



# 全國首創水利工程碳預算管理方法

賴建信／經濟部水利署 署長

許朝欽／經濟部水利署 組長

陳加榮、林哲震／經濟部水利署 正工程師

因應溫室氣體排放逐年攀升所致全球暖化效應，如何有效降低其排放甚而達到淨零排放之目標，儼然為全球所倡議及推動之浪潮，爰此，水利署響應我國同步全球之意志，實踐 2050 年淨零排放之願景，於今（111）年 2 月依工程生命週期執行階段率先頒訂「水利工程減碳作業參考指引（規劃設計篇）」，系統性推動工程減碳（Carbon Reduction），並透過逐年設定量化減碳目標，使整體減碳策略及施政方針得以具體落地，尤其為達量化管制目的，水利署更於每年推動眾多水利工程無法逐案盤查之困境下，首創「碳預算管理」方法，透過數據分析、自動程式輔助及工程碳排量審查流程，實質掌握國內水利工程自預算提報與設計階段即依年度減碳量化目標，檢討核定碳排量上限，使工程設計過程可滾動檢討減碳效益，有效鼓動第一線工程人員整合納入低碳工法、減碳設計、綠色經費、減碳施工等具體減碳策略與思維。綜論水利署實質推動系統性工程減碳作業，經統計截至 10 月止今年已發包之 105 件工程，皆符合年度減碳目標設定，且針對全國首創之碳預算管理方法學，更於同年 11 月榮獲第三方公正單位英國標準協會台灣分公司（BSI）查證，闡明水利署已具體且客觀的落地執行，並朝水利工程淨零排放之目標邁進。

## 前言

聯合國政府間氣候變遷專門委員會（Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC）於今（111）年 8 月公布第六次評估報告（IPCC AR6）揭示人類活動所產生之溫室氣體排放影響已毋庸置疑且造成加速全球氣候暖化現象，而對於排放濃度不斷提升之現況，更全面衝擊人類未來的生存環境，是以，攸關抑制碳排放量持續攀高已儼然成為全球各國需嚴正面對之重要課題。盱衡聯合國於去年召開之第 26 屆聯合國氣候變遷大會（COP26），各國皆倡議面對如此嚴峻挑戰，唯一可能的關鍵即應針對經濟與能源徹底檢討轉型，並放眼「2030 年中期溫室氣體減排、2050 年長期淨零排放」之目標共識，換言之，鑒於近年世界各地極端旱澇事件及熱浪等氣候異常現象頻仍，於各國政府皆展現 2050 年淨零排放之施政決心下，身為海島國家之臺灣，面對淨零轉型的工作更將勢如破竹，誠如蔡英文總統於民國 110 年 4 月 22 日「世界

地球日」出席「永續。地球解方—2021 設計行動高峰會」開幕典禮時表示：「因應氣候變遷，國際上一股新的趨勢正在形成，當世界上多數的國家在談論 2050 年淨零轉型的目標，臺灣亦將不會落後於國際趨勢，積極以系統性部署達到 2050 年淨零排放目標的可能路徑。」因此，水利署作為以利水、治水、親水、活水為核心目標之行政（主管）機關，更有感於面對氣候變遷所帶來氣候災害之各項嚴峻挑戰，尤其去年臺灣遭逢自民國紀年（西元 1911 年）以來全年累積雨量僅 880.4 mm（如圖 1）之百年大旱，使水利署深刻的體認到唯有正視未來氣候變遷的威脅，並同步我國今年 3 月公布「2050 淨零排放路徑及策略總說明」之內涵，積極推動落實淨零轉型目標，才有機會使臺灣擁有更好的耐受能力與韌性，援引氣候專家 James P. Bruce 提出「如果氣候變遷是一條鯊魚，水資源就會是牠的利牙」之呼籲，面臨 2050 年淨零排放之減碳挑戰水利署責無旁貸。

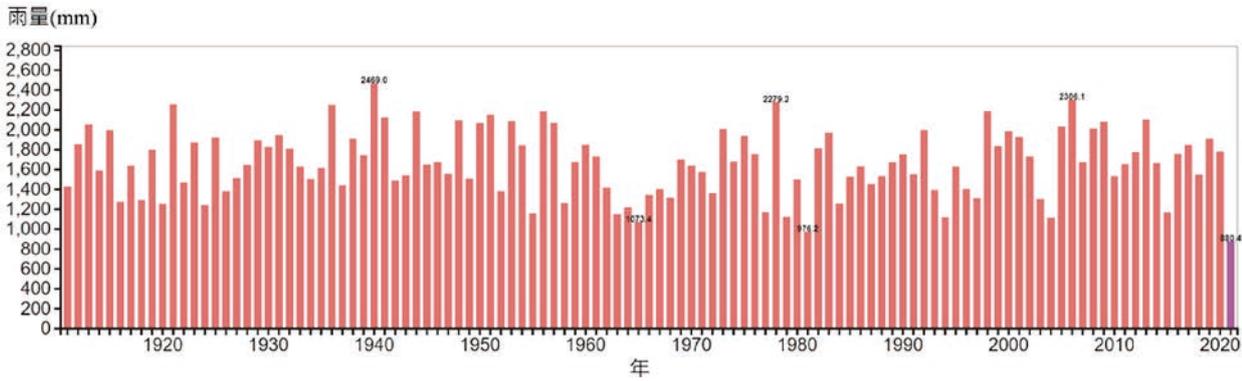


圖 1 全臺歷年累積雨量直條圖  
資料來源：氣象局提供（民國 110 年）

## 水利工程減碳目標

因應碳排放量持續攀升，溫室氣體效應導致全球暖化及氣候變遷，水利署超前部署率先推動水利工程落實節能減碳，以 2050 淨零碳排為核心目標，貫徹水利工程生命週期減碳之管理思維（概念圖詳圖 2），整體概念架構由實質減碳政策引導，使工程生命週期之各階段逐步朝減量規劃、減碳設計、減碳施工及營運節能等面向推動多元化之減碳策略，尤以今（111）年 2 月水利署函頒「水利工程減碳作業參考指引（規劃設計篇）」，並於同年 11 月通過 BSI 查證後函頒修訂第二版，具體研提碳排放管理辦法及整體減碳策略（包括綠色經費佔 5% 經費以上、混凝土規範礦物摻料提升等）供各所屬機關依循推動。

然而，欲達水利工程淨零碳排之目標並非一蹴即至，雖水利署已函頒指引且提倡各項減碳策略，惟針對水利工程整體減碳之目標設定，仍須藉由明確之淨零時程、關鍵里程碑設定與減碳路徑規劃，始能掌握

推動成效及檢討施政方針，本文取以英國 2008 年制定「氣候變遷法」(Climate Change Act, CCA) 之溫室氣體排放管理手段，除立訂氣候變遷法奠定排放減量之法律約束力外，針對淨零時程亦明確以 2020 年減量達 37%（相較於 1990 年的水準）、2025 年達 51% 及 2030 年達 57% 之目標，以便實現 2050 年完成淨零排放，同時為確達目標更採 5 年為期，設定排放上限 (Cap) 及制定各項管理機制與流程<sup>[1-4]</sup>，顯示透過總量管制及實踐永續管理之作法，為減碳策略布局之可行作為，遂水利署為落實水利工程減碳願景，以工程標案之預算書中所載與碳排放有關之各項活動資訊，採數據分析方法盤點民國 108 年至 110 年發包工程之年平均碳排放量，以為基期碳排放進行總量管制，並分別訂以 2022 年減碳基期碳排放 20%、2023 年減碳基期碳排放 30%、2030 年減碳基期碳排放 40%，直至 2050 年減碳基期碳排放 50%，並搭配轄管土地植樹固碳等措施，同步全球達成碳中和目標。



圖 2 水利工程生命週期減碳概念圖

## 水利工程「碳預算管理」方法

對於工程減碳之實質方法，經回顧國內外案例多為個案工程執行碳盤查，並進一步設定減碳目標與方案為主，如我國「蘇花改計畫工程」（圖 3(a)）、英國「Dymchurch Frontage A 河堤工程」（圖 3(b)），即透過規劃階段估算碳排放量，並由第三方碳管理單位輔導減碳設計，及施工期間執行碳盤查（ISO14067）建構完整碳管理架構<sup>[5]</sup>，反觀水利署每年平均核辦 300 餘件工程之規模，案件繁多實難以一概之，或逐案導入碳盤查作業推動減碳作業，為此，水利署今（111）年獨步全國首創提出「碳預算管理」方法，以因應工程減碳之量化管理及目標設定，整體方法主要建構於碳排放量估算方式與流程之率定，透過盤點過去民國 108 年至 110 年水利署推動水利工程之碳排放量（平均每年排放約 58.7 萬 tCO<sub>2</sub>e），作為基準值（基期碳排放量）率定逐年減碳目標，並進一步以工程發包年相應減碳目標，逐案設定各類工程碳排放量上限及減碳量，而其碳排放量上限則為本文所定義之碳預算，又碳預算管理方法則自工程勘評階段，即與經費核定方式同步各別審核容許碳排放量，並進行個案及總量碳排管控，具體掌握及限制核辦後設計階段之工程碳排放量，且倘遇個案工程因特殊原因致無法達標，則可由各執行單位所建立之推動協調小組，循以各所屬機關為單位，進行內部工程案碳額度交易（調整）審議或報署協調管控，達成碳排放量總量管制之目的。

## 工程碳排放量審查程序

由於水利工程執行面向廣泛且種類不勝枚舉，為使前揭「碳預算管理」之系統性管理模式，具體實踐減碳策略於所推動之各類工程，經考量執行單位、工程類別及採購方式等屬性，概可分為河海工程（包含河海類工程、集水區保育治理工程及一般疏濬工程）、水資源小型工程及水資源大型報院計畫工程等類別<sup>[6-8]</sup>，適性制定各類別工程減碳審查流程，且考量工程採購作業、執行期程及規模之差異，除水資源大型報院計畫工程採專案列管外，對於河海工程及水資源小型工程之減碳作業推動與審查流程（如圖 4），依序可分為碳預算管理目標確立、提報工程碳排放量盤點、執行檢核設計及檢核、工程發包及造冊列管等，逐步規範及檢視各類別推動工程之碳排放量，使管制作業確符目標需求。

## 碳預算管理目標確立

水利工程減碳為水利署推動之精神核心，本階段可謂碳預算管理之最高政策指導原則，對於目標之確立主要為碳預算上限訂定，又訂定依據除參考我國減碳路徑規劃外，對於年度工程推動之碳排總量，更依據水利署數據分析民國 108 年至 110 年推動之河海工程、水資源小型工程碳排放量（基準值佔基期碳排放量約 46.1 萬 tCO<sub>2</sub>e），並循各年度減碳目標之設定（2022 年減少 20%、2023 年減少 30% 等）計算水利署目標年容許碳排總量，並依數據分析中所得，各執行單位歷年



圖 3(a) 火車替代卡車運輸土石之蘇花改計畫工程  
資料來源：公路總局



圖 3(b) 採預鑄及水運方式之 Dymchurch Frontage A 河堤工程  
資料來源：UK Environmental Agency, 2010, Construction Carbon Calculator in practice.

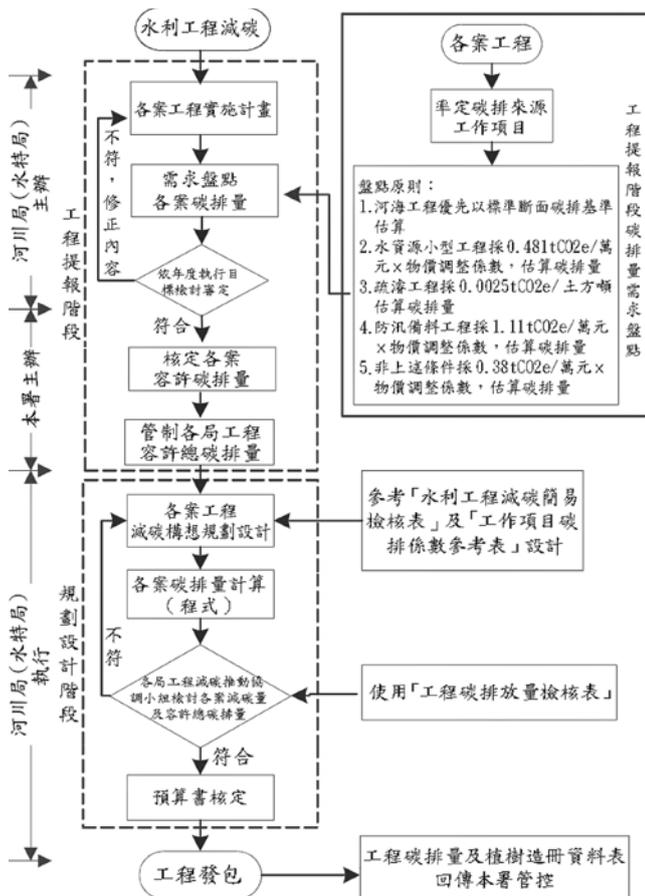


圖 4 河海工程、水資源小型工程碳排量審查流程圖

推動水利工程之數量與規模等數據經驗，由水利署統籌分配容許總碳排量，以確立碳預算管理目標，使整體機制分權分工的落地管制。

### 提報工程碳排量盤點

執行單位於工程計畫進入提報階段時，首先應確認工程實施必要性，並依特性於實施計畫中納入減碳思維之規劃及說明，提出耐久性、易維護、減少營運耗能之節能減碳構想，至水利署啟動提報工程先期作業時，各執行單位需盤點碳排來源工作項目，並透過「水利工程減碳作業參考指引」中建議之標準斷面碳排基準，或循基期數據分析所得之各類別碳排量回歸成果（疏濬工程約 0.0025 噸 CO<sub>2</sub>e/ 土方噸、防汛備料工程約 1.11 噸 CO<sub>2</sub>e/ 萬元、水資源小型工程約 0.481 噸 CO<sub>2</sub>e/ 萬元、非上述條件約 0.38 噸 CO<sub>2</sub>e/ 萬元）估算各案工程碳量後，據以提報由水利署依年度減碳目標，召開會議檢討及審定各案容許碳排量（與經費核定方式同步）。

### 執行減碳設計及檢核

完成工程容許碳排量之審定後，工程設計人員即

依實施計畫之節能減碳構想，參照「水利工程減碳作業參考指引」減碳策略、「水利工程減碳簡易檢核表」及「工作項目碳排係數參考表」，進行工程減碳構想規劃設計，並於編列工程預算書時運用經費電腦估價系統（簡稱 PCCES）編碼編列成果<sup>[9-11]</sup>，以及水利署開發之碳排量計算工具，實際計算與填報工程碳排放量檢核表，以提送各執行單位成立之工程減碳推動協調小組檢討碳排量，同時針對超過所核容許碳排量者，則應重新檢討減碳構想規劃設計、修正工程內容或執行工程間碳額度交易後，由各局自行核定，以達成總控管目標。

### 工程發包及植樹造冊控管

最後，透過前開程序自構思減碳構想、提報工程審議，乃至於執行單位成立推動協調小組，逐層檢討減碳量及執行總量管制，所辦工程即可依程序核定預算書及發包執行，實踐減碳設計理念及落實思維於施工階段，而其中為使植樹固碳之效益得以如實彰顯，對於工程內所辦種植之灌木、喬木皆由各執行單位於 1、4、7、10 月上旬前彙整前一季數量後，提報水利署造冊控管各項植栽養護工作。

### 專案列管之水資源大型報院計畫

有別於前開河海工程及水資源小型工程，水資源大型報院計畫工程因每年經費與核定期程不確定性高，為避免該類工程碳排量計列於發包年度，所致碳排量突增之失真現象，管制作為以專案列管並採容許碳排量平均攤入至各年度進行總量管控，而整體減碳效益則俟全數細部設計完成後，再與計畫報院規劃階段之總碳排量進行差異分析與檢討。故水利署循前開專案列管方式，經數據分析民國 108 年至 110 年推動之有關計畫工程，碳排量基準值佔基期碳排量約 12.6 萬 tCO<sub>2</sub>e，並為達整體減碳之目標，各案工程碳排量審查流程如圖 5，由流程圖中可見，各類水資源大型報院計畫工程之減碳構思從報院計畫中即由執行機關與水利署、水利規劃試驗所共同參與，提前將減碳作為納入規劃考量（包含計畫經費、期程、總碳排量等），又於實質推動過程中，各執行單位工程減碳推動協調小組應依年度執行目標檢討審定後，於設計階段依採購策略之差異，率定切符實際之檢視程序，例如涉及非統包工程，碳排量審查程序適用河海工程及水資源小型工程審查程序，而對觀統包工程則因於決標後始辦設計，故採各階段細部設計時估算實

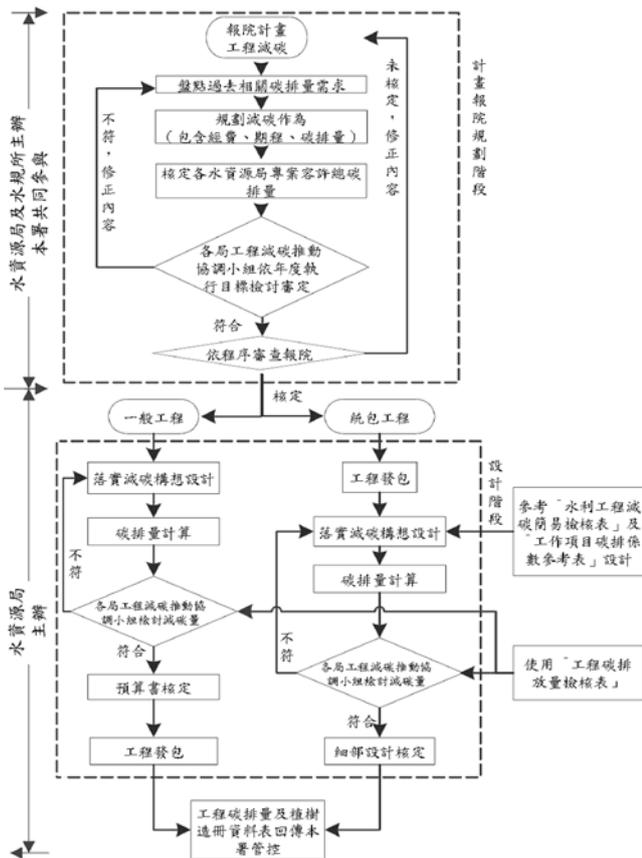


圖 5 水資源大型報院計畫工程碳排量審查流程圖

際碳排量，並由各局工程減碳推動協調小組檢討減碳量後分階段核定執行後，再於全數完成細部設計時，將工程減碳量及植樹造冊資料表回傳水利署統籌管控，以整體呈現減碳成果。

### 碳排量估算方式與流程

綜理前揭各項減碳目標及量化管制作為與程序，究其根本皆立基於碳排量之估算原則與水利工程各工作項目碳排係數之建立，考量工程各階段可蒐集之數據精細度及涵蓋範圍完整性，影響工程碳排量推估及減碳成效評估之客觀性，對於水利工程設計之碳排量估算，主要根據英國標準協會（British Standards

Institution, BSI) 公布之 PAS 2050 準則，採以「排放係數法」由各工作項目的「活動強度」乘以「碳排係數」所得之合計加以估計二氧化碳當量 (CO<sub>2</sub>e)，即

$$\text{碳排量 (CO}_2\text{e)} = \sum \text{活動強度} \times \text{碳排係數}$$

式中「活動強度」(Activity Intensity) 泛指一段時間內之生產量 (或能源消耗量或服務量) 大小；而「碳排係數」(Emission Factors) 則指每單位原 (物) 料、燃料使用量、產品產量或其他操作量所排放造成之溫室氣體排放量。

循上揭推估方式，針對水利工程設計資料之材料用量及機具操作時數耗能而產生的二氧化碳當量，可細究工程中各工作項目之單價分析，根據水利署頒定之「水利工程工資工率分析參考手冊」(民國 108 年) (簡稱工資工率手冊) 內容 [12]，工程預算書中單價分析即囊括「機具」(含電力 / 燃料使用)、「工料」、及「人員」等三大類，同時依其組成之活動強度，並透過文獻或公開資訊提供之碳排係數資料 [13,14-16]，以單位長度、體積或重量中原料含量，乘以現有的原料碳排係數進行轉換，進而求得各工作項目之碳排當量 (或作工作項目碳排係數)，其中考量「人員」部分為既存碳排來源，不因工程實施而加計於工項碳排量，故「人員」單位碳排量採計為 0，再以坡面工工作項目為例，詳表 1，透過工料內容組成並選用適當之單位碳排量，即可求得該工作項目之碳排係數。因此，整體估算作業可流程化如圖 6，首先依據工程預算書等內容作為估算資料來源，分析其工作項目活動單位與數量，並率定出工項活動強度及碳排係數等資訊，同時透過各工作項目之組成進行工程排放量計算以及探討與分析。

承續前項訂定之方法基礎，整體工程碳排量估算之客觀性亦取決於邊界之立訂，援引環保署「溫室氣體排放量盤查作業指引」(民國 111 年) 規定，進行溫室氣體盤查可界定範疇原則，定義工程之碳排量估算

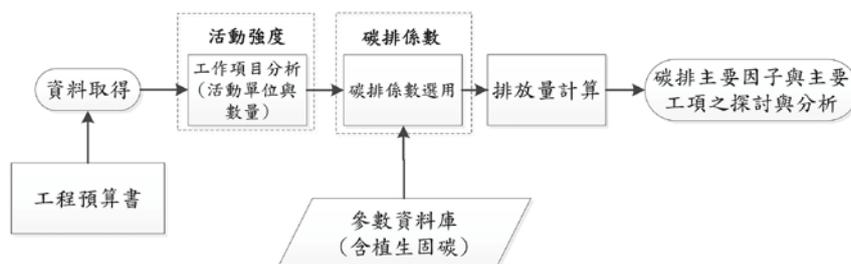


圖 6 碳排量估算流程圖

表 1 坡面工工作項目單位碳排量範例

工作項目：坡面工，混凝土，厚 20 cm		單位：M2		計價代碼：0238510302	
工料名稱	單位	數量	單位碳排量	碳排量 (kgCO <sub>2</sub> e)	編碼 (備註)
產品，預拌混凝土材料費，175 kgf/cm <sup>2</sup>	M3	0.200	193.145	38.629	
技術工	工	0.005	0.000	0.000	
普通工	工	0.010	0.000	0.000	
開挖機，0.70~0.79 m <sup>3</sup>	時	0.022	49.068	1.079	
零星工料	式	1.000	0.000	0.000	
合計	M2	1.000		39.708	
人工：	機具：	碳排係數 (kgCO <sub>2</sub> e / M2) 計		39.708	
材料：	雜項：				

資料來源：「水利工程工資工率分析參考手冊」(民國 108 年)

歸納為「範疇一之直接排放」、「範疇二之能源間接排放」及「範疇三之其他間接排放」，並各工程碳排邊界圖如圖 7，具體估算內容如下<sup>[5-14,17-21]</sup>：

1. 直接排放：指施工機具設備或現場燃料使用後產生之碳排量。
2. 能源間接排放：指工區範圍內之外購能源所產生之碳排量。
3. 其他間接排放：指工程所需之工程材料（包含工區內因運輸行為使燃料耗用）碳排量總和。

邊界圖涵蓋內容原則以工區範圍為界，包括工區範圍、工務所等，並考量水利工程複雜性及不可控制因素，為提供規劃設計人員簡易計算，碳排量認定原則為就直接工程費（主體工程部份）進行估算，不包括間接工作費（環境保護措施費、職業安全衛生費、品質管制作業費、廠商管理費、營造綜合保險費、營業稅等）之內容，同時機電、設備類回歸生產端考量，以利效推動及落實於設計階段之執行；另植樹固碳部分，則以灌木及喬木植樹復育之固碳量，率定喬木齡採 30 年估算，並灌木採 5 年估算每株於工程生命週期中之固碳量<sup>[9]</sup>，而估算時依其樹量（平均單株）

進行估算加總，嗣於工程規劃設計階段計算排碳量予以扣除（固碳量），以落實強化植樹固碳及減碳理念。

綜上所述，為能有效且快速進行各案水利工程之碳排量估算，於完整率定估算流程、邊界及確認資料來源之前提下，本文進一步藉由行政院公共工程委員會開發既有之 PCCES 架構，透過系統中各工作項目編碼之格式化過程，以其編碼作為碳排係數自動化代入估算之索引，進行 Microsoft Office 之應用程式 Visual Basic for Application（簡稱 VBA）開發，同時透過可拆解率（程式擷取計算碳量之項目經費 / 預算經費）之指標設定與控制，估計民國 108 年至 110 年全署推動約 930 件水利工程之碳排量，並進而於考量工程屬性及其物調指數等特性下，線性迴歸單位經費下之碳排量，供各執行單位於工程提報階段憑辦估列需求之數據經驗參考，經分別根據過去三年所執行之工程經驗，進行線性迴歸分析結果，河海工程（不含疏濬、防汛備料工程）碳排量約為 0.38 tCO<sub>2</sub>e / 萬元（詳圖 8）、防汛備料工程碳排量約為 1.11 tCO<sub>2</sub>e / 萬元（詳圖 9）、水資源非專案工程碳排量約為 0.48 tCO<sub>2</sub>e / 萬元（詳圖 10），另疏濬工程則因工程屬性與活動內容與經費無相關性，故採以土方處理量進行碳排量迴歸計算，並依迴歸結果碳排量約 0.0025 tCO<sub>2</sub>e / 噸（詳圖 11）。

依分析所見，相較於防汛備料或疏濬工程，雖河海工程受工程性質差異所影響致離散度（相關係數約 0.59）較大，惟依工作項目之經費規模與碳排量之關係趨勢，仍具一定程度之關聯性，爰作為提報階段估計需求使用，並進一步於設計階段實際估算碳排量，仍可發揮量化管制及系統性減碳之效果，至於提高該類工程迴歸分析之相關性，則將於後續進一步納入工程性質、預算金額與碳排放量辦理相關性分析及敏感度分析。

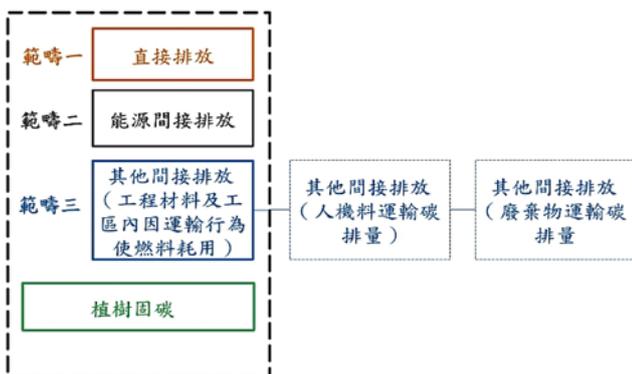


圖 7 工程碳排邊界圖

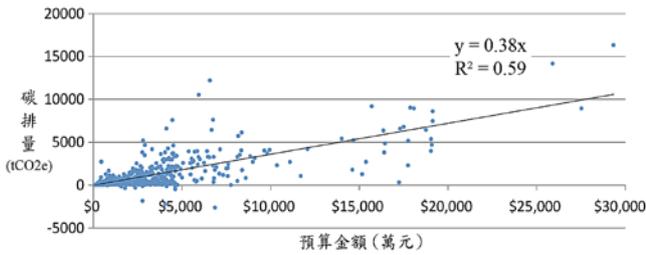


圖 8 河海工程碳排量及經費分布圖

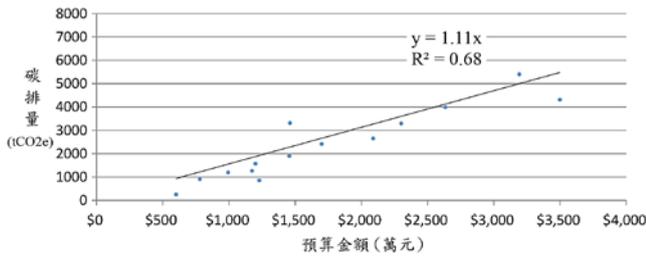


圖 9 防汛備料碳排量及經費分布圖

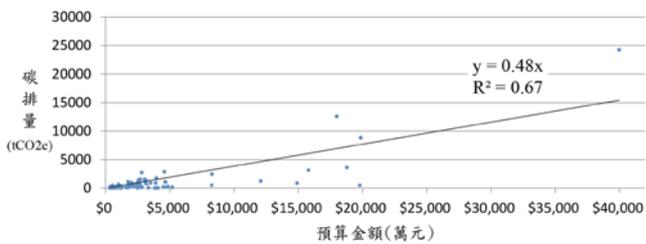


圖 10 水資源非專業工程碳排量及經費分布圖

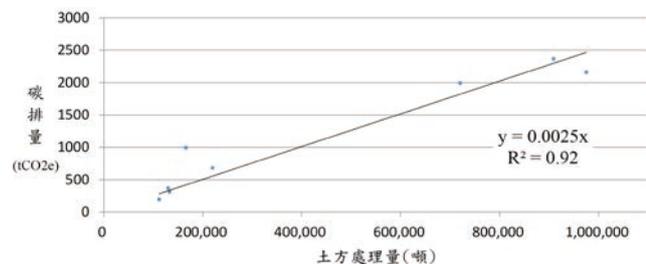


圖 11 疏濬工程碳排量及經費分布圖

### 水利工程碳排量計算方法驗證

為確認前揭碳排量計算方法符合實際，本文引以水利署第七河川局於民國 111 年 3 月 15 日發包執行，並於同年 7 月 20 日完工在案之「旗山溪溪洲河段河道整理工程」為驗證案例，進行碳排量估算成果與施工日誌登載實際機具活動碳排量之差異分析，該工程期間工程實施項目囊括河道整理、河道疏通整理、施作臨時護岸、堆置等作業，工項多以土方之挖方工作為主，經統計整體處理土方量（活動強度）約為 222,014 m<sup>3</sup>，爰依水利署函頒「水利工程減碳作業參考指引」所載之碳排係數（0.981kg CO<sub>2</sub>e/m<sup>3</sup>）換算，挖方工作之碳排量約為 217.9 tCO<sub>2</sub>e/；又調查該工程於施工計畫及施工日誌所登載之機具管理資訊，可知實際出工機具計為每日 5

台挖土機，並實際施作工期為 112 天，經洽承攬廠商推估表示平均能源耗油量約 600.0 L/天，挖土機所產生之總耗油量約為 67,200 L，並以環保署於「產品碳足跡資訊網」公佈之單位碳排量（約 3.48 kgCO<sub>2</sub>e/L），總碳排量約 233.9 tCO<sub>2</sub>e，因此，經比較本文率定之碳排量計算方法與實際盤查施工日誌登載之挖土機使用能源耗油量換算碳排量，整體差異約為 7.3%，顯見水利署首創之水利工程碳預算管理方法，可準確應用導入碳排量計算，藉此使設計階段達到量化掌握實際碳排量之效果，提高節能減碳觀念導入及減量設計之效率，惟針對工項碳排係數資料庫之擴充，水利署仍將持續輔以工程碳盤查，逐步蒐集水利工程各工項之有關特性與數據，使管理方法可適地適性的計算與管制碳排量。

### 小結

水利署透過函頒「水利工程減碳作業參考指引」及 VBA 程式開發，已於今（111）年全面啟動碳預算管理方法，有效將減碳思維及推動流程與方法落實於各所屬機關執行，根據年度之目標設定，如 111 年以 46.9 萬噸作為管控上限，即以基期碳排量（58.7 萬噸）減碳 20%，於各案工程規劃設計階段全數納入減碳策略因地制宜落實減碳設計，同時透過利用碳排量估算程式，在預算書成立時即能自行檢視碳排量，避免超過總量上限或啟動碳額度交易機制，除個案管控碳排量外，於總量管制上亦可充分掌握及深度管理，以今年度為例，截至 10 月已核辦水利工程計 177 件，並目前發包 105 件工程皆符合減碳量 20%，且合於總量管制之 46.9 萬噸以下，可謂水利署經由初始目標設定、律定碳排量計算模式及總量管控等碳預算管理方法，確可朝淨零目標逐步落地推動。

### 因地制宜推動減碳策略

為落實水利署戮力推動之減碳目標及各項減碳行動構想架構，並考量工程規劃設計階段即納入減碳思維最具效益，水利署除落實量化估計及數據管理外，對於水利工程減碳策略亦因地制宜施以具體方針，本文綜理水利工程減碳方針略可歸以綠色材料、綠色能源、綠色工法、綠色環境等面向，並實質內容除積極導入再生材料、減廢、營建自動化、生態、節能、固碳、耐久等多元措施與概念外<sup>[18,22]</sup>，推動過程中更擬具「水利工程減碳簡易檢核表」（圖 12）供各執行單位於規劃設計階段檢視依循，以強化相關概念之落實，同時為展決心，水

水利工程減碳簡易檢核表

工程名稱: \_\_\_\_\_

面向	類別	編號	規劃、設計階段	是v	否v	不測
綠色環境	戶外減碳	1	是否加大工程綠地面積。			
		2	是否避開原有老樹設計，施工時保護老樹不受傷害。			
		3	是否多數綠地種喬木或覆層綠化，少種人工草坪、花園、灌木。			
		4	是否在坡面工或坡腳，以植穴或花台方式，種植喬木。			
		5	是否利用多年生蔓藤植物攀爬構造物，以爭取綠化量。			
		6	是否盡量利用在地物種或吸儲存放果佳之樹種 (如: 高圓球樹種 <input type="checkbox"/> 相思樹 <input type="checkbox"/> 樟樹 <input type="checkbox"/> 椰樹 <input type="checkbox"/> 杉木 <input type="checkbox"/> 木 <input type="checkbox"/> 光臘樹 <input type="checkbox"/> 肖楠 <input type="checkbox"/> 檳香 <input type="checkbox"/> 樟樹 <input type="checkbox"/> 木 <input type="checkbox"/> 台灣檫 <input type="checkbox"/> 烏心石 <input type="checkbox"/> 檜木 <input type="checkbox"/> 松類 <input type="checkbox"/> 木油桐 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/> 樹種 (株))			
		7	其他:			
綠色材料	再生材料	1	是否採用礦物摻料預拌混凝土設計(礦物摻料 <input type="checkbox"/> 20%, <input type="checkbox"/> 30%, <input type="checkbox"/> 50%, <input type="checkbox"/> 其他 %)			
		2	是否採用高性能混凝土設計，以減少水泥使用量。			
		3	是否採用再生級配骨材作為混凝土骨材。			
		4	是否採用再生磚塊或再生水泥磚作為室外圍牆或花台。			
		5	是否採用再生瀝青混凝土。			
		6	其他:			
綠色工法	減廢	1	是否採用土方平衡設計。			
		2	是否運用土方交換規劃。			
		3	是否採用預鑄材料設計。			
		4	是否採用工地織物材料設計。			
		5	棄土，餘方是否近運利用。			
		6	是否選擇材料回填， <input type="checkbox"/> 就地取材 <input type="checkbox"/> 級配粒料 <input type="checkbox"/> 透水材料。			
		7	是否採用砌鋪石工， <input type="checkbox"/> 乾砌石 <input type="checkbox"/> 鋪石 <input type="checkbox"/> 裝砌石 <input type="checkbox"/> 混凝土掛石。			
		8	是否採用蛇籠工。			
		9	是否採用箱型石籠工， <input type="checkbox"/> 就地取材 <input type="checkbox"/> 外購石料。			
		10	是否採用拋石工， <input type="checkbox"/> 就地取材 <input type="checkbox"/> 外購石料。			
		11	是否採用多孔隙瀝青混凝土鋪面。			
		12	其他:			
綠色工法	營運自動化	1	是否採用系統模板。			
		2	是否採用預鑄外牆、柱、樑。			
		3	是否採用清水模板。			
		4	其他:			

水利工程減碳簡易檢核表

面向	類別	編號	施工階段	是v	否v	不測
綠色環境	生態	1	是否於用地整理時應注意植栽保留，避免多餘之砍伐。			
		2	是否於施工階段辦理生態檢核。			
		3	其他:			
綠色能源	節能	1	是否施工區照明、交通維持之警示燈、警示路牌與指示燈、工務所用電及其他用電，配置節能標準產品，以達節能減碳。			
		2	是否選用低耗能(節能)的施工機具與設備，有助於工程節能減碳。			
		3	是否選用適當功率之機具工作，降低閒置等候時間，間接降低耗能，以達減碳功效。			
		4	其他:			
綠色工法	減廢	1	是否採最短運距以土方挖填，促使土方挖填平衡，降低土方運入或運離所造成之排廢。			
		2	是否採用就地取材或縮短運距之材料，降低運送過程之中廢排廢。			
		3	其他:			
面向	類別	編號	營運階段	是v	否v	不測
綠色環境	生態	1	是否維持工程完工時之綠覆率，確保計有植栽 90% 以上存活率。			
		2	是否增加原有綠化面積或生態複層面積比例之 30% 以上。			
		3	是否對既有樹種作保護與維持。			
		4	其他:			
綠色能源	節能	1	是否進行例行性維修與檢測，維持設備高效率或低耗能之功能，或適度更新節能產品。			
		2	是否採用替代能源維持設備運轉。			
		3	是否增設太陽光電、小水利發電等綠電設施。			
		4	其他:			
綠色環境	固碳	1	是否於水庫、滯洪池、環境營造周邊，增加種植喬木，可吸附貯存較高之二氧化碳。			
		2	其他:			
綠色工法	耐久	1	是否執行防沖刷、防淤積等維護要項(含設施與管理)，延長設施壽命。			
		2	是否紀錄耐久設計與材料之效益，回饋後續工程之規劃、設計與施工。			
		3	其他:			

設計者: \_\_\_\_\_ 簽章

圖 12 水利工程減碳簡易檢核架構示意圖

利署於推動政策上更以各所屬機關為單位，管控綠色經費（如水利工程常用項目表 2）之設計容量應占發包經費 5% 以上，使工程設計人員於該階段即確認工程特性，提出耐久性、易維護、減少營運耗能之節能減碳構想，並達鼓勵應用有利工程節能減碳之新技術、新工法、新材料或創新管理等措施之果效。

表 2 水利工程綠色經費常用工作項目表

類別	常用項目
植樹固碳	喬木、灌木等
就地取材	現地塊石利用、剩餘土方堤前培厚、挖填土方平衡、採取現地土石的石籠護岸或土工沙腸袋等
再生料源	再生混凝土、再生瀝青混凝土、水庫淤泥利用、使用焚化底渣再生粒料或廢棄物再利用（拆除之混凝土構造物）等
節能材料	綠建材標章、省水標章、環保標章、節能標章之環保節能材料等

### 友善環境之綠色材料

為落實保護自然環境，創造永續水環境，執行水利工程時可採用砌石護岸、護坦工、砌石工等設計，透過

當地天然石材或優先使用當地生產材料之運用，降低碳排放量及對環境之衝擊，又工程材料（設備）之料源應一併考量運輸耗能成本、使用年限、養護難易、再生利用等，如應用高性能混凝土（High Performance Concrete, HPC）或再生瀝青混凝土等再生材料；同時亦盡量選用低汙染、省資源、可回收之綠建材、省水標章、環保標章、減碳標籤及節能標章等取得國家認證之綠色或環保建材（設備），或優先採用具減碳效益的替代性材料，如提高礦物摻料比例替代高碳排及能耗之水泥用量，使材料應用上更為因地制宜且對於環境更為友善。

### 永續經營之綠色能源

綠色能源泛指源自於大自然的各項資源，如水力發電、太陽能發電、風力發電等，而於各類水利工程中，可透過規劃於水利設施或用地結合再生能源應用，如增設太陽能或風力發電等再生能源設備，或規劃於水庫上下游河川水頭落差較大處增設水力發電設備，使能源使用上具備永續性，且直接、有效之降低碳排放量 [20]。

## 節能減碳之綠色工法

於水利工程設計時即因地制宜使用自然材料，並詳細評估營建材料的使用量，充分降低對於環境衝擊，及減少工程廢棄物產生，而實質作為如廣泛應用回包式加勁工法、土工沙腸袋工法、石籠工法及搭配現地土石或取自工區河床自然石材之砌石工法等，同時拆除既有構造物之混凝土亦可運至堤前進行坡腳保護，創造表面之天然綠化植生面積並有效減少混凝土用量，另對於水利工程常見之土方工作，則以土方挖填平衡方式設計或透過公共工程土石交換，降低土方開挖量或棄土量，並減少土方運入或外運，減少載運所衍生之汙染與能源消耗；至於施工階段除建議透過工程管理手段，對妥善規劃營建材料之供應、動線及配置，提升裝卸效率外，對於施工方式亦鼓勵採用自動化、標準化作業，如使用系統模板或導入預鑄品等。

## 自然為本之綠色環境

聯合國教科文組織（UNESCO）的國際水文計畫（IHP）從過去的研究發現，水資源水文循環與生態系統彼此連結緊密，透過良好建全的生態系統，得有完善的水文循環功能。因此，水利工程導入「基於自然的解決方案」（Nature-based Solutions, NbS）之設計理念，以適合當地特色、資源能有效被利用的方式，增強生態系統服務效益及增加韌性，如採用濕地減洪提供調節、淨水及維持棲地外，更具固碳效益，尤其整治工程可以復育取代，如利用造林與植生保護河岸邊坡或控制沖蝕情況等，以利用自然或生態系統服務的設計來實現綠色環境目標；另針對工區及周邊進整體環境評估，除避免破壞生態環境外，實施水利工程時，應優先栽種在地高固碳原生種及多樣性的喬木、灌木，強化碳匯功能，營造永續和諧生態環境。

## 第三方公正單位（BSI）查證

為確保水利署數據蒐集模式及減碳目標設定可落地，確認成效可達預期，且整體減碳方法學符合 PAS 2050 / ISO 14067 之規範，需委託第三方公正單位協助提供獨立、公正的專業查證服務，以取得產品與服務生命週期階段之溫室氣體評估之查證活動，故水利署委託 BSI 辦理查核確認作業。BSI 於 1901 年成立於英

國倫敦，至今已逾 120 年歷史，為英國皇家特許之國家標準制訂機構與歷史最悠久的國際性標準發行機構，更是全球第一個國家驗證機構和國際標準化組織的核心成員，BSI 制定的標準除被國際 ISO 組織所認可，亦是臺灣制定符合國內現況標準時所引用的標竿，其所制定之標準一般皆為 ISO 國際標準之前身，例如 BS 5750（ISO 組織引用為 ISO 9001）、BS 7750（ISO 組織引用為 ISO 14001）及 OHSAS 18001（ISO 組織引用為 ISO 45001）等，於全球化方面，BSI 通過約 20 個地區或國際系統的認證，且已通過財團法人全國認證基金會（TAF）認可，並取得產品碳足跡查驗機構認證證書，是最具公信力的第三方公正查證單位。

水利署減碳機制經 BSI 分三個階段查核（文件審查、第一階段查核及第二階段查核），透過審查「水利工程減碳作業參考指引（規劃設計篇）」內容，與水利署減碳團隊的訪談，並更進一步詳細檢視減碳基準與目標設定、整體碳管理之流程與機制、碳排係數引用來源及數值正確性、工作項目碳排係數之組成、迴歸曲線分析及水利工程碳排計算程式系統建置及使用等，查核確認結果表示水利署減碳機制可提供規劃設計階段合宜的碳足跡估算方式，減碳機制已具十足公信力，以全國首創之系統性碳預算管理手段，通過第三方公正單位檢視，確保減碳效益評估模式及各項碳排係數更接近事實，且可落地執行以達所設定之短、中長期減碳目標，提升管理之效度。

## 水利工程減碳推動實績

### 現地土方續利用，環境衝擊再降低——

#### 111 年度湖山水庫周邊設施改善工程

湖山水庫於 105 年開始蓄水，為維持正常營運及例行性維護工作，水利署中區水資源局（簡稱中水局）依據年度之設施檢查成果報告建議改善事項，提報「111 年度湖山水庫周邊設施改善工程」（預算金額 2,200 萬元）辦理湖山水庫周邊環境及既有設施構造物改善，確保水庫設施構造物安全及設施功能，實質工程內容主要為例行性進行周邊設施排水強化及邊坡保護等工作。嗣經中水局考量本案類屬水資源小型工程，估計需求碳排放量約為 869.37 tCO<sub>2</sub>e，並循水利署 2022 年設定之基期減碳 20% 目標，核以碳排上限量 695.50 tCO<sub>2</sub>e 為目

標制定減碳策略，中水局透過水利署函頒「水利工程減碳作業參考指引」之內容，朝「現地土方續利用，環境衝擊再降低」之核心減碳思維，於規劃設計階段即納入土方平衡及餘方近運利用配合加大工程種植高固碳喬木等理念，將引水隧道出口渠道設施強化部分，以河道清淤之土石方設置箱型土石籠（總長度 156 m）取代混凝土護岸（如圖 13 所示），同時搭配種植在地高固碳原生喬木烏柏 110 株，除強化植樹固碳及大幅減少混凝土用量外，其效果更外溢於有效解決土方去化問題，此外，本案工程亦針對其他工區所辦新設消能池、集水井、排水箱涵、排水溝、紐澤西護欄及擋土牆等周邊設施排水強化及邊坡保護工作，採以清水模板（總面積 973.3 m<sup>2</sup>）系統化作業，大幅減少營建廢棄物及施工能耗，最後，以水利署開發之 VBA 程式計算，本案設計後碳排量較核定碳排上限減幅達 63.7%（252.59 tCO<sub>2</sub>e；可拆解率為 93%），顯示水利署推行之水利工程碳預算管理方法，除能有效達到量化管理外，對於減碳思維及策略亦能產生實質之落地效果。



圖 13 引水隧道出口渠道土石籠護岸施工現場圖

## 烏日河畔新風貌，旱溪水岸綠廊道——旱溪排水（光明路橋至復光橋）治理工程併辦土石標售

旱溪排水為純都會型之平地區域排水系統，屬臺中地區重要區域排水，為能營造河川安全及友善生態之水環境，水利署第三河川局展開一系列旱溪排水治理工程，其中「旱溪排水（光明路橋至復光橋）治理工程併辦土石標售」（預算金額 9,888 萬元）即為實施代表作之一，該工程依提報階段估計需求碳排放量約為 2,647 tCO<sub>2</sub>e，並循水利署 2022 年設定之基期減碳 20% 目標，核以碳排上限量 2,118 tCO<sub>2</sub>e 為目標制定減碳策略，案經執行單位以「河畔新風貌，水岸綠廊道」為減碳與環境營造設計理念，該工程透過河道護岸部分採半重力式護岸搭配混凝土砌石護坡取代傳統混凝土護岸之手段，並水域部分以回填現地土石保護，不僅有效減少邊坡開挖及混凝土使用量（如圖 14 及圖 15 所示），對於生態環境之營造更創造出多孔隙生物棲息空間，降低環境的衝擊，同時，護岸綠帶之設計部分更搭配大量種植茄苳、黃連木、烏心石、苦楝、光臘樹、鐵冬青、流蘇樹等高固碳原生樹種（共計 238 株）及大面積種植喬木類植物 1 萬 8,164 株增加固碳量，透過整體減碳作為之構思及友善生態環境策略之落實，依設計成果計算總碳排放量約為 1,905 tCO<sub>2</sub>e（可拆解率為 87%），碳排量較核定碳排上限減幅達 10.1%，結果顯示透過現地土石應用及強化植樹固碳之理念，即可有效達到減碳效果，而兼顧防洪保護及友善生態之手法，亦能帶給當地居民一條安全、固碳及生態兼具的水岸廊道。

## 未來展望與結語

全球氣候變遷已成為不爭的事實，隨著極端氣候加劇，減碳工作在做與不做間必須要有明確的抉擇，雖然我國減碳 12 項關鍵戰略及 2050 淨零排放路徑皆尚未明確規範水利工程領域相關減碳策略或執行內容，但面對生存環境的惡化，水利工程無疑地必須在減碳上竭盡心力。目前「水利工程碳預算管理方法」已完成第三方公正單位的查證，其中碳預算管理方法中之碳排係數，亦將配合水利署全面推動與實質逐步執行，輔以個案工程碳盤查佐證檢討擴充及滾動檢討

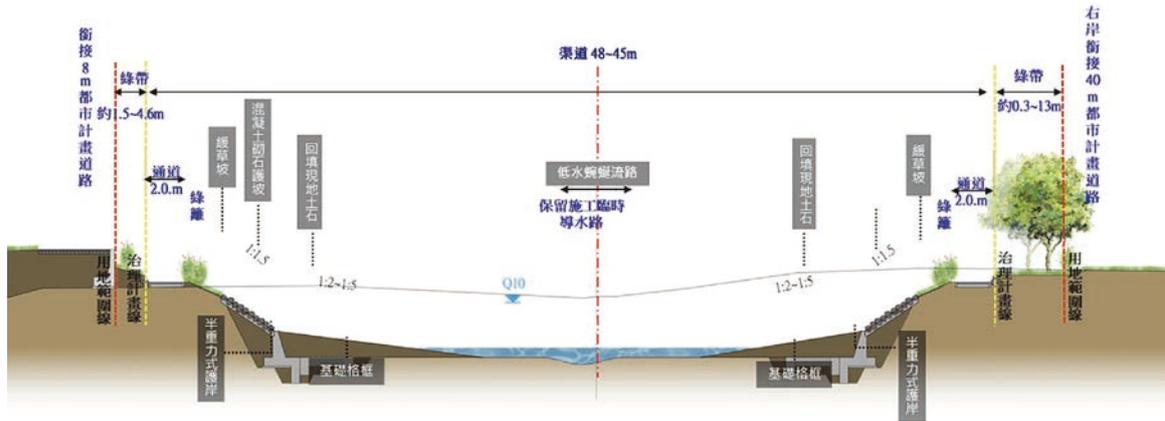


圖 14 旱溪排水河道設計斷面圖



圖 15 旱溪排水（光明路橋至復光橋）治理工程現場照片

整體方法資料庫，使減碳制度轉化為工程人員之減碳思維；又為深化水利署減碳意識，工程人員除了挹注減碳思維外，更能身體力行投入減碳工作，後續將配合推動需求進一步規劃「ISO14067 產品碳足跡主任查證員訓練課程」培訓水利署同仁（60 位）取得相關資格，而面對 2050 淨零之挑戰，未來水利署亦將投入更多人力、經費全面思考工程減碳創新作為，如低碳水泥（淤泥）材料與工法之研究、節能監控技術開發，以及建構完善之智慧節能設計及智能監造系統，將綠色轉型（Green Transformation, GX）與數位轉型（Digital Transformation, DX）結合同步發展，配合以自然為基礎解決方案（Nature-based Solutions, NbS），強化工程減碳力道，逐步實現水利綠工程及淨零排放目標邁進。

### 參考文獻

1. "Building a low-carbon economy – the UK's contribution to tackling climate change." by CCC.
2. 2009, "Advice on the fourth carbon budget." by CCC, 2011, "Advice on the fifth carbon budget." by CCC, 2015.
3. UK Environmental Agency (2012), Carbon calculator for construction

activities. <http://www.environment-agency.gov.uk/business/sectors/37543.aspx>

4. 英國氣候變遷委員會（Climate Change Committee, CCC）官網，<https://www.theccc.org.uk/>，於 2021 年 10 月 6 日造訪。
5. 「研訂公共工程計畫相關審議基準及綠色減碳指標計算規則」委託研究案—成果報告減碳規則篇，行政院公共工程委員會，民國 101 年。
6. 碳排放資訊於水資源有效利用之評估，經濟部水利署水利規劃試驗所，民國 110 年。
7. 永續水利工程評估指標推廣與碳盤查作業研究，經濟部水利署，民國 104 年。
8. 水利署及其所轄機關設施碳中和潛力評估研究，經濟部水利署，民國 106 年。
9. 應用公共工程經費電腦估價系統（PCCES）架構估算工程二氧化碳排放量委託研究案成果報告，行政院公共工程委員會，民國 102 年。
10. 公共工程碳排放量試辦計畫，行政院農業委員會水土保持局，民國 103 年。
11. 水資源工程計畫碳管理制度研究（總報告），經濟部水利署水利規劃試驗所，民國 104 年。
12. 水利工程工資工率分析手冊，經濟部水利署，民國 108 年。
13. 西濱快速公路八棟寮至九塊厝新建工程之鋪面工程生命週期排碳特性分析，鋪面工程 16 卷 2 期，民國 107 年。
14. 製造業產品環境足跡及資源永系資訊專區（網站），經濟部工業局，民國 110 年。
15. 綠色企業 (<https://www.cht.com.tw/zh-tw/home/cht/esg/environmental-sustainability/5g-green-enterprise>)，中華電信。
16. 產品碳足跡資訊網 (<https://cfp-calculate.tw/cfpc/WebPage/LoginPage.aspx>)，行政院環境保護署。
17. 產品與服務碳足跡計算指引，行政院環境保護署，民國 109 年。
18. 永續公共工程政策白皮書—修正版，行政院公共工程委員會，民國 110 年。
19. 新興公共工程計畫落實節能減碳評估，行政院農業委員會林務局，民國 110 年。
20. 水庫系統碳足跡與水資源工程溫室氣體排放量評估（總報告），經濟部水利署水利規劃試驗所，民國 102 年。
21. 溫室氣體排放量盤查作業指引，行政院環境保護署，民國 111 年。
22. 「公共工程納入節能減碳與綠色能源之策略及作法」簡報資料，公共工程委員會，民國 109 年。

