

走訪美國蒙大拿州火科學實驗室與處理火林相

文／圖 ■ 陳泓碩 ■ 林務局新竹林區管理處技士
曾志中 ■ 林務局嘉義林區管理處技士

一、前言

美國西部地區大平原草場和洛磯山脈森林區域野火 (wildfire) 發生頻繁、規模亦鉅，如 1910 年的大火 (Great Fire of 1910)，從華盛頓州東北橫跨北愛達荷州至西蒙大拿州，延燒面積高達 121 萬公頃；或是 1988 年黃石國家公園火災，延燒面積亦高達 32 萬公頃。為了維護周遭居民的生命安全並盡量降低野火帶來的危害，各有關單位非常重視野火管理，美國農部 (United States Department of Agriculture, USDA) 林務署 (Forest Service) 即於西北部的蒙大拿州，設立密蘇拉火科學實驗室 (Missoula Fire Science Laboratory) 及奧多李奧波德荒野研究所 (Aldo Leopold Wilderness Research Institute)，從事火科學相關研究。

二、密蘇拉火科學實驗室

1960 年 9 月 12 日林務署在蒙大拿州密蘇拉市設立北部林火實驗室 (Northern Forest Fire Laboratory)，亦即今日密蘇拉火科學實驗室前身。北部林火實驗室擁有 2 座風洞 (wind

tunnels) 及 1 座堪稱最新技術的環境控制燃燒室，透過科學研究，提供一個使林火預防、撲滅更為有效的經濟方式，並成為經營國家荒野 (wildland) 資源的政府機構之一。



▲圖1、高速風洞，正方形斷面邊長為0.91公尺，最大風速可達每秒17.88公尺。



▲圖2、低速風洞，正方形斷面邊長為3.12公尺，最大風速可達每秒3.12公尺。



▲圖3、環境控制燃燒室－煙霧蒐集設備

山脈研究站底下，執行火、燃料與煙霧科學計畫 (The Fire, Fuel, and Smoke Science Program, FFS)，計畫共分為以下六大領域，致力於野火的基礎、應用研究。

(一) 物理火燃過程 (Physical Fire Processes)

實驗室的研究成果及理論推導出的物理模型，經過田野觀察資料蒐集和驗證後，可用來探究物理火燃過程及提升火管理的安全性。

(二) 燃料動態 (Fuel Dynamics)

燃料動態研究，可幫助土地管理者詮釋植群遭受野火或控制火燃燒的變動情形，並以此發展季節性或多年型燃料變動的預測工具。

(三) 煙霧排放與擴散 (Smoke Emissions and Dispersion)

由於政府有維護公眾健康及安全的責任，因此用來推估野火對煙霧排放水準、能見度、碳匯及在全球國家間移動情形的工具須力求更新。

(四) 火生態 (Fire Ecology)

為了預測火燒後的生態演替，管理者須深入了解，不同植物的火燒適存能力 (fire-adaptive) 與火燒猛烈度 (fire severity) 間的相互作用機制。

(五) 火和燃料經營策略 (Fire and Fuel Management Strategies)

為了增進火場發生的預報能力，研究員在地景尺度下，模擬不同植群經營方式與氣候變遷、火場間的交互影響。

(六) 科學整合與推廣 (Science Synthesis and Delivery)

利用各種研發的應用工具及各種教育課程、導覽，以幫助土地經營者應用新的或當前研究成果為目的，同時負有向大眾傳遞知識的使命。

另外在洛磯山脈研究站 FFS 計畫人員與華盛頓總署火與航空管理單位 (Washington Office Fire and Aviation Management) 共同努力下，成立火模擬研究所 (Fire Modeling Institute, FMI)，主要任務為提供最好的火情分析技術及最先端科學文獻資訊，以因應火情管理員 (fire manager)、工程師及科學家所面臨的各式火相關資源管理需求。



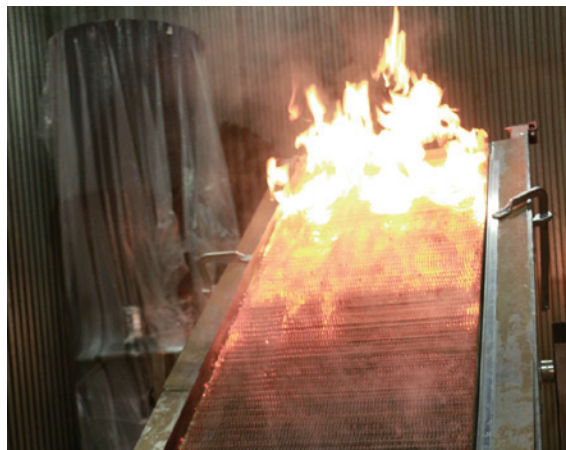
▲圖4、密蘇拉火科學實驗室



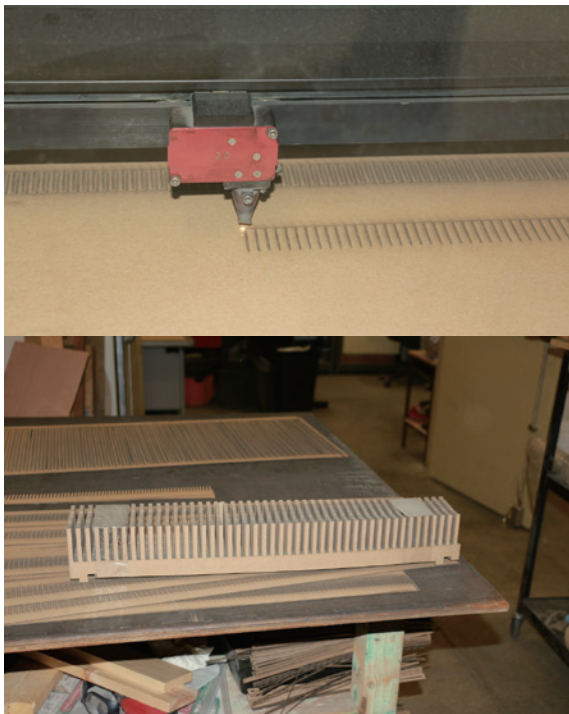
▲圖5、中間為FFS計畫副主持人身兼FMI執行長Thomas Dzomba

三、細顆粒燃料在遇火擴散時，熱傳導的主要模式

火科學研究的一大困境為，當前所有火模擬模式皆推導自相同的物理公式－熱能轉換法則，僅因為利用不同假設前提，而獲得不同的實驗研究參數及模式架構，才產生數十種相異的模式。因此，為了突破此困境，有必要更加了解物理燃燒過程，特別是其傳遞方法及時機，以提升模式的解釋、模擬能力。密蘇拉火科學實驗室 Mark Finney 研究員等人，利用實驗室的風洞、環境控制燃燒室設備，長期進行物理火燃過程領域的試驗。當前的研究著眼於細顆粒燃料 (fine fuels，如：草、針葉等) 的引燃機制。有別於以往模式皆假設輻射熱為引燃的關鍵，最新實驗結果指出，單靠輻射加熱 (radiation heating) 並不足以使細顆粒燃料較粗顆粒燃料 (如：木材) 提早引燃，透過火焰接觸所產生的對流加熱 (convective heating) 才是細顆粒燃料在遇火擴散時，熱傳導的主要模式。並已藉由美國境外 (如：加拿大) 的野外試驗及美國境內真實火場的觀測結果，再次驗證此論點。



▲圖6、林火擴散試驗



▲圖7、雷射切割紙板

四、新（2016）國家火災危險度評級系統 (National Fire Danger Rating System, NFDRS)

FMI 當前開發的 8 款主要應用軟體及系統，包括：

- （一）BehavePlus fire modeling system：用來模擬火行為、其影響程度和火場環境。
- （二）FFI Ecological Monitoring Application：可描述當前生態系統，並監測其變化及是否符合當地法規。
- （三）FireFamilyPlus(FFP) 4.1：為大眾型軟體，使用NFDRS計算火災危險度指數或統計火場及氣候資料。

（四）Fire Order Fire Effects Model(FOFEM)：可模擬下列4種火情：地表和地上燃料耗損、悶燒或全面燃燒時的粗、細煙霧釋出量和速率、各土深隨時間增溫情形及不同地表火燃燒時間長短、火焰高度、樹種、樹體大小的樹木致死率。

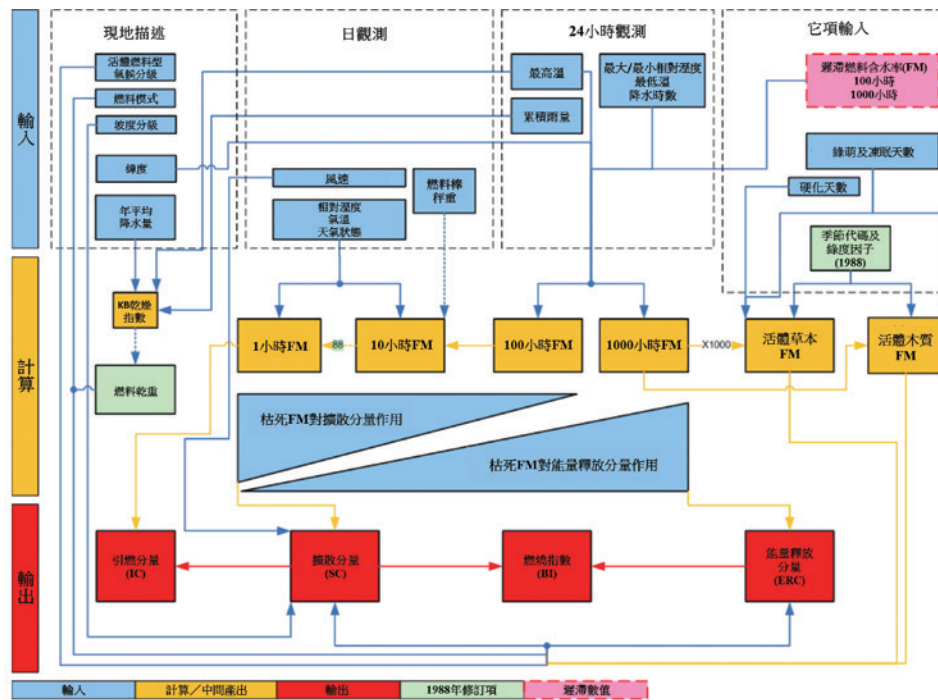
（五）FlamMap 5.0：利用地圖展示各區塊在特定環境（不同氣象和燃料濕度）下可能的火行為(fire behavior)。

（六）FeulCalc：用來模擬、評估不同處理作業下地表、地上、樹冠燃料累積量。

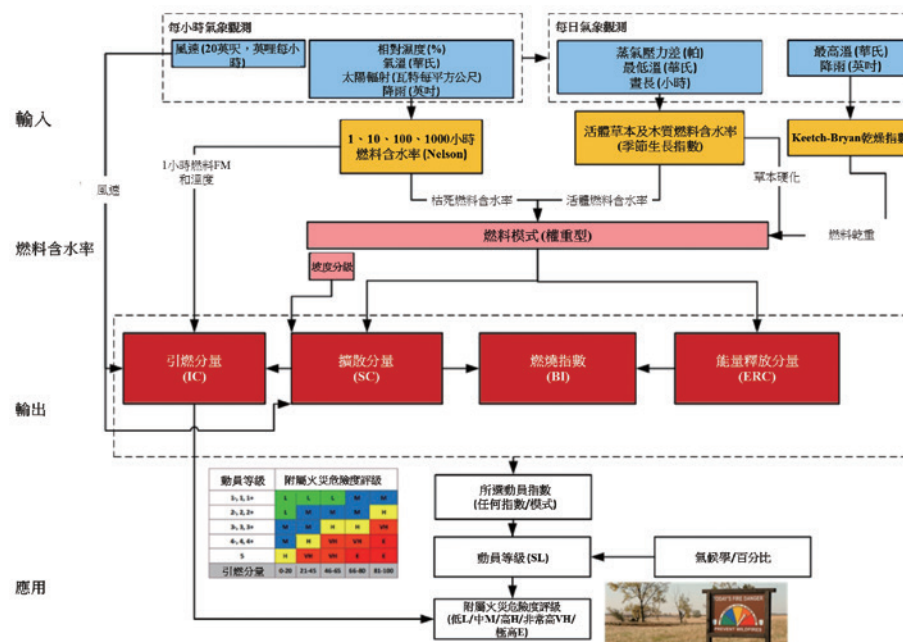
（七）國家火災危險度評級系統(National Fire Danger Rating System, NFDRS)。

（八）天氣資訊管理系統(Weather Information Management System, WIMS)。

其中自 1972 年建置以來未曾大幅度修改的 NFDRS，在 2014 年通過重大更新計畫，並於 2016 年底正式上線。NFDRS 遲至 2014 年才執行重大更新的一個原因為，系統更新後，勢必產生適應陣痛期及全面訓練課程調整，相關林火管理員、消防員、課程教師都必須重新學習，影響層面極廣，使得美國政府之前始終不敢貿然更新。本次主要更新項目為：系統原本使用的 40 種燃料模式利用群集分析歸納成 5 大類、不再直接測定活體植物的含水量、加入熱輻射的新燃料模式可向上推估任何尺寸燃料含水量、刪減須人為校正輸入項目成為全自動上傳更新系統。新（2016）NFDRS 經多次驗證得到優異的預測結果，且因新系統更為簡化、直觀，在未來辦理教育訓練或提供其他領域應用時，將較為容易且可縮短適應期。



▲圖8、舊（1978/88）NFDRS系統架構¹



▲圖9、新(2016) NFDRS系統架構²

1、2由密蘇拉火科學實驗室Matt Jolly研究員提供，陳泓碩譯。

五、奧多李奧波德荒野研究所

坐落於蒙大拿大學(University of Montana)校區的奧多李奧波德荒野研究所(Aldo Leopold Wilderness Research Institute)，與密蘇拉火科學實驗室同屬林務署洛磯山脈研究站底下八大機構之一。研究所為美國林務署於1993年設立，致力於發展及推廣提升荒野管理的知識。傳統三大研究領域為：遊客調查、遊憩對生態衝擊評估、野火生態，近來加入了空氣汙染、入侵種、野生動物、氣候變遷等議題，不再侷限於保護荒野可供遊憩的價值，持續監測各種威脅帶來的影響，並試圖以更大的尺度來研究整個荒野生態。



▲圖10、奧多李奧波德荒野研究所

火是荒野的擾動源之一，更多的研究則顯示火與荒野生態是相互依存的關係，亦即火控制著荒野植群的組成和結構、調節生態演替過程，並影響當地野生動物、昆蟲、疾病及生態系的豐富度、歧異度和穩定度。美國採取的嚴格滅火政策，干擾火在荒野所扮演的自然角色，並已違背保存荒野「自然狀態」目標。

Carol Miller 為所內火生態研究員，她的

研究與火科學實驗室出發點著重在人（如：保全森林火周遭居民安全及協助救火員了解火場情勢、減少人員傷亡等），與如何安全、迅速控制並撲滅火為首要宗旨不同，著重於仰賴火演替的生態系。希望能透過研究讓大眾了解火也是生態系重要的一環，在某些情形下，施行讓它燒(let it burn)政策利多於弊，且每場因人為撲滅的火反而會導致大規模的地景改變，而影響荒野生態結構甚劇。但儘管政府知道滅火可能造成的生態影響，實際要執行讓它燒政策並不容易，須同時承受當地民眾輿論及其他施行時因天氣、地點而異所帶來的危害風險。因此協助政府釐清何時、何地、何種情況適宜施行讓它燒政策，讓火重新扮演其在荒野的自然角色而不受人為干擾，便是其研究重心。

六、LOLO 國家森林控制火處理林相

控制火(prescribed fire)是林火管理策略之一，學習自印地安先民用火文化，是種仿自然擾動的生態營林方式。其施行目的及功能包括：

- (一) 減少燃料累積，降低森林大火發生機率，保障人民生命財產安全。
- (二) 改善棲地環境，利於需開闊地物種及掠食性動物生存。
- (三) 控制植群結構及組成，促進適火植物生長。
- (四) 加速養分循環及移除殘材，促進植物生長及便利復舊造林。
- (五) 移除入侵生物，降低與瀕危物種之競爭。

- (六) 移除受感染植物，降低害蟲和疾病的傳播。
- (七) 促進飼料植物生長，利於畜牧及獵物取食。
- (八) 增加地景歧異度，促進生物多樣性。
- (九) 移除林下灌叢，利於通行。
- (十) 改良景觀，促進遊樂價值。



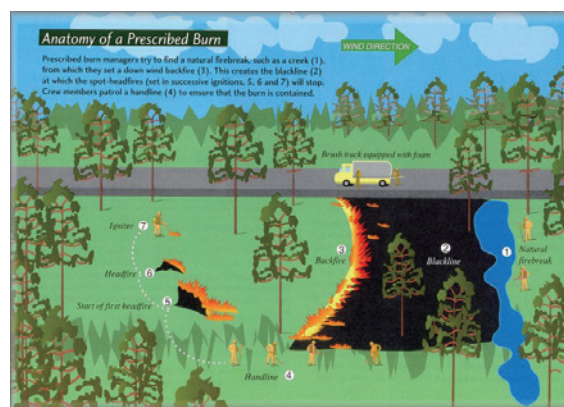
▲圖11、Lolo國家森林控制火施行森林林相



▲圖12、Lolo國家森林控制火地表遺留殘材

控制火的施行須由專業人員在適宜的環境條件下，依照不同的目的調整其頻率及強度。若不當執行，非但無法達到預期目的，反而會造成周邊社區的煙霧危害，甚至失控演變為森林火災。因此，控制火施行前須將選定地點、面積及相關位置標註於地圖上，施行

期間的允許天氣狀況（包含晴雨、風向、溫溼度等）、燃料濕度、人員及裝備配置、監控、安全、緊急處理等事項，亦應事先研擬並訂定周詳計畫，並知會當地消防隊、地方政府相關單位及周邊居民。施行前夕，須再次確認各天然條件及人員、裝備配置是否與計畫相符，並視情況微調。施行步驟為，先在下風處天然屏障燃燒邊界設置防火線 (firebreak)，並引火回燒 (backfire) 形成無法再燃燒的黑化區 (blackened zone)，再於上風處點火；燒燃期間人員於側面邊界巡邏監視並控制燃燒，確保燃燒情形符合計畫直到熄滅。

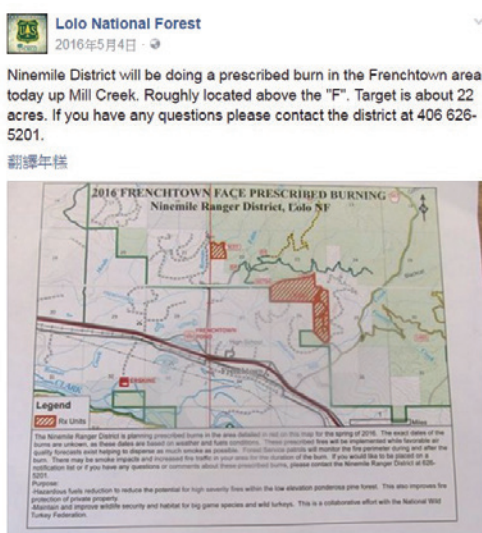


▲圖13、控制火施行示意圖³

Lolo 國家森林 (Lolo National Forest) 位於蒙大拿州西部，佔地約 85 萬公頃，圍繞著密蘇拉市，毗鄰平頭印地安保留區 (Flathead Indian Reservation)，轄下設有 Missoula、Ninemile、Plains/Thompson Fall、Seeley Lake 及 Superior 等 5 個工作站 (Ranger station) 管理各林區 (Ranger District)。各工

³源自<http://lomakatsi.org/prescribed-fire/>

作站定期依現場情形擬定控制火 (Prescribed fire) 施行計畫，並為減低施放期間對周遭居民及遊客的影響，施行前會將位置、目的及注意事項等相關資料，公布於官方網路傳播工具（如：網頁、臉書、推特等）；施行時，除周邊設有告示，並將執行最新情形同步更新發布，使大眾可隨時掌握並回饋意見。



▲圖 14、Lolo 國家森林控制火施行前告示⁴



▲圖 15、Lolo 國家森林控制火施行中現場相片及影片資訊⁵

本次實地前往的控制火施行林區，即位於 Lolo 國家森林轄下的 Ninemile 工作站北方約 5 公里處的 Grand Menard 區。根據官方網站及臉書資料顯示，施行期間為 105 年 4 月中旬，與參訪時間已間隔達半年以上。現場仍可見林木軀幹下方呈焦黑火燒痕跡，上方則枝葉翠綠無生長衰退趨勢，研判火燒的引響僅止於樹皮外層，未延燒至內層生命維持組織（如木質部、韌皮部等）。另外觀察林下地被，殘材、枯落葉累積量明顯減少，灌木、雜草低矮多屬新生，亦即地表燃料呈稀疏且非連續狀態。該區域內特別保留未施行控制火林相供作比對，可了解施行控制火所帶來的林內透視程度增加、地表燃料留存減少等益處，且可能因此區位於露營地不遠處，故於 11 月中旬新設解說牌，利用現成的教材，讓民眾了解控制火如何營造健康的森林。



▲圖 16、Ninemile 工作站控制火施行前

⁴源自 <https://www.facebook.com/lolonationalforest/>
⁵同上。



▲圖17、Ninemile工作站控制火施行後



▲圖18、Ninemile工作站轄管Grand Menard露營區內林火防治宣導



▲圖19、Ninemile工作站控制火解說牌

七、結語

火是一種生態系的自然擾動，部分生態系亦仰賴火燒演替及維持其恆定性。依照當前林業所提倡生態系經營理念，採舊有嚴格的林火管制政策，似已不合時宜。若欲引進美國遵循自然的讓它燒政策或模擬自然擾動的控制火政策，卻又可能面臨各方輿論壓力和存有不確定風險等因素，而難以推行。

但是燃料同時是林火行為三大環境因子、大火行為指標之一，臺灣自2001年梨山大火以來又歷經十多年，長期累積的大量燃料將增長林火發生及成為大火的可能。加上氣候變遷、全球暖化使得極端天氣（如：久旱不雨、新歷史高溫等）發生頻率異常上升，原有的全然滅熄林火政策恐不符時宜。因此，除了加強現有的林火防範宣導、防火演練及健全林火通報系統，採取更積極的燃料管理策略實有其必要和急迫性。

另外，從美國終於釋出新（2016）NFDRS可見，發展更完善的監測預警系統一直是林火管理的重點之一。而從本次系統更新項目不難發現，尋求更為簡單、直觀卻仍保有模擬、預測準確度的模式，為未來模式發展趨勢，配合全自動化資料上傳，將林火危險度以天氣預報的方式呈現，達到更即時、貼近生活的目的。🌲