



導入碳預算管理提升 水利工程減碳新策略

經濟部水利署署長 / 賴建信

經濟部水利署組長 / 許朝欽

經濟部水利署正工程司 / 林哲震

經濟部水利署正工程司 / 陳加榮

關鍵字：碳預算管理、系統性減碳、植樹固碳、總量管制、工程生命週期

摘要

隨著極端氣候加劇，全球氣候變遷已成為事實，我國提出減碳12項關鍵戰略及2050淨零排放路徑雖已明確訂定未來執行政策方向，但未規範水利工程領域相關減碳內容；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。爰此，水利署為推動水利工程節能減碳之目標，參考國外減碳作法、指標及國內政策方向，於每年推動眾多水利工程無法逐案碳盤查之現況下，首創「碳預算管理」方法，而以系統性減碳之策略及管控，自工程預算編列開始即導入減碳思維採行總量管制，且以工程生命週期規劃、設計、施工、營運等各階段擬定相對應策略，編撰「水利工程減碳作業參考指引」

作為本署減碳方針，並已通過英國標準協會（BSI）查證確認。經盤點過去2019年至2021年水利署推動水利工程之碳排量，平均每年排放約58.7萬tCO₂e作為基期碳排量，以2022年減碳基期碳排量20%、2023年減碳基期碳排量30%、2030年減碳基期碳排量40%，直至2050年減碳基期碳排量50%，並搭配轄管土地植樹固碳等措施，以落實淨零轉型之長期願景目標。

一、水利工程淨零目標及減碳政策推動

（一）全球趨勢與臺灣轉型策略

溫室氣體排放逐年攀升所致全球暖化效應，已被聯合國政府間氣候變遷專門委員會



(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 公布之第六次評估報告 (IPCC AR6) 中揭示並呼籲，面對排放濃度不斷提升之現況，將全面衝擊人類未來的生存環境；因此，如何抑制碳排放量持續攀高，將為全球各國急需著力探討之重要課題。其中，面對世界各地極端旱澇事件及熱浪等氣候異常現象頻仍之環境變異，身為海島國家之臺灣，響應各國提出「2050淨零排放」的宣示與行動，於2022年3月公布「2050淨零排放路徑及策略總說明」，明確指出面臨嚴峻之轉型挑戰，政府將透過科技研發及氣候法制兩大基礎，逐步推動能源、產業、生活、社會等轉型策略（圖1），及十二項關鍵戰略，同步全球實現淨零轉型之長期目標願景[24]，使臺灣擁有更好的防災耐受能力與韌性。

（二）水利工程減碳目標

為呼應政府轉型政策及各項減碳行動構想，雖水利工程領域尚未具體規範轉型策略，惟水利署仍以超前部署之勢，率先推動水利工程落實節能減碳；盱衡各國淨零時程、關鍵里程碑設定與國內減碳路徑規劃等主流做法，設定2050淨零碳排為核心目標，並盤點過去2019年至2021年所推動之水利工程碳排放量（平均每年排放約58.7萬tCO₂e）作為基期碳排放量，採總量管制，以2022年減碳基期碳排放量20%、2023年減碳基期碳排放量30%、2030年減碳基期碳排放量40%，直至2050年減碳基期碳排放量50%，及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）



圖 1 臺灣淨零轉型之策略與基礎 [24]



圖 2 水利工程淨零減碳里程碑

(三) 水利工程減碳政策推動

為貫徹水利工程生命週期減碳之管理思維，於工程規劃、設計、施工、營運等生命週期各階段擬定策略（圖3），在最具減碳效益之工程規劃設計階段，於2022年2月獨步全國提出「水利工程減碳作業參考指引」（規

劃設計篇），具體導入水利工程碳預算管理做法及整體減碳策略（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；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，同時鼓勵採用有利於工程節能減碳之新技術、新工法、

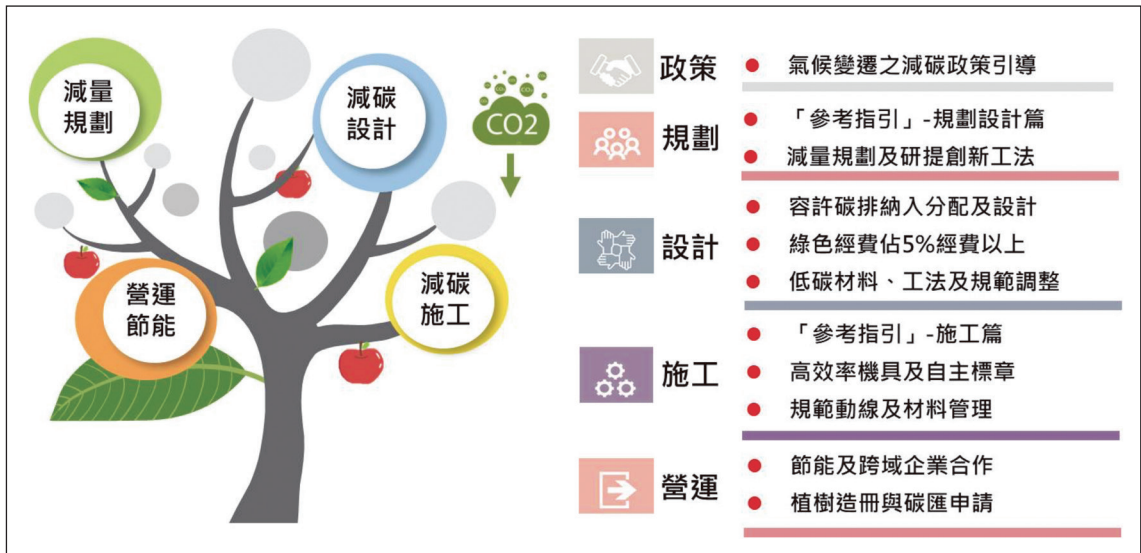


圖 3 工程生命週期各階段減碳策略



表 1 混凝土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 20cm		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 ₂ e)	編碼 (備註)
產品，預拌混凝土材料費，175kgf/cm ²	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 ³	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 ₂ 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」(2020)

新材料或創新管理等措施。此外，於實際作為上除透過設計階段的碳排量估算與分析外，研提減碳策略過程更落實綠色材料、綠色能源、綠色工法、綠色環境等概念，積極導入再生材料、減廢、營建自動化、生態、節能、固碳、耐久等多元措施於設計中，達成管理目標與低碳設計之關鍵指標；至於工程生命週期其他階段，則配合推動減碳施工、規範增修、機具優化、材料管理、水庫滯洪池植樹固碳、設備節能運用、太陽能與小水力開發、跨域合作等整合性具體策略及作為，以展現整體水利工程減碳成效。

二、水利工程碳預算管理方法

(一) 工程碳排量計算

為推動碳預算管理方法俾達減碳目標

及量化管制作為，水利工程碳排量計算與各工作項目碳排係數之建立至關重要。水利署根據英國標準協會 (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」之合計加以估計二氧化碳當量 (CO₂e)。至「碳排係數」是最難建立條件之一，水利署根據所頒定「水利工程工資工率分析參考手冊」之單價分析所包括「機具」(含電力/燃料使用)、「工料」、及「人員」等三大類，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，以單位長度、體積或重量中原料含量，搭配施工經驗進行轉換，進而求得各工作項目之碳排係數 (表1)。

其中為明確工程碳排量估算內容，援引環保署「溫室氣體排放量盤查作業指引」所

定義工程碳排量估算範疇作為邊界條件，藉由公共工程委員會開發之既有經費電腦估價系統（PCCES）架構，以其編碼作為碳排係數分類索引，並自行撰擬Microsoft開發工具Visual Basic for Applications（VBA）程式及開發系統自動化代入計算，藉以估計2019年至2021年全署推動約千件水利工程之碳排量，進一步設定全署減碳目標，作為推動碳預算管理之依據（圖4）。

（二）碳預算管理方法

水利工程執行面向廣泛且種類不勝枚舉，水利署每年平均辦理高達300餘件工程，實務上實難以由第三方碳管理單位輔導減碳設計，並逐案執行施工階段碳盤查，因此必須採系統性管理，爰於2022年2月編定之「水利工程減碳作業參考指引」（規劃設計篇）中，除含括水利工程常見工作項目碳排係數與計算方法之律定，以及循工程發包年相應之減碳目標外，為落實減碳策略實質應用於所推動之各類工程；經考量執行單位、工程類別等屬性、碳排量管理範圍，依河海工程（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，適性制訂各類別工程減碳審查流程，並整合以「碳預算管理」模式辦理系統性減碳[23]。其模式主要依工程採購作業、執行期及規模之差異，以水資源大型報院計畫工程採專案列管，並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5，圖中依序可見碳預算管理之基礎為發包年度之減碳目標確立，並以此基礎考量工程屬性、物調指數等特性，由各執行單位於工程提報階段以水利署過去推動工程之數據經驗（即為各工程減碳前之基準），採標準斷面估算法或工程類別回歸係數推估法，進行提報工程碳排量盤點，並將成果提報由水利署統籌檢討以各所屬機關為單位，核定各案工程容許碳排量及管制總量，使工程推動及實施自工程勘評階段，即與經費同步以目標需求進行個案及總量碳排管控。

當完成工程容許碳排量核定後，工程設計人員即可依其節能減碳構想，進行工程規劃設計，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，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，提送各



圖 4 碳排量計算流程

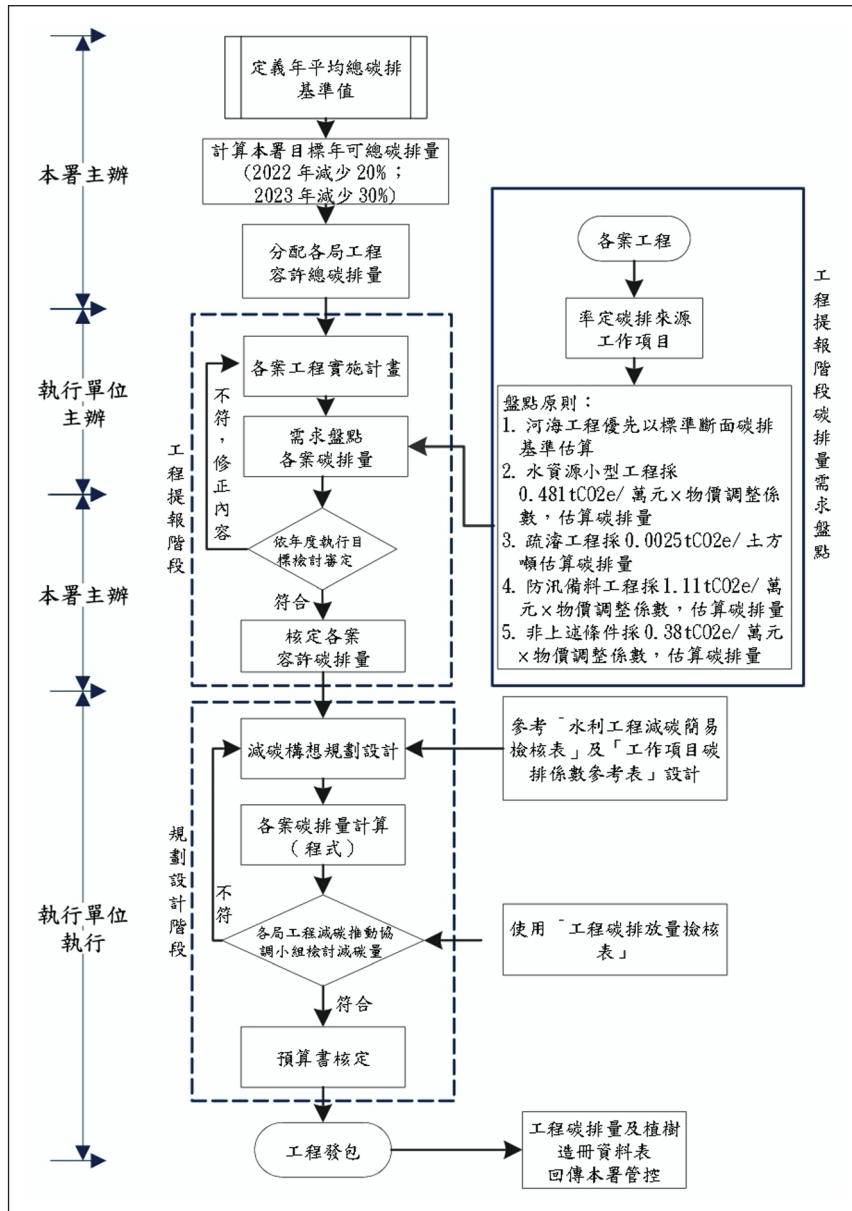


圖 5 工程碳排放量審查流程 [25]

執行單位成立之工程減碳推動協調小組檢討碳排量；倘遇個案工程因特殊原因致無法達標，則可由各執行單位副局長所建立之推

動協調小組，進行內部工程案件碳額度交換（調整）檢討或報署協調管控（圖6）。最後，於核定工程總碳排量管控下，所辦工



圖 6 工程提報與推動小組審查機制

程即可依程序核定預算書、發包執行及造冊列管。上開整體管理架構即所稱「碳預算管理方法」。

(三) 第三方公正單位查證

鑒於所提出之減碳管理機制及方法學為全國首創，為使其更具有公信力且可實際落實推動，水利署特邀第三方公正單位，即英國標準協會臺灣分公司（BSI）辦理相關查證作業。減碳機制經三階段查證，透過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及水利工程碳排計算程式系統建置等；查證結果表示已可提供規劃設計階段合宜的碳足跡估算方式，減碳機制

明確且減碳效益評估模式及各項碳排係數確實可反映整體之工程碳排量，尤其透過標準作業流程（SOP）之制定更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。

(四) 小結

水利署為推動國內水利工程落實節能減碳之願景，透過國際間廣泛使用之「排放係數法」進行工作項目之「活動強度」乘以「碳排係數」之合計加以估計二氧化碳當量（CO₂e）；並藉由PCCES工項編碼及程式整合開發之應用，估算水利署2019年至2021年之工程碳排量。另為推動減碳工程之碳排量需求盤點，採逐年設定減碳目標之方式，首



創「碳預算管理」方法，以最具減碳效益之工程規劃設計階段優先納入系統性減碳策略及管控，自工程預算編列開始即導入減碳思維及策略並據以設定減碳目標，使設計單位可依政策指導，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。最後，在各執行單位之推動協調小組檢討合於碳排量總量管制目標前提下，辦理工程發包執行及造冊列管，以逐步達成水利工程淨零目標。

三、減碳策略運用與實際案例

(一) 水利工程減碳策略應用

為落實水利工程全生命週期減碳策略應用，以四大綠色內涵（綠色材料、綠色工法、綠色環境、綠色能源）納入工程考量，以政策引導方式綜合考量對環境之影響及計畫合理效益，以減量設計為主軸；搭配選用低碳排係數工項及材料、因地制宜工法，配合施工階段抽查及有效節能營運管理，逐步執行達成減碳成效。經調查水利署2022年發包之170件工程常用減碳策略如下：

1. 低耗能之工法：採用自動化或標準化施工方式、結構體輕量化設計（如系統模板）、於施工方法中導入預鑄品（如預鑄護欄、預鑄溝蓋、預鑄車阻、預鑄鋼筋混凝土管、預鑄樑柱、預鑄外牆、預鑄隧道環片等）。
2. 減少工程廢棄物：由源頭減少資源的產出

並考量營建廢棄物回收與再利用、透過管理手段對營建材料的供應、裝卸動線及倉儲配置等進行妥善規劃。

3. 土方挖填平衡：規劃應以最小面積開挖或以最短運送距離操作、優先考量用於工區填挖平衡以減少外運；剩餘土方堤前培厚。
4. 生態工法（近自然工法）：因地制宜使用自然材料之施工方法，如回包式加勁工法、地工沙腸袋工法、石籠工法搭配現地土石或取自工區河床之自然石材的砌石工法。
5. 綠建材或環保建材：低汙染、省資源、再生利用、可回收之綠建材或再生材料等綠色環保產品、設備。
6. 新型混凝土：高性能混凝土（HPC）、自充填混凝土（SCC）、超高性能混凝土（UHPC）。
7. 再生工程材料：再生瀝青混凝土、再生混凝土、高壓混凝土磚再生建材、再生橡膠地磚、再生陶瓷面磚建材、水庫淤泥利用、使用焚化底渣再生粒料或廢棄物再利用。
8. 就地取材：砌石護岸、鋪塊石、混凝土排塊石、混凝土砌塊石、乾砌塊石、混凝土襯排塊石、混凝土襯砌塊、拋石護坦工、自然河床料便道鋪築、土堤培厚等。
9. 替代材料：混凝土礦物摻料提升替代水泥用量。
10. 環保低污染材料：綠建材、省水標章、環保標章、減碳標籤及節能標章、ESG廠商產品與服務。

（二）創新減碳工法運用

除常用之水利工程減碳策略外，水利署亦不斷嘗試新減碳工法，如「濁水溪下溪墘堤防段防災減災工程」地工沙腸袋工法運用（圖7），以具抗紫外線之高強度聚丙烯（PP）編織而成，經縫合成管狀織布袋，再抽取現地土砂填灌，由於織布之孔隙可將水排除而保留砂土於袋體內，而形成廣泛應用於河川及水利方面之大型重力式結構物。利用現地材料回填，可取代傳統消波塊或混凝土構造物，完工後整體效益良好，且施工快速、不需用混凝土、袋體尺寸可客製

化、施工簡易無須大量施工機具、柔性工法，易於修補維護、友善環境等特性等。實務案例亦有運用於各式壩體類結構堤心材料（突堤、離岸堤、防波堤、潛堤）、臨時施工圍堤或圍堰、橋墩保護、海岸線保護、人工沙丘、人工養灘、河川護岸堤心材料或其他保護工程。

水利工程常有疏濬需求，利用疏濬現地砂、水加上少許水泥就地拌和調配，既無使用鋼筋又不須外運進來混凝土，可有效減少砂石車運具載運，達節能減碳之效。實際應用案例如「濁水溪許厝寮堤段整體環境改善



圖 7 地工沙腸袋應用情形



圖 8 固化土步道施作情形



工程」(圖8)，相當於減少1,089 m³混凝土用量、現地土方再利用約15,400 m³，計可減少碳排放約563tCO₂e。

(三) 策略使用頻率分析

經統計2022年發包之170件水利工程，依據減碳方式原則四大策略：「綠色材料」、「綠色工法」、「綠色環境」及「綠色能源」，粗略分為以下14項具體執行方式(表2)，並歸納工程使用減碳策略計達296次；其中減碳策略使用以就地取材使用82次為最高、植樹固碳及生態營造使用69次居次，再者為再生工程材料則使用45次，而使用較少方式為以自然為本的解決方案(1次)、最小營建規模(2次)、新型混凝土(2次)，可為

後續持續努力推廣之方向。有關綠色能源部分，鑒於水利工程設計過程較無綠色能源開發之應用，針對該項策略，現階段執行單位多納入施工階段及營運階段考量，未來如有新科技或工法開發應用相關綠色能源技術，可進一步於水利工程中設計導入及推廣。

(四) 實際案例

工程設計已導入減碳思維，其中2022年代表性工程如第六河川局的「鹽水溪新埔橋至北新橋堤防新建工程併辦土石標售」(圖9)，減碳策略主要以石籠取代坡面工8,000 m³、植樹喬木100株、綠色經費佔31.4%，共減碳2,650 tCO₂e；及水利署第十河川局的「磺溪南勢湖二號堤防整建工程」

表 2 水利工程減碳策略與執行頻率

減碳策略	落實執行方式	具體方式	使用次數
綠色材料	環保與耐久材料	使用環保標章建材	10
	新型混凝土	使用 HPC、SCC、UHPC	2
	再生工程材料	再生瀝青、水庫淤泥等	45
	就地取材	石材、土方就地取用	82
	替代材料	礦物摻料等	8
綠色工法	低耗能之工法	系統模板、預鑄品等	4
	減少工程廢棄物	既有構造留用等	11
	土方挖填平衡	挖填平衡降低棄土	24
	生態工法(進自然工法)	砌石工、石籠等	38
綠色環境	最小營建規模	減量設計	2
	植樹固碳、生態營造	種植喬、灌木、植披	69
	以自然為本的解決方案(NbS)	NbS 生態設計	1
綠色能源	再生能源系統	水力、風力、太陽能	-
	節約能源設備	LED、節能設備等	-



圖 9 石籠取代坡面工



圖 10 使用環保與耐久材及大量植樹

(圖10)使用環保標章材料-馬賽克磚1177.8才、植樹喬木63株、灌木6,216株等減碳策略，綠色經費佔33%，共減碳595 tCO₂e。兩案件皆已充分將減碳策略融入於設計中，不同於以往傳統工法，在安全考量下，以就地取材、環保與耐久材料及大量植樹固碳，不單能美化環境，更能落實工程減碳。

四、執行成果與效益

水利署為瞭解推動系統性減碳成果，經統計2022年發包之170件工程，其中河海類工程計99件、水資源小型工程計24件、疏濬工程計37件、防汛備料類工程計10件，減碳量共計80,661 tCO₂e，減少比例24.1%，綠色經費比例14%；並統計種植喬木約14萬株，灌木約137萬株，面積達178公頃，已順利達成2022年減碳目標(-20%)。

就效益而言，因應氣候變遷，溫室氣體效應導致全球暖化升溫，降低溫室氣體排放是減緩氣候變遷的主要手段。水利工程碳預算管理之方法於設計階段即落實工程節能減碳，並以植樹方式進行固碳之方式，均能間接推動各類相關產業往淨零轉型方向邁進，以低碳材料進行設計或採低耗能之施工機具達到減碳成效，對環境及企業有正面影響。希望藉此帶動其他機關及民間企業社會責任，並使企業能落實「環境保護(Environment)、社會責任(Social)和公司治理(Governance)」，帶動機關與民間企業攜手共創淨零碳排的新局面；植樹部分則針對轄管土地加大種樹力道，結合綠美化環境營造與河川揚塵防制業務，推動於滯洪池或環境營造工程周邊栽植，除能對減碳做出具體貢獻外，更能營造人與自然生態共存的優質環境，並使綠色供應鏈之產業帶來效益，



加速產業升級及創造就業機會。

五、結論

本文屬拋磚引玉之探討，期望引起更多產、官、學界之關注，並帶動跨界、跨領域之工程減碳思維及策略探討。水利署已於2022年全面啟動碳預算管理機制，依統計資料顯示，可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過程。2022年設定之減碳目標（-20%），各案工程皆落實減碳設計，透過利用碳排量估算程式，在預算書成立時即自行檢視碳排量，避免超過總量上限或啟動碳額度交換機制；除個案管控碳排量外，於總量管制上亦可充分掌握管理。確經由初始目標設定、律定碳排量計算模式及總量管控等碳預算管理機制，為推動淨零目標之合宜方式。

面對2050淨零之挑戰，未來水利署將投入更多人力、經費，全面思考工程減碳創新策略及作為；除已領先公部門於2023年2月完成「ISO 14067產品碳足跡主任查證員訓練課程」輔導60位同仁取得查證資格外；並研議辦理各類型工程碳足跡盤查，取得第三方公證單位查證後，回饋碳排係數資料庫並驗證水利署首創之工程系統性減碳-碳預算管理機制。未來將更致力於低碳材料與工法之研究開發，如低碳水泥（淤泥）材料、節能監控技術開發；並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），落實水利工程淨零轉型之長期願景目標。

參考文獻

1. 「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。
2. 產品與服務碳足跡計算指引，行政院環境保護署，民國109年。
3. 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。
4. 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。
5. 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。
6. 「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。
7. 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。
8. 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。
9. 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。
10. 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。
11. 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。
12. 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。
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. 水利工程工資工率分析手冊，經濟部水利署，民國108年。
15. 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。
16. 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。
17. 綠色企業（<https://www.cht.com.tw/zh-tw/home/cht/esg/environmental-sustainability/5g-green-enterprise>），中華電信。
18. 產品碳足跡資訊網（<https://cfp-calculate.tw/cfpc/WebPage/LoginPage.aspx>），行政院環境保護署。
19. UK Environmental Agency (2012), Carbon calculator



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

20. “Building a low-carbon economy – the UK’s contribution to tackling climate change.” by CCC,
21. 2009, “Advice on the fourth carbon budget.” by CCC; 2011, “Advice on the fifth carbon budget.” by CCC, 2015.
22. 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。
23. 「社團法人中國土木工程學會」第四十九卷第六期刊, 「全國首創水利工程碳預算管理方法」, 2022。
24. 臺灣 2050 淨零排放路徑及策略總說明, 國家發展委員會, 2022。
25. 「水利工程減碳作業參考指引」(規劃設計篇), 經濟部水利署, 2022。