

國際核災劑量評估系統開發及其在福島事故之模擬研究

曾慧婷 鄧仁星 蔡宗樺 王建勛 簡榮佑

中央氣象局 氣象科技研究中心

摘要

核電廠的安全始終是核能發展重要的一環，台灣過去在核電廠緊急應變評估系統中的劑量評估系統，主要是針對國內的核電廠所設計，但由歷史上的車諾比事件以及 2011 年發生之福島事件，嚴重核事故的發生，將會造成鄰近國家汙染，並且隨著時間推移影響全世界。而我們台灣附近之日本、韓國和大陸沿岸都有為數不少的核電廠，因此發展具備長程傳輸的擴散模擬的劑量評估系統，為我們目前以及未來重要的目標。

現今國內劑量評估系統中的大氣擴散模式，是採用日本 Yamada 團隊所發展之 A2Ct&d 模式 (Atmosphere to Computational Fluid Dynamics- transport and diffusion) 模式，模式本身是屬於中小尺度，較大尺度的模擬則會受限於模式本身使用的 UTM(Universal Transverse Mercator Projection System) 座標，會使得模擬的範圍選取有所限制，因此在開發時將座標改成經緯度座標，並參考美國國家海洋及大氣管理局/大氣資源實驗室(National Oceanic and Atmospheric Administration / Air Resources Laboratory, NOAA/ARL) 開發的 HYSPLIT 模式 (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model) 長程擴散及沉降機制，目的是希望劑量評估系統中新一代大氣擴散系統能夠兼備中小尺度及大尺度的模擬，使一套模擬系統能符合更多作業上需求。

本文中以日本福島事件做為本系統開發的驗證案例，參照 Terada et al.(2012) 計算回推的釋放源資料進行模擬，使用解析度 0.5 度的 ncep GFS 模式資料，亦使用經過降尺度系統處理之高解析度氣象場資料進行模擬。主要比對事件發生後 124 小時(2011/03/11 20UTC~2011/03/17 00UTC) 銻 137 的沉降分布的模擬結果，其中 3/14 日銻 137 沉降量量值在 10 萬 Bq/m² 以上的分布範圍可距離福島電廠南方 10 公里，而日本 WSPEEDI(Worldwide Version of System for Prediction of Environmental Emergency Dose Information) 模擬結果(Katata et. al. 2012) 銻 137 沉降量分布約距離福島電廠南方 20 公里左右，且電廠附近的極值都可以達到 100 萬 Bq/m²，結果頗為一致。另外，也利用了這樣的參數設定，將福島事件的銻 137 釋放量時序變化套用在台灣，將釋放點改為龍門電廠進行模擬，假設龍門電廠發商類似的事故時，探討台灣的局部環流及地形對放射性汙染物的擴散及傳輸造成甚麼樣的影響。模擬結果發現，由於雪山山脈及中央山脈與龍門電廠相對位置，造成在台灣的兩側有兩股向南之大氣擴散驅動力，銻 137 除了在電廠附近有較大的沉降量外，在蘭陽平原南端，約北緯 24.5 度以南受到山脈阻擋，也有一個沉降量累積較多的區域。

關鍵字:A2Ct&d,HYSPLIT,日本福島事件

一、前言

以往我國將核能安全聚焦在國內核電廠上，因此在此在原子能委員會核研所(以下簡稱核研所)與交通部中

央氣象局(以下簡稱氣象局)的合作下，建立了一套專屬於國內各個核電廠的「核子事故緊急應變劑量評估系統」，此系統透過全自動更新之核電廠預報資料，將各個核電廠之氣象資料庫進行混合風場內

插，得到未來 8 天預報場，結合數值地形之三維小尺度大氣擴散模式分析計算，再利用大氣擴散分析結果，引入放射性核種釋放量，執行網格劑量的運算，評估可減免劑量的結果，與採行民眾防護行動措施建議時間，提供決策者參考。

然而綜觀古今，在核能發電後有幾起嚴重的核電廠核安事故，其中早期較為著名的車諾比事件，近期則是日本福島事件，其事故發生之後，放射性物質除在本地造成嚴重汙染外，隨著天氣系統以及大氣環流，這些放射性物質也會隨著漂洋過海，對鄰近國家，甚至全世界造成影響。然而，造成多大的影響，僅透過一些國內與國際間之學術組織，其片面發布輻射塵隨大氣擴散在全球傳輸模擬預估結果，並未對模擬條件與使用參數多做說明，加上媒體報導時容易有資訊傳遞錯誤之嫌，容易造成民眾過度之恐慌，對社會經濟帶來衝擊。

在台灣，除了國內之核電廠外，鄰近國家如大陸沿岸、日本、韓國都有多座核電廠，尤其，台灣海峽之距離僅幾百公里，若其核電廠發生事故，對我國具有相當的影響，因此，我國亟需發展一套具備長程傳輸擴散模擬能力之國際核災緊急應變劑量評估系統，由其模擬結果再經由專家的分析評估，傳遞正確的資訊，採取相關應變措施，避免不必要之恐慌，消除民眾之疑慮。

二、模式開發

沿用現行劑量評估系統中的大氣擴散模式：

A2Ct&d 模式，對其模式進行長程傳輸擴散能力的建立，以及模式優化，使模式除了能夠符合例行的作業化系統，在進行個案研究時，也能有很好的應用。

在長程擴散傳輸的部分，希望建立一個多重巢狀網格的模擬，在事故發生地區及所關注地區都能夠有高解析度的模式，在兩高解析度模擬範圍之外會有一個全球的模擬範圍進行長程擴散的汙染物傳遞過程。因此，將原 Yamada 團隊建立在 UTM 座標底下之中小尺度擴散模式，即 A2Ct&d 模式，改成經緯度座標，如此一來，在最外層的模擬範圍的氣象場資料即可很方便的採用全球模式預報資料進行

模擬。而高解析度模擬地區的氣象場則可使用經過降尺度系統之全球預報模式資料，或者是區域模式資料。並且在長程傳輸的部分參考了 Hysplit 模式第四版當中，煙陣從低解析度進入到高解析度的模擬範圍時，會進行煙陣分裂，將一個大煙陣在垂直和水平方向皆進行煙陣的分裂，水平方向會分裂成 4~5 個小煙陣，垂直方向煙陣的分裂個數，則由原本的大煙陣涵蓋了幾層垂直層而定，這樣一來，汙染物的擴散才能符合高解析度之氣象場變化和地形之作用。

在程式優化部分，引入了乾濕沉降的作用計算地表沉降量、加入多時序多源之釋放源、藉由各個核種之轉換因子的引入，可直接由模式輸出之地表濃度和地表沉降計算放射性核種之有效劑量及等價劑量，圖 1 中左半部為原 Yamada et. al. 之 A2Ct&d 模式和新一代 A2C t&d 模式之演進。

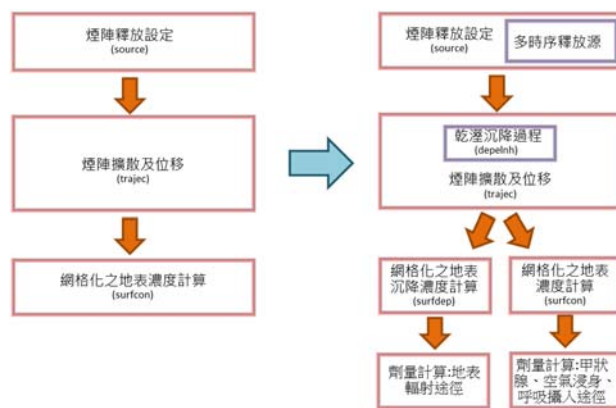


圖 1 原版 A2Ct&d 模式的簡化流程(左圖)及新一代 A2Ct&d 模式的簡化流程(右圖)，其中括弧中代表的是模式所使用之副程式名稱。

乾濕沉降作用對於核災之擴散模擬實為相當重要的煙陣過程，因此本模式參考了Hysplit模式第四版中的乾濕沉降計算方法。乾沉降效應移除之質量計算當煙陣底的位置或粒子的中心位在地表層中，才進行計算，其地表層通常指的是氣象模式中第二層高度層內。當假設沉積層中汙染物的垂直濃度分布為均勻的，則乾沉降的質量沉降可被計算

$$Ddry = Vd C$$

式中Vd為乾沉降速度，C為原本煙陣之質量。因為假設在垂直方向為top-hat分布，且汙染層的深度為 ΔZp ，相等於 $\pm 1.54 \sigma z$ 。在粒子的計算中，被定義為

地面層的深度。沉降速度被轉換成時間常數形式：

$$\beta_{dry} = Vd/\Delta Zp$$

其中，沉降速度在輸入或沉積速度計算時被直接指定。

濕沉降的計算可用含有雲過程的清除比來表示，此清除比指的就是污染物在水中濃度和污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⁻¹)。雲內沉降的時間常數為

$$\beta_{inc} = Ft Fb V_{inc} \Delta Zp^{-1}$$

其中，S=3.2x10⁵為單位體積的平均清除比，ΔZp為污染層的厚度，將會有不同的清除比。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

$$\beta_{bel} = 5 \times 10^{-5} (1.0 - Fb)$$

空氣的濕沉降取決於其溶解度而較不活躍的氣體可視其 Henry's Law constant (Molar atm⁻¹) 方程式而定，其為水中和空氣中污染物平衡濃度的比值。

由日本 311 核災的經驗中，可知道當天然災害來臨時，核電廠各個機組可能先後受到損害，並且因為各個機組所承受的情況不同，當有核外洩的情形發生時，隨著時間會有不同程度的污染釋放出來，因此在擴散模擬時，連續相同濃度的釋放源已不敷使用，在新一代的 A2Ct&d 當中，修改程式將釋放源濃度的這個變數改為二維的儲存方式，分別為不同釋放地點及不同濃度，在每一次釋放出新的煙陣時，就會依照釋放時間的不同，讀取不同的釋放率。其輸入的濃度設定檔(durationinp)如圖 2。

隨著時間變化，各種放射性核種因不同的半衰期，各個放射性核種間的比例就會與煙陣剛釋放時不同，若要把每個煙陣當中每一個放射性核種在每一個時間的濃度記錄下來則會耗費太多記憶體，為克服這個問題，模式將設計成，在煙陣沉降時，各個放射性物種才進行半衰期的計算，以及直接乘上各種劑量的轉換因子(DCF)，包含有呼吸攝入(DCF_{inh})、空氣浸身(DCF_{sub})、地表輻射(DCF_{gnd})和甲狀腺等價劑量(DCF_{thy})，得到網格化的劑量結果，其計算過程

如(1)~(3)式，(1)式是利用地表濃度(surfcon,Bq/m³)所計算包含了呼吸攝入及空氣浸身兩種途徑之全身劑量率，(2)式是利用地表沉降(surfdep,Bq/m²)計算出地表輻射途徑之全身劑量率，(3)式為呼吸途徑之甲狀腺劑量率，亦是由地表濃度計算而來。

$$Dose_{inh+sub} = surfcon \times [Br \times DCF_{inh} + DCF_{sub}] \frac{\exp[-\lambda t] [1 - \exp(-\lambda t e)]}{\lambda} \quad (1)$$

$$Dose_{gnd} = surfdep \times \exp(-\lambda t a) \times t e \times \exp((-\lambda t_1 - t) t e) \times \frac{1}{\lambda} (1 - \exp(-\lambda t e)) \times DCF_{gnd} \quad (2)$$

$$Dose_{thy} = surfcon \times Br \times DCF_{thy} \frac{\exp[-\lambda t a] [1 - \exp(-\lambda t e)]}{\lambda} \quad (3)$$

式子中，Br 為一般人呼吸率 1.224 m³/hr，λ 為衰變係數，t 為計算煙陣的時間點，ta 則為煙陣自釋放出至網格點的時間點，te 劑量累積的時間長度，地表沉降除了新沉降的劑量率須計算外，也需考慮原本殘留在的地表的放射性污染物產生的劑量，因此 t1 代表已經沉降在此網格中的放射性物質自其沉降時至此刻又經過多少時間。

Location	sd	ed	sd	ed	rate (/s)
s1 (10)					
20110312	0500	20110312	0930		3.0555E+09
20110312	0930	20110312	1530		1.3888E+09
20110312	1530	20110312	1600		2.4722E+11
20110312	1600	20110313	0000		6.3888E+09
20110313	0000	20110313	1100		7.7777E+09
20110313	1100	20110313	1500		9.1666E+09
20110313	1500	20110313	2300		1.0277E+10
20110313	2300	20110314	1100		3.0555E+09
20110314	1100	20110314	1900		6.9444E+09
20110314	1900	20110314	2130		1.1666E+09
s2 (10)					
20110312	0500	20110312	1000		6.6666E+10
20110312	1000	20110312	1500		2.0277E+09
20110312	1500	20110312	1730		1.5277E+11
20110312	1730	20110312	2200		4.1666E+09
20110312	2200	20110313	0330		2.0277E+11
20110313	0330	20110313	0800		3.3333E+09
20110313	0800	20110313	1100		2.7500E+09
20110313	1100	20110313	1700		1.5277E+09
20110313	1700	20110314	0130		2.2777E+09
20110314	0130	20110314	2130		3.3333E+09

圖 2 由左而右是每個不同時間不同的濃度釋放的初始日期(年、月、日)，初始時間(小時、分鐘)，結束日期(年、月、日)結束時間(小時、分鐘)，最後則為不同的濃度釋放率(g/s 或 Bq/s)，分別有兩個不同的釋放地點(S1、S2)。

在現行的劑量評估系統當中，是藉由地表濃度來進行各種劑量的轉換計算，然而，煙陣受到沉降之後會在地表上累積，在空氣中的濃度也會減少，在新一代的 A2Ct&d 模式中，考慮了以上的煙陣過程(如

圖 3)，並且直接在程式當中引入了各種核種的半衰期及各種轉換因子，計算出更合理、真實之劑量結果。圖 3 當中即為目前國際核災劑量評估系統的作業流程，上半部分為可使用之氣象場資料，氣象場資料與地形地表資料等之整合，下半部分則為大氣擴散模式與劑量評估之計算流程。

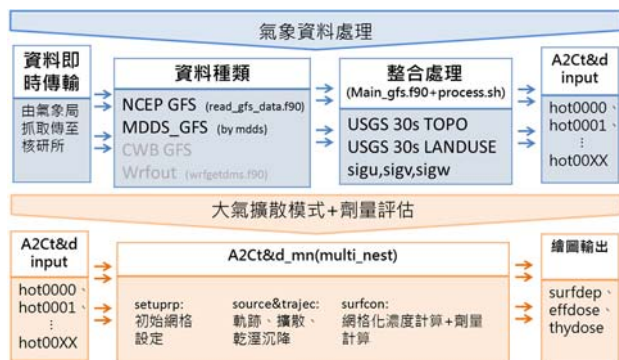


圖 3 國際核災劑量評估系統流程

三、研究個案:福島事件

福島事件是繼 1986 年車諾比事件以來，近期一個嚴重的核安事故，由地震引起的複合式災害，在 2011 年 3 月 11 日日本時間下午兩點 46 分，日本東方外海發生規模 9.0 的強震，地震後引發了強烈的海嘯，超過 15000 人因此喪生。在地震發生時，福島第一核電廠的第 1、2、3 號機組是正常運轉中，而 4、5、6 號機組則是例行停機維修中，地震發生後，前三部反應爐立即進入冷停機狀態，停止核分裂的鏈鎖反應，進行爐心冷卻，然而地震引發的海嘯隨之而來，海嘯癱瘓了核電廠的緊急供電系統，使得核電廠的冷卻系統無法正常運作，核電廠的反應爐因溫度不斷升高而爐心熔毀，而在搶救恢復冷卻系統時，發生了 2 次氫爆事件，以及計劃性的壓力釋放，造成核災初期有幾個短暫但輻射物質大量外洩的事件發生。

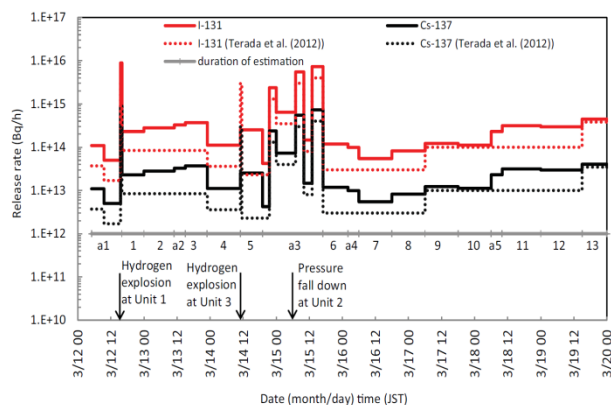


圖 4 Kobayashi et al. 2013 針對福島事件反推之釋放源時序圖。紅線代表為碘 131，黑線代表為銫 137，實線是 Kobayashi et al. 2013 的反演結果，虛線是 Terada et al 2012 的反演結果。(圖片來源: Kobayashi et al. 2013)

災後，各界學者利用觀測資料以及模式模擬推估，反推出放射性汙染物釋放量的時序變化，如圖 4，從圖中指出幾個氫爆事件和計畫性的壓力釋放的時間點，與其相對應釋放出的大量放射性汙染物濃度的量級。本文中進行新一代 A2Ct&d 模式模擬時，進行了兩個個案的模擬，一個是日本福島事件的模擬，且為了與 Terada et. al.(2012) 使用日本 WSPEEDI 的模擬結果比較，同樣使用 Terada et. al.(2012) 年釋放量回推結果(如圖 4 中的黑色虛線)，其詳細的釋放時間及釋放量則如表 1 的紅色框。另一個是將福島事件銫 137 釋放量時序變化，套用在台灣的龍門電廠進行模擬，此釋放量時序變化採用的是 Kobayashi et. al.(2013) 在得到海上的觀測資料後，重新進行回推反演的釋放量結果，其結果之釋放量較 Terada et. al.(2012) 的較多(如圖 4 中的黑色實線)

表 1 摘自 Kobayashi et. al.(2013) 與 Terada et. al.(2012)回推福島事件放射性核種 Cs137 之釋放量結果。

氣象場資料使用了 NCEP GFS 解析度 0.5 度的資料(720*361)，和經過降尺度系統處理之日本地區 NCEP GFS 氣象場分別有兩公里(121*121)和一公里(121*121)的解析度。網格設計如圖 5，模擬的時間即從放射性汙染物開始釋出的 12 日 0500JST 開始，至 17 日 0900JST 為止，共 124 小時的模擬。

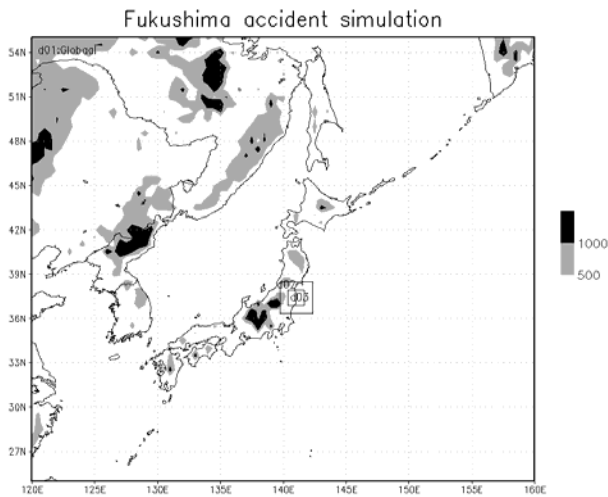


圖 5 新一代 A2Ct&d 模式模擬範圍，共有 3 個模擬範圍，解析度分別為 0.5 度、2 公里、1 公里。色階代表地形高度。

在這五天當中，有兩個氫氣爆炸及壓力釋放事件，有較大的釋放量出現，其中選取了 3 月 14 日 (2011/3/14 09JST~2011/3/14 09JST)福島電廠三號機組氫氣爆炸事件之模擬，與日本 WSPEEDI 使用相同的釋放量之模擬結果進行地表沉降量的比對，圖 6(a)為 A2Ct&d 模式模擬結果，圖 6(b)為 WSPEEDI 之模擬結果。在 14 號這天 A2Ct&d 模式與 WSPEEDI 的模擬顯示這天的 Cs-137 沉降量主要都是往福島電廠的南南西方進行傳輸和擴散，兩者的沉降量都可達 10 萬 Bq/m² 以上，A2Ct&d 模式的 10 萬 Bq/m² 等值線大約可達 37.3°N 略近於 WSPEEDI 之 37.2°N，但大致上的傳輸方向與 WSPEEDI 的結果頗為相同。在同為 1 公里解析度，較小的模擬範圍的結果比較，兩者的極值都達到了 100 萬 Bq/m² 以上(圖略)，顯示新一代的 A2Ct&d 模式具備有這樣的能力進行這類事件的模擬。

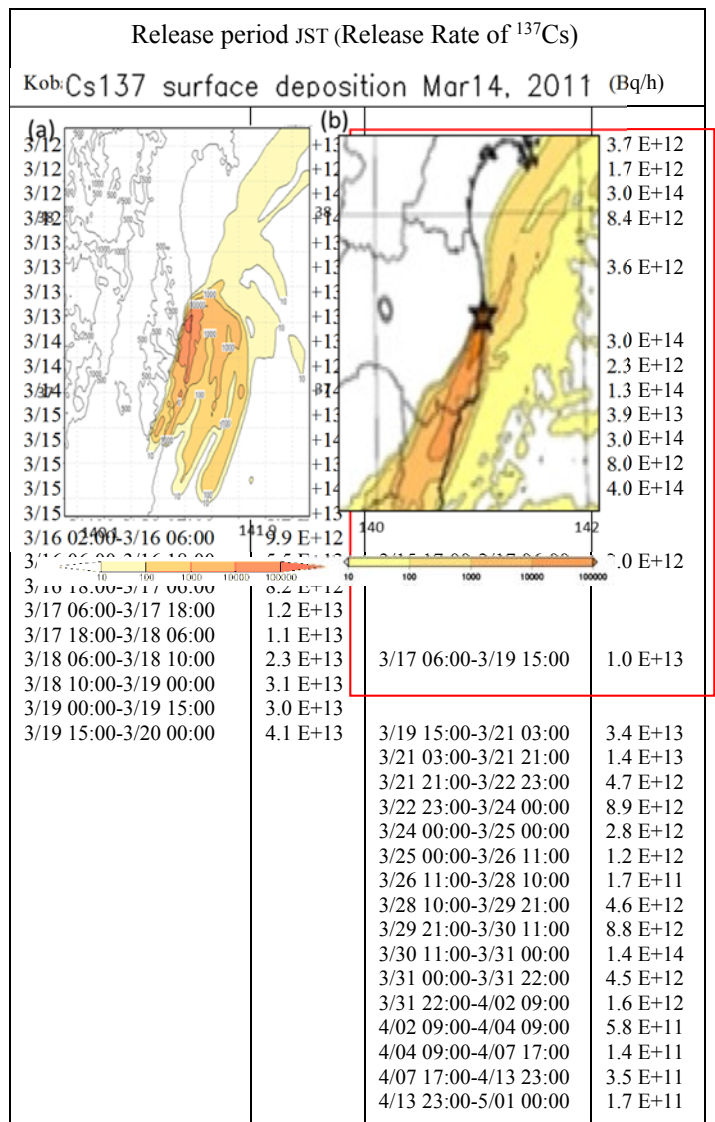


圖 6 (a)新一代 A2Ct&d 模擬福島事件之 Cs-137 地表沉降結果。(b)Terada et. al.(2012)使用日本 WSPEEDI 模擬之 Cs-137 地表沉降結果，色階即為地表沉降濃度，單位為 Bq/m²。

另外，相同處於地震帶的台灣，若是發生了相同的災害，會對台灣有什麼樣的影響。於是，利用此次福島事件相同的釋放量套用在台灣的龍門電廠，進行了一整年的模擬(2011/03/12~2012/03/11)，而 Cs-137 的釋放則是由 3 月 12 日 05JST 至 5 月 1 日 00JST。模擬結果如圖 7，左圖為釋放期間的地表沉降量累積，在龍門電廠附近年沉降量可達 100 萬 Bq/m²，而附近約 25km 的範圍內沉降量可達 10 萬 Bq/m²，呈狹長型東北西南走向，而另外在宜蘭地區，約北緯 24.4 度的地方有一個次極值的出現，沉降量也可達 10 萬 Bq/m² 以上。由於在釋放期間的

3~4 月份，在台灣仍受東北季風影響較多的月份，再加上台灣山脈走向，放射性物質的沉降多累積在雪山山脈和中央山脈以東，且放射性物質的沉降大致也有東北西南的分布。圖 7 右，則為釋放期間的有效劑量累積量，在龍門電廠附近往東北、西南方向長約五十公里的範圍劑量可達 1mSv 以上，另外，與沉降量相同，在宜蘭地區北緯 24.5 度以南，也有一個有效劑量累積達 1mSv 以上之區域，而在龍門電廠附近之輻射量則是越往核電廠增加較多，核電廠的位置其有效劑量可達 100mSv 以上，但範圍相當小。

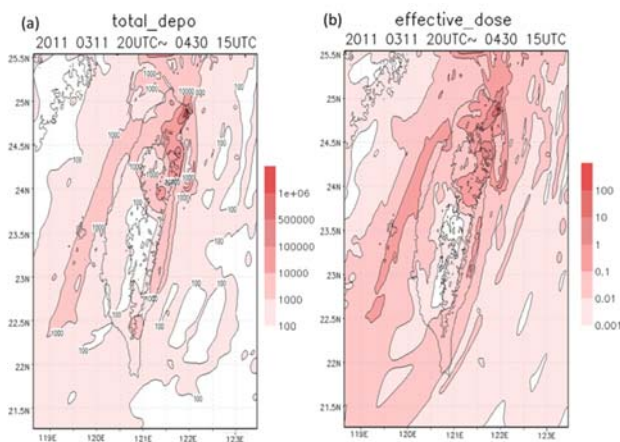


圖 7 (a)由 A2Ct&d 模擬 Cs-137 釋放期間之地表沉降量。單位:Bq/m²，(b)Cs-137 釋放期間有效劑量累積量，單位:mSv。

四、結論

座標系統修改成經緯度座標之後，進行模擬時就可以很方便的選取所要模擬的區域，不會限制在 UTM 座標的分區內，且使用既有的全球模式或者區域模式資料，經過簡單的資料整合後，即可供給新一代的大氣擴散模式(A2Ct&d+Dose)，經過新加入的煙陣過程，以及模擬設定上的多元化，引入放射性核種之特性，計算得到有效劑量、等價劑量和地表沉降量等具有決策效益及研究價值之結果，使此劑量評估系統更具說服力及可用性。

福島事件中，日本地區的模擬比較，我們的擴散模式與日本的擴散模式相比之下已有不錯的表現，能夠抓到放射性物質擴散的大方向，沉積量累積的量

級及範圍，都相當接近，但其擴散的範圍較小了一些，往後可以繼續與實際觀測的沉降範圍進行比較，讓模式進行一些參數的調整，使得我們的擴散模式更接近真實的情況。當福島事件發生在台灣時，我們進行了一整年的模擬，可看到在台灣地區地形對污染物有很顯著的影響，配合上風場之後，即可看出在事故發生時，何處是適合進行掩蔽的地區，何處需要撤離的地區，以及依污染的程度採取需要措施，才能將災害的傷害降到最低。

將境內境外核子事故緊急應變系統結合在一起，並且使用及時的預報資料進行模擬，取代現行劑量評估系統氣象資料庫的形式，是目前核能安全發展所努力的方向。

五、參考文獻

- 楊雍穆(民 93)。核子事故緊急應變劑量評估系統 RAPTAD/DOSE 中劑量評估模組建立(編號: INER-A0487R)，未出版。
- Chino, M., Nakayama, H., Nagai, H., Terada, H., Katata, G., Yamazawa, H., “Preliminary estimation of release amounts of 131I and 137Cs accidentally discharged from the Fukushima Daiichi nuclear power plant into atmosphere.” J. Nucl. Sci. Technol., vol 48, pp. 1129-1134, 2011.
- Roland R. Draxler, “description of the hysplit_4 modeling system,” Air Resources Laboratory, Silver Spring, Maryland, Dec. 1997.
- Takuya Kobayashi, Haruyasu Nagai, Masamichi Chino. Source term estimation of atmospheric release due to the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident by atmospheric and oceanic dispersion simulations. J Nucl Sci Technol. 2013;50:255–264.
- Terada, H., Katata, G., Chino, M., Nagai, H., “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., vol. 112, pp. 141-154, 2012.

Yamada T., 2004: Merging CFD and atmospheric modeling capabilities to simulate airflows and dispersion in urban areas., Computational Fluid Dynamics Journal, 13(2):47, 329-341.