

出國報告（出國類別：研究）

蘇黎世聯邦理工學院瑞士地震服務  
中心（**ETHZ-SED**）地震預警技術  
交流研習

服務機關：交通部中央氣象署 地震測報中心

姓名職稱：宋冠毅 技士

派赴國家/地區：瑞士/蘇黎世

出國期間：114 年 5 月 14~16 日、19~22 日

報告日期：114 年 6 月 30 日

## 研習摘要

本次應瑞士聯邦理工學院地震服務中心（ETH Zürich Swiss Seismological Service, ETHZ-SED）邀請，進行為期 5 天的地震預警技術交流研習，聚焦於地震預警系統成果與優化、新地震測報技術、系統回放與故障排除、地震觀測網與合作規劃等議題。期間除簡報、對話交流外，並實作 ETHZ-SED 所開發的地震預警系統（ETHZ-SED SeisComP EEW, ESE），進行歷史事件回放與模組分流測試。本次會議，雙方已就瑞士 ESE 系統在臺灣測試期間所面臨之挑戰，提出多項優化策略，並確認品質控管自動化與決策模組整合等後續合作方向。此次交流為 ESE 系統於中央氣象署正式導入前重要的討論階段，雙方期許在持續交流的框架下，建構本署更穩定且可靠的地震預警服務，強化災防應變效能。

## 目次

|                     |    |
|---------------------|----|
| 研習摘要.....           | 2  |
| 目次.....             | 3  |
| 參訪目的.....           | 4  |
| 參訪及學習過程.....        | 6  |
| 一、出國行程規劃表及學習歷程..... | 6  |
| 二、會議研習討論項目.....     | 7  |
| 三、研習重點回顧.....       | 8  |
| 心得及業務建議.....        | 35 |
| 參考文獻.....           | 40 |

## 參訪目的

臺灣位於板塊交界帶，地震活動頻繁。為強化地震發生後關鍵數秒內的預警應變能力，交通部中央氣象署(下稱本署)長期投入地震預警系統之建置與優化，期許系統能準確地評估震央位置與規模，並發出兼具時效且可信的防災警報。然而，本署現行地震預警系統(eBEAR)採用單一點震源模型來量化地震破裂與能量釋放(Chen et al., 2015)，當大型地震發生時，其破裂過程會沿著斷層面延伸，具備明顯的線性破裂特性。若僅以點震源模式簡化處理，恐低估大型地震的影響範圍與震度強度，進而造成預警涵蓋不足及應變時效(Warning Time)延遲等問題，亟待研擬精進策略。

為提升大型地震情境下預警資訊之準確性與應變效能，2023年7月，本署基於2018至2023年間派員赴德國參與SeisComP地震監測軟體培訓所累積之經驗，正式向瑞士聯邦理工學院地震服務中心(ETH Zürich Swiss Seismological Service, ETHZ-SED)提出合作請求，導入以SeisComP為核心平台之地震預警系統(ETHZ-SED SeisComP EEW, ESE)於本署主機進行線上測試(Massin et al., 2021)。該系統整合點震源演算法Virtual Seismologist(VS)(Cua, 2005; Cua and Heaton, 2007; Cua et al., 2009)與線震源演算法Finite-Fault Rupture Detector(FinDer)(Böse et al., 2012; Böse et al., 2015; Böse et al., 2018; Böse et al., 2023)，期望建構一套能因應多元震源特性之複合型演算法預警系統，以補強既有架構於大型地震預警作業中的物理限制與應變不足。

新系統上線測試起，先後歷經2024年花蓮地震與2025年嘉義大埔地震兩起災害性地震的考驗，兩次地震均同步觸發本署eBEAR及瑞士ESE系統，產製完整預警資料，提供實地驗證與交叉比對之依據。為深入掌握系統於實際應用環境中的表現及潛在優化方向，宋員於2024年9月首度應邀前往ETHZ-SED展開技術交流。2025年5月則進行第2次為期5日的訪問，除延續前次討論成果，亦進一步聚焦於

新一代地震預警系統的效能評估與改進策略，研習內容涵蓋以下核心目標：

1. 發展複合型預警演算法邏輯：結合本署與ESE系統的多套演算法，建構能因應多元震源情境之綜合預警發布機制。
2. 導入誤報抑制與可信度檢核機制：學習ESE系統所採用之Likelihood發報決策評分制度，掌握其整合測站觸發情形、規模分布與測站空餘角等條件進行預警發報的判斷依據，可作為未來強化本署預警決策流程之參考。
3. 建立自動化品質控管與歷史地震回放優化機制：探討地震預警品質控管流程，並學習地震預警演算法回放流程，以作為系統優化之重要依據。
4. 探索AI與DAS技術應用潛力：討論機器學習於地震波相辨識之實作方式，並討論DAS技術於地震測報作業之定位與瓶頸。
5. 奠定長期國際合作架構：透過技術交流與國際地震測報經驗共享，整合專家智慧與實務經驗，提升本署於全球地震預警領域之能見度與連結力。

本次交流除鞏固過往系統合作基礎，亦進一步釐清未來優化重點，為臺灣推動下一階段地震預警系統建置、強化社會互動功能、擴充觀測能量及落實品質控管流程提供明確推進方向。未來，本署將持續盤點研習所獲，研擬具體應用策略，提升系統效能與防災韌性。

## 參訪及學習過程

### 一、出國行程規劃表及學習歷程

| 日 期           | 地點                | 工作摘要                                                             |
|---------------|-------------------|------------------------------------------------------------------|
| 114年5月14日     | 瑞士蘇黎世             | 地震預警程式測試與簡報修改                                                    |
| 114年5月15日     | 瑞士蘇黎世             | 地震預警與測報作業討論                                                      |
| 114年5月16日     | 瑞士蘇黎世             | 地震預警系統於大埔地震成效、挑戰及機器學習於地震測報應用討論                                   |
| 114年5月19日     | 瑞士蘇黎世             | 地震預警服務(公眾影響、應用程式與決策)及未來合作項目確認                                    |
| 114年5月20日     | 瑞士蘇黎世             | DAS技術討論與地震預警系統測試與參數優化                                            |
| 114年5月21 ~22日 | 瑞士蘇黎世、奧地利維也納、臺灣桃園 | 5月21日下午13：25自蘇黎世機場往維也納，當天下午17：45再轉機由維也納返回桃園，預計5月22日下午16：05抵達桃園機場 |

## 二、 會議研習討論項目

- (一) 探討中央氣象署地震預警系統之最新策略及未來精進方向。
- (二) 美國地質調查局 (USGS) ShakeAlert 地震預警團隊的近期成效與挑戰。
- (三) 線震源 Finite-Fault Rupture Detector (FinDer) 演算法的最新開發成果。
- (四) eBEAR 與 ESE 系統在 2025 年嘉義大埔地震主震之預警表現。
- (五) eBEAR 與 ESE 系統在 2025 年大埔地震餘震序列分析。
- (六) 瑞士 ESE 系統演算法於臺灣測試過程中所面臨挑戰與潛在改進方向。
- (七) 地震預警系統品質控管機制與流程設計之深入討論。
- (八) 地震預警服務於行動裝置 APP 之應用策略與使用者互動經驗。
- (九) 地震預警服務對社會大眾與行為反應之影響 (社會科學角度)。
- (十) 新地震預警決策模組導入與應用方法。
- (十一) 分布式光纖感測 (DAS) 於地震監測與預警系統之應用前景。
- (十二) 機器學習技術於地震目錄建置與即時測報作業之實務應用。
- (十三) 學習 ESE 系統的離線回放與故障排除 (實作)。
- (十四) SeisComP 系統的參數優化 (實作)。
- (十五) 觀摩地震儀、地震站、地震監測展示與地震測站網頁 (實地參訪)。
- (十六) 2025 年下半年至 2026 年上半年之合作研究與系統開發規劃。

### 三、 研習重點回顧

本次與蘇黎世聯邦理工學院瑞土地震服務中心(ETHZ-SED)進行技術研習，內容涵蓋地震預警與地震測報核心技術，並著重於國際實務經驗交流、系統實際結果探討與模組優化應用。研習期間，我方與 ETHZ-SED 團隊針對多項議題進行討論，除聚焦 SeisComP 平台下 FinDer 與 VS 兩套演算法之整合應用與觸發穩定性外，亦學習國際實務經驗。為完整回顧本次研習內容，以下將依主題分類五項重點：

- 地震預警系統成果與優化：分析 CWA 現行預警策略與 ESE 兩套演算法成果，並學習瑞士 ETHZ-SED 與美國 USGS 運作經驗，聚焦複合型演算法整合應用成效與警報品質提升策略。
- 新地震測報技術交流討論：探討 AI 於波相挑取與定位模組的實務導入，並學習分布式光纖感測（DAS）於地震監測補強之潛力。
- ESE 系統回放與故障排除：進行模組參數調校與 Docker-based 回放平台建置，實測 VS 與 FinDer 演算法於歷史案例下之系統穩定性與觸發表現。
- 地震儀、地震站與波形平台展示與設計交流：參訪地震儀與測站實例，觀摩 ETHZ-SED 在站體設計、儀器選用、即時波形監控平台與測站資訊網頁整合等多項作業經驗。
- 確認未來合作與後續工作重點：針對系統測試、品質控管、自動化回放平台與決策模組整合等未來工作項目，明確規劃後續合作方向。

針對上述五項主題，後續將分項說明本次交流過程與實質收穫。

## (一) 地震預警系統成果與優化

### 1. 本署地震預警系統之最新策略及未來精進方向

說明：本討論由我方說明本署現行地震預警系統之架構設計、策略演進與近年研發成果，涵蓋觀測網建設、國際資料整合、警報發布條件調整、地震參數評估機制及 AI 模型應用等多項重點。

(1) 測站擴充：截至 2025 年 4 月，本署已建置 704 座即時測站與 953 組地震觀測儀器，並逐步加入來自鄰近國家之合作機構提供的即時觀測資料。透過跨境資料共享，本署有機會進一步提升臺灣外海的地震定位與規模計算之準確度，同時還能提升地震預警的發布時效。

(2) 預警系統精進策略：我方目前已經調整警報的更新條件，並於未來考慮擴充地震預警參考點、整合點震源、線震源、現地地震預警法( on-site EEW )、即時觀測震度與機器學習等方法，因應不同震源特性與地震類型，建構多層次、更完整的預警邏輯，提升系統於多元地震情境下的應變能力。

小結：本討論，ETHZ-SED 團隊對我方展示之各項策略整合與應用表達肯定，同時也對我方複合型預警架構之發展方向表示濃厚興趣。Dr. Maren Böse 亦隨後分享美國地質調查局（USGS）相關做法（詳見下一小節），呼應我方策略構想，並強化本署推動新一代地震預警系統之方向與信心。

### 2. 美國地質調查局（USGS）ShakeAlert 地震預警團隊的近期成效與挑戰

說明：本部分由 ETHZ-SED 的 Dr. Maren Böse 報告，分享其參與開發之美國 ShakeAlert 地震預警系統（McGuire et al., 2025）、FinDer-ShakeMap 模型整合經驗，以及近期於土耳其地震觀測中的應用成果。此次技術交流聚焦於複合型預警策略、發布管道流程、系統效能評估及震後資訊整合機制等議題。

(1) 複合型演算法預警系統：首先，ShakeAlert 採用之多種演算法（EPIC、FinDer、G-larmS）設計複合型演算法預警系統，各方法彼此間具備高度互補性，以應對各種不同情境的地震事件，並透過合適的啟用條件，由決

策模組統一進行警報發布判斷，有效提升系統穩定性。我方目前亦朝向同步導入點震源與線震源模型，未來可參考美國經驗，評估導入決策整合啟用標準，強化多模型資訊融合機制，提升預警品質並減少誤報、漏報機率。

(2) GNSS 即時站的應用：呈上點，ShakeAlert 系統中之 GFAST-PGD 模型利用 GNSS 即時位移資料（Peak Ground Displacement, PGD）進行大地震的震源規模與破裂延伸估算，特別針對地震規模 7.0 以上事件，可補強傳統基於觀測振幅計算規模時所面臨的規模飽和、低估議題，該機制展現 GNSS 資料於強震預警中所具備之穩定性與準確性潛力。我國目前已建置具即時傳輸能力之 GNSS 測站網，未來可研議將其納入地震預警架構，與現有地震儀進行整合，提升對大規模地震的規模、斷層破裂與震度資訊之準確度。

(3) 地震預警產品分級與震度預估方法：美方 ShakeAlert 系統與我國相同之處為依據預估規模與震度條件，針對不同發布管道與使用者特性，提供分級地震警報服務。在震度預估產品設計上，目前我方預警資訊以參考點對應行政區域進行警報發布，在空間解析度與資訊視覺化有進步空間。美方 ShakeAlert 系統進一步區分為兩種格式：網格型（grid-based）與等值圖型（contour-based），並依據方法的特性（產製時效與準確度）應用於不同的產品。例如：大眾運輸採用網格型方法預估震度，而 WEA 行動裝置緊急廣播則採用等值圖預估震度。此策略具備高度彈性，為本署可參考的發展方向，並依使用端需求（如關鍵設施、個人化 APP 等）設計不同的預估震度機制。然而，此策略需注意同一事件於不同產品中之震度結果的差異性，進而對民眾產生資訊落差與訊息混淆風險。因此，本署若未來考慮參考美方方法，建議先針對歷史事件進行警報適切性驗證與模擬比對，確保產品間訊息一致性與警報準確性，方可穩健推進預警資訊多格式化之策略目標。

(4) 近場高頻強地動訊號造成規模高估之初步觀察與因應討論：ShakeAlert 系統中的 FinDer 模型係根據 PGA 分布估算震央位置與地震規模，然而在地震初期，若近震央區域測站於 P 波抵達數秒內即觀測到高頻且振幅極大的加速度訊號，可能導致高估規模問題。此現象於美國加州 Julian 地震中觀察到，事實上我國亦有類似案例發生。針對此挑戰，因 PGV 經由加速度積分能抑制高頻、強化低頻特徵，並與災損關聯性較高，交流中初步討論以 PGV 為替代參數之可能性，另我方亦提出是否採用近震央測站資料進行地震定位，不納入規模估算之策略，以避免局部極值主導整體報告規模的判斷，不過後續仍需依實際地震案例進行系統性評估。

小結：本次交流深入學習與觀摩美國 ShakeAlert 團隊在多層級警報策略、GNSS 整合應用及震度資訊格式設計等面向之作法，對我方未來地震預警系統之架構優化與警報發布策略調整，具有具體的參考價值。

### 3.線震源演算法 FinDer 的最新開發成果與應用成效

說明：本部分由 ETHZ-SED 的 Dr. Maren Böse 說明 FinDer 線震源演算法之最新應用成果與功能擴充，協助我方深入理解其設計理念與實務運作特性，並作為後續評估地震預警、地震測報相關業務整合策略之重要參考。

(1) 2023 年土耳其 Mw 7.8 地震的離線測試：FinDer 已針對 2023 年 2 月 6 日發生於土耳其 Kahramanmaraş 的地震序列進行離線回放模擬測試。該序列包含主震 Mw 7.8 的 Pazarcık，以及後續的 Mw 7.6 Elbistan 與 Mw 6.4 Yayladağı 等多起大型地震。研究團隊利用 FinDer 模型搭配強震動加速度波形資料，以回放方式模擬地震當時的破裂情形，成功推估斷層的破裂方向與延伸長度，且結果與地震發生數日後建立的最終震源模型高度一致（Böse et al., 2024）。此成果顯示 FinDer 在處理大型地震破裂特性方面具有相當好的即時預估能力，有助於提升地震預警品質，並為後續防災應變決策提供具參考價值的科學依據。

(2) FinDer 與震度分布圖的整合：在歐洲 DT-GEO 計畫中，研究團隊建立一套 FinDer 線震源模型與震度圖的整合架構，並納入 EPOS (European Plate Observing System) 平台進行應用。該架構可連續接收來自歐洲多國的地震資料服務（如：ORFEUS、EFEHR 及 EMSC）所提供的即時地震連續波形資料、地動參數（如：PGA、PGV）與民眾震感回報等資訊，並依據事件發生後的不同時間階段，動態更新地震破裂模型與地動分布結果。此機制可反映地震資訊的逐步累積特性，亦能支援震後從數秒至數週不等的多階段地震衝擊評估資料的流程。本次簡報內容顯示，FinDer 模型除了地震預警階段的破裂辨識，也可應用於震後震度圖的修正與更新。我國未來如遇規模 6.0 以上地震，亦可參考此架構導入 FinDer 模型於震度預估與資訊視覺化流程，進一步強化初期地震災情研判的即時性與空間解析能力，作為防救災決策的有力支援工具。

(3) FinDer 演算法加入 External Origin 的新功能：FinDer 已針對納入外部演算法提供的震源資訊 (external origin) 進行測試，突破以往僅能依據自身觀測的 PGA 分布推估破裂中心 (centroid) 的限制。此項新功能提升 FinDer 的彈性，可直接套用其他定位模組產出的震央結果，進行後續的破裂方向與斷層長度計算。在某些特殊情境下，例如：臺灣外海地震，由於初期地震觀測站分布較為稀疏，容易導致 centroid 偏差問題，進而影響破裂模型準確度。若能直接導入外部定位結果，預計可有效改善破裂幾何的空間推估品質，提升模型穩定性與可靠度。本項功能未來將進一步於臺灣外海地震案例中進行測試，評估其對預警定位準確度的實質貢獻。整體而言，此功能對本署推動複合型演算法預警系統具有高度應用潛力，不僅有助於強化不同演算法間的資訊整合與決策一致性，也可降低因估算差異所導致的誤報風險，進一步提升整體地震預警系統的穩定性與應變效能。

小結：本次交流針對 FinDer 線震源演算法的最新發展進行深入討論，涵蓋 2023

年土耳其地震案例之離線回放模擬、震度圖整合應用，以及支援外部震源資訊（external origin）之新功能。整體觀察顯示，FinDer 不僅具備即時掌握破裂特性的能力，亦能延伸應用於震後地震震度圖資訊的更新與補強，對提升大型地震之災損評估與災後應變措施具有實質助益。此外，該系統可彈性整合其他定位來源，有助於本署未來推動複合型預警架構的整合發展，進一步提升多模組運作效率與警報品質，以強化我國地震預警系統穩定性。

4. 本署 eBEAR 系統與瑞士 ESE 系統在 2025 年嘉義大埔地震主震之預警表現說明：本部分由我方報告，聚焦於 2025 年嘉義大埔主震之地震預警效能分析，並透過 FinDer、VS 與 eBEAR 三套演算法進行交叉比較，與專家們探討各系統在發報時效、預估準確性及適用條件等方面之整體表現。同時，也延伸討論強地動預估式於不同震源模型下的適用條件，分析其對警報準確度之影響，作為未來精進預警系統參數設計的重要依據。

(1) 主震事件之預警效能比較：說明 2025 年嘉義大埔主震進行多演算法之即時預警效能比較。分析結果顯示，三套系統皆能於地震發生 9 秒內完成發報，其中本署的 eBEAR 演算法發警報的覆蓋範圍最廣，但同時因預估的規模趨勢略高，過度警報比例相較其他演算法較高。FinDer 系統整體表現穩定，僅有一縣市漏發；VS 系統雖起初低估規模，但最終發布結果與 CWA 觀測值相符，準確性優異。

(2) 新、舊強地動預估式（Ground Motion Prediction Equation, GMPE）分析：本署目前採用兩套強地動預估式，其中新版除延續既有資料外，另納入 1999 年集集地震（ $M_w$  7.7）之觀測資料，預估結果相較舊版具有較緩的衰減趨勢，並反映大規模地震的破裂特性。根據本次模擬分析，若三種演算法均採用新版公式於全國 47 個預警參考點進行 PGA 預估，相較之下會出現較多的過度警報。因此，會議中專家指出，當未來若要採用線震源方法時，如 FinDer 為具破裂延伸概念之線震源演算法，由於演算邏輯已

納入破裂方向與長度等物理因素，應避免使用以大地震為基礎、對遠距地動預估偏高之強地動預估式，否則會產生疊加效果，導致 PGA 估值過高而影響警報準確性與穩定性。因此，建議未來使用線震源模型時，應選擇適用公式，以降低過度警報之風險。

小結：本次交流以嘉義大埔地震為案例，針對 ESE 系統中 FinDer 與 VS 兩項演算法，與本署現行 eBEAR 系統進行成效討論。雙方聚焦於警報發布時效與地震資訊準確性等核心議題進行技術交流，對於理解各演算法的適用情境及可優化環節具有實質助益。會議中亦針對 GMPE 選用與震源模型搭配之適切性提出具體建議，供本署未來持續精進預警系統設定與提升整體穩定性與警報品質之參考。

#### 5. 本署 eBEAR 與瑞士 ESE 系統於大埔地震餘震期間之預警表現比較

說明：本部分由我方報告，針對 2025 年嘉義大埔地震主震後約一個月內之餘震序列，檢驗 eBEAR、FinDer 與 VS 三套地震預警演算法在密集地震活動期間之偵測能力、震源參數準確性與系統穩定性，並從過度警報、漏報角度探討各自表現與潛在優化空間。

- (1) 偵測率與穩定性比較：以  $M_L \geq 4.5$  且觀測震度達 3 級以上之事件作為分析基準，評估三套系統在應發布情境下之掌握能力。結果顯示，eBEAR 系統維持最高偵測率，展現其於高頻繁餘震活動中的高靈敏度；FinDer 表現也成效高偵測率，僅少數事件未觸發警報。相對而言，VS 系統在主震後偵測率明顯偏低，未能即時建立多起餘震震源結果，顯示 SeisComP 模組在密集序列條件下之觸發與定位效能仍有優化空間。
- (2) 震源參數準確性分析：三套系統震源參數整體表現穩定。eBEAR 常見規模輕微高估，FinDer 與 VS 則在初期結果略有低估，後續修正後皆可趨近實際值。震央位置初報誤差 20 公里內的比例，三種演算法皆達 86% 以上，顯示各系統對震源空間掌握具一定可靠性。
- (3) 過度警報與漏報觀察：本次分析中，過度警報係指實際事件規模未達  $M_L$

4.5 或震度未達 3 級，該演算法卻觸發警報；漏報則指實際規模達  $M_L 4.5$  且震度達 3 級，演算法卻未發出警報之情形。整體觀察顯示，三套演算法之過度警報比例均屬偏低，然而在漏報表現方面，VS 系統問題較為明顯，主要因多起餘震未能即時完成定位作業，影響警報發布成效。反映 SeisComP 系統內部模組於密集的地震活動下的反應能力仍有優化空間。針對上述情況，雙方於會議中就模組優化方向進行交流，初步研判其問題與記憶體資源配置、自動挑波模組的緩衝時間取捨、定位模組的緩衝邏輯等設定有關，後續章節將進一步說明會中討論的改進措施，以提升其穩定性與實務應用效能。

小結：本次比較分析指出，eBEAR、FinDer 於密集的地震序列下表現穩定，偵測率優異。VS 系統雖具潛力，但於餘震期間觸發效能尚待優化。會議中亦針對 SeisComP 模組配置、挑波與定位策略等細部設定進行技術交流，作為本署後續強化 VS 模組穩定性與提升整體預警系統效能之重要參考依據。

#### 6. ESE 系統於臺灣測試過程中所面臨挑戰與潛在改進方向

說明：本部分由我方彙整 2024 至 2025 年間瑞士 ESE 系統於本署測試期間之實際運行經驗，聚焦 FinDer 與 VS 兩套預警演算法在觸發能力、模組穩定性與系統整合層面的表現。透過此次技術交流，雙方針對測試中觀察到的關鍵問題進行討論，並提出具體的調整策略，以提升 ESE 系統在臺灣應用環境下的整體效能與穩定度。

- (1) SeisComP 模組穩定性與觸發能力提升：大埔主震後餘震期間，SeisComP 系統之 VS 模組定位效能顯著下降，多起餘震未能即時產出震源結果或未產生結果。初步分析，這項障礙主要與 scautopick 自動挑波模組、scanloc 定位參數與程式本身的運算邏輯有關。目前我方根據 ETHZ-SED 團隊建議，調整相關參數，並搭配回放模擬進行測試，系統穩定性與觸發效率已逐漸提升。

(2) Scanloc 定位誤判與假事件處理：高密度地震活動期間，scanloc 模組因 associate 條件設定不同，容易出現兩類典型問題：其一，來自不同地震的波形訊號因時間接近且部分觸發測站重疊，誤被併為同一事件，導致定位錯誤；其二，某些地震事件僅成功挑出 P 波，當 P 波抵達遠站並觸發定位時，因缺乏足夠空間分布與 S 波佐證，會被誤判為另一個獨立事件，形成假事件。此結果顯示，精確調整 associate 條件（如到時關聯時間長度與空間距離門檻）對於提升事件辨識正確性至關重要。針對此問題，已經由回放測試，調整 maxSearchDist 進行初步調整，後續將視情況滾動調整相關系統參數。

(3) email 報文與 log 記錄不一致：測試期間，我方發現地震預警報告 e-mail 版本與落地 log 檔案內容有時候會出現資訊不一致情形。為避免未來地震事件追蹤與問題排查作業困難，目前已向 ETHZ-SED 反映，瑞士方將進一步檢查相關模組程式邏輯，並針對輸出格式進行修正，以確保不同管道之資訊內容一致性與系統穩定性。

(4) EEW 僅提供首報訊息：目前 ESE 系統僅提供第一報的地震預警資訊，未能提供後續地震參數演算之更新報內容。針對此限制，本次會議我方已向瑞士團隊反映，經查為 sceewlog 模組設定所致，瑞士方已協助完成修正，並開放警報更新報功能。後續將持續觀察實際運作狀況，確保更新報能穩定產出以符合地震預警需求。

小結：透過本次討論，雙方已全面盤點 ESE 系統於臺灣環境下運行所面臨之主要挑戰，並就 SeisComP 模組參數調整、觸發穩定性優化等關鍵議題確認初步改進策略。未來本署將持續與 ETHZ-SED 團隊合作，深化系統測試與調整作業，強化其於實務作業中的穩定性與可靠度，為建構新一代地震預警架構奠定更穩固的基礎。

7. 地震預警系統品質控管機制與流程設計：

說明：本項討論主要針對本署正在規劃推動之地震預警系統品質控管機制進行介紹，該機制以自動化流程為核心，期望未來能持續產製具有一致性與可比性的品質分析報告，作為預警系統優化之依據。本次簡報由我方說明整體架構與目標，並與瑞士團隊就資料呈現與流程設計交換意見。

- (1) 網頁平台查詢：目前本署已陸續建置 EEW 監控相關平台，提供地震儀測站品質監控、系統運作狀況展示、地震預警發報紀錄查詢等功能，作為即時掌握系統狀況的重要工具。
- (2) 品質控管自動化流程設計：本機制規劃將原先偏人工化的品質控管方式，逐步導入自動產製報告的設計。整體可分為兩大評估項目（如圖 1）：
  - 測站資訊評估：波形到時準確性、單站規模偏差分析以及測站觸發率。
  - 預警報告評估：評估地震預警所有解算結果震央位置、規模估值與參與測站分布，並與人工確認之最終震源參數進行比對。
- (3) 建立預警品質評估報告：初步設計構想為當地震預警系統對外發送警報時，將針對系統所有的解算結果進行評估，並自動產製對應的品質報告，內容涵蓋測站資訊與預警報告之各項關鍵指標比對，並以統一格式建檔，利於歷史事件之回顧與統計分析。
- (4) 品質報告後改善措施：透過報告結果，可進一步辨識應改善的項目為測站本身還是系統性問題，並嘗試以離線回放模擬與參數優化流程，達到模組調校、測站參數修正與 GMPE 公式微調等目的。
- (5) ETHZ-SED 團隊回饋：該團隊對本署規劃之品質控管機制整體設計方向給予初步肯定，然而，也提醒目前設計項目繁多，若針對所有地震預警系統所解算之結果（包括未發報者）一併進行評估，將需投入相當程度之測試與驗證資源，執行成本較高。針對此一挑戰，該團隊建議可先參考美國 USGS 的實務做法，聚焦於已實際發報的地震預警結果進行品質分析。報告格式方面，亦可借鏡 USGS 所發佈之 summary report 設計，針對每筆發

報結果，與後續人工確認之震源參數（如經度、緯度、深度、規模、發震時間與震度等）進行比對，並同步記錄警報發布時間與更新時效，建立一套簡潔且具一致性的品質追蹤資料格式，利於後續分析與系統調校。

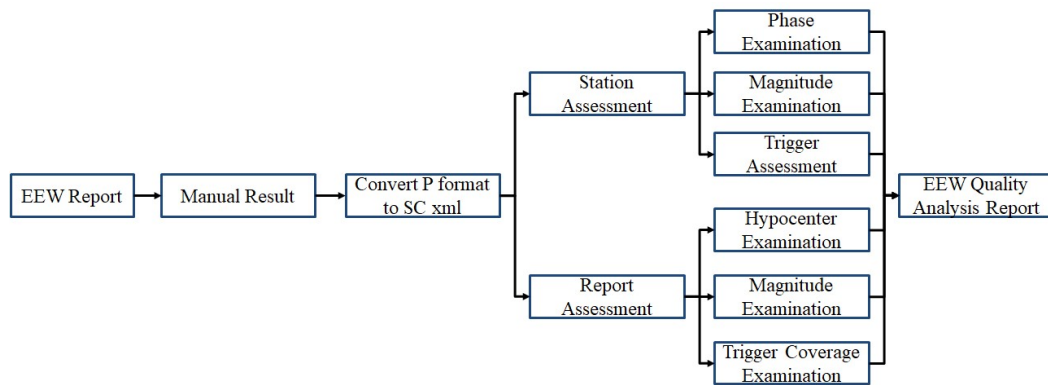


圖 1、地震預警品質控管流程圖。本版本區分測站與預警報告兩大評估項目，最終產製地震預警品質分析報告，以檢驗地震預警發報情形，同時作為系統優化之依據。

小結：本次交流針對地震預警系統之品質控管機制進行具體討論，確認目前以自動化為核心的規劃方向具實用性，並有助於後續系統優化與穩定性提升。瑞士團隊對整體架構表達肯定，同時建議釐清控管範圍與執行優先順序，特別是在報告欄位設計與評估對象選取上，建議可參考 USGS 的作法，先聚焦於實際發報之事件，逐步建立格式統一、自動產出的品質報告流程，為日後全面推動提供明確的發展方向。

## 8. 地震預警服務於手機 App 之應用策略與使用者互動經驗

說明：本次交流由 ETHZ-SED 的 Dr. Frédéric Massin 介紹其地震預警資訊對公眾發布的方式，並分享其所開發 App 在預警服務與使用者互動上的經驗。我方則回饋臺灣地區於 App 推播經驗，並就警報傳遞延遲等問題進行討論。

- (1) ETHZ-SED 地震預警 App 功能：ETHZ-SED 團隊開發的地震預警 APP 不僅提供地震預警資訊，亦整合多樣化的語音災害應變建議，協助使用者快速理解應對措施。該系統整合多元功能，提升使用者接收資訊後的實際應

變效率，亦為我方未來 App 可參考之公眾應用設計範例。

- (2) 使用者回饋與系統優化：ETHZ-SED 表示其 APP 平台具備使用者互動功能，可於地震發生後收集使用者是否收到預警、主觀的震度感受等資訊，做為後續精進預警策略與技術調校的重要依據。我方亦回應目前臺灣尚缺乏此類直接互動平台，未來可借鏡其設計導入相關功能，以提升系統回饋與公眾參與機制。
- (3) 推播延遲問題與改善建議：交流中我方向瑞士團隊分享，在臺灣地震發生後，透過手機 APP 推播地震資訊時，會出現延遲現象，進而影響預警效益。ETHZ-SED 團隊亦回應指出，該問題同樣在其系統中存在，並已彙整統計資料持續追蹤分析。我方建議，未來可思考是否直接與 Apple 與 Google 兩大作業系統公司洽談，將預警資料整合進手機系統本身的推播架構中，以降低中間處理時間，加速訊息傳遞速度。

小結：本次討論 ETHZ-SED 團隊分享其多元功能設計與即時互動回饋經驗，對我方未來提升 App 預警品質與災害應變輔助功能提供實務參考。我方亦針對地震資訊推播延遲問題提出初步改善構想，建議可評估與 Apple 與 Google 等作業系統平台直接合作，以強化警報傳遞效率，提升預警資訊即時性。

#### 9. 地震預警服務對社會大眾與行為反應之影響（社會科學角度）

說明：本部分由 ETHZ-SED 團隊的 Benazir Orihuela 女士報告，聚焦於兩項主題。其一為地震預警系統對社會層面的影響（Orihuela et al., 2023），特別是民眾在接收到預警後的實際行為反應；其二則為評估地震預警系統在災害損失減緩方面的效益。報告結合問卷調查、模擬實驗與數值模型，提供系統在社會接受度與風險減輕方面的整體評估（Orihuela et al., 2025）。

- (1) 使用者行為反應調查：地震預警訊息發送後，民眾是否採取即時反應，對減災效益有顯著影響。透過問卷與案例分析發現，大多數用戶能理解警報訊息內容，但實際採取行動的比例與當地教育、文化及經驗背景息息相關。

研究亦指出，提示方式與音效設計將影響行動誘發效果，建議可強化 App 的互動功能與回饋機制，持續收集使用者經驗以優化警報發布策略。

(2) 預警成效與災損減緩評估：第二部分則以中美洲多國為例，透過隨機事件模擬與傷亡估算模型，建立地震預警系統的減災效益評估框架。分析結果說明地震預警系統的運作下，可有效降低死亡人數，對此區域國家具顯著效益。另外，報告亦針對避難行動與就地掩護兩種反應模式進行比較，結果指出對於以單層建築為主的地區，直接疏散可更有效降低傷亡風險，而多層建築中則建議採取「趴下、掩護、穩住」的行動。

(3) 地震預警價值與應用延伸：報告說明在地震高風險地區建置 EEW 系統為具高度經濟效益之公共投資。另外，也建議可參考各地建築物類型、人口分布設計差異化設計警報後的應變策略，並延伸社會科學面調查機制，持續監測民眾回應與信任度，做為技術調整與服務優化的重要依據。

小結：本次簡報從多面向探討地震預警服務的設計與成效，深入剖析使用者行為與災損減緩之間的關聯性，並透過量化分析強化科學依據，對我方未來精進預警系統設計與策略規劃提供啟發。後續可思考建置具互動性與回饋機制的服務架構，強化政府機構與民眾之間的連結與使用體驗，並結合教育推廣與多元應用，擴大地震預警系統之整體效益。

#### 10. 新地震預警決策模組導入與應用方法。

說明：本段內容由 ETHZ-SED 團隊 Dr. Dario Jozinović 報告，聚焦於其近期研究成果，提出一套以地動包絡擬合度為基礎的預警決策模組，作為提升預警品質與降低誤報的機制(Jozinović et al., 2024)。此模組可整合 ESE 系統的 VS 與 FinDer 兩套演算法，可作為複合型演算法預警系統的決策依據。

(1) 參考地動包絡擬合度作為發報依據：本次報告以「觀測地動包絡與模擬預測包絡」的相似程度（GoF：Goodness-of-Fit）作為核心評估準則。擬合度指標結合「最大振幅比值」與「包絡形狀相似性」，具備對波形的物理

現象有更直接的反映能力，可有效識別警報可信度，提升決策精準度。

- (2) 可整合多種演算法來源：本方法可結合 VS、FinDer 等不同演算法的結果，逐一計算擬合度，挑選擬合度最佳的解算結果進行對外發布，並濾除可信度不足的異常結果。此設計將有助於本署預警發報的決策依據，符合未來複合型演算法預警系統的發展框架。
- (3) 我方應用潛力與回饋：臺灣現行地震預警決策模組主要依據規模與預估震度兩項門檻進行判斷，並輔以使用站數、測站分布空餘角等條件作為是否發送警報的依據。相較之下，ETHZ-SED 已建議發報決策應納入測站觸發分布、單站規模分布檢驗與測站空餘角檢核，進一步透過 Likelihood 計算預警結果的可信度，並有效降低誤報風險。本次會議中，雙方針對新方法在臺灣系統中的應用可能性。我方認為，若能導入包絡擬合度檢查機制，並針對過去曾發生誤報之假地震案例進行測試，若能避免不合理的解算結果，將對提升整體預警警報的精確度有極大助益。

小結：本次簡報介紹之預警決策模組，以地動包絡擬合度為核心，對於提升預警品質與降低誤報風險具有高度應用潛力。未來將規劃以臺灣過去幾年發生的誤報案例為測試場景，進行離線驗證與效能評估，期待未來能做為我方新一代地震預警決策機制的重要依據。

## (二) 新地震測報技術交流討論

### 1. 分布式光纖感測（DAS）於地震監測與預警系統之應用前景

說明：本部分由 ETHZ-SED 的 Dr. Frédéric Massin 報告，介紹分布式光纖感測技術（Distributed Acoustic Sensing, DAS）於瑞土地震監測上的應用成果（Massin et al., 2025）。DAS 技術具備高空間解析與連續監測特性，為現有地震觀測系統帶來新契機。本次交流聚焦於 DAS 的應用方式、資料處理流程設計，以及未來在實務應用上的潛在推展方向。

- (1) 系統整合流程與資料處理架構：ETHZ-SED 團隊展示其於 Bedretto 地下

實驗室與瑞土地震監測網路中部署 DAS 系統之成果，並成功透過專屬資料接收模組將 DAS 訊號整合進 SeisComP 架構中，使其得以與既有地震儀資料同步處理，實現自動挑波與定位等基本功能，具備地震事件偵測能力。

- (2) DAS 與傳統儀器整合：研究指出 DAS 系統在低震幅條件下仍具辨識力，特別能在測站密度較低、或傳統儀器難以部署之場域（如隧道、地下構造）提供補強觀測資料，可擴充地震網的密度。
- (3) 潛在應用場景與效能驗證：DAS 雖具有連續感測與高解析特性，但實際應用上仍須面對多項挑戰，包括振幅紀錄上限導致的規模飽和問題、既有光纖線路環境雜訊干擾，以及龐大資料量所帶來的處理負荷。基於上述限制，建議可優先選擇臺灣島內地震站密度較低、背景雜訊較低的區域進行部署，作為補強監測之策略，尤其有助於掌握小至中型地震的定位精度。至於規模估算部分，需進一步評估是否導入經驗性公式，或採取非傳統方法（如根據震動幅度與影響範圍）進行間接推估。整體而言，DAS 系統之應用潛力需仰賴長期資料累積與標準化處理作業，未來仍需擬定明確策略，以釐清其在地震預警系統中的定位與實務效益。

小結：本次交流顯示，DAS 技術具備強大潛力，可作為傳統地震監測網的有力補充。ETHZ-SED 團隊已成功建立初步應用架構，展示其於監測、定位與系統整合上的可行性。對我方而言，DAS 系統在特定區域部署具高度應用價值，未來若能搭配適當之資料處理策略與定位模型，將有機會進一步強化臺灣地震預警系統之整體監測效能。

## 2. AI 技術於震相挑取與地震重新定位之應用交流

說明：本段內容雙方皆進行簡報。ETHZ-SED 的 Dr. Dario Jozinović 報告，介紹 AI 技術整合於 SeisComP 系統之最新進展，特別聚焦於以 SeisBench 與 scdlpicker 模組為基礎的波相挑取、初動極性辨識與地震自動定位之應用，並分享其在瑞士

日常地震監測流程中的實際成效（Jozinović et al., 2025）。

(1) ETHZ-SED 實作經驗：

- SeisBench 與 scdlpicker 模組應用：ETHZ-SED 團隊利用 SeisBench 套件整合多個已訓練之波相挑取 AI 模型，並透過 scdlpicker 模組，實現 AI 挑取結果與 SeisComP 框架的串接。最新版本已可提供 P 波與 S 波到時、挑波的不確定度與 P 波初動極性等資訊，彌補傳統挑波模組之限制。
- AI 模型效能提升震源參數品質：當系統導入 AI 模型，P 波與 S 波挑波數量與品質皆顯著提升，進而改善自動定位與規模估算精度。其中，AI 挑取器的特徵函數亦可作為人工挑取不確定度的指標，為自動監測結果提供信心評估依據。
- 優化工作流程與人力支援：藉由 AI 模型先行完成波相挑取並自動評估不確定度與初動極性，有助於簡化人工負擔，使其只需檢查 AI 結果，可大幅提升地震目錄產製效率。

(2) 本署實作經驗：

- AI 模型於實務作業中之應用流程：臺灣地震活動監測系統目前已外掛 AI 挑波程式，並加入 SeisComP 架構中，目前以每 10 分鐘擷取波形資料，再使用 SeisBench 的 EQTransformer 進行波相挑取與後續自動定位作業，可提供即時地震活動資訊。
- 初步效能驗證結果：目前針對 2024 年 4 月 3 日花蓮地震主震後四天內的餘震事件進行初步測試。經比對 AI 模型自動定位結果與人工確認後的地震報告，震央與深度誤差約為 4 公里與 5 公里，規模誤差則約為 0.18。值得注意的是，本系統目前仍採用全球一維速度模型，未來若能導入臺灣本地的三維速度模型，預期可進一步提升定位準確度與整體系統效能。

- 人力負載有望降低：透過 AI 模型輔助地震自動定位，可有效減少分析人員逐站手動挑波的作業時間。以本次 AI 與 SeisComP 整合測試為例，主震後共產生約 5000 筆事件，僅需人工檢查波相、微幅調整定位結果與彙整自動定位報告，估算約耗時 75 小時/人。相較於過去完全仰賴人工處理相同數量事件，約需 1750 小時/人，AI 技術導入後可大幅降低工時，提升作業效率。

(3) 雙方經驗交流：

- 資料處理分流：由於臺灣地震測站數量龐大，約近千個儀器，當以 SeisBench 進行 AI 挑波時，模型運算會中斷或者 SeisComP 定位模組（如 scanloc）無法順利處理等情形。針對此限制，ETHZ-SED 團隊建議可採分流策略進行挑波，再統一交由 scanloc 模組進行最終定位，並強調應使用 Final Report 模式，即一次性整合所有可用波相進行完整定位，避免如即時模式般逐步更新造成系統負荷或結果不穩。此一作法可兼顧挑波品質與整體系統穩定性，後續將根據此建議進行系統優化。
- 臺灣機器學習模型再訓練：目前本署所採用之機器學習模型為 SeisBench 的 EQTransforme，此模型以全球地震資料訓練為基礎，具備泛用性。但因為地震波形特徵會因震源位置、波傳路徑與地質構造而產生差異。為進一步提升波相辨識與震源參數解算之準確性，ETHZ-SED 團隊建議本署應考慮以臺灣地區的實際觀測資料重新訓練模型，以強化模型對在地地震特性的適應能力與整體辨識效能。

小結：本次交流聚焦於 AI 技術於地震監測實務的潛力。ETHZ-SED 已成功將 scdlpicker 機器學習模組整合至 SeisComP 架構中，除了提供 P 波與 S 波到時資訊外，亦能輸出挑波的不確定度與初動極性，顯著提升震源參數之解算品質。我方目前則透過外掛方式運行 SeisBench 模型，串接至既有系統進行自動定位測試，

初步結果誤差合理，並可大幅減輕人力負擔。鑒於臺灣地震頻繁、測站密集且資料解析度高，雙方皆對 AI 輔助自動挑波技術之應用持正面期待，並認為此技術對強化地震監測效率與品質具明確助益。未來除可持續評估導入 scdlpicker 模組之可行性外，亦可考慮以臺灣本地地震資料重新訓練 AI 模型，進一步提升模型對在地地震特性的辨識與適應能力，加速地震目錄製作之自動化進程。

### (三) ESE 系統回放與故障排除

本次訪問亦進行實作測試與系統優化作業，優化重點聚焦於本署現行 SeisComP 系統之自動挑波模組 (scatopick)、自動定位模組 (scatoloc) 與事件定位模組 (scanloc) 期望能加強系統穩定性 (圖 2)。另一方面，亦著手建立可用於歷史地震事件的離線回放測試機制，做為未來大規模測試作業的前置準備，全面驗證系統處理效能與穩定表現。本次會議期間，我方與 ETHZ-SED 團隊針對 2024 年花蓮地震與 2025 年嘉義大埔地震主震進行離線回放模擬測試，目前整體流程已可順利運作，系統於回放期間能正確觸發並產出 VS 與 FinDer 之預警解算結果。此項測試驗證 SeisComP 系統於歷史地震案例之回放功能與穩定性，亦為未來針對大型地震事件與密集地震序列進行壓力測試與系統評估之重要基礎，後續將據此架構進行系統效能檢討與參數優化作業。

#### 1. SeisComP 系統優化與改進

(1) scatopick 模組分流處理：原系統僅採用單一挑波模組進行波相辨識，在面對本署 TSMIP 觀測網超過 600 站之連續資料時，易出現挑波延遲或部分波形未能成功處理之情形。為提升處理效率與穩定性，目前已於新 ESE 預警主機端導入三組 scatopick 模組並行運作，每組分別負責約 200 個測站 (圖 3)。後續將持續以歷史密集地震序列進行模擬測試，進一步驗證分流策略之實務效益與穩定表現。

(2) SeisComP 模組參數調整：原系統於面對密集餘震序列時，易發生定位作業延遲或部分事件未能完成定位之情形。本次討論後，已針對 scatopick、

scautoloc 與 scanloc 三項核心模組進行參數微調，包括觸發時間窗、波相關聯條件等設定，藉以降低延遲定位與漏報風險，提升系統於高地震活動期間之穩定性與精準度。

- (3) sceewlog 模組報文更新報啟用：sceewlog 模組在 magAssociation 功能啟用狀態下，僅能產出首報，無法進行後續之預警參數更新。係因 magAssociation 評估機制採用綜合優先權排序邏輯，導致後續雖有更高規模與更佳概似性之預警結果，亦因綜合評分未超越首筆而無法觸發更新。考量本署地震預警系統需具備接收持續修正與動態更新之能力，已將該功能關閉，並持續觀察是否能順利產生更新報。後續將持續檢視預警結果之實際表現，評估系統運作邏輯是否符合應用需求。

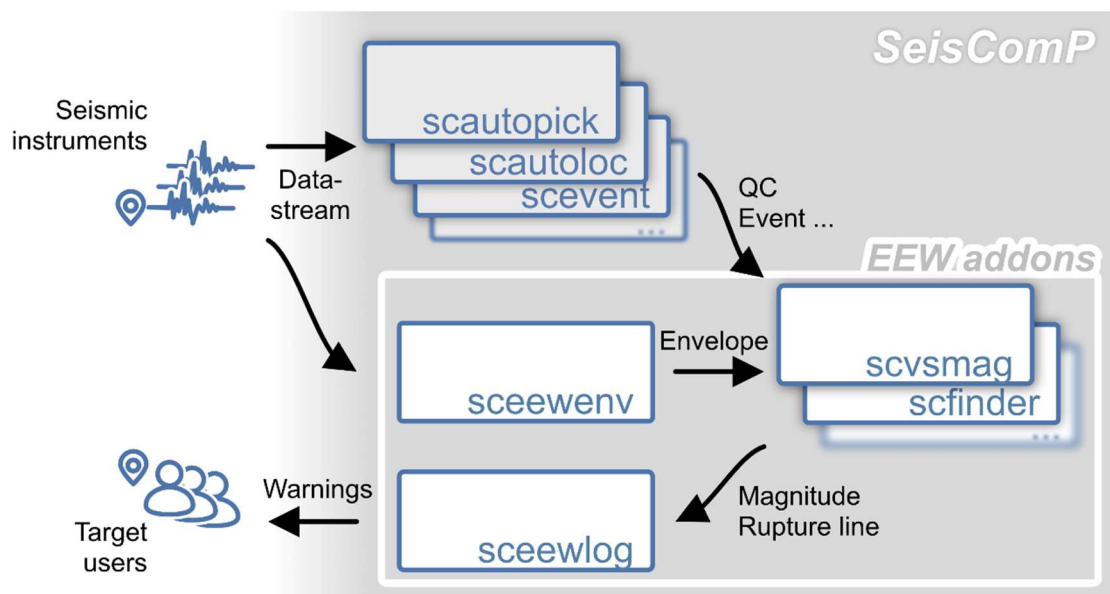


圖 2、ESE 系統架構圖。即時地震資料進入 SeisComP 系統後，展開自動化地震資料處理流程，依序由 scautopick 模組挑波、scautoloc 及 scanloc 定位（圖中未展示），再送入 EEWaddons 進行地動包絡線與規模參數解算，最終由 sceewlog 模組將預警資訊傳送至用戶端。本次優化作業主要聚焦於強化 scautopick、scautoloc 與 scanloc 等核心模組，加強系統穩定性與資料準確度。(Massin et al., 2021)

| System                                                                                                                                                                                                          |             |         |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|---------|
| The current status of the system                                                                                                                                                                                |             |         |
| <div> <div>Refresh</div> <div>Start</div> <div>Stop</div> <div>Restart</div> <div>Check</div> <div>Reload</div> <div>Enable module(s)</div> <div>Disable module(s)</div> <div>Update configuration</div> </div> |             |         |
| All commands (such as 'start', 'stop') will affect all modules which rows are currently selected. If no row is selected, all modules are affected. You can c                                                    |             |         |
| Auto                                                                                                                                                                                                            | Module      | Status  |
| On                                                                                                                                                                                                              | scmaster    | running |
| On                                                                                                                                                                                                              | fdsnws      | running |
| On                                                                                                                                                                                                              | gaps        | running |
| On                                                                                                                                                                                                              | quakelink   | running |
| On                                                                                                                                                                                                              | sc2ql       | running |
| On                                                                                                                                                                                                              | scamp       | running |
| On                                                                                                                                                                                                              | scanloc     | running |
| On                                                                                                                                                                                                              | scautoloc   | running |
| On                                                                                                                                                                                                              | scautopick  | running |
| On                                                                                                                                                                                                              | scautopick1 | running |
| On                                                                                                                                                                                                              | scautopick2 | running |
| On                                                                                                                                                                                                              | sceewenv    | running |
| On                                                                                                                                                                                                              | sceewlog    | running |
| On                                                                                                                                                                                                              | scevent     | running |
| On                                                                                                                                                                                                              | scevtlog    | running |
| On                                                                                                                                                                                                              | scgof       | running |
| On                                                                                                                                                                                                              | scmag       | running |
| On                                                                                                                                                                                                              | scqc        | running |
| On                                                                                                                                                                                                              | scvsmag     | running |
| On                                                                                                                                                                                                              | seedlink    | running |
| On                                                                                                                                                                                                              | slarchive   | running |

圖 3、SeisComP 系統模組狀態監控畫面（新 ESE 主機）。畫面中可見本署已於新環境部署三組獨立之 scautopick 模組（scautopick、scautopick1、scautopick2），分別負責不同測站群進行挑波作業，實現分流化，藉此提升大量事件觸發時之系統穩定性與效率。

## 2. ESE 系統回放機制建置與模擬測試

(1) 系統建置與技術導入：本次交流期間，我方已經向 ETHZ-SED 團隊學習 ESE 地震預警系統之 playback 架構，並成功於本署主機完成基於 Docker 環境之模擬平台建置。該平台整合 SeisComP 模組、地震資料導入與回放腳本等設定，已能順利執行模擬地震事件之自動處理流程。建置過程中亦已排除回放階段之技術障礙，具備完整支援 VS 與 FinDer 模組之解算能力，為後續測試工作建立穩固基礎。

(2) 離線事件回放測試：呈上點，平台完成安裝後，本次模擬回放目標以 2024 年花蓮地震主震與 2025 年嘉義大埔地震主震為模擬案例，搭配本署 TSMIP 即時觀測站資料進行測試。結果顯示 VS 與 FinDer 模組均可於模擬情境中穩定啟用並產出預警解算結果（如圖 4 與圖 5 所示），成功重現

地震發生當下之波形觸發與預警參數演化歷程。此次測試不僅驗證系統回放功能之準確性與穩定性，亦證實其可有效支援後續演算法比對與品質評估等應用需求。

- (3) 未來應用與工作規劃：後續將擴大應用本模擬平台，針對中、大型地震事件與密集地震序列進行系統性回放測試，以深入分析 VS 與 FinDer 模組於不同震源條件下之觸發差異、穩定性與預警準確度。同時亦規劃建立標準化測試流程與評估指標，作為參數優化與品質控管依據，進一步強化本署地震預警系統效能與可信度。

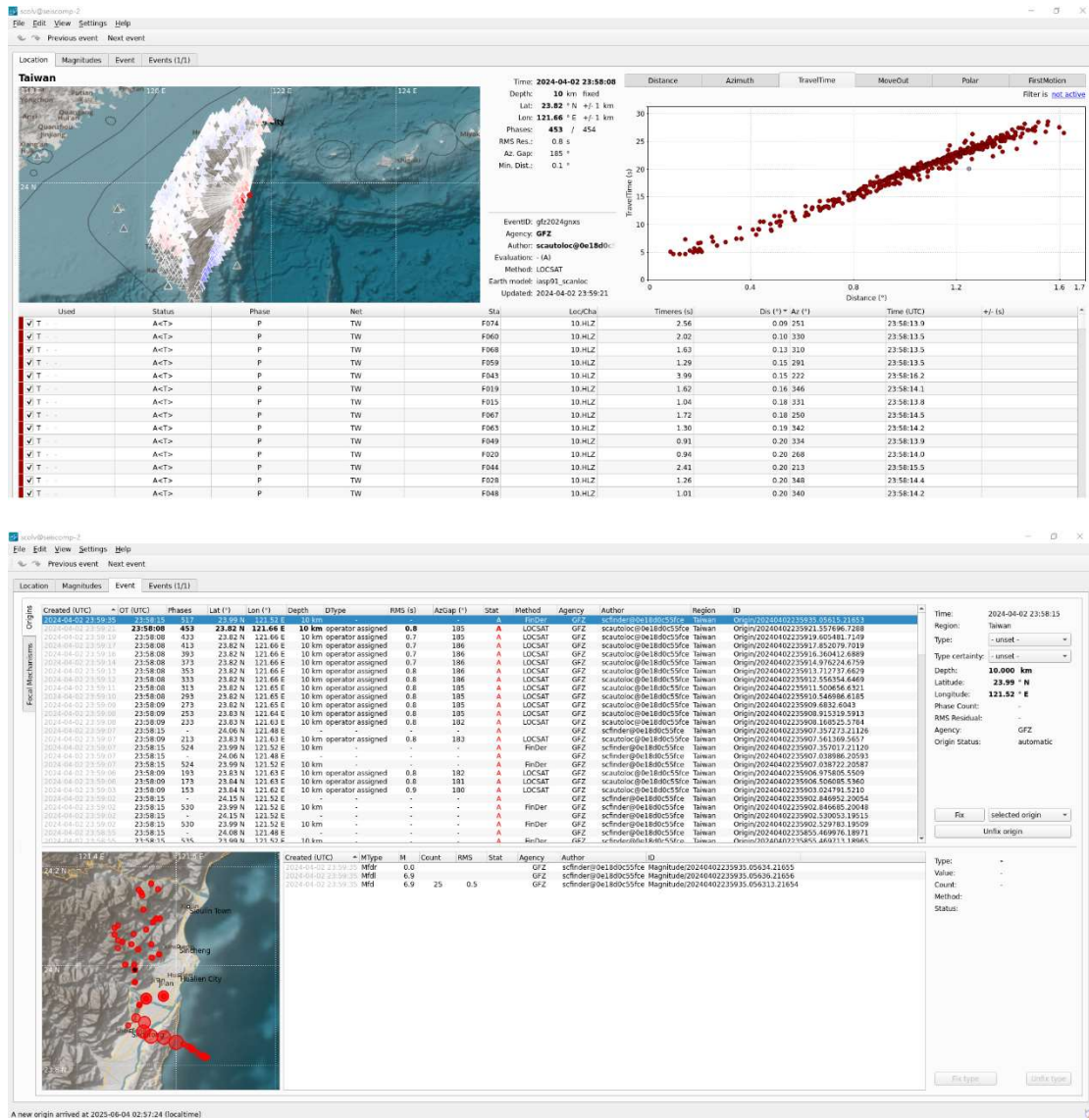


圖 4、ESE 系統針對 2024 年花蓮地震主震之離線回放模擬結果。上圖顯示系統

能成功觸發並展示 P 波到時、定位資訊，下圖則展示地震預警逐報的定位分布、規模及對應的時效結果。

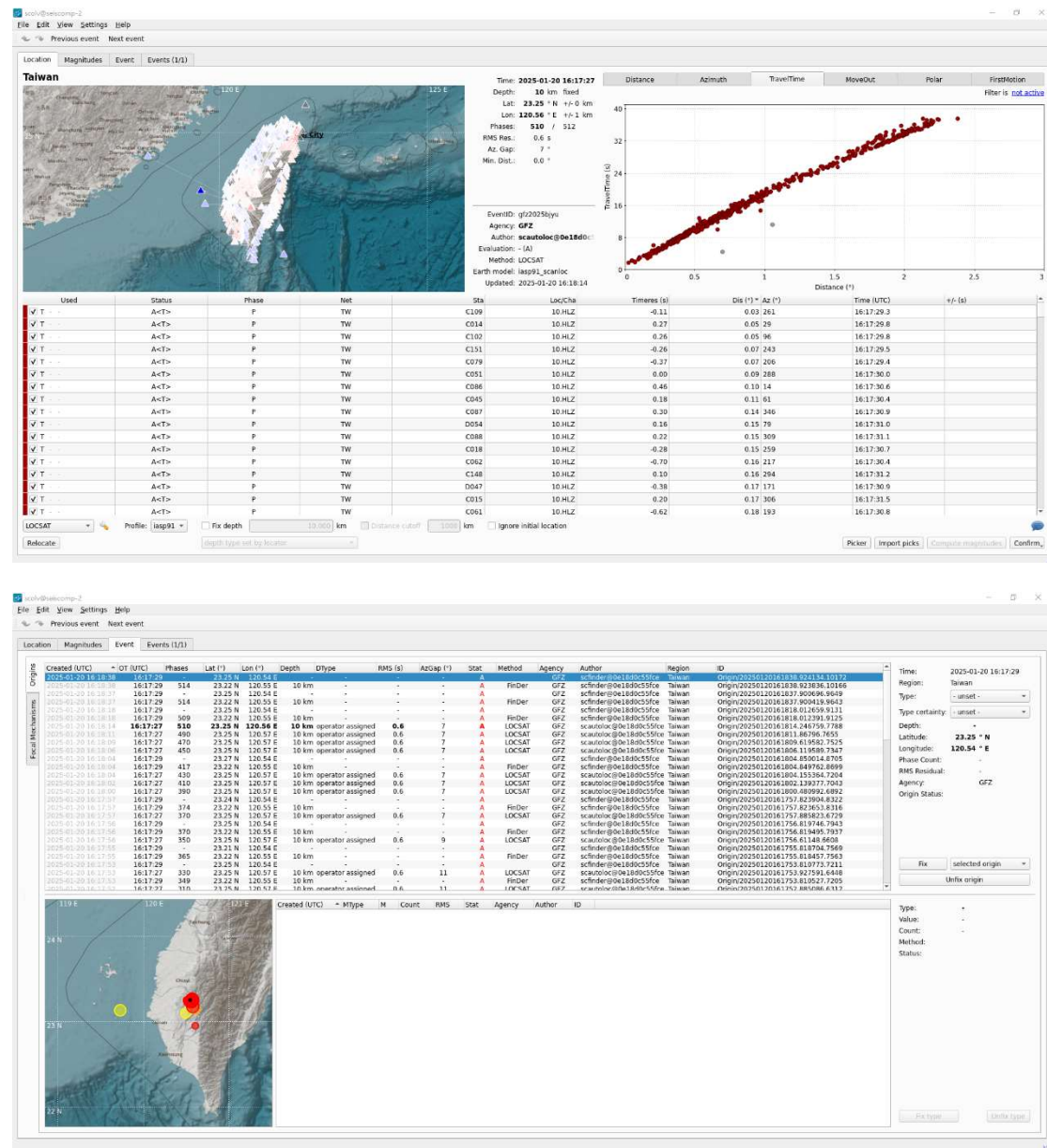


圖 5、ESE 系統針對 2025 年嘉義地震主震之離線回放模擬結果。上圖顯示系統能成功觸發並展示 P 波到時、定位資訊，下圖則展示地震預警逐報的定位分布、規模及對應的時效結果。

#### (四) 地震儀、地震站、地震監測展示與地震測站網頁

地震觀測網為地震測報業務的核心，唯有高品質、低延遲的地震儀器與穩定運作的監測網，才能支撐各層級演算法的應用與地震測報作業的運行。因此，本

次出訪除聚焦於演算法交流外，我方亦特別關注該團隊於「地震儀」、「地震觀測站」、「地震測站與波形監測平台」以及「地震測站網頁」等層面的整體架構，並透過實地觀摩與主動延伸探索，深入了解 ETHZ-SED 在儀器選用、測站配置與平台整合上的實務經驗，以作為本署相關作業之參考。

1. 地震儀：ETHZ-SED 團隊於本次交流期間展示其儀器配置與應用情形(圖 6)，其中主力地震儀亦為本署熟悉的 Nanometrics 儀器，未來雙方可就即時資料的傳輸模式、封包設計、資料壓縮與延遲降低等議題進行深入交流。此外，ETHZ-SED 亦展示瑞士早期 Quervain-Piccard universal seismograph 與現代採用太陽能發電的可攜式地震儀，展現該國地震觀測的演進史。由於臺灣具備良好日照條件，未來亦可評估太陽能系統於偏遠地區或特殊地形之應用潛力與可行性。
2. 地震觀測站（強震站）：本次正式交流行程以技術討論與系統操作為主，我方善用個人休假期間，依 ETHZ-SED Dr. Clinton 建議，實地走訪瑞士境內共六個地震站設點，包括首都伯恩、蘇黎世、琉森及鄰近地區。觀察發現，瑞士強震儀設置地點相當多元，涵蓋道路分隔島、教堂、公園草地與校園等區域，與本署目前的設置環境相似，雖有較高背景雜訊風險，但鑒於強震儀主要用途為監測中、大型地震之近場效應，此配置策略合理。以琉森 SLUW 測站為例(圖 7)，我方抵達現場時即於波形圖上觀察到人為靠近所產生之擾動訊號，顯示儀器反應靈敏且運作正常。該測站採用鋼製圓蓋設計，內部將感測器與數位化器置於人工凹槽中，整體設計兼顧抗干擾與維護便利性。相較之下，本署目前多以 FRP 材質簡便站房為主，未來於新設測站時，亦可視環境條件與維運需求，適度參考瑞士之站體材料與設計作法。
3. 地震測站與波形監測平台：我方實地參訪 ETHZ-SED 地震測站監控與維運工作室，觀摩其即時監控平台之應用情形。現場配置多組大型螢幕，整合顯示全國各測站之即時波形、儀器健康狀態與通訊品質指標，便於快速掌握資料

傳輸狀況（如圖 8）。該平台除提供日常監控功能外，亦為設備排程、故障診斷與緊急通報之主要依據。我方亦與 ETHZ-SED 團隊就測站維運策略與介面設計進行交流分享。目前本署亦已運用 Grafana 建置圖形化監控平台，整合通訊狀態、延遲監測與資料收錄負載等資訊，作為系統維運與調度參考。雙方平台雖設計方式不同，但同樣重視測站狀態的即時可視化與操作效率，顯示兩端對地震觀測系統穩定性具有高度重視。

4. 地震測站網頁：ETHZ-SED 透過網頁平台，清楚呈現其全國地震站的資訊。（參考網頁：<https://networks.seismo.ethz.ch/en/networks/ch/>）每一測站網頁除提供基本資訊（如站碼、經緯度、高程與設備型號），亦整合多項輔助資料，包括地形圖、地質圖與場址特性等地表與地下剖面環境背景資訊，協助使用者能快速掌握測站環境條件。此類資訊對於地震波傳遞過程、地動預估甚至擴展至建築物反應等分析工作至關重要，本署目前臺灣地震與地球物理資料管理系統（GDMS）提供測站資訊與資料品質等資訊介面。建議未來可參考 ETHZ-SED 經驗，擴充測站資訊，提供地形、地質背景與場址條件說明，有助於觀測資料應用價值，提升測站資料對外呈現之完整度與專業性。





圖 6、ETHZ-SED 地震儀展示。依序為 Nanometric 寬頻地震儀的紀錄器、感測器等設備（左上至右上）、瑞士的 Quervain-Piccard universal seismograph 老地震儀（左下），以及具備太陽能電力供應功能之可攜式地震儀（右下）。此次觀摩展示 ETHZ-SED 從舊世代邁向新世代過程，所採用之地震監測設備。

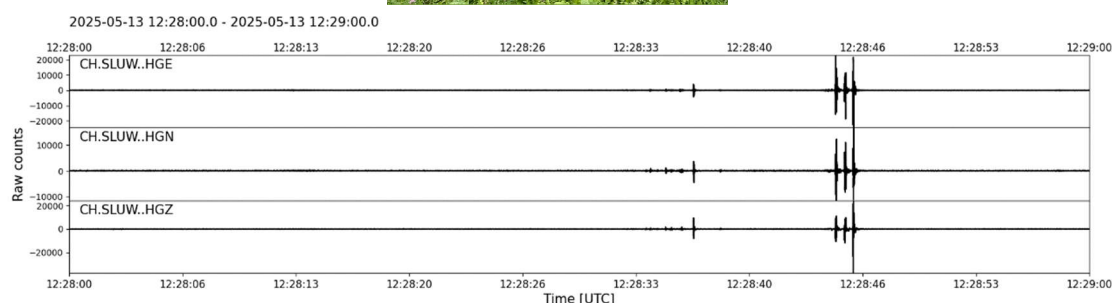


圖 7、瑞士琉森 SLUW 測站現地觀摩紀錄。上圖為宋員於 SLUW 測站之實地合照，觀測儀器設置於地表之鋼製保護蓋下方；下圖為同時段 SLUW 測站所記錄

之三分量波形資料，明顯可見儀器已在當時記錄人為的腳步擾動，顯示儀器反應靈敏且運作正常。



圖 8、ETHZ-SED 地震測站監控與即時波形平台觀摩紀錄。上圖為 ETHZ-SED 地震測站監控工作室的大螢幕，展示其整合顯示瑞士全國地震測站狀態、即時波形與通訊品質；下圖為我方於交流後與該監控平台合影，實地瞭解其應用情境與維運作業方式。

## (五) 未來合作與後續工作重點

本次技術交流雙方已就 ESE 系統於我國實務應用條件下之可行性、限制與改進方向進行深入討論，並針對後續合作方向達成初步共識。未來本署將持續推動系統整合測試與模組優化，並朝向上線運作的目標邁進。未來主要工作項目如下：

1. 即時地震預警結果分析：本署將持續針對 ESE 系統所產出且符合本署預警發布標準之事件，進行結果分類與效能分析，包含正確警報、誤報及漏報等情形，並同步評估其震源與規模參數之準確性。藉由即時預警結果之系統性檢視，有助於掌握 ESE 系統之實際應用表現，作為日後優化參數與修正邏輯之重要依據。
2. 歷史地震資料回放與系統優化：近五年臺灣地區累積多起規模 5.5 以上之地震事件及密集震序列，提供驗證系統穩定性之寶貴素材。本署已建置離線回放模擬平台，後續將針對中、大型地震事件進行系統回放測試，比對震源參

數與預警結果，俾利釐清系統於不同震源條件下之觸發行為與潛在限制，並據以調整相關參數設置。

3. 測站資料擴充與觀測資料整合：配合本署持續擴建地震觀測網，未來 ESE 系統將同步納入 CWASN 短週期速度型儀器、寬頻地震儀，強化初期地震觸發能力與整體系統靈敏度。儘管此類儀器於強震預警中可能面臨振幅飽和情形，惟於震源偵測與前期反應方面仍具實質助益，未來將規劃納入 SeisComP 處理流程中，以提升系統整體效能。
4. 地震預警品質控管系統建置：為確保地震預警系統運作品質及穩定性，後續將持續推動品質控管報告自動化作業流程，涵蓋測站觸發率、震源與規模誤差、預警時效等指標，建立標準化品質追蹤報表，以利事件回顧、統計分析及系統精進作業，並作為實務運作與政策調整之參考依據。
5. ESE 系統與決策模組整合作業：目前本署已完成 ESE 系統初步解算結果之串接流程建置，後續將進一步強化各模組間之資訊傳遞效能，特別針對 FinDer 模型所產出之破裂方向與斷層長度等線震源參數，進行決策模組整合與 PGA 預估流程之擴充。相關資訊將透過自行撰寫的 EEW script 傳送至 Earthworm 架構之 EEW\_RING，供決策模組後續進行警報判斷，俾使點震源與線震源演算法可於同一平台共同應用，完成複合型演算法預警系統構想。
6. 後續行動與預期規劃：未來將持續依合作共識推動各項技術整合作業，並預計 115 年度與瑞士團隊進行第三次技術交流，針對本次工作成果進行確認與綜整檢討，俾利 ESE 系統正式納入本署地震預警作業流程，並穩健推進新一代地震預警系統之建置目標。

## 心得及業務建議

本次赴瑞士蘇黎世聯邦理工學院地震服務中心（ETHZ-SED）進行技術研習，從一開始即受到對方團隊的高度重視與熱情接待。對方不僅毫無保留地分享系統設計理念與模組設定邏輯，亦提供豐富的實務經驗作為交流基礎，使我在短短數日內接收大量資訊與前瞻觀念。如此密集且高強度的討論節奏，難以在工作時間內完全吸收，經常需延伸至下班後、假日才能消化內容。整個研習過程中，除詳細紀錄各次討論重點與新知外，亦不斷反思與盤點：我們改善項目有哪些？未來發展的優先順序為何？如何讓系統更穩定、更全面，進而提升民眾對地震警報的信任？有鑑於本次研習所涵蓋議題廣泛，為利後續成效落實與應用推進，以下分項整理交流期間所獲主要技術重點與應用啟發，作為本署後續強化預警系統、測報作業之參考。

### 發展複合型演算法的地震預警架構

此次研習進一步確認：推動地震預警系統朝向「複合型架構」發展，確實是一條正確且必要的道路，唯有如此，方能有效因應多樣震源情境所帶來的挑戰。ETHZ-SED 已於 SeisComP 平臺成功整合 FinDer（線震源）與 Virtual Seismologist（點震源）兩種演算法，並經多國的實際應用，證實其具備高度互補性與穩定性。我方自兩年前即已導入此架構進行測試與觀察，未來若能進一步透過臺灣歷史地震資料進行驗證，並修正相關系統模組配置，將有機會正式介接至本署現行地震預警系統，建立具備多情境應變能力之預警流程。特別是在面對規模較大的地震事件時，線震源模型能預估破裂延伸情形，補足點震源於空間涵蓋上的物理限制，進一步提升地震警報於時間與空間兩面向的準確性與實用性。

### 導入新型誤報抑制機制

ESE 系統採用以 Likelihood 為核心的決策機制，綜合觸發分布檢核、規模檢驗與測站空餘角等條件，作為發出地震預警的重要依據之一。該機制在實務運作中已展現穩定成效，並證實能有效過濾誤報結果。建議本署可考慮將此邏輯導入

目前仍以傳統門檻進行判斷的 eBEAR 模組，有助於修正過去數起誤報案例，提升警報品質。此外，ETHZ-SED 目前正發展一項新方法，透過比對觀測地動包絡與預測包絡的擬合度，進一步評估警報的可信度。此技術具備高度應用潛力，建議我方持續關注其開發進展，待其公開並穩定運作後，再據以規劃測試，檢視是否能有效降低誤報與漏報的機率，作為未來正式上線的依據。

### **建立地震預警品質控管與系統優化機制**

為強化地震預警系統的穩定性與可持續性，本次交流著重於建立一套涵蓋品質控管、參數調整與歷史資料回放的優化機制。品質控管的核心目的，在於即時掌握系統錯誤來源，釐清演算法運作是否異常，並據此修正對應的系統參數。接著，透過回放模組重現特定地震事件的處理過程，驗證調整後的系統行為是否有所改善，形成「監控、調整、驗證」的優化循環。ETHZ-SED 團隊此次特別分享以 Docker 架構建置的歷史事件回放流程，並親自協助我方完成安裝與測試，成功實作 2024 年花蓮地震與 2025 年大埔地震的演算法重現。此機制不僅有助於針對即時預警作業中發現的問題進行精準追蹤與校正，更因應目前尚無法預期何時再度發生大型地震的現實情境，提供一種在無需等待新事件發生的前提下，仍能有效驗證系統效能與穩定性的手段。未來，建議本署應持續活用此架構，不僅針對 VS 與 FinDer 模組，也能延伸至本署現行的 eBEAR 預警系統，並加以評估觸發時效、震源與規模預估、震度分布與系統穩定性等全面性檢視與評估，逐步建立完善的系統優化機制，強化地震預警系統效能。

### **國際經驗的教學相長**

雖然此次研習地點在瑞士，但在 ETHZ-SED 團隊的安排下，讓我得以深入了解其合作夥伴美國 USGS 所主導的地震預警系統 ShakeAlert，包括系統架構設計與實際運作方式。這個過程，不僅拓展了我對全球地震預警趨勢的理解，也讓這次的學習深度與廣度遠超預期。透過交流，我初步掌握 ShakeAlert 系統在多演算法整合上的具體做法，例如結合點震源與線震源模型以因應不同類型地震，並

納入 GNSS 等多元資料作為強化依據。在震度預估方面，美方設計了 grid 與 contour 兩種方法，對應不同資訊平台與使用者需求等。這些實務經驗顯示，複合型演算法架構已成為全球地震預警系統的主流方向，美方經驗也進一步驗證我方近年推動多演算法整合策略的必要性，提升我方未來系統發展的信心。

更重要的是，在交流過程中我發現，許多技術瓶頸並非臺灣獨有。以此次提及的美方預警規模高估問題為例，臺灣亦曾面臨類似情形。這樣的共同經驗顯示，各國在推動地震預警系統時，往往會遇到相似的技術挑戰。因此，國際交流的價值不僅在於學習他國的成功案例，更在於彼此釐清實務上的盲點，激盪出改進的方向與策略。建議本署持續推動並拓展與國際地震監測機構之技術合作，透過實地與線上交流、案例回顧與演算法驗證等方式，建立長期互動機制，發揮各方優勢。即使來自不同國家、使用不同語言，但是在地震預警發展的這條道路上我們面對的挑戰卻極為相似，正因如此，更值得我們深入維持彼此的合作關係。

### **強化 GNSS 應用以提升大型地震應變能力**

本次交流了解 GNSS 資料與地震預警系統整合的潛力，特別是在大型地震的情境下，GNSS 所提供之位移資訊能有效補強規模估算與破裂特徵判釋能力。本署目前已建置 GNSS 觀測網，建議可著手評估與預警系統整合之技術可行性，特別針對大型地震之高風險斷層帶進行測站加密佈設，提升對潛在災害性地震的掌握能力。此策略不僅有助於改善傳統模型對大型地震規模低估之問題，亦能作為未來多元資料融合之預警架構發展方向之一，進一步提升資料的準確性。

### **地震預警系統與社會科學連結**

此次交流讓我深刻體認到，地震預警系統的成功不僅取決於技術本身的精準度與反應速度，更關鍵的是與民眾之間的互動設計與信任關係。ETHZ-SED 於 App 功能中導入使用者行為建議、互動回報與多元警報方式，展現出以人為本的預警設計理念。相較之下，我方現行系統在使用者參與與行為追蹤方面仍有強化空間。建議本署未來可循序導入具備即時互動與經驗回饋機制的應用平台，蒐集

使用者是否收到警報、主觀震度感受與應變反應等資訊，作為預警策略優化與演算法調校的重要依據。同時也應思考如何結合社會科學工具，持續進行民眾行為模式與信任度調查，建立制度層面的回饋與修正機制，強化與公眾之間的資訊互動與理解橋樑。此舉將有助於提升整體預警體系的韌性與社會接受度，實踐以人為核心的災防服務價值。

### **新地震測報技術展望**

此外，本次研習亦涵蓋人工智慧與 DAS 技術在地震監測系統中的應用潛力。ETHZ-SED 團隊展示如何透過 SeisBench、scdlpicker 等深度學習模型，強化波相挑取的準確性，有助於提升地震目錄的建置效率，並減輕人力負擔，未來可朝「演算法部署、人工查核」的混合作業架構持續優化。

至於分布式光纖感測技術（DAS），ETHZ-SED 展現其作為高密度地震觀測工具的潛力，有機會補強傳統地震儀難以涵蓋之區域。建議本署後續可持續了解國內外學術機構發展情形，評估臺灣島內地震測站較稀疏之地區，進行 DAS 技術的實驗性佈設與效益評估，作為下一代觀測網的潛在補強方案。

### **地震觀測網維運與資料管理機制**

地震觀測網是支撐各式各樣地震測報系統運作的基礎核心，唯有穩定、高品質的資料來源，才能提供各項應用服務。在 ETHZ-SED 團隊的盛情邀約下，我得以實地觀摩其地震觀測網的運作經驗，從地震儀、地震測站、地震測站網頁與資料監控平台，認知到架構思維與實務做法。瑞士測站選址多元，常見於公園、校園或道路分隔島等開放空間。部分站體採用具防護性與維護便利性的金屬圓蓋結構，感測器則安置於地面凹槽中，不僅提升抗干擾能力，亦利於日後維運，可作為我方未來新設測站之參考。ETHZ-SED 團隊亦展示其整合性波形監控平台，透過多組螢幕呈現全國測站的即時訊號、通訊狀態與儀器健康指標，達到快速掌握資料品質與故障應變的目的。我方目前以 Grafana 建置類似架構，雙方系統在資料呈現上各具特色，但目的與效果相同，顯示雙方在監控平台建構上的規劃皆

有前瞻性與實用性。此外，其公開之測站網頁內容詳盡，整合地質、地形與場址條件等背景資訊，展現高度透明與科學應用導向。建議本署未來可整合上述資訊，以強化地震資料的專業深度與應用價值。

本次瑞士之行，不僅是一場技術交流，更是一段完整的學習歷程與反思契機。感謝 ETHZ-SED 團隊的高度參與，也感謝這段旅程中天候穩定、身體狀況良好，使我得以專注於學習與實作。未來我將持續整理本次收穫，並逐步與同仁研議具體推動策略，期待能真正將這次交流轉化為推動新一代地震預警系統的助力，為臺灣建立更強韌、更可信的警報服務，進一步提升整體防災量能。



圖 9、研習期間，準備氣象署紀念品、鳳梨酥及臺灣產製威士忌，致贈 ETHZ-SED 團隊，象徵雙方交流合作圓滿完成，亦傳達臺灣人情與文化之心意。

## 參考文獻

- [1] Böse, M., Heaton, T. H., & Hauksson, E. (2012). Real-time Finite Fault Rupture Detector (FinDer) for large earthquakes. *Geophysical Journal International*, 191(2), 803–812. doi:10.1111/j.1365-246X.2012.05657.
- [2] Böse, M., Felizardo, C., & Heaton, T. H. (2015). Finite-Fault Rupture Detector (FinDer): Going Real-Time in Californian ShakeAlert Warning System. *Seismological Research Letters*, 86(6), 1692–1704. doi:10.1785/0220150154.
- [3] Böse, M., Smith, D., Felizardo, C., Meier, M.-A., Heaton, T. H., & Clinton, J. F. (2018). FinDer v.2: Improved Real-time Ground-Motion Predictions for M2-M9 with Seismic Finite-Source Characterization. *Geophysical Journal International*, 212(1), 725–742. doi:10.1093/gji/ggx430.
- [4] Böse, M., J. Andrews, R. Hartog, and C. Felizardo (2023). Performance and Next Generation Development of the Finite-Fault Rupture Detector (FinDer) within the United States West Coast ShakeAlert Warning System, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 113 (2): 648–663. doi: 10.1785/0120220183.
- [5] Chen, D.-Y., N.-C. Hsiao, and Y.-M. Wu (2015). The Earthworm based earthquake alarm reporting system in Taiwan. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 105, 568-579. doi: 10.1785/0120140147.
- [6] Cua, G. (2005). Creating the virtual seismologist: Developments in ground motion characterization and seismic early warning (PhD thesis). California Institute of Technology, Pasadena, California. doi: 10.7907/M926-J956/
- [7] Cua, G., & Heaton, T. (2007). The Virtual Seismologist (VS) method: A Bayesian approach to earthquake early warning. In P. Gasparini, G. Manfredi, & J. Zschau (Eds.), *Seismic early warning* (pp. 85–132). Springer Heidelberg.
- [8] Cua, G., M. Fischer, T. Heaton, S. Wiemer (2009). Real-time performance of the

Virtual Seismologist earthquake early warning algorithm in southern California, *Seismological Research Letters*, September/October 2009; 80: 740 - 747. doi:10.1785/gssrl.80.5.740

[9] Jozinović, D., Clinton, J., Massin, F., Böse, M., & Cauzzi, C. (2024). Realtime Selection of Optimal Source Parameters Using Ground Motion Envelopes. *Seismica*, 3(1). <https://doi.org/10.26443/seismica.v3i1.1142>

[10] Jozinović, D., Clinton, J., Massin, F., Diehl, T., and Saul, J.: Advancing Operational Earthquake Monitoring at Local and Regional Scales with Machine Learning-Enhanced SeisComp Tools - as Demonstrated in Switzerland, EGU General Assembly 2025, Vienna, Austria, 27 Apr–2 May 2025, EGU25-17226, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu25-17226>, 2025.

[11] Jeffrey J. McGuire, Carl W. Ulberg, Angie I. Lux, Maren Böse, Jennifer R. Andrews, Deborah E. Smith, Brendan W. Crowell, Jessica R. Murray, Ivan Henson, Renate Hartog, Claude Felizardo, Minh Huynh, Mario Aranha, Grace A. Parker, Annemarie Baltay, Mark H. Murray, Glenn P. Biasi, Steve Guiwits, Jessie K. Saunders, Andrew D. Good, Victor Marcelo Santillan, Craig W. Scrivner, Walter M. Szeliga, Timothy I. Melbourne, Victor Kress, Robert M. de Groot, Sara K. McBride, Douglas Given, Richard M. Allen, Thomas H. Heaton, Allen Husker, Valerie Thomas, Harold J. Tobin, Sumant Jha, Julian Bunn; ShakeAlert® Version 3: Expected Performance in Large Earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America* 2025;; 115 (2): 533–561. doi: <https://doi.org/10.1785/0120240189>

[12] Maren Böse, Savas Ceylan, Jennifer Andrews, Frédérick Massin, John Clinton, Jessie K. Saunders, Orhan Tatar, Meltem Türkoğlu; Rapid Finite-Fault Models for the 2023 7.8 Kahramanmaraş, Türkiye, Earthquake Sequence. *Seismological Research Letters* 2024;; 95 (5): 2761–2778. doi: <https://doi.org/10.1785/0220230426>

[13] Massin, F., J. F. Clinton, M. Böse (2021) Status of Earthquake Early Warning in

- Switzerland, *Frontiers in Earth Science*, 9 : 707654. doi : 10.3389/feart.2021.707654
- [14] Massin, F., Edme, P., Clinton, J., Scarabello, L., Tian, L., Rinaldi, A. P., and Meier, M.-A. and the FEAR team: Integrating DAS into Seismic Monitoring Systems: Insights from SED and the BedrettoLab, EGU General Assembly 2025, Vienna, Austria, 27 Apr–2 May 2025, EGU25-6500, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu25-6500>, 2025.
- [15] Orihuela, B., Dallo, I., Clinton, J., Strauch, W., Protti, M., Yani, R., et al. (2023). Earthquake early warning in Central America: The societal perspective. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 97, 103982. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4348227>
- [16] Orihuela, B., Dallo, I., Clinton, J., Strauch, W., Protti, M., Yani, R., et al. (2023). Public Feedback and Actions During EEW Alerts: Lessons From Central America. *SSA Annual Meeting Book of Abstracts 96 (2B)*, 1339.