

防災與減碳同行

國有林防災工程的永續願景

文、圖／詹勳全（通訊作者 | 國立中興大學水土保持學系教授）

王依蘋（國立中興大學國土資源保育中心副研究員）

李膺讚（林業及自然保育署集水區治理組科長）

林業減碳行動起步

隨著氣候變遷議題日益受到關注，「減碳」已不再只是政策口號，而是逐步融入國家政策與民生各層面。在國有林治山防災工程的推動過程中，從工程材料的製造與運輸，到施工期間的能源使用等，均為溫室氣體排放的來源。因此，如何在確保防災安全的同時，兼顧減碳目標，達成永續發展，已成為當前的重點課題。

為有效降低並管理防災工程所產生的碳排放，林業及自然保育署（簡稱林業保育署）參考水利署與農村發展及水土保持署（簡稱農村水保署）的相關經驗，開始推動國有林防災工程碳排放盤查的前期作業。此作業內容包括：調查與分析現階段國有林防災工程的碳排情形、建立碳排放量化方法、規劃碳排放強度上限及管理機制等。此外，林業保育署亦選擇具體工程案例進行碳盤查實務操作與驗證，以建立具參考價值的實務基礎。

此外，林業保育署也透過系統化的教育訓練課程，協助並輔導本署及各地區分署第一線同仁瞭解碳排放的估算方法與管理機制。藉由這樣的培育過程，逐步提升同仁對減碳工作的認識與參與度，同時也為邁向 2050 年「淨零排放」的目標預作準備，期望在確保工程安全的同時，推動環境永續，攜手邁向林業永續的新里程。

國有林工程碳排放計算依據

為呼應臺灣 2050 年淨零排放政策，並與國際社會共同邁向減碳目標，ISO/TS 14067 技術規範已於 2018 年正式修訂為國際標準《ISO 14067》，使產品碳足跡(Carbon Footprint of Products, CFP) 的評估與計算有統一的國際依據。該標準整合了 ISO 14040 系列與英國 PAS 2050 等相關規範，現已成為全球廣泛採用的碳足跡盤查基礎。臺灣亦與國際同步推動碳足跡管理作業，並採用《ISO 14067:2018》（簡稱 ISO

14067) 作為碳盤查與減量工作的標準依據；林業保育署也參照該標準架構，建立適用於林業防災工程的碳排放量評估方法。

$$\text{碳足跡} = \text{活動數據} \times \text{排放係數} \times \text{全球暖化潛勢 (GWP)}$$

ISO 14067 提供多種碳排量化方法，其中最常見且通用性較高的是「排放係數法 (Emission Factor Method)」。林業保育署採用此方法導入防災工程碳盤查作業，並透過 3 項主要參數進行碳排量估算，包括：1. 活動數據 (Activity Data)；2. 排放係數 (Emission Factor)；3. 全球暖化潛勢 (Global Warming Potential,

GWP)。此一方法可應用於工程各階段的碳排放計算，有助於未來制訂具體可行的減碳策略，進而落實淨零排放的長期目標。

其中，「活動數據」是指產品在生產或服務提供過程中所使用的材料、能源或交通運輸等之實際使用量；「排放係數」則表示每單位活動數據所對應產生的溫室氣體排放量；至於「全球暖化潛勢 (GWP)」則是用來將各類溫室氣體轉換為二氧化碳當量 (Carbon Dioxide Equivalent, CO₂e) 的參數。

GWP 可作為不同氣體對氣候變遷影響程度的比較基準。下表列出了幾種常見溫室氣體的 GWP 數值，作為後續碳排量估算之依據。

常見溫室氣體全球暖化潛勢

溫室氣體種類	TAR, 2001	AR4, 2007	AR5, 2013	AR6, 2021
二氧化碳 (CO ₂)	1	1	1	1
甲烷 (CH ₄)	23	25	28	27.9
氧化亞氮 (N ₂ O)	296	298	265	273
氫氟碳化物 (HFCs)	12-12,000	124-14,800	1-12,400	0.004-16,200
全氟碳化物 (PFCs)	5,700-11,900	7,390-17,700	1-17,400	0.002-18,500
六氟化硫 (SF ₆)	22,200	22,800	23,500	24,300
三氟化氮 (NF ₃)	10,800	17,200	16,100	17,400

資料來源：環境部 (2024)

確立工程系統邊界

ISO 14067 是以「生命週期評估」(Life Cycle Assessment, LCA) 為基礎，強調需從產品或服務的整體生命週期角度，全面評估其碳排放量。因此，明確界定碳排放來源與涵蓋範圍，是進行碳足跡盤查的首要步驟。該標準核心在於以「生命週期觀點」(Life Cycle Perspective) 進行碳排放計算，涵蓋從原料取得、生產製造、運輸配送、使用階段，直到廢棄處理等各個階段，全面掌握溫室氣體的排放與移除情形。

在執行碳盤查時，必須清楚定義盤查的系統邊界與功能單位，並依循 6 項基本原則進行資料的蒐集與分析，包括：相關性、完整性、一致性、連貫性、準確性與透明度。此外，亦需考量資料的獨立性，避免重複計算。透過產品碳足跡的量化結果，可有效辨識產品或工程生命週期中的碳排放熱點，進而擬定具體的減碳策略，協助實現溫室氣體移除與淨零排放的目標。

依據 ISO 14067 的規範，於進行任何產品或服務的碳足跡盤查前，應依循「第三類環境宣告」(Type III Environmental Declaration) 或「足跡溝通計畫」中所訂定的「產品類別規則」(Product Category Rules, PCR)。

此一程序旨在確保同類產品由不同單位進行碳足跡評估時，能遵循一致的方法學，產出具有可比性之結果。

目前我國已公告多項產品與工程之 PCR 規則，相關資訊可於「產品碳足跡資訊網」查詢。

系統邊界的界定是碳盤查作業的起點。「系統邊界」是指盤查所涵蓋的範圍與內容，包括所涉及的能源與資源類型、排放源追蹤對象，以及生命週期的各階段。明確劃定系統邊界，有助於建立碳排放估算的基礎，並直接影響後續活動數據的完整性與一致性。

在界定系統邊界後，下一步即為活動數據的蒐集。這些數據需涵蓋系統邊界內所有會產生碳排放的項目，例如：原物料使用量、運輸距離與運輸方式、施工機具的操作時間與燃料消耗量等。接著，將所蒐集的活動數據搭配相對應的排放係數與 GWP 參數，即可完成工程項目的碳排放量計算。

根據國內《橋梁及道路碳足跡產品類別規則》(CFP-PCR) 指出，碳足跡的評估範疇可涵蓋施工建造階段與營運管理階段。其中，施工建造階段包括施工過程中使用的工程材料、施工機具所消耗的燃料與能源，以及施工期間管理單位相關作業所產生的活動數據；營運管理階段則以橋梁在未來 50 年營運期間的操作與維護作業為評估對象，涵蓋材料使用、能源消耗與燃料使用等項目。

對於實際工程施作而言，無論是建造或營運階段，其工作項目、工程規模、材料使用數量與材質選擇等內

容，皆會反映在契約詳細表的各項工項中。因此，可透過契約詳細表中各項工項的活動數據（即數量），結合對應的碳排放係數，進而推算出整體工程的碳排放總量。

以國有林防災工程為例，每項工程在展開修復作業前，林業保育署會先派員進行現地損壞評估，並研議是否進行修復作業。經核定後，委由設計監造公司依據實際需求進行防災工程設施之規劃與設計。

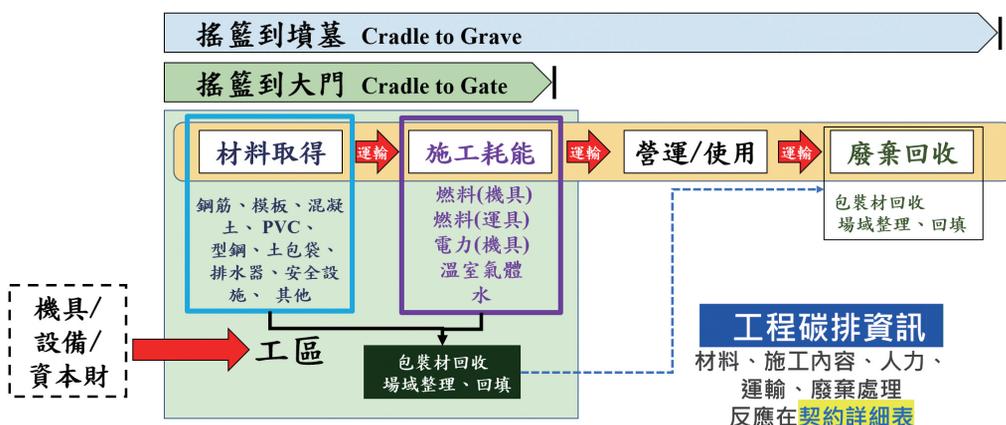
設計單位在進行規劃時，會詳實估算工程所需的材料種類與數量、施工機具配置、施工規模與期程、協調溝通需求，及預估的廢棄物處理方式等，並將上述資訊納入契約詳細表。由於契約詳細表涵蓋材料費、運輸費、施工費、廢棄物處理費及其他雜項支出，完整反映材料取得、工程施工與清理階段的資訊，因此可作為精準估算工程碳排放量的依據。

此方法具備資料可追溯性高、計算結果準確性佳的優點，特別適用於碳足跡量化作業。下圖說明國有林防災工程生命週期碳足跡的涵蓋範疇，主要以「材料取得」及「施工耗能」階段為計算範圍。至於未於詳細價目表中明列的工項，則不納入碳排計算範圍。

國有林防災工程的活動係數收集

林業保育署於 2024 年進行工程碳足跡的初次盤查作業。在展開減碳措施之前，首先需要設定減碳基準年並進行碳盤查，以便在獲得工程碳排預估模型後，擬定具體的減碳目標。

根據國內外相關單位選取碳排基準年的依據，通常有以下幾種方式：1. 參考國際公約或法律條文的發布年份；2. 以首次進行盤查的年度為基準，例如水利署選擇以 2019-2021 年的 3 年平均值作為碳排基準年，農村水保署則以 2020-2021 年的 2 年平均值為基



國有林工程生命週期碳足跡範疇

準年；3. 選擇資料深入分析的年份，如聯合國 IPCC 報告中，近期基礎年選定為 2019 年。

由於本計畫自 2024 年 3 月起正式執行，且當年度大部分工程仍處於執行或發包階段，林業保育署選擇以 2022、2023 年的工程資料作為碳排基準年進行統計與分析。根據「公共工程節能減碳檢核注意事項」的第二點規定，災後緊急工程、搶修及復建工程等類型，不需要進行節能減碳檢核，因此這些類型的工程不會納入此次碳盤查清單。

在選定 2022、2023 年為減碳基準年後，林業保育署收集上述年度的工程結算明細表，對施工工項進行整理。工項大致可分為：工程材料使用（包括植栽樹種）、施工機具操作、燃油或電力能源消耗、各類運輸等，這些活動均涉及碳排放，這些活動的使用量或操作量即為所需的活動數據。

根據 ISO 14067:2018 標準，進行碳足跡盤查時，若某些排放源對碳排放的貢獻不具實質性，則可以將其排除在盤查範圍之外。因此，在資料有限或存在缺漏的情況下，部分工程的碳排放項目可能未納入盤查範圍，相關的情況如下。

- 人工相關活動：根據「產品與服務碳足跡計算指引」（環境部，2010），如人力、行政管理、維護、行銷與銷售、員工私人運輸及員工

差旅等排放源，因與供應鏈過程無直接關聯，可排除在碳排放評估範圍之外。

- 單位為「式」的活動：若進行碳排放估算時，某些活動（如施工放樣、環境整理、施工測量等）所占的碳排放比例不足 1%，則可不納入碳足跡盤查範圍。然而，若該活動為重要工項（如機具搬運費），則需依照工程經費與碳排放之間的關係式來進行估算。
- 臨時設施與設備：對於可重複使用的臨時設施或設備（如施工圍籬、警示標誌、臨時擋土樁等），因為這些設施或設備在不同工程間可能會重複使用，因此不納入碳排放量的評估範圍，以避免重複計算。

國有林防災工程排放計算

根據工程工單內容，蒐集國內外對應的原物料、工料及能源資源的排放係數，以估算工程的碳排放量。所蒐集的碳排放係數來源包括環境部產品碳足跡資訊網提供的多種產品排放係數，例如建材、能源、金屬製品和水泥製品等材料的碳排放係數；林業保育署（2011）專案研究「新興公共工程計畫落實節能減碳評估」中收集的碳排放係數；水利署（2022）所發布的「水利工程減碳作業參考指引」中的工作項目碳排放係數參考表；以及農村水保署（2023）「水土保持工程參考指引」中的工作項目碳排放係

工程碳足跡計算項目

A、原物料的生產碳排

Σ (工程材料用量×工料排放係數)

B、材料及施工機具運輸排碳

Σ (燃料用量×燃料排放係數)

C、工程施作之能源消耗碳排

Σ (Σ 機具操作時數×機具單位時間能資源耗用量)×能資源排放係數

D、廢棄物的運輸與處置排碳

Σ (廢棄物量×處理排放係數)

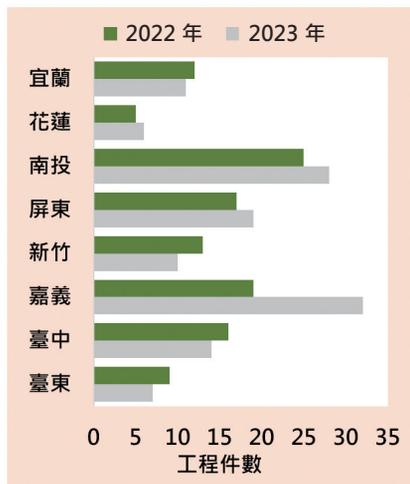
資料來源：林業保育署 (2024)

數參考表。上述資料已彙整於林業保育署 2024 年的國有林防災工程碳排分析與減碳評估報告中，作為碳盤查實務應用的參考。此碳盤查方法採用「排放係數法」，對原物料使用、施工機具操作、運輸過程、能源消耗與廢棄物處理等項目進行碳排量估算。

國有林減碳基準年的碳排計算

基準年工程件數

林業保育署在 2022、2023 年計辦理 318 件工程，涵蓋崩塌地處理、防砂工程、林道改善工程及緊急處理工程 4 種工程類型。其中，緊急工程



■ 基準年工程數量
資料來源：林業保育署 (2024)

地區分署	防砂工程	林道工程	崩塌地處理	總計	%
宜蘭	6	6	11	23	9.5
花蓮	1	6	4	11	4.5
南投	25	20	8	53	21.8
屏東	14	14	8	36	14.8
新竹	5	10	8	23	9.5
嘉義	33	9	9	51	21.0
臺中	15	11	4	30	12.3
臺東	1	9	6	16	6.6
總計	100	85	58	243	100

根據「公共工程節能減碳要點」的規定，無需進行節能減碳檢核作業。因此，基準年碳排放分析將以崩塌地處理、防砂工程和林道改善工程為主，共計分析了 243 件工程。在這些工程中，南投分署的工程數量最多，共有 53 件，占總工程量的 21.81%；其次是嘉義分署，工程數量為 51 件，占 20.99%。而花蓮分署與臺東分署的工程數量相對較少，平均每年少於 10 件。

本次統計涵蓋的國有林工程共計 243 件，相關分布情況如圖所示。為提升辨識度，圖以不同顏色標示各類工程項目：崩塌地處理以土色標示、防砂工程以淡藍色表示、林道工程則以綠色標示。各地區分署工程件數分布概況如下：

- 宜蘭分署共 23 件工程，以崩塌地處理為主要類型。
- 新竹分署有 23 件工程，以林道工程為主。
- 臺中分署共 30 件工程，以防砂工程為主要類型。

- 南投分署共 53 件工程，防砂工程和林道工程占比相近。
- 嘉義分署共 51 件，以防砂工程為主。
- 屏東分署有 36 件工程，以防砂工程、林道工程為主。
- 臺東分署有 16 件工程，以林道工程居多。
- 花蓮分署有 11 件工程，以林道工程居多。

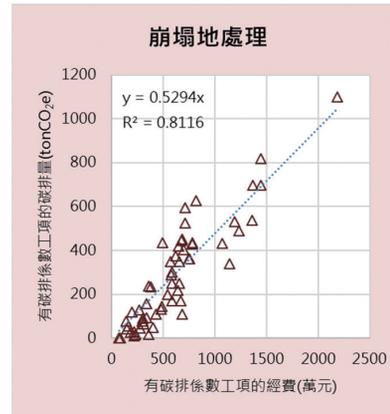
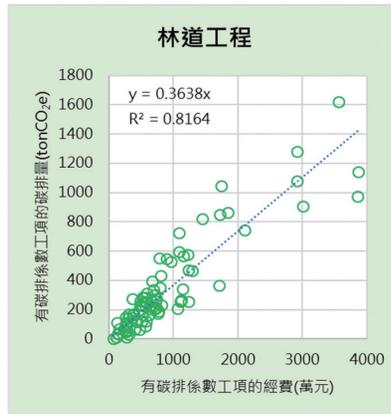
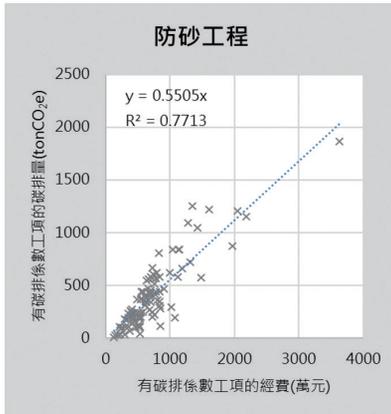
基準年的工程碳排分析

林業保育署根據上述 243 件工程的契約詳細表，統計每項工程所使用的材料種類、施工機具使用量、碳排放總量及經費支出等資料，並進行碳排放總量的計算與分析。針對每一工項和材料，填入對應的碳排放係數，逐一計算並加總各工項的碳排放量，最終得出每件工程的總碳排放量。年平均約有 121 件工程，依據不同工程類型的碳排放年均值分別為：

- 防砂工程：約 21,336.82 tonCO₂e
- 林道工程：約 15,406.90 tonCO₂e

工程類型	宜蘭	花蓮	南投	屏東	新竹	嘉義	臺中	臺東	總計
防砂工程	6	1	25	14	5	33	15	1	100
林道工程	6	6	20	14	10	9	11	9	85
崩塌地處理	11	4	8	8	8	9	4	6	58
合計	23	11	53	36	23	51	30	16	243

■ 國有林之工程項目統計
資料來源：林業保育署（2024）



■ 國有林防災工程之經費與碳排關係式
資料來源：林業保育署（2024）

- 崩塌地處理：約 8,458.92 tonCO₂e
- 總計年度碳排放量為 45,202.64 tonCO₂e

碳排放強度管控

由於每年工程的規模和發包數量會根據需求與規劃有所變動，例如強颱與地震對工程設施的衝擊程度，會影響修復規模、經費和資源的分配，因此難以僅以工程總量來進行控管，為符合實際災害經費之運用情形，「碳排放強度」（即每萬元經費之碳排放量，計算方式為總碳排放除以總經費）作為控管依據，則是較合理的碳排管理。

建立工程碳排的上限和管控

為使工程主辦機關在設計或預算書編列前，即能初步掌握工程碳排之上限，林業保育署建置各類工程型態之經費與碳排放對應預估模型，

得出各類工程型態之碳排放強度轉換係數（即每萬元經費所對應之碳排放量）。再透過工程預算金額進行加乘，即可推估該工程之碳排放量。同理，如將轉換係數依據碳排放強度目標進行調整，則可設定出各工程類型之碳排放上限值，將有助於工程主辦機關進行碳排放總量管控及目標管理。

碳排放強度轉換係數透過以下 2 個步驟來建立：

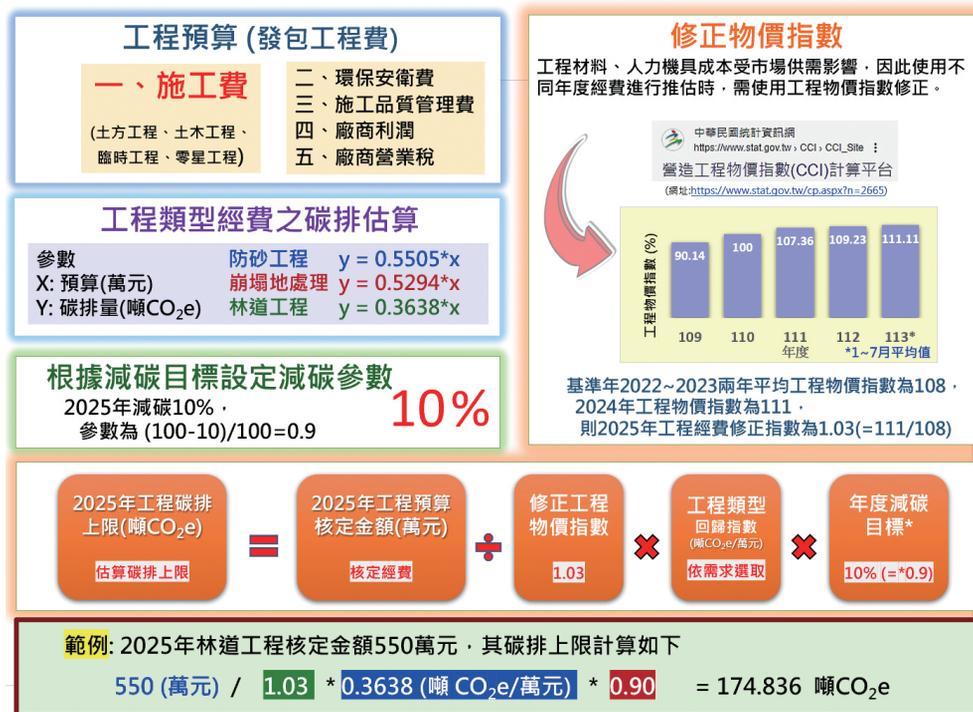
- 建立碳排預估模型（迴歸分析法）：本計畫透過碳排放係數法，計算每件工程的實際碳排放量。接著，將「工程碳排放量」與「工程經費」進行線性迴歸分析，以求得能代表兩者關係的迴歸方程式及決定係數（R²）。通過此模型，只需知道工程的經費，即可快速推估其預期的碳排放量。
- 建立工程類型碳排放強度：針對防砂工程、林道工程、崩塌地處理工程 3 類主要工程，進行「每萬元經

費對應碳排量 (tCO₂e/萬元)」的統計與分析。並利用多件工程案例進行模型驗證與誤差測試，探討以經費估算碳排放時可能出現的偏差原因，如工項組成差異、材料種類或地形條件等。

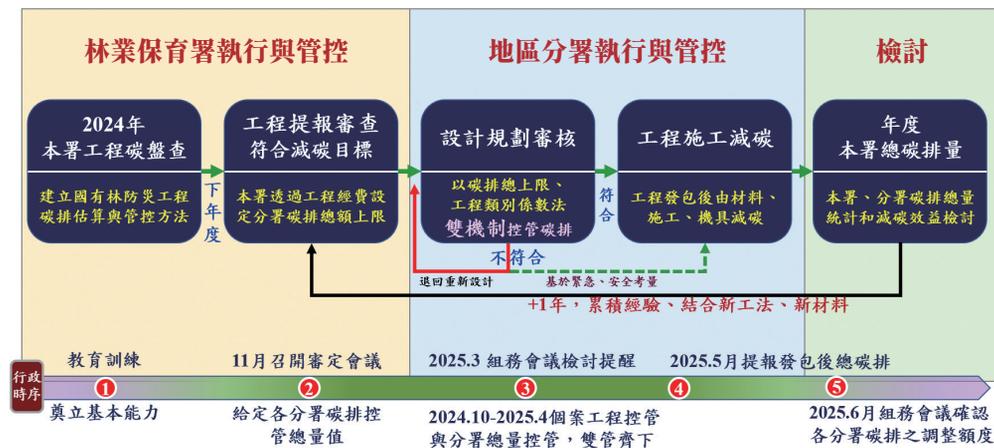
碳排強度參數（以每萬元工程經費對應的碳排放量表示）：

- 防砂工程：0.5505 ton CO₂e / 萬元
- 林道工程：0.3638 ton CO₂e / 萬元
- 崩場地處理工程：0.5294 ton CO₂e / 萬元

以 2025 年林道工程為例，根據工程類型選取相應的林道工程碳排強度 0.3638 ton CO₂e/萬元，並設立減碳 10% 的目標。考慮到通貨膨脹因素，將基準年與 2024 年的物價指數比值納入考量，因為 2025 年工程通常在 2024 年底設計並發包，故物價指數以 2024 年為主。根據這些參數，修正並估算出該工程的排放上限管控值。透過上述分析方法與管理模組的建立，林業保育署未來將能在工程規劃初期即納入碳排放評估機制，進一步提升防災工程的永續性與環境友善性。



■ 碳排上限使用參數
資料來源：林業保育署（2024）



■ 國有林防災工程之減碳管理
資料來源：林業保育署（2024）

國有林工程之減碳管理

為推動國有林防災工程系統性減碳，林業保育署構建完整的行政管控流程與減碳策略目標。國有林工程減碳管理機制分為 3 個階段，由林業保育署及各地區分署共同執行與管控，逐步將減碳措施納入整體流程。3 個階段的詳細說明以下：

■ 林業保育署執行與管控

本計畫首先建置「國有林防災工程碳排估算與管控方法」，並於 2024 年 9 月進行教育訓練，向各地區分署及相關單位推廣工程碳排估算操作方式。林業保育署將依此方法，結合年度工程經費，為各地區分署設定碳排總量上限，設定短期減碳目標，逐步實施並推展碳排管理制度。

■ 地區分署執行與管控

各地區分署將根據林業保育署所核定的年度碳排總量上限，並結合「工程類別碳排係數法」進行雙軌碳排管理機制，進行工程設計規劃與審核控管。於工程發包後，各地區分署將落實材料選用、施工方法及機具操作的減碳措施，並於施工階段進行減碳檢核，確保工程實施過程符合減碳目標。

■ 檢討與修正

每年，林業保育署將統合各地區分署執行成果，進行工程碳排總量統計與減碳效益檢討，並作為後續滾動式修正與政策調整的依據。整體流程強調經驗累積、資料深化及新技術導入，以確保工程減碳管理得以落實執行。

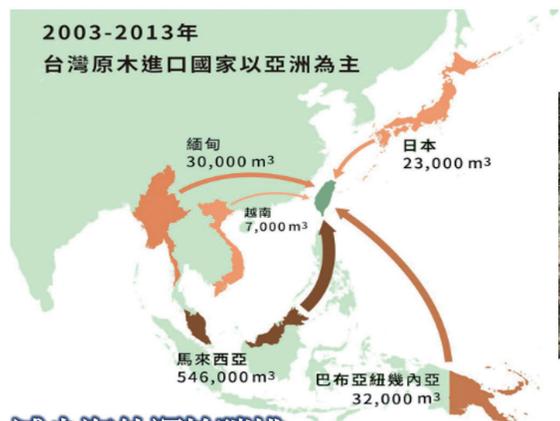
因應淨零排放策略，農業部訂定了四大主軸政策，分別為「減量、增匯、循環及綠趨勢」，其中國有林工程屬於「減量」範疇。為實現 2040 年逐步達成淨零排放的目標，國有林工程以 2022、2023 年為基準年（設定減碳強度為 100%），逐步減少碳排放量。短期減碳目標之設定為，2024 年減碳目標為 5%，並且林業保育署已順利達成此目標。2025 年減碳目標定為 10%，後續將持續追蹤與評估減碳效益，確保達成預定的減排目標。

透過上述分析與工具的建置，林業保育署未來將能在工程規劃初期即納入碳排放考量，進一步提升防災工程的永續性與環境友善性。目前，國

有林工程尚未完全納入正式的碳排放管制範疇，但林業保育署已積極導入碳排放資訊管理與減碳制度，並結合行政規劃、技術應用與教育推廣，朝向低碳永續的政策願景邁進。

減碳有方 防災不減力

為同時達成防災、減碳與永續治理的多重目標，林業保育署參考農村水保署推動水土保持工程減碳制度的經驗與作法，並根據基準年所執行的國有林防災工程資料進行彙整與分析，作為設定減碳基準年的依據。透過統計各項工項活動數據，並結合材料使用、施工工序、運輸方式及廢



減少海外運輸碳排

國產材
陸運



進口材
海運
+
陸運



推廣利用國產木材
資料來源：林業保育署（2024）



林業保育署期以科學方法管理碳排，兼顧防災工程，展現永續治理的方向。

棄物處理等排放係數，本計畫計算出 3 類主要工程的排放強度：防砂工程為 0.5505 ton CO₂e / 萬元、林道工程為 0.3638 ton CO₂e / 萬元、崩塌地處理工程為 0.5294 ton CO₂e / 萬元。除此之外，本計畫還建立了相應的工項排放係數清單，為後續的碳排估算與管控制度提供基礎。未來，林業保育署將透過工程碳排上限與年度減碳目標管控的雙軌機制，作為國有林工程規劃、審查與執行階段的重要依據。並配合後續的追蹤與滾動式檢討，適時評估實際減碳成效並調整管控策略。

為確保工程碳排制度能夠有效落實，除了建立減碳機制外，第一線現場人員的操作熟悉度也是關鍵。為此，林業保育署將辦理國有林防災工程減碳教育訓練，推廣碳排計算方法，並協助各地區分署與承辦人員熟悉碳排上限設置與管控流程。藉由林業保育署與轄內各地區分署的共同參與，持續累積執行經驗與資料基礎，並透過滾動式檢討與新技術及低碳材料的整合，逐步優化整體工程碳排管理機制，穩定邁向 2040 年大幅減少工程碳排放的目標，實現防災與減碳並行的國有林工程永續願景。♻️