核子事故對全臺劑量評估與事故外釋射源項回推

技術發展

期末報告

委託單位：原子能委員會

受委單位：核能研究所 保健物理組

摘 要

為改進現行境內核子事故劑量評估系統以天氣類型法的氣象資料庫造成的氣象預報的限制，本計畫利用科技部「國際核災輻射塵影響評估技術研究」計畫中，中央氣象局與美國國家海洋與大氣總署NOAA 合作發展的複雜地形區的三維連續變分降尺度系統，最佳化後應用於境內核子事故緊急應變劑量評估系統中。並開發氣象觀測資料同化分析技術，建立三維氣象資料分析能力，使劑量評估系統可兼具已發生之輻射影響評估；並提升濕沉降之計算評估能力，增強乾濕沉降效應的計算精度與能力，增進劑量評估的效能，以建置涵蓋全臺灣之新一代核子事故緊急應變劑量評估系統。

另外，並將已建立之射源項回推技術釋射源項回推技術，發展以量測分析資料及高解析度氣象分析資料為基礎的外釋射源項回推能力，使劑量評估系統可評估已發生的放射性物質外釋結果及預測未影響趨勢。

本年度主要完成核一廠多層巢狀網格降尺度系統之劑量評估系統建置，並利用假想案例分析國內各核電廠在不同季節的擴散趨勢特性，同時進行境內境外劑量評估系統整合介面開發。資料同化部分，引入高空氣象觀測與非傳統氣象觀測資料的測試與校驗。外釋射源項回推則以國內環境輻射監測資料，進行案例分析。為回應 106 年度審查意見，新增劑量評估系統與嚴重核子事故評估系統整合之可行性評估項目。

目 錄

圖目錄

表目錄

1. 計畫目的

本計畫主要目標為利用 104 年開發之射源項回推功能，以事故評估系統之模擬結果作為回推初始條件，套用「即時化高解析度之網格氣象觀測/預報資料」，提升外釋射源項回推之準確度與可信度，使得劑量評估系統可根據環境監測結果用以預測未來的劑量影響趨勢；此外，緊急應變時期偵測取樣之標的，關係到外釋射源項回推之良窳，故採用取樣分析與劑量率量測之選擇與對應之回推應用，也將於本計畫建立規範。同時於本計畫執行期間，亦積極與相關研究機構，進行技術交流，汲取研發經驗與心得，回饋至國內系統開發參考。

本計畫為四年期計畫，規畫工作項目如下：

1. 核子事故劑量評估系統作業運轉維護。
2. 整合境內境外劑量評估系統，簡化系統操作程序，降低維運成本，以具備境內核災對於緊急應變計畫區及全台灣之劑量影響分析能力。
3. 開發並建立氣象觀測資料同化分析技術，使劑量評估系統可同時兼具已發生之輻射影響評估，及預測未來民眾劑量影響趨勢之能力。加速擴散模式運跑效能，提升濕沉降之計算評估能力。
4. 將 104 年開發之射源項回推技術，建立以量測分析資料及高解析度氣象分析資料為基礎的外釋射源項回推能力。並基於射源項回推方法，建立輻射量測與環境取樣分析之需求規範。
5. 結合事故評估專業，研究事故評估系統評估外釋射源項之各項參數條件，擬定最適化之參數設定，建立各電廠嚴重事故射源項外

釋時序與外釋量資料庫。

本年度（107）規畫之各工作項目如下：

1. 完成核三廠區 3 層巢狀網格區(緊急應變計畫區 250 公尺、緊急應變準備區 500 公尺、60 公里範圍 1 公里)降尺度氣象預報系統開發與建置。
2. 完成核一廠 4 層巢狀網格(緊急應變計畫區 250 公尺、緊急應變準備區 500 公尺、60 公里範圍 1 公里及全臺範圍 2.5 公里解析度)之劑量評估系統建置(含操作及顯示系統)，提供核一廠假想事故之劑量評估結果。
3. 進行全臺灣 2.5 公里解析度核子事故模擬評估作業，完成每週選定案例之分析與討論，並統計每日案例對於陸地區域影響之量化分析。
4. 利用觀測資料完成核一廠年度氣象場預報校驗，以進行氣象資料庫類型劑量評估系統之氣象資料庫更新。
5. 完成非傳統氣象觀測資料的氣象資料同化分析技術開發及其測試與校驗。
6. 以本土化射源回推作業程序，進行射源回推自動化系統建置。
7. 辦理系統操作與伺服器端例行運轉之維護訓練。
8. 劑量評估系統與嚴重核子事故評估系統整合之可行性評估。

期中與期末查核點分列如下。

期中：

1. 完成核三廠緊急應變計畫區 250 公尺、緊急應變準備區 500 公尺、60 公里範圍 1 公里解析度之降尺度氣象預報系統建置。
2. 完成核一廠緊急應變計畫區 250 公尺、緊急應變準備區 500 公尺、

60 公里範圍 1 公里及全臺範圍 2.5 公里解析度之劑量評估系統建置。

3. 完成劑量評估系統年度訓練課程。
4. 統計冬春每日案例對於陸地行政區域之影響情況。
5. 完成射源回推自動化系統建置。

期末：

1. 完成核一廠氣象資料庫類型劑量評估系統之氣象資料庫更新。
2. 完成非傳統氣象觀測資料的氣象資料同化分析技術開發。
3. 統計夏秋每日案例對於陸地行政區域之影響情況。
4. 完成射源回推自動化系統案例測試。
5. 完成劑量評估系統與事故評估系統整合可行性評估。

2. 模式簡介

2.1. 劑量評估系統發展歷程

劑量評估系統的開發歷程如圖 2-1 所示，起於民國 85 年全國核子事故處理委員會作業執行室委託核能研究所與中央氣象局合作，所共同開發第一代的三維緊急應變劑量評估系統，如圖 2-2。此套系統利用網路分散處理與遠端控制技術，由於當時無任何高解析（須達公里級以上）的作業化氣象模式可供進行大氣擴散分析，故以氣象資料庫形式，整合研究用之高解析度氣象三維風場預報模式 HOTMAC (Higher Order Turbulence Model for Atmospheric Circulation)，雲團大氣擴散分析 RAPTAD (Random Puff Transport and Diffusion)，以及環境人員輻射劑量評估等專業科技而成的電腦運算系統。在核電廠發生事故啟動緊急應變動員時，可運用此系統，配合氣象局專家主觀之天氣風場預報資料，進行事故發生後未來 4 天內，電廠輻射物質外釋所造成即時劑量率與累積劑量評估分析，預先評估事故災害所可能造成電廠周圍之民眾輻射劑量，提供給緊急應變決策者之重要決策資訊參考。

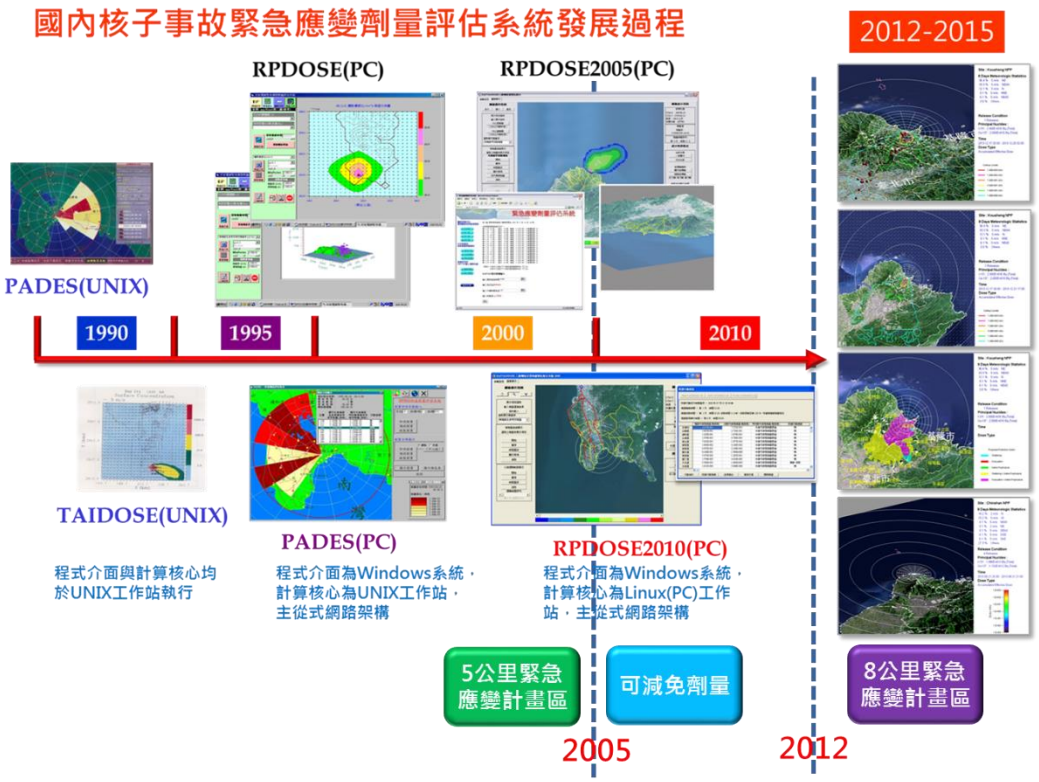


圖 2-1 劑量評估系統發展歷程

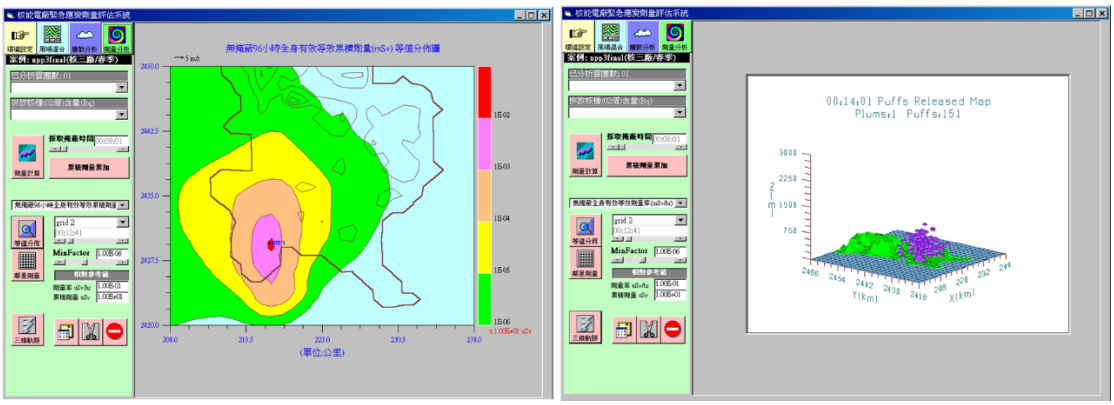


圖 2-2 第一代三維緊急應變劑量評估系統介面

民國 92、93 及 94 年由核研所與氣象局共同開發第二代的三維緊急應變劑量評估系統，進行為期二年半之「核一、二、三廠近指中心劑量評估系統即時化功能建立」，其中氣象資料庫更新擴建計畫之計畫目標為：擴建更真實化的氣象資料庫，並提供緊

急應變劑量評估系統即時的廠區附近之氣象參數預報，主要工作包括: 廠區附近氣象場預報模式更新(Version 4 升級至 Version 7)，氣象模式解析度提高（由原先的 1 公里提升至 250 公尺）、氣象模式所需之地形高度資料全面更新（由原先之 1 公里提升至 100 公尺）、全時氣象特徵參數分析與分類，即時化預報氣象特徵參數輸出及遠端傳輸介面建立，三維氣象場資料庫的運跑及建置等。本系統在氣象風場預報模組之功能上，配合目前更先進的整合網路與大型資料庫存取技術，進行更符合即時預報需求之功能提升，同時進行更詳細的參數切割，建置更全面完整可用的全時風場資料庫（由原先每個廠約 40 組提高至近 900 組）。

另外劑量評估系統人機介面採用高階跨平台程式語言開發，展示介面以衛星影像為底圖，結合數值地形，並引入地理資訊概念，操作介面可讓使用者於圖台上依需求縮放，平移，與旋轉，大幅提升劑量評估結果之資料視覺化功能與操作互動性。如圖 2-3。

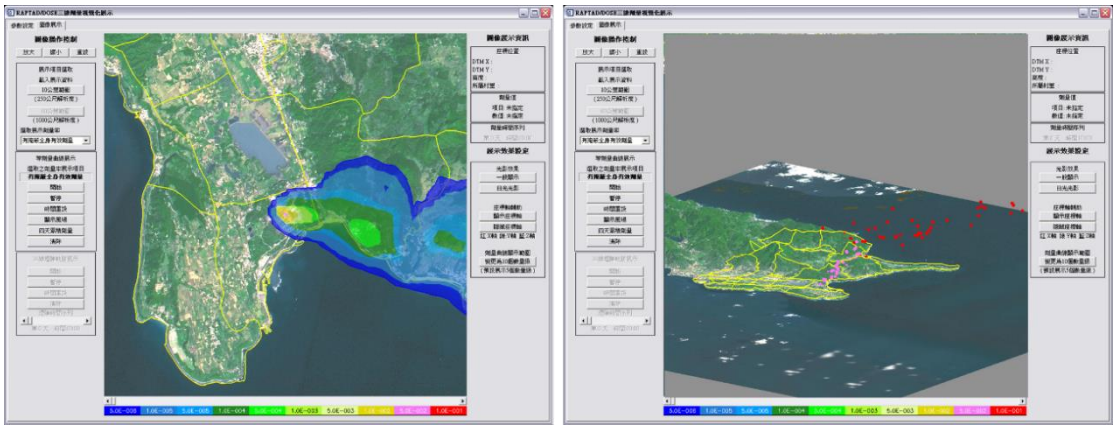


圖 2-3 即時化氣象預報三維劑量評估系統

民國 96 年因應「核子事故緊急應變法」第十四條規定，原能會已於 94 年 7 月 15 日發布「核子事故民眾防護行動規範」並

自發布日起生效。該規範和以往採行之「核子事故民眾防護行動指引」最大不同處是採用可減免劑量新觀念，作為採行防護措施干預基準之依據。為符合新法規之防護措施干預基準的要求，針對劑量評估系統開發符合減免劑量規範之劑量評估模式，同時需增加現有之氣象預報天數，以達到七天疏散減免劑量之評估需求。另依據原能會核技處軟硬體使用維護需求，與考量大氣擴散程式之更新，以高階個人電腦取代 SUN/Solaris 運作平台，故進行程式改寫、轉換與功能測試，以期達成伺服器 PC 化之階段性目標。在圖資方面，以更精細之衛星影像與數值地形進行處理融合，並配合原能會提供之資料，進行村里等資料更新，讓決策者能清楚掌握實際狀況。如圖 2-4。

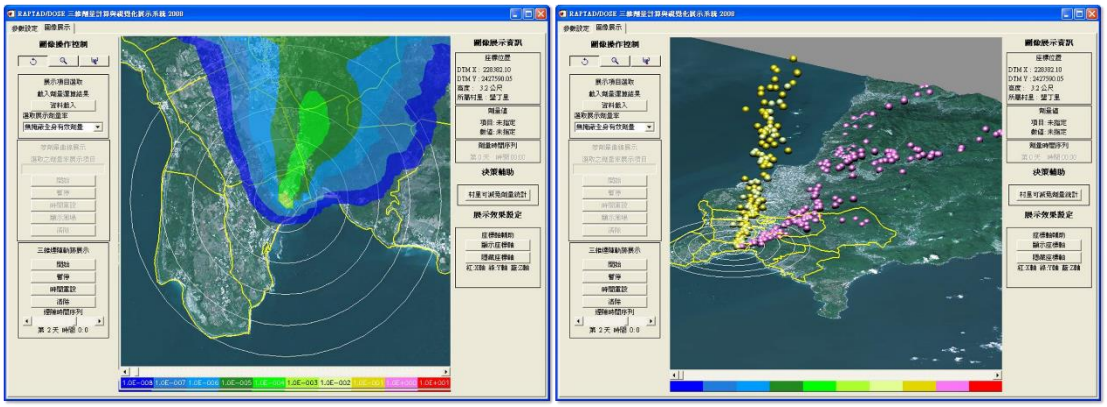


圖 2-4 可減免劑量之劑量評估系統介面

民國 100 年日本發生福島事故後，劑量評估系統使用者介面程式強化與提升地理資訊與資料視覺化效果，如圖 2-5。並於 101 年起至 104 年，因應 311 日本福島核電廠事故，配合緊急應變計畫區擴大，劑量評估系統規格須相對應擴充評估範圍，重新運跑並建置滿足緊急應變計畫區擴大後之氣象資料庫及修改台灣四個核電廠附近地區的 8 天環境氣象預報資訊外，並參酌日本福島

民眾防護措施實施之經驗，精進評估系統氣象模組的準確性，除將原本氣象與大氣擴散模式由 HOTMAC 與 RAPTAD 升級為 A2C (A2Cflow 與 A2Ct&d)，並將高解析度地表利用資料引入 A2C 模組；同時考量氣候變遷因素，利用新的觀測資訊重訂並擴大資料庫的分類，更新後核一、二、三與龍門廠資料庫分別為 1344、1416、1320 與 1412 組；另外亦新增廠區大環境的降水預報資訊，將不同放射性核種分類的乾濕沉降效應，直接引入 A2Ct&d 中，增進劑量評估的效能。

另外以相同之氣象場評估程序，利用 A2C 模式為主軸進行日本福島事故擴散模擬，射源項排放時序係利用日本環境偵測數據與 WSPEEDI 模擬相互比較調整所推估而得，以 3/14 日當天有較大射源排放量的個案為例，比較新一代 A2C t&d 模式與日本 WSPEEDI 模式的模擬結果比較可以得知新一代 A2C t&d 模式在定性與定量上都具有可信度。

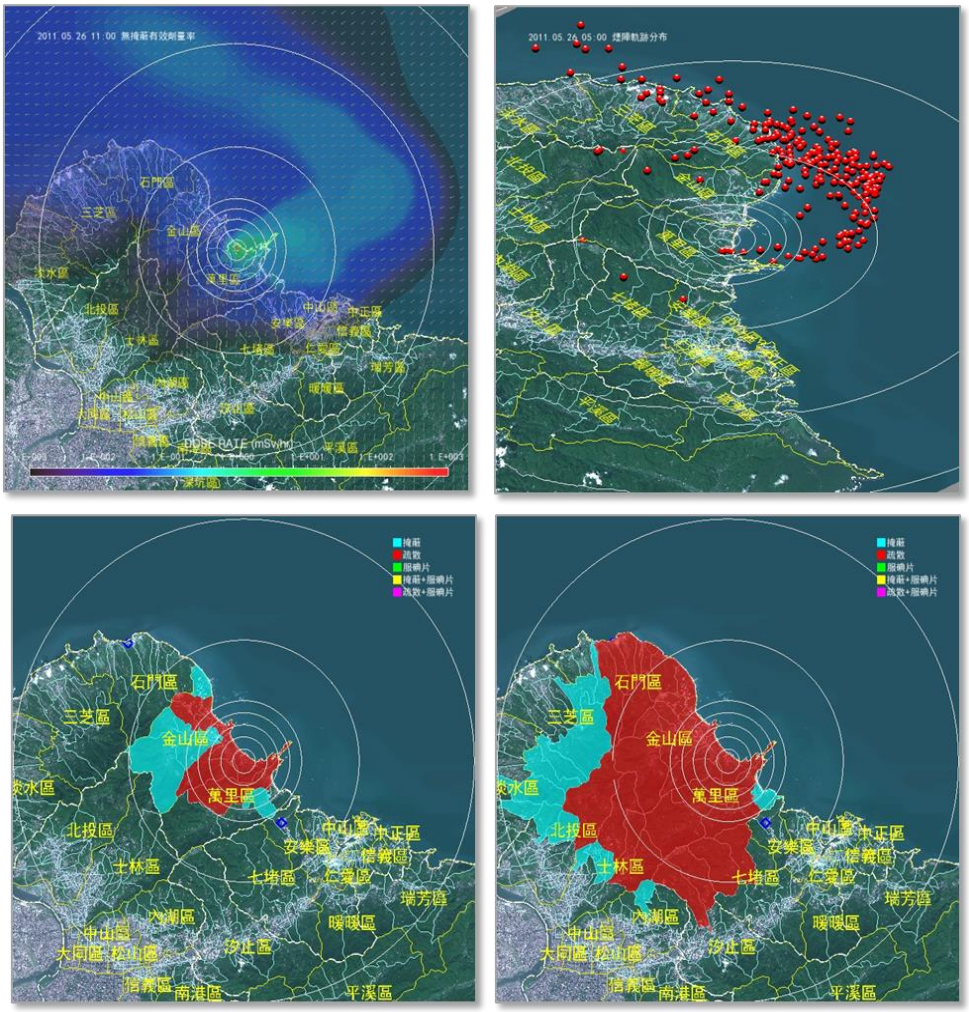


圖 2-5 福島事故後劑量評估系統資料視覺化提升

依據歷年演習經驗與輻防處需求，採用全新思維，重新建立劑量評估系統操作介面(如圖 2-6)，與強化劑量評估結果之二維與三維視覺化顯示功能(如圖 2-7)。視覺化輸出除原靜態(jpg)與動態(gif)圖檔外，增加提供 MPEG4 高畫質之影像輸出格式，與 Google Earth 之 kml 檔案功能，如圖 2-8。

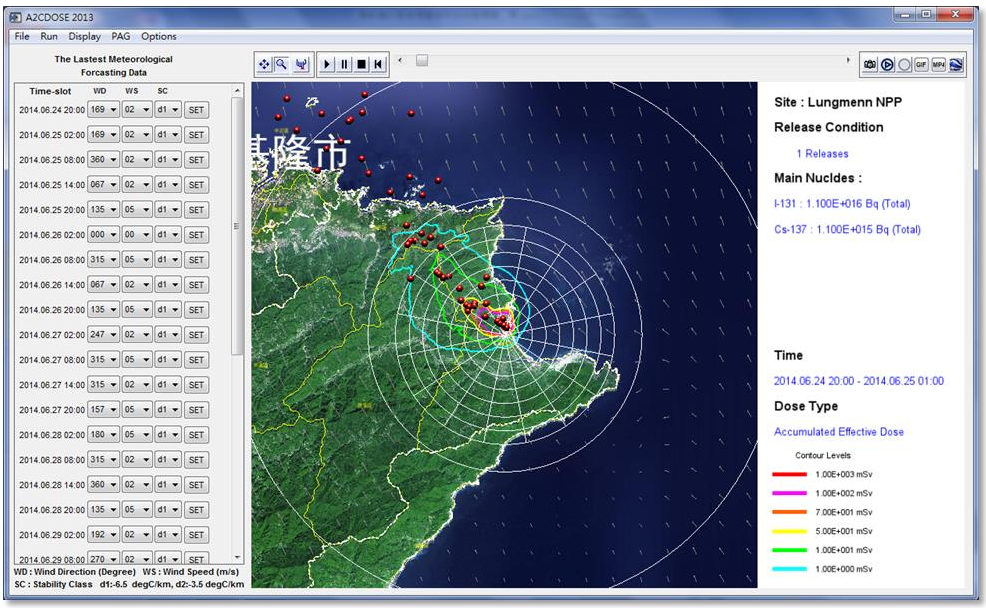


圖 2-6 劑量評估系統 2016 年版介面

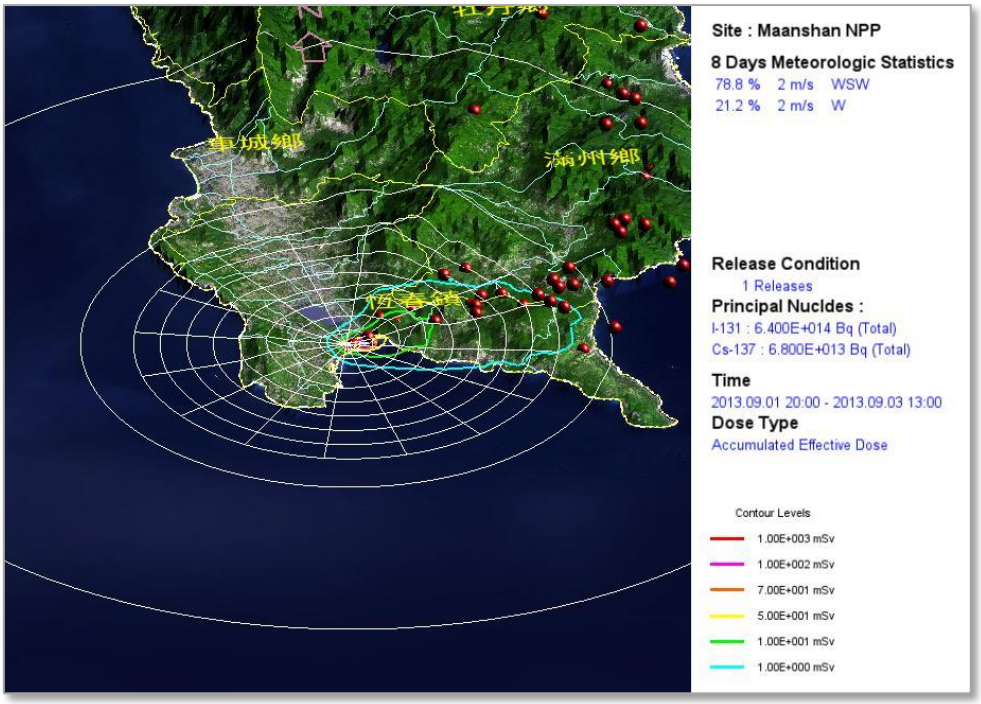


圖 2-7 核三廠三維劑量評估結果顯示

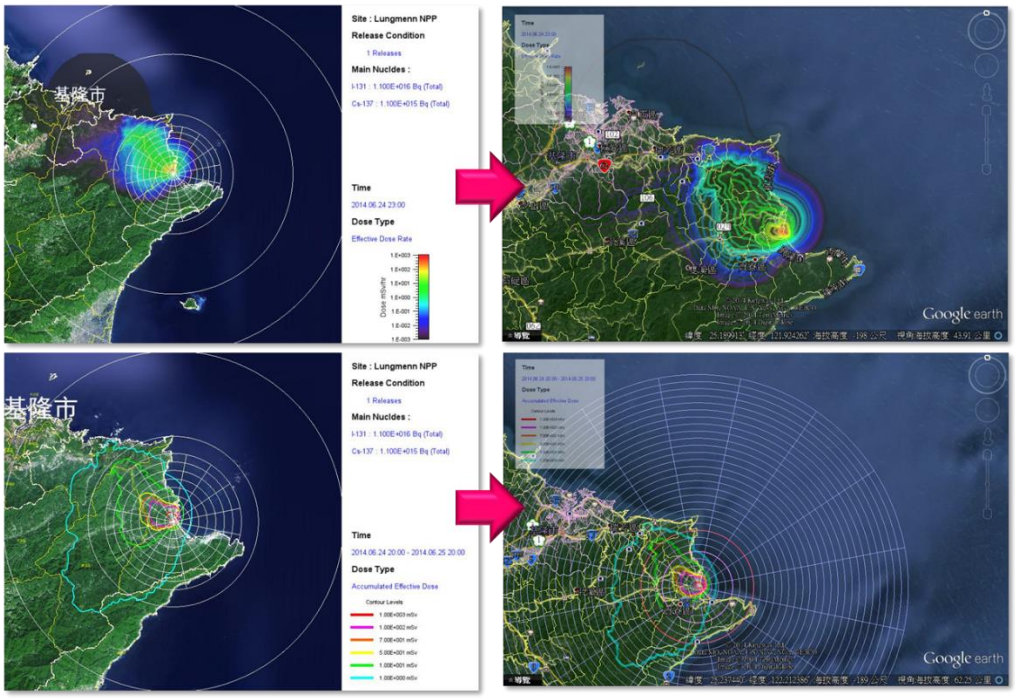


圖 2-8 劑量評估結果輸出 kml 檔案功能建立及結果展示

104 年利用氣象局即時化降尺度氣象預報技術，建立台灣區域 2.5 公里解析度氣象預報場，開發可評估全台灣 2.5 公里解析度之劑量評估系統，並達成多電廠同時發生事故之評估能力，並完成事故期間外釋射源項定量與外釋時序回推之方法建立。此兩項功能為本計畫延續發展之基礎。

劑量評估系統於每 12 小時當氣象局全球預報作業系統執行完後，氣象局核能安全緊急應變系統即時氣象資料系統即馬上開始運作，將台灣四個核電廠附近地區的 8 天環境氣象預報資料，利用網路連線，傳輸至原能會及輻射偵測中心核電廠緊急應變系統劑量評估系統之伺服器內，當這些伺服器接收到氣象預報資料後，配合氣象資料庫系統，即時執行風場混合模組，求取未來 8 天每小時的核電廠附近高解析度三維氣象資訊，以供系統在事故發生時評估事故災害所可能造成電廠周圍民眾輻射劑量多寡。

當事故發生或平常演練時，劑量評估人員可透過本系統建立

的操作介面，透過全自動更新氣象預報資訊，或經由使用者自行調整設定預測風場，利用網路連線遠端高效能之伺服器，進行結合數值地形之三維小尺度大氣擴散模式之分析計算，再將結果計算放射性外釋雲團之網格劑量，同時可經由各項參數之設定，執行可減免劑量結果，與採行防護行動措施建議時間之評估計算，提供三維圖像化與文字介面之輸出結果，以供決策者參考使用。

現行以天氣類型法的氣象資料庫的氣象預報，是以假設計算範圍內氣象條件相同且無雲雨產生的狀態下，以高解析度模式模擬太陽輻射及地形與地表狀態產生的變化為主，故其僅適用於氣團型天氣狀況的小區域範圍。當計算範圍擴大、氣象條件變化較大、範圍內氣象條件差異較大時或範圍內存在雲雨系統時，此方法的適用性則有審慎考量的空間。以此方法應用在日本福島事件初期（3 月 12 日至 3 月 16 日）的結果來看，整體而言（3 月 15 日除外），在不考慮天氣類型分類的誤差下，現行之劑量評估系統得到的結果因 A2Cflow 氣象模式對海陸風環流的模擬強度較實際為強，導致外釋的放射性物質主要傳輸方向較實際更偏向內地或海上（較偏東西向），角度大致差 10 度左右。但在 3 月 15 日時，當天有一鋒面系統靠近，伴隨著條狀的降雨系統，在鋒面帶上為氣流輻合區，因為氣流輻合及降雨的影響，外釋的放射性物質很難越過鋒面帶到更西北的地方，但在現行天氣類型法的計算結果，因無考慮氣象條件在範圍內的變化，使得外釋的放射性物質能帶到西北地方並穿越山區到達日本西部海面，就算考量濕沉降的效應，僅僅是在降雨區的沉降量增加，傳輸的方向及形狀並沒有太大的差異。

為改進現行境內核子事故劑量評估系統以天氣類型法的氣

象資料庫造成的氣象預報的限制(無法滿足較大範圍及天氣變化較劇烈的情況)，利用科技部「國際核災輻射塵影響評估技術研究」計畫中，中央氣象局與美國國家海洋與大氣總署 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) 下之 GSD (Global System Division) 合作發展的複雜地形區的三維連續變分降尺度系統 (Mesoscale Dynamic Downscaling System, MDDS)，最佳化後應用於境內核子事故緊急應變劑量評估系統中。並開發氣象觀測資料同化分析技術，建立三維氣象資料分析能力，使劑量評估系統可兼具已發生之輻射影響評估；並提升濕沉降之計算評估能力，增強乾濕沉降效應的計算精度與能力，增進劑量評估的效能，以建置涵蓋全臺灣之新一代核子事故緊急應變劑量評估系統。

根據福島事故後之檢討，在缺乏外釋射源項之情況下，劑量評估系統將無法提供有效資訊，作為決策參考依據。因為不同之外釋時間與外釋量，對於擴散污染分布結果可能大不相同。由日本之經驗，雖然福島事故期間依照事故發展狀況(如氫爆或二號機大量外釋等)，隨時利用單位外釋量以 SPEEDI 進行模擬，即使預測出高污染區域與觀測結果具一致趨勢，然因缺乏絕對數值佐證，致使當時日本政府無法利用評估結果作出任何決策判斷。

故福島事故後，國際間均在尋求可於事故期間獲取外釋射源項之方法，而利用環境偵測資料配合大氣擴散模擬回推外釋量與外釋時序，為目前國際間共同之因應對策並致力精進之技術，主要如日本 WSPEEDI，美國 NARAC、RASCAL，歐洲 RODOS、ARGOS，英國 NAME 等劑量評估與決策系統，都投入以偵測資料達成外釋射源項回推之研發議題。

2.2. 降尺度系統 (CWB/MDDS)

有別於過去核一、二、三廠緊急應變劑量評估系統，運用由 A2Cflow 透過統計的方式所建立的天氣類型資料庫，並藉由 CWB/GFS 在各個核電廠的八天預報資訊，自動挑選使用的天氣類型，並經由時間混和內插，產生供 A2C 擴散模式使用的氣象場資料；在新一代核子事故緊急應變劑量評估系統中，則是建置了全真化的即時氣象應用資料庫 (real-MAD)，包含美國及氣象局的作業化全球模式預報資料 (NCEP/GFS 及 CWB/GFS)、氣象局作業化區域模式 (CWB/WRF) 的預報資料，以及因應緊急應變劑量評估系統開發的不同範圍與解析度的動力降尺度系統 (CWB/MDDS)，每日定時進行即時的分析與整合處理，使得發生核電廠事故時，大氣擴散模式可即時（最近時間） 運用氣象預報資料進行模擬並評估對台灣的影響，爭取在最短的時間內掌控更佳的即時資訊。

目前 NCEP/GFS 與 CWB/GFS 的資料均為每天 4 次預報資料 (00、06、12、18 UTC)，其水平解析度分別為 0.5 及 0.375 度經緯度（在台灣附近約為 55 及 40 公里），預報時間長度均取預報準確度較高的前 8 天，每 3 或 6 小時輸出氣象模式預報資料。

目前 CWB/WRF 的資料亦為每天 4 次預報資料，其為 3 層巢狀網格（水平解析度分別為 45、15、5 公里），範圍分別涵蓋東亞、東南亞及台灣附近區域（如圖 2-9），預報時間長度為 84 小時，每小時輸出氣象模式預報資料。

CWB/MDDS 的開發與建置的目的是提供緊急應變劑量評估系統所需的較長時間且較高解析度的氣象預報資訊。目前在新一代核子事故劑量評估系統中，已進行每日 4 次的全臺灣 2.5 公里

解析度（範圍如圖 2-9 所示）的 CWB/MDDS T2.5 作業化 8 天氣象預報場輸出。在本計畫中將利用 CWB/MDDS 的方法，進行核一、二、三廠 1 公里、0.5 公里及 0.25 公里解析度的氣象預報降尺度分析系統建置。

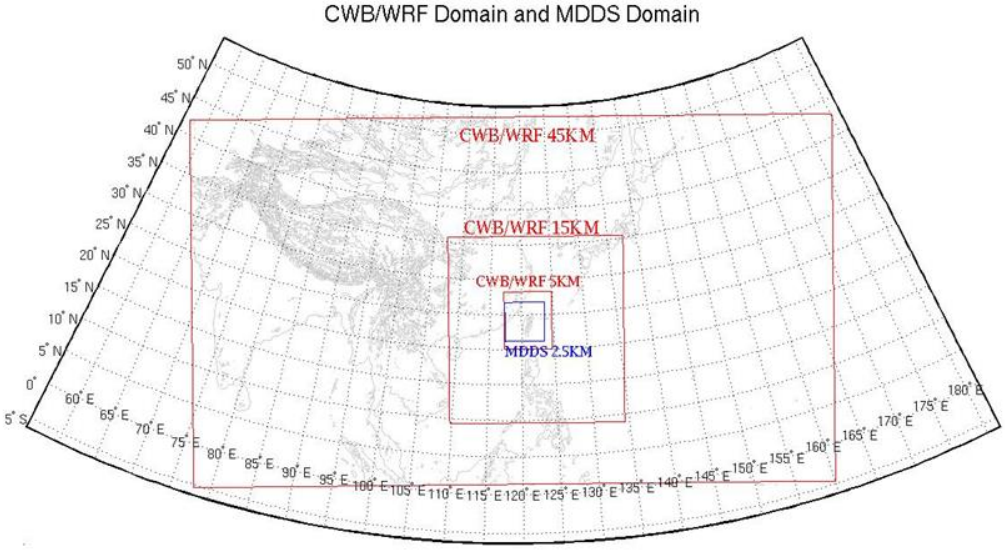


圖 2-9 CWB/WRF 不同解析度所包含的範圍及 MDDS 高解析度氣象資訊之範圍。紅色方框為 CWB/WRF，藍色方框為 MDDS 2.5 公里解析度範圍

MDDS (Mesoscale Dynamic Downscaling System) 為中央氣象局與美國國家海洋與大氣總署 (NOAA) 下之 GSD (Global System Division) 合作發展的複雜地形區的三維連續變分降尺度系統。

降尺度指的是將解析度較粗糙的資料提升其解析度而得到較精細的資訊：小尺度天氣變數以大尺度天氣作為背景，並受局部下墊面特徵，例如地形、離海岸的距離、土地利用等影響，經由降尺度方法以提高其解析度(Grotch et al., 1991)。降尺度方法常

運用在氣候上的議題，由全球尺度的一般環流模式 (GCM) 結果得到區域尺度的現象。降尺度方法分三種：統計降尺度、動力降尺度以及兩種方式混和的統計動力混合降尺度 (Murphy et al., 1999)。

統計降尺度方法主要概念是建立大尺度模式（如 GCM)或再分析網格點資料和氣象觀測值兩者之間的統計關係式(Von Storch et al., 1993; Wilby et al., 2004)。以簡單的式子可描述為 R=F(X)，R 為大尺度網格點資料稱為預報因子 (predictor)，X 是欲降尺度的變數，此處為氣象觀測值稱為預報變量 (predictand)，兩者的經驗關係式 F 透過統計方法建立，以解釋網格點間的氣象變化 (Fowle et al., 2007)。在某給定範圍中，大氣變量與預報變量有越高的相關程度，越適合選作預報因子 (Kang et al., 2007)。最廣泛使用的統計降尺度方法為回歸模式 (regression model)，回歸模式中利用的統計方法有線性回歸、典型相關分析 (Canonical Correlation Analysis, CCA) (Bürger et al., 1996)、類神經網路 (artificial neural networks, ANN) (Cavazos et al., 2005)、主成分分析 (Principal Component Analysis, PCA)、奇異值分解 (Singular Value Decomposition, SVD) (Huth et al., 1999) 等，這些方法利用歷史觀測資料來做統計訓練 (statistically-trained)，以求建立預報因子和預報變量之間的關係式。PCA、SVD、CCA 皆屬於多變量分析方法，指分析多個變數的資料，探討資料彼此之間的關聯性或是釐清資料的結構。PCA 及 SVD 原理皆是經由線性轉化將變數分解為主分量（時間序列）與特徵向量（空間分布），得到相對較顯著且彼此互相獨立的主成分分數，以解釋觀測資料中的大部分資訊。CCA 則是利用兩組變數，分別對這兩組變數各做

線性組合後，再計算兩組變數加權和的簡單相關係數，然後以這個簡單相關係數當做這兩組變數之間相關性的衡量指標。ANN 是一種模仿生物神經網路的結構和功能的計算模型，為一自適性 (adaptive) 系統，利用輸入變數和輸出變數間複雜的關係進行建模。此外還有在國際間廣泛被使用的套裝軟體模式 SDSM (Statistical DownScaling Model)，結合序率天氣繁衍 (stochastic weather generator) 模式以及回歸模式 (Wilby et al., 2002)，常作為評估氣候變遷衝擊之工具。SDSM 中的天氣繁衍模式，使用了環流 pattern 跟水氣變量去決定局部的天氣變數，再利用統計方法實行了誤差校正 (bias correction) 和變數膨脹(variance inflation) 的技術，減少了計算時的標準誤差且可以增加模式解釋的變量，達到最佳的降尺度表現。

而動力降尺度方法是用多組方程式和大氣中的各種物理過程（如輻射驅動力、積雲參數化等）做時間積分，經由時間平均後的結果 (Barnston et al., 1999)。廣義來說，根據物理基礎將大尺度氣象特徵解析為小尺度的區域氣象變數就稱為動力降尺度。而常用作法是利用 GCM 或 AGCM(Atmospheric General Circulation Model，大氣一般環流模式)的區域結果作為初始場及邊界條件，使用物理基礎建構的 LAM (limited-area model)、區域氣候模式 (RCM) 或區域大氣模式系統 (RAMS) 進行高解析度數值模擬，考量區域之地形地貌等因素，而得到小尺度的天氣現象及區域性的氣象特徵 (Giorgi et al., 2001)，如地形降雨 (Frei et al., 2003)、極端氣候事件 (Fowler et al, 2007) 等非線性效應事件。利用區域模式降尺度之分析結果，必須與 GCM 再分析資料的大尺度資訊之特徵有一致性，因此需要測試不同的區域模式，選擇

適合的為最佳降尺度工具。動力降尺度的表現對於選定區域大小、水平解析度、地形、地表利用等變數非常敏感，因此在不同的區域模式模擬比較測試動力降尺度的結果是有必要性的 (Xue et al., 2007)。

統計降尺度優點在於計算資源的需求相對較少且方法也較簡易，但結果通常對極端事件表現得不理想，其模擬的結果無法顯示氣候的物理過程、並且缺少適當的物理解釋，用來作為預報時需要假設未來氣候特徵是統計穩定的，而這個假設一般無法滿足也無法證明。動力降尺度方法優點在於包含大氣的物理及動力過程為基礎，對於模擬的結果能以物理機制做適當的解釋，但是計算耗時，而且需要大量的模式輸出儲存空間。

台灣是一個多山的海島，五大山脈（雪山山脈、中央山脈、玉山山脈、阿里山山脈及海岸山脈）縱貫全島，地勢高於 3000 公尺的山脈有 100 座以上，最高峰玉山高度幾近 4000 公尺。在如此複雜的地形影響下，降尺度方法是否考慮地形的效應就決定了其結果的可信度。在複雜地形區的降尺度方法最簡便的即是利用區域數值模式的動力降尺度法，但此方法會面臨所有數值模式的極限，諸如初始場產生的模式調整問題 (spin up problem)、模式動力及物理參數化問題等等。而在統計降尺度中，以 fingerprint method 將地形高度對氣象場的理想分布特性作為其方法的權重函數 (Steincker et al., 2006)，可得到複雜地形區內較好的氣象場分布，但此方法僅適用於單一的純量氣象變數，對向量變數（風場）並不適用，且不同氣象變數間並無任何的物理關係存在。

MDDS 是試圖解出靜態下因複雜地形產生的氣象場變化，所發展出一適合複雜地形區的新三維連續變分中尺度動力降尺度

系統。MDDS 利用追隨地勢座標的純控制方程三維變分法，其包含較完整的中小尺度氣象物理方程式為變分法的控制方程，使其結果在不同氣象變數間有相當大程度滿足所使用的控制方程式。利用三維變分法的特性，MDDS 可以快速解析出高解析度下受地形影響的氣象場特性，且消耗較少的計算資源。

考慮僅以動量方程、連續方程、熱力方程及水汽保守方程為控制方程的純三維變分，其價值函數可寫為：

$$J=\iiint(\alpha_1 P_1^2+\alpha_2 P_2^2+\alpha_3 P_3^2+\alpha_4 P_4^2+\alpha_5 P_5^2+\alpha_6 P_6^2+\alpha_7 P_7^2)\,d\Omega$$

其中 P_n 為各項控制方程，包含三個方向的動量方程（P_1 到 P_3）、連續方程（P_4）、熱力方程（P_5）、水汽保守方程（P_6）及所有氣象變數的平滑懲罰項（P_7），α_n 為各控制方程項的權重。

$$P_1=R_d p_{00}^{-\kappa}\left(\bar{\theta}_v+\theta_v'\right)\left(\bar{p}+p'\right)^{\kappa-1}\left(\frac{\partial p'}{\partial X}+\frac{J_1}{J_3}\frac{\partial p'}{\partial \eta}\right)+\left(u\frac{\partial u}{\partial X}+v\frac{\partial u}{\partial y}+\dot{\eta}\frac{\partial u}{\partial \eta}\right)-fv$$

$$P_2=R_d p_{00}^{-\kappa}\left(\bar{\theta}_v+\theta_v'\right)\left(\bar{p}+p'\right)^{\kappa-1}\left(\frac{\partial p'}{\partial y}+\frac{J_2}{J_3}\frac{\partial p'}{\partial \eta}\right)+\left(u\frac{\partial v}{\partial X}+v\frac{\partial v}{\partial y}+\dot{\eta}\frac{\partial v}{\partial \eta}\right)+fu$$

$$P_3=\frac{R_d p_{00}^{-\kappa}\theta_v p^{\kappa-1}}{J_3}\frac{\partial p'}{\partial \eta}+\left(u\frac{\partial J_3\dot{\eta}}{\partial X}+v\frac{\partial J_3\dot{\eta}}{\partial y}+\dot{\eta}\frac{\partial J_3\dot{\eta}}{\partial \eta}\right)-\left(u\frac{\partial J_1 u}{\partial X}+v\frac{\partial J_1 u}{\partial y}+\dot{\eta}\frac{\partial J_1 u}{\partial \eta}\right)-$$
$$\left(u\frac{\partial J_2 V}{\partial X}+v\frac{\partial J_2 V}{\partial y}+\dot{\eta}\frac{\partial J_2 V}{\partial \eta}\right)-\frac{(\kappa-1)g}{\bar{p}}p'-\frac{g}{\bar{\theta}_v}\theta'$$

$$P_4=(1-\kappa)p^{-1}\left(u\frac{\partial p'}{\partial X}+v\frac{\partial p'}{\partial y}+\dot{\eta}\frac{\partial p'}{\partial \eta}\right)-\frac{(1-\kappa)p^{-1}g}{R_d\bar{\theta}_v p_{00}{}^{-\kappa}\bar{p}^{\kappa-1}}\left(J_3\dot{\eta}-J_1 u-J_2 v\right)$$
$$+\left(\frac{\partial u}{\partial X}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial \dot{\eta}}{\partial \eta}-\frac{u}{J_3}\frac{\partial J_1}{\partial \eta}-\frac{v}{J_3}\frac{\partial J_2}{\partial \eta}+\frac{\dot{\eta}}{J_3}\frac{\partial J_3}{\partial \eta}\right)$$

$$P_5=u\frac{\partial \theta_v'}{\partial X}+v\frac{\partial \theta_v'}{\partial y}+\dot{\eta}\frac{\partial \theta_v'}{\partial \eta}+\frac{1}{J_3}\left(J_3\dot{\eta}-J_1 u-J_2 v\right)\frac{\partial \bar{\theta}_v}{\partial \eta}$$

$$P_6=u\frac{\partial q_v'}{\partial X}+v\frac{\partial q_v'}{\partial y}+\dot{\eta}\frac{\partial q_v'}{\partial \eta}+\frac{1}{J_3}\left(J_3\dot{\eta}-J_1 u-J_2 v\right)\frac{\partial \bar{q}_v}{\partial \eta}$$

其中 u、v、$\dot{\eta}$ 為三個方向的風速，p 為壓力，θ_v 為虛位溫，q_v 為水汽混合比，J_n 為三個方向之座標轉換因子，$p=\bar{p}(z)+p'$，

$\theta_v = \bar{\theta}_v(z) + \theta_v'$ ， $q_v = \bar{q}_v(z) + q_v'$ ， $R_d = 287\, Jk_g^{-1}K^{-1}$ 為乾空氣氣體常數，$p_{00} = 10^5$ 帕為參考壓力值，$g = 9.8\, s^{-2}$ 為重力加速度，$\kappa = 0.287$ 。為減少變數及控方程式的數量，故以狀態方程式取代各式中的密度項，可使各控制方程式包括較多氣象變數，增加變分求解時的穩定性。

考慮追隨地勢座標，其垂直座標定義為：

$$\eta = \frac{z_t(z - z_g)}{z_t - z_g}$$

其中 z_g 為地表高度，z_t 為模式頂高度。在此定義下，三個方向的座標轉換因子可寫為：

$$J_1 = \frac{\eta - z_t}{z_t}\frac{\partial z_g}{\partial x}$$

$$J_2 = \frac{\eta - z_t}{z_t}\frac{\partial z_g}{\partial y}$$

$$J_3 = \frac{\partial z}{\partial \eta} = \frac{z_t - z_g}{z_t}$$

Xie et al. (2011) 提出連續變分法進行資料同化分析，利用一個高度非線性的，多尺度解析函數，模擬經常與鋒面或強對流下沖氣流外流相關聯的複雜現象的理想化試驗數據進行連續變分法分析，並與傳統的客觀分析或現行的變分分析進行比較，且測試了遞歸濾波，小波，及多網格方式決定變分法中的誤差協方差矩陣，雖然不同的誤差協方差矩陣方式對連續變分法分析的結果有些細微差異，但每個捕獲的風暴邊界的主要波長由大至小均優於現行變分分析或 Barnes 在相同條件下的客觀分析結果（如圖 2-10）。證實此方法在各種情況下均能提供良好的分析。在此我們也利用此方式進行降尺度的分析，在同一個分析範圍內，先在網格距較大的情況下解出上述的價值函數最小值，得到此網距可解

析的尺度現象，在以此為下一個較小網格距（其網格距比通常為1/2）求解的初始值，如此反覆得到最終的最小網距的分析資料。

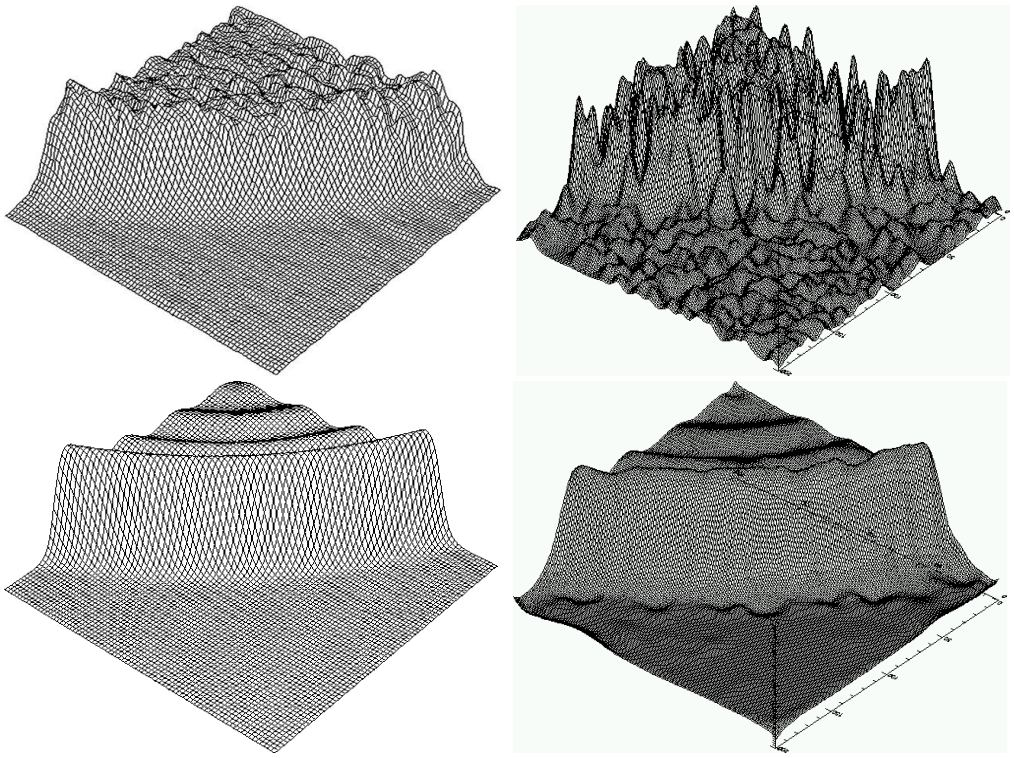


圖 2-10 利用多重尺度之複雜現象的理想化試驗數據進行不同資料同化（或客觀分析）的比較。上圖左為 Barnes 方法、上圖右為現行的 3DVAR 方法、下圖左為理想化試驗數據圖、下圖右為連續變分方法

2.3. A2C (Atmosphere to Computational fluid dynamic) 模式介紹

在大氣部分 (A2Cflow)，為能模擬非均勻地形並易於處理地表邊界條件，本模式垂直方向採用 (Mahrer and Pielke, 1975) 所定義之地形座標：

$$z^* = \overline{H}\frac{z - z_g}{H - z_g}$$

其中 z^*，z 分別為轉換後及卡氏座標下的垂直座標。式中 z_g 為地表高度，$\overline{H}$ 為 z^* 座標下的模式頂高度，H 為 z 座標下的模式頂高度。在模式頂，兩種座標（z^* 及 z 座標）之座標面為相同的水平面。

模式中基本控制方程式包括 x 方向(東西方向)及 y 方向(南北方向）之動量方程、連續方程、亂流動能方程、亂流長度尺度方程、熱力及水汽混合比方程等，分別敘述如下：

東西方向動量方程：

$$\frac{dU}{dt} = f(V - V_g) + g\frac{\overline{H} - z^*}{\overline{H}}\left(1 - \frac{\overline{\theta_v}}{\theta_v}\right)\frac{\partial z_g}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\left(K_x\frac{\partial U}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_{xy}\frac{\partial U}{\partial y}\right) + \frac{\overline{H}}{H - z_g}\frac{\partial}{\partial z^*}\left(-\overline{uw}\right)$$

南北方向動量方程：

$$\frac{dV}{dt} = f(U - U_g) + g\frac{\overline{H} - z^*}{\overline{H}}\left(1 - \frac{\overline{\theta_v}}{\theta_v}\right)\frac{\partial z_g}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}\left(K_{xy}\frac{\partial V}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_y\frac{\partial V}{\partial y}\right) + \frac{\overline{H}}{H - z_g}\frac{\partial}{\partial z^*}\left(-\overline{vw}\right)$$

連續方程：

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W^*}{\partial z^*} - \frac{1}{H - z_g}\left(U\frac{\partial z_g}{\partial x} + V\frac{\partial z_g}{\partial y}\right) = 0$$

其中 z^* 座標下之垂直速度（W^*）可寫為：

$$H - z_g \qquad H - z_g \left(\partial x \qquad \partial y \right)$$

上幾式中，大寫表示總集平均值，小寫表示對平均值的擾動量，U、V 為 x 及 y 方向平均風速，U_g、V_g 為 x 及 y 方向地轉風，g 為地球重力加速度，θv 為虛位溫，W 為 z 座標下之垂直速度。

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + U\frac{\partial}{\partial x} + V\frac{\partial}{\partial y} + W^*\frac{\partial}{\partial z^*}$$

為全微分，K_x、K_{xy} 及 K_y 為水平渦流黏滯係數。在動量方程中之等號右邊第一項為科氏力造成的加速度項，第二項為地形效應項，第三及第四項為水平渦流黏滯力項，第五項為亂流項。

亂流動能方程式如下：

$$\begin{aligned}\frac{d}{dt}\left(\frac{q^2}{2}\right) &= \frac{\partial}{\partial x}\left[K_x\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{q^2}{2}\right)\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[K_y\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{q^2}{2}\right)\right] \\ &+ \left(\frac{\overline{H}}{H - z_g}\right)^2\frac{\partial}{\partial z^*}\left[qlS_q\frac{\partial}{\partial z^*}\left(\frac{q^2}{2}\right)\right] \\ &- \frac{\overline{H}}{H - z_g}\left(\overline{uw}\frac{\partial U}{\partial z^*} + \overline{vw}\frac{\partial V}{\partial z^*}\right) + \beta g\overline{w\theta_v} - \frac{q^3}{B_1 l}\end{aligned}$$

在上式中，等號右邊第一至三項為亂流動能的傳送項，此傳送假設為順梯度擴散，第四項為風切產生項，第五項為浮力項，第六項為動能消散項。$q^2 = \overline{u^2} + \overline{v^2} + \overline{w^2}$ 、$\overline{w\theta_v}$ 為亂流熱通量。

亂流長度尺度 l 可利用下式求得：

$$
\begin{aligned}
\frac{d}{dt}\left(q^2 l\right) &= \frac{\partial}{\partial x}\left[K_x \frac{\partial}{\partial x}\left(q^2 l\right)\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[K_y \frac{\partial}{\partial y}\left(q^2 l\right)\right] \\
&+ \left(\frac{\overline{H}}{H - z_g}\right)^2 \frac{\partial}{\partial z^*}\left[q l S_l \frac{\partial}{\partial z^*}\left(q^2 l\right)\right] \\
&- l F_1 \left[\frac{\overline{H}}{H - z_g}\left(-\overline{uw}\frac{\partial U}{\partial z^*} - \overline{vw}\frac{\partial V}{\partial z^*}\right) + \beta g \overline{w\theta_v}\right] \\
&- \frac{q^3}{B_1}\left[1 + F_2\left(\frac{l}{kz}\right)^2\right]
\end{aligned}
$$

在上式中，等號右邊第一至三項為傳送項，此傳送假設為順梯度擴散，第四項為風切產生項與浮力項，第五項為消散項，其中 F_1 、F_2 、S_q 、S_l 及 B_1 為從實驗所得之經驗常數，其值分別為 1.8、1.33、0.2、0.2 及 16.6。

熱力及水汽混合比方程式如下：

$$
\begin{aligned}
\frac{d\delta\theta}{dt} &= \frac{\partial}{\partial x}\left(K_x \frac{\partial \delta\theta}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_y \frac{\partial \delta\theta}{\partial y}\right) \\
&+ \frac{\overline{H}}{H - z_g}\left[\frac{\partial}{\partial z^*}\left(-\overline{w\theta}\right) + \frac{1}{\rho C_P}\frac{\partial R_N}{\partial z^*} - W\frac{\partial \theta_v}{\partial z}\right]
\end{aligned}
$$

$$
\frac{dq_v}{dt} = \frac{\partial}{\partial x}\left(K_x \frac{\partial q_v}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_y \frac{\partial q_v}{\partial y}\right) + \frac{\overline{H}}{H - z_g}\frac{\partial}{\partial z^*}\left(-\overline{wq_v}\right)
$$

在上兩式中，等號右邊第一、二項為水平渦流黏滯項，第三項在熱力方程式中包含亂流項、輻射通量項及環境溫度垂直平流項，在水汽混合比方程式中為亂流項。

方程式中之亂流通量，由簡化的二階亂流閉合方程得到 (Yamada, 1983)：

$$
\left(\overline{uw}, \overline{vw}\right) = -l\tilde{S}_M\left(\frac{\partial U}{\partial z}, \frac{\partial V}{\partial z}\right)
$$

$$
\left(\overline{w\theta}, \overline{wq_v}\right) = -\alpha l q\tilde{S}_M\left(\frac{\partial \theta}{\partial z}, \frac{\partial q_v}{\partial z}\right)
$$

其中$\tilde{S}_M$及α是通量理查遜數 (flux Richardson number) 的函數。$\alpha \equiv K_H/K_M$為亂流普朗多常數的倒數，其中K_H及K_M為渦流擴散及黏滯係數。$\tilde{S}_M$及α可由 Mellor and Yamada (1974) 之 level 2 模式中得到。此求法為亂流動能方程式中忽略動能的全微分項和亂流動能的傳送項，為風切產生項、浮力項及動能消散項之平衡。

A2Cflow 模式主要預報的變數為水平風場 (U, V)、亂流動能 q^2、亂流長度尺度 l、溫度擾動$\delta\theta$及水汽混合比 q_v。利用有限差分的方法將這些預報方程寫成有限差分式，積分是採用內隱式法 (Alternating Direction Implicit method, ADI)，積分間距則滿足 CFL (Courant-Friedrich-Lewy) 之穩定條件標準。ADI 法在時間及空間微分是具有無條件性穩定及二階準確。

為增加有限差分法的準確性，網格點上平均及擾動場之變數在水平及垂直方向均採交錯網格配置。由於風場、溫度場及水汽場在靠近地面往上之變化非常快，因此垂直方向採用非均勻網格間距。

在煙流擴散 (A2Ct&d) 方面，模式採用 KDE (Kernel Density Estimation) 法，即將連續排放源，切割成無數的物質粒子，各粒子以某一間隔時間釋放出來，經環境風場飄送與擴散，形成許多大小不同的煙陣 (puff)，每一粒子即為一煙陣的中心。模式利用蒙地卡羅統計法 (Monte Carlo Statistical Method) 計算煙陣 (puff) 的傳送。煙陣質點在Δt後的位置$x_i(t+\Delta t)$由下式計算：

$$x_i(t+\Delta t) = x_i(t) + U_{pi}\Delta t$$

其中U_{pi}為質點x_i方向的速度，且$U_{pi} = U_i + u_i$，U_i為平均速度，

u_i 為亂流速度。

$$u_i(t+\Delta t) = au_i(t) + b\,\sigma_{ui}\zeta + \delta_{i3}(1-a)t_{Lx_i}\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\sigma_{ui}^2\right)$$

$$a = \exp\left(-\Delta t/t_{Lx_i}\right)\ ,\ b = \left(1-a^2\right)^{0.5}$$

上式 ζ 是以一個標準偏差及零平均值之高斯分布的隨機變數，t_{Lx_i} 是速度 u_i 的拉氏積分時間尺度 (Lagrangian integral time scale)，σ_{ui} 是速度 u_i 變化的標準偏差，δ_{i3} 是 Dirac delta，U_i 和 σ_{ui} 則由氣象模式計算而得。

在煙流濃度中，考慮地表反射下，利用高斯分布去模擬每一煙陣的濃度，則某一空間點的濃度為所有煙陣質點濃度影響的加總，在點 (X,Y,Z) 的濃度可以下式表示：

$$\chi(X,Y,Z) = \frac{Q\Delta t}{(2\pi)^{3/2}}\sum_{k=1}^{N}\frac{1}{\sigma_{xk}\sigma_{yk}\sigma_{zk}}\exp\left[-\frac{1}{2}\frac{(x_k-X)^2}{\sigma_{xk}^2}\right]\times$$
$$\exp\left[-\frac{1}{2}\frac{(y_k-Y)^2}{\sigma_{yk}^2}\right]\times\left\{\exp\left[-\frac{1}{2}\frac{(z_k-Z)^2}{\sigma_{zk}^2}\right]+\right.$$
$$\left.\exp\left[-\frac{1}{2}\frac{(z_k-Z-2z_g)^2}{\sigma_{zk}^2}\right]\right\}$$

其中 (x_k,y_k,z_k) 是 k 質點的位置，σ_{xk} ，σ_{yk} 和 σ_{zk} 是高斯分布的標準偏差，可利用 Yamada and Bunker (1988) 的方法計算。

2.4. 劑量評估系統說明

劑量評估系統主要分為幾個部分，氣象場部分、大氣擴散、沉降、劑量計算。新一代劑量評估系統直接使用作業化的預報資料，以及經過降尺度系統處理過後之氣象資料，以取代以往所使用的氣象資料庫方式，所以新一代劑量評估系統之氣象的部分也

能夠有較佳的預報資訊。

資料庫類型的氣象場資料，是用全球模式 (CWB GFS) 資料內插到核電廠位置，得到單點 8 天的預報資料，再去選取相對應的資料庫當中的氣象場，如此處理出來的結果，與直接將當下預報模式進行降尺度處理得到的資料有一定的落差，因此新一代劑量評估系統使用一個範圍的氣象預報資料，會比資料庫類型使用一個點的氣象預報資料，更能反應出綜觀尺度下系統的對台灣附近天氣情況的影響。

比較兩系統進行福島事件的模擬結果可得到以下幾點結論：

- 兩系統均能有效掌握放射性物質外釋的主要傳輸路徑。
- 資料庫類型系統由於無法模擬天氣變化時的情境(如鋒面、颱風、對流系統等)，當碰到天氣系統變化時，無法掌握變化期或天氣系統造成的風場變化，導致福島事件期間 3 月 15~16 日福島西北側鋒面附近的濃度較高區無法解析，但在新系統可以做到。
- 資料庫類型系統應用 A2Cflow 進行廠區高解析風場模擬，因 A2Cflow 本身在福島事件應用上可能過度強化海陸風效應，導致傳輸方向與實際上有點偏（約達 15 度左右），此問題若需改進可能需要花一點時間調教模式中之輻射傳遞方法。新系統沒有這個問題，但模擬海陸風效應之可能會受 MDDS 使用的 GFS 或 WRF 模式解析度之影響。
- 由於目前新系統仍在開發當中，其解析度尚未達到資料庫類型系統的程度，藉由本 4 年期計畫的完成可彌補此缺失。
- 其他新系統與資料類型系統的差別來自模式的改進，諸如模

擬範圍擴大至全臺灣、乾濕沉降效應的改進、多核種、外釋時序變化、引進事故評估之外釋情節、開發外釋量回推方法、事故全期模擬分析與預報整合等。

大氣擴散、沉降以及劑量計算都是由改寫過後 A2Ct&d 模式進行運算，其中大氣擴散的部分是原本 A2Ct&d 模式中，將煙流切割為無數個煙陣的粒子煙陣 (puff-particle) 模式進行計算。

沉降的部分則是參考美國 NOAA ARL 實驗室之 HYSPLIT 模式中對於乾溼沉降的判斷與計算方法，改寫之後加入 A2Ct&d 模式，使得煙陣有移除到地表累積的機制。乾沉降主要受沉降速度之影響，而濕沉降的計算則以含有雲過程的清除比來表示，此清除比指的是汙染物在水中濃度和汙染物在空氣中濃度的比值，濕沉降速度的表示式如下：

$$V_{inc} = S\,P$$

其中，P 為降雨強度(mm/hr)。而雲內沉降的時間常數為：

$$\beta_{inc} = F^t\,F_b\,V_{inc}\,\Delta Z_p^{-1}$$

其中，F^t 及 F_b 分別為雲頂及雲底高，$S=3.2\times10^5$ 為單位體積的平均清除比，ΔZ_p 為汙染層的厚度。雲下的沉降直接被定義成常數率與降雨率之間為獨立關係，雲下的沉降時間常數(s^{-1})為

$$\beta_{bel} = 5\times10^{-5}\,(1.0-F_b)$$

目前的作業化系統中，在濕沉降移除機制中所需的降雨率、以及雲底和雲頂的資訊，來自 CWB WRF 5 公里解析度的預報資料，其中雲高的資訊利用雲滴混合比估算得到，再將其資料內插至作業化模擬的氣象資料網格當中。

最後劑量計算的部分，是根據模式中的地表濃度和地表沉積量，對於空氣浸身、呼吸攝入、地表輻射等途徑，乘上各個核種

的劑量轉換因數得到，其中也包含計算核種的半衰期。如此新一代的劑量評估系統就可以得到核子事故的完整資訊。

目前系統有一個即時的氣象資料庫，除了各個核電廠例行假想事故中會用到的 NCEP 預報資料、以及降尺度處理過後水平 2.5 公里解析度的 NCEP 預報資料，會每天固定 4 個時間進行氣象場的整合之外，也整合了 CWB GFS 資料和 CWB WRF 的資料存放，以利其他額外之模擬使用。因此系統文件的另一部分，即是在詳細的說明，各個資料原本的格式、存放位置以及整合至 A2Ct&d 模式可使用的資料過程。上述資料目前規畫保留 15 天以達核子事故即時評估的需求。

2.5. 射源項評估與回推的方法

在射源項回推方面，主要採用由日本原子力研究開發機構 (JAEA) 的 Terada、Katata、Chino…等學者群合作研究後，於 2012 年發表的文章: Atmospheric discharge and dispersion of radionuclides during the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident. Part1: Source term estimation and local-scale atmospheric dispersion in early phase of the accident 提出的方法(Katata et al., 2012、Terada et al., 2012)。當時因觀測資料種類繁多，但在時間上並不連續及完整，所以將福島核災事件從 2011 年 3 月 12 至 15 日分為 13 個時段進行回推，並根據不同狀況使用不同的觀測資料及方法去估算釋放率，一共使用了三種估算法，分段說明如下：

方法一：沿用 (Chino et al., 2011) 方法為回推射源項之理論基礎，方法之概念是將觀測資料當成參考值，取模式計算出來的結果相互比對後，去估算出釋放率。方法一選用的觀測資料為土壤樣本資料 (dust sampling data)。釋放率是觀測點上量測到的核種濃度 (M_i) 與 WSPEEDI 模式計算出來之濃度 (C_i) 之比值，如下式：

$$Q_i = M_i / C_i$$

其中，Q_i 是某核種之釋放率 (Bq/hr)，M_i 是觀測之核種濃度 (Bq/m^3)，C_i: 稀釋因子 (hr/m^3)，相當於模式在單位釋放率設定為 $1\ Bq/hr$ 下模擬出的核種濃度。

即可得轉換因子 (C)，得到的轉換因子即是釋放率。

$$\frac{airdose^O}{airdose^M} = \frac{C}{1}$$

方法二：方法二的原理與方法一相同，差別在於使用的觀測資料為各測站的空氣劑量率資料 (monitoring data)，其資料空間分布範圍也較土樣資料廣。釋放率由觀測資料和模擬之空氣劑量率兩者以空間分布圖繪製比對後，取距離釋放源最相近之觀測點作為參考值，如圖 2-11 橘色圓圈處，當模擬單位空氣劑量率 ($1\,Bq/hr$) 之分布結果與轉換因子 C 之積與觀測相近時，轉換因子 C 即為所求的釋放率 (Bq/hr)。

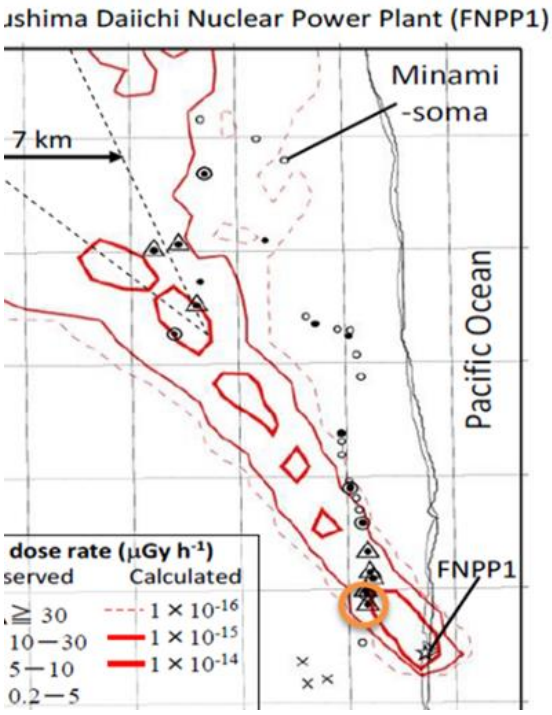


圖 2-11 福島事故觀測資料點與劑量模擬計算結果

方法三：在 3/13 23:00 至 3:14 11:00 的時段內缺乏鄰近釋放源的觀測資料，因當日風向主要為東南風，故採用距離較遠（下風處）之西北向之單一站點資料來回推釋放率。釋放率 (Q) 由高斯煙羽模式 (Gaussian plume model) 搭配觀測之空氣劑量率

推估而得，此方法配合風速 (U)、大氣穩定度 (σ_y，σ_z)、釋放高度 (H)、下風處距釋放點的距離 ($x, y, 0$)，以計算核種濃度：

$$\chi(x,y,0)=\frac{Q}{\pi\cdot\sigma_y\cdot\sigma_z\cdot U}\cdot\exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y{}^2}\right)\cdot\exp\left(-\frac{H^2}{2\sigma_z{}^2}\right)$$

另外，本計畫中亦參考其他國家對核電廠發生事故所做的回推釋放源方法研究。如美國 NCAR (National Center for Atmosphere Research) 應用研究實驗室之 G. Cervone et al.在 2014 年發表的文章: Source Term Estimation for the 2011 Fukushima Nuclear Accident 提到的方法(Cervone and Franzese, 2014)，主要是利用觀測濃度和模擬濃度誤差最小化來辨認出釋放率的變化。首先設定一個釋放率的假設值為常數 q，對應到一連串 N 個離散的 $Q_n, n=1\ldots N$，而 Q_n 的大小可由 q 乘上一純量 ω_n，所以重建釋放源的目標就是得到一向量 $W=\{\omega_1\cdots\omega_N\}$。藉由最小化各個觀測點觀測到的放射性物質及由大氣擴散模式的模擬值的誤差，來得到一隨機優化的向量 W。

如果是在每個觀測位置 $x=(x,y,z)$ 和每個釋放時間 t 的放射性物質濃度總和可寫成

$$C(x,t)=\sum_{n=1}^{N}c_n(x,t)$$

其中，c_n 為每段釋放期間每個觀測位置和時間模擬得到的濃度值。

為找出未知的釋放率 Q_n，首先，在整個空間中定義出 M 個離散的觀測站，以及共有 K 個樣本時間 t，然後將 N 個釋放量都是 q 的釋放源在大氣擴散模式進行模擬，其中每段釋放都得到一

個濃度 ε_{nmk}，其中 $n=1\ldots N, m=1\ldots M, k=1\ldots K$，也就是說，是在第 n 個釋放期間在測站 m 的時間 k 得到的濃度值。若是由真實的釋放量 Q_n 產生的濃度則可表示如下:

$$c_{nmk}=\omega_n\varepsilon_{nmk}$$

其中 ω_n 則是未知向量 W 中的一個，而濃度相對應到真實的釋放率 Q_n 則可表示如下:

$$C_{mk}=\sum_{n=1}^{N}c_{nmk}=\sum_{n=1}^{N}\omega_n\varepsilon_{nmk}$$

並且假設濃度和釋放率之間是線性關係:

$$Q_n=\omega_n q$$

未知的 ω_n 則可透過最小化在位置 m 時間 k 的模擬濃度 C_{mk} 和觀測濃度 $C_{mk}{}^{O}$ 之間的平均平方差來得到:

$$\Delta=\frac{1}{M+K}\sum_{m=1}^{M}\sum_{k=1}^{K}\left(C_{mk}-C_{mk}{}^{O}\right)^2$$

求解此價值函數 Δ 即可得到 ω_n。

JAEA 與 NCAR 使用的外釋射源項回推方法很相似，皆是利用觀測資料之空氣劑量率和單位釋放率模擬之空氣劑量率比值回推外釋射源項，兩者主要差異在於 JAEA 的方法中，會依分析員的經驗，根據不同的狀況篩選較適合的觀測資料與時段進行回推，因此有較高的分析員數值與經驗需求，以及較高的人力資源需求；NCAR 則是囊括所有觀測點資料，以觀測與模擬空氣劑量率最小化平均平方差的方式進行回推，此方法在觀測資料的使用上較為客觀，較少的人員主觀分析介入，在回推程序自動化的建立上亦較為容易，但相對地對於整體觀測資料的品質要求較高。表 2-1 即為 JAEA 與 NCAR 外釋射源項回推方法比較。

表 2-1　JAEA 與 NCAR 外釋射源項回推方法比較

	JAEA	NCAR
計算方法	利用觀測資料之空氣劑量率和單位釋放率模擬之空氣劑量率比值回推外釋射源項	
觀測資料篩選	主觀篩選觀測資料與時段，進行回推	囊括所有觀測點資料，以觀測與模擬空氣劑量率最小化平均平方差的方式進行回推
優勢	分析員依經驗篩選出較適合回推的時段資料，可以獲得更好的回推結果	1. 資料使用較為客觀 2. 回推程序較容易自動化
限制	1. 分析方法較主觀 2. 人力資源消耗較高 分析員的素質與經驗要求高	觀測資料品質要求高

2.6. 氣象觀測資料同化分析方法

當進行射源項回推時，需要先知道已排放的放射性物質在空氣中傳輸與擴散的主要推動力量，即放射性物質所在的氣象資料的空間及時間分布，以便讓劑量評估模式使用。由於氣象觀測資料的空間與時間解析度差距甚大，如陸地上有密度較高的地面觀測資料，但海面上的觀測資料較少；空中的觀測資料（探空資料）空間及時間密度（約數百公里即 6-12 小時）很疏。擁有較高空間與時間解析度的雷達或衛星資料均非一般氣象變數（如回波強度、竟像速度、衛星反射率資料等）。如何由這些難得的氣象觀測資料，獲取足夠且滿足劑量評估模式所需的高解析度四維氣象資訊，亦即透過觀測與模式背景場，提供最佳的模式初始條件，是本計畫中之氣象觀測資料同化(Data Assimilation)分析的主要目的。

由於現代的作業數值天氣預報模式使用更一般性的氣象流體物理原始方程，為避免天氣預報模式因初始氣象分析場未能滿

足模式的物理導致大振幅的虛假重力波被模式激發出來，從而影響整個預報場的準確度。因此必須對由氣象觀測資料分析得到的初始場做初始化或平衡的手續。而從氣象觀測資料收集到初始化的過程稱為氣象觀測資料同化。此為一循環的過程，並可分為 4 個部分：

(a) 氣象觀測資料品質控制。

(b) 客觀分析，主要為空間內插。

(c) 初始化，又稱為平衡。

(d) 進行短時間的預報，以作為下次客觀分析的首次猜測場 (initial guess) 之用。

在氣象觀測資料品質控制方面，主要是處理氣象觀測資料的重大誤差。氣象資料的誤差可分為自然誤差和重大誤差，自然誤差包括儀器誤差和代表性誤差，代表性誤差和存在於大氣中卻不能被觀測網偵測的小尺度氣象擾動有關；重大誤差主要是因為人為因素、不當的儀器校準和電信傳送等所造成。在進行資料同化時，自然誤差可以妥善處理，而重大誤差才是需要檢驗出來並加以訂正或捨棄的對象。

一般來說，品質控制主要有兩種方法，即統計校驗和連續校驗，統計校驗是指氣象變數的值有一定範圍，如果不再這範圍內，就可認定這個資料有錯而捨棄不用；連續校驗是指利用空間或時間的連續性檢驗資料的正確性，將某測站資料和周圍測站或前後時間資料互相比較，若相差太大則此測站此時的資料可能有錯。

客觀分析方面，主要是將不規則分布的測站點資料，進行空間的內插置規則網格點上，並可在此內插過程中，利用數學的方式進行濾波的動作，將氣象資料裡面的小於網格可解析尺度的擾

動去除。更可利用簡單的平衡條件（如靜力平衡）進行各種氣象變數間的平衡，維持氣象場間的內在一致。在此過程中通常需要模式的預報場或氣候場資料當作客觀分析的背景值。

在初始化方面，主要是因為一般的客觀分析方法所得的氣象分析資料，各氣象場之間並無法滿足數值預報模式所使用的物理方程，其原因有很大一部分是因為客觀分析中使用的背景資料的正確性及觀測資料密度的極度不均勻所致。若直接利用客觀分析場作為數值預報模式的初始場時，很有可能會馬上激發虛假的大幅度重力波產生而導致預報結果的錯誤。

主要資料同化的方法分為：經驗插值法、統計插值法、變分法、卡曼濾波等幾種。變分法相較於經驗插值法、統計插值法可以同化非傳統的觀測資料，例如衛星資料及雷達資料等，且不需要單獨初始化，動力初始化可以在同化的過程中實現等優點，且相較於系集卡曼濾波形式的資料同化所需要的計算資源較少。

在 1950 年代 Sasaki 利用變分學提出變分最佳分析的理論基礎，此方法能將動力的、數學的甚至經驗的約束條件納入最佳化過程中，以便維持氣象場的內在一致。並於 Sasaki (1969)及 Sasaki (1970)年共 4 篇文章指出此方法的特點、約束條件的功能以及濾波器的特性，從而奠定變分最佳分析的理論基礎和應用在氣象資料分析的可行性。並自 1980 年代開始急劇發展，諸如變分初始化、變分正模初始化、變分資料同化、雷達與衛星資料變分反演等，目前仍在氣象資料分析及初始化上扮演最主流與主要的角色。

變分學主要討論如何求出一個泛函的極值。所謂泛函就是一個或多個函數的函數。例如平面或求面上兩點的距離依賴於通過

這兩點的曲線，因此這個距離就是泛函，它的大小取決於這條曲線的形狀，而變分學就是找出此泛函極值（最小值）的曲線，極最短距離的曲線。

假如這個函數求極值問題屬於最小二乘問題，例如求出一個最佳的分析場，既按某個準確度和背景值、觀測值充分接近，又滿足大氣所應有的動力或其他約束條件的問題，即稱為變分資料同化。其泛函 J（或稱為價值函數）可寫為：

$$\mathrm{J}(x)=\frac{1}{2}x^{T}B^{-1}x+\frac{1}{2}(H_{x}-y)^{T}R^{-1}(H_{x}-y)+J_{c}$$

其中 x 為氣象變數（如風場、溫度、壓力、水氣場等）相對於背景值的增量矩陣，y 為觀測變數（可與氣象變數相同或不同）相對於背景值的增量矩陣，H_x 為理論或經驗上觀測變數與氣象變數的關係函數，B 及 R 分別為背景場及觀測場的誤差協方差矩陣，J_c 為其他動力或經驗統計等約束條件。

複雜地形上的氣流分析在核一、二、三場劑量評估系統的氣象應用中非常重要。一般來說，現有的風資訊來自各種不同的觀測系統，這些觀測系統各有不同的觀測誤差和分辨率。此外地形也限制了它們的代表性，需使用追隨地勢座標且對大氣邊界層內的風速垂直分布做若干假設。基於此，系統中所使用的變分資料同化中之動力約束條件採追隨地勢座標的複雜非靜力原始方程（與 MDDS 相同）。並在此動力約束條件加上邊界層的影響，而邊界層的計算分為兩部分，一為地面層，另一為行星邊界層。

地面層根據 Monin and Obukhow (1954)建議，在水平均勻的地面層其平均流和紊流的垂直變化只和由量測摩擦風速 u_* 所得的地面動量通量、浮力通量 B_0、高度 z（限制了垂直的渦流高度，

和其攜帶紊流通量）有關。因此我們可以假定穩定參數為 $\zeta = z/L$ ，獲得動量通量、熱量通量、水汽通量的無維度穩定函數，其表示如下：

$$\frac{kz}{u_*}\frac{\partial u}{\partial z} = \phi_m\left(\frac{z}{L}\right); \quad \frac{kz}{\theta_*}\frac{\partial \theta}{\partial z} = \phi_h\left(\frac{z}{L}\right); \quad \frac{kz}{q_*}\frac{\partial q}{\partial z} = \phi_h\left(\frac{z}{L}\right)$$

其中 k 是馮卡曼常數，u 是在地面層高度 z 的風場，θ 為位溫，θ_*, q_* 為溫度尺度、水氣尺度，L 是 Obukhov 長度，其公式如下:

$$L = -\frac{u_*^3\theta}{kg\overline{(w'\theta')}_0} = \frac{u_*^2\theta}{kg\theta_*}$$

其中 $\overline{(w'\theta')}_0$ 為地面層熱動量通量，g 為重力加速度。

Deardorff (1968) 對動量穩定函數提供了一種較常用的通式解，Businger et al. (1971) 利用 kansa 觀測資料歸納出關係式如下：

$$\phi_m = \begin{cases} (1-\gamma_1\zeta)^{-\frac{1}{4}} & \textit{in the unstable case}, \quad \zeta < 0 \\ 1+\beta\zeta & \textit{in the stable case}, \quad \zeta > 0 \end{cases}$$

$$\phi_h = \begin{cases} \mathrm{Pr}_{tN}(1-\gamma_2\zeta)^{-\frac{1}{2}} & \textit{in the unstable case}, \quad \zeta < 0 \\ \mathrm{Pr}_{tN}+\beta\zeta & \textit{in the stable case}, \quad \zeta > 0 \end{cases}$$

Dyer (1967, 1974) 由 Hay 及 Gurley（均位於新南威爾斯州）觀測資料建議 $\mathrm{Pr}_{tN} = 1$ 、$\beta = 5$ 、$\gamma_1 = \gamma_2 = 16$ ，Pr_{tN} 為普朗克常數。

假定地面層的高度為模式最底層的高度，將動量、熱量、水汽穩定函數對 z 積分並整理成對 ζ 的函式，其中水汽穩定函式依照 Carlson and Boland (1978) 假定於地面層內存在一摩擦次層，其高度從地表到 z_1（z_1 在地上為 0.01 公尺，在水上為 z_0），再依據 Grell et al. (1994) 修正水汽項：

$$u_a = \frac{u_*}{k}\left[\ln\left(\frac{z_a}{z_0} - \int_0^{\zeta}[1-\phi_m(\zeta)]\frac{d\zeta}{\zeta}\right)\right] = \frac{u_*}{k}\left[\ln\left(\frac{z_a}{z_0}\right) - \psi_m\right]$$

$$\theta_a - \theta_g = \frac{\theta_*}{k}\left[\ln\left(\frac{z_a}{z_0} - \int_0^{\zeta}[1-\phi_h(\zeta)]\frac{d\zeta}{\zeta}\right)\right] = \frac{\theta_*}{k}\left[\ln\left(\frac{z_a}{z_0}\right) - \psi_m\right]$$

$$q_a - q_g = \frac{q_*}{k}\left[\ln\left(\frac{z_a}{z_0} - \int_0^{\zeta}[1-\phi_h(\zeta)]\frac{d\zeta}{\zeta}\right)\right] = \frac{q_*}{k}\left[\ln\left(\frac{kz_a u_*}{K_a} + \frac{z_a}{z_l}\right) - \psi_h\right]$$

z_a為模式最底層的高度，u_a、θ_a、q_a為在z_a時的風速、位溫、水汽混和比，θ_g、q_g則為地表的值，z_0為地表粗糙長度，為$K_a = 2.4\times10^{-5} m^2 s^{-1}$為背景擴散係數，$\psi_m$、$\psi_h$為積分後的相似函數。

Businger (1973)首先根據觀測提出自由對流中紊流會造成水平風場的波動及垂直風切，而建立自由對流速度尺度的概念，Godfrey and Beljaars (1991) 和 Beljaars (1995) 將此明確建立在水平風場的修正項 (βw_*)；Mahrt and Sun (1995)針對在大尺度流場微弱下，次網格內中尺度的熱量通量和水汽通量極為重要而對風場提出了修正項 (u_{sg})。其風場修正如下：

$$u_a^{\ 2} = u_a^{\ 2} + \alpha w_* + u_{sg}^{\ 2}$$

$$w_* = \frac{g}{T_0} h\overline{(w'\theta_v')}_0$$

$$u_{sg} = 0.32\times\left(\max\left(\frac{dx}{5000}\right) - 1, 0\right)^{0.33}$$

$\alpha=1$，w_*為自由對流速度尺度，T_0為地表溫度，h為邊界層高度，dx為網格尺度。相似函數依照 Blackadar (1976,1979)高階析度邊界層模式及 Zhang and Anthes (1982)，以穩定度分為四個區域，穩定度則由 Bulk Richardson Number 來決定：

第一區：$Ri_b \geq 0.2$，穩定，如夜間穩定無紊流。

$$\psi_m = \psi_h = -10\ln\left(\frac{z_a}{z_0}\right)$$

第二區：$0 < Ri_b < 0.2$，Damped mechanical turbulence

$$\psi_m = \psi_h = \frac{-5Ri_b}{1.1-5Ri_b}\ln\left(\frac{z_a}{z_0}\right)$$

$$\frac{z_a}{L} = \frac{Ri_b}{1-5Ri_b}\ln\left(\frac{z_a}{z_0}\right) \qquad \frac{z_a}{L} \leq 0.5$$

$$\frac{z_a}{L} = \left[1.89\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)+44.2\right]Ri_b{}^2 + \left[1.18\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)-1.37\right]Ri_b \qquad \frac{z_a}{L} > 0.5$$

第三區：$Ri_b = 0$，強迫對流。

$$\psi_m = \psi_h = 0$$

第四區：$Ri_b < 0$，自由對流。

$$\psi_m = 2\ln\left(\frac{1+x}{2}\right) + \ln\left(\frac{1+x^2}{2}\right) + 2\tan^{-1}x + \frac{\pi}{2}$$

$$\psi_h = 2\ln\left(\frac{1+x^2}{2}\right)$$

其中

$$x = \left(1-\gamma_1\zeta\right)^{\frac{1}{4}} = \phi_m{}^{-1}$$

Bulk Richaradson Number $Ri_b = \frac{g}{\theta_a} z_a \frac{\theta_{va}-\theta_{vg}}{u_a{}^2}$

θ_{va} 為在 z_a 高度的虛位溫。因為 u_*、θ_*、L 需要遞迴去求解，而 z_a/L 為 Ri_b 的函數，為了節省計算時間，假定 z_a/L 在第一、三、四區的初始值為 $Ri_b \ln(z_a/z_0)$。

遞迴解出 u_*、θ_*、L 後則可以依照下面關係求出地面層的動量通量、熱動量通量、水汽通量：

$$\overline{(u_a' w')_0} = -u_*^{\ 2}$$

$$\overline{(w'\theta')_0} = -u_*\theta_*$$

$$\overline{(w'q')_0} = -u_* q_*$$

$$\overline{(u_a' w')_0} = -u_*^{\ 2}$$

$$\overline{(w'\theta_v')_0} = \overline{(w'\theta')_0} + 0.61\theta_a \overline{(w'q')_0}$$

行星邊界層主要根據 Hong and Pan (1996)所開發並於 Mediun-Range Forecast (MRF) 模式中使用的行星邊界層參數化模組，再依據 Hong et al. (2006)來修正。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left[K_c\left(\frac{\partial C}{\partial z} - \gamma_c\right)\right]$$

其中 $C: u, v, \theta, q$ ，K_c 為紊流擴散係數，λ_c 為 Toren and Mahrt (1986) 提出 Nonlocal-K 近似所增加的垂直梯度修正項(反梯度)，因為大尺度紊流對整個邊界層的影響有反梯度的效果。根據 Toren and Mahrt (1986)，Holtslag et al. (1990)，Holtslag and Boville (1993)，動量擴散係數 K_{zm} ：

$$K_m = k w_s z\left(1 - \frac{z}{h}\right)^p$$

$$w_s = u_* \phi_m^{\ -1}$$

其中 $p = 2$ 為擴散係數垂直形狀的指數，w_s 為混和層速度尺度。反梯度 γ_c 為：

$$\gamma_c = b\frac{\overline{(w'c')_0}}{w_s h} \qquad c \quad only \ for \ \theta, q$$

$b = 7.8$，$\overline{(w'c')_0}$ 為地面層的熱動量通量和水氣通量。為了使邊

界層底和地面層頂的通量一至，將 $z=0.1h$ 代入穩定函數：

$$\phi_m=\begin{cases}\left(1-16\dfrac{0.1h}{L}\right)^{-\frac{1}{4}} & \textit{for neutral and unstable,} \quad \overline{(w'\theta_v')_0}\le 0\\ 1+5\dfrac{0.1h}{L} & \textit{for stable,} \quad \overline{(w'\theta_v')_0}>0\end{cases}$$

$$\phi_h=\begin{cases}\left(1-16\dfrac{0.1h}{L}\right)^{-\frac{1}{2}} & \textit{for neutral and unstable,} \quad \overline{(w'\theta_v')_0}\le 0\\ 1+5\dfrac{0.1h}{L} & \textit{for stable,} \quad \overline{(w'\theta_v')_0}>0\end{cases}$$

邊界層的高度 h 由 Ri_b 推導而來：

$$h=Ri_{b\_cr}\frac{\theta_{va}|U(h)|^2}{g(\theta_v(h)-\theta_s)}$$

$$\theta_s=\theta_{va}+\theta_{vT}$$

$$\theta_{vT}=\frac{b\overline{(w'\theta_v')_0}}{w_s}$$

$Ri_{b\_cr}=0.5$ 為 Ri_b 的臨界值，$U(h)$ 和 $\theta_v(h)$ 為在邊界層的風速和虛位溫，θ_s 為邊界層底的虛位溫，θ_{vT} 為虛位溫在邊界層底逸入的值，其值不大於 3^oK 。因此為了求出 K_m ，先假定 $\theta_s=\theta_{va}$ ，以各模式層求出 Ri_b 內差出邊界層高度 h ，再依序代回 ϕ_m 、w_s 、θ_{vT} ，將 θ_{vT} 帶入 θ_s 求出修正後的 θ_s 、h 、ϕ_m 、w_s ，最後求出 K_m 。K_h 則由普朗克常數推導：

$$P_r=\left(\frac{\phi_h}{\phi_m}+bk\frac{0.1h}{h}\right)=\frac{K_m}{K_h}$$

在邊界層之上使用 Louis (1979)的 Local-K 近似來計算 K_m 、K_h ：

$$K_{m,h}=l^2\cdot f_{m,h}(Ri_g)\cdot\left(\frac{\partial U}{\partial z}\right)$$

$$\frac{1}{l}=\frac{1}{kz}+\frac{1}{\lambda_0}$$

l 是混和長度，$\lambda_0=150$ 公尺為漸近長度尺度，$f_{m,h}(Ri_g)$ 為 gradient Richardson number 的函數，依照穩定度分：

$$Ri_g=\frac{g}{\theta}\frac{\frac{\partial\theta_v}{\partial z}}{\left(\frac{\partial U}{\partial z}\right)^2}$$

不穩定（$Ri_g<0$）：

$$f_m(Ri_g)=1-\frac{8Ri_g}{1+1.746\sqrt{-Ri_g}}$$

$$f_h(Ri_g)=1-\frac{8Ri_g}{1+1.286\sqrt{-Ri_g}}$$

中性或穩定（$Ri_g\geq 0$）

$$f_h(Ri_g)=\frac{1}{(1+5Ri_g)^2}$$

在中性和穩定的情形下，K_m 由 $P_r=1.0+2.1Ri_g=K_m/K_h$ 來計算。

3. 核一廠多層巢狀網格之降尺度氣象預報系統開發與建置

本項工作為應用先前「國際核災輻射塵影響評估技術研究」完成之 MDDS 與 104 核技處科技計畫成果，將現階段緊急應變計畫區採高解析度資料庫類型之天氣類型法氣象資料，而全台灣採 MDDS 2.5 公里解析度全真化氣象預報，整合成全部利用 MDDS 技術建立核電廠周圍三層巢狀網格高解析度全真化氣象預報，加上全台灣 2.5 公里解析度之氣象預報共四層巢狀網格。採用 MDDS 氣象預報技術除能更精確掌握風場的三維空間分布及天氣系統變化時伴隨風場的轉變，也可解決在極端天天氣條件下，氣象資料庫類型無法適用之問題。

3.1. 核一廠四層巢狀網格之劑量評估系統建置

為提升計算效率，今年度進行劑量評估系統核心程式整理與流程最佳化之作業，並將計算結果以分層數據資料庫(Hierarchical Data Format，HDF5)格式輸出。HDF5 為一種資料模型、函式庫與儲存資料的檔案格式，非常適合儲存大量科學計算或是觀測的數據。HDF5 文件由群組（group）與數據集（dataset）兩種基本資料架構組成，現在已被眾多商業與非商業程式語言所支援，包括 Java，MATLAB/Scilab，Octave，IDL，Julia, Python 和 R 等。

分層架構之資料格式對於程式讀取具有極佳之可讀性，也可避免直接讀取二元碼資料可能因錯位造成之資料讀取錯誤。目前劑量評估系統輸出為檔案分為煙陣軌跡(puftrac.nc)與濃度劑量檔案(pufconc.nc)，圖 3-1 與圖 3-2 分別為檔案的群組與資料階

層架構。檔案會依不同之乾沉降速度分別輸出，最後會再將不同乾沉降速度之濃度劑量結果加總得到最後結果，以供系統執行擴散分布結果之繪圖作業。

Name	Long Name
puftrac.nc	puftrac.nc
trajec	trajec
trajec.AirConcentrationR	trajec.AirConcentrationR
trajec.CurrentTime	trajec.CurrentTime
trajec.GroundConcentrationR	trajec.GroundConcentrationR
trajec.Latitude	trajec.Latitude
trajec.Longitude	trajec.Longitude
trajec.RelativeHeight	trajec.RelativeHeight
trajec.ReleaseTime	trajec.ReleaseTime
trajec.SigX	trajec.SigX
trajec.SigY	trajec.SigY
trajec.SigZ	trajec.SigZ

圖 3-1 煙陣軌跡檔案資料架構

Name	Long Name	Type
pufconc.nc	pufconc.nc	Local File
ChinShan	ChinShan	—
air_conc	air concentration	Geo2D
cld	cloudshine effective dose distribution	Geo2D
gnd	groundshine effective dose distribution	Geo2D
inh_eff	inhalation dose (effective) distribution	Geo2D
inh_thy	inhalation dose (thyroid) distribution	Geo2D
lat	latitude	1D
lon	longitude	1D
surf_conc	surface deposition	Geo2D
time	time	1D
u	U wind component	Geo2D
v	V wind component	Geo2D

圖 3-2 濃度劑量檔案資料架構

劑量評估系統擴散模式是以煙陣粒子隨所在位置之氣象場條件，進行擴散傳輸模擬，在於固定時間間隔，將污染粒子經高斯擴散，轉換成地表網格濃度或劑量輸出。因此粒子所在位置氣象場解析度高，所得到粒子追蹤的空間解析度也較高。目前氣象場的設定為巢狀網格，即由核電廠為中心向外延伸，氣象場解析度由高至低，如此在外釋源處可獲得高空間解析度的粒子擴散追蹤，隨著擴散距離越遠，空間解析度隨之遞減，以獲得較高的計

算資源使用效益。

原本擴散模式程式架構為劑量與濃度之計算網格與氣象場設定一致，但於不同網格解析度間進行等值線繪圖與套疊，可能會產生不連續的情況，因此為解決此問題，原系統係將所有計算範圍以最細網格解析度(250 公尺) 建立陣列，再依實際解析度範圍區間之結果填入陣列，依序最內層填入 250 公尺解析度結果，中間為 500 公尺解析度結果內插成 250 公尺解析度後填入，最外層則為 1 公里解析度結果內插成 250 公尺解析度後填入。最後利用 250 公尺解析度二維陣列進行等值線繪圖輸出。

但由於目前氣象場資料已擴增為四層巢狀網格，最大範圍涵蓋台灣本島與外島，擴散模式輸出若再以全計算範圍 250 公尺之解析度為目標，會造成輸出陣列檔案龐大，影響資料傳輸與圖像輸出效能。因此更新後系統核心係以使用者欲顯示之範圍為考量，依據顯示範圍訂定合適之網格解析度，再由擴散計算得到之煙陣粒子位置，依照網格經緯度計算網格濃度與劑量。

圖 3-3 至圖 3-5 分別為核一廠案例採用不同之劑量網格設定所得到之結果，圖 3-3 為經度範圍 121.255530 至 121.939168，緯度範圍 25.064640 至 25.517259，網格解析度 1024×1024；圖 3-4 為經緯度各增加 1 度，經度範圍 120.255530 至 121.939168，緯度範圍 25.064640 至 26.517259，網格解析度 1024×1024；圖 3-5 為緯度範圍增加 1 度，經度範圍不變，經度範圍 121.255530 至 121.939168，緯度範圍 25.064640 至 26.517259，網格解析度 32×32。其中圖 3-3 因擴散結果超出網格設定範圍而造成劑量曲線上方被截斷。另為凸顯差異，圖 3-4 與圖 3-5 網格解析度採較極端的設定值，可以明顯看出粗網格解析度所呈現之鋸齒狀，另圖

3-5 非方形網格，但並不影響最後等劑量曲線計算結果。

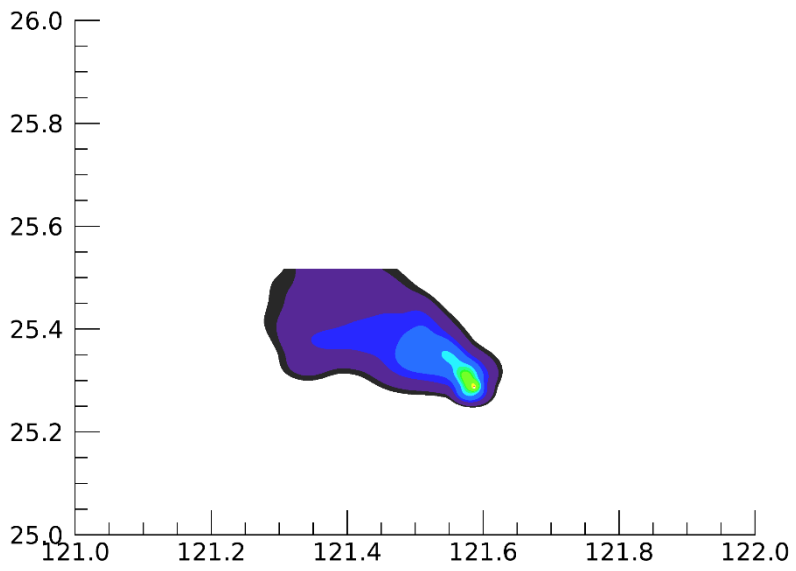


圖 3-3 核一廠案例不同劑量網格設定輸出結果 1

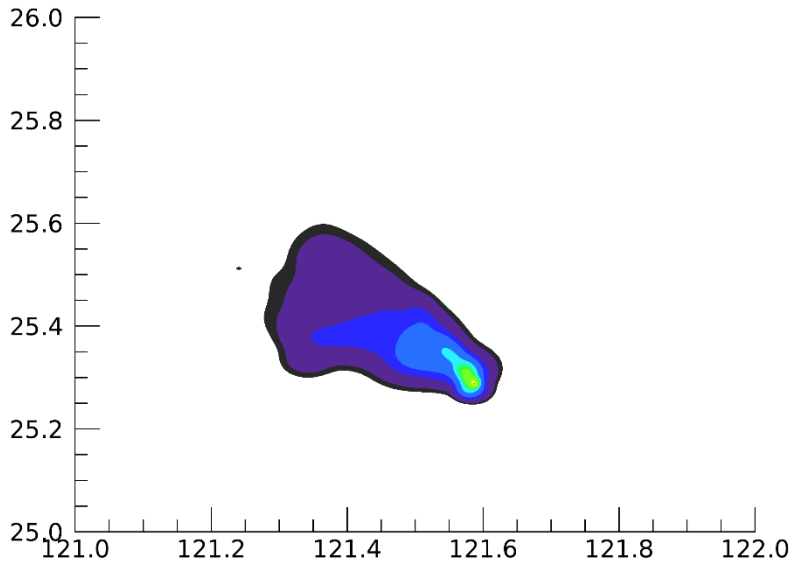


圖 3-4 核一廠案例不同劑量網格設定輸出結果 2

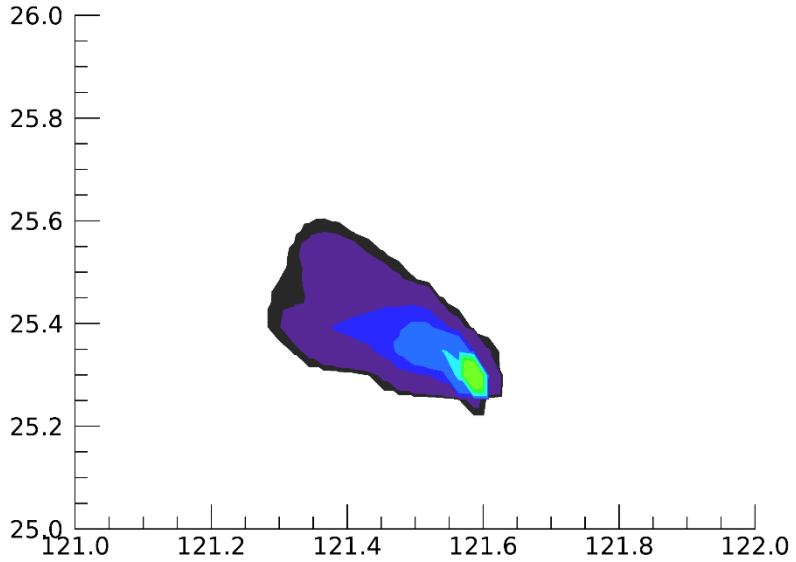


圖 3-5 核一廠案例不同劑量網格設定輸出結果 3

本計畫今年度重新設計規劃劑量評估系統操作界面與顯示平台，以整合境內境外劑量評估系統。目前劑量評估系統顯示圖台係鎖定核電廠半徑 60 公里範圍，底層圖層為 SPOT5 衛星影像。考量境外事故顯示圖層需求，且計畫不可能亦無必要購置全球衛星影像以作為底圖，因此圖台設計改由網路地圖服務(Web Map Service，WMS)取得顯示圖層。

WMS 是開放地理空間協會(Open Geospatial Consortium，OGC)對於地圖查詢的服務協定，其設計理念是希望從擷取網路中所散佈的資料庫地理資訊及屬性資料，以產生客製化的地圖，且地圖一般是以 JPEG、GIF 或 PNG 等格式儲存。WMS 的規範即是客戶端向伺服器端要求圖資與伺服器端如何對客戶端表現圖資的標準化方法。WMS 伺服端是透過 http 和使用者互動，因此使用者是透過 URL 傳送 CGI(Common Gateway

Interface)參數和 WMS 伺服端互動。

國內 WMS 服務由內政部國土測繪中心(National Land Surveying and Mapping Center，NLSC)提供，本系統選擇其提供之衛星正攝影像與電子地圖兩種作為台灣地區顯示圖層。然國土測繪中心並無提供台灣區域以外的圖層，因此針對境外核災使用需求，系統由美國國家航空暨太空總署(National Aeronautics and Space Administration，NASA)取得「下一代，藍色彈珠」(The Blue Marble：Next Generation）的衛星影像，以及免費開源的開放街圖(OpenStreetMap，OSM)提供之電子地圖等兩種圖層。

整合後之劑量評估系統分為執行擴散模擬與劑量計算的操作介面與顯示平台兩部分。圖 3-6 為參數輸入與執行啟動介面，由上而下依序為給定任務名稱，設定事故地點，外釋起始時間，核種外釋時序，擴散模擬啟動，與圖像化顯示等，其中擴散過程中考慮濕沉降因素與否可經由介面設定勾選。擴散模擬與劑量計算完成後，點選圖像化顯示會出現如圖 3-7 之顯示平台。圖台具有放大縮小，左右平移與復原的功能，由右上第二排地圖圖層的下拉選單，可以選擇不同之底圖圖層，如圖 3-8。左上方視覺化資料的下拉選單，則可選擇欲顯示的評估結果，如圖 3-9。

各項評估結果以等值線方式呈現視覺化效果，圖台具有隨時間變化的動態呈現方式，或由使用者自行選擇時間點。圖台右下角圖例會顯示等值線單位與顏色代表數值。圖 3-10 為核一廠案例分析結果，底圖圖層為國土測繪中心衛星正射影像。圖 3-11 為日本福島事故案例模擬結果，底圖圖層為 OSM。

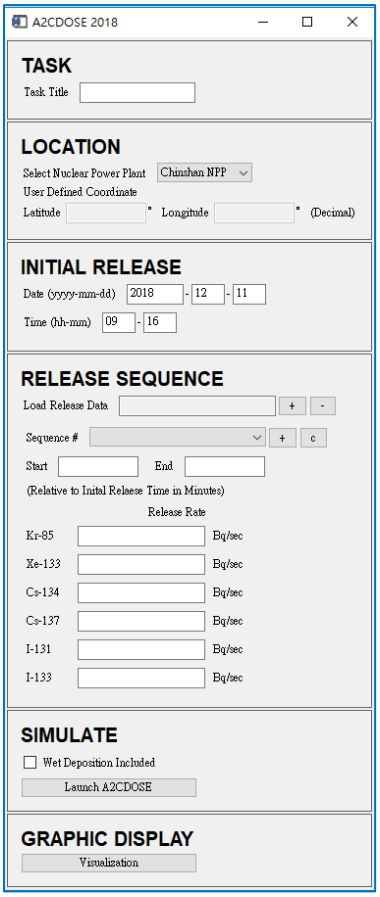


圖 3-6 擴散模擬與劑量計算參數輸入介面

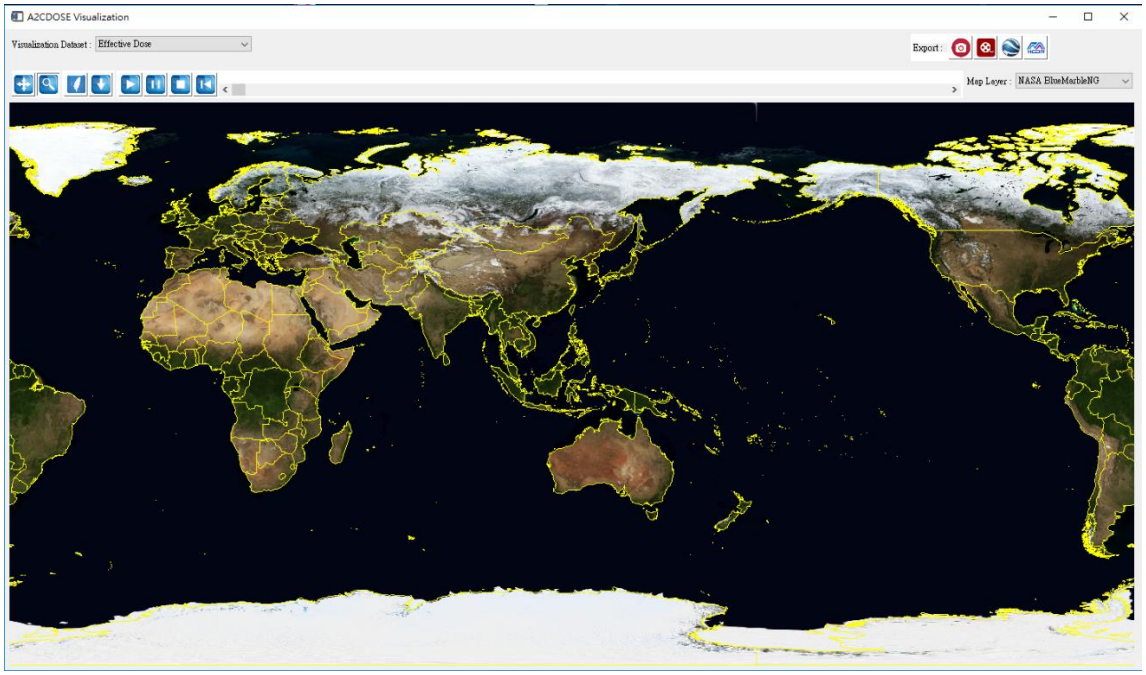


圖 3-7 圖像顯示介面

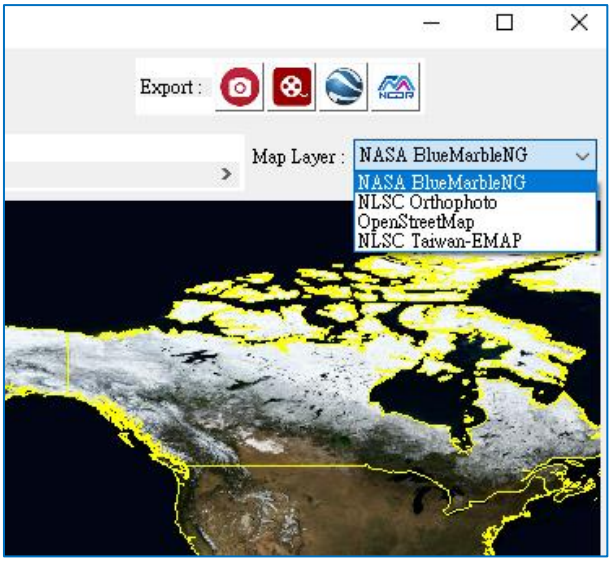


圖 3-8 底圖圖層選單

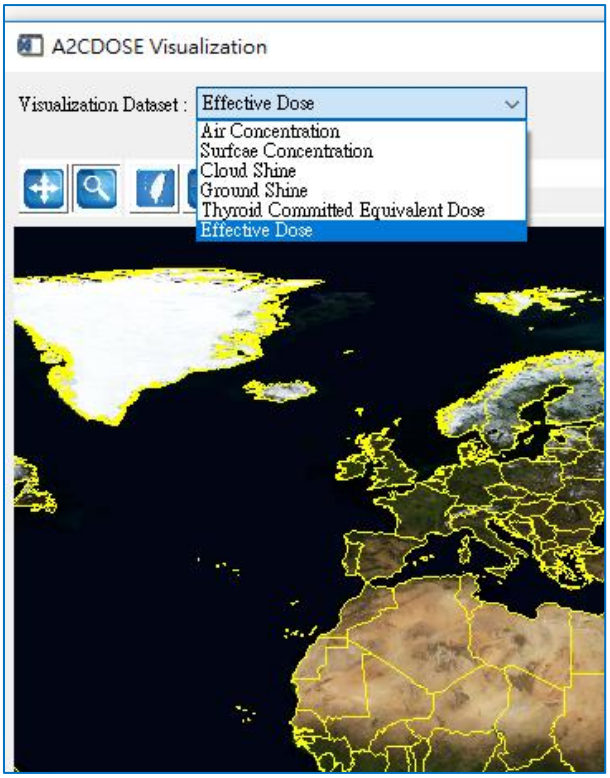


圖 3-9 顯示項目選單

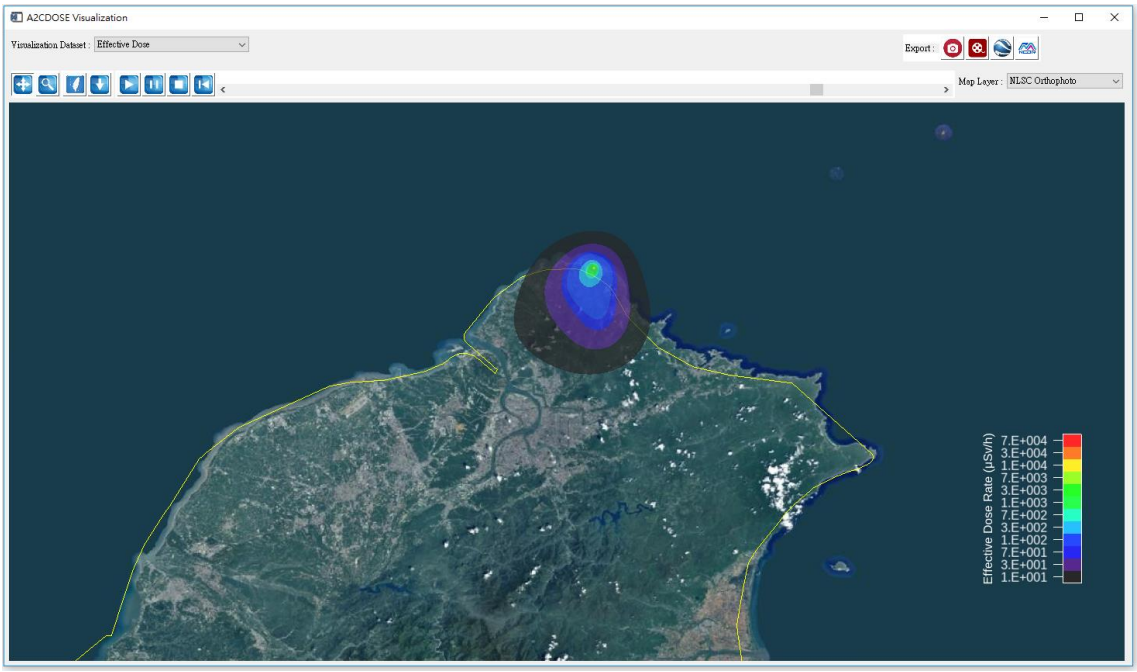


圖 3-10 核一廠案例有效劑量率分布顯示

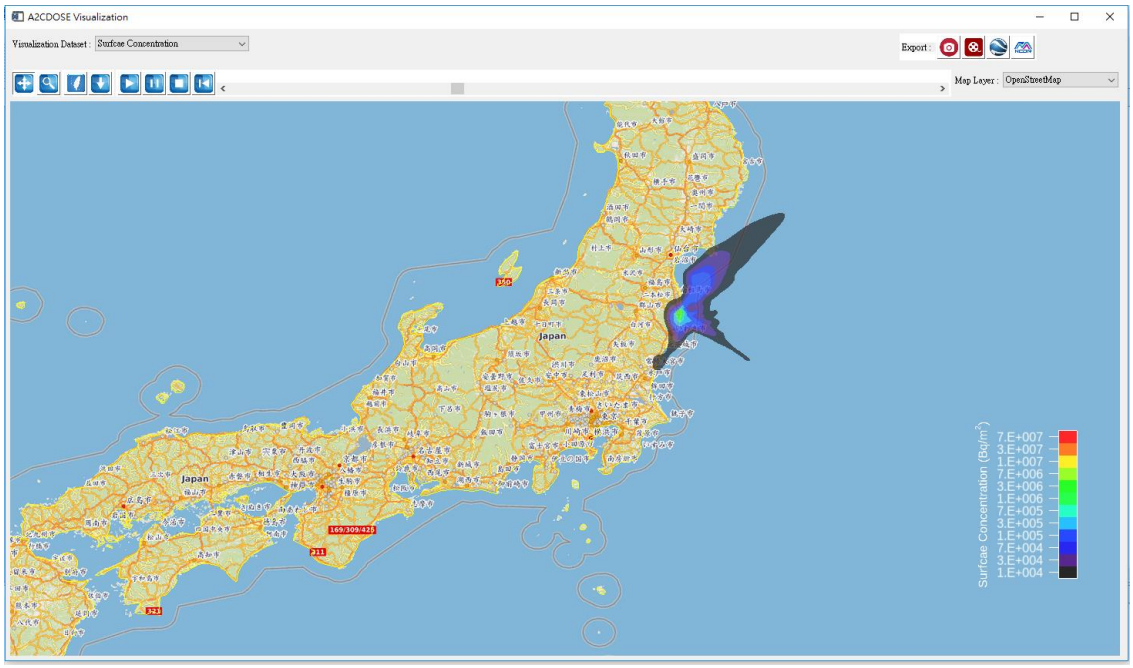


圖 3-11 日本福島案例地表濃度分布顯示

3.2. 核一廠假想事故評估案例分析

每日的例行假想事故模擬的設定，是以福島事件等級的量及進行模式釋放源排放依據，以 JAEA 回推福島事件釋放量，前 7 天累加 Cs-137 的總量: 4.3619×10^{15}Bq，換算($\div 168 \div 3600$)得到 Cs-137 的釋放率為7.2121×10^{9}Bq/s，而 JAEA 回推的結果中，I-131 的釋放量大約為 Cs-137 釋放量的 10 倍，因此，在此設定 I-131 的釋放量為7.2121×10^{10}Bq/s。目前 NCEP GFS 預報的時間長度為 192 小時，因此劑量評估的計算模擬也是 192 小時，時間解析度為 6 小時，其中 Cs-137 的乾沉降速度為 0.01m/s，I-131 的乾沉降速度為 0.03m/s。輸出的產品有有效劑量率、甲狀腺約定等價劑量率以及地表沉降濃度。

以 2018 年 05 月 30 日的案例為例，圖 3-12 為在預報時間 24 小時，風向大致上是西南風的情況，風速由海面上 10m/s 到陸地上大約 1m/s，在陸地上是風速偏小的天氣情況，Cs-137 的有效劑量的模擬，於解析度 2.5 公里的結果(圖 3-12a)，可看到劑量大致上都是往海面上分布，解析度 1 公里的結果(圖 3-12b)，1×10^{-5}mSv/h 影響範圍大約是核一廠附近沿岸約 1 公里的距離，核一廠附近的極值大小大約是1×10^{-2}mSv/hr，解析度 500 公尺的結果(圖 3-12c)和解析度 250 公尺(圖 3-12d)的結果都和 1 公里解析度的相似，但極值的部分可達到1×10^{-1}mSv/h，可看到核一廠的有效劑量量值為1×10^{-3}mSv/h，由於當天風速較小的情況下，較大的有效劑量影響的範圍仍侷限在新北市萬里區。圖 3-13 為沉降量的分布，可以看到從 2018/05/30 00Z 開始釋放後，各個時間的風向風速影響累積的結果，風向西南風，在解析度 2.5 公里的模擬結果(圖 3-13a)，可看到沉降量的分布方向在核一

廠東北方海面上，極值達 10 萬 Bq/m2，在解析度 1 公里的有效劑量結果(圖 3-13b)，活度濃度的值達到 100 萬 Bq/ m2，在越高解析度的結果範圍中可以看到活度濃度分布其更細微的空間分布。圖 3-14 為甲狀腺約定等價劑量分布與劑量大小，大致與有效劑量相似。

I-131 的每日假想事故模擬，其有效劑量的計算結果如圖 3-15，由於其釋放量為 Cs-137 的 10 倍，在解析度 2.5 公里的範圍內，其極值 0.1 mSv/h，且對陸地的影響範圍較廣，除新北市之外，基隆市少部分也受到影響，在 1 公里解析度時，極值達 1 mSv/h，500 公尺和 250 公尺則可達到 10mSv/h。圖 3-16 則為 I-131 之地表沉降量，各個解析度之極值都可達 100 萬 Bq/ m^2，圖 3-17 則為甲狀腺約定等價劑量，由於沉降速度、釋放量及甲狀腺轉換因子都較 Cs-137 來得大且多，因此在甲狀腺的劑量率部分，較 Cs-137 大 100 倍，達 10 mSv/h 以上。

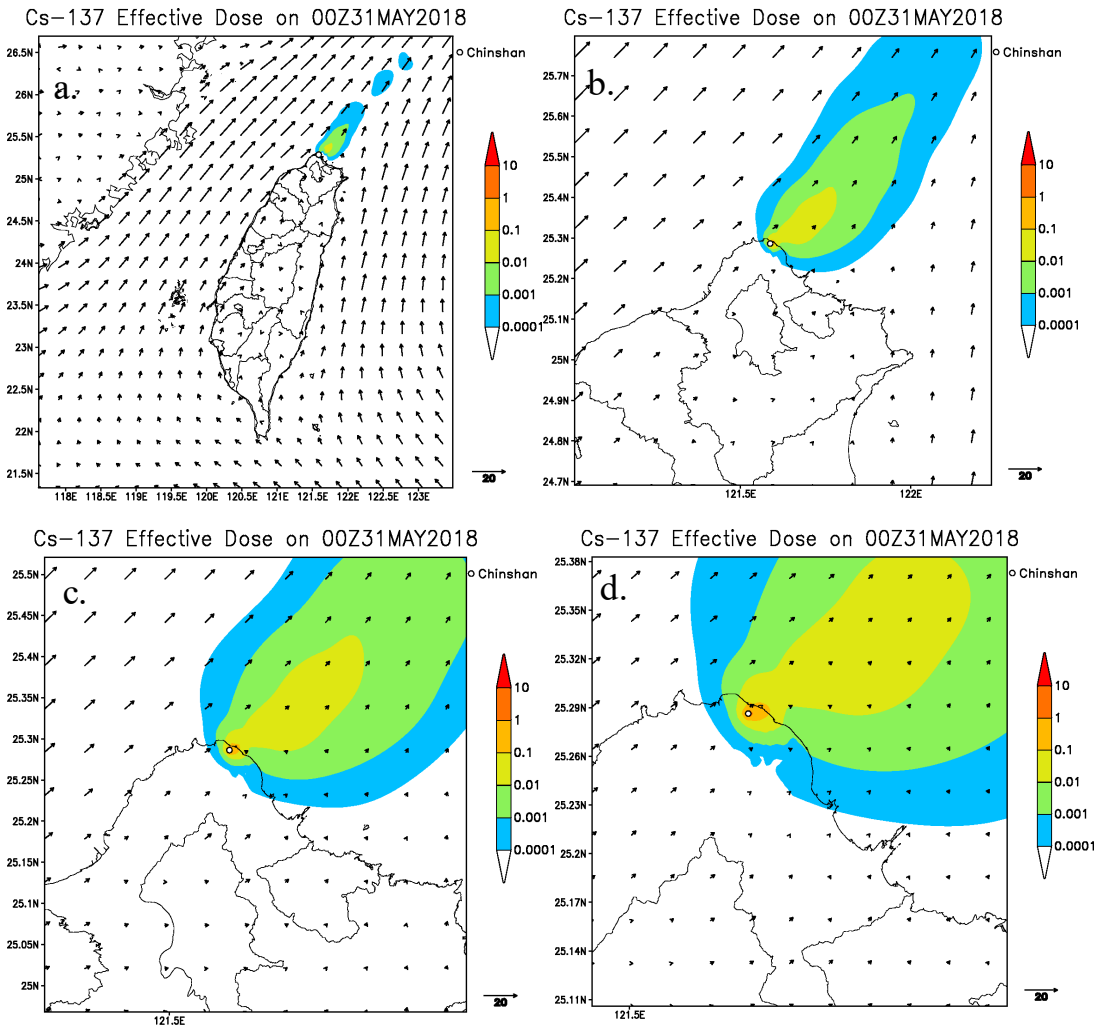


圖 3-12 核一廠 4 層巢狀網格之劑量評估系統結果，圖為 2018/05/30 Cs-137 的假想案例模擬，預報 24 小時後(2018/05/31)的有效劑量率分布，單位:mSv/hr。由左至右，由上至下依序為 a. 解析度 2.5 公里 b.解析度 1 公里 c.解析度 500 公尺 d.解析度 250 公尺。

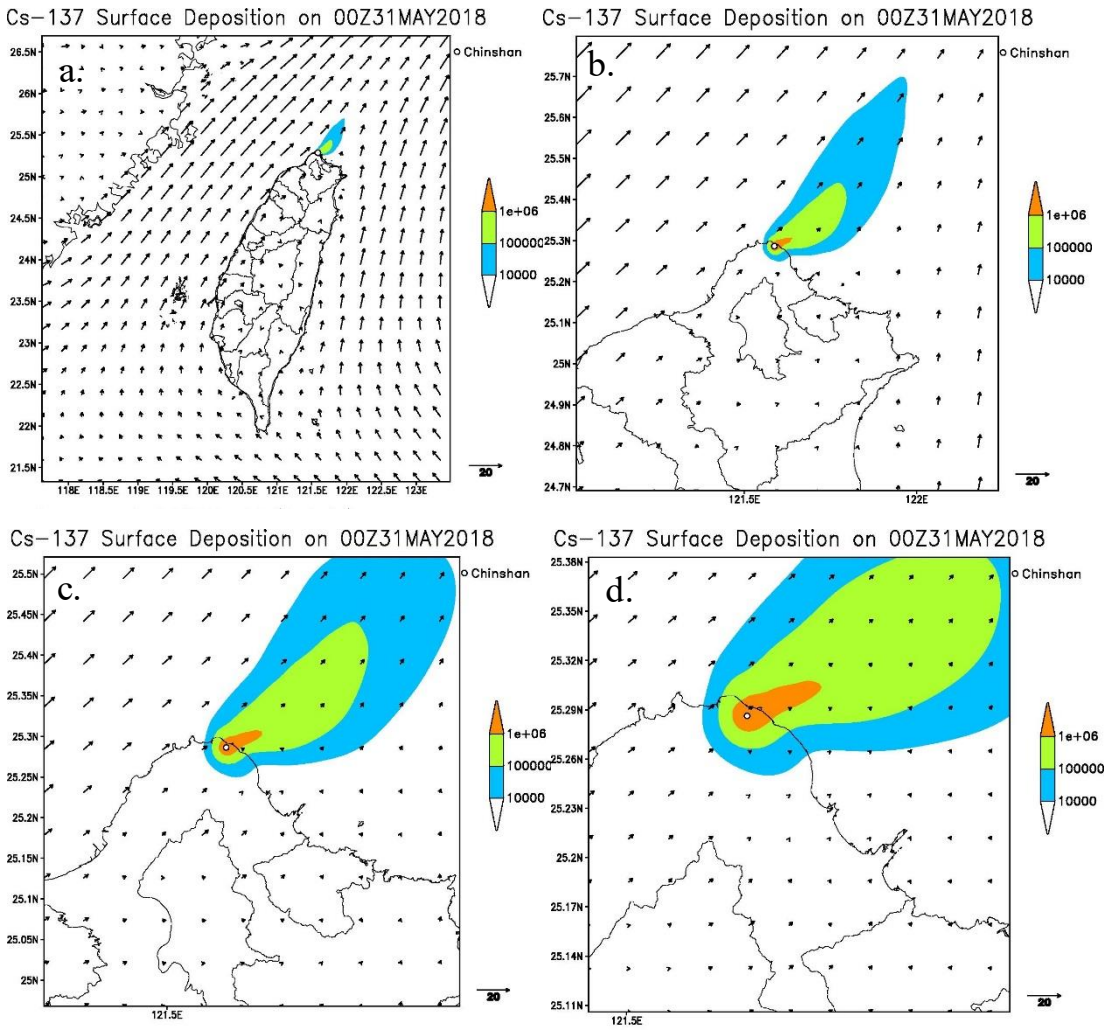


圖 3-13 核一廠 4 層巢狀網格之劑量評估系統結果，圖為 2018/05/30 Cs-137 的假想案例模擬，預報 24 小時後(2018/05/31)的地表沉降量分布，單位:Bq/m^2。由左至右，由上至下依序為 a. 解析度 2.5 公里 b.解析度 1 公里 c.解析度 500 公尺 d.解析度 250 公尺。

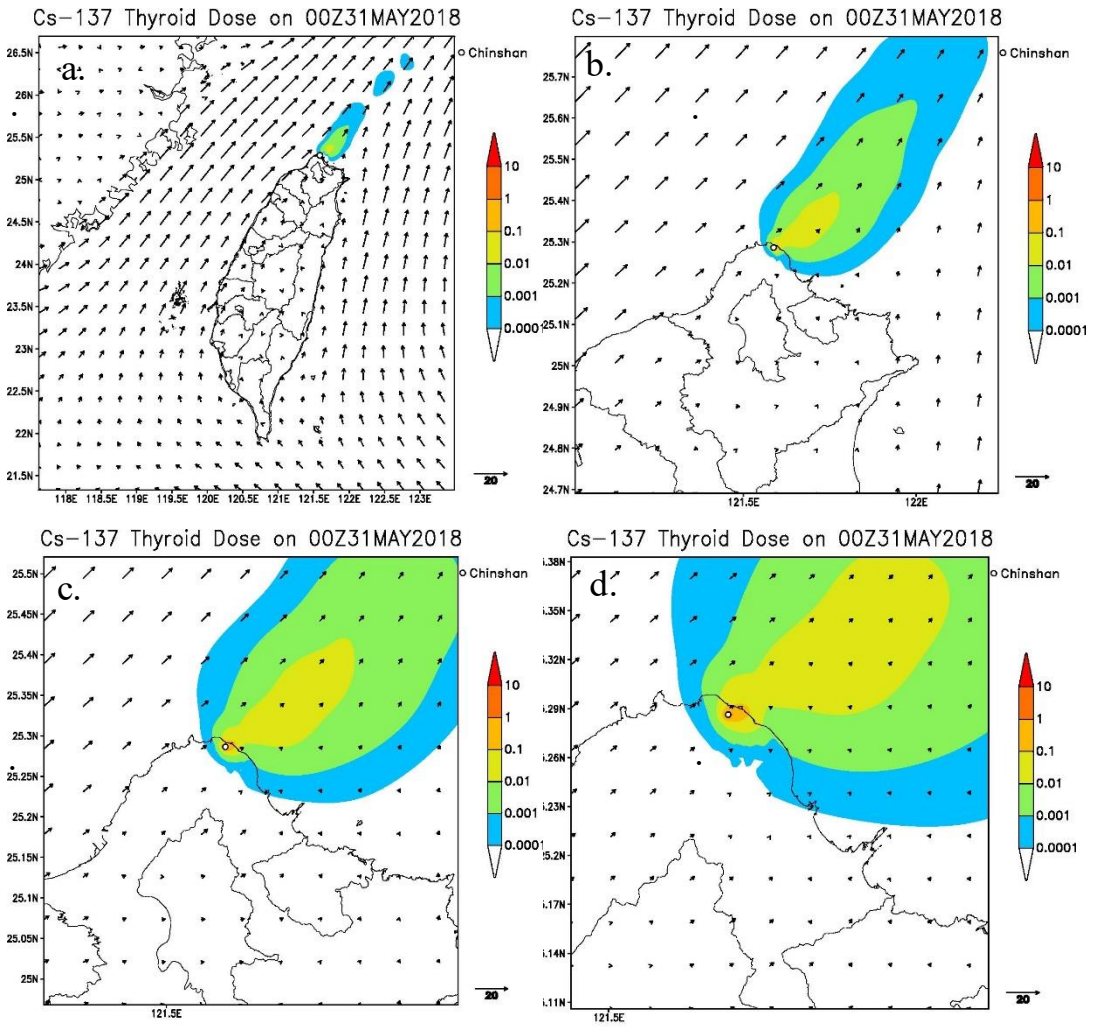


圖 3-14 核一廠 4 層巢狀網格之劑量評估系統結果，圖為 2018/05/30 Cs-137 的假想案例模擬，預報 24 小時後(2018/05/31)的甲狀腺約定等價劑量分布，單位:mSv/hr。由左至右，由上至下依序為 a. 解析度 2.5 公里 b.解析度 1 公里 c.解析度 500 公尺 d.解析度 250 公尺。

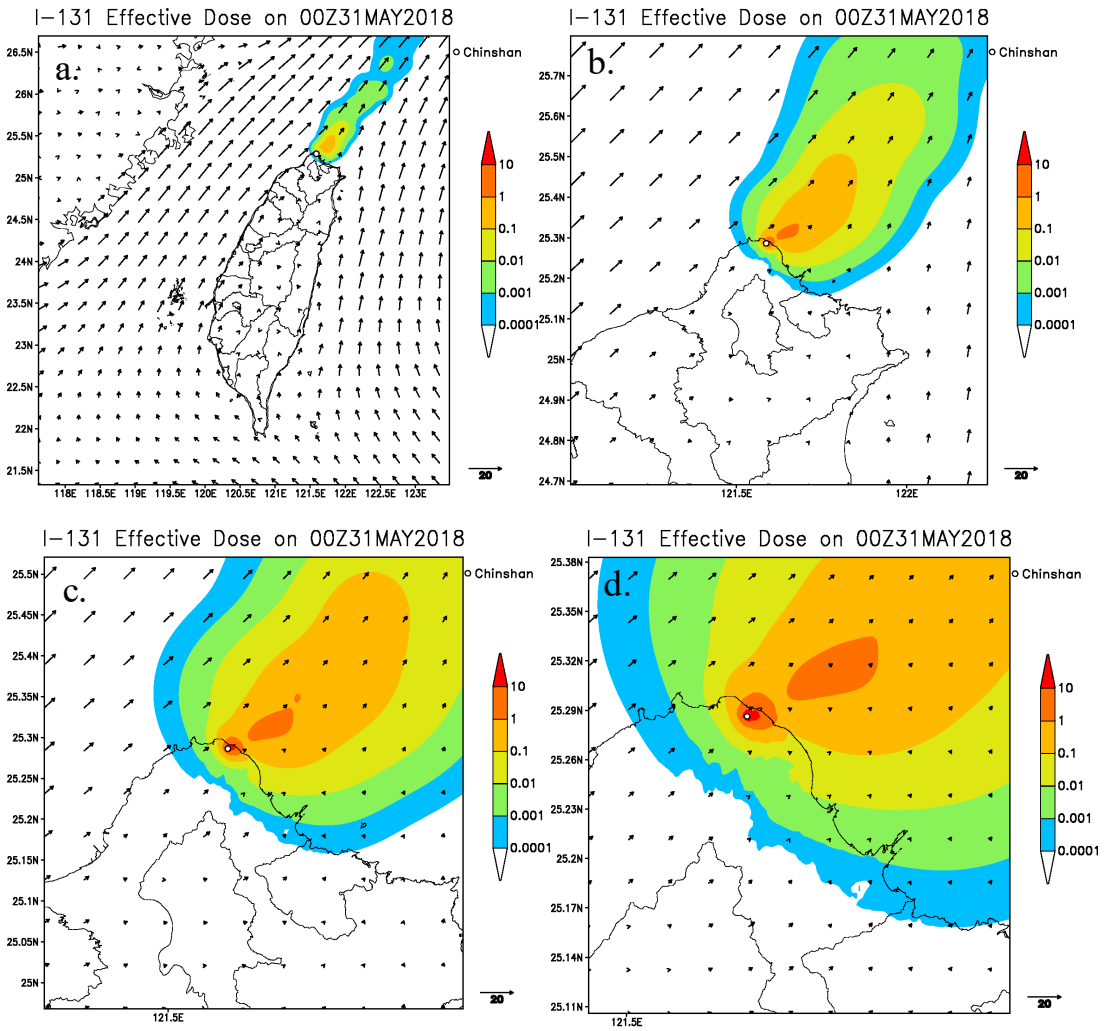


圖 3-15 核一廠 4 層巢狀網格之劑量評估系統結果，圖為 2018/05/30 I-131 的假想案例模擬，預報 24 小時後(2018/05/31)的有效劑量率分布，單位:mSv/hr。由左至右，由上至下依序為 a. 解析度 2.5 公里 b.解析度 1 公里 c.解析度 500 公尺 d.解析度 250 公尺。

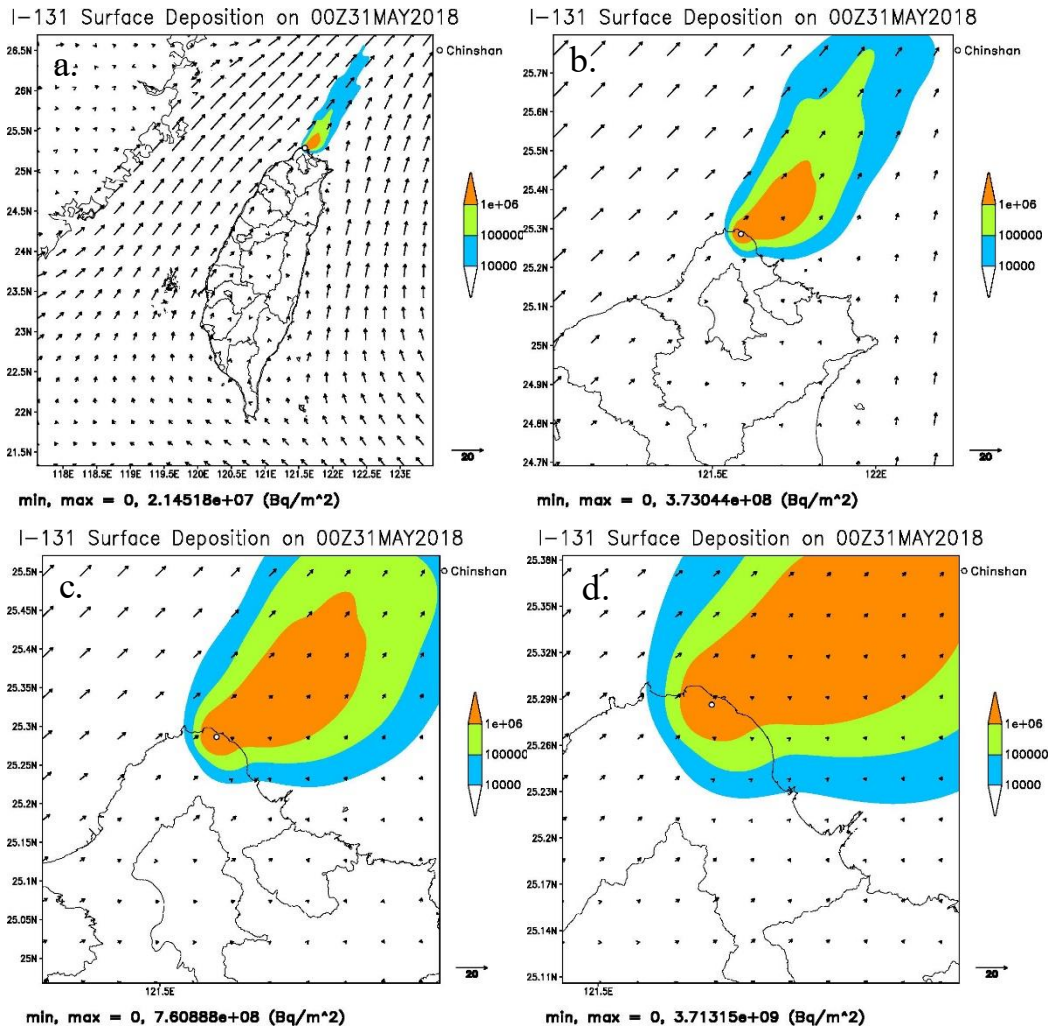


圖 3-16 核一廠 4 層巢狀網格之劑量評估系統結果，圖為 2018/05/30 I-131 的假想案例模擬，預報 24 小時後(2018/05/31)的沉降量活度濃度分布，單位:Bq/m^2。由左至右，由上至下依序為 a. 解析度 2.5 公里 b.解析度 1 公里 c.解析度 500 公尺 d.解析度 250 公尺。

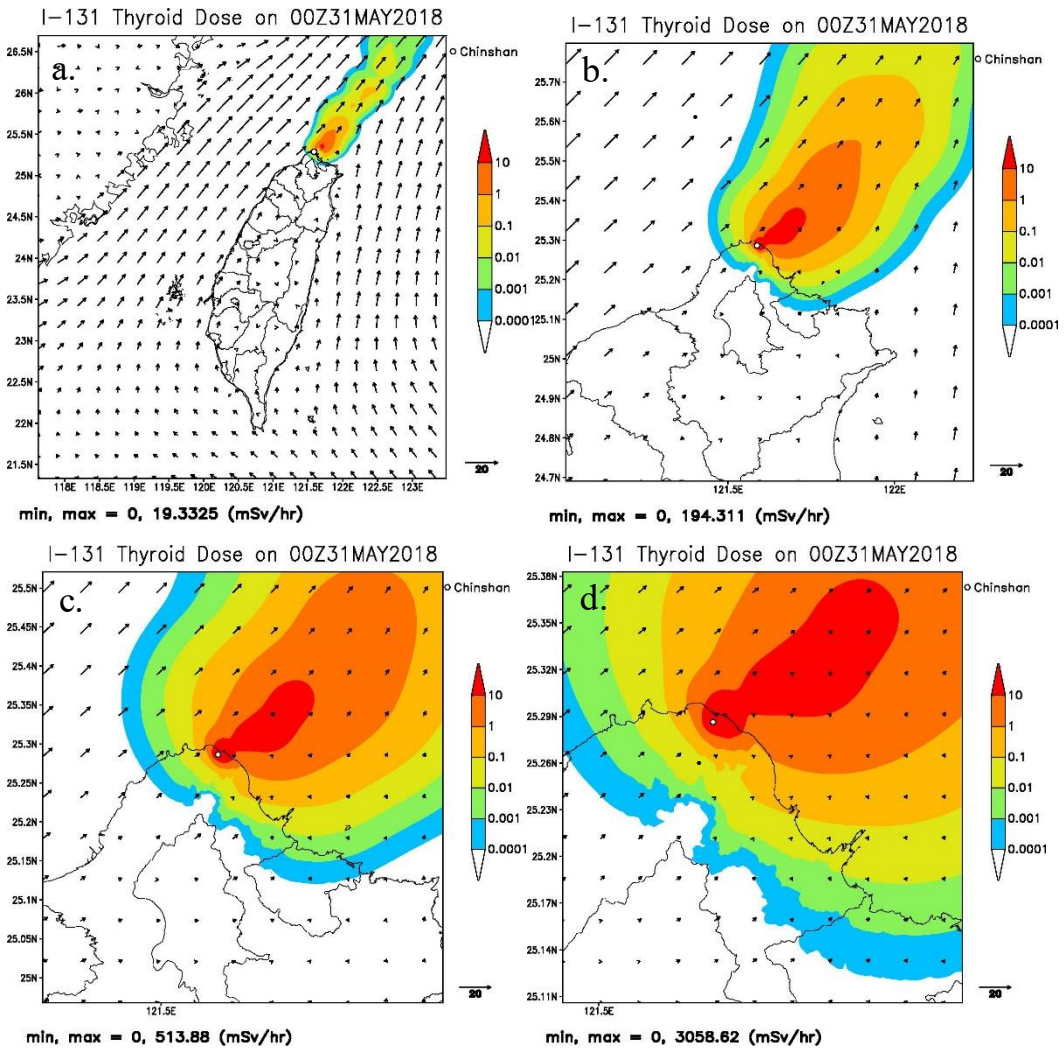


圖 3-17 核一廠 4 層巢狀網格之劑量評估系統結果，圖為 2018/05/30 I-131 的假想案例模擬，預報 24 小時後(2018/05/31)的甲狀腺約定等價劑量分布，單位:mSv/hr。由左至右，由上至下依序為 a. 解析度 2.5 公里 b.解析度 1 公里 c.解析度 500 公尺 d.解析度 250 公尺。

3.3. 核三廠區三層巢狀網格降尺度氣象預報系統開發與建置

為使全真化氣象預報滿足現行緊急應變計畫區半徑 8 公里和 8 公里外的準備區，核三廠三層巢狀網格的設定如下：中心點設定為東經 120.7516，北緯 21.9581，蘭伯特投影，參考緯度為北緯 30 度和 60 度，參考經度與中心點的經度相同。

第一層巢狀網格取MDDS全真化2.5公里解析度範圍的資料，內插到以三層巢狀網格設定的 2 公里解析度範圍(共 129 公里)，並降尺度至 1 公里解析度。第二層巢狀網格取 1 公里解析度中間共 65 公里範圍，並降尺度至 500 公尺解析度。第三層巢狀網格取 500 公尺解析度中間共 32 公里範圍，並降尺度至 250 公尺解析度。其範圍如

圖 3-18 所示：最外圍的黑色框為 MDDS 第一層巢狀網格 1 公里解析度總共 128 公里範圍，其滿足核三廠半徑 30 公里 1 公里解析度範圍。其次黑色框為 MDDS 第二層巢狀網格 500 公尺解析度共 64 公里範圍，其滿足核三廠半徑 20 公里 500 公尺解析度範圍。最小的黑色框為 MDDS 第三層巢狀網格 250 公尺解析度 32 公里範圍，其滿足核三廠半徑 10 公里 250 公尺解析度範圍(紅色框)。MDDS 地形高度和地表利用資料捨棄 USGS(U.S. Geological Survey，美國地質調查局) 30 秒資料(約 1 公里解析度)，改用中央大學的高解析度地形高度資料(100 公尺解析度)和高解析度地表利用資料(NCU-CSRSR，Center for Space and Remote Sensing Research，國立中央大學太空及遙測研究中心，40 公尺解析度)。

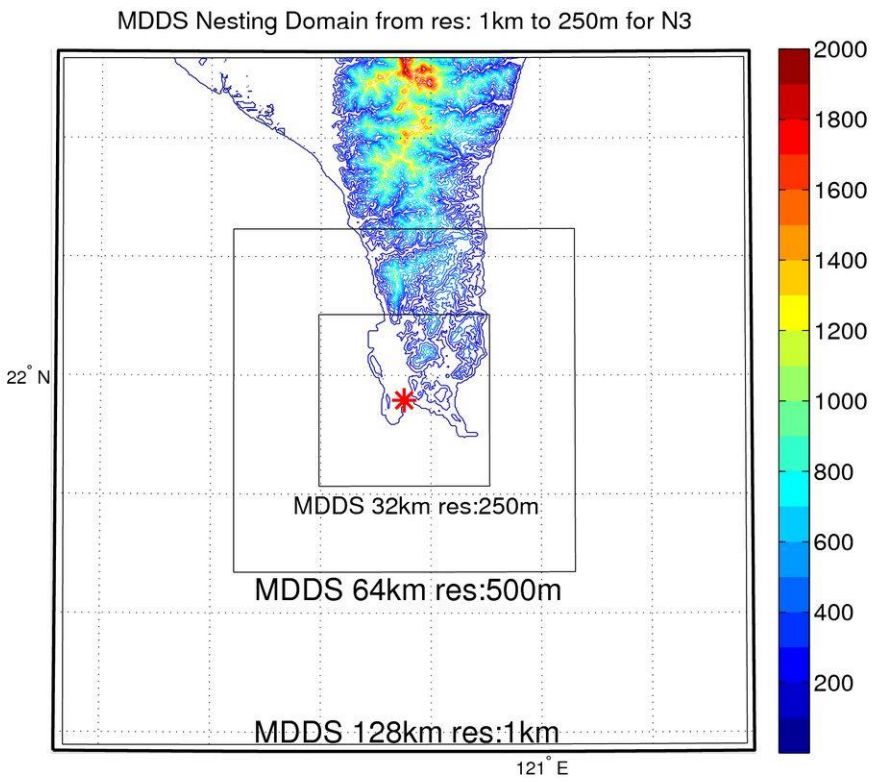


圖 3-18 核三廠區 MDDS 3 層巢狀網格區範圍圖。最外圍的黑色框為 MDDS 第一層巢狀網格 1 公里解析度共 128 公里範圍，其次黑色框為 MDDS 第二層巢狀網格 500 公尺解析度共 64 公里範圍，最小的黑色框為 MDDS 第三層巢狀網格 250 公尺解析度 32 公里範圍

3.4. 核三廠區三層巢狀網格降尺度氣象預報系統案例測試

測試案例為 2018 年 03 月 08 號 00Z 的時間點，其天氣系統概況為冷鋒面通過台灣，鋒面不連續帶尾正位在蘭嶼附近，台灣正被冷鋒後的冷高壓勢力所籠罩，全台灣風場均為較強烈的東北風。圖 3-19 為當時的地面天氣圖，可見台灣正位於鋒面後壓力梯度較大的區域。

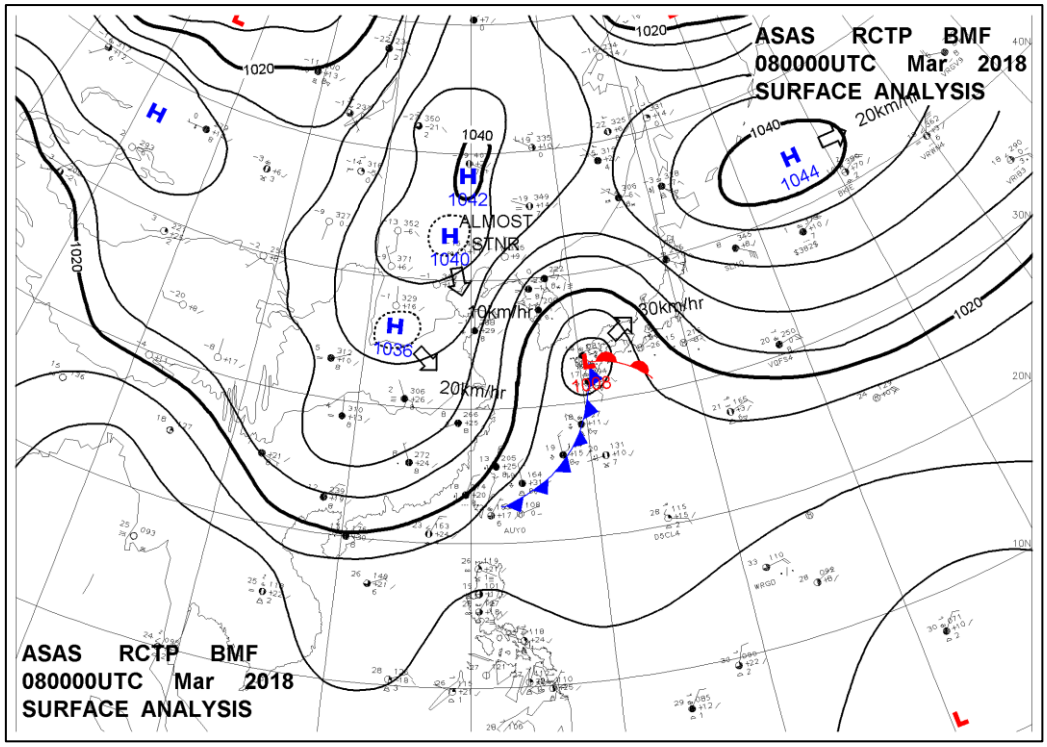


圖 3-19 2018 年 3 月 8 號地面天氣圖，其時間台灣正被冷鋒後的冷高壓勢力所籠罩，全台灣風場均為較強烈的東北風。

圖 3-20 到圖 3-22 分別為核三廠 1 公里，500 公尺，及 250 公尺解析度範圍所表示的風場，台灣地區北部、東部均為東北風，西半部風場由北而南依序為風場中央山脈所形成的東北風、北風、西北風，屏東一帶則為東北風跨越山勢較矮的中央山脈所形成的東風及東北風系。在 1 公里的解析度中，可以看到東部海面的東風遇到屏東北部較高的中央山脈而轉向成北風系，直到南邊山勢較低轉為東北風過山，隨後在山後弱風速區產生依順時針渦旋(枋山東部山區)。隨著解析度的增加，可以看到 MDDS 解析出東北風系遇到大佛山所形成的繞流及渦漩。墾丁一帶則因為地勢較為平緩仍維持東北風系。對比地面觀測站的圖，圖 3-23 為氣象局自動氣象站(newshp)、氣象局局屬測站(meso)及機場站(metar)之同時間測站風向圖，可以發現測站和 MDDS 解析結果差不多，

東部為東北風，西部為西北風，墾丁一帶為東北風系。

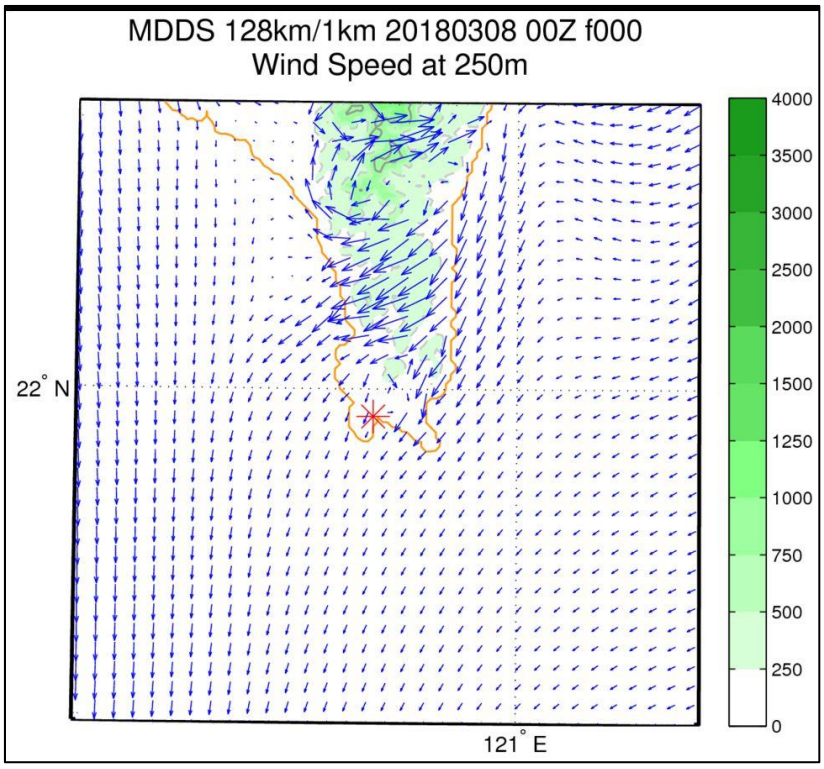


圖 3-20 MDDS 核三廠第一層巢狀網格(1 公里解析度)風場圖。東部海面的東風遇到屏東北部較高的中央山脈而轉向成北風系，直到南邊山勢較低轉為東北風過山，隨後在山後弱風速區產生依順時針渦旋(枋山東部山區)。

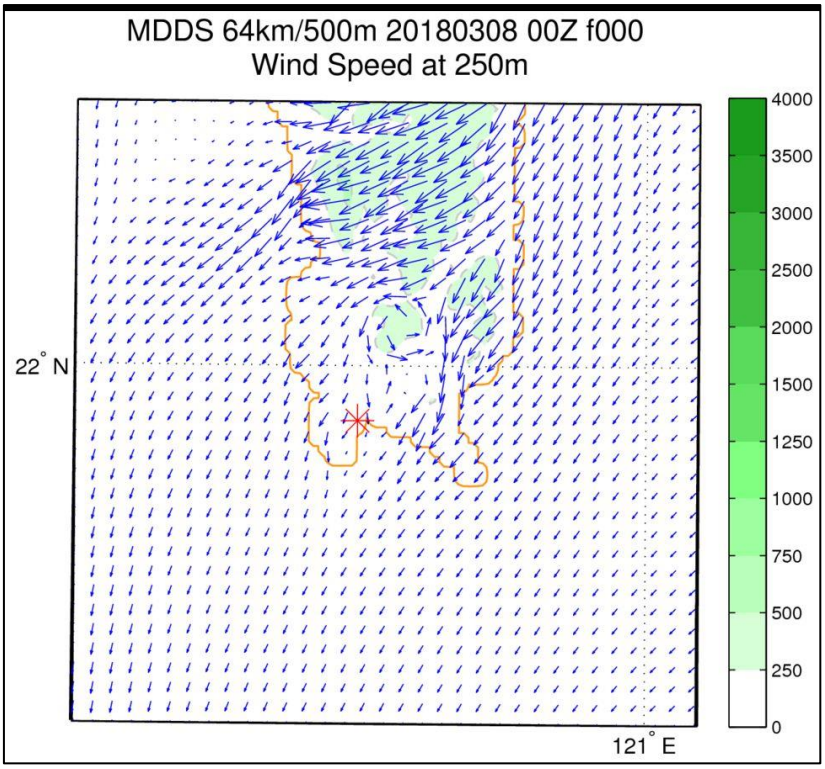


圖 3-21 MDDS 核三廠第二層巢狀網格(500 公尺解析度)風場圖。

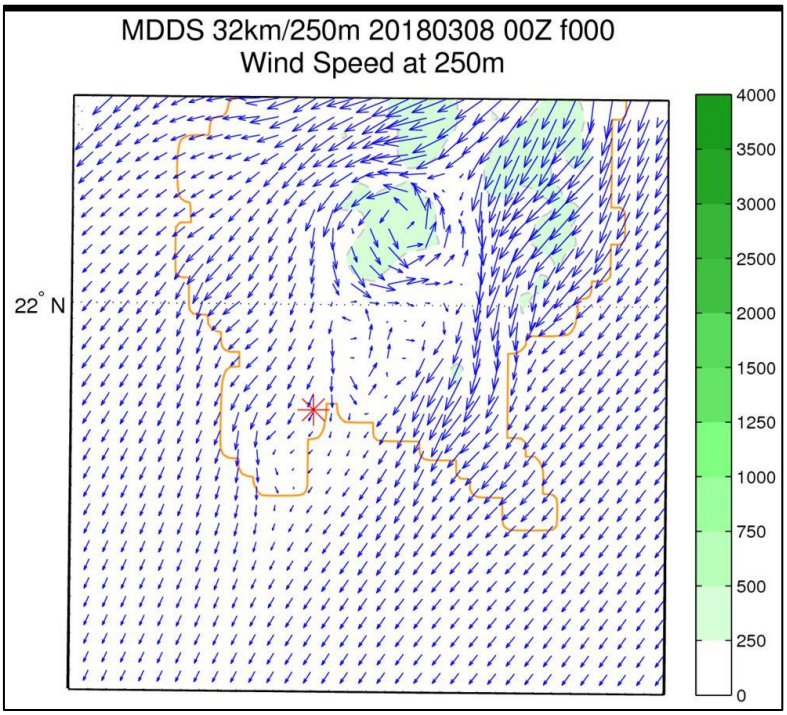


圖 3-22 MDDS 核三廠第三層巢狀網格(250 公尺解析度)風場圖。隨著解析度的增加，可以看到 MDDS 解析出東北風系遇到大佛山所形成的繞流及渦漩。墾丁一帶則因為地勢較為平緩仍維持東北風系。

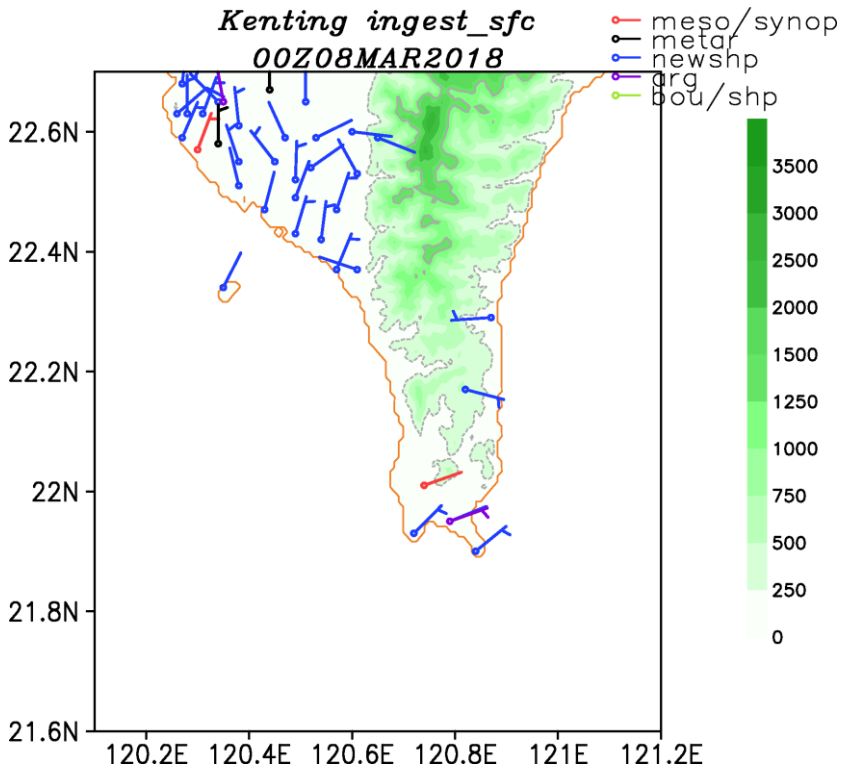


圖 3-23 2018/03/08 氣象局自動氣象站(藍色風標)、氣象局局屬測站(紅色風標)及機場站(黑色風標)測站風向圖。測站觀測結果和 MDDS 解析結果差不多，東部為東北風，西部為西北風，墾丁一帶為東北風系。

圖 3-24 到圖 3-26 則分別為 1 公里，500 公尺，及 250 公尺解析度範圍所表示的壓力擾動場，由於大氣環境中最主要受到冷高壓影響，壓力擾動場由北而南是由高到低且梯度較大，可以看到隨著解析度的增加，越能解析出壓力場在地形上面的變化。圖 3-27 到圖 3-29 分別為 1 公里，500 公尺，及 250 公尺解析度範圍所表示的溫度擾動場，同樣受到冷高壓影響，溫度梯度較為大，由北到南分別由低溫到高溫，同樣可以看到隨著解析度的增加，越能解析出溫度擾動場在地形上面的變化。

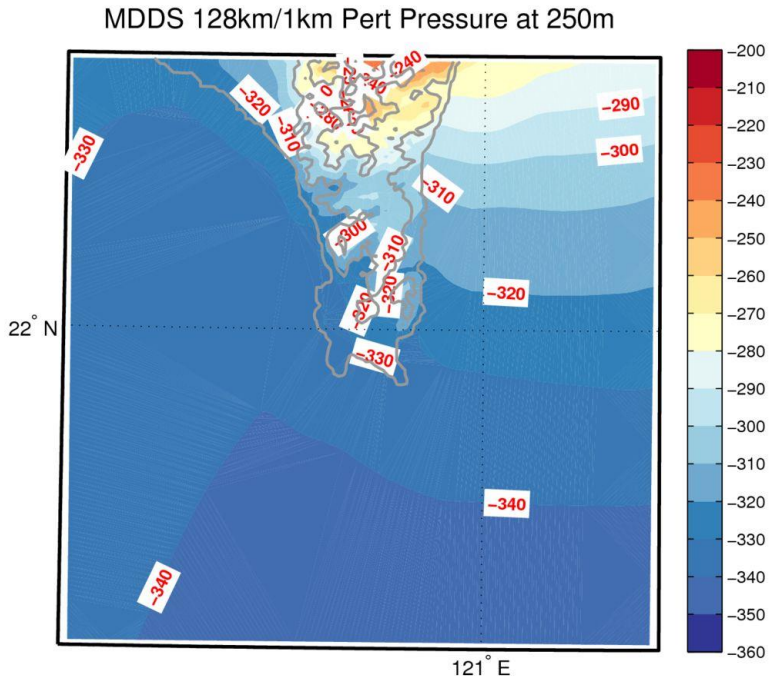


圖 3-24 MDDS 核三廠第一層巢狀網格(1 公里解析度)壓力擾動場。此時大氣環境中最主要受到冷高壓影響，壓力擾動場由北而南是由高到低且梯度較大，可以看到隨著解析度的增加，越能解析出壓力場在地形上面的變化。

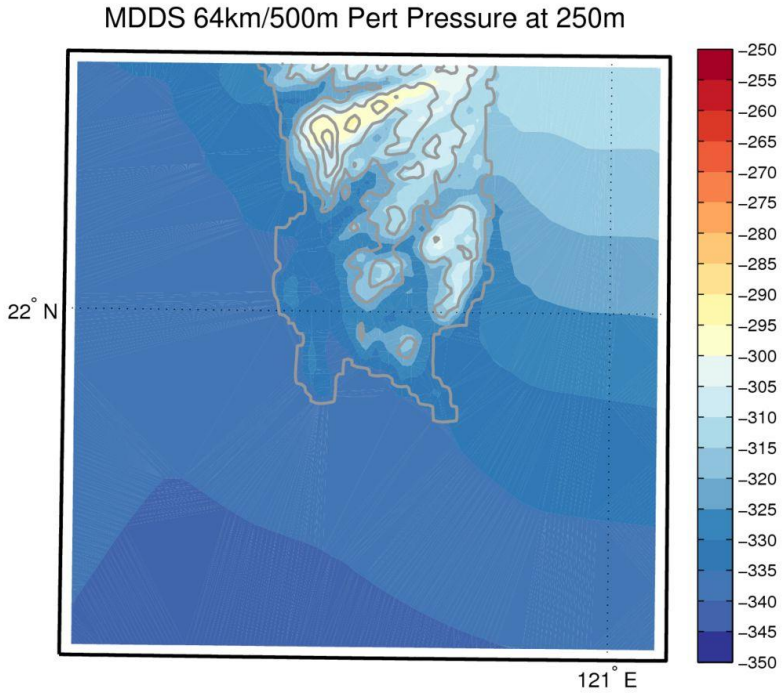


圖 3-25 MDDS 核三廠第二層巢狀網格(500 公尺解析度)壓力擾動場

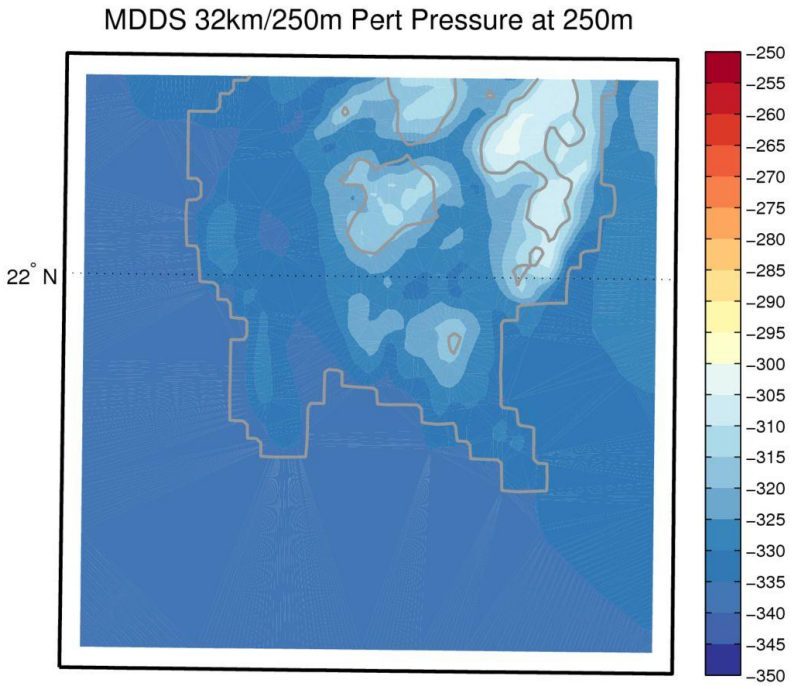


圖 3-26 MDDS 核三廠第三層巢狀網格(250 公尺解析度)壓力擾動場

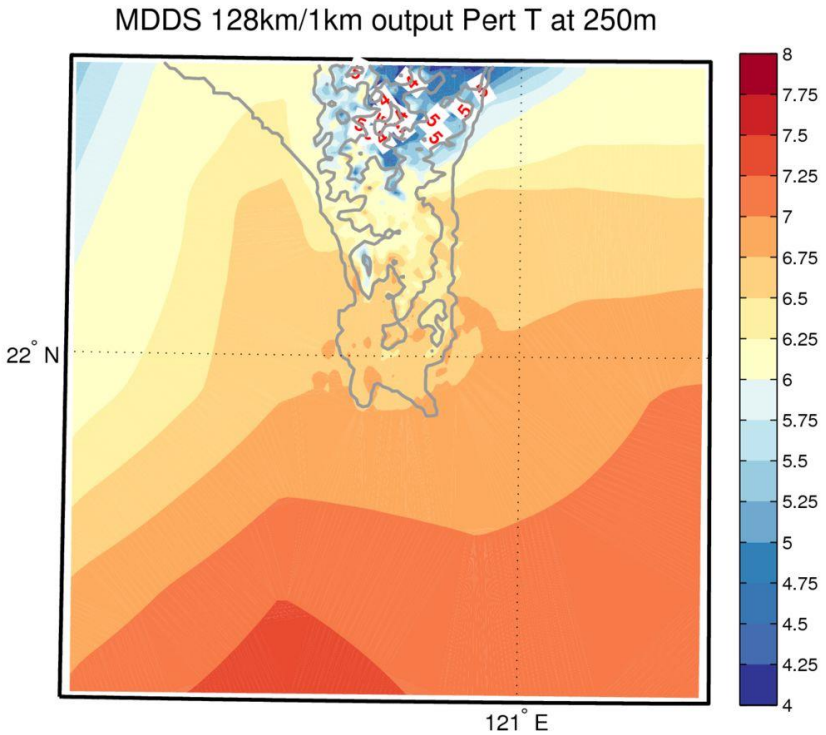


圖 3-27 MDDS 核三廠第一層巢狀網格(1 公里解析度)溫度擾動場。同樣受到冷高壓影響，南北溫度梯度較大，由北到南分別由低溫到高溫，同樣可以看到隨著解析度的增加，越能解析出溫度擾動場在地形上面的變化，地形越高溫度越低。

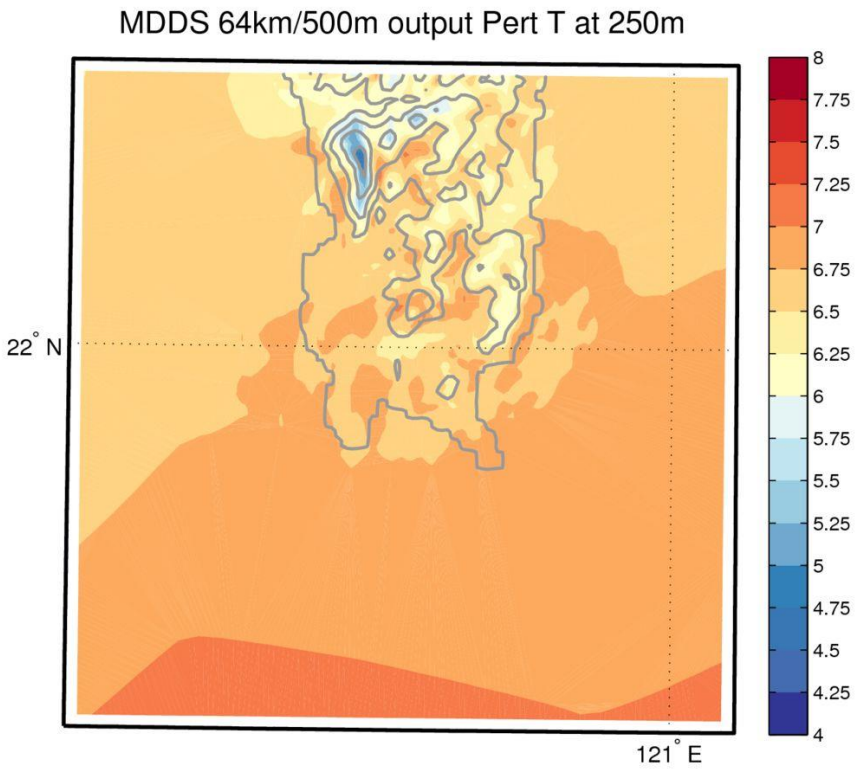


圖 3-28 MDDS 核三廠第二層巢狀網格(500 公尺解析度)溫度擾動場

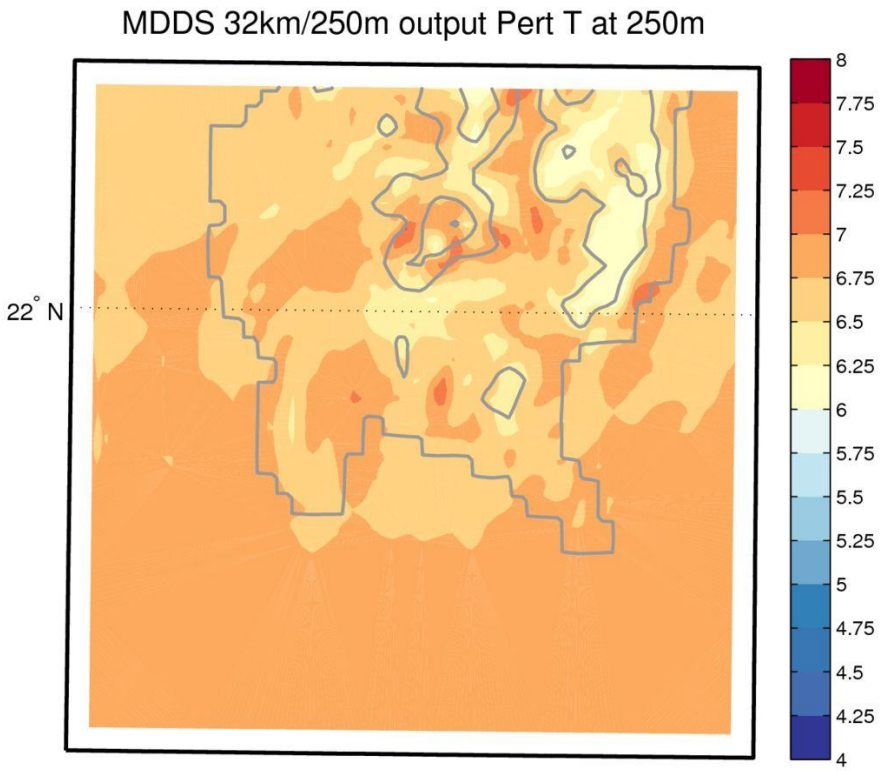


圖 3-29 MDDS 核三廠第三層巢狀網格(250 公尺解析度)溫度擾動場

3.5. 濕沉降功能之案例驗證

案例選擇 107 年 9 月 24 日，東北風南下北部迎風面屬於有雨的天氣，由當日的 24 小時累積雨量圖，如圖 3-30，北部的降雨主要集中在雪山山脈以及宜蘭南部沿岸，而核一、核二廠所在之北海岸也有明顯的降雨，因此選取這個個案分別進行只有乾沉降及包含濕沉降過程的比較，在劑量評估系統中引入的降雨資訊來自 CWB WRF 5 公里的 84 小時降雨預報資訊，其時間解析度為 6 小時，如圖 3-31。

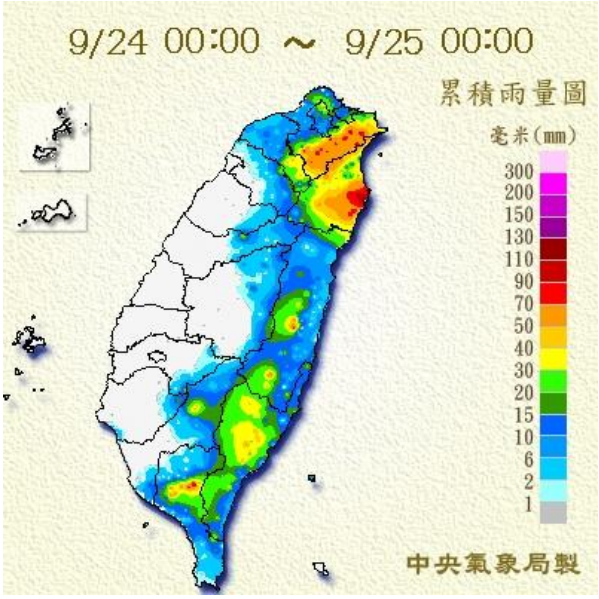


圖 3-30 2018 年 9 月 24 日 24 小時降雨累積圖(圖片來源:中央氣象局官網)

核一廠在 9 月 24 日的假想事故模擬結果中，利用 Cs-137 的模擬結果進行比較，圖 3-32 為僅有乾沉降過程的空氣劑量率分布，圖 3-33 為僅有乾沉降過程之沉降量累積分布，圖 3-34 為包含濕沉降過程的空氣劑量率分布，圖 3-35 為包含濕沉降過程之沉降量累積分布，兩相比較之下可看出在 06 時和 24 時，有濕沉降過程的結果中，空氣劑量率(圖 3-32 和圖 3-34 相比)明顯減少很多，沉降

量(圖 3-33 和圖 3-35 相比)則是增加許多，顯示在有降雨的情況下，有許多的放射性污染物透過了模式中的濕沉降機制沉降到了地面上，而在只有乾沉降過程時，地表沉降量則是比較小的(圖 3-33)。

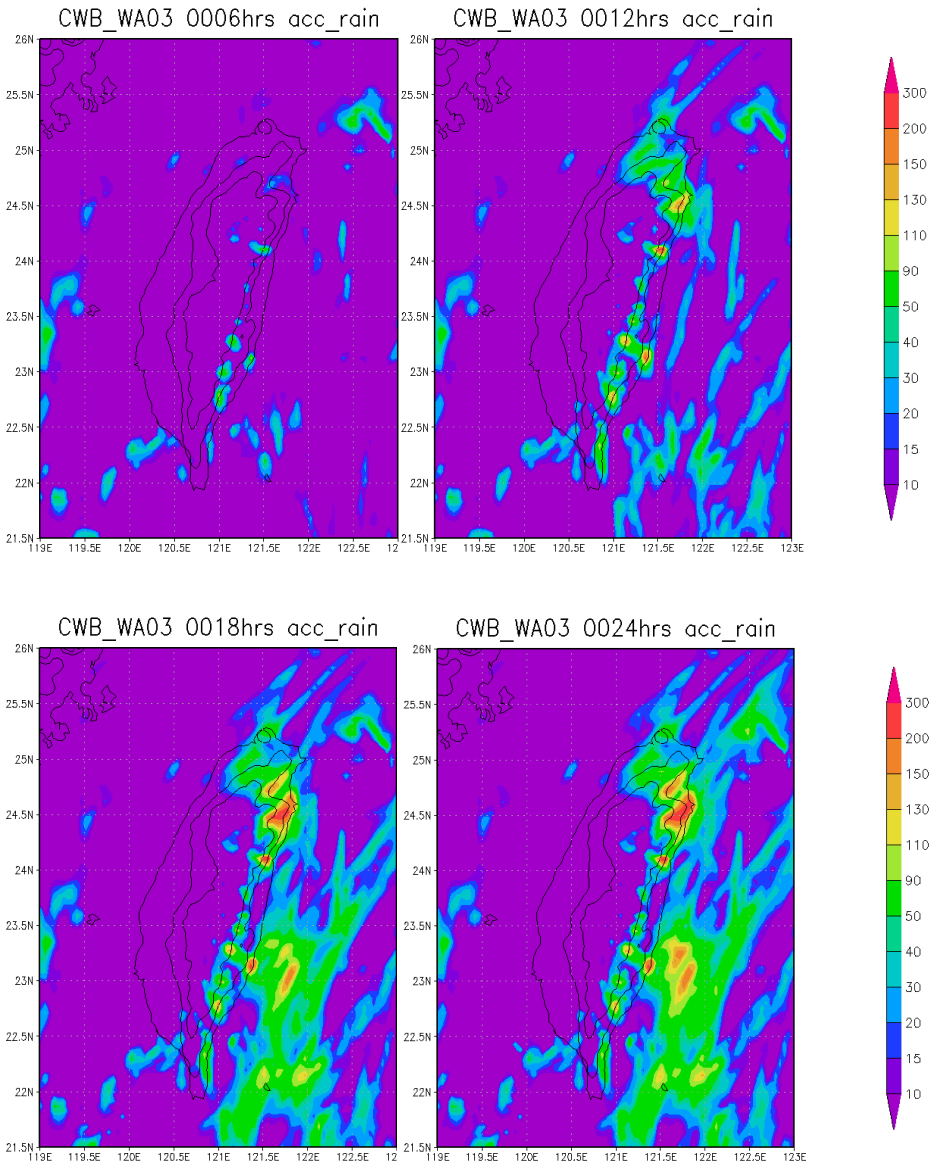


圖 3-31 2018 年 9 月 24 日 CWB WRF 每六小時累積降雨預報分布圖(mm)，水平解析度為 5 公里。

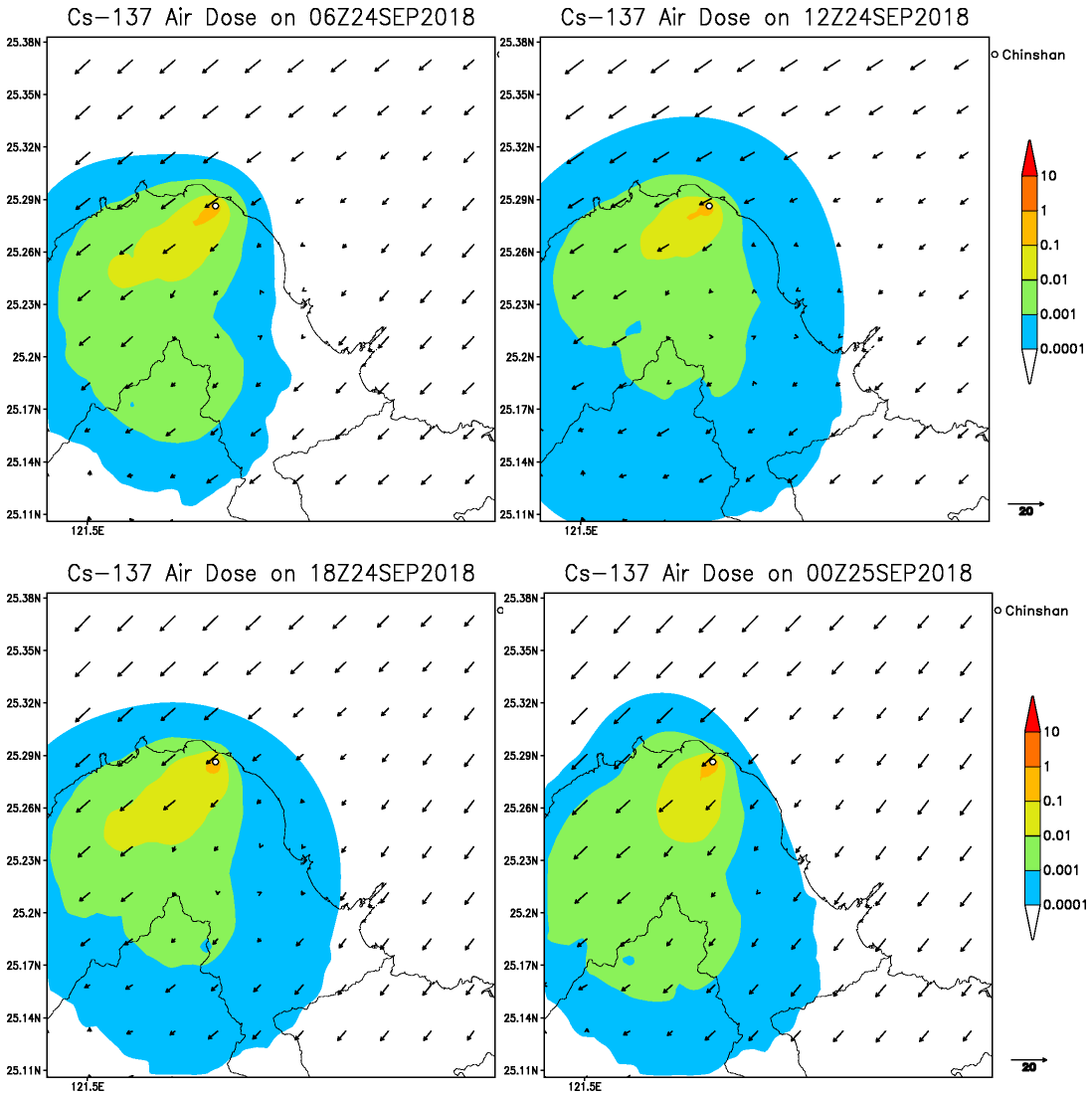


圖 3-32 2018 年 9 月 24 日僅有乾沉降過程之每六小時之空氣劑量率(mSv/hr)分布。

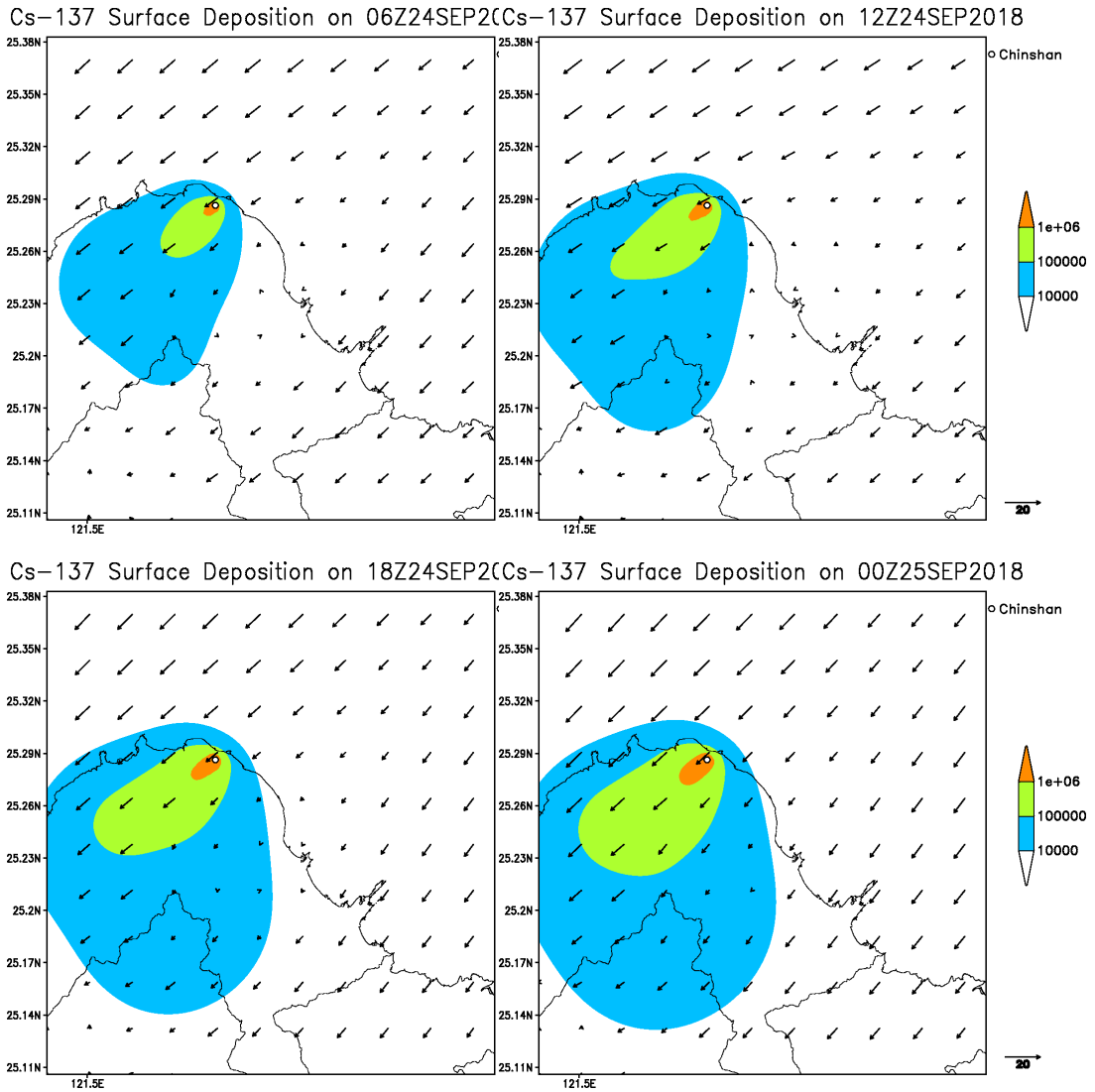


圖 3-33 2018 年 9 月 24 日僅有乾沉降過程之每六小時之地表沉降累積量(Bq/m^2)分布。

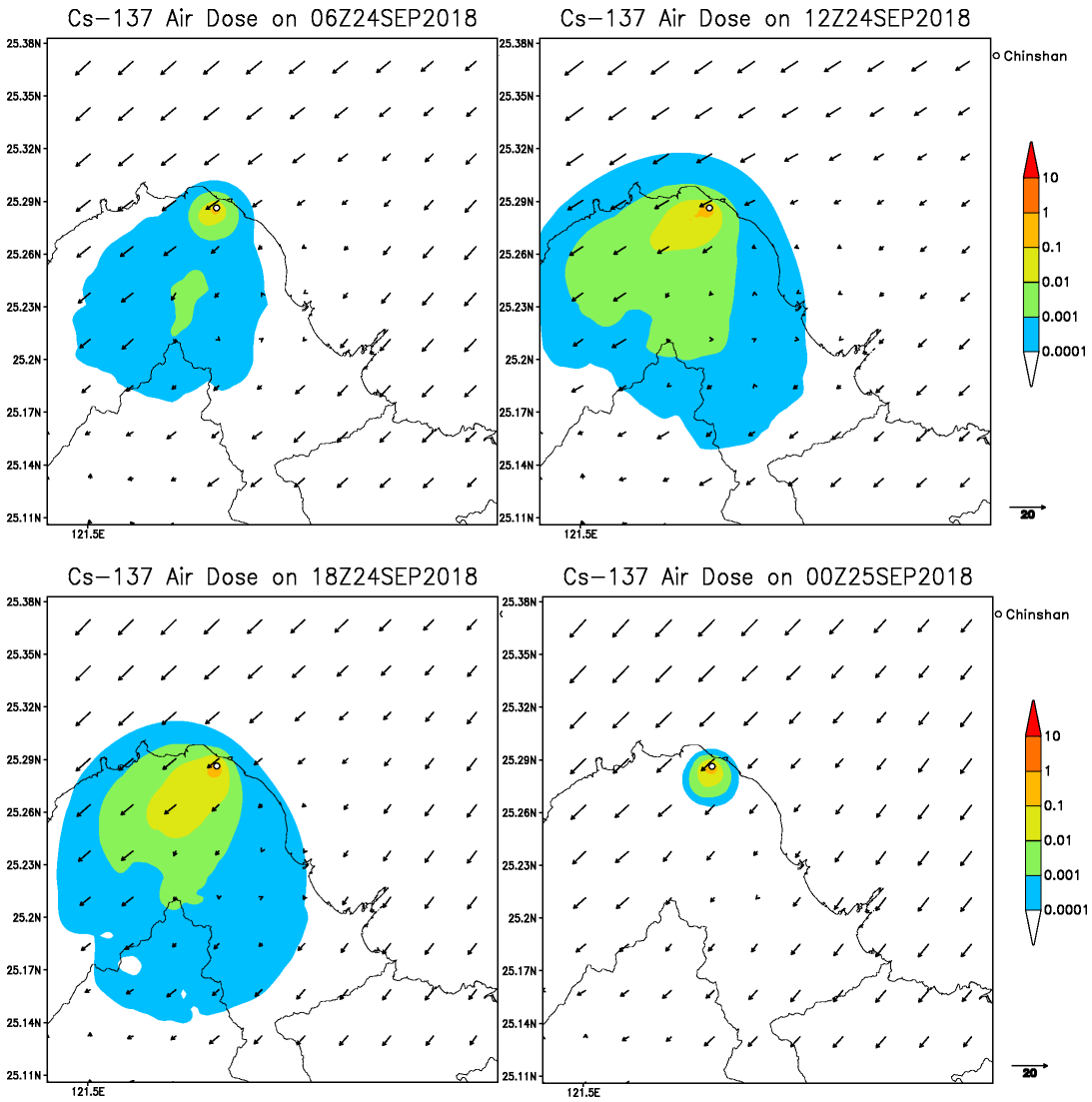


圖 3-34 2018 年 9 月 24 日包含濕沉降過程之每六小時之空氣劑量率(mSv/hr)分布。

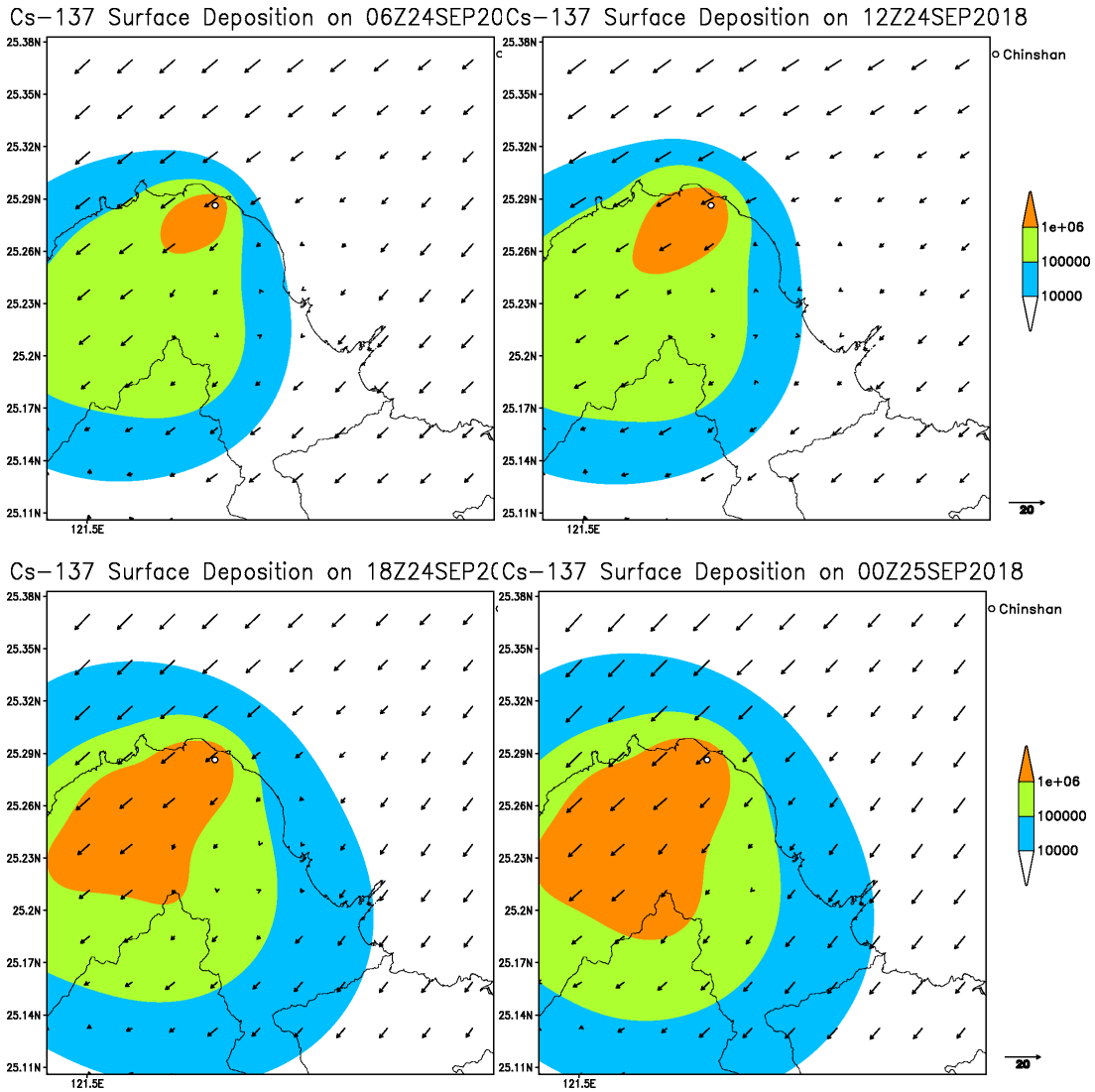


圖 3-35 2018 年 9 月 24 日包含濕沉降過程之每六小時之地表沉降累積量(Bq/m^2)分布。

4. 核電廠假想事故各季節每日案例對於陸地行政區域之影響情況分析

由於每周例行作業案例選取，以當週週三至下週週二為一案例選取期間，冬季每日案例的探討時間為 2017 年 11 月 29 日至 2018 年 2 月 27 日，共 13 周，春季每日案例的探討時間為 2018 年 2 月 28 日至 2018 年 5 月 29 日，共 13 周，夏季每日案例的探討時間為 2018 年 5 月 30 日至 2018 年 8 月 28 日，共 13 周，秋季每日案例的探討時間為 2018 年 8 月 29 日至 2018 年 10 月 30 日及 2017 年 11 月 03 日至 2017 年 11 月 28 日，共 13 周。假想案例釋放條件是 Cs-137 7.2121×10^{9}Bq/s 連續釋放，I-131 7.2121×10^{10}Bq/s 連續釋放，藉由每周七天之累積有效劑量的分布，初步掌握各個電廠在此季節下的分布特性。分析每周七天累積劑量分布圖，發現核一、核二廠的位置雖然相距不遠，但是與北部地區地形相對位置不同，造成環境風場與地形交互作用有不同的結果，其分布特性便有很大的不同，在各個季節的統計分析上，核一和核二廠的分類依據則會採取不同的條件，核一廠在各種風向當中，受地形影響的程度較小，主要依據風向變化組合進行分類，而核二廠的劑量分布常與地形有較多的交互作用，因此除了風向的因素外，也會加入地形因素進行分類，透過各個類型在各個季節的發生頻率，得到核一、核二廠劑量分布特性之概念。由於 I-131 的釋放率較大，累積 7 日的劑量結果特色較為顯著易分析，因此，在各個季節個分類表格中，以 I-131 的累積圖作為代表。

4.1. 冬季案例探討

冬天的風向以東北風為主，依核一廠各週的分布，Cs-137 1 mSv 累積劑量影響的區域，對比至台灣北部的行政區域圖(圖 4-1)，大致上是北海岸的新北市的石門、三芝區，0.1 mSv 之累積劑量則可影響至台北市的北投區，I-131 之釋放量為 Cs-137 的 10 倍，且沉降速度為 Cs-137 的 3 倍，其累積之劑量較 Cs-137 顯著，1 mSv 的累積劑量可影響至台北市的北投、士林區，而北海岸的金山、石門、三芝地區都有到達 50mSv 以上的劑量影響。核一廠附近的地形在東北風主宰的風場環境下，通常是一般的高斯分布的狀態，僅隨著風場角度的不同，而有一些變化，分布特性較為單純，其東北風在冬季的劑量分布之圖例、日期、7 天累積劑量圖之標號，如表 4-1 所示，其中圖例的部分由於 I-131 之釋放量較大，其模擬結果之大值較為顯著，因此表格中皆以 I-131 之 7 天有效劑量之累積。

表 4-1 核一廠冬季每周劑量分布之分類

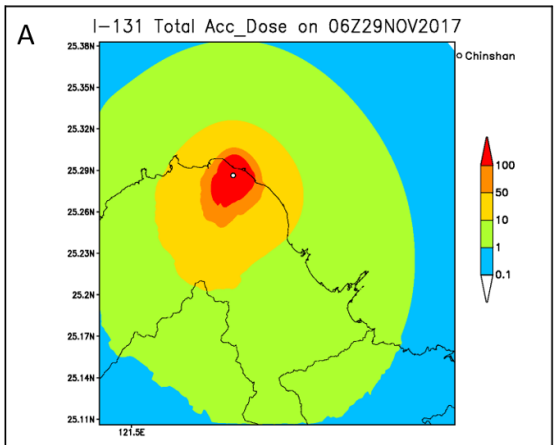
A	
風速較小的東北風影響之下，以核一廠為中心，近似圓形的分布	
2017/11/29~2018/2/27	
圖4-2a~m、圖4-3a~m	

圖 4-1　左:台灣北部地區行政圖(圖片來源:國家教育研究院電子報)，右: 台灣地區陸上 40 公尺解析度數值地形模型，圖上的 A 為報告中所指金山山麓位置，B 為大屯山群，C 為五指山(圖片來源:國立台北科技大學與中央研究院)

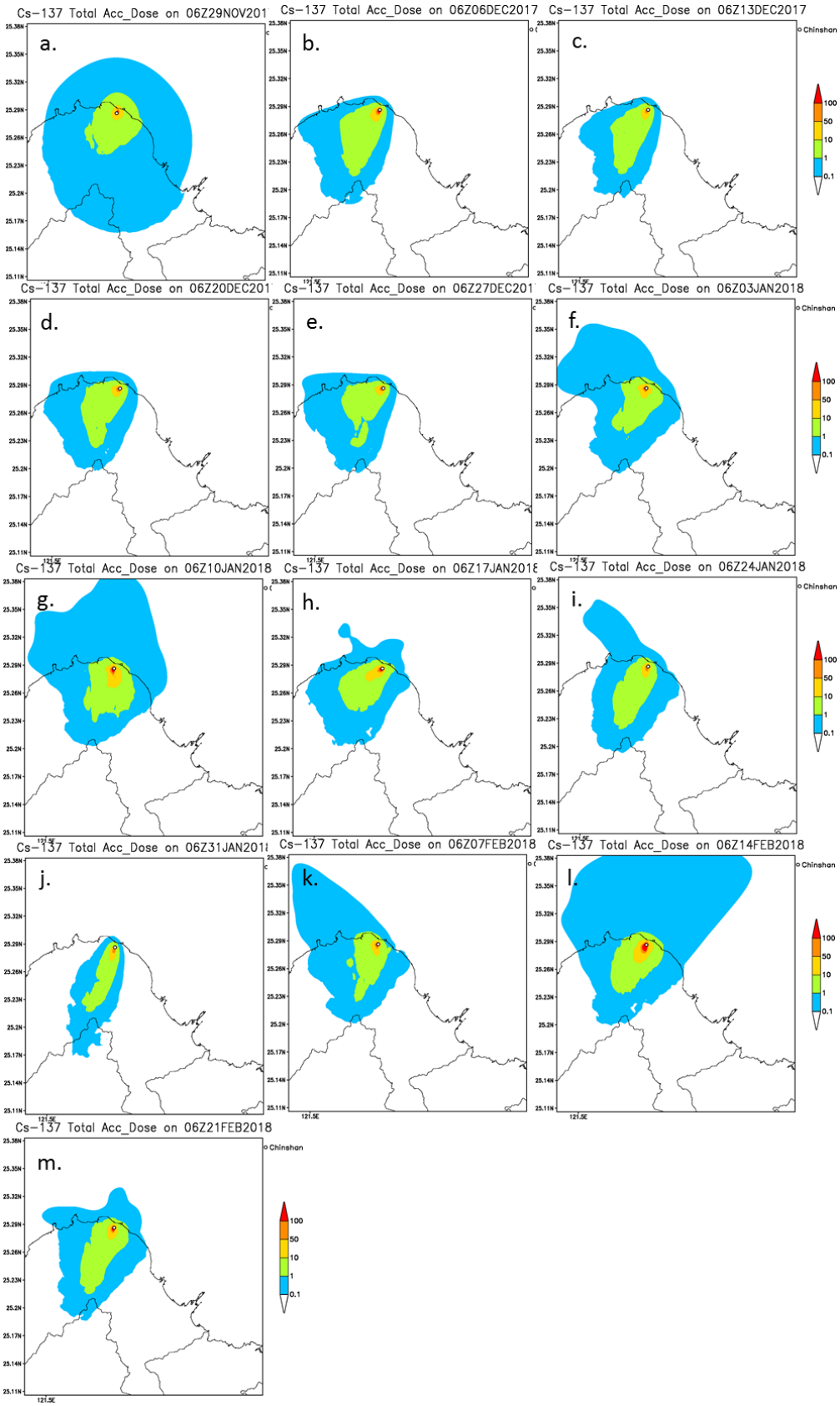


圖 4-2 核一廠冬季，自 2017 年 11 月 29 日至 2018 年 2 月 27 日 Cs-137 假想事故模擬之 7 日有效劑量累積圖(mSv)。

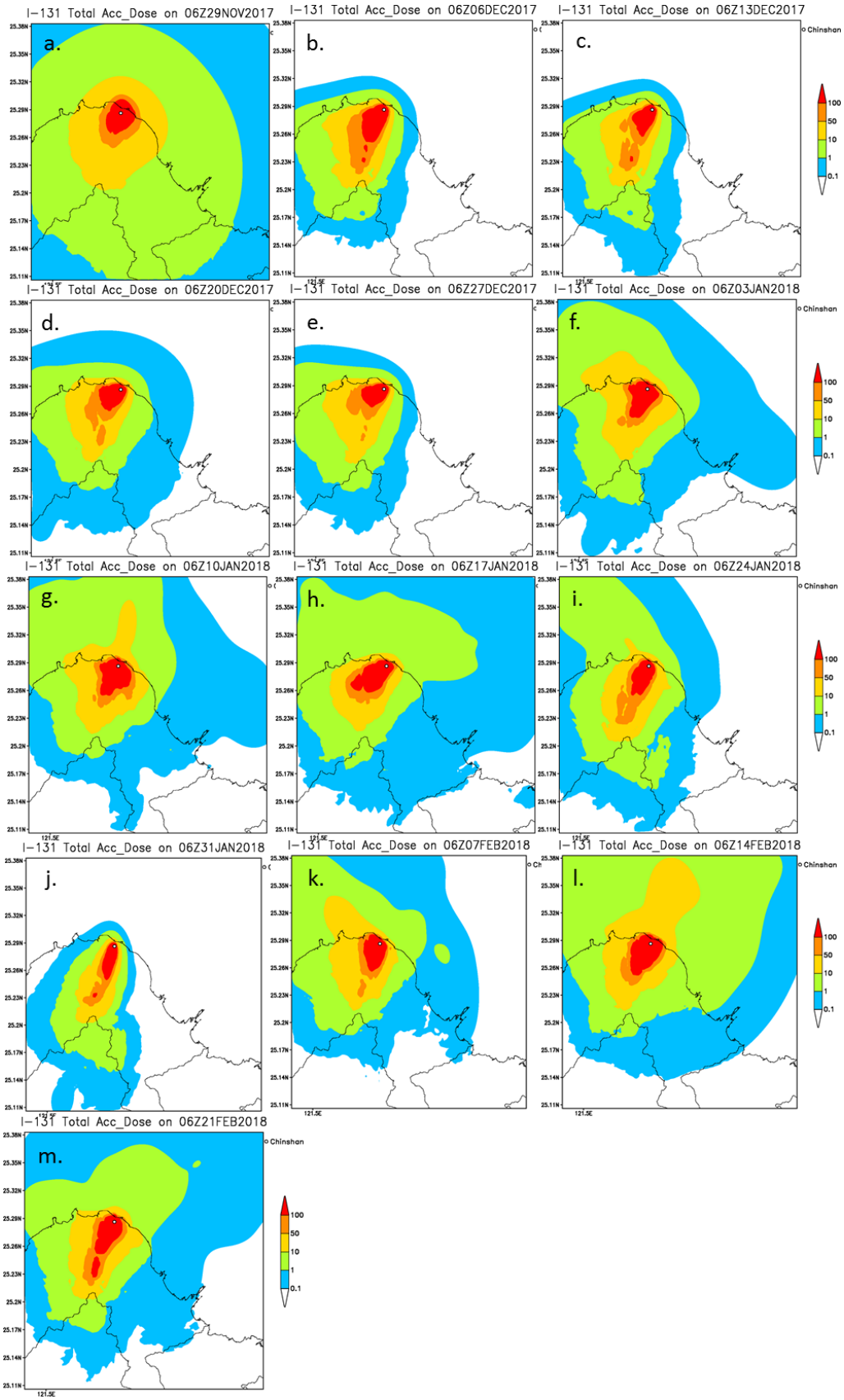
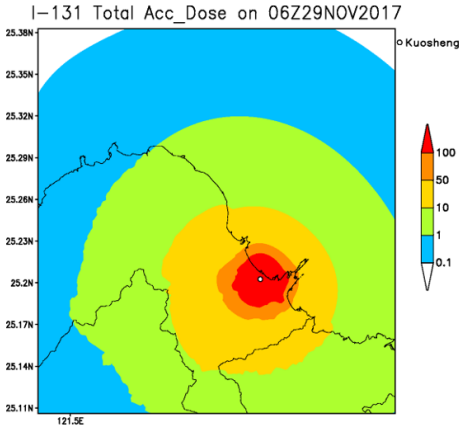
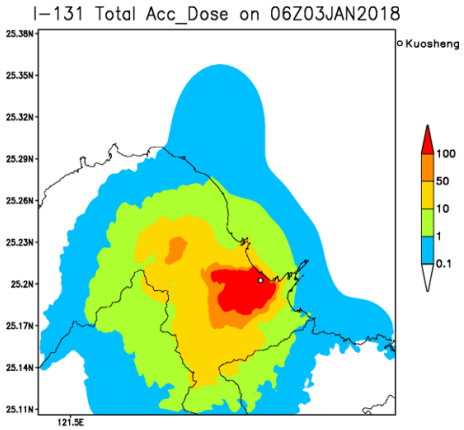
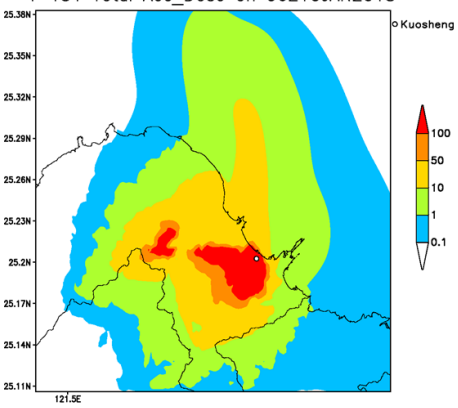
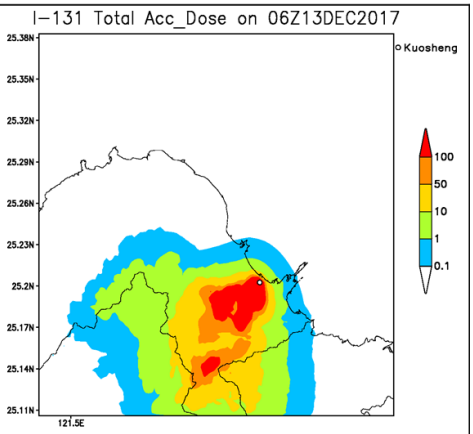


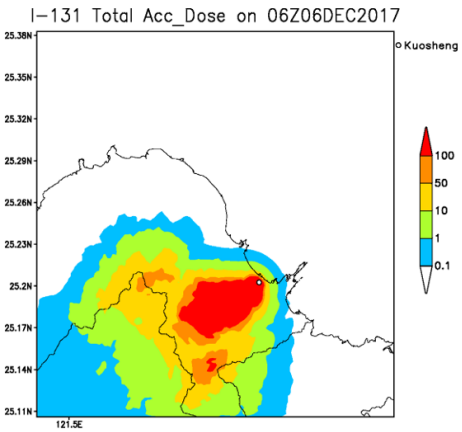
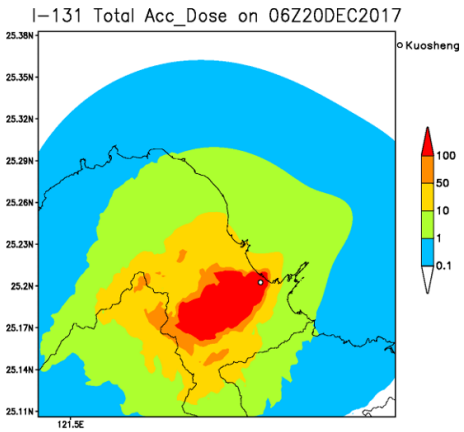
圖 4-3 核一廠冬季，自 2017 年 11 月 29 日至 2018 年 2 月 27 日 I-131 假想事故模擬之 7 日有效劑量累積圖(mSv)。

核二廠的 Cs-137 1 mSv 累積劑量影響的區域，大部分是新北市的萬里、金山地區，有時亦會影響到新北市的汐止區及基隆市的七堵區，而 0.1 mSv 的累積劑量則會影響到新北市的石門區及台北市的北投、士林、內湖區。I-131 1mSv 累積劑量影響區域包含了新北市之石門、金山、萬里、汐止區，基隆市之中山、安樂、七堵區，臺北市之北投、士林、內湖區，而 50 mSv 的累積劑量影響區域幾乎包含整個萬里區，值得注意的是，在核二廠周圍特殊的地形之下，如圖 4-1，大屯火山群大致上形成一個「乙」字形，恰好包圍了核二廠的西邊和南邊，而西邊的山勢較為陡峭，使得在盛行東風時，在核二廠西北邊的金山山麓容易有煙陣的累積，形成局部的極大值。冬季的分類可分為東北風的高斯擴散類型，受地形影響而產生局部大值的類型則可分為金山山麓東側累積、大屯山區累積、五指山累積、金山山麓及五指山累積、及三處都有累積共 6 類。其各個分類的劑量分布之圖例、日期、7 天累積劑量圖之標號，如表 4-2 所示。

表 4-2 核二廠冬季每周劑量分布之分類

A 	B 
穩定的東北風之下，大致為高斯分布	東南風的影響之下，在核二廠西北邊之金山山麓有一局部大值產生。
11/29~12/5	1/3~1/9、2/7~2/13、2/14~2/20
圖4-4a,圖4-5a	圖4-4f、k、l,圖4-5f、k、l

C 	D 
偏東風的影響下，受到高度大約1000公尺的大屯山群阻擋的局部大值。	在偏北風之下，受到核二廠南方之高度約600公尺的五指山阻擋，劑量在此產生區域大值。
1/10~1/16、1/17~1/23	12/13~12/19、1/31~2/6、2/21~2/27
圖4-4g、h,圖4-4g、h	圖4-4c、j、m、圖4-5c、j、m

E 	F 
偏北風和東風的風向組合下所造成兩處之劑量累積分布。	東北風和東南風之間的轉換所造成三處之劑量累積分布。
12/6~12/12	12/20~12/26、12/27~1/2、2/14~2/20
圖4-4b,圖4-5b	圖4-4d、e、I,圖4-4d、e、i

由 Cs-137 和 I-131 都明顯有累積的 2018/1/17、2018/2/7、2018/2/14 這三週(圖 4-4h、k、l 和圖 4-5h、k、l)，進行煙陣累積時風場的探討，以釐清在甚麼條件下會有累積的情況，了解核二廠的煙陣擴散與地形間的特性。

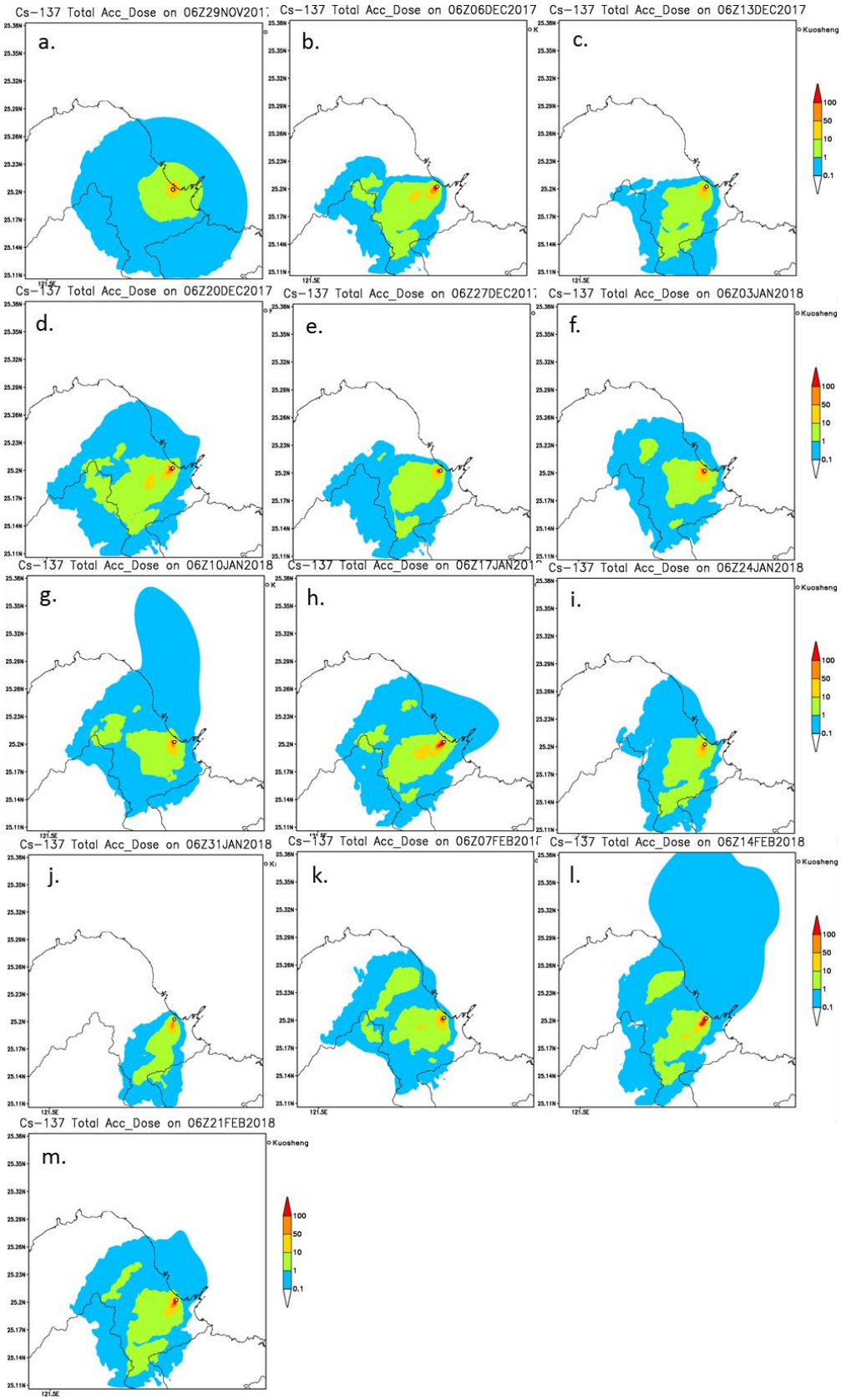


圖 4-4 核二廠冬季，自 2017 年 11 月 29 日至 2018 年 2 月 27 日 Cs-137 假想事故模擬之 7 日有效劑量累積圖(mSv)。

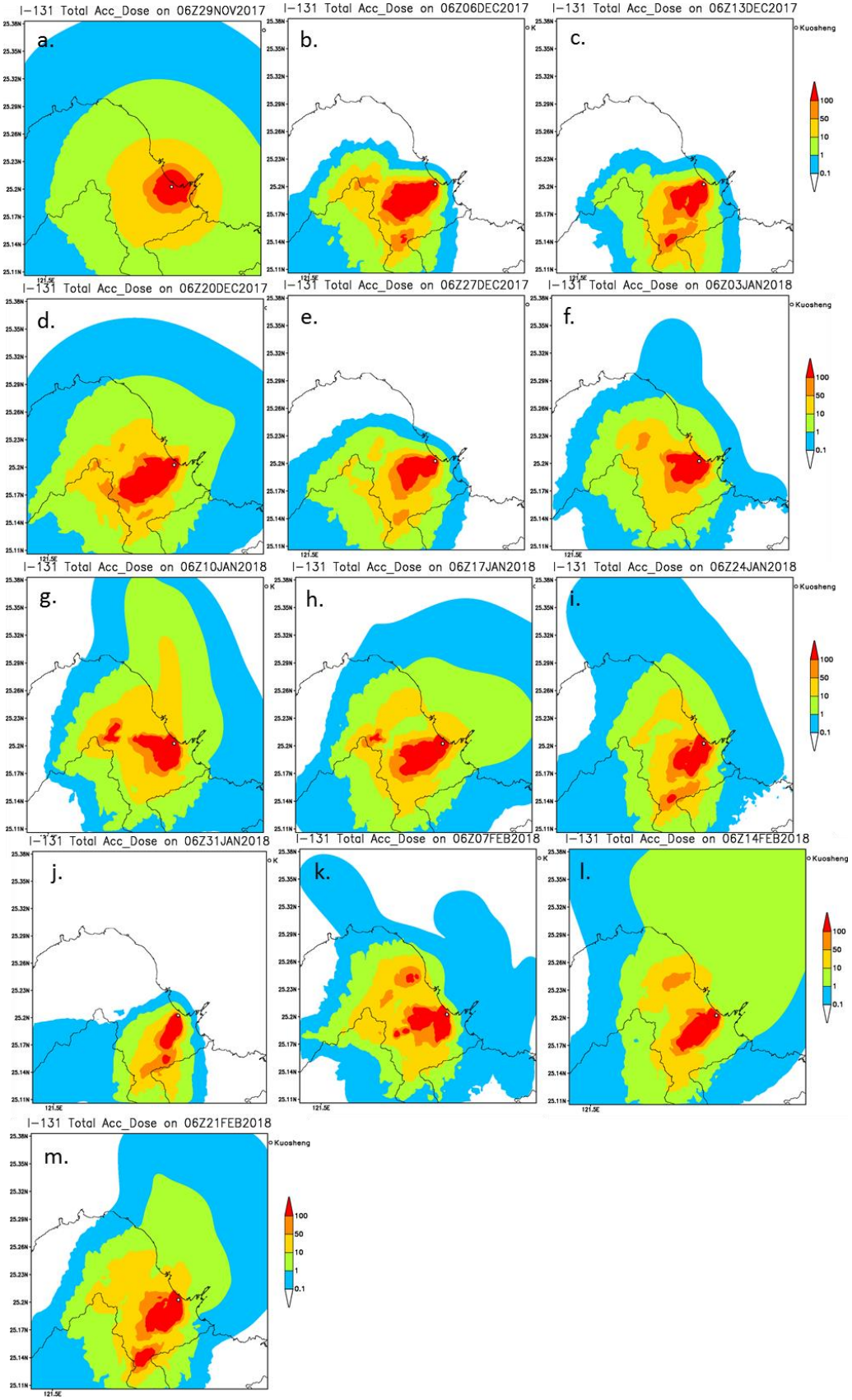


圖 4-5 核二廠冬季，自 2017 年 11 月 29 日至 2018 年 2 月 27 日 I-131 假想事故模擬之 7 日有效劑量累積圖(mSv)。

將這三周的七天共 28 個時間的風場及空氣劑量分布圖逐一檢視，並將有造成累積的時間挑出(圖 4-6~圖 4-11)，在 1 月 17 日的累積主要集中在大屯山區(如圖 4-1 右圖”B”所標示)，台北市北邊市界附近，這幾個時間的風向主要都以偏東風為主，在靠近山脈處會由偏東風的東北風，轉為偏東風的東南風，使得此處有風場的輻合，造成劑量的累積。2 月 7 日的劑量累積除了在台北市北邊市界附近之外，在新北市金山區的山坡上，此處的累積較無風場上的轉變，主要是在東南風的情況下，煙陣受到地形的阻擋，累積劑量在山坡上。

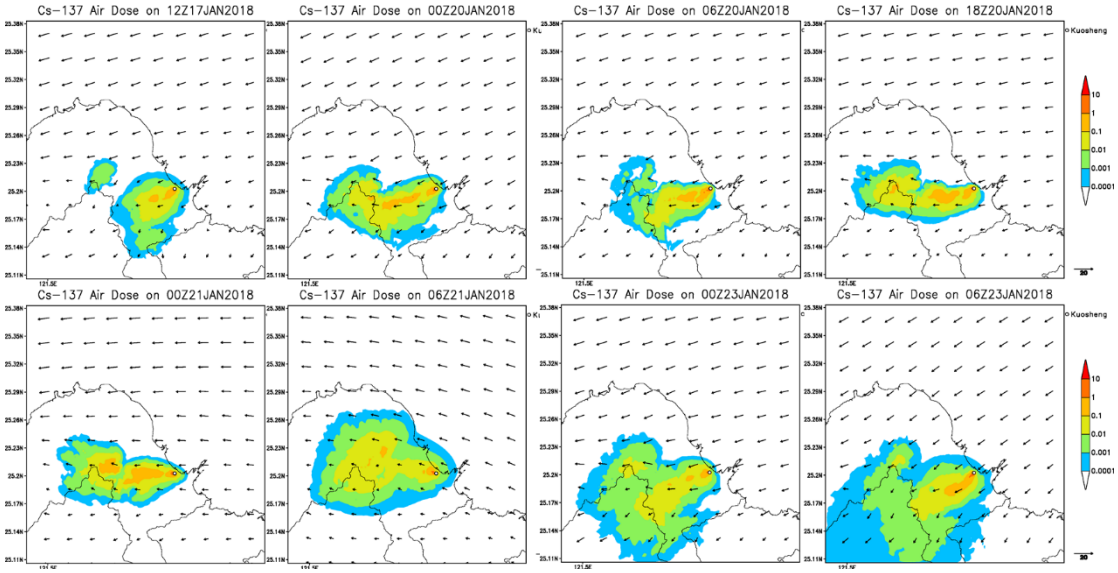


圖 4-6 2018 年 1 月 17 日當周，Cs-137 假想模擬中，劑量累積在大屯山的空氣劑量率及風場。

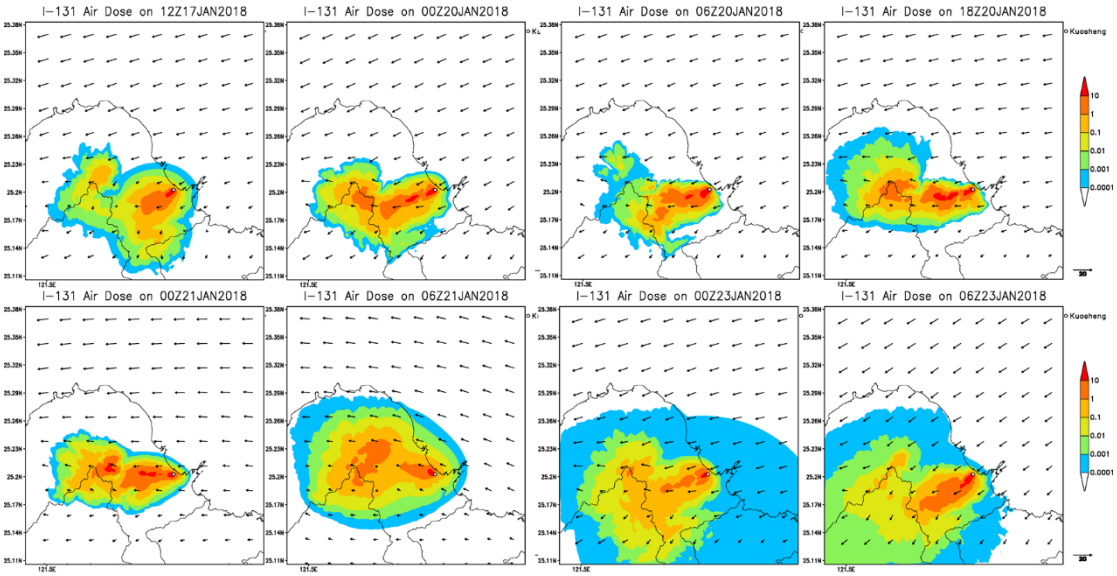


圖 4-7　2018 年 1 月 17 日當周，I-131 假想模擬中，劑量累積在大屯山的空氣劑量率及風場。

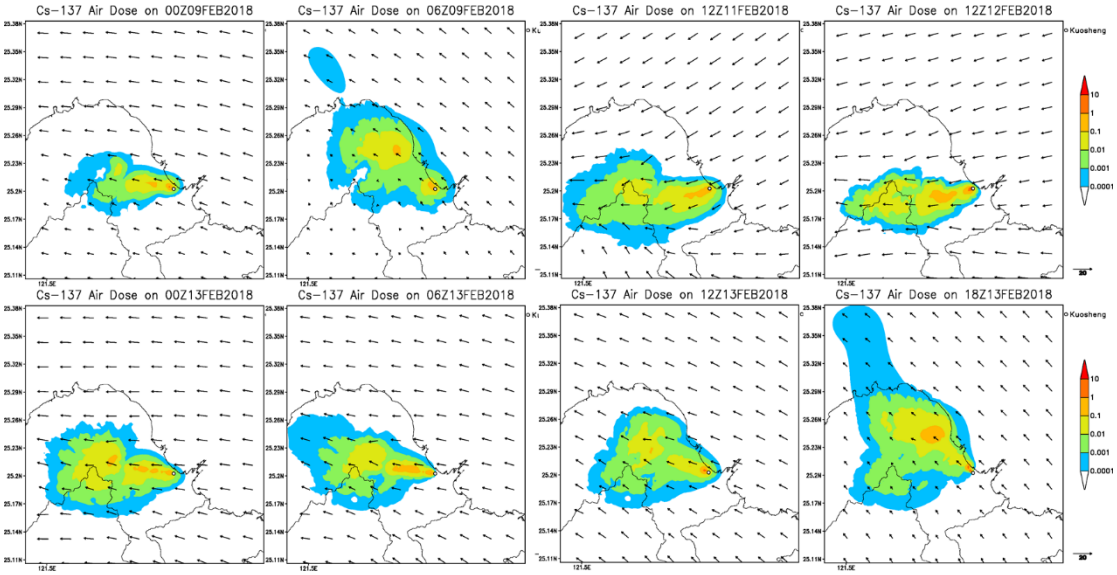


圖 4-8 2018 年 2 月 7 日當周，Cs-137 假想模擬中，劑量累積在大屯山的空氣劑量率及風場。

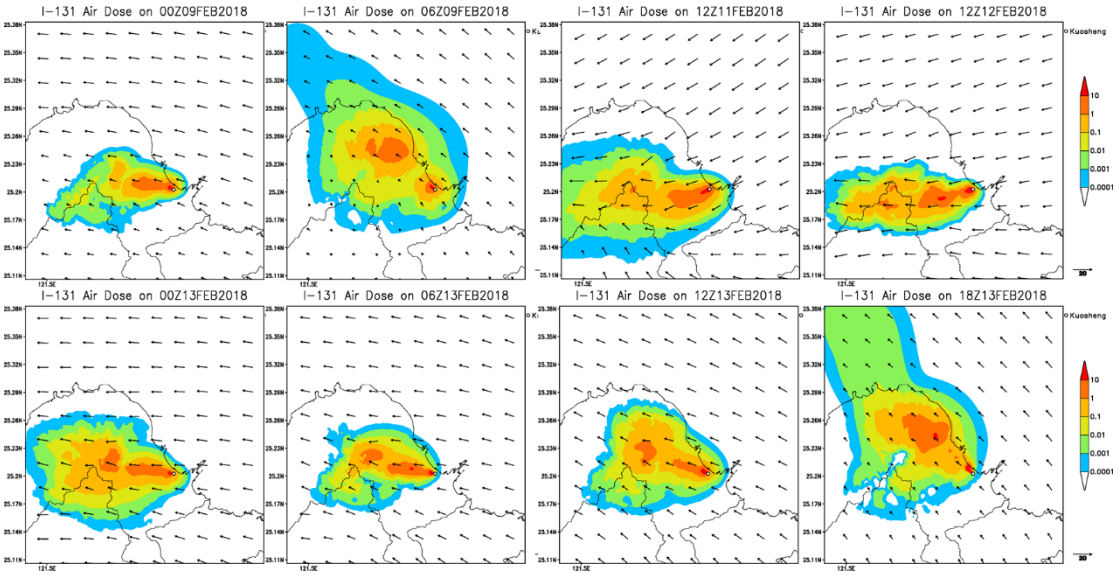


圖 4-9 2018 年 2 月 7 日當周，I-131 假想模擬中，劑量累積在大屯山的空氣劑量率及風場。

2 月 14 日的幾個累積的狀況大部分與上述兩周類似，但在 2 月 18 日 06Z 和 2 月 19 日 12Z(圖 4-10 和圖 4-11)在幾乎是靜風的情況下，也有在核二廠西邊山坡累積的情形，顯示核二廠周遭的地形，在偏東風系時容易產生風場輻合及攔截的作用，與核一廠相比較，核二廠擴散的範圍明顯較小。

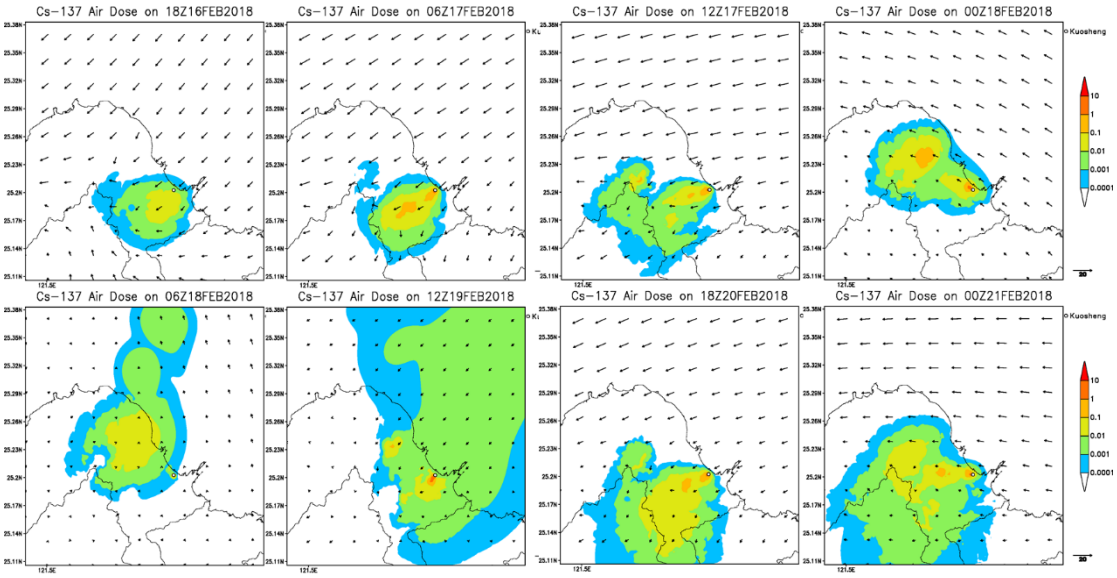


圖 4-10 2018 年 2 月 14 日當周，Cs-137 假想模擬中，劑量累積在大屯山的空氣劑量率及風場。

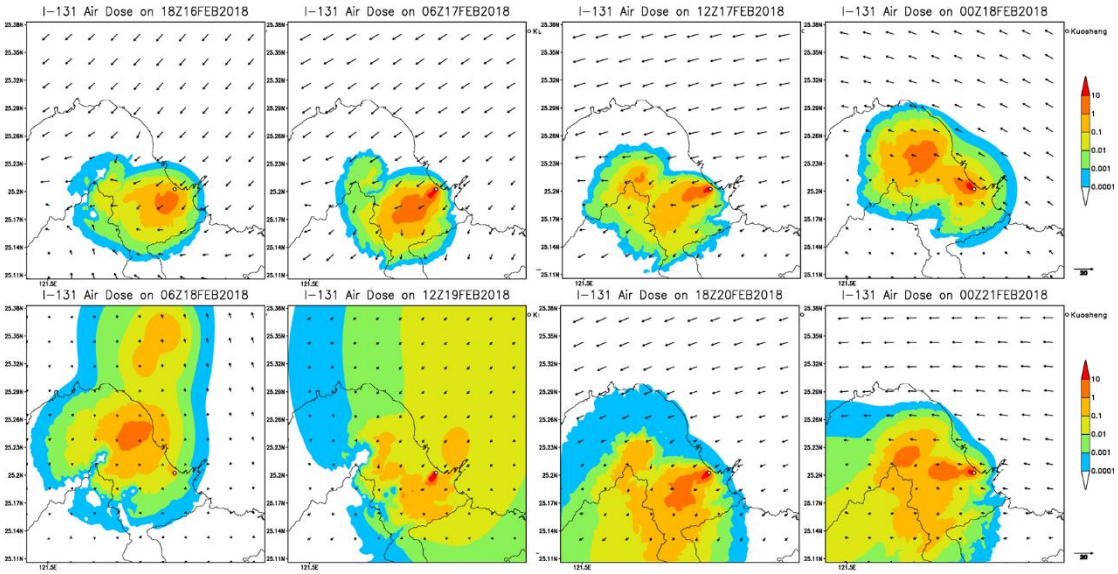
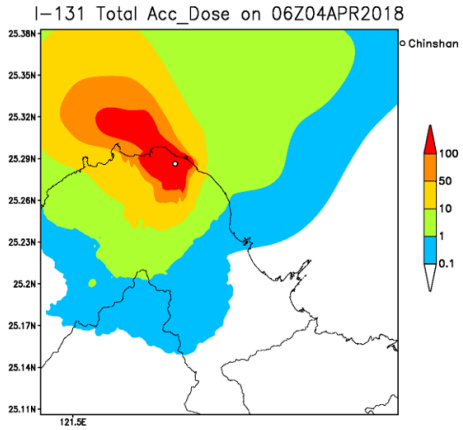
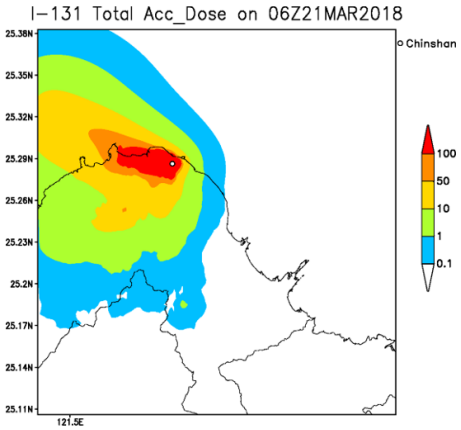


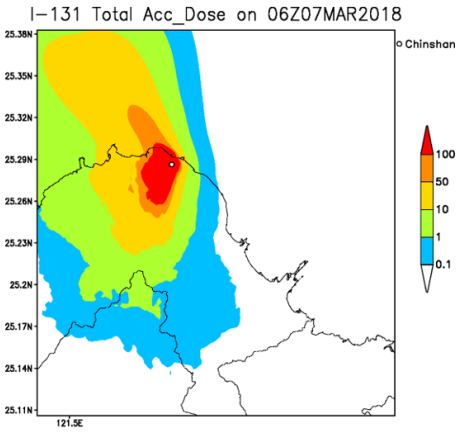
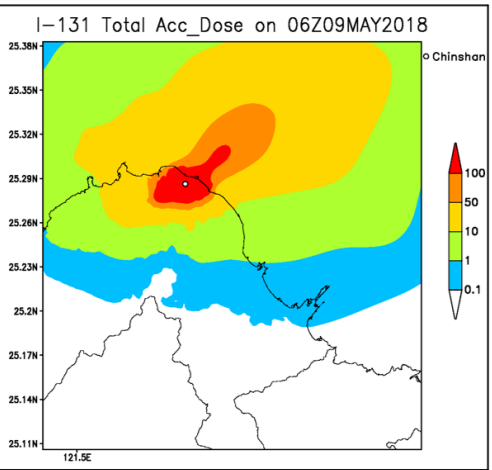
圖 4-11 2018 年 2 月 14 日當周，I-131 假想模擬中，劑量累積在大屯山的空氣劑量率及風場。

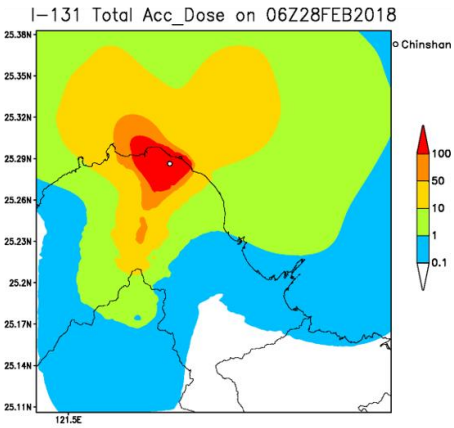
4.2. 春季案例探討

在春季時,北部地區東北風的發生頻率降低,南風分量增多,多了許多東南風發生,更甚者有代表夏季型態的西南風出現,但頻率仍低。核一廠在春季風場的條件下,劑量多是往西北邊、東北邊海面上擴散,Cs-137 假想事故的模擬結果(圖 4-12)1mSv 影響的行政區主要為新北市的石門、金山、三芝區,10mSv 的劑量僅影響金山區,台北市與基隆市皆不受影響,I-131 假想事故的模擬結果(圖 4-13)1 mSv 影響的行政區主要為新北市的萬里、金山、石門、三芝區及台北市的北投、士林區,10 mSv 的劑量主要影響石門、金山區。春季的分類共可分為五種類型,其各個分類的劑量分布之圖例、日期、7 天累積劑量圖之標號,如表 4-3 所示。

表 4-3 核一廠春季每周劑量分布之分類

A 	B 
主要為東南風情形下，一般的高斯分布	穩定的東風之下，大致為高斯分布
4/4~4/10、4/25~5/1	3/21~3/27、3/28~4/3
圖4-12f、圖4-13f	圖4-12d、e,圖4-13d、e

C 	D 
主要為北風和一些南風分量所造成以核一廠為中心，南北走向的劑量分布	主要以東北和一些西南的風向，呈現東北西南走向的劑量分布
3/7~3/13、3/14~3/20、4/11~4/17	5/9~5/15、5/16~5/22、5/23~5/29
圖4-12b、c、g,圖4-13b、c、g	圖4-12k、l、m,圖4-13k、l、m

E	
東南風為主，但風向變化大，劑量往多方向分布	
2/28~3/6、4/18~4/24、5/2~5/8	
圖4-12a、h、j,圖4-13a、h、j	

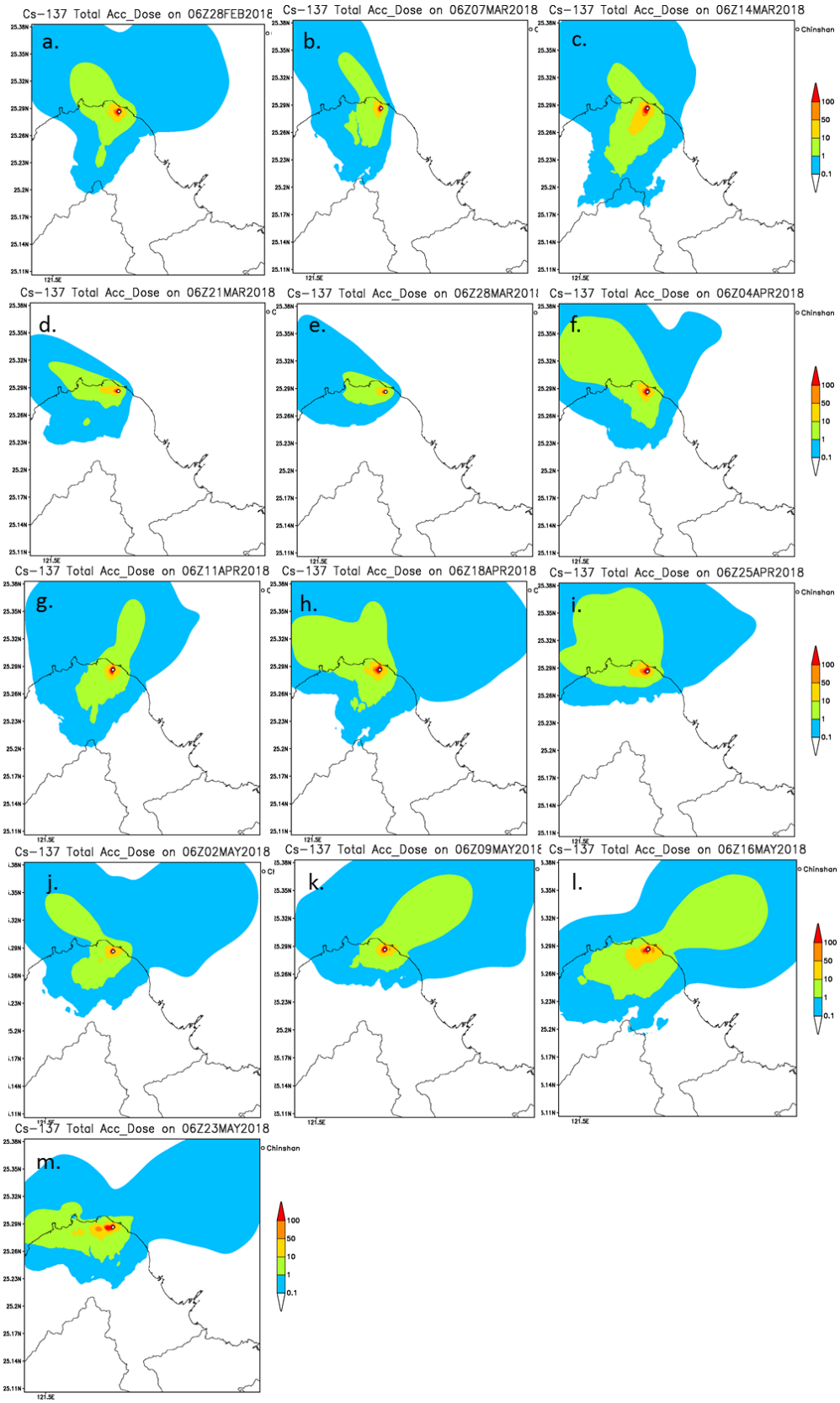


圖 4-12 核一廠春季，自 2018 年 2 月 28 日至 2018 年 5 月 23 日 Cs-137 假想事故模擬之 7 日有效劑量累積圖(mSv)。

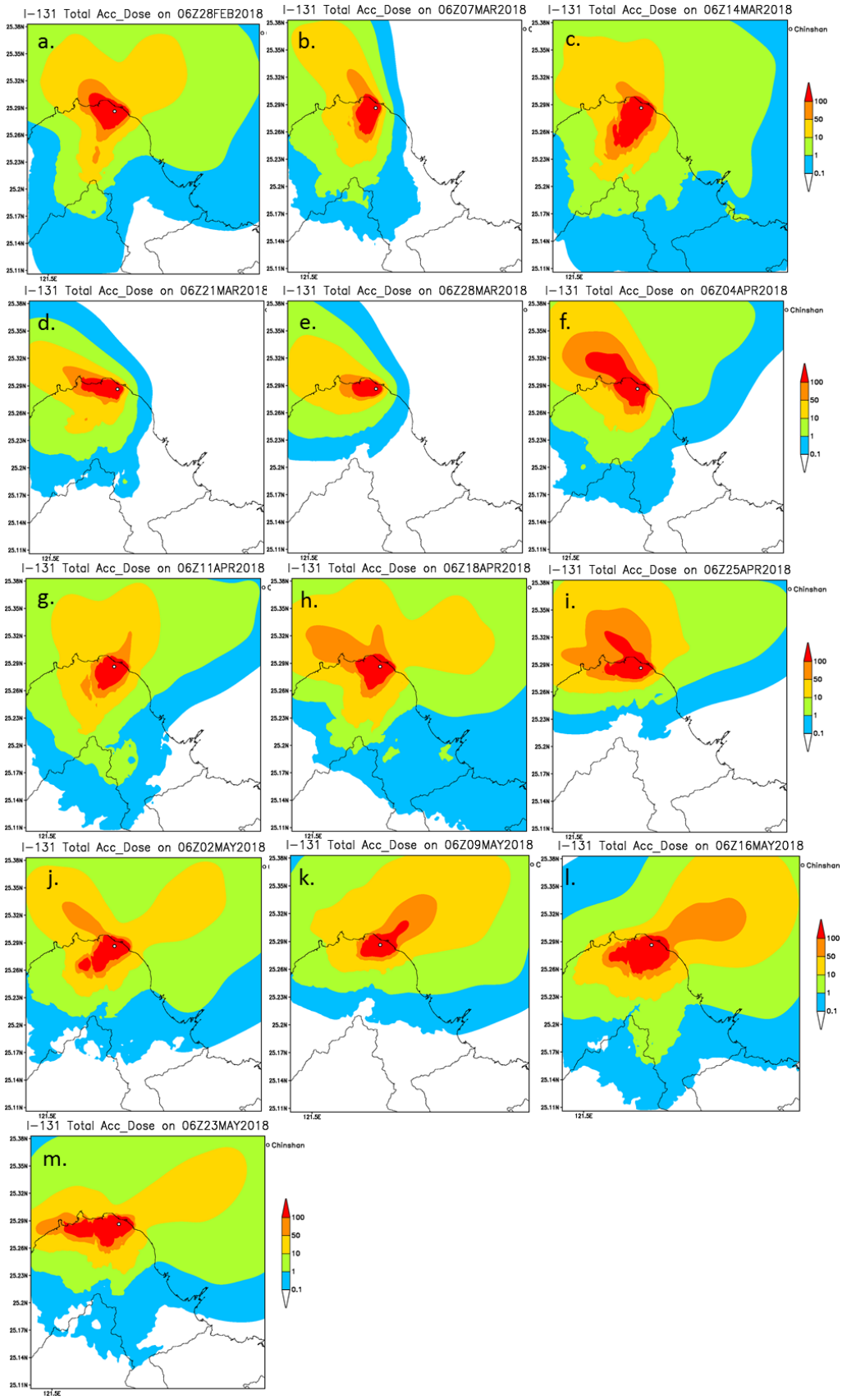
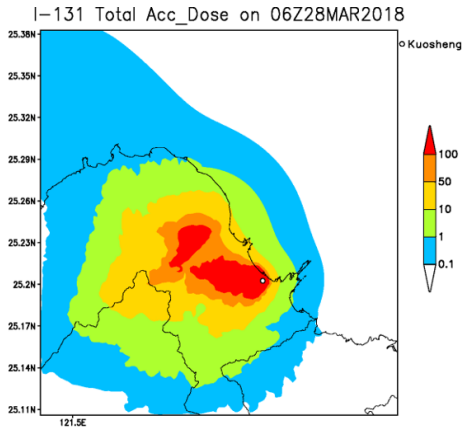
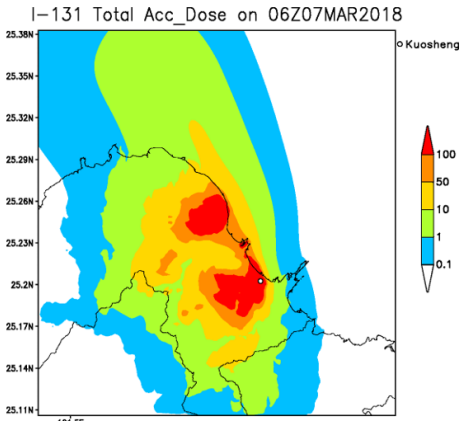
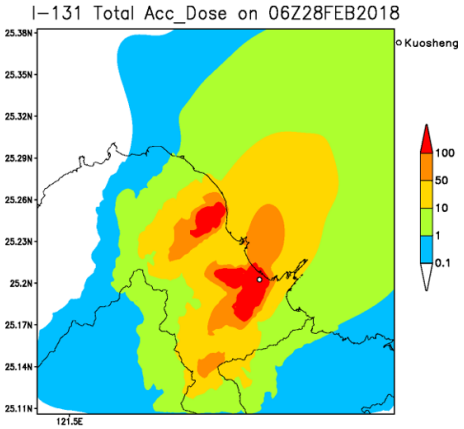
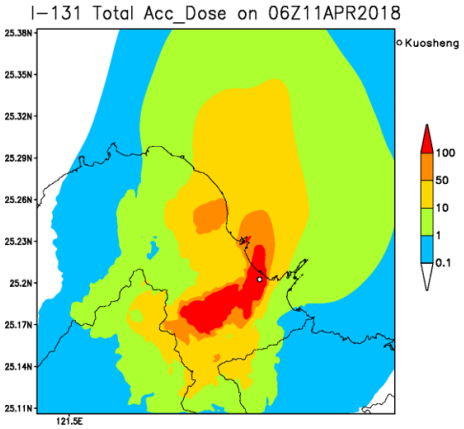


圖 4-13 核一廠春季，自 2018 年 2 月 28 日至 2018 年 5 月 23 日 I-131 假想事故模擬之 7 日有效劑量累積圖(mSv)。

核二廠的春季，如圖 4-1414 和圖 4-1515，因為春季多了較多的南風分量，7 天的劑量累積情況會較冬季多往海面上分布，Cs-137 的假想模擬中，1 mSv 的劑量主要分布在新北市的金山、萬里區，10 mSv 的劑量則多是在萬里區核電廠的附近，I-131 的假想模擬中，1 mSv 的累積劑量可影響區域較 Cs-137 擴散至台北市的北投和士林區以及基隆的中山、安樂、七堵區，10 mSv 以上的累積劑量仍以新北市的金山、萬里區為主。春季的核二廠，可分為地形累積之金山山麓東側、金山山麓東側與五指山、金山山麓與大屯山區，以及特殊類型，共 4 類，其各個分類的劑量分布特性、日期、7 天累積劑量圖之標號，如表 4-4 所示。

表 4-4 核二廠春季每周劑量分布之分類

A 	B 
東南風的影響之下，在核二廠西北邊之金山山麓有一局部大值產生。	東風和東南風的風向組合下所造成兩處之劑量累積分布。
3/28~4/3、4/18~4/24、5/2~5/8、5/9~5/15、5/23~5/29	3/7~3/13、3/21~3/27、4/4~4/10、4/25~5/1
圖4-14 e、h、j、k、m,圖4-15e、h、j、k、m	圖4-14 b、d、f、l,圖4-15 b、d、f、l

C 	D 
偏北風和東南風的風向組合下所造成兩處之劑量累積分布。	風向多變時造成較為特殊的分布狀況
2/28~3/6、3/14~3/20	4/11~4/17、5/16~5/22
圖4-14 a、c,圖4-15 a、c	圖4-14 g、l,圖4-15 g、l

而在西面的大屯山區仍有累積的情形，較明顯的是 3 月 21 日、4 月 4 日、4 月 25 日的這三周，相同利用每個時間來進行山坡上有劑量的區域大值時的風場探討。3 月 21 日這周造成西面山區累積的風場，如圖 4-16，上半部為 Cs-137 的空氣劑量率，下半部為 I-131 的空氣劑量率，前三個時間屬於是東風遇到地形轉為東南風及東北風的輻合情形，第四個時間則是屬於地形的阻檔結果。4 月 4 日這周(圖 4-17)的 4 月 8 日 06Z 為東風遇到地形轉向造成，4 月 9 日 12Z 則是東南風下，地形阻擋的結果，後面兩個時間則是風速很小之下煙陣受到地形阻擋。4 月 25 日這周(圖 4-18)的 4 月 26 日 18Z 和 4 月 30 日 06Z 的屬風速小且東南風的情況，4 月 27 日 12Z 屬於風場轉變的情形。

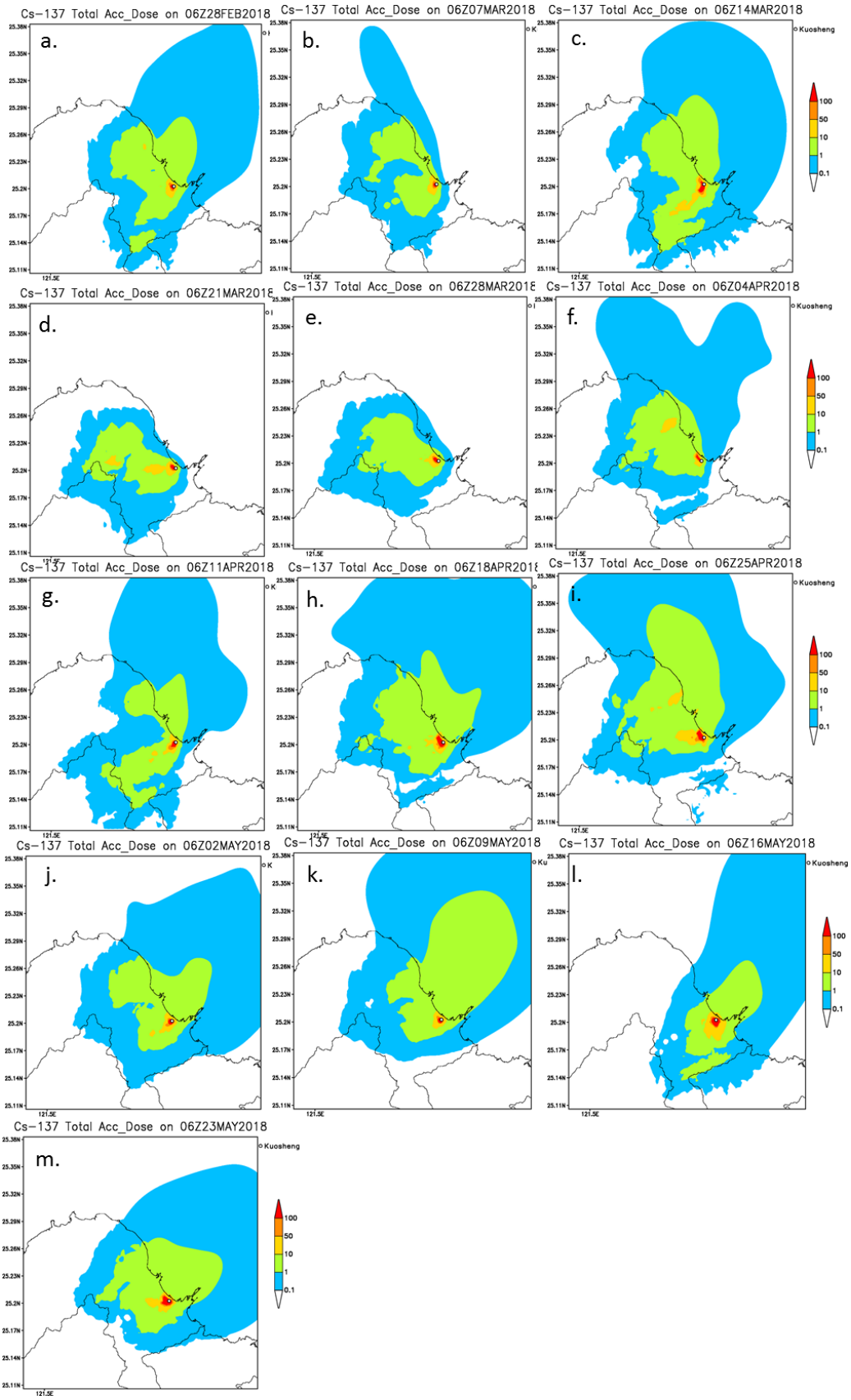


圖 4-14 核二廠春季，自 2018 年 2 月 28 日至 2018 年 5 月 23 日 Cs-137 假想事故模擬之 7 日有效劑量累積圖(mSv)。

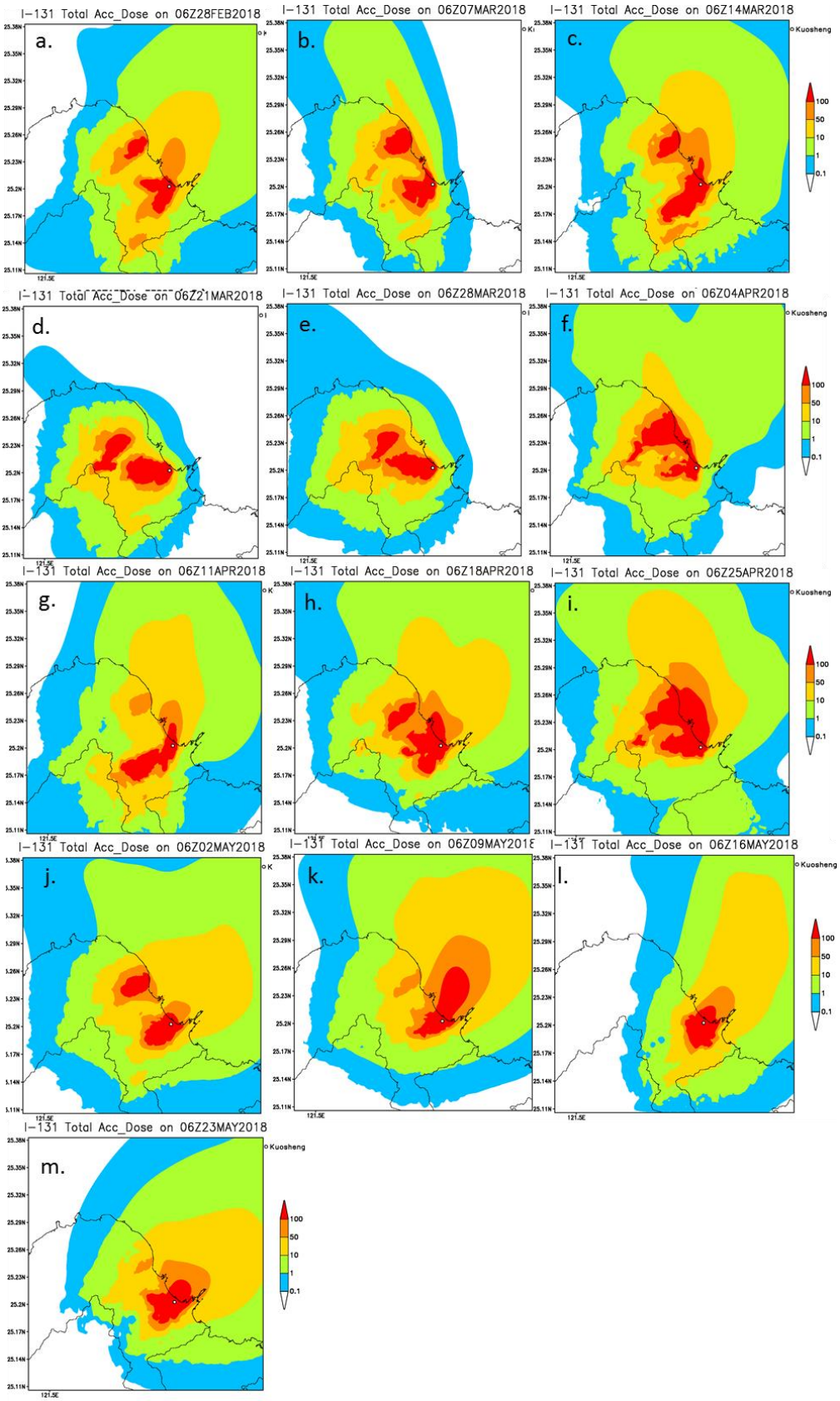


圖 4-15 核二廠春季，自 2018 年 2 月 28 日至 2018 年 5 月 23 日 I-131 假想事故模擬之 7 日有效劑量累積圖(mSv)。

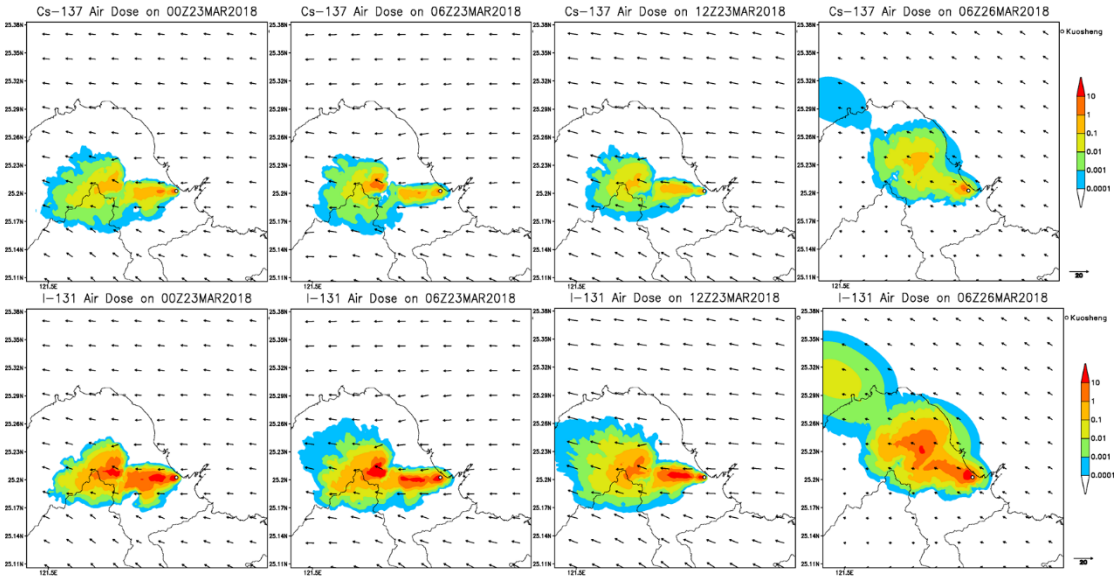


圖 4-16 2018 年 3 月 21 日當周，假想模擬中，劑量累積在大屯山的空氣劑量率及風場。上半部:Cs-137，下半部:I-131

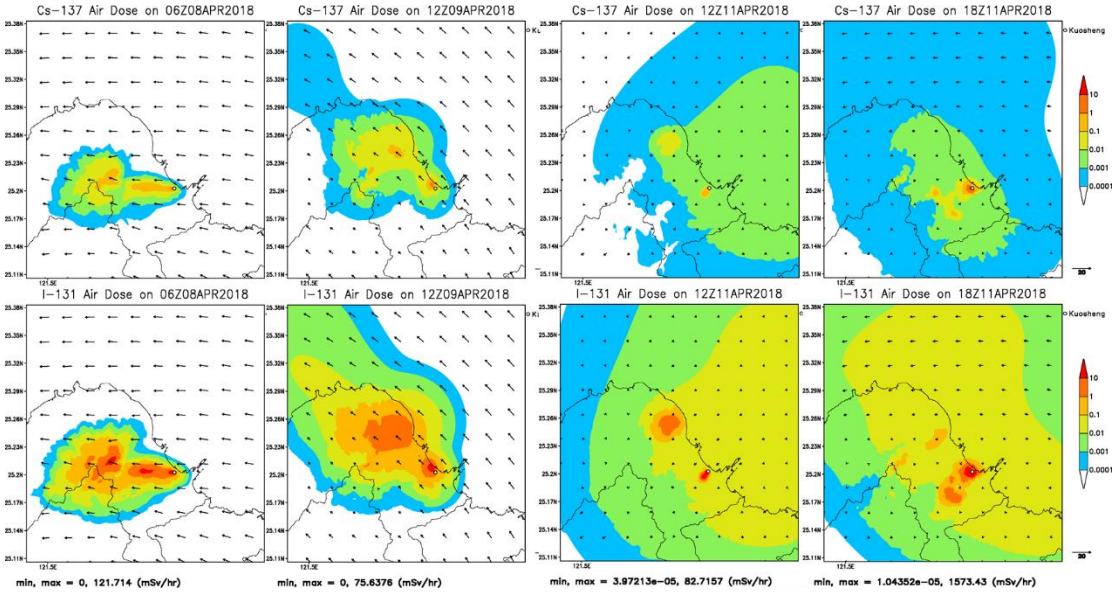


圖 4-17 2018 年 4 月 4 日當周，假想模擬中，劑量累積在大屯山的空氣劑量率及風場。上半部:Cs-137，下半部:I-131

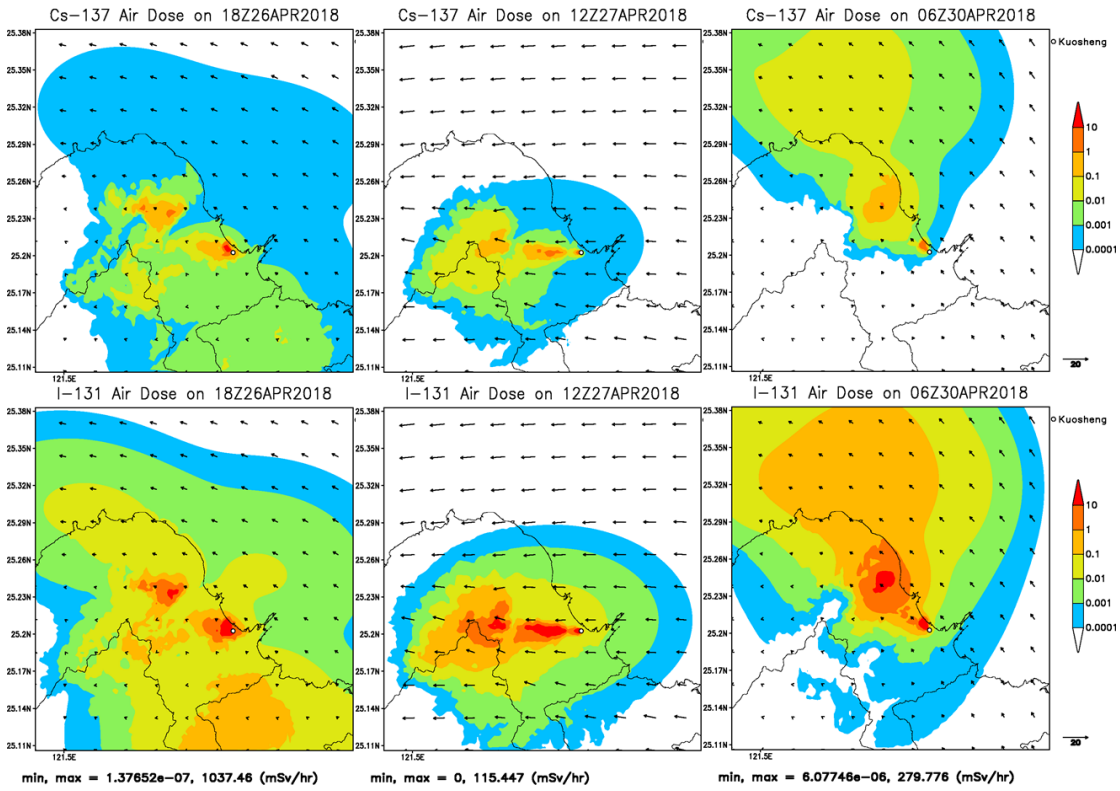
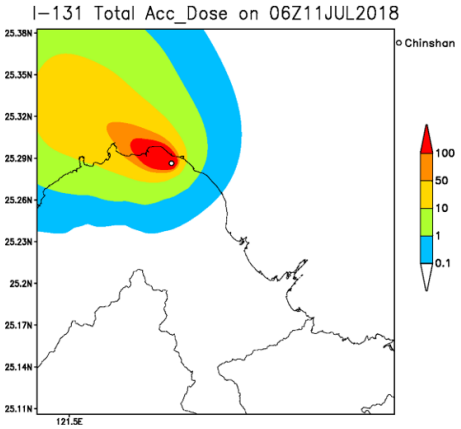
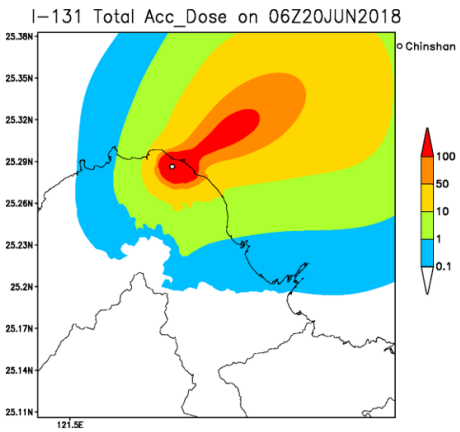


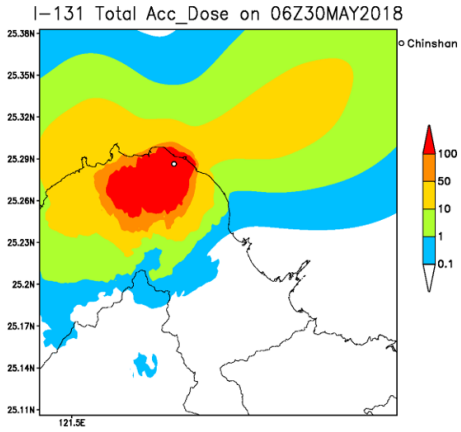
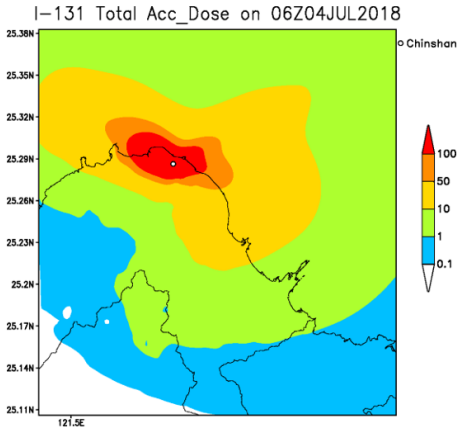
圖 4-18 2018 年 4 月 25 日當周，假想模擬中，劑量累積在大屯山的空氣劑量率及風場。上半部:Cs-137，下半部:I-131

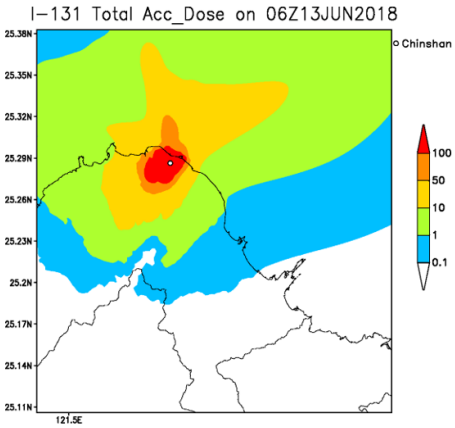
4.3. 夏季案例探討

在夏季，整個台灣主要受到西南季風影響，但在 2018 年的夏季，北台灣的風場除了西南風之外，受到一些夏季系統影響，也有許多東南風主宰的時間，相似的風場會造成相似的劑量分布，因此這邊會利用風場進行分類，進而大致掌握核一、二廠夏季的劑量分布特性。在核一廠的部分主要分為 5 種不同類型的個案，其各個分類的劑量分布特性、日期、7 天累積劑量圖之標號，如表 4-5 所示。

表 4-5 核一廠夏季每周劑量分布之分類

A 	B 
穩定的東南風之下，純粹的高斯分布	穩定的西南風之下，大致為高斯分布
7/4~7/10、8/8~8/14	6/20~6/26、6/27~7/3、8/15~8/21
圖4-19 g、k,圖4-20 g、k	圖4-19 d、e、l,圖4-20 d、e、l

C 	D 
受到東北風和西南風影響，以核一廠為中心，東北西南走向的分布	受到西北風和東南風影響，以核一廠為中心，西北東南走向的分布
5/30~6/5、6/6~6/12、7/18~7/24、8/22~8/28	7/4~7/10、7/25~7/31、8/1~8/7
圖4-19 a、b、h、m,圖4-20 a、b、h、m	圖4-19 f、i、j,圖4-20 f、i、j

E 
風向變化大，劑量呈現放射狀分布
6/13~6/19
圖4-19 c,圖4-20 c

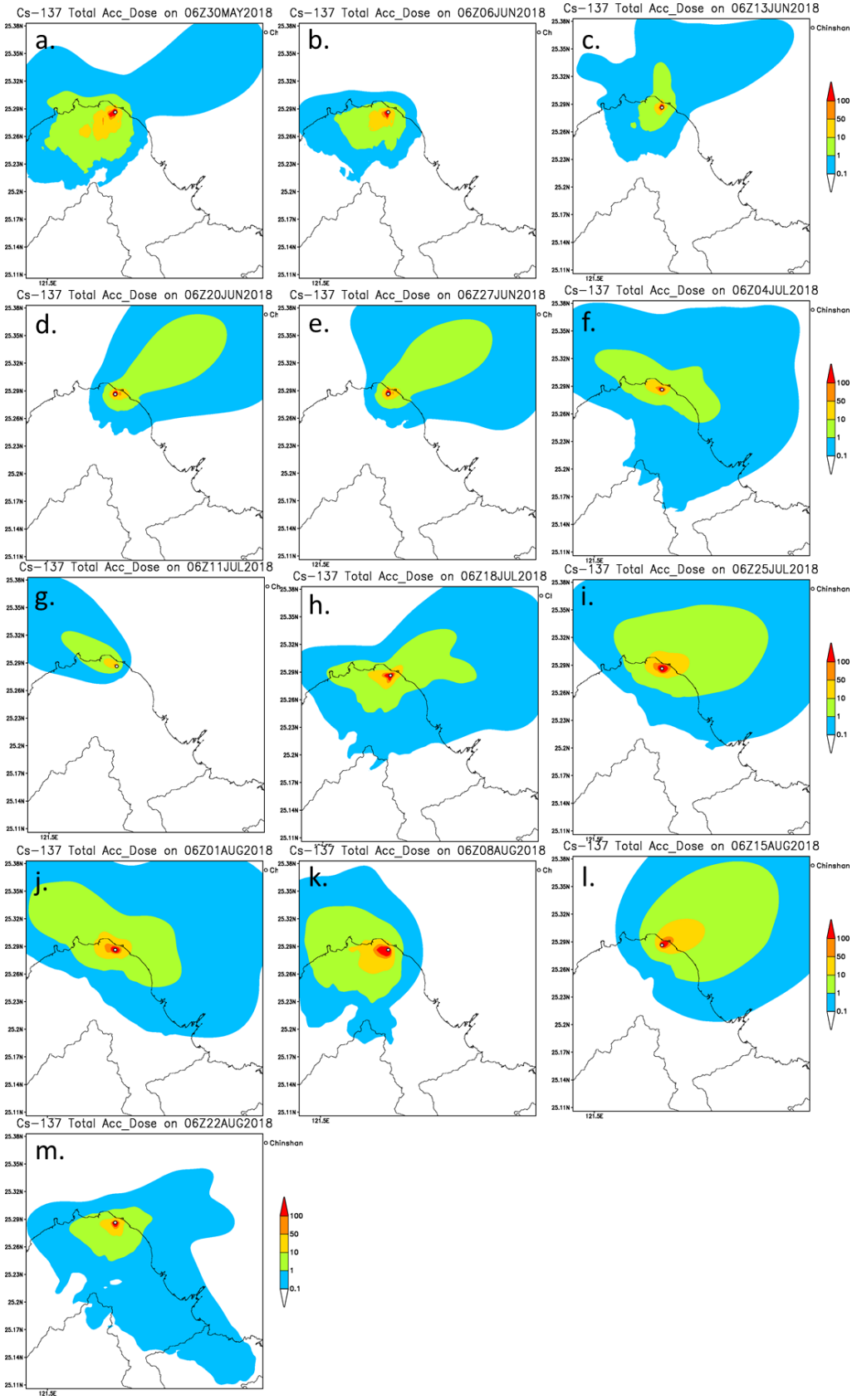


圖 4-19 核一廠夏季，自 2018 年 5 月 29 日至 2018 年 8 月 28 日 Cs-137 假想事故模擬之 7 日有效劑量累積圖(mSv)。

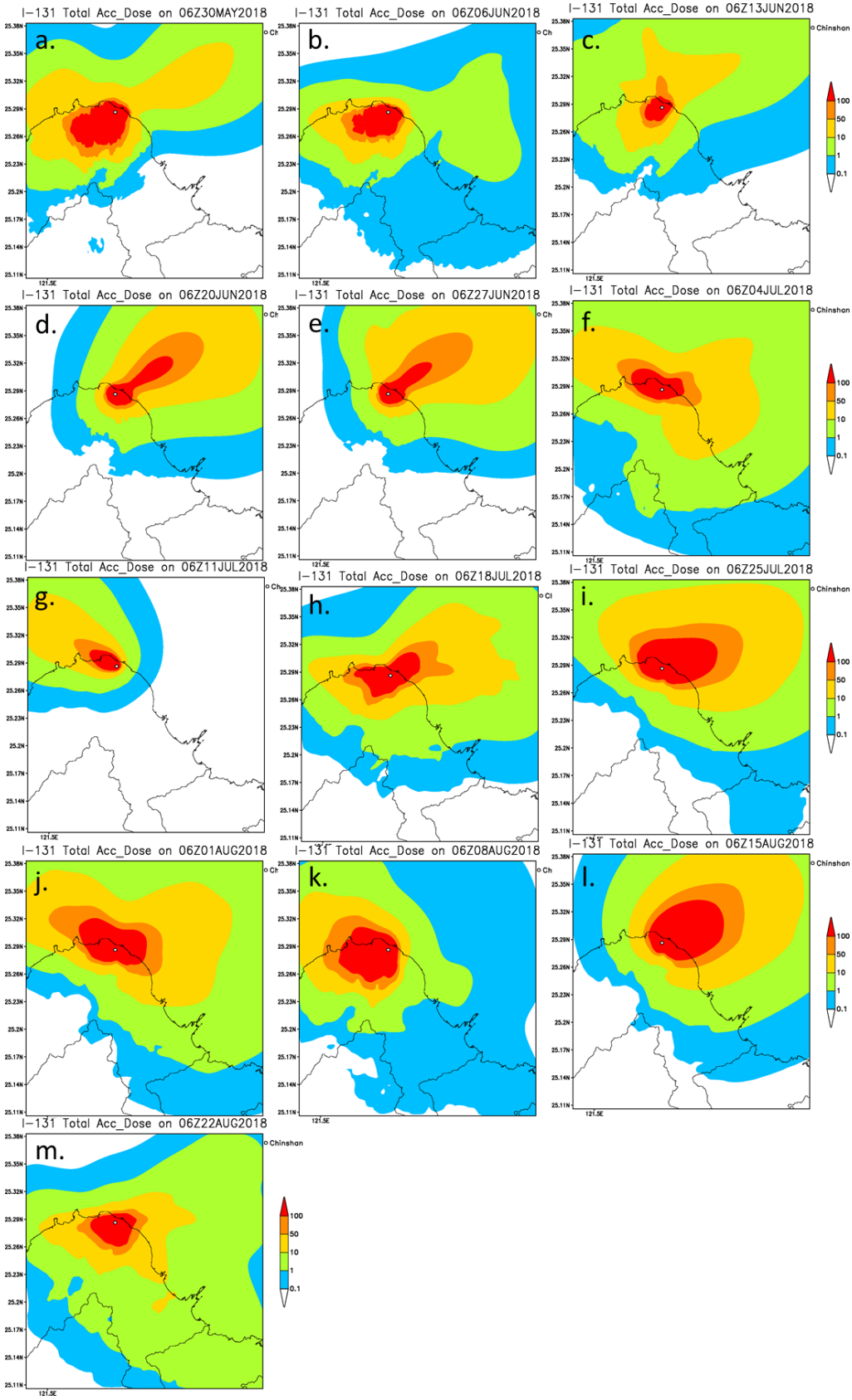
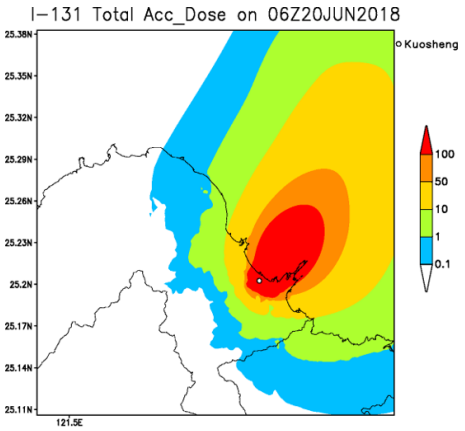
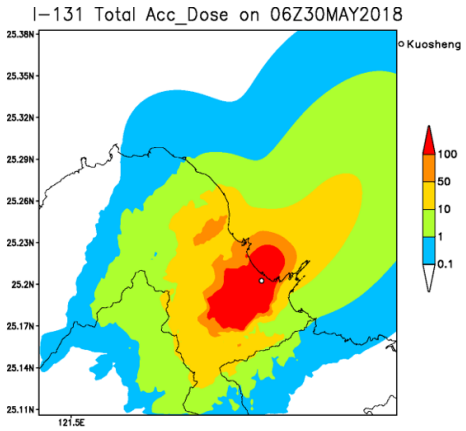
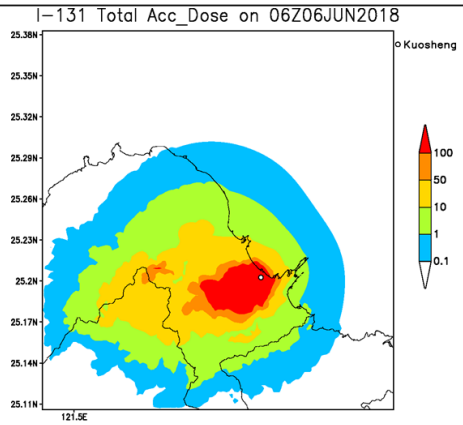


圖 4-20 核一廠夏季，自 2018 年 5 月 29 日至 2018 年 8 月 28 日 I-131 假想事故模擬之 7 日有效劑量累積圖(mSv)。

在核二廠的部分，夏季劑量分布類型分為純粹高斯擴散分布類型及地形累積類型，在高斯擴散分布類型裡，僅西南風此一風向，地形累積類型裡，共有金山山東側山麓、大屯山區累積這兩類。其各個分類的劑量分布特性、日期、7 天累積劑量圖之標號，如表 4-6 所示。在地形累積類型將挑選 B、C 類型中各一個個案進行細部的分析。

表 4-6 核二廠夏季每周劑量分布之分類

A 	B 
穩定的西南風之下，大致為高斯分布	東南風的影響之下，在核二廠西北邊之金山山麓有一局部大值產生。
6/20~6/26、6/27~7/3、7/25~7/31、8/15~8/21	5/30~6/5、6/13~6/19、7/4~7/10、7/11~7/17、7/18~7/24、8/1~8/7、8/8~8/14
圖4-21 d、e、i、l,圖4-22 d、e、i、l	圖4-21 a、c、f、g、h、j、k,圖4-22 a、c、f、g、h、j、k

C	
偏東風的影響下，受到高度大約1000公尺的大屯山群阻擋的局部大值。	
6/6~6/12、8/22~8/28	
圖4-21 b、m,圖4-22 b、m	

在 6 月 12 日 18 時的環境風場(圖 4-23)，為風速不大的東風，當風遇到為於核二廠西方的大屯山區時，風場繞流，由東風轉為東南風，其北方一點地的風則順著地形由東風轉為東北風，煙陣往南集中，且風速受到大屯山群的阻擋，在大屯山區也屬於減速的狀態，因而累積出局部大值。而在 6 月 18 日 18 時(圖 4-24)和 6 月 19 日 00 時的環境風場，屬於較弱的東南風，且隨著時間南風分量增加，在金山地區風速減弱，造成煙陣堆積，產生局部大值。

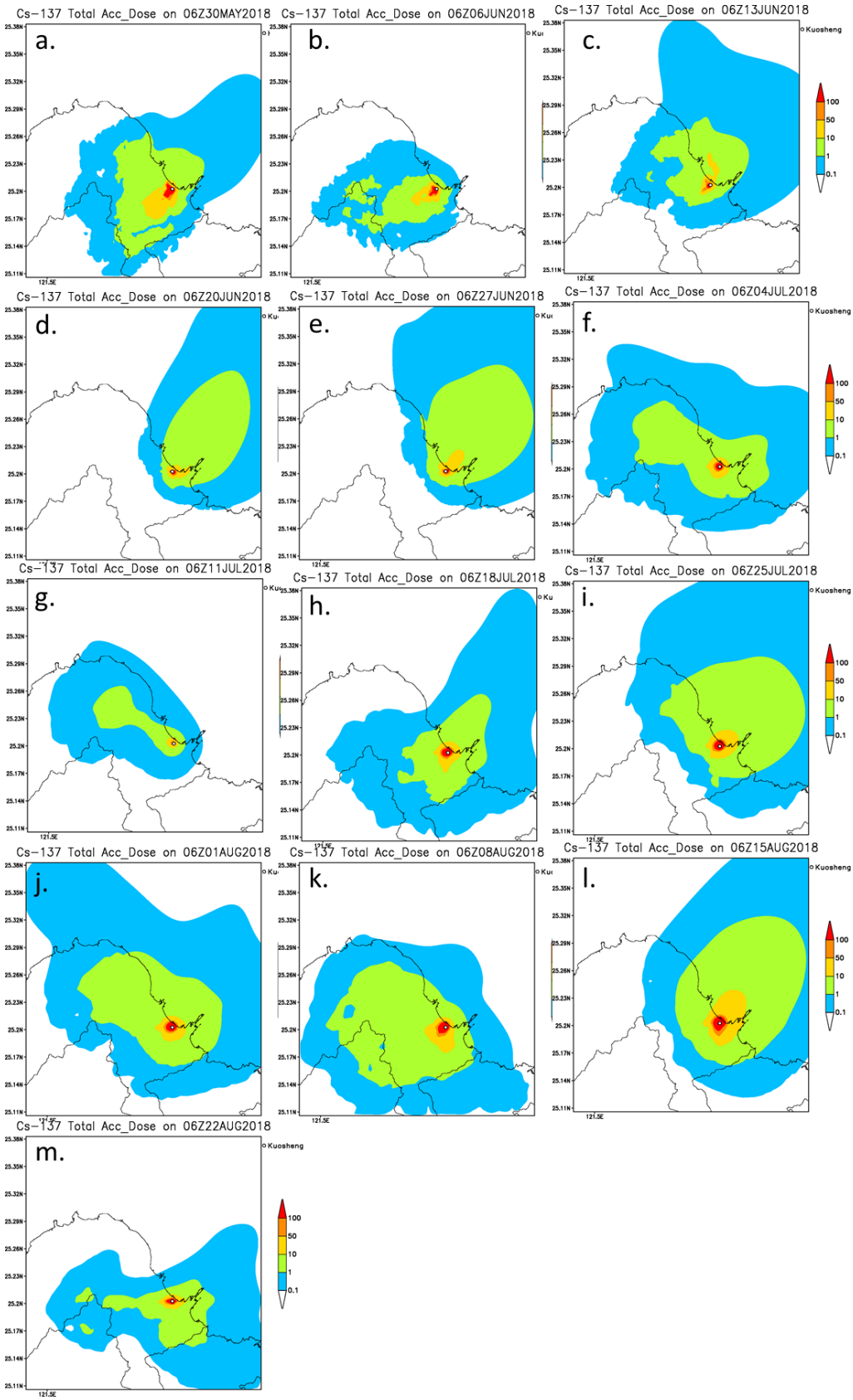


圖 4-21 核二廠夏季，自 2018 年 5 月 29 日至 2018 年 8 月 28 日 Cs-137 假想事故模擬之 7 日有效劑量累積圖(mSv)。

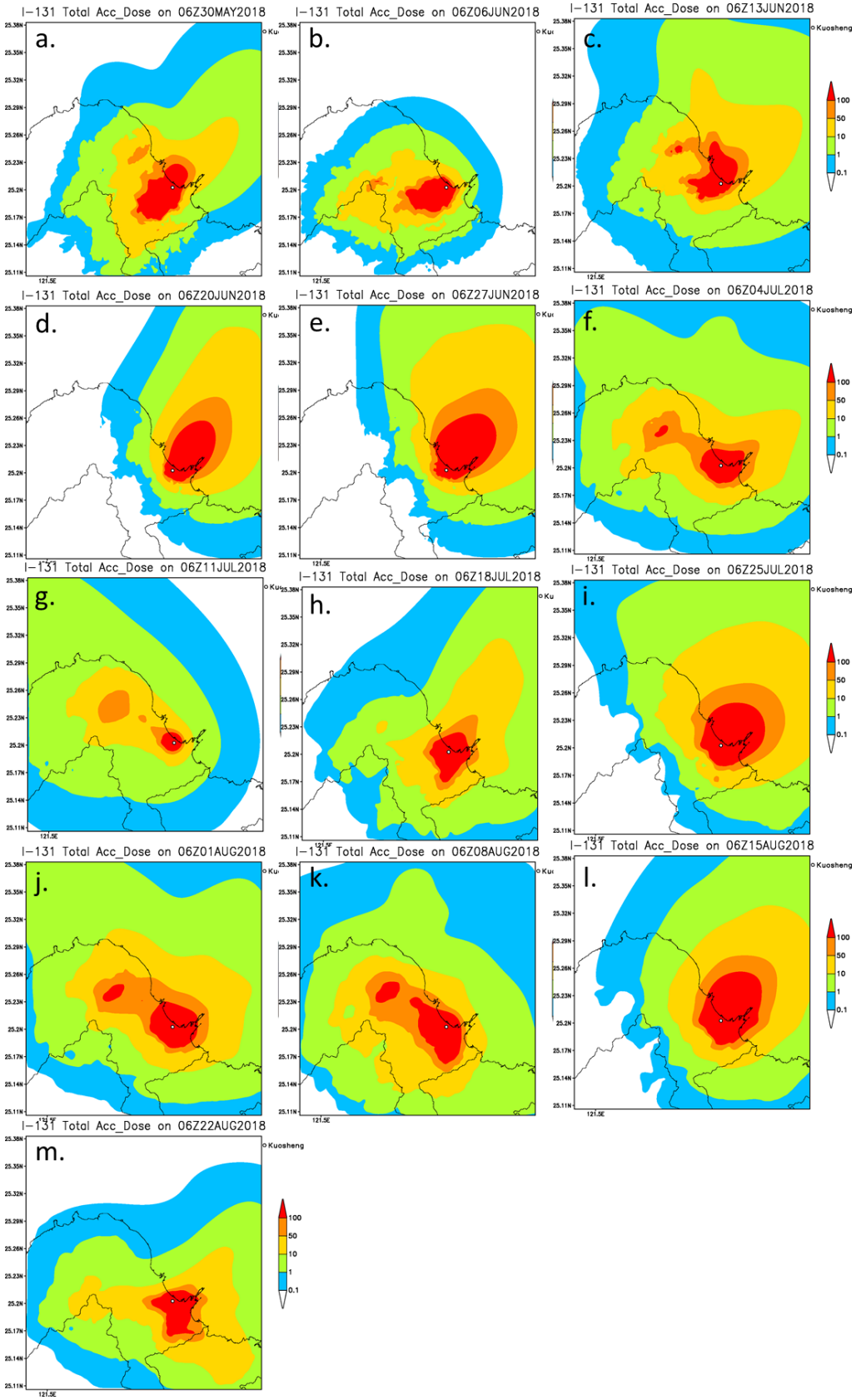


圖 4-22 核二廠夏季，自 2018 年 5 月 29 日至 2018 年 8 月 28 日 I-131 假想事故模擬之 7 日有效劑量累積圖(mSv)。

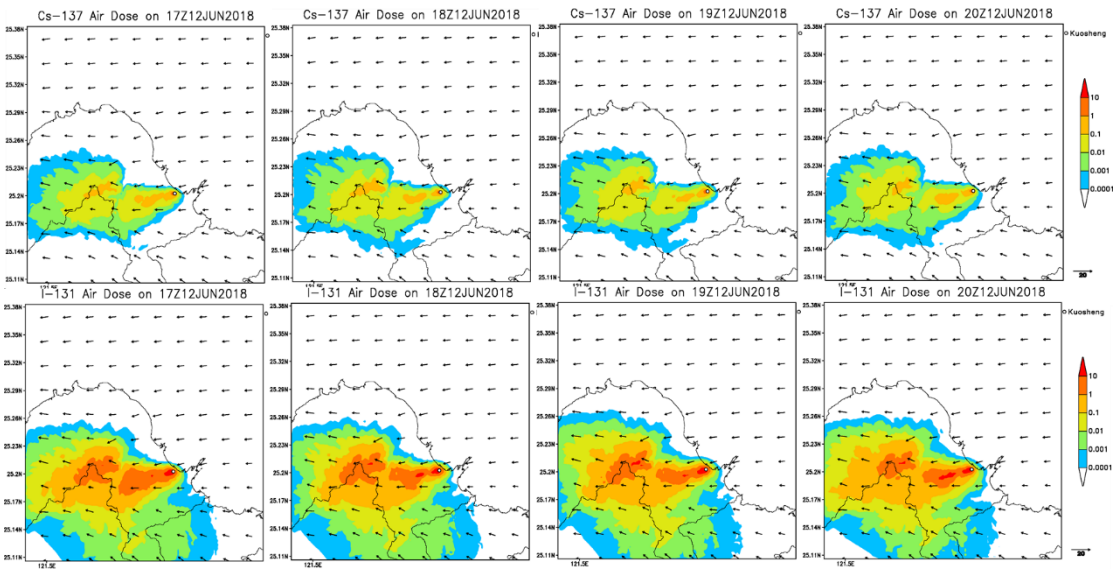


圖 4-23 2018 年 6 月 6 日當周，假想模擬中，劑量累積在大屯山的空氣劑量率及風場。上半部:Cs-137，下半部:I-131

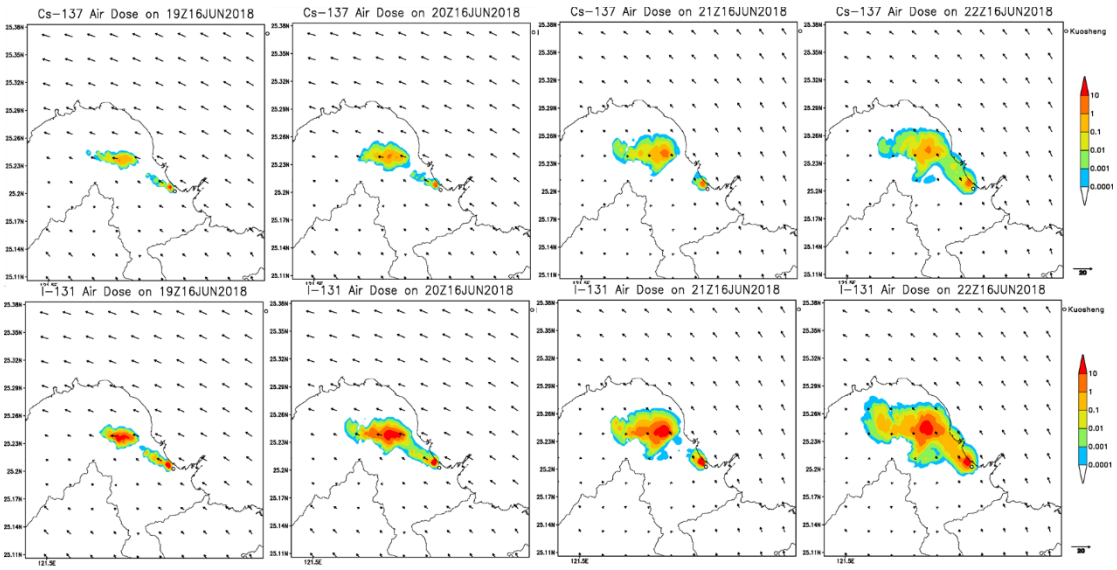
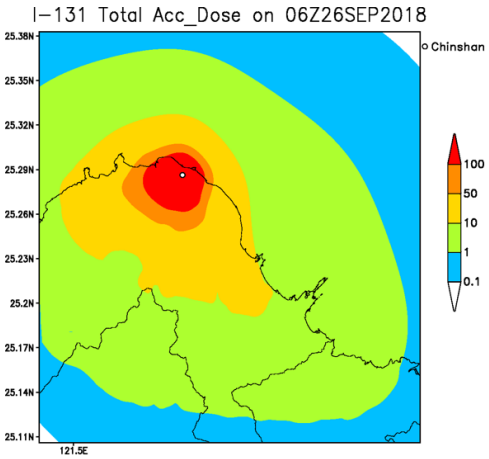
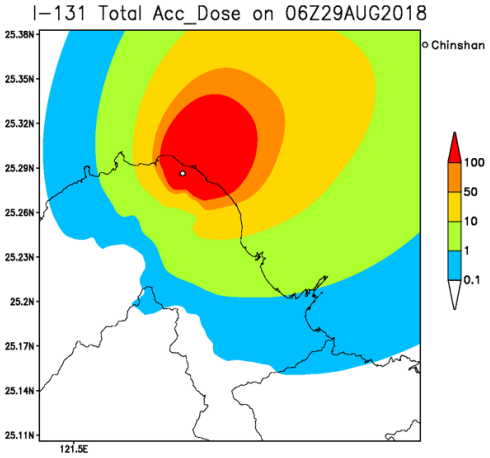


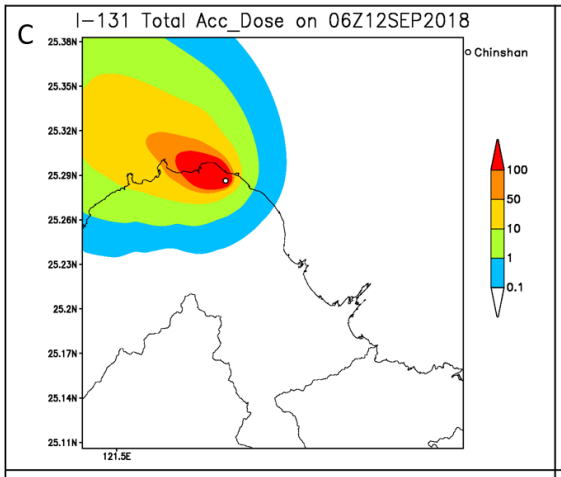
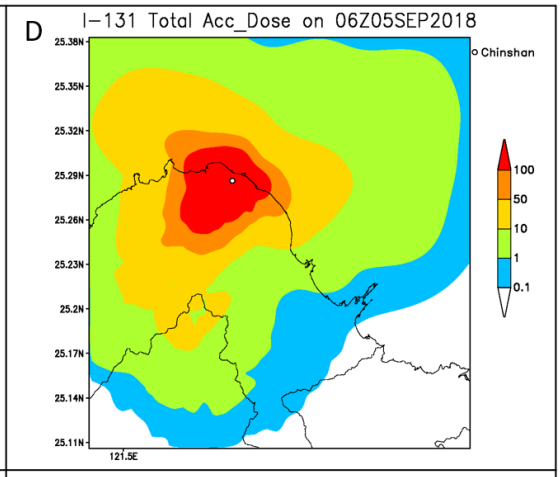
圖 4-24 2018 年 6 月 13 日當周，假想模擬中，劑量累積在大屯山的空氣劑量率及風場。上半部:Cs-137，下半部:I-131

4.4. 秋季案例探討

進入到秋季，北台灣的北風分量明顯增加，在 2017 及 2018 年秋季的部分，核一廠分為 4 個類型，各分類的日期可看出，在 2018 年 9 月底以前仍有一些南風分量,之後就多為東北風影響，其劑量分布的特性都很相似，在秋季東北風的風速較弱，使得劑量分布範圍較近且呈圓形的分布，其各個分類的劑量分布特性、日期、7 天累積劑量圖之標號，如表 4-7 所示。

表 4-7 核一廠秋季每周劑量分布之分類

A 	B 
風速較小的東北風影響之下，以核一廠為中心，近似圓形的分布	穩定的西南風之下，大致為高斯分布
2018/9/26~10/30、2017/11/1~11/28	8/29~9/4
圖4-25 e~m,圖4-26 e~m	圖4-25 a,圖4-26 a

	
穩定東南風下，呈高斯分布。	依各風向的變化，以核一廠為重心，呈現倒三角的劑量分布。
9/12~9/18	9/5~9/11、9/19~9/25
圖4-25 c,圖4-26c	圖4-25 b、d,圖4-26 b、d

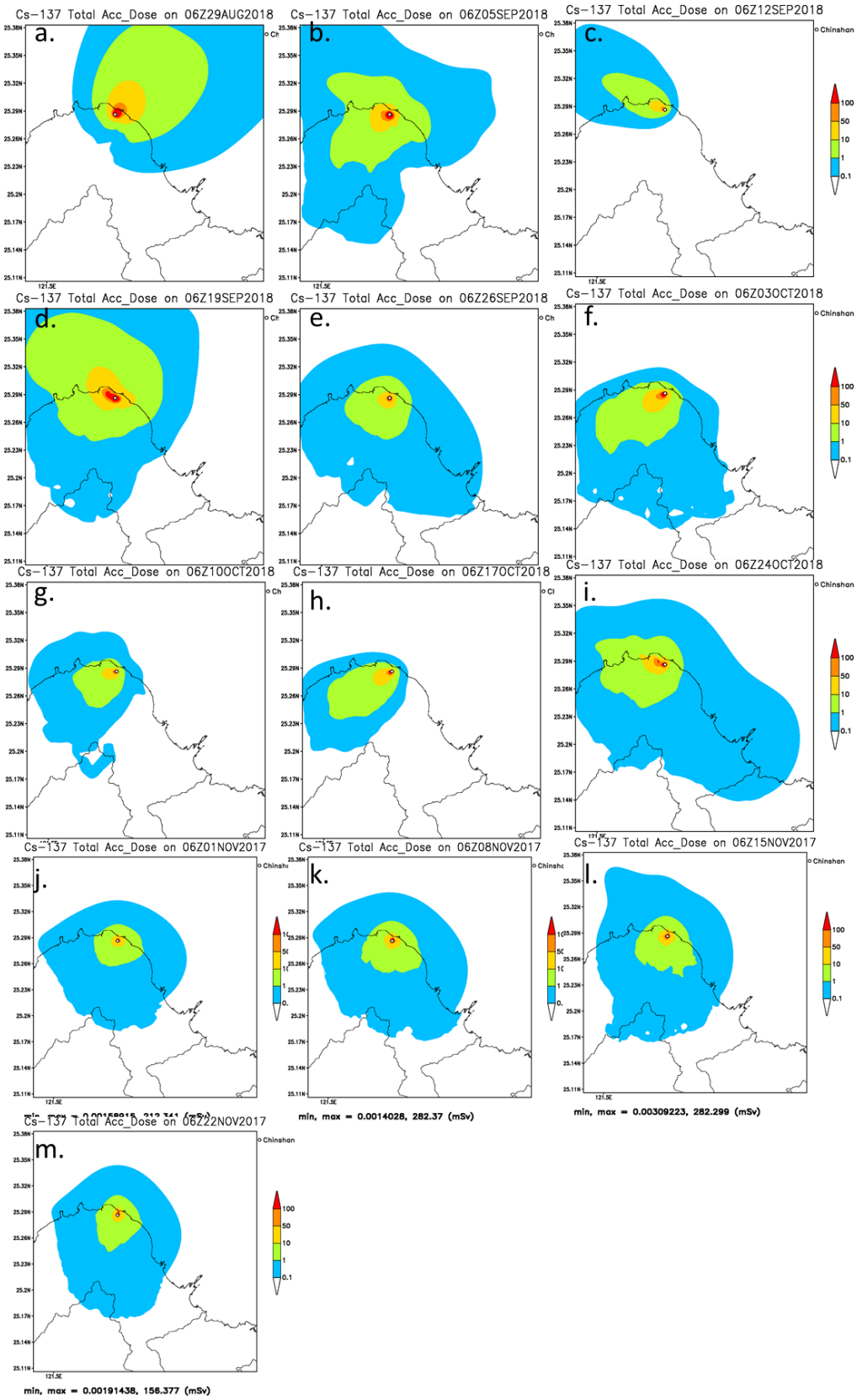


圖 4-25 核一廠秋季，自 2018 年 8 月 29 日至 2018 年 10 月 30 日和 2017 年 11 月 1 日至 11 月 29 日 Cs-137 假想事故模擬之 7 日有效劑量累積圖(mSv)。

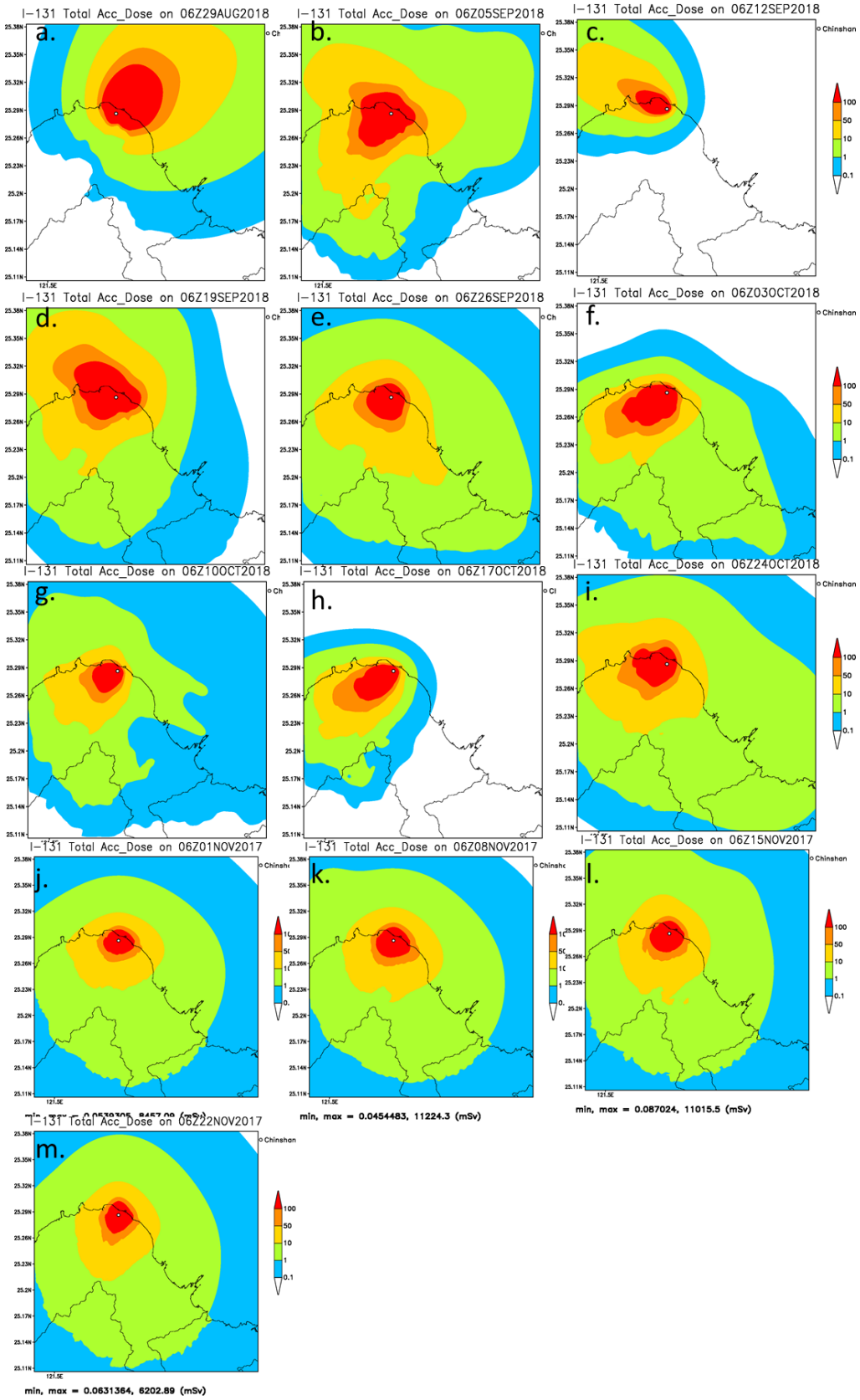
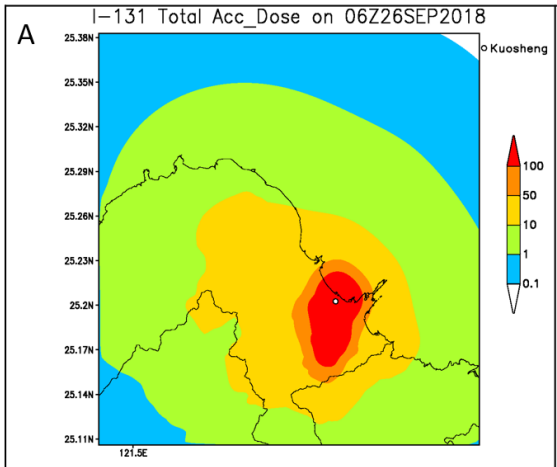
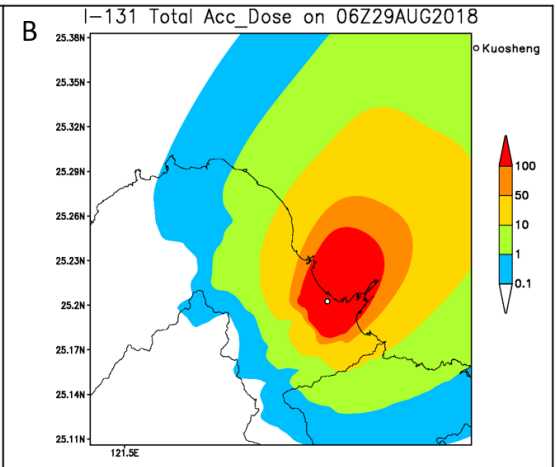
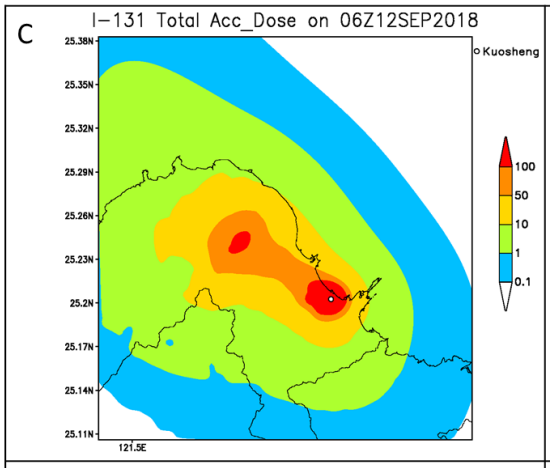
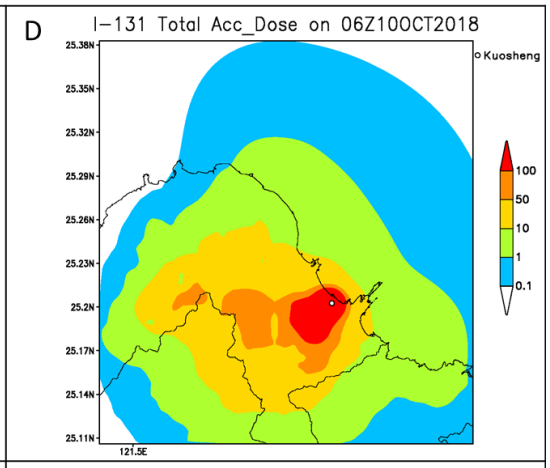


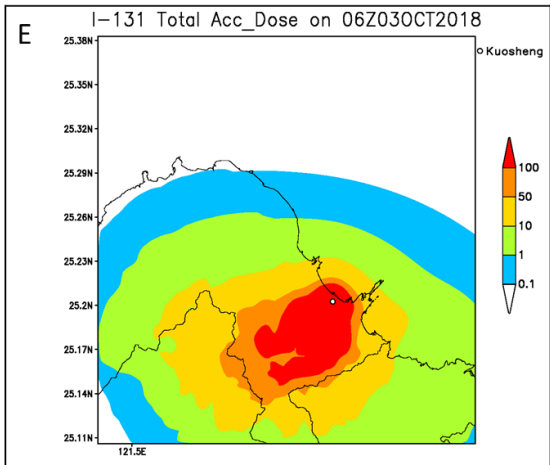
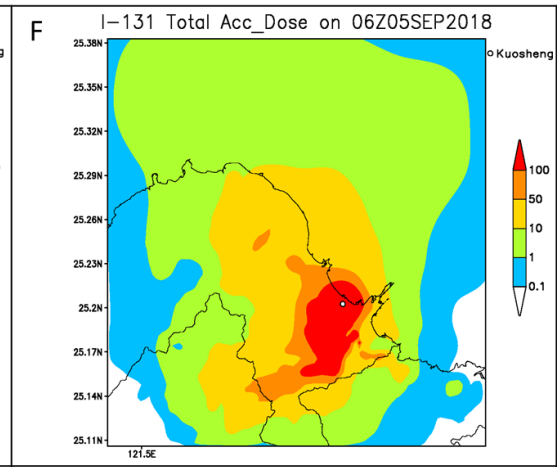
圖 4-26 核一廠秋季，自 2018 年 8 月 29 日至 2018 年 10 月 30 日和 2017 年 11 月 1 日至 11 月 29 日 I-131 假想事故模擬之 7 日有效劑量累積圖(mSv)。

秋季屬季節轉換之際，風向變化較大，配合上核二廠特殊的地理位置，產生較多類型的累積劑量分類，在純粹高斯分布類型，分為東北和西南風，在地形累積類型，分為金山山麓東側、大屯山區累積、五指山累積以及金山山麓東側加上五指山累積，共 6 類。其各個分類的劑量分布特性、日期、7 天累積劑量圖之標號，如表 4-8 所示。

表 4-8 核二廠秋季每周劑量分布之分類

	
東北風影響之下，大致為高斯分布	穩定的西南風之下，大致為高斯分布
9/26~10/2、2017/11/1~11/28	8/29~9/4
圖4-27 e、j、k、l、m,圖4-28 e、j、k、l、m	圖4-27 a,圖4-28 a

	
東南風的影響之下，在核二廠西北邊之金山山麓有一局部大值產生。	偏東風的影響下，受到高度大約1000公尺的大屯山區阻擋的局部大值。
9/12~9/18、9/19~9/25、10/24~10/30	10/10~10/16、10/17~10/23
圖4-27 c、d、l,圖4-28 c、d、l	圖4-27 g、h,圖4-28 g、h

	
在偏北風之下，核二廠南方之五指山高度約600公尺，來自核二廠的劑量在此產生區域大值。	偏北風和東南風的風向組合下所造成兩處之劑量累積分布。
10/3~10/9	9/5~9/11
圖4-27 f,圖4-28 f	圖4-27 b,圖4-28 b

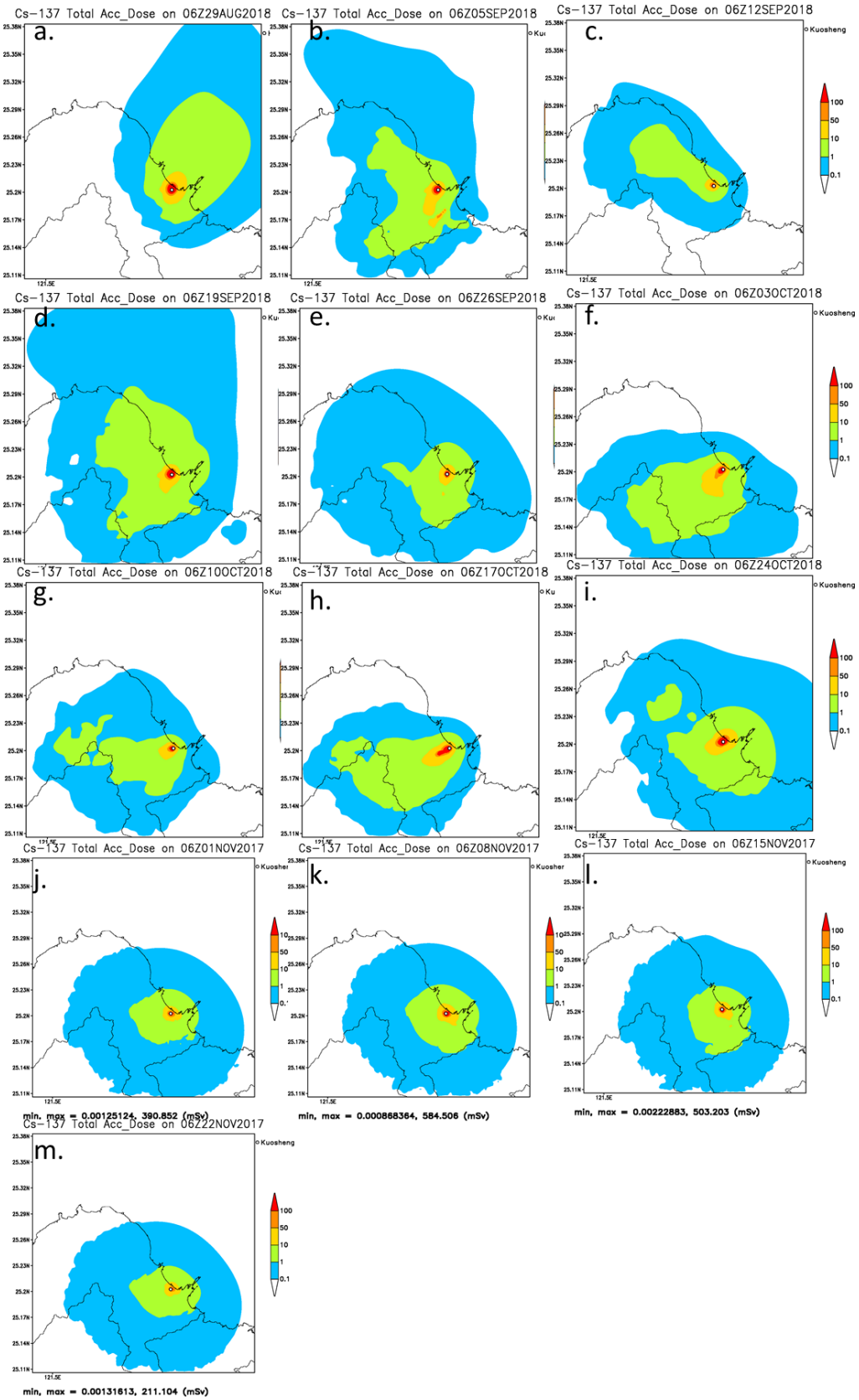


圖 4-27 核二廠秋季，自 2018 年 8 月 29 日至 2018 年 10 月 30 日和 2017 年 11 月 1 日至 11 月 29 日 Cs-137 假想事故模擬之 7 日有效劑量累積圖(mSv)。

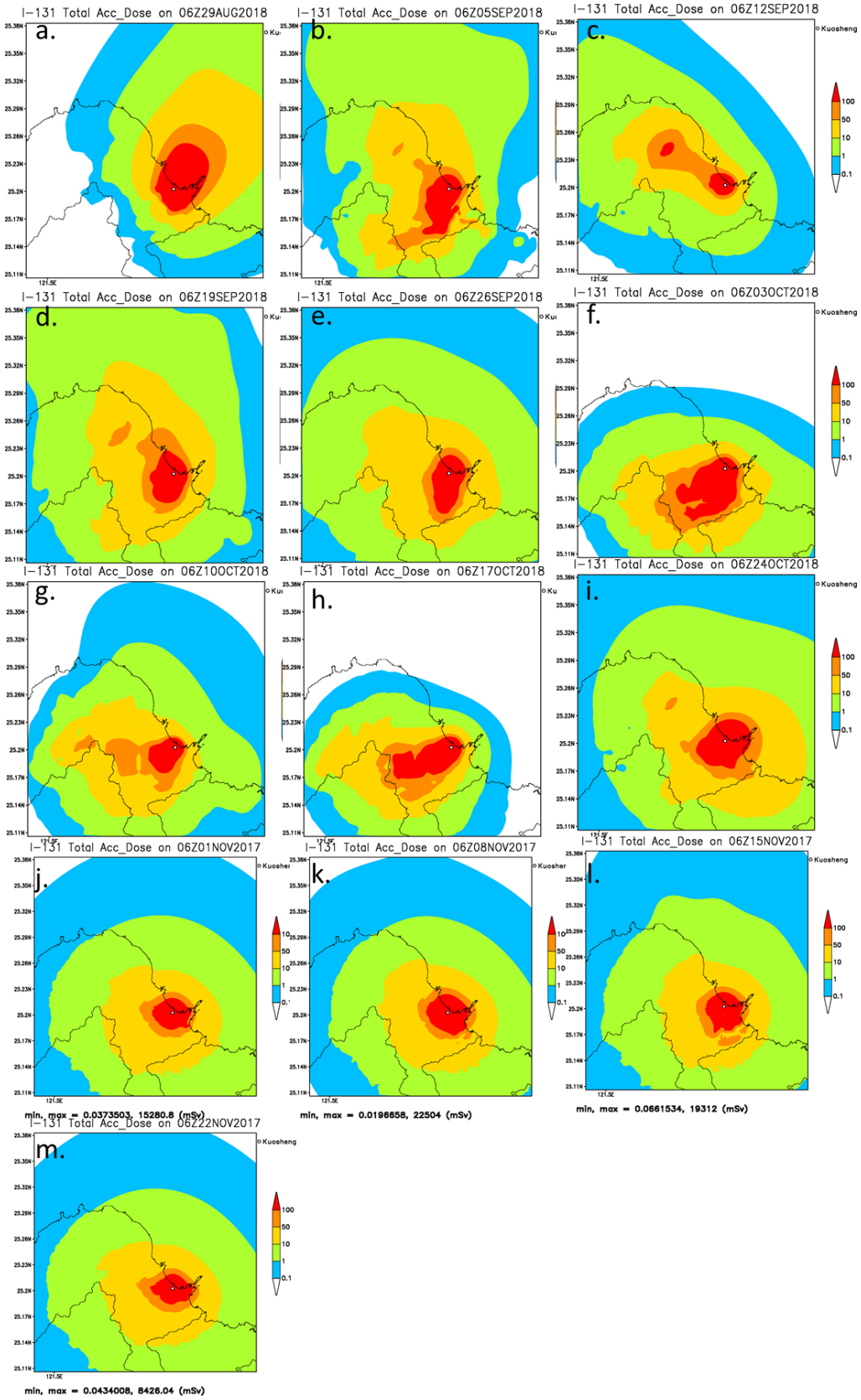


圖 4-28 核二廠秋季，自 2018 年 8 月 29 日至 2018 年 10 月 30 日和 2017 年 11 月 1 日至 11 月 29 日 I-131 假想事故模擬之 7 日有效劑量累積圖(mSv)。

在 9 月 12 日~18 日這周，風向為穩定的東南風，如圖 4-29 及圖 4-30，在這樣的風場下，煙陣往核二廠的西北邊傳送，遇到金山附近的地形，高度不高，風場雖然不明顯受到影響，但煙陣仍會在此處有一區域性大值在此累積，在 I-131 空氣劑量率分布因為釋放率大了 Cs-137 釋放率 10 倍，可以較明顯看到金山地區的累積。

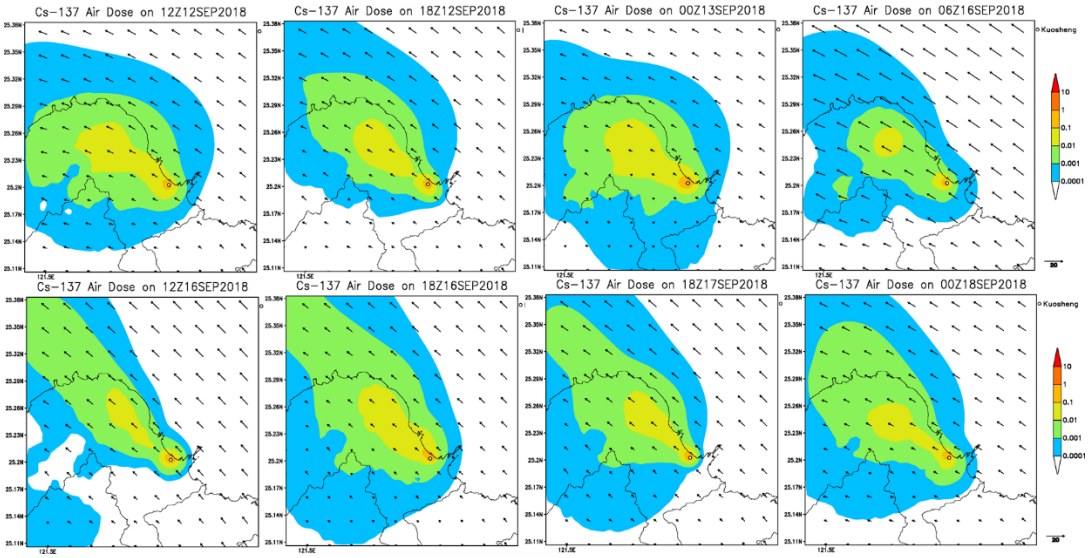


圖 4-29 2018 年 9 月 12 日當周，假想模擬中，Cs-137 劑量累積在金山地區的空氣劑量率(mSv/hr)及風場。

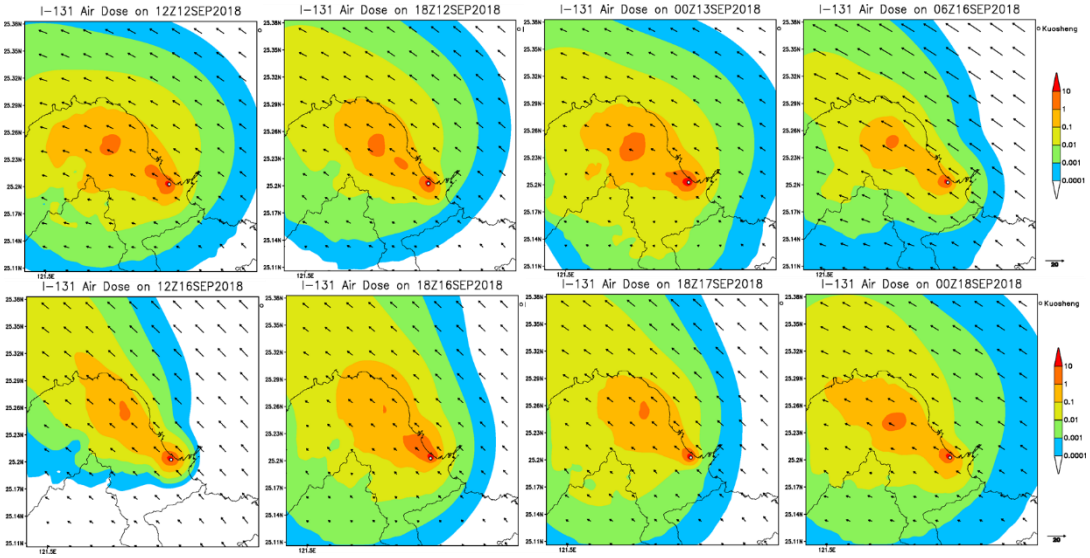


圖 4-30 2018 年 9 月 12 日當周，假想模擬中，I-131 劑量累積在金山地區的空氣劑量率(mSv/hr)及風場。

10 月 3 日這周的劑量累積主要往核二廠南邊，造成這樣累積的風場為偏北的東北風，且風速不大(圖 4-31 和圖 4-32)，煙陣便順著大屯山區與雪山山脈之間的低處傳輸，並在較高的五指山前累積。

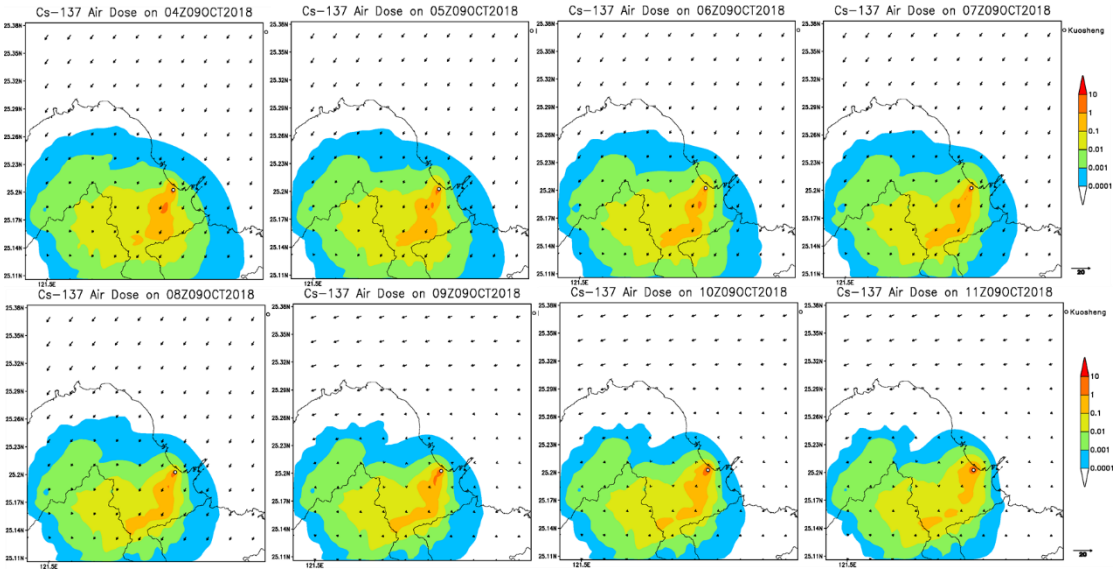


圖 4-31 2018 年 10 月 3 日當周，假想模擬中，Cs-137 劑量累積在大屯山的空氣劑量率(mSv/hr)及風場。

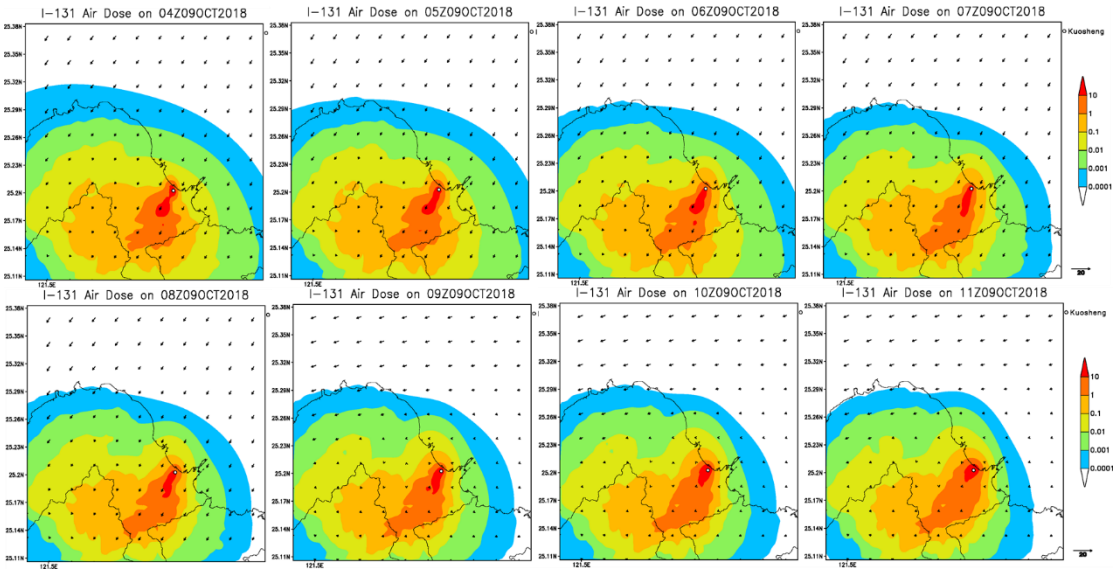


圖 4-32 2018 年 10 月 3 日當周，假想模擬中，I-131 劑量累積在大屯山的空氣劑量率(mSv/hr)及風場。

在 10 月 10 日這周，主要東風分量較多的情形(如圖 4-33 和圖 4-34)，在大屯山區的風速都有明顯減速的情形，因此煙陣在大屯山的山前和山頂處都有累積。

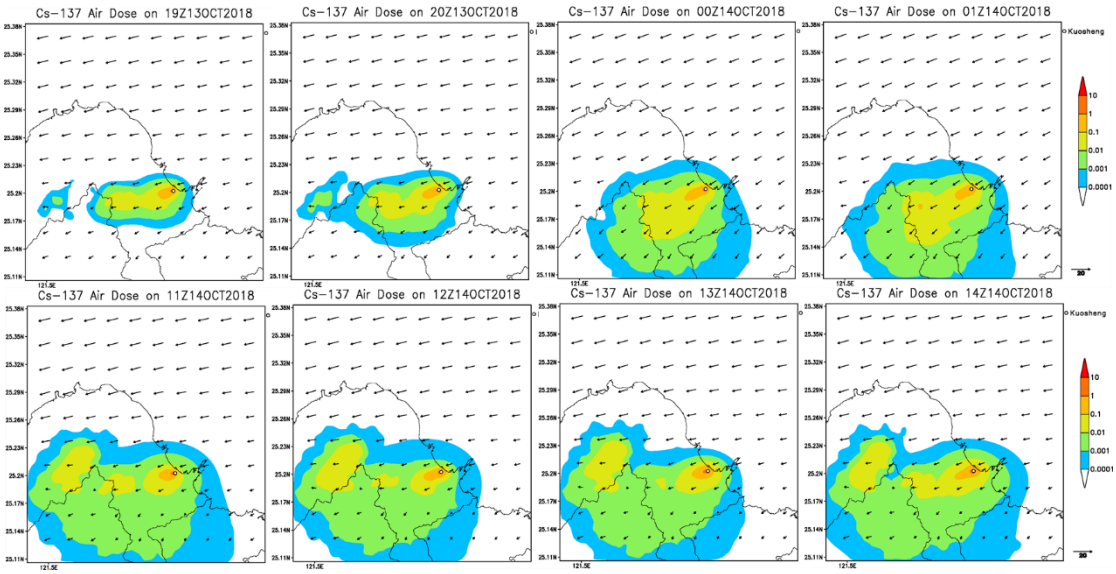


圖 4-33 2018 年 10 月 10 日當周，假想模擬中，Cs-137 核種累積在大屯山區的空氣劑量率(mSv/hr)及風場。

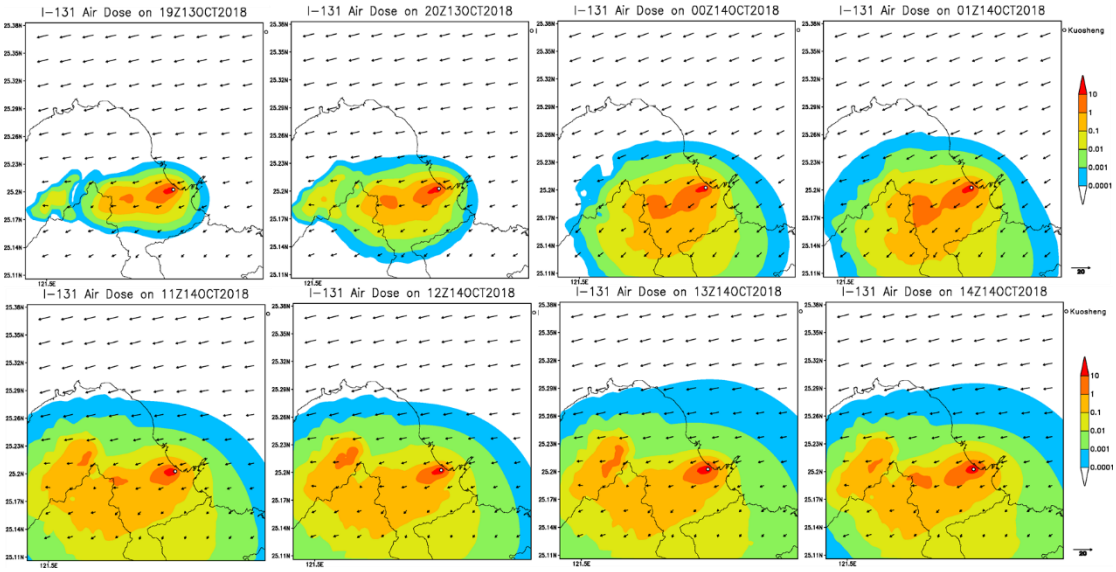


圖 4-34 2018 年 10 月 10 日當周，假想模擬中，I-131 劑量累積在大屯山區的空氣劑量率(mSv/hr)及風場。

5. A2Cflow 模式調教精進及核一廠氣象資料庫更新

模式中位溫的計算係使用以下之方程式，其中 ΔΘ 表示位溫的擾動值。

$$\frac{D\Delta\Theta}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x}\left[K_x \frac{\partial \Delta\Theta}{\partial x}\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[K_y \frac{\partial \Delta\Theta}{\partial y}\right] + \frac{\overline{H}}{H - z_g}$$

$$\times \left[\frac{\partial}{\partial z*}(-\overline{w\theta}) + \frac{1}{\rho C_p}\frac{\partial R_N}{\partial z*} - W\frac{\partial \Theta_v}{\partial z*}\right] ,$$

其中 W ∂Θv/ ∂z*的 W 為卡氏座標下的垂直速度，但在 A2C 的原始程式中，此項是使用地勢追隨座標的垂直速度，造成模式在模擬時無法表現出應有的地形效應，因此將之修改。在模式設定中地面溫度與海水表面溫度分別根據表 5-1 之每月的溫度平均值作為模擬初始值設定。

表 5-1 各月份平均地面溫度與平均海表面溫度

上半年	**1 月**	**2 月**	**3 月**	**4 月**	**5 月**	**6 月**
地面溫度(℃)	14.67	15.45	16.81	20.42	23.50	25.50
海水表面溫度(℃)	20.39	21.04	22.84	23.63	25.20	26.22
下半年	**7 月**	**8 月**	**9 月**	**10 月**	**11 月**	**12 月**
地面溫度(℃)	27.31	27.15	25.77	22.79	19.94	16.25
海水表面溫度(℃)	28.29	28.82	28.10	26.36	26.58	22.09

A2Cflow 模式模擬的設計分為四個巢狀網格，解析度為 4 公里、1 公里、0.5 公里還有 0.25 公里，格點數分別為 120×120、120×120、80×80 以及 80×80，最小範圍則涵蓋以各核一廠為中心；模式將初始風向依據各個月份之測站風場統計結果，每個月有將近 20 個風向的

分類，模擬的初始風速分別設為 2 m/s、5 m/s 還有 8 m/s，穩定度參數值則分成 0.002(即-0.65°C/100m，相當於穩定度分類中的 D 級)跟 0.005(-0.35°C/100m，相當於穩定度分類中的 E 級)兩種穩定度，其中穩定度參數值 0.002 代表標準大氣之溫度遞減率，相較於穩定度參數 0.002 的標準大氣之溫度遞減率，穩定度參數 0.005 較為穩定。

根據上述條件模擬日期取每月中，其中春季和秋季的初始模擬時間為 22LST，夏季的初始模擬時間為 02LST，冬季的初始模擬時間為 20LST，每一個模擬均總共模擬 36 個小時。圖 5-1 到圖 5-96 為 A2Cflow 模式模擬之風場，其中 1 個風向 3 個風速、2 種穩定度及四個季節之結果，共 24 組模擬。向量圖為模式第二層風，其高度為 20m，溫度擾動以填色表示，溫度擾動是指當下格點上的溫度與其模擬初始輸入地面溫度之差值。

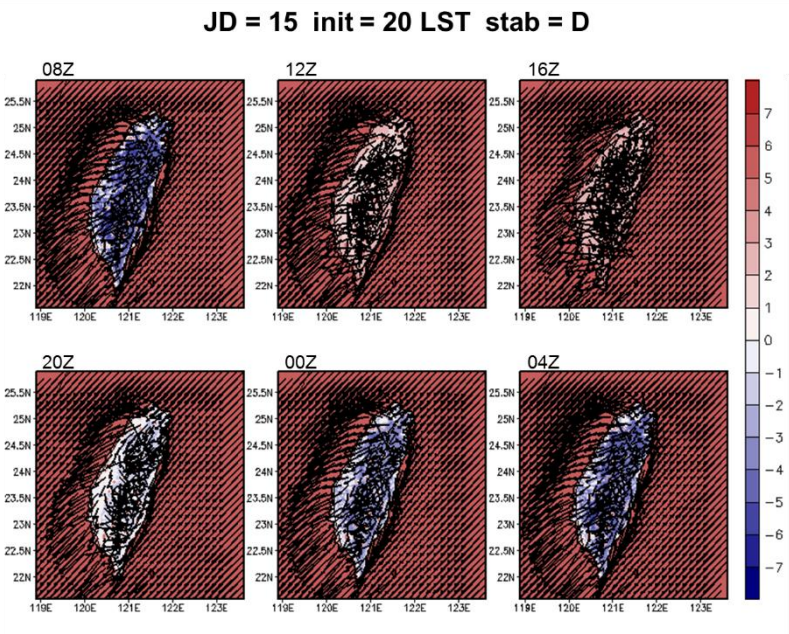


圖 5-1　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 15 日，模擬初始時間為 20LST，中心位置為核一廠(第 1 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 2m/s，穩定度參數為 0.002(穩定度分類 D 級)；填色部分為溫度擾動，單位為℃。

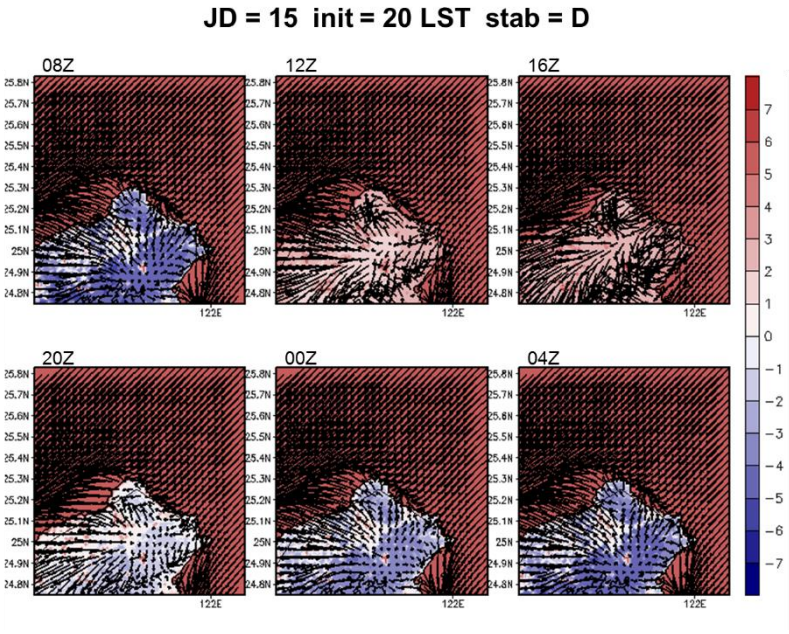


圖 5-2　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 15 日，模擬初始時間為 20LST，中心位置為核一廠(第 2 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 2m/s，穩定度參數為 0.002(穩定度分類 D 級) ；填色部分為溫度擾動，單位為℃。

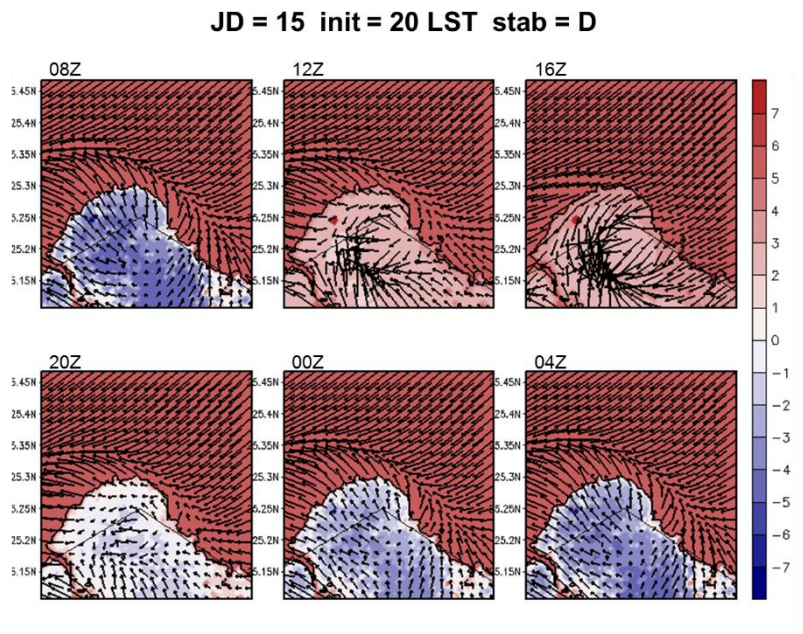


圖 5-3　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 15 日，模擬初始時間為 20LST，中心位置為核一廠(第 3 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 2m/s，穩定度參數為 0.002(穩定度分類 D 級) ；填色部分為溫度擾動，單位為℃。

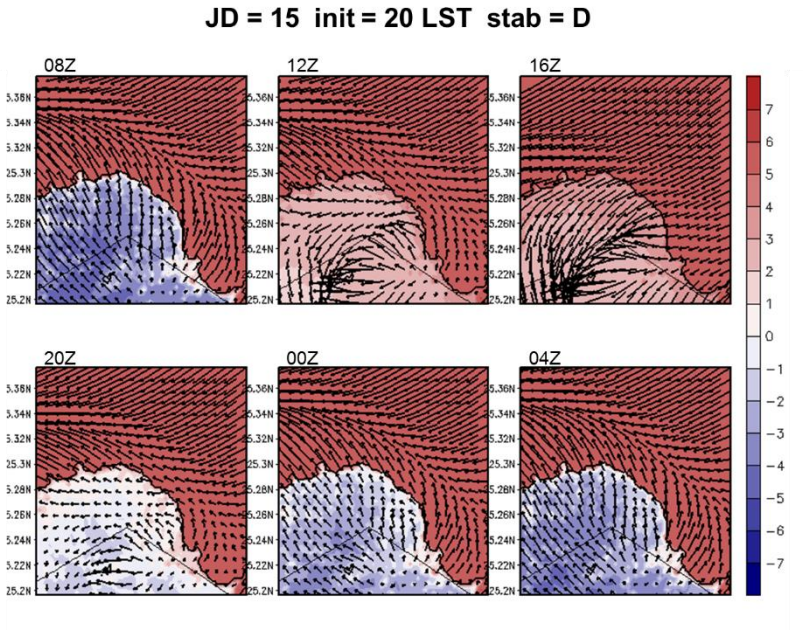


圖 5-4　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 15 日，模擬初始時間為 20LST，中心位置為核一廠(第 4 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 2m/s，穩定度參數為 0.002(穩定度分類 D 級) ；填色部分為溫度擾動，單位為℃。

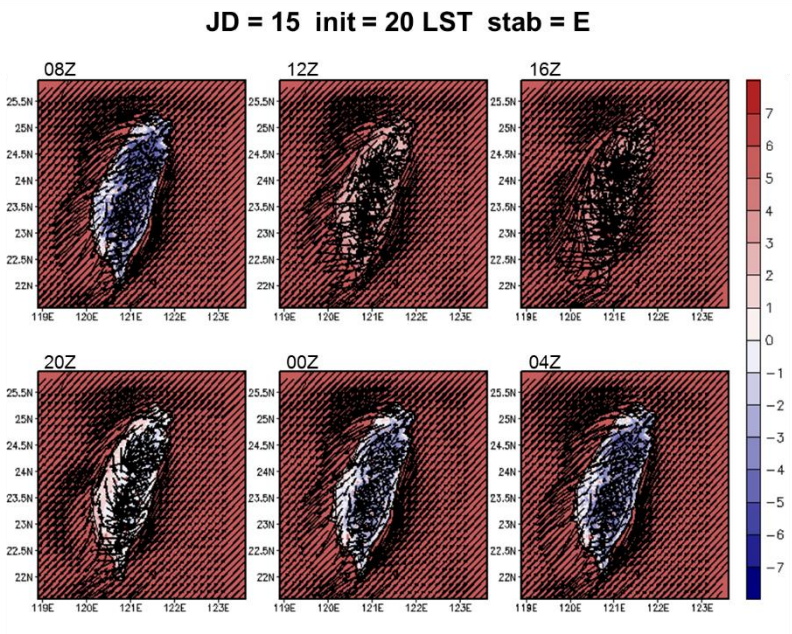


圖 5-5　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 15 日，模擬初始時間為 20LST，中心位置為核一廠(第 1 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 2m/s，穩定度參數為 0.005(穩定度分類 E 級) ；填色部分為溫度擾動，單位為℃。

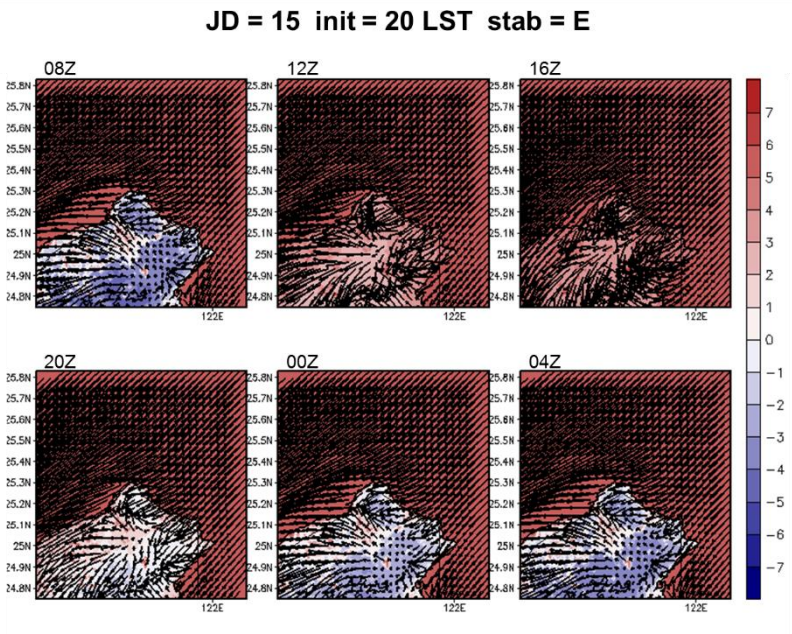


圖 5-6　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 15 日，模擬初始時間為 20LST，中心位置為核一廠(第 2 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 2m/s，穩定度參數為 0.005(穩定度分類 E 級) ；填色部分為溫度擾動，單位為℃。

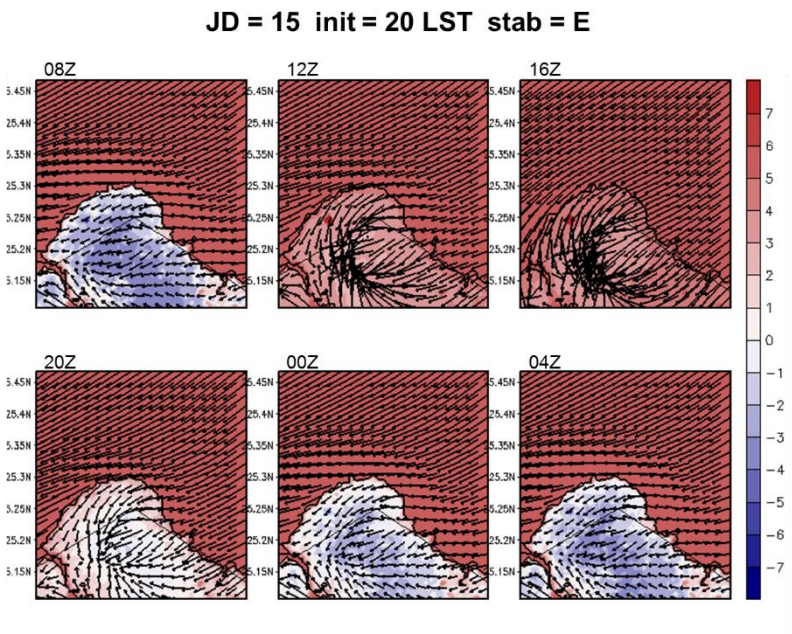


圖 5-7　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 15 日，模擬初始時間為 20LST，中心位置為核一廠(第 3 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 2m/s，穩定度參數為 0.005(穩定度分類 E 級) ；填色部分為溫度擾動，單位為℃。

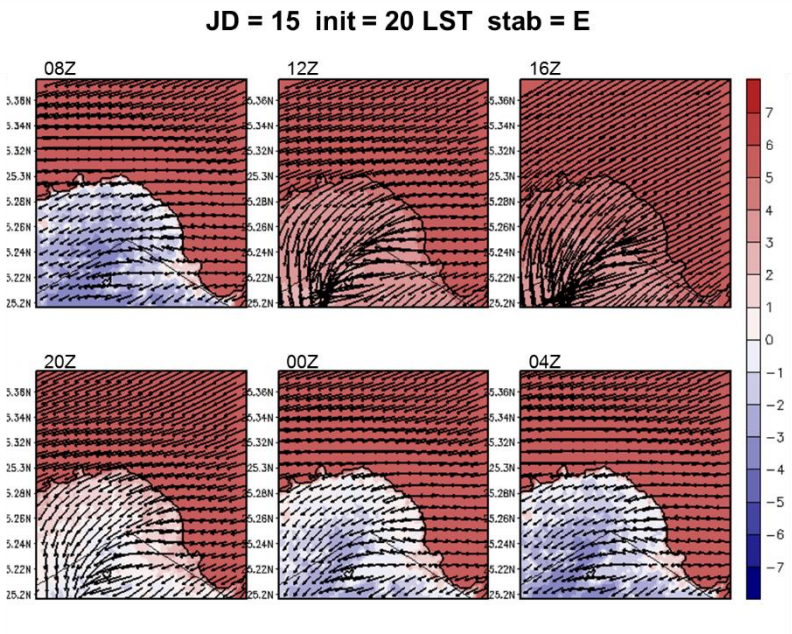


圖 5-8　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 15 日，模擬初始時間為 20LST，中心位置為核一廠(第 4 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 2m/s，穩定度參數為 0.005(穩定度分類 E 級) ；填色部分為溫度擾動，單位為℃。

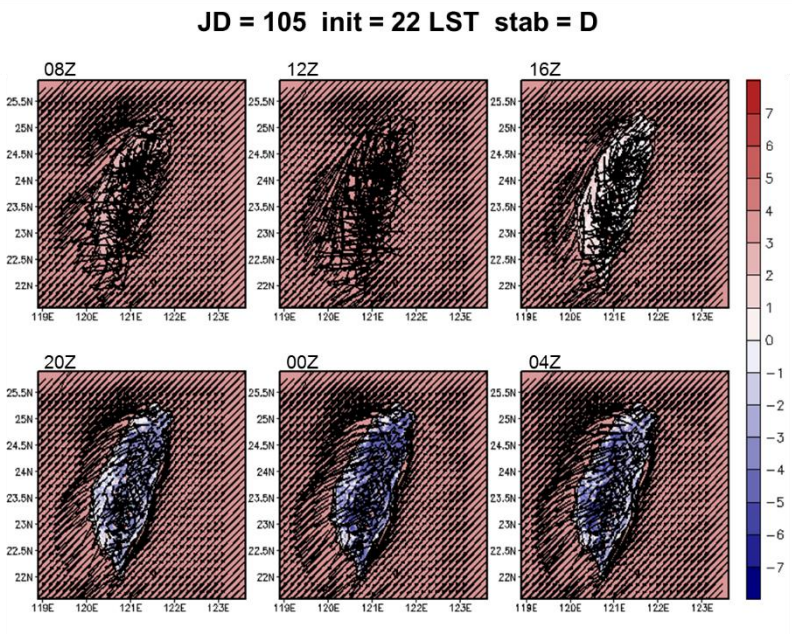


圖 5-9 A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 105 日，模擬初始時間為 22LST，中心位置為核一廠(第 1 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 2m/s，穩定度參數為 0.002(穩定度分類 D 級) ；填色部分為溫度擾動，單位為℃。

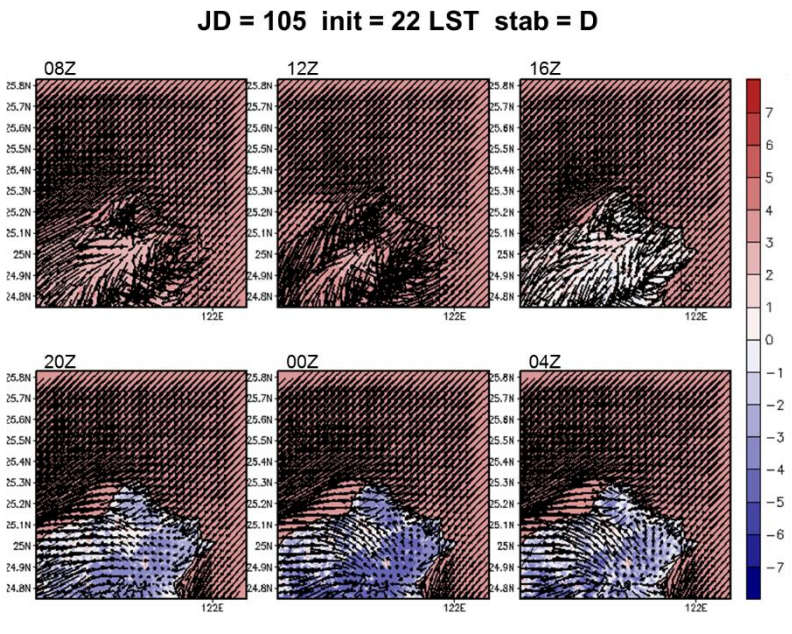


圖 5-10 A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 105 日，模擬初始時間為 22LST，中心位置為核一廠(第 2 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 2m/s，穩定度參數為 0.002(穩定度分類 D 級) ；填色部分為溫度擾動，單位為℃。

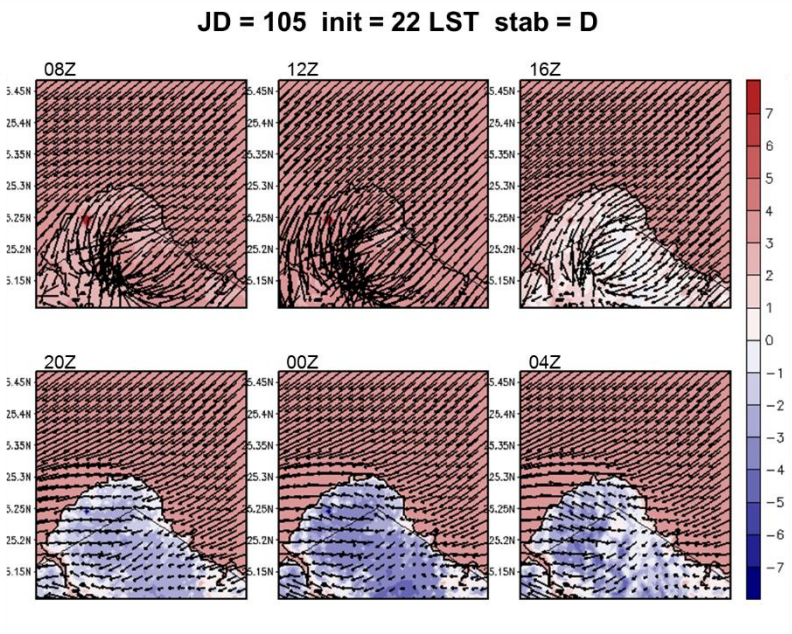


圖 5-11　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 105 日，模擬初始時間為 22LST，中心位置為核一廠(第 3 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 2m/s，穩定度參數為 0.002(穩定度分類 D 級) ；填色部分為溫度擾動，單位為℃。

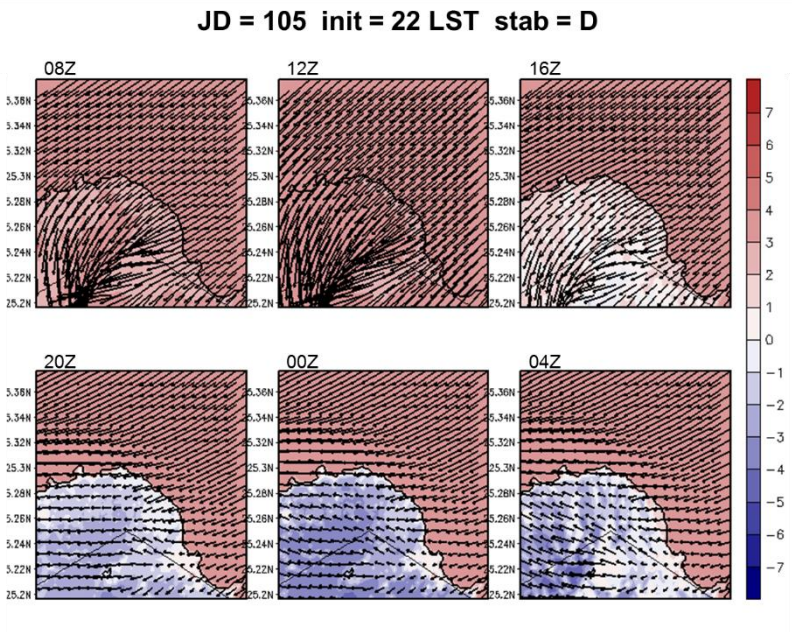


圖 5-12　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 105 日，模擬初始時間為 22LST，中心位置為核一廠(第 4 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 2m/s，穩定度參數為 0.002(穩定度分類 D 級) ；填色部分為溫度擾動，單位為℃。

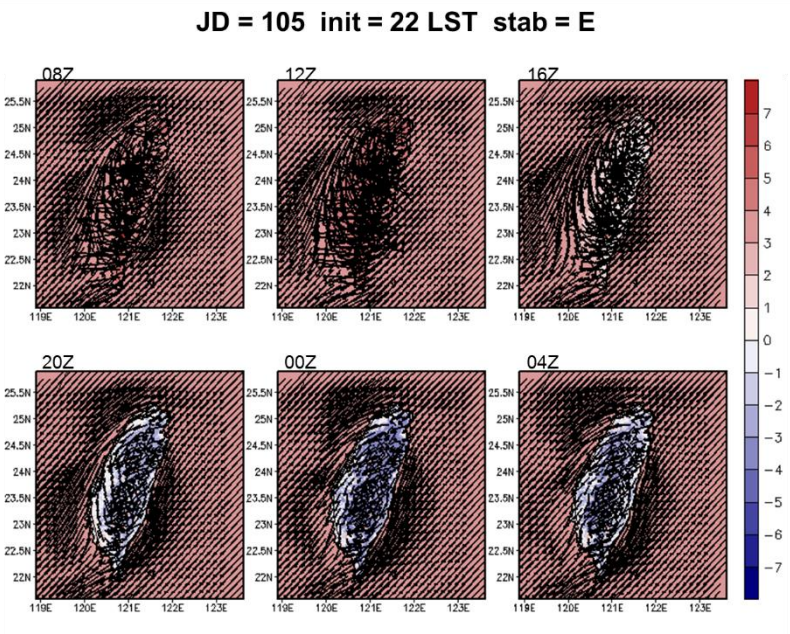


圖 5-13　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 105 日，模擬初始時間為 22LST，中心位置為核一廠(第 1 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 2m/s，穩定度參數為 0.005(穩定度分類 E 級) ；填色部分為溫度擾動，單位為℃。

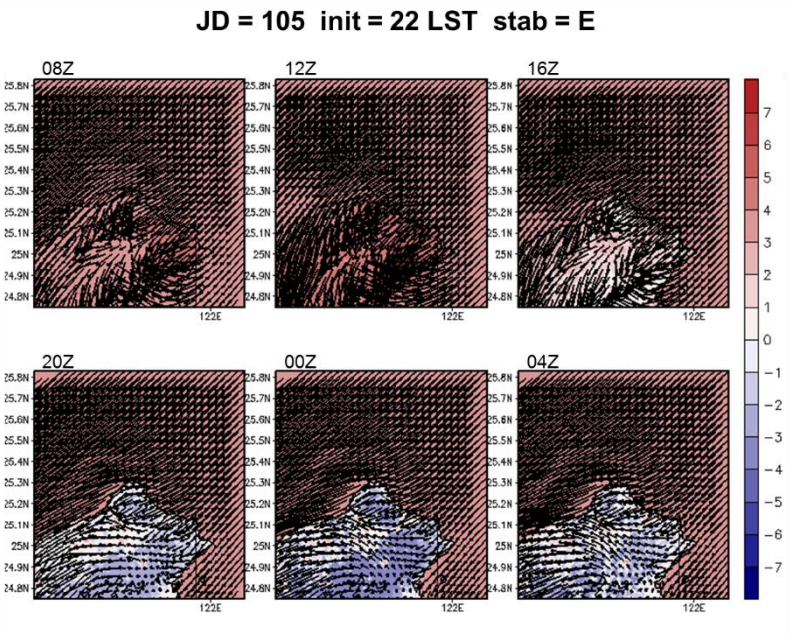


圖 5-14　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 105 日，模擬初始時間為 22LST，中心位置為核一廠(第 2 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 2m/s，穩定度參數為 0.005(穩定度分類 E 級) ；填色部分為溫度擾動，單位為℃。

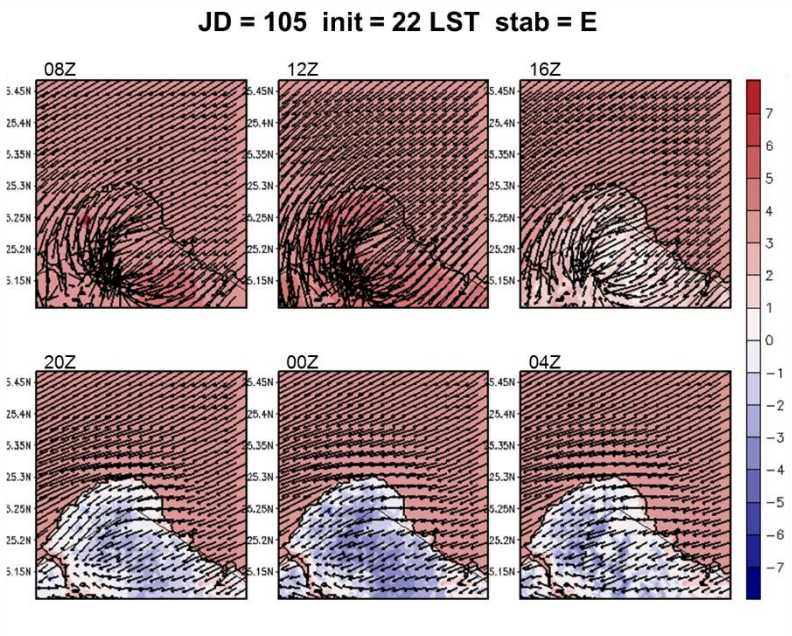


圖 5-15　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 105 日，模擬初始時間為 22LST，中心位置為核一廠(第 3 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 2m/s，穩定度參數為 0.005(穩定度分類 E 級) ；填色部分為溫度擾動，單位為℃。

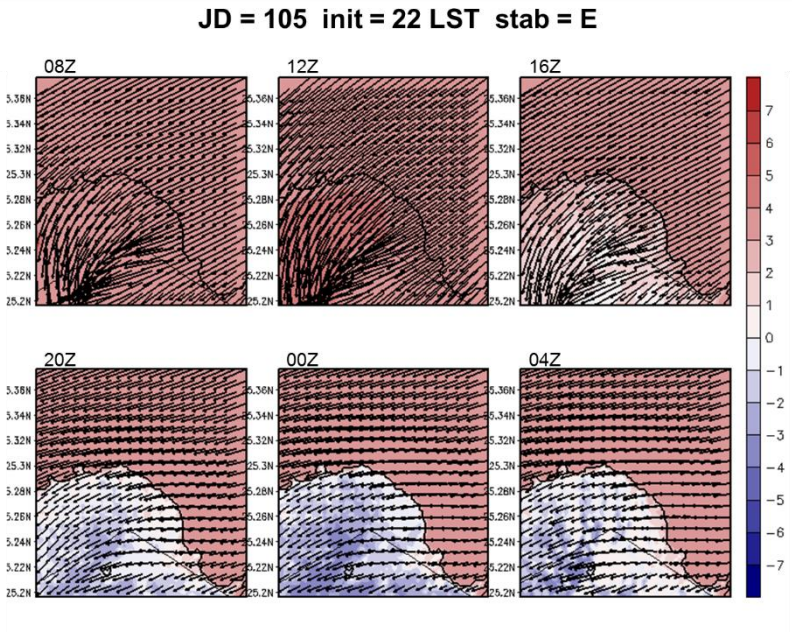


圖 5-16　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 105 日，模擬初始時間為 22LST，中心位置為核一廠(第 4 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 2m/s，穩定度參數為 0.005(穩定度分類 E 級) ；填色部分為溫度擾動，單位為℃。

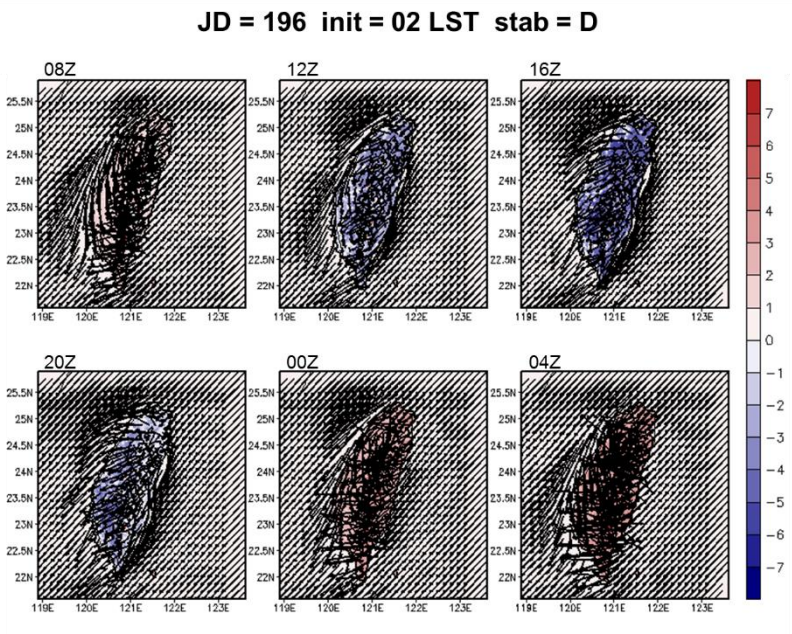


圖 5-17　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 196 日，模擬初始時間為 02LST，中心位置為核一廠(第 1 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 2m/s，穩定度參數為 0.002(穩定度分類 D 級) ；填色部分為溫度擾動，單位為℃。

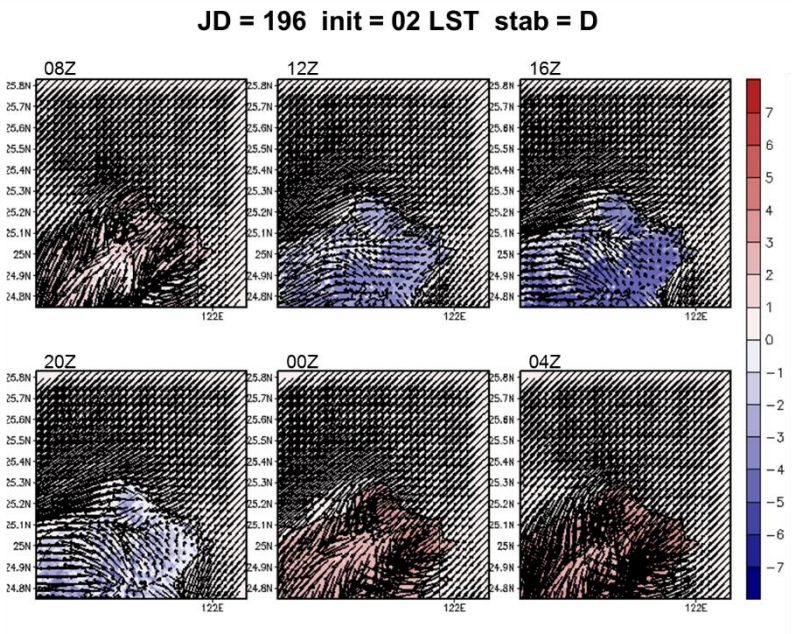


圖 5-18　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 196 日，模擬初始時間為 02LST，中心位置為核一廠(第 2 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 2m/s，穩定度參數為 0.002(穩定度分類 D 級) ；填色部分為溫度擾動，單位為℃。

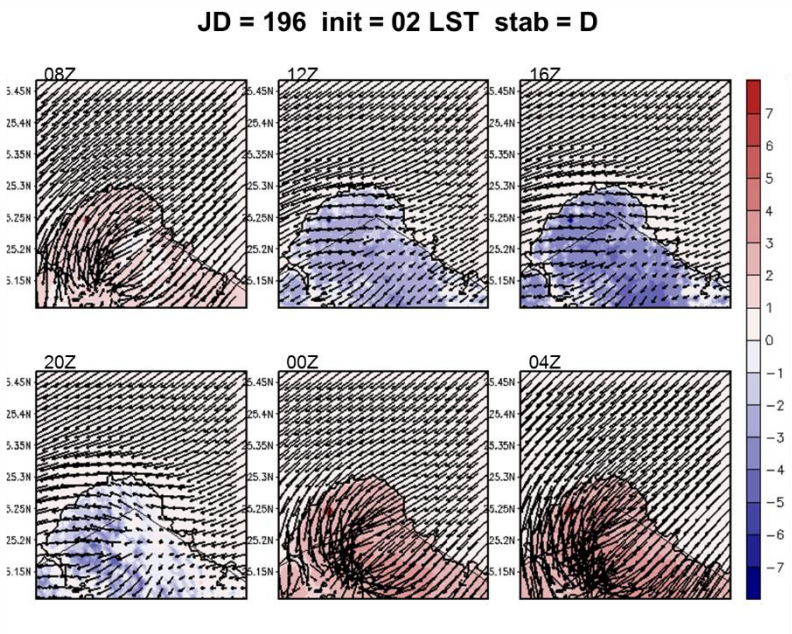


圖 5-19　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 196 日，模擬初始時間為 02LST，中心位置為核一廠(第 3 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 2m/s，穩定度參數為 0.002(穩定度分類 D 級) ；填色部分為溫度擾動，單位為℃。

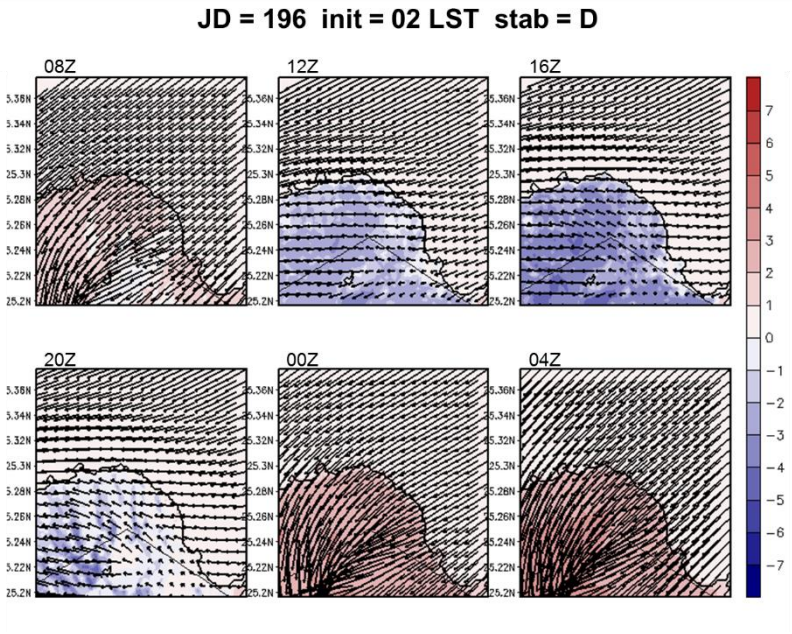


圖 5-20　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 196 日，模擬初始時間為 02LST，中心位置為核一廠(第 4 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 2m/s，穩定度參數為 0.002(穩定度分類 D 級) ；填色部分為溫度擾動，單位為℃。

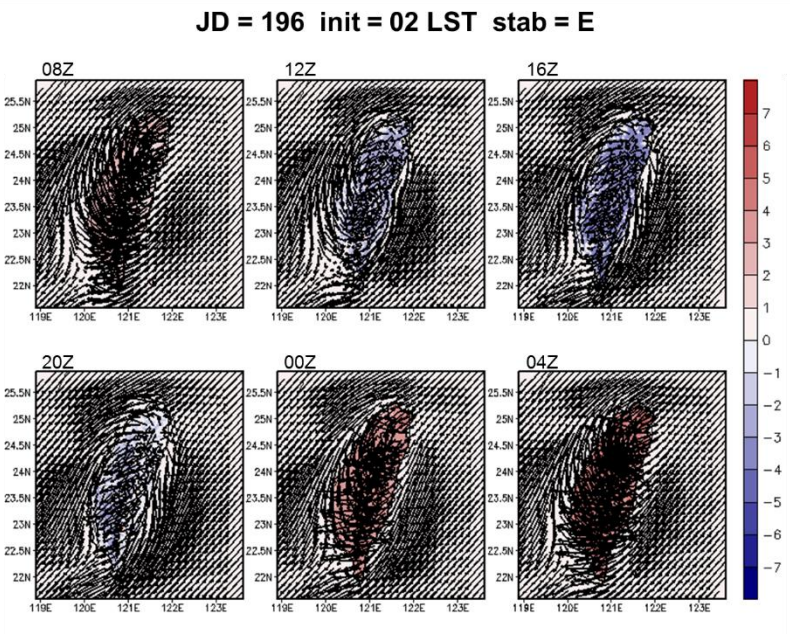


圖 5-21　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 196 日，模擬初始時間為 02LST，中心位置為核一廠(第 1 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 2m/s，穩定度參數為 0.005(穩定度分類 E 級)，填色部分為溫度擾動，單位為℃。

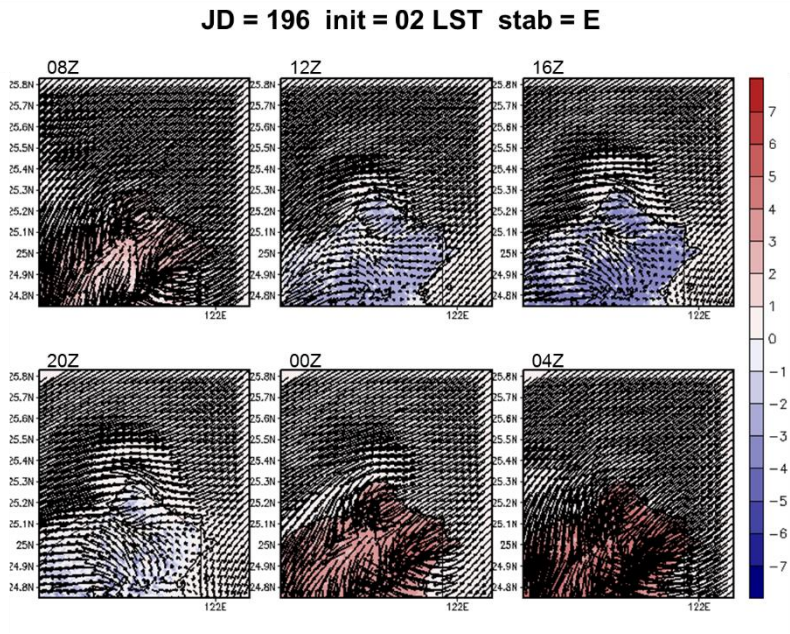


圖 5-22 A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 196 日，模擬初始時間為 02LST，中心位置為核一廠(第 2 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 2m/s，穩定度參數為 0.005(穩定度分類 E 級)，填色部分為溫度擾動，單位為℃。

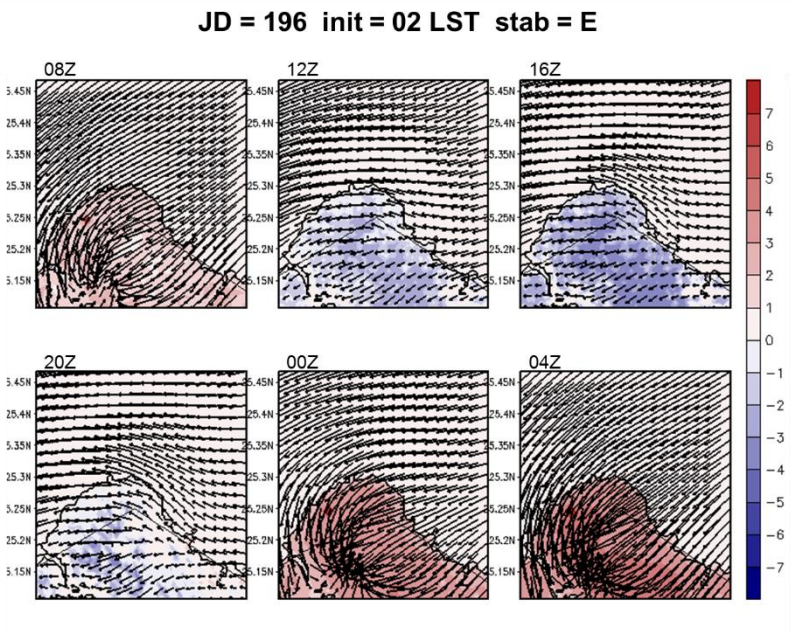


圖 5-23　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 196 日，模擬初始時間為 02LST，中心位置為核一廠(第 3 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 2m/s，穩定度參數為 0.005(穩定度分類 E 級)，填色部分為溫度擾動，單位為℃。

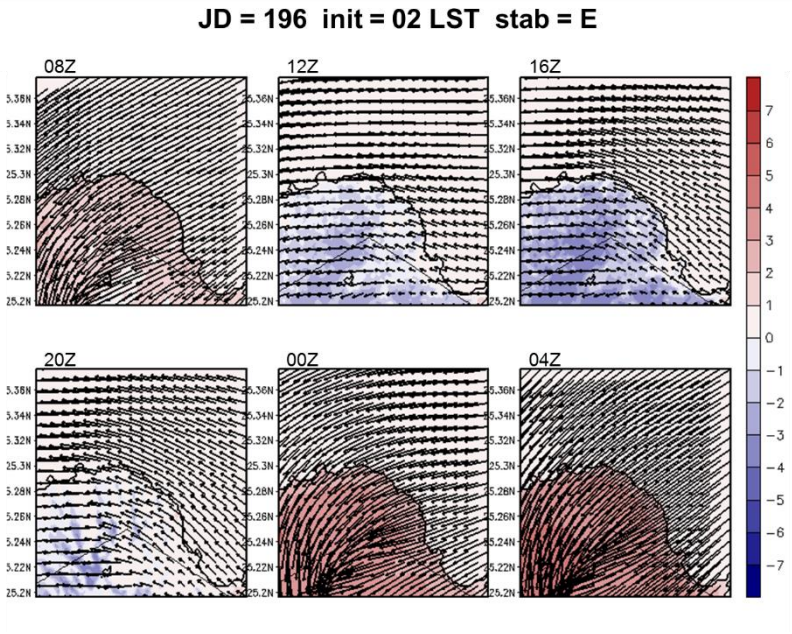


圖 5-24　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 196 日，模擬初始時間為 02LST，中心位置為核一廠(第 4 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 2m/s，穩定度參數為 0.005(穩定度分類 E 級)，填色部分為溫度擾動，單位為℃。

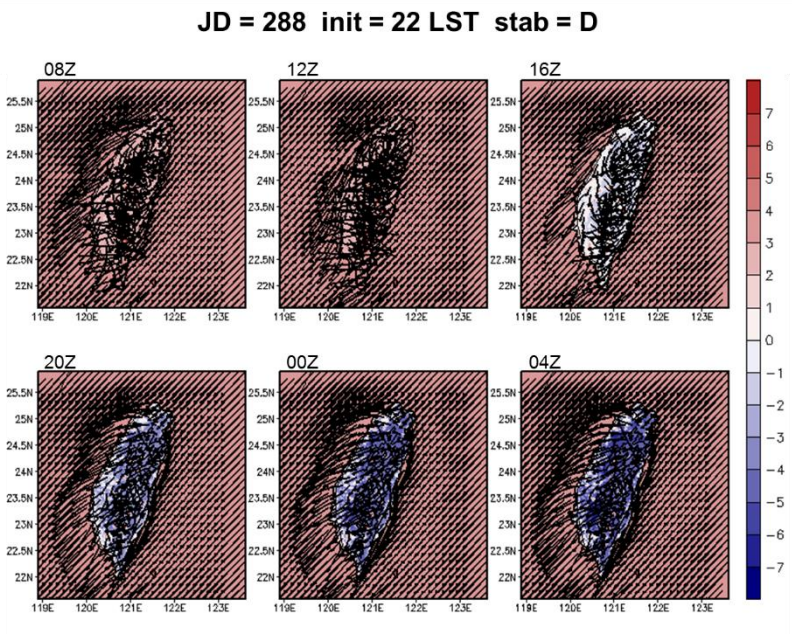


圖 5-25　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 288 日，模擬初始時間為 02LST，中心位置為核一廠(第 1 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 2m/s，穩定度參數為 0.002(穩定度分類 D 級)，填色部分為溫度擾動，單位為℃。

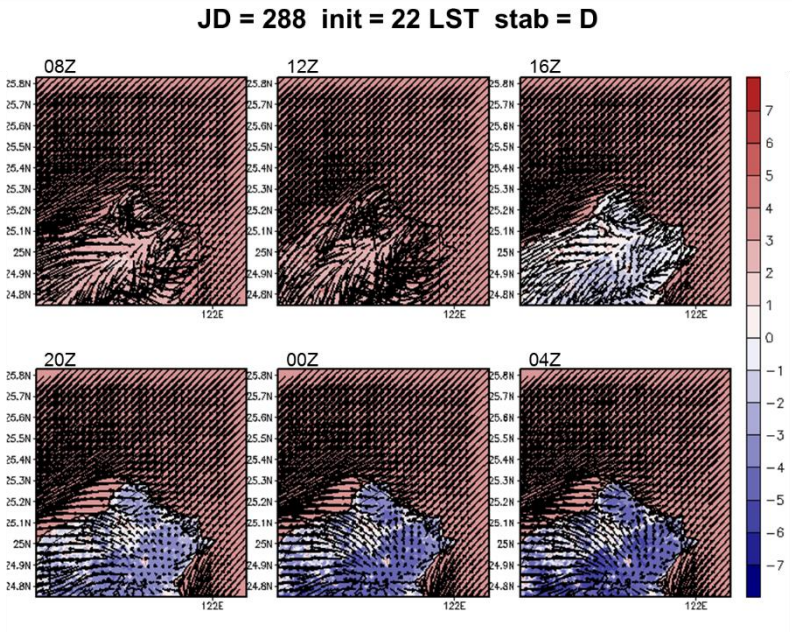


圖 5-26　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 288 日，模擬初始時間為 02LST，中心位置為核一廠(第 2 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 2m/s，穩定度參數為 0.002(穩定度分類 D 級)，填色部分為溫度擾動，單位為℃。

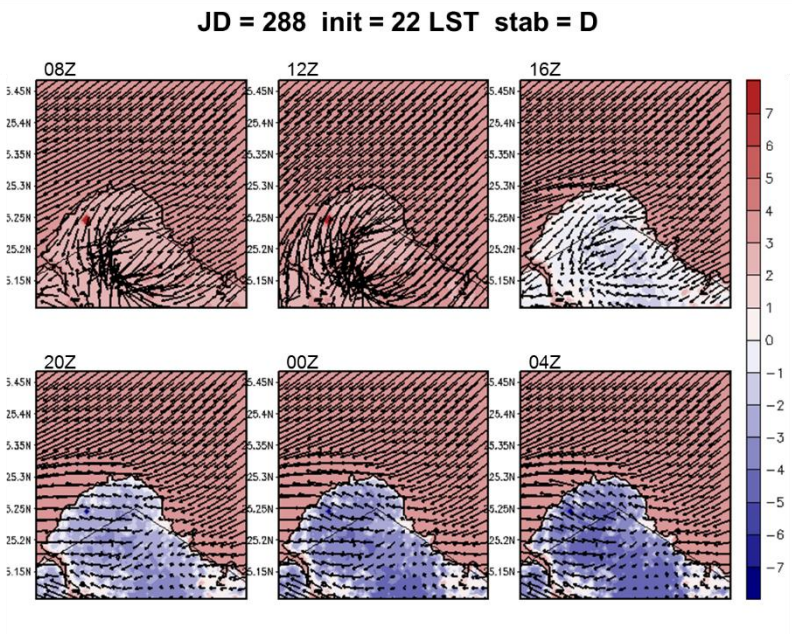


圖 5-27　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 288 日，模擬初始時間為 02LST，中心位置為核一廠(第 3 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 2m/s，穩定度參數為 0.002(穩定度分類 D 級)，填色部分為溫度擾動，單位為℃。

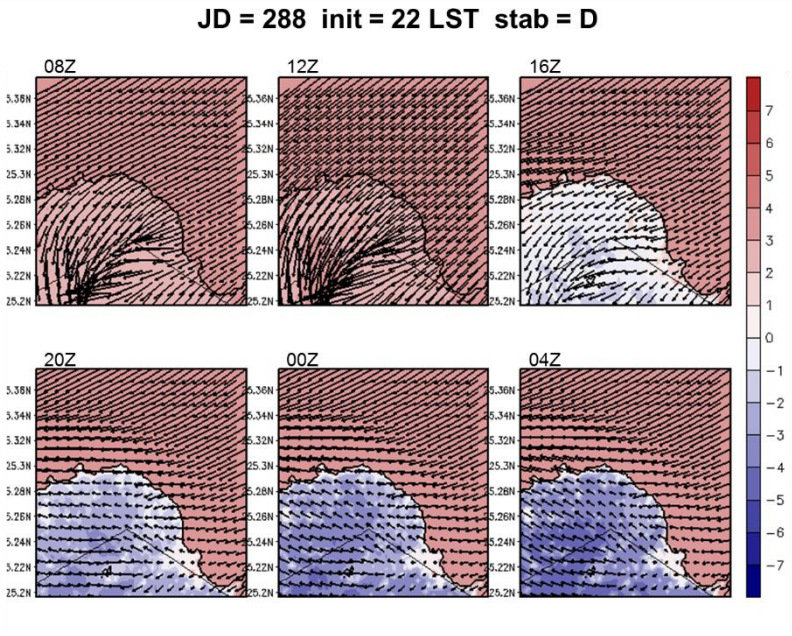


圖 5-28　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 288 日，模擬初始時間為 02LST，中心位置為核一廠(第 3 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 2m/s，穩定度參數為 0.002(穩定度分類 D 級)，填色部分為溫度擾動，單位為℃。

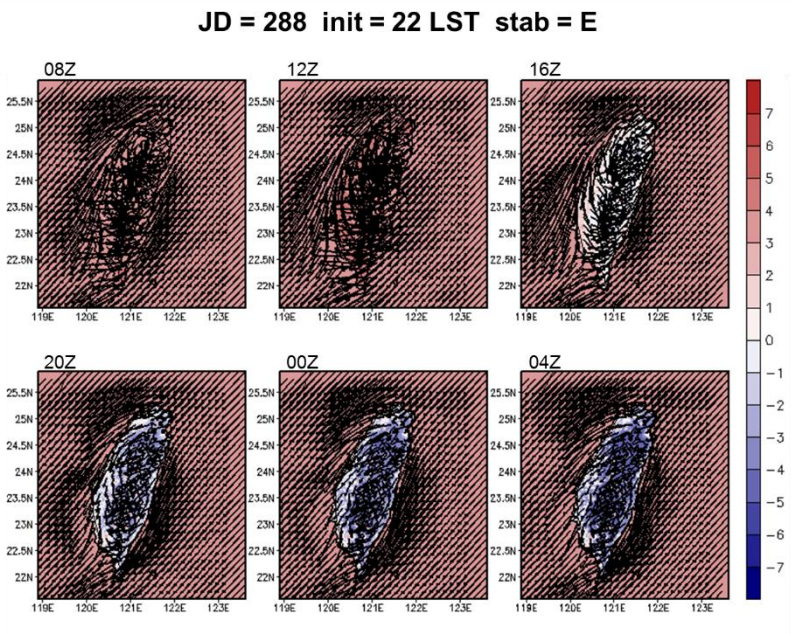


圖 5-29　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 288 日，模擬初始時間為 22LST，中心位置為核一廠(第 1 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 2m/s，穩定度參數為 0.005(穩定度分類 E 級)，填色部分為溫度擾動，單位為℃。

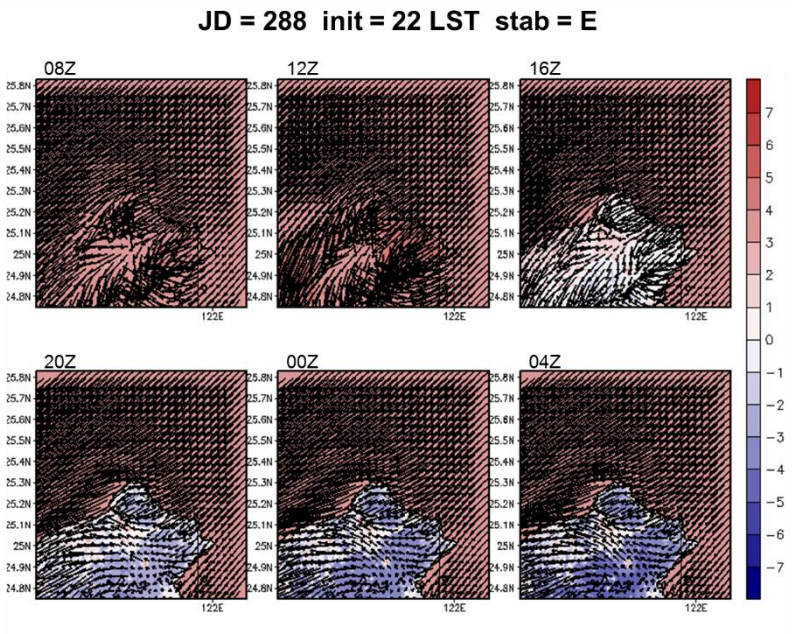


圖 5-30　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 288 日，模擬初始時間為 22LST，中心位置為核一廠(第 2 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 2m/s，穩定度參數為 0.005(穩定度分類 E 級)，填色部分為溫度擾動，單位為℃。

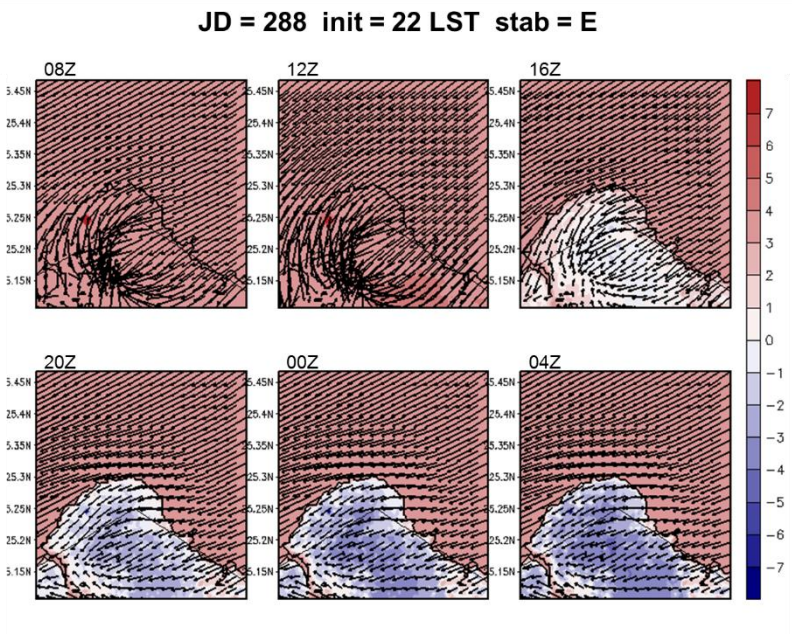


圖 5-31　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 288 日，模擬初始時間為 22LST，中心位置為核一廠(第 3 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 2m/s，穩定度參數為 0.005(穩定度分類 E 級)，填色部分為溫度擾動，單位為℃。

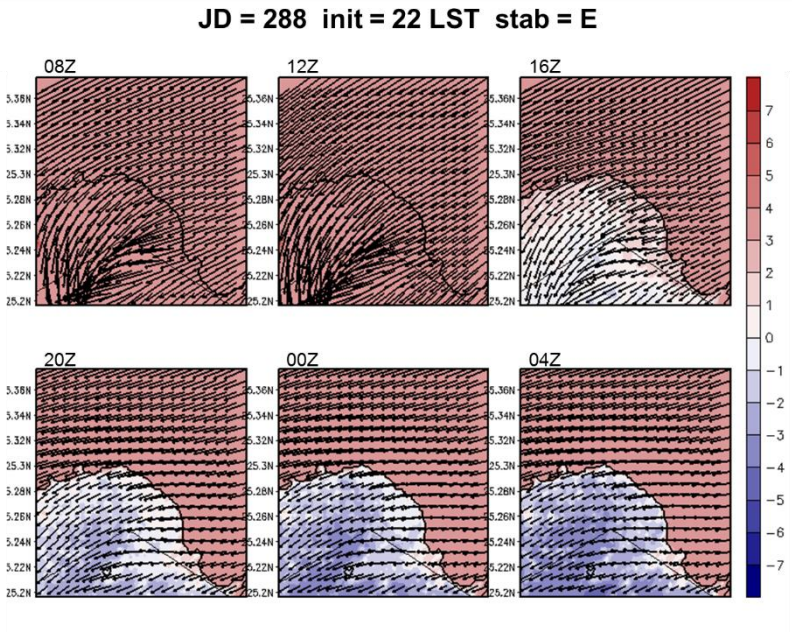


圖 5-32　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 288 日，模擬初始時間為 22LST，中心位置為核一廠(第 4 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 2m/s，穩定度參數為 0.005(穩定度分類 E 級)，填色部分為溫度擾動，單位為℃。

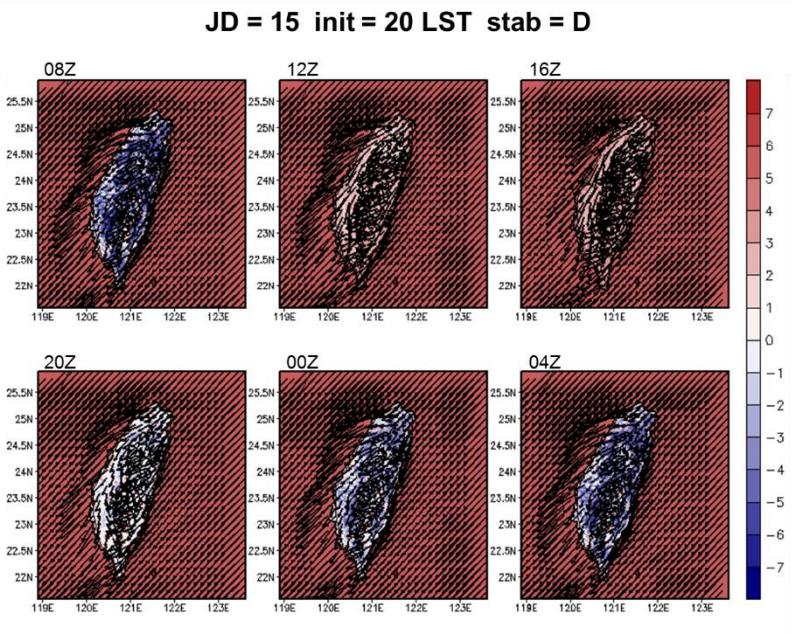


圖 5-33　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 15 日，模擬初始時間為 20LST，中心位置為核一廠(第 1 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 5m/s，穩定度參數為 0.002(穩定度分類 D 級)，填色部分為溫度擾動，單位為℃。

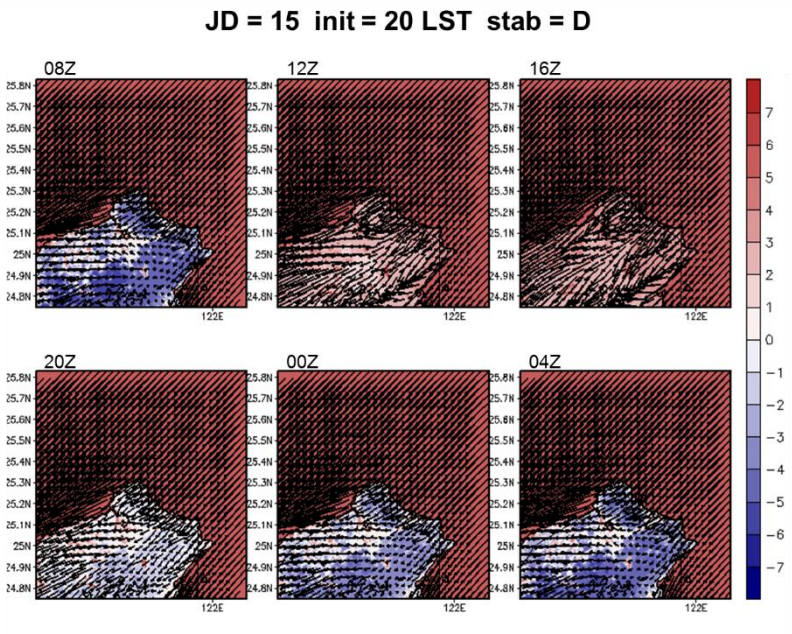


圖 5-34　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 15 日，模擬初始時間為 20LST，中心位置為核一廠(第 2 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 5m/s，穩定度參數為 0.002(穩定度分類 D 級)，填色部分為溫度擾動，單位為℃。

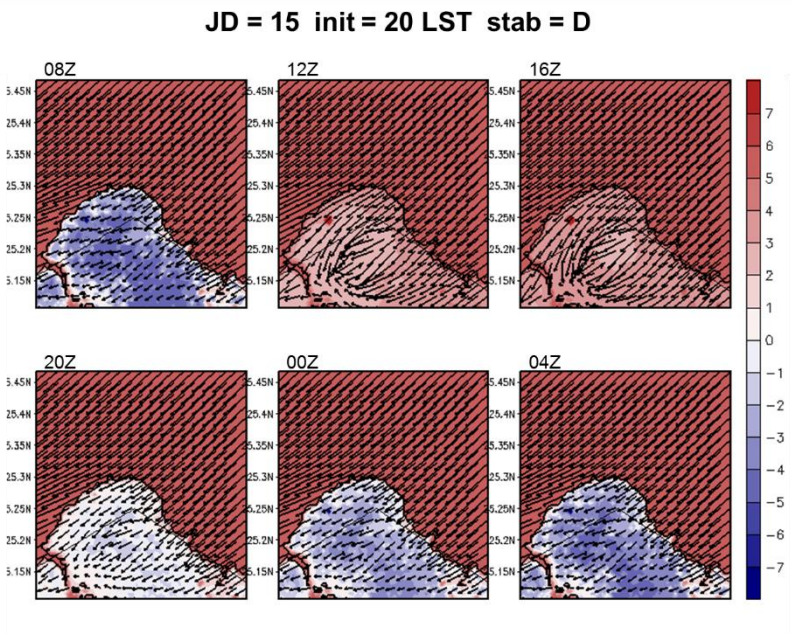


圖 5-35　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 15 日，模擬初始時間為 20LST，中心位置為核一廠(第 3 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 5m/s，穩定度參數為 0.002(穩定度分類 D 級)，填色部分為溫度擾動，單位為℃。

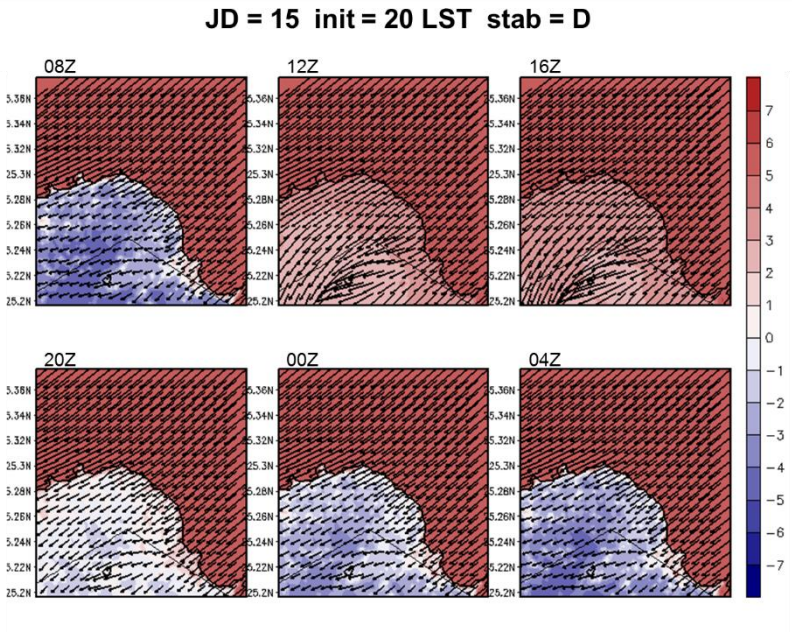


圖 5-36　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 15 日，模擬初始時間為 20LST，中心位置為核一廠(第 4 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 5m/s，穩定度參數為 0.002(穩定度分類 D 級)，填色部分為溫度擾動，單位為℃。

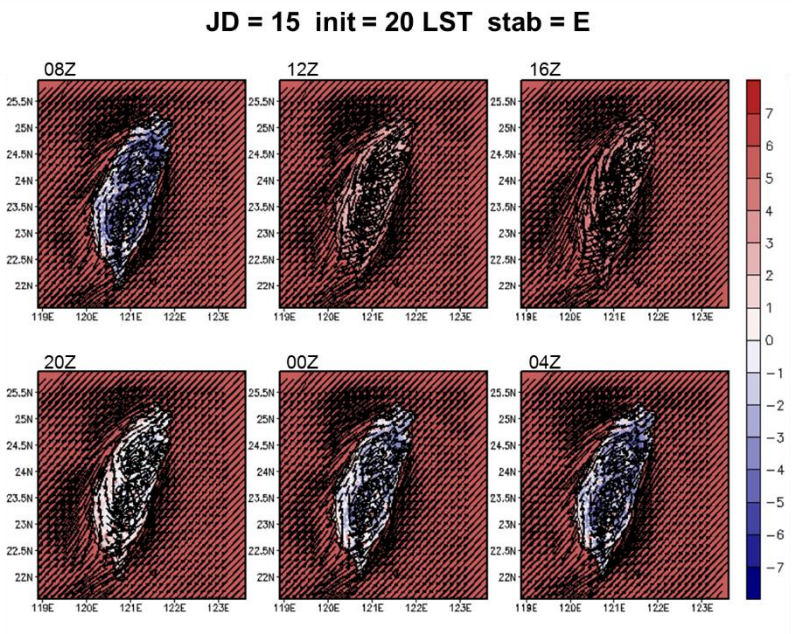


圖 5-37　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 15 日，模擬初始時間為 20LST，中心位置為核一廠(第 1 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 5m/s，穩定度參數為 0.005(穩定度分類 E 級)，填色部分為溫度擾動，單位為℃。

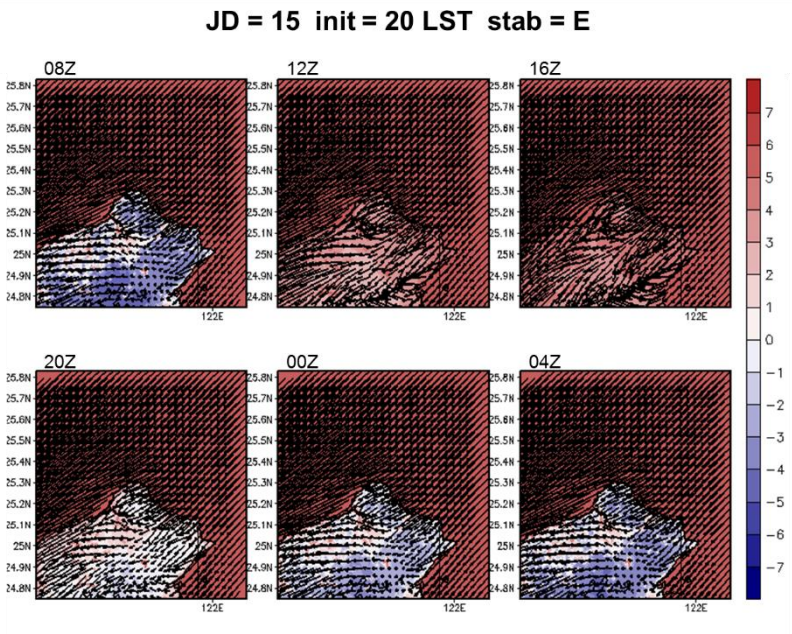


圖 5-38　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 15 日，模擬初始時間為 20LST，中心位置為核一廠(第 2 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 5m/s，穩定度參數為 0.005(穩定度分類 E 級)，填色部分為溫度擾動，單位為℃。

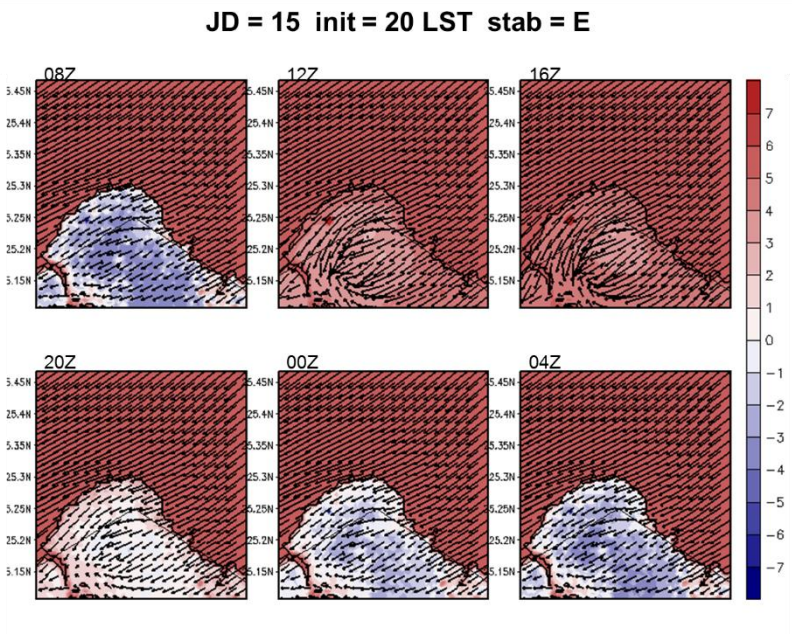


圖 5-39　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 15 日，模擬初始時間為 20LST，中心位置為核一廠(第 3 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 5m/s，穩定度參數為 0.005(穩定度分類 E 級)，填色部分為溫度擾動，單位為℃。

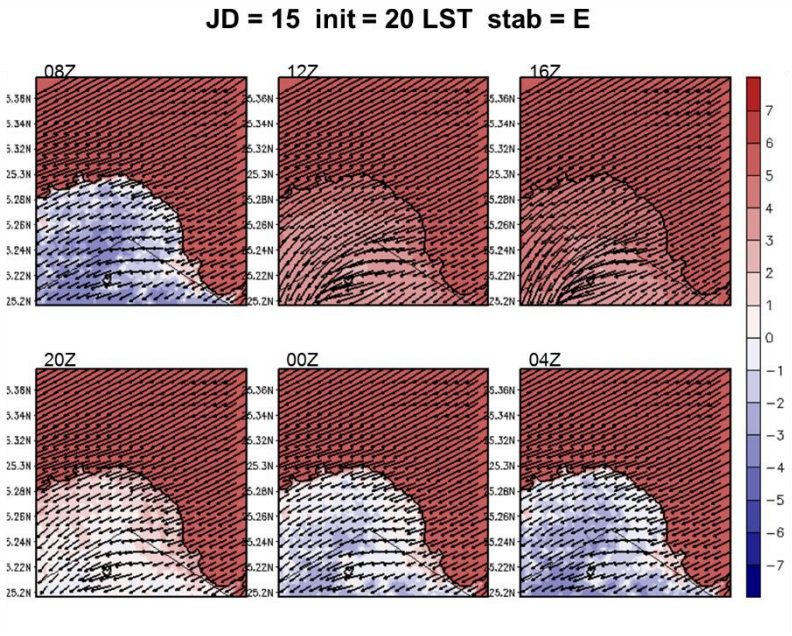


圖 5-40　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 15 日，模擬初始時間為 20LST，中心位置為核一廠(第 4 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 5m/s，穩定度參數為 0.005(穩定度分類 E 級)，填色部分為溫度擾動，單位為℃。

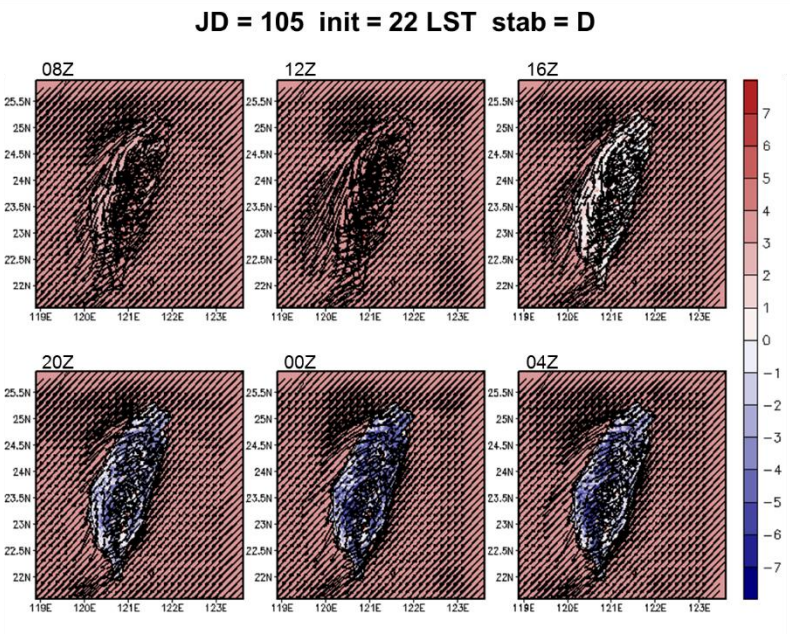


圖 5-41　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 105 日，模擬初始時間為 22LST，中心位置為核一廠(第 1 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 5m/s，穩定度參數為 0.002(穩定度分類 D 級)，填色部分為溫度擾動，單位為℃。

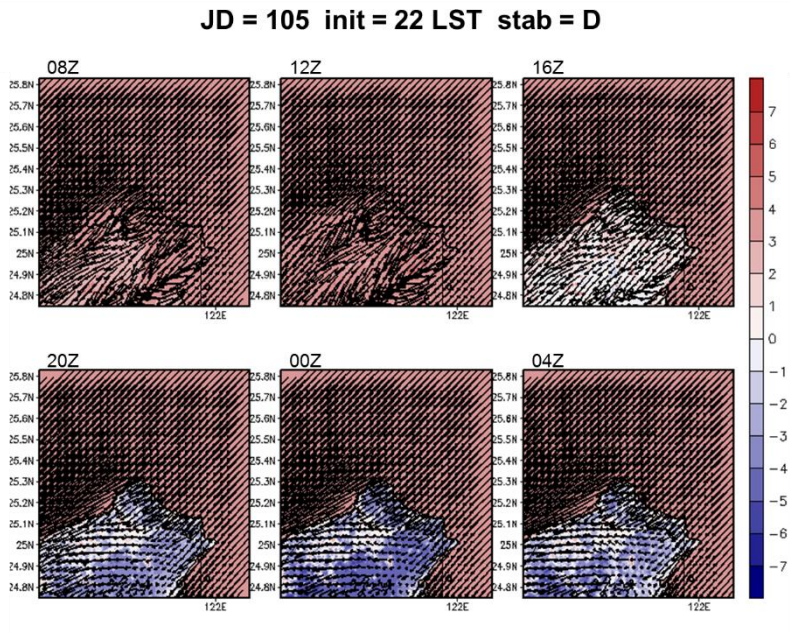


圖 5-42　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 105 日，模擬初始時間為 22LST，中心位置為核一廠(第 2 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 5m/s，穩定度參數為 0.002(穩定度分類 D 級)，填色部分為溫度擾動，單位為℃。

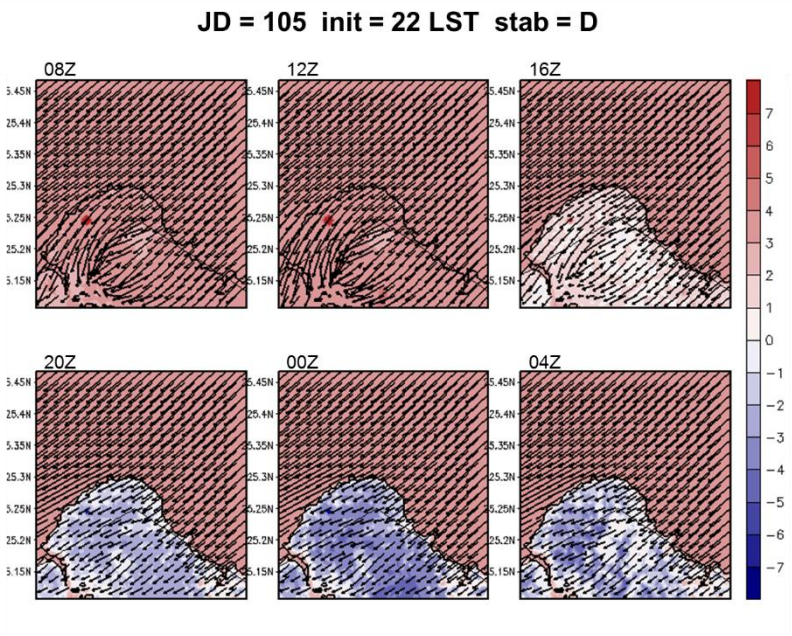


圖 5-43　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 105 日，模擬初始時間為 22LST，中心位置為核一廠(第 3 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 5m/s，穩定度參數為 0.002(穩定度分類 D 級)，填色部分為溫度擾動，單位為℃。

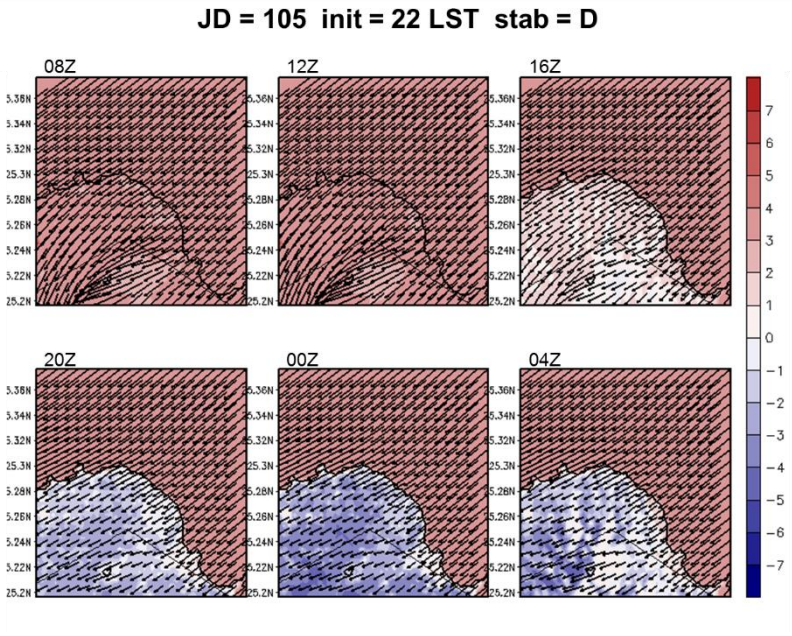


圖 5-44　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 105 日，模擬初始時間為 22LST，中心位置為核一廠(第 4 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 5m/s，穩定度參數為 0.002(穩定度分類 D 級)，填色部分為溫度擾動，單位為℃。

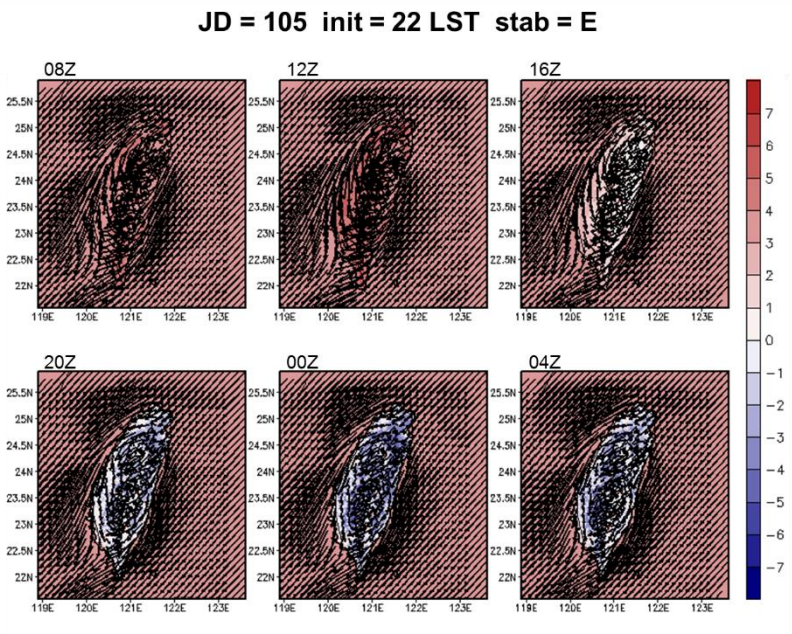


圖 5-45　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 105 日，模擬初始時間為 22LST，中心位置為核一廠(第 1 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 5m/s，穩定度參數為 0.005(穩定度分類 E 級)，填色部分為溫度擾動，單位為℃。

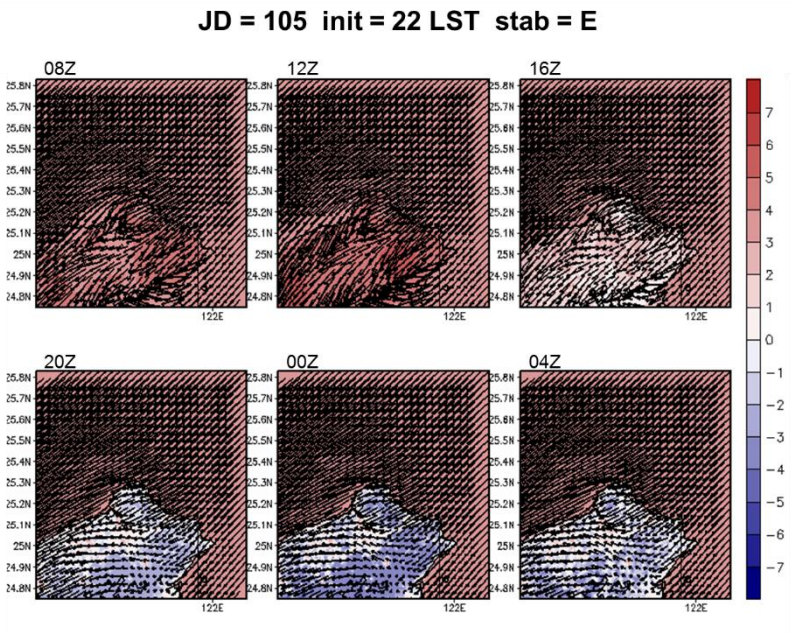


圖 5-46　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 105 日，模擬初始時間為 22LST，中心位置為核一廠(第 2 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 5m/s，穩定度參數為 0.005(穩定度分類 E 級)，填色部分為溫度擾動，單位為℃。

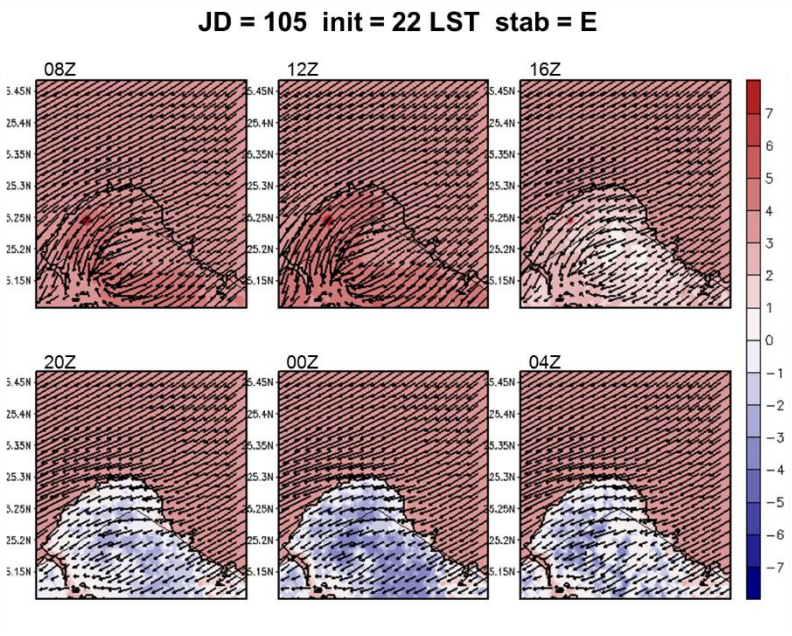


圖 5-47　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 105 日，模擬初始時間為 22LST，中心位置為核一廠(第 3 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 5m/s，穩定度參數為 0.005(穩定度分類 E 級)，填色部分為溫度擾動，單位為℃。

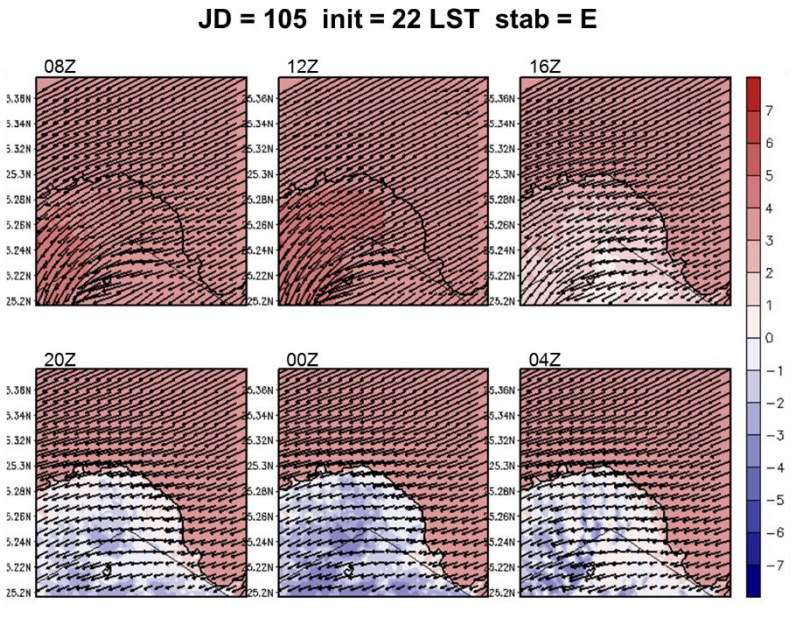


圖 5-48　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 105 日，模擬初始時間為 22LST，中心位置為核一廠(第 4 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 5m/s，穩定度參數為 0.005(穩定度分類 E 級)，填色部分為溫度擾動，單位為℃。

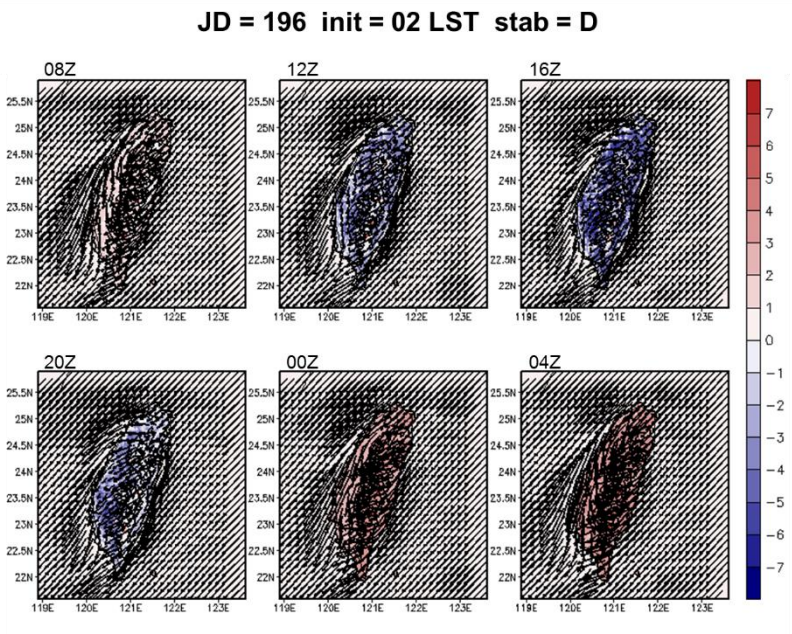


圖 5-49　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 196 日，模擬初始時間為 02LST，中心位置為核一廠(第 1 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 5m/s，穩定度參數為 0.002(穩定度分類 D 級)，填色部分為溫度擾動，單位為℃。

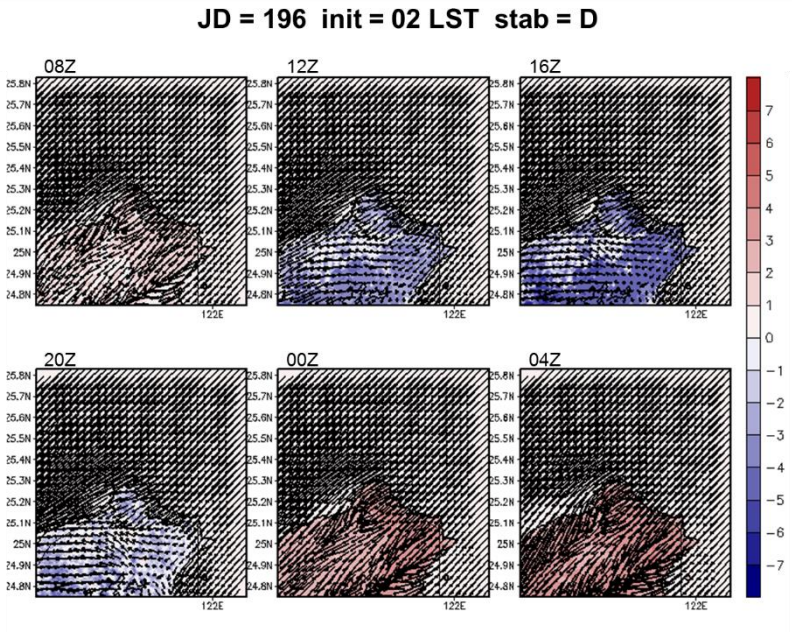


圖 5-50　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 196 日，模擬初始時間為 02LST，中心位置為核一廠(第 2 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 5m/s，穩定度參數為 0.002(穩定度分類 D 級)，填色部分為溫度擾動，單位為℃。

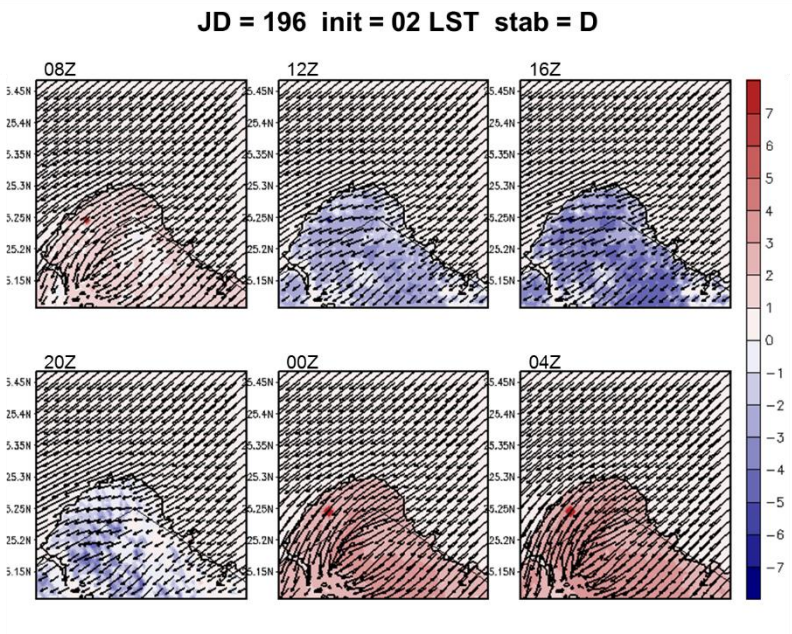


圖 5-51　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 196 日，模擬初始時間為 02LST，中心位置為核一廠(第 3 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 5m/s，穩定度參數為 0.002(穩定度分類 D 級)，填色部分為溫度擾動，單位為℃。

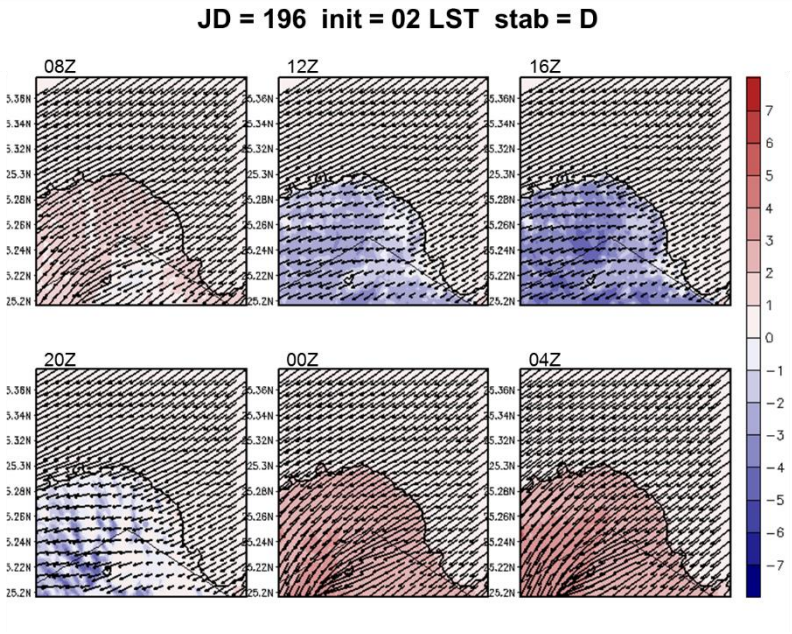


圖 5-52　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 196 日，模擬初始時間為 02LST，中心位置為核一廠(第 4 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 5m/s，穩定度參數為 0.002(穩定度分類 D 級)，填色部分為溫度擾動，單位為℃。

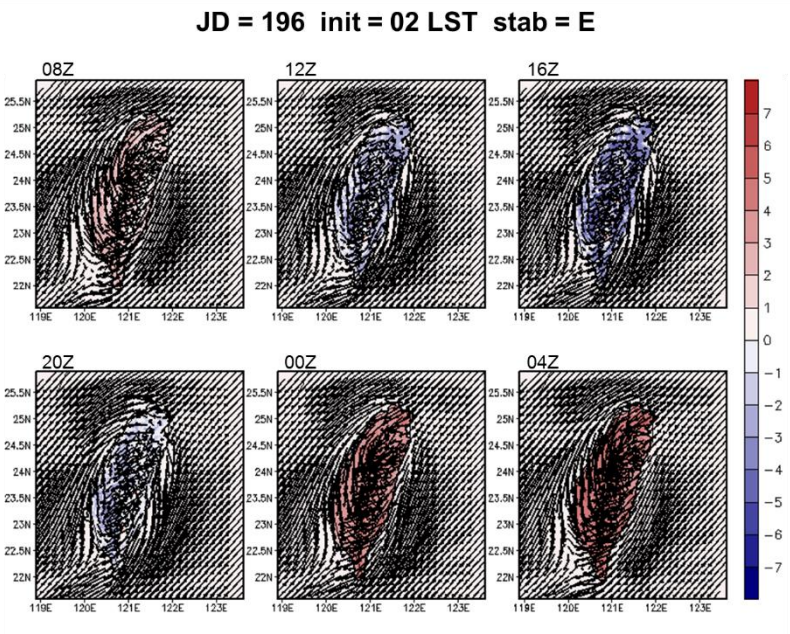


圖 5-53　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 196 日，模擬初始時間為 02LST，中心位置為核一廠(第 1 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 5m/s，穩定度參數為 0.005(穩定度分類 E 級)，填色部分為溫度擾動，單位為℃。

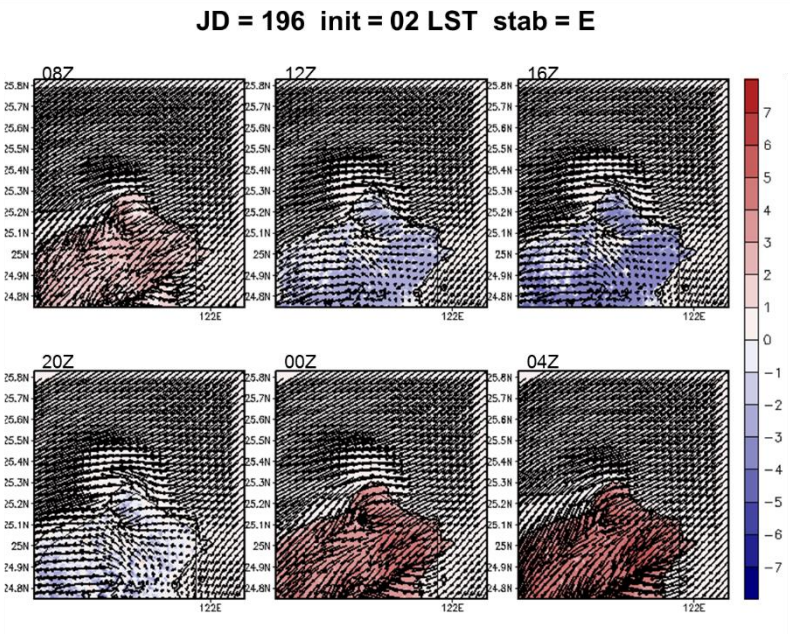


圖 5-54　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 196 日，模擬初始時間為 02LST，中心位置為核一廠(第 2 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 5m/s，穩定度參數為 0.005(穩定度分類 E 級)，填色部分為溫度擾動，單位為℃。

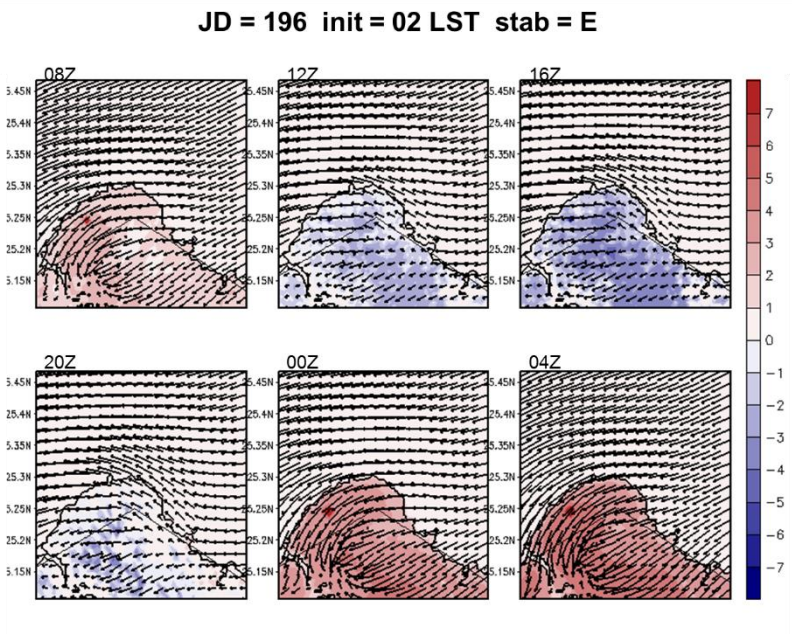


圖 5-55　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 196 日，模擬初始時間為 02LST，中心位置為核一廠(第 3 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 5m/s，穩定度參數為 0.005(穩定度分類 E 級)，填色部分為溫度擾動，單位為℃。

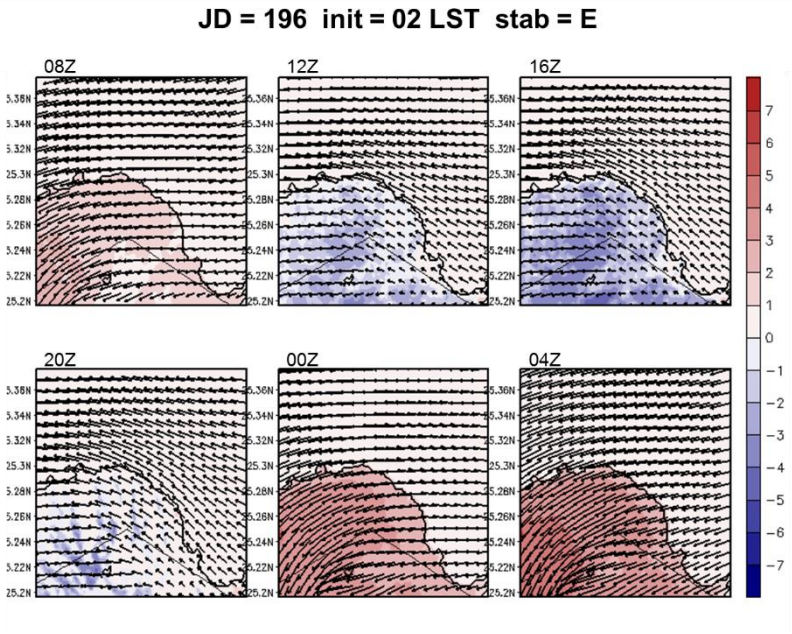


圖 5-56　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 196 日，模擬初始時間為 02LST，中心位置為核一廠(第 4 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 5m/s，穩定度參數為 0.005(穩定度分類 E 級)，填色部分為溫度擾動，單位為℃。

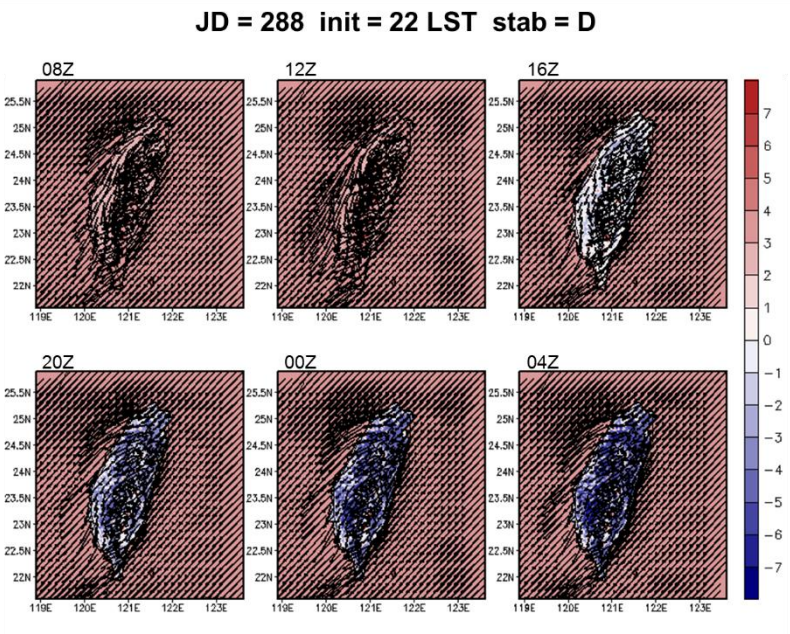


圖 5-57　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 288 日，模擬初始時間為 22LST，中心位置為核一廠(第 1 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 5m/s，穩定度參數為 0.002(穩定度分類 D 級)，填色部分為溫度擾動，單位為℃。

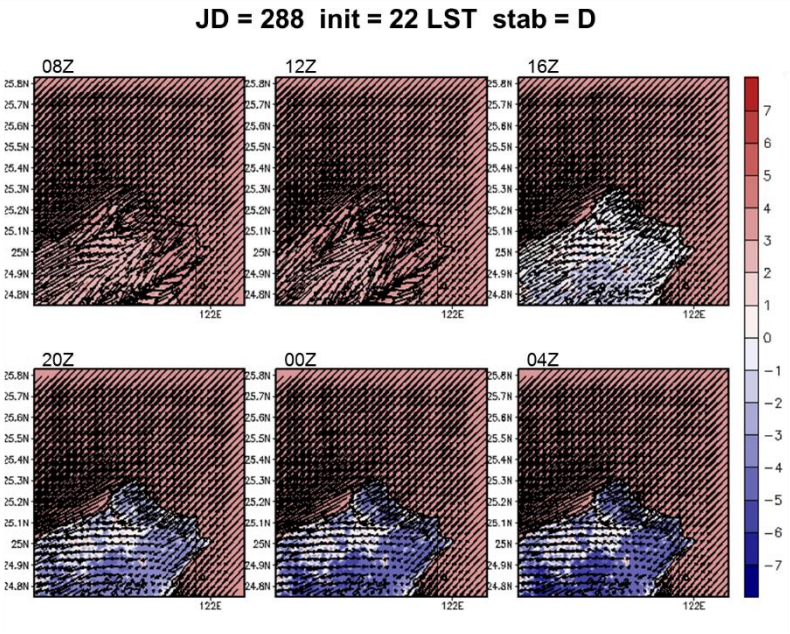


圖 5-58　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 288 日，模擬初始時間為 22LST，中心位置為核一廠(第 2 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 5m/s，穩定度參數為 0.002(穩定度分類 D 級)，填色部分為溫度擾動，單位為℃。

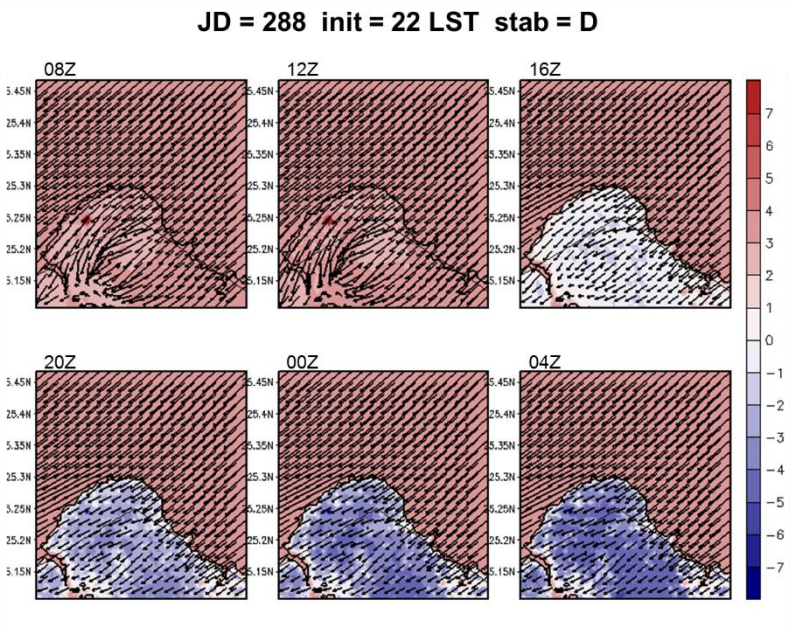


圖 5-59　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 288 日，模擬初始時間為 22LST，中心位置為核一廠(第 3 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 5m/s，穩定度參數為 0.002(穩定度分類 D 級)，填色部分為溫度擾動，單位為℃。

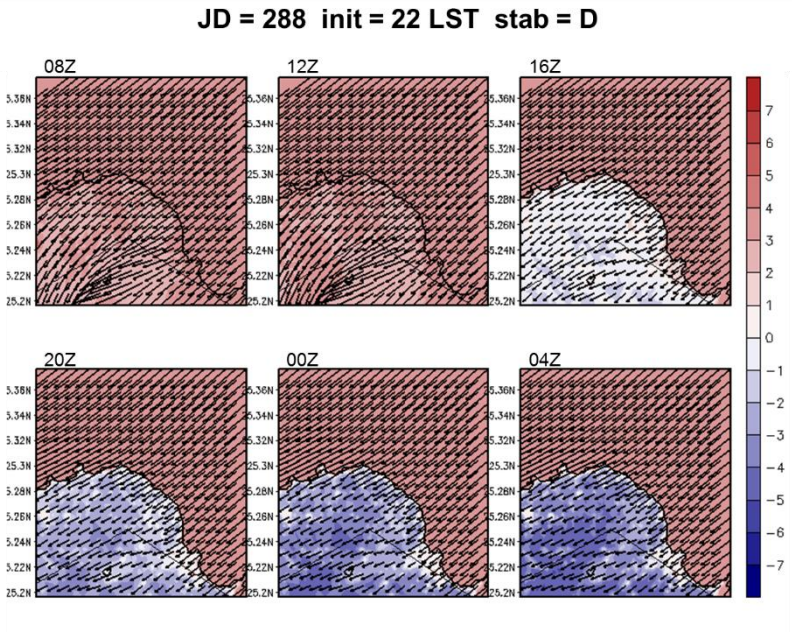


圖 5-60　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 288 日，模擬初始時間為 22LST，中心位置為核一廠(第 4 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 5m/s，穩定度參數為 0.002(穩定度分類 D 級)，填色部分為溫度擾動，單位為℃。

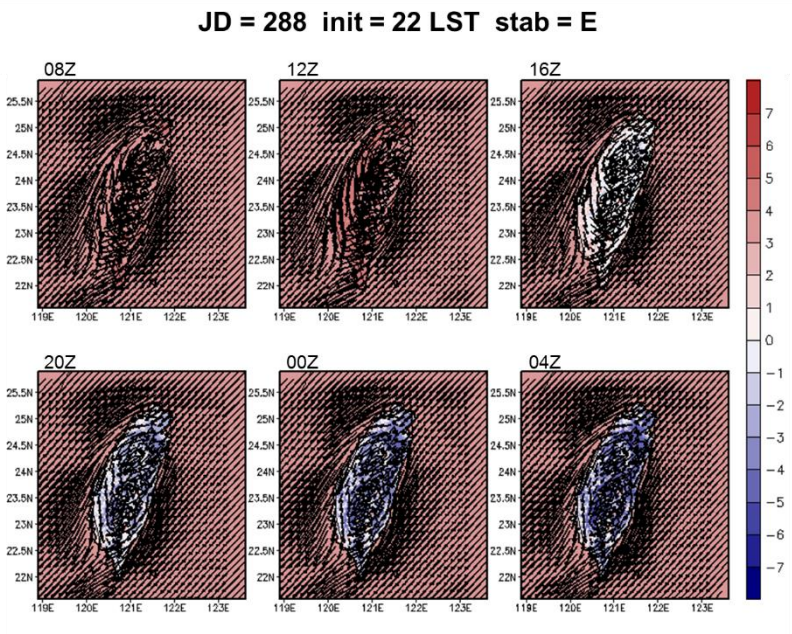


圖 5-61　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 288 日，模擬初始時間為 22LST，中心位置為核一廠(第 1 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 5m/s，穩定度參數為 0.005(穩定度分類 E 級)，填色部分為溫度擾動，單位為℃。

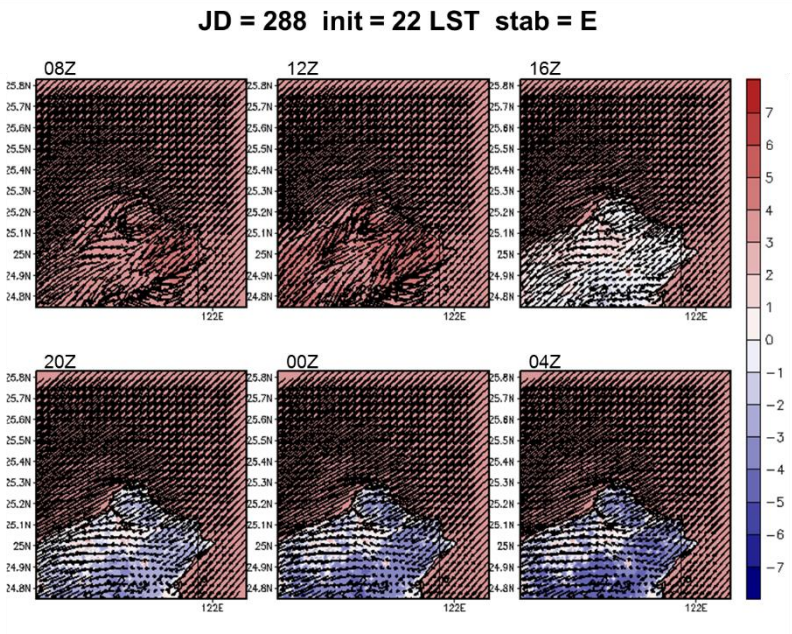


圖 5-62　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 288 日，模擬初始時間為 22LST，中心位置為核一廠(第 2 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 5m/s，穩定度參數為 0.005(穩定度分類 E 級)，填色部分為溫度擾動，單位為℃。

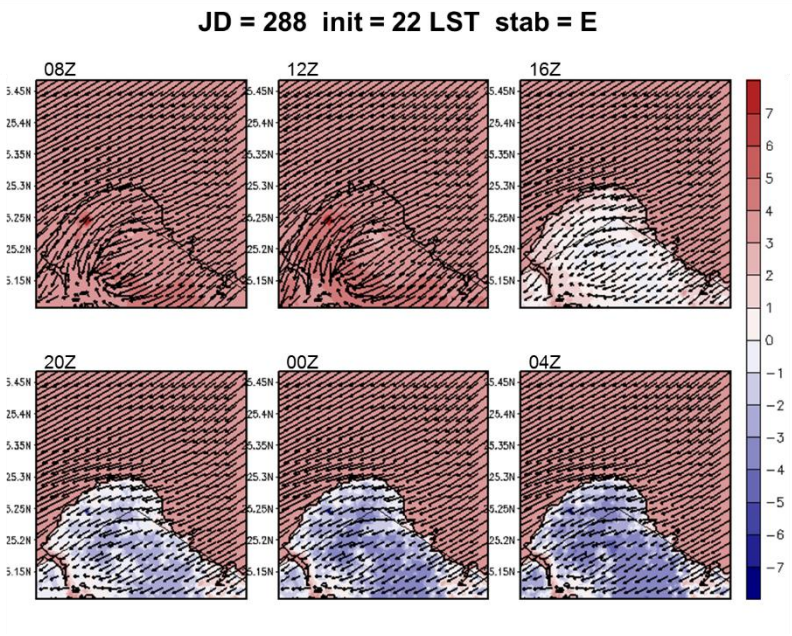


圖 5-63　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 288 日，模擬初始時間為 22LST，中心位置為核一廠(第 3 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 5m/s，穩定度參數為 0.005(穩定度分類 E 級)，填色部分為溫度擾動，單位為℃。

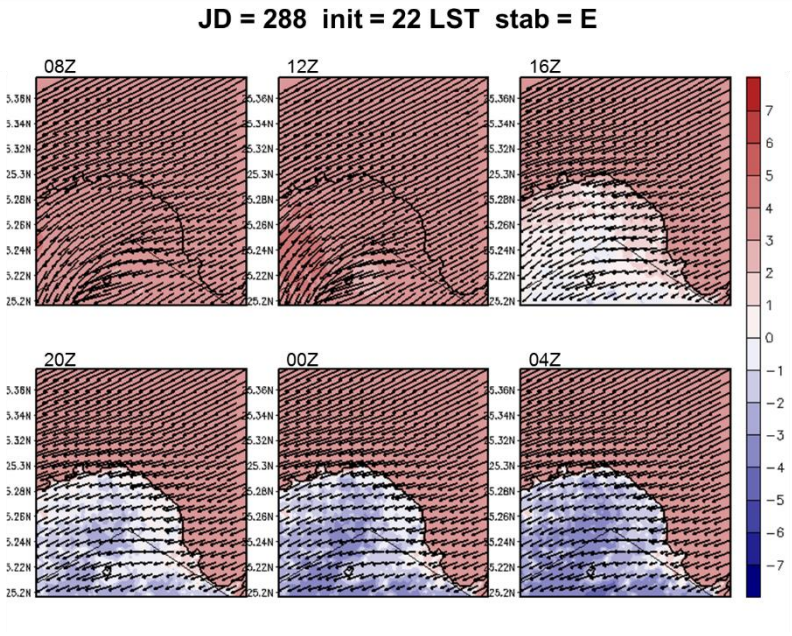


圖 5-64　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 288 日，模擬初始時間為 22LST，中心位置為核一廠(第 4 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 5m/s，穩定度參數為 0.005(穩定度分類 E 級)，填色部分為溫度擾動，單位為℃。

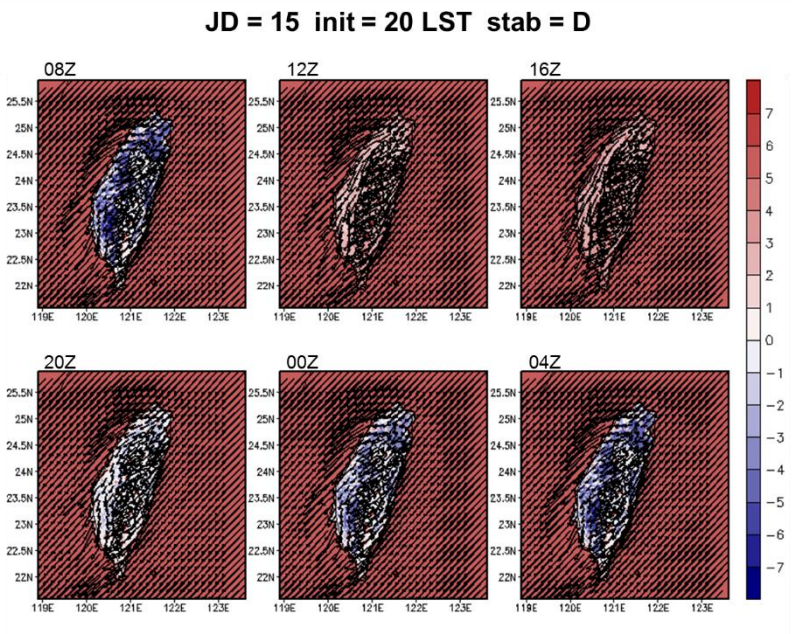


圖 5-65　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 15 日，模擬初始時間為 20LST，中心位置為核一廠(第 1 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 8m/s，穩定度參數為 0.002(穩定度分類 D 級)，填色部分為溫度擾動，單位為℃。

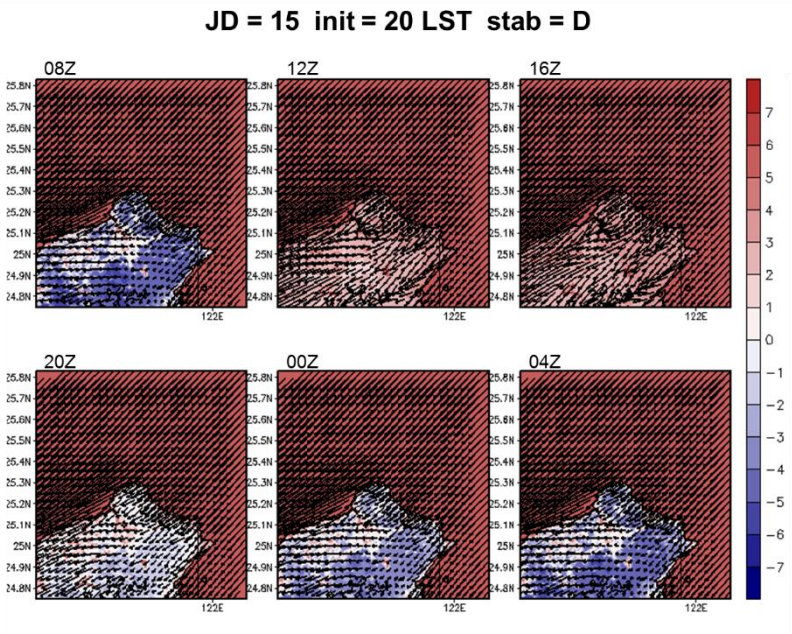


圖 5-66　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 15 日，模擬初始時間為 20LST，中心位置為核一廠(第 2 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 8m/s，穩定度參數為 0.002(穩定度分類 D 級)，填色部分為溫度擾動，單位為℃。

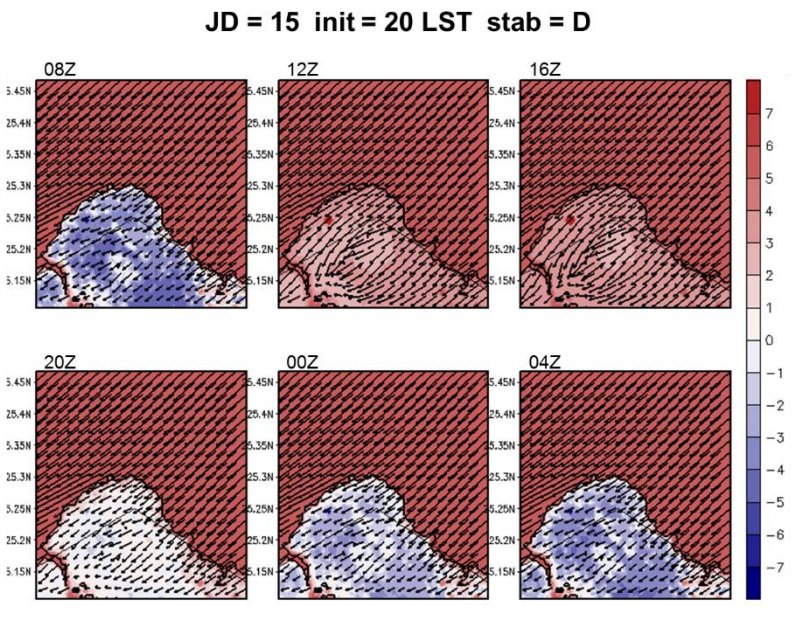


圖 5-67 A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 15 日，模擬初始時間為 20LST，中心位置為核一廠(第 3 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 8m/s，穩定度參數為 0.002(穩定度分類 D 級)，填色部分為溫度擾動，單位為℃。

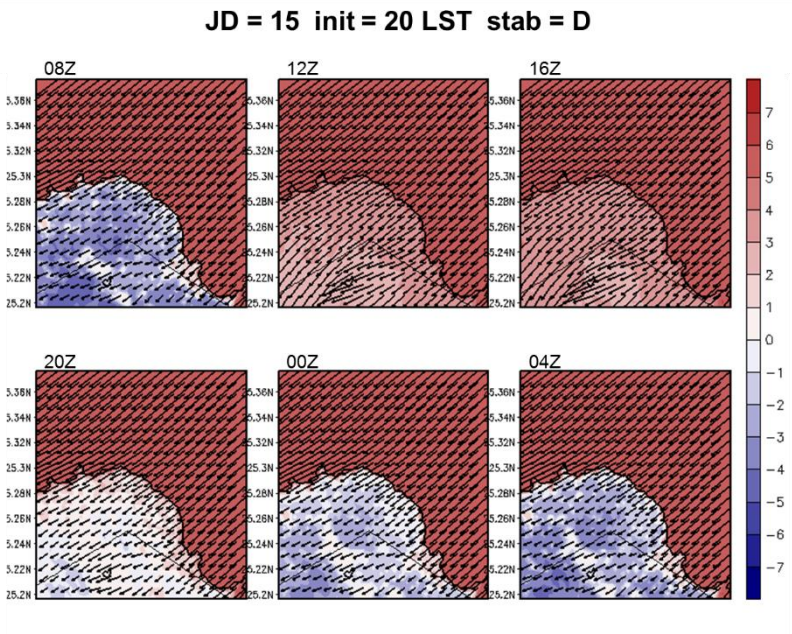


圖 5-68　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 15 日，模擬初始時間為 20LST，中心位置為核一廠(第 4 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 8m/s，穩定度參數為 0.002(穩定度分類 D 級)，填色部分為溫度擾動，單位為℃。

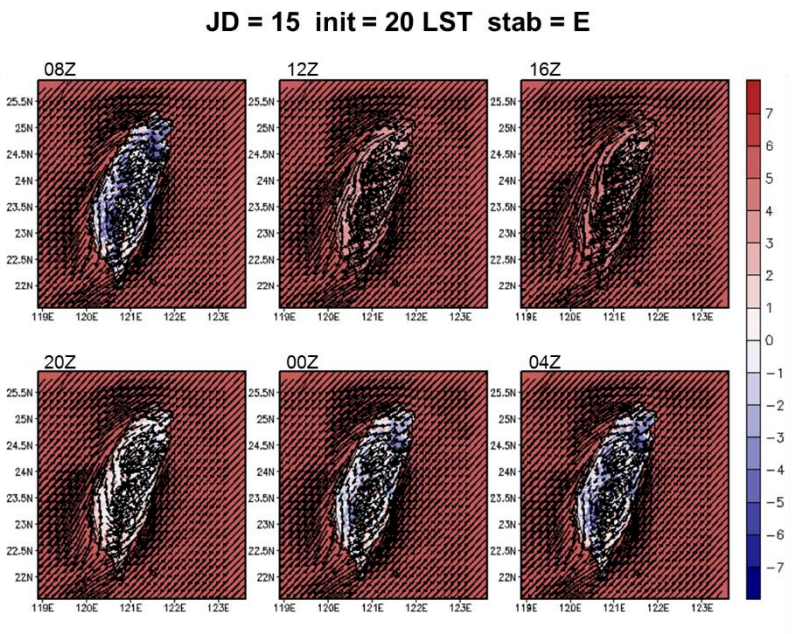


圖 5-69　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 15 日，模擬初始時間為 20LST，中心位置為核一廠(第 1 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 8m/s，穩定度參數為 0.005(穩定度分類 ED 級)，填色部分為溫度擾動，單位為℃。

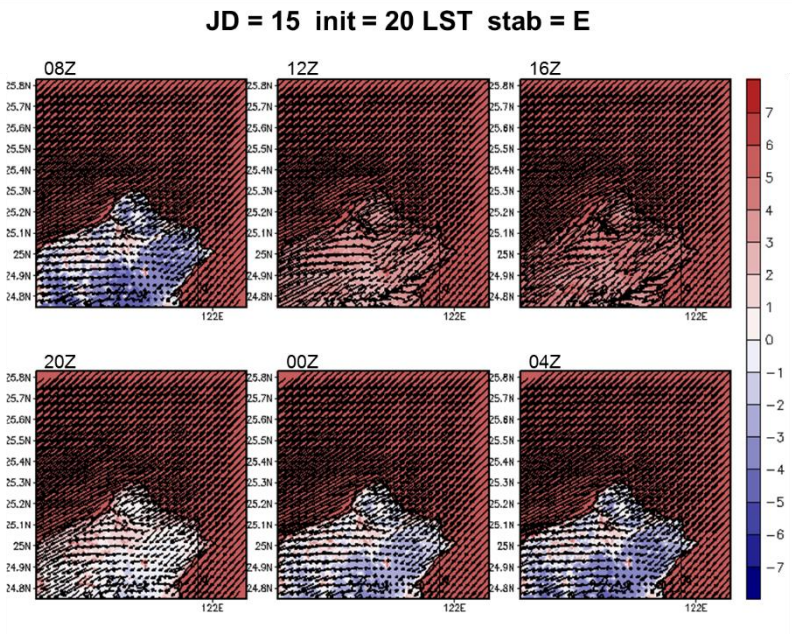


圖 5-70　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 15 日，模擬初始時間為 20LST，中心位置為核一廠(第層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 8m/s，穩定度參數為 0.005(穩定度分類 ED 級)，填色部分為溫度擾動，單位為℃。

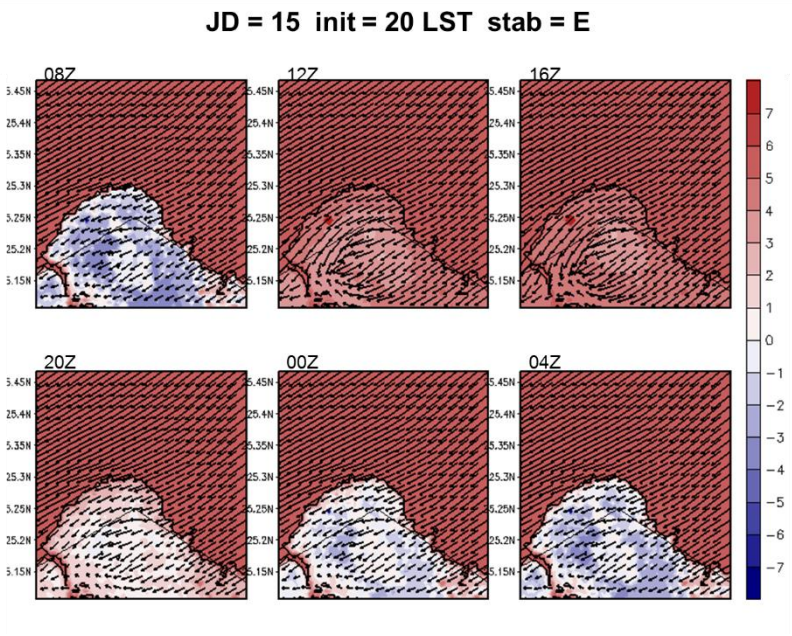


圖 5-71　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 15 日，模擬初始時間為 20LST，中心位置為核一廠(第 3 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 8m/s，穩定度參數為 0.005(穩定度分類 ED 級)，填色部分為溫度擾動，單位為℃。

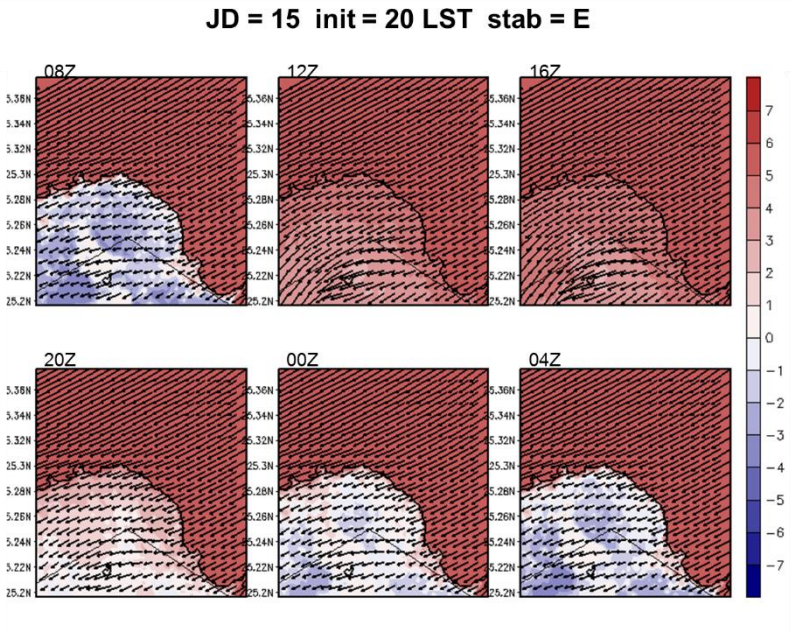


圖 5-72　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 15 日，模擬初始時間為 20LST，中心位置為核一廠(第 4 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 8m/s，穩定度參數為 0.005(穩定度分類 E 級)，填色部分為溫度擾動，單位為℃。

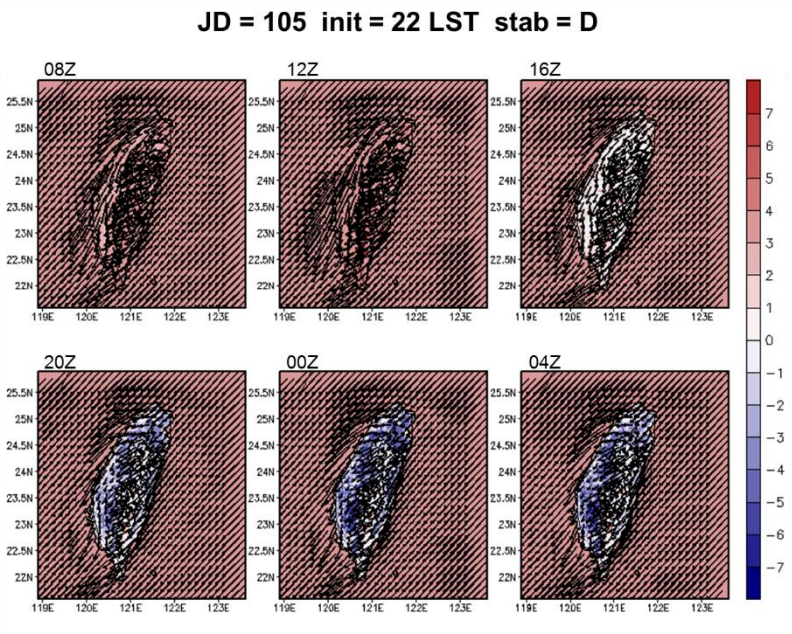


圖 5-73　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 105 日，模擬初始時間為 20LST，中心位置為核一廠(第 1 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 8m/s，穩定度參數為 0.002(穩定度分類 D 級)，填色部分為溫度擾動，單位為℃。

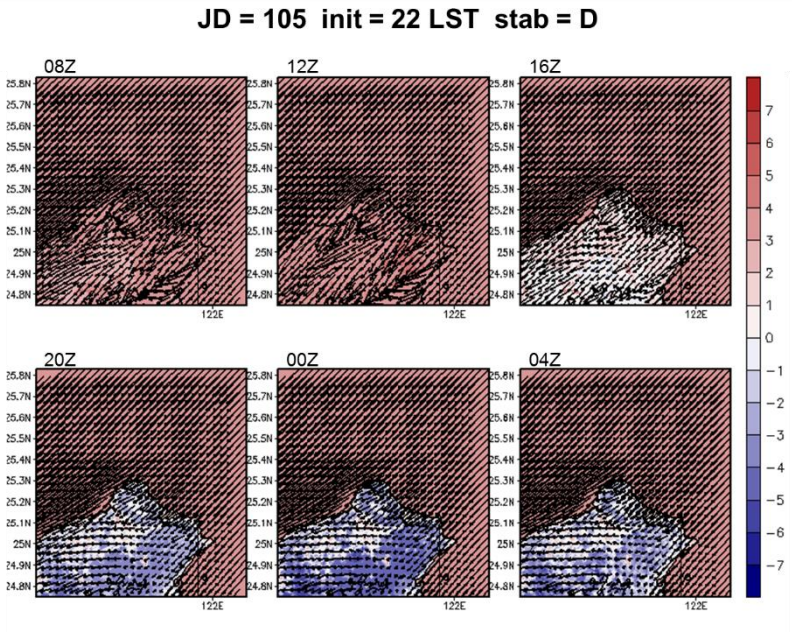


圖 5-74　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 105 日，模擬初始時間為 20LST，中心位置為核一廠(第 2 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 8m/s，穩定度參數為 0.002(穩定度分類 D 級)，填色部分為溫度擾動，單位為℃。

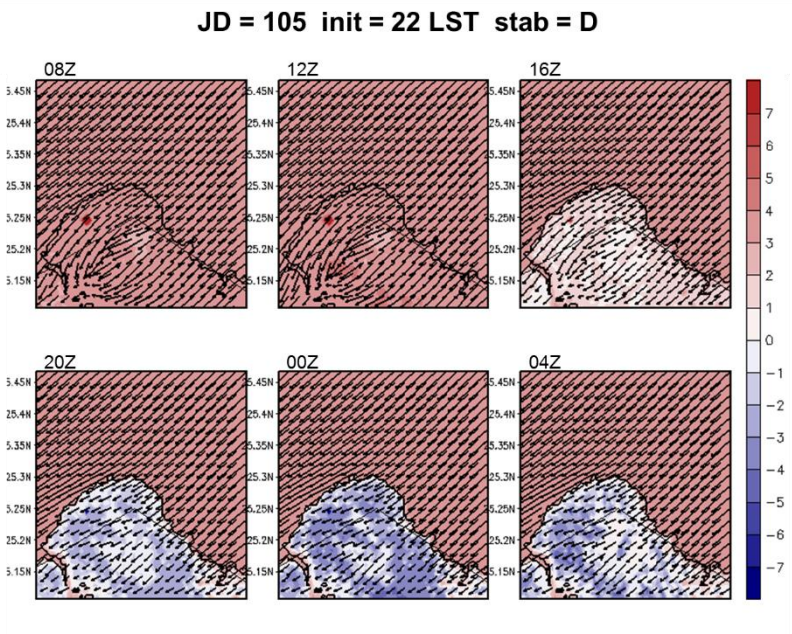


圖 5-75 A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 105 日，模擬初始時間為 20LST，中心位置為核一廠(第 3 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 8m/s，穩定度參數為 0.002(穩定度分類 D 級)，填色部分為溫度擾動，單位為℃。

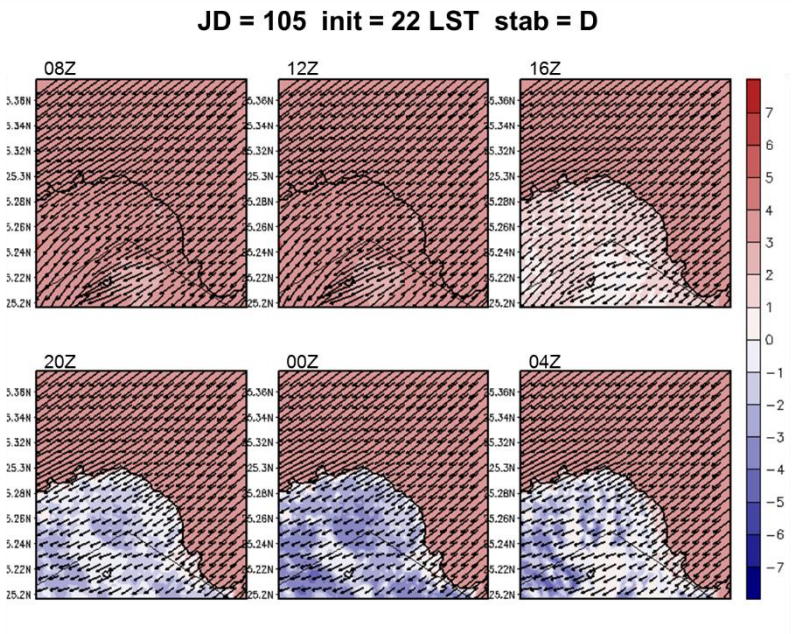


圖 5-76　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 105 日，模擬初始時間為 20LST，中心位置為核一廠(第 4 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 8m/s，穩定度參數為 0.002(穩定度分類 D 級)，填色部分為溫度擾動，單位為℃。

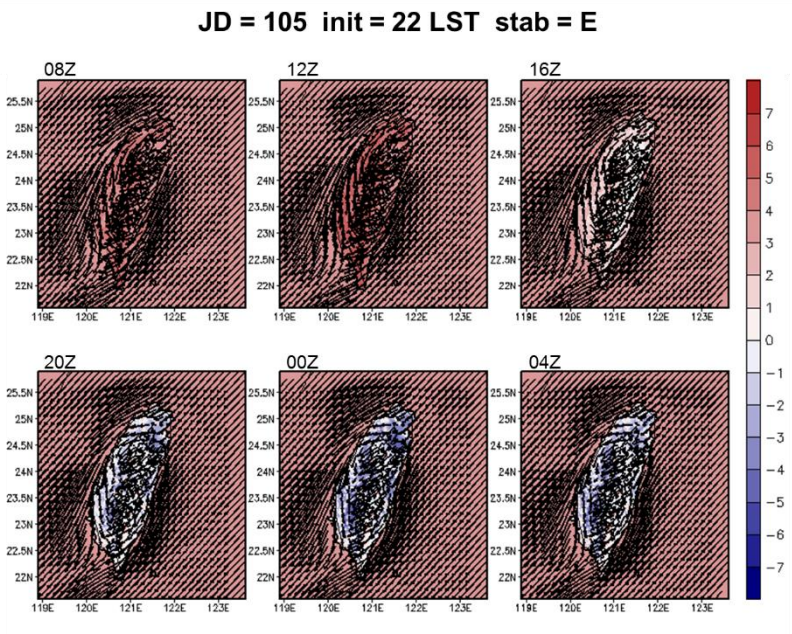


圖 5-77　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 105 日，模擬初始時間為 20LST，中心位置為核一廠(第 1 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 8m/s，穩定度參數為 0.005(穩定度分類 ED 級)，填色部分為溫度擾動，單位為℃。

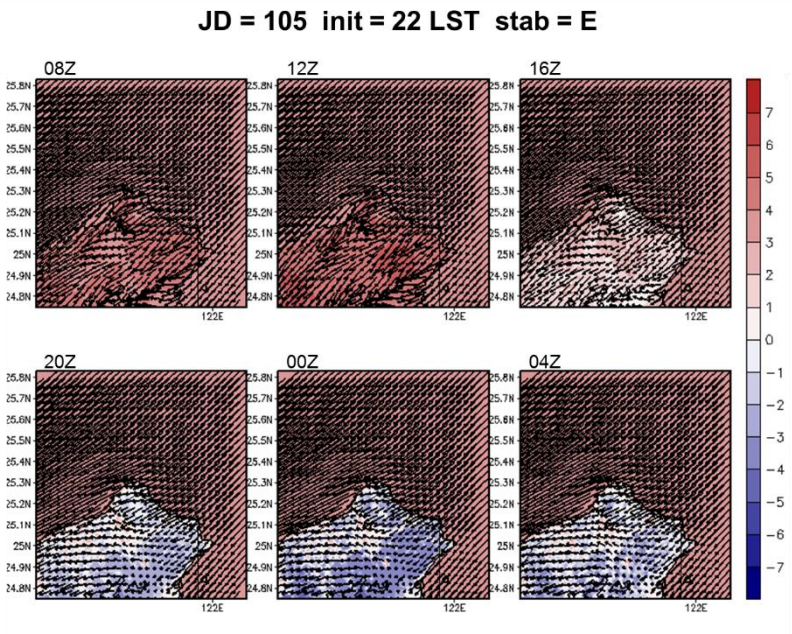


圖 5-78　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 105 日，模擬初始時間為 20LST，中心位置為核一廠(第層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 8m/s，穩定度參數為 0.005(穩定度分類 ED 級)，填色部分為溫度擾動，單位為℃。

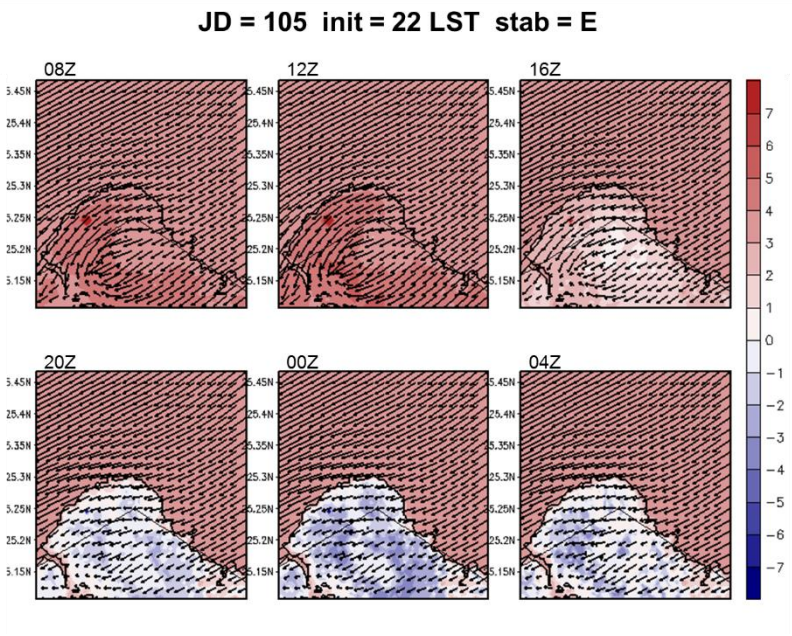


圖 5-79　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 105 日，模擬初始時間為 20LST，中心位置為核一廠(第 3 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 8m/s，穩定度參數為 0.005(穩定度分類 ED 級)，填色部分為溫度擾動，單位為℃。

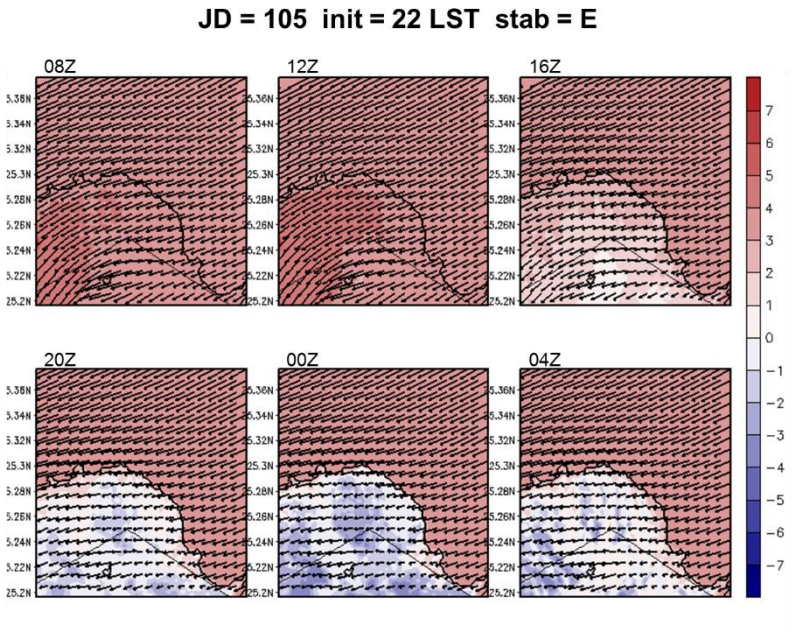


圖 5-80　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 105 日，模擬初始時間為 20LST，中心位置為核一廠(第 4 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 8m/s，穩定度參數為 0.005(穩定度分類 ED 級)，填色部分為溫度擾動，單位為℃。

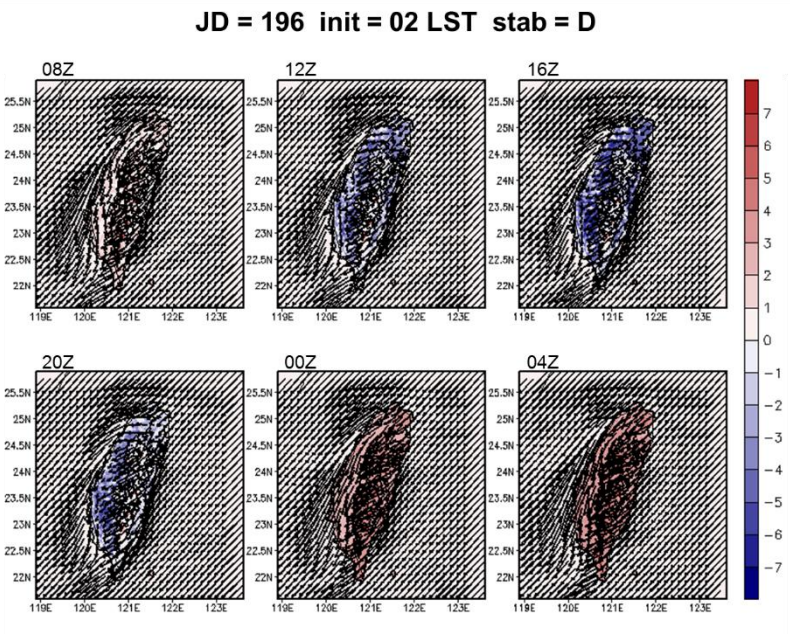


圖 5-81　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 196 日，模擬初始時間為 20LST，中心位置為核一廠(第 1 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 8m/s，穩定度參數為 0.002(穩定度分類 D 級)，填色部分為溫度擾動，單位為℃。

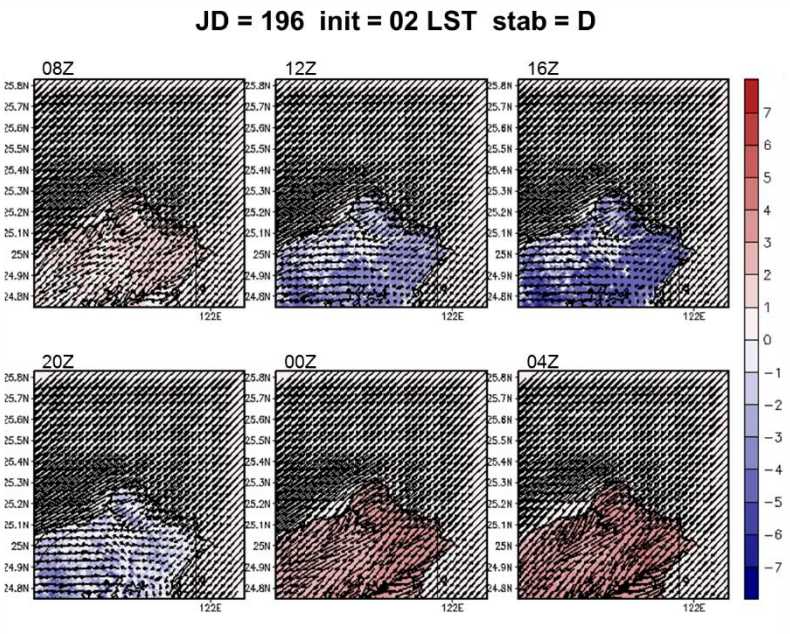


圖 5-82　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 196 日，模擬初始時間為 20LST，中心位置為核一廠(第 2 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 8m/s，穩定度參數為 0.002(穩定度分類 D 級)，填色部分為溫度擾動，單位為℃。

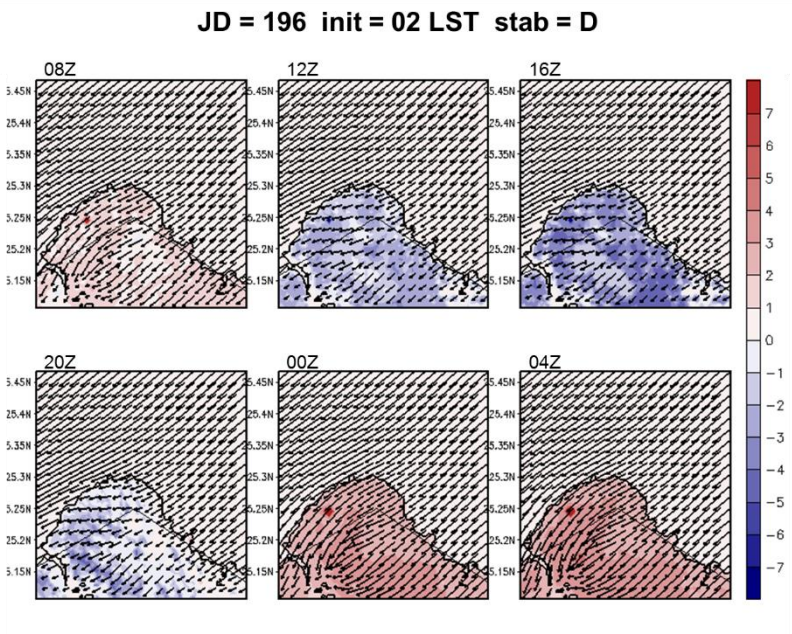


圖 5-83 A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 196 日，模擬初始時間為 20LST，中心位置為核一廠(第 3 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 8m/s，穩定度參數為 0.002(穩定度分類 D 級)，填色部分為溫度擾動，單位為℃。

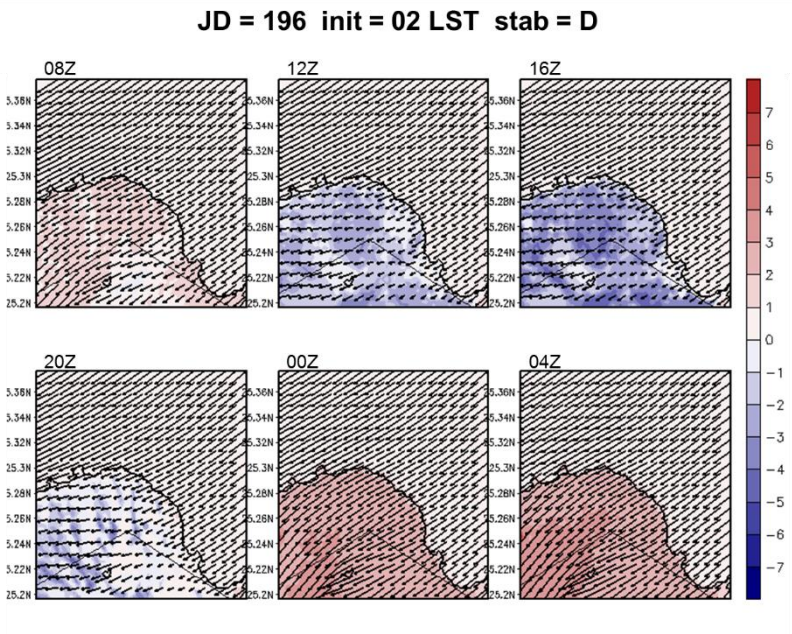


圖 5-84　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 196 日，模擬初始時間為 20LST，中心位置為核一廠(第 4 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 8m/s，穩定度參數為 0.002(穩定度分類 D 級)，填色部分為溫度擾動，單位為℃。

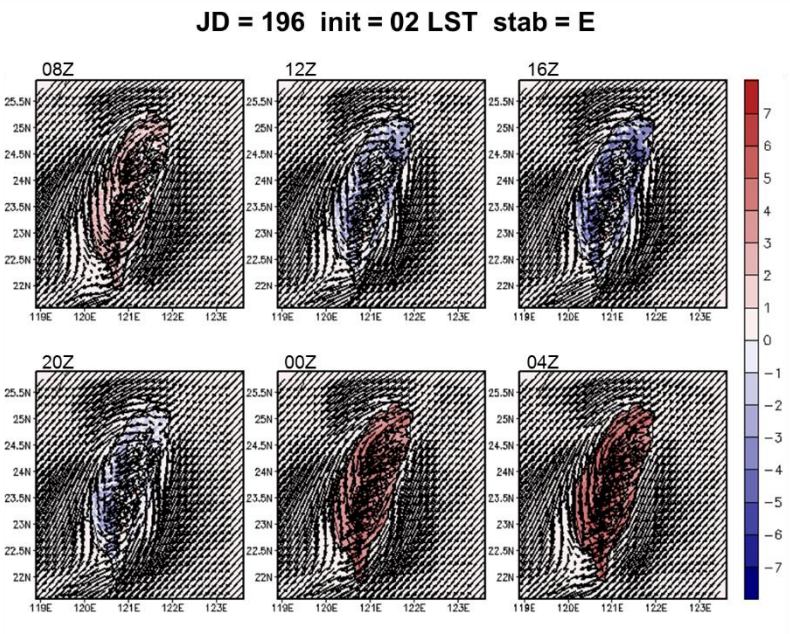


圖 5-85　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 196 日，模擬初始時間為 20LST，中心位置為核一廠(第 1 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 8m/s，穩定度參數為 0.005(穩定度分類 E 級)，填色部分為溫度擾動，單位為℃。

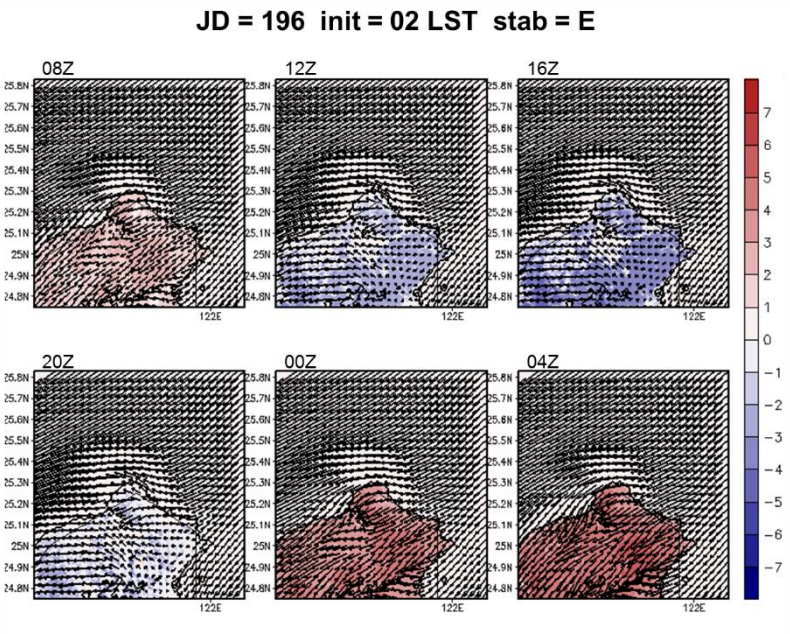


圖 5-86　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 196 日，模擬初始時間為 20LST，中心位置為核一廠(第層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 8m/s，穩定度參數為 0.005(穩定度分類 E 級)，填色部分為溫度擾動，單位為℃。

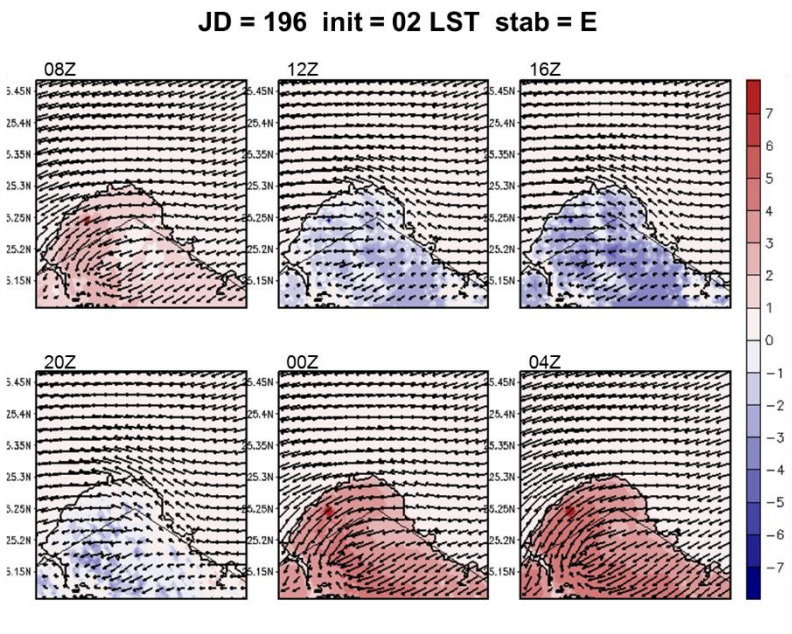


圖 5-87　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 196 日，模擬初始時間為 20LST，中心位置為核一廠(第 3 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 8m/s，穩定度參數為 0.005(穩定度分類 E 級)，填色部分為溫度擾動，單位為℃。

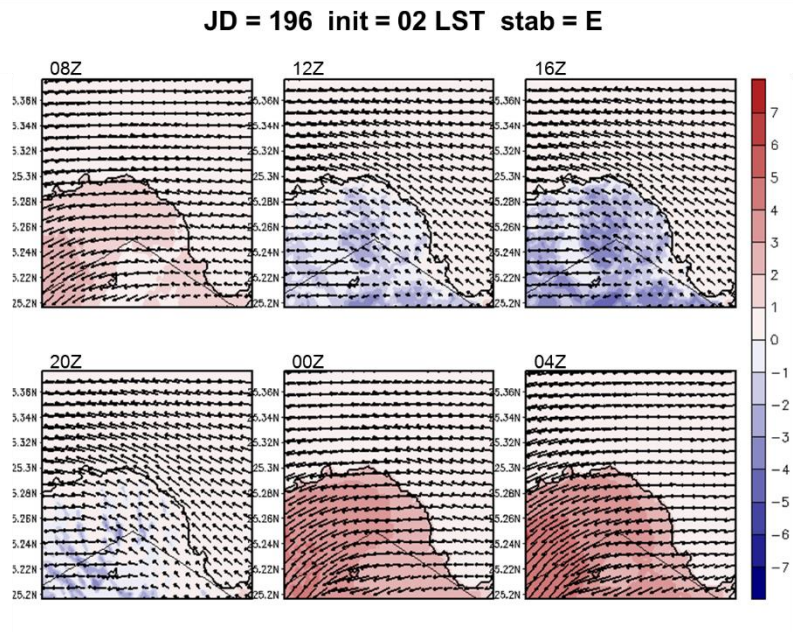


圖 5-88　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 196 日，模擬初始時間為 20LST，中心位置為核一廠(第 4 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 8m/s，穩定度參數為 0.005(穩定度分類 E 級)，填色部分為溫度擾動，單位為℃。

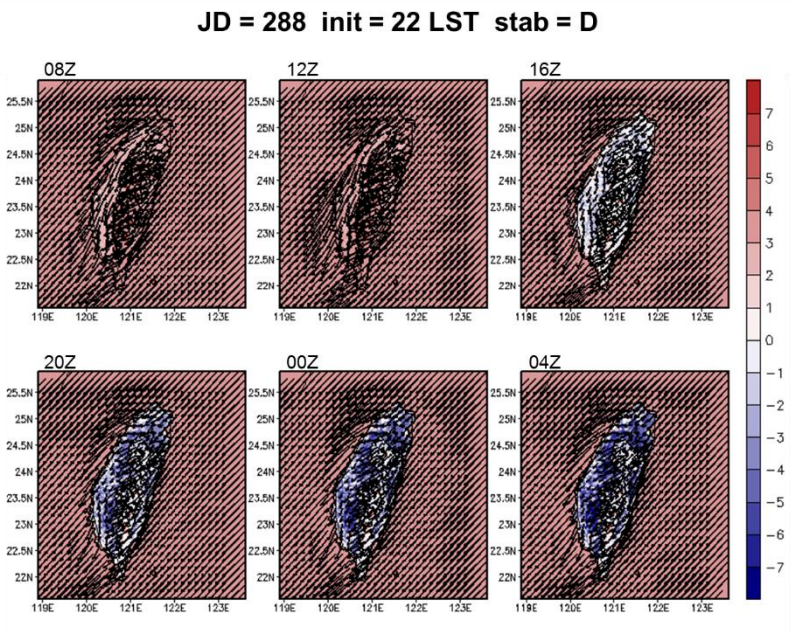


圖 5-89　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 288 日，模擬初始時間為 20LST，中心位置為核一廠(第 1 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 8m/s，穩定度參數為 0.002(穩定度分類 D 級)，填色部分為溫度擾動，單位為℃。

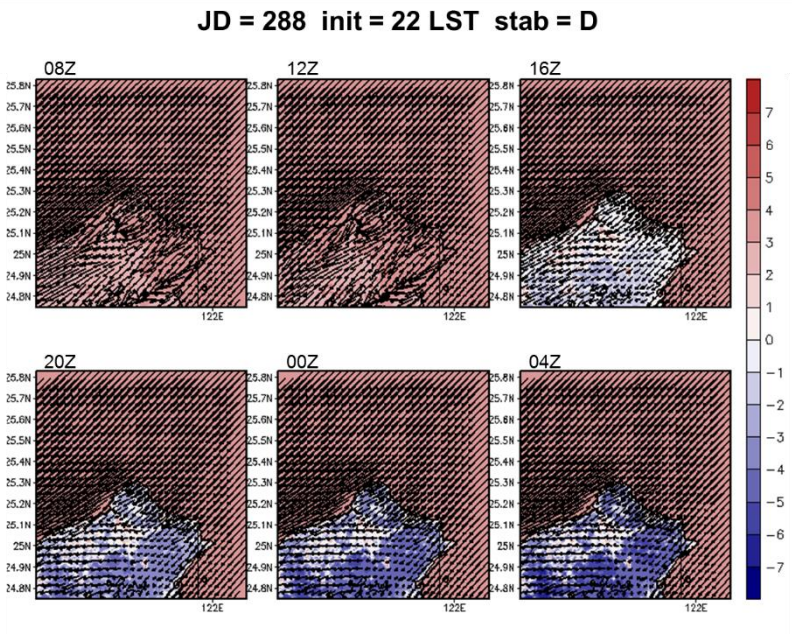


圖 5-90　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 288 日，模擬初始時間為 20LST，中心位置為核一廠(第 2 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 8m/s，穩定度參數為 0.002(穩定度分類 D 級)，填色部分為溫度擾動，單位為℃。

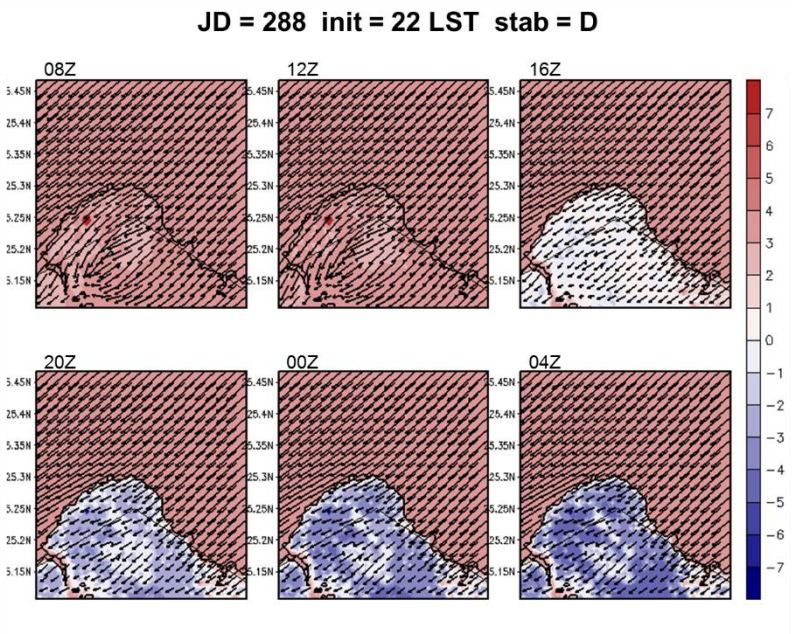


圖 5-91　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 288 日，模擬初始時間為 20LST，中心位置為核一廠(第 3 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 8m/s，穩定度參數為 0.002(穩定度分類 D 級)，填色部分為溫度擾動，單位為℃。

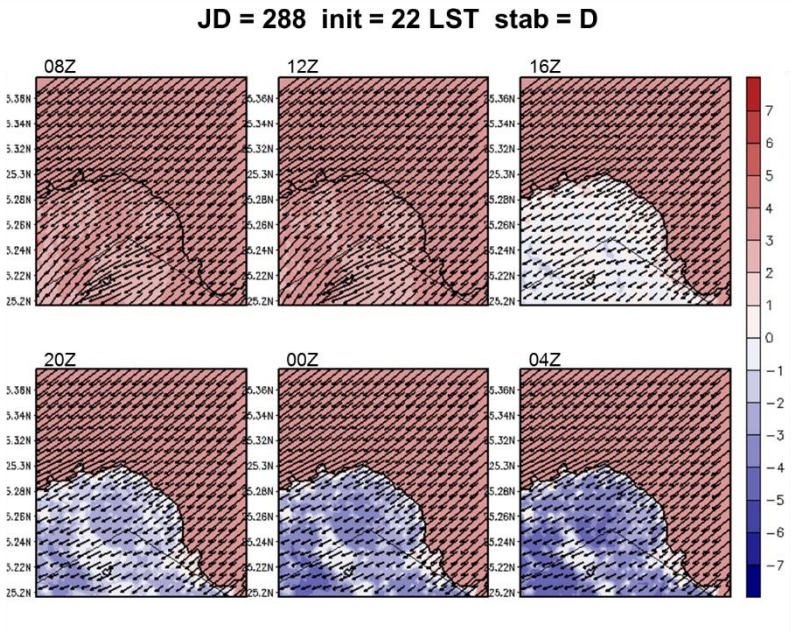


圖 5-92　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 288 日，模擬初始時間為 20LST，中心位置為核一廠(第 4 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 8m/s，穩定度參數為 0.002(穩定度分類 D 級)，填色部分為溫度擾動，單位為℃。

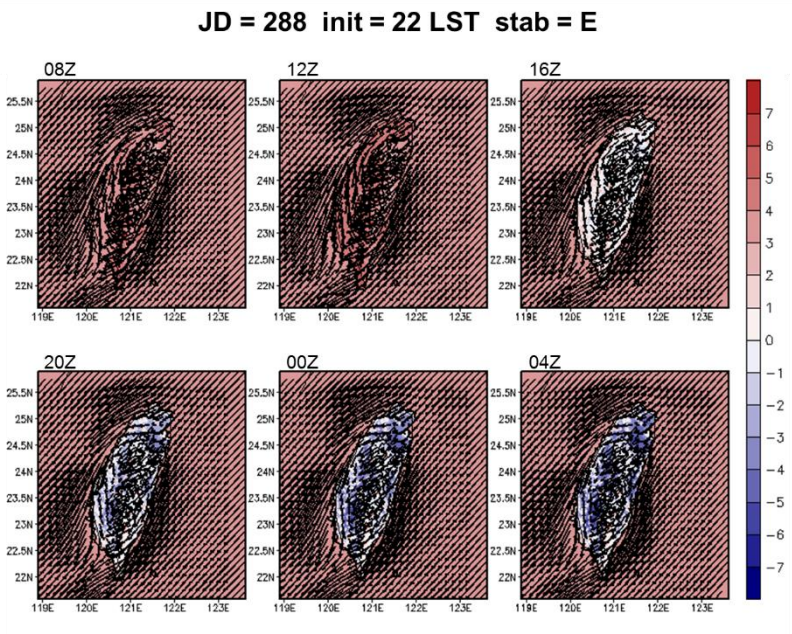


圖 5-93　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 288 日，模擬初始時間為 20LST，中心位置為核一廠(第 1 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 8m/s，穩定度參數為 0.005(穩定度分類 E 級)，填色部分為溫度擾動，單位為℃。

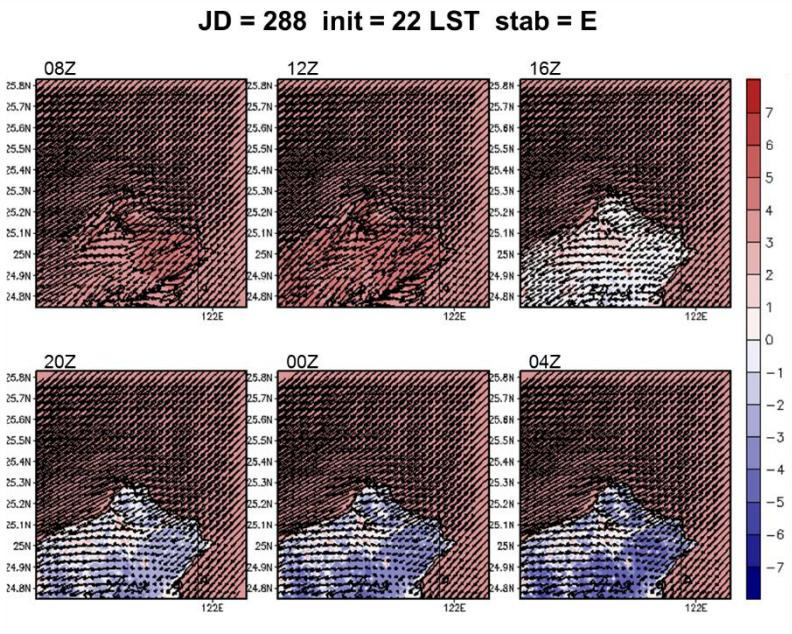


圖 5-94　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 288 日，模擬初始時間為 20LST，中心位置為核一廠(第層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 8m/s，穩定度參數為 0.005(穩定度分類 E 級)，填色部分為溫度擾動，單位為℃。

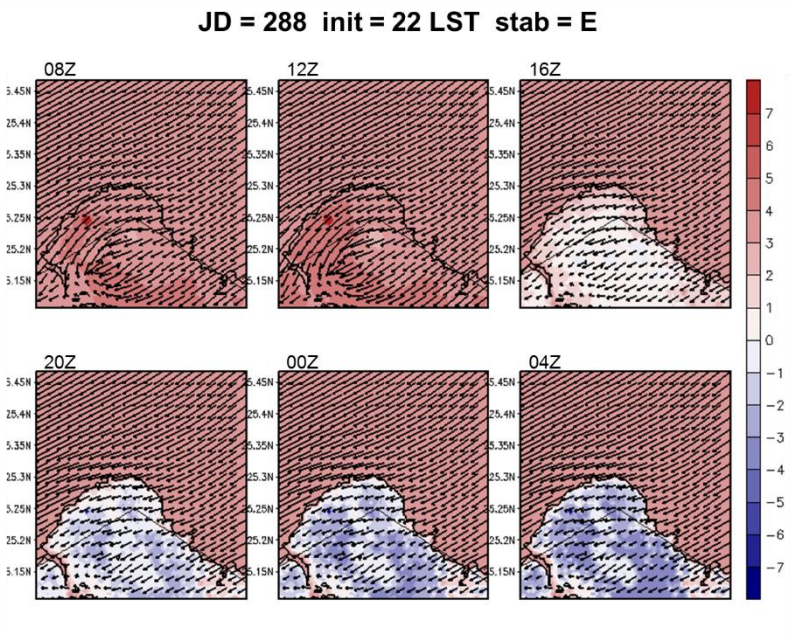


圖 5-95　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 288 日，模擬初始時間為 20LST，中心位置為核一廠(第 3 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 8m/s，穩定度參數為 0.005(穩定度分類 E 級)，填色部分為溫度擾動，單位為℃。

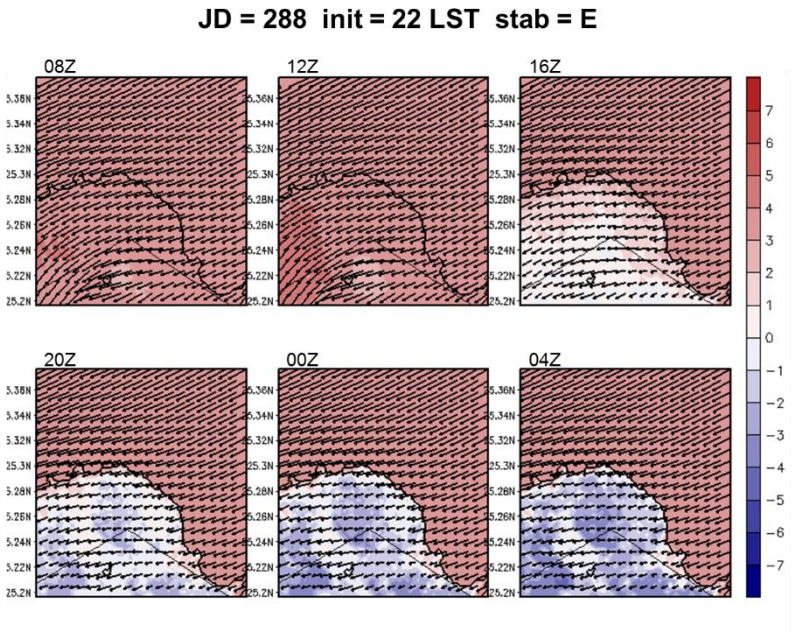


圖 5-96　A2Cflow 調校後之模擬(20m 高)風場，模擬日期太陽日為第 288 日，模擬初始時間為 20LST，中心位置為核一廠(第 4 層巢狀網格)，風向為 45°，風速為 8m/s，穩定度參數為 0.005(穩定度分類 E 級)，填色部分為溫度擾動，單位為℃。

6. 非傳統觀測資料建立資料品質控制前置處理模組及非傳統觀測資料同化模組，及高空觀測資料引入同化模組進行測試與校驗

中央氣象局中尺度動力分析系統(Mesoscale Dynamic Analysis System, MDAS)為中央氣象局與美國國家海洋與大氣總署（NOAA）下之GSD (Global System Division)合作發展的複雜地形區的三維連續變分資料同化分析系統，提供複雜地形區高解析度的三維氣象資料。此部分循序漸進地增加不同氣象觀測資料的價值函數，建立以三維變分為理論基礎的氣象同化分析技術，確保能最佳化的利用觀測資料。

6.1. 高空觀測資料同化模組測試與校驗

6.1.1. 高空觀測資料種類與品質控制

高空觀測資料除了 106 年計劃建立的民用飛機觀測 (airep, ua)、投落送 (tempdrop, ux)、颱風渦漩之飛機偵查 (vortex_recco, ur)、高空溫壓報 (temp, us) 、高空風報 (pilot, up)、海面船舶探空溫壓報 (tempship, uk)、衛星風報 (satob, ts)及衛星雲導風(Cloud-Drift Winds)之外，今年新增了ASCAT衛星反演海面風場，ASCAT 為接替 QuikSCAT 後續執行海表面風場觀測任務。ASCAT 通過時海面會有兩條掃描帶，兩條掃描帶(觀測區)寬度約為 500 公里，而兩條掃描帶間格約 700 公里(非觀測區)。ASCAT 反演過程透過荷蘭皇家氣象協會(KNMI)處理散射儀的回波訊號，透過參個散射儀不同入射角度及不同的海面粗糙度其回波訊號型態不

同，在依據過去長期實驗結果經驗式進行風場反演(林，2012)，接續利用最大似然估計法(Maximum Likelihood Estimator;MLE)資料篩選出有效風場，導入地球物理模組(CMOD5.n)及 2D-VAR 資料同化法(Verspeek et al 2010,2011, Portabella 2012)，最後產出海表面 10 米風場。ASCAT 衛星資料主要由 OSI SAF 反演後傳輸到各國氣象單位(RSS、NASA-JPL 等)，考慮到資料即時性因素，本研究之 ASCAT 資料來源為美國全球海洋資料同化實驗計畫(U.S. Global Ocean Data Assimilation Experiment ; USGODAE)提供，資料水平解析度為 12.5 公里，每日四筆資料(00、06、12、18 UTC)。在台灣地區每一天會有四筆資料，升冪和降冪通過時間大約為 0000 和 1200 UTC。定時接收資料並進行品管，先移除陸地、海冰的資料之後在進行時間與空間的篩選。觀測時區間誤差越小，與真實觀測資料愈接近，訂為+/- 30 分鐘，所採取樣本數減少但數據可信度較高。

高空資料品質控制在探空觀測資料的部分參考 LAPS 觀測種類品管架構(106 年計劃)，本年度新增 3 種觀測資料品質檢驗：重大誤差檢驗(曾，1997)、流體靜力檢驗(Collins 和 Gandin, 1990)、結冰檢驗。

(1)重大誤差檢驗參考曾忠一(1997)歸納的要點針對氣象變數於合理的觀測範圍且符合物理意義，包含儀器溫度於-90~45°C、400 mb 以上各層氣溫小於 0°C、相鄰兩層風速大於 15m/s 時風向差在 50 度內、相鄰兩層風速比值應介於 0~2 之間等。

(2)探空結冰層檢驗，針對-10~0°C 標準層 T_n，T_n與其上兩層 T_{n+1}及 T_{n+2}溫度差值皆小於1.5K，代表感應器有結冰情況，溫度無法採用。其檢驗公式如下：

$\Delta T_1 = |T_n - T_{n+1}|$，$\Delta T_2 = |T_n - T_{n+2}|$，$\Delta T_1, \Delta T_2 < 1.5K$

(3)流體靜力檢驗，參考 Collins 和 Gandin(1990)判定大氣環境是否滿足流體靜力平衡，假如差異值(δ)超過容許值(δ_{max})則將資料移除。利用測高方程判斷相鄰兩層大氣的氣壓和溫度計算兩邊差值決定資料是否一致性。

$$\delta = Z_{n+1} - Z_n - A_n(T_{n+1} + T_n), A_n = \frac{R}{2g} ln \frac{P_n}{P_{n+1}}$$

$$|\delta| \leq |\delta_{\max}| \text{ 採用，} |\delta| > |\delta_{\max}| \text{ 捨棄}$$

其中 Z 為高度，T 為溫度，R 為理想氣體常數，g 為重力值，P 為氣壓值。

ASCAT 衛星反演資料品質控制參考過去文獻提供的校驗數據進行篩選，Bentamy et al. (2008)與 Verspeek et al.(2009)指出 ASCAT 與浮標比對顯示當環境風速為 3~13 m/s 時，bias 最小(圖 6-1)與觀測相近。Chou et al.(2013)利用投落送資料比對顯示風速在 12~18 m/s 資料品質最好，誤差標準低於衛星技術規範，但 ASCAT 在弱風速時風向 bias 較大；強風速時風速易低估(圖 6-2)，進一步分析顯示在潮溼(水氣飽和)環境下誤差最顯著，主要原因可能為空氣中大水滴擾動造成散射儀對海面粗糙度的觀測誤判(回波訊號衰減)，關於 ASCAT 資料品質的議題這幾年有許多學者致力於此，希望能解決在劇烈天氣下海面風場的誤差，研究數據皆指出 ASCAT 反演資料在弱風速的情況下與觀測有較大的差異，使用時需更加謹慎，本研究目前不使用風速小於 2m/s 的風速資料。資料品質控制後示意圖範例可參考圖 6-3。

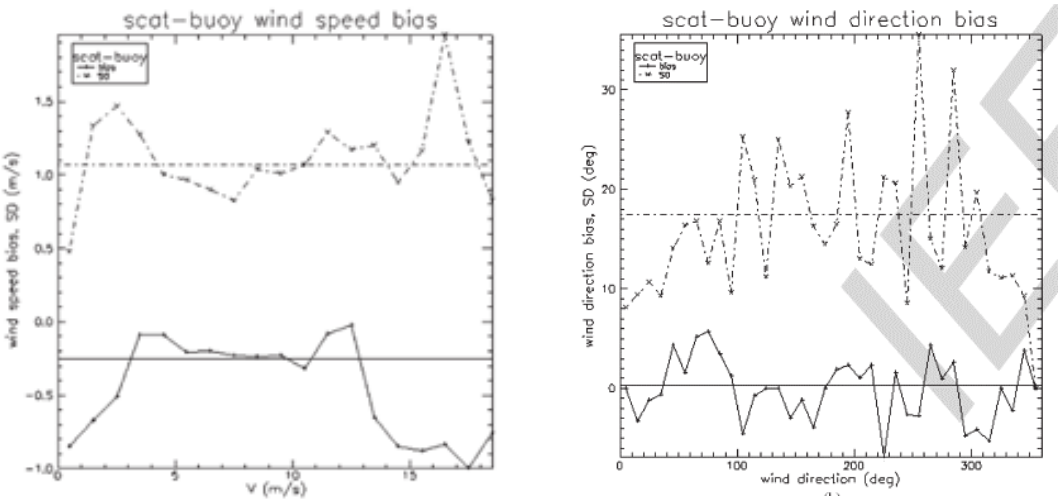


圖 6-1 ASCAT 與浮標之偏差量與標準差，顯示當環境風速為 3~13 m/s 時 bias 最小，反演風場與觀測相近。左圖為風速 m/s，右圖為風向 degree(實線為 Bias，虛線為 Standard Deviation)。摘自 Verspeek et al.(2009)

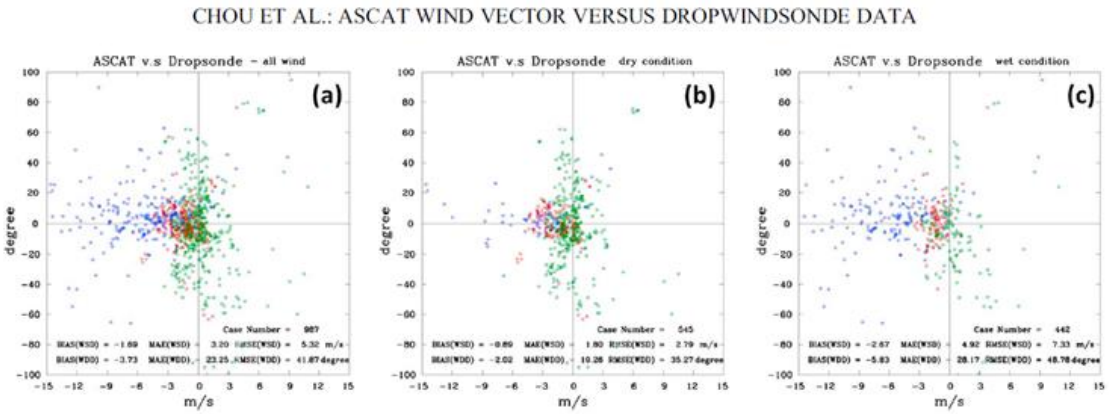


圖 6-2 ASCAT 與投落送於不同溼度條件兩者風向與風速相關性比較。左圖為全部資料，中與右圖為區分為乾燥與潮溼環境。顯示風速在 12~18 m/s 資料品質最好，弱風速時風向 bias 較大，強風速時風速易低估(綠點為風速小於 12 m/s，紅點 12~18m/s，藍點為大於 18 m/s)。摘自 Chou et al.(2013)

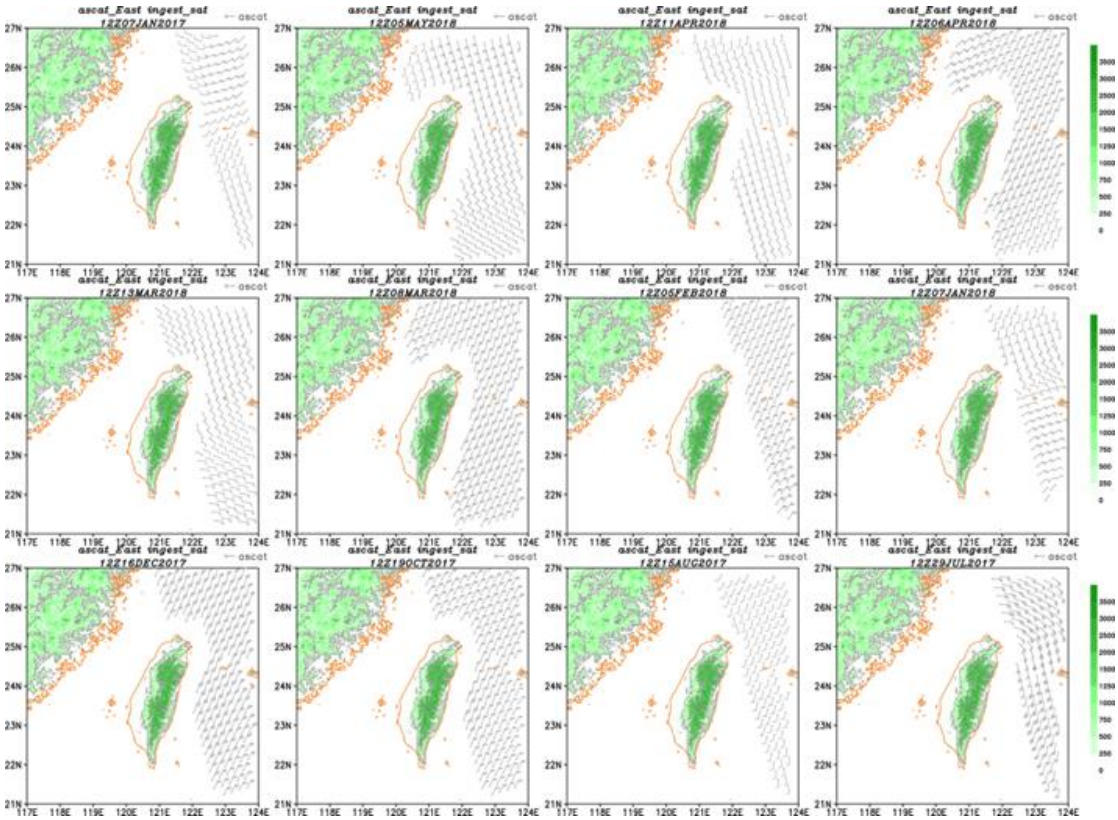


圖 6-3 ASCAT 海面風場資料不同時間點經品質控制後示意圖。品質控制策略不採用風速低於 2m/s 的觀測資料，並移除陸地及近海岸的觀測資料。

6.1.2. 高空觀測資料同化引入方式

由於觀測資料種類眾多與資料量龐大，每一種觀測資料的特性及解析度亦不同，其觀測值所代表的有效範圍亦可以視為不同。舉例來說，ASCAT 衛星反演的海面風場解析度為約為 12.5 公里，為衛星雲導風約 500 公尺，雷達解析度約 1 公里，若將所有的資料都帶入 MDAS 中進行降尺度耗時且不具該解析度觀測資料應有代表性，因此觀測資料需要經過稀化過程進行網格化，挑出該解析度具有代表性的網格化觀測資料來進行資料同化。因此在變分降尺度的過程高空觀測資料需要進行稀化過程，雷達資料也要進行稀化過程。

為滿足同化觀測資料與背景場解析度相近的需求，建立一個理想觀測網格座標(圖 6-4 中綠色三角形)，假設背景場的網格大小為 kx * ky，則理想觀測網格為(kx-1) * (ky-1)。以理想觀測網格為基準，設定稀化有效半徑(為該次網格資料解析度的一半)，同心圓尋找距離最接近的雷達反演風資料(圖 6-4 左)，如遇到最近距離有兩筆以上資料則選取與背景場誤差最小值之代表。例如水平解析度 0.5 度全球模式資料提高至 2.5 公里的計算過程中，會經由五層巢狀方式依序將解析度逐次提高，以雷達資料為例，圖 6-5 由左而右分別是第一、三、五次降尺度中雷達資料在不同解析度的稀化網格資料(2017 年尼莎颱風，5000 公尺高度)。

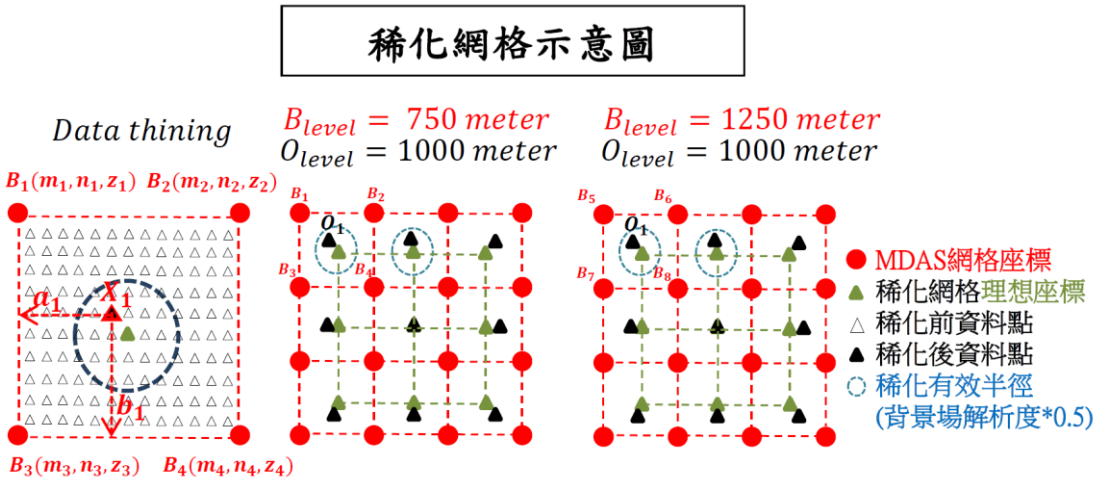


圖 6-4 觀測價值函數計算概念圖。圖中及圖右為稀化資料網格點設計示意圖，圖左為稀化方法示意圖。

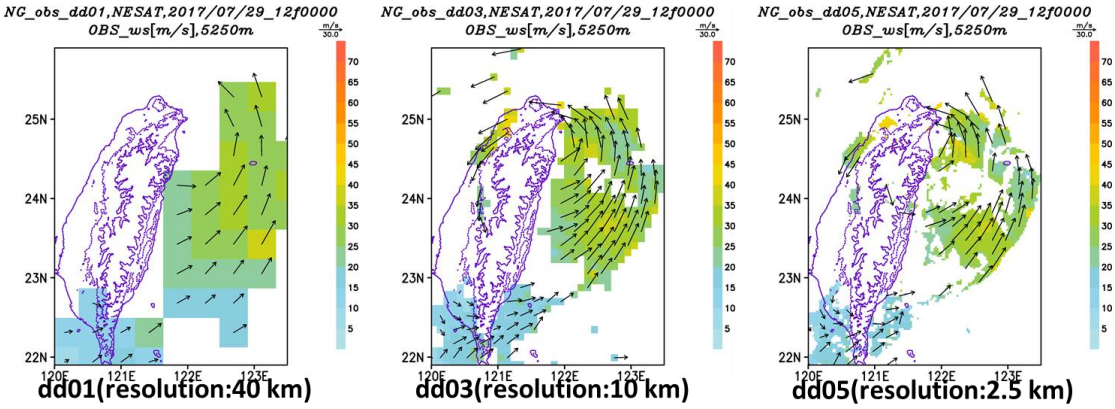


圖 6-5 雷達反演風配合模式背景場稀化成不同解析度，色階為風速 (ms^{-1})。左圖為在 5000 公尺高空水平解析度 40 公里的稀化網格雷達觀測資料，中間為水平解析度 10 公里，由邊為水平解析度 2.5 公里，可以看到隨著解析度提高引入的雷達觀測資料越多。

6.1.3. 高空觀測資料同化模組校驗方法

統計驗證參數，為了評估同化實驗的表現，計算模式值與觀測值之間的誤差量，評估分析場的準確度，本實驗使用四個驗證參數針對風場計算得分。

(A)平均向量誤差(Mean Vector Difference,MVD): U_b、V_b模式水平風，U_o、V_o觀測水平風，N樣本數。當 MVD 越小表示風場有越高的準確度。

$$MVD = \frac{\sum_{i=1}^{N}\sqrt{(U_b - U_o)^2 + (V_b - V_o)^2}}{N}$$

(B)空間相關係數(Spatial Correlation Coefficient,SCC):B模式值、O觀測值，下標 i 為某網格點，上標 ¯ 為平均值，N樣本數。SCC 介於+1 至-1 之間，正值表示兩者為正相關，負值表示兩者為負相關，值越高表示兩者空間相關性越高。

$$SCC = \frac{\sum_{i=1}^{N}(B_i - \bar{B})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(B_i - \bar{B})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(O_i - \bar{O})^2}}$$

(C)均方根誤差(Root Mean Square Error,RMSE): X_b模式值、X_o觀測值，N樣本數。RMSE 越小表示其誤差越小，表示該變數有較高的準確度。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(X_b - X_o)^2}{N}}$$

(D)均方根強度(Root Mean Square Magnitude,RMSM): X_b模式值、X_o觀測值，N樣本數。兩者 RMSM 值越接近表示其愈相似，有較高一致性。

$$RMSM_o = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(X_o)^2}{N}},\ RMSM_b = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(X_b)^2}{N}}$$

6.1.4. 高空觀測資料同化模組校驗

在有限的資料池中挑選事件時間較完整通過台灣的天氣系統個案，因為其高空觀測資料較密集，包含東北季風及西南季風。個案分別為 2018 東北季風(10/11、10/31)、2018 西南季風(06/13)，圖 6-6 至圖 6-8 為不同個案初始猜測場(FG)與 MDAS(MA)風速分析圖，初始猜測場使用 NCEP 全球模式 0.5 度，動力降尺度至 2.5 公里。表 6-1 至表 6-3 為個案統計參數之得分。

東北季風影響時間 2018/10/11 12z 時台灣受到東北季風加強影響，天氣轉為冷溼，在衛星雲圖上(圖 6-6f)可以得知台灣上空高層雲分布密集。高空資料包含了探空、雲導風及飛機觀測資料，本測試範例列出最多觀測資料的高度層(高度為 10250 公尺)進行繪圖比較兩者差異。圖 6-6 至圖 6-8 圖說明 a 為稀疏化的高空觀測資料，b 為稀疏化高空資料減去初始猜測場風速，c 為 MDAS 結果和初始差測場的差值，d 為 NCEP/GFS 0.5 度資料經過前處理後的初始猜測場，e 為經過資料同化 MDAS 之結果。從圖 6-6a 高空觀測資料可觀察到高層環流為強西風帶，風速達 30 m/s 以上，強風軸為於 120E、26N 位置，稀疏化高空資料減去初始猜測場風速(圖 6-6b)可以觀察到在強風軸位置初猜場風速低估，台灣外海附近的風速初猜場風速高估。經過 MDAS 降尺度後可以看到高空西風帶的結構-西北側強、東南側弱仍保持完整(圖 6-6d 與圖 6-6e)，說明經過資料同化後結構並沒有隨意改變；經由兩者的差值(圖 6-6c)，可以看到 MDAS 加強了強風軸的風速，同時也下修了台灣外海附近風速，使結果更趨近於觀測資料。

為了驗證同化的有效性，表 6-1 為東北季風影響期間(10/11)

整層風場校驗統計平均值，dd01~dd05 為由粗到細不同解析度結果，由結果可以發現在每次降尺度的過程中(dd02~dd05)，MDAS 的統計誤差量(RMSE 與 MVD)皆比初始猜測場小，伴隨解析度提高統計誤差也是逐漸降低，說明模式資料經 MDAS 降尺度後，其結果風速風向較原始模式資料更貼近觀測值。空間相關方面，MDAS 每一層降尺度之 SCC 都大於初始猜測場，也說明 MDAS 在空間分布上較初始猜測場更貼近觀測資料。均方根強度(RMSM)方面，越靠近觀測資料的均方根強度代表和觀測資料較一致，而 MDAS 每一層降尺度其 RMSM 均較原始模式資料貼近觀測資料之 RMSM。上面四個統計參數說明 MDAS 引入高空資料後是有改善模式氣象場。

2018/10/31 12z 亦為東北季風個案，高空觀測資料(圖 6-7a)得知高空駛流風場為西南風，初猜場與高空觀測資料差異示於圖 6-7b，在台灣西南部外海風速低估，透過 MDAS 結果(圖 6-7c)加強了台灣西南部外海的風速值。透過校驗得分比較(表 6-2)，MDAS 誤差量(RMSE 與 MVD)皆比初始猜測場低，空間相關性(SCC)也由原本 0.96 提升至 0.99，均方根強度(RMSM)方面 MDAS 結果數值也較初始猜測場更接近觀測資料數值，顯示經 MDAS 資料同化後之氣象場較初始猜測場更接近觀測資料。

2018/06/13 12z 為西南季風個案，從圖 6-8f 衛星雲圖得知台灣南部外海有劇烈天氣系統通過，高空觀測資料與初始猜測場顯示台灣西南部外海為西南風(圖 6-8a 與 d)，只是觀測風場風速高於初始猜測場(圖 6-8b)。透過 MDAS 降尺度之後加強了西南外海的風速值。校驗分析(表 6-3)顯示 MDAS 誤差量(RMSE 與 MVD)

皆比初始猜測場低，空間相關性(SCC)MDAS 結果也較初始猜測場更靠近觀測資料(數值更接近 1)，均方根強度(RMSM)方面 MDAS 結果數值也較初始猜測場更接近觀測資料數值，顯示經 MDAS 資料同化後之氣象場較初始猜測場更接近觀測資料，其結果更趨近於觀測。

表 6-1 2018 東北季風(10/11)風場初始猜測場(FG)、MDAS(MA)兩者與觀測(OBS)誤差量，校驗參數為 RMSE(紅色)、MVD(藍色)、SCC(綠色)與 RMSM(黑色)。dd01 至 dd05 為不同解析度結果。

	Var	dd01	dd02	dd03	dd04	dd05
RMSE(FG)	U	5.91	7.18	5.27	6.85	6.90
	V	3.98	4.16	4.15	4.25	4.27
RMSE(MA)	U	5.92	3.07	4.16	5.00	6.06
	V	3.91	1.39	1.92	2.10	2.19
MVD(FG)	Wind	4.27	4.52	4.32	4.53	4.55
MVD(MA)	Wind	4.17	1.57	2.06	2.34	2.45
SCC(FG)	U	0.91	0.88	0.92	0.89	0.89
	V	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
SCC(MA)	U	0.91	0.98	0.95	0.94	0.91
	V	0.95	0.99	0.98	0.98	0.98

	Var	dd01	dd02	dd03	dd04	dd05
RMSM (FG)	U	30.09	30.57	30.86	30.98	31.05
	V	9.34	9.12	9.03	8.97	8.93
RMSM (MA)	U	30.01	31.24	31.00	31.12	31.09
	V	9.60	10.55	10.06	9.98	9.95
RMSM (OBS)	U	90.96	31.76	31.68	32.17	32.24
	V	10.80	10.62	10.53	10.51	10.50

表 6-2 2018 東北季風(10/31)風場初始猜測場(FG)、MDAS(MA)兩者與觀測(OBS)誤差量，校驗參數為 RMSE(紅色)、MVD(藍色)、SCC(綠色)與 RMSM(黑色)。dd01 至 dd05 為不同解析度結果。

	Var	dd01	dd02	dd03	dd04	dd05
RMSE(FG)	U	2.74	2.84	2.80	2.79	2.78
	V	3.01	3.03	3.02	2.99	3.00
RMSE(MA)	U	2.74	0.50	0.79	1.05	1.20
	V	3.13	0.53	0.83	1.12	1.26
MVD(FG)	Wind	3.43	3.44	3.41	3.39	3.39
MVD(MA)	Wind	3.51	0.53	0.76	1.08	1.29
SCC(FG)	U	0.97	0.98	0.98	0.98	0.98
	V	0.96	0.97	0.97	0.97	0.97
SCC(MA)	U	0.97	1.00	1.00	1.00	0.99
	V	0.96	1.00	1.00	1.00	0.99

	Var	dd01	dd02	dd03	dd04	dd05
RMSM (FG)	U	15.48	15.46	15.60	15.62	15.69
	V	15.47	15.19	15.37	15.41	15.45
RMSM (MA)	U	15.49	14.43	14.57	14.56	14.63
	V	15.45	14.61	14.81	14.81	14.84
RMSM (OBS)	U	14.62	14.64	14.61	14.61	14.68
	V	15.08	14.65	14.91	14.95	15.00

表 6-3 2018 西南季風(06/13)風場初始猜測場(FG)、MDAS(MA)兩者與觀測(OBS)誤差量，校驗參數為 RMSE(紅色)、MVD(藍色)、SCC(綠色)與 RMSM(黑色)。dd01 至 dd05 為不同解析度結果。

	Var	dd01	dd02	dd03	dd04	dd05
RMSE(FG)	U	2.67	2.69	2.66	2.65	2.65
	V	3.18	3.09	3.12	3.13	3.13
RMSE(MA)	U	2.66	0.92	1.22	1.40	1.51
	V	3.24	1.05	1.43	1.66	1.79
MVD(FG)	Wind	3.56	3.50	3.52	3.52	3.52
MVD(MA)	Wind	3.60	0.99	1.34	1.64	1.83
SCC(FG)	U	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96
	V	0.65	0.68	0.67	0.67	0.67
SCC(MA)	U	0.96	1.00	0.99	0.99	0.99
	V	0.64	0.96	0.93	0.91	0.89

	Var	dd01	dd02	dd03	dd04	dd05
RMSM (FG)	U	10.76	10.70	10.77	10.78	10.79
	V	2.95	2.96	2.95	2.95	2.94
RMSM (MA)	U	10.75	11.12	11.04	10.96	10.94
	V	2.98	3.58	3.42	3.30	3.25
RMSM (OBS)	U	11.61	11.43	11.45	11.44	11.46
	V	3.97	3.97	3.96	3.95	3.95

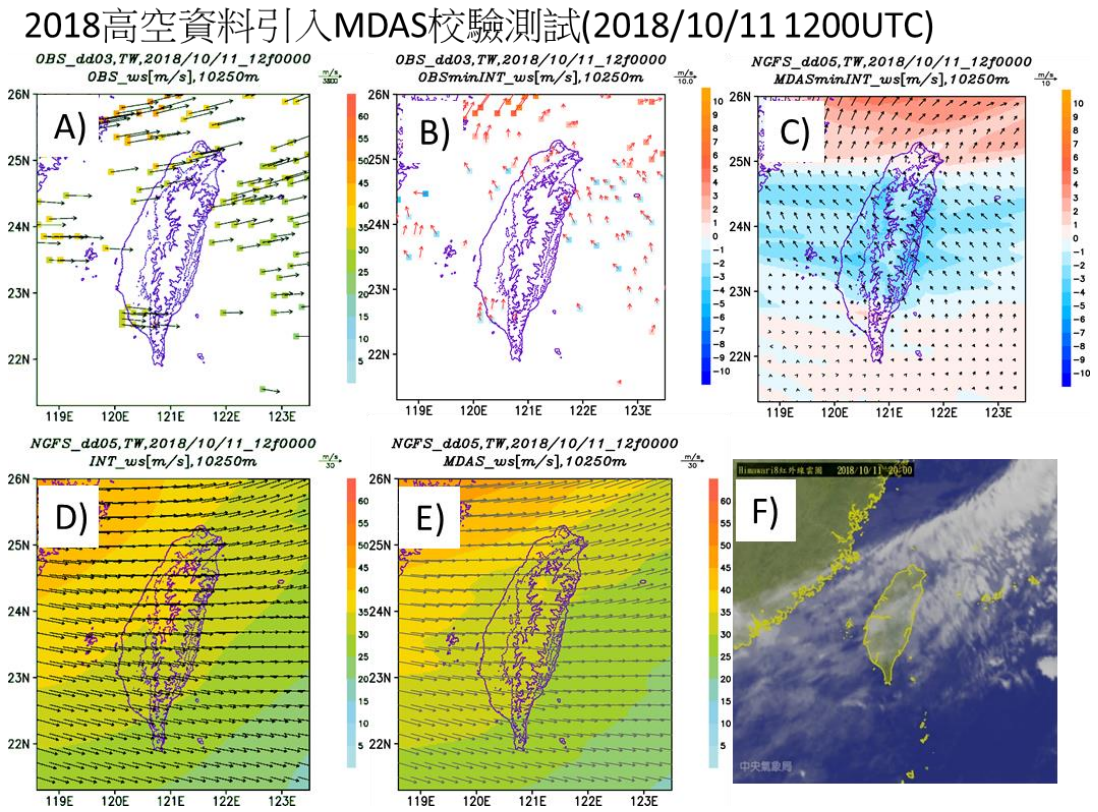


圖 6-6 2018 東北季風(10/11)10250 公尺風速。(A)傳統高空觀測資料、(B)觀測資料減初始猜測場、(C)MDAS 減初始猜測場、(D)初始猜測場、(E)MDAS 與(F)衛星雲圖；(A)(D)(E)風標為向量，(B)(C)風標為向量差。

2018高空資料引入MDAS校驗測試(2018/10/31 1200UTC)

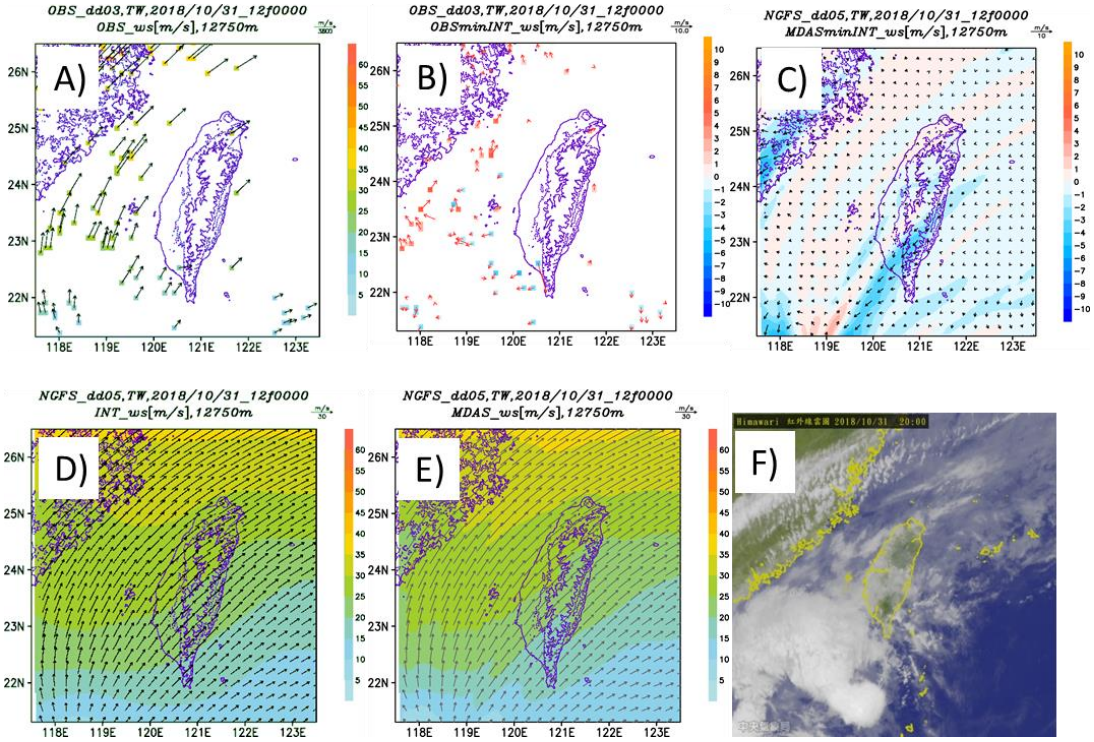


圖 6-7 2018 東北季風(10/31)12750 公尺風速。(A)傳統高空觀測資料、(B)觀測資料減初始猜測場、(C)MDAS 減初始猜測場、(D)初始猜測場、(E)MDAS 與(F)衛星雲圖；(A)(D)(E)風標為向量，(B)(C)風標為向量差。

2018高空資料引入MDAS校驗測試(2018/06/13 1200UTC)

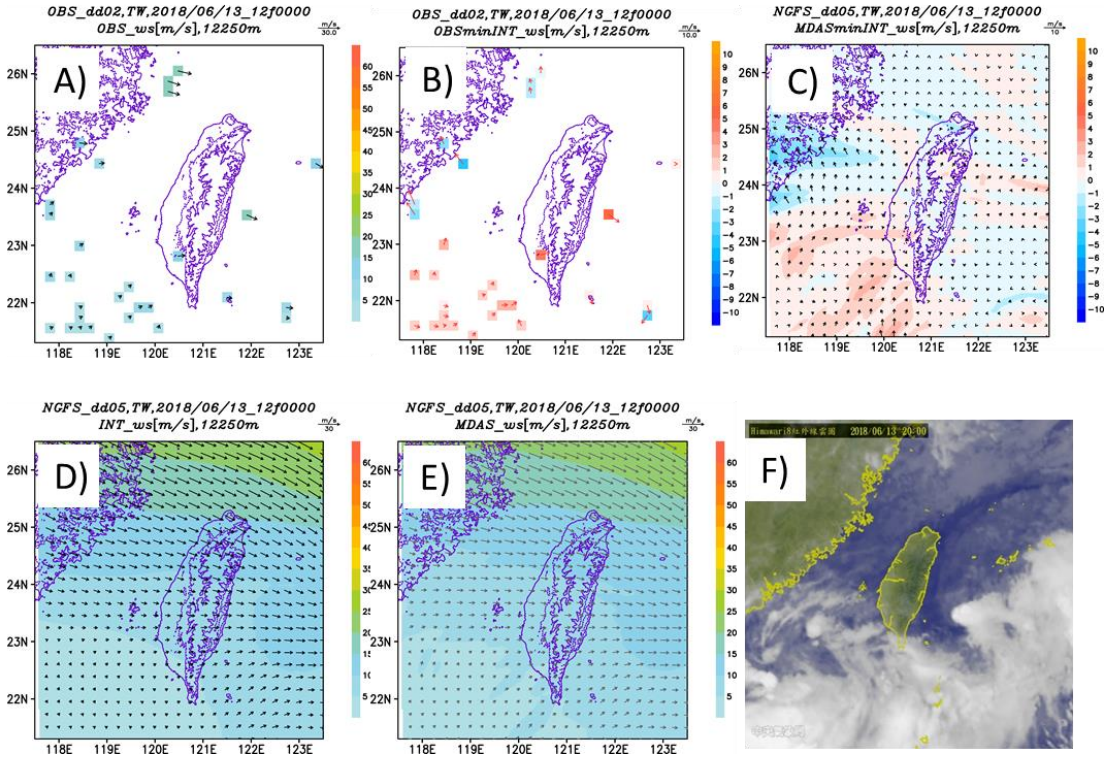


圖 6-8 2018 西南季風(06/13)12250 公尺風速。(A)傳統高空觀測資料、(B)觀測資料減初始猜測場、(C)MDAS 減初始猜測場、(D)初始猜測場、(E)MDAS 與(F)衛星雲圖；(A)(D)(E)風標為向量，(B)(C)風標為向量差。

6.2. 非傳統觀測資料資料品質控制模組資料同化模組

6.2.1. 非傳統觀測資料資料品質控制

觀測大氣的方法可分為傳統和非傳統方法。傳統方法包括地面測站及探空氣球等，直接以儀器測量各種大氣資料；非傳統方法則有雷達及衛星，得到的資料必須經過複雜的換算才能使用。例如一顆雷達所能量測的速度是徑向速度，指的是風靠近或遠離雷達觀測站的速度，要合成一般觀測資料的風向、風速，需要有兩顆雷達以上同時覆蓋的區域才可以反演的出來。

雷達反演資料主要使用QPESUMS系統之三維合成風場資料，近年臺灣雷達觀測網密度愈趨於密集，多樣性的雷達反演技術也趨於成熟。中央氣象局利用局屬S–band都卜勒雷達與空軍C–band雙偏極化雷達資料，進行雙都卜勒雷達風場反演(張，2010)，同時相關技術應用於實際作業QPESUMS系統中進行。雙都卜勒風場合成分析能夠提供三維的風場反演資料，透過資料進一步分析颱風雨帶環流特性，颱風中心位置、強度與暴風範圍等的變化趨勢，藉以提升對於海面風力的監測分析，均具參考價值。同時風場反演資料在校驗分析中，與剖風儀、探空等觀測值具有相當佳的一致性(張，2014)。如圖6-9在侵臺颱風辛樂克（2008）、薔蜜（2008）、莫拉克（2009）東西風與南北風的RMSE分別為2.6 m/s與3.2 m/s，誤差不大。

將雙都卜勒風場反演資料之高時間及空間解析度且接近真實大氣的特性引入MDAS系統中，彌補海上及高空觀測資料不足，也藉以提升動力降尺度的分析能力。考量雷達最佳分析區域的限制，使用之雷達組如圖6-10，共七組 (張，2014)，資料詳細資訊如下，水平及垂直解析度分為1.25、1.0公里；有效觀測經緯度分

別為東經118.0~123.5125度、北緯19.9875~27度；垂直層為1~10公里等間距高度。雷達反演風資料已透過客觀分析轉為等經緯網格資料，且為UTC，時間解析度為每10分鐘一筆。

反演資料使用時發現颱風期間偶有不合理風場，推論原因可能是徑向速度場反折錯程序處理不佳產生明顯不合理之風場，其品質控管還需更進一步改善。故考量上述在颱風期間使用反演風資料時，本研究搭配模式氣象局資料與預報中心提供之颱風警報單將颱風中心定位資訊考量進去，配合Rankine-Vortex的基本假設，製作一個理想颱風風速模型與反演風比對，針對不合理之風向與風速進行剔除。同時參考LAPS設定，當模式資料與雷達反演風風速差異值高於門檻的資料也會進行剔除，如圖6-11。

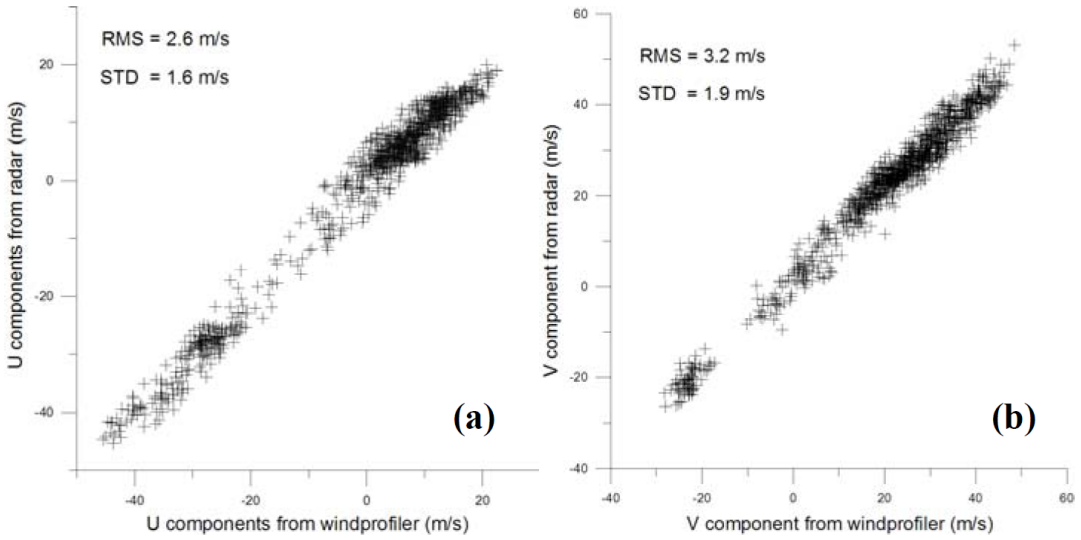


圖6-9 辛樂克(2008)、薔蜜(2008)及莫拉克(2009)颱風所有分析高度之雙都卜勒反演風速與與那國島剖風儀風速觀測散布圖，顯示雷達反演風場資料與剖風儀觀測資料相近。(a)為東西風分量，(b)為南北風分量。(摘自張，2014)

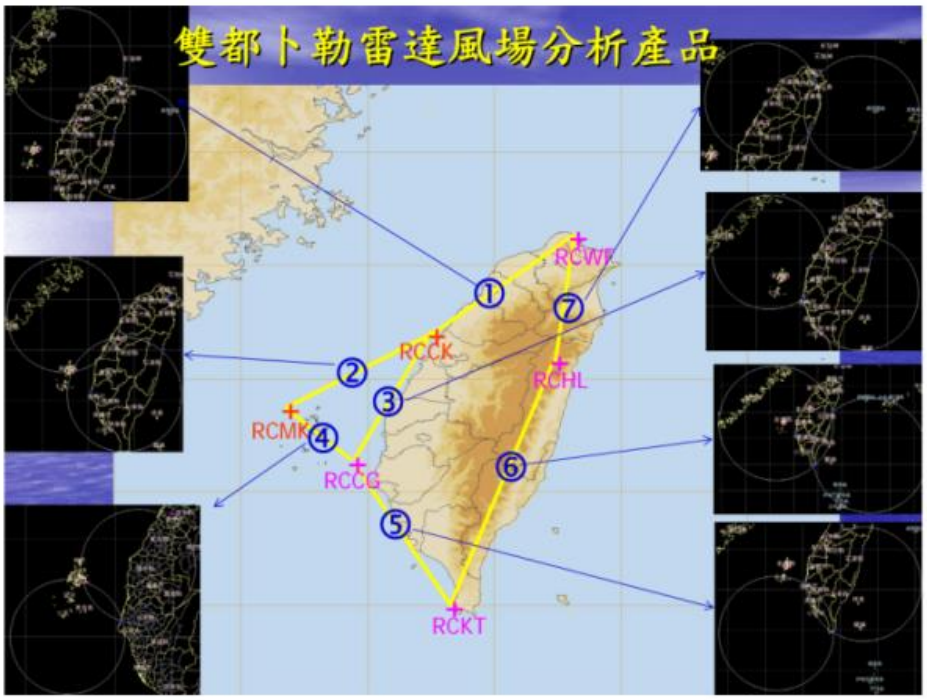


圖6-10 雙都卜勒雷達風場合成之雷達組圖，分別為1~7組。(摘自張，2014)

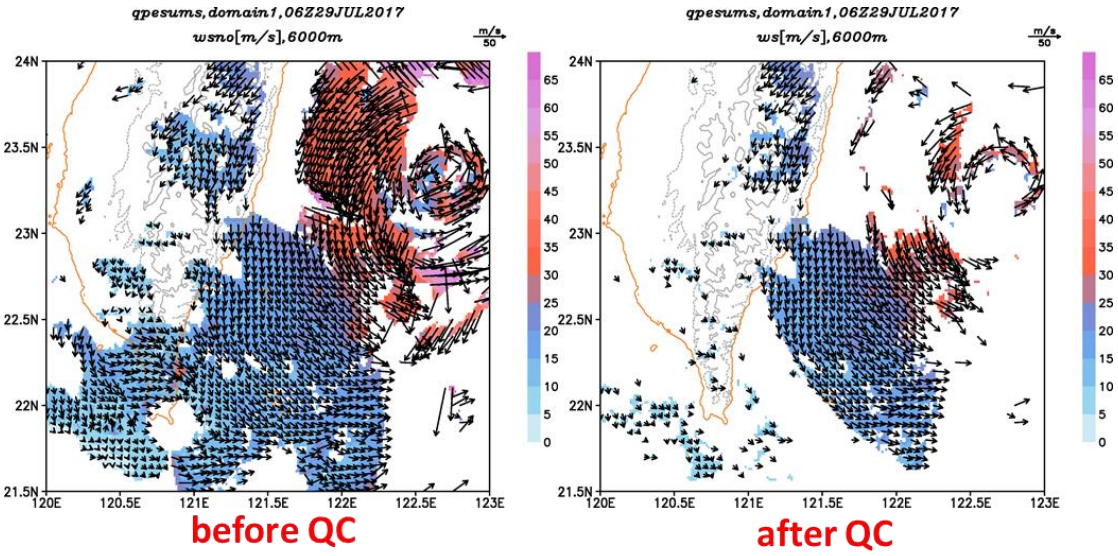


圖6-11 雷達反演風進行資料品質控制前後差異。

6.2.2. 非傳統觀測資料同化模組及初步結果

MDAS 之泛函 J 可以寫成為：

$$J = \omega_1 J_1 + \omega_2 J_2$$

$$J_1 = \iiint \sum_{i,j} \alpha_{i,j} \left(O_j - X_j\right)^2$$

$$J_2 = \iiint (\beta_1 P_1^2 + \beta_2 P_2^2 + \beta_3 P_3^2 + \beta_4 P_4^2 + \beta_5 P_5^2 + \beta_6 P_6^2 + \beta_7 P_7^2)$$

其中J_1為觀測資料的泛涵，J_2為氣象局中尺度動力降尺度系統(MDDS)的泛涵，亦為變分資料同化中弱約束條件的泛涵。ω_1和ω_2分別為觀測資料和約束條件的權重，目的是在於平衡價值函數的大小，使得每一項對於總函數(J)都能有一定比例的貢獻。觀測資料的泛涵(J_1)中，$\alpha_{i,j}$為觀測資料的種類與觀測變數的權重，i 為非傳統觀測資料種類，此處引入 1 種-雷達反演風，j 為觀測資料的變數，此處引入 2 種-u wind 與 v wind，$\alpha_{i,j}$目前給定 1，未來會參考前人研究納入反演風觀測誤差因子修正$\alpha_{i,j}$權重值。O_j為觀測變數所在位置，X_j則為使用鄰近觀測變數的模式格點資料經水平及垂直內插至O_j所在位置之值。動力降尺度的泛涵(J_2)中考慮了中尺度弱約束條件，P_1~P_3為動量方程，P_4為質量守恆方程，P_5為熱力方程，P_6為水汽方程，P_7為平滑項，β_1~β_7分別為各項的權重。在本次測試中，β_1~β_7設定為 10、10、0.5、75、10、10 及 1。MDAS 在降尺度的過程中注重觀測資料與動力約束條件並重，因此利用權重函數ω_1和ω_2來調整。估算方法先假定ω_2為 1，並算出觀測資料的泛涵J_1及約束條件的泛涵J_2的級數差距，令ω_1為此級數差距使初始之$\omega_1 J_1$約等於$\omega_2 J_2$，再進行變分降尺度迭代計算

為了初步檢視雷達資料同化之結果，挑選較完整通過台灣的劇烈天氣系統個案，因為其天氣系統雷達反演風場較多。此處個案挑選 2017 年尼莎颱風 (07/29~07/30)，圖 6-12 為個案初始猜測場(FG)與 MDAS(MA)風速分析圖，初始猜測場使用 NCEP 全球模式 0.5 度，動力降尺度至 2.5 公里。

以雷達資料 5000 公尺高度為例，尼莎颱風期間 2017/07/29 12z 時透過圖 6-12a 稀化的雷達反演風資料，可以觀察到中颱尼莎颱風中心位於宜蘭上空，北部及東部地區受颱風環流影響，有豪雨情況發生。圖 6-12f 雷達合成迴波圖明顯看到颱風環流結構，除了北部及東部受颱風環流影響，南部也受到颱風外圍雨帶影響。圖 6-12b 為稀疏化雷達反演風網格資料減去初始猜測場風速，可以看到在颱風中心東南方有雷達觀測資料部分之風速比初始猜測場風速強，不過雷達資料在花蓮外海並不連續，向量差也可以看到雷達觀測資料南風偏強。圖 6-12d 為 ncep/gfs 0.5 度資料經過前處理後的初始猜測場，圖 6-12e 為經過資料同化 MDAS 之結果，圖 6-12c 為 MDAS 結果和初始差測場的差值。首先可以看到經過 MDAS 後颱風完整的結構仍保持，說明經過資料同化後結構並沒有隨意改變；經由兩者的差值(圖 6-12c)，MDAS 同化結果在颱風登陸時間加強了颱眼東南側環流帶的風速，值得注意的是 MDAS 結果加強了整條環流帶的風速，而觀測資料在東南風方的環流帶上中間有一段是沒有雷達觀測資料的，說明 MDAS 可以在同化少量的雷達觀測資料下，建立較完整的天氣系統現象。同樣 MDAS 可以重建颱風受到地形影響在宜蘭外海的減速以及台北桃園新竹外海的風速加強。

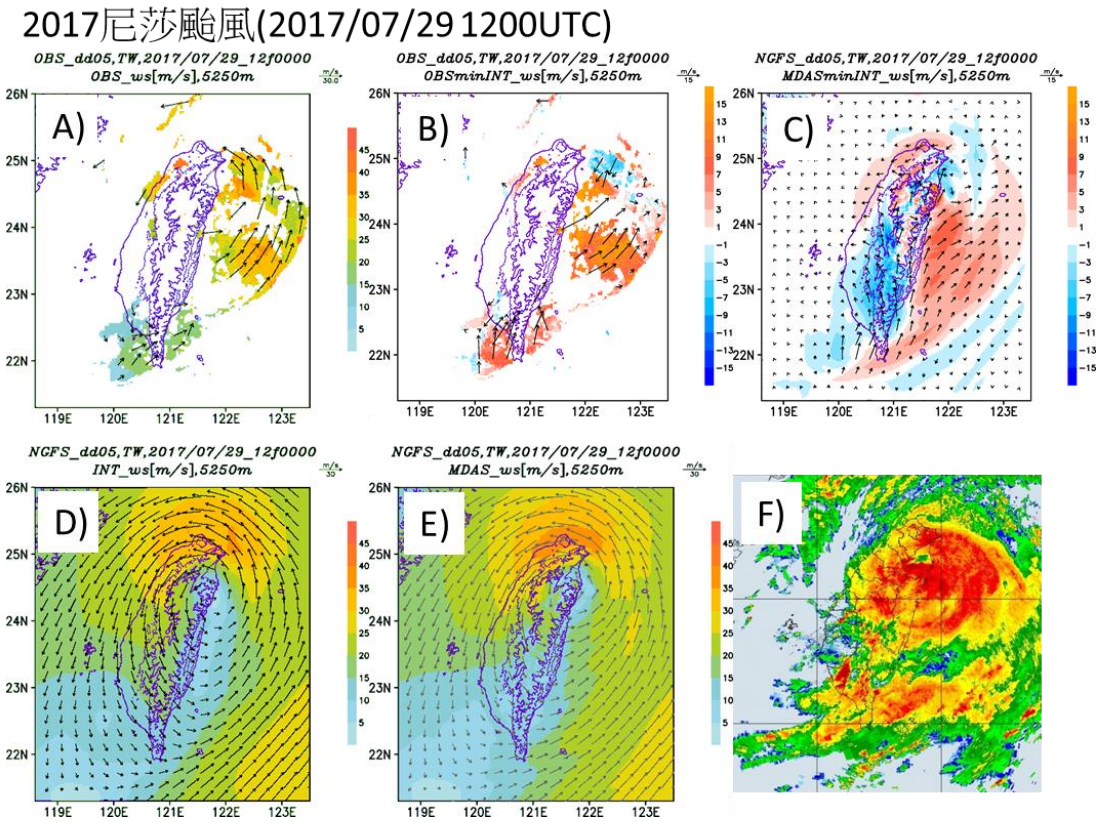


圖 6-12 2017 尼莎颱風 5250 公尺風速。(A)QPESUMS 雷達反演風、(B)QPESUMS 雷達反演風減初始猜測場、(C)MDAS 減初始猜測場、(D)初始猜測場、(E)MDAS 與(F) 合成雷達迴波；(A)(D)(E)風標為向量，(B)(C)風標為向量差。

7. 以本土化射源回推作業程序，進行射源回推自動化建置

本計畫使用 A2Ct&d 於福島事件期間(2011/3/11-2011/3/21)真實觀測資料，針對日本福島核電廠事故案例以射源項回推程序進行自動化推估。

7.1. 射源項回推方法

射源項回推方法的基礎概念是參考 JAEA 的方法，利用觀測資料之空氣劑量率和單位釋放率模擬之空氣劑量率比值回推外釋射源項，(7-1)式即為外釋射源項回推關係式：

$$Q_i = M_i / C_i \qquad (7\text{-}1)$$

其中，Q_i是任一待求核種釋放率或是多個核種釋放率總和(Bq/sec)，M_i是觀測之空氣劑量率 (mSv/sec)，C_i 是稀釋因子(sec/m^3)，相當於模式在單位釋放率設定為$1\ Bq/sec$下模擬出的空氣劑量率。

以此方法為核心建構的外釋射源項回推系統作業程序如圖 7-1 所示，步驟依序為 A2Ct&d 單位釋放率模擬(Unit Run)、資料處理階段 (Data Processing)、射源項回推階段 (Source Term Estimate Process, STE)及釋放率驗證(Release Rate Verification)。

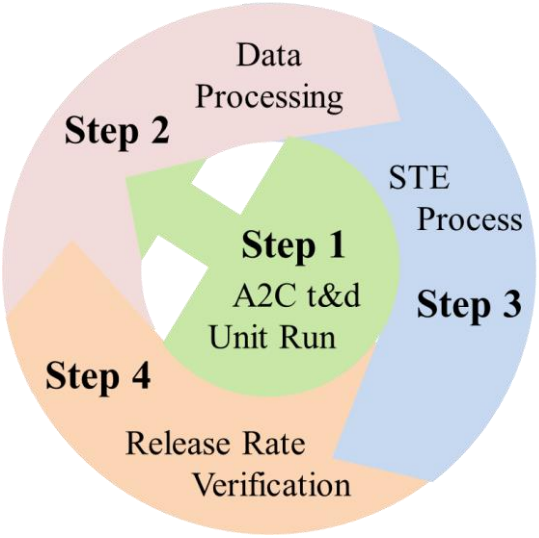


圖 7-1 外釋射源項回推系統作業程序

1. 單位釋放率模擬：當事故發生射源項回推系統啟動，根據事故時間及地點以單位釋放率 1 Bq/sec 進行 A2Ct&d 模擬，模擬完成即可輸出每個時間步階的煙陣活度、大小及位置。

2. 資料處理階段：蒐集現有的觀測資料及事件歷程資料。觀測資料包含測站位置資訊及逐時核種空氣劑量率測值，利用測站位置及步驟一輸出的煙陣資料，可計算出單位釋放率模擬於測站點的空氣劑量率。進入步驟三射源項回推階段前，為了求解射源釋放率時序，需先將待求的事故射源釋放率時序以現有的資訊進行分段，事件歷程資料即是重要的分段設計依據。

3. 射源回推階段：步驟一與二完成後，即準備好射源回推計算所需資料，觀測逐時空氣劑量率、單位釋放率模擬逐時觀測點模擬空氣劑量率及射源釋放率分段資訊。步驟二中已將射源釋放率R依時間序列分段成R_1~R_n，第k段釋放率R_k釋放的煙陣提供s測站於t時間的空氣劑量率一共為$A_k^{s,t}$，則 t 時間s測站空氣劑量率觀測值$A^{s,t}$可以表示為

$$A^{s,t} = \sum_{k=1}^{n} A_k^{s,t} \qquad (7\text{-}2)$$

由外釋射源項回推關係式(7-1)式得知，單一釋放率期間k所釋放的煙陣提供s測站於t時間的空氣劑量率可表示為

$$A_k^{s,t} = R_k \times Au_k^{s,t} \qquad (7\text{-}3)$$

其中$Au_k^{s,t}$為單位釋放率模擬於第k段釋放率期間釋放的煙陣提供s測站於t時間的空氣劑量率。利用(7-3)式，第k段釋放率可表示為：

$$R_k = \frac{A_k^{s,t}}{Au_k^{s,t}} = \frac{A^{s,t} - \sum_{l=1}^{n} A_l^{s,t}}{Au_k^{s,t}} \text{，} l \neq k \qquad (7\text{-}4)$$

將(7-4)式中的$A_l^{s,t}$以(7-3)式代換掉後可改寫為

$$R_k = \frac{A^{s,t} - \sum_{l=1}^{n} (R_l \times Au_l^{s,t})}{Au_k^{s,t}} \text{，} l \neq k \qquad (7\text{-}5)$$

利用(7-5)式即可求得第1至n段釋放率，亦為射源回推計算核心公式，求解方法如下：

篩選出單位釋放率劑量評估模式模擬中，測站s只受單一釋放率時段R_a影響的時間，這些時間的空氣劑量率模擬值僅來自R_a，因此$\sum_{l=1}^{n}(R_l \times Au_l^{s,t})$ 在$l \neq a$時，總和為0，則(7-5)式便可簡化為

$$R_a = \frac{A^{s,t}}{Au_a^{s,t}} \qquad (7\text{-}6)$$

R_a即可直接由觀測點觀測與模擬的空氣劑量率比值求得R_a。其中，若多個測站於多個時間皆只受單一釋放率R_a的影響，則可分別求解出代表R_a的釋放率，並將其平均視為R_a，接著以此方法試著分別針對R_1~R_n，個別篩選出其影響時間進行求解。

至此多數的釋放率時段已求得，接著篩選出即使混合了數個釋放率時段影響，但其中僅有一組未知釋放率R_b的時間，即可因為$\sum_{l=1}^{n}(R_l \times Au_l^{s,t})$ 在$l \neq b$的時候皆為已知，利用(7-5)式進行R_b

的求解。依此類推，重複進行數次的疊代便可一步步扣除已求得的釋放率部分，完成射源項回推階段。

由於煙陣中心對周圍的劑量影響隨距離呈高斯分布，距離大於 3 倍標準差之外所造成的劑量影響非常小，因此於該時段的釋放率計算可先將超出距離範圍的煙陣排除在外，按式 7-6 的解法，是由篩選出測站只受單一釋放率影響的煙陣，可以解出特定時段 t 的 R，再由觀測劑量結果扣除時段 t 所造成的劑量，即可先排除 t 時段造成的劑量並進行下一次疊代。理想情況之下可計算所所有時段的釋放率，pseudocode 如下：

```
iterations
for each Time t in TimeSeries
  for each Site s in SiteList
    find Puffs ps in PuffList if ps are in the vicinity of s at t
      for each Puff p in ps
        if R(p) has value, then remove p from ps
      if only one puff in ps  式(7-6)
        R(ps) = (dose observed from s at t) / (dose simulated from ps at t)
        (dose observed) = (dose observed) – R(ps) * (dose simulated from ps)
```

4. 釋放率驗證：利用步驟二中的事件歷程資料，檢視步驟三求得的外釋射源釋放率時序演變合理性，倘若釋放率時序特性與事件歷程無法匹配，或蒐集到新的觀測資料與事件歷程資料時，回到步驟二進行觀測資料更新及釋放率時段的分段調整。

步驟 2、3、4 為一個循環，重複解出釋放率時間序列及合理性驗證，進而求得合理的釋放率時間序列。

7.2. 以射源回推自動化福島案例測試

將福島事故射源項回推做自動化個案，首先加入的資料為東京電力公司(Tokyo Electric Power Company)提供的福島電廠內 3 月 11 日至 21 日的輻射偵測資料(單位為 μSv/h)，監測點分布如圖 7-2 所示，代號及經緯度整理在表 7-1。另外日本各縣雖然皆有地面劑量監測站，但資料起始時間皆在 3 月 14 日，除了離事故發生時間點較久之外，且絕大多數測站距離電廠皆超過 100km，其中離電廠最近的福島縣地面測站(距離福島電廠 61km)要到 4 月份才開始有資料，因此在射源項回推計算上主要使用福島電廠內的輻射偵測資料，以計算事故早期的外釋時序。圖 7-3 即為福島電廠內 3 月 11 日至 21 日的輻射偵測值。本研究模擬設定由 2011 年 3 月 11 日 20 時至 19 日 19 時，共 192 小時（8 天），每 5 分鐘釋放一個活度為 1010 Bq/sec的 Cs-137 煙陣，釋放初始高度為 20 公尺。結果如圖 7-4 所示，圖中藍色實線為射源項回推結果，不同於 JAEA 的 I-131 與 Cs-137 的回推研究結果，如圖 7-5，JAEA 回推結果中這兩種核種的外釋比例大致上為 10:1，本研究除了單純以廠內測量之空氣劑量率進行回推，將所有外釋核種皆視為 Cs-137 外，還將由使用單點時間的空氣浸身劑量做回推，改變為由一段時間的空氣浸身劑量加總回推外釋時序，結果如圖 7-4，而在不同的氣象資料下模擬的結果會有相當的不同，因此我們在福島事故期間釋放率回推結果約落在10^{15}~10^{22}之間，雖然變動範圍高出 JAEA 的10^{12}~10^{16}之間 3-6 個級距，但特別值得注意的是$R3$ 與$R6$ 分別為福島電廠 1 號機組與 3 號機組發生氫爆的時間區段，$R10$ 則為 2 號機組核子反應爐容器壓力抑制室周遭發生爆炸聲的區段，R_3、R_{10}與釋放率回推高值區段皆能有

很好的匹配。

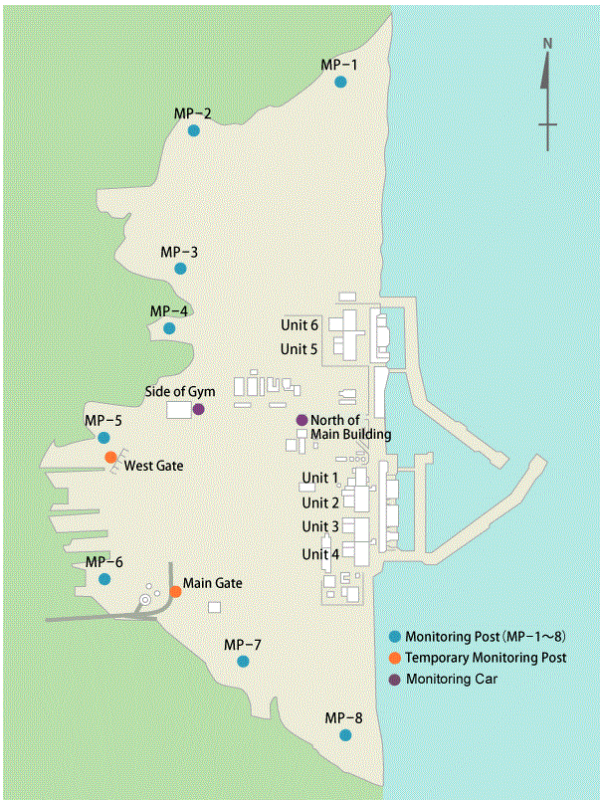


圖 7-2 福島電廠場內輻射偵測點分布位置圖

表 7-1 福島電廠內輻射偵測點經緯度及代號表

監測點代號	經度	緯度	監測點描述
MG	141.023	37.419	Temporary monitoring post at **M**ain **G**ate at Fukushima Daiichi
NMB	141.031	37.426	Fukushima Daiichi monitoring by car located **N**orth of **M**ain **B**uilding
GYM	141.024	37.426	Fukushima Daiichi monitoring by car located at the side of the **GYM**
WG	141.020	37.424	Temporary monitoring post at **W**est **G**ate at Fukushima Daiichi
MP1	141.033	37.440	Fixed **M**onitoring **P**ost **1** at Fukushima Daiichi
MP2	141.025	37.438	Fixed **M**onitoring **P**ost **2** at Fukushima Daiichi
MP3	141.024	37.432	Fixed **M**onitoring **P**ost **3** at Fukushima Daiichi
MP4	141.023	37.430	Fixed **M**onitoring **P**ost **4** at Fukushima Daiichi
MP5	141.020	37.425	Fixed **M**onitoring **P**ost **5** at Fukushima Daiichi
MP6	141.020	37.419	Fixed **M**onitoring **P**ost **6** at Fukushima Daiichi
MP7	141.027	37.416	Fixed **M**onitoring **P**ost **7** at Fukushima Daiichi
MP8	141.032	37.412	Fixed **M**onitoring **P**ost **8** at Fukushima Daiichi

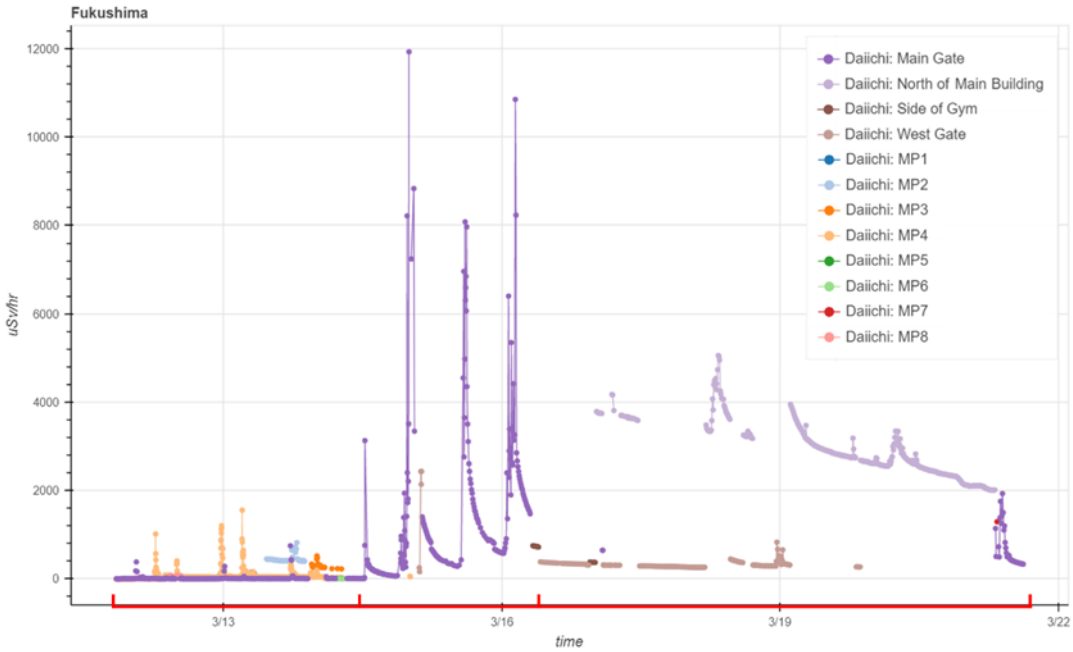


圖 7-3 福島電廠內 3 月 11 日至 21 日的輻射偵測值

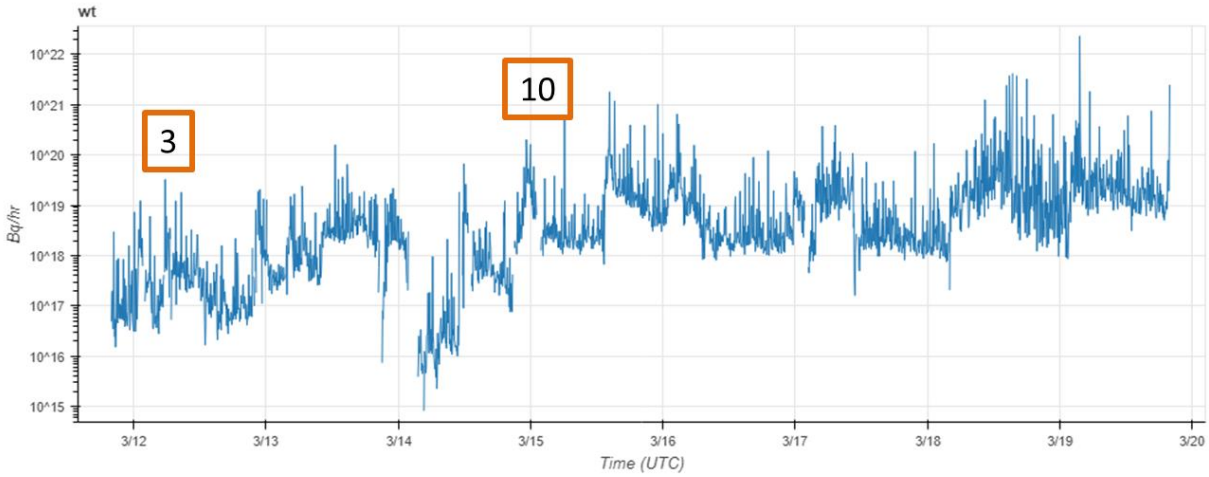


圖 7-4 福島事故射源項回推結果

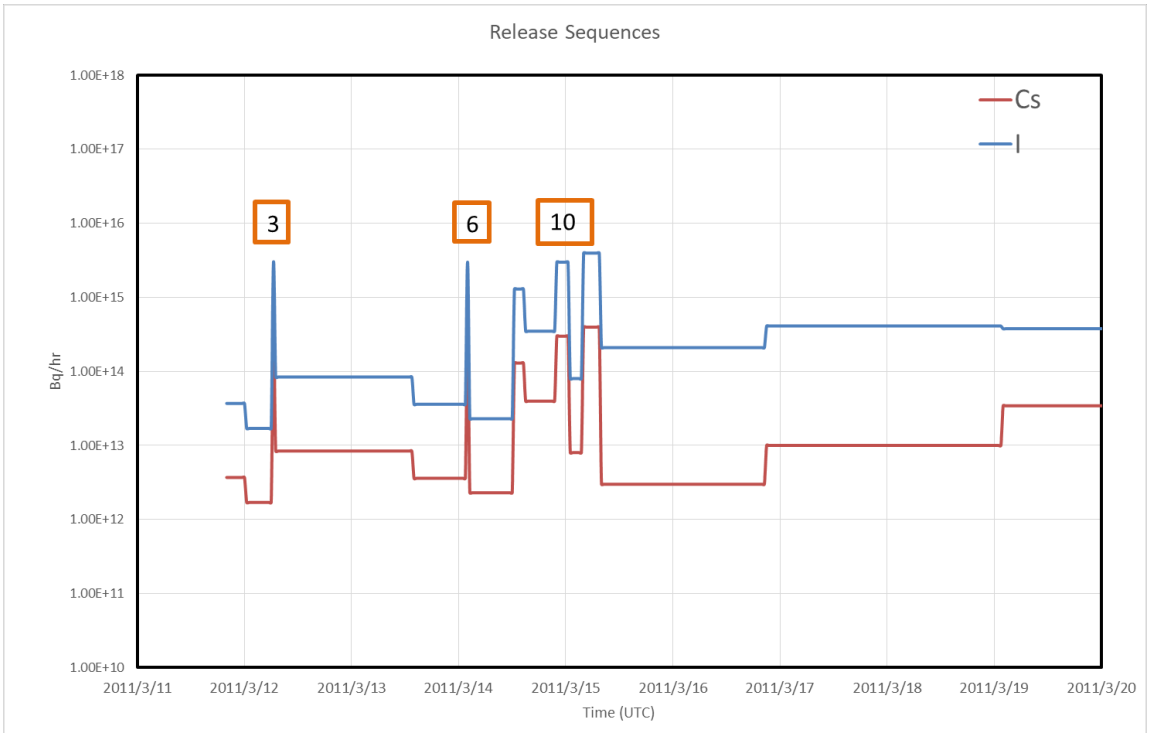


圖 7-5 JAEA 的 I-131 與 Cs-137 的回推研究結果

再利用射源項回推結果重新進行 A2Ct&d 劑量模式模擬，模擬完的測站值如圖 7-6 至圖 7-17 所示，圖中彩色實線為 A2Ct&d 劑量模式於測點的模擬結果，色點為觀測值。可以將觀測資料大致分為三個區段探討，分別為 14 日至 16 日的高值起伏區段、12 日至 14 日的零星高值區段及 16 日之後的 NMB 站。14 日至 16 日劑量率高值起伏區段部分，由圖 7-6 顯示，測點 MG 的模擬趨勢與觀測值有很好的匹配。其他觀測點於此段時間資料缺漏嚴重，無法進行比較。12 日至 14 日的觀測值出現零星高值區段部分，觀測點 MP1 至 MP8 顯示可參考圖 7-10 至圖 7-17，回推後的釋放率模擬結果能大致掌握高值出現的時間點，其中觀測資料較完整的 MG 與 MP4，觀測劑量率高值部分，模擬高值出現的時間點與觀測也都有很好的匹配。16 日之後的觀測資料部分，僅 NMB 站點於高值起伏的部分有較連續及完整的資料，而其中模擬的高值起伏趨勢與觀測有很好的匹配。

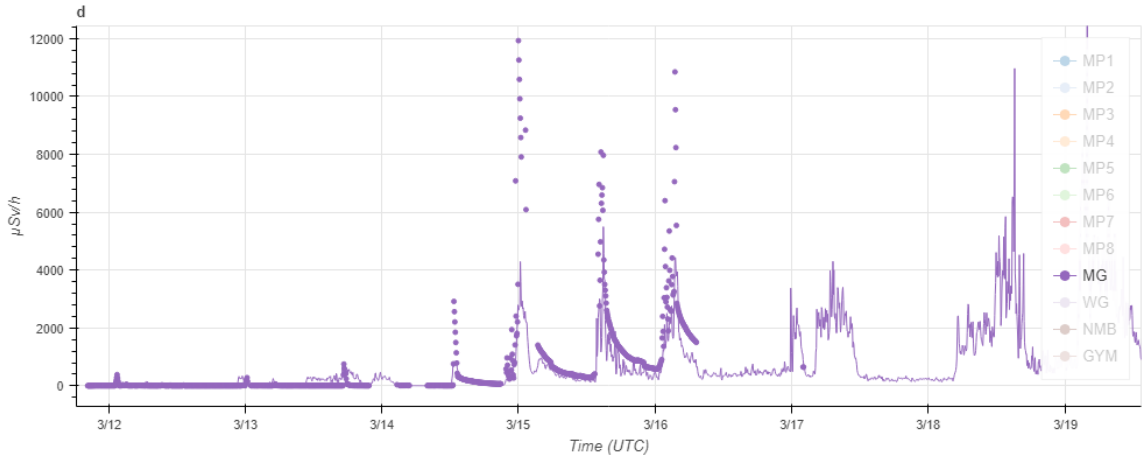


圖 7-6 福島電廠 MG 測站劑量率模擬結果

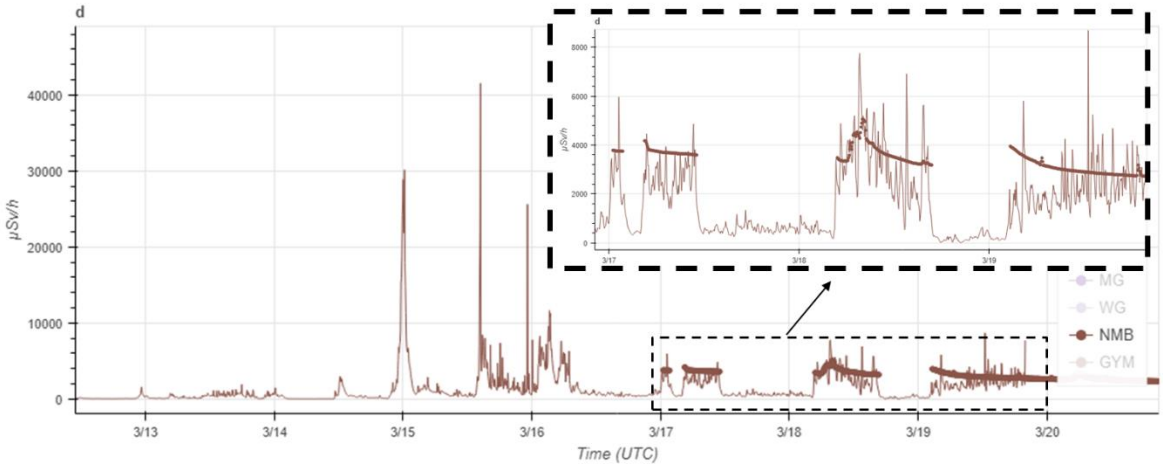


圖 7-7 福島電廠 NMB 測站劑量率模擬結果

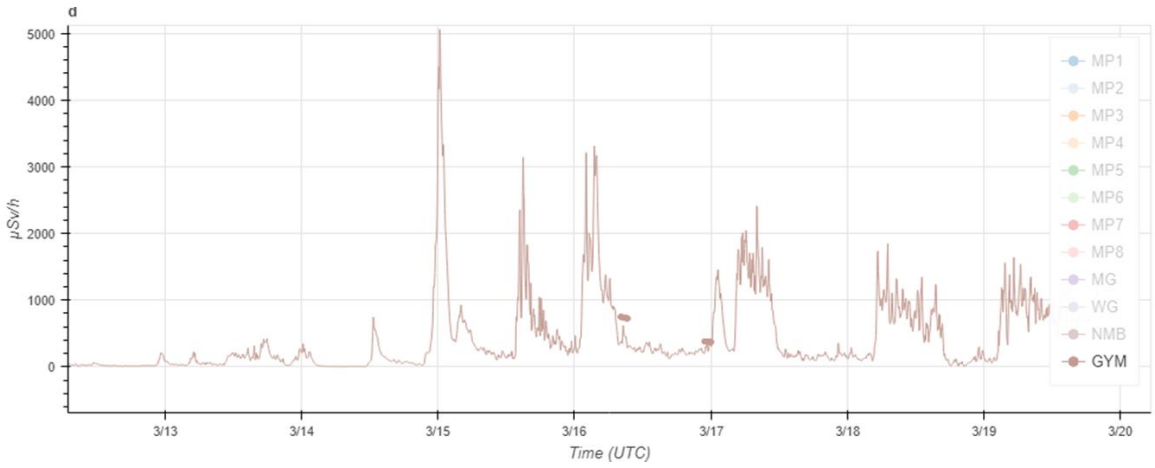


圖 7-8 福島電廠 GYM 測站劑量率模擬結果

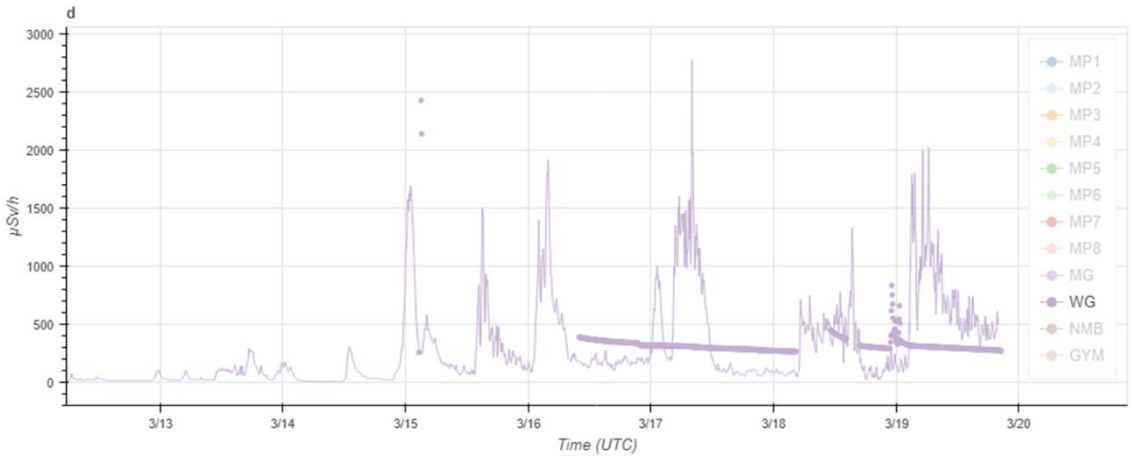


圖 7-9 福島電廠 WG 測站劑量率模擬結果

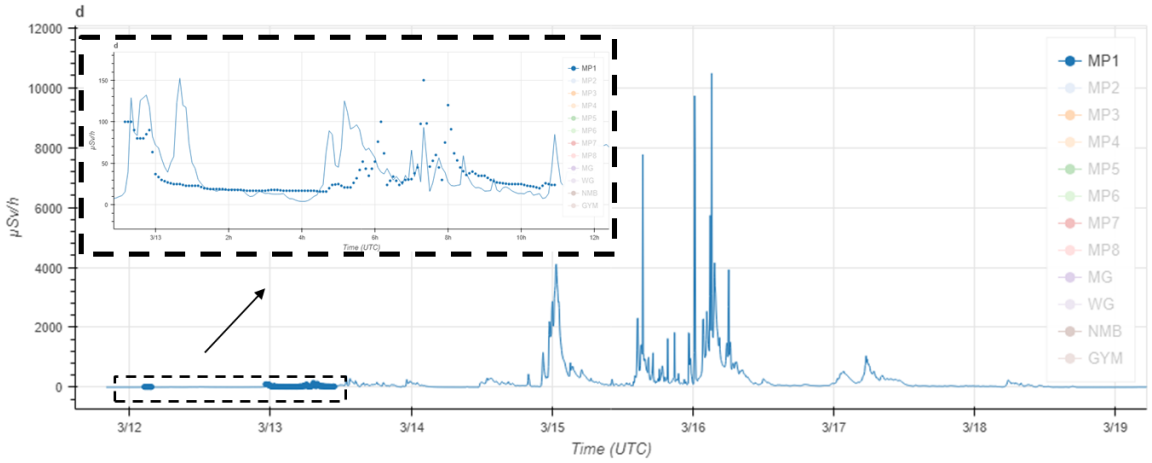


圖 7-10 福島電廠 MP1 測站劑量率模擬結果

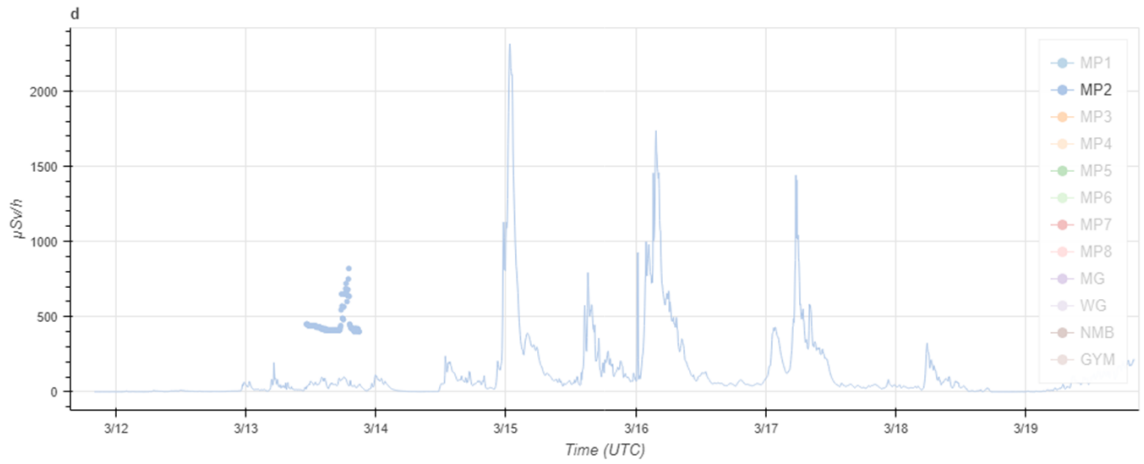


圖 7-11 福島電廠 MP2 測站劑量率模擬結果

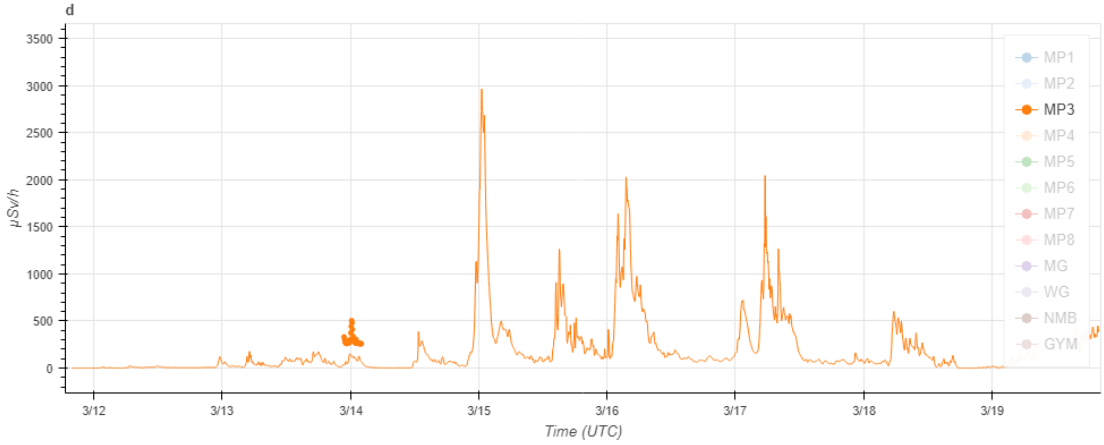


圖 7-12 福島電廠 MP3 測站劑量率模擬結果

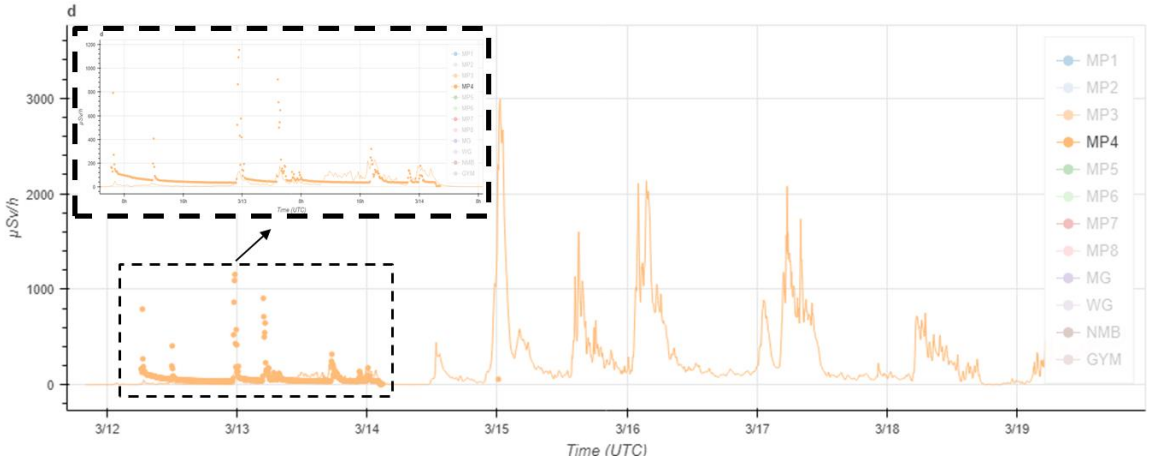


圖 7-13 福島電廠 MP4 測站劑量率模擬結果

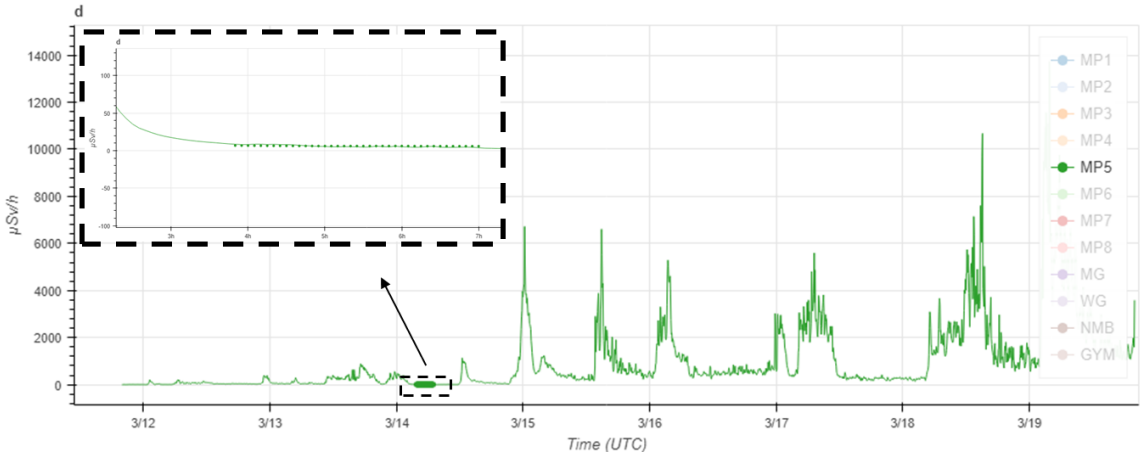


圖 7-14 福島電廠 MP5 測站劑量率模擬結果

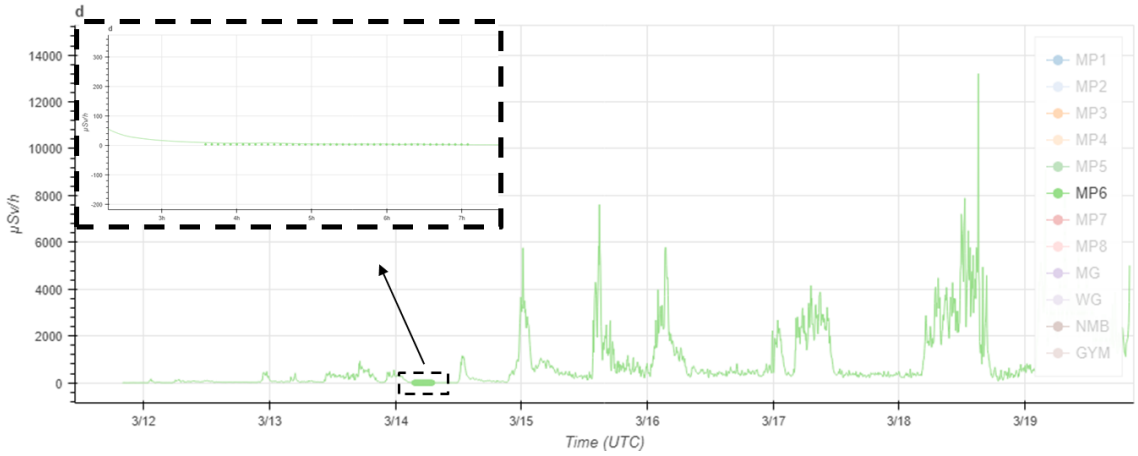


圖 7-15 福島電廠 MP6 測站劑量率模擬結果

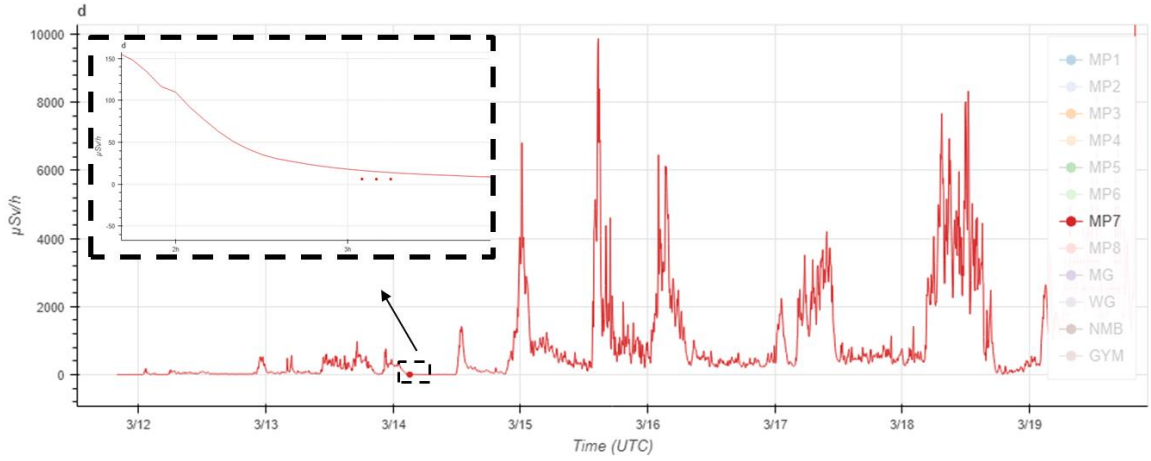


圖 7-16 福島電廠 MP7 測站劑量率模擬結果

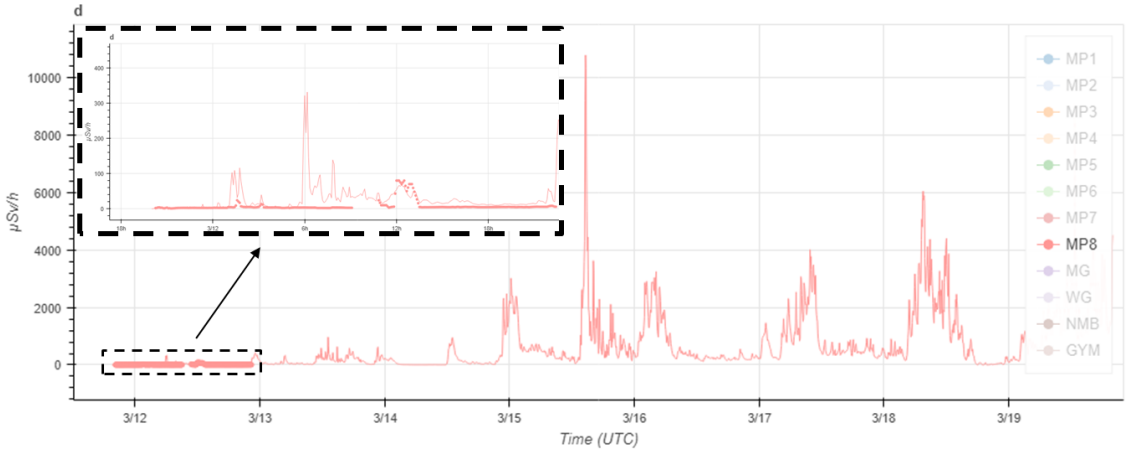


圖 7-17 福島電廠 MP8 測站劑量率模擬結果

7.3. 射源回推自動化本土案例測試

7.3.1. 台灣區域即時輻射偵測資料傳輸系統現況

在本土化射源回推程序中，係以量測分析資料及高解析度氣象分析資料為主的外釋射源項回推功能，使緊急應變劑量評估系統可根據即時輻射偵測資料，評估已發生的放射性物質外釋射源項，並根據劑量評估模擬預測未來影響趨勢。即時輻射偵測資料部分，為了使緊急應變劑量評估系統於事故發生時，能於第一時間進行放射性物質外釋射源項評估及未來影響趨勢預測，於系統中加入台灣區域即時輻射偵測資料傳輸系統，即時收集各縣市輻射偵測資料。

本計畫已與原子能委員輻射偵測中心合作，於 2017 年 10 月 6 日開始，蒐集每分鐘將最新的輻射偵測資料傳輸至核研所 SFTP 站。資料種類與蒐集狀況如下：

1. 全國固定式監測站 TRMCFXYYYYMMDDHH.CSV (2017/10 至今)
2. 移動式偵測器 TRMCEXYYYYMMDDHH.CSV (2017/11 至 2018/06)
3. 核能 1-4 廠 TPNUPLYYYYMMDDHH.CSV(2017/10 至 2017/11)
4. 蘭嶼 TPLAYUYYYYMMDDHH.CSV(2017/10 至 2017/11)
5. 台北市政府 TPEGOVYYYYMMDDHH.CSV(2017/10 至今)

檔名中，YYYY 為四位數年份、MM 為二位數月份、DD 為二位數日期、HH 為二為數小時。資料格式皆為逗點分隔檔(CSV)如表 7-1 至表 7-3 所示，由左而右為測站、由上而下為分鐘資料，逐分鐘刷新檔案。目前在 2018 年底時，即時觀測資料的測站位置如圖 7-18。

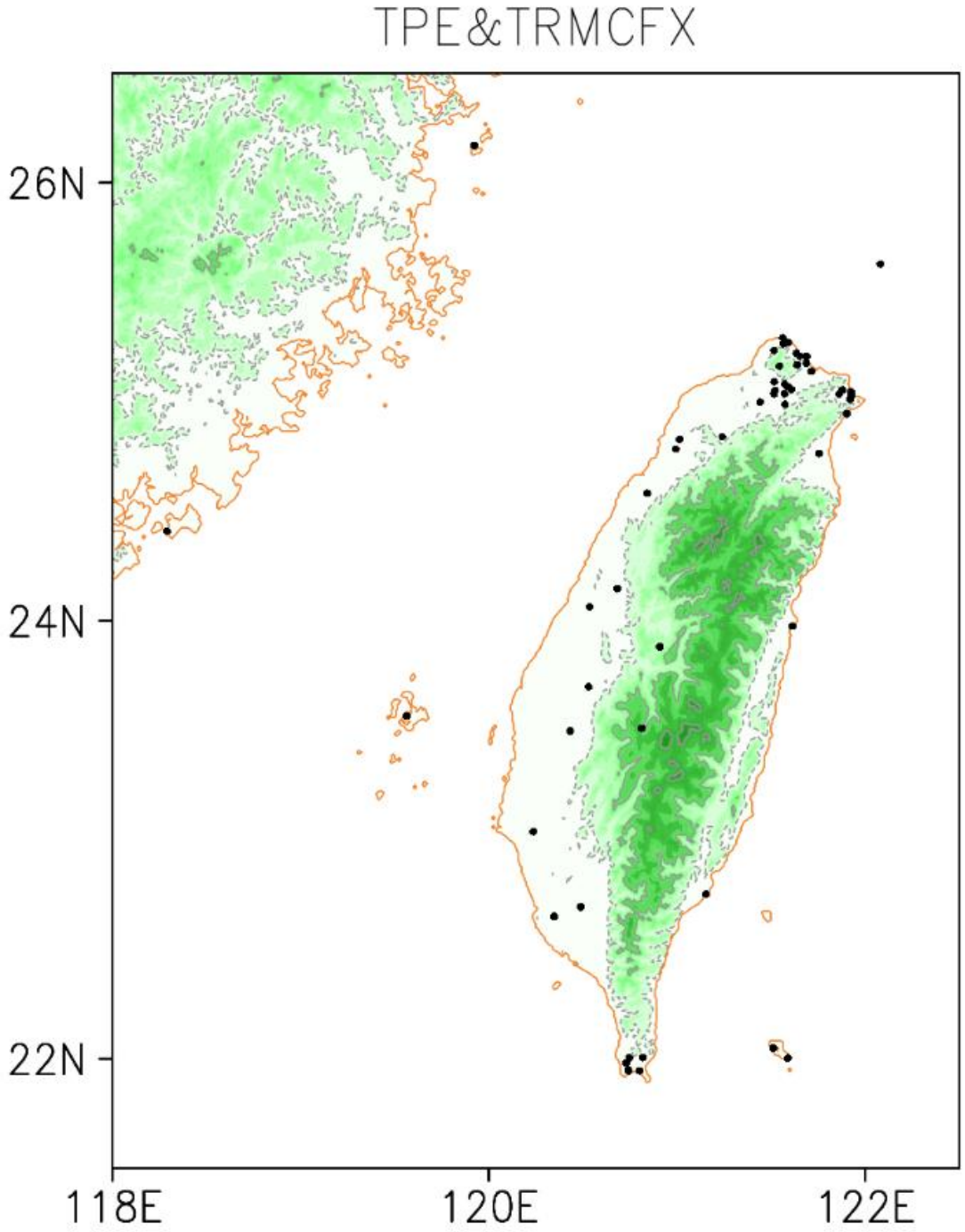


圖 7-18 即時輻射偵測站位置

表 7-2 全國固定式監測站輻射偵測資料示意

GPS	25.047575,121.92	25.010583,121.91	25.03516,121.86	25.053834,121.88	25.030353,121.92	22.0493,121.51	24.409,118.28
	澳底	貢寮	雙溪	三港	龍門	椰油	金門
2018/11/13 08:00	0.0438	0.0323	0.0556	0.0445	0.0328	0.0343	0.0681
2018/11/13 08:01	0.0436	0.0322	0.0561	0.0443	0.0327	0.0346	0.0688
2018/11/13 08:02	0.0441	0.0322	0.0557	0.0438	0.0327	0.0346	0.0693
2018/11/13 08:03	0.044	0.0318	0.0568	0.0435	0.0328	0.0348	0.0683
2018/11/13 08:04	0.0439	0.0321	0.0575	0.0429	0.0329	0.035	0.0692
2018/11/13 08:05	0.0442	0.0318	0.0576	0.0434	0.0328	0.0354	0.0709
2018/11/13 08:06	0.0446	0.032	0.0583	0.0439	0.0329	0.0359	0.0723
2018/11/13 08:07	0.0452	0.0326	0.0595	0.0432	0.0329	0.036	0.0726
2018/11/13 08:08	0.0446	0.033	0.0593	0.0437	0.0329	0.0356	0.0739
2018/11/13 08:09	0.0448	0.0331	0.0593	0.0438	0.0329	0.0353	0.0745
2018/11/13 08:10	0.045	0.033	0.0587	0.0427	0.0322	0.0354	0.0736
2018/11/13 08:11	0.045	0.0335	0.0591	0.0428	0.0322	0.0356	0.0727
2018/11/13 08:12	0.0453	0.0332	0.0592	0.043	0.0322	0.0356	0.0707
2018/11/13 08:13	0.0446	0.0337	0.0592	0.0439	0.032	0.0354	0.0691
2018/11/13 08:14	0.0443	0.0338	0.0592	0.0434	0.0319	0.0367	0.0691
2018/11/13 08:15	0.0439	0.0343	0.0601	0.043	0.0319	0.0364	0.0682
2018/11/13 08:16	0.0444	0.0343	0.0587	0.0425	0.0323	0.0363	0.0677

表 7-3 台北市政府輻射偵測資料示意

GPS	25.0913,121.51	25.0675,121.59	25.056,121.60	25.0521,121.52	25.0361,121.51	25.0362,121.57	24.9873,121.5755
	承德站	內湖站	南港站	中北站	中正站	信義站	木柵站
2018/11/13 08:00	0.058	0.078	0.065	0.063	0.049	0.073	0.065
2018/11/13 08:01	0.058	0.078	0.065	0.063	0.049	0.073	0.065
2018/11/13 08:02	0.058	0.078	0.065	0.063	0.049	0.073	0.065
2018/11/13 08:03	0.058	0.078	0.065	0.063	0.049	0.073	0.065
2018/11/13 08:04	0.058	0.078	0.065	0.063	0.049	0.073	0.065
2018/11/13 08:05	0.062	0.08	0.065	0.064	0.048	0.071	0.067
2018/11/13 08:06	0.062	0.08	0.065	0.064	0.048	0.071	0.067
2018/11/13 08:07	0.062	0.08	0.065	0.064	0.048	0.071	0.067
2018/11/13 08:08	0.062	0.08	0.065	0.064	0.048	0.071	0.067
2018/11/13 08:09	0.062	0.08	0.065	0.064	0.048	0.071	0.067
2018/11/13 08:10	0.061	0.077	0.059	0.066	0.046	0.072	0.063
2018/11/13 08:11	0.061	0.077	0.059	0.066	0.046	0.072	0.063
2018/11/13 08:12	0.061	0.077	0.059	0.066	0.046	0.072	0.063
2018/11/13 08:13	0.061	0.077	0.059	0.066	0.046	0.072	0.063
2018/11/13 08:14	0.061	0.077	0.059	0.066	0.046	0.072	0.063
2018/11/13 08:15	0.057	0.078	0.058	0.068	0.043	0.067	0.062
2018/11/13 08:16	0.057	0.078	0.058	0.068	0.043	0.067	0.062

7.3.2. 核一廠每日案例測試

將臺灣核一廠每日固定產出模擬劑量分布的個案，配合台北市政府輻射偵測站位置與實際觀測值案例，選取 2018 年 10 月 31 日做射源回推測試，單位釋放率模擬設定由 2018 年 10 月 31 日 00 時至 7 日 23 時，共 192 小時（8 天），每 5 分鐘釋放一個活度為 10^{10} Bq/sec的 Cs-137 煙陣，釋放初始高度為 20 公尺。在單一

釋放率下的模擬煙陣影響到台北各測站的劑量，隨著時間與釋放煙陣越多，劑量隨之上升，如圖 7-19。經過射源項回推計算後，結果在核一廠沒有事故發生時，卻得到了幾個時間有釋放率的情況，如圖 7-20，且利用射源項回推結果重新進行 A2CDOSE 劑量模式模擬，模擬完的測站值如圖 7-21 所示，圖中彩色實線為 A2CDOSE 劑量模式於測點的模擬結果，色點為台北市政府輻射偵測資料。由圖 7-19 至圖 7-21 中可以得知模擬核一廠開始釋放時，於 10 月 31 日 01 時至 04 時，模擬測站劑量為很微小約 10^{-35}μSv/hr，原因為一開始煙陣才剛釋放距離台北市測站約為 22 公里，煙陣正隨著時間擴散，隨著環境場移動，尚未接近台北市所以模擬測站受到影響太小，甚至小於平時尚未有故發生時的背景輻射值，但此時的實際觀測是有背景輻射值約為 0.1μSv/hr，由射源回推的核心公式$R_a = \frac{A^{s,t}}{Au_a^{s,t}}$可知觀測資料值越大且模擬測站值越小則釋放率越大，所以回推射源項有高的釋放率出現，但這個值不是真實的。所以本研究將實際觀測值扣掉背景範圍值 0.2μSv/hr 後得到了較合理的結果如圖 7-22 至圖 7-23 所示。由於在選取觀測資料時有先將背景輻射值 0.2μSv/hr 扣掉，所以核一廠在尚未有事故發生時，外釋射源項回推得到的結果為沒有釋放率，如圖 7-22，且模擬與觀測站的劑量均為 0 如圖 7-23，就修正了假的釋放率的情形。

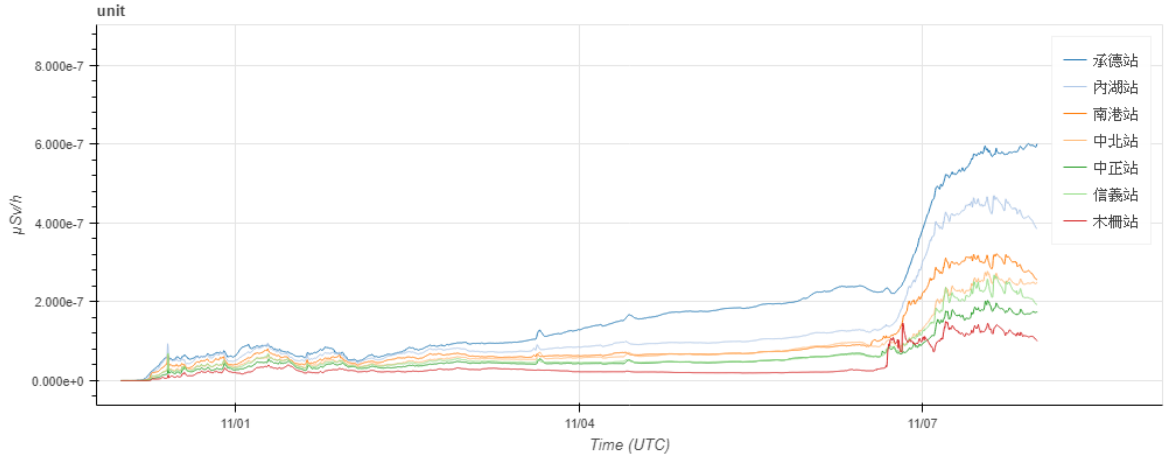


圖 7-19 單位釋放率在台北各測站的劑量表現

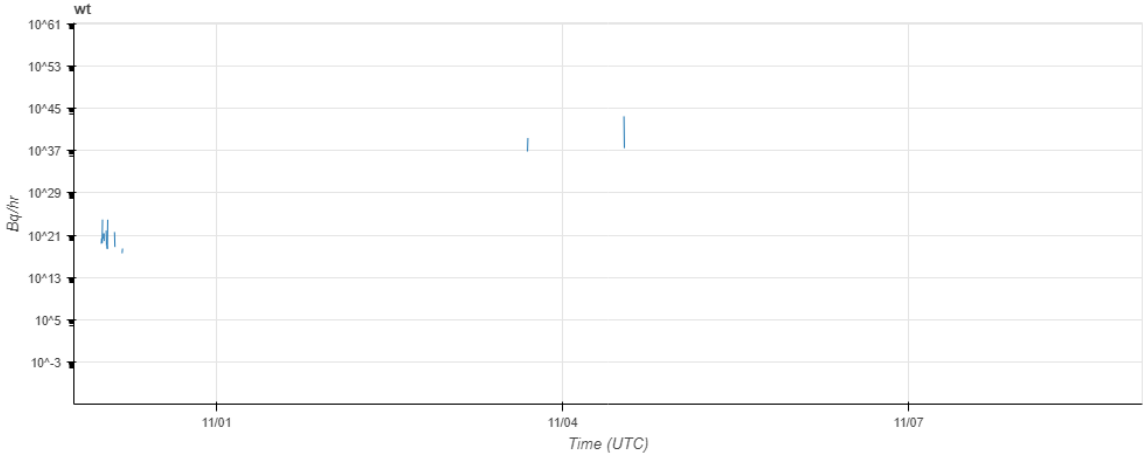


圖 7-20 核一廠尚未扣掉背景輻射值的射源項回推結果

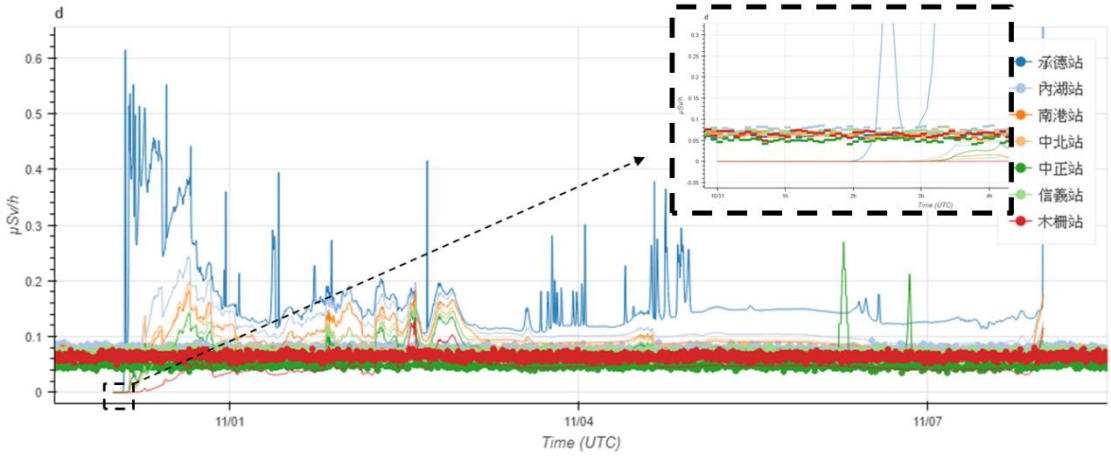


圖 7-21 核一廠在台北測站扣掉背景範圍值後劑量率模擬結果

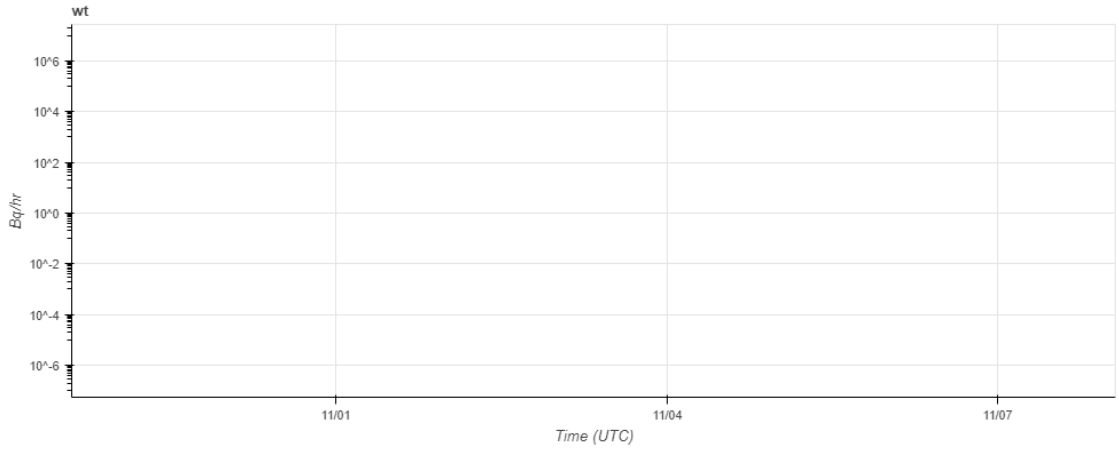


圖 7-22 核一廠在扣掉背景範圍值後射源項回推結果

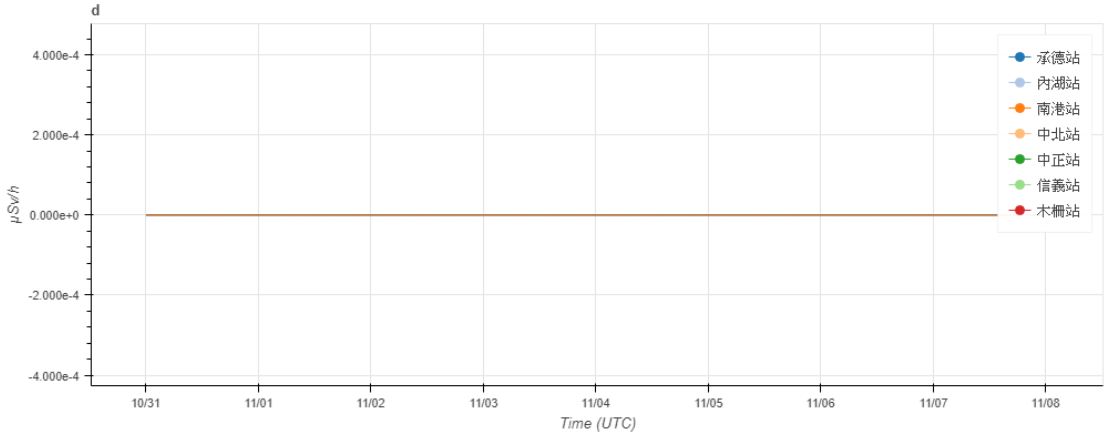


圖 7-23 核一廠在台北測站扣掉背景範圍值後劑量率模擬結果

7.3.3. 以福島事件釋放率於臺灣核二廠釋放測試

首先因為台灣尚未有外釋事故發生的真實觀測資料作為佐證，所以本研究將福島事件外釋時序在核二廠釋放做出北台灣各測站的假想觀測值，選取核二廠的原因是測試季節於台灣的盛行風為東北風或東風系，煙陣對陸地的影響較廣，但選取核一廠煙陣被帶往西方或西南方，影響到陸地的範圍非常微小，會容易有誤差，可以參考七天劑量累積分布如圖 7-24 和圖 7-25，而測站選取為接近核二廠的金山站(25.221,121.635)、萬里站(25.1765,121.6885)、大鵬站(25.208,121.651)、野柳站(25.206,121.689)和大坪站(25.167,121.638)。軌跡資料是以每個煙

陣濃度 10^{10}(無單位)為基礎，需要參照排放間隔時序進行單位轉換，調整後之軌跡濃度結果，以及測站位置，計算各測站之劑量時序，作為此測試的真實觀測資料。再進行核二廠假想案例的外釋射源回推，其模擬設定由 2018 年 11 月 19 日 00 時至 11 月 26 日 23 時，共 192 小時(8 天)，每 5 分鐘釋放一個活度為 10^{10} Bq/sec 的 Cs-137 煙陣，加入已知的觀測資料後，得到回推核二廠的釋放率如圖 7-26，與 JAEA 的釋放時序相互比較如圖 7-27，可以看到在 JAEA 推算出的 Cs-137 釋放率回推結果約落在10^{12}~10^{16}之間，而我們使用同樣釋放率於核二廠測試回推結果為10^{11}~10^{17}之間，與 JAEA 的結果很接近，且 R_3 為電廠 1 號機組與 3 號機組發生氫爆的時間區段，測試結果也有表現出來，在R_{10}2 號機組核子反應爐容器壓力抑制室周遭發生爆炸聲的區段處，釋放率回推高值區段皆能有很好的匹配。

最後測試根據 JAEA 的外釋時序，隨著 2018 年 11 月 19 日的氣象場，使煙陣到達核二廠附近偵測站的值，當作此次測試的真實觀測資料，隨後隨機加減 10%的誤差值，以假設事故發生時，隨著環境場的誤差及觀測誤差等等不可避免之原因，測試本研究對於誤差的表現如何，結果如圖 7-28，可知由於一些測站誤差使後來的結果，釋放率的震盪幅度較大一些，不連續的現象也較多，但大致高值的配置仍然有掌握到，且釋放率的級距沒有顯著的差異。

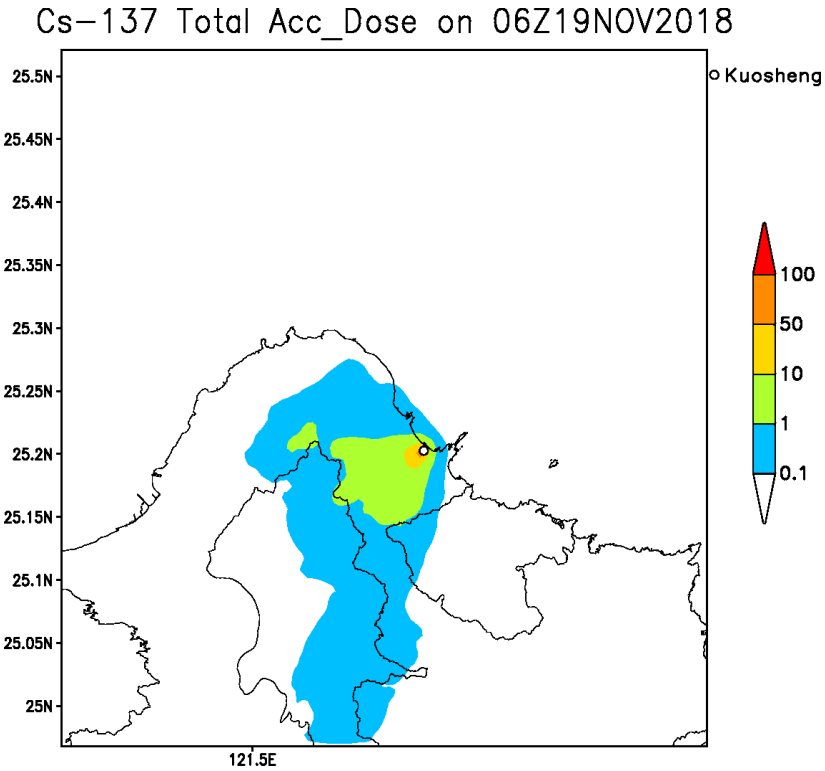


圖 7-24 核二廠 Cs-137 核種假想事故於 2018/11/19 七天有效劑量累積分布(mSv)

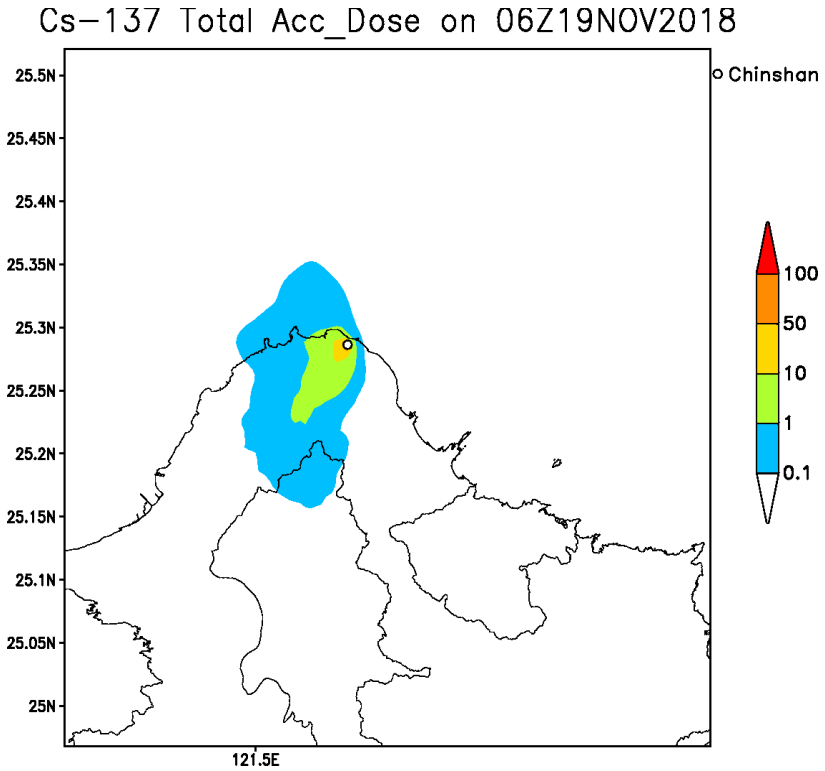


圖 7-25 核一廠 Cs-137 核種假想事故於 2018/11/19 七天有效劑量累積分布(mSv)

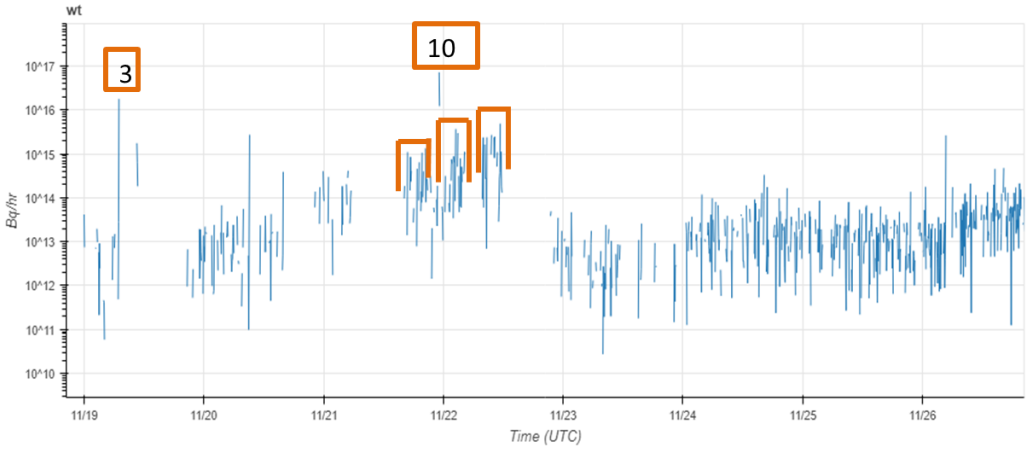


圖 7-26 福島事件外釋於核二廠後用臺灣測站回推出釋放率結果

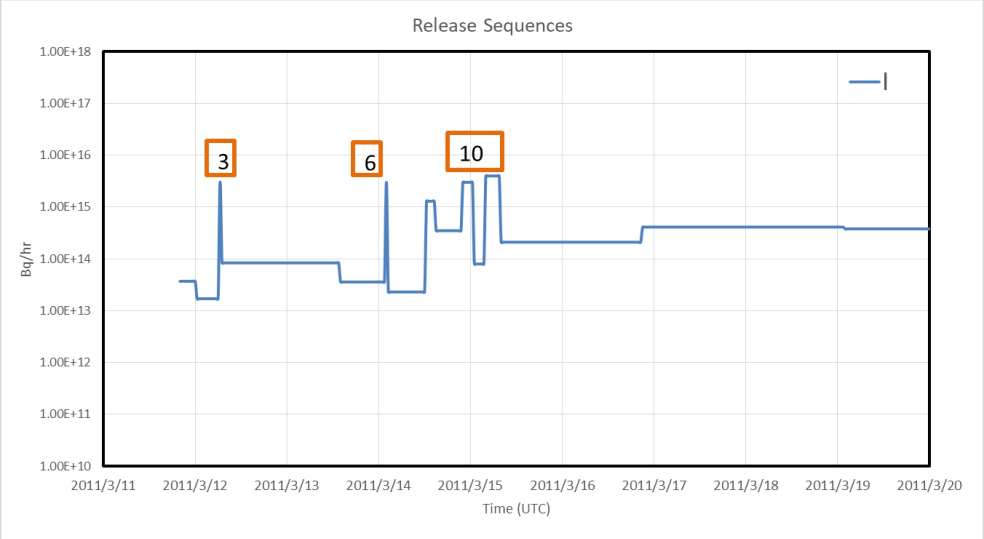


圖 7-27 JAEA 於福島事件 C-137 的釋放率

圖 7-28 Fig.A 為福島事件外釋於核二廠後，用臺灣測站回推釋放率結果，FigB 為將觀測資料加減 10%的誤差值後，計算回推後結果比較。

7.3.4. 射源回推自動化流程

射源項回推的部分，須由 A2Ct&d 提供煙陣軌跡、活度、大小、時間及位置(系統內為 nc 檔)，配合現有的觀測資料包括測站位置資訊(單個或多個 csv 檔)。將以上計算及步驟整合後，只須執行一程式(rls.sh),依照螢幕的步驟給予要計算的日期及檔案如圖 7-29，確認過後，即可自動化得到釋放率的結果。結果為一 html 檔案，可用各種瀏覽器開啟(如 IE、firefox 或 Chrome 等)，其圖可以自動放大縮小或點選單一測站放大比較，等較彈性看圖

功能提供使用者研究如圖 7-30。

```
[cwb_routine@rdc169 chu_test]$ sh rls.sh
Please input the day you want to run ex 20180101: 20181115
!!!!!This is your puff track file: puftrac20181115.nc
!!!!!This is your obs data of csv in the path : /home/cwb_routine/chu_test/TPE20181115
please give me the pufftrac you want to run:puftrac20181115.nc
it's csv file or path:/home/cwb_routine/chu_test/TPE20181115
```

圖 7-29 自動化執行步驟示意圖

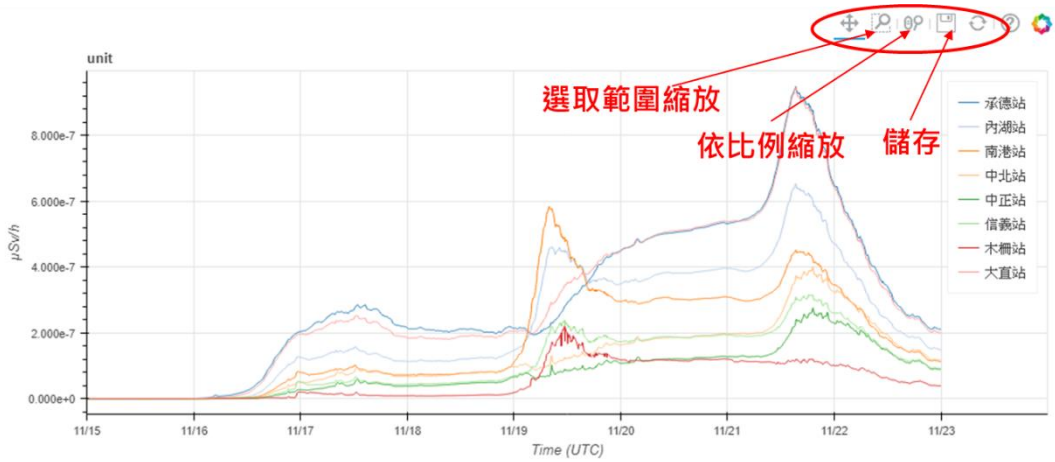
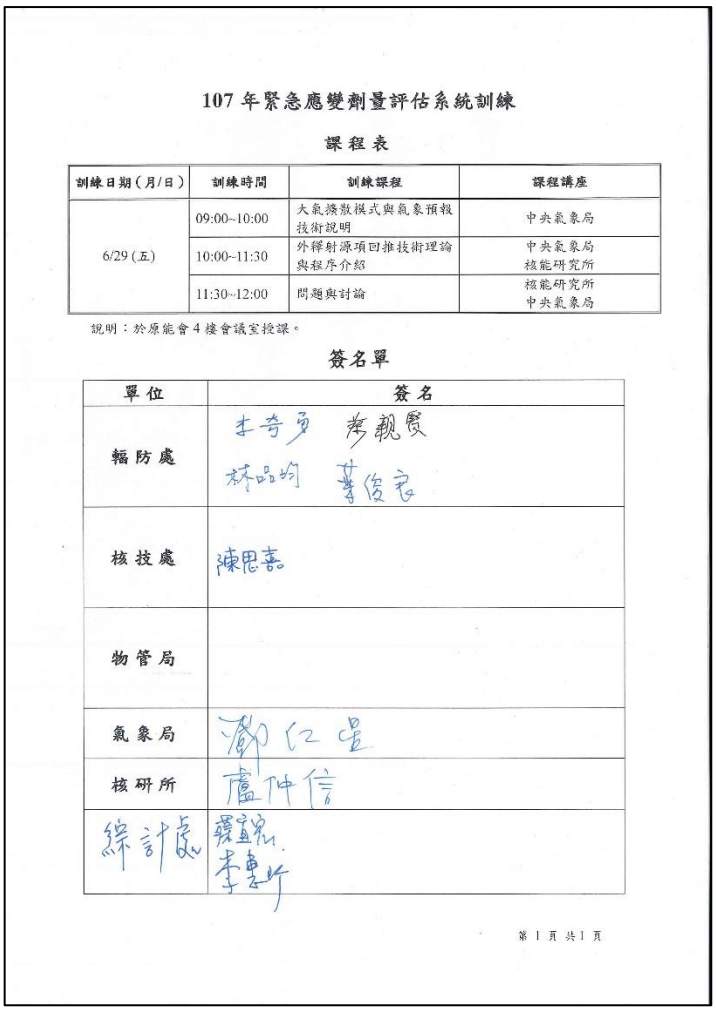


圖 7-30 射源回推結果顯示調整功能示意圖

8. 辦理系統操作與伺服器端例行運轉之維護訓練

8.1. 系統操作訓練課程

年度之劑量評估系統訓練課程分為理論說明與系統介紹，以及上機實作兩部分。於 107 年 6 月 29 日 9 點至 12 點辦理大氣擴散與氣象預報技術的說明，107 年 9 月 27 日 9 點至 12 點辦理劑量評估系統與外釋射源項程式實作課程，課程表與簽到單如圖 8-1 及圖 8-2。另本計畫配合年度核安演習緊急應變人員再訓練課程，針對劑量評估系統項目提供講師與教材，共計 4 場。



107 年緊急應變劑量評估系統訓練

課程表

訓練日期（月/日）	訓練時間	訓練課程	課程講座
6/29（五）	09:00~10:00	大氣擴散模式與氣象預報技術說明	中央氣象局
	10:00~11:30	外釋射源項回推技術理論與程序介紹	中央氣象局 核能研究所
	11:30~12:00	問題與討論	核能研究所 中央氣象局

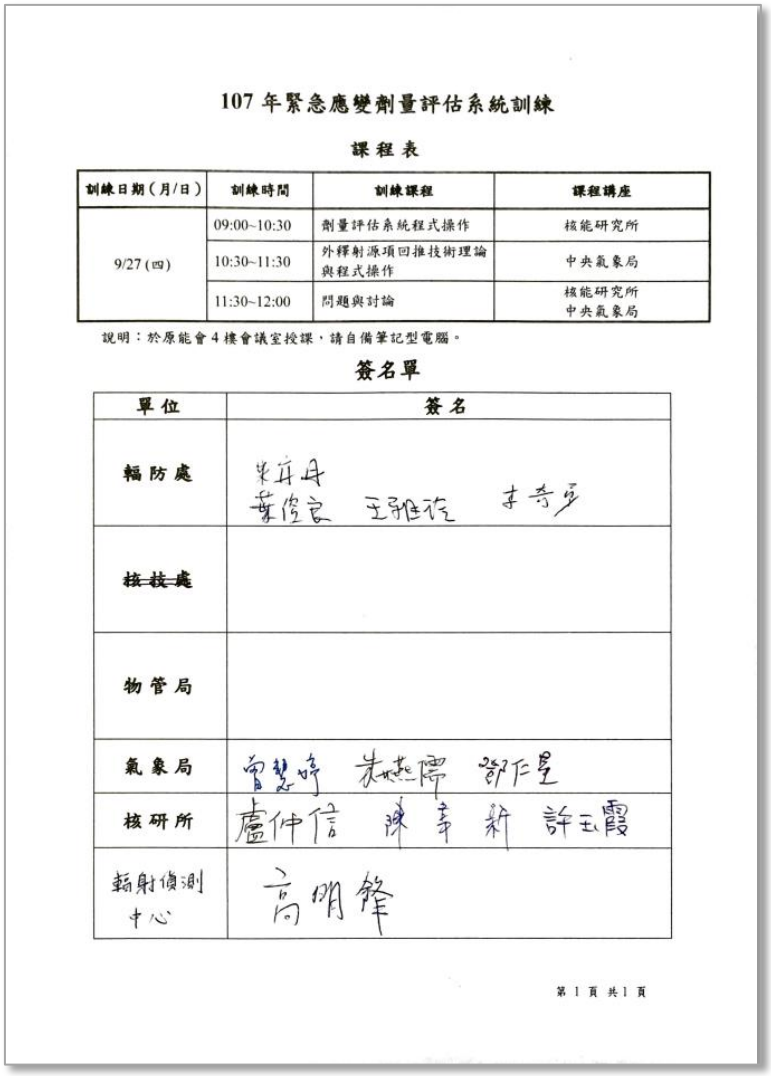
說明：於原能會 4 樓會議室授課。

簽名單

單位	簽名
輻防處	朱奇勇 李親賢 林品均 葉俊宏
核技處	陳思嘉
物管局	
氣象局	劉仁星
核研所	盧仲信
綜計處	賴宣榮 李惠玲

第 1 頁 共 1 頁

圖 8-1 107 年 06 月 29 日訓練課程表與簽到單



107 年緊急應變劑量評估系統訓練

課程表

訓練日期(月/日)	訓練時間	訓練課程	課程講座
9/27(四)	09:00~10:30	劑量評估系統程式操作	核能研究所
	10:30~11:30	外釋射源項回推技術理論與程式操作	中央氣象局
	11:30~12:00	問題與討論	核能研究所 中央氣象局

說明：於原能會4樓會議室授課，請自備筆記型電腦。

簽名單

單位	簽名
輻防處	朱井丹 葉俊宏 王雅筠 李奇夏
~~核技處~~	
物管局	
氣象局	曾慧婷 朱燕陳 鄧仁星
核研所	盧仲信 陳幸新 許玉霞
輻射偵測中心	高明鋒

第 1 頁 共 1 頁

圖 8-2 107 年 09 月 27 日訓練課程表與簽到單

8.2. 劑量評估系統維運

設置於原能會電腦機房儲存劑量評估系統氣象場資料庫之網路附加儲存系統(NAS)，經例行檢測發現二顆硬碟出現S.M.A.R.T. (Self-Monitoring Analysis and Reporting Technology)異常，本計畫協助更新異常硬碟，然經自動資料重建作業執行失敗，造成獨立磁碟備援陣列(Redundant Array of Independent Disks，RAID)損毀，因此在重建磁碟陣列系統後，透過位於輻射偵測中心的備援系統，將系統資料復原。

9. 劑量評估系統與嚴重核子事故評估系統整合之可行性評估

核子事故外釋輻射源項分析方法依核能電廠事故類別分成兩類，其一為設計基準事故(DBA)，其二為嚴重事故(Severe Accident)。

設計基準事故系針對大破口冷卻水流失 (DBA LOCA)，評估方式係根據美國核管會法規指引(US NRC Regulatory Guides)1.3 與 1.4 及核一、二、三廠終期安全分析報告 (Final Safety Analysis Report，FSAR) 第 15 章設計基準事故輻射劑量分析的基準，使用 ORIGEN2 程式並根據爐心設計來計算各廠全爐心分裂產物平衡盤存量，再使用 RADTRAD 程式建立 DBA LOCA 放射性核種傳輸及移除模型，計算事故第 1 天、第 2 天、3 天、第 4~7 天期間的累積外釋分率，前三項的排放時間為 24 小時，第四項的排放時間為 96 小時。

核電廠完整的安全度評估(Probabilistic Risk Assessment，PRA)依爐心放射性物質包封邊界與事故演進的情節可概分成三階段，分別為一階 (Level-l) 的反應器冷卻水系統(Reactor Coolant System，RCS)分析、二階(Level-2) 的圍阻體完整性及輻射源項分析，以及三階(Level-3) 的輻射外釋後果分析，嚴重事故源項分析則屬於延續於一階 PRA 之後的二階分析範疇。

嚴重事故外釋射源項評估主要為美國能源部所屬聖地亞(Sandia)國家實驗室研發之 MELCOR (Methods for Estimation of Leakages and Consequences of Releases)程式，及美國 Fauske & Associates, Inc. (FAI)公司所研發之 MAAP (Modular Accident Analysis Program)程式等兩

套程式。

另外美國核管會發展之RASCAL(Radiological Assessment System for Consequence AnaLysis)程式，是用來針對持核管會執照之核設施一旦發生放射性緊急事故時，進行預測劑量評估。RASCAL 計算核電廠事故射源項的方法主要是基於 NUREG-1228 報告所描述方式(Source Term Estimation During Incident Response to Severe Nuclear Power Plant Accident)。程式考慮核電廠一般參數、爐心與冷卻水中放射性核種盤存量、發生護套破損與爐心熔損時序和相關釋放比率、利用圍阻體輻射監測到的射源項、利用冷卻水取樣所評估射源項、外釋路徑模式與抑低機制等模式，以用來評估意外事故外釋射源項。

上述程式均具使用者圖形界面(GUI)程式，且在未取得原始程式碼的情況下，要與劑量評估系統進行跨系統整合難度很高，另程式整併也需獲得程式開發者授權。因此透過上述事估評估程式輸出之外釋射源項時序資料，利用中繼程式轉換成劑量評估系統可匯入的格式，為劑量評估系統與事估評估系統介接之可行方案。

表 9-1 為 MAAP 程式經整理後可提供之外釋射源項時序中一小部分資料，事估評估系統輸出時間以秒為單位，外釋活度單位為每秒之外釋率，核種以惰性氣體(NG)，碘(I)系，銣銫(Rb、Cs)系，銻碲(Sb、Te)系，鍶(Sr)系，釕(Ru)系，鑭(La)系，鈰(Ce)系，與鋇(Ba)系等 9 大類元素之總外釋率表示，因此還需經由各放射性核種之爐心盤存量(core inventory)比例換算，以得到個別放射性核種之外釋率。

表 9-2 為劑量評估系統外釋射源項輸入格式，採用 csv 的檔案格式，共有核種名稱，外釋起始時間，外釋結束時間，外釋率等 4 個欄位，同核種可以有多個連續或不連續的外釋時序，可經由中繼程式將事估評估系統輸出資料轉換成此格式匯入。

表 9-1 MAAP 輸出整理後之外釋射源項資料

事故時間	I-131 (μCi/Sec)	Kr-85 (μCi/Sec)	Xe-133 (μCi/Sec)	Cs-137 (μCi/Sec)
2016/9/13 08:30 T=3390	2.05E+00	1.87E+02	1.02E+06	7.20E+00
2016/9/13 12:00 T=3600	2.05E+00	1.87E+02	1.02E+06	7.20E+00
2016/9/14 07:00 T=4740	4.10E+01	1.54E+03	8.05E+06	1.05E+01
2016/9/14 08:00 T=4800	2.12E+03	1.92E+05	4.11E+07	7.28E+02
2016/9/14 08:30 T=4830	2.20E+03	2.00E+05	4.26E+07	7.56E+02
2016/9/14 09:00 T=4860	2.24E+03	2.03E+05	4.35E+07	7.70E+02
2016/9/14 09:30 T=4890	2.28E+03	2.07E+05	4.42E+07	7.84E+02

表 9-2 劑量評估系統射源項輸入格式

NAME,ST,ED,Q

CS-137,0,11520,1.0E10

CS-137,11520,23040,1.0E10

I-131,0,11520,1.0E10

I-131,11520,23040,1.5E10

CS-134,0,11520,1.0E10

CS-134,11520,23040,1.5E10

事估評估系統與劑量評估系統透過輸出資料介接，為兩系統協同作業的可行性作法，現階段可由主管機關統籌各技術研發單位，律定交換資料格式以及交換管道，以發揮系統最大效益。

10.總結

年度完成查核點工作項目如下：

1. 完成核三廠緊急應變計畫區250公尺、緊急應變準備區500公尺、60公里範圍1公里解析度之降尺度氣象預報系統建置。說明如3.1節與3.4節。
2. 完成核一廠緊急應變計畫區250公尺、緊急應變準備區500公尺、60公里範圍1公里及全臺範圍2.5公里解析度之劑量評估系統建置，以及假想事故案例分析。說明分別如3.3節與3.4節。
3. 統計各季節每日案例對於陸地行政區域之影響情況。說明如第4章。
4. 完成核一廠氣象資料庫類型劑量評估系統之氣象資料庫更新。說明如第5章。
5. 完成非傳統氣象觀測資料的氣象資料同化分析技術開發。說明如第6章。
6. 完成射源回推自動化程序建置與案例測試。說明分別如7.2節與7.3節。
7. 完成劑量評估系統年度訓練課程二場次，與資料庫類型劑量評估系統伺服器硬碟異常排除。說明分別如 8.1 及 8.2 節。
8. 評估劑量評估系統與嚴重核子事故評估系統整合之可行性。說明如第9章。

11.參考文獻

1. 曾忠一, 1997: 氣象資料同化, 渤海堂文化公司, 台北市.
2. 林書正,2012: ASCAT 衛星散射儀反演風場於熱帶氣旋環境下的誤差特徵。中國文化大學，碩士論文。
3. 張保亮、唐玉霜,2014:雙都卜勒雷達風場分析在侵台颱風海面風力估計之研究。
4. Bannai T. Regarding the evaluation of the conditions on reactor cores of Units 1, 2 and 3 related to the accident at Fukushima Dai-ichi nuclear power station. Tokyo Electric Power Co. Inc. Tokyo, Nuclear and Industrial Safety Agency, 2011.
5. Barnston, A. G., M. H. Glantz, and Y. He, 1999: Predictive skill of statistical and dynamical climate models in SST forecasts during the 1997/98 El Ninõ episode and the 1998 La Ninã onset. Bull. Amer. Meteor. Soc., 80, 217–243.
6. Bentamy, A., D. Cooize-Fillon, Croize-Fillon, and C.Perigaud, 2008: Characterization of ASCAT measurements based on buoy and QuikSCAT wind vector observations. Ocean Sci., 4, 265-274.
7. Bürger G. 1996. Expanded downscaling for generating local weather scenarios. Climate Research 7: 111–128.
8. Beljaars, A. C. M., 1995: The parametrization of surface fluxes in large-scale models under free convection. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 121, 255–270.
9. Blackadar, A. K., 1976: Modeling the nocturnal boundary layer. Preprints, Third Symp. on Atmospheric Turbulence, Diffusion,

and Air Quality, Raleigh, NC, Amer. Meteor. Soc., 46–49.

10. Blackadar, A. K., 1979: High-resolution models of the planetary boundary layer. Advances in Environmental Science and Engineering, J. R. Pfafflin and E. N. Ziegler, Eds., Gordon and Breach Science Publishers, 50–85.
11. Businger, J. A., Wyngaard, J. C., Izumi, Y., and Bradley, E. E, 1971: Flux-Profile Relationships, J. Atmos. Sci., 28, 181-189.
12. Businger, J. A., 1973: A note on free convection. Boundary-Layer Meteorol., 4,323-326
13. Bannai T. Regarding the evaluation of the conditions on reactor cores of Units 1, 2 and 3 related to the accident at Fukushima Dai-ichi nuclear power station. Tokyo Electric Power Co. Inc. Tokyo, Nuclear and Industrial Safety Agency, 2011.
14. Carlson, T. N., and F. E. Boland, 1978: Analysis of urban-rural canopy using a surface heat flux/temperature model. J. Appl.Meteor., 17, 998–1013.
15. Cavazos T, Hewitson BC. 2005. Performance of NCEP-NCAR reanalysis variables in statistical downscaling of daily precipitation. Climate Research 28: 95–107.
16. Cervone G., and Franzese P., Source Term Estimation for the 2011 Fukushima Nuclear Accident, Workshop: Methods for Estimating Radiation Release from Fukushima Daiichi, NCAR Boulder, CO, February 2012.
17. Chino M et al. Preliminary estimation of release amounts of 131I and 137Cs accidentally discharged from the Fukushima Daiichi nuclear power plant into the atmosphere. Journal of Nuclear Science and Technology, 2011, 48(7):1129−1134.
18. Chou, K.-H.; Wu, C.-C.; Lin, S.-Z. Assessment of the ASCAT

wind error characteristics by global dropwindsonde observations. J. Geophys. Res. 2013, 118, 9011–9021.

19. Chu, J.L., et al., Seasonal forecast for local precipitation over northern Taiwan using statistical downscaling. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2008. 113(D12)
20. Collins, W. G., and L. S. Gandin, 1990: Comprehensive quality control at the National Meteorological Center. Mon. Wea. Rev., 118, 2752– 2767.
21. Deardoff, J. W., 1968: Dependence if air-sea transfer coefficients on bulk stability. J.Geophys. Res., 73, 2549-2557
22. Dyer, A. J., 1967: The turbulent transport of heat and water vapor in unstable atmosphere. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 93, 501–508., 1974: A review of flux-profile relationships. Bound.-Layer Meteor., 7, 363–372
23. Díez E, Primo C, García-Moya JA, Guttiérez JM, Orfila B. 2005. Statistical and dynamical downscaling of precipitation over Spain from DEMETER seasonal forecasts. Tellus Series A-Dynamic Meteorology and Oceanography 57(3): 409–423.
24. F. Bruijn, and H.-L. Pan, 1990: A high resolution air mass transformation model for short-range weather forecasting. Mon.Wea. Rev., 118, 1561-1575.
25. Fowler, H.J., S. Blenkinsop, and C. Tebaldi, 2007 Linking climate change modelling to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling. International Journal of Climatology, 27(12): 1547-1578.
26. Frei C, Christensen JH, D´equ´e M, Jacob D, Jones RG, Vidale PL.2003. Daily precipitation statistics in regional climate models: evaluation and intercomparison for the European Alps.

Journal of Geophysical Research 108(D3): 4124, DOI: 10.1029/2002JD002287.

27. Giorgi F, Hewitson BC. 2001. Regional climate information – evaluation and projections. In Climate Change 2001: The Scientific Basis. C, Houghton JT, Ding Y, Griggs DJ, Noguer M, van der Linden PJ, Dia X, Maskell K, Johnson CA (eds). Cambridge University Press: Cambridge.
28. Grotch SL, MacCracken MC. 1991. The use of general circulation models to predict regional climatic change. Journal of Climate 4:286–303.
29. Grell, G. A., J. Dudhia, and D. R. Stauffer, 1994: A description of the fifth-generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5). NCAR Tech. Note NCAR TN-398-1-STR, 117 pp.
30. Godfrey, J. S. and Beljaars, A. C. M., 1991: On the turbulent fluxes of buoyancy, heat and moisture at the air-sea interface at low wind speeds. J. Geophys. Res., 96, 22043-22048
31. Haylock, M.R., et al., Downscaling heavy precipitation over the United Kingdom: A comparison of dynamical and statistical methods and their future scenarios. International Journal of Climatology, 2006. 26(10): 1397-1415.
32. Holtslag, A. A. M., and B. A. Boville, 1993: Local versus nonlocal boundary-layer diffusion in a global climate model. J. Climate, 6, 1825–1842.
33. Holtslag, A. A. M., F. Bruijn, and H.-L. Pan, 1990: A high resolution air mass transformation model for short-range weather forecasting. Mon.Wea. Rev., 118, 1561-1575.
34. Hong, S.-Y., and H.-L. Pan, 1996: Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a Medium-Range Forecast model.

Mon.Wea. Rev., 124, 2322–2339.

35. Huth R. 1999. Statistical downscaling in central Europe: evaluation of methods and potential predictors. Climate Research 13: 91–101.
36. Kang, H., et al., Multimodel output statistical downscaling prediction of precipitation in the Philippines and Thailand. Geophysical Research Letters,2007. 34(15)
37. Katata, G, Ota, M, Terada, H, Chino, M and Nagai, H. 2012. Atmospheric discharge and dispersion of radionuclides during the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident. Part I: source term estimation and local-scale atmospheric dispersion in early phase of the accident. Journal of Environmental Radioactivity, 109: 103–113.
38. Local Analysis and Prediction System -README (LAPS) http://laps.noaa.gov/
39. Lorenz, E. N., 1960: Energy and numerical weather prediction. Tellus, 12, 364–373.
40. Louis, J. F., 1979: A parametric model of vertical eddy fluxes in the atmosphere. Bound.-Layer Meteor., 17, 187–202
41. Murphy J. 2000. Predictions of climate change over Europe using statistical and dynamical downscaling techniques. International Journal of Climatology 20: 489–501.
42. Mahrt, L., and J. Sun, 1995: The subgrid velocity scale in the bulk aerodynamic relationship for spatially averaged scalar fluxes. Mon. Wea. Rev., 123, 3032–3041.
43. Monin, A. S. and Obukhov, A. M., 1954: Osnovnye zakonomernosti turbulentnogo peremesivanijav prizemnom sloe atmosfery. (Dimensionless Characteristics of Turbulence in the

Surface Layer of the Atmosphere. In Russian. Trudy Geofiz. Inst. Akad. Nauk. SSSR. 24, 163-187.

44. Prudhomme C, Reynard N, Crooks S. 2002. Downscaling of global climate models for flood frequency analysis: Where are we now? Hydrological Processes 16: 1137–1150.
45. Roland R. Draxler, “descriptionof thehysplit_4 modelingsystem,“Air Resources Laboratory,Silver Spring, Maryland,Dec.1997.
46. Sasaki YK., 1969: Proposed inclusion of time-variation terms, observational and theoretical in numerical variational objective analysis. J Meteor Soc Japan 47:115–203
47. Sasaki YK., 1970a: Some basic formalisms in numerical variational analysis. Mon Wea Rev 98:857–883
48. Sasaki YK., 1970b: Numerical variational analysis formulated under the constraints as determined by long-wave equations as a low-pass filter. Mon Wea Rev 98:884–898
49. Sasaki YK., 1970c: Numerical variational analysis with weak constraint and application to the surface analysis of severe storm gust. Mon Wea Rev 98:899–910
50. Song-You Hong, Yign Noh, and Jimy Dudhia, 2006: A New Vertical Diffusion Package with an Explicit Treatment of Entrainment Processes. Mon. Wea. Rev., 134, 2318–2341.
51. Steinacker, R., M. Ratheiser, B. Bica, B. Chimani, M. Dorninger, W. Gepp, C. Lotteraner, S. Schneider and S. Tschannett, 2006: A mesoscale data analysis and downscaling method over complex terrain, Monthly Weather Review, 134, 2758-2771; doi: 10.1175/MWR 3196.1.
52. Syu, H.H., J.D. Neelin, and D. Gutzler, Seasonal and

Interannual Variability in a Hybrid Coupled GCM. Journal of Climate, 1995. 8(9): 2121-2143.

53. TEPCO, Tokyo Electric Power Company, 2011. Additional Monitoring Data at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station. http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/11052811-e.html (accessed 18.11.11.).
54. Terada, H., G. Katata, M. Chino, and H. Nagai (2012), Atmospheric discharge and dispersion of radionuclides during the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident. Part II: Verification of the source term and analysis of regional-scale atmospheric dispersion, J. Environ. Radioact., 112, 141–154
55. Timbal, B., A. Dufour, and B. McAvaney,2003. An estimate of future climate change for western France using a statistical downscaling technique. Climate Dynamics, 20(7-8):807-823.
56. Troen, I., and L. Mahrt, 1986: A simple model of the atmospheric boundary layer; sensitivity to surface evaporation. Bound.-Layer Meteor., 37, 129–148.
57. Verspeek J A, Stoffelen A, Portabella M,et al. Validation and calibration of ASCAT using CMOD5.n[J]. Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(1): 386-395.
58. Verspeek J A, Portabella M, Stoffelen,et al. Calibration and Validation of ASCAT Winds[R]. OSI SAF Technical Report SAF/ OSI/ KNMI/ TEC/ TN/163, 2011.
59. Verspeek J A, Stoffelen A, Portabella M,et al. Validation and calibration of ASCAT using CMOD5.n[J]. Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(1): 386-395.
60. Von Storch, H., E. Zorita and U. Cubasch, 1993: Downscaling of global climate change estimates to regional scales: An

application to Iberian rainfall in wintertime. J. Climate 6: 1161-1171

61. Wilby RL, Charles SP, Zorita E, Timbal B, Whetton P, Mearns LO (2004) Guidelines for use of climate scenarios developed from statistical downscaling methods: supporting material of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Task Group on Data and Scenario Support for Impacts and Climate Analysis.
62. Wilby RL, Wigley TML. 1997. Downscaling general circulation model output: a review of methods and limitations. Physical Geography 21: 530–548.
63. Wilby RL, Conway D, Jones PD. 2002a. Prospects for downscaling seasonal precipitation variability using conditioned weather generator parameters. Hydrological Processes 16: 1215–1234.
64. Wood AW, Leung LR, Sridhar V, Lettenmaier DP. 2004. Hydrologic implications of dynamical and statistical approaches to downscaling climate model outputs. Climatic Change 62: 189–216.
65. Xie, Y., S. Koch, J. McGinley, S. Albers, P. E. Bieringer, M. Wolfson, and M. Chan, 2011: A space–time multiscale analysis system: A sequential variational analysis approach. Mon. Wea. Rev., 139, 1224–1240.
66. Xue Y, Vasic R, Janjic Z, Mesinger F, Mitchell KE, 2007: Assessment of dynamic downscaling of the continental US regional climate using the Eta/SSiB regional climate model. J Clim 20(16):4172–4193
67. Yamada, T. and S. Bunker, 1988: Development of a Nest Grid, Second Moment Turbulence Closure Model and Application to

the 1982 ASCOT Brush Creek Data Simulation. J. Appl. Meteor.,27, 562-578.

68. Y. -L. Lin, N. -H. Lin, R. P. Weglarz. (1992) Numerical modeling studies of lee mesolows, mesovortices and mesocyclones with application to the formation of Taiwan mesolows. Meteorology and Atmospheric Physics 49:1-4, 43-67.
69. Zhang, D. L., and R. A. Anthes, 1982: A high-resolution model of the planetary boundary layer—Sensitivity tests and comparisons with SESAME-79 data. J. Appl. Meteor., 21, 1594–1609.