

圖 56：劑量率計算方法

十一、透過機器學習方式將輻射偵測結果用於預測土壤質地(義大利團隊)

土壤知識在精準農業中發揮關鍵作用，需要土壤物理和化學特性的高解析度地圖，以加強作物管理並降低產量風險，土壤質地影響各種生物、化學和物理過程，例如有機物、養分和污染物的傳輸、沉積、侵蝕和吸附，傳統方法與遙測方法對於大面積區域，直接測量方法可能既耗時又昂貴，透過空中輻射偵測之加馬輻射能譜進行的間接測量可克服這些問題，可以快速有效地繪製大面積地圖，選擇梅扎諾(Mezzano Lowland)研究區域，該區域是因為其填海歷史、幾乎獨有的農業土壤以及公共土壤紋理圖的可用性。

地點選擇梅扎諾低地，位於波河平原東部的艾米利亞-羅馬涅大區(Regione Emilia-Romagna, RER)，面積約 189 平方公里，1960 年前，這還是一片鹹水沼澤，土地開墾過程將其轉變為農田，該區研究優勢為人為基礎設施最少，可減少空氣加馬訊號中的人為干擾，整個地區目前位於海平面以下，海拔範圍為-3.5 至 -0.5 公尺，土地主要用於農業，特別是番茄作物，如圖 57。

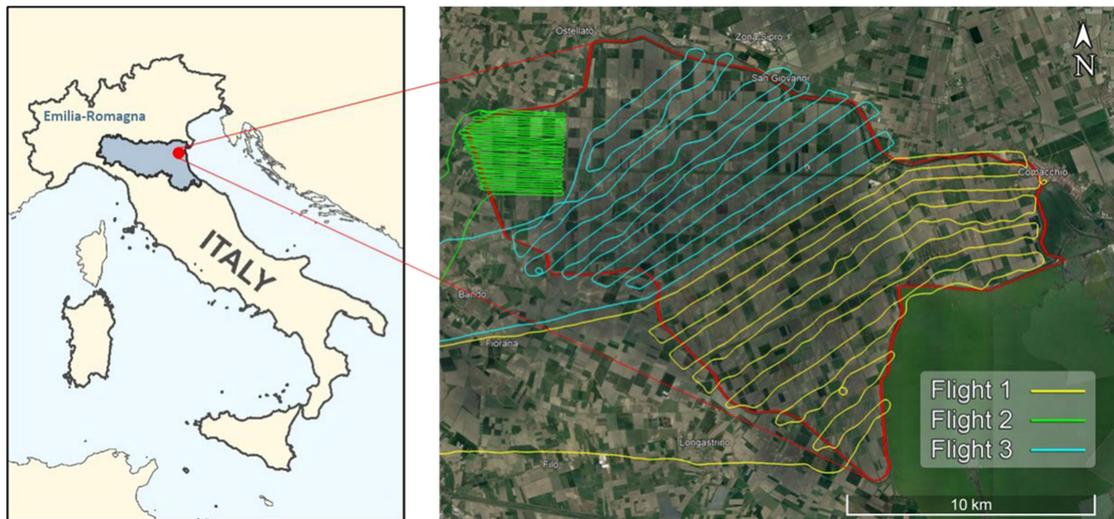


圖 57：在梅扎諾(Mezzano Lowland)低地執行空中輻射偵測

空中輻射偵測所使用的載具為 Radgyro，具有 1.6 升渦輪增壓引擎，有效負重：150 公斤，油箱：90 公升，燃料：普通汽油，長度：5.20 m，寬度：2 m，飛行迴轉半徑：8.5 m，起飛空間：< 70 m，飛行時間：< 3.5 小時，可調查範圍：~ 50 km²/h，如圖 58。



	Airborne Gamma Ray Spectrometer 16 L	
	4 NaI(Tl)	4 Lit.
	Energetic resolution	8.5% at 662 keV (¹³⁷ Cs)
	Channels	2048
	Real-time feedback	notebook + 5G
	Dimensions	75cm x 45cm x 50cm
	Weight (total)	~ 115 kg
	Output	List mode events

圖 58：Radgyro 空中輻射偵測載具

頻譜分析採用非負最小平方法的全頻譜分析(FSA)，將所獲得的能譜視為每個放射性核種的基本能譜的組合，使用基於 GEANT 4 的蒙地卡羅程式模擬在相應的飛行高度並重建基本能譜，模擬考慮分佈在地表面之無限平面放射性核種的加馬輻射，為了排除大氣中氬氣的干擾，大氣中氬-222 子核會使系統高估地面鈾-238 活度濃度，由於這種偏差和缺乏長期平衡，將鈾-238 含量被排除在研究之外，檢測極限為鉀-40 的活度濃度 0.05×10^{-2} Bq/g，鈷-232 的活度濃度 0.08 μ Bq/g。

艾米利亞-羅馬涅大區地質地震土壤服務局提供整個地區的土壤質地圖，地圖顯示表層 30 cm 土壤，解析度為 500 m × 500 m，地圖是透過使用對基於點的紋理資料進行插值而得出的，並以地理土壤學資料作為補充資訊，對於梅扎諾區域，使用 723 個方形網格的數據，其中包括黏土、沙子和淤泥的重量百分比含量，質地類別是根據美國農業部(USDA)分類定義的，將從所獲得的加馬能譜中的鉀-40 和鈷-232 活度濃度資料進行空間化，解析度為 500m x 500m，與艾米利亞-羅馬涅大區的地圖一致，如圖 59。

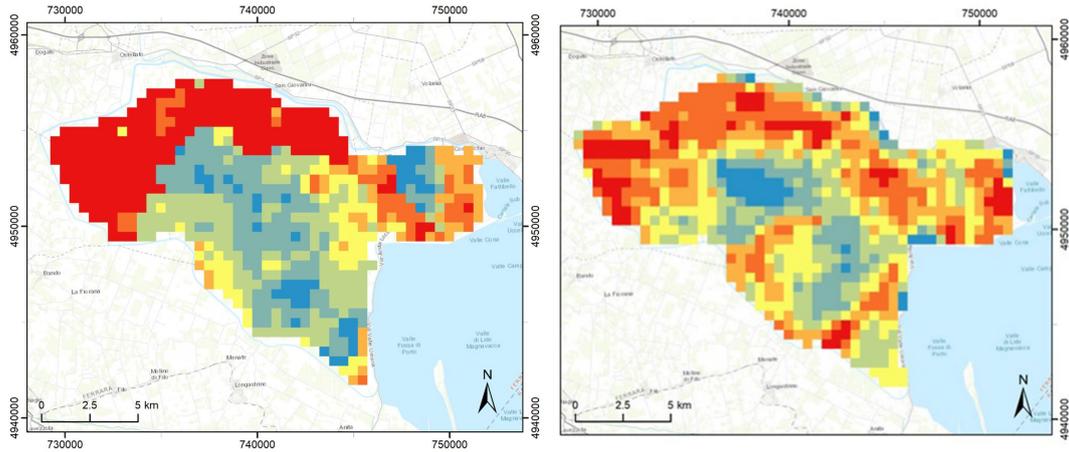


圖 59：黏土土壤質地圖(左)與鉀-40 輻射偵測結果(右)

研究目標為使用單線性迴歸 (SLR) 和非線性機器學習 (NLML) 演算法建立鉀-40 和鈾-232 豐活度濃度與土壤成分 (沙、淤泥、黏土) 之間的關係，NLML 演算法部分開發了一種深度類神經網路模型，利用鉀-40 和鈾-232 豐度來預測黏土和砂土含量，如圖 60。

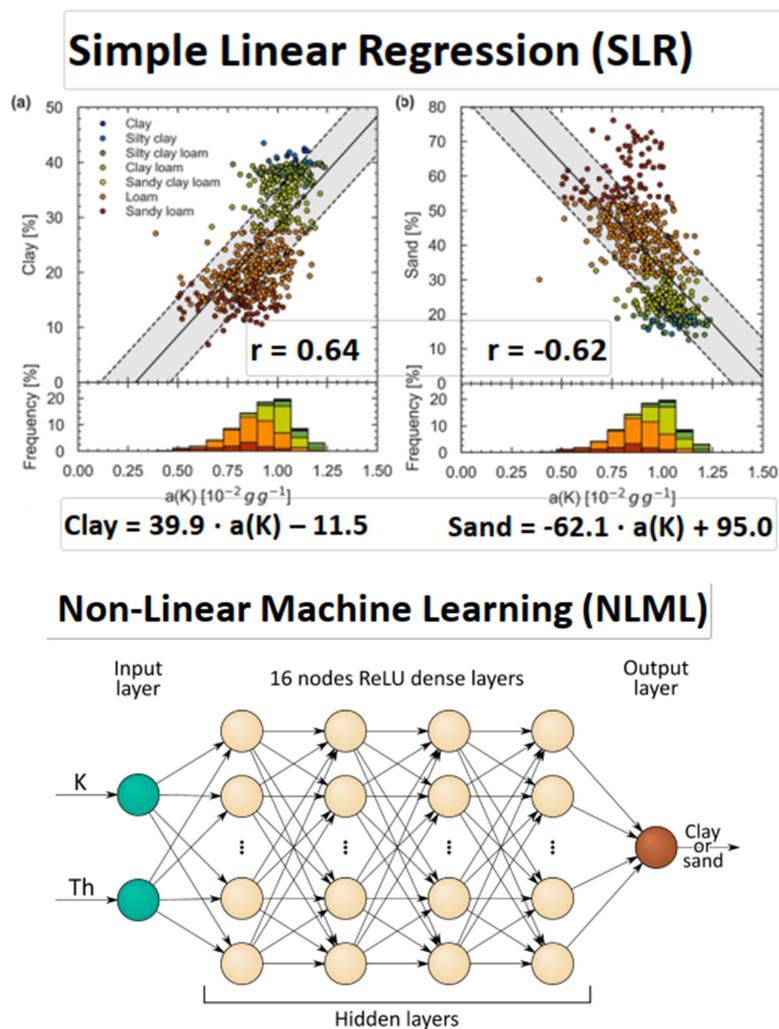


圖 60：單線性迴歸 (SLR) 和非線性機器學習 (NLML) 演算法

機器學習方法首先要進行模型開發，即收集訓練資料集，用於「教導」或「訓練」該演算法，模型從這些數據中學習模式和關係，避免過度擬合，透過分割數據，確保模型不僅能記住訓練數據(過度擬合)，還能很好地推廣到新的、未見過的數據，最後要執行模型驗證，包含測試資料集，用於評估模型在資料上的效能。

透過機器學習方法在 Mezzano Lowland 區域進行的結果顯示，土壤質地預測圖顯示了與 RER 黏土和沙圖相同的宏觀結構，北部地區黏土含量高與波河古河床有關，主要差異是 RER 地圖未顯示的兩個高黏土和低沙含量的窄形特徵，在整個調查區域的分佈並不均勻，總共記錄了 273 個測量值，AGRS 提供了更一致和統一的區域覆蓋範圍，它產生了 1469 個加馬能譜，是 RER 測量數量的五倍多，由於 AGRS 增加許多取樣數據，可以辨別透過有限的 RER 測量無法偵測到的結構和模式，Eridano、Proto-Idice 和 Proto-Valreno 河道的廢棄導致河床被沉積物充填，在沉積充填過程中，較粗的顆粒（如沙子）會先沉積，然後逐漸沉積較細的顆粒（如黏土），如圖 61 至圖 62。

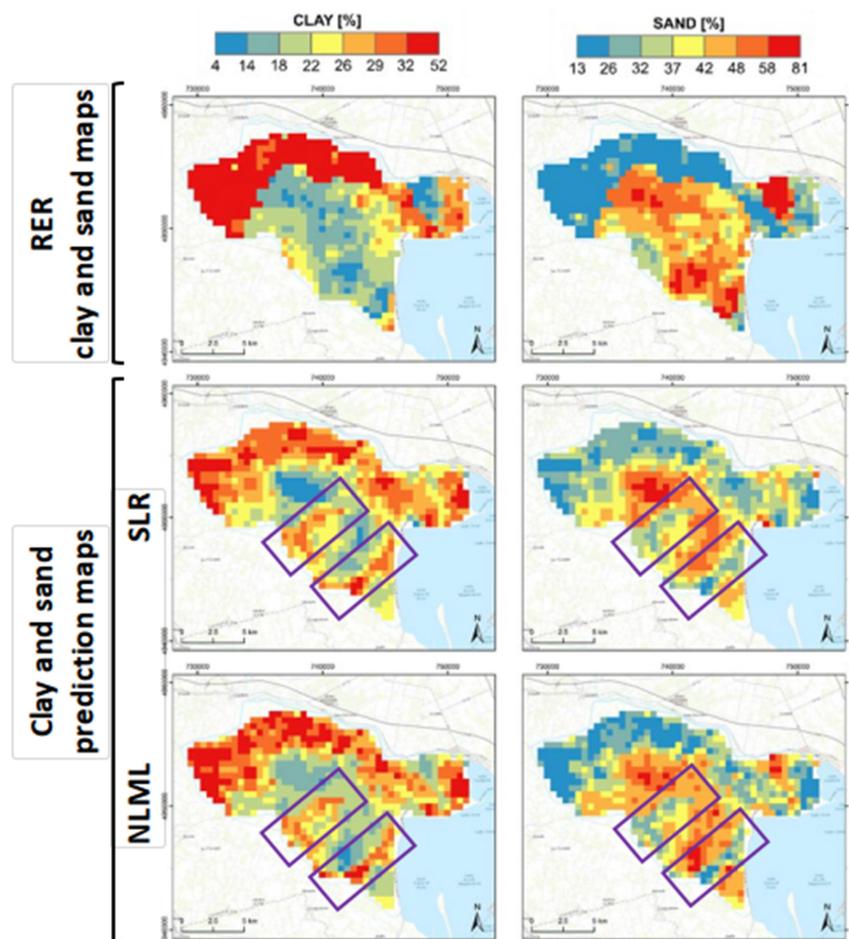


圖 61：透過機器學習方法在 Mezzano Lowland 區域進行的結果

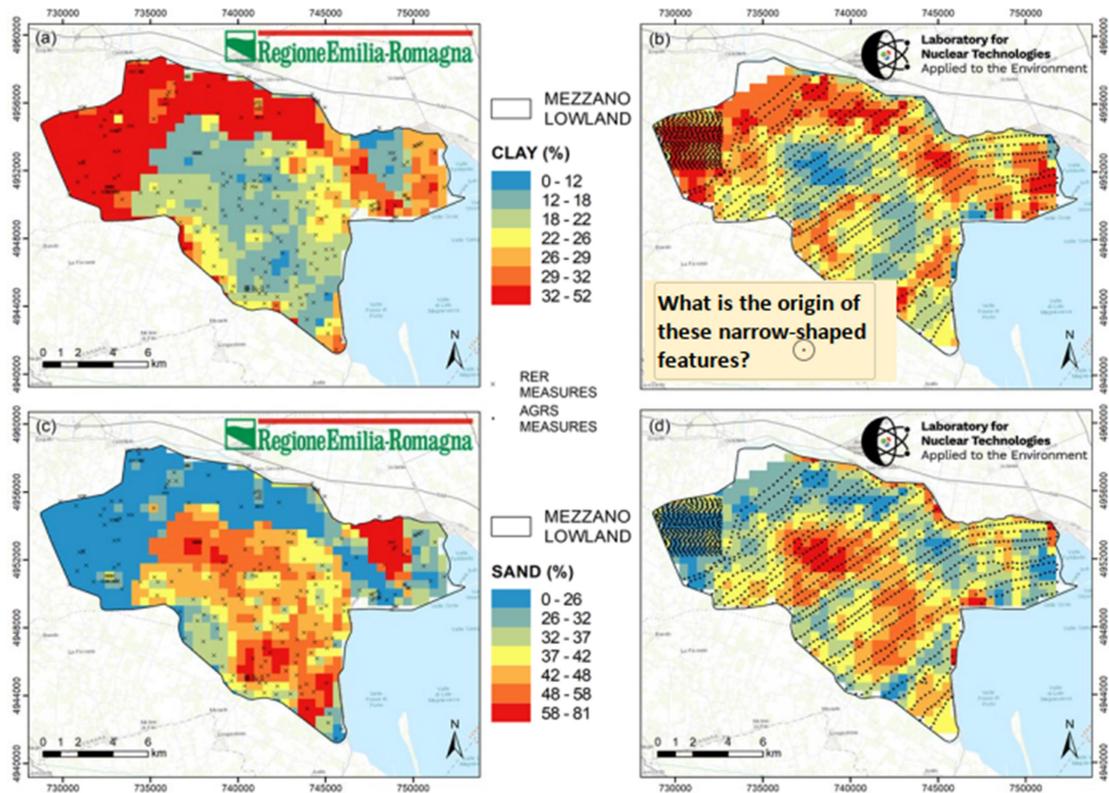


圖 62：艾米利亞-羅馬涅大區(Regione Emilia-Romagna)土壤質地預測圖

義大利團隊透過機器學習方式將輻射偵測結果用於預測土壤質地的研究成果已發表在 *Remote sensing* 期刊，如圖 63，該研究重要結論為 AGRS 是一種快速可靠的間接測量技術，可用於檢索土壤質地。ML 演算法能夠改善 R2 值 (Coefficient of determination) 方面的土壤質地預測。如果經過適當的訓練，可以透過單一機器學習演算法對紋理三角形的任何部分進行黏土、淤泥和砂土含量的預測，AGRS 測量的高密度可以突顯公共土壤質地圖中不存在的廢棄河床的痕跡。



Article

Airborne Radiometric Surveys and Machine Learning Algorithms for Revealing Soil Texture

Andrea Maino ^{1,2,*}, Matteo Alberi ^{1,2}, Emiliano Anceschi ³, Enrico Chiarelli ^{1,2}, Luca Cicala ⁴, Tommaso Colonna ⁵, Mario De Cesare ^{4,6,7}, Enrico Guastaldi ⁵, Nicola Lopane ^{1,5}, Fabio Mantovani ^{1,2}, Maurizio Marcialis ⁸, Nicola Martini ⁹, Michele Montuschi ^{1,2}, Silvia Piccioli ⁹, Kassandra Giulia Cristina Raptis ^{1,2}, Antonio Russo ³, Filippo Semenza ^{1,2} and Virginia Strati ^{1,2}

圖 63：發表在 *Remote sensing* 期刊的研究

十二、使用數值方法自動化評估測量結果並執行品質保證(瑞士團隊)

設備在平時不使用的期間，可能會出現故障，所以品質保證系統需要定期進行測試，包含檢視偵測器老化、硬體缺陷、不正確的設定，軟體啟動時測試所有硬體和軟體組件的功能，所有可直接檢測到的故障都會被檢測到，並且通常會在之後直接修復，但仍會有些細節無法察覺。

有時碘化鈉偵測器或光電倍增管的能量漂移超過可接受的範圍，漂移無法直接偵測且無法量化，能量解析度則是偵測器損耗的重要指標，通常難以察覺且無法量化，偵測器的相對效率不應變化太大，否則許多校正參數無法使用，而且只能間接測量，評估過程繁瑣且非自動化，許多數據（例如相對效率）僅在與之前的測量值進行比較時才有意義且只能手動操作，無法自動化。

可以透過 2 個步驟解決上述問題。1. 首先選擇合適測量地點，例如柏林的實驗室，2. 定義測量時間，例如測量 10 分鐘，3. 定義測量週期，例如每月對所有系統進行系統檢查，4. 數據採用自主開發的演算法進行評估，流程演算法如圖 64，包括：

- A、自動能量校正。
- B、使用不同方法自動評估和擬合能峰。
- C、自動確定峰值計數率和全高半寬。
- D、與先前測量和其他系統的結果比較。
- E、必要時：即時修理或更換零件。

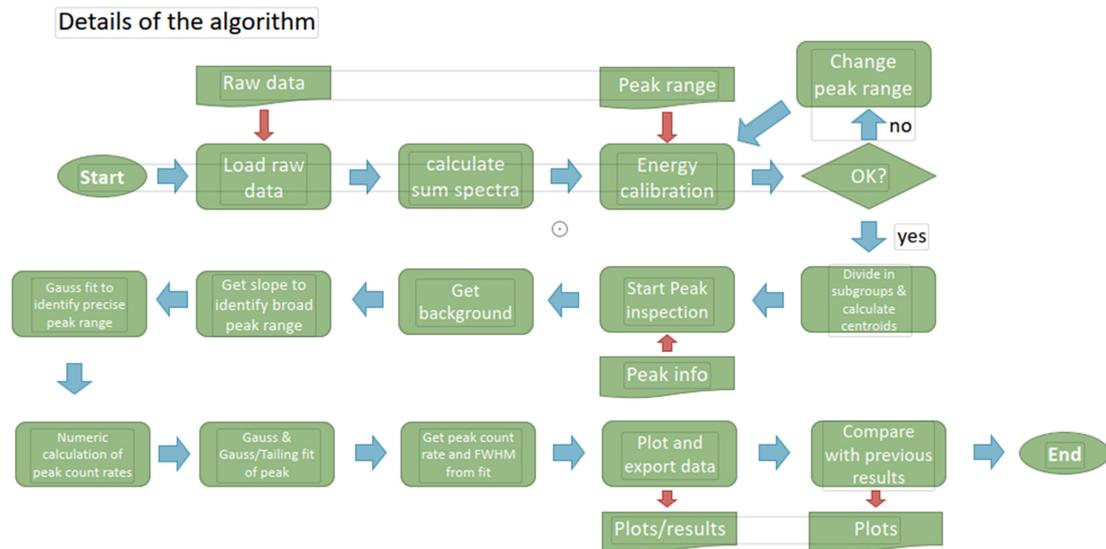


圖 64：自動化評估測量結果並執行品質保證的流程

瑞士團隊制定並實施了定期系統檢查的新程序，程序的核心是評估測量能譜的演算法，即量測能譜->能量校正->峰值檢測->計算 FWHM 和計數率，結果再與先前的測量結果進行比較評估，可用於識別有故障的控制器(Digibase)，未來將更容易追蹤探測器的性能，並在需要時即時更改它們。

十三、在緊急應變時量測或遺失輻射源時使用無人機載感測器(RSI 公司)

偵檢器檢測靈敏度正比於晶體體積，但同時會增加重量，另外若衰減時間越短，就越能處理高計數率，所以首先要決定配合不同類型的飛行載具與偵檢器的類型，如圖 65，因而規劃出 3 種最佳組合，如圖 66。

Detector choice		
Scintillator	Decay time(ns)	Density g/cm ³
NaI(Tl)	250	3.67
CsI(Na)	630	4.51
CsI(Tl)	1000	4.51
BGO	300	7.13

圖 65：各種偵檢器的特性



圖 66：3 種飛行載具與偵檢器的最佳組合

在安大略湖，距離岸邊 2000 公尺處進行宇宙射線的分離偵測，如圖 67。

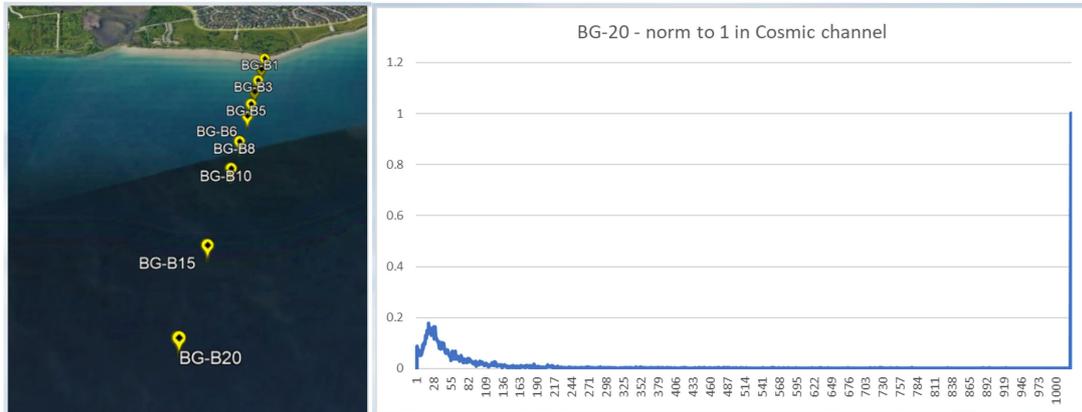


圖 67：宇宙射線的分離偵測

在 2023 年 7 月，Elia, E.A.等研究人員在不列顛哥倫比亞高原，以遙控飛機系統 (RPAS)量測內陸表面沉積物的計數率，如圖 68。

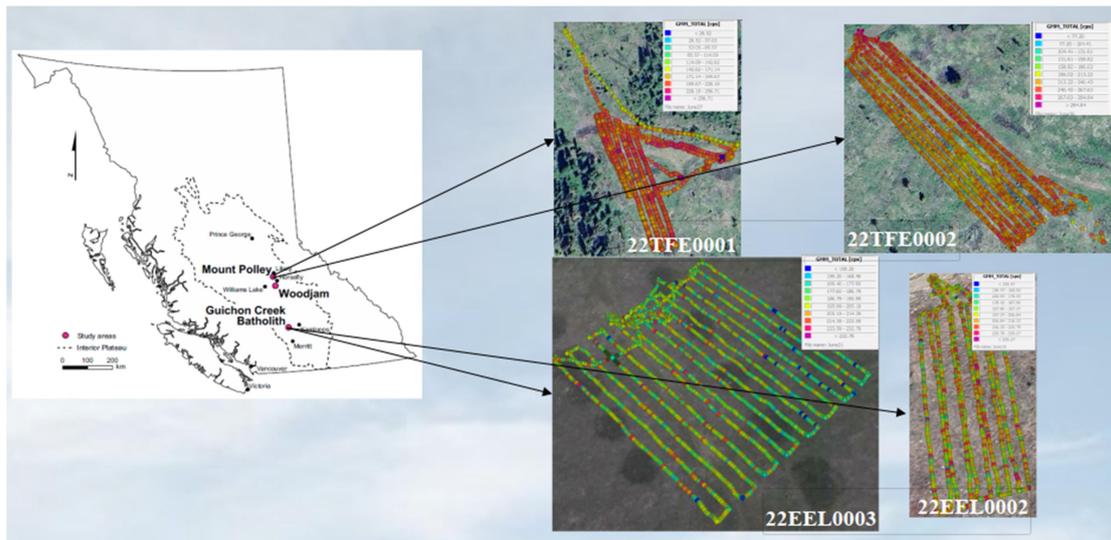


圖 68：以遙控飛機系統量測哥倫比亞高原內地地面沉積物的計數率

噪音調整奇異值分解法 (NASVD)為 Jens Hovgaard 博士於 1995-97年開發，可用於自動數據分析，大致來說是用矩陣與反矩陣的卷積計算，如圖 69，舉圖例來說，如圖 70 中，藍色為僅量 1 秒的原始能譜資料，經 NASVD 方法計算後的重建能譜為圖中橘色部分。

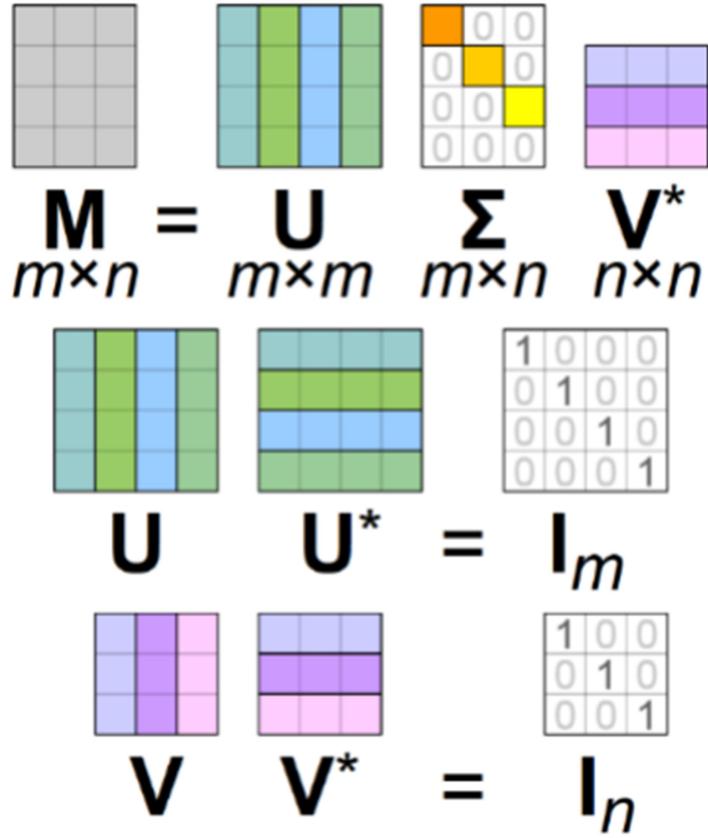


圖 69：噪音調整奇異值分解法

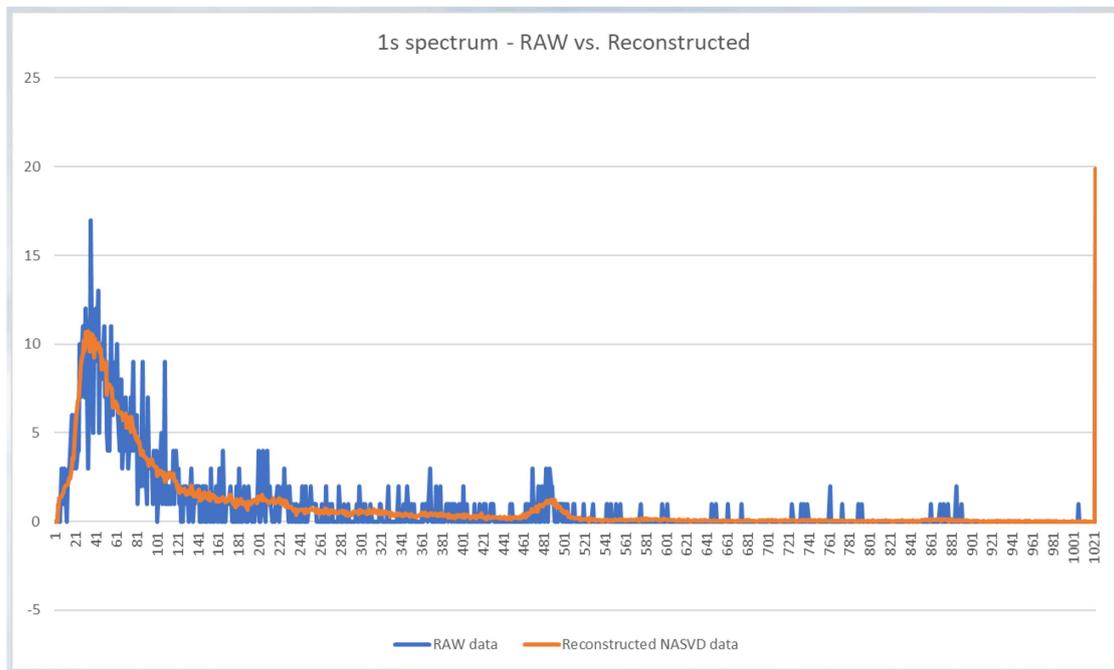


圖 70：原始能譜(藍)與經 NASVD 方法計算後的重建能譜(橘)

Hovgaard 博士和 Grasty 博士在 1997 年第四次十年一次的國際礦產勘探會議中發表透過光譜成分分析減少機載伽馬射線資料中的統計雜訊，如圖 71。

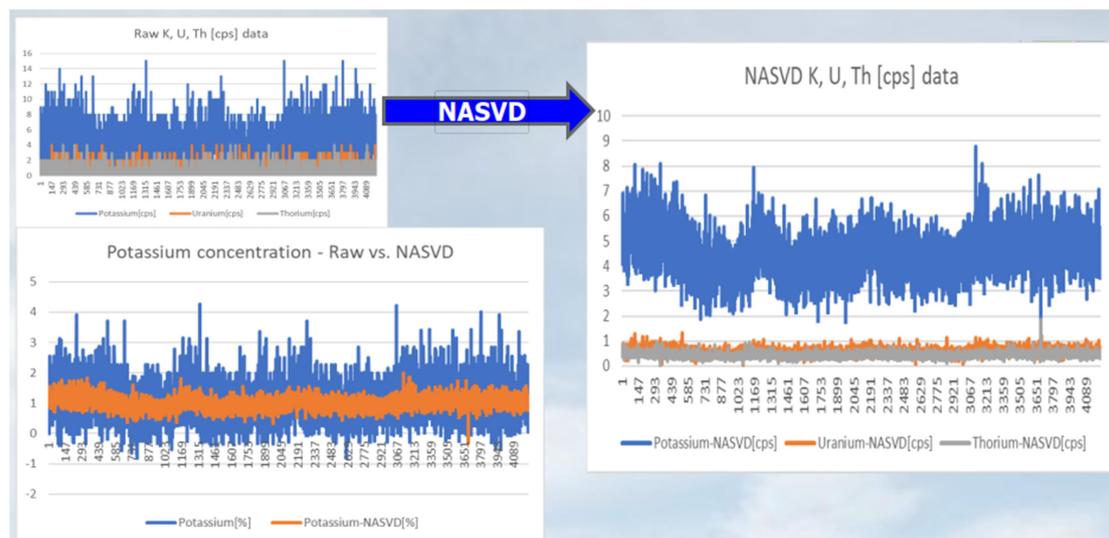


圖 71：Hovgaard 博士和 Grasty 博士的研究成果在遺失輻射源演練時，使用無人機載感測器及使用 NASVD 方法計算後的結果，如圖 72 至圖 73。

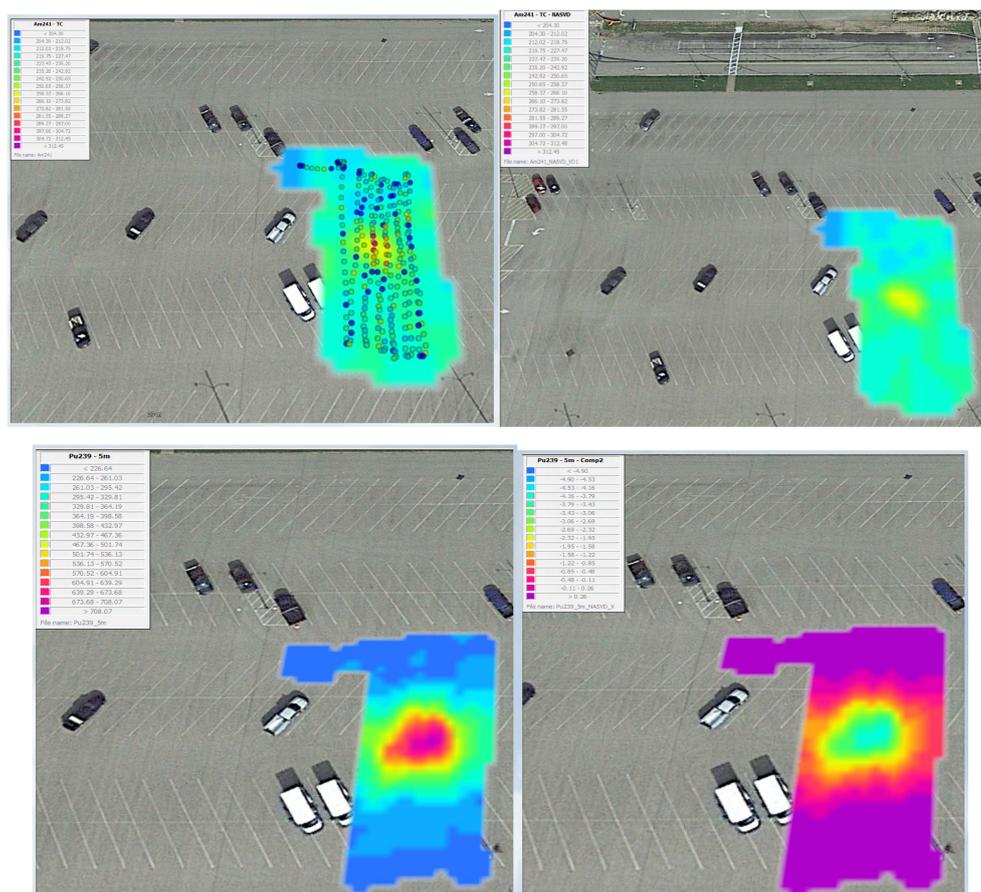


圖 72：某處停車場進行遺失輻射源演練

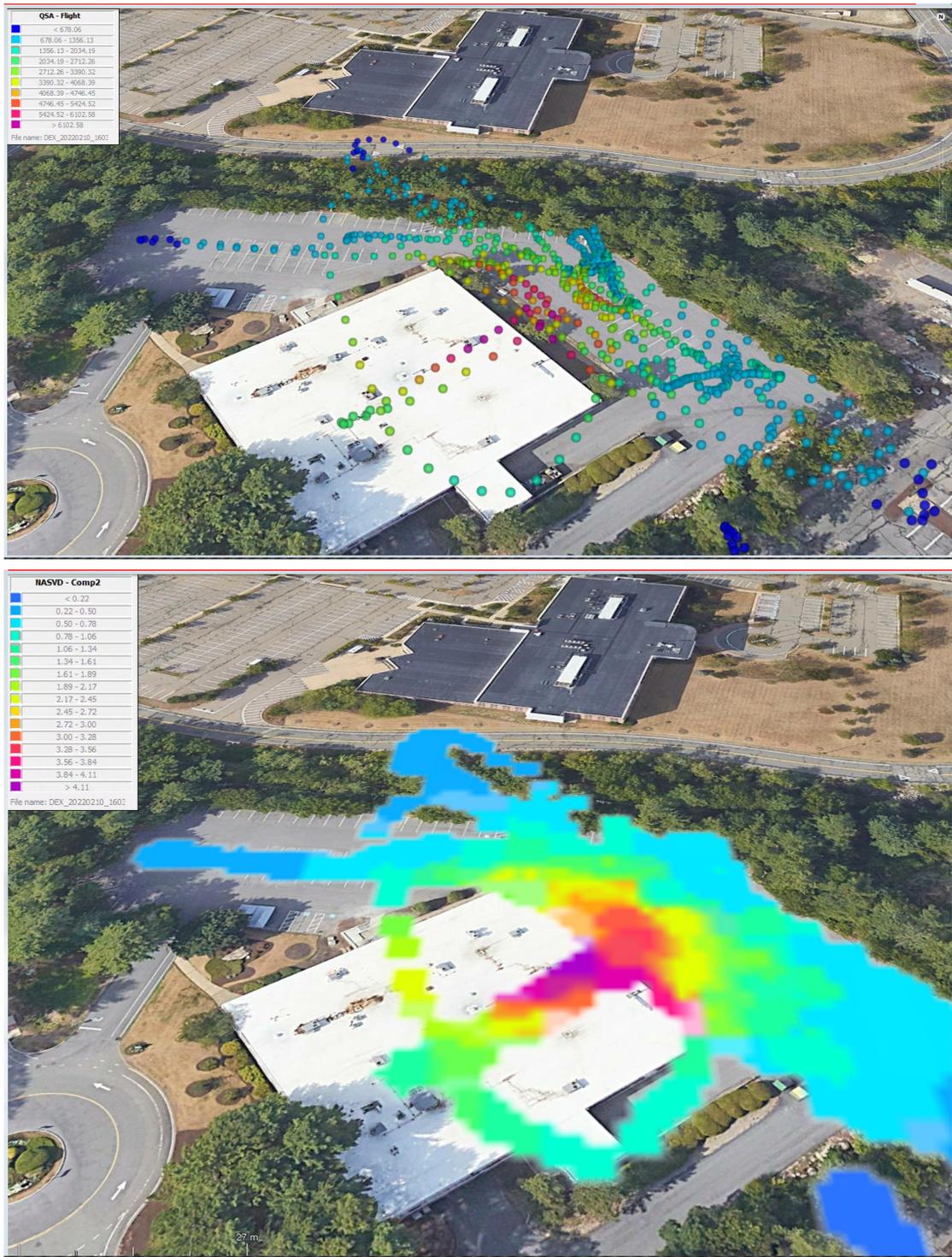


圖 73：某處辦公建築門口進行遺失輻射源演練

RSI 公司分享多年的空中輻射偵測經驗，包含可以先透過儀器與先前量測數據和實驗室所分析地球化學之間的一致性來確定系統可靠性，數據後處理和降低雜訊相當重要，需要「乾淨」區域來提高對比度，無人載具盡量飛得又慢又低，小圓柱形偵檢器晶體具有不少優點，可以考慮設計自動繪製放射性落塵分佈圖的軟體功能。

十四、瑞士施皮茨實驗室使用無人機執行放射性量測的經驗

施皮茨(Spiez)實驗室的緊急應變團隊能夠在發生核生化(NBC)事件時迅速做出反應，團隊在瑞士已運作超過 25 年，需要時是透過瑞士國家緊急行動中心(NEOC)進行召集 DDPS 緊急應變小組(EEVBS)，並透過參加歷年國際演習等方式不斷改進。

該緊急應變團隊隨時為在特殊 NBC 情況下即時部署的瑞士部隊（包含化學小組、警察、救護車和消防隊等），並提供快速建議和支援，他們由來自 Spiez 實驗室和 NBC EOD 武裝部隊能力中心的志願專家組成，這個特別團隊的運作理念是在盡可能短的時間內提供高效的現場支援，該緊急應變團隊每週 7 天、每天 24 小時提供服務，一旦警報響起，核子、生物和化學專家就會迅速趕到現場，並向部署在現場的事故指揮部提供建議。

核子 DDPS 緊急應變小組 (A-EEVBS)在發生放射性或核子事故時充當瑞士聯邦機構，作為聯邦緊急放射性事件的一部分，A-EEVBS 負責執行戶外偵測任務，而 Spiez 實驗室則進行固定實驗室分析，A-EEVBS 由約 20 名專家志工組成。若需要長期的工作或累積了大量待測樣本，軍事實驗室徵召單位 NBC Defense Lab 會提供額外支援，該部隊的成員在施皮茨實驗室接受測量儀器使用培訓，參加年度進修課程，並可在短時間內部署，這樣一來，總共可以額外快速動員 80 位核能專家來應付核事故。

生物 DDPS 緊急應變小組 (B-EEVBS)的專家隨時待命，為生物事件應變小組提供科學和技術建議，他們還確保施皮茨實驗室生物防護實驗室的響應準備就緒，特別是其處理、篩檢和分析高傳染性伊波拉病毒和馬堡病毒等風險組 4 病原體的能力。

化學 DPS 緊急應變小組 (C-EEVBS)自 2000 年 1 月以來，DDPS 的化學應急小組一直支援各州干預小組處理涉嫌使用化學製劑的事件，緊急小組使用自己的服務車輛，或從施皮茨 NBC 中心的軍用直升機，可迅速在一小時內到達事故現場，CEEVBS 的成員接受過化學戰劑處理的培訓，能夠在受污染地區受安全防護執行任務，在施皮茨的認可分析實驗室進行分析，C-EEVBS 也可透過專線電話提供全天候技術建議，這項服務很重要，因為在發生神經毒劑攻擊的情況下，在最初幾分鐘內採取正確的措施對於事件的進一步發展至關重要。

接下來回到無人機執行放射性量測的部分，在瑞士是由核子 DDPS 緊急應變小組負責，必須先了解無人機可以用於哪些場景？包含(1)有高輻射曝露或爆炸風險等，(2)測量現場不得有人在場的測量任務場景，或是(3)人員無法進入的地點，例如山谷、斜坡、深坑、峽谷以及有倒塌風險和其他危險的房屋和建築物，或是(4)需要放射狀況區域詳細資訊測量（例如，航空輻射測量飛行後局部區域的詳細輻射劑量率圖）。

C-EEVBS 最後選用 DJI T16 無人機，它可以在 15 分鐘內自動飛行約 5 公頃，之後必須更換電池，銫-137 的偵測極限為 20 MBq，對於上述 3 種可能場景的測試演練已證明了無人機的功用。

簡介瑞士今年辦理 ARM23 演習的方式，演習初始情境設定為輻射源失竊，隨後 NEOC 的 ARM 團隊收到警報並指定了搜索區域，經過粗略定位和識別後，資訊提供給無人機團隊，演習目標為練習任務規劃、訓練和優化搜尋策略、練習跨團隊合作、獲得使用測量設備的經驗，無人機執行 ARM23 演習的量測結果，如圖 74 至圖 77，本次演習活動獲得結果包含活度濃度的估計誤差在 15% 內，無人機能順利偵測到 1 處微弱的鈾-137 輻射源，但無法準確量化，活度較強的鈾-137 輻射源，可準確量化，無人機和測量團隊之間的互動運作良好，直升機空中輻射偵測結果成功移交給無人機團隊，本次演習過程的各步驟時間表是未來改善計畫的重要參考資料。



圖 74：直升機空中輻射偵測

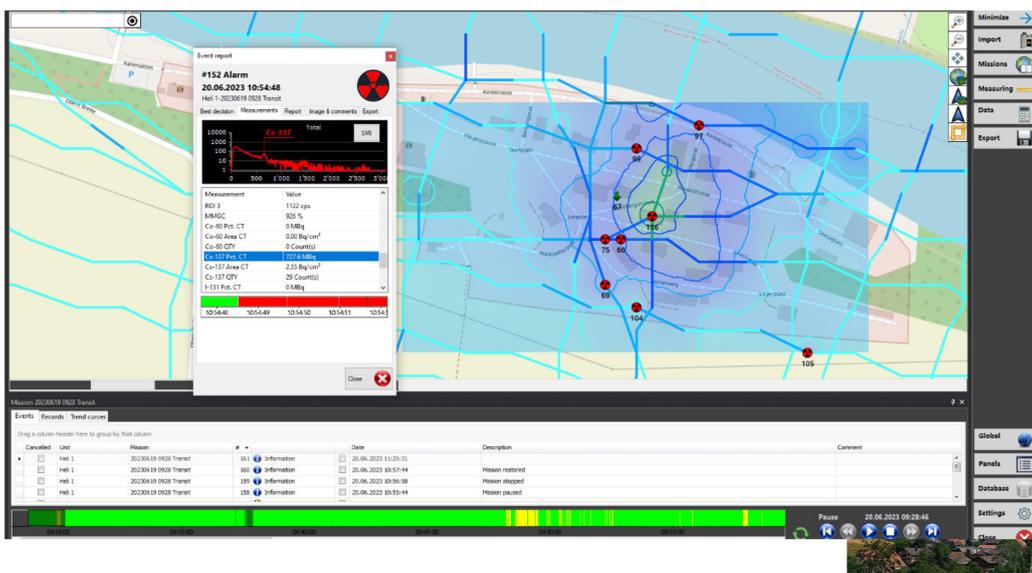


圖 75：直升機空中輻射偵測結果



Tests with a DJI T16

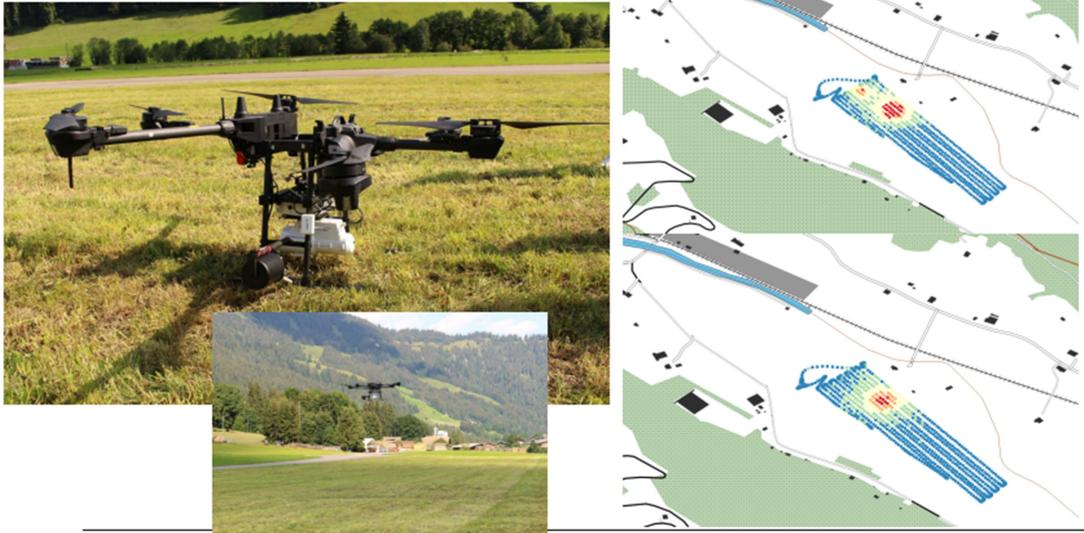


圖 76：無人機空中輻射偵測

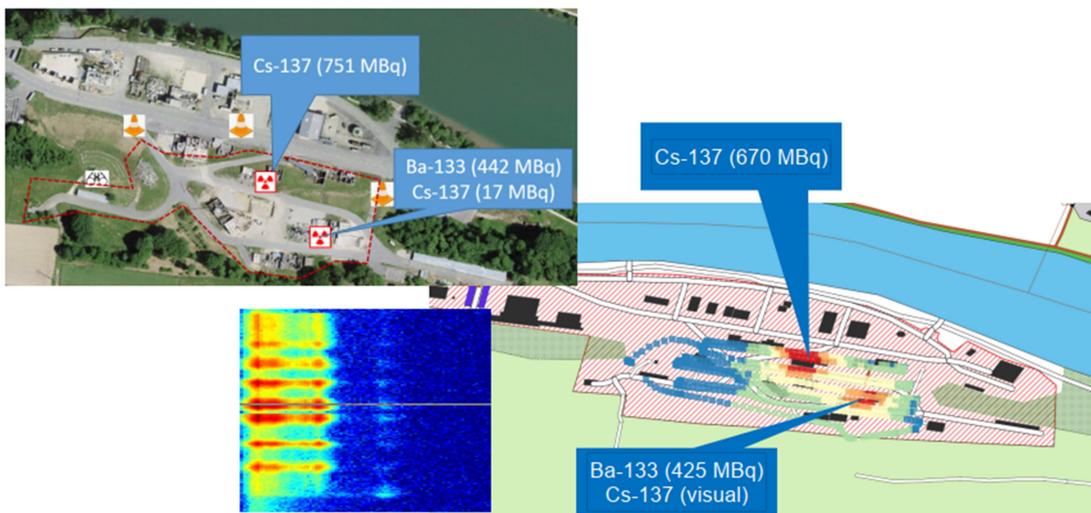


圖 77：無人機空中輻射偵測結果

十五、ERS 2.0 資料交換格式

協定資料交換格式的起始想法是 Simon Karlsson 及其同事為練習「RESUME 99」(RESUME 99 使用行動裝置進行快速環境調查，報告 NKS-15，ISBN 87-7893-065-0)所發展的 NKS(Nordisk Kernesikkerhedsforskning)格式，純文字格式(ASCII)，以識別符-值對形式寫入的數據，空格作為分隔符號，/*作為註解標識符號，NKS 資料格式定義，如圖 78 及圖 79。

Identifier	Description	Unit	Value example
AE_CS137	Equivalent surface activity of ^{137}Cs .	Bq/m ²	2345.6
AEM_CS137	Detection limit for equivalent surface activity of ^{137}Cs .	Bq/m ²	50
AEU_CS137	Uncertainty in surface activity of ^{137}Cs , standard deviation or standard error.	Bq/m ²	23.4
AR_CS137	Real activity of ^{137}Cs per unit area.	Bq/m ²	7845.6
ARM_CS137	Detection limit for real activity of ^{137}Cs per unit area.	Bq/m ²	70.
ARU_CS137	Uncertainty in real activity of ^{137}Cs per unit area, standard deviation or standard error	Bq/m ²	78.4
AR_K40	Activity of ^{40}K per unit mass.	Bq/kg	768
ARM_K40	Detection limit of the activity of ^{40}K per unit mass.	Bq/kg	12
ARU_K40	Uncertainty in the activity of ^{40}K per unit mass, standard deviation or standard error.	Bq/kg	7.6
AR_TH232	Activity of ^{232}Th series per unit mass.	Bq/kg	38.9
ARM_TH232	Detection limit of the activity of ^{232}Th series per unit mass.	Bq/kg	10
ARU_TH232	Uncertainty in the activity of ^{232}Th series per unit mass, standard deviation or standard error.	Bq/kg	8.9
AR_U238	Activity of ^{238}U series per unit mass.	Bq/kg	32.1
ARM_U238	Detection limit of the activity of ^{238}U series per unit mass.	Bq/kg	3.
ARU_U238	Uncertainty in the activity of ^{238}U series per unit mass, standard deviation or standard error.	Bq/kg	3.2
CPS	Counts per second full spectrum, live time.	Counts/s	1235.2
CPSU	Uncertainty in the counts per second full spectrum, live time, standard deviation or standard error.	Counts/s	123.
DATE	Measurement date.	Integer	19990907
D_CS137	Dose rate to air in free air from ^{137}Cs . Also used for air kerma rate.	μGy/h	0.022
DU_CS137	Uncertainty in the dose rate to air in free air from ^{137}Cs . Also used for uncertainty in the air kerma rate.	μGy/h	0.002
D_TOT	Total dose rate to air in free air from all sources. Also used for air kerma rate.	μGy/h	0.22
DU_TOT	Uncertainty in the total dose rate to air in free air. Also used for uncertainty in the air kerma rate.	μGy/h	0.02
H_TOT	Total ambient dose equivalent rate H*(10).	μSv/h	0.29

圖 78：NKS 資料格式

HU_TOT	Uncertainty in the total ambient dose equivalent rate H*(10).	μGy/h	0.03
REC	Record number.	Integer	23
SYS	System identification.	Alpha-numeric	DKA1
TAG	Identifier for surface type. Values are: ARW (asphalt road wide) ARN (asphalt road narrow) GR (Gravel road) CS (City street) GA (grass area)	Alpha-numeric	ARW
TIME.UTC	Time at measurement. UTC.	hhmmss	080511
TIME.LT	Time at measurement. Local time (in Sweden: UTC + 1h if not daylight saving time Summer time; UTC + 2h if daylight saving time).	hhmmss	100511
TIME.ST	Time at measurement. Standard time (in Sweden: UTC + 1h).	hhmmss	090511
X_RT90	X-co-ordinate, here defined as the East co-ordinate in the Swedish grid RT90 (seven integers).	m	1656211
Y_RT90	Y-co-ordinate, here defined as the North co-ordinate in the Swedish grid RT90 (seven integers).	m	6758321
X_WGS84	X-co-ordinate, here defined as the East co-ordinate in the World Geodetic System.	degrees	17.150868
Y_WGS84	Y-co-ordinate, here defined as the North co-ordinate in the World Geodetic System.	degrees	60.675144

圖 79：NKS 資料格式(續)

Robert Finck 及其同事在準備「RESUME 2002」(RESUME 2002 演習的初步結果，報告 NKS-86，ISBN 87-7893-144-4)演練時，對 NKS 格式進行了大規模延伸，包含：

1. 格式應適合移動輻射偵測。
2. 它應該使用 ASCII 字元並且人類可讀。
3. 它應該允許延伸。
4. 在適用時應可轉換為其他常用格式。
5. 應該可以將該格式擴展到其他類型的輻射測量，儘管這可能不是報告資料的最佳解決方案。
6. 部分損壞的資料不應妨礙轉換軟體正確讀取剩餘資料。
7. 應努力使描述資料所需的文件空間盡可能小，並考慮人類的可讀性。

ECCOMAGS 第 6 工作小組於 2003 年將包含光譜資訊在內的原始資料新增至 PRD 資料格式，格式規格僅在大學伺服器上發布

(<http://www.gla.ac.uk/ECCOMAGS/ERSFormat.pdf>)

(ERS：歐洲輻射和光譜測量格式)

為了提供對格式規範的持續應用，將規範其複製到 ARM07 練習的報告中（Bucher 等人：在瑞士 ARM07 演習框架內進行的德國、法國和瑞士機載加馬能譜系統國際比對演習，PSI 報告 09-07，<https://doi.org/10.55402/psi:35550>）。

G. Butterweck 及其同事在 ARM17 演習期間對 ERS 1.0 資料格式的演變（Butterweck 等人：捷克共和國、法國、德國和瑞士在瑞士 ARM17 演習框架內進行的機載加馬能譜系統國際比對演習，PSI 報告 18-04，<https://doi.org/10.55402/psi:34959>），包含：

1. 引入分隔符號“;” 標識符-值對之間。
2. 以點描述符（“PA”）取代點編號（“N”）作為指示符用於點數據的開始。
3. 允許使用多個偵測器（例如單一碘化鈉晶體）。
4. 能量窗口辨識的延伸。
5. 能量視窗計數比率的識別碼（例如 MMGC 比率）。
6. 修訂劑量率單位（例如 $\mu\text{Sv/h}$ 而非 $\mu\text{Sv/s}$ ）。
7. 放棄行長度的限制。

ERS 資料格式歷史沿革如圖 80。

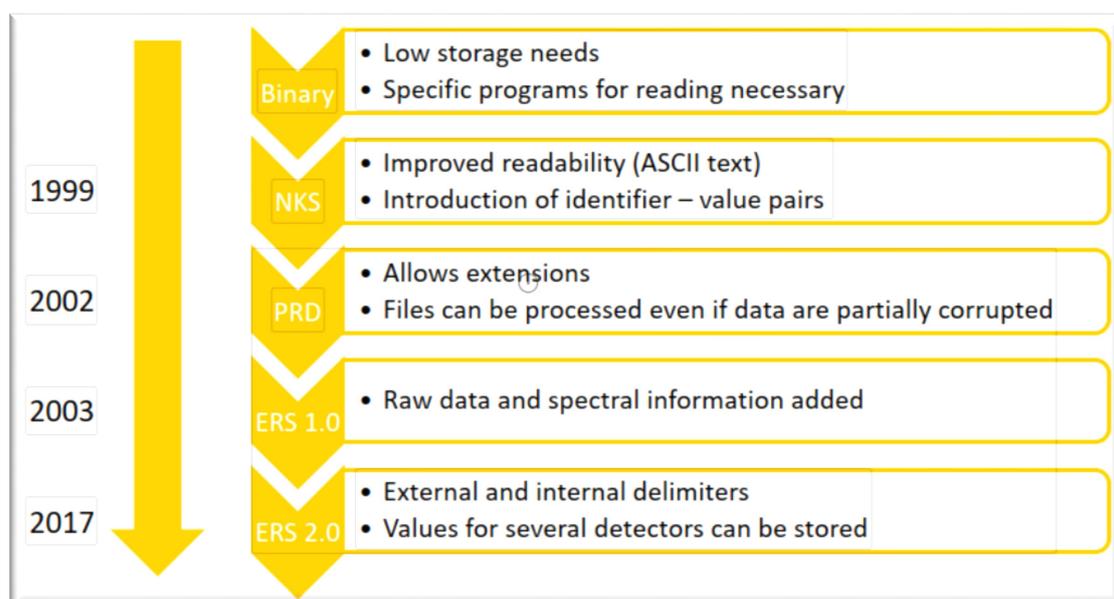


圖 80：ERS 資料格式歷史沿革

通用資料格式對於緊急情況下的國際合作至關重要，透過國際比對活動優化資料格式規範，ERS 2.0 格式基本上是一個以分號和空格分隔的 ASCII 文本文件。詳細的格式規範已發布並隨時可用 (DOI) 該格式允許存儲，測量參數、評估參數、原始數據和評估數據到單一文件中，從而為資料的未來使用提供改進的可追溯性。

資料格式未來發展，2003 年 ECCOMAGS 第 6 工作小組報告中提出了「ERS 組」發布和管理資料格式的想法，也許現在(2003)是時候復興這個想法了如圖 81。

4.5 ERS group

The format and its principle ideas should be free for everyone to use. No one will be allowed to charge anyone for the rights to use of the format. When the format comes in use, there will certainly be requests or suggestions for expansions of the format. If nothing is done to control that, each user will quickly have his own set of identifiers, and maybe also his own syntax rules. Then the compatibility required for exchanging data would be lost. During the last spectral analysis workshop held in June 2003 in Glasgow, it was decided to create a special interest group in charge to validate and record all changes on the ERS-format. Members of organisations involved in the ECCOMAGS project are welcome to take part to this group. In the future, the ERS-group could be open to additional organisations and countries. Suggestions for expanding the format could be discussed within the ERS-group before a new version is laid down. The secretary of the group led by one organisation should be appointed to publish (on a web site for example) the full description and documentation of all versions of the format. The Swedish Radiation protection Authority (SSI) is willing to do this to start with.

圖 81：「ERS 組」發布和管理資料格式的想法

十六、使用旋翼無人機系統遠端檢測 α 和 γ 放射性(西班牙與德國)

本研究是在兩個歐洲項目的框架內進行的：

1. (2017-2021) (<http://www.preparedness-empir.eu/>)：經過改造的能譜偵檢器，安裝在特定的無人機上，並在測量活動中進行校正，此外也開發並測試了定位器。
2. (2020-2023) (<https://remotealpha.drmr.nipne.ro/>)：開發遠端 α 機載偵檢器並安裝在無人機中，並在實驗室進行了測試。

介紹研究團隊所使用 4 種無人機搭載能譜偵測器組合：

1. PTB (德國)、UPC (西班牙)：DJI Matrice 600 Pro 無人機 (有效負載：6 公斤)， CeBr_3 偵檢器(1.5"x1.5")或碘化鈉(NaI)偵檢器(2"x2")，總重量：1.5 kg，可飛行約 20 分鐘，如圖 82。



圖 82：DJI Matrice 600 Pro 無人機與 CeBr_3 偵檢器

2. CMI 和 Nuvia (捷克共和國)：SWISSDRONE SDO 50 v2 汽油引擎無人機，有效負載約 45 kg，HPGe 偵檢器，總重量 25 公斤，如圖 83。



圖 83：SWISSDRONE SDO 50 v2 汽油引擎無人機與 HPGe 偵檢器

3. Kromek (英國)：AARM 無人機搭載 CsI 或 CZT 偵檢器，如圖 84。



圖 84：AARM 無人機搭載與 CZT 偵檢器

4. Nuvia (捷克共和國)：NuEM 無人機同時搭載多種類型的偵檢器，如圖 85。



圖 85：NuEM 無人機同時搭載多種類型的偵檢器

無人機校正程序為：1.背景特徵量測及 2.點射源與垂直高度飛行量測，如圖 86。

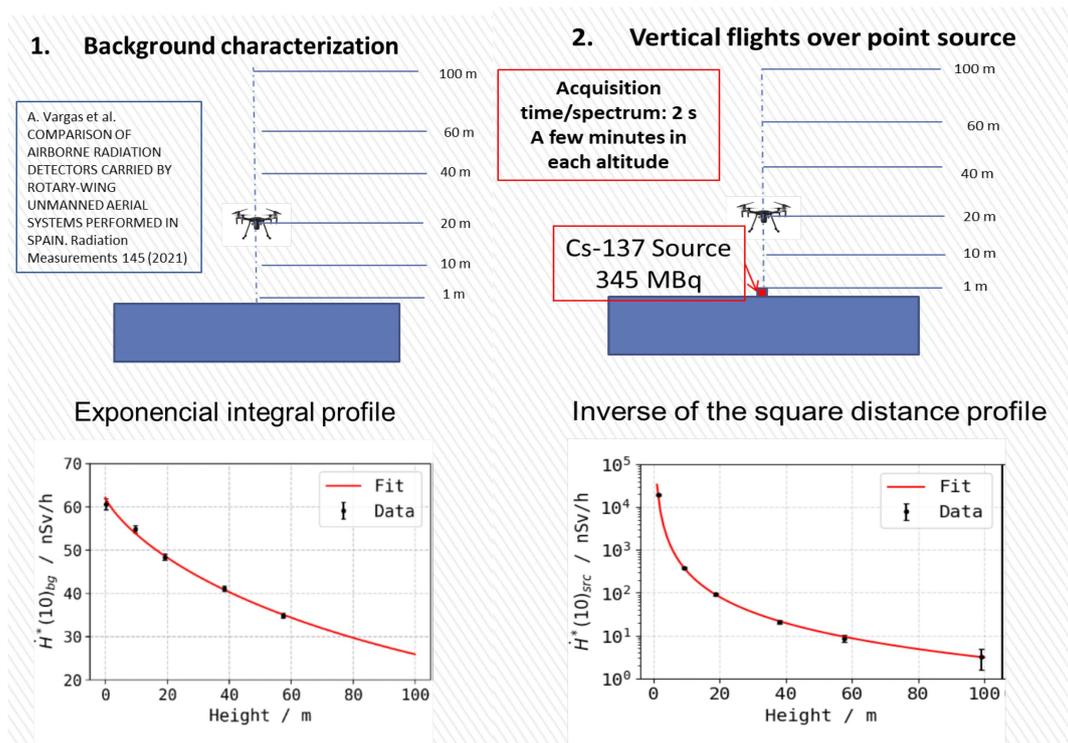


圖 86：無人機校正程序

團隊接著介紹以偵測輻射誘發的螢光現象來探測 α 輻射的原理，當 α 輻射游離附近空氣分子，分子會發出 200 nm 至 400 nm 紫外線範圍內的螢光， α 輻射在空氣中的射程僅 0.04 公尺，螢光紫外線在空氣中的射程高達 500 公尺，如圖 87。

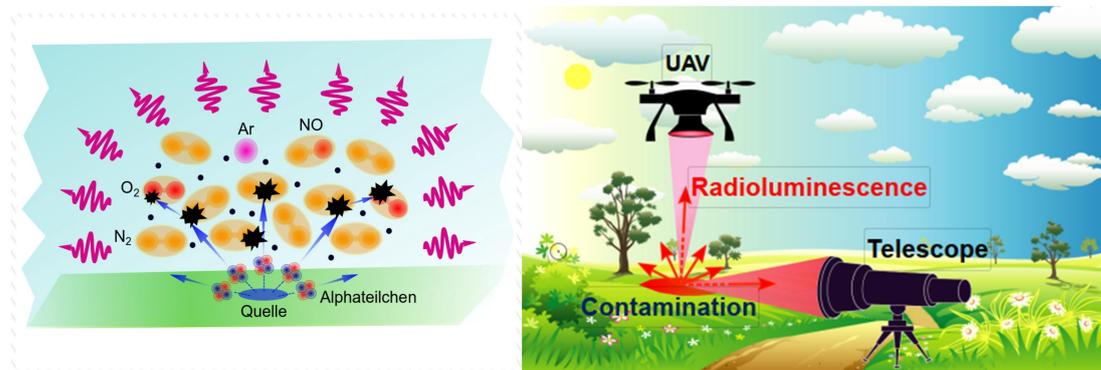


圖 87：偵測輻射誘發的螢光現象來探測 α 輻射的原理

白天時日光背景能譜，如圖 88， α 輻射產生的 UVA 紫外線因白天時太陽輻射的增加而無法辨識，(因 α 衰變)每個 MeV 誘導發光紫外線光子數約 19 個光子，發射的光子主要在 UVA 波長範圍內，假設在 UVC 波長範圍內僅產生約 0.2 個光子/MeV，但由於 UVC 背景發射量低，為了進行環境放射測繪，改為測量 UVC。

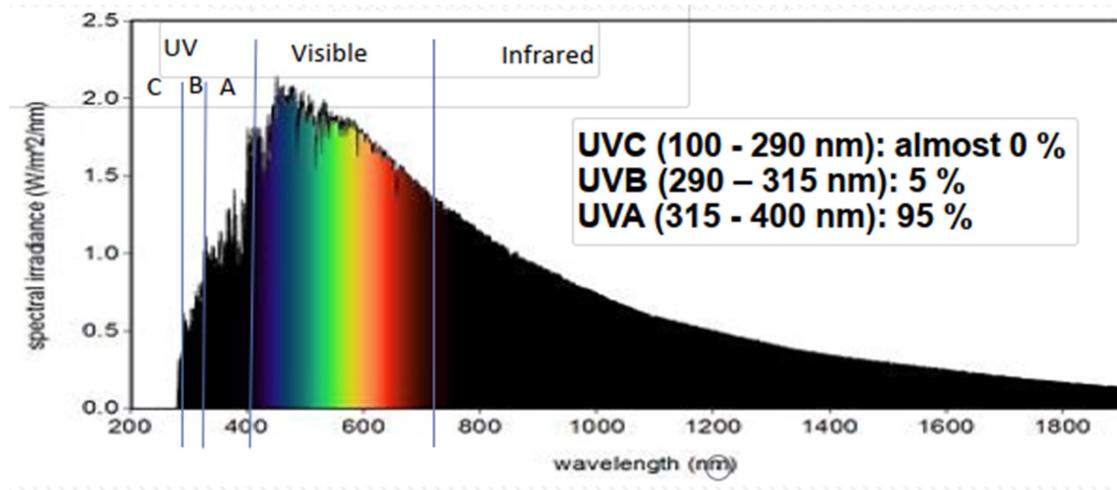


圖 88：日光背景能譜

在 DroneLab (UPC-巴塞隆納理工學院) 中進行測試後，望遠鏡安裝在無人機上並在戶外實測，如圖 89 至圖 90。



圖 89：在 DroneLab 進行測試後，望遠鏡安裝在無人機並在戶外實測

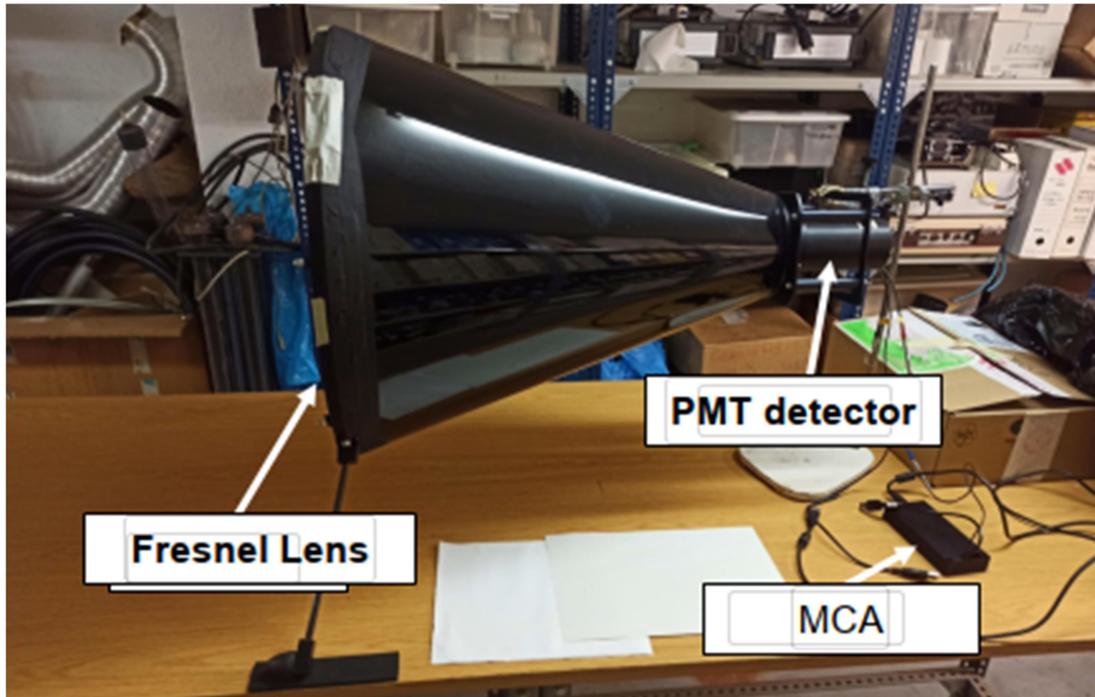


圖 90：DroneLab 測試望遠鏡

在實驗室中以不同活度（1 MBq、10 MBq 和 100 MBq）銻-241 輻射源進行測試光學偵測系統，如圖 91。

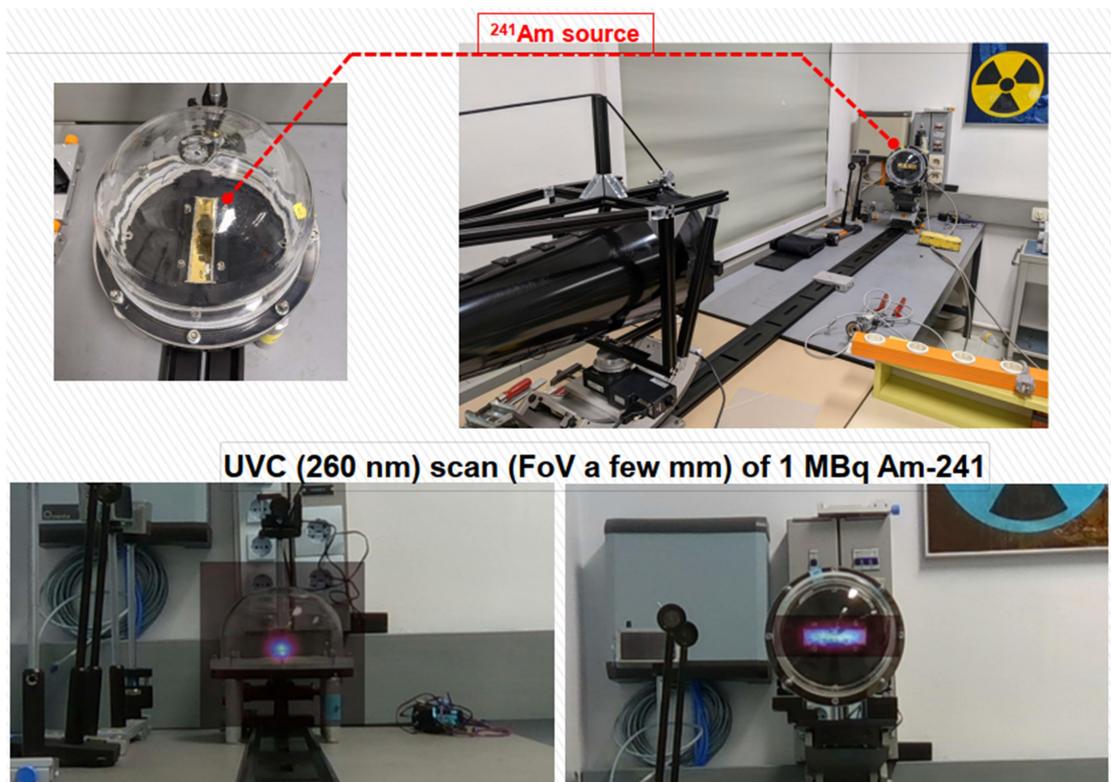


圖 91：驗室中以不同活度銻-241 輻射源進行測試光學偵測系統

確定無人機上安裝的探測器的有效偵測視野大小和效率，如圖 92。

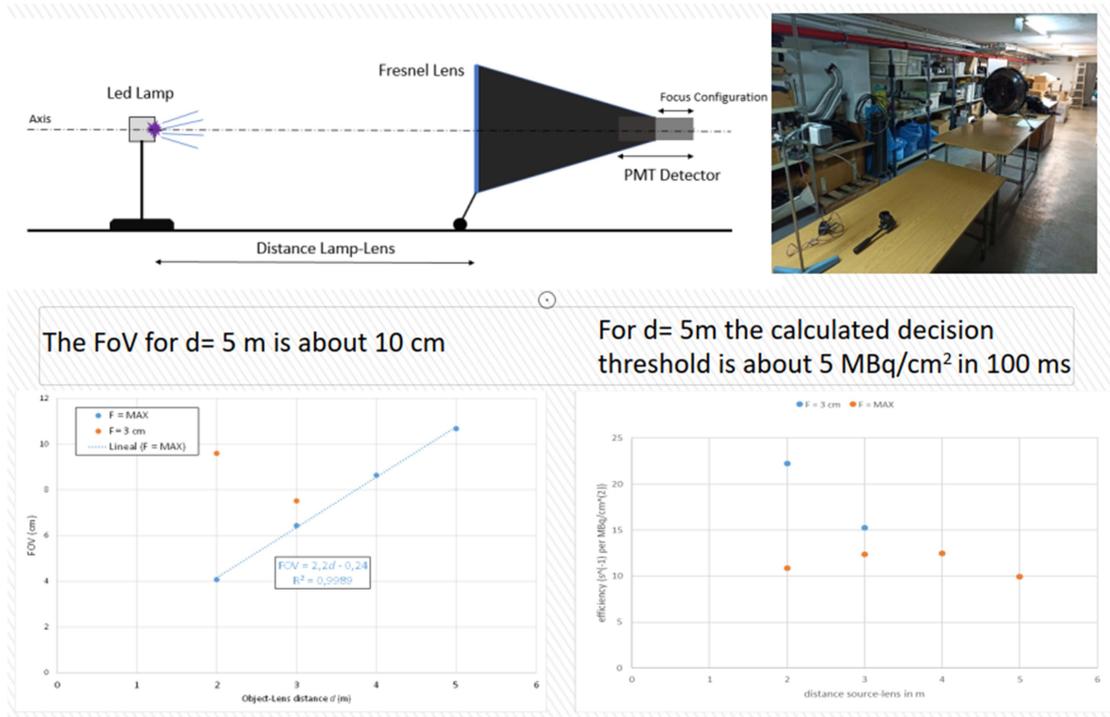


圖 92：確定無人機上安裝的探測器的有效偵測視野大小和效率

使用家庭水族箱對水消毒用途的 5 個 LED 紫外線燈所含 UVC 組成的簡單系統，再使用一氧化氮淨化的銻-241 輻射源 100 MBq 在 DroneLab 測試菲涅爾透鏡，如圖 93。



圖 93：5 個 LED 紫外線燈所含 UVC 組成的簡單系統

挑選面積 15 m x 30 m 的戶外，地面安裝 5 個 UVC 光源發射器，在飛行過程中即時檢測計數率，飛行間距 70 公分，離地飛行高度 1.5 公尺，速度 1 公尺/秒，每 100 毫秒記錄一次計數率測量結果，如圖 94。

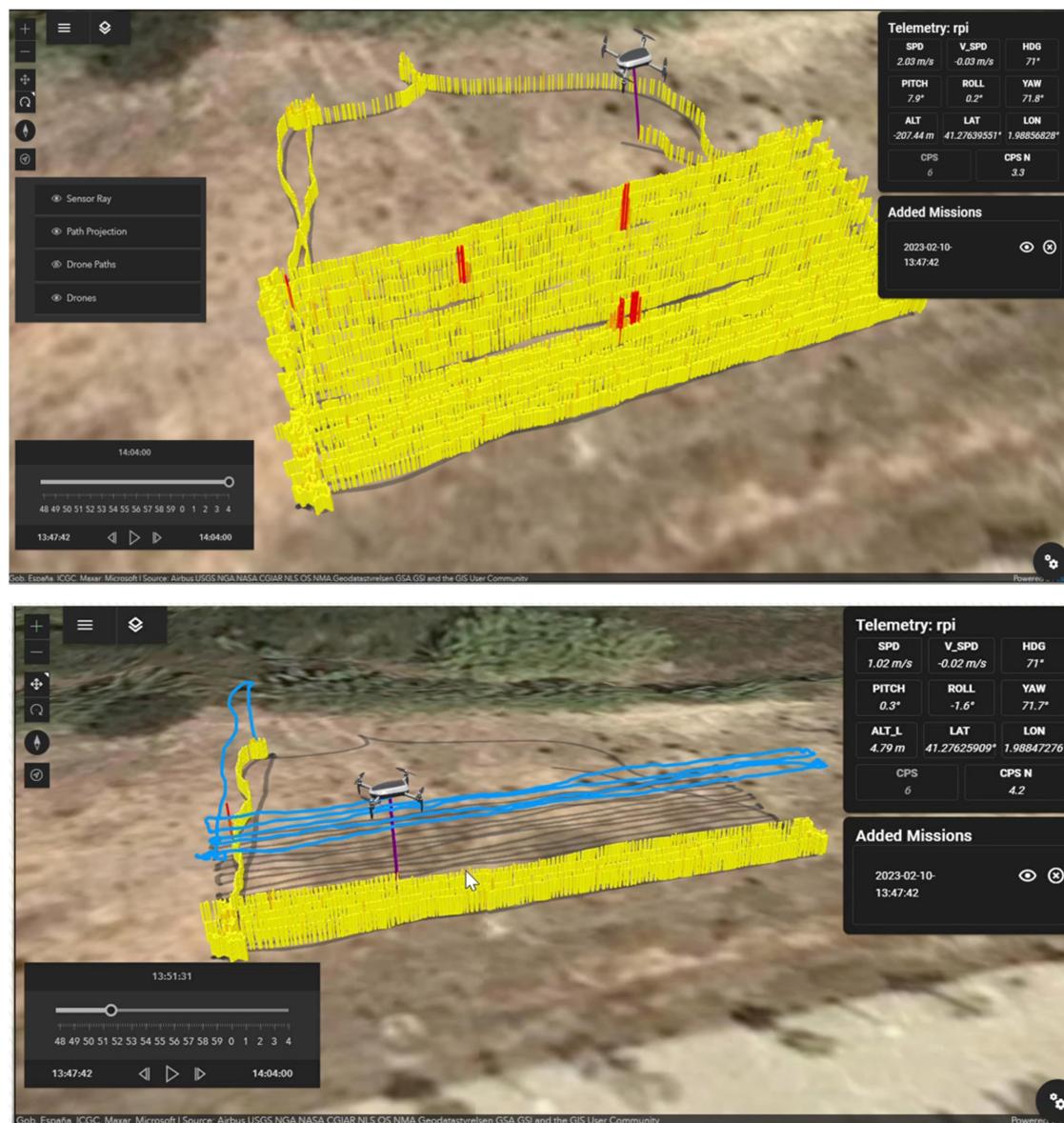


圖 94：UVC 組成簡單系統的戶外測試

此鏡像系統也安裝在 DJI M600 pro 無人機上，如圖 95，鏡子安裝時傾斜約 45 度，光電倍增管位於鏡子前面，並透過桿系統固定，以便安裝在最佳距離，此反射鏡系統比菲涅耳透鏡有一些優點：

- i) 可以使用較小的無人機，
- ii) 在有風的條件下有更好的空氣動力學性能，更穩定，
- iii) 若針對每個海拔高度進行適當調整，則效率較高。



圖 95：DJI M600 pro 搭載無人機 UVC 組成簡單系統的戶外測試

十七、戶外實際展示與參觀實驗室

(一) 輻射意外事故偵測車

瑞士 NEOC 規劃 2 部專用的輻射意外事故偵測車，如圖 96，每台車上配備有小型遙控偵測車 1 部、中型遙控偵測車 1 部如圖 97、手持式碘化鈉型輻射偵檢器 2 部、手持式閃爍型輻射偵檢器 2 部、手持式阿伐貝他輻射污染偵檢器 2 部、手持式純銻輻射偵檢器 1 部等如圖 98。當境內通報有疑似輻射彈時，會先以遠端遙控的小型或中型遙控偵測車靠近偵測並藉以判斷輻射劑量率強弱，若因為輻射劑量率較高或有爆裂可能而導致人員無法接近時，若輻射彈貼近地面時採用小型偵測車，小型偵測車可像投擲手榴彈方式遠端投擲，它會自行翻回正面，若小型偵測車高度無法貼近輻射彈時，改用中型偵測車，中型偵測車有 3 折可伸縮臂及攝影機，末端可以夾取輻射彈至鉛屏蔽中，隨後移去安全區域引爆或拆除。



圖 96：瑞士 NEOC 輻射意外事故偵測車



圖 97：小型與中型遙控偵測車



圖 98：偵測車內手持式輻射偵檢器

(二)大型遙控偵測車

瑞士 NEOC 規劃 1 部履帶式中型偵測車，如圖 99，1 部大型 6 輪越野式偵測車，如圖 100，皆配備視訊攝影機、輻射異常物夾取裝置、輻射能譜成像攝影機(H3D H Series Imaging Spectrometer)，遙控距離皆可達 300 公尺以上，大型 6 輪越野式偵測車配置輻射劑量率成像攝影機，可將加馬能譜或加馬輻射劑量率套疊視訊攝影機現場影像，如圖 101 至圖 103。



圖 99：履帶式中型偵測車



圖 100：大型 6 輪越野式偵測車



圖 101：遙控距離可達 300 公尺以上的 MCA 與操作系統



圖 102：以真實輻射源進行大型 6 輪越野式偵測車演練



圖 103：加馬能譜與加馬輻射劑量率套疊視訊攝影機現場影像

(二) 偽裝成正常貨車的輻射偵測車(機密，禁止拍照)

瑞士與其他歐陸國家相連，為防止核子擴散或放射性物質的不法運送，NEOC 設計將 4 組大面積碘化鈉偵檢器及中子偵檢器分別安裝於貨車兩側之內部，類似大港計畫貨櫃門式偵檢器原理，不過是隱藏安裝在車內部，該偵測車外觀就像一般小貨車，經測試在瑞士高速公路正常行駛速度(110km/h)下，能夠找出附近行駛車輛上的強度微小的加馬輻射源。

(三) 移動實驗室(偵測車)

NEOC 設計 2 台移動實驗室(車)，皆配有 2 台純鍍偵檢器及鉛屏蔽，可於現場取樣後，就近於移動實驗室車內進行加馬核種活度分析，如圖 104 至圖 105。



圖 104：移動實驗室(車)



圖 105：移動實驗室(車)

(五)核鑑識設備車

NEOC 展示 1 台瑞士的核鑑識設備車，車內配有生物跡證採證工具、微量化學跡證採證工具、刑事鑑識相關設備等，如圖 106 至圖 107。



圖 106：跡證採證工具



圖 107：核鑑識設備車

(四)參觀施皮茨實驗室(禁止拍照)

施皮茨實驗室是瑞士聯邦核子生化防護研究所轄下，聯邦民防辦公室的一個部門，為國際組織、瑞士政府和民眾提供與軍備控制、保護措施、健康和事件管理相關的服務，就軍控和不擴散條約的實施和發展向瑞士政府和國際組織提供諮詢，參與國際軍控和環境保護任務，支援民防合作夥伴組織的 NBC 準備工作和 NBC 活動管理，為瑞士政府和武裝部隊採購核子生化防護設備提供建議，並與瑞士武裝部隊一起確保隨時部署應對嚴重 NBC 事件所需的資源，實驗室共有 110 名員工及培訓 7 名實習學員。

瑞士的實驗室認證是由瑞士認證服務機構(SAS)執行，與國際認證的精神相同，可使政府、相關產業和社會能夠確定測試實驗室是否有能力且可靠地接受委託測試工作。施皮茨實驗室測試服務已獲得 SAS 認證包含：

1. STS 0019 用於分析樣本中是否存在化學戰劑和相關化合物的測試實驗室。
2. STS 0022 吸附劑和呼吸器過濾器測試實驗室。
3. STS 0028 放射性核種測定與元素分析測試實驗室。
4. STS 0036 合成材料和橡膠測試實驗室以及合成材料、橡膠和紡織品曝露於化學戰劑時的行為測定。
5. STS 0054 生物製劑檢測實驗室。
6. STS 0055 NBC 防護材料以及防護結構中使用的設備和裝置的測試實驗室。

其中 STS 0028 放射性核種測定與元素分析測試實驗室與本中心性質類似，任務包含環境樣品和其他各種類型和來源樣品中放射性核種活度濃度測定、測量特殊放射性的國家實驗室、執行環境採樣程序、化學浸漬活性炭的分析、環境樣品中主要元素和微量元素測定、灰塵顆粒和選定空氣污染物的測定。主要透過檢測和評估待測樣品所發射加馬輻射的儀器分析方法、將待評估的放射性核種從待測樣品中分離出來的放射化學分析方法，或質譜法測定放射性核種活度濃度。

在施皮茨實驗室內，與會人員參觀了 4 台高純鍍偵檢器、2 部感應耦合電漿質譜儀(ICP-MS)、數間化學分析實驗室、區分高污染樣品與一般環測樣品兩種不同動線的數間實驗室。

肆、心得

- 一、從各國講者分享的經驗及討論技術可以看出，少數國家使用定翼機搭配無人機，大多數國家採用直升機搭配無人機的組合來執行空中輻射偵測任務，近年來各國均持續加強無人機的應用及技術探討，像是前文提到無人機搜尋遺失輻射源、無人機量測有危險(爆炸、化學戰劑、生物毒劑等)可疑輻射源，以無人機量測 UVC 螢光現象來計算地面 α 輻射活度濃度的新構想，設計無人機的簡單、易執行、準確度高的校正方法等資訊，可提供相關單位(輻射偵測中心、國原院、核安會)參考，有助於我國精進空中輻射偵測技能。
- 二、瑞士的空中輻射偵測的軟硬體設備、人員培訓、相關輻射偵測網路、分析實驗室、國家動員機制均相當完善，特別是專用的輻射意外事故偵測車(配有小型遙控偵測車、中型遙控偵測車、手持式純鍍輻射偵檢器等)、大型遙控偵測車，移動實驗室等，令人印象深刻，國內目前缺乏大型遙控偵測車，移動實驗室，及專用的輻射意外事故偵測車等，由實際展示過程可以瞭解瑞士政府對輻射意外事故相關技術發展與應用相當重視，持續投入不少經費研發新設備，並且獲得瑞士聯邦政府長期穩定的經費支持，同時也持續透過國際交流及合作計畫提升瑞士技術能力。
- 三、歐陸不少國家受到車諾比爾核電廠事故的影響，有多年的實測數據，這些國家境內受到輻射污染的區域，可以作為空中輻射偵測的訓練場地，可在場地上舉辦大型演習、進行校正量測、或測試驗證新開發設備等相關工作，相對國內缺少這樣的環境。
- 四、空中輻射偵測需要不同技術背景人才，例如直升機駕駛、無人機操作員、輻射偵測操作人員、輻射專家、儀器維護人員、數據分析人員等專業團隊，除需長期培訓及互相協調分工合作才能執行，技術門檻極高。而提升技術、辦理人員培訓、維護設備或購置新軟硬體均需持續投入不少經費，相比地震、颱風等天災，國內發生輻射意外事故或核電廠事故的機率低非常多，常會遇

到審核機關質疑預算效益，因此經費運用與預期效益之間的權衡始終考驗決策者的智慧。

- 五、瑞典建置具有輻射監測演習模擬功能的 ARGOS 平台的概念值得國內借鏡，使用 ARGOS 平台能讓演習更接近實際狀況且更具成本效益，模擬資料的使用使得放射性落塵場景的演習更加真實，檢視多種不同類型儀器的使用狀況，檢視不同來源的輻射監測資源之間整合，提前找出輻射監測系統潛在的未知問題，規劃未來降低風險的應對方法。

伍、建議事項

- 一、 持續加強無人機空中輻射偵測之應用及提升相關技術是近年來的國際趨勢，建議可參考瑞士今年辦理 ARM23 演習經驗，演習初始情境設定為輻射源失竊，隨後直升機空中輻射偵測搜索大面積區域，經過粗略定位和識別後，資訊提供給無人機團隊，演習目標為練習任務規劃、訓練和優化搜尋策略、練習跨團隊合作、獲得使用測量設備的經驗，演習場地建議可選在國原院(方便使用真實輻射源)及馬沙溝生態公園(高鈾-232 活度濃度的環境背景區域)內，以實際量測的演習檢視輻射監測系統潛在的未知問題，規劃未來的精進作法。
- 二、 建議參考瑞士建置專用輻射意外事故偵測車的經驗，該偵測車配有遙控偵測車、空中輻射偵測無人機、手持式純鍮輻射偵檢器、移動式實驗室、加馬輻射劑量率偵檢器、 $\alpha\beta$ 輻射污染偵檢器與其他緊急應變資訊整合之電腦設備硬體及軟體等，建議未來可透過提出科技計畫爭取相關經費來建置。
- 三、 空中輻射偵測技術的發展與應用為國家長期必備之能力，需要長期穩定的經費支持，建議持續派遣人員參加相關交流會議及實務訓練課程，透過國

際交流吸取國際最新設備及技術，提升我國國內輻射事故之緊急應變量能。

陸、附件(施皮茨實驗室的輻射偵測相關海報)