

NRD-SER-110-02

「國立清華大學水池式反應器老化管理評估報告」
安全評估報告

行政院原子能委員會核能管制處

中華民國 110 年 2 月 22 日

目 錄

摘 要.....	i
第一章 背景與緣由.....	1
一、概述.....	1
二、審查發現.....	1
三、結論與建議.....	2
第二章 老化評估作業規劃.....	4
一、概述.....	4
二、審查發現.....	6
三、結論與建議.....	7
第三章 評估作業與結果.....	8
一、概述.....	8
二、審查發現.....	15
三、結論與建議.....	29
第四章 審查總結.....	30
一、審查結論.....	30
二、後續管制要求.....	31
附件一：THOR 換照申請案之老化管理評估報告審查分工表.....	32

摘要

清華大學水池式反應器 (Tsing Hua Open-pool Reactor, 簡稱THOR) 自民國50年起臨界運轉, 業經民國90年、100年等二次執照換發。民國109年7月28日, 清華大學依核子反應器設施運轉執照申請審核辦法第17條以清原中心字第1099005115號函申請第三次運轉執照換發 (第60至70年間之運轉), 並檢附「國立清華大學水池式反應器老化管理評估報告」, 報請主管機關審核。

清華大學提送的「國立清華大學水池式反應器老化管理評估報告」之內容共計有四章: 第一章背景與緣由, 簡述THOR在我國原子能研究與應用之現況。第二章老化評估作業規劃, 參考美國聯邦法規10 CFR 54.21(a), 將THOR研究用反應器之結構、系統與組件 (Structures, Systems, and Components, 簡稱SSC) 分為三類, 共計18項; 有鑑於THOR爐房、THOR反應器冷卻水邊界、管路系統與爐心格架等項目之檢查評估作業涉及特殊設備與專業技術, 清華大學分別委託專業機構作成檢查報告, 作為本報告之附件。第三章評估作業與結果, 將18項結構、系統與組件依其運轉現況、維護保養方式或專業檢查結果進行老化管理評估。第四章結論。

原能會接獲本申請案後, 即聘請專業審查委員與本會核能管制處同仁等成立專案審查小組, 審查分工名單如附件一; 本案歷經4次審查會議, 針對清華大學提送的老化管理評估報告共計提出79項審查意見。本報告敘述本會對「國立清華大學水池式反應器老化管理評估報告」之審查結果, 根據本會針對「國立清華大學水池式反應器老化管理評估報告」之審查意見與清華大學各次之答覆說明撰寫此安全評估報告, 內容分為: 第一章背景與緣由, 第二章老化評估作業規劃, 第三章評估作業與結果, 以及第四章審查總結; 除第四章審查總結外, 其餘各章均包含概述、審查發現, 以及結論與建議三部份。

經就清華大學所提報告內容及對審查意見之答覆內容進行審查, 評估於執照更新後之運轉期間, THOR研究用反應器各結構、系統與組件可維持反應器安全運轉所需功能, 審查結果認為可以接受。

第一章 背景與緣由

一、概述

清華大學水池式反應器（Tsing Hua Open-pool Reactor，簡稱 THOR）自民國 50 年臨界運轉，迄今（民國 109 年）已屆 59 年。在國內各研究用反應器陸續除役後，THOR 目前為國內唯一座研究用反應器，主要用於研究、教學以及硼中子捕獲治療（Boron Neutron Capture Therapy，簡稱 BNCT）。自民國 100 年第二次執照更新以來，經統計每年皆執行多次之運轉照射，以提供 BNCT 研究、臨床治療與緊急醫療任務，如圖 1-1。綜合 THOR 近年於研究教學、放射性藥物原料製備，以及硼中子捕獲治療之必要性，清華大學遂申請第三次執照更新。

老化管理評估報告係依核子反應器設施運轉執照申請審核辦法第 17 條，於研究用核子反應器設施運轉執照之換發申請時，報請主管機關審核。並基於 THOR 各項設備之運轉與維護現況，針對未來運轉期間是否能符合主管機關之要求進行評估。

二、審查發現

審查小組提出 RAI 編號 B0-0001，對於 THOR 的老化管理評估報告並未採用/參考核電廠所遵循的 GALL AMP，也似無一定的格式，請清大補充說明其適切性。清大說明 THOR 為小於 10MW 之輕水開放式水池研究用反應器，與商業發電用之反應器類別不同（THOR 無壓力容器、圍阻體、蒸汽產生器等設施），可能造成的意外情境或事故後果亦輕緩很多，故未採用/參考核電廠所遵循的 GALL AMP；THOR 的老化管理評估報告係採用美國核能電廠運轉執照更新作業所依循之美國聯辦法規 10 CFR 54，從中挑選可以適用於研究用核子反應器設施者來進行老化管理評估。

具體做法為參考 10 CFR 54.21(a)針對核能電廠安全及運轉相關結構、系統與組件（Structures, Systems, and Components，簡稱 SSC）訂定老化管理之精神，從中評估適用於研究用核子反應器設施者，由 THOR 運轉及安全分析

報告第 13 章之假想事故涉及之結構、系統與組件，與其維護之難易程度，作為設備分類與評估之依據，以進行老化管理。經審查答覆內容可以接受。

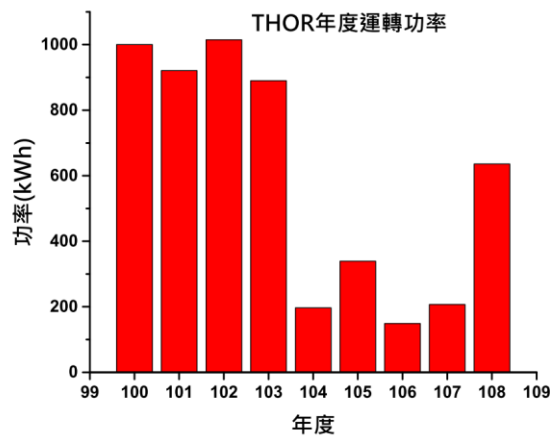
審查小組提出 RAI 編號 B0-0002，請清大說明 THOR 有哪些土木/結構老化管理計畫（Aging Management Program，簡稱 AMP）。清大回復已強化重要的機/儀電設備的底部固定（anchorage）及接頭。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 B0-0003，有鑑於清大 THOR 反應器主結構物與一般民用建築結構差異，相關安全鑑定報告書宜由具適當資格第三方專業人士再作審視，完成同儕審查程序。清大已委請新北市土木技師公會指派合宜人選進行第三方專業審查，並召開同儕審查會議，已充分釐清主管機關提出之廠房模式合適性、分析工具(方法)合適性等技術性議題；同儕審查所提出之建議已於安全鑑定報告書中進行相關修訂。經審查答覆內容可以接受。

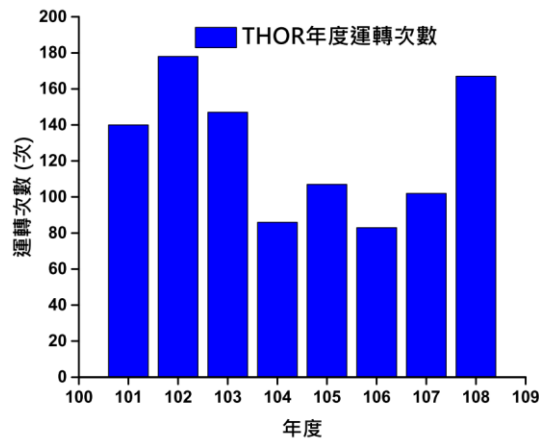
三、結論與建議

本章概述 THOR 現行用途與申請換發運轉執照之緣由。經就清華大學送審報告本章內容及清華大學對審查小組提問之答覆內容進行審查，審查結果可以接受。

(a)



(b)



(c)

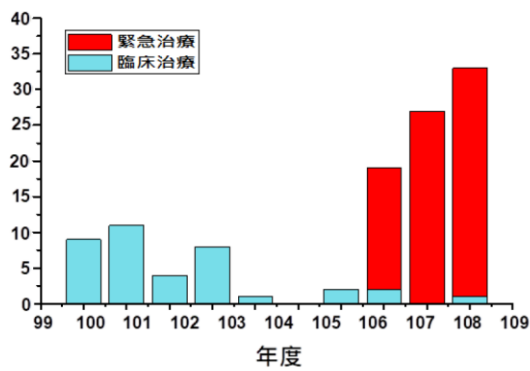


圖 1-1 民國 100 年至 109 年之歷年

(a)運轉功率、(b)運轉次數、(c)BNCT 治療次數

第二章 老化評估作業規劃

一、概述

美國聯邦法規 10 CFR 54 係美國核能電廠運轉執照更新作業之要求，其中 10 CFR 54.21(a)特別針對執照更新涉及之老化管理議題，訂定技術細節要求，內容包括：(1) 鑑定需進行老化管理之結構、系統與組件。(2) 針對鑑定之結構、系統與組件，證明其老化效應可被充分管理，並在更新後之運轉期限內繼續維持預期之功能並符合現行執照基礎。

雖研究用核子反應器設施之設計、安全分析與管制作業與動力用核子反應器設施有極大不同，老化管理評估報告仍參考 10 CFR 54.21(a)針對核能電廠安全及運轉相關結構、系統與組件訂定老化管理之精神，從中評估適用於研究用核子反應器設施者，由 THOR 運轉及安全分析報告第 13 章之假想事故涉及之結構、系統與組件，與其維護之難易程度，作為設備分類與評估之依據，以進行老化管理。

THOR 安全分析報告第 13 章之假想意外事故，依照美國核管會 (Nuclear Regulatory Commission, 簡稱 NRC) NUREG-1537 Part-2, Chapter 13 之意外事故分類，計有：第 13.2 節「瞬間快速加入反應度」、第 13.3 節「冷卻水流失」、第 13.4 節「冷卻水流速失常」、第 13.5 節「燃料處置不當或機能失常」、第 13.6 節「實驗異常」、第 13.7 節「正常電力喪失」、第 13.8 節「外來事件」，以及第 13.9 節「處理不當或裝備故障」。經評估最大之假想意外事故係「燃料處置不當或機能失常」，在最壞的假設情況下，造成放射性物質外洩，惟輻射劑量仍符合「游離輻射防護安全標準」之規定；再較輕微者係「冷卻水流失」，造成 THOR 爐房內低度之放射性污染。其餘假想意外事故皆未影響燃料完整性、造成放射性物質污染 THOR 爐房內或外釋之狀況。本報告設備分類指稱之「涉及安全分析報告第 13 章之假想意外事故」係指第 13.3 節「冷卻水流失」與第 13.5 節「燃料處置不當或機能失常」之事故。

參考 10 CFR 54.21(a)之要求，清華大學訂定 THOR 老化管理之設備分類

如下：

第 I 類：屬於 THOR 主結構或與主結構等涉及安全分析報告第 13 章之假想意外事故相關，且預期在執照更新後之運轉期間不易更換，而需採用維護與監測等方式確保其功能者。計有：

- 廠房或圍阻體
- 反應器冷卻水邊界(含混凝土及內襯)

第 II 類：不與主結構相連之反應器冷卻水管路與相關組件，雖與安全分析報告第 13 章所載假想意外事故相關，但因其不與主結構相連而可維護或更換者。計有：

- 管路系統(含閥件)
- THOR 爐心格架
- 熱交換器
- 泵本體
- 法蘭墊片

第 III 類：不涉及安全分析報告第 13 章所載假想意外事故相關，且其可透過市售商品、訂製品或以模組化方式進行維護或更換之組件。計有：

- 電纜、連結器及托盤
- 電子設備及電路板
- 馬達與驅動系統
- 壓縮空氣供應系統
- 控制棒驅動設備
- 遠端設備與訊號傳送器

- 水位指示器
- 電源供應系統
- 柴油發電機
- 固定式吊車
- 重要機/儀電底部固定與接頭

二、審查發現

審查小組提出 RAI 編號 B0-0201，有關清華大學申請 THOR 更新執照，即將超過 60 年運轉，依據核能電廠老化管理評估經驗，部分不可動件須考慮疲勞機制，尤其是第 II 類組件，THOR 的老化管理評估是否也要考慮疲勞效應。清大說明 THOR 之運轉條件中並無高能（高溫高壓）管路存在，第 II 類組件之操作溫度最高不會超過 THOR 之跳機溫度（54.4°C，正常運轉約恆定於 35°C 左右）壓力不會大於一次泵出口之操作壓力 32 PSI，因此可以預期第 II 類組件可能因為長時間反覆應力而疲勞破壞機制之機率應該不高；但為避免第 II 類組件失效造成冷卻水流失事故，THOR 曾於民國 100 年左右針對淨化管路進行更換，並於民國 108 年大修期間針對第 II 類的泵、管路與法蘭接口進行檢整。此外，透過每個工作日的例行檢查即可對於第 II 類組件進行確認並於必要時進行維修（如：民國 109 年大修針對一次側密封劣化及 PV5 閥體進行維修）並同步進行管路組件巡檢。預期透過上述之巡檢與更換作業，已可確保 THOR 第 II 類組件之可用性。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 B0-0202，有關在不同章節內組件分類的異同未加以說明。清大說明第 2.1 節中所提分類主要係利用 10 CFR 54.21 進行類別之概述，惟為能確保 THOR 各項組件能有對應的檢測方法與接受標準，故於第 2.2 節再將 THOR 設施特性納入其與安全分析中所列事故之關聯性後，進而區分為三類組件；已修訂第 2.2 節相關說明文句，增加報告可讀性。經審查清大答覆內容可以接受。

三、結論與建議

本章清華大學參考美國聯邦法規 10 CFR 54.21(a)之要求，依 THOR 運轉及安全分析報告第 13 章之假想事故（第 13.3 節「冷卻水流失」與第 13.5 節「燃料處置不當或機能失常」）涉及之結構、系統與組件，與其維護之難易程度，訂定 THOR 老化管理之設備分類與評估依據。經就清華大學送審報告本章內容及清華大學對審查小組提問之答覆內容與報告修訂內容進行審查，審查結果可以接受。

第三章 評估作業與結果

一、概述

本章依第二章老化管理之設備分類，第 I 類：(1)廠房或圍阻體 (2)反應器冷卻水邊界，第 II 類：(3)管路系統 (4)THOR 爐心格架 (5)熱交換器 (6)泵本體 (7)法蘭墊片，第 III 類：(8)電纜、連結器及托盤 (9)電子設備及電路板 (10)馬達與驅動系統 (11)壓縮空氣供應系統 (12)控制棒驅動設備 (13)遠端設備與訊號傳送器 (14)水位指示器 (15)電源供應系統 (16)柴油發電機 (17)固定式吊車 (18)重要機/儀電底部固定與接頭，由該設備現況與維護方式進行功能評估。

上述 (1)廠房或圍阻體 (2)反應器冷卻水邊界 (3)管路系統 (4)THOR 爐心格架 等分類項目，其檢查評估作業因涉及特殊設備與專業技術，清華大學於 108 年委託專業機構作成「清華大學 THOR 研究型反應器控制板破損分析評估」、「清華大學反應器主結構物安全鑑定報告書」、「清華大學水池式反應器內部組件目視檢查總結報告」，以及「清華大學水池式反應器冷卻水管路目視檢查總結報告」等 4 份報告作為本案附件，並依其檢查結果進行老化評估說明。以下針對老化管理評估報告第三章參照之 4 份報告與同報告第三章之評估結果分別進行概要敘述。

(一)「清華大學 THOR 研究型反應器控制板破損分析評估」部分

民國 108 年 10 月清華大學委託核能研究所進行 THOR 反應器內部組件目視檢查，檢查發現# 1 號控制板上母材腐蝕較嚴重，建議進一步評估其結構完整性；本分析評估報告係清華大學委請工業技術研究院進行。清華大學每 5 年會進行一次 THOR 反應器內部組件目視檢查，於民國 103 年及民國 108 年目視檢查皆發現於# 1 號控制板上母材有明顯腐蝕痕跡，民國 98 年之目視影像紀錄，雖然解析度較差，但仍可明確辨識相同位置的缺陷已存在，其劣化範圍及程度基本上並未隨時間而發生顯著差異。依美國電力研究所 (Electric Power Research Institute, 簡稱 EPRI) PID-1010639, “Non-Class 1 Mechanical

Implementation Guideline and Mechanical Tools, Revision 4”，鋁合金於處理過之水質（treated water）中劣化機制，評估目前 THOR 水質環境及操作條件應不是造成控制板上方腐蝕缺陷原因，亦不預期現有之腐蝕程度與範圍會惡化。該腐蝕缺陷推測應係早年水質環境不良，且控制板上方側面封閉鐸道內部有製造缺陷，因而導致此缺陷發生。

（二）「清華大學反應器主結構物安全鑑定報告書」部分

本報告於民國 108 年 12 月份委請葉為恭結構土木技師事務所進行。歷史紀錄中，新竹地區出現最大震度之地震係在 1999 年 9 月 21 日發生，震度達 5 級，惟 THOR 不論是限制體內的反應器本體及爐房建物或非限制體區域的一般建物與水塔均未受影響。依據內政部 100 年 1 月『建築物耐震設計規範及解說』，THOR 所處為第一類地盤，其 475 年回歸期設計地震地表加速度 $A_T = 0.28 g$ 。THOR 爐房建物部分，本案以非線性靜力側推分析法進行耐震能力評估，混凝土強度(設計值) $f_c' = 175 \text{ kgf/cm}^2$ ，鋼筋降伏強度(設計值) $f_y = 2800 \text{ kgf/cm}^2$ ，柱主筋、梁柱配筋、箍筋及牆筋等鋼筋配置採用原設計圖值；評估結果，THOR 爐房建物之性能目標地表加速度 A_P 大於 A_T ，不需補強。THOR 反應器水池本體部分，依據耐震規範考量水池牆地震力及水壓力，分析並依混凝土規範檢核原有鋼筋量，檢核結果符合規定。外觀目測檢視結果，THOR 爐房建物大部分結構構件（梁、柱、板）外表尚完好，THOR 反應器水池本體牆面、牆頂及走道樓板均有相當數量網狀及不規則微裂縫現象，經檢測裂縫深度均未超過保護層；上述裂縫均非結構性裂縫，不影響建物安全。混凝土鑽心試體試驗結果，THOR 爐房建物與 THOR 反應器水池本體之中性化深度皆小於保護層，中性化程度在可接受範圍。

（三）「清華大學水池式反應器內部組件目視檢查總結報告」部分

本檢查於民國 108 年 10 月份委請核能研究所進行，以具有 ACCPL-II 證書之檢查人員使用 AHLBERG CAMERAS PIS200 型水底攝影控制主機與 HI-RAD XS 型彩色數位攝影機等器材，針對核心鋁架、控制板、實驗管、貫穿管、氣送管、熱中子室、進水環，以及高低功率池、閘門池內襯鋁板鐸道

等組件進行反應器內部組件水底攝影目視檢查。檢查發現鐸道及熱影響區附近之蝕孔及蝕化情況較多，# 1 號控制板上方母材腐蝕較嚴重，惟與民國 103 年檢測結果相較，腐蝕情況類似，無劣化現象，對 THOR 研究用反應爐之安全運轉均無顧慮。

(四)「清華大學水池式反應器冷卻水管路目視檢查總結報告」部分

本檢查於民國 108 年 10 月份委請核能研究所進行，以具有 ACCPL-II 證書之檢查人員使用 AHLBERG CAMERAS PIS200 型水底攝影控制主機與 HI-RAD XS 型彩色數位攝影機等器材，針對一次水泵進出水口冷卻水管路執行內視鏡 VT-1 目視檢測，以及針對一次側冷卻水管路執行 VT-2 目視檢測。VT-1 目視檢測發現一次水泵進出水口冷卻水管路相關鐸道有銹化、龜裂、蝕孔和刮痕等輕微腐蝕現象，彎道處有明顯的沖蝕磨耗特徵，部分鐸道則有熔合不良的情形，雖與前次檢測結果相比沒有惡化的趨勢，惟仍建議剷除並重新進行鐸補。VT-2 目視檢測發現一次側冷卻水管路各閥與法蘭均未發現洩漏，各個管路支撐結構均未見實體位移、零件鬆動或遺失等現象。

(五) 老化管理評估報告第三章部分

(1) 廠房或圍阻體，清華大學於 108 年委託葉為恭結構土木技師事務所作成「清華大學反應器主結構物安全鑑定報告書」，針對組成 THOR 廠房之南棟與北棟建物，以內政部建築技術規則與建築物耐震設計規範及解說為標準進行結構安全性評估。THOR 廠址判定為第一類地盤，評估 475 年回歸期設計地表加速度為 0.28 g。經實際強度、實際箍筋狀況與鋼筋號數與設計值之比對，並確認本設施之材料中性化與裂紋狀況皆未影響建物保護層後，選擇以保守之設計條件進行評估。經評估確認南棟與北棟建物耐震能力無虞且材料中性化狀況並未大於混凝土保護層，THOR 之廠房(或圍阻體)結構強度可符合運轉執照之要求。

(2) 反應器冷卻水邊界(混凝土結構部分)，清華大學於 108 年委託葉為恭結構土木技師事務所作成「清華大學反應器主結構物安全鑑定報告書」，以及

(2)反應器冷卻水邊界(內襯部分),清華大學於 108 年委託核能研究所作成「清華大學水池式反應器內部組件目視檢查總結報告」。混凝土結構部分,評估結果顯示 THOR 水池結構有充足之能力抵禦場址所可能發生地震之加速度(0.28 g)與水頭所造成的作用力,混凝土中性化及裂紋深度與寬度皆在可接受範圍。內襯部分(亦包含水平照射管、貫穿管、熱中子室及相關支撐板材、進水環等固定於混凝土結構之鋁製品),檢測結果顯示,部分實驗管路存在蝕溝、蝕斑等現象,以及熱中子室側板之鐸道與母材上皆有出現腐蝕跡象,但與 103 年之檢測報告影像比對後,其腐蝕程度無明顯變化;用以包封整體冷卻水之水池內襯的檢測結果,整體而言其腐蝕程度亦無明顯改變,且由最新檢測所得之陰離子濃度亦顯示池水狀況不致出現與過往歷史不同的腐蝕行為。本項清華大學於每年大修期間以符合 BS1881 part:203 標準或相同規格之檢測方法,於 THOR 池體表面進行裂紋形貌監測,以及每 5 年進行 THOR 水池內部組件檢查。綜合上述評估,可確認 THOR 水池之反應器冷卻水邊界(混凝土結構部分與內襯部分)可符合運轉執照之要求。

(3)管路系統(一次側管路部分),清華大學於 108 年委託核能研究所作成「清華大學水池式反應器冷卻水管路目視檢查總結報告」,經目視檢測發現一次泵出口管路段之鐸道 CWP1 W3 存在有製造之初鐸接不良及部分管路沖腐蝕之現象。該檢測發現除藉由加壓測試證實 CWP1 W3 鐸接不良處之結構強度無虞外,亦透過美國機械工程師學會(American Society of Mechanical Engineers,簡稱 ASME)鍋爐與壓力容器規範(Boiler & Pressure Vessel Code,簡稱 BPVC)Sec.XI App.A “Analysis of Flaws”與鋼構造建築鋼結構鐸接規範進一步評估該缺陷狀況為可接受;管路沖腐蝕現象與民國 99 年目視檢查紀錄影像相較,兩者間之差異並不顯著。有關一次側管路之檢查與維護,清華大學依程序書 THOR-O-10 於運轉前進行例行檢查,以及依程序書 THOR-G-02 於大修期間委請專業廠商進行檢查,確保一次側管路之完整性;若未來鐸道 CWP1 W3 檢查發現有進一步劣化時,再進行重新補鐸。綜合上述評估,依目視檢測與加壓測試結果,以及現行檢查與維護方式,可確認於執照更新後之運轉期間,一次側管路可維持原設計之功能。(3)管路系統(二次側管路部分),

二次側管路為無放射核種之軟化水，除了在熱交換器內與一次側管路進行熱交換外，並未與一次側管路有所交集，即使發生二次側管路破損亦不會造成 THOR 池水水位下降之狀況；二次側管路除例行巡視檢查外，其維護保養委請廠商進行。(3)管路系統（淨化系統部分與補充系統部分），THOR 之淨化系統係作為 THOR 冷卻水淨化之用，利用淨化槽之離子交換樹脂吸附冷卻水中的離子，以達到降低 THOR 冷卻水導電度之目的。THOR 之補充系統係作為 THOR 冷卻水補充之用，先利用軟化槽將水源軟化，再以淨化槽降低其導電度。此二系統因相關管路皆為 PVC 之管材，維修更換時皆有其上下游端的管閥可以隔離，故未有無法維修更換之狀況。預期於 THOR 執照更新後之補水頻率與用水量並不會顯著改變，故此二系統於執照更新後之運轉期間，各項檢查及維護作業將依現行方式進行。

(4)THOR 爐心格架（爐心格架部分），清華大學於 108 年委託核能研究所作成「清華大學水池式反應器內部組件目視檢查總結報告」，以及(4)THOR 爐心格架（控制板部分），清華大學於 108 年委託工業技術研究院作成「清華大學 THOR 研究型反應器控制板破損分析評估」。爐心格架部分，經目視檢測結果，整體而言並未發現明顯缺陷或腐蝕跡象，且再依近年水質管理狀況與水質陰離子檢測結果，可預期爐心格架於執照更新後之運轉期間，不致因腐蝕問題而導致設備不可用。爐心格架若有更換需要，則可依循民國 87 年之更換經驗進行。控制板部分，目視檢測發現# 1 號控制板有腐蝕之現象，進一步與民國 98、103 年之目視檢測影像紀錄比對，結果顯示於近年內並無變化；整體而言，目視檢測發現四片控制板皆呈現輕微腐蝕與刮痕之表面狀況，經與民國 86 年後之各次目視檢測結果比對，四片控制板表面狀況並無明顯不同。綜合各項評估與追蹤記錄，依現行檢查及控制板本領校正方式，可確認於執照更新後之運轉期間，爐心格架與控制板可維持原設計之功能。

(5)熱交換器，用於一、二次側管路冷卻水之熱交換，清華大學於民國 108 年 10 月份進行加壓測試，在二次側管路為開放條件下，以高於正常運轉之壓差進行 2 小時的加壓測試，測試結果無任何冷卻水由二次側管路滲漏之現象，

充份證實熱交換器之完整性。未來若出現設備破損洩漏或移熱能力明顯減低時，可委請專業廠商進行檢修以恢復其功能，縱有不可改善之狀況，亦可由設備更新之方式來恢復其功能。基於上述測試結果，依現行檢查與維護方式，可確認於執照更新後之運轉期間，熱交換器可維持原設計之功能。

(6) 泵本體，THOR 採用之一、二次側水泵係為供應 THOR 冷卻水而設置，除例行之啟動前檢查外，其維護保養係委託具有台電核電廠泵浦維修經驗之專業機械工程公司進行。泵之相關零件係為通用零件或訂製品，易於進行設備更換。依現行檢查與維護方式，可確認於執照更新後之運轉期間，一、二次側水泵可維持原設計之功能。

(7) 法蘭墊片，清華大學於 108 年委託核能研究所作成「清華大學水池式反應器冷卻水管路目視檢查總結報告」，亦針對冷卻水管路法蘭墊片進行檢視，目視檢查期間另委請管路與機械專業工程公司同步更換法蘭墊片。法蘭墊片係為通用零件，易於進行更換。依現行檢查與維護方式，可確認於執照更新後之運轉期間，法蘭墊片可維持原設計之功能。

(8) 電纜、連結器及托盤，主要係指用以收送 THOR 主控制系統與主橋所設置之各項偵檢器訊號（如：溫度、中子及加馬通量）、驅動訊號（如：如控制板步進馬達訊號）等所使用之纜線與連結器（如同軸電纜、RJ-45 等），以及用來承載上述纜線之托盤或線槽等。本項組件之失效並不會造成 THOR 安全分析報告第 13 章所載之假想事故，且有一般市售品可供更換，不會有無法修復之狀況，於執照更新後之運轉期間，可維持反應器運轉所需功能。

(9) 電子設備及電路板，主要係指反應器控制台（Control System Console，簡稱 CSC）與數據取訊電腦（Data Acquisition Computer，簡稱 DAC）之電路板、電腦，以及附屬之儀控設備（如：功率監視系統、燃料溫度監視模組、池水溫度監視模組）等。本項組件之失效並不會造成 THOR 安全分析報告第 13 章所載之假想事故，且有美國原廠家 General Atomics 公司供應組件（部分為標準之市售品），不會有無法修復之狀況，於執照更新後之運轉期間，可維持反應器運轉所需功能。

(10)馬達與驅動系統（如：皮帶、皮帶輪、軸連結器橡膠圈等），除每日例行之檢查外，每年大修期間亦會進行預防保養。本項組件之失效並不影響燃料完整性、造成放射性物質污染 THOR 爐房內或外釋之狀況，且皆為工業標準零件，不會有無法修復之狀況，於執照更新後之運轉期間，可維持反應器運轉所需功能。

(11)壓縮空氣供應系統，原為舊型機械式壓縮設備，近年已改採一台 7.5HP 的渦卷式空氣壓縮機，除每日例行之檢查外，每年大修期間亦會進行預防保養。本系統皆採市售商品及標準品所構成，不會有無法修復之狀況。本項組件之失效並不會造成 THOR 安全分析報告第 13 章所載之假想事故，於執照更新後之運轉期間，可維持反應器運轉所需功能。

(12)控制棒驅動設備，用以抽插控制板，可分為驅動系統及限位機構二部分，於每年大修期間進行測試、調整與維護。本項組件之失效並不會造成 THOR 安全分析報告第 13 章所載之假想事故，且有一般市售品可供更換，不會有無法修復之狀況，於執照更新後之運轉期間，可維持反應器運轉所需功能。

(13)遠端設備與訊號傳送器，置於控制室外之遠端設備，主要有分裂產物計數器與 BNCT 治療監測系統，其訊號傳送器係透過網路線進行訊號傳輸，將資訊傳送至 THOR 控制室供運轉員監測、監視或記錄。分裂產物計數器、BNCT 治療監測系統，以及其訊號傳送等設備之失效並不會造成 THOR 安全分析報告第 13 章所載之假想事故，且有一般市售品可供更換，不會有無法修復之狀況，於執照更新後之運轉期間，可維持反應器運轉所需功能。

(14)水位指示器，裝設於爐心頂端 5.63 公尺處，為市售之簡易水位開關。THOR 池水水位除每日例行巡視外，水位指示器於每年大修進行功能測試。本項組件之失效並不會造成 THOR 安全分析報告第 13 章所載之假想事故，且有一般市售品可供更換，不會有無法修復之狀況，於執照更新後之運轉期間，可維持反應器運轉所需功能。

(15)電源供應系統，係指設置於地下室變電房之變壓器、自動切換開關，

以及分電盤等，將台電公司所供應的 11.4 kV 市電轉換為 THOR 運轉所需之電源。本項組件之失效並不影響燃料完整性、造成放射性物質污染 THOR 爐房內或外釋之狀況，且有一般市售品可供更換，不會有無法修復之狀況，於執照更新後之運轉期間，可維持反應器運轉所需功能。

(16)柴油發電機，於 11.4 kV 市電跳脫時，提供 THOR 運轉所需之各項馬達、電梯及照明用電需求。每月進行啟動測試，以及每年進行市電跳脫時電源切換功能測試。本項組件之失效並不影響燃料完整性、造成放射性物質污染 THOR 爐房內或外釋之狀況，且有一般市售品可供更換，不會有無法修復之狀況，於執照更新後之運轉期間，可維持反應器運轉所需功能。

(17)固定式吊車，用以進行各項實驗設備、樣品鉛罐之吊掛，除每年接受勞動部之檢查外，亦於每次大修委託廠家進行維護保養。本項組件之失效並不會造成 THOR 安全分析報告第 13 章所載之假想事故，且有一般市售品可供更換，於執照更新後之運轉期間，可維持反應器運轉所需功能。

(18)重要機/儀電設備底部固定與接頭，除每年大修針對室內外重要設備進行巡檢與確認，確保其接頭效能與底部固定組件（螺栓、樁等）之狀態外，亦會於颱風季節來臨前與地震後再次進行巡檢與確認。本項組件之失效並不影響燃料完整性、造成放射性物質污染 THOR 爐房內或外釋之狀況。經由例行之巡檢與維護，於執照更新後之運轉期間，可維持反應器運轉所需功能。

二、審查發現

(一)「清華大學 THOR 研究型反應器控制板破損分析評估」部分

審查小組提出 RAI 編號 B1-0001，要求清大澄清控制板上方母材腐蝕，如：形成間隙腐蝕（crevice corrosion）的條件，表面尺寸沒有明顯變化，是否足以論斷深入之方向也沒有進一步腐蝕，以及對控制板的結構完整性及運轉安全之影響。清大說明 THOR 之控制板係利用控制板上方一楔型構造以焊接方式與連桿結合，再以 17 個鉚釘將控制板與夾板固定，於運轉時由驅動系統自爐心向上拉出。若#1 控制板因上方母材腐蝕造成結構破壞而無法驅動，即

代表其停留在原爐心安全停機之位置，不會影響系統安全。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 B1-0002，指出反應器控制板破損分析評估結論建議對有缺陷及腐蝕現象之組件或區域，應進一步評估其結構完整性及安全性，並定期追蹤劣化現象，但清大在本項評估中僅說明目前控制板腐蝕情形與可能原因，並未進一步評估結構完整性及安全性，故請清大說明如何確認控制板可繼續使用並確保反應器安全。清大說明 THOR 之設計係為本質安全之狀況（詳見前 B1-0001 答覆）；在承受外力方面，THOR 單根控制板之體積約小於 3000 立方公分，其在水中所受之自重約略小於 5kg，控制板並無顯著受力情況，無結構安全顧慮。此外，控制板縱有發生無法操作之劣化狀況發生，仍可藉由過往將#4 控制板由不銹鋼更換為 B₄C 材料之經驗進行更換。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 B1-0003，要求清大澄清民國 98 年、103 年目視檢測之影像解析度，以及使用民國 98 年檢測影像做為評估依據之原因為何。清大說明因檢測設備演進更新，歷次檢測所使用的檢測設備儀器雖會有差異，但仍符合檢測基準要求。使用民國 98 年檢測紀錄只是因其為可取得之最老檢測影像紀錄。為避免檢測設備更新影響檢測結果追蹤比對，已修訂程序書要求對於需記錄的檢測發現，須建立監測基準影像或圖像與參照對象，並應量化幾何特徵及進行必要說明。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 B1-0004，指出應力腐蝕的成因，除了水質、材料等因素外，更重要的是應力的影響，而清大依據 Generic Aging Lessons Learned（簡稱 GALL）的篩選原則提出控制板為鋁合金 6061 材質，其化學成份中鋅、鎂含量皆低於 1.2%，應力腐蝕破裂不易發生的論述，可能說服力不足，必須說明控制板的受力情形，以確保控制板不會發生應力腐蝕。清大說明控制板置於爐心中，與格架間存有充足間隙，故當其停機時除控制板本身以及連接桿下半部之重量係由控制板底部承載；而控制板於拉升時，因不與任何結構接合，本身僅受自重影響。如編號 B1-0001 與 B1-0002 之答覆，控

制板在水中所受之自重約略小於 5kg，並無顯著受力狀況，是以應力不是控制板發生應力腐蝕的主因。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 B1-0005，要求清大澄清與控制板護套相同材質的水池襯板，是否亦會如控制板護套破損之分析結果，因早年水質條件較不理想而發生孔蝕之現象。清大說明控制板破損並非單純水質所導致，因此水池襯板並不致於產生相同狀況，另依據近期之目視檢查結果，水池襯板之孔蝕並無明顯變化。為強化後續追蹤，THOR 程序書建立監測基準影像與參照對象等檢測紀錄強化要求。經審查答覆內容可以接受。

(二)「清華大學反應器主結構物安全鑑定報告書」部分

審查小組提出 RAI 編號 B2-0002，請清大提供過去主結構物耐震評估的相關報告，俾利本會審查。經清大提供民國 89 年 THOR 結構鑑定報告。本項經審查可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 B2-0502，在建築物損壞調查方面，要求有關本案結構裂縫是否影響結構安全之判斷依據，應依美國混凝土學會 (American Concrete Institute, 簡稱 ACI) 規範之相關規定辦理。清大答覆說明，根據 ACI committee 224 規定不同暴露環境下最大允許混凝土裂縫寬度，規定暴露環境於高相對濕度、濕潤空氣、土壤允許裂縫為 0.3mm；暴露環境儲水槽允許裂縫為 0.1 mm。本案測得牆側裂縫寬度為 0.048mm，牆頂走道裂縫寬度 0.288 mm，且因水池牆有做內襯防水，研判裂縫不影響結構安全，並將該段敘述及參考資料納入報告本文。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 B2-0601，針對本安全鑑定報告書第 6.2 節混凝土鑽心試體檢測成果彙整，要求補充有關混凝土鑽心取樣“最小強度除以 0.75”的相關規範依據。清大答覆說明係參考內政部發布「結構混凝土施工規範」第 18.5.5 節有關混凝土鑽心試體合格標準任一試體不得低於設計強度 f_c' 之 75% 規定反推，本案進行鑽心取樣之試體中，絕大多數之強度皆遠高於設計值，僅有一個試體強度為設計強度的 85%，檢測結果滿足該規範之要求，故分析

中以設計強度作為參數應屬合理，相關規範業已納入安全鑑定報告書參考文獻。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 B2-0801，請清大說明 THOR 耐震能力只檢核該建物在工址 475 年回歸期設計地震力作用下所需達到之性能水準，提出法規之符合性。清大說明本案係依內政部營建署「建築物耐震設計規範及解說」第八章既有耐震能力規範及國震中心規定進行耐震能力檢核。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 B2-0802，請清大補充說明建物 RC 牆是如何模擬的。清大說明既有 RC 牆厚僅 15.24 cm 厚，類似填充牆行為，因此以業界普遍以磚牆等值斜撐模擬。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 B2-0803、B2-0804、B2-0805，綜整主要審查意見包括：(1)應說明本案非線性靜力側推分析 (Pushover Analysis) 所假設之構材塑鉸模式及失效模式之合理性；(2)應說明結構分析將剛域係數 (Rigid-zone factor) 設定為 1 是否合理；(3)應說明牆的模擬方式及依據為何；(4)應說明本案 Pushover 非線性分析是以力控制法或位移控制法求得容量曲線對性能曲線 (Base Shear v.s. Roof Displacement Curve)；(5)報告第 41~46 頁各圖未標出性能點，請補充說明國震中心之耐震評估技術手冊與美國 ATC-40 之求得性能點 P 之差異性與保守度。清大答覆說明：(1)梁柱塑角設定依原設計箍筋間距設定 (參照國震中心技術手冊採用 Elwood and Moehle, 2005 公式計算塑角)，應能反應當時狀態。破壞模式發生在柱端彎矩塑鉸及牆斜撐軸力塑鉸尚屬合理；(2)Rigid zone factor 依國震中心技術手冊建議以 1.0 輸入，因梁版一起澆注形成剛度很強之區域，採用 1.0，應屬合理。目前有關鋼筋混凝土建築物耐震能力評估係針對梁、柱、牆等主要構材塑性鉸特性設定，營建署核定程式 TESP A 及 SERCB 程式目前都是僅針對梁、柱、牆設定塑鉸分析；(3)既有 RC 牆厚僅 15.24 cm 厚，類似填充牆 (Infill Wall) 行為，以磚牆破壞路徑行為考量，目前業界普遍保守以磚牆等值斜撐模擬。因 TESP A 剪力牆等值寬柱模式是針對補強剪力牆，會造成基礎尺寸不足，對於既有 RC 牆一般不採用此模式分析；

(4)先以力控制法 (Load control method) 求得 0.8V-max，再檢核其層間變位是否有超過規定 1%，如層間變位超過 1%則視為位移控制；(5)已標出 Vmax 之 0.8V-max 為性能點，國震中心耐震評估手冊性能點方法是用容量震譜法與 ATC-40 一樣。經審查第(1)、(2)、(3)、(5)項答覆內容可以接受；惟針對第(4)項意見，審查小組進一步提問：以力控制法進行側推分析時，當結構出現穩定性問題時 (亦即結構系統勁度矩陣為 singular)，求解時若無適當控制會出現數值發散現象，此時所算得之側向位移是否仍然合理。清大答覆：ETABS 程式在側推時會因穩定性問題時，無法收斂而程式自動終止側推，側推曲線內值都是經過收斂之合理值，本案經檢核結果其側向層間變為比都小於規定 1%，詳報告表 8-4 耐震能力評估結果(南棟)及表 8-5 耐震能力評估結果(北棟)，其結果應為合理。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 B2-0806，有關本安全鑑定報告書第 8.1 節設計耐震能力評估方式中，應補充說明對於本案 THOR 場館建物用途屬第二類建物結構 ($I=1.50$) 在側推分析上的處置依據並納入參考文獻。清大說明係依據國家地震工程研究中心出版的「校舍結構耐震評估與補強技術手冊第三版」(民國 102 年 12 月第三版)，並已修訂相關報告參考文獻。本項經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 B2-0807，有鑑於 THOR 場館主結構物柱間牆體高寬比超過 2.0，與一般民用建築物差異頗大，在側推分析中 BWPH 程式卻修正為 2.0，是否符合 BWPH 程式等分析牆體時理論的限制，應有適當考量及補充說明。清大說明 BWPH 程式中當牆高寬比大於 2.0，程式將其修正為 2.0，可由鋼筋混凝土建築物耐震能力詳細評估磚牆-理論背景與系統操作中所載之計算理論進行佐證，業界對於類此設計之建築採用上述方法進行簡化已是常用評估方法，故應無低估之疑慮。本項經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 B2-0808，THOR 場館主結構物側推分析電腦建模並未考慮周圍相連的廠館結構(例如：參觀平台結構、行政辦公區建物等)，但現場視察發現周圍館舍似乎與主結構物相鄰接，對於 THOR 主結構物與周

圍相接的場館結構，請清大澄清說明在地震來襲時是否另有碰撞問題，以及可能的危害為何。清大答覆依據同儕審查結果之建議，目前鄰棟建物與主結構相鄰不致影響 THOR 主結構之安全；惟為能確保本設施之可用性，清大依同儕審查所提出之建議，當地震震度達 5 級時確認結構完整性，如有危險性時立即予以改善，並列為安全鑑定報告之結論與建議。本項經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 B2-0901，審查發現某斷面之控制鋼筋比計算有誤。經清大修正，本項經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 B2-0902，審查發現 THOR 水池的耐震分析章節太過簡略。清大進一步說明該章節係分析長邊水池壁（切短向斷面），水池為剛性構造物，牆頂未束制，牆底固定於厚基礎版，其結構形為類似懸臂梁形為，保守取單位 100 cm 進行模擬分析，以檢核其配筋量是否足夠，應屬合理之模擬方式。本項經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 B2-0903，針對 THOR 池水的動態效應考量（包括地震 sloshing 是否會溢濺出）。經清大補充計算，由靜態水壓、地震力與動態水壓之載重組合，各高層配筋檢核結果符合規定；地震 sloshing 雖可能使 THOR 池水溢濺，惟溢濺後池水可透過爐房側邊之鐵捲門下方縫隙排釋至外側排水溝，所經之處皆不會影響 THOR 之儀控與電力設施。本項經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 B2-P301，有關主結構裂紋檢測之某照片裂紋寬度小於 0.3mm 的結論與報告書之照片似不相符。經清大澄清說明，報告書之照片 95 是參觀台與反應器廠房之牆間隙（非裂縫），照片 96 為參觀台戶外地坪裂縫，皆不影響結構安全。本項經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 B2-0001、B2-0401、B2-0501 等，針對相關章節部份文字、圖表之遺漏或誤植處，請清華大學澄清說明與修正。清華大學皆已依審查意見澄清或修訂報告內容，經審查答覆內容可以接受。

(三)「清華大學水池式反應器內部組件目視檢查總結報告」部分

審查小組提出 RAI 編號 B3-0202，要求澄清「清華大學水池式反應器內部組件及鐸道目視檢查程序書」是否已經 ACCP 高級檢測師 (L-III) 審核簽證。清大說明 THOR 目視檢測程序書並未要求需由 ACCP 高級檢測師審查簽證，因此是由具國內非破壞檢測協會目視檢測高級檢測師資格之人員審查簽證。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 B3-0203，要求澄清本報告表 2.2 及表 2.3 所列具 ACCP L-II 資格以外人員之工作內容，以及檢測人員操作攝影機時是否可同時觀看檢視到受檢視標的物的影像畫面(螢幕)。清大說明未具 ACCP L-II 資格人員，僅協助進行水底攝影機操作；而檢測人員在指揮攝影機固定與移動之情況下，可同時透過儀器螢幕看到受檢物的影像畫面。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 B3-0406，要求澄清檢測期間是否均未發生更換檢測人員、中午休息或需進行系統設備調整與更換組件之情形，以及同時執行 VT-1 及 VT-3 校驗之作法。清大說明檢測期間人員中午休息時段，檢測系統設備仍留置於原處並維持通電，無需要再校驗情形；系統校驗均依據目視檢查程序書執行，並已修訂程序書區分 VT-1 及 VT-3 校驗作業標準。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 B3-0407，要求澄清本報告 4.6 節所述“長鏡頭”檢測方式與一般之遠距目視檢測有何不同。清大說明所述之長鏡頭即遠距目視檢測。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 B3-0503，要求澄清本報告圖 5.4.1 箭頭所指類似裂縫的痕跡，是否為本次檢查新發現。清大說明圖 5.4.1 係為比對三次檢測結果之發現，由民國 98 年與 108 年角度相近之照片可以發現，此處痕跡係為焊珠重疊所致之交界面；該因高度差之故而使得焊接時無法令同向之焊道連續施作，故於三道焊導施工後進行高度差區域之補焊，而造成焊珠重疊之現象。

經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 B3-0504，要求澄清本報告圖 5.4.6 及圖 5.4.8 的廣泛“蝕斑”現象。清大說明檢視圖 5.4.6 部分係為壓印與組件刮擦所致凹痕，僅有少數為蝕斑。此外，由圖 5.4.8 之再確認，部分應屬積垢，主要係因該處位於水流之主要流場之外之肩角，使水中之微粒因流速過低而無法被挾帶，以致沉積。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 B3-0505，要求澄清先前報告發現初期之腐蝕區兩處之後續狀況以及圖 5.5.5 與圖 5.5.6 之螺帽下方疑似 crevice corrosion 或 galvanic corrosion 的情形。清大說明目前各處腐蝕狀況與之前檢查並無顯著差異。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 B3-0507，請清大澄清本報告第 5.1 節關於「59 個核心格架，全面執行 VT-1 檢查，各處發現如蝕斑及刮痕等之輕微腐蝕現象，無重要發現」的論述與第 10 頁「僅檢測 59 格中的 56 格」的敘述不符。清大已更正相關錯誤。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 B3-0508，要求澄清目視檢查總結報告外，是否另有檢測報告？若總結報告即為檢測報告，則應經檢測人員簽署。清大說明總結報告已經相關檢測人員簽署。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 B3-0509，建議清大於目視檢驗報告表 5.0.1「IVVI 檢測記錄表」可再依組件細分或加註組件別，以增加可讀性。清大已於相關檢測紀錄表增列組件細目或註解。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 B3-0510，要求澄清本報告圖 5.1.1 ~ 圖 5.1.5 格架編號型式（如：G-3）與表 5.1.1（如：G3）不一致之情形，以及報告中對於檢測結果之說明那些是缺陷？那些僅是需記錄的瑕疵，並建議應有相關評估標準。清大說明已修訂格架編號型式，並已修訂程序書納入相關指示與需記錄指示之定義與接受標準，以及建立監測基準影像或圖像與參照對象、量化幾何特徵及必要說明等規定要求。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 B3-0511，要求澄清本報告中（鐸道/母材）蝕斑、蝕溝、蝕孔之定義，並建議於報告中適當標註。清大已於報告中標註說明。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 B3-0512，要求澄清檢查總結報告表 2.1「檢測項目及檢測內容」相關受檢組件之目視檢測種類。清大已針對表 2.1 目視檢測種類為 VT-3 之受檢組件進行修訂。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 B3-0601，要求澄清“與 103 年檢測比較，腐蝕情況類似，無劣化現象”為逐處比對後的結論，抑或僅為此報告中有提供新舊檢查照片比對處有限的結果？並建議對每一需注意的指示（indication），應擷出要點供下次檢查注意比對。清大說明檢測紀錄過程中，若無明顯瑕疵，則僅針對新舊檢查照片比對處有限的結果，若屬明顯處，將參考民國 103 年檢測紀錄是否有新增劣化之情況，並依審查意見，將各項指示及缺陷之要求書於程序書中，未來依據此程序書，並依據被檢物附近之固定標的靜態結構物（如：螺栓、螺帽、法蘭寬、板厚、鐸道寬...等），標示所有需注意之 indication 與其相對尺寸，作為未來執行檢測與追蹤之依據。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 B3-0201、B3-0401、B3-0402、B3-0403、B3-0404、B3-0405、B3-0501、B3-0502，以及 B3-0506 等，針對本報告相關章節部份文字、圖表之遺漏或誤植或標示不夠清楚處，請清大澄清說明與修正。清大皆已依審查意見澄清或修訂報告內容，經審查答覆內容可以接受。

（四）「清華大學水池式反應器冷卻水管路目視檢查總結報告」部分

審查小組提出 RAI 編號 B4-0001，本報告指出 THOR 冷卻水管路完整性檢查與內部組件及鐸道目視檢查主要依據本報告第 5、6 兩篇參考資料「清華大學水池式反應爐冷卻水管路完整性檢查」程序書（108 年 9 月）與「清華大學水池式反應器內部組件及鐸道目視檢查」程序書（108 年 9 月）執行，要求清大說明此兩程序書由何單位編撰與核定。清大答覆說明係由目視檢測執行單位核研所編撰、核定，工作執行前由清大審閱；惟此答覆顯見程序書的核

定並未符合目視檢測規定，故進一步要求清大該目視檢測程序書須有高檢師資格者審核簽證；清大乃請具 ASNT ACCP L-III 高檢師資格者審核簽證。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 B4-0003，針對本報告只有對於冷卻水管路的完整性進行評估之適切性，而對 THOR 是否有任何/其他高能量管路、埋管(buried pipe) 等進行說明。清大回覆 THOR 為開放式水池反應器，其操作條件為常壓水、最高爐心出口水溫被嚴格限制在 54.4°C 以下，且一次泵於正常運轉之最大出口壓力為 32 PSI，無任何高能管路及 buried pipe。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 B4-0201，要求澄清兩位有 ACCP Level II 證書人員是否在效期內，另 4 位未經目視訓練班之人員是否有實務操作上的訓練與考核，是否有經類似 ASNT 考照所要求之視力檢驗，其在本案之檢測所負責工作的佔比為何？是否為實際執行大部份或全部檢查工作之人員。清大說明 ACCP Level II 證書均在效期。另 4 位未經目視訓練班之人員僅接受目視檢測課程講習及文件研讀等課程，現場作業包含檢測工具準備、校準試塊準備、檢測執行、裝備管理，不須經過 ASNT 考照所要求之視力檢驗。本案之檢測係由具有 ACCP Level II 證書之人員執行檢測與判讀。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 B4-0202，要求澄清「清華大學水池式反應器冷卻水管路完整性檢查程序書」是否已經 ACCP 高級檢測師 (L-III) 審核簽證。清大說明 THOR 目視檢測程序書並未要求需由 ACCP 高級檢測師審核簽證，因此是由具國內非破壞檢測協會目視檢測高級檢測師資格之人員審核簽證。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 B4-0203，要求澄清本報告表 2.2 及表 2.3 所列具 ACCP L-II 資格以外人員之工作內容，以及檢測人員操作攝影機時是否可同時觀看檢視到受檢視標的物的影像畫面(螢幕)與加註攝影機操作之原因。清大說明加註攝影機操作係因檢測係藉由攝影機之影像執行鐳道檢測與判讀；未具

ACCPL-II 資格人員，僅協助進行水底攝影機“方位”操作；而檢測人員在指揮攝影機固定與移動之情況下，可同時透過儀器螢幕看到受檢物的影像畫面。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 B4-0301，要求澄清 AHLBERG CAMERAS PIS200 型水底攝影機為有線或無線，如有線，長度為何，檢測過程是否有受到長度的限制或因管道拐彎，連接構件如閘門等阻礙而使某些管路片段無法檢查觀察。清大說明本次檢測管路長度小於電纜長度，管道拐彎不影響檢測，而本次檢測管路上沒有閘門（或已移除）。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 B4-0502，要求澄清檢查看到的銲道熔合不良，龜裂、蝕孔、沖蝕等，是依何判據（criterion）判定其為不重要。另附件一分析中提到冷卻水管為 6061 鋁合金，所看到的銹斑是否為孔蝕，是否需評估孔蝕深度。清大說明本次目視檢測的銲道熔合不良，龜裂、蝕孔、沖蝕等，在本次目視檢測程序書「清華大學水池式反應爐冷卻水管路完整性檢查程序書（108 年 9 月）」的接受標準以內。另附件一所提係 6061 鋁合金冷卻水管在銲接時熔接不良所致之缺陷並非孔蝕。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 B4-0504，指出本報告中第 5.2 節標題與第 5.2.2 節檢測項目「一次水泵出水口管側法蘭至閘 PV3/PV5 管側法蘭管壁」應為一次水泵進水口管側之誤。清大已修正。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 B4-0505，要求澄清本報告外是否另有檢測報告，若總結報告即為檢測報告，則應經檢測人員簽署。清大說明本報告已請相關檢測人員簽署。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 B4-0506，要求澄清本報告表 5.1.1 及表 5.2.2 之檢測距離，以及 VT 檢驗紀錄表中 VT-2 檢測開始與結束時間、測試壓力、持壓時間(開始與結束)與相關壓力等檢測資訊。清大已於報告第 5.3 節敘明 VT-2 檢測相關參數及執行時間等資訊。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 B4-0601，要求澄清管路銲道如無安全疑慮，為

何建議評估剷除並重新鐸補。清大說明鐸道係由之前的鐸接工藝熔合不良所形成，會削減鐸道有效截面積與降低鐸道機械強度；經評估目前無安全疑慮，但如要改善，改善方案除了剷除並重新進行鐸補之外，亦可藉由定期檢查該不良鐸道是否有劣化趨勢。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 B4-0602，要求澄清本報告摘要與結論似乎都蘊涵整體冷卻水管路經過目視檢查評估，沒有安全疑慮。但實際檢查似乎只佔全部冷卻水管路的一小片段，以此片段是否足以涵蓋全體冷卻水管路的結構完整性。清大說明選擇以目視檢測之管路主要包含管路分接以及泵出口等流場相對紊亂，而預期有較高剪速度之出口段，已對於沖腐蝕之影響保守含括；而泵之下游段則採以加壓密封測試確認其完整性，已有足夠涵蓋性。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 B4-0603，針對報告第 6 章結論(1)「管路內部上融合不良的鐸道，與前次檢測結果相比沒有惡化的趨勢，且經初步評估後(如附件一)應無安全疑慮，但是仍建議評估剷除並重新進行鐸補作業之合適性；新鐸道需執行 RT 檢測、表面 PT 檢測或管內 VT 目視檢測。」提出兩項疑慮：

(1) 附件一針對管路鐸道熔接不良的缺陷以表面裂縫假設進行評估，不甚妥當，假設裂縫深度為 1mm，不能據此論斷管路無安全疑慮；(2) 結論(1)後半段建議未說明是否執行或其執行結果。清大答覆：(1) 相關評估之假設基礎請參見 RAI 編號 B4-P101 與 B4-P102 之答覆說明；(2) 由於 THOR 近期檢視熔合不良的鐸道結果皆顯示該處鐸道缺陷並未明顯劣化，故清大仍傾向以定期檢視確認其狀況方式進行辦理。審查委員同意其中第(2)項答覆，但對於第(1)項問題，雖參閱 RAI 編號 B4-P101 與 B4-P102 之答覆說明，仍未能釋疑；後續經清大改以新版評估作業證實一次側管路即使發生全周未完全熔接之缺陷，其鐸道凹陷深度需達管厚之 49% (4.36 mm) 才会有安全疑慮，並修訂老化管理評估報告第 13 頁(詳細內容請參見 RAI 編號 B4-0601 之答覆說明)內容。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 B4-0604，要求澄清對於本報告第 6 章結論與建

議之採行與辦理情形。清大已就目視檢查結果建議於老化管理評估報告、安全分析報告等說明相關採行辦理情形或進行內容修訂。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 B4-P101，要求澄清本報告附件一、一次側管路焊道熔接不良評估假設與計算上的疑義。清大除說明原使用之分析模式外，並依審查建議避開有疑義的假設後另作保守分析，假設全周長之裂縫出現，需具有 49%之管厚缺陷才會導致元件的應力強度因子觸及斷裂韌性，應可確保安全。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 B4-P102，要求澄清一次側管路銲道亦有滲透不足及銲瘤，但僅針對焊接熔融不良進行分析之原因，以及是以有考量 6061T6 鋁合金銲後軟化影響與引用 ASME Sec.XI App.A 之依據。清大說明僅針對銲接熔融不良進行分析評估係考量對壁厚影響最為顯著；ASME Sec.XI App.A 僅引用線彈性破壞力學計算處理幾何與結構部分問題，未使用與材質相關部分，此外銲道滲透不足之幾何情形，除小於美國銲接學會（American Welding Society，簡稱 AWS）規範標準外，相關缺陷引致之應力不僅甚低，對材料破裂韌性造成之影響，相較於材料破裂韌性限值亦小，同時亦已經一次側管路目視檢測及加壓測試可以確認該管路可達到原設計之功能，加以依 THOR 之設計特性，即使有管路滲漏發生，亦不可能導致水位下降至燃料上方 3.66 公尺之可能；又假使發生此種事故仍可依相關處置程序及維護作業經驗進行止漏維修作業。後續清大將於每個上班日，以及於大修時委託專業廠商實施管路銲道巡檢，以確保該組件之完整性，相關巡檢要求並已納入程序書。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 B4-0002、B4-0101、B4-0401、B4-0501，以及 B4-0503 等，針對本報告相關章節部份文字、圖表之遺漏或誤植或標示不夠清楚處，請清華大學澄清說明與修正。清華大學皆已依審查意見澄清或修訂報告內容，經審查答覆內容可以接受。

（五）老化管理評估報告第三章部分

審查小組提出 RAI 編號 B0-0301，要求清大澄清燃料溫度監控之熱電耦金屬構成，在長期中子等輻射線照射下，會否有劣化影響其量測準確度的問題，以及是否有進行校正之可能。清大答覆說明熱電耦所使用之材料經輻射照射後之影響效應已在 GA 公司於燃料設計時納入考量。另檢視近年 THOR 以 1 MW 進行功率校正時，以自然對流進行池水升溫測試時之燃料溫度，並未見燃料溫度有不合理之變化，亦可見熱電耦之可靠度，且 THOR 運轉員於運轉期間，臨界達指定功率後仍需頻繁的反覆確認水溫、流量與燃料溫度。縱使 THOR 未來於運轉期間發生燃料溫度模組失準現象，如錯誤高估會迫使反應器停機；若錯誤低估，THOR 之設計功率亦不會讓反應器運轉於超過 2 MW 以上，而讓燃料出現超過 500°C 之狀況。文獻檢索亦未發現熱電耦失效之紀錄，故可確認安全。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 B0-0302，要求清大澄清 THOR 控制系統是否需要插介面卡到電腦主機板，是否有難以獲得適當介面電腦主機板的問題。清大說明 THOR 之反應器控制台（Control System Console，簡稱 CSC）與數據取訊電腦（Data Acquisition Computer，簡稱 DAC）使用的介面為較早期的 ISA 介面，THOR 曾評估過進行 CSC 與 DAC 整體系統的更新，並也尋得具有能力執行該系統更新的廠家及其報價，如未來不幸遇到介面卡或電腦故障而無法修復時，仍可依循採購及設計變更審查等程序完成更新。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 B0-0304，有關報告內容“……並依內政部建築物耐震設計規範及解說[5]第 2.4 節所載方式，以場址地表下方 30 米之加速度進行公式計算後，將其判定為第一類地盤，…”之敘述並不正確，因場址被判定為第一類地盤的依據為場址地表下 30 米岩土層的平均剪力波速 V_{s30} ，不是加速度。清華大學已修正該段敘述。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 B0-0305，針對耐震分析所使用的軟體 ETABS 提出質疑。因近幾年來，ETABS 2016 及 SAP2000 V20 之後的版本可提供 P-M 或 P-M-M 非線性鉸設定以執行側推分析，背骨曲線的彎矩強度及轉角變位皆

可依側推過程軸力變化而變化，合理反映非線性鉸軸力變化對側推結果的影響。本案耐震分析使用之 ETABS 為 V8.4 版，與目前最新 V18 版之 Pushover 分析功能之差異性為何，是否仍然適用本案。清大答覆說明本次使用塑鉸是參照國震中心 TEASPA 第三版，並非使用 ETABS 內設塑鉸，因 ETABS 內定塑鉸未考慮鋼筋貢獻過於保守，不採用其內應塑鉸。與 ETABS 2016 其差異是其塑鉸未反映非線性鉸軸力變化對側推影響，依目前規定 6 層以下建物仍可使用該版本，本案因僅為 1 層，軸力不大，影響結果應不大，目前業界仍還是以此版本為主分析。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 B0-0401，要求說明老化管理評估報告表 4、老化管理項次之評估與維護計畫所提固定式吊車應納入評估與維護範圍。清大說明固定式吊車每年均有委請廠商進行維護並經勞檢局檢測，已依審查意見將固定式吊車應納入評估與維護範圍。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 B0-0303、B0-P301，針對相關章節部份文字、圖表之遺漏或誤植處，請清大澄清說明與修正。清大皆已依審查意見澄清或修訂報告內容，經審查答覆內容可以接受。

三、結論與建議

清華大學參照美國聯邦法規 10 CFR 54.21(a)將 THOR 研究用反應器各結構、系統與組件分為三大類，共計 18 種項目；其中，THOR 爐房、THOR 反應器冷卻水邊界、管路系統與爐心格架等項目之檢查評估作業，因涉及特殊設備與專業技術，清華大學分別委託專業機構作成檢查報告，供以老化評估管理。本章由各項目之運轉現況、維護保養方式或專業檢查結果，評估於執照更新後之運轉期間，THOR 研究用反應器各結構、系統與組件可維持反應器安全運轉所需功能。經就清華大學送審報告本章內容及清華大學對審查小組提問之答覆內容與報告修訂內容進行審查，審查結果可以接受。

第四章 審查總結

一、審查結論

清華大學參照美國聯邦法規 10 CFR 54.21(a)將 THOR 研究用反應器各結構、系統與組件分為三大類，第 I 類：屬於 THOR 主結構或與主結構等涉及安全分析報告第 13 章之假想意外事故相關，且預期在執照更新後之運轉期間不易更換，而需採用維護與監測等方式確保其功能者，如：(1)廠房或圍阻體 (2)反應器冷卻水邊界。第 II 類：不與主結構相連之反應器冷卻水管路與相關組件，雖與安全分析報告第 13 章所載假想意外事故相關，但因其不與主結構相連而可維護或更換者，如：(3)管路系統 (4)THOR 爐心格架 (5)熱交換器 (6)泵本體 (7)法蘭墊片。第 III 類：不涉及安全分析報告第 13 章所載假想意外事故相關，且其可透過市售商品、訂製品或以模組化方式進行維護或更換之組件，如：(8)電纜、連結器及托盤 (9)電子設備及電路板 (10)馬達與驅動系統 (11)壓縮空氣供應系統 (12)控制棒驅動設備 (13)遠端設備與訊號傳送器 (14)水位指示器 (15)電源供應系統 (16)柴油發電機 (17)固定式吊車 (18)重要機/儀電底部固定與接頭。共計 18 種項目。

前述 (1)廠房或圍阻體 (2)反應器冷卻水邊界 (3)管路系統 (4)THOR 爐心格架 等項目之檢查評估作業，因涉及特殊設備與專業技術，清華大學於 108 年另委託專業機構作成「清華大學 THOR 研究型反應器控制板破損分析評估」、「清華大學反應器主結構物安全鑑定報告書」、「清華大學水池式反應器內部組件目視檢查總結報告」，以及「清華大學水池式反應器冷卻水管路目視檢查總結報告」等 4 份報告作為本案附件，供以老化評估管理。

經由 18 種項目之運轉現況、維護保養方式或專業檢查結果，評估於執照更新後之運轉期間，THOR 研究用反應器各結構、系統與組件可維持反應器安全運轉所需功能。綜合審查小組對於清華大學送審之「國立清華大學水池式反應器老化管理評估報告」之審查結果，本案報告內容可以接受。

二、後續管制要求

無。

附件一：THOR 換照申請案之老化管理評估報告審查分工表

文件名稱	負責委員	負責單位
THOR 老化管理評估報告	外聘專業審查 委員	核管處
清華大學 THOR 研究型反應器控制板破損分析評估		核管處
清華大學水池式反應器冷卻水管路目視檢查總結報告		核管處
清華大學反應器主結構物安全鑑定報告書		核管處
清華大學水池式反應器內部組件目視檢查總結報告		核管處