

行政院原子能委員會
委託研究計畫研究報告

109 年核電廠水災與海嘯危害再評估精進技術研究與管制技術諮詢
Regulatory technology and advanced assessment methodology on
flooding and tsunami hazard reassessment for NPP (2020)

計畫編號：109B010

受委託機關(構)：國立成功大學

計畫主持人：蕭士俊

聯絡電話：(06) 275-7575 #63262

E-mail address：schsiao@mail.ncku.edu.tw

協同主持人：洪李陵、陳彥龍

研究期程：中華民國 109 年 5 月至 109 年 12 月

研究經費：新臺幣 176 萬元

核研所聯絡人員：徐康耀

報告日期：109 年 12 月 11 日

目 錄

目 錄.....	i
中文摘要.....	1
英文摘要.....	3
壹、計畫緣起與目的.....	5
貳、研究方法與過程.....	8
一、美國核電廠水災危害評估提交報告.....	8
(一)第一階段報告需提供資訊.....	9
(二)第二階段報告需提供資訊.....	11
(三)水災機制評估要點.....	20
二、美國核電廠水災危害評估案例研究.....	32
(一)DCPP 第一階段 – 水災危害再評估報告.....	33
(二)DCPP 第二階段 – 重點評估報告.....	40
(三)Millstone 核電廠第二階段 – 重點評估和綜合評估報告 ...	41
三、機率式海嘯危害度分析方法.....	52
(一)海嘯波源模型.....	55
(二)重現期評估.....	60
(三)海嘯波傳模型.....	62
(四)機率模型.....	63
四、美國核電廠相關單位之案例研究.....	72
(一)PTHA 設定方法.....	72
(二)PTHA 分析成果.....	75
(三)USNRC 案例研究.....	76
五、日本核電廠相關單位之研究.....	83

(一) PTHA 設定方法.....	84
(二) PTHA 分析成果.....	86
(三) 日本核電廠案例	87
六、PSHA SSHAC-3 SSC 隱沒帶 PTHA 邏輯樹建置評估	97
七、PTHA 邏輯樹建置	106
(一) 琉球隱沒帶	106
(二) 馬尼拉隱沒帶	112
參、主要發現與結論.....	129
肆、參考文獻.....	133

中文摘要

日本 2011 年 3 月 11 日的福島核災事故發生後，美國核能管制委員會組成近期專案小組(NTTF)進行調查與檢討，其中的建議事項 2.1 要求水災再評估。因此，為了能瞭解美國核電廠水災危害評估之評估項目和程序，本報告進行相關規範和導則資料之蒐集及彙整，並以美國 DCPD 核電廠為案例進行兩階段的水災危害評估程序之說明。USNRC (2012)要求之水災危害評估分為兩個階段，第一階段為水災危害再評估報告，第二階段則依前階段之成果依照 NEI 16-05 (2016)提出之水災影響評估程序(Flooding Impact Assessment Process, FIAP)，進行初步評估程序，再依所屬路徑提交重點評估或綜合評估報告。由於 DCPD 於第二階段之評估報告為重點評估報告，故以 Millstone 核電廠於第二階段提交之重點和綜合評估報告作為補充的案例。

在核電廠的海嘯危害度評估中，除了傳統的定值式評估方法之外，機率式的評估方式已逐漸發展成形且受到重視。本研究以機率式海嘯危害度評估方法的相關資料蒐集及研析為目的，透過蒐集美國和日本核電廠相關單位之研究報告和導則，彙整機率式海嘯危害度評估方法之流程及發展現況。

NTTF 的建議事項 2.1 要求地震重新評估。為此，國家地震工程研究中心依據美國地震危害分析資深委員會訂定之第 3 層級程序

(SSHAC-3)進行 4 處核電廠所需之地震源特徵(SSC)模型、地震動特徵(GMC)模型與地震危害度分析輸入文件(HID)建置。台灣地處海嘯侵襲風險相對較高的區域，且核電廠皆建於沿海地帶，故海嘯的危害度評估相當重要。隨著美國及日本發展之機率式海嘯危害度分析(PTHA)技術的成熟，如何與現有之機率式地震危害度分析(PSHA)研究成果銜接成為重要的工作。為此，本計畫以 PSHA SSHAC-3 SSC (2019)隱沒帶邏輯樹應用於 PTHA 之可行性研析為目的，包含 PTHA 方法概述、PSHA SSHAC-3 SSC (2019)隱沒帶邏輯樹應用於 PTHA 之方法建立，並分別以 PSHA SSHAC-3 SSC (2019)中的琉球隱沒帶和馬尼拉隱沒帶邏輯樹為例進行說明。

關鍵字：水災危害再評估報告(FHRR)、水災影響評估程序(FIAP)、初步評估程序、重點評估報告、綜合評估報告、機率式海嘯危害度分析(PTHA)、海嘯波源模型、重現期、海嘯波傳模型、機率模型、機率式海嘯危害度分析(PTHA)、機率式地震危害度分析(PSHA)、地震危害分析資深委員會(SSHAC)、地震源特徵(SSC)

Abstract

After the Fukushima Daiichi nuclear disaster in Japan on March 11, 2011, the U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC) formed a Near-Term Task Force (NTTF) to conduct investigations. Recommendation 2.1 requires flooding hazard reevaluation. In order to understand the assessment process and items for flooding hazard evaluation of nuclear power plants in the United States, the relevant standards and guidelines are collected in this report. In addition, the two-stage reports submitted by DCPD are chosen to account for the evaluation process. The flood hazard assessment required by USNRC (2012) is divided into two stages. Firstly, a flood hazard reevaluation report (FHRR) is demanded. Then, a focused evaluation report or an integrated assessment report should be submitted based on the results of FHRR in accordance with the flooding impact assessment process (FIAP) proposed by NEI 16-05 (2016). Since DCPD submitted a focused evaluation report, an integrated assessment report proposed by Millstone nuclear power plant is included as a supplement in this study.

In the tsunami hazard assessment of nuclear power plants, the deterministic method was fully developed and used in tsunami forecasting. On the other hand, the probabilistic method was gradually developed in recent years. This study was aimed to collect and investigate the relevant data of the probabilistic tsunami hazard assessment (PTHA). The reports and guidelines were collected from the relevant organizations of nuclear power plants in the USA and Japan. Finally, the process and current development of the PTHA were shown.

NTTF Recommendation 2.1 requires seismic reevaluation. Therefore, the National Center for Research on Earthquake Engineering (NCREE) carried out Seismic Source Characterization (SSC) model, Ground Motion Characterization (GMC model and Hazard Input Document (HID) for four nuclear power plants in Taiwan in accordance with the Senior Seismic Hazard Analysis Committee (SSHAC) Level 3. The tsunami hazard assessment is important to the nuclear power plants in Taiwan due to Taiwan is in an area where the risk of tsunami is relatively high and the plants are close to the ocean. With the development of the probabilistic tsunami hazard analysis (PTHA) in the United States and Japan, the connection between the probabilistic seismic hazard analysis (PSHA) to PTHA is an essential issue. This study was aimed to study the feasibility of applying the logic tree of PSHA SSHAC-3 SSC (2019) in PTHA for the subduction zone. The overview of PTHA, PSHA SSHAC-3 SSC (2019) subduction zone, and the methodology for converting the logic tree was proposed and the Ryukyu and Manila subduction zones were examined.

Keywords: flood hazard reevaluation report (FHRR), flooding impact assessment process (FIAP), initial evaluation process, focused evaluation report, integrated assessment report, Probabilistic tsunami hazard assessment (PTHA), tsunami source model, return period, tsunami modeling, probabilistic model, probabilistic tsunami hazard assessment (PTHA), probabilistic seismic hazard assessment (PSHA), Senior Seismic Hazard Analysis Committee (SSHAC), seismic source characterization (SSC)

壹、計畫緣起與目的

日本東部海域於 2011 年發生一起地震矩規模高達 9.1 的大地震，並進一步引發大規模海嘯，對日本本島東北部沿岸地區造成極大的傷亡。更可怕的是海嘯造成之海水溢淹破壞日本福島核電廠的設備，進一步導致嚴重的核災。在日本 2011 年 3 月 11 日的福島核災事故發生後，美國核能管制委員會(Nuclear Regulatory Commission, NRC)組成近期專案小組(Near-Term Task Force, NTTF)進行調查與檢討。共計 35 項改善建議事項中的建議事項 2.1 水災危害再評估(Flooding Reevaluation)的部分，要求營運中核電廠反應器廠址需依目前最新資訊重新將水災對廠址安全的影響進行評估。USNRC 於 2012 年 3 月 12 日以發送法令信函方式(10 CFR 50.54(f) Letter)，要求全美核電廠持照者，必須遵照指定事項辦理相關作業。

另一方面，NTTF 建議事項 2.1 之地震再評估(Seismic Reevaluation)部分，亦要求營運中核電廠反應器廠址需依目前最新資訊重新將地震對廠址安全的衝擊進行評估。為此，國家地震工程研究中心於 2015 年至 2019 年期間協助台灣電力公司進行行政院原子能委員會要求的地震危害度重新評估。依據美國地震危害分析資深委員會(Senior Seismic Hazard Analysis Committee, SSHAC)訂定之第 3 層級程序，國家地震工程研究中心以 4 處核電廠為標

的建置地震源特徵(Seismic Source Characterization, SSC)模型、地震動特徵(Ground Motion Characterization, GMC)模型與地震危害度分析輸入文件(Hazard Input Document, HID)，以利機率式地震危害度分析(Probabilistic Seismic Hazard Analysis, PSHA)和建立地震動反應譜(Ground Motion Response Spectrum, GMRS)之用。

臺灣地處環太平洋火山帶(ring of fire)，四面環海且位於菲律賓海板塊與歐亞板塊的交界處，受到海嘯襲擊的可能性相對較高。以鄰近的地震型海嘯潛勢區為例，東北方有菲律賓海板塊隱沒至歐亞大陸板塊下方而形成的「琉球海溝」，西南方則為歐亞大陸板塊隱沒至菲律賓海板塊下方而形成的「馬尼拉海溝」。在核電廠的海嘯危害度評估中，除了傳統的定值式評估之外，機率式的評估方式已逐漸發展成形且受到重視。美國和日本核電廠相關單位的地震型機率式海嘯危害度評估方法已發展成熟。隨著美國及日本發展之機率式海嘯危害度分析(Probabilistic tsunami hazard assessment, PTHA)技術的成熟，如何銜接現有之地震相關研究(PSHA SSHAC-3)為相當重要的一環。

因此，本計畫為瞭解 USNRC 在水災危害評估之流程架構和評估技術等要求，故彙整規範和導則的相關資料，並以美國 DCPP 的

提交報告為案例進行說明，並補充美國 Millstone 核電廠案例說明綜合評估報告。另一方面，進行 PTHA 的相關資料蒐集及研析，包含方法架構、海嘯波源模型(隱沒帶(地震)和海底山崩引致海嘯)、以及海嘯波傳。最後，以 PSHA SSHAC-3 SSC (2019)隱沒帶邏輯樹應用於 PTHA 之可行性研析為目的，包含 PTHA 方法概述、PSHA SSHAC-3 SSC (2019)隱沒帶邏輯樹應用於 PTHA 之方法建立，並分別以 PSHA SSHAC-3 SSC (2019)中的琉球隱沒帶和馬尼拉隱沒帶邏輯樹為例進行說明。

貳、研究方法與過程

一、 美國核電廠水災危害評估提交報告

USNRC 於 2012 年 3 月 12 日以發送法令信函方式(10 CFR 50.54(f) Letter (USNRC, 2012))，要求全美核電廠持照者，必須遵照指定事項辦理相關作業。在建議事項 2.1 水災的部分，要求核電廠進行兩個階段的水災危害評估：

第一階段報告：對所有運轉中之核電廠發出 10 CFR 50.54(f) 信函，要求針對現行的早期廠址執照(early site permits, ESP)和複合式執照(combined license, COL)審查所用之管制導則和方法重新評估其地震和洪水危害。

Phase 1: Issue 10 CFR 50.54(f) letters to all licensees to reevaluate the seismic and flooding hazards at their sites against present-day regulatory guidance and methodologies used for ESP and COL reviews.

第二階段報告：如有必要，則根據第一階段的評估結果，決定是否有採取其他監管措施之必要，例如更新設計基準和結構物、系統、組件(Structures, Systems, and Components, SSCs)，以抵擋重新評估後之地震和水災危害。

Phase 2: If necessary, and based upon the results of Phase 1, determine whether additional regulatory actions are necessary (e.g., update the design basis and SSCs important to safety) to protect against the updated hazards.

相對應上述兩個階段，美國核電廠被要求分別出具「危害再評估報告(Hazard Reevaluation Report)」和「綜合評估報告(Integrated Assessment Report)」。

(一)第一階段報告需提供資訊

第一階段報告需提供之資訊包含「廠區資訊」、「水災再評估」、「比較現行與再評估分析結果」、「期中評估及措施」和「其他措施」，共五個部分。

1. 廠區資訊

係指與水災評估相關的廠區資訊。再評估的範圍包含對安全和最終熱沉(UHS)，以及與安全有關之 SSCs，並應包括與這些 SSCs 有關的資料。相關的廠區資訊如下：

- (1) **地理資訊**：詳細的廠區資訊(設計和竣工後)，需包含現況的廠區配置、與安全有關之 SSCs 的高度、廠區地形，以及相關的時空間資訊。
- (2) **現行執照基準(CLB)**：現行執照針對不同水災因子的高程評估。
- (3) **水災和防護之變化**：取得執照後，水災及其防護措施之改變。

- (4) 水文變化：取得執照後，流域及當地區域之變化。
- (5) 防護及減災：CLB 的防洪及減災。
- (6) 額外相關資訊：評估水災所需之相關資訊(例如：海底地形、水災履勘視察結果等)。

2. 水災危害再評估

根據最新的方法和規範，對每種水災機制進行評估。對可能造成廠區危害的水災進行分析，包括局部強降雨和廠區排水系統、溪流及河流氾濫、潰壩、暴潮、盪漾、海嘯、冰引致水患、河道變遷以及複合影響。可排除不適用於廠區的水災機制，但須說明源由。陳述條件及假設，提出使用之方法和模型(包含輸入及輸出資料和其他相關資訊)。

3. 比較「現行執照基準」與「再評估」的水災機制分析結果

針對各個水災因子，評估現行設計基準的洪水高度和再評估的洪水高度，需說明如何以 USNRC (2012)附錄 4 的結果進行判定(即，建議事項 2.3 水災履勘視察)。若現行設計基準足以應付再評估後的所有水災機制，需說明判定之依據。

4. 期中評估及措施

必要時，在完成下述的綜合評估之前，應進行期中評估，以及為解決超出設計基準的水災危害而採取或預計採取之措施。

5. 其他措施

除了上述第 4 點之外，若有其他為解決水災危害而採取或規劃的其他措施則在此說明。

(二)第二階段報告需提供資訊

USNRC (2012)要求未通過第一階段之核電廠需進行綜合評估，然而 USNRC (2015)則改以分級的方式決定進行綜合評估之必要性，NEI 16-05 (2016)提出水災影響評估程序 (Flooding Impact Assessment Process, FIAP)將第一階段的水災再評估結果，依據「水災機制(flood mechanism)」、「防洪(flood protection)」和「洪災消滅(flood mitigation)」劃分 5 種路徑(等級)，並明訂不同路徑需進行的事項及需依循之相關導則，以供核電廠完成最終水災危害評估報告，如圖 1-1 和表 1-1 所示。

FIAP 建立之目的在於利用水災再評估的相關成果(例如，減災策略評估(Mitigating Strategies Assessments, MSAs))，以利後續進一步的改善和制訂策略。路徑 1 至路徑 3 屬於重點評估(focused evaluation)，並且 USNRC 接受以此代替 10 CFR 50.54(f)信函要求之綜合評估。另一方面，路徑 4 和 5 則需進行綜合評估。

初步評估程序(initial evaluation process)為 FIAP 中的關鍵步驟，目的在於確立需進一步探討的水災機制，程序可分為 4 個部分：「增進水災評估真實性(improve realism of flood hazard evaluation)」、「水災參數特性(characterization of flood parameters)」、「水災影響和防護初步評估(initial evaluation of flood impacts and protection)」和「決定合適路徑(determination of appropriate process path)」。

1. 增進水災評估真實性(Box 2)

針對超出設計或執照基準的水災機制之保守性假設、輸入參數和方法(assumptions, inputs and methods, AIMS)，需重新審視其保守性。保守性的評估方式如下：1. 將 AIMS 應用於重大的歷史水災事件，透過與觀測值的比較確認其保

守程度；2. 透過文獻回顧的方式確認輸入參數的合理性，以及對特定區域的適用性；3. 專業人員審查。

評估流程依據核電廠是否要以替代方法(alternative methods)重新進行評估分為三種情況：

- (1) 不以替代方法重新進行評估(Box 2-3)：將通過 USNRC 審核的水災危害再評估報告中超出設計基準之水災機制進行影響評估程序(Impact Assessment Process, IAP)。
- (2) 以替代方法重新進行評估的可能性 1(Box 2a-2b-2c)：以替代方法將水災危害再評估報告中超出設計基準之水災機制進行重新評估(Box 2a)，並可證明其未超出設計或執照基準(Box 2b，通過)的情況下，則無須再進行其他步驟，直接歸屬路徑 1(Box 2c)。
- (3) 以替代方法重新進行評估的可能性 2(Box 2a-2b-3)：以替代方法將水災危害再評估報告中超出設計基準之水災機制進行重新評估(Box 2a)，但仍超出標準(Box 2b，未通過)，則需訂定不同評估路徑(路徑 2 至路徑 5)所需之新參數(Box 3)。

2. 水災參數描述(Box 3)

為了 FIAP 後續的評估，需在此針對不同水災機制彙整評估所需之水災參數，包含「水災高度以及相關影響」、「水災歷時，包含警戒時間和警戒水位」、「廠區於水災期間的運轉模式」和「水災危害再評估中的其他相關廠區特性因子」，可參考表 1-2。

3. 水災影響和防護初步評估(Box 4)

此步驟分為「評估水災對廠區狀態之影響 (Assess Flooding Impact on Plant Conditions)」和「確認容許餘裕 (Determination of Available Physical Margin (APM))」，共兩個步驟。

評估水災對廠區狀態之影響可分為三個步驟，分別為關鍵 SSCs 的確認、防洪功能和水災影響，如表 1-3 所示。需要注意到，此步驟與減災策略評估(MSA)的部分內容相同，核電廠可引用完成的 MSA 進行說明。

防洪包含(臨時)被動或主動防護功能，藉以達到防止或控制洪水影響關鍵 SSCs 的區域以維持關鍵安全因子(Key Safety Factors, KSFs)。針對不同的水災機制，廠區可能需採取不同的防洪方式。對於每個超出設計基準的水災機制，皆

須評估其防洪功能。評估方式為確認防護關鍵 SSCs 的容許餘裕(available physical margin, APM)，而 NEI 16-05 (2016) 附錄 B 提出 4 種方式確認是否有足夠的 APM：

- (1) 若可確保水災再評估採用的輸入參數、假設和(或)方法是保守的，則可接受 APM 極小的情況。
- (2) 在可接受的參數上限和下限之間，對關鍵輸入參數進行敏感度分析。
- (3) 特定輸出參數(例如洪峰高程)中的潛在誤差可從觀察到的模型校正資料進行估算，並用於量化「足夠的 APM」。
- (4) 其他政府訂定的規範，可以用來證明具有「足夠的 APM」。

4. 決定合適路徑

依據初步評估程序之結果(即上述之第 1 點至第 3 點)，決定各水災機制在後續評估需採用之路徑，如表 1-4 所示。

5. 路徑 1：證明水災機制皆未超出設計標準

當所有水災機制均在設計安全範圍內時，無須進行額外的評估。但須整合所有水災因子，說明 13 項水災特性，

如表 1-2 所述。

6. 路徑 2：證明能有效防洪

需證明防護設施能保護關鍵 SSCs，並進一步證明防護是有效且可靠的，評估方式如表 1-5 所示。

7. 路徑 3：證明對局部強降雨可行之水災應變

此步驟僅限於水災機制為超越設計基準之局部強降雨，闡述其依據 NEI 12-06 (2015)附錄 G 所制定的可行應變(實施多樣性與彈性因應對策導則(Diverse and Flexible Coping Strategies (FLEX) Implementation Guide))策略制訂減災策略。

8. 路徑 4：證明減災有效性

除 LIP 以外的水災機制在超過設計基準的情況下，且僅以防洪方式不足以確保廠區的安全性。為了能維持或恢復 KSFs，核電廠需要制訂減災策略，並確認其有效性，執行步驟如表 1-6 所示。

除此之外，評估需包含以下關鍵要件：

- (1) 詳細說明策略、所需設備和(或)採取措施。
- (2) 以時間軸的方式說明實施行動或對策之必要人為操作，

包含：提示訊號(cues)、關鍵指引(key indications)和廠區通報。

- (3) 評估主動設備的可靠度。應確定減災所需的設備並考慮適用性的相關影響。主動設備的可靠度應考量洪水延時、設備的預期有效性、消耗品的有效性、消耗品的補充方式(若需要)，以及被動 SSCs 在外水條件下運作的能力。
- (4) 評估整體減災對策之人為操作的適當性。
- (5) 探討水災嚴重度之可能性。

9. 路徑 5：情境法

(1) 目的

情境法評估之目的在於說明：1. 在高重現期之水災情境條件下，廠區具備有效的防護策略；2. 在低重現期之水災情境條件下，廠區具備可行的減災應變策略，其流程如圖 1-2 所示。

(2) 情境開發與描述(Box 11a)

建立及定義水災情境廠區的配置和水災機制特性有關。為了能以適當的評估擬定之策略，以下為水災情境需

具備之考量要素：

- A. 入侵關鍵 SSCs 區域的洪水高度。
- B. 預期造成廠區影響的高度，以致無法採取維護 KSFs 之措施。
- C. 防洪設施的高度。
- D. 減災策略失效的高度。
- E. 水災機制特定參數(例如：潰壩參數)。
- F. 其他相關廠區資訊。

(3) 識別有效防洪情境(Box 11b-11c)

此處採用與路徑 2 相同之評估方式說明能有效的進行防洪，並能保護 SSCs，如表 1-5 所示。

(4) 決定合適情境的評估方式(Box 11d)

針對無法有效防洪之水災情境需決定合適的評估方式，方式可分為兩種：1. 對於發生機會較大的水災情境(重現期為 1,000 年至 10,000 年)，需說明廠區具備「適當的水災應變策略(adequate flood response strategy)」。

一般來說，此情境相當於使關鍵 SSCs 失效的最低水位高度；

2. 對於發生機會較小的水災情境，則需說明廠區具「可行的水災應變策略(feasible flood response strategy)」° 另一方面，對於具有有效防洪之水災情境，則需評估其重現期，但無須進行額外的評估。

(5) 闡述可行之應變策略(Box 11e)

根據步驟(4)之評估結果，依照 NEI 12-06 的 FLEX 對策制訂可行之應變對策。

(6) 闡述有效之減災策略(Box 11f)

根據步驟(4)之評估結果，針對減災策略能有效維持 KSFs 之水災情境，說明其有效策略。評估其有效性之方式與路徑 4 的步驟相同，如表 1-6 所示。

(7) 識別具潛力之改善策略(Box 11g)

根據步驟 1 至步驟 6 的評估結果，決定是否需進一步改善策略。以下列舉 5 種可能的改善方式：

A. 變更程序，將進入(entry)、命令(command)及控制(control)和(或)水災措施導則(flood action guidance)明確化

- B. 預先放置泵和(或)其他設備
- C. 強化臨時防護
- D. 永久設置屏障或調整防護以提升可靠度
- E. 修改策略以包含確認性措施(confirmatory actions)

(三)水災機制評估要點

此小節摘錄 USNRC (2012)之部分內容，目的為彙整評估不同水災機制所需注意之事項和相關導則。

1. 水災評估導則

USNRC 法規要求充分保護對核電廠與安全有關的結構物、系統、組件(SSCs)，使其免受水災的不利影響。USNRC 工作人員在導則文件 USNRC NUREG-0800 (2007)和 USNRC NUREG/CR-7046 (2011)中探討水災危害評估方法。

The NRC regulations require that structure, systems and components (SSCs) important to safety of a nuclear power plant are adequately protected from the adverse effects of flooding. The NRC staff discusses the approach for determining the flood hazard for new reactors in its current guidance documents, NUREG-0800 and NUREG/CR-7046.

2. 階層式危害度評估方法

階層式危害度評估(Hierarchical Hazard Assessment,

HHA)為針對特定場所的危害評估逐步完善的方法，它以與現有數據一致的最保守且合理的假設來評估場所的安全性。HHA 可分為以下三個步驟：首先，透過回顧歷史資料和廠址附近的地質水文、地震和結構破壞現象找出水災成因。接著，針對各種水災，以保守簡化的方式進行評估。最後，若有任何安全有關的 SSCs 受水災危害，則採用更貼近實際的資料再次進行評估；若無，則將最嚴重的危害訂為設計基準。

This step of the process reiterates the current hierarchical hazard assessment (HHA) used by U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC) staff. The HHA is described as a progressively refined, stepwise estimation of the site-specific hazards that evaluates the safety of the site with the most conservative plausible assumptions consistent with available data.

3. 不同水災機制評估要點

(1) 局部強降雨(Local Intense Precipitation)

- A. 應將所有主動排水系統視為無法運行。
- B. 應忽略徑流損失以最大化徑流。
- C. 應慎選影響水深和流速的水力參數，並且這些參數應與標準工程方法中所用之值一致。

(2) 溪流及河川氾濫(Flooding in Streams and Rivers)

- A. 應考慮於該地點所在流域的可能最大降雨(PMP)，以此確定該地點附近河流中可能發生的最大洪水(PMF)。
- B. 美國國內區域的 PMP 需透過 HMR 和合適的區域報告進行估算。
- C. 需要基於地形和排水系統網絡特徵和集水區性質的降雨-徑流轉換函數以及徑流特徵，藉此建立適當的 PMF 流量歷線。
- D. 美國陸軍工程兵團的水文和水力方法在工程方法中被廣泛接受。

(3) 潰壩(Dam Breaches and Failures)

- A. 應評估該地點因上游大壩破壞而造成的洪水波，包括 domino 型或梯級壩故障。
- B. 應評估可能位於(或高於)與安全相關之 SSC 的儲水和其控制結構(例如：現場冷卻或輔助水庫和堤壩)。
- C. 應評估其他影響土堤的因素，例如：泥沙。
- D. 應適當的確認採用之模型。

(4) 暴潮(Storm Surge)

A. NOAA 技術報告提供最大可能颱風造成風場之評估方法。

B. 將風場參數作為水動力計算模型的輸入資料，可進行暴潮之計算，但其方法、資料和模型之採用將依廠址環境條件而有不同。

(5) 盪漾(Seiche)

對於具有不規則幾何形狀和變動水深的海灣和湖泊，長波數值模型可能是目前唯一可行的方式。

(6) 海嘯(Tsunami)

階層式的評估方式(即，HHA)，依序為：「區域」受海嘯影響的敏感性，「廠址」受海嘯影響的敏感性，和特定危害的評估(例如：取水口)。

(7) 冰引致水患(Ice Induced Flooding)

目前並無評估的方法，只能以歷史記錄進行評估，故需確保評估的保守性。

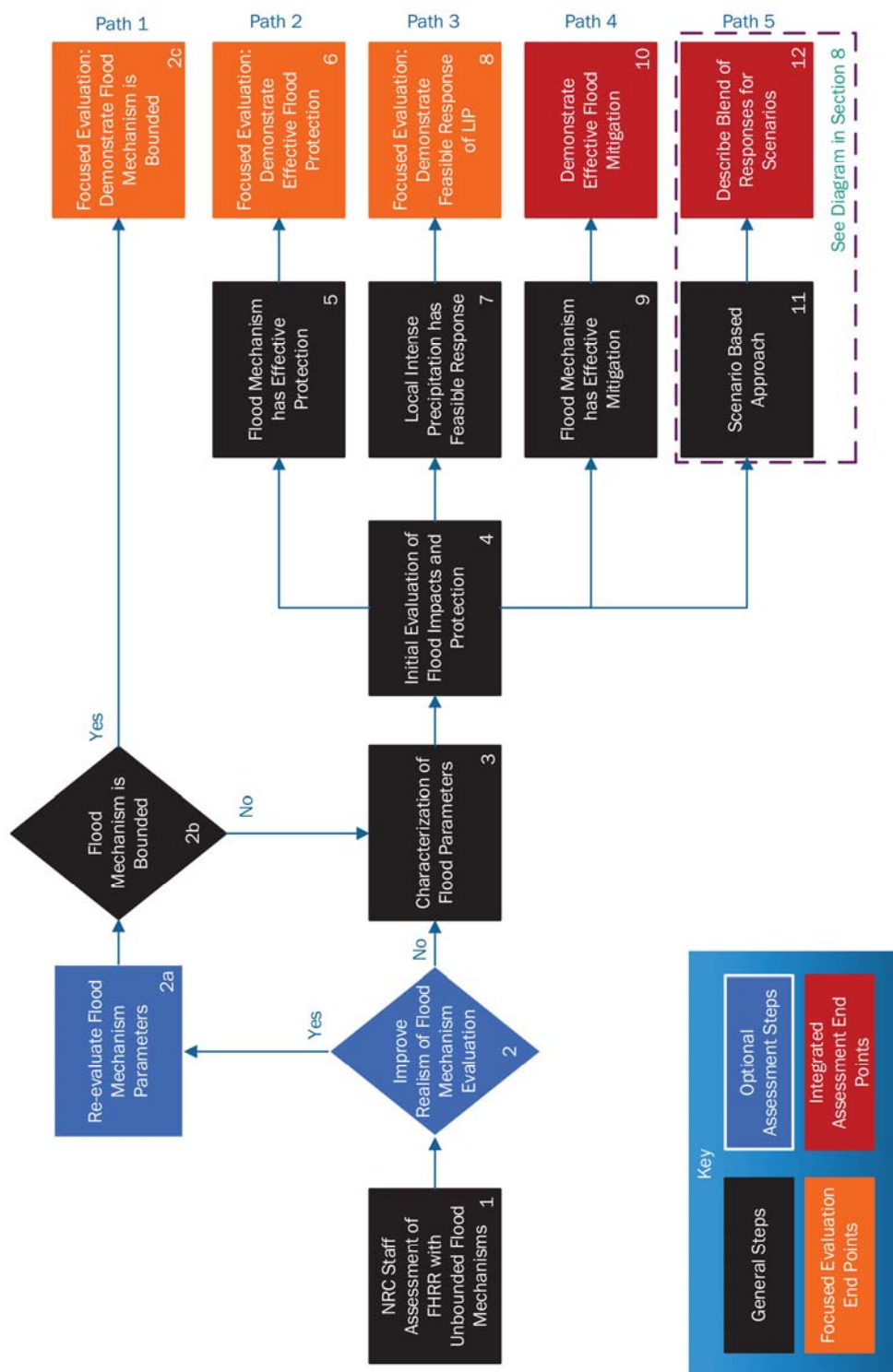
(8) 河道變遷(Channel Migration or Diversion)

A. 應回顧鄰近廠址自然河道的歷史和地貌變化過程，藉此瞭解可能的變化趨勢。

- B. 應考慮用於輸送廠址用水的人造渠道、運河或導流結構毀損的可能性。

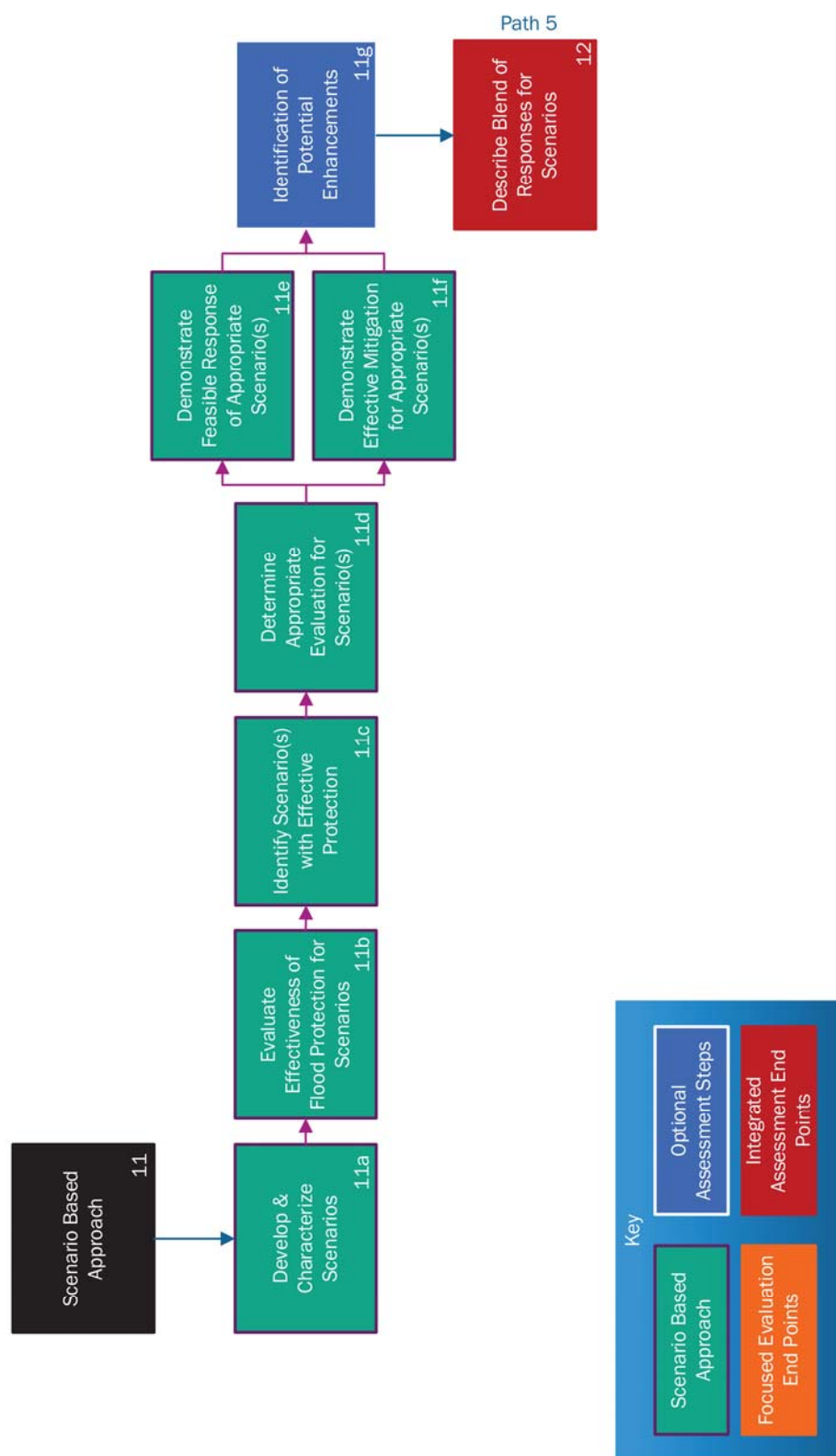
(9) 複合影響(Combined Effect Flood)

- A. 需依照 ANS-2.8 (1992)考慮複合式水災情境。
- B. 除了 ANS-2.8 (1992)所述之情境外，根據特定地點考慮其他合理的複合情境，並需考量其他水災機制和地點的影響。



(資料來源：NEI 16-05 (2016))

圖 1-1 水災影響評估程序(FIAP)



(資料來源：NEI 16-05 (2016))

圖 1-2 情境法(路徑 5)的評估程序

表 1-1 水災影響評估路徑之要點

路 徑	評估程度	評估事項	相關導則
1	水災危害評估	水災機制參數	NEI 16-05 (2016) 附錄 A
2	有效防洪	容許餘裕	NEI 16-05 (2016) 附錄 B
		防洪功能可靠度	NEI 16-05 (2016) 附錄 B
		廠區整體應變能力	NEI 16-05 (2016) 附錄 C
3	局部強降雨引致水 災的可行之應變(防 護和(或)減災)	防護功能和減災設 備可靠度	NEI 12-06 (2015)
		人為操作的可行性	
4	有效洪災消滅	減災設備可靠度	NEI 16-05 (2016) 附錄 B
		廠區整體應變能力	NEI 16-05 (2016) 附錄 C
5	情境法 (混合式應變)	多方面	多方面

表 1-2 水災機制參數說明

		水災機制參數	說明
水災程度及相關影響	1	最大靜水位高	提供適當的單位(units)和基準(datum)
	2	最大波浪溯升高	提供適當的單位(units)和基準(datum)
	3	最大水動力/土砂載重	探討防洪屏障因動水(flowing water)和土砂(debris)所承受的載重
	4	土砂堆積/沖蝕的影響	探討速度和沖刷結果並與 CDB、允許流速和防沖刷材料等的比較
	5	其他相關影響	探討與水災機制相關的其他重要的有害影響，例如土壤沉積
	6	同時存在的條件	探討與水災機制可能同時存在的條件(例如：強風、結冰等)
	7	對地下水之影響	探討地下水是否因水災而發生過飽和，需分析水災持續時間和土壤條件
水災事件歷時	8	警戒時間	探討可能來自於相關預報資料(例如：當地或區域氣象預報)和洪水水位監測發出警示至啟動水災防護警戒所需的時間
	9	廠區預備期	探討水災防護啟動至廠區淹水所需之反應時間
	10	溢淹歷時	探討當洪水水位高於廠區造成溢淹的持續時間
	11	退水歷時	探討洪水完全退去至廠區能無限期安全且穩定運轉所需的時間
其他	12	廠區運轉形態	補充說明廠區運轉形態
	13	其他因子	探討其他廠區因子

表 1-3 評估水災對廠區狀態之影響的分析步驟

分析步驟	說明
1. 識別關鍵 SSCs	識別為了維持關鍵安全因子 (Key Safety Factors, KSFs) 需要保護的關鍵 SSCs。需列表說明 SSCs 在廠區內的位置
2. 防洪功能	識別用以防止洪水影響各區關鍵 SSCs 的防洪功能
3. 水災影響	識別影響關鍵 SSCs 的臨界洪水位，並且需考量靜水壓和動水壓造成之載重
	確認造成關鍵 SSCs 受水災影響的形式(例如，廠區溢淹或建物漏水)
	識別導致關鍵 SSCs 區域積水之可能入水路徑(例如，管流、百葉窗，出入口和溝槽)

表 1-4 水災影響評估程序的路徑判定標準

路徑	描述
1	若可證明所有水災機制參數皆未超出設計基準，則無須再進行其他水災相關策略之評估。
2	若認為超出設計標準的水災可透過防護的方式處理，且可證明具有有效的餘裕空間足以保護關鍵 SSCs。為了能確保成功進行防洪，需證明防護功能(現有和規劃中)的可靠度，以及充分的廠區應變能力。
3	若局部強降雨(Local Intense Precipitation, LIP)為超出設計基準的水災機制，則應依照 NEI 12-06 (2015)制訂可能的減災策略，並採用相關的評估報告(例如，MSA)，藉此達到對 KSFs 的保護和(或)減災。
4	若無法證明廠區面臨超出設計標準的水災機制(LIP 除外)時，廠區能具有有效的餘裕空間、可靠的防護功能和充足的廠區應變能力的情況下，需制定有效的減災策略，透過 SSCs、減災設備和手動操作的方式達到維護或恢復 KSFs。
5	與路徑 4 相似，若無法證明廠區面臨超出設計標準的水災機制(LIP 除外)時，廠區能具有有效的餘裕空間、可靠的防護功能和充足的廠區應變能力之外，亦無法提出有效的減災策略，以及混合策略是最可行的方式的情況下，需制訂多種水災情境，並針對不同情境制訂專屬的因應策略。

表 1-5 防洪有效性之評估步驟

步驟	說明
足夠的容許餘裕 (APM)	評估各項防洪功能是否具足夠的 APM。一般而言，APM 是指「造成防洪功能失效之水災參數」與「再評估後之水災參數」間的差異。可參考 NEI 16-05 (2016)附錄 B 所述之方法確認 APM 是否足夠。
可靠的被動和(或)主動防洪功能	評估防洪功能是否可靠，以防止洪水入侵造成關鍵 SSCs 故障，並需證明防洪功能在水災期間能正常運作。
適當的防洪應變	評估防洪策略的制訂和執行相關的廠區應變是否適當。

表 1-6 洪災消滅有效性之評估步驟

步驟	說明
可靠的洪災消滅功能	評估洪災消滅功能的可靠度，包含恢復或維護 KSFs 的設備。
適當的洪災消滅應變	評估廠區應變(含洪災消滅對策制定與執行)是否合適。

二、 美國核電廠水災危害評估案例研究

全美國核電廠遵照 USNRC 於 2012 年 3 月 12 日的 10 CFR 50.54(f)信函進行核電廠水災危害評估。由於目前國內核電廠皆位於沿岸地區，需要對暴潮、風浪和海嘯之水災機制進行評估。因此，本研究以資料蒐集的方式先檢視美國沿岸核電廠的水災危害評估報告結果，再從中挑選與國內水災機制來源類似之案例，以供國內相關單位參酌。

美國位於沿岸的核電廠共有 9 座，其中 1 座位於西岸，8 座位於東岸，如圖 2-1 和圖 2-2 所示。在提交報告的部分，依據水災危害再評估報告(FHRR)分析結果，核電廠需依各自超出現行執照基準(CLB)之水災機制按照 NEI 16-05 (2016)之指示進行進一步的評估，並提交報告。美國沿岸核電廠經 FHRR 後，需分析之水災機制、所屬評估路徑和提交報告類型彙整如表 2-1 所示。

由於台灣地處環太平洋，故本研究以同樣位於環太平洋的 DCPD 為例進行說明。另一方面，由於 DCPD 的 FHRR 顯示該廠僅有局部強降雨超出標準，且提交之報告為重點評估報告(路徑 2)。為了能進一步瞭解美國核電廠依循 NEI 16-05 (2016)進行之綜合評估報告情況，故再引入 Millstone 核電廠案例進行補充。

(一)DCPP 第一階段 – 水災危害再評估報告

DCPP 依照 USNRC (2012)之要求，於 PG&E (2016)中依序說明「報告背景」、「廠區資訊」、「水災危害再評估」、「比較現行執照基準與再評估的水災機制分析結果」、「期中評估及措施」和「其他措施」。本研究以分別逐一說明各個水災機制的現行執照基準(CLB)和再評估分析結果，以及期中評估及措施和其他措施之步驟之方式，進行此電廠案例之說明。

1. 局部強降雨(Local Intense Precipitation, LIP)

在現行執照基準(CLB)的部分，DCPP 的報告說明建物設計可應付的最大可能降雨(PMP)為 4 in/hr，並且具備溢流孔之設計，以防止雨水積聚，但無說明此條件之源由。

DCPP 依據 USNRC NUREG/CR-7046 (2011)指示進行可能最大降雨之計算(PMP)，並以此作為 LIP 和可能最大溢淹(PMF)之輸入條件。DCPP 參考最新的 Hydrometeorological Reports (HMRs)和 World Meteorological Organization (WMO)手冊，以基於颶風的方式計算 SPMP (Site-specific PMP)，以提升 LIP 的精確度。最終，DCPP 採用 14 場歷史颶風事件(圖 2-3)，並以此計算 SPMP 和 LIP，如表 2-2 所示，得到 1

小時 LIP 的計算結果為 4.5 in/hr，對應之重現期為 1.29 億年(USNRC (1994)建議重現期採用 10 萬至 10 億年)。

評估的方式是採用 HHA 方法(USNRC NURGE/CR-7046, 2011)，並以水動力模式(FLO-2D)，在假設所有排水設施失效和無逕流損失的情況下(符合 HHA 的保守原則，以及 10 CFR 50.54(f)信函之要求)，將歷史事件以 SPMP (Site-specific PMP)方式計算廠區的 LIP，並以此獲得不同時區間(0.25, 0.5, 0.75, 1, 2, 3, 4, 5, 6 小時)的 Site-specific LIP(表 2-3)。此外，考量了 5 種不同雨型之可能性(表 2-4)，藉此獲得對廠區影響最大之雨型。圖 2-4 為廠區的最大水深分布，結果顯示部分地區會發生溢淹(超出門檻值達 0.05 ft 至 0.68 ft)，並需建立減災的方法。LIP 溢淹造成之水載重並不會對廠區造成安全上的影響。

由於 FLO-2D 分析結果顯示 LIP 可能造成廠區部分區域溢淹，故 DCPD 需於 FHRR 說明期中評估及措施。為此，DCPD 進行 LIP 減災評估。透過 FLO-2D 分析發現，無論如何調校地形及增設排水設施皆無法完全減緩溢淹的結果。因此，依照 USNRC (2014)中的 FAQ-033 和 USNRC (2013)

中的 FAQ-031 指示，進行臨時減災措施。臨時減災措施以「氣象預報」和「臨時性屏障(沙袋)」之方式因應。

2. 溪流及河川氾濫(Flooding in Streams and Rivers)

於 CLB 中，可能最大洪水(probable maximum flood, PMF)是藉由可能最大降雨(PMP)持續在目標區域降雨達 24 小時所得(16.6 in)。PMF 的評估乃假設有較大的地表逕流，所有涵洞(culverts)皆被堵住，並且洪水僅沿唯一的河川(Diablo Creek)流動。結果顯示，最靠近廠區的水位高度為 6 ft，低於廠址高程。

於再評估中，PMP 依照 USGS NUREG/CR-7046 (2011) 的 HHA 方法進行評估，評估結果顯示 24 小時的 PMP 為 18.2 in。雖然再評估後的 PMP 超過 CLB 的 PMP。但後續以水文模型(HEC-HMS)和水理模型(HEC-RAS)進行 PMF 的分析後，結果顯示最靠近廠區的水位高度為 8 ft，依舊低於廠址高程，故評估結果顯示為安全。

3. 潰壩(Dam Breaches and Failures)

DCPP 無此水災機制造成危害之可能性。

4. 暴潮(Storm Surge)

於 CLB 中，DCPP 以三維水工模型試驗的方式，探討波高、波向、溯升高、水載重和波浪飛濺在取水建物上之影響。結果顯示，防波堤外的波高最大為 45 ft，且取水處的波高達到最大值。

於再評估中，DCPP 以數值模式(Simulating WAVes Nearshore, SWAN)模擬的方式，在考量超越機率 10%的高潮位條件下，計算暴潮及波浪和盪漾(風和波)之影響，以此決定可能最大暴潮(probable maximum storm surge, PMSS)。分析的結果顯示防波堤外的最大波高為 44.6 ft，防波堤內最大波峰波高為 12.8 ft。除了防波堤外的最大波高低於 CLB 的設計之外，再評估分析之防波堤內最大波峰高度亦小於當前的海嘯設計高度(34.9 ft)，故評估結果顯示為安全。

5. 盪漾(Seiche)

於 CLB 中，盪漾被視為暴潮影響的一部份。另一方面，原水水庫(raw water storage reservoir, RWSR)考量盪漾的影響，結果顯示不會造成大量的水體損失。

於再評估中，DCPP 開發數值模型進行分析，結果顯示

水體晃動的最大高度約為 2 ft，RWSR 的最大預期水量損失為 14,684 加侖。然而，由於 RWSR 的儲水量為 250 萬加侖，且僅需 100 萬加侖即可正常運轉，故盪漾造成之水量損失不影響安全性。

6. 海嘯(Tsunami)

於 CLB 中，DCPP 考慮之海嘯源為遠域(環太平洋地震帶的大型隱沒帶)和近域(鄰近海底斷層)海嘯，並以歷史經驗和研究分析的方式進行評估。

於再評估階段，DCPP 按照 HHA 之方式(USGS NURGE/CR-6966, 2009)，評估地震、海底山崩和火山作用的「歷史資料」和「模擬研究」後，選定遠域海嘯(4 個環太平洋地震帶上的大型隱沒帶，距離最遠為日本隱沒帶)和近域海嘯(2 個斷層、2 個海底山崩，以及 1 個海底山崩事件伴隨斷層地震)，以數值模擬的方式進行分析。在地震型海嘯方面，以二維海嘯模式(FUNWAVE-TVD)搭配地震型海嘯初始水位分布模型(Okada, 1985)。在海底山崩引致海嘯方面，則以 FUNWAVE-TVD 搭配高精度的數值模型(NHWAVE)模擬海底山崩的海嘯生成。

在海嘯溯升和溯降的評估方面，前者同時考慮超越機率 10%的高潮位條件(USNRC NUREG/CR-6966, 2009)和海平面上升量(USNRC JLD-ISG-2012-06, 2013a; USNRC NUREG/CR-7046, 2011)，後者則同時考量超越機率 90%的低潮位條件(NUREG/CR-6966, 2009)。

此外，在最嚴重的情境建立後，則又更進一步考慮了部分防波堤毀損之情形。即便如此，CLB 與再評估之結果相比，在取水設施附近水位高度、取水設施後方最大溯升高和取水設施最大溯降等方面，再評估之結果皆顯示廠區之現況是安全的。再評估於取水設施附近的水位高度分析結果為 32.8 ft，低於 CLB 的 34.9 ft；於取水設施後方最大溯升高的部分，再評估之結果為 62.3 ft (CLB 無考慮此因子)，因防侵蝕之措施足以抵擋沖刷，故評估為安全；在最大溯降的部分，CLB 的最大溯降為-8.7 ft，而再評估之結果為-15.7 ft。然而，由於取水設施的最低運作水位為-17.1 ft，故評估結果仍為安全。

除了海嘯造成之水位變動評估之外，再評估亦對其造成之水動力、殘骸衝擊力和土砂載重，以及泥沙傳輸進行評

估，評估結果皆顯示現況安全。

7. 冰引致水患(Ice Induced Flooding)

DCPP 無此水災機制造成危害之可能性。

8. 河道變遷(Channel Migration or Diversion)

DCPP 無此水災機制造成危害之可能性。

9. 複合影響(Combined Effect Flood)

於 CLB 中，DCPP 探討海嘯、颶風波浪、暴潮、防波堤降低至平均較低低潮位(MLLW)和潮汐之複合影響。透過水工試驗模型的方式，探討兩種不同的複合式情境：(a)颶風波浪、暴潮和潮汐，以及(b)海嘯和颶風波浪。

再評估分析則依據 USNRC NUREG/CR-7046 (2011)附錄 H 之指示考量不同的複合式情境，情境分為三大類：降雨事件造成之水災、沿岸水災和海嘯造成之水災。這三大類分別於溪流及河川氾濫、暴潮和海嘯的評估時進行考量。

(二)DCPP 第二階段 – 重點評估報告

在第一階段(FHRR)的分析中發現 DCPD 面對再評估之 LIP 時，會有安全上的疑慮。因此，DCPD 需在第二階段依照 NEI 16-05 (2016)指示進行評估，採取相對應的措施，故提交 PG&E (2017)報告。

DCPD 依照 NEI 16-05 (2016)提出之 FIAP 的初步評估程序，以 2D 模式(FLO-2D)對洪水進入建物的路徑和水量進行更細部的分析，結果顯示廠區溢淹深度最高達 1.01 ft，持續時間最長為 8.80 小時。此評估程序和結果可對應 FIAP 程序：進行增進水災評估真實性(Box 2)、重新評估水災機制參數(Box 2a)、水災機制仍未能滿足標準(Box 2b)、進行水災參數描述(Box 3)，以及水災能有效的防護(Box 5)，故 DCPD 需進行重點評估(Focused Evaluation, FE)：證明能有效防洪(路徑 2)。

DCPD 進行「容許餘裕(APM)」和「被動和(或)主動防洪功能」的分析。APM 和防洪功能的分析是假設 LIP 發生期間，廠區附近的水位維持在最高水位的情況下，以及不考慮入滲(infiltration)和逕流損失(runoff losses)且內部及外部排水失效(部分除外)的保守條件，分析結果顯示 APM 為 0.9 in。

依照 NEI 16-05 (2016)附錄 B 所述，若可確保水災再評估

採用的輸入參數、假設和(或)方法是保守的，則可接受 APM 極小的情況。另一方面，由於 APM 和防洪功能皆滿足 NEI 16-05 (2016)之要求，故不需進行廠區防洪應變的評估。

(三)Millstone 核電廠第二階段 – 重點評估和綜合評估報告

Millstone 核電廠有 2 號機和 3 號機，FHRR 分析結果指出 2 和 3 號機在「海嘯」和「暴潮」之再評估結果未能符合安全標準，分別屬於 NEI 16-05 (2016)定義之重點評估(路徑 2)和綜合評估(路徑 5)的範疇。此外 2 號機於「局部強降雨」則需進行重點評估(路徑 3)。

LIP 和海嘯評估分別屬於路徑 3 和路徑 2，此兩種路徑最大的差異在於路徑 2 需「證明」APM 為充裕、防護為可靠且廠區應變為適當。另一方面，路徑 3 則需「說明」APM、防災和減災的可靠度、以及可行的廠區應變方式。在 APM 的部分，LIP 和海嘯整體來看最少有 4.5 ft 以上，此外，由於設計變更程序之要求，故可保證防洪或減災設備之可靠度。在防洪應變方面，依照 NEI 16-05 (2016)附錄 C 分別對 LIP 和海嘯進行分析，主要說明制訂防護對象及方式、建立及說明具時效性反應措施(Time Sensitive Actions, TSAs)的可行性、規劃反應時

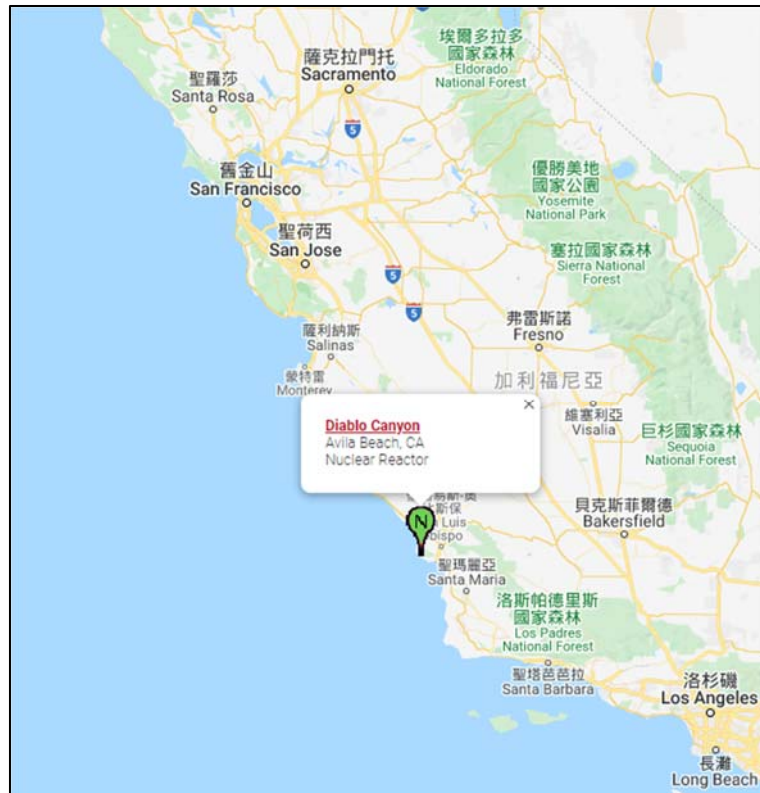
間表、規劃應變措施之啟動方式及條件，以及未來的環境條件對水災事件可能造成之影響。

在重要設施的安全性方面，若雨水滲入 2 號機所屬抽水站則可透過排水系統排除，且其重要設施(抽水馬達)位於 21.7 ft 處。另一方面，海嘯最大溯升高達到 14.7 ft，超出 2 號機取水設施基礎高程 0.7 ft，以及 3 號機取水設施基礎高程 0.2 ft。但 2 號機和 3 號機取水站的重要設施(抽水馬達)分別位於 21.7 ft 和 25.5 ft 處。因此，LIP 及海嘯的 APM 評估結果皆顯示其充足。

在防洪應變方面，當降雨預報(local weather forecasts, CAENS, or CONVEX)顯示未來 12 小時會出現 6 小時內超過 3 inch 的降雨時，Millstone 核電廠可在 5 小時內(約有 7 小時的餘裕時間)完成規劃之防洪措施。另一方面，當海嘯警報發佈(CAENS and/ or CONVEX)時，Millstone 核電廠需在 8 小時內(海嘯預計抵達所需時間)完成防洪措施。2 號機和 3 號機的準備時間分別約為 5 小時和 2 小時。因此，無論是 LIP 及海嘯的防洪應變皆顯示其可行。

暴潮的評估則是透過情境法制訂重現期較小(1 萬年)和重

現期較大(10 萬年)的情境條件，並分別制訂出能有效防護和可行的應變及減災措施，相關之水災參數如表 2-5 所示。接著，需針對此兩種情境分別說明其 APM、防災和減災的可靠度、以及可行的廠區應變方式。值得一提的是當面對 10 萬年重現期的情境時，Millstone 核電廠分析結果顯示 APM 和防洪措施足以保護 SSCs，但並無法確保輔助飼水(auxiliary feedwater, AFW)相關設備的安全性。因此，對此情況 Millstone 核電廠設想兩種情況(AFW 失效(Loss of AFW)和無法供水(Loss of Service Water))以及其應對策略。第一種情況參照 NEI 12-06 (2015)的 FLEX 策略，透過 BDB AFW 泵取代失效的 AFW；第二種情況則是由於取水設施淹水的情況，需制訂不同水位高度的應對策略、視取水設備在積水退去後是否能恢復而採取不同的因應策略，並制訂維護 KSFs 之方式。



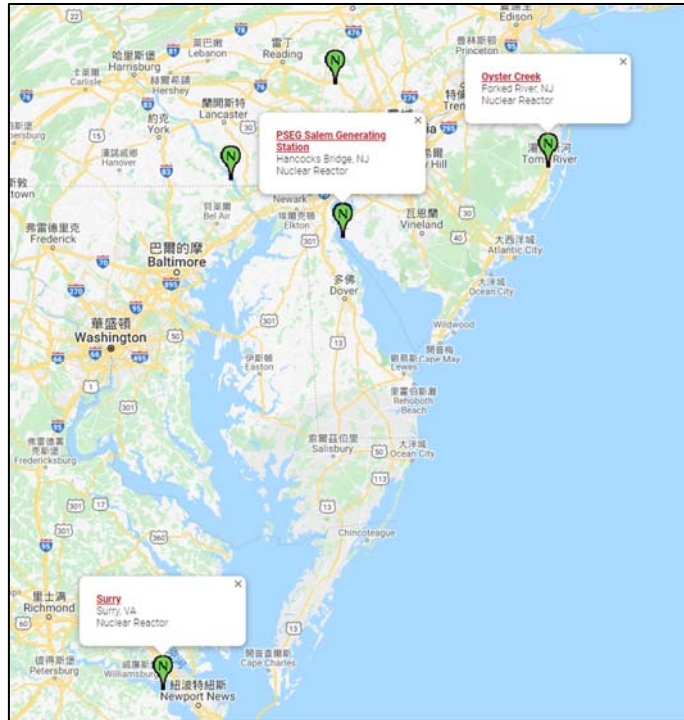
(資料來源：Energy Justice Network (<http://www.energyjustice.net/map/nuclearoperating>))

圖 2-1 美西沿岸核電廠



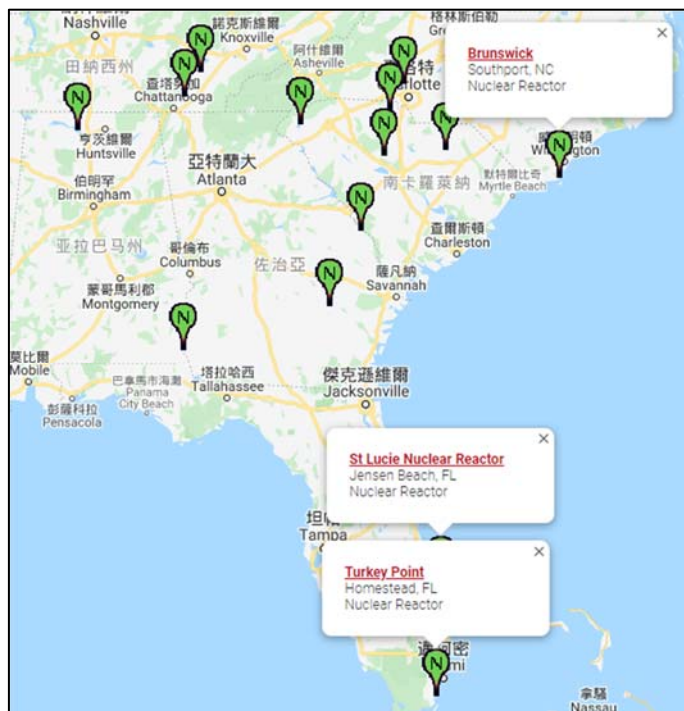
(資料來源：Energy Justice Network (<http://www.energyjustice.net/map/nuclearoperating>))

圖 2-2 美東沿岸核電廠



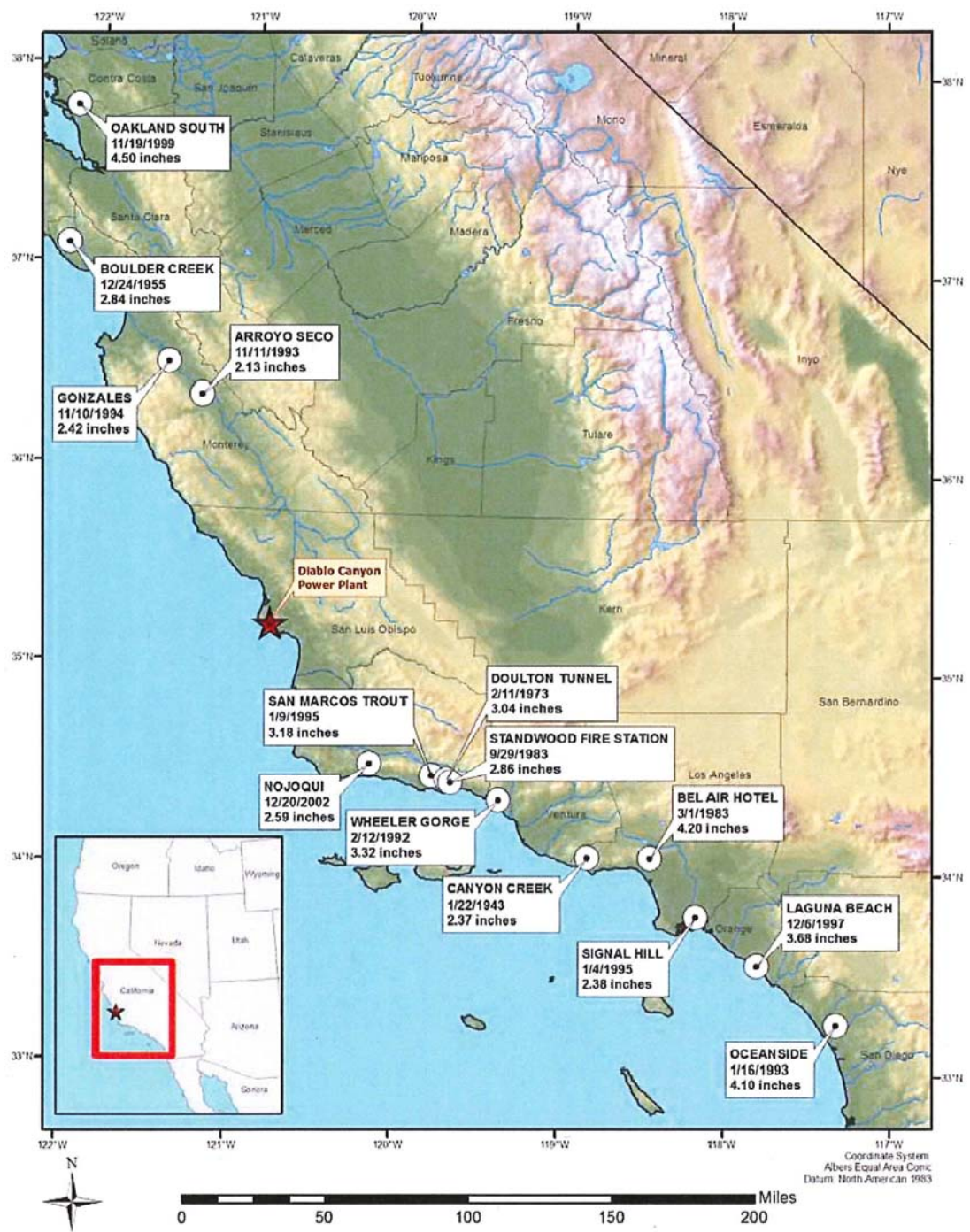
(資料來源：Energy Justice Network (<http://www.energyjustice.net/map/nuclearoperating>))

圖 2-2 美東沿岸核電廠(續)



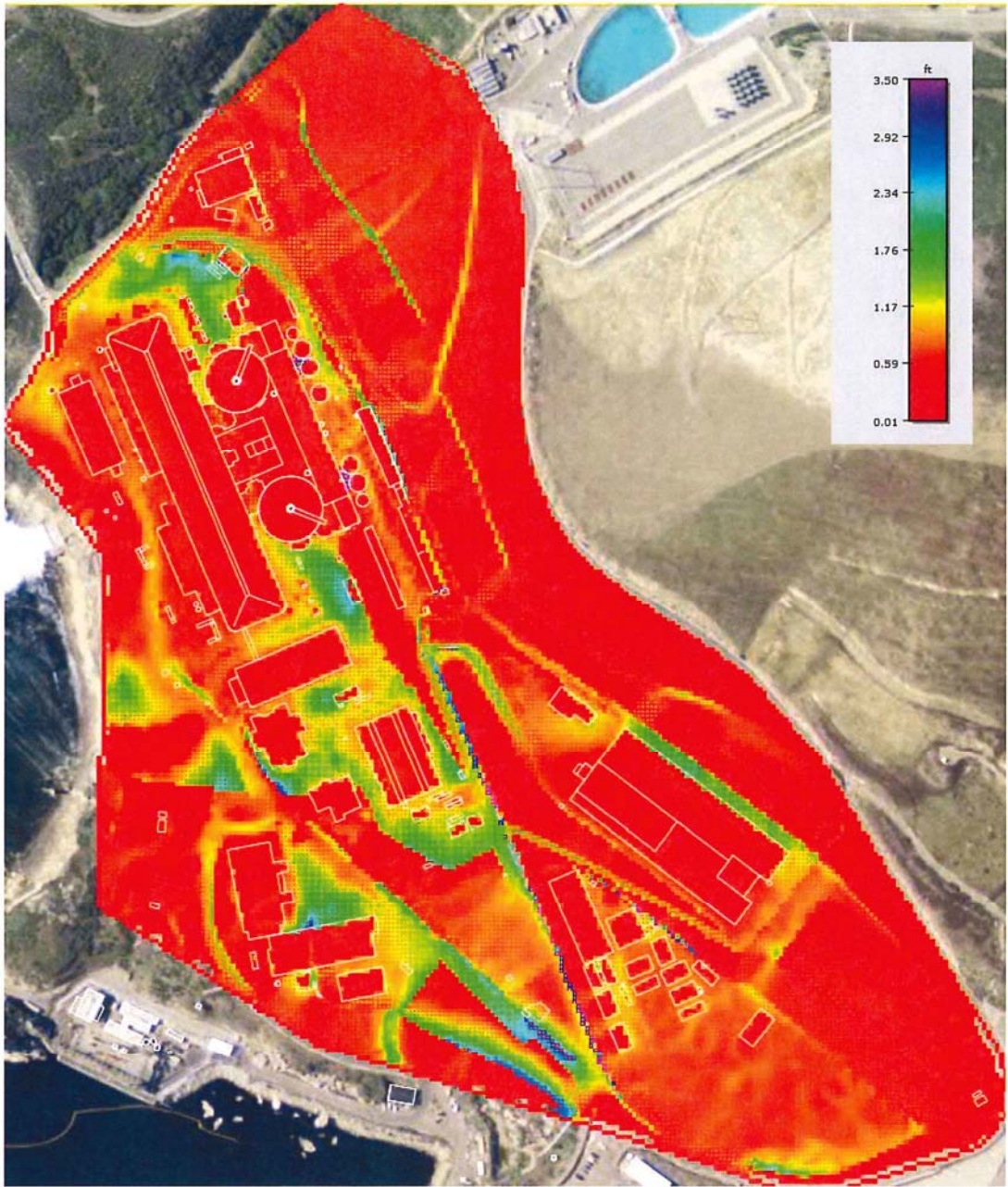
(資料來源：Energy Justice Network (<http://www.energyjustice.net/map/nuclearoperating>))

圖 2-2 美東沿岸核電廠(續)



(資料來源：PG&E (2016))

圖 2-3 DCPD 計算 LIP 採用之歷史颶風事件



(資料來源：PG&E (2016))

圖 2-4 LIP 造成 DCPP 之最大水深分布(ft)

表 2-1 美國東岸及西岸的沿岸核電廠依 NEI 16-05 (2016)規定需進行之水災機制評估和提交報告

核電廠 [地點]	FHRR 評估超出 CLB 之水災機制 [需進行的評估路徑]	提交報告類型
Seabrook [新罕布夏]	局部強降雨 [路徑 2]、暴潮 [路徑 2]	重點 評估
Oyster Creek [新澤西]	局部強降雨 [路徑 2]、暴潮 [路徑 2]	
PSEG Salem Generating Station [新澤西]	局部強降雨 [路徑 2]	
Brunswick [北卡羅來納]	未公開	
St Lucie Nuclear Reactor [佛羅里達]	局部強降雨 [路徑 2]	
Turkey Point [佛羅里達]	局部強降雨 [路徑 2]、暴潮 [路徑 2]、盪漾 [路徑 2]、海嘯 [路徑 2]	
Diablo Canyon [加利福尼亞]	局部強降雨 [路徑 2]	
Millstone [康乃狄克]	局部強降雨 [路徑 3]、海嘯 [路徑 2]、暴潮 [路徑 5]	綜合 評估
Surry [維吉尼亞]	局部強降雨 [路徑 3]、潰壩 [路徑 2]、暴潮 [路徑 4]	

表 2-2 DCPD 採用之颶風事件，以及 SPMP 和 LIP 之結果

(資料來源：PG&E (2016))

Station Name	State	Lat	Lon	Year	Mon	Day	Maximum 1-hour Rainfall	DCPD Total Adjustment Factor	DCPD 1-hour LIP
OAKLAND SOUTH	CA	37.7830	-122.1500	1999	11	19	3.26	1.38	4.50
BEL AIR HOTEL	CA	34.0860	-118.4550	1983	3	1	3.00	1.40	4.20
OCEANSIDE	CA	33.2560	-117.3200	1993	1	16	2.95	1.39	4.10
LAGUNA BEACH	CA	33.5510	-117.8000	1997	12	6	2.50	1.47	3.68
WHEELER GORGE	CA	34.3670	-119.3830	1992	2	12	2.32	1.43	3.32
SAN MARCOS TROUT	CA	34.4830	-119.8000	1995	1	9	2.15	1.48	3.18
DOULTON TUNNEL	CA	34.4630	-119.7080	1973	2	11	2.25	1.35	3.04
STANDWOOD FIRE STATION	CA	34.4500	-119.6830	1983	9	29	2.40	1.19	2.86
BOULDER CREEK	CA	37.0916	-122.1668	1953	12	24	2.20	1.29	2.84
NOJOQUI	CA	34.5340	-120.1780	2002	12	20	2.09	1.24	2.59
GONZALES	CA	36.5150	-121.5100	1994	11	10	2.09	1.16	2.42
SIGNAL HILL	CA	33.8000	-118.1667	1995	1	4	2.00	1.19	2.38
CANYON CREEK	CA	34.0832	-118.8418	1943	1	22	1.96	1.21	2.37
ARROYO SECO	CA	36.3590	-121.2900	1993	11	11	2.01	1.06	2.13

Rainfall and LIP values are in inches.

表 2-3 DCPD 在不同延時條件下的 LIP

(資料來源：PG&E (2016))

Duration (hours)	DCPD LIP (inches)
0	0
0.25	2.5
0.5	3.6
0.75	4.1
1-hour	4.5
2-hour	5.1
3-hour	5.4
4-hour	5.6
5-hour	5.8
6-hour	5.9

表 2-4 DCPD 在 5 種不同雨型分布的 PMP

(資料來源：PG&E (2016))

Duration (hours)	Front End Peaking		One-Third Peaking		Center Peaking		Two-Third Peaking		End Peaking	
	ILIP* (in)	PLIP**	ILIP (in)	PLIP	ILIP (in)	PLIP	ILIP (in)	PLIP	ILIP (in)	PLIP
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.250	2.475	0.423	0.043	0.007	0.026	0.005	0.006	0.001	0.006	0.001
0.500	3.555	0.608	0.093	0.016	0.054	0.009	0.032	0.006	0.032	0.006
0.750	4.095	0.700	0.173	0.030	0.084	0.014	0.059	0.010	0.059	0.010
1.000	4.500	0.769	0.269	0.046	0.118	0.020	0.086	0.015	0.086	0.015
1.250	4.683	0.801	0.422	0.072	0.161	0.028	0.115	0.020	0.115	0.020
1.500	4.841	0.828	0.605	0.103	0.211	0.036	0.146	0.025	0.146	0.025
1.750	4.994	0.854	1.145	0.196	0.291	0.050	0.177	0.030	0.177	0.030
2.000	5.130	0.877	3.620	0.619	0.387	0.066	0.211	0.036	0.211	0.036
2.250	5.226	0.893	4.700	0.803	0.540	0.092	0.254	0.043	0.246	0.042
2.500	5.318	0.909	5.105	0.873	0.723	0.124	0.304	0.052	0.289	0.049
2.750	5.397	0.923	5.263	0.900	1.263	0.216	0.384	0.066	0.335	0.057
3.000	5.465	0.934	5.399	0.923	3.738	0.639	0.480	0.082	0.385	0.066
3.250	5.515	0.943	5.491	0.939	4.818	0.824	0.633	0.108	0.453	0.077
3.500	5.561	0.951	5.558	0.950	5.223	0.893	0.816	0.139	0.532	0.091
3.750	5.604	0.958	5.604	0.958	5.381	0.920	1.356	0.232	0.624	0.107
4.000	5.639	0.964	5.639	0.964	5.517	0.943	3.831	0.655	0.720	0.123
4.250	5.673	0.970	5.673	0.970	5.608	0.959	4.911	0.839	0.856	0.146
4.500	5.704	0.975	5.704	0.975	5.676	0.970	5.316	0.909	1.009	0.172
4.750	5.735	0.980	5.735	0.980	5.721	0.978	5.474	0.936	1.167	0.199
5.000	5.764	0.985	5.764	0.985	5.757	0.984	5.610	0.959	1.350	0.231
5.250	5.791	0.990	5.791	0.990	5.789	0.989	5.701	0.975	1.755	0.300
5.500	5.818	0.994	5.818	0.994	5.817	0.994	5.769	0.986	2.295	0.392
5.750	5.844	0.999	5.844	0.999	5.844	0.999	5.814	0.994	3.375	0.577
6.000	5.900	1.000	5.900	1.000	5.900	1.000	5.900	1.000	5.900	1.000

* ILIP = cumulative LIP; ** PLIP = Portion of cumulative LIP

表 2-5 Millstone 核電廠暴潮情境的水災參數

		水災機制參數	情境 1 (重現期：1 萬年)	情境 2 (重現期：10 萬年)
水災程度及相關影響	1	最大靜水位高	16.9 ft / 17.5 ft MSL	19.8 ft / 20.9 ft MSL
	2	最大波浪溯升高	37.2 ft MSL (取水設施) 27.6 ft MSL (取水設施內部的最高水位) 17.5 ft MSL (2 號機東側) 19.8 ft (2 號機的西側)	43 ft MSL (取水設施) 31.7 ft MSL (取水設施內部的最高水位) 20.9 ft MSL (2 號機東側) 23.6 ft (2 號機的西側)
	3	最大水動力 / 土砂載重	符合標準	符合標準
	4	土砂堆積 / 沖蝕的影響	極小	極小
	5	其他相關影響	極小	極小
	6	同時存在的條件	無	無
	7	對地下水之影響	極小	極小
水災事件歷時	8	警戒時間	12 – 24 小時	12 – 24 小時
	9	廠區預備期	12 – 24 小時	12 – 24 小時
	10	溢淹歷時	10 小時	9 小時
	11	退水歷時	10 小時	8 小時
其他	12	廠區運轉形態	1, 2, 3, 4, 5, 6	1, 2, 3, 4, 5, 6
	13	其他因子	極小	極小

三、 機率式海嘯危害度分析方法

海嘯的英文為”tsunami”，而這個單字乃源自於日語的「津波」，「津」有海港的意思，「波」則是指波浪，兩個字合在一起則代表對港造成衝擊的波浪(Cartwright and Nakamura, 2008)。海嘯是一種能量集中的重力波，具有較長的週期和波長，波長可達數十至數百公里，週期則介於 5 至 60 分鐘之間(Mofjeld et al., 2000)。由於波浪能量集中的關係，當其撞擊海岸結構物或海港時，會引起海水面的劇烈震盪，進而造成結構物損壞。核電廠因反應爐的散熱需求，多數建於沿岸。因此，在核電廠水災評估中，海嘯評估是重要的一環。

海嘯常以定率式海嘯危害度分析(Deterministic Tsunami Hazard Analysis, DTHA)的方式進行危害度分析，是以海嘯數值模式模擬分析特定地震情境對欲探討地區造成之影響；而機率式海嘯危害度分析(Probabilistic Tsunami Hazard Analysis, PTHA)則考慮各種可能發生的海嘯事件，並且加入模式、地震參數等不確定性因素，推求不同機率下的海嘯超越波高、溢淹範圍等危害度。

PTHA 乃源自於機率式地震危害度分析(Probabilistic Seismic Hazard Analysis, PSHA)發展而來。圖 3-1 為 PSHA(Cornell,

1968)和 PTHA(Downes and Stirling, 2001)的計算步驟，兩者皆分為四個步驟，依序為災害源(Sources)、災害源重現期(Recurrence)、災害衰減(Attenuation)和廠址危害度(Hazard at Site)，如圖 3-1 所示。

以災害源來說，PTHA 除了需考量地震(fault)引致之海嘯外，還需考量海底山崩(submarine landslide)和海底火山作用(submarine volcano)。因此，在災害源重現期的評估上亦需建立這三種不同災害源的重現期。災害衰減部分方面，Downes and Stirling (2001)建立與 PSHA 強地動衰減式類似的海嘯波高衰減經驗式。然而，目前仍以進行水動力模擬的方式獲得之海嘯波高分布為主要的評估方式(例如：Gonzalez et al. (2009); 原子力規制委員会 (2018); PG&E (2010); Thio et al. (2010))。最後，廠址危害度之評估則透過搭配統計方法進一步分析獲得危害度曲線(hazard curve)，該曲線代表海嘯波高超越不同特定高度的發生機率。此外，可再繪製空間上相同超越機率的波高分布，建立危害度地圖(hazard map)。整體而言，PTHA 和 PSHA 的主要差異在於「災害源類型」和「災害衰減評估方法」。

隨著 PTHA 逐步的發展，美國和日本核電廠相關單位的規

範和導則已可見相關內容。NUREG-CR7223 (2016)提到當以定值法評估造成可能最大溢淹(Probable Maximum Flooding, PMF)的主因為可能最大海嘯(Probable Maximum Tsunami, PMT)時，PTHA 能提供更為有用且適當的分析結果。隨著 Gonzalez et al. (2009)在 PTHA 方法上的發展，以 PTHA 進行海嘯危害度評估已為可行。另一方面，目前應用於核電廠的最大挑戰在於重現期較長(一萬至百萬年)之海嘯危害主要來自於崩移所致，然而目前仍缺少足夠的資訊訂定崩移情境的重現期。

NOAA(2007)指出 USNRC 進行核電廠審查時，PTHA 可提供決策者一個貼近現實且具科學依據的評估方式。PTHA 用於地震引致之海嘯已發展出一雛形(應用於 Seaside, Oregon)，並被美國聯邦機構及州政府考慮納入海嘯危害度評估相關事項。ASCE 7-16 (2017)則建議溢淹深度和流速之計算可利用 PTHA 計算外海的海嘯波高作為輸入條件進行細部的二維水動力模擬分析，或是以 PTHA 計算所得之溯升高和溢淹距離作為能量坡降線(Energy Grade Line, EGL)的輸入條件，進行斷面水力分析。

另一方面，日本原子力規制委員會(Nuclear Regulation Authority, NRA)則在審查導則-《基準海嘯及耐海嘯設計方針》

(原子力規制委員会, 2013)中提及 PTHA 評估之要求(許文勝, 2016), 但因審查導則在記載上需避免方法及模型限於一種, 故未記載具體的作法。原子力規制委員会 (2018)則進一步提出地震型海嘯的 PTHA 計算方法, 達到技術上輔助審查導則之目的。

目前美國和日本核電廠相關單位在 PTHA 發展之重要研究成果如下: Gonzalez et al. (2009); Gonzalez et al. (2013)建立地震型海嘯考慮潮位和近域地震滑移分布的不確定性的 PTHA 模型。Thio et al. (2010)同樣是建立地震型的 PTHA, 考量之不確定性包括海嘯數值模擬計算、斷層傾角和滑移分布的不確定性, 並藉由格林函數(Green's function)及逆推海嘯源的方式考量大量(超過 10,000 組)的邏輯樹情境。PG&E (2010)則提出地震型、海底山崩型的 PTHA, 並將颱風波浪和潮汐視為災害源進行評估。不確定性的部分則考量了震源位置、斷層傾角和滑移分布, 並搭配邏輯樹情境進行分析。原子力規制委員会 (2018)則針對地震型 PTHA 進行更為細緻的探討, 考量了斷層滑移在空間和時間上的不均勻性。

(一)海嘯波源模型

海嘯的誘發原因可分為 5 種(Grezio et al., 2017): 地震

(earthquake)、海底山崩(submarine failure and landslide)、火山作用(volcanic causes)、大氣作用(atmospheric forcing)和小行星撞擊(asteroid impact)，如圖 3-2。其中地震型和海底山崩型是大部分的海嘯源，其次為火山作用(約佔 5%)(Paris et al., 2014)。

目前，美國核電廠相關單位在 PTHA 之研究主要著重於地震型和海底山崩型海嘯源(NUREG-CR7223, 2016)，而日本核電廠相關單位則致力於發展地震型的評估方法(原子力規制委員会, 2018)。因此，本節將以前兩種海嘯波源評估方法的介紹為主，並增加火山作用海嘯波源評估方式。

1.地震型

海底地震(包含隱沒帶和斷層)引發之海嘯，目前仍以 Okada (1985)提出之理論模型普遍被學界所採用。經由此模型計算海底位移量，再計算海水面變化以求得海嘯波的初始波形的方式已被廣泛應用在不同的海嘯模式之中。表 3-1 和圖 3-3 為 Okada (1985)的斷層模型所需之地震參數，一般需藉由地質調查所得，例如：美國地質調查局(United States Geological Survey, USGS)或由專家學者評估。

(1) 震央(Epicenter; Longitude, Latitude)：地震發生時，地震震源向上垂直投影至地面的位置(經度，緯度)，即地面

距震源最近的地方。

- (2) 破裂深度(Focal depth, h)：震央至震源的垂直距離。
- (3) 斷層長度(Length of Fault Plane, L)：平行於走向角的斷層長度。
- (4) 斷層寬度(Width of Fault Plane, W)：垂直於走向角的斷層長度。
- (5) 滑移量(Dislocation, D)：斷層滑移量。
- (6) 走向角(Strike direction, θ)：斷層走向（沿海溝破裂為主）與北方的順時針夾角。
- (7) 傾角(Dip angle, δ)：地球表面與斷層面的夾角。
- (8) 滑移角(Rake angle, λ)：滑移方向與斷層走向的夾角。

2.海底山崩型

NUREG-CR7223 (2016)指出隨著地震型 PTHA 方法的發展，目前很重要的工作是加入海底山崩型海嘯的 PTHA 計算。然而，由於目前海底山崩型海嘯在其空間及時間演化發展上仍有相當大的認知不確定性，其中重現期的計算是造成精確度低和不確定性高的主要因素。即便如此，NUREG-CR7223 (2016)仍提出海底山崩型海嘯的 PTHA 評估流程架構(圖 3-4)以供未來 PTHA 之發展。

海底山崩型海嘯的 PTHA 評估流程架構主要有兩個步驟：1. 建立滑移物體積和面積與事件發生重現期的關係，

2. 以崩移型態(failure type)或是流變模型(rheological model)進行海嘯計算模擬評估。在崩移型態的部分假設崩移物為剛體的條件下，依潛勢區的特性分為弧型滑動(rotational landslide)、平面型滑動(translational landslide)和潛移型滑動(creeping landslide)。另一方面，亦可將崩移物視為流體，採用流變模型進行計算。流變模型依潛勢區特性可分為黏性滑動(viscous slide)、賓漢流(Bingham flow)、赫歇爾-巴爾克萊流(Herschel-Bulkley flow)。

接著，依照滑動類型設定所需之物理模型參數進行數值模擬，最後將各種類型及崩移體積的情境彙整成不同危害度(例如：最大水位分布)的複合式海嘯衝擊矩陣(composite tsunami metric)。

3.火山作用型

火山作用引致海嘯之機制可分為四種，分別為水下爆炸(underwater explosions)、爆震波(shock waves)、火山碎屑流(pyroclastic flows)和火山口地滑(caldera collapse)，如表 3-2 所示。水下爆炸起因於火山噴出的物質給予液體(水體)極大的擾動(形成水坑)，Le Méhauté and Wang (1996)提出理論

的初始波形，Paris (2015)則以長波數值模型進行模擬分析。

爆震波是由於火山噴發對氣體(大氣)造成擾動，導致強烈的壓力變化，Choi et al. (2003)以 Ray tracing 模式進行評估。

火山碎屑流來自於火山噴發出的高溫混和物(空氣和顆粒)流入海中，Maeno and Imamura (2007)和 Paris (2015)分別提出以異重流模型和分層淺水波模型進行分析。火山口地滑則源自火山噴發後，形成破火山口，後續因其崩塌引致海嘯。一般以剛體崩移模型或淺水波模型進行模擬(Maeno and Imamura, 2007)。

(二)重現期評估

1.地震型

地震重現期模式(recurrence model)可分為指數型(exponential)和特徵型(characteristic)兩種。前者較常被採用的為 G-R 關係式(Gutenberg and Richter, 1994)和特徵模型(Schwartz and Coppersmith, 1984)。在美國方面,PG&E (2010)建立 DCPD 的 PTHA 模型,其 G-R 關係式的邏輯樹權重為 0.33,而特徵型模型的權重為 0.67。Thio et al. (2010)則是採用 G-R 關係式和最大規模模型(特徵模型的一種),但未交代邏輯樹權重的分配情形。原子力規制委員會 (2018)則是僅以 G-R 關係式進行計算。

2.海底山崩型

USGS (2012)指出由於海底山崩的「發生機率較低」且「重現期資訊是不確定的」,以 PTHA 評估海底山崩型海嘯相對於地震型海嘯會有較高的不確定性。因此,美國地質調查局(USGS)著重於利用地質及地球物理資訊來判識海底地震發生的可能性。

評估海底山崩引致海嘯的發生機率有兩種(USGS, 2012): 經驗方法(Empirical Approaches)和地工方法

(Geotechnical Approach: From Earthquake to Landslide)。地工方法是以地震重現期推估方式進行計算，例如 G-R 關係 (Gutenberg and Richter, 1994)。

經驗方法又可分為四種：當歷史資料充足時，可採用二項分布-貝他共軛先驗概率(Binomial-Beta Conjugate Prior)或柏松-迦瑪的共軛先驗概率(Poisson-Gamma Conjugate Prior)。二項分布-貝他共軛先驗概率假設地震發生在特定板塊或山崩潛在區且皆經歷相同的時間，事件資料呈現 Beta 分佈，試驗為有發生及不發生之二項分配，事後所得之機率為兩者平均加權的 Beta 分佈(Savage, 1994)。柏松-迦瑪的共軛先驗概率則是假設山崩遵循柏松過程(即事件獨立)，事件為加入尺度參數及形狀參數的 Gamma 分佈(Mortgat and Shah, 1979; Campbell, 1982)。

相對的，當歷史資料不足時則可採用蒙地卡羅法(Monte Carlo Method)或貝葉斯推理法(Bayesian Inference Method)。蒙地卡羅法是從過去資料中抽取樣本，再由樣本推估事件的分佈情形(Parsons (2008))。貝葉斯推理法是利用地質事件資料的排序與過去資料所推估之分佈進行結合得

到新的機率。

2.火山作用型

美國和日本核能管制相關單位目前並無提出評估方法。

(三)海嘯波傳模型

在災害評估上，PTHA 的概念與 PSHA 相似，其中最大的不同在於 PTHA 以「海嘯模擬」取代了 PSHA 的地動衰減關係(Geist and Parsons, 2006)。一般機率式海嘯危害度分析採用逐一模擬各種海嘯情境的方式計算海嘯波傳(例如：Gonzalez et al. (2009); 原子力規制委員会 (2018); PG&E (2010))，採用之數值模型主要為水深積分的水動力數值模型(例如：淺水波方程模型)。

另一方面，Downes and Stirling (2001)提出需建立類似 PSHA 地動衰減式的經驗式，藉此快速計算海嘯造成之近岸波高及其溢淹，如圖 3-1 所示。Geist and Parsons (2006)則在線性水動力計算的框架下，以格林函數(Green's function)的方式計算海嘯造成特定位置附近的波高。這兩者主要的差別在於後者透過格林函數可以更快速的探討各種海嘯情境，進行更為全面的機率分析(Burbidge et al., 2008)。除此之外，還可快速

且有效的篩選出高風險區域。

當海嘯位於深水區時，因其波長極大(數百公里)且非線性較低，其傳播過程可透過線性淺水波方程模式進行水動力模擬(Satake, 1995)。當海嘯傳播至近岸及海嘯溯升及其導致溢淹時，其非線性變大，故模擬則需納入非線性的影響。因此，Thio et al. (2010)提出先以格林函數搭配線性淺水波方程模式進行大量的海嘯情境模擬，建立機率式離岸波高後，再以逆推(inverse)的方式得到某個特定超越機率下的海嘯源情境，最後將此情境以非線性淺水波方程模式進行細部模擬，得到近岸的海嘯溢淹危害度，藉此考量大量的地震型海嘯情境。

(四)機率模型

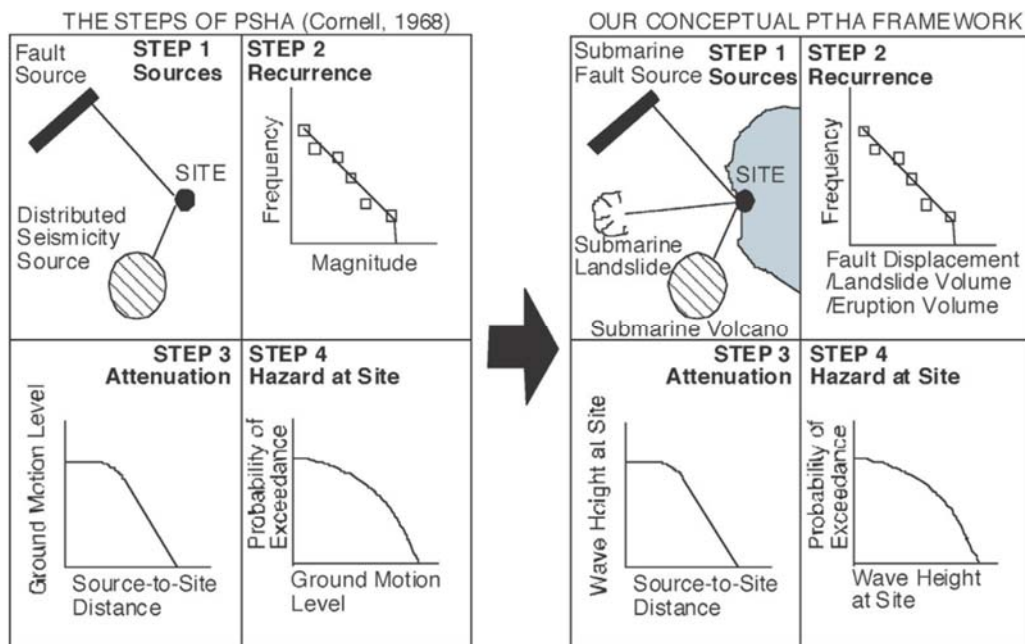
不確定性(uncertainty)的評估是機率式危害度評估相當重要的一環。Rikitake and Aida (1988)以 PTHA 計算日本沿岸的海嘯波高超過特定高度的發生機率。然而，他們並未考慮到數值模式和震源參數的不確定性對於結果所造成的影響。Bommer and Abrahamson (2006)指出若不考慮不確定性的影響，將會「低估」PSHA 的結果。同樣的，PTHA 不可忽略不確定性的影響(PG&E, 2010)。

原子力規制委員会 (2018)引述日本土木學會報告書(土木學會原子力土木委員會津波小委員會, 2016)中記述為“偶然不確定性，為起因於物理現象特有隨機性的不確定性，不可預測，透過 1 條海嘯危害度曲線考量。認識不確定性，為起因於知識、認識不足的不確定性，(中略)伴隨研究進展可進行確定，但當前不可預測，以邏輯樹的分支考量，以多條海嘯危害度曲線表現。”。上述各類不確定性相關海嘯危險性曲線的圖示如圖 3-5 所示。

PG&E (2010)將不確定性的來源分為數值模式和參數，並再細分為偶然(aleatory)和認知(epistemic)。偶然不確定性中，數值模式的隨機誤差可能來自於淺水波方程的近似和假設，以及地形資料的解析度；參數方面則為海嘯波源模型相關參數的不確定性。在認知不確定性中，數值模式的不確定性可能來自於知識或資料的不足，使得模擬海嘯危害的方法存在不確定性；參數則來自於對於物理現象認知上的不足(例如：震源參數的分佈)。

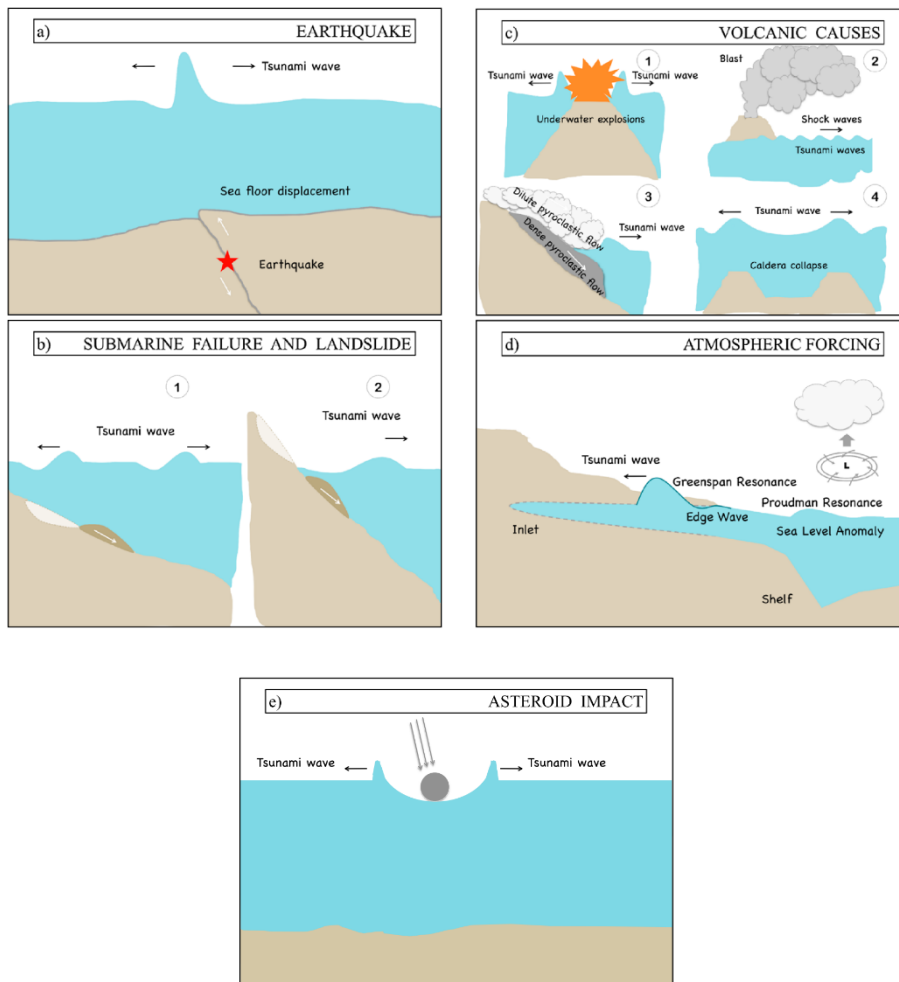
PG&E (2010)在實做上將數值模式、斷層傾角和滑移量分佈、震源位置歸類為隨機不確定性，但未交代認知不確定性

考量之因子。Thio et al. (2010)則是將數值模式、斷層傾角和
滑移量歸類為隨機不確定性；將斷層滑移速率、幾何條件和滑
移角，以及地震重現期模型歸類為認知不確定性。



(資料來源：Downes and Stirling (2001))

圖 3-1 機率式地震危害度分析及機率式海嘯危害度分析之架構



(資料來源：Grezio et al. (2017))

圖 3-2 五種海嘯波源：(a)地震、(b)海底山崩、(c)火山作用、(d)大氣作用和(e)小行星撞擊

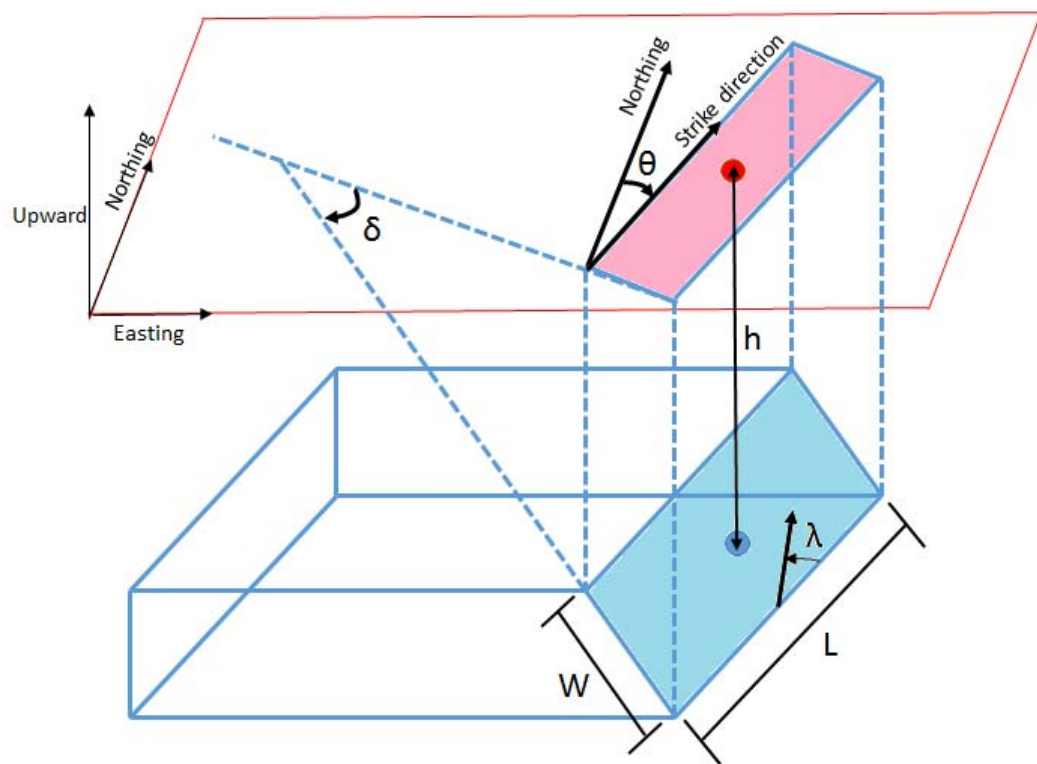
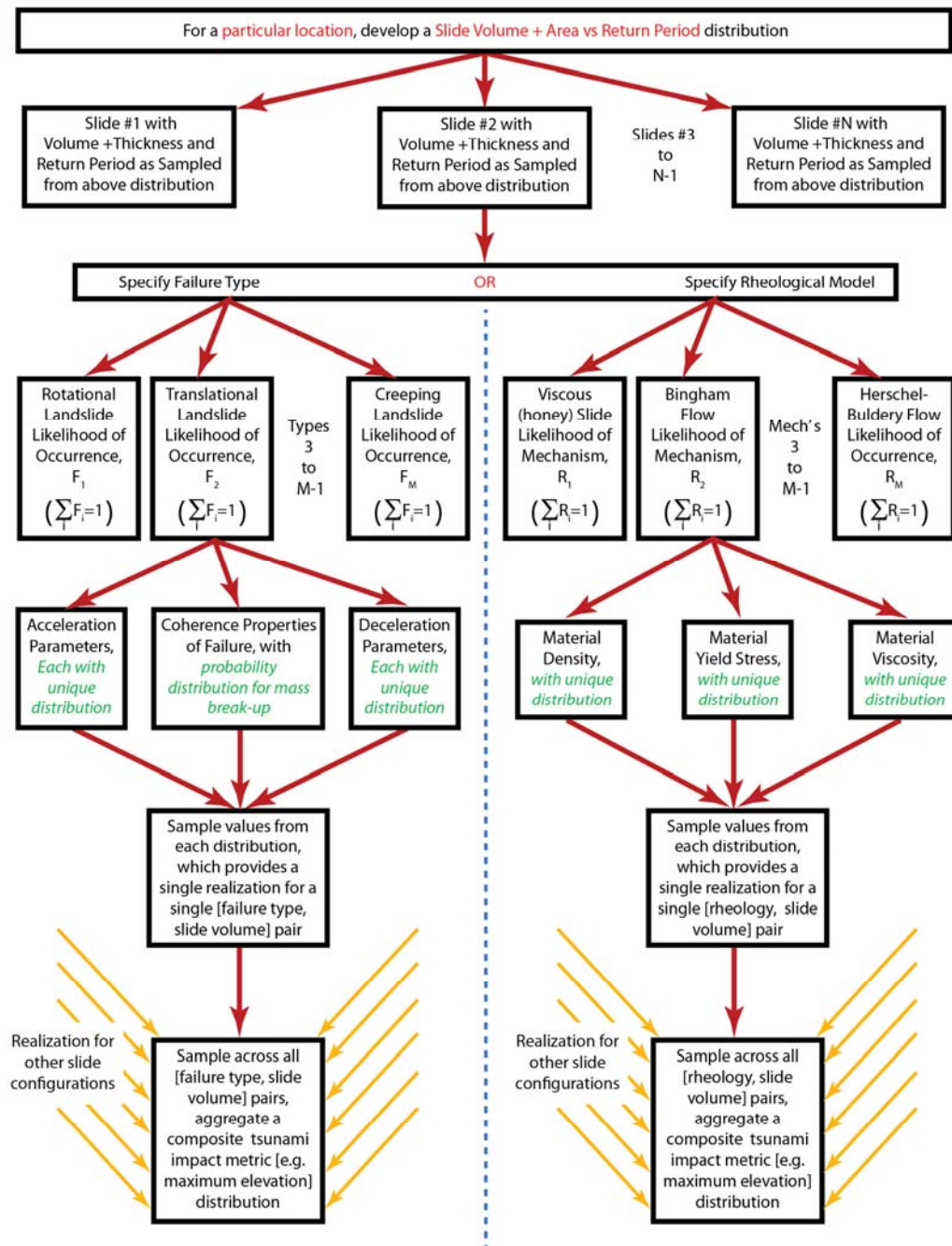
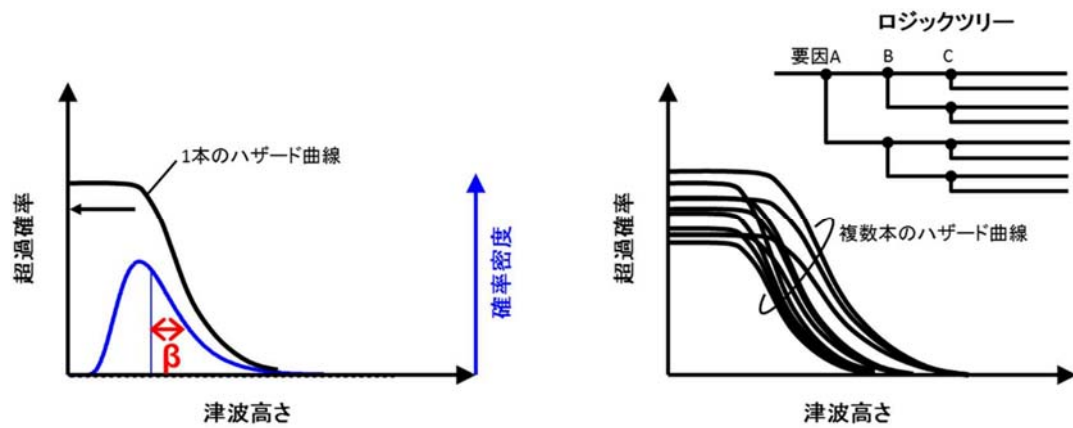


圖 3-3 斷層參數示意圖



(資料來源: NUREG-CR7223 (2016))

圖 3-4 海底山崩型之 PTHA 初步評估流程架構



(資料來源：原子力規制委員会 (2018))

圖 3-5 偶然不確定性(左圖)和認知不確定性(右圖)在海嘯危害度曲線的呈現

表 3-1 Okada (1985)的斷層模型所需參數

參數	單位
震央(經度、緯度)	度
破裂深度(h)	公尺
斷層長度(L)	公尺
斷層寬度(W)	公尺
滑移量(D)	公尺
走向角(θ)	度
傾角(δ)	度
滑移角(λ)	度

表 3-2 火山引致海嘯之評估方式

類型	生成機制	案例 [最大溯升高]	數值模擬方式
水下爆炸	火山噴出的物質以射流的型態噴出水面，形成水坑	1996 Karymsky Lake (卡雷姆斯科耶湖，俄羅斯) [19 m]	- 理論初始波形 - 淺水波 (或 Boussinesq) 模型
爆震波	火山爆發對大氣造成強烈的壓力變化	1883 Krakatau (喀拉喀托，印尼) [1.8 m]	Ray tracing 模式
火山碎屑流	火山噴發出的高溫混和物(空氣和顆粒)流入海中	2003 Montserrat (蒙特塞拉特，英屬西印度群島) [4 m] 1994 Rabaul (拉包爾，巴布亞紐幾內亞) [8 m]	- 異重流模型 - 分層淺水波模型
火山口地滑	火山噴發後，形成破火山口	距今約 7300 年前，Kikai eruption (鬼界破火山口) [20 m]	- 剛體崩移模型 - 淺水波模型

四、 美國核電廠相關單位之案例研究

NUREG-CR7223 (2016)以 Thio et al. (2010)的研究成果進行案例研析，並指出 USNRC 可採用 Thio et al. (2010)之方法進行 PTHA。因此，本節說明 Thio et al. (2010)以及 NUREG-CR7223 (2016)的研究成果。

Thio et al. (2010)以加州海岸為例發展 PTHA 的計算方法，該方法主要可分成兩個步驟：1. 以大量的海嘯情境(超過 10,000 種)計算機率式離岸波高(probabilistic offshore waveheight)，並且考量了認知及隨機的不確定性。2. 透過機率式離岸波高、海嘯源拆解(source disaggregation)和非線性數值模式，完成機率式海嘯溢淹的分析。

(一) PTHA 設定方法

透過格林函數可將震源區斷層拆解為數個子斷層，透過單個海嘯波形(格林函數)的總和來表示地震情景(圖 4-1)。透過預先計算並儲存在每個子斷層的單位滑移量產生之海嘯波形，可進一步快速的組合成各種情境之海嘯波形(圖 4-2)，而不需進行全新的計算模擬。

Thio et al. (2010)採用截斷的 G-R 關係和最大規模模型進

行地震重現期的推估。G-R 關係的分佈函數顯示事件數量隨地震規模幅度呈指數遞減，而最大規模模型則由常態分佈表示。

Thio et al. (2010)訂立了隨機不確定性的三個主要來源為：

[1] 數值模式(σ_A)：模擬歷史海嘯事件，分析結果與觀測資料間的差異。

[2] 傾角(σ_D)：模擬不同傾角的海嘯情境，分析對結果的影響。

[3] 滑移分佈(σ_S)：模擬不同滑移分布的海嘯情境，分析對結果的影響。

總變異量(σ_{total})為：

$$\sigma_{total} = \sqrt{\sigma_A^2 + \sigma_D^2 + \sigma_S^2} \quad (4-1)$$

在認知不確定性方面，Thio et al. (2010)將斷層滑移速率、幾何條件和滑移角，以及地震重現期模型以邏輯樹的方式進行分析。

海嘯波線性的假設不適用於振幅與水深相近的區域，此時需以非線性的數值模式計算溯升和溢淹。為了將離岸波高危害度擴展至近岸，Thio et al. (2010)將加州海岸沿岸區域的海嘯源進行分類，以逆推的方式評估海嘯源區和其規模大小。

由於 Thio et al. (2010)未完整說明建立之機率模型計算公式，僅提及偶然不確定性是以機率密度函數的方式進行考量，而偶然不確定性之計算皆以 natural log 進行表示。另一方面，PG & E (2010)是以對數常態分布的機率密度函數建立機率模型。此外，PG & E (2010)的偶然不確定性計算方式與 Thio et al. (2010)相近，且評估方式是與 Dr. Hong Kie Thio 討論之結果，故在此補充 PG & E (2010)所述之設定方法：

$$\begin{aligned}
 & V_{\text{EQK}}(W_{\text{tsu}} > z) \\
 &= \sum_{i=1}^{N_{\text{FLT}}} N_i(M_{\min}) \int_m \int_{\text{Loc}} f_{m_i}(M) f_{\text{Loc}_i}(\text{Loc}) \\
 &\quad P(W_{\text{tsu}} > z | M, \text{Loc}) dM d\text{Loc}
 \end{aligned} \tag{4-2}$$

其中， W_{tsu} 為海嘯波高， N_{FLT} 為會造成海嘯的斷層數目， $N_i(M_{\min})$ 為第 i 個震源發生地震規模大於 $M_{\min}$ 的年發生率， f_{m_i} 和 f_{Loc_i} 分別為地震規模的機率密度函數和斷層破裂位置的機率密度函數， $P(W_{\text{tsu}} > z | M, \text{Loc})$ 為在地震規模 M 及震源於 Loc 位置處的條件下，海嘯波高 W_{tsu} 大於水位 z 的機率，此機率可表示為：

$$P(W_{\text{tsu}} > z | M, \text{Loc}) = 1 - \Phi \left(\frac{\ln z - \ln(\hat{W}_{\text{tsu}}(M, \text{Loc}))}{\sigma_{\text{EQK}}} \right) \tag{4-3}$$

其中， Φ 代表累積常態分佈函數，模式計算中的海嘯最大振幅

值(maximum amplitude)定為機率分布的中值波高 $\hat{W}_{tsu}$ ，標準差

$\sigma_{EQK} = \sqrt{\sigma_{mod}^2 + \sigma_{par}^2}$ 則透過偶然不確定性的計算得到(σ_{mod}^2 和 σ_{par}^2

分別為數值模式和地震參數的變異量)。

若是資料樣本數較少，海嘯波高的年超越率可表示為：

$$v_{EQK}(W_{tsu} > z) = \sum_{i=1}^{N_{FLT}} \sum_{j=1}^{NS_i} rate_{ij} P(W_{tsu} > z | M_{ij}, Loc_{ij}) \quad (4-4)$$

其中， $rate_{ij}$ 為第 i 個地震源所引發第 j 個情境的海嘯發生機率。

(二) PTHA 分析成果

Thio et al. (2010)根據太平洋周圍的隱沒帶資料計算加州海岸的機率式海嘯波高，如圖 4-3 所示。圖 4-4 顯示，由於北部和中部沿海地區直接暴露於太平洋中，其危害度相對較高；而南加州沿海其他地區的危害度則受到大陸邊界地區的屏障而相對較低。圖 4-5 是 46 個選定位置和重現期的海嘯源分解圖，可以清楚地看到 Alaska 隱沒帶是南加州海岸的主要災害來源。

經由圖 4-5 的海嘯源分析後，進一步以非線性水動力模式進行細緻的海嘯波傳、溯升及溢淹模擬，可得到代表其超越機率的溢淹危害度地圖。接著，對不同超越機率進行計算可得到

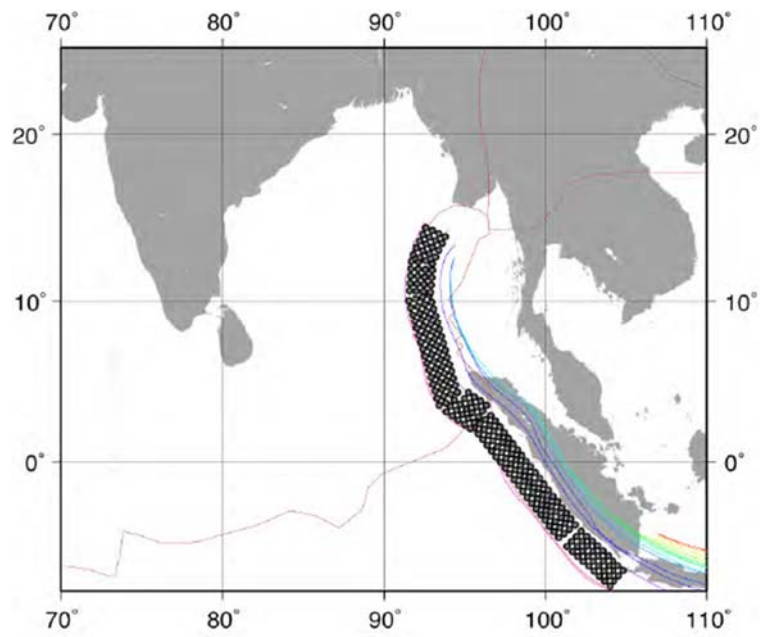
不同年重現期(ARP)的溢淹範圍，瞭解不同區域的溢淹風險(圖 4-6)。

(三)USNRC 案例研究

NUREG-CR7223 (2016)以 NOAA 海嘯研究中心 (NOAA, Center for Tsunami Research, NCTR)發展之海嘯模式(ComMIT)，利用 Thio et al. (2010)之成果進行蒙特利灣(Monterey Bay)超越機率 2,500 年的海嘯模擬分析。

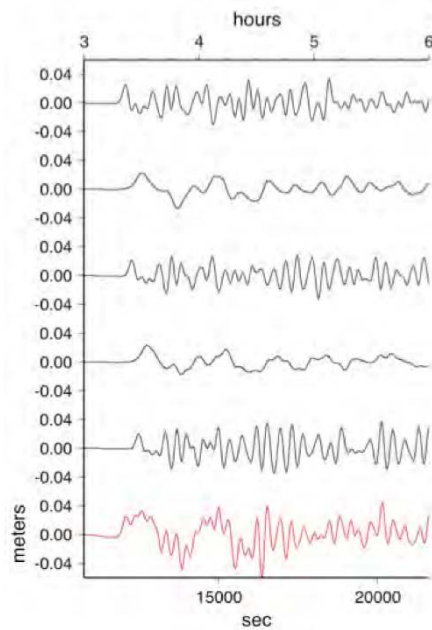
首先，透過海嘯源逆推的方式可得到兩個可能的海嘯波源區為 Alaska-Aleutian 和 Kuril-Kamchatka，如圖 4-7 所示。然而，經過非線性淺水波方程模式計算後發現 Alaska-Aleutian 地震矩規模 9.5 之情境(圖 4-8)的大部分誤差小於 10%；另一方面，Kuril-Kamchatka 地震矩規模 9.7 之情境(圖 4-9)則因滑移量高達 142 m 而排除為可能的海嘯源。

最後，即以 Alaska-Aleutian 地震矩規模 9.5 進行分析，獲得蒙特利灣近岸年超越機率達 2,500 年的海嘯波高(圖 4-10)、海嘯流速(圖 4-11)和海嘯溯升及溢淹範圍(圖 4-12)。



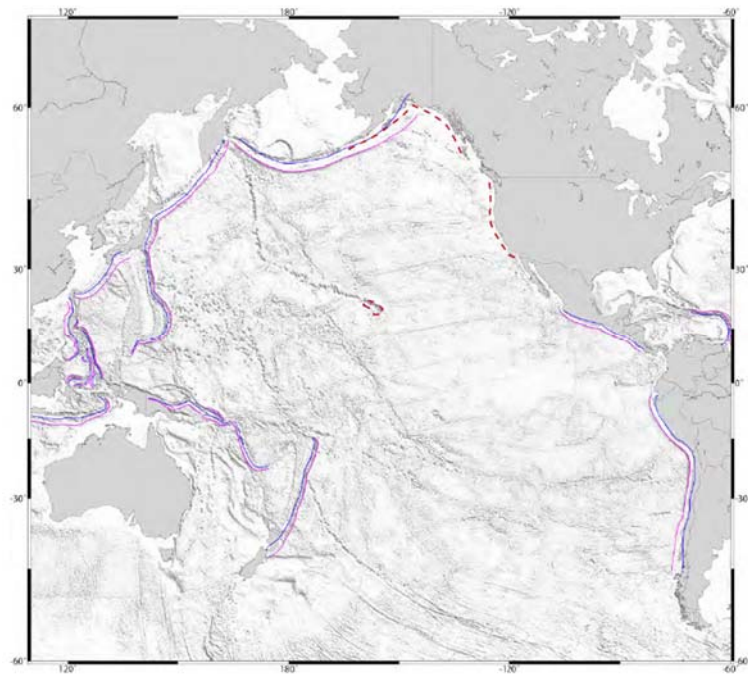
(資料來源：Thio et al. (2010))

圖 4-1 子斷層分割情形



(資料來源：Thio et al. (2010))

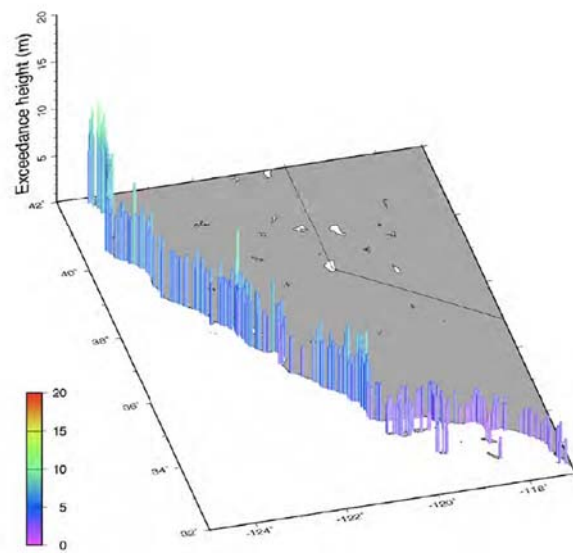
圖 4-2 以格林函數方法計算之水位變化(黑線為單個子斷層對應之水位變化，紅線則為將子斷層水位變化加權總和後之結果)



(資料來源：Thio et al. (2010))

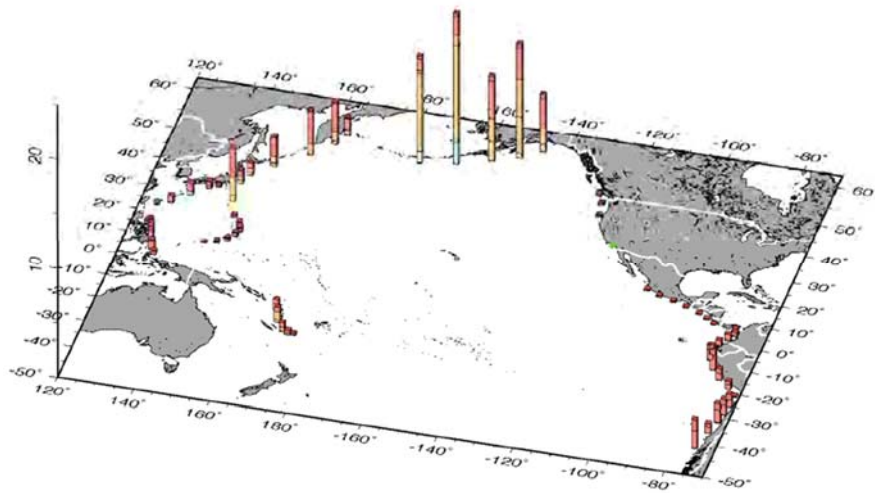
圖 4-3 Thio et al. (2010)評估的海嘯源分布

2500 yr return period



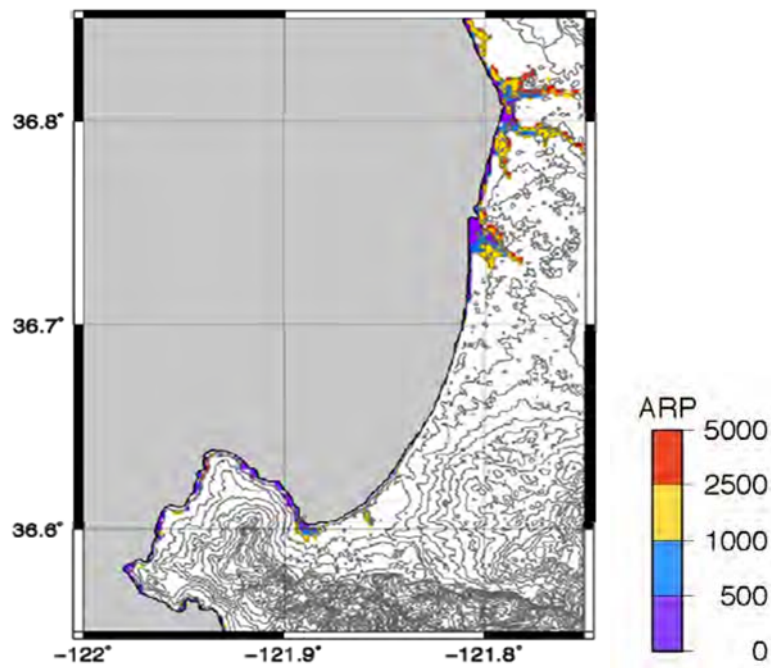
(資料來源：Thio et al. (2010))

圖 4-4 超越機率為 2,500 年的機率式離岸波高



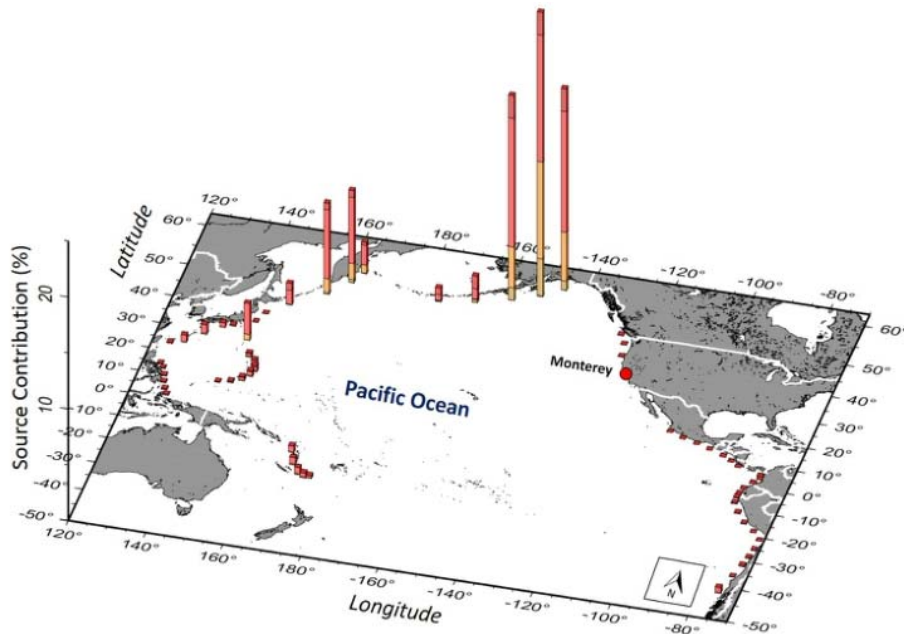
(資料來源：Thio et al. (2010))

圖 4-5 以逆推方式求得之海嘯源分布圖(以美國加州聖塔莫尼卡地區，475 年超越機率為例)



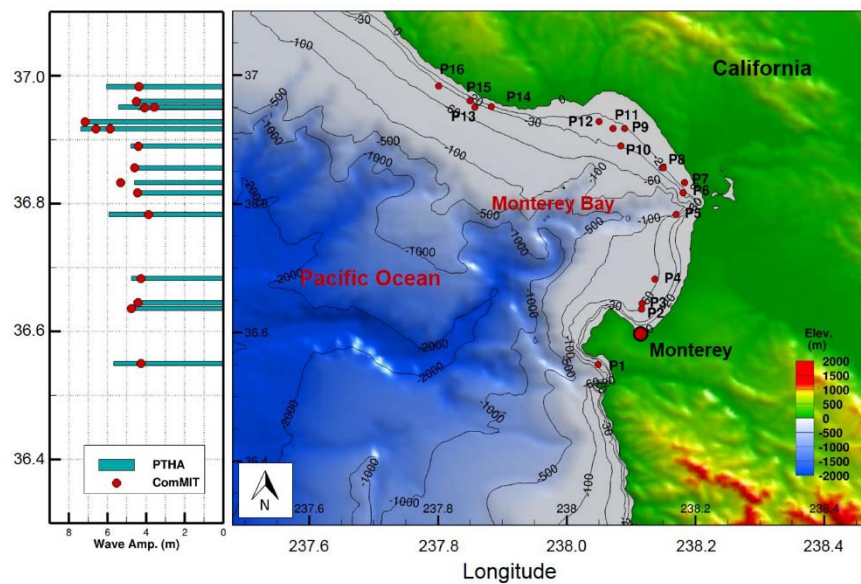
(資料來源：Thio et al. (2010))

圖 4-6 海嘯溢淹危害度地圖(以美國加州蒙特利灣地區，2,500 年超越機率為例)



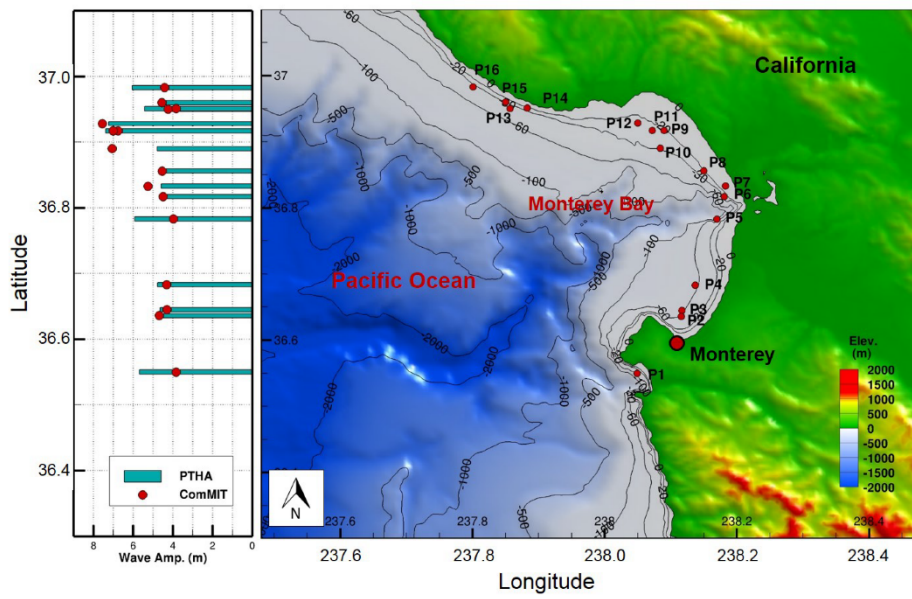
(資料來源：NUREG-CR7223 (2016))

圖 4-7 以逆推方式求得之海嘯源分布圖 (以美國加州蒙特利灣地區，2,500 年超越機率為例)



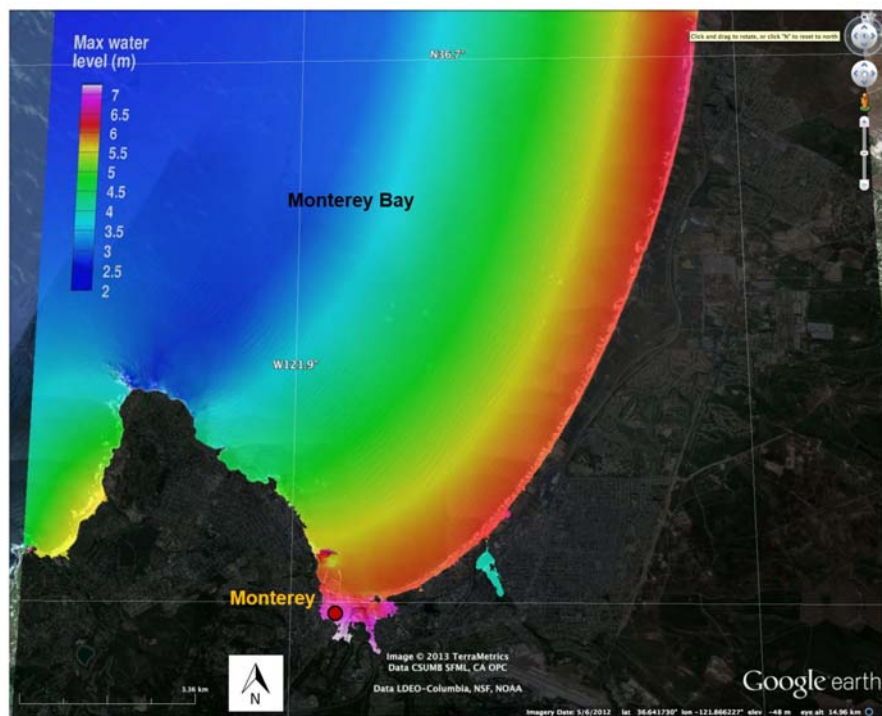
(資料來源：NUREG-CR7223 (2016))

圖 4-8 離岸波高比對結果(Alaska-Aleutian 地震矩規模 9.5 情境)



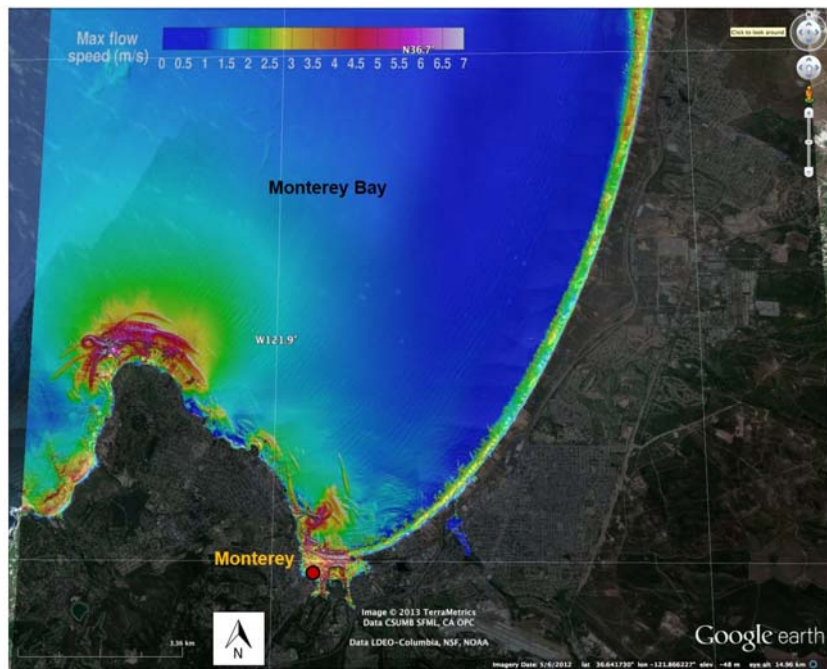
(資料來源：NUREG-CR7223 (2016))

圖 4-9 離岸波高比對結果(Kuril-Kamchatka 地震矩規模 9.7 情境)



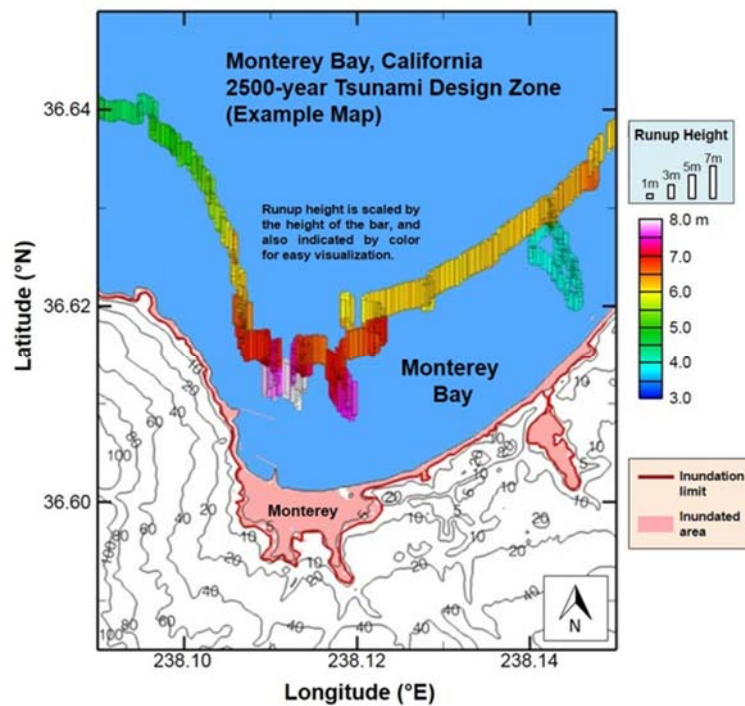
(資料來源：NUREG-CR7223 (2016))

圖 4-10 海嘯波高分布圖



(資料來源：NUREG-CR7223 (2016))

圖 4-11 海嘯流速分布圖



(資料來源：NUREG-CR7223 (2016))

圖 4-12 海嘯溯升高和溢淹範圍

五、 日本核電廠相關單位之研究

原子力規制委員会 (2018)指出在日本 311 海嘯發生之前，地震學認為基於過去發生的地震記錄，在相同地點會以相同規模及間隔發生(特徵地震)。然而，311 地震因多個地震區連動，規模大幅度超越迄今為止的歷史記錄，顯示傳統設計波高方法改善的必要性。有鑑於此，日本原子力規制委員会(NRA)提出技術報告(原子力規制委員会 (2018))。此報告主要目的有兩點：1. 技術上輔助基準海嘯及耐海嘯設計方針相關審查導則；2. 展示海嘯假定的海嘯源模型等不確定性的處理對 PTHA 結果具有影響，以及 PTHA 作為新知識反映工具的有效性及擴展性。

日本在汲取 311 海嘯經驗後，要求設計標準物件設施在遭受造成重大影響的海嘯(基準海嘯)時，必須安全功能不受損。因此，NRA 於 2013 年將制訂基準海嘯、以及其相當於什麼程度的超越機率等作為要求事項，並要求以 DTHA 進行基準海嘯波高的評估，再以 PTHA 評估波高及其發生機率。

原子力規制委員会 (2018)提出之 PTHA 方法如圖 5-1 所示。首先，為了能全面的評估海嘯對特定區域造成之危害，首先需篩選出可能致災的海嘯源，需包含近域海嘯源(板塊間地震、海洋板塊內地震、海域中活斷層所造成地殼內部地震和陸上及海底

地滑)和遠域海嘯源(例如：智利海嘯)，此為「海嘯波源區之選定」。第二步則為「海嘯特性化波源模型和重現期模型之設定」，主要需計算特定情境海嘯發生的機率，並以特性化波源模型的方式進行地震海嘯參數的情境設定。接著是以海嘯數值模型計算「海嘯波傳」，最後透過「機率模型」繪製海嘯危害度曲線。

(一)PTHA 設定方法

今後 T 年評估位置的海嘯波高超越高程(h)之機率 $p_f(h)$ 可表示為：

$$p_f(h) = 1 - \exp \left\{ -T \sum_i \frac{Pe_{f,i}(h)}{Te_{f,i}} \right\} \prod_j \{1 - Pe_{f,j}(h) Pn_j(T)\} \quad (5-1)$$

$$Pe_f(h) = \int_h^{h_{upper}} f_H(x; h', \beta^2) \quad (5-2)$$

其中， $Pe_f(h)$ 為評估位置的海嘯波高超越 h 的機率， Te_f 和 $Pn(T)$ 分別為活斷層及板塊間地震的平均活動間隔(年)和考量距離最新活動時期之經過時間的活斷層或板塊間地震於今後 T 年內活動的機率， $f_H(x; h', \beta^2)$ 是以評估位置計算海嘯波高 h' 為中值、 β^2 為變異量的機率密度函數， h_{upper} 為機率密度函數的截斷上限值， i 和 j 為活斷層及板塊間地震的波源模型編號。

式(5-2)中的變異量代表相同波源在特定位置形成的海嘯

波高於時間上對推測值的離散程度。但以任意地點進行評估時，無法獲得足以評估此離散程度的觀測資料。因此，PTHA 通常假設海嘯波高具有遍歷性(遍歷性指時間離散性與空間離散性相等)，進行空間離散性的計算，計算方式如下：

$$\beta = \ln(\kappa) = \left\{ \frac{1}{n} \left[\sum_{m=1}^n (\ln K_m)^2 - n(\ln K)^2 \right] \right\}^{1/2} \quad (5-3)$$

$$\ln K = \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n \ln K_m \quad (5-4)$$

$$K_m = \frac{r_m}{h'_m} \quad (5-5)$$

其中， n 表示歷史觀測數目， r_m 和 h'_m 分別為位置 m 的觀測和模擬之最大海嘯波高。

原子力規制委員会 (2018)的板塊間地震的海嘯源設定方法可分為三個步驟，依序為「宏觀設定」、「微觀設定」和「斷層傳播特性設定」。宏觀設定為進行波源位置、地震規模和平均滑移量的選定，微觀設定則是考慮了滑移分布於空間上的不均勻性，並依照地震矩規模制訂不同的分布考量，如圖 5-2 所示。當地震矩規模小於 8.2 時，考慮破裂面積(S)以均勻的平均滑移量(D)滑動；當規模介於 8.2-8.8 時，則將破裂面積分成兩塊，其中大小為 0.4 S 的滑移量為平均的兩倍(2 D)，另外

0.6S 區域的滑移量為 0.33D；最後，當規模超過 8.9 時則劃分為三個區塊，其中最大滑移量(3D)佔整體破裂面積的 10% (0.1S)。

圖 5-3 為斷層傳播特性的模擬方式，主要有同心圓狀斷裂傳播和伴隨時間差連動傳播兩種。前者假設一次地震活動跨多個子段的情況下，以斷裂開始點及平均斷裂傳播速度為參數的同心圓狀斷裂傳播；後者則是假定地震活動中有多個子段產生時間差的情況下，以各子段的斷裂順序、相互的時間差作為參數。表 5-1 顯示原子力規制委員会 (2018)採用之特徵化波源模型和數值模型配置可使變異量(β)大幅降低。若是考慮斷層破裂以同心圓傳播(表 5-1 所指之動的破壞)時，變異量可降至 0.24-0.27；若不考慮斷層傳播特性(表 5-1 所指之靜的破壞)則為 0.22-0.33。顯示透過特性化波源模型能降低隨機不確定性，並且當考量斷層破裂為同心圓傳播時，可使變異量變化區間較小，代表變異量能更具代表性。

(二)PTHA 分析成果

圖 5-4 為原子力規制委員会 (2018)的 PTHA 案例，此案例探討千島海溝至日本海溝沿線的板塊地震對日本沿岸的影

響。需注意到的是，原子力規制委員会 (2018)的研究已將斷層傳播特性以偶然不確定性的方式進行考量，故在進行邏輯樹情境計算時，是以變異量的形式呈現於 PTHA 之中。

圖 5-5 和圖 5-6 分別為新方法和舊方法建置的海嘯危害度曲線，可發現到在最大溯降部分的差異不大，而最大溯升則有顯著的差異，新方法所得之結果為舊方法的 2-5 倍。造成此差異的主要原因為舊方法沒有考慮到滑移量在空間，以及時間(斷層傳播)的分布。

(三)日本核電廠案例

東北電力 (2019)以日本最新的海嘯評估方式進行女川核能發電廠的評估流程如圖 5-7 所示，流程依序為「海嘯波源選定」、「檢討海嘯波源選定」、「地震型海嘯波源設定」、「制訂基準海嘯」和「針對基準海嘯的防範評估」。第一階段和第二階段的海嘯波源選定和檢討海嘯波源選定，可分為地震引致之海嘯和其他因素引發之海嘯。前者考慮了近域和遠域的地震型海嘯源，並依其波源特性分為東北地方太平洋近海地震、地震型海嘯、海洋板塊內地震海嘯和海域活動斷層引起的地殼內地震；後者則包含了陸地上的崩移及坍塌、海底山崩和火山

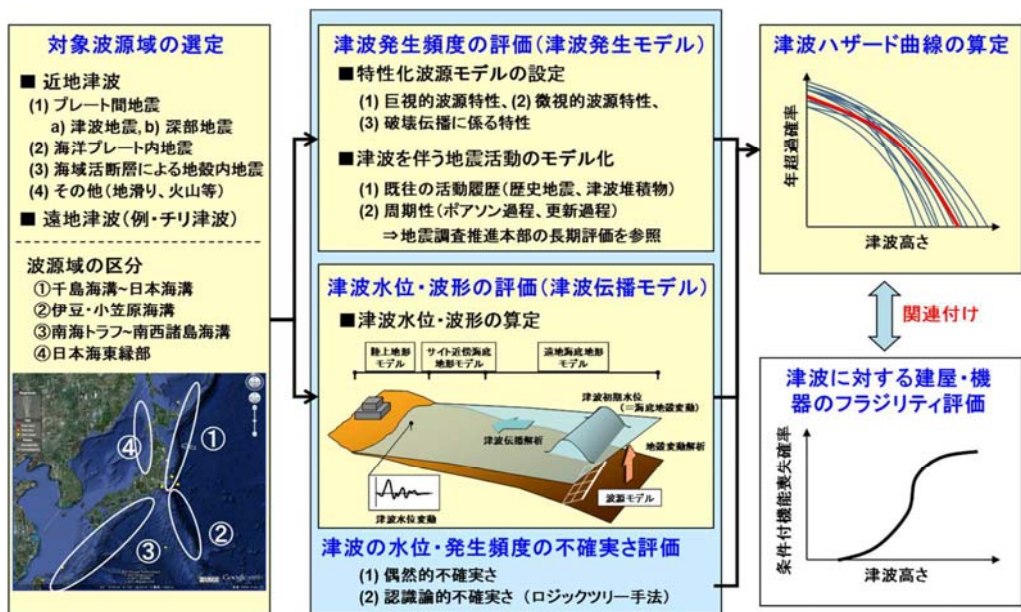
現象，依序以土地面積、水深 1,000 m 內的坡面及大陸棚和廠址附近的火山活動情形進行分析。需要注意的是，無論是哪一種海嘯源的評估皆需經過詳細的文獻調查。

在第三階段的地震型海嘯波源設定方面則依海嘯波源分類之結果制訂海嘯評估方式，舉例來說，針對東北地方太平洋近海地震需考量斷層破裂傳遞模型。接著，將地震和非地震引致之海嘯進行整體性的通盤考量後完成基準海嘯之制訂(第四階段)，並進行機率式海嘯危害度評估，瞭解此基準海嘯的年超越機率。最後，進行泥沙運移評估，分析基準海嘯造成的海底地形變化對進水口和緊急海水泵進水口，以及海水泵房底部的泥沙淤積情形，如圖 5-8。

圖 5-9 為女川核電廠進行的 PTHA 評估流程，包含：1. 海嘯波源的設定、2. 海嘯情境的認知不確定性、3. 海嘯波高計算的隨機不確定性，以及 4. 海嘯危害度曲線的建立。在認知不確定性的部分，需要對波源模型的選定、地震發生的可能型式、可能的地震矩規模和重現期進行討論設定；在隨機不確定性方面則為斷層模型(滑移分布不均勻的斷層、均勻的矩形斷層)、數值模型和對數標準偏差及機率分布截斷範圍進行討

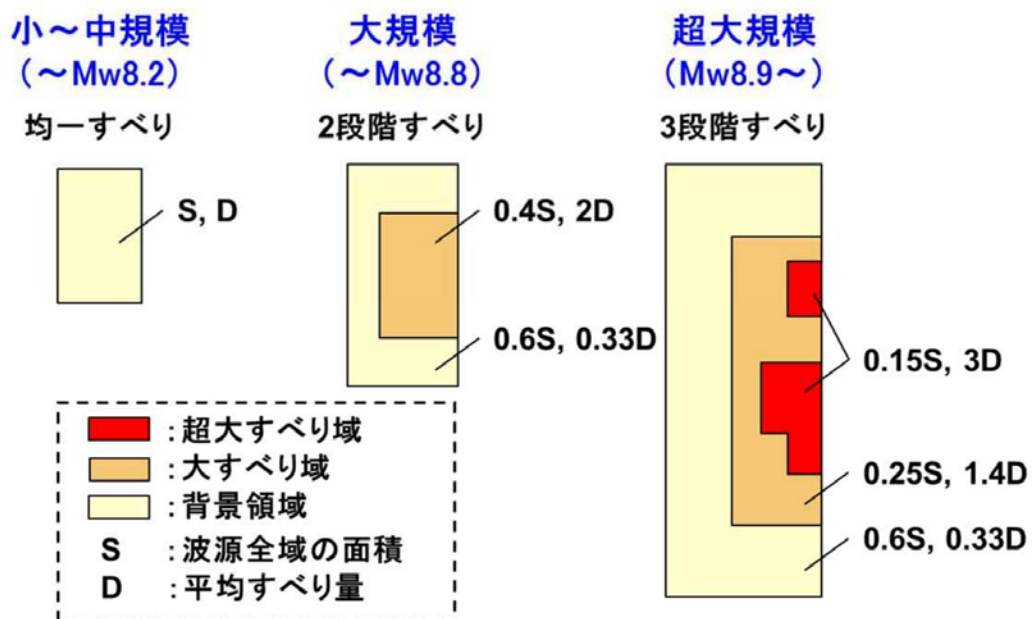
論設定。

圖 5-10 顯示藉由女川核電廠以 DTHA 的方式制訂之基準海嘯造成的水位上升和下降分別為 10.1 m 和 -3.5 m，透過 PTHA 的分析可瞭解到，基準海嘯造成之水位上升相當於 100 萬至 1,000 萬的年超越機率，而水位下降則為 1,000 至 1 萬的年超越機率。



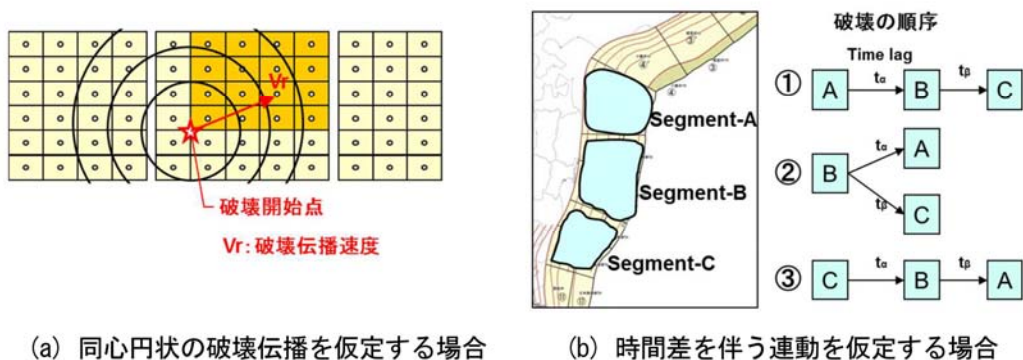
(資料來源：原子力規制委員会 (2018))

圖 5-1 日本 NRA 的地震型機率式海嘯危害度分析架構

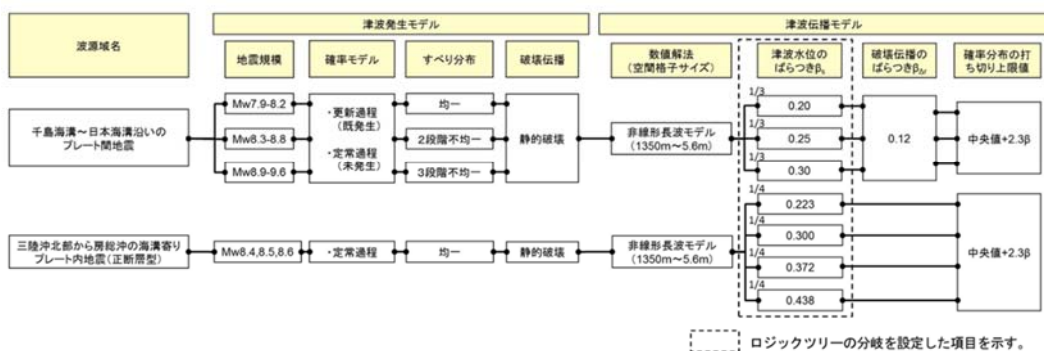


(資料來源：原子力規制委員会 (2018))

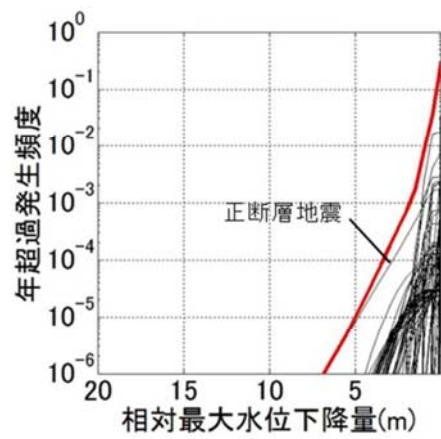
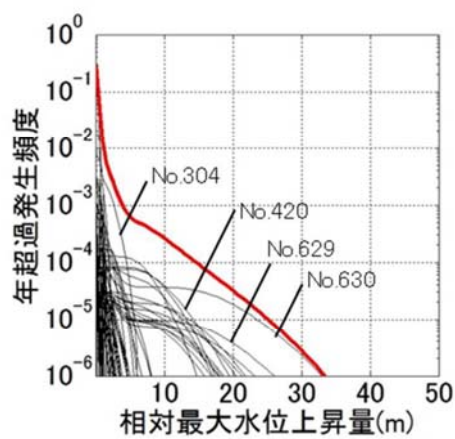
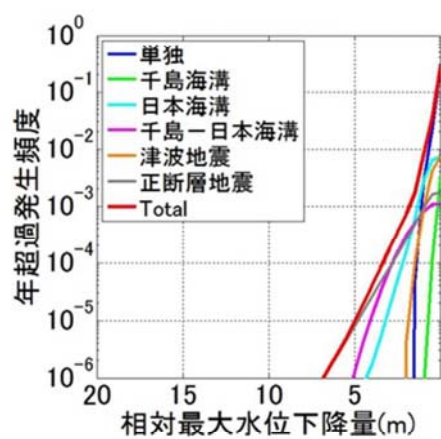
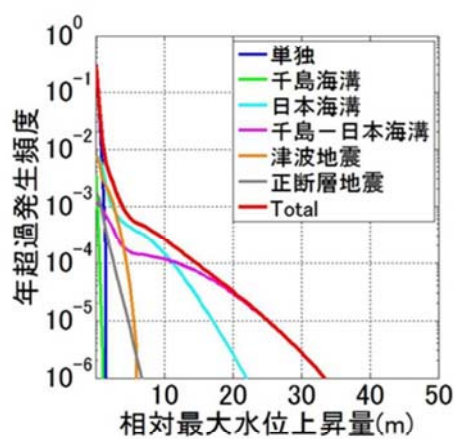
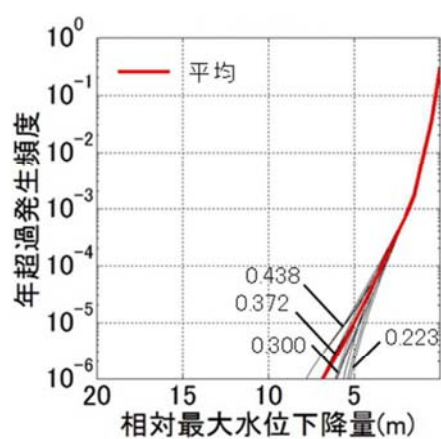
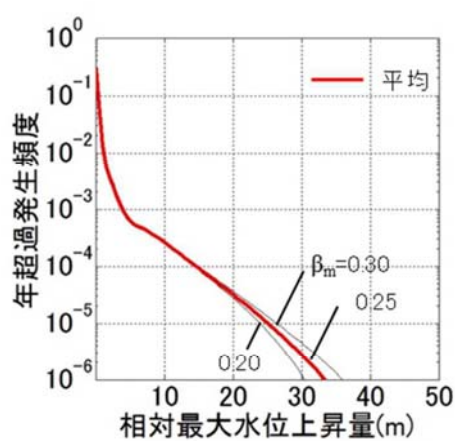
圖 5-2 滑移量空間分布設定



(a) 同心円状の破壊伝播を仮定する場合 (b) 時間差を伴う連動を仮定する場合
(資料來源：原子力規制委員会 (2018))
圖 5-3 斷層傳播特性的設定方法：(a)假定為同心圓狀斷裂傳播和
(b)假定為伴隨時間差連動



(資料來源：原子力規制委員会 (2018))
圖 5-4 日本 NRA 的地震型海嘯邏輯樹案例

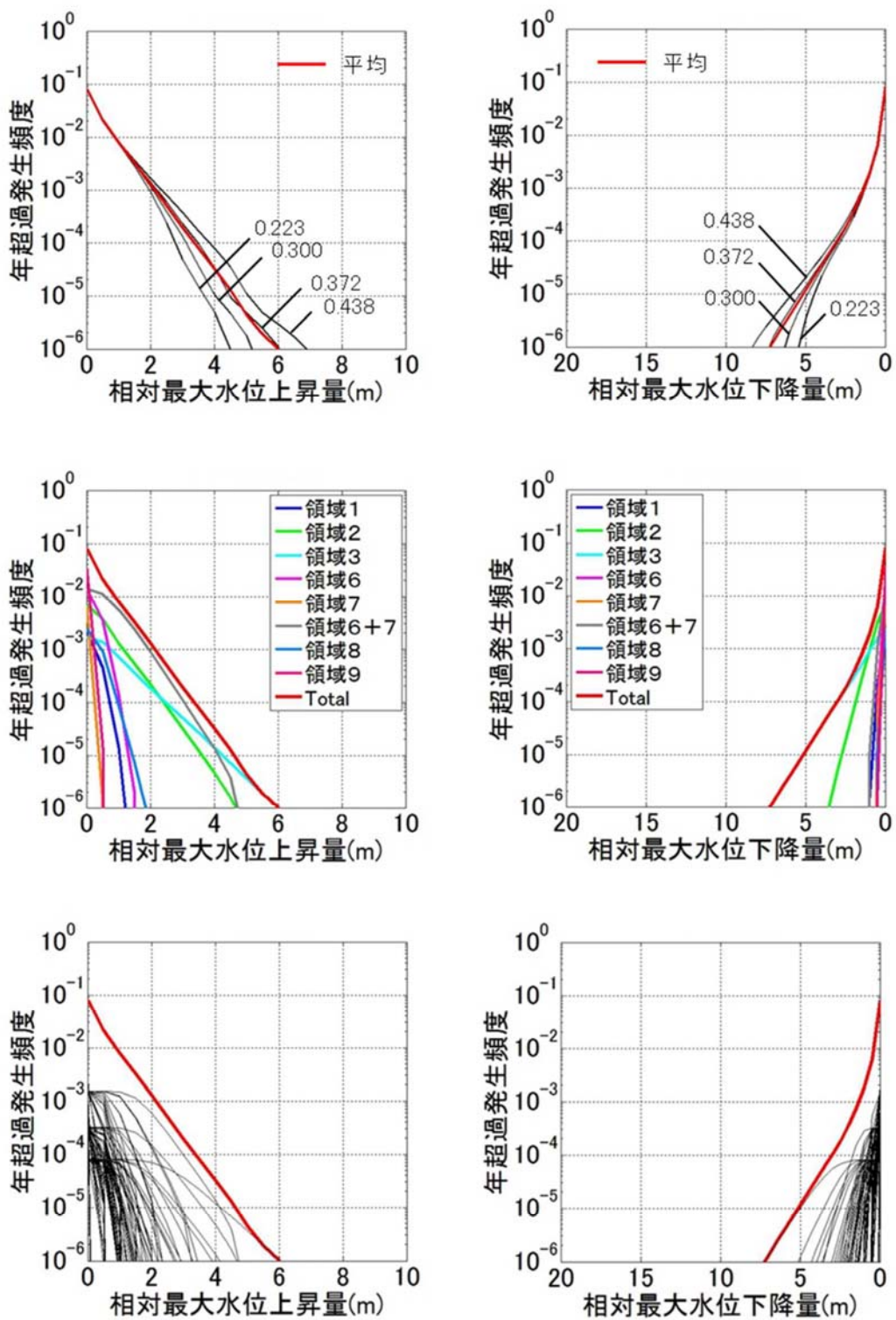


(a) 水位上昇側

(b) 水位下降側

(資料來源：原子力規制委員会 (2018))

圖 5-5 日本 NRA 提出之新 PTHA 方法建立之海嘯危害度曲線



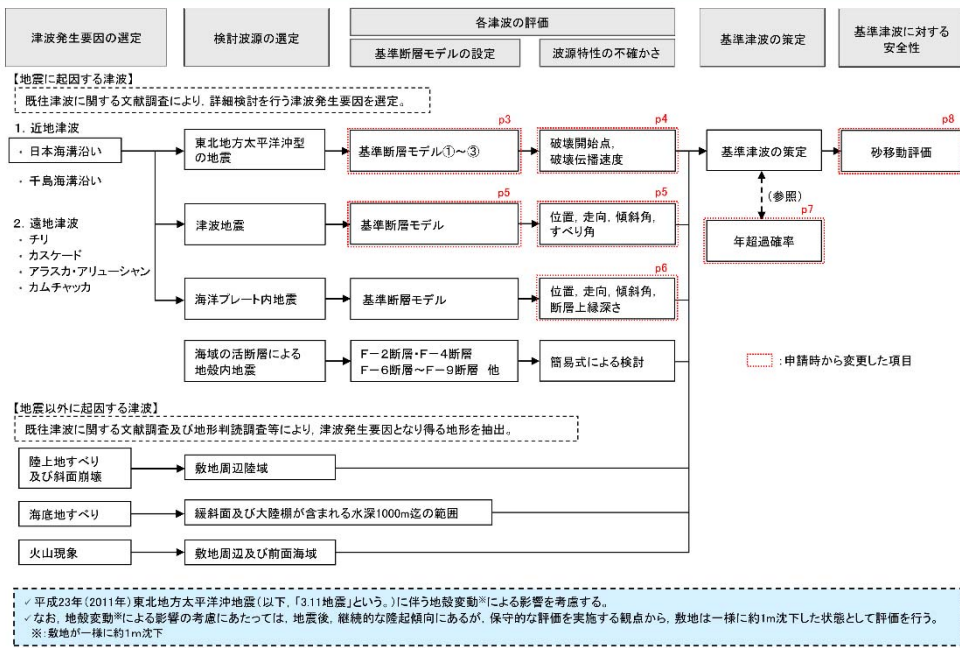
(a) 水位上昇側

(b) 水位下降側

(資料來源：原子力規制委員会 (2018))

圖 5-6 舊 PTHA 方法建立之海嘯危害度曲線

津波評価の全体概要

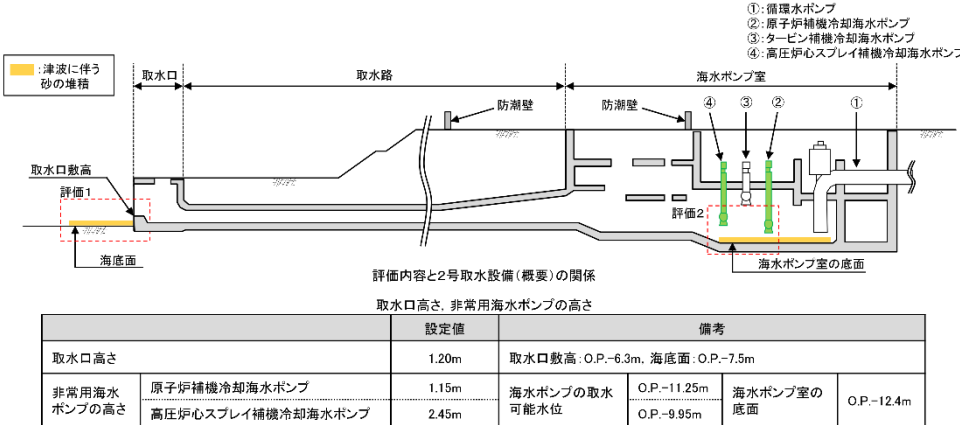


(資料來源：東北電力 (2019))
圖 5-7 女川核電廠的海嘯評估流程

V. 基準津波に対する安全性(砂移動評価)
1. 評価方針

第439回審議会合 (H29.2.3)
資料1-1 p4 再掲 **169**

- 海底地形変化(評価1)
 - 基準津波に伴う砂移動(海底地形変化)を評価して、2号取水口前面の砂の堆積高さが取水口高さを上回らず(取水口敷高に到達せず)、非常用海水ポンプの取水に影響が無いことを確認する。
 - 砂移動解析は、藤井ほか(1998)及び高橋ほか(1999)の手法を用いて実施する。
- 海水ポンプ室内における砂の堆積(評価2)
 - 2号海水ポンプ室内における砂の堆積高さを評価して、非常用海水ポンプ位置における砂の堆積高さが海水ポンプの高さを上回らず(海水ポンプの下端に到達せず)、非常用海水ポンプの取水に影響が無いことを確認する。
 - 砂の堆積高さは、2号取水設備を1次元的にモデル化し、高橋ほか(1999)の手法を用いて算定する。
 - なお、本検討は、海底地形変化の検討(評価1)において、取水口前面の砂の堆積高さが最も大きいケースを対象に実施する。

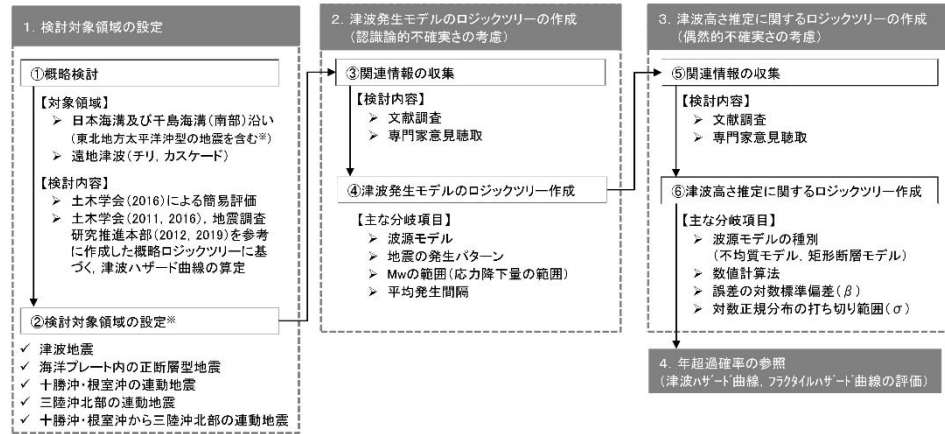


(資料來源：東北電力 (2019))
圖 5-8 女川核電廠の泥沙運移評估

IV. 年超過確率の参照 1. 評価概要

1. 1 評価方針

- ・ 確率論的津波ハザード評価は、日本原子力学会(2012)、土木学会(2011)、土木学会(2016)及び3.11地震から得られた知見等を踏まえて実施した。
- ・ また、3.11地震の発生に伴い、当該地震の発生領域に蓄積していたひずみはほぼ解消し、今後数百年オーダーの期間にプレート境界部で3.11地震と同程度の規模のすべりが発生する可能性が小さいことも考慮した。
- ・ 評価フローを以下に示す。



※: 東北地方太平洋沖型の地震の評価にあたっては、3.11地震の発生に伴い、今後数百年オーダーの期間にプレート境界部で3.11地震と同程度の規模のすべりが発生する可能性が小さいことを考慮した。



(資料來源: 東北電力 (2019))

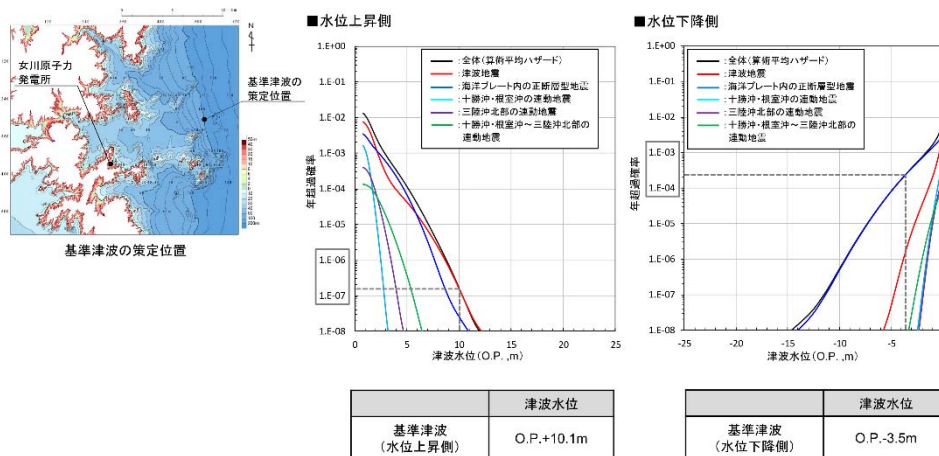
圖 5-9 女川核電廠的 PTHA 評估流程

IV. 年超過確率の参照 4. 評価結果

4. 2 年超過確率の参照

- ・ 基準津波の年超過確率は、水位上昇側で $10^{-6} \sim 10^{-7}$ 程度、水位下降側で $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 程度である※。

※: 敷地前面(水位上昇側)、2号取水口前面(水位下降側)における津波ハザード評価結果は、補足説明資料「IV. 6. 敷地前面、2号取水口前面における津波ハザード評価結果」に記載。



(資料來源: 東北電力 (2019))

圖 5-10 女川核電廠於取水口の PTHA 評估結果

表 5-1 模擬方法對變異量的影響

(資料來源：原子力規制委員会 (2018))

	1) 波源特性	2) 伝播特性	3) 遡上特性	4) 痕跡情報	津波高のばらつき β (κ)
土木学会 2011.9	• 一様すべりモデル	• 海底地形	• 地形格子 100~200m • 遡上なしの全反射	• 痕跡点の位置情報 の精度:小	日本海溝:0.34~0.37 (1.40~1.45) 南海トラフ:0.30~0.47 (1.35~1.60)
	• 不均一モデル	• 海底地形	• 地形格子 50m • 遡上なしの全反射	• 痕跡点の位置情報 の精度:小	日本海溝:0.31~0.37 (1.37~1.45) 南海トラフ:0.28~0.39 (1.32~1.48)
本技術報告	• 特性化波源モデル (不均一モデル)	• 海底地形	• 地形格子 5.6m • 遡上あり • 建屋あり	• 痕跡点の位置情報 の精度:高	日本海溝: 動的破壊、0.24~0.27 (1.27~1.31) 静的破壊、0.22~0.33 (1.25~1.39)

六、 PSHA SSHAC-3 SSC 隱沒帶 PTHA 邏輯樹建置評估

海嘯依「海嘯源」與「評估區域」的海嘯抵達時間和距離可分為近域、區域和遠域海嘯(IOC, 2019)。當時間在 1 小時內或距離在 200 km 內，稱為近域海嘯(local tsunami)；當時間介於 1-3 小時或距離在 1000 km 內，則稱為區域海嘯(regional tsunami)；當時間超過 3 小時或距離超過 1000 km，為屬於遠域海嘯(teletsunami 或 distant tsunami)。

地震通常造成近域海嘯的原因，然而海底山崩和火山作用引致之火山碎屑流(pyroclastic flows)亦為可能的因素。按照現有的歷史資料來說，90%的海嘯傷亡是來由近域海嘯造成(IOC, 2019)。除此之外，絕大多數的海嘯災害來自於近域或區域海嘯。IOC (2019)指出在 1980 年至 2017 年之間共有 34 個近域或區域海嘯造成近 25.2 萬人死亡(表 6-1)，以及數十億美元的損失。需要注意的是，其中有 24 個海嘯事件發生在太平洋和其鄰近地區。

遠域海嘯發生的機率較低，但由於其能量相當充足，使得其除了能對海嘯源附近的地區造成嚴重災害之外，亦能對較遠的地區造成影響，故其致災強度大於區域海嘯。在過去的 300 年之間，至少有 43 個遠域海嘯發生並導致 18 人死傷，如表 6-2 所示。舉例來說，1960 年的智利地震海嘯除了造成當地約 5000 人

死傷、200 萬人流離失所和 550 萬美金的損失之外，更對遠在太平洋的夏威夷，以及西太平洋的菲律賓和日本造成 61、20 和 139 人死亡。

圖 6-1 為台灣地震危害高階模型的報告架構，包含地震源特徵(Seismic Source Characterization, SSC)模型、地震動特徵(Ground Motion Characterization, GMC)模型和地震危害度分析輸入文件(Hazard Input Document, HID)共三個部分。SSC 模型的部分則分為斷層震源(Fault Source)、區域震源(Areal Source)和隱沒帶震源(Subduction Zone Source)。

本年度計畫主要針對隱沒帶震源的部分進行探討，而隱沒帶震源可再分為板塊界面型地震(Interface)和板塊內部型地震(Intraslab)，PSHA SSHAC-3 SSC (2019)是以斷層震源模擬前者，以區域震源模擬後者。另一方面，PTHA 需要斷層震源資訊，故本計畫之隱沒帶 SSC 於 PTHA 情境可用性之探討僅考慮板塊界面型地震。

因此，本節主要說明將 PSHA SSHAC-3 SSC (2019)隱沒帶資料應用於 PTHA 所需瞭解之要點。首先，如前一節所述，海嘯源主要需考量地震、海底山崩和火山作用。因此，需要注意到

PSHA SSHAC-3 SSC (2019)中的地震情境僅能提供 PTHA 進行地震型海嘯的分析。另一方面，由於地震危害度考量之地震源範圍是以核電廠為圓心，半徑 320 km 之範圍(圖 6-2)，故未能涵蓋區域型和遠域型的地震海嘯源。

圖 6-3 為核電廠附近的斷層及海溝分布，可以發現在隱沒帶的部分為琉球海溝和馬尼拉海溝。因此，本年度在 PSHA SSHAC-3 隱沒帶 SSC 的評估部分是以此兩區的資料進行。

圖 6-4 為 PSHA SSHAC-3 隱沒帶板塊界面型採用之邏輯樹架構，可分為 Interface Model、Rupture Model、Rupture Source (Length)、Earthquake Probability Model、Slip Rate、Geometry Model 和 Magnitude Distribution Model，共 8 個部分。

Interface Model 中，板塊界面型地震在 D-B 段為滑脫斷層 (Decollement)，台電計畫稱為 Interface 1；在 B-M 段為巨型逆斷層 (Megathrust)，台電計畫稱為 Interface 2。Interface 1 和 Interface 2 的傾角可能不同，也都有不確定性。Rupture Model 為各種可能的隱沒帶分段組合。

板塊界面型地震不僅傾角 (Geometry Model)，斷層長度 (Rupture Source) 和寬度 (Interface Model 和 Geometry Model) 也

有不確定性。在 Interface Model 中，三個分支分別考慮 Interface 1 和 Interface 2 合併開裂(寬度最大)、Interface 2 單獨開裂、以及 Interface 1 和 Interface 2 個別開裂。Earthquake Probability Model 為地震重現期之計算(考慮了 Poisson process 和時間相依)，Slip Rate 為隱沒帶的年滑移率，而 Magnitude Distribution Model 涉及地震規模分佈和參數的幾種可能性。下一節將以琉球和馬尼拉隱沒帶邏輯樹為例，以 PSHA SSHAC-3 隱沒帶 SSC 提供之隱沒帶邏輯樹轉換至 PTHA 所需之地震型海嘯邏輯樹。

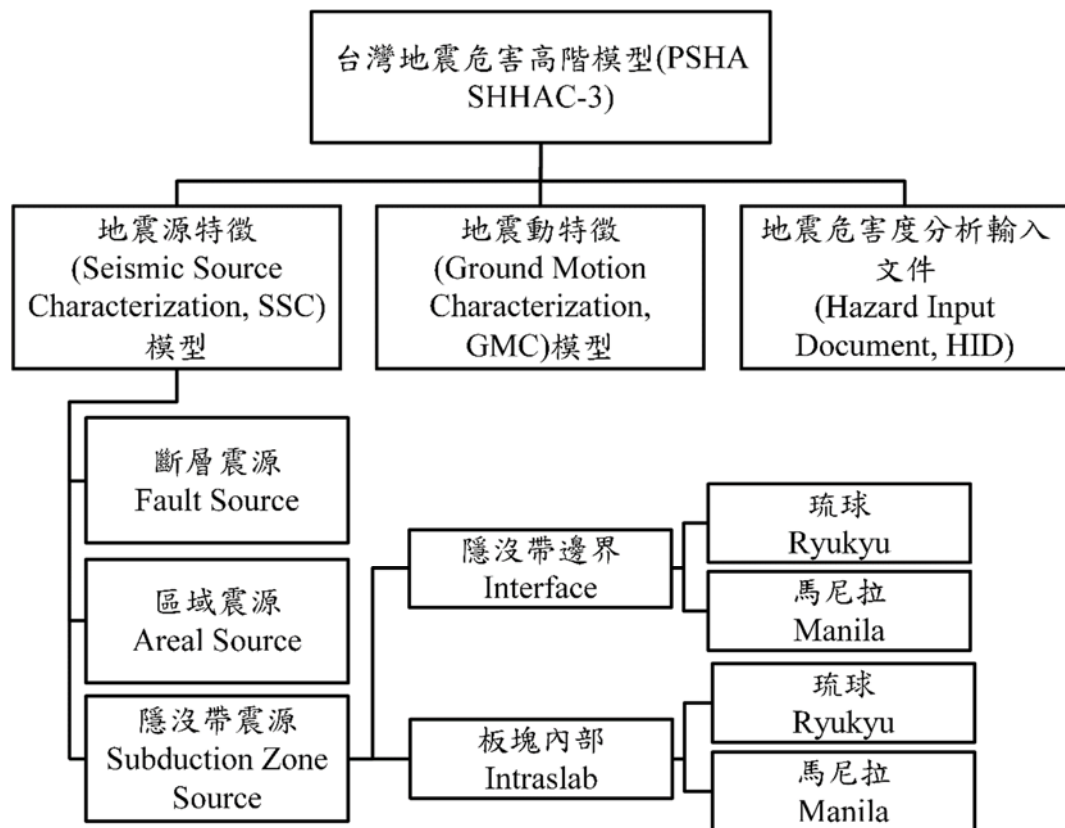
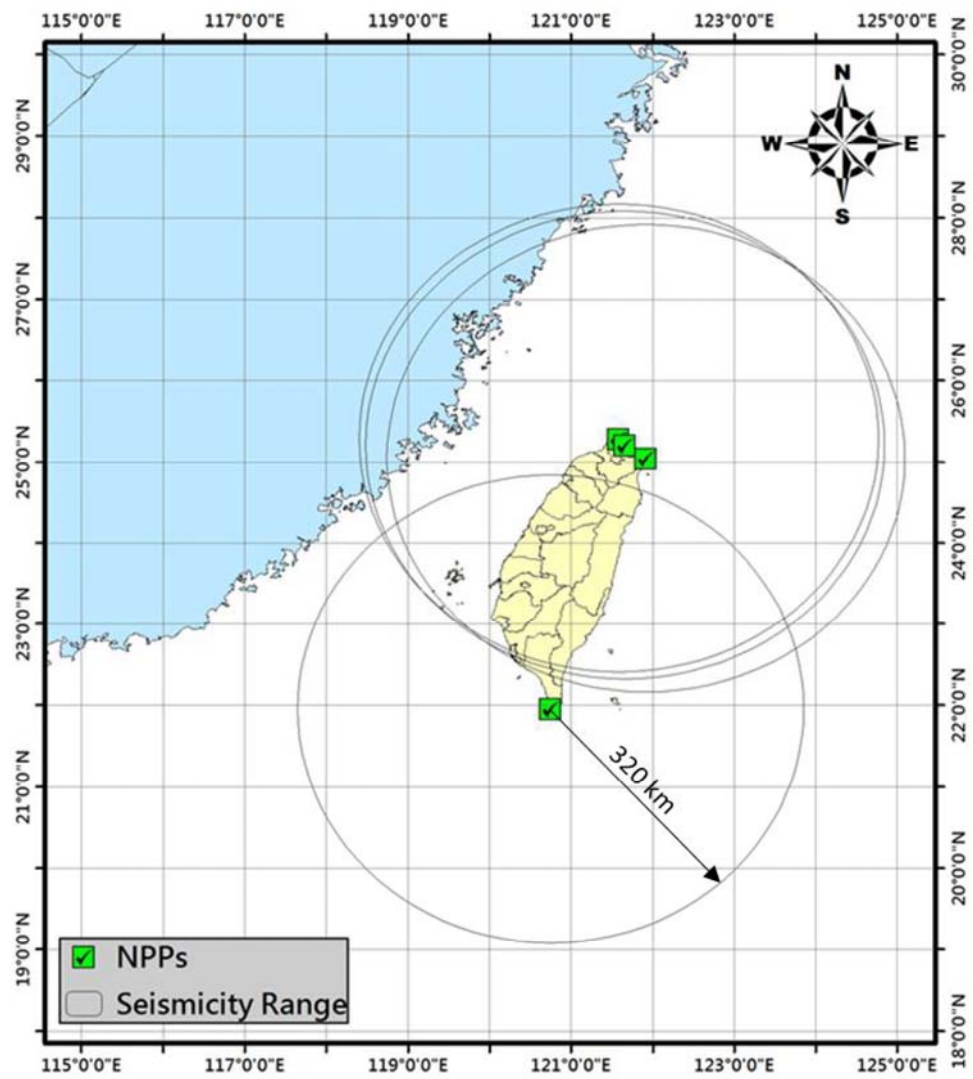
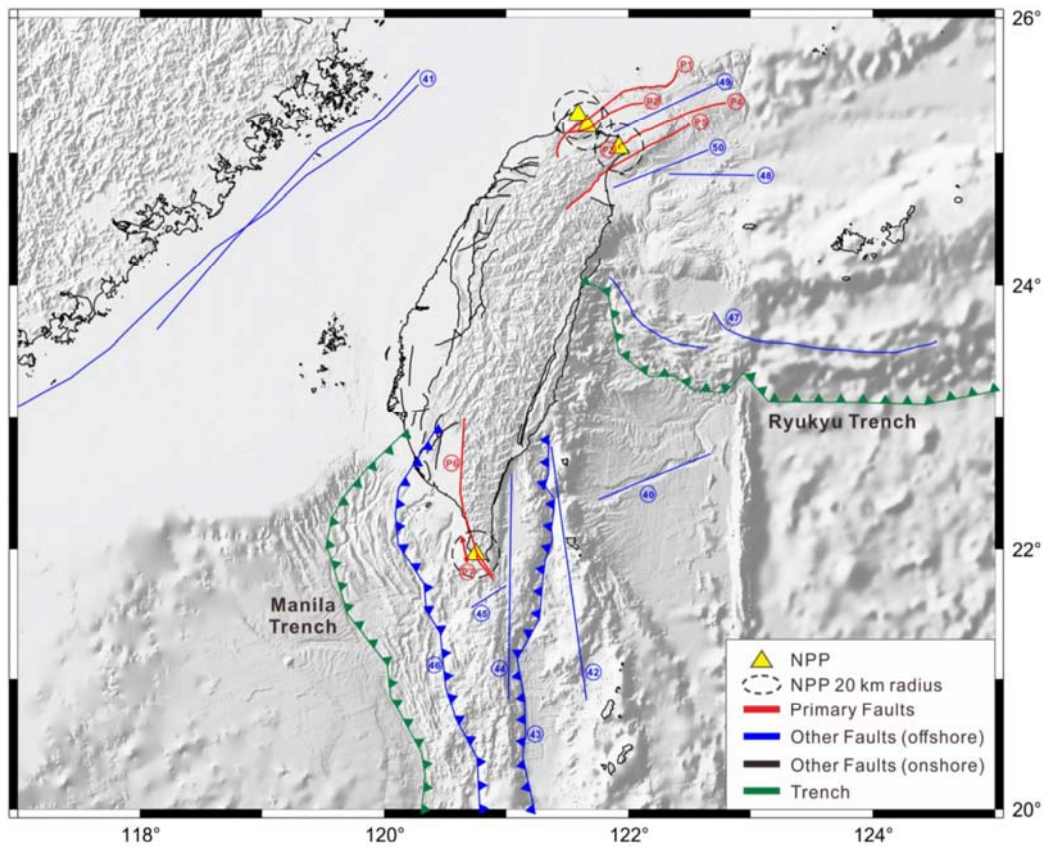


圖 6-1 台灣地震危害高階模型極其隱沒帶震源報告架構



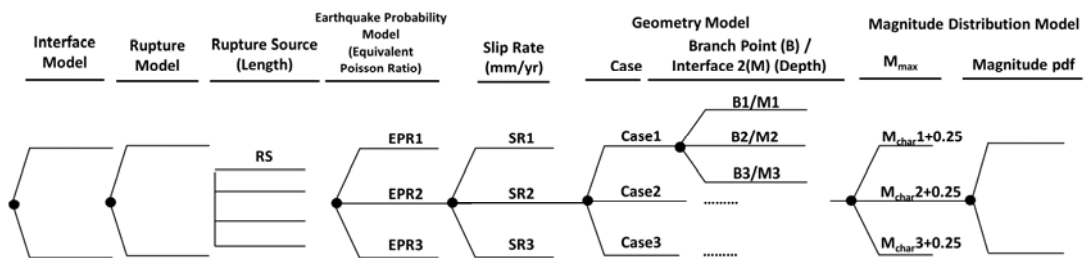
(資料來源：PSHA SSHAC-3 SSC (2019))

圖 6-2 台灣核電廠 PSHA 考慮之地震源範圍



(資料來源：PSHA SSHAC-3 SSC (2019))

圖 6-3 核電廠附近的斷層及海溝分布



(資料來源：PSHA SSHAC-3 SSC (2019))

圖 6-4 PSHA SSHAC-3 SSC 隱沒帶板塊界面型採用之邏輯樹架構

表 6-1 歷史近域及區域海嘯造成的死傷人數

(資料來源：IOC (2019))

Regional and local tsunamis causing deaths since 1980				
Year	Date		Source Location	Estimated Dead or Missing
	Mon	Day		
1981	9	1	Samoa Islands	Few
1983	5	26	Noshiro, Japan	100
1988	8	10	Solomon Islands	1
1991	4	22	Limon, Costa Rica	2
1992	9	2	Off coast Nicaragua	170
1992	12	12	Flores Sea, Indonesia	1 169
1993	7	12	Sea of Japan	208
1994	6	2	Java, Indonesia	238
1994	10	8	Halmahera, Indonesia	1
1994	11	4	Skagway Alaska, USA**	1
1994	11	14	Philippine Islands	*81
1995	5	14	Timor, Indonesia	11
1995	10	9	Manzanillo, Mexico	1
1996	1	1	Sulawesi, Indonesia	9
1996	2	17	Irian Jaya, Indonesia	110
1996	2	21	Northern Peru	12
1998	7	17	Papua New Guinea	1 636
1999	8	17	Izmit Bay, Turkey	155
1999	11	26	Vanuatu Islands	5
2001	6	23	Southern Peru	26
2003	9	25	Hokkaido, Japan	2
2004	12	26	Banda Aceh, Indonesia	*^227 899
2006	3	14	Seram Island, Indonesia	4
2006	7	17	Java, Indonesia	802
2007	4	1	Solomon Islands	50
2007	4	21	Southern Chile	8
2007	8	15	Southern Peru	3
2009	9	29	Samoa Islands	192
2010	1	12	Haiti	7
2010	2	27	Southern Chile	156
2010	10	25	Mentawai, Indonesia	431
2011	3	11	Tohoku, Japan	*^18 434
2013	2	6	Solomon Islands	10
2015	9	16	Central Chile	8
2017	6	17	Greenland**	4
2018	9	28	Sulawesi, Indonesia	*2 256
2018	12	22	Krakatau, Indonesia***	437
Total				254 639
* May include earthquake deaths				
** Tsunami generated by landslide				
***Tsunami generated by volcanic eruption				
^ Includes dead/missing near and outside source region				

表 6-2 歷史遠域海嘯造成當地及遠域的死傷人數和影響區域

(資料來源：IOC (2019))

Tsunamis causing deaths greater than 1000 km from the source location in existing records						
Date			Source Location	Estimated Dead or Missing		
Year	Mon	Day		Local	Distant	Distant locations that reported casualties
1700	1	27	Cascadia Subduction Zone, USA		2	Japan
1755	11	1	Lisbon, Portugal	50 000	3	Brazil
1837	11	7	Southern Chile	0	16	USA (Hawaii)
1868	8	13	Northern Chile**	*25 000	7	New Zealand, Samoa, Southern Chile
1877	5	10	Northern Chile	277	2 005	Fiji, Japan, Peru, USA (Hawaii)
1883	8	27	Krakatau, Indonesia	34 417	1	Sri Lanka
1899	1	15	Papua New Guinea	0	Hundreds	Caroline Islands, Solomon Islands
1901	8	9	Loyalty Islands, New Caledonia	0	Several	Santa Cruz Islands
1923	2	3	Kamchatka, Russia	2	1	USA (Hawaii)
1945	11	27	Makran coast, Pakistan	*4 000	15	India
1946	4	1	Unimak Island, Alaska, USA	5	162	Marquesas Is, Peru, USA (California, Hawaii)
1957	3	9	Andreanof Islands, Alaska, USA	0	2	USA (Hawaii, indirect deaths from plane crash doing tsunami reconnaissance)
1960	5	22	Central Chile	2 000	226	Japan, Philippines, USA (California, Hawaii)
1964	3	28	Prince William Sound, Alaska, USA	106	18	USA (California, Oregon)
2004	12	26	Banda Aceh, Indonesia***	*175 827	52 072	Bangladesh, India, Kenya, Madagascar, Maldives, Myanmar, Seychelles, Somalia, South Africa, Sri Lanka, Tanzania, Yemen
2005	3	28	Sumatra, Indonesia	0	10	Sri Lanka (deaths during evacuation)
2011	3	11	Tohoku, Japan	*18 432	2	Indonesia, USA (California)
2012	10	28	Haida Gwaii, Canada	0	1	USA (Hawaii, death during evacuation)

* May include earthquake deaths ** Local and regional deaths in Chile and Peru *** Local and regional deaths in Indonesia, Malaysia, and Thailand

七、 PTHA 邏輯樹建置

本節以琉球隱沒帶板塊界面型邏輯樹(圖 7-1)中，Interface Model 為 Interface1 + Interface2 分支說明本計畫提出之 PSHA SSHAC-3 SSC (2019)應用於 PTHA 的處理方式。地震型 PTHA 計算所需之參數包含 Okada 模型參數(震央位置、破裂深度、斷層長度、斷層寬度、滑移量、走向角、傾角、滑移角，共 8 個)和機率模型參數(邏輯樹權重和地震重現期，共 2 個)，合計 10 個。其中，3 個參數(斷層長度、滑移角和邏輯樹權重)可直接從 PSHA SSHAC-3 SSC (2019)報告中取得，5 個參數(震央、走向角、破裂深度、斷層寬度和傾角)為間接自 PSHA SSHAC-3 SSC (2019)報告的圖表中取得，最後 2 個參數(滑移量、地震重現期)需額外搭配理論和經驗公式計算。未來若能取得 PSHA SSHAC-3 SSC (2019)的細部震源參數設定，則可再進行計算方法的調整。

(一)琉球隱沒帶

1.直接取得之參數：斷層長度(L)、滑移角(λ)和邏輯樹權重

琉球海溝共計 6 種破裂的可能性(R1、R2、R3、R1+R2、R2+R3、R1+R2+R3)，其斷層長度(L)分別為 194 km、462 km、432 km、656 km、894 km 和 1088 km，如圖 7-1 所示。

由於斷層屬於逆衝斷層(RV)，代表滑移角(λ)為 90 度，如表 7-1 所示。

在邏輯樹權重的部分，會發現到除了 Rupture Source 外皆有權重值分配，如圖 7-1 所示。這是由於滑移速率(slip rate [mm/year])已全數由 Rupture Segment 分配至 Rupture Source，故所有 Rupture Source 的組合在 PSHA 計算時需同時考慮，故無權重值。

然而，在 PTHA 的計算中，地震海嘯考慮之情形是由單一個 Rupture Source (例如，R1)導致水體擾動，進而形成海嘯。因此，不同的 Rupture Source 需分別進行海嘯數值模擬，故本研究需對 Rupture Source 的分支建立權重值。舉例來說，Rupture Model 為 RS1+RM1 底下的 R1、R2、R3、R1+R2、R2+R3 和 R1+R2+R3，將視為 6 個不同的海嘯事件，且權重值皆設定為 1。

2.間接取得之參數：震央(x_c, y_c)和走向角(θ)

震央(x_c, y_c)和走向角(θ)可藉由 PSHA SSHAC-3 SSC (2019)中之破裂面分布圖取得。假設「地震發生時的破裂面即為隱沒帶之交界面」和「震央位於破裂面形心處」的條件

下，透過圖 7-2 可將海溝分段(例如：R1)以直線近似，線段中心處則設為該海溝之震央(x_c, y_c)，並可依此計算走向角(θ)。

以 R1 為例，將破裂面分布位置取線性迴歸後可得參數如表 7-2 所示。需要注意到，透過單一線段近似 R1 海溝段之方式會與原本 PSHA SSHAC-3 SSC (2019)之設定產生差異(震央、走向角和斷層長度)。此差異可透過劃分多個線段近似的方式處理，此處為求簡要闡述轉換至 PTHA 邏輯樹之方法，故以單一線段的方式舉例說明。

3.間接取得之參數：傾角(δ)、斷層寬度(W)、震源深度(h)

傾角(δ)、斷層寬度(W)和震源深度(h)透過 PSHA SSHAC-3 SSC (2019)報告中之資訊，以及幾何關係進行計算。R1 計算之結果列於表 7-3 和表 7-4，計算方法如下所述。

首先，將圖 7-3 中的 Branch Point 與地表之水平距離令為 X_1 ，Branch Point 與 Bottom of Interface 2 的水平距離令為 X_2 ，則 Interface 1 的傾角(δ_1)可表示為：

$$\delta_1 = \tan^{-1}\left(\frac{B}{X_1}\right) \quad (7-1)$$

同樣的，Interface 2 的傾角(δ_2)可表示為：

$$\delta_2 = \tan^{-1} \left(\frac{M-B}{X_2} \right) \quad (7-2)$$

W_1 和 W_2 分別為 Interface 1 和 Interface 2 的斷層寬度，

以斷層面積(A)和長度(L)的關係式為：

$$W_1 + W_2 = \frac{A}{L} \quad (7-3)$$

$$W_1^2 = X_1^2 + B^2 \quad (7-4)$$

$$W_2^2 = X_2^2 + (M-B)^2 \quad (7-5)$$

接著，透過圖 7-3 得知 X_1 約為 22 km，再搭配表 7-1 提供之斷層面積可進行 Interface 1 和 Interface 2 的傾角(δ_1 和 δ_2)和斷層寬度(W_1 和 W_2)之計算。

Interface 1 和 Interface 2 的破裂深度 h_1 和 h_2 可表示為：

$$\begin{cases} h_1 = \frac{B}{2} \\ h_2 = \frac{M+B}{2} \end{cases} \quad (7-6)$$

最後，由於 Interface 1 和 Interface 2 具各自的破裂深度(震央)，故透過圖 7-4 求得之震央在此分為兩處，Interface 1 和 Interface 2 的震央可分別表示如下，計算結果如表 7-5 所示：

$$\begin{cases} \text{dis}_1 = \frac{W_1 \cos(\delta_1)}{2} \\ \text{dis}_2 = \frac{W_2 \cos(\delta_2)}{2} \end{cases} \quad (7-7)$$

$$\begin{cases} dx_1 = \text{dis}_1 \sin(\theta + \frac{\pi}{2}), dy_1 = \text{dis}_1 \cos(\theta + \frac{\pi}{2}) \\ dx_2 = \text{dis}_2 \sin(\theta + \frac{\pi}{2}), dy_2 = \text{dis}_2 \cos(\theta + \frac{\pi}{2}) \end{cases} \quad (7-8)$$

$$\begin{cases} (x_{c1}, y_{c1}) = \left(x_c + \frac{dx_1}{111.32 \cos(y_c)}, y_c + \frac{dy_1}{110.54} \right) \\ (x_{c2}, y_{c2}) = \left(x_c + \frac{dx_2}{111.32 \cos(y_c)}, y_c + \frac{dy_2}{110.54} \right) \end{cases} \quad (7-9)$$

4.額外計算取得之參數：滑移量(D)和地震重現期(T)

斷層發生一次地震矩規模 M_w 的地震時，透過地震矩 $M_0 = \mu AD$ 與 Hanks and Kanamori (1979) 提出之關係式 $M_0 = 10^{1.5M_w + 16.05}$ ，可得滑移量如下，R1 之計算結果如表 7-6 所示。

$$D = \frac{10^{1.5M_w + 16.05}}{\mu A} \quad (7-10)$$

其中，地殼的剪力模數 $\mu = 3 \times 10^{11} \text{ dyne/cm}^2$ ，斷層面積 A 的單位為 cm^2 ，斷層滑移量 D 的單位為 cm 。

長期而言，斷層滑移累積的地震矩(seismic moment)會因發生地震而陸續解除，以取得平衡。斷層每發生一次地震矩規模 m 的地震，釋放地震矩為 $M_0 = 10^{1.5m + 16.05}$ (Hanks and Kanamori, 1979)，而斷層每年滑移累積的地震矩為 $M_0 = \mu AS$ ，

斷層年平均滑移速率 S 的單位為 cm/year ，故可得在 Poisson Process 假設下，地震年平均發生率 λ 和地震重現期(T)如下，
R1 計算結果如表 7-7 至表 7-9 所示。

$$\begin{cases} \lambda = \frac{\mu AS}{10^{1.5m+16.05}} \\ T = \frac{1}{\lambda} \end{cases} \quad (7-11)$$

5.邏輯樹情境

以 Rupture Model = RS1+RM1 的邏輯樹分支為例，因考慮 6 種不同的 Rupture Source，5 種 Interface 1 和 Interface 2 的破裂位置組合，以及 3 種不同的地震矩規模計算方式，故 RS1+RM1 總計有 $6*5*3 = 90$ 組海嘯情境需進行海嘯模擬計算。其餘的 Rupture Model 中，RS1+RM2 共 $6*5*3=90$ 組海嘯情境，RS1+RM3 共 $3*5*3=45$ 組海嘯情境，RS1+RM4 共 $6*5*3=90$ 組海嘯情境，故琉球隱沒帶邏輯樹總計共有 315 組海嘯情境需進行海嘯模擬計算。

(二)馬尼拉隱沒帶

本節以與上一節琉球隱沒帶相同的方式，進一步確認本研究提出之方法用於馬尼拉隱沒帶的可行性。

1.直接取得之參數：斷層長度(L)、滑移角(λ)和邏輯樹權重

馬尼拉隱沒帶共計 6 種交界面破裂的可能性(D1、D2、D3、D1+D2、D2+D3、D1+D2+D3)，其斷層長度(L)分別為 117 km、229 km、274 km、346 km、503 km 和 620 km，以及 6 種分支斷層(splay fault)破裂的可能性(S1、S2、S3、S1+S2、S2+S3、S1+S2+S3)，其斷層長度(L)分別為 33 km、322 km、130 km、355 km、452 km 和 485 km，如圖 7-5 所示。由於斷層屬於逆衝斷層(RV)，代表滑移角(λ)為 90 度，如表 7-10 所示。

與琉球隱沒帶考慮邏輯樹權重的方式相同，本研究將 Rupture Source 各分支的權重值設定為 1。舉例來說，Rupture Model 為 MSI-RM1 底下的 D1、D2、D3、D1+D2、D2+D3 和 D1+D2+D3，將視為 6 個不同的海嘯事件，且權重值分別為 1。

2.間接取得之參數：震央(x_c, y_c)和走向角(θ)

震央(x_c, y_c)和走向角(θ)可藉由 PSHA SSHAC-3 SSC (2019)中之破裂面分布圖取得。假設「地震發生時的破裂面即為隱沒帶之交界面」和「震央位於破裂面形心處」的條件下，透過圖 7-6 可將海溝分段(例如：D1)以直線近似，線段中心處則設為該海溝之震央(x_c, y_c)，並可依此計算走向角(θ)。需要注意到，其中的分支斷層 S1 位於陸域，故在計算海嘯所需之初始水位分布時，將不考慮此區段。

本研究以 D1 為例，將破裂面分布位置取線性迴歸後可得參數如表 7-11 所示。與琉球海溝相同，未來可透過劃分多個線段近似的方式處理，此處為求簡要闡述轉換至 PTHA 邏輯樹之方法，故以單一線段的方式舉例說明。

3.間接取得之參數：傾角(δ)、斷層寬度(W)、震源深度(h)

傾角(δ)、斷層寬度(W)和震源深度(h)透過 PSHA SSHAC-3 SSC (2019)中之資訊，以及幾何關係進行計算。與本研究於琉球隱沒帶採用之作法類似，不同之處在於 PSHA SSHAC-3 SSC (2019)報告並未在此提供對應之斷層面積，故本研究採用 Strasser et al. (2010)之經驗式，以 SSC 報告所列之地震矩規模計算面積大小：

$$M_w = 4.441 + 0.846 \log A \quad (7-12)$$

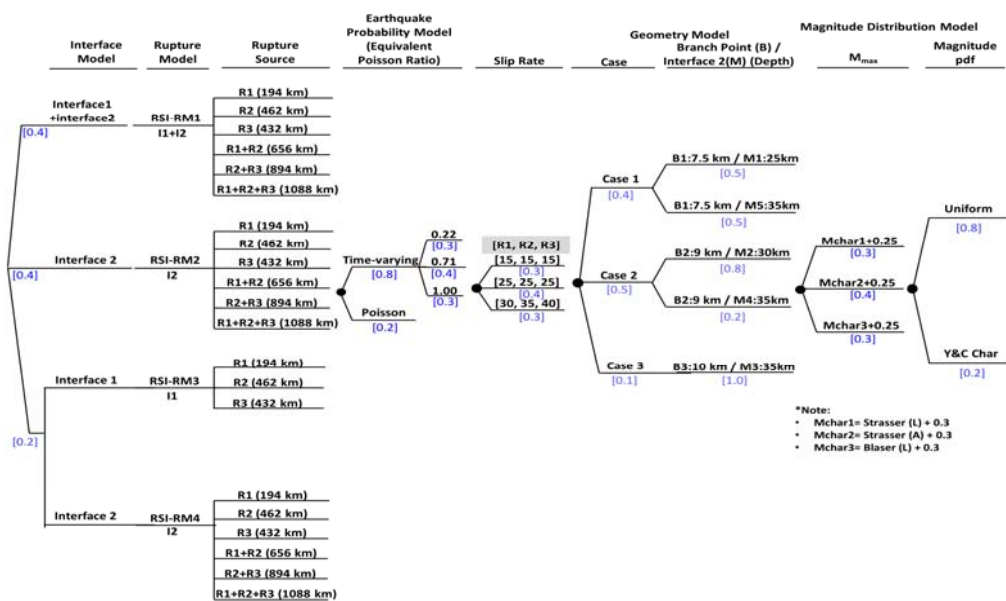
從表 7-8 可得知 Interface 1 的水平長度(X_1)約為 106 km，以此計算 D1 之結果列於表 7-12 至表 7-14。需要注意的是，當考慮分支斷層時，需再從表 7-8 中取得分支斷層的水平長度，代入 X_1 。

4.額外計算取得之參數：滑移量(D)和地震重現期(T)

透過本研究於琉球隱沒帶採用之相同作法可得滑移量和地震重現期，如表 7-15 至表 7-18 所示。

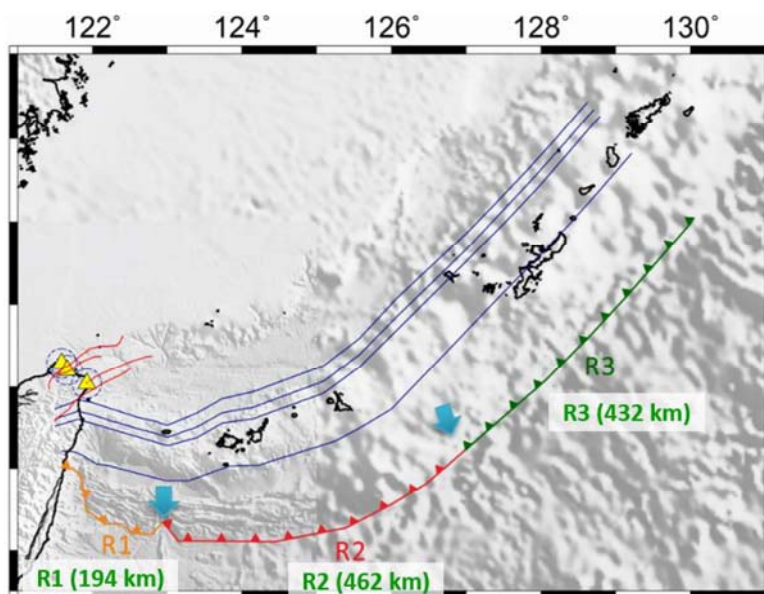
5.邏輯樹情境

以 Rupture Model = MSI-RM1 的邏輯樹分支為例，因考慮 6 種不同的 Rupture Source，5 種 Interface 1 和 Interface 2 的破裂位置組合，以及 3 種不同的地震矩規模計算方式，故 MSI-RM1 總計有 $6*5*3 = 90$ 組海嘯情境需進行海嘯模擬計算。其餘的 Rupture Model 中，MSI-RM2 共 $6*5*3=90$ 組、MSI-RM3 共 $3*5*3=45$ 組、MSI-RM4 共 $6*5*3=90$ 組、MSI-RM5 共 $6*6*3=90$ 組、MSI-RM6 共 $6*6*3=90$ 組海嘯情境，故馬尼拉隱沒帶邏輯樹總計共有 405 組海嘯情境需進行海嘯模擬計算。



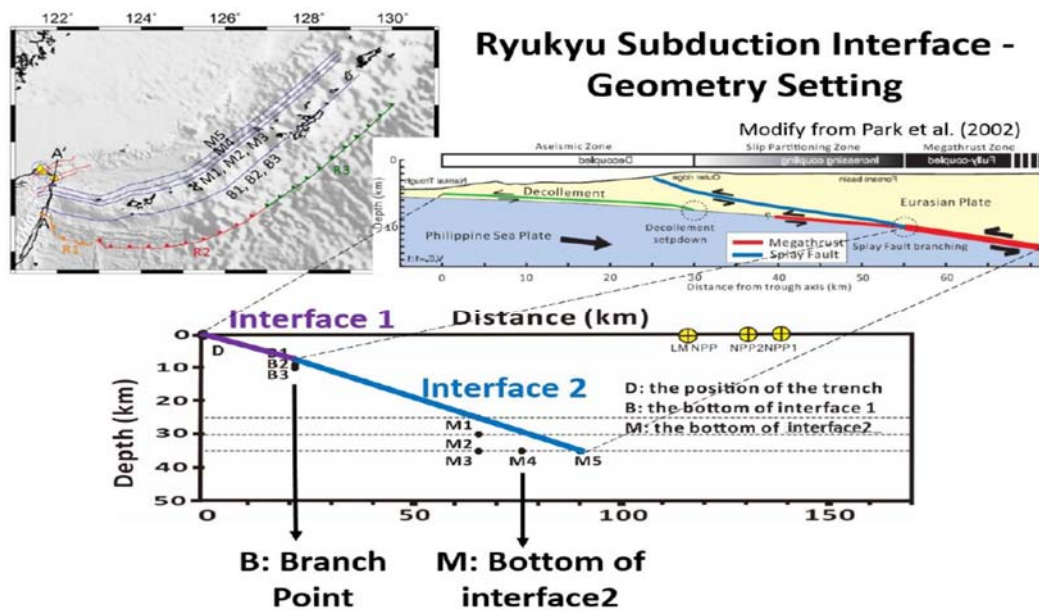
(資料來源：PSHA SSHAC-3 SSC (2019))

圖 7-1 PSHA SSHAC-3 SSC 琉球隱沒帶板塊界面型邏輯樹



(資料來源：PSHA SSHAC-3 SSC (2019))

圖 7-2 琉球隱沒帶板塊界面型分布圖



(資料來源：PSHA SSHAC-3 SSC (2019))

圖 7-3 琉球隱沒帶結構示意圖

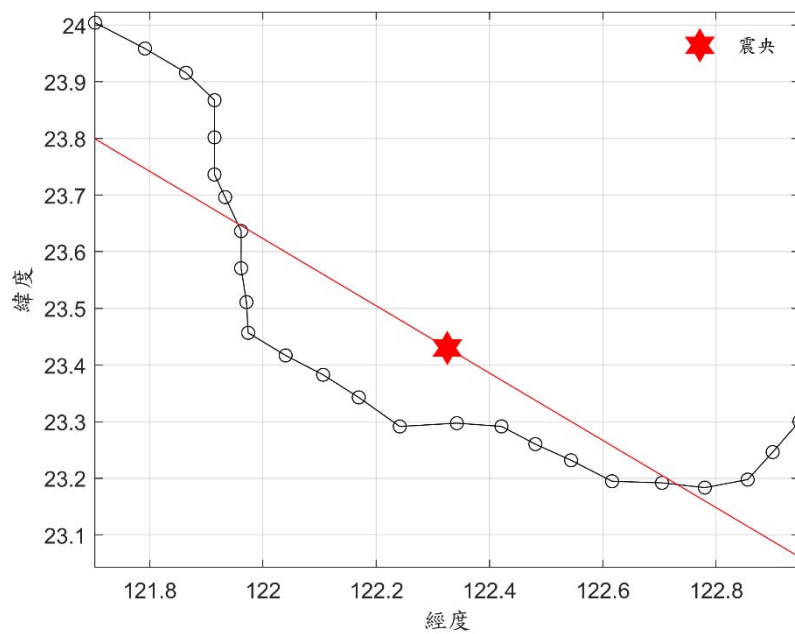
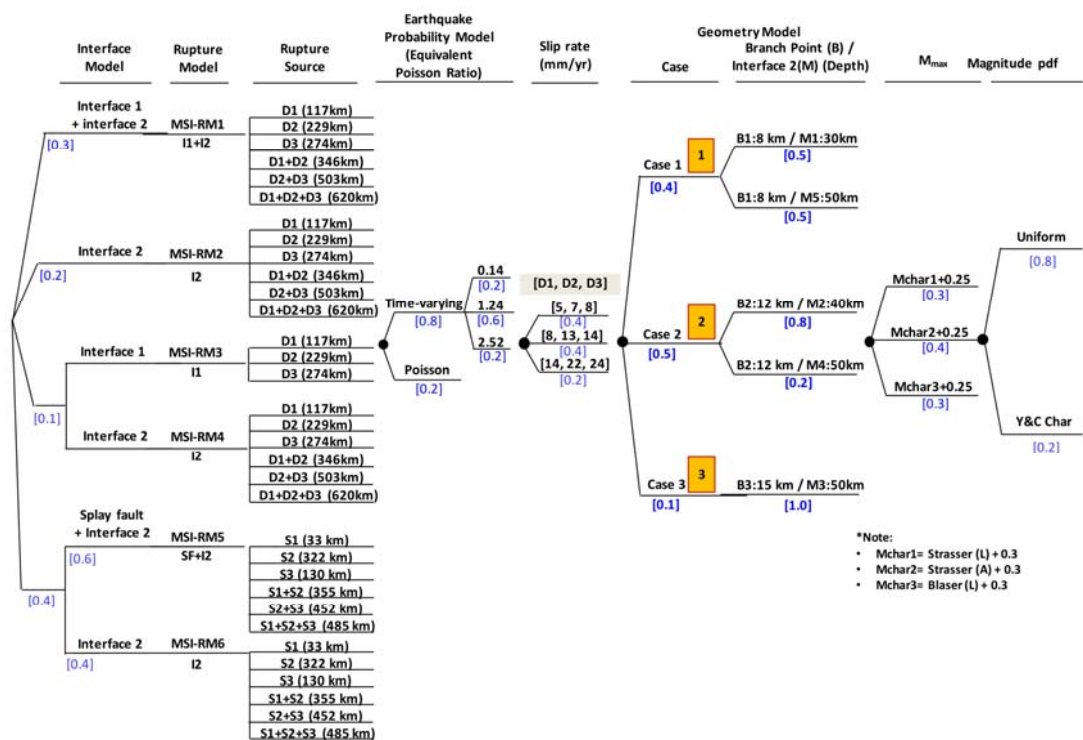
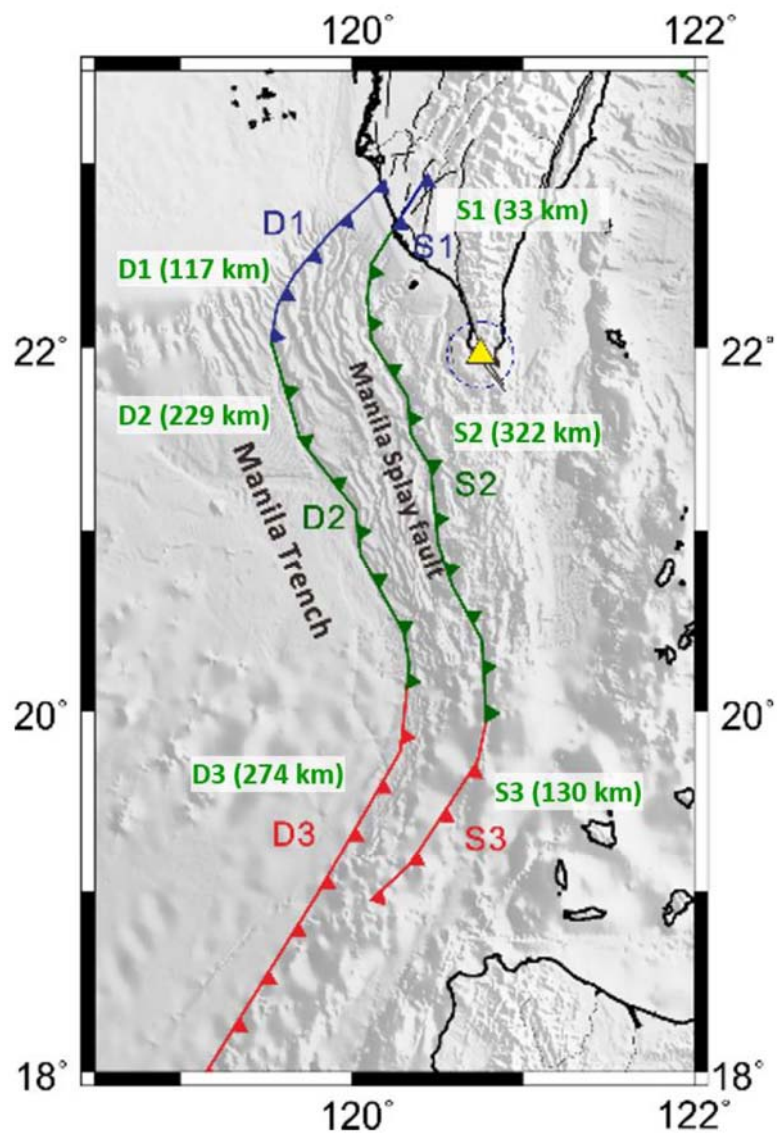


圖 7-4 琉球隱沒帶的 R1 海溝之處理方式



(資料來源：PSHA SSHAC-3 SSC (2019))

圖 7-5 PSHA SSHAC-3 SSC 馬尼拉隱沒帶板塊界面型邏輯樹



(資料來源：PSHA SSHAC-3 SSC (2019))

圖 7-6 馬尼拉隱沒帶板塊界面型分布圖

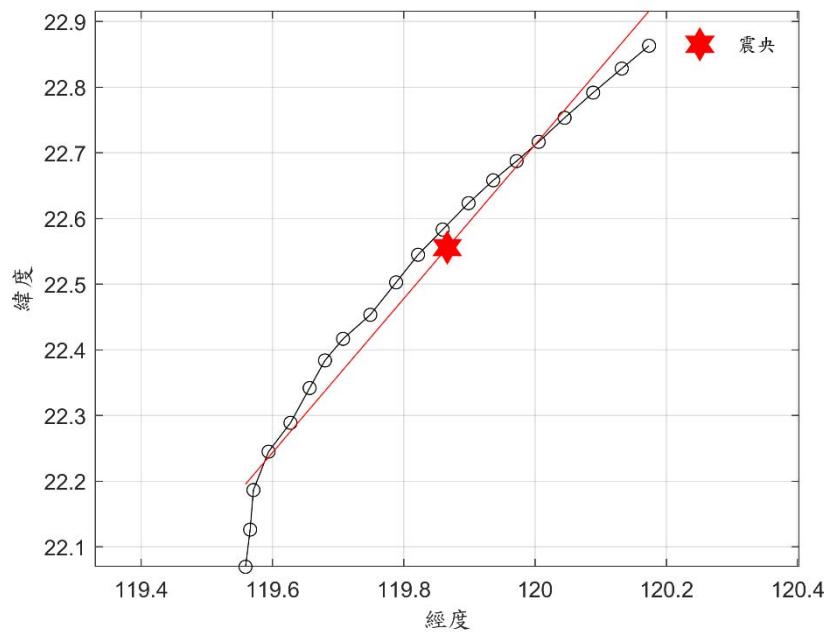
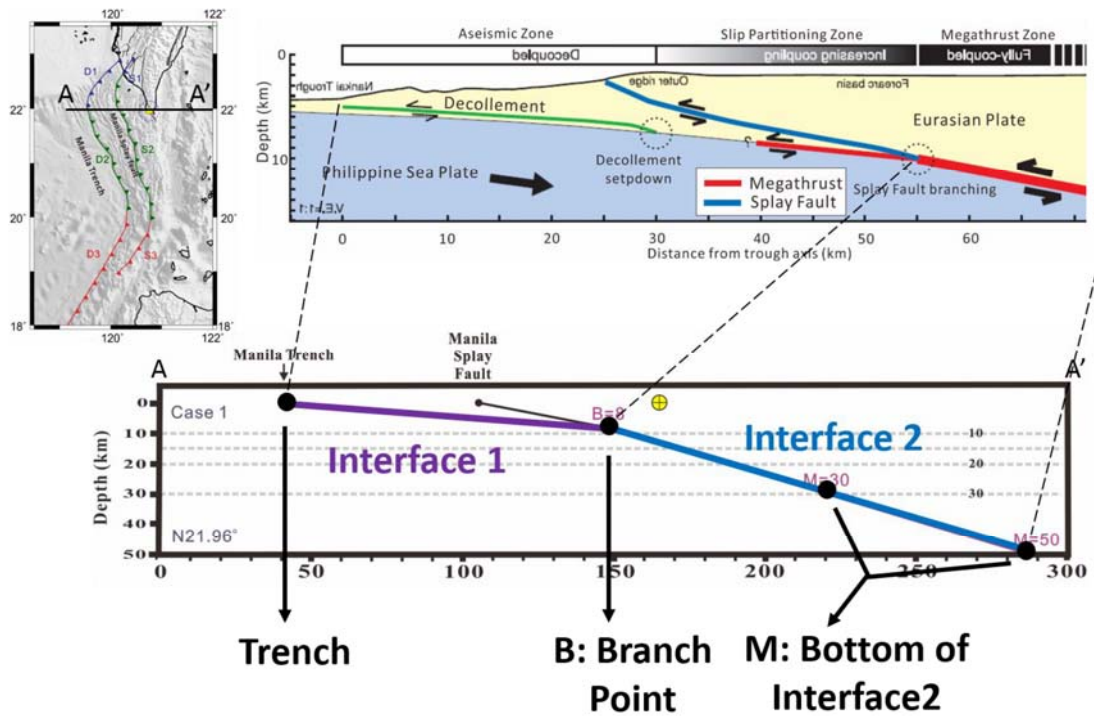


圖 7-7 馬尼拉隱沒帶的 D1 海溝之處理方式



(資料來源：PSHA SSHAC-3 SSC (2019))

圖 7-8 馬尼拉隱沒帶結構示意圖

表 7-1 琉球隱沒帶邏輯樹中的部分參數設定

(資料來源：PSHA SSHAC-3 SSC (2019))

A.9 Ryukyu Subduction Zone Interface

Ryukyu Trench	Segmentation	Style of Faulting	Length (km)	Dip (°)	Depth (km)			Area (km ²)	Characteristic Magnitude			Slip rate (mm/yr)			Allocation Slip rate (mm/yr)		
					B	M	A		M _{char} 1	M _{char} 2	M _{char} 3	S1	S2	S3	S1	S2	S3
R1	Interface1+ Interface2	90 (RV)	194	B1/M1	7.5	25	16773	8.35	8.32	8.52	15.0	25.0	30.0	9.0	15.0	16.0	
				B1/M5	7.5	35	20998		8.40								
				B2/M2	9	30	17042		8.32								
				B2/M4	9	35	18856		8.36								
				B3/M3	10	35	17364		8.33								
R2			462	B1/M1	7.5	25	74071	8.88	8.86	9.13	15.0	25.0	35.0	5.0	8.0	12.0	
				B1/M5	7.5	35	87617		8.92								
				B2/M2	9	30	74562		8.86								
				B2/M4	9	35	80499		8.89								
				B3/M3	10	35	75189		8.87								
R3			432	B1/M1	7.5	25	71853	8.84	8.85	9.08	15.0	25.0	40.0	8.0	13.0	24.0	
				B1/M5	7.5	35	80857		8.89								
				B2/M2	9	30	72244		8.85								
				B2/M4	9	35	76542		8.87								
				B3/M3	10	35	72745		8.85								

表 7-2 琉球隱沒帶 R1 海溝之震央、斷層長度和走向角

震央(x_c, y_c)	斷層長度(L)	走向角(θ)
(東經 122.33 度, 北緯 23.43 度)	194 km	329 度

表 7-3 琉球隱沒帶 R1 海溝之斷層寬度和傾角

Depth (km)		斷層面積 (km ²)	斷層寬度 (km)		傾角 (degree)	
B	M		Interface 1	Interface 2	Interface 1	Interface 2
7.5	25	16,773	23.24	63.22	18.82	16.07
7.5	35	20,998	23.24	84.99	18.82	18.88
9	30	17,042	23.77	64.08	22.25	19.13
9	35	18,856	23.77	73.43	22.25	20.74
10	35	17,364	24.17	65.34	24.44	22.50

表 7-4 琉球隱沒帶 R1 海溝之震源深度

Depth (km)		震源深度 (km)	
B	M	Interface 1	Interface 2
7.5	25	3.75	16.25
7.5	35	3.75	21.25
9	30	4.50	19.50
9	35	4.50	22.00
10	35	5.00	22.50

表 7-5 琉球隱沒帶 R1 拆解至 Interface 1 和 Interface 2 之震央

Depth (km)		震央(x_c, y_c) (度)	
B	M	Interface 1	Interface 2
7.5	25	(122.4223, 23.4813)	(122.5849, 23.5715)
7.5	35	(122.4223, 23.4813)	(122.6674, 23.6174)
9	30	(122.4223, 23.4813)	(122.5840, 23.5710)
9	35	(122.4223, 23.4813)	(122.6181, 23.5900)
10	35	(122.4223, 23.4813)	(122.5833, 23.5706)

表 7-6 琉球隱沒帶 R1 海溝之滑移量

Mw			斷層面積 (km^2)	滑移量 (m)		
M _{char1}	M _{char2}	M _{char3}				
8.35	8.32	8.52	16,773	7.47	6.73	13.44
8.35	8.40	8.52	20,998	5.97	7.09	10.73
8.35	8.32	8.52	17,042	7.35	6.63	13.22
8.35	8.36	8.52	18,856	6.64	6.88	11.95
8.35	8.33	8.52	17,364	7.21	6.73	12.98

表 7-7 琉球隱沒帶 R1 海溝之地震重現期($M_w=M_{char1}$)

M_w	斷層 面積 (km^2)	T (yr)			
		T1($S_1=9.0$ mm/yr)	T2($S_2=15.0$ mm/yr)	T3($S_3=16.0$ mm/yr)	$T = 0.3*T_1 +$ $0.4*T_2 +$ $0.3*T_3$
8.35	16,773	830	498	467	588
8.35	20,998	663	398	373	470
8.35	17,042	817	490	459	579
8.35	18,856	738	443	415	523
8.35	17,364	802	481	451	568

表 7-8 琉球隱沒帶 R1 海溝之地震重現期($M_w=M_{char2}$)

M_w	斷層 面積 (km^2)	T (yr)			
		T1($S_1=9.0$ mm/yr)	T2($S_2=15.0$ mm/yr)	T3($S_3=16.0$ mm/yr)	$T = 0.3*T_1 +$ $0.4*T_2 +$ $0.3*T_3$
8.32	16,773	748	449	421	530
8.40	20,998	788	473	443	559
8.32	17,042	736	442	414	522
8.36	18,856	764	458	430	541
8.33	17,364	748	449	421	530

表 7-9 琉球隱沒帶 R1 海溝之地震重現期($M_w=M_{char3}$)

Mw	斷層 面積 (km ²)	T (yr)			
		T1(S1=9.0 mm/yr)	T2(S2=15.0 mm/yr)	T3(S3=16.0 mm/yr)	$T = 0.3*T1 + 0.4*T2 + 0.3*T3$
8.52	16,773	1,493	896	840	1058
8.52	20,998	1,192	716	671	845
8.52	17,042	1,469	882	827	1041
8.52	18,856	1,328	797	747	941
8.52	17,364	1,442	865	811	1022

表 7-10 馬尼拉沒帶邏輯樹中之部分參數設定

(資料來源：PSHA SSHAC-3 SSC (2019))

A.10 Manila Subduction Zone Interface

Rupture Source	Interface Model	Style of Faulting	Length (km)	Dip (°)	Depth (km)		Characteristic Magnitude			Slip rate (mm/yr)			Slip rate Aleatory Weight (mm/yr)			Allocation Slip rate (mm/yr)		
					B	M	M _{char1}	M _{char2}	M _{char3}	S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3
D1	Interface1+ Interface2	90 (RV)	117	B1/M1	8	30	8.05	8.27	8.17	5.0	8.0	14.0				2.1	3.3	6.5
				B1/M5	8	50		8.40										
				B2/M2	12	40		8.28										
				B2/M4	12	50		8.33										
				B3/M3	15	50		8.29										
D2			229	B1/M1	8	30	8.45	8.55	8.64	7.0	13.0	22.0				2.2	4.7	7.5
				B1/M5	8	50		8.67										
				B2/M2	12	40		8.56										
				B2/M4	12	50		8.61										
				B3/M3	15	50		8.57										
D3			274	B1/M1	8	30	8.56	8.67	8.77	8.0	14.0	24.0				4.6	7.7	13.0
				B1/M5	8	50		8.78										
				B2/M2	12	40		8.68										
				B2/M4	12	50		8.72										
				B3/M3	15	50		8.69										

表 7-11 馬尼拉隱沒帶 D1 海溝之震央、斷層長度和走向角

震央(x_c, y_c)	斷層長度(L)	走向角(θ)
(東經 119.87 度, 北緯 22.56 度)	117 km	49.54 度

表 7-12 馬尼拉隱沒帶 D1 海溝之斷層寬度和傾角

Depth (km)		斷層面積 (km ²)	斷層寬度 (km)		傾角 (degree)	
B	M		Interface 1	Interface 2	Interface 1	Interface 2
7.5	25	38,469	106.30	222.49	4.32	5.67
7.5	35	47,827	106.30	302.47	4.32	7.98
9	30	38,469	106.38	222.11	6.46	7.24
9	35	42,893	106.68	259.93	6.46	8.41
10	35	39,530	107.06	230.81	8.05	8.72

表 7-13 馬尼拉隱沒帶 D1 海溝之震源深度

Depth (km)		震源深度 (km)	
B	M	Interface 1	Interface 2
8	30	4.00	19.00
8	50	4.00	29.00
12	40	6.00	26.00
12	50	6.00	31.00
15	50	7.50	32.50

表 7-14 馬尼拉隱沒帶 D1 拆解至 Interface 1 和 Interface 2 之震央

Depth (km)		震央(x_c, y_c) (度)	
B	M	Interface 1	Interface 2
8	30	(120.2046, 22.1952)	(120.5688, 21.7980)
8	50	(120.2046, 22.1952)	(120.8154, 21.5291)
12	40	(120.2046, 22.1952)	(120.5654, 21.8017)
12	50	(120.2046, 22.1952)	(120.6816, 21.6750)
15	50	(120.2046, 22.1952)	(120.5900, 21.7749)

表 7-15 馬尼拉隱沒帶 D1 海溝之滑移量

Mw			斷層面積 (km^2)	滑移量 (m)		
M _{char1}	M _{char2}	M _{char3}				
8.05	8.27	8.17	38,469	1.16	2.47	1.75
8.05	8.40	8.17	47,827	0.93	3.11	1.41
8.05	8.28	8.17	38,469	1.16	2.56	1.75
8.05	8.33	8.17	42,893	1.04	2.73	1.57
8.05	8.29	8.17	39,530	1.12	2.58	1.70

表 7-16 馬尼拉隱沒帶 D1 海溝之地震重現期($M_w=M_{char1}$)

Mw	斷層 面積 (km ²)	T (yr)			
		T1(S1=2.1 mm/yr)	T2(S2=3.3 mm/yr)	T3(S3=6.5 mm/yr)	$T = 0.4*T1 + 0.4*T2 + 0.2*T3$
8.05	38,469	550	350	178	396
8.05	47,827	443	282	143	319
8.05	38,469	550	350	178	396
8.05	42,893	493	314	159	355
8.05	39,530	535	341	173	385

表 7-17 馬尼拉隱沒帶 D1 海溝之地震重現期($M_w=M_{char2}$)

Mw	斷層 面積 (km ²)	T (yr)			
		T1(S1=2.1 mm/yr)	T2(S2=3.3 mm/yr)	T3(S3=6.5 mm/yr)	$T = 0.4*T1 + 0.4*T2 + 0.2*T3$
8.27	38,469	1,176	749	380	846
8.40	47,827	1,482	943	479	1,066
8.28	38,469	1,218	775	393	876
8.33	42,893	1,298	826	419	933
8.29	39,530	1,227	781	396	822

表 7-18 馬尼拉隱沒帶 D1 海溝之地震重現期($M_w=M_{char3}$)

Mw	斷層 面積 (km ²)	T (yr)			
		T1(S1=2.1 mm/yr)	T2(S2=3.3 mm/yr)	T3(S3=6.5 mm/yr)	T = 0.4*T1+ 0.4*T2 + 0.2*T3
8.17	38,469	833	530	269	599
8.17	47,827	670	426	216	482
8.17	38,469	833	530	269	599
8.17	42,893	747	475	241	537
8.17	39,530	810	516	262	583

參、主要發現與結論

本計畫第一主題為「美國核電廠水災危害評估提交報告與管制技術內涵研析」，本研究所得主要發現與結論敘述如下：

- 一、本研究彙整美國核電廠水災危害評估之規範，評估報告分為兩個階段，分別為水災危害再評估報告和重點或綜合評估報告。前者依循 USNRC 於 2012 年發布之 10 CFR 50.54(f) 信函，並以 NUREG-0800、NUREG/CR-6966、NUREG/CR-7046 和 ANS-2.8 等相關導則進行以保守為原則，透過階層式危害度評估(HHA)的方式將 9 種水災機制進行再評估。
- 二、本研究彙整 USNRC 於 2012 年發布之 10 CFR 50.54(f) 信函針對不同水災機制之評估要點。舉例來說，局部強降雨之評估應將所有主動排水系統視為無法運行、忽略徑流損失以最大化徑流、慎選影響水深和流速的水力參數，並且這些參數應與標準工程方法中所用之值一致。
- 三、核電廠在進行第二階段的水災評估時，需依照 NEI 16-05 (2016) 提出之 FIAP 的初步評估程序進行，再依所屬路徑分類進行水災評估。其中的前 3 個路徑需提交重點評估報告，後 2 個路徑需提交綜合評估報告。
- 四、本研究蒐集美國沿岸核電廠的第二階段評估報告資料，瞭解其評估之水災機制，以及依據 NEI 16-05 (2016) 需進行之評估路徑，並擇選與台灣同處於環太平洋帶之 DCPD 為案例，說明其第一階段和第二階段的評估流程。此外，由於 DCPD 於第二階段只需繳交重點評估報告(路徑 2)，故加入需進行綜合評估之案例(Millstone 核電廠)。

五、DCPP 於局部強降雨(LIP)再評估時，先計算出可能最大降雨(PMP)，進而推求出 LIP。接著，以水動力模式(FLO-2D)分析 5 種不同雨型(降雨延時為 6 小時)對廠區造成之影響，並遵照 10 CFR 50.54(f)信函之指示以保守的方式進行考量。

六、Millstone 核電廠在面對路徑 5 的暴潮評估時，10 萬年重現期的情境分析結果顯示 APM 和防洪措施足以保護 SSCs，但並無法確保輔助飼水(auxiliary feedwater, AFW)相關設備的安全性。因此，Millstone 核電廠設想兩種情況(AFW 失效(Loss of AFW)和無法供水(Loss of Service Water))以及其應對策略。

本計畫第二主題為「機率式海嘯危害度分析技術研究」，本研究所得主要發現與結論敘述如下：

一、機率式海嘯危害度分析方法之架構可分為四個步驟，依序為海嘯波源模型、重現期評估、海嘯波傳模型和機率模型。

二、目前美國和日本的核電廠相關單位已建置完成機率式的地震型海嘯源評估方法，其他海嘯源的評估方式尚未建置完成。若需評估海底山崩引致海嘯，可按 USNRC (NUREG-CR7223, 2016)提出之初步架構，以及 USGS (2012)提出之重現期評估方法進行建置。

三、機率式海嘯危害度分析的概念與機率式地震危害度分析相似，其中最大的差異在於前者以「海嘯模擬」取代後者的地動衰減關係。早期雖有研究提出類似地動衰減式的經驗式，但目前仍是以水動力數值模型進行海嘯波計算為主。

四、USNRC (NUREG-CR7223, 2016)指出 USNRC 可採用 Thio et

al. (2010)之方法進行機率式海嘯危害度分析。Thio et al. (2010)透過格林函數以有效率的方式考慮大量的地震情境(超過10,000 種)建立離岸海嘯波高，並透過拆解的方式以更精細的方式進行模擬，達到建立溢淹危害度地圖之目的。

五、日本 NRA 建立的地震型機率式海嘯危害度分析方法之主要特色在於其特徵化波源模型，以此考慮了滑移量在空間和時間上的不確定性。透過此方式，可有效降低模擬計算的變異量。在海嘯溯升方面，發現採用特徵化波源模型會得到較保守的結果。

本計畫第三主題為「PSHA SSHAC-3 隱沒帶 SSC 於機率式海嘯危害度分析之可行性評估研究」，本研究所得主要發現與結論敘述如下：

- 一、PSHA SSHAC-3 SSC (2019)能提供 PTHA 有關地震型海嘯的部分海嘯情境。然而，仍須對可能的區域和遠域的地震型海嘯源進行評估。此外，雖然目前美國和日本核能管制單位尚未能提出考慮海底山崩和火山作用海嘯源的 PTHA 方法，但國內仍應持續關注相關研究，不可忽視其影響。
- 二、本研究依據 PSHA SSHAC-3 SSC (2019)書面報告建置轉換為 PTHA 邏輯樹所需參數之方法，未來若取得更細部的斷層資料，可再進行方法調整。
- 三、隱沒帶分為板塊界面型地震(Interface)和板塊內部型地震(Intraslab)，PSHA SSHAC-3 SSC (2019)是以斷層震源模擬前者，以區域震源模擬後者。由於 PTHA 需要斷層震源資訊，

故目前僅能考慮 PSHA SSHAC-3 SSC (2019)中的板塊介面型地震。

四、評估 PSHA SSHAC-3 SSC (2019)書面報告的琉球隱沒帶和馬尼拉隱沒帶的板塊界面型地震邏輯樹結果顯示，以此建置 PTHA 危害度曲線需要分別考慮 315 和 405 個海嘯情境。

肆、参考文献

1. ANS-2.8, 1992. American National Standard for Determining Design Basis Flooding at Power Reactor Sites. Prepared by the American Nuclear Society Standards Committee Working Group.
2. ASCE 7-16, 2017. Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures, American Society of Civil Engineers, Structural Engineering Institute.
3. Bommer, J.J. and Abrahamson, N.A., 2006. Why do modern probabilistic seismic-hazard analyses often lead to increased hazard estimates? B Seismol Soc Am, 96: 1976-1977.
4. Burbidge, D., Cummins, P.R., Mleczko, R. and Thio, H.K., 2008. A probabilistic tsunami hazard assessment for western australia. Pure and Applied Geophysics, 165(11-12): 2059-2088.
5. Cartwright, J.H. and Nakamura, H., 2008. Tsunami: A history of the term and of scientific understanding of the phenomenon in Japanese and western culture. Notes Rec R Soc Lond, 62(2): 151-66.
6. Choi, B.H., Pelinovsky, E., Kim, K.O. and Lee, J.S., 2003. Simulation of the trans-oceanic tsunami propagation due to the 1883 krakatau volcanic eruption. Nat Hazard Earth Sys, 3(5): 321-332.
7. Cornell, C.A., 1968. Engineering seismic risk analysis. B Seismol Soc Am, 58(5): 1583-1606.
8. Dominion Energy, 2020. Response to March 12, 2012 request for information enclosure 2, recommendation 2.1 flooding focused evaluation / integrated assessment submittal.
9. Downes, G.L. and Stirling, M.W., 2001. Groundwork for

- development of a probabilistic tsunami hazard model for New Zealand, International Tsunami Symposium 2001. NOAA Pacific Marine Environmental Laboratory (PMEL), Seattle, Washington, pp. 293-301.
10. Geist, E.L. and Parsons, T., 2006. Probabilistic analysis of tsunami hazards. *Nat Hazards*, 37(3): 277-314.
 11. Gonzalez, F.I., Geist, E.L., Jaffe B., Kanoglu U., Mofjeld H., Synolakis C.E., Titov V.V., Arcas D., Bellomo D., Carlton D., Horning T., Johnson J., Newman J., Parsons T., Peters R., Peterson C., Priest G., Venturato A., Weber J., Wong F. and Yalciner A., 2009. Probabilistic tsunami hazard assessment at Seaside, Oregon, for near- and far-field seismic sources. *J Geophys Res-Oceans*, 114.
 12. Gonzalez, F.I., LeVeque, R.J. and Adams, L.M., 2013. Probabilistic tsunami hazard assessment (PTHA) for Crescent City, CA, University of Washington.
 13. Grezio, A., Babeyko, A., Baptista, M. A., Behrens, J., Costa, A., Davies, G., Geist, E. L., Glimsdal, S., Gonzalez, F. I., Griffin, J., Harbitz, C. B., LeVeque, R. J., Lorito, S., Lovholt, F., Omira, R., Mueller, C., Paris, R., Parsons, T., Polet, J., Power, W., Selva, J., Sorensen, M. B. and Thio, H. K., 2017. Probabilistic tsunami hazard analysis: Multiple sources and global applications. *Rev Geophys*, 55(4): 1158-1198.
 14. Gutenberg, B. and Richter, C., 1994. Frequency of earthquakes in california. *B Seismol Soc Am*, 34(4): 185-188.
 15. Hanks, T.C. and Kanamori, H., 1979. A moment magnitude scale. *J*

- Geophys Res: Solid Earth, 84(B5): 2348-2350.
16. IOC., 2019. Tsunami Glossary. Intergovernmental Oceanographic Commission Technical Series 85.
 17. Le Méhauté, B. and Wang, S., 1996. Water waves generated by underwater explosion, 10. World Scientific.
 18. Maeno, F. and Imamura, F., 2007. Numerical investigations of tsunamis generated by pyroclastic flows from the Kikai caldera, Japan. *Geophys Res Lett*, 34(23).
 19. Mofjeld, H.O., Gonzalez, F.I., Bernard, E.N. and Newman, J.C., 2000. Forecasting the heights of later waves in pacific-wide tsunamis. *Nat Hazards*, 22(1): 71-89.
 20. NEI 12-06, 2015. Diverse and Flexible Coping Strategies (FLEX) Implementation Guide (Revision 2). Nuclear Energy Institute.
 21. NEI 16-05, 2016. External Flooding Assessment Guidelines (Revision 1). Nuclear Energy Institute.
 22. NOAA, 2007. Geologic evidence of tsunamis. Scientific and technical issues in tsunami hazard assessment of nuclear power plant sites.
 23. NUREG-CR7223, 2016. Tsunami hazard assessment: Best modeling practices and state-of-the-art technology.
 24. Okada Y., 1985. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bull. Seismological Soc. Amer.*, 75(4), 1135-1154.
 25. Paris, R., 2015. Source mechanisms of volcanic tsunamis. *Philos Trans A Math Phys Eng Sci*, 373(2053).
 26. Paris, R., Switzer, A.D., Belousova, M., Belousov, A., Ontowirjo, B.,

- Whelley, P.L. and Ulvrova, M., 2014. Volcanic tsunami: A review of source mechanisms, past events and hazards in southeast Asia (Indonesia, Philippines, Papua New Guinea). *Nat Hazards*, 70(1): 447-470.
27. PG&E, 2010. Methodology for probabilistic tsunami hazard analysis: Trial application for the Diablo Canyon power plant site.
 28. PG&E, 2016. Updated Response to Request for Information Pursuant to 10 CFR 50.54(f) Regarding Recommendation 2.1 Flooding.
 29. PG&E, 2017. In Response to 50.54(f) Information Request Regarding Near-Term Task Force Recommendation 2.1.
 30. PSHA SSHAC-3 SSC, 2019, Development of the Hazard Input Document for Taiwan using SSHAC Level 3 Methodology. Volume 2: SSC Technical Report, Taiwan Power Company.
 31. Rikitake, T. and Aida, I., 1988. Tsunami hazard probability in Japan. *B Seismol Soc Am*, 78(3): 1268-1278.
 32. Satake, K., 1995. Linear and nonlinear computations of the 1992 Nicaragua earthquake tsunami. *Pure and Applied Geophysics*, 144(3-4): 455-470.
 33. Schwartz, D.P. and Coppersmith, K.J., 1984. Fault behavior and characteristic earthquakes - examples from the Wasatch and San Andreas fault zones. *J Geophys Res*, 89(Nb7): 5681-5698.
 34. Strasser, F.O., Arango, M.C. and Bommer, J.J., 2010. Scaling of the source dimensions of interface and intraslab subduction-zone earthquakes with moment magnitude. *Seismol Res Lett*, 81(6): 941-950.

35. Thio, H.K., Somerville, P. and Polet, J., 2010. Probabilistic tsunami hazard in California: pp. 1-331.
36. USNRC, 1994. Estimating Bounds on Extreme Precipitation Events. National Academy Press, Washington.
37. USNRC, 2012. Request for Information Pursuant to Title 10 of the Code of Federal Regulations 50.54(f) Regarding Recommendations 2.1, 2.3, and 9.3, of the Near-Term Task Force Review of Insights from the Fukushima Dai-ichi Accident, March 12, 2012, ADAMS Accession No. ML12053A340.
38. USNRC, 2013. FAQ-031, Hazard Reevaluation Report (HRR)-Interim Action Responses (Revision 1).
39. USNRC, 2014. FAQ-033, Hazard Reevaluation Report (HRR)-Options for Interim Actions for Challenging HRRs (Revision 1).
40. USNRC, 2015. Coordination of Requests for Information Regarding Flooding Hazard Reevaluations and Mitigating Strategies for Beyond-Design-Basis External Events.
41. USNRC JLD-ISG-2012-06, 2013. Guidance for Performing a Tsunami, Surge and Seiche Flooding Safety Analysis (Revision 0). Japan Lessons-Learned Project Directorate Interim Staff Guidance.
42. USNRC NUREG-0800, 2007. Standard Review Plan for the Review of Safety Analysis Reports for Nuclear Power Plants: LWR Edition - Site Characteristics and Site Parameters (Chapter 2). ADAMS Accession No. ML070400364.
43. USNRC NUREG/CR-6966, 2009. Tsunami Hazard Assessment at Nuclear Power Plant Sites in the United States of America - Final

- Report. ADAMS Accession No. ML082810348.
44. USNRC NUREG/CR-7046, 2011. Design-Basis Flood Estimation for Site Characterization at Nuclear Power Plants in the United States of America. ADAMS Accession No. ML11321A195.
 45. USGS, 2012. Tsunami landslide source probability and potential impact on new and existing power plants.
 46. 原子力規制委員会，2013。基準津波及び耐津波設計方針に係る審査ガイド。
 47. 原子力規制委員会，2018。確率論的津波ハザード評価に係る手法の提案:プレート間地震による津波波源の設定方法とその適用例。
 48. 土木學會原子力土木委員會津波小委員會，2016。原子力発電所の津波評価技術 2016。
 49. 東北電力，2019。女川原子力発電所2号炉津波評価について。
 50. 許文勝，2016。核電廠海嘯安全審査導則草案。
 - 51.