

安全審查報告

送審單位	台灣電力公司
報告名稱	核三廠機率式斷層位移危害 度分析總結報告

核能安全委員會核安管制組

中華民國 113 年 11 月

|

摘 要

台電公司因應核能安全委員會(組改前為行政院原子能委員會，以下簡稱本會)核安總體檢第二階段核能管制要求，針對恆春斷層的影響進行機率式斷層位移危害度分析與評估。在本會專案審查小組針對該報告之內容進行檢視與嚴格執行安全審查後，確認符合要求。

有鑑於福島事故之經驗，以及本會邀請經濟合作暨發展組織核能署(OECD/NEA)獨立專家小組進行同行審查辦理結果，本會要求台電公司就恆春斷層對核三廠廠區之影響進行機率式斷層位移危害度分析，並利用分析結果判斷恆春斷層對核三廠廠區的潛在影響。

台電公司依本會福島管制案要求提交「核三廠機率式斷層位移危害度分析總結報告」，經本會專案審查小組進行審查後確認：(1)地震法分析中，核三廠核島區與緊要海水泵室範圍內，地震再現周期 10,000 年與 100,000 年下之各分析點位移量，均未超過容許位移量，並不會對建築物與設備造成影響；(2)精進地震法分析中，核三廠核島區與緊要海水泵室範圍內，地震再現周期 10,000 年與 100,000 年下之各分析點位移量，均未超過容許位移量，並不會對建築物與設備造成影響。

總結台電公司「核三廠機率式斷層位移危害度分析總結報告」之審查結果，審查小組認為可以接受。

目 錄

第一章 前言	1
第二章 地震法機率式斷層位移危害度分析	3
第三章 位移法機率式斷層位移危害度分析	10
第四章 精進地震法機率式斷層位移危害度分析	14
第五章 審查總結	31
參考文獻	32

第一章 前言

一、本案緣起

有鑑於 2011 年日本 311 福島事故經驗，本會邀請經濟合作暨發展組織核能署(Organization for Economic Co-operation and Development Nuclear Energy Agency, OECD/NEA)獨立專家小組針對我國核能電廠壓力測試結果之國家報告進行同行審查工作，該審查工作已於 102 年 3 月 15 日完成，並提出審查之技術觀察與建議。

OECD/NEA 同行審查報告第 2.3.3 節：「當斷層非常接近核能電廠結構物時，除了震動性地動(藉由機率式地震危害度分析(Probabilistic Seismic Hazard Analysis, PSHA)計算)相關危害外，地震危害分析亦須包含斷層位移危害分析，以評估錯動造成的地表位移對核能電廠結構、系統與組件(Structures, Systems, and Components, SSCs)安全性的潛在影響。美國核能管制委員會 10 CFR 100 附錄 A 與國際原子能總署安全導則 SSG-9 明確提出此議題。就位移危害而言，北部的山腳斷層及南部的恆春斷層是位於可能影響核電廠的距離內，由台電公司提出的調查顯示，台電公司對斷層需調查的特性以及達到目的之方式均有良好的瞭解，然而，對斷層特性瞭解之預期僅限於納入 PSHA 之結果，且目前並未有個別的斷層位移危害分析」，並提出技術觀察，應該執行斷層位移危害分析，隨後本會將其列為核安總體檢第二階段核能管制項目之一。

綜上，為確保核能電廠在斷層位移可能引發的各種情況下仍可安全營運，本會要求台電公司針對恆春斷層對核三廠廠區之影響進行機率式斷層位移危害度分析，利用分析結果判斷恆春斷層對核三廠廠區的危害性。本機率式斷層位移危害度分析(Probabilistic Fault Displacement Hazard Analysis, PFDHA)分兩階段進行，第一階段為地震法(Earthquake Approach)，採用現有文獻資料以及現地勘查成果，進行場址之斷層位移分析；第二階段為位移法(Displacement Approach)，針對欲了解之斷層場

址進行古地震調查，以獲得斷層相關參數來進行場址之斷層位移分析。然因核三廠核島區場址現存構造年代較老或非能動斷層，且於建廠時期已將可供分析之古地震事件材料移除，無法獲得可靠之近期活動參數，故經評估後選擇於馬鞍山場址與頂虎頭山場址進行古地震調查，且不進行位移法分析，而改採更新第一階段地震法分析參數後，再次以地震法分析核島區之斷層位移危害度，稱為精進地震法。

二、審查過程

台電公司提出「核三廠機率式斷層位移危害度分析總結報告」，經本會完成程序審查之後，即邀請國內相關領域專家學者組成專案審查小組，進行專業審查作業。本會共計召開「核三廠機率式斷層位移危害度分析總結報告」2次審查會議及辦理4次書面審查，共提出29項審查意見。台電公司完成審查意見答覆並提出修訂版報告，經本會審查小組審查後，確認已無後續意見。

經完成上述審查過程後，本會提出台電公司「核三廠機率式斷層位移危害度分析總結報告」之安全審查報告。本安全審查報告分為五章，第一章為前言，第二章為地震法機率式斷層位移危害度分析，第三章為位移法機率式斷層位移危害度分析，第四章為精進地震法機率式斷層位移危害度分析，最後第五章說明審查總結。

第二章 地震法機率式斷層位移危害度分析

一、概述

本章說明台電公司核三廠評估報告中地震法機率式斷層位移危害度分析之審查內容。地震法分析之基本理論與分析程序，與 Cornell(1968)提出之機率法地震危害度分析程序相同，依據 Cornell 理論以及 Youngs 等人之研究成果(Youngs et al., 2003)，場址特定時間範圍內因斷層造成特定位移量之機率，與斷層之地震發生次數、地震規模分布、斷層破裂至場址最短距離、場址是否因地震造成位移之機率等因素有密切關係。因此地震法分析，首先需決定分析所需使用之參數與模式，參數與模式可由文獻回顧以及現地勘查之成果決定；其次決定分析所採用之邏輯樹，由於資料數量以及現今科學對斷層與地震認知無法涵蓋所有資訊，因此採用邏輯樹方式考慮其不確定性與評估各種可能性；最後進行斷層位移危害度分析。

地震法之分析震源，採用台電公司「營運中核能電廠地質穩定性及地震危害度再評估計畫」中所定義恆春斷層東緣之海域段(RFA)，恆春斷層東緣之陸域段(RFB)，以及西南恆春斷層段(SWA)。前述計畫針對恆春斷層相關震源參數已進行詳細的討論，且地震法分析時並無斷層參數之新事證，故採用該計畫之相關震源參數與模式進行位移危害度分析。

地震法分析範圍涵蓋核三廠整個核島區與緊要海水泵室，分析以核三廠 1、2 號機反應器廠房連線中點為中心，採用 100m×100m 區塊將核島區分為數個區塊，危害度分析針對反應器廠房連線中點、每一區塊角隅點以及緊要海水泵室角隅點進行，分析所得之位移量為因斷層錯動所造成之地表破裂處，破裂兩邊之相對位移量。分析結果包含(1)反應器廠房連線中點之位移危害度曲線，可提供不同再現周期下之位移量；(2)核島區各分析點之位移量；(3)緊要海水泵室之位移量。依 RG 1.208 之內

容，機率式地震危害度分析(PSHA)有關 SSE (Safe Shutdown Earthquake)，提供年超越頻率(Annual Frequency of Exceedance)為 0.0001(再現周期 10,000 年)以及 0.00001(再現周期 100,000 年)之分析結果。本案機率式斷層位移危害度分析，同樣提供再現周期 10,000 年與再現周期 100,000 年之分析結果。

二、審查情形

台電公司評估報告的地震法分析方法與成果，主要是描述地震法機率式斷層位移危害度分析的分析方法、分析參數、分析邏輯樹、各項機率函數以及分析結果。針對地震法內容，審查小組審查情形彙整如下：

有關地震法震源參數等議題，審查小組提出審查意見：報告所述東恆春斷層長度為 41 公里，究竟是 16+25 還是 17+24，請澄清。

台電公司答覆說明：第一階段地震法之震源中，東恆春斷層總長 41 公里係由陸域段長度(16 公里)及海域段長度(海口以北 2 公里、南灣以南 23 公里)加總而得。第二階段精進地震法則是考慮震源斷層分段，分段點以南 24 公里，以北 17 公里，共計 41 公里。經審查答覆內容後，可以接受。

有關地震法分析參數等議題，審查小組提出審查意見：(1)在採用純粹特徵地震模式下，如何以斷層年平均滑移速率計算地震年平均發生率？(2)在地震法中，為何假設斷層破裂至場址最短距離為均勻分佈？報告實際採用的最短距離還是隨機變數嗎？

台電公司答覆說明：(1)在純粹特徵地震模式下，地震平均釋放能量計算方式將改為 $\text{Mean}[M_0/\text{eqk}] = 10^{(1.5m+16.05)}$ ，利用地震平均發生率公式，即可推估地震平均發生率 $N_n(m_0)$ 。(2)此處敘述文字不精確，於報告修改本段文字為「一般假設於沿斷層面各點破裂之機率相同，其機率密度函數為均勻分布。」經審查答覆內容後，可以接受。

有關地震法邏輯樹分析等議題，審查小組提出審查意見：(1)在地震

法的邏輯樹中，滑移速率的不確定性權重多設定為 0.0125 至 0.1，僅東緣恆春斷層活動率 0.00025 次/年設定為 0.75，此將影響整個分析結果，並使其偏於不保守。請明列每年 0.00025 次的滑移速率值，並檢討其 0.75 的權重適切性。(2)在恆春斷層滑移速率、規模分布及最大可能地震邏輯樹圖中，斷層活動率宜以滑移速率呈現。(3)機率式斷層位移危害度分析邏輯樹各分支之權重，請說明台電公司內部歷次審查會議有無特別針對邏輯樹分支權重所召開的專家會議，並補充說明邏輯樹及各分支權重訂定之過程及相關會議討論紀錄。

台電公司第 1 次答覆說明：(1)第一階段地震法中，有關震源之參數係引自「營運中核能電廠地質穩定性及地震危害度再評估計畫」。其中滑移速率係用於推算活動率，東緣恆春斷層活動率 0.00025 次/年則係由最近一次活動距今時間保守假設。賦予東緣恆春斷層以滑移速率推算活動率之權重遠低於 0.00025 次/年之原因，為前述計畫依滑移速率推算之再現期非常短，與歷史觀測資料紀錄不相符，因此推測該等滑移速率值應含有非斷層活動因素，故於邏輯樹設定上將以滑移速率推算活動率之權重予以降低。(2)於地震法機率式斷層位移危害度分析中滑移速率係用於推算活動率，恆春斷層滑移速率、規模分布及最大可能地震邏輯樹圖內顯示之斷層活動率係假設前次活動迄今之時距，即為斷層活動之再現期計算之結果。若活動率要以滑移速率呈現，則依不同傾角、滑移角及最大地震規模之假設，將會有多個滑移速率，造成混淆。(3)本案第一、二階段之機率式斷層位移危害度分析成果，已由台電公司聘請專家召開期末報告審查會議，包括針對所採用斷層參數、機率密度函數、位移衰減式以及邏輯樹之合理性(含權重等)進行審閱，於報告定稿前，再由顧問公司邀請相關專家召開期末工作成果審查會議，並依據各審查意見修訂報告，方才定稿。邏輯樹及各分支權重之訂定係由顧問公司及國外專家 LCI 公司討論後決定，並於前述各階段期末報告審查中經由台電公司及顧問公司分別委請之專家委員進行審查後同意，故歷次報告審查過程

中即已針對邏輯樹架構內容進行討論。

針對台電公司第 1 次答覆說明，審查小組提出第 2 次審查意見：(1)指出“恆春斷層活動率 0.00025 次/年”推估之依據應有合理之論述。“活動率之權重予以降低”，降低多少及非斷層活動因素佔比多少等，均應有合理之論述。(2)指出滑移速率和斷層活動率放在同一張邏輯樹圖中，難以直接比較，尤其前者權重高達 0.75。宜選用相同的尺度參數，非固定值可以範圍表達。(3)指出本案機率式斷層位移危害度分析邏輯樹各分支權重，台電公司答復說明係由計畫執行單位與美國 LCI 公司討論決定，如此不可謂「召開專家會議決定」，台電公司應儘速規劃召開專家會議訂定邏輯樹分支權重值，以使評估結果具技術適切性。

台電公司第 2 次答覆說明：(1)第一階段地震法中之震源參數係直接引自「營運中核能電廠地質穩定性及地震危害度再評估計畫」。於第二階段精進地震法中，則是綜合過去恆春斷層相關文獻資料及本計畫槽溝開挖成果，將恆春斷層以一整體系統進行評估，其滑移速率推估之方法及結果已與第一階段不同，相較之下比第一階段地震法周全，故本計畫建議採用第二階段精進地震法之分析成果。(2) 恆春斷層滑移速率、規模分布及最大可能地震邏輯樹圖為第一階段地震法之震源邏輯樹，其滑移速率/活動率及權重均引自「營運中核能電廠地質穩定性及地震危害度再評估計畫」。修改後之恆春斷層滑移速率、規模分布及最大可能地震邏輯樹圖，已將活動率以滑移速率範圍方式表示，同時註明係由活動率依不同傾角、滑移角及最大地震規模之假設倒推得到。(3)第一階段地震法之震源邏輯樹及權重均引自「營運中核能電廠地質穩定性及地震危害度再評估計畫」，第二階段精進地震法之邏輯樹及各分支權重，係由國外專家 LCI 公司初步提出後列於報告中，再經由顧問公司及台電公司所聘請專家學者召開會議進行討論及審閱，過程中除針對分析方法外亦對於邏輯樹及權重進行探討，若有疑義者皆得提出並修正後一併帶入危害度分析進行成果修正，而經各修訂版次送專家學者審閱均無進一步

意見後決定最後版本，故評估結果應已具技術適切性。

針對台電公司第 2 次答覆說明，第(1)、(2)項審查意見答覆部分已無後續意見；第(3)項審查意見答覆部分，審查小組提出第 3 次審查意見：(3)指出有鑑於地震危害分析資深委員會(Senior Seismic Hazard Analysis Committee, SSHAC) 所訂定第 3 層級(以下簡稱 SSHAC Level 3)之機率式地震危害度分析(Probabilistic Seismic Hazard Analysis, PSHA)已告完成，請台電公司召開專家會議，檢視現有邏輯樹模型是否已充分考量知識不確定性，進一步評估本案參採 SSHAC Level 3 SSC 邏輯樹模型或相關參數之必要性，並依該會議結論視需要修訂本案報告。

台電公司第 3 次答覆說明：(3)台電公司已邀請參與 PSHA SSHAC Level 3 計畫之學者專家於 109 年 11 月 10 日及 12 月 8 日進行 2 次專家會議。依據第二次專家會議之結論，與會專家同意就本案之目的與關心之年發生率範圍而言，相對於 PSHA SSHAC Level 3 計畫，本案採用之震源參數與邏輯樹較為保守。經審查答覆內容後，可以接受。

有關地震法次要位移發生機率等議題，審查小組提出審查意見：本案採用的位移衰減式均為國外經驗公式，請考慮以集集地震斷層破裂的測量結果，加以驗證國外經驗式的適合性或做參數的調整，以符實用。

台電公司第 1 次答覆說明：由於恆春斷層未通過本案廠址，故本案地震法斷層位移分析需選用次要位移之預測公式。因目前並無已發表之逆斷層次要位移預測公式，本案採用 Petersen et al.(2011)平移斷層次要位移預測公式，因此尚難以 921 地震時量測之逆斷層活動資料進行驗證或參數調整。且僅以單一事件之量測資料自行發展位移預測公式，其代表性恐有疑慮。

針對台電公司第 1 次答覆說明，審查小組提出第 2 次審查意見：指出集集地震斷層破裂的測量結果已有論文發表，用這些資料來核對國外經驗式的適用性並無困難。

台電公司第 2 次答覆說明：經以 921 地震時量測之逆斷層活動資料 (K.I.Kelson et al., 2001、康耿豪, 2004)驗證本案採用之位移預測公式 (Petersen et al.,2011, Eq.18)，其結果顯示預測值與實際量測值大致相符。另由前述資料可知，921 地震時車籠埔斷層之次要位移絕大部份出現於斷層上盤；於下盤幾無次要位移發生。若此現象普遍存在於所有逆斷層活動，則於逆斷層下盤使用此預測公式時實際上所得為偏保守之結果。經審查答覆內容後，可以接受。

有關地震法位移危害度分析等議題，審查小組提出審查意見：(1)一般 PSHA 軟體可以計算不同頻率的反應譜加速度所對應年超越頻率的危害度曲線；PFDHA 雖與 PSHA 在理論上相同，但畢竟主要參數是位移而非 PSHA 的反應譜加速度，其編碼必須經過一些修改。台電公司所提供的審查資料未能看出 THAZ 軟體係如何執行與計算 PFDHA 的危害度曲線，請進一步說明。(2)台電公司以商用軟體 MathCad 進行平行計算，來驗證 THAZ 程式的正確性與可靠度，請提供驗證案例 THAZ 和 MathCad 計算位移危害度時，各相關積分變數離散化之間距；並請將案例 THAZ 計算位移危害度的各相關積分變數離散化之間距，分別放大成 2 倍和縮小成一半，重新計算位移危害度，再比較之。

台電公司第 1 次答覆說明：(1)THAZ 為 Letties Consultants International (LCI)公司一模組化程式集合，包括個別之前處理、後處理程式及核心程式(THAZ)。由於 PSHA 與 PFDHA 之差異有限，目前 THAZ 版本可執行兩者之分析。於進行 PFDHA 時之輸入，基本上與進行 PSHA 相同，主要分為場址、位移預測公式、震源及分析需求之訊息。場址訊息包括位置(座標)、分析網格(footprint)尺寸及分析考慮範圍；位移預測公式包括選用斷層位移預測公式(Fault Displacement Prediction Equation, FDPE)及發生地表破裂之條件機率公式；震源訊息包括斷層位置(座標)、寬度、深度、傾角、滑移速率、活動率、規模分布模型及參數、規模上限(或特徵地震規模)等；分析需求包括分析規模下限、規模級距

(magnitude step)、破裂級距(沿斷層走向及垂向)等。(2)驗證案例之 MathCad 規模間距取 0.05，原 THAZ 則取程式建議之 0.1 為規模間距；由 THAZ 規模間距分別取 0.05、0.1 及 0.2 之計算結果算例中，可觀察到其對位移危害度分析結果影響甚微。經審查答覆內容，可以接受。

三、審查小結

綜合審查小組對本章審查後，確認台電公司評估報告地震法機率式斷層位移危害分析之分析方法、分析參數、機率函數與公式，對核三廠整個核島區與緊要海水泵室進行地震法斷層位移危害度分析，在地震再現周期 10,000 年與 100,000 年下之各分析點位移量，均未超過容許位移量，並不會對建築物與設備造成影響。

綜合審查小組對本章審查結果，核三廠機率式斷層位移危害度分析之地震法分析結果，經審查可以接受。

第三章 位移法機率式斷層位移危害度分析

一、概述

本章說明台電公司核三廠評估報告中位移法機率式斷層位移危害度分析之審查內容。台電公司辦理核三廠機率式斷層位移危害度分析，在位移法機率式斷層位移危害度分析，針對欲了解之斷層場址進行古地震調查，以獲得斷層相關參數來進行場址之斷層位移分析。經評估地表地質、既有地質調查成果與建廠前調查等相關資料，核三廠廠址核島區無發現因構造活動造成之近期地殼錯動證據，該區域構造活動均屬年代較老之構造或非能動斷層。此外，核三廠建廠時於核島區進行之整地工作，已將可供準確分析與定年古地震事件之材料移除(地層年代小於五萬年)，若於此條件下進行核島區之槽溝開挖，仍無法獲得可靠之近期活動參數，故經評估後選擇於馬鞍山場址(調查馬鞍山周圍之西南恆春段)與頂虎頭山場址(調查恆春斷層帶東緣)進行槽溝開挖調查。

另依據 Youngs et al. (2003)提出之位移法機率式斷層位移危害度分析之分析程序，核島區位移法機率式斷層位移危害度分析，須利用核島區之古地震調查成果取得分析參數。由於古地震調查場址並不位於核島區，因此古地震調查成果無法提供核島區進行位移法機率式斷層位移危害度分析使用，僅能就西南恆春段與恆春斷層帶東緣進行位移法分析。

由於核島區屬於斷層錯動造成之次要位移區域，而西南恆春段或恆春斷層帶東緣為斷層錯動之主要位移區域，故核島區之斷層位移危害度，如直接引用西南恆春段或恆春斷層帶東緣之位移法分析成果，將導致核島區之斷層位移危害度過度保守；再者，若將核島區之斷層位移危害度，利用西南恆春段或恆春斷層帶東緣主要位移區域之位移分析成果，配合地震法分析之次要位移預測公式進行推估，由於目前並無任何此種混合分析方法之實際案例，因此不採用此分析方法。經討論後，本階段不進行核島區位移法機率式斷層位移危害度分析，而是以古地震調

查成果更新第一階段地震法分析參數後，再次以地震法進行核島區之斷層位移危害度分析，採用更新參數之地震法分析稱為精進地震法分析，精進地震法分析參數與結果於下一章節說明。

二、審查情形

針對位移法斷層位移危害度分析，審查小組審查情形彙整如下：

有關槽溝場址調查成果等議題，審查小組提出審查意見：核一、二、三廠各廠址特性，各有不同。在論述位移法適用性時，應優先考量各廠址地質特性，是否有引致位移危害之潛能，而非以槽溝開挖之位置選擇結果而論。

台電公司第 1 次答覆說明：核三廠機率式斷層位移危害度分析之原始目的即為探討恆春斷層錯動引致地表變形於核三廠產生之危害。經文獻回顧、現場勘查與斷層活動性調查，確認恆春斷層並未通過核三廠場址，因此並未選擇於核三廠進行槽溝開挖及古地震調查。所述槽溝場址中，頂虎頭山場址目標為西南恆春段、馬鞍山場址則以恆春斷層東緣為目標。而位移法係依據目標場址實際古地震調查所獲位移量、發生時間等資料進行分析，故無法適用於核三廠場址。

針對台電公司第 1 次答覆說明，審查小組提出第 2 次審查意見：要求依據 Youngs et al.(2003)機率式斷層位移危害分析原始論文的位移法定義，且確實考量核一、二、三廠各廠址地質特性之不同，分別探討位移法適用性。

台電公司第 2 次答覆說明：Youngs et al.(2003)位移法係利用於場址實際探查到之斷層錯動特性計算場址位移危害度，因此槽溝古地震調查為一必要之步驟。槽溝調查之目標為地質構造活動所造成全新世以來地層錯動之事件，利用所蒐集斷層造成之古地震事件資料，包括斷層錯動位移量以及錯動發生時間，提供位移法使用。因此位移法槽溝開挖場址條件為(a)槽溝須位於目標場址；(b)場址須存在可供辨識古地震事件之

地層；且(c)須存在可供判定年代之地層材料。經文獻回顧、現場勘查與斷層調查，確認恆春斷層並未通過核三廠場址；核三廠核島區之岩層為為上新世地層，岩層中微構造為年代較老構造發育同時或之後(推測約為上新世)受到大地應力影響所形成，屬於年代較老之構造；馬鞍山西側至核島區東側於建廠時邊坡開挖發現之數條被摺曲變形的透鏡狀砂體及小規模斷層，由其上覆未被截切之珊瑚礁定年推估該構造 35,000 年來未曾活動，為非能動斷層。綜合上述，核三廠核島區及其周圍區域並無位移法槽溝開挖之目標場址存在，亦非斷層位移危害度分析討論之對象。經審查答覆內容後，可以接受。

有關位移法分析方法等議題，審查小組提出審查意見：(1)除了在核島區進行地震法之外，應考慮在槽溝位置分別進行地震法和位移法，並比較分析結果。(2)針對位移法之說明“利用西南恆春段或恆春斷層帶東緣主要位移區域之位移法分析成果，配合地震法分析之次要位移預測公式進行推估，目前並無任何此種混合分析方法之實際案例，因此 LCI 公司建議不採用此分析方式”，提出以下問題：(a)以次要位移預測公式進行推估是否為地震法分析專屬；(b)本案的精進地震法分析是否有實際案例；(c)請分別說明美國 Diablo Canyon 核電廠(DCPP)及日本核電廠的作法。

台電公司答覆說明：(1)經諮詢本案國外協力顧問 LCI 公司，其回覆表示於本案中若要進行槽溝位置之位移法分析，其仍需要地震法建立之地震重現模式、斷層分段模型與單事件平均滑移量等資料，因此並非彼此獨立之分析，而無法由比較得知何者較保守。此外，各場址之地質特性不盡相同，故由槽溝場址之地震法和位移法比較結果，進一步套用至核島區實無意義。(2)(a)位移法係針對古地震調查場址位置進行，無法用於該場址外地點之位移分析，故並無主、次要位移之分別；地震法基於機率式地震危害度分析方法，運用地震時發生位移之機率分布配合地震之位移預測公式，才有主要、次要之區別。(b)精進地震法實際即是地

震法，僅係本案中利用槽溝古地震調查結果調整參數，為與第一階段之地震法區分而給予之名稱；地震法於實務中已在各國多個計畫中應用。(c)加州太平洋瓦斯電力公司(PG&E)與美國核能管理委員會(NRC)於DCPP 均採用地震法分析海岸線斷層(Shoreline Fault)對廠址造成之次要位移危害度。就目前所知，日本現有核電廠之機率式斷層位移相關研究尚未聞有使用位移法者。經審查答覆內容後，可以接受。

三、審查小結

綜合審查小組對本章審查結果，由於古地震調查場址並不位於核島區，因此古地震調查成果無法提供核島區進行位移法機率式斷層位移危害度分析使用，本階段不進行核島區位移法機率式斷層位移危害度分析，經審查可以接受。

第四章 精進地震法機率式斷層位移危害度分析

一、概述

本案機率式斷層位移危害度分析不進行核島區位移法機率式斷層位移危害度分析，而是以古地震調查所得斷層之位移量、滑移速率等資料，配合地震法之分析方法，更新第一階段地震法分析參數後，再次以地震法分析核島區之斷層位移危害度分析，採用更新參數之地震法分析稱為精進地震法分析。

在精進地震法中，分析震源為恆春斷層帶東緣-海域段(RFA)、恆春斷層帶東緣-陸域段(RFB)、西南恆春段(SWA)及西南恆春段其他可能線型(SWA_Alt1、SWA_Alt2)，共 5 個震源分段，經過各震源分段組合後，最後採用 9 組震源組合進行分析，並參考既有相關文獻與引用古地震調查成果更新震源參數與模式後進行斷層位移危害度分析。

古地震調查所獲得震源參數包含馬鞍山場址與頂虎頭山場址成果，然其中頂虎頭山槽溝之古地震調查成果顯示在 4,500 年內並無與地震事件相關之全新世地表或近地表的錯移證據，可能原因為槽溝位置在恆春斷層前緣的分支構造上，並無保存近期之構造活動，因此槽溝內古地震之滑移速率、再現周期等參數不確定性較大，造成槽溝分析成果與前人研究成果出現差異，經評估後，斷層位移危害度分析不直接使用頂虎頭山槽溝之位移成果。

精進地震法分析範圍涵蓋核三廠整個核島區與緊要海水泵室，分析以核三廠 1、2 號機反應器廠房連線中點為中心，參考美國核管會(U.S.NRC)研究資訊文件(Research Information Letter, RIL) 12-01 內容並配合反應器廠房尺寸(直徑約 50m)，分析網格尺寸採用 50m x50m 區塊，將核島區分為數十個區塊，緊要海水泵室則分成 2 個區塊。危害度分析針對反應器廠房連線中點、每一區塊角隅點以及緊要海水泵室角隅點進行，分析結果包含(1)反應器廠房連線中點之位移危害度曲線，可提供不

同再現周期下之位移量；(2)核島區各分析點之位移量；(3)緊要海水泵室之位移量。

二、審查情形

台電公司評估報告的精進地震法分析方法與成果，主要是描述分析架構邏輯樹、滑移速率分析、分析參數、機率函數以及分析結果。針對精進地震法機率式斷層位移危害度分析，審查小組審查情形彙整如下：

有關分析架構邏輯樹等議題，審查小組提出審查意見：精進地震法邏輯樹中增加考慮斷層破裂深度到 35 公里，請說明此考量因素及其對結果之影響。

台電公司答覆說明：一般地殼震源考量之深度為 15~20 公里；然 Yen and Ma(2011)研究指出台灣南部具代表性之蘊震深度為 35 公里；且本計畫檢核震源區周圍地震深度，顯示 90%分位之地震震源深度為 33.8 公里，與前述 Yen and Ma(2011)研究結果相近。因此為考量震源深度之不確定性，於精進地震法中採 15 公里及 35 公里等兩組最大破裂深度有其必要。於地震法機率式斷層位移危害度分析中，由破裂深度與斷層長度及傾角可計算得斷層破裂面積；「斷層破裂面積與滑移速率推算之地震矩($M_0 = \mu AS$)」與「由斷層破裂面積推算之地震規模所計算得到之每次地震平均地震矩($\text{Mean}[M_0/\text{eqk}] = 10^{(1.5m+16.05)}$)」相除，即為地震活動率。經審查答覆內容後，可以接受。

有關各震源分段之滑移速率分析等議題，審查小組提出審查意見：(1)在震源 RFB 之滑移速率累積機率曲線中，(a)震源分段 RFB 滑移速率計算相關參數表之累積機率曲線有誤；(b)詳述 CDF 曲線 1 和 2 之推算方式和分佈型態。(2)請說明如何求得震源分段 SWA 之滑移速率累積機率曲線圖之修正後 SWA 整體滑移速率的 CDF。(3)請詳述如何由震源 RFB 之滑移速率累積機率曲線圖之曲線 2 和震源分段 SWA 之滑移速率累積機率曲線圖之修正後 SWA 曲線得到震源 RFA 之滑移速率

累積機率曲線圖之 CDF。

台電公司第 1 次答覆說明：(1) (a)因震源機制考量斜移斷層及逆斷層且賦予相同權重[0.5]，故將震源分段 RFB 滑移速率計算相關參數表之最右欄數值繪成震源 RFB 之滑移速率累積機率曲線圖時，各滑移速率已再乘以前述 0.5 之權重。(b)分析中將各震源分段滑移速率分布假設符合對數常態分布，並藉由調整中值及標準偏差值以連續累積分布函數擬合原離散分布之 CDF 曲線。震源 RFB 之滑移速率累積機率曲線圖中 CDF 曲線 1 及 CDF 曲線 2 為兩種擬合結果，CDF 曲線 1 於滑移速率中值以及滑移速率上限值之吻合程度較好，但於滑移速率下限值有高估之現象；CDF 曲線 2 則是保留了滑移速率上限值與下限值之累積機率分布特性，但中值則有低估情況。本計畫考量對滑移速率分布範圍之上下限值可靠度較所求得中值之可靠度高，因此選用 CDF 曲線 2 描述震源分段 RFB 之滑移速率分布較為合適。(2) SWA 之滑移速率係基於本計畫中古地震調查之馬鞍山槽溝場址由三角剪切模式推估之滑移量(1.88m)，以梯型分布模式分別考慮滑移量(S)、槽溝紀錄到最後一次地震事件迄今累積之滑移量(δs)、槽溝紀錄到最早一次地震事件以前累積之滑移量(δs_0)、斷層滑動機制修正量(r)、時間間距(t)及槽溝場址代表性修正因子(f)之不確定性，其關係式為滑移速率 $u = \frac{1}{f} \left(\frac{(S + \delta s - \delta s_0) \sqrt{(1+r^2)}}{t} \right)$ 。以蒙地卡羅法進行 10,000 次取樣計算後，可得到滑移速率之 CDF。其中馬鞍山槽溝之滑移速率分布為不考慮 f 之情況下，而 SWA 整體之滑移速率分布則為有考慮 f 之情況下。另外考慮到上述結果僅為保留少數事件之單一場址，在對數常態分布之假設下，調整中值及標準偏差，以擴大不確定性分布之範圍，修正 SWA 整體之滑移速率分布。(3)震源分段 RFA 之滑移速率為震源分段 RFB 之滑移速率扣除震源分段 SWA 之滑移速率，因此要求得 RFA 分布，必需考慮 RFB 及 SWA 之分布。實際做法為分別依據 RFB 及 SWA 之平均值及標準偏差求出其各別之各百分位值，求出其差值後再依大小排序，重新得到其分布。

針對台電公司第 1 次答覆說明，審查小組提出第 2 次審查意見：

(1)指出(a)震源分段 RFB 滑移速率計算相關參數表下方備註公式有誤，表中有三個傾角，三個滑移角，三個垂直滑移速率，為何不用 27 個滑移速率來觀察？即令採用這六個滑移速率，震源 RFB 與 RFC 之滑移速率累積機率曲線圖在機率上升前後需為水平線，且滑移速率 6mm/yr 應在機率 0.7 時轉向水平。震源 RFB 與 RFC 之滑移速率累積機率曲線圖的圖名為何出現 RFC？(b)擬合程序的目標函數為何？為何會有兩組擬合結果？看起來這兩條曲線都無法通過擬合檢定。(c)在邏輯樹中，滑移速率最終仍只取三值，賦以權重來處理知識不確定性，這種三點近似方法之 CDF 和權重如與對數常態分佈無關，則不用執著於各震源分段滑移速率要用對數常態分佈模擬，避免對數常態變數加減後不再是對數常態分佈的困擾。(2)指出在滑移速率(u)公式中，有 6 個變數，若每個變數皆有 n 個取樣，考慮或不考慮整體滑移速率比 f 之情況下，總隨機取樣個數為 n 的 6 次方或 n 的 5 次方，那麼 10,000 次取樣是如何決定的？再者，考慮或不考慮 f 之兩種情況下，其它 5 個變數取樣值一致嗎？最後，如何調整對數常態分佈之中值及標準差，以得修正後 SWA 整體滑移速率？(3)首先，要考慮這兩個滑移速率是否統計獨立？若否，需估計相關係數。再者，有解析公式可以計算兩個隨機變數差值的 CDF。最後，若採用蒙地卡羅模擬法，程序也非如此。

台電公司第 2 次答覆說明：(1) (a)因恆春斷層帶東緣之可能斷層機制有斜移斷層及逆斷層等 2 種，各有其傾角、滑移角與垂直滑移速率。其中斜移斷層滑移速率有 $3 \times 2 \times 3 = 18$ 種組合，逆斷層 $3 \times 1 \times 3 = 9$ 種組合，因兩種斷層機制各佔 0.5，故將斜移斷層之 18 種組合整合為 3 種，逆斷層 9 種組合整合為 3 種。震源 RFB 與 RFC 與 RFC 之滑移速率累積機率曲線圖之圖名及內容已修正，詳見報告中震源 RFB 之滑移速率累積機率曲線。將未整合之 27 個滑移速率繪於圖中，可得到整合前 27 個滑移速率與整合後 6 個滑移速率之 CDF 比較圖，由圖可觀察到其與以

整合方式簡化後擬合之結果差異不大。(b)本計畫以前述 6 個滑移速率樣本之平均值及標準差，求取對數常態分布，得到 CDF1；固定 CDF1 之平均值，調整標準差，其標準差乘上 1 至 3 倍間之修正倍數，間距為 0.05，計算 CDF，以各 CDF 所估計之滑移速率值與 6 個滑移速率值之平方和 $\sum_i (x_i - x_s)^2$ 為目標函數，找到上下界與 6 個滑移速率值接近且目標函數值最低之組合，即 CDF2。(c)依據 Keefer & Bodily (1983)，對數常態分布之 CDF 可使用三點近似來描述，其累積機率分布為 95%、50% 及 5% 時之滑移速率，相對分配權重為 0.185、0.63 及 0.185。故此處利用對數常態分佈求得 CDF，再利用三點近似取 95%、50% 及 5% 時之滑移速率，作為邏輯樹中所使用之滑移速率，其權重分別為 0.185、0.63 及 0.185。(2)本報告中進行 10,000 次取樣，每一次取樣是針對在滑移速率 (u) 公式中 6 個變數皆同時隨機取樣，故共為 60,000 個取樣，而非以固定 5 項參數只對 1 項參數取樣方式進行取樣。考慮或不考慮 f 之兩種情況下，其餘 5 個變數皆同時隨機取樣，故變數取樣值一致。10,000 次取樣代表為進行 10,000 次 6 個參數隨機取樣之結果，其樣本數量應夠大足以近似常態分佈。因槽溝所推估的滑移量來自較少之事件數，滑移速率不確定度較大，故 SWA 整體滑移速率(考慮 f)之滑移速率範圍小於第一階段地震法的滑移速率範圍，故使滑移速率平均值不變，調整滑移速率範圍上下界以擴大不確定範圍，讓滑移速率範圍上下界能夠涵蓋第一階段地震法的滑移速率範圍。因此固定 $1/2 + 1/2 * \text{erf}[(\ln(x) - \mu)/(\sigma\sqrt{2})]$ 式中 μ 值，以 SWA 整體滑移速率(考慮 f)的標準差為底，調整標準差，其標準差乘上 1 至 3 倍間之修正倍數，間距為 0.05，計算 CDF，以各 CDF 所估計之滑移速率值與 6 個滑移速率值之平方和 $\sum_i (x_i - x_s)^2$ 為目標函數，找到上下界與第一階段地震法的滑移速率範圍接近且目標函數值最低之組合，則可得到修正後 SWA 整體滑移速率曲線，並得到新中值。(3) RFB 及 SWA 為不同方式獨立評估所得之滑移速率。 σ 為標準差， μ 為平方值，可利用 $1/2 + 1/2 * \text{erf}[(\ln(x) - \mu)/(\sigma\sqrt{2})]$ 計算累

積分布函數(CDF)。計算 RFB 及 SWA 之 CDF，且令 $RFA = RFB - SWA$ ，則可得求得 RFA 之標準差及平方值，最後可獲得 RFA 之 CDF。

針對台電公司第 2 次答覆說明，審查小組提出第 3 次審查意見：

(1)指出(a)6 個滑移速率的樣本數太低，平均值及標準差的估計值會偏，尤其標準差的估計值會明顯偏低，以致於必須放大標準差來求得 CDF²。請直接以 27 個樣本滑移速率進行類似分析，以資比較。(b)請說明在求算 CDF² 中，何謂「各 CDF 所估計之滑移速率值」。(c) Keefer & Bodily(1983)將連續隨機變數的 Beta 分佈以三點離散分佈取代之，即取累積機率 95%、50%及 5%之變數，分別賦予 0.185、0.63 及 0.185 之機率(權重)，其延伸引用並不限於對數常態分佈。無論其原始機率分佈是否為對數常態分佈，重點在於找出累積機率 95%、50%及 5%之變數值，賦予上述權重。並非假設對數常態分佈之故，才能應用這些數值，所以不必強求各分段斷層的滑移速率均為對數常態分佈，總結報告和答復說明需精準表達此論述。(2)指出考慮 f 有 6 個變數，共有 60,000 個取樣；不考慮 f 有 5 個變數，共有 50,000 個取樣，共同的 5 個變數在 60,000 個取樣和 50,000 個取樣之中，是否相同？在尋找修正後 SWA 整體滑移速率曲線時，6 個滑移速率值為何？(3)指出由 RFB 及 SWA 的平均數和標準差，自然可求得 RFA 的平均數和標準差，但仍然無法根據 RFA 的平均數和標準差求得 RFA 的 CDF。在 RFB 及 SWA 皆為對數常態分佈的前提下，RFA 不再是對數常態分佈，RFA 的 CDF 將只有數值結果，沒有簡單公式。

台電公司第 3 次答覆說明：(1)(a)相同作法以 27 個滑移速率值進行得到之 CDF¹ 及 CDF² 與整合後 6 個滑移速率值所得者比較，顯示其差異甚小。(b) CDF² 係由固定滑移速率樣本之平均值並調整標準差而得到之多組候選 CDF 中，找到上下界與原滑移速率樣本值接近且目標函數值最低者。(c)本計畫分析中重點的確為找到各分析震源滑移速率之分布主體及範圍，故採 Keefer & Bodily(1983)三點近似法，其方法並未限定

於何種分布，已於總結報告中相關章節增補此論述。(2) (a)考慮或不考慮 f 之兩種情況下，其餘 5 個變數皆同時隨機取樣，故變數取樣值相同。(b)有關「6 個滑移速率值」文字為筆誤，於 SWA 係取 10,000 個樣本，故前述文字應更正為「10,000 個滑移速率值」。(3) 在 RFB 及 SWA 皆為對數常態分佈的前提下，兩者之差 RFA 的確不再是對數常態分佈，惟仍可由三點近似法得到其分布之範圍。採對數常態分布之假設係為避免滑移速率產生負值。由 RFA 依大小排序後，其 5%、50%及 95%百分位值分別為 0.002mm/yr、2.69mm/yr 及 10.24mm/yr，小於本報告在 RFA 滑移速率為對數常態分布假設下所得之 0.7mm/yr、2.7mm/yr 及 10.6mm/yr，顯示本報告所採將得到較為保守斷層位移分析結果。經審查答覆內容後，可以接受。

有關各分析震源之滑移速率分析等議題，審查小組提出審查意見：(1)頂虎頭山與馬鞍山兩處槽溝開挖位置均與恆春斷層的主要破裂線或活斷層線有一定距離，斷層滑移速率是由斷層鄰近地區的地層變動資料間接推算，其不確定性可能較高，在邏輯樹中應做較審慎的考慮並提出詳細說明。(2)請明列精進地震法邏輯樹中的滑移速率之不確定性及權重。(3) 請詳細說明各分析震源平均滑移速率分配表和西南恆春段各分析震源線型平均滑移速率分配表的分配滑移速率百分比計算。(4) 請說明為何各分析震源斷層位移危害度分析滑移速率表和西南恆春段各分析震源線型斷層位移危害度分析滑移速率表的變異數修正比例與平均值相同。

台電公司第 1 次答覆說明：(1)本案中已考量到古地震調查成果所得之斷層滑移速率是由斷層鄰近地區的地層變動資料間接推算，故於第二階段精進地震法中，除古地震調查成果外，尚參採其他來源資料以決定滑移速率分布範圍。以恆春斷層帶東緣-陸域段(RFB)為例，其係依據本計畫古地震調查成果、「營運中核能電廠補充地質調查工作」、「營運中核能電廠地質穩定性及地震危害度再評估計畫」成果及其他相關文獻

資料，推估垂直滑移速率為介於 1mm/yr~6mm/yr 之間，再由滑動機制(逆斷層、斜移斷層)、傾角(45°、60°、75°)及滑移角(逆斷層 90°、斜移斷層 35°、55°)，各賦予權重，綜合考量後可得到滑移速率之離散分布；再進一步以對數常態分布之連續累積分布函數擬合前述離散分布，得到 RFB 滑移速率分布範圍(中值 3.7mm/yr、平均值 4.6mm/yr、90%信賴區間值為 1.2~11.2 mm/yr)。已於總結報告中對各分析震源滑移速率之推導過程詳細說明。(2)精進地震法邏輯樹中各分析震源之滑移速率及權重，詳見精進地震法斷層位移危害度分析邏輯樹圖。(3)各分析震源平均滑移速率分配表為將滑移速率由各別震源分段(RFA、RFB 及 SWA)分配至各分析震源(SWA、SWA+RFB...等)之方式，以 SWA 震源分段為例說明：SWA 之滑移速率平均值為 1.0mm/yr，綜合考量分析震源線型複雜度以及分析震源線型與震源分段關聯性，滑移速率分配至 SWA 及 SWA+RFB 分析震源各 60%及 40%，即 SWA 分析震源滑移速率為 0.6 mm/yr、SWA+RFB 分析震源滑移速率為 0.4 mm/yr。另需考慮同一分析震源之滑移速率需一致，故由各震源分段分配之滑移速率必須相同，因此可見到 SWA+RFB 分析震源由 SWA 震源分段及 RFB 震源分段分配到之滑移速率均為 0.4 mm/yr。西南恆春段各分析震源線型平均滑移速率分配表為針對 SWA 之三種可能線型(SWA、SWA_Alt1 及 SWA_Alt2)進行更進一步分配之結果。考量 TR2 槽溝場址通過 SWA 線型，故將 SWA 震源分段之滑移速率平均值 1.0mm/yr 分配予 SWA 線型 80%(即 0.8mm/yr)，而 SWA_Alt1 及 SWA_Alt2 線型則各分配得 10%(0.1mm/yr)。再依前述分配方式，分別分配至 SWA 及 SWA+RFB 分析震源各 60%及 40%，即 SWA 分析震源滑移速率為 0.48 mm/yr、SWA+RFB 分析震源滑移速率為 0.32 mm/yr。相同分配方式，可得到 SWA_Alt1 分析震源滑移速率為 0.06 mm/yr、SWA_Alt1+RFB 分析震源滑移速率為 0.04 mm/yr 及 SWA_Alt2 分析震源滑移速率為 0.06 mm/yr、SWA_Alt2+RFB 分析震源滑移速率為 0.04 mm/yr。(4)變異數與平均值之修正比例相同係依據統

計學原理，以使各分配後之分布於合併後得到與原分布範圍相同。

針對台電公司第 1 次答覆說明，第(1)項審查意見答覆部分已無後續意見；第(2)~(4)項審查意見答覆部分，審查小組提出第 2 次審查意見：(2)指出恆春斷層東緣崖狀地形特徵及合成孔徑雷達干涉技術 (Interferometry Synthetic Aperture Radar, InSAR) 變位最明顯處是恆春斷層的活動線(active line)，而恆春西斷層是整個恆春斷層帶的西界，過去從未有學術期刊或報告認定它是活斷層，要認定它是一條活斷層必須要有充分的理由。請檢討精進地震法邏輯樹中恆春斷層帶東緣與恆春西斷層之權重值。(3) 指出(a)RFA、RFB 及 SWA 之中值、標準差和平均值宜列表。(b)報告中需詳述分配過程。(c)各分析震源平均滑移速率分配表與西南恆春段各分析震源線型平均滑移速率分配表的標題和內容需說明是平均滑移速率的分配。(4)指出(a)是變異數與平均值之修正比例相同，還是標準差與平均值之修正比例相同？(b)為何對數常態分佈的變量經由加、減組合後，還是對數常態分佈？

台電公司第 2 次答覆說明：(2)第二階段精進地震法之斷層震源詳見震源分段示意圖，並未將恆春西斷層作為分析震源。(3)RFA、RFB 及 SWA 之滑移速率中值、平均值和變異數於報告中補充列表及詳述分配過程並修正各分析震源平均滑移速率分配表與西南恆春段各分析震源線型平均滑移速率分配表之表名。(4) (a)本報告採變異數與平均值之修正比例相同。(b)本報告假設 RFA 為對數常態分布，計算出其滑移速率中值為 2.8mm/yr，平均值 3.6mm/yr，累積機率 5%及 95%之滑移速率各為 0.7mm/yr 及 10.6mm/yr。若直接就 RFA 值排序，可得到其中值(累積機率 50%)為 2.7mm/yr，平均值 3.6mm/yr，累積機率 5%及 95%之滑移速率各為 0.002mm/yr 及 10.2mm/yr，與假設為對數常態分布之計算結果相同或略低，顯示本報告所採 RFA 滑移速率較為保守。

針對台電公司第 2 次答覆說明，第 (2)、(3)項審查意見答覆部分已無後續意見；第(4)項審查意見答覆部分，審查小組提出第 3 次審查意

見：(4)要求說明如何得悉 RFA 值，用以排序？請在上圖中加繪 RFA 值排序之梯形圖，以資比對。

台電公司第 3 次答覆說明：(4) (a)由 RFB 及 SWA 之平均值及標準偏差求出其各別之各百分位值，求出其差即 RFA 值，其後再依大小排序，重新得到其分布。(b)加繪 RFA 值排序之梯形圖後之圖形。經審查答覆內容後，可以接受。

有關斷層位移預測公式等議題，審查小組提出審查意見：(1)斷層槽溝開挖都位於主要斷層，因此只能用於地震法斷層位移危害度分析，請台電公司儘快將槽溝結果運用於位移衰減式的修正及相關參數釐清，並提出地震法斷層位移危害度分析結果及核島區次要斷層的位移機率。(2)請列表分別陳述各個槽溝提供何種參數應用於精進地震法，並比較這些參數在地震法和精進地震法的異同。(3)請進一步說明如何使用目前各廠外附近槽溝開挖之成果，提供本案位移法(或地震法)之機率式斷層位移危害度分析。

台電公司答覆說明：(1)已將槽溝開挖之古地震調查成果所獲參數，應用於精進地震法中。依精進地震法分析結果，核三廠各分析點於再現周期 10,000 年之地表破裂相對位移量均小於 1.0cm；再現周期 100,000 年經尺度修正後，各重要建築物及管線位置之位移量均仍小於容許位移量。(2)第一階段地震法採用「營運中核能電廠地質穩定性及地震危害度再評估計畫」之邏輯樹與參數；第二階段則採近期地質調查研究成果、本案槽溝之古地震調查成果。利用由槽溝獲得之古地震事件之次數、發生時間、位移量、破裂長度、傾角、滑移角及滑移速率等參數，可用以調整第一階段地震法內之參數；為與第一階段地震法區分，故本案稱之為精進地震法。有關本案核三廠地震法與精進地震法採用之分析邏輯樹與參數已彙整於總結報告內。(3)由槽溝獲得之古地震事件之次數、發生時間、位移量、破裂長度、傾角、滑移角及滑移速率等參數，整合近期相關研究成果使用參數，進行精進地震法分析各廠核島區之位移量。以

核三廠恆春斷層帶東緣-陸域段(RFB)滑移速率為例，如何將槽溝開挖成果用於本案之機率或斷層位移危害度分析中，說明如下：由古地震調查成果、「營運中核能電廠地質穩定性及地震危害度再評估計畫」成果及其他相關文獻資料，恆春斷層帶東緣-陸域段(RFB)之垂直滑移速率推估約介於 1 mm/yr~6 mm/yr 之間，滑移速率計算採用 1 mm/yr、4 mm/yr、6 mm/yr，並各給定權重。由營運中核能電廠補充地質調查成果(2012)以及詹新甫(1974)之資料，震源滑動機制可能為逆斷層或包含左移斷層之斜移斷層，其傾角採 75°、60° 及 45°(各給予權重)，滑移角採 55° 及 35°(斜移斷層，等權重)或 90°(逆斷層，權重 1.0)。由此可計算出不同之滑移速率及權重。將滑移速率之不確定性以連續分佈函數(Continuous Distribution Function, CDF)擬合，擬合之 CDF 曲線可用以描述震源分段 RFB 之滑移速率分布。由 CDF 曲線可得滑移速率之中值為 3.7 mm/yr，平均值為 4.6 mm/yr，90%信賴區間之滑移速率值為 1.2~11.2 mm/yr。經審查答覆內容後，可以接受。

有關各分析震源之特徵地震規模等議題，審查小組提出審查意見：

(1) (a)精進地震法的分析流程已變更，需補上類似地震法機率式斷層位移危害度分析流程的實際分析流程圖。(b)可能地震規模計算邏輯樹圖的三點近似方法權重，需與各分析震源特徵地震規模表的權重位數相符。無論前幾章對地震法或位移法如何概述，斷層位移危害度分析的結果依精進地震法求得，故精進地震法宜依序完整詳述分析流程，含分析流程圖、各種模型和假設（特別強調精進地震法更新部份）、相關公式、相關參數之取得或訂定（特別強調因槽溝開挖而更新之參數）等等。(2)採用 Leonard (2010)經驗公式時，(a)如何考慮斷層破裂寬度的不確定性？(b)此經驗公式的標準差為何值？為何不以此標準差來考慮經驗公式的隨機不確定性？(c)此地震矩規模的機率分佈型態為何？(d)同樣是三點近似公式，為何規模與滑移速率取點不同？

台電公司第 1 次答覆說明：(1)精進地震法補充依實際分析流程修

改之分析流程圖，並將各分析震源特徵地震規模表內權重位數修正為與可能地震規模計算邏輯樹圖相同。(2) (a)為求簡化，本計畫以分析震源之長度及加權平均之斷層破裂寬度乘積為破裂面積，採 Leonard (2010) 經驗公式計算特徵地震規模。其中加權平均斷層破裂寬度係考量 3 種傾角(45°、60° 及 75°)及兩種深度(15km 及 35km)計算之斷層破裂寬度，並以長寬比 ≥ 0.67 限制寬度下限值，經計入權重後之平均值。(b)Leonard (2010)原文獻未提供特徵地震規模之標準差；一般以破裂面積推估地震規模之標準偏差約介於 0.15~0.30 間，本報告採用標準偏差為 0.20。(c)於採用 Miller and Rice (1983)三點近似法時，係假設震矩規模為常態分布。(d)滑移速率部份係依據 Keefer and Bodily(1983)建議之三點近似法，規模部份則係依據 Miller and Rice (1983)三點近似法，兩者之選用百分位數及權重不相同。與 Miller and Rice (1983)相比，Keefer and Bodily(1983)近似法由分布之尾部採樣較多，故在探查不確定性參數之範圍時，較前者有用。由於滑移速率為 PFDHA 之重要參數，而其不確定性分布範圍在計算斷層小位移量時更形重要，故使用 Keefer and Bodily(1983)作為近似方法以涵蓋知識不確定性。相對的，於考慮 Mchar 時係以增減中值的方式涵蓋其知識不確定性，故可採用 Miller and Rice (1983)作為近似方法。

針對台電公司第 1 次答覆說明，第(2)項審查意見答覆部分已無後續意見；第(1 項審查意見答覆部分，審查小組提出第 2 次審查意見：(a)分析流程圖的純粹特徵地震模式圖、年地震平均發生率公式、和斷層位移危害度分析公式也需依實際分析方法呈現；(b)分析流程圖的「地震規模」、「規模分佈」、「地震年平均發生率」、和「地震法機率式斷層位移危害度分析」四張圖形的規模下限、規模上限、和特徵地震規模之數學符號需一致。

台電公司第 2 次答覆說明：(a)於精進地震法補充依實際分析流程修改之分析流程圖，其中純粹特徵地震模式圖係根據日本原子力學會安全

度評估(Probabilistic Safety Assessment, PSA)規範，故應無需再修改；年平均發生率公式則已依據所採地震規模分布模式修正；斷層位移危害度分析公式亦已依本計畫實際使用公式呈現。(b)已修改於精進地震法補充依實際分析流程呈現之分析流程圖，使其規模上、下限及特徵地震規模之符號一致。經審查答覆內容後，可以接受。

有關場址發生位移機率函數等議題，審查小組提出審查意見：在場址發生位移機率密度函數表中，(a)WC(1993)和 MR(2011)為何與距離 r 無關？其意義應不是「主要位移機率」。(b)WC(1993)和 MR(2011)如何與 Petersen(2011)搭配，計算超越斷層位移的年平均發生率？宜於年平均發生次數($v(d)$)公式中補述。(c)如果已經假設斷層破裂寬度由最大破裂深度延伸至地表，WC(1993)和 MR(2011)還有採用的必要嗎？

台電公司第 1 次答覆說明：(a)Wells and Coppersmith(1993)及 Moss and Ross(2011)考慮的是不同地震規模下，地表產生破裂之機率。其考慮的是主要破裂，故與距離 r 無關。(b)於本計畫地震法機率式斷層位移危害度分析中，因場址未位於恆春斷層上，故需以次要位移考慮，其發生之機率需考慮主要破裂之發生機率 $P(s_r \neq 0)$ (以 WC(1993)及 MR(2011)) 與次要破裂之發生機率 $P(d \neq 0)$ (以 Petersen et al.(2011))；相關敘述可見於總結報告第四、(四)(4)節及第七、(三)3 節。報告第四、(一) 節及第四、(二) 節為地震法機率式斷層位移危害度分析之方法及所需參數之一般性敘述，應無需修改。(c)由過去之觀測紀錄顯示，雖然大規模地震較易產生地表破裂，然由於並非所有相同規模之地震均會產生相同(地表破裂或不破裂)之結果，其發生仍為一機率事件，故仍應考慮 WC(1993)和 MR(2011)。

針對台電公司第 1 次答覆說明，審查小組提出第 2 次審查意見：(a)既然都與距離 r 無關，為何這兩個條件機率還一直以 $P_n(\text{Slip} | m, r)$ 表示？(b)報告主文只在年平均發生次數($v(d)$)公式和 $P_n(D > d | m, r)$ 公式列出 PFDHA 的計算公式，這兩個公式皆未說明主要破裂位移和次要破裂位

移，故在之後章節引入主要位移和次要位移的經驗公式，實有必要重新列出 PFDHA 的計算公式。(c)反過來說，如果採用了 WC(1993)和 MR(2011)，那麼斷層破裂寬度由最大破裂深度延伸至地表就有機率問題，而不能事先假設了。

台電公司第 2 次答覆說明：(a) $P_n(D>d|m,r)$ 公式為通式，考慮之範疇包括主要破裂與次要破裂，故式中有 r 項。WC(1993)及 MR(2011)原始文獻內考慮主要破裂，故其表示式均無 r 項。(b)已於報告中重列計算公式。(c)斷層破裂是否達地表為調查所得結果，而 WC(1993)及 MR(2011)則是說在斷層在發生特定地震規模時是否會再造成地表破裂之機率。經審查答覆內容後，可以接受。

有關次要破裂斷層位移預測公式等議題，審查小組提出審查意見：在次要破裂斷層位移預測公式表和正規化位移值計算公式表中，(a)斷層位移預測公式(Fault Displacement Prediction Equation, FDPE)適用於何種斷層形式？(b)FDPE 的位移方向為何？(c)請繪圖比較這兩條 FDPE。(d)如何在 PFDHA 中考慮 FDPE 的不確定性？

台電公司第 1 次答覆說明：(a)次要破裂斷層位移預測公式表中 Petersen et al.(2011)之 2 個斷層次要位移預測公式係用於平移(strike-slip)斷層。因目前並無已發表之逆斷層次要位移預測公式，已發表之次要位移預測公式有 Youngs et al.(2003)對正斷層提出之預測公式，以及 Petersen et al.(2011)預測公式。由於 Petersen et al.(2011)採用高品質與解析度之斷層位移量測資料且數量較多，而計畫場址位移之形式並非單純逆斷層，亦包含水平位移，平移斷層位移預測公式仍有其適用性，故選用 Petersen et al.(2011)預測公式。(b)斷層位移預測公式之方向為沿斷層錯動之滑移方向。(c)Petersen et al.(2011)之 2 位移預測公式比較如下：於規模較小時對平均位移正規化(d/AD)之位移量較直接計算之位移量小；規模較大時則反之；兩公式於規模 7.0 時計算之位移量大略相同。(d)斷層位移預測公式之不確定性表現於超越機率，即超過某一位移量之

機率。

針對台電公司第 1 次答覆說明，審查小組提出第 2 次審查意見：
(a)宜將 FDPE 比較圖補充入報告。(b)如何在 PFDHA 中考慮 FDPE 的不確定性是指 FDPE 預估誤差的分佈型態和採用的分佈範圍。

台電公司第 2 次答覆說明：(a)已於報告中補充位移預測公式計算結果比較圖。(b)本計畫所用 FDPE 取自 Petersen et al.(2011)，依據其所用資料，公式適用範圍為規模 6.7~7.6、距離 ≤ 3 公里，誤差分布型態為對數常態分布。經審查答覆內容後，可以接受。

有關斷層位移危害度分析等議題，審查小組提出審查意見：(1)在核三廠核島區重要建築物相關資料表中，(a)容許位移量和地表破裂位移量的方向是否一致？(b)容許位移量和地表破裂位移量是否還要以基礎尺寸短邊檢核一次？(2)報告所述“採用更新參數之地震法將稱為精進地震法..”，請補充說明原地震法之參數與精進地震法之更新參數比較。(3)請說明採用精進地震法選取 50m $\times$ 50m 為 PFDHA 分析區域之合理性。

台電公司第 1 次答覆說明：(1) (a)機率式斷層位移危害度分析所得之地表相對位移量與容許位移量考量方向未必一致，故必須先將相對位移量考慮滑移角及傾角等因素，修正至與容許位移量考量之方向一致；惟 7-05-表 1 中「地表破裂位移量(cm)」欄內所列為經建築物尺寸修正之地表相對位移量(但未作方向修正)，較前述方向修正後位移量大，為一保守之考量。(b)補充本計畫於斷層位移對建築物安全性評估中，建築物長短邊之檢核結果，詳見核三廠核島區重要建築物相關資料表。(2)第一階段地震法及第二階段精進地震法之邏輯樹及參數，詳見報告機率式斷層位移危害度分析流程邏輯樹圖、震源幾何參數邏輯樹圖、恆春斷層滑移速率/規模分布以及最大可能地震邏輯樹圖、斷層位移危害度分析架構邏輯樹圖、震源分段示意圖、恆春斷層帶東緣之分析震源情境與幾何參數邏輯樹圖、西南恆春段之分析震源情境與幾何參數邏輯圖。兩階段地震法之參數差異點包括分析震源、滑移速率、傾角、破裂深度、斷層

機制、規模上限等。(3) 本計畫原規劃之分析網格為 100m×100m，第一階段地震法即依此網格大小分析。其後於第二階段進行時，依據本會 104 年 07 月 21 日「核三廠核管案件編號 MS-JLD-10201 執行進度說明會」結論，參照美國核管會(U.S.NRC) RIL 12-01，並配合反應器廠房尺寸，以 50m×50m 網格進行分析。

針對台電公司第 1 次答覆說明，第(1)、(2)項審查意見答覆部分已無後續意見；第(3)項審查意見答覆部分，審查小組提出第 2 次審查意見：(3)要求再具體說明清楚。

台電公司第 2 次答覆說明：(3)依據 USNRC RIL 12-01，PG&E 與 NRC 均採用 50m×50m 網格進行 PFDHA，且考量核三廠核島區內重要建築物尺寸多接近 50m(最大僅 61m)，故為反映實際情形，於第二階段精進地震法中改採 50m×50m 網格進行分析。經審查答覆內容後，可以接受。

有關廠房結構、系統或組件容許位移量等議題，審查小組提出審查意見：核三廠廠房外關鍵管線容許位移量分析評估報告，請檢討懸臂梁變位公式正確性。

台電公司第 1 次答覆說明：核三廠廠房外關鍵管線均為包覆在土層中的地下管線，此案中是討論地層發生錯位時管線受到位移產生之靜態力的影響。對地下管線而言，一般土壤會提供管線某種程度之支撐(彈簧撓性及阻尼之組合效應)。因缺乏現地土壤之機械特性，在分析過程中假設地層發生錯動時管線下方沒有土層的支撐，所以當一端產生 2cm 位移時，另一端因有固定閥件假設為固定端，即形成目前的懸臂樑結構，是相對較保守的分析模式。

針對台電公司第 1 次答覆說明，審查小組提出第 2 次審查意見：指出懸臂梁變位公式應為位移量 $=PL^3/3EI$ ，但報告中使用的是 PL^3/EI ，在固定位移量，計算受力 P 的大小時，會低估結果，請澄清。

台電公司第 2 次答覆說明：報告中懸臂梁變位公式，最大撓度(錯位)與力量的關係確有誤植，但引用此公式的目是要導引到本節最後一段文字(如下)：主要是作為選擇評估管段時的選擇依據“而將懸臂梁變位公式代入正向應力公式及剪應力公式，可以得知：當錯位相同時，管徑 r 越大，則產生的應力越大 ($\sigma \propto r/L^2$, $\tau \propto r^2/L^3$)；同樣當錯位相同時，管段越短，則產生的應力越大。”。但在進行危害度最高管段的 2cm 錯位應力分析時，是使用有限元素法做模擬分析，在分析管段的一端施加 2cm 固定位移當作負載來計算應力，並沒有使用懸臂梁變位公式去計算載重後，再用荷重法來分析應力。所以懸臂梁變位公式的誤植並不影響後續分析的結果。懸臂梁公式誤植之處已於報告中修訂為 $\delta = PL^3/3EI$ 。經審查答覆內容後，可以接受。

三、審查小結

綜合審查小組對本章審查後，確認台電公司評估報告精進地震法之分析架構邏輯樹、分析參數、機率函數與公式，對核三廠進行精進地震法斷層位移危害度分析，核三廠於再現周期 10,000 年以及再現周期 100,000 年之各分析點位移量，均未超過容許位移量，並不會對建築物與設備造成影響。

綜合審查小組對本章審查結果，核三廠機率式斷層位移危害度分析之精進地震法分析結果，經審查可以接受。

第五章 審查總結

審查小組已針對台電公司所提交的「核三廠機率式斷層位移危害度分析」總結報告內容與結果進行全面性檢視與審查，審查結論總結如下：

- (一)地震法機率式斷層位移危害度分析中，分析震源採用台電公司「營運中核能電廠地質穩定性及地震危害度再評估計畫」中所定義東緣恆春斷層震源、西緣恆春斷層震源，以及恆春斷層帶東緣之海域段。地震法分析範圍涵蓋核三廠核島區及緊要海水泵室，地震再現周期 10,000 年與 100,000 年下之各分析點位移量，均未超過容許位移量，並不會對建築物與設備造成影響。
- (二)位移法機率式斷層位移危害度分析，因核三廠核島區場址現存構造年代較老或非能動斷層，且建廠時期已將可供分析之古地震事件材料移除，無法獲得可靠之近期活動參數，故經評估後選擇於馬鞍山場址與頂虎頭山場址進行古地震調查，且不進行位移法分析，而以古地震調查成果更新第一階段地震法分析參數後，再次以地震法分析核島區之機率式斷層位移危害度(精進地震法分析)。
- (三)精進地震法分析中，分析震源為恆春斷層帶東緣-海域段(RFA)、恆春斷層帶東緣-陸域段(RFB)、西南恆春段(SWA)及西南恆春段其他可能線型(SWA_Alt1、SWA_Alt2)，共 5 個震源分段，進行分析。精進地震法分析範圍涵蓋核三廠核島區及緊要海水泵室，地震再現周期 10,000 年與 100,000 年下之各分析點位移量，均未超過容許位移量，並不會對建築物與設備造成影響。

參考文獻

1. Cornell, C.A. (1968). Engineering seismic risk analysis. Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 58, no. 5, pp.1583-1606.
2. U.S. Nuclear Regulatory Commission, (2012). Research Information Letter 12-01, Confirmatory Analysis of Seismic Hazard at the Diablo Canyon Power Plant from the Shoreline Fault Zone.
3. Youngs, R.R., Arabasz, W.J., Anderson, R.E., Ramelli, A.R., Ake, J.P., Slemmons, D.B., McCalpin, J.P., Doser, D.I., Fridrich, C.J., Swan, F.H. III, Rogers, A.M., Yount, J.C., Anderson, L.W., Smith, K.D., Bruhn, R.L., Knuepfer, L.K., Smith, R.B., dePolo, C.M., O'Leary, K.W., Coppersmith, K.J., Pezzopane, S.K., Schwartz, D.P., Whitney, J.W., Olig, S.S., & Toro, G.R. (2003). A methodology for probabilistic fault displacement hazard analysis (PFDHA). Earthquake Spectra 2003; vol. 19, no. 1, pp.191-219.
4. 台灣電力公司，(2012)，營運中核能電廠補充地質調查工作。
5. 台灣電力公司，(2013)，營運中核能電廠地質穩定性及地震危害度再評估計畫。
6. 內政部營建署，(2001)，建築物基礎構造設計規範。
7. 台灣電力公司，(2021)，核三廠機率式斷層位移危害度分析報告(定稿版)。