



專題報導

淺談水庫碳足跡之計算

▶ 專案1部 廖弓普

隨著人口成長與經濟發展之影響，造成水資源短缺的問題日益嚴重，建造水庫似乎是解決用水問題之優選方案，水庫提供的水力發電模式也被稱為清潔能源，具有減少溫室氣體排放的效益。但是，因為全球暖化議題開始受到重視，逐漸有研究指出傳統興建水庫的方式，可能會造成更多的溫室氣體排放，並開始探討水庫排放溫室氣體對大氣之影響。本文從三種不同角度探討水庫碳足跡計算機制，包括：水庫興建工程的碳足跡、水庫供應水資源的碳足跡及水庫營運的碳足跡，並分別探討其應用標準與計算差異。

IPCC在2007年發表第四次全球氣候評估綜合報告更明確指出，全球氣候暖化的原因，有90%的可能性是來自於人為活動產生的溫室氣體排放所造成的影響。因此，國際間呼籲產業應積極進行溫室氣體減量工作，並成為全球共同努力的任務。以往普遍認為造成全球暖化之溫室氣體來源為陸地生態系統（森林和土壤）運作與人為活動（生產與消費）貢獻的結果，但是，已有研究指出水庫因為大範圍淹沒陸域生態區，可能是導致大

氣中增加CO₂和CH₄的排放源。因為，大量被淹沒的植被加上日愈增加的高溫問題，導致水庫底部產生大量溫室氣體逸散排放至大氣環境，也間接讓水庫導致溫室氣體排放的問題開始在學術界引起激烈的爭論。

台灣地區平均每年有二千多毫米的雨量，原本應是水資源不虞匱乏的國家。但是台灣地區因為地狹人稠、山坡陡峭、降雨量集中，再加上河川長度短，導致大部分的雨水都迅速地流入海洋。因此，台灣地區每人每年平均分配到的水量卻只有全世界平均雨量的七分之一而已，以目前國際間可用水量的標準，台灣地區被歸屬為缺水國家。因此，建造水庫是台灣解決水資源問題的主要選項之一。因為國際間已開始研究建造水庫對溫室氣體排放的影響。以下將探討三種水庫碳足跡類型的計算與評估方式，以及水庫水體溫室氣體排放通量之量測研究。

一、計算水庫碳足跡引用的標準

計算水庫碳足跡引用標準涉及「CNS/ISO 14064-1組織層級溫室氣體排放與移除

之量化及報告附指引之規範」、「PAS 2050 產品與服務生命週期溫室氣體排放評估規範」、「CNS/ ISO 14040生命週期評估原則與架構」及「CNS/ ISO 14044生命週期評估要求事項與指導綱要」等標準，作為鑑別水資源工程與水庫系統溫室氣體排放源之依據，以及計算水資源工程溫室氣體排放量與水庫系統碳足跡之基礎。本文將參酌聯合國教育、科學及文化組織(UNESCO)與國際水力發電協會(IHA)聯合發表的「水庫溫室氣體量測指引(GHG Measurement Guidelines for Freshwater Reservoirs)」作為水庫水體溫室氣體量測與分析的規範。

二、水庫碳足跡範疇界定

水庫碳足跡可分為水庫工程的碳足跡、水庫供應水資源的碳足跡以及水庫營運的碳足跡等三大類型，其範疇界定方式如圖1所示。

1. 水庫營運過程的碳足跡

水庫營運過程的碳足跡係水庫操作與營運過程所排放的溫室氣體，並以ISO14064-1標準作為計算依據，依水庫營運階段邊界包含的排放範疇可區分為範疇一(直接溫室氣體排放量)、範疇二(能源間接溫室氣體排放量)及範疇三(其他間接溫室氣體排放量)，歸納如表1所示，

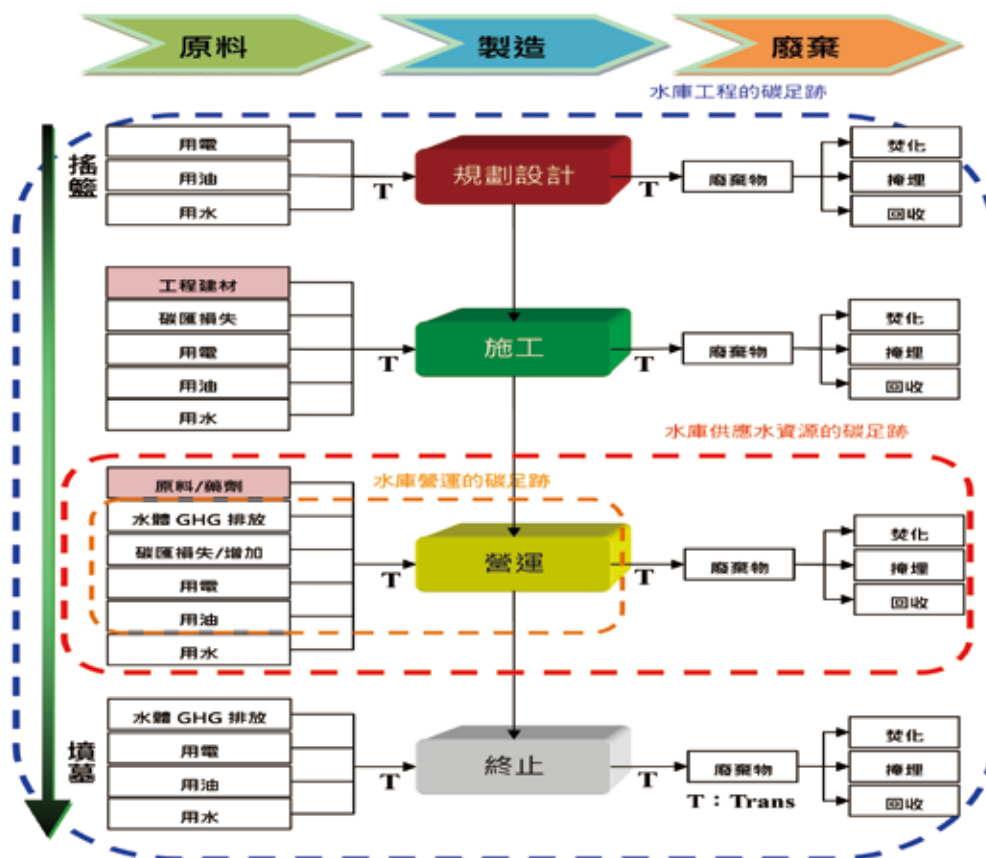


圖1 水庫碳足跡全生命週期系統邊界圖



表1 各階段營運邊界所包含之排放範疇

各階段	範疇一	範疇二	範疇三
營運中 水庫	設施操作維護管理 ●公務車輛、船舶燃料 ●緊急發電機燃料 ●工作人員排泄物、空調、消防設備冷煤逸散 ●水源水質保護區範圍林木面積異動之破匯變化 ●水庫水體排放	●管理中心用電	●清淤與漂流木移除委外處理之燃料 ●廢棄物清運等

ISO14064-1標準要求針對營運過程的範疇1與範疇2排放的溫室氣體進行量化計算，不需要考量水庫規劃、建造過程中所使用之工程建材，非使用生命週期之概念進行評估。翡翠水庫即為全臺第一個ISO14064-1標準進行溫室氣體排放量查證的案例。

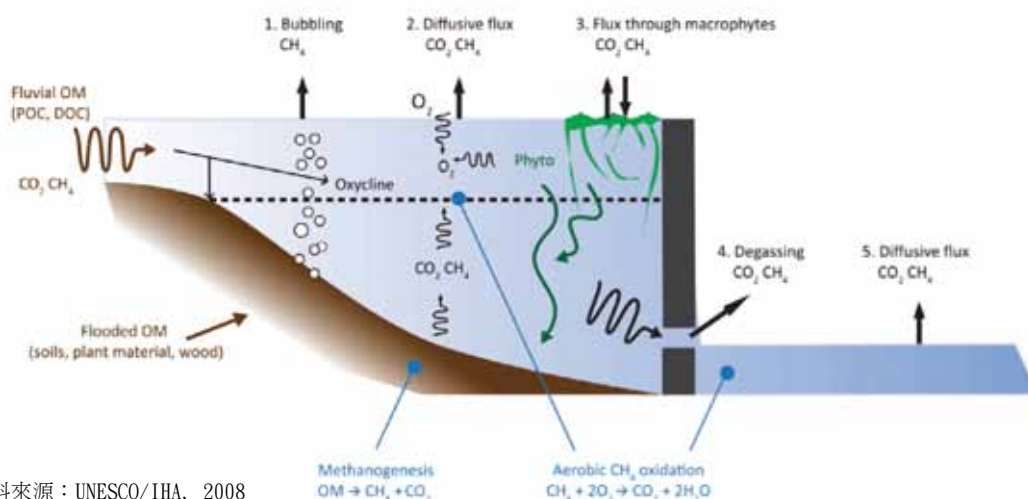
2. 水庫供應水資源的碳足跡

引用PAS2050:2011標準，並以水庫供應1噸水作為產品功能單位範疇，計算水庫供應水資源的碳足跡，其範疇界定包括

為水庫營運階段的範疇1與範疇2之溫室氣體排放量，還需要納入水庫操作與維護過程所需的化學原物料使用，並加計廢棄物處理造成的溫室氣體排放量，但並不計算水庫硬體設施與工程在建置的過程造成的溫室氣體排放量。

3. 水庫工程的碳足跡

依據ISO/CNS 14040 對於生命週期評估的描述：從產品原料取得、製造、使用與廢棄等階段，評估其產生的環境衝擊。因此，依生命週期評估的概念，水庫工程的碳足跡應包含：工程設計、材料生產、運輸、施工、使用、維修以及設備老舊拆除等後續廢棄處理或再生利用等流程，以此作為整體的溫室氣體排放量評估才算完整的生命週期碳足跡。所以，水庫工程碳足跡除評估營運階段所造成之排放量外，亦需考量水庫工程在規劃、施工以及水庫終止使用等各階段所造成之溫室氣體排放量。



資料來源：UNESCO/IHA, 2008

圖2 水庫水體溫室氣體排放的來源圖

三、水庫水體溫室氣體計算

1. 水庫水體溫室氣體產生的原因

一般來說，水庫產生溫室氣體，是因為淹沒範圍增大造成水體流速減緩，導致有機碳與無機碳均彙集到水庫中累積。在特定情況下，這些碳會因生物作用或化學作用轉而成為甲烷與二氧化碳的形式，由水中形成氣泡至水庫水面、消落帶、電站水輪機組等處被釋放到空氣中。不同的水庫情況，如：水庫所在的氣候帶、淹沒深度和面積、單位面積發電量、以及蓄水前是否清除淹沒區林木等，都是可能影響水庫蓄水後溫室氣體排放量多寡。水庫水體溫室氣體排放的來源如圖2所示。

2. 水庫水體溫室氣體排放通量之量測

水庫溫室氣體進入大氣是一個動態變化的生物地球化學過程，包括氣體的產生、傳輸及排放。因影響水庫溫室氣體排放的因素很多，直接導致水庫溫室氣體排放的不確定性。所以，透過對實際研究區域的溫室氣體排放進行長期的跟蹤監測，是研究水庫逸散排放溫室氣體最直接，也是最有效的手段。針對不同的研究區域和測量時段，測量方法有多種選擇。

水庫水體的溫室氣體產生機制隨著不同的環境要素而變化，因受到氣溫、水深、風速、光照強度以及水體理化性質的影響，不同類型水庫的溫室氣體排放情況也存在不同的差異，水庫溫室氣體排放通量的表現也會有極大的變異性。

從監測原理來說，水庫溫室氣體排放通量之計算方法可分成以下3種：

(1) 測量水中溶解氣體濃度計算溫室氣體排放通量

如薄邊界層(TBL)法、水化學平衡計算法和碳同位素分析法。這類方法測量過程較為複雜，對測量的要求比較苛刻，相應的後期計算比較多。該類方法現在應用相對較少。

(2) 測量水表面上方溫室氣體的累積濃度來計算溫室氣體排放通量

如紅外線鐳射法和渦度相關通量法、遙感衛星空間監測法。這類方法目前應用較少，但是作為對區域大面積監測最有效的方法正在被大力推廣應用。特別是遙感衛星空間監測法，隨著歐盟及日本專門用於監測地球溫室氣體排放衛星的發射，遙感衛星資料的資訊公開，獲取針對某一區域的溫室氣體排放的遙感衛星資料也變得較為容易。但是，針對遙感衛星資料的率定，還是需要通過實地測量來獲得資料，這仍將回歸具體的實地測量方法的選用上。紅外線鐳射和渦度相關通量法，對被測水面的環境要求比較高，其監測結果對水面擾動影響比較敏感，因此，對於作為主要航道或是具社會娛樂功能的庫區水域，這種不確定性會影響應用該方法測量值的誤差較大。如果被測水面的這類影響為常態(如航道利用、水上娛樂等)，則該法測得的實際結果，也可作為該區域的實際溫室氣體排放量之參考。

(3) 測量穿過水—氣介面的溫室氣體來計算溫室氣體排放通量

如浮箱方法，是目前應用最廣、最成熟的一種方法，其操作相對簡單、成本較低，只要運輸小船能到的地方，均



可實現現場測量，對被測區域沒有太多的限制，但其多侷限於點的監測，在進行大範圍、全區域的溫室氣體排放計算時，需要作一些條件假定，如測量值在外推到整個區域時，通常需假定該區域水體具有理化及生物地球特徵的同一性。

聯合國教科文組織(UNESCO)與世界水電協會(IHA)溫室氣體專案小組已針對水庫表面不同型式逸散之溫室氣體提出「水庫溫室氣體量測指引，該指引詳述針對水庫水體之溫室氣體排放研究應考量注意之事項與分析方法，與其他水質量測與底泥量測之分析工具與分析因子，對國際間之水庫溫室氣體排放研究有相當大的幫助。

四、結語

國際間對溫室氣體排放與管理研究已擴及各個不同領域，影響水資源管理甚為重要的水庫系統之溫室氣體排放議題則是近年來才開始受到重視。以往相關研究較集中在南

美、北歐及加拿大北部等地區的少數水庫，隨著水力發電設施和水資源工程建設之開發腳步，針對水庫的溫室效應研究才開始受到關注。台灣屬於水資源不足之區域，相關水資源的開發題議更是我們需面對的課題，而溫室效應造成的危害更是國際間正在共同努力解決的問題，水庫碳足跡的研究未來將會受到更多的重視與研究。 

參考文獻

- 1.陳佩婷，民國92年，「水庫工程生命週期成本效益分析之研究」，國立臺灣大學土木工程研究所，碩士論文。
- 2.經濟部水利署規劃試驗所，民國100年，「碳排放資訊於水資源有效利用之評估」。
- 3.經濟部水利署水利規劃試驗所，民國99年，「天花湖水庫推動計畫(3)-水庫全生命週期於節能減碳之評估研究」。
- 4.趙小傑、趙同謙、鄭華、段曉男、陳法霖、歐陽志雲、王效科，民國97年，「水庫溫室氣體排放及其影響因素」，環境科學，第29卷，第8期。
- 5.戴會超、李華、鄭鐵剛，2010，「水庫水域生態系統溫室氣體排放測量技術」，中國工程科學，第12卷，第9期。
- 6.鍾竺均，民國96年，「東南亞河川流域及海洋之碳循環—子計畫一：河川、湖泊及河口(海口)二氧化碳及甲烷通量測定及水質與底泥營養鹽與碳循環的關係(I)」。
- 7.Goldenfum, J.A., 2010, "GHG Measurement Guidelines for Freshwater Reservoirs", The UNESCO/IHA Greenhouse Gas Emissions from Freshwater Reservoirs Research Project.

