

輻射事件應變技術開發研究(1/4)

Research on The Emergency-Response Technology for The Radioactive Events(1/4)

主管單位：行政院原子能委員會

姚勳忠¹

林聰得¹

鄧仁星²

Yaur, Shyun-Jung¹

Lin, Tsung-Te¹

Jen-Hsin Teng²

¹核能研究所

²中央氣象局

摘要

為提供輻射災害緊急應變防災、救災人員之教育訓練與應變所需資源，本計畫擬建置輻災防救訓練研發中心基地，協助解決現今輻射災害防救訓練場所、裝備與教材不足之問題，研擬國內輻射彈爆炸事件應變策略，透過開發應變所需之遠端遙控輻射偵檢技術，以及核子事故以外類型之輻射災害管理技術與平台，擴大輻射災害的應變效益及效能。針對前述目的，本計畫執行工作包括：

1. 強化輻射應變技術
2. 完備應變設備整備相關作業及其作業程序 SOP
3. 輻射事件應變技術開發與研究(放射性物質擴散分析能力建立)
4. 開發遠端遙控行動式輻射偵測平台、應變資訊平台

關鍵詞：輻射災害、緊急應變

Abstract

In order to provide the education, training and resources of radiation disaster response and disaster relief personnel, this project plans to build a radiation disaster prevention and rescue training research and development center to help solve the current shortage problems of radiation disaster prevention and rescue training sites, equipment and teaching materials. This project also plans to expand the effectiveness of response to radiation disasters by developing domestic dirty bomb incident response strategies, remote control radiation detection technologies, and the radiation disaster management technology and platform other than nuclear accidents. For the aforementioned purposes, the implementation of this project includes:

1. Enhance the radiation disaster response technology
2. Complete operating procedures for the emergency equipments and preparation.
3. Research and development of radiation incident response technology (establishment of radioactive material diffusion analysis capability)
4. Develop remote control mobile radiation detection platform and response information platform.

Keywords : radiation disaster, emergency response

一、前言

輻射災害事件或輻射彈爆炸事件初始數小時的應變作為至為關鍵，影響各階段整體救災執行策略與成效。因此第一線應變人員需負有多工的任務，例如確認輻射外釋狀況、污染分布情形、導入搶救生命行動、民眾防護行動措施建議，回報現場狀況等等。這些任務在第一線應變人員抵達現場內數分鐘即開始執行，初始應變活動效能與協調狀況，將決定後續其他支援之組織團隊與資源抵達現場，接續救災行動的執行成效。因此，進行輻射事件應變技術開發與研究，對我國提升災害防救能量至為重要。

二、研究目的

1.1. 完備應變設備整備相關作業及其作業程序SOP

進行輻射彈爆炸事件初期應變規劃研究(主要參考Radiological Dispersal Device Response Guidance, 美國國土安全部, 2017), 進行輻應隊輻射彈爆炸事件初期應變應變人力、設備需求之評估, 補充相關作業程序之不足。

1.2. 輻射事件應變技術開發與研究

選定擴散模擬模式, 建立未來模擬演算戶外輻射彈爆炸事件影響之區域輻射強度或污染範圍之基礎, 降低應變人員曝露於輻射下的健康風險與壓力, 以利必要之防護行動決策。

1.2.1. 研究方法

首先進行流體力學模式及擴散模式解析評估, 因為環境風場的特性, 在於建築物周圍的流況相當複雜, 建築物的幾何形狀會直接對風場造成影響, 因此模擬時應同時包含主建物及其周遭的鄰近建築。於實際模擬時, 為確保鄰近建築之影響有被納入模擬中考量, 常需將模擬域擴展至百公尺至公里之較為寬廣的大小。而為精確模擬風場現象, 所使用之網格又必須足夠解析地形地物之幾何形狀及各式風場現象, 寬廣的模擬域與高解析度之網格配置兩者之因素將可能導致產生數量龐大的網格, 如此數量的網格不僅提高模擬的困難度, 也會增加前後資料處理的時間。因此, 模式本身的強度, 以及對於各種資源的支援及使用上的效率與便利性也成為選擇模式的重要關鍵。

1.2.2. 擴散模式簡介

大氣擴散模式中點源高斯模式描述了空間裡為數眾多的點之濃度, 運用質量不減定律於排放物上所得的平流(橫向移動)和擴散(縱向移動)二者的微分方程。首先情境假設: 1. 污染物之排放速率為一定。2. 平均風速和風向一定。3. 排放物的化學性質穩定且不從周圍的空氣中下沉(fallout)。4. 排放源的周圍是平坦開闊的, 方程式在穩定情況下的一個解答通常是統計學中的常態分配, 以圖1的鐘形曲線來描述排放源順風處的物質濃度。圖中座標系統之 x 軸表風向朝水平延伸, y 軸是在垂直於 x 軸的水平面上, z 軸則為垂直延伸。在圖1中, 因於氣體物質由像是煙囪這樣的點源排放出來, 在遇到大氣時, 一般而言會有額外的上升現象(由於浮力、熱力和動量作用), 煙流(plume, 如羽狀物)的總高度比排放源的高度稍高些。其中高度 h 表示有效排放高度, 取決於所採用的標準方程式。

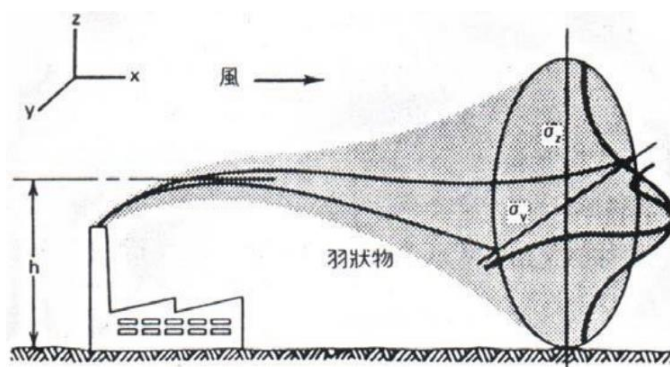


圖 1 煙流示意圖

$$c(x,y) = \frac{Q}{\pi\sigma_y\sigma_zU} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2} - \frac{h^2}{2\sigma_z^2}\right) \quad (1)$$

在點源高斯模式的一般形式下，可預測下風處某位置(x,y,z)的濃度。通常採用以下簡化模式來預測點源下風方向之地面處(z=0)污染物濃度。方程式中 Q 為固定的排放速率(mg/sec)；U為固定的風速(m/sec)；h為煙囪的有效排放高度(公尺)； σ_y 為水平擴散係數(公尺)； σ_z 為垂直擴散係數(公尺)。

為了預測地面任一點(x, y)濃度，首先要決定擴散係數 σ_y 與 σ_z ，它們是根據進行預測的氣象條件來決定的。數種有效推算 σ_y 與 σ_z 的方法之一是利用經驗觀測所得的結果與適當的穩定度分類相結合的方法。這種分類取決於地面風速、白天入射的太陽輻射量和夜間的雲量。

1.2.3. 模式選用

因應符合輻射防護與緊急應變子項計畫之需求，需要滿足以下條件，進行篩選：

- 1.能快速計算。
- 2.能使用區域性即時數值預報氣象資料，並且搭配可以運用此種氣象場的大氣污染物擴散模式。
- 3.適合使用點源之大氣擴散模式。
- 4.模式模擬解析度需要能解析至城市尺度範圍。
- 5.模式模擬適合地形需要能因應臺灣的複雜地形。

在地形處理上AERMOD模式和ISCST3模式皆使用分界流線的概念，當水平煙羽和抬升煙羽在通過山體時，只是對複雜地形和簡單地形進行一體化處理，處理精確度不高，分層簡化的處理結果與實際條件不一定完全吻合，因此在處理近場複雜地形時，容易出現短期預測結果超標的現象。CALPUFF大氣污染控制模式使用”slug方法”，最終生成三維網格風場，更加真實地反映出在地的氣象分佈及地形分佈，因此對於複雜流場和較廣範圍條件下具有突出優勢。

為了因應即時輻射防護與緊急應變，需要較快速的計算出輻射影響範圍，而CALPUFF模式與Models-3/CMAQ相比，相對需要較少的計算資源，CALPUFF模式計算速度也比較快速。而從各大氣擴散模式的應用層面，可以看到HYSPLIT模式主要應用污染物長程傳輸並追蹤其污染來源為主，而CALPUFF模式已有些跟核電廠排放的污染有

相關應用的研究產出。

綜合以上，CALPUFF模式除了是美國EPA推薦模式，符合本項計畫之需求也具有成熟的理論基礎和長期的跟蹤改進及驗證研究，是一個成熟的應用模式。且CALPUFF模式可運用於複雜地形，非穩態的流場，在長距離情況下可以矯正地形對流場的影響，而且在擴散計算時可以根據具體流場特點選擇積分方式和擴散參數計算方法。CALPUF模式的計算區域可以從幾十米到上千公里，從局部尺度到區域尺度，對於模擬突發核事故情況下的短期及長期擴散非常適合。故此研究選擇使用CALPUFF模式系統來建置輻射彈爆炸事件市區小尺度氣象模式中的大氣擴散模式。

1.3. 建置遠端遙控行動式輻射偵測平台

因應輻射事件應變技術開發需求，參考圖2輻射偵測平台技術研發示意圖，建置遠端遙控輻射偵測平台，並依計畫執行過程所發現新的需求，適度策略滾動修正載具平台規格。行動式輻射偵測載台可經由遠端操控，執行輻射偵測、環境感測、環景影像監視之畫面與量測數據整合通訊，讓控制人員於遠端遙控操作人機介面，並即時傳輸相關監測資訊，使得應變人員進入現場前，預先了解狀況與潛在之危害，降低應變人員遭受輻射曝露、高溫、粉塵、高濃度二氧化碳及潛在爆裂物等之危害風險。初期預畫戶外場域地貌為混凝土或柏油路況地形，規劃採用輪式載具平台，其優點為質量輕、速度快、機動靈活、效率高、不易損壞路面。雖然其垂直越障跨越能力差、但仍被廣泛應用。

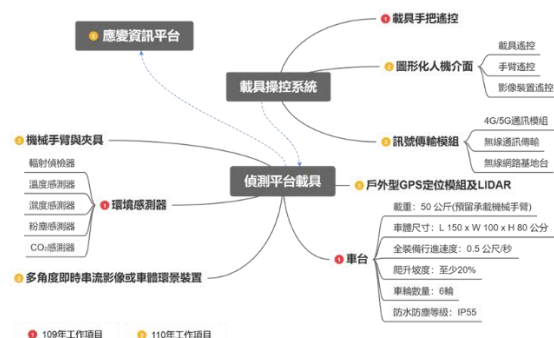


圖2 輻射偵測平台技術研發示意圖

遠端遙控行動式輻射偵測載具由執行機構、驅動裝置、檢測裝置和控制系統等基本元件所組成。其中又可分為三大模組及六個子系統。三大模組分別是感測器模組、控制模組和驅動模組。六個子系統是驅動系統、載具結構系統、感受系統、載具與環境交換系統、人機交換系統和控制系統。載具的「大腦」通常是由電腦或微控制器組成。它可收集周圍環境的信息，並根據收集到的環境情況向執行機構發出命令，驅動載具完成各種指令動作。透過ROS Topic及RESTful API等通訊協議，進行資訊交換，實現雲端控制及良好的跨平台通用性與擴充性。ROS可透過網路等常用通訊協定，將來自控制板的命令下達到微控制器和接收來自為控制器的命令，亦可接收來自各感測器的回傳訊息，以此模式建構之遙控行動式輻射偵測平台，後續可擴充至遠端操控模式，並支援環境偵測資訊即時回傳需求。

計畫中以近端遙控方式建構遙控行動式輻射偵測平台，遙控距離可於視線區域20公尺內進行操控，運作訊號流程圖如圖2右下方紅色區塊處所示。初期採開迴路方式設計，

以手持遙控器直接操控載具施行環境偵測任務，載具預留智慧控制模組導入區塊，後續搭配相關控制機組、定位/防護感測器，並導入自走程式形成必迴路系統，即可透過網路進行命令傳輸，於中控室進行遠端遙控偵蒐作業。

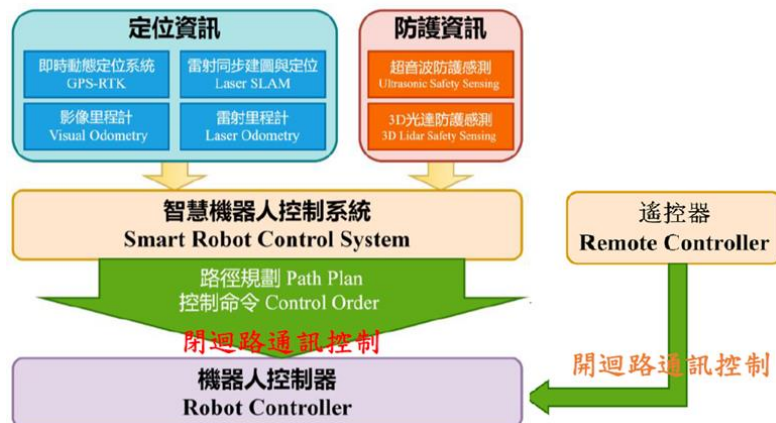


圖3 遙控型行動式載具操控訊號流程架構圖

為使行動式輻射偵測平台內部多個子系統能夠順利相互通訊，採用全網路通訊機制，讓所有的資料交換接能夠過網路通訊完成，其實體通訊架構規劃可參照圖4所示。該通訊架構圖藍色區塊部分組件都為網路化模組，可直接利用網路通訊達成所有的資料交換及控制。綠色區塊部分組件屬於非網路化模組，需經過網路化的控制器組件，使其能夠透過網路通訊與其它非網路化模組資料交換。紫色部分為外部裝置，可直接利用網路通訊模式，與行動式輻射偵測平台任一裝置組件進行資料交換。此通訊架構具有非常好的穩定性以及擴充性，能夠快速地與其他系統互相整合，方便後續與雲端系統整合，達到多機協作、遠端資料蒐集及監控等作業需求。

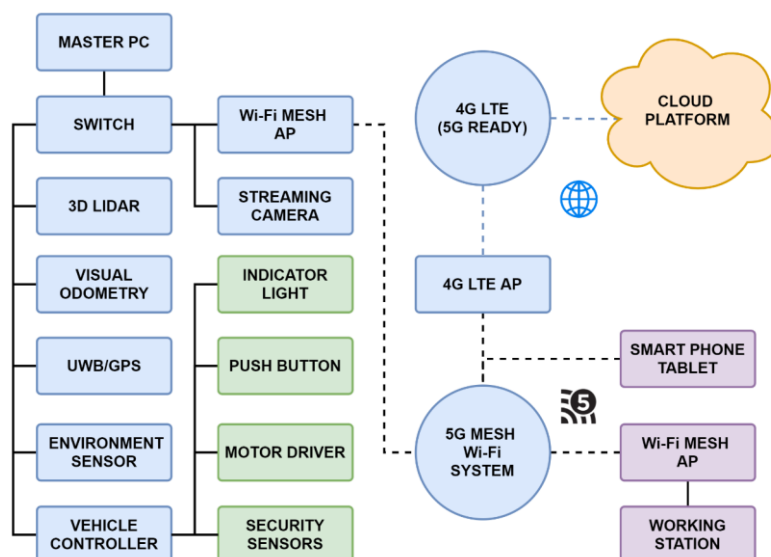


圖4 行動式輻射偵測平台實體通訊架構圖

1.4. 建置輻射災害應變資訊平台

配合前述輻射彈爆炸事件初期應變規劃研究，開發核子事故以外類型之應變所需之

輔助平台雛形，做為未來提升應變組織與成員間溝通、資訊分享效益。

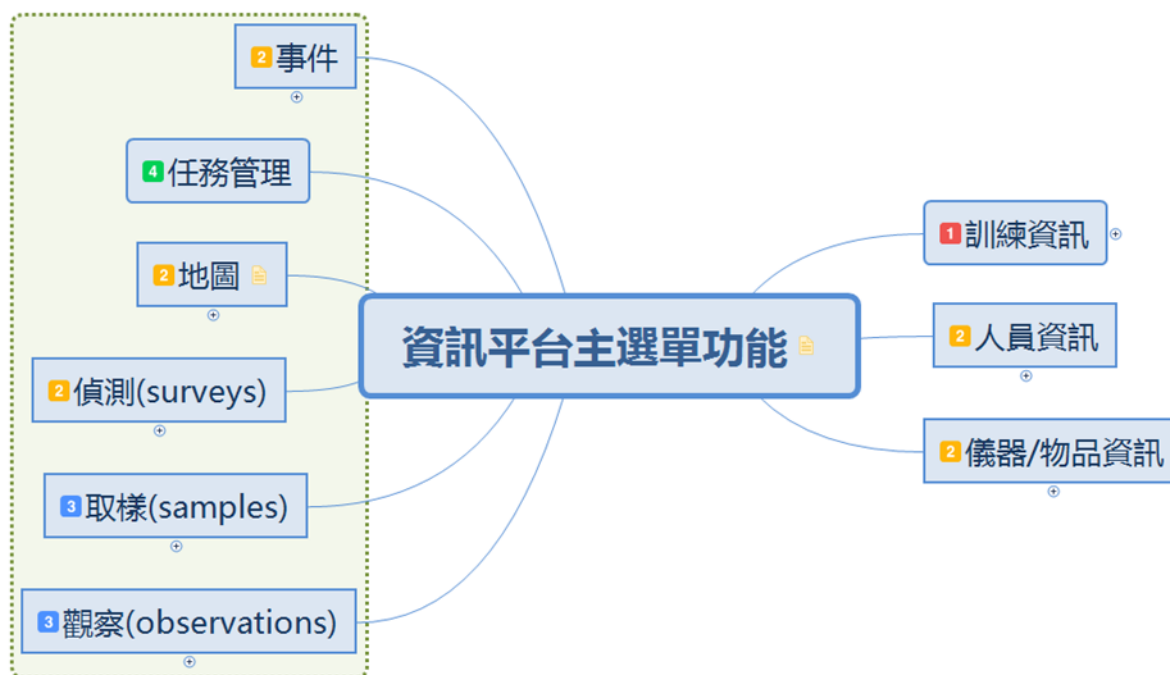


圖5 資訊平台主功能示意圖

三、研究成果

3.1 強化輻射應變技術

今(109)年6月4、5日，於核能研究所完成一場次之輻射應變技術隊訓練課程以及輻射應變技術隊訓練辦理報告，以及各課程之教材及上課影片。訓練對象為原能會各局處及所屬相關單位任務編組之輻射應變技術隊成員共38人。內容包含第一線偵測人員基礎訓練，包含基礎防護裝備穿脫，輻射偵測與射源搜索概念說明、現場小組作業前準備與作業方式、並進行室內大禮堂與戶外大草坪分組分時、實際射源搜索訓練。

因受COVID-19疫情影響，依嚴重傳染性肺炎中央流行疫情指揮中心之防疫規定，宣導學員遵守社交距離，室內應至少保持1.5公尺，室外至少保持1公尺，若無法有效維持社交距離，需全程配戴口罩。本次訓練課程之學員、工作人員及講師需於訓練課程前填寫健康聲明表，若有疑似症狀或接觸史，不予參加訓練。

3.2 完備應變設備整備相關作業及其作業程序 SOP

輻射彈爆炸事件前 100 分鐘科學的應變計畫導則描述了應變的任務和策略，可以被第一線和地方應變人員與組織在對戶外輻射彈爆炸後前 100 分鐘內應變救災中所執行，這些應變計畫導則的訂定是基於可能發生之後果所作的真實評估結果。導則中也包括設備需求建議，其中含個人防護裝備(PPE: personal protective equipment)和公眾資訊。

本研究提供可行動導則，輻射彈爆炸事件應變導則的參考文字和附加工具可以用來協助輻射彈爆炸事件現場有效應變的計畫擬定，以便保護第一線應變人員與公眾，並且建立後續資源整合的跨單位協調。

3.3 輻射事件應變技術開發與研究

3.3.1 CALPUFF 模式簡介與建置

CALPUFF模式系統包含CALMET、CALPUFF、CALPOST以及一系列前處理程式，來與這些程式所需要的氣象和地理資料作介面相容。此三大組成部分簡述如下：

(1) CALMET：是在三維尺度的網格模擬區域中，呈現逐時的風場與溫度場的氣象模式。對於二維場，如混合層高度、地表特性、擴散特性等，也都包含在模式所產生的輸出檔中。

(2) CALPUFF：是多層、多物種且非穩態的Lagrangian 高斯煙陣模式，可模擬從污染源排放的污染物，經過大氣擴散與化學轉化等程序後之變化。可應用在CALMET中產生的輸出檔，亦可使用較簡化的非網格氣象資料如以存在的煙柱模式。空間與時間變異的氣象條件下，藉由模式來結合煙陣在整個模擬期間下的結果分佈。CALPUFF基本輸出檔包含所選擇受體的小時濃度或小時沉降通量。

(3) CALPOST：為後處理程式，以數據及圖表來總結模擬的結果，舉例來說，如辨別在每一受體三小時平均濃度中的最高與次高，亦能分別列出前幾十大值等。

因相關程序都在Linux環境下運作，建置CALPUFF 模式系統第一步為至www.exponent.com下載各模式的相對應版本之壓縮檔；第二步是確認系統編譯器版本，及透過解壓縮指令(ex. tar -xvzf *.zip)解壓縮檔案並建置目錄；第三步為利用編譯器進行編譯成各模式目錄下相對應的執行檔及FORTRAN檔，舉例說明如CALMET模式目錄下會有calmet_v6.5.0.exe及calmet.for檔，其編譯指令為gfortran -o calmet_v6.5.0.exe calmet.for；此外，解壓縮檔內多為大寫的英文檔名，多數在編譯時會出現錯誤其說明為找不到檔案，則需轉換檔名為小寫英文檔名，透過Shell 批次檔來改檔名，其範例如圖6。

```
#!/bin/bash
for oldname in `ls`
do
  for newname in `ls $oldname|tr '[A-Z]' '[a-z]`
  do
    mv $oldname $newname
  done
done
```

圖 6 英文檔名大小寫轉換 Shell 批次檔範例

3.3.2 簡易建物運跑測試

由於輻射彈很可能會在人口密集的都市開放空間，如市區街道中引爆並隨建築物周圍之大氣擴散污染物，因此根據臺灣主要地標及附近周圍進行建物模型建置。首先，先處理CALMET模式的地形設定，將收集之中華民國內政部公開資料的30m水平解析度的地形資料引進CALMET模式並先選取範圍以臺北101大樓為中心點半徑五公里的距離內之區域為分析對象。氣象資料由CWB/WRF模式輸出之水平解析度1公里逐時氣象資料，引入CALMET做降尺度處理成250公尺水平解析度，結果顯示主要風向為東北風。

單一建築模型根據臺灣首都臺北的地標臺北101大樓進行建物模型外觀設計。臺北101是位於臺灣臺北市信義區的摩天大樓，總高度包含尖頂及天線約509公尺，不包含尖頂及天線約449公尺，此研究先以高度不含尖頂及天線449公尺以及寬度55公尺的長方形柱體進行建物模型建置。

單一簡易建物運跑測試中，先以污染物碘-131的乾濕沉降參數進行模擬測試，假設髒彈大小半徑為0.3公尺，污染物排放速率為 $1.0E01$ Bq/s，爆炸位置為101大樓東北方的10公尺處，模擬示意圖如圖6(單一建築)至圖7(多建物，在101大樓西方(左側)5公尺處建置一長70公尺，寬30公尺，高度為45公尺之建築模型進行測試)。圖7中所示在兩個建築物西南側有較高累積污染物濃度，且較單一建築時污染物濃度更高，高濃度之分布範圍較大。當兩棟大樓靠近時，會因大樓夾擠效應導致風速加大，以30公尺水平解析度的結果來看，類似夾擠效應導致的污染物分布變較為細長。

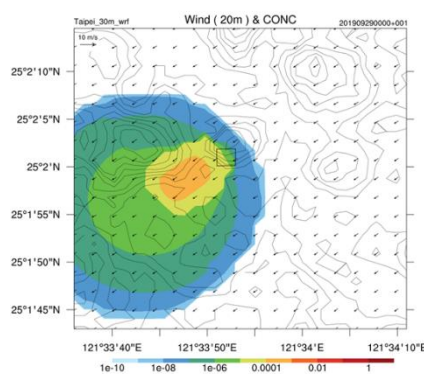


圖 7 CALPUFF 水平解析度 30 公尺單一建物影響之模擬結果
(填色部分為濃度柱狀累積分布單位為 Bq/m^2 ，黑色方框為 101 的建物範圍)

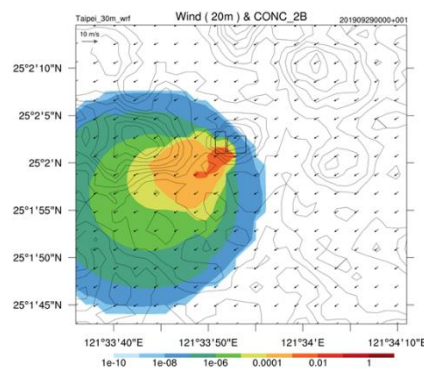


圖 8 CALPUFF 水平解析度 30 公尺多建物影響之模擬結果
(填色部分為濃度柱狀累積分布單位為 Bq/m^2 ，黑色方框為 101 的建物範圍)

3.4 建置遠端遙控行動式輻射偵測平台

因應輻射事件緊急應變與多元化場域應用需求，設計預留至少 50 kg 之載重能力，可搭載較大擺弧範圍商用機械手臂，作為遠端物件夾取與載運任務應用。戶外型移動載具底盤動力模組規劃 6 輪式傳動底盤車台，採全驅輪組傳動架構，由前輪轉向方式操控

載具運動，期間可經更換輪型方式，達到多元地貌應用需求，並適度降低車載量測儀器與光學感測元件震動損害。此外因應遙控行動式輻射偵測平台搭載機械手臂後，仍可於戶外崎嶇路面正常運行，故需提升載具底盤車體尺寸規格。因應車體剛性結構強度與車台重量評估需求，利用 Autodesk Inventor 軟體進行車體結構應力應變和模態分析，以市售商規 3030 鋁擠型柱體作為車台結構材料，在主體承受 1470N(約計 150 公斤)局部應力下，車體主樑變形量小於 0.1mm(可參考圖 9)。所以當車體重量(含電控元件)限制在 80kg 以內，載具尺寸約計 1540mm*760mm*510mm，此時車體將有充足載重能力加裝機械手臂與車體電控系統組件。

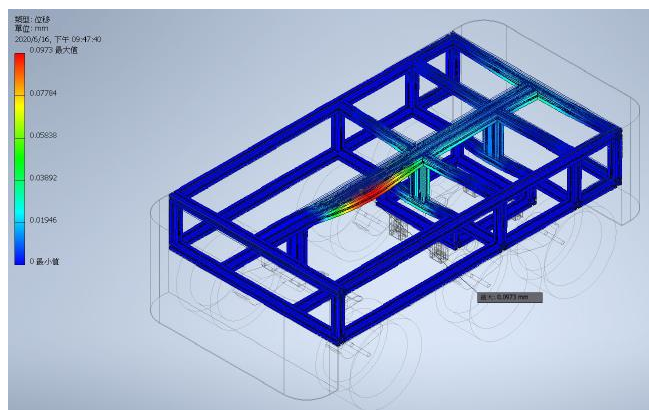


圖 9 載具底盤結構應力分析圖

載具車台初期採用手持無線遙控介面操控運行，加載環境偵測模組(空間輻射計、溫度、濕度、CO₂ 及 PM2.5 感測器)，導入 4G LTE 通訊與 GPS 定位機制，擴增戶外場域操控與通訊傳輸能力，以網路通訊鏈結方式即時傳輸環境偵檢資訊。後續為達到中控室遠端操控與緊急應變作業需求，將加載光學雷達/視覺輔助定位模組，施行地圖建模、影像擷取與環境參數偵測功能。現有通訊系統架構由 Wi-Fi Mesh 及 4G LTE 行動網路組成。Wi-Fi Mesh 網路由多個 Wi-Fi 節點構成，所有的節點都互相連接，每個節點擁有多條連接通道，當某一條線路堵塞或者無回應時，Wi-Fi Mesh 網路可以根據現況選擇其他的線路進行數據傳輸，任何一個節點故障都不影響網路的連接，可靠性非常高，並且在網路發生故障時可自動修復，確保網路高速流暢。遙控行動式輻射偵測平台於 Wi-Fi Mesh 涵蓋場域內作業時，與工作站及 IOT 裝置等連網設備緊密連結，作業場域內的設備都能輕易透過 4G LTE 行動網路連結雲端資料。考量後續 5G 通訊網路應用層面，可採用 5G 頻段的智慧型手機鏈結 5G 通訊網路，透過 USB 網路共享模式提供整個 Wi-Fi Mesh 網路通訊，在現階段高速網際網路應用上，此方式可展現較佳的成本效益。

依上述設計條件完成之遙控式戶外型移動載具平台，具良好的底盤設計，能使遙控行動式輻射偵測平台能夠於戶外多元地貌的場域移動，圖 10 為戶外型輻射偵測平台戶外遙控操控實測現況圖，載具在未鋪設柏油路面道路的區域也可以順利遙控移動，能輕易越過 150mm 高度之人行道障礙。具有良好的負重能力，搭載 60 公斤負載，仍可於戶外場地穩定行駛。六輪驅動設計，使載具有良好的爬坡能力，輕鬆爬上 40% 陡坡，適應各種地形。載具上方搭載環境感測模組與空間輻射偵檢模組，現階段可利用手持遙控器操控載具平台接近輻射源，直接量測輻射劑量值，並經場域構建之 WiFi 5G 通訊方式，

即時回傳環境偵測資訊。



圖 10 戶外型輻射偵測平台戶外遙控操作測試實況

因應地貌變化落差較大地形或沙灘場域行走作業，另外設計一組降低車身重心結構載具，採取六輪獨立懸吊系統設計(如圖 11 所示)。此設計讓輻射偵測平台於戶外作業時，可更貼合多元地面，並可降低使用越野款式輪胎(例如人字胎面)時的震動效應，減少載具內部電控元件與偵檢儀器的損傷。此外車身上設計載重區，全區由獨立懸吊系統支撐，提供了載重區平穩的支撐力。可用於裝設機械手臂及臨時物件夾取貯放區，使戶外型輻射偵測平台有良好的機械手臂擴充性。載具車體採六輪獨立驅動，每輪搭配一個 70W 功率的直流無刷馬達及控制器獨力驅動。此配置下車台設計，可精確掌控各輪運動狀態及動力輸出，使用步進馬達裝配機械式絕對式編碼器，即使在斷電情況也能夠掌握馬達絕對角度，無需外部檢知器，就能夠掌握轉向極限，減少機構複雜程度，並能適時提升操控穩定性。搭配電子差速可讓戶外型輻射偵測平台，有良好的轉向控制性能，並能依照行走現況調配電子差速，可防止輪胎打滑現象，影響到系統定位精確度問題。

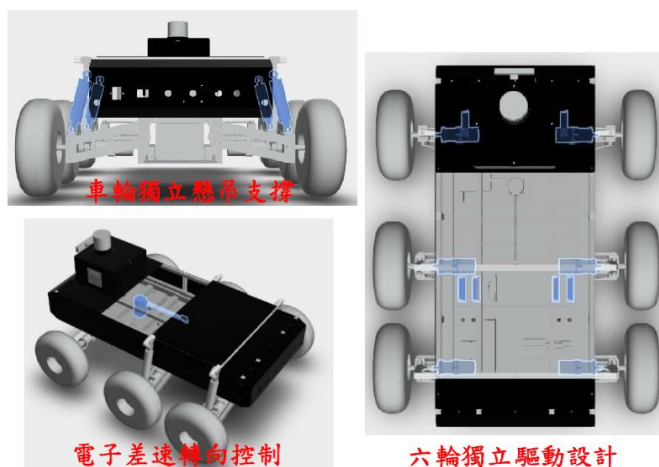


圖 11 獨立懸吊動力款車台設計

3.5 建置輻射災害應變資訊平台

今年度已完成平台離型功能規劃，另外，為因應輻應隊平時整備需求，依往年整備訓練等經驗，同時規劃增添資訊平台於平時可建立、編輯應變人員名單、相關儀器物品清單與訓練課程之資料庫功能。

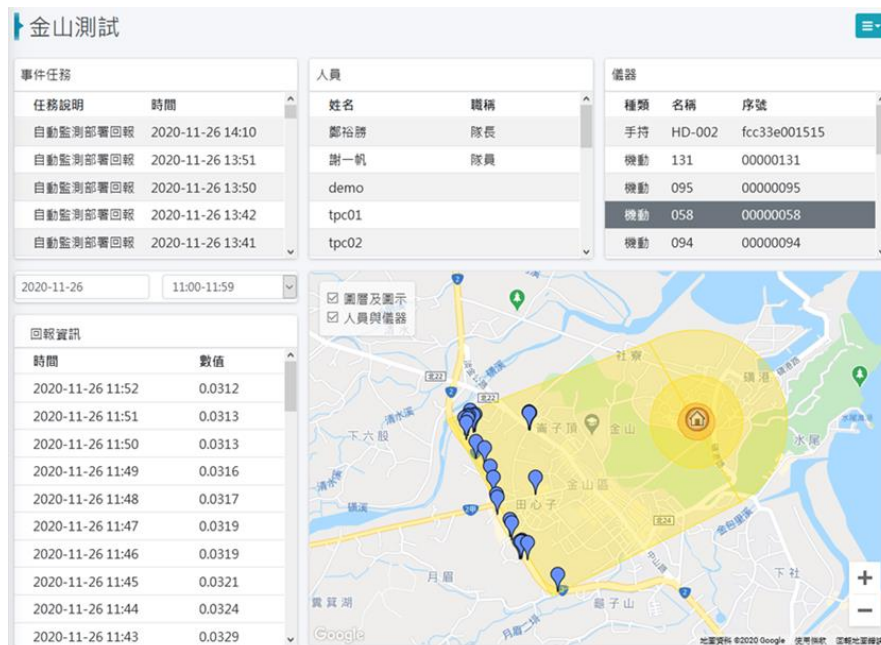


圖 12 圖台資訊測試畫面

四、結論與建議

輻射事件應變技術開發與研究建置CALPUFF模式系統有主要三大模組需設置(CALMET、CALPUFF、CALPOST)以及其他相關處理程式需逐一建置。各模式需透過設定文件的編輯來進行模式設定，模式輸出檔案格式可分為DAT檔及GRD檔，其中GRD檔可以透過Surfer軟體進行2D及3D繪圖。

未來會持續進行多建物模型建置進行模擬，以期建立快速評估分析輻射彈在都市的模擬影響的能力。

在建置遠端遙控行動式輻射偵測平台工作項目，下階段將持續完善戶外型輻射偵測平台遠端操控機能，並進行搭載機械手臂之系統整合作業，使其具備影像辨識、定位及物件夾取功能，支援輻射災害應變任務應用需求。

參考文獻

1. 行政院原子能委員會，ERS-AEC-016 程序書，輻射應變技術隊技術組處理輻射彈爆炸事件動員程序書(第二版)，106 年 6 月 21 日。
2. 行政院原子能委員會，ERS-AEC-015 程序書，輻射應變技術隊輻射彈爆炸事件現場應變作業程序書(第一版)，105 年 11 月 7 日。
3. 行政院環保署，1998 年七月，「空氣品質模式評估技術規範」

4. 張能復，2004 年，「軌跡模式在污染來源追蹤及污染源影響評估應用能力之探討研究」。
5. 曠永銓，周武雄，習良孝，2006 年七月，「CALPUFF 模式在台灣地區的模擬驗證與應用」，中興工程季刊，第九十四期，頁 85—92。
6. 李建忠，劉易，2013 年，「高空氣象資料在 AERMOD 預測中的適用性分析研究」，環境科學與管理，38(9)：24-27。
7. 呂世宗、林松錦、張哲明，1996，「ISC 大氣擴散模式對火力電廠環境影響評估適用性之研究」，中華民國環境保護學會會誌第十九卷第一期，p.24-46。
8. 江旭程、何彌亮、李正忠，1991，「不同空氣品質模式計算結果之比較」，大仁學報第九期，p.98-107。
9. 劉文得，1999，「以 ISC 模式評估氣象因子對空氣污染物擴散之敏感度」，東南工業專科學校東南學報第二十二期，p.163-172。
10. 元曉琴，2000 年，「穩定度判斷對空氣品質模式之影響—台中火力發電廠個案研究」，碩士論文，國立中興大學。
11. 林陽聲，1998 年，「地理資訊系統運用於空氣品質異常分析之研究」，碩士論文，國立中興大學環境工程學系。
12. 林春利，2001 年，「台中火力發電廠硫氧化物排放減量對中部地區空品之探討」，碩士論文，私立東海大學。
13. 廖崇園，2000 年，「應用 ISCST3 擴散模式和 CMB 受體模式評估實施 PM10 檢量管制後對空氣品質之影響」，碩士論文，國立中興大學。
14. 李賢衛，2002 年，「空氣污染物排放與總量管制增量限值變異之研究—以園區硫氧化物排放為例」，碩士論文，高雄第一科大環境與衛生工程系。
15. 霍慶，蔡旭暉，宋宇，2012 年，「全國大氣擴散輸送模態與區劃研究」，環境科學學報，32(2)：360366。
16. 陳帝文，2015 年，「澎湖群島大氣汞污染物濃度時空分佈及化學特徵分析」，碩士論文，國立中山大學環境工程研究所。
17. 張億閔，2014 年，「台灣海峽周邊地區大氣汞時空分佈及污染來源解析」，碩士論文，國立中山大學環境工程研究所。
18. 馬京津，張英娟，2009 年，「應用 HYSPLIT 模式分析華北夏季水氣輸送路徑」，第十四屆全國大氣環境學術會議論文集 (2009/02)，p.70—75。
19. 余嘉裕，林能暉，謝和修，林宗嵩，2008 年，「東南亞地區春季前推軌跡群集分析及氣候影響」，大氣科學，36 卷 4 期 (2008/12/01)，p.287—301。
20. 林群燁，2010 年，「沙塵暴對台南地區大氣氣膠物化特性之影響」，碩士論文，成功大學環境工程學系。
21. 黃威巽，2006 年，「2001 年東亞硫沉降之模擬」，碩士論文，中央大學大氣物理研究所。

22. White, J. Harvey, and H. Farnstrom, K., "Testing of Mobile Surveillance Robot at A Nuclear Power Plant," Robotics and Automation, IEEE International Conference on Proceedings, vol.5, pp.7–14, 1987.
23. National Urban Security Technology Laboratory. 2017. Radiological Dispersal Device(RDD) Response Guidance Planning for the First 100 Minutes.
24. Chang, J.S., 1990. Appendix E, NAPAP Report 4, The regional acid deposition model and engineering model. In Acid Deposition: State of Science and Technology, Vol I, Emissions, Atmospheric Processes, and Deposition, U.S. Government Printing Office, Washington D.C., 20402-9325.
25. Draxler, R.R., 1996: Trajectory optimization for balloon flight planning. *Weather and Forecasting*, 11, 111-114.
26. Drew R. Michanowicz, 2016: A hybrid land use regression AERMOD model for predicting intra-urban variation in PM_{2.5}. *Atmospheric Environment.*, 131, 307—315.
27. Dodla, V.B.R., Gubbala, C.S. and Desamsetti, S. (2017). Atmospheric dispersion of PM_{2.5} precursor gases from two major thermal power plants in Andhra Pradesh, India. *Aerosol Air Qual. Res.* 17: 381–393.
28. Hicks, B. B., 1986: Differences in wet and dry particle deposition parameters between North America and Europe. In *Aerosols: Research, Risk Assessment, and Control Strategies*, Lewis Publishers, Chelsea, MI, 973-982.
29. Hosker, R.P., 1984: Flow and diffusion near obstacles. In: *Atmospheric Science and Power Production*. R. Randerson, Ed, DOE/TIC-27601, National Technical Information Service, Springfield, VA.
30. Huber, A.H. and W.H. Snyder, 1982: Wind tunnel investigation of the effects of a rectangular-shaped building on dispersion of effluents from short adjacent stack. *Atmospheric Environ.*, 17, 2837-2848.
31. Isakov V., Venkatram A., Touma J.S., Koracin D., 2007, "Evaluating the use of outputs from comprehensive meteorological models in air quality modeling applications. " *Atmospheric Environment*, Vol. 41, No. 8, pp. 1689-1705.
32. Kesarkar A.P. Dalvi M., Kagainalkar A., Ojha A., 2007, "Coupling of the Weather Research and Forecasting Model with AERMOD for pollutant dispersion modeling. A case study for PM₁₀ dispersion over Pune, India." *Atmospheric Environment*, Vol. 41, No.9, pp. 1976-1988.
33. Kreyszig, E., 1968: *Advanced Engineering Mathematics*. 2nd Ed., J.Wiley and Sons, New York, 898 pp.
34. Legg, B. J., and M. Raupach, 1982: Markov chain simulation of particle dispersion in inhomogeneous flows: the mean drift velocity induced by a gradient in Eulerian velocity variance. *Boundary- Layer Meteorol.*, 24, 3-13.

35. Levy, J.I., J.D. Spengler, D. Hlinka, D. Sullivan, and D. Moon, 2002: Using CALPUFF to evaluate the impacts of power plant emissions in Illinois: model sensitivity and implications. *Atmospheric Environ.*, 36, 1063-1075.
36. Orloff K.G., Kaplan B., Kowalski P., 2006, "Hydrogen cyanide in ambient air near a gold heap leach field : Measured vs. modeled concentrations." *Atmospheric Environment*, Vol. 40, No.17, pp.3022-3029.
37. Petterssen, S., 1940: *Weather Analysis and Forecasting*. McGraw-Hill Book Company, New York, 221-223.
38. Scire, J.S., D.G. Strimaitis and R.J. Yamartino, 2000: *A User's Guide for CALPUFF Dispersion Model (Version 5)*. Earth Tech, Inc., Concord, MA.
39. Scire, J.S. and L.L. Schulman, 1980: Modeling plume rise from low-level buoyant line and point sources. *Proceeding Second Point Conference on Application of Air Pollution Meteorology*, 24-28 March, New Orleans, L.A., 133-139
40. Schulman, L.L. and J.S. Scire, 1981: The development and capabilities of the BLP Model. In: *Proceeding APCA Specialty Conference on Dispersion Modeling from Complex sources*, St. Louis, MO.
41. Schulman, L.L., D.G. Strimaitis and J.S. Scire, 1997: *Addendum to ISC3 User's Guide: The Prime Plume Rise and Building Downwash Model*, Earth Tech, Inc. Concord, MA
42. Stein A.F., Isakov V., Godowich J., Draxler R.R., 2007, "A hybrid modeling approach to resolve pollutant concentrations in an urban area." *Atmospheric Environment*, Vol. 41, No. 40, pp. 9410-9426.
43. U.S.EPA (2004). *User's guide for the AERMOD terrain preprocessor (AERMAP)*. North Carolina 27711: US EPA, Environmental Protection Agency.
44. Van der Hoven, I., 1968: Deposition of particles and gases. In *Meteorology and Atomic Energy*. D. Slade (Ed.), TID-24190, NTIS, Springfield, VA, 445 pp.
45. Venkatram A., Isakov V., Yuan J., Pankratz D., 2004, "Modeling dispersion at distances of meters from urban sources" *Atmospheric Environment*, Vol. 38, No. 28, pp.4633-4641.
46. Walmsley, J. L., and M.L. Wesely, 1996: Modification of coded parameterizations of surface resistances to gaseous dry deposition. *Atmos. Environ.*, 30, 1181-1188.
47. Wesely, M.L., 1989: Parameterizations of surface resistances to gaseous dry deposition in regional-scale numerical models. *Atmos. Environ.*, 23, 1293-1304.
48. Zhou Y., J.I. Levy, J.K. Hammitt, and J.S. Evans, 2003: Estimating population exposure to power plant emissions using CALPUFF: a case study in Beijing, China. *Atmospheric Environ.*, 37, 815-826.
49. Anil Mahtani, Luis Sanchez, Enrique Fernandez and Aaron Martinez, "TEffective Robotics Programming with ROS - Third Edition," Chapter2, 2016.

50. Roy Thomas Fielding, "Architectural Styles and the Design of Network-based Software Architectures," Doctor of Philosophy in Information and Computer Science. University of California, Irvine, 2000. CHAPTER 5 Representational State Transfer.
51. Desmond King-Hele, "Erasmus Darwin's Improved Design for Steering Carriages--And Cars," Notes and Records of the Royal Society of London Vol. 56, pp. 41-62., 2002.