

核設施放射性災害應變與 複合式災害互依性分析技術建立

Development of the Analysis Techniques for Emergency Response to Radiological Accidents and Infrastructures Interdependency under Multiple Concurrent Hazards

主管單位：行政院原子能委員會

汪子文 方新發 彭思琪 林家德 夏振原 黃佳慧
Tzu-Wen Wang, Hsin-Fa Fang, Hui-Mei Peng,
Jyh-Der Lin, Chen-Yuan Hsia, Chia-Hui Huang

行政院原子能委員會核能研究所

摘要

發生國際間重大核子或輻射事故時，政府必須採取適當的緊急應變行動，以確保民眾和環境之安全。緊急應變行動所涵蓋的技術領域相當廣泛，包括規範與標準研擬、輻射偵測、劑量評估、防護措施整備等，因此必須建立相關的技術以支援政府的決策系統。本研究計畫針對輻射長程之擴散模式、放射性核種分析技術、輻射劑量評估與緊急應變技術進行研究與分析。

此外，因應近年來天候環境變化與人為事故頻傳，所衍生對於複合式災害之顧慮，探討核設施在此類災害下的可能風險，在建立核設施與其他基礎設施互依性分析方法論方面，以核設施為例，開發我國基礎設施互依性分析與案例分析能力，以因應未來建立複合式災害之預警風險評估方法論與模型工具的需求。除善盡核能管制機關施政責任，亦可增進民眾對核能應用之信心，進而推廣核能發展，對低碳能源使用持續貢獻。

關鍵詞：長程之擴散模式、放射性核種分析、複合式災害、互依性

Abstract

To cope with postulated catastrophic accidents that might be caused by a series of equipment failures in nuclear power plants, government has to adopt an adequate emergency response to protect people and environment. Emergency response actions extensively cover various technical aspects, including standard and regulation development, radiation indicators, dose assessment, emergency preparedness, etc. Therefore, it is necessary to set up technical base and support government decision. This research studies technical bases such as long-range dispersion models, radioanalytics, radiation dose assessment and emergency response.

In light of recent climate change associated phenomena and human-caused events, risk of nuclear infrastructure from multiple concurrent hazards is also addressed in this report. This research also reviews risk caused by interdependency between nuclear facility and other infrastructure. It's necessary to establish analysis methodology and simulation model, therefore. At first, nuclear power plant is the subject of the pilot analysis of infrastructure interdependency.

Hopefully, this capability could help the Atomic Energy Council (AEC) establish measures and regulations to keep nuclear power base load safe, in any case of catastrophic natural or human disaster. Moreover, nuclear power can enhance its social acceptance through reliable capability and continue to contribute to low-carbon energy production.

Keywords: long-range dispersion models, Radioanalytics, multiple concurrent hazards, Interdependency

一、前言

「核設施放射性災害應變與複合式災害互依性分析技術建立」計畫為反映國際間在放射性災害應變與基礎設施安全研究上的進展，拓展核研所於核電廠輻射外釋事故緊急應變計畫與定量風險評估的研究範圍，以因應國科會99年成立特別額度計畫類別，鼓勵研發單位提出新研究議題的需求。本計畫規劃於民國99年度，計畫研究動機原來自於大陸積極拓展核電建設，規劃於沿岸設立為數甚多的核電廠，對於可能發生的核子事故與相關應變應預先研議之需求，而民國98年發生的莫拉克風災，則引起有關極端氣候對於基礎設施安全之衝擊以及核電廠如何因應之考量。

本計畫於100年度開始執行，為期三年。而日本於100年3月11日發生規模9的東太平洋地震，引發巨型海嘯，更導致福島第一核電廠內的三部機組發生爐心熔損事故。雖然此次災害最嚴重的區域局限於日本，也無人因核災輻射而死亡，但國際間一直高度關切輻射的國際擴散效應。福島事故的起源來自地震加海嘯的複合式災害，唯此事故與本計畫標題的契合，純屬巧合。福島一廠安然度過強烈地震的挑戰，但地震造成鄰近基礎設施的癱瘓，包括交通道路與外部電力網絡，乃至於隨之而來的海嘯來襲後，電廠喪失所有緊急電源，又無法及時取得外電的支援，終致爐心熔損。福島事故正凸顯本計畫研究議題的必要性，尤其是基礎設施與核設施之間在平時與緊急時期的相互依存性。

本計畫目標為完成國際間放射性災害相關偵測評估技術之建立研究以及對於我國核設施與其他基礎設施互依性方法論的初步研究，以提升國內核能安全與輻射災害應變主管機關以及其他相關單位在災害應變方面之規劃、預警、應變等各階段之能力技術。下文分別以下列項目，敘述本計畫於101年度的研究摘要：

- 建立鄰近地區事故長程污染擴散人口評估技術
- 建立核子事故快速空氣取樣系統與放射性核種分析技術
- 擇定分析案例與適用的模型
- 建立核電廠海嘯危害評估方法

二、鄰近地區事故長程污染擴散人口評估技術

2.1 前言

日本福島事件之後，釋放出大量的放射性物質到大氣中，隨著大氣的飄散到世界各地，引起各國關心。美國核能學會在2011年6月底的年會中，以集體劑量來說明福島事件排放造成的影響衝擊，並與車諾比爾事故及三哩島事故相互比較。評估集體劑量除需排放量與大氣擴散模式以評估空氣濃度或沉降量分布情形外，同時也要利用人口分布資料。

2.2 內容概要

目前，一般的大氣擴散評估結果可能以不同濃度等高線涵蓋區域或網格點濃度方式表現，人口資料有需要進行適當處理以搭配相關應用。如果人口資料越精細可靠，評估結果也相對越精細可靠。近年來，地理資訊系統發展迅速，我國政府為提昇空間決策品質及行政效率，內政部統計處著手最小統計區工作推動，以期解決以往以行政區界發布時，所造成之地理空間扭曲問題，並希望在保有社經空間趨勢與民眾隱私權保護情況下，進行社經資料之整合與流通，從而建立較村里層級更小的統計發布單元；也就是說透過最小統計區的完成，可提供更細緻與更準確分布的人口資料。

2.3 小結

本計畫針對最小統計區資料的發展進行研究，並就台灣現有可獲得人口資料，完成「最小統計區與人口分佈研究初步」報告，提出建置全國人口網格分布地圖適當方法與應用(圖1)，搭配大氣擴散模式運算評估可能造成的集體劑量。目前我國核子事故緊急應變地方單位為鄉鎮市區層級，透過鄉鎮市區長指揮調度地方村里工作人員與相關個人聯繫。應用最小統計區可讓聯繫工作更精緻有效，原負責同一村里的通報人員中可依地理區位區分輕重緩急將個人或家庭所需之應變措施即時傳達。

三、建立核子事故快速空氣取樣系統與放射性核種分析技術

3.1 前言

為因應類似日本福島核電廠事故之影響，需於短時間大量取樣監測，提高偵測靈敏度及縮短取樣時間。為滿足緊急監測之任務需求，本計畫設計與完成大流量空氣取樣系統。此系統擁有超大流量空氣取樣器，比一般環境空氣取樣流量大160~500倍，可於短時間內收集足夠的樣品進行分析。

為確保環境樣品放射性核種活度分析結果的精確度與準確度，依據全國認證基金會(TAF)ISO 17025規範對實驗室參加能力試驗之要求，主辦國內能力試驗比對計畫，提升我國游離輻射領域量測實驗室之農產品量測能力，並參加國際原子能總署主辦之國際比對試驗。

3.2 內容概要

大流量空氣取樣系統的設計：(1)流量控制:以變頻雙馬達自動切換控制，最大流量率達1500m³/h (25m³/min) 以上；(2)監控系統設施:以PLC進行系功能操控，觸控式設定能自動化採樣收集或自行設定模式運作；(3)收集微粒濾材為不鏽鋼外框，可使用活性炭吸附器具(圖2)。

依據國際規範ISO GUIDE 30-35要求，研發關鍵農產品米樣、水、土壤、茶

葉、牛奶、肉類與菇類標準參考物質之配置方法及建立標準化流程(圖3)，並評估標準參考物質之配置分析結果、驗證配置性能及量測不確定度。標準參考物質可供國內從事放射性核種分析實驗室做為計測系統之效率校正，結果可追溯國家標準。

參加國際原子能總署主辦之國際比對試驗(World-wide Open Proficiency Test)，如圖4。分析結果於2012年3月15日提報給原子能總署。分析的項目包括：(1)水樣品有三種不同放射性活度的水樣，分析Co-60、Cs-134、Cs-137、Eu-152、H-3；(2)土壤樣品分析Ac-228、Cs-137、K-40、Po-210、TL-208。

3.3 小結

考量國內現有的環境空氣監測採樣設備皆為小流量系統，使用長時間的連續抽氣取樣監測適用於平時一般的環境監測，但在事故發生時需於短時間內收集足夠的樣品進行核種分析，則較不適用，如碘131半化期為8天，連續取樣一週再分析活度量已衰變近一半，不易量測也無法即時反應環境現況。本計畫建置的大流量空氣取樣系統，可因應未來國際輻災時可以及時取足夠樣品分析，以評估國內的輻射狀況與建議政府採取的應變措施。

環境樣品放射性核種分析能力試驗有助於提升實驗室分析結果的公信力，日本福島核子事故發生後至今，農委會等政府單位每月委託核能研究所分析日本進口之食品物品數千件做放射性核種分析，本計畫建立之技術可為國人健康把關。

四、擇定核設施與電網互依性分析案例與適用的模型

4.1 前言

本計畫評估現有複雜系統設施互依性分析模型，並以核設施相關肇始事件為基礎，評估並擇定適當的案例進行模擬。

選用工具以系統動力學方式及合代理人基模擬，探討台灣電力網路的特性，經由對不同的連鎖性故障模型的模擬結果，我們發現台灣電網的脆弱特點呈現一致的結果，計畫結果應有助於對台灣電網的認知，並做為後續電網發展的重要參考。

4.2 內容概要

以系統動力學及代理人基兩種方法進行災害引致電網連鎖故障影響之初步分析。技術上以系統動力學計算節點過載及瞬間動態過載，討論節點的脆弱度，並以 Repast 程式(代理人基建置平台)建立台灣全島發電廠與高壓輸配電網絡模型，含超高壓、一次、二次變電所、配電站及電力調度中心，可模擬電力之負載追隨、節點超載，並以代理人基模擬進行非特定災害影響模擬(圖 5)。

以系統動力學進行連續失效(cascading failure)分析(圖6)，假設某一結點或連結被移除後，會引發動態流的重新分布和改變剩下結點或連結的負載，當負載超過設定的負載容量時，此節點或連結即視為失效(failures)並將其移除，然後再重新計算動態流，直到沒有任何節點或連結發生失效為止。並使用兩種過載失效評估：一類為使用參與中間度指標(betweenness centrality)，另一類為瞬間動態(transient dynamic)。

代理人基模擬系統則是近年來分析複雜系統較為流行的方法，代理人基模擬的優勢在於可以設計較為簡單的行為和模型，去解決複雜系統的最佳化問題。計劃中，以Repast 進行代理人基系統的模擬，並根據系統分析的結果進行實驗，和製作出視覺化的資料呈現。也探討了前人提出的兩種複雜網路的連鎖故障模型，並且以台灣的電力網路作為分析的對象，找出存在於電力網路中的弱點區塊，並搭配以Repast 實作的代理人基系統，作為日後決策的依據。

4.3 小結

本計畫以三個項目進行分析：(1)參與中間度指標的節點過載、(2)參與中間度指標的連結過載及(2)瞬間動態過載的脆弱性；分析台灣電網的脆弱節點及連結，不同分析項目所得到的結果有相當的一致性，重複率最高的龍潭、中寮、龍崎這三間超高壓變電所，以及連接到他們的電纜線，顯示這些節點及連線為台灣電網較脆弱的環節。

五、核電廠海嘯危害評估方法研究

5.1 前言

因應 2011 年福島核電廠因地震海嘯之複合式災害所導致的核子事故，針對超過設計基準的海嘯，建立定論性危害分析方法，並整理台灣核一二三廠海嘯設計基準現況，及國內對於超過預期海嘯模擬的成果，以評估海嘯對於核電廠設備的可能危害規模。

5.2 內容概要

近年來因美國新電廠執照申請作業重起爐灶的需要，海嘯危害評估作法已有更清楚的界定，加上日本於 2011 年發生巨型地震，引發海嘯，並造成福島一廠核電廠三部機組爐心熔損事故，也使得我國核電廠海嘯危害可能有重新評估的需求。本報告說明新近的核電廠廠址海嘯危害評估方法論，主要以美國核能管制委員會導引 NUREG/CR-6966 為基礎，並兼述日本土木工程學會(JSCE)(圖 7)、國際原子能總署(IAEA)與我國目前的海嘯危害評估導引與作法。我國周圍均有潛在的海嘯孕源，選擇核電廠廠址時因冷卻水考量，均位於海邊，但也因此無法免於海嘯的威脅。目前各廠在進行廠址評估時，均有考慮海嘯危害並反

映在設計基準內，考慮的因素主要在於海嘯造成的高水位危害，亦即最高潮昇高度。本報告除敘述海嘯的危害種類與影響外，也說明最大可能海嘯的詳細評估作法。基於海嘯的危害特性是與廠址區域的近岸海底地形與陸地地形高度相關，故應針對廠址可能遭遇到的海嘯來源，以數值模擬多種情境海嘯，從中評估最壞狀況的海嘯危害，並確立各種危害指標，包括高、低水位、沖刷效應、衝擊力、沈積物、碎物聚積、拋射物等，進而決定適當的設計基準及安全相關SSC所需的防護措施。

5.3 小結

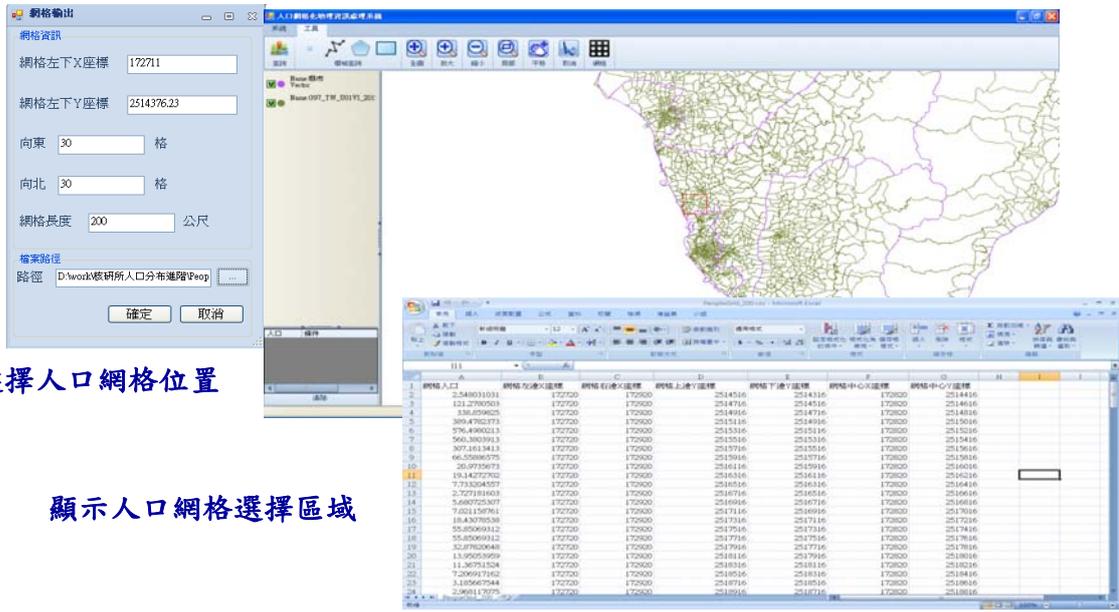
最大可能海嘯(PMT) 評估過程的主要工作是訂出各種可能的情境海嘯，再由其中決定PMT。評估過程裡應根據各情境海嘯的淹溢模型分析結果，決定最嚴重的海嘯危害指標。理想的評估結果應包括：

1. 高水位：顯示最高水面高度的地圖；
2. 低水位：顯示最低水面高度的地圖；
3. 沖刷潛勢：參考報告第4章所述之沖刷強化參數的地圖；
4. 沈積：參考報告第4章所述易受到海嘯波帶來的沈積物危害的區域地圖；
5. 施力：參考第4章所述的速度場地圖，用於估算核電廠結構物所受的力；
6. 碎物聚積：可顯示核電廠廠址容易遭遇碎物聚積的區域地圖；
7. 拋射物：可顯示受到假想最壞狀況之拋射物衝擊力的地圖；

上述評估結果的相關資料應供評估人員設定為廠址的海嘯危害特性，並進一步決定各安全重要SSC 的海嘯設計基準。

參考文獻(核能研究所報告)

1. 方新發，「最小統計區與人口分佈研究初步」報告(INER-9250R)，2012。
2. 李鏞偉、梁坤炫、王正忠，「大流量空氣取樣系統報告」(INER-9698)，2012。
3. 彭恩琪，「參加2011年環境試樣放射性核種分析能力試驗比對結果」(INER-9736)，2012。
4. 李蔡彥，「核設施互依性分析案例研究」，核能研究所委託計畫，政治大學，2012。
5. 林家德、夏振原，「核能電廠海嘯危害分析方法論研」(INER-9611)，2012。



選擇人口網格位置

顯示人口網格選擇區域

人口網格數據輸出

圖 1 人口網格資料查詢



圖 2 大流量空氣取樣控制系統觸控面版模式



圖 3 標準參考物質之配置方法及流程

The IAEA-TEL-2011-03 World-wide open proficiency test
Laboratory No. 128, Results submitted on 2012-03-15

2012-05-24

Individual Evaluation Report

for

Laboratory No. 128

Your personal customer number: 16427

Mrs. Jyi-Lan Wu
 Health Physics
 Institute of Nuclear Energy Research
 No. 1000, Wenhua Rd., Jiaan Village, Longtan Township, Taoyuan County 32546, Taiwan (R.O.C.)
 TW

Tel: 886-3-4711400 Ext.7646
 Fax: 886-3-4711171
 e-mail: jlwuu@iner.gov.tw



Contact Information

S. Tarjan
 IAEA Reference Materials Group
 Terrestrial Environment Laboratory
 NA Environment Laboratories NAEL
 International Atomic Energy Agency
 A-2444 Seibersdorf - Austria

Email: s.tarjan@iaea.org
 Tel: + 43 1 2600 28242
 Fax: + 43 1 2600 28222
<http://nucleus.iaea.org/rpst>

DISCLAIMER:
 This report has been generated automatically and is for your personal information only. The official results of the proficiency test will be published in the final report. If you believe, that any information provided on this form might be incorrect, please contact us as soon as possible.

圖 4 參加 IAEA 放射性核種分析國際能力試驗證明

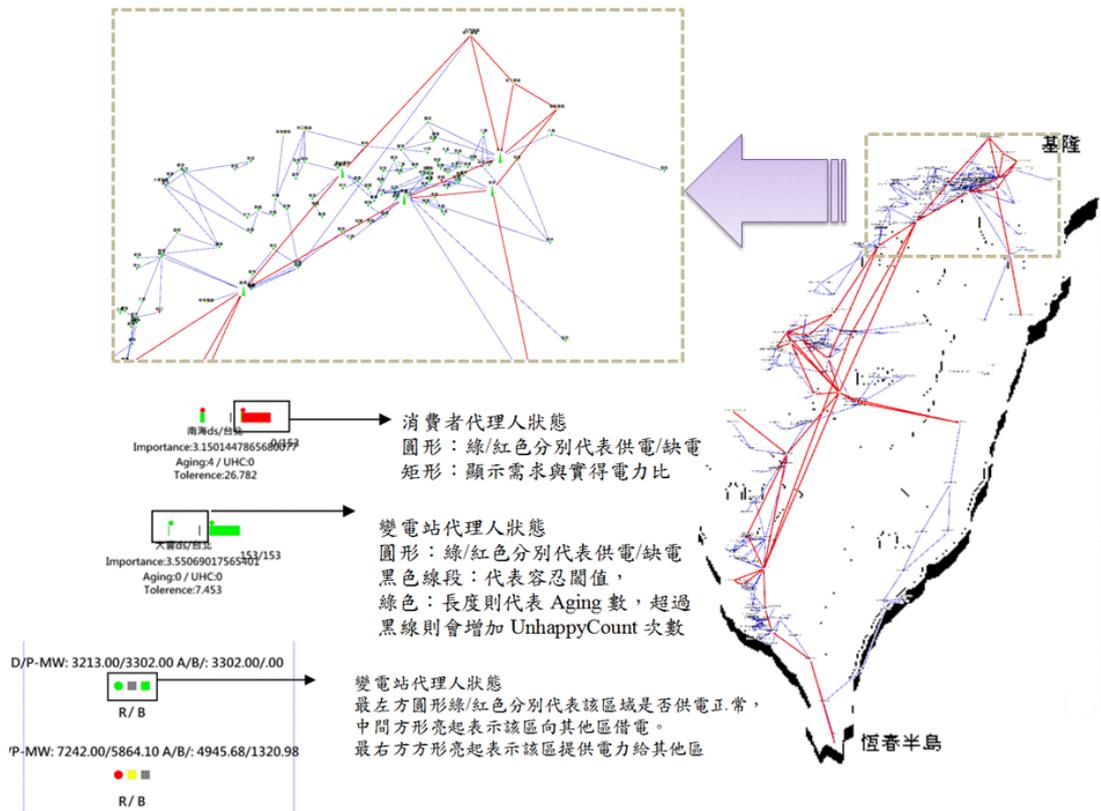


圖 5 代理人模擬系統中的自動化模擬

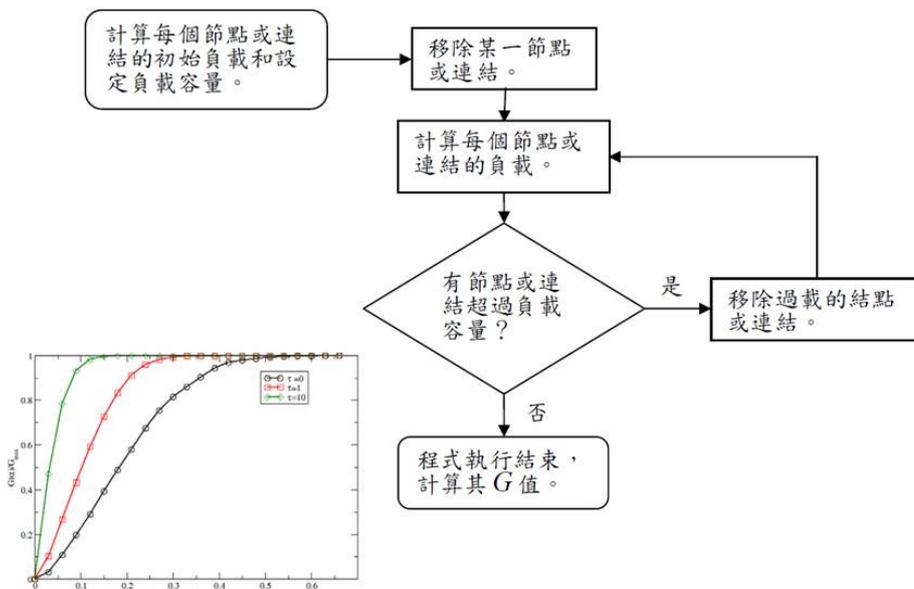


圖 6 連鎖性失效的模擬流程圖

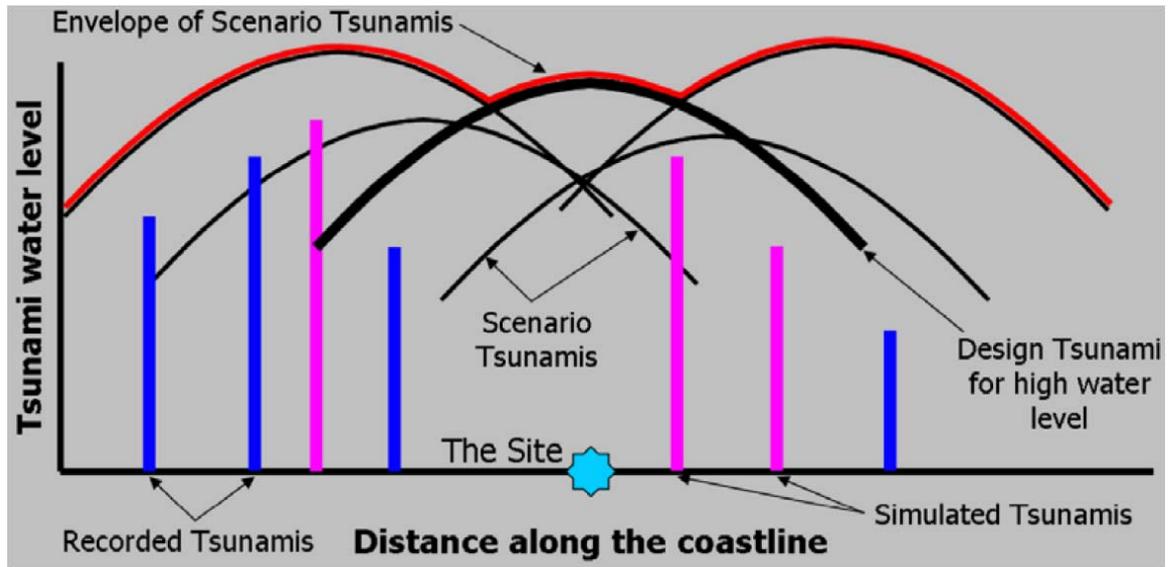


圖 7 日本 JSCE 設計海嘯概念說明圖