

# 國產竹建材碳足跡盤查之研究

內政部建築研究所委託研究報告

中華民國 113 年 12 月

(本報告內容及建議，純屬研究小組意見，不代表本機關意見)

GRB：11363G0018

## 「國產竹建材碳足跡盤查之研究」

受委託者：國立臺灣大學

計畫主持人：黃國倉 教授

共同主持人：蔡明哲 教授

研究助理：莊閔傑、呂羿儒

研究期程：民國 113 年 2 月至 113 年 12 月

研究經費：新臺幣 89.5 萬元

## 內政部建築研究所委託研究報告

中華民國 113 年 12 月

(本報告內容及建議，純屬研究小組意見，不代表本機關意見)



## 目次

目次 .....	I
表次 .....	III
圖次 .....	V
摘要 .....	VII
ABSTRACT.....	IX
第一章 緒論.....	1
第一節 研究緣起與背景.....	1
第二節 本研究計畫之重要性.....	3
第三節 研究內容.....	4
第二章 國內外有關本案之文獻與案例.....	7
第一節 竹林碳匯研究近況.....	7
第二節 竹製產品全生命週期碳循環過程.....	8
第三節 竹製產品全生命週期碳足跡測定架構.....	9
第四節 建築資材碳排資料庫.....	12
第五節 碳足跡相關國際標準比較.....	13
第六節 木、竹製板材碳足跡產品類別規則(PCR).....	17
第七節 國內外竹建材之建築應用案例.....	19
第三章 研究方法.....	21
第一節 ISO 14067 方法概論.....	21
第二節 國產竹建材碳足跡盤查說明.....	23
第四章 竹建材碳足跡盤查過程與結果.....	31
第一節 竹建材碳足跡盤查過程.....	31
第二節 竹桿件碳足跡盤查結果.....	42
第三節 竹集成板材碳足跡盤查結果.....	45
第四節 減碳效益評估.....	57
第五章 結論與建議.....	61
第一節 結論.....	61
第二節 建議.....	62
附錄一：期初審查意見回覆表.....	63
附錄二：期中審查意見回覆表.....	65
附錄三：期末審查意見回覆表.....	69
附錄四：專家會議議程與內容.....	71
參考書目 .....	73



## 表次

表 1-1 我國各縣市各森林面積之總面積與占比 .....	2
表 2-1 五個竹產品全生命週期各階段的碳足跡及內容 .....	9
表 2-2 ABRI 初級資材碳排資料庫 .....	13
表 2-3 ISO 14067、PAS 2050:2011 與臺灣碳標籤之比較 .....	16
表 3-1 各產品與服務碳足跡之各階段系統邊界的詳細說明 .....	28
表 3-2 本研究相關數據排放係數表 .....	29
表 4-1 孟宗竹伐竹作業及載運之用油情形 .....	32
表 4-2 定長加工及鹼性藥劑前處理之油、水、電及藥劑用量使用內容 .....	34
表 4-3 竹桿剖片、雙面鉋、毛料定寬及粗部砂磨加工之油、水、電使用內容 .....	35
表 4-4 竹片人工乾燥及蒸汽熱處理加工之油、水、電使用內容 .....	37
表 4-5 竹集成元竹片載運、修邊定寬及砂磨定厚加工之油、水、電使用內容 .....	39
表 4-6 竹集成板佈膠作業之用膠使用量統計 .....	40
表 4-7 高週波熱壓板加工之用電數據量測蒐集 .....	41
表 4-8 竹集成板表面整平砂磨及裁板機定長加工之油、水、電使用內容 .....	42
表 4-9 竹桿件碳足跡盤查計算表 .....	43
表 4-10 竹桿件碳足跡占比 .....	44
表 4-11 竹集成板材成品重量紀錄表 .....	46
表 4-12 碳化平拼竹集成板材碳足跡盤查計算表 .....	46
表 4-13 碳化側拼竹集成板材碳足跡盤查計算表 .....	48
表 4-14 碳化直交竹集成板材碳足跡盤查計算表 .....	49
表 4-15 未碳化平拼竹集成板材碳足跡盤查計算表 .....	51
表 4-16 未碳化側拼竹集成板材碳足跡盤查計算表 .....	52
表 4-17 未碳化直交竹集成板材碳足跡盤查計算表 .....	54
表 4-18 不同加工法下之竹集成板材碳足跡排放量 .....	55
表 4-19 碳化竹集成板材碳足跡占比 .....	56
表 4-20 未碳化竹集成板材碳足跡占比 .....	56
表 4-21 工料碳排分析資料 .....	57
表 4-22 竹構涼亭工料碳排放分析表 .....	58
表 4-23 鋼筋混凝土構涼亭工料碳排放分析表 .....	58
表 4-24 竹集成板材鋪設地坪工料碳排放分析表 .....	59
表 4-25 拋光石英磚鋪設地坪工料碳排放分析表 .....	60
表 4-26 拋光石英磚鋪設隔音地坪工料碳排放分析表 .....	60
表 4-27 硬實木和室高架地板鋪設地坪工料碳排放分析表 .....	60



## 圖次

圖 1-1 建築生命週期各階段碳排與對應之評估系統.....	4
圖 1-2 計畫流程圖.....	6
圖 2-1 南京工業大學一棟建築使用之膠合竹桿件空間桁架.....	12
圖 2-2 木、竹製板材生命週期流程圖.....	18
圖 2-3 印尼峇里島竹子學校.....	20
圖 2-4 越南富國島大世界迎賓中心.....	20
圖 2-5 泰國清邁潘亞登國際學校運動場.....	20
圖 3-1 ISO14067 碳足跡盤查之流程.....	21
圖 3-2 碳足跡盤查流程圖.....	24
圖 3-2 典型原竹竹桿加工製程圖.....	25
圖 3-3 典型竹集成板材之製程圖.....	26
圖 3-4 竹建材製程地圖.....	28
圖 4-1 合作廠商位置圖.....	31
圖 4-2 伐竹作業運輸距離.....	32
圖 4-3 伐竹作業.....	32
圖 4-4 載運情形.....	33
圖 4-5 定長加工及鹼性藥劑前處理之現場情形.....	34
圖 4-6 竹片劈裂加工現場情形.....	36
圖 4-7 竹片雙面成型加工現場情形.....	36
圖 4-8 竹片經人工乾燥及蒸汽熱處理加工之現場情形.....	38
圖 4-9 竹片修邊定寬及砂磨定厚加工之現場情形.....	39
圖 4-10 竹片佈膠作業之現場情形.....	41
圖 4-11 竹片高週波熱壓板加工之現場情形.....	42
圖 4-12 竹桿件製程圖.....	43
圖 4-13 竹桿件成品.....	43
圖 4-14 竹桿件碳排放各階段占比.....	45
圖 4-15 竹集成板材製程圖.....	45
圖 4-16 竹集成板材成品(a)碳化-平拼板；(b)碳化-側拼板；(c)碳化-直交板； (d) 未碳化-平拼板；(e) 未碳化-側拼板；(f) 未碳化-直交板.....	46
圖 4-17 未碳化竹集成板材各階段碳排放量占比.....	57
圖 4-18 竹構涼亭示意圖.....	58
圖 4-19 鋼筋混凝土構涼亭示意圖.....	58
圖 4-20 竹集成板材地坪鋪設示意圖.....	59
圖 4-21 拋光石英磚地坪鋪設示意圖.....	59



## 摘要

**關鍵詞：** 碳足跡、竹建材、碳盤查

### 一、研究緣起

據聯合國環境規劃署的報告，現今的建築產業，消耗了全球約 50% 的能源和材料，產生約 38% 的碳排放，依據農業部林業及自然保育署第四次森林資源調查結果顯示臺灣竹林面積估計約有 18.3 萬公頃，是具有經濟生產規模的可再生性資源，且過去研究亦指出竹林比一般林木更具碳匯效益，且竹子生長快速，具有輕量化及單位體積強度高等優點，為符合環保綠建材之再使用、再循環及低污染等特性。未來如能廣泛應用於建築材料上，可帶動國內竹產業轉型。

### 二、研究方法及過程

本研究透過碳足跡盤查 (Carbon footprint verification, CFV) 方法量化國產竹材加工之碳足跡，以推廣竹構造或以竹子作為裝修建材之應用，解決我國竹林需定期適當砍伐以維持高效之竹林固碳潛力，同時響應國際淨零排放 (Net zero emissions) 議題。內政部建築研究所於 112 年底提出低碳 (低蘊含碳) 建築評估制度 (Low embodied-carbon building rating system, LEBR) 之評估方法並預計 113 年開始實施，其目的在評估建築生命週期中建築材料製造運輸、施工、更新修繕、拆除廢棄等四階段的蘊含碳排評估 (Embodied carbon, EC)。有鑑於竹子作為建材或裝修材相較於傳統建築材料而言，具有碳排放減量效益。本研究以國產竹材為對象，透過碳足跡盤查之方法建立國產竹之初級資材碳排放量數據，建立國產竹建材從搖籃到工地範疇之碳足跡，以與即將上路之低碳建築評估系統應用接軌。

本研究採用最新的 ISO 14067 標準進行碳足跡盤查，碳足跡盤查之範圍與現行低蘊含碳建築評估系統採用之建材初級碳排資料庫之盤查範圍相同，因此可直接應用於 LEBR 評估系統中，且其碳足跡盤查數據結果將可以與其它建材互為比較。國產竹之碳足跡盤查範圍包括原料取得階段、運輸搬運階段、竹材加工製造階段與配送至工地等四階段，藉此建立竹建材的初級碳排資料庫。在各階段碳排放調查方面，為取得碳排放量的一級數據，本研究採用現場耗能數據之量測法，計算從實際原竹開採、運輸、加工廠加工到運輸至工地等過程之碳排放量。

### 三、重要發現

1. 本研究以竹桿件和竹集成板材為碳足跡盤查對象，竹桿件碳足跡盤查結果直徑 13 公分、13 尺長單支竹桿件之碳排放量為 2.348 kgCO<sub>2</sub>e/支。
2. 竹集成板材部分，則依是否板材經碳化處理以及板材拼接方式之不同區分六種成品。每種成品單片尺寸皆為 180cm 長×30cm 寬×1.8cm 厚。其碳足跡盤查結果為單片平均碳排放為 26.889 kgCO<sub>2</sub>e/片，相當於每單位面積之碳排放量為 46.106 kgCO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>。
3. 在減碳效益評估部分，以一假設之休憩涼亭施工為例。比較竹構涼亭(主要以竹桿件綁扎構築)與鋼筋混凝土構造涼亭，在同樣規模尺寸下由其工料分析進行

其各總碳排放量之比較。發現竹構涼亭之總碳排放量為 1,266.357 kgCO<sub>2</sub>e，而 RC 造涼亭為 1,988.170 kgCO<sub>2</sub>e。竹構造涼亭較 RC 造涼亭減碳約 722 kg，相當於減碳 36.31%。然而若考慮生命週期，以竹構造涼亭耐用年限 15 年；RC 構造涼亭耐用年限 60 年計算，則竹構造涼亭生命週期碳排為 3,799.07 kgCO<sub>2</sub>e；RC 構造涼亭生命週期碳排為 1,988.17 kgCO<sub>2</sub>e，則竹構造涼亭反而較 RC 構造涼亭更不具減碳效益，減碳比例為-91.1%。

4. 若以室內地坪裝修為例，比較竹集成板材鋪裝與拋光石英磚鋪裝二種方法之碳排放量。在同樣鋪設 100m<sup>2</sup>之室內地坪，比較其使用之各項工料並算其總碳排放量。竹集成板材構法之總碳排為 4,997 kgCO<sub>2</sub>e；而拋光石英磚構法之總碳排放為 3,323 kgCO<sub>2</sub>e；若考慮隔音問題，以緩衝材水泥砂漿+貼地磚基準值計算總碳排放量為 3,566 kgCO<sub>2</sub>e。竹地板構法反而較傳統磁磚構法增加碳排 1,674 kg，相當於增加 50.38%之碳排放量。其主要原因在於竹集成板材加工過程熱壓與膠合之碳排比重大，加工過程之工序多且複雜，加上竹構地板下方需另外進行防水處理增加防水材使用量，總體而言反而較貼磁磚構法碳排高，不利減碳。若與硬實木和室高架地板相比，增加碳排 3,247kg，相當於增加 185.54%之碳排放量。

#### 四、主要建議事項

根據本研究成果發現，提出下列建議：

建議一：竹建材在建築產業之低碳應用與揭露(立即可行建議)

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：農業部林業及自然保育署

透過本研究發現不同的加工方式，造成竹建材成品之蘊含碳差異大。減碳效益隨竹建材應用處之不同而異。建議未來應以生命週期之角度考量竹建材耐用年限、維護成本等因素，進行更為全面的以生命週期角度評估竹建材之低碳效益。另因應 2050 淨零排放之國家目標及碳管理是當前最主流減碳方式之一，鼓勵廠商對竹建材產品提出產品碳排放資訊揭露文件，可引導竹建材廠商與國家淨零排放政策及國家永續發展目標逐步接軌，並降低產業衝擊。

建議二：針對木竹材料之設計及應用加強宣導推廣(中長期建議)

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：農業部、財團法人台灣建築中心

竹子生長快速，具有輕量化及單位體積強度高優點，且台灣盛產竹材，如能廣泛應用於建築材料上，可帶動國內竹產業升級轉型，目前，竹建材已納入健康及生態綠建材評定範圍，目前亦有竹地板取得綠建材標章，未來，建議強化竹建材設計及應用之宣導推廣，使消費者了解竹建材良好的特性，以提高本土竹建材使用率。

## ABSTRACT

**Keywords:** Carbon Footprint, Bamboo Material, Carbon Footprint Verification

### 1. Research Background

According to a report by the United Nations Environment Programme, the construction industry currently consumes approximately 50% of global energy and materials, while contributing around 38% of global carbon emissions. In Taiwan, the Forestry Bureau's fourth forest resource survey estimates that bamboo forests cover about 183,000 hectares. Previous research has shown that bamboo forests offer greater carbon sequestration benefits compared to other types of forests. Additionally, bamboo grows rapidly, is lightweight, and has high strength per unit volume, making it ideal for sustainable green building materials that are reusable, recyclable, and low in pollution.

### 2. Research Methods and Process

This study uses Carbon Footprint Verification (CFV) to quantify the carbon footprint of domestically produced bamboo. The goal is to address the need for periodic bamboo harvesting to maintain high carbon sequestration efficiency in Taiwan's bamboo forests, while also aligning with global net-zero emissions targets. In late 2023, the Architectural Building Research Institute introduced the Low Embodied-Carbon Building Rating System (LEBR). This system evaluates the carbon footprint across building's lifecycle: material production and transportation, construction, maintenance, and demolition. Bamboo, compared to traditional construction materials, potentially offers reductions in carbon emissions.

This study focuses on domestically produced bamboo, using carbon footprint auditing to collect carbon emission data of primary bamboo materials. This data will cover from cradle to construction site. The carbon footprint audit follows the latest ISO 14067 standards, making the results directly applicable to the LEBR framework. The audit covers four stages: raw material acquisition, transportation, bamboo processing, and delivery to construction sites, establishing a database of carbon emissions for bamboo materials. To ensure accurate data, the study measures energy consumption during each stage, calculating carbon emissions from bamboo harvesting, transportation, processing, and delivery to construction sites.

### 3. Key Findings

- (1) The study analyzed the carbon footprint of bamboo poles and laminated bamboo boards. For bamboo poles, a single piece with a diameter of 13 cm and a length of 13 feet has a carbon emission of 2.348 kgCO<sub>2e</sub> per pole.

- (2) Regarding laminated bamboo boards, six product types were evaluated based on whether the boards were carbonized and the method of board assembly. Each board measures 180 cm in length, 30 cm in width, and 1.8 cm in thickness. The average carbon emission per board is 26.889 kgCO<sub>2</sub>e, which corresponds to a carbon footprint of 46.106 kgCO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>.
- (3) For carbon reduction evaluation, a hypothetical construction of a bamboo pavilion was compared with a reinforced concrete (RC) pavilion of the same size. The total carbon emissions for the bamboo pavilion amounted to 1,266.357 kgCO<sub>2</sub>e, while the RC pavilion generated 1,988.170 kgCO<sub>2</sub>e. The bamboo pavilion resulted in approximately 650 kg less carbon emissions, representing a reduction of 36.31%.
- (4) In a comparison of flooring materials for interior renovation, the study evaluated the carbon emissions of bamboo laminated flooring versus polished tile. For a 100 m<sup>2</sup> indoor floor, the bamboo flooring method produced a total carbon emission of 4,997 kgCO<sub>2</sub>e, while the tile method generated 3,323 kgCO<sub>2</sub>e. The bamboo flooring method emitted 1,674 kg more CO<sub>2</sub>, representing a 50.38% increase in emissions compared to traditional tile flooring.

#### **4. Key Recommendations**

Recommendation 1: Low-Carbon Applications and Carbon Disclosure of Bamboo Materials in the Construction Industry (Immediate feasible recommendation)

Organizing Institution: Architectural Building Research Institute, (MOI)

Collaborating Institution: Forestry and Nature Conservation Agency, Ministry of Agriculture

Recommendation 2: Strengthen Promotion and Advocacy for the Design and Application of Wood and Bamboo Materials (Mid- to long-term recommendation)

Organizing Institution: Architectural Building Research Institute, (MOI)

Collaborating Institution: Ministry of Agriculture, Taiwan Architecture & Building Center

## 第一章 緒論

### 第一節 研究緣起與背景

據聯合國環境規劃署的報告，現今的建築產業，消耗了全球約 50% 的能源和材料，產生約 38% 的碳排放，而目前台灣竹林面積估計約有 18 萬公頃以上，是具有經濟生產規模的可再生性資源，且過去研究亦指出竹林比一般林木更具碳匯效益，且竹子生長快速，具有輕量化及單位體積強度高等優點，未來如能廣泛應用於建築材料上，可帶動國內竹產業轉型。

依據聯合國農糧組織 (FAO) 和國際竹藤聯盟 (INBAR) 調查，全球竹林面積估計超過 3,000 萬公頃，總計有超過 1,600 種竹子，主要分布在熱帶、亞熱帶和暖溫帶地區，其中大約有 85% 之竹林分布在亞洲，且多數為發展中國家(行政院農業委員會 2022)。我國各縣市森林面積之統計如表 1-1 所示。依據第四次森林資源調查結果，臺灣地區林地之竹林面積約 18 萬 3 千餘公頃，占森林覆蓋面積 8%，推估竹材的蘊藏量約有 15.8 億支。屬農業部林業署轄管國有林(含租地造林地)竹林面積約 7.5 萬公頃(租地約 2.8 萬公頃)、原民會轄管土地約 1.2 萬公頃、私有林約 3.2 萬公頃、未登錄地約 5 萬公頃，其他國產署、大學實驗林竹林約 1 萬公頃(行政院農業委員會 2022)。竹林主要分布於台南、高雄、新竹、苗栗、南投、嘉義等縣市。各縣市中，以嘉義縣 25,971 公頃 (14.2%) 最多，南投縣 23,952 公頃 (13.1%) 次之，其他依次為高雄市 23,584 公頃 (12.9%)、臺南市 23,307 公頃 (12.7%)、苗栗縣 18,123 公頃 (9.9%)、新竹縣 15,758 公頃 (8.6%)。

為振興我國竹產業發展，活化偏鄉經濟，行政院於 110 年 10 月 4 日核定執行「新興竹產業發展綱要」計畫，以民國 111 至 120 年共 10 年期為推動期程，經跨部會統籌，透過一級產業端 (生產端)、二級產業端 (加工端)、三級產業端 (利用、行銷、推廣)、技術教育端及法規端此五個面向，規劃 10 年期程之整體竹產業發展，並以短期-振興 (111-114 年)、中期-永續 (115-118 年)、長期-卓越 (116-120 年) 為三階段發展主題，重新串聯從生產、加工、研發應用到銷售的整體產業鏈。有鑑於為了推廣國產竹建材，內政部國土管理署亦刻正研擬「竹構造建築物設計及施工技術規範(草案)」內容包括：結構設計觀念與原則、材料、結構分析、構材接合部、耐久性與維護計畫及建築物防火等九個章節，以及常見竹種力學性質、竹接頭的範例與分類等內容。將有助於我國建築設計業進行竹建材應用之參考。此外，除了原竹可作為建材使用或加工成竹集成版作為建築板材應用之外，世界上已有許多國家利用竹材加工剩餘物做為生質燃料，而我國能源署也提供躉購費率獎勵措施，近年已新增「農業廢棄物」類別，業者只要符合「再生能源發電設備設置管理辦法」規定，利用竹材廢棄物發電，就可申請躉購費率每度 5.1407 元，充分利用竹林廢棄物。

有鑑於竹子作為建材或裝修材相較於傳統建築材料而言，具有節能減碳效益，但國內尚無系統性之研究，本研究將蒐集國內外相關文獻，並調查國內主要之竹製建材產品，嘗試建立本土竹建材之碳足跡盤查方法並界定範疇，再利用該盤查方法，以至少二項以上竹建材為對象，建立國產竹建材從搖籃到工地範疇之碳足跡數據，並透過量化國產竹

材之碳足跡，推廣竹構造或竹建材之應用。此外，國際上及國內都大力推動淨零轉型，本研究將比較竹建材及其它材質建材之碳足跡，並評估竹建材及竹構造對於淨零建築之減碳效益，以利契合淨零轉型政策。

表 1-1 我國各縣市各森林面積之總面積與占比

	總計 (公頃)	針葉樹林 (公頃)	針闊葉混淆林 (公頃)	闊葉樹林 (公頃)	竹林 (公頃)
<b>總計</b>	<b>2,197,090</b>	<b>299,779</b>	<b>171,954</b>	<b>1,542,026</b>	<b>183,330</b>
<b>占比</b>	<b>100%</b>	<b>14%</b>	<b>8%</b>	<b>70%</b>	<b>8%</b>
<b>臺灣地區</b>	<b>2,189,245</b>	<b>299,650</b>	<b>171,954</b>	<b>1,534,311</b>	<b>183,330</b>
新北市	155,483	7,218	8,623	128,080	11,562
臺北市	11,491	40	42	6,516	4,892
桃園市	47,134	2,268	2,061	33,311	9,495
臺中市	113,963	38,151	14,050	57,403	4,359
臺南市	54,148	124	7	30,711	23,307
高雄市	170,523	25,281	9,404	112,254	23,584
宜蘭縣	168,384	18,944	14,753	132,485	2,203
新竹縣	104,211	17,180	9,928	61,345	15,758
苗栗縣	125,946	19,361	9,134	79,327	18,123
彰化縣	10,104	31	0	8,948	1,125
南投縣	303,186	70,030	32,032	177,173	23,952
雲林縣	12,609	97	33	7,701	4,778
嘉義縣	79,888	5,382	2,146	46,390	25,971
屏東縣	156,194	1,173	1,045	152,457	1,518
臺東縣	286,984	25,015	17,854	240,306	3,808
花蓮縣	372,781	69,312	50,472	245,183	7,813
澎湖縣	3,242	9	25	3,208	-
基隆市	9,395	22	159	8,501	713
新竹市	2,804	1	-	2,548	255
嘉義市	773	11	186	463	113
<b>金馬地區</b>	<b>7,845</b>	<b>129</b>	<b>-</b>	<b>7,716</b>	<b>-</b>
金門縣	6,452	129	-	6,323	-
連江縣	1,393	-	-	1,393	-

(資料來源：行政院農業委員會, 2022)

根據民國 104 年林業署第四次全國森林資源調查統計資料，全台森林有 219.7 萬公頃，竹子占了 8.3%，台灣竹林栽種面積約為 18 萬 3 千公頃，蘊藏竹材量至少 15.8 億支，可立即生產區約 7.7 萬公頃，是具有經濟生產規模的可再生性資源。過去研究亦指出竹林比一般林木更具碳匯效益，但竹子生命週期短，竹材需要定期更新利用才能發揮固碳和其價值。以中南部以蔴竹 (*Bambusa blumeana*)、麻竹 (*Dendrocalamus latiflorus*)、長枝竹 (*Bambusa dolichoclada*) 為主，而桃竹苗地區則以較高經濟價值的桂竹 (*Phyllostachys makinoi*) 與綠竹 (*Bambusa oldhamii*) 為主，資源相當豐富。原住民保留地占整體竹材產量的七到八成，但在 2016 年實施禁伐補償條例，其規定竹、木之覆蓋率七成以上每年可領三萬元補償金。由於竹農擔心領不到補償金而不願進行疏伐，導致原住民保留地內之竹林產量銳減。一般總認為伐木是消耗資源，事實上不論樹木或竹林，都必須適當疏伐以維持生長空間，才能更有效率地進行固碳。台灣的竹材，尤其是桂竹和孟宗竹，具有較高的固碳率。這使得竹材成為一種具有環保價值的材料。竹材的

應用不僅限於建築材料，還可用於製造各種生活用品，如層積竹材料，這種材料的韌性強，可根據需求定制。臺灣地區竹類共有 15 屬、40 種、3 變種及 10 栽培種，包括北部地區之桂竹，中部地區之麻竹、孟宗竹及南部地區之蔴竹、長枝竹。主要用途為竹編用具、竹工藝品、竹柱、竹蓆、竹篾、竹筏及竹家具等。研究指出，在竹材生產過程中，碳化是碳排放量最高的製程，其次是防黴、防腐、乾燥處理與塗膠。

然而，作為國產竹材主力的桂竹與綠竹，自 2016 年開始竹材產量則連年下滑，而孟宗竹製成的集成材可用於建築裝潢材料，是建築用竹材之大宗。國產竹材之生產量從 2009 年每年生產 325.1 萬支，到 2020 年時僅剩 54.3 萬支之產量，竹材來源的衰減幅度及對於竹產業加工業者所帶來的衝擊可見一般。根據林試所之研究，孟宗竹每公頃每年固碳量可以高達 47 噸，比木本植物高出三到六倍；而桂竹每公頃固碳 22 噸/年，僅次於孟宗竹。由於竹子固碳效果較一般林木佳，且生長快速四年即可成材利用，在固碳上扮演著重要角色。近年來由於淨零排放議題高漲，而竹子具有生長快速、輪伐期短等特點，做為替代木材的使用上是具有發展潛能的綠色材料。在國產竹材式微產業逐漸消逝下，林業署於 2017 年喊出「國產材元年」的口號，其中一環便是振興竹產業。而於 2021 年底政府提出「新興竹產業發展綱要計畫」，以振興國產竹之產業鏈。

本研究透過碳盤查方法量化國產竹材之碳足跡，以推廣竹構造或以竹子作為裝修建材之應用，解決我國竹林需定期適當砍伐以維持高效之竹林固碳潛力，同時響應國際淨零排放議題。內政部建築研究所於 112 年底提出低碳建築(低蘊含碳)之評估方法並預計 113 年開始實施，其目的在評估建築生命週期中建築材料製造運輸、施工、更新修繕、拆除廢棄等四階段的蘊含碳排評估。有鑑於竹子作為建材或裝修材相較於傳統建築材料而言，具有碳排放減量效益。本研究以國產竹材為對象，透過碳足跡排查之方法建立國產竹之初級資材碳排放量數據，建立國產竹建材從搖籃到工地範疇之碳足跡，以與即將上路之低碳建築評估系統應用接軌。

## 第二節 本研究計畫之重要性

從建築物整個生命週期 (Life cycle assessment, LCA) 的碳足跡來看，其包含了建築物能源使用部分的「使用碳排」以及建材製造運輸與施工的「蘊含碳排」。所謂的「蘊含碳排(Embodied Carbon, EC)」，其意義為內含於建築物生命週期過程，包括由建材的原始資材開採、運輸、工廠生產、運至工地、現場施工、更新維護、拆除廢棄等過程的碳排放量(林憲德 2019)。依據 2022 年國際能源署的報告顯示，全球溫室氣體排放，建築部門約占 37%，其中建築物的「使用碳排」約占 28%，而建築物的「蘊含碳排」約占 9%。為了掌握此全生命週期評估的國際趨勢，內政部建築研究所針對「使用碳排」部分採用建築能效評估系統 BERS (Building Efficiency Rating System) 作為評估與標示之依據，另外對於「蘊含碳排」部分，則採用低碳建築評估系統 LEBR (Low Embodied-carbon Building Rating System) 作為評估與標示之依據，以推動淨零建築政策。為了進行低碳建築中之蘊含碳排計算所需，內政部建築研究所於 2019 年建置了「建築碳足跡資料庫系統」ABRI-LCC (Life Cycle Carbon database of Architecture & Building Research Institute)，做為我國建築產業專用的碳足跡評估之國家標準資料庫。

依據 EN15978 (BSI 2011)建築工程的永續性-建築環境性能評估計算方法，對建築物蘊含碳排 EC 之評估項目如圖 1-1 所示，其中製造運輸、施工、更新修繕、拆除廢棄等四階段為其建議的評估範疇，但其中第五階段的建材回收再利用項目為選擇性、不強制評估的額外優惠計算項目。本計畫中有關國產竹之碳足跡計算，將依 EN15978 所定義之「搖籃到工地」之範疇即為圖中的 A1 到 A4 各項碳排之盤查內容。這包括了原物料、原料運輸、加工製造、資材運輸到工地等四個階段之碳排資料蒐集與統計。本計畫所欲建立者即為竹建材之「初級資材碳足跡 P-LCC」，以與內政部建築研究所之 ABRI-LCC 資料庫定義同軌，以同步作為未來建築碳排計算上之應用。

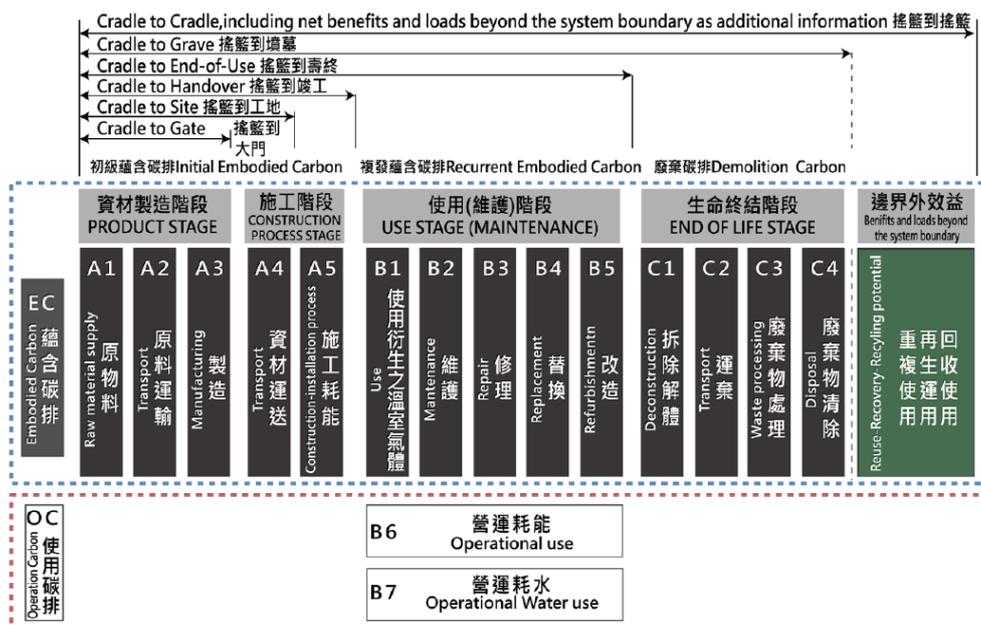


圖 1-1 建築生命週期各階段碳排與對應之評估系統  
(資料來源：林憲德,2023)

### 第三節 研究內容

本研究透過碳盤查方法量化國產竹材之碳足跡，以推廣竹構造或以竹子作為裝修建材之應用，解決我國竹林需定期適當砍伐以維持高效之竹林固碳潛力，同時響應國際淨零排放議題。內政部建築研究所於 112 年底提出低碳建築(低蘊含碳)之評估方法並預計 113 年開始實施，其目的在評估建築生命週期中建築材料製造運輸、施工、更新修繕、拆除廢棄等四階段的蘊含碳排評估。有鑑於竹子作為建材或裝修材相較於傳統建築材料而言，具有碳排放減量效益。本研究以國產竹材為對象，透過碳足跡排查之方法建立國產竹之初級資材碳排放量數據，建立國產竹建材從搖籃到工地範疇之碳足跡，以與即將上路之低碳建築評估系統應用接軌。

建材生產之碳排與當地的能源結構與工業能源效率密切相關，不同國家的能源結構不同，縱使具有相同的產品製程，其換算後之碳排放數據也會不同。因此在進行建築產業之碳排評估上將不能直接引用國際上之碳排數據庫，而需要使用本土之數據支持下，

其建築上之碳排量化評估結果始具公信力。國際間常見的建材碳足跡資料庫有以下三種盤查統計法(林憲德 2019)：

- (1) 生產線盤查法，又稱 PB 法(Process Based Method)
- (2) 產業關連表統計法，又稱 IO 法(Input-Output Method)
- (3) 複合法(Hybrid Method)：綜合上述二法間折衷之方法。

歐洲技術委員會在 2011 年的 CEN/TC350 標準中只推薦使用生產線盤查法，因為此法是由下至上的算法，可瞭解建築物由每一與生命週期碳排放衝擊相關的產品與製程組合。因此，本研究將優先採用生產線盤查法進行國產竹每一階段之碳盤查，研究採用方法原因說明如下。

本計畫參考 ISO 14067 以及我國環境部所認定之木竹製板材碳足跡產品類別規則，同時考量為了與現行低碳建築評估系統之應用接軌。建議國產竹之碳足跡盤查範疇應分為原料取得階段(包括竹子生長期間之固碳量)、原料運輸階段、加工製造階段與配送至工地等四階段，以建立竹建材的初級碳排資料庫。依此採用與其他建材碳足跡盤查相同方法與範疇所建立之各類國產竹製建材，其碳足跡數據結果始可與其他建材互為比較。

由於來自中國大量廉價之竹製產品，使得我國竹產業逐漸沒落，竹材加工廠逐漸消逝，可能導致不易尋找可作為碳足跡盤查之對象。由於本計畫需求為至少完成二種竹建材或構造之碳足跡盤查，倘尋無竹材加工廠可茲應用生產現直接調查方法以獲得第一級之耗能數據時，本研究擬將透過查找相關文獻之研究數據，以第二級之數據進行反推其潛在之碳足跡。本研究有關碳排放量一級數據之取得，可能採用現場耗能數據之量測法。

● 本計畫之研究內容如下：

1. 蒐集竹材作為建築材料之相關文獻及案例。
2. 彙整國產竹材應用於建築產業之產品與應用案例。
3. 建立本土竹建材之碳足跡盤查方法。
4. 應用碳足跡盤查方法，量化國產竹材之初級資材碳排數據。
5. 與其它材質建材比較，評估其減碳效益。

● 預期之成果為：

1. 完成竹建材應用及碳足跡相關文獻蒐集及整理。
2. 完成本土竹建材從搖籃到工地範疇之碳足跡盤查方法。
3. 完成至少2項以上國內主要竹建材或竹構造之碳盤查。
4. 完成竹建材或竹構造減碳效益評估。

整個計畫之流程圖如圖 1-2 所示。

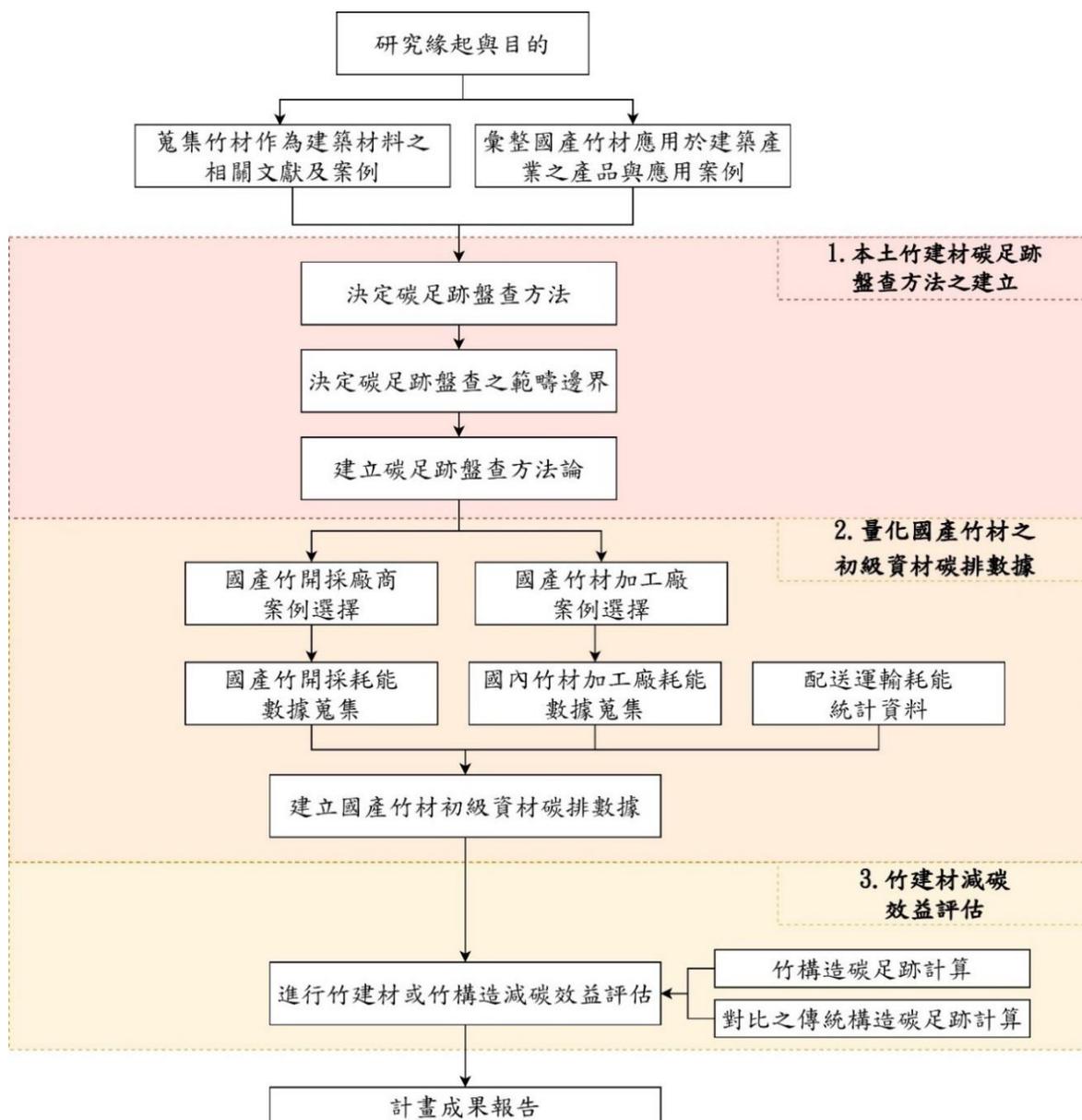


圖 1-2 計畫流程圖  
(資料來源：本研究整理)

## 第二章 國內外有關本案之文獻與案例

### 第一節 竹林碳匯研究近況

有關竹林碳匯研究文獻最早 Tripathi and Singh 對印度熱帶地區竹種 (*D. strictus*) 的未成熟及成熟竹林進行碳儲量估算及分佈和竹林年淨碳匯量的研究 (Tripathi and Singh 1996)。直到近 10 年來，國際不斷提升對於竹林碳匯的重視程度。目前，美國及許多亞洲國家已有不少學者基於生物學方法，對單位面積竹林固碳能力和立竹碳儲量進行了研究，提出了竹林總生物量、地上生物量、地下生物量、稈高的異速生長等模型 (Vogtländer, van der Velden and van der Lugt 2014, 費世民 2021, Gan, Chen et al. 2022)，同時亦發展出超過 30 種竹種的地上部分碳生物量計算模型，並著重於竹林生態系的固碳能力 (朱安明, 洪奕丰 et al. 2023, 濮佳莉, 王鑫 et al. 2023)。然而相關研究的方法及模型，並未對枯落物、土壤碳儲量進行有系統的研究，並未針對竹林培育及竹產品加工等對竹林種植面積與結構及其對應碳匯能力的影響效應進行評估。竹林的經營與碳匯評估方法與林木不同，但卻常與其它不同類型的森林進行討論與比較，聯合國糧農組織於 2015 年全球森林資源評估中亦未將竹林覆蓋率進行單獨說明，亦無相關章節呈現各國的竹林覆蓋比例。因此若要藉由竹材碳匯評估來具體評估竹材的發展潛加則更顯不易。

我國為鋪墊竹林碳匯以利將來碳權計算，建立竹林固碳能力及碳匯方法學，已委託農業部林業試驗所完成孟宗竹、麻竹、刺竹及桂竹之碳轉換係數四種。碳轉換係數(carbon conversion factor, CCF)係植物之比重(bulk density, BD)與碳含量百分比(percent carbon content, PCC)之相乘積，是估算林地碳吸存量之重要係數。該研究結果顯示，碳轉換係數在不同竹種、不同立地及竹桿位置間具有顯著差異。碳轉換係數在四種竹材之竹桿間之變化均呈現竹桿上段>中段>下段之相同趨勢。四種竹種單支平均碳轉換係數從大至小分別為桂竹 0.357、孟宗竹 0.318、刺竹 0.281 及麻竹 0.234，此研究結果有助於提昇臺灣竹林碳吸存量估計之準確性(林裕仁, 王秋嫻 and Sara 2011)。

竹材具有許多優點，例如：質量輕、低汙染、可回收、生產週期短等，是容易取得且環保之綠建材。相較於其他天然建材，生長與循環速度快，竹材只需 4 到 6 年就能成材，是利用性極高的資源。竹子是生長快速、再生性強，碳吸存的能力比木材還強，在實現聯合國永續發展目標 (簡稱 SDGs) 的過程中，可以扮演重要角色。依據農委會林業署第四次森林資源調查資料，以地面樣區調查結果估算森林之碳儲存量，我國森林總碳儲存量轉換為 CO<sub>2</sub> 儲存當量，約為 7 億 5 千 4 百萬公噸，其中以闊葉林型最高，約佔 63%；針葉樹林型次之，佔 21%；竹林、竹木混淆林則佔 3.4%(約 2,500 萬公噸)。

李榮恩等人所著文章指出，因竹桿為中空有節之構造較難比照實心的樹木，所以竹林碳匯的研究並非如同木材採用材積估算，而是直接測定其生物量，再以異速生長模式及轉換係數來估算。而據其整理之相關文獻，過往有關竹林碳匯，

孟宗竹及桂竹每公頃年平均碳吸存量分別為 3.80-12.22 及 3.26-9.96 (Mg ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>) (李隆恩, 林俊成 et al. 2023)。

傳統竹林經營著重於經濟性生產,以竹材及竹筍為主要經營目標 (林文鎮、江濤, 1963; 呂錦明等, 1982; 李久先, 1983; 高毓斌, 1987; 顏添明等 2003a; 2003b; Lin, 2011)。隨著臺灣經濟發展、工資上揚及竹類相關替代品產生, 整個竹產業逐漸勢微 (顏添明, 2011; Lin, 2011)。近年來由於國際間重視碳吸存的議題, 竹林因生長快速具有高碳吸存的潛力, 竹林碳吸存能力之評估也變得相當重要 (Yen et al., 2010; Yen and Lee, 2011)。國際上多以林木的「現存量」加以換算出其「碳貯存量」。一般林木各部位 (幹枝葉) 碳貯存量大多為 45 ~48%, 約接近 50%, 所以貯存量可視為現存量的一半。以台灣孟宗竹竹林的現存量推估, 大約為每公頃 70~100 公噸, 因此換算碳貯存量則為每公頃約 35~50 公噸。碳吸存量計算是以二氧化碳與碳分子量的比值換算而來, 貯存量需再乘上 44/12 而得, 因此每公頃能吸收 128~183 公噸二氧化碳, 以孟宗竹林碳吸存效果最大。王仁等 (王仁, 陳財輝 et al. 2010) 之研究顯示孟宗竹林分於適當的生長條件下, 其碳吸存的速率為每年 5.4 Mg/ha, 即碳吸存量為每年每公頃 5.4 公噸, 換算為二氧化碳吸存量為  $5.4 \times 44/12 = 19.8$  公噸。為新植造林人工闊葉樹林型每年每公頃的二氧化碳吸存量為 8.52 公噸之 2.3 倍。

全臺林地竹林面積為 18.3 萬公頃, 初估具生產潛力區位之竹林約 7.7 萬公頃。竹材碳吸存效益, 會隨即經營與否而不同, 以有在經營之孟宗竹林為代表作為估算, 雖目前採伐量尚待回復提升, 若以 5,000 公頃為採伐目標, 竹材採伐後一年內即可再發竹成林, 二氧化碳吸存量估計於 111-114 年之竹產業振興階段期間共為 99,000 公噸 (每年 24,750 公噸), 碳匯效益為 1.34 億元。

## 第二節 竹製產品全生命週期碳循環過程

產品碳足跡評估 (Product carbon footprint) 已於許多國家開始實施, 對於產品出口到當地的產品亦需提出產品碳足跡資訊。為積極應對全球氣候變化, 減少溫室氣體的排放, 英美及日本等已對於企業及部分產品進行碳足跡的評估, 並以碳標籤的形式呈現產品的碳足跡, 使消費者可直接取得產品的碳足跡資訊。目前國內外竹產品碳足跡的研究較少。根據 Pablo (Van der Lugt 2012) 及 Gu 等人 (Gu, Zhou et al. 2019) 研究指出孟宗竹於不同的加工製程中, 如展開、整合、重組方式下最終的碳轉移儲存率及竹製品最終碳足跡的差異很大。根據《商品及服務在生命週期內的溫室氣體排放評估規範》內容, 英國標準協會 PAS 2050 規定, 碳足跡計測應從原料的運輸開始計算, 由竹製品從原料、生產到市場端前之各環節碳排放和碳轉移的數據的收集, 需精確計算碳足跡的測值。

一般而言, 竹產品全生命週期碳循環包括竹林培育 (種植、管理、經營)、原料生產 (竹材或竹筍採集運輸及倉儲)、產品加工利用 (加工過程中各工序)、銷售使用及廢棄處置 (分解作用) 等 5 個主要階段, 其中包括: 碳固定、累積、儲存、封存及各環節的直接或間接碳排放。Fei 表示竹林培育為一個碳累積及儲

存階段，包括：種植、管理、經營等活動中直接或間接碳排放(費世民 2021)。竹材生產與營林企業及竹產品加工業者的碳轉移環節做連結，包含竹材或竹筍採收、初級加工、運輸、倉儲過程中直接或間接碳排放；產品加工利用是碳封存環節，將碳長期固定封存在產品中，還包含各項加工、產品加工及副產品利用等整個過程中各工序的直接或間接碳排放；產品進入消費者使用階段之後，碳即固定於各竹產品中，如家具、建築、日用製品、紙品等，隨著使用年限的增加，將會延長碳封存的時間，直到廢棄處置為止，分解釋放 CO<sub>2</sub>，重新回到大氣中。透過竹產品全生命週期碳循環過程的測定分析，測量竹林竹材、伐竹、竹加工等竹業各環節中 CO<sub>2</sub> 的吸收排放過程的碳足跡，為全面提升竹林碳匯功能、正確評估竹加工企業環保要求及加快推進竹產業高品質發展，促進竹林碳匯交易、實行竹產品或企業碳標籤制度。

### 第三節 竹製產品全生命週期碳足跡測定架構

竹產品全生命週期各階段的基礎資料進行收集、測定即為全生命週期分析的依據，透過資料收集、測定，進行竹產品全生命週期碳循環過程碳足跡計算。再者，竹產業不同於其它林產業，竹林經採伐利用後可自我更新，不需要透過再造林更新，竹林生長處於生長動態平衡中，可以持續吸收固定碳、累積儲存碳，持續提升碳匯作用；竹產品所利用的竹原料佔比不大，透過竹產品使用，可實現長時間的碳封存。目前尚未見竹產品全生命週期碳循環測定研究，由於竹產品銷售使用、廢棄階段碳排放時間很長，其碳足跡很難計測，在實際計算測定中，從竹產品角度，一般由原料到產品進行測量碳足跡，估算出竹產品生產過程的碳儲存與排放；從竹林生態系角度，一般由栽植到產品進行計測碳足跡，估算出竹產品全生命週期的碳足跡，如表 2-1。

表 2-1 五個竹產品全生命週期各階段的碳足跡及內容

階段	類別	內容
竹林培育階段	碳吸收累積	發筍、生長發育、新竹成竹數
	碳儲存	竹林結構、立竹度、年齡結構、各部位生物量；枯枝落葉生物量；土壤有機碳儲量
	碳排放	凋落物碳儲量、分解時間與釋放量；土壤呼吸碳排放量；種植、管理、經營活動的人工、動力、水肥等外部能耗、材料消耗所產生的碳排放量。
原料生產階段	碳轉移	採伐量或採筍量及其生物量
	碳歸還	枝葉的採伐或採筍剩餘物、初加工剩餘物及其生物量
	碳排放	竹材或竹筍採集、初步加工、運輸、倉儲及剩餘物利用活動的人工、動力等外部能耗、材料消耗所產生的碳排放量。
產品加工利用階段	碳封存	竹產品、副產品生物量
	碳歸還或留存	加工剩餘物及其生物量

	碳排放	單元加工、產品加工、副產品利用等加工過程中各製程所產生的人工、動力、耗材等外部能耗、材料消耗所產生的碳排放量。
銷售使用階段	碳封存	竹產品、副產品生物量
	碳排放	有企業到銷售市場的運輸、人工等外部能耗所產生的碳排放量。
廢棄處理階段	碳釋放	廢棄產品碳儲量；分解時間與釋放量。

(資料來源：本研究整理)

有關竹產品全生命週期碳循環估算方面之研究整理如下：

● 竹林碳彙估算

根據劉應芳研究指出四川孟宗竹林平均碳儲量為 98.5140 t/hm<sup>2</sup> 平均生物量為 49.1393 t/hm<sup>2</sup>，可計算出孟宗竹林靜態碳儲量為 2.005 kg/kg，竹林碳匯量為 7.3517 kgCO<sub>2</sub>eq/kg(劉應芳 2012)。王勇軍研究結果顯示四川慈竹林生態系總碳儲量為 135.95 t/hm<sup>2</sup>，慈竹林生物量為 111.70 t/hm<sup>2</sup>，可計算孟宗竹林靜態碳儲量為 1.2171kg/kg，竹林碳匯量為 4.4627 kgCO<sub>2</sub>eq/kg。但竹林培育過程中水肥使用等碳排放缺乏測量數據，無法估算，未扣除(王勇軍, 黃從德 and 王憲帥 2009)。

● 竹材碳轉移估算

據劉應芳研究結果顯示孟宗竹林生物量中，竹材生物量 24.57 t/hm<sup>2</sup> (依竹材佔比 50%計)，竹材碳累積 12.28 t/hm<sup>2</sup> (竹材碳密度 0.5 )，那麼以年均利用率 30%計，每年碳轉移達 3.6854 t/hm<sup>2</sup>(劉應芳 2012)。由此可得知孟宗竹林竹材存留的碳吸收儲存 8.60 t/hm<sup>2</sup>。而後續竹林 2~3 年自我更新，又可恢復到原有竹材碳累積 12.28 t/hm<sup>2</sup>，說明竹林碳累積儲存量並沒有減少，此為與其它森林不同之處。從竹林角度，以四川孟宗竹林碳匯 7.35 kgCO<sub>2</sub>eq/kg 計，減去竹材碳轉移和加工過程碳排放，1 kg 竹展開砧板的全生命週期碳足跡為 5.34 kgCO<sub>2</sub>eq/kg，即竹林可儲存 CO<sub>2</sub> 達 5.34 kg/kg，顯示竹林具有巨大的碳儲存能力。但這個數據可能偏大，主要由於沒有計算竹林培育階段碳排放。

● 竹產品生產碳足跡估算

週鵬飛等人表示從竹材角度，量測 1 塊竹集成板乾質量為 1.0430 kg，再乘以竹材含碳率 0.5%後可得到 1 塊竹集成板的碳儲量，再轉化為儲存 CO<sub>2</sub> 當量為： $M=1.0430 \times 0.5042 \times 44/12=1.9283$  kg，即 1 kg 竹集成板碳儲存為 1.8488 kgCO<sub>2</sub> 當量；1 kg 竹集成板的碳足跡為 -0.1614 kgCO<sub>2</sub> 當量；1 kg 竹集成板的碳足跡為 -0.1614 kgCO<sub>2</sub> 當量；竹集成板板產品碳足跡為 1.6874 kgCO<sub>2</sub> 當量 (意即可封存約 1.6874 kg 的 CO<sub>2</sub>) (週鵬飛, 顧蕾 and 彭維亮 2014)。

● 竹產品全生命週期碳足跡估算

於中國大陸有關竹家具、竹製品主要以孟宗竹材為主，由相關研究結果可知木家具、木製品加工過程 (與竹家具、竹製品加工過程基本一致) 的碳足跡為 -0.4777 kgCO<sub>2</sub>eq/kg (碳排放)，碳轉移 -1.8488 kgCO<sub>2</sub>eq/kg，可推導出 1 kg 竹家具、竹製品的全生命週期碳足跡為 5.0252 kgCO<sub>2</sub> 當量 (竹林碳儲存 5.0252 kgCO<sub>2</sub>/kg)。儘管竹產品全生命週期碳足跡數據很缺乏，參照木材產品相關數據

還不夠科學嚴謹，同時各竹種研究的有限性和碳生物量計算的不確定性，限制了絕大多數竹種碳儲量的可靠評估；但透過估算可以得知竹產業是綠色碳匯產業，竹林具有強大的固碳能力，同時具有提供水源涵養、固土保肥、食物和建築材料等人類關鍵生態系服務的能力。

● 提升竹製品碳增匯減排效應

竹類植物一次種植，永續利用，生長迅速，碳積累持續，可以每年採伐，是一種快速再生資源，能夠比天然林和人工林提供更多的生物量；一旦長成，每年都可以選擇性收穫，並用於製造各種耐用產品，並在產品使用壽命期間進行碳封存。因此，竹產品碳增匯減量效應提昇路徑主要在三個方面：

一是竹林可以持續累積儲存碳，為一個巨大的碳匯；竹林經過培育、經營、採伐、儲存、使用，促進竹林健康生長，持續獲得更多竹原料，確保竹林碳儲量的持續成長，發揮碳增匯作用，並透過碳匯交易，滿足企業、地區綠色發展的碳「減排」目標需求。

二是竹產品的使用可長期封存碳，具有碳排放滯後效應，延緩碳排放；透過擴大產量、提升質量，提高產品碳封存體量，延長產品壽命，增加產品碳封存時間；還可取代木材、混凝土及鋼材等高排放材料或替代煤、石油等能源、化學材料，發揮替代碳減量效應，可直接減少工業及能源部門的碳排放，達到碳減量目標要求。近年來，竹子利用已突破傳統領域，竹產品已形成各種領域的產品應用，廣泛應用於建築、裝飾、家具、造紙、包裝、運輸、醫藥、食品、紡織、化學、電子、國防、航太等多個領域。

MOSO(孟宗竹)的永續發展負責人帕布洛·範·德洛赫特 (Pablo van der Lugt) (2017) 在《Booming Bamboo》中說明竹子如何在減緩氣候變遷以及透過重新造林恢復生態系統方面發揮重要作用，探討竹建築材料、纖維材料等工程竹材料在建築和設計方面的最具創新性的應用。對歐洲工業用竹製品進行的研究表明，在其整個生命週期中，它們的生態成本較低甚至為負，甚至超過了森林管理委員會 (The Forest Stewardship Council) 認證的硬木，可用作鋼和水泥的替代品 (Van Der Lugt 2017)。

三是減少竹產品生產全過程碳排放。在竹林培育階段，強化高效培育、密集經營，減少人工、動力、水肥等外部能耗、材料消耗；在原料生產階段，強化機械化採伐、就地初加工、標準化倉儲，減少人工、動力等外部能耗、材料消耗；在產品加工利用階段，強化機械化智慧化精深加工、高效綜合利用，減少各工序所產生的人工、動力、耗材等外部能耗、材料消耗，從而達到最大程度地減少碳排放。在廢棄處理階段，強化廢棄物再利用，延長使用期限，延緩碳釋放時間。

此外，一篇位於中國之研究 (Xu, Xu et al. 2022) 量化竹建材的二氧化碳排放量及其固碳效果，以竹建材之各生產階段分別評估其碳排放量，其結果顯示相較於各生產階段，竹子於種植階段有最大的固碳量；而由於在竹建材之生產加工過程需要進行碳化、防霉、防腐、乾燥處理與膠合處理，使得其生產階段的碳排放量為最高。該研究表明一立方公尺材積的竹建材可固碳 249.92 公斤的二氧化碳

當量，相當於每噸竹建材的固碳量比木材多約 140 公斤的固碳量。此外，另一篇以生命週期觀點探討位於南京工業大學內一棟建築使用之膠合的竹桿件空間桁架的碳排放量(如圖 2-1)，顯示膠合竹桿件同樣在其生產加工階段之排碳量為最大(Zhang, Xu et al. 2023)。

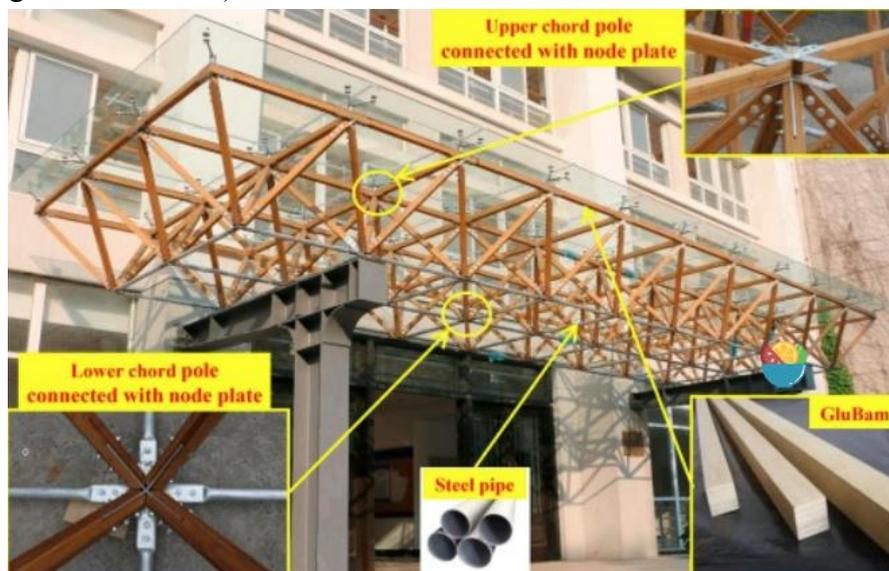


圖 2-1 南京工業大學一棟建築使用之膠合竹桿件空間桁架  
(資料來源：Zhang, Xu)

一篇台灣的研究(Chang, Chen et al. 2018)，其應用生命週期評估 (LCA) 方法調查了多層膠合竹合板其生產鏈上所有的輸入和輸出流。文中分析比較漂白膠合竹板與經熱處理之膠合竹板等二種不同加工過程的竹製板材，結果顯示漂白膠合竹板在所有環境影響都比熱處理的膠合竹板來得低，其主因為熱處理板材過程中使用熱壓、乾燥和使用化學品等步驟而增加了對環境的衝擊。就多層竹合板的碳儲存而言，其在氣候變化影響類別中具有正向的環境效益。Escamilla 等人則評估了五種不同的竹建材對環境的影響(Escamilla and Habert 2014)，包括竹桿、扁竹、竹編織品、膠合竹和編織竹墊板。研究結果指出，隨著竹材加工程度增加對環境的影響也越大，手工製作的扁竹和編織竹墊相較於膠合竹和編織竹墊板來說對環境影響較小。對於較低加工的竹材來說，竹子的種類和採收方式則對整體環境沒有很大的影響，僅占不到 10%，乾燥過程為主要的影響占 35%，其次是剪裁所使用的電力，占 25%，以及用於防蟲處理，佔 17%。另一方面，膠合竹材和編織竹墊板，主要在運輸過程對環境影響較大，佔總量的 15%至 25%；最大耗能來自切割和壓製的電力使用，佔總量的 40%至 50%。

由上述之文獻中可知，一般而言加工程度大的膠合板材其碳排會較一般竹桿材大，且在竹材的生產過程中加工所需耗能之碳排佔比最大。

#### 第四節 建築資材碳排資料庫

我國常見建材之碳足跡文獻，初期為由低碳建築聯盟 LCBA (Low Carbon Building Alliance)所建立的碳排資料庫，此資料庫後經內政部建築研究所採用並

更名為 ABRI 初級資材碳排資料庫，以作為低蘊含碳建築評估之用。該資料庫之建材碳排計算邊界是遵循 PAS 2050 中的 B2B 範疇所建立，未包含建材配送與銷售、回收與廢棄階段的环境負荷。該建材碳排資料庫採用之方法主要由生產現直接耗能統計而得，是由廠商提供之耗能與產量統計得知，部分資料採用國內環境部之碳足跡盤查公告值，少部分來自 SimaPro 資料庫或採用二級數據，如木材相關材料是以過去之研究文獻整理而得(林憲德 2015)。節錄其中部分常見建材之碳排統計資料如下。

表 2-2 ABRI 初級資材碳排資料庫

分類	材料/工項名稱	單位	碳排 (kgCO <sub>2</sub> e)				總碳排量
			原料開採	原料運輸	產品生產	成品運輸	
金屬	鋼筋及鐵件	kg	0.964		0.168	0.017	1.15
	型鋼	kg	0.964		0.185	0.013	1.16
	不鏽鋼管	kg	1.13	0.183	0.915	0.026	2.25
	鍍鋅鋼管	kg	0.964		0.285	0.026	1.28
砂石	石材加工品 (6 分板)	m <sup>3</sup>	0.082	0.47	1.74	1.02	3.31
	2.5cm 磨石子地磚	m <sup>3</sup>	20.83				20.83
	磁磚 (1cm)	m <sup>3</sup>	7.7		7.16	0.228	15.09
	紅磚 (20×9.5×5cm)	塊	0.01	0	0.41	0.032	0.45
水泥	卜特蘭水泥(乾式)	kg	0.94			0.0044	0.944
	白水泥	t	2.47	4.17	941.81	19.95	968.4
	1:3 水泥砂漿粉刷 2cm 厚	m <sup>2</sup>	0.089	0.29	8.57	0.1	9.05
	預拌混凝土 (4000psi)	m <sup>3</sup>	4.8	17.42	343.09	4.57	369.88
	矽酸鈣板 (9mm)	m <sup>2</sup>	0.01	0.046	1.81	0.052	1.92
木材	原木製材 (人工乾燥軟木)	m <sup>3</sup>					66.09
	原木製材 (人工乾燥硬木)	m <sup>3</sup>					258.37
	集成材	m <sup>3</sup>					214.34
木質板材	實木皮化粧合板 (2 分板、6mm)	m <sup>2</sup>		0.056	0.65	0.02	0.72
	合板 (18mm)	m <sup>2</sup>		0.157	3.12	0.06	3.34
	單板層積材 (LVL) (6 分板, 18mm)	m <sup>2</sup>		0.157	1.29	0.06	1.51
	集成材 (6 分板)	m <sup>2</sup>		0.157	2.66	0.06	2.87
	高密度粒片板 (塑合板, OSB 定向粒片板, 密度 850kg/m <sup>3</sup> , 18mm)	m <sup>2</sup>	依王松永調查 650kg/m <sup>3</sup> 密度粒片板, 原料運輸、製程、				17.6
	中密度粒片板 (密集板, 密度 700kg/m <sup>3</sup> , 18mm)	m <sup>2</sup>	成品運輸之碳排 10.29、				14.48
	低密度粒片板 (甘蔗板, 密度 550kg/m <sup>3</sup> , 18mm)	m <sup>2</sup>	733.0、3.05kgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> 以重量比例換算				11.4

(資料來源：林憲德,2015)

## 第五節 碳足跡相關國際標準比較

### 2.5.1 PAS 2050 簡介

PAS 2050 規範之標題為「商品和服務在生命週期內的溫室氣體排放評價規範」，是屬於公共領域規範，用於產品碳足跡評估。該標準規範碳足跡之盤查應從原料的運輸開始計算，由製品從原料、生產到市場端前之各環節碳排放的數據的收集。PAS2050 是由英國標準協會 (British standards institution, BSI) 發布的

一項關鍵碳足跡評估標準，旨在評估商品和服務的生命週期溫室氣體排放。這一標準提供統一的方法來估算產品的碳足跡，進而幫助企業和消費者做出低碳的選擇。PAS 2050 的引入對於國際溫室氣體排放標準的演變具有重大貢獻(Sinden 2009)。

PAS 2050 覆蓋了產品生命週期的所有階段，從原材料獲取、生產、使用到廢棄處理(Sinden 2009)。此外，PAS 2050 也為碳會計引入了創新的方法論，強調碳排放報告的透明度和一致性。標準規定了對生命週期評估進行嚴格審查的要求，以確保其可靠性和有效性。PAS 2050 的出現顯示國際間對產品或服務之溫室氣體排放量在標準化量測和報告方面的需求。透過此一標準化，企業可以在全球市場中客觀地比較不同產品間對環境之影響。值得注意的是，PAS 2050 也影響了對環境管理系統和國際相關標準的發展(比如後續的 ISO 14067 標準)，提升了產品碳足跡測量的透明度，透過實施此標準有助於構建綠色供應鏈，並在全球範圍內提升企業的環境責任(West 2009)。一般而言，PAS 系列標準是英國政府在尚未有國際標準(如 ISO)公布可供參考前，作為暫行標準之參考，一旦被國際標準採納或有同樣準則的國際標準公告後，此暫行標準即自動被國際標準所替代。以 PAS 2050 為例，後續已有 ISO 14067 之碳足跡盤查標準，因此本研究主要以 ISO14067 作為主要之碳盤查方法。PAS 2050 和 ISO 14067 都是針對產品碳足跡的標準，但兩者之間存在一些差異。PAS 2050 是英國標準協會(BSI)制定的標準，而 ISO 14067 是國際標準化組織(ISO)制定的標準。其主要差異在於，PAS 2050 的評估範圍較為廣泛，涵蓋了產品生命週期的所有階段，而 ISO 14067 允許只涵蓋了產品生命週期的部分階段，前提是必須要有明確界定之盤查範圍，此即透過產品類別規則 PCR 予以界定與規範。

### 2.5.2 PAS 2060 簡介

PAS 2060 標準是應用於確認企業或組織內關於碳中和方法及其揭露之架構。此標準特別著重於機構、企業或組織內碳排放量的減少及其減碳措施之報告。此與 ISO 14064 標準密切相關，ISO 14064 為組織層面的溫室氣體排放量計算，但無量化和報告的指導原則，特別是針對自願性或強制性氣候行動框架要求方面(Garcia 2014)。此一標準著重於組織內之碳排查與本研究針對竹建材產品之碳足跡計算不同，因此不適用於本研究。

### 2.5.3 ISO 14067 簡介

ISO 14067 則聚焦於產品的碳足跡計算，提供了關於如何量化和報告產品從原料獲取到生產加工處理的整個生命週期內溫室氣體排放的指南。這與環境產品聲明 (Environmental Product Declaration, EPD) 相結合，EPD 根據 ISO 14025 標準，利用生命週期評估 (LCA) 數據提供產品環境影響的透明資訊。ISO 14067 和 EPD 一起，強化了產品對環境衝擊的全面理解(ISO 2009)。這些標準共同提供企業在全球範圍內實現更永續的業務，提升企業環境責任和消費者對綠色產品的

信任。通過實施 PAS 2060、ISO 14064 和 ISO 14067，企業能夠有效管理其環境影響，並對外展示其承諾於環境保護和永續發展的具體行動(ISO 1996)。

而 ISO 14067 是一專為適用於產品和服務的碳足跡計量標準。依該標準之規定，需要紀錄每個主要生命週期階段與之連結之溫室氣體排放量與固碳量。完成碳足跡計算後，須將計算結果整理於報告中，碳足跡盤查之結果、數據、方法、假設及生命週期闡釋，須以透明與具備充足細節方式呈現，並證明符合 ISO 14067 標準之規定。報告中的必要資訊包括：功能單位、系統界線、重要單元過程清單、數據蒐集資訊(包括數據來源)、納入考量的溫室氣體清單、選定的分配方法、選定的截斷準則、盤查時間與期間、數據選定與數據品質與不確定性評估等內容。

簡言之，PAS 2060 與 ISO 14064 之適用對象為組織或企業，ISO 14067 之適用對象為產品或服務本身。本研究旨在針對竹建材從生產加工至配送過程之碳盤查，係屬於產品範疇之碳足跡計算，而非 PAS 2060 或 ISO 14064 適用之對象，應採用如 ISO 14067 以產品為對象的評估法。下節介紹 ISO 14067 標準所建議之產品碳足跡盤查方法。

#### 2.5.4 環境部產品與服務碳足跡計算指引

行政院環境保護署(現為環境部)於民國 99 年 2 月發布了產品與服務碳足跡計算指引，主要目的在提供企業和組織計算其產品和服務的碳足跡的標準方法。該指引涵蓋了產品生命週期各階段的碳排放，包括材料採購、生產、運輸、使用和最終處置。該指引採用生命週期評估(Life Cycle Assessment, LCA)方法來計算碳足跡，即將產品或服務的整個生命週期中所排放的溫室氣體總量加總起來。計算方法包括：量化產品生命週期各階段的活動量，例如使用的能源量、生產的材料量或提供的服務量；根據排放係數將活動量轉換為溫室氣體排放量；將各階段的溫室氣體排放量加總，即為產品或服務的碳足跡。

為了應用該指引於某一產品之碳足跡計算，其明確指出需要有相對應的產品類別規則(Product category rules, PCR)，依其所界定之盤查範圍、項目與方法所得結果，可申請國內碳標籤但需經第三方驗證。目前國內與本研究課題竹建材有關之既有現成產品類別規則為「木、竹製板材碳足跡產品類別規則」，其內容敘述於下節中。

本研究旨在進行國產竹建材從搖籃到工地之碳足跡，其範疇將包括以下三階段：

- (1) 原料取得階段：其過程包括竹材原料及包裝材製造、竹材收成能資源投入、初級加工(包括：原竹選別、貯存、調整、切削、製品選別、捆束、廢材處理、搬運等)等相關過程之溫室氣體排放，再加上到工廠製造之運輸過程相關的溫室氣體排放等。
- (2) 製造階段：次級加工經由飾面材料、膠、防腐劑、油漆/亮光漆等之原料加工後之次級加工等相關過程，包括：旋切、膠合、飾面材料膠合、抽樺、加壓、砂磨/砂光塗裝等過程。竹製板材製造完成後包裝出貨等過程。上述工廠製程之用水供應、用油與電力之消耗供應相關流程。但如果直接使用木、

竹材等作為燃料所產生之 CO<sub>2</sub> 排放則不列入計算。且不必涵蓋使用廢棄階段之回收材。

- (3) 配送銷售階段：是指從製造工廠運送到經銷商，運輸相關過程之溫室氣體排放。

### 2.5.5 碳足跡盤查標準間之比較

在碳足跡盤查過程中，不同標準之間存在一些差異，這些差異可能影響碳足跡的計算和報告。下表 2-3 是 ISO 14067、PAS 2050:2011 與臺灣碳標籤在實質貢獻、資料保存、一級活動數據要求、門檻值、截斷原則、數據有效性、不確定性分析及一級活動數據等方面的比較。

表 2-3 ISO 14067、PAS 2050:2011 與臺灣碳標籤之比較

項目	ISO 14067	PAS 2050:2011	臺灣碳標籤
實質貢獻小於 100% 時	未提及	已刪除 (6.3)	凡預期的生命週期溫室氣體排放已確定為低於 100%，所評估的排放應擴大至代表符合該產品功能單位之 100%溫室氣體排放。(5.5)
資料保存	未提及	至少三年	五年或產品之預期壽命
一級活動數據要求	依 PCR 之規定	組織+上游<10%，需向上游供應商索取一級活動數據，至累積貢獻達 10%以上	
門檻值	未提及	已刪除 (6.3)	1.單排放源>50%，其餘需達 95% 2.使用階段排放之要求
截斷原則	允許較少貢獻者省略，但應寫入報告書內(5.2.5.4)	<1%可排除，但總額不超過 5%	排放門檻不超過 5%
數據有效性	無定量化要求	非計畫：>10%，超過 3 個月，需重新計算 計畫性：>5%，超過 3 個月，需重新計算(10.2)	
不確定性分析	必要，定性或定量(5.5)	選擇性	
一級活動數據	可為直接排放、活動數據或排放係數	活動數據(不包含排放係數)	

(資料來源：本研究整理)

## 第六節 木、竹製板材碳足跡產品類別規則(PCR)

### 2.6.1 產品功能單位

首先定義本研究的功能單位，竹桿件以「每支」作為其功能單位；而竹集成板材則以「平方公尺」為其功能單位。本研究之碳足跡標示將按此單位進行標準化列示。

### 2.6.2 生命週期範圍之界定

本研究選擇採用從「搖籃到工地」的方法，包括原料取得、製造、配送銷售三個階段，各階段內容與流程如圖 2-2 所示。

#### 1. 原料取得階段包括下列過程：

- (1) 國內木、竹材原料及包裝材製造等過程。
- (2) 國內外之木、竹材收成能資源投入。
- (3) 輔助原料製造等過程。
- (4) 初級加工:原木竹選別、貯存、調整、切削、製品選別、捆束、殘廢材處理、搬運等生產製材品等初級加工等相關過程。
- (5) 上述過程中與生產原料相關的生命週期溫室氣體排放。
- (6) 各原料/燃料到工廠製造之運輸過程相關的生命週期溫室氣體排放。
- (7) 此PCR碳足跡盤查時，需清楚說明國內外木、竹材使用比例。
- (8) 木、竹材生長過程中之碳儲存不列入計算；木、竹材種植或保存100年以上者除外。

#### 2. 製造階段包括下列過程：

- (1) 次級加工:經由飾面材料、膠、防腐劑、油漆/亮光漆等等之原料加工後之次級加工等相關過程，加工過程有旋切、膠合、飾面材料膠合、抽榫、加壓、砂磨/砂光塗裝等過程。
- (2) 竹製板材製造完成後包裝出貨等過程。
- (3) 上述製造工廠製程之用水供應相關流程及廢棄處理等過程。
- (4) 能資源與電力之消耗與供應相關流程。
- (5) 直接使用竹材等作為燃料所產生之CO<sub>2</sub>排放不列入計算。
- (6) 此PCR之製造階段不涵蓋使用廢棄階段之回收材再製。上述製造工廠製程之用水供應相關流程及廢棄處理等過程。

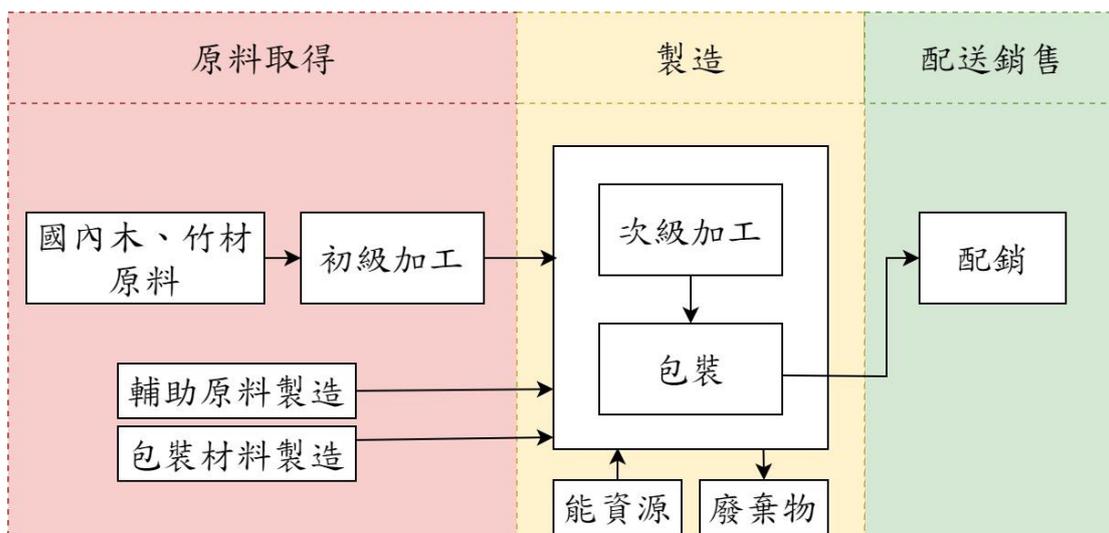


圖 2-2 木、竹製板材生命週期流程圖

(資料來源：改繪自行政院環境保護署 (2020). “碳足跡產品類別規則(CFP-PCR)-木、竹製板材.” 第 3.0 版)

3. 配送銷售階段包括下列過程：
  - (1) 運輸相關過程：從製造廠運送到經銷商的過程。
  - (2) 成品包材若為可回收製品，應依據實際回收情況進行考量(如：回收率)。
  - (3) 上述過程中不列入評估之流程有二：其一為銷售作業相關流程不列入評估。第二為由銷售點到消費者中間各批發商或配送中心、倉儲及消費者往返銷售據點的相關運輸流程不列入評估。

### 2.6.3 數據蒐集

一級活動數據指過程的量化值，或透過直接測量來獲得某項活動或基於其原始來源直接測量的數據，(行政院環境保護署 2010)；不符合一級活動數據要求事項的則稱為二級數據，如數據庫與出版文獻之數據、國家盤查清單的預設排放因數、計算數據、估計等。於原料取得階段，預計需蒐集的項目包括：國內竹材原料及包裝材製造、竹材收成能資源投入，及初級加工、竹材運送；於製造階段，需蒐集的項目包括：次級加工製造之原/物料投入量、用水用電數據、燃料投入量等；於配送銷售階段，需蒐集的項目包括：產品運輸數量、運送距離、交通工具相關資料、可回收成品包材之回收情形、裝載率與空車率等資訊。

國內主要竹製產品加工業者多分布於南投竹山地區，本研究訪查國內主要竹材加工業者發現幾乎已無針對竹建材固定進行加工之業者，竹建材加工產業因國內需求量少，多以有訂單時始進行批次加工，平時已無固定在生產竹建材。因此，為了量化竹建材之碳足跡，本計畫特地訂購一批竹桿件與竹集成板材進行產品加工生產，以量化原竹採伐到運輸、加工等過程之碳排放量數據統計與蒐集。

## 第七節 國內外竹建材之建築應用案例

由大藏聯合建築師事務所設計的竹構集會堂於民國 111 年完工，位於台南長榮大學內。該建築以舊式糖廊為設計理念，採用臺灣國產的孟宗竹和桂竹作為骨幹。其結構由環繞圓心的二十四組半月形竹桁架構成，每組竹桁架以鋼構為接頭。

同樣由大藏聯合建築師事務所設計的華德福大地實驗教育學校位於台中烏日區，於民國 106 年完工。這個竹構教室採用臺灣本地的竹材作為桁架，外牆體混合使用 RC 牆和免拆模板灌注加稻殼的黏土工法牆體。土牆部分的室內牆面採用傳統竹管層編竹夾泥牆的白灰牆，而外牆則隔著透濕防水布鋪設柳杉雨淋板。此外，半戶外的竹構多功能教室也採用與教室相同的竹桁架構造，其最高點匯集處設有鋼構的通風塔，上面鋪設透明 PC 板以採天光。

由建築師甘銘源設計的 102 年雲林農業博覽會大門入口棚架，以台灣中部地區的孟宗竹作為主要結構材料，結合鋼材形成大型桁架結構系統，跨距達 14 公尺，創下當時台灣最大竹構跨距的紀錄。雲林農博的微笑餐廳則以傘的概念為設計發想，利用竹材可彎曲及承受較高張力的特性，採用孟宗竹材上下兩層斜向交疊，形成編織交錯的屋架結構。

112 年古坑草嶺石壁竹創森園區建築師葉育鑫所設計的「瀨座」，使用當地孟宗竹、桂竹、疏伐林木再利用的杉木瓦構築而成。

108 年，清華大學設立了全台第一所原住民族科學發展中心，由建築師林志成設計，使用新竹縣尖石鄉的桂竹建造。該建築內層以鋼筋水泥強化結構，並採用了可抽換竹材的創新工法，以利於日後的維護。這座結合原住民族傳統工藝與現代工法的竹屋，是全國第一座領有建築與使用執照，且可供教學及辦公使用的原住民族竹建築。

，位於台北客家文化主題公園內的竹構大棚是個完全採用竹材的案例，採用的是孟宗竹。主結構系統為桁架，頂棚採用竹皮編織而成的天花板與外加 PC 浪版的複合式屋頂。同樣園區中另一竹構的活動場所是主祭亭台，主要作為半戶外活動空間，亦是採用孟宗竹的構架系統，柱樑交接處則採用仿中國式樣的斗拱。

由艾羅拉·哈迪 (Elora Hardy) 創立的印尼巴里島竹子學校，使用當地經過防蟲處理的竹材，結合峇里島的傳統工藝，純手工建造了這座大型竹拱建築。這個建築依照當地原住民 IBUKU 設計，外觀延伸長達 19 公尺的曲線，內部採用馬鞍面網格結構相連，形成高達 14 公尺的拱形結構，作為學生半開放的室內運動場使用。

圖 2-4 是位於越南富國島的大世界迎賓中心，由武重義建築師事務所設計，於 2021 年 4 月完工。佔地 1,460 平方公尺，使用繩索和竹釘連接竹桿，總計使用 4 萬 2 千根竹桿。



圖 2-3 印尼峇里島竹子學校

(資料來源：攝影: SONNY TUMBELAKA/AFP, 圖片來源: Getty Editorial)



圖 2-4 越南富國島大世界迎賓中心

(資料來源：攝影: Hiroyuki Oki)

另外圖 2-5 是由清邁 CLC 事務所設計，於 2017 年完工的泰國潘亞登國際學校，為一所國際佛學學校。其校舍及運動場皆運用自然永續材料打造，使用竹桿和繩索作為主要建築材料。

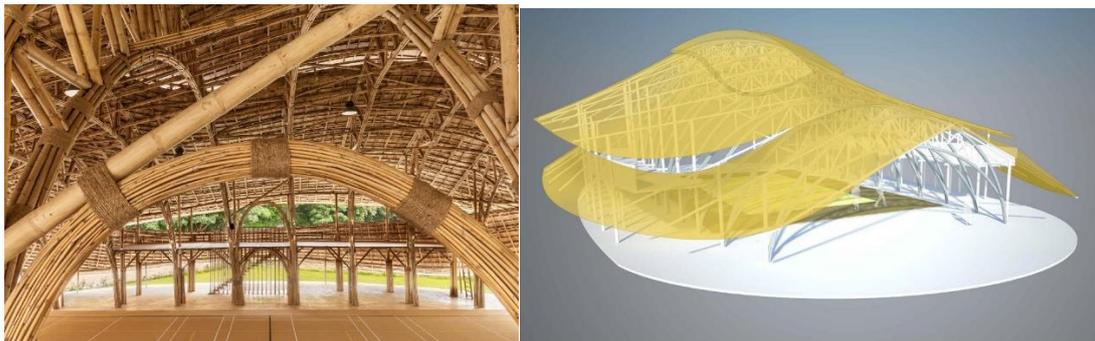


圖 2-5 泰國清邁潘亞登國際學校運動場

(資料來源：清邁 CLC 事務所)

整理上述幾項竹構造可知，目前以孟宗竹及桂竹較常見運用在竹建材上，主要作為竹桁架及裝飾板材使用，故本研究選擇以竹桿件及竹板材作為主要碳盤查對象。

## 第三章 研究方法

### 第一節 ISO 14067 方法概論

ISO14067 之流程如圖 3-1 所示，包括建構製成流程圖、界定系統邊界、數據收集、計算碳足跡與最後的不確定性分析。但，最後的不確定性分析需仰賴多批次生產與重複數據收集始能進行，在一般連續大量生產下的產品可輕易透過分批量測而進行不確定性分析，然而，本計畫恐無法進行此步驟。其原因為，有鑑於國產竹建材加工產業式微與竹構建築佔整體新建建築量而言畢竟是極少數，國內已尋無固定生產竹建材之廠商，本研究須以訂製生產之作法採購一批原竹，部分作為竹桿件加工以及部分作為竹集成板材加工，從原竹採伐、運輸、加工等各個階段逐一進行探碳排放量之盤查。礙於經費之限制，二種竹建材產品恐僅能各進行一次性之一個批次的生產，也因此無法透過分批生產分別統計各批次之碳排放量，以進行不確定性分析。



圖 3-1 ISO14067 碳足跡盤查之流程

(資料來源：經濟部工業局)

#### 3.1.1 生命週期評估

本研究採用 ISO 14067 標準，以生命週期評估(Life cycle assessment, LCA)方法系統地量化產品的碳足跡。本研究主要目標是評估孟宗竹桿件和竹集成板材 (Laminated bamboo board) 從搖籃到工地端的碳排放，包含從原料取得、製造、配送銷售等階段。首先，定義研究的功能單位為竹桿件「每支」及竹板材「平方公尺」，確保所有數據都能按此單位進行標準化。於確定系統邊界方面，需要選擇評估從竹材採收、製造加工過程、運輸的所有環節。在盤查階段，我們收集了各階段的能源使用數據。這些數據可以來源自生產線實際測量數據、供應商的報告、已發表的研究以及環境資料庫。每項資料都經過確認其可靠性，並按照 ISO 14067 標準進行記錄和處理。

在進行 ISO 14067 下的生命週期評估 (LCA) 研究時，確定系統邊界是一項關鍵任務，主要是於碳盤查中確認所需的生產階段內容。本研究選擇採用從「搖籃到工地」的方法，以確保對產品全生命週期中的碳排放進行完整評估。這包括從原材料採集階段開始，涵蓋原料的開採、運輸、初級加工，直至生產、運送。

當確認這些邊界之後，生命週期盤查階段要求收集與這些生產階段相關的所有能源使用數據。這意味著從原料供應商處獲取有關原材料的來源、運輸距離及方式等信息，並考量生產設施中的能源消耗以及產品在使用過程中的能耗和排放情況。於此過程中，每個階段的數據收集需要與整個供應鏈的多方合作，以確保數據的完整性和精確性。例如，對於生產階段，不僅要考慮直接能源消耗，如電力和燃料的使用，還要考慮間接排放，如從能源生產到最終消耗所涉及的運輸過程中的排放。

### 3.1.2 產品基本資訊

進行 ISO 14067 標準下的生命週期評估 (LCA) 時，以竹建材為例進行碳足跡的量化分析需深入了解產品的基本信息及其在各個生命週期階段的環境影響。竹建材以其可再生性和環保性能逐漸成為建築行業中受關注的綠色材料選擇。竹材來自快速生長的竹子，通常在三到五年內即可達到伐採利用的成熟度，相較於木材，其生長速度快且對生態系統的恢復力強。這種快速更新的特性使竹子成為一種極佳的碳吸存源，有助於減少大氣中的 CO<sub>2</sub> 濃度。在收割後，竹子能自然再生，不需額外的種植，從而保持生態的持續性和減少人工干預。竹建材的加工過程相對簡單，主要包括伐採、清洗、乾燥和加工成各種建築用材。這些步驟通常不涉及重化學物質的使用，因此相比其他建築材料，竹材的加工對環境的負擔較小。竹建材在使用階段的維護也較為簡便，其天然的防腐性能減少了化學防腐劑的需求。

在 ISO 14067 的框架下，對竹建材進行生命週期評估時，需要從原材料的採集、加工、運輸、使用到最終處置的全過程進行碳排放的計算。這包括直接排放（如加工過程中燃料的使用）和間接排放（如運輸過程中由燃料燃燒所產生的排放）。竹建材在終生使用階段結束後的處置方式同樣影響其整體碳足跡。

### 3.1.3 數據收集

在遵循 ISO 14067 標準進行生命週期評估 (LCA) 的過程中，數據的收集是關鍵，其要求需精確包含與產品生命週期相關的所有環境影響數據。此過程涉及從原材料的採購到產品最終處置的各個環節。由活動數據之來源依其品質可區分為一級活動數據與二級活動數據：

1. 「一級活動數據」：其定義為整個過程(process)中的量化值，係透過直接測量來獲得某項活動或基於其原始來源直接測量的數據，數據之品質最為可靠。其數據應以組織所擁有、營運或控制之製程中直接蒐集而得，且一級活動數據應針對個別製程或製程發生所在之廠址進行蒐集，並應具該製程之代表性。

2. 「二級活動數據」之定義為不符合一級數據要求事項的數據，二級數據可包括數據庫或既有文獻上之數據、國家盤查清單的預設排放因數、計算的數據、推估而得的數或其他具代表性並由主管機關確認後之數據等。在碳盤查之過程中如無法取得一級活動數據之前提下，可允許使用第二級活動數據來源。

在進行竹建材碳足跡分析時，首先需要從竹子的開採到加工過程中搜集相關之耗能與所需資源的數據，包括竹子採伐時所使用機具消耗的能源、收割後的處理方法、運輸至加工廠的車輛用油等；加工階段的數據蒐集則聚焦於能源使用、所用化學物質及相關排放數據。這些數據主要可通過與供應商合作、檢視生產設施的運營記錄和使用生產過程量測等方式獲得。

運輸階段的數據收集則涉及確定產品從生產地到加工廠以及加工廠完成成品後運送至工地端的路線，並據以計算運輸過程中的能源消耗和排放量。這通常需要依據運輸工具的類型（如貨車、汽車或其他）和使用的燃料類型來做計算。

### 3.1.4 碳足跡計算

碳足跡評估過程首先需確定評估目標與範圍，這包括界定系統邊界以及決定將考量哪些類型的碳排放。隨後進行生命週期盤查分析(inventory)，即收集所有必要數據，涉及產品從原材料的開採、處理、運輸、使用到最終處理的整個過程。在這一階段，數據之蒐集可來自多方來源，這些來源可能包括供應商提供的具體數據、生產過程的記錄以及公認的既有數據庫。每個階段的數據不僅要記錄消耗的原料和能源，尚須詳細記錄相對應的溫室氣體排放量。接著將收集到的數據透過特定的碳排轉換係數轉換為碳排放量，這些碳排轉換係數能將各種能源消耗和原料使用轉化為等效的二氧化碳排放當量。

在完成 ISO 14067 標準的碳足跡計算之後，將產品的碳足跡與同類產品進行比較是一個重要的分析步驟。這有助於評估產品在市場中的環境表現，本研究在完成竹建材之碳足跡計算後，將進一步對比傳統的構法比較採用國產竹建材與傳統建材在碳足跡上之差異。

## 第二節 國產竹建材碳足跡盤查說明

依據前述文獻與案例蒐集發現，國內主要以孟宗竹作為建材之產品多為竹桿件與竹集成板材為主，因此本研究以此二產品為碳足跡盤查之對象。本研究則參照 ISO 14067 碳足跡盤查流程進行，如圖 3-2 碳足跡盤查流程圖。

### 3.2.1 國產竹建材之碳足跡盤查流程

(一) 選擇產品(原竹竹桿件、竹集成板材)

#### ● 原竹竹桿加工製程之各步驟與工序

1. 竹桿(Bamboo Clums)：竹桿是整個製程的原料，通常選取生長良好的成熟竹桿做為伐採對象。
2. 裁切(Cutting)：將竹桿裁切成適當的長度及大小，準備進行後續的處理。

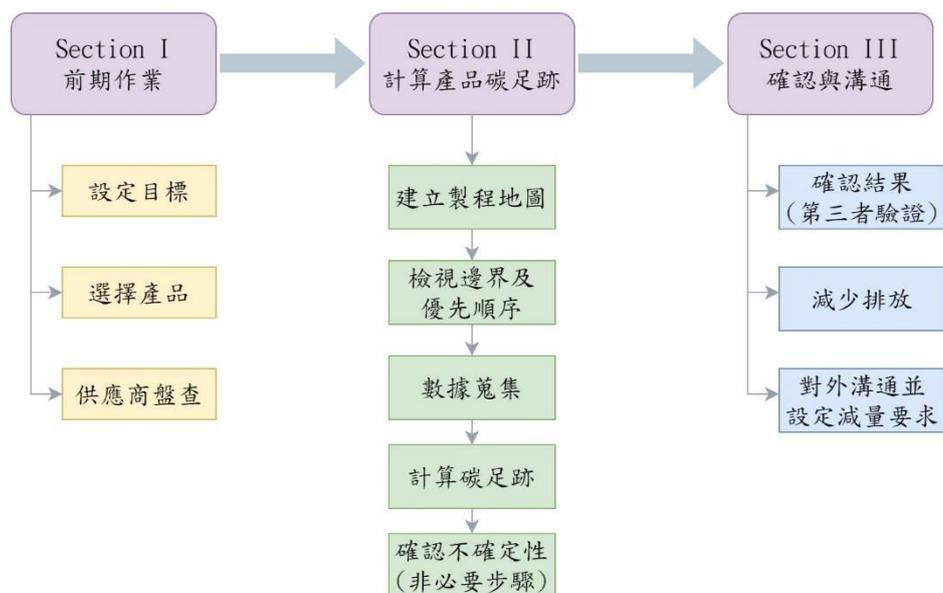


圖 3-2 碳足跡盤查流程圖

(資料來源：本研究改繪)

3. 鹼前處理(Alkali Pretreatment)：將將裁切好的竹材進行鹼性處理，以去除竹材中的醣分和其它可溶性物質，提高竹材的耐久性和防腐性能。使用的鹼性藥劑：在這個步驟中會使用氫氧化鈉做為藥劑進行處理。
4. 乾燥/碳化處理(Steam Drying/Carbonizing)：將經過鹼前處理的竹材進行蒸汽乾燥或碳化處理，以進一步提高竹材的強度和穩定性，並降低含水率。
5. 鋸切(Slicing)：將乾燥或碳化處理後的竹材切割成所需的長度、形狀和尺寸，通常切割成薄片或特定形狀的構件。
6. 砂磨(Sanding)：對切割好的竹材進行砂磨處理，使其表面光滑平整，為後續的塗裝步驟做好準備。
7. 護木油(Wood preservative and stain)：竹桿內側及竹皮部刷塗二層護木油，可有效提升竹材的耐久性及美觀性。
8. 倉儲(Warehousing)：將處理完成的竹材產品存放在倉庫中，準備進行銷售或運輸。
9. 運輸(Transport)：將最終產品運輸到銷售地點或消費者手中，這一過程可能涉及多種運輸方式，如卡車、船舶等。

圖 3-2 製程圖說明竹桿件從原料處理到最終產品的全過程。每個步驟都經過仔細設計，以確保竹材的質量和耐用性，同時也考慮到環境保護和資源的有效利用。通過這些步驟，竹材得以轉化為高質量的建築材料，適用於各種建築和裝飾用途。

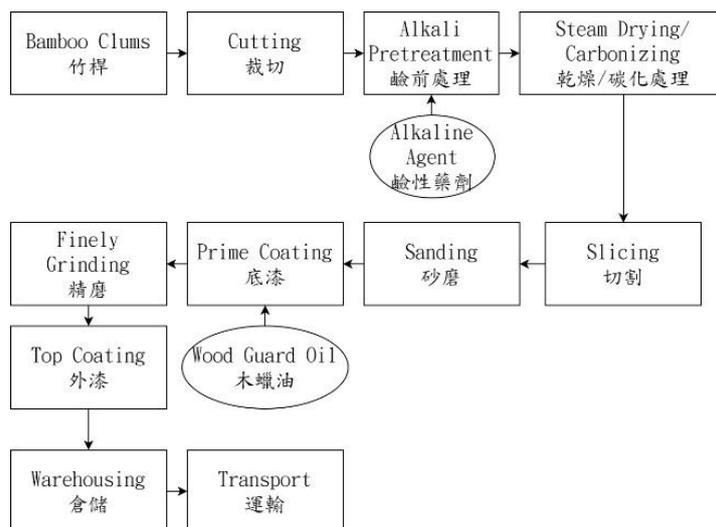


圖 3-2 典型原竹竹桿加工製程圖

(資料來源：本研究整理)

### ● 竹集成板材製程之各步驟與工序

1. 竹桿 (Bamboo clums)：竹桿是整個製程的原料，通常選取生長良好的成熟竹桿做為伐採對象。
2. 裁切 (Cutting)：將竹桿裁切成適當的長度，準備進行後續的處理。
3. 切片 (Chipping)：將裁切好的竹材進行集成元切片加工。
4. 鹼前處理 (Alkali pretreatment)：將裁切好的竹材進行鹼性處理，以去除竹材中的醣分和其它可溶性物質，提高竹材的耐久性和防腐性能。使用的鹼性藥劑：在這個步驟中會使用氫氧化鈉做為藥劑進行處理。
5. 乾燥/碳化處理 (Steam drying/carbonizing)：將經過鹼前處理的竹材進行蒸汽乾燥或碳化處理，以進一步提高竹材的強度和穩定性，並降低含水率。
6. 集成元成型加工 (Dimensional processing of lamina)：使用自動刨木機及圓鋸機進行集成元定厚及定寬作業。
7. 砂磨 (Sanding)：對切割好的竹材進行砂磨處理，使其表面光滑平整，為後續的膠集成準備。
8. 膠合 (Gluing)：將乾燥或碳化處理後的竹集成元進行膠合處理，使用膠合劑將竹片粘合在一起，形成竹集成板材的基本結構。
9. 熱壓 (Hot Pressing) 將排列好的竹集成元進行熱壓處理，以提升竹集成板材的膠合性能，藉此達到良好的結構強度及尺寸安定性。
10. 對齊 (Aligning)：對熱壓後的竹板材進行對齊處理，確保每塊竹板材的尺寸和形狀符合要求。
11. 排序 (Sorting) 對對齊後的竹集成板材進行排序，按照質量和規格進行分類。
12. 拋光 (Polishing) 對排序後的竹集成板材進行拋光處理，使其表面光滑平整，

為後續的塗裝步驟做好準備。

13. 粗磨 (Rough Grinding): 對拋光後的竹集成板材進行粗磨處理, 使其表面進一步平整, 為精磨步驟做準備。
14. 切割 (Slicing): 將粗磨後的竹集成板材根據所需的尺寸和形狀進行加工。
15. 砂磨 (Sanding): 對切割後的竹集成板材進行砂磨處理, 使表面更加光滑平整。
16. 底漆 (Prime coating): 在竹集成板材表面塗上一層底漆, 這有助於增強後續塗層的附著力, 並提高竹板材的耐久性和防護性能。
17. 精磨 (Finely grinding): 對塗有底漆的竹集成板材進行精細打磨, 使其表面更加光滑平整, 為外層塗裝做好準備。
18. 面漆 (Top coating): 在竹集成板材表面塗上一層外漆, 進一步提高竹板材的耐久性和美觀性。
19. 倉儲 (Warehousing): 將處理完成的竹板材產品存放在倉庫中, 準備進行銷售或運輸。
20. 運輸 (Transport): 將最終產品運輸到銷售地點或消費者手中, 這一過程可能涉及多種運輸方式, 如卡車、船舶等。

圖 3-3 為典型竹集成板材之製程圖, 說明竹集成板材從原料處理到最終產品的全過程。每個步驟都經過仔細設計, 以確保竹材的質量和耐用性, 同時也考慮到環境保護和資源的有效利用。通過這些步驟, 竹材得以轉化為高品質的建築和裝飾材料, 適用於各種用途。

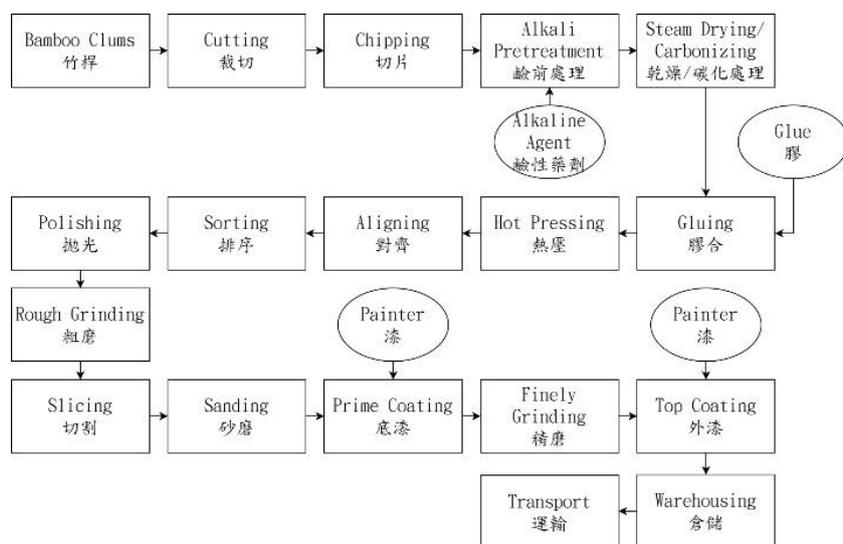


圖 3-3 典型竹集成板材之製程圖

(資料來源：本研究整理)

## (二) 製作加工製程地圖

「原竹竹桿加工」加工製程包括鹼性藥劑前處理、蒸氣熱處理、熱處理、煙燻處理、保綠處理、染色處理、乾燥處理、粉碎處理。「竹集成板材」加工製程包括鋸切、鋸切去節、粗鉋、蒸煮(防腐處理)、乾燥(或碳化處理)、精鉋、選片、上膠、排列、熱壓、整板膠合、砂磨、鋸切成規格化板材、檢驗分等、修補及包裝。

依據環境部產品與服務碳足跡計算指引，本研究範疇為量化國產竹建材從搖籃到工地(B2C)之碳足跡。其評估範圍將參考自環境部於2020年所公告之「碳足跡產品類別規則(CFP-PCR)-木、竹製板材」第3.0版，其範疇將包括以下三個階段，並如圖3-4所示：

### 1. 原料取得階段：

包括從國內竹林中取得的竹材，這些原料是生產竹建材的主要來源。這一過程包括將竹材進行初步加工，使其達到進一步處理的標準。輔助原料製造包括製造過程中需要的輔助材料，例如黏合劑、化學處理劑等，這些材料在初級加工或次級加工中會被使用。製造過程中需要的包裝材料，例如用於最終產品的包裝盒、包裝袋等，這些材料在產品完成後會被使用。

### 2. 製造階段：

初級加工後的原料進行更進一步的處理，這個階段包括各種深加工工序，例如切割、打磨、防腐處理、乾燥、碳化等。這些工序使原料達到產品要求的質量標準。次級加工完成後，產品進入包裝階段。包裝材料會在這個階段被使用，以確保產品在運輸和銷售過程中不受損壞。製造過程中所需的能源，例如電力、燃料等。這些能源在各個加工步驟中被消耗，並對應產生相應的碳排放。製造過程中產生的各種廢棄物，包括加工過程中的邊角料、化學處理的廢液等。這些廢棄物需要適當處理，以減少環境影響。

### 3. 配送銷售階段：

最終產品完成後，需要將產品配送到銷售地點或消費者手中。這一過程涉及的運輸過程會消耗燃料並產生相應的碳排放。

圖3-4竹建材製程地圖說明了竹建材從原料取得到製造再到最終配送銷售的完整生命週期，並強調了每個階段所涉及的能資源消耗和碳排放。這有助於了解竹建材在整個生命週期中的碳足跡，從而為碳減排策略的制定提供依據。

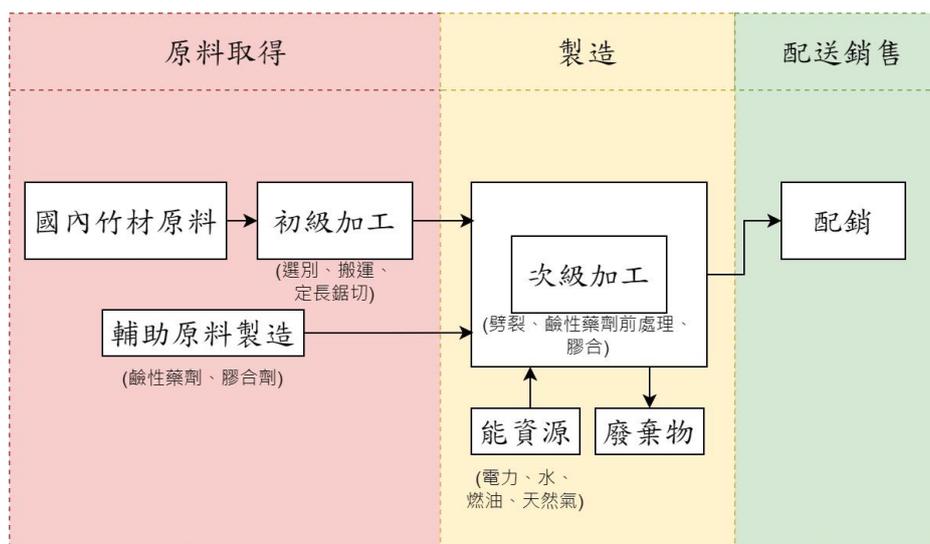


圖 3-4 竹建材製程地圖

(資料來源：本研究繪製)

(三) 檢視邊界及優先順序

檢視邊界及優先順序的主要目的是確認生命週期各階段的投入與產出，從而評估資料蒐集的優先順序，確保碳足跡盤查的準確性和全面性。這一過程目的在識別並量化產品或服務在其整個生命週期中所產生的所有溫室氣體排放，以便制定有效的碳減排策略。表 3-1 為根據行政院環境保護署(2010)產品與服務碳足跡計算指引，對各階段系統邊界的詳細說明：

表 3-1 各產品與服務碳足跡之各階段系統邊界的詳細說明

章節編號	系統邊界	
5.4.2.1	原物料	所有轉換原物料的製造過程導致之溫室氣體排放
5.4.2.2	能源	產品生命週期中能源供應體系造成之排放
5.4.2.3	製造與服務供應	發生製造與服務供應所造成之溫室氣體排放(含耗材)
5.4.2.4	製造廠所營運	製造廠所營運而造成之溫室氣體排放(含工廠、倉庫、中央供應中心、辦公室、零售折扣店等)
5.4.2.5	產品運輸	使用路運、空運、水運、鐵路運輸或其他運輸造成之排放
5.4.2.6	產品儲存	儲存造成之溫室氣體排放(如冷卻、加熱、濕度控制及其他控制)
5.4.2.7	使用階段	產品使用或提供服務時，造成之溫室氣體排放
5.4.2.8	最終處理的 GHG 排放	最終處理造成之溫室氣體排放(如掩埋、焚化、廢水處理等)

(資料來源：產品與服務碳足跡計算指引)

#### (四) 活動數據蒐集範疇及量化方式

本研究採用排放係數法進行碳足跡盤查，這是一種常見且有效的方法，用於量化各種活動產生的溫室氣體排放量。該方法通過利用原料、物料、燃料的使用量或產品產量等數值，乘以特定的排放係數來計算排放量。

##### 4. 排放量計算公式

排放量的計算公式如下：

排放量=適當的活動強度數據×排放係數×GWP（全球暖化潛勢）

其中：

活動強度數據：包括原料使用量、物料使用量、燃料消耗量或產品產量等數據。

排放係數：每單位活動強度數據所排放的溫室氣體量，該係數由政府機構或相關組織公佈。

GWP（全球暖化潛勢）：用於將不同溫室氣體的排放量轉換成二氧化碳當量（CO<sub>2</sub>e），以便進行統一的比較和評估。

##### 5. 排放係數的來源與應用

排放係數通常由政府機構或專業組織根據特定能源種類和使用情況制定並公佈。例如，對於交通運輸排放源而言，只需要知道燃料的含碳量及燃料使用量，即可利用排放係數計算出 CO<sub>2</sub> 的排放量。這種方法的推估正確性可以達到誤差小於 2%~3% 的程度。

#### (五) 計算碳排放量

對於交通運輸排放源，CO<sub>2</sub> 排放量的計算需要以下步驟：

1. 確定燃料含碳量：了解所使用燃料的碳含量（通常以 kg CO<sub>2</sub>e/L 表示）。
2. 燃料使用量：測量或估算所消耗的燃料量。
3. 計算排放量：使用排放係數法計算出總排放量。
4. 應將不同類型之溫室氣體使用相對應之全球暖化潛力(GWP)轉換成二氧化碳當量公噸(CO<sub>2</sub>)，CO<sub>2</sub> 之 GWP = 1.0

排放量 = 活動數據 x 排放係數 x GWP（全球暖化潛勢）

若使用柴油作為燃料，已知柴油的排放係數為 3.232kg CO<sub>2</sub>e/L（數據參考自環境部 2023 年最新之公告值），則根據燃料使用量可以推算出總排放量。

表 3-2 本研究相關數據排放係數表

名稱	數值(kgCO <sub>2</sub> e)	宣告單位	公告年份
車用汽油(於固定源使用)	2.88	公升(L)	2023
柴油(於公路運輸移動源使用)	3.32	公升(L)	2023
電力	0.494	度(kWh)	2024
天然氣(於固定源使用)	2.63	立方公尺(m <sup>3</sup> )	2023
臺灣自來水	0.233	立方公尺(m <sup>3</sup> )	2022
氫氧化鈉	0.675	公斤(kg)	2022
聚氨基甲酸乙酯樹脂(PU)	3.17	公斤(kg)	2015
營業小貨車(柴油)	0.587	延噸公里(tkm)	2022
營業大貨車(柴油)	0.131	延噸公里(tkm)	2022

(資料來源：環境部產品碳足跡計算服務資料庫)

### 3.2.2 數據收集

數據收集是碳足跡盤查中的關鍵步驟，它涵蓋了從原材料到成品的整個生產過程。以下是數據收集流程的詳細說明：

1. 原料數據收集
  - (1) 主要原料：收集所有主要原料的數據，如原料種類、用量、來源等。例如，竹材的種類、來源地及使用量。
  - (2) 輔助原料：包括生產過程中使用的輔助材料的數據，如鹼性藥劑、交合等的用量和來源。
2. 能源數據收集
  - (1) 燃料：收集製造過程中消耗的所有燃料數據，如柴油、汽油等，並記錄用量。
  - (2) 電力：收集使用的電力數據，包括用電量及其來源（如國家電網、自備發電等）。
3. 資源數據收集
  - (1) 自然水：包括生產過程中使用的自然水（如河水、湖水等）的用量。
4. 生產數據收集
  - (1) 製程數據：包括每個生產步驟的詳細數據，如加工設備的使用情況、加工時間、溫度、壓力等。
  - (2) 能資源使用：每個生產步驟中所使用的能源數據，如電力、燃料的用量。
  - (3) 排放數據：包括生產過程中產生的各類污染物數據，如廢氣、廢水、固體廢棄物的排放量。
5. 物流數據收集
  - (1) 運輸：記錄所有產品和原材料運輸過程中的數據，包括運輸工具類型、燃料用量、運輸距離等。
  - (2) 倉儲：收集產品和原材料在倉儲過程中的數據，如倉庫的能源消耗、溫濕度控制設備的用量等。
6. 產出數據收集
  - (1) 產品：收集最終產品的數據，包括產品的種類、數量、規格等。
  - (2) 聯產品：包括生產過程中產生的副產品的數據。
  - (3) 廢棄物：記錄所有生產過程中產生的廢棄物數據，並詳細記錄其處理方式和處理量。

數據收集流程是碳足跡盤查中至關重要的一環，通過詳細的數據收集和分類，可以準確計算出各個生產過程中的碳排放量，為制定減排措施提供科學依據。

## 第四章 竹建材碳足跡盤查過程與結果

### 第一節 竹建材碳足跡盤查過程

有鑑於我國已幾乎無固定生產竹建材之加工廠，難以透過既有之生產線進行數據之收集。因此，為了量化國產竹建材之碳足跡，本計畫透過實際砍伐一批原竹(主要為孟宗竹)，其中一部份作為竹桿件生產；另一部份作為竹集成板材之生產，並實際委託相關之加工業者進行實際之加工作業與生產成品。透過現場實際蒐集與當下量測生產加工過程之相關數據，以進行後續碳足跡計算。

本研究與大自然竹木業有限公司、元立竹業有限公司、欣林竹藝社、茂昌竹藝社及永騰木業有限公司等共五家國產竹材廠商與加工廠合作，共可概分為五個作業流程：原竹砍伐、定長鋸切及鹼性藥劑處理、劈裂、雙面及四面鉋加工、碳化及乾燥加工、集成板加工。除永騰木業位於台中市大雅區以外，其餘四家廠商皆位於南投縣竹山鎮，位置如下圖 4-1 所示。



圖 4-1 合作廠商位置圖

(資料來源：Google 地圖與本研究整理)

#### 4.1.1 原竹砍伐與運輸作業

原竹之砍伐是委託大自然竹藝有限公司進行，自雲林縣古坑鄉石壁地區砍伐 650 支 16 尺長孟宗竹載運至林內加工廠，其運輸路徑與運距 42.5 公里，如

圖 4-2 所示。其中 450 支作為竹桿件材料，200 支作為竹板材材料。下表 4-1 為伐竹作業及原竹載運之用油、水、電紀錄。

- (1) 作業名稱：原竹砍伐
- (2) 內容說明：伐竹(650 支 16 尺長孟宗竹桿)，並將竹材載運至林內的加工廠。
- (3) 數量：650 支(16 尺長竹桿)
- (4) 合作廠商：大自然竹藝有限公司
- (5) 伐竹地點：雲林縣古坑鄉石壁地區孟宗竹林
- (6) 原竹加工地點：南投縣竹山鎮延山里鹿山路 452 號

國內典型伐竹作業同時包含原竹載運到竹材加工廠的運載作業內容。表 4-1 為孟宗竹伐竹作業時使用手提鏈鋸(廠牌：小松；型號：G 3800，16“鏈板尺寸)做為主要的伐竹機具，並選擇竹齡 4~5 年之成熟孟宗竹桿做為取材對象，總共伐採

16 尺長的竹桿共 650 支。作業期間總共使用 7.3 L 的二行程汽油。依環境部 2023 年公告於於車用汽油固定源使用的碳足跡數值為 2.88 kgCO<sub>2</sub>e/L，由此可知砍伐共 650 支 16 尺長的孟宗竹桿期間總共產生 21.02 4kgCO<sub>2</sub>e（計算式為：7.3 L × 2.88 kgCO<sub>2</sub>e / L=21.02 4kgCO<sub>2</sub>e）的碳足跡數值。

此外，伐竹地點位於雲林縣古坑鄉石壁地區孟宗竹林，而原竹加工地點則為南投縣竹山鎮延山里鹿山路 452 號。本計劃則選用福特 23 噸貨車做為載運車輛，竹林地到工廠距離 44 公里，其總油耗量為 20.33 L 高級柴油。依環境部 2023 年公告於公路運輸移動源使用柴油的碳足跡數值為 3.32 kgCO<sub>2</sub>e / L，可知此載運期間總共產生 67.496 kgCO<sub>2</sub>e 的碳足跡數值。圖 4-3 及圖 4-4 為孟宗竹伐竹作業及載運之現場情形，由圖中顯示竹林作業地點為產業道路附近，其成熟竹桿的離地面向上約 1 公尺高的竹桿直徑介於 13~16 cm 之間。



圖 0-1 伐竹作業運輸距離  
(資料來源：Google 地圖)

表 4-1 孟宗竹伐竹作業及載運之加油情形

作業名稱	油耗用量(L)	備註
伐竹作業	7.3	選用 16 尺竹材共伐 650 支，伐竹使用工具為鏈鋸。所需統計之能資源為鏈鋸用油(二行程汽油)；鏈鋸廠牌為小松(型號：G 3800；規格直徑：16")。
原竹載運	20.33	高級柴油；竹林地到工廠距離 44 公里；Focus 23 噸貨車

(資料來源：本研究整理)

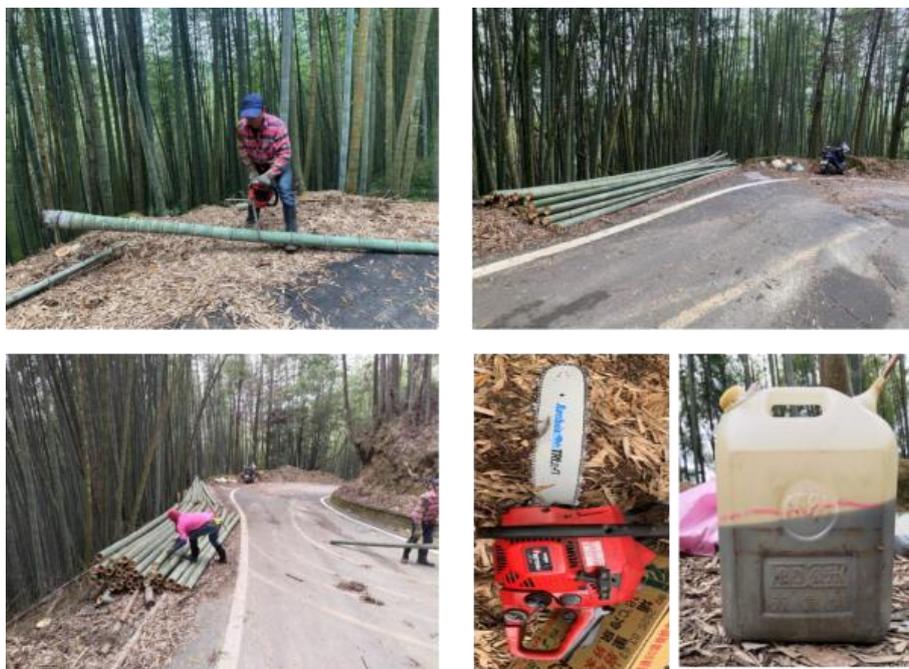


圖 4-3 伐竹作業

(資料來源：本研究拍攝)



圖 4-4 載運情形

(資料來源：本研究拍攝)

#### 4.1.2 定長鋸切及鹼性藥劑處理作業

此部分委託元立竹業有限公司進行定長鋸切及鹼性藥劑處理作業，詳細說明如下，下表 4-2 為定長鋸切及鹼性藥劑處理作業之油、水、電紀錄。

- (1) 作業名稱：定長鋸切及鹼性藥劑處理
- (2) 內容說明：將竹材進行定長鋸切（13 尺長），並進行鹼性藥劑處理。
- (3) 合作廠商：元立竹業有限公司
- (4) 數量：650 支（13 尺長竹桿）
- (5) 備註：執行廠商為大自然竹木業有限公司

使用圓盤鋸切機進行定長加工，用電 1.4 度；鹼性藥劑處理則使用瓦斯加熱並使用 NaOH 作為鹼性藥劑，共使用 394 公斤瓦斯，用水 15 度，藥劑使用 12.511 公斤。

##### ● 油、水、電紀錄及分析：

表 4-2 為竹桿載運到原竹加工廠之後隨即進行圓盤鋸切機定長加工及使用 NaOH 鹼性藥劑前處理之加工內容。於竹桿定加工內容為 200 支 16 尺長鋸切為二段 6.2 尺長的竹桿共 400 支，其用電量為 1.4 kWh。環境部 2024 年公告於電力的碳足跡數值為 0.494 kgCO<sub>2e</sub> / kWh，由此可知此定長加工期間總共產生 0.6916 kgCO<sub>2e</sub>（計算式為：1.4 kWh×0.494 kgCO<sub>2e</sub> / kWh=0.6916 kgCO<sub>2e</sub>）的碳足跡數值。

此外，使用 NaOH 鹼性藥劑前處理之加工方面，所使用的熱源為瓦斯加熱，於水由加入 NaOH 做為鹼性藥劑，由表 4-2 顯示瓦期用量為 394 kg（換算成 m<sup>3</sup>為：394 kg/0.4531 ton/KL×596 m<sup>3</sup>/KL=518.26 m<sup>3</sup>），由環境部 2023 年公告於固定源之使用液化天然氣的碳足跡數值為 2.63 kgCO<sub>2e</sub>/m<sup>3</sup>，由此可知鹼性藥劑加熱期間總共產生 1,363.02 kgCO<sub>2e</sub>（計算式為：518.26 m<sup>3</sup>×2.63 kgCO<sub>2e</sub>/m<sup>3</sup>=1,363.02

kgCO<sub>2e</sub>) 的碳足跡數值。再者，用水總量為 15 度亦等同於 15 m<sup>3</sup> 的水，台灣自來水公司 2022 年公布臺灣自來水的碳足跡數值為 0.233kgCO<sub>2e</sub>/m<sup>3</sup>，由此可知前期間自來水總共產生 3.495 kgCO<sub>2e</sub> 的碳足跡數值。

表 4-2 定長加工及鹼性藥劑前處理之油、水、電及藥劑用量使用內容

作業名稱	瓦斯用量(kg)	用電總量(kWh)	用水總量(度)	藥劑用量(kg)	備註
定長加工	N/A	1.4	N/A	N/A	圓盤鋸切機定長加工 200 支切為到 6.2 尺 400 支；竹蘆材料為 13 尺 450 支兩刀去頭去尾。
鹼性藥劑前處理	394	N/A	15	12.511	瓦斯加熱；NaOH 作為鹼性藥劑

(資料來源：本研究整理)

最後，於鹼性藥劑方面，用量為 12.511 kg，由環境部 2022 年公告於氫氧化鈉的碳足跡數值為 0.675 kgCO<sub>2e</sub>/kg，由此可知鹼性藥劑加熱期間總共產生 8.44 kgCO<sub>2e</sub> (計算式為：12.511 kg×0.675 kgCO<sub>2e</sub>/kg =8.44 kgCO<sub>2e</sub>) 的碳足跡數值。綜合上述，在定長鋸切及鹼性藥劑處理作業此期間總共總生 1,374.545 kgCO<sub>2e</sub>(計算式為：1,363.02 + 3.495 + 8.44 =1,374.96 kgCO<sub>2e</sub>) 的碳足跡。圖 4-5 顯示鹼性藥劑前處理之現場情形。



圖 4-5 定長加工及鹼性藥劑前處理之現場情形

(資料來源：本研究拍攝)

## 4.1.3 劈裂、雙面鉋及四面鉋加工作業

- (1) 作業名稱：竹桿劈裂、雙面鉋、毛料定寬及粗部砂磨加工
- (2) 內容說明：將 400 支 6.2 尺長的竹桿進行剖片加工及雙面鉋，接下來再進行定寬作業及砂磨加工，最終加工成 3,000 片集成元。
- (3) 合作廠商：欣林竹藝社
- (4) 數量：400 支（6.2 尺長竹桿）

## ● 油、水、電紀錄及分析：

表 4-3 為竹桿由原竹加工廠（大自然竹業）載運到欣林竹藝社後隨即進行竹桿劈裂、雙面鉋、毛料定寬及粗部砂磨加工等加工內容。

## (1) 原竹載運：

選用三菱堅達 3.49 噸貨車做為載運車輛，載運 400 支 6.2 尺長的竹桿到欣林竹藝社共 9 km，用油總量為 1.2 L，依環境部 2023 年公告於公路運輸移動源使用柴油的碳足跡數值為 3.32 kgCO<sub>2e</sub> / L，由此可知此載運期間總共產生 3.984 kgCO<sub>2e</sub> 的碳足跡數值。

## (2) 竹桿剖片加工：

此部分加工內容為將 400 支 6.2 尺長的竹桿進行剖片加工成 3,200 片，其長×寬×厚為 186×2.7×0.7 cm 集成元，其用電量為 42.2 kWh。環境部 2024 年公告於電力的碳足跡數值為 0.494 kgCO<sub>2e</sub> / kWh，由此可知此定長加工期間總共產生 20.847 kgCO<sub>2e</sub> 的碳足跡數值，圖 4-6 竹片劈裂加工現場情形顯示竹片劈裂加工之現場情形。

## (3) 雙面鉋加工：

此部分加工內容為將 3,000 片集成元定厚加工後為長×寬×厚=186×2.7×0.7 cm，其用電量為 53.9 kWh。可知此定長加工期間總共產生 26.627 kgCO<sub>2e</sub> 的碳足跡數值，圖 4-7 竹片雙面成型加工現場情形顯示竹片經雙面鉋加工之現場情形。

## (4) 毛料定寬作業：

此部分加工內容為將 3,000 片集成元毛料定寬加工後為長×寬×厚=186×2.5×0.7 cm，其用電量為 4.1 kWh。可知此定長加工期間總共產生 2.025 kgCO<sub>2e</sub> 的碳足跡數值。

## (5) 砂磨加工：

此部分加工內容為將 3,000 片集成元砂磨加工後為長×寬×厚=186×2.5×0.5 cm，其用電量為 30.4 kWh。由此可知此定長加工期間總共產生 15.018 kgCO<sub>2e</sub> 的碳足跡數值。

表 4-3 竹桿剖片、雙面鉋、毛料定寬及粗部砂磨加工之油、水、電使用內容

作業名稱	用電總量(kWh)	用油總量(L)	備註
原竹載運	N/A	1.2	高級柴油；大自然竹業載運 400 支 6.2 尺長的竹桿到欣林竹藝社共 9 km；三菱堅達 3.49 噸貨車(平均油耗為 7.3 km/L)
竹桿剖片加工	42.2	N/A	將 400 支 6.2 尺長的竹桿進行剖片加工成 3,200 片集成元(長×寬×厚=186×2.7×0.7 cm)
雙面鉋加工	53.9	N/A	將 3,000 片集成元定厚加工後為長×寬×厚=186×2.7×0.7 cm

毛料定寬作業	4.1	N/A	將 3,000 片集成元毛料定寬加工後為長×寬×厚=186×2.5×0.7 cm
砂磨加工	30.4	N/A	將 3,000 片集成元砂磨加工後為長×寬×厚=186×2.5×0.5 cm

(資料來源：本研究整理)



圖 4-6 竹片劈裂加工現場情形

(資料來源：本研究拍攝)



圖 4-7 竹片雙面成型加工現場情形

(資料來源：本研究拍攝)

## 4.1.4 碳化及乾燥加工作業

- (1) 作業名稱：碳化及乾燥加工
- (2) 內容說明：將 3,000 支竹集成元進行人工乾燥至含水率為 12% 以下，接下來再取出 2,000 支竹集成元進行蒸汽管間接加熱處理。
- (3) 數量：3,000 支竹片進行人工乾燥，其中 2,000 支進行碳化加工。
- (4) 合作廠商：茂昌竹藝社。

## ● 油、水、電紀錄及分析：

表 4-4 竹片人工乾燥及蒸汽熱處理加工之油、水、電使用內容為由欣林竹藝社加工後的 3,000 支竹片載運到茂昌竹藝社後隨即進行竹片乾燥及蒸汽熱處理加工內容。

## (1) 竹片載運：

選用三菱堅達 3.49 噸貨車做為載運車輛，載運 3,000 支 6.2 尺長的竹桿到茂昌竹藝社共 7.5 km，柴油用油總量為 1.03 L。依環境部 2023 年公告於公路運輸移動源使用柴油的碳足跡數值為 3.32 kgCO<sub>2e</sub>/L，由此可知此載運期間總共產生 3.42 kgCO<sub>2e</sub> 的碳足跡數值。

## (2) 人工乾燥加工：

此部分加工內容為將 3,000 片集成元（長×寬×厚=186×2.5×0.5 cm）乾燥至含水率均為 12% 以下，其用電量為 184.6 kWh。可知此乾燥加工期間總共產生 91.192 kgCO<sub>2e</sub> 的碳足跡數值，圖 4-8 顯示竹片人工乾燥加工之現場情形。

## (3) 蒸汽熱處理

此部分加工內容為將 2,000 片集成元（長×寬×厚=186×2.5×0.5 cm）進行蒸汽管熱處理，其含水率約 8~9%，柴油用油總量為 2.2 L。依環境部 2023 年公告於固定源使用柴油的碳足跡數值為 3.29 kgCO<sub>2e</sub>/L，由此可知此期間總共產生 7.238 kgCO<sub>2e</sub> 的碳足跡數值。

表 4-4 竹片人工乾燥及蒸汽熱處理加工之油、水、電使用內容

作業名稱	用電總量 (kWh)	用油總量 (L)	備註
竹片載運	N/A	1.03	高級柴油；欣林竹藝社載運 3,000 支 6.2 尺長的竹集成元到茂昌竹藝社共 7.5 km；三菱堅達 3.49 噸貨車(平均油耗為 7.3 km/L)
人工乾燥設備加工	184.6	N/A	將 3,000 片集成元（長×寬×厚=186×2.5×0.5 cm）乾燥至含水率均為 12% 以下。
蒸汽熱處理	N/A	2.2	將 2,000 片集成元（長×寬×厚=186×2.5×0.5 cm）進行蒸汽管熱處理，其含水率約 8~9%。

(資料來源：本研究整理)



圖 4-8 竹片經人工乾燥及蒸汽熱處理加工之現場情形

(資料來源：本研究拍攝)

#### 4.1.5 竹集成板加工作業

- (1) 作業名稱：竹集成板加工
- (2) 內容說明：將 186×1.8×0.5 cm 集成元加工成 180×32.4×1.8 cm 的集成板材，依市售常用型式加工成平拼、側拼及直交式三種竹集成板組成方式。
- (3) 加工製程：集成元修邊機定寬→佈膠→高週波熱壓→集成板成型（平拼、側拼及直交式）加工→表面整平砂磨作業→裁板機定長加工
- (4) 數量：15 片，經熱處理集成板為每組各膠合拼成三片（共 9 片），未經熱處理集成板為每組各膠合拼成二片（共 6 片）
- (5) 合作廠商：永騰木業有限公司
- (6) 集成元尺寸及數量：186×1.8×0.5 cm 集成元，經碳化集成元為 865 支，未經碳化集成元為 580 支，共計 1,445 支。
- (7) 膠合劑及熱壓條件：使用聚氨基甲酸乙酯樹脂(PU 膠)，佈膠量為 300 g/m<sup>2</sup>，高週波熱壓溫度為 40 °C 持壓 6 min，壓力為 8 kgf/cm<sup>2</sup>。

#### ● 油、水、電紀錄及分析：

由茂昌竹藝社加工後的 1,445 支竹片載運到永騰木業公司後，隨即進行集成元修邊定寬及砂磨定厚加工。

##### (1) 竹片載運：

由表 4-5 可知選用三菱堅達 3.49 噸貨車做為載運車輛，由茂昌竹藝社載運 1,445 支 6.2 尺長的竹桿到永騰木業共 65.5 km，柴油用油總量為 9.2 L。依環境部 2023 年公告於公路運輸移動源使用柴油的碳足跡數值為 3.32 kgCO<sub>2</sub>e / L，由此可知此載運期間總共產生 30.544 kgCO<sub>2</sub>e 的碳足跡數值。

##### (2) 集成元修邊定寬加工

此部分加工內容為集成元精細修邊加工，共計 1,445 支 180×1.8×0.5 cm 集成元，其用電量為 18.6 kWh。可知此加工期間總共產生 9.1884 kgCO<sub>2</sub>e 的碳足跡數值。

##### (3) 集成元砂磨定厚加工

此部分加工內容為集成元砂磨定厚加工，共計 1,445 支 180×1.8×0.5 cm 集

成元 1,445 支 180×1.8×0.5 cm 集成元(碳化 865 支,未碳化 580 支):因砂磨機未設電錶,以電流×時間換算用電量。公式為:  $220 \times \text{電流} \times \text{根數} \times 3 \times \text{時間} / \text{千瓦小時}$ ,  $220 \times 36.51 \times 1.732 / 1000 \times 2h = 27.82 \text{ kWh}$ , 其用電量為 27.82 kWh。可知此定長加工期間總共產生 13.743 kgCO<sub>2e</sub> 的碳足跡數值。

表 4-5 竹集成元竹片載運、修邊定寬及砂磨定厚加工之油、水、電使用內容

作業名稱	用電總量(kWh)	用油總量(L)	備註
竹片載運	N/A	9.2	高級柴油;茂昌竹藝社載運 1,445 支竹集成元(長×寬×厚=186×2.5×0.7 cm)到永騰木業共 65.5 km;三菱堅達 3.49 噸貨車(平均油耗為 7.3 km/L)
集成元修邊定寬加工	18.6	N/A	集成元修邊加工,共計 1,445 支 180×1.8×0.5 cm 集成元
集成元砂磨定厚加工	27.82	N/A	集成元修邊加工,共計 1,445 支 180×1.8×0.5 cm 集成元 1,445 支 180×1.8×0.5 cm 集成元(碳化 865 支,未碳化 580 支): $220 \times 36.51 \times 1.732 / 1000 \times 2h = 27.82 \text{ kWh}$

(資料來源:本研究整理)

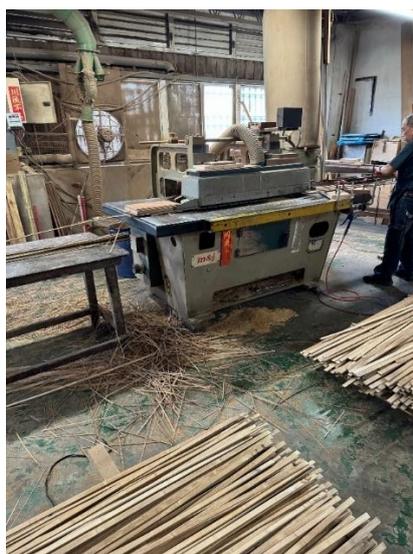


圖 4-9 竹片修邊定寬及砂磨定厚加工之現場情形

(資料來源:本研究拍攝)

(4) 佈膠作業依成板型式分為三種:

i. 平拼板加工:

當 5 片的直交竹集成板加工時則需總佈膠量為  $735 \text{ g/m}^2 \times 5 \text{ 片} = 3.68 \text{ kg}$ 。環境部 2015 年公告於聚氨基甲酸乙酯樹脂(PU)的碳足跡數值為  $3.17 \text{ kgCO}_2\text{e} / \text{kg}$ , 由此可知此加工期間總共產生  $10.176 \text{ kgCO}_2\text{e}$  的碳足跡數值。由上式可知每一片平拼板的碳足跡數值為  $2.333 \text{ kgCO}_2\text{e}/\text{片}$ 。

表 4-6 顯示竹集成板佈膠作業之油、水、電使用內容,此部分加工內容為集成板尺寸 180×32.4×1.8 cm, 碳化板 3 片, 未碳化板 2 片, 佈膠量為  $300 \text{ g/m}^2$ , 使用聚乙烯樹脂(佳欣樹脂股份有限公司, 型號:ME-108)為膠合劑。單層集成

元厚度方向膠合面積： $180\text{cm} \times 0.5\text{cm} \times 18 \text{支} \times 4 \text{層} = 0.65 \text{ m}^2$ ；4層的單層集成元膠合板膠合面積： $180\text{cm} \times 32.4\text{cm} \times 3 \text{層} = 1.75 \text{ m}^2$ ；膠合總面積為  $0.65 \text{ m}^2 + 1.75 \text{ m}^2 = 2.4 \text{ m}^2$ ，單一片平拼竹集成板的佈膠量為  $2.4 \text{ m}^2 \times 300 \text{ g/m}^2 = 720 \text{ g/片}$ 。當5片的平拼竹集成板加工時則需總佈膠量為  $720 \text{ g/m}^2 \times 5 \text{片} = 3.6 \text{ kg}$ 。環境部2015年公告於聚氨基甲酸乙酯樹脂(PU)的碳足跡數值為  $3.17 \text{ kgCO}_2\text{e / kg}$ ，由此可知此加工期間總共產生  $11.412 \text{ kgCO}_2\text{e}$  的碳足跡數值。由上式可知每一片平拼板的碳足跡數值為  $2.282 \text{ kgCO}_2\text{e/片}$ 。

ii. 側拼板加工：

此部分加工內容為集成板尺寸  $180 \times 32.4 \times 1.8 \text{ cm}$ ，碳化板3片，未碳化板2片，佈膠量為  $300 \text{ g/m}^2$ ，使用聚乙烯樹脂（佳欣樹脂股份有限公司，型號：ME-108）為膠合劑。單層集成元厚度方向膠合面積： $180\text{cm} \times 1.8\text{cm} \times 66 \text{支} \times 1 \text{層} = 2.14 \text{ m}^2$ ，單一層側拼竹集成板的佈膠量為  $2.14 \text{ m}^2 \times 300 \text{ g/m}^2 = 642 \text{ g/片}$ 。當5片的平拼竹集成板加工時則需總佈膠量為  $642 \text{ g/m}^2 \times 5 \text{片} = 3.21 \text{ kg}$ 。環境部2015年公告於聚氨基甲酸乙酯樹脂(PU)的碳足跡數值為  $3.17 \text{ kgCO}_2\text{e / kg}$ ，由此可知此加工期間總共產生  $10.176 \text{ kgCO}_2\text{e}$  的碳足跡數值。由上式可知每一片側拼板的碳足跡數值為  $2.035 \text{ kgCO}_2\text{e/片}$ 。

iii. 直交板加工：

此部分加工內容為集成板尺寸  $180 \times 32.4 \times 1.8 \text{ cm}$ ，佈膠量為  $300 \text{ g/m}^2$ ，使用聚乙烯樹脂（佳欣樹脂股份有限公司，型號：ME-108）為膠合劑。上下平拼膠合面積為  $180\text{cm} \times 0.5\text{cm} \times 18 \text{支} \times 2 \text{層} = 0.324 \text{ m}^2$ ；中間層側拼膠合面積為  $180\text{cm} \times 0.8\text{cm} \times 66 \text{支} \times 1 \text{層} = 0.95 \text{ m}^2$ ；三層直交板膠合面積為  $180\text{cm} \times 32.4\text{cm} \times 2 \text{層} = 1.17 \text{ m}^2$ 。三層膠合總面積為  $0.324 + 0.95 + 1.17 = 2.45 \text{ m}^2$ 。單一直交竹集成板的佈膠量為  $2.45 \text{ m}^2 \times 300 \text{ g/m}^2 = 735 \text{ g/片}$ 。當5片的直交竹集成板加工時則需總佈膠量為  $735 \text{ g/m}^2 \times 5 \text{片} = 3.68 \text{ kg}$ 。環境部2015年公告於聚氨基甲酸乙酯樹脂(PU)的碳足跡數值為  $3.17 \text{ kgCO}_2\text{e / kg}$ ，由此可知此加工期間總共產生  $10.176 \text{ kgCO}_2\text{e}$  的碳足跡數值。由上式可知每一片平拼板的碳足跡數值為  $2.333 \text{ kgCO}_2\text{e/片}$ 。

表 4-6 竹集成板佈膠作業之用膠使用量統計

作業名稱		用膠總量 (kg)	備註
佈膠作業	平拼板加工	3.60	集成板尺寸 $180 \times 32.4 \times 1.8 \text{ cm}$ 碳化板3片，未碳化板2片 $720 \text{ g/m}^2 \times 5 \text{片} = 3.6 \text{ kg}$
	側拼板加工	3.21	集成板尺寸 $180 \times 32.4 \times 1.8 \text{ cm}$ 碳化板3片，未碳化板2片 $642 \text{ g/m}^2 \times 5 \text{片} = 3.21 \text{ kg}$
	直交板加工	3.68	集成板尺寸 $180 \times 32.4 \times 1.8 \text{ cm}$ 碳化板3片，未碳化板2片 $735 \text{ g/m}^2 \times 5 \text{片} = 3.68 \text{ kg}$

(資料來源：本研究整理)

(5) 高週波熱壓板依成板型式分為三種：

◇ 平拼板加工：

表 4-7 顯示高週波熱壓板加工之油、水、電使用內容，此部分加工內容30片(碳化板共12片+未碳化共8片+直交上下板共10片=30片)單層平拼用電量： $220 \times 21.51 \times 1.732 / 1000 \times 1.8\text{hr} = 14.75 \text{ kWh}$ ；20片： $14.75 / 30 \times 20 = 9.83 \text{ kWh}$ ；5片集

成板用電量： $220 \times 21.44 \times 1.732 / 1000 \times 0.5 \text{hr} = 4.08 \text{ kWh}$ ，其用電量為 13.91 kWh。環境部 2024 年公告於電力的碳足跡數值為  $0.494 \text{ kgCO}_2\text{e}/\text{kWh}$ ，由此可知此加工期間總共產生  $6.872 \text{ kgCO}_2\text{e}$ （計算式為： $13.91 \text{ kWh} \times 0.494 \text{ kgCO}_2\text{e} / \text{kWh} = 6.872 \text{ kgCO}_2\text{e}$ ）的碳足跡數值。由上式可知每一片平拼板的碳足跡數值為  $6.872 \text{ kgCO}_2\text{e} / 5 \text{片} = 1.374 \text{ kgCO}_2\text{e} / \text{片}$ 。



圖 4-10 竹片佈膠作業之現場情形

（資料來源：本研究拍攝）

◇ 側拼板加工：

亦可得知此部分加工內容為 8 片(碳化板共 33 片+未碳化共 2 片+直交上下板共 3 片=8 片)側拼用電量： $220 \times 23.23 \times 1.732 / 1000 \times 0.8 \text{hr} = 7.08 \text{ kWh}$ ；5 片： $7.08 / 8 \times 5 = 4.43 \text{ kWh}$ ，其用電量為 4.43 kWh。可知此加工期間總共產生  $2.188 \text{ kgCO}_2\text{e}$  的碳足跡數值。由上式可知每一片側拼板的碳足跡數值為  $2.188 \text{ kgCO}_2\text{e} / 5 \text{片} = 0.438 \text{ kgCO}_2\text{e} / \text{片}$ 。直

◇ 交板加工：

顯示此部分加工內容為 10 片上下平拼： $14.75 / 30 \times 10 = 4.92 \text{ kWh}$ ；中間側拼： $7.08 / 8 \times 3 = 2.66 \text{ kWh}$ ；5 片： $220 \times 21.23 \times 1.732 / 1000 = 8.09 \text{ kWh}$ ； $8.09 \times 0.5 \text{ hr} = 4.04 \text{ kWh}$ ，其用電量為 11.62 kWh。環境部 2024 年公告於電力的碳足跡數值為  $0.494 \text{ kgCO}_2\text{e} / \text{kWh}$ ，由此可知此加工期間總共產生  $5.740 \text{ kgCO}_2\text{e}$ （計算式為： $11.62 \text{ kWh} \times 0.494 \text{ kgCO}_2\text{e} / \text{kWh} = 5.740 \text{ kgCO}_2\text{e}$ ）的碳足跡數值。由上式可知每一片直交板的碳足跡數值為  $5.740 \text{ kgCO}_2\text{e} / 5 \text{片} = 1.148 \text{ kgCO}_2\text{e} / \text{片}$ 。

表 4-7 高週波熱壓板加工之用電數據量測蒐集

作業名稱	用電總量 (kWh)	備註
平拼板加工	13.91	30 片(碳化板 12+未碳化 8+直交上下板 10=30)單層平拼用電量： $220 \times 21.51 \times 1.732 / 1000 \times 1.8 \text{hr} = 14.75 \text{ kWh}$ 20 片拼板用電量： $14.75 / 30 \times 20 = 9.83 \text{ kWh}$ 5 片集成板用電量： $220 \times 21.44 \times 1.732 / 1000 \times 0.5 \text{hr} = 4.08 \text{ kWh}$
側拼板加工	4.43	8 片(碳化板 3+未碳化 2+直交上下板 3=8)側拼用電量： $220 \times 23.23 \times 1.732 / 1000 \times 0.8 \text{hr} = 7.08 \text{ kWh}$ 5 片拼板用電量： $7.08 / 8 \times 5 = 4.43 \text{ kWh}$
直交板加工	11.62	10 片上下平拼用電量： $14.75 / 30 \times 10 = 4.92 \text{ kWh}$ 中間側拼用電量： $7.08 / 8 \times 3 = 2.66 \text{ kWh}$ 5 片拼板用電量： $220 \times 21.23 \times 1.732 / 1000 = 8.09 \text{ kWh}$ ； $8.09 \times 0.5$

		hr = 4.04 kWh
--	--	---------------

(資料來源：本研究整理)

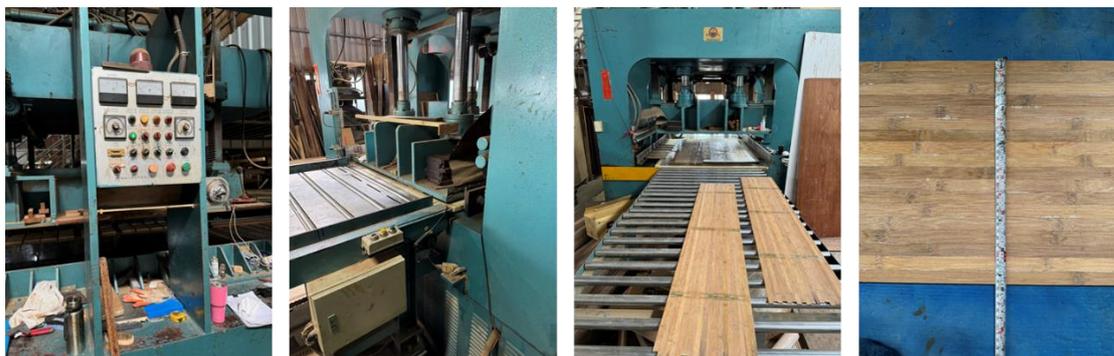


圖 4-11 竹片高週波熱壓板加工之現場情形

(資料來源：本研究拍攝)

(6) 表面整平砂磨作業

表 4-8 顯示竹集成板表面整平砂磨加工之油、水、電使用內容，此部分加工內容為 15 片(碳化 9 片,未碳化板 6 片) 單片砂磨面積  $180 \times 32.4 \text{ cm} \times 2 \text{ 面} = 1.17 \text{ m}^2 \times 15 \text{ 片} = 17.55 \text{ m}^2$ ，其用電量為 32.12 kWh。可知此加工期間總共產生 15.867 kgCO<sub>2e</sub> 的碳足跡數值，由上式可知每一片集成板表面整平砂磨作業的碳足跡數值為  $15.867 \text{ kgCO}_2\text{e}/15 \text{ 片} = 1.058 \text{ kgCO}_2\text{e}/\text{片}$ 。

(7) 裁板機定長加工

表 4-8 亦顯示竹集成板裁板機定長加工之油、水、電使用內容，此部分加工內容為 15 片(碳化 9 片,未碳化板 6 片)集成板 (尺寸  $180 \times 32.4 \times 1.8 \text{ cm}$ ) 進行砂磨，其用電量為 0.5 kWh。可知此加工期間總共產生 0.247 kgCO<sub>2e</sub> 的碳足跡數值，由上式可知每一片集成板裁板機定長加工的碳足跡數值為  $0.247 \text{ kgCO}_2\text{e}/15 \text{ 片} = 0.016 \text{ kgCO}_2\text{e}/\text{片}$ 。

表 4-8 竹集成板表面整平砂磨及裁板機定長加工之油、水、電使用內容

作業名稱	用電總量(kWh)	用油總量(L)	用膠總量(kg)	備註
表面整平砂磨作業	32.12	N/A	N/A	15 片(碳化板 9 片,未碳化板 6 片)，單片砂磨面積 $180 \times 32.4 \text{ cm} \times 2 \text{ 面} = 1.17 \text{ m}^2 \times 15 \text{ 片} = 17.55 \text{ m}^2$ 用電量計算： $220 \times (75.8 + 92.8) \times 1.732 / 1000 \times 0.5 \text{ h} = 32.12 \text{ kWh}$
裁板機定長加工	0.5	N/A	N/A	15 片(碳化 9 片,未碳化板 6 片)，集成板尺寸 $180 \times 32.4 \times 1.8 \text{ cm}$

(資料來源：本研究整理)

## 第二節 竹桿件碳足跡盤查結果

本研究竹桿件製程共分為三個階段：原竹砍伐、定長鋸切、鹼性藥劑處理，如圖 4-12 所示。

本研究竹桿件竹種使用四年生孟宗竹 (*Phyllostachys edulis*)，長度為 13 公尺，約為 3.939 公尺；直徑為 11.4 公分(抽樣 20 支竹桿件平均)；重量為 11.5 公斤(抽樣 20 支竹桿件平均)，成品如圖 4-13。

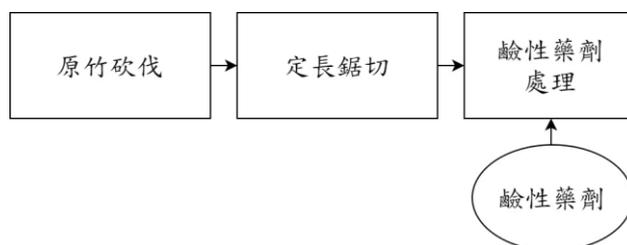


圖 4-12 竹桿件製程圖

(資料來源：本研究繪製)



圖 4-13 竹桿件成品

(資料來源：本研究拍攝)

本研究竹桿件盤查總產量為 450 支，計算碳足跡時依數量(支)為分配原則，依前述過程加總在前三階段碳足跡為 2.254 kgCO<sub>2</sub>e/支，加上配銷階段碳足跡為 2.348 kgCO<sub>2</sub>e/支，詳如表 4-9 所示。

表 4-9 竹桿件碳足跡盤查計算表

階段	群組	作業名稱	總活動量	每支數量	碳排放係數	碳足跡 (kgCO <sub>2</sub> e/支)
A 1	能源	伐竹作業-手提鏈鋸	5.05 (L)汽油	0.011 (L)	2.880 (kgCO <sub>2</sub> e/L) 車用汽油(於固定源使用)	0.032
A 2	能源	伐竹作業-載運	14.07 (L)柴油	0.031 (L)	3.320 (kgCO <sub>2</sub> e/L) 柴油(於公路運輸移動源使用)	0.104
A 2	能源	原料階段來料運輸-陸運(TKM)-鹼性藥劑	8.66 (kg) 鹼性藥劑	0.003 (tkm)	0.587 (kgCO <sub>2</sub> e/tkm) 柴油(於公路運輸移動源使用)	0.002
A 3	能源	鹼性藥劑前處理-桶裝瓦斯	658.80 (m <sup>3</sup> )天然氣	0.797 (m <sup>3</sup> )	2.630 (kgCO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup> )	2.097

					天然氣(於固定源使用)	
A3	資源	鹼性藥劑前處理-自來水	10.38 (m <sup>3</sup> )自來水	0.023 (m <sup>3</sup> )	0.233 (kgCO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup> ) 臺灣自來水	0.005
A3	原物料	鹼性藥劑前處理-鹼性藥劑	8.66 (kg) 鹼性藥劑	0.019 (kg)	0.675 (kgCO <sub>2</sub> e/kg) 氫氧化鈉	0.013
A3	能源	定長加工	0.97 度(kWh)電力	0.002 (kWh)	0.494 (kgCO <sub>2</sub> e/kWh) 電力	0.001
A4	產品	配銷-竹桿件	5175 (kg)竹桿件	0.712 (tkm)	0.131 (kgCO <sub>2</sub> e/tkm) 營業大貨車(柴油)	0.093
竹桿件碳排放總量						2.348

註：A1：原物料階段；A2：原料運輸階段；A3：製造生產階段；A4：資材運送階段

(資料來源：本研究整理)

而在配銷階段，本研究參考 112 年交通部汽車貨運調查報告中之汽車貨運運量及延噸公里統計表，其中竹桿件應屬商品別(編號 041)其他木竹製品，故可得平均運距為 61.9 公里。再依營業大貨車(柴油)係數為 0.131 延噸公里，可得知每支竹桿件於配銷階段碳足跡排放為 0.093 kgCO<sub>2</sub>e。

竹桿件碳足跡盤查結果為 2.348 kgCO<sub>2</sub>e/支，其中碳足跡排在鹼性藥劑前處理占比最大為 90.2%，如表 4-10 所示，在此階段使用天然氣作為燃料加熱水是相當耗能的過程。往後可採燒竹子本身廢棄部分如削減之竹葉、竹桿，或評估使用其他生質能以降低此過程碳排放量。另以生命週期階段分類來看，則在 A3 製造生產階段碳排放占比最大，占 90.2%，如圖 4-14。

表 4-10 竹桿件碳足跡占比

作業名稱	總活動量	碳足跡 (kgCO <sub>2</sub> e/支)	碳足跡 占比
伐竹作業-手提鏈鋸	5.05(L)汽油	0.032	1.4%
伐竹作業-載運	14.07(L)柴油	0.104	4.4%
原料階段來料運輸-陸運 (TKM)-鹼性藥劑	8.66(kg) 鹼性藥劑	0.002	0.1%
鹼性藥劑前處理-桶裝瓦斯	358.80(m <sup>3</sup> )天然氣	2.097	89.3%
鹼性藥劑前處理-自來水	10.38(m <sup>3</sup> )水	0.005	0.2%
鹼性藥劑前處理-鹼性藥劑	8.66(kg) 鹼性藥劑	0.013	0.6%
定長加工	0.97(kWh)電力	0.001	0.0%
配銷-竹桿件	5175.00(kg)竹桿件	0.093	4.0%

(資料來源：本研究整理)

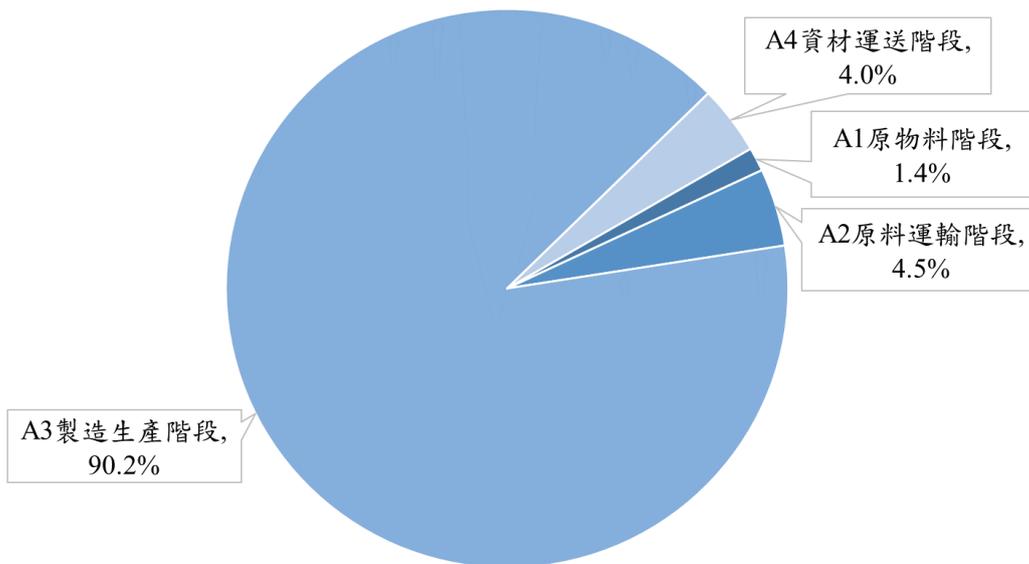


圖 4-14 竹桿件碳排放各階段占比

(資料來源：本研究繪製)

### 第三節 竹集成板材碳足跡盤查結果

本研究竹集成板材製程共分為十二個階段，如圖 4-15 所示。

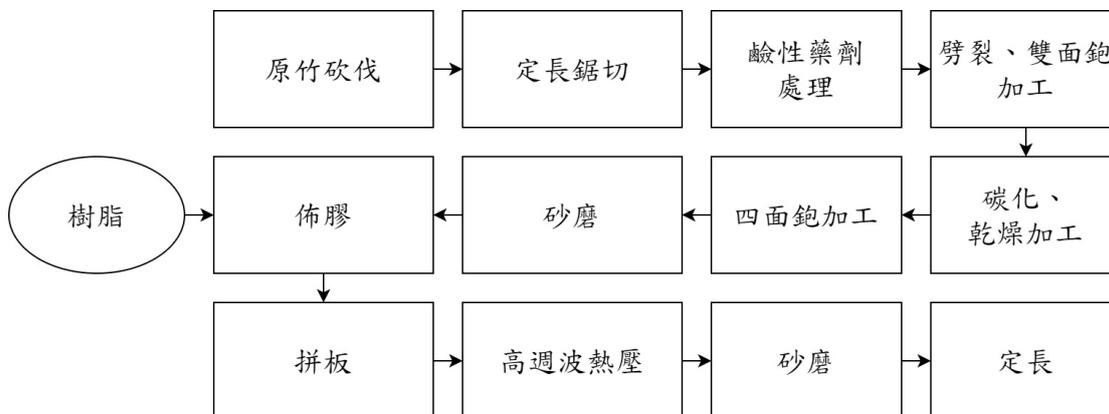


圖 4-15 竹集成板材製程圖

(資料來源：本研究繪製)

本研究竹集成板材使用四年生孟宗竹 (*Phyllostachys edulis*) 進行加工並同步量測蒐集加工生產線上之各項耗能數據，以供後續計算國產竹建材之碳足跡。竹集成板材由於加工過程拼接之方法不同以及區分是否有進行碳化過程，成品之總碳排放量亦會相異。因此本研究共進行六種不同竹集成板之加工生產線碳足跡盤查，此六種竹集成板材分別為：碳化-平拼板、碳化-側拼板、碳化-直交板、未碳化-平拼板、未碳化-側拼板、未碳化-直交板。這六種成品均為相同尺寸，單片為長 180 公分、寬 32.4 公分、厚 1.8 公分；單片重量平均約為 10.68 公斤。其秤重記錄如表 4-11 所示，而六種竹集成板材之成品如圖 4-16 之照片所示。



圖 4-16 竹集成板材成品(a)碳化-平拼板；(b)碳化-側拼板；(c)碳化-直交板；(d)未碳化-平拼板；(e)未碳化-側拼板；(f)未碳化-直交板

(資料來源：本研究拍攝)

本研究六種竹集成板材總生產量共 15 片，依高週波熱壓成板形式不同及經碳化(熱處理)與否，共有 6 種不同形式之板材，其重量如下表 4-11 所示。

表 4-11 竹集成板材成品重量紀錄表

試材名稱	樣品 1(公斤)	樣品 2(公斤)	樣品 3(公斤)	平均(公斤)	標準差
碳化-平拼	11.27	11.07	11.33	11.22	0.14
碳化-側拼	11.36	11.33	11.42	11.37	0.05
碳化-直交	10.86	10.46	10.57	10.63	0.21
未碳化-平拼	10.42	10.47	N/A	10.45	0.04
未碳化-側拼	10.45	10.25	N/A	10.35	0.14
未碳化-直交	10.12	9.98	N/A	10.05	0.10

(資料來源：本研究整理)

每種板材平均碳足跡為 26.889kgCO<sub>2</sub>e/片，計算碳足跡時依數量(支)或數量(集成元)為分配原則。在配銷階段，本研究參考 112 年交通部汽車貨運調查報告中之汽車貨運運量及延噸公里統計表，其中竹集成板材應屬商品別(編號 040)合板及其他組合木材，故可得平均運距為 80.0 公里。再依營業大貨車(柴油)係數為 0.131 延噸公里，可得知每片竹集成板材於配銷階段碳足跡排放為 0.112 kgCO<sub>2</sub>e。

表 4-12 碳化平拼竹集成板材碳足跡盤查計算表

階段	群組	作業名稱	總活動量	每片數量	碳排放係數	碳足跡 (kgCO <sub>2</sub> e/片)
A1	能源	伐竹作業-手提鏈鋸	1.01 (L)汽油	0.068 (L)	2.880 (kgCO <sub>2</sub> e/L) 車用汽油(於固定源使用)	0.195
A2	能源	伐竹作業-載運	2.82 (L)柴油	0.188 (L)	3.320 (kgCO <sub>2</sub> e/L) 柴油(於公路運輸移動源)	0.625

					使用)	
A2	能源	原料階段來料運輸-陸運(TKM)-鹼性藥劑	1.74 (kg)鹼性藥劑	0.017 (tkm)	0.587 (kgCO <sub>2</sub> e/tkm) 柴油(於公路運輸移動源使用)	0.010
A3	能源	鹼性藥劑前處理-桶裝瓦斯	72.01 (m <sup>3</sup> )天然氣	4.801 (m <sup>3</sup> )	2.630 (kgCO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup> ) 天然氣(於固定源使用)	12.625
A3	資源	鹼性藥劑前處理-自來水	2.08 (m <sup>3</sup> )自來水	0.139 (m <sup>3</sup> )	0.233 (kgCO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup> ) 臺灣自來水	0.032
A3	原物料	鹼性藥劑前處理-鹼性藥劑	1.74 (kg)鹼性藥劑	0.116 (kg)	0.675 (kgCO <sub>2</sub> e/kg) 氫氧化鈉	0.078
A3	能源	定長加工	0.19 (kWh)電力	0.013 (kWh)	0.494 (kgCO <sub>2</sub> e/kWh) 電力	0.006
A2	能源	劈裂-原竹載運	0.54 (L)柴油	0.0036 (L)	3.320 (kgCO <sub>2</sub> e/L) 柴油(於公路運輸移動源使用)	0.120
A3	能源	竹桿剖片加工	19.06 (kWh)電力	1.270 (kWh)	0.494 (kgCO <sub>2</sub> e/kWh) 電力	0.628
A3	能源	雙面鉋加工	25.96 (kWh)電力	1.731 (kWh)	0.494 (kgCO <sub>2</sub> e/kWh) 電力	0.855
A3	能源	毛料定寬作業	1.97 (kWh)電力	0.132 (kWh)	0.494 (kgCO <sub>2</sub> e/kWh) 電力	0.065
A3	能源	砂磨加工	14.64 (kWh)電力	0.976 (kWh)	0.494 (kgCO <sub>2</sub> e/kWh) 電力	0.482
A2	能源	乾燥-原竹載運	0.50 (L)柴油	0.033 (L)	3.320 (kgCO <sub>2</sub> e/L) 柴油(於公路運輸移動源使用)	0.110
A3	能源	人工乾燥加工	88.92 (kWh)電力	5.928 (kWh)	0.494 (kgCO <sub>2</sub> e/kWh) 電力	2.928
A3	能源	蒸汽熱處理(碳化9片)	0.95 (L)柴油	0.106 (L)	3.290 (kgCO <sub>2</sub> e/L) 柴油(於固定源使用)	0.348
A2	能源	集成元-原竹載運	9.20 (L)柴油	0.613 (L)	3.320 (kgCO <sub>2</sub> e/L) 柴油(於公路運輸移動源使用)	2.036
A3	能源	集成元修邊定寬加工	18.60 (kWh)電力	1.240 (kWh)	0.494 (kgCO <sub>2</sub> e/kWh) 電力	0.613
A3	能源	集成元砂磨定厚加工	27.82 (kWh)電力	1.855 (kWh)	0.494 (kgCO <sub>2</sub> e/kWh) 電力	0.916
A3	原物料	佈膠作業-平拚板(5片)	3.60 (kg)聚氨基甲酸乙酯樹脂	0.720 (kg)	3.170 (kgCO <sub>2</sub> e/kg) 聚氨基甲酸乙酯樹脂(PU)	2.282

A3	能源	高週波作業-平拵板 (5片)	13.91 (kWh)電力	2.782 (kWh)	0.494 (kgCO <sub>2</sub> e/kWh) 電力	1.374
A3	能源	表面整平砂磨作業 (15片)	32.12 (kWh)電力	2.141 (kWh)	0.494 (kgCO <sub>2</sub> e/kWh) 電力	1.058
A3	能源	裁板機定長加工作業 (15片)	0.50 (kWh)電力	0.033 (kWh)	0.494 (kgCO <sub>2</sub> e/kWh) 電力	0.016
A4	產品	配銷-竹集成板材 (15片)	160.20 (kg)竹集成 成板材	0.854 延噸公里 (tkm)	0.131 (kgCO <sub>2</sub> e/tkm) 營業大貨車(柴油)	0.112
碳化平拵竹集成板材碳排放總量						27.516

註 1：A1：原物料階段；A2：原料運輸階段；A3：製造生產階段；A4：資材運送階段

(資料來源：本研究整理)

表 4-13 碳化側拵竹集成板材碳足跡盤查計算表

階段	群組	作業名稱	總活動量	每片數量	碳排放係數	碳足跡 (kgCO <sub>2</sub> e/片)
A1	能源	伐竹作業-手提鏈鋸	1.01 (L)汽油	0.068 (L)	2.880 (kgCO <sub>2</sub> e/L) 車用汽油(於固定源使用)	0.195
A2	能源	伐竹作業-載運	2.82 (L)柴油	0.188 (L)	3.320 (kgCO <sub>2</sub> e/L) 柴油(於公路運輸移動源使用)	0.625
A2	能源	原料階段來料運輸-陸運(TKM)-鹼性藥劑	1.74 (kg)鹼性藥劑	0.017 (tkm)	0.587 (kgCO <sub>2</sub> e/tkm) 柴油(於公路運輸移動源使用)	0.010
A3	能源	鹼性藥劑前處理-桶裝瓦斯	72.01 (m <sup>3</sup> )天然氣	4.801 (m <sup>3</sup> )	2.630 (kgCO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup> ) 天然氣(於固定源使用)	12.625
A3	資源	鹼性藥劑前處理-自來水	2.08 (m <sup>3</sup> )自來水	0.139 (m <sup>3</sup> )	0.233 (kgCO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup> ) 臺灣自來水	0.032
A3	原物料	鹼性藥劑前處理-鹼性藥劑	1.74 (kg)鹼性藥劑	0.116 (kg)	0.675 (kgCO <sub>2</sub> e/kg) 氫氧化鈉	0.078
A3	能源	定長加工	0.19 (kWh)電力	0.013 (kWh)	0.494 (kgCO <sub>2</sub> e/kWh) 電力	0.006
A2	能源	劈裂-原竹載運	0.54 (L)柴油	0.0036 (L)	3.320 (kgCO <sub>2</sub> e/L) 柴油(於公路運輸移動源使用)	0.120
A3	能源	竹桿剖片加工	19.06 (kWh)電力	1.270 (kWh)	0.494 (kgCO <sub>2</sub> e/kWh) 電力	0.628
A3	能源	雙面鉋加工	25.96 (kWh)電力	1.731 (kWh)	0.494 (kgCO <sub>2</sub> e/kWh) 電力	0.855
A3	能源	毛料定寬作業	1.97 (kWh)電力	0.132 (kWh)	0.494 (kgCO <sub>2</sub> e/kWh)	0.065

					電力	
A3	能源	砂磨加工	14.64 (kWh) 電力	0.976 (kWh)	0.494 (kgCO <sub>2</sub> e/kWh) 電力	0.482
A2	能源	乾燥-原竹載運	0.50 (L) 柴油	0.033 (L)	3.320 (kgCO <sub>2</sub> e/L) 柴油(於公路運輸移動源使用)	0.110
A3	能源	人工乾燥加工	88.92 (kWh) 電力	5.928 (kWh)	0.494 (kgCO <sub>2</sub> e/kWh) 電力	2.928
A3	能源	蒸汽熱處理(碳化9片)	0.95 (L) 柴油	0.106 (L)	3.290 (kgCO <sub>2</sub> e/L) 柴油(於固定源使用)	0.348
A2	能源	集成元-原竹載運	9.20 (L) 柴油	0.613 (L)	3.320 (kgCO <sub>2</sub> e/L) 柴油(於公路運輸移動源使用)	2.036
A3	能源	集成元修邊定寬加工	18.60 (kWh) 電力	1.240 (kWh)	0.494 (kgCO <sub>2</sub> e/kWh) 電力	0.613
A3	能源	集成元砂磨定厚加工	27.82 (kWh) 電力	1.855 (kWh)	0.494 (kgCO <sub>2</sub> e/kWh) 電力	0.916
A3	原物料	佈膠作業-側拚板(5片)	3.21 (kg) 聚氨基甲酸乙酯樹脂	0.642 (kg)	3.170 (kgCO <sub>2</sub> e/kg) 聚氨基甲酸乙酯樹脂(PU)	2.035
A3	能源	高週波作業-側拚板(5片)	4.43 (kWh) 電力	0.886 (kWh)	0.494 (kgCO <sub>2</sub> e/kWh) 電力	1.374
A3	能源	表面整平砂磨作業(15片)	32.12 (kWh) 電力	2.141 (kWh)	0.494 (kgCO <sub>2</sub> e/kWh) 電力	1.058
A3	能源	裁板機定長加工作業(15片)	0.50 (kWh) 電力	0.033 (kWh)	0.494 (kgCO <sub>2</sub> e/kWh) 電力	0.016
A4	產品	配銷-竹集成板材(15片)	160.20 (kg) 竹集成板材	0.854 延噸公里(tkm)	0.131 (kgCO <sub>2</sub> e/tkm) 營業大貨車(柴油)	0.112
碳化側拼竹集成板材碳排放總量						26.332

註1：A1：原物料階段；A2：原料運輸階段；A3：製造生產階段；A4：資材運送階段

(資料來源：本研究整理)

表 4-14 碳化直交竹集成板材碳足跡盤查計算表

階段	群組	作業名稱	總活動量	每片數量	碳排放係數	碳足跡(kgCO <sub>2</sub> e/片)
A1	能源	伐竹作業-手提鏈鋸	1.01 (L) 汽油	0.068 (L)	2.880 (kgCO <sub>2</sub> e/L) 車用汽油(於固定源使用)	0.195
A2	能源	伐竹作業-載運	2.82 (L) 柴油	0.188 (L)	3.320 (kgCO <sub>2</sub> e/L) 柴油(於公路運輸移動源使用)	0.625

A2	能源	原料階段來料運輸-陸運(TKM)-鹼性藥劑	1.74 (kg)鹼性藥劑	0.017 (tkm)	0.587 (kgCO <sub>2</sub> e/tkm) 柴油(於公路運輸移動源使用)	0.010
A3	能源	鹼性藥劑前處理-桶裝瓦斯	72.01 (m <sup>3</sup> )天然氣	4.801 (m <sup>3</sup> )	2.630 (kgCO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup> ) 天然氣(於固定源使用)	12.625
A3	資源	鹼性藥劑前處理-自來水	2.08 (m <sup>3</sup> )自來水	0.139 (m <sup>3</sup> )	0.233 (kgCO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup> ) 臺灣自來水	0.032
A3	原物料	鹼性藥劑前處理-鹼性藥劑	1.74 (kg)鹼性藥劑	0.116 (kg)	0.675 (kgCO <sub>2</sub> e/kg) 氫氧化鈉	0.078
A3	能源	定長加工	0.19 (kWh)電力	0.013 (kWh)	0.494 (kgCO <sub>2</sub> e/kWh) 電力	0.006
A2	能源	劈裂-原竹載運	0.54 (L)柴油	0.0036 (L)	3.320 (kgCO <sub>2</sub> e/L) 柴油(於公路運輸移動源使用)	0.120
A3	能源	竹桿剖片加工	19.06 (kWh)電力	1.270 (kWh)	0.494 (kgCO <sub>2</sub> e/kWh) 電力	0.628
A3	能源	雙面鉋加工	25.96 (kWh)電力	1.731 (kWh)	0.494 (kgCO <sub>2</sub> e/kWh) 電力	0.855
A3	能源	毛料定寬作業	1.97 (kWh)電力	0.132 (kWh)	0.494 (kgCO <sub>2</sub> e/kWh) 電力	0.065
A3	能源	砂磨加工	14.64 (kWh)電力	0.976 (kWh)	0.494 (kgCO <sub>2</sub> e/kWh) 電力	0.482
A2	能源	乾燥-原竹載運	0.50 (L)柴油	0.033 (L)	3.320 (kgCO <sub>2</sub> e/L) 柴油(於公路運輸移動源使用)	0.110
A3	能源	人工乾燥加工	88.92 (kWh)電力	5.928 (kWh)	0.494 (kgCO <sub>2</sub> e/kWh) 電力	2.928
A3	能源	蒸汽熱處理(碳化9片)	0.95 (L)柴油	0.106 (L)	3.290 (kgCO <sub>2</sub> e/L) 柴油(於固定源使用)	0.348
A2	能源	集成元-原竹載運	9.20 (L)柴油	0.613 (L)	3.320 (kgCO <sub>2</sub> e/L) 柴油(於公路運輸移動源使用)	2.036
A3	能源	集成元修邊定寬加工	18.60 (kWh)電力	1.240 (kWh)	0.494 (kgCO <sub>2</sub> e/kWh) 電力	0.613
A3	能源	集成元砂磨定厚加工	27.82 (kWh)電力	1.855 (kWh)	0.494 (kgCO <sub>2</sub> e/kWh) 電力	0.916
A3	原物料	佈膠作業-直交板(5片)	3.68 (kg)聚氨基甲酸酯樹脂	0.736 (kg)	3.170 (kgCO <sub>2</sub> e/kg) 聚氨基甲酸酯樹脂(PU)	2.333

A3	能源	高週波作業-直交板(5片)	11.62 (kWh)電力	2.324 (kWh)	0.494 (kgCO <sub>2</sub> e/kWh)電力	1.148
A3	能源	表面整平砂磨作業(15片)	32.12 (kWh)電力	2.141 (kWh)	0.494 (kgCO <sub>2</sub> e/kWh)電力	1.058
A3	能源	裁板機定長加工作業(15片)	0.50 (kWh)電力	0.033 (kWh)	0.494 (kgCO <sub>2</sub> e/kWh)電力	0.016
A4	產品	配銷-竹集成板材(15片)	160.20 (kg)竹集成板材	0.854 延噸公里 (tkm)	0.131 (kgCO <sub>2</sub> e/tkm)營業大貨車(柴油)	0.112
碳化直交竹集成板材碳排放總量						27.341

註 1：A1：原物料階段；A2：原料運輸階段；A3：製造生產階段；A4：資材運送階段

(資料來源：本研究整理)

表 4-15 未碳化平拼竹集成板材碳足跡盤查計算表

階段	群組	作業名稱	總活動量	每片數量	碳排放係數	碳足跡 (kgCO <sub>2</sub> e/片)
A1	能源	伐竹作業-手提鏈鋸	1.01 (L)汽油	0.068 (L)	2.880 (kgCO <sub>2</sub> e/L)車用汽油(於固定源使用)	0.195
A2	能源	伐竹作業-載運	2.82 (L)柴油	0.188 (L)	3.320 (kgCO <sub>2</sub> e/L)柴油(於公路運輸移動源使用)	0.625
A2	能源	原料階段來料運輸-陸運(TKM)-鹼性藥劑	1.74 (kg)鹼性藥劑	0.017 (tkm)	0.587 (kgCO <sub>2</sub> e/tkm)柴油(於公路運輸移動源使用)	0.010
A3	能源	鹼性藥劑前處理-桶裝瓦斯	72.01 (m <sup>3</sup> )天然氣	4.801 (m <sup>3</sup> )	2.630 (kgCO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup> )天然氣(於固定源使用)	12.625
A3	資源	鹼性藥劑前處理-自來水	2.08 (m <sup>3</sup> )自來水	0.139 (m <sup>3</sup> )	0.233 (kgCO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup> )臺灣自來水	0.032
A3	原物料	鹼性藥劑前處理-鹼性藥劑	1.74 (kg)鹼性藥劑	0.116 (kg)	0.675 (kgCO <sub>2</sub> e/kg)氫氧化鈉	0.078
A3	能源	定長加工	0.19 (kWh)電力	0.013 (kWh)	0.494 (kgCO <sub>2</sub> e/kWh)電力	0.006
A2	能源	劈裂-原竹載運	0.54 (L)柴油	0.0036 (L)	3.320 (kgCO <sub>2</sub> e/L)柴油(於公路運輸移動源使用)	0.120
A3	能源	竹桿剖片加工	19.06 (kWh)電力	1.270 (kWh)	0.494 (kgCO <sub>2</sub> e/kWh)電力	0.628
A3	能源	雙面鉋加工	25.96 (kWh)電力	1.731 (kWh)	0.494 (kgCO <sub>2</sub> e/kWh)電力	0.855
A3	能源	毛料定寬作業	1.97 (kWh)電力	0.132 (kWh)	0.494 (kgCO <sub>2</sub> e/kWh)	0.065

					電力	
A3	能源	砂磨加工	14.64 (kWh) 電力	0.976 (kWh)	0.494 (kgCO <sub>2</sub> e/kWh) 電力	0.482
A2	能源	乾燥-原竹載運	0.50 (L) 柴油	0.033 (L)	3.320 (kgCO <sub>2</sub> e/L) 柴油(於公路運輸移動源使用)	0.110
A3	能源	人工乾燥加工	88.92 (kWh) 電力	5.928 (kWh)	0.494 (kgCO <sub>2</sub> e/kWh) 電力	2.928
A2	能源	集成元-原竹載運	9.20 (L) 柴油	0.613 (L)	3.320 (kgCO <sub>2</sub> e/L) 柴油(於公路運輸移動源使用)	2.036
A3	能源	集成元修邊定寬加工	18.60 (kWh) 電力	1.240 (kWh)	0.494 (kgCO <sub>2</sub> e/kWh) 電力	0.613
A3	能源	集成元砂磨定厚加工	27.82 (kWh) 電力	1.855 (kWh)	0.494 (kgCO <sub>2</sub> e/kWh) 電力	0.916
A3	原物料	佈膠作業-平拵板(5片)	3.60 (kg) 聚氨基甲酸乙酯樹脂	0.720 (kg)	3.170 (kgCO <sub>2</sub> e/kg) 聚氨基甲酸乙酯樹脂(PU)	2.282
A3	能源	高週波作業-平拵板(5片)	13.91 (kWh) 電力	2.782 (kWh)	0.494 (kgCO <sub>2</sub> e/kWh) 電力	1.374
A3	能源	表面整平砂磨作業(15片)	32.12 (kWh) 電力	2.141 (kWh)	0.494 (kgCO <sub>2</sub> e/kWh) 電力	1.058
A3	能源	裁板機定長加工作業(15片)	0.50 (kWh) 電力	0.033 (kWh)	0.494 (kgCO <sub>2</sub> e/kWh) 電力	0.016
A4	產品	配銷-竹集成板材(15片)	160.20 (kg) 竹集成板材	0.854 延噸公里 (tkm)	0.131 (kgCO <sub>2</sub> e/tkm) 營業大貨車(柴油)	0.112
未碳化平拵竹集成板材碳排放總量						27.168

註 1：A1：原物料階段；A2：原料運輸階段；A3：製造生產階段；A4：資材運送階段

(資料來源：本研究整理)

表 4-16 未碳化側拵竹集成板材碳足跡盤查計算表

階段	群組	作業名稱	總活動量	每片數量	碳排放係數	碳足跡 (kgCO <sub>2</sub> e/片)
A1	能源	伐竹作業-手提鏈鋸	1.01 (L) 汽油	0.068 (L)	2.880 (kgCO <sub>2</sub> e/L) 車用汽油(於固定源使用)	0.195
A2	能源	伐竹作業-載運	2.82 (L) 柴油	0.188 (L)	3.320 (kgCO <sub>2</sub> e/L) 柴油(於公路運輸移動源使用)	0.625
A2	能源	原料階段來料運輸-陸運(TKM)-鹼性藥劑	1.74 (kg) 鹼性藥劑	0.017 (tkm)	0.587 (kgCO <sub>2</sub> e/tkm) 柴油(於公路運輸移動)	0.010

					源使用)	
A3	能源	鹼性藥劑前處理-桶裝瓦斯	72.01 (m <sup>3</sup> )天然氣	4.801 (m <sup>3</sup> )	2.630 (kgCO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup> ) 天然氣(於固定源使用)	12.625
A3	資源	鹼性藥劑前處理-自來水	2.08 (m <sup>3</sup> )自來水	0.139 (m <sup>3</sup> )	0.233 (kgCO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup> ) 臺灣自來水	0.032
A3	原物料	鹼性藥劑前處理-鹼性藥劑	1.74 (kg)鹼性藥劑	0.116 (kg)	0.675 (kgCO <sub>2</sub> e/kg) 氫氧化鈉	0.078
A3	能源	定長加工	0.19 (kWh)電力	0.013 (kWh)	0.494 (kgCO <sub>2</sub> e/kWh) 電力	0.006
A2	能源	劈裂-原竹載運	0.54 (L)柴油	0.0036 (L)	3.320 (kgCO <sub>2</sub> e/L) 柴油(於公路運輸移動源使用)	0.120
A3	能源	竹桿剖片加工	19.06 (kWh)電力	1.270 (kWh)	0.494 (kgCO <sub>2</sub> e/kWh) 電力	0.628
A3	能源	雙面鉋加工	25.96 (kWh)電力	1.731 (kWh)	0.494 (kgCO <sub>2</sub> e/kWh) 電力	0.855
A3	能源	毛料定寬作業	1.97 (kWh)電力	0.132 (kWh)	0.494 (kgCO <sub>2</sub> e/kWh) 電力	0.065
A3	能源	砂磨加工	14.64 (kWh)電力	0.976 (kWh)	0.494 (kgCO <sub>2</sub> e/kWh) 電力	0.482
A2	能源	乾燥-原竹載運	0.50 (L)柴油	0.033 (L)	3.320 (kgCO <sub>2</sub> e/L) 柴油(於公路運輸移動源使用)	0.110
A3	能源	人工乾燥加工	88.92 (kWh)電力	5.928 (kWh)	0.494 (kgCO <sub>2</sub> e/kWh) 電力	2.928
A2	能源	集成元-原竹載運	9.20 (L)柴油	0.613 (L)	3.320 (kgCO <sub>2</sub> e/L) 柴油(於公路運輸移動源使用)	2.036
A3	能源	集成元修邊定寬加工	18.60 (kWh)電力	1.240 (kWh)	0.494 (kgCO <sub>2</sub> e/kWh) 電力	0.613
A3	能源	集成元砂磨定厚加工	27.82 (kWh)電力	1.855 (kWh)	0.494 (kgCO <sub>2</sub> e/kWh) 電力	0.916
A3	原物料	佈膠作業-側拵板(5片)	3.21 (kg)聚氨基甲酸酯樹脂	0.642 (kg)	3.170 (kgCO <sub>2</sub> e/kg) 聚氨基甲酸酯樹脂(PU)	2.035
A3	能源	高週波作業-側拵板(5片)	4.43 (kWh)電力	0.886 (kWh)	0.494 (kgCO <sub>2</sub> e/kWh) 電力	1.374
A3	能源	表面整平砂磨作業(15片)	32.12 (kWh)電力	2.141 (kWh)	0.494 (kgCO <sub>2</sub> e/kWh) 電力	1.058

A3	能源	裁板機定長加工 作業(15片)	0.50 (kWh)電力	0.033 (kWh)	0.494 (kgCO <sub>2</sub> e/kWh) 電力	0.016
A4	產品	配銷-竹集成板材 (15片)	160.20 (kg)竹集 成板材	0.854 延噸公里 (tkm)	0.131 (kgCO <sub>2</sub> e/tkm) 營業大貨車(柴油)	0.112
未碳化側拼竹集成板材碳排放總量						25.984

註 1：A1：原物料階段；A2：原料運輸階段；A3：製造生產階段；A4：資材運送階段

(資料來源：本研究整理)

表 4-17 未碳化直交竹集成板材碳足跡盤查計算表

階段	群組	作業名稱	總活動量	每片數量	碳排放係數	碳足跡 (kgCO <sub>2</sub> e/片)
A1	能源	伐竹作業-手提鏈 鋸	1.01 (L)汽油	0.068 (L)	2.880 (kgCO <sub>2</sub> e/L) 車用汽油(於固定源使 用)	0.195
A2	能源	伐竹作業-載運	2.82 (L)柴油	0.188 (L)	3.320 (kgCO <sub>2</sub> e/L) 柴油(於公路運輸移動 源使用)	0.625
A2	能源	原料階段來料運 輸-陸運(TKM)-鹼 性藥劑	1.74 (kg)鹼性藥 劑	0.017 (tkm)	0.587 (kgCO <sub>2</sub> e/tkm) 柴油(於公路運輸移動 源使用)	0.010
A3	能源	鹼性藥劑前處理- 桶裝瓦斯	72.01 (m <sup>3</sup> )天然氣	4.801 (m <sup>3</sup> )	2.630 (kgCO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup> ) 天然氣(於固定源使用)	12.625
A3	資源	鹼性藥劑前處理- 自來水	2.08 (m <sup>3</sup> )自來水	0.139 (m <sup>3</sup> )	0.233 (kgCO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup> ) 臺灣自來水	0.032
A3	原物料	鹼性藥劑前處理- 鹼性藥劑	1.74 (kg)鹼性藥 劑	0.116 (kg)	0.675 (kgCO <sub>2</sub> e/kg) 氫氧化鈉	0.078
A3	能源	定長加工	0.19 (kWh)電力	0.013 (kWh)	0.494 (kgCO <sub>2</sub> e/kWh) 電力	0.006
A2	能源	劈裂-原竹載運	0.54 (L)柴油	0.0036 (L)	3.320 (kgCO <sub>2</sub> e/L) 柴油(於公路運輸移動 源使用)	0.120
A3	能源	竹桿剖片加工	19.06 (kWh)電力	1.270 (kWh)	0.494 (kgCO <sub>2</sub> e/kWh) 電力	0.628
A3	能源	雙面鉋加工	25.96 (kWh)電力	1.731 (kWh)	0.494 (kgCO <sub>2</sub> e/kWh) 電力	0.855
A3	能源	毛料定寬作業	1.97 (kWh)電力	0.132 (kWh)	0.494 (kgCO <sub>2</sub> e/kWh) 電力	0.065
A3	能源	砂磨加工	14.64 (kWh)電力	0.976 (kWh)	0.494 (kgCO <sub>2</sub> e/kWh) 電力	0.482
A2	能源	乾燥-原竹載運	0.50 (L)柴油	0.033 (L)	3.320 (kgCO <sub>2</sub> e/L)	0.110

					柴油(於公路運輸移動源使用)	
A3	能源	人工乾燥加工	88.92 (kWh) 電力	5.928 (kWh)	0.494 (kgCO <sub>2</sub> e/kWh) 電力	2.928
A2	能源	集成元-原竹載運	9.20 (L) 柴油	0.613 (L)	3.320 (kgCO <sub>2</sub> e/L) 柴油(於公路運輸移動源使用)	2.036
A3	能源	集成元修邊定寬加工	18.60 (kWh) 電力	1.240 (kWh)	0.494 (kgCO <sub>2</sub> e/kWh) 電力	0.613
A3	能源	集成元砂磨定厚加工	27.82 (kWh) 電力	1.855 (kWh)	0.494 (kgCO <sub>2</sub> e/kWh) 電力	0.916
A3	原物料	佈膠作業-直交板(5片)	3.68 (kg) 聚氨基甲酸乙酯樹脂	0.736 (kg)	3.170 (kgCO <sub>2</sub> e/kg) 聚氨基甲酸乙酯樹脂(PU)	2.333
A3	能源	高週波作業-直交板(5片)	11.62 (kWh) 電力	2.324 (kWh)	0.494 (kgCO <sub>2</sub> e/kWh) 電力	1.148
A3	能源	表面整平砂磨作業(15片)	32.12 (kWh) 電力	2.141 (kWh)	0.494 (kgCO <sub>2</sub> e/kWh) 電力	1.058
A3	能源	裁板機定長加工作業(15片)	0.50 (kWh) 電力	0.033 (kWh)	0.494 (kgCO <sub>2</sub> e/kWh) 電力	0.016
A4	產品	配銷-竹集成板材(15片)	160.20 (kg) 竹集成板材	0.854 延噸公里 (tkm)	0.131 (kgCO <sub>2</sub> e/tkm) 營業大貨車(柴油)	0.112
未碳化直交竹集成板材碳排放總量						26.993

故最後可得，竹集成板材依不同製程其碳足跡整理為下表 4-18，平均碳足跡 26.889 kgCO<sub>2</sub>e/片，46.106 kgCO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>，其中以碳化-平拼板碳足跡最高。若以作業名稱來看，其中碳足跡排放鹼性藥劑前處理作業占比最大為 47.1%(碳化)及 47%(未碳化)，如表 4-19 及表 4-20 示；而若以生命週期階段分類來看，則在 A3 製造生產階段碳排放占比最大，占 96.5%(碳化)及 96.9%(未碳化)，如圖 4-17。

表 4-18 不同加工法下之竹集成板材碳足跡排放量

竹集成板材	碳足跡 (kgCO <sub>2</sub> e/片)	碳足跡 (kgCO <sub>2</sub> e/m <sup>2</sup> )
碳化-平拼板	27.516	47.181
碳化-側拼板	26.332	45.151
碳化-直交板	27.341	46.880
未碳化-平拼板	27.168	46.585
未碳化-側拼板	25.984	44.555
未碳化-直交板	26.993	46.284
平均	26.889	46.106

(資料來源：本研究整理)

表 4-19 碳化竹集成板材碳足跡占比

作業名稱	總活動量	碳足跡 (kgCO <sub>2</sub> e/片)	碳足跡占比
伐竹作業-手提鏈鋸	1.01 (L)汽油	0.195	0.7%
伐竹作業-載運	2.82 (L)柴油	0.625	2.3%
原料階段來料運輸-陸運 (TKM)-鹼性藥劑	1.74 (kg) 鹼性藥劑	0.010	0.0%
鹼性藥劑前處理-桶裝瓦斯	72.01 (m <sup>3</sup> )天然氣	12.625	46.7%
鹼性藥劑前處理-自來水	2.08 (m <sup>3</sup> )水	0.032	0.1%
鹼性藥劑前處理-鹼性藥劑	1.74 (kg) 鹼性藥劑	0.078	0.3%
定長加工	0.19 (kWh)電力	0.006	0.0%
劈裂-原竹載運	0.54 (L)柴油	0.120	0.4%
竹桿剖片加工	19.06 (kWh)電力	0.628	2.3%
雙面鉋加工	25.96 (kWh)電力	0.855	3.2%
毛料定寬作業	1.97 (kWh)電力	0.065	0.2%
砂磨加工	14.64 (kWh)電力	0.482	1.8%
碳化-原竹載運	0.50 (L)柴油	0.110	0.4%
人工乾燥加工	88.92 (kWh)電力	2.928	10.8%
蒸汽熱處理(碳化9片)	0.64 (L)柴油	0.348	1.3%
集成元-原竹載運	9.20 (L)柴油	2.036	7.5%
集成元修邊定寬加工	18.60 (kWh)電力	0.613	2.3%
集成元砂磨定厚加工	27.82 (kWh)電力	0.916	3.4%
佈膠作業-三項平均(5片)	3.50 (kg)高密度聚乙烯	2.217	8.2%
高週波作業-三項平均(5片)	9.99 (kWh)電力	0.987	3.6%
表面整平砂磨作業(15片)	32.12 (kWh)電力	1.058	3.9%
裁板機定長加工作業(15片)	0.50 (kWh)電力	0.016	0.1%
配銷-竹集成板材(15片)	160.20 (kg)竹集成板材	0.112	0.4%

(資料來源：本研究整理)

表 4-20 未碳化竹集成板材碳足跡占比

作業名稱	總活動量	碳足跡 (kgCO <sub>2</sub> e/片)	碳足跡占比
伐竹作業-手提鏈鋸	1.01 (L)汽油	0.195	0.7%
伐竹作業-載運	2.82 (L)柴油	0.625	2.3%
原料階段來料運輸-陸運 (TKM)-鹼性藥劑	1.74 (kg) 鹼性藥劑	0.010	0.0%
鹼性藥劑前處理-桶裝瓦斯	72.01 (m <sup>3</sup> )天然氣	12.625	46.6%
鹼性藥劑前處理-自來水	2.08 (m <sup>3</sup> )水	0.032	0.1%
鹼性藥劑前處理-鹼性藥劑	1.74 (kg) 鹼性藥劑	0.078	0.3%
定長加工	0.19 (kWh)電力	0.006	0.0%
劈裂-原竹載運	0.54 (L)柴油	0.120	0.4%
竹桿剖片加工	19.06 (kWh)電力	0.628	2.3%
雙面鉋加工	25.96 (kWh)電力	0.855	3.2%
毛料定寬作業	1.97 (kWh)電力	0.065	0.2%
砂磨加工	14.64 (kWh)電力	0.482	1.8%
碳化-原竹載運	0.50 (L)柴油	0.110	0.4%
人工乾燥加工	88.92 (kWh)電力	2.928	10.8%

集成元-原竹載運	9.20 (L)柴油	0.348	1.3%
集成元修邊定寬加工	18.60 (kWh)電力	2.036	7.5%
集成元砂磨定厚加工	27.82 (kWh)電力	0.613	2.3%
佈膠作業-三項平均(5片)	3.50 (kg)高密度聚乙烯	1.745	6.4%
高週波作業-三項平均(5片)	9.99 (kWh)電力	1.382	5.1%
表面整平砂磨作業(15片)	32.12 (kWh)電力	1.148	4.2%
裁板機定長加工作業(15片)	0.50 (kWh)電力	1.058	3.9%
配銷-竹集成板材(15片)	160.20 (kg)竹集成板材	0.016	0.1%

(資料來源：本研究整理)

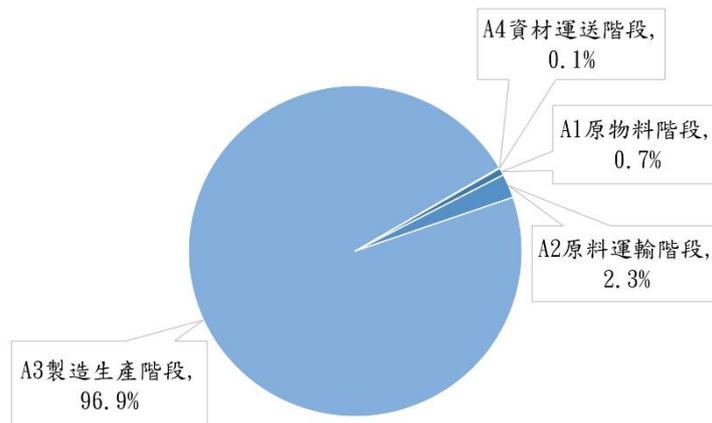


圖 4-17 未碳化竹集成板材各階段碳排放量占比

(資料來源：本研究繪製)

## 第四節 減碳效益評估

### 4.4.1 竹構與鋼筋混凝土構涼亭減碳效益評估

本研究竹桿件減碳效益規劃使用竹桿件搭建一竹構涼亭如圖 4-18，另和一般鋼筋混凝土構涼亭如圖 4-19 透過其工料數量統計分別計算其碳排。工料碳排分析資料整理如下表 4-21。

表 4-21 工料碳排分析資料

分類	材料/工項名稱	碳排量 kgCO <sub>2</sub> e	單位	資料來源
木竹	竹桿件	2.348	支	本研究
木竹	竹集成板材	26.889	片	本研究
木竹	竹集成板材	46.106	m <sup>2</sup>	本研究
木竹	木模板(1.5cm)	1	m <sup>2</sup>	來源 LCBA;更新於 2017
水泥	預拌混凝土(3000psi)	327.75	m <sup>3</sup>	來源 LCBA;更新於 2017
土質	文化瓦	7.08	m <sup>2</sup>	來源 LCBA;更新於 2017
金屬	鋼筋	1.15	kg	ABRI 初級資料庫,2022
塑膠	PE 防水布(聚乙烯防潮膜)	3.864	m <sup>2</sup>	ABRI 初級資料庫,2022 本研究換算
地坪裝修	貼磁磚地坪(基準值)	33.23	m <sup>2</sup>	低碳建築評估手冊
地坪裝修	緩衝材水泥砂漿+貼地磚	35.66	m <sup>2</sup>	低碳建築評估手冊
地坪裝修	硬實木和室高架地板	17.5	m <sup>2</sup>	來源 LCBA;更新於 2017

(資料來源：本研究整理)

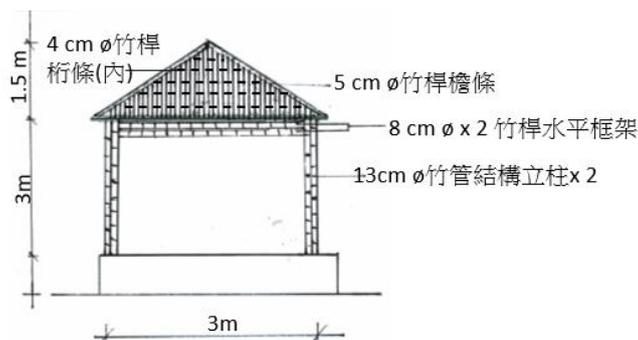


圖 4-18 竹構涼亭示意圖

(資料來源：本研究繪製)

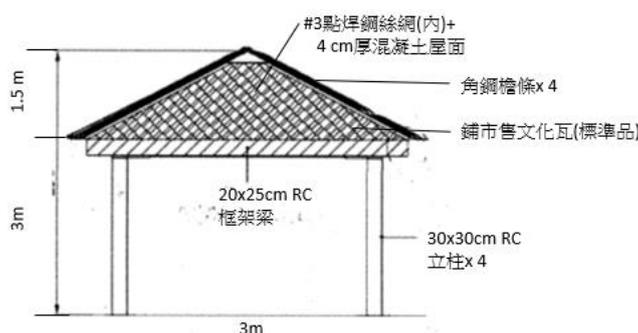


圖 4-19 鋼筋混凝土構涼亭示意圖

(資料來源：本研究繪製)

表 4-22 竹構涼亭工料碳排放分析表

工程材料	單位	數量	單位碳排放量	總碳排放量(kgCO <sub>2</sub> e)
1. 結構竹桿 8 支 (直徑 13cm 兩支竹桿綁紮)	m	24	2.348 (kgCO <sub>2</sub> e/支)	18.784
2. 水平框架竹桿 8 支 (直徑 8cm 兩支竹桿綁紮)	m	24	2.348 (kgCO <sub>2</sub> e/支)	18.784
3. 檐條(5cm 直徑竹桿) 4 支	m	14	2.348 (kgCO <sub>2</sub> e/支)	9.392
4. 桁條(4cm 直徑竹桿) 4 支	m	66	2.348 (kgCO <sub>2</sub> e/支)	9.392
5. 竹集成板 (單片: 180x30x1.8cm)	片	45	26.889 (kgCO <sub>2</sub> e/片)	1,210.005
竹構涼亭碳排放總量合計				1,266.357

(資料來源：本研究整理)

表 4-23 鋼筋混凝土構涼亭工料碳排放分析表

工程材料	單位	數量	單位碳排放量	總碳排放量(kgCO <sub>2</sub> e)	備註
1. 鋼筋工程(鋼筋)	kg	700	1.15 (kgCO <sub>2</sub> e/kg)	805.000	柱、梁、屋頂版鋼筋綁紮
2. 模板工程(木模板 1.5cm)	m <sup>2</sup>	30	1.00 (kgCO <sub>2</sub> e/m <sup>2</sup> )	30.000	柱、梁、屋頂版模板組立
3. 混凝土(3000psi 預拌混凝土)	m <sup>3</sup>	3	327.75 (kgCO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup> )	983.250	場拌 3000psi 混凝土含人工澆置
4. 貼文化瓦(文化瓦)	m <sup>2</sup>	24	7.08 (kgCO <sub>2</sub> e/m <sup>2</sup> )	169.920	-
RC 構涼亭碳排放總量合計				1,988.170	

(資料來源：本研究整理)

竹構涼亭總碳排為 1,266.357 kgCO<sub>2</sub>e；而 RC 鋼筋混擬土構涼亭總碳排為 1,988.170 kgCO<sub>2</sub>e，足可見使用竹材建構涼亭可比一般 RC 構涼亭更有減碳效益。竹構造涼亭較 RC 造涼亭減碳約 722 kg，相當於減碳 36.61%。然而若考慮生命週期，以竹構造涼亭耐用年限 15 年；RC 構造涼亭耐用年限 60 年計算，則竹構造涼亭生命週期碳排為 3,799.07 kgCO<sub>2</sub>e；RC 構造涼亭生命週期碳排為 1,988.17 kgCO<sub>2</sub>e，則竹構造涼亭反而較 RC 構造涼亭更不具減碳效益，減碳比例為-91.1%。

#### 4.4.2 室內裝修地坪應用竹集成板材之減碳效益評估

本研究竹集成板材減碳效益規劃使用竹集成板材和一般拋光石英磚來鋪設 100 m<sup>2</sup> 地坪，以此比較其工料之碳排，如下圖 4-20 及圖 4-21。

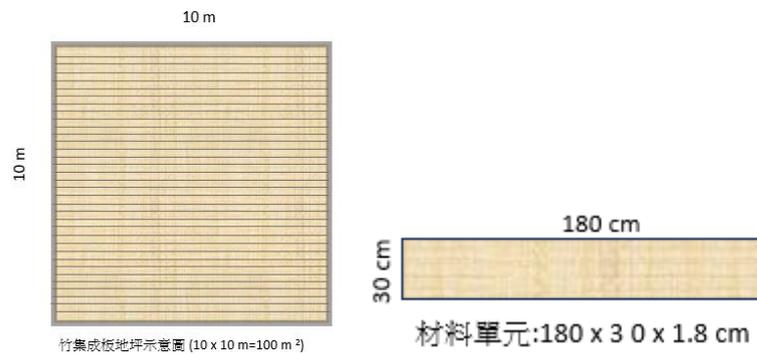


圖 4-20 竹集成板材地坪鋪設示意圖

(資料來源：本研究繪製)

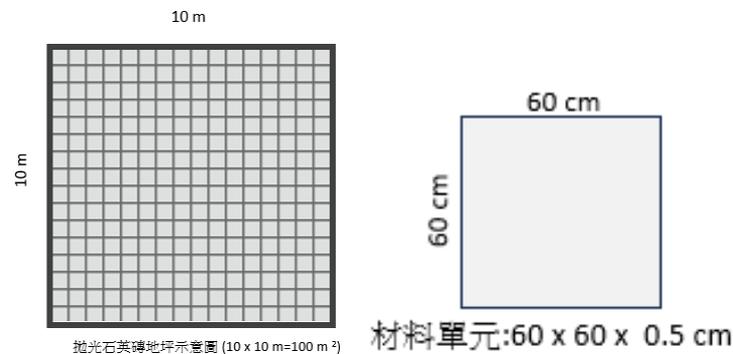


圖 4-21 拋光石英磚地坪鋪設示意圖

(資料來源：本研究繪製)

表 4-24 竹集成板材鋪設地坪工料碳排放分析表

工程材料	單位	數量	單位碳排放量	總碳排放量 (kgCO <sub>2</sub> e)
1. 竹集成板材 (單片:180x30x1.8cm)	m <sup>2</sup>	100	46.106 (kgCO <sub>2</sub> e/m <sup>2</sup> )	4,610.600
2. 聚乙烯防潮膜 (直徑 8cm 兩支竹桿併紮)	m <sup>2</sup>	100	3.864 (kgCO <sub>2</sub> e/m <sup>2</sup> )	386.400
竹集成板材鋪設地坪碳排放總量合計				4,997.000

(資料來源：本研究整理)

表 4-25 拋光石英磚鋪設地坪工料碳排放分析表

工程材料	單位	數量	單位碳排放量	總碳排放量 (kgCO <sub>2</sub> e)
貼磁磚地坪(基準值)	m <sup>2</sup>	100	33.23 (kgCO <sub>2</sub> e/ m <sup>2</sup> )	3,323
拋光石英磚鋪設地坪碳排放總量合計				3,323

(資料來源：本研究整理)

表 4-26 拋光石英磚鋪設隔音地坪工料碳排放分析表

工程材料	單位	數量	單位碳排放量	總碳排放量 (kgCO <sub>2</sub> e)
緩衝材水泥砂漿+貼地磚	m <sup>2</sup>	100	35.66 (kgCO <sub>2</sub> e/ m <sup>2</sup> )	3,566
拋光石英磚鋪設隔音地坪碳排放總量合計				3,566

(資料來源：本研究整理)

表 4-27 硬實木和室高架地板鋪設地坪工料碳排放分析表

工程材料	單位	數量	單位碳排放量	總碳排放量 (kgCO <sub>2</sub> e)
硬實木和室高架地板	m <sup>2</sup>	100	17.50 (kgCO <sub>2</sub> e/ m <sup>2</sup> )	1,750
硬實木和室高架地板鋪設地坪碳排放總量合計				1,750

(資料來源：本研究整理)

如以竹集成板材鋪設，總碳排放為 4,997.000 kgCO<sub>2</sub>e；而拋光石英磚部分，則引用低碳建築評估手冊數據(林憲德 2023)，以貼磁磚地坪基準值計算總碳排放 3,323 kgCO<sub>2</sub>e；若考慮隔音問題，以緩衝材水泥砂漿+貼地磚基準值計算總碳排放 3,566 kgCO<sub>2</sub>e。竹地板構法反而較傳統磁磚構法增加碳排 1,674 kg，相當於增加 50.38%之碳排放量。其主要原因在於竹集成板材加工過程熱壓與膠合之碳排比重大，加工過程之工序多且複雜，加上竹構地板下方需另外進行防水處理增加防水材使用量，總體而言反而較貼磁磚構法碳排高，不利減碳。若與硬實木和室高架地板相比，增加碳排 3,247kg，相當於增加 185.54%之碳排放量。

## 第五章 結論與建議

有鑑於國內竹材加工產業式微再加上國內竹建材需求量少，國內已難以找到專為竹建材進行完整加工之加工廠商。為了完成國產竹建材之碳足跡盤查，本研究於雲林石壁地區實際砍伐 650 支竹材，並委託南投竹山地區及台中大雅等地共五間廠商，分別進行 1 種竹桿件與 6 種竹集成板材之各項加工作業，以此完成各階段耗能資數據蒐集，以完成從搖籃到工地範疇之碳足跡盤查計算。同時完成 2 種竹構造案例之減碳效益評估。

### 第一節 結論

本計畫完成之工作項目與研究成果如下：

1. 本研究整理國內外相關竹建材碳足跡文獻及竹建材應用於建築設計案例，國內案例計七例、國外案例計三例。
2. 本研究依循 ISO 14067 產品碳足跡盤查，確立國產竹建材自搖籃到工地範疇之碳足跡盤查方法。
3. 本研究以竹桿件和竹集成板材為碳足跡盤查對象，竹桿件碳足跡盤查結果直徑 13 公分、13 尺長單支竹桿件之碳排放量為 3.287 kgCO<sub>2</sub>e/支。
4. 竹集成板材部分，則依是否板材經碳化處理以及板材拼接方式之不同區分六種成品。每種成品單片尺寸皆為 180cm 長×30cm 寬×1.8cm 厚。其碳足跡盤查結果為單片平均碳排放為 26.889 kgCO<sub>2</sub>e/片，相當於每單位面積之碳排放量為 46.106 kgCO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>。
5. 在減碳效益評估部分，以一假設之休憩涼亭施工為例。比較竹構涼亭(主要以竹桿件綁扎構築)與鋼筋混凝土構造涼亭，在同樣規模尺寸下由其工料分析進行其各總碳排放量之比較。發現竹構涼亭之總碳排放量為 1,266.357 kgCO<sub>2</sub>e，而 RC 造涼亭為 1,988.170 kgCO<sub>2</sub>e。竹構造涼亭較 RC 造涼亭減碳約 722 kg，相當於減碳 36.31%。然而若考慮生命週期，以竹構造涼亭耐用年限 15 年；RC 構造涼亭耐用年限 60 年計算，則竹構造涼亭生命週期碳排為 3,799.07 kgCO<sub>2</sub>e；RC 構造涼亭生命週期碳排為 1,988.17 kgCO<sub>2</sub>e，則竹構造涼亭反而較 RC 構造涼亭更不具減碳效益，減碳比例為-91.1%。
6. 若以室內地坪裝修為例，比較竹集成板材鋪裝與拋光石英磚鋪裝二種方法之碳排放量。在同樣鋪設 100m<sup>2</sup>之室內地坪，比較其使用之各項工料並算其總碳排放量。竹集成板材構法之總碳排為 4,997kgCO<sub>2</sub>e；而拋光石英磚構法之總碳排放為 3,323 kgCO<sub>2</sub>e；若考慮隔音問題，以緩衝材水泥砂漿+貼地磚基準值計算總碳排放量為 3,566 kgCO<sub>2</sub>e。竹地板構法反而較傳統磁磚構法增加碳排 1,674 kg，相當於增加 50.38%之碳排放量。其主要原因在於竹集成板材加工過程熱壓與膠合之碳排比重大，加工過程之工序多且複雜，加上竹構地板下方需另外進行防水處理增加防水材使用量，總體而言反而較貼磁磚構法

碳排高，不利減碳。若與硬實木和室高架地板相比，增加碳排 3,247kg，相當於增加 185.54%之碳排放量。

## 第二節 建議

### 建議一

竹建材在建築產業之低碳應用與揭露(立即可行建議)

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：農業部林業及自然保育署

透過本研究發現不同的加工方式，造成竹建材成品之蘊含碳差異大。減碳效益隨竹建材應用處之不同而異。建議未來應以生命週期之角度考量竹建材耐用年限、維護成本等因素，進行更為全面的以生命週期角度評估竹建材之低碳效益。另因應 2050 淨零排放之國家目標及碳管理是當前最主流減碳方式之一，鼓勵廠商對竹建材產品提出產品碳排放資訊揭露文件，可引導竹建材廠商與國家淨零排放政策及國家永續發展目標逐步接軌，並降低產業衝擊。

### 建議二

針對木竹材料之設計及應用加強宣導推廣：(中長期建議)

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：農業部、財團法人台灣建築中心

竹子生長快速，具有輕量化及單位體積強度高等優點，且台灣盛產竹材，如能廣泛應用於建築材料上，可帶動國內竹產業升級轉型，目前，竹建材已納入健康及生態綠建材評定範圍，目前亦有竹地板取得綠建材標章，未來，建議強化竹建材設計及應用之宣導推廣，使消費者了解竹建材良好的特性，以提高本土竹建材使用率。

### 附錄一：期初審查意見回覆表

項次	委員意見	意見回覆
1	本案投標廠商對本計畫之瞭解尚屬完整，內容及執行方式也是可行，主持人學經歷符合規定。	感謝委員肯定。
2	第 16 頁兩種竹建材碳盤查(竹桿、竹地板材)之流程圖建議須有中英對照。	遵照辦理。
3	依內政部建研所過去研究報告「建築碳足跡評估概論」，碳足跡評估分「使用碳排」與「蘊含碳排」亦即建築能源使用部分與建材製造運輸與施工。本案分為「原料取得」、「製造階段」、「配送銷售階段」三階段，如何予以整合？	本計畫內所區分之三階段即為碳足跡中從搖籃到工地範疇之碳排放，其盤查之範圍與所內蘊含碳排評估中 A1「原物料」至 A4「資材運送」之範疇一致。
4	本案為竹建材碳足跡盤查，建議前列章節應由文獻討論其他材料之碳盤查，以為比較。	感謝委員建議，本計畫擬將文獻探討與其他材料之碳排比較。
5	建築材料竹木受限材料強度，難與 RC、鋼材競爭，高度化建築發展之趨勢，碳足跡評估(盤查)當然以竹(孟宗竹)為最低，惟以結構安全而言，建議應補充文字於前言內，避免誤導以竹木取代 RC、鋼構之誤解。	感謝委員建議，遵照辦理。
6	有關碳足跡係屬環境部主管業務，請問是否了解環境部現有國產竹之碳足跡標籤？	本研究之碳足跡盤查標準將引用並依循環境部之木、竹製板材碳足跡產品類別規則(CFP-PCR)進行。
7	第 17 頁所提產品類別規則(PCR)涉及原料取得、製造、配送銷售、消費者使用、廢棄處理等階段，本研究僅匡列前三階段，請說明是否符合環境部之規定？	依本案招標文件之需求說明「建立國產竹材從搖籃到工地範疇之碳足跡數據」，意指 PCR 規則中之前三階段，此三階段之碳排盤查邊界亦契合所內建築蘊含碳排評估之內容，可直接與其評估系統接軌使用。但若要符合環境部之 PCR 則需包括消費者使用與廢棄處理階段。此部分之研究範圍，擬未來與所內召開工作會議決議後辦理之。
8	本案研究主題為產品之碳足跡，與本所其他建築能效標示及低蘊含碳建築標示(以建築為主體)不同，因此必須以 ISO 14067 為主，請本案釐清。	本計畫將遵循 ISO14067 標準進行碳足跡盤查。



## 附錄二：期中審查意見回覆表

項次	委員意見	意見回覆
1	本研究在建立國產竹建材從搖籃到工地之碳足跡，參採國際常見之生產盤查法，擬依 ISO 14067 標準進行原料採取、運輸、生產及產品配送等碳排放數據收集建立。惟國內竹產業式微，本計畫特自行委託業者處理，由現場量測耗能數據，以取得一級數據，計畫踏實具體，值得肯定。	感謝委員肯定。
2	期中報告書摘要一、研究緣起第一段及第二段重複，請修正。另緒論提及竹林面積佔人工造林面積半數，建請補充說明詳細。	摘要重複處已修正
3	報告書 P.22 國產竹建材之建築應用案例，在節能減碳應用具一定效果，另外建議探討病蟲害影響到結構及使用年限的問題。縱然有瓦斯加熱及 NaOH 作為鹼性藥劑處理，但年限如何，請提供業者參考。	病蟲害與防腐年限等課題過去所內亦有它案進行研究探討。
4	報告書 P.43 進行竹桿與竹集成板材之加工製作，進行盤查整個過程之碳排放量，建議補充以竹集成板材和木板材在相同的使用及效益下，分析 2 者碳排放量及價格進行比較，俾供業者參考。	感謝委員建議，擬補充於期末報告中。
5	建議說明選定竹桿件及竹集成板材做為產品碳足跡盤查對象之原因，並敘明於實建屋構造之應用範圍。應先分析竹材用於主結構或次結構(裝修材)再選擇主題材料。	本案選定竹桿件與竹集成材之原因，是乃經文獻與案例回顧後，環顧國內使用竹材作為建築材料之應用多以此二種竹建材居多。
6	本研究初步結果指出目前已無進行竹建材之加工，本研究最後亦委託竹材加工廠，進行竹桿件及竹集成板材計算碳排放量，考量實際應用與需求是否不符?建請補充說明。	雖國內由於進口竹材廉價再加上國內使用竹建材並不普及，因此國產竹材加工產業式微。為順利完成計畫對竹建材之碳足跡盤查以納入我國現行「低蘊含碳建築評估」內，以作為未來逐步推廣以國產竹作為建材之目的，遂以最小可完成一批次之竹建材加工生產原則下，委託加工生產，以減少與大規模生產時最終碳足跡盤查結果之誤差。

7	報告書摘要一兩段文字重複呈現，請重新整理。	摘要重複處已修正。
8	據報告所述竹林固碳當量優於林木，是否需要調整綠化量指標相關規定。	綠建築中綠化量指標之固碳量意義與本研究基於碳足跡盤查之碳排放量不同，因此不建議進行調整。
9	由於國內竹材產業式微，故本研究由研究單位直接委託加工廠商代工，再予紀錄計算碳排數據，這種方式與日後形成產業生產之碳排數據是否有誤差?更高或更低?請補充說明。	為了減少與大規模生產時最終碳足跡盤查結果之誤差，本研究以最小可完成一批次之竹建材加工生產原則下，委託加工生產，以避免非規模化生產下計算得數據偏大之現象。
10	竹材應用端是否只有竹桿和膠合板材二種?國外的應用是否也是如此;若作為結構材所能採用的應力資料、材料材質處理是否已規格化?結構體防火性能的要求如何克服?	本研究僅就國內常見之竹建材應用為例，在竹子作為結構材料尚未普遍以及國內未有此類之應用下，本研究暫排除竹子作為結構材之應用例。
11	加工處理的作業流程，未呈現乾燥過程，建請後續補充。	加工過程包括乾燥，將於後續詳細補充。
12	目前僅以孟宗竹進行碳足跡盤查研究，建議增加其他竹材碳足跡研究。	感謝委員建議，本案主要係以孟宗竹為主要研究標的，同時考量計畫經費有限，有關其他竹種建議未來另案辦理。
13	建議增加國產竹建材在建築結構上之研究、可興建之建築物最高高度研究及加強竹產業鏈分析。	有關竹建材在結構上之相關研究，所內亦有相關之研究報告，非為本計畫之研究範疇。
14	本研究非常紮實，從砍伐、運輸、加工以實際研究，取得國內第一手資料，建議未來將研究成果國際發表供國際參考。	感謝委員肯定。
15	本研究以個案進行碳足跡盤查與實際大規模運作之碳足跡是否不同;另加強運用在建築物研究，其碳足跡才可實務應用，請補充說明。	為了減少與大規模生產時最終碳足跡盤查結果之誤差，本研究以最小可完成一批次之竹建材加工生產原則下，委託加工生產，以避免非規模化生產下計算得數據偏大之現象。
16	針對竹建材之特性熱漲冷縮、蟲害、防火、請加以分析，才可應用於建材。	本計畫目的在於進行碳足跡之盤查，有關竹建材之熱漲冷縮、防火等其他物理性能，非為本計畫研究之範疇。
17	報告書封面後第一頁缺少執行單位、研究期程、研究經費等資訊，請補充;另補充英文摘要。	謝謝委員建議，擬於期末報告補充。

18	報告書 P.10 圖 2-1 內含簡體字，本研究案係屬政府部門委託，建議將簡體字修改為繁體字。	擬於期末報告將簡體字體更正為繁體字。
19	報告書第五章初步結論稍微簡略，宜再詳實說明，並增列後續重點研究之工作項目；工作項目特圖，建議增列實際執行進度，俾利確認是否符合預定進度。	感謝委員建議，遵照辦理。
20	碳足跡盤查 5 個步驟中未納入拆除、廢棄階段，請補充說明。	本計畫所定義之碳盤查範圍，不考量拆除與廢棄階段，是為配合所內低碳建築評估系統中之建材初級碳排資料庫所需，以與其他建材在同樣基礎下進行評估應用。而有關拆除與廢棄階段之碳排放量計算，在現行低碳建築評估系統中是以情境假設之方式模擬計算之。
21	建立竹建材碳足跡數據，為推動國內振興竹產業一大助力，亦助於竹產業者了解如何進行碳盤查。	感謝委員肯定。
22	回應部會改組，林務局、農委會，建議修正為林業署、農業部。	相關部會名稱已修正。
23	報告書摘要三、初步研究結果 4.採取得 600 支孟宗竹，而報告書 P.37 第四章提及砍伐 650 支，請確認釐清。另報告書 P.40 圖 3-5 修正為圖 4-5，表 4-4 修正為表 4-2。	感謝委員指證，誤繕處已修正。
24	本研究內容計算國內竹建材碳足跡盤查方法，而國內竹子有 6 大種類並依生長方式分為分為「叢生竹」與「散生竹」，本研究選用孟宗竹為研究對象，是否考量未來納入其他竹種類進行碳足跡盤查，俾更為完整。	感謝委員建議，本案主要係以孟宗竹為主要研究標的，同時考量計畫經費有限，有關其他竹種之研究，建議未來另案辦理。
25	本研究報告書內資料來源、期刊等請標示清楚。	感謝委員指正，擬於期末報告詳細補充相關資料來源。
26	國產竹建材之建築應用案例蒐集，所呈現以國內為主，多數裝飾材料為主，建築應用較少，請評估是否納入國外案例。	本案後續會再蒐集相關之國外案例補充。
27	竹建材種類以孟宗竹為主，是否納入其他竹種類加以評估，俾比較分析。	本案主要係以孟宗竹為主要研究標的，同時考量計畫經費有限，有關其他竹種之研究，建議未來另案辦理。
28	本研究竹建材應用與文獻蒐集齊全。構	感謝委員肯定。

	造設計與相關應用及技術蒐集完整，符合預期成果，值得肯定。	
29	目前國產竹建材經濟產值、就業人數、產業規模等統計資料，建請揭露俾作為未來政策的中長期研究規劃研究之用。	感謝委員建議，擬再補充國產竹建材相關統計資料數據於期末報告中。
30	期中報告進行部分碳足跡盤查，針對兩階段作業(砍伐及運輸、裁切和鹼性藥水處理)提出 5 個數據，其中最大 2 個數據是鹼水加熱和竹桿運輸，前者佔總合之 92.5%，使用 15m <sup>3</sup> 的水處理 400 支竹桿所反映碳排是否符合一般商轉情況，請進一步確認；另竹桿運輸碳排基於 44 公里距離，再與其他產品碳足跡比較時應取同一基礎。	一般大規模商業化生產常見之一批次。係以處理 400 支竹桿為原則使達最小規模。本案研究為盡可能貼近一般商轉情況故也以 400 支竹桿為盤查標的。 感謝委員提醒，與其他產品比較時會再留意運輸距離問題。
31	本研究計畫深具意義，因竹子為台灣特產之一，曾有過輝煌歷史，值得重視及推廣。 竹為生生不息的優質材料，相較於至少需 30-40 年成材之樹木，竹只需 4 年即可利用，另竹的固碳亦是木材 4 倍，透過碳足跡盤查之研究，讓國人了解竹建材為減碳新趨勢，再度發揚光大。	感謝委員肯定。
32	本部推動產品碳足跡制度，採鼓勵廠商核算產品碳足跡，並要求將碳足跡標籤標示於產品上，供民眾選購參考，其適用對象仍以民眾得選購之產品為主。 後續若有涉及申請建材相關產品碳足跡標籤，仍請依「行政院環境保護署推動產品碳足跡管理要點」之相關規定辦理。	感謝委員建議，本案國產竹足跡盤查之目的係為了給建築設計端參考同時作為所內「建築低蘊含碳排」評估之所需。 謝謝委員提醒，後續若有商業化產品同時涉及碳足跡標籤時，擬依建議依相關規定辦理。

### 附錄三：期末審查意見回覆表

項次	審查委員意見	執行單位回應
1	<p>鄭教授政利：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 本計畫期末報告內容充實、豐富，工作執行績效良好，符合預期成果需求。</li> <li>2. 本計畫對於竹建材碳足跡盤查操作採 ISO 14067 規範方法，大致嚴謹詳實，建議應該可以連結參照環境部或國際正式採認之盤查程序，接軌正式碳足跡及碳費制度之運作為宜。</li> <li>3. 國內竹建材之建築應用推廣方面，除了把握碳排資料與加工製作技術外，建議應該可以關注建造工法及工程規範，以促成相關產業之成熟發展為宜。</li> <li>4. 竹構造與鋼筋混擬土構造及其他構造之碳排比較分析，建請導入全生命週期評估，才能真正反應碳排之效益。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 感謝委員肯定。</li> <li>2. 感謝委員提示。</li> <li>3. 感謝委員建議。</li> <li>4. 雖然竹桿件構造對比於鋼筋混凝土造有減碳效益，然就生命週期之觀點，由於竹構造之耐用壽命僅約 15 年，在 60 年的生命週期內將會面臨 3 至 4 次的更新，若將其碳排亦納入評估，則竹構造不見得會比 RC 造低碳。本研究將補充說明以生命週期之角度評估其減碳效益。</li> </ol>
2	<p>張建築師矩墉：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. P.45 竹桿件直徑 11.4cm(20 支平均)，但主桿兩端直徑可能不同是取大或小，取平均或是桿中段？</li> <li>2. 竹集成材的作業中有多次的載運，其中集成元的載運特別高於其他載運，是因為運輸距離的原因嗎？</li> <li>3. P.58 在計算竹構涼亭時，竹構涼亭表 4-22，結構竹桿 24m，但因為竹桿定尺長 13 尺(3.9m)，所以 <math>4 \times 2 = 8</math> 支，每支 3.287 kgCO<sub>2</sub>e 應該是 <math>3.287 \times 8 = 26.30</math>kg，餘 8 支 0.9 廢料。後面水平桿 24cm 也是一樣 8 支。另外研究時採 13cm 竹桿，8cm、5cm、4cm 直徑碳排應有差別。</li> <li>4. 研究結論，竹集成板材因加工關係還是碳排放偏高，所以還是以竹桿作為構材較佳。認同建議二意見，針對防火性、結構強度、防腐等作深入研究，制定相關規範，以利推廣利用。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 本研究取平均值計算。</li> <li>2. 因此段製程將集成元由南投載運至台中，運輸距離較高。</li> <li>3. 竹桿件尺寸的差異可能會有碳足跡上之差異，然而本研究礙於經費與研究時間限制無法完成各式尺寸桿件之精確碳盤查。但也由於本計畫砍伐之原竹中同一根原竹本身就具有不同直徑之桿件部分，加上桿件尺寸影響者主要在於之刨面加工，而整個碳足跡中影響最大者為乾燥過程，因此研判竹桿件直徑對整體碳足跡影響應不大。</li> <li>4. 有關防火性、結構強度、防腐等非本研究範圍，建議納入未來研究。</li> </ol>
3	<p>江委員哲銘：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 建議預期成果二竹建材從搖籃到工地之碳足跡盤查方法能彙以流程圖並予以扼要說明。</li> <li>2. 建議第四章編撰上能加設「小結」。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 將於成果報告中補充碳足跡盤查方法流程圖及說明。</li> <li>2. 感謝委員建議，已於成果報告中補充。</li> </ol>
4	<p>陳委員瑞鈴：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 在室內裝修地坪之減碳效益評估部分，本研究係以將竹板材與瓷磚作比較。由於兩者施作後的質感完全不同，消費者若擬採用竹板材而不得，一般應會考慮以木板材取代，以取得比較類似的感受。建議增加木板材的減碳量比較，以利了解。</li> <li>2. 另，在磁磚之碳排計算上，單位碳排放量是每片 33.23 kgCO<sub>2</sub>e，而每片為 0.36 m<sup>2</sup>，故總碳排量計算錯誤(高達 9230 kgCO<sub>2</sub>e)。是否誤繕？請說明訂正。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 感謝委員建議，已於成果報告中增加補充竹地板材構法與傳統木板材地板之碳排比較。</li> <li>2. 此為單位誤繕，已於成果報告修正。</li> </ol>

5	<p>江執行長欣政：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 竹子製成竹集成材可有效去化竹材，並提升國產材使用率；若可降低竹集成材的碳足跡，才能成為願意使用低碳材料相關業者之誘因，建議可再作後續研究，才能持續振興國內竹產業。</li> <li>2. 研究成果豐碩，符合預期成果。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 感謝委員建議。</li> <li>2. 感謝委員肯定。</li> </ol>
6	<p>社團法人台灣永續綠營建聯盟（楊秘書長明俊）：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 竹是我國之特產之一，運用到建築材料生生不息，是很好的永續建材，值得鼓勵。</li> <li>2. 此次研究計畫，收集國內外之案例作分析，竹建材碳足跡盤查之研究的資料詳細且值得參考之價值。</li> <li>3. 剛發布的全國建築師公會主辦的 2024 台灣建築獎十大複選作品-石壁竹創森計畫，為南投萬大水力電廠，也是大藏規畫設計公司建築設計，對於木結構的堅持，值得各界多加鼓勵及支持。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 感謝委員肯定。</li> <li>2. 感謝委員肯定。</li> <li>3. 感謝委員建議。</li> </ol>
7	<p>黃理事長秀莊：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 本研究案對竹各式成品之碳排，研究分析很詳細，由本期末報告書內容就了解。</li> <li>2. 期中審查時，本人就建議補充以竹集成板材和木板再相同使用及效益下，分析兩者碳排量及價格進行分析比較，以提供業者參考。本次在 P.59P.60 將竹集成板材鋪設地坪和拋光石英地磚鋪設隔音地板進行碳排放分析。結果竹地板構法反而比磁磚構法增加碳排，故建議下次有機會還是和木板材分析多做比較，以提供業者參考。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 感謝委員肯定。</li> <li>2. 本研究竹地板材之比較對象選擇磁磚地板是因我國之低碳（低蘊含碳）建築評估手冊中將磁磚地坪作為室內地坪構造之比較基準。而有關於傳統木構比較之部分，擬於成果報告中增加補充竹地板材構法與傳統木板材地板之碳排比較。</li> </ol>
8	<p>洪建築師迪光：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 竹集成板材鋪設地坪碳排放總量反較傳統工法碳排高 25.3%。</li> <li>2. 後續可加強竹建材運用在建築、景觀之研究，在防火及防腐之研究下，才可充分在市場上應用。</li> <li>3. 可加強在教育上宣傳，鼓勵落實竹建材在建築上應用。</li> <li>4. 竹構涼亭 VS 鋼筋混擬土構涼亭減碳 32.7%，是很好的推廣宣傳素材。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 因竹集成板材加工過程熱壓與膠合之碳排較大，且加工過程之工序多且複雜，加上竹構地板下方需另外進行防水處理增加防水材使用量。</li> <li>2. 本計畫目的在於進行碳足跡之盤查，有關竹建材防火、防腐等其他性能，非為本計畫研究之範疇。</li> <li>3. 感謝委員建議。</li> <li>4. 感謝委員肯定。</li> </ol>
9	<p>中華民國全國建築師公會（許建築師中光）：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 竹材因不同加工方式，致有碳排量出現較高佔比者，是否有同一建材樣本在改變加工方式後，能有減少碳排之比較。</li> <li>2. 竹構造減碳效益評估部分，除竹材本身外，宜包括竹材與金屬等其他材料構件組合完成狀態之評估。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 感謝委員肯定。</li> <li>2. 礙於竹構造組合之方式多元，本研究僅能粗估金屬繫件之使用量進行估算。</li> </ol>
10	<p>台灣省建築材料商業同業公會聯合會(王總幹事榮吉):</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 符合預期成果，文獻蒐集量齊全。</li> <li>2. 竹建材所在地雲林縣、南投縣之縣市政府及公務單位應評估多多設計及使用竹建材。以前新北鶯歌建築陶瓷重鎮公共建設使用建築陶瓷，花蓮縣石材產地，公建大量使用建築石材。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 感謝委員肯定。</li> <li>2. 感謝委員建議。</li> </ol>

## 附錄四：專家會議議程與內容

### 「國產竹建材碳足跡盤查之研究」

#### 專家學者諮詢會議議程

壹、時間：113 年 9 月 23 日(星期一)下午 3 時

貳、地點：內政部建築研究所 13 樓討論室一(新北市新店區北新路 3 段 200 號 13 樓)

參、主席：黃國倉 計畫主持人

肆、議程：

- 一、主席致詞。
- 二、研究計畫案內容說明。
- 三、討論國產竹碳足跡盤查結果。
- 四、討論竹集成版與竹桿件構造碳排放量之比較對象。
- 五、主席結論

伍、會議討論專家意見與回覆內容

項次	專家意見	意見回覆
1	本研究針對國產竹建材碳足跡盤查之研究，結果對國產竹使用自給率或許有潛在的增加率，肯定本研究的投入。	感謝委員肯定。
2	目前國內自產竹使用量過去十年已減少三分之二左右，加上禁伐補償策略恐造成竹伐量再減少。未來可將中國進口竹桿之碳排進行比較，以強化國產竹材之碳足跡強項。	感謝委員提示，後續會討論納入比較。
3	林試所 112 年引進自動採收機器（叢生竹，例如：刺竹、長枝竹），未來可評估納入低碳少人力的作法。採收後剩竹可直接粉碎再利用。	感謝委員建議，後續可以提出作為減碳參考方法。
4	竹集成板材尺寸 180x30x1.8cm 是參考何種地板規格尺寸？一般地板若為 180x30 厚度不太會做到 1.8cm。尺寸更動是否會影響碳排？固定方式是黏貼還是釘子？	竹集成板材尺寸為加工後之成品尺寸，未來施作時會再裁切，尺寸更動對碳排之影響應甚微。板材之固定係採黏貼與部分洋丁補強固定。

5	竹構涼亭的接合方式是採用何種方式？若是採鐵件接合是否有納入計算？鋼構涼亭組成後是否有考慮表面處理？竹構是否也應考慮表面處理？	竹構涼亭採用綁扎方式接合，鐵件僅部分五金繫件，有粗估使用量並納入計算。比較對象用的鋼構涼亭預計改為 RC 涼亭。
6	簡報資料第七頁，竹林碳匯量之單位應該是 $\text{kgCO}_2/\text{m}^2$ ，須再確認。	本案引用文獻為劉應芳 (2012). 四川省竹林碳儲量研究。
7	竹集成板與拋光石英磚減碳效益評估，應將後續的工法也納入考慮，例如衝擊音加工的碳排也有差異。	謝謝委員提示，本案目前僅預計納入材料，工法碳排則無探討。
8	竹構涼亭與鋼構涼亭減碳效益評估比較應考慮與 RC 構涼亭比較，以符合基準條件之一般要求。	感謝建議，本案後續會再討論修正比較對象。
9	到工地運距如何計算？	本案工地運距計算方式係參考低碳建築資料庫以交通部平均運距計算。
10	可以新增剖面圖以利理解。	謝謝委員建議。

## 參考書目

1. BSI (2011). BS EN15978: Sustainability of construction works - Assessment of environmental performance of buildings calculation method. London, British Standards Institution.
2. Chang, F.-C., K.-S. Chen, P.-Y. Yang and C.-H. Ko (2018). "Environmental benefit of utilizing bamboo material based on life cycle assessment." Journal of Cleaner Production **204**: 60-69.
3. Escamilla, E. Z. and G. Habert (2014). "Environmental impacts of bamboo-based construction materials representing global production diversity." Journal of Cleaner Production **69**: 117-127.
4. Gan, J., M. Chen, K. Semple, X. Liu, C. Dai and Q. Tu (2022). "Life cycle assessment of bamboo products: Review and harmonization." Science of The Total Environment **849**: 157937.
5. Garcia, R., & Freire, F (2014). "Carbon footprint of particleboard: A comparison between ISO/TS 14067, GHG Protocol, PAS 2050 and Climate Declaration." Journal of Cleaner Production **64**: 488-497.
6. Gu, L., Y. Zhou, T. Mei, G. Zhou and L. Xu (2019). "Carbon Footprint Analysis of Bamboo Scrimber Flooring—Implications for Carbon Sequestration of Bamboo Forests and Its Products." Forests **10**(1): 51.
7. ISO (1996). ISO 14000. Environmental Management Systems—Requirements with guidance for use, International Organization for Standardization.
8. ISO (2009). ISO 14020. Environmental labels and declarations — General principles, International Organization for Standardization.
9. Sinden, G. (2009). "The contribution of PAS 2050 to the evolution of international greenhouse gas emission standards." The International Journal of Life Cycle Assessment **14**(3): 195-203.
10. Tripathi, S. and K. Singh (1996). "Culm recruitment, dry matter dynamics and carbon flux in recently harvested and mature bamboo savannas in the Indian dry tropics." Ecological Research **11**(2): 149-164.
11. Van der Lugt, P. (2012). "Life cycle assessment and carbon sequestration: the environmental impact of industrial bamboo products." Proceedings of the IXth World Bamboo Congress.
12. Van Der Lugt, P. (2017). Booming bamboo: the (re) discovery of a sustainable material with endless possibilities, Materia.
13. Vogtländer, J. G., N. M. van der Velden and P. van der Lugt (2014). "Carbon sequestration in LCA, a proposal for a new approach based on the global carbon cycle; cases on wood and on bamboo." The International Journal of Life Cycle Assessment **19**: 13-23.
14. West, J. E. (2009). "Standards Column." Quality Engineering **21**(4): 463-470.
15. Xu, X., P. Xu, J. Zhu, H. Li and Z. Xiong (2022). "Bamboo construction materials: Carbon storage and potential to reduce associated CO2 emissions." Science of the Total Environment **814**.
16. Zhang, J., J. Xu, Y. Wu, T. Xie, L. Bo and Z. Li (2023). "Life Cycle Assessment of Steel-Glued Laminated Bamboo (GluBam) Hybrid Truss in China." Energy and Buildings: 113218.
17. 王仁, 陳財輝, 陳信佑, 鍾欣芸, 劉恩好, 李宗宜 and 劉瓊霏 (2010). "孟宗竹林伐採後二年間地上部生物量與碳吸存量動態." 林業研究季刊 **32**(3): 35-44.
18. 王勇軍, 黃從德 and 王憲帥 (2009). "慈竹林生態系碳儲量及其空間分配特徵." 福建林業科技 **36**(2): 6-9.
19. 刘应芳 (2012). 四川省竹林碳储量研究, 四川农业大学硕士论文.
20. 朱安明, 洪奕丰, 张旭峰, 于海霞, 王洪涛, 王雅梅 and 于文吉 (2023). "全生命周期木/竹产品碳足迹研究进展." China Forest Products Industry **60**(2).
21. 行政院農業委員會 (2022). 新興竹產業發展計畫 (111 至 114 年度).
22. 行政院環境保護署 (2010). 產品與服務碳足跡計算指引.
23. 行政院環境保護署 (2020). "碳足跡產品類別規則(CFP-PCR)-木、竹製板材." 第 3.0 版
24. 李隆恩, 林俊成, 陳巧璋 and 林鴻志 (2023). "臺灣重要經濟竹種之碳匯效益." 林業研究專訊 **30**(5): 15-18.
25. 林裕仁, 王秋嫻 and W. Sara (2011). "Analyzing Carbon Conversion Factors of Four Species of Taiwanese Bamboo." 台灣林業科學 **26**(4): 341-355.
26. 林憲德 (2015). 建築碳足跡(二版), 詹氏書局.
27. 林憲德 (2019). 建築材料碳足跡資料系統建置之研究, 內政部建築研究所.
28. 林憲德 (2023). 低碳(低蘊含碳)建築評估手冊, 內政部建築研究所.
29. 费世民 (2021). "竹产品全生命周期碳足迹研究进展及其测定框架." 四川林业科技 **42**(6): 1-10.
30. 週鵬飛, 顧蕾 and 彭維亮 (2014). "竹展開砧板碳足跡計測及構成分析." 浙江農林大學學報 **31**(6): 860-867.
31. 濮佳莉, 王鑫, 庞树宇, 梁辰, 王双飞 and 覃程荣 (2023). "竹林碳汇及竹材制品碳足迹研究现状." 中国造纸 **42**(8): 37-45.

**國產竹建材碳足跡盤查之研究**

出版機關：內政部建築研究所

電話：(02) 89127890

地址：新北市新店區北新路3段200號13樓

網址：<http://www.abri.gov.tw>

編者：黃國倉、蔡明哲、莊閔傑、呂羿儒

出版年月：113年12月

版次：第1版

ISBN:978-626-7501-20-7 (平裝)