

出國報告（出國類別：會議）

參加第 11 屆空中輻射偵測系統
國際技術交流研討會

服務機關：核能安全委員會輻射偵測中心

姓名職稱：劉任哲技正

派赴國家：瑞士

出國期間：112 年 9 月 16 日至 112 年 9 月 24 日

報告日期：112 年 12 月 12 日

摘要

本次奉派參加第十一屆空中輻射偵測系統國際技術交流研討會，研討會於2023年9月18日至22日在瑞士伯恩市(Bern)及施皮茨市(Spiez)舉行，由瑞士國家緊急行動中心(National Emergency Operations Centre，以下簡稱NEOC)主辦，參與國家包括瑞士、美國、加拿大、澳洲、瑞典、丹麥、挪威、義大利、英國、德國、法國、冰島、奧地利、捷克、臺灣等15餘國，研討會前三天，由各國專家簡報，會議場地在施皮茨市NEOC訓練中心，各國專家針對空中輻射偵測系統的實際應用經驗、數據校正技術、資料交換格式、輻射監測資訊整合、辦理輻射監測演習及數值模擬方法等議題提出分享；研討會第四天，在施皮茨市NEOC訓練中心之戶外展示場地，觀摩瑞士執行空中輻射偵測的系統與儀器、無人機載具之空中輻射偵測系統、輻射異常物搜尋輻射偵測車、移動實驗室輻射偵測車、輻射擴散裝置處理之遠端遙控輻射偵測車及瑞士國家環境輻射偵測網等軟硬體設備，並參觀施皮茨實驗室；研討會第五天，在伯恩市NEOC辦公室，各國參與討論明年由捷克共和國主辦的第十二屆空中輻射偵測系統國際技術交流研討會規劃，透過各國與會專家相互交流，可提升我國空中偵測作業技術能力。

關鍵字：空中輻射偵測、無人機、輻射異常物、移動實驗室、輻射擴散裝置

目 錄

壹、出國目的.....	1
貳、出國行程.....	2
參、會議過程紀要.....	3
肆、心得.....	83
伍、建議事項.....	84
陸、附件.....	85

圖 目 錄

圖 1：第 11 屆空中輻射偵測系統國際技術交流研討會參加人員合影.....	3
圖 2：瑞士國家緊急行動中心的組織架構.....	7
圖 3：模擬烏克蘭戰爭原子彈爆炸或車諾比爾核電廠事故的輻射擴散影響.....	8
圖 4：瑞士境內首次空中輻射偵測結果.....	9
圖 5：瑞士境內 1989 年空中輻射偵測結果.....	10
圖 6：專用於空中偵測的瑞士直升機.....	11
圖 7：執行空中輻射偵測飛行任務中的瑞士直升機.....	11
圖 8：固定安裝在直升機機艙內的操作分析電腦.....	12
圖 9：瑞士境內核能電廠、重要基礎建設、人口密集地區的環境背景輻射.....	13
圖 10：瑞士與合作夥伴的業務演習使用設備.....	13
圖 11：以 4 個輻射源執行演習，檢視射源定位、搜尋、資料後處理技術能力...	14
圖 12：瑞士與國際合作夥伴的業務演習.....	14
圖 13：捷克共和國 PRIMOCO UAV ONE 固定翼無人機.....	15
圖 14：H3 蜂巢狀地理空間索引系統.....	16
圖 15：採用 H3 系統模擬核電廠事故放射性物質外釋.....	16
圖 16：使用烏克蘭普里皮亞季的 Safecast.org 資料進行測試.....	17
圖 17：澳洲國家早期預警系統.....	18
圖 18：受過專門訓練的澳洲警察成員執行空中輻射偵測.....	19
圖 19：澳洲移動式輻射偵測設備.....	20
圖 20：每秒計數率隨時間變化測量結果.....	21
圖 21：飛行軌跡的經緯度資訊.....	21
圖 22：高劑量率位置與地圖套疊.....	22
圖 23：飛行軌跡的經緯度資訊與地圖套疊.....	22
圖 24：瑞典空中輻射偵測的資源.....	23

圖 25：瑞典輻射監測演習.....	24
圖 26：具有模擬功能的儀器.....	24
圖 27：ARGOS 平台舉辦的 Ginsten 演習.....	25
圖 28：配合 SRV-2000/RADOS RDS-200 加馬劑量率儀器進行輻射監測演習....	26
圖 29：輻射偵測車模擬 ARGOS 大氣擴散計算結果.....	26
圖 30：實測與模擬現場度量純銻偵檢器的加馬能譜.....	27
圖 31：瑞典採用模擬功能參與輻射監測演習的展示.....	28
圖 32：美國內華達州米德湖附近天然背景區域.....	29
圖 33：NNSS-3 區.....	30
圖 34：內華達州拉斯維加斯的拉斯維加斯研發區.....	30
圖 35：傳統的方式與蒙地卡羅方法的優缺點.....	31
圖 36：建立偵檢器及直升機蒙地卡羅空間模型.....	31
圖 37：實驗室中模擬.....	32
圖 38：模擬計算結果(紅)與實測結果比較(藍).....	32
圖 39：於機場地面以銫-137 點射源實測直升機燃料對偵檢器的影響.....	33
圖 40：銫-137 點射源實測直升機燃料對偵檢器的影響之結果與蒙地卡羅方法 模擬計算的結果比較.....	33
圖 41：比較直升機不同離地高度銻-133 點射源實測對偵檢器的影響，再與蒙 地卡羅方法模擬計算的結果比較.....	33
圖 42：蒙地卡羅方法模擬地表放射性物質的能譜.....	34
圖 43：瑞士研究團隊.....	35
圖 44：加拿大 2017 年「堅定楓樹」演習和 2021 年「協同挑戰」演習.....	36
圖 45：從加拿大魁北克市到拉馬爾拜即時移動調查.....	37
圖 46：美國 AMS 團隊與加拿大 NRCan 團隊合作進行聯合調查.....	37
圖 47：加拿大車載輻射偵測與 JAEA 空中輻射偵測整合.....	38

圖 48：無人機輻射探測器(ARDUO).....	38
圖 49：加拿大自行開發的康普頓安全望遠鏡實測結果.....	39
圖 50：挪威 NGU 之硬體設備.....	40
圖 51：平時空中輻射偵測方式測繪地圖，核子事故時車載輻射偵測.....	41
圖 52：DJI M300 RTK2 無人機及地磁圖測繪.....	42
圖 53：挪威直升機搭載的空中輻射偵測系統.....	43
圖 54：2015 年在尤通黑門測試場進行空中輻射偵測系統的校正.....	44
圖 55：2019 年發表的銻-137 空中輻射偵測結果與地面測量之間的相關性研究..	45
圖 56：劑量率計算方法.....	46
圖 57：在梅扎諾(Mezzano Lowland)低地執行空中輻射偵測.....	47
圖 58：Radgyro 空中輻射偵測載具.....	48
圖 59：黏土土壤質地圖(左)與鉀-40 輻射偵測結果(右).....	49
圖 60：單線性迴歸(SLR)和非線性機器學習(NLML)演算法.....	49
圖 61：透過機器學習方法在 Mezzano Lowland 區域進行的結果.....	50
圖 62：艾米利亞-羅馬涅大區(Regione Emilia-Romagna)土壤質地預測圖.....	51
圖 63：發表在 Remote sensing 期刊的研究.....	51
圖 64：自動化評估測量結果並執行品質保證的流程.....	52
圖 65：各種偵檢器的特性.....	52
圖 66：3 種飛行載具與偵檢器的最佳組合.....	53
圖 67：宇宙射線的分離偵測.....	53
圖 68：以遙控飛機系統量測哥倫比亞高原內地面沉積物的計數率.....	54
圖 69：噪音調整奇異值分解法.....	54
圖 70：原始能譜(藍)與經 NASVD 方法計算後的重建能譜(橘).....	55
圖 71：Hovgaard 博士和 Grasty 博士的研究成果.....	55
圖 72：某處停車場進行遺失輻射源演練.....	56

圖 73：某處辦公建築門口進行遺失輻射源演練.....	56
圖 74：直升機空中輻射偵測.....	57
圖 75：直升機空中輻射偵測結果.....	59
圖 76：無人機空中輻射偵測.....	60
圖 77：無人機空中輻射偵測結果.....	60
圖 78：NKS 資料格式.....	61
圖 79：NKS 資料格式(續).....	62
圖 80：ERS 資料格式歷史沿革.....	63
圖 81：「ERS 組」發布和管理資料格式的想法.....	64
圖 82：DJI Matrice 600 Pro 無人機與 CeBr ₃ 偵檢器.....	65
圖 82：DJI Matrice 600 Pro 無人機與 CeBr ₃ 偵檢器.....	65
圖 84：AARM 無人機搭載與 CZT 偵檢器.....	66
圖 85：NuEM 無人機同時搭載多種類型的偵檢器.....	66
圖 86：無人機校正程序.....	67
圖 87：偵測輻射誘發的螢光現象來探測 α 輻射的原理.....	67
圖 88：日光背景能譜.....	68
圖 89：在 DroneLab 進行測試後，望遠鏡安裝在無人機並在戶外實測.....	68
圖 90：DroneLab 測試望遠鏡.....	69
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.....	69
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.....	70
圖 93：5 個 LED 紫外線燈所含 UVC 組成的簡單系統.....	70
圖 94：UVC 組成簡單系統的戶外測試.....	71
圖 95：DJI M600 pro 搭載無人機 UVC 組成簡單系統的戶外測試.....	72
圖 96：瑞士 NEOC 輻射意外事故偵測車.....	73
圖 97：小型與中型遙控偵測車.....	74

圖 98：偵測車內手持式輻射偵檢器.....	74
圖 99：履帶式中型偵測車.....	75
圖 100：大型 6 輪越野式偵測車.....	75
圖 101：遙控距離可達 300 公尺以上的 MCA 與操作系統.....	76
圖 102：以真實輻射源進行大型 6 輪越野式偵測車演練.....	76
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.....	77
圖 104：移動實驗室(車).....	78
圖 105：移動實驗室(車).....	79
圖 106：跡證採證工具.....	80
圖 107：核鑑識設備車.....	81

表 目 錄

表 1：第 11 屆空中輻射偵測系統國際技術交流研討會之議程.....	4
-------------------------------------	---

壹、 出國目的

本屆空中輻射偵測系統(Aerial Measuring System, 以下簡稱AMS)國際技術交流研討會係由瑞士國家緊急行動中心(NEOC)主辦, 各國代表(含實體與視訊)合計約80多位。本屆研討會關注的重點涵蓋各國有關空中輻射偵測系統的應用實際經驗、數據校正技術、資料交換格式及數值模擬方法等議題, 主辦方實際展示瑞士執行空中輻射偵測系統儀器、無人載具空中輻射偵測系統、輻射異常物搜尋輻射偵測車、移動實驗室輻射偵測車、輻射擴散裝置處理遠端遙控輻射偵測車及瑞士國家環境輻射偵測網等軟硬體設備, 會議主要目的希望透過各國空中輻射偵測成果之技術交流與實務經驗分享, 相互學習並提升各國空中輻射偵測應變之技術與能力。

貳、出國行程

本次出國公差的技術交流會議時程為自 9 月 16 日(六)至 9 月 24 日(日)，會議議程 5 天，交通路程 4 天，會議議程安排如表一，出國行程概述如下：

日期	地點	工作內容
9 月 16 日~17 日	台灣桃園國際機場→菲律賓馬尼拉國際機場→阿布達比國際機場→瑞士蘇黎世機場→伯恩火車站→Schonburg 公車站	去程(班機與國外長途火車)
9 月 18 日~22 日	施皮茨市 伯恩市	參加第 11 屆空中輻射偵測系統國際技術交流研討會
9 月 23 日~24 日	Schonburg 公車站→伯恩火車站→瑞士蘇黎世機場→阿布達比國際機場→泰國曼谷國際機場→台灣桃園國際機場	回程(班機與國外長途火車)

參、會議過程紀要

第11屆空中輻射偵測系統國際技術交流研討會，於2023年9月18日至22日在瑞士施皮茨市化生放核中心的訓練場所舉行，該場所平時也是軍事訓練場所，故無法拍攝其建築外觀，9月18日至20日在演講廳進行室內研討會，9月21日在化生放核中心的戶外進行實際操作展示，9月22日在伯恩市Guisanplatz Expo會議室，各國討論明年交流研討會議規劃及各國提前準備研究方向。參與國家包括瑞士、美國、加拿大、澳洲、瑞典、丹麥、挪威、義大利、英國、德國、法國、冰島、奧地利、捷克、臺灣等15餘國，參與會議人數約80多位，與會人員合影(不含視訊參加人員20餘位)如圖1。



圖 1：第 11 屆空中輻射偵測系統國際技術交流研討會參加人員合影

本屆研討會由瑞士國家緊急行動中心(NEOC)主辦，C. Poretti博士進行迎賓接待及A. Hess博士進行會議開幕致詞，講述本屆研討會邀請講者所關注的重點，涵蓋各國空中輻射偵測系統軟硬體介紹、空中輻射偵測系統實際應用經驗分享、

資料交換協定、空中輻射偵檢器校正方法、無人機(Unmanned Aerial Vehicle)輻射偵測應用經驗與校正方法、地面監測系統與團隊搭配直升機與無人機辦理大型演習等議題，及說明第4日戶外操作演練的注意事項。此次會議所有與會國家的簡報內容都很豐富，包含瑞士主辦國的空中輻射偵測詳細介紹、各型無人機在空中偵測方面的開發現況和實務應用、國際虛擬資料分析研討會概念、空中輻射偵測的蒙地卡羅方法模擬計算、機器學習方式將輻射偵測結果用於預測土壤質地、以數值方法自動化評估空中輻射偵測結果並執行品質保證、使用無人機搜尋遺失輻射源、ERS 2.0資料交換格式、使用旋翼無人機系統遠端檢測 α 和 γ 放射性等議題。

第11屆空中輻射偵測系統國際技術交流研討會之交流議題安排表如表1，本報告針對各國之簡報議題內容進行重點摘述，並提出心得分享與建議。

表 1：第 11 屆空中輻射偵測系統國際技術交流研討會之議程

時間	講者	國家	主題
2023/09/18 13:00-13:20	Ladislaus Rybach	瑞士	Airborne Radiometric Surveys of Swiss Nuclear Installations – the Beginnings
13:30-13:50	Cristina Poretti	瑞士	AMS in Switzerland
14:00-14:20	Lubomir Gryc	捷克	Aerial Radiation Survey Measurements in the Czech Republic
15:00-15:20	Stefan Schoenhacker	澳洲	Airborne Radiometry in Austria
15:30-15:50	Simon Karlsson	瑞士	Topic: The use of simulated data in radiation monitoring exercises
2023/09/19 09:15-09:35	Piotr Wasiolek	美國	202X International Virtual Data Workshop
09:45-10:05	Daniel Haber	美國	Advanced Airborne Data Processing
11:00-11:20	David Breitenmoser	瑞士	Towards Monte Carlo based Full Spectrum Modelling of Airborne Gamma-Ray Spectrometry Systems
11:30-11:50	Laurel Elisabeth Sinclair	加拿大	Numerical Methods in Aerial Survey: A Canadian perspective

時間	講者	國家	主題
2023/09/19 13:00-13:20	Vikas Chand Baranwal	挪威	Natural and Anthropogenic Dose Rate Calculation from Airborne Gamma Ray Measurements
13:30-13:50	Benno Bucher	瑞士	Implementation of Topographic Correction in Data Processing Software
14:00-14:20	Matteo Alberi	義大利	Soil Texture Predicted by Machine Learning Algorithms Applied to Airborne Radiometric Data
15:00-15:20	Tönjes Koschine	德國	Automatic Evaluation of Quality Assurance Measurements using Numerical Methods
15:30-15:50	Jens Hovgaard (RSI)	加拿大	Fully Automated Data Processing
2023/09/20 09:15-10:05	Birgit Seiler	德國	Photon Flux Modelling for Data Correction at BfS
11:00-11:20	Michael Reed	美國	New Sensor Characterization Metadata Architecture being Developed by U.S
11:30-11:50	Dean Connor	英國	Scenario Agnostic Processing and Calibration Requirements for 3D Inversion of Gamma Ray Collected by UAVs
13:00-13:20	Nicolas Martin-Burtart (RSI)	加拿大	Use of UAV-Borne Sensors in Emergency Mapping or Lost Source Scenarios
13:30-13:50	Fabian Hauenstein	瑞士	Experiences in Drone-Based Radioactivity Measurements by the Spiez Laboratory
14:00-14:20	Arturo Vargas	西班牙	Remote Detection of Alpha and Gamma Radioactivity by using Rotary-Wing Unmanned Aerial Systems
15:00-15:20	Michael Reed	美國	Data Format Capabilities of iAVID
15:30-15:50	Gernot Butterweck	瑞士	ERS 2.0 Format for Data Exchange

時間	講者	國家	主題
2023/09/21 09:35-10:05	Cristina Poretti & Adrian Hess	瑞士	NEOC and the Sampling & Measurement Organisation
10:05-10:20	Alberto Stabilini	瑞士	Paul Scherrer Institute (PSI)
10:20-10:35	Christian Kaister	瑞士	NBC EOD Centre of Competence
10:55-11:10	Marc Stauffer	瑞士	Spiez Laboratory (LS)
11:10-11:25	TBD teams	瑞士	Nuclear Forensics Switzerland (FOR ZH)
11:30-12:00	Cristina Poretti & Adrian Hess	瑞士	AGS in Switzerland
時間	主題		
13:00-16:00	Measurement Organisation Marketplace - Mobile Measuring Devices, part 1 - Mobile Measuring Devices, part 2 - Laboratory (Gamma Spectrometry, Sample Collection Point) - Nuclear Forensics Switzerland		

一、瑞士國家緊急行動中心

瑞士國家緊急行動中心(NEOC)隸屬瑞士聯邦國防、民防和體育部(DDPS)內聯邦民防辦公室(FOCP)的一個部門，屬於一個專門的聯邦政府民防組織，也是國家報告和情況中心及聯邦民事保護危機管理委員會的工作機構(如圖 2)。

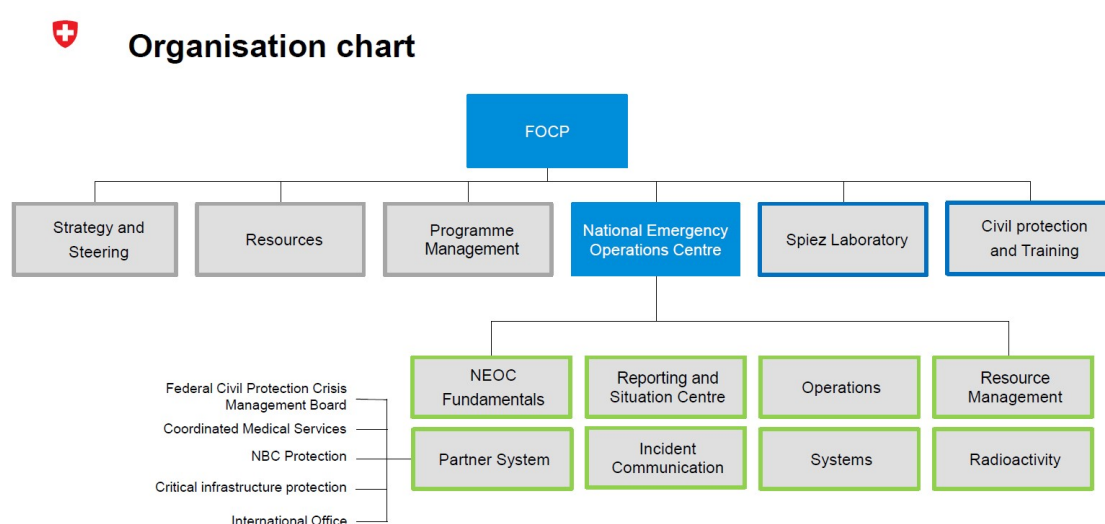


圖 2：瑞士國家緊急行動中心的組織架構

NEOC 的職責是持續監測和評估整體狀況，如果發生自然、技術和社會相關災害（例如導致瑞士境內放射性增加、生物或化學災害、衛星墜毀或基礎設施故障的事件），NEOC 會通知其合作夥伴組織，負責說明整體情況並充當協調機構，如果發生輻射強度增加及擴散的緊急情況，NEOC 可以採取措施保護瑞士人民，在某些緊急情況下，例如重大化學事故或潛在的衛星墜毀，NEOC 會根據具體情況執行進一步的任務，並隨時由聯邦委員會分配額外的任務。

NEOC 隨時做好應變準備，透過最少的員工來進行初步評估並與合作夥伴組織建立聯繫，當發生緊急情況時，NEOC 可以根據情況迅速擴大救災量能。除了約 40 名固定員工外，NEOC 還可以利用其他各單位來發揮作用，以擁有充足的人力並確保永續性。

NEOC 全年 365 天為其合作夥伴組織提供服務，每年大約有 400 起案件需

要待命人員進行狀況評估，如若任務需要可邀請合作夥伴的專家參與，NEOC 在工作中也需依賴與瑞士聯邦各州警察部隊行動中心等夥伴的合作。近 5 年內處理輻射相關威脅包含 2017 年遺失輻射源事件、2019 年北德文斯克(Nyonoksa)輻射事故、2020 年車諾比爾核電廠附近森林大火、2020 年貝魯特爆炸事故、2022 年烏克蘭戰爭(如圖 3)等事件。

Radiological situation

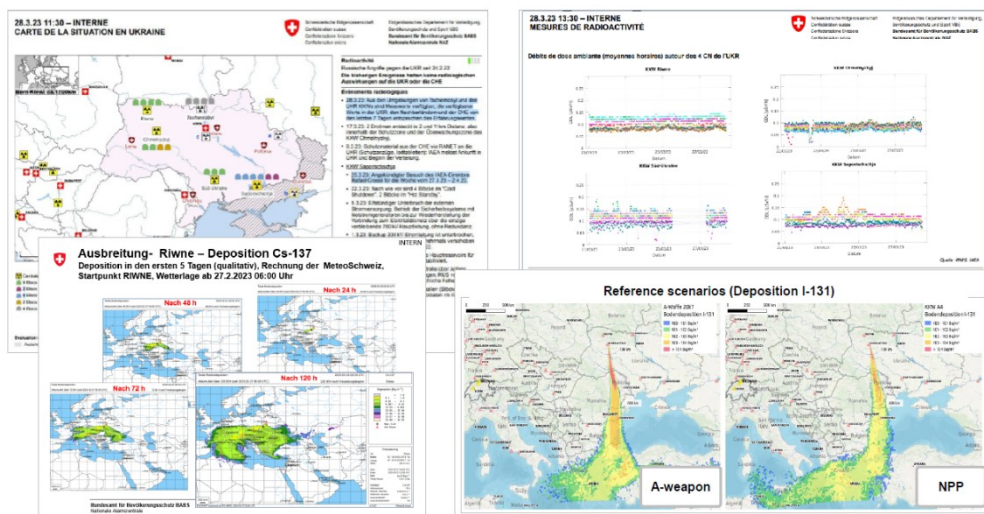
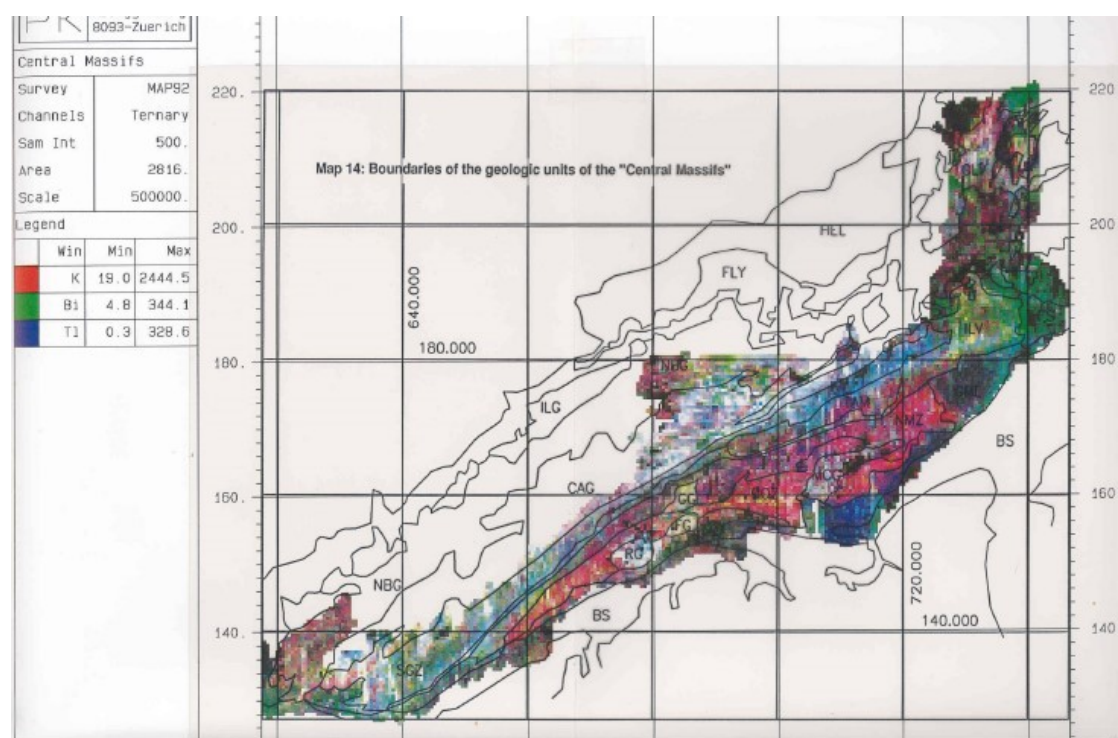


圖 3：模擬烏克蘭戰爭原子彈爆炸或車諾比爾核電廠事故的輻射擴散影響

二、瑞士空中輻射偵測的源起

瑞士起初是在 1975 年，為了測繪地球物理相關地圖而建立空中遙測技術，自 1979 年至 1982 年陸續完成了磁力地圖、重力圖、大地水準面地圖、地震活動圖、航磁圖、地熱圖。

1985 年，瑞士地球物理委員會在瑞士國家地球物理調查計畫內發起地質測繪工作，該任務交給其成員 L. Rybach，為了建置空中輻射偵測技術，需要偵測設備、校正方法、測量程序及數據採集與處理軟體。後續設備由蘇黎世聯邦理工學院地球物理研究所由市售商業組件組裝而成，由電子實驗室工作人員參與設計和安裝，校正、測量方法和軟體由 Georg Schwarz 開發(1991 年博士論文)，首次空中輻射測繪於 1986 至 1989 年期間進行，並由 Schwarz、Klingele、Rybach 發表結果，如圖 4，由蘇黎世聯邦理工學院地球物理學系負責後續設備維護及更新。



**Ternary Radioelement Map; Central Massifs, Swiss Alps
(Schwarz, Klingelé, Rybach (1992))**

圖 4：瑞士境內首次空中輻射偵測結果

1989 年初，瑞士核安監察局向瑞士聯邦核子設施安全委員會宣布需要定期進行輻射量測，委員會成員 L. Rybach 向檢查局報告說明，地球物理研究所在繪圖方面擁有必要的設備和經驗。核安檢查局決定啟動並資助定期空中輻射偵測 (ARM) 調查，L. Rybach 於 1989 年 6 月 20 日簽署了相應的契約，包括與地球物理研究所進行為期 5 年的計畫，調查於 1989 年開始，每年執行一次，如圖 5。

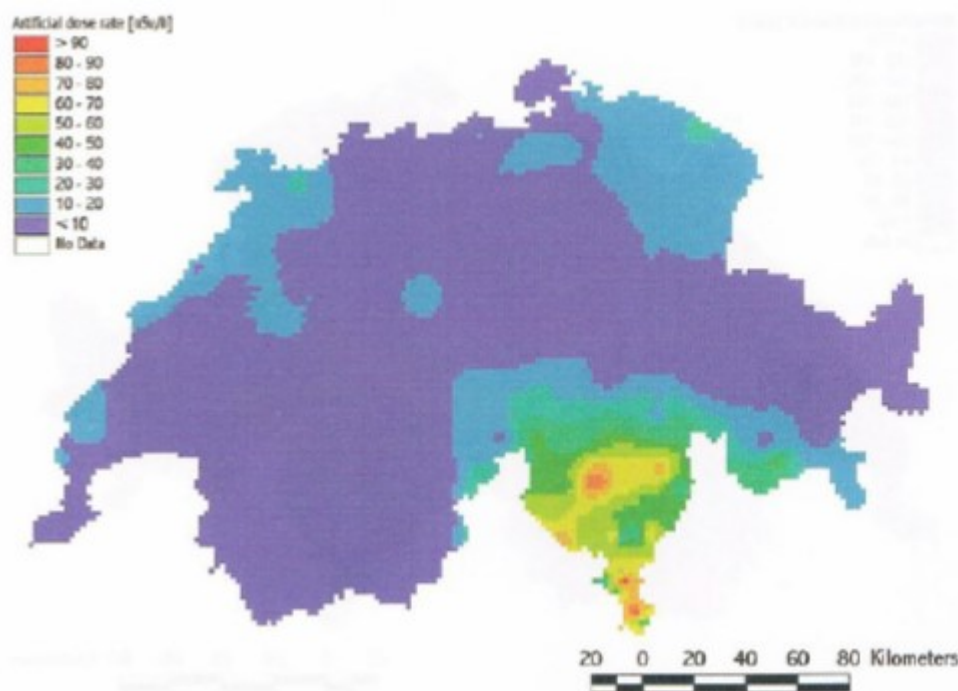


圖 5：瑞士境內 1989 年空中輻射偵測結果

瑞士境內有三座核電廠，共四個反應器，核能發電對瑞士電力生產的貢獻穩定約在 40% 左右。2022 年，核電發電量為 23 百萬兆瓦(TWh)，佔瑞士總發電量的 37%。自 1996 年以來對瑞士各城市進行空中輻射偵測背景調查，目前瑞士空中輻射偵測詳細年度報告可從 FAR 網站下載(<https://far.ensi.ch/en/>)，1989 年至 2005 年由蘇黎世聯邦理工學院(IGETH)發布，2006 年起由保羅謝爾研究所(PSI)發布。

三、瑞士的輻射偵測網路

瑞士的輻射偵測網路由 2 部分組成，一個是固定式自動測量網路，另一個是行動測量設備，空中輻射偵測設備部分，瑞士自 2018 年起使用米里安科技公司 (Mirion Technologies) 的測量設備，低劑量率時偵檢器為 4x4L (共 16.8L) 碘化鈉閃爍偵測器、光電倍增管、多通道分析組成，高劑量率時偵檢器為蓋革偵檢器，每秒擷取一次數據，偵檢器及操作分析電腦均固定安裝在直升機機艙內，配置專用的直升機及駕駛飛行員，如圖 6 至圖 8。



圖 6：專用於空中偵測的瑞士直升機



圖 7：執行空中輻射偵測飛行任務中的瑞士直升機



圖 8：固定安裝在直升機機艙內的操作分析電腦

執行空中輻射偵測時，直升機飛行高度為距地面 90 公尺高，水平飛行間距為 250 公尺，飛行時速為 150 公里，在 3 小時飛行時間內可飛過 100 平方公里，每年的偵測目標為：(1)量測城市、重要基礎建設、人口密集地區的環境背景輻射，如圖 9，(2)與合作夥伴（ENSI、FOPH、州）的測量計畫，(3)與合作夥伴（各州/國際）的業務演習，如圖 10 至圖 12，(4)輻射偵測科學上有趣且技術上具有挑戰性的領域。空中輻射偵測可在短時間內提供有關地面大面積輻射污染的良好定量訊息，並可以依據結果優化地面測量並確定優先順序，另外，瑞士非常重視國際合作與交流，以便在需要時可以有效地合作，從而保護人民。

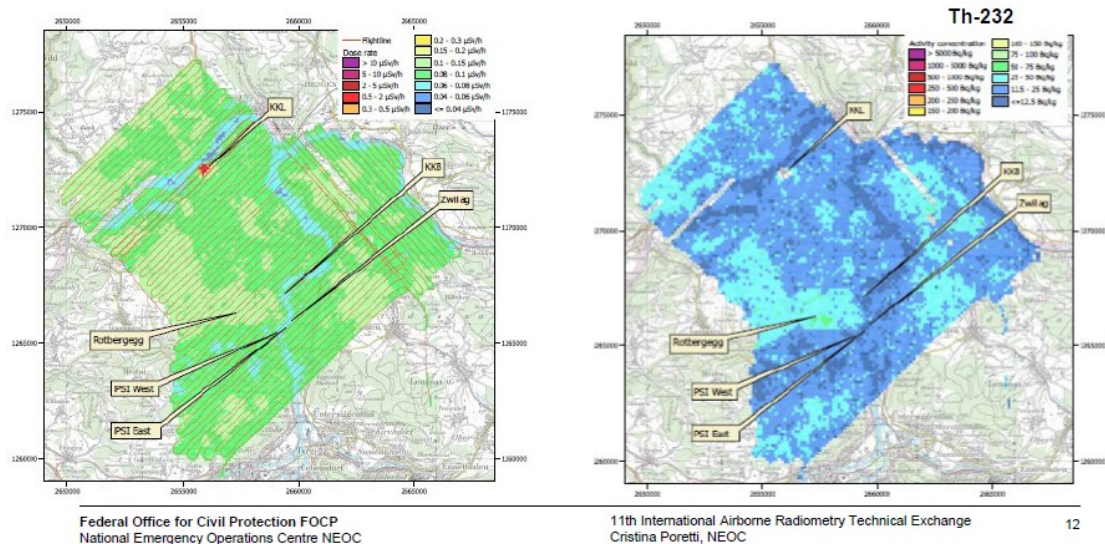


圖 9：瑞士境內核能電廠、重要基礎建設、人口密集地區的環境背景輻射

Measurement Campaigns

Operational exercises with partners

Comparison measurement campaign in Thun:

40 participants / 7 different organisations / 6 different measuring instruments



[Scientific report \(PSI\)](#)
[Youtube Video of the exercise \(German\)](#)

圖 10：瑞士與合作夥伴進行演習所使用設備

Measurement Campaigns

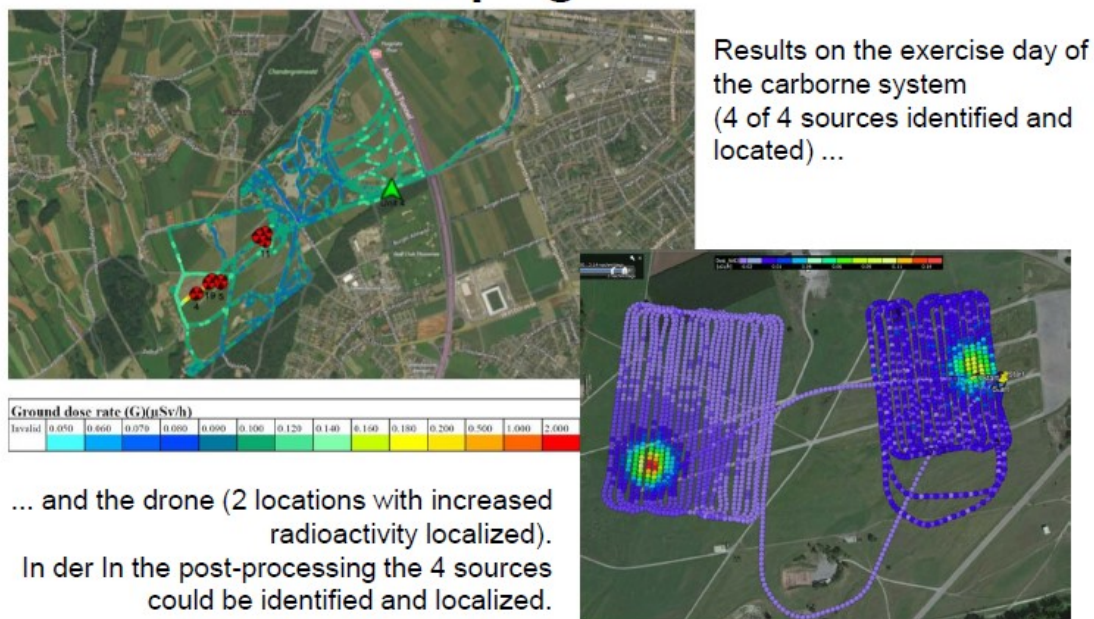


圖 11：以 4 個輻射源執行演習，檢視射源定位、搜尋、資料後處理技術能力



圖 12：瑞士與國際合作夥伴的業務演習

四、捷克共和國空中輻射偵測

捷克共和國總面積 78,871 平方公里，農地約佔 70% 超過 55,000 平方公里，如果發生大面積輻射污染，需要對大面積進行快速調查，特別是如果污染發生在農作物生長季節，若太慢執行輻射偵測，可能會發生失去採取某些對策來保存部分收穫的可能性，受污染生物量增加（植物生長），導致後續更高的財務損失、更高的處置成本，還有來自農業部門的巨大壓力。

若只有 1 架直升機，1,000 公尺飛行間距，需要飛行 100,000 公里總距離，需要 3 個月時間才能完成整個國家的量測，而且機組人員需要時間休息，不能 24 小時連續工作，直升機也需要定時維護。

因此需要規劃搭配無人載具解決，捷克法律不允許自行飛行，必須事先報備，且要求在可視距離內飛行，但在緊急情況下，可以獲得臨時許可證。採用遠端無人機直升機，例如 LIAZ SKYSPOTTER，其飛行時間可長達 7 小時，有效負載高達 80 公斤，使用普通汽油的內燃機，可直接替換有人駕駛直升機。採用固定翼無人機，例如 PRIMOCO UAV ONE，飛行時間可長達 15 小時，有效負載高達 30 公斤，使用普通汽油的內燃機，起飛和降落跑道只需長度 300m，不需要機場，可以使用當地警方暫時關閉的道路即可，如圖 13。



圖 13：捷克共和國 PRIMOCO UAV ONE 固定翼無人機

為了克服傳統正方形區域的劃分法所遇到困難，例如捷克共和國大約可劃分 2.7 百萬點，點數太多，甚至連顯示都不容易，連重繪地圖都需要幾分鐘時間，還有在某些比例尺的地圖中點會重疊，會遺失部分訊息。因此捷克團隊改採用 H3 蜂巢狀地理空間索引系統，如圖 14，H3 使用六邊形網格，可細分為越來越細小的六邊形網格，網路上有提供免費資源，QGIS 外掛程式也可用，每個縮放等級(單元大小)中的每個六邊形單元在世界地圖中都有固定的 ID。改採用 H3 空間索引系統後，從 2.7 百萬點減小成約 17,000 個蜂巢狀區域，如圖 15。

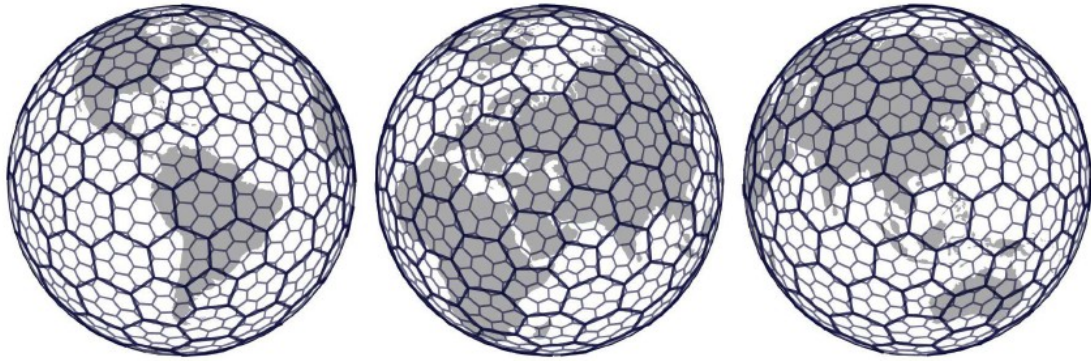


圖 14：H3 蜂巢狀地理空間索引系統

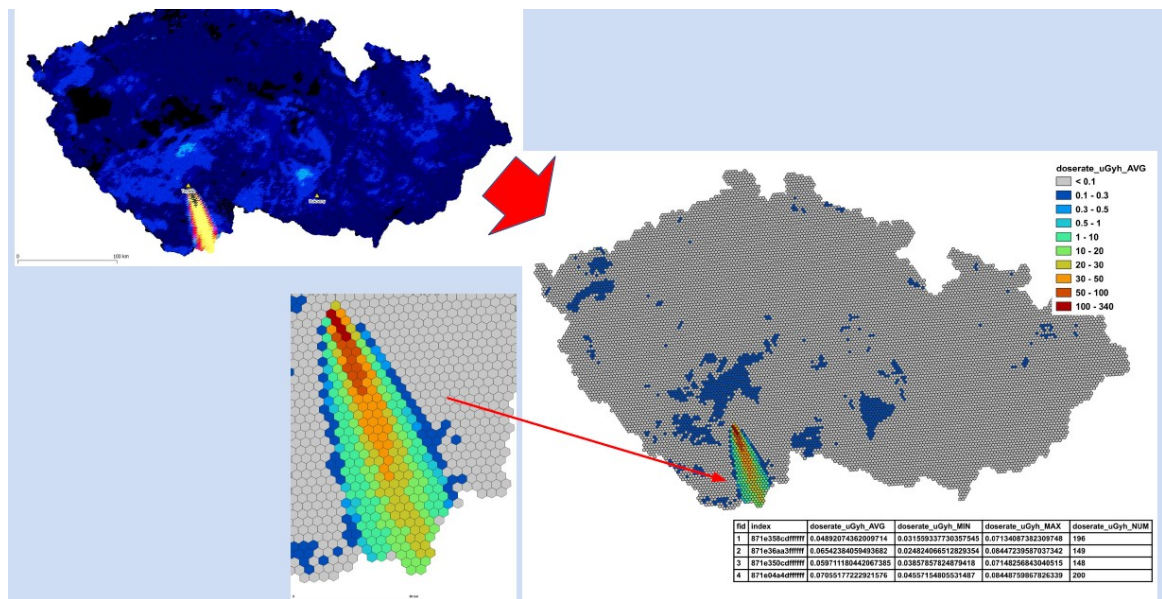


圖 15：採用 H3 系統模擬核電廠事故放射性物質外釋

使用來自烏克蘭普里皮亞季的 Safecast.org 資料進行測試，地面劑量率範圍從 0.04 到 1920 $\mu\text{Sv/h}$ ，含有局部熱點，只需用到少量地圖，如圖 16。

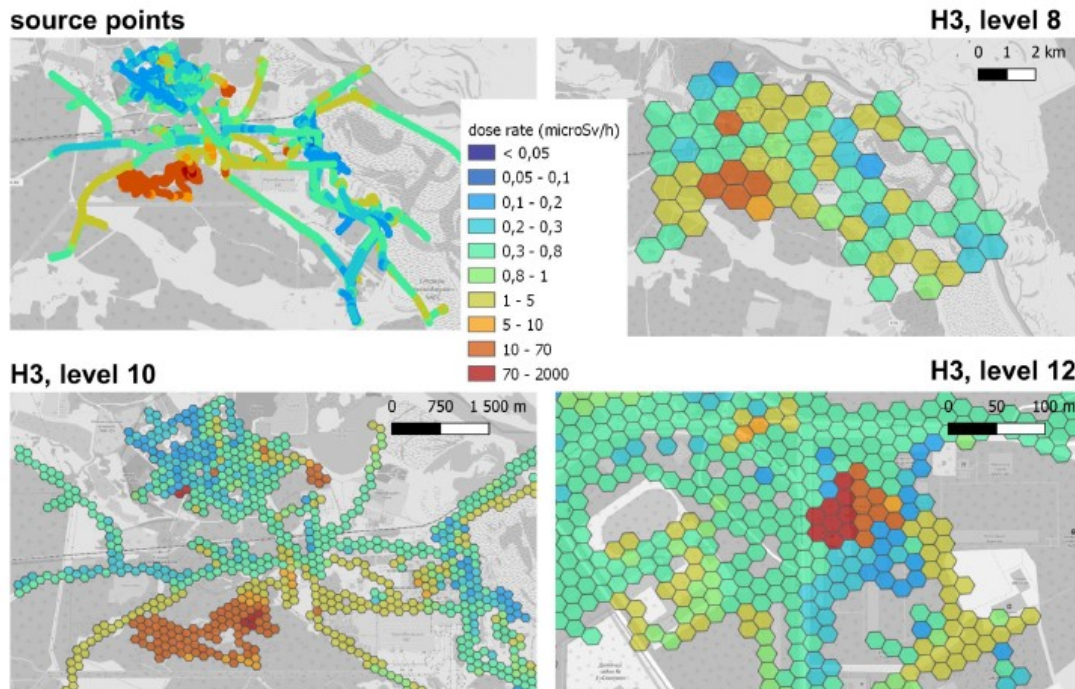


圖 16：使用烏克蘭普里皮亞季的 Safecast.org 資料進行測試

使用 H3 蜂巢狀地理空間索引系統的好處，包含一個「單元格」可以有多個屬性，可將單點值分解為一個（例如平均值或中位數），但也可以保留其他屬性，例如最大值，具備可擴展性，H3 網格有 16 個預定義等級的分層細分，源於不同設備（機載、地面）的測量結果可混合顯示，也可處理部分較小的區域，對軟體性能要求較低，可將各部分合併到最終的向量層中，方便團隊之間的合作，例如，您需要同時擁有加馬輻射劑量率和 Cs-137 污染值，一個團隊可以計算加馬輻射劑量率網格，另一個團隊可以計算 Cs-137 污染值網格，然後使用唯一的單元索引輕鬆合併兩個屬性表。

依據初步測試結果，H3 Grid 網格似乎是一個非常有前途的插值方法，它是開放標準且免費授權（Apache2.0 授權），無許可證費用，文件和軟體資源文件應便於實施到資料處理系統中，包括處理大型資料集的自動化，未來捷克團隊將計劃進一步測試，並於未來幾屆研討會說明成果。

五、澳洲空中輻射偵測

澳洲化生放核技術中心(CBRN Competence Center)是澳洲內政部處理化學、生物、放射、核子相關問題之主要權責機關，所屬單位負責輻射防護繼續教育、專項訓練與技術，轄下第 4 分部則是空中警察。

澳洲國家早期預警系統包含約 300 個加馬劑量率監測儀，相互距離約 15 公里，負責核設施、研究反應器和臨時儲存設施的監測，偵測器類型為 RS03，量測輻射劑量率範圍為 10 nSv/h 至 10 Sv/h，民眾可透過網路及 ORF 圖文電報取得 111 個站的監測結果，此外還有國境邊緣 10 個空氣收集器系統，如圖 17。

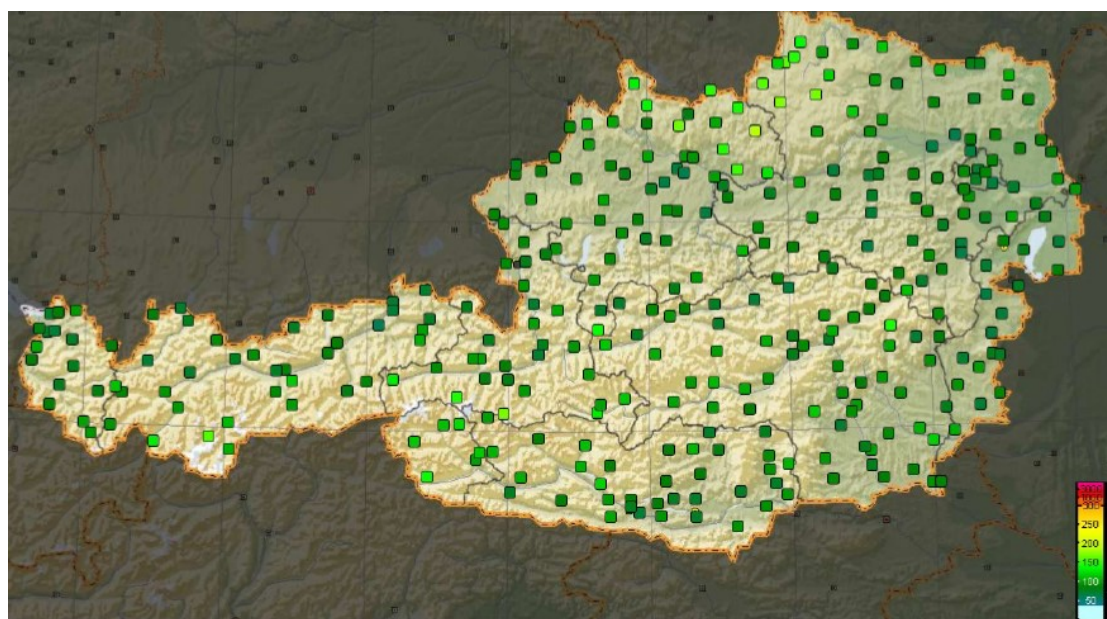


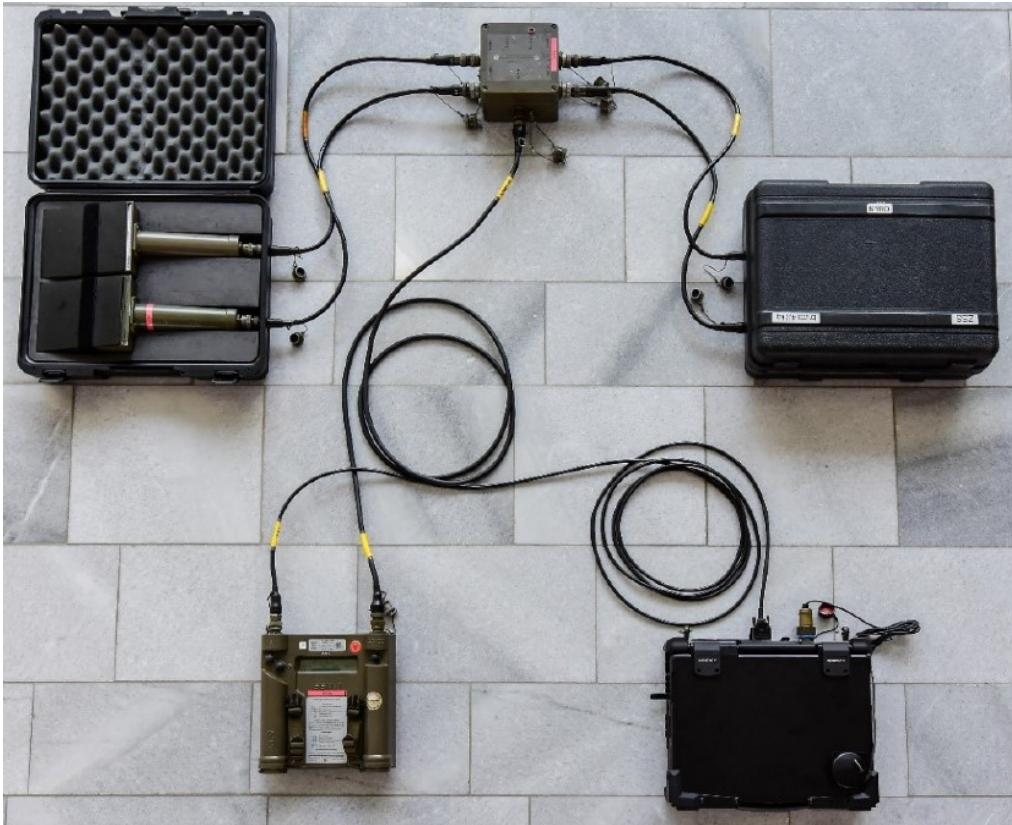
圖 17：澳洲國家早期預警系統

澳洲國家負責空中輻射偵測的首長是聯邦氣候行動部長或聯邦國家元首(視情況而決定)，第一線應變人員則是澳洲警方，由主管當局下令啟動任務，目前共有 56 名受過專門訓練的澳洲警察成員，都接受過 3 週輻射防護訓練及 1 週空中輻射偵測特殊訓練，如圖 18，此外澳洲警察成員需於兩年內接受持續訓練，包含 1 週空中輻射偵測特殊訓練及 2 天追蹤培訓。



圖 18：受過專門訓練的澳洲警察成員執行空中輻射偵測

澳洲移動式輻射偵測的載具包含直升機、車輛、貨船，在交通管制點及重大活動中還會加設固定式設備，如圖 19。直升機執行空中輻射偵測任務時的飛行時速為 80 公里，離地面高度 80 公尺，飛行水平間距為 100 公尺或 150 公尺。



 Federal Ministry
 Republic of Austria
 Interior
 Directorate Special Units
 Special Intervention Unit Cobra



12

圖 19：澳洲移動式輻射偵測設備

澳洲直升機執行空中輻射偵測任務的結果展示，如圖 20 至圖 23。

Results (1): cps profile

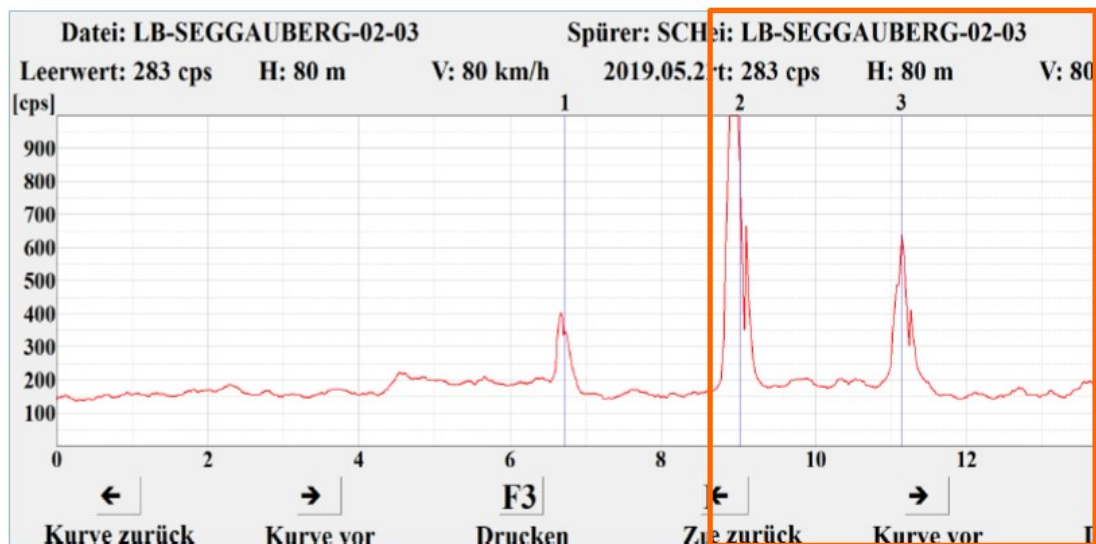


圖 20：每秒計數率隨時間變化測量結果

Results (2): GPS track

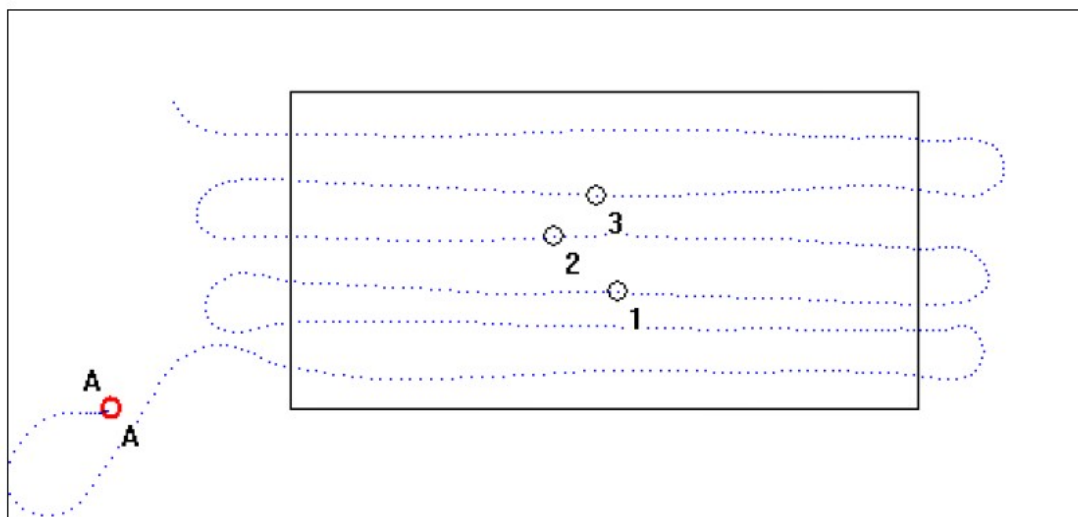


圖 21：飛行軌跡的經緯度資訊

Results (3): Highest cps value over map

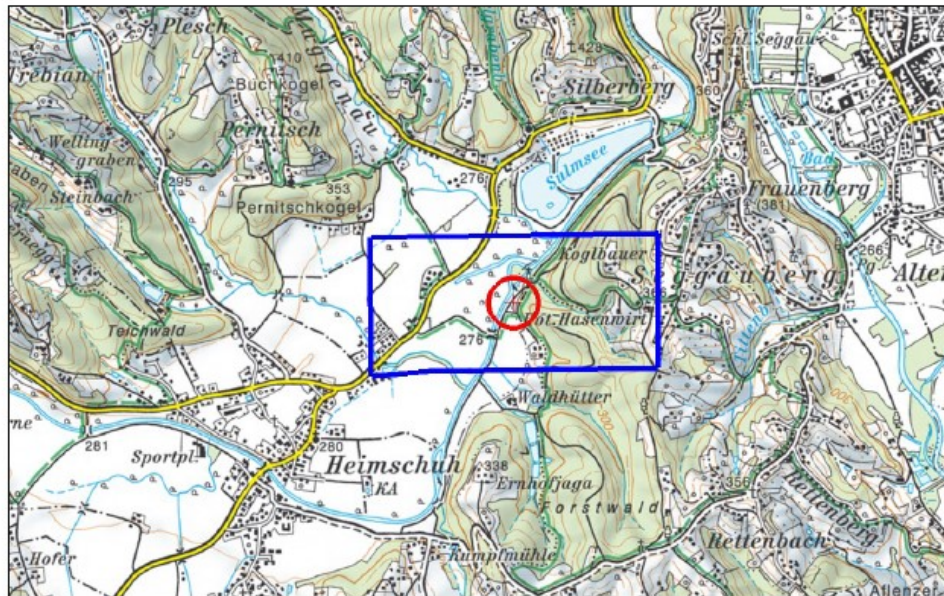


圖 22：高劑量率位置與地圖套疊

Results (5): GPS track as map overlay



圖 23：飛行軌跡的經緯度資訊與地圖套疊

六、瑞典的空中輻射偵測

瑞典空中輻射偵測的設備與資源包含歷年瑞典地質調查資料、3 架固定翼飛機、2 組完整的空中輻射偵測器系統及多年豐富的航空測量經驗，如圖 24。

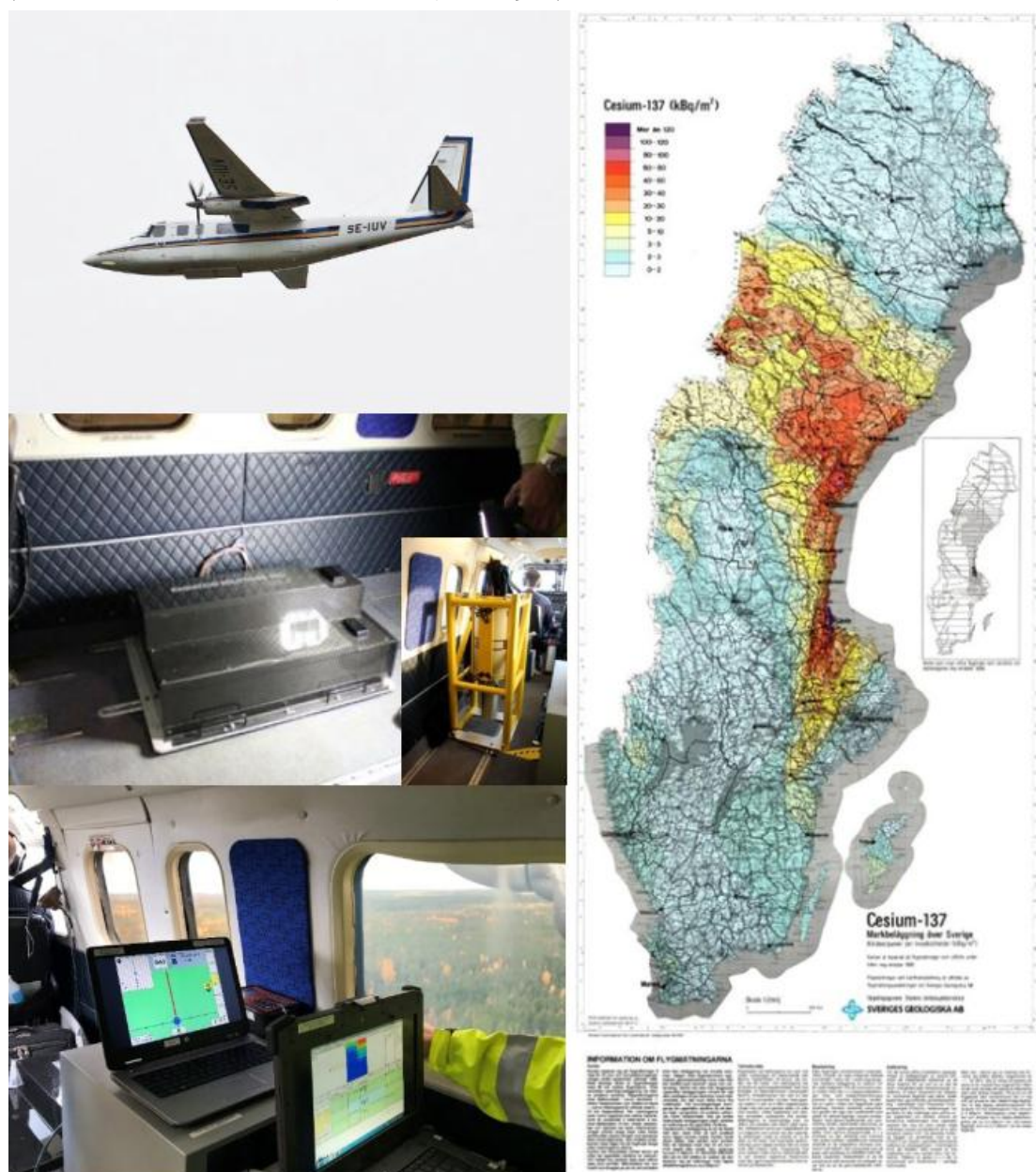


圖 24：瑞典空中輻射偵測的資源

瑞典輻射監測演習，包含專家緊急應變組織內部培訓、每年進行一次特定項目演習、每年進行一次大規模的演習、核能電廠所在地方政府每年舉辦區域輻射監測演習、每半年舉行一次全面核電廠演習、瑞典 SSM(Stral Sakerhets Myndigheten)機關提供模擬數據及具有模擬功能的儀器，如圖 25 至圖 26，包含國家和地區加馬輻射監測站、手持式輻射劑量率儀器、移動輻射劑量率儀器、輻射偵測車及現場度量移動式加馬能譜測量儀器。



圖 25：瑞典輻射監測演習



圖 26：具有模擬功能的儀器

阿爾戈斯(ARGOS™)平台具有輻射監測演習模擬功能，具備大氣擴散計算功能，可設計核電廠事故的預定輻射源（包括強度和核種），包含兩種不同的大氣擴散計算方法，舉 2022 年 11 月 Ringhals 核電廠所舉辦「Ginsten 演習」為例，瑞典每個電廠周圍都有 30 個加馬輻射監測站，當資料進入瑞典輻射監測資料管理系統 RadGIS 時，模擬基於 ARGOS 大氣擴散計算的結果，透過輻射氣團和地面沉積進行劑量率模擬，並根據核種擴散衰減計算出劑量率，如圖 27。

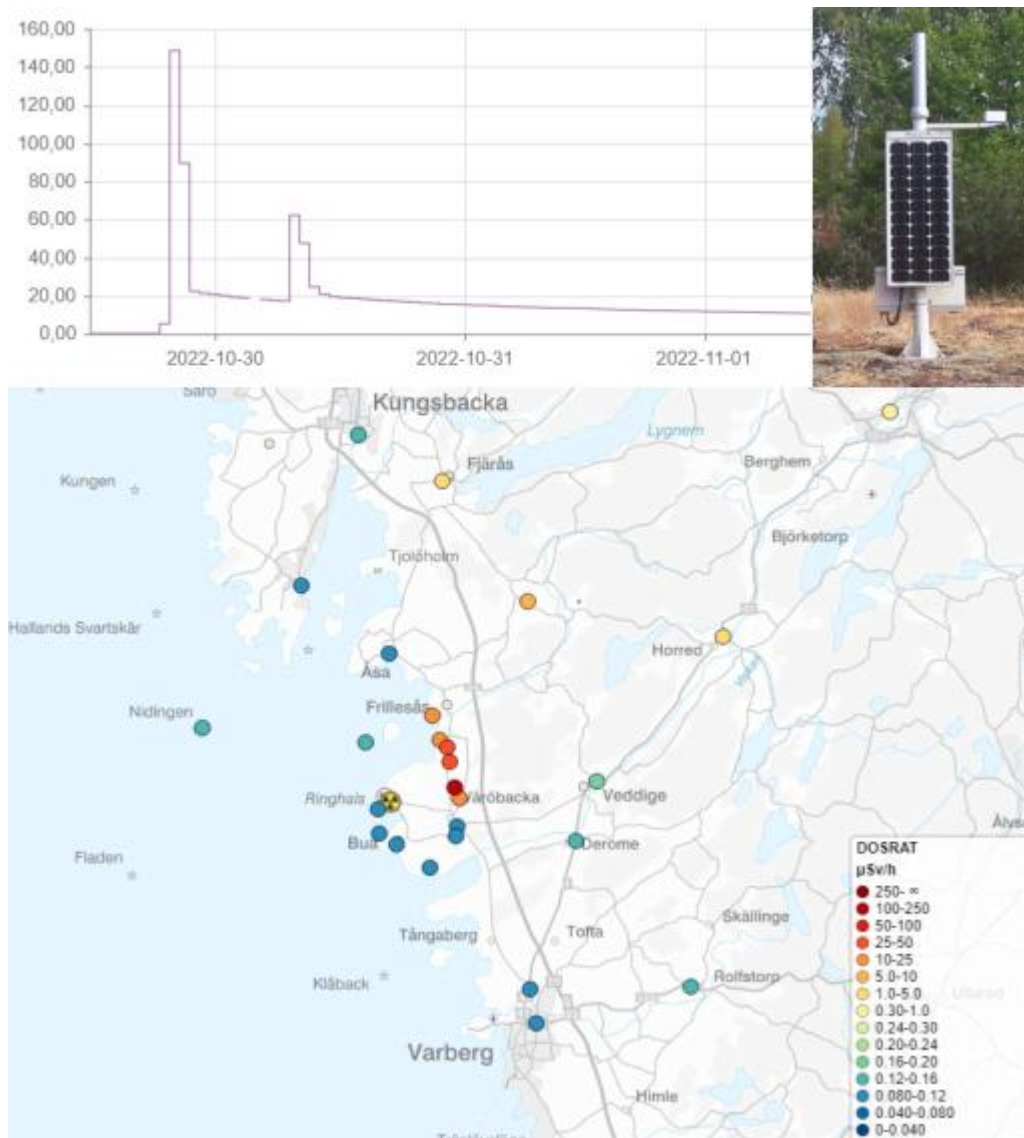


圖 27：ARGOS 平台舉辦的 Ginsten 演習

設計手機應用程式並配合 SRV-2000/RADOS RDS-200 手持式加馬劑量率儀器，從 ARGOS 大氣擴散計算的結果作為輸入，使用 GPS 位置確定劑量率值，劑量率僅來自地面沉積（而非輻射氣團），進行輻射監測演習，如圖 28。



圖 28：配合 SRV-2000/RADOS RDS-200 加馬劑量率儀器進行輻射監測演習

ARGOS 大氣擴散模擬計算的結果進入 RadGIS 系統，輻射偵測車自動導入輻射監測資料管理系統 RadGIS，並模擬輻射劑量率和加馬能譜，如圖 29。



圖 29：輻射偵測車模擬 ARGOS 大氣擴散計算結果

瑞典執行輻射監測演習時也常會模擬現場度量純銻偵檢器的加馬能譜，其前置準備作業，首先使用 Nucleonica 軟體產生的各核種基本能譜，再建立假設所有核種的總合能譜，並針對衰變和擴散方向進行校正，野外演習量測時，首先測量背景輻射的加馬能譜，如圖 30，隨後將該位置加馬能譜實測結果和模擬的加馬輻射劑量率（來自前面所提到的手機應用程式）發送至監控中心電腦，再將模擬的加馬能譜合併背景輻射的加馬能譜後進行分析，分析結果再發送至監控中心。

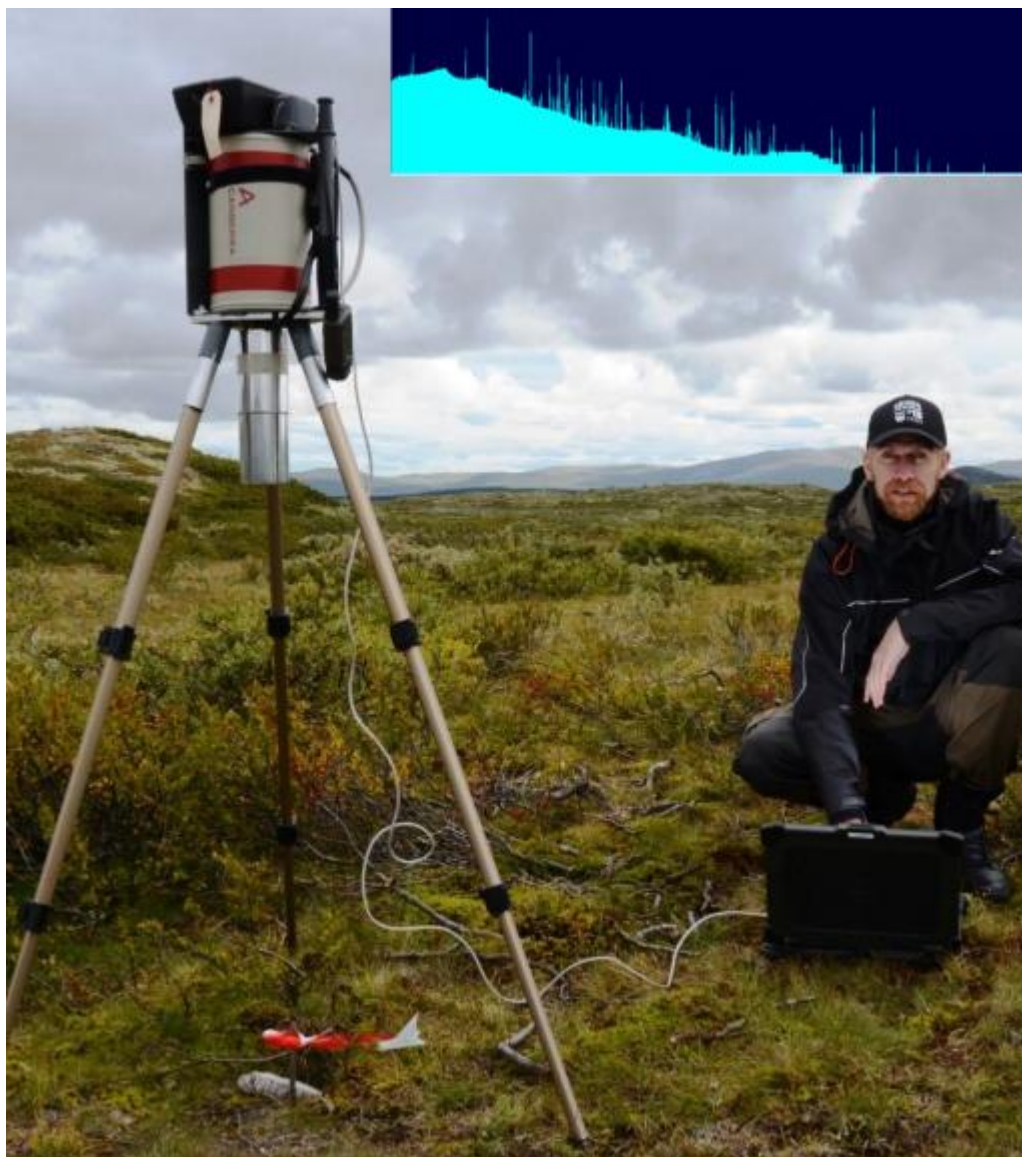


圖 30：實測與模擬現場度量純銻偵檢器的加馬能譜

瑞典採用模擬功能參與輻射監測演習的經驗分享，模擬功能可以促進更好且更具成本效益的演習，模擬資料的使用使得放射性落塵場景的演習更加真實，可

多種不同類型的儀器中使用相同的模擬，從而實現不同輻射監測資源之間的合作，如圖 31。

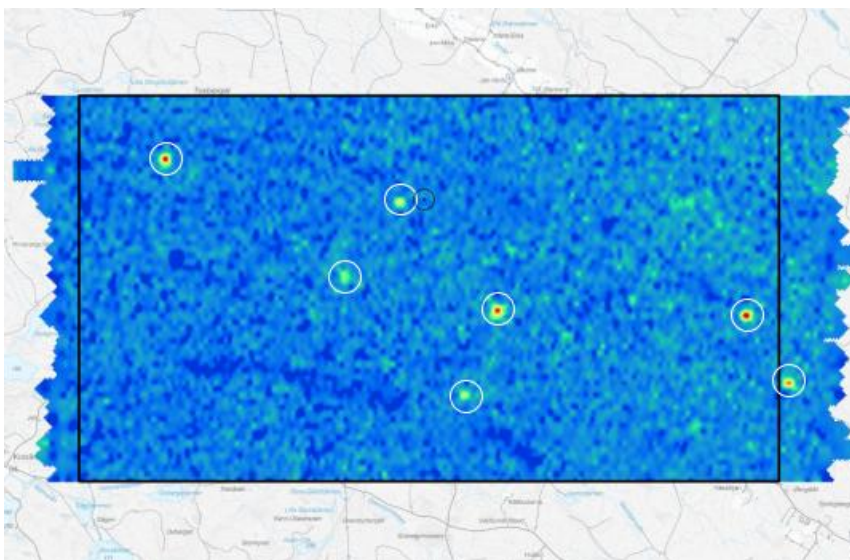
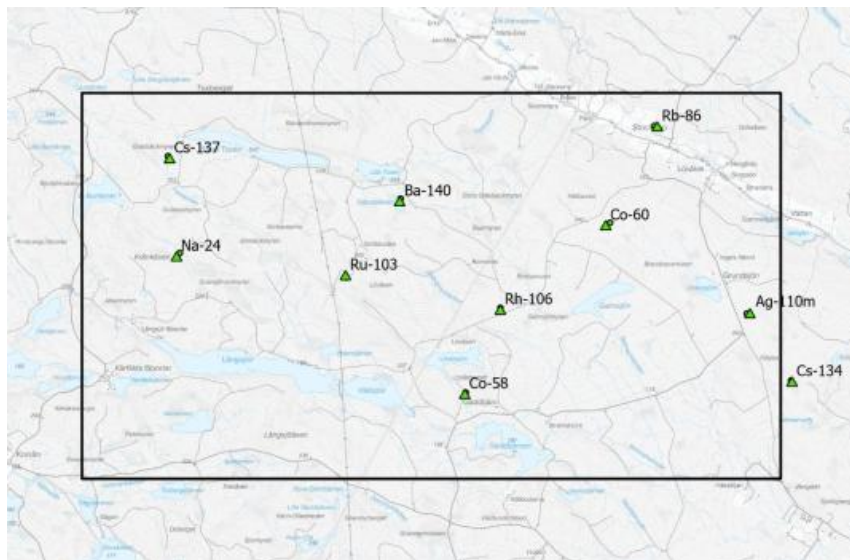
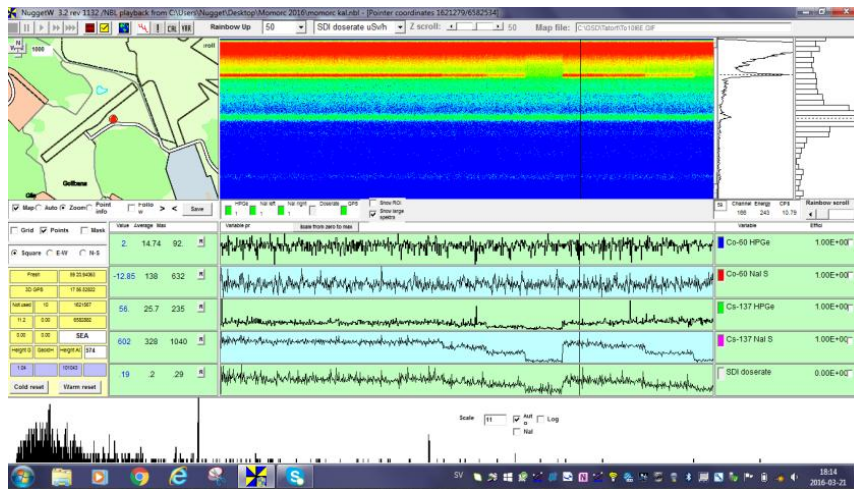


圖 31：瑞典採用模擬功能參與輻射監測演習的展示

七、介紹國際虛擬資料分析研討會概念

不同國家之間空中輻射偵測資料的交換合作會遇到以下幾個問題，採用商業軟體或自行開發軟體，轉換係數與校正方式的差異，如何獲得修正因子(如海拔、地形、偵測器反應)，資料分析結果的產出方式，GIS 地圖資料的差異。

研討會討論以下內容，在資料分析方面，討論各國空中輻射偵測的重要組成差異，將飛機飛行高度的能譜資料轉換為地面輻射劑量率的方法，結果對於保護公眾健康與安全的決策方式；在方法方面，各國空中輻射偵測團隊可能使用不同的能譜量測方法，討論資料交換方法、校正和校準程序是改善最終資料分析結果的學習過程的一部分，比較數據分析方法和軟體，改進分析技術和使用的軟體，如何加強與維持類似能力國家的國際合作，與 IAEA RANET 計畫的合作。

比較德國、瑞士和美國因應空中緊急情況所使用的航空輻射資料分析方法當作說明案例，實務上執行方式為交換任務或演習期間(同區域)收集的 2-3 個原始資料，然後分析資料並建立商用的地圖產品或數值結果，最後比較結果並討論差異。可以與外國團隊分享資料包含有自然背景調查、飛越已知輻射源、核電廠調查數據、附加數據如校正飛行、飛行高度、水平間距、水線飛行量測數據、能譜解析度、資料格式如 csv (文字檔案)、歐洲檔案格式、SQL 資料庫等、高度計數據、單位、使用地圖等。

實例 1：使用空中輻射偵測設備量測美國內華達州米德湖附近天然背景區域，配合州政府機構所設地表輻射偵測設備，飛行高度為 100 英尺，水平飛行間距為 200 英尺，如圖 32。

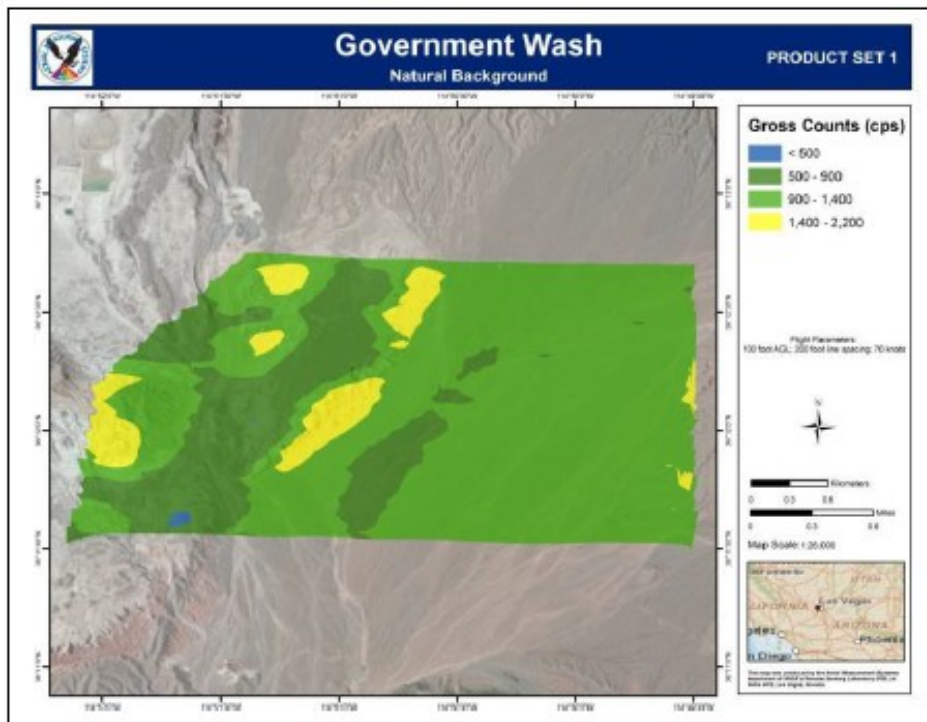


圖 32：美國內華達州米德湖附近天然背景區域

實例 2：由於經常執行核武測試，NNSS - 3 區與 NNSS 的許多區域一樣，該區域的輻射污染相當明顯，對 NNSS - 3 區一小部分大於 1 平方英里的區域進行了量測，飛行高度為 50 英尺，水平飛行間距為 75 英尺，如圖 33。

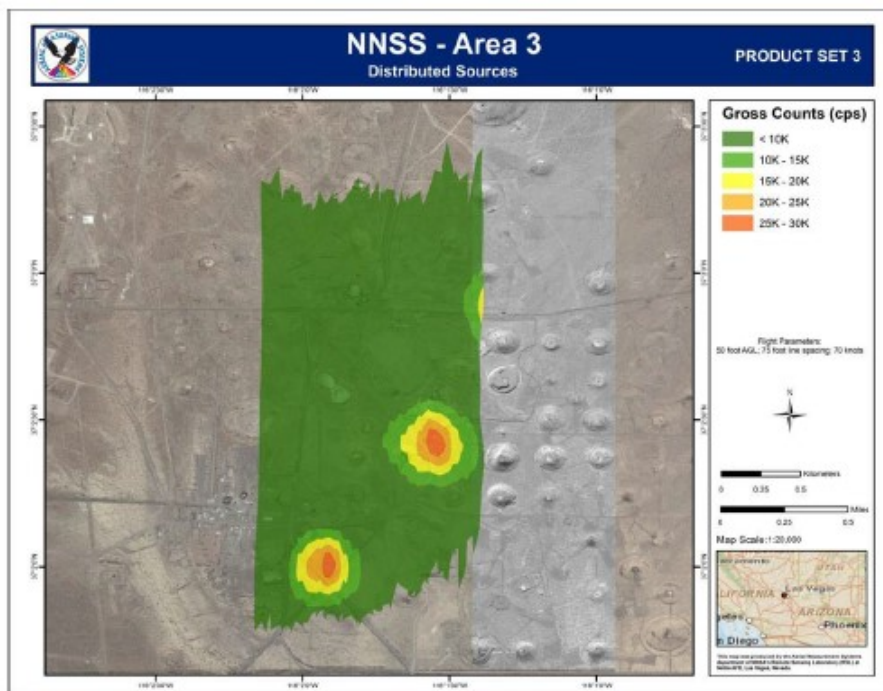


圖 33：NNSS - 3 區

實例 3：為了瞭解各種高度和形狀的建築物和人造物體密集地區對航空測量的影響，於內華達州拉斯維加斯的拉斯維加斯研發區 (LV R&D Area) 進行量測，在以下高度飛行：飛行高度為 300 英尺，水平飛行間距為 300 英尺，或飛行高度為 600 英尺，水平飛行間距為 600 英尺，如圖 34。

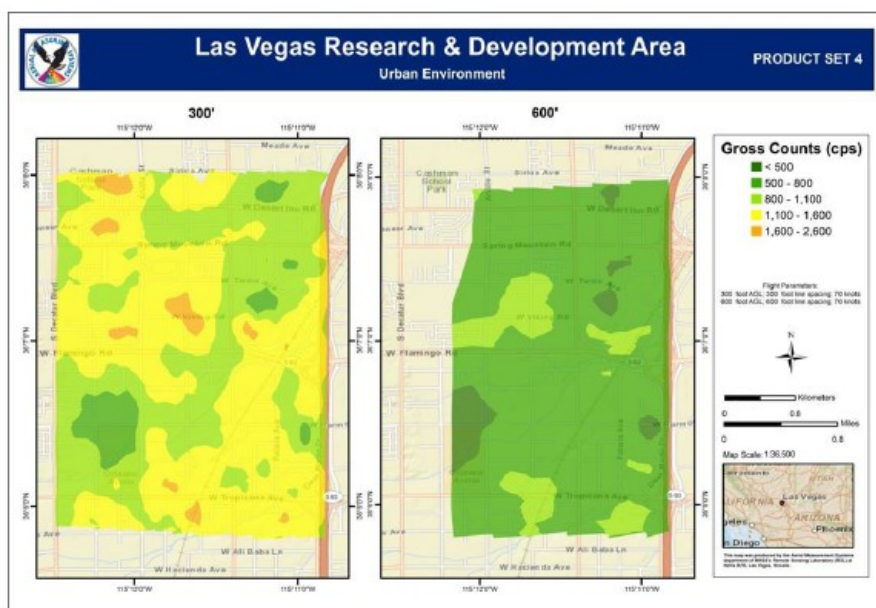


圖 34：內華達州拉斯維加斯的拉斯維加斯研發區

八、瑞士基於蒙地卡羅方法建立機載加馬射線能譜測量系統全能譜模型

因空中輻射偵測飛行高度距地面約 90 公尺高，導致計數率低且較不符統計分佈，對於數據校正產生較大誤差，傳統的校正方式受限特定校正射源核種種類、有限的輻射源幾何形狀並需要額外分析修正，基於蒙地卡羅的校正方法不受限校正射源核種種類及輻射源幾何形狀，快速且具有成本效益，但需要建立輻射源、偵檢器及包括直升機在內的複雜蒙地卡羅空間模型，如圖 35 至圖 36。

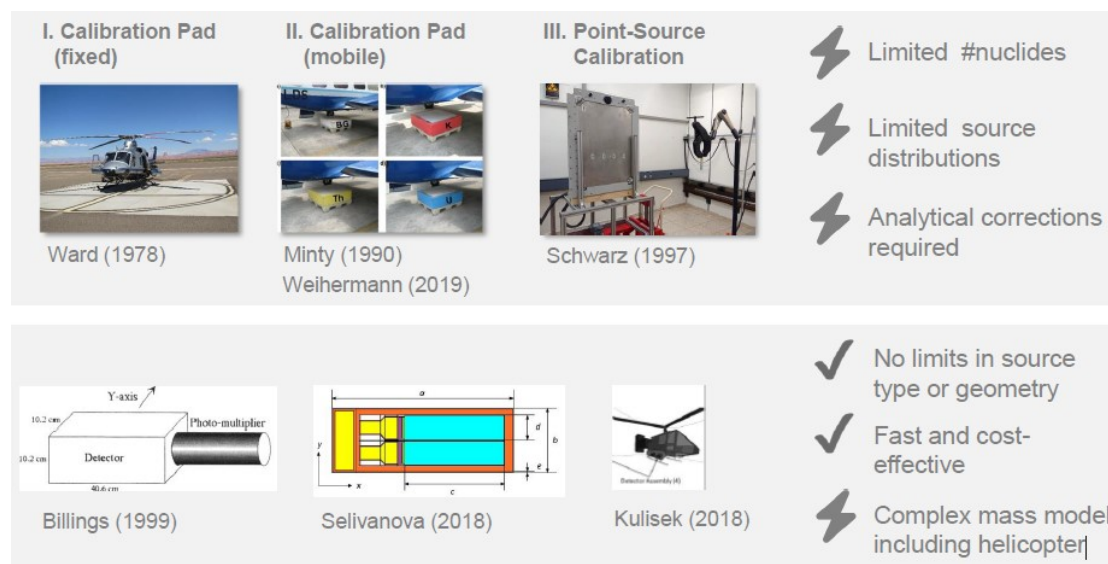


圖 35：傳統的方式與蒙地卡羅方法的優缺點



圖 36：建立偵檢器及直升機蒙地卡羅空間模型

於實驗室中模擬加馬混和校正輻射源、實驗室建物、偵檢器，並與實測結果比較，如圖 37 至圖 38。

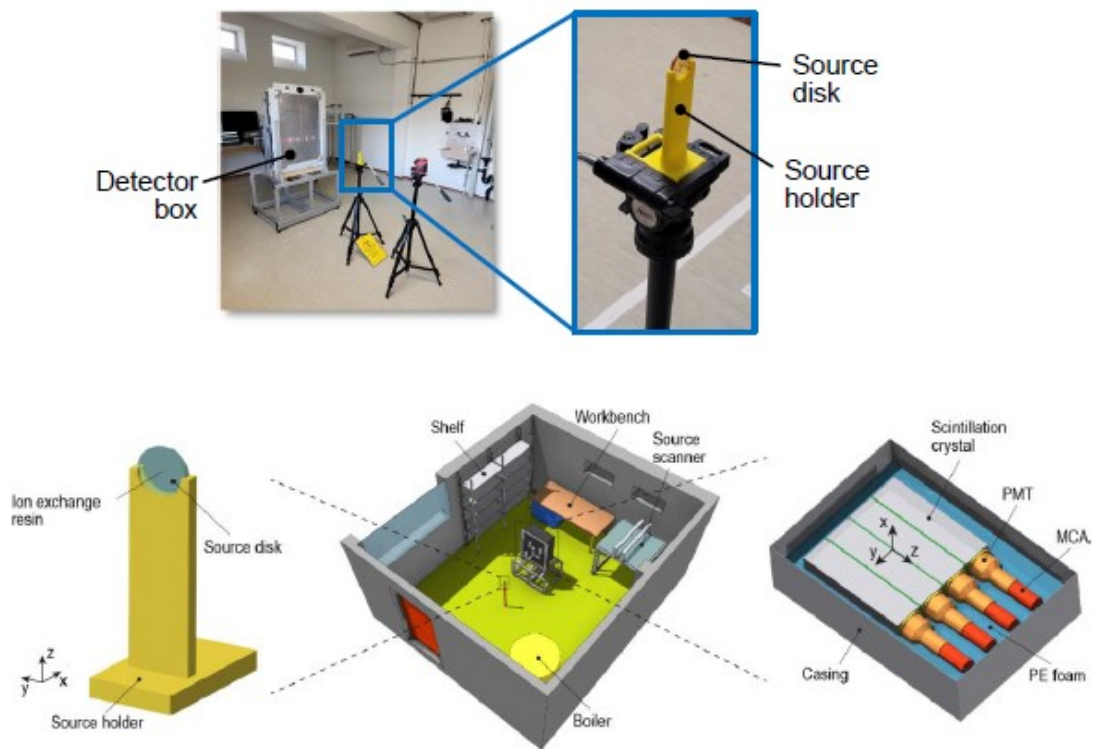


圖 37：實驗室中模擬

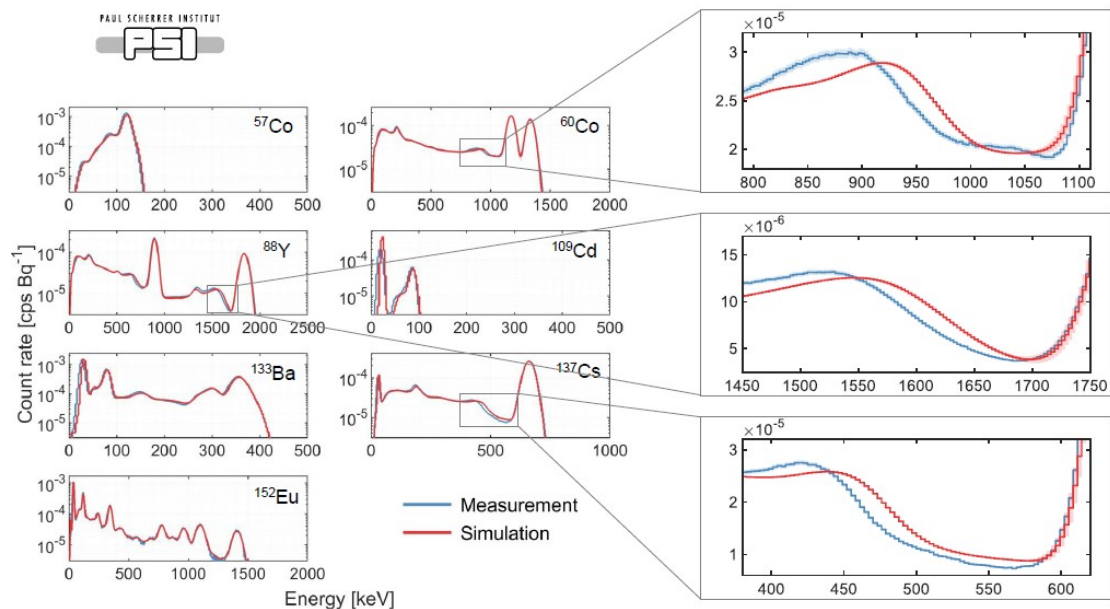


圖 38：模擬計算結果(紅)與實測結果比較(藍)

於機場地面以銫-137 點射源(活度 0.75 GBq)實測直升機燃料(剩 9%、剩 44%、剩 92%)對偵檢器的影響，每次量測 12 分鐘，再與蒙地卡羅方法模擬計算的結果比較，如圖 39 至圖 40。



圖 39：於機場地面以銫-137 點射源實測直升機燃料對偵檢器的影響

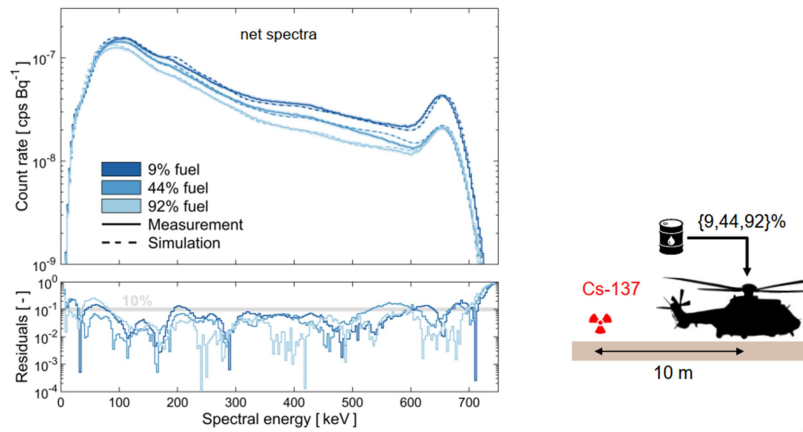


圖 40：銫-137 點射源實測直升機燃料對偵檢器的影響之結果
與蒙地卡羅方法模擬計算的結果比較

比較直升機不同離地高度(30 公尺、30 公尺、30 公尺)以銻-133 點射源實測對偵檢器的影響，每次量測 12 分鐘，再與蒙地卡羅方法模擬計算的結果比較，如圖 41。

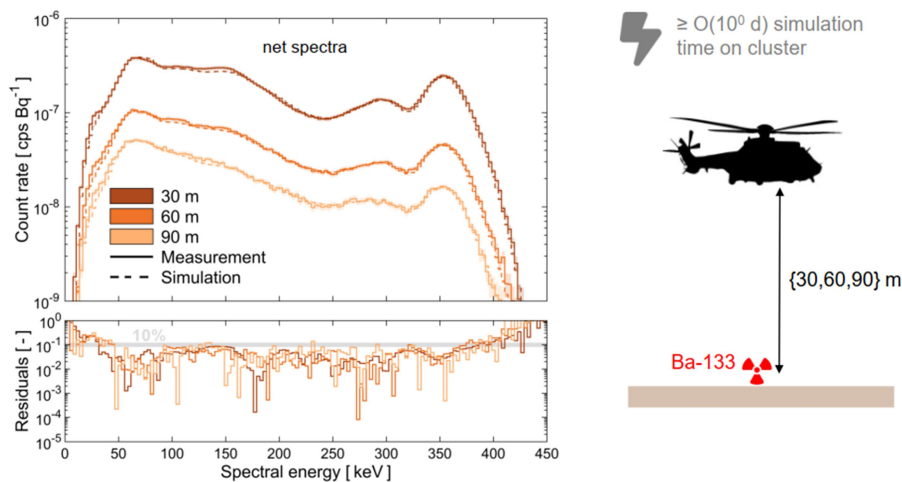


圖 41：比較直升機不同離地高度銻-133 點射源實測對偵檢器的影響
，再與蒙地卡羅方法模擬計算的結果比較

蒙地卡羅方法模擬地表所含天然核種鉀-40、鈾系、及鈾系，人造核種銫-137，及空氣中天然核種氡-222，如圖 42。

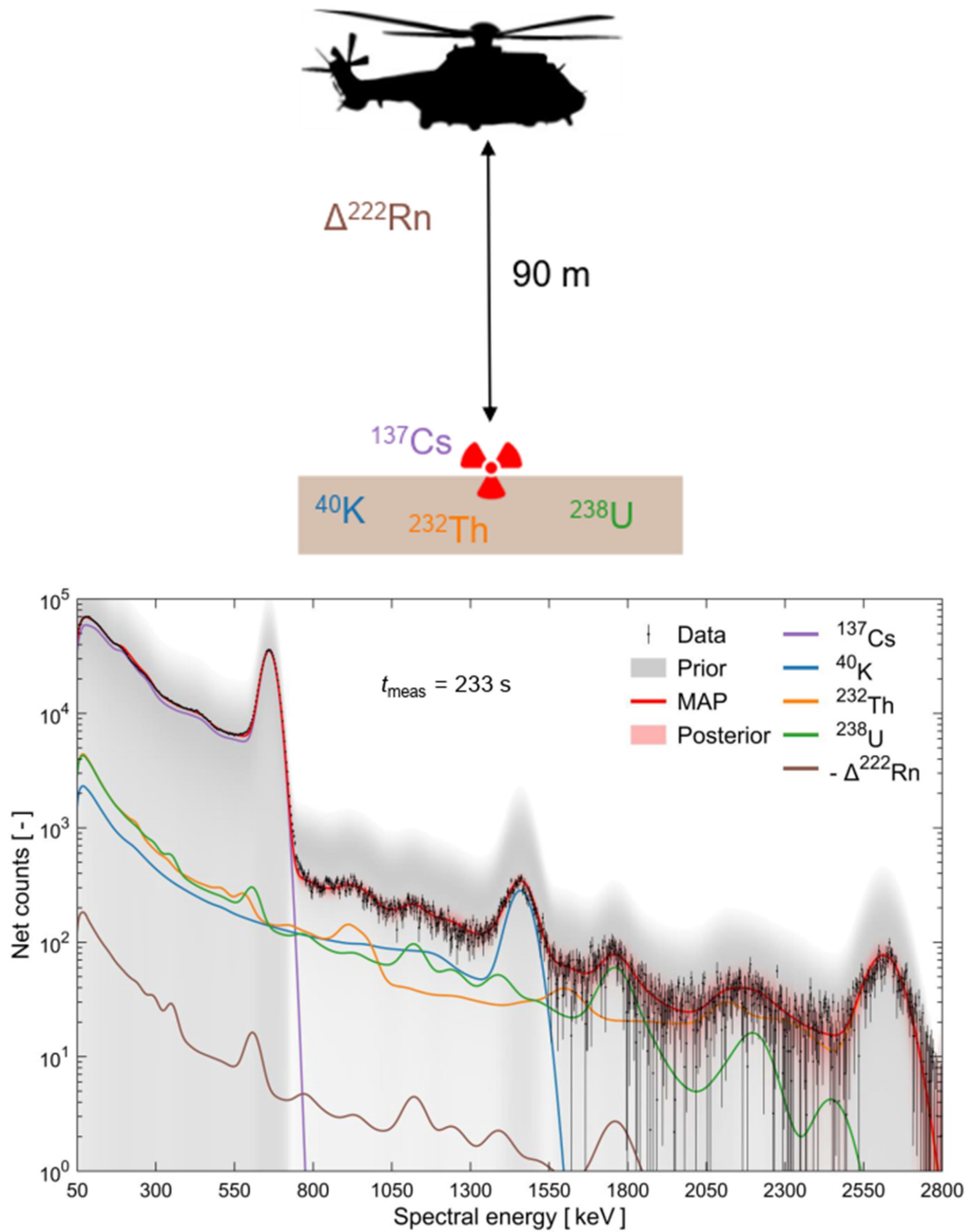


圖 42：蒙地卡羅方法模擬地表放射性物質的能譜

綜上，蒙地卡羅模型可實現準確的絕對能譜預測（誤差 < 10%），研究團隊提出新穎的閃爍非比例模型校正方法，應用遠遠超出空中偵測加馬能譜方法 (Airborne Gamma-Ray Spectrometry, 以下簡稱 AGRS)，將偵測器響應函數與雙微

分通量結合的新型偵測器響應模型方法，針對 AGRS 應用，將貝葉斯推理與卜瓦松分布(Poisson distribution)結合的新穎能譜反推方法，使用蒙地卡羅模型可進行宇宙輻射、氦氣和體內輻射推估，經過驗證的方法與各國使用系統平台或軟體無關，並且首次允許對任意輻射場進行量化，包括低能量下的人造放射性核種，瑞士團隊將於 2024 年春季或夏季國防演習時公布剩餘研究成果，如圖 43。



圖 43：瑞士研究團隊

九、加拿大的空中輻射偵測新系統簡介

加拿大是一級核武國家，境內有 19 個核能電廠，5 座研究用反應器，還有鈾礦開採、精煉和轉化工業，但沒有鈾濃縮工廠，此外還有小型模組化反應器計畫，加拿大核安委員會所管制約 2500 個使用業者(例如建築檢測、醫院用途等)，上述這些輻射源使用單位的風險分析是資源配置決策的基礎。

加拿大目前的恐怖主義威脅等級為中級，意味著可能發生恐怖暴力行為，自 2014 年 10 月以來一直處於該級別，2021 年安大略省發生卡車襲擊事件，共有 4 人死亡，2018 年多倫多發生貨車襲擊事件，共 11 人死亡，2017 年魁北克發生清真寺槍擊事件，共 6 人死亡，1989 年蒙特婁理工學院發生槍擊事件，共 14 人死亡。

加拿大聯邦政府執行聯邦核能緊急應變計畫，負責提供空中和地面移動輻射調查，執行全面禁止核子試爆條約實施法，監測管理局則負責國家地震、次聲及水聲監測，加拿大核爆監測資料中心與維也納國際資料中心進行資訊交換及支援情報評估。

加拿大空中輻射偵測設備具有堅固耐用、快速安裝、獨立的加馬能譜和中子計數率測繪系統，NRCan 核能緊急應變小組與加拿大皇家空軍 CH-146 Griffon 直升機機組人員一起在 2017 年「堅定楓樹」演習和 2021 年「協同挑戰」演習中進行演練，如圖 44。

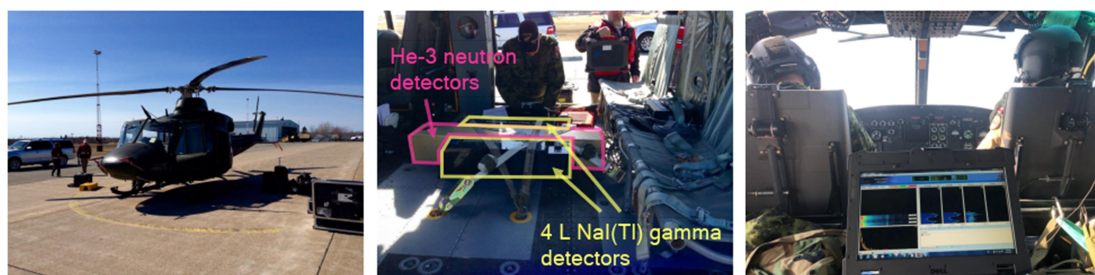


圖 44：加拿大 2017 年「堅定楓樹」演習和 2021 年「協同挑戰」演習

加拿大空中輻射偵測系統與衛星導航系統 (GNSS) 地理資訊進行整合，具有追蹤即時軌跡功能及二次能譜和同位素鑑定功能，在第 44 屆 G7 峰會期間使用康普頓安全望遠鏡 (SCoTSS) 加馬顯像儀從魁北克市到拉馬爾拜進行即時移動調查，如圖 45。

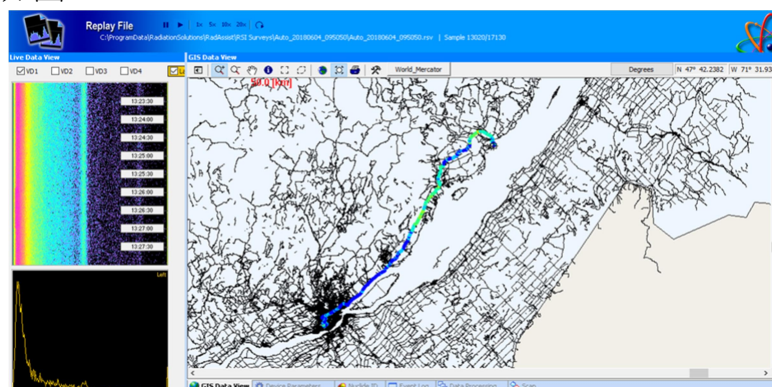


圖 45：從加拿大魁北克市到拉馬爾拜即時移動調查

國際合作部分，2014 年 1 月 20 至 24 日美國 AMS 團隊與加拿大 NRCan 團隊合作進行聯合調查，在美國內華達國家安全站點處執行(報告編號：GSC OPEN FILE 7783)，如圖 46。



圖 46：美國 AMS 團隊與加拿大 NRCan 團隊合作進行聯合調查

日本福島事故後，加拿大與日本的國際合作，例如加拿大車載輻射偵測與 JAEA 空中輻射偵測整合，JAEA 無人機上的加拿大 ARDUO 偵測器，如圖 47。

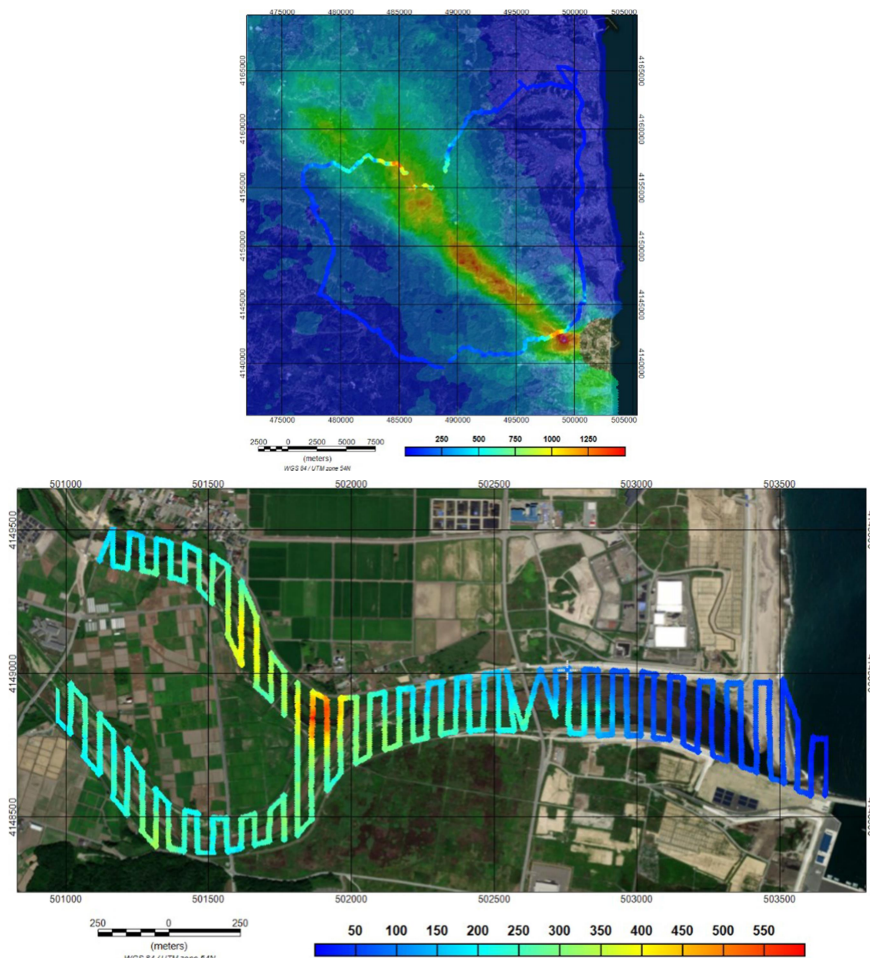


圖 47：加拿大車載輻射偵測與 JAEA 空中輻射偵測整合

加拿大自行開發用於無人機操作的先進輻射探測器 (ARDUO)，主旋翼和尾旋翼無人飛機，能負重約 20 公斤，具 6 公斤垂直飛升能力，能維持飛行 15 至 40 分鐘，具備 Pixhawk 自動駕駛儀，搭載 ARDUO 定向加馬探測器，可即時計算輻射能譜與輻射源方向，與地面控制站配合，每秒更新輻射數據，如圖 48。

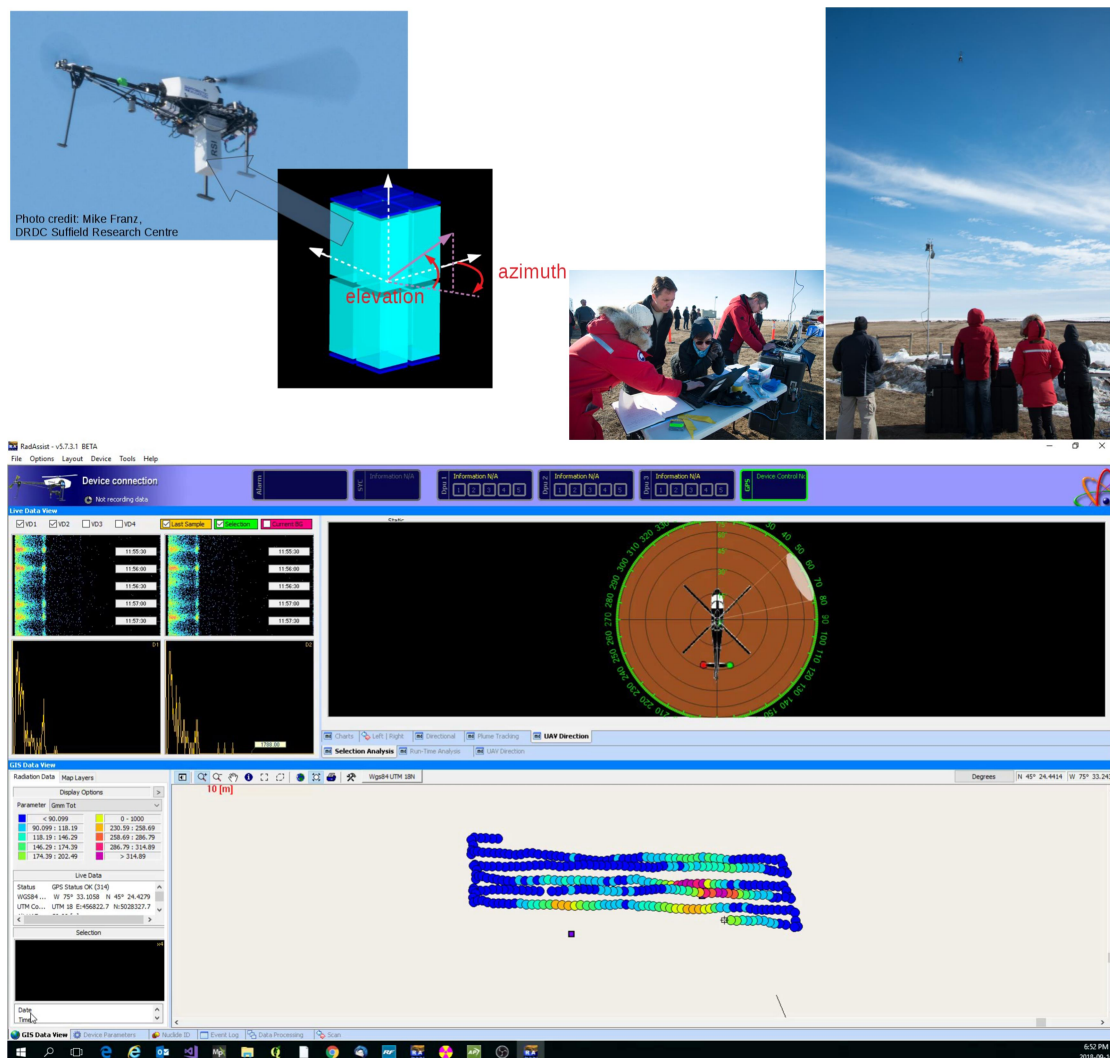


圖 48：無人機輻射探測器 (ARDUO)

加拿大自行開發基於矽光電倍增管的康普頓安全望遠鏡 (SCoTSS)，由 288 個單獨的 CsI(Tl) 晶體組成，每個晶體大小為 2.8 cm^3 或 1.35 cm^3 ，能以奈秒計時並追蹤加馬輻射在探測器內的相互作用，且能從康普頓散射方程式重建輻射源的方向，在寬廣區域調查搜尋與識別同位素，從遠處記錄輻射源並能從多個方向進行三角測量與斷層掃描，如圖 49。

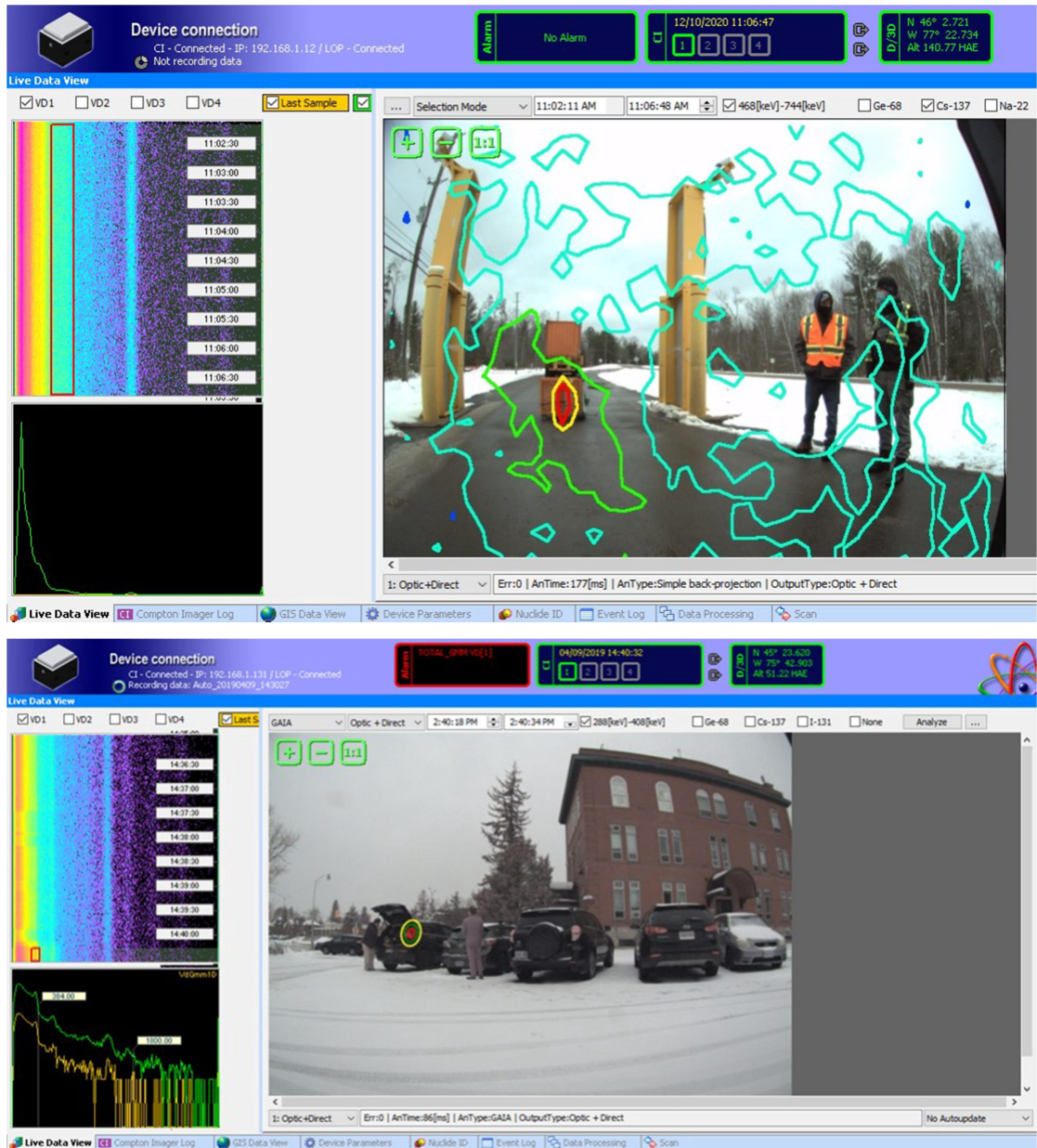


圖 49：加拿大自行開發的康普頓安全望遠鏡實測結果

十、NGU 在挪威核能緊急組織中的作用和活動

首先介紹 NGU(Norges geologiske undersøkelse)核能緊急應變團隊及工作，NGU 由五人組成團隊，負責儀器維護、資料收集、處理和解釋，為挪威輻射核能源局及核安局 (DSA)領導的挪威核應急準備計畫提供技術支持，負責空中和地面輻射偵測並進行地質和放射線測繪，校正能譜並提升 NGU 的能力。硬體設備方面包含兩台 RSX-5(16+4 公升)碘化鈉(NaI)加馬射線能譜儀，用於直升機和車載測量(與 DSA 共用一台)、用於地面測量的 RS-125 和 RS-230 加馬射線能譜儀、Automess 6150、Tracero PED-ER+ 劑量率偵檢器、四台 16 公升 NaI 能譜儀，支援陸軍和海岸警衛隊，如圖 50。軟體系統方面包含輻射解決方案的 RadAssist 和用於資料收集和處理的 NGU Gammalog、用於處理和視覺化的 Geosoft 及 Oasis Montaj、用於視覺化和地圖準備的 ArcGIS/Geosoft。



圖 50：挪威 NGU 之硬體設備

NGU 平時主要的任務為空中輻射偵測方式測繪挪威境內地球物理地圖資訊，核子事故時主要的任務為緊急應變車載輻射偵測，如圖 51。

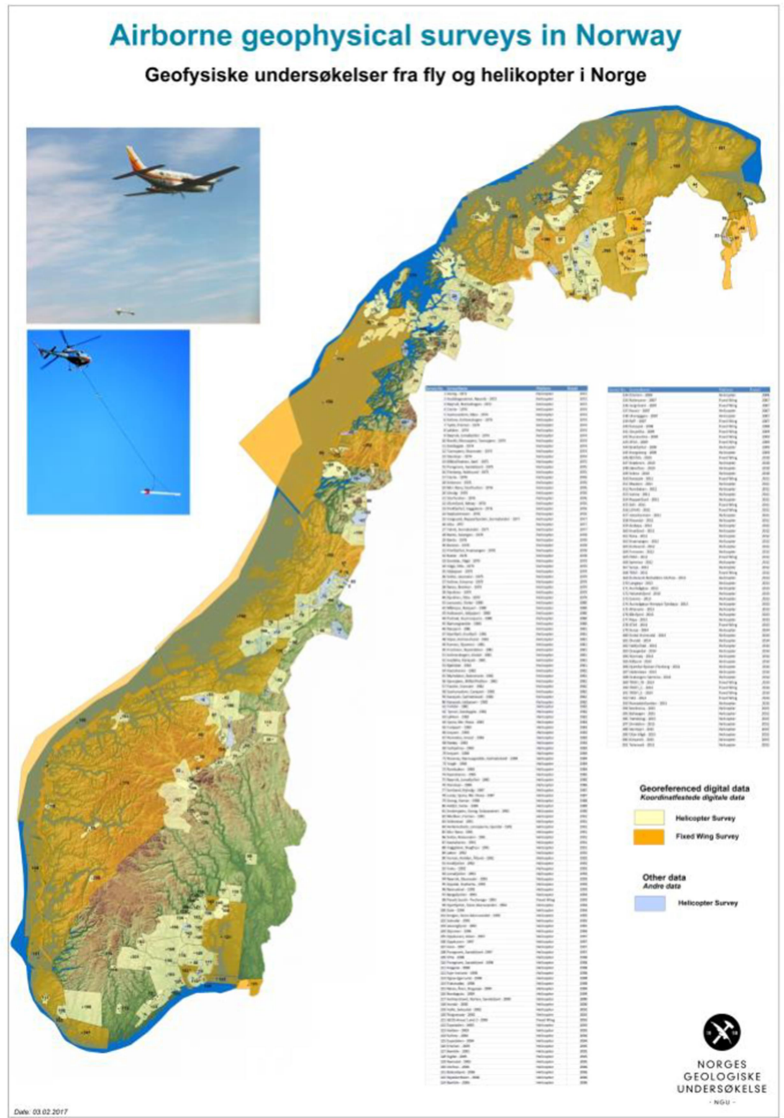


圖 51：平時空中輻射偵測方式測繪地圖，核子事故時車載輻射偵測

NGU 目前正在規劃增加併入無人機輻射量測能力，考慮採用無人機加馬能譜儀進行地質測繪並支援緊急應變計劃，目前已用於地磁圖測繪，由 DJI M300 RTK2 (可有效負重 2.4 - 2.7 kg, 電池供電時間約 50 分鐘) 搭載 UGCS 地形追蹤軟體和硬體、NRA24 高度量測儀和 Skyhub3 機載電腦，如圖 52。



圖 52：DJI M300 RTK2 無人機及地磁圖測繪

挪威現有直升機搭載加馬輻射射線能譜儀的空中輻射偵測系統 (AGRS)，偵檢器採用 Radiation Solutions 公司製造的 RSX-5，具有 1024 個頻道，每個頻道間隔為 3 MeV 以內，包含有 16 公升碘化鈉(NaI)偵測器(向下)及 4 公升 NaI 偵測器(向上)，配備 GPS、雷達高度計、壓力和溫度感測器，數據收集方面，飛行間距為 100 至 200 公尺，跨越地質特徵走向的飛行，一般飛行高度為 75 公尺，一般飛行速度為 100 km/h (約 30 m，採樣間隔 1 秒)，如圖 53。



圖 53：挪威直升機搭載的空中輻射偵測系統

2015 年在尤通黑門 (Jotunheimen) 測試場，配合地面銫-137 活度濃度測量結果和銫-137 淨計數加權的靈敏度係數，進行空中輻射偵測系統的校正，包含宇宙輻射校正和飛行時背景輻射校正、高度衰減校正、靈敏度係數校正，飛行區域內計算 60 公尺飛行高度每個點的權重因子 (Tyler, 1996, J. Env. Rad., 33, 213-235)，如圖 54。

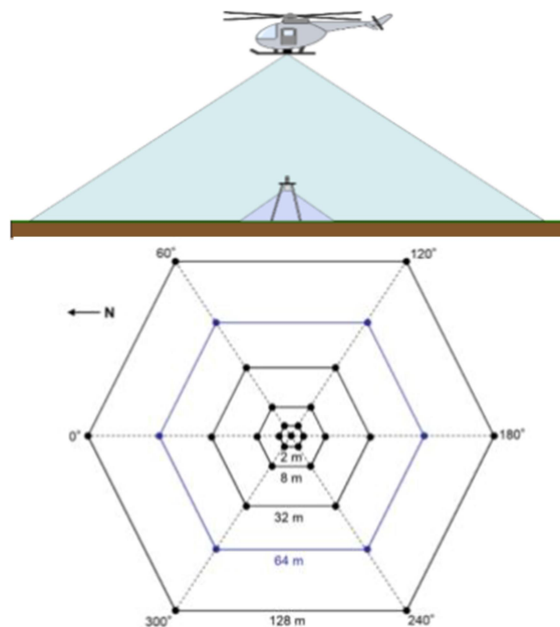
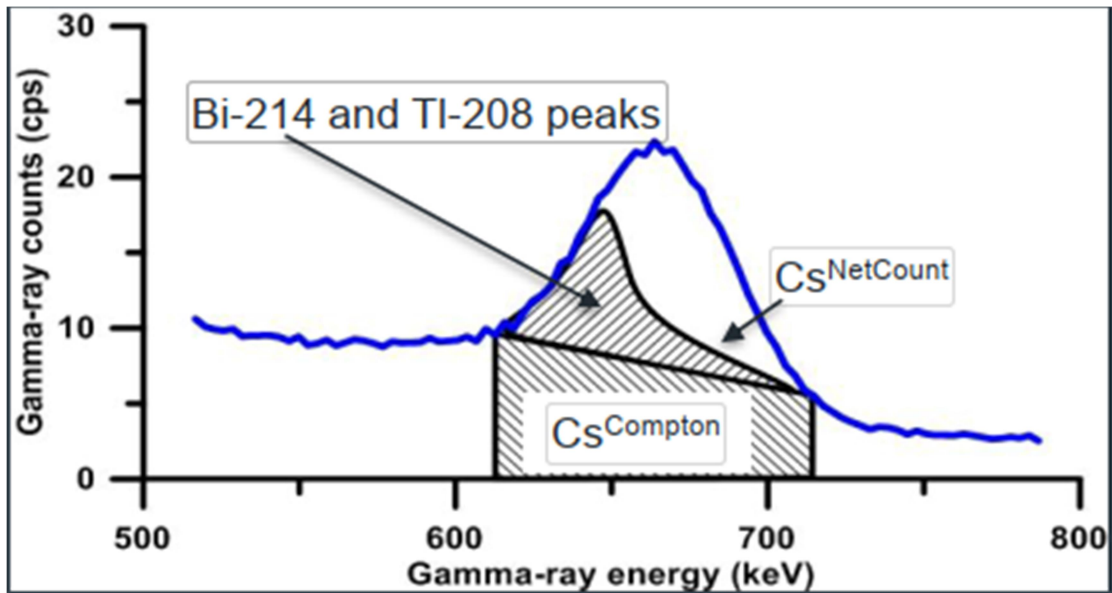


圖 54：2015 年在尤通黑門測試場進行空中輻射偵測系統的校正

2019 年發表的銫-137 空中輻射偵測結果與地面測量之間的相關性研究 (Thørring et al., 2019, J. Env. Rad., 208-209, 1-11), 如圖 55。

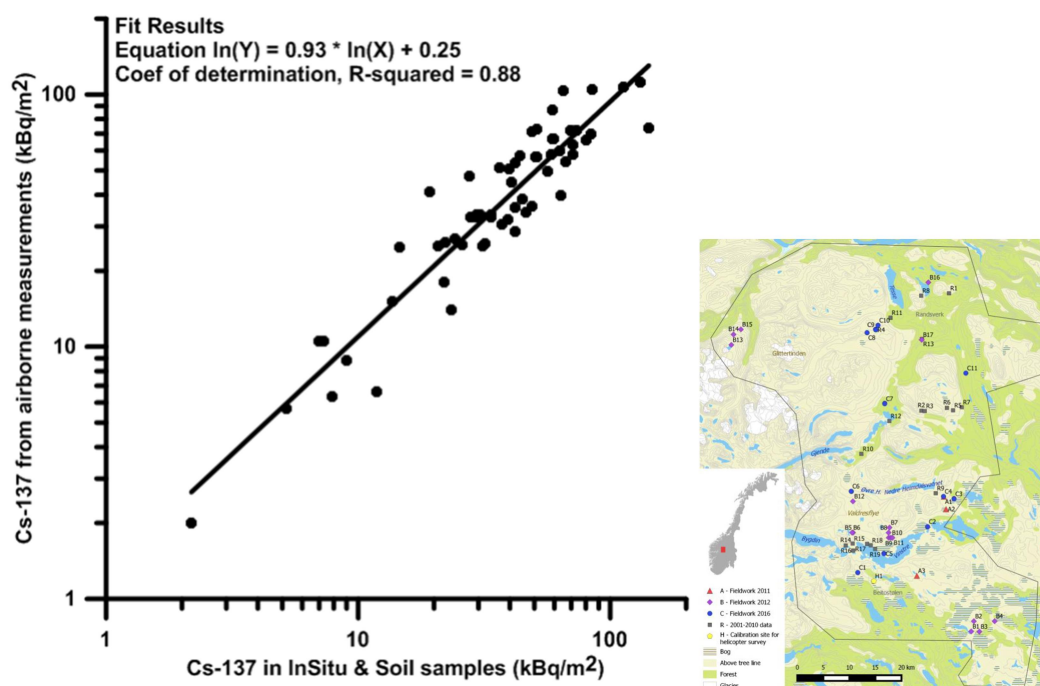


圖 55：2019 年發表的銫-137 空中輻射偵測結果與地面測量之間的相關性研究

劑量率計算方法, 總劑量率(TDR)=人造劑量率(ADR)+天然劑量率(NDR),
 $NDR = 1.505 \times \text{地面鉀-40 活度濃度} + 0.653 \times \text{地面鈾-238 活度濃度} + 0.287 \times \text{地面鈾-232 活度濃度}$, 在沒有任何人造輻射的區域, 從直升機上量測總加馬計數(必須修正直升機影響、宇宙輻射和飛行高度), 再除以 NDR, 可得到總加馬計數係數(CTDR); 從直升機上量測天然加馬計數(必須修正直升機影響、宇宙輻射和飛行高度), 再除以 NDR, 可得到天然加馬計數係數(NTDR), 隨後在新調查區域進行空中輻射偵測, 總劑量率(TDR)為直升機上量測天然加馬計數除以總加馬計數係數(之前在沒有任何人造輻射的區域得到的), NDR 為直升機上量測天然加馬計數除以天然加馬計數係數, ADR 為 TDR 減去 NDR, 如圖 56。