

我國用過核子燃料最終處置初步
安全論證報告

審查報告



行政院原子能委員會放射性物料管理局
中華民國112年3月

[本頁空白]

目 錄

一、前言	1
二、審查過程	1
三、主要審查發現及意見答復說明.....	2
四、審查結論	9
五、結語	10

一、前言

依據民國（下同）91年12月公布施行之「放射性物料管理法」（下稱物管法）及其施行細則規定，放射性廢棄物之處理、運送、貯存及最終處置，應由放射性廢棄物產生者台電公司負責，並依最終處置計畫時程切實推動。據此，台電公司依物管法及其施行細則規定，並參考國外經驗，於93年提報「用過核子燃料最終處置計畫書」，經原能會審查後於96年核定。台電公司另依物管法施行細則規定，分別於99年、103年、107年及111年檢討修正「用過核子燃料最終處置計畫書」。

依據現行用過核子燃料最終處置計畫書之規劃，目前計畫已進入候選場址評選與核定階段工作，本階段主要目標為完成候選場址調查區域的調查與評估並建議優先詳細調查之場址，以及建立候選場址功能/安全評估技術。為因應階段工作之展開，原能會要求台電公司應持續就處置技術持續採滾動式檢討精進，故原能會參酌國際核能先進國家經驗，於用過核子燃料最終處置計畫書（2018年修訂版）審查會議決議時，請台電公司依國際原子能總署(IAEA)所發布安全論證導則，參照「我國用過核子燃料最終處置技術可行性評估報告」（SNFD2017報告）國際同儕審查及原能會審查意見，就我國處置計畫階段及地質處置母岩特性，採取國際處置先進技術，於110年底前提出「我國用過核子燃料最終處置初步安全論證報告」（SNFD2021報告），並於114年底前提出「我國用過核子燃料最終處置安全論證報告」（SNFD2025報告），且均須辦理國內及國際同儕審查作業，以確保台電公司相關處置技術可達最佳現有技術且符合國際水平，以提升處置設施的安全性，確保民眾安全及環境品質。

二、審查過程

台電公司於110年12月30日函報「我國用過核子燃料最終處置初步安全論證報告」送請原能會審查，經程序審查查核結果，確認台電公司所提報「我國用過核子燃料最終處置初步安全論證報告」及相關文件資料，符合報告完整

性要求，同意該報告進入實質審查程序，並於 111 年 2 月 25 日召開審查前會議。

本案邀集 8 位具有高放處置專長之學者專家協助原能會物管局執行審查作業，主要專長涵蓋處置技術、岩石力學、地震水文、材料科學、核子工程、輻射防護等相關領域，併同物管局 6 位處置相關業務同仁進行審查。另為符合公正、獨立審查之要求，經查本案審查委員三年內均未參與台電公司高放處置委託研究計畫。

本案審查團隊共提出 103 項審查意見，歷經 4 回合審查作業後，於 111 年 12 月 27 日召開審查會議，原能會除就審查意見作成審查結論外，並作成會議決議要求台電公司切實辦理。台電公司後續依會議決議，於 112 年 2 月 20 日函送「我國用過核子燃料最終處置初步安全論證報告」修訂版。

三、主要審查發現及意見答復說明

經查台電公司「我國用過核子燃料最終處置初步安全論證報告」依執行內容及架構，可區分為(一)評估背景、(二)評估基礎、(三)安全評估、(四)整合證據、論證與分析及(五)其他要素等項目，各項目之重點審查意見及台電公司答復說明摘述如下：

(一)評估背景

1.初步安全論證報告之定位

「我國用過核子燃料最終處置初步安全論證報告」相較於上階段「我國用過核子燃料最終處置技術可行性評估報告」，對於處置系統安全論證的分析方法及技術發展，再邁進一步並更具完整性。由於「我國用過核子燃料最終處置初步安全論證報告」係以「我國用過核子燃料最終處置技術可行性評估報告」建置之各項處置技術為基礎所發展之初步安全論證成果，台電公司應補充說明二者之間主要差異，以及「我國用過核子燃料最終處置初步安全論證報告」之定

位與目的。

台電公司說明「我國用過核子燃料最終處置技術可行性評估報告」參考瑞典 Forsmark 處置場長期安全報告(文件編號 SKB TR-11-01)，引進安全評估步驟作為安全評估方法流程，發展完備之全系統安全評估技術，而「我國用過核子燃料最終處置初步安全論證報告」除以「我國用過核子燃料最終處置技術可行性評估報告」發展技術及成果為基礎外，亦引進國際間處置計畫推動過程中之趨勢，發展安全論證技術，故本報告參考 OECD/NEA 地質處置設施安全評估報告(文件編號 NEA MeSA)提出的通用型安全論證流程並予以執行。此外，藉由「我國用過核子燃料最終處置初步安全論證報告」發展通用型安全論證，整合「我國用過核子燃料最終處置技術可行性評估報告」各項成果並進行各項技術精進，進而以評估結果回饋予研發計畫、未來場址調查工作、工程設計之發展及未來相關安全評估計畫中，可進一步強化與利害關係人間的對話，凝聚推動處置計畫的社會共識。台電公司之回復說明，審查委員認為可以接受。

2.初步安全論證方法及流程

「我國用過核子燃料最終處置初步安全論證報告」章節及篇幅繁多，雖於安全論證方法乙節說明本報告章節的配置有助於對報告通盤認識，惟建議台電公司可採圖示方式，將本報告各章編號標示於安全論證方法流程圖內之適當對應位置，以便呈現本報告對應於安全論證內容的完整涵蓋。

台電公司說明本報告參考 NEA MeSA 報告之通用安全論證流程，建立我國通用安全論證方法，於報告章節之架構編排上，亦依據該流程進行對應與呈現，而安全論證流程圖與「我國用過核子燃料最終處置初步安全論證報告」各章節相對應。台電公司之回復說明，審查委員認為可以接受。

(二)評估基礎

1. 「我國用過核子燃料最終處置初步安全論證報告」之 FEPs 清單更新說明

「我國用過核子燃料最終處置初步安全論證報告」所採用的特徵/事件/作

用(FEPs)資料庫及資料清單仍沿用「我國用過核子燃料最終處置技術可行性評估報告」，請台電公司補充說明其 FEPs 資料清單是否已比對、更新至 IFEP 3.0 版，以及其相較於「我國用過核子燃料最終處置技術可行性評估報告」差異之處。

台電公司說明 IFEP 為 NEA 提出之通用型 FEPs 清單，且納入不同處置條件之因子，故於我國尚未選定處置場址階段，藉由參考該清單，確保在建構情節過程中，已完整考量並納入各條件因子，提高安全評估結果可信度。「我國用過核子燃料最終處置初步安全論證報告」係在尚無場址的情況下，設定一研究用案例進行初步安全論證的方法論研究，因此沿用「我國用過核子燃料最終處置技術可行性評估報告」的 FEPs，以 SKB 的 FEPs 架構為主體並參考 INEA FEP List 2.1 版的清單內容進行設定，再依據國際專家建議及我國高放處置技術(2018-2020)精進發展，挑選出 152 項對處置系統較有影響的 FEPs 因子，作為相關參考案例情節及安全評估發展之依據。台電公司目前已掌握國際最新發展趨勢，並將開始採用 NEA IFEP 3.0 架構進行相關工作，後續會將 FEP 改用 IFEP3.0 架構進行發展。審查委員認為台電公司之說明可以接受，但提醒台電公司應持續注意 FEPs 因子的影響性及完整性，必要時做些增減且要有充分理由，以作為相關參考案例情節及安全評估發展之依據。

2.工程障壁設計需求說明

「我國用過核子燃料最終處置初步安全論證報告」針對緩衝材料設計功能、性質及設計需求，台電公司主要係參考國際文獻綜整所提出，惟其長期安全的外在環境條件標準，應係屬於該國處置系統設計及外在環境的演變，請台電公司說明其設計需求是否直接引用該條件，或應由本土試驗及數值模擬分析得到本土的長期安全設計需求之數據參數。

台電公司說明緩衝材料長期安全之設計需求係依據安全功能及安全功能指標而定，所參考的安全功能指標標準值亦有相關的特性研究為基礎而訂定，故不受特定環境條件影響。至於外在環境的演變，在處置設施設計完成後，將會

執行處置設施演化分析，並進行數值模擬分析及部分本土試驗研究，依參考的處置設施環境條件，評估各項處置設施功能受長期的環境影響下，是否仍能保持前述的安全功能及安全功能指標標準的要求，以確保設計的安全。審查委員認為台電公司之說明可以接受。

3.氣候演化推估

「我國用過核子燃料最終處置初步安全論證報告」針對氣候演化，係參考美國國家大氣研究中心(NCAR)過去 21,000 年之氣候暫態演化模擬之研究（文件編號 TraCE-21ka, 2011），以短時間區間的氣候（海水面）紀錄，進行長時間尺度上的氣候演化推估，請台電公司說明該方法是否合宜；此外，台電公司現階段對於百萬年的變遷情境與熱、水力、力學、化學 (THMC)相關評估沒有顯著的對應，由於變遷後的環境變化可能導致 THMC 背景環境的改變，例如：地面相對抬升所引致風化侵蝕增加，可能使處置場址之深度改變，進而造成模式邊界特性的改變；未來板塊活動累積尺度是否將引起相對較大的氣候演變等，建議台電公司未來可考慮加入環境變遷後的相關評估。

台電公司說明 TraCE-21ka (2011)包含實際的氣候觀測資料與全球不同地區的古氣候資料之耦合，該資料可提供研究使用，較易取得及進行後處理，亦可當作氣候模式驗證的依據。TraCE-21ka 包含 2 萬 1 千年以來全球氣候各項參數，以及不同高度的氣候資料，有利於後續進行區域氣候模式的模擬與驗證，且長時間尺度海水面變化的相關文獻均有列入參考。此外，「我國用過核子燃料最終處置初步安全論證報告」亦同時參考政府間氣候變化專門委員會(IPCC)氣候變遷第六次評估報告（文件編號 IPCC AR6），以及科技部、中研院及氣象局等氣候變遷科學重點摘錄與臺灣氣候變遷評析更新報告，進行研析及論述，並針對冰河循環造成海平面下降，進行相關的演化分析技術強化。台電公司目前持續發展 THMC 相關分析模式技術，環境變化導致 THMC 背景環境改變，以及相依參數等相關評估將納入規劃。審查委員認為台電公司之說明可以接受。

(三)安全評估

1.處置設施之演化分析

「我國用過核子燃料最終處置初步安全論證報告」進行處置設施演化分析時，有關膨潤土質量再分布之部分，係假設緩衝材料各邊界為固定，但實際上處置孔及處置隧道飽和時，由於緩衝材料之回脹壓力大於回填材料，故緩衝材料與回填材料交界面並非固定，而是會出現上舉現象，這也是抵抗緩衝材料膨脹安全功能的要求，請台電公司於緩衝材料質量再分布分析時加以考量。

台電公司說明本項研究主要探討緩衝材料掏空後之質量再分布行為，同時確認緩衝材料流失後是否可以藉由回脹特性填補缺口並維持安全功能，因此僅於概念模式中設定緩衝材料為對象，並將邊界條件設定於緩衝材料之邊界。惟審查委員認為，邊界條件的設定如果對維持安全功能是保守的，則並無問題；而緩衝材料上舉的狀況對其填補空隙的功能是不利的，因此不宜忽視，由於緩衝材料對回填材料的推擠為重要課題，請台電公司後續模擬及分析時應注意此情況。

2.參數彙整與不確定性分析

「我國用過核子燃料最終處置初步安全論證報告」中，台電公司應詳細說明進行參數不確性分析時，對於各種不同參數的統計分布，及現階段對於不確定分析之掌握程度。

台電公司說明「我國用過核子燃料最終處置初步安全論證報告」多數參數係引用自文獻，文獻所述之數值及分布係基於其取得之資料量及專家之判斷所提供，背後原因及原理之相關研究持續進行；如常態分布機率密度函數 (probability density function, PDF) 常被用於描述物理量的隨機量測誤差，而實際上，通常無法取得真正代表某參數的機率密度函數類型，因此，三角分布或雙三角分布機率密度函數可提供合理的近似值。由於參數的不確定性管理為現階段工作之一，而參數的機率分布也需以系統性方式決定，後續將參考國際經驗執行，如瑞典 SKB 相關技術報告（文件編號 TR-02-11）提出，不同的情況下可以下述不同機率分布描述，如均勻及三角分布可用於資料缺乏或主觀判斷

時；常態分布為描述相加過程導致的誤差；對數常態分布為描述相乘過程導致的誤差等。審查委員認為台電公司之說明可以接受。

3.劑量評估模式與來源說明

「我國用過核子燃料最終處置初步安全論證報告」針對「生物圈放射性核種模式」，並無任何核種之分析或計算，僅針對地景的環境介質核種傳輸模式作定性說明；另有關「生物圈劑量轉換因子」，亦未說明關鍵群體的核種傳輸參數及核種於各種地景生態系統的核種傳輸計算方程式，請台電公司參照「我國用過核子燃料最終處置初步安全論證報告」有關之工程障壁、地質圈之技術分析及發展成果方式進一步說明；此外，「我國用過核子燃料最終處置初步安全論證報告」說明目前各潛在曝露群體之最大生物圈劑量轉換因子分析結果與國際文獻相比相對較大，請台電公司補充說明該國際文獻資料。

台電公司說明已增加說明採用 GoldSim 程式之區塊模式(Compartment Model)，並將概念模型內的核種傳輸作用之數學模式及來源增列於附錄 A 及附錄 B，曝露途徑劑量計算之數學模式及來源，增列於附錄 C 及附錄 D，相關參數及來源則增列於附錄 E；另所述比較之國際文獻，分別為日本 JNC 於 2000 年發表之 H12 報告(JNC, 2000, ch6.1.1.2)及日本 NUMO 於 2021 年發表之 NUMO-TR-20-03 報告(NUMO, 2021, p6-128)。由於「我國用過核子燃料最終處置初步安全論證報告」之參考案例環境條件及評估方法皆與日本較接近，故以日本相關報告計算結果為主要比較對象。審查委員認為台電公司之說明可以接受。

(四)整合證據、論證與分析

1.參考設計與設計前提之回饋

本報告所建構之方法論參考 NEA MeSA 通用安全論證流程，堪稱完備，並以 KBS-3 處置概念為標竿，進行科學探討、工程設計及安全評估技術模擬分析研究，以建置本土執行團隊、人才培育訓練、數據資料庫、安全分析能力等，有助於整體發展。「我國用過核子燃料最終處置初步安全論證報告」針對參考設

計與設計前提之回饋部分提及，即使緩衝材料在最嚴重的侵蝕情況下，銅殼厚度仍保有足夠餘裕，可考慮後續在最佳化的過程中針對銅殼厚度進行調整，建議台電公司未來如要考慮調整設計及製作時，必須審慎評估各項因子的影響，並經充分科學驗證，具有充足理由，再確定為宜。

台電公司說明台電公司借鏡國際執行最終處置計畫之歷程、透過發展通用型安全論證流程；主要精神可透過各項評估結果之不斷迭代與回饋、依後續計畫推展進程所選定實際之處置場址，亦可依地質特性調整至最佳化設計。審查委員認為台電公司之說明可以接受。

2.安全論證之補充或替代指標

參考國際原子能總署放射性廢棄物安全論證與安評估報告(文件編號 IAEA SSG-23)，安全論證可使用劑量或風險以外的指標，以提供額外的信心，如同文獻回顧所述，「地下水或近地表水中的放射性核種濃度、生物圈的放射性核種通量等，皆可做為補充說明的替代性安全指標」，「可考慮將評估結果和自然界中相對應之 α 、 β 射源核種的總濃度/通量進行比較，或比較其每單位攝入量所造成的劑量，以比較其整體的放射毒性」，故請台電公司進行相關分析，以作為安全論證之補充。

台電公司說明「我國用過核子燃料最終處置初步安全論證報告」已明確說明我國現行管制要求，並廣泛展示國際上相關的替代安全指標做為參考，以利整體概念理解及確保各項考量並未遺漏。然台電公司現階段之初步安全論證則仍優先著重於風險及劑量之定量評估進行比較，後續依循技術發展進程及計畫規劃，建構合理適用之補充指標。對此，審查委員建議台電公司應持續參考國際相關經驗，納入後續規劃，以提升安全論證信心。

(五)其他要素

有關初始岩石應力的現地量測技術能力方面，例如套鑽法及水力破裂法皆須進行量測以建構原始現地應力分布的狀態，然此項技術之發展無論淺孔或深孔，皆須有專業的量測設備、鑽探技術、量測與分析人員，由於各項都是關鍵

且須長期持續發展，故「我國用過核子燃料最終處置初步安全論證報告」應具體說明台電公司目前對於岩石現地應力量測技術發展進度及概況，並進一步說明未來工作規劃。

台電公司答復說明受限於我國尚未具備特定場址，有關現地應力量測以技術整備為主，目前台電公司已透過學研合作方式，利用既有鑽孔發展應力調查相關技術，例如：井孔崩落法等。另，因套鑽法及水力破裂法須於特殊條件，如隧道內與特定鑽孔強制開裂之情況下執行，目前將持續朝多方尋求合作機會，以順遂後續地質調查相關作業之進行，以及達成候選場址評選與核定階段之里程及目標。惟審查委員提醒台電公司仍應適時完成現地的技術整備工作，以提供深層地質處置可行性資訊，使各項的現場調查技術也得以順利的發展與驗證。

四、審查結論

- (一)台電公司「我國用過核子燃料最終處置初步安全論證報告」主要係參考國際間尚未完成選址國家之經驗與作法，在非特定場址的情況下，建置研究用之參考案例，供工程設計及安全評估使用。請台電公司切實依據「我國用過核子燃料最終處置初步安全論證報告」歷次審查意見及答復說明進行報告內容補充與修訂。
- (二)有關國際同儕專家針對「我國用過核子燃料最終處置初步安全論證報告」所提出之技術發展建議事項，請台電公司持續回饋至後續之處置技術研發、場址調查、工程設計與安全評估，以提升我國相關處置技術能力，同時採滾動式檢討精進處置技術，並持續發展適用於我國本土條件之處置技術。
- (三)請台電公司持續依我國用過核子燃料最終處置計畫之規劃，妥善辦理高放處置資料庫建置工作，以確保計畫成果的可檢視性及回溯性，並加強計畫相關品保作業。
- (四)請台電公司依 108 年 11 月 28 日「用過核子燃料最終處置計畫書（2018 年

修訂版)」審查會議決議，就我國用過核子燃料最終處置計畫階段及地質處置母岩特性，採取國際高放處置先進技術，於 114 年底前提出經國內及國際同儕審查之「我國用過核子燃料最終處置安全論證報告」，以確保台電公司相關處置技術可達最佳現有技術且符合國際水平，以提升用過核子燃料最終處置設施的安全性，確保民眾安全及環境品質。

五、結語

國際間對於用過核子燃料管理發展，主要皆依其國情環境，投入相當人力及經費，按部就班循序漸進，執行處置技術建置發展、建立地下實驗室及興建處置設施。其中，安全論證是國際間高放處置技術發展重點，藉由國際經驗可知，安全評估有反覆論證之必要性，且透過對處置設施安全性之研發活動長期累積論據，是對最終處置安全建立信心的基礎，同時參照目前國際間執行高放處置計畫之國家，主要皆提出不同階段之處置設施安全論證報告或安全評估報告，除可驗證處置場之安全性要求，亦可強化社會溝通及發展高放處置安全技術。

針對我國高放處置計畫後續進展，原能會將持續依照物管法相關規定，會同經濟部督促台電公司切實執行用過核子燃料最終處置計畫。原能會亦將繼續關注國際相關動態，要求台電公司後續應依循國際趨勢，持續精進用過核子燃料最終處置技術及能力，並就我國用過核燃料最終處置計畫階段，提出相關安全論證報告，以提升我國高放處置技術能力與國際同步。