

新一代核子事故緊急應變劑量評估系統之外釋射源項回推功能建置

邱慶睿 鄧仁星
中央氣象局科技研究中心

摘要

2011年3月11日日本福島核電廠事故是繼1986年車諾比事件以來最嚴重的核子事故，國際間投注相當多心力於核子汙染範圍與影響程度之評估，其中，事故造成放射性物質外釋量的估計儼然成為後續研究分析重點課題之一。

原子能委員會是核能及輻射安全的主管機關，緊急應變是核安管制的最後一道防線，其目的在保障民眾和環境之安全。日本福島核子事故後，原能會於「國內核能電廠現有安全防護體制全面體檢方案總檢討報告」有關緊急應變作業能力檢討及改善方案中，強調精進現有應變作業工具，劑量評估系統即為其精進項目之一。

國內現行的核子事故緊急應變劑量評估系統根據輸入的氣象場與外釋射源的釋放率，經由大氣擴散模式進行放射性物質的大氣擴散、沉降以及劑量計算，藉此進一步分析放射性物質的影響程度與範圍。然而過去經驗得知當事故包含非計畫性排放時，外釋射源資料的建立相當困難，無法有效提供給模式進行運算，因此，本研究參考了國際間的射源回推方法，配合三維大氣擴散劑量評估模式，於新一代核子事故緊急應變劑量評估系統中，建置適合本土的外釋射源項回推方法及作業程序。

關鍵字：射源項回推、New RPDose

一、前言

2011年3月11日發生於日本東北方太平洋的近海地震與接連引起的海嘯重創了日本東岸，其中福島第一核電廠因海嘯造成一系列設備損毀、爐心熔毀及放射性物種外洩等災情，是繼1986年車諾比核電廠事故以來最嚴重的核子事故，對此，國際間投注了相當多心力於研究評估核電廠釋放之放射性物質擴及範圍與影響程度，其中事故造成放射性物質外釋量的估計尤為相當重要的一環。

原子能委員會(簡稱原能會)是核能及輻射安全的主管機關，緊急應變是核安管制的最後一道防線，其目的在保障民眾和環境之安全。311日本福島核電廠事故後，原能會於「國內核能電廠現有安全防護體制全面體檢方案總檢討報告」有關緊急應變作業能力檢討及改善方案中，俾即時提供研析準確的評估結果掌握各項救災資源，強調精進現有應變作業工具，新一代核子事故緊急應變劑量評估系統開發即為精進項目之一。

核子事故緊急應變劑量評估系統根據輸入的氣象場與外釋射源的釋放率，經由大氣擴散劑量評估模式進行放射性物種的大氣擴散、沉降以及劑量計算，藉此進一步分析放射性物種的影響程度與範圍。然而過去經驗得知當事故包含非計畫性排放時，外釋射源資料的建立相當困難，無法有效提供給模式進行運算，

有鑑於此，本研究參考Katata et al.(2012)、Terada et al.(2012)及Cervone and Franzese(2014)提出的外釋射源項回推方法，配合三維大氣擴散劑量評估模式，於新一代核子事故緊急應變劑量評估系統中，建置適合本土的外釋射源項回推方法及作業程序。

二、模式設定與輸入資料介紹

(一) 三維大氣擴散劑量評估模式簡介

大氣擴散與劑量計算方面，本研究沿用新一代核子事故緊急應變劑量評估系統中的三維大氣擴散劑量評估模式New RPDose，進行模擬運算。New RPDose為煙陣(puff)模式，藉由放射性核種煙陣的釋放後，隨氣象場進行大氣擴散與乾沉降計算，過程中包含了放射性核種的劑量計算。在煙流擴散方面，模式採用KDE (Kernel Density Estimation)法，將連續排放源切割成無數的煙陣，各煙陣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，再利用蒙地卡羅統計法 (Monte Carlo Statistical Method)計算煙陣的傳送。煙陣質點在 Δt 後的位置由 $x_i(t + \Delta t)$ 下式計算：

$$x_i(t + \Delta t) = x_i(t) + U_{pi}\Delta t \quad (1)$$

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，

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

其中 $a = \exp(-\Delta t/t_{Lxi})$, $b = (1-a^2)^{0.5}$ 。上述中 ζ 是以一個標準偏差及零平均值之高斯分布隨機變數，使煙流產生隨機的蜿蜒效應。 t_{Lxi} 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} 是從氣象模式計算而得來。

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 (3) 式表示：

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

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。

劑量計算方面，New RPDose 依照人員劑量的來源，分別計算呼吸與空氣浸身兩途徑所造成無掩蔽全身劑量率、地表輻射途徑所造成無掩蔽之全身劑量率以及呼吸途徑所造成甲狀腺全身有效等價劑量。本研究主要用到呼吸與空氣浸身兩途徑所造成無掩蔽全身劑量率進行外釋射源項的回推計算。

呼吸與空氣浸身所造成全身有效等效劑量率 (以下將兩者之和簡稱空氣劑量率，算式中以 $Dose_{inh+sub}$ 表示) 為：

$$Dose_{inh+sub} = surfcon \times (Br \times DCF_{inh} + DCF_{sub}) \times \frac{\exp(-\lambda t_a)[1-\exp(-\lambda t_e)]}{\lambda t_e} \quad (4)$$

其中， $surfcon$ 為地表濃度 (Bq/m^3)； Br 為一般人呼吸率 $1.224m^3/hr$ ； DCF_{inh} 為呼吸途徑全身有效等效劑量轉換因子 (mSv/Bq)，而 DCF_{sub} 為空氣浸身途徑全身有效等效劑量轉換因子； λ 為衰變係數， t_a 為從雲團開始排放到時間點 t 之時間間隔 (相當於輻射雲團到達網格 i, j 點的時間)， t_e 則為暴露時間。

輻射物質方面，Cs-137 半衰期約為 30 年 (10960 天)，較 Ru-103、I-131、Te-132、Cs134 其他核種半衰期時間長，經過大氣擴散後能維持其輻射強度較長的時間，適合做為核子事故的指標物種。因此，本研究以 Cs-137 為模擬核種，並參考 Katata et al., (2012) 將 Cs-137 乾沉降速度設定為 $0.001m/s$ 。

(二) 氣象場輸入資料

氣象場方面，如圖 1 所示，於 Domain2 範圍以外的 Domain1 (全球 domain) 使用 NCEP GFS (National Centers for Environmental Prediction Global Forecast

System) 的 ANL 0.5° 每天 4 筆的分析場資料；Domain2 (經度約介於 $136.8^\circ E \sim 143.5^\circ E$ 、緯度約介於 $34.1^\circ N \sim 40.8^\circ N$) 以內則使用 MDDS 解析度 1km 的三維連續變分降尺度氣象資料，其為科技部「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三維連續變分降尺度系統 (Mesoscale Dynamic Downscaling System, MDDS)，根據 NCEP ANL 0.5° 資料，進行三維連續變分降尺度到 1km 解析度的氣象場資料。

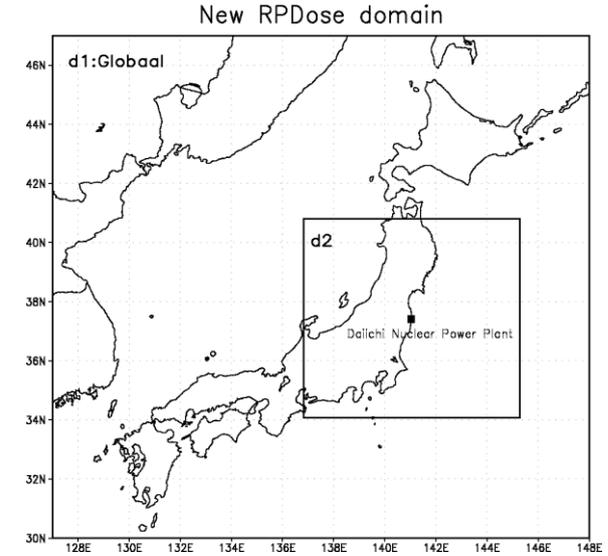


圖 1 New RPDose 模式使用的氣象場。d1 (全球 domain) 使用 NCEP GFS 的 ANL 0.5° 每天 4 筆的分析場資料；d2 使用 MDDS 解析度 1km 的三維連續變分降尺度氣象資料

(三) 觀測資料

在 311 福島事件發生後，觀測資料種類繁多，但時間上並不連續及完整，本研究在射源項回推方法建立上，為有效測試與驗證射源項回推方法的正確性，設定福島電廠中心向外八個方位 (北、東北、東、東南、南、西南、西、西北) 2km 處為假定觀測站，由北依順時針依序編號為 1 至 8 號測站，以 New RPDose 於假定測站的模擬空氣劑量率替代真實觀測資料，此模擬簡稱為 AObs Run。AObs Run 的釋放率時序是參考 Katata et al., (2012) 與 Terada et al., (2012) 的射源項回推結果如圖 2 所示，使用其前 8 天 15 段的釋放率時序 (圖 2 紅色方框) 進行 2011 年 3 月 11 日 20 時至 19 日 19 時，共 192 小時 (8 天) 的模擬，每 10 分鐘釋放一個 Cs-137 煙陣，釋放初始高度為 20 公尺。

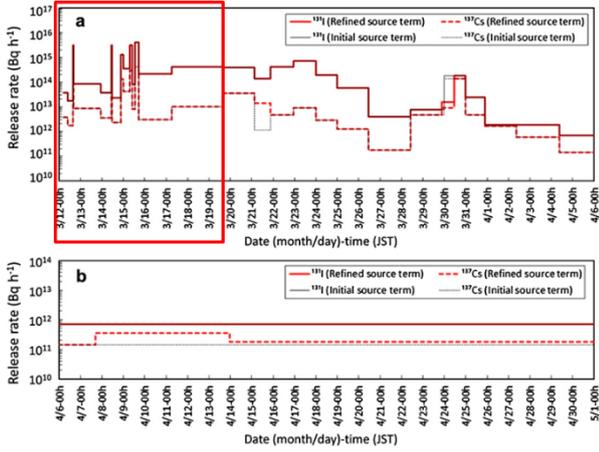


圖2 Katata et al., (2012)與Terada et al., (2012)的Cs-137與I-131釋放率回推結果。實線為I-131釋放率，虛線為Cs-137釋放率，黑線為Katata et al.的回推結果，紅線為Terada et al.修正後的結果。

三、射源項回推作業程序

射源項回推方法的基礎概念是參考Katata et al.,(2012)及Cervone and Franzese, (2014)提出的外釋射源項回推方法，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，(5)式即為外釋射源項回推關係式

$$Q_i = M_i/C_i \quad (5)$$

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/m³)，相當於模式在單位釋放率設定為1Bq/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3所示，步驟依序為New RPDose單位釋放率模擬(簡稱Unit Run)、資料處理階段(Data Processing)、射源項回推階段(Source Term Estimate Process，簡稱STE)及釋放率驗證(Release Rate Verification)。

步驟一 - Unit Run：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1Bq/sec進行New RPDose模擬，模擬完成即可輸出每個時間階段的煙陣活度、大小及位置。

步驟二 - 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Unit Run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。

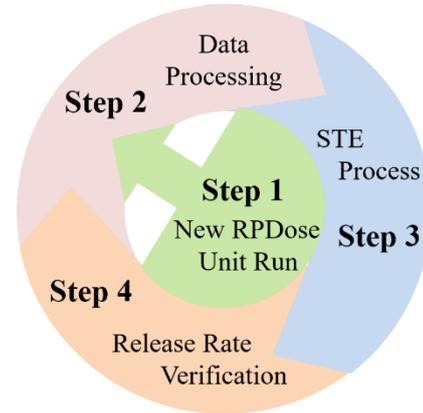


圖3 外釋射源項回推系統作業程序

步驟三 - STE Process：步驟一與二完成後，即準備好射源回推算所需資料，觀測逐時空氣劑量率、Unit Run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 $R_1 \sim R_n$ ，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

$$A^{s,t} = \sum_{k=1}^n A_k^{s,t} \quad (6)$$

由外釋射源項回推關係式(5)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

$$A_k^{s,t} = R_k \times Au_k^{s,t} \quad (7)$$

其中 $Au_k^{s,t}$ 為Unit Run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)式，第 k 段釋放率可表示為

$$R_k = \frac{A_k^{s,t}}{Au_k^{s,t}} = \frac{A^{s,t} - \sum_{l=1}^{k-1} A_l^{s,t}}{Au_k^{s,t}}, \quad l \neq k \quad (8)$$

將(8)式中的 $A_l^{s,t}$ 以(7)式代換掉後可改寫為

$$R_k = \frac{A^{s,t} - \sum_{l=1}^{k-1} (R_l \times Au_l^{s,t})}{Au_k^{s,t}}, \quad l \neq k \quad (9)$$

利用(9)式即可求得第1至 n 段釋放率，亦為射源回推算核心公式，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(9)式便可簡化為

$$R_a = \frac{A^{s,t}}{Au_a^{s,t}} \quad (10)$$

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 $R_1 \sim R_n$ ，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(9)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。

步驟四 - 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。

步驟二、三、四為一個循環，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。

四、射源項回推作業程序案例分析

為驗證射源項回推公式的正確性及實際案例的適用性，以下規劃兩組分析案例，針對日本福島核電廠事故8天案例(2011年3月11日20時至19日19時)以射源項回推程序進行分析。兩組案例分別為理想案例及一般案例。在理想案例中，Unit Run的模擬設定皆與AObs Run相同，唯獨差別在於Cs-137釋放率調整為單位釋放率(1Bq/sec)。值得一提的是，為了驗證射源項回推公式的正確性，本研究於理想案例中，將Unit Run與AObs Run的煙陣質點位置方程式(2)式中的隨機變數 ζ 設定為相同的隨機變數，可使兩組模擬具有相同的蜿蜒情形，而一般案例中，為了測試射源項回推公式於實際案例中的適用性，於是將 ζ 恢復為正常的隨機變數，使Unit Run與AObs Run具有不同的蜿蜒效應。

(一) 理想案例分析與結果討論

理想案例射源回推計算結果如表1所示，表格左至右為第1至4次疊代結果，第4次疊代結果(陰影欄)亦為回推最終結果，意即經過了4次疊代即可求得理想案例的所有釋放率分段。最右列為Katata et al.(2012)的釋放率回推結果，表中 R_1 、 R_4 、 R_5 、 R_7 及 $R_{13} \sim R_{15}$ 於第1次疊代即求得釋放率，意即這7段釋放率可以分別篩選出只受其影響的時段，再利用觀測資料(AObs Run替代資料)之空氣劑量率和Unit Run之空氣劑量率比值求得釋放率。 R_2 、 R_6 、 R_8 與 R_{12} 可於第2次疊代時求得，這4段釋放率須利用已於第1次疊代時求得的釋放率方可求解。同理， R_3 與 R_9 需透過第1與第2次疊代求得之釋放率方可求解； R_{10} 與 R_{11} 則需透過第1至3次疊代求得之釋放率，接著於第4次疊代時求得。

回推最終結果(第4次疊代結果)與Katata et al.(2012)的結果近乎一致如圖4所示，圖中黑線為Katata et al.的射源項回推結果，紅線為理想案例回推結果。結果顯示，理想案例利用(9)式完美地回推AObs Run Cs-137釋放率。這可以由以下原因解釋，AObs Run使用Katata et al.的射源項回推結果做為模擬的釋

放率時序，用以替代觀測資料，然而在理想案例中，相同的隨機變數 ζ ，使Unit Run與AObs Run具有相同的蜿蜒情形，這也造成Unit Run所有煙陣傳輸路徑與AObs Run皆一致，再搭配相同的氣象場，即完成近乎沒有誤差的回推結果，同時也驗證了回推公式之正確性。

表1 理想案例Cs-137釋放率回推結果

R_n	Ideal Case STE Result (unit: Bq/sec)				Katata et al. (2012)
	iter=1	iter=2	iter=3	iter=4	
R_1	1.0E+09	1.0E+09	1.0E+09	1.0E+09	1.0E+09
R_2	-999	4.7E+08	4.7E+08	4.7E+08	4.7E+08
R_3	-999	-999	8.3E+10	8.3E+10	8.3E+10
R_4	2.3E+09	2.3E+09	2.3E+09	2.3E+09	2.3E+09
R_5	1.0E+09	1.0E+09	1.0E+09	1.0E+09	1.0E+09
R_6	-999	8.3E+10	8.3E+10	8.3E+10	8.3E+10
R_7	6.4E+08	6.4E+08	6.4E+08	6.4E+08	6.4E+08
R_8	-999	3.6E+10	3.6E+10	3.6E+10	3.6E+10
R_9	-999	-999	1.1E+10	1.1E+10	1.1E+10
R_{10}	-999	-999	-999	8.3E+10	8.3E+10
R_{11}	-999	-999	-999	2.1E+09	2.2E+09
R_{12}	-999	1.1E+11	1.1E+11	1.1E+11	1.1E+11
R_{13}	8.3E+08	8.3E+08	8.3E+08	8.3E+08	8.3E+08
R_{14}	2.8E+09	2.8E+09	2.8E+09	2.8E+09	2.8E+09
R_{15}	9.6E+09	9.6E+09	9.6E+09	9.6E+09	9.6E+09

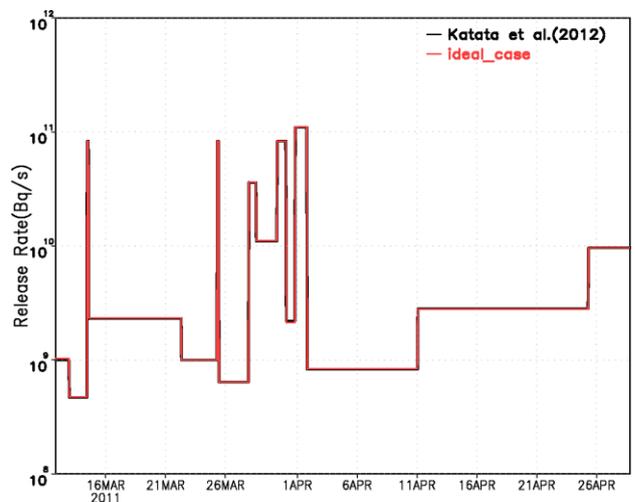


圖4 理想案例Cs-137釋放率回推結果時序圖

(二) 一般案例分析與結果討論

一般案例射源回推計算結果如圖5所示，而逐次的疊代結果記錄在表2。在一般案例中，釋放率的求解於第3次疊代時已求得全部15段的釋放率，且大部分時段的回推結果能與Katata et al.的結果有很好的匹配，唯 R_7 與第 R_{11} 回推結果有較大落差，其中又以 R_{11} 的落差最大，以下探討其原因。

R_{11} 的釋放時間為3月15日的01時至03時50分，共18顆煙陣，煙陣釋放進入大氣，經一次疊代篩選後，

6號測站只受 R_{11} 影響的時段為3月15日03至05時，7號測站為3月15日03至04時如表3所示，表中A與Au分別為AObs Run與Unit Run的空氣劑量，最右列為 R_{11} 回推結果，而結果顯示 R_{11} 在3月15日的03時至04時於6號測站有較明顯的高估。圖6為3月15日03時至04時的煙陣立體位置圖，左側為Unit Run(圖6a)、右側為AObs Run(圖6b)。圖中灰點為煙陣投影到地面的位置，色點為加入了煙陣高度後的位置，顏色則代表煙陣的釋放率時段。圖6顯示，亂數生成的隨機變數 ζ 使Unit Run與AObs Run煙陣具有不同的蜿蜒效應，造成煙陣分布位置有所差異，其中，Unit Run影響6號與7號站的煙陣為 R_{11} ，而在AObs Run中，6、7號站除了受到 R_{11} 煙陣影響外，亦會受到 R_7 、 R_9 及 R_{10} 煙陣的影響，射源回推計算時會將這些影響量皆視為 R_{11} 貢獻的，導致了 R_{11} 的高估。

表2 一般案例Cs-137釋放率回推結果

General Case STE Result (unit: Bq/sec)				Katata et al. (2012)
R_n	iter=1	iter=2	iter=3	
R_1	9.7E+08	9.7E+08	9.7E+08	1.0E+09
R_2	4.2E+08	4.2E+08	4.2E+08	4.7E+08
R_3	-999	1.2E+11	1.2E+11	8.3E+10
R_4	2.4E+09	2.4E+09	2.4E+09	2.3E+09
R_5	1.0E+09	1.0E+09	1.0E+09	1.0E+09
R_6	-999	6.8E+10	6.8E+10	8.3E+10
R_7	1.7E+09	1.7E+09	1.7E+09	6.4E+08
R_8	-999	3.3E+10	3.3E+10	3.6E+10
R_9	-999	-999	1.1E+10	1.1E+10
R_{10}	9.3E+10	9.3E+10	9.3E+10	8.3E+10
R_{11}	1.6E+10	1.6E+10	1.6E+10	2.2E+09
R_{12}	1.0E+11	1.0E+11	1.0E+11	1.1E+11
R_{13}	8.7E+08	8.7E+08	8.7E+08	8.3E+08
R_{14}	2.8E+09	2.8E+09	2.8E+09	2.8E+09
R_{15}	8.9E+09	8.9E+09	8.9E+09	9.6E+09

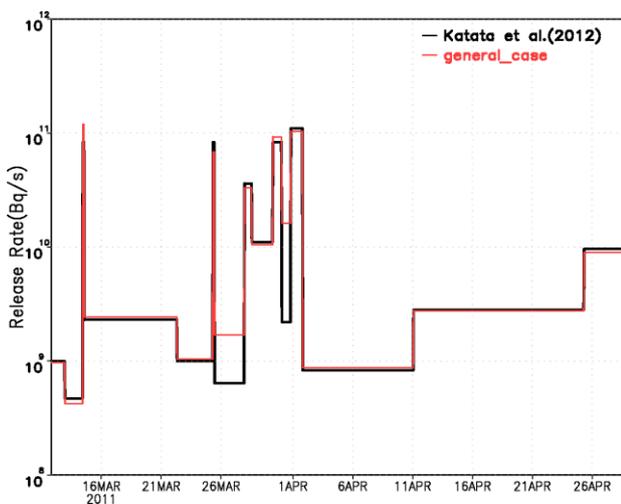


圖5 一般案例Cs-137釋放率回推結果時序圖

表3 一般案例 R_{11} 回推結果

Observation No.6 on 15 Mar 2011			
time	A(mSv/hr)	Au(mSv/hr)	R_{11} (Bq/s)
03:00	3.06E-04	1.03E-14	2.97E+10
04:00	1.04E-04	6.88E-15	1.51E+10
05:00	5.93E-05	1.42E-14	4.17E+09

Observation No.7 on 15 Mar 2011			
time	A(mSv/hr)	Au(mSv/hr)	R_{11} (Bq/s)
03:00	2.40E-04	1.65E-14	1.45E+10
04:00	1.20E-04	2.26E-14	5.32E+09

五、結論

現行的核子事故緊急應變劑量評估系統可以依設定好的外釋射源項釋放率，根據輸入的氣象場經由大氣擴散劑量評估模式進行放射性物種的大氣擴散、沉降以及劑量計算，若能有效提供合理的外釋射源項，將可提升放射性物種的傳輸模擬與劑量評估結果。本研究建置了一套外釋射源項回推方法及作業程序，以觀測資料空氣劑量率和單位釋放率模擬之空氣劑量率比值作為外釋射源項回推基礎，透過將事故射源釋放率時序分割成數個釋放率分段，逐步篩選出只受單一釋放率時段影響的時段，以觀測與模擬空氣劑量率比值進行射源項求解，再一步一步利用已求得之釋放率求解其他待求的釋放率分段。

在福島事件理想案例中，射源項回推可以準確推算出釋放源釋放量，驗證了射源項回推方法的合理性；在一般案例中，多數的釋放率分段能有合適的回推結果，僅於少數分段回推結果落差較大，誤差主要為隨機蜿蜒效應造成的煙陣位置差異所導致，這是為了使一般案例更貼近真實案例所能預期的，且隨機蜿蜒效應會使每次模擬結果都略有不同，期望未來可透過對多組模擬回推結果進行平均來減少誤差，並引入真實的觀測資料，利用更多案例進行調整，當事故發生時，即有一套完整的回推流程可供使用。

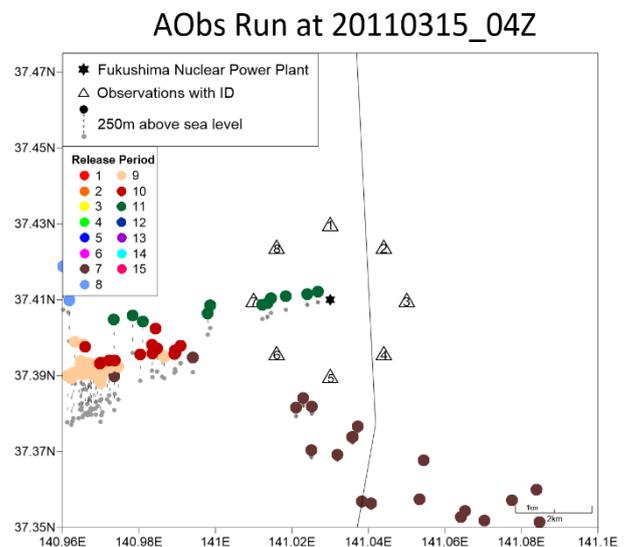
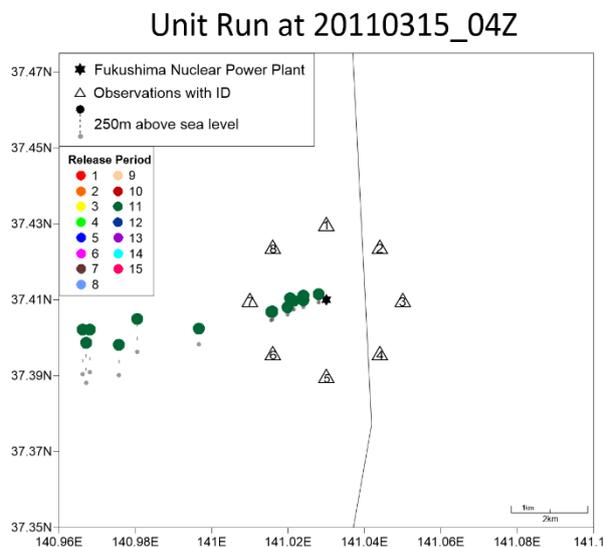
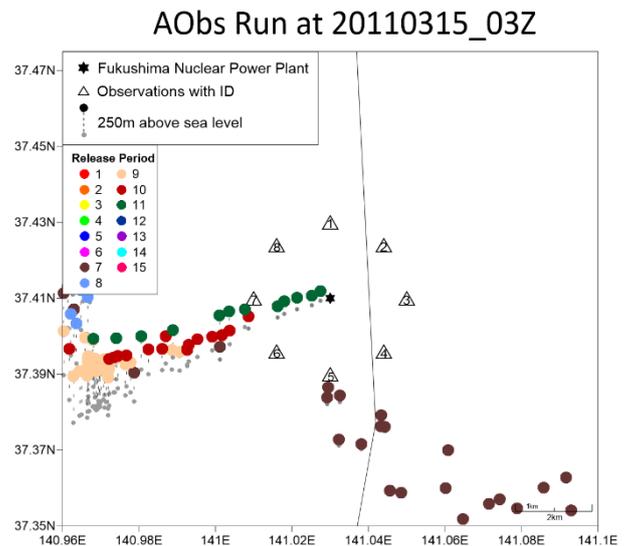
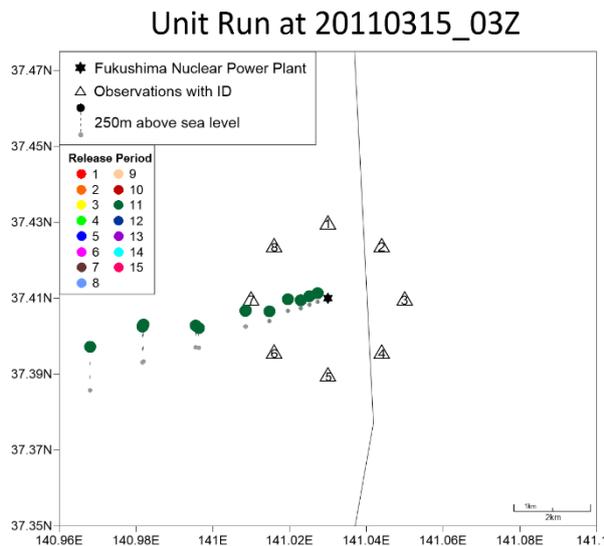


圖6a 一般案例Unit Run 3月15日03時至04時的煙陣立體位置圖

圖7b 一般案例AObs Run 3月15日03時至04時的煙陣立體位置圖

六、參考文獻

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.

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.

Terada, H., Katata, G., Chin, M., Nagai, H., 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. *Journal of Environmental Radioactivity*, **112**: 141–154.

Yamada, T., and S. Bunker, 1988: Development of a Nested Grid, Second Moment Turbulence Closure Model and Application to the 1982 ASCOT Brush Creek Data Simulation. *Journal of Applied Meteorology*, **27**, 562-578.