

NRD-SER-110-01

「國立清華大學水池式反應器
運轉執照更新安全分析報告」
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 設施.....	1
一、概述.....	1
二、審查發現.....	1
三、結論與建議.....	2
第二章 現場特質.....	5
一、概述.....	5
二、審查發現.....	5
三、結論與建議.....	6
第三章 結構、系統和組件之設計.....	7
一、概述.....	7
二、審查發現.....	7
三、結論與建議.....	7
第四章 反應器說明.....	8
一、概述.....	8
二、審查發現.....	8
三、結論與建議.....	9
第五章 反應器冷卻水系統.....	10
一、概述.....	10
二、審查發現.....	10
三、結論與建議.....	11
第六章 特殊安全措施.....	14
一、概述.....	14
二、審查發現.....	14
三、結論與建議.....	14
第七章 儀器和控制系統.....	15

一、概述.....	15
二、審查發現.....	16
三、結論與建議.....	18
第八章 電力系統.....	20
一、概述.....	20
二、審查發現.....	20
三、結論與建議.....	22
第九章 輔助系統.....	24
一、概述.....	24
二、審查發現.....	24
三、結論與建議.....	25
第十章 實驗之設施和利用.....	26
一、概述.....	26
二、審查發現.....	26
三、結論與建議.....	26
第十一章 輻射防護計畫和廢棄物處理.....	27
一、概述.....	27
二、審查發現.....	29
三、結論與建議.....	31
第十二章 管理運作.....	34
一、概述.....	34
二、審查發現.....	35
三、結論與建議.....	36
第十三章 意外事故之分析.....	37
一、概述.....	37
二、審查發現.....	38
三、結論與建議.....	41
第十四章 運轉技術規範.....	42

一、概述.....	42
二、審查發現.....	42
三、結論與建議.....	42
第十五章 財務驗證.....	43
一、概述.....	43
二、審查發現.....	43
三、結論與建議.....	43
第十六章 其他執照方面之考量.....	44
一、概述.....	44
二、審查發現.....	45
三、結論與建議.....	46
第十七章 THOR 之初步除役規劃.....	47
一、概述.....	47
二、審查發現.....	48
三、結論與建議.....	49
第十八章 審查總結.....	50
一、審查結論.....	50
二、後續管制要求.....	53
附錄 A 鋁合金材料完整性.....	54
一、概述.....	54
二、審查發現.....	54
三、結論與建議.....	56
附錄 B BNCT 設施及醫療程序.....	57
一、概述.....	57
二、審查發現.....	59
三、結論與建議.....	59
附錄 C 國立清華大學水池式反應器運轉安全技術規範.....	61
一、概述.....	61

二、審查發現.....	61
三、結論與建議.....	65
附錄 D 清華核子設施管制區域緊急應變計畫.....	66
一、概述.....	66
二、審查發現.....	66
三、結論與建議.....	67
附錄 E 品質保證方案.....	68
一、概述.....	68
二、審查發現.....	68
三、結論與建議.....	69
附錄 F THOR 運轉程序書.....	70
一、概述.....	70
二、審查發現.....	70
三、結論與建議.....	70
附錄 G THOR 反應器運轉歷年輻防紀錄.....	72
一、概述.....	72
二、審查發現.....	72
三、結論與建議.....	72
附錄 H 核輻安委員會審查 THOR 執照換發文件結論.....	73
一、概述.....	73
二、審查發現.....	73
三、結論與建議.....	73
附件一：THOR 換照申請案之安全分析報告（SAR）審查分工表.....	75

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運轉執照更新安全分析報告」，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運轉執照更新安全分析報告」之內容共計有十七章，各章節內容係參考美國核管會（Nuclear Regulatory Commission，簡稱NRC）NUREG-1537 Part 1, “Guidelines for Preparing and Reviewing Applications for the Licensing of Non-Power Reactors”編寫，報告並含有附錄A至附錄H等篇章做為補充資料。

原能會接獲本申請案後，即聘請專業審查委員與本會各處室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執照更新安全分析報告共計提出109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運轉執照更新安全分析報告」之審查結果，根據本會針對「國立清華大學水池式反應器運轉執照更新安全分析報告」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，報告除第十八章審查總結外，各章節名稱均與執照更新安全分析報告各章相同，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THOR研究用反應器可安全運轉，審查結果認為可以接受，並有NM-1000更新案列為後續追蹤管制項目。

第一章 設施

一、概述

清華大學水池式反應器 (Tsing Hua Open-pool Reactor, 簡稱 THOR) 係美國 General Atomics (GA) 公司設計, 平時運轉功率約為 1.2~1.7 MW, 可隨需求提昇至最高功率 2 MW, 每年約運轉 200 個工作天; 用於實驗上比例約佔總運轉小時一半。THOR 除可進行反應器物理、化學及工程方面之基本研究與教學外, 尚應用於醫療、工業及農業方面, 亦能製造多種放射性同位素 (如: 碘-131) 提供國內各大醫院使用。

本章主要為 THOR 設施之綜合性論述, 包括安全考量、設施和設備說明、與同型設施之比較、運轉摘要、用過燃料政策考量、設施的修改和歷史等。

二、審查發現

審查小組提出 RAI 編號 A0-0001, 請清大就福島核災後, THOR 有無需要在安全分析報告加強或反應提出補充說明。經清大說明 THOR 原始設計即無熱移除之疑慮, 亦即 THOR 爐心之衰變熱皆能透過池水或是自然對流移除, 以及在現場無電力狀況下水頭即可以重力注水, 並提出具體佐證說明。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A0-0101, 要求澄清近 10 年來 THOR 運轉統計資料之「年度運轉功率」單位是否正確。清大更正功率單位為 MWh。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A0-0102, 請清大補充敘述國際間運轉超過 60 年之研究用反應器資料。清大於 SAR 表 1-1 列出美國目前仍在運轉中的 TRIGA 研究用反應器; 其中, 美國賓州大學的 Penn State Breazeale Reactor (PSBR) 自 1955 年初次臨界起, 至 2020 年已運轉 65 年。於表 1-2 列出美國近年獲准執照更新的研究用反應器與其運轉年限, 其中 Armed Forces Radiobiology Research、Texas A&M University College、University of Florida (以上三者屬 TRIGA 研究用反應器)、Purdue University、University of Maryland 之研究用反

應器至 2020 年皆已運轉約 60 年，與清大 THOR 研究用反應器運轉年數相當，且皆已於 2016 年左右獲准執照更新，可運轉至 2036 年左右。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A0-0103，要求提供 THOR 設施內部引風機及相鄰館舍共用排氣系統之配置圖，並說明運轉時排風量足以排除 THOR 運轉時產生之空浮氣體，另要求針對 THOR 運轉造成相鄰館舍部份實驗室發生氙核種污染提出說明及改善作為。清大提供 THOR 引風機系統示意圖及其相鄰館舍（同位素館）排氣系統相對位置圖，說明引風機系統排風量每小時約可完成 4~5 次的換氣率，經加設負壓計量測結果，爐房內負壓值可達 50 pascals 以上，另外針對 THOR 相鄰館舍測得氙核種之說明，初步推論氙氣可能經由老舊管線擴散，已進行老舊管路封閉改善，並將持續追蹤改善成效。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A0-0104，要求說明碘-131 生產製造相關設施之通風設備做了哪些改善，及改善前後之差異。清大說明主要是將抽氣管路及馬達汰新，以及活性碳濾層系統改為袋進袋出形式，可更精準評估碘-131 製造時之排放氣體濃度，以及系統活性碳之吸附效率。經審查答覆內容可以接受。

三、結論與建議

本章已充分說明 THOR 近 10 年來之設施相關變化、統計資料及現況，針對國際間運轉超過 60 年之研究用反應器亦已條列說明，內容完整且敘述詳實。

表 1-1 2020 年美國目前仍在運轉中之 TRIGA 反應器

設施名稱 / 運轉單位	開始建造日期	初次臨界日期	2020 年已運轉之年數	反應器型式	熱功率 (kW)
ARRR Aerotest Operations, Inc	1963.01.01	1964.07.09	56	TRIGA Conversion	250
NRAD Argonne National Laboratory	1975.01.01	1977.10.12	43	TRIGA Mark II	250
AFRRI TRIGA Armed Forces Radiobiology Research Institute	1960.12.01	1962.01.01	58	TRIGA Mark F	1,000
Dow TRIGA Dow Chemical Company Michigan Operations	1965.01.01	1967.07.06	53	TRIGA Mark I	300
KSU TRIGA Mark II Kansas State University, Mech./Nuclear Eng	1961.01.01	1962.10.16	58	TRIGA Mark II	250
OSTR, Oregon State. Univ. Oregon State University Radiation Center	1966.01.01	1967.03.08	53	TRIGA Mark II	1,100
PSBR Penn St. Univ. The Pennsylvania State University	1955.01.01	1955.08.15	65	TRIGA Mark III Conversion	1,000
RRR Reed College Reed College	1965.01.01	1968.07.02	52	TRIGA Mark I	250
ACRR Annular Core RR Sandia National Laboratories	1966.01.01	1967.06.01	53	TRIGA Modified	2,400
NSCR Texas A&M Univ, Nuclear Science Center, Texas A&M University	1959.01.01	1962.01.01	58	TRIGA Conversion	1,000
GSTR US Geological Survey U.S. Geological Survey	1967.10.10	1969.02.26	51	TRIGA Mark I	1,000
UC Irvine TRIGA UC Irvine, Dept of Chemistry	1968.03.01	1969.11.25	51	TRIGA Mark I	250
MUTR Univ. Maryland Univ. Maryland, Dept. of Materials & Nuclear Eng.	1960.03.01	1960.12.01	60	TRIGA Modified	250
TRIGA Univ. Utah Utah Nuclear Engineering Program	1972.07.11	1975.10.25	45	TRIGA Mark I	100
UWNR Univ. Wisconsin Max Carbon Radiation Science Center	1959.01.01	1961.03.26	59	TRIGA Conversion	1,000
WSUR Washington State Univ. WSU Nuclear Science Center	1960.10.10	1961.03.07	59	TRIGA Conversion	1,000
UC Davis/McClellan TRIGA McClellan Nuclear Research Center	1987.09.15	1990.01.20	30	TRIGA Mark II	2,000
TRIGA II Univ. Texas Nuclear Engineering Teaching Laboratory	1986.01.10	1992.03.12	28	TRIGA Mark II	1,100

(資料來自 IAEA Research Reactor Database，各設施之最後更新日期在 2018 年 4 月至 6 月間。)

表 1-2 5 部近年獲准執照更新的研究用反應器與其運轉年限

設施名稱 / 運轉單位	初次臨界日期	2020 年已運轉之年數	反應器型式	熱功率 (kW)	最近獲准執照更新日期	獲准之運轉年限
AFRI TRIGA Armed Forces Radiobiology Research Institute	1962.01.01	58	TRIGA Mark F	1,000	2016.11.30	2036.11.30
PUR-1 Universiy Purdue	1962.08.30	58	Pool MTR	12	2016.10.31	2036.10.31
NSCR Texas A&M Univ, Nuclear Science Center, Texas A&M University	1962.01.01	58	TRIGA conversion	1,000	2015.10.01	2035.10.01
UFTR University of Florida	1959-05-2 8	61	Argonaut	100	2017.03.31	2037.03.31
MUTR Univ. Maryland Univ. Maryland, Dept. of Materials & Nuclear Eng.	1960.12.01	60	TRIGA Modified	250	2016.12.22	2036.12.22

第二章 現場特質

一、概述

本章係依據美國核管會（Nuclear Regulatory Commission，簡稱 NRC）NUREG-1537 要求進行審查，主要敘述 THOR 周邊地理、人口統計，以及工業、運輸和軍事設施，同時針對氣象、水文、地質、地震和地質技術加以分析。近年來，除建築物數量及人口分布（民國 105 年合併國立新竹教育大學、民國 106 年拆除生物科技館南館）出現較大改變外，其餘氣象、水文和地質資料等並無明顯變化。民國 107 年清華大學完成水池式反應器 Ar-41(氫-41)放射性氣體排放擴散分析與劑量評估，報告結果顯示 THOR 運轉時產生之放射性氣體影響環境甚微，無人員安全疑慮。

二、審查發現

審查小組提出 RAI 編號 A0-0201，有關地震急停設定值，THOR 之安全分析報告（Safety Analysis Report，簡稱 SAR）之敘述內容過於簡略，以及設定值太低。經清大補充說明並調整地震急停設定值至 25 gal。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A0-0202，要求 THOR 報告內對於描述地震大小之用詞宜修正一致。清大說明將報告內與地震大小相關描述統一修改為震度。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A0-0203，SAR 指出：「本址位於山谷，上游集水區小於 4 平方公里，出口大於 50 公尺，排水良好，大雨不至於有淹水之可能……」。有鑑於清華南校區之台積館於民國 97 年落成，後續亦陸續有館舍落成或興建，請清大說明相關開發是否影響集水區。清大依據民國 96 年出版的“國立清華大學仙宮校區開發環境影響差異分析報告”，說明近期之校地開發對集水區設置了更完善之排水系統，相關之開發整治對於 THOR 設施之防洪效益應屬正向。經審查答覆內容可以接受。

三、結論與建議

本章已充分說明 THOR 之場址特性，校內建築物距離反應器爐房及輻射管制區均大於 100 公尺，相關禁建區及低密度人口區亦完成訂定，周邊工業、運輸和軍事設施皆不影響 THOR 安全，且氣象、水文、地震等自然災害並無明顯危及反應器正常運轉之疑慮，符合 NRC NUREG-1537 各項要求。

第三章 結構、系統和組件之設計

一、概述

THOR 結構包括限制體 (Confinement) 及非限制體 (Non-confinement) 區域；限制體可再區分為爐房、水池與核心；非限制體則區分為反應器館、同位素館、室外冷卻水塔與備用水貯存槽。系統和組件主要包括燃料系統、冷卻系統、儀器與控制系統、電力系統及輔助系統。此外，本章亦針對 THOR 結構、系統與組件 (Structures, Systems, and Components, 簡稱 SSC) 進行氣象、洪水及地震等損害評估。

二、審查發現

審查小組提出 RAI 編號 A0-0301，要求 SAR 內對於描述建物之用詞從鋼筋水泥修正為鋼筋混凝土。清大已將 SAR 內用詞修正為鋼筋混凝土，經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A0-0302，要求 SAR 內對於描述水份滲透之媒介從水泥修正為混凝土孔隙。清大已將 SAR 內用詞修正為混凝土孔隙，經審查答覆內容可以接受。

三、結論與建議

本章已充分說明歷史紀錄範圍內之強風、豪雨或地震等自然災害，均不會對 THOR 結構、系統和組件造成影響。清大於民國 108 年亦針對 THOR 水池及建築結構進行鑑定，結果顯示 THOR 主結構強度符合現行法規要求，確實保障反應器運轉安全；相關審查結果可參考「國立清華大學水池式反應器老化管理評估報告」之安全評估報告 (NRD-SER-110-02)。

第四章 反應器說明

一、概述

本章係關於 THOR 反應器之燃料、控制板、緩和劑和反射體、射源、核心支架、水池、生物屏蔽、爐心設計、熱流設計、輻射對水池材料之影響評估等。本次 THOR 運轉執照換發申請之修訂部分為運轉年份、控制板本領、中子偵檢器編號、爐心配置等資料之更新。

二、審查發現

審查小組提出 RAI 編號 A0-0402，要求澄清一方面 THOR 反應器會急停條件為燃料不銹鋼護套超過 500°C，另一方面燃料護套溫度之最高值設定在 750°C，兩個數字以何者為準；而所謂實驗證實在 750°C 下不銹鋼護套仍維持其完整性，此一結論是否有涵蓋長期中子照射下材質劣化，脆化後的狀況。清大說明 500°C 為觸發反應器急停指標，運轉過程可保證不會有超出 750°C 的狀況，而目前 THOR 中的燃料再運轉 20 年，累積的中子通量仍不致導致燃料護套材質脆化，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 A0-0404，針對附錄 C 之表 C-1 所載反應器急停跳脫信號之地震震度過高之跳脫設定為「地震震度三級以上(5 cm/s², 0.005 g，依中央氣象局地震標準)」。經查中央氣象局地震震度三級對應 PGA 值為 8.0~25 cm/s²，要求清大確認設定值與震度之正確性，以及就 THOR 耐震設計之加速度值為基礎，說明地震震度跳脫設定值之合理性。清大答覆說明 THOR 建物結構檢核的耐震性為 0.28 g，相當於約 274 gal，故重新調整地震儀跳脫動作之設定值為 25 gal，約 0.0255 g，屬震度三級。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A0-0405，針對 SAR 第 4.5.3 節所載 THOR 在常溫及無氙(Xe)的情況下，需要至少為 0.4% 的控制板負反應度，然 SAR 附錄 C 第 3.1.1 節要求 THOR 之安全停機餘裕應大於 1%，請清大澄清所述「需要至少為 0.4% 的控制板負反應度作為停爐的安全餘裕 (shutdown margin)」之正確性。清大答覆說明 SAR 第 4.5.3 節所載 THOR 需要至少為 0.4% 的控制板負

反應度，係指考慮實驗所增加之正反應度下，控制板仍需具有之負反應度。為避免混淆，清大將該文字敘述修正為「需要至少為 1.0 % 的控制板負反應度作為停爐的安全餘裕 (shutdown margin)」。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A0-0406，針對 SAR 第 4.7 節所載，於快中子通量小於 5×10^{21} n/cm² 時，快中子輻射並不會對 6061T6 鋁合金造成明顯的機械破裂韌性變化乙項，要求確認 THOR 所採用之鋁合金係 6061 或 6061T6。清大答覆說明 THOR 採用的鋁合金為 6061T6。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A0-0407，要求說明 SAR 中，藉由運轉經驗之臨界時控制板棒位推論停機餘裕之作法，其使用的數據所對應的爐心狀況，並指出同章節前一段之數據錯誤。清大說明在乾淨冷爐、常溫、非常低功率的條件下進行校正實驗，並更正錯誤數據。經審查答覆內容可接受。

審查小組提出 RAI 編號 A0-0408，要求更新總運轉時數。清大已完成更新。經審查答覆內容可接受。

審查小組提出 RAI 編號 A0-0401 及 A0-0403，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、結論與建議

本章係關於 THOR 反應器之燃料、控制板、緩和劑和反射體、射源、核心支架、水池、生物屏蔽、爐心設計、熱流設計、輻射對水池材料之影響評估等。審查小組所提出之問題，清華大學皆已完成答覆，經審查答覆內容可以接受。THOR 反應器各項組件均能以安全考量或具適當保守性。

第五章 反應器冷卻水系統

一、概述

THOR 冷卻水系統包括一/二次冷卻水系統、一次冷卻水清潔/補充水系統、 ^{16}N 控制系統（功率運轉時之放射性產物）及利用一次冷卻水之輔助系統（用過燃料貯存池），主要功能是透過強制水流冷卻 THOR 池水，將爐心產生之分裂熱能經由一次冷卻水帶出並泵送至熱交換器，該熱能再由二次冷卻水送到冷卻塔散至大氣。

二、審查發現

審查小組提出 RAI 編號 A0-0501，要求澄清一次冷卻水系統與二次冷卻水系統間之熱交換器內部假如產生破裂洩漏，是否有偵測發現之機制。清大說明 THOR 設有每月池水取樣分析程序，可確認熱交換器無微漏狀況；而對於較大破口可能導致冷卻水快速洩漏風險，則可由 THOR 設置於水池之水位警報器進行監測，當水位降低至標準水位 2 吋以下時即會發出現場警報聲。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A0-0502，要求說明二次冷卻水系統中冷卻水處理劑與水中微生物控制劑的成分及作用，以及水質現行處理作法。清大說明冷卻水處理劑內含磷酸鈉、六偏磷酸鈉、胺的醋酸衍生物（EDTA）等物質，用於軟化硬水；水中微生物控制劑主成分為有機胺鹽複合表面活性劑，具有高效殺菌滅藻能力。民國 99 年大修期間於冷卻塔加裝防紫外線濾網抑制水中青苔生成，故不再使用水中微生物控制劑；另每年大修期間定期清洗冷卻塔及換水，近年來鈣化顆粒顯著減少，亦不再添加冷卻水處理劑。未來若源頭水質有劣化情形造成水質過硬或藻類青苔復生趨勢，則視必要性使用相關水中添加劑。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A0-0503，要求說明一次冷卻水淨化後流程。清大答覆從爐心抽出來之一次冷卻水，經由一小水管進入淨化槽除去水中放射性及非放射性雜質後再送回低功率池內，全天候淨化一次水水質，以維持反

應器一次側之設備組件材質狀況。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A0-0504，要求說明除放射性廢液貯存槽外，是否尚有其他設備協助儲存放射性廢液。清大答覆該貯存槽下方為錐形結構，可容納底泥及部分污水。因原始資料指其容量約為 1,000 加侖(約 3,785 公升)，依過往使用經驗實際可容納廢液容量約 3,300 公升，故修訂 SAR 此處容量；另除此容器外並無其他設備協助儲存放射性廢液。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A0-0505，要求圖 5-1 標示與內文統一用字。清大答覆有關圖 5-1 用過燃料貯存池名稱業已修正。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A0-0506，要求修正文字俾符合現行法規名稱。清大已修正為「游離輻射防護安全標準」。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A0-0507，要求依設施運轉現況修正 SAR 文字描述，並說明放射性廢液貯存槽沉澱物所含核種性質、年產量、貯存地點及管理情形。清大已依運轉現況修正文字描述方式，並說明沉澱物經水樣分析主要產物包括鈷、錳等核種，由於沉澱之固化物體積有限，目前暫存於廢水暫槽底之錐型空間，不影響廢水轉送作業。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A0-0508，要求說明 THOR 地下純水處理室有無空浮疑慮、滯留槽地面孔洞流向，以及如何確保冷卻水系統之密閉性。清大說明冷卻水系統為密閉系統，其密閉性係由管路法蘭進行止漏，相關法蘭之巡檢已於民國 108 年進行維護，因此無空浮疑慮。滯留槽底部之孔洞係為排水用途，可將排水輸送至純水處理室最內部之轉送槽。純水處理室所設置之兩個轉送槽可依水樣分析之結果，選擇轉送至放射性廢水暫存場或逕行排放。經審查答覆內容可以接受。

三、結論與建議

本章已充分說明 THOR 冷卻水系統足以移除運轉時爐心產生之分裂熱能；另部份經中子活化產生少量之放射性物質，則在循環系統中被滯留衰變或吸

收後，透過冷卻水再送回水池內，大幅減少洩漏至外界之機率，其核種活度及劑量，亦遠低於游離輻射防護安全標準，符合運轉安全及輻射安全要求。

清華水池式反應器冷卻水迴路
Tsing Hua Open-pool Reactor (THOR) Coolant Circuit

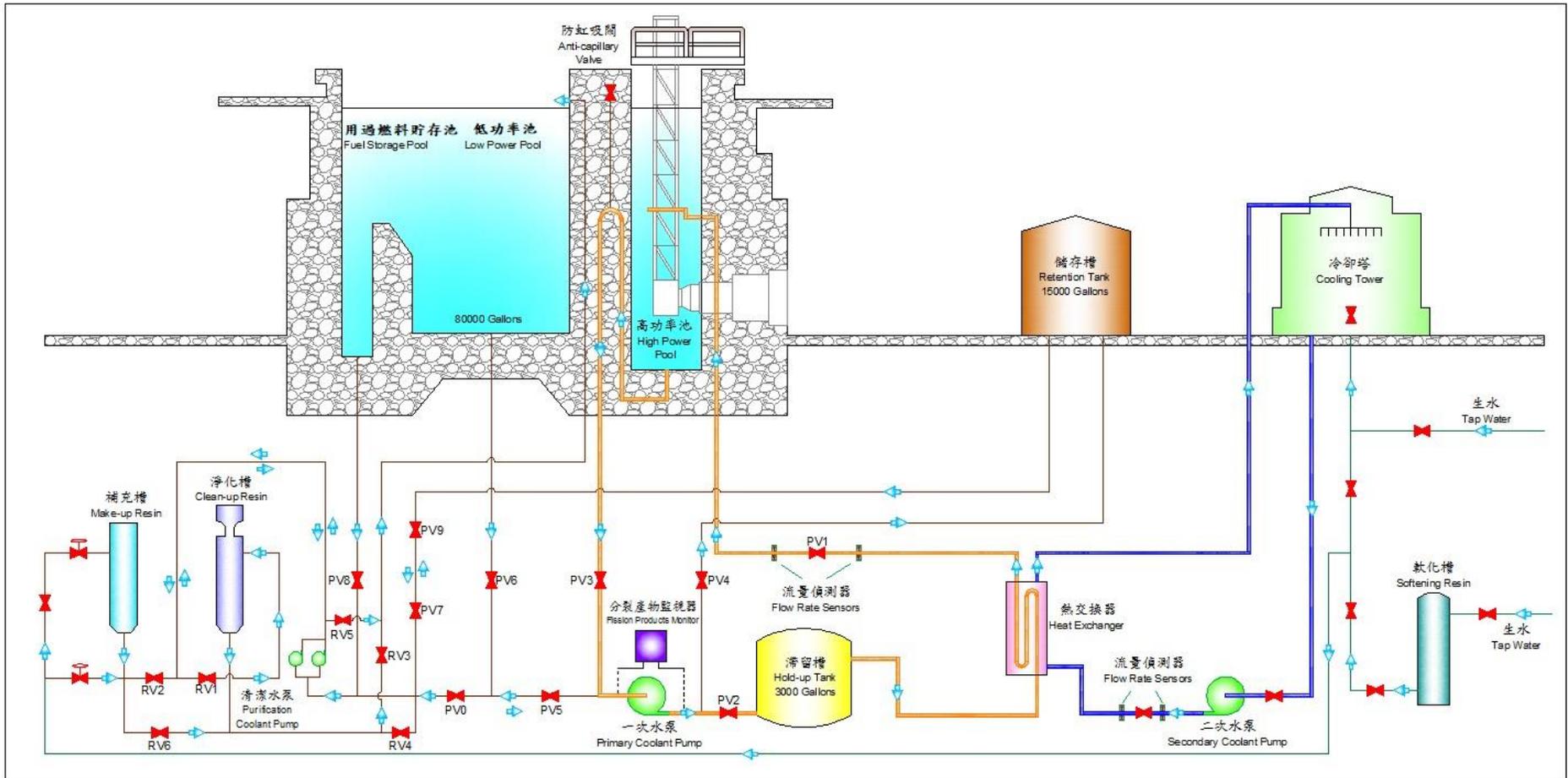


圖 5-1 THOR 冷卻系統流程圖

第六章 特殊安全措施

一、概述

本章內容係關於 THOR 之通風系統、限制體、緊急爐心冷卻系統等。本次 THOR 運轉執照換發申請之修訂部分，主要僅為文字敘述。

二、審查發現

審查小組提出 RAI 編號 A0-0601，要求澄清緊急冷卻用注水的注入是否可被動靠重力傳送，或需主動泵浦加壓傳送。清大說明 THOR 之自來水管路係與高處之台積館與宿舍區連通，可以被動地靠重力補水；另亦曾逕透過三道淨化系統（軟化槽、補充槽與淨化槽）以重力進行補水，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 A0-0602，針對 THOR 爐房內主引風機系統維持負壓能力，要求說明主引風機系統是否定期執行風量量測及 THOR 爐房建築物負壓測試。清大答覆當 THOR 引風機系統啟動後，爐房內部空氣被抽離就會自然形成負壓狀態，爐房內空氣則被導引由煙囪排出，爐房內部負壓狀態僅由運轉員拉開通往爐房的門加以確認，並無要求負壓值及風量定期量測的相關規範；經檢討後，已參照 RAI 編號 A0-0103 說明，於控制室通往爐房入口處加裝負壓計提供運轉人員判讀，在主引風機系統啟動情況下，爐房內部負壓值得以維持 50 pascals 以上。經審查答覆內容可以接受。

三、結論與建議

本章關於 THOR 之通風系統、限制體、緊急爐心冷卻系統等，雖本次之修訂內容僅為文字之修訂，審查小組仍請清華大學針對安全相關之議題再做更詳細說明。清華大學皆已完成答覆，經審查答覆內容可以接受，本設施足以維持爐心水位、防止放射性物質外釋，符合安全運轉要求。

第七章 儀器和控制系統

一、概述

THOR 儀器和控制系統（以下簡稱儀控系統）係用以執行升降反應器功率的控制操作或系統有不正常信號產生時，能迅速以自動或手動方式，使反應器停機，達到反應器運轉操作上的安全。

THOR 儀控系統係由美國 GA 公司所製造，是一種專為 TRIGA 反應器設計的電腦化控制系統，其設計符合美國之聯辦法規。THOR 控制室之儀控系統已於民國 82 年更新為電腦化控制系統，並於民國 90 年更換電腦主機。民國 107 年進行更新升級原有之 NM-1000 廣域中子監測系統，將已停產之 NM-1000 系統的線性功率（linear power）和對數功率（log power）通道分離處理，分別以 NMP-1000 及 NLW-1000 取代之。

THOR 儀控系統主要包含反應器控制台（Control System Console，簡稱 CSC）、兩個獨立的功率監測裝置（NP-1000 及 NPP-1000）、三個獨立的燃料溫度監測裝置、數據取訊電腦（Data Acquisition Computer，簡稱 DAC）、廣域中子監測裝置（NMP-1000 及 NLW-1000）、直接接線（Hardwired）的反應器急停迴路（Circuits）等設備，系統簡化之方塊圖如圖 7-1 所示。

THOR 之運轉係藉由調節四根控制板來控制操作，控制板之調節可以手動或自動方式操作。當反應器有急停情況時，四根控制板利用本身重力，即可迅速插入核心，使反應器停止運轉。THOR 在控制室和實驗設備區域各有一手動急停按鈕，反應器旁也放置裝有鎊片之容器，萬一控制板卡住無法急停時，也可由運轉人員直接將此容器投入爐心，以達緊急停機之目的。

當 THOR 運轉時，發生(1)週期太短；(2)中子通率太高；(3)高壓不足；(4)一次冷卻水無流量；(5)一次水出口溫度太高；(6)水位太低；(7)地震震度過高；(8)控制板電磁鐵失電(含停電)；(9)燃料溫度太高；(10)DAC/CSC 監測信號誤失；(11)電腦當機；(12)手動急停(含電磁鐵鑰匙開關、外部手動急停)；(13)純水處理室及 BNCT 照射室門開啟 等信號現象，均會造成反應器急停，同時

反應器自動控制系統都會發出警報，此時運轉員需檢查異常原因，直至發現原因並確認控制功能正常後，方能再起動反應器運轉。

另外控制系統內設置了六道互鎖信號，其功用是在操作情況異常時，防止控制板往上抽出，以確保運轉安全。這些互鎖包括：(1)急停未復歸；(2)控制板驅動裝置與控制板未耦接；(3)射源階功率低於於 $2 \times 10^{-8}\%$ ；(4)同時按下兩個以上之上昇控制板按鍵；(5)反應器週期小於 7 秒；(6)狀態開關放在脈衝位置（註：目前 THOR 無脈衝功能，但系統仍有保留此互鎖裝置）。

在區域輻射監測方面，THOR 爐房設有區域輻射偵測器及中子輻射偵測系統，控制室及大門入口處並有監測顯示螢幕，使運轉員能夠隨時掌握狀況。如果 THOR 爐房內輻射強度太高，則反應器控制室內區域監測系統警告紅燈會亮警號會響。如果外釋之水中分裂產物量太高，則可由分裂產物監視器測出，若發現分裂產物監視器顯示 ^{87}Kr 、 ^{131}I 、及 ^{137}Cs 等三種核種同時超過偵測器之最小可偵測活度（minimum detectable activity，簡稱 MDA），且其活度均超過 $1.68 \times 10^{-5} \text{ kBq/cm}^3$ 時，表示核燃料有破裂之疑慮，則須立即停爐檢查。此外，BNTC 照射室之中子計數結果也同步顯示於控制室，可同時監控以確保實驗安全。

二、審查發現

審查小組提出 RAI 編號 A0-0701，要求澄清各儀電控制系統的零組件目前是否有取得之困難，是否有供料來源之管理系統隨時掌控各重要的零組件料源。清大說明 THOR 已針對較重要的信號調節器盤面及控制系統週邊進行備援方案的規劃，亦已找到具有豐富經驗的國外資深技師，需要時可請求其支援相關零組件的維修與更新。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A0-0702，要求針對「…廣域中子偵測裝置更新案已陳報主管機關獲核備(民國 108 年 2 月 26 日會核字第 1080001351 號函)…」敘述錯誤，進行修改。清大並依本會審查意見修改為正確之陳述，經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A0-0703，要求清大再檢視 NMP-1000 及 NLW-1000 相關文件，以電磁相容（EMC）設計為例，確認其設計符合所承諾之美國相關聯辦法規要求。審查小組另於現場查證視察發現 NLW-1000 之電源線與訊號線相觸而未維持適當之間距，可能會有電磁干擾（EMI）問題，要求清大檢討改善。清大依本會審查意見及現場查證視察發現，提出答覆說明並進行改善，摘要如下。經審查答覆內容與改善措施可以接受。

(1) 有關現場查證發現 NLW-1000 之電源線與訊號線相觸而未維持適當之間距問題，THOR 已重新檢整電源線，使電源線盡量與其它訊號線維持適當間距；另使用電纜屏蔽編織層（cable shielding braid）包覆 NLW-1000 的同軸訊號線及高壓線，避免電源及外在環境的電磁干擾。

(2) NLW-1000 與 NMP-1000 儀器之設計與開發係遵循 GA 公司電磁系統品質手冊（RMS Quality Manual, Revision V, April 30, 2014），GA 據此執行其相關產品的設計控制，其原則與範疇應可符合 10 CFR 50 附錄 B Criteria III. Design Control 之規範。

(3) GA 公司執行 NLW-1000 及 NMP-1000 電磁相容（EMC）設計適當性確認之方式，係參照 IEEE 7-4-3.2-1993 附錄 C 的系統設計指南（C.2.3 節的電磁干擾系統設計），使用可防止電磁干擾的技術；GA 公司並引用 IEEE 7-4.3.2-1993 附錄 C 建議：「Performance may be demonstrated by a combination of testing, analysis, or documented operating experience in a similar environment」，論述：「在過去 60 多年以來，GA 公司的產品已在 60 多個研究用反應器中累積了相當豐富的運轉經驗，自 1992 年起並開始使用數位儀器，並且從未在 GA 設計的安全系統中遭遇過因電磁干擾而引起的已知事件或可疑事件」。

(4) NLW-1000 與 NMP-1000 雖未執行電磁相容（EMC）驗證測試，但透過符合 10 CFR 50 附錄 B Criteria III. Design Control 規範之品保措施，復以 GA 設計的安全數位儀控系統運轉經驗，未遭遇過「因電磁干擾而引起之已知事件或可疑事件」，可合理確認 GA 產品 NLW-1000 與 NMP-1000 電磁相容（EMC）設計之適當性。

(5) NLW-1000 模組提供「週期太短」反應器急停功能，本身具有一些可用以防止電磁干擾的設計或裝置，可避免其遭受電磁干擾或產生電磁干擾源。然而，假使上述的設計失效或裝置未適當安裝，雖可能導致 NLW-1000 的功能喪失或是 NLW-1000 產生的電磁訊號干擾其它周邊設備或組件，然因 THOR 具備多重且多樣化的安全限制通道之設計，即使部份通道發生電磁干擾而功能劣化或失效，其它安全急停通道仍能持續監測訊號並維繫 THOR 的安全運轉。

(6) 美國 AFRRRI (Armed Forces Radiobiology Research Institute) 研究用反應器所更新的廣域中子監測通道採用與清大 THOR 相同之作法，使用 NLW-1000 與 NMP-1000 來取代舊有的 NM-1000。清大承諾依本會建議，持續關注美國 AFRRRI 研究用反應器之執照修改申請案 (ML20318A339) 的審查情形及結果，如有發現任何與 NLW-1000 與 NMP-1000 相關需要釐清的問題或改善建議，將於該案結案後 2 個月內提報參採狀況予本會核備。

三、結論與建議

THOR 儀控系統於運轉時可顯示反應器之核心動態資料，使運轉人員能一目瞭然，有任何情況可以迅速處理，並設有反應器保護信號與互鎖信號，可預防不當之操作，確保反應器之運轉安全。

THOR 儀控系統於民國 107 年更新原有之 NM-1000 廣域中子監測系統，將已停產之 NM-1000 系統以 NMP-1000 及 NLW-1000 取代之。經清華大學以電磁相容 (EMC) 設計為例，再檢視 NMP-1000 及 NLW-1000 相關文件，確認其設計符合所承諾之美國聯邦法規 10 CFR 50 附錄 B Criteria III. Design Control 規範，可合理確認 GA 產品 NLW-1000 與 NMP-1000 電磁相容設計之適當性，並由分析評估確認 NLW-1000 發生電磁干擾 (EMI) 時，仍可確保反應器安全運轉。

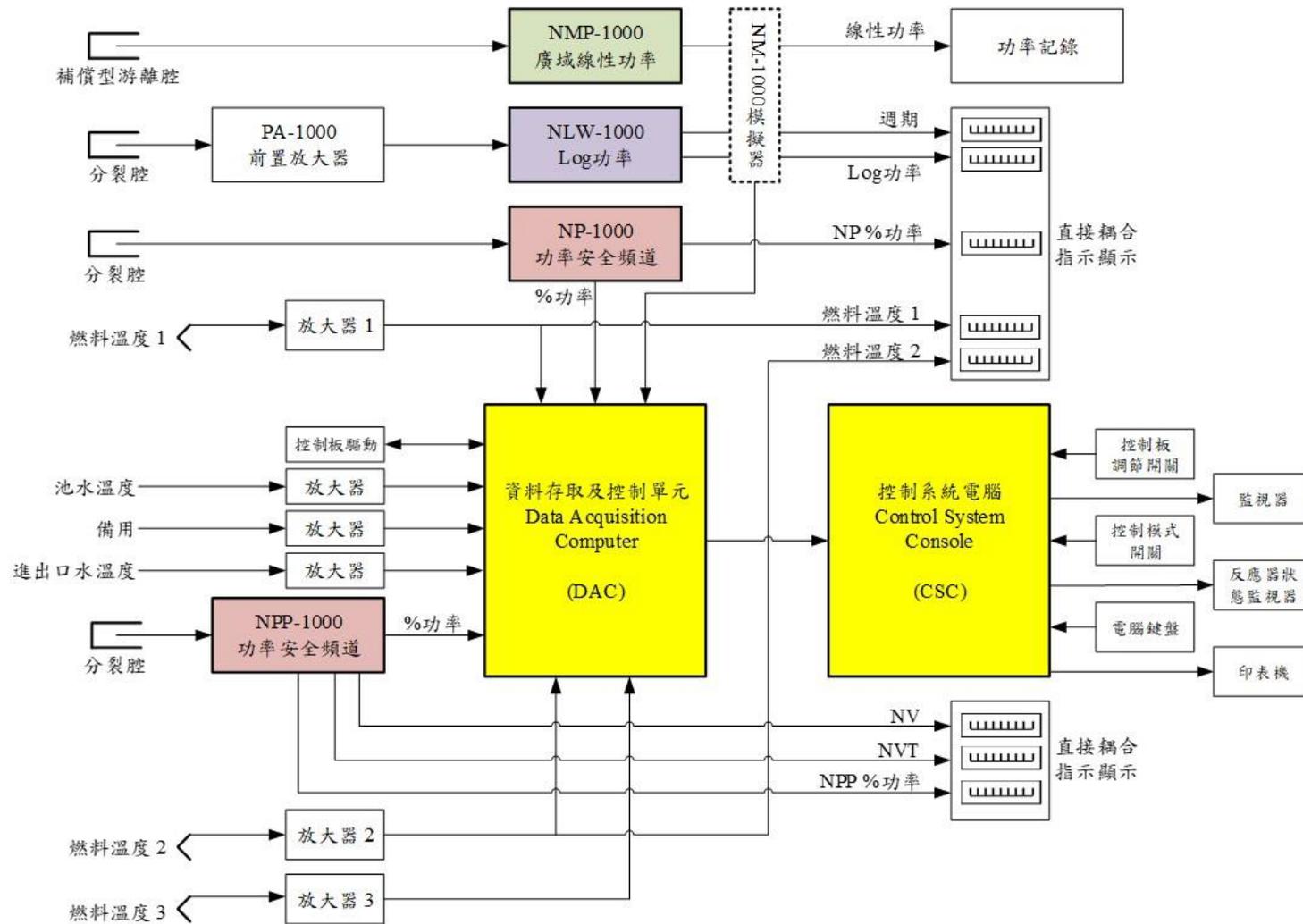


圖 7-1 THOR 儀控系統簡化方塊圖

第八章 電力系統

一、概述

THOR 主要電源係由市電 11.4 kV 電源所供應之，配電分布如圖 8-1 所示，其中連接 11.4 kV 市電有兩個三相變壓器，一個由 11.4 kV 轉 120/208 V (容量 200 kVA)，供電給爐房、參觀台、輻射偵檢儀校正實驗室、其它實驗室、空壓機、起重機、電梯、冷氣及照明等設備使用。另一個由 11.4 kV 轉 440 V (容量 300 kVA)，供電給清潔水泵、一次水泵、二次水泵、冷卻塔風扇、主引風機及實驗設備引風機等設備使用，並經一個單相變壓器 (容量 30 kVA) 將 440 V 轉 110 V，提供 THOR 控制室儀控系統電源。

THOR 另備有緊急柴油發電機組，機組容量為 500 kW，輸出電壓為 440 V。當失去市電時，發電機 440 V 的輸出可直接取代 11.4 kV 轉 440 V 的三相變壓器 (容量 300 kVA) 輸出，並經另一個三相變壓器將發電機 440 V 轉 120/208 V 輸出取代 11.4 kV 轉 120/208 V 的三相變壓器 (容量 200 kVA) 輸出。

THOR 運轉時，若因電源供應失常 (喪失 11.4kV 市電)，緊急備用柴油發電系統會立即自動啟動取代市電。運轉員可藉此做緊急處置，必要時可將核心燃料移至低功率池 (以人力操作，無須電力)，利用低功率池約 2.27×10^5 公升 (60,000 加侖) 水，藉自然對流的方式，將核心燃料衰減熱帶走。然而，即使是發生以上之情況，僅藉高功率池水以自然對流的方式，亦足以將燃料衰減熱帶走，達到爐心冷卻的效果。

二、審查發現

審查小組提出 RAI 編號 A0-0801，現場查證視察發現緊急柴油發電機蓄電池電極腐蝕狀況頗為嚴重，要求澄清緊急柴油發電機定期保養工作雖由校方統一執行，THOR 之運轉單位是否有獨立監控其維護保養如期如質進行；另保養測試人員之輻射風險如何管制。清大說明 THOR 運轉中心會每月簽收存查緊急柴油發電機的保養及測試紀錄副本，可確認緊急柴油發電機有確實測試保養，同時將「蓄電池電極腐蝕狀況」納入「THOR 緊急柴油發電機/中

壓電纜檢查表」。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A0-0802，係針對連接至反應器地下室變電房內之 11.4 kV 地下電纜（中壓電纜），要求說明是否有納入老化管理評估項目或有納入維護檢測項目，監控電纜絕緣狀況，以提升電源之可靠度。清大並依本會審查意見將「中壓電纜絕緣狀況」檢測納入「THOR 緊急柴油發電機/中壓電纜檢查表」，並說明係依台灣區用電設備檢驗維護工程工業同業公會之自備變電站設備竣工檢測及定期維護檢測規範來進行檢測。此外，清大並依本會審查意見，加列變壓器供電相關資訊及配電分布圖於安全分析報告中。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A0-0803，係要求針對報告內容：「 1ϕ 、2W、110V-電源經過特別穩壓處理後專線提供控制室反應器儀控電源使用」，提出補充說明。清大補充說明，為確保 THOR 控制系統之穩定性，THOR 目前採用符合 UL1778 規範之不斷電系統（Uninterrupted Power Supply，簡稱 UPS）系統作為穩壓設備。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A0-0804，係要求針對緊急柴油發電機，確認是否已建置定期測試（含電源供應切換功能測試）及維護措施，並補充說明 THOR 控制室反應器儀控電源喪失下之緊急應變措施。清大說明，除依現場查證視察意見將「蓄電池比重量測、電壓量測、接頭檢查、電池沈澱物檢查及容量測試等」納入「THOR 緊急柴油發電機/中壓電纜檢查表」外，並將自動電源切換系統（ATS）動作測試結果記錄於定期維護保養表中。另經補充分析結果，所設置之 UPS 系統，於喪失外電及緊急發電機供電時，可持續供電（核儀相關設備）之時間（41 分鐘）足以讓運轉員確認機組安全停機。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A0-0805，要求補充說明緊急照明設備配置及確認可供運轉人員及時執行反應器停機作業。清大說明，緊急照明設備屬消防安全設備，有納入定期維護保養，且有合格標章，並由合格廠商安裝，亮度及電池容量分別符合「各類場所消防安全設備設置標準」第 178 及第 177 條

規定。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A0-0806，係針對現場查證視察發現一、二次冷卻水泵之接地線有維護狀況不良之情況，請清大檢討改善。清大已完成一、二次冷卻水泵接地線改善。經審查答覆內容可以接受。

三、結論與建議

THOR 主要電源係由市電供應，並另備有緊急柴油發電機，若因市電供應失常（喪失市電），緊急柴油發電機會立即自動啟動，藉由自動切換開關取代市電。所設置之 UPS 系統，於喪失外電及緊急發電機供電時，可持續供電核儀相關設備，足以讓運轉員確認機組安全停機。故 THOR 之電力系統可確保反應器安全運轉。

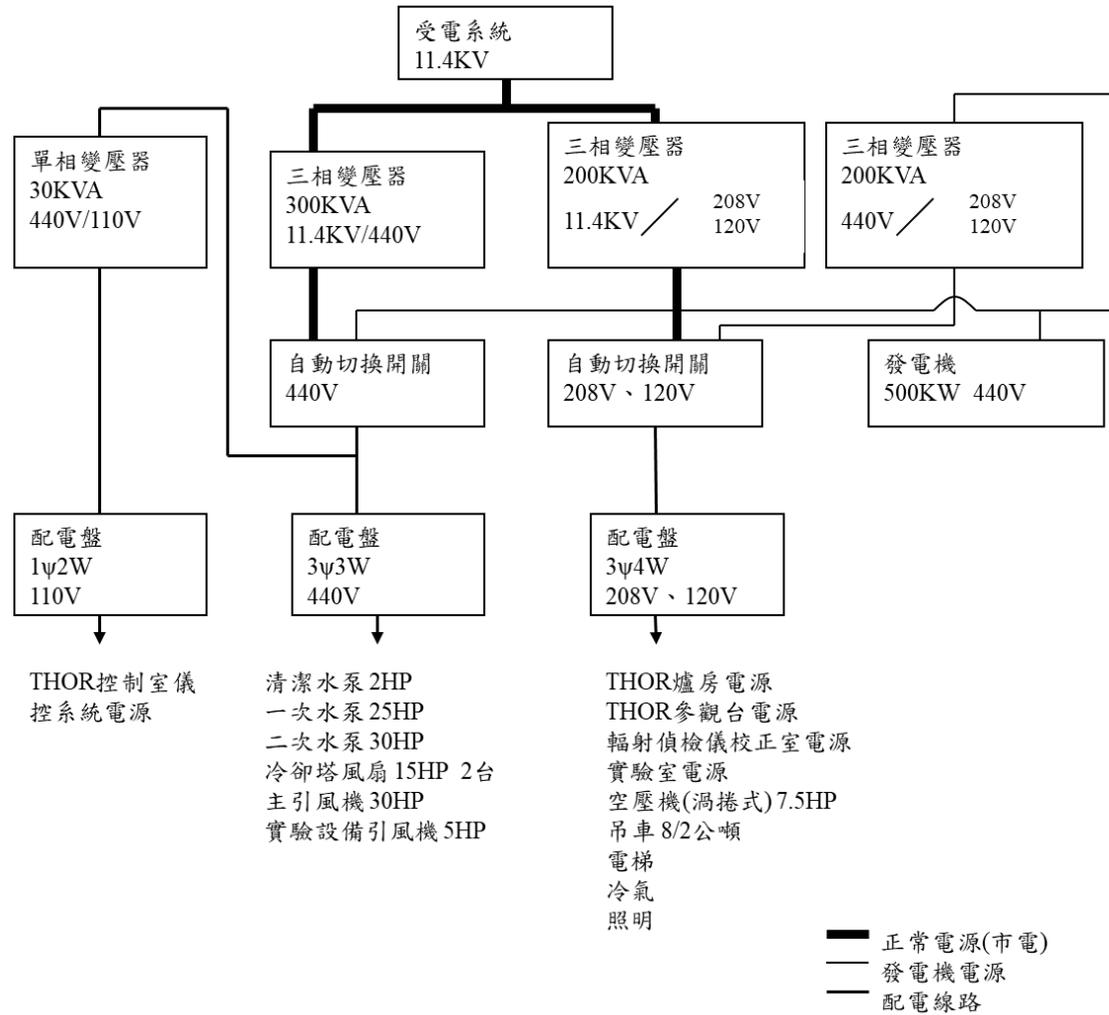


圖 8-1 THOR 配電分布圖

第九章 輔助系統

一、概述

本章內容係關於 THOR 之通風和空調系統、反應器燃料之處理和貯存、防火系統和計畫、通訊系統、一次冷卻水系統密閉氣體之控制、壓縮空氣機、固定式吊車等。本次 THOR 運轉執照換發申請之修訂部分，主要為燃料貯存狀況更新及新增緊急應變中心通訊系統之相關說明。

二、審查發現

審查小組提出 RAI 編號 A0-0901，要求說明 SAR 第 9.3 節防火系統和計畫所提火警受信總機是否有連線至駐警隊，以及夜間火警處理機制。清大答覆火警受信總機已設置連線至駐警隊；另夜間火警處理機制則已於「THOR 緊急事故處理及應變程序書」(THOR-S-04) 增訂事故處理流程。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A0-0902，要求說明 SAR 第 9.6 節一次冷卻水系統密閉氣體之控制有關游離腔監測到一次水中 ^{16}N 強度過高之後續處理機制。清大答覆安裝於一次循環水前端管路旁之 ^{16}N 強度監控裝置，僅做為反應器運轉功率、及一次循環水啟動的參考指標，並無所謂強度過高的處理機制。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A0-0906，要求澄清自製燃料鈎繩構造與使用方法，在吊運燃料過程是否能與水面保持適當距離。清大答覆說明燃料係位於水下約 7m 深，吊運期間，除執行吊掛之人員外，亦需有輻防人員進行觀測與確認，雙重確認燃料吊掛狀況；於燃料起吊後，利用手持偵測設備確認水面之輻射劑量，並對起吊人員警示。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A0-0907，要求澄清 THOR 滅火器配置圖圖面標註與消防器具標示不明。清大答覆說明以顏色標註區分做修改。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A0-0908，有關現場查證發現水處理室內之手提滅火器標示於民國 77 年 5 月換裝藥劑，應澄清其可用性。清大答覆此為海龍滅火器，未訂使用期限，僅須定期檢查充填壓力是否正常，目前此支滅火器壓力值維持在綠色可用範圍。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A0-0903、A0-0904，以及 A0-0905 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。

三、結論與建議

輔助系統主要設置目的係提供適當之工作環境。通風和空調系統可以抑制 THOR 爐房內輻射劑量，保障作業人員健康。通訊系統可讓控制室之運轉員與爐房內之工作人員相互聯絡，以利緊急情況之通報。防火系統藉由火警偵測及平時檢查與定期消防訓練，於火災初期發生時應能發揮滅火之功效。THOR 輔助系統之設置，能使反應器在運轉時更為安全。

第十章 實驗之設施和利用

一、概述

本章內容係關於 THOR 之實驗設施，包括池中照射、氣送系統、矽晶中子植磷管、中子導引管、熱中子室與硼中子捕獲治療、貫穿管、加馬照射室、冷中子源、脈衝反應實驗等設施之說明及使用狀況，也說明 THOR 之論文產量及實驗計畫之審查規定等。本次 THOR 運轉執照換發申請之修訂部分，主要為更新設備使用現況及更新運轉年份及參訪人數等資料。

二、審查發現

審查小組提出 RAI 編號 A0-1001，審查發現人員參訪統計於修訂項目對照表中有新的數據，但 SAR 未更新。清大已更正 SAR 之人員參訪統計資料。經審查答覆內容可接受。

三、結論與建議

本章關於 THOR 之實驗設施之說明及使用狀況，以及論文產量及實驗計畫之審查規定等。THOR 實驗設施能確保實驗之進行而不影響反應器之運轉，實驗之審查能確保反應器安全並減少人員輻射曝露與放射性物質釋出之危險。清華大學已對本會審查意見進行答覆說明，經審查答覆內容可以接受。

第十一章 輻射防護計畫和廢棄物處理

一、概述

(一) 輻射防護計畫

本節審查內容包含輻射源、輻射監測與偵測及環境監測等等，皆依游離輻射防護法及其施行細則、游離輻射防護安全標準為審查依據。

1. 輻射源尚包括惰性放射性氣體 ^{41}Ar ，運轉所產生放射性廢液及淨化槽樹脂所吸附之放射性物質等。
2. 輻射監測與偵測包括 THOR 爐房內輻射偵檢、放射性氣體排放監測管制、放射性液體排放監測管制及人員與劑量的管制。其中，THOR 爐房內例行的輻射防護管制項目、偵測頻率與方式如表 11-1 所示（參考「附錄 G THOR 反應器運轉歷年輻防紀錄」之「3. THOR 例行輻射管制項目與偵測頻率」）。而民國 99 至 108 年間，THOR 運轉時之空間輻射劑量率、空浮濃度、污染等例行輻防管制紀錄如表 11-2（參考「附錄 G THOR 反應器運轉歷年輻防紀錄」之「2. THOR 1.0~1.5 MW 功率運轉例行輻防管制紀錄」）所示。THOR 放射性氣體排放之監測，設置於煙囪內，有可連續自動記錄之區域 γ 輻射偵檢儀，並可監測總 γ 輻射劑量率之變化。每月亦定期以真空取樣器進行對 THOR 運轉時排放至煙囪內的氣體取樣一次，以執行核種分析與活度檢測。產生的放射性廢液，均先經過水處理室內的放射性廢液貯存槽暫時貯存、靜置數天後，經取樣分析核種與活度後，將該液體轉送至廢液處置場貯存，在排放之前必須經過該處置場的輻防人員取樣分析核種活度，並以核種的參考濃度作為排放依據。該校依規定提報 THOR 運轉氣、液體排放報告予主管機關審查，其中氣體排放對民眾所造成的劑量評估，放射性物質排放之擴散分析參考美國 NRC Regulatory Guide 1.111，以此大氣擴散模式以及 ^{41}Ar 劑量轉換因子評估關鍵民眾劑量。民國 99 年至 108 年間 THOR 運轉之氣、液體排放至環境中對民眾所造成的年劑量如表 11-3 所示，而進入 THOR 管制區之所有工作人員依規定均

配戴個人體外輻射劑量配章、每年進行身體檢查乙次及每年定期進行一次全身計測，以作為體內輻射劑量評估。

3. THOR 環境監測是針對管制區外的環境進行輻射偵測，共設置 22 個熱發光劑量計（thermoluminescent dosimeter，簡稱 TLD）偵測站與二座高壓游離腔偵測點當作直接加馬輻射偵測，另以抽氣法、水盤法以及採集土樣、草樣、水樣等進行 THOR 周圍空浮粒子與落塵輻射監測。

（二）廢棄物處理

THOR 所產生的放射性廢棄物，均依放射性廢棄物處理貯存及其設施安全管理規則之相關規定辦理。內容包括目的與受理對象、放射性廢棄物受理之分類及規定、放射性廢棄物受理作業之申請、放射性廢棄物之包裝及標示、放射性廢棄物之受理貯存以及附則。

THOR 所產生的放射性廢棄物數量、核種與活度，均較一般商業用的動力反應器少很多且單純。THOR 所產生的放射性廢棄物可分為氣態、液態和固態三類廢棄物，均依該校放射性廢棄物與處理規則分類作適當的處理，其排放相關管制作業如下：

氣態：反應器運轉時所產生的 ^{41}Ar 放射性氣體經由引風機系統抽氣，再由煙囪排放於外界大氣中，藉由大氣擴散方式加以稀釋。同時利用設置於 THOR 爐房內、煙囪排放口及周圍環境之 24 小時連續自動記錄 γ 輻射偵測系統，隨時監控環境之輻射劑量率的變化。THOR 運轉時將伴隨惰性放射性氣體 ^{41}Ar 產生，根據煙囪底部抽氣取樣測量數據、氣體排放率（ $65,700 \text{ m}^3/\text{小時}$ ）、年運轉時數（保守假設為 1,000 小時）等參數進行劑量評估， ^{41}Ar 排放所造成的總累積劑量不超過 $9\text{E}-03 \text{ mSv}/\text{人年}$ ，遠低於法規限值。

液態：THOR 水處理室所產生的放射性廢液，放射性廢液中所含核種主要係以 ^{58}Co 、 ^{60}Co 、 ^{54}Mn 、 ^{51}Cr ，以及 ^{137}Cs 等，均先經過水處理室內的放射性廢液貯存槽暫時貯存、靜置數天後，再轉送至放射性廢液處置場貯存，廢

液處置場所貯存的廢液在排放之前，必須經過該處置場的輻防人員取樣分析核種活度，並以核種的參考濃度作為排放依據。廢液轉送每年約進行 10~12 次，總轉送量約 30,000 公升，總排放活度約為 6×10^6 Bq。

固態：放射性固態廢棄物產物，包括水處理後的固態陰、陽離子（樹脂）、化學沉澱物、照射後的物品及使用後污染物品（如鋁線、PE 罐、塑膠手套、綿線）等。此一型態之廢棄物係依主管機關制定的放射性廢棄物接收處理注意事項規定包裝，並暫存校內固態放射性廢棄物貯存室貯存，最後再送核能研究所處理。預估 10 年內將更換兩次固態陰、陽離子交換樹脂，其總重量與化學沉澱物合併計算約 200 公斤，鋁線、PE 罐、塑膠手套、棉線等物品總和約 100 公斤。

二、審查發現

（一）輻射防護計畫部分

審查小組提出 RAI 編號 A0-1102，要求說明空浮濃度偵測之紀錄保存。清大說明空浮濃度會記錄於 THOR 管制區內空浮濃度偵測紀錄表，並有程序書管理該作業。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A0-1104，要求說明本章「輻防人員」之定義。清大說明「輻防管制人員」與「輻防人員」有所區別，有建立機制針對不同作業由不同輻防專業人員執行。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A0-1101、A0-1103，以及 A0-1105 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，以及使用「曝露累積劑量」、「輻射安全證書」與「區域空間輻射劑量率」等之統一名詞，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。

（二）廢棄物處理部分

審查小組提出 RAI 編號 A0-1106，針對放射性氣體排放監管，要求清大

將惰性氣體抽氣與排放等流程詳述，並納入 SAR 本文中。清大已於本章完成相關補充修訂。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A0-1107，針對放射性液體轉送，要求清大說明放射性廢液中主要核種組成，以及排放作業相關輻防措施。清大說明放射性廢液主要核種；對於輻防措施方面，除配戴人員輻射劑量計之外，亦於作業期間啟動地下室排風扇將氣體抽離等輻防措施，相關內容已摘要納入 SAR 本文中。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A0-1108，要求說明放射性廢液處理廠房及放射性廢棄物貯存庫之結構安全鑑定結果及頻次。清大說明放射性廢棄物貯存庫已於民國 106 年進行安全鑑定，放射性廢液處理廠房正規畫中，承諾將依結構技師之建議建立鑑定及管理機制。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A0-1109，要求說明地下 1 樓純水處理室出入口未設置門框型污染偵檢器之原因。清大說明純水處理室為封閉式管路所在，正常作業下並無污染疑慮；惟為加強管制，已修正相關作業程序書 THOR-S-02 及 THOR-W-04，當人員離開純水處理室門口，須由輻防人員以污染偵測儀器進行污染偵測，確認無污染後才可離開。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A0-1110，要求說明 THOR 運轉時伴隨產生之惰性放射性氣體 ^{41}Ar ，其排放路徑、排放濃度、對附近館舍之劑量影響以及 THOR 歷年運轉所產生之放射性廢棄物趨勢。清大說明 ^{41}Ar 產生之排放路徑主要由煙囪排出，經量測及計算評估結果，造成的總累積劑量不超過 $9\text{E}-03$ mSv/人年，劑量遠低於法規限值，並列舉歷年 THOR 運轉產生之固、液、氣體廢棄物產量及量測紀錄，說明無異常增加趨勢。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A0-1111，要求說明廢液傳送管路之耐候強度及耐震性，及防範管路及貯存槽意外洩漏措施。清大說明依作業程序書 THOR-W-06，進行放射性廢液轉送前會進行管路完整性之檢測。此外，於純水處理室內之廢水轉送槽，係採槽體設計，其外部尚有一地表洩水收集槽，該槽體即可避免桶槽破損所致溢流。經審查答覆內容可以接受。

三、結論與建議

有關輻射防護部份，對於輻射工作人員之全身劑量計測紀錄、民眾劑量評估等輻防管制紀錄，皆另於「附錄 G THOR 反應器運轉歷年輻防紀錄」中完整紀錄，經審查均符合游離輻射防護法相關規定。有關廢棄物處理部分，經審查均符合放射性物料管理法相關規定。清華大學已對本會審查意見進行答覆說明，經審查答覆內容可以接受。

表 11-1 THOR 例行輻射管制項目與偵測頻率

輻防管制項目	空間輻射劑量率	空浮濃度	污染	氣體排放
偵測頻率	24 小時連續自動偵測	定期：每月一次 不定期：視計畫而定	定期：每月一次 不定期：視計畫而定	1. 劑量率：24 小時連續自動偵測 2. 活度：每月一次
偵檢方式與儀器	空間輻射劑量率儀	濾紙抽氣 低背景總 α 、 β 計測與 HPGe 核種分析	1. 大面積 (α 、 β) 閃爍偵檢儀與試紙擦拭 2. 低背景總 α 、 β 計測與 HPGe 核種分析	1. 區域空間輻射劑量率儀 2. 真空取樣：HPGe 核種分析與活度計測

表 11-2 THOR 運轉例行輻防管制紀錄

項目 年度	THOR 爐房管制區				備註
	空間輻射劑量率 ($\mu\text{Sv/h}$)		空浮濃度 (Bq/m^3)	污染 (Bq/cm^2)	
	實驗照射管與水池上方區域	非實驗照射管等區域			
99	0.18~5.15	0.18~1.05	無人工放射性核種	無污染	*空浮濃度限度： 12 Bq/m^3 *污染限度 α ：0.4 Bq/cm^2 ， β ：4 Bq/cm^2 *空間輻射劑量率 限度：25 $\mu\text{Sv/h}$
100	0.18~5.15	0.18~1.05	同上	無污染	
101	0.18~5.15	0.18~1.05	同上	無污染	
102	0.18~5.15	0.18~1.05	同上	無污染	
103	0.18~5.15	0.18~1.05	同上	無污染	
104	0.18~5.15	0.18~1.05	同上	無污染	
105	0.18~5.15	0.18~1.05	同上	無污染	
106	0.18~5.15	0.18~1.05	同上	無污染	
107	0.18~5.15	0.18~1.05	同上	無污染	
108	0.18~5.15	0.18~1.05	同上	無污染	

表 11-3 THOR 運轉氣、液體排放至環境對民眾所造成的劑量(mSv/人·年)

年度	項目	環境	備註
		民眾劑量(mSv/人·年)	
99		9.50E-04	* 民眾的年有效劑量限度： 1mSv * 劑量評估：民眾劑量係指位於距 THOR 排放煙囪 56 公尺處的原科館(核能科技二館)陽台處，劑量計算係依經原能會核準備查的關鍵群體劑量評估模式計算。
100		1.01E-03	
101		8.74E-04	
102		1.15E-03	
103		8.22E-04	
104		2.43E-04	
105		4.35E-04	
106		1.68E-04	
107		7.85E-04	
108		1.85E-03	

第十二章 管理運作

一、概述

清華大學設置核子設施運轉與輻射防護安全委員會（簡稱核輻安會），主管清華大學核子設施安全管制及輻射防護之監督。THOR 之審查和稽核，包括核子反應器重要安全事項之審查、一般核子反應器安全事項之審查與核准、輻射防護措施計畫之審查，以及輻射防護相關議案等，由核輻安會監督執行。反應器運轉狀況下，若有任何異常事件，操作員以自動或手動方式讓反應器急停。異常事件發生後必須分析找出真正原因並解決，反應器才可以再度啟動。THOR 運轉紀錄須妥善保存，每年提送運轉總結報告給主管機關，若發生異常狀況與反應器安全有關事項，則依照運轉技術規範陳報主管機關。保安計畫依主管機關之規定訂定。為確保 THOR 運轉之品質，訂定品質保證方案，列於 SAR 附錄 E。THOR 所有運轉員或高級運轉員通過主管機關之考核審定並領有運轉執照，當反應器機組或系統更新時，舉辦訓練確定其能勝任反應器的運轉操作。

本章之環境報告說明 THOR 運轉產生之輻射來源，並分別評估：(1) 輻射對 THOR 爐房內工作環境之影響。在放射性氣體方面，煙囪排放的均為 ^{41}Ar ，純水處理室的輻射主要是高功率運轉產生之 ^{16}N ，相關房室之鑰匙於 THOR 運轉時皆有行政管控，以防止誤入。在放射性液體方面，主要來源是純水處理室的再生廢液，於處理後經專用管路傳送至放射性廢液暫存場。在放射性固體方面，主要係純水處理相關的廢樹脂、廢棄的管路設備等，經妥善包裝後暫存於純水處理室內，由輻防人員定期清點並進行輻射偵測。以上造成之劑量皆可符合游離輻射防護安全標準之輻射工作人員年劑量限度規定。(2) 輻射對 THOR 爐房外圍環境之影響。THOR 在功率運轉時，由煙囪排放的主要放射性氣體係 ^{41}Ar ，經估算環境中關鍵群體劑量僅約 $0.48 \sim 9.23 \times 10^{-3} \text{ mSv/年}$ ，符合游離輻射防護安全標準之輻射作業造成一般人之年劑量限度規定。(3) THOR 發生意外事故時對環境造成之影響。THOR 是一個設計上先天安全 (inherently safe) 的研究用反應器，唯一可能有輻射物質外洩的是因燃料處置

不當而造成破損，才會有少量分裂產物釋出影響環境，惟經評估其影響範圍小，對爐房內工作人員及爐房外民眾的輻射劑量仍符合游離輻射防護安全標準之規定。

THOR 緊急應變計劃詳細內容參見 SAR 附錄 D。核子保防係依我國與國際原子能總署簽定之「台灣研究用反應器保防雙邊協定」(INFCIRC/133) 及台、美及 IAEA 三邊保防協定 (INFCIRC/158) 執行保防檢查。

二、審查發現

審查小組提出 RAI 編號 A0-1201，要求說明本次執照更新是否須訂定廣域中子監測系統 NM-1000 更新案對應的起動計劃。清大說明由於 THOR 廣域中子監測系統 NM-1000 更新未牽涉 THOR 爐心燃料佈局變更或裝填新燃料；然而，在正式啟用新系統之前，該新系統也進行相當嚴謹的測試，包括：預啟動測試 (Prestart Tests)、NMP-1000 通道測試、NLW-1000 通道測試、警告測試 (Warning Tests)、以及反應器功率測試 (Reactor Power Tests) 等，以確認新系統之功能可符合原訂目標並確保 THOR 的運轉安全。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A0-1202，有關第 12.12 節「環境報告」僅敘述 THOR 運轉時對現場工作人員之影響，以及 ^{41}Ar 對環境之影響，未有 ^{16}N 、運轉產生之放射性廢棄物，以及設施意外事故對環境之影響的敘述。請清大依 SAR 第 11 章與第 13 章，摘要 THOR 運轉與設施意外事故所產生之放射性物質對環境之影響，並敘述其法規符合性。清大修訂第 12.12 節報告內容，增訂 (1) 輻射對 THOR 爐房內工作環境之影響、(2) 輻射對 THOR 爐房外圍環境之影響、(3) THOR 發生意外事故時對環境造成之影響，經審查可接受；惟再要求提供所述輻射偵檢劑量率數值範圍。清大說明煙囪偵測口的輻射強度則隨運轉功率之升高而增加，高功率運轉時未超過 $0.8\mu\text{Sv/h}$ ，平時未運轉時約 $0.2\mu\text{Sv/h}$ ，符合游離輻射防護安全標準之輻射作業造成輻射工作人員之年劑量限度規定。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A0-1203，要求於第 12.13 節加入無預警視察之說

明。清大說明已經加入無預警視察相關敘述「...補足性進入亦可配合例行檢查為之。此外，IAEA 因近來視察對象之設施增加，為有效率進行視察，正擴大無預警視察，直接前往視察目標設施，係為目前最有利提高核子物質利用透明度的視察作為，IAEA 曾於 103 年 6 月 19 日、106 年 11 月 27 日對我國執行無預警檢查」。經審查答覆內容可以接受。

審查 THOR 保安計畫內容，符合 INFCIRC/225/Revision 5 之相關要求，其內容可以接受。

三、結論與建議

本章係說明 THOR 之管理運作，包含組織架構、審查及稽查機制、管理運作程序、報告、紀錄等，並包含緊急應變計劃、保安計畫、品質保證、組織、運轉員之訓練與資格再審定、起動計劃、環境報告、核子保防等作業方式。其中起動計劃請清華大學釐清廣域中子監測系統 NM-1000 更新案對應的起動計劃，經審查答覆內容可以接受。輻射偵檢劑量率數值範圍經清華大學說明符合游離輻射防護安全標準，經審查答覆內容可以接受。核子保防章節加入無預警視察之說明，經審查答覆內容可以接受。環境報告說明 THOR 運轉產生之放射性廢棄物及發生意外事故對環境之影響，經評估對爐房內工作人員及爐房外民眾的輻射劑量均可符合游離輻射防護安全標準之規定。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，THOR 之管理運作，符合相關法規與品保要求，足以確保 THOR 設施及人員安全。

第十三章 意外事故之分析

一、概述

本章就 THOR 在 2 MW 功率下運轉時，可能發生的假想意外事故及其影響作評估分析，參考 NRC NUREG-1537 Part 2 所述之 9 類意外事故進行分類分析。意外事故分類包括：最大假想意外事故、瞬間快速加入反應度、冷卻水流失、冷卻水流速失常、燃料處置不當或機能失常、實驗異常、正常電力喪失、外來事件，以及處理不當或裝備故障等。THOR 假想中最嚴重之意外事故僅發生於「燃料處置不當或機能失常」中之「燃料裝卸意外事故」。對於瞬間快速加入反應度之意外事故，由於 $U-ZrH_{1.6}$ 燃料具有非常高且瞬發的負反應度溫度係數，此種特性不僅保障燃料本身之完整性，同時也消除了因瞬間加入之反應度而造成燃料損壞之可能性，就算在全功率運轉產生一最大之反應度加入爐內，所產生之最大燃料溫度仍然遠小於其限度 1150°C ；THOR 使用之 TRIGA 燃料不會有任何因為瞬間反應度之加入而產生燃料破損之事件發生。若發生破管致使冷卻水流失時，當池水位低於爐心頂端 5.63 公尺（18.5 呎）以下時，反應爐會自動停機；就算在全功率運轉下發生冷卻水流失之意外事故，其最大之燃料溫度也不致於造成燃料破損或分裂產物外洩，並且在其發生的過程中，需要一段時間事件才會演進至惡化程度，操作人員足以利用其他方式進行補水。冷卻水流速失常事故時，THOR 池水的自然對流亦足以將燃料衰減熱帶走，達到爐心冷卻的效果。燃料處置不當或機能失常所造成之意外事故，包括燃料重新排列、燃料老化效應、金屬與水之反應、燃料裝卸意外事故等，唯一有可能造成放射性物質外洩，而影響環境及人員劑量者，是燃料護套破損，分裂產物氣體外洩，而又發生在空氣中，這種情形可能發生在反應爐停機之後，其中一根或多根燃料棒因為處置不當而發生意外事故導致燃料護套破損之可能危害。在最壞情況下所得到的人員劑量值（無論是在反應爐房內之操作人員，或是非管制區之外界人員）均遠小於「游離輻射防護安全標準」的規定許可劑量。正常電力喪失時，由於燃料仍浸於池水中，對 THOR 而言，並不會對燃料造成影響，亦不會有任何意外事故發生。外來事件，包括颱風、地震或外來事件衝擊等，發生之可能性極低。控制板

故障或破損，導致反應器無法停機時，可於反應器橋上將鎊粒以及鎊片送入照射管並吊入池中，將反應器停機。THOR 純水處理室內的熱交換器內部若產生破損，則一次水中的放射性核種可能混入二次水中，因二次水係封閉管路，並不直接與外界連結，不致於污染外界環境。綜合上述討論多種可能發生之意外事故及假設最壞的情況，唯一可能有輻射物質外洩的是因燃料處置不當造成破損時，才會有少量分裂產物釋出，但仍符合「游離輻射防護安全標準」的劑量限值。

二、審查發現

審查小組提出 RAI 編號 A0-1301，要求澄清由開始發生漏水至水位低於爐心所需 40 分鐘以上，此時間是以何種水位為計算起始點，救援反應時間是否有足夠餘裕；另假如反應器原有可供救援用水源因嚴重自然災害而消失，外部救援用水預估需多久可抵達。清大說明 SAR 所述內容係參考國際間各研究用反應器於極保守之條件作為撰寫之依據，實際條件遠比安全分析告所載條件更長。另目前 THOR 與埔頂消防隊所建立之緊急應變機制，外部救援可於 10 分鐘之內抵達，並最晚於 1 小時內執行（含抵達、列置、狀況確認與應變中心授權等必要程序）補水措施，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 A0-1302，針對本章節部份文字誤植處，請清大修正。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。

審查小組提出 RAI 編號 A0-1303，要求澄清平常操作時是否會有單一人操作的可能性，以及儀控系統的安全限制引發後，操作人員是否有人為撤銷（override）相關互鎖（interlocks）而繼續操作的可能性。清大說明依據「核子反應器運轉人員執照管理辦法」附件一，有關研究用核子反應器運轉人員執勤之最低人數規定，主控制室僅需維持至少一名運轉人員即可，而 THOR 一般情形下會有主控及副控兩位運轉人員輪值。另 THOR 只有在特殊運轉情況才會 override 相關 interlocks，在此特殊運轉情況下，控制室內會至少維持兩名以上的運轉人員。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A0-1304，要求提供第 13.3 節冷卻水流失事故分析「在水位低於爐心三小時之後，燃料溫度才可能到達最高溫度 870°C」之計算書。清大說明該分析係最初依據國際相關文獻為參考，目前無法取得原計算書，惟美國針對 TRIGA 燃料之事故分析（NRC NUREG/CR-2387）亦顯示冷水流失事故並不會導致燃料破損。清大另提出較符實際 THOR 現況估算之熱流分析結果及其計算書，其審查發現詳見 RAI 編號 A0-1309、A0-1310、A0-1311，及 A0-1312。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A0-1305、A0-1307，及 A0-1308，要求針對「燃料裝卸意外事故」提出計算書說明劑量評估模式。清大說明劑量評估模式、大氣擴散模式、劑量轉換因數等佐證，考量 THOR 限制區外圍最接近的館舍為生醫工程與環境科學館，其距離 THOR 約為 56 公尺，評估在爐房外 56 公尺民眾停留 1 小時之有效劑量為 2.43×10^{-5} mSv，遠小於 1 mSv，符合游離輻射防護安全標準之輻射作業造成一般人之年劑量限度規定。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A0-1306，要求說明第 13.8 節「外來事件 - THOR 遭逢颱風、地震或外來事件衝擊時，產生之意外事故」之地震可能造成的結果及是否可被「最大假想意外事故」之後果所涵蓋。清大說明冷卻水流失之評估中，係將地震視為導致 THOR 一次側管路斷管之原因，故其分析結果仍可被其涵蓋。清大並說明參照國外研究用反應器執照更新安全分析報告，最大假想意外事故均是以單一燃料棒因故產生破損的情節進行分析評估，外來事件（地震，颱風或飛航事故）所造成的意外事故均被認定不會超越最大假想意外事故。此外，THOR 所使用的 TRIGA 燃料組件即使單純空冷，也不會有熔毀破損的情形發生，且爐心位置在高功率池底部，受到周邊結構的屏蔽，外力衝擊造成毀損的可能性低，故評估結果認定外來事件無安全上之顧慮。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A0-1309，要求澄清 THOR 冷卻水流失熱流計算書第 3.2 節之案例並未考慮活動式水門將高、低功率池隔離的情境，恐怕不夠

完整也不夠保守。清大說明 THOR 僅有進行年度維修後之功率校正可能將爐心隔離於高功率池，此作業期間係在大修維護並測試後進行，因此不僅發生高功率池失水機率更低之外、有更多運轉員在現場作業、且吊車將持續與水閘門連結等實際狀況。故若 THOR 於功率校正期間發生失水事故時，現場人員將能迅速將爐心挪移至低功率池後再次關閉水閘門，故在分析過程中未將高低功率池分隔之狀況納入考慮。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A0-1310，要求澄清 THOR 冷卻水流失熱流計算書第 3.3 節進行水位變化評估時並未考慮衰變熱對水位之影響。清大說明在事故時間 1,400 分鐘內，衰變熱僅會造成不到 5 cm 之水位減少，溫升效應不顯著。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A0-1311，要求澄清 THOR 冷卻水流失熱流計算書第 5.1 節並未考慮最嚴重之 nearly completely uncovered fuel assemblies 情境。清大針對該情境增加全爐心底部通風阻絕的案例模擬，計算結果顯示燃料最高溫度約 575°C，未達到原安全分析報告所載之 870°C 限值。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A0-1312，要求澄清 THOR 控制室無人值班時之安全防護措施。包括：(1) 若停電時，低水位訊號是否仍能發揮功能，自動通知負責人回來處理；(2) 若池水流失且低水位訊號因故未能發揮功能時，既有的應變程序是否能適切涵蓋此假想情節。(假想情節包括但不限於以下情節：地震造成池水流失且館舍全黑)。清大說明 THOR 在無熱交換器散熱之情況下，對高功率池的加熱所導致的升溫速率約 5°C/h，如果再考慮全池水，則升溫速率更將微不足道，每日的例行巡檢即可確認系統安全無虞。(1) 停電期間，THOR 仍備有柴油發電機與不斷電系統可供低水位訊號自動通知負責人回來處理；(2) 如為斷管事故所造成的池水流失，THOR 備有特殊的安全設計可用以防止爐心裸露，包括：高功率池出水管路之常開式防虹吸閘、低功率池出水口常閉式金屬罩、以及用過燃料儲存池之實體混凝土隔離牆；另已針對地震後程序書進行修訂，以確保無人值班狀況下，若發生地震三級以上、喪失

外電且柴油發電機啟動失敗後，增列巡視機制確保反應器之安全。經審查答覆內容可以接受。

三、結論與建議

本章係評估分析 THOR 運轉時可能發生的假想意外事故及其影響。其中冷卻水流失事故、燃料裝卸意外事故請清華大學提出對應之評估分析基礎，經審查答覆內容可以接受。針對地震可能造成的結果，請清華大學說明是否可被「最大假想意外事故」所涵蓋，經審查答覆內容可以接受。對於停電、地震、池水流失等狀況，清華大學說明 THOR 控制室無人值班時之安全防護措施，經審查答覆內容可以接受。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，THOR 運轉可能發生之意外事故，不會造成工作人員及一般民眾在輻射上之威脅。

第十四章 運轉技術規範

一、概述

THOR 所使用之運轉技術規範，包括 THOR 設施之特性及運轉狀況，這些內容由美國 GA 公司建造反應器時所提供。依據這些運轉技術規範來運作反應器，可防範操作上之誤動作，且當發生事故或不正常運轉之情況時，對群眾之影響能降至最低。運轉技術規範內容，另於章節「附錄 C」中詳細敘述。

二、審查發現

詳見附錄 C 章節。

三、結論與建議

詳見附錄 C 章節。

第十五章 財務驗證

一、概述

THOR 主要運轉目的係支援教育及研究工作，經費來源主要由校務基金年度預算支出，其餘較大之維護經費（如設施除役），則須申請專款支出，使其在最大安全許可下維持運轉。

二、審查發現

審查小組提出 RAI 編號 A0-1501，要求說明 THOR 運轉期間之人事及維修費用來源。清大答覆該費用均來自校務基金。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A0-1502，要求說明 THOR 除役期間之經費來源。清大答覆該費用將向教育部、科技部或其他國家核能科技相關單位申請專款支出。經審查答覆內容可以接受。

三、結論與建議

本章係依據 NRC NUREG-1537 Part 2 要求撰寫之章節。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。

第十六章 其他執照方面之考量

一、概述

本章內容包含先前反應器組件之利用、醫學應用，以及老化管理等三部分。

有關「先前反應器組件之利用」部分，係考慮 THOR 在執照更新期間與更新後，利用其他反應器接收組件或使用原先系統組件，仍足以維持安全運轉。由於 THOR 並無接收任何外來之反應器組件，故僅對使用原先系統組件部分加以評估。燃料護套完整性之喪失為 THOR 之設計基準事故，本章即由燃料護套損壞可能的機械性質，評估確認使用此原有系統組件仍足以維持安全運轉。燃料護套損壞可能之機械性質有：(1) 輻射造成護套強度退化；(2) 高溫造成之內部高壓，導致應力超過護套之彈性限度；(3) 腐蝕與浸蝕作用造成護套薄化或局部弱化；(4) 由於移動操作或實驗所造成之機械損壞；(5) 安全元件或系統之退化。清華大學評估結果，THOR 之燃料護套均不會發生上述 5 項現象。另從 THOR 燃料使用歷史觀之，自 1977 年起，以部份 TRIGA 型燃料取代 MTR 型燃料，至 1987 年已全部更新為機械性質更佳之 TRIGA 型燃料，使用至今也未發現燃料破損現象，分裂產物監視系統顯示均無任何異常狀況，定期取樣水質核種分析皆正常。THOR 之 SAR 是以上述說明來確定在申請執照更新之期間，THOR 可安全運轉無虞。

有關「醫學應用」部分，所提設施是 THOR/BNCT (Boron Neutron Capture Therapy, 硼中子捕獲治療)，其改建及輻射與安全測試報告詳如附錄 B 說明，另有章節審查。

有關「老化管理」部分，係依核子反應器設施運轉執照申請審核辦法第 17 條規定，於核子反應器設施運轉執照之換發申請時，須報請主管機關審核之資料。本次 THOR 運轉執照換發申請，清華大學依法提送「國立清華大學水池式反應器老化管理評估報告」予本會審查。THOR 老化管理評估報告參考美國聯邦法規 10 CFR 54.21(a)，將 THOR 研究用反應器之結構、系統及組件分為三類，共計 18 項。第 I 類定義為與主結構體並涉及冷卻水流失事故之

組件，需採維護與監測方式確保其可用性，如：(1)廠房或圍阻體 (2)反應器冷卻水邊界。第 II 類定義為與冷卻水流失事故相關，但可經由排程來進行維修之組件，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 類定義為與冷卻水流失事故無關，且可透過市售品、訂製品或模組進行維護更換之組件，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。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，並依其檢查結果進行老化評估說明。清華大學評估於執照更新後之運轉期間，THOR 研究用反應器各結構、系統及組件可維持反應器安全運轉所需功能。SAR 第十六章為綜整摘述「國立清華大學水池式反應器老化管理評估報告」之評估結果，另有安全評估報告 (NRD-SER-110-02) 審查。

二、審查發現

審查小組提出 RAI 編號 A0-1601，要求澄清若碳化硼確實有持續緩慢流失的現象，有關控制板總反應度的異常，在相關程序書上是否有明確指示發生此現象的後續應遵行步驟。清大說明 THOR 的控制系統中與控制板相關的參數即是臨界棒位，依據 THOR 運轉程序書在每次運轉時運轉人員應記錄每根控制板的臨界棒位。控制板的能力是否異常，可透過相同功率的臨界棒位是否下降來做判斷，如果達到相同功率的臨界棒位有明顯下降的情況，則必須進行控制板校正以確認其安全停機餘裕是否足夠。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A0-1602，要求澄清高功率池內壁鋁合金襯板孔

蝕深度的判斷方式，以及歷次追蹤檢測紀錄情形。清大說明孔蝕深度係由檢測人員就拍攝檢測影像之比對物及被評估物比例，以及參照附錄 A 之 A-4 頁相關依蝕孔形態與觀測之直徑進行評估判定，另訂程序書已建立孔蝕之監測接受標準；另依歷次檢測結果，孔蝕情形並無顯著差異，檢測結果均記錄於檢測錄影，目前程序書已規範建立監測基準影像與參照對象，以及針對檢測發現與記錄其形態、分佈、尺寸等幾何特徵與量化資訊等之紀錄要求。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A0-1603，要求澄清對於民國 108 年水底目視檢查結論摘錄(8)及檢測單位相關建議等之後續處理因應情形。清大說明已修訂安全分析報告內容，將對於相關檢測提議之處理方式納入。經審查答覆內容可以接受。

三、結論與建議

「先前反應器組件之利用」部分，自 1987 年更新之 TRIGA 型燃料，使用至今未發現燃料破損現象，分裂產物監視系統顯示均無任何異常狀況，定期水質取樣核種分析皆正常，燃料護套損壞可能之機械性質皆不會發生，本項同意 SAR 之分析結果，在申請執照更新之期間，THOR 燃料護套可安全運轉無虞。「醫學應用」部分，審查結論詳如本報告之附錄 B。「老化管理」部分，審查結論詳如「國立清華大學水池式反應器老化管理評估報告」之安全評估報告(NRD-SER-110-02)。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。

第十七章 THOR 之初步除役規劃

一、概述

THOR 除役之進行方式主要分為立即拆除及遲延拆除兩種，選擇立即拆除係以工作人員接受較大輻射曝露劑量，以換取廠址及廠設施較迅速地開放作無管制的使用，選擇遲延拆除則希望工作人員所接受的輻射曝露劑量減少，並且有較少的放射廢棄物。基本上，兩者在進行的拆除工程步驟程序及範圍上是相同的，差別僅在於後者在反應器停機後至除役之期間，有一安全貯存期（通常是 10 年以上）。

在經費上，雖然遲延拆除可以節省大量的放射廢棄物處理與處置費用，但根據文獻資料，因牽涉到 THOR 安全貯存與費用之通貨膨脹率及貼現率（假設分別為 6 %、10 %，但實際變動率無法預知）的問題，造成遲延拆除所需費用反較立即拆除方式進行除役所需費用為高。以下是以立即拆除之除役來評估 THOR 之除役時程與預算。

THOR 之除役時，拆除工程分為五個主要範圍：計畫與準備、除污、解體運輸、拆毀及廠址整建造景。由於 THOR 除役工作是一項大工程，許多工作會在廠內同時進行，故未來在除役計畫書當中，會詳細表列廠內各項解體工程的順序時程。

THOR 已提出除役費用評估摘要表，其中用過燃料運送費用尚需與契約廠商實際商談後，方能有較確切的評估，該項費用會有較大的變動。另詳細的列出活化放射性物料處理與處置、反應器內部組件處理與處置、其他系統內部組件處理與處置、放射性廢棄物處理與處置、人事費用、特殊儀器設備與工具、雜項支出、建築物拆毀（不具輻射污染）等項目之費用評估。

除役工作所需費用佔較大比例的項目有：用過燃料運送（8.1 %）、用過燃料處置（15.1 %）、活化放射性物料處理與處置（10.9 %）、反應器內部組件處理與處置（7.7 %）、其他系統內部組件處理與處置（18.2 %）及人事費用（18.2 %），費用為 603.38 百萬元。另外，加上 20 %之臨時費，以應付因除役前無

法精確估算活化放射性物料、反應器內部組件、其他系統內部組件、放射性廢棄物數量所導致之額外處理與處置費用，或用過燃料運送及用過燃料處置費用之調漲，或其他臨時的處理與處置費用，故其所需總費用為 724.06 百萬元。

保留建物闢為紀念博物館之預算概估：THOR 係國內第一個建造之核子反應器，為紀念梅故校長，亦稱 THOR 之建築物為梅貽琦先生紀念館。雖然保留 THOR 建物闢為紀念博物館每年所需之費用總計為 10.48 百萬元，若燃料不運送至美國，則每年必須增加專業保養人員及管理人員各一位，人事費用必須增加 2.00 百萬元，每年所需費用總計由 10.48 百萬元增為 12.48 百萬元。但若估計燃料運送及燃料處理與處置費用，以及先期廠房部分設施除污及輻射偵測費用（估計約需 14.87 百萬元）在內，則所需經費仍相當可觀。

二、審查發現

審查小組提出 RAI 編號 A0-1701，要求依核管法規定，明確說明「核子反應器設施之除役，應採取拆除之方式，並在主管機關規定之期限（25 年）內完成」。清大修訂報告內容，說明 THOR 的除役將傾向以立即拆除為目標，預計在永久停止運轉後，三年內完成除役。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A0-1702，要求依核管法規定，明確說明 THOR 反應器除役後，場址土地之未來利用規劃為限制性使用或非限制性使用之方式。清大說明 THOR 目前的除役規劃是以非限制性使用為目標。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A0-1703，要求除役計畫之提出時機與除役計畫之內容應依核管法規定，於核子反應器設施預定永久停止運轉之三年前提出，因故不繼續運轉時，應於永久停止運轉後三年內提出，並參考「核子反應器設施除役計畫導則」內容撰擬。清大說明將依法辦理，實際提出除役計畫將依照當時狀況重新進行規劃與評估。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A0-1704，要求說明除役預估費用之估算依據，

並比對國際上有無同型設施完成除役作業之費用參考資料。清大說明係參考“江祥輝，核能電廠除役技術研究”並援引“R. I. Smith G. J. Konzek W. E. Kennedy, Jr., Technology, Safety and Costs of Decommissioning a Reference Pressurized Water Reactor Power Station, NUREG/CR-0130 (1978)”報告，另以 THOR 同類型且熱功率大於 1 MW 的 TRIGA 反應器為例，說明 THOR 目前概估的除役經費應屬合理範圍。經審查答覆內容可以接受。

三、結論與建議

THOR 之初步除役規劃已敘明時程、拆除工程順序、所需人力並規劃可於 3 年完成除役作業。另相關費用也予以估算，並對場址土地利用提出規劃方案。審查期間所提問題，經審查清華大學之答覆說明可以接受。未來實際執行之前，仍需依本會相關之規定提出申請，屆時將詳細審查，經核准後才能實施。

第十八章 審查總結

一、審查結論

本次係清大 THOR 之第三次運轉執照換發申請(第 60 至 70 年間之運轉)，經外聘專業審查委員與本會各局處審查委員審查，所提審查意見清華大學均已答覆說明及修訂報告，經審查可以接受。各章節之審查結論與建議，彙整摘述如下：

第 1 章 設施：充分說明 THOR 近 10 年來之設施相關變化、統計資料及現況，針對國際間運轉超過 60 年之研究用反應器亦已條列說明，內容完整且敘述詳實。

第 2 章 現場特質：已充分說明歷史紀錄範圍內之強風、豪雨或地震等自然災害，均不會對 THOR 結構、系統和組件造成影響。

第 3 章 結構、系統和組件之設計：THOR 結構、系統和組件之設計內容，符合美國核能工業相關規範及標準，歷史紀錄範圍內之最大強風、豪雨或地震等外在因素，均不會影響反應器運轉安全。

第 4 章 反應器說明：THOR 反應器之燃料、控制板、緩和劑和反射體、射源、核心支架、水池、生物屏蔽、爐心設計、熱流設計、輻射對水池材料之影響評估等。審查小組所提出之問題，清華大學皆已完成答覆，經審查答覆內容可以接受。THOR 反應器各項組件均能以安全考量或具適當保守性。

第 5 章 反應器冷卻水系統：本章已充分說明 THOR 冷卻水系統足以移除運轉時爐心產生之分裂熱能；另部份經中子活化產生少量之放射性物質，則在循環系統中被滯留衰變或吸收後，透過冷卻水再送回水池內，大幅減少洩漏至外界之機率，其核種活度及劑量，亦遠低於游離輻射安全標準，符合運轉安全及輻射安全要求。

第 6 章 特殊安全措施：本設施足以維持爐心水位、防止放射性物質外釋，符合安全運轉要求。

第 7 章 儀器和控制系統：THOR 儀控系統於運轉時可顯示反應器之核心動態資料，使運轉人員能一目瞭然，有任何情況可以迅速處理，並設有反應器保護信號與互鎖信號，可預防不當之操作，確保反應器之運轉安全。

第 8 章 電力系統：THOR 主要電源係由市電供應，並另備有緊急柴油發電機，若因市電供應失常導致反應器急停，緊急柴油發電機會立即自動啟動，藉由自動切換開關取代市電。所設置之 UPS 系統，於喪失外電及緊急發電機供電時，可持續供電核儀相關設備，足以讓運轉員確認機組安全停機。故 THOR 之電力系統可確保反應器安全運轉。

第 9 章 輔助系統：輔助系統主要設置目的係提供適當之工作環境，能使反應器在運轉時更為安全。

第 10 章 實驗之設施和利用：THOR 實驗設施能確保實驗之進行而不影響反應器之運轉，實驗之審查能確保反應器安全並減少人員輻射曝露與放輻射物質釋出之危險。

第 11 章 輻射防護計畫和廢棄物處理：有關輻射防護部分，對於輻射工作人員之全身劑量計測紀錄、民眾劑量評估等輻防管制紀錄，皆另於附錄 G 中完整紀錄，經審查均符合游離輻射防護法相關規定。有關廢棄物處理部分，經審查均符合放射性物料管理法相關規定。

第 12 章 管理運作：本章係說明 THOR 之管理運作，包含組織架構、審查及稽查機制、管理運作程序、報告、紀錄等，並包含緊急應變計畫、保安計畫、品質保證、組織、運轉員之訓練與資格再審定、起動計畫、環境報告、核子保防等作業方式。環境報告說明 THOR 運轉產生之放射性廢棄物及發生意外事故對環境之影響，經評估對爐房內工作人員及爐房外民眾的輻射劑量均可符合游離輻射防護安全標準之規定。THOR 之管理運作，符合相關法規與品保要求，足以確保 THOR 設施及人員安全。

第 13 章 意外事故之分析：本章係評估分析 THOR 運轉時可能發生的假想意外事故及其影響，THOR 運轉可能發生之意外事故，不會造成工作人員

及一般民眾在輻射上之威脅。

第 14 章 運轉技術規範：詳見附錄 C 章節。

第 15 章 財務驗證：本章依據 NRC NUREG-1537 Part 2 要求撰寫。清華大學說明 THOR 運轉期間人事及維修費用來源，以及未來除役經費申請來源，審查結果可以接受。

第 16 章 其他執照方面之考量：「先前反應器組件之利用」部分，自 1987 年更新之 TRIGA 型燃料，使用至今未發現燃料破損現象，分裂產物監視系統顯示均無任何異常狀況，定期水質取樣核種分析皆正常，燃料護套損壞可能之機械性質皆不會發生，本項同意 SAR 之分析結果，在申請執照更新之期間，THOR 燃料護套可安全運轉無虞。「醫學應用」部分，審查結論詳如本報告之附錄 B。「老化管理」部分，審查結論詳如「國立清華大學水池式反應器老化管理評估報告」之安全評估報告（NRD-SER-110-02）。

第 17 章 THOR 之初步除役規劃：已敘明時程、拆除工程順序、所需人力並規劃可於 3 年完成除役作業。另相關費用也予以估算，並對場址土地利用提出規劃方案。未來實際執行之前，仍需依本會相關之規定提出申請，屆時將詳細審查，經核准後才能實施。

附錄 A 鋁合金材料的完整性：延續 THOR 初次申請執照更新時之評估，增加每 5 年定期目視察檢查結果，未有明顯劣化情形。清華大學將持續保持水質純淨以抑低鋁合金腐蝕之速率，並配合相關定期檢查，可確保鋁合金之完整性。

附錄 B BNCT 設施及醫療程序：THOR 是可提供大量、穩定且安全的中子源設施，其輻射作業應依循所提報之輻射防護計畫切實執行，落實合理抑低措施，在 BNCT 達到醫療效果的同時，確保人員與環境之輻射防護安全。

附錄 C 國立清華大學水池式反應器運轉安全技術規範：THOR 之運轉安全技術規範係用以確保反應器安全地運轉操作，不危害到反應器設施周圍工作人員及一般民眾之安全及健康。THOR 運轉技術規範已能涵蓋各項安全限

制、檢測及行政管理要求，足以規範 THOR 在安全之條件下運作。

附錄 D 清華核子設施管制區域緊急應變計畫：本次針對緊急應變組織編組與職責分工、緊急應變場所與設備、平時整備、緊急應變行動、復原措施等進行審查，其內容均符合妥善因應緊急事故所需，符合核子事故緊急應變法與研究用核子反應器設施緊急應變管制辦法相關規定。

附錄 E 品質保證方案：THOR 品質保證方案主要內容範圍為：(1)設計、建造與修改，以及(2)反應器運轉，經審查方案主要項目可符合 ANSI/ANS-15.8-1995 所述，並將 Regulatory Guide 2.5 納為品保方案建立依據，可符合國外一致性作法。

附錄 F THOR 運轉程序書：所提 THOR 之運轉程序書，已明確規定 THOR 正常起動、運轉、停機及異常狀況之處理程序，符合安全運轉要求。

附錄 G THOR 反應器運轉歷年輻防紀錄：對於輻射工作人員之全身劑量計測紀錄、民眾劑量評估等輻防管制紀錄，皆已完整紀錄，均符合游離輻射防護法相關規定，經審查可以接受。

附錄 H 核輻安委員會審查 THOR 執照換發文件結論：清華大學核輻安委員會針對 THOR 執照換發事宜所討論之重要項目，均已於 THOR 安全分析報告及老化管理評估報告相關章節中描述與評估。

綜合上述，針對本案清華大學 THOR 運轉執照換發申請所提「國立清華大學水池式反應器運轉執照更新安全分析報告」進行審查，審查結果可以接受，並有下列一項列為後續追蹤管制項目。

二、後續管制要求

無。

附錄 A 鋁合金材料完整性

一、概述

THOR 採用 6061T6 鋁合金做為主要結構材料，應用範圍包括反應器鋁襯池壁、爐體懸吊支撐結構、實驗管以及爐心格架等。根據國外文獻資料，研究用反應器鋁合金材料運轉多年後，曾有孔蝕與塊蝕等腐蝕現象，導致發生鋁襯池壁穿孔漏水、焊道薄化或燃料護套破損等情事，其腐蝕劣化現象，肇因除為材料本身既有缺陷外，外在環境之水化學性質亦屬重要因素。

THOR 於民國 83 年進行水質改善工程，降低爐水導電度；民國 86 年委託核能研究所針對 THOR 組件進行目視檢測，檢測結果發現若干水池襯套鋁合金腐蝕現象及燃料格架裂痕情形，已於民國 87 年更換新燃料格架。此後 THOR 持續將水質控制列為因應鋁合金材料老化工作之重點事項。

附錄 A 原係 THOR 運轉 40 年初次申請執照更新時之評估，內容主要以民國 86 年目視檢查結果，以及民國 83 年 THOR 池水水質改善成果等作為討論內容，此次執照更新申請增加每 5 年定期目視察檢查結果（民國 93 年、98 年、103 年、108 年），說明未有明顯劣化，因此評估在良好管制使用下，鋁合金材料可持續正常運作，無老化致使安全性堪慮之問題。有關 THOR 老化管理議題，清華大學已於本次運轉執照換發申請，依核子反應器設施運轉執照申請審核辦法第 17 條，陳報「國立清華大學水池式反應器老化管理評估報告」予本會審查，審查結論詳見安全評估報告 NRD-SER-110-02。

二、審查發現

審查小組提出 RAI 編號 A0-0A01，要求澄清內部組件目視檢查是否有就各處蝕孔深度及爐心方盒角落上的裂縫作出檢查評估，並與前期結果進行比對探討。清大說明歷次內部組件之目視檢測均顯示無劣化情形，故無需進一步評估，而民國 87 年已經進行爐心格架與相關組件之更新，更新後的組件並未發現裂縫問題。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A0-0A02，有鑑於鋁合金材料腐蝕速率受水質影

響，附錄 A 敘述 THOR 爐水淨化由除礦槽系統每日 24 小時進行，惟查 THOR 僅每週運轉 2 天，每次約 8 小時，應再澄清淨化作業實際執行情形。清大說明平時無論反應器是否運轉，THOR 池水皆會持續進行淨化，因此確實為 24 小時進行；惟僅當 THOR 進行年度大修作業，執行冷卻水系統相關維修時，因安全考量會暫時關閉該系統，但水質檢測作業仍遵循主管機關要求，每隔 7 至 10 日檢測確認池水品質。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A0-0A03，有關 THOR 鋁合金材料目視檢測，附錄 A 敘述於民國 93 年、98 年、103 年、108 年均進行檢測，應再補充最近一次執行結果，是否有蝕孔增加或明顯劣化現象。清大答覆為確保各處鋁襯狀況，檢查作業係委託核能研究所對所有檢測範圍進行編碼並檢查，透過歷年同處影像紀錄之比對，孔蝕數量與分佈並無明顯增加與劣化現象。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A0-0A04，日本 JRR-4 研究用反應器水質導電度規範上限為 1 S/cm，請清大再說明 THOR 水質控制成效。清大提供 2019 年至 2020 年池水導電度變化圖，圖中顯示池水導電度變化範圍在 0.3 至 2 S/cm 間，近期數值皆在 0.5 S/cm 附近。清大說明已依主管機關 2019 年視察建議調整池水檢測頻次，可更有效維持池水品質，近期池水品質均較過往為佳。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A0-0A05，有關附錄 A 敘述 THOR 高功率池鋁襯池壁上孔蝕經檢測人員目視判斷達 1 mm，針對目視判斷深度之適切性，由於目視檢測不具有瑕疵/缺陷深度量測的能力，此為檢測方法技術本質上的限制，故請清大修正附錄 A 報告敘述內容。清大已修訂報告敘述，移除以目視判定深度之描述。經審查修訂結果可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A0-0A06，有關 THOR 爐心燃料格架塊蝕跡象與裂縫問題之解決，附錄 A 說明已於民國 87 年完成燃料格架更新，應再補充後續檢測結果。清大說明根據民國 98、103、108 年水底目視檢測結果，新爐心格架並未發現類似塊蝕現象與裂縫問題，應無疑慮。經審查答覆內容可以接

受。

審查小組提出 RAI 編號 A0-0A07，THOR 控制板為碳化硼與純鋁之燒結物，經檢查發現有材料劣化流失情形，雖附錄 A 說明可由反應器臨界時控制板高度、每年控制板本領校正，以及每 5 年目視檢查等了解控制板碳化硼流失情形，惟再建議清大再增加定期水質監測作法。清大說明水中硼元素可藉由相關設備(如：感應偶合電漿-原子放射光譜，Inductively Coupled Plasma with Atomic Emission Spectroscopy，簡稱 ICP-AES) 進行定量分析，配合水質檢測作業每月取樣並將數據留存備查。經審查答覆內容可以接受。

三、結論與建議

附錄 A 內容延續 THOR 初次申請執照更新時之評估，增加每 5 年定期目視檢查結果(民國 93 年、98 年、103 年、108 年)，未有明顯劣化情形。清華大學將持續保持水質純淨以抑低鋁合金腐蝕之速率，並配合相關定期檢查，可確保鋁合金之完整性。附錄 A 所提審查意見清華大學均已答覆說明，內容經審查可以接受。

附錄 B BNCT 設施及醫療程序

一、概述

利用硼-10 與中子發生作用，放出輻射線以殺死腫瘤細胞的同時，卻又不嚴重影響正常組織細胞，是硼中子捕獲治療 (Boron Neutron Capture Therapy, 簡稱 BNCT) 的基本精神所在。BNCT 的治療過程可分成兩部分：首先是在腫瘤部位聚集穩定的同位素硼-10，再利用熱中子照射腫瘤部位。所謂熱中子 (Thermal Neutron) 是指能量較低的中子 (通常是指能量在 1 eV 以下的中子)。由於熱中子與硼-10 之間的捕捉機率，遠大於熱中子與細胞主要組成 (碳、氫、氧、氮) 之間的捕捉機率。因此，大部分照射在腫瘤部位的熱中子皆與硼-10 發生反應，並迅速放出高能量的鋰-7 及 α 粒子。由於鋰-7 及 α 粒子在組織細胞中的最大移動距離分別只有 $5\mu\text{m}$ 和 $9\mu\text{m}$ ，此一距離與一個細胞的大小相當，因此，若能控制中子與硼-10 的反應發生在腫瘤細胞內，則腫瘤細胞將被硼中子反應所產生的高能量粒子摧毀，正常組織細胞所受到的傷害相對較小。

THOR 是台灣第一座、也是目前唯一仍在運作的研究用核子反應器。從 1961 年臨界運轉至今，已經歷 59 年的運轉歷史。在 2001 年，為了整合清華大學 BNCT 研究團隊，並支援國內 BNCT 相關研究照射，遂向當時國科會申請通過「改建 THOR 做為 BNCT 醫療設施」的整合型研究計畫。歷經三年時間，終於在 2004 年將 THOR 原有之熱中子柱改建為 BNCT 超熱中子束，並規劃 BNCT 治療專區，提供醫界及學界進行 BNCT 治療癌症及其他相關研究。圖 B-1 為 THOR/BNCT 中子照射室示意圖。

除了將 THOR 原有之熱中子束改建為超熱中子束做為照射治療室之外，在其周圍空間，並分別規劃劑量監控室、準備室/恢復室，以及模擬定位室。其中照射治療室是一個長 \times 寬 \times 高=380 公分 \times 380 公分 \times 240 公分的治療空間，進出迷道寬度 180 公分，內部配置雷射定位系統 1 套 (4 個)；劑量監控室則是透過三組中子分裂腔 (fission chamber) 所建構而成的 On-line Monitoring 系統，可掌握病人接受中子照射劑量的情形；準備室/恢復室則提供做為病人注

射含硼藥物及照射結束後的休息場所，醫護人員也可在此透過 TV-monitor 瞭解病人在照射治療室內的情況、透過 Area Monitor 系統瞭解照射治療室內及治療室外空間輻射劑量率的變化、以及透過對講機與病人進行雙向溝通；模擬定位室則提供做為病人治療前預先定位，以減少工作人員在照射治療室內的曝露時間。圖 B-2 是 BNCT 照射治療室及周圍主要附屬空間配置。

清華大學在 2009 年與台北榮民總醫院及日本京都大學簽署三方合作備忘錄，以及與信東生技公司簽署 BPA 藥物製備合約後，於 2010 年 8 月 11 日首次在 THOR 針對復發頭頸癌進行 BNCT 臨床試驗（每位病人僅需接受兩次照射），至 2014 年間才完成第一階段 17 位無法再以其他方法治療的復發性頭頸癌病人的 BNCT 治療。後續療效追蹤發現：除了明顯改善病人之病情與生活品質外，其中 6 位病人在臨床上判定為腫瘤完全消失（complete response，簡稱 CR），顯示 BNCT 可為癌病患者提供新且有效的治療方式。

清華大學自 2010 年開始進行臨床試驗至今已經歷 10 年，相關運作程序與輻防管制措施也皆遵循 THOR 設施運作規範。截至 2019 年底為止，THOR/BNCT 已進行超過 100 人次的頭頸部腫瘤或腦腫瘤病患的照射治療，病人的病情皆有明顯改善，其中並有多位病患由影像分析結果顯示腫瘤已不存在。

有關輻射劑量評估部分，截至目前為止所進行超過 100 人次的 BNCT 照射治療，平均每次治療所需要的照射時間約為 20 分鐘（治療當天會依據病人的生理狀況、以及血液含硼濃度來調整反應器運轉功率），反應器運轉當下除了照射治療室內的輻射劑量較高之外，緊鄰照射治療室的準備室/恢復室內也會比背景輻射劑量高約 10~20 倍（約 1~2 μ Sv/h，視病人照射擺位條件及反應器運轉功率而定），由於此一區域是醫護人員及支援的工程人員所在之處，因此有可能造成協助 BNCT 進行的工作人員接受額外的輻射劑量。

以目前 BNCT 進行治療的經驗來看，THOR 在 1.5 MW 運轉下，準備室/恢復室內的平均空間輻射劑量率約為 1~2 μ Sv/h。若以保守 2 μ Sv/h 估算，每週進行一次 BNCT 照射治療、每次進行的運轉時間為一小時，則醫護人員及

設施工作人員每年（以 50 週計算）因協助 BNCT 照射治療的進行所額外接受的輻射劑量約為 0.1 mSv/y；此外，當病人完成照射後一段時間（約 5 分鐘），工作人員必須進入照射治療室內協助病人離開，此時治療室內的輻射劑量雖然依舊偏高，但協助病人離開所需的時間極短（3 分鐘內可以完成），若以照射治療室內平均空間輻射劑量率 $50 \mu\text{Sv/h}$ 估算，每週進行一次 BNCT 照射治療、每次治療需進入照射治療室內兩次、每次所需的時間為 3 分鐘，則協助人員每年（以 50 週計算）因協助病人進出照射室所額外接受的輻射劑量約為 0.25 mSv/y。

針對協助 BNCT 照射治療的人員劑量評估，即使假設每項工作皆由同一批人員負責，則每人每年因協助 BNCT 治療的進行所額外接受之輻射劑量最大保守值為 0.35 mSv。目前主要參與人員皆會配戴人員劑量配章、以及立即顯示型輻射劑量計，所有監測及計讀結果皆低於上述預估值，顯示 BNCT 運作對於協助人員劑量的影響仍在合理範圍之內。

二、審查發現

本次審查並無特殊審查發現。對於輻射工作人員、醫護人員之劑量評估，額外接受之輻射劑量最大保守值為 0.35 mSv，而藉由配戴人員劑量配章、顯示型輻射劑量計，確保輻射劑量結果皆低於最大保守值，符合游離輻射防護安全標準之輻射作業造成一般人之年劑量限度（1 mSv/y）規定。

三、結論與建議

THOR 是可提供大量、穩定且安全的中子源設施，其輻射作業應依循所提報之輻射防護計畫切實執行，落實合理抑低措施，在達到醫療效果的同時，確保人員與環境之輻射防護安全；附錄 B 所述內容經審查可以接受。

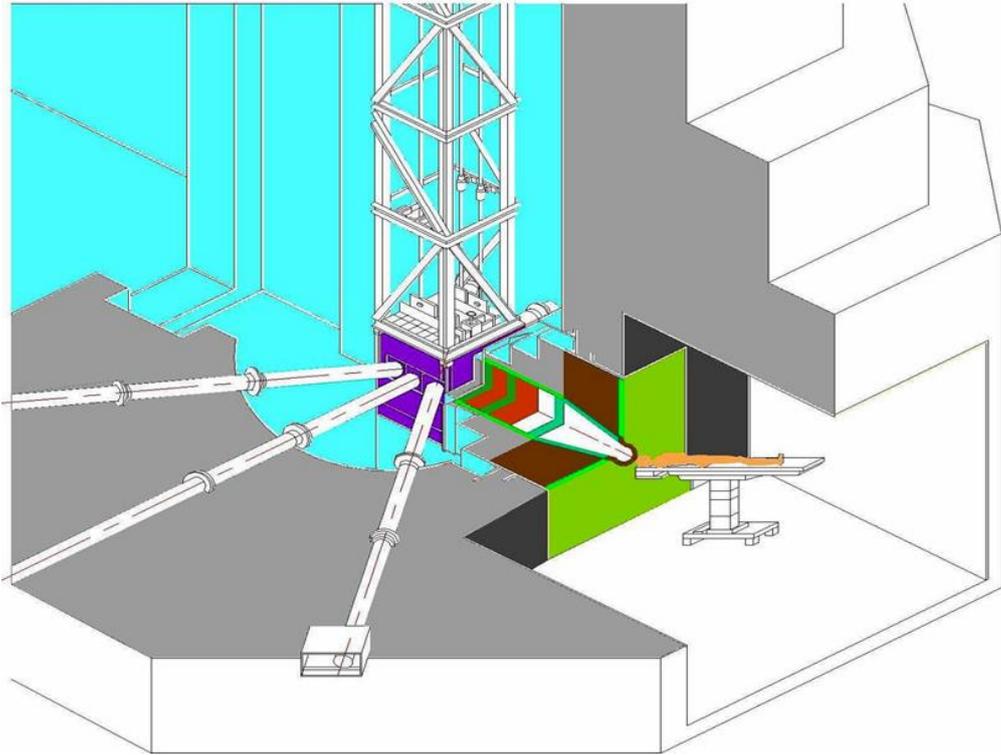


圖 B-1 THOR/BNCT 中子照射室示意圖

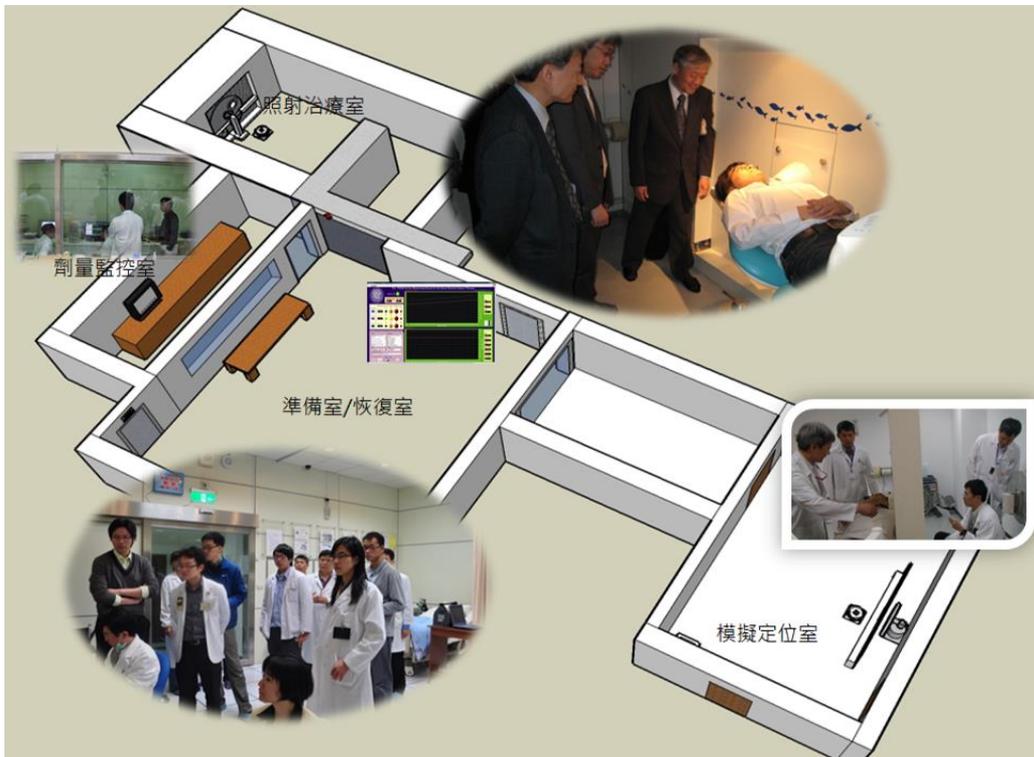


圖 B-2 BNCT 照射治療室及周圍主要附屬空間配置

附錄 C 國立清華大學水池式反應器運轉安全技術規範

一、概述

技術規範係以技術方面達到安全，穩當地運轉 THOR 反應器，並在主管機關及清華大學核子設施及輻射防護安全委員會之監督下安全地運轉操作此反應器，同時保證不會危害到反應器設施周圍工作人員及一般民眾之安全及健康。技術規範內容包括定義、安全限制及限制安全系統設定值、反應器運轉時之限制條件、安全系統之檢試要求、設計特徵、行政管理、技術規範之基準等。THOR 安全限制包括：(1) THOR 燃料溫度之最高值 750°C；(2) 反應器熱功率不超過 2.3 MWt (115%)；(3) 反應器水位必須高過爐心燃料頂端以上；(4) 反應器冷卻水溫度不可大於等於 100°C 等。安全技術規範訂有反應器自動急停或由操作員手動急停之反應器安全保護系統設定值，對反應器運轉時之各項限制條件，包括：反應度限制、控制及安全系統、冷卻系統、限制體、引風機系統、引風機系統、緊急供電系統、輻射監測系統、實驗上的限制，以及燃料等。針對 THOR 各項安全相關之系統定期之檢驗、測試及校正，以維持系統正常運作。對反應器燃料、反應器爐心、控制及安全系統、廠區輻射監測系統、用過燃料貯存池、反應器爐房等設計特徵之說明。THOR 之行政管理，包括組織架構、委員會及核子設施運轉安全業務內容之稽查及審查、異常事件處置、運轉記錄、定期報告、實驗審核等。

二、審查發現

審查小組提出 RAI 編號 A0-0C01，要求澄清運轉安全技術規範表 C-1 高壓不足之急停控道之數目。清華大學說明高壓不足之急停控道分別為 NP-1000、NPP-1000、以及 NM-1000，其中 NP-1000/NPP-1000 之急停跳脫為直接引接至急停迴路中，而 NM-1000 之急停跳脫係由其微處理器系統之內部設定點所引動，並非橋接於 THOR 直接接線之急停迴路之中。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A0-0C02，有關表 C-1 「THOR 各項安全急停設定」中，地震急停之設定值為「震度三級以上(5 cm/s²，0.005 g，依中央氣象

局地震標準)」，惟經查中央氣象局資料，震度三級下限值對應之加速度為 8 cm/s²，故請清大澄清 THOR 地震急停設定值之依據，並評估是否需修訂設定點。本項清大依照本案 RAI 編號 A0-0201 之答覆說明，將地震急停設定值調整至 25 gal，並修訂表 C-1。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A0-0C03，要求澄清運轉技術規範表 C-1「THOR 各項安全急停設定」註解「進行 BNCT 臨床治療時，為減少人員曝露，可能暫時取消 BNCT 照射室門開啟之安全急停設定」之正確性。清華大學說明進行 BNCT 照射時取消照射室門急停的目的係為「減少病人在照射室內停留的時間」，而非減少人員曝露，該處內容已修正刪除「為減少人員曝露」相關敘述。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A0-0C04，有關附錄 C 第 3.2.4 節與第 5.3 節敘述功率控道：「包括兩組分裂腔（fission chamber，簡稱 FC）頻道及一組分裂腔與補償式游離腔（compensated ionization chamber，簡稱 CIC）組合而成的頻道」，與圖 C-1「儀控系統簡化之方塊圖」所示不同，要求清大說明。清大澄清說明該敘述係指更新後之廣域中子偵測系統，該系統為 NLW-1000 與 NMP-1000 兩個偵測通道所組成，而 NLW-1000 與 NMP-1000 則各自使用獨立的分裂腔與補償式游離腔，故其敘述與圖 C-1 所示相符。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A0-0C05，要求檢討國立清華大學核子設施運轉與輻射防護安全委員會委員專業要求及聘任程序。清大說明「核子設施運轉與輻射防護安全委員會組織章程」經檢討後，將增訂成員應具備核能安全與輻射防護專長之規定，並訂定委員聘任之程序為：由原科中心主任提名，經原科院院長同意之後，簽請校長核定。清大已修訂「核子設施運轉與輻射防護安全委員會組織章程」。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A0-0C06，要求說明表 C-1「THOR 各項安全急停設定」第 7 項「地震」之對應元件，如何使反應器自動急停，以及例行測試執行方式。清大地震儀是連接反應器儀控系統的輔助設備，當實際地震最

大地動加速度 (PGA) 達設定值，則可使反應器自動急停；地震儀每三年校正乙次，每年歲修並以敲擊地震儀附近結構牆測試是否有急停動作。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A0-0C07，要求說明說明表 C-1「THOR 各項安全急停設定」第 11 項「電腦當機」是指哪個設備故障，如何送出「跳脫」信號使反應器自動急停。清大說明 THOR 儀控系統共配置兩組電腦系統，一為負責主控制台的 CSC 電腦，另一則為用於反應器與反應器控制台之間的資料存取控制介面的 DAC 電腦，在 THOR 急停迴路中，各設有 CSC Watchdog 與 DAC Watchdog 急停設定，此兩部電腦主機會在固定時脈相互送出監測訊號，一旦兩者任一部電腦出現 watchdog 監測訊號失效或當機，THOR 系統即會急停。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A0-0C08，要求說明表 C-1「THOR 各項安全急停設定」第 12 項「手動急停」之 5 個控道元件。清華大學說明 THOR「手動急停」之 5 個控道元件包括主控制台 SCRAM 按鈕、Key Reset、Key Off、爐房 1 樓入口處之手動急停按鈕，以及 BNCT 控制室手動急停按鈕。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A0-0C09，要求對表 C-1「THOR 各項安全急停設定」第 14 項「BNCT 照射室門開啟」註解「**進行 BNCT 臨床治療時，為減少人員曝露，可能暫時取消 BNCT 照射室門開啟之安全急停設定」，納入對應的行政管制措施。清大說明 BNCT 治療在 THOR 啟動前控制室除會先確認 BNCT 照射室是否有人員逗留外，BNCT 處之作業人員亦會進行人員確認，BNCT 治療過程輻防人員亦會隨行進行環境劑量監測，修訂該註解「**在行政管制下，進行 BNCT 臨床治療時……」。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A0-0C10，要求說明附錄 C 第 3.3.2 節「THOR 運轉前應將低功率池底部中央之水管口以金屬罩蓋上」之對應程序書。清大說明程序書 THOR-O-01 之檢查表中規範於啟動前檢查時，要求“THOR 起動前檢查，起動前檢查單如表 F-1 所示。” 確認低功率池之管路需有金屬(鐘)罩覆

蓋，雖於文中未明列，但仍已達成實質管制要求。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A0-0C11，要求澄清附錄 C 第 3.7 節「輻射監測系統」所提三個偵測點中的「BNCT 外」是指 γ 輻射偵測系統之偵測點或是中子輻射偵測系統之偵測點。清大說明是指 γ 輻射偵測系統，並修訂上述 SAR 部分內容避免誤解。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A0-0C12，要求附錄 C 第四章第 4.2.3 節「控制及安全系統之檢試」之要求：「反應器急停時間(控制板掉落時間)應小於 0.7 秒」應納入對應程序書 THOR-C-03「反應器急停控制板掉落時間測量程序」之接受標準，並請清大提供近年測試結果，以佐證 THOR 控制板之掉落時間符合接受標準。清大說明已修訂程序書 THOR-C-03，加入控制板掉落時間接受標準，並提供 2015~2019 年之測試結果，皆符合接受標準。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A0-0C13，要求釐清附錄 C 第 5.2.2 節敘述「THOR 共有四根安全控制板，……，設計之反應度為每根 2.8 %」與 THOR 老化管理評估報告第 3.4.2 節表 2「THOR 近年控制本領與停機餘裕」所列控制棒控制本領差異，並說明控制棒是否有特殊老化機制，分析控制板本領之衰減是否會影響到 THOR 未來十年之安全停機餘裕及更新控制板之計畫。清大說明控制板本領係指其吸收中子的能力，會與控制板組成及位置、爐心布局、燃料組成及燃料溫度、燃料溫度、冷卻水溫度和密度以及中子毒物濃度等相關，同一根控制板安置於爐心不同位置，其本領值可能不同，雖然個別控制板之本領變化需要關注，然而，安全停機餘裕 (Shutdown Margin) 才是反應器運轉限制必須符合的要件。近年來 THOR 之安全停機餘裕均大於 1 %，符合 THOR 運轉之安全停機餘裕限制。近年的運轉經驗趨勢顯示在未來十年 THOR 的四根控制板應仍能提供足夠的安全停機餘裕。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A0-0C14，要求說明表 C-1 所示之各項安全限制系統急停設定相關控道功能除每年至少校正、測試一次外，是否亦定期進行頻道檢查。清大說明如頻道檢查之定義，THOR 會執行每日例行巡檢或運轉

前設備檢查，也會在運轉照射期間定時執行相關的頻道檢查，包括例行檢查及運轉期間檢查。此外，為使 THOR 安全分析報告可更周延地規範 THOR 相關的頻道檢查，亦於附錄 C 第 4.2.5 節及表 C-3 增訂 THOR 頻道檢查之說明及檢測項目。經審查答覆內容可以接受。

三、結論與建議

THOR 之運轉安全技術規範係用以確保反應器安全地運轉操作，不危害到反應器設施周圍工作人員及一般民眾之安全及健康。THOR 各項安全急停設定，已請清華大學澄清說明相關配置，經審查答覆內容可以接受。對於進行 BNCT 臨床治療時，暫時取消 BNCT 照射室門開啟之安全急停設定，清華大學亦已說明其目的並強化該段敘述，經審查答覆內容可以接受。對於國立清華大學核子設施運轉與輻射防護安全委員會之委員專業要求及聘任程序，在清華大學重新檢討後，經審查可以接受。對於反應器急停時間接受標準，清華大學已納入程序書，經審查答覆內容可以接受。對於控制板本領衰減，清華大學澄清說明仍可保有 THOR 未來十年之安全停機餘裕，經審查答覆內容可以接受。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，THOR 運轉技術規範已能涵蓋各項安全限制、檢測及行政管理要求，足以規範 THOR 在安全之條件下運作。

附錄 D 清華核子設施管制區域緊急應變計畫

一、概述

本計畫係清華大學水池式反應器有關緊急應變計畫說明，內容包含緊急應變組織編組與職責分工、緊急應變場所與設備、平時整備、緊急應變行動、復原措施等，主要目的係規劃分析清華大學水池式反應器有關緊急事故應變整備工作，確保萬一發生緊急事故時能妥善因應。審查依據為核子事故緊急應變法、研究用核子反應器設施緊急應變管制辦法。

二、審查發現

審查小組提出 RAI 編號 A0-0D01，若 THOR 發生廠區全黑 (Station blackout, SBO)，則 THOR 的最壞狀況及如何處置。清大說明 THOR 停機之後，燃料棒產生的衰變熱可藉由池水自然對流移除，並不會發生如核電廠因餘熱移除系統失效而導致燃料棒熔毀問題。經審查答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A0-0D02，緊急應變所需設備有詳列清單，但並無規範各設備之檢查、維護與測試頻率，建議清大針對各項緊急應變所需物資與設備之使用期限與檢查頻率再做研究，以訂定適當的檢查、維護與測試頻率，確保隨時可用且功能正常符合應變所需。對於比較特殊和精密的設備儀器，如：手持無線對講機、個人即時劑量計、長柄手提式輻射偵檢儀、手提式抽氣機、污染擦拭樣品計測儀、手提式大面積污染偵檢儀等，建立個別的設備檢查表，還有各項儀器維護和功能測試的方式、偵檢儀器的校正等規劃。清大答覆說明已於附錄 D 第 5.1 節中明訂各設備應指定負責人定期每半年實施清點、維護與性能測試。另 THOR 緊急應變清單有使用期限之物資主要為急救箱內部藥品、生理食鹽水、以及碘片等醫藥用品，未來針對這些物資，經檢查如發現其使用期限小於 6 個月時，將標註於設備保養維護表之備註欄位，並同時啟動物資更新行動，以確保其不會過期。針對設備儀器，目前均依據 THOR 緊急應變計畫之設備管理規定，每半年定期實施清點、保養、以及校驗等措施，上列各項設備目前 THOR 也都已訂定其個別對應的檢查表並確實記錄其檢查情形。此外，關於上列輻射偵檢相關儀器，目前 THOR 均

依據原能會輻射防護處之規定，建立對應的儀器校正計畫，每年定期實施校正一次。經審查答覆內容可以接受。

三、結論與建議

清華核子設施管制區域緊急應變計畫主要目的係規劃分析清華大學水池式反應器有關緊急事故應變與整備工作。本次針對緊急應變組織編組與職責分工、緊急應變場所與設備、平時整備、緊急應變行動、復原措施等進行審查，其內容均符合妥善因應緊急事故所需。另審查發現緊急應變所需之物資與設備，係以半年一次檢查、維護與測試的頻率做應變整備，而各項設備與物資保存、使用期限或劣化情形不一。清大說明，除對各項緊急應變物資與設備調查其狀況外，在每次查驗、維護與測試時，如發現醫藥用品（有使用期限之物資）其使用期限小於 6 個月時，將啟動物資更新行動，以確保不會過期。各項設備儀器則定期清點校驗，確保功能正常符合應變所需。清華大學之說明，經審查可以接受，符合核子事故緊急應變法與研究用核子反應器設施緊急應變管制辦法相關規定。

附錄 E 品質保證方案

一、概述

品質保證方案的目的，是在為反應器整體運轉作業，提供符合品質保證要求之作法，以確保反應器運轉之可靠安全。依附錄 E 所述，THOR 品質保證方案依循規定為「研究及教學用核子反應器運轉管制規範」，另於參考資料中列出美國國家標準學會／美國國家標準（American National Standards Institute／American National Standards）ANSI/ANS-15.8-1995, “Quality Assurance Program Requirements for Research Reactors”。

本次 THOR 運轉執照更新之品質保證方案延續前一個十年之方案，內容僅有些微修訂，方案內容主要規範事項包括：

1. 設計、建造及修改。如：行政組織、設計管制、採購管制、程序及圖面管制、設備標識管制、試驗測試管制、裝卸貯存及運輸管制、不符合項目之管制。
2. 反應器運轉。如：運轉組織、運轉績效、經驗回饋、運轉條件、運轉職責、管制區域、附加任務、緊急聯絡、組態管制、加鎖與標識、運轉程序。

二、審查發現

審查小組提出 RAI 編號 A0-0E01, 106 年清華大學原子科學技術發展中心建立品質保證方案草案（編號 NSTDC-QAM-001-01），其範圍涵蓋反應器運轉與照射，此方案與 THOR 品質保證方案之競合關係應澄清。清大答覆該方案草案原係規劃依「核子反應器設施品質保證準則」建立，惟其後發現 THOR 屬研究用反應器，實際編制無法負擔動力用核子反應器等級之品保作業，因此並未正式實施。經審查答覆內容可以接受，惟有關 THOR 品質保證方案內容，建議清大再參考美國 NRC Regulatory Guide 2.5, Revision 1, “Quality Assurance Program Requirements for Research and Test Reactors”。清大答覆 NRC Regulatory Guide 2.5 指引之 ANSI/ANS-15.8-1995, “Quality Assurance

Program Requirements for Research Reactors”，已作為編寫品保方案之參考範例，並已於附錄 E 中加入 Regulatory Guide 2.5 及 ANSI/ANS-15.8-1995 為品保方案建立之依據。經審查報告修訂版及答覆內容可以接受。

審查小組提出 RAI 編號 A0-0E02，有關行政組織方面，核輻安委員會之位階以及其與原子科學技術發展中心之關係，審查發現 SAR 第 12 章所述與附錄 C 之行政系統架構圖（圖 C-3）所示不相符，應再檢視修訂。清大答覆核輻安委員會依照組織章程，負責核子反應器安全事項之審查與督導、輻射防護措施計畫之審查、以及輻射防護相關事項之審查與督導，除此之外並不牽涉原子科學技術發展中心之行政管理事項，故就行政系統架構而言，兩者不相關聯；清大並修訂行政系統架構圖（圖 C-3）。經審查修訂內容可以接受。

三、結論與建議

THOR 品質保證方案延續前一個十年之方案內容，主要內容範圍為：(1) 設計、建造與修改，以及(2)反應器運轉，經審查方案主要項目可符合 ANSI/ANS-15.8-1995, “Quality Assurance Program Requirements for Research Reactors” 所述，並將 Regulatory Guide 2.5 納為品保方案建立依據，可符合國外一致性作法。附錄 E 所提審查意見，清華大學均已完成答覆說明，答覆內容可以接受。

附錄 F THOR 運轉程序書

一、概述

本附錄包含 THOR-O-01「THOR 運轉程序書」及 THOR-O-08「BNCT 實驗及間歇運轉程序書」等兩份程序書，供作附錄 E 之參考資料。THOR-O-01「THOR 運轉程序書」內容包括起動前確認事項、起動前檢查、起動程序、反應器運轉程序、異常情況之處理程序、停爐程序等，並包含 THOR 起動前檢查單及 THOR 正常運轉下運轉人員應記錄資料等表單。THOR-O-08「BNCT 實驗及間歇運轉程序書」內容包括 BNCT 實驗照射申請單內容確認、THOR 起動前準備、照射樣本準備、BNCT 照射室屏蔽門關閉、各次照射起停時間及實驗安全確認項目記錄、照射完爐心功率降低、停爐程序等。

二、審查發現

審查小組提出 RAI 編號 A0-0F01，要求說明運轉資料儲存採用磁片/磁碟機之備品及更新計畫。清大說明由於運轉資料記錄功能係整合於 CSC 主控制系統之中，在未更新電腦主機與軟體的前提之下，目前並無法單獨擴充新的儲存媒介，僅能繼續採用磁片/磁碟機的備份方式。THOR 目前已購置足夠量的磁片可以使用，無備品短缺的疑慮。如未來確有更新需求，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 A0-0F02，要求說明 BNCT 實驗及間歇運轉程序書 THOR-O-08 之進入照射室之劑量可接受範圍及參考儀表。清大說明 BNCT 照射室內的空間劑量參考儀表係安裝於照射室內遠端角落之蓋格管，顯示劑量於照射室入口處，做為進入照射室的參考依據，目前訂定可進入照射室的參考劑量率為 $50 \mu\text{Sv/h}$ ，短時間協助病人進出或更換樣品情況下，平均每次接受的輻射劑量都在 $1 \mu\text{Sv}$ 以下。經審查答覆內容可以接受。

三、結論與建議

本章係 THOR 運轉程序書及 BNCT 實驗及間歇運轉程序書，供作附錄 E 之參考資料。關於清華大學 THOR 現行運轉資料之記錄儲存方式，經審查可

以接受。關於 BNCT 實驗及間歇運轉程序，清華大學已說明進入照射室之可接受劑量範圍，以及可提供參考之劑量儀表，經審查答覆內容可以接受。本章所提 THOR 之運轉程序書，已明確規定 THOR 正常起動、運轉、停機及異常狀況之處理程序，符合安全運轉要求。

附錄 G THOR 反應器運轉歷年輻防紀錄

一、概述

本附錄為歷年輻防紀錄，主要分為三類，「國立清華大學原科中心反應器業務單位歷年累積劑量紀錄表」、「THOR 1.0 ~ 1.5 MW 功率運轉例行輻防管制紀錄」以及「THOR 例行輻射管制項目與偵測頻率」，皆為表格數據資料。

有關「國立清華大學原科中心反應器業務單位歷年累積劑量紀錄表」，包含 THOR 自民國 51 年起至民國 108 年之年累積劑量紀錄，皆符合游離輻射防護安全標準之規定。

有關「THOR 1.0 ~ 1.5 MW 功率運轉例行輻防管制紀錄」，包含 THOR 自民國 84 年起至民國 108 年之「空間輻射劑量率」、「空浮濃度」、「污染」以及針對環境之「民眾劑量」，對於空間劑量率小於空間輻射劑量率限度： $25 \mu\text{Sv/h}$ ，對於關鍵群體之民眾劑量，不超過 $9\text{E}-03 \text{ mSv/人年}$ ，劑量遠低於輻射作業造成一般人之年劑量限度（ 1 mSv/人年 ）之法規限值。

有關「THOR 例行輻射管制項目與偵測頻率」，對於「空間輻射劑量率」、「空浮濃度」、「污染」以及「氣體排放」，皆有檢測頻率之自主管理規定。

二、審查發現

本次審查並無特殊審查發現。對於輻射工作人員，其劑量紀錄皆符合法規；對於環境劑量，其評估劑量皆符合輻射作業造成一般人之年劑量限度（ 1 mSv/人年 ）之法規限值。

三、結論與建議

對於輻射工作人員之全身劑量計測紀錄、民眾劑量評估等輻防管制紀錄，皆於附錄 G 中完整記錄，均符合游離輻射防護法相關規定，經審查可以接受。

附錄 H 核輻安委員會審查 THOR 執照換發文件結論

一、概述

清華大學核輻安委員會依「研究及教學用核子反應器運轉管制規範」成立，負有反應器重要安全事項之審查、核准、督導或執行之責。

THOR 安全分析報告及老化管理評估報告初稿正式提送原能會申請換發執照前，THOR 業務單位先提交清華大學核輻安委員會審查，審查意見於民國 109 年 6 月 15 日開會討論，附錄 H 為清華大學核輻安委員會審查意見及 THOR 業務單位回應之紀錄。

核輻安委員會審查後提出之重要議題包括：調降中子啟動計數互鎖限值安全性議題、委託專業機構進行 THOR 老化管理評估作業議題、THOR 地震急停設定值議題、THOR 零組件替代品議題、破裂韌性評估議題、第 I 類結構/系統/組件壽命與維護議題、THOR 池底目視檢測及清潔議題等。審查結果核輻安委員會同意 THOR 安全分析報告及老化管理評估報告。

二、審查發現

審查小組提出 RAI 編號 A0-0H01，指出：(1)附錄 H 多處出現錯別字或贅字，應再整體檢視並修正，以及(2)有關核輻安委員會之組織架構、權責及運作情形等，與相關規範之符合性應澄清。清大答覆說明：(1)已重新檢視錯別字及贅字並修訂，以及(2)說明核輻安委員會組織章程已納入 SAR 附錄 C 之附件 2，組織設立依據之一為「研究及教學用核子反應器運轉管制規範」。核輻安委員會依規定負責清華大學核子反應器安全事項之審查、督導等相關事宜。經審查答覆內容可以接受。

三、結論與建議

附錄 H 係清華大學核輻安委員會對 THOR 安全分析報告修訂初稿及老化管理評估報告之審查意見以及 THOR 業務單位之回應，討論之重要項目均另於 THOR 安全分析報告及老化管理評估報告相關章節中描述與評估。針對附

錄 H 所提審查意見清華大學均已完成答覆，答覆內容可以接受。

附件一：THOR 換照申請案之安全分析報告（SAR）審查分工表

章節	章節名稱	負責單位 ^{註1}
第1章	設施	相關局處 ^{註2}
第2章	現場特質	核管處
第3章	結構、系統和組件之設計	核管處
第4章	反應器說明	核管處
第5章	反應器冷卻水系統	核管處、物管局
第6章	特殊安全措施	核管處
第7章	儀器和控制系統	核管處、輻防處
第8章	電力系統	核管處
第9章	輔助系統	核管處
第10章	實驗之設施和利用	核管處、輻防處
第11章	輻射防護計畫和廢料處理	輻防處、物管局
第12章	管理運作	相關局處 ^{註2}
第13章	意外事故之分析	核管處、輻防處
第14章	運轉技術規範（即附錄C）	相關局處 ^{註2}
第15章	財務驗證	核管處
第16章	其他執照方面之考量	核管處、輻防處
第17章	THOR 之初步除役規劃	物管局、綜計處
附錄A	鋁合金材料的完整性	核管處
附錄B	BNCT 設施及醫療程序	輻防處
附錄C	國立清華大學水池式反應器運轉安全技術規範	相關局處 ^{註2}
附錄D	國立清華大學「清華大學水池式反應器」緊急應變計畫	核技處
附錄E	品質保證方案	核管處
附錄F	THOR 運轉程序書	核管處
附錄G	THOR 反應器運轉歷年輻防記錄	輻防處
附錄H	109年6月15日THOR執照更新案核輻安委員審查意見及回覆說明	核管處

註1：外聘專業審查委員皆負責本案安全分析報告（SAR）與其修訂項目對照表之審查。

註2：本會綜計處、核管處、輻防處、核技處及物管局審查第1、12章與附錄C之業務職掌內容。