

小規模A/R CDM植林計畫—— 以台電公司鳳山植林計畫為例

文/圖 鄭智馨 ■ 國立台灣大學森林環境暨資源學系助理教授(通訊作者)
邱祈榮 ■ 國立台灣大學森林環境暨資源學系助理教授
林大方 ■ 國立台灣大學森林環境暨資源學系研究生
洪志祐 ■ 國立台灣大學森林環境暨資源學系研究生

一、A/R CDM植林計畫

全球暖化是目前國際社會最受關注的焦點議題之一。IPCC(2007)第四次評估報告中提出，造成全球暖化的原因極可能來自大氣中不斷增加的溫室氣體效應所引起，其中，以大氣二氧化碳濃度的上升的影響最大。大氣二氧化碳濃度的上升，與人類活動息息相關，人類對石化燃料的燃燒以及森林砍伐，為二氧化碳濃度上升的最主要來源。因此，為減緩溫室氣體效應的惡化，降低石化燃料的燃燒，以再生性能源的替代石化能源使用，或是增加森林環境對大氣二氧化碳吸收等不同措施的實施是必須的。

1997年制訂的京都議定書，即針對已開發國家或工業國家(議定書中Annex B國家)，訂定溫室氣體(主要是二氧化碳)排放的減量目標，提出排放減量(Emission Reduction)或是排放移除(Emission Removal)等方式達成二氧化碳排放減量目標。議定書並制定3種履約機制用來達成二

氧化碳排放減量目標，包括聯合減量 (Joint Implementation)、清潔發展機制 (Clean Development Mechanism, CDM) 和排放交易 (International Emission Trade)。在履約機制下，除了工業、交通和能源等部門實施提高能源效率，開發新能源和可再生能源等項目減少溫室氣體排放外，亦可透過實施植林方式，產生實質性的溫室氣體減量。

履約機制雖然允許不同國家間，可彼此的合作與交易，而達成全球整體性溫室氣體的減排。不過，這樣的機制仍被部分人士質疑與反對，就如環保人士認為大部分工業生產過程的直接減碳是必須且是可行的，不能僅單單透過減碳履約機制，以較便宜的轉換方式取代該有的減碳責任。另外，以計畫為導向的減碳過程，也受到不少批評，部分已核准計畫提出的認證排放減量 (Certified Emission Reduction)，仍然具有高度真實性與實用性的爭議。

儘管如此，林業部門的植林計畫普遍被國

際社會所接受，對農地或退化土地實施造林(Afforestation)與再造林(Reforestation)的清潔發展機制(A/R CDM)，也被大部份國家積極執行中。例如澳大利亞與紐西蘭提出每年將在其國內增加超過5萬與3萬公頃的造林面積，並用於國家碳排放減量信用額度計算上。A/R CDM除可協助達成碳排放減量外，成功的植林計畫也額外提供必須的環境服務(Environmental Services)，例如增加生物多樣性、降低土壤沖蝕與減少水資源破壞等。

台灣雖然不在京都議定書的參與國之列，但植林減碳仍然是台灣必須努力進行的。為了表現台灣參與植林減碳的能力，使植林計畫符合A/R CDM的標準是必要的，本文以台電公司於鳳山地區的小規模A/R CDM計畫為例(小規模A/R CDM為每年二氧化碳移除量小於16,000噸)，簡單敘述A/R CDM植林計畫的背景、可行性、基線調查與預期碳量移除。植林計畫的成功，預期將帶來環境永續發展與企業社會責任的雙贏局面。

二、A/R CDM基本概念與森林生態系

A/R CDM植林計畫是增加陸域環境碳吸存的最重要方法之一，植林計畫即藉由植林樹木的光合作用，增加陸域生態系統對大氣二氧化碳的固定，因而達到降低大氣二氧化碳濃度的效果。植林後，植林樹木除了以光合作用將二氧化碳固定於植物體內外，植物所累積的生物碳也會因為植體死亡、枯枝落葉掉落或根系代謝等方式，而以植物殘體、枯落物或土壤有機碳等不同型式儲存於生態系統中。因此，植林過

程碳量的改變，包括地上部生物量(Aboveground Biomass)、地下部生物量(Belowground Biomass)、枯立倒木(Snags And Woody Debris)、枯枝落葉層(Litter)與土壤有機物(Soil Organic Matter)等不同形式碳庫所構成的生態系統碳量(Ecosystem Carbon)。A/R CDM植林碳減的實際效益，即在實施植林計畫下所增加的生態系統碳量，扣除無實施植林計畫下的生態系統碳量，為所謂的外加(Additionality)碳量。

A/R CDM外加碳量或是增加碳排放移除評估的基本概念如表1所示。簡單而言，植林計畫的減碳效益來自植林基地背景資料、碳量基線調查與持續碳量監測等的綜合評估結果。其中，植林基地的背景資料，包含氣候、植生、水文、地質或土地利用等，提供了植林計畫的可行性評估，或應用於植林樹種的選擇，或是相關障礙分析(Barrier Analysis)等，並可使用於植林計畫實施前，評估不同基線情境(Base Scenario)下的可能外加碳量。

植林基地碳量基線調查與持續碳量監測，提供實際植林碳減效益的查證(Verification)與確認(Certification)。如前面所述，碳量基線調查以生態系統碳量為基準，包括植生、枯立倒木、枯枝落葉與土壤有機碳量等各部分碳庫的總和，植林計畫一般也以基線碳量當成在植林計畫實施前，植林基地的碳量基準。碳量監測則在植林計畫實施後，實際進行碳蓄積量的調查，確認植林計畫的植林減碳效益，因而獲得認證排放減量的碳權(Carbon Credits)。

在A/R CDM植林過程中，森林經營操作對化石燃料的消耗，例如整地、除草、施肥、病蟲害管理與疏伐等作業，也被CDM執行理事會

納入植林減碳的計算中。同樣地，發生在非植林區外的碳洩漏(Carbon Leakage)，也納入植林減碳的計算。碳洩漏是指發生在植林樣區外的碳排放，例如苗木或肥料運輸所消耗的化石燃料上，或是在發展中國家，由於植林計畫會對植林區域的使用進行限制，使得原有放牧或薪柴的利用轉移到非植林區域，甚至可能引起非植林區域的毀林(Deforestation)，也同樣造成碳洩漏的發生。因此，植林計畫除了對生態系統碳量的基線調查與後續監測外，植林過程完整的紀錄與評估，在A/R CDM的執行上，也是必須要考慮進來的。

A/R CDM植林計畫也須對環境、社會與經濟層面的影響進行評估，以符合植林計畫的永續發展。植林計畫對環境影響的最重要指標在於植林計畫是否能維持或改善現有的生態功能、環境品質、生物多樣性與社區健康狀況等，若具有重大的負面影響，則必須展開下一

步的環境影響評估，並描述或提供解決重大負面影響採取之措施。對社會與經濟影響的指標包括對居民收入、就業機會、技術發展、社會公正、貧窮消除與植林區域未來投資等，同樣地，若具有重大的負面影響，則必須展開下一步的社會經濟影響評估，且描述解決重大負面影響採取之措施。

三、台電公司鳳山植林計畫概況與基線調查

台電公司於2008年開始與高雄縣政府與步兵學校合作，在步校後方雞母山(現已經縣政府更名為鳳凰山)上的草生地(圖1(a))進行兩階段共50公頃的植林計畫，初期30公頃已於2009年完成整地與植栽，第二期的30公頃植林基地也於2010年年中完成整地與植栽(圖1(b))。鳳山地區的氣候年均溫約為24.7度，年雨量為1784公厘，年降雨日數為92天(以高雄市氣象站為基

表1 A/R CDM植林計畫基本概念

植林基地背景資料	基線調查與基線情境分析	碳量監測 (短期及長期碳增加量)
基本背景資料	地上部碳量	植林減碳效益監測與確認
氣候資料	上層林木與地被植物(灌木、草類)生物量	地上部碳量調查(短期、長期)
植被調查	死有機物質(枯木、倒木)	地下部碳量調查(短期、長期)
地形、地質與土壤調查	枯枝落葉	經營作業化石燃料消耗
現有土地利用形式	地下部碳量	灌溉、施肥、農藥
背景資料應用	土壤有機碳量、植物根生物量	社會經濟效益評估
植林樹種選擇	植林整地作業化石燃料消耗	就業、景觀、休閒、林木經濟
障礙分析	碳洩漏(非植林區域內所增加碳排放量)	環境服務評估
植林碳蓄積潛能驗證評估	苗木運輸、能源取代	生物多樣性、減少水資源破壞、土壤沖蝕降低



圖1 台電鳳山植林計畫基地概況。(a)植林前基地，(b)新植1年後桃花心木林地，(c)土壤剖面探樣，(d)鄰近相思樹林地。

準)。植林基地地質屬於更新世大社層，以泥岩、砂岩及礫石混層為主。土壤屬於高石礫含量的大貝湖系，土壤不僅石礫含量高，土層厚度淺，約略小於30公分(圖1(c))。依據GPS的定位調查，植林基地海拔介於51至88公尺，平均高度為72公尺，平均坡度為15度。

植林基地由於持續受到人為干擾(如踐踏)與高火燒頻率(火源來自鄰近農地與公墓)的影響，使得現有基地植生以大黍草(*Panicum maximum*)為主，並無森林演替發生(圖1(a))。因此，若無植林計畫的實施，高火燒頻率的發生，也將持續

限制現有植林基地的森林演替，而無法有效地增加碳蓄積量。植林計畫的目的即藉由人為栽植與管理方式，將現有的草生地經植林改變成為森林林相(圖1(b))，增加生態系統碳蓄積量與對大氣二氧化碳的固定。

植林計畫植株栽培密度分別為第一期每公頃栽植1,200株與第二期每公頃栽植1,500株，栽植間隔介於2.5–3公尺間。60公頃植林基地內，預計栽植81,000株的苗木。植林苗木種類有桃花心木 (*Swietenia mahagoni*)、相思樹 (*Acacia Confusa Merr*)、白雞油 (*Fraxinus*

表2 台電鳳山植林基地碳量基線調查與預期外加碳量推估

	基線調查		20年植林預期碳量	
	每公頃碳含量 (噸/公頃)	植林樣區總碳量 (噸)	每公頃碳含量推估 (噸/公頃)	植林樣區 總碳量推估 (噸)
生物碳量、枯立倒木及枯枝落葉層碳量	2.8	168	林木: 100 林下植物 ^b : 0.5 枯立倒木 ^b : 1.8 枯枝落葉層 ^b : 2.8	林木: 6,000 (22,020) ^a 林下植物 ^b : 30 (110) 枯立倒木 ^b : 108 (396) 枯枝落葉層 ^b : 168 (617)
土壤有機碳量	31.0	1,860	41.0 ^c	2,460 (9,028) ^c
總碳量	33.8	2,028	146.1 每公頃外加碳量: 112.3 噸/公頃	8,766 (32,171) 外加總碳量: 6,738 (24,728) 噸

^a括弧內為相當二氧化碳量換算^b以植林基地鄰近1公里內的兩處人工林地與兩處廢耕地推估^c依據AR-AMS0004與AR-AMS0005土壤有機碳量增加之定義值(0.5 ton ha⁻¹ year⁻¹)推估

Formosana Hay.)、楓香 (*Liquidamber Formosana*)，無患子(*Sapindus Saponaria*)、黃連木(*Pistacia Chinensis*)及烏心石 (*Formosan Michelia*)等樹種。植栽後，除定期澆水外，短期內另外訂定有施肥、病蟲害防治與除草等措施，長期則有修枝、疏伐等措施，用以維持良好生育環境與植物生長，確定植林計畫的成功。

植林基地的碳量基線調查方法，參考IPCC所制訂國家溫室氣體清冊指南(2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories)與CDM執行理事會所訂定AR-AMS0004與AR-AMS0005的建議方式進行碳量基線調查。現地採樣時，則將植林基地的碳量區分成生物碳量、枯立倒木碳量、枯枝落葉層碳量與土壤有機碳量等。生物碳量包括植生地上部與地下部的生物碳量，而土壤有機碳量則以土壤表層0-20公分為主。植林基地由於受到

人為與高火燒頻率的影響，使得生物相關碳量以草類生物碳量為主，且無大型樹木、枯立倒木或枯枝落葉層。草類生物碳量調查，利用0.5公尺x 0.5公尺面積大小的方框，分別於2009年及2010年於樣區內隨機選取數個方框採樣樣點，收集所有草類生物樣本，帶回實驗室經70℃烘乾、經稱重分析植生生物碳濃度後求得草類生物碳量。土壤有機碳量的採樣，則分別採集土壤0-10公分表層土壤與10-20公分表層土壤，帶回實驗室經風乾與磨土，以2mm篩網過篩。部分過篩後土壤，再經細磨後，分層分析碳含量。現地土壤採樣時，同時也進行土壤密度採樣，以無鏽鋼土環採集一定體積土壤，經帶回實驗室以105℃烘乾稱重後，得到土壤密度。土壤單位面積的有機碳量，為土壤有機碳濃度、土壤密度及採集深度的乘積。草類與土壤有機碳濃度的分析，利用台灣大學理學院貴重儀器中心，以元素分析儀進行分析。

現有植林基地生物碳量與土壤有機碳量基線調查結果如表2所示，草類生物碳量每公頃2.8噸，土壤有機碳量每公頃31.0噸。60公頃植林樣區的草類生物碳量基線為168噸，土壤有機碳量基線為1,860噸，總碳量基線為2,028噸。

四、植林碳量推估與後續監測

根據相關研究文獻與鄰近林地的現地調查，在不考慮可能來自植林基地位置、植林樹種與經營管理等差異考量下，我們進行20年後植林基地的總碳蓄積量推估(表2)，不過，真實的碳蓄積量計量與驗證仍待植林時間與後續碳量監測求得。預期林木生物碳量參照林俊成等人(2002)對20年相思木與光臘樹的植林資料，經20年植林，林木生物碳量預期每公頃可達100噸。因此，60公頃植林樣區的林木碳量在20年後為6,000噸，約相當於22,020噸的二氧化碳量。植林樣區的枯立倒木、枯枝落葉層與下層草類碳量的推估，則利用植林基地鄰近1公里內，兩處人工林地(相思樹(圖1(d))與印度紫檀)與兩處廢耕林地(廢耕果園與廢耕次生林)，以現有林地資料進行植林後可能碳量的推估。四個鄰近林地平均而言，植林預期每公頃可增加林下植物生物碳量0.5噸，枯立倒木1.8噸，枯枝落葉層2.8噸。植林土壤有機碳量的增加則利用AR-AMS0004與AR-AMS0005的定義值(每年每公頃增加0.5噸土壤有機碳量)推估，20年後，預期每公頃將增加10噸的土壤有機碳量，即60公頃植林基地，將可增加600噸的土壤有機碳量。

與植林基地基線碳量比較，預期20年後植

林生態系統的總碳量為每公頃146.1噸，遠高於現有每公頃33.8噸的基線碳量。植林生態系統的碳量分布，包括植林植物生物碳量為每公頃100噸、林下植物生物碳量為每公頃0.5噸，死有機物質(枯立倒木與枯枝落葉層)為每公頃4.6噸與土壤有機碳量為每公頃41噸。因此，20年後，60公頃植林樣區預期將有6,738噸的外加碳量，或是24,728噸的外加二氧化碳蓄積量，可經由植林計畫清除，其中，以植林樹木的移除蓄積量最高，其次為土壤有機碳。

台電植林基地的整地、灌溉、施肥或病蟲害防治等森林作業的石化燃料的消耗，以及後續植林過程的碳蓄積量監測，仍需在規模A/R CDM規範下執行，方能符合規模A/R CDM要求的認證排放減量的標準。此外，植林計畫對環境與社會經濟的影響，如生物多樣性、減少水資源破壞、土壤沖蝕降低或就業與景觀衝擊等環境服務功能，也需加以評估，更能夠讓植林計畫符合環境、社會與經濟等不同層面的永續發展。

五、結語

在全球各國重視全球暖化的議題時，台灣亦以實際行動表現對環境議題的重視及貢獻。我們以台電公司鳳山植林計畫為例，希望能有更多的植林計畫被提出，我們冀望在執行植林計畫的同時，也將植林計畫規劃成符合規模A/R CDM要求的認證排放減量的標準，相信這樣能使台灣在碳交易市場和減碳貢獻上，更受到國際的肯定與重視。▲