 生命週期衝擊評估(Life-Cycle Impact Assessment: LCIA)

生命週期衝擊評估階段仍針對盤查結果分析進而評估其環境負荷，目的在於提供所需之附加資訊，以協助評估產品之盤查分析階段。SETAC 將其衝擊評估分為分類化、特徵化與評價等三步驟，並透過這三個步驟得到完整的環境衝擊評估(劉家豪，2004)。

四、生命週期評估釋義(Interpretation)

釋義係為盤查分析與衝擊評估結果之綜合解釋，應與目標和範圍之界定有一致性，釐清研究應用方向與使用限制。

2.4.2 生命週期評估軟體介紹

生命週期評估概念雖淺顯易懂，實際操作時卻需耗費相當大量之計算與數據盤查，需仰賴電腦軟體輔助得以完整計算其結果。而生命週期評估軟體有很多種，本節就 SimaPro、Eco-Report、Do it Pro 及 Gabi 等四套軟體進行簡略說明。

一、SimaPro

SimaPro 為荷蘭 Leiden 大學於 1990 年初所開發，此軟體近年來在國際上為相當普遍使用之生命週期評估模式軟體，建置方法係依循 LCA 之架構，在衝擊評估方法上亦有持續更新，操作介面更為人性化，為一強大及完整之軟體資料庫；且使用者只須用較少的時間去了解生命週期評估過程，便可利用生命週期評估規劃產品。該軟體其他特色如下(王慧茹，2009)：

1. 產品之生命週期可組合不同產品或製程之生命週期。
2. 可分解產品，並將分解之零件列入是否回收作為考量。
3. 可研究不同策略於廢棄物處理於環境之影響。
4. 對於環境衝擊評估可利用不同的標準化、特徵化之方法。
5. 可將結果以不同之方式顯現出來。
6. 可使用其他類似軟體所發展之資料庫。

二、Eco-Report

Eco-Report 為歐盟委託荷蘭研究機構開發之評估軟體，以表格方式呈現；利用產品之能源及 BOM 表，與產品之生命週期中生產、出售、廢棄等階段之作為導入數據後整理出環境衝擊表，以產生指標性環境衝擊文件。

三、Do it Pro

我國工研院針對台灣生命週期評估衍生之程式，以資料庫盤查為主要需求，其作用主要針對本土環境資料庫，如混凝土、金屬石化、塑膠單體、石化、道路運輸、燃料電力和水資源相關資源。使用者勾選材料組成或名稱，預設其層數，便可計算物料對於環境負荷，並可依實際狀況之需求進行相關環境設計作業。Do it Pro 軟體是唯一具有台灣

本土化環境資料之資料庫。

四、Gabi

整合研究單位與產業界之資料庫，包含上百種不一樣材料與能源步驟，資料庫擁有生產技術及物質與能源流兩大項，用於環境管理系統、能源使用效率分析、LCA 及環境化設計等，為一款功能強大的軟體工具，適合有盤查經驗及物質流概念之使用者。

2.4.3 生命週期評估相關文獻回顧

國內目前有關建築生命週期評估之研究如表 2.4 所示，探討對象大多數以建築軀體工程之二氧化碳排放量評估，茲研究整理如下：

表 2.4 生命週期評估相關文獻回顧

論文研究	年份	作者
水泥業二氧化碳排放趨勢及投入產出結合生命週期評估之研究	2011	李炳崑
地工泡棉(EPS)應用於路基之價值分析與施工碳排比較	2013	陳瑋志
以生命週期評估方法探討高層木構造建築的可行性-比較木構造與 RC 構造集合住宅的環境效益	2015	蔡育昇
校園宿舍永續發展與碳足跡盤查之研究	2015	蕭玉珍
整合 BIM 與 LCA 數據之應用研究—以北科大一新建物之環境衝擊評估為例	2019	張靜涵

2.5 碳足跡

由於人類過度開發導致地球環境日益惡化，環境保護問題成為國際間重視的課題，各國皆發展減緩氣候變遷之產品，產品碳足跡與碳標籤因儼然成為減量目標的工具之一。

進行碳足跡之盤查除具有環保宣傳效益，更可藉由盤查結果規劃相關控管措施，降低成本支出，達到減碳目標之經濟效益。碳足跡(Carbon Footprint)源自於生態足跡(Ecological Footprinting)(Wacziarg, 1996)，可被定義為企業組織、產品生產或活動於整個生命週期中直接或間接產生溫室氣體排放量。相較於一般大家瞭解的溫室氣體排放量，碳足跡的差異之處在於從消費者端出發，即於日常生活中涉及到化石燃料與用電之消費或是本身形成，都會排放溫室氣體，解決「有煙囪才有污染」等相關想法。公司與產品溫室氣體之排放，一般是指製造階段所排放之碳排放，但產品碳排放需含有該產品原料之採集與生產、組裝、運輸，直到應用及廢棄處理或回收所產生之溫室氣體排放量(劉家豪，2004)。

碳足跡之應用層面廣泛，目前可分為「個人碳足跡」、「產品碳足跡」、「組織型碳足跡」、「國家／城市碳足跡」等四大層面。

2.5.1 國內現階段碳足跡參考標準與計算指引

環保署於 2006 年推出溫室氣體減量法草案送立法院審議，該法是我國因應氣候變遷的重要法源基礎，主要以持續性方式推動國內企業盤查與政府簽署自願減量協議，期望能建立符合國際潮流之自願減量機制，促使產業及早投入減碳行列。另於 2007 年 7 月啟動國家溫室氣體登錄，公共工程委員會也於 2008 年提出永續公共工程節能減碳政策白皮書，行政院於 2009 年底成立行政院節能減碳推動會，並通過國家節能減碳總計畫及其十大標竿方案，環保署也於 100 年 5 月建立服務及產品碳足跡計算指導引，如表 2.5 所示(溫善政，2013)。我國碳足跡計算係依據行政院環境保護署 99 年頒布的「產品與服務碳足跡計算指引」，該指引乃奠基於 CNS 14040 與 CNS14044 已建立之生命週期評估法，並詳細規範產品與服務生命週期溫室氣體排放評估而成，以提供在計算產品與服務生命週期溫室氣體排放時，有一致性之評估方法。根據產品與服務碳足跡計算指引之產品碳足跡評估之方法。在碳足跡計算時，必須對於產品碳足跡量化的目的與範疇進行界定，再者為清楚載明該產品系統的功能單元，使得碳足跡評估結果能夠以每功能

單元之二氧化碳排放當量(CO₂e)報告。而後是產品系統邊界的界定，即決定碳足跡評估內容包含哪些過程單元，包括：原物料製造過程、能源供應體系、製造場所、產品運輸、儲存、使用和最終處理等(洪子賀，2015)。

表 2.5 我國產品與服務碳足跡計算指引計算原則(行政院環保署，2010)

原則	內容說明
生命週期觀點	考量產品由原物料提煉取得，經生產製造階段，至使用與生命終結處理及最終處置之完整生命週期。
模組性	若無法達成生命週期原則，可利用部分碳足跡組成一個產品碳足跡，並與其比較。
相對性方法與功能單位	此單位為建構核心產品碳足跡評估，並推算相對功能單位之結果。
巡迴路徑法	當應用生命週期評估方法四個階段進行產品碳足跡評估時，應確認生命週期評估的各別階段使用了其他階段之結果。
科學方法之優先順序	產品碳足跡評估之決定依據自然科學；第二順位為依據其他科學與國際慣例；最後順位為依據價值選擇。

第三章 研究方法

3.1 研究流程

本研究係依循生命週期評估之步驟流程，設定盤查階段為 EPS 日常使用階段，建立盤查清單後將其填寫完成，待盤查清單建立完成後，依據特性及類別將數據輸入至生命週期評估軟體 SimaPro 9.4.0.1 之相對應之欄位中，並藉由軟體內建之分析方法 ReCipe2016 Midpoint 及 IPCC2021 GWP100 進行環境衝擊評估，最後得出數據並進行結果之闡釋，其研究流程圖如圖 3.1 所示。

本研究係依循生命週期評估之步驟流程，設定盤查階段為 EPS 日常使用階段，建立盤查清單後將其填寫完成，待盤查清單建立完成後，依據特性及類別將數據輸入至生命週期評估軟體 SimaPro 9.4.0.1 之相對應之欄位中，並藉由軟體內建之分析方法 ReCipe2016 Midpoint 及 IPCC2021 GWP100 進行環境衝擊評估，最後得出數據並進行結果之闡釋，其研究流程圖如圖 3.1 所示。

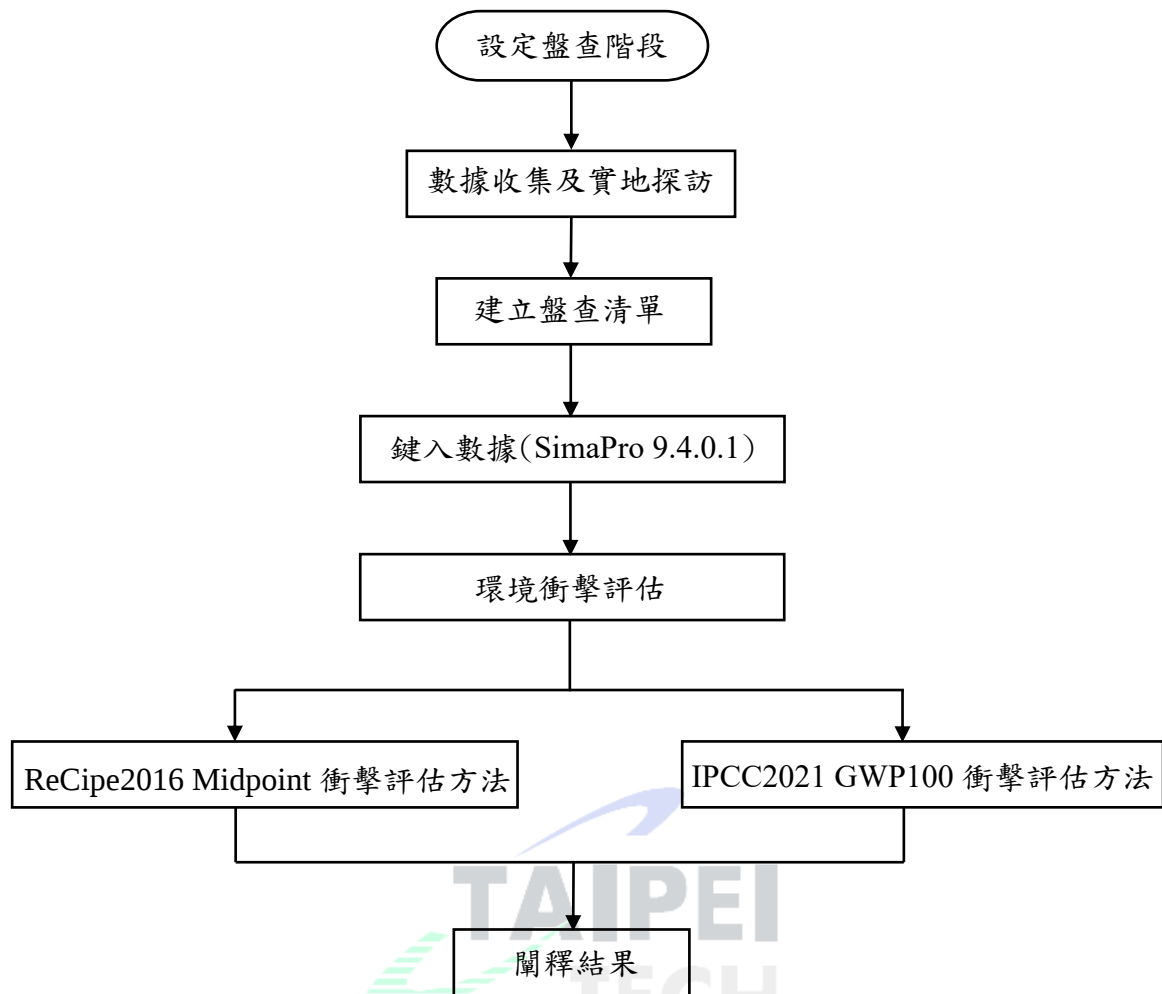


圖 3.1 研究方法流程圖

3.2 碳盤查及實際案例探訪法

本研究所採用之調查流程，係根據碳足跡計算步驟，釐清製造流程，分析產品輸入與輸出產品，確定各種能源用量，採用實地調查之目的在於減少調查工作阻礙以使調查工作便於進行。碳排放數據蒐集則為調查能源使用量後，可採用適當之分析單據來提供 EPS 製造之碳排放資料來建置依據。

本研究先針對台灣廠商於 108 年度至 110 年度之實際生產情況進行初步了解，並就實際製造以及用水與用電進行碳排放量分析。本研究之後續分析係依據下列之若干假設：

一、EPS 之生產耗能階段由於影響因素非常多且無法一一詳細分析，故採用由總

表統計分析之方式，再經運算以得出各類型 EPS 產品於工廠內生產過程所需消耗之電力與水量能源。

二、全台灣生產製造 EPS 的廠商大約有 20 多家，本研究在與廠商的溝通當中，原本是要藉由每個機具做細部的個別水電耗費量測，但由於牽涉到機具的線路設計而無法設置獨立的水、電量表，因此研究乃藉由全工廠的耗水及耗電費用來做數據的分析依據。

3.3 SimaPro 9.4.0.1 生命週期評估軟體簡介

目前可得知已有既有文獻針對 LCA 軟體進行比較之研究，因 Simapro 9.4.0.1 資料庫容量、操作便利性及學習簡易度較優於其他三種，故選擇 Simapro 9.4.0.1 作為使用評估軟體，以下將四件生命週期評估程式之特點整理如表 3.1 所示。

表 3.1 常見生命週期評估軟體之特點比較 (王慧茹，2009)

軟體項目	EcoReport v5	Simapro 9.4.0.1	Do It Pro	Gabi 4.0
資料庫容量	差	好	尚可	好
使用者介面	有	有	有	有
網路連線操作		有		
運算之透明度	差	尚可	差	尚可
敏感度分析		有	有	有
視覺化輸入輸出	差	尚可	差	尚可
操作便利性	尚可	優	尚可	尚可
學習簡易度	優	優	優	尚可
線上說明	有	有	有	有

SimaPro 9.4.0.1 軟體之基本架構主要建構於組裝概念，以產品階段表示，如圖 3.2 所示。其運用組織結構圖，即可簡單呈現出各生命週期階段之影響，且可根據特性描述選取影響類別，呈現出來之結果皆不相同，如圖 3.3、3.4、3.5、3.6 所示。

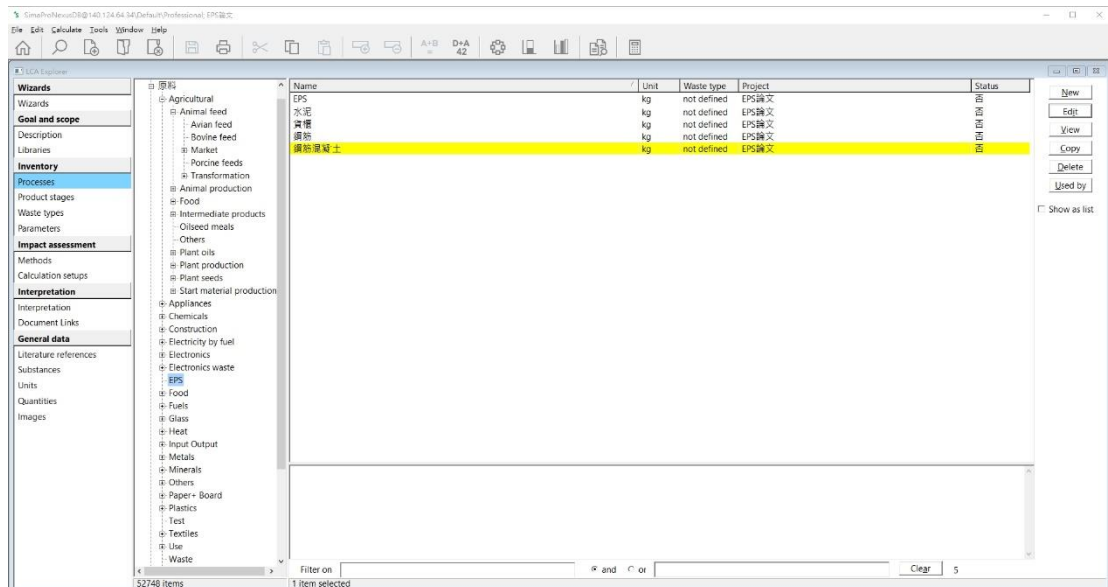


圖 3.2 SimaPro9.4.0.1 基本架構示意圖

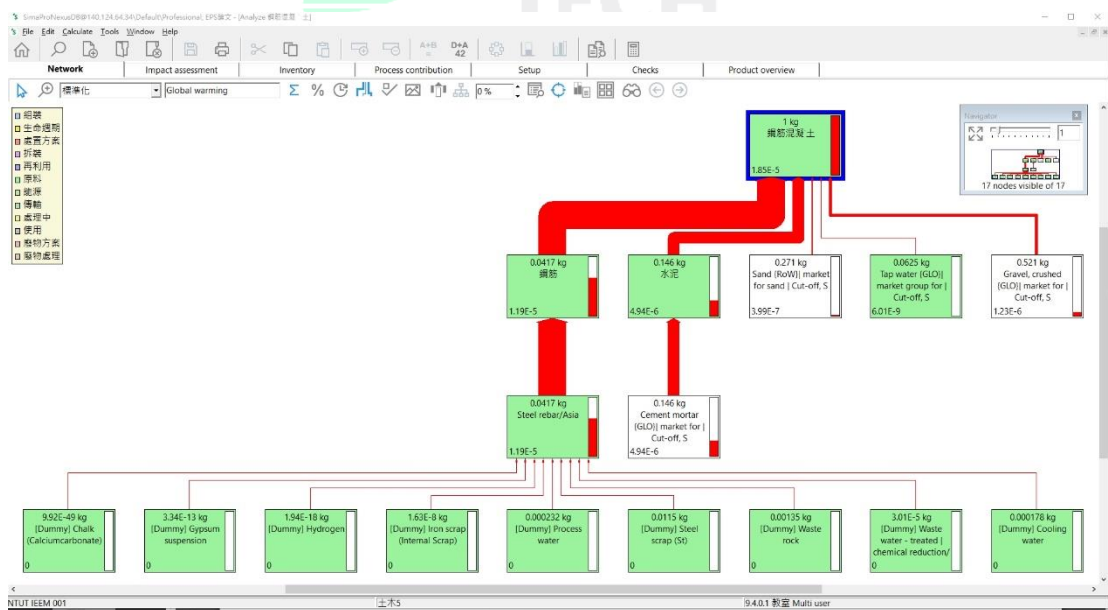


圖 3.3 SimaPro 9.4.0.1 軟體之產品網狀結構示意圖

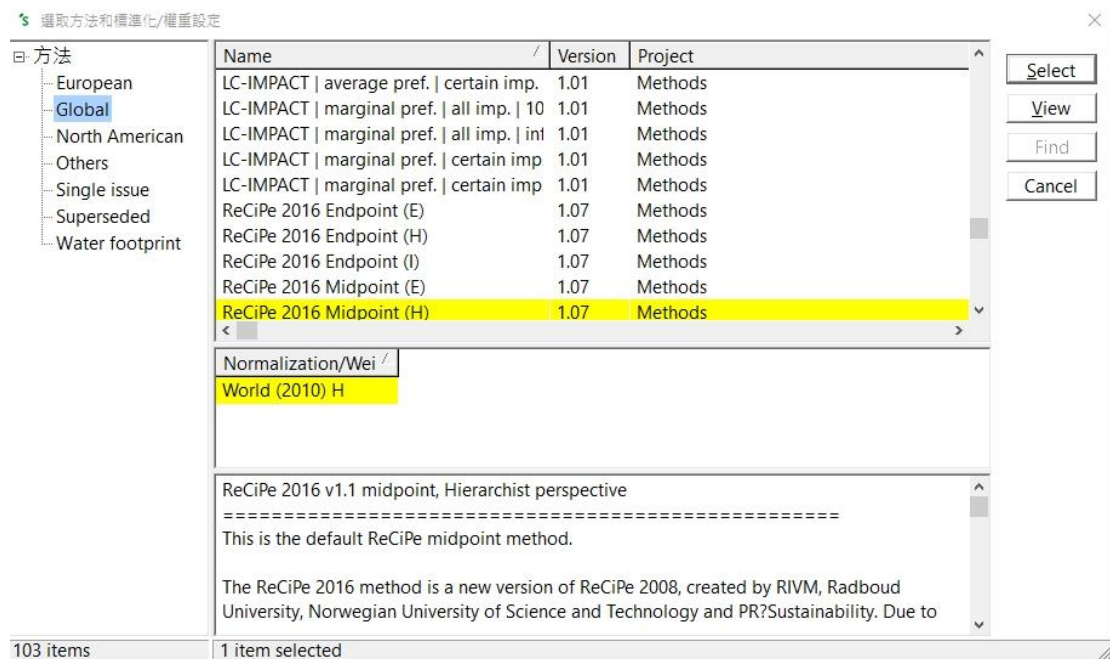


圖 3.4 SimaPro9.4.0.1 權重設定介面示意圖

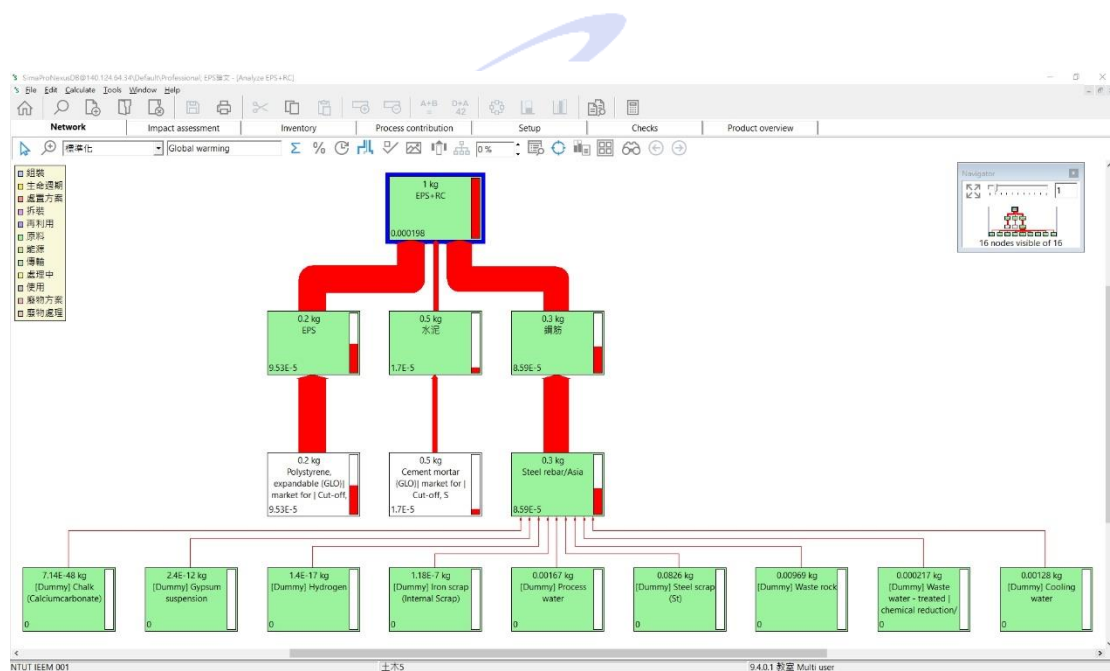


圖 3.5 SimaPro 9.4.0.1 樹狀圖架構示意圖

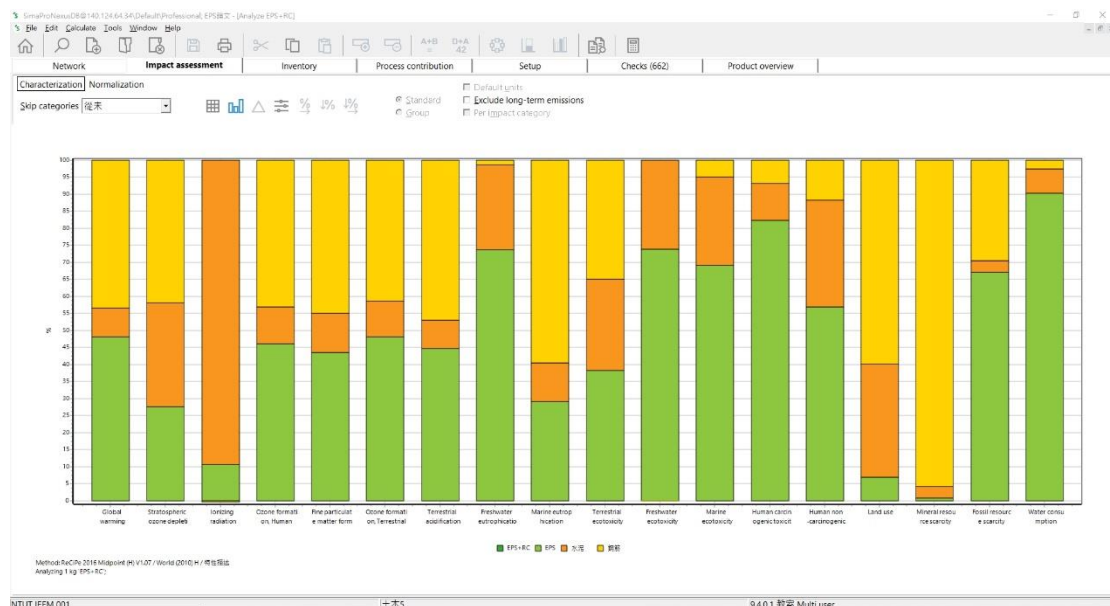


圖 3.6 SimaPro 9.4.0.1 長條圖特性描述示意圖

SimaPro 之優勢為使用者只須用較少的時間去了解生命週期評估過程，便可利用生命週期評估規劃產品。其他特色如下(王慧茹，2009)：

- 一、其選單式清單使使用者容易上手使用。
- 二、依據 ISO14040 架構，方便使用者輸入目的與範圍、盤查資料、衝擊評估及闡釋等項目，並可利用 script language 編寫使用者自我使用介面，
- 三、對於不是環保相關工程師，ReCipe 及 IPCC2021 有助於判斷其產品是否可視為「對環境友善」。
- 四、資料來源清楚，新數據資料容易歸類建檔，各資料庫之間的數據可以互相交換而不受干擾；盤查項目可因需求隨時增加，並且自動轉換單位。
- 五、對於環境衝擊評估可利用不同的標準化、權重及特徵化的方法，並可將產品各階段進行解析，就個別之零件是否回收或不同廢棄物處理策略對環境的影響進行考量。
- 六、分析結果可同時比較相關資料於不同模式中，並可以利用數據表達產品分配、生產、廢棄或使用時，呈現環境衝擊的大小。

七、可用多種圖形表達分析結果，其中製程樹狀圖因可用類似溫度計之指標來表現環境負荷，故具參考價值。

3.3.1 ReCipe2016 衝擊評估方法

ReCipe2016 是一種被廣泛引用的衝擊評估方法，由 ReCipe2008 方法改良而來，通過將排放和資源開採轉化為數量有限的環境影響分數，將分類後結果整理成各類別指標。

遵循 ReCipe2008 中提出的模型框架以人類健康、生態系統質量和資源稀缺為保護領域。人類健康損害的單位，DALYs (disability adjusted life years)，代表一個人因疾病或事故而失去或致殘的年數。生態系統質量的單位分別是陸地、淡水和海洋生態系統中當地相關物種的損失，在空間和時間上進行整合。為了將陸地、淡水和海洋生態系統的影響匯總到一個單位中，(Goedkoop et al. 2009)提出的相同方式，包括三種生態系統的物種密度。資源稀缺性之單位，代表未來礦產和化石資源開採所涉及額外成本。終點特徵因子(CFe)源自中點特徵因子(CFm)，每個影響類別具有恆定的中點至終點因子，其方程式(3.1)所示。

$$CF_{e,x,a} = CF_{m,x} \times F_{m \rightarrow e,a} \quad (3.1)$$

其中 a 表示保護區域，即人類健康、(陸地、淡水和海洋)生態系統或資源稀缺，x 表示關注壓力， $F_{m \rightarrow e,a}$ 是保護區域的中點到端點轉換因子 a。這些中點到終點因素在每個影響類別中都是恆定的，因為在因果路徑上的中點影響位置之後，每個壓力源的環境機制被認為是相同的。圖 3.7 顯示了環境機制（即 18 個中點影響類別）與三個保護區域（即端點）之間的聯繫，如 ReCipe2016 中包含環境模型的選擇標準是模型應參考全球範圍及模型應該反映當前的科學技術水平。

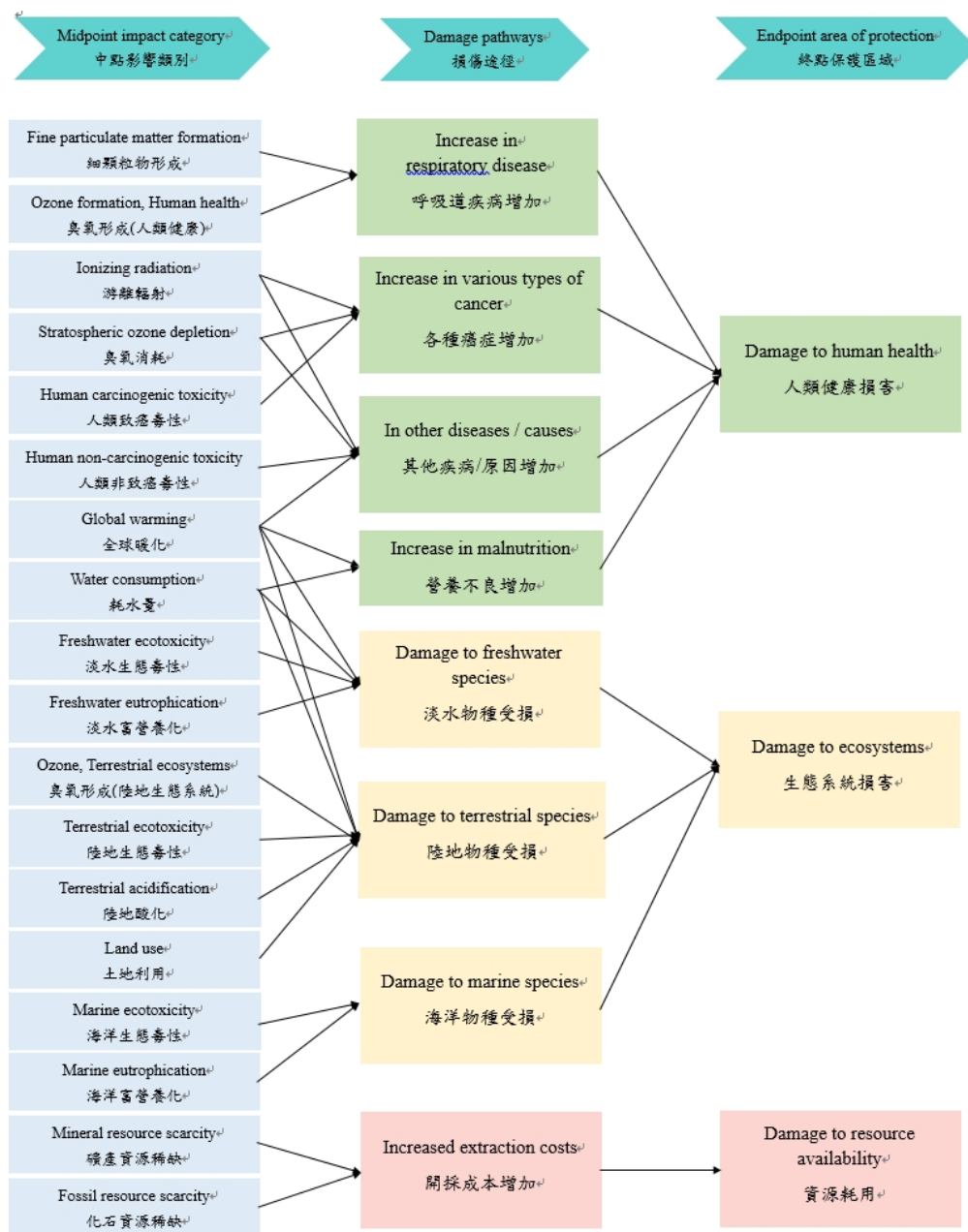


圖 3.7 ReCipe2016 流程概念圖

ReCipe2016 主要繼承 ReCipe2008 之分析架構，衝擊評估類別共有十八項，分別為(1) 全球暖化(Global warming)、(2)臭氧消耗(Stratospheric ozone depletion)、(3)游離輻射(Ionizing radiation)、(4)臭氧形成(人類健康) (Ozone formation, Human health)、(5)細顆粒物形成(Fine particulate matter formation)、(6)臭氧形成(陸地生態系統) (Ozone formation, Terrestrial ecosystems)、(7)陸地酸化(Terrestrial

acidification)、(8)淡水富營養化(Freshwater eutrophication)、(9)海洋富營養化(Marine eutrophication)、(10)陸地生態毒性(Terrestrial ecotoxicity)、(11)淡水生態毒性(Freshwater ecotoxicity)、(12)海洋生態毒性(Marine ecotoxicity)、(13)人類致癌毒性(Human carcinogenic toxicity)、(14)人類非致癌毒性(Human non-carcinogenic toxicity)、(15)土地利用(Land use)、(16)礦產資源稀缺(Mineral resource scarcity)、(17)化石資源稀缺(Fossil resource scarcity)、(18)耗水量(Water consumption)等。

ReCipe2016 亦改良 Eco-Indicator 99 損害評估模式與不確定性之部分，將上述衝擊評估類別簡化歸納為人體健康、生態系統品質及資源損害等三大環境範疇，其包括四項分析步驟，係特徵化(Characterization)、常態化(Normalization)、單項得點(Single score)及評價加權(Weighting)，藉由逐步修正數據來得到最終衝擊值。

一、特徵化

在 SimaPro 9.4.0.1 軟體中，ReCipe2016 之特徵化主要延續 ReCipe2008 之架構作部分更新，考量生態與土地利用方面遂而增加之，其特徵化結構如表 3.2 所示。而本研究欲探討之衝擊項目為「氣候變遷」此項，因此所採用之衝擊評估模式亦包括 ReCipe 2016，其衝擊評估流程如圖 3.7 所示。

表 3.2 ReCipe 特徵化之環境衝擊類別(黃瓊儀，2003)

	名稱	內容說明
1	可吸入性有機物 (Respiratory organics)	排放至空氣中之有機物質引起的夏季煙霧，進而造成吸入性效應。
2	可吸入性無機物 (Respiratory inorganics)	因塵土、SO _x 及 NO _x 排放至空氣中形成同季煙霧導致吸入性效應。
3	臭氧層破壞 (Ozone layer)	為害來自臭氧削減所造成的 UV 射線增加。
4	氣候變遷 (Ozone layer)	因氣候變遷導致之疾病及死亡數增加。

表 3.2(續)

5	酸化/優養化 (Acidification/Eutrophication)	氮、磷類之營養源過多，使路上植物物種單樣化，水中藻類大量繁殖，形成嚴重生態破壞。
6	生態毒性 (Ecotoxicity)	具生態毒性之物質排放至空氣、水體及土壤所造成的生態系統品質危害。
7	致癌物 (Carcinogens)	因排放至空氣、水及土壤中的致癌物質而引起致癌效應。
8	土地使用 (Land use)	在人為活動中，土地的使用將會對物種多樣性造成衝擊。
9	礦物 (Minerals)	由於礦石品位降低，因此在開採剩餘礦石時必預投入之額外能源。
10	石化燃料 (Fossil fuels)	為開採剩餘較低品質之資源，每 MJ、kg 或 m ³ 的石化燃料，所需要花費的能源耗量。

二、常態化

由於 ReCipe2016 之三大損害種類各具有不同單位，為了能使用已設定之權重因子，因此將三大損害之單位賦予無因次化，並沿用 Eco-Indicator 99 之架構，以 1993 年的歐洲為範疇及基準年，依照每人每年所承擔之環境損害作為基準值，其常態化因子如表 3.4 所示。

表 3.4 ReCipe 常態化因子(Goedkoop, et al, 2001)

損害類別	常態化因子
人體健康(Human healthy)	64.7
生態系統品質(Ecosystem Quality)	1.95E-04
資源耗用(Resources)	1.68E-04

三、評價加權

由於 ReCipe2016 之評價加權權重因子係由一專家小組所組成之評估團隊，經由一系列的問項審查共同歸納出人體健康、生態系統品質及資源三類損害之嚴重性，以訂定其個別之權重因子；其中更引用人文觀點，分為 Egalitarian 觀點、Hierarchist

觀點及 Individual 觀點，通常會選用的觀點為 Hierarchist 觀點，亦受到科學及政策上之認可，表 3.5 則為其評價加權因子。

表 3.5 ReCipe 評價加權因子(Goedkoop, et al, 2001)

損害類別	常態化因子
人體健康(Human healthy)	300
生態系統品質(Ecosystem Quality)	400
資源耗用(Resources)	300

四、單項得點

將經由 ReCipe2016 之特徵化、常態化及評價加權三步驟之各項環境影響效應之加權結果統整加總，即可得到單項得點之結果數據，可作為決策者考量比較產品或製程是否對環境友善的參考依據。

3.3.2 IPCC2021 GWP100 衝擊評估方法

IPCC2021 GWP100 是一種被廣泛引用的衝擊評估方法，由 IPCC2013 GWP100 方法改良而來，通過將衡量排放氣體對全球暖化影響的一種手法，將分類後結果整理成各類別指標，並在計算暖化趨勢中，以一段特定時間去作為評估期。

遵循 IPCC2013 中提出的模型框架 GWP 中的氣候效應，氣候效應在不同的強迫因子之間可能不同（對於大多數現實的 RFs 在 25% 以內）。(Berntsen et al. 2005) 提出了一個修訂的 GWP 概念，其中包括強迫劑的能效。(Berntsen et al. 2005) 以這種方式計算了 NO_x 和歐洲和東南亞的二氧化碳排放量，與氣候敏感性相比，能效的不確定性較小。然而，Berntsen 表明，對於由 NO_x 排放產生的臭氧，氣候效率也將取決於排放的位置。

GWP100 表示全球暖化潛勢 100 年， C_1 、 C_2 、...、 C_n 表示每種溫室氣體的排放量（單位為噸或公斤）， GWP_1 、 GWP_2 、...、 GWP_n 表示每種溫室氣體的全球暖化潛勢（單位為 CO₂ 當量），其方程式(3.2)所示。。

$$GWP_{100} = (C_1 \times GWP_1 + C_2 \times GWP_2 + \dots + C_n \times GWP_n) / (C_1 + C_2 + \dots + C_n) \quad (3.2)$$

一、影響因素

一般化學物質對氣候變遷與全球暖化與以下因素相關：

1. 化學物質對於紅外線吸收力強弱。
2. 吸收紅外線光譜波長之規模。
3. 化學物質在大氣層中之生命年限。

二、評估期長短之重要性

一般化學物質以一段特定時間去作為評估期，而其判斷數據趨勢與期計算時間長短有相對關係，若一化學物質在大氣中能在極短時間就分解成功，會對其初期評估階段有極大的影響，若因氣體已被部分分解，對其中後期評估階段的淺勢影響會降低許多，表 3.6 則為其溫室氣體其 GWP 生命期及數值。

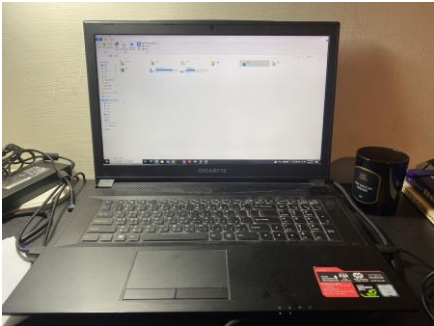
表 3.6 其溫室氣體其 GWP 生命期及數值

溫室氣體	生命期（年）	全球暖化潛勢之評估時間		
		20 年	100 年	500 年
<u>甲烷</u>	12	72	25	7.6
<u>一氧化二氮</u>	114	289	298	153
氫氟碳化合物	270	12000	14800	12200
氫氟碳化合物	14	3830	1430	435
<u>六氟化硫</u>	320	16300	22800	32600
<u>全氟三丁胺</u>			7100	

3.3.3 硬體規格

SimaPro 9.4.0.1 生命週期評估軟體，適用於 32 位元 Windows 應用程式。其設備系統標準如表 3.7 所示。

表 3.7 SimaPro 建議設備規格表（SimaPro 網站，2022）

設備名稱	設備圖示	說明
電腦		最低需求： 處理器：多核處理器結合 64 位作業系統。 記憶體：至少 4 GB (32 位元) 或 8 GB (64 位元)。
		推薦需求： 硬碟：已安裝的資料庫至少需要 20 GB 空間。

第四章 研究成果

本章節根據研究方法確立之方法作為研究流程，針對 EPS 生產週期與施工過程之碳排放量做計算與其他材料做比較，使用生命週期評估軟體 Simapro 9.4.0.1，分析所使用之方法學為 ReCipe2016 Midpoint 及 IPCC2021 GWP100，做為量化台達化學工業股份有限公司前鎮廠於生產 EPS 階段之環境衝擊及比較鋼筋混凝土(Reinforced Concrete;簡稱 RC)、隔熱材取代之環境衝擊，亦使用台電及台水公布之用電用水量之碳排放做為相關能源消耗模擬計算，得知不同模式間之分析差異。

4.1 個案背景說明

- 一、本研究之研究對象選定台達化學工業股份有限公司前鎮廠，位於高雄市前鎮區建基路 3 號，主要生產為發泡級聚苯乙烯。
- 二、本研究之研究對象選定新北市轄區內災害緊急搶修及復建工程，位於三峽區北 113 線 0K+650，主要建材使用發泡級聚苯乙烯及鋼筋混凝土等。
- 三、本研究之研究對象選定國立臺北科技大學圖書館屋頂太陽能設備暨休憩空間整建工程，位於台北市大安區忠孝東路三段 1 號，主要建材使用發泡級聚苯乙烯及鋼筋混凝土等。

4.2 碳盤查範圍與資料

本研究係依循生命週期評估之步驟流程，設定系統盤查範圍為建築生產製造階段與運輸階段相關能源，而不考慮其他階段；且基於資料完整性及可靠性，盤查數據之收集透過台達化學工業股份有限公司前鎮廠提供相關文件及實際到場調查，以供本研究進行碳盤查分析。

系統盤查資料清單則為台達化學工業股份有限公司前鎮廠於生產製造階段與運輸階段時所使用之能源及電水費度數，如表 4.1 所示。

- 一、用電量：依台達化提供 108 年度至 110 年度相關統計數據，每年度加總後並消

除數據間較大之差異。三年度之電費使用度數為 15,957,382.1 度，如表 4.2、4.4 所示。

二、用水量：依總務處營繕組提供 108 年度至 110 年度相關統計數據，每年加總後並消除數據間較大之差異。三年度之水費使用為 121990.00 度，如表 4.3、4.4 所示。

三、廢棄物：每個月的清運量概估為 41.94 公噸左右，故一年之廢棄物排放量約為 1509.644 公噸；因軟體使用單位為 kg，轉換後可得到 41,934 公斤。

表 4.1 主要盤查資料

盤查項目	使用量
用電量	15,957,382.1 KWh
用水量	121990.00 度
廢棄物	1509644kg

表 4.2 108 年至 110 年之用電量

108 年電費		109 年電費		110 年電費	
月	用電量(度)	月	用電量(度)	月	用電量(度)
1	440822	1	387574	1	417598
2	382049	2	441598	2	425886
3	465997	3	426398	3	501778
4	442215	4	301637	4	459740
5	461875	5	317018	5	475410
6	404900	6	430167	6	473948
7	421963	7	463155	7	478586
8	436277	8	466356	8	484832
9	419259	9	475044	9	447174
10	415763	10	508270	10	454251

表 4.2(續)

11	439523	11	491117	11	458751
12	423247	12	485644	12	491470

表 4.3 108 年至 110 年之用水量

108 年水費		109 年水費		110 年水費	
月	用水量(度)	月	用水量(度)	月	用水量(度)
1	3315	1	3307	1	3470
2	3270	2	3390	2	3452
3	3372	3	3356	3	3478
4	3345	4	3022	4	3467
5	3387	5	2973	5	3483
6	3300	6	3346	6	3390
7	3316	7	3425	7	3420
8	3322	8	3528	8	3456
9	3260	9	3562	9	3434
10	3253	10	3606	10	3426
11	3316	11	3584	11	3454
12	3344	12	3501	12	3660

表 4.4 電水費單據度數統計

108 年度		109 年度		110 年度	
用電量(度)	519397.86	用電量(度)	519397.60	用電量(度)	5569424.90
用水量(度)	39800.00	用水量(度)	40600.00	用水量(度)	41590.00

4.3 碳排分析與衝擊評估結果

本研究使用生命週期評估軟體 SimaPro 9.4.0.1 量化 EPS 及各個建材於現場使用階段所產生之碳排放量與環境衝擊評估，並利用 ReCipe2016 與 IPCC2021 GWP100 兩種評估模式，以探討不同模式分析結果之差異。

4.3.1 ReCipe2016 衝擊評估

一、特徵化分析

表 4.5、表 4.6、表 4.7、表 4.8 及圖 4.1、圖 4.2、圖 4.3、圖 4.4 根據所提供的數據分析，我們可以得出在全球暖化、臭氧消耗、人類致癌毒性和耗水量等影響類別下，EPS 相對於 RC 是一種更環境友好的材料選擇。首先，在全球暖化方面，EPS 的影響較低，只有 762.36703kg CO₂ eq，相比之下，RC 和 EPS+RC 分別為 860.99017kg CO₂ eq 和 1032.2518 kg CO₂ eq。其次，臭氧消耗方面，EPS 同樣表現較好，僅為 2.26E-05kg CFC11 eq，而 RC 和 EPS+RC 分別為 7.24E-05 kg CFC11 eq 和 4.15E-05 kg CFC11 eq。人類非致癌毒性方面，EPS 的影響明顯較低，僅為 97.897488 kg 1,4-DCB，相比之下，RC 和 EPS+RC 分別為 101.94197 kg 1,4-DCB 和 120.72291 kg 1,4-DCB。最後礦產資源稀缺方面，EPS 也表現出較低的影響，僅為 0.14895875 m³，而 RC 和 EPS+RC 分別為 5.898472 m³和 17.491403 m³。綜上所述，從全球暖化、臭氧消耗、人類非致癌毒性和礦產資源稀缺的角度來看，EPS 相對於 RC 是一種更環境友好的選擇。

表 4.5 ReCipe2016 特徵化分析 1kg 材料結果

Impact category	Unit	EPS	EPS+RC	RC
全球暖化	kg CO ₂ eq	3.811835	2.293893	0.35874591
臭氧消耗	kg CFC11 eq	0.000000	0.000000	3.02E-08
游離輻射	kBq Co-60 eq	0.002232	0.003479	0.002291943

表 4.5(續)

臭氧形成 (人類健康)	kg NOx eq	0.006383	0.003922	0.00068498
細顆粒物形成	kg PM2.5 eq	0.002981	0.001885	0.000351519
臭氧形成 (陸地生態系統)	kg NOx eq	0.006969	0.004191	0.000690623
陸地酸化	kg SO2 eq	0.009164	0.005723	0.001003391
淡水富營養化	kg P eq	0.000411	0.000202	1.69E-05
海洋富營養化	kg N eq	0.000029	0.000023	6.05E-06
陸地生態毒性	kg 1,4-DCB	2.631065	1.771971	0.44549146
淡水生態毒性	kg 1,4-DCB	0.020602	0.010129	0.000974251
海洋生態毒性	kg 1,4-DCB	0.028965	0.014622	0.001609904
人類致癌毒性	kg 1,4-DCB	0.076045	0.036057	0.00202239
人類非致癌毒性	kg 1,4-DCB	0.489487	0.268273	0.042475821
土地利用	m2a crop eq	0.005956	0.014061	0.008142803
礦產資源稀缺	kg Cu eq	0.000745	0.013108	0.007288084
化石資源稀缺	kg oil eq	1.897074	0.979613	0.081252295
耗水量	m ³	0.064975	0.029826	0.001034579

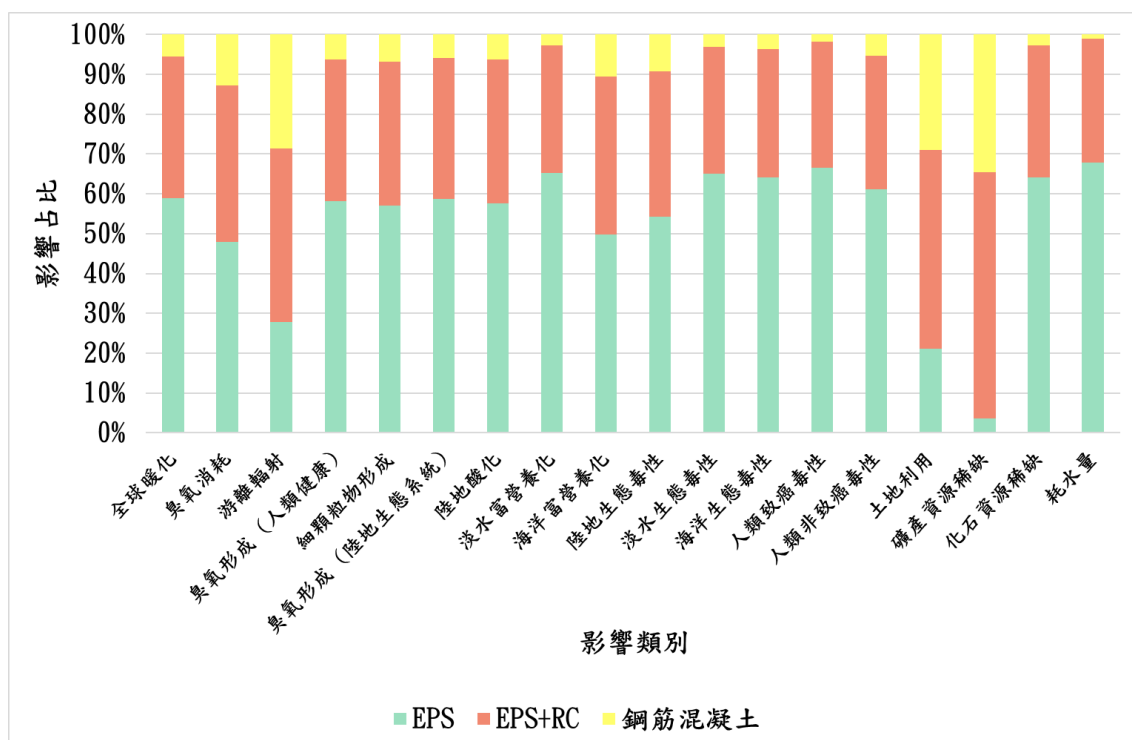


圖 4.1 ReCipe2016 特徵化分析 1kg 材料結果

表 4.6 ReCipe2016 特徵化分析 1kg 材料結果

Impact category	Unit	EPS	玻璃棉	石棉
全球暖化	kg CO2 eq	3.81183520	2.72115280	0.07408105
臭氧消耗	kg CFC11 eq	0.00000011	0.00000118	0.00000004
游離輻射	kBq Co-60 eq	0.00223205	0.22638292	0.00380378
臭氧形成 (人類健康)	kg NOx eq	0.00638262	0.00777020	0.00042841
細顆粒物形成	kg PM2.5 eq	0.00298144	0.00553468	0.00018036
臭氧形成 (陸地生態系統)	kg NOx eq	0.00696943	0.00796152	0.00043476
陸地酸化	kg SO2 eq	0.00916375	0.01232466	0.00039684
淡水富營養化	kg P eq	0.00041059	0.00138427	0.00002432

表 4.6(續)

海洋富營養化	kg N eq	0.00002852	0.00010255	0.00000148
陸地生態毒性	kg 1,4-DCB	2.63106520	6.73934210	0.47526981
淡水生態毒性	kg 1,4-DCB	0.02060213	0.11083784	0.00199026
海洋生態毒性	kg 1,4-DCB	0.02896548	0.14721156	0.00287513
人類致癌毒性	kg 1,4-DCB	0.07604466	0.45503328	0.00452785
人類非致癌毒性	kg 1,4-DCB	0.48948744	2.53205820	0.05830244
土地利用	m ² a crop eq	0.00595627	0.06283023	0.00321684
礦產資源稀缺	kg Cu eq	0.00074479	0.00680506	0.33872111
化石資源稀缺	kg oil eq	1.89707370	0.83259745	0.02062407
耗水量	m ³	0.06497480	0.03263660	0.00028606

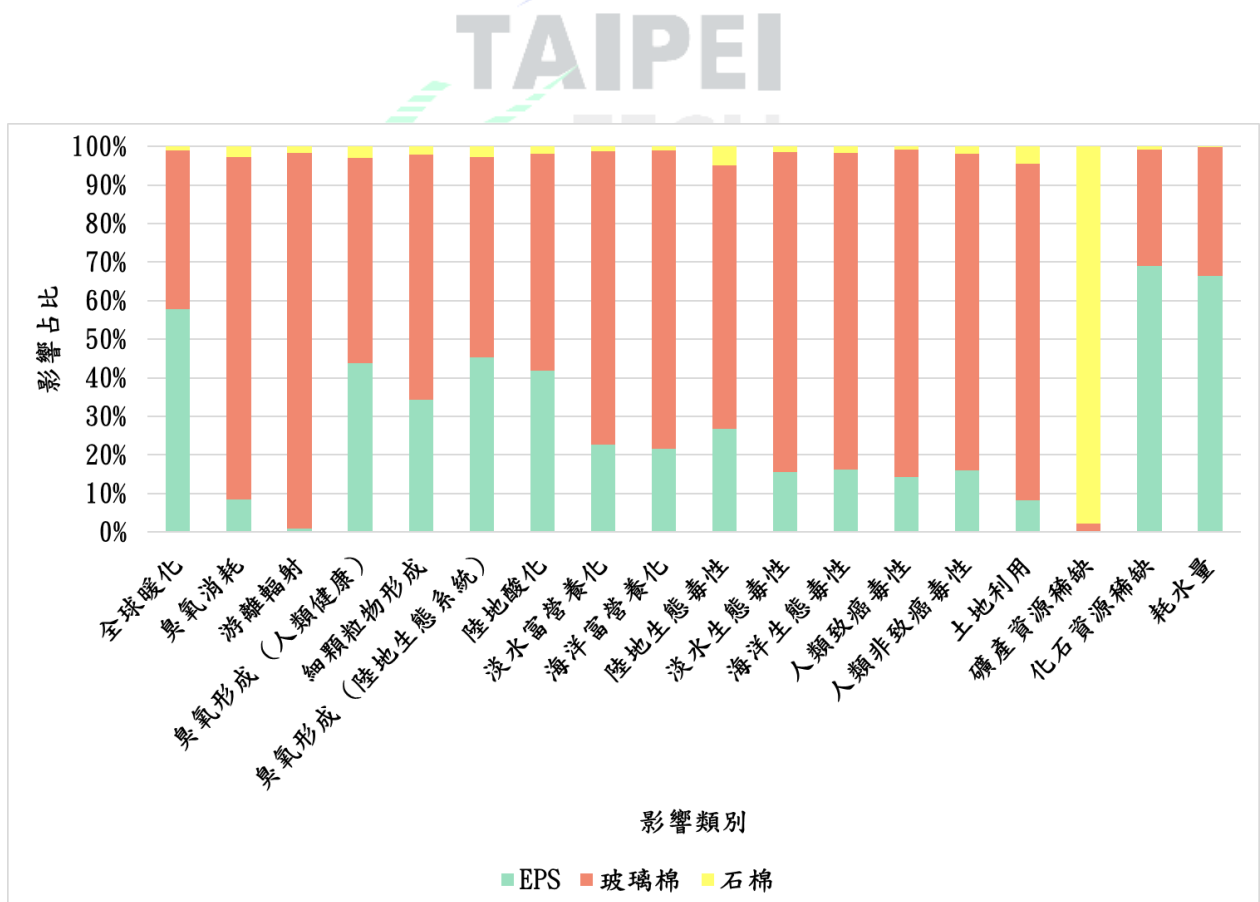


圖 4.2 ReCipe2016 特徵化分析 1kg 材料結果

表 4.7 ReCipe2016 特徵化分析 1m³材料結果

Impact category	Unit	EPS	EPS+RC	RC
全球暖化	kg CO2 eq	762.36703	774.69492	860.99017
臭氧消耗	kg CFC11 eq	2.26E-05	2.88E-05	7.24E-05
游離輻射	kBq Co-60 eq	0.44640936	1.0781912	5.500664
臭氧形成 (人類健康)	kg NOx eq	1.2765248	1.3224531	1.6439515
細顆粒物形成	kg PM2.5 eq	0.5962886	0.6272081	0.84364458
臭氧形成 (陸地生態系統)	kg NOx eq	1.3938863	1.4268374	1.6574948
陸地酸化	kg SO2 eq	1.8327499	1.9046734	2.4081373
淡水富營養化	kg P eq	0.082117599	0.076934288	0.04065111
海洋富營養化	kg N eq	0.005704851	0.006807837	0.014528738
陸地生態毒性	kg 1,4-DCB	526.21304	594.08385	1069.1795
淡水生態毒性	kg 1,4-DCB	4.1204251	3.8976474	2.3382033
海洋生態毒性	kg 1,4-DCB	5.793096	5.5519303	3.8637703
人類致癌毒性	kg 1,4-DCB	15.208931	13.914532	4.8537361
人類非致癌毒性	kg 1,4-DCB	97.897488	98.403049	101.94197
土地利用	m2a crop eq	1.1912537	3.4851879	19.542728
礦產資源稀缺	kg Cu eq	0.14895875	2.3167642	17.491403
化石資源稀缺	kg oil eq	379.41474	356.36358	195.00551
耗水量	m ³	12.99496	11.680964	2.4829904

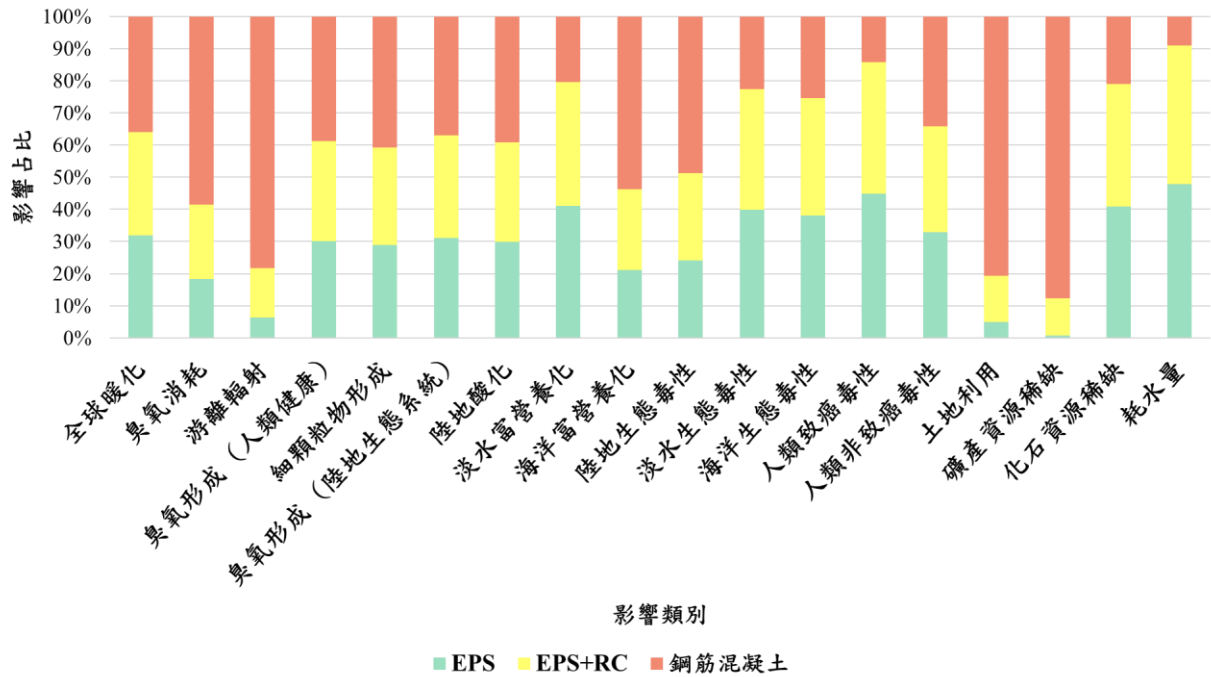


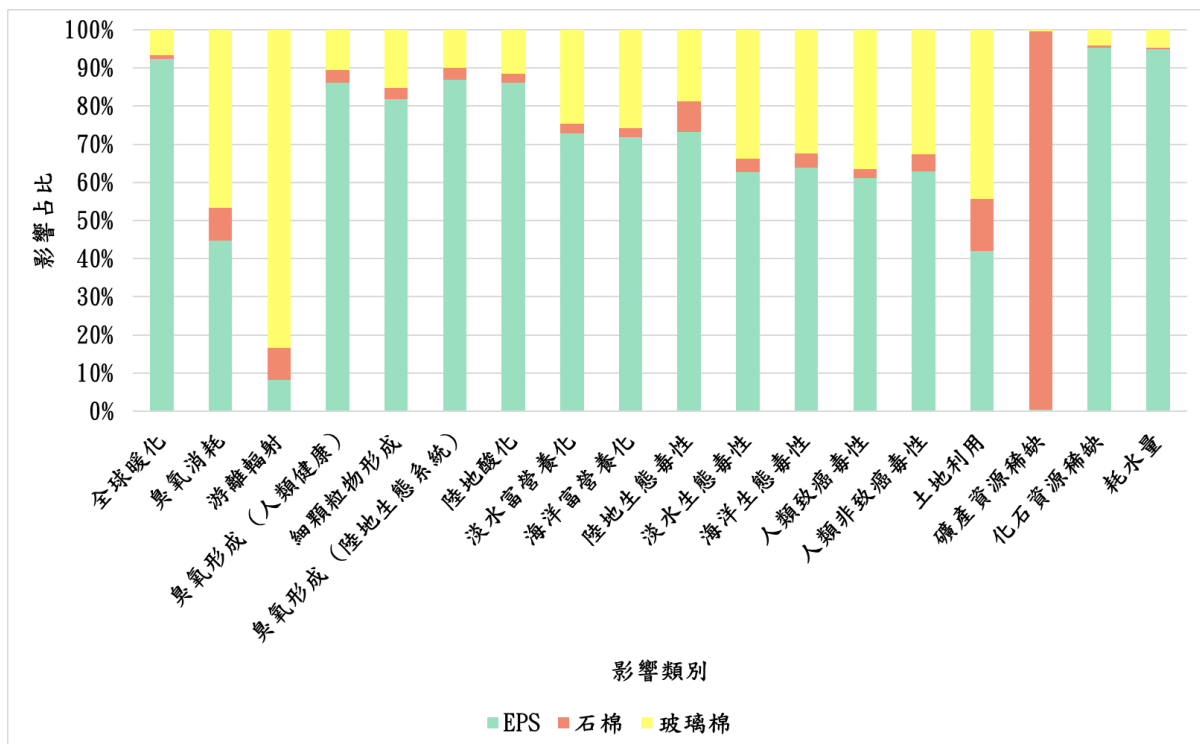
圖 4.3 ReCipe2016 特徵化分析 $1m^3$ 材料結果

表 4.8 ReCipe2016 特徵化分析 $1m^3$ 材料結果

Impact category	Unit	EPS	石棉	玻璃棉
全球暖化	kg CO2 eq	762.36703	8.889726	54.423056
臭氧消耗	kg CFC11 eq	2.26E-05	4.36E-06	2.36E-05
游離輻射	kBq Co-60 eq	0.44640936	0.45645408	4.5276583
臭氧形成 (人類健康)	kg NOx eq	1.2765248	0.051409667	0.15540392
細顆粒物形成	kg PM2.5 eq	0.5962886	0.021643484	0.11069367
臭氧形成 (陸地生態系統)	kg NOx eq	1.3938863	0.052171387	0.15923042
陸地酸化	kg SO2 eq	1.8327499	0.047621328	0.24649327
淡水富營養化	kg P eq	0.082117599	0.002918425	0.027685467
海洋富營養化	kg N eq	0.005704851	0.000177476	0.002051084
陸地生態毒性	kg 1,4-DCB	526.21304	57.032377	134.78684

表 4.8(續)

淡水生態毒性	kg 1,4-DCB	4.1204251	0.23883104	2.2167568
海洋生態毒性	kg 1,4-DCB	5.793096	0.34501517	2.9442312
人類致癌毒性	kg 1,4-DCB	15.208931	0.5433421	9.1006656
人類非致癌毒性	kg 1,4-DCB	97.897488	6.9962931	50.641163
土地利用	m ² a crop eq	1.1912537	0.38602103	1.2566046
礦產資源稀缺	kg Cu eq	0.14895875	40.646533	0.13610114
化石資源稀缺	kg oil eq	379.41474	2.4748885	16.651949
耗水量	m ³	12.99496	0.034327026	0.65273202

圖 4.4 ReCipe2016 特徵化分析 1m³材料結果

二、常態化分析分析

表 4.9、表 4.10、表 4.11、表 4.12 及圖 4.5、圖 4.6、圖 4.7、圖 4.8 EPS 及各個建材於現場使用階段時經由 ReCipe2016 模式分析所得之常態化結果，單位為無因次，由圖表可以看出材料所造成之衝擊效應中，首先在全球暖化方面，EPS 的影響較低，只有 0.095295879，相比之下，RC 和 EPS+RC 分別為 0.10762377 和 0.12903147。其次，臭氧消耗方面，EPS 同樣表現較好，僅為 0.000376774，而 RC 和 EPS+RC 分別為 0.001209379 和 0.000693155。人類非致癌毒性方面，EPS 的影響明顯較低，僅為 0.00313272，相比之下，RC 和 EPS+RC 分別為 0.003262143 和 0.003863133。最後礦產資源稀缺方面，EPS 也表現出較低的影響，僅為 1.24E-06，而 RC 和 EPS+RC 分別為 0.000145703 和 4.91E-05。綜上所述，從全球暖化、臭氧消耗、人類非致癌毒性和礦產資源稀缺的角度來看，EPS 相對於 RC 是一種更環境友好的選擇，主要原因推測為使用了大量電力、用水量及生產階段所產生之碳排，包括柴油發電與 SO₂之排放，皆會影響生態及人體健康。

表 4.9 ReCipe2016 常態化分析 1kg 材料結果

Impact category	EPS	EPS+RC	RC
全球暖化	0.000476	0.000287	0.000045
臭氧消耗	0.000002	0.000002	0.000001
游離輻射	0.000005	0.000007	0.000005
臭氧形成 (人類健康)	0.000310	0.000191	0.000033
細顆粒物形成	0.000117	0.000074	0.000014
臭氧形成 (陸地生態系統)	0.000392	0.000236	0.000039
陸地酸化	0.000224	0.000140	0.000024
淡水富營養化	0.000632	0.000311	0.000026
海洋富營養化	0.000006	0.000005	0.000001

表 4.9(續)

陸地生態毒性	0.000173	0.000117	0.000029
淡水生態毒性	0.000818	0.000402	0.000039
海洋生態毒性	0.000666	0.000336	0.000037
人類致癌毒性	0.007384	0.003501	0.000196
人類非致癌毒性	0.000016	0.000009	0.000001
土地利用	0.000001	0.000002	0.000001
礦產資源稀缺	0.000000	0.000000	0.000000
化石資源稀缺	0.001935	0.000999	0.000083
耗水量	0.000244	0.000112	0.000004

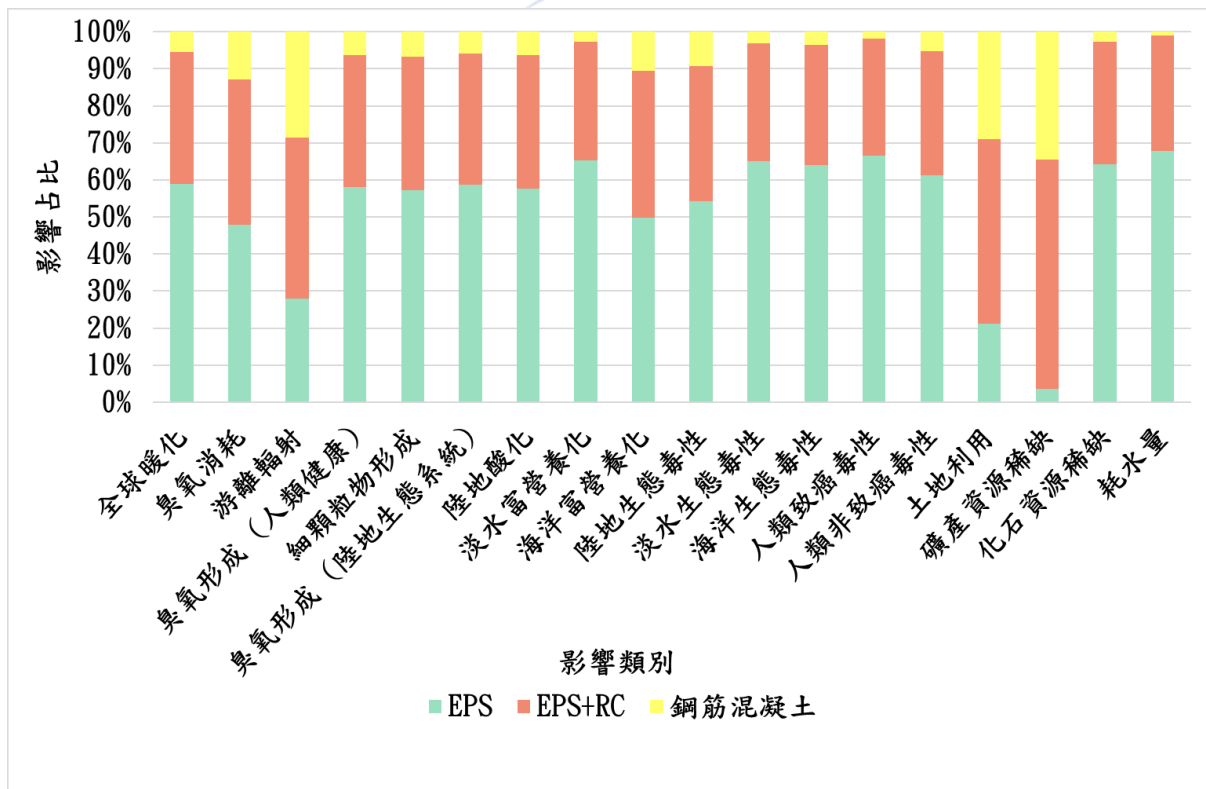


圖 4.5 ReCipe2016 常態化分析 1kg 材料結果

表 4.10 ReCipe2016 常態化分析 1kg 材料結果

Impact category	EPS	石棉	玻璃棉
全球暖化	0.000476479	9.26E-06	0.000340144
臭氧消耗	1.88E-06	6.07E-07	1.97E-05
游離輻射	4.64E-06	7.91E-06	0.000470876
臭氧形成 (人類健康)	0.000310196	2.08E-05	0.000377632
細顆粒物形成	0.000116574	7.05E-06	0.000216406
臭氧形成 (陸地生態系統)	0.000392379	2.45E-05	0.000448234
陸地酸化	0.000223595	9.68E-06	0.000300722
淡水富營養化	0.000632306	3.75E-05	0.002131781
海洋富營養化	6.19E-06	3.21E-07	2.23E-05
陸地生態毒性	0.000173124	3.13E-05	0.000443449
淡水生態毒性	0.000817904	7.90E-05	0.004400262
海洋生態毒性	0.000666206	6.61E-05	0.003385866
人類致癌毒性	0.007383936	0.000439654	0.044183732
人類非致癌毒性	1.57E-05	1.87E-06	8.10E-05
土地利用	9.65E-07	5.21E-07	1.02E-05
礦產資源稀缺	6.20E-09	2.82E-06	5.67E-08
化石資源稀缺	0.001935015	2.10E-05	0.000849249
耗水量	0.000243656	1.07E-06	0.000122387

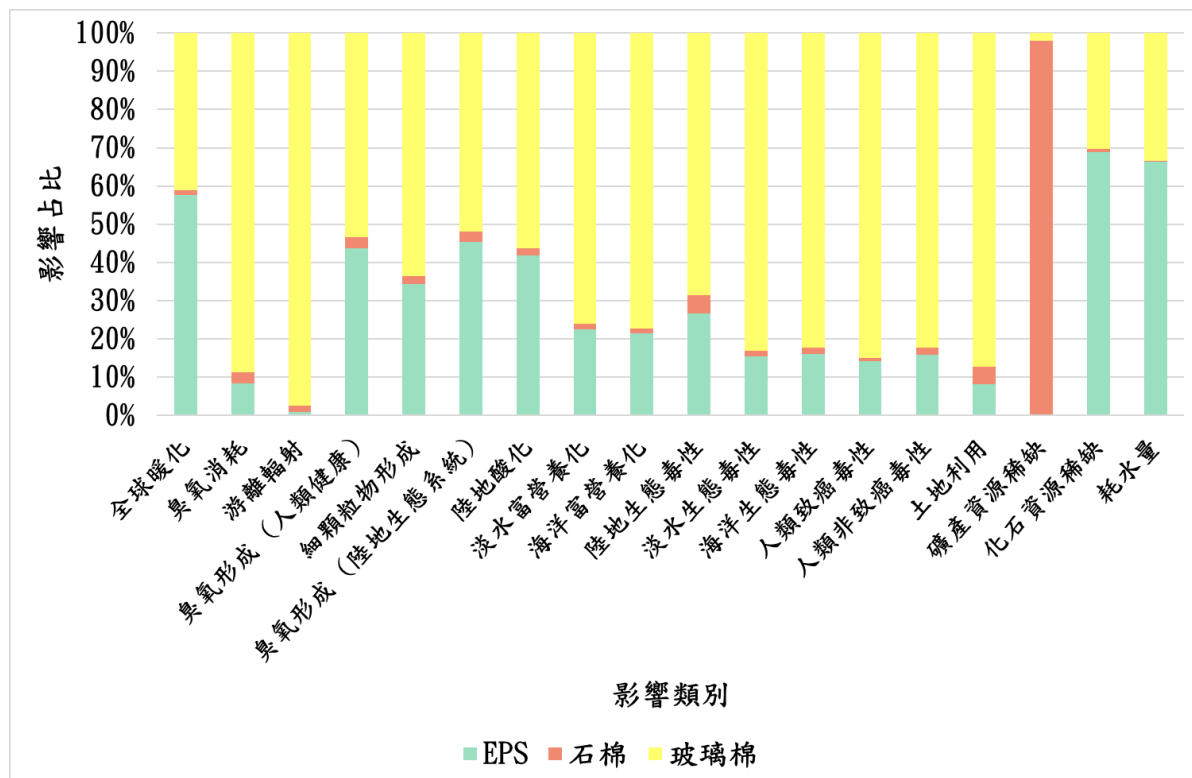


圖 4.6 ReCipe2016 常態化分析 1kg 材料結果

表 4.11 ReCipe2016 常態化分析 1m³材料結果

Impact category	EPS	EPS+RC	RC
全球暖化	0.095296	0.096837	0.107624
臭氧消耗	0.000377	0.000481	0.001209
游離輻射	0.000929	0.002243	0.011441
臭氧形成 (人類健康)	0.062039	0.064271	0.079896
細顆粒物形成	0.023315	0.024524	0.032987
臭氧形成 (陸地生態系統)	0.078476	0.080331	0.093317
陸地酸化	0.044719	0.046474	0.058759
淡水富營養化	0.126461	0.118479	0.062603
海洋富營養化	0.001238	0.001477	0.003153

表 4.11(續)

陸地生態毒性	0.034625	0.039091	0.070352
淡水生態毒性	0.163581	0.154737	0.092827
海洋生態毒性	0.133241	0.127694	0.088867
人類致癌毒性	1.476787	1.351101	0.471298
人類非致癌毒性	0.003133	0.003149	0.003262
土地利用	0.000193	0.000565	0.003166
礦產資源稀缺	0.000001	1.93E-05	0.000146
化石資源稀缺	0.387003	0.363491	0.198906
耗水量	0.048731	0.043804	0.009311

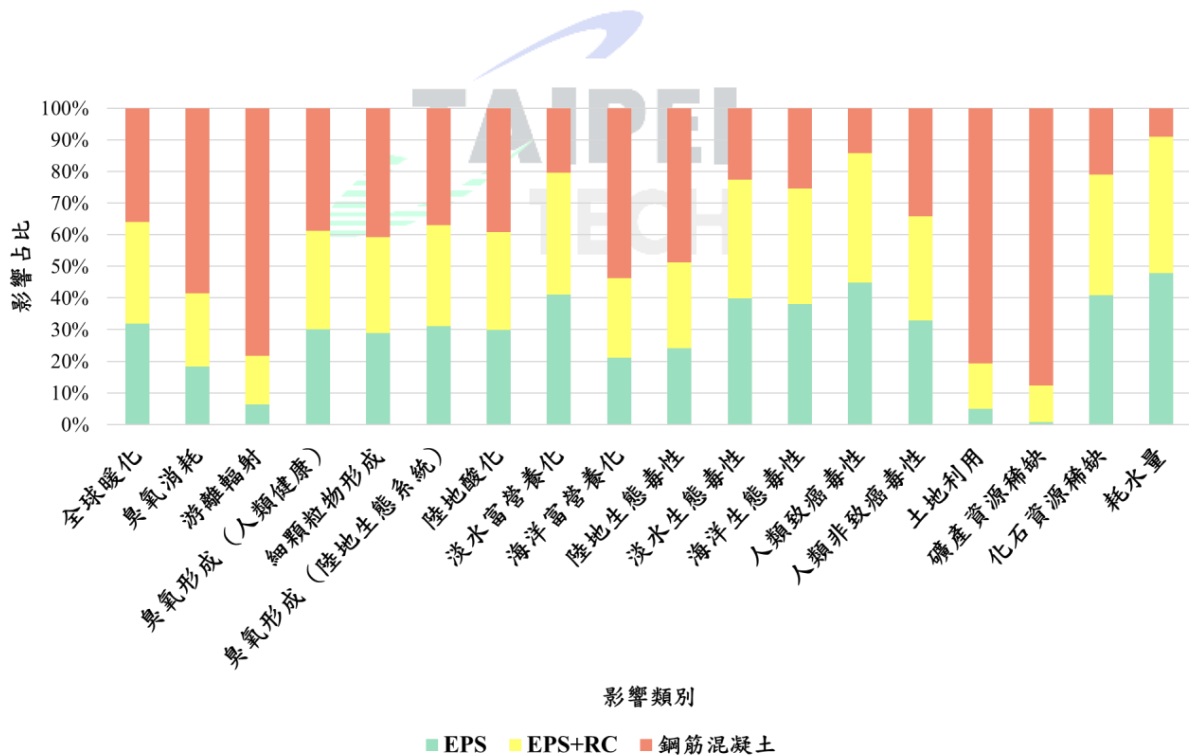


圖 4.7ReCipe2016 常態化分析 1m³材料結果

表 4.12 ReCipe2016 常態化分析 1m³材料結果

Impact category	EPS	石棉	玻璃棉
全球暖化	0.096716	0.001436	0.008358
臭氧消耗	0.000368	8.97E-05	0.000485
游離輻射	0.002492	0.001404	0.010196
臭氧形成 (人類健康)	0.062039	0.002499	0.007553
細顆粒物形成	0.023315	0.000846	0.004328
臭氧形成 (陸地生態系統)	0.078476	0.002937	0.008965
陸地酸化	0.044719	0.001162	0.006014
淡水富營養化	0.126461	0.004494	0.042636
海洋富營養化	0.001238	3.85E-05	0.000445
陸地生態毒性	0.034626	0.003746	0.008854
淡水生態毒性	0.015333	0.000852	0.007703
海洋生態毒性	0.014475	0.000747	0.005141
人類致癌毒性	3.674189	0.130938	2.115434
人類非致癌毒性	0.012833	0.000689	0.004717
土地利用	0.000193	6.25E-05	0.000204
礦產資源稀缺	1.24E-06	0.000339	1.13E-06
化石資源稀缺	0.387003	0.002524	0.016985
耗水量	0.048731	0.000129	0.002448

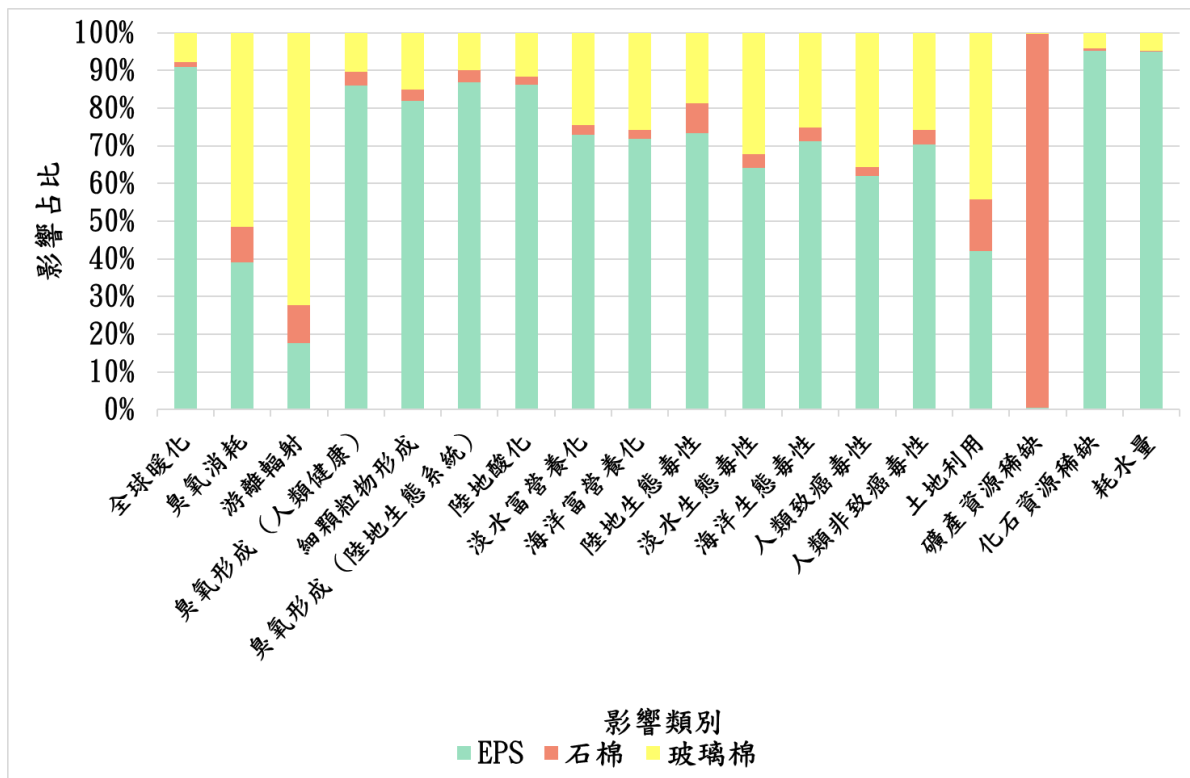


圖 4.8ReCipe2016 常態化分析 $1m^3$ 材料結果

三、評價加權分析

在 ReCipe2016 模式中，將衝擊類別之常態化分析結果乘以三項損害類別相對應之權重因子，經過加總計算後可得到 EPS 及各個建材於現場使用之評價加權結果。

表 4.13、表 4.14、表 4.15、表 4.16 及圖 4.8、圖 4.9、圖 4.10、圖 4.11 EPS 及各個建材於現場使用階段時經由 ReCipe2016 模式分析所得之評價加權分析結果，由於此項衝擊評估與常態化之權重因子相異不大，故可看出 RC 及玻璃棉不論在人體健康、生態系統品質及資源耗用損害仍舊產出較高之衝擊效應。

表 4.13 ReCipe2016 評價加權分析 1kg 材料結果

傷害類別	Unit	EPS	EPS+RC	RC
人類健康	mPt	74.103425	44.560538	7.1619009
生態系統	mPt	3.9946833	2.3976746	0.38052042
資源耗用	mPt	8.216615	3.9890838	0.20559702

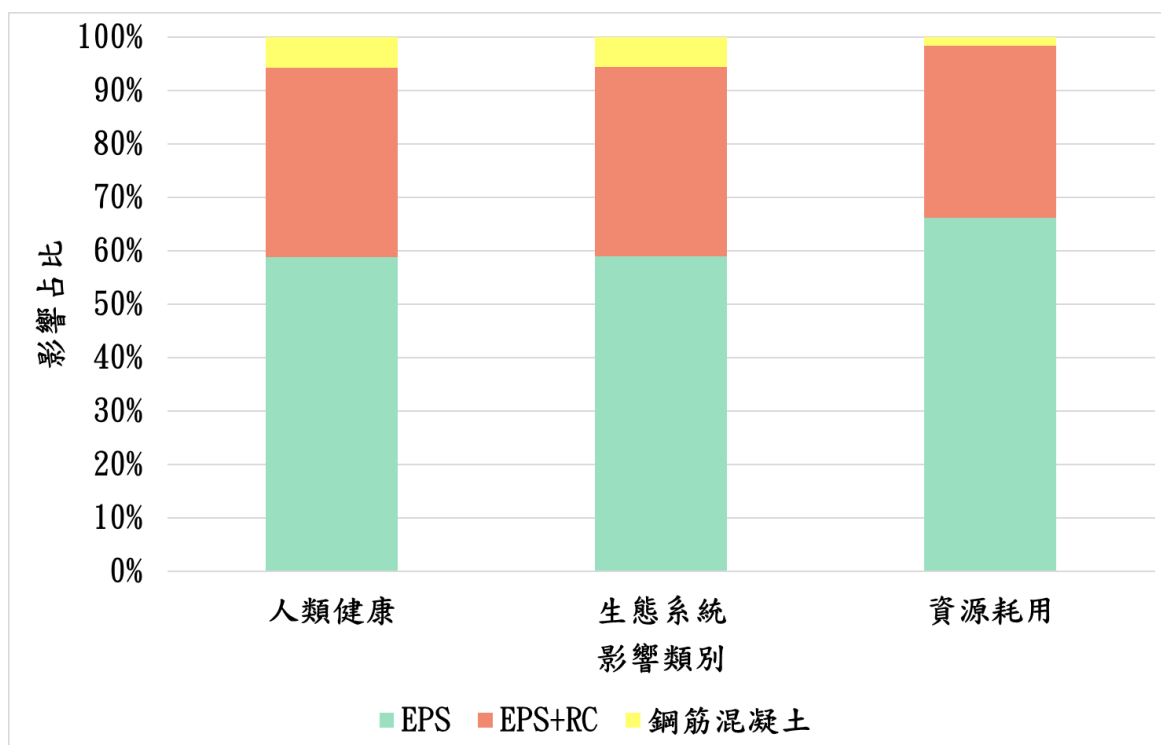


圖 4.8 ReCipe2016 評價加權分析 1kg 材料結果

表 4.14 ReCipe2016 評價加權分析 1kg 材料結果

傷害類別	Unit	EPS	玻璃棉	石棉
人類健康	mPt	74.10343	101.9154	2.640922
生態系統	mPt	3.994683	3.571499	0.108531
資源耗用	mPt	8.216615	2.316281	0.90947

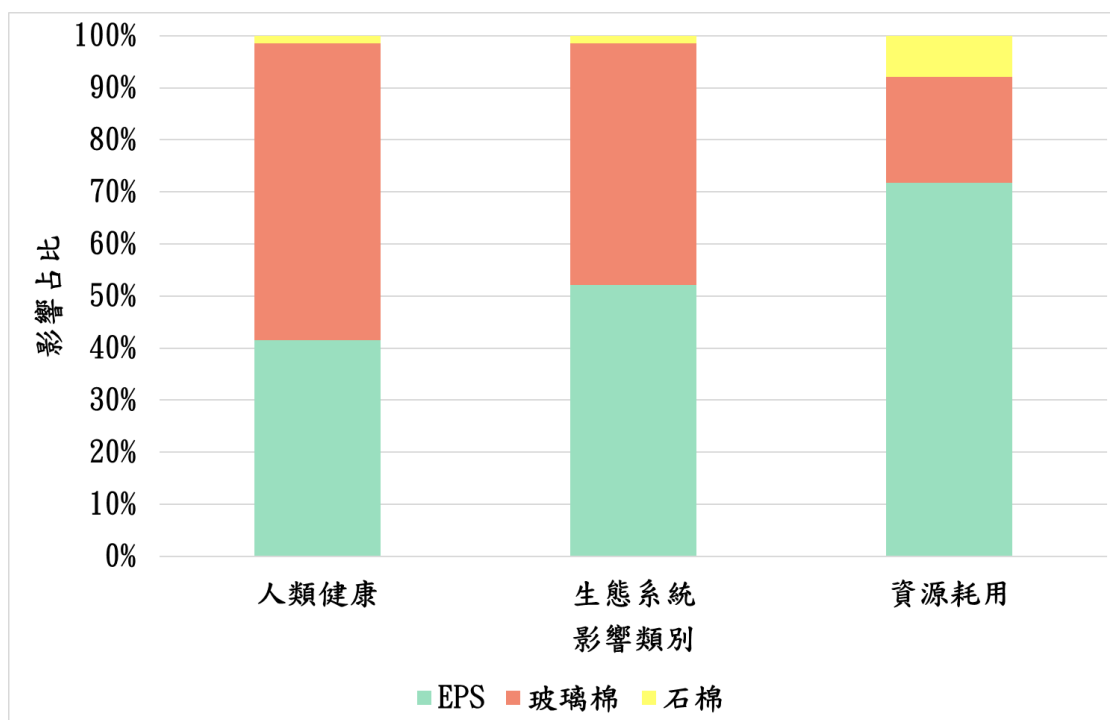


圖 4.9 ReCipe2016 評價加權分析 1kg 材料結果

表 4.15 ReCipe2016 評價加權分析 $1m^3$ 材料結果

傷害類別	Unit	EPS	EPS+RC	RC
人類健康	Pt	14.82069	15.11667	17.18856
生態系統	Pt	0.798937	0.813226	0.913249
資源耗用	Pt	1.643323	1.499587	0.493433

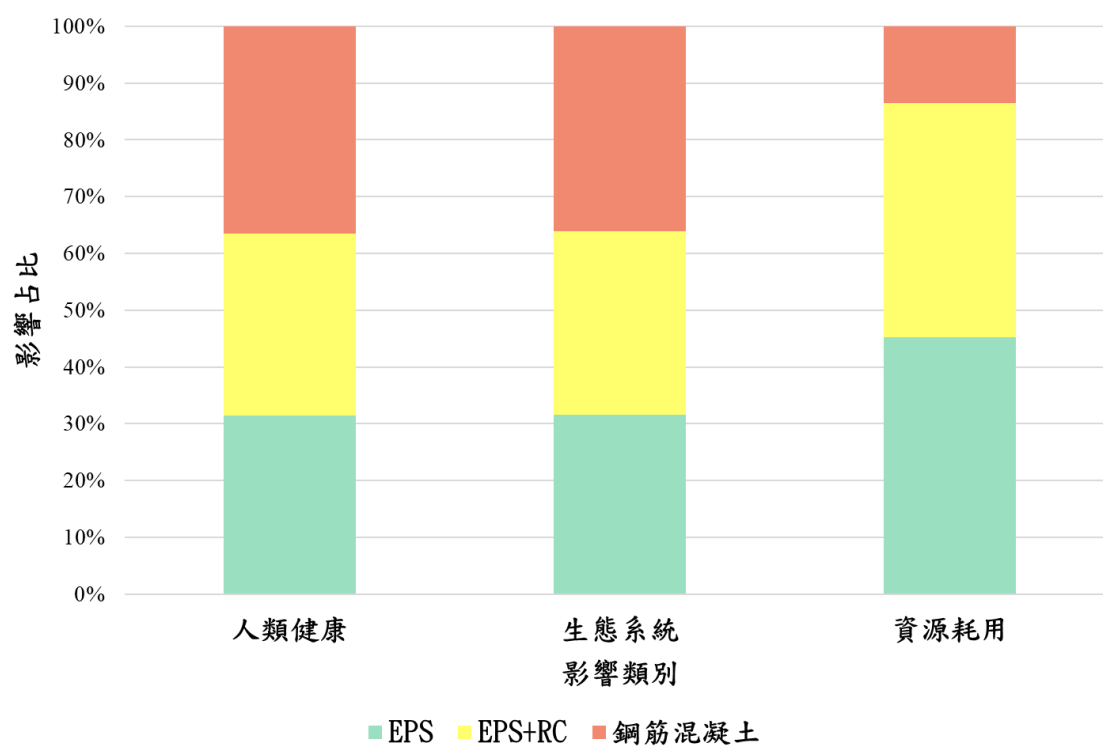


圖 4.10 ReCipe2016 評價加權分析 1m³材料結果

表 4.16 ReCipe2016 評價加權分析 1m³材料結果

傷害類別	Unit	EPS	玻璃棉	石棉
人類健康	Pt	14.82069	2.038307	0.316911
生態系統	Pt	0.798937	0.07143	0.013024
資源耗用	Pt	1.643323	0.046326	0.109136

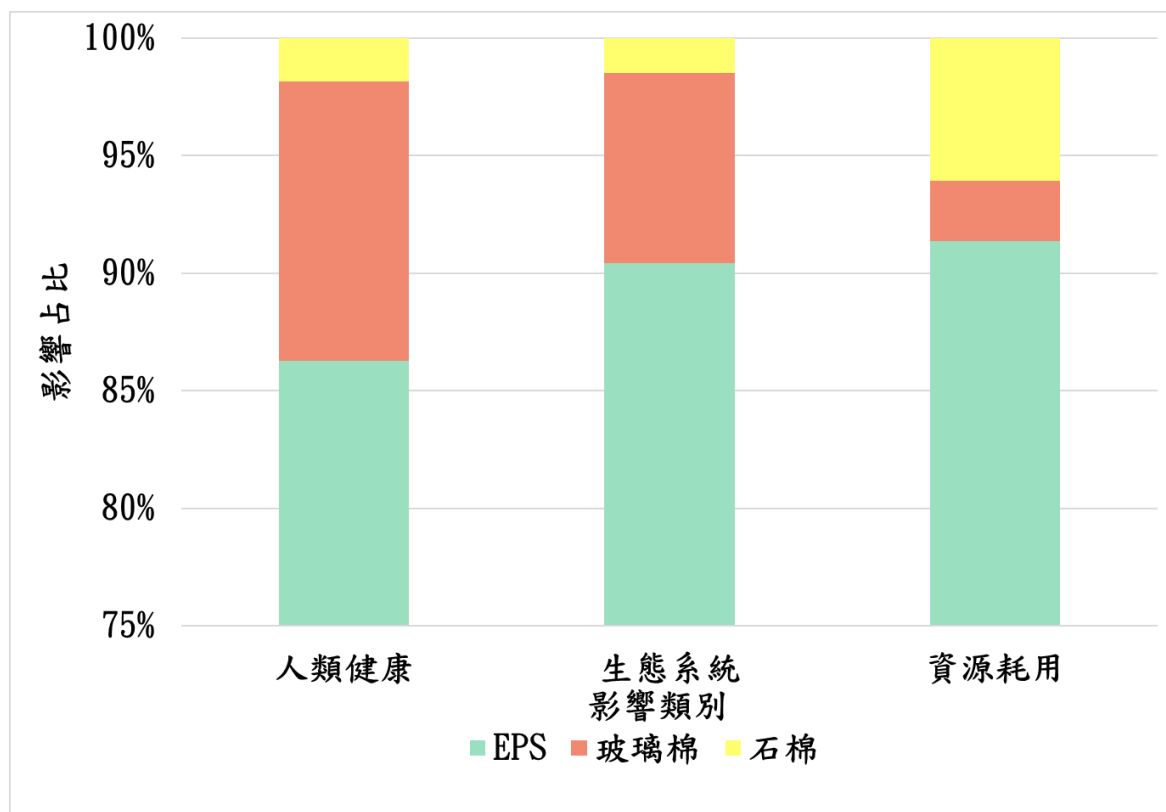


圖 4.11 ReCipe2016 評價加權分析 1m³材料結果

四、單項得點分析

EPS 及各個建材於現場使用階段時經由 ReCipe2016 模式分析所得之單項得點結果如表 4.17、表 4.18、表 4.19、表 4.20 及圖 4.12、圖 4.13、圖 4.14、圖 4.15 所示，可看出 RC 及玻璃棉造成之人體健康損害為最高。因此就分析結果而言，若 EPS 及各個建材於現場使用要減低對環境衝擊造成之損害，應由減用該材料或取代方面著手改善，減少使用所產生的耗能。

表 4.17 ReCipe2016 單項得點分析 1kg 材料結果

傷害類別	Unit	EPS	EPS+RC	RC
人類健康	mPt	74.10343	44.560538	7.1619009
生態系統	mPt	3.994683	2.3976746	0.38052042
資源耗用	mPt	8.216615	3.9890838	0.20559702

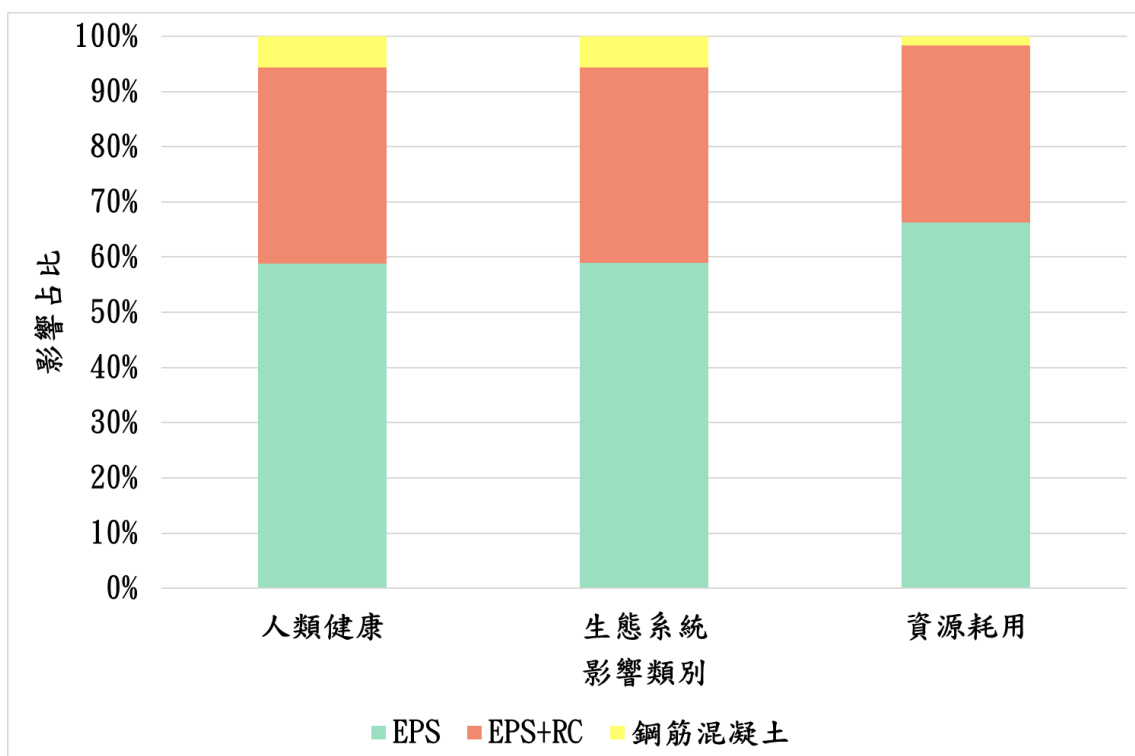


圖 4.12 ReCipe2016 單項得點分析 1kg 材料結果

表 4.18 ReCipe2016 單項得點分析 1kg 材料結果

傷害類別	Unit	EPS	玻璃棉	石棉
人類健康	mPt	74.103425	101.91535	2.6409219
生態系統	mPt	3.9946833	3.5714994	0.10853058
資源耗用	mPt	8.216615	2.3162813	0.90947005

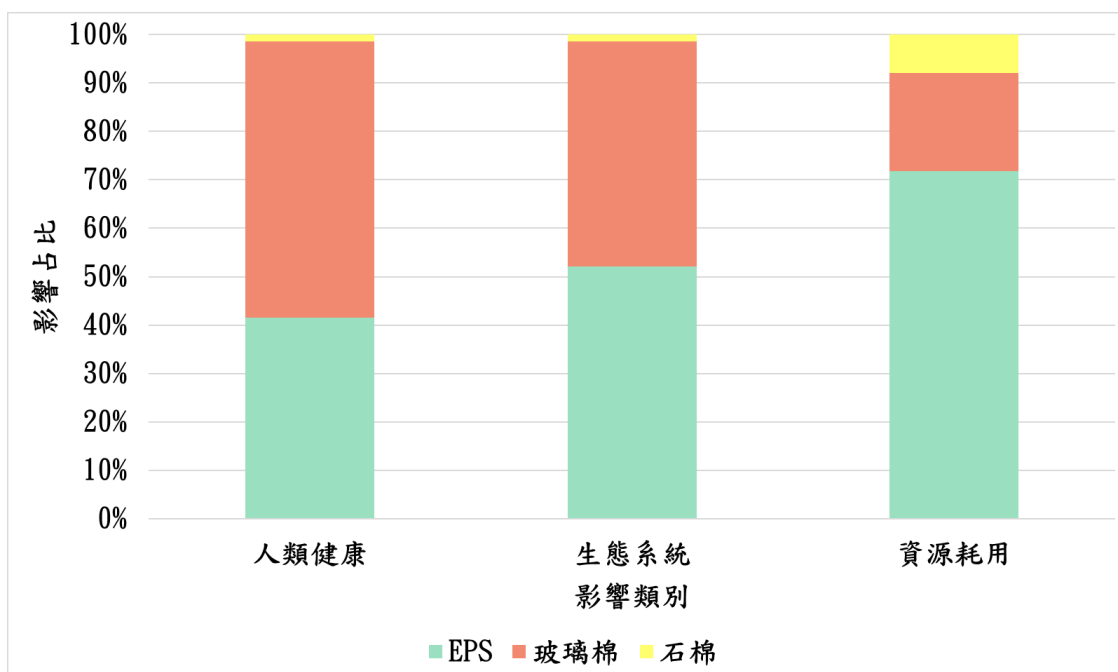


圖 4.13 ReCipe2016 單項得點分析 1kg 材料結果

表 4.19 ReCipe2016 單項得點分析 1m³材料結果

傷害類別	Unit	EPS	EPS+RC	RC
人類健康	Pt	14.82069	15.11667	17.18856
生態系統	Pt	0.798937	0.813226	0.913249
資源耗用	Pt	1.643323	1.499587	0.493433

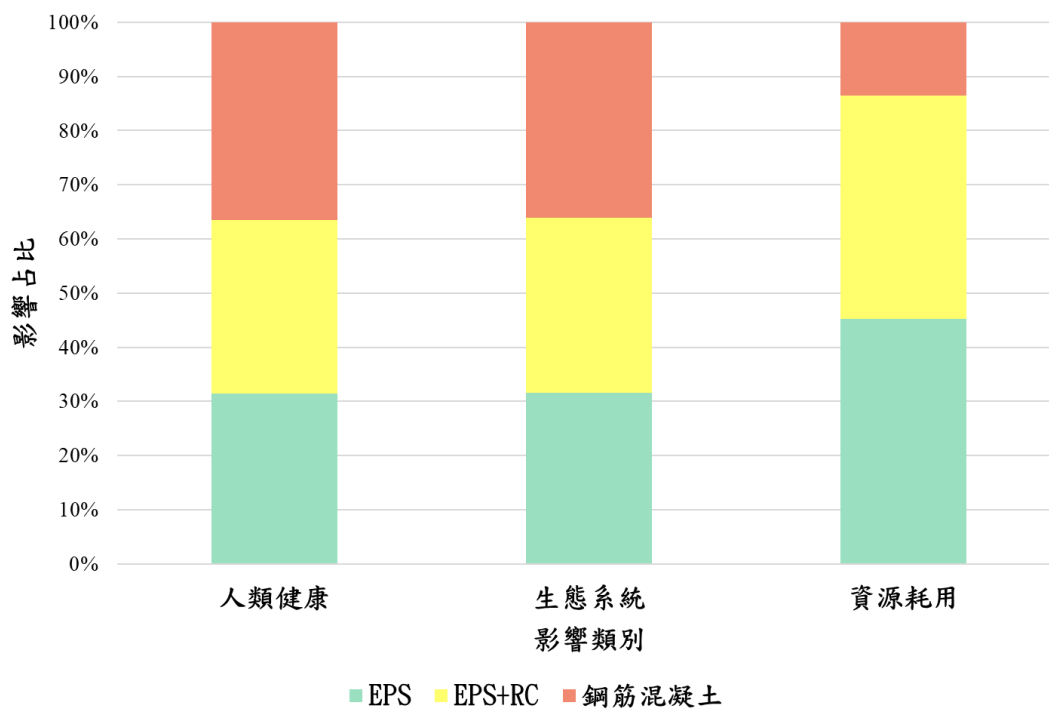


圖 4.14 ReCipe2016 單項得點分析 1m³材料結果

表 4.20 ReCipe2016 單項得點分析 1m³材料結果

傷害類別	Unit	EPS	玻璃棉	石棉
人類健康	Pt	14.820685	2.0383069	0.31691063
生態系統	Pt	0.79893667	0.071429988	0.013023669
資源耗用	Pt	1.643323	0.046325625	0.10913641

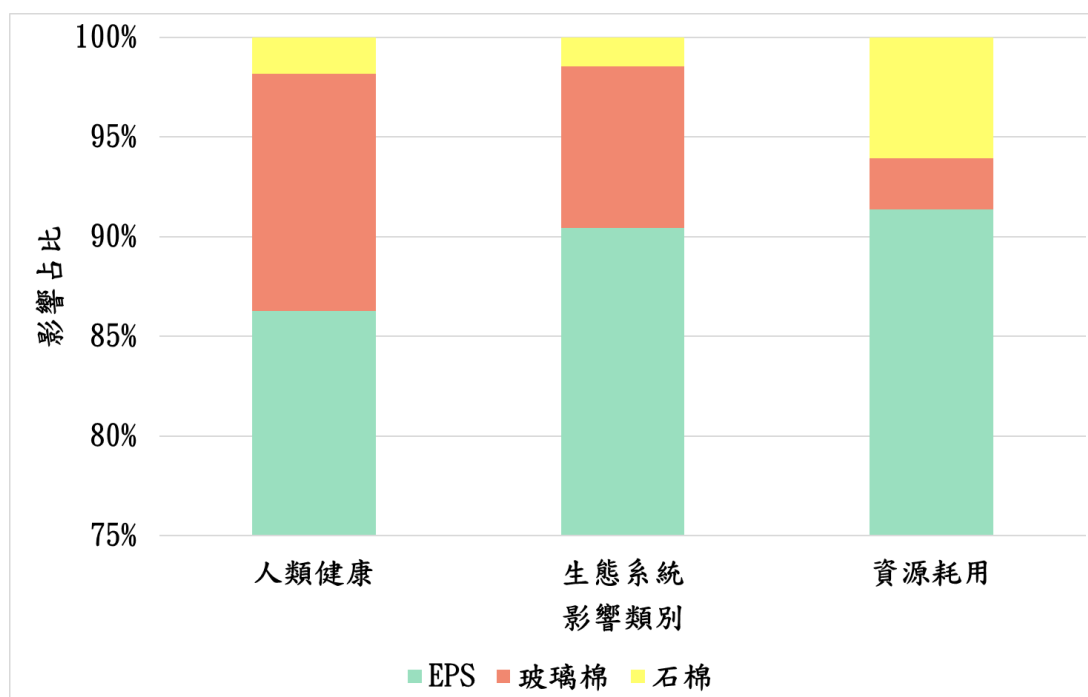


圖 4.15 ReCipe2016 單項得點分析 1m³材料結果

4.3.2 IPCC2021 GWP100 衝擊評估

IPCC2021 GWP100 是一種被廣泛引用的衝擊評估方法，由 IPCC2013 GWP100 方法改良而來，並使用 IPCC 2021 年溫室氣體排放評估方法(IPCC GWP 2021 100a)，分別計算 EPS、EPS+RC、RC、玻璃棉及石棉於 EPS 及各個建材於現場使用階段所產生之碳排放量。

其分析出的碳排放量分別為 EPS 718.57675 公斤當量(kgCO₂e)、EPS+RC 985.13535 公斤當量(kgCO₂e)、EPS+RC 985.13535 公斤當量(kgCO₂e)、RC 850.2571 公斤當量(kgCO₂e)、玻璃棉 52.761826 公斤當量(kgCO₂e)、石棉 8.7544893 公斤當量(kgCO₂e)，如表 4.21 所示；由表 可以看出 EPS+RC 為最高耗能，其次為 RC 排放量，如圖 4.16 所示。

表 4.21 IPCC2021 GWP100 單項得點分析 1m³材料結果

Impact category	Unit	EPS	EPS+RC	RC	石棉	玻璃棉
GWP100 - fossil	kg CO2-eq	718.57	735.04	850.2571	8.7544	52.761
GWP100 - biogenic	kg CO2-eq	3.896	3.51	0.8132045	0.00809	0.4230
GWP100 - land transformation	kg CO2-eq	0.0899	0.1044	0.20585044	0.0230	0.09236

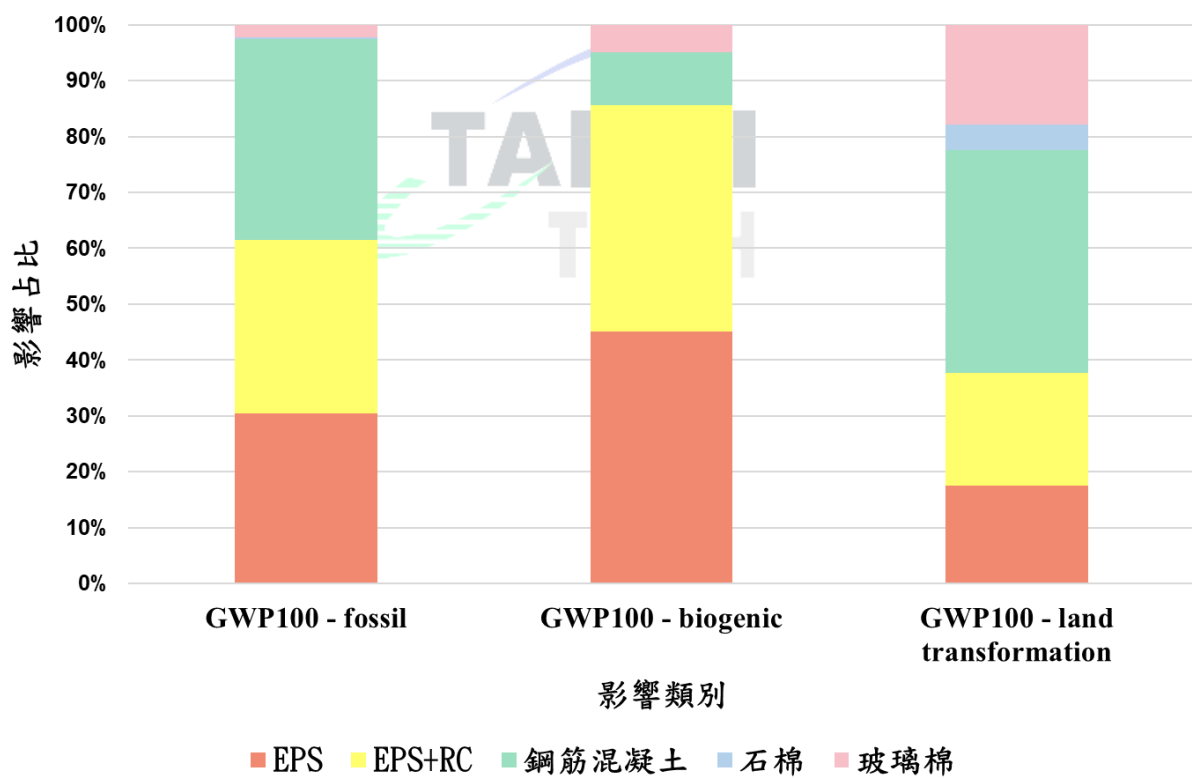


圖 4.16 IPCC2021 GWP100 單項得點分析 1m³材料結果

第五章 結論與建議

5.1 結論

本研究之研究標的「EPS 生產製造至使用階段之能源使用碳排放量分析研究」，根據案例公司所提供之盤查數據進行生命週期評估，本研究提出以下結論及建議。

一、依據 ReCipe Midpoint 法結果，EPS 在全球暖化、臭氧消耗、人類非致癌毒性和礦產資源稀缺方面影響較低。具體數據顯示 EPS 的二氧化碳排放為 762.36703 kg Co_2eq ，臭氧消耗為 2.26E-05kg CFC11eq，人類非致癌毒性為 97.897488kg 1,4-DCB，礦產資源稀缺為 0.14895875m³。與 RC 和 EPS+RC 相比，EPS 在這些指標上表現較低。

二、依據 ReCipe Endpoint 法結果 EPS 在人類健康、生態系統、資源耗用方面的影響較低。具體數據顯示 EPS 的影響值分別為 14.82069PT、0.798937PT、1.643323 PT。相比之下，RC 和 EPS+RC 在這些指標上表現較高。從這些指標來看，EPS 相對於 RC 是一種更環境友好的選擇。可能原因包括 RC 生產過程中消耗的用電量、用水量以及所產生的碳排放，包括SO₂排放等，這些都對生態環境和人體健康造成影響。

三、依據 IPCC2021 GWP100 法結果其分析出的碳排放量分別為 EPS 718.57 kg Co_2eq 、EPS+RC 735.0368 kg Co_2eq 、RC850.2571 kg Co_2eq 、玻璃棉 52.761826 kg Co_2eq 、石棉 8.7544893 kg Co_2eq ，由此可以看出 RC 為最高碳排放量，其次為 EPS+RC 之碳排放量。

四、透過 ReCipe 及 GWP100 方法學分析結果後從中得知，在現場施工使用上相同體積之碳排放量 RC 會較高於 EPS，其兩個方法學分析結果相似，由此得知在現場施工使用建材，EPS 是可以有效取代 RC 降低碳排放之建材。

5.2 建議

一、以生命週期評估技術的觀點來看，目前市場上的生命週期評估軟體多數來自國外，可能不完全適用於台灣的環境情況。此外，Simapro 9.4.0.1 軟體所提供的資料庫數據也大多非本土化，可能會有些選擇不夠理想。因此，在未來進行評估時，建議可以與本地的碳排放係數相比較並進行調整，以獲得更精確且符合國內環境的衝擊評估結果。

二、生命週期評估的過程十分複雜，而盤查清單是否完整將會影響評估結果的客觀性和可信度。然而，現場的數據有時已經不再可靠，甚至可能缺少完整的數據。因此，在收集數據方面，這是一項非常困難的任務。為了能夠進行有效的模擬計算，建議未來進行相關研究調查時應與管理者進行溝通，盡可能詳細地收集數據資料，長期統計和累積各年度的資料，並建立能源排放量和原料使用量等數據庫。

三、從第四章可以得知比較 RC 與 EPS 後，RC 之碳排放量略高於 EPS，但是兩者在使用上的不同，例如 EPS 之 K 值和 RC 之磅數，也會影響碳排放數據，建議可在後續研究的部分作深入探討。



參考文獻

1. 劉家豪，IC 製造業產品生命週期分析，國立成功大學，碩士論文，2004。
2. 王慧茹，第三類產品環境宣告差異性比較研究—以 TFT-LCD 產品模組為例，國立臺北科技大學，碩士論文，2009。
3. 洪子賀，運用電腦模擬輔助施工破盤查作業之研究—以混凝土坡面工為例，國立中央大學，碩士論文，2015。
4. 溫善政，建築物施工暨營運階段碳足跡探討—以嘉創中心為例，中華大學，碩士論文，2013。
5. 黃瓊儀，人造纖維產品之生命週期評估研究，國立成功大學，碩士論文，2003。
6. 林憲德，熱濕氣候的綠色建築，詹氏書局，2003。
7. 黃文輝，產品碳足跡，工業技術研究院綠能與環境研究所，2012。
8. 聯合國，聯合國氣候變化框架公約—京都議定書，USA，1997
9. 盧正修、楊英賢、廖志祥、張家欽，以生命週期評估探討鋰電池效能之碳足跡效益研究，海峽兩岸氣候變遷與永續發展論壇，2011。
10. 蕭瓊茹，資源回收再利用產品之環境衝擊評估-以燈管及乾電池為例，國立臺北科技大學，2012。
11. 游嘉文，大學校園環境應用綠建築之研究—以國立台北科技大學校園為例，國立臺北科技大學，碩士論文，2005。
12. 盧佩瑜，建築碳足跡盤查用後評估之研究，國立成功大學，碩士論文，2015。
13. 蘇韶弘，營建業中建築物主體工程碳足跡建模之芻議—以校園一般建築物為例，國立宜蘭大學，碩士論文，2011。
14. 張又升，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，2002。
15. 劉珮格，揭露碳足跡帶動低碳思維風潮—以盟鑫工業為例，綠基會專題報導，2012
16. 台灣產品碳足跡資訊網，行政院環境保護署，2015。
17. 何謂建築碳足跡，低碳建築聯盟，2016。

18. 林憲德，建築碳足跡，詹氏書局，2015
19. 黃柏維（2004）。EPS 之防災應用性探討。國立臺北科技大學土木與防災技術研究所碩士論文，台北市。
20. 台達化學工業股份有限公司，台達發泡性聚苯乙烯之特性與應用，2020。
21. 何泰源，EPS 輕質填土工法之特性及應用案例，中華技術季刊，第 32 卷，11 期，2006，第 22-42 頁。
22. 林利國、李文勳，「EPS 輕質填土工法之研究」，中華顧問工程司研究報告，2000。
23. 積水化成品工業株式會社，EPS 土木施工法，2010。
24. 塚本英樹等，「EPS 工法の新たな展開」，発泡スチロール土木工法開発機構，2008。
25. 鄭永欽，「美國猶他州 I-15 州際公路重建工程概述及 EPS 之應用」，輕質填土工法技術研討會論文集，2000。
26. 新北市政府養護工程處，三峽區北 113 縣(0K+650)災害復建工程，2022。
27. A review of life cycle assessment (LCA) on some food products, Poritosh Roy,USA,2009
28. ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level, Mark A. J. Huijbregts,USA,2017
29. Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing,Piers Forster, Venkatachalam Ramaswamy , USA,2014
30. . Goedkoop, M.J., “The ECO-indicator 98 explained”, The International Journal of Life Cycle Assessment”, Volume 3, Issue 6, P.352-360, 1998
31. Goedkoop, M. and Spriensma, R., “The Eco-Indicator 99. A Damage Oriented Method for Life Cycle Impact Assessment”, Methodology Report. 3rd Edition, 2001.