



南迴計畫潮枋段

土建及一般機電工程

工程碳管理與減碳作為

練健勳／台灣世曦工程顧問股份有限公司 計畫副理

湯允中*／台灣世曦工程顧問股份有限公司 副理

蔣啟恆／台灣世曦工程顧問股份有限公司 資深協理

羅逸建／交通部鐵道局南部工程分局 段長

史春華／交通部鐵道局南部工程分局 分局長

因氣候異常、地球暖化現象加劇，世界各國加強溫室氣體排放的制約，碳排放管制已由過去的組織型碳盤查，轉為關注於全生命週期考量的碳足跡盤查；更藉由重視全生命週期的碳盤查，尋找全生命週期中具成效之減碳計畫。

交通部於2000年公告「交通部節能減碳規劃設計參考原則」，提出由規劃、設計、施工乃至營運階段，各階段遵循之節能減碳作為。運研所亦於2012年完成「交通運輸工程碳排放量推估模式建立」研究案，初步訂出公共工程中工程項目之排碳係數，供各界執行碳排放計算之參考。立法院於2023年1月10日三讀通過《溫室氣體減量及管理法》修正為《氣候變遷因應法》，以及總統於2023年2月15日公布「氣候變遷因應法」，成為能源轉型與管理的法源依據，宣告台灣進入溫室氣體減量的新紀元。

目前台灣面臨2050淨零排放跨世代、跨領域、跨國際之轉型工程，政府將建構科技研發及氣候法制等兩大面向之基礎環境，推動能源、產業、生活、社會等四大轉型策略，逐步實現2050淨零排放之永續社會。但是不論溫室氣體減量或是淨零排放，基礎工作就是從碳足跡盤查著手，必須要依循科學性、系統性的標準來盤查各個活動數據的碳排放量，以作為後續減量評估及淨零計算的基準。而且營建業是所有產業的龍頭，尤其營建業常用的鋼筋、水泥等工程材料，更是主要的碳排源，如能考慮減碳設計及低碳材料，對於降低碳排量將大有助益，也更向淨零排放的目標往前邁進。

交通部鐵道局自2016至2022年辦理「臺鐵南迴鐵路臺東潮州段電氣化工程建設計畫」潮枋段土建及一般機電工程碳足跡盤查，為我國首件鐵道工程之碳足跡盤查查證作業，依據ISO 14067全生命週期產品碳足跡規範，並借鑒環境部2014年頒布之基礎建設—道路、公路隧道、橋梁等三種工程類型之碳足跡產品類別規則（PCR），針對本工程施工期間進行分標段、分年度之實質盤查工作，包含細設成果碳排放量推估、實際工程碳足跡盤查、輔導、查證及彙整，並於工程竣工時，以數據資料充足且完整的碳足跡盤查報告，向第三方驗證機構提出查證申請並取得碳足跡盤查查證聲明證書；其目標除了藉由盤查紀錄了解本工程全生命週期碳排放影響外，更希望藉由本工程盤查執行經驗，建立國內未來鐵道工程碳盤查作業標準，提供未來類似工程執行碳足跡盤查作業參考，進而落實工程節能減碳之目標。

本文內容包含潮枋段土建及一般機電工程之實際碳盤查作為與成果，並探究減碳作為對盤查數據之影響，以供各工程先進及類似案例酌為參考。

關鍵詞：潮枋段、碳足跡、碳排放係數、產品類別規則（CFP-PCR）、2050淨零排放

* 通訊作者，tangyc@ceci.com.tw

緣起

由於氣候異常、地球暖化現象日益加劇，世界各地均遭逢因氣候變遷所帶來之環境變化挑戰。對於大自然的反撲，世界各國紛紛加強溫室氣體排放之制約。2015 年聯合國氣候變化綱要公約第 21 次締約國會議（COP21）「巴黎氣候協議」^[1] 決議，在 21 世紀結束前，要將地球暖化程度控制在攝氏 2 度內（目標 1.5 度內）。先前我國「溫室氣體減量及管理法」，則要求 2050 年的溫室氣體排放量，將回到 2005 年 2.45 億噸的 50% 以下。所有作為都具體顯示須對溫室氣體排放加以盤查、管制，並藉由碳足跡盤查，尋找出具成效之減碳計畫。簡言之，碳足跡、碳揭露、碳中和等作為，已成為全球環境議題上的重點課題。

行政院於 2008 年揭示「永續公共工程—節能減碳政策白皮書」為公共工程辦理節能減碳之指導方針，後續於 2009 年頒訂「振興經濟擴大公共建設投資計畫節能減碳執行方案」，則明定公共工程執行預算需考量一定比例之綠色內涵經費，2010 年更直接將「推動節能減碳公共工程」列為國家節能減碳總計畫的十大標竿之一。另交通部亦於 2010 年公告「交通部節能減碳規劃設計參考原則」，提出於公共工程執行各階段，由規劃、設計、施工乃至營運階段，各階段當遵循之節能減碳作為。運研所亦於 2011 年完成「交通運輸工程碳排放量推估模式建立」研究案^[2]，初步訂出公共工程中工程項目之排碳係數，供各界執行碳排放計算之參考。

基此，交通部鐵道局為順應世界潮流及政府節能減碳之政策目標，配合落實 2050 淨零排放作業及確實掌握國內軌道工程全生命週期之碳排放量，選定「臺鐵南迴鐵路臺東潮州段電氣化工程建設計畫」潮枋段土建及一般機電工程，作為推動全國首件鐵道工程碳足跡盤查工作之標的，提供未來其他類似工程之碳排放估算參考，其盤查成果亦可作為未來減碳依據。

鑒於目前國內基礎建設碳足跡產品類規則（PCR）為環境部於 2014 年 5 月 30 日核准之基礎建設—道路、隧道、橋梁等三種工程類型，尚無包含軌道工程，故於參考前述國內三種工程類型之碳足跡產品類規則下，並蒐集國外鐵路工程碳管理案例，進而規劃

軌道工程碳足跡產品類規則之架構與機制，辦理本工程碳足跡盤查工作。於工程施工期程，進行分年度之實質盤查工作，並於工程竣工時，以數據資料充足且完整的碳足跡報告，向合格的驗證機構提出查驗申請並取得碳足跡聲明證書。

本工程位於屏東縣，其範圍為臺鐵之潮州站至枋寮站，總長約為 25.8 公里，其工程施工期間為 2016 年 9 月至 2021 年 12 月，有關碳足跡盤查成果已於 2022 年 8 月 1 日取得查證聲明書。

本文將闡述包含細部設計完成後針對細設資料進行碳排放量推估工作，以及施工階段對於各項工程材料及機具等實際排放量完整記錄及計算後，將實際盤查結果與設計推估成果進行比較與回饋修正，以建立本土工程碳排係數資料庫，以及後續相關工程於規劃設計階段參採使用。

計畫簡介

工程概述

本計畫盤查標的為南迴鐵路電氣化—潮枋段「C811Z 潮州枋寮段土建及一般機電工程」，工程由潮州站以南至枋寮站，全長約 25.8 公里，沿線共 7 座車站（崁頂站、南州站、鎮安站、林邊站、佳冬站、東海站、枋寮站）；工程內容為原線鐵路電氣化、改善沿線鐵路橋涵、邊坡、場區月台、平交道及機電設備等。工程位置如圖 1。



圖 1 盤查標的工程位置圖

計畫目標

本計畫為全國首件軌鐵道工程碳盤查，其主要目標分述如圖 2 如下：

1. **蒐集數據以利減碳規劃**：旨在揭露標的工程 - 「南迴計畫潮枋段土建及一般機電工程」從原料開採、施工建造到營運維修過程所產生之碳排放量，並藉此排放數據，作為日後減少工程溫室氣體排放活動規劃之參考。
2. **碳盤查宣告單位與功能單位**：本次碳足跡盤查宣告單位為本工程之整體溫室氣體排放量，包含完工通車後 50 年之養護與營運作業，另針對主要工程構件訂定其功能單位，並以該功能單位進行單位排碳量計算，供後續其他工程參採。
3. **查證聲明書等級保證**：取得此次標的建設之「南迴計畫潮枋段土建及一般機電工程」環境足跡查證聲明書為全國第 1 張鐵道工程查證聲明書，其保證等級屬合理保證等級（reasonable assurance），包含 (1) 盤查範疇涵蓋 95% 以上排放量、(2) 5% 以上排放量係依據現場實際盤查數據計算、(3) 一級活動數據之排放量佔 10% 以上。
4. **建立鐵道工程之碳足跡產品類別規則（PCR）**：鑒於環境部於 2014 年 5 月 30 日核准基礎建設 - 道路、公路隧道、橋梁等三種工程類型之碳足跡產品類別規則（PCR），並分別於 2017 年 3 月 21 日及 5 月 19 日核准其更新版，惟未見鐵路相關之產品類別規則，故藉由本工程以及參考既有基礎建設之 PCR，建立國內未來鐵道工程碳盤查作業標準。

5. **未來展望**：完成本工程碳足跡盤查計畫後，確認量化碳排放數據，相關數據透過碳揭露方式公開組織或產品與服務之碳排放資訊，作為本局推動永續工程、訂定減量目標與減量承諾的基礎。

國內外工程碳足跡及工程碳管理發展 碳足跡盤查之發展

自 1992 年聯合國氣候變化綱要公約（United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC）通過後，各國政府與民間組織持續推動溫室氣體減量與能源管理相關措施。重要之締約國（COP）年會對於全球碳管理趨勢如圖 3 所示；整體發展係由組織型溫室氣體管制開始，再逐漸將盤查的範圍擴展至相關供應鏈，重視產品與服務碳足跡盤查。在完成產品或服務碳足跡盤查，並量化碳排放數據後，則透過碳揭露方式公開組織或產品與服務之碳排放資訊，作為社會溝通、訂定減量目標與減量承諾的基礎。而後為達成減量目標，應執行減碳專案或碳削減措施，再透過國際規範或自願性減碳的碳抵換（Carbon Offsets）與交易機制，抵減無法透過減量降低的碳排放量，達到特定邊界內整體零淨排放（即排碳量不再增加）或稱碳中和的境界。

有關 UNFCCC 第 21 次締約國會議已於 2015 年 11 月 30 日在法國巴黎召開，達成之「巴黎氣候協議」^[1]是繼京都議定書之後，最具有約束力的全球溫室氣體減量新協議，成功凝聚 195 個參與國史無前例地無異議一致通過協定內容。要控制全球升溫在 2 度內，並淘汰所有的化石燃料，致力於乾淨並且安全無虞的再

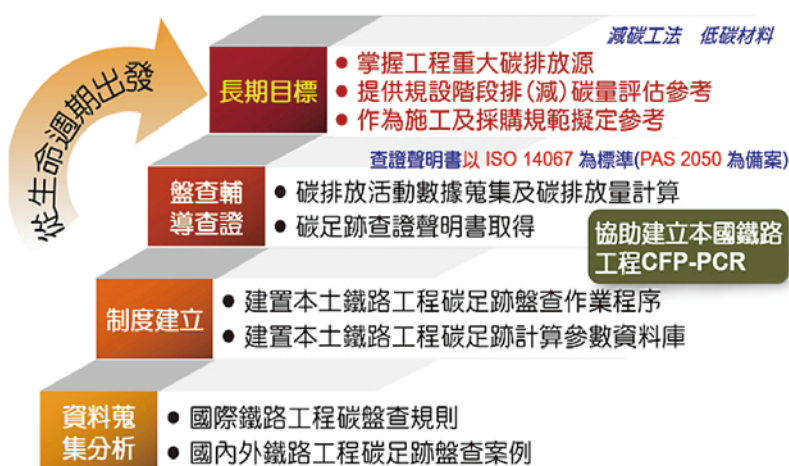


圖 2 碳盤查階段及目標



圖 3 國際碳管理趨勢

生能源。「巴黎氣候協議」^[1] 決議的要點如下：

1. 西元 2100 年前，限制全球溫度漲幅在與前工業化時期相比攝氏 2 度之內，更進一步的遠程目標為控制在 1.5 度之內。
2. 要求 2020 年檢討各國目標，接著每五年檢討，並將 INDC（國家預期自主貢獻）模式轉換為更強化之 NDC（國家自主貢獻）機制進行減排或限排。另外，辦理定期的全球暖化控制進度盤點。
3. 參與國須致力將人類活動排放的溫室氣體，在下半個世紀降低到能與大自然吸收量平衡的程度。
4. 2020 年前，已開發國家每年投入 1,000 億美元的氣候資金，資金配置隨著國家減排目標定期檢討，2025 年產生新的資金目標。
5. 許多國家將因氣候變遷蒙受損失，但不會因為協議而產生任何法律責任或賠償要求。

國際碳足跡盤查規範

碳足跡的定義與評估方法，最早付諸於文字、形成規範，是在英國標準協會（BSI）、碳信託（Carbon Trust）和英國環境、食品與農村事務部（Department for Environment, Food and Rural Affairs, Defra）聯合發佈的 PAS 2050: 2008^[3] 商品和服務生命週期溫室氣體排放評估規範（Specification for the assessment of the life cycle green house gas emissions of goods and services）中。PAS 2050 的定位屬於公開可取得規範（Publicly Available Specification），為英國國家標準或國際標準制訂前的暫行性標準，通常三年後會再審查以確認下一個三年是否該重新修訂為國家標準或撤銷，屆時若未成為正式的英

國國家標準（BS）將不再具指引效力。然而在碳足跡議題的持續發燒，而國際標準仍然無法推出的狀況下，英國標準協會遂於 2011 年 10 月份參考碳足跡國際標準草案（ISO 14067（DIS）），推出 PAS 2050：2011^[4]，作為國際標準通過前之碳足跡評估參考標準。

PAS 2050 特色在於以標準化的方法，作為產品和服務之生命週期溫室氣體排放量的內部評估依據，並在產品和服務生命週期溫室氣體排放基礎上，輔助評估替代產品之配置、採購和生產方法、原材料和供應商的選擇，提昇評估結果的可信度及可比較性，該指引亦為國際標準組織制定產品碳足跡標準 ISO 14067 之重要參考。

2011 年 12 月 23 日國際標準組織發出 ISO 14067 DIS 版文件（國際標準草案版），分為兩部分：ISO 14067-1（溫室氣體—產品碳足跡—第 1 部分：量化）、ISO 14067-2（溫室氣體—產品碳足跡—第 2 部分：溝通）。最終合併成一個技術規範：ISO/TS 14067^[5] 溫室氣體—產品碳足跡—量化及溝通之要求與指引。ISO 14067 於 2018 年 3 月 12 日進入國際標準定版草案（FDIS），並已於 2018 年 8 月 21 日進入國際標準正式發行。

碳足跡管理已成為不可逆之趨勢，而工程碳管理則是日漸受到重視，在完成組織碳盤查或碳足跡盤查計畫，並量化碳排放數據後，則強調透過碳揭露方式公開組織或產品與服務之碳排放資訊，作為社會溝通、訂定減量目標與減量承諾的基礎。

碳足跡計算過程中，須設定相關之邊界文件，隨著國內外工程相關之碳管理文件之齊備，工程碳管理的全面導入亦將成為工程設計施作之重要工作項目之一。

碳足跡盤查準則：產品類別規則（PCR）

目前國際間開發共同的產品類別規則是國際組織 GEDnet 努力的目標，為整合各國現有 EPD（環境產品宣告）系統，瑞典發起國際產品環境宣告系統：International EPD® System，目的在促進各國的第三類環境宣告一致化，以利全球產品能一致且正確地依循經過驗證的 PCR 進行產品生命週期評估、提出具有國際代表性的 EPD，減少未來出口其他國家時遇到不必要的貿易障礙，並避免因各國方法不同而造成製造商的人、物力消耗。

瑞典運輸管理局（The Swedish Transport Administration）於 2014 年 2 月 28 日經由國際 EPDs 系統正式公告公路、街道及道路 PCR，2016 年 5 月 25 日啟動改版作業，並於 2018 年 1 月 10 日公告新版 PCR 條文內容。內容包含：總則、產品定義、功能單位宣告、內容聲明、單位及數量、系統邊界、截斷原則、分配原則、數據描述及數據質量要求、環境產品宣告內容、環境產品宣告之有效性、PCR 修改等 12 節。有關道路 PCR 宣告單位為：平方公尺 / 主要道路 – 全生命週期，其生命週期邊界自原料開採 / 製造（含運輸）階段、施工階段、營運管養階段之所有過程皆須納入盤查，至於運輸服務及工程拆除階段，則排除於邊界條件外。

其次為義大利 CRIT 公司 LCA 實驗室於 2013 年 12 月 20 日經由國際 EPDs 系統正式公告橋梁及高架道路 PCR，2018 年 1 月 29 日發行新版 PCR 取代。內容同樣包含：總則、產品定義、功能單位宣告、內容聲明、單位及數量、系統邊界、截斷原則、分配原則、數據描述及數據質量要求、環境產品宣告內容、環境產品宣告之有效性、PCR 修改等 12 節。本橋梁 PCR 宣告單位為：公里 – 年，其生命週期範圍與前述道路 PCR 相同。

我國碳足跡產品類別規則（CFP-PCR）

環境部於 2014 年 5 月 30 日核准基礎建設 – 道路、隧道、橋梁等三種工程類型之碳足跡產品類別規則（PCR）。內容定義包含基礎建設之系統邊界、生命週期範圍。原料取得階段、施工建造階段及管理營運階段之一級數據、二級數據之來源與情境皆有詳列規範，以作為未來基礎建設 - 道路、隧道、橋梁等工程計算碳足跡之依據。其中橋梁及隧道工程（Tunnel Infrastructure）CFP-PCR 核定之正式文件名稱與適用範圍說明分述如下：

1. 橋梁工程：我國各種類型之橋梁工程，包含木橋、鋼筋混凝土橋、鋼構橋梁及組合式橋梁等各種類

型橋梁。功能為提供各類型載具跨越地形，連結河流或山谷兩側，並包含滿足此功能之交控、照明與其他必要附屬設施。本產品的功能單位定義為每公里 - 寬度之橋梁之修建（包含橋梁設備與其他必要附屬設施），以及未來 50 年之營運。

2. 隧道工程：我國各種類型之隧道工程，包含公路、鐵路、人行、水流及捷運等各種隧道類型。功能為提供車輛通行或輸送物資穿越山岳、平地或海底之通路，並包含滿足此功能所需之環控、照明與其他必要附屬設施。本產品的功能單位定義為每公里 – 斷面積之隧道之修建（包含隧道設備與其他必要附屬設施），以及未來 50 年之營運。

因國內目前尚未有鐵路工程之產品類別規則（PCR），故本工程參考國際上類似之鐵、公路工程環境產品宣告，包含瑞典 Bothnia 鐵路、西班牙 Arroyo Valchano 鐵路橋、西班牙 N-340 道路、瑞典 NCC 自行車橋及義大利波河大橋等，作為本工程碳盤查執行依據。

盤查內容與執行方式

工作內容與範圍

本計畫內容包含：文獻資料蒐集與盤查制度建立、本工程細部設計成果之碳排放量評估、實際工程碳足跡輔導及盤查及查證、工程碳排放量彙整及碳匯變化量調查，最後依實際碳足跡盤查及排放量推估結果，配合碳匯變化量調查結果，彙整工程整體碳排放量評估及減碳成效總結報告，盤查範疇詳圖 4。

工作範圍說明如下：

1. 工程細部設計成果之碳排放量評估：建立本工程之排碳資料庫、工程碳排放量計算及工程節能減碳效益評估檢討等。



圖 4 施工階段盤查標的及範圍

2. 實際工程碳足跡輔導及盤查、查驗及查證：本工程所使用之產品（材料、半成品、成品及設備等）碳排放活動數據資料調查或收集及各類施工活動碳足跡實際盤查、查驗及查證。盤查範圍包含 ISO/TS 14067、PAS 2050 及環保署制訂之我國「產品與服務碳足跡計算指引」所定義之材料、機具、運輸、廢棄物、水電及燃料等，及碳匯變化、人員運輸以及施工範圍之外的組織型盤查亦涵蓋在內。
3. 計算工程碳排放總量：經由實際碳足跡盤查結果，計算本工程碳排放總量。
4. 總體碳匯變化量調查：調查本工程用地範圍內之碳匯變化量。
5. 碳排放量評估及減碳成效成果：由本計畫文獻資料之蒐集與盤查制度建立，依實際碳足跡盤查、推估及碳匯變化量調查結果，彙整完成本計畫之整體碳排放量評估及減碳成效，以呈現整體執行成果。

盤查作業方式

為確實掌握工程全生命週期碳排放量，本團隊將探討並參考國內外碳足跡評估之發展，並參考國內之道路橋樑工程碳足跡盤查案例，擬定本工程執行流程（詳圖 5）：

1. 估算及盤查準備作業
2. 盤查輔導作業
3. 查證及發證作業
4. 成果報告

基於盤查內容的完整性考量，碳足跡計算應包含至少 95% 的功能單位預期的生命週期溫室氣體排放

量；而一般與產品供應鏈本身無直接關聯之過程，則可排除於系統邊界之外，包含：人力、行政管理與維護、行銷與銷售等。依據本工程盤查成果，整理各作業流程之工作要項說明如下：

1. 估算及盤查準備階段：

(1) 細部設計成果碳排放量評估報告

針對設計成果以碳足跡概念為基本考量，依據工程設計內容彙整施工中可能的各種排碳活動項目與數量，及蒐集對應碳排放係數，進而推估本工程之碳排放量與減碳效益評估檢討。

(2) 碳足跡盤查服務實施計畫書

針對國內外鐵道工程碳管理與碳足跡盤查現況進行資料蒐集，分析本工程特性，以及依循之碳足跡盤查依循規範、盤查範疇、盤查工作相關組織權責架構與機制、盤查工作內容與盤查程序、盤查表單與盤查結果查核原則等，並經查證單位簽認後，據以頒布執行。

(3) 碳足跡盤查依據

碳排放量計算應有同一標準及具一致性，國際上對於碳排放量之計算訂有相關計算原則及規範，包括：國家層級之 IPCC 國家溫室氣體清單指南（IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories）、企業層級之溫室氣體盤查議定書（The Greenhouse Gas Protocol）等；而在工程排碳量之計算部分，則須再加入生命週期評估（LCA）的概念，以碳足跡的觀點進行量化。



圖 5 執行流程圖

(4) 碳足跡盤查組織建立 (詳圖 6)

依循我國現行鐵路工程發包、施工及品管流程，發展出可整合各層級組織共同推動碳足跡盤查的規範、原則、流程與方法等，其各層級組織包含：工程主辦機關—交通部鐵道局、監造單位、施工承攬廠商（含其分包廠商）、輔導單位及查驗單位等；在既有三級品管制度下，適切導入此品管架構，並與施工承攬廠商（含其分包廠商）就本工程之特性、實質性議題、活動數據資料（一級數據或二級數據）之選擇與蒐集、盤查表單填列及試算表彙整等充分溝通，並藉由查證單位、輔導單位、監造單位與廠商三單位之密集聯繫，使本盤查作業能順利推動。



圖 6 盤查組織

(5) 碳足跡盤查邊界說明及排放源鑑定

碳足跡盤查以工程生命週期為考量，評估範圍分為地理邊界及時間邊界。

地理邊界：採工程地理範圍界定，考量本計畫執行目的及涵蓋範圍之完整性，本計畫碳足跡盤查範圍包括兩大部分：工程主體（工區）及施工管理（非

工區）；工程主體（工區）係依循國外鐵路 PCR 基本模組之內容劃定，包含施工過程中所有投入物料、能資源之製造及使用之排碳量；施工管理（非工區）主要為因本工程所進行之管理及監造活動，包括管理單位、監造及承包商之辦公室活動（詳圖 7）。

時間邊界：時間範圍應以工程生命週期為考量，區分為工程材料、施工階段及使用階段等三階段之碳排放量，其中工程材料及施工階段之排碳量由本計畫之盤查輔導工作執行，以取得完整資訊；使用階段之排碳量，則由本計畫蒐集未來本工程營運能耗維護修繕之相關資料，以推估方式試算其排碳量（詳圖 8）。

2. 盤查輔導階段：

(1) 工地現場輔導及盤查流程

工地現場盤查輔導工作為本計畫執行核心，其工作流程將先由承包商進行活動數據蒐集彙整及單據表單留存建檔，上傳至碳管理資訊平台後，再由本團隊進行碳足跡量化；期間透過承包商及監造單位（駐地工程師）進行內部查核，以及本團隊書面及現場查核等程序，可確保資料品質。

(2) 碳足跡活動數據蒐集

本計畫藉由建立表單系統進行數據蒐集，表單系統分為兩部分，第一部分為施工活動數據紀錄，其中包含施工碳管理日誌及施工碳管理登錄表，須由承包商依實際施工情形每日記錄，並完整蒐集相關單據或佐證資料。第二部分為施工活動數據彙整統計，包含施工碳管理月報及年報，本部分資料依日誌填報資料自動匯出，提供監造單位（駐地工程師）進行查核比對，並提供輔導單位納入碳足跡盤查清冊以計算排碳量。



圖 7 地理邊界示意圖



圖 8 生命週期碳足跡示意圖

(3) 碳足跡排放係選用

碳足跡排放係選用正確與否，影響碳足跡估算成果甚鉅，其係數選用步驟如下：(1) 確認碳足跡排放係數來源，包含本土碳足跡係數、環保署公告各項碳足跡排放係數、內政部公告之建築材料碳排放係數、研究文獻產出之工程材料碳足跡排放係數、國內外生命週期評估軟體所附資料庫內之碳足跡係數等，(2) 碳排放係數規格化率定，依據係數之規格製程特性、時間性、地理性、生命週期盤查邊界、盤查方式、功能單位碳足跡數據以及資料來源，進行詮釋資料整合工作，制定相同之係數率定規範，(3) 排放係數適當選擇，擇定條件包含生命週期盤查完整性、盤查方式適當性、規格與製程特性針對性、本土化地理特性以及時間性。

其係數選用流程詳見圖 9。

(4) 施工階段排碳量計算

本工程針對不同項目蒐集相關活動數據，再乘上由本團隊蒐集所得之排放係數，求得施工建造階段排碳量，詳見圖 10。

(5) 總體碳匯變化量調查

碳匯的估算方法為蒐集及量化盤查區域內生物量的變化，並加以量化成為溫室氣體的移除或排放量，可包括工區內之樹林、草地與土地利用改變等，統計年度生長量（如植林、植草）以掌握碳匯量的增加，並統計年度損失量（如移除、火災）以掌握碳匯量的減少。

(6) 碳足跡排放清冊制定

本計畫施工期程長達 4 年以上，為利於查證單位每年進行預審作業，須將每日、每月盤查而得之碳排放量，彙整建立每年之施工碳足跡排放清冊；其內容包含工程基本資料、生命週期地圖、不同生命週期階段活動數據彙整及衝擊計算、全生命週期碳排放量計算及統計分析。

(7) 碳足跡盤查總結報告

本計畫於施工期間將計算工程碳排放量數據，建立盤查清冊，逐年完成查驗，並於工程竣工後，彙集



圖 9 係數選用流程圖



圖 10 施工階段排碳量計算

該標案歷年碳足跡盤查清冊，綜整成為可供查證之工程碳足跡盤查總結報告書初稿，提送機關及執行本案之碳足跡盤查查證機構進行並完成查證程序。

3. 查證及發證階段：

工程施工完成碳足跡盤查作業後，提出「工程碳足跡盤查總結報告暨排放清冊」，由查證單位進行審查及查證程序，以取得符合 ISO 14067 國際標準之查證證書及意見聲明書為目標。

4. 成果報告階段：

於取得查證聲明書後，彙整本工作歷年執行成果，辦理成果報告書，其內容包括：鐵路工程整體碳管理發展評析、本計畫工程碳排放量估算及碳足跡盤查歷程及成果、本工程碳排放總量及碳足跡之結果、本工程總體碳匯變化量調查成果、本計畫設計階段排放量估算與盤查結果差異比對解析及減碳成效說明。

碳足跡數據分析

基於碳足跡分析規範要求與目前國際碳管理趨勢，主要在計算碳排放量，由該活動各種溫室氣體活動數據，乘以該活動單位溫室氣體排放或移除係數，再乘以所排放之溫室氣體的全球暖化潛勢（GWP）所得之合計量，以二氧化碳當量（CO₂e）表示。計算方式為【碳排放量（CO₂e）= 活動強度 × 排放係數 × GWP 值（IPCC 2007）】，本計畫盤查之溫室氣體種類除二氧化碳外，包括 IPCC 2007 年第四次評估報告中所列之所有溫室氣體，即二氧化碳、甲烷、氧化亞氮、氟氯碳化物、全氟碳化物、氟化醚、全氟聚醚、碳氫化合物及蒙特婁議定書所管制之物質等。

此外，排碳係數需採用生命週期係數；完整的生命週期係數定義為考量其原物料開採提煉、運輸、製造、使用及廢棄階段之碳排放量，為提升盤查結果代表性，亦應以本土化係數為優先。依此原則，本案例排碳係數選用來源及原則說明如後：

1. 排放係數來源

排放係數蒐集之主要來源有以下 5 種：

- (1) 供應商配合本計畫盤查所得之產品碳足跡係數
- (2) 環保署公告或供應商提供之產品碳足跡係數
- (3) 結合國內公告係數與係數資料庫計算而得之生命週期係數
- (4) 國內外生命週期資料庫
- (5) 國內外文獻刊載之排放係數

2. 係數選用原則

由於相同類型項目可能有數種排放係數，本計畫之排放係數選用將根據下列原則進行篩選，包括：盤查範疇、生命週期盤查方式、技術性、地理性與時間性。

設計階段之碳排放量推估

設計階段碳排放量推估之目的

所謂設計階段碳排放量推估係依據核定之細部設計成果，針對工程全生命週期中可能的各類排碳活動及材料數量等經過統計後，再蒐集對應之碳排放量係數，進而推估本工程之碳排放量與減碳效益計算，其主要目的係作為後續本工程施工过程中，推動碳足跡盤查、碳排放管制及碳足跡驗證的重要基礎。

本工程於施工前即依據細部設計成果進行工程碳排放量推估，撰寫設計階段工程碳排放量評估報告，作為施工階段實際盤查成果之對照資料，可有效了解設計推估與實際盤查之碳排放量差異，以利提升未來設計階段碳排放量推估準確度，進而強化設計階段所提出之減碳對策執行成效。

推估方式

依據本工程細設成果，先行將設計成果中各工項數量轉換為主要活動數據計算碳排放量，並以經費比例分析無法由設計成果呈現之排碳源；至於排碳係數之決定，原則採用參考國內外各政府單位、學會相關資料，以及生命週期軟體如 Simapro 所連結之環境資料庫，進行各項工程材料碳排放係數之參照引用。

本工程係採單價分析資料的方式，由最底層工程數量為活動數據；另有關排放係數之決定，主要分為四類：(1) 廠商、機關或設計公司自行盤查並經過認證之工程材料產品碳足跡、(2) 環保署公告能資源排放係數、(3) 內政部建研所公告之工程材料排放係數、(4) 國內外生命週期評估軟體所附碳排放係數資料庫（例如 Ecoinvent 生命週期資料庫），其優先使用依序為 (1) > (2) > (3) > (4)。

有關碳排放量之推估，即由上述細部設計成果之活動數據，以及蒐集之碳排放係數進行計算，其公式如下：

$$\text{碳排放量} = \sum \left[\text{活動數據（如油耗、用電量、材料量）} \times \text{碳排放係數} \right]$$

推估成果

本工程屬鐵路工程，本工程類型包含軌道、車站、

橋梁、建築、景觀、排水及機電設備等工程，其工作項目依據設計成果資源統計表，共高達 1,714 項，扣除非工程材料工項，如臨時工項（假設工程）、純為施工工項、使用金額為計價工項，以及設備材料工項，剩餘屬工程材料之活動數據計 627 項（預算金額約 10.1 億），經由現階段碳排放係數資料庫中搜尋，可尋求碳排放係數之工程材料如工項約 207 項（預算金額約 6.05 億），針對這 207 項之碳排放量加總，初步估算碳排放量為 41,596,035 kg CO₂e，即約為 41,596 tCO₂e。另再依工程預算金額比例，將已推估碳排放係數之工項，其所佔金額約為工程材料工項總計之 60%（6 億 / 10 億），故推算本工程材料部份之總碳排放量約為 41,596 / 0.6 = 69,327 tCO₂e 以上推估數據僅就本工程材料部分加以估算。

以上推估數據僅就本標部分工程材料加以估算，對於施工機具之直接排放量推估，則依據交通部運輸研究所 101.05「交通運輸工程排碳量推估模式建立與效益分析之研究」報告，其有關公路總局蘇花改工程各標之研究案例內，施工機具之直接排放量約佔總工程排放量之 16%。因考量施工機具乃為安裝各種材料、設備所需，若僅以上述「工程材料」之排碳量放大比例計算，可能疏漏了運輸、安裝「設備材料」之排碳量，故此處之施工機具排碳量應由「工程材料」+「設備材料」合計之排碳量放大比例來計算，而設備材料之製造階段排放量由於無法推估，此處先以預算比來推算，約為 5,406 tCO₂e，故施工機具之碳排放量為（工程材料 69,327 + 設備材料 5,406）/ 0.84 =（69,327 + 5,406）= 14,235 tCO₂e，由此推算本標工程之總碳排放量約為 69,327 + 14,235 = 83,562 tCO₂e。

對於營運階段之設施操作維護排碳量，依據交通

部運輸研究所 101.05「交通運輸工程排碳量推估模式建立與效益分析之研究」報告結論所述，以參考法國及瑞典的評估結果，採固定比例工程碳排放量之 14% 推估，故營運階段之碳排放量約為 83,562 × 0.14 = 11,699 tCO₂e，則本標全生命週期之總碳排放量約為 83,562 + 11,699 = 95,261 tCO₂e。

落實盤查輔導

作業流程

工地現場盤查輔導工作為本計畫執行核心，其工作流程將先由廠商進行活動數據蒐集彙整及單據表單留存建檔，上傳至碳管理資訊平台後，再由盤查單位進行碳足跡量化；期間透過廠商及監造單位（駐地工程師）進行內部查核，以及盤查單位書面及現場查核等程序，可確保資料品質。活動數據蒐集資料將定期彙整，再對應已匯入資料庫中之碳排放係數相乘後，即可成為排放清冊。本計畫盤查輔導流程將依據核定之盤查標的、範圍及邊界等，執行盤查輔導工作，如圖 11 所示。

盤查表單建置

依據實際執行流程規劃，本團隊研擬將表單系統分為兩部分，第一部分為施工活動數據紀錄，其中包含施工碳管理日誌及施工碳管理登錄清冊，須由廠商依實際施工情形每日記錄，並完整蒐集相關單據或佐證資料。第二部分為施工活動數據彙整統計，包含施工碳管理月報及年報，本部分資料由日誌填列資料彙整為總表，提供監造單位（駐地工程師）進行查核比對，並提供輔導單位納入碳足跡盤查清冊以計算排碳量。各項表單內容重點說明如下，並整理如表 1。

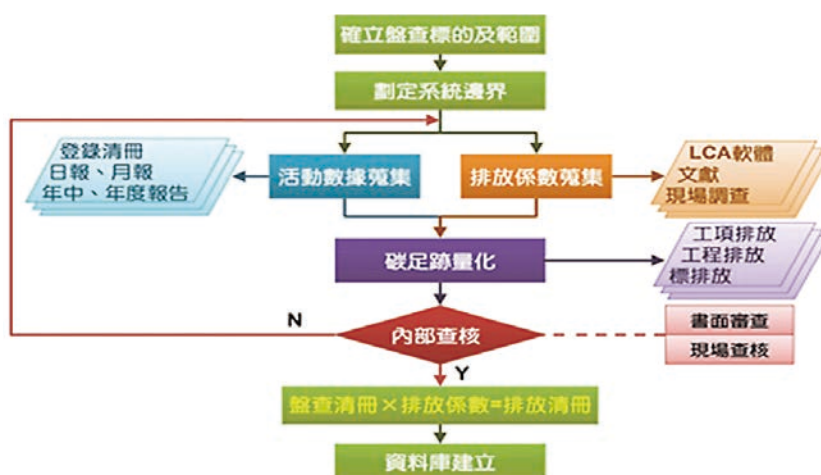


圖 11 盤查輔導流程圖

表 1 碳足跡盤查表單分類

	表單名稱	表單內容	負責單位	彙整單位
活動數據紀錄	碳管理日誌	碳排放活動數據	廠商	廠商
	碳管理登錄清冊	材料、機具/運具、電力、用水、植生等資料	廠商	廠商
活動數據彙整	碳管理月報	每月活動數據統計	廠商、監造、分局（段）	盤查團隊
	碳管理年報	每月活動數據統計	廠商、監造、分局（段）	盤查團隊

活動數據管控表

為提高活動數據之品質，建立日誌記錄，項目將配合公共工程施工日誌，建立表單內容對應工程進行中需填寫之公共工程施工日誌，確實歸類相關活動數據以及機具使用時數及耗油量等數據，另考量碳足跡盤查需求，各項活動數據管控將獨立製表，另外填列，數據管控表詳表 2。

表 2 活動數據管控表單

編號	表單名稱	內容
A-1	施工碳管理日誌	施工日誌資料以及機具使用資料
A-2	材料進/出場管控表（含運輸）	各項材料進/出場時須填列
A-3	機具進出管控表（含運輸）	各項機具進/出場時須填列
A-4	電力使用管控表	依各電表之電費單填列
A-5	自來水使用管控表	依各電表之電費單填列
A-6	廢棄物管控表（含運輸）	各項廢棄物清運時須填列
A-7	人員公務運輸管控表	各項人員公務運輸發生時須填列
A-8	碳匯變化管控表	各項植生或移除發生時須填列
A-9	施工機具油耗管控表	統計分包商每月實際加油量

碳管理登錄清冊

工程進行中使用機具、運具、材料等項目龐雜繁多，為瞭解施工中各種碳排放源之基本資料，故規劃登錄清冊以事先規劃或實際使用之項目。登錄清冊可於工程施作前開始製作，再於施工期間需配合實際使用機具、材料等修訂增補，其製作目的係分類標示施工過程產生碳排放源之基本資料，後續與施工活動數據建立連結，在碳足跡計算時有基本數據可供引用。

登錄清冊將分為工程材料、機具（設備）、運具、電表、水表、植生等不同類別表單，分別記錄規格、功率、能源種類、能耗及佐證資料等。清冊類別與登錄項目詳如表 3。

表 3 施工碳管理登錄清冊分類表

編號	清冊類別	佐證資料
B-1	工程材料登錄表	購買證明、發票、進料單、送貨單、物質安全資料表、再生材料名稱及使用比例、物料清單、化學成份表、產品規格書或原料分析表等。
B-2	施工機具/耗能設備登錄表	機具/設備標準規格書及出廠證明等。
B-3	運具設備登錄表	運具標準規格書及出廠證明等。
B-4	用電登錄表	電費單
B-5	用水登錄表	水費單
B-6	植生登錄表	購買證明、發票、進料單和送貨單等。

碳排放量分析成果

本工程自 2016 年 9 月開工，至 2021 年 12 月完工，以下各節將分就各年度之工料、機具、公務運輸、用水及用電、廢棄物及植栽碳匯變化進行說明。

施工階段碳排放量

2016 年 9 月至 12 月份工程施工碳排放量約為 1,025.96 公噸二氧化碳當量，材料使用占總排放量 92.59%，各項排放源排放量分析詳表 4。

表 4 2016 年工程施工碳排放量統計表

排放源	碳排放量 (tCO ₂ e)	佔比
材料使用	949.97	92.59%
材料運輸	11.46	1.12%
機具使用	17.99	1.75%
機具運輸	14.68	1.43%
公務運具使用	5.27	0.51%
用電	22.79	2.22%
用水	—	0.00%
廢棄物處理及運輸	2.35	0.23%
人員化糞池逸散	1.45	0.14%
工程總量	1,025.96	100.00%

2017 年 1 月至 12 月份工程施工碳排放量約為 10,306.04 公噸二氧化碳當量，材料使用占總排放量 91.12%，各項排放源排放量分析詳表 5。

表 5 2017 年工程施工碳排放量統計表

排放源	碳排放量 (tCO ₂ e)	佔比
材料使用	9,391.33	91.12%
材料運輸	285.41	2.77%
機具使用	261.51	2.54%
機具運輸	225.12	2.18%
公務運具使用	40.13	0.39%
用電	75.40	0.73%
用水	—	0.00%
廢棄物處理及運輸	16.79	0.16%
人員化糞池逸散	10.35	0.10%
工程總量	10,306.04	100.00%

2018 年 1 月至 12 月份工程施工碳排放量約為 11,650.86 公噸二氧化碳當量，材料使用占總排放量 89.36%，各項排放源排放量分析詳表 6。

表 6 2018 年工程施工碳排放量統計表

排放源	碳排放量 (tCO ₂ e)	佔比
材料使用	10,411.49	89.36%
材料運輸	262.70	2.25%
機具使用	462.68	3.97%
機具運輸	356.14	3.06%
公務運具使用	34.74	0.30%
用電	67.55	0.58%
用水	0.45	0.00%
廢棄物處理及運輸	43.45	0.37%
人員化糞池逸散	11.65	0.10%
工程總量	11,650.86	100.00%

2019 年 1 月至 12 月份工程施工碳排放量約為 6,554.20 公噸二氧化碳當量，材料使用占總排放量 76.77%，各項排放源排放量分析詳表 7。

表 7 2019 年工程施工碳排放量統計表

排放源	碳排放量 (tCO ₂ e)	佔比
材料使用	5,031.80	76.77%
材料運輸	171.28	2.61%
機具使用	533.54	8.14%
機具運輸	684.01	10.44%
公務運具使用	32.64	0.50%
用電	62.79	0.96%
用水	0.51	0.01%
廢棄物處理及運輸	26.12	0.40%
人員化糞池逸散	11.51	0.18%
工程總量	6,554.20	100.00%

2020 年 1 月至 12 月份工程施工碳排放量約為 6,685.24 公噸二氧化碳當量，材料使用占總排放量 75.30%，各項排放源排放量分析詳表 8。

表 8 109 年工程施工碳排放量統計表

排放源	碳排放量 (tCO ₂ e)	佔比
材料使用	5,033.82	75.30%
材料運輸	116.62	1.74%
機具使用	429.51	6.42%
機具運輸	972.08	14.54%
公務運具使用	28.54	0.43%
用電	67.63	1.01%
用水	0.63	0.01%
廢棄物處理及運輸	26.12	0.39%
人員化糞池逸散	10.29	0.15%
工程總量	6,685.24	100.00%

2021 年 1 月至 12 月份工程施工碳排放量約為 14,202.26 公噸二氧化碳當量，材料使用占總排放量 94.57%，各項排放源排放量分析詳表 9。

表 9 2021 年工程施工碳排放量統計表

排放源	碳排放量 (tCO ₂ e)	佔比
材料使用	13,431.71	94.57%
材料運輸	145.29	1.02%
機具使用	223.83	1.58%
機具運輸	295.97	2.08%
公務運具使用	18.90	0.13%
用電	59.55	0.42%
用水	0.56	0.00%
廢棄物處理及運輸	20.77	0.15%
人員化糞池逸散	5.68	0.04%
工程總量	14,202.26	100.00%

依據各年度統計，本工程施工階段（2016 年至 2021 年）工程施工總碳排放量為 50,424.56 公噸二氧化碳當量，詳見表 10。

表 10 本工程施工碳排放量統計表

排放源	碳排放量 (tCO ₂ e)	佔比
材料使用	44,250.13	87.76%
材料運輸	992.75	1.97%
機具使用	1929.06	3.83%
機具運輸	2548.00	5.05%
公務運具使用	140.22	0.28%
用電	355.71	0.71%
用水	2.15	0.00%
廢棄物處理及運輸	135.60	0.27%
人員化糞池逸散	50.94	0.10%
工程總量	50,424.56	100.00%

營運管理階段碳排放量

本工程營運管理及使用階段包括操作、維護 / 重置與拆除之相關排碳活動，操作階段為空調、照明、電器、換氣、給污水、輸送與加熱各面向，維護 / 重置階段為設備、裝修材等材料之置換，拆除則指本工程所有建築到達使用年限後將主結構拆除。依據「建築產業碳足跡（林憲德著）」之時間邊界為 60 年，經推估後，本工程操作、維護 / 重置與拆除之排碳量總計為 59,574.92 tCO₂e，詳表 11。

表 11 營運管理碳排放量統計表

建築物階段	碳足跡 (tCO ₂ e)
建築物材料修繕	4,672.98
建築物使用階段	54,591.42
建築物拆除廢棄階段	310.52
合計	59,574.92

加值分析與減碳策略

功能單元碳排放量分析

本工程就各路堤、橋梁、月台、機房等功能單元，分析較具代表性之數據，可以得知路堤段（含軌道）每進行公尺碳排放量在 160 ~ 370 kg CO₂e 之間、橋梁段（含軌道）每平方公尺碳排放量在 920 ~ 1,000 kg CO₂e 之間、車站月台每平方公尺碳排放量在 100 ~ 200 kg CO₂e 之間、車站機房每平方公尺碳排放量在 740 ~ 1,190 kg CO₂e 之間，資料整理如表 12、表 13，提供未來鐵路工程碳排放量推估參考。

表 12 路堤段各類功能單元碳排放量統計表

功能單元	數量 (m)	排放量 kg CO ₂ e / m
潮州抬高段	1,000	270
佳冬抬高段	2,050	370
擴建雙軌	4,990	300
原線電化	8,580	160

表 13 橋梁及車站各類功能單元碳排放量統計表

功能單元	數量 (m)	排放量 kg CO ₂ e / m
溪州溪橋	467	1,000
北勢溪橋	976	920
東海月台	783	200
枋寮月台	5,236	100
東海機房	125	1,190
枋寮機房	836	740

工程減碳策略

依據本次盤查結果與經驗，並參考國內外案例，建議未來施工可採取以下措施，期使對環境干擾降至最低：

- 1. 低耗能材料，儘可能減少材料使用之排碳；
- 2. 就地取材（人、機、料），儘可能減少運輸油耗排碳；
- 3. 妥善安排機具操作排程，減少怠速時間；
- 4. 機電設備使用具有節能標章或以電力取代燃油；
- 5. 減少資源用量（用水、用電）及廢棄物量；
- 6. 妥善安排全能工班。

結論與建議

- 1. 本文涵蓋作業內容為：細部設計碳排放量推估、施工階段工程碳足跡盤查輔導（活動數據蒐集與排放係數律定）、資料統整與分析等^[6]。
- 2. 經統計 2016 至 2021 年間之排碳量分析，鐵道工程材料碳排放量之佔比約為總量之 85% 以上，顯示工程材料為整體工程生命週期之大宗碳排放源。
- 3. 本工作除取得鐵道工程首張碳足跡查證聲明書外，並已建置部份台灣南部地區工程材料碳排放係數資料庫，以及提供本工程依具工程類別、性質、規模、工法等相關單位碳排放係數，可供後續相關工程計畫於規劃設計階段評估出更準確的碳排放量。
- 4. 配合國家 2050 淨零排放政策，建議未來可以持續擴大鐵道工程之碳足跡盤查查證作業，以建置我國鐵道工程之碳排放量基準。
- 5. 基於環境部目前已頒布公路之道路、橋梁、隧道產品類別規則（PCR），後續相關鐵道工程如辦理工程碳足跡盤查作業，其作業依據規範除按 ISO 14067 標準外，亦可建立我國鐵道工程之道基、橋梁、隧道等產品類別規則（PCR）。
- 6. 未來累積相當數量之鐵道工程碳足跡盤查參數結果，包含各重要工程材料（如混凝土、鋼筋、鋼結構等）之碳排放係數，以及各工程類型（如車站、道基、橋梁、隧道等）之單位碳排放量等，建議可著手制定我國鐵道工程之碳排放量相關數據規定，並於施工規範中予以規定限制，鼓勵施工廠商落實節能減碳目標，並朝 2050 淨零排放政策邁進。

參考文獻

- 1. UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change). (2015). "Paris Agreement".
- 2. 中興工程顧問股份有限公司（2012），「交通運輸工程碳排放量推估模式建立與效益分析之研究」，「交通運輸工程碳排放量推估模式建立與效益分析之研究」。
- 3. BSI (2008). "Guide to PAS 2050. How to assess the carbon footprint of goods and services."
- 4. BSI (2011). "PAS 2050: Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services."
- 5. ISO (2013), "ISO/TS 14067. Greenhouse gases - Carbon footprint of products - Requirements and guidelines for quantification and communication".
- 6. 台灣世曦工程股份有限公司（2021），「台 9 線南迴公路拓寬改善後續計畫安朔草埔段委託工程碳管理暨碳足跡盤查輔導及查證服務工作碳足跡盤查總結報告書」。