

審查評估報告

送審單位	台灣電力公司
報告名稱	核三廠二號機反應爐蓋第 40 號螺樁修理報告

行政院原子能委員會
中華民國 105 年 1 月 6 日

摘要

104年11月12日台電公司核三廠二號機第22次大修執行反應爐開蓋作業時，第40號螺樁鬆脫不易，行政院原子能委員會(以下簡稱本會)駐廠人員立即掌握事件情形，並確認機組已在停機狀態，無核能安全或輻射外釋疑慮。

隨後本會邀集台電公司進行事件說明並提出處理對策，台電公司遂陳報「核三廠二號機反應爐蓋第40號螺樁修理計畫」。因應審查作業需求，本會邀請具機械、材料、非破壞檢測背景之專家學者，與本會輻防處、核管處共同組成專案小組進行技術性審查。審查期間共召開3次審查會議，提出總計33項待澄清問題或意見，台電公司已逐項說明與辦理。

螺樁鬆脫不易事件在國外核電廠有多起案例，處理方式包括評估現況仍符合法規安全原則後申請繼續運轉，或將螺樁移除並檢測螺孔螺牙受損情形，視嚴重程度分別以整修螺牙、有限度移除受損螺牙、或安裝螺孔牙套完全修復等方式處理。台電公司評估後採用螺樁移除、安裝螺孔牙套，並使用新螺樁、新螺帽與新墊片，修理作業於12月25日完成。

台電公司及其委託之研究機構，依據螺樁及螺孔之跡證分析結果，研判此次大修螺樁退出時，螺樁第1牙之向上變形區與螺孔螺牙之下方斜面產生刮磨損傷，不斷產生細小磨屑，並逐漸累積至相當體積，旋轉至螺孔第28~35牙處(由上向下數)終致發生嚴重的磨擦黏結(galling)現象，使得螺樁無法順利退出。

台電公司根據本會審查意見、修理結果及肇因分析研判，提出「核三廠二號機反應爐蓋第40號螺樁修理報告」送審。原能會已完成修理計畫及修理報告之審查及相關作業視察，並將結果彙整於「核三廠二號機反應爐蓋第40號螺樁修理報告」審查評估報告。總結本次核三廠二號機反應爐蓋第40號螺樁旋出不易事件處理，台電公司已適當地規劃與執行修理作業，針對肇因已提出對應改善措施，整體作業經本會審查結果可以接受。

目錄

摘要	i
目錄	ii
「核三廠二號機反應爐蓋第 40 號螺樁修理報告」	1
審查評估報告	1
第一章 簡介	1
一、前言	1
二、原能會事件處理過程	2
第二章 反應爐蓋螺樁簡介	7
一、概述	7
二、審查發現	8
(一)螺樁基本資料	8
(二)螺樁裝卸程序	9
第三章 發現暨處理過程	12
一、概述	12
二、審查發現	14
(一)過去案例處置情況	14
(二)本次事件過程	14
第四章 國外類似案例處理方式	16
一、概述	16
二、審查發現	18
(一)核三廠反應爐螺孔螺牙損傷接受基準	18
(二)國外案例處理情形	19
第五章 修理作業	21
一、概述	21
二、審查發現	22
(一)修理作業程序安全性與適切性	23
(二)修理作業對於證據之保存	25
(三)設計修改案(DCR)審查	27
第六章 螺件檢測結果	30
一、概述	30
二、審查發現	30
(一)檢測方法與結果	30
(二)未來檢測計畫	32
第七章 肇因調查及改善措施	34
一、概述	34
二、審查發現	37
(一)可能肇因蒐集	37
(二)肇因調查方法	38
第八章 總結	41

「核三廠二號機反應爐蓋第 40 號螺樁修理報告」 審查評估報告

第一章 簡介

一、前言

104 年 11 月 9 日核三廠二號機解聯停機開始第 22 次大修，11 月 12 日進行至反應爐開蓋作業，順利完成螺帽放鬆後，依序以氣動工具將螺樁旋出爐槽法蘭螺孔，當執行至第 40 號螺樁時，發生鬆脫不易無法旋出情況。

本會駐廠人員於第一時間掌握相關訊息，確認機組處於停機大修狀態，無核能安全或輻射外釋疑慮。台電公司並於確認本事件屬大修期間「安全相關結構、系統及組件維修或檢測之品質不符案件」後，依「核子反應器設施停止運轉後再起動管制辦法」於 11 月 16 日以書面通報本會。本事件在國內核電廠雖屬首次發生，惟經查美國近 18 年約有 13 起案例，計有 27 支螺樁發生類似狀況。國外電廠處理方式包括評估現況仍符合法規安全原則後申請繼續運轉，或將螺樁鋸除、移除螺樁殘根、並檢測螺孔螺牙受損情形，視嚴重程度分別以整修螺牙、有限度移除受損螺牙、或安裝螺孔牙套完全修復等不同處理方式。此次，台電公司核三廠移除螺樁殘根並檢測螺孔螺牙受損情形，決定採用安裝螺孔牙套完成修復作業。

台電公司並於 104 年 12 月 2 日依本會要求提送「核三廠二號機反應爐蓋第 40 號螺樁修理計畫」。針對本案審查作業所需，本會邀請具機械、材料、非破壞檢測背景之專家學者組成審查小組進行技術性審查，就修理計畫訂定、修理作業內容、螺孔檢測及評估、時程規劃、肇因調查與改善措施、品保稽查計畫等進行審查，共召開三次審查會議，提出 33 項待澄清問題或意見，台電公司已逐項說明與辦理。

台電公司根據本會審查意見、修理結果及肇因分析研判，彙整完成「核三廠二號機反應爐蓋第 40 號螺樁修理報告」，於 104 年 12 月 28 日陳報本會審核，其後再於 104 年 12 月 31 日將報告進版陳報。台電公司報告內容

分為第一至八章，包含前言、反應爐螺樁簡介、發現暨處理過程、國外類似案例處理方式、修理作業、螺件檢測結果、肇因調查及改善措施、及總結之章節項目。本會專案小組即逐章撰寫審查發現(含審查意見及答覆內容)，另外亦納入本會事件處理過程，彙整而成本「核三廠二號機反應爐蓋第 40 號螺樁修理報告」審查評估報告。

二、原能會事件處理過程

(一)104 年 11 月 12 日駐廠視察員回報當日核三廠二號機執行反應爐蓋螺樁拆出爐槽作業，第 40 號螺樁於旋出過程中，卡緊無法移除。本次事件發生於 EOC-22 大修第 4 天，機組處於停機狀態，螺樁卡住之可能影響為是否阻礙反應爐蓋吊出，與是否位於燃料挪移路徑，並無核能安全或輻射外釋之疑慮。

(二)核三廠於 11 月 14 日開立 NCD(不符合品質案件)，本會於 11 月 16 日(次一個上班日)收到台電公司書面通報，符合通報規定。

(三)11 月 16 日本會發文要求台電公司說明：

1. 事件始末。
2. Tension/De-tension 之正常程序。
3. 第 40 號螺樁卡住之初步肇因及後續改善措施；其他螺樁於移除過程中有無異常現象以及 SOP 1327 之執行結果。
4. 國外案例與處置方式。
5. 修復計畫及品保措施(含 ANII 查證計畫)。

(四)11 月 18 日台電公司至本會進行事件說明，會中台電公司提出處置規劃為先破壞取出 40 號螺樁，以便評估螺孔損傷程度，再據以決定後續修理計畫。本會要求辦理以下事項：

1. 應陳送本案之維修計畫(含規畫之細節及相關執行政序，以及作業潛在風險之應變計畫)，經本會審查後再進行後續之檢修作業。

2. 檢修作業之異物入侵管制要確保不會有異物進入反應爐槽內，整個修復作業過程應保存完整紀錄。
 3. 程序書 1327(反應爐螺栓移除、清潔及回裝)規範之作業程序與現場作業有差異或不足之處應檢討修訂，以確保施工作業之品質。
- (五)11月19日本會駐廠視察員調閱100年5月二號機反應爐40號螺樁磁粒檢測(MT)、螺孔超音波檢測(UT)、螺帽與墊片目視檢查(VT)等紀錄，確認檢查結果合格；另經查程序書1327(反應爐螺栓移除、清潔及回裝)，僅要求記錄回裝時螺樁伸長量，前(第21)次大修40號螺樁伸長量為0.052吋，符合程序書之要求。
- (六)11月24日本會發函要求台電公司於11月25日至本會說明事件目前處理進度及修復計畫。會中台電公司事件處理策略改為若評估符合法規安全原則，將向本會申請核准以現狀繼續運轉一個週期，待下次大修再完成修復。由於此次所提處置方式與11月18日會議所述不同，因此本會要求台電公司應在符合法規之前提下，審慎考量兩種方案之各種可能遭遇情境，研提最適切之處置方式，並於確定後提送本會。
- (七)12月2日台電公司提出「核三廠二號機反應爐蓋第40號螺樁修理計畫」，內容包括發現暨處理過程說明、國外類似案例、修理作業、螺孔檢測及評估、時程規劃、肇因調查及改善措施、品保稽查計畫。鑑於本案後續審查所需之專業，故本會邀請機械、材料、非破壞檢測領域之4位學者專家，與本會核管處、輻防處組成專案小組進行審查。
- (八)12月4日本會專案小組召開第一次審查會，針對修理計畫訂定、修理作業內容、螺孔檢測及評估、時程規劃、肇因調查與改善措施、品保稽查計畫等內容進行審查，會後本會正式發出第一次待澄清問題及意見，重要項目已分述於本報告第二至七章審查發現章節內。
- (九)12月8日核三廠執行反應爐螺孔目視檢查作業，本會駐廠視察員現場查證作業情形。檢測方式係同時使用4台相距90度之小型攝影機，

每台攝影機以 22.5 度為有效視野，旋轉 4 次完成一個圓周紀錄後，移動至另一個高度重覆進行，最終完成螺孔螺牙全長之影像紀錄。檢測要求及標準係依據台電核發處 ISI-VT-34-1(Rev. 0)「核三廠反應爐法蘭螺孔螺牙目視檢查程序」，視察結果未有異常發現。

- (十)12 月 10 日本會專案小組召開第二次審查會，針對修理計畫、螺樁全拉伸所需最小咬合牙數計算結果等進行討論，並對第一次審查意見討論澄清，會後本會正式發出第二次待澄清問題及意見，重要項目已分述於本報告第二至七章審查發現章節內。
- (十一)12 月 11 日台電公司修訂陳報「第三核能發電廠二號機第 22 次大修輻射曝露合理抑低計畫」，新增「反應器爐蓋螺樁移除及牙套安裝」作業報告，本會審查後同意備查。
- (十二)12 月 12 日至 14 日核三廠依序執行 40 號螺樁鋸切、鑽除、搪孔、殘餘螺樁移除等作業，本會駐廠視察員在預定駐廠日期外，配合核三廠時程提前赴核三廠查證。查證發現 40 號螺樁上部鋸切後，對下部螺樁執行超音波檢測，結果出現一處指示(indication)。其後經核三廠確認係為螺樁切割末端不平整，非螺牙受損或 Crack 起始點。
- (十三)12 月 15 日本會專案小組學者專家赴核三廠，聽取螺樁取出過程、螺牙受損狀況、肇因初步分析等，並至二號機圍阻體管制站檢視取出之螺樁，學者專家對於探查肇因方向及檢視方法亦提出建議。
- (十四)12 月 17 日本會專案小組召開第三次審查會，針對螺樁移除作業及品保稽查結果、肇因初判、後續作業規劃等進行審查，並對第二次審查意見討論澄清，會後本會正式發出第三次待澄清問題及意見，重要項目已分述於本報告第二至七章審查發現章節內。本次會中台電公司提出西屋公司對螺孔螺牙評估結果，有 37 牙完整可用，28 牙可經整修恢復功能，7~8 牙需移除。因整修後可用牙數大於最低需求 53 牙，故西屋公司建議螺孔可於修理後繼續使用(use-after-repair)。惟台

電公司說明不採用最低牙數之評估作法，並決定將 40 號螺孔擴孔安裝牙套，此屬變更原始設計，因此本會要求台電公司提出設計修改案 (DCR) 文件送審，未來並需提出完整修理報告。

(十五) 12 月 18 日台電公司陳報 DCR-M2-4953 「反應爐#40 螺樁之螺孔加裝牙套」，其中設計規範、設計報告(含牙套應力分析)，均經註冊專業工程師(Registered Professional Engineer)簽證合格；另針對涉及之材料、設計、製造、機械介面、牙套材料相容性等評估結果，顯示本項作業相容於(reconciled with)原始廠家要求及建造法規，此次 40 號螺孔擴孔並安裝牙套之修理作業，設計上不影響反應爐蓋法蘭密封能力與反應爐壓力承持功能。本會審查後，提出 4 項待澄清問題。

(十六) 12 月 19 日起牙套安裝人員(AREVA 人員)於核三廠內進行試作 (MOCK-UP) 訓練，依據程序書 “Reactor Vessel Stud Hole Sleeving Procedure Six(6) Inch Diameter RV Studs- 3 Loop Westinghouse Vessel---Doc. ID & No. 03-1254797 Rev. 005” 執行法蘭螺孔加大、俾製牙套螺紋，與 GO/NO GO Gauge 螺牙核測等主要項目。本會視察員於期間赴核三廠查證，試作訓練於 12 月 21 日順利完成。

(十七) 12 月 22 日本會審查同意第(十五)項 DCR 之 4 項問題答覆後，核三廠開始依序執行反應爐螺孔頂部加大、移除螺孔現有螺紋並擴大、俾製新螺紋、安裝新牙套等作業。配合施工進度，12 月 22 日及 23 日本會核管處人員偕同專案小組學者專家赴核三廠執行現場視察，包括：聽取牙套試作訓練結果、施工前準備作業說明、牙套非破壞檢測結果及安裝作業說明等，並檢視螺樁移除過程影音紀錄。經與現場工作人員面對面討論，確認牙套施工準備作業確實。

(十八) 12 月 25 日核三廠牙套安裝完畢，本會駐廠視察員查證相關執行紀錄及品質文件，包括：(1) 特殊程序書 104-PP-05 執行版與 AREVA 程

序書執行版，(2)檢測隊在本案相關之檢測作業清單與檢測紀錄，(3)新螺樁、螺帽、墊片與牙套(含 O-ring 與 dowel pin)之品質文件(電子檔)，(4)西屋公司工作人員及設備檢定合格之相關品質文件，(5)AREVA 工作人員認證合格之相關品質文件，(6)AREVA 特殊加工設備、程序與圖面(電子檔)，(7)修理/更換計畫之執行狀況表(牙套安裝完畢之現況)，(8)ANII 查核報告(牙套安裝完畢之現況)。查證後提出 5 項待澄清問題，核三廠已於當日答覆澄清。

(十九)12 月 26 日核三廠開立不符合品質案件 NCD-104053，係牙套驗收品質證明文件為影本資料，核三廠已要求廠商立即提供正本。本會於 12 月 28 日(次一個上班日)收到台電公司書面通報，符合通報規定。

(二十)12 月 28 日台電公司於現場作業完成後，依本會審查意見、修理結果及肇因分析研判，提出「核三廠二號機反應爐蓋第 40 號螺樁修理報告」。

(二十一)12 月 29 日本會邀集台電公司對第 40 號螺樁修理計畫執行結果進行說明，專案小組針對修理作業、螺件檢測結果、肇因調查及改善措施等內容進行審查。審查結果本會要求台電公司對於修理作業過程事件敘述之完整性、跡證分析結果與故障推演之一致性、對應改善措施之有效性、ALARA 計畫內容等應再予以強化說明。

(二十二)12 月 31 日台電公司提出「核三廠二號機反應爐蓋第 40 號螺樁修理報告」(R1 版)。本會依據專案小組審查及相關作業視察結果，完成本審查評估報告。報告分為第一至八章，包含前言、反應爐螺樁簡介、發現暨處理過程、國外類似案例處理方式、修理作業、螺件檢測結果、肇因調查及改善措施、總結。

第二章 反應爐蓋螺樁簡介

一、概述

核三廠反應爐壓力容器(Reactor Pressure Vessel, RPV)為西屋公司設計，用來容納產生核反應的爐心和覆蓋爐心的冷卻水，使爐心產生的熱能藉冷卻水傳遞至蒸汽產生器。反應爐頂蓋係以 58 支反應爐蓋螺樁(含螺帽及墊片)與反應爐槽法蘭鎖緊結合，利用爐蓋與爐槽法蘭間兩只 O 型封環來做爐槽與爐蓋的密封，如圖 1 所示；材質及尺寸相關規範如表 1。

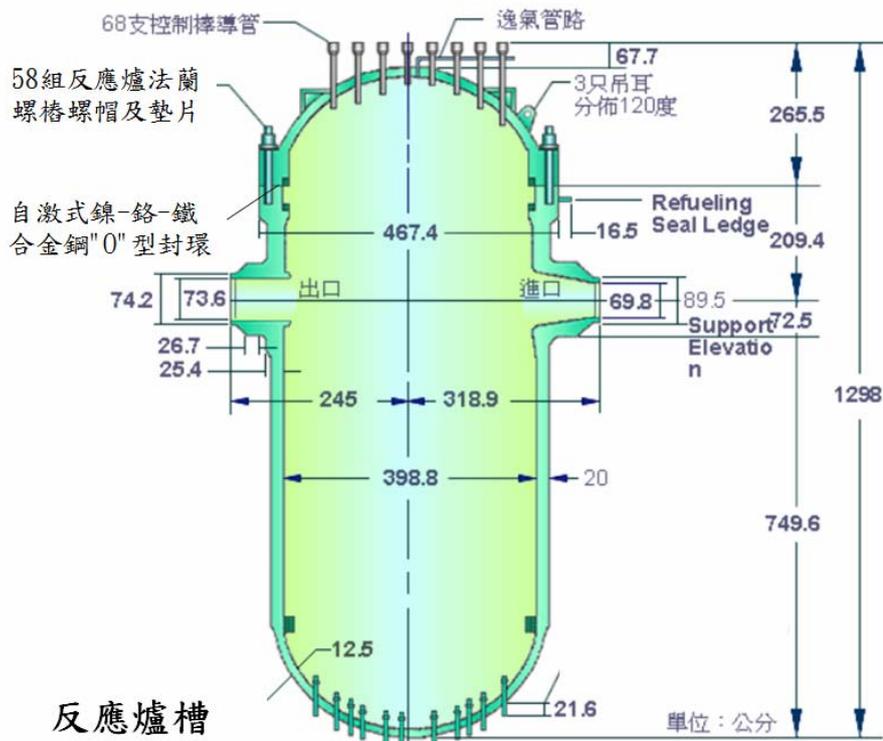
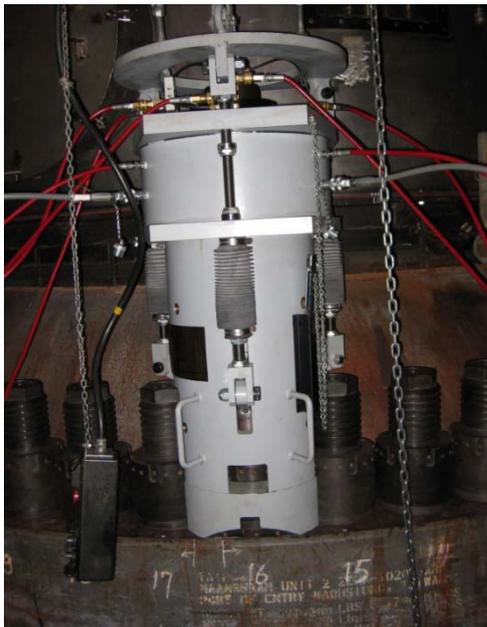


圖 1 核三廠反應爐構造

表 1 核三廠反應爐蓋螺件材質與尺寸

螺 件	材 質	尺 寸(吋)
螺樁	SA-540 Type B-24	6 (直徑) × 55.75(長度)
螺帽	SA-540 Type B-24	8.75 (直徑) × 6.25(高度)
螺樁墊圈	SA-540 Type B-24	6.13(內徑) × 1.19(厚度)

反應爐蓋螺樁功能為將爐蓋與爐槽法蘭鎖緊結合，鎖緊後螺樁之額定拉伸量為 0.050 吋±0.002 吋。由於螺樁直徑達 6 吋，無法以一般油壓扭力扳手來鎖緊或放鬆，必須用油壓拉伸機先將螺樁拉伸再將螺帽鎖緊(或放鬆螺帽)，最後放鬆拉伸機，完成螺樁鎖緊或放鬆程序。在螺樁安裝或旋入過程中，另以氣動工具配合補償螺樁重量。核三廠已制定拉伸與放鬆螺樁之作業程序書，相關工具如圖 2 所示。



油壓拉伸機



氣動工具

圖 2 螺樁鎖緊作業所用之拉伸機與氣動工具

二、審查發現

針對反應爐蓋螺樁簡介，本會專案小組在審查過程主要就螺樁基本資料及螺樁裝卸程序進行提問。

(一)螺樁基本資料

1. 螺樁使用時間及次數(I-14)。

台電公司之回覆說明為：

第 40 號螺樁從建廠後就持續使用至今，已使用 30 年，安裝 22 次，

卸除 21 次，第 22 次(即本次)卸除過程鬆脫不易(卡住)。

台電公司之回覆說明，經審查結果可以接受。

2. 說明螺樁材質、機械性質、二次加工程序以及非破壞檢測程序，以利拆除作業及肇因分析(I-13)。

台電公司之回覆說明為：

- (1)反應爐螺樁材質為 SA-540 Type B-24，係屬鉻鎳鉬(Cr-Ni-Mo)低合金鋼。
- (2)螺樁係由熱軋製(Hot Roll)鋼棒(Bar)，再經搪孔、俾製螺牙等二次加工程序而成。製造過程中並依 NB-2000 相關規定，執行 UT、MT 及 VT 等非破壞檢驗。
- (3)台電公司已請工研院及核研所在執行肇因分析作業時，亦將可能之材質缺陷因素，納入證據收集及評估項目。
- (4)其他材料性質參見 ASME Section II, Specification for Alloy-Steel Bolting Materials for Special Applications, SA-540, 1998 年版。

台電公司之回覆說明，經審查結果可以接受。

(二)螺樁裝卸程序

1. 在鎖緊及拆卸螺樁時有一定的分組及順序，不同分組所施加張力不同，第 40 號螺樁在鎖緊時是在哪一組，是否是受比較大的張力？最後的伸長量雖符合要求，但鎖緊過程中，是否有超過額定伸長量的可能性？是否有過程中伸長量的紀錄？另拆卸時，第 40 號螺樁是否剛好是較會受到不平均施力的一根？另目前程序書 1327 (反應爐蓋螺栓移除、清潔及回裝) 維護數據表僅列出螺栓最後之伸長量，過程中若有超出接受標準之異常情形亦應填列(I-2)。

台電公司之回覆說明為：

- (1)第 40 號螺樁在鎖緊時是排序於第 15 組拉伸，屬於第 3 組(張力較

小群組)，最後的伸長量為 0.052 吋，符合程序書 1327 要求，至於拉伸過程是否有過拉伸之情況，因係利用油壓緩慢拉伸，皆是將同一組 3 台拉伸機油壓加到規定壓力再鎖緊螺帽，在第二個階段拉伸鎖完後，會量測記錄伸長量，對過拉伸之螺樁再降低拉伸量，故鎖緊過程是否有過拉伸，可由第二個階段拉伸鎖完後的量測伸長量記錄得知。40 號螺樁在上次回裝拉伸時，沒有過度拉伸的情況。

- (2) 拆卸時，第 40 號螺樁屬第 15 組(共有 3 支螺樁)，不會受到不平均施力，其他螺樁均依此原則拉伸或拆卸，沒有受到不平均施力之情況。
- (3) 目前程序書 1327 (反應爐蓋螺栓移除、清潔及回裝) 維護數據表僅列出螺栓最後之伸長量，過程中若有超出接受標準之異常情形將修訂於程序書中填列。

台電公司之回覆說明，經審查結果可以接受。

2. 拆卸螺樁與吊掛搬運過程中，是否有碰撞致螺牙受傷的可能性？如有發生碰撞，標準作業程序中是否有要求要紀錄？(I-3)

台電公司之回覆說明為：

- (1) 第 40 號螺樁在上次大修期間安裝時沒有碰撞紀錄，在安裝旋入此一螺樁及執行拉伸鎖緊時現場均正常。
- (2) 螺樁在回裝時，因螺樁每支重 179 公斤，目前的作法是整理完的螺樁，使用運輸架搬運至更換燃料池反應爐槽旁，再以專屬吊車將螺樁由運輸架吊裝至螺孔內，吊運時必須靠工作人員手扶對準法蘭螺孔再置入，置入前先在爐槽及爐蓋法蘭間放置一片鋼板，螺樁置入法蘭螺孔後，先坐於鋼板上，第二階段再抽出鋼板，將螺樁下放坐於爐槽螺孔內。
- (3) 未來如果發生碰撞時，會檢查螺牙並加以整理，並記錄受損處理

情形，將修訂於程序書。

台電公司之回覆說明，經審查結果可以接受。

第三章 發現暨處理過程

一、概述

台電公司報告說明核三廠二號機第 22 次大修於 11 月 12 日執行反應爐開蓋作業，先以油壓拉伸機順利完成 58 支反應爐蓋螺帽放鬆後，再以氣動工具將螺樁一一旋出爐槽法蘭螺孔，以便後續吊離法蘭螺樁動作。當執行至第 40 號螺樁時，發現鬆脫不易無法旋出。為排除問題，工作人員先以旋入模式將第 40 號螺樁旋至原先定位，再嘗試以旋出模式將其旋出，結果在約略與前次相同位置處又發生鬆脫不易，決定暫停該支螺樁旋出作業，並繼續進行其他螺樁旋出作業。

俟其他螺樁全數旋出吊離後，再嘗試旋出該螺樁，仍無法順利旋出。核三廠召集內部會議商議處理對策，並同步洽詢原設計廠家提供處理建議。圖 3 為無法順利取出之 40 號螺樁位置圖。

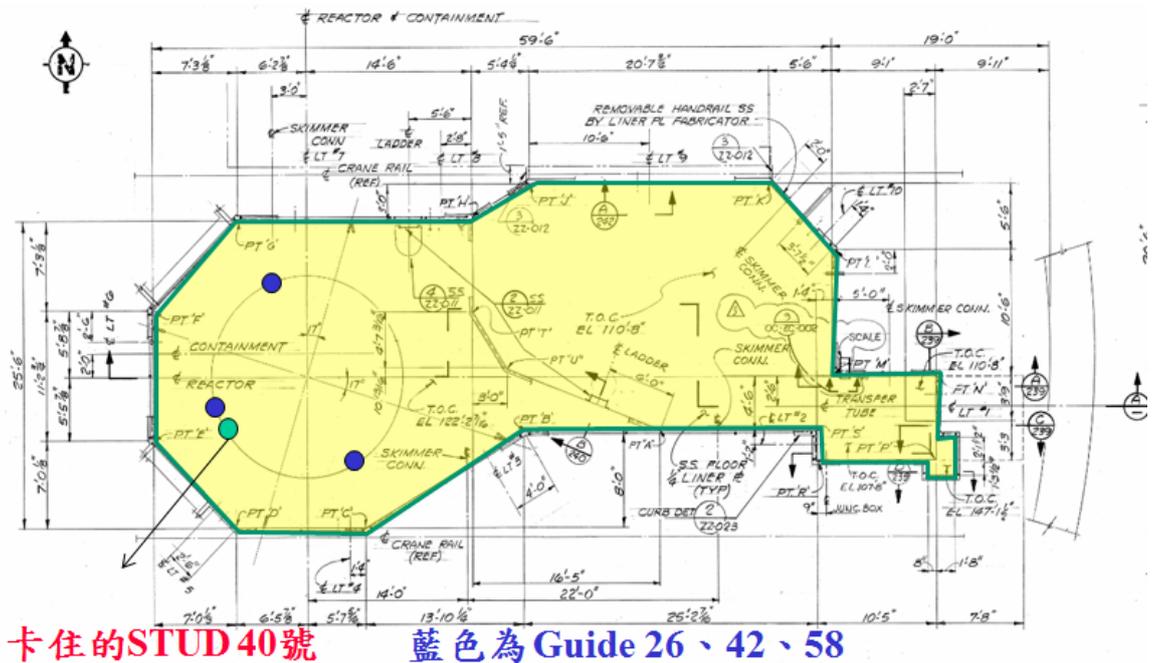
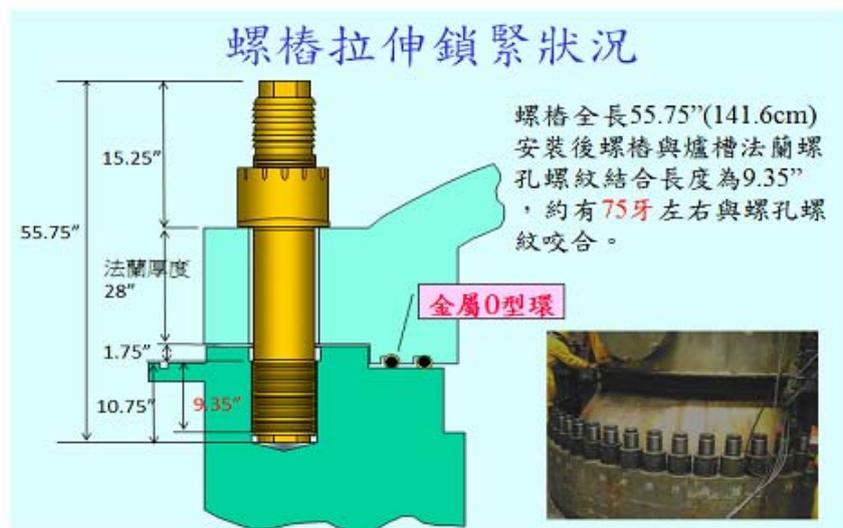
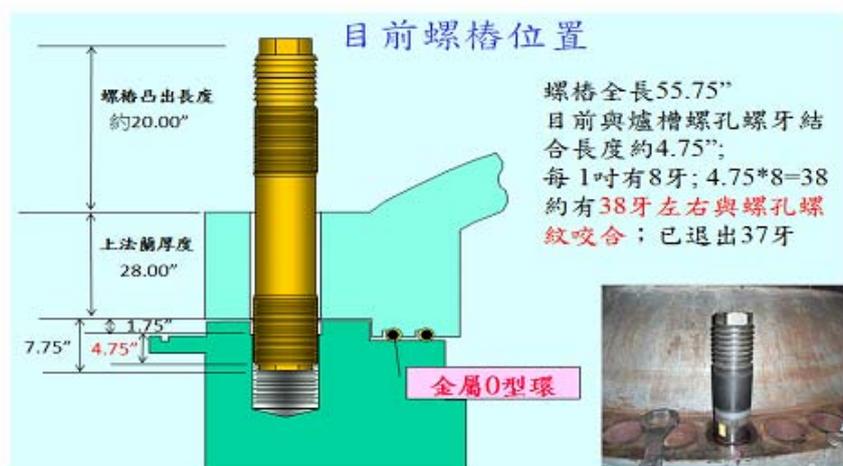


圖 3 無法順利取出之 40 號螺樁位置圖

反應爐蓋螺樁全長 55.75 吋，正常安裝鎖緊後，螺樁與爐槽螺孔螺牙咬合長度 9.35 吋(約 75 牙左右)。本次第 40 號螺樁鬆脫不易位置，經量測螺樁凸出上法蘭面長度約 20 吋，推算剩餘未旋出法蘭螺孔之長度為 7.75 吋，扣除法蘭螺孔上緣孔徑較大且無螺牙長度 1.785 吋、及螺樁底部 1.25 吋無螺牙直徑較小部分後，實際剩餘螺樁螺牙與爐槽螺孔螺牙尚咬合長度為 4.75 吋(約 38 牙左右)，如圖 4。



正常鎖緊狀態下螺樁之位置



此次無法順利拆出螺樁之位置

圖 4 40 號螺樁鬆脫不易位置與推估剩餘咬合長度

二、審查發現

針對發現暨處理過程，本會專案小組在審查過程主要就過去案例處置情況及本次事件過程進行提問。

(一)過去案例處置情況

1. 台電公司核能電廠反應爐蓋過去螺樁卡住前例及處理情形(I-1)。

台電公司之回覆說明為：

- (1)經向核一、二和龍門廠詢問反應爐螺樁拆裝經驗，並沒有像核三廠此次鬆脫不易無法取出的先例。本次反應爐螺樁鬆脫不易需要以機械加工方式移除，為國內核電廠第一次發生之事件。
- (2)以往核三廠兩部機反應爐蓋螺樁，在拆裝時有鬆脫不易之經驗，因都能順利取出，故當時並無正式紀錄，包括(1)一號機 92 年 5 月第 14 次大修回裝螺樁時，第 10 號螺樁有旋入不易情形。(2)二號機 82 年 11 月曾發生一次。(3)88 年 2 月發生第 52 號螺樁鬆脫不易情況。(4)95 年 10 月發生第 2 號螺樁鬆脫不易狀況。以往案例都能以工具拆出，再針對螺孔巡牙及螺樁巡牙後回裝使用，僅有此本次二號機螺樁無法順利拆出。

台電公司之回覆說明，經審查結果可以接受。

(二)本次事件過程

1. 第 40 號螺樁孔於待修理期間，因更換燃料池補水而曾接觸硼酸水，應澄清清潔處理程序，以避免後續可能發生的腐蝕破壞？(I-6)

台電公司之回覆說明為：

- (1)核三廠對第 40 號螺樁受硼酸水浸入，已編訂特殊程序書 104-PP-003 二號機反應爐蓋法蘭面螺孔硼酸水沖淨作業程序書處理。若第 40 號螺樁無法取出時，將由螺樁中心孔對底部孔塞鑽一 0.5 吋小孔，來執行螺樁底部硼酸水沖淨作業，直到沖淨逸流排放水硼濃度低於 2 ppm。

(2)本次實際規劃將第 40 號螺樁移除，對螺孔拍照存證後，安裝新螺樁或牙套前，再執行除礦水清洗工作，確保螺孔不會有硼酸腐蝕之問題，已納入程序書 104-PP-005 步驟 3.10。
台電公司之回覆說明，經審查結果可以接受。

第四章 國外類似案例處理方式

一、概述

核能電廠大修期間反應爐蓋螺樁鬆脫不易狀況，在國內雖是首次發生，但在國際上已有多起案例。美國近 18 年約有 13 起案例，計 27 支螺樁發生類似狀況，經處理後機組皆能維持穩定運轉。此次台電公司參酌類似案例制定處理流程如圖 5。

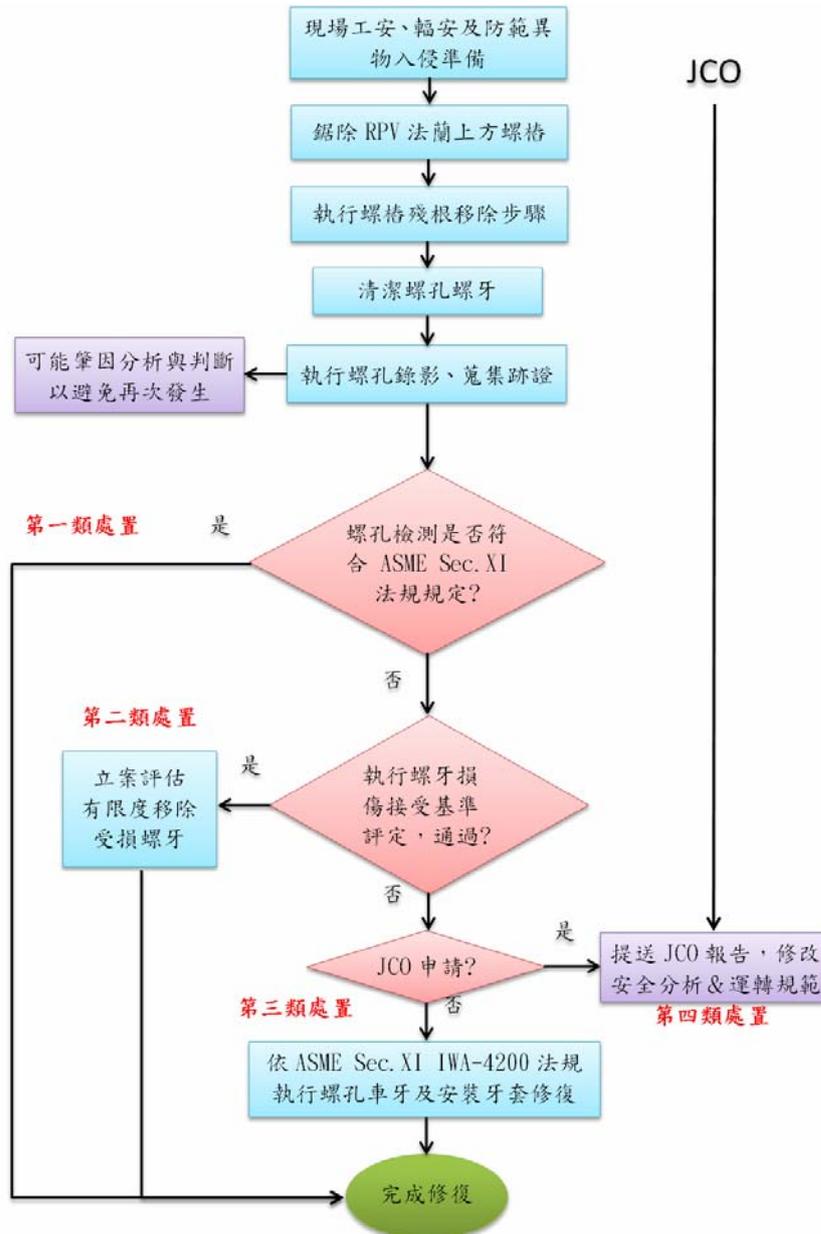


圖 5 反應爐蓋螺樁鬆脫不易處理流程

國外電廠部分案例採取評估符合法規安全原則後申請繼續運轉(第四類處理)；或將螺樁鋸除、移除螺樁殘根、檢測螺孔螺牙受損情形後再確定後續處理方向：

- (一)若檢測結果僅有微小螺牙損傷，將採整修螺牙完成修復(第一類處理)。
- (二)若檢測結果有少數螺牙受損，則執行螺牙損傷接受基準評定，若通過評定，則將受損螺牙移除完成修復(第二類處理)。
- (三)若螺牙損傷接受基準評定未通過，則採安裝螺孔牙套完成修復(第三類處理)。

美國核電廠近年發生之螺樁鬆脫不易案例處理方式如表 2。

表 2 美國近年發生螺樁鬆脫不易處理方式

案例	電廠	反應爐形式	發生年代	鬆脫不易螺樁支數	處理方式
1	D. C. Cook	PWR	1986	1	不詳
2	Catawba	PWR	1989	1	第一類
3	Callaway	PWR	1987	5	第四類
4			1989	5	第一、二類
5			1996	1	第四類
6	Braidwood	PWR	1991	1	第二、四類
7	Comanche Peak	PWR	1992	1	第三類
8			1994	4	第二類
9	Sequoyah	PWR	1996	1	不詳
10	Seabrook	PWR	1997	1	第二類
11	Byron	PWR	2010	1	第四類
12	Harris	PWR		2	第一類
13	Watts Bar 2	PWR	2013	3	第三類
總計支數				27	

註： 第一類處理：僅整修螺牙

第二類處理：有限度移除螺牙

第三類處理：完全修復並安裝螺孔牙套

第四類處理：評估符合法規安全原則後，申請繼續運轉

二、審查發現

針對國外類似案例處理方式，本會專案小組主要就螺牙損傷接受基準及國外案例處理情形進行提問。

(一)核三廠反應爐螺孔螺牙損傷接受基準

1. 台電公司說明西屋公司將計算第 40 號螺孔咬合區所需最少有效螺牙數，由於此最少有效螺牙數將決定是否必須採取第三類處理(安裝螺孔牙套)，故本會審查小組要求提出計算結果。(I-20)

台電公司之回覆說明為：

西屋公司針對核三廠頂蓋螺栓的最小咬合長度分析考慮的螺樁受力情形包括安裝負載(stud tensioning load)、運轉負載(Level A)、運轉負載(Level B)，並採用原始應力計算書的計算方法，分別來計算螺樁的最小咬合長度，得出最保守的結果為 Level A 負載時的咬合長度 6.621 吋，約為 53 牙。亦即 40 號螺樁最大許可損失長度為 2.38 吋，以 1 吋 8 牙換算螺牙數量為 19 牙。

本會審查小組要求進一步澄清：

- (1)西屋計算書提到 ASIC 的 $0.4S_y$ criterion 是適用於鎖緊時張力施加，另提到 ASME B&PV Code 的 $0.6S_m$ criterion 為涵蓋運轉時螺樁受力，但後續分析因 ASIC criterion 沒有在 ASME B&PV Code 要求內，所以沒有計算此一部份。應澄清 $0.4S_y$ 與 $0.6S_m$ 之大小關係，以確認僅用 ASME B&PV Code 的 $0.6S_m$ criterion 之適切性。
- (2)西屋計算書分析反應爐運轉時最大螺樁負載時採用加熱 4.37 小時之熱暫態拉力負載，應說明為何此時間點之熱暫態拉力負載為最大。
- (3)西屋計算書第 4.1 節 Equation 5 公式出處應說明。
- (4)西屋計算書第 4.2 節說明 maximum operational heatup load 增加

4%為保守，此保守性應再提供說明。

(5)西屋計算書中使用之數值係出自其他文件，應再提供引用文件，以確認數值正確性。

台電公司再回覆：

已不採行螺牙損傷接受基準評估，將直接採取第三類處理(安裝螺孔牙套)，請同意終止本項審查。

本會審查小組同意本項終止審查。

(二)國外案例處理情形

1. 國外有電廠連續發生螺樁卡住的案例，是否為同一機組？是否同一螺樁經修復後再次卡住？(I-4)

台電公司之回覆說明為：

國外類似先例中，僅美國 Callaway 壓水式核能電廠一號機曾先後發生數支螺樁卡住案例，為同一機組。國外案例並未發生在同一螺孔修復後再次卡住之情形。

台電公司之回覆說明，經審查結果可以接受。

2. 國外案例中，修復過程有沒有出現過引發其他意外事件的先例？如有，目前規劃的進程序有沒有對應的防範策略？在考量作業風險管控時，應作整體考量，而非僅限於螺樁。(I-5)

台電公司之回覆說明為：

(1)國外案例中，Braidwood 核電廠 1991 年大修第 35 號螺樁卡住，1995 年為了方便燃料吊運予以切除至與法蘭切齊。於 2002 年將殘餘螺樁移除時，發生加工人員疏忽擴孔過大而放棄此檢修工作。

(2)在此次切移除螺樁之工作區域內，已充分考量作業風險管控，除依循目前程序書 105 人員與安全、161.1 異物入侵防範、190 起重吊掛、900 系列輻防管制，並提出加強防範及應變措施如下，編寫於螺樁修理特殊程序書內。

(a)工作區組件完整性防護措施

(b)異物入侵防範措施

(c)輻射防護措施

(d)工安措施

(e)應變措施

台電公司之回覆說明，經審查結果可以接受。

第五章 修理作業

一、概述

核三廠二號機第 40 號螺樁修理作業分為移除螺樁與安裝螺孔牙套兩大步驟，台電公司報告說明係分別由原設計廠家西屋公司與國外具備安裝牙套經驗之 AREVA 公司執行。核三廠已制訂「二號機反應爐蓋螺樁修理工作程序書」(104-PP-05)做為執行依據，修理過程須符合工作區組件完整性防護、異物入侵防範、輻射防護及工安等相關作業安全風險管理措施。

螺樁移除程序可分為：鋸切(Sawing)、殘根鑽孔(Drilling through hole)、殘根搪銑(Boring)、移除殘根(Remnant Removal)與螺孔螺牙檢測評估(Evaluation)等 5 階段，如圖 6-9 所示。

螺孔牙套安裝程序分為：螺孔頂部擴孔、移除現有螺孔螺紋、俾製螺牙、磨削與清理螺孔螺紋、檢查螺孔螺紋區域與安裝牙套等 6 階段，安裝完成之牙套如圖 10。



螺樁切除作業



螺樁切除後超音波檢測

圖 6 螺樁鋸切與超音波檢測

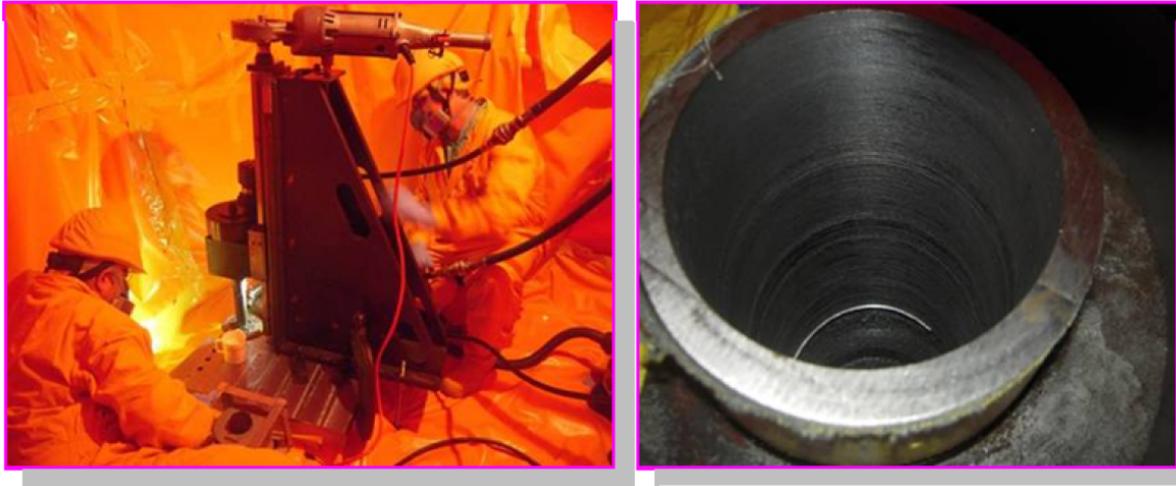


圖 7 螺樁殘根鑽孔



圖 8 殘根搪銑

圖 9 移除殘根



圖 10 完成之螺孔牙套與定位銷(dowel pin)

二、審查發現

針對修理作業，本會專案小組主要在修理作業程序安全性與適切性、修理作業對於證據之保存，及設計修改案(DCR)文件內容進行提問。

(一)修理作業程序安全性與適切性

1. FME 不銹鋼板覆蓋之結構分析能否承受人員重量？如不宜讓人員站踏其上應有警示(I-7)。

台電公司之回覆說明為：

(1)不鏽鋼蓋板厚度為 6mm，總承載力為 $200\text{kg}/\text{m}^2 * \pi * 3.86\text{m} * 3.86\text{m}/4 = 2,340 \text{ kg}$ 。經在工廠實際驗證，縱使人員誤進入蓋板上，亦不會造成破損，致人員墜落。

(2)將在工作現場以警語標示禁止人員進入此蓋板。

(3)施工機具及人員皆無須設置或站立在蓋板上，故無過負荷顧慮。

台電公司之回覆說明，經審查結果可以接受。

2. 西屋公司程序書第九章，對於是否有 critical step 或哪一個是 critical step 都沒有勾選或標明，請予釐清(I-8)。

台電公司之回覆說明為：

西屋公司正式程序書並無 critical step，惟核三廠認為西屋程序書 9.2 及 9.3 節鑽孔與搪孔兩項作業為重要步驟(critical step)，已於核三廠特殊程序書另行加註注意事項，且列為品質查證點。

台電公司之回覆說明，經審查結果可以接受。

3. 西屋人員工作時，台電公司除提供所有必要的資源外，是否有現場監工管控的人員？如有，程序書上應清楚釐定指揮權的隸屬。另台電公司目前程序書有些項目用中文，有些用英文，牽涉到西屋與台電人員都須共同遵守的項目建議應注意中英並列(I-9)。

台電公司之回覆說明為：

(1)本次第 40 號螺樁移除工作，除西屋公司外，台電公司也有好幾個單位或部門參與，故在檢修程序書上第 6 節已明訂各部門或單位之分工，並明訂由機械組經理或其代理人負責施工現場的指揮及控制。西屋公司到廠後開工前，核三廠內會先召開開工前講習及

共同作業協議組織，指派現場檢驗管控之工作聯絡人及向西屋公司工作人員說明指揮權、各部門之分工及協調事項，確保工作能順利進行。

- (2) 涉及西屋與 AREVA 及台電人員都須共同遵守的項目，已於程序書加入中英文程序。

台電公司之回覆說明，經審查結果可以接受。

4. 請了解西屋公司維修同類型反應爐的實績，以確定修理作業之適切性 (I-15)。

台電公司之回覆說明為：

西屋公司為核三廠反應爐設計廠家，對於設計資料之掌握較為直接；且西屋公司已執行過 14 次反應爐螺樁修理作業(維修實績略)，故台電公司考量以西屋公司來移除螺樁應無不當。

台電公司之回覆說明，經審查結果可以接受。

5. 本案有關之輻射防護管制及劑量抑低規劃已涉及變更「核三廠二號機第 22 次大修合理抑低計畫」，請依規定陳報本會(I-23)。

台電公司之回覆說明為：

已依審查意見於 104 年 12 月 11 日陳報，大會並於 104 年 12 月 11 日函復同意備查。

台電公司之回覆說明，經審查結果可以接受。

6. AREVA 人員於牙套與法蘭交界處鑽孔以安裝定位銷，惟發生牙套與法蘭有相對轉動位移之影響為何。

台電公司之回覆說明為：

(1) 開始執行定位銷之鑽孔時，發生牙套與法蘭有些微相對轉動位移，已立即暫停作業，修改作業程序並換新 O 型環重新鑽孔完成。

(2) 事件造成法蘭上之痕跡，經洽 AREVA 公司評估結果不影響功能。

AREVA 評估原文如下：

The approx. 0.172 inch wide by 0.150 deep scallop/divot in the outer periphery of the sleeve flange at the top surface will not affect the form, fit, or function of the reactor vessel stud hole sleeve.

台電公司之回覆說明，經審查結果可以接受。

(二)修理作業對於證據之保存

1. 螺樁移除的最後階段牽涉到將剩下的材料以鈍器施力使往內潰縮，此一施力的方式請更清楚說明，並請注意此項動作應有完整的規劃以避免使螺樁上螺牙受到損傷，以儘量保存供後續肇因分析的證據(I-10)。

台電公司之回覆說明為：

已參照西屋執行 Mock-up 後修訂之程序書，修訂核三廠特殊程序書 104-PP-05 步驟 7.4，以鈍面工具由外向內加壓較厚之處，使其向內凹陷，加壓過程以不傷及螺孔螺紋及螺樁螺紋為原則，肇因分析準備作業已列入步驟 3.11 據以執行。

台電公司之回覆說明，經審查結果可以接受。

2. 螺樁移除後，相關的檢查程序應擬定完整書面步驟或程序書，例如巡牙必須在目視檢查及螺牙拍照/錄影存證之後，相關步驟次序必須清楚釐定，以免不小心傷害到螺牙的證據。請台電公司詳審西屋之作業程序書(I-11)。

台電公司之回覆說明為：

- (1)已於特殊修理程序書內 7.5 節明訂在螺樁移除後，螺孔巡牙前及巡牙後各執行螺牙拍照/錄影存證，巡牙後執行目視檢查，以確保螺牙受傷之證據及整修後之結果都有適當之紀錄保留。
- (2)西屋之作業程序書已納入檢修特殊程序書，經審查確認其可行性及完整性。

台電公司之回覆說明，經審查結果可以接受。

3. 螺樁在拆除過程中，請用適當的非破壞檢測方法（如超音波）判斷破損的位置，以利保存破損處不被後續拆除作業破壞（請於切除第 40 號螺樁凸出於法蘭面上之部分後執行 UT 檢測，並研議於該螺樁鑽孔後拿出前再次執行 UT 檢測之可行性，以期找出可能之裂縫起始點）(I-16)。

台電公司之回覆說明為：

將遵照審查意見，於切除第 40 號螺樁凸出於法蘭面上之部分後執行 UT 檢測。

- (1) 鑽孔後再由內孔執行 UT，因龜裂瑕疵一般為徑向，由內孔 UT 不易判讀，且牙面會造成判讀困難，故須由端面執行 UT。
 - (2) 切除螺樁後執行 UT 檢測，檢查螺樁螺牙有無裂痕，確認是否有應力過當或製造瑕疵造成螺樁材質受損之起始點。
4. 後續之肇因分析應有完整規劃，此規劃應在開始移除作業前準備好，以免某些移除作業會干擾到日後肇因分析的工作或證據(I-12)。

台電公司之回覆說明為：

- (1) 台電公司已接洽工研院材料所專家參與現場蒐證，以了解此次螺樁鬆脫不易最可能之肇因。此次移出過程將依工研院專家指導，儘量保留所有證據，以供肇因分析之用。這些規劃皆會在職前講習跟所有工作人員說明。
- (2) 有關移除作業前肇因分析準備作業之相關規劃摘要說明如下列，將列入程序書內據之執行，以作為日後肇因分析的工作或證據。
 - (a) 切除螺樁後執行 UT 檢測，檢查螺樁螺牙有無裂痕，確認是否有應力過當或製造瑕疵造成螺樁材質受損。
 - (b) 搪孔啟始前 2 吋，應小心對心，並做好查驗，確認搪孔不會傷及螺孔螺牙，以保存肇因證據。

- (c) 搪孔後之殘根於內壓取出時將小心施力，避免裂片彎曲。
- (d) 碎片將依方位編號，完整保持在電廠內，做為肇因分析之用。
- (e) 殘根移除後，將先進行目視檢測並錄影存證，再進行清理，確保可能之肇因事證不會被清除。

台電公司之回覆說明，經審查結果可以接受。

(三) 設計修改案(DCR) 審查

1. 牙套應力分析書未就厚度進行分析驗證，應進一步釐清(III-3)。

台電公司之回覆說明為：

- (1) 經洽 AREVA 公司，牙套的厚度在修理和原始配置的比對性分析並不是最關鍵的參數，對應施加在牙套上負載所產生之應力計算，也不是一個關鍵參數。
- (2) 關鍵參數是承載剪應力之螺牙面積大小和應力分析書第 6.5 節所計算的唇部區域。唇部區域厚度約 0.055 吋，此值可視為牙套的代表厚度。
- (3) 應力分析書第 6.1~6.4 節，係針對牙套中有俾製內、外螺牙部位，證明其螺牙咬合處所承載受力總面積(承載能力)，等於或高於原螺孔/螺樁之螺牙咬合面積。由於咬合處螺牙所承受的純屬剪力(Pure Shear)，此部位牙套厚度，基本上並未承載明顯負荷。螺牙咬合主要是靠螺牙本身厚度承載剪力，而第 6.5 節分析目的是要驗證牙套上端介於爐蓋接合面及 O 型環中間一小段未俾製螺牙部位之牙套厚度，因受爐蓋 Pre-load 影響可能產生壓應力(bearing stress)，計算結果仍符合法規應力限值。

台電公司之回覆說明，經審查結果可以接受。

2. 牙套應力分析書第 6.9 節最後一段敘述：“By inspection, the flange is massive compare to the vessel shell”，應針對法蘭與頂蓋的尺寸或質量加以比較。

台電公司之回覆說明為：

經洽 AREVA 公司計算結果，法蘭厚度抗剪力面積(扣除螺孔後)相對於反應爐壁厚面積大許多，其法蘭抗剪能力約為爐壁之 2.63 倍。

台電公司之回覆說明，經審查結果可以接受。

3. 牙套應力分析書第 6.9 節最後一段敘述：“concluded that secondary stresses and fatigue are negligibly impacted”，應再具體說明。

台電公司之回覆說明為：

依西屋公司原分析報告第 A-175 頁已詳載包括法蘭、螺樁等疲勞分析結果。原設計法蘭之 Usage Factor(疲勞使用因子)相當低約 0.014。法蘭擴孔對影響疲勞之 Peak stress 很小，再加上從疲勞觀點，此處並非 Critical location。

台電公司之回覆說明，經審查結果可以接受。

4. 本修理案之法蘭、螺樁、牙套材料皆不同，依 IWA 4224.3(a)，當使用材料與原始材料不同應評估其適當性，惟 Engineering Information Record 第 8.3 節僅敘述牙套材料可接受，應再說明理由。

台電公司之回覆說明為：

- (1) 經查原設計，法蘭材料 SA-508 CL2，螺樁材料 SA-540 Gr. B24 CL3，本次牙套材料 SA-540 Gr. B23 CL3。
- (2) SA-540 Gr. B24/B23 CL3 為同等級之材料，均為 Regulatory Guides 1.65-1973 中允許用作反應爐螺樁之材料，可以互用，兩者為鉻-鎳-鉬含量限值略有不同之低合金鋼，其降伏強度 $S_y=130$ ksi 及拉力強度 $S_t=145$ ksi 相同。
- (3) 由於牙套材質 SA-540 Gr. B23 CL3 與原設計螺樁材料 B24 CL3 可以互用，因此其外螺牙與法蘭新攻螺孔之關係類同原螺樁與原螺

孔，未增加損傷母螺孔之風險，故牙套使用與螺樁(B24 CL3)雷同之 SA-540 Gr. B23 材質是可接受的。

(4)比對 ASME SEC II 1974 edition, SA-508 CL 2 (RV flange)與 SA-540 Grade B24/B23 CL 3 Stud Bolt/Sleeve 材質物理性質如下：

SA-508 CL2, $S_y=50$ ksi, $S_t=80\sim 105$ ksi (法蘭材質)

SA-540 Gr. B24 CL 3, $S_y=130$ ksi, $S_t=145$ ksi (螺樁及墊圈材質)

SA-540 Gr. B23 CL 3, $S_y=130$ ksi, $S_t=145$ ksi (牙套材質)

台電公司之回覆說明，經審查結果可以接受。

第六章 螺件檢測結果

一、概述

核三廠本次大修期間針對反應爐蓋螺件執行之非破壞檢測項目與結果，經摘述台電公司報告如下表，除 40 號螺件執行修理之相關檢測外，其餘螺件亦執行加強檢測，結果皆合格。

原有螺件	檢測結果
螺孔	除 40 號螺孔外，其餘 57 個螺孔執行目視檢查合格。修理前與修理後執行 39、40、41 號螺孔手動超音波檢測合格。
螺帽與墊片	除 40 號螺帽與墊片外，其餘 57 組目視檢查合格。
螺樁	除 40 號螺樁外，其餘 57 根螺樁磁粒檢測合格。
新螺件	檢測結果
40 號螺孔	安裝牙套後執行手動超音波檢測合格。
40 號新螺帽與新墊片	目視檢查合格。
40 號新螺樁	磁粒檢測合格。
新牙套	外螺牙磁粒檢測合格，內螺牙目視檢查合格

二、審查發現

針對螺件檢測結果，本會專案小組在審查過程主要就檢測方法與結果，及未來檢測計畫進行提問。

(一) 檢測方法與結果

1. 請說明如何執行螺孔螺牙部位之超音波(UT)檢測，以及螺牙判定可接受或不可接受之檢測標準。另螺樁修理計畫中，僅說明 UT 檢測的程序 ISI-UT-31-1 與結果評估所依循之 ASME 法規，但以照相或錄影方式執行目視檢查，對於如何判定有效螺牙數，則並未說明所依據之法

規或程序為何？請補充目視檢查的檢測程序，並明列對於螺牙是否受損的判定準則(I-11)。

台電公司之回覆說明為：

- (1)螺孔螺牙部位執行超音波(UT)檢測，係以直束探頭於法蘭面檢測螺牙根部算起徑向 1 吋範圍之螺孔母材。
- (2)接受標準係依據 ASME B&PV Code Section XI IWB-3515.3。
- (3)若發現有長度超過 0.2 吋(由螺牙根部算起徑向 0.2 吋)之瑕疵，則判定為不可接受。
- (4)對核三廠反應爐法蘭螺孔之照相錄影檢測，係依 12 月 11 日發行之第 40 號螺樁目視檢查特殊程序書執行。對於螺孔螺牙受損的判定準則為是否有變形/剪傷/腐蝕/破碎等異常情況。

台電公司之回覆說明，經審查結果可以接受。

2. 本會駐廠視察員發現螺樁移除前執行 54 個螺孔螺牙目視檢測結果，有 41 個螺孔未發現螺牙有變形/剪傷/腐蝕/破碎等異常情況，但有 12 個螺孔有潤滑劑未完全清理之情況(編號 1、2、3、9、16、24、30、34、35、38、41、44)，應再補充潤滑劑未完全清理之 12 個螺孔及導引桿孔 3 孔之目視檢查結果。另檢測結果第 15 號螺孔第 1 牙變形，應補充改善措施。針對潤滑劑未完全清理及螺孔牙變形之情事，應有維護作業上之改善措施(I-18)。

台電公司之回覆說明為：

- (1)潤滑劑清理後 12 個螺孔再目視檢查結果未發現異常；導引桿孔 3 孔於牙套安裝後檢查結果未發現異常。
- (2)第 15 號螺孔第 1 牙變形之狀況記錄於程序書上；此一狀況符合法規一牙以內(含一牙)之接受標準，判定合格。螺樁回裝前將進行整修巡牙作業及目視檢查，並把結果登錄於程序書 1327 表四。
- (3)將依西屋公司建議，以刷輪配合轉動馬達來執行螺孔清理工作，

並增訂清孔時間及降低清孔時刷輪移動速度。每孔至少清孔 2 分鐘以上，確保清孔之有效性；本次螺孔為配合目視檢查皆已清理完成，爐蓋回裝後，安裝螺樁前將再依程序書執行清孔補強，另螺孔潤滑將依西屋公司建議，不再塗抹潤滑劑。

台電公司之回覆說明，經審查結果可以接受。

(二)未來檢測計畫

1. 請補充說明未來牙套之檢測計畫(III-9)。

台電公司之回覆說明為：

(1)核三廠二號機反應爐法蘭第 40 號螺孔裝置牙套之周圍母材:依照 ASME SEC. XI 2007 年版及 2008 年增訂版要求，屬核能一級組件，TABLE IWB-2500-1 歸類別為 B-G-1 項目 6.40，應執行體積檢測，以 ISI-UT-31-1R5P3 反應爐壓力槽凸緣(法蘭)面螺樁孔超音波檢測，依 FIG. IWB-2500-12 從法蘭面向下 12 吋、螺孔螺牙 360 度徑向往外 1 吋範圍以直束超音波執行檢測，以確認螺孔周圍母材之完整性，檢測計畫如下：

a. 本次大修執行第40號螺孔裝置牙套之周圍母材運轉前檢測 (PSI)

b. 運轉期間檢測:於下次大修(第23次)增加檢測，並依原編定在第四個十年運轉期間檢測計畫執行。

(2)牙套內表面螺牙:依照 ASME SEC. XI 2007 年版及 2008 年增訂版要求，屬核能一級組件，TABLE IWB-2500-1 歸類別為 B-G-1 項目 B6.50，應執行 VT-1 檢測。檢測計畫如下：

a. 本次大修執行第40號螺孔裝置牙套內表面螺牙之運轉前檢測 (PSI)

b. 運轉期間檢測:於下次大修(第23次)增加檢測，另將修訂核三廠第四個十年運轉期間非破壞檢測計畫，增加第40號螺孔牙套內

表面螺牙之運轉期間檢測。

(3)第 40 號新螺樁:

- a. 本次大修執行第40號新螺樁運轉前檢測(PSI)磁粒檢測。
- b. 運轉期間檢測:於下次大修(第23次)增加檢測,並依原編定在第四個十年運轉期間檢測計畫執行。

台電公司之回覆說明,經審查結果可以接受。

第七章 肇因調查及改善措施

一、概述

本次事件故障調查台電公司委託國內研究機構進行。台電公司報告說明螺樁殘根目視檢查結果，損傷區域為最下方第 1 至 3 牙及第 8 牙，如圖 11 所示。



圖 11 螺樁損傷區域

螺孔螺牙目視檢查結果，螺孔法蘭面向下深度約 5.5~6.5 吋處(自上方算起第 28~35 牙，共 8 牙)受損;螺孔的上方第 1 牙遭撞擊而向下變形，如圖 12 所示。另執行超音波檢測並未發現螺牙母材有異常瑕疵。



圖 12 目視檢驗確認螺孔螺牙損傷區域

針對螺孔損傷之第 28~35 牙部分，利用非破壞複製膠膜(replica)方

式，以高倍率電子顯微鏡執行檢查，發現嚴重損傷區的下方螺牙較上方螺牙存在更嚴重的刮傷和擠壓變形，如圖 13 所示。

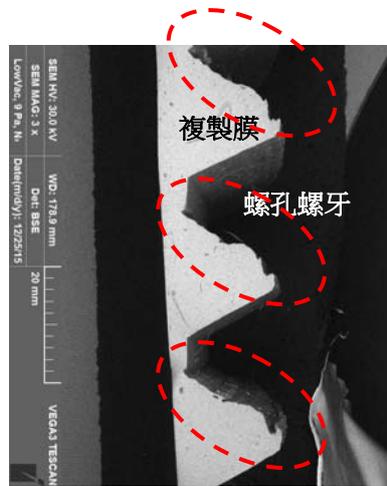
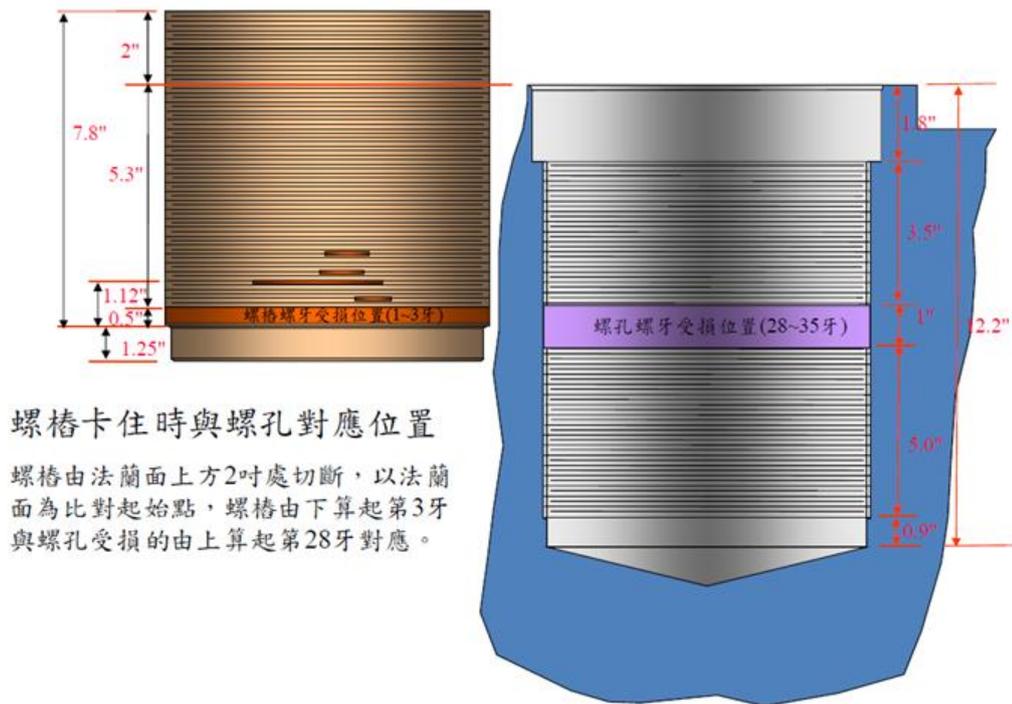


圖 13 複製膠膜檢查結果

台電公司及其委託之研究機備，依檢查之結果研判肇因為第 40 號螺樁前次安裝時，可能因操作不順而與法蘭螺孔發生碰撞，造成螺孔上方第 1 牙螺牙向下變形和螺樁下方第 1 牙螺牙向上變形的損傷結果。對於第 40 號螺樁旋入作業尚不構成障礙，但在此次大修螺樁退出時，螺樁下方第 1 牙之向上變形區與螺孔螺牙之下方斜面產生過巨的刮磨損傷，不斷產生細小磨屑，並逐漸累積至相當體積，終致旋轉至螺孔第 28~35 牙處(由上向下數)發生嚴重的磨擦黏結(galling)現象，使得螺樁無法順利退出。

磨擦黏結(galling)現象係兩個接觸的金屬表面發生相對運動，強度大的材料會將強度小的材料拉扯而斷裂，斷裂細屑不斷遭受輾壓而硬化。此硬化細屑在相對運動過程中，又不斷持續刮出金屬細屑，斷裂細屑最終造成對磨件卡住或局部黏結。



螺樁卡住時與螺孔對應位置

螺樁由法蘭面上方2吋處切斷，以法蘭面為比對起始點，螺樁由下算起第3牙與螺孔受損的由上算起第28牙對應。

核三廠針對本案之改正行動及預防再發生措施如下：

1. 針對本案肇因，核三廠改善措施如下：

- (1) 每次大修拆出螺樁後，清理螺樁螺牙後執行目視檢查，並以螺帽巡牙，對破損螺牙、變形螺牙、毛邊、擦傷壓痕等進行整修並將異常狀況及處理結果紀錄程序書。
- (2) 如果發現螺樁受損，對應之螺孔要詳細檢查是否也有受損，並做必要之整修，留存紀錄。
- (3) 螺孔清理後，對螺樁檢查發現有損傷時，應目視檢查其對應之螺孔，並以 go-gauge 檢查，確認螺牙完整性。
- (4) 安裝螺樁時，以氣壓活塞缸抵銷螺樁重量，避免撞到傷到第一牙。並於旋入或旋出螺樁時，以吊車控制活塞缸活塞伸出量約行程一半，確保補償重量之功能；安裝時對準螺孔，避免傾斜造成錯牙旋入而傷到螺牙；旋入螺樁時，先以手動旋入 3 牙確定過程順暢後，才用氣動工具旋入。
- (5) 旋入螺樁時，若發現不正常摩擦力增大，調整重量抵消設備無法

改善時，以正常扭力旋出螺樁，檢查螺樁及螺孔，找出磨擦增大原因，無法排除時必須尋求協助，不可強行旋入。

2. 對於國外文獻蒐集之肇因，核三廠訂定相關防範措施如下：

- (1) 法蘭與螺樁未對準：回裝螺樁前必須手動緩慢對準螺孔，確定過程未發生碰撞，先以手動旋入 3 牙確定過程順暢後，才用氣動工具旋入。
- (2) 防止異物入侵：回裝螺樁前使用刷輪，配合轉動馬達，依程序書訂定之清孔時間及移動速度做螺孔螺牙的有效清理，並以吸塵器移除所有的異物。
- (3) 不正確或無螺牙潤滑：為求更佳之螺牙間潤滑性，螺樁螺牙改使用 N-5000 潤滑劑，並依西屋技訊 WCAP-9464 指引，塗佈潤滑劑時，以尼龍不斷線纖維薄薄的塗一層，避免厚塗；螺帽及螺孔的母螺牙不要塗潤滑劑。
- (4) 腐蝕造成副產物於螺樁或法蘭螺牙處積聚：每次螺樁退出後，檢查螺樁與螺孔清潔度與是否積存腐蝕產物。
- (5) 螺樁與反應爐法蘭螺孔之螺牙錯扣：回裝螺樁時，先以手動旋入 3 牙確定過程順暢沒有錯扣後，才用氣動工具旋入。
- (6) 材料成分含有雜質或製程缺陷：持續遵照核能品保方案執行採購及維修作業。

二、審查發現

針對肇因調查及改善措施，本會專案小組在審查過程主要就可能肇因蒐集及肇因調查方法進行提問。

(一) 可能肇因蒐集

1. 所提可能之肇因係依據 1985 年出版之 EPRI NP-3950, “Equipment for Removing Seized Closure Studs From Reactor Pressure

Vessels” 報告，並未納入國外類似案例(最早發生的在 1986 年)的肇因，應再彙整國外類似案例之肇因，提出澄清說明(I-21)。

台電公司之回覆說明為：

- (1)經查 Callaway 核能發電廠之反應爐第 18 號螺樁，於 1996 秋天所發生的卡住情形，其原因為螺孔內之碎屑(debris)使得螺樁卡住。至於第四章所列共 27 支反應爐螺樁卡住的案例中，除此例之外其餘 26 支卡住的螺樁其肇因不易查得。
- (2)另依據 Exlon 公司之 Byron & Braidwood 執照新續申請文件，1991 年 Braidwood 二號機第 35 號和 2010 年 Byron 二號機第 11 號反應爐蓋螺樁卡住事件之肇因追查結果，非因老化因素(譬如 SCC 應力腐蝕龜裂、粒間應力腐蝕龜裂或因磨耗及腐蝕所造成的材料減損)所造成。
- (3)由核能發電協會(WANO)日本東京中心人員傳回資料顯示，日本目前只有玄海原子力發電所 PWR 機組#1 號機，於 2008 年(平成 20 年)1 月 18 日發生過類似核三廠反應爐蓋螺樁退出困難問題。其肇因推定為反應爐蓋螺樁(Stud Bolt)再取出作業，因潤滑劑塗佈時或螺樁取出裝置設置時，異物附著於該螺樁之螺紋部，致異物卡住使螺樁退出困難。

台電公司之回覆說明，經審查結果可以接受。

(二)肇因調查方法

1. 肇因分析應提出計劃，並在螺孔開始加工前完成證據的蒐集與保存。螺孔內目前看到疑似金屬細絲或其他異物應蒐集以備日後作成分分析(III-1)。請於微觀金相分析了解其硬化層與硬度(III-8)。

台電公司之回覆說明為：

- (1)針對第 40 號螺孔內螺牙之檢查攝影/錄影紀錄，除原檢測隊目視檢查以攝影機錄影紀錄及西屋公司檢查的高解析度各高程及角度

之照相外，已再依審查意見於 12 月 19 日使用工業內視鏡做螺孔內螺牙之影像攝影紀錄，另規劃於 12 月 21 日上午由國內專業機構以非破壞式的複製膠膜(replica)方式，將其 3-D 損傷形態複製下來供高倍率形態觀察，作為證據保存。

(2)針對第 40 號螺樁卡住肇因分析，除西屋公司的評估及肇因說明外，另委託國內專業研究機構來執行，做有系統的規劃分析，確保能找到真正之肇因，詳細規畫工作如下：

- a. 目視檢查和取樣：第40號螺樁已用機械加工法取出螺樁殘根，針對第1-3牙和第8牙和其他週遭區域進行巨觀目視檢查，並選擇應檢查的取樣位置，以無虞損傷材料組織之切割方式進行試片取樣。反應爐法蘭螺孔損傷8牙部分則以非破壞式的複製膠膜(replica)方式，將其3-D損傷形態複製下來供高倍率形態觀察。
- b. 光學顯微分析：將螺樁第1-3牙損傷區和螺牙正常區的取樣試片進行截面金相顯微組織觀察，以分析螺牙區材料是否存在異常組織或者具有微裂縫等損傷現象。
- c. 電子顯微分析：螺樁第1-3牙試片進行表面和截面的掃描式電子顯微鏡(SEM)分析，包含SEM形貌觀察和能量分散能譜儀(EDS)成份分析，以觀察螺牙區材料是否夾雜其他外來物，或者存在雜質或介在物等；第8牙則進行表面形貌觀察。螺孔區複製膜亦使用SEM進行高倍率形態觀察。
- d. 硬度分析：以表面Vickers微硬度分析配合金相組織觀察結果，檢查螺樁表面是否有硬化處理層或異常脆化現象。
- e. 材質鑑定分析：由螺樁取樣進行ICP化學組成分析，同時進行螺樁硬度分析推估材料強度，以推測螺樁材料規格等級。

(3)由於第 40 號螺孔於在 12 月 14 日凌晨螺樁取出後，先由西屋公司執行清理照相紀錄，後續檢測隊再執行一次清理後續作目視檢查

攝影；原先螺孔內西屋照相看到疑似金屬細絲或異物，同一天在
檢測隊目視檢查錄影及後續現場檢查或攝影都未再發現。金屬絲
位置在螺孔由上算起第 1 牙，本次螺樁旋出卡住位置在螺孔由上
算起第 28 牙至 35 牙，本次螺樁卡住並非此一金屬絲造成。

台電公司之回覆說明，經審查結果可以接受。

第八章 總結

104 年 11 月 12 日核三廠二號機大修執行反應爐開蓋作業時，發生第 40 號螺樁鬆脫不易，由於當時機組已在大修停機狀態，故不影響安全，亦無輻射外釋疑慮。

本會隨即邀集台電公司進行事件說明並要求提出處理對策，台電公司遂陳報修理計畫並於後續陳報修理報告。因應審查作業需求，本會邀請具機械、材料、非破壞檢測背景之專家學者，與本會輻防處、核管處共同組成專案小組。審查作業初期重點為修理作業程序與證據保存作法，修理期間並至核三廠查證相關施工準備作業；審查作業後期重點為修理作業成果與肇因分析結果。

此次螺樁鬆脫不易事件，台電公司評估後採用螺樁移除、安裝螺孔牙套，並使用新螺樁、新螺帽與新墊片，修理作業於 12 月 25 日完成。

台電公司及其委託之研究機備依螺樁及螺孔之跡證分析結果，推估第 40 號螺樁前次旋入時，與法蘭螺孔發生碰撞，造成螺孔上方第一牙螺牙向下變形和螺樁下方第一牙螺牙向上變形的損傷結果，變形情況對當時第 40 號螺樁旋入作業尚不構成障礙。但此次大修螺樁退出時，螺樁第 1 牙之向上變形區與螺孔螺牙之下方斜面產生刮磨損傷，隨著螺樁旋出不斷產生細小磨屑，並逐漸累積至相當體積，旋轉至螺孔第 28~35 牙處(由上向下數)終致發生嚴重的磨擦黏結(galling)現象，使得螺樁無法順利退出。依檢測結果及跡證，肇因之相關說明應屬合理。

經由第二至七章審查發現章節之討論與答覆，總結本次事件台電公司已適當地規劃與執行修理作業，針對肇因已提出對應改善措施，對於其他業界案例肇因亦訂定相關防範措施，整體作業經本會審查可以接受。