

行政院原子能委員會
委託研究計畫研究報告

除役期間設備與機具環境影響參數評估

**Influential assessment of environmental parameters on facility and
machine during the shutdown stage of plant decommissioning**

計畫編號：108B008

受委託機關(構)：國立清華大學

計畫主持人：林洸銓

聯絡電話：(03) 5715131 ext.343

E-mail address：kc-lin@mx.nthu.edu.tw

協同主持人：馮玉明

研究期程：中華民國 108 年 4 月至 108 年 11 月

研究經費：新臺幣 52.3 萬元

核研所聯絡人員：林獻洲

報告日期：108 年 11 月 29 日

目 錄

目 錄	I
中文摘要	1
ABSTRACT.....	2
壹、計畫緣起與目的	3
貳、研究方法與過程	4
參、主要發現與結論	5
一、國際上相關電廠除役案例	5
二、概述餘熱移除系統及安全注水系統與停用之影響	8
(一) 餘熱移除系統.....	8
(二) 安全注水系統.....	12
(三) 移除餘熱移除系統及安全注水系統在 Mode 5+ 下之影響.....	13
三、除役機具進駐與機具作動等所造成環境對相連管路與留用設備等可能之劣化機制	15
(一) 震動或粉塵對除役機具維護管理之影響.....	15
(二) 運轉溫度對除役機具維護管理之影響.....	19
肆、參考文獻	31

中文摘要

依據我國「核子反應器設施管制法」規定，核設施在永久停機後，須以拆除方式完成除役；然而，就我國核電廠之現況而言，在用過燃料池已幾近飽和、用過核燃料乾式貯存設施未取得運轉執照狀況下，於進入除役階段前，即可能面臨反應器爐心內用過核子燃料無法全數移出之情形。此時核電廠雖不再運轉，但部分機械系統、廠房結構、電氣設施，實際仍負有維持電廠核安、輻安、工安等相關仍需視同運轉之安全要求，故需持續對此類之系統/設備/組件，進行必要的維護與檢測作業，以維持其應有設計功能。由是之故，本計畫乃參考國際除役作業規定，留用設備維護相關之安全規範及研究報告，從而彙整出符合我國現況相對應之評估方法與影響參數，評估除役過渡期間，現場環境(包含溫度、濕度、壓力與粉塵等)對留用機械設備與除役機具之影響效應，以提供留用機械設備與除役機具堪用性與可靠性之參考依據，進而協助上位計畫研究核能電廠除役期間停機過渡階段安全管制技術。

Abstract

In our country, the nuclear power plant would be in the transition stage after the reactor decommissioning. During this stage after the reactor shutdown, the spent fuel pool would be fully occupied and should be stored in the core since the operation license has not been proved for the dry storage facility. This decommissioning activity is different from that for the Europe, American, and Japan etc. With the fuel stored in the core, part of safety related equipment, facility, and system should be still retained to maintain their safety function based on appropriate inspection and surveillance test. Therefore, it is crucial to investigate the effects of environmental conditions (including temperature, pressure, humidity, and particles, etc.) on the function and availability of the retained machines and facilities. The research results can provide the useful information for the their regulation during the shutdown stage of plant decommissioning by the regulatory staff.

壹、計畫緣起與目的

國際先進之核能使用國家對於核能電廠在運轉執照到期，業者提交之除役計畫業經管制單位認可後，即進入除役階段，此時，在爐心之用過核燃料待衰變熱降低一段時程後便全數移出。依據我國「核子反應器設施管制法」規定，核設施在永久停機後，須以拆除方式完成除役；然而，就我國核電廠之現況而言，在用過燃料池已幾近飽和，用過核燃料貯存設施未取得運轉執照狀況下，於進入除役階段前，即可能面臨反應器爐心內用過核子燃料無法全數移出之情形。此時核電廠雖不再運轉，但部分機械系統、廠房結構、電氣設施，實際仍負有維持電廠核安、輻安、工安等相關仍需視同運轉之安全要求，故需持續對此類之系統/設備/組件，進行必要的維護與檢測作業，以維持其應有設計功能。故應廣泛參考國際除役階段執行相關留用設備維護作業及法源依據，以及相關之安全規定及研究報告，從而彙整出符合我國現況相對應之評估方法、影響參數及準則草案。

由是之故，蒐集彙整國外除役階段電廠所引用之相關法規，除役技術引用之法規與規範以及對於對留用機械設備、除役機具與留用機械設備及除役機具相互間之影響有關的管制法規等，並根據我國國情與電廠除役階段之特殊現況，評估除役與過渡期間，現場環境(包含溫度、濕度、壓力與粉塵等)對留用機械設備與除役機具之影響效應，以提供留用機械設備與除役機具堪用性與可靠性之參考依據，進而協助核能電廠除役期間設備維護安全之管制。

貳、研究方法與過程

我國核一廠停機除役階段，爐心與燃料池都儲存著用過燃料，此與大多歐美日等國電廠除役作業迥異。因此，需要蒐集研究國外類似電廠除役案例、參考國外相關除役法規與作業，協助彙整出符合核一廠相對應之現況。評估除役與過渡期間，現場環境(包含溫度、濕度、壓力與粉塵等)對留用機械設備與除役機具之影響效應，以提供留用機械設備與除役機具堪用性與可靠性之參考依據。而依據核一廠 PDSAR (Pre-Defuel Safety Analysis Report)，除役期間停機階段與過渡階段留用之系統與機械設備繁多，本計畫之研究於今年度是以餘熱移除系統及安全注水系統為主，計畫執行方式與步驟，可分述如下：

一、蒐集彙整國際上相關電廠除役案例，在爐心仍有燃料之過渡階段以及燃料已移除之除役作業前期階段，反應器廠房區內，針對作業時所規劃之停用與使用之安全設備；

二、整體概述餘熱移除系統及安全注水系統，並探討在爐心仍有燃料之過渡階段(Mode 5+)，停用相關系統所造成之影響；

三、蒐集彙整國外相關報告，討論運轉溫度對除役機具維護管理之影響；

四、研究除役機具進駐與機具作動等所造成溫度、濕度、粉塵、振動負載與運作頻率等參數，造成相連管路與留用設備等可能之劣化機制；

五、協助上位計畫「核能電廠除役期間停機過渡階段安全管制技術研究」進行相關學術上的協助；

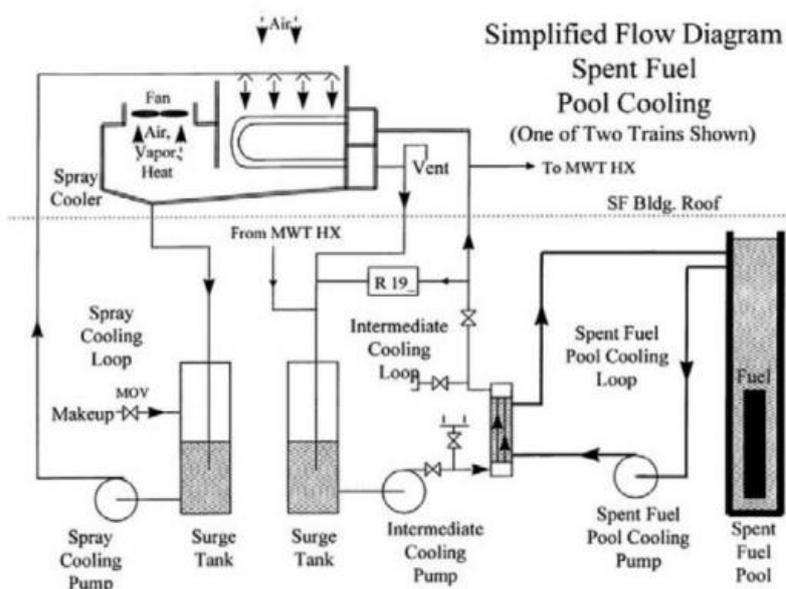
六、相關報告之撰寫。

參、主要發現與結論

一、國際上相關電廠除役案例

燃料已移除之除役作業前期階段在美國進入除役的電廠(如 Crystal River 3、Kewaunee、SONGS 2 & 3、Vermont Yankee 和 Fort Calhoun)皆計畫將用過燃料儘速移出廠房，規劃在 4~6 年內將燃料全數移出。若無法儘速提出，則考慮建立用過燃料池獨立島區(spent fuel pool island, SFPI)，其概念如圖 1 所示。由於停機後用過燃料池之熱負載將迅速降低，應用 SFPI 概念可允許減少其它用過燃料池的冷卻支援系統，其概念為建立可自給自足(self-sufficient)之系統，如：

- 建立氣冷風扇(免除廠用海水系統)
- 使用可拋棄式或池內離子交換樹脂單元
- 安裝燃料廠房排氣監測系統
- 於鄰近燃料廠房處建立專用水槽以補充池水



圖一、用過燃料池島區(SFPI)示意圖

Oyster Creek 核電廠是美國沸水式反應器發電廠。該工廠位於新澤西州，於 1969 年正式商轉。該核能電廠具有美國最古老的單機組沸水式反應器，淨發電容量為 636 MWe。在 2000 年當時因為經濟原因 GPU Energy 規劃將其除役，其除役規劃自 1997 年開始。雖然其後在 2003 年被 Exelon Corporation 收購，2005 年 7 月，Exelon Nuclear 旗下的 AMERGEN 公司向核管會提出執照更新，核管會通過展延至 2029 年 4 月，及時免除了關廠危機。但由於 2010 年時紐澤西州環境保護局 (New Jersey Department of Environmental Protection, NJDEP) 修改了當地的冷卻水相關法令，AMERGEN 公司評估 Oyster Creek 電廠為符合新的環保法規需多花費至少 8 億美元，因營運成本問題，所以該電廠於 2018 年進入除役階段。由 EPRI 000000000001000093 報告可得知，在 1997 年準備除役時，Oyster Creek 核電廠進行了許多前期準備工作，如針對電廠員工方面的思想方向的轉型，報告建議可從以下幾點著手：

- 參觀除役中的電廠
- 研究並確定廚藝過程需用到的技術
- 確認除役目標與計劃
- 成立促進除役進程的相關研討會

而針對除役前期規劃與執行可分為以下幾項來著手，如：除役之計劃和準備；電廠除汙與拆除之準備與規劃；電廠除汙與拆除。第一階段除役之計劃和準備部分，在此階段計劃活動包含以下內容：

- 規劃假設與設計基準

- 項目可行性之研究
- 規劃整體時間表
- 修改流程並制定查核點
- 過渡期工作人員規劃
- 電廠設計修改與成本估算
- 過渡階段緊急計劃與用過燃料存放計劃與管理
- 與電廠員工相關勞資協議

而第二階段涵蓋從電廠停機到正式除汙與拆除，在此階段會對電廠進行修改，以利後續施工，此階段任務包含：

- 去除石棉
- 操作系統的特徵化
- 主要系統的化學除汙
- 對除役機具會用到的設備加以改裝，如備用電源、備用的用過燃料池之冷卻系統、監視系統、輻射監控系統等
- 安裝臨時設施
- 安裝放射性廢物處理系統

在第三階段包括拆除和運輸大型零組件、剩餘零組件的去汙和工廠結構的拆除。具體項目包括：

- 去除大型零組件，如壓力容器與蒸汽產生器
- 對拆除的零組件進行除汙
- 用過燃料池獨立島區的設計與施工
- 液體廢水處理
- 去除被輻射活化的混泥土和結構材料

二、概述餘熱移除系統及安全注水系統與停用之影響

(一) 餘熱移除系統

在正常停機後，反應爐殘餘蒸汽由主冷凝器吸收，爐水的冷卻則由餘熱移除系統(Residual Heat Removal System, RHR)運轉停機冷卻模式(RHR 系統功能之一)負責。餘熱移除系統有以下各種運轉型態：

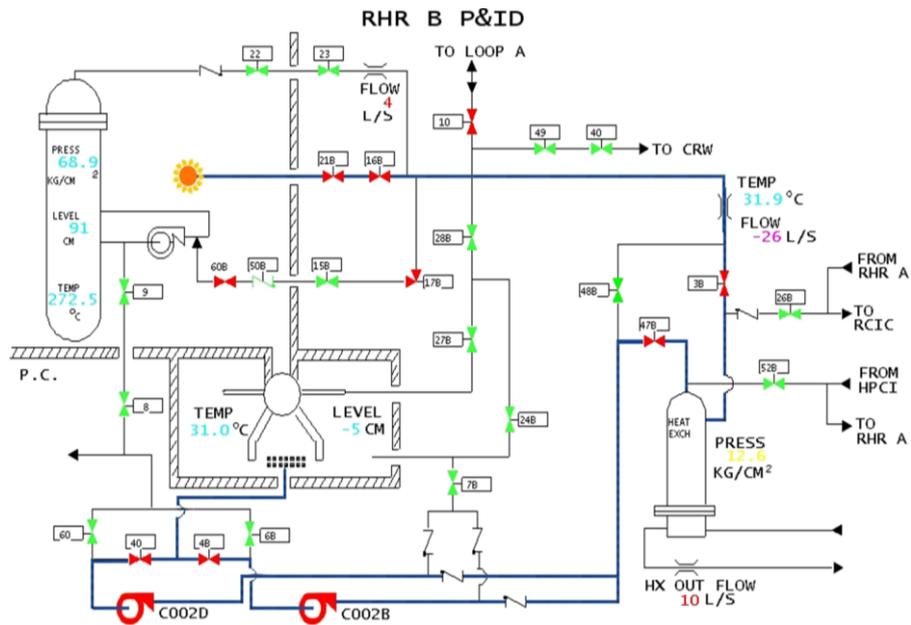
1. 低壓注水型態
2. 圍阻體噴灑型態(含抑壓槽噴灑)
3. 蒸汽凝結型態(已取消不用)
4. 抑壓槽冷卻型態
5. 停爐冷卻型態 (含槽蓋噴灑)。設有 RHR 遙控停機盤 (RHR-ASP)
6. 試運轉型態
7. 燃料池冷卻型態
8. 替代停爐冷卻型態

而其中，低壓注水型態為當反應爐發生失水事故時，與其他之爐心緊急冷卻支系統連合，以恢復並保持爐水水位，防止燃料溫度超過 2200°F；圍阻體噴灑型態則是為了防止管路破裂事故後，圍阻體內部壓力及溫度過高而設，其管路如下：

1. 乾井噴灑型態

水泵經由進水閥 E11-F004 自抑壓槽取水，泵送出冷卻水，經過逆止閥 E11-F031，手動閥 E11-F034，電動閥 E11-F047，並經熱交換器使冷卻水溫度下降，再經 E11-F003、E11-F016、E11-F021，供給到位於乾井內之噴灑

集管，將冷卻水向圍阻體內部噴灑。乾井內之噴灑集管灑水，可使乾井內的洩漏蒸汽凝結，並降低乾井壓力。此噴灑之水收集到乾井底部，當積水超過乾井通洩管之高度時，積水則溢流洩至抑壓槽。因圍阻體內部裝有許多電氣設備，故此系統必須在確實需要，才可使用。使用上有行政與邏輯方式管制。



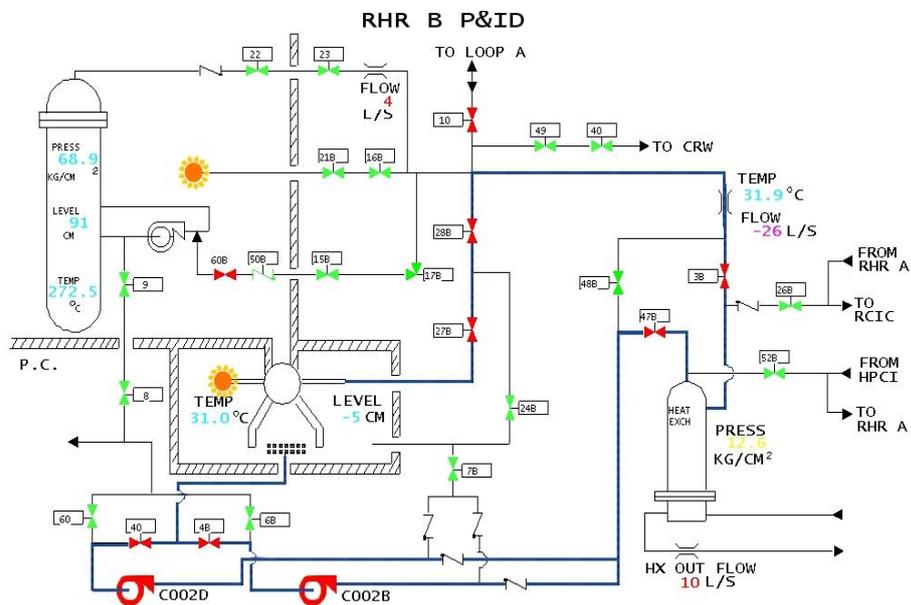
圖二、乾井噴灑型態之管道和儀表圖

2. 抑壓槽噴灑型態

在主蒸汽管安全釋放閥動作後，或 LOCA 事故後的 RPV 洩壓動作時，抑壓槽內空間亦可能有大量的熱空氣。必要時可以起動本系統的抑壓槽噴灑型態，經 E11-F028, E11-F027 向抑壓槽內空間噴灑冷卻水，使其冷卻並降低壓力。其流程與抑壓槽冷卻型態相似，僅在冷卻水泵送回抑壓槽時改由 E11-F028, E11-F027 向抑壓槽內空間噴灑。抑壓槽噴灑型態使用時，可能會造成抑壓槽內的裝置(如：抑壓槽—乾井真

空破除器)故障，故目前在正常狀態下已不用，僅在 EOP 中使用。

而抑壓槽冷卻型態則是當 HPCI 或 RCIC 運轉過久或安全/釋放閥開啟過久，都會促使抑壓槽內水溫上升(可能是 ECCS 動作，亦可能是洩漏、手動動作或測試)。抑壓槽水溫度過高，不但會喪失其冷卻能力(熱容量)，而且也會使低壓 ECCS 系統水泵(RHR 水泵及 CS 泵)的 NPSH 不足。此時需經由本系統的抑壓槽冷卻功能，來降低抑壓槽水溫至運轉規範的限制值 95°F 之下。抑壓槽冷卻型態是利用 RHR 水泵，經進水閥 E11-F004 自抑壓槽取水，泵送出冷卻水，經逆止閥 E11-F031，手動閥 E11-F034，電動閥 E11-F047，經熱交換器，E11-F003，E11-F028，E11-F024 等閥進行冷卻。冷卻後之水再回流至抑壓槽。



圖三、抑壓槽噴灑型態之管道和儀表圖

蒸汽凝結型態已不用的原因為 E11-F052 A/B 易內漏，

而 TORUS 設計之負荷並未考量因 E11-F052 A/B 洩漏蒸汽加壓 RHR 熱交換器，致使熱交換器釋壓閥動作開啟而排至 TORUS 之熱負載。目前該管路已加盲板 (SSF-001) 停用，以克服造成 TORUS 高溫，高水位問題；停爐冷卻型態則是在反應爐停爐期間，反應爐可依靠運轉 RCIC 降壓，也可以利用各蒸汽管路洩水閥、主蒸汽管旁通閥等設備降壓(降溫)。當控制棒全插入後，反應爐壓力已低(9.5 kg/cm² 以下)，上述方式降壓降溫將不夠快速，此時可使用 RHR 之停爐冷卻型態，將反應爐按規定之冷卻速度冷卻，其管路如下：

- (1) RHR 自反應爐再循環系統 B 之吸水管側取水
- (2) 經過停爐冷卻隔離閥 E11-F009，E11-F008，再經進口閥 E11-F006 到 RHR 水泵
- (3) 爐水經 RHR 水泵加壓後，經逆止閥 E11-F031、E11-F047 到熱交換器冷卻後，由熱交換器再經 E11-F003、E11-F017、E11-F015 等閥後，注入再循環出口迴路 A 或 B 送回反應爐(一般多使用 B 迴路)
- (4) 熱交換器是利用廠用海水或緊要海水系統來做冷卻。爐水降溫率是利用熱交換器之旁通閥，調整流經熱交換器之爐水流量來控制
- (5) 為使反應槽頂部能均衡的冷卻下來，在反應槽蓋頂內，設有一噴嘴，被冷卻之爐水可經 E11-F023、E11-F022 及逆止閥 E11-F019 等閥，自壓力槽蓋頂部向內噴灑冷卻水，以降低頂蓋區域壓力，並防止爐槽內部上下溫差過大

(二) 安全注水系統

安全注水系統(Safety Injection System)又稱為 Emergency Core Cooling System。其設計目的為當反應爐發生設計基礎爐水流失事故(Design Basis Loss of Coolant Accident, LOCA)時,能在很短時間內及時補水,以防爐內燃料熔燬,同時配合一次圍阻體與二次圍阻體,共同限制放射性物質外洩,以保護周遭民眾及其財產免受輻射傷害。其容量設計是按照反應爐額定出力的 105%(1864 MWt),而此系統必須能由偵測爐心失水事故徵象之偵測裝置自動起動,而不需由值班人員決定或操作;且不需依賴廠外或主發電機供給動力,而是取自緊急交流電源和直流蓄電池電力。

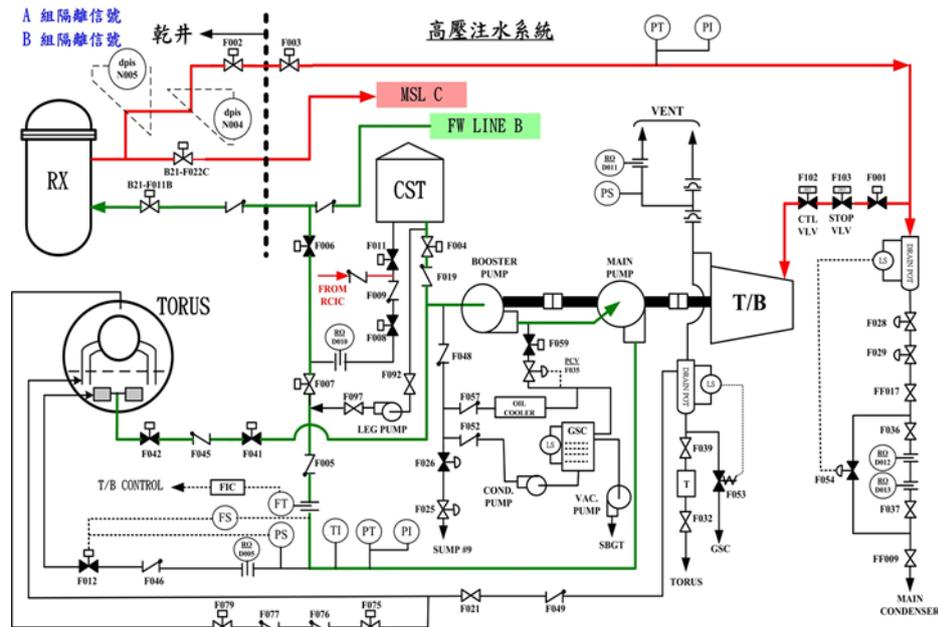
在燃料外形不變之情況下,本系統之注水與噴灑才有效果,因而燃料護套決不可熔燬,所以 ECCS 設計要能保持燃料護套溫度低於 2200°F 為基礎。主要由四個支系統所組成:

1. 高壓注水系統(High Pressure Core Injection, HPCI)
2. 自動洩壓系統(Automatic Depressurization System, ADS)
3. 爐心噴灑系統 (Core Spray, CS)
4. 低壓注水系統(Low Pressure Core Injection, LPCI)

在其中高壓注水系統與自動洩壓系統屬於高壓設備,於高壓力時動作。高壓注水系統係利用反應爐餘熱產生之蒸汽推動小型汽機,進而驅動水泵打水進入反應爐,因而本系統不必依賴外來電源或動力,就可一面消耗反應爐餘熱,來降低反應爐壓力,另一方面又可利用驅動水泵來打水,補水進入反應爐,

而小汽機之排汽則排至壓力抑壓槽(TORUS)冷卻。而自動洩壓系統則由自動控制信號，動作開啟五個自動洩壓閥，將反應爐蒸汽洩至壓力抑壓槽內，並藉由槽內的水使蒸汽冷凝。此兩系統主要目的在使反應爐壓力降低，本身並無長期冷卻爐心之功能。

低壓注水系統與爐心噴灑系統屬於低壓設備，能用以長期冷卻爐心。此二系統均使用緊急交流電源，其水泵之水源正常取自抑壓槽，水打入爐心後，經破管處洩至乾井，再流入抑壓槽，形成一閉路循環。



圖四、高壓注水系統之管道和儀表圖

(三) 移除餘熱移除系統及安全注水系統在 Mode 5+下之影響

針對此項我們主要蒐集並參考核研所所撰寫的”核一廠停機狀態下爐心燃料完整性之嚴重事故分析”報告。其主要以MAAP 5.04 版本來作為分析工具。採用 MAAP 5.04 版本模組原因為其相對於 MAAP 5.03 新增了更詳細的節點，包括爐

心、主蒸汽管、再循環管路。在假設條件的部分，架設之暫態為循環水管路斷管(LOCA)，並且破口位於循環水泵取水端管路最低點，位於 RPV 底部之下 8.3924 m，破口面積為 0.1976 米平方 (循環管完全斷管，內徑 19.75 inch)；假設以事故後 15 小時執行補水，藉以了解電廠執行救援措施之時機，並且在執行救援措施的狀況下，以燃料護套溫度是否會超過 1500 F(1088 K)作為依據進行分析。衰變熱為 shutdown 394 天 (LOCA case)。

分析結果顯示核一廠在無冷卻/無助水的情況下發生 LOCA，水位於 319.06 秒降至 TAF，400.15 秒降至 2/3 爐心高度。而當燃料束所產生的衰變熱無法被水移除，使得燃料護套溫度開始上升，燃料護套溫度於 32.6 小時超過 1500 F。而啟動一串 RHR 來以此將水注入 RPV 內時，由於燃料護套有 RHR 冷卻，所以並沒有發生銦水反應且沒有產生氫氣；而假設事故後 15 小時，在此時才啟動爐心噴灑系統，則也由於爐心噴灑系統的關係所以燃料護套並沒有發生銦水反應且沒有產生氫氣。

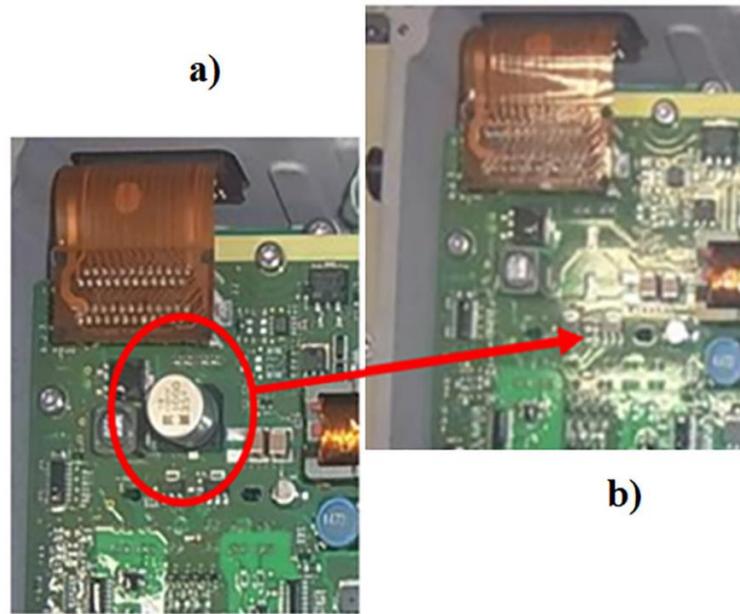
該報告的結論為以 LOCA 之無救援措施的情況下，燃料護套最高溫度皆會超過 1500 F (1088 K)，且皆會產生氫氣。而在有執行救援措施的情況下，不管是注水或噴灑，燃料護套最高溫度都會低於 1500 F (1088 K)，皆可維持用過燃料束之完整性。爐心噴灑的流量雖然比 RHR 還低，但對燃料護套溫度降溫的效果較顯著，故使用爐心噴灑可大幅降低燃料護套溫度。

三、除役機具進駐與機具作動等所造成環境對相連管路與留用設備等可能之劣化機制

因爐心仍有燃料之過渡階段在國際上較少有相同之狀況，在此我們設想一些會可能會影響除役機具之相關環境參數，並針對這些參數可能會造成的影響去搜尋。比如說可能會遭受環境溫度進程產生循環應力；或是除役機具中的母板上焊點在遭受震動之下可能的疲勞損傷進一步導致機具失效；也可能因為環境的相對濕度改變進而對其導電度造成影響；抑或是在除役環境其溫/濕度對於廠區結構或工作人員的影響等。所以以下將會分幾個觀點去闡述可能會造成影響之相關參數，相關國外報告挑選數篇具代表性的介紹如下。

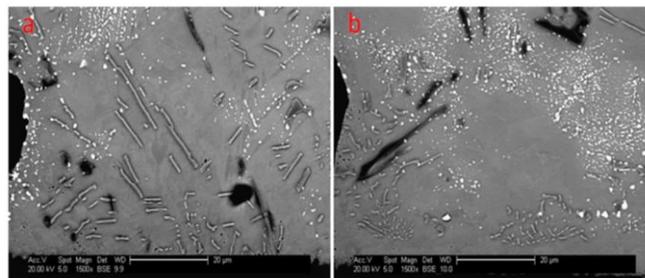
(一)震動或粉塵對除役機具維護管理之影響

而除了溫濕度外，切除或是鑽孔時機具產生的震動也可能會對其機具本身造成危害。Jannouna 等人[3]對於隨機振動下嵌入式電子焊點的機率疲勞損傷進行估計，在除役機具中也可能具有嵌入式電子設備，廣泛用於航空，汽車，火車和替代能源中，用於電能的轉換，控制和分配。這些設備在惡劣的多物理環境中運行，並承受動態負載。此文章以有限元素法來估計應力的能量頻譜密度(PSD)，並以頻譜分析法結合不同的疲勞損傷藉以評估焊點在震動疲勞損傷的可靠性。從圖中可看出在實驗的震動前後其電容的損傷程度，此報告建立模型並與實驗來進行驗證，此篇文章指出分析嵌入式電子設備在震動環境下的重要性。未來在這方面也可進行更深的研究。



圖五、隨機振動前後之對比[3]

Borgesena 等人[4]提出的震動和熱循環變化幅度下無鉛焊點損傷演化的力學模型中也提出，電子產品在長期曝光於熱與震動的循環環境中，其壽命往往取決於焊點的疲勞壽命，此篇主要是將兩個最新的力學模型組合成一個更全面的模型，其中包括熱循環和振幅變化的振動之間的相互作用。熱循環導致隨後的振動中裂紋擴展大大增強，如果熱循環足以導致再結晶，從而產生新的裂紋擴展路徑，則這種影響最強，但即使是非常有限的循環次數，也可能對跨晶裂紋擴展產生重大影響。



圖六、隨機振動前後金屬晶體之對比[4]

而在粉塵方面，由上述 CFD 分析可以知道其分析是可行的，但現實中粉塵很可能帶有輻射，並且粉塵顆粒的大小將會影響計算上的結果。Tripathi 等人[5]針對帶電的放射性氣溶膠 (radioactive aerosol) 的除去機制開發了數值方法，其發現放射性氣溶膠所帶的電荷大小會影響其碰撞效率和容易清除與否；Luo 等人[6]針對 CFD 如何分析氣舉式反應器中局部流體動態進行開發與驗證，其使用使用 CFD 來模擬並追蹤微生物細胞並在反應器中生成的軌跡以進行反應器性能評估。Jain 等人[7]則是對於液固流體化床進行實驗與數值研究，並針對放射性粒子進行分析模擬。在進行相關模擬時，其氣溶膠的動量方程式如下

$$m \frac{dV}{dt} = mg^* - \frac{6\pi\eta A(V-U)}{1 + \alpha N_{Kn}} + F_e$$

其中

m =質量

V =速度

$(1 + \alpha N_{Kn})$ = Stokes-Cunningham slip correction factor

N_{Kn} = Knudsen number。其中 Knudsen number 是由 λ_a/a 而來，而 λ_a 則是空氣分子的平均自由徑

$$g^* = g(\rho_p - \rho_a)/\rho_p$$

g =重力加速度

ρ_p =氣溶膠顆粒密度

ρ_a =空氣密度

U = 空氣速度

F_e = 水滴和氣溶膠之間的電子引力

$$\alpha = 1.26 + 0.44 \exp(1.07/N_{Kn})$$

而分析粒子運動還有一條著名的 Basset – Boussinesq – Oseen 方程式

$$m_p \frac{d\vec{v}_p}{dt} = \frac{1}{8} \pi \rho d^2 C_D |\vec{v}_f - \vec{v}_p| (\vec{v}_f - \vec{v}_p) + \frac{\pi d^3 \rho_f}{6} \frac{d\vec{v}_f}{dt} + \frac{\pi d^3 \rho_f}{12} \left(\frac{d\vec{v}_f}{dt} - \frac{d\vec{v}_p}{dt} \right) + \frac{\pi d^3}{6} (\rho_p - \rho_f) \vec{g}$$

其中

m_p = 粒子質量

d = 粒子直徑

ρ = 粒子密度

\vec{v} = 速度向量

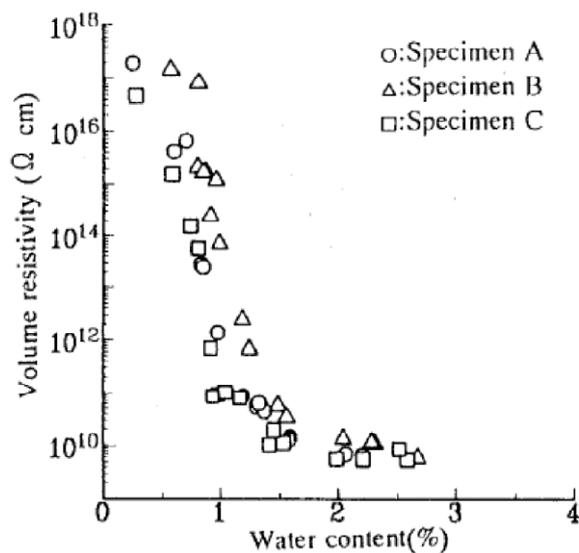
而 Basset – Boussinesq – Oseen 方程式等號右邊的四項可依序解釋如下：

- 是由於連續相和粒子之間的滑動速度而產生的阻力。阻力係數 C_D 是根據 CFX5.7 代碼中包含的 Schiller-Naumann 相關係數計算的。
- 考慮了由於流體加速引起的圍繞粒子上之壓力梯度而施加在粒子上的力。
- 是由於粒子加速而產生的虛擬質量力。由於粒子和連續相之間的密度差異很小，因此它們的速度加速度之間沒有太大差異。

- 是由於浮力產生的力量。

(二)運轉溫度對除役機具維護管理之影響

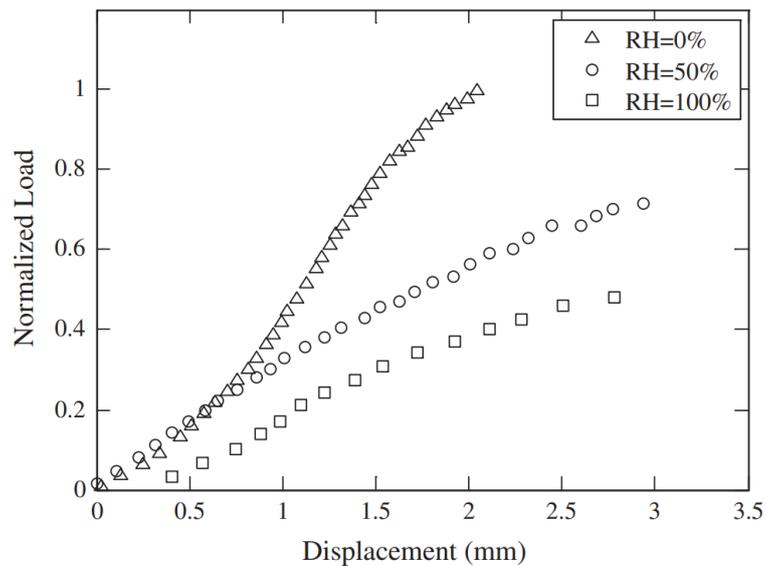
溫濕度可能影響的層面很大，其中包含對電子產品之影響，Ciprian 等人[8]在 2009 年所發表的文章中就有關於環境濕度對於電力系統可能造成的影響。其表示空氣中的水含量越高的情況下，電路板和外殼中裸露焊盤之間的距離越小，電容就越大，其原因為水層的分層厚度最終可能允許離子傳導，從而加速腐蝕速率。而為抵消環境條件變化所產生的干擾而設計的替代方案包括：修改機械組件的尺寸、更改組件在 PCB 中的位置或修改裸露的導電層的佈線等方面著手。下圖為當環氧樹脂上的水含量上升到 2.5% 時，其電阻率從 10^{18} 到 10^{10} 發生變化



圖七、環氧樹脂濕度與電阻率之關係圖[8]

而在 AVTECH 公司所提出的 ” 推薦的數據中心溫度和濕度 ” [9]報告中也提及，保持 68°F 至 75°F (20°C 至 24°C) 的環境溫度範圍對於系統可靠性而言是最佳的。該溫度範圍為

設備在空調或 HVAC 設備出現故障時的運行提供了安全的緩衝，同時更易於保持安全的相對濕度水平。在數據中心或計算機機房中，相對濕度必須保持在 45% 至 55% 之間，以實現最佳性能和可靠性，而如果監測相對濕度是可行的，建議在低於 40% 相對濕度超過 60% 的情況下發出警告警報，並建議在相對濕度 30% 和 70% 處發出嚴重警報。此建議可提供在管制除役機具維護上溫溼度的參考。Arif 等人[10]則研究了關於在不同濕度下 PA66/GF30 的裂紋之斷裂機制，PA66/GF30 為一種參雜玻璃纖維的尼龍，其具有優良的耐磨性、耐熱性及電性能；機械強度高；能自熄；尺寸穩定性良好，廣泛應用於汽車工業產品、紡織產品、泵葉輪和一級精密工程零組件，在除役機具中可能會使用。從其文中的實驗可得知濕度會劇烈的影響其材料的損傷程度。報告中所做的實驗，相對溼度為 0 之試塊相比於 50% 與 100% 相對溼度環境下，可承受較高的負載而不會發生破壞。



圖八、試塊所承受之負載與不同相對濕度下之關係[10]

由上述幾篇文獻中不難發現溫濕度的影響對除役機具維護管理是有可能造成影響的，除役環境參數很多，現階段應上位計劃建議，先初步分析溫度上升造成自然對流的現象，可先進行計算並驗證模擬是否可行。

1. 熱流分析統御方程式

此次分析模擬的過程牽涉到流場變化，故連續方程式和動量方程式是必要的；因必須同時考慮溫度場，故能量方程式也為一重要方程式。除了這些之外，若流體為一紊流，則在分析的時候也須加入紊流方程式，將下來將會說明所使用之方程式和參數。計算流體力學是將模型分成很多個小體積來進行計算，而本研究所使用的計算流體力學軟體 FLUENT 是採用有限差分法延伸而來的有限體積法進行演算，利用泰勒級數展開求取近似解。而為了節省計算時間和資源，此次分析模型的簡化和假設條件如下：1. 流體為牛頓流體；2. 流體為不可壓縮流體，而根據此假設，流體的連續方程式和統御方程式如下

連續方程式 (Continuity Equation)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U}) = \dot{m}$$

其中 $t = \text{time}$

$\rho = \text{密度}$

$\vec{U} = \text{流體速度向量}$

$\dot{m} = \text{流體質量產生或消散率}$

動量方程式 (Momentum Equation)

$$\frac{\partial(\rho \vec{U})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U} \vec{U}) = -\nabla P + \rho \vec{g} + \nabla \cdot (\mu \nabla \vec{U})$$

其中 $t = \text{time}$

$\rho = \text{密度}$

$\vec{U} = \text{流體速度向量}$

$\dot{m} = \text{流體質量產生或消散率}$

$P = \text{流體壓力}$

$\vec{g} = \text{重力向量(Gravitational Vector)}$

$\mu = \text{流體黏滯度(Viscosity)}$

紊流現象非常複雜，若需要非常精準的模擬其在流場中的流動特性和尾端窩流現象，採用 Large Eddy Simulation(LES)模型是較好的做法。但由於 LES 計算資源過於龐大且計算時間也較長，故在此研究中選擇其他的紊流模式，配合適當的網格數量和模型，並設定良好的邊界條件使模擬分析可以得到有效且準確的結果。本研究採用 SST $k-\omega$ 來進行驗證和模擬，此模式是以 Standard $k-\varepsilon$ 為基礎並延伸之，發展以改善邊界網格和渦流特性，各式方程式如下所示。

Standard $k-\varepsilon$:

Turbulence Kinetic :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k$$

Dissipation Rate:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon$$

其中

G_k = 由平均速度梯度所產生的紊流動能

G_b = 由浮力所產生的紊流動能

Y_M = 波動擴張對整體不可壓縮的紊流耗散的貢獻率

σ_k : k 之紊流普朗特數

σ_ϵ : ϵ 之紊流普朗特數

Model Constants:

$$C_{1\epsilon} = 1.44$$

$$C_{2\epsilon} = 1.92$$

$$C_\mu = 0.09$$

$$\sigma_k = 1.0$$

$$\sigma_\epsilon = 1.3$$

$$C_{3\epsilon} = \tan \left| \frac{v}{u} \right|$$

v : 流速分量平行於重力向量

u : 流速分量垂直於重力向量

Modeling the Turbulent Viscosity:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

Realizable k-ε:

Turbulence Kinetic:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k$$

Dissipation Rate:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b$$

其中

G_k = 由平均速度梯度所產生的紊流動能

G_b = 由浮力所產生的紊流動能

Y_M = 波動擴張對整體不可壓縮的紊流耗散的貢獻率

σ_k : k 之紊流普朗特數

σ_ε : ε 之紊流普朗特數

$$C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right]$$

$$\eta = S \frac{k}{\varepsilon}$$

$$S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}$$

$$C_{1\varepsilon} = 1.44 ,$$

$$C_2 = 1.9 ,$$

$$\sigma_k = 1.0 ,$$

$$\sigma_\varepsilon = 1.2$$

Modeling the Turbulent Viscosity

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{kU^*}{\varepsilon}}$$

$$U^* \equiv \sqrt{S_{ij}S_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij}\tilde{\Omega}_{ij}}$$

$$\tilde{\Omega}_{ij} = \Omega_{ij} - 2\varepsilon_{ijk}\omega_k ,$$

$$\Omega_{ij} = \overline{\Omega_{ij}} - \varepsilon_{ijk}\omega_k$$

$$A_0 = 4.04 ,$$

$$A_s = \sqrt{6} \cos \phi$$

$$\phi = \frac{1}{3} \cos^{-1}(\sqrt{6}W) ,$$

$$W = \frac{S_{ij}S_{jk}S_{ki}}{\tilde{S}^3} ,$$

$$\tilde{S} = \sqrt{S_{ij}S_{ij}} ,$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)$$

SST k- ω :

Turbulence Kinetic:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \tilde{G}_k - Y_k + S_k$$

Specific Dissipation Rate:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega$$

其中

G_k = 由平均速度梯度所產生的紊流動能

G_ω = the generation of ω

Γ_k = k 的有效擴散率

Γ_ω = ω 的有效擴散率

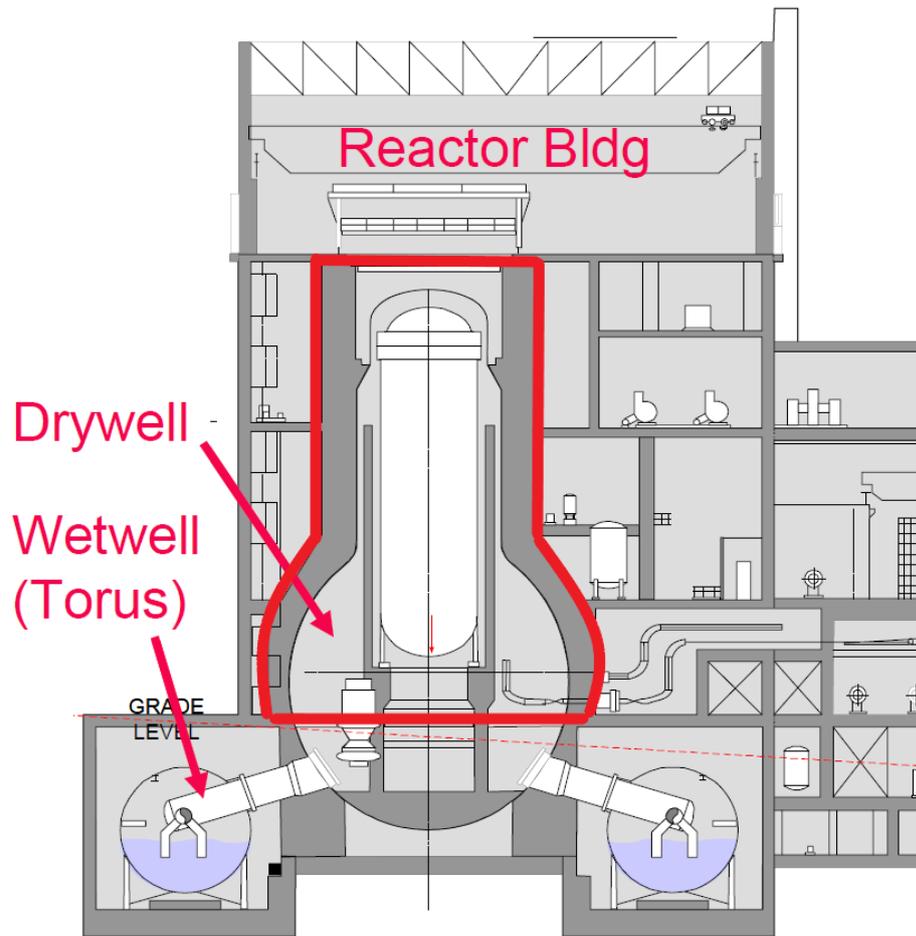
Y_k = 因紊流所導致 k 消散率

Y_ω = 因紊流所導致 ω 消散率

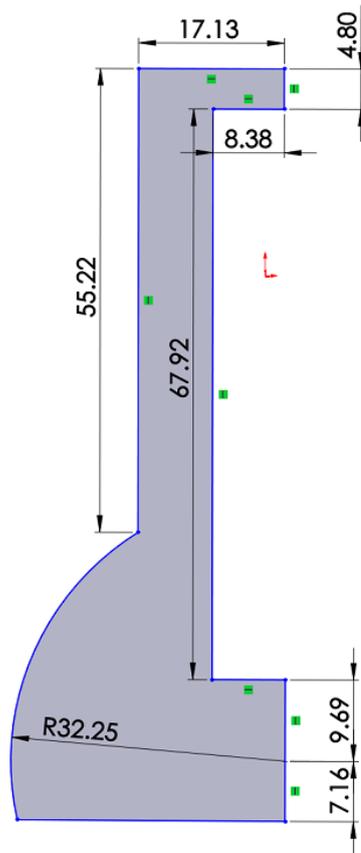
D_ω = 擴散項

2. 模型建立與溫度流場分布

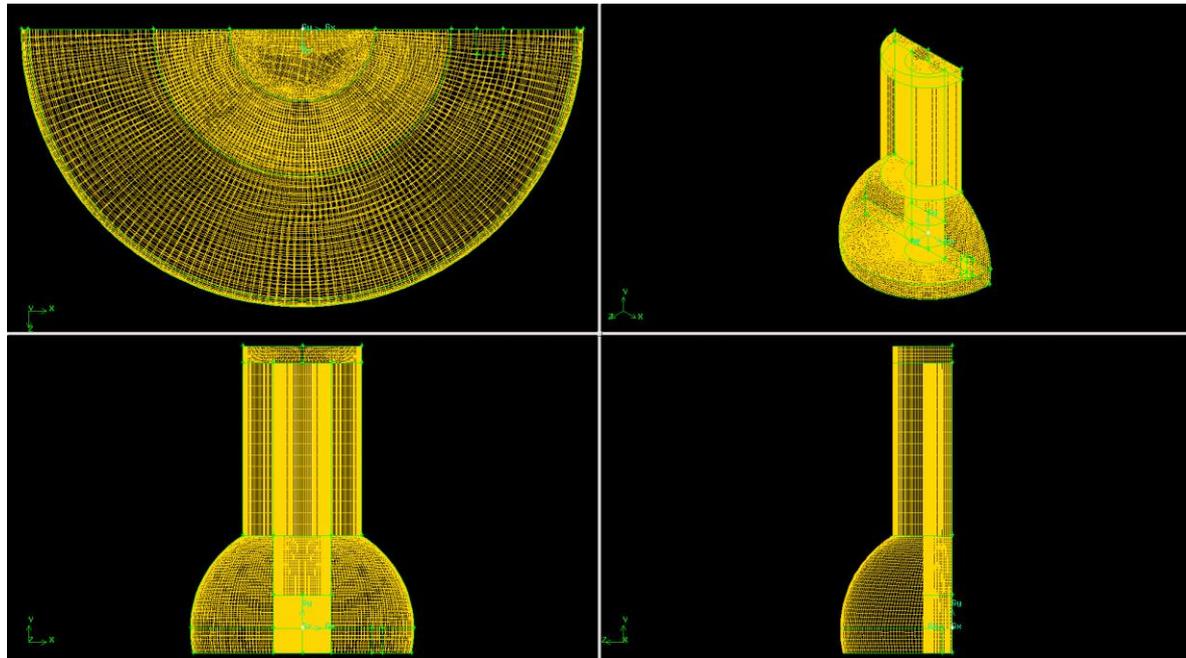
此次分析模型使用核一廠一次圍阻體，其示意圖如下所示。省略細部結構物並假設外壁為絕熱且為封閉空間，此假設可使得結果較為保守。系統初始溫度假設為 300K，為了探討有熱源在的情況下整體流場的變化，因此將熱源假設為 10000W/m^3 。模型以扇形掃出的方式建立，其 3D 網格圖與 2D 平面圖如下。



圖九、一次圍阻體區域示意圖

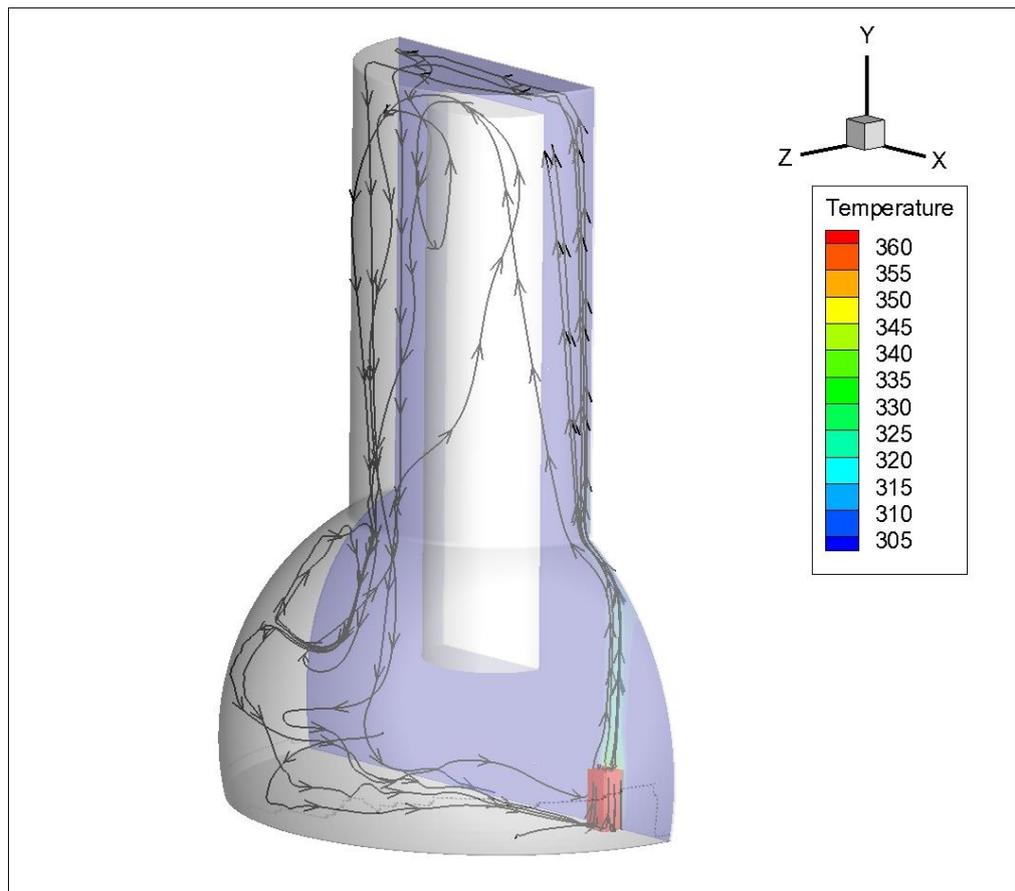


圖十、一次圍阻體模型 2D 截面圖

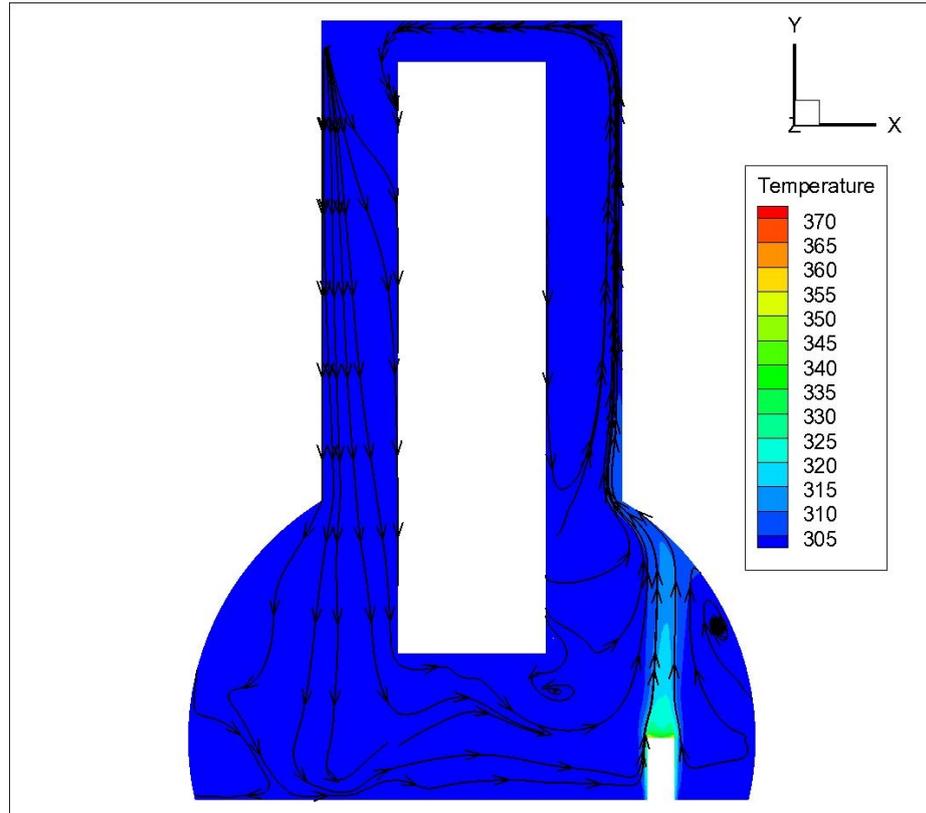


圖十一、一次圍阻體模型 3D 網格圖

分析出來的 3D 溫度與流線分布如下圖所示，可以看出 CFD 是可以順利進行模擬並且就流場與溫度分布來進行探討。首先可看出即使熱源通量為 10000W/m^3 ，因一次圍阻體廠區較大，要使其它位置溫度上升也並非那麼容易，其次，我們可從細部的 2D 截面流線圖看出，在熱源上方偏右處有渦流的產生，在機具進行除役作業時，極有可能會有粉塵的產生，有渦流處就代表粉塵可能較易堆積在此處，可能造成人員劑量上的影響抑或是機具的毀損，再者，此圖也可看出熱源位置對於渦流位置是有決定性的影響的，未來想要更深入探討時熱源位置之假設是一個討論的方向。



圖十二、一次圍阻體模型 3D 溫度與流場分布



圖十三、一次圍阻體模型 2D 截面溫度與流場分布

此 CFD 模型可提供後續分析之用，且因為我們是考慮絕熱並與外界隔離的狀態，因此是相對保守的假設條件。如未來假設電廠通風設備故障而導致圍阻體內無法維持負壓對外的洩漏範圍，CFD 所提供的流場分布走向也可以提供管制方對洩漏範圍的控管。而機具的位置也是對於流場走向的一大關鍵，位置未來建議可依照實際情況進行相對應的假設與模擬分析，並且在現場拆除時機具可能會在生物屏蔽內，那麼屏蔽與結構物也會對於流場有所影響。因 CFD 模型在建立時需包含熱源位置假設，也就是說整體為一個模型，所以改動熱源位置需將整個模型改動，因時程規劃上的問題因此計畫暫不進行深入探討。目前假設為初步成果，已證實 CFD 在這方面確實可以執行流場分析並提供管制方需加強注意的位置。

肆、參考文獻

1. Electric Power Research Institute, “Preparing for Decommissioning: The Oyster Creek Experience,” June 2000.
2. Institute of Nuclear Energy Research, “Severe Accidents Analysis after Reactor Shutdown for Chinshan Nuclear Power Plant using MAAP 5.04 Code.”
3. Mayssam Jannouna, Younes Aoues, Emmanuel Pagnacco, Philippe Pougnet, Abdelkhalak El-Hami, “Probabilistic fatigue damage estimation of embedded electronic solder joints under random vibration”, *Microelectronics Reliability*, 2017.
4. P. Borgesena, L. Wentlentb, T. Alghoula, R. Sivasubramonya, M. Yadava, S. Thekkuta, J.L. Then Cuevasa, C. Greenea, “A mechanistic model of damage evolution in lead free solder joints under combinations of vibration and thermal cycling with varying amplitudes”, *Microelectronics Reliability*, 2019.
5. S.N. Tripathi, R.G. Harrison, “Scavenging of electrified radioactive aerosol”, *Atmospheric Environment* 35 (2001) 5817–5821, 2001.
6. Hu-Ping Luo, Muthanna H. Al-Dahhan, “Verification and validation of CFD simulations for local flow dynamics in a draft tube airlift bioreactor”, *Chemical Engineering Science* 66 (2011) 907–923, 2011.
7. Varsha Jain, Lipika Kalo, Deepak Kumar, Harish J. Pant, Rajesh K. Upadhyay, “Experimental and numerical investigation of liquid–solid binary fluidized beds: Radioactive particle tracking technique and dense discrete phase model simulations”, *Particuology* 33 (2017) 112–122, 2017.
8. Rosa Ciprian, Brad Lehman, “Modeling Effects of Relative Humidity, Moisture, and Extreme Environmental Conditions on Power

Electronic Performance”, IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 2009.

9. Grundy, R. “Recommended Data Center Temperature & Humidity Preventing Costly Downtime Caused By Environment Conditions”, AVTECH Software, November 14 2005.

10. Arif, M. F., Meraghni, F., Chemisky, Y., Despringre, N., & Robert, G., “In situ damage mechanisms investigation of PA66/GF30 composite: Effect of relative humidity”, Composites Part B: Engineering, 2014.