

# 安全審查報告

|      |                       |
|------|-----------------------|
| 送審單位 | 台灣電力公司                |
| 報告名稱 | 核能一廠「地震危害與篩選(SPID)報告」 |

行政院原子能委員會核能管制處

中華民國 111 年 12 月



## 摘 要

台電公司因應原能會福島事故後地震風險再評估要求，已依美國核能管制委員會近期專案小組之福島事故改善建議事項「NTTF 2.1: Seismic」，以地震危害分析資深專家委員會第3層級(SSHAC Level 3)評估程序針對核一廠進行地震危害再評估，並提交核一廠地震危害與篩選(SPID)報告。原能會專家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，確認該報告符合美國核能管制委員會認可之美國電力研究所 EPRI 1025287 等導則之評估方法與相關接受準則之要求。

有鑑於福島事故經驗教訓以及山腳斷層系統等地質新事證可能帶來的地震危害，本會依據「NTTF 2.1: Seismic」建議事項，要求台電公司須以 SSHAC Level 3 評估程序針對核一廠進行地震危害再評估，並以美國核能管制委員會所認可的美國電力研究所 EPRI 1025287 導則，於地震危害評估完成後進行篩選程序，以判斷是否需進一步執行機率式地震安全度評估等相關措施，並須提出暫行性措施，用以確保若發生超越設計基準地震危害下仍可安全停機。

台電公司提交核一廠 SPID 報告至原能會，隨後並將因應參與式同行審查小組對核一廠地震危害與篩選報告之審查意見納入修訂，提交該報告之修訂版。經本會專案審查小組針對該報告進行審查後確認：(1)核一廠 SPID 報告之地震危害評估程序與內容均符合 EPRI 1025287 等導則可接受準則；(2)依據 EPRI 1025287 導則之地震危害篩選程序，核一廠在完成 SSHAC Level 3 地震危害評估後，仍需進一步執行機率式地震安全度評估等相關耐震評估；(3)核一廠目前已經進入除役過渡階段，台電公司已依據 EPRI 1025287 導則要求，提出短期應對措施，並依 EPRI 3002000704 耐震評估導則，執行核一廠加速耐震補強評估(ESEP)程序，以強化核一廠爐心仍有燃料期間，於遭遇超越設計基準地震之燃料安全性。

## 目 錄

|                       |    |
|-----------------------|----|
| 第 1 章 前言 .....        | 1  |
| 第 2 章 地震危害重新評估 .....  | 4  |
| 第 3 章 設計與評估基準地震 ..... | 55 |
| 第 4 章 地震危害成果總檢 .....  | 57 |
| 第 5 章 短期應對措施 .....    | 60 |
| 第 6 章 審查總結 .....      | 65 |
| 參考文獻 .....            | 67 |
| 英文縮寫說明 .....          | 68 |

# 第 1 章 前言

## 一、本案緣起

日本福島第一核電廠事故發生後，原能會(以下簡稱本會)因應福島事故之核電廠總體檢，要求台電公司依美國核能管制委員會(以下簡稱 USNRC) 近期專案小組(Near-Term Task Force, NTTF) 之福島事故改善建議事項「NTTF 2.1: Seismic」重新評估地震廠外危害[1]，依據美國「地震危害分析資深專家委員會(Senior Seismic Hazard Analysis Committee, SSHAC)」所訂定第 3 層級(以下簡稱 SSHAC Level 3)之程序[2, 3]，針對國內各核電廠進行機率式地震危害評估(Probabilistic Seismic Hazard Analysis, PSHA)。同時，須將地震危害評估結果，依符合 USNRC 認可之美國電力研究所 EPRI 1025287 耐震評估導則[5]之要求內容呈現。(註：EPRI 1025287 導則全名為「Seismic Evaluation Guidance: Screening, Prioritization and Implementation Details for the Resolution of Fukushima Near-Term Task Force Recommendation 2.1: Seismic.」，故美國業界簡稱 SPID 導則，依此導則所撰寫並提交給 USNRC 的地震危害與篩選報告則稱為 SPID 報告，故以下將稱 SPID 導則或 SPID 報告)

因應本會管制要求，台電公司爰委託國家地震工程研究中心(以下簡稱國震中心)，召集國內外知名地震專家學者，依 USNRC NUREG-2117 [3]導則組成評估團隊，於 104 年 8 月正式啟動「台灣地區核能設施地震危害評估專案計畫」，在經歷 3 次計畫專題研討會及 7 次大型工作會議，針對震源特徵(Seismic Source Characterization, SSC)及地動特徵(Ground Motion Characterization, GMC)之邏輯樹所使用之資料、模型及方法進行充分討論並確認之後，於 108 年 6 月完成地震危害度計算輸入文件(Hazard Input Document, HID)，該文件亦於同年 11 月獲得該計畫參與式同行審查小組(Participate Peer Review Panel, PPRP)確認該計畫所建構的危害度計算邏輯樹模型之相關不確定性的中值(Center)、分布型態

(Body)以及範圍(Range)，在技術上是可辯護的(Technically Defensible)，且執行時所遵循的流程均符合 SSHAC Level 3 等級品質，最後並簽署認可。

此外，考量核一廠反應器廠房座落在剪力波速小於 2,800 m/sec 岩盤上，台電公司遂依據 SPID 導則另於 107 年 3 月啟動「台灣地區核能電廠地震動反應譜建置專案計畫」(以下簡稱 GMRS 建置計畫)，除根據 HID 文件資料計算產出剪力波速 760 m/sec 參考岩盤的危害度曲線(Hazard Curves)及均佈危害反應譜(Uniform Hazard Response Spectra, UHRS)外，該計畫亦依據 USNRC RG 1.208 管制導則[4]所訂程序，進一步考量各廠場址岩土層特有力學與材料性質，經由地盤反應分析(Site Response Analysis, SRA)程序求得場址放大函數(Site Amplification Function)，進而得到核一廠場址的地震危害度曲線、地震動反應譜(Ground Motion Response Spectra, GMRS)以及基礎輸入反應譜(Foundation Input Response Spectra, FIRS)。

## 二、審查過程

台電公司於 110 年 1 月 29 日提交核一廠之 SPID 報告，並因應 PPRP 對核一廠 SPID 報告之審查意見修訂，於 110 年 2 月 26 日提交核一廠 SPID 更新版報告。經本會完成程序審查後，邀請國內相關領域專家及本會同仁組成專案審查小組，對該報告進行專業實質審查作業。110 年 7 月 7 日，本會辦理 CS/KS/MS-JLD-10101 核管案之核一、核二及核三廠「地震危害與篩選報告」審查案第一次審查會議，針對核一廠部分共提出第一批審查意見 46 題。台電公司於 110 年 8 月 20 日來函提出第一次答覆說明，本會於 110 年 9 月 14 日召開第二次審查會議，核一廠部分經第二次審查會議後，第一批審查意見共有 25 題獲得同意。台電公司於 110 年 11 月 4 日來函針對第一批審查意見提出第二次答覆說明。本會於 111 年 1 月 4 日召開第三次審查會議，經第三次審查會議後，第一批審查意見剩 9 題未結案，此外另新增提出第二批審查意見共 4 題。

台電公司於 111 年 2 月 23 日來函針對第一批審查意見提出第三次審查意見答覆說明，另對第二批審查意見提出第一次答覆說明。本會於 111 年 3 月 23 日召開第四次審查會議，經第四次審查會議後，第一批審查意見(46 題)，3 項有複審意見；第二批 4 項審查意見，4 項有複審意見。

台電公司於 111 年 5 月 9 日來函針對第一批審查意見提出第四次答覆說明，另對第二批審查意見提出第二次答覆說明。經委員書面審查後，第一批審查意見 46 題，僅剩 1 項有複審意見；第二批 4 項審查意見，已無後續意見。針對該項未結案之審查意見，台電公司於 111 年 6 月 24 日來函提出第五次答覆說明。經本會審查小組書面審查後，確認已無後續審查意見。

經完成上述審查過程後，本會提出台電公司核能一廠「地震危害與篩選(SPID)報告」之安全審查報告。本安全審查報告分為 5 章，第 1 章為前言，第 2 章為地震危害重新評估，第 3 章為設計與評估基準地震，第 4 章為地震危害成果總檢，第 5 章為短期應對措施，最後第 6 章則說明審查總結。

## 第 2 章 地震危害重新評估

### 一、概述

台電公司核一廠 SPID 報告第 2 章地震危害重新評估之內容主要包括：場址地質說明、機率式地震危害度分析，以及地盤反應分析等內容。其中，地盤反應分析之審查除針對核一廠廠址岩土層波速剖面及材料參數進行檢視外，亦對地盤反應分析所採用的方法論及相關輸入參數進行檢視，以確保地盤反應分析所得之控制點危害度曲線及地震反應譜具合理性與可靠性，相關分析程序及內容則須符合 USNRC RG 1.208 [4]、NUREG/CR-6728 [7]及 EPRI 1025287 [5]等導則之要求。

### 二、審查情形

針對台電公司核一廠 SPID 報告第 2 章地震危害重新評估之內容，審查小組審查情形彙整如下：

有關場址地質及震源構造等議題，審查小組提出 2 項審查意見：(1)送審報告圖 1 中的文字不清楚，以及廠址、斷層位置與其他地質構造在圖上之標示不易辨識；另外，”「明」顯低於”及”「個」別”之繕打錯誤亦請修訂。(2)請對危害度貢獻度高之震源作更詳細之說明。

台電公司答覆說明：(1)已提高圖 1 之解析度，俾利清晰辨識標示；審查意見所指出的錯漏字已修訂。另外，Best-estimate (BE)的「中值」譯詞將改為「最佳估值」，避免與文中的「Median」混淆。(2)送審報告第 2.1.2 節已針對具高地震危害潛勢的顯著震源進行重點資訊說明，如斷層幾何位置、斷層長度、孕震深度、與電廠最短距離、滑移速率、控制規模與控制距離等，並輔以第 2.1.2 節地震危害參數拆解圖及重要震源危害貢獻百分比圖，符合於 SPID 導則所訂的需求撰述內容。經審查答覆內容後，可以接受。

有關 SRA 分析方法與 EPRI SPID 導則附錄 B 符合性之問題，審查

小組提出審查意見：送審報告主要的工作是廠址特有的地盤反應分析，此部分應加強論述，並請再檢核是否符合 EPRI SPID 導則之附錄 B 的要求？譬如廠址剪力波速 ( $V_s$ ) 剖面與其變異係數 (Coefficient of Variation, COV) 採 0.15 之理由及參考應變的決定。

台電公司答覆：(i)送審報告係依據 USNRC NTTF 2.1: Seismic 建議事項之要求及其對應之作業規範 EPRI 1025287 (SPID)導則完成參考岩盤條件地震危害度評估、地盤反應分析以及控制點地震動(亦即基礎輸入反應譜, FIRS)評估, 所有作業內容皆針對核電廠特定廠址而執行的。前述分析工作所用的輸入參數與模型, 包括岩盤條件地震危害度曲線、控制地震源、輸入地震動、剪力波速剖面、岩土材料非線性動態參數曲線、波速隨機化範圍等, 皆是採用核一廠最新地震危害度分析、過去廠區既有鑽探與波速量測資料、以及 GMRS 建置計畫中執行廠區增補現地試驗分析資料進行建立與評估。以上所述用於核一廠地盤反應分析的廠址資料, 已陳述在「2.1.2 顯著震源構造」、「2.2 機率式地震危害度分析」、「2.3.1 輸出控制點定義」、「2.3.1 地層性質概述」、「2.3.3 廠址波速剖面與土層材料參數」、「2.3.4 地盤反應分析之邏輯樹架構」、「2.3.5 廠址波速剖面隨機設定」以及「2.3.6 輸入地震反應譜」各節內容;(ii)SPID 導則 Appendix B 主要建議電廠進行 FIRS 評估計算時, 相關地震危害度分析與地盤反應分析所應注意的項目, 例如對波速基準剖面的要求以及對其變異性的考量。送審報告建立 FIRS 採用的輸入模型與參數, 符合 SPID 導則附錄 B 規範原則, 且報告內容亦符合 SPID 導則所規定的報告章節架構與要求內容。針對波速剖面與岩土材料非線性曲線的相關參數檢核進行說明如下:(a)廠址  $V_s$  剖面與 COV: 根據 SPID 導則「B-3.2 Capturing Epistemic Uncertainty in Velocity Profiles」及「B-4.1 Randomization of Shear-Wave Velocities」章節所述, 核一廠滿足使用至少 3 組波速基準剖面之建議, 並根據現地量測資料(包括: 表面波譜法 (SASW)、懸盪式波速井(P-S logging)與微地動陣列量測(MAM)等量測資

料)統計結果給定 COV 以設定 200 組隨機波速剖面，以涵蓋廠區波速變異性。核一廠之 COV 於深度 1000m 以上/下設定為 0.15/0.1；(b)以參考應變(reference strain)之變化來考量岩土材料非線性參數曲線之不確定性：根據 SPID 導則「B-3.3 Nonlinear Dynamic Material Properties」一節所述要求，為能描述土壤和堅硬岩石場地的非線性動態材料特性的不確定性，應使用兩組剪力模數衰減曲線與遲滯阻尼來考慮該地層材料之動力性質。GMRS 建置計畫針對核一廠，以現地材料實驗結果配合 Darendeli (2001)模型所建立之非線性參數曲線。為考量其不確定性，使用 1/1.2 和 1.2 倍參考剪應變( $\gamma_r$ )做設定。此設定參考 Darendeli (2001)使用的資料庫，包括不同場址的數據，統計分布則屬常態分佈，故該標準偏差大於特定場域的預期標準偏差。因此，技術整合團隊設定 1.2 對應約 1.65 倍標準偏差的合理假設，以考量 5%至 95%範圍的不確定性。經審查答覆內容後，可以接受。

有關地盤反應分析方法論、輸入地震及地震輸入位置等議題，審查小組提出 5 項審查意見：(1) 2.3.7 方法論章節，併同 2.3.6 輸入地震反應譜章節，請再以圖示補充/輔助說明。(2) 2.3.6 輸入地震反應譜之位置為何要定義在地表下 5 公里，請強化說明報告內容。(3) 第一次地盤反應分析時：(i)是否只考慮台灣通用岩盤(Taiwan Generic Rock, TWGR)深部波速之隨機變異？(ii)圖 33 之參考岩盤加速度反應譜( $SA_{ref}$ , Spectral Acceleration of reference rock)在地表，還是控制點，其  $Vs_{30}$  (TWGR 深部波速剖面)為何？第二次地盤反應分析時， $SA_{site}$  在地表，還是控制點？(4) 2.3.7 節方法論第二段，為何  $UHRS_{ref}$  包含台灣參考岩盤之線性地盤反應？如何確定它沒有包含非線性地盤反應？(5) 2.3.7 節，分析方法採用二次地盤反應分析，請清楚說明採用此分析方法的背景與目的，並提供示意圖說明此分析之完整流程與分析考量，並於圖上標示輸入運動位置、輸出運動位置。

台電公司答覆：(1)送審報告採用之輸入地震建立方法以及兩次地盤

反應分析程序，已分別增繪示意圖於「2.3.6 輸入地震反應譜」及「2.3.7 方法論」章節，俾利輔助說明。(2)參考岩盤條件( $V_{s30}=760\text{ m/s}$ )地震危害度分析，其採用之地震動預估模式(GMPE)雖無場址項，但隱含來自一個  $V_{s30}$  為  $760\text{ m/s}$  的完整參考岩盤剪力波速剖面的場址放大效應，且屬線性放大行為。因此，送審報告執行的地盤反應分析程序，為符合參考岩盤條件( $V_{s30}=760\text{ m/s}$ )地震危害度分析的均佈危害度反應譜( $\text{UHRS}_{\text{ref}}$ )建立內涵，是以修正波速剖面為主軸執行兩次地盤反應分析，隨之計算參考岩盤剖面線性放大效應以及特定廠址波速剖面非線性放大效應之間頻譜差異，據以求得到控制點位的廠址地盤放大函數(site amplification factors)。地震動預估模式(GMPE)對應的參考岩盤剖面，採用送審報告建立的 TWGR 剪力波速剖面。根據美中及美東地區(RG 1.208, 2007)以及美國西部 Diablo Canyon 核電廠(DCPP 核電廠)報告(DCPP, 2015)定義的實值基岩位置，概為剪力波速近  $3,000\text{ m/s}$ ，該值對應 TWGR 波速剖面的深度位置約在 5 公里處，故計畫專家團隊決議整體廠址剪力波速剖面建立至 5 公里深處，以能有效考慮到整體波速剖面在大震度輸入運動下岩土材料非線性效應。實值岩盤位置以下更深處預期為半無限域岩盤材料的線性行為，兩次地盤反應分析結果將相互抵消。有關輸入地震定義於地表下 5 公里位置之說明，增述於「2.3.7 方法論」一節內容。(3)送審報告所採用地盤反應分析程序流程與輸入與輸出位置定義於圖面：(i)第一次的地盤反應分析採用線性分析，係為能擬合  $\text{UHRS}_{\text{ref}}$  之基本設定，此部分不考慮剖面隨機變異；(ii)圖 33 的  $\text{SA}_{\text{ref}}$  為 TWGR 地表位置之輸出，即圖中的參考岩盤地表位置(reference-site)，其  $V_{s30}$  波速為  $760\text{ m/s}$ 。第二次地盤反應分析為非線性分析， $\text{SA}_{\text{site}}$  則為於廠區 5 公里整體剖面之反應器廠房控制點高層位置之輸出。(4)參考岩盤條件均佈危害度反應譜( $\text{UHRS}_{\text{ref}}$ )之評估，係採用台灣 SSHAC Level 3 PSHA 計畫所發展的地震動評估模型(參考岩盤條件設定為  $V_{s30}=760\text{ m/s}$ )，其模型發展本質為場址放大效應來自一個  $V_{s30}$  為  $760\text{ m/s}$

的完整參考岩盤(TWGR)剪力波速剖面，且屬線性放大行為。以 ASK14 地震動評估模型的場址項為例，在  $V_{s30} = 760 \text{ m/s}$  地盤條件下，其放大效應不會隨著地震動大小而有明顯改變，接近線性行為。(5)參考岩盤條件( $V_{s30} = 760 \text{ m/s}$ )地震危害度分析，其採用之地震動預估模式(GMPE)雖無場址項，但隱含來自一個  $V_{s30}$  為  $760 \text{ m/s}$  的完整參考岩盤剪力波速剖面的場址放大效應，且屬線性放大行為。因此，送審報告所執行的地盤反應分析程序，為符合參考岩盤條件地震危害度分析的均佈危害度反應譜( $UHS_{ref}$ )建立內涵，是以修正波速剖面為主軸而執行兩次地盤反應分析，隨之計算參考岩盤剖面線性放大效應以及特定廠址波速剖面非線性放大效應之間頻譜差異，據以求得到控制點位的廠址地盤放大函數。計畫執行時所採用之輸入地震建立方法及兩次地盤反應分析程序，已分別增繪示意圖於「2.3.6 輸入地震反應譜」及「2.3.7 方法論」章節，俾利輔助說明。經審查答覆內容後，可以接受。

有關淺部波速剖面議題，審查小組提出 3 項審查意見：(1)請補繪微地動陣列量測(MAM)試驗之波速剖面。(2)請將所有現地試驗的淺部波速剖面合繪一圖，再加繪 3 組淺部波速基準剖面，以作比較。(3)圖 16，請說明各鑽孔剖面在壓力波速剖面差異小，但在剪力波速剖面卻有較大差異。

台電公司第 1 次答覆：(1)核一廠淺部波速模型主要依據表面波譜分析(SASW)、懸垂式速度井測(P-S Logging)以及微地動陣列量測(MAM)試驗資料建立一整合頻散曲線(dispersion curve)，據此估算最佳估值(BE)、上限值(UB)與下限值(LB)之淺部剪力波速基準剖面。送審報告「2.3.3.1 淺部波速剖面」一節增述核一廠 MAM 試驗之頻散曲線與最佳估值(BE)淺部剪力波速基準剖面。(2)核一廠 3 組淺部波速基準剖面主要根據 SASW、P-S Logging 與 MAM 試驗量測資料而建，可用廠區波速資料與 3 組淺部波速基準剖面之比較說明之。(3)送審報告中所示的核一廠速度井測剪力波速剖面圖，為各鑽孔試驗的原況量測結果，其受

鑽孔現地條件等因素的影響，故呈現的剪力波速有局部較大變動情形發生。對此，使用速度井測資料建置廠區剪力波速基準剖面時，專家團隊重新評估判釋廠區既有懸垂式波速資料(P-S Logging)。另，除了以 3 組波速基準剖面考量波速變異性，亦設定有 200 組隨機波速剖面，以能涵蓋廠址土層波速的不確定性範圍。

針對台電公司第 1 次答覆說明，第(1)及(3)項部分經審查答覆內容後，可以接受；第(2)項部分審查小組提出第 2 次審查意見：在深度 250m 以下，現地試驗的淺部波速剖面與 3 組淺部波速基準剖面並不一致，請再補充說明。

台電公司第 2 次答覆說明：圖示左側 250 公尺以下虛線段所示的 MAM 推估剪力波速，乃直接取自 104 年完成之「營運中核能電廠擴大地質調查工作—核電廠廠區微地動量測紀實成果報告」(5.3 核一廠速度構造分析)；對於 3 組淺部波速基準剖面之建構，則蒐集整廠區過去及新增之現地量測資料，包含 P-S Logging、SASW 與 MAM 等試驗資料，經技術整合專家團隊(TI Team)與外部專家(Kenneth Stokoe 教授)詳細評估及整合頻散曲線分布範圍，據以建立最佳估值(BE)、上限值(UB)與下限值(LB)之淺部波速基準剖面。MAM 的推估剪力波速主要依據資料為頻散曲線(dispersion curves)，因進行逆推分析時 104 年報告與送審報告使用的地層分層、理論模型等皆有所不同，故解算的剪力波速剖面存有若干差異，致使 104 年報告所提的速度構造有高過送審報告上限值(UB)波速基準剖面之情況。此外，執行地盤反應分析時，對波速基準剖面有進行隨機化(randomization)以產生 200 個隨機波速剖面，以能考量到地層波速之變異性，隨機變異參數設定相關內容已述於「2.3.5 廠址波速剖面隨機設定」一節。經審查答覆內容後，可以接受。

有關深度波速剖面議題，審查小組提出 4 項審查意見：(1)送審報告所求得之 FIRS 於各頻率之譜加速度均大於參考岩盤( $V_{s30} = 760\text{m/s}$ )之譜加速度，顯示場址放大效應；但從場址(或是 TWGR)速度剖面之  $V_s$ ，

對照核一廠反應器廠房基礎深度(地表下 14.7m)以下均大於 760m/s，請再說明之。(2)TWGR 深部波速剖面垂直移動與淺部波速剖面接合的邏輯思考依據為何？基本上，現地試驗的淺部波速剖面較具可信度，而視 TWGR 深部波速剖面的深度為相對值，才對其進行垂直移動。果真如此，3 組淺部波速基準剖面與 TWGR 深部波速剖面接合的深度應一致，而非對 TWGR 深部波速剖面採用同一垂直移動深度。以圖 22 為例，TWGR 深部波速剖面下移 1595 m，而 LB、BE 和 UB 分別在 1705 m、1825 m 和 2295m 與 TWGR 深部波速剖面接合，這代表 UB 淺部波速基準剖面的深度可相信至 2295 m，而 BE 淺部波速基準剖面的深度只相信至 1825 m。事實上，BE 淺部波速基準剖面的可信深度應比 UB 淺部波速基準剖面深。再者，波速剖面接合點的定量準則為何？(3)TWGR 深部波速剖面 28 m 深度的剪力波速小於 1000 m/s，TWGR 深部波速剖面與淺部波速剖面接合時，是否已考慮岩石區剪力波速需大於 1000 m/s？(4)請說明求取深度 16 公里剖面之目的為何？

台電公司第 1 次答覆：(1)送審報告針對核一、二、三廠建立廠區波速基準剖面主要根據現地量測資料所建立，包含 SASW、P-S Logging 以及 MAM 等試驗資料。由圖顯示，核二廠土層波速較高於核一、核三廠，在淺地表處僅略低於台灣通用岩盤(TWGR)剖面，在深部則接近 TWGR 剖面。比較岩盤條件均佈危害度反應譜(UHRS<sub>ref</sub>)與控制點反應譜(FIRS)，核一、核三廠因土層性質偏軟，在長週期段有明顯的地盤放大效應；核二廠址波速雖接近 TWGR 剖面，惟地盤放大效應亦受到淺部土層之影響。送審報告所提出之兩次地盤反應分析主要為了對應參考岩盤條件( $V_{s30}=760$  m/s)地震危害度分析的均佈危害度反應譜(UHRS<sub>ref</sub>)建立內涵以進行波速剖面修正程序，故雖核二廠整體波速剖面接近 TWGR 剖面，仍需進行兩次地盤反應分析以求得廠區地盤放大函數。(2)核一廠淺部 3 組剪力波速基準剖面主要根據廠區 SASW、P-S Logging 與 MAM 試驗量測資料的頻散曲線進行估算。對於整體波速基準剖面之建立原

則，首先完成最佳估值(BE)淺部波速基準剖面與深部波速剖面(即台灣通用岩盤 TWGR 波速剖面)之接合；隨後上限值(UB)與下限值(LB)淺部波速基準剖面，再與最佳估值(BE)整體剖面對應的 TWGR 剖面位置進行接合作業；最後完成 3 組整體剪力波速基準剖面。其中，淺、深部波速剖面兩者的接合作業原則如下：(a)因地表波速各地有異，TWGR 剖面可依深度進行上或下調整，以利與淺部剖面連接；(b)淺部剖面與 TWGR 剖面在連接點的波速梯度應儘量接近；(c)深度 5 公里處的剪力波速值應近於 3,000 m/s，以能與 TWGR 剖面對應；(d)由於最佳估值(BE)整體波速基準剖面的信心度較高，故上限值(UB)與下限值(LB)整體波速基準剖面則依 BE 剖面為核心進行建立。(3)在核一廠整體剪力波速基準剖面中，岩石區剪力波速皆是大於 1,000 m/s 並採用岩盤材料參數。(4)建立 TWGR 剖面目的為提供一專屬台灣地區岩石特性且 Vs30 值近 760 m/s 的深域剪力波速模型，其深部剪力波速為根據地震層析成像(seismic tomography)結果進行評估，使 TWGR 波速剖面最深可達到 16 公里。再者，根據「2.3.3.3 整體波速剖面」所述深、淺部波速剖面進行接合時，因地表波速各地有異，深部之 TWGR 波速剖面可依深度進行上或下調整，以尋找出適當的接合位置並建立一 5 公里深度的整體廠址剪力波速剖面，故具 16 公里深度 TWGR 波速剖面可確保完成結合後整體波速剖面達 5 公里深度。

針對台電公司第 1 次答覆說明，第(1)、(3)及(4)項部分經審查答覆內容後，可以接受；第(2)項部分審查小組提出第 2 次審查意見：(i)依接合作業原則 4 反映於接合作業原則(b)，即最佳估值(BE)淺部剖面與 TWGR 剖面在連接點的波速梯度應儘量接近，如何定量波速梯度的接近程度？由圖觀之，淺部剖面沿著很大深度垂直下降，TWGR 剖面沿著較小深度垂直下降，波速梯度如何接近？(ii)有否不同連接深度對地盤反應分析結果的敏感性分析？

台電公司第 2 次答覆說明：(i)因波速分層在淺部最佳估值(BE)剖面

少於 TWGR 剖面，故對於兩者波速梯度應儘量接近之接合考量，主要由計畫團隊的外部經驗資深專家(Kenneth Stokoe 教授)依其見解先進行專業判識，技術整合專家(TI Team)再於正式的工作會議(Working Meeting)及專題討論會議(Workshop)上進行評估與討論後訂定最終的整體波速剖面。兩者波速剖面接合的定量準則，主要以接合作業原則(b)之整體基準波速剖面在深度 5 公里處的剪力波速值應近於 3,000 m/s 為主；(ii)GMRS 建置計畫於第五次工作會議(Working Meeting #5)已以核一廠討論波速剖面連接深度之參數敏感性分析案例。對於波速剖面而言，考量顯著影響地盤反應分析結果主要在極淺部較低值的波速變化，在較深處相對高值的波速變化影響較小，故偏深處的連接點對於地盤反應分析結果的影響性較不顯著。經審查答覆內容後，可以接受。

針對「深度波速剖面議題」第(2)項審查意見之第 2 次答覆說明內容相關議題，審查小組另提出審查意見：對於波速剖面而言，考量顯著影響地盤反應分析結果主要在極淺部較低值的波速變化，請依此原則，提供 BE、UB 與 LB 三組整體波速基準剖面，對應核一廠歷年地震事件井下量測記錄，繪製井下 150m 至地表對應之廠址理論轉換函數。以量化驗證在較深處相對高值的波速變化影響較小，故偏深處的連接點對於地盤反應分析結果的影響性較不顯著之論述。

台電公司第 1 次答覆說明：(i)採用實際井下地震歷時，配合三組波速剖面(150m)在同樣材料參數下，井下 150m 至地表對應之廠址理論轉換函數示於圖面。由結果顯示隨著頻率越大，三組理論轉換函數趨勢接近，顯示主要地盤反應分析結果主要受到淺層土壤影響較多；(ii)有關量化驗證在較深處相對高值的波速變化影響較小，故偏深處的連接點對於地盤反應分析結果的影響性較不顯著之論述請參考「廠址中小度地震觀測結果納入地震危害評估結果檢核議題」審查意見之答覆內容。

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：請確認本項驗證之實際地震事件為 110 年 1 月 15 日於核一廠之事件，同

時請確認土層之剪力波速剖面及 Darendeli(2001)的雙曲線模型參數，是否與「廠址中小度地震觀測結果納入地震危害評估結果檢核議題」之審查意見答復中之選擇相同？並請確認此時 STRATA 程式的輸入模式假設是否為土層內(Within)模式。經比對本項意見答復之土層理論轉換函數，與「廠址中小度地震觀測結果納入地震危害評估結果檢核議題」之審查意見答覆說明之  $PA = 0.05\text{ g}$  (約 49gal) Within 設定下之理論轉換函數相符，無論是顯著頻率的分佈或對應的振幅高度均一致，顯見透過 STRATA 程式採用人造地震歷時，輸入為 Within 模式可再次驗證與實測地震事件井下量測之特性相符。請針對此驗證結論於報告中加以著墨，以彰顯評估該工作之成果。

台電公司第 2 次答覆說明：(i)針對 0/150m\_within 的理論轉換函數，彙整比較「廠址中小度地震觀測結果納入地震危害評估結果檢核議題」之審查意見答覆中所呈現不同輸入設定分析結果以及本題意見答覆中以實際井下地震儀歷時分析結果，並多增一案例協助說明，設定上配合 5 km 整體土壤剖面與相同材料參數，將井下地震儀紀錄置於深度 150 m 的位置做輸入，用以比較不同輸入設定對淺層土層理論轉換函數之影響，整理列表。由四組的轉換函數之比較，可發現不同之輸入設定，在此地震等級下得到的 0/150 m\_within 的理論轉換函數結果是近似的；(ii)SPID 報告以 USNRC 要求之內容針對 FIRS 所進行之危害篩選作彙整式說明，建議維持 SPID 報告的呈現。NCREE (2021)報告曾對各廠井下地震儀紀錄以經驗轉換函數與模型求得之理論轉換函數比較，說明實測地震紀錄反映之土壤特性被涵蓋在送審報告模型設定範圍內。經審查答覆內容後，可以接受。

有關輸入地震反應譜議題，審查小組提出 4 項審查意見：(1)請將送審報告 FIRS 求取相關最重要的  $UHRS_{ref}$ 、 $SA_{input}$  與 FIRS 畫在同一圖上以便查核與比較。(2)圖 33 中高頻段的擬合值偏低是由點震源模式造成，請分別將下列曲線合繪一圖，以資比較：(i) $UHRS_{ref}$ 、純線性反捲積

之  $SA_{ref}$  和點震源模式之  $SA_{ref}$  等三條曲線；(ii)純線性反捲積之  $SA_{input}$  和點震源模式之  $SA_{input}$  的傅氏譜(Fourier Amplitude Spectrum, FAS)等兩條曲線。(3)表 16、表 18 和表 19 不同危害水準的  $UHR_{ref}$  和  $SA_{input}$  數值表，宜註明單位。表 17 的延時(Duration)如何決定？是否也用於隨機震動理論(RVT)？(4)請說明  $UHR_{ref}$  如何取得？ $UHR_{ref}$  有沒有包含土壤非線性效應？若  $UHR_{ref}$  包含土壤非線性效應，讓  $SA_{input}$  經線性地盤反應分析得到之反應譜  $SA_{ref}$  與  $UHR_{ref}$  相符，似乎並不能顯示  $SA_{input}$  之代表性。

台電公司第 1 次答覆：(1)核一廠參考岩盤條件均佈危害度反應譜( $UHR_{ref}$ )、年超越機率  $1E-04$  水準之輸入地震反應譜( $SA_{input}$ )與控制點廠址地震動(FIRS)已並列在圖上做比較。(2)輸入地震建立的過程中，各階段的產出已並列在圖上比較。(3)(i) $UHR_{ref}$  和  $SA_{input}$  數值表的譜加速度單位均為  $g$ ，將補充於「2.3.6 輸入地震反應譜」一節相關表格中；(ii)RVT 中 FAS 轉為加速度反應譜所依據的強震延時參數，主要根據核一廠的控制震源以及由台灣地震資料建立的強震延時推估經驗式評估之，藉以建立輸入運動。(4)(i) $UHR_{ref}$  為進行地震危害度分析過程中，採用參考岩盤條件  $V_{s30} = 760 \text{ m/s}$  之地震動評估模型配合地震源模型，所求得特定年超越機率下的均佈危害反應譜；(ii)參考岩盤條件( $V_{s30} = 760 \text{ m/s}$ )之地震危害度分析所採用之地震動預估模式(GMPE)雖無場址項，但隱含來自一個以  $V_{s30} = 760 \text{ m/s}$  的完整參考岩盤剪力波速剖面的場址放大效應，且屬線性放大行為。若實際以一個小地動強度的輸入運動，並以 TWGR 剪力波速剖面進行非線性與線性分析，結果雖相近，但其間微小的物理模擬上的差異，仍可為兩次地盤反應分析中考量。因此，送審報告以線性分析先求得輸入運動使 TWGR 地表輸出與  $UHR_{ref}$  相符，而後以同樣的輸入地震進行一次 TWGR 線性分析，一次以廠區整體剖面之非線性分析，兩次結果的比值則為廠區的地盤放大效應，同時校正地震動預估模式(GMPE)可能缺乏的非線性放大效應。

針對台電公司第 1 次答覆說明，第(3)項部分經審查答覆內容後，可以接受；第(1)、(2)及(4)項部分審查小組提出第 2 次審查意見：(1)撇開各廠場址土壤的差異，理論上地震波是從底部向上傳遞而增加/放大，由比較圖來看，送審報告的(i)地表以下 5 公里位置的  $SA_{input}$ ；(ii)反應器廠房基礎位置的 FIRS；(iii) $Vs30=760\text{m/s}$  的  $UHRs_{ref}$  位置的地震波似乎與此基本趨勢並不吻合，請再簡要說明解釋此一現象，並附  $UHRs_{ref}$  與 FIRS 的地表以下高程比較。(2)(i)在 mark-up 修正版報告提到：「故取 8 至 15Hz 範圍內兩者平均 FAS 的比值，作為點震源 FAS 的調整倍率。完成結合高、低頻段 FAS 後即為輸入地震( $SA_{input}$ )」，請於第 1 次答復說明的核一廠線性反捲積  $SA_{input}$  與點震源模式  $SA_{input}$  之傅氏譜比較圖中，再加繪此完成結合高、低頻段 FAS 後的  $SA_{input}$ ；(ii)在 mark-up 修正版報告提到：「核一廠  $SA_{input}$  為 FAS 型式，在高頻段(大於 8 至 15Hz)為點震源模型(Single-corner Source Model)所產出 FAS；在低頻段(小於 8 至 15Hz)為  $UHRs_{ref}$  經由線性反捲積由地表至深度 5 公里岩盤之 FAS」，其中「高頻段(大於 8 至 15Hz)」和「低頻段(小於 8 至 15Hz)」語意模糊。(3)請根據回覆內容修訂報告。

台電公司第 2 次答覆說明：(1)當震波由底部往上传遞經由土壤阻尼作用，高頻能量會因阻尼而衰減。 $UHRs_{ref}$  對應  $Vs30 = 760 \text{ m/s}$  的土壤剖面的線性場址效應，相對地，FIRS 則為考慮廠區土壤特性之非線性地盤放大效應，因此，其主要週期隨著土壤非線性行為而往長週期移動。此外， $UHRs_{ref}$  位於場址岩盤露頭高程之處，為台灣通用岩盤 TWGR 剖面( $Vs30 = 760\text{m/s}$ )地表位置；核一廠 FIRS 位於反應器廠房基礎高程之處，約在地表下 14.7 m 深度位置。(2)(i)核一廠線性反捲積  $SA_{input}$ 、點震源模式  $SA_{input}$ 、以及完成結合高、低頻段 FAS 後的  $SA_{input}$ ，並列於圖上；(ii)修訂內容為：「核一廠  $SA_{input}$  為 FAS 型式，在高頻段(大於接合頻率)為點震源模型(Single-corner Source Model)所產出 FAS；在低頻段(小於接合頻率)為  $UHRs_{ref}$  經由線性反捲積由地表至深度 5 公里岩盤之

FAS。」。不同危害水準輸入地震採用之接合頻率點及調整倍數並列於表上。所列參數值增列於表 17 之核一廠 11 個危害水準之輸入地震點震源模型參數表。(3)已依審查意見依回覆內容修訂報告。經審查答覆內容後，可以接受。

有關兩次地盤反應分析示意圖呈現之議題，審查小組提出審查意見：承「輸入地震反應譜議題」第(1)項審查意見的第 2 次答覆說明，根據前述「地盤反應分析方法論、輸入地震及地震輸入位置等議題」第(1)項審查意見答覆說明中關於兩次地盤反應分析之修正示意圖 38，請說明由  $UHS_{ref}$  至  $SA_{input}$  再傳遞回  $SA_{ref}$ ，此時 TWGR 剪力波速剖面 ( $V_{S_{ref}}$ )之設定為何？根據送審報告圖 22 之說明，整體波速剖面有向下平移 1595 m，此應為該答覆說明圖上之  $V_{S_{site}}$ ，請再確認此時由  $SA_{input}$  傳遞至  $SA_{site}$  時，於 STRATA 之輸入設定為土層內(Within)還是露頭(Outcrop)？並請根據審查意見測試範例，透過 STRATA 繪製設定為 Outcrop 或 Within 條件之線彈性理論轉換函數，以釐清 Outcrop 或 Within 對理論轉換函數峰值之影響。此部分的確認將影響後續 RVT 分析結果各頻率對應之反應譜值。當設定為 Within 輸入時，其理論轉換函數之峰值遠大於設定為 Outcrop 輸入。

台電公司第 1 次答覆：(i)釐清 STRATA 程式關於輸入運動為岩盤露頭運動型式之說明如下：輸入運動若為岩盤露頭運動型式，則代表在鄰近場址之岩盤露頭(rock outcrop)處地盤運動( $A_n + B_n = 2A_n$ )，將其置於場址地層剖面之岩盤假想露頭(Hypothetical outcrop of rock)處，此處之地盤運動同樣為  $2A_n$ ；(ii)依據測試範例，經 STRATA 輸入為 Outcrop 及 Within 對理論轉換函數的計算，比較委員所提供之結果，兩者相同；(iii)送審報告執行兩次地盤反應分析時之輸入運動均採 5 km 深度處之露頭運動型式，其原因主要有二：其一是因為在第一次地盤反應分析之輸入運動主要是先由地震學點震源型式所得出之深度 5 km 傅氏振幅譜，經一個放大倍率(scaled factor)後去取代原先由 TWGR 地表反捲積

分析所產生不合理之高頻處運動，擬合此二者之傅氏振幅譜作為 5 km 處之輸入運動，使得此運動經由 TWGR 剖面傳至地表處之反應譜  $SA_{ref}$  會與 UHRS 一致。由於地震學點震源所產生之運動為一露頭運動，因此，兩次地盤反應分析之輸入運動也同樣採用該深度處之露頭運動進行分析；其二，由單向度應力波傳理論推導可得出：半無限域之層間運動會與所建立之地層土柱模型參數有關，若指定輸入運動為層間運動型式，該輸入運動代表該處地層上行波與下行波之總量，在經由地層轉換函數計算得出實際上行波與下行波分量比例，進而得出實際作用於該深度地層層間運動之上行波與下行波。送審報告執行第一次地盤反應分析時是建立 TWGR 剖面及參數進行線性分析，而第二次地盤反應分析時則是使用核電廠場址近地表剖速剖面與深層 TWGR 剖面(同樣總計 5 km 深度)進行擬線性分析(考慮地層材料非線性性質)，故把第一次地盤反應分析所得之 5 km 處地層層間運動(總量)輸入在二模型中，依據波傳理論推導，此時第二次模型所得出上行波與下行波比例將與第一次分析不同(但輸入運動的總量是相同的)，使得此兩者分析模型之基岩(bedrock)上行波與 bedrock 露頭運動不具有地震危害一致性(seismic hazard consistency)；(iv)現行頻率域一維地盤反應分析程式之架構都依循前述原理：輸入層間運動(總量)、再由程式轉換函數計算上、下行波分量，若現今自行撰寫分析程式可輸出送審報告第一次地盤反應分析時之 5 km 處層間運動上行波  $E_{5km}$  下行波  $F_{5km}$ ，再另外於第二次地盤反應分析模型中指定 5 km 處之層間運動為同樣的上行波  $E_{5km}$  與下行波  $F_{5km}$ ，再將此層間運動乘上轉換函數求取地表面運動時，則會在地表面之上行波不等於下行波，產生不符合波傳理論之計算結果(因上述計算過程中並未考慮地表面上行波與下行波相等的邊界條件，直接指定某個輸入運動之上行波與下行波比例進行計算)，後續將以本審查意見延申之簡易地層模型進行驗證比對。故送審報告選用以 5km 處之露頭運動都做兩次地盤反應分析之同個輸入運動，不僅可符合輸入運動一致性之定義(即在此

二模型中之 5km 層間運動上行波  $E_{5km}$  皆為 0.5 倍輸入運動)，後續若因驗證或其他需要欲進行時間域地盤受震反應分析時，只需將上行波  $E_{5km}$  輸入(如有限元素法(FEM)或有限差分法(FDM))或者指定其為露頭運動並建置半無限域(或建置模擬半無限域地層之土壤彈簧與阻尼，如 DEEPSOIL 程式)，皆是數值模擬上可以明確定義的輸入運動模式。

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：經檢視台電公司對於 STRATA 軟體輸入為 Outcrop 或 Within 對理論轉換函數的計算測試，無進一步意見。因此，送審報告相關 RVT 評估方式，如採用兩次地盤反應分析，亦即  $SA_{input}$  是位於地底 5 公里深度處，對於考慮土壤特性之理論轉換函數的分析選擇，應選定輸入為 Within 之模式，才符合一維波傳理論及使用 STRATA 軟體的假設。至於獲致符合地震學點震源型式或滿足 UHRS 之輸入地震，則屬輸入地震的決定方式，無論採用傳統頻率域或 RVT 分析模式，如摘自「如何使用隨機振動理論(RVT)進行地盤反應分析議題」審查意見之答復說明，與上述界定場址土壤特性及一維波傳理論分析無關。如欲另行撰寫分析程式則仍應與 STRATA 軟體檢核確認其正確性。

台電公司第 2 次答覆：為避免誤解，已修正送審報告地盤反應分析程序之示意圖，並繪製數值模型設定之示意圖。經審查答覆內容後，可以接受。

有關岩土材料剪力模數及阻尼比性質曲線議題，審查小組提出 3 項審查意見：(1)2.3.3.4 各小節剪力模數及阻尼比性質曲線應有參考出處，尤其是淺部的參考應變。(2)請將現地岩土、岩土過渡區和岩石等三區各組非線性材料參數曲線(剪力模數和阻尼比)合繪一圖，以觀察連續性。(3)送審報告對於岩土材料非線性模型，採用 Darendeli(2001)的修正雙曲線模型來建立剪力模數折減曲線及阻尼比曲線，請提供核一廠完整各層土層深度對應之模型參數，以平行驗證表格內容與後續 GMRS 及 FIRS 相關重評估內容。

台電公司第 1 次答覆：(1)核一廠淺部岩土材料非線性參數曲線建立以 Darendeli (2001)模型為主並根據廠區增補土壤材料試驗成果進行模型參數調整，包含以參考應變變化考量不確定性範圍。送審報告「2.3.3.4 剪力模數及阻尼比性質曲線」一節增述岩土材料非線性參數曲線之參考出處為 NCREE (2021)。(2)核一廠廠址在 255 m 深度內現地岩土、岩土過渡區和岩石的三區分組所對應之剪力模數和阻尼比材料參數曲線(以 BE 對應之曲線為參考)，於圖上做比較。(3)送審報告依據核一廠現地材料試驗資料進行擬合 Darendeli (2001)模式，說明如下，

(i)剪力模數折減曲線：

$$G / G_{\max} = 1 / [1 + (\gamma / \gamma_r)^a] \quad (1)$$

$$\gamma_r = (\phi_1 + \phi_2 * PI * OCR^{\phi_3}) * (\sigma'_0)^{\phi_4} \quad (2)$$

在此， $\gamma_r$  為參考應變、PI 為塑性指數、OCR 為土壤過壓密比、 $\sigma'_0$  為平均有效應力，及  $\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4$  與  $a$  為擬合參數。

(ii)阻尼比曲線：

$$D_{Adjusted} = b * \left(\frac{G}{G_{\max}}\right)^{0.1} * D_{Masing} + D_{\min} \leq 15\% \quad (3)$$

$$D_{\min} = (\phi_6 + \phi_7 * PI * OCR^{\phi_8}) * (\sigma'_0)^{\phi_9} * [(1 + \phi_{10} * \ln(frq))] + 2.5 \quad (4)$$

$$b = \phi_{11} + \phi_{12} * \ln(N) \quad (5)$$

$$D_{Masing, \alpha=1} = \frac{100}{\pi} \left[ 4 * \frac{\gamma - \gamma_{ref} \left( \left( \frac{\gamma + \gamma_{ref}}{\gamma_{ref}} \right) / \gamma_{ref} \right)}{\left( \gamma^2 / \gamma_{ref} \right)} - 2 \right] (\%) \quad (6)$$

在此  $D_{Adjusted}$ 、 $D_{Masing}$ 、 $D_{\min}$  分別為調整阻尼、依梅新規則計算之阻尼以及最小阻尼。 $freq$  為頻率、 $N$  為載重週數，而  $\phi_i$  for  $i=6 \sim 12$  與  $b$  為擬合參數。已提供各土層相對應之參數列表。

針對台電公司第 1 次答覆說明，第(1)及(3)項部分經審查答覆內容後，可以接受；第(2)項部分審查小組提出第 2 次審查意見：請進一步解釋在不同深度阻尼比曲線比較圖中，最深之 Group D 的阻尼比為何在剪應變 0.1%時快速上升。

台電公司第 2 次答覆說明：Group D 表示剪力波速介於 1,000 m/s 至 1,500 m/s 之岩石材料，當剪應變超過 0.08% 時，表示岩石材料已經開始進入破裂階段(fracturing range)，其剪力模數會開始快速衰減、阻尼則會因材料破裂而開始激增。與淺層土壤材料不同的是，此類岩石材料通常覆土深度很深，一旦受地震剪應力作用而達到產生破裂之應變程度，但因深層地層的高圍壓束制效應(confining effect)使得岩石材料受震會發生破裂，但不至於像淺層土壤會發生整個承载力破壞造成明顯的變形區。經審查答覆內容後，可以接受。

有關整體波速剖面及波速剖面隨機設定議題，審查小組提出 3 項審查意見：(1)表 6 至表 8 之最大和最小剪力波速來源為何？請於報告補述，並說明其假設之機率分佈型態。(2)請於報告簡述如何產生 200 個隨機波速剖面，且使剪力波速不隨深度而下降。(3)由於分析過程包含眾多參數，且計算過程包含許多程序，最後產出僅為一條反應譜曲線，因此不容易直接從這複雜的程序中判斷結果的合理性，建議能對於參數的敏感度作說明，說明參數變化對分析結果可能造成的影響，並有個分析對照組，採用一些簡單參數設定進行分析，比較分析結果與對造組結果的差異評估其合理性。

台電公司第 1 次答覆：(1)送審報告中表 6 至表 8 所呈現之數值為考量剪力波速基準剖面隨機變異之範圍。核一廠隨機波速剖面的變異係數(COV)設定深度 0 至 1 km 與大於 1 km 分別為 0.15 與 0.1，並設定在對數常態分佈(Log-normal Distribution)下以 $\pm 2\sigma$ 考量波速變異性。核一廠在考量隨機波速剖面之設定增述於「2.3.3.3 整體波速剖面」、「2.3.5 廠址波速剖面隨機設定」一節內容。(2)送審報告地盤反應分析過程中對整體波速基準剖面產生 200 個隨機波速剖面，係依據 Toro (1995)提出的層間相關性模型(Inter-layer Correlation,  $\rho_{IL}$ )，為土層厚度(thickness-dependent,  $\rho_t$ )與深度(depth-dependent,  $\rho_d$ )之函數，公式如下： $V_{S_i} = \exp(\ln[\hat{V}_i] + Z_i \cdot \sigma_{\ln V_S})$ 。其中， $Z_i = f_{XN}(Z_{i-1}, \rho_{IL})$ 為各層土層間波速的增加

值，與相關係數 $\rho_{IL}$ 有關。當 $\rho_{IL}$ 越小則表示上下土層關連性小，反之則越大，在大部分的狀況下 $\rho_{IL}$ 介於0.4~0.8之間。 $\sigma_{\ln V_s}$ 為波速剖面 $\ln[V_i]$ 之變異性在常態分佈做調整之標準偏差，提供波速剖面在隨機剖面設定之調整案例圖。根據前述說明，STRATA在設定隨機波速剖面時，因有層間相關性模型參數 $\rho_{IL}$ 的介入，不見得會產生剪力波速不隨深度而下降之案例，特別是一般認知上在淺層波速分布較具有變異性。以核三廠VSBGBV1為例，STRATA產生隨機剖面之示意圖，灰色線代表200組隨機產生之波速剖面，藍色實線為此200組波速剖面之中值，藍色虛線則代表中值加、減一個標準差的範圍，綠線則是某次隨機剖面。可發現兩點：所有200組隨機剖面模擬出來的結果可辨識出有每層都有 $(V_{s,max})$ 與 $(V_{s,min})$ ，此原因為在STRATA產生隨機剖面之過程設定每層隨機模擬之波速最大值與最小值，避免蒙地卡羅模擬時有極小概率生成異常大或異常小的隨機波速。因STRATA假設地層波速變異性為對數常態分佈，故送審報告設定各層 $(V_{s,max})$ 與 $(V_{s,min})$ 分別為中值加、減2倍標準差 $(\sigma_{\ln V_s})$ ，用以涵蓋5%至95%之波速不確定性；可發現綠線隨著深度變化跳動，且隨機波速剖面之各層波速並不一定深層波速會大於淺層波速，譬如該次模擬剖面之5公尺處波速大於下一層波速、10公尺處波速亦大於下一層波速。隨機波速剖面設定之層間相關性模型增述於「2.3.5 廠址波速剖面隨機設定」一節中。(3)為求得核一廠廠區之地盤放大函數，依據SPID導則考量波速剖面、非線性材料參數、以及大地震下高頻下過度考量阻尼效應(kappa2調修)之不確定性，並以邏輯樹呈現。為能協助了解不同參數考量對於結果之敏感度，主要以邏輯樹各節點之最佳估值為基準，呈現其參數變化對廠區放大效應敏感度之影響。由結果顯示，波速剖面之變異性對地盤放大函數之敏感度大於非線性材料參數及kappa2調修。送審報告以kappa2調修修正等值線性(EQL)分析方法對高頻下大應變的變化，使結果合乎實際物理現象，對地盤放大效應之影響不大。

針對台電公司第 1 次答覆說明，第(1)項部分經審查答覆內容後，可以接受；第(2)及(3)項部分審查小組提出第 2 次審查意見：(1)(i)答復說明之 a.「…中值加、減 2 倍標準差( $\sigma_{\ln V_s}$ )，用以涵蓋 5%至 95%之波速不確定性」敘述的 5%至 95%不精確；(ii)答復說明有「根據前述說明，STRATA 在設定隨機波速剖面時，因有層間相關性模型參數 $\rho_{ll}$ 的介入，不見得會產生剪力波速不隨深度而下降之案例」，但「2.3.5 廠址波速剖面隨機設定」增述了「另，採用層間相關性模型(Toro, 1995)致使剪力波速不隨深度而下降。」，請修改；(iii)在函數 $Z_i = f_{xn}(Z_{i-1}, \rho_{ll})$ 中， $Z_i$ 是否為 $Z_{i-1}$ 的增函數？(2)未說明圖中各線條所代表之意義？並請根據回覆內容修訂報告。

台電公司第 2 次答覆說明：(1)(i)第 1 次答復說明之 a.修訂為：「所有 200 組隨機剖面模擬出來的結果可判識出有每層都有( $V_{s,max}$ )與( $V_{s,min}$ )，此原因為在 STRATA 產生隨機剖面之過程設定每層隨機模擬之波速最大值與最小值，避免蒙地卡羅模擬時有極小概率生成異常大或異常小的隨機波速。因 STRATA 假設地層波速變異性為對數常態分佈，故送審報告設定各層( $V_{s,max}$ )與( $V_{s,min}$ )分別為中值加、減 2 倍標準差( $\sigma_{\ln V_s}$ )。」；(ii)修訂內容為：「…；另，採用層間相關性模型(Toro, 1995)來考慮各波速基準剖面與所對應模擬的 200 個隨機波速剖面之相關性，使得模擬出來 200 個隨機剖面之波速中值剖面與波速基準剖面具有相近的波速梯度，呈現地層剪力波速隨著深度增加的趨勢，但又不至於產生每個隨機剖面波速變化梯度與基準剖面完全一致(相關性為 1 之完全正相關)的情況，亦或不至於產生出隨機剖面各層波速變化太劇烈，各隨機波速剖面與波速基準剖面呈現完全無相關或相關性極低，而造成無法反映核電廠廠址地層波速統計特性的模擬結果。」；(iii)根據 Toro 層間相關性模型之定義， $Z_i$ 不一定為 $Z_{i-1}$ 的增函數，在以蒙地卡羅法生成各分析案例之 200 個核電廠隨機波速剖面，會出現第 i 層波速是大於波速中值，但第 i+1 層波速  $V_{Si+1}$  小於波速中值的模擬情況。(2)依據核一廠地

盤反應分析之參數邏輯樹上各節點分支，以最佳估值(BE)模型為基準，進行參數敏感度分析之結果如圖所示。符號說明如下：(i)VSX：波速基準剖面，VSB 對應最佳估值(BE)，VSU 對應上限值(UB)，VUL 對應下限值(LB)；(ii)GX：現地土壤非線性參數模型，GB 對應最佳估值，GU 對應上限值，GL 對應下限值；(iii)VX：岩土過渡區非線性參數模型，V1 對應類土壤，V2 對應類岩石；(iv)KX：kappa2 調修之起點頻率振幅與頻譜最大振幅之比值，K1 對應 0.17，K2 對應 0.11、K3 對應 0.05。以上符號說明增述於「2.3.5 廠址波速剖面隨機設定」一節。

針對台電公司第 2 次答覆說明，第(3)項部分經審查答覆內容後，可以接受；第(2)項部分審查小組提出第 3 次審查意見：為了確保剪力波速不隨深度而下降，一旦因  $Z_i$  之故，致使  $V_{Si}$  小於  $V_{S(i-1)}$  時，宜令  $V_{Si}=V_{S(i-1)}$  來調整之；否則，請說明理由。

台電公司第 3 次答覆說明：(i)以核一廠 SPID 報告之圖 15 及圖 16 為例，核一廠場址地層現有速度井測資料，可發現各孔地層波速剖面雖有整體波速值隨深度增大的趨勢，但地層不同深度之波速值仍有來回跳動的情況。而在送審報告所執行之核一廠 SASW 試驗(SPID 報告圖 17、圖 18)結果，可看出各測線之波速剖面不一定隨著深度增加而波速變大，但整體針對核一廠區最佳評估(BE)波速剖面評估出來結果(如 SPID 報告圖 18 之紅線)是呈現剪力波速隨著深度增加而逐漸變大的趨勢，但各測線分析所得之剪力波速剖面不必然都呈現波速隨深度呈現正相關的趨勢(如 ES、NE、EN 測線在某些深度會出現波速弱層的現象)，SPID 報告圖 18 中各測線(灰線)仍是分布在某個區間內而有所變化。因此送審報告所採用之 BE 基準剖面可視為廠區地層所有測線、速度井測資料經由統計與專業判斷所得出之代表性數值(中值)，而送審報告所採用之剪力波速 COV 值則是統計上為了涵蓋廠區地層在不同深度處可能的波速變化；(ii)因此送審報告 BE、LB、UB 各基準剖面建立依據統計結果波速趨勢隨著深度增加，但了解實際波速是隨土層特性而有高低變化，故

分析時是產生 200 組隨機波速剖面，勢必藉由剪力波速統計參數中值與 COV 變異係數來考量廠區內地層波速在空間上的分布與不確定性，模擬實際核一廠廠區內不同位置可能產生的剪力波速剖面分析案例。根據 STRATA 使用手冊，最頂層 ( $i=1$ ) 剪力波速之標準常態變數 (standard normal variable)  $Z_1$  與其他層並不相關，以  $Z_1 = \varepsilon_1$  來表示， $\varepsilon_1$  為獨立常態隨機變數 (具有 zero mean 與 a unit standard deviation 之特性)。則第 2 層 ( $i=2$ ) 剪力波速  $Z_2$  則可以表示為  $Z_2 = \rho_{LL} \cdot Z_1 + \varepsilon_2 \cdot \sqrt{1 - \rho_{LL}^2}$ 。其中  $\rho_{LL}$  為層間相關性參數 (inter-layer correlation)， $\varepsilon_2$  為第 2 層的新獨立常態隨機變數。利用上述關係式，逐一由淺而深建立該分析案例之隨機波速剖面。值得注意的是上下兩層剪力波速  $Z_i$ 、 $Z_{i+1}$  之  $\varepsilon_i$ 、 $\varepsilon_{i+1}$  為獨立常態隨機變數並透過  $\rho_{LL}$  層間相關性參數來控制上下兩層剪力波速之相關性，從上述理論與送審報告實際模擬核電廠廠區地層剪地層剪力波速隨機剖面的結果，均會產生某些上層剪力波速小於下層剪力波速的案例情況，但由於常態隨機變數  $\varepsilon_i$  已在程式中依照各地層剪力波速之中值 (原先依照廠區地層頻散曲線所辨識之 BE、LB 與 UB 剪力剖面) 與變異係數 (COV) 設定，故雖出現某些案例模擬出來某深度上層剪力波速小於下層剪力波速，但整體所模擬的 200 個隨機剖面之剪力波速中值與標準差 (或 COV) 仍保有原設定之統計特性 (即符合核一廠廠區現地波速剖面資料之統計特性)，此 200 個隨機剖面之剪力波速中值剖面幾乎等於該案例剪力波速剖面，而這些剖面 (原 BE、LB 與 UB) 之剪力波速是隨著深度而漸增的；(iii) 送審報告在產製 BE、LB、UB 各基準剖面的 200 組隨機波速剖面時，採用 STRATA 程式相關性模型 (correlation model) 之內建 USGS B 類地盤 (360~750 m/s) 參數 (Toro, 1995)，此組參數之  $\rho_{LL}$  在深度大於 200 m 後，其值  $\rho_{LL} = \rho_{200} = 1$ ，即深度 200 m 後之  $Z_{(i+1)} = \rho_{200} \cdot Z_i = Z_i$ ，表示該隨機波速分析剖面在深度 200 m 後地盤模型上下兩層剪力波速為完全相關。依據計畫團隊在建立各電廠中值 (BE) 基準波速剖面時所審視電廠地層波速量測資料，經執行計畫之技術專家討論判斷各電廠較可信之波速資料

深度範圍分別為：核一廠約在 0~150 m、核二廠約在 0~95 m、核三廠約在 0~240 m，因此送審報告技術專家決議在考量各廠廠址地盤分類與可靠波速資料之深度範圍，採用 USGS B 類地盤(360~750 m/s)之相關性模型參數應屬合宜。經審查答覆內容後，可以接受。

有關 SRA 分析之邏輯樹與分支權重議題，審查小組提出 2 項審查意見：(1)請於送審報告中說明「權重配置 0.2、0.6 與 0.2 可對應於評估資料 5%至 95%之變異範圍」之假設和依據。(2)2.3.7 節第一段，請清楚說明何謂場址項模型認知之不確定性？

台電公司第 1 次答覆：(1)有關送審報告所採用地盤反應分析之邏輯樹權重配置之設定，係根據 Miller and Rice(1983)以高斯積分法計算常態分佈之累積密度函數之機率與其所對應之權重，說明當資料分布範圍為平均值 $\pm 1.6$  倍的標準差之間時，即約 5%至 95%的區間時，權重計算後的結果約為 0.2、0.6 與 0.2。以上依據增述於「2.3.4 地盤反應分析之邏輯樹架構」一節內容。(2)模型認知(Epistemic)不確定性之考量，主要在既有的資料中找出合適的評估模型，但實際上對欲發展之模型可能在學理上、分析技術或對資料代表性理解不夠。因此模型在未來的應用上將存在不確定性，稱為認知不確定性，也可直接說明為模型建置的不確定性，此不確定性在未來將可能因資料或模型之更新後被減小或移除。2.3.7 節已重新說明地震動預估模式(GMPE)與地盤反應分析之間的介面銜接方法。

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)相關數字和論述均未出現在 Miller and Rice (1983)文中，請查核後再進一步解釋。(2)請於報告中作更清楚的說明。

台電公司第 2 次答覆說明：(1)參考美國 DCPD 核電廠執行 SSHAC Level 3 地震源特徵模型的經驗(PG&E, 2015)，其利用 Miller and Rice (1983)經由高斯積分求得之權重，選擇資料分布在 5%至 95%之間，近似 0.2、0.6、0.2 之權重設定。送審報告所採用之波速剖面與非線性材料

參數，經由分析與討論，說明可對應 5%至 95%資料範圍，故採用 0.2、0.6、0.2 之權重設定於邏輯樹中。(2)第 1 次答復主要內容已說明於前次修訂內容標註版本之「2.3.7 方法論」一節，僅第 1 次答復未確實標註須修訂報告為「是」。

針對台電公司第 2 次答覆說明，第(2)項部分經審查答覆內容後，可以接受；第(1)項部分審查小組提出第 3 次審查意見：當連續分佈的機率函數以離散分佈的分位數（對應於累積機率）和權重（即離散機率值）來取代時，無論 Miller and Rice (1983)或 Lee and Choi (2008)皆以前幾次矩的對應關係來推導，累積機率 5%、50%、95%對應於權重 0.2、0.6、0.2 的依據為何？請列出公式說明。

台電公司第 3 次答覆說明：假設資料分布呈標準常態分布(Standard Normal Distribution)，其平均值( $\mu$ )與標準偏差( $\sigma$ )分別為 0 與 1，而標準常態累積機率可表示為：

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-y^2/2} dy。$$

經查標準常態累積機率表，可得累積機率 5%、50%與 95%對應之隨機變數  $x$  分別為-1.645、0 與 1.645。在此，將連續分佈機率函數以離散分佈的分位數(對應於累積機率)和權重(即離散機率值)來取代，可藉由計算期望值  $E(x)$ 與變異數  $Var(x)$ 的相互關係，求得對應權重，如下式(1)所示：

$$\begin{cases} E(x) = \sum_{i=1}^3 x_i w_i \\ Var(x) = E[(x - \mu_x)^2] = \sum_{i=1}^3 (x_i - \mu_x)^2 x_i = 1 \\ \sum_{i=1}^3 w_i = 1 \end{cases} \quad (1)$$

其中， $x_i$ 可視為分位數， $w_i$ 為權重值；因 $E(x) = \mu_x = 0$ 且 $Var(x) = \sigma_x = 1$ ，並將  $x_1$ 、 $x_2$  與  $x_3$  分別帶為-1.645、0 與 1.645，則式(1)可改寫如下：

$$\begin{cases} -1.645w_1 + 1.645w_3 = 0 \\ (-1.645)^2 w_1 + (1.645)^2 w_3 = 1 \\ w_1 + w_2 + w_3 = 1 \end{cases} \quad (2)$$

式(2)經整理可得：

$$\begin{cases} w_1 = w_3 \\ 2.706(w_1 + w_3) = 1 \\ w_2 = 1 - w_1 - w_3 \end{cases} \quad (3)$$

式(3)經整理可得：

$$\begin{cases} w_1 = w_3 = 1/5.412 \approx 0.2 \\ w_2 = 3.412/5.412 \approx 0.6 \end{cases} \quad (4)$$

最後以大數作為設定邏輯樹權重的原則下，標準常態累積機率 5%、50% 與 95%對應的權重分別為 0.2、0.6 與 0.2。邏輯樹中對於基準波速剖面、非線性材料參數曲線以及 kappa2 調修的分支權重值設定，係由計畫技術專家群憑據經驗資料進行專業檢視、評估與判識而得，相關說明補充於第 2.3.4 一節內容。經審查答覆內容後，可以接受。

有關如何使用隨機振動理論(RVT)進行地盤反應分析議題，審查小組提出審查意見：請簡述如何使用隨機振動理論進行地盤反應分析，含過程和相關假設，尤其是第二次地盤反應分析之非線性材料行為的模擬。

台電公司第 1 次答覆：地盤反應分析的隨機振動理論方法首先在工程地震學文獻中提出(如 Schneider 等人, 1991)，並已應用於地盤反應分析與美國中部及東部核電廠之地震動反應譜評估(Rathje 等人, 2005 及 Silva 等人, 1997)，被 USNRC 認可說明文件於網站上公布(Rathje and Kottke, 2008)。

RVT 模式之地盤反應分析程序進行說明：傳統頻率域地盤反應分析模式，其輸入運動為加速度時間歷時，需經快速傅立葉轉換至頻率域(包含振幅與相位角)，在頻率域中透過地層層間轉換函數計算後，才能得出輸出運動(亦為複數型式)，再經由傅立葉逆轉換至時間域紀錄計算反應譜。而 RVT 模式之場址反應分析則僅利用輸入運動之 FAS(或功率譜)，同樣利用地層轉換函數計算各地層之受震反應，再利用極值統計計算加速

度、剪應變等受震反應，最後得出地表運動之 FAS(或功率譜)結果，經由隨機理論與單自由度系統之轉換函數與地震延時參數則可得出該運動之反應譜。

第二次地盤反應分析之非線性材料行為模擬：根據(NCREE, 2021)報告，台灣核電廠深部岩層(剪力波速大於 1,000 m/s 者)皆採用相同的非線性模數折減和阻尼比曲線。非線性特性取決於剪力波速，隨著剪力波速的增加，材料行為將更為線性。線性度的增加代表較佳岩石品質，而且微裂隙更少。此外，使用剪力波速相依的非線性曲線，將可決定在未知材料類型深度的非線性曲線，並間接考慮剪力波速隨著深度增加而增加的深度效應。非線性特性係由 Kenneth Stokoe 教授所建立，其與研究團隊使用動態扭轉共振柱法測試岩石樣本已有 30 多年的經驗。所有測量結果皆在小於約 10 個大氣壓的圍壓下進行，並將試體應變控制在小於 0.05-0.09% 的範圍。因此，Stokoe 教授將其成果外推到更大的深度和更大的應變範圍。這些曲線的  $D_{min}$  值與用於台灣參考岩盤定義  $D_{min}$  的  $D_{min}$ -Vs 關係一致。岩層的非線性對放大係數的影響很小，因此僅在中值模型中採用（不需要考慮模型不確定性）。在各廠區材料非線性模型部分，現地岩土非線性曲線是經由檢視評估廠區現地地質調查資料與室內岩土材料動態試驗結果以及專家判識，利用 Darendeli (2001) 模型回歸各廠「廠區高信度地盤模型建置試驗成果報告」(國立成功大學, 2021) 實際鑽孔資料之材料試驗結果，得出適用該廠區之模型參數。由於各廠區之最佳估值(BE)剖面初始剪力波速為隨深度增加(即初始剪力模數  $G_0$  與深度相關)，且 Darendeli 模式之材料參考應變(reference strain,  $\gamma_{REF}$ )與有效垂直應力  $\sigma_v$  有直接關係，如此便可結合  $G_0$ 、 $\sigma_v$ 、 $\gamma_{REF}$  與深度之相關性，推估其他近地表較深處(無實際取樣並進行室內試驗之深度)之材料非線性性質，並推廣延伸至岩土過渡區非線性曲線。

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：  
(i) RVT 之說明不夠精確，RVT 考慮場址之輸入和反應皆是隨機過程，

描述量為功率譜，輸入功率譜乘上地層轉換函數絕對值的平方，即得反應功率譜。反應功率譜藉助極值統計可得局部最大反應之機率分佈，在適當假設下，再推演全域最大反應之機率分佈。反應譜呈現反應歷時的全域最大值，但 RVT 的最大反應還是隨機變數，通常取代表值（中數、平均數或某一百分比值）來與反應譜值對應。在遍歷性(ergodic)過程的假設下，輸入功率譜正比於輸入運動之 FAS 的平方，而 ergodic 過程的前提是穩態過程，故計算輸入運動之 FAS 需有夠長的強動延時；(ii)上述 RVT 的輸入功率譜乘上地層轉換函數絕對值的平方，即得反應功率譜，乃基於線性系統的假設，系統特性以地層轉換函數為代表。第二次地盤反應分析已考慮非線性材料行為，如何求得線性之地層轉換函數？

台電公司第 2 次答覆說明：(i)RVT 是為無須輸入時間歷時的地盤反應分析方法，該理論及模型設定經實際分析驗證，也為 USNRC 管制導則 RG 1.208 認可分析方法之一。由於 RVT 理論分析，以隨機理論配合土層之轉換函數統計、地震延時參數，求得反應之功率譜。其中強震延時的評估，乃藉由考慮土壤共振之延時模型  $D_{rms}$  (Wang and Rathje, 2018)，以使能反映等值線性分析考慮土壤非線性行為；(ii)第二次地盤反應分析是採用等值線性(equivalent linear)方式去疊代到剪應變相符之地層材料性值，故本質上仍為線性計算(頻率域分析皆是線性系統計算)。至於 RVT 分析進行等值線性分析之模式與傳統以歷時作為輸入之頻率域分析相似：(a)使用輸入運動之 FAS 與剪應變轉換函數去計算各層之剪應變 FAS；(b)由剪應變 FAS 使用 RVT 之極值模式去預測最大剪應變( $\gamma_{max}$ )；(c)有效剪應變( $\gamma_{eff}$ )定義為 0.65 倍最大剪應變( $\gamma_{max}$ )；(d)由各層有效剪應變去根據該材料之模數衰減曲線與阻尼曲線更新下次分析所使用之等值剪力模數  $G_{eff}$  與  $D_{eff}$ ；(e)持續進行疊代計算直到剪應變符合收斂要求。經審查答覆內容後，可以接受。

接續「如何使用 RVT 進行地盤反應分析議題」審查意見第 2 次答覆說明，針對以井下量測歷時記錄驗證 RVT 轉換函數相關議題，審查

小組提出審查意見：關於第二次地盤反應分析是採用等值線性 (equivalent linear) 方式去迭代到剪應變相符之地層材料性值，故本質上仍為線性計算(頻率域分析皆是線性系統計算)，至於 RVT 分析進行等值線性分析之模式與傳統以歷時作為輸入之頻率域分析相似，僅有在獲得最大應變之來源方式不同，後續之迭代流程應相同。因此，如採用核一廠歷年地震事件井下量測記錄，亦可輸入對應地震事件之 FAS 進行比對。請採用核一廠歷年地震事件井下量測歷時記錄，驗證 RVT 與傳統歷時輸入對應迭代所得之廠址理論轉換函數是否相符。此項意見與之前所提土層波速剖面議題的輸入地震歷時不同。

台電公司第 1 次答覆：依據電廠整體剖面對應井下地震儀深度，以實際地震歷時，進行 RVT 與歷時分析求得理論轉換函數，說明對應迭代所得之廠址理論轉換函數是否相符。以單一地震事件實際紀錄進行 RVT 與時間域歷時分析，在核一廠 150 公尺的中值波速剖面配合中值非線性材料模型設定下，理論轉換函數的結果顯示在小地震下，兩分析方法所呈現之理論轉換函數相近。

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：請將本項檢核結果納入報告內容。

台電公司第 2 次答覆說明：承本回合「以井下量測歷時記錄驗證 RVT 轉換函數相關議題」之第 2 點回覆。另外，針對 STRATA 程式採歷時分析與 RVT 分析的成果已執行驗證。經審查答覆內容後，可以接受。

有關地震輸入反應譜及 STRATA 程式 RVT 參數設定議題，審查小組提出審查意見：(i)在 2.3.6 節中，何謂  $SA_{input}$  為 FAS 型式？如何由 FAS 轉換為反應譜？在隨機振動理論中，隨機反應的最大值還是隨機變數，有其機率分佈，需取某一代表值視為擬加速度反應譜(PSA, Pseudo-spectral Acceleration)；(ii)(a)在 STRATA 程式中，採用了某一種隨機反應最大值的機率分佈，其基本假設為何？(b)在 STRATA 程式中，採用了

某一種代表值視為 PSA，其對應之超越機率為何？

台電公司第 1 次答覆：(i)送審報告採等值線性方法(Equivalent Linear method, EQL)進行地盤反應分析，該法於頻率域中進行，透過 RVT 富氏譜作為輸入。在 2.3.6 節描述所使用之深度 5 km 岩盤輸入運動結合點震源與  $UHRS_{ref}$  反捲積分析結果之 FAS，以為進行後續場址地盤反應分析的基盤運動輸入模式；(ii)在 STRATA 程式使用者手冊 2.2.2 Random Vibration Theory Method 中說明由 FAS 轉換為反應譜之程序。隨機振動理論可以分為兩個部分：(a)使用 Parseval 定理在時域和頻域之間進行轉換，以及(b)使用極值統計估計峰值因子(Peak Factor, PF)。考慮一個時變信號  $x(t)$ 及其相關的 FAS,  $X(f)$ 。此信號的均方根值( $x_{rms}$ )是其在給定時間段內( $T_{rms}$ )的平均值，並根據該時間段內的時間序列積分計算得出：

$$x_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T_{rms}} \int_0^{T_{rms}} [x(t)]^2 dt} \quad (1)$$

Parseval 定理將時間序列的積分與其傅立葉變換的積分相關聯，因此式 (1)可以根據信號的 FAS 寫成：

$$x_{rms} = \sqrt{\frac{2}{T_{rms}} \int_0^{\infty} [X(f)]^2 df} = \sqrt{\frac{m_0}{T_{rms}}} \quad (2)$$

其中  $m_0$  定義為 FAS 的零階矩。FAS 的  $n$  階矩定義為：

$$m_n = 2 \int_0^{\infty} (2\pi f)^n [X(f)]^2 df \quad (3)$$

峰值因子(PF)表示信號的最大值( $x_{max}$ )與其均方根值( $x_{rms}$ )的比值，因此如果  $x_{rms}$  和 PF 已知，則可以使用以下公式計算  $x_{max}$ ：

$$x_{max} = PF \cdot x_{rms} \quad (4)$$

Cartwright 和 Longuet-Higgins (1956) 根據時間序列的極值數( $N_e$ )和帶寬( $\xi$ )推導出峰值因子期望值的積分式(Boore, 2003)：

$$E[PF] = \sqrt{2} \int_0^{\infty} 1 - [1 - \xi \exp(-z^2)]^{N_e} dz \quad (5)$$

在此定義帶寬( $\xi$ )為：

$$\xi = \sqrt{\frac{m_2^2}{m_0 m_4}} \quad (6)$$

與時間序列的極值數( $N_e$ )為：

$$N_e = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{m_4}{m_2}} T_{gm} \quad (7)$$

其中  $T_{gm}$  為地震動延時(ground motion duration)。根據上述說明則可依此計算由加速度 FAS 轉換為加速度反應譜。在最大的  $N_e$  下，式(5)可以由 Type I Asymptotic equation (Gumbel 1958)，並假設有效帶寬 $\xi$ 為 1，被簡化成一個漸近式(Boore, 2003)

$$E[PF] = [2 \cdot \ln(\xi \cdot N_e)]^{1/2} + \frac{0.5772}{[2 \cdot \ln(\xi \cdot N_e)]^{1/2}} \quad (8)$$

將式(5)與式(8)進行比較，並採用兩個不同的有效帶寬，分別為 1.0 與 0.45。在中、大地震下的地震時間序列， $\xi$ 通常為 0.45；當 $\xi$ 為 1 時，初始的 PF 會接近一個雷利分布(Rayleigh distribution) (Cartwright and Longuet-Higgins 1956)。此外，PF 範圍為 1.5 到 3.5，隨著  $N_e$  變大，PF 的變化趨緩。PF 的期望值可在  $N_e$  範圍內由積分式求得，藉由相關結果的比較後，採用完整的積分式求得 PF。依據積分式 PF 為時間序列的極值數( $N_e$ )和帶寬( $\xi$ )設定下平均值。

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：(i) 式(6)的帶寬是定義式，式(7)的極值數是某種假設下的估計值，受  $T_{gm}$  影響很大，進而影響平均峰值因子，故提出「輸入地震反應譜議題」之第(3)項審查意見，採用  $T_{gm,5-75}$  或較大的  $T_{gm,5-95}$ ，平均峰值因子也明顯不同；(ii) 如何決定  $T_{rms}$ ？(iii)既然採用平均峰值因子計算 PSA，結果與等值線性歷時分析必互有高低，最好比較之，以觀察等值線性 RVT 的保守程度。

台電公司第 2 次答覆說明：(i)RVT 分析中考慮到共振將會導致時間的增加，因此對於共振頻率上須對強震延時進行調整。分析模型雖採用

$T_{gm,5-95}$  進行探討，惟因進行了強震延時修正，故即使另使用  $T_{gm,5-75}$ ，對分析結果不致有太大差異。以核三廠土層剖面以及年超越頻率 1E-04 的輸入地震為案例，在採用  $T_{gm,5-75}$  與  $T_{gm,5-95}$  強震延時進行等值線性 RVT 分析之比較，結果顯示兩者強震延時的地表反應譜結果接近；(ii)  $T_{rms}$  之評估是參考延時模型(Wang and Rathje, 2018)，為一考慮共振所造成延時的改變。

$$D_{5-95,rock}^{osc} / D_{gm} = \begin{cases} Dur_0 - \frac{(f - 0.1Hz)}{a + b(f - 0.1Hz)} & (0.1Hz \leq f < f_{lim}) \\ 1.0 & (f \geq f_{lim}) \end{cases}$$

其中  $D_{gm}$  即為  $T_{rms}$ ，分析過程將參考岩盤的  $T_{gm,5-95}$  求得地表的  $T_{rms}$ ；(iii) 請詳見「RVT 與歷時分析結果之一致性議題」審查意見之第 2 次答復說明。

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：RVT 的相關公式皆假設隨機外力歷時和隨機反應歷時為穩態過程 (Stationary Process) 而推導，估計穩態過程的統計量時，宜以 Ensemble Average 為之；惟受限於只有一組樣本歷時，常以 Temporal Average 計算統計量，即再進一步假設穩態過程為 Ergodic。均方根加速度  $x_{rms}$  的計算式即為 Temporal Average 的演變，穩態歷時沒有開始點，也沒有結束點，故以 Temporal Average 取代 Ensemble Average 時，樣本歷時的延時愈長愈好。因為樣本歷時有初動和餘動階段，只取強動歷時來計算頻譜和統計量，才有  $T_{gm}$  的不同選擇，也造成  $x_{rms}$  的差異 (Ensemble Average 只有一種結果，Temporal Average 產生不同結果)。對長週期系統而言，樣本歷時或強動歷時的延時要求更長，否則 RVT 的結果漸不可信。RVT 的結果需以 Deterministic Approach (時域分析或頻域分析) 來驗證。

台電公司第 3 次答覆說明：RVT 分析在應用上具有穩定、高效率特性，因此在計畫執行時間限制下，參考了 RG1.208 選擇以 RVT 分析進行地盤反應分析，相關的限制條件亦參考 SRP 3.7.1 ” SRP

Acceptance Criteria”中之規定。RVT 計算時地震延時是重要影響地表譜值的重要參數，除此外，RVT 分析對於大地震下將對於阻尼有過度考量之現象。以上的限制，在分析過程中進行以下修正：(i)在 STRATA 軟體中，RVT 分析依據 Wang and Rathje(2018)，在計算地表譜值  $y_{max}$  時，帶入均方根之延時( $D_{rms}$ )為強震延時( $D_{gm}$ )與土壤共振反應之延時( $D_{osc}$ )之總合。應用如下式

$$D_{rms} = D_{gm} + D_{osc} \quad (1)$$

$$y_{rms}(f_{osc}, \zeta) = \sqrt{\frac{m_0(f_{osc}, \zeta)}{D_{rms}}} \quad (2)$$

$$y_{max} = y_{rms} \cdot PF \quad (3)$$

除延時的影響外，由實際地震資料了解 RVT 分析在大地震下對於阻尼有過度考量之現象，導致高頻會過度衰減，以致低估地表譜值。因此，送審報告以實際地震紀錄建立修正程序(Kappa2 修正)，以校正 RVT 因過度考量阻尼所產生反應譜低估的現象，使分析結果更接近經驗模型。經審查答覆內容後，可以接受。

針對「地震輸入反應譜及 STRATA 程式 RVT 參數設定議題」審查意見的第 2 次答覆說明，有關輸入地震資料確認及 RVT 與 EQL 歷時分析轉換函數相符等議題，審查小組提出審查意見：承「地震輸入反應譜及 STRATA 程式 RVT 參數設定議題」審查意見第 2 次答覆說明，請提供等值線性歷時分析(EQL)以及非線性歷時分析(NL)，於  $SA_{input}$  位置之輸入地震歷時(所提附件資料僅為地表之結果，而非輸入之地震波，請確認時間間隔是否為 0.005 秒，有些時間點並非其整數倍，且為何要取如此微小之取樣時間?)，並繪製在不同輸入 PA 下，套用 Darendeli 模型進行迭代時，請一併驗證 RVT 與等值線性歷時分析(EQL)，對應所得之廠址理論轉換函數是否相符。針對核一、二、三廠各場址，即便輸入地震歷時採用相同之測試依據，實際上三個廠的場址 RVT 分析之廠址理論轉換函數亦不同，請修正後分別比對。

台電公司答覆：本審查意見之回復已彙整於「廠址中小度地震觀測

結果納入地震危害評估結果檢核議題」審查意見之答覆內容中。經審查答覆內容後，可以接受。

有關 RVT 與歷時分析結果之一致性議題，審查小組提出審查意見：為了驗證 RVT 與歷時分析結果的一致性，在第二次地盤反應分析時，請比較下列分析方法之結果：(i)等值線性 RVT；(ii)等值線性歷時分析，和(iii)非線性歷時分析。比較項目有 PSA、FAS 和反應歷時，比較案例可取 0.112 秒週期之 GM11，以及 200 個隨機波速剖面之最低者。

台電公司第 1 次答覆：送審報告以 RVT 進行一維等效線性之地盤反應分析，當輸入運動較大時，會因過阻尼使得分析過程中低估了高頻段的反應，即需參考當輸入運動較小時的分析結果，使被低估的高頻段的修正為與非線性分析結果相符，透過這樣的修正方式，報告中稱之為「kappa2 調修」。為確認此現象，以地震動由小到大的地震歷時(PGA 分別為 0.005 g、0.85 g (年超越頻率約  $1E-3$ )、1.86 g (年超越頻率約  $1E-4$ ) 及 3.67 g (年超越頻率約  $1E-5$ ))，以核三廠 BE 波速剖面及一組非線性材料曲線進行地盤反應分析為例，比較等效線性分析(EQL)與非線性歷時分析(NL)之結果。求得地表之傅氏譜(FAS)比較，並提供地表加速度反應譜之比較。比較圖中顯示隨著輸入運動強度的增加，來自 EQL 和 NL 分析之 FAS 分離的頻率點從大約 3 Hz 降低到 1 Hz。由於數值問題，EQL 分析呈現的高頻段 FAS 與 NL 分析的 FAS 的 kappa (可視為高頻段之斜率)要大。另繪製四個輸入運動強度在 EQL 和 NL 分析的地表加速度反應譜。兩者分析的結果在 PGA = 0.005 g 基本相同，在 PGA = 0.85 g 的反應譜也非常相似。但對於兩個較大的地震強度級別(PGA = 1.86 g, 3.67 g)，EQL 分析的反應譜均大於 NL 分析的結果，雖然兩者反應譜都有在週期 2.0 sec 有峰值。但 EQL 反應譜形狀在較短週期(約 0.3 至 0.5 sec)較 NL 反應譜平坦。由反應譜的比較顯示，對於最大地動強度 3.67 g 的輸入，EQL 和 NL 模型之間的 PSA 值存在很大差異，因為 EQL 模型導致 PSA 值比 NL 結果大 2 倍。NL 和 EQL 分析都低估了觀察到在

高頻段的放大；此低估對於 NL 分析更為重要。這種低估可能是一維波傳假設的結果，因在地盤反應分析中假設土層在水平方向上無限延伸。在這種設定下，當產生大應變時，剪應力無法傳遞，地表的峰值加速度和短週期反應是有限的。當需要模擬土壤的完全非線性應力應變反應時，這種影響更為顯著。實際上，只有進行三維分析才有可能有較佳的擬合度。因此，廠區土層特性在大震動強度下真正的放大很可能介於 EQL 和 NL 分析預測的地盤放大係數之間。

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：尚未回復在第二次地盤反應分析時，(1)等值線性 RVT 和(2)等值線性歷時分析的 PSA 和 FAS 之比較。

台電公司第 2 次答覆：提供等值線性(RVT)、等值線性歷時分析(EQL)以及非線性歷時分析(NL)之傅氏譜(FAS)與加速度反應譜(PSA)比較結果。其中等值線性(RVT)、等值線性歷時分析(EQL)結果相近，與非線性歷時分析結果之比較乃說明送審報告以  $\kappa_2$  調整修正等值線性法在大震度下之過阻尼現象。

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：當地盤輸入和土層系統動態特性相同時，RVT 在長週期或強震的 PSA 明顯小於 EQL，趨於不保守，請檢討說明之。

台電公司第 3 次答覆：(i)在回覆第二次審查意見時，採用相同土壤參數進行地盤反應分析，但在進行 RVT 分析時，採用與 EQL 分析不同的輸入 FAS，因此造成比較上的差異；(ii)在採用相同的輸入運動(或 FAS)與土壤參數模型下，EQL 與 RVT 在長周期大於 1 sec(地盤顯著周期)譜形相近。由剪應變剖面說明 EQL 與 RVT 的結果趨勢一致；由阻尼剖面亦有一樣的趨勢，但 EQL 結果略小於 RVT，造成反應譜的差異。剪應變與組尼剖面圖說明歷時分析的阻尼低於 RVT 分析結果，故地表反應譜 RVT 分析的結果較低。另外需注意的是，由於 RVT 的概念是以統計機率求得分析結果，故以單一筆歷時分析結果並無法直接探討其一

致性；(iii)在等效線性分析中，歷時分析與 RVT 分析大地震下都有過度考量阻尼的現象，因此以 Kappa2 修正程序，校正高頻被過度衰減的現象，修正地表反應譜短周期的譜值，以使結果接近經驗值。將上述經由歷時分析與 RVT 分析求得之地表反應譜，進行 Kappa2 修正程序後，結果說明 RVT 與歷時分析經校正後的反應譜均比非線性歷時分析結果保守。

針對台電公司第 3 次答覆說明，審查小組提出第 4 次審查意見：等值線性分析(時間域 EQL 或頻率域 RVT)在大震度下的高頻內涵因過阻尼現象之故，低於非線性分析(NL)。但送審報告未經 kappa2 調整時，為何等值線性分析的短週期譜加速度卻高於非線性分析？以 kappa2 調整等值線性分析在大震度下的短週期內涵後，等值線性分析的短週期譜加速度更高於非線性分析，亦即更保守。如此一來，kappa2 調整有其必要性嗎？在 FAS 的比較中，縱座標為對數尺度，等值線性分析的低頻分量調整遠比高頻分量調整重要，何況極低頻分量的調整影響整體反應譜，而 kappa2 調整高頻分量僅影響局部反應譜。與非線性分析(NL)比較，等值線性分析（時間域 EQL 或頻率域 RVT）保守與否取決於 FAS 的低頻分量大小，而非高頻分量的 kappa2 調整。以  $PA = 0.85g$  為例，RVT 的極低頻分量小於 NL 和 EQL，請以此例繪出 NL、EQL 和 RVT 在 kappa2 調整後的反應譜比較。

台電公司第 4 次答覆：(i)送審報告依據 RG1.208 要求採用 RVT 模式的擬線性地盤反應分析。在此分析方法的理論設定下，5 km 深土壤剖面與大地震等級下的輸入運動，會由於土壤大應變下非線性行為，分析所得之地表運動及其 FAS 就會造成集中在大於 1 秒以上之長週期震動，而此一效應反映在地表運動加速度反應譜時，就會造成反應譜譜型峰值變化都在大於 1 sec 後，而在小於 0.2 sec 後至 ZPA 處之反應譜呈現平坦無變化的譜型，且帶動短周期譜加速度值的提高；(ii)比較 NL 分析所得地表運動與 EQL 分析的結果，在高強度地震下，EQL 分析結果

在大應變下產生不符合實際而振幅過低的高頻內涵(Kausel and Asimaki, 2002)。基於 EQL 與 NL 結果的比較，TI 團隊獲致結論：對於台灣的核電廠場址來說，在高強度的輸入地震下，調修 EQL 法所算出的傅氏振幅譜在約 2 Hz 以上的高頻分量，使其與實際大地震紀錄呈現之 kappa 值吻合是必須的。修正後的地表反應譜主要調整在顯著頻率段(0.1 ~ 1 sec)，雖譜值可能有保守考量，但能確實使主要頻段在傅氏振幅譜中能保留應有的頻率內涵；(iii)將 PA=0.85g 分別採擬線性歷時分析與 RVT 分析所求得地表反應譜進行 kappa2 調整後繪出，並比較 NL 分析結果與修正後反應譜與傅氏振幅譜，說明在 kappa2 調整是影響在週期 0.05-0.4 sec 反應譜，對 0.05 sec 周期之前的反應譜有小幅度的影響。

針對台電公司第 4 次答覆說明，審查小組提出第 5 次審查意見：(i) 為何 PA=0.85g 的 FAS 比較圖在第 1、2 及 4 次答復說明都不一樣？(ii) 以 PA=0.85g 的 FAS 和 SA 比較圖為例，即令高頻分量不進行 kappa2 調整，0.5 秒(2 Hz)週期之前的 SA 比較圖中，EQL 依然不會顯著低於 NL。TI 團隊的結論：「對於台灣的核電廠場址來說，在高強度的輸入地震下，調修 EQL 法所算出的傅氏振幅譜在約 2 Hz 以上的高頻分量，使其與實際大地震紀錄呈現之 kappa 值吻合是必須」，但觀察 PA=3.67g 的 FAS 和 SA 比較圖，kappa2 調整前，EQL 在 0.5 秒(2 Hz)週期之前的 SA 仍然高於 NL。後續的 SPRA 等分析基於 SA，而非 FAS，調整 kappa2 將使分析結果更為保守。

台電公司第 5 次答覆：(i) 在此澄清第 4 次答復說明所呈現 PA=0.85g (Case 2)輸入地震下，不同地盤反應分析方法所得到傅氏譜(FAS)的比較中，因將 NL 分析的結果誤植為 PA=1.86g (Case 3)輸入地震之結果，導致誤解，重新整理後回覆如後；(ii)重新整理不同強度(Case 1~ Case 4)輸入地震對應不同地盤反應分析方法之結果，其 FAS 與反應譜(SA)之比較，分別說明如下。可看出到隨著輸入地震強度由小至大，RVT 分析與 EQL 分析(時間域)所呈現之地表反應譜會接近或超越 NL 分析之結

果。送審報告依據 RG 1.208 採用等值線性 RVT 分析之方法，除考慮隨機波速剖面外，亦提出修正大地震下高頻區段過度考慮阻尼之現象，結果呈現的地表反應譜雖保守但在主要頻段可保留應有的頻率內涵；(iii) 為清楚說明等值線性 RVT 分析從傅氏譜轉換至反應譜期間的過程，以  $PA=0.85$  及  $PA=3.67g$  之輸入地震為例，說明 RVT 分析在考慮土壤共振反應延時( $D_{osc}$ )前後，地表反應譜的變化。Wang and Rathje(2018)提出對於土壤剖面，在計算地表譜值時，所帶入均方根延時( $D_{rms}$ )應為強震延時( $D_{gm}$ )與土壤共振反應延時( $D_{osc}$ )之總合，並將其理論加入 STRATA v0.8.0 版本的計算過程。經比較利用 STRATA v0.8.0 版本與 STRATA v0.5.10 版本使用等值線性 RVT 分析所求得之地表傅氏譜，說明此兩版本傅氏譜結果相同。在相同傅氏譜下，則呈現考慮土壤共振反應延時( $D_{osc}$ )與否之地表反應譜變化。顯示因考慮  $D_{osc}$  使總延時增加，造成地表反應譜改變，主要係因延時長度與時間序列的極值數( $N_e$ )為正比： $N_e = \frac{1}{\pi} \sqrt{m_4/m_2} T_{gm}$ ；故隨著  $N_e$  變大，極值統計估計峰值因子(Peak Factor, PF)的變化趨緩，而影響地表反應譜。另一方面，圖中也呈現當 RVT 分析不考慮  $D_{osc}$  之結果與 EQL 分析結果較為接近，乃因 EQL 分析採歷時分析，是為整筆歷時反應之結果。經審查答覆內容後，可以接受。

有關廠址中小度地震觀測結果納入地震危害評估結果檢核議題，審查小組提出審查意見：根據核一廠場址之 DHA 及 DHB 地震觀測地層轉換函數分析結果，廠址土壤第一個顯著週期約落在 1.0 sec (1.0Hz)，第二個顯著週期為 0.5 sec (2.0Hz)，且建議之理論模型之顯著週期均略小於實際量測值。於本次地震危害重評估程序中，如何將廠址中小度地震所呈現之實際地震觀測結果納入檢核比對。

台電公司第 1 次答覆：核一廠的井下地震儀地震觀測地層轉換函數分析結果，確可作為計畫成果之參考。這些由地表與井下深度 150 公尺地震儀之實測地震資料所求得的地層轉換函數代表的是核一廠址，在中小度地震下之地層的真實線性場址反應，雖然無法直接與送審報告著重

之強震非線性場址反應相比對，但可作為所建立核一廠代表性地層剖面在近地表範圍的驗證之用。然要特別說明的是，針對送審報告所建立之廠址代表性地層剖面是由廠區內多種量測方法與施測位置所獲得之地層參數所建立，用以涵蓋整個廠區之地層特性變化；而井下地震儀觀測到的是在廠區內特定位置下之地震動場址反應，會因地層構造之三維變化造成兩者有所差異，但此比對仍可作為驗證廠址地層剖面合理性之參考。

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：同意因送審報告所建立之廠址代表性地層剖面，是由廠區內多種量測方法與施測位置所獲得之地層參數所建立，用以涵蓋整個廠區之地層特性變化。然而，目前多種量測方法所引致之震度仍不及真實地震事件之行為。請提供與井下同深度(150m 以內)，對應 LB/BE/UB 之三組剪力波速剖面圖，同時在三組基準下採用 Darendeli 非線性模型，經等值線性迭代後淺層(150m)至地表之土層理論轉換函數。為比對中小度地震下真實線性場址反應與強震時非線性模型之性能，請提供 10 筆(可依據「RVT 與歷時分析結果之一致性議題」審查意見之回覆資料提供，請修正圖標上方輸入地震應為 PA，同時可考慮增加原 SSE 及 RLE 之評估等級)與危害度相符於基礎下方 150m 深度之人造輸入地震歷時。

台電公司第 2 次答覆說明：為說明送審報告模型之發展是否合理評估廠區之地盤放大效應，藉由廠區井下陣列之實際紀錄進行比較。經比較實際地震紀錄與核一廠地盤反應分析模型結果之轉換函數後，顯示實際地震紀錄所反映出之頻率內涵均在 3 組模型所涵蓋之範圍內。另提出分析所採用的井下地震儀實測紀錄與轉換函數供參考。

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：為比對中小度地震下真實線性場址反應與強震時非線性模型之性能，請提供送審報告進行等值線性歷時分析(EQL)、RVT 以及非線性歷時分析(NL)時所採用之地表下 5 公里的四組輸入地震歷時( $PA=0.0005g$ 、 $0.85g$ 、

1.86g 及 3.67g)，並將其套用 STRATA 配合 TWGR 剪力波速剖面( $VS_{ref}$ )，設定為 Within 輸入，傳遞至地下 150m 深度之人造地震歷時，請繪製四組理論轉換函數  $TF(150m/5000m)(within)$ ，並檢核是否差異不大？以量化驗證在較深處相對高值的波速變化影響較小，故偏深處的連接點對於地盤反應分析結果的影響性較不顯著之論述。並提供此深度(150m)位置四組輸出歷時，以作為後續核一廠區淺層土壤模型非線性行為影響之比較依據。

台電公司第 3 次答覆說明：依據各審查意見所提建議，統整回覆如下說明：(i)由於審查意見希望以歷時分析結果說明偏深處的連接點對於地盤反應分析結果的影響性較不顯著之論述，在此說明具連接點的剖面係為廠區整體土壤波速 5 km 剖面(Site-specific)，即為廠區地表土壤剖面連結 TWGR 之結果；非為 TWGR 剖面。故以下的說明均以廠區整體剖面進行分析及討論；(ii)為說明在連接點以下較深處波速變化對於地盤反應分析結果的影響性，故以連接點在 650 米位置的波速剖面為例，連接點以下不同波速變化下理論轉換函數之變化。提出同一個深度的連接點以下，波速剖面隨深度變化之案例圖；另繪出各土壤剖面之理論轉換函數，結果說明深處波速的變化對於地盤反應分析的結果影響不大；(iii)地盤反應分析以歷時分析進行，提供所採用的輸入模型與輸出設定；(iv)3 組 5 公里土壤剖面以四組地震歷時進行歷時分析，輸入為 5 公里的 within，並對應井下地震儀深度之輸出 0/150m(within)及 150m/5000m(within)理論轉換函數。結果說明淺層土壤剖面是主要影響地盤反應分析結果。此外，由剪應變與阻尼剖面可說明在 500 公尺以下之土層變異性變化不大；(v)3 組 5 公里土壤剖面以四組地震歷時進行歷時分析，輸入為 5 公里的 outcrop，並對應井下地震儀深度之輸出 0/150m(within)及 150m/5000m(outcrop)理論轉換函數。結果說明淺層土壤剖面是主要影響地盤反應分析結果。另由剪應變與阻尼剖面則說明在 500 公尺以下之土層變異性變化不大；(vi)由上述說明不同輸入設定是

影響理論轉換函數。然而在送審報告輸入地震的建立，是以建立符合 UHRS 設定為基本假設，並能在相同輸入下進行二次地盤反應分析，相除求取廠區考量非線性之地盤放大函數。經由「兩次地盤反應分析示意圖呈現之議題」審查意見案例說明，除輸入地震的建立是包括地震學理論與 UHRS 在剪力波速 3000m/s 岩盤位置的 FAS，亦在 outcrop 設定上符合輸入運動一致性的假設。提供送審報告採用的地盤反應分析程序文章如文獻「基於通用地盤修正之地盤反應分析程序，地工技術，張毓文等人」作為參考；(vii)「輸入地震資料確認及 RVT 與 EQL 歷時分析轉換函數相符等議題」之審查意見希望比較歷時分析與 RVT 分析之地盤反應分析結果，確認在 0/150 m (within) 的理論轉換函數是一致的。由 5 km 中值波速模型及中值非線性材料參數，兩種地盤反應分析方法所輸出 0/150m (within) 的理論轉換函數加以比較後，其結果顯示是相近的，為大地震下因阻尼已到 15% 之限制，因此差異性更小；(viii) 深度(150m) 位置四組輸出歷時係以深度 5 km 處 outcrop 輸入的輸出結果。

針對台電公司第 3 次答覆說明，審查小組提出第 4 次審查意見：(i) 原始意見即建議 0/150m 採用廠區土壤參數，150m 以下則採用「兩次地盤反應分析示意圖呈現之議題」審查意見之內容，亦即送審報告圖 22 之整體波速剖面向下平移 1595m 之資料，請確認此點。惟第 3 次答復為何以連接點在 650m 位置為例，同時又分為 Case 0 至 Case 4 論述，請釐清各個 Case 的依據為何？且所提呈現的理論轉換函數與核三廠相同，亦非針對核一廠的 50m 進行討論，5km 輸入設定仍為 Outcrop，請釐清資料的正確性；(ii) 根據「廠址中小度地震觀測結果納入地震危害評估結果檢核議題」審查意見第 3 次答復之輸入與輸出表格中，輸入欄 A.1 及 A.2 為設定 5 公里輸入 within motion，A.3 及 A.4 為設定 5 公里輸入 Outcrop motion。但是觀察第 3 次答復中圖上標題雖有區分 within 或 outcrop，但理論轉換函數並無差異，且圖形上標之標註亦相同(均為 within)，請釐清資料正確性。(iii) 根據目前提供的理論轉換函數及其對

應的迭代而得的阻尼比，可觀察獲知當  $PA = 0.85g$ 、 $1.86g$  及  $3.67g$  三種狀況下，土層多已達到 Darendeli 非線性模型阻尼比上限 15%，因此，所迭代而得之理論轉換函數在土層顯著週期位置的振幅值偏小，對於後續 FIRS 的計算是否偏保守，是否中小地震的輸入  $PA$  反而會主導 FIRS 的反應譜值，建議應提出評估。

台電公司第 4 次答覆說明：(i)實際上要達到量化驗證偏深處的連接點對於地盤反應分析結果的影響性較不顯著之論述，需比較同一輸入地震強度下，不同深部地層電廠廠址波速剖面與台灣通用岩盤波速剖面 (TWGR) 連接點之敏感度分析，故前次回覆即先以核一廠分析剖面 VSBGBV1 為例(即為 case0)，由於原核一廠 BE 剖面與 TWGR 相連接處在 1825m，此深度之上層波速(廠址剖面)、下層波速(TWGR)均為 1706m/s，因此假設 TWGR 垂直向下平移深度 1295m，則連接點深度變為 1525m，但此深度以下之 TWGR 波速仍為 1706m/s，以此做為 case1 案例。另外在廠址波速剖面部分不變動(連接點深度不變、均為 1825m，即 0~1825m 範圍內的核一廠廠址 BE 波速剖面不更動)的情況下，調整 TWGR 垂直向下平移深度 1545m，使得 1825m 處連接之 TWGR 波速剖面發生變化，如 case2 剖面在 1825m 所連接之 TWGR 該層波速為 1744m/s；而 case3 剖面即是將 TWGR 只垂直向下移動 1475m，則在深度 1825m 處所連結到之 TWGR 該層波速變為 1807m/s。核一廠分析一共模擬 case1 至 case3 三種剖面連接方式，將連接點敏感度分析之各案例結果列表，亦提供各案例之波速剖面與連接點深度附近之波速剖面連接情況，此連接點敏感度分析案例之轉換函數 150m\_within/5km\_outcrop、在各輸入地震條件之結果，由敏感度分析結果可知廠址波速剖面與 TWGR 剖面之深處連接點條件(TWGR 垂直向下平移深度由 1295m 變化至 1595m、TWGR 連接處之地層  $V_s$  由 1706m/s 逐漸變化至 1807m/s)，對於轉換函數 150m\_within/5km\_outcrop 影響不大，始可達到審查意見所要求之“量化驗證在較深處相對高值的波速變

化影響較小，故偏深處的連接點對於地盤反應分析結果的影響性較不顯著之論述”；(ii)根據第 3 次答復之輸入與輸出表格中，呈現案例是分別在 5 公里處各以 within motion 及 outcrop motion 進行分析，並同樣可由程式去輸出 A1 至 A5 的結果。若說明不同輸入設定對應在 150m 各自輸出之 A5，參照圖示說明，其對應的理論轉換函數分別為 inp\_within - A2 及 inp\_outcrop-A3。提供不同輸入設定所呈現深部土壤之理論轉換函數比較整理。由不同地震大小經地盤反應分析所呈現之 150m 以下土層之理論轉換函數，在 1 Hz 以下之主要頻率是相近的，說明偏深處的連接點對於地盤反應分析結果的影響性較不顯著之論述；(iii) 阻尼比上限 15%為 NUREG-0800 中要求核電廠進行地盤反應分析時之設定。另，美國核能法規 RG 1.208 定義的特定廠址地震動反應譜，稱 GMRS 或 FIRS，係屬風險導向(risk-consistent)，其透過考量地震危害度曲線在年超越頻率  $1E-4$  至  $1E-5$  之間斜率，致能符合核能電廠之地震風險爐心熔毀頻率 (Seismic Core Damage Frequency, SCDF)  $1E-5$ /年的性能目標值。經審查答覆內容後，可以接受。

有關 kapp2 調修及廠址放大函數議題，審查小組提出 2 項審查意見：(1)圖 34 和圖 35 控制點不同危害水準之對數平均 FAS 如何得之？為何文中稱為對數平均？圖中又稱為 Median？(2) 請解釋圖 37 控制點不同危害水準加權重後對數均值放大係數隨週期的高低翻轉變化的。

台電公司答覆：(1)圖 34 與圖 35 控制點不同危害水準之對數平均 FAS 計算方式，以圖中未經 kappa2 修正之灰色線為例說明：每一危害水準皆有 18 條對數平均 FAS，其對應地盤反應分析參數邏輯樹(第 2.3.4 節)的 3 組波速基準剖面、3 組淺部岩土材料非線性曲線、2 組過渡區岩土材料非線性曲線、以及 1 組岩石材料非線性曲線之組合結果。每一組合產生 200 個隨機波速剖面並個別進行地盤反應分析，最後計算 200 個分析輸出 FAS 的對數常態分佈中值，即： $median_i = \exp\left[\sum_{j=1}^{200} \ln(FAS_{ij})/200\right]$ 。其中， $median_i$  為第  $i$  個頻率點下 200 個 FAS 的對數常態分佈中值， $FAS_{ij}$

為第  $j$  個隨機波速剖面經地盤反應分析求得之第  $i$  個頻率點 FAS。在對數常態分佈的設定條件下，「2.3.9 廠址放大函數」一節所述對數均值或對數平均，將修正為中值。(2)圖 37 呈現核一廠土層特性之放大效應，在小地動強度下(GM01，年超越頻率為  $1E-01$ )，地層材料剪力模數折減不多、阻尼比亦不大，此時放大函數之顯著週期約在 0.2 秒至 1.0 秒之間。隨著危害水準增加、地動強度也增加，地層材料之非線性效應逐漸顯著，造成地層材料剪力模數折減越多，放大函數之顯著週期也越往長週期移動，同時地層材料等值阻尼比也隨所受之剪應變增大而增加，使得短週期之放大函數逐漸下降。除此外，依據 RG 1.208 對阻尼比材料參數曲線最大為 15%之限制條件，在剪應變增大的情況下，因地層材料等值阻尼比受到限制，使長週期放大函數大於 1.0。經審查答覆內容後，可以接受。

有關 kapp2 修正之必要性及非線性地盤反應分析程式數值方法及設定議題，審查小組提出 2 項審查意見：(1)進行線性分析還要進行高頻衰減參數修正，且衰減參數也有其不確定性，似乎不若進行時間域動力歷時分析來得直接可靠。(2)有關等值線性分析結果於大應變之調修方法：(i)請說明 Deepsoil 與 Py-seismosoil 時域非線性分析程式所使用的時間積分法為何？若為顯式時間積分，如何控制假高頻反應？若為隱式時間積分，非線性矩陣代數方程式如何進行求解，收斂準則為何？(ii)承上題，應力波傳問題若以數值方法求解，在問題的空間域經過離散之後，振動頻率及模態會隨著頻率的增加而偏離解析解，因此所造成的應力波反應通常會出現假高頻反應，因此時間積分法通常會引入數值阻尼(numerical damping)將假高頻反應過濾掉，請說明 Deepsoil 與 Py-seismosoil 時域非線性分析是否有處理假高頻反應問題？(iii)Deepsoil 與 Py-seismosoil 分析程式各使用了 MKZ (Modified Kondner - Zelasko)及 HH (hybrid hyperbolic)材料模式，請說明考量岩土材料非線性行為時，材料模式(應力應變關係)是採增量模式還是全量模式？若採全量模式，

請說明如何考量材料的阻尼效應？

台電公司第 1 次答覆：(1)就地盤反應分析而言，時間域非線性分析與線性分析之差異，在於土壤剪應力-剪應變行為之依時特性模擬，一般認為非線性時間域分析能較準確模擬土壤高頻反應(2、3Hz 至 20Hz)，而頻率域線性分析在高頻處會有過阻尼(over-damped)效應而低估地層高頻反應。然，送審報告建立之土層模型深度達 5 公里，故依照波傳理論抑或結構動力學概念，其場址受震顯著反應應多集中於較低頻率，且送審報告因考量此過阻尼效應而進行 kappa2 調修方法，修正分析結果之高頻傅氏譜含量，經由數值案例與實測地震資料證明，送審報告之分析模式應可有效修正線性分析低估高頻反應之現象。(2)(i)DEEPSOIL 使用 Newmark  $\beta$  method (implicit)  $\beta=0.25$ ,  $\gamma=0.5$ ，在線性分析時對任何  $dt$  是無條件穩定的，故無使用數值阻尼。DEEPSOIL 在進行時間域非線性分析時，在所給定之加速度增量時，採用計算出的兩次連續迭代的最大應變差小於指定殘差的收斂準則。Py-seisosoil 為有限差分模式，速度-位移-應力交錯網格二階有限差分公式(velocity-displacement-stress staggered grid second order finite difference formulation)(Moczo, 1998)。其對波動方程的數值解符合以下空間  $dy$  和時間  $dt$  的離散化穩定性條件： $dy = V_{min}/(f_{max} \cdot ppw)$ ,  $dt = p_0 \cdot dy/V_{max}$ 。其中  $V_{max}$  and  $V_{min}$  為地層材料之最大與最小速度； $ppw$  為每個波長的點數； $f_{max}$  為模擬的最大頻率， $p_0$  為細分最小時間步長(min. time step)( $=dy/V_{max}$ )之係數。對於二階差分方案，使用每個波長 6 到 12 個點可以充分求解線性波動方程的數值解。非線性分析使用每個波長 40 個點來避免發散，當改善空間離散化時，還需改進時間步長。在送審報告相關分析中使用  $p_0=0.01$  來確保數值解具有正確性。DEEPSOIL 之 MKZ 模式與 Py-seisosoil 之 HH 模式為全量模式，其土壤材料之勁度為各遲滯迴圈之割線勁度，其土壤材料的阻尼效應一般採用梅興法則，透過計算遲滯迴圈面積與彈性位能面積比來計算材料阻尼，DEEPSOIL 另外有提供 Non-Masing Unload-Reload Rules

用來修正大應變下之遲滯阻尼；(ii)DEEPSOIL 之 MKZ 模式與 Pyseismoil 之 HH 模式應為全量模式，其土壤材料之勁度為各遲滯迴圈之割線勁度，其土壤材料的阻尼效應一般採用梅興法則，透過計算遲滯迴圈面積與彈性位能面積比來計算材料阻尼，DEEPSOIL 另外有提供非梅興加卸載法則(Non-Masing Unload-Reload Rules)用來修正大應變下之遲滯阻尼。

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)並未說出為何不直接用非線性動力歷時分析的理由。(2)(i)Newmark method 取  $\beta = 0.25$ ,  $\gamma = 0.5$ ，及一般顯式時間積分對假高頻反應並不具備抑制效應，請補充說明 DEEPSOIL 及 PySeismoSoil 兩套程式不處理假高頻反應之保守性；(ii)請補充說明 DEEPSOIL 及 PySeismoSoil 兩套程式如何處理無限域應力波傳邊界條件？

台電公司第 2 次答覆說明：(1)使用時間域地盤反應分析，在目前廣泛使用的一維分析程式(如 DEEPSOIL、SeismoSoil、MOD2000 等)均需製作與反應譜相符之輸入運動作為基盤運動輸入，依據 USNRC RG 1.208，須考量地盤反應分析參數變異性之要求，則需製作 60 組或以上之人造地震輸入運動才能符合代表性且具統計意義。如此，考量所有場址波速剖面、地層非線性性質與輸入運動之變異性，地盤反應分析案例將提升至 11 (地震危害水準) $\times$ 3(波速基準剖面組數) $\times$ 3(土層非線性模型組數) $\times$ 2(岩土過渡區非線性模型組數) $\times$ 200(隨機波速剖面組數) $\times$ 60(輸入運動組數) = 2,376,000 組，其計算量實為龐大且耗時。送審報告以 STRATA 程式採用 RVT 模式計算所有案例之平均時間約 3 至 4 天，即使假設時間域非線性分析(NL)的每筆輸入運動計算時效與頻率域等值線性分析(EQL)相同(實務經驗上計算時間 NL 大於 EQL)，仍需要花費近 60 倍的計算時間。是故，考量地盤反應分析作業執行效益，送審報告使用頻率域等值線性分析，並提出高頻修正方式以應對在大應變、地動強度較大時所產生的過阻尼(over-damped)效應。綜上所述，送審報告

採用 EQL 方法主要基於：(1)必須在某一地震危害水準之震度等級下模擬大量的案例數，俾利對土壤性質的模型不確定性進行取樣量化，共須考量 11 個輸入地震水準範圍計算放大函數；(2)EQL 法是日前核電設施相關工程實務上最廣泛使用的標準方法，亦被美國核能規範 RG 1.208 所認可。為了應對 EQL 法在遭遇大應變時的適用性限制，送審報告對此過阻尼效應採用 kappa2 調修方法，以修正分析結果低估高頻反應之現象。有關送審報告採用頻率域等值線性分析而非使用非線性動力歷時分析之理由，簡述於「2.3.7 方法論」一節內容。(2)(i)DEEPSOIL 程式在時間域非線性分析針對高頻反應處理方式，說明於其使用者手冊之「3.2.2 Maximum Frequency (for Time Domain Analysis only)」一節，該節提及各地層能傳遞運動之最大頻率( $f_{max}$ )須符合  $f_{max} = V_s/4H$ ，其中  $V_s$  為該地層之剪力波速，H 為該層厚度，DEEPSOIL 建議各層之最大頻率必須在 30 Hz 以上。一般以 DEEPSOIL 程式進行非線性時間域分析之實務應用，由於程式本身並無額外數值阻尼針對假高頻反應進行抑制修正，程式分析結果與輸出頻譜會忠實反映數值計算得出的所有反應(包含假高頻部分)，這些非正常的高頻振動造成輸出歷時反應會較大(特別是高頻反應)，必須由地盤波速模型之參數回饋，才可判斷最後 DEEPSOIL 分析頻譜結果之可信頻率範圍。PySeismoSoil 為有限差分法，採用顯式時間積分模式，在程式中並沒有施加數值阻尼不具備抑制假高頻反應，同樣的會使得高頻處反應較大。送審報告並未以 DEEPSOIL 及 PySeismoSoil 兩套時間域非線性(NL)地盤反應分析程式進行核電廠控制點地震反應譜(FIRS)計算，主要是用此兩套程式來比對驗證等值線性分析結果於大應變下之調修方法，即 kappa2 調修。根據 NL 與 EQL 案例比對結果，在頻率 20Hz 內之 FAS 與反應譜並未觀察到明顯的高頻反應，對於 kappa2 調修採用的門檻值 0.065 秒不會產生影響；(ii)DEEPSOIL 及 PySeismoSoil 兩套程式的時間域層狀地層單向度應力波傳之一維分析程式，在地層模型邊界(即底部輸入運動處)有兩種模擬方式，分別是

剛性岩盤(rigid halfspace in DEEPSOIL; rigid bedrock in PySeismoSoil)與彈性岩盤 (elastic halfspace in DEEPSOIL; elastic bedrock in PySeismoSoil)。該兩程式所謂的彈性岩盤需輸入半無限域地層材料之波速與阻尼，實質上應稱為順應邊界(compliant boundary)，在一般數值分析模型需用等值彈簧及等值阻尼盤(dashpot)來模擬。經審查答覆內容後，可以接受。

有關評估過程與廠址土壤及結構監測與識別結果比對議題，審查小組提出 2 項審查意見：(1)送審報告的主要目的為比對地震危害重評估結果與核一廠除役過渡階段安全分析報告(PDSAR)設計基準，以決定後續之進一步管制措施。若以核電廠設施設計反應譜的工程使用角度，根據美國 NRC RG1.60 規定之轉角週期(A：0.0303 sec(33Hz)、B：0.1111 sec(9Hz)、C：0.4 sec(2.5Hz)、D：4.0 sec(0.25Hz))，與加速度反應譜值之決定，乃針對未知之相關結構、系統及組件(SSCs)加以規定。惟目前無論是核一廠廠址土壤顯著週期、圍阻體結構之主要振動週期或關鍵組件，均已有明確之監測與識別結果可供參考，請說明於整體評估程序中，上述已知資訊是否能提供更聚焦之危害評估建議值？(2)根據台電公司之核一廠圍阻體結構地震觀測之識別結果，1、2 號機圍阻體之第一模態振動週期約落在 0.4065 sec (2.46 Hz)。於本次地震危害重評估程序中，請問如何將現有圍阻體結構頻率範圍適當地考量於目前危害度重評估之 FIRS。

台電公司第 1 次答覆：(1)&(2)送審報告產出之控制點反應譜(FIRS)乃依據 NUREG/CR-6728 (McGuire et al., 2001)所提 Approach 3 方式執行，整體評估產出包括 17 個結構週期之地表危害度曲線，此結果可反映至廠區各式結構之耐震需求，以為後續機率式地震安全度評估(SPRA)案進行耐震評估之參考。

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)(i)請詳細說明目前核一廠場址是否有土壤顯著週期、圍阻體結構之主

要振動週期或關鍵組件之振動週期可參考？是否均已包含在 NUREG/CR-6728 Approach 3 評估之 17 個結構週期地表危害度曲線？請留意選擇週期間格之影響。目前僅納入圍阻體相關資訊，廠址土壤顯著周期及關鍵組件之資料並未評估，並請補充相關數據的依據來源相關報告；(ii)請補充說明「以為後續機率式地震安全度評估(SPRA)案進行耐震評估之參考」之具體作法及技術細節。(2)早期核電廠設計反應譜乃依據 USNRC RG1.60 之規定，並未考慮地盤反應分析。送審報告圖 45 中 FIRS 之反應譜於特定週期區間其譜值放大，應與本次篩選程序中已考慮核一廠場址特性有關，如該區間與圍阻體或重要關鍵組件之振動週期共振，將對接續之耐震評估有重大影響。請提供對應 LB/BE/UB 三組剪力波速基準下，採用 Darendeli 非線性模型，經等值線性迭代後淺層(150m)至地表之土層理論轉換函數(依據 STRATA 分析邏輯，「廠址中小度地震觀測結果納入地震危害評估結果檢核議題」審查意見答覆之 10 筆輸入，有對應之迭代後之 Vs 剖面，與等值理論地表理論轉換函數，請一併提供)，以釐清放大區間的合理性。

台電公司第 2 次答覆說明：(1)(i)核一廠關鍵結構、系統及組件(SSCs)的主要振動週期範圍與基礎輸入地震反應譜(FIRS)之對應說明如下。地表危害度(soil hazard)計算之 17 個週期點為 0.01、0.02、0.03、0.05、0.075、0.1、0.15、0.2、0.25、0.3、0.4、0.5、0.75、1.0、1.5、2.0 及 3.0 秒，其可涵蓋核一廠關鍵 SSCs 的主要振動週期範圍。核一廠關鍵 SSCs 主要振動週期範圍之參考文獻為：Taiwan Power Company (2019). “Pre-Defueled Safety Analysis Report, Chinshan Nuclear Power Station Unit 1 & 2,” Amendment No. 1, CSNPS-PDSAR.；(ii)台電公司運轉中核電廠於機率式地震安全度評估(SPRA)案中所進行的設備及結構物耐震能力評估，將依據技術報告 EPRI 3002012994 (EPRI, 2018)區分為結構與設備兩大類進行，並參照技術報告 EPRI 3002012994 所建議之評估導則，依據送審報告之控制點地震反應譜，並基於控制點地震反應

譜建立樓層反應譜後，評估耐震容量因子、結構反應因子及設備反應因子等安全因子所涵蓋之各參數。核一廠已進入除役過渡階段前期，非屬功率運轉機組，有關耐震風險評估作業，將規劃依據除役計畫重要管制事項(CS-DP-31)辦理。(2)請詳見「廠址中小度地震觀測結果納入地震危害評估結果檢核議題」審查意見之第 2 次答復說明。

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)(i) 根據核一廠地震觀測地層轉換函數分析結果，僅提供經驗/理論轉換函數圖形(請參考「廠址中小度地震觀測結果納入地震危害評估結果檢核議題」第 1 次審查意見內容)，並無對應之顯著週期表格，請說明其來源依據。且如依據實測地震資料之經驗轉換函數，應無法明確識別上述表格之週期，建議採用頻率轉換函數(Frequency Response Function, FRF)來呈現觀測之轉換函數；(ii)有關所提耐震風險評估作業轉由依據除役計畫重要管制事項(CS-DP-31)辦理之規劃，請待 SPID 報告審查完成後再議；(ii)依審查意見辦理。(2)接續「廠址中小度地震觀測結果納入地震危害評估結果檢核議題」之審查意見，請以地下 150m 深度之四組人造地震歷時，配合核一廠 LB/BE/UB 三組剪力波速基準下，採用 Darendeli 非線性模型，經等值線性迭代後淺層(150m)至地表之土層理論轉換函數，其對應之土壤波速剖面與阻尼比剖面迭代成果請一併呈現。

台電公司第 3 次答覆說明：(1)(i)依據核一廠地震觀測地層轉換函數分析結果所述，採用結合隨機與確定性子空間識別(Combined Stochastic and Deterministic Subspace Identification, CSI)方法所得數次地震事件下核一廠 1、2 號機反應器廠房主要振動頻率範圍約在 2.40 至 2.47 Hz 之間，抑或主要振動週期範圍約在 0.40 至 0.42 秒之間，此一結果涵蓋在核一廠除役過渡階段安全分析報告(CSNPS-PDSAR, 2019) 所列聯合廠房結構之主要振動週期範圍內。核一廠安全停機相關之關鍵結構、系統及組件(SSCs)主要位於聯合廠房內。核一廠聯合廠房關鍵 SSCs 的主要振動週期，在 CSNPS-PDSAR 與 CSNPS-FSAR 的陳述內容無異；(ii)核

一廠井下地震儀實測地震資料計算之土壤顯著頻率彙整說明如下。係依據核一廠地震觀測成果報告有關井下地震儀實測平均之水平向經驗轉換函數所識別核一廠廠區土壤顯著頻率，前幾個主要峰值頻率所轉換之週期，亦說明於下。其中提出深度 150 公尺至地表間土層透過井下地震儀所觀測到之土壤顯著週期。(2)如審查意見要求，依據「廠址中小度地震觀測結果納入地震危害評估結果檢核議題」審查意見之答覆說明中，所輸出 150 公尺的地震歷時(5 公里輸入 outcrop motion)，換以廠區 3 組 150 公尺土壤剖面進行分析，說明土層理論轉換函數如下。各地震歷時分析時之土壤波速剖面與阻尼比剖面迭代成果，請詳核一廠歷時分析在不同地震歷時下的參數迭代成果，包括：理論轉換函數、土壤波速剖面、阻尼比剖面。

針對台電公司第 3 次答覆說明，第(1)項部分經審查答覆內容後，可以接受；第(2)項部分審查小組提出第 4 次審查意見：根據「兩次地盤反應分析示意圖呈現之議題」審查意見第 1 次答復說明，對於 STRATA 程式的輸入設定應採 within motion 設定的部分，無進一步意見，且根據「廠址中小度地震觀測結果納入地震危害評估結果檢核議題」審查意見第 3 次答復之輸入與輸出表格，已進行 A.1 及 A.2 的分析模式，惟請釐清本項的驗證比對仍採用 Outcrop motion 設定的原因，且顯示的理論轉換函數之圖標卻為 Within，請釐清。

台電公司第 4 次答覆說明：(i)「兩次地盤反應分析示意圖呈現之議題」審查意見之第 1 次答復說明中，主要依據審查意見提供的測試範例與要求，經 STRATA 輸入分別為 Outcrop 及 Within 對理論轉換函數的計算，也比較審查意見所提供之結果，答覆審查意見提出說明兩者結果是相同的。送審報告執行 FIRS 計算時乃採用假想露頭的輸入運動以確保兩次的地盤反應分析的輸入相同。該設定滿足法規定義、PSHA 分析與地震學學理、且可與後續土壤結構互制分析、產出 ESEP 計畫、SPRA 所需的樓板反應譜等工作皆可達到地震危害一致性的要求；(ii)依據「廠

址中小度地震觀測結果納入地震危害評估結果檢核議題」第3次審查意見中，要求以5公里作 Within 輸入，輸出150m的地震歷時進行「評估過程與廠址土壤及結構監測與識別結果比對議題」第(2)項審查意見所提及之內容。依據要求”以地下150m深度之四組人造地震歷時，配合核三廠 LB/BE/UB 三組剪力波速基準下，採用 Darendeli 非線性模型，經等值線性迭代後淺層(150m)至地表之土層理論轉換函數”，針對此意見，回復中應呈現理論轉換函數 0/150m(within)供參。重新整理由 within 輸入考量 150m\_within/5km\_within 的轉換函數所求得的 150m 輸出歷時，以 150m 土層進行分析之結果，提供相關資訊包括：理論轉換函數、土壤波速剖面、阻尼比剖面。各地震歷時分析時之土壤波速剖面與阻尼比剖面迭代成果，請詳核一廠歷時分析在不同地震歷時下的參數迭代成果。經審查答覆內容後，可以接受。

### 三、審查小結

針對台電公司評估報告第2章地震危害重新評估部分，審查小組審查結果分項說明如下：

- (1) 有關廠址地質說明部分，台電公司已依 EPRI 1025287 導則[5]之要求並參採核一廠 SSHAC Level 3 SSC 模型，於本章詳述核一廠地層構造及顯著震源構造，並依審查意見修正相關圖形並強化相關說明。
- (2) 有關機率式地震危害度分析部分，台電公司已依據 NUREG/CR-6372 [2]及 NUREG-2117 [3]導則執行 SSHAC Level 3 地震危害度評估程序，建構 PSHA 分析之地震危害輸入文件(HID)，並由 HID 文件之邏輯樹模型計算得到核一廠參考岩盤的均值地震危害度曲線，且 SSHAC Level 3 地震危害度評估過程及成果亦已獲得 PPRP 審查小組之簽屬認可。
- (3) 有關地盤反應分析部分，台電公司已按 EPRI 1025287 導則[5]要求

及 NUREG/CR-6728 導則[7]之建議，對核一廠廠址進行地盤反應分析，並比照美國 DCPD 電廠，採用基於 GMPE 剖面修正之地盤反應分析法，分別針對 TWGR 波速剖面及核一廠整體波速剖面進行兩次地盤反應分析；該兩次地盤反應分析所使用的輸入資料(包括：場址岩土層波速剖面與土層材料性質、廠址波速剖面隨機設定、邏輯樹架構及輸入反應譜)、地盤反應分析 RVT 計算相關參數設定、 $\kappa_2$  參數調修之合理性，以及透過地盤反應分析最終得到之控制點放大函數及危害度曲線，台電公司皆已針對審查小組所提審查意見進行澄清答覆說明。

- (4) 綜上所述，本會審查小組確認台電公司於執行核一廠地盤反應分析所採用之方法與程序均符合 EPRI 1025287 [5]、NUREG/CR-6728 [7] 及 USNRC RG 1.208 [4]等導則要求。綜合審查小組對本章的審查結果，經審查確認可以接受。

## 第 3 章 設計與評估基準地震

### 一、概述

在進行地震危害成果總檢之前，核一廠 SPID 報告第 3 章須先針對核一廠的設計基準地震(SSE)以及歷次耐震評估所使用的評估基準地震，包括：反應譜形、尖峰地表加速度及控制點等細節，進行回顧說明；本章說明評估報告第 3 章設計與評估基準地震的審查內容。

### 二、審查情形

有關 ESEP 評估基準地動(Review Level Ground Motion, RLGM)及垂直地震等議題，審查小組提出 2 項審查意見：(1)ESEP 評估所用之 RLGM 應也在報告中註明出處。(2)報告中垂直向地震的 FIRS 為何未見交代？

台電公司答覆：(1) 核一廠未於反應器廠房基礎輸入地震反應譜(FIRS)完成前，執行相關自主耐震提升強化作業，包括先期加速耐震評估程序(ESEP)，故「3.0 設計與評估基準地震」一節未能論述有關先期 ESEP 所用評估基準地震動(RLGM)一事。本報告「5.0 短期應對措施」一節已說明核一廠完成 FIRS 後即儘速執行 ESEP。目前核一廠已依據本報告 FIRS 訂定為 RLGM 並正積極辦理 ESEP 作業【按：核一廠 ESEP 報告已經於 111 年 7 月 29 日提交本會審查】。另有關 100 年台電公司執行核一廠耐震安全餘裕評估(SMA)所用的評估基準地震(RLE)，其反應譜型以及尖峰地表加速度設計值之說明，已於第 3.2.1 節及第 3.2.2 節中增述訂定原則。(2)依據 SPID 導則(EPRI 1025287)以及地震危害篩選報告內容格式範本，地震危害檢視以水平向安全停機地震(SSE)與控制點廠址地震動(即 FIRS)為主，且美國核電廠實際提交地震危害篩選報告內文(如 DCPD 核電廠)亦僅說明水平向的比較，故送審報告主要說明水平向地盤反應分析相關成果，而垂直向 FIRS 則詳述於(NCREE, 2021)報告中。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，台電公司已將安全停機地震(SSE)、執行耐震餘裕評估案所採用的評估基準地震(RLE)，以及執行快速耐震補強評估案所採用的評估基準地震(RLGM)，分別詳述於本章各小節，並澄清本章係依據 EPRI 1025287 導則[5]之地震危害篩選報告內容格式範本，地震危害檢視以水平向安全停機地震(SSE)與控制點廠址地震動(即 FIRS)為主，故無提供垂直向 FIRS 之反應譜。綜合審查小組對本章的審查結果，經審查確認可以接受。

## 第 4 章 地震危害成果總檢

### 一、概述

本章說明核一廠 SPID 報告第 4 章地震危害成果總檢的審查內容。EPRI 1025287 導則[5]規定須在同一控制高程位置一併審視安全停機地震(SSE)、耐震餘裕評估(SMA)的基準地震(RLE)，以及透過最新地震危害評估所得到的反應器廠房基礎輸入地震反應譜(FIRS)，以確認後續是否須執行機率式地震安全度評估、高頻設備耐震評估，以及用過燃料池耐震評估。以下針對台電公司所提報告第 4 章的說明審查情形。

### 二、審查情形

針對核一廠地震危害評估成果總檢，本會審查小組審查情形彙整如下：

有關 FIRS 之合理性以及與 SSE、RLE 比較之相關議題，審查小組提出 3 項審查意見：(1) 送審報告所得 FIRS 在所有頻率點均大於 SSE 及之前評估所用之 RLGM，並非如報告所述「0.1 至 1 秒周期段以及小於 0.1 秒周期段有超過 SSE」。(2)核一廠的 SSE 之 ZPA 是否已經提升為 0.4g，應在報告中有所註明。(3)FIRS 之反應譜與 SSE 及 RLE 之反應譜型有明顯差異，其尖峰值對應之週期較長，請說明原因與 FIRS 結果的合理性。

台電公司答覆：(1)FIRS 反應譜值在所有週期點皆高於 SSE 為屬實，惟根據 USNRC NTTF 2.1: Seismic 之要求以及 SPID 導則(EPRI 1025287)所述，主要在小於 0.1 秒週期以及 0.1 至 1.0 秒週期此兩個區段進行 FIRS 與 SSE 的檢視比較篩濾(screening)，以提供核電廠後續執行耐震安全評估(SPRA、用過燃料池評估等)決策方向的基準。是故，送審報告在撰述上，依據 NTTF 2.1: Seismic 與 SPID 導則的指定，著重在前述兩個週期區段的比較結果進行敘述。FIRS 反應譜值在所有週期點皆高於 SSE 的

部分，將於送審報告「1.0 總論」及「6.0 結論」章節提敘。(2)有關「0.3g 強化為 0.4g」乙案(亦即核管案編號 CS-JLD-101101)，於 107 年 6 月 5 日同意就現況結案，而依據台電公司核一廠報會的 PDSAR，目前 SSE 仍為 0.3g。(3)送審報告係依據 NTTF 2.1: Seismic 要求及其對應作業規範 SPID 導則(EPRI 1025287)完成參考岩盤條件地震危害度評估、地盤反應分析以及控制點地震動(FIRS)評估，所有作業內容本是針對核電廠特定廠址執行之。針對送審報告執行時採用的地盤反應分析技術係參考美國 DCPD 核電廠所用之評估方式，該作業程序已經被 USNRC 審核同意。早期核電廠決定安全停機地震與評估基準地震，並無進行地盤反應分析，僅參考國際核能規範建立的反應譜型(Newmark and Hall)以及核電廠評估的峰值加速度進行設計基準地震建置，故會有明顯差異。經審查答覆內容後，可以接受。

有關地震危害評估後續的耐震風險評估作業以及高頻設備耐震評估作業之內容及所採方法論議題，審查小組提出審查意見：核一廠 SPID 報告「4.0 地震危害成果總檢」，請說明「耐震風險評估作業」以及「高頻設備耐震評估作業」之內容及所採方法論。

台電公司答覆：依據 USNRC 認可之 EPRI 1025287 (SPID)導則中圖 1-1，在核能電廠重新進行廠址地震危害分析後，對於 GMRS 大於 SSE 的機組，NRC 要求以執行 SMA 或 SPRA 的方式，釐清機組在設備與結構物耐震設計方面的合適性，對於被要求進行 SPRA 的機組，則必須透過 SPRA 提出符合現行電廠設計、運轉與維護的風險洞見，以作為美國核管會在提出相關管制作為之依據。EPRI SPID 導則中，針對 GMRS 只有在高頻區域超越 SSE 的機組，提出在高頻區域確認耐震設計的替代評估方法，以加速持照業者與美國核管會完成地震風險再評估工作，相關評估則依據 EPRI 3002004396 報告進行，對於被要求執行 SPRA 的機組，在 EPRI 3002004396 報告第 5 章中，提出在高頻區域耐震能力分析中評估安全因子的導則。依據 SPID 導則、地震危害篩選報告內容格式

範本、以及美國核電廠實際提交地震危害篩選報告內容(如美國 DCPD 核電廠)，SPID 報告「第 4.0 地震危害成果總檢」僅是扼要說明經比較控制點反應譜(RLE)與建廠設計基準地震(SSE)後，風險評估、高頻設備耐震評估以及用過燃料池評估三者的後續作業需要性檢核結果，有關「耐震風險評估作業」以及「高頻設備耐震評估作業」非屬送審報告執行內容，故本章節仍維持原敘述內容。經審查答覆內容後，可以接受。

### 三、審查小結

經審查小組對本章審查後，台電公司評估報告已依 EPRI 1025287 導則[5]之篩選程序，針對核一廠提出地震危害評估成果總檢，並經確認核一廠後續仍須執行機率式地震安全度評估、高頻設備耐震評估以及用過燃料池完整性評估。有關 FIRS 與 SSE 及 RLE 圖形比較以及合理性問題，審查小組亦已進行嚴格審視，台電公司亦已依審查意見提出修訂。綜合審查小組對本章審查結果，經審查確認可以接受。

## 第 5 章 短期應對措施

### 一、概述

在經過地震危害再評估之後，因尚需一段時間才能完成 SPRA 評估，因此 USNRC NTTF 2.1:Seismic 建議事項[1]明確要求，經地震危害成果總檢判定須執行 SPRA 的美國業者，須於 SPID 報告中一併提出短期應對措施，因此 EPRI 1025287 導則[5]中亦有相關明確要求。本章說明台電公司評估報告第 5 章評短期對應措施的審查內容。

### 二、審查情形

針對核一廠 SPID 報告所提短期應對措施相關議題，本會審查小組審查情形彙整如下：

有關參考美國電廠個案 SPID 報告，並提出短期應對措施補充內容相關議題，審查小組提出審查意見：核一廠 SPID 報告 5.0 短期應對措施，僅說明將執行加速耐震評估程序(ESEP)及 SPRA，過於簡略，請參考以下美國電廠個案但不限於以下個案之說明，提出補充內容：(i)美國 DCPD 核電廠之 SPID 報告第 5 章說明 1977 HE Evaluation, 1988 LTSP Evaluation 等過去耐震評估資訊以及 ESEP、地震履勘(NTTF 2.3)等相關內容；(ii)美國 North Anna 核電廠之 SPID 報告第 5 章說明 ESEP、風險估算、之前的 IPEEE 及 USI A-46、地震履勘(NTTF 2.3)、2011 年 8 月 23 日規模 5.8 地震後續措施等相關內容；(iii)美國 Columbia 核電廠之 SPID 報告第 5 章說明地震履勘(NTTF 2.3)及 IPEEE、ESEP 以及 IPEEE 及之後的機率式地震安全度評估等相關內容。

台電公司第 1 次答覆：核一廠過去耐震評估資訊如下所列，內容增述於送審報告「5.0 短期應對措施」一節：(i)2011-2013「營運中核能一廠耐震安全餘裕評估計畫」；(ii)2012-2016「運轉中核能一廠耐震安全度評估(含用過燃料儲存池結構完整性評估)」；(iii)2012-2016「核一廠一號

機、二號機 NTTF 2.3 地震履勘」。

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：5.1 及 5.2 所述，請採送審報告分析結果重新檢視確認；SPRA 評估範圍並不包括燃料池，且燃料池耐震完整性評估已有另案管制，故有關燃料池敘述部分請刪除。

台電公司第 2 次答覆說明：依審查意見已於第 5.2 節刪除用過燃料池相關敘述並更新內容，並重新檢視後更新第 5.1 節與第 5.3 節內容。另，新增「5.4 核能三廠加速耐震評估程序(2019-2021)」一節以補充說明核一廠加速耐震補強評估內容。

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：(i) 所提報告 Mark-up 第 78 頁，提到「根據地震危害總檢結果」、「亦參考核能研究所於」，請檢視報告中文句之完整性；(ii)「SPRA 係依據美國機械工程師學會…」此段之敘述，須修訂內容以符合審查現狀，且該安全目標並非本會管制要求；(iii)第 5.4 節(期程應為 2020 ~ 2022)有關敘述要修訂內容以符合審查現狀(目前核一廠 ESEP 尚未提交本會)。

台電公司第 2 次答覆說明：(i)修訂如下：「根據地震危害總檢結果」改為「根據『4.0 地震危害成果總檢』所示，FIRS 在 0.1 至 1 sec 以及小於 0.1 sec 的檢核週期範圍超過 SSE」；「亦參考核能研究所於」改為「亦參考台電公司委託核能研究所於」；(ii)依審查意見修訂第 5.2 節內容，如下：「因應 2011 年 3 月 11 日福島核電廠事故，原能會以核能管制案件 CS-JLD-10101 要求台電公司須參照美國核管會所提 NTTF 建議事項 2.1 執行地震風險再評估，台電公司於 2012 年 7 月「依據近廠斷層地震危害分析結果並參照技術導則 SPID Guidance 及美國機械工程師學會(American Society of Mechanical Engineers, ASME)所發展的核能電廠地震安全度評估標準(ASME/ANS RA-Sa-2009)，執行運轉中核能電廠地震安全度評估(簡稱第一階段 SPRA)，建立地震安全度評估模式，包括地震危害(Seismic Hazard)評估、耐震能力(Fragility)評估以及事故序列

(Accident Sequence)分析等三個部分。所完成之地震風險評估模式，委託國內外專家依據 ASME 所制定的核能電廠安全度評估標準進行同行審查，評估報告已於 2016 年 8 月底陳報原能會。原能會針對第一階段 SPRA 報告進行相關審查：其中相關補充報告及附錄報告，如「核一、二、三廠兩機組地震風險差異分析報告」及各廠「耐震度評估報告」分別於 2019 年 5 月、12 月准予備查，各廠「地震風險再評估報告」則於 2019 年 5 月要求後續 SPRA 報告須依歷次審查意見要求辦理，先行結案。基於目前核一廠在除役過渡階段，反應器爐槽仍有用過燃料，有關地震耐震及風險評估作業，將視核一廠相關核管案件或除役計畫重要管制事項之承諾事項辦理。」；(iii)依審查意見修訂第 5.4 節內容，修改文字如下：「本案預計於 111 年執行完畢並提送核一廠 ESEP 報告至原能會執行審查作業。」經審查答覆內容後，可以接受。

短期應對措施內容與地震危害成果總檢一致性之議題，審查小組提出審查意見：核一廠 SPID 報告 5.0 短期應對措施，僅說明將執行 ESEP，與 4.0 地震危害成果總檢，相關說明不一致，請提出澄清說明。

台電公司第 1 次答覆：基於目前核一廠在除役狀態下屬非營運中核能電廠，後續機率式地震安全度評估(SPRA)、高頻設備耐震評估與用過燃料池耐震評估相關作業，以及短期應對措施之加速耐震評估，將視核一廠相關核管案件或除役計畫重要管制事項之承諾事項辦理。

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：本項請將「地震危害評估後續的耐震風險評估作業以及高頻設備耐震評估作業之內容及所採方法論」審查意見之答覆說明納入。

台電公司第 2 次答覆：依審查意見納入「地震危害評估後續的耐震風險評估作業以及高頻設備耐震評估作業之內容及所採方法論議題」審查意見第 1 次答覆說明，本項更新答覆如下：基於目前核一廠在除役狀態下屬非營運中核能電廠，後續機率式地震安全度評估(SPRA)、高頻設備耐震評估與用過燃料池耐震評估相關作業，以及短期應對措施之加

速耐震評估，將視核一廠相關核管案件或除役計畫重要管制事項之承諾事項辦理。依據 USNRC 認可之 SPID 導則中圖 1-1，在核能電廠重新進行廠址地震危害分析後，對於 GMRS 大於 SSE 的機組，NRC 要求以執行 SMA 或 SPRA 的方式，釐清機組在設備與結構物耐震設計方面的合適性，對於被要求進行 SPRA 的機組，則必須透過 SPRA 提出符合現行電廠設計、運轉與維護的風險洞見，以作為 USNRC 在提出相關管制作為之依據。SPID 導則中，針對 GMRS 只有在高頻區域超越 SSE 的機組，提出在高頻區域確認耐震設計的替代評估方法，以加速持照業者與美國核管會完成地震風險再評估工作，相關評估則依據 EPRI 3002004396 報告進行，對於被要求執行 SPRA 的機組，在 EPRI 3002004396 報告第 5 章中，提出在高頻區域耐震能力分析中評估安全因子的導則。依據 SPID 導則、地震危害篩選報告內容格式範本、以及美國核電廠實際提交地震危害篩選報告內容(如美國 DCP 核電廠)，SPID 報告「第 4.0 地震危害成果總檢」僅是扼要說明經比較控制點反應譜(RLE)與建廠設計基準地震(SSE)後，風險評估、高頻設備耐震評估以及用過燃料池評估三者的後續作業需要性檢核結果，有關「耐震風險評估作業」以及「高頻設備耐震評估作業」非屬送審報告執行內容，故本章節仍維持原敘述內容。

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：請修訂「基於目前核一廠在除役狀態下屬非營運中核能電廠」，納入核一廠反應器爐槽仍有用過燃料之實際狀況，以及因應此狀況相關防護措施之耐震要求。

台電公司第 3 次答覆：依審查意見修訂 6.0 結論，如下：「總結核一廠地震危害重新評估結果，根據「SPID Guidance (EPRI 1025287)」檢核準則，採用 3 組整體波速基準剖面、數組岩土材料非線性參數曲線以及 3 組  $\kappa_2$  調修倍值之 54 條邏輯樹分支地盤反應分析所得之反應器廠房基礎輸入地震反應譜(FIRS)，其在全部週期點皆高於 SSE，意即

FIRS 在 0.1 至 1 sec 以及小於 0.1 sec 的檢核週期範圍超過 SSE。基於目前核一廠在除役過渡階段，反應器爐槽仍有用過燃料，有關地震耐震及風險評估作業，將視核一廠相關核管案件或除役計畫重要管制事項之承諾事項辦理。」。(註：本安全審查報告撰寫期間，核一廠 ESEP 報告審查進行中。)經審查答覆內容後，可以接受。

### 三、審查小結

經審查小組對本章審查後，核一廠 SPID 評估報告已依 EPRI 1025287 導則[5]之要求，說明 SPRA 執行完成前的短期應對措施。為強化核一廠爐心仍有燃料期間，於遭遇超越設計基準地震之燃料安全性，已提交核能一廠 1、2 號機之加速耐震評估程序(ESEP)評估報告至本會審查，目前核一廠 1、2 號機皆已進入除役過渡階段，雖無安全停機議題，然而反應器爐心仍有用過燃料，有關後續機率式地震安全度評估作業，台電公司將依核一廠相關核管案件或除役計畫重要管制事項之承諾事項辦理。綜合審查小組對本章審查結果，經審查確認可以接受。

## 第 6 章 審查總結

綜合審查小組針對台電公司所提交的核能一廠「地震危害與篩選(SPID)報告」內容與結果所進行的全面性檢視與審查，審查結論總結如下：

(一)有關地震危害評估部分，審查結論分項說明如下：

- (1) 有關廠址地質說明部分，台電公司已依 EPRI 1025287 導則[5]之要求並參採核一廠 SSHAC Level 3 SSC 模型，於本章詳述核一廠地層構造及顯著震源構造，並依審查意見修正相關圖形並強化相關說明。
- (2) 有關機率式地震危害度分析部分，台電公司已依據 NUREG/CR-6372 [2]及 NUREG-2117 [3]導則執行 SSHAC Level 3 地震危害度評估程序，建構 PSHA 分析之地震危害輸入文件(HID)，並由 HID 文件之邏輯樹模型計算得到核一廠參考岩盤的均值地震危害度曲線，且 SSHAC Level 3 地震危害度評估過程及成果亦已獲得 PPRP 審查小組之簽屬認可。
- (3) 有關地盤反應分析部分，台電公司已按 EPRI 1025287 導則[5]要求及 NUREG/CR-6728 導則[7]之建議，對核一廠廠址進行地盤反應分析，並比照美國 DCPD 核電廠，採用基於 GMPE 剖面修正之地盤反應分析法，分別針對 TWGR 波速剖面及核一廠整體波速剖面進行兩次地盤反應分析；該兩次地盤反應分析所使用的輸入資料(包括：廠址岩土層波速剖面與土層材料性質、廠址波速剖面隨機設定、邏輯樹架構及輸入反應譜)、地盤反應分析 RVT 計算相關參數設定、kappa2 參數調修之合理性，以及透過地盤反應分析最終得到之控制點放大函數及危害度曲線，台電公司皆已針對審查小組所提審查意見進行澄清答覆說明。
- (4) 綜上所述，審查小組確認台電公司於執行核一廠地盤反應分析所採用之方法與程序均符合 EPRI 1025287 [5]、NUREG/CR-6728 [7]及

USNRC RG 1.208 [4]等導則要求。綜合審查小組對核一廠 SPID 報告之地震危害評估的審查結果，經審查後確認可以接受。

(二)有關評估與基準地震方面，台電公司已將安全停機地震(SSE)、執行耐震餘裕評估案所採用的評估基準地震(RLE)，以及執行快速耐震補強評估案所採用的評估基準地震(RLGM)，分別詳述於核一廠 SPID 報告第 3 章，並依據 EPRI 1025287 導則[5]之地震危害篩選報告內容格式範本，地震危害檢視以水平向安全停機地震(SSE)與控制點廠址地震動(即 FIRS)為主。綜合審查小組對核一廠 SPID 報告之評估與基準地震敘述的審查結果，經審查後確認可以接受。

(三)有關地震危害成果總檢方面，核一廠 SPID 評估報告已依 EPRI 1025287 導則[5]之篩選程序，針對核一廠提出地震危害評估成果總檢，並經篩選確認核一廠後續仍須執行機率式地震安全度評估、高頻設備耐震評估以及用過燃料池完整性評估。有關 FIRS 與 SSE 及 RLE 圖形比較以及合理性問題，審查小組亦已進行嚴格審視，台電公司亦已依審查意見提出修訂。綜合審查小組對核一廠 SPID 報告之地震危害成果總檢審查結果，經審查後確認可以接受。

(四)有關短期對應措施方面，核一廠 SPID 評估報告已依 EPRI 1025287 導則[5]之要求，說明 SPRA 執行完成前的短期應對措施。為強化核一廠爐心仍有燃料期間，於遭遇超越設計基準地震之燃料安全性，已提交核能一廠 1、2 號機之加速耐震評估程序(ESEP)評估報告至本會審查。目前核一廠 1、2 號機皆已進入除役過渡階段，雖無安全停機議題，然而反應器爐心仍有用過燃料，有關後續機率式地震安全度評估作業，台電公司將依核一廠相關核管案件或除役計畫重要管制事項之承諾事項辦理。綜合審查小組對本章審查結果，經審查確認可以接受。

(五)綜合審查小組對台電公司之核能一廠「地震危害與篩選(SPID)報告」內容審查，並檢視相關審查意見答覆說明後，確認可以接受。

## 参考文献

1. USNRC, 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 Daiichi Accident, ADAMS Accession No. ML12053A340, Mar. 12, 2012.
2. Budnitz R.J., Apostolakis G., Boore D.M., Cluff L.S., Coppersmith K.J., Cornell C.A. and Morris P.A., Recommendations for probabilistic seismic hazard analysis: guidance on uncertainty and the use of experts. NUREG/CR-6372, US Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C., 1997.
3. Kammerer, A.M., Ake, J.P., Practical Implementation Guideline for SSHAC Level 3 and 4 Studies. NUREG 2117, US Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C., 2012.
4. USNRC RG 1.208, A Performance-Based Approach to Define the Site-Specific Earthquake Ground Motion, U.S. Nuclear Regulatory Commission March 2007.
5. Electric Power Research Institute, Seismic Evaluation Guidance, Screening, Prioritization and Implementation Details (SPID) for the Resolution of Fukushima Near-Term Task Force Recommendation 2.1: Seismic, EPRI-1025287, February 2013.
6. Electric Power Research Institute, Seismic Evaluation Guidance: Augmented Approach for the Resolution of Fukushima Near-Term Task Force Recommendation 2.1 – Seismic, EPRI 3002000704, 2013.
7. Risk Engineering Inc., Technical Basis for Revision of Regulatory Guidance on Design Ground Motions: Hazard- and Risk-Consistent Ground Motion Spectra Guidelines. NUREG/CR-6728, US Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C., 2001.

## 英文縮寫說明

| 英文縮寫  | 英文全寫及中文翻譯                                                        |
|-------|------------------------------------------------------------------|
| ASME  | American Society of Mechanical Engineers<br>美國機械工程師學會            |
| COV   | Coefficient of Variation<br>變異係數                                 |
| DCPP  | Diablo Canyon Power Plant<br>美國加州魔鬼谷核電廠                          |
| EPRI  | Electric Power Research Institute<br>美國電力研究所                     |
| EQL   | Equivalent Linear<br>等值線性                                        |
| ESEP  | Expedited Seismic Evaluation Process<br>加速耐震評估程序                 |
| FAS   | Fourier Amplitude Spectra<br>傅氏譜                                 |
| FIRS  | Foundation Input Response Spectra<br>反應器廠房基礎輸入地震反應譜              |
| HID   | Hazard Input Document<br>地震危害度輸入文件                               |
| GMC   | Ground Motion Characterization<br>地動特徵                           |
| GMPE  | Ground Motion Prediction Equation<br>地震動評估模式                     |
| GMRS  | Ground Motion Response Spectra<br>地震動反應譜                         |
| NCREE | National Center for Research on Earthquake Engineering<br>國家地震中心 |
| NTTF  | Near-Term Task Force<br>美國核能管制委員會近期專案小組                          |
| MAM   | Microtremor Array Measurement                                    |

|       |                                                                 |
|-------|-----------------------------------------------------------------|
|       | 微地動陣列量測                                                         |
| PDSAR | Pre-Defueled Safety Analysis Report<br>除役停機過渡階段前期安全分析報告         |
| PGA   | Peak Ground Acceleration<br>最大地表加速度                             |
| PG&E  | Pacific Gas and Electric<br>美國太平洋天然氣及電力公司                       |
| PPRP  | Participate Peer Review Penal<br>參與式同行審查小組                      |
| PSA   | Pseudo-spectral Acceleration<br>擬加速度反應譜                         |
| PSHA  | Probabilistic Seismic Hazard Analysis<br>機率式地震危害度分析             |
| RG    | Regulatory Guidance<br>美國核能管制委員會管制導則                            |
| RLE   | Review Level Earthquake<br>評估基準地震                               |
| RLGM  | Review Level Ground Motion<br>評估基準地動                            |
| RVT   | Random Vibration Thoery<br>隨機振動理論                               |
| SA    | Spectral Acceleration<br>加速度反應譜                                 |
| SASW  | Spectral Analysis of Surface Waves<br>表面波譜分析                    |
| SMA   | Seismic Margins Assessment<br>耐震餘裕評估                            |
| SPID  | Screening, Prioritization and Implementation Details<br>地震危害與篩選 |
| SPRA  | Seismic Probabilistic Risk Assessment<br>機率式地震安全度評估             |

|       |                                                           |
|-------|-----------------------------------------------------------|
| SRA   | Site Response Analysis<br>地盤反應分析                          |
| SSCs  | Structures, Systems, and Components<br>結構、系統及組件           |
| SSC   | Seismic Source Chacterization<br>震源特徵                     |
| SSE   | Safe Shutdown Earthquake<br>安全停機地震                        |
| SSHAC | Senior Seismic Hazard Analysis Committee<br>地震危害分析資深專家委員會 |
| SRP   | Standard Review Plane<br>標準審查計畫                           |
| TWGR  | Taiwan Generic Rock<br>台灣通用岩盤                             |
| UHRS  | Uniform Hazard Response Spectra<br>均佈危害反應譜                |
| USNRC | United States Nuclear Regulatory Commission<br>美國核能管制委員會  |