

行政院原子能委員會
放射性物料管理局
委託研究計畫研究報告

109 室內乾貯設施建物型式與貯存護箱類型之
審驗技術與案例研析
期末總報告

委託單位：行政院原子能委員會放射性物料管理局
執行單位：國立清華大學
計畫主持人：許榮鈞
子項主持人：曾永信
計畫編號：109FCMA001
報告日期：中華民國 109 年 12 月 16 日

109 室內乾貯設施建物型式與貯存護箱類型之 審驗技術與案例研析

受委託單位：國立清華大學

研究主持人：許榮鈞

協同主持人：曾永信

研究期程：中華民國 109 年 02 月至 109 年 12 月

研究經費：新臺幣 2,100,000 元

放射性物料管理局 委託研究

中華民國 109 年 12 月

(本報告內容純係作者個人之觀點，不應引申為本機關之意見)

目 錄

一、 摘要(中、英文)	1
二、 計畫目標.....	2
三、 重要成果.....	3
四、 展望.....	6
五、 附件	
子計畫 1： 「室內乾貯設施建物型式與貯存護箱類型之輻射屏蔽評估研究」期末報告.....	I
子計畫 2： 「室內乾貯設施建物型式與貯存護箱類型對熱傳功能之評估研究」期末報告.....	II

計畫名稱：109 室內乾貯設施建物型式與貯存護箱類型之審驗技術與案

例研析

一、摘要

為持續精進用過核子燃料中期貯存之管制技術，本研究深入探討一大型室內乾式貯存設施裝載兩種不同型態護箱時之輻射屏蔽與熱傳特性。研究中假設一大型混凝土乾貯廠房，兩側分別容納 60 組金屬護箱(以 HI-STAR 100 為例)與 60 組混凝土護箱(以 HI-STORM 100 為例)，藉以探討大型單一設施貯存不同類型乾貯護箱的輻射屏蔽與熱傳特性，強化國內自主平行驗證與安全審驗技術。針對前述的目標，基於參考文獻與專家經驗，本研究建立一個假想設施計算模型，並從輻射屏蔽與熱傳的觀點進行深入評估，研究主軸包括(1)國際室內乾貯設施輻射屏蔽與熱傳設計相關管制要求資訊蒐集研析、(2)乾貯地上建物設施與貯存護箱輻射屏蔽與熱傳評估模式建立、(3)單一設施貯存不同類型護箱，以及異常或意外事件情境之輻射屏蔽與熱傳案例評估與影響效應研析、(4)研提室內乾貯設施輻射屏蔽與熱傳分析審查重點或注意事項。本研究計畫執行所獲致的成果與經驗將有利於精進國內用過核子燃料室內乾式貯存設施審驗技術。

In order to continue improving the regulatory management technology of spent nuclear fuel interim storage, this study explored the radiation shielding and heat transfer characteristics of a large indoor dry storage

facility when two different types of dry storage casks are loaded. The facility considered in this study was a big concrete building loaded with 60 HI-STAR 100 metal casks and 60 HI-STORM 100 concrete casks. The characteristics of radiation field and temperature distribution around the facility were examined in detail in order to establish and improve parallel verification methodologies for upcoming safety review of a similar facility in the Chinshan nuclear power plant in Taiwan. To achieve the project goals, this study established a hypothetical facility model and evaluated it from radiation shielding and heat transfer point of views. The research content in each technical area included: (1) collecting information on the design and regulatory requirements of international indoor dry storage facilities, (2) establishing calculation models for the hypothetical facility with two types of cask, (3) evaluating the characteristics of radiation field and temperature distribution of the hypothetical facility under normal and abnormal conditions, and (4) summarizing the research results and proposing guidelines or recommendations for reviewing related safety analyses. The results and experience obtained from this project facilitate the progress of indoor dry storage program of spent nuclear fuels in Taiwan.

二、計畫目標

本研究探討一大型室內乾式貯存設施裝載兩種不同型態護箱時之輻射屏蔽與熱傳特性，藉此獲得案例分析經驗，持續精進用過核子燃料中期貯存之管制技術。本團隊參考台電公司所提出之核能一廠除役計畫環境影響評估報告書及各項公開資訊，輔以瑞士 ZZZ 與英國 SZB 設施之各項設計資訊，規劃一裝載量逾 8000 束用過核子燃料之假想室內乾貯設施，搭載 HI-STAR 100 與 HI-STORM 100 兩種型式護箱進行貯存，探討兩種護箱在不同列置或搭配參數下，對於輻射屏蔽與熱流性所造成之影響進行研析，計畫研究標的假想設施與兩種護箱模型如圖 1 與圖 2 所示。

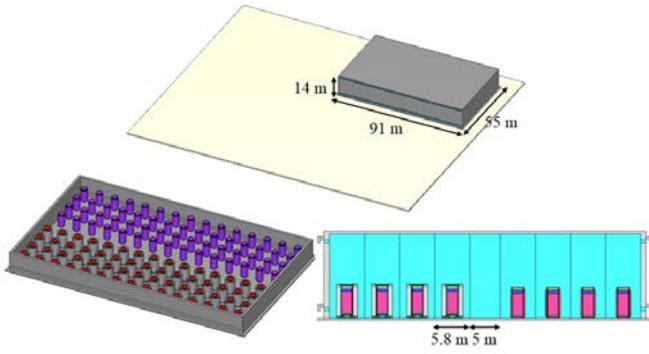


圖 1、裝載金屬護箱與混凝土護箱之假想設施示意圖

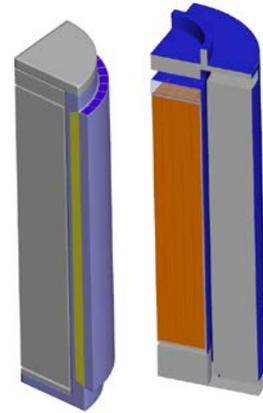


圖 2、設施裝載之兩種護箱模型

三、重要成果

●子項計畫 1：「室內乾貯設施建物型式與貯存護箱類型之輻射屏蔽評估研究」

(一) 針對金屬護箱(HI-STAR 100)與混凝土護箱(HI-STORM 100)

各別進行完整表面劑量率分析。HI-STAR 100 護箱側邊表面劑量率以加馬射線為主要貢獻，屏蔽分析需特別注意護箱側邊上下兩端(無中子吸收材區域)的劑量率；HI-STORM 100 護箱側邊表面劑量率以加馬射線為主要貢獻，劑量率在護箱進(下)出(上)氣口處較高，此兩處為輻射屏蔽的重點區域，該護箱頂部在空氣通道界面位置上方有一屏蔽環塊設計，有效降低該處劑量率，此為其特殊的屏蔽設計。

(二) 針對標的設施模型進行不同迷道設計的探討(圖 3)，結果可用於優化迷道設計有效降低此一項目的場外輻射貢獻。進出氣迷道設計對於室內乾貯設施的屏蔽設計相當重要，迷道輻

射滲流的遷移計算相對困難，且必須考慮不同進出氣通道的特性與限制，不同迷道設計的遮蔽效果建議納入整體建物屏蔽設計。

- (三) 針對 2 種類型之護箱以 2 種不同排列型式在混凝土建物與金屬建物內貯存之情節，共完成 4 種組合之設施周遭中子與加馬射線劑量率分析。特定建物不同護箱排列方式的探討可以參考不同護箱完整表面輻射特性的資料，此一數據有利於後續設施整體與場外劑量率分布的探討(圖 4)。針對混凝土建物與金屬建物內貯存相同護箱排列的情節，混凝土建物如預期可提供額外輻射屏蔽，以本假想案例設施為例，其設施外表面劑量率比鋼構建物低約 2 個數量級，鋼構建物僅具天候遮蔽效果，其屏蔽效果不大(以護箱本體輻射屏蔽為主)。

●子項計畫 2：「室內乾貯設施建物型式與貯存護箱類型對熱傳功能之評估研究」

- (一) 針對正常貯存中，護箱列置方式、間距與護箱比例等參數進行探討後發現，將各式參數對金屬護箱與混凝土護箱之影響加以分級，並針對所需技術重點與管制重點進行檢核(如表 1)。其結果確認，設施貯存多種護箱所需之分析技術與貯存單一護箱並無差異，透過方法論的規劃與保守參數的組合即

可達成分析目的。而在管制重點的部分，可確認各項參數對於熱流雖有不同程度之影響，但仍透過既有審查導則進行管制與規範。

(二) 經檢視熱流分析之事故類型後可以確認，室內乾貯設施熱流分析中較為嚴苛之事故案(例如火災、水災以及絕熱案例)往往皆以護箱表面作為邊界條件，故單一設施中裝載異種護箱僅會的此事故的初始條件造成影響，而無需顧慮單一設施中不同護箱彼此間交互作用對分析技術所造成的影響。

表 1、熱流參數對分析技術與管制要點之匯整

狀態	護箱類別	護箱間距	護箱列置	迷道設計	護箱比例	廠房類型	技術重點
正常貯存	金屬護箱	中	低	低	低	高	BC 設定
	混凝土護箱	低	低	低	低	高	
異常事件	金屬護箱	中	低	低	低	中	BC 設定
	混凝土護箱	低	低	低	低	中	
意外事故	金屬護箱	低	低	低	低	中	IC 合適性
	混凝土護箱	低	低	低	低	低	
管制重點	依審查導則管制	作業程序合適性	具彈性，可依屏蔽需求規劃	具彈性，可依屏蔽需求規劃	方法論檢視護箱邊界代表性	具彈性，可依結構分析需求規劃	<u>現有審查導則已有對應管制條文</u>

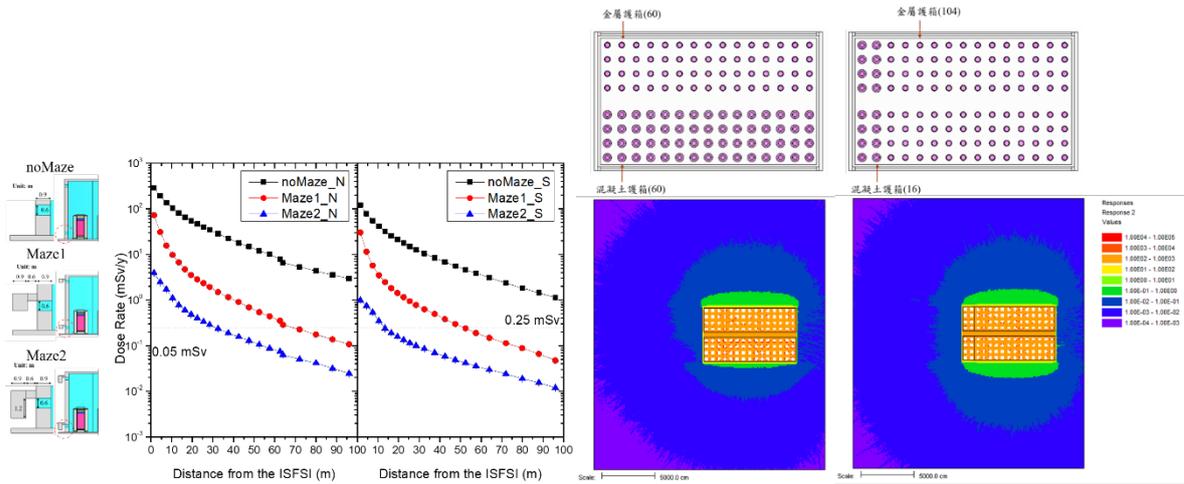


圖 3、設施迷道設計案例劑量率分布比較

圖 4、混凝土建物搭載不同護箱配置劑量率分布圖

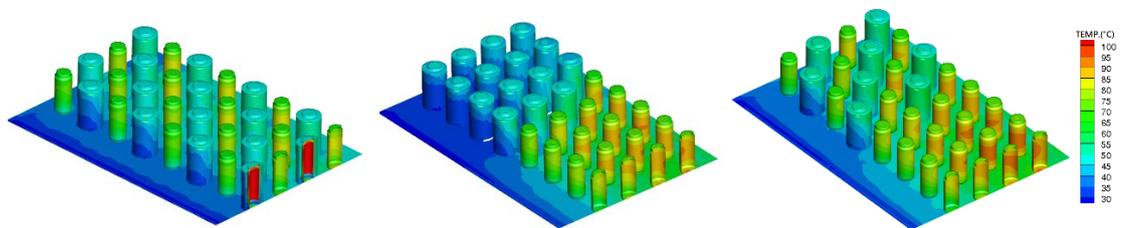


圖 5、同一設施中不同列置方式對護箱移熱能力之影響

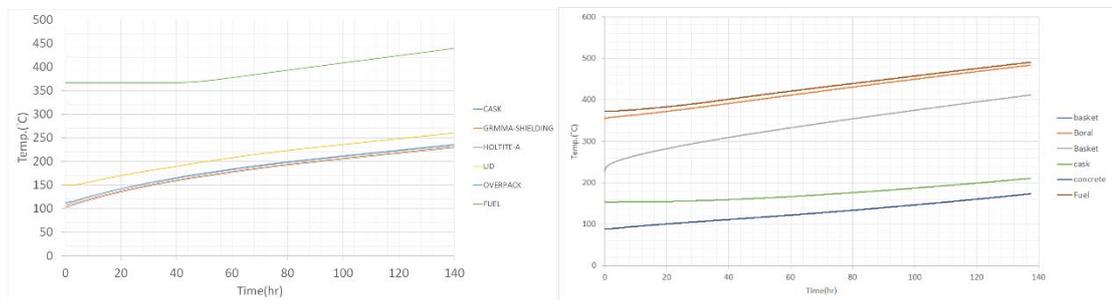


圖 6、同一設施中金屬護箱(左)與混凝土護箱(右)遭遇絕熱案例之元件升溫趨勢

四、展望

本研究團隊藉由國際間設施資訊的研析、乾貯護箱輻射與熱傳分析模式的建立、以及假想設施案例的探討，逐步精進國內用過核子燃料室內貯存設施安全分析所需必要技術，對於我國未來室內乾貯設施申照審查與分析驗證可提供堅實技術支援。目前核一廠第二期乾貯設施相關規劃資訊尚

未定案，由往年的研究成果與經驗累積，本計畫特別考量核一廠二期乾貯設施概念設計參數，參考國際類似貯存護箱之案例，建立本研究所需之假想設施作為分析標的。本團隊從輻射屏蔽與熱流安全的角度深入分析，探討不同護箱、不同排列與不同設施建物的輻射劑量分布與熱傳特性差異，分析結果可提升國內室內乾貯輻射屏蔽與熱傳分析平行驗證技術能力，精進國內用過核子燃料室內乾式貯存設施審驗技術。

五、 附件

1. 子計畫 1 「室內乾貯設施建物型式與貯存護箱類型之輻射屏蔽評估研究」期末報告
2. 子計畫 2 「室內乾貯設施建物型式與貯存護箱類型對熱傳功能之評估研究」期末報告

行政院原子能委員會
放射性物料管理局
委託研究計畫研究報告

109 年室內乾貯設施建物型式與貯存護箱類型之
審驗技術與案例研析
子項一：室內乾貯設施建物型式與貯存護箱類
型之輻射屏蔽評估研究
期末報告

委託單位：行政院原子能委員會放射性物料管理局
執行單位：國立清華大學
計畫主持人：許榮鈞
子項主持人：許榮鈞
計畫編號：109FCMA001
報告日期：中華民國 109 年 12 月 16 日

109 年室內乾貯設施建物型式與貯存護箱類型之
審驗技術與案例研析

子項一：室內乾貯設施建物型式與貯存護箱類
型之輻射屏蔽評估研究

受委託單位：國立清華大學

研究主持人：許榮鈞

子項主持人：許榮鈞

研究期程：中華民國 109 年 02 月至 109 年 12 月

研究經費：新臺幣 2,100,000 元

放射性物料管理局 委託研究

中華民國 109 年 12 月

(本報告內容純係作者個人之觀點，不應引申為本機關之意見)

摘要

為持續精進用過核子燃料中期貯存之管制技術，本研究探討一大型室內乾式貯存設施裝載兩種不同型態護箱時之輻射屏蔽與劑量分布特性。研究中假設一大型混凝土乾貯廠房，兩側分別容納 60 組金屬護箱與 60 組混凝土護箱，藉由先進數值方法分析此類設施的輻射屏蔽與劑量分布關係，強化國內自主平行驗證與安全審驗技術。針對前述的目標，選擇瑞士 ZZL 與英國 SZB 作資料蒐集，本研究建立一個合理的假想設施計算模型，並從輻射屏蔽的觀點進行深入評估，研究主軸包括(1)國際室內乾貯設施輻射屏蔽設計相關管制要求資訊蒐集研析、(2)乾貯地上建物設施與貯存護箱輻射屏蔽評估模式建立、(3)單一設施貯存不同類型護箱，以及異常或意外事件情境之輻射屏蔽案例評估與影響效應研析、(4)研提室內乾貯設施輻射屏蔽分析審查重點或注意事項。本研究計畫執行所獲致的成果與經驗將有利於國內用過核子燃料室內乾式貯存設施的推動，協助核電廠除役計畫的進行。

關鍵字：輻射屏蔽、室內乾貯、金屬護箱、混凝土護箱

ABSTRACT

In order to continue improving the regulatory management technology of spent nuclear fuel interim storage, this study investigated the characteristics of radiation shielding and dose distribution of a large indoor dry storage facility when two different types of dry storage casks are loaded. The facility considered in this study was assumed a big concrete building loaded with 60 metal casks and 60 concrete casks. The relationship between shielding design and dose distribution around the facility were examined in detail in order to establish and improve parallel verification methodologies for upcoming safety review of a similar facility in the Chinshan nuclear power plant in Taiwan. To achieve the project goals, this study established a hypothetical facility model and evaluated it from several radiation shielding point of views. The research content included: (1) collecting information on the design and regulatory requirements of international indoor dry storage facilities (ZZL and SZB), (2) establishing calculation models for the hypothetical facility loaded with two types of cask, (3) evaluating the characteristics of radiation field of the hypothetical facility under normal and abnormal conditions, and (4) summarizing the research results and proposing guidelines or recommendations for reviewing related safety analyses. The results and experience obtained from this project will facilitate the progress of indoor dry storage program of spent nuclear fuels in Taiwan and also subsequent activities in nuclear power plant decommissioning.

Keywords: Radiation shielding, Indoor Dry Storage, Metal cask, Concrete cask.

目錄

摘要.....	i
ABSTRACT.....	ii
目錄.....	iii
圖目錄.....	v
表目錄.....	ix
第一章、前言與目的.....	1
1.1 背景說明.....	1
1.2 計畫標的設施.....	3
1.2.1 標的用過核子燃料.....	3
1.2.2 標的貯存護箱.....	4
1.2.3 標的建物設施.....	6
1.3 計算案例樹狀圖.....	7
第二章、輻射屏蔽安全分析方法.....	8
第三章、國際室內乾貯設施輻射屏蔽設計與管制要求資訊蒐集研析.....	12
3.1 瑞士 ZZL 設施資訊.....	12
3.1.1 ZZL 輻射評估管制要求.....	14
3.1.2 ZZL 廠房設計幾何尺寸.....	15
3.1.3 ZZL 廠房安全功能說明.....	15
3.1.4 ZZL 貯存護箱形式數量.....	15
3.1.5 ZZL 相關關鍵字.....	17
3.1.6 ZZL 設施資訊整理.....	17
3.2 英國 SZB 設施資訊.....	19
3.1.1 SZB 輻射評估管制要求.....	20
3.1.2 SZB 廠房設計幾何尺寸.....	21
3.1.3 SZB 廠房安全功能說明.....	21

3.1.4 SZB 貯存護箱形式數量	22
3.1.5 SZB 乾貯操作經驗	22
3.1.6 SZB 設施資訊整理	24
3.3 國際室內乾貯設施輻射屏蔽設計與管制要求資訊文件.....	25
第四章、乾貯地上建物設施與貯存護箱輻射屏蔽評估模式建立.....	28
4.1 護箱屏蔽模型建立.....	28
4.1.1 HI-STAR 100 護箱屏蔽計算模型	28
4.1.2 HI-STORM 100 護箱屏蔽計算模型	37
4.2 乾貯設施屏蔽模型建立.....	45
4.3 標的用過核子燃料射源項.....	49
第五章、單一設施貯存不同類型護箱，以及異常或意外事件情境之輻射屏蔽案 例評估與影響效應研析.....	52
5.1 貯存護箱表面劑量率分析.....	53
5.1.1 HI-STAR 100 護箱表面劑量率分析	53
5.1.2 HI-STORM 100 護箱表面劑量率分析	59
5.2 設施周遭劑量率分布.....	64
5.2.1 標的設施周遭劑量率分布.....	64
5.2.2 標的設施進出氣通道之迷道設計探討.....	70
5.2.3 不同類型之護箱以兩種排列型式在混凝土建物與金屬建物內貯存 之差異.....	72
5.3 異常或意外事件情境之輻射屏蔽案例評估與影響效應研析.....	83
5.3.1 異常事故情境.....	83
5.3.2 意外事故情境.....	84
5.4 輻射屏蔽案例評估與影響效應研析總結表.....	88
第六章、室內乾貯設施輻射屏蔽分析審查重點研析.....	91
第七章、結論.....	93
參考文獻.....	95

圖目錄

圖 1.1、HI-STAR 100 系統示意圖，(左)主體外觀、(右上)MPC 及(右下)外包裝設計[9].....	5
圖 1.2、HI-STORM 100 混凝土護箱示意圖[10].....	5
圖 1.3、標的建物設施外觀、內部及側剖面示意圖.....	6
圖 1.4、本計畫執行之案例樹狀圖.....	7
圖 2.1、MAVRIC 控制模組的執行流程[12].....	10
圖 3.1、ZZL 設施空照圖[14].....	13
圖 3.2、ZZL 設施高階放射性廢棄物以及用過核子燃料貯存廳 (Behälterlagerhalle)[15].....	13
圖 3.3、ZZL 設施的營運單位與相關管制機關.....	14
圖 3.4、ZZL 設施近十年的護箱貯存數量[22].....	16
圖 3.5、SZB 乾貯設施廠房外觀[24].....	19
圖 3.6、SZB 乾貯設施廠房內部[24].....	19
圖 3.7、設施的營運單位與相關管制機關.....	20
圖 3.8、鋼筒轉移坑洞示意圖[24].....	21
圖 3.9、廠方人員將破鋼圓環擺放定位[32].....	22
圖 3.10、鋼筒下載過程中使用的破鋼圓環以及雙層鉛屏蔽[32].....	23
圖 3.11、廠方人員蹲在鉛屏蔽上移除鋼筒的耳軸塊(trunnion block)[32].....	23
圖 4.1、HI-STAR 100 系統軸向剖面圖[9].....	29
圖 4.2、HI-STAR 100 系統幾何尺寸[9].....	30
圖 4.3、HI-STAR 100 系統徑向剖面圖[9].....	30
圖 4.4、HI-STAR 100 屏蔽模型材料設定(Table5.3.2)[33].....	31
圖 4.5、標的護箱 HI-STAR 100 護箱屏蔽模型.....	32
圖 4.6、單束 BWR 燃料在不同燃料條件下的燃料光子射源能譜(Table5.2.5)[9]32	
圖 4.7、單束 BWR 燃料在不同燃料條件下的結構光子射源活度(Table5.2.10)[9].....	33
圖 4.8、單束 BWR 燃料在不同燃料條件下的燃料中子射源能譜(Table5.2.13)[9].....	33
圖 4.9、裝載不同燃料條件之 HI-STAR 100 護箱表面各位置總劑量率 (Table5.4.9)[9].....	36
圖 4.10、HI-STAR 100 護箱表面各位置示意圖(Figure5.1.1)[33].....	36
圖 4.11、HI-STORM 100 系統軸向剖面圖[10].....	38
圖 4.12、HI-STORM 100 系統幾何尺寸[10].....	39
圖 4.13、HI-STORM 100 系統徑向剖面圖[10].....	39
圖 4.14、HI-STORM 100 屏蔽模型材料設定 1(Table5.3.2) [10].....	40

圖 4.15、HI-STORM 100 屏蔽模型材料設定 2(Table5.3.2) [10]	41
圖 4.16、HI-STORM 100 護箱屏蔽計算模型	41
圖 4.17、單束 BWR 燃料在不同燃料條件下的燃料光子射源能譜(Table5.2.6)[10]	41
圖 4.18、單束 BWR 燃料在不同燃料條件下的結構光子射源活度 (Table5.2.13)[10]	42
圖 4.19、單束 BWR 燃料在不同燃料條件下的燃料中子射源能譜 (Table5.2.17)[10]	42
圖 4.20、裝載不同燃料條件之 HI-STORM 100 S Version B 護箱表面各位置總劑 量率(Table5.4.13)[10]	45
圖 4.21、HI-STORM 100 S Version B 護箱表面各位置示意圖(Figure 5.1.13)[10]	45
圖 4.22、HI-STAR 100 安全分析報告 Table 1.4.1[33]	46
圖 4.23、HI-STAR 100 安全分析報告 Figure 1.4.1[33]	46
圖 4.24、HI-STORM 100 安全分析報告 Table 1.4.1[10]	46
圖 4.25、HI-STORM 100 安全分析報告 Table 1.4.2[10]	46
圖 4.26、HI-STORM 100 安全分析報告 Figure 1.4.1[10]	47
圖 4.27、HI-STORM 100 安全分析報告 Figure 1.4.2[10]	47
圖 4.28、設施屏蔽模型內部配置	48
圖 4.29、設施屏蔽模型外觀	48
圖 4.30、設施屏蔽模型外觀剖面及迷道設計示意	48
圖 4.31、(左)燃料中子、(中)燃料光子與(右)結構光子能譜	51
圖 4.32、(左)燃料中子、(中)燃料光子與(右)結構光子軸向分布	51
圖 5.1、標的護箱伴隨射源定義位置	54
圖 5.2、HI-STAR 100 護箱表面劑量率計分位置示意圖	58
圖 5.3、HI-STAR 100 護箱表面劑量率分布，左側邊，右頂部	58
圖 5.4、HI-STAR 100 護箱表面劑量率加馬射源貢獻，左側邊，右頂部	59
圖 5.5、標的護箱伴隨射源定義位置	60
圖 5.6、HI-STORM 100 護箱表面劑量率計分位置示意圖	62
圖 5.7、HI-STORM 100 護箱表面劑量率分布，左側邊，右頂部	63
圖 5.8、HI-STORM 100 護箱表面劑量率加馬射源貢獻，左側邊，右頂部	63
圖 5.9、標的設施伴隨射源設定	67
圖 5.10、標的設施計分區域示意	67
圖 5.11、北側格點計分劑量率隨距離變化	68
圖 5.12、南側格點計分劑量率隨距離變化	68
圖 5.13、西側格點計分劑量率隨距離變化	68
圖 5.14、三側格點計分劑量率率隨距離變化	69
圖 5.15、標的設施周遭總劑量率分布 ($\mu\text{Sv/h}$)	69

圖 5.16、標的設施周遭劑量率分布，(左)中子，(右)加馬，(μSv/h).....	69
圖 5.17、標的設施周遭加馬射源貢獻劑量率分布，(左)FN，(中)FG，(右)HG， (μSv/h).....	70
圖 5.18、設施周遭劑量率迷道設計討論情節 1: 無迷道設計	71
圖 5.19、設施周遭劑量率迷道設計討論情節 3: 迷道設計 2(Maze2).....	71
圖 5.20、三種迷道設計討論情節之設施北側(左)與南側(右)劑量率隨距離變化	71
圖 5.21、鋼構建物屏蔽模型外觀.....	72
圖 5.22、金屬護箱和混凝土護箱配比为 60：60 配置.....	73
圖 5.23、金屬護箱和混凝土護箱配比为 104：16 配置.....	73
圖 5.24、組合 1 北側格點計分劑量率隨距離變化.....	75
圖 5.25、組合 1 南側格點計分劑量率隨距離變化.....	75
圖 5.26、組合 1 西側格點計分劑量率隨距離變化.....	75
圖 5.27、組合 1 三側格點計分劑量率率隨距離變化.....	75
圖 5.28、組合 1 設施周遭總劑量率分布 (μSv/h)	76
圖 5.29、組合 2 北側格點計分劑量率隨距離變化.....	77
圖 5.30、組合 2 南側格點計分劑量率隨距離變化.....	77
圖 5.31、組合 2 西側格點計分劑量率隨距離變化.....	77
圖 5.32、組合 2 三側格點計分劑量率率隨距離變化.....	77
圖 5.33、組合 2 設施周遭總劑量率分布 (μSv/h)	78
圖 5.34、組合 3 北側格點計分劑量率隨距離變化.....	79
圖 5.35、組合 3 南側格點計分劑量率隨距離變化.....	79
圖 5.36、組合 3 西側格點計分劑量率隨距離變化.....	79
圖 5.37、組合 3 三側格點計分劑量率率隨距離變化.....	80
圖 5.38、組合 3 設施周遭總劑量率分布 (μSv/h)	80
圖 5.39、組合 4 北側格點計分劑量率隨距離變化.....	81
圖 5.40、組合 4 南側格點計分劑量率隨距離變化.....	81
圖 5.41、組合 4 西側格點計分劑量率隨距離變化.....	81
圖 5.42、組合 4 三側格點計分劑量率率隨距離變化.....	82
圖 5.43、組合 4 設施周遭總劑量率分布 (μSv/h)	82
圖 5.44、異常事情情節：混凝土護箱進氣通道半阻塞示意圖	83
圖 5.45、混凝土護箱進氣通道半阻塞側邊表面劑量率分布.....	84
圖 5.46、傾倒案例(左)頂部與底部劑量率比較位置(右)底部劑量率隨距離變化	85
圖 5.47、HI-STAR 100 傾倒案例頂部與底部總劑量率比較.....	86
圖 5.48、HI-STAR 100 傾倒案例頂部與底部劑量率比較(左)中子(右)光子.....	86
圖 5.49、HI-STAR 100 傾倒案例底部劑量率隨距離變化(左)總劑量率(右)光子劑 量率貢獻.....	86
圖 5.50、HI-STORM 100 傾倒案例頂部與底部總劑量率比較	86
圖 5.51、HI-STORM 100 傾倒案例頂部與底部劑量率比較(左)中子(右)光子....	87

圖 5.52、HI-STORM 100 傾倒案例底部劑量率隨距離變化(左)總劑量率(右)光子
劑量率貢獻.....87

表目錄

表 3.1、ZZL 於 2014 年貯存各式護箱型號及數量[20].....	16
表 3.2、相關字詞英德對照.....	17
表 3.3、ZZL 與 SZB 相關之國際室內乾貯設施輻射屏蔽設計與管制資訊文件.....	25
表 3.4、ONR 信件回覆提供文件.....	26
表 4.1、HI-STAR 100 驗證計算射源強度[9].....	33
表 4.2、HI-STAR 100 護箱屏蔽模型驗證計算比較[9].....	36
表 4.3、HI-STORM 100 驗證計算射源強度[10].....	42
表 4.4、HI-STORM 100 護箱屏蔽模型驗證計算比較[10].....	44
表 4.5、護箱射源強度(68 束)與設施總射源強度(120 組護箱).....	50
表 5.1、MAVRIC 程式採用之粒子作用截面資訊.....	52
表 5.2、HI-STAR 100 護箱計算時間.....	57
表 5.3、標的護箱區域計分結果.....	57
表 5.4、HI-STORM 100 護箱計算時間.....	61
表 5.5、標的護箱區域計分結果.....	62
表 5.6、標的乾貯設施計算時間.....	65
表 5.7、輻射屏蔽案例評估影響研析.....	88

第一章、前言與目的

1.1 背景說明

我國核一廠兩座機組雖已先後進入除役過渡階段，在兩部機組內部用過核子燃料移除後，方能進行實際的除役作業，是故用過核燃料乾式貯存設施為除役的必要設施。

原能會已在 106 年 6 月 28 日完成審查台電公司「核一廠除役計畫」，並要求台電公司核一廠第二期乾式貯存設施，應採取具社會共識之室內貯存型式設計。核一廠除役作業預計於 25 年內分四個階段來完成，其中包括停機過渡階段 8 年、除役拆廠階段 12 年、廠址最終狀態偵測階段 3 年，以及廠址復原階段 2 年等作業。

參考台電公司所提出之核能一廠除役計畫環境影響評估報告書[1]及各項公開資訊，台電公司擬於廠址內原氣渦輪機廠房及日用油槽區附近占地約 3 公頃之區域規劃核一廠二期乾式貯存設施，並採取與核一、二廠的一期露天乾貯設施[2, 3]不同的設計理念，將採以室內乾式貯存的設計。依據相關計畫書內容，其主要概念設計參數有：

1. 可貯存全廠約 7,400 束沸水式反應器(BWR)用過核子燃料；
2. 考量金屬護箱採用室內貯存概念設計，所需鋼筋混凝土建物牆壁厚度最大要求為 90 公分、建物屋頂厚度最大要求為 45 公分。

上述資訊顯示，當台電將核一廠所有用過核子燃料裝載至選定護箱中，並貯存於一室內設施時，以往乾貯申照作業中所採用的分析技術預期將無法全然適用。此一設計方向的變更可能某種程度導致過往安全分析使用之技術與需審查管制重點的改變，例如：申照者可能必須重新考慮計算資源的限制，可能必須發展新

式的分析方法，抑或導入不同的模型簡化觀點(例如：幾何模型的對稱性或材料均質化的影響)或是採用分段計算等技巧來限縮每次求解所需的資源，甚至透過上述各項技巧之組合，以期在有限時間內完成所有的分析工作並提交高品質的安全分析報告以進行設施申照。另一方面，管制單位也必須預先規劃室內乾貯設施可能帶給未來審查工作的衝擊，深入了解各種分析技術對分析結果所帶來的影響，強化審查經驗與相關人才訓練，以精進我國用過核子燃料室內貯存設施安全管制技術。

管制單位放射性物料管理局於 106 與 107 年已分別透過「除役核電廠用過核燃料室內乾式貯存安全管制技術」[4]與「精進用過核燃料室內乾式貯存設施安全審查技術之研究」[5]研究成果作為研擬「申請設置用過核子燃料乾式貯存設施安全分析報告導則」[6]與「用過核子燃料乾式貯存設施安全分析報告審查導則」[7](以下簡稱審查導則)參考之一，另於 108 年委託「核電廠除役之室內乾貯安全分析平行驗證研究」計畫[8]整合國內具有專業技術與審查實務經驗之人員組成對應研究團隊，假設一假想室內乾貯設施，進行臨界、結構、熱流與輻射屏蔽驗證技術檢整及審查導則施行細節的研究。延續前述的研究成果與經驗累積，本計畫中特別考量核一廠第二期乾式貯存設施概念設計參數，參考國際類似貯存護箱之安全分析案例，建立一適當的假想設施之輻射屏蔽分析與熱流分析模型以提升國內室內乾貯輻射屏蔽與熱傳分析平行驗證技術與審查經驗。

1.2 計畫標的設施

為了達成「109 年室內乾貯設施建物型式與貯存護箱類型之審驗技術與案例研析」計畫的目標，並探討室內乾貯設施裝載有不同類型護箱時之輻射與熱流特性之差異，本研究團隊參考台電公司的核能一廠除役計畫環境影響評估報告書 [1] 及相關資訊，研究假設如下所述的標的設施，統一作為於輻射屏蔽和熱流子項進行關鍵項目的安全分析。本節所述標的設施的幾何尺寸與材料性質與未來實際規劃可能不同，研讀者不應直接引述相關數據與其它設施結果或法規限值進行比較，本研究僅著重於技術能力的建立以及觀察分析結果的特性與趨勢。本計畫設定之研析標的，可分為用過核子燃料、貯存護箱型式以及室內乾式貯存設施建物三個部分，以下分別描述。

1.2.1 標的用過核子燃料

本研究選定之標的用過核子燃料，以參考自台電公司核一廠用過核子燃料乾式貯存設施安全分析報告，設定其燃料束為 GE 8x8-1 型式， ^{235}U 初始濃縮度為 3.25 wt%，最大燃耗度為 36,000 MWD/MTU，在用過燃料池中最少冷卻 10 年，單束燃料衰變熱小於 0.25 kW。

本研究目前的假設適用於室內乾貯設施輻射特性分析探討，非為實際乾貯設施屏蔽安全分析報告內容，射源項假設參考台電公司核一廠用過核子燃料乾式貯存設施安全分析報告 [2]，此射源內容具有沸水式用過核子燃料輻射源特性，足以符合本研究目的。射源項假設變動，若同為沸水式用過核子燃料，其輻射特性趨勢將會類似，但其設施外周遭劑量率變化則需考量輻射強度改變，對應設施屏蔽設計重新作劑量率分析。

1.2.2 標的貯存護箱

本研究為能深入探討單一設施貯存兩種不同護箱之情節，並於研析過程中避免因為護箱熱負載、裝載燃料束型式與裝載數目的差異，內部源項不同而造成後續比較討論的困難，故參考美國 Holtec 公司之 HI-STAR 100 與 HI-STORM 100 系統，兩系統屬於同系列之護箱，可透過不同的多功能密封鋼筒 (Multi-Purpose Canister, MPC) 並搭配不同的外包封容器達到裝載各類型燃料之需求。本研究考量標的用過燃料係為沸水式燃料束，故多功能密封鋼筒將選用 MPC-68 型式，以研析此兩種護箱於裝填 68 束之 BWR 用過核子燃料束且具有總熱源 17 kW 時之輻射屏蔽與熱流特性。

研究中選用之 HI-STAR 100 護箱之設計外型簡圖則如圖 1.1 所示[9]，其為金屬護箱，由 MPC 包覆於外包裝(Overpack)金屬容器內，由內而外分別為 MPC(主要材質為不鏽鋼)、內殼、外殼、加馬吸收材(主要材質為碳鋼)與中子吸收材(Neutron Shield Holtite-A)，其設計特色為外圍加馬屏蔽層可依設計需求，逐層包覆以達設計所需之輻射屏蔽需求。

另一個標的護箱，HI-STORM 100 護箱如圖 1.2，係採用混凝土作為外包封材料，不同於上述金屬護箱藉由表面移熱的散熱機制，HI-STORM 100 其 MPC 與混凝土殼層間具有散熱功能的空氣通道，且混凝土殼層上下兩端各有 4 個進出氣孔協助散熱。另一特色為不同於其它混凝土護箱為求澆製後之混凝土具有較佳的抗拉伸強度而置有鋼筋之作法，該類護箱係採用金屬外殼作為澆製時之模具，且於完成澆製後不予拆除，令其提供混凝土護箱應具有的抗拉伸強度。此一設計因內部不具有鋼筋且該模具於製造之初可確保灌漿作業的滲漏狀況，故可以確保澆製後之混凝土護箱內部不致存在蜂窩現象以致設計之輻射屏蔽能力有所減損。兩護箱細部幾何與材質將依各輻射與熱流分析需求作適當簡化。

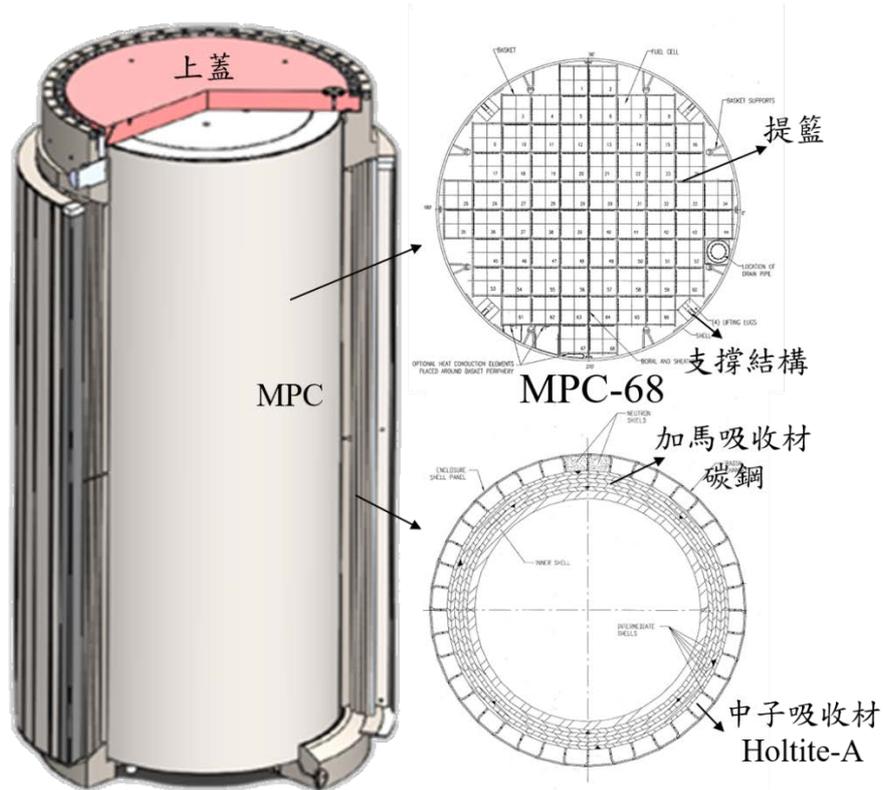


圖 1.1、HI-STAR 100 系統示意圖，(左)主體外觀、(右上)MPC 及(右下)外包裝設計[9]

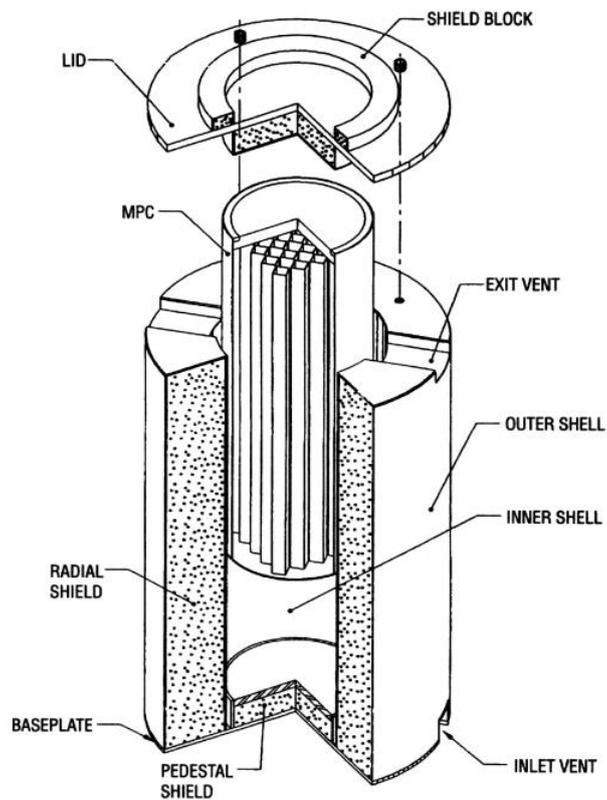


圖 1.2、HI-STORM 100 混凝土護箱示意圖[10]

1.2.3 標的建物設施

本研究考量裝載容量與未來不同型式間護箱配比之需求，規劃一可容納 120 組護箱之設施。參考標的護箱公開的安全分析報告[9, 10]所載資訊，取其大者將每組護箱之間距設置為 5.8 m，並據以規劃出整體廠房尺寸(如圖 1.3 所示)為長 91 m、寬 55 m 之單廳式設計，設施中央留有 5 m 通道，作為運送護箱之走道及機具所需設計，高度則在考量作業需求後訂為 14 m。

本假想設施之主要設計除參考台電公司核能一廠除役計畫環境影響評估報告書[1]及相關資訊外，亦將物管局於 108 年所執行之 108FCMA003 計畫所採用之假想設施資訊納入其中，主體除混凝土基座外，其建物主體為混凝土材料，其廠房側壁厚度為 90 cm，頂部厚度為 45 cm，並於南北兩端之牆面高度在 1.2 m 及 13 m 處具有 60 cm 寬之空氣通道，通道具有迷道設計以降低輻射滲流的效應。

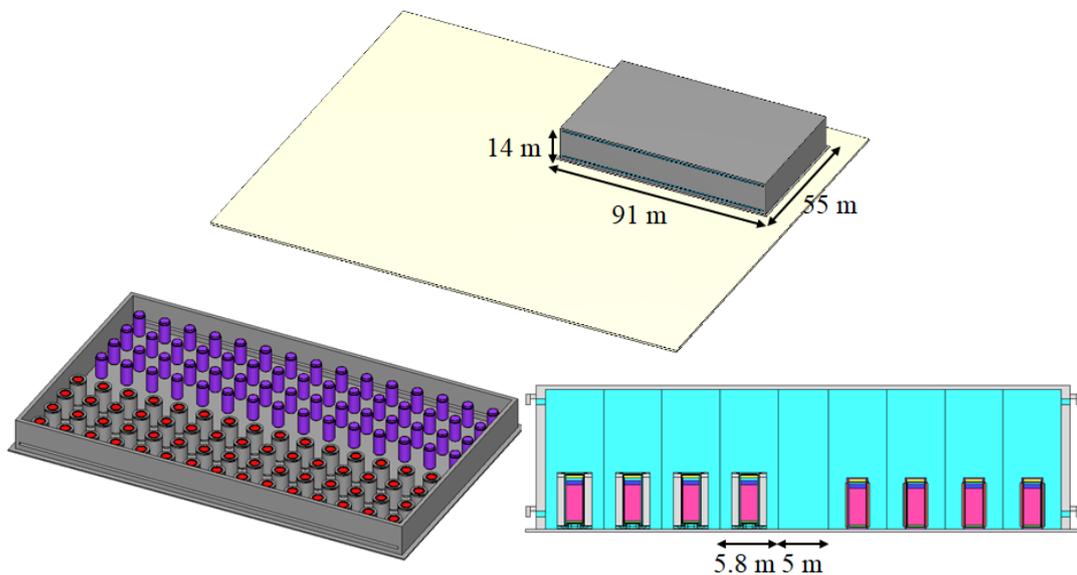


圖 1.3、標的建物設施外觀、內部及側剖面示意圖

1.3 計算案例樹狀圖

本研究分別規劃了乾貯護箱與室內設施的屏蔽分析案例，如圖 1.4 案例樹狀圖，包含 2 種護箱型式(HI-STAR 100 與 HI-STORM 100)與 2 種建物結構(混凝土建物與鋼構建物)搭配 2 種護箱配置(60:60 與 104:16)，共 42 個案例，整體計算時間共需 342 天(單電腦單執行序)，其中護箱案占約 22 天，設施案占約 320 天。

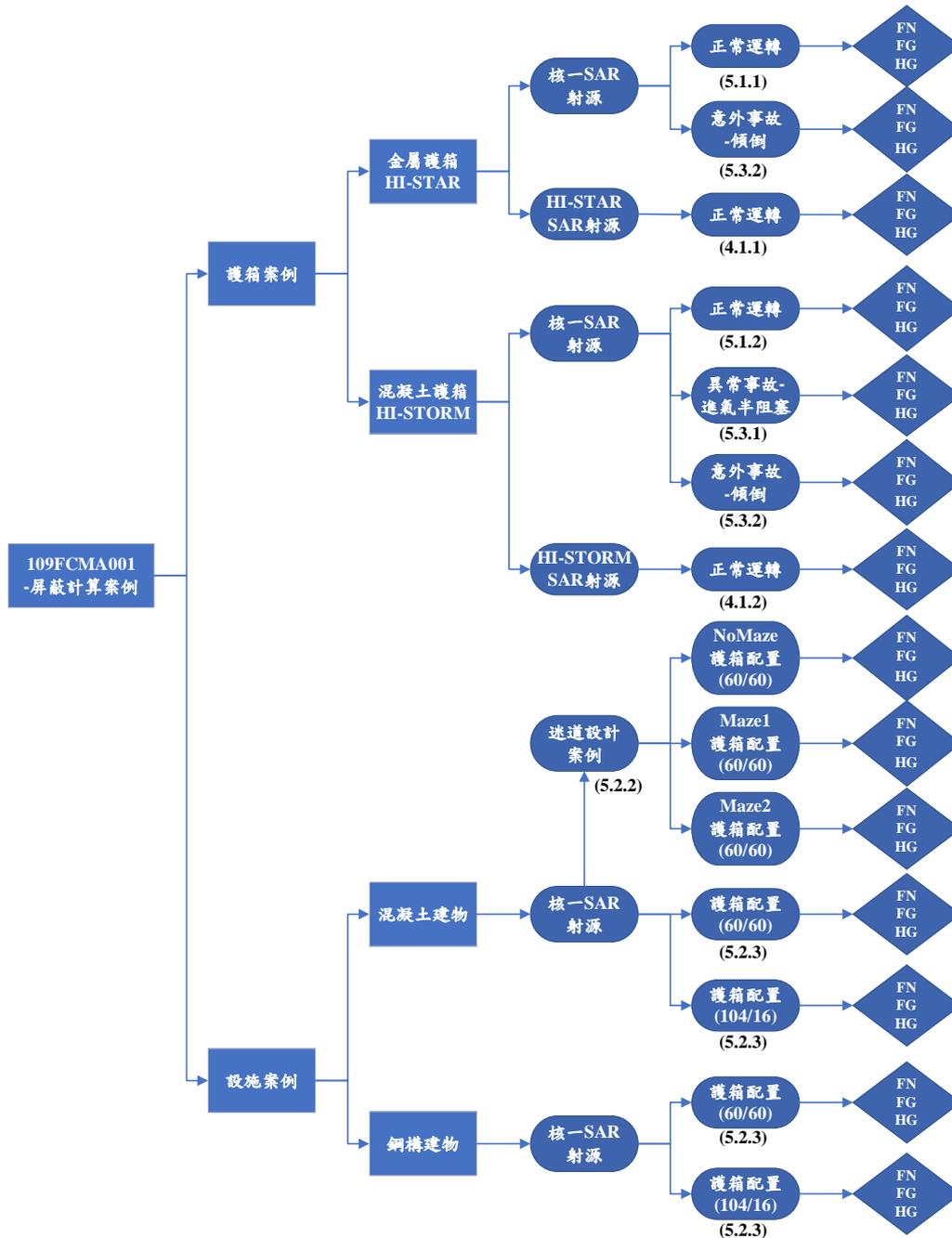


圖 1.4、本計畫執行之案例樹狀圖

第二章、輻射屏蔽安全分析方法

用過核子燃料輻射源項評估及乾式貯存護箱與設施的輻射屏蔽計算，上述兩者為用過核子燃料乾式貯存相關輻射屏蔽安全分析中最重要的部分。本子計畫著重於室內乾貯建物型式與貯存護箱類型之輻射屏蔽評估研究，用過核子燃料輻射源項非為計畫主要探討目標，在此不針對用過核子燃料輻射源項作重新評估，乃採用 1.2.1 節所述之標的用過核子燃料資訊；計畫主要著力於護箱與設施之輻射屏蔽計算，針對選定之兩種標的護箱，其採用的護箱資訊皆與子計畫二熱流分析相同，建構兩種護箱輻射屏蔽分析模型，對其作護箱表面劑量率分布探討。再對裝載兩種標的護箱的標的設施，建構其設施輻射屏蔽分析模型，對其作整體輻射場特性評估，其中分析的標的設施亦同於子計畫二，結合屏蔽與熱流分析，研提對室內乾貯設施建物型式與貯存護箱類型之輻射屏蔽評估之審查要點，以利乾貯設施整體計算方法的建立與分析經驗的累積。

標的設施，預計可貯存 120 組護箱(8160 束用過核子燃料)，後續的分析優先考慮其中 60 桶為金屬護箱，另外 60 桶為混凝土護箱。分析標的設施如圖 1.3，設施上半部擺放金屬護箱，下半部擺放混凝土護箱，中間留有走道空間，不規劃結構牆及額外的作業空間等。標的設施建物長邊留有上下兩端進出氣通道，並同時具有迷道設計。標的護箱，依參採資料作模型建構，其內部密封鋼筒(Canister)的幾何與材質設定將用過核子燃料束作均質化，依其燃料特性均勻化為四區，上端版區(UEF)、充氣區(Plenum)、有效燃料區(Effective Fuel)、下端版區(LEF)，以簡化整體設施分析。

如圖 1.3 所示，整體設施包含 120 桶乾貯護箱是一個非常龐大的輻射屏蔽設施，除了有複雜的幾何模型之外，其輻射屏蔽安全分析會同時包含深穿透、輻射滲流與天空散射等困難的輻射遷移計算。參考國外文獻與本團隊過往的經驗累積，最佳的解決方法需仰賴先進的數值方法與高速電腦。使用連續能量截面資料的蒙

地卡羅(Monte Carlo)計算通常被視為對於複雜屏蔽問題最準確的遷移計算方法，但蒙地卡羅計算結果帶有無法避免的統計誤差且相對需耗費大量的計算資源。室內乾貯設施此類龐大且複雜的輻射屏蔽問題，採用蒙地卡羅程式進行分析時，需要引入有效的變異數降低技巧，才可能在市面上常見個人電腦或機櫃型電腦與時間限制下得到合理可信任的估計值。

本團隊過往的研究成果與經驗已成功建立起 ADVANTG/MCNP[11] 與 SCALE/MAVRIC[12] 二大可用於大型輻射屏蔽問題的分析技術，此二方法均採用 Consistent Adjoint Driven Importance Sampling (CADIS) 理論，結合決定論法 (Deterministic Methods) 與蒙地卡羅法的優點，以決定論法程式作簡易近似的伴隨遷移計算，自動化地產生適用於三維蒙地卡羅程式的權重射源分布 (Biased Source) 及粒子權重地圖 (Weight Window Map)，有效地優化蒙地卡羅程式的計算效率。上述二方法均具備有在短時間內能快速驗證困難輻射屏蔽相關計算的能力，可應用於國內用過核子燃料乾貯系統的輻射安全分析與審查作業。

考量本研究特性與整體使用便利性，本計畫選擇 MAVRIC 程式為主要分析工具，其屬於 SCALE (Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation) 程式集下的專門用於輻射屏蔽分析的控制模組，SCALE 是由橡樹嶺國家實驗室 (ORNL) 所建立與維護的計算機程式集，可應用於臨界安全、反應器物理、輻射屏蔽、與用過核子燃料特性等分析，目前已更新至 6.2 版本。SCALE 中有許多具有不同功能的子程式，稱之功能模組，可以獨立執行，亦可以串接的方式組成控制模組進行整合性分析。以 MAVRIC 控制模組為例，圖 2.1 為其執行流程，此控制模組自動化地串接特定功能的子程式進行不同功能的串接計算，MAVRIC 控制模組依序以串接 XSPROC 產生計算問題所需的核子截面資料，再以 Denovo 執行決定論法的常規與伴隨遷移計算，再利用 CADIS 理論建構產生權重射源分布以及各區域粒子遷移的權重地圖，最後以 Monaco 應用 Denovo 產生之變異數降低參數有效地執行蒙地卡羅法的粒子遷移計算。

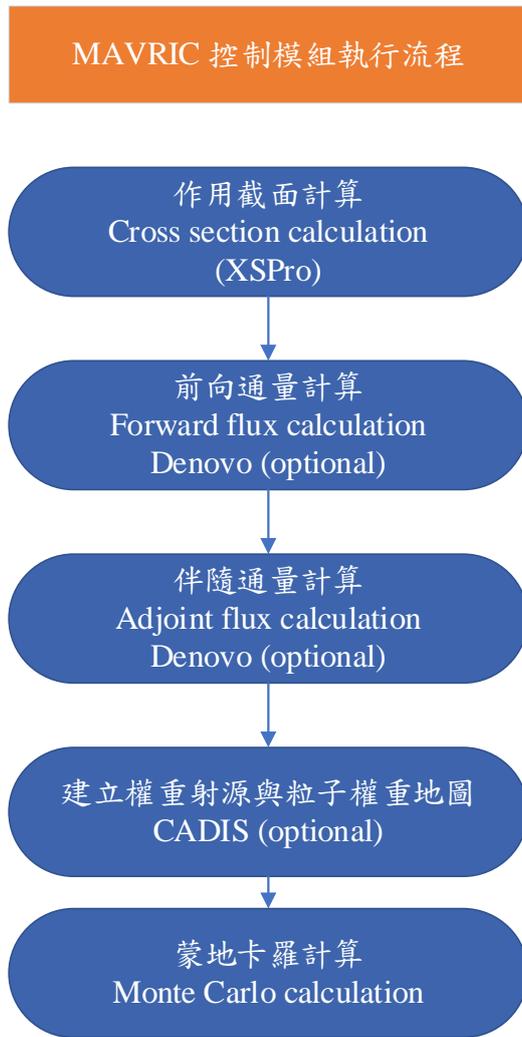


圖 2.1、MAVRIC 控制模組的執行流程[12]

本子計畫的主要工作與執行的步驟擬定如下：

1. 從目前歐、亞採用室內乾貯主要國家當中，選取 2 座不同建物型式且資料較完整公開的室內乾貯設施，以瑞士的 ZZL 與英國的 SZB 作為本計畫研析案例之主要參考依據。蒐集國際間室內乾貯輻射屏蔽設計與管制要求資訊，針對選定設施相關文獻進行研析，探討其屏蔽設計與相關輻射管制要求資訊。同時針對乾貯設施輻射屏蔽評估方法相關文獻作蒐集與研析，持續精進乾貯設施相關輻射屏蔽分析能力。
2. 經蒐集室內乾貯設施之相關設計資訊，建構室內貯存案例之地上建物設施及貯存護箱之安全分析評估模型與方法。乾貯建物設施與貯存護箱輻射屏蔽評估模式建立，子計畫一與子計畫二共同討論，確立標的護箱(HI-

STAR 100 金屬護箱與 HI-STORM 100 混凝土護箱)與標的設施(凝土地上建物)相關資訊，以此共同資訊建構護箱和設施之輻射屏蔽計算模型。確立符合預期目標同一建物內可貯放不同類型的乾貯護箱，目前預設可存放 120 桶護箱，且金屬與混凝土護箱數目各半。

3. 採用三維蒙地卡羅程式 SCALE/MAVRIC，對標的護箱作護箱表面劑量率分布結果探討，完整了解兩種標的護箱輻射特性。持續採用三維蒙地卡羅程式 SCALE/MAVRIC，優先考慮執行整體設施全尺度的輻射遷移模擬計算，若有計算執行困難再考慮適當的簡化。因本案例必須同步考量大範圍 120 組護箱的複雜幾何與深穿透問題，如何使蒙地卡羅程式在合理的時間內得到可接受之統計誤差的結果是本研究的重點。選定異常(混凝土護箱的進氣通道半阻塞情節)或意外(金屬護箱與混凝土護箱傾倒情節)事件情境，進行輻射屏蔽案例評估與影響效應研析。
4. 針對兩種護箱表面劑量率分布作輻射特性重點比較，並彙整標的設施輻射場特性，研提室內乾貯設施輻射屏蔽分析審查重點或注意事項。

第三章、國際室內乾貯設施輻射屏蔽設計與管制要求資訊

蒐集研析

本章節針對國際上兩座用過核子燃料室內乾式貯存設施：瑞士的 ZZZ 設施與英國的 SZB 設施，蒐集公開可取得的文獻，並且進行輻射相關議題的回顧。目標為取得輻射評估管制要求、廠房設計幾何尺寸、廠房安全功能說明、貯存護箱型式數量等資訊。

3.1 瑞士 ZZZ 設施資訊

於 1980 年代中期，在聯邦反應器研究所所在地維倫林根(Würenlingen)興建「國家廢棄物中心」的計畫逐漸成形。對此，瑞士的核能電廠營運商提出了「中央中期貯存設施」之構想，當地市政團隊對此也表示歡迎，因為預期管理該設施的股份公司會帶來收入。負責管理該設施的 ZWILAG 公司(Zwilag Zwischenlager Würenlingen AG)於 1990 年 1 月 18 日成立。公司創立目的除了經營中期貯存設施之外，還有為瑞士所有類型的放射性廢棄物提供臨時貯存功能[13]。

瑞士政府於 1996 年 8 月 21 日批准了 Zentrale Zwischenlager(ZZZ)設施的建造申請與貯存大廳的營運申請[13]。目前的 ZZZ 設施包含數個廠房，各廠房的相對位置如圖 3.1 所示：

1. 固化包裝廠以及行政大樓。(Conditioning Plant and Office Building)
2. 中低階放射性廢棄物貯存廳。(Storage Hall for Low- and Medium-Level Waste)
3. 中階放射性廢棄物貯存廳。(Storage Hall for Medium-Level Waste)
4. 熱室。(Hot Cell)

熱室功能為護箱的檢查與維護、用過燃料的檢查與裝載。操作員以遠端

遙控的方式執行熱室中的各項操作。熱室建物尺寸為長 36 公尺、寬 14 公尺、高 25 公尺；規劃牆壁厚度為 160 公分、天花板厚度為 150 公分。

5. 接收大樓。(Reception Building)
6. 護箱貯存廳(存放高階放射廢棄物以及用過燃料，內部照片可見圖 3.2，
Cask Storage Building (High-Level Building))
7. 電漿爐廠房。(Plasma Plant)
8. 輔助廠房。(Auxiliary Building)



圖 3.1、ZZL 設施空照圖[14]



圖 3.2、ZZL 設施高階放射性廢棄物以及用過核子燃料貯存廳
(Behälterlagerhalle)[15]

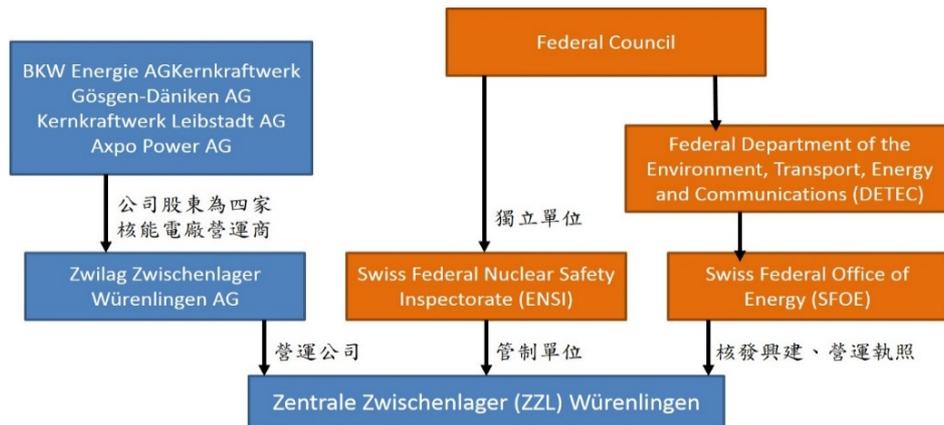


圖 3.3、ZZL 設施的營運單位與相關管制機關

ZZL 營運單位與相關管制機關關係可參見圖 3.3(圖中政府單位名稱為官方英文譯名)所示。負責設施營運的 ZWILAG 公司，現今股東成員為：BKW Energie AG(佔股 10.7%)、Kernkraftwerk Gösgen-Däniken AG(佔股 31.2%)、Kernkraftwerk Leibstadt AG(佔股 33.8%)、Axpo Power AG(佔股 24.3%)，股東皆為瑞士境內的核能電廠營運商[16]。相關政府單位為：聯邦核能安全督察委員會(Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, ENSI)，是一獨立政府單位，主管瑞士境內的核能事務管制；聯邦環境、運輸、能源與運輸部(Das Eidgenössische Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, UVEK)及其下轄的瑞士聯邦能源辦公室(Bundesamt für Energie Bundesamt, BfE)，負責 ZZL 設施的興建、營運執照的審核與發放。

3.1.1 ZZL 輻射評估管制要求

由瑞士核安會對轄下設施，關於運輸/貯存雙重功能金屬護箱規範，ENSI-G05[17]導則得知：瑞士對於金屬護箱劑量率有以下規範，距離護箱 2 m 劑量率不超過 0.1 mSv/h、護箱表面劑量率不超過 10 mSv/h、護箱表面平均劑量率不超過 0.5 mSv/h。另外，由 HSK(Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen，於 2009 年改制為 ENSI)針對 ZWILAG 提出的 ZZL 建造暨營運執照申請資料的官方審查意見[18]，要求 ZZL 設施內部貯存護箱表面劑量率低於 0.5 mSv/h，且在屋

頂加裝針對意外事故時檢查外釋氣體的偵檢器，確認是否帶有貝他射源的懸浮粒子。用過燃料貯存廳採用自然對流，需要與環境交換冷熱空氣。偵檢器監測外釋熱空氣對環境以及周圍人員可能造成的影響。在事故發生時，也可藉由偵測氣體中增加的核種活度，進行警示。

3.1.2 ZZL 廠房設計幾何尺寸

根據 ZWILAG 公司於官方網站提供的介紹冊[19]，以及 HSK 審查意見[18]，負責容納高階放射性廢棄物以及用過核子燃料的護箱貯存廳，長 68.4 m、寬 41.0 m、高 17.9 m(不含屋頂)，地板為厚度 30 cm 的混凝土，天花厚度為 30 cm；設計容量為 200 個運輸/貯存兩用護箱。

3.1.3 ZZL 廠房安全功能說明

從 HSK 審查意見得知[18]，ZZL 設施的耐震設計基準為水平加速度 0.16 g，垂直加速度 0.11 g。另外在高階放射性廢棄物以及用過核子燃料部分，由裝載的護箱或容器負責內容物保護功能。裝載用過燃料的護箱有洩漏偵檢器並與行政大樓的警報器連線。

3.1.4 ZZL 貯存護箱形式數量

目前只有 ENSI 的 F. Kochy 在國際原子能總署於 2014 年舉辦的兩用護箱工作坊使用的簡報[20]有提及各式護箱的數量，詳如表 3.1。

表 3.1、ZZL 於 2014 年貯存各式護箱型號及數量[20]

型號	數量
TN24G/GB	4
TN24BH/BHL	14
TN97L	9
TN52L	1
TN81CH	6
HAW20/28CG	5
Castor I-c-Diorit	1
總量	40

在 2016 年，瑞士根據「用過核子燃料管理安全及放射性廢棄物管理安全聯合公約」，提交相關報告[21]，報告中載明，ZZL 設施截至 2016，有 29 個兩用護箱貯存 2236 個 BWR 燃料元件；4 個兩用護箱貯存 148 個 PWR 燃料元件；1 個兩用護箱貯存 349 個 DIORIT 研究反應爐燃料元件。總共 2733 個燃料原件，450.4 噸重(tonnes of Heavy metal)，總活度 5.2×10^{18} Bq。

ZWILAG 公司的年報[22]以及 ENSI 的年度監督報告[23]，目前記錄的最新年度都是 2019 年。ZWILAG 公司最新的 2019 年年度報告並未提及用過燃料的貯存事項，但在 2018 年的年度報告有統計總數，資料詳見圖 3.4。ENSI 監察報告則說明，ZZL 共有 69 個兩用護箱，包括 11 個 CASTOR 護箱和 12 個 TN 護箱裝載 632 個燃料再處理產生的玻璃固化物；45 個 TL 護箱裝載 3212 個用過燃料；1 個 CASTOR 護箱裝載 PSI 研究用反應器的燃料。空間使用率大約 34%。除此之外，還有從 2003 存放至今，裝載 Lucens 實驗反應爐除役廢棄物的 6 個容器。

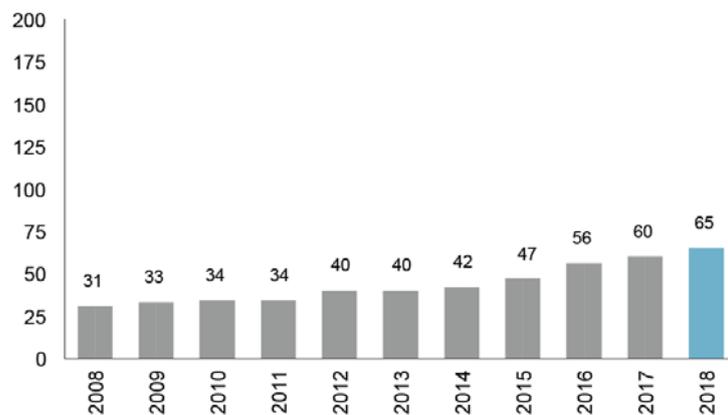


圖 3.4、ZZL 設施近十年的護箱貯存數量[22]

3.1.5 ZZL 相關關鍵字

由於 ZZL 設施相關的公司或是官方文件，使用瑞士德語，以下列出相關的德語詞彙於表 3.2，以便後續相關研究使用。

表 3.2、相關字詞英德對照

德文原文	英文翻譯
hockaktive Abfälle	Highly active waste
abgebrannte Brennelemente	Spent fuel
Behälter, TL- Behälter	Container, transport/storage container
Lager	Storage, warehouse
Behälterlagerhalle	Cask storage hall
Strahlenschutz	Radiation Protection
Ortsdosisleistung	Ambient dose rate
Erdben	Earthquake
betrieb	Operation
Grad	degree
Wärmeabfuhr	Heat dissipation

3.1.6 ZZL 設施資訊整理

1. 輻射評估管制要求：對於護箱劑量率有以下規範，距離護箱 2 m 劑量率不超過 0.1 mSv/h、護箱表面劑量率不超過 10 mSv/h、護箱表面平均劑量率不超過 0.5 mSv/h。屋頂處有偵檢器，檢查意外事故時外釋氣體有無含有 beta 射源的懸浮粒子
2. 熱流管制要求：玻璃基質材料與護套溫度限值為 450&390°C。護箱表面溫度 120°C；以及在裝載 5.8 MW 下，廠房空氣最高增加 26°C，與最初申照之 23°C 略有不同、聚乙烯材料溫度 120°C。混凝土廠房溫度 100°C，進口溫度 32°C。
3. 廠房設計幾何尺寸：室內空間為長 68.4 m、寬 41.0 m、高 17.9 m(不含屋

頂)；地板為混凝土，厚度為 30 cm；天花板厚度為 30 cm。

4. 廠房安全功能說明：安全相關建築(包含貯存廳)的耐震設計基準為水平加速度 0.16 g、垂直加速度 0.11 g。由裝載高階廢棄物跟用過燃料的護箱負責保護功能。裝載用過燃料的護箱有洩漏偵檢器，且與行政大樓警報器連線。
5. 貯存護箱型式數量：在 ENSI 檢查年(2019 年末)，共有 69 個兩用護箱，包括 11 個 CASTOR 和 12 個 TN 護箱裝載 632 個燃料在處理產生的玻璃固化物；45 個 TL 護箱裝載 3212 個用過燃料；1 個 CASTOR 裝載 PSI 研究用反應器的燃料。空間使用率大約 34%除此之外，還有從 2003 存放至今，裝載 Lucens 實驗反應爐除役廢棄物的 6 個容器。

3.2 英國 SZB 設施資訊

Sizewell B(SZB)的乾貯設施為 EDF Energy 公司在 Sizewell B 核能電廠廠區內額外興建的乾式貯存設施，其外觀與內部照片可見圖 3.5 和圖 3.6。興建目的是為增加用過燃料貯存容量，以增加 Sizewell B 核電廠的使用年限。



圖 3.5、SZB 乾貯設施廠房外觀[24]



圖 3.6、SZB 乾貯設施廠房內部[24]

EDF Energy 公司為該設施的營運公司，隸屬於法國電力公司集團，前身為被收購的英國能源 British Energy 公司[25]。與此乾貯設施相關的英國政府機關則包含：核能管制辦公室(Office of Nuclear Regulation, ONR)，其為英國主要的核子設施管制單位，是一透過就業與養老金部大臣向議會負責的國營公司(Public

Corporation)[26]；放射性廢棄物管理公司(Radioactive Waste Management Ltd.)是放射性廢棄物管制與指導單位，其為核子除役署(Nuclear Decommission Authority, NDA)的子公司之一，核子除役署是一透過能源暨氣候變遷大臣(2016年7月部門改組，現為商業、能源技產業策略大臣[27])向議會負責的非政府部門公共機關[28]；商業、能源技產業策略部(Department for Business, Energy and Industrial Strategy, BEIS)則與核能管制辦公室同時負責相關核子設施的執照審發[29]。另外，SZB的設施更動，例如興建乾貯設施，還須經過當地議會同意，如薩福克郡郡議會(Suffolk County Council)以及薩福克海岸區區議會(Suffolk Coastal District Council，於2018年改制，現為東薩福克區區議會，East Suffolk District Council[30])。以上資訊整理於圖3.7。

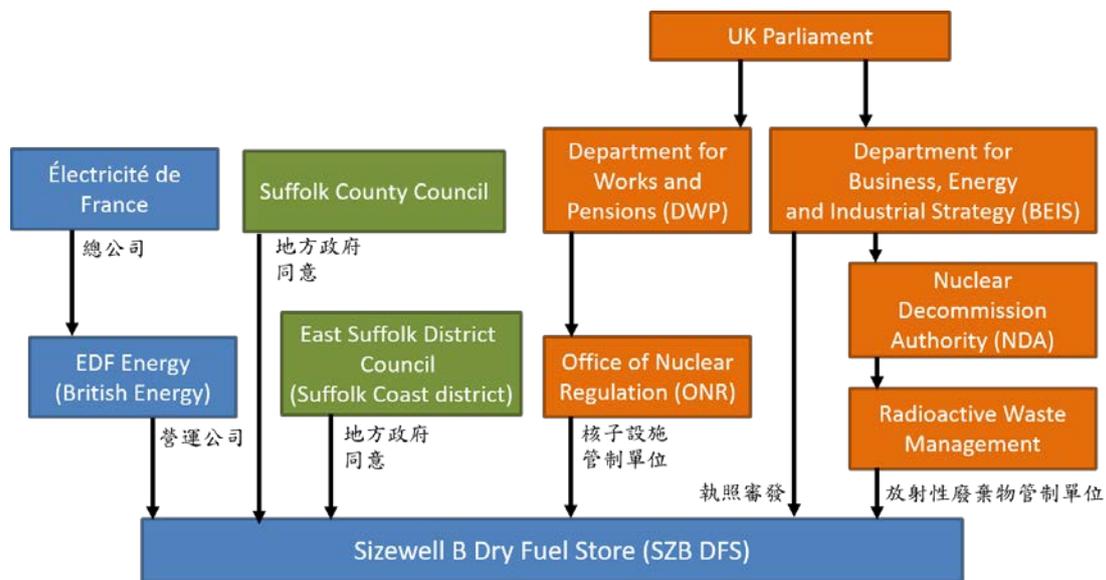


圖 3.7、設施的營運單位與相關管制機關

3.1.1 SZB 輻射評估管制要求

從 SZB 的護箱廠商，Holtec 公司 Haizhen Pan 博士的 SZB 乾貯設施投影片 [24]得知，廠址邊緣的劑量率限值為 0.50 $\mu\text{Sv/h}$ ，但文獻僅提及貯存建築距離廠址邊緣數公尺。因 SZB 設施旁邊仍有輻射工作人員在日常作業，考量一年工時 2000 小時，工作人員年劑量為 $0.5 \times 2000\text{h} = 1 \text{ mSv/y}$ ，此劑量率限值屬於 ALARA

合理選擇。我國貯存設施對一般民眾年劑量限值為 0.25 mSv。

3.1.2 SZB 廠房設計幾何尺寸

從 Holtec 投影片[24]以及物管局公務出國報告[31]，建物尺寸為：長 114 m、寬 60 m、高 15 m(不含屋頂)，廠房混凝土基座為 750 mm，其中基座上下兩端皆各別有四層的 T32 鋼筋做加強。廠房地板中央有挖設一個坑洞(Canister Transfer Pit, CTP)如圖 3.8 所示[24]，提供多功能密封鋼筒從運輸護箱轉移至貯存護箱時使用。

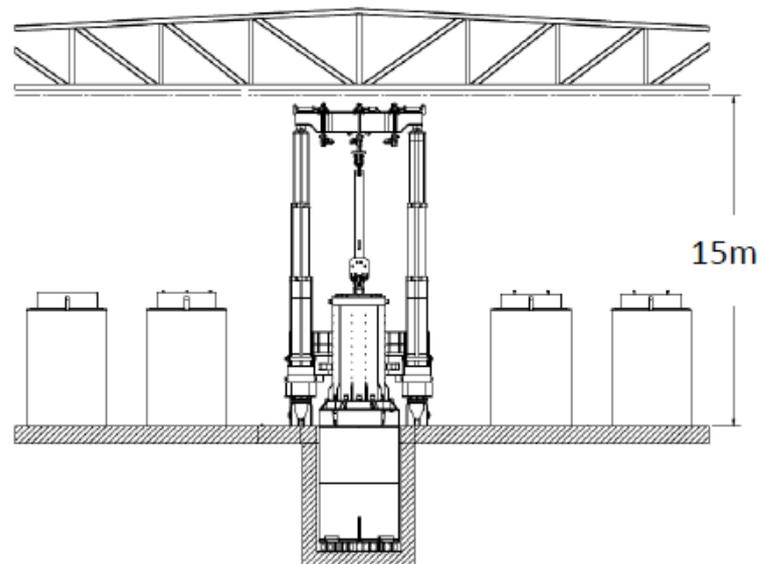


圖 3.8、鋼筒轉移坑洞示意圖[24]

3.1.3 SZB 廠房安全功能說明

於參訪報告[31]，以及先前的乾貯研究計畫[4]，SZB 乾貯設施的鋼構廠房僅提供氣候保護屏障功能，並無核能安全相關防護功能。Holtec 公司也說明只是為了增加大眾接受度，所以加上鋼構廠房，且因建材為輕鋼架材質，如果建物損壞，導致建材掉落於護箱上，護箱完整性不會受到損壞[24]。SZB 可在 0.14 g 的地震規模下維持運作，貯存護箱 HI-STORM MIC 的耐震基準則是 0.72 g。另外有設計鋼筒轉移坑洞，目的是為降低地震對多功能密封鋼筒的轉移過程安全性的影響。

3.1.4 SZB 貯存護箱形式數量

SZB 設施的設計貯存容量為 143 組混凝土貯存護箱，自 2017 年 3 月開始第一組貯存護箱之儲存作業，截至 2018 年 7 月完成第七組 HI-STORM MIC 混凝土貯存護箱之儲存作業[24][31]。

3.1.5 SZB 乾貯操作經驗

EDF energy 的 R. Parlone 曾於職業暴露資訊系統(Information. System on Occupational Exposure, ISOE) 簡報[32]介紹 SZB 的首次乾式貯存經驗，本節截錄該份簡報中與乾貯設施相關之內容。

裝載用過燃料的多功能密封鋼筒藉由運輸護箱送至乾貯設施後，須從運輸護箱下降至位於轉移坑洞的貯存護箱。於下降過程會產生高度校準的光子射束(collimated gamma beam)。廠方將鍛造碳鋼(forged carbon steel)組成的圓環，以及額外的雙層鉛屏蔽作為輻射屏蔽[32]。屏蔽器材的設置及使用可見圖 3.9、圖 3.10 及圖 3.11。



圖 3.9、廠方人員將碳鋼圓環擺放定位[32]



圖 3.10、鋼筒下載過程中使用的碳鋼圓環以及雙層鉛屏蔽[32]



圖 3.11、廠方人員蹲在鉛屏蔽上移除鋼筒的耳軸塊(trunnion block)[32]

3.1.6 SZB 設施資訊整理

1. 輻射評估管制要求: 廠址邊緣的劑量率限值為 0.50 $\mu\text{Sv/h}$ ，但貯存建築仍距離邊緣數公尺。
2. 熱流管制要求: 鋼構廠房具有外牆底部與頂部通氣孔設計，以自然對流的方式被動式散熱，不需額外安裝強制對流設備。經評估當設施貯存滿載時，建物頂部最高溫將達 70°C、廠內地表面溫度約 30-35 °C，英國電廠工作溫度限值為 26 °C。
3. 廠房設計幾何尺寸: 114 m、寬 60 m、高 15 m(不含屋頂)。廠房混凝土基座為 750 mm，其中基座上下兩端皆各別有四層的 T32 鋼筋做加強。
4. 廠房安全功能說明: 鋼構廠房僅提供氣候保護屏障功能並無核能安全相關之防護功能。廠房耐震基準為 0.14 g。
5. 貯存護箱型式數量: 七個 HI-STORM MIC 護箱(截至 2018 年 7 月)。

3.3 國際室內乾貯設施輻射屏蔽設計與管制要求資訊文件

將本研究搜尋與瑞士 ZZL 與英國 SZB 相關之國際室內乾貯設施輻射屏蔽設計與管制要求資訊文件條列於表 3.3。

表 3.3、ZZL 與 SZB 相關之國際室內乾貯設施輻射屏蔽設計與管制資訊文件

ZZL	
檔案名稱	文件標題
01. F. Koch (Switzerland)zsl	Dual Purpose Casks in Dry Storage in Switzerland
02. Switzerland_report_web	The control of safety of radioactive waste management and decommissioning in Switzerland
03. Joint_Convention-Sixth_national_report-Switzerland_2017	IMPLEMENTATION OF THE OBLIGATIONS OF THE JOINT CONVENTION ON THE SAFETY OF SPENT FUEL MANAGEMENT AND ON THE SAFETY OF RADIOACTIVE WASTE MANAGEMENT
04. Prospekt_Anlagen_Prozesse_E	INSTALLATIONS AND OPERATIONAL PROCESS
05. Geschaeftsbericht20181	Zwilag Zwischenlager Würenlingen AG Geschäftsbericht 2018 (英譯：Zwilag Zwischenlager Würenlingen AG Annual Report 2018)
06. Aufsichtsbericht_2019_web_barrierefrei	Aufsichtsbericht 2019 (英譯：Regulatory Oversight Report 2019)
07. ENSI_g05_d	Transport- und Lagerbehälter für die Zwischenlagerung (英譯：Transport and storage containers for temporary storage)
08. 21474553	GUTACHTEN zum Gesuch der ZWILAG Zwischenlager Würenlingen AG um Erteilung der Bewilligung für Bau und Betrieb des

	Zentralen Zwischenlagers für radioaktive Abfälle (英譯：OPINION on ZWILAG Zwischenlager Würenlingen AG's application for the approval to build and operate the central interim storage facility for radioactive waste)
09. ENSI-B17_D_Ausgabe_2020_01-1	Betrieb von Zwischenlagern für radioaktive Abfälle
SZB	
檔案名稱	文件標題
01. RPPG10602-0401-12330569.pdf	除役核電廠用過核燃料室內乾式貯存安全管制技術期末總報告
02. C10701736.pdf	參加第 34 屆除役與放射性廢棄物管理研習並參訪英國室內乾貯設施
03. Sizewell Drystore - Presentation 09252019.pdf	Sizewell B Dry Fuel Storage Project
04. Parlone2018_ppt.pdf	Operational Experience of the first Dry Fuel Storage Campaign at Sizewell B

另外，本團隊於五月十一號去信英國 ONR，欲索取相關資訊文件，ONR 於六月九日回覆，並且附上三份 SZB 相關文件。文件名稱與摘要條列於表 3.4。

表 3.4、ONR 信件回覆提供文件

文件名稱	內容摘要
Office for Nuclear Regulation Justification for Granting Agreement to Allow Sizewell B Dry Fuel Store Processing to Move from Commissioning Controls to Normal Operations	本報告說明 ONR 對於 SZB 乾貯設施由試運轉階段進入到正常運轉階段之申請的管制觀點與判斷。該報告總結認為，鑑於該設施已經展現相關經驗以及正常營運的安全要求，可以同意該設施進入正常營運階段。未有提及技術細節。
Schedule of construction and commissioning hold points including specification of consent to commence active commissioning	本文件為 ONR 對乾儲廠房之興建、營運，所要求的檢驗停留點。每一個檢驗停留點，EDF 需要繳交安全論證報告，經同意後才可進入下一階段工程。未

	有提及如使用的材質、參數等技術細節。
ONR's assessment of Category 1 paper, NP/SC 7575, SZB EC 338898, Dry Fuel Store (DFS) safety case, known as stage submission 1 revision 0, furnished to ONR for information purposes only Project Assessment Report: ONR-SZB-PAR-13-020 Revision 1	此份計畫評估報告記錄 ONR 已經執行的工作（評估 EDF 所提出的第一期安全論證），會作為管制機關審查者審視 EDF 提出安全論證的參考文件。EDF 同意使用 316L 不鏽鋼做為多功能鋼筒的筒壁(P.13)，未特別有提及如使用的材質、參數等技術細節。

第四章、乾貯地上建物設施與貯存護箱輻射屏蔽評估模式

建立

本章節針對 1.2 節訂定之標的設施，建立其輻射屏蔽安全分析評估模式，包含貯存護箱屏蔽模型的建構與驗證、整體設施屏蔽模型的設立及標的用過燃料射源項描述。

4.1 護箱屏蔽模型建立

計畫標的護箱為 HI-STAR 100 金屬護箱與 HI-STORM 100 混凝土護箱，內搭配 MPC-68。各別參考兩者公告的安全分析報告[9, 10]，建構本研究所需之護箱屏蔽模型並與報告內提供的分析結果作驗證。

4.1.1 HI-STAR 100 護箱屏蔽計算模型

HI-STAR 100 金屬護箱，內配置 MPC-68，參考其安全分析報告[9]，建構本研究所需之護箱屏蔽模型，如圖 4.1-4.3 所示，圖 4.1 為軸向剖面圖，可發現護箱側邊主要光子屏蔽為多層次金屬結構堆疊而成的外包裝殼層，環繞於外包裝最外層外的中子吸收材(Holtite-A)為側邊主要中子屏蔽，但僅位於護箱側邊中段區域，因此 HI-STAR 100 護箱模型表面劑量率分布高點應位於側邊上下兩端區域。頂部區域以一次蓋與二次蓋設計作為主要屏蔽，底部區域具有一完整金屬底座來固定 MPC-68。圖 4.2 所提供之詳細尺寸結構為 HI-STAR 100 護箱屏蔽模型主要建構依據。圖 4.3 為徑向剖面圖，可更清晰發現外包裝多層堆疊結構，及外層中子吸收材所在位置。屏蔽模型的材料設定參考自安全分析報告 Table 5.3.2 內容[33]，如圖 4.4 所示。

本研究建構 HI-STAR 100 護箱屏蔽模型，過程中有幾個簡化的假設描述如

下。第一項假設，如同第二章對 MPC 的描述，不論是在 HI-STAR 100 或 4.1.2 節的 HI-STORM 100 屏蔽模型，內部搭配的 MPC-68，皆忽略內部提籃細部結構，僅依照用過燃料特性，均勻化為四區(上端板區、充氣區、有效燃料區、下端板區)。參閱本團隊過往研究，對密封鋼筒詳細幾何模型與均勻化幾何模型兩者護箱表面劑量率的比較[5, 34]，均勻化作法側邊加馬劑量率會略為高估約 33%，中子劑量率則差異不大，此一簡化設定對於輻射劑量評估將會是保守的。第二項假設為忽略外包裝的多層堆疊結構，簡化為單層碳鋼包覆 MPC，此作法與原設計兩者屏蔽物質總量不變，將不影響屏蔽分析結果。第三項假設為省略中子吸收材的裝載結構，在原設計裡中子吸收材具要有薄層碳鋼作支撐，但因碳鋼佔比很小，故在此將模擬中子吸收材為環塊狀包覆於外包裝外，此作法對劑量影響不大。圖 4.5 為本研究 HI-STAR 100 護箱屏蔽計算模型，高 5.16 m，直徑 2.4 m。

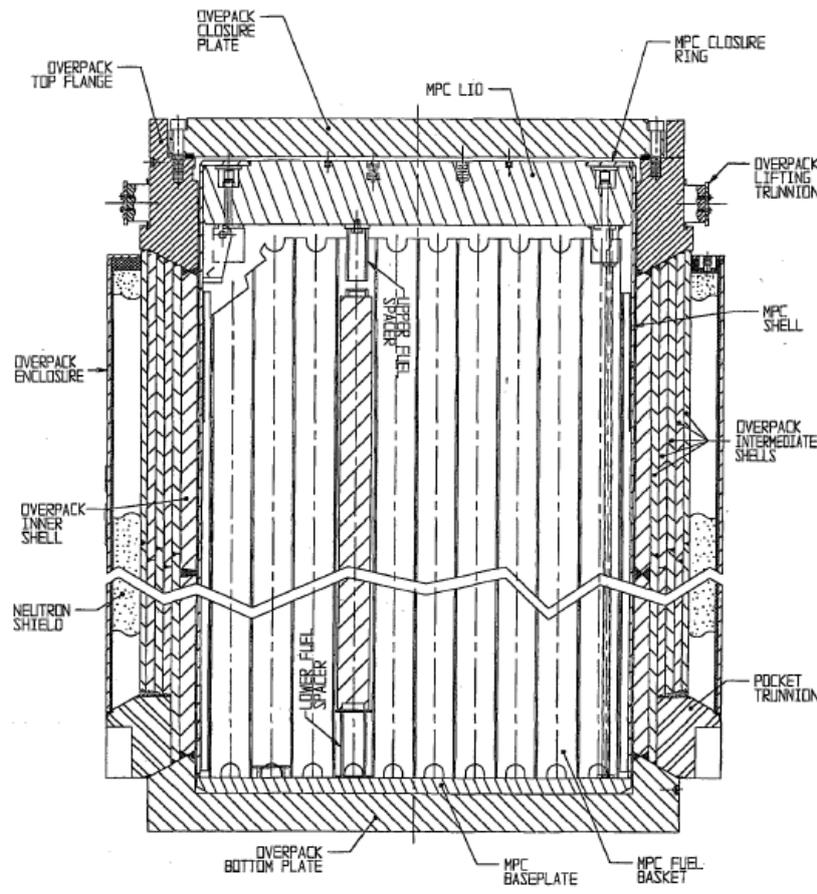


圖 4.1、HI-STAR 100 系統軸向剖面圖[9]

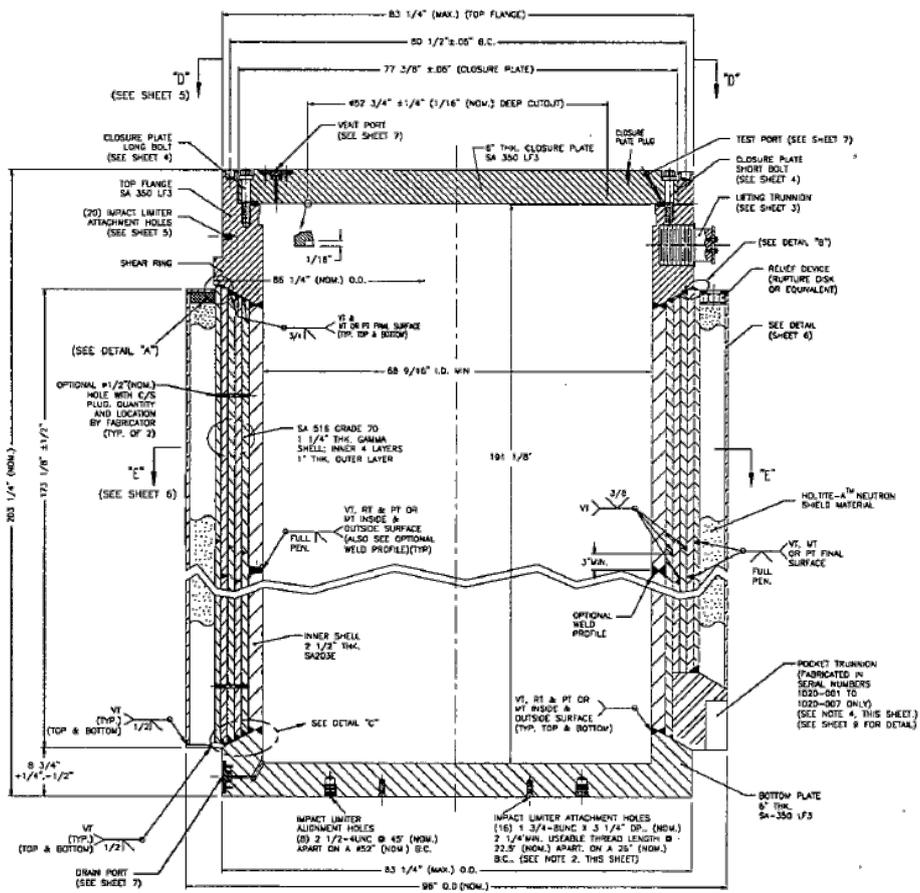


圖 4.2、HI-STAR 100 系統幾何尺寸[9]

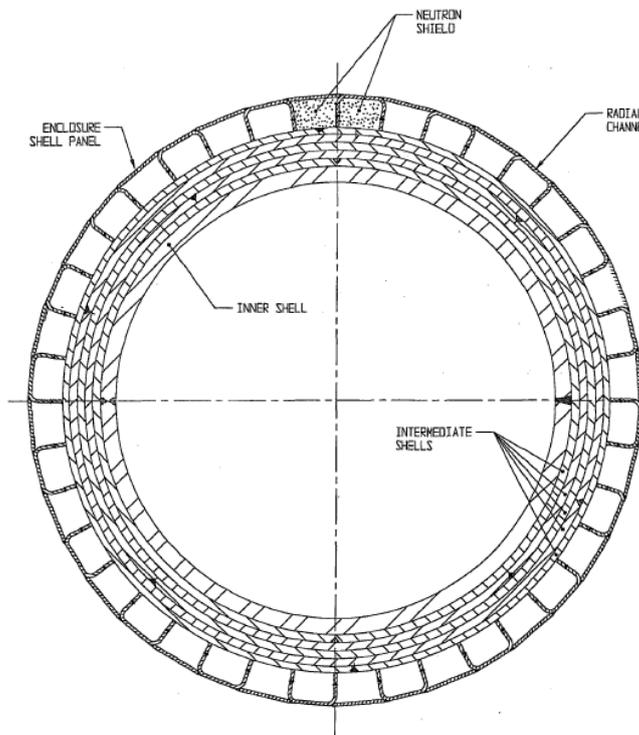


圖 4.3、HI-STAR 100 系統徑向剖面圖[9]

Component	Density (g/cm ³)	Elements	Mass Fraction (%)
Uranium Oxide	10.412	²³⁵ U	2.9971(BWR) 3.2615(PWR)
		²³⁸ U	85.1529(BWR) 84.8885(PWR)
		O	11.85
Boral	2.644	¹⁰ B	4.4226 (MPC-68) 4.367 (MPC-24)
		¹¹ B	20.1474 (MPC-68) 19.893 (MPC-24)
		Al	68.61 (MPC-68) 69.01 (MPC-24)
		C	6.82 (MPC-68) 6.73 (MPC-24)
SS304	7.92	Cr	19
		Mn	2
		Fe	69.5
		Ni	9.5
Carbon Steel	7.82	C	0.5
		Fe	99.5
Zircaloy	6.55	Zr	100
Neutron Shield Holtite-A	1.61	C	27.66039
		H	5.92
		Al	21.285
		N	1.98
		O	42.372
		¹⁰ B	0.14087
BWR Fuel Region Mixture	3.979996	²³⁵ U	2.4483
		²³⁸ U	69.5601
		O	9.6801
		Zr	18.3115
Lower End Fitting (BWR)	1.5130	SS304	100
Gas Plenum Springs (BWR)	0.2701	SS304	100
Expansion Springs (BWR)	0.6897	SS304	100
Upper End Fitting (BWR)	1.3939	SS304	100
Handle (BWR)	0.2619	SS304	100

圖 4.4、HI-STAR 100 屏蔽模型材料設定(Table5.3.2)[33]

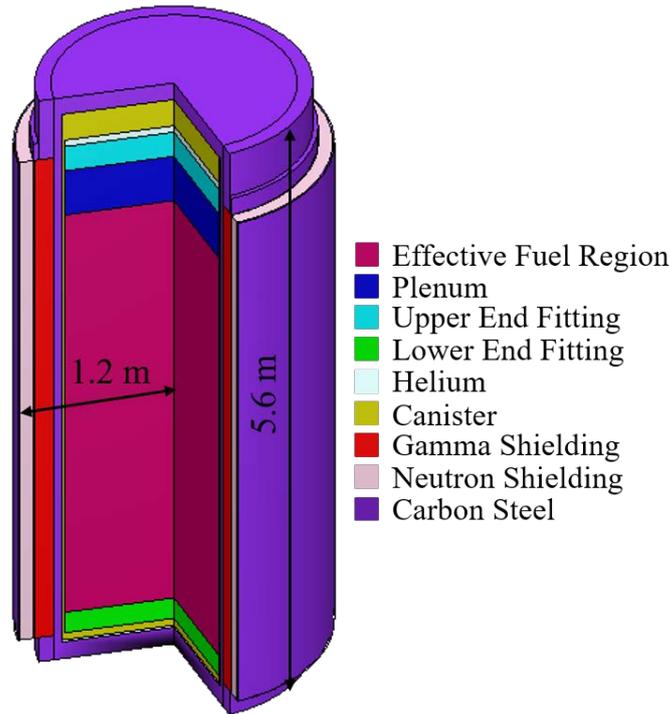


圖 4.5、標的護箱 HI-STAR 100 護箱屏蔽模型

以下針對上述建構的 HI-STAR 100 護箱屏蔽模型作驗證計算，參考其安全分析報告內提供的射源項資料，選定條件為裝載於 MPC-68 內之 BWR 鋁合金護套用過燃料，燃耗為 34,500 MWD/MTU 及冷卻 11 年，此條件下射源能譜及強度參考圖 4.6 至圖 4.8 提供資訊，整理射源強度列表如表 4.1[9]，其中結構光子射源參考自圖 4.7 提供的燃料束結構內 ^{60}Co 活度，以各組件活度數值乘 2(^{60}Co 每秒產生 2 個光子)作為結構光子射源強度。

CALCULATED MPC-68 BWR FUEL GAMMA SOURCE PER ASSEMBLY FOR DESIGN BASIS ZIRCALOY CLAD
FUEL FOR VARYING BURNUPS AND COOLING TIMES

Lower Energy (MeV)	Upper Energy (MeV)	10,000 MWD/MTU 5 Year Cooling		20,000 MWD/MTU 7 Year Cooling		24,500 MWD/MTU 8 Year Cooling		29,500 MWD/MTU 9 Year Cooling	
		(MeV/s)	(Photons/s)	(MeV/s)	(Photons/s)	(MeV/s)	(Photons/s)	(MeV/s)	(Photons/s)
0.45	0.7	1.68E+14	2.93E+14	2.83E+14	4.92E+14	3.21E+14	5.57E+14	3.64E+14	6.34E+14
0.7	1.0	3.28E+13	3.86E+13	4.89E+13	5.75E+13	4.54E+13	5.34E+13	4.46E+13	5.25E+13
1.0	1.5	9.61E+12	7.69E+12	1.42E+13	1.13E+13	1.46E+13	1.17E+13	1.63E+13	1.30E+13
1.5	2.0	1.11E+12	6.34E+11	8.42E+11	4.81E+11	7.68E+11	4.39E+11	8.20E+11	4.69E+11
2.0	2.5	1.22E+12	5.40E+11	3.47E+11	1.54E+11	1.65E+11	7.34E+10	8.09E+10	3.60E+10
2.5	3.0	4.73E+10	1.72E+10	1.87E+10	6.82E+09	9.32E+09	3.39E+09	5.31E+09	1.93E+09
Total		2.13E+14	3.40E+14	3.47E+14	5.62E+14	3.82E+14	6.23E+14	4.26E+14	7.00E+14
Lower Energy (MeV)	Upper Energy (MeV)	34,500 MWD/MTU 11 Year Cooling		39,500 MWD/MTU 14 Year Cooling		44,500 MWD/MTU 19 Year Cooling			
		(MeV/s)	(Photons/s)	(MeV/s)	(Photons/s)	(MeV/s)	(Photons/s)		
0.45	0.7	3.87E+14	6.73E+14	3.96E+14	6.89E+14	3.87E+14	6.73E+14		
0.7	1.0	3.31E+13	3.89E+13	2.03E+13	2.39E+13	1.09E+13	1.28E+13		
1.0	1.5	1.57E+13	1.26E+13	1.38E+13	1.10E+13	1.05E+13	8.38E+12		
1.5	2.0	8.10E+11	4.63E+11	7.59E+11	4.34E+11	6.17E+11	3.53E+11		
2.0	2.5	2.05E+10	9.10E+09	5.27E+09	2.34E+09	3.33E+09	1.48E+09		
2.5	3.0	1.62E+09	5.91E+08	4.16E+08	1.51E+08	2.84E+08	1.03E+08		
Total		4.36E+14	7.25E+14	4.31E+14	7.24E+14	4.09E+14	6.95E+14		

圖 4.6、單束 BWR 燃料在不同燃料條件下的燃料光子射源能譜(Table5.2.5)[9]

CALCULATED MPC-68 ⁶⁰CO SOURCE PER ASSEMBLY FOR DESIGN BASIS ZIRCALOY CLAD FUEL
AT VARYING BURNUPS AND COOLING TIMES

Location	10,000 MWD/MTU 5 Year Cooling (curies)	20,000 MWD/MTU 7 Year Cooling (curies)	24,500 MWD/MTU 8 Year Cooling (curies)	29,500 MWD/MTU 9 Year Cooling (curies)	34,500 MWD/MTU 11 Year Cooling (curies)	39,500 MWD/MTU 14 Year Cooling (curies)	44,500 MWD/MTU 19 Year Cooling (curies)
Lower end fitting	39.71	40.80	34.04	30.55	27.49	19.64	11.08
Gas plenum springs	12.13	12.47	10.40	9.33	8.40	6.00	3.39
Gas plenum spacer	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Expansion springs	2.21	2.27	1.89	1.70	1.53	1.09	0.62
Grid spacers	85.54	87.89	73.32	65.80	59.22	42.30	23.88
Upper end fitting	11.03	11.33	9.45	8.48	7.64	5.45	3.08
Handle	1.38	1.42	1.18	1.06	0.95	0.68	0.38

圖 4.7、單束 BWR 燃料在不同燃料條件下的結構光子射源活度(Table5.2.10)[9]

CALCULATED MPC-68 BWR NEUTRON SOURCE PER ASSEMBLY
FOR DESIGN BASIS ZIRCALOY CLAD FUEL
FOR VARYING BURNUPS AND COOLING TIMES

Lower Energy (MeV)	Upper Energy (MeV)	10,000 MWD/MTU 5 Year Cooling (Neutrons/s)	20,000 MWD/MTU 7 Year Cooling (Neutrons/s)	24,500 MWD/MTU 8 Year Cooling (Neutrons/s)	29,500 MWD/MTU 9 Year Cooling (Neutrons/s)	34,500 MWD/MTU 11 Year Cooling (Neutrons/s)	39,500 MWD/MTU 14 Year Cooling (Neutrons/s)	44,500 MWD/MTU 19 Year Cooling (Neutrons/s)
1.0E-01	4.0E-01	1.62E+05	1.01E+06	1.08E+06	1.81E+06	2.80E+06	3.61E+06	4.57E+06
4.0E-01	9.0E-01	8.29E+05	5.15E+06	5.52E+06	9.23E+06	1.43E+07	1.84E+07	2.33E+07
9.0E-01	1.4	7.68E+05	4.72E+06	5.08E+06	8.47E+06	1.31E+07	1.69E+07	2.14E+07
1.4	1.85	5.79E+05	3.50E+06	3.77E+06	6.27E+06	9.71E+06	1.25E+07	1.58E+07
1.85	3.0	1.07E+06	6.25E+06	6.75E+06	1.12E+07	1.73E+07	2.22E+07	2.80E+07
3.0	6.43	9.26E+05	5.61E+06	6.04E+06	1.01E+07	1.56E+07	2.00E+07	2.53E+07
6.43	20.0	7.91E+04	4.93E+05	5.29E+05	8.84E+05	1.37E+06	1.77E+06	2.24E+06
TOTALS		4.41E+06	2.67E+07	2.88E+07	4.79E+07	7.42E+07	9.54E+07	1.21E+08

圖 4.8、單束 BWR 燃料在不同燃料條件下的燃料中子射源能譜(Table5.2.13)[9]

表 4.1、HI-STAR 100 驗證計算射源強度[9]

Source Term (per assembly)	FSAR HI-STAR 100 34,500 MWD/MTU 11 Year Cooling Table 5.2.5、5.2.10、5.2.13[9]
燃料中子 Fuel Neutron	7.42×10^{07}
燃料光子 Fuel Gamma	7.25×10^{14}
結構光子 Hardware Gamma	7.787×10^{12}

HI-STAR 100 安全分析報告[9]第五章節為屏蔽分析結果，其以 SCALE4.3 的 SAS2H 和 ORIGEN-S 作用過核子燃料射源項分析且以 MCNP-4A 作後續護箱劑量率分析。HI-STAR 100 安全分析報告[9]5.1 節描述正常運轉狀況與假設情節案例分析結果，其中與本研究選定驗證燃料條件，HI-STAR 護箱劑量率分析結果如圖 4.9 所示。

以 SCALE/MAVRIC 程式進行 HI-STAR 100 護箱屏蔽模型驗證計算，將上述建構的圖 4.5 屏蔽計算模型，內部分別裝填表 4.1 的三種射源項(燃料中子、燃料光子及結構光子)，其射源能譜、軸向分布、強度皆參考自安全分析報告[9]。MAVRIC 應用 FW-CADIS 理論作混合式輻射遷移計算，將護箱周遭設為伴隨射源，目的為迫使內部射源粒子能穿透護箱層層屏蔽至表面計分區域，以機櫃電腦 Win10 作業系統搭載 2.20GHz E5-2696 v4 CPU 和 192 GB RAM 固定每個案例計算時間為 25 小時，驗證比較結果如下。

圖 4.9 為安全分析報告內 Table5.4.9[9]結果，對應圖 4.10 為各點位置示意圖，其中部分偵檢位置不清楚在此不作討論，整理圖 4.9 與本研究驗證計算結果於表 4.2。以下僅討論點 1 至 5 的偵檢結果，其中針對位置定義最明確之點 2(護箱側邊一半高度)作劑量率比較討論，本研究結果與安全分析報告近似，皆約為 0.31 mSv/h，以此可推定本研究此次建構的 HI-STAR 100 護箱屏蔽模型在軸向結構部分把握度很高；點 1 為護箱側邊底部區域(中子吸收材以下)，劑量率結果與安全分析報告相比差異約 4.09 倍，參考圖 4.10 比較點 1 與 2 的相對位置，兩者側邊屏蔽厚度有明顯差異，但分析報告呈現劑量率結果相近，明顯報告有說明不清楚的地方，有可能是底部具有其他額外的屏蔽結構，而報告內給予的護箱結構圖並無描述；點 3 和 4 為護箱側邊頂端區域(中子吸收材以上)，而點 5 為護箱頂部區域，三處劑量率差異接近 2 倍，考量護箱材料與幾何上些微的差距，以輻射安全角度來判斷仍屬可合理接受之範圍。上述針對本研究建構的屏蔽計算模型，驗證計算分析結果能符合後續研究需求，後續將在第五章以此屏蔽模型進行室內

乾貯設施屏蔽計算分析。

表 4.2、HI-STAR 100 護箱屏蔽模型驗證計算比較[9]

Point	HI-STAR 100 FSAR (mSv/h)	This Study (mSv/h)	Ratio (This Study/FSAR)
1	0.380	1.554	4.09
2	0.311	0.305	0.98
3	0.317	0.570	1.80
4	0.299	0.570	1.91
5	0.016	0.031	1.96

Dose Point [†] Location	10,000 MWD/MTU 5 Year Cooling (mrem/hr)	20,000 MWD/MTU 7 Year Cooling (mrem/hr)	24,500 MWD/MTU 8 Year Cooling (mrem/hr)	29,500 MWD/MTU 9 Year Cooling (mrem/hr)	34,500 MWD/MTU 11 Year Cooling (mrem/hr)	39,500 MWD/MTU 14 Year Cooling (mrem/hr)	44,500 MWD/MTU 19 Year Cooling (mrem/hr)
2a	49.51	52.69	44.53	44.60	50.12	52.65	55.25
3a	139.50	154.42	132.09	129.62	132.20	115.66	103.70
1	34.25	39.29	34.23	35.33	37.96	35.72	33.64
2	25.50	27.53	24.21	27.97	31.12	32.05	33.07
3	34.44	37.75	32.25	31.43	31.69	27.33	22.81
4	32.63	35.76	30.52	29.69	29.91	25.74	21.42
5	0.14	0.60	0.64	1.03	1.58	2.01	2.53
6	112.26	121.21	103.06	98.97	97.96	82.26	65.73
10CFR71.47 Limit	1000.00 (2a,3a) 200.00 (1-6)	1000.00 (2a,3a) 200.00 (1-6)	1000.00 (2a,3a) 200.00 (1-6)				

圖 4.9、裝載不同燃料條件之 HI-STAR 100 護箱表面各位置總劑量率(Table5.4.9)[9]

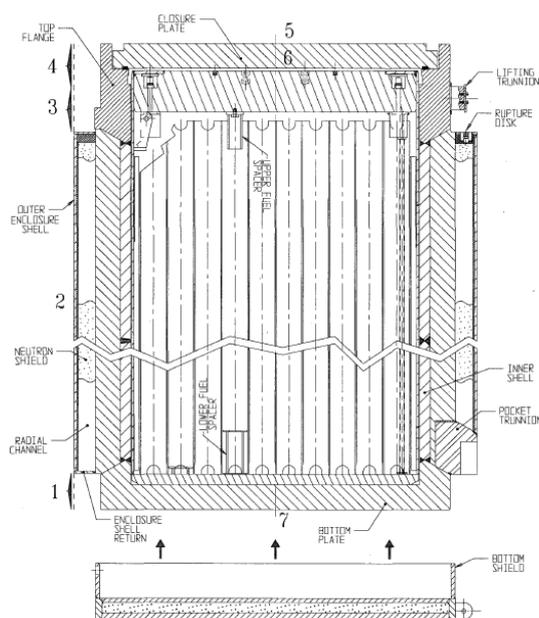


圖 4.10、HI-STAR 100 護箱表面各位置示意圖(Figure5.1.1)[33]

4.1.2 HI-STORM 100 護箱屏蔽計算模型

HI-STORM 100 混凝土護箱，內配置 MPC-68，參考其安全分析報告[10]，建構本研究所需之護箱屏蔽模型，如圖 4.11-4.13 所示，圖 4.11 為軸向剖面圖，可發現護箱側邊主要屏蔽材料為混凝土殼層位於內外兩層似碳鋼結構內，混凝土殼層厚度約 70 cm，其與 MPC 間留有空氣通道，並在護箱上下兩端各別留有 4 個開口作為通風的進出氣通道，而在空氣通道上端 HI-STORM 100 護箱有個特殊設計屏蔽環塊(Shield block)，來補強空氣通道上方的屏蔽，護箱底部則具有混凝土和碳鋼堆疊而成的底座。HI-STORM 100 護箱屏蔽模型主要建構依據參考自圖 4.12 與圖 4.13，但相較於前者 HI-STAR 100 的安全分析報告，HI-STORM 100 的安全分析報告給予的幾何尺寸資料缺失較嚴重，部分參數為由研究者經驗來補足。屏蔽模型的材料設定參考自安全分析報告 Table 5.3.2 內容[10]，如圖 4.14 和圖 4.15 所示。

幾何與材料缺失的部分原因為 HI-STORM 100 的安全分析報告，同時為 HI-STORM 100、HI-STORM 100S 及 HI-STORM 100S Version B 等外包封容器的安全分析報告，甚至也包含 HI-TRAC 100 和 HI-TRAC 125 的分析內容，部分細部資訊並沒有提供的很清楚，且報告內敘述因 HI-STORM 100S Version B 相較前述 HI-STORM 100 和 HI-STORM 100S 兩者尺寸較短，其劑量率評估結果亦高於兩者，故在後續報告內僅提供 HI-STORM 100S Version B 評估結果供參考[10]。

本研究建構 HI-STORM 100 護箱屏蔽模型，過程中有幾個簡化的假設描述如下。第一項假設為護箱內部搭配的 MPC-68，依照燃料特性均勻化為四區，此為保守假設。第二項假設，參同安全分析報告內描述，將進出氣孔模擬為角度相同，實際上應會相差 45 度，報告內指出建模方式對劑量率影響小，在本研究的模擬此建模方式與實際建模將不太有所差異，原因為模擬計分設定為會考慮護箱側邊各高度 360 度的平均劑量率。最後還有一點不同，HI-STORM 安全分析報告

內的屏蔽分析模型，未考慮 MPC 與外包封間空氣流通的碳鋼通道，本研究有將其納入考慮。圖 4.16 為本研究 HI-STORM 100 護箱屏蔽計算模型，高 5.8 m，直徑 3.4 m。

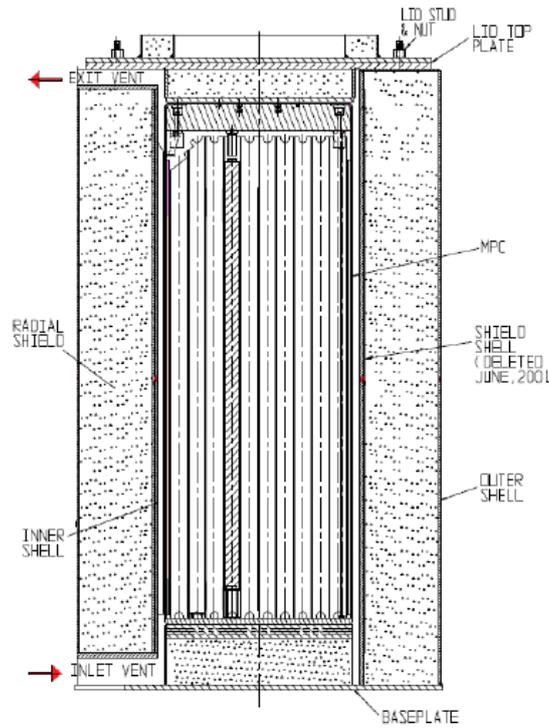


圖 4.11、HI-STORM 100 系統軸向剖面圖[10]

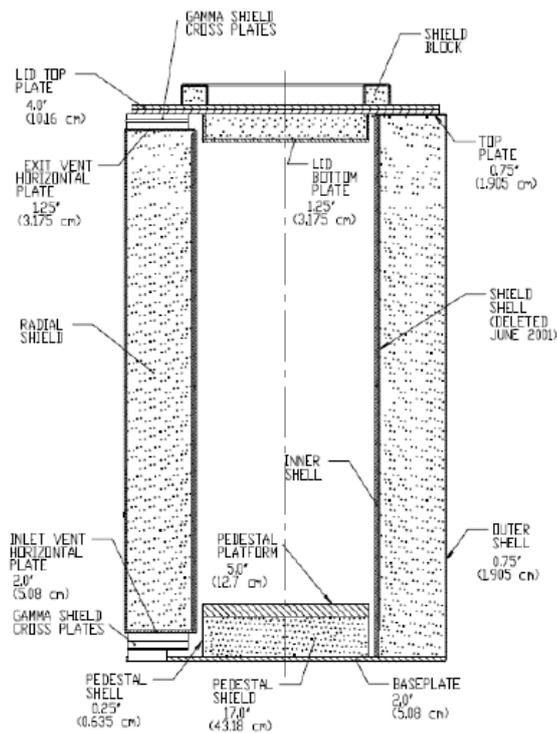


圖 4.12、HI-STORM 100 系統幾何尺寸[10]

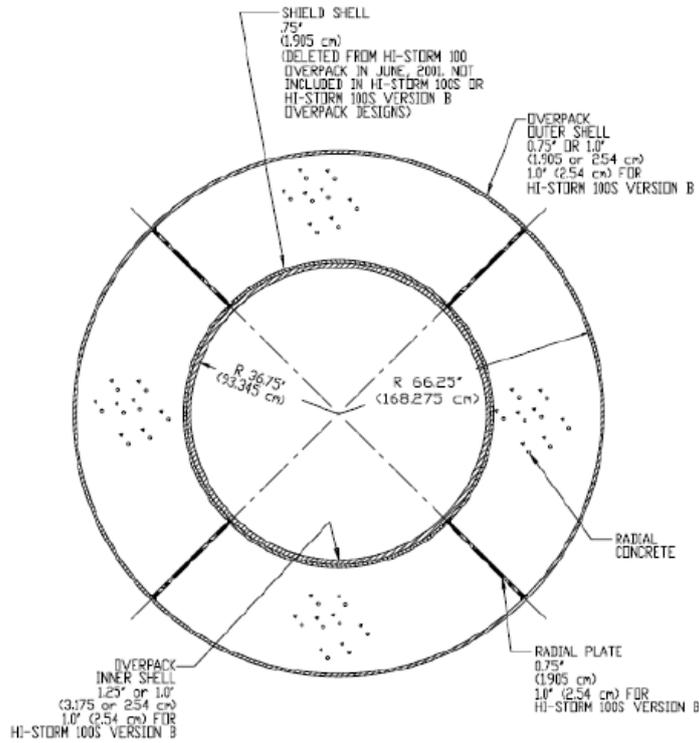


圖 4.13、HI-STORM 100 系統徑向剖面圖[10]

Component	Density (g/cm ³)	Elements	Mass Fraction (%)
Uranium Oxide	10.412	²³⁵ U	2.9971(BWR) 3.2615(PWR)
		²³⁸ U	85.1529(BWR) 84.8885(PWR)
		O	11.85
Boral ^f	2.644	¹⁰ B	4.4226 (MPC-68 and MPC-32 in HI-STORM & HI-TRAC; MPC-24 in HI-STORM)4.367 (MPC-24 in HI-TRAC)
		¹¹ B	20.1474 (MPC-68 and MPC-32 in HI-STORM & HI-TRAC; MPC-24 in HI-STORM) 19.893 (MPC-24 in HI-TRAC)
		Al	68.61 (MPC-68 and MPC-32 in HI-STORM & HI-TRAC; MPC-24 in HI-STORM) 69.01 (MPC-24 in HI-TRAC)
		C	6.82 (MPC-68 and MPC-32 in HI-STORM & HI-TRAC; MPC-24 in HI-STORM) 6.73 (MPC-24 in HI-TRAC)
SS304	7.92	Cr	19
		Mn	2
		Fe	69.5
		Ni	9.5
Carbon Steel	7.82	C	0.5
		Fe	99.5
Zircaloy	6.55	Zr	100

圖 4. 14、HI-STORM 100 屏蔽模型材料設定 1(Table5.3.2) [10]

Component	Density (g/cm ³)	Elements	Mass Fraction (%)
Neutron Shield Holtite-A	1.61	C	27.66039
		H	5.92
		Al	21.285
		N	1.98
		O	42.372
		¹⁰ B	0.14087
		¹¹ B	0.64174
BWR Fuel Region Mixture	4.29251	²³⁵ U	2.4966
		²³⁸ U	70.9315
		O	9.8709
		Zr	16.4046
		N	8.35E-05
		Cr	0.0167
		Fe	0.0209
		Sn	0.2505
Lower End Fitting (BWR)	1.4862	SS304	100
Gas Plenum Springs (BWR)	0.2653	SS304	100
Expansion Springs (BWR)	0.6775	SS304	100
Upper End Fitting (BWR)	1.3692	SS304	100
Handle (BWR)	0.2572	SS304	100
Lead	11.3	Pb	99.9
		Cu	0.08
		Ag	0.02
Water	0.9140 (water jacket)	H	11.2
	0.9619 (inside MPC)	O	88.8
Concrete	2.24	H	0.6
		O	50.0
		Si	31.5
		Al	4.8
		Na	1.7
		Ca	8.3
		Fe	1.2
		K	1.9

圖 4.15、HI-STORM 100 屏蔽模型材料設定 2(Table5.3.2) [10]

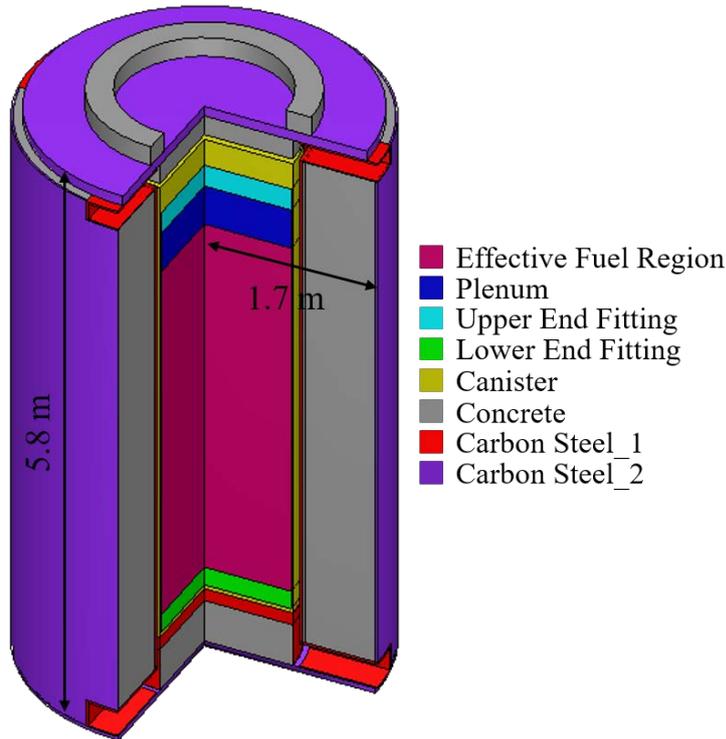


圖 4.16、HI-STORM 100 護箱屏蔽計算模型

以下針對上述建構的 HI-STORM 100 護箱屏蔽模型作驗證計算，參考其安全分析報告內提供的射源項資料，選定條件為裝載於 MPC-68 內之 BWR 鋳合金護套用過燃料，燃耗為 50,000 MWD/MTU 及冷卻 3 年，此條件下射源能譜及強度參考圖 4.17 至圖 4.19 提供資訊，整理射源強度列表如表 4.3[10]。其中結構光子射源參考自圖 4.18 提供的燃料束結構內 ^{60}Co 活度，以各組件活度數值乘 $2(^{60}\text{Co}$ 每秒產生 2 個光子)作為結構光子射源強度。

CALCULATED MPC-68 BWR FUEL GAMMA SOURCE PER ASSEMBLY
FOR DESIGN BASIS ZIRCALOY CLAD FUEL
FOR VARYING BURNUPS AND COOLING TIMES

Lower Energy	Upper Energy	50,000 MWD/MTU 3 Year Cooling	
		(MeV/s)	(Photons/s)
0.45	0.7	1.28E+15	2.23E+15
0.7	1.0	5.76E+14	6.77E+14
1.0	1.5	1.18E+14	9.47E+13
1.5	2.0	1.04E+13	5.92E+12
2.0	2.5	1.20E+13	5.33E+12
2.5	3.0	4.04E+11	1.47E+11
Total		2.00E+15	3.01E+15

圖 4.17、單束 BWR 燃料在不同燃料條件下的燃料光子射源能譜(Table5.2.6)[10]

CALCULATED MPC-68 ⁶⁰Co SOURCE PER ASSEMBLY FOR DESIGN BASIS
ZIRCALOY CLAD FUEL
AT DESIGN BASIS BURNUP AND COOLING TIME

Location	50,000 MWD/MTU and 3-Year Cooling (curies)
Lower End Fitting	90.55
Gas Plenum Springs	27.67
Gas Plenum Spacer	N/A
Expansion Springs	5.03
Grid Spacer Springs	41.50
Upper End Fitting	25.15
Handle	3.14

圖 4.18、單束 BWR 燃料在不同燃料條件下的結構光子射源活度
(Table5.2.13)[10]

CALCULATED MPC-68 BWR NEUTRON SOURCE PER ASSEMBLY
FOR DESIGN BASIS ZIRCALOY CLAD FUEL
FOR VARYING BURNUPS AND COOLING TIMES

Lower Energy (MeV)	Upper Energy (MeV)	50,000 MWD/MTU 3-Year Cooling (Neutrons/s)
1.0e-01	4.0e-01	9.79E+06
4.0e-01	9.0e-01	5.00E+07
9.0e-01	1.4	4.57E+07
1.4	1.85	3.37E+07
1.85	3.0	5.93E+07
3.0	6.43	5.40E+07
6.43	20.0	4.79E+06
Totals		2.57E+08

圖 4.19、單束 BWR 燃料在不同燃料條件下的燃料中子射源能譜
(Table5.2.17)[10]

表 4.3、HI-STORM 100 驗證計算射源強度[10]

Source Term (per assembly)	FSAR HI-STORM 100 50,000 MWD/MTU 3 Year Cooling Table 5.2.6、5.2.13、5.2.17[10]
燃料中子 Fuel Neutron	2.57×10^{08}
燃料光子 Fuel Gamma	3.01×10^{15}
結構光子 Hardware Gamma	1.43×10^{13}

HI-STORM 100 安全分析報告[10]第五章節為屏蔽分析結果，與 HI-STAR 100 安全分析報告相同，同樣以 SCALE4.3 的 SAS2H 和 ORIGEN-S 作用過核子燃料射源項分析且以 MCNP-4A 作後續護箱劑量率分析。HI-STORM 100 安全分析報告[10]5.1 節描述正常運轉狀況與假設情節案例分析結果，其中與本研究選定驗證燃料條件，HI-STORM 100S Version B.護箱劑量率分析結果如圖 4.20 所示。

以 SCALE/MAVRIC 程式進行 HI-STORM 100 護箱屏蔽模型驗證計算，將建構的圖 4.16 屏蔽計算模型，內部分別裝填表 4.3 的三種射源項，其射源能譜、軸向分布、強度皆參考自安全分析報告[10]。MAVRIC 應用 FW-CADIS 理論作混合式輻射遷移計算，同樣將護箱周遭設為伴隨射源，對護箱表面劑量率作計分，以機櫃電腦 Win10 作業系統搭載 2.20GHz E5-2696 v4 CPU 和 192 GB RAM 固定每個案例計算時間為 25 小時，驗證比較結果如下。

圖 4.20 為安全分析報告內 Table5.4.13[10]結果，其中各點對應位置參照圖 4.21，點 1、2、3 和 4 個別對應位置為進氣孔、護箱側邊、出氣孔和護箱頂部。表 4.4 為整理圖 4.20 與本研究驗證計算結果。HI-STORM 100 的安全分析報告有提供三種射源項各別在護箱表面劑量率計算結果，其中燃料中子產生的二次光子被加總在燃料光子的計算結果。本研究 HI-STORM 100 護箱屏蔽計算表面劑量率與其 SAR 的比較差異應屬合理，尤其是在完整資訊不足的情況下進行複雜幾何的深穿透屏蔽計算。比較差異原因主要來自資訊不足所造成的模型設定不太一致。HI-STORM 100 安全分析報告內容所提供之幾何尺寸與材料資料更少，部分參數為研究者以過往經驗補足。二者劑量率比較差異較大出現於燃料光子與結構光子射源在位置 2 的結果，本研究認為報告中的數據較不合理。例如，燃料光子射源在位置 2 的結果不應遠高於其他位置，考量混凝土護箱的屏蔽設計，屏蔽區域重點應會放在上下進出氣孔端(點 1 與點 3)，且因該位置之屏蔽與射源的設定與其他位置沒有很大的差異；同樣的原因，結構光子射源在位置 2 的結果也不應遠小於其他位置，參考圖 4.18，Gird 的 ^{60}Co 射源活度約是 LEF 的一半，且是整體燃

料結構光子活度第二多的區塊，但分析報告中結構光子劑量率在位置 1 與位置 2 的差異過大，位置 2 結構光子造成的劑量率甚低，另外可能原因為分析報告內實際計算模型與報告中所提供的幾何尺寸與材質設定並不一致。考量前述安全分析報告結構尺寸材料資訊不明，造成建構之分析模型結構材料有所差異，且部分報告內載之評估位置與範圍不清楚，而整體結構上公分級別的尺寸材料差異對 1 MeV 左右的光子是可能會達到有幾個半值層以上衰減效果差別，以輻射屏蔽分析角度本研究屏蔽分析模型仍屬合理接受範圍。

表 4.4、HI-STORM 100 護箱屏蔽模型驗證計算比較[10]

Point	Fuel Gammas (mSv/h)			⁶⁰ Co Gammas (mSv/h)		
	FSAR	This study	Ratio	FSAR	This study	Ratio
1	0.202	0.294	1.46	0.562	0.199	0.35
2	2.113	0.377	0.18	0.001	0.051	51
3	0.044	0.209	4.77	0.182	0.175	0.96
4	0.078	0.016	0.21	0.051	0.020	0.39
Point	Neutrons (mSv/h)			Totals (mSv/h)		
	FSAR	This study	Ratio	FSAR	This study	Ratio
1	0.188	0.017	0.09	0.952	0.584	0.61
2	0.064	0.016	0.25	2.178	0.444	0.20
3	0.037	0.004	0.11	0.263	0.389	1.48
4	0.034	0.025	0.74	0.162	0.060	0.37

Dose Point [†] Location	Fuel Gammas ^{††} (mrem/hr)	⁶⁰ Co Gammas (mrem/hr)	Neutrons (mrem/hr)	Totals (mrem/hr)
1	20.15	56.22	18.80	95.17
2	211.31	0.12	6.38	217.81
3	4.39	18.15	3.73	26.27
4	7.76	5.05	3.40	16.20

圖 4. 20、裝載不同燃料條件之 HI-STORM 100 S Version B 護箱表面各位置總劑量率(Table5.4.13)[10]

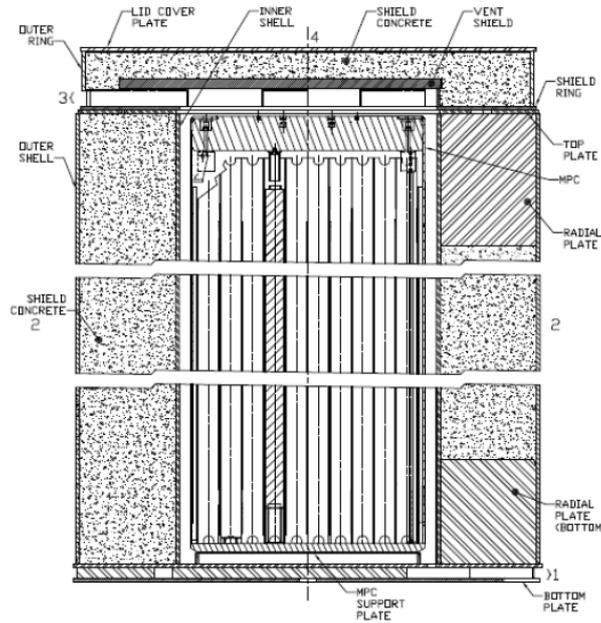


圖 4. 21、HI-STORM 100 S Version B 護箱表面各位置示意圖(Figure 5.1.13)[10]

4.2 乾貯設施屏蔽模型建立

依據上節建構之標的護箱屏蔽模型，考量兩護箱安全分析報告內乾貯設施護箱配置模式，參考 HI-STAR 100 安全分析報告 Table1.4.1(圖 4. 22)與 Figure1.4.1(圖 4. 23)[33]和 HI-STORM 100 安全分析報告 Table1.4.1(圖 4. 24)、Table1.4.2(圖 4. 25)、Figure1.4.1(圖 4. 26)與 Figure1.4.2(圖 4. 27)[10]，其中 HI-STORM 100 配置距離大於 HI-STAR 100，且其排列方式又區分為矩形與方形，最後參照方形配置並以整體建模考量訂定乾貯設施內護箱間配置距離為 5.8 m。依此資訊，將 120 組標的護箱模型以 15×8 方式作排列，建置單廳結構，中間留有 5 m 之通道，整體內部配置如圖 4. 28。初步考慮金屬護箱和混凝土護箱配比为 60：60，且金屬護箱置於設施上半部(北側)，混凝土護箱置於下半部(南側)，後續計算將會再加入考慮兩護箱配比为 104：16。

設施外部建築為混凝土建物，側壁厚度為 90 cm，頂部厚度為 45 cm，設施外觀及剖面圖如圖 4. 29 及圖 4. 30，建物長邊在高度 0.6 m(進氣)與 13 m(出氣)留

有氣體通道，且其外部具有迷道設置，迷道設計細部結構參考圖 4.27 左側。

MPC Type	Nominal Cask Pitch (ft.)
MPC-24	12
MPC-68	12

圖 4.22、HI-STAR 100 安全分析報告 Table 1.4.1[33]

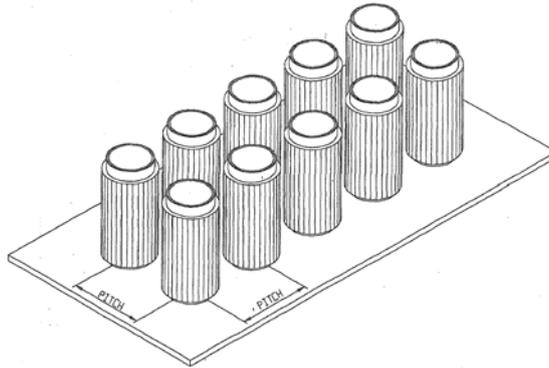


圖 4.23、HI-STAR 100 安全分析報告 Figure 1.4.1[33]

Orientation	Nominal Cask Pitch (ft.)
Between adjacent rows, P1, and adjacent columns, P2	13.5
Between adjacent sets of two columns, P3	38

圖 4.24、HI-STORM 100 安全分析報告 Table 1.4.1[10]

Orientation	Nominal Cask Pitch (ft.)
Between adjacent casks	18' - 8"

圖 4.25、HI-STORM 100 安全分析報告 Table 1.4.2[10]

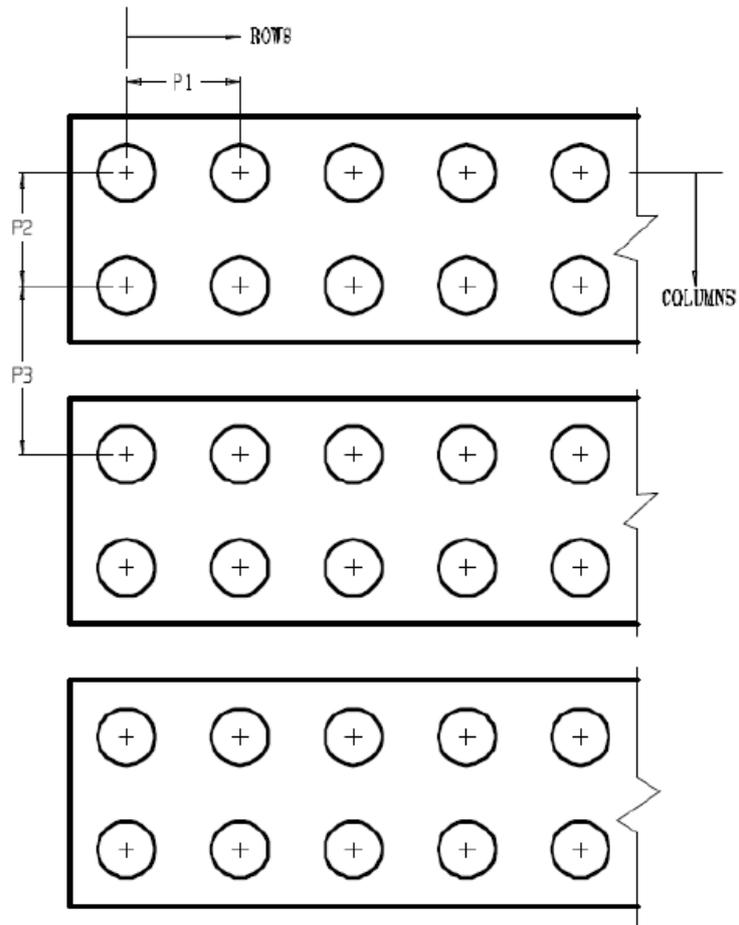


圖 4. 26、HI-STORM 100 安全分析報告 Figure 1.4.1[10]

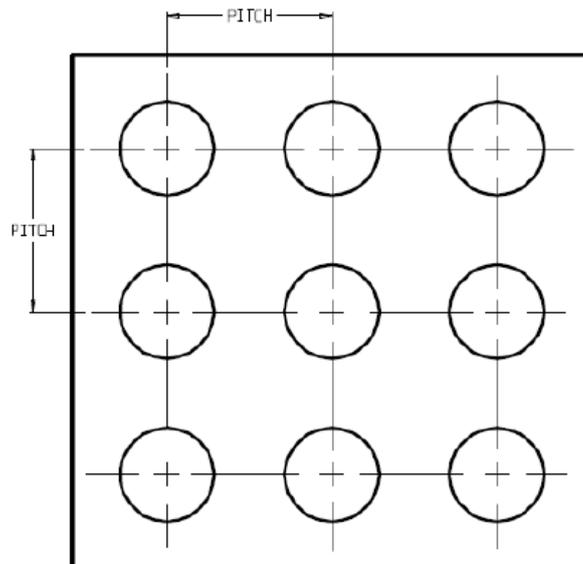


圖 4. 27、HI-STORM 100 安全分析報告 Figure 1.4.2[10]

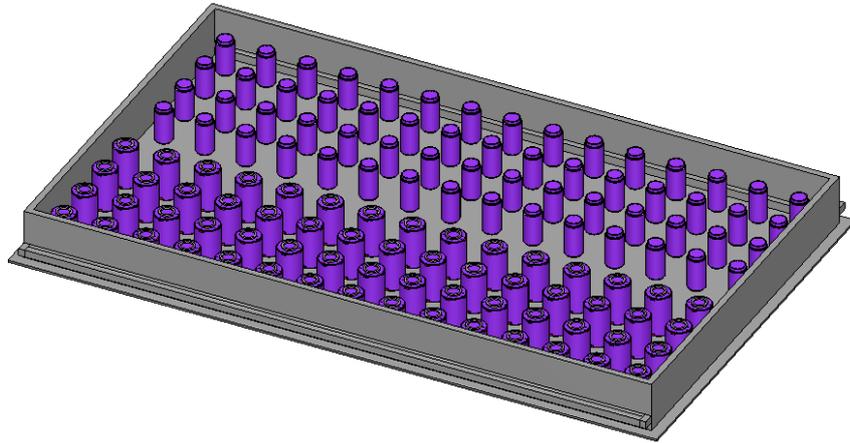


圖 4.28、設施屏蔽模型內部配置

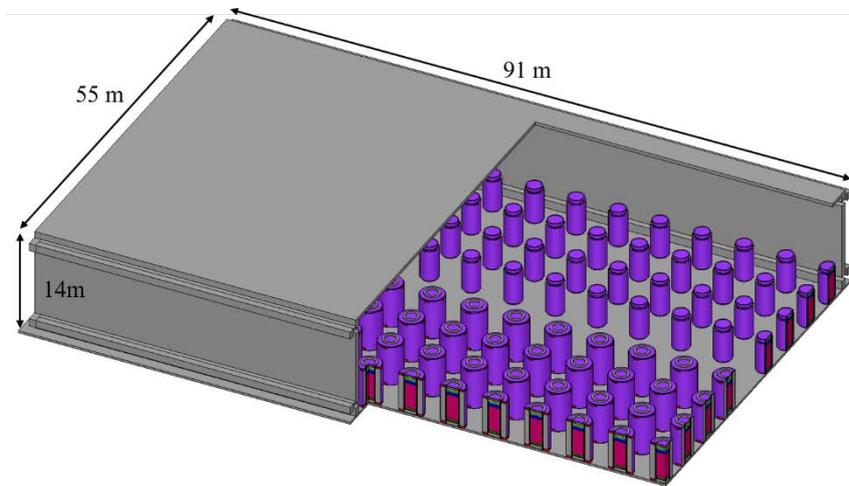


圖 4.29、設施屏蔽模型外觀

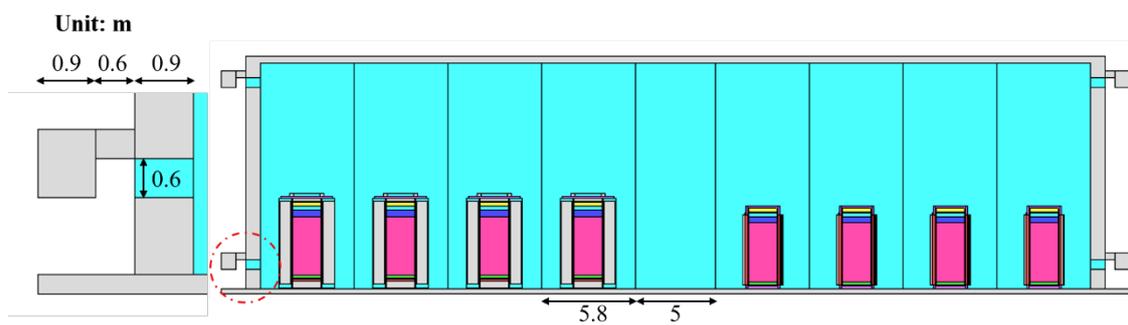


圖 4.30、設施屏蔽模型外觀剖面及迷道設計示意

4.3 標的用過核子燃料射源項

1.2.1 節選定之標的用過燃料束型式為 GE 8x8-1，其 ^{235}U 初始濃縮度為 3.25 wt%，燃耗度為 36,000 MWD/MTU，至少冷卻 10 年。參考台電核一廠乾貯安全分析報告內容[2]，本研究後續於 HI-STAR 100 與 HI-STORM 100 內部 MPC68 裝載的 68 束燃料射源特性描述如下。

用過核子燃料射源項包含三種類型：燃料中子(Fuel neutron, FN)、燃料光子(Fuel Gamma, FG)及結構光子(Hardware Gamma, HG)。燃料中子射源絕大部分來自鈾系元素的自發性分裂，另一部分來自鈾系元素經阿伐衰變後的(α, n)反應釋出。燃料光子射源則主要來自分裂產物和鈾系元素衰變放出的加馬射線和 X 射線。結構光子射源主要來自不鏽鋼內含雜質 ^{59}Co 經中子活化後產生之 ^{60}Co ，因燃料位於爐心中其結構將會受到大量中子照射而被活化，在此依據核一廠乾貯安全分析報告內容假設不鏽鋼材質所含的 ^{59}Co 雜質為 1.2 g/kg，考量燃料束各區不鏽鋼含量後，再乘上各區的區域通量比例，此比例同樣參考自台電核一廠乾貯安全分析報告[2]，得到各區結構光子射源。表 4.5 整理出護箱裝填 68 束燃料後的射源強度及整體設施(120 組護箱)的總射源強度，三種射源能譜及軸項分布如圖 4.31 與圖 4.32 所示。

表 4.5、護箱射源強度(68 束)與設施總射源強度(120 組護箱)

Source	Region	Strength (n or γ /s/cask)	Total Strength of ISFSI(120 casks) (n or γ /s)
FN	Effective fuel	1.364×10^{10}	1.637×10^{12}
FG	Effective fuel	7.568×10^{16}	9.082×10^{18}
HG	LEF	2.367×10^{14}	2.840×10^{16}
	Effective fuel	1.078×10^{14}	1.294×10^{16}
	Plenum	1.307×10^{14}	1.568×10^{16}
	UEF	6.533×10^{13}	7.840×10^{15}

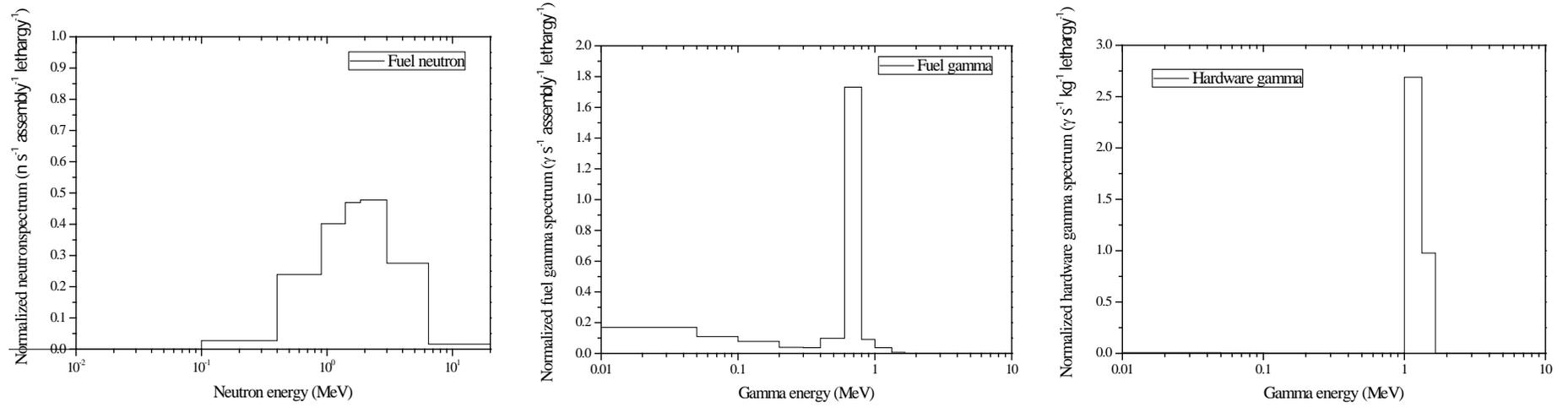


圖 4. 31、(左)燃料中子、(中)燃料光子與(右)結構光子能譜

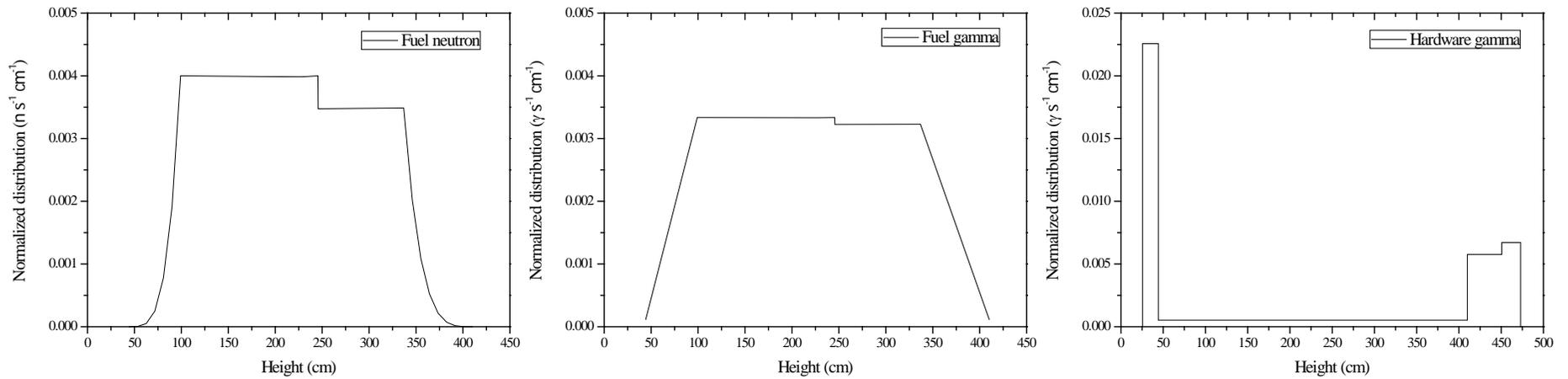


圖 4. 32、(左)燃料中子、(中)燃料光子與(右)結構光子軸向分布

第五章、單一設施貯存不同類型護箱，以及異常或意外事

件情境之輻射屏蔽案例評估與影響效應研析

依照第二章描述的輻射屏蔽安全分析方法，本章節先針對兩種標的護箱在正常運轉下表面劑量率分析，異常及意外情節下劑量率分析，最後再針對今年度計畫分析重點單一設施貯存不同類型護箱作設施周遭劑量率特性探討。

本章節分析程式，皆採用 SCALE/MAVRIC 序列，最新版本為 v6.2。MAVRIC 序列，套用 CADIS 理論，同時使用決定論法與蒙地卡羅法，可自動化地產生並應用具有一致性的權重射源分布及粒子權重地圖參數作為蒙地卡羅程式模擬過程的變異數降低技巧，適合應用於使用類比蒙地卡羅計算較困難的輻射遷移問題，改善其蒙地卡羅模擬效率。CADIS 計算理論為先進行一次粗略的決定論格點座標(Discrete Ordinates, S_N)計算，由伴隨通量的分布關係建構粒子權重地圖及權重射源分布，應用於後續的蒙地卡羅模擬，使最終能在合理的時間內得到一低誤差範圍的結果。MAVRIC 序列利用 Denovo 功能模組作決定論法計算，產生對應之變異數降低參數用於三維 Monaco 功能模組作粒子遷移模擬。本研究分析計算，MAVRIC 控制序列主要採用的功能模組與模擬過程各粒子的作用截面庫資訊如表 5.1 所列。

表 5.1、MAVRIC 程式採用之粒子作用截面資訊

Code package	Hybrid method	Cross-section data
MAVRIC-v6.2.3	S_N (Denovo) + MC (Monaco)	ENDF/B-VII.0 multigroup 27n19g (Denovo) + ENDF/BVII.0 continuous-energy (Monaco)

5.1 貯存護箱表面劑量率分析

針對二種標的護箱，以 4.1 節建構的 HI-STAR 100 金屬護箱及 HI-STORM 100 混凝土護箱屏蔽計算模型，內裝載相同的 68 束標的燃料，射源資訊參照 4.3 節所述，考量同樣的射源強度能譜及軸項分布，作護箱表面劑量率分析探討。MAVRIC 序列在此皆應用 Forward-Weighted Consistent Adjoint Driven Importance Sampling(FW-CADIS)理論，此理論與前述 CADIS 理論差異為，FW-CADIS 會以決定論法計算兩次後再搭配蒙地卡羅法計算，而 CADIS 理論僅以決定論法計算一次即搭配蒙地卡羅法。兩次決定論法差異為，第一次的計算目的為決定模擬問題中多個計分區域各自比例的差異，再搭配正常順序的 CADIS 理論計算，此方法可以使多個計分區域在一次計算內皆能得到較可靠的計分統計結果。

本節的護箱表面劑量率分析，皆考慮兩種計分方式，區域計分(Region Tally)和格點計分(Mesh Tally)。兩者皆採用總徑跡長計量方法(Total Track Length Estimator)定出總粒子通量率再乘以轉換因子轉成周圍等效劑量。區域計分，考慮兩個護箱表面位置，一為側邊區域計分定義為護箱側邊外 1 cm 處，高度為有效燃料區區間；另一為頂部區域計分定義在護箱頂部 1 cm 處，密封鋼筒涵蓋半徑範圍內。格點計分定義在護箱側邊和頂部表面 1 cm 處，側邊格點計分將每個高度各方位作平均，頂部格點計分將每個半徑各方位作平均(參考圖 5.2 與圖 5.6)。本研究選擇以 ICRP-74 號報告的劑量轉換因子 (Dose Conversion Coefficient, $\text{pSv}\cdot\text{cm}^2$)，轉換成 ICRU 球深度 10 mm 處之周圍等效劑量 (Ambient Dose Equivalent) $H^*(10)$ 作為偵檢計分之響應函數值。

5.1.1 HI-STAR 100 護箱表面劑量率分析

針對 HI-STAR 100 屏蔽計算模型(圖 4.5)，考量計分位置，將伴隨射源定義為包覆護箱表面之小區域範圍，如圖 5.1 彩色區域所示，目的為迫使模擬粒子能

穿透護箱屏蔽至表面造成有效計分。Denovo 將 HI-STAR 100 護箱屏蔽模型切割為 600,000(100×100×60)格點，作兩次(Forward S_N 與 Adjoint S_N)簡化決定論法計算，格點分布集中於外包裝屏蔽、中子吸收材區域、頂部一次蓋、二次蓋及護箱表面側邊和頂部等粒子遷移變化較劇烈之區域，再連接 Monaco 蒙地卡羅程式作模擬。

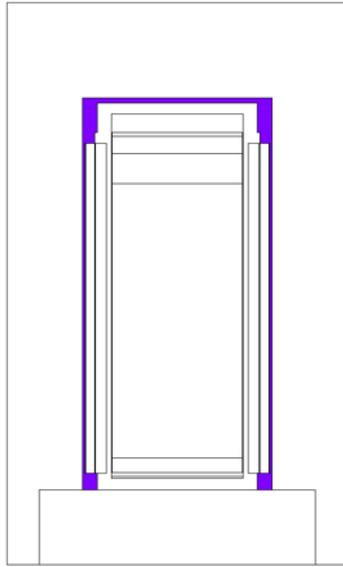


圖 5.1、標的護箱伴隨射源定義位置

此次分析，以機櫃電腦 Win10 作業系統搭載 2.20GHz E5-2696 v4 CPU 和 192 GB RAM 固定三個射源案例計算時間約 25 小時，模擬粒子數目與各別計算時間結果如表 5.2。燃料光子與結構光子兩次決定論法計算約花費 15 分鐘，而燃料中子則因需同時考慮中子和光子兩種粒子花費時間約 70 分鐘，後續各別再進行 25 小時的蒙地卡羅計算。此處決定論法計算時間，受上述格點數影響，格點切割越詳細耗費在 S_N 計算之時間越長，此過程需依靠使用者經驗作取捨進而有較佳之計算效率。

表 5.3 為護箱表面側邊與頂部區域計分結果。側邊劑量率貢獻光子大於中子 ($n: 1.21 \times 10^{-01}$, $\gamma: 2.83 \times 10^{-01}$)，而光子部分又以 FG 為最大貢獻，FN 次之，因側邊區域計分定義範圍為有效燃料區位置，而 FG 與 FN 射源僅存在於有效燃料區，此兩者為側邊區預計分主要貢獻來源合乎射源位置；頂部劑量率則以中子為主要

貢獻($n: 4.54 \times 10^{-02}$, $r: 3.22 \times 10^{-03}$)，考量護箱屏蔽模型設定，僅在外包裝外層有設置中子吸收材，頂部屏蔽主體為金屬結構，對光子屏蔽效果較佳，故頂部中子劑量率較高。本次計算分析，除了燃料光子的護箱頂部計分，整體蒙地卡羅模擬的統計誤差皆小於 1 % 以下，參考圖 4.24 燃料光子能譜，因其能量較低約為 0.7 MeV 左右，故光子粒子較難穿透頂部的多層金屬屏蔽。而蒙地卡羅計算模擬通常以 FOM 作計算效率量化數值比較，FOM 定義如下公式，R 為結果相對誤差， $T_{simulation}$ 為計算時間，FOM 數值越高代表計算效率越好，反之越差。此案例分析，各射源項在側邊區域計分效率皆優於頂部區域，代表不論是中子或光子，粒子都更容易由護箱側邊遷移至外部造成劑量貢獻。

$$FOM = \frac{1}{R^2 \times (T_{simulation})}$$

圖 5.2 為格點計分表面劑量率計分位置示意圖，圖 5.3 為 HI-STAR 100 護箱表面劑量率分布(左為護箱側邊，右為護箱頂部)。首先，觀察護箱側邊劑量率分布，光子與中子兩者劑量率貢獻接近，但仍以光子劑量率較大，並發現護箱上下兩端為其劑量率高處，特別是底部。考量 HI-STAR 100 屏蔽模型設定，僅在護箱側邊中段具有多層光子屏蔽與外層的中子吸收材設計，故在護箱上下兩端為屏蔽較薄弱處；護箱頂部劑量率分布，在密封鋼筒上方呈現平坦分布，以中子為主要貢獻，在密封鋼筒上方與光子差異約有 1 個量級的差距，約在 90 cm 處光子與中子劑量率微降原因為脫離密封鋼筒射源區域，而到 105 cm 處(中子吸收材區域)兩者皆有劑量率提升，光子提升特別明顯甚至貢獻超越中子。

圖 5.4 為 HI-STAR 100 護箱表面劑量率三種加馬射源貢獻(左為護箱側邊，右為護箱頂部)。護箱側邊，在有效燃料區以燃料光子為主要貢獻，燃料中子產生的二次光子次之，因此兩射源僅存在於有效燃料區。三種射源項皆會對護箱側邊光子劑量率造成貢獻，在護箱上下兩端以結構光子為最主要貢獻，其餘兩者之貢獻遠小於結構光子。護箱頂部，結構光子因射源分布關係最接近頂部計分區域貢獻最高。

表 5.2、HI-STAR 100 護箱計算時間

Source	Forward S _N (min)	Adjoint S _N (min)	Total S _N (min)	MC (hr)	Total (hr)
FN(108×2E05)	36.55	32.39	68.94	25.00	26.16
FG(124×1E07)	7.08	6.79	13.87	25.10	25.31
HG(120×1E07)	6.71	6.80	13.52	25.20	25.43

FN: 燃料中子、FG: 燃料光子、HG: 結構光子

Forward S_N: 前向分格法、Adjoint S_N: 伴隨分格法、MC: 蒙地卡羅法

表 5.3、標的護箱區域計分結果

Source	Dose rate (mSv/h)	Error (%)	FOM (/min)	
FN	Side n	1.21×10^{-1}	0.20	166
	Top n	4.54×10^{-2}	0.41	39
	Side γ	4.86×10^{-2}	0.12	442
	Top γ	5.02×10^{-4}	0.68	14
FG	Side γ	2.00×10^{-1}	0.05	2280
	Top γ	5.98×10^{-6}	8.72	0.09
HG	Side γ	3.46×10^{-2}	0.10	725
	Top γ	2.71×10^{-3}	0.18	194
Total	Side	4.04×10^{-1}	0.20	166
	Top	4.87×10^{-2}	0.35	15

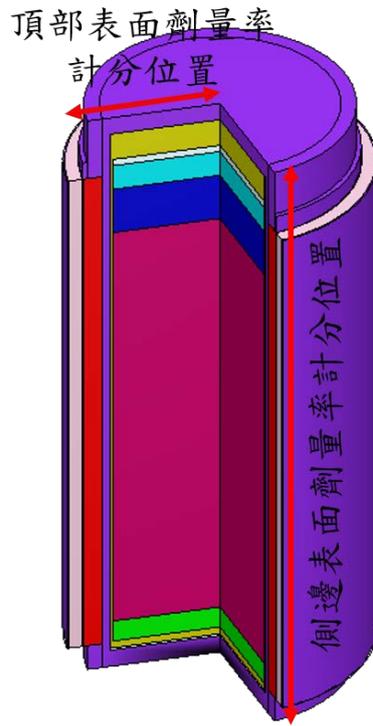


圖 5.2、HI-STAR 100 護箱表面劑量率計分位置示意圖

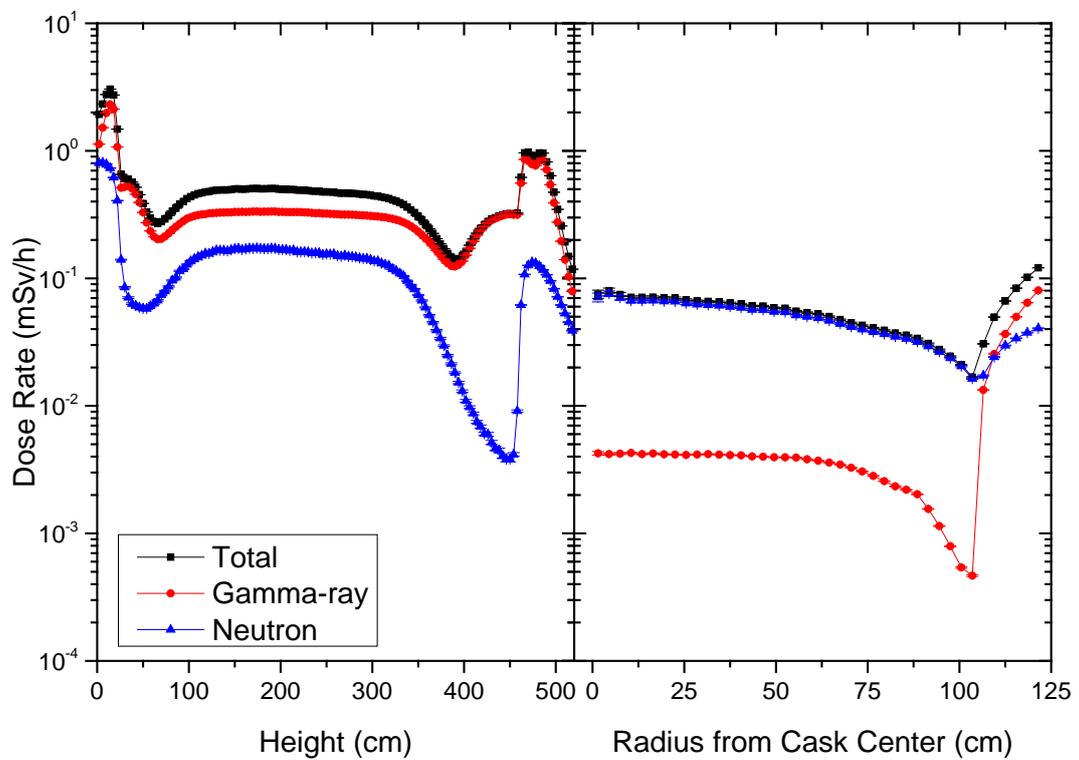


圖 5.3、HI-STAR 100 護箱表面劑量率分布，左側邊，右頂部

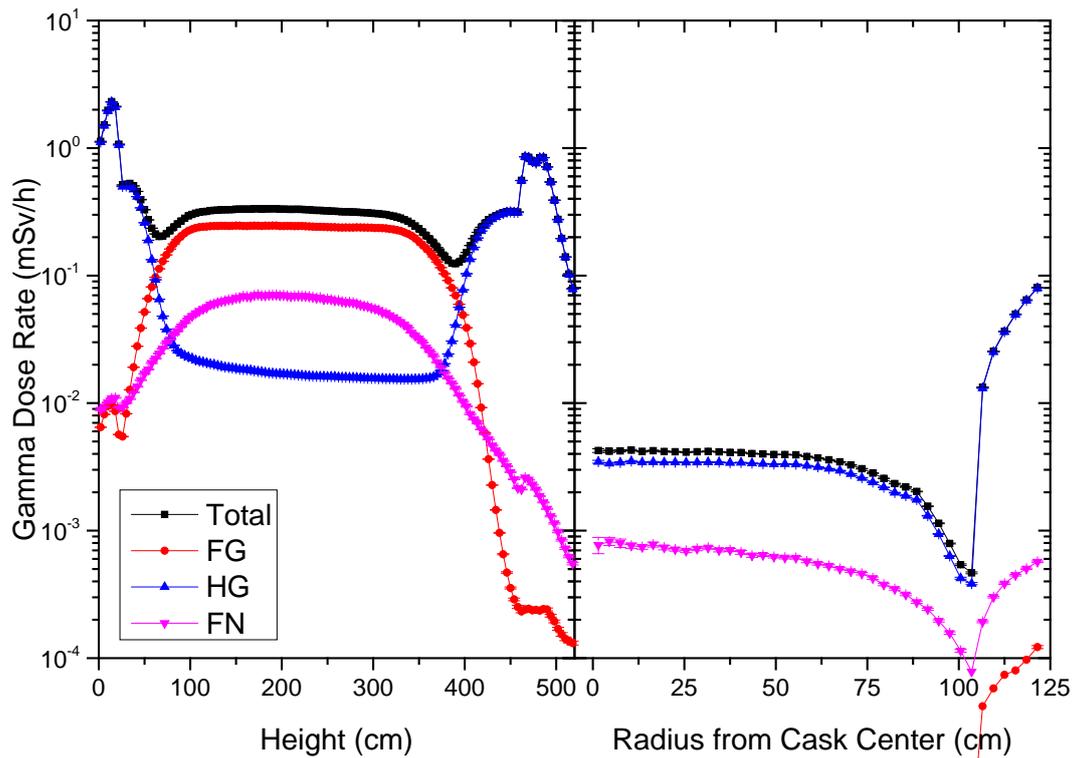


圖 5.4、HI-STAR 100 護箱表面劑量率加馬射源貢獻，左側邊，右頂部

5.1.2 HI-STORM 100 護箱表面劑量率分析

針對 HI-STORM 100 屏蔽計算模型(圖 4.13)，考量計分位置，將伴隨射源定義為環繞護箱區域範圍，如圖 5.5 彩色區域所示，此設定為迫使模擬粒子能穿透護箱屏蔽至表面造成有效計分。Denovo 將 HI-STAR 100 護箱屏蔽模型切割為 290,228(74×74×53)格點，作兩次(Forward S_N 與 Adjoint S_N)簡化決定論法計算，格點分布集中於密封鋼筒與混凝土屏蔽層間空氣通道、上下進出氣孔端、護箱表面側邊和頂部等粒子遷移變化較劇烈之區域，再連接 Monaco 蒙地卡羅程式作模擬。

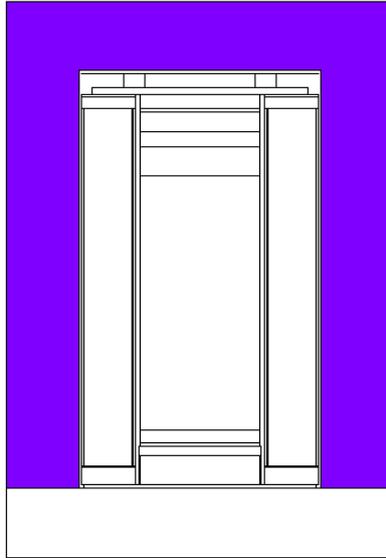


圖 5.5、標的護箱伴隨射源定義位置

與 HI-STAR 100 同樣的計算環境，以機櫃電腦 Win10 作業系統搭載 2.20GHz E5-2696 v4 CPU 和 192 GB RAM 固定三個射源案例計算時間各約 25 小時，模擬粒子數目與各別計算時間結果如表 5.4。燃料光子與結構光子兩次決定論法計算約花費 8 分鐘，而燃料中子同時考慮中子和光子兩種粒子花費時間約 35 分鐘，後續各別再進行 25 小時的蒙地卡羅計算。與表 5.2 結果相較，格點數目差異約 0.5 倍，燃料中子決定論法計算時間亦減少一半，格點切割方式為 CADIS 理論應用的重點，有效的使用者經驗應用可增進問題的計算效率。

表 5.5 為護箱表面側邊與頂部區域計分結果。側邊劑量率以光子為主要貢獻，光子和中子劑量率兩者差距一個量級以上($n: 7.71 \times 10^{-03}$, $\gamma: 1.52 \times 10^{-01}$)，而 FG 為大部分光子劑量率貢獻來源；頂部劑量率以光子為主要貢獻($n: 6.68 \times 10^{-03}$, $r: 1.37 \times 10^{-02}$)，頂部計分區域定義為密封鋼筒上方，中子受到護箱在空氣通道頂部屏蔽環塊設計影響，中子劑量率較低，而光子劑量率又以射源最靠近頂部的結構光子為主要貢獻來源。本次蒙地卡羅模擬的統計誤差皆小於 2 % 以下，和 HI-STAR 100 屏蔽模型相同，燃料光子在頂部計分最為困難。計算效率部分，側邊區域皆優於頂部區域，代表射源粒子都更容易由護箱側邊遷移至外部造成劑量貢獻，此結論亦與 HI-STAR 100 護箱相同。

圖 5.6 為格點計分表面劑量率計分位置示意圖，圖 5.7 為 HI-STORM 100 護箱表面劑量率分布(左為護箱側邊，右為護箱頂部)。護箱側邊光子劑量率明顯大於中子劑量率分布，但兩者劑量率分布起伏在部分區域有些微差異，中子劑量率分布在 25 cm 及 550 cm 處因為進出氣孔高度而有劑量突起，在中段的有效燃料區呈現平坦分布，光子劑量率分布呈現同樣特性惟在 80 cm 跟 500 cm 有所不同，後續圖 5.6 再作說明。頂部劑量率同樣以光子為主要貢獻，特別點在 95 cm 處受屏蔽環塊影響中子劑量率下降而光子則無此現象。

圖 5.8 為 HI-STORM 100 護箱表面劑量率三種加馬射源貢獻(左為護箱側邊，右為護箱頂部)。護箱側邊，燃料光子與燃料中子的二次光子劑量率分布皆同於上述側邊中子劑量率分布，結構光子是在 80 cm(下端板)與 500 cm(上端板)造成有光子劑量率突起的主因，因其燃料分布除有效燃料區外也包含上端板、充氣區及下端板。頂部劑量率結構光子同樣因射源分布關係最接近頂部計分區域貢獻最高。

表 5.4、HI-STORM 100 護箱計算時間

Source	Forward S_N (min)	Adjoint S_N (min)	Total S_N (min)	MC (hr)	Total (hr)
FN(113×2E05)	18.27	13.87	32.15	25.10	25.56
FG(101×1E07)	3.82	3.78	7.59	25.00	25.14
HG(26×5E07)	3.33	3.73	7.05	25.00	26.04

表 5.5、標的護箱區域計分結果

Source	Dose rate (mSv/h)	Error (%)	FOM (/min)
FN	Side n	7.71×10^{-3}	0.19
	Top n	6.67×10^{-3}	7
	Side γ	7.67×10^{-3}	0.20
	Top γ	5.04×10^{-4}	0.90
FG	Side γ	1.20×10^{-1}	1840
	Top γ	2.61×10^{-3}	2
HG	Side γ	2.44×10^{-2}	1460
	Top γ	1.06×10^{-2}	63
Total	Side	1.59×10^{-1}	192
	Top	2.04×10^{-2}	7

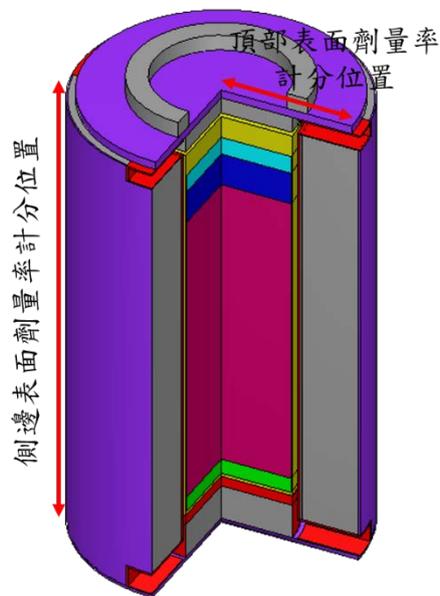


圖 5.6、HI-STORM 100 護箱表面劑量率計分位置示意圖

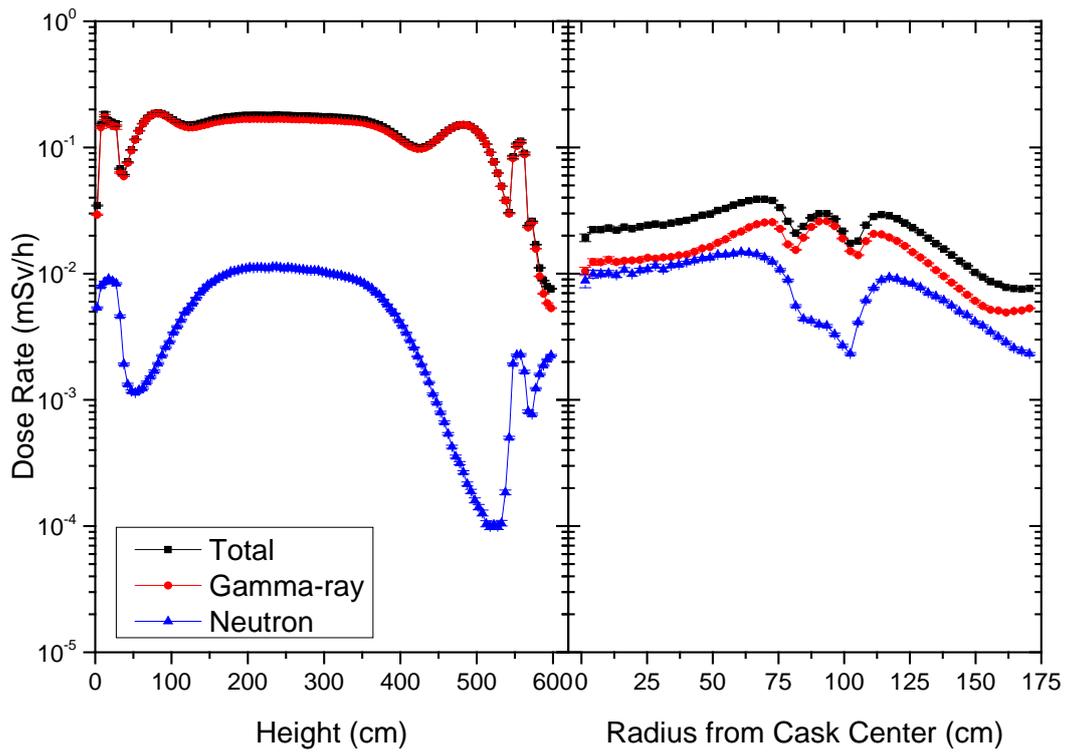


圖 5.7、HI-STORM 100 護箱表面劑量率分布，左側邊，右頂部

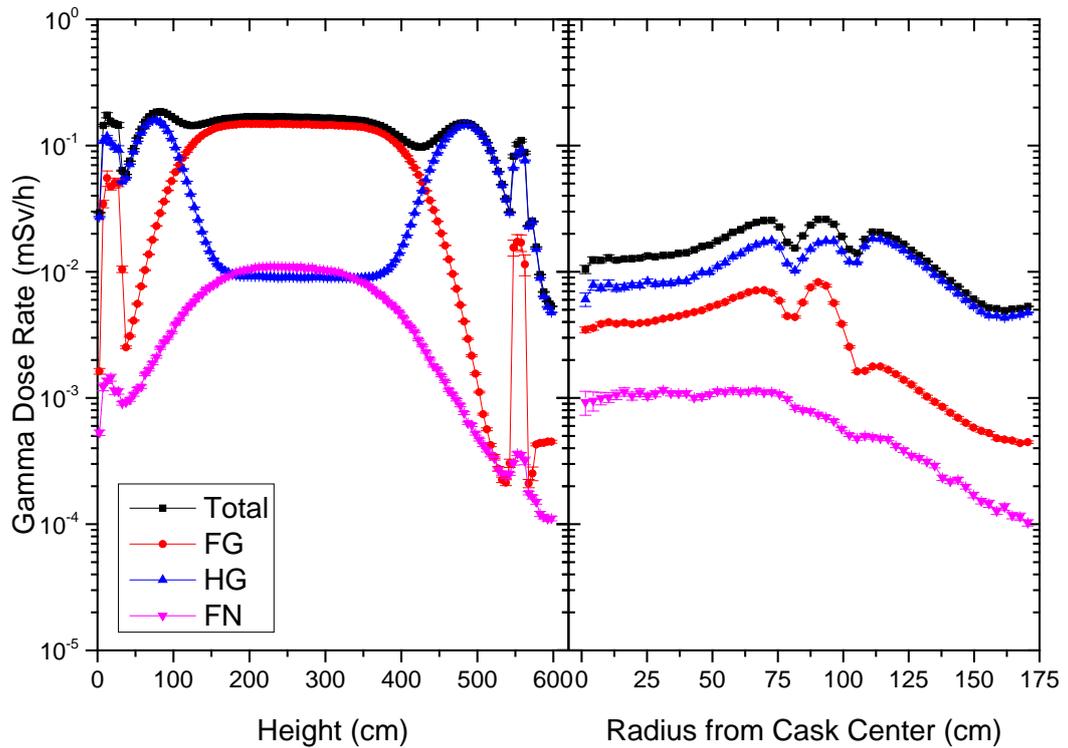


圖 5.8、HI-STORM 100 護箱表面劑量率加馬射源貢獻，左側邊，右頂部

5.2 設施周遭劑量率分布

5.1 節討論了乾貯護箱在正常運轉下，表面劑量率分布情形。本節在此以前述兩種護箱模型為例，搭配 4.2 節建構的室內乾貯設施屏蔽計算模型進行設施周遭劑量率分布探討。本節的架構分三部分作討論：5.2.1 節為標的設施劑量率分布計算結果、5.2.2 節為標的設施迷道設計情節案例探討、5.2.3 節以優化的標的設施進行為不同類型之護箱以兩種排列型式在混凝土建物與金屬建物內貯存之差異比較。

5.2.1 標的設施周遭劑量率分布

標的設施屏蔽計算模型，幾何參考 4.2 節內容，圖 4.28 至圖 4.30 所示，用過核子燃料射源參採 4.3 節內容。同樣以 MACRIC 程式應用 FW-CADIS 理論分析設施周遭輻射場劑量率分布，因整體設施為左右對稱式設計，為減少計算資源的需求，故僅考慮設施的北、南和西側三面區域，故設定設施周遭三面區域高度 0-3 m 為伴隨射源(圖 5.9)，因設施周遭劑量率主要計分區域為高度 0-2 m，可能有人員所在之區域，圖 5.10 為計分區域示意。以 ICRP-74 號報告的周圍等效劑量 $H^*(10)$ 作為偵檢計分之響應函數值。

Denovo 將標的設施屏蔽模型切割成 5,169,570 個格點 (X: 309、Y: 239、Z: 70) 作兩次 (Forward S_N 與 Adjoint S_N) 簡化決定論法計算，格點切割密集於設施靠北、南、西三側最外層護箱區域，建物內部由外而內排列的護箱格點數遞減，因最外圍護箱對周遭設施劑量率貢獻比例將會最大，其餘內層排列護箱受護箱貯存排列位置影響而有類似護箱輻射自屏蔽的效果，格點切割也集中於建物的進出氣通道區域，再連接 Monaco 蒙地卡羅程式作模擬。

標的設施屏蔽模型格點數目相當大量，以機櫃電腦 Win10 作業系統搭載 2.20GHz E5-2696 v4 CPU 和 192 GB RAM，三種射源案例計算時間呈現於表 5.

6。單光子粒子射源兩次決定論法計算約需 2 個小時，燃料中子射源需同時考慮中子與光子兩種粒子約需 9 個小時。本次模擬後續三種射源案例蒙地卡羅計算時間皆需耗費約 15 天左右，由此可見具有大量貯存護箱的設施屏蔽計算案例計算的困難度。

表 5.6、標的乾貯設施計算時間

Source	Forward S _N (hr)	Adjoint S _N (hr)	Total S _N (hr)	MC (hr)	Total (day)
FN(600×1E06)	5.16	3.86	9.01	358.5	14.93
FG(375×1E08)	0.95	0.87	1.82	343.5	14.32
HG(332×1E08)	0.77	0.88	1.65	376.0	15.67

考慮設施北、南、西三側考量劑量率隨距離變化情形，格點計分位置為設施表面至設施邊界(100 m)，高度 0-2 m 處人員活動區域，設施周遭劑量率分布結果如圖 5.11 至圖 5.14。圖 5.11 為設施北側劑量率隨距離變化分布，總劑量率分布隨距離衰減約 3 個數量級，100 m 處劑量率約為 0.11 mSv/y，20 m 前光子貢獻略大於中子，20 m 後兩者約略持平至設施邊界，參照圖 4.28 設施屏蔽模型，北側貯存 60 個 HI-STAR 100 護箱，是否為貯存護箱特性仍需後續比較探討；圖 5.12 為設施南側劑量率隨距離變化分布，總劑量率分布隨距離衰減類似於北側，但皆以光子劑量為主要貢獻，中子劑量率小一個數量級，100 m 處劑量率約為 0.05 mSv/y，南側貯存 60 個 HI-STORM 100 護箱，此護箱表面劑量率皆以光子為主，呈現趨勢亦相同。圖 5.13 為設施西側劑量率隨距離變化分布，總劑量分布隨距離衰減一個數量級，100 m 處劑量率約為 0.02 mSv/y。圖 5.14 為集結前述三側劑量率繪圖，標的設施僅在北和南兩側設有空氣流動通道，圖中明顯發現此兩側劑量率分布較高，又以北側最高，此主要因為金屬護箱表面劑量率大於混凝土護箱約 2 倍左右。北和南側設施表面劑量率較高原因主要為計分區域設定，參照圖 4.28 設施屏蔽模型在高度 1.2-1.8 m 處具有進氣通道，而此次分析計分設定為

0-2 m 高度，加上圖 4.30 通道迷道設計，靠近建物南北側的護箱其內部用過核子燃料射源輻射滲流出護箱後，此迷道設置可能未能有效發揮功能，考量此情形故劑量率較高，後續將試圖改變迷道尺寸觀測對設施劑量率整體影響。

圖 5.15 為整體設施周遭總劑量率分布($\mu\text{Sv/h}$)，顏色區塊以紅色為劑量率最高，紫色為劑量率最低，其中設施內白色區塊代表該位置劑量率高於 100 mSv/h ，皆為設施內各護箱密封鋼筒所在位置，建物內中間走道區域劑量率約為 0.3 mSv/h 。北側設施牆外劑量率約為 $10 \mu\text{Sv/h}$ 數量級範圍，南側設施牆外劑量率約為 $5 \mu\text{Sv/h}$ 數量級範圍，西側設施牆外劑量率約為 $0.03 \mu\text{Sv/h}$ 數量級範圍，整體劑量率隨距離設施越遠劑量率隨之下降。圖 5.15 對應圖 5.14 結果，可明顯發現北側劑量率較高，南側劑量率次之，而設施西側呈現劑量率較低原因有兩者，一為西側面乾貯護箱數目(8)相對南北兩側(15)較少，二為室內乾貯建物設計在西側不具有進出氣通道故其劑量率最低(小於 $0.1 \mu\text{Sv/h}$)。圖 5.16 整體設施周遭劑量率分布，分中子和加馬個別劑量率分布($\mu\text{Sv/h}$)，中子劑量率在設施內金屬護箱貯存區域明顯高於混凝土護箱區域一個數量級，光子劑量率則呈現與圖 5.11 與圖 5.12 對應結果北、南兩側劑量率分布接近。圖 5.17 顯示各別加馬射源貢獻，其中以 FG 貢獻最多。

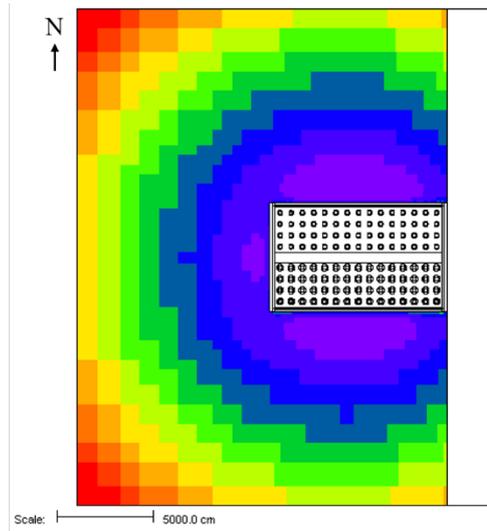


圖 5.9、標的設施伴隨射源設定

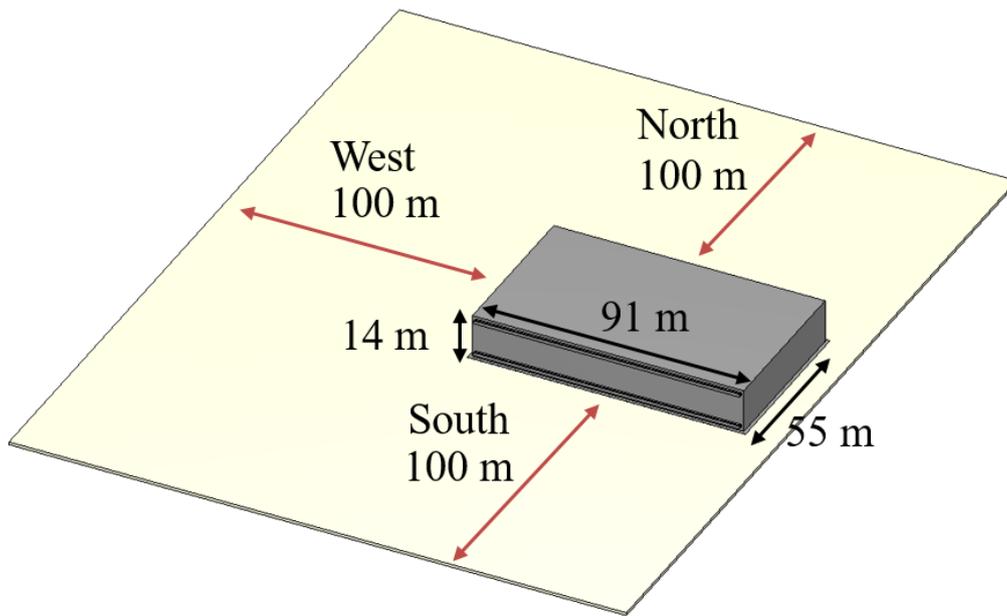


圖 5.10、標的設施計分區域示意

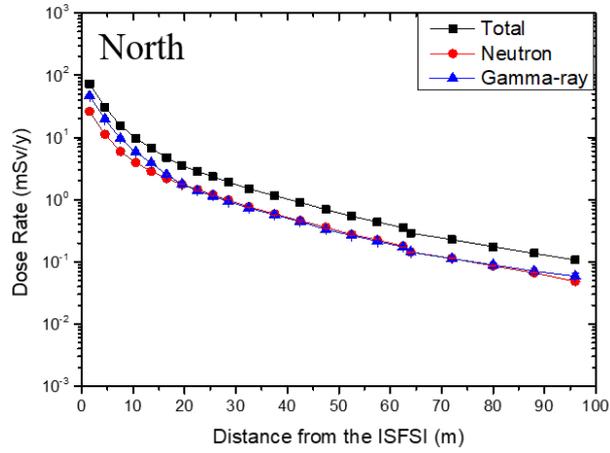


圖 5.11、北側格點計分劑量率隨距離變化

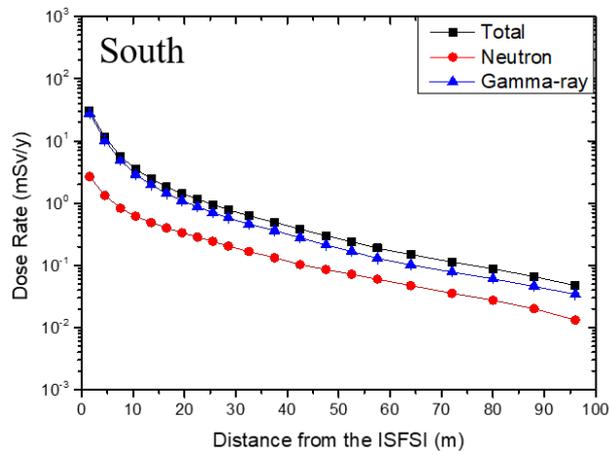


圖 5.12、南側格點計分劑量率隨距離變化

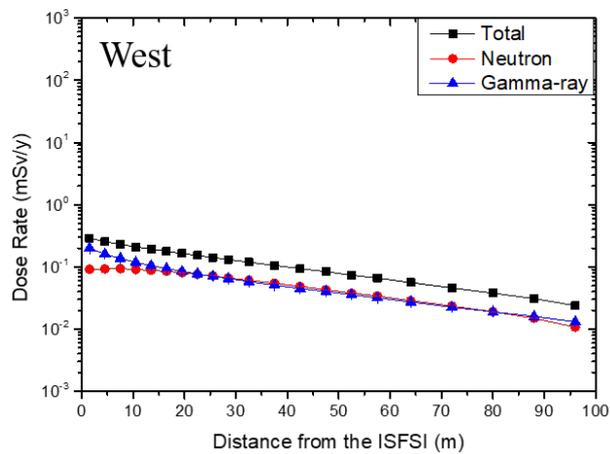


圖 5.13、西側格點計分劑量率隨距離變化

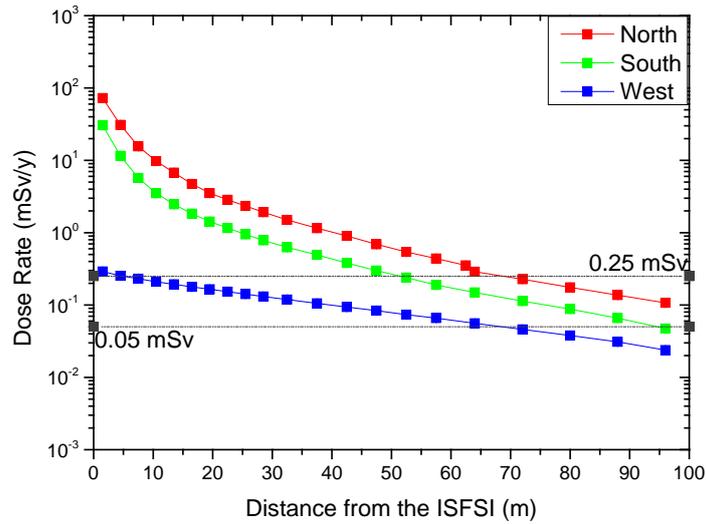


圖 5.14、三側格點計分劑量率率隨距離變化

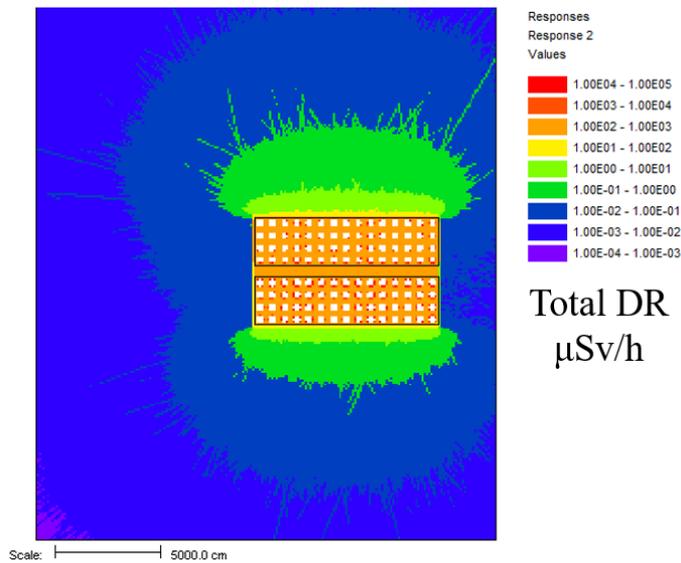


圖 5.15、標的設施周遭總劑量率分布 (μSv/h)

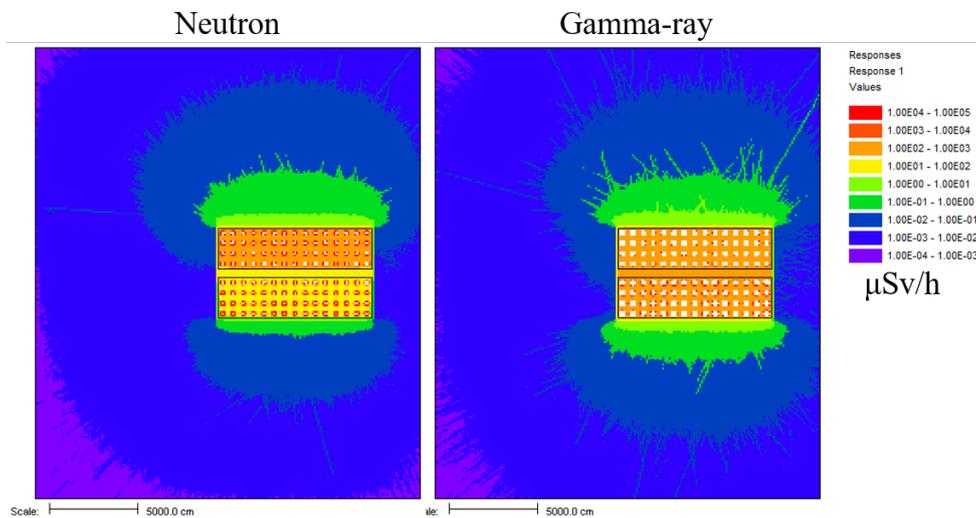


圖 5.16、標的設施周遭劑量率分布，(左)中子，(右)加馬，(μSv/h)

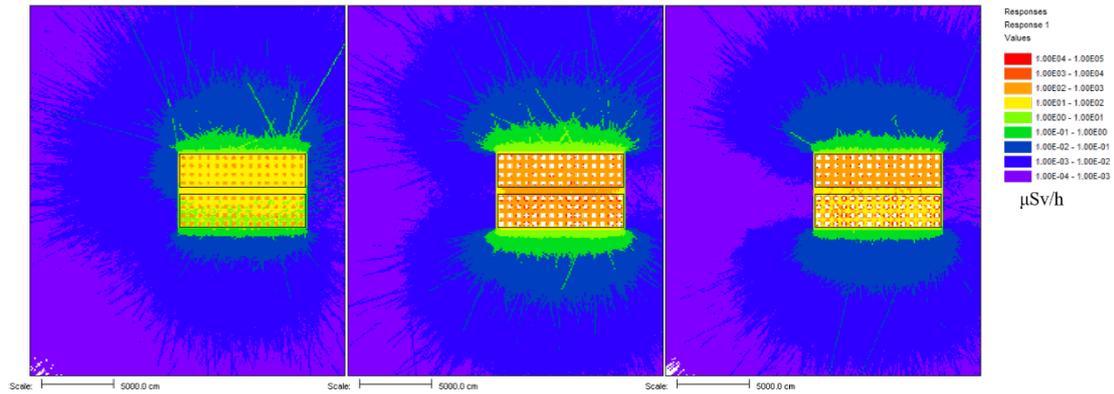


圖 5.17、標的設施周遭加馬射源貢獻劑量率分布，(左)FN，(中)FG，(右)HG，(μSv/h)

5.2.2 標的設施進出氣通道之迷道設計探討

5.2.1 節屏蔽分析結果顯示，標的設施南北側表面劑量率分布較高，可能受進出氣通道外迷道設置未能有效發揮功能所致，在此將考慮另外兩種迷道情節，來探討如何對進出氣通道之迷道設計進行優化。

三種設施迷道設計案例分別為：情節 1 無迷道設計(noMaze)、情節 2 迷道設計 1(Maze1)和情節 3 迷道設計 2(Maze2)。情節 1 無迷道設計為移除建物進出氣通道外所有的迷道，同圖 5.18 所示；情節 2 迷道設計 1 即為原標的設施迷道設計，同於圖 4.30 所示，外部迷道設計僅剛好遮蔽進出氣通道出口 60 cm 的長度；情節 3 迷道設計 2，參考圖 5.19 所示，將外部迷道設計延伸遮蔽至 120 cm 的長度。

設施屏蔽分析計算參數參考第四章，以金屬護箱和混凝土護箱配比为 60：60 作迷道設計情節探討，在此僅對設施周遭具有進出氣通道的北側與南側作劑量率分布討論。設施兩側劑量率分布如圖 5.20，圖 5.20(左)為北側劑量率分布結果，3 種迷道設計情節劑量率分布皆隨距離呈現劑量率衰減情形，但可明顯發現情節 1 noMaze 劑量率為最高，建物表面劑量率約為 289 mSv/y；情節 2 Maze1 劑量率次之，建物表面劑量率約為 70 mSv/y；情節 3 Maze2 劑量率最小，建物表

面劑量率約為 4 mSv/y，此劑量率分布結果呈現情節 3 Maze2 的迷道屏蔽效應為最佳，可使設施表面劑量率與情節 1 沒有迷道相比差異約 2 個數量級。圖 5.20(右)為南側劑量率分布結果，3 種情節趨勢同於前述北側劑量率分布情形。後續相關計算之設施屏蔽計算模型內採用的迷道皆為情節 3 Maze2 的設計。

3 種迷道設計情節劑量率分布結果，呈現 Maze2 的迷道設計屏蔽效果最佳，爾後進行設施相關進出氣通道迷道設計時，因應不同的建物進出氣通道迷道設計，應進行迷道遮蔽效果確認測試後再決定整體建物屏蔽設計。

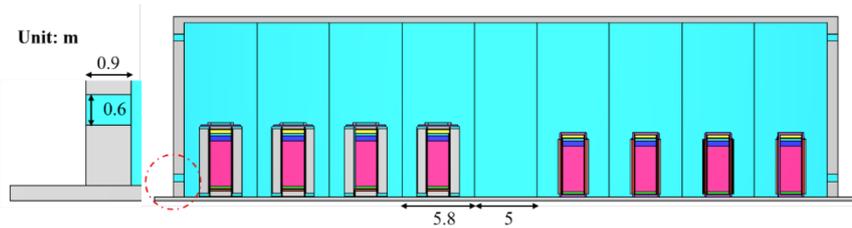


圖 5.18、設施周遭劑量率迷道設計討論情節 1: 無迷道設計

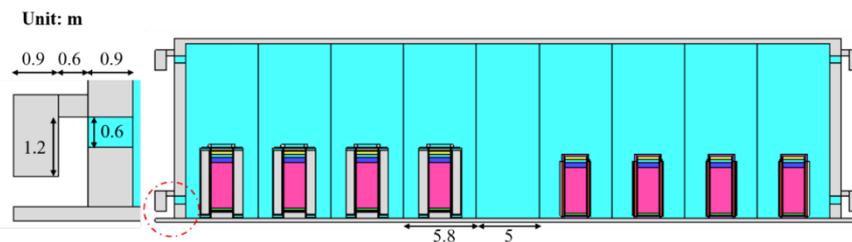


圖 5.19、設施周遭劑量率迷道設計討論情節 3: 迷道設計 2(Maze2)

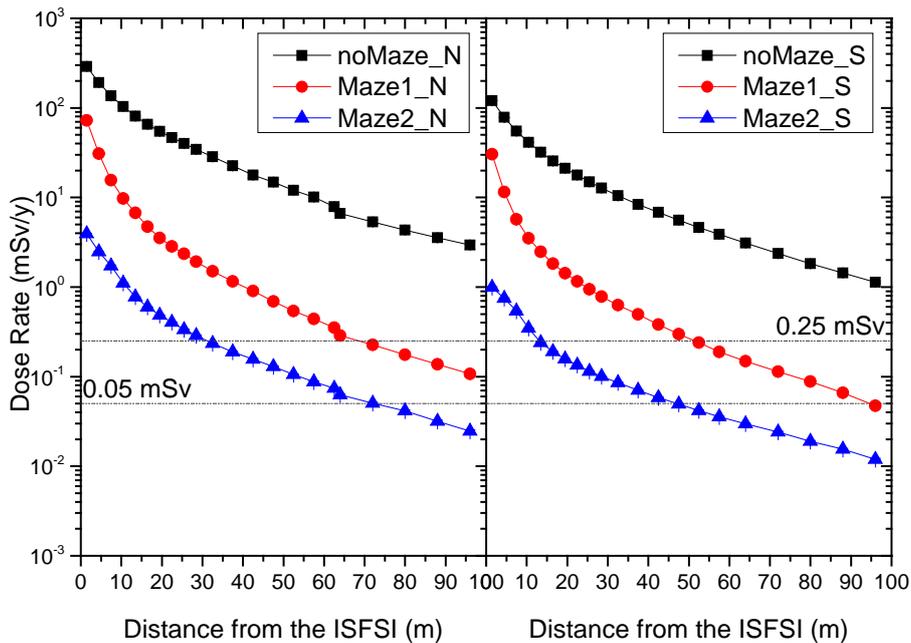


圖 5.20、三種迷道設計討論情節之設施北側(左)與南側(右)劑量率隨距離變化

5.2.3 不同類型之護箱以兩種排列型式在混凝土建物與金屬建物內貯存之差異

前面 5.2.1 節呈現標的設施周遭劑量率分布情形，5.2.2 節進行設施外進出氣通道迷道設計優化，5.2.3 節將以優化後的設施屏蔽計算模型討論不同類型之護箱以兩種排列型式在混凝土建物與金屬建物內貯存之差異。

兩種護箱型式，金屬護箱 HI-STAR 100 與混凝土護箱 HI-STORM 100，幾何描述請參考 4.1 節。兩種建物型式，混凝土建物(圖 4.29)與鋼構建物(圖 5.21)，混凝土建物相關描述請參考 4.3 節，而鋼構建物相關幾何屏蔽模型設定同於 4.3 節描述，惟鋼構建物採用不銹鋼材料，建物厚度為 5 mm。考慮兩種護箱排列型式，金屬護箱和混凝土護箱配比為 60：60(圖 5.22)與 104：16(圖 5.23)。上述兩種建物型式與兩種護箱排列型式可搭配成以下四種組合：

組合 1：混凝土建物內護箱 60：60 配置。

組合 2：混凝土建物內護箱 104：16 配置。

組合 3：鋼構建物內護箱 60：60 配置

組合 4：鋼構建物內護箱 104：16 配置。

後面將依序對各組合作劑量率分布結果呈現說明。

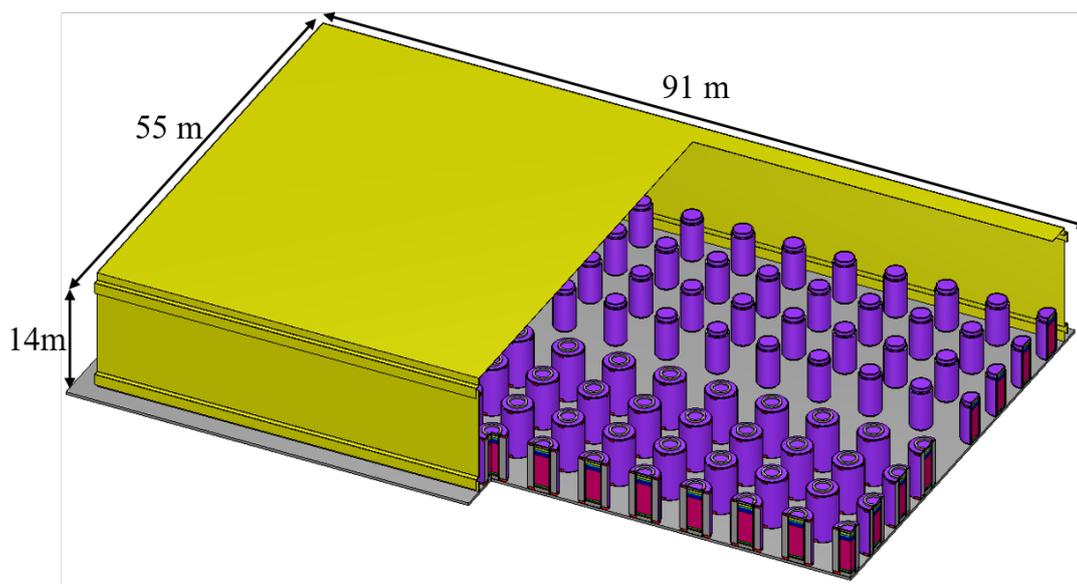


圖 5.21、鋼構建物屏蔽模型外觀

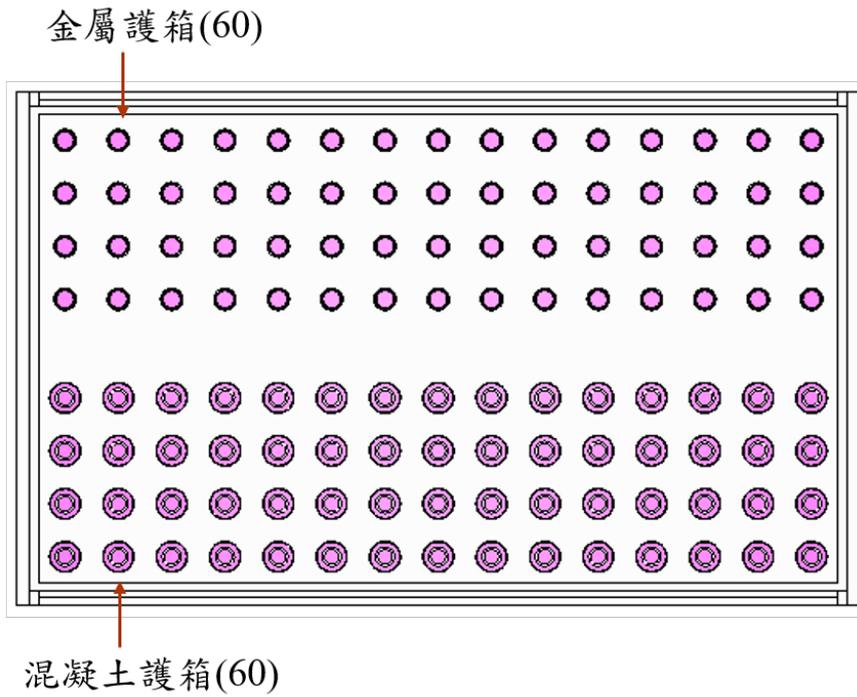


圖 5.22、金屬護箱和混凝土護箱配比为 60 : 60 配置

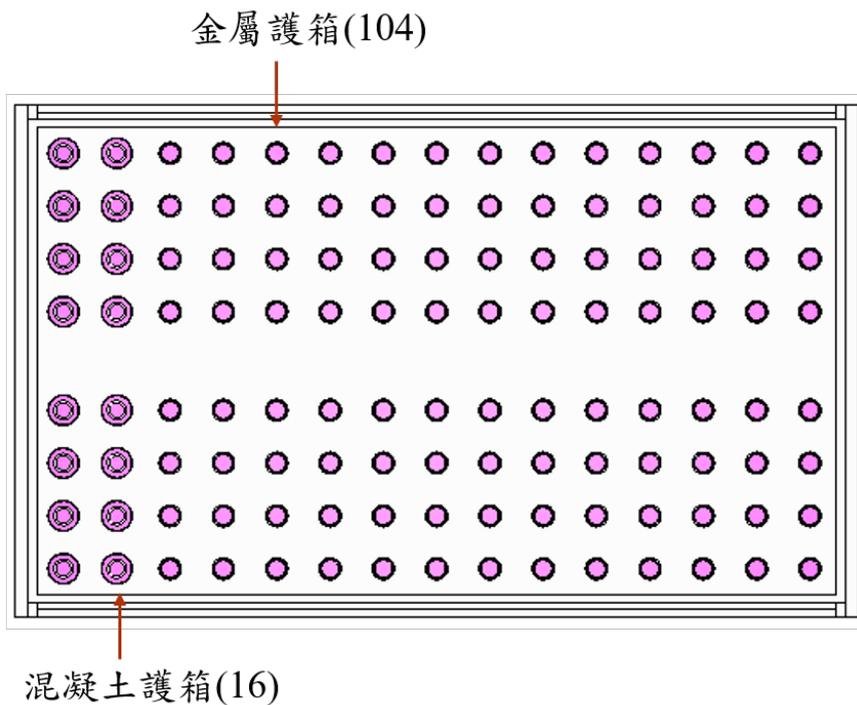


圖 5.23、金屬護箱和混凝土護箱配比为 104 : 16 配置

組合 1，混凝土建物內護箱 60：60 配置。同圖 5.10 考慮設施北、南、西三側考量劑量率隨距離變化情形，格點計分位置為設施表面至設施邊界(100 m)，高度 0-2 m 處人員活動區域，設施周遭劑量率分布結果如圖 5.24 至圖 5.26。圖 5.24 為設施北側劑量率隨距離變化分布，總劑量率分布隨距離衰減約 2 個數量級，100 m 處劑量率約為 0.025 mSv/y，65 m 前中子貢獻略大於光子，65 m 後兩者互換，100 m 處光子劑量率貢獻較大。圖 5.25 為設施南側劑量率隨距離變化分布，總劑量率分布隨距離衰減約 2 個數量級，100 m 處劑量率約為 0.01 mSv/y，60 m 前中子與光子貢獻相近，100 m 處光子劑量率貢獻較大。圖 5.26 為設施西側劑量率隨距離變化分布，總劑量率分布隨距離衰減約 1 個數量級，100 m 處劑量率約為 0.01 mSv/y，西側光子劑量率貢獻皆大於中子。圖 5.27 為集結前述三側劑量率繪圖，標的設施僅在北和南兩側設有空氣流動通道，圖中明顯發現此兩側建物表面劑量率分布較高，又以北側最高，差異約為 2 倍，主要原因來自金屬護箱表面劑量率大於混凝土護箱約 2 倍左右。

圖 5.28 為組合 1 整體設施周遭總劑量率分布($\mu\text{Sv/h}$)，顏色區塊以紅色為劑量率最高，紫色為劑量率最低，其中設施內白色區塊代表該位置劑量率高於 100 mSv/h，皆為設施內各護箱密封鋼筒所在位置，建物內中間走道區域劑量率約為 0.3 mSv/h。北側設施牆外劑量率約為 0.5 $\mu\text{Sv/h}$ 數量級範圍，南側設施牆外劑量率約為 0.2 $\mu\text{Sv/h}$ 數量級範圍，西側設施牆外劑量率約為 0.04 $\mu\text{Sv/h}$ 數量級範圍，整體劑量率隨距離設施越遠劑量率隨之下降。圖 5.28 對應圖 5.27 結果，可發現北側劑量率較高，南側劑量率次之，而設施西側呈現劑量率較低原因有兩者，一為西側面乾貯護箱數目(8)相對南北兩側(15)較少，二為室內乾貯建物設計在西側不具有進出氣通道故其劑量率最低(小於 0.1 $\mu\text{Sv/h}$)，且因護箱排列的關係(北側為金屬護箱，南側為混凝土護箱)設施西側劑量率在圖 5.28 中呈現靠近北側的劑量率高於靠近南側的區域。

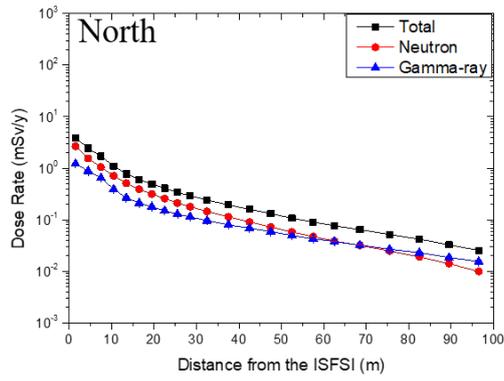


圖 5.24、組合 1 北側格點計分劑量率隨距離變化

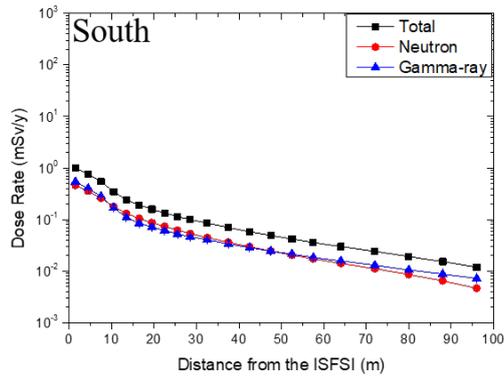


圖 5.25、組合 1 南側格點計分劑量率隨距離變化

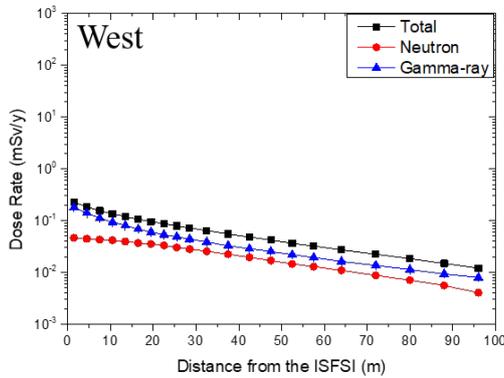


圖 5.26、組合 1 西側格點計分劑量率隨距離變化

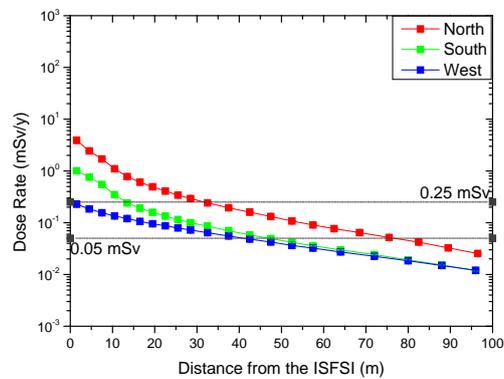


圖 5.27、組合 1 三側格點計分劑量率率隨距離變化

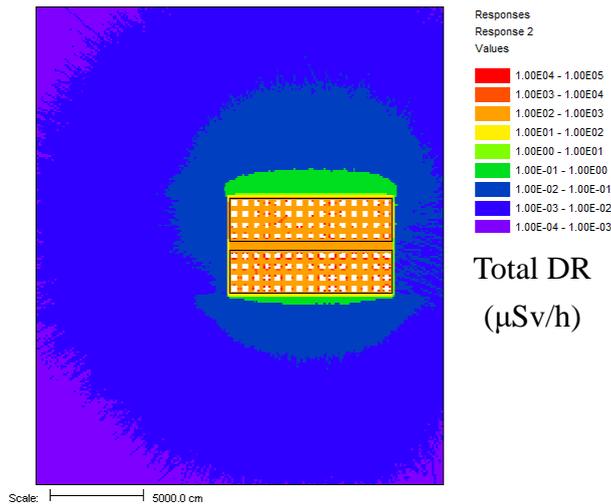


圖 5.28、組合 1 設施周遭總劑量率分布 ($\mu\text{Sv/h}$)

組合 2，混凝土建物內護箱 104:16 配置。同圖 5.10 考慮設施北、南、西三側考量劑量率隨距離變化情形，格點計分位置為設施表面至設施邊界(100 m)，高度 0-2 m 處人員活動區域，設施周遭劑量率分布結果如圖 5.29 至圖 5.31。因護箱配置為上下對稱關係，圖 5.29 北側與圖 5.30 南側劑量率分布是一樣的，兩側在 80 m 前為中子貢獻較大，80 m 後為光子貢獻較大，100 m 處劑量率約為 0.03 mSv/y。圖 5.31 為設施西側劑量率隨距離變化分布，100 m 處劑量率約為 0.01 mSv/y，100 m 處光子劑量率貢獻大於中子。圖 5.32 為集結前述三側劑量率繪圖，在設有空氣流動通道的北側與南側，劑量率明顯高於西側。

圖 5.33 為組合 2 整體設施周遭總劑量率分布($\mu\text{Sv/h}$)，顏色區塊以紅色為劑量率最高，紫色為劑量率最低，其中設施內白色區塊代表該位置劑量率高於 100 mSv/h，皆為設施內各護箱密封鋼筒所在位置，建物內中間走道區域劑量率約為 0.3 mSv/h，但靠近左邊 16 個混凝土護箱間隔走道的劑量率會低於右側 104 個金屬護箱的間隔走道，為兩種類型護箱劑量率差異所致。北側和南側設施牆外劑量率約為 0.5 $\mu\text{Sv/h}$ 數量級範圍，西側設施牆外劑量率約為 0.02 $\mu\text{Sv/h}$ 數量級範圍，整體劑量率隨距離設施越遠劑量率隨之下降。圖 5.33 對應圖 5.32 結果，可發現北側與南側有進出氣通道之劑量率較高，西側不具有進出氣通道故其劑量率最低(小於 0.1 $\mu\text{Sv/h}$)。

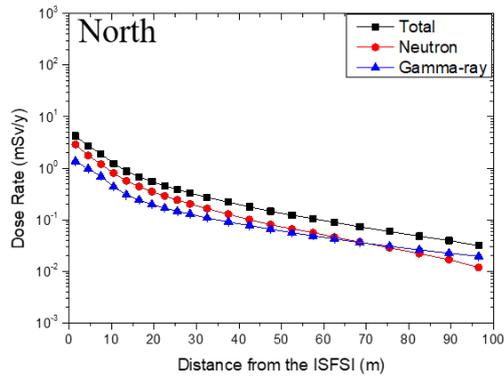


圖 5.29、組合 2 北側格點計分劑量率隨距離變化

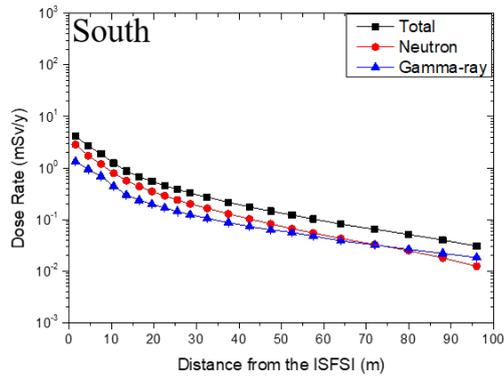


圖 5.30、組合 2 南側格點計分劑量率隨距離變化

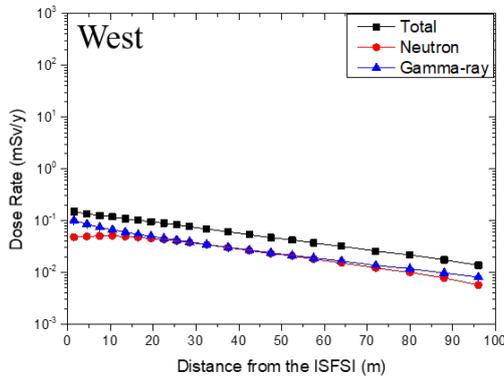


圖 5.31、組合 2 西側格點計分劑量率隨距離變化

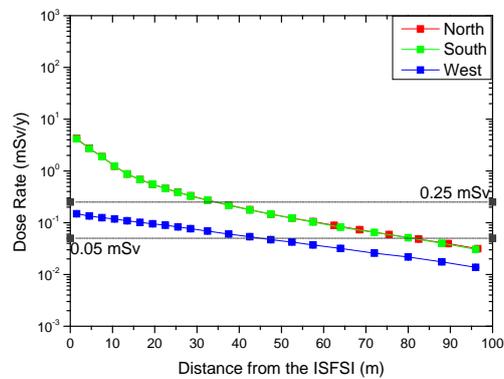


圖 5.32、組合 2 三側格點計分劑量率率隨距離變化

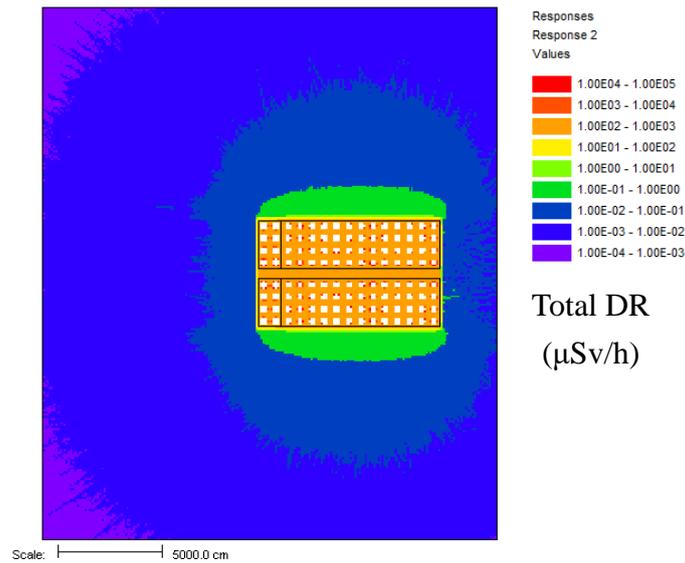


圖 5.33、組合 2 設施周遭總劑量率分布 ($\mu\text{Sv/h}$)

組合 3，鋼構建物內護箱 60：60 配置。同圖 5.10 考慮設施北、南、西三側考量劑量率隨距離變化情形，格點計分位置為設施表面至設施邊界(100 m)，高度 0-2 m 處人員活動區域，設施周遭劑量率分布結果如圖 5.34 至圖 5.36 圖 5.39。圖 5.34 為設施北側劑量率隨距離變化分布，100 m 處劑量率約為 30 mSv/y。圖 5.35 為設施南側劑量率隨距離變化分布，100 m 處劑量率約為 15 mSv/y。圖 5.36 為設施西側劑量率隨距離變化分布，100 m 處劑量率約為 16 mSv/y。設施三側的光子劑量率貢獻皆大於中子，此主要原因為兩類型護箱其表面劑量率皆以光子為主要貢獻，又因鋼構建物在此不具有輻射屏蔽的功能僅具有氣候遮蔽的功用。圖 5.37 為集結前述三側劑量率繪圖，可發現在建物表面北側劑量率最高，西側次之，南側最小，此主因仍為金屬護箱表面劑量慮高於混凝土護箱，受金屬護箱影響較多者其劑量率分布會較高。

圖 5.38 為組合 3 整體設施周遭總劑量率分布($\mu\text{Sv/h}$)，顏色區塊以紅色為劑量率最高，紫色為劑量率最低，其中設施內白色區塊代表該位置劑量率高於 100 mSv/h，皆為設施內各護箱密封鋼筒所在位置，建物內中間走道區域劑量率約為 0.3 mSv/h。北側設施牆外劑量率約為 0.2 mSv/h 數量級範圍，南側設施牆外劑量率約為 0.08 mSv/h 數量級範圍，西側設施牆外劑量率約為 0.15 mSv/h 數量級範圍。

圍，整體劑量率隨距離設施越遠劑量率隨之下降。圖 5.38 對應圖 5.37 結果，可發現北側劑量率較高，其餘兩側劑量率相近。組合 3 在搭配鋼構建物的情結下，設施周遭劑量率變化情形，主要受排列護箱本身輻射特性影響，近金屬護箱區域劑量率較高，近混凝土護箱區域劑量較低。

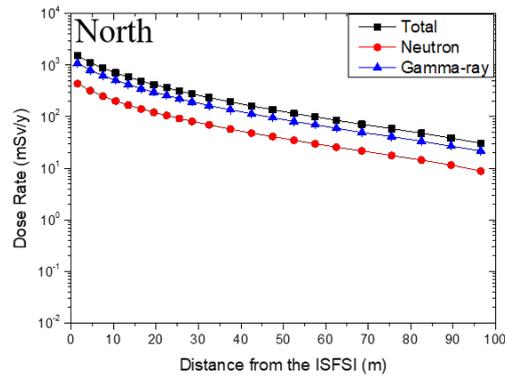


圖 5.34、組合 3 北側格點計分劑量率隨距離變化

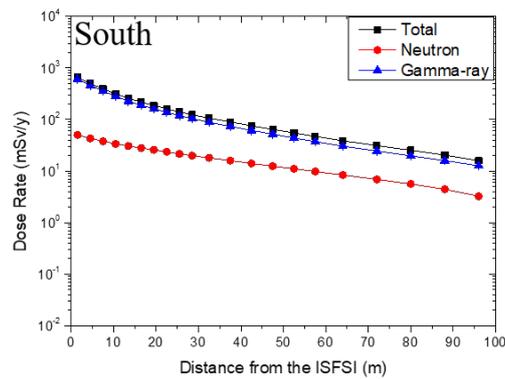


圖 5.35、組合 3 南側格點計分劑量率隨距離變化

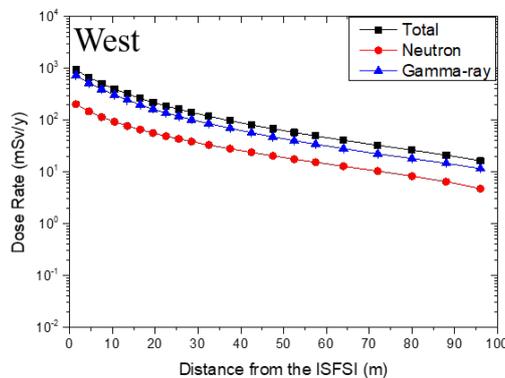


圖 5.36、組合 3 西側格點計分劑量率隨距離變化

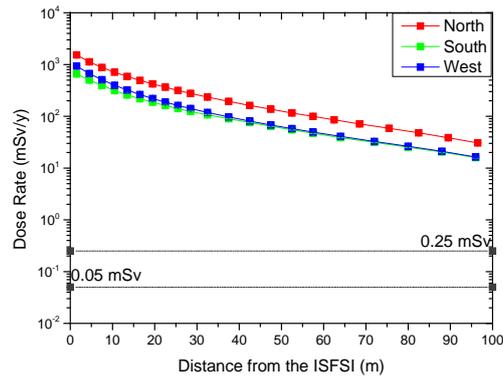


圖 5.37、組合 3 三側格點計分劑量率率隨距離變化

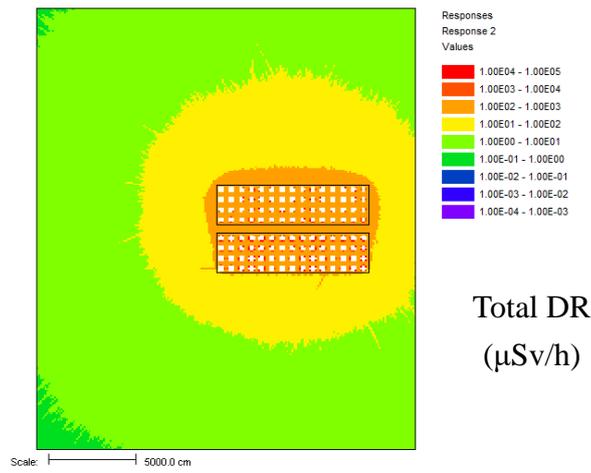


圖 5.38、組合 3 設施周遭總劑量率分布 (μSv/h)

組合 4，鋼構建物內護箱 104：16 配置。同圖 5.10 考慮設施北、南、西三側考量劑量率隨距離變化情形，格點計分位置為設施表面至設施邊界(100 m)，高度 0-2 m 處人員活動區域，設施周遭劑量率分布結果如圖 5.39 至圖 5.41。同於組合 2，護箱排列為上下對稱，故北側與南側兩側劑量率分布相同(圖 5.39 與圖 5.40 近乎相同)，且因受金屬護箱影響為較多，故兩側整體劑量率皆高於西側劑量率變化，南北兩側 100 m 處劑量率約為 30 mSv/y，西側 100 m 處劑量率約為 15 mSv/y。圖 5.42 為集結前述三側劑量率繪圖，同於組合 3 搭配鋼構建物，劑量率分布將以貯存護箱特性為主。

圖 5.43 為組合 4 整體設施周遭總劑量率分布(μSv/h)，顏色區塊以紅色為劑量率最高，紫色為劑量率最低，其中設施內白色區塊代表該位置劑量率高於 100 mSv/h，皆為設施內各護箱密封鋼筒所在位置，建物內中間走道區域劑量率約為

0.3 mSv/h。南北側設施牆外劑量率約為 0.2 mSv/h 數量級範圍，西側設施牆外劑量率約為 0.1 mSv/h 數量級範圍，整體劑量率隨距離設施越遠劑量率隨之下降。

圖 5.43 對應圖 5.42 結果，可發現南北兩側劑量率較高，西側面較低。

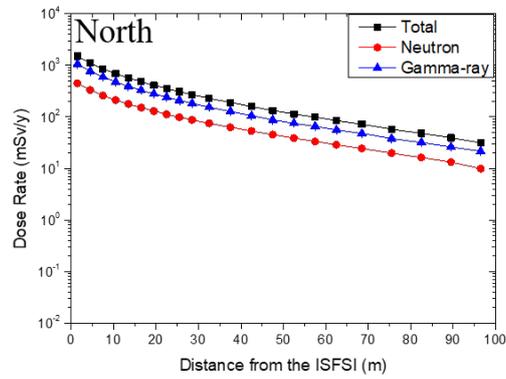


圖 5.39、組合 4 北側格點計分劑量率隨距離變化

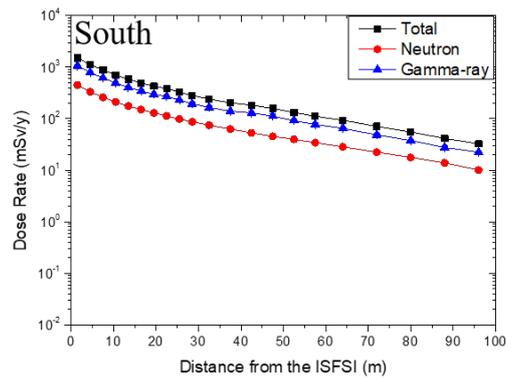


圖 5.40、組合 4 南側格點計分劑量率隨距離變化

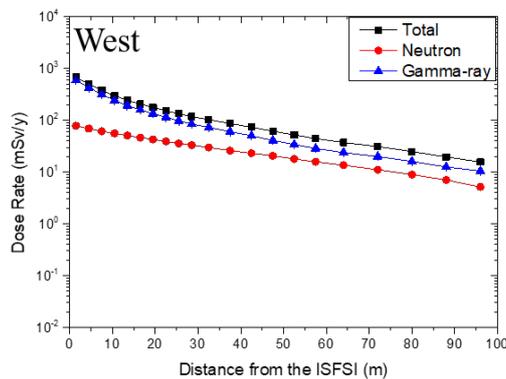


圖 5.41、組合 4 西側格點計分劑量率隨距離變化

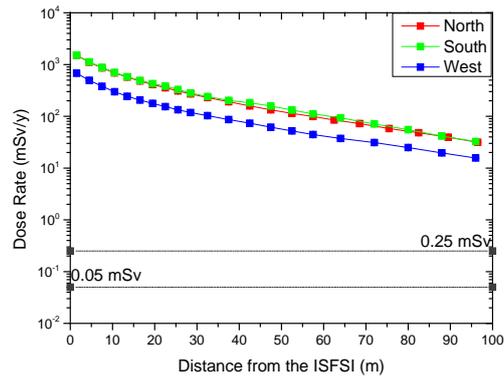


圖 5.42、組合 4 三側格點計分劑量率率隨距離變化

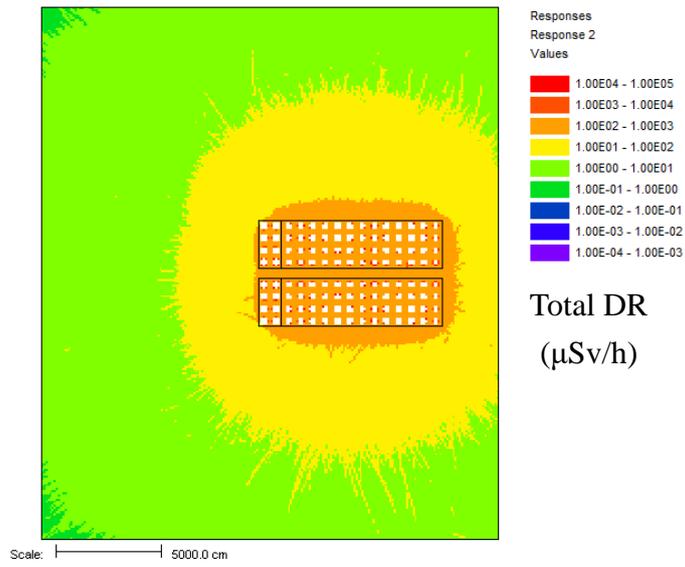


圖 5.43、組合 4 設施周遭總劑量率分布 ($\mu\text{Sv/h}$)

5.3 異常或意外事件情境之輻射屏蔽案例評估與影響效應研析

5.1 節針對正常運轉下，對乾貯護箱表面劑量率分布作探討，5.2 節對貯存設施周遭劑量率分布作探討。此節，將對護箱異常或意外事件情境之輻射屏蔽案例評估與影響效應研析。異常事故情節將討論混凝土護箱進氣通道半阻塞案例，意外事故情節將討論金屬護箱與混凝土護箱傾倒案例。

5.3.1 異常事故情境

異常事故情境在此將考量混凝土護箱的進氣通道半阻塞情節，模型示意圖如圖 5.44，將進氣通道塞入土壤作為半阻塞的材料假設，將以進氣通道半阻塞最主要受影響區域護箱側邊劑量率分布來作比較討論。

圖 5.44 圖 5.45 為正常運轉狀況下(圖 5.7 左)與異常事故下護箱側邊表面劑量率分布。與正常運轉狀況相比，劑量率分布僅在護箱進氣通道周圍的區域造成影響，對於通道以上的區域近乎無影響；在進氣通道周遭，受土壤半阻塞影響，不論是中子或光子劑量率貢獻皆低於正常運轉狀況，以此異常事故討論情節可知混凝土護箱發生進氣通道半阻塞事故時，輻射防護非為其需要考量的要點，護箱散熱功能的喪失應為此情節考量要素。

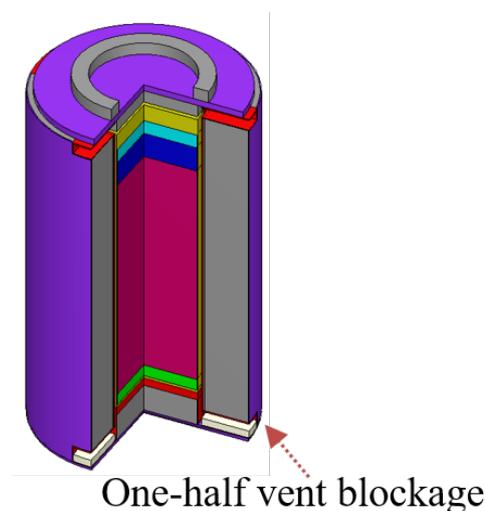


圖 5.44、異常事情情節：混凝土護箱進氣通道半阻塞示意圖

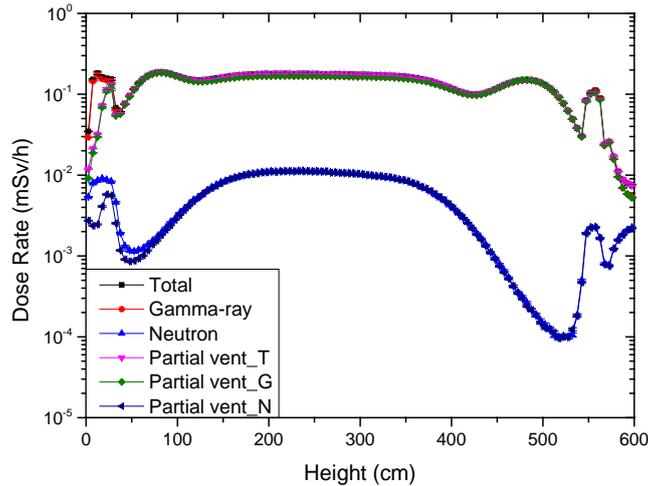


圖 5.45、混凝土護箱進氣通道半阻塞側邊表面劑量率分布

5.3.2 意外事故情境

意外事故情節將各別考量金屬護箱與混凝土護箱傾倒案例，討論傾倒時護箱頂部(正常運轉下)與底部(意外事故下)表面劑量率分布差異與底部劑量率隨距離變化，如圖 5.46 所示。

金屬護箱 HI-STAR 100 意外事故傾倒屏蔽分析案例，圖 5.47 為頂部與底部劑量率分布比較，底部劑量率約高於頂部劑量率 2 個數量級，靠近護箱外側中子吸收材區域兩者差異約 1 個數量級。圖 5.48 顯示個別中子與光子劑量率貢獻，頂部劑量率以中子為主要貢獻，而底部劑量率以光子為主要劑量貢獻。圖 5.49 為底部平均劑量率隨距離變化情形，主要以光子劑量率為主要貢獻，其中又以結構光子為光子劑量率的最大貢獻來源。

考慮工作人員意外事故時接收的輻射劑量，參考核一廠用過核子燃料乾式貯存設施安全分析報告[2]評估方式，工作人員應變作業分為前處理及後處理兩階段，前處理約需 3 人作業 30 分鐘，以距離護箱底部 5 m 距離之劑量率作評估，參照圖 5.49，距底部 5 m 處劑量率為 0.62 mSv/h，前處理三人可能接受的劑量為 $0.62 \times 0.5 \times 3 = 0.93 \text{ man-mSv}$ 。後處理約需 10 人次作業每次需 30 分鐘，後處理可能接受

劑量為 $0.62 \times 0.5 \times 10 = 3.1 \text{ man-mSv}$ 。前後處理相加共 4.03 man-mSv 小於事故劑量限值 50 mSv/y 。本研究建構的 HI-STAR 100 護箱傾倒意外事故之底部平均劑量率隨距離變化情形(圖 5. 49)，有助於快速評估工作人員接受的輻射劑量。

混凝土護箱 HI-STORM 100 意外事故傾倒屏蔽分析案例，圖 5. 50 為頂部與底部劑量率分布比較，底部劑量率高於頂部劑量率約 3 倍，其中最大的差異為 HI-STORM 護箱頂部有設計屏蔽環塊可有效屏蔽護箱中間空氣通道的區域，對比底部劑量率空氣通道位置即為劑量率最大值。圖 5. 51 顯示個別中子與光子劑量率貢獻，不論是頂部或是底部劑量率皆以光子為主要劑量貢獻來源。圖 5. 52 為底部平均劑量率隨距離變化情形，主要也是以光子為主要貢獻來源，但其以燃料光子的最大劑量率貢獻來源。

按前述假設同樣考慮工作人員意外事故時接收的輻射劑量，前處理約需 3 人作業 30 分鐘，以距離護箱底部 5 m 距離之劑量率作評估，參照圖 5. 52，距底部 5 m 處劑量率為 0.38 mSv/h ，前處理三人可能接受的劑量為 $0.38 \times 0.5 \times 3 = 0.57 \text{ man-mSv}$ 。後處理約需 10 人次作業每次需 30 分鐘，後處理可能接受劑量為 $0.38 \times 0.5 \times 10 = 1.9 \text{ man-mSv}$ 。前後處理相加共 2.47 man-mSv 小於事故劑量限值 50 mSv/y 。

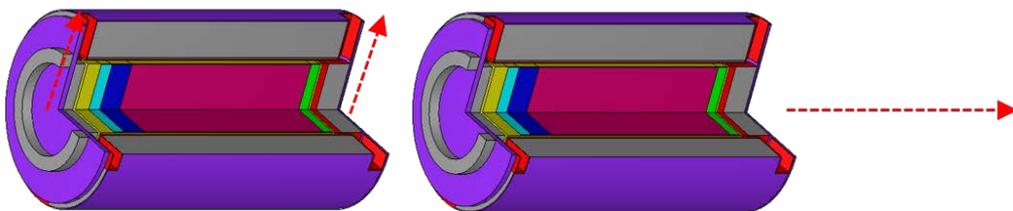


圖 5. 46、傾倒案例(左)頂部與底部劑量率比較位置(右)底部劑量率隨距離變化

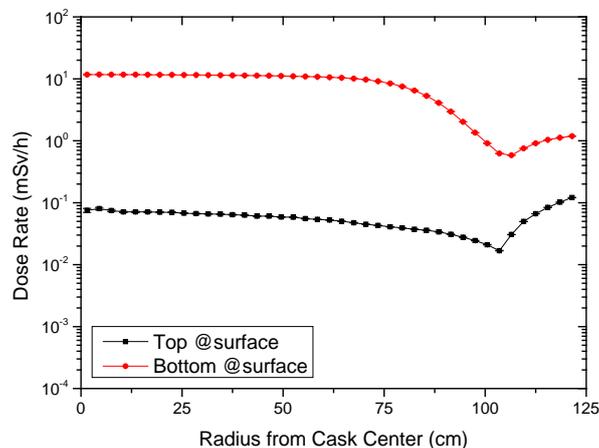


圖 5.47、HI-STAR 100 傾倒案例頂部與底部總劑量率比較

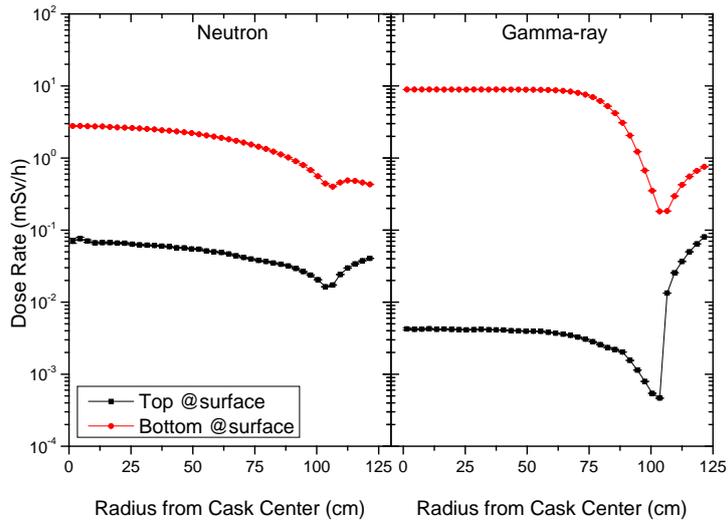


圖 5.48、HI-STAR 100 傾倒案例頂部與底部劑量率比較(左)中子(右)光子

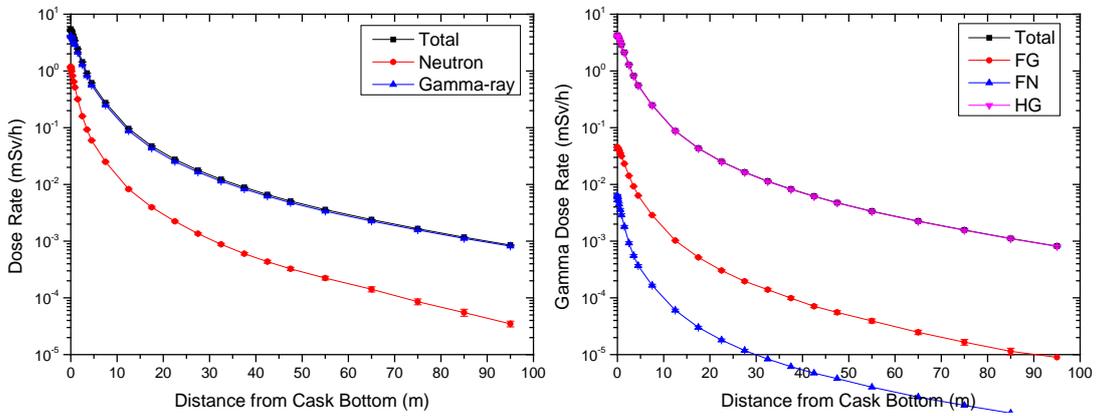


圖 5.49、HI-STAR 100 傾倒案例底部劑量率隨距離變化(左)總劑量率(右)光子劑量率貢獻

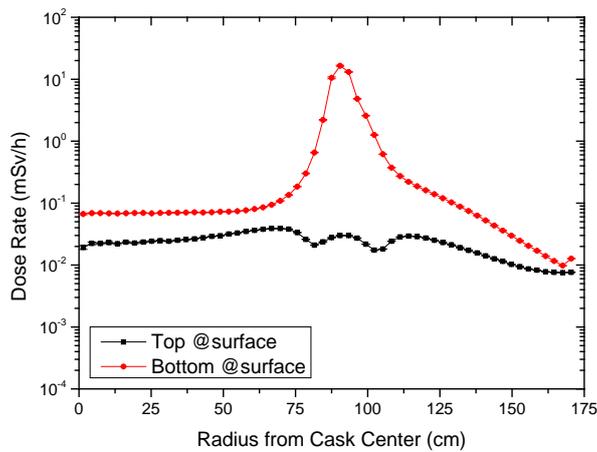


圖 5.50、HI-STORM 100 傾倒案例頂部與底部總劑量率比較

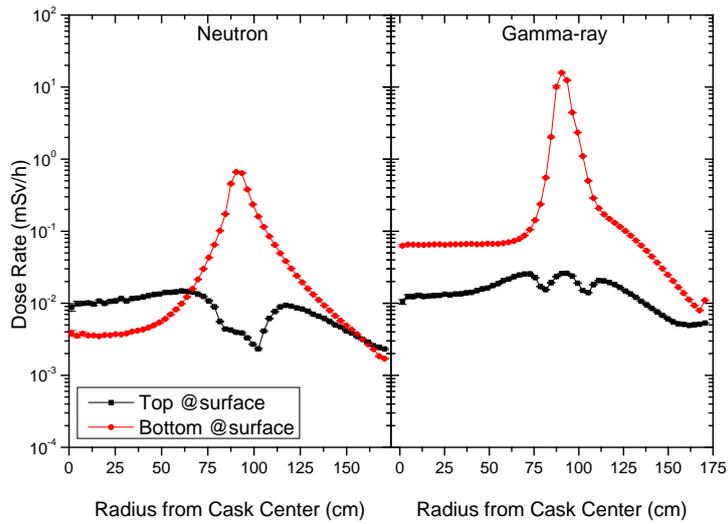


圖 5.51、HI-STORM 100 傾倒案例頂部與底部劑量率比較(左)中子(右)光子

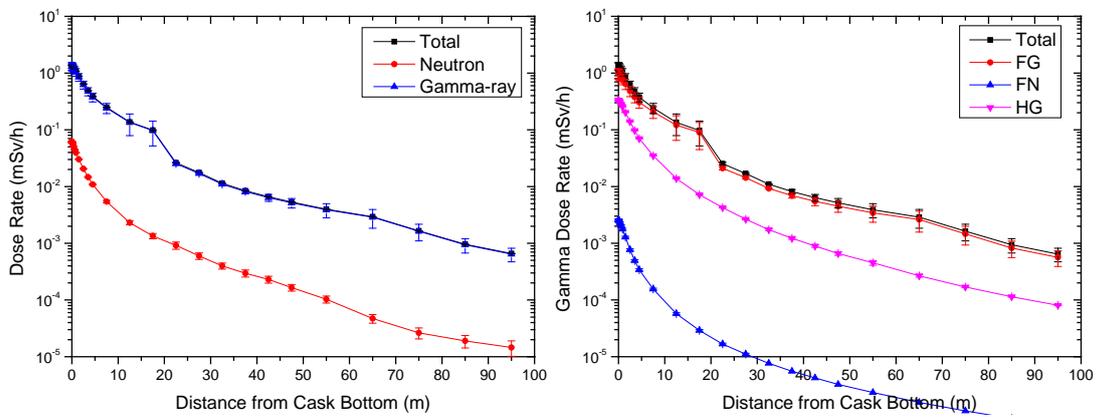


圖 5.52、HI-STORM 100 傾倒案例底部劑量率隨距離變化(左)總劑量率(右)光子劑量率貢獻

5.4 輻射屏蔽案例評估與影響效應研析總結表

總結第五章(5.1 節護箱表面劑量率分析、5.2 節設施周遭輻射特性探討與 5.3 節護箱異常與意外事故情境分析)輻射分析評估案例於表 5.7。

表 5.7、輻射屏蔽案例評估影響研析

護箱	屏蔽分析要點
HI-STAR 100	<p>1. 護箱表面劑量率評估:</p> <p>側邊: 以加馬射線為主要貢獻, 需特別注意護箱側邊上下兩端(無中子吸收材區域);</p> <p>頂部: 表面劑量率以中子為主要貢獻。</p> <p>2. 傾倒意外情節評估:</p> <p>底部: 以加馬射線為主要貢獻。意外情節評估需備妥護箱表面劑量率分析及特殊位置劑量率隨距離變化情形, 以利後續相關意外事故作人員劑量評估。</p>
HI-STORM 100	<p>1. 護箱表面劑量率評估:</p> <p>側邊: 以加馬射線為主要貢獻, 劑量率在護箱進(下)出(上)氣口處會有高點, 為輻射屏蔽的重點區域。</p> <p>頂部: 加馬射線與中子劑量率兩者相近, 但加馬輻射貢獻較大。特別在空氣通道上方有屏蔽環塊設計, 有效降低該處劑量率, 此為 HI-STORM 100 護箱特別的屏蔽設計。</p> <p>2. 護箱進氣通道半阻塞異常情節評估:</p> <p>輻射防護非為其考量的要點。</p> <p>3. 傾倒意外情節評估:</p>

	<p>底部：以加馬射線為主要貢獻，對比頂部設計有屏蔽環塊，底部空氣通道位置為劑量率最大值。意外情節評估需備妥護箱表面劑量率分析及特殊位置劑量率隨距離變化情形，以利後續相關意外事故作人員劑量評估。</p>
<p>室內乾貯設施</p>	<p>1. 乾貯設施輻射特性受貯存護箱影響： 混凝土設施，內配置金屬護箱和混凝土護箱配比為 60：60，設施北面(金屬護箱貯存處)輻射劑量率大於設施南面(混凝土護箱貯存處)，主因為貯存護箱特性所致，故在進行設施周遭劑量率分析前，建議先行進行護箱表面劑量率分析以利後續輻射特性探討。</p> <p>2. 迷道設計探討 針對設施進行不同迷道設計的探討，結果可用於優化迷道設計，有效降低此一項目的場外輻射貢獻，不同迷道設計的遮蔽效果建議納入整體建物屏蔽設計。</p> <p>3. 設施輻射特性組合討論：</p> <p>(1) 特定建物不同護箱排列方式的探討 (60:60 與 104:60 相比)設施特性可參造不同護箱完整表面輻射特性的資料，此一數據有利於後續設施整體與場外劑量率分布的探討；</p> <p>(2) 不同建物(混凝土建物與金屬建物)內貯存相同護箱排列的情節(60:60)，混</p>

	<p>凝土建物可提供額外輻射屏蔽，鋼構建物僅具天候遮蔽效果，其屏蔽效果不大(以護箱本體輻射屏蔽為主)</p>
--	--

第六章、室內乾貯設施輻射屏蔽分析審查重點研析

參照第二章的輻射屏蔽安全分析方法，以第四章建構的乾貯護箱與設施屏蔽計算模型作分析，討論單一設施貯存不同類型護箱以及異常或意外事件情境之輻射屏蔽案例評估與影響效應研析，羅列出下列室內乾貯設施輻射屏蔽分析審查重點：

一、護箱表面劑量率分析：

1. HI-STAR 100 金屬護箱側邊表面劑量率以加馬為主要貢獻，需特別注意護箱側邊上下兩端(無中子吸收材區域)為屏蔽分析重點處；頂部表面劑量率以中子為主要貢獻，靠近護箱邊緣加馬輻射貢獻會高於中子輻射。
2. HI-STORM 100 混凝土護箱側邊表面劑量率以加馬為主要貢獻，劑量率在護箱進(下)出(上)氣口處會有高點，此兩處為輻射屏蔽的重點區域，頂部表面劑量率兩者相近，但加馬輻射貢獻較大，其特別在空氣通道上方有屏蔽環塊設計，有效降低該處劑量率，此為 HI-STORM 100 護箱特別的屏蔽設計。

二、設施影響效應探討：

1. 室內乾貯設施，考量貯存 60 組金屬護箱(HI-STAR 100)與 60 組混凝土護箱(HI-STORM 100)，發現設施北面(金屬護箱貯存處)輻射劑量率大於設施南面(混凝土護箱貯存處)，此為此案例兩種貯存護箱特性，故在進行設施周遭劑量率分析前，建議先行進行護箱表面劑量率分析以利後續輻射特性探討。
2. 針對標的設施模型進行不同迷道設計的探討，結果可用於優化迷道設計有效降低此一項目的場外輻射貢獻。進出氣迷道設計對於室內乾貯設施的屏蔽設計相當重要，迷道輻射滲流的遷移計算相對困難，且必須考慮不同進出氣通道的特性與限制，不同迷道設計的遮蔽效果建議納入整體

建物屏蔽設計。(5.2.2 節)

3. 針對 2 種類型之護箱以 2 種不同排列型式在混凝土建物與金屬建物內貯存之情節，共完成 4 種組合之設施周遭中子與加馬射線劑量率分析。特定建物不同護箱排列方式的探討(組合 1 與組合 2 相比)可以參考不同護箱完整表面輻射特性的資料，此一數據有利於後續設施整體與場外劑量率分布的探討。
4. 針對混凝土建物與金屬建物內貯存相同護箱排列的情節(組合 1 與組合 3 相比)，混凝土建物如預期可提供額外輻射屏蔽，以本假想案例設施為例，其設施外表面劑量率比鋼構建物低約 2 個數量級，鋼構建物僅具天候遮蔽效果，其屏蔽效果不大(以護箱本體輻射屏蔽為主)。(5.2.3 節)

三、護箱異常或意外事故研析:

1. 異常事故討論情節，探討混凝土護箱發生進氣通道半阻塞事故時，輻射防護非為其考量的要點，護箱散熱功能的喪失應為此情節考量要素。(5.3.1 節)
2. 意外事故討論情節，評估工作人員接受意外事故造成的輻射劑量，建議事先於安全分析報告內進行完整的意外事故情節護箱表面劑量率分析及特殊位置劑量率隨距離變化情形，以利後續相關意外事故工作人員劑量評估。(5.3.2 節)

第七章、結論

因應核電廠的除役流程安排，廠區內的乾式貯存設施勢必要能儘速啟用，未來國內可能會採以室內乾式貯存的型式來進行。考量目前電廠的貯存護箱型式仍未有定案，本計畫負責進行室內乾貯設施建物型式與貯存護箱類型之輻射屏蔽評估研究，建立了兩種不同型式的標的護箱屏蔽模型，並建構可存放 120 組護箱的室內乾貯設施屏蔽模型，各別進行輻射屏蔽分析研究，逐步建立適用於室內乾貯設施平行驗證的技術。本研究內相關標的設施模型，僅作為平行驗證研究所用，所述標的設施的幾何尺寸與材料性質與未來實際規劃可能不同，讀者不應直接引述相關數據與其它設施結果或法規限值進行比較，本研究僅著重於技術能力的建立以及觀察分析結果的特性與趨勢。

本研究假設之標的設施規劃可貯存 120 組護箱(8160 束用過核子燃料)，此龐大的室內乾貯建物，會包含有複雜的幾何模型之外，輻射分析將同時包含了深穿透、輻射滲流與天空散射等困難且大規模的遷移計算。延續本團隊過往的經驗累積，本研究成功應用混合式輻射遷移方法 MAVRIC 程式於標的設施的輻射劑量分析，混合式輻射遷移方法能結合決定論法與蒙地卡羅法的優點，具備在有限時間內評估複雜屏蔽設施的劑量分析能力，以本計畫為例在計畫時程內共執行 42 個案例，此結果已確實展示混合式輻射遷移方法的優勢與潛在應用。

本研究順利完成兩個國際室內乾貯設施(ZZL 和 SZB)相關輻射屏蔽設計與管制要求資訊蒐集(第三章)；以混合式輻射遷移方法應用於標的護箱屏蔽模型建構與驗證與標的設施模型建構(第四章)，進而進行兩種標的護箱表面劑量率特性分析(5.1 節)，且對標的設施周遭劑量率分布探討與設施模型迷道設計優化(5.2 節)，除正常運轉情節外，亦討論後異常與意外事故下護箱劑量率探討，並評估工作人員接受劑量(5.3 節)。最後整合本計畫各項成果與經驗，提供室內乾貯設施輻射屏蔽分析審查重點研析作為國內相關作業參考(第六章)，以精進我國用過核子燃料

室內貯存設施安全管制技術。

參考文獻

- 1 台灣電力股份有限公司，“核能一廠除役計畫環境影響評估報告書，”初稿，106年12月。
- 2 台灣電力股份有限公司，“核一廠用過燃料乾式貯存設施安全分析報告，”97年1月。
- 3 台灣電力股份有限公司，“核二廠用過燃料乾式貯存設施安全分析報告，”101年3月。
- 4 許榮鈞等人，“除役核電廠用過核燃料室內乾式貯存安全管制技術，”期末報告，106年12月。
- 5 許榮鈞等人，“精進用過核燃料室內乾式貯存設施安全審查技術之研究，”期末報告，107年12月。
- 6 行政院原子能委員會放射性物料管理局，“申請設置用過核子燃料乾式貯存設施安全分析報告導則，”108年1月18日，會物字第10800005641號令。
- 7 行政院原子能委員會放射性物料管理局，“用過核子燃料乾式貯存設施安全分析報告審查導則，”108年1月18日，會物字第10800005551號令。
- 8 許榮鈞等人，“108年核電廠除役之室內乾貯安全分析平行驗證研究，”期末報告，108年12月。
- 9 Holtec International, “Final Safety Analysis Report OF HI-STAR 100 Cask System,” Docket No. 71-9261, Rev. 17, 2018
- 10 Holtec International, “Final Safety Analysis Report for the HI-STORM 100 Cask System,” Docket No. 72-1014, Rev. 13, 2016
- 11 C.J. Werner¹, et. al, “Monte Carlo N-Particle® Transport Code System Version 6.2,” LA-UR-17-29981, Los Alamos National Laboratory report , 2017.
- 12 B.T. Rearden, M.A. Jessee, et. al“SCALE Code System,” ORNL/TM-2005/39,

Version 6.2.3, Oak Ridge National Laboratory, 2018.

- 13 https://www.zwilag.ch/en/history-_content---1--1068.html
- 14 Zwilag Zwischenlager Würenlingen AG, “SAFETY LOCKER UP”
- 15 Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate, “Regulatory Oversight Report 2018,” ENSI-AN-10620, July, 2019.
- 16 https://www.zwilag.ch/en/company-_content---1--1023.html
- 17 Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate, “Transport- und Lagerbehälter für die Zwischenlagerung,” ENSI-G05, April, 2008.
- 18 Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen, “GUTACHTEN zum Gesuch der ZWILAG Zwischenlager Würenlingen AG um Erteilung der Bewilligung für Bau und Betrieb des Zentralen Zwischenlagers für radioaktive Abfälle,“ HSK 27/12, December, 1995.
- 19 Zwilag Zwischenlager Würenlingen AG, “INSTALLATIONS AND OPERATIONAL PROCESS.”
- 20 F. Kochy, “Dual Purpose Casks in Dry Storage in Switzerland,” International Workshop on the Development and Application of a Safety Case for Dual Purpose Casks for Spent Nuclear Fuel, May, 2014
- 21 Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate, “Implementation of the Obligations of the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management Sixth National Report of Switzerland in Accordance with Article 32 of the Convention,”
- 22 Zwilag Zwischenlager Würenlingen AG, “Zwilag Zwischenlager Würenlingen AG Geschäftsbericht 2018,“
- 23 Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate, “Aufsichtsbericht 2019,” ENSI-AN-10650, June, 2020
- 24 H. Pan, “Sizewell B Dry Fuel Storage Project,” September, 2019

- 25 <https://www.edfenergy.com/about/financial-information/nuclear-power-notes/faq>
- 26 U.K. Office of Nuclear Regulation, “Framework Document between Department for Work and Pensions and Office of Nuclear Regulation,” October, 2018
- 27 <https://www.gov.uk/government/organisations/department-for-business-energy-and-industrial-strategy/about>
- 28 U.K. Nuclear Decommissioning Authority, “Nuclear Decommissioning Authority Framework Document 2013,” October, 2013.
- 29 U.K. Office of Nuclear Regulation, “Licensing Nuclear Installations,” September, 2019.
- 30 U.K. Ministry of Housing, Communities and Local Government, “The East Suffolk (Local Government Changes) Order 2018,” 2018.
- 31 劉志添, “參加第 34 屆除役與放射性廢棄物管理研習並參訪英國室內乾貯設施,” 公務員出國報告, 107 年 9 月
- 32 R. Parlone, “Operational Experience of the first Dry Fuel Storage Campaign at Sizewell B,” 2018 ISOE European Symposium, June, 2018
- 33 Holtec International, “Final Safety Analysis Report OF HI-STAR 100 Cask System,” Docket No. 72-1008, Rev. 3, 2009
- 34 Y. F. Chen, Y. F. Chiou, S. J. Chang, S. H. Jiang and R. J. Sheu, “Effects of Source and Geometry Modeling on the Shielding Calculations for a Spent Nuclear Fuel Dry Storage Cask” Nuclear Technology VOL.182, p.224-234, 2013.

行政院原子能委員會
放射性物料管理局
委託研究計畫研究報告

109 室內乾貯設施建物型式與貯存護箱類型之審
驗技術與案例研析
子項二：室內乾貯設施建物型式與貯存護箱類
型對熱傳功能之評估研究
期末報告

委託單位：行政院原子能委員會放射性物料管理局
執行單位：國立清華大學
計畫主持人：許榮鈞
子項主持人：曾永信
計畫編號：109FCMA001
報告日期：中華民國 109 年 12 月 16 日

109 室內乾貯設施建物型式與貯存護箱類型之審
驗技術與案例研析

子項二：室內乾貯設施建物型式與貯存護箱類
型對熱傳功能之評估研究

受委託單位：國立清華大學

研究主持人：許榮鈞

子項主持人：曾永信

研究期程：中華民國 109 年 02 月至 109 年 12 月

研究經費：新臺幣 2,100,000 元

放射性物料管理局 委託研究

中華民國 109 年 12 月

(本報告內容純係作者個人之觀點，不應引申為本機關之意見)

摘要

為能進一步探討單一設施裝載有不同類型護箱之熱流特性，本研究透過計算流體力學分析技術，針對內部裝載有不同比例之 HI-STAR 100 金屬護箱與 HI-STORM 100 混凝土護箱之假想室內乾貯設施進行熱流特性探討。該分析模式除與 HOLTEC 公司之安全分析報告比對以確認模式精確度之外，亦著手針對必要之護箱-廠房耦合技術進行建立，以進行護箱間距、廠房類型、護箱比例以及列置條件等參數對熱流特性影響之探討。各項參數所獲之熱流特性，更將進一步進行量化整理為計算兩種護箱在類正常、異常與事故貯存期間之元件溫度計算基礎。其結果顯示單一設施裝載兩種護箱之熱流情境並不會對分析方法與工作造成額外之技術要求或管制行動。

關鍵字：金屬護箱、混凝土護箱、計算流體力學、熱流分析。

ABSTRACT

In order to assist the regulatory body to further understand the thermal behavior as an indoor dry storage facility stored with different kinds cask, the Computational Fluid Dynamics (CFD) method has been employed to investigate the thermal behaviors of a hypothetical facility stored with several ratio of HI-STAR 100 and HI-STORM casks in this study. The NRC approved SARs have been utilized to verified the accuracy of the model of selected casks, the key assumptions such as the internal convection and thermal load are examined in this work. All parameter including cask pitch, facility type, cask ratio and arrangement pattern are also simulated by the established CFD method. The results obtained from the facility model show that the technology of simulation will not be affected under this situation. A further simulation results also show that the temperature of SSCs of HI-STORM and HI-STAR will not significantly change under different off-normal and accident condition. Therefore, no any regulation action need be added as a facility stored with 2 different kind dry storage casks.

Keywords: Metal cask, Concrete cask Indoor dry storage, CFD, Thermal analysis.

目錄

摘要.....	i
ABSTRACT.....	ii
目錄.....	iii
圖目錄.....	v
表目錄.....	ix
第一章、前言與目的.....	1
1.1 研究背景說明.....	1
1.2 計畫標的設施.....	3
1.2.1 標的用過核子燃料.....	3
1.2.2 標的貯存護箱.....	3
1.2.3 廠房設施基礎設計資訊.....	5
第二章、研究方法.....	7
2.1 統御方程式.....	7
2.2 數值模式.....	10
2.2.1 DO 熱輻射模式.....	10
2.2.2 紊流模式.....	10
2.2.3 自然對流模式.....	12
第三章、國際室內乾貯設施熱傳設計與管制要求資訊蒐集研析.....	13
3.1 瑞士 ZZZ 設施資訊蒐集.....	13
3.2 英國 SZB 設施資訊蒐集.....	17
第四章、乾貯地上建物設施與貯存護箱熱傳評估模式建立.....	21
4.1 分析模式建立.....	21
4.1.1 HOLTEC-MPC-68 模式發展.....	22
4.1.2 HI-STAR 護箱模式發展.....	25
4.1.3 HI-STORM 混凝土護箱模式.....	28
4.1.3 廠房模式.....	32
4.2 材料性質.....	37
4.2.1 固體材料.....	37
4.2.2 流體材料.....	40

4.2.3 燃料束均質化性質.....	41
4.3 燃料熱源配置.....	41
4.3.1 驗證用熱源配置.....	41
4.3.2 案例分析用熱源配置.....	43
4.3.3 軸向功率配置.....	45
4.3.4 各式護箱於廠房內貯存時之視因子.....	47
4.4 分析模式驗證.....	49
4.4.1 HI-STAR 100 分析模式驗證.....	49
4.4.2 HI-STORM 100 護箱模式驗證.....	53
第五章、案例分析與結果討論.....	57
5.1 單一設施貯存不同類型護箱之熱傳效應研析.....	59
5.1.1 不同列置狀況對通風路徑之影響.....	63
5.1.2 不同護箱比例對於熱流特性之影響.....	69
5.1.3 不同護箱間距對於熱流特性之影響.....	74
5.1.4 採用鋼構廠房對熱流特性之影響.....	78
5.1.5 考慮迷道與否對通風路徑之影響研析.....	80
5.1.6 各式參數對正常貯存之最大影響.....	82
5.2 單一設施貯存不同類型護箱之異常與意外情境研析.....	86
5.2.1 單一設施貯存不同類型護箱之環溫變化案例研析.....	86
5.2.2 進氣口半阻塞事故.....	90
5.2.3 單一設施貯存不同類型護箱之水災意外情境研析.....	95
5.2.4 單一設施貯存不同類型護箱之火災意外情境研析.....	98
5.2.5 單一設施貯存不同類型護箱之絕熱意外情境研析.....	100
5.3 熱流參數影響之彙整.....	104
第六章、室內乾貯設施熱傳分析審查重點研析.....	106
第七章、結論.....	108
參考文獻.....	109
附錄-程式碼.....	113

圖目錄

圖 1、HI-STAR 100 系統示意圖 [19]	4
圖 2、HOLTEC 網站所示之 HI-STORM 100 系統示意圖	5
圖 3、假想設施之配置圖與關鍵尺寸示意圖	6
圖 4、瑞士 ZZL 之設計外觀	13
圖 5、瑞士 ZZL 近年之護箱貯存資訊	17
圖 6、SZB 設施中以地坑方式進行 HI-STORM 裝載之示意圖	20
圖 7、HI-STAR 系統主要組件示意圖(ML10281079)	21
圖 8、HI-STAR 與 HI-STORM 所採用的 MPC-68 提籃配置(ML10281079)	23
圖 9、MPC-68 提籃與包封容器模型示意圖	24
圖 10、HI-STAR 100 系統護箱護設計圖面 (ML10281079)	25
圖 11、HI-STAR 100 護箱與 MPC-68 組裝後所得之分析模式	26
圖 12、HI-STAR 1/4 護箱模式網格配置	27
圖 13、HI-STORM 1/4 對稱護箱模式	29
圖 14、HI-STORM 1/4 護箱模式網格配置	30
圖 15、HI-STORM 1/4 護箱模式空氣流道與混凝土包封容器之網格配置	31
圖 16、假想設施分析模式之最小護箱單元模組與列置方式示意圖	34
圖 17、1/4 假想設施分析模式示意圖(藍色進口、紅色出口)；左圖：含迷道設計；右圖：不含迷道設計	36
圖 18、HI-STORM 100 安全分析報告之熱源配置保守性檢核	42
圖 19、本研究於模式平行驗證所採用之熱源配置	43
圖 20、本研究於案例分析工作中所採用之熱源配置	44
圖 21、本研究所採用之燃料軸向功率配置圖	46
圖 22、本研究平行驗證所採用之燃料軸向功率配置圖[20]	46

圖 23、本研究計算輻射熱傳視因子之分析模式.....	48
圖 24、HI-STAR 分析模式於長期貯存之溫度分佈	51
圖 25、HI-STAR 分析模式誤差圖	52
圖 26、HI-STORM 分析之溫度分佈	55
圖 27、HI-STORM 分析模式誤差圖	56
圖 28、兩種護箱以 1:1 配比進行交錯列置(列置 1)之溫度分佈.....	60
圖 29、兩種護箱在 1:1 配比搭配列置 1 之廠房溫度分佈	61
圖 30、兩種護箱在 1:1 配比搭配列置 1 之廠房水平切面溫度分佈	62
圖 31、兩種護箱在 1:1 配比搭配列置 1 之廠房縱向切面溫度分佈	63
圖 32、混凝土護箱靠外側(列置 2)之方式進行列置時室內乾貯設施之溫度分佈	65
圖 33、混凝土護箱靠外側(列置 2)之方式進行列置時室內乾貯設施之廠房空氣 溫度.....	66
圖 34、以金屬護箱靠外側(列置 3)之方式進行列置時室內乾貯設施之溫度分佈	67
圖 35、兩種護箱分區列置(列置 4)時室內乾貯設施之溫度分佈.....	68
圖 36、護箱比例改變為 32:88 並密集列置之室內乾貯設施之溫度分佈	70
圖 37、護箱比例改變為 32:88 並密集列置之室內空氣溫度分佈	70
圖 38、護箱比例改變為 32:88 並以棋盤列置之室內乾貯設施溫度分佈	71
圖 39、護箱比例改變為 32:88 並以棋盤列置之室內空氣溫度分佈	71
圖 40、護箱比例改變為 16:104 並密集列置之室內乾貯設施之溫度分佈	72
圖 41、護箱比例改變為 16:104 並密集列置之室內空氣溫度分佈	72
圖 42、護箱比例改變為 16:104 並採棋盤列置之室內乾貯設施之溫度分佈	73
圖 43、護箱比例改變為 16:104 並採棋盤列置之室內空氣溫度分佈	73
圖 44、兩種護箱以 1:1 棋盤式配置，並將護箱節距改為 5.0m 之溫度分佈	75

圖 45、兩種護箱以 1:1 棋盤式配置，並將護箱節距改為 5.0m 之廠房內空氣溫度分佈.....	75
圖 46、兩種護箱以分區列置並將護箱節距改為 5.0m 之溫度分佈	76
圖 47、兩種護箱以分區列置並將護箱節距改為 5.0m 之廠房內空氣溫度分佈	76
圖 48、兩種護箱以 32:88 之棋盤式配置，並將護箱節距改為 5.0m 之溫度分佈	77
圖 49、兩種護箱以棋盤式列置並將護箱節距改為 5.0m 之廠房內空氣溫度分佈	77
圖 50、以鋼構廠房進行貯存之護箱溫度分佈.....	79
圖 51、以鋼構廠房進行貯存之廠房溫度分佈.....	79
圖 52、採用列置 1 且不考慮迷道設計時之護箱溫度分佈.....	81
圖 53、採用列置 1 且不考慮迷道設計時之廠房內流線分佈.....	81
圖 54、HI-STORM 於各式邊界條件中最保守組合之溫度分佈	84
圖 55、HI-STAR 於各式邊界條件中最保守組合之溫度分佈	85
圖 56、單一設施裝載不同護箱之狀況下發生異常高溫之溫度分佈.....	87
圖 57、單一設施裝載不同護箱之狀況下發生極端高溫之溫度分佈.....	87
圖 58、HI-STORM 於溫度異常事故下之溫度分佈	88
圖 59、HI-STAR 於溫度異常事故下之溫度分佈	88
圖 60、發生廠房進口半阻塞事故之全廠護箱溫度分佈.....	91
圖 61、發生廠房進口半阻塞事故下之廠房流場溫度分佈.....	91
圖 62、發生廠房進口半阻塞事故下之廠房流線分佈.....	92
圖 63、HI-STORM 發生進氣口半阻塞事故下之元件溫度分佈	94
圖 64、HI-STAR 於水災事故下之溫分佈	96
圖 65、HI-STORM 於水災事故下之溫分佈	97
圖 66、HI-STAR 於火災事故下溫度分佈	99

圖 67、HI-STORM 於火災事故下溫度分佈	99
圖 68、HI-STAR 於絕熱事故下溫度分佈	102
圖 69、HI-STORM 於絕熱事故下溫度分佈	102
圖 70、HI-STORM 於全阻塞與絕熱事故下之溫度變化趨勢比較	103

表目錄

表 1、廠房模式護箱間距規劃.....	35
表 2、廠房模式之護箱比例與列置規劃.....	36
表 3、中子屏蔽熱傳性質.....	37
表 4、不銹鋼(304 及 304L)熱傳特性.....	37
表 5、碳鋼(A-36、A-533 及 SA-588)熱傳特性.....	37
表 6、鋁合金熱傳特性.....	38
表 7、燃料丸(UO ₂)熱傳特性.....	38
表 8、混凝土熱傳特性.....	38
表 9、修正後鋼構廠房蒙皮之熱傳特性.....	39
表 10、氬氣熱傳性質.....	40
表 11、空氣熱傳性質.....	40
表 12、貯存作業時燃料束均質化等效熱傳性質.....	41
表 13、本研究於不同護箱間距下之護箱視因子.....	48
表 14、HI-STAR 分析模式計算量化結果比對表.....	51
表 15、HI-STORM 分析模式計算量化結果比對表.....	56
表 16、基準案例之參數列表.....	59
表 17、四種配置狀況下所得之混凝土護箱進氣口溫度與金屬護箱表面對進口溫度之平均差(°C).....	68
表 18、縮小護箱間距對熱傳機制指標之影響.....	75
表 19、有無迷道對於廠房流量之影響.....	81
表 20、各式參數對於 HI-STORM 護箱之最大影響.....	84
表 21、各式參數對於 HI-STAR 護箱之最大影響.....	85
表 22、溫度出現異常時對於 HI-STORM 護箱之最大影響.....	89

表 23、溫度出現異常時對於 HI-STAR 護箱之最大影響	89
表 24、廠房進口半阻塞事故對於 HI-STAR 護箱之最大影響	92
表 25、廠房進口半阻塞事故對於 HI-STORM 護箱之最大影響	93
表 26、護箱進口半阻塞事故對於 HI-STORM 護箱之影響	94
表 27、水災事故下 HI-STAR 護箱之元件溫度	96
表 28、水災事故下 HI-STORM 護箱之元件溫度	97
表 29、各式熱流參數對於分析技術管制之影響.....	105

第一章、前言與目的

1.1 研究背景說明

我國核一廠兩座機組雖已先後進入除役過渡階段，而在該廠兩部機組將用過核子燃料移除後，方能進行實際除役作業，是故用過核燃料乾式貯存設施是除役的必要設施。

原能會已在 106 年 6 月 28 日完成審查台電公司「核一廠除役計畫」，並要求台電公司核一廠第二期乾式貯存設施，應採具社會共識之室內貯存型式。由於核一廠預定於 25 年內分四個階段完成除役工作，其中包括停機過渡階段 8 年、除役拆廠階段 12 年、廠址最終狀態偵測階段 3 年，以及廠址復原階段 2 年等作業。

參考台電公司所提出之核能一廠除役計畫環境影響評估報告書[1]及各項公開資訊，台電公司擬於廠址內原氣渦輪機廠房及日用油槽區附近占地約 3 公頃之區域規劃核一廠二期乾式貯存設施，並採取與核一、二廠的一期乾貯設施[2, 3]不同的設計理念，一期乾貯設施採混凝土護箱的戶外貯存設計，二期乾式貯存採室內貯存的概念設計。依據相關規劃資訊，其主要概念設計參數有：

1. 可貯存全廠約 7,400 束沸水式反應器(BWR)用過核子燃料；
2. 考量金屬護箱採用室內貯存概念設計，所需鋼筋混凝土建物牆壁厚度最大要求為 90 公分、建物屋頂厚度最大要求為 45 公分。

上述資訊顯示，當台電將核一廠所有用過核子燃料裝載至選定護箱之中，並置於此一室內設施時，以往乾貯申照作業中所採用的分析技術預期將無法全然適用。此一設計方向的變更可能某種程度導致過往安全分析使用之技術與需審查管制重點的改變，例如：申照者可能必須重新考慮計算資源的限制，可能必須發展新式的分析方法，抑或導入不同的模型簡化觀點；例如：幾何模型的對稱性或材

料均質化的影響，或是採用分段計算等技巧來限縮每次求解所需的資源，甚至透過上述各項技巧之組合，以期在有限時間內完成所有的分析工作並提交高品質的安全分析報告以進行設施申照。另一方面，管制單位也必須預先規劃室內乾貯設施可能帶給未來審查工作的衝擊，深入了解各種分析技術對分析結果所帶來的影響，以精進我國用過核子燃料室內貯存設施安全管理技術。

管制單位放射性物料管理局於民國 106 至 108 年已分別透過「除役核電廠用過核燃料室內乾式貯存安全管理技術」[14]、「精進用過核燃料室內乾式貯存設施安全審查技術之研究」[15]與「核電廠除役之室內乾貯安全分析平行驗證研究」[16]委託計畫之協助，達成「申請設置用過核子燃料乾式貯存設施安全分析報告導則」[17]與「用過核子燃料乾式貯存設施安全分析報告審查導則」[18](以下簡稱審查導則)之發展。延續前述的成果與經驗累積，若能於此計畫中特別考量核一廠第二期乾式貯存設施可能在單一設施中貯存不同形式相之情境將可為管制單位提供有價的技術資訊。

1.2 計畫標的設施

為了達成「109 年室內乾貯設施建物型式與貯存護箱類型之審驗技術與案例例研析」計畫的目標，並探討室內乾貯設施裝載有不同類型護箱時之熱流特性差異，本研究團隊參考台電公司所提出之核能一廠除役計畫環境影響評估報告書[1]及 1 期乾貯護箱少量使用之相關資訊，假定如下所述的標的設施，以求本案的熱流特性研析得以聚焦。本節所述標的設施的幾何尺寸與材料性質與未來實際規劃可能不同，研讀本報告時不宜直接引述本報告所擬定之參數與其分析結果，並逕行將其與法規限值比較。本計畫研析標的的分述如下：

1.2.1 標的用過核子燃料

本研究選定之標的用過核子燃料最大熱負載為 500W/束，而最冷燃料則依配置所需將其定義為 125W/束，詳細資訊則將於研究報告中就其計算基礎與代表性進行說明。

1.2.2 標的貯存護箱

本研究為能深入探討單一設施貯存兩種不同護箱之狀況，並於研析過程中選避免因為護箱熱負載、裝載燃料束之差異造成討論基礎之差異，故於研究中分別參考美國 Holtec 公司之 HI-STAR 100 與 HI-STORM 100 系統，該公司所設計之同系列護箱，可以透過不同的多功能密封鋼筒 (Multi-Purpose Canister, MPC) 並搭配不同的外包封容器達到裝載各類型燃料之需求；於本研究中考量核一廠用過核子燃料係為沸水式燃料束，故將選用 MPC-68 型式之型號，以研析這兩種護箱於裝填 68 束具有總熱源 17 kW 之 BWR 用過核子燃料束時之熱流特性。

研究中選用之 HI-STATR 護箱之設計外型簡圖則如圖 1 所示[19]，其材料組成如表 1，由內而外分別為密封鋼筒 MPC (主要材質為不鏽鋼)、內殼、外殼、加

馬吸收材 (主要材質為碳鋼)與中子吸收材 (Neutron Shield Holtite-A)，其設計特色為外圍加馬屏蔽層可依設計需求，逐層包覆以達設計所需之輻射屏蔽需求。

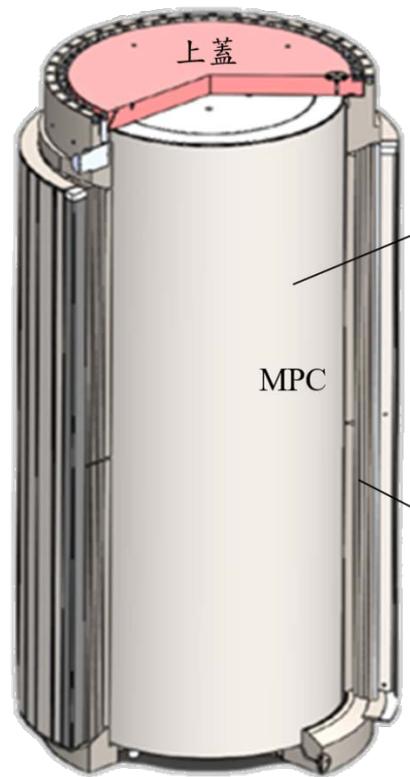


圖 1、HI-STAR 100 系統示意圖 [19]

不同於前述之 HI-STAR 金屬護箱，HI-STORM 護箱(圖 2)係採用混凝土為包封材料，然不同於其它混凝土為求澆製後之混凝土具有較佳的抗拉伸強度而置有鋼筋之作法，該類護箱係採用金屬外殼作為澆製時之模具，且於完成澆製後不予拆除，以提供混凝土護箱應具有的抗拉伸強度。此一設計因內部不具有鋼筋，且該模具於製造之初可確保灌漿作業的滲漏狀況，故可以確保澆製後之混凝土護箱內部不致存在蜂窩現象以致護箱設計之輻射屏蔽能力有所減損。

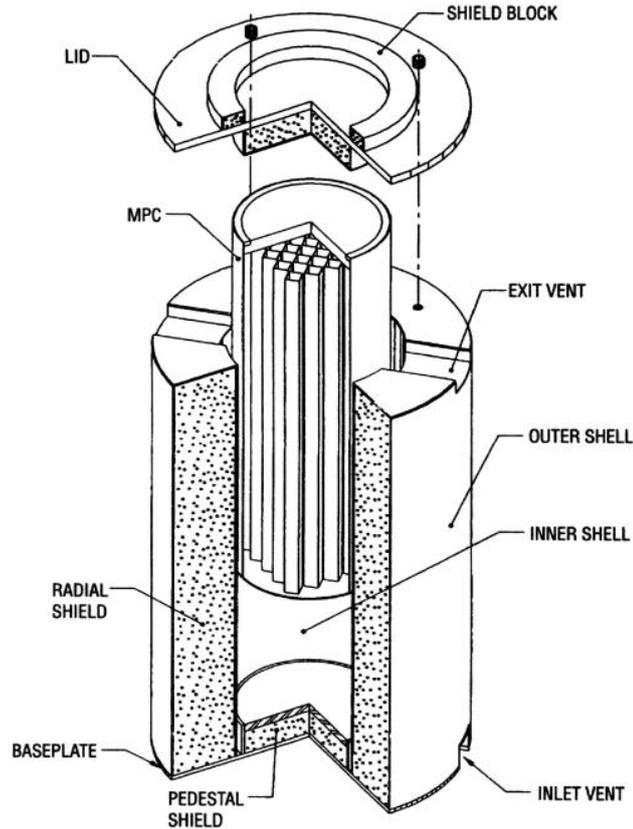


圖 2、HOLTEC 網站所示之 HI-STORM 100 系統示意圖

1.2.3 廠房設施基礎設計資訊

本研究考量護箱容量與配比之需求，規劃為一可容納 120 組護箱之設施。並依據原始護箱設計安全分析報告所載資訊，將每組護箱之間距設置為節距(pitch)為 5.8m 之條件，據以規劃出整體廠房尺寸(如圖 3 所示)為 91 m 長、55 m 寬之單廳式設計，高度則在考量作業所需高度之需求後訂為 14m。

本假想設施之主要設計除參考台電公司核能一廠除役計畫環境影響評估報告書[1] 及相關資訊外，亦將物管局於 108 年所執行之 108FCMA003 計畫所採用之假想設施資訊納入其中，主體除混凝土基座外，其建築設計則同時考慮混凝土與鋼構兩種設計。於混凝土廠房中，側壁厚度為 90 cm，頂部厚度為 45 cm，並具有 45cm 寬之空氣流道，而於鋼筒廠房之設計中則維持整體廠房尺寸一致之前提下，將其厚度改為 1cm 厚之鋼構材料並忽略其結構梁柱之影響與貢獻。

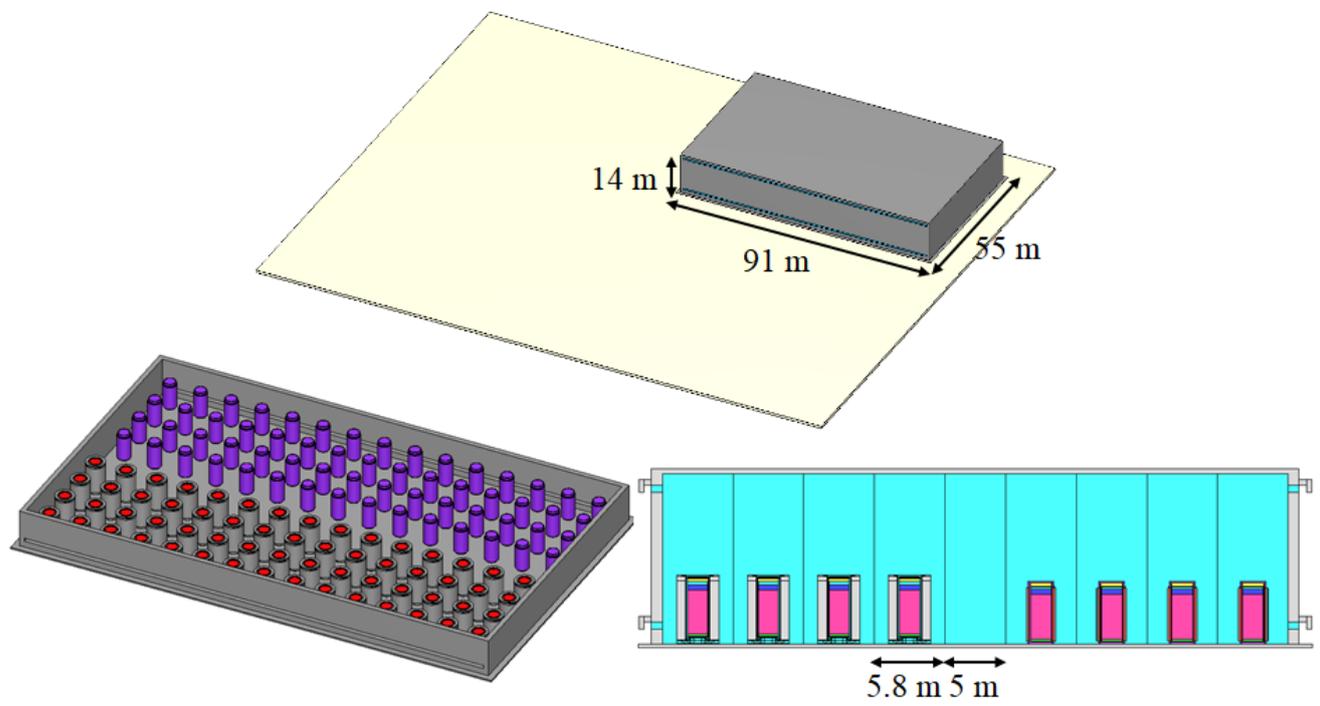


圖 3、假想設施之配置圖與關鍵尺寸示意圖

第二章、研究方法

本研究以有多年使用經驗之計算流體力學(Computational Fluid Dynamics, CFD)分析工具 FLUENT 來進行各項分析模式之發展，並參考前述之廠房與護箱規劃。為能針對所選定之之標的設施進行探討，本研究於分析之初先行描述所採用之研究方法如下：

2.1 統御方程式

考量本研究計畫擬探討之標的設施，不論係選用混凝土廠房抑或鋼構廠房，並搭配不同類型(例如金屬、混凝土或混和裝載)，其熱流散熱機制皆是以被動式散熱(Passive Cooling)機制，藉由衰變熱對空氣所造成的加熱效果，並促使其密度發生改變而產生自然對流以達到熱移除之目的。而本研究所考量之分析計算域(Calculation Domain)之整體熱移除路徑可自內部燃料束至廠房出口概述如下：

1. 由於本研究所選之兩種護箱，皆以貯存 BWR 用過核子燃料束為目標，故無論最後裝載之護箱型式為何，其燃料丸所產生之熱源至 MPC 鋼筒內的熱傳機制可描述為：
 - A. 燃料丸所具有的衰變熱(熱產生率 W/m^3)透過氦氣夾層與燃料護套傳導/輻射以熱通量(W/m^2)之型式至燃料護套內表面；
 - B. 護套內表面之熱通量透過熱傳導機制傳送至護套外表面；
 - C. 護套外表面之熱通量藉由輻射與氦氣之傳導往外圍提籃結構/中子毒素材料甚至外圍燃料傳遞，部分亦藉由內部氦氣之受熱對流向燃料束上方移動；
 - D. 不論是藉由對流/傳導或是輻射機制，所有的熱將由 MPC 之殼體、上蓋、底板以熱傳導機制向外傳遞；

2. 上述 MPC 內的熱源在不同護箱型式之乾貯護箱中，將藉由：

A. HI-STAR 金屬護箱：MPC 外表面所具有之熱通量，並經由高傳導效果的鋼製隔板與低傳導效果的中子吸收材共同以熱傳導機制向外傳遞至 OVERPACK 外表面。最後，藉由自然對流與輻射熱傳，將熱由護箱傳遞至廠房空間內之空氣與廠房表面；

B. HI-STORM 混凝土護箱：MPC 外表面之熱通量透 MPC 表面所具有之熱對流以及傳至空氣流道之流體，部分熱量則透過輻射熱傳自混凝土護箱之內襯傳遞，再透過空氣流道之空氣以熱傳流型式移除，部分則經由內襯透過熱傳導送至 OVERPACK 外表面鋼質護套，再以相同熱傳機制(輻射加對流)送至廠房內；

3. 各式護箱經由表面或空氣流道傳送至廠房空氣或是廠房壁面之熱源，最終亦將透過輻射與對流逸散至廠房空氣中，再藉由受熱後空氣所生之浮力由廠房出氣口排出，並因為所造成的壓力差，促使廠房外之空氣經進氣口流入(如圖 3 所示)。

此外，本研究所擬探討的標的設施，若要滿足主管機關所提之審查導則要求，則需將正常貯存(穩態)、意外、事故(穩態及部分暫態)納入考慮。是故，在綜合上述各項分析需納入之熱流機制後，本研究將以一暫態自然對流之共軛熱傳，並包含熱輻射之熱流議題進行研析，而其統御方程式可以分別描述如下：

質量守恆方程式

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

其中，

ρ 為流體密度；

而 \vec{v} 為速度向量。

動量守恆方程式

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2)$$

其中， p 為靜壓力， $\rho \vec{g}$ 為體積力項；

\vec{F} 為額外力源，於本研究中主要係為自然對流所生之浮力項； $\bar{\tau}$ 為應力張量，其形式可以寫為：

$$\bar{\tau} = \mu \left[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right], \quad (3)$$

其中，

μ 為流體黏滯係數；

I 則為單位張量。

能量守恆方程式

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot [\vec{v}(\rho E + p)] = \nabla \cdot (\kappa_{eff} \nabla T) + S_h \quad (4)$$

其中，

E 為單位質量之總能量；

h 為焓值；

p 為靜壓力；

\vec{v} 為速度向量；

κ_{eff} 則為等效熱導率：

$$k_{eff} = k + k_t \quad (5)$$

其中，

k 為物質本身之分子熱導率；

k_t 則為流場紊流所致之熱導率。

2.2 數值模式

在採用計算流體力學分析程式進行分析時，除了需就各項擬分析之熱流機制進行檢視，並以合適之統御方程式加以描述外，亦需就分析之熱流特性，導入合適之數值模式(Numerical Model)來加以模擬，雖然此一部分係屬於專業技術之描述，而與過往研究工作[4, 14-16]有相當程度之理論一致性；但為求本研究報告之可讀性與完整性，本節中仍針對研究所需考量的各項數值模式，例如輻射熱傳與紊流模式等進一描述。

2.2.1 DO 熱輻射模式

由於納維-斯托克斯(Navier-Stokes)方程式，未能用以描述熱輻射機制對此系統之影響。在此平行驗證工作中採用與前期研究相同之 DO 模式進行熱輻射之模擬，除確保研究技術之一致性與延續性外，亦可減低研究前置作業之非必要校驗工作，以期能將計算資源投入本期研究擬探討之案例之中。此模式主要乃是求解輻射傳輸方程式(Radiation Transport Equation, RTE)來計算經有限體積法離散後的各個網格中，物質受輻射熱傳機制所造成的熱輻射效應，惟因乾貯設施貯存期間氣體係為透明氣體，故輻射熱傳於氣體間的散射效應將不予考慮。針對輻射熱通量在透明流體與非透明固體間的傳播方式；其式可以寫為：

$$\nabla \cdot (I_{\lambda}(\vec{r}, \vec{s})\vec{s}) = 0。 \quad (6)$$

其中， $I(\vec{r}, \vec{s})$ 為 \vec{r} 點沿著 \vec{s} 方向之總輻射強度：

$$I(\vec{r}, \vec{s}) = \sum_k I_{\lambda_k}(\vec{r}, \vec{s})\Delta\lambda_k； \quad (7)$$

λ 則為波長。

2.2.2 紊流模式

經檢視本研究所選定之 HI-STAR(如圖 1 所示)與 HI-STORM 護箱(圖 2)及假想標的設施(如圖 3 所示)可以發現，無論是護箱內空氣流道(大於 5m)或是廠房高度(逾 15m)，皆將使其雷利數(Rayleigh Number, $Ra = \frac{g\beta(T_s - T_{\infty})}{\nu\alpha}$)超過 10^9 。是

故，為求能精確的掌握紊流所造成的熱流效應，本研究參考有分析經驗[15]以及國際間多項驗證報告[19]之比對後，選擇以具有一定適用性與精確度的 k- ω 模式作為紊流模擬之數值模式，k- ω 模式之方程式可以表示為：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \tilde{G}_k - Y_k + S_k \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + \tilde{G}_\omega - Y_\omega + S_\omega \quad (9)$$

其中， k 為紊流動能；

ω 則為消散率；

\tilde{G}_k 為紊流動能梯度；

\tilde{G}_ω 為消散率梯度；

Y_k 與 Y_ω 分別為 k 與 ω 因為紊流所造成的消散量；

S_k 與 S_ω 分別為 k 方程式與 ω 方程式之源項；

Γ_k 與 Γ_ω 則為等效擴散項，且可進一步定義為：

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} ; \quad (10)$$

$$\Gamma_\omega = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} ; \quad (11)$$

上二式中， μ 為流體黏滯係數， σ_k 與 σ_ω 為紊流普蘭特常數(turbulent Prandtl number)而， μ_t 則為：

$$\mu_t = \alpha^* + \frac{\rho k}{\omega} ; \quad (12)$$

其中，紊流阻尼 α^* 可以定義為

$$\alpha^* = \alpha_\infty^* + \left(\frac{\alpha_0^* + Re_t / R_k}{1 + Re_t / R_k} \right) ; \quad (13)$$

而， α_∞^* 為阻尼；

$$Re_t = \frac{\rho k}{\mu \omega} ; \quad (14)$$

$$R_k = 6 ; \quad (15)$$

$$\alpha_0^* = \frac{\beta_i}{3} ; \quad (16)$$

$$\beta_i = 0.072。 \quad (17)$$

2.2.3 自然對流模式

在 FLUENT 中的自然對流主要乃是藉由流體密度差以及重力場的設定而達成動量方程式中之額外力源項： \vec{F} 進行設定，並透過單位體積之密度差($\Delta\rho\vec{g}$)來提供流體額外的驅動力。由於重力場是一常數，因此模式中僅需將流體密度與溫度之變化特性加以聯結，即可完成此模式的設定。

在 FLUENT 中，用以設定流體密度變化的設定方法可以分為三種：

1. 理想氣體法；
2. 為溫度函數之材料性質；以及，
3. 布希尼克(Boussinesq)近似法。

有鑑於國際間的研究成果[11]或是國內相關乾貯安全分析方法論的發展驗證[4]抑或近期的管制分析工作[14, 15]，皆證實採用布希尼克近似法有助於改善整體的收斂性並同時維持良好的模擬精度；故本研究選用此法進行流體性質與體積力之設定，其式中體積膨脹係數 β 可定義為：

$$\beta \approx -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\rho_\infty - \rho}{T_\infty - T} \right); \quad (18)$$

其中， ρ 代表密度， T 代表溫度，而下標 ∞ 則代表參考條件下之量值。

第三章、國際室內乾貯設施熱傳設計與管制要求資訊蒐集

研析

3.1 瑞士 ZZL 設施資訊蒐集

ZZL 係為位於瑞士亞爾高州維倫林根之一處集中式貯存設施(圖 4)，經檢視公開可取得之資訊後得知其貯存廳設計尺寸為：長 68 公尺、寬 41 公尺、高 20 公尺，容量為 200 個護箱。針對 ZZL 進行補充資訊蒐集後所得的 INSTALLATIONS AND OPERATIONAL PROCESS 文件則顯示該設計係以自然對流之方式配合空氣排放監控之方式進行移熱，並未採用主動通風系統之設計。其設計目的係用以裝載瑞士境內各類用過核子燃料與高放射性廢棄物。整體設施係包括作為辦公室之廠區(#1)，以及分別用以貯存低放(#2)、中放(#3)廢棄物之空間與用以處理相關廢棄物所需之熱室(#4)接收站(#5)、電漿處理廠(#7)輔助廠房(#8)以及利用護箱進行高放廢棄物貯存之廠房(#6)。



圖 4、瑞士 ZZL 之設計外觀

該設施係依據該國主管機關所發佈之 EN SI-G04[33]與 G05[34]等導則要求進行設計。其中 G04[33]係瑞士為求就 EN SI 已進行監管之區域所產生的或移轉到此監管區域之放射性廢棄物以及用過核子燃料進行設施設計與操作之導則，而 G05 則針對運輸與傳送之要求進行規範。經檢視上述文件後，得知該文件係以原則性規範之方式，將各項用過核子燃料裝載之護與乾貯設施之要求詳列其中。各項要求可進一步詳列如下：

1. 建築物之設計需考慮地震與飛機撞擊所導致之影響，並確保該廠具有貯存標的物料所需之技術與設備，避免貯存物料受到天候影響；
2. 該建物亦應需有充足的設計以避免人員與環境受到貯存標的物料之影響；
3. 設施於設計之初需考慮設施的除役與除污；
4. 針對具裂變特性之物料用過核子燃料則需確保該設施於正常或事故等狀況下皆需維持於次臨界以下，並需提出合適的計算結果以作為申照之佐證；
5. 設施的獨立性，位於既有核設施內的貯存設施，若不會對安全相關功能造成不利影響，則可以共享該設施的基礎設施；而非位於既有核設施內之貯存廠址，則需證明其獨立性。
6. 針對運輸與裝載兩用 (T/L)護箱，需確保該設施因事故而升溫至最高溫度 120°C 之前有充足的應變時間，以確保護箱不至過熱；
7. 針對建物、護箱等應參照 EN SI-05，充份確保其溫度不致超過以下條件
 - A. 樓板與護箱接觸溫度不得超過 60°C；
 - B. 混凝土建物最高溫度不得超過 100°C 燃料最高溫度不得超過 450°C；
 - C. 金屬護箱表面溫度不得超過 120°C；
 - D. 進氣口溫度應以 32°C 進行考量。
8. 除此之外，針對設施之兩用護箱輻射防護管制則有以下幾項要求：

- A · 距離護箱 2 公尺劑量率不超過 0.1 mSv/h；
- B · 護箱表面劑量率不超過 10 mSv/h；
- C · 護箱表面平均劑量率不超過 0.5 mSv/h；

9 · 對於其它系統或是設備之要求可以歸納入下：

- A · 針對搬運與吊掛設備則與德國相同，係依據 KTA3902 之規範進行設計；
- B · 針對廢棄物與用過核子燃料之輻射偵測則需以 ENSI-G13 為基準進行設置，並需依特殊工作提供必要之輻射偵測設備；相關劑量記錄亦需留存備查。
- C · 通風設備必須有合適的過濾系統以確保外釋劑量符合排放限值的要求；
- D · 通風系統必須具有適當的設計，以避免從廢棄物中釋放出的分裂氣體大量累積；任何產生的氣體必須通過通風系統監測、處理後方可排出；
- E · 建物設計需考慮兩用護箱用過核子燃料/或高放廢棄物的衰變熱量，存儲建築物必須具有進出氣口，以確保建築物能被動地散熱；
- F · 針對護箱本身之結構設計要求，原則上仍參採 ASME Code Sec.-III；
- G · 針對密封功能之要求氬氣洩漏率應低於 10^{-8} Pa m³/s 且洩漏率與總體護箱內之體積比應低於 $2 \cdot 10^{-6}$ (Pa m³/s)/m³。

10 · 由於該導則係包含電廠溼式貯存之要求，其部分溼式貯存要求或可作為再取出單元之管制要求考：

- A · 封閉式建築物內應設有濕式存貯設施，其設計須能夠承受飛機撞擊之破壞，或者能證明其有足夠的保護措施；

- B. 必須確保有考慮到對燃料、燃料格架和水池內部檢查和維護工作的可行性。此外，還應考慮到所需技術設備的安裝是否可行。
- C. 儲水池必須配備合適的洩漏監測系統；
- D. 須提供合適的過濾系統，防止池水釋出未被許可的污染物到環境中。
- E. 池水水質之維持、處理和監測系統納入其中，以確保池水品質能符合清潔系統、冷卻系統、貯存池及其內部構件、目的貯存物料之長期完整性，並盡可能地減少貯存物的裂變、活化以及腐蝕。此外，必須確保池水保持良好的能見度，以防止水中微生物的形成、生長和繁殖。
- F. 核子燃料存放架必須由耐腐蝕材料製成，並且必須確保其在貯存池中的安排設置始終能符合(臨界)安全限制。
- G. 核子燃料存放架的設計必須能靠池水的自然對流來保證持續地散熱，並防止池水的局部沸騰。
- H. 核子燃料格架的設計也應確保核子燃料的完整性，且不致在貯存期間造成燃料的損壞或無法取出之狀況，設計時亦需同時考慮核子燃料棒或燃料匣形變的可能性。

該設施自營運已來 [35]內部貯存之護箱形式包括有 TN24、TN97、TN52 與 TN81 等，亦有少量 CASTOR，而依據最新資訊(2018 年)顯示， ENSI 所公開的年度檢查報告中[36]，目前該設施共計裝載有 11 個 CASTOR 和 12 個 TN 護箱裝載 632 個燃料再處理產生的玻璃固化物；41 個 TN 護箱裝載 2936 組用過燃料；1 個 CASTOR 裝載 PSI 研究用反應器的燃料以及 2003 存放至今的 6 個裝載 Lucens 實驗反應爐的除役廢棄物容器，整體空間使用率大約為 32%(圖 5)。

Anzahl Behälter im Lager für Brennelemente und hochaktive Abfälle (Füllgrad: 32%)

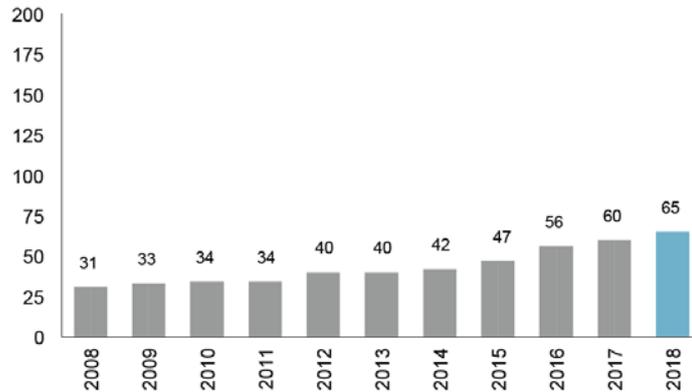


圖 5、瑞士 ZZL 近年之護箱貯存資訊

3.2 英國 SZB 設施資訊蒐集

由於英國核能安全主管機關 ONR 對相關管制文件管制之作為係為定時更新並移除舊有資料之方式進行有限度之公開，因此目前網路上可建議修正為尋獲之 SZB 文件數量較少。為能克服此一困難，本研究團隊於 5 月 11 日即以電郵方式致函 ONR 請求提供相關參考資訊，並於 5 月 14 日接獲該單位回覆，依據英國於 2000 年公佈之資訊公開法(FOIA, Freedom of Information Act)ONR 有義務就本團隊之提問進行回應；而 ONR 亦於六月初提供本次諮詢請求之管制文件連結；其後，本團隊亦於 10 月中再次針對該設施廠房中未規劃再取出之原因進行詢問，惟受限於 ONR 所分享之資訊完整性，各項 SZB 管制資訊謹匯整如下。

依據所蒐集之資料，英國放射性廢棄物管理局於 2011 年發佈的用綜合評估報告[37]顯示，SWZ 於初期概念設計之時即提出此一設施之主要構想，包含其設計目的係用以裝載該電廠已產生之 1000 束用過核子燃料，以及 1300 束電廠運轉至 40 年所可能產生的額外燃料，甚至是延役 20 年共計 3500 束用過核子燃料，並規劃以乾貯護箱進行裝載。

基於此初步設計構想，ONR 亦於 2014 年依 Sizewell B 營運廠商 EDF 能源公司所提送之乾式貯存建築計劃評估報告(Project Assessment Reports, PARs)進行審查後，許可其興建 Sizewell B(以下簡稱 SZB)核電廠內乾式貯存設施，並於 2016 年 8 月正式啟用 SZB 乾式貯存設施，之其在 2017 年完成首個護箱之裝載。該設施規劃貯存容量為 143 組 HT-STORM 100 混凝土護箱，並由護箱滿足法規必要之輻射屏蔽與移熱能力。由於其廠房僅提供氣候遮蔽之功能，故其廠房頂部與側邊係為鋼構設計，整體廠房由電鍍或烤漆之無隔熱材鋼板包覆，並於廠房壁面之上下緣規劃有成列、無迷道之通風口以供空氣流通。值得注意的是，由於混凝土護箱係將熱源透過頂部之出氣口加以排釋，故預期廠房頂部之溫度將明顯提高至與出氣口溫度相當，甚至可以預期在不考慮頂部日照隔離之條件下，兩者加成效應將使廠房頂部溫度更勝出氣口溫度。目前所蒐集得之文件顯示[38]，在電廠工作環境溫度為 26°C 之條件下，建物頂部溫度於滿載時將達 70°C，而廠房內地表溫度將為 30-35°C 左右。

而依據國際原子能總署對於核物料之管制要求，核物料於總署封存後，需有對應之設施與關鍵查核點(Key measurement point, KMP)之構成與必要之保防作業方可施行再取出作業，故在檢視 SZB 廠房內之列置與廠房設計後可以確認該乾貯設施並無再取出單元；透過郵電方式向 ONR 取得證實，其政策與傳播局(Policy and Communications Directorate)回覆，確認 SZB 確實可以利用電廠燃料池作為再取出作業之場所，但因相關管制僅在 SZB 出現實質需求並提出評估結果後才會開始執行，目前尚無進一步可供參考之技術/管制文件。

除此之外，針對目前所蒐集的資訊可以發現(圖 6)，SZB 因為廠房無任何結構功能以支撐吊車進行裝載與搬運作業，故整體之護箱裝載作業係以龍門吊車進行操作，並考慮龍門吊車之限高之故整體作業需仰賴地坑來協助。其作業流程在綜合設備可用性與運轉規劃後可以推測如下：

1. 利用 HI-TRAC 傳送護箱完成裝載前置作業(含乾燥至密封等)；

2. 將 HI-TRAC 以運送設備傳送至貯存廠房；
3. 利用龍門吊車將 HI-STORM 護箱吊起，並挪移至地坑內，完成相關準備作業；
4. 將 HI-TRAC 移至 HI-STORM 護箱上方，並將其固定；
5. 利用龍門吊車將 MPC-68 拉升以利下方屏蔽門操作；
6. 將屏蔽門拉開後利用吊車將 MPC-68 下降至 HI-STORM 中；
7. 移除 HI-TRAC 並完成上蓋吊掛；
8. 利用龍門吊車拉升整個 HI-STORM 護箱並挪移至廠房兩側進行貯存。

基於此一作業流程，可以得知該操作對於輻射屏蔽將有正面效益；預期作業期間之最大輻射強度將落於護箱空氣通道之向上輻射。反之，由於護箱於作業期間係置於地坑中，因此亦可預期此時之護箱冷卻能力將較正常貯存為差。故未來國內若出現此類之裝載作業時，主管機關或可以進氣口全阻塞案例進行作業時間管制，或要求申照業者提具合理之安全分析結果(含平面人員劑量評估與熱傳散熱能力)，以證實該狀態下之安全性與容許時限。

此外，透過近年運轉/年度視察報告等的檢視，除了例行的應符合事項與核能安全之查驗外，並未專章提出 SZB 乾貯廠之管制建議，僅就整體 SZB(含機組與所有設施)應儘速就護箱、管路與結構件的腐蝕提出完整的管理規劃[39]；而此要求亦與審查導則中詳列應針對氣候、污染物與腐蝕機制進行評估之要求一致。

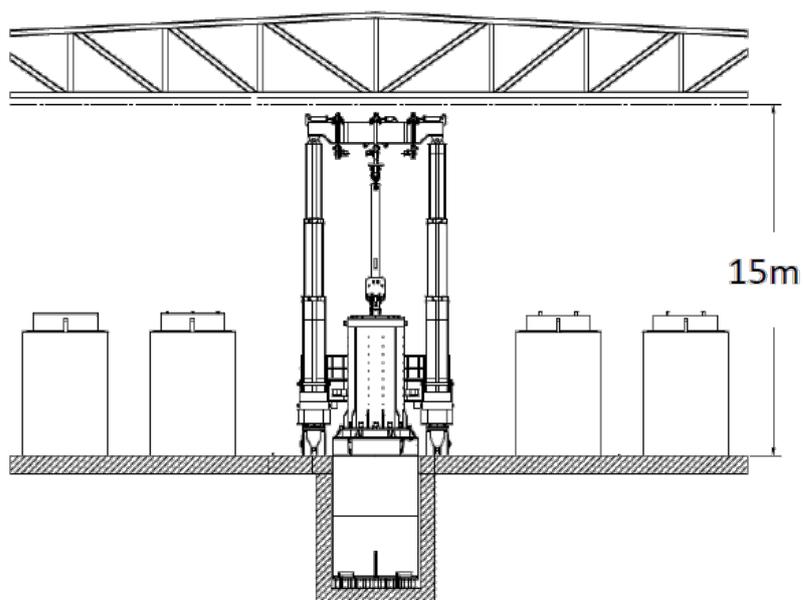
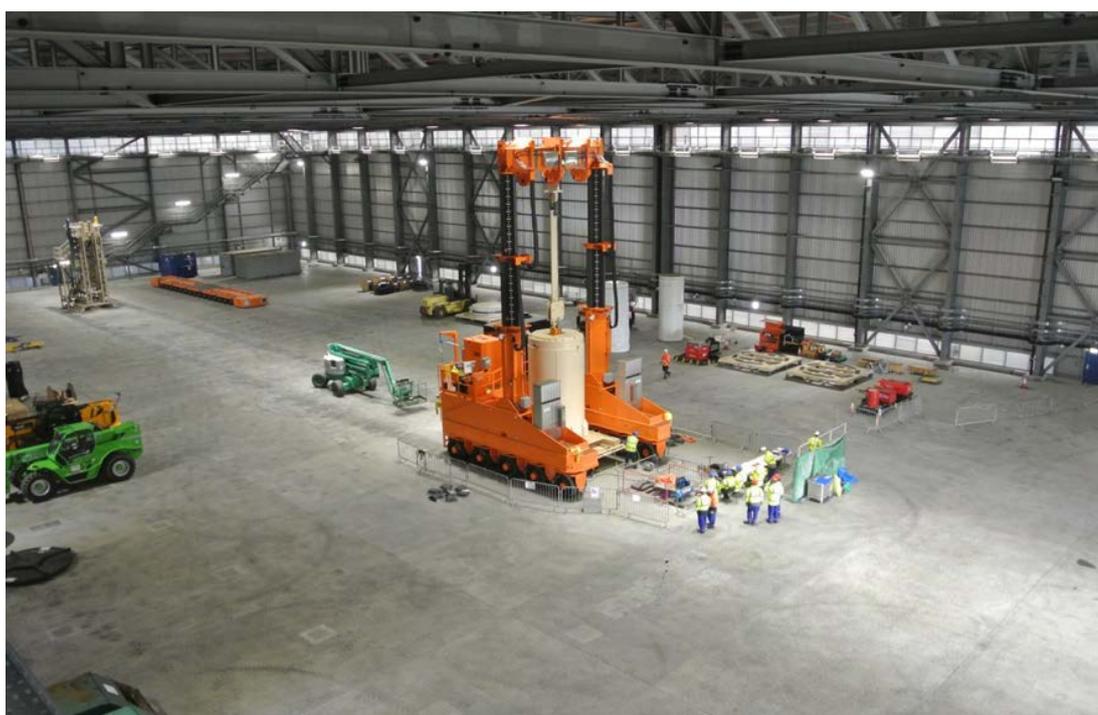


圖 6、SZB 設施中以地坑方式進行 HI-STORM 裝載之示意圖

第四章、乾貯地上建物設施與貯存護箱熱傳評估模式建立

4.1 分析模式建立

經檢核 HOLTEC 廠家公開之安全分析報告，可以得知近期該公司同系列的護箱不論是納入本研究考慮範疇的 HI-STORM、HI-STAR，抑或是未納入考量的 HI-STORM (U)系統，其整體架構大致可區分為 MPC 護箱(含提籃)以及 OVERPACK 兩個部件(如圖 7 所示)。且在本研究擬探討單一設施貯存不同護箱的假設情境，該類系統皆可選用設計供裝載 BWR 燃料之 MPC-68 進行探討。

也因為各式護箱間所選用之包封容器皆為同型之 MPC-68，是故若先行就該包封容器進行模式建立，則預期將有助於使各式護箱間的內部組件(含燃料、提籃與 MPC)皆具有一致的假設條件、幾何模型與網格分佈，進而避免各類護箱間因為重複建置 MPC 模型所造成的些微誤差。是故本研究以下將逐一就 MPC-68 包封容器與外包封容器，如 HI-STORM 與 HI-STAR 分別進行模式建立與組合，以利後續驗證與研析。

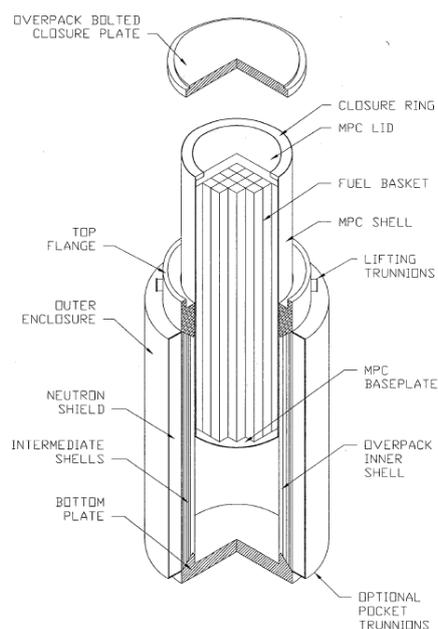


圖 7、HI-STAR 系統主要組件示意圖(ML10281079)

4.1.1 HOLTEC-MPC-68 模式發展

為能令後續的建模作業得以順利並避免不必要之差異，本研究先行就兩種護箱內部裝載之 MPC-68 進行模式建立。而各項 MPC-68 與內部提籃之主要假設與簡化可以規劃如下：

1. 採用 1/4 對稱模式；
2. 提籃與中子毒物分別於幾何模型中加以描繪，惟蒙皮因厚度較薄，故與中子毒物層假設合為一體並計算其等效熱傳係數；
3. 提籃底部與 MPC 密封容器無接觸；
4. 忽略 BWR 燃料底部之噴嘴等結構件；
5. 忽略密封容器內部用以固定提籃之提籃支持件(Basket Supports)
6. 所有組件間之接觸熱阻以一維薄殼熱傳模式進行設定其間隙性質則依據所處空間之氣體進行設定；
7. 有鑑於對稱面之提籃與中子毒物係為共用(如圖 8)之故，於此對稱模型中取其厚度的 1/2 進行模型設置；
8. 燃料束以均質化模式進行設置；

而基於以上假設與簡化所得之 MPC-68 幾何形狀，藉由 CFD 分析軟體之前處理作業後，即可獲得如圖 9 所示之分析模式。由其圖形可見提籃與燃料與密封容器底部並無接觸，且以紅色呈現之中子毒物則貼附於提籃內表面，並與有效發熱段位置一致。

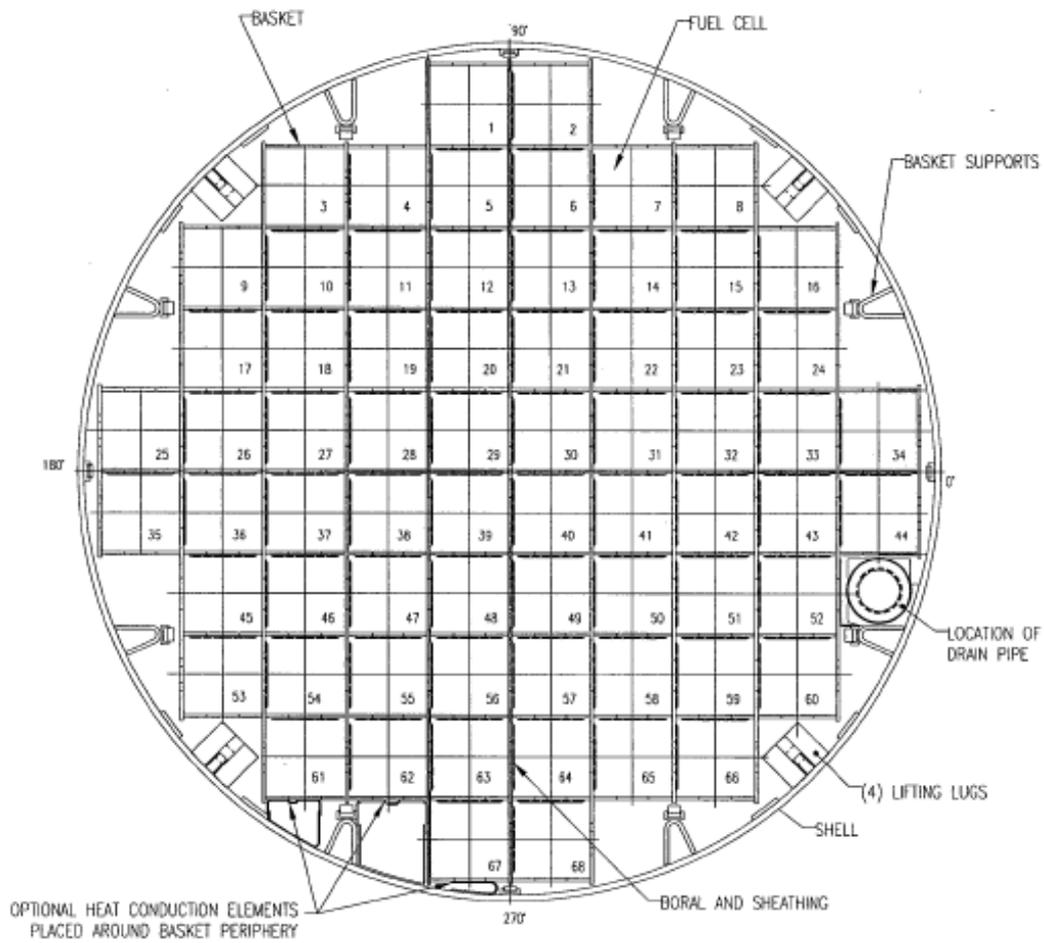


圖 8、HI-STAR 與 HI-STORM 所採用的 MPC-68 提籃配置(ML10281079)

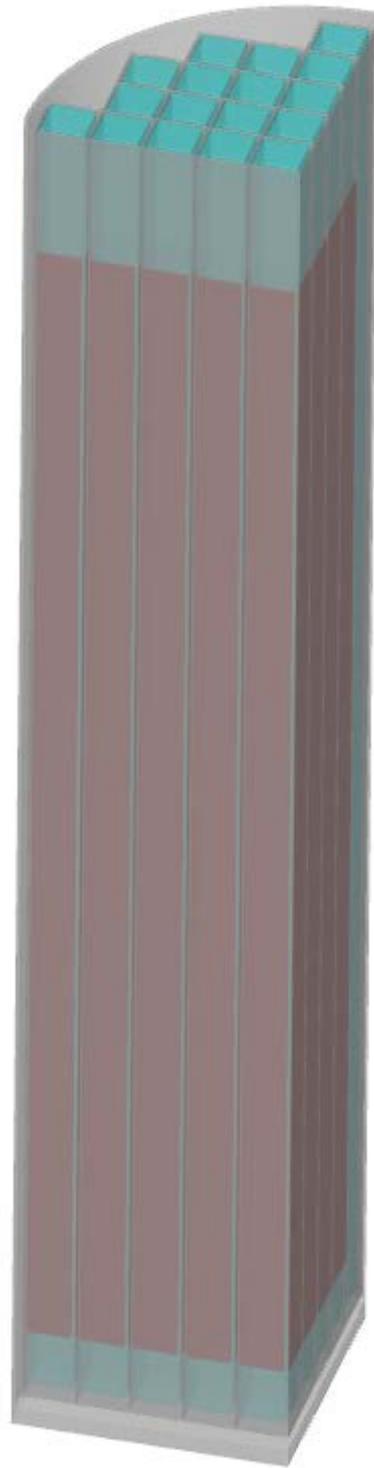


圖 9、MPC-68 提籃與包封容器模型示意圖

4.1.2 HI-STAR 護箱模式發展

在完成 MPC-68 包封容器的分析模式建立後，本研究即可就擬探討之護箱外包封形式進行模式建立，其中屬於金屬護箱之 HI-STAR 100 護箱，其分析模式建立之各式假設與簡化可以概略描述如下：

1. 依循 MPC-68 模式使用之 1/4 對稱模式，HI-STAR 護箱模式亦將採 1/4 對稱；
2. 針對護箱之內外層殼體中具有屬多層式結構，以達到可調整之加馬屏蔽設計需求 (如圖 10 所示)，本研究利用均質化模式納入屏蔽層中；於分析模型中不再對其分層，並將接觸熱阻納入其與內外層交界處之一維薄殼熱傳設定中。
3. 外層中子吸收材與鑄式金屬片之模建，於建立時考量其固定方式為焊接，故忽略金屬鑄片於製造時之折角圓弧，且因該處聚合物之中子吸收材係以填充方式組裝，亦不考慮其固化後與鑄片接合處之接觸熱。

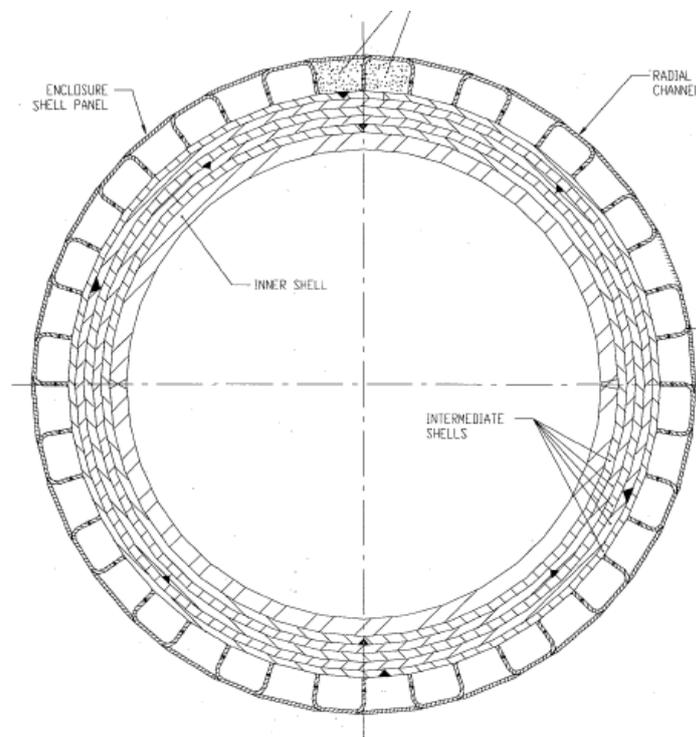


圖 10、HI-STAR 100 系統護箱護設計圖面 (ML10281079)

依據上述之各項簡化與假設，本研究即可獲得與前節所獲之 MPC-68 相容之 HI-STAR 100 護箱模式，並將兩者進行組合以獲得如圖 11 所示之完整模式；其中加馬吸收材以黃色呈現，中子吸收材以深紫色代表、OVERPACK 以淡紫色標示、護箱上蓋與燃料提籃則以灰色呈現；而此一模型所具有之網格則如圖 12 所示。

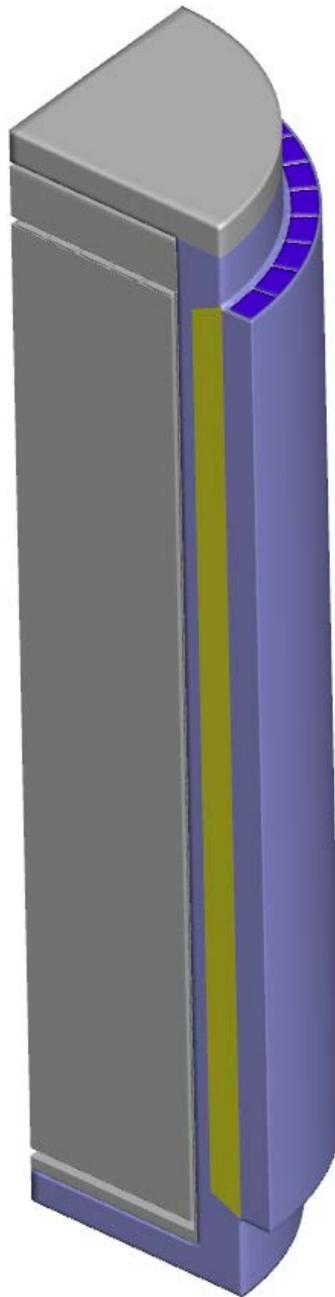


圖 11、HI-STAR 100 護箱與 MPC-68 組裝後所得之分析模式

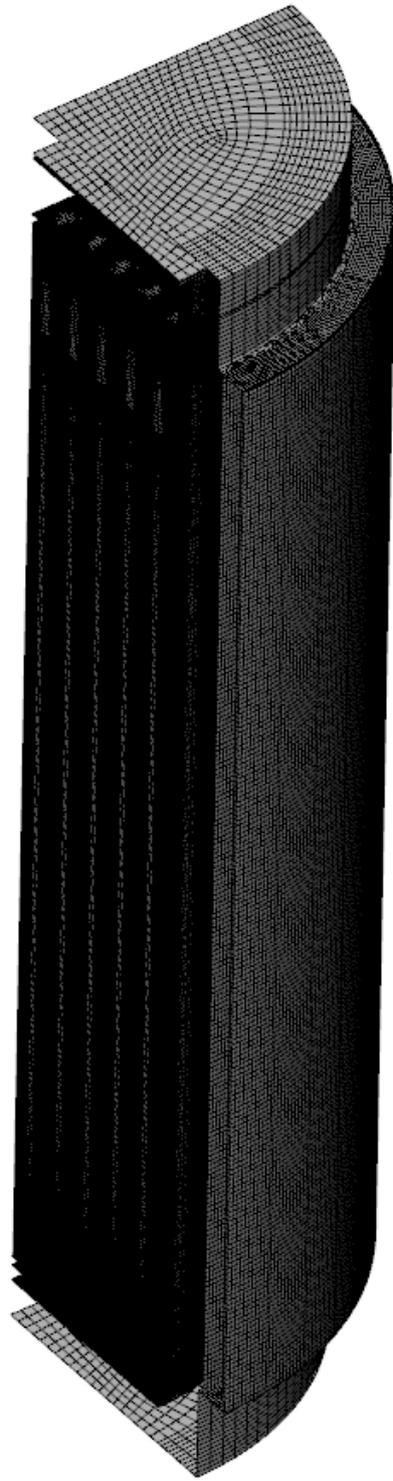


圖 12、HI-STAR 1/4 護箱模式網格配置

4.1.3 HI-STORM 混凝土護箱模式

藉由 4.1.3 節所用之技巧，本研究亦使用同一 MPC-68 包封容器的分析模式進行 HI-STORM 100 護箱之模式建立，其分析模式之各式假設與簡化可以概略描述如下：

1. 本護箱之空氣流體為主要自然對流之路徑，故於模擬中需將該處通道以流體區進行設置；
2. 考慮對稱邊界，故使用 1/4 對稱模式；
3. MPC-68 底部與 HI-STORM 之底座觸接觸熱阻不計，算求得較保守之混凝土溫度；
4. 忽略空氣流道與混凝土結構之極薄金屬殼體，以減少其熱傳效益，惟該處表面之輻射熱傳特性，仍依實際元件表面狀況為之；
5. 由於 HI-STORM 係以金屬為混凝土澆製之殼體，且於完成澆製後不予拆除，故其內部並無鋼筋等加強韌性之結構，僅於內外澆製殼體之部分增設 4 組薄板式加勁板，以避免混凝土澆製時的重量造成變形，而考量該結構有助於增加內部熱源向外之徑向熱傳，故於分析中仍將其納入模式中。

依據上述之各項簡化與假設，本研究採用對稱邊界之方式，將提籃由中心對稱面加以分割成為 1/4 對稱模型。所得幾何形狀模型則如圖 13 中所示；整體分析模式則如圖 11 示，其中混凝土以灰色呈現，燃料束以橘色代表、各處與空氣接觸之熱對流表面則以藍色表示。

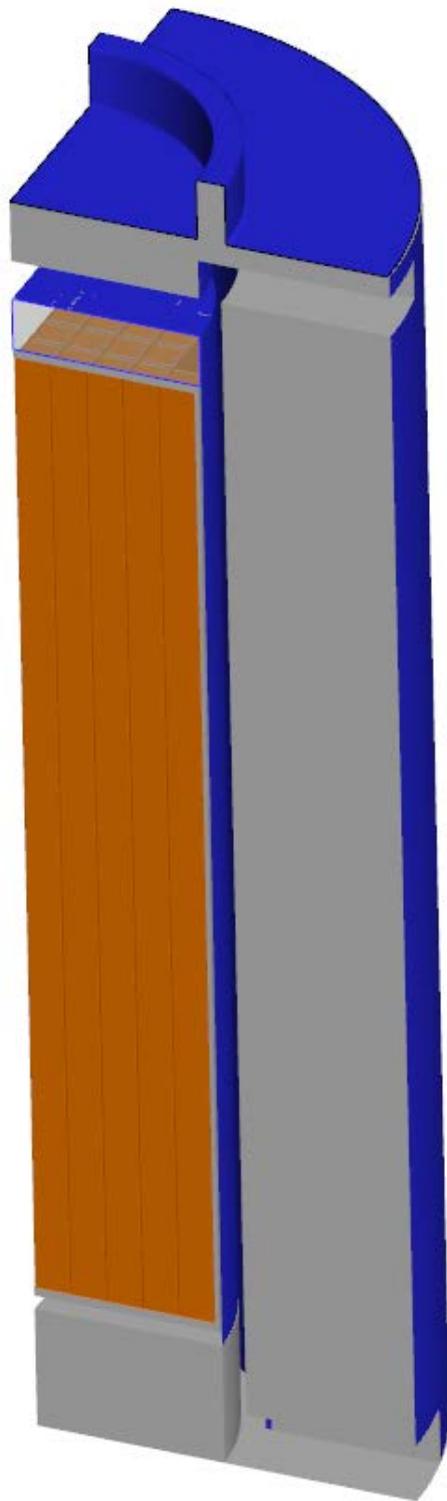


圖 13、HI-STORM 1/4 對稱護箱模式

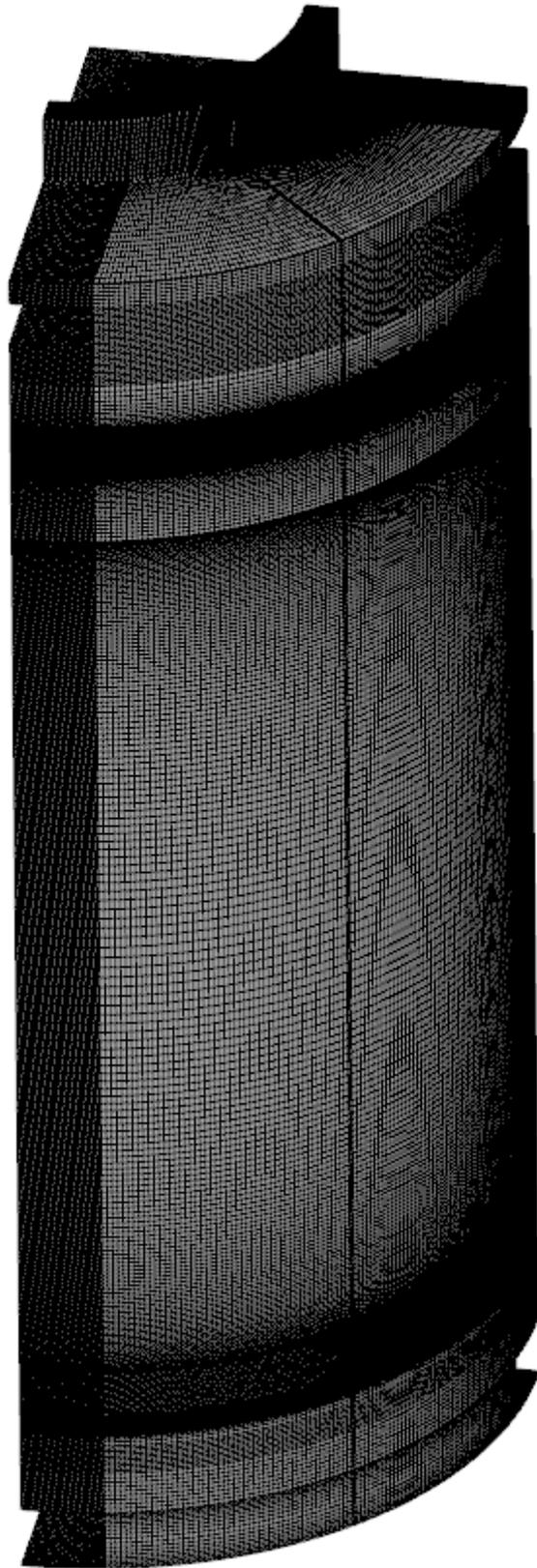


圖 14、HI-STORM 1/4 護箱模式網格配置

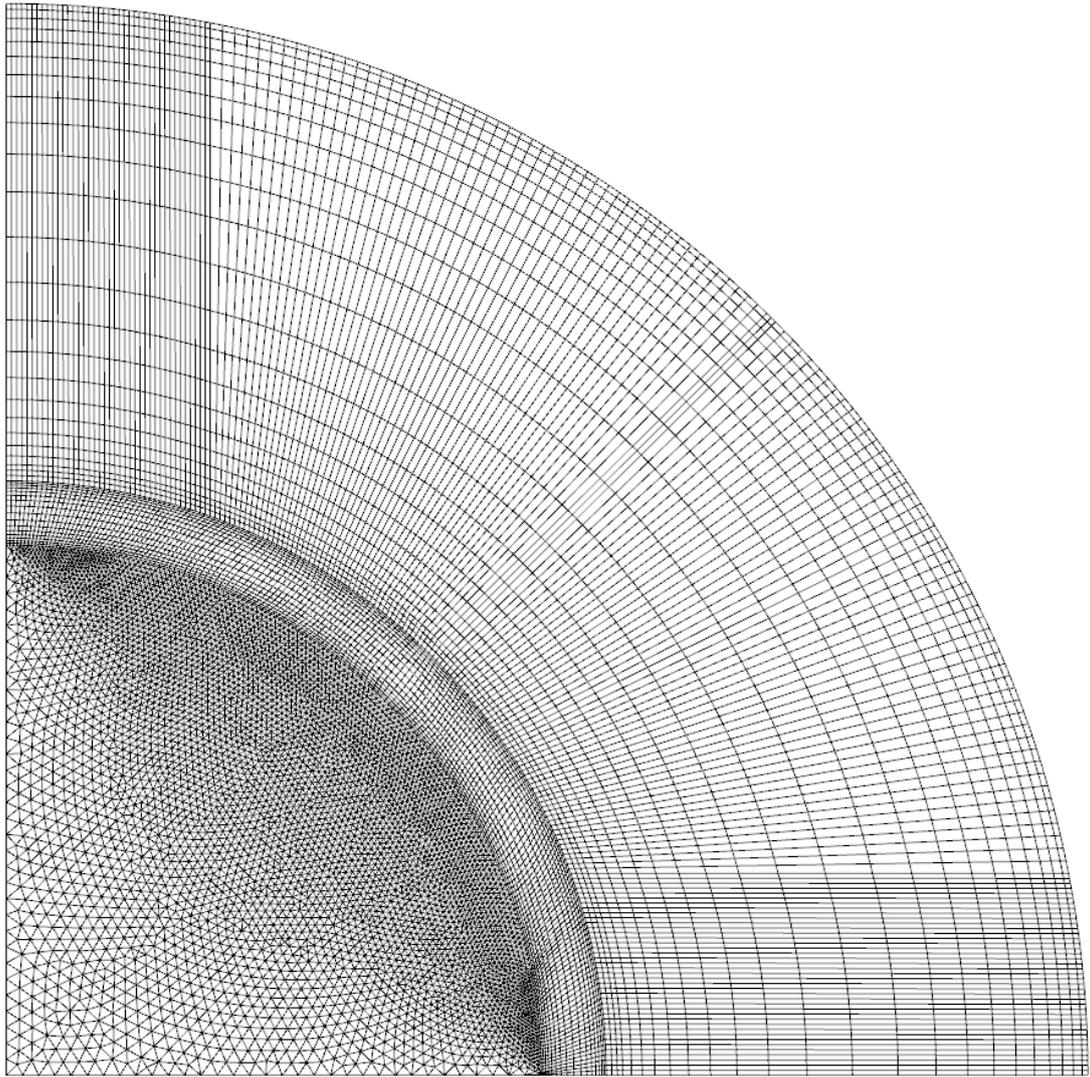


圖 15、HI-STORM 1/4 護箱模式空氣流道與混凝土包封容器之網格配置

4.1.3 廠房模式

依本計畫所擬定之廠房分析參數，如廠房形式、護箱間距、護箱列置狀況及比例變化等參數，本室內乾貯設施廠房各項模式發展所導入之假設可臚列如下：

1. 將每一護箱例依配置間距(pitch)設置為如表 1 所示之單元模組，內置乙個金屬或混凝土護箱，各單元模組可以視配置需求進行 HI-STORM 100 與 HI-STAR 100 護箱之複製與置換；此一間距調整之基礎係以保留合適作業間隙為原則，並將容許調整範圍分割為三組間距而成；因此在評估可能巡檢所需之寬度(一個人之肩寬)後，換算並略為調整而求得護箱間距為 5.8、5.0 與 4.2m。
2. 基本廠房尺寸(H:L:W:)依據計畫書所載護箱間距 5.8m 為基準進行列置，在縮小間距之案例中，維持相同基本廠房尺寸以作為比對之基礎；
3. 混凝土廠房不考慮其澆製時之內部配筋及其對熱傳之增強效益；
4. 各護箱與廠房基座之接觸面，忽略其接觸熱阻以求得較高基座溫度；惟為確保分析結果保守之故，不考慮基座之厚度以忽略其熱傳導散熱能力；
5. 計算所得之護箱表面最保守熱傳對流係數、廠房平均溫度直接轉化為邊界條件，並作為前述護箱模式分析之依據；
6. 各護箱之表面視因子依頂部與側邊視為獨立邊界，以利視因子計算與設定；所得結果將匯出作為護箱子模型之計算邊界條件；
7. 透過 FLUENT 前處理工具之特性，於每個單元模組間先行產生固定且一致之面網格(如圖 16)後再行建立該單元模型內部之體積網格；如此即可在複製移動其護箱列置後藉由相對簡單之操作流程進行模式調整。

依據以上之假設與簡化，並配合表 1 所示之三種護箱間距之配置，即則可獲得各類參數下之廠房設計參數組合(表 2)：3 種間距×3 護箱比例×4 種排列規劃=36 種模式，若再配合廠房類別則上述數量更將倍增；其分析總數預期已大幅

超過本年度計算能力。故本研究於後續分析工作中將以熱流學理就案例結果進行解析；並就無需深入探討之案例進行精要結論，以期將有限的分析資源投入值得探討之案例中，藉以探討其熱流特性。

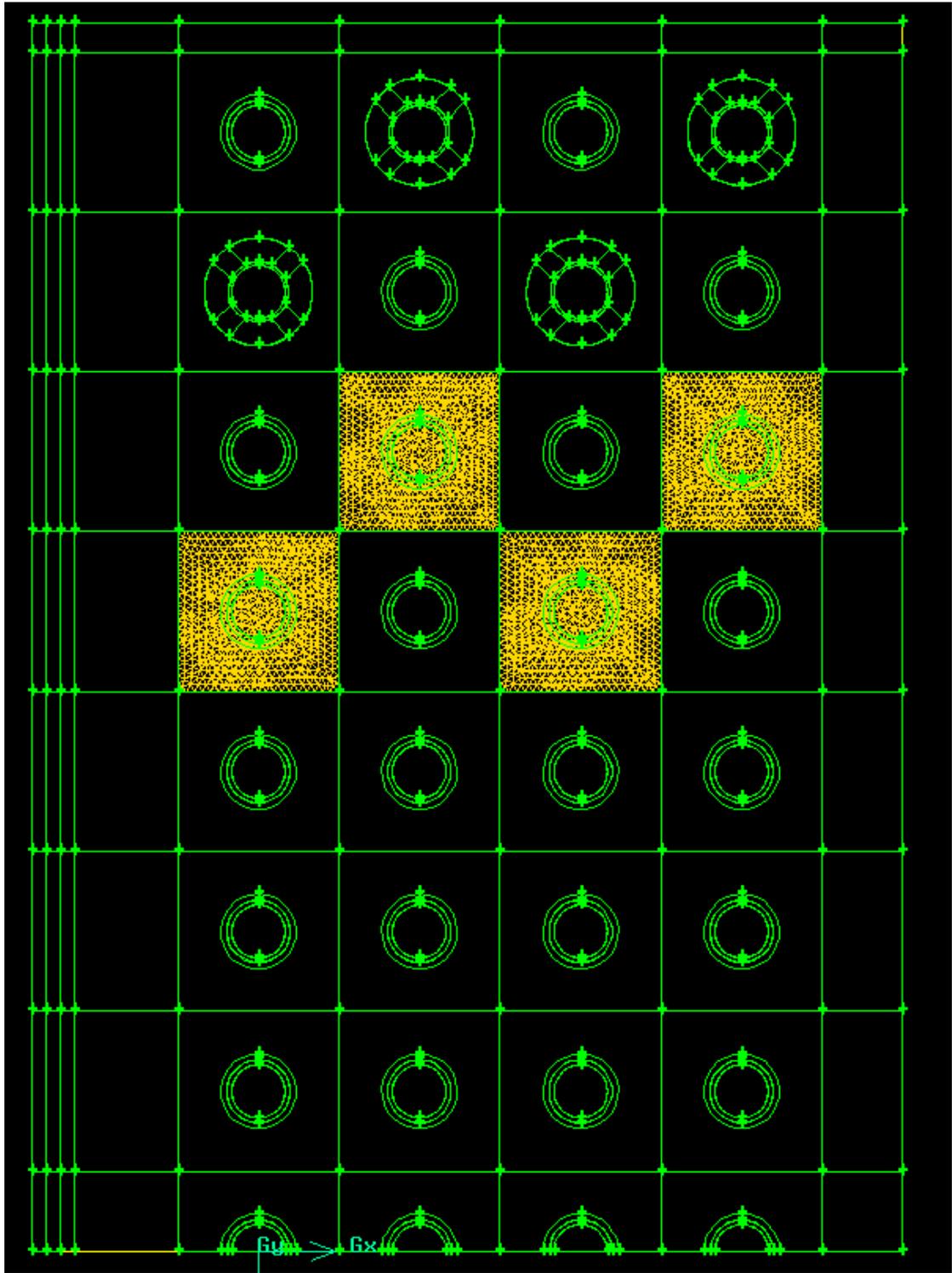


圖 16、假想設施分析模式之最小護箱單元模組與列置方式示意圖

表 1、廠房模式護箱間距規劃

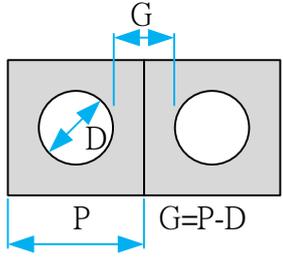
幾何參數	 <p>D：護箱直徑；Diameter G：護箱間隙；Gap P：列置節距；Pitch</p> <p>$G = P - D$</p>	
	HI-STORM：D=3.36m	HI-STAR：D=2.44m
Pitch (m)	Gap (m)	Gap (m)
5.8	2.44	3.36
5.0	1.64	2.56
4.2	0.84	1.76

表 2、廠房模式之護箱比例與列置規劃

混凝土/金屬護箱比例
60/60
32/88
16/104
列置方式
棋盤
金屬護箱靠外
金屬護箱靠內
混凝土護箱靠角落

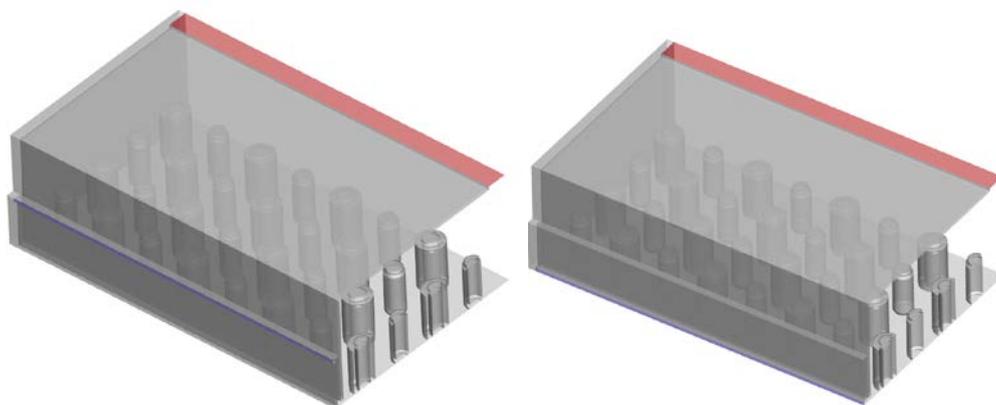


圖 17、1/4 假想設施分析模式示意圖(藍色進口、紅色出口)；左圖：含迷道設計；右圖：不含迷道設計

4.2 材料性質

本研究針對上述所規劃的假想設施及其內貯的兩種護箱於貯存期間之各項 SSCs 所含材料之熱流特性加以記錄以作為檢核之依據。其中 Holtite-A 材料於檢索 Holtec 提交 NRC 之報告[40]得知其材料包含有樹脂、1%的碳化硼以及含鋁之材料 ATH；惟受限於該材料之公開資訊不足以作為分析之條件，故為能確保本假想設施之各項分析不致因為材料性質的選用而出現不合理之結果，本研究中各項材料性質係引用我國目前兩座乾貯設施安全分析報告[2, 3]中所載經專業檢驗之材料性質。

4.2.1 固體材料

表 3、中子屏蔽熱傳性質

熱 傳 特 性	Holtite-A
Conductivity (W/m-K)	0.65
Density (Kg/m ³)	1630.40
Specific Heat (J/Kg-K)	1335.55

表 4、不銹鋼(304 及 304L)熱傳特性

熱 傳 特 性	溫 度 (K)				
	296.72	352.27	463.38	546.72	657.83
Conductivity (W/m-K)	15.05	16.09	18.00	19.21	20.76
Density (Kg/m ³)	8016.37	7994.22	7949.93	7908.41	7858.59
Specific Heat (J/Kg-K)	483.98	503.24	533.38	550.13	567.30
Emissivity	0.36				

表 5、碳鋼(A-36、A-533 及 SA-588)熱傳特性

熱 傳 特 性	溫 度 (K)					
	296.72	352.27	463.38	518.94	630.05	685.60
Conductivity (W/m-K)	41.36	41.59	41.88	41.01	38.77	37.54
Density (Kg/m ³)	7861.36					

Specific Heat (J/Kg-K)	473.10
Emissivity	0.8

表 6、鋳合金熱傳特性

熱 傳 特 性	溫 度 (K)			
	392	572	752	932
Conductivity (W/m-K)	14.33	15.16	16.61	18.06
Density (Kg/m ³)	6560.36			
Specific Heat (J/Kg-K)	301.44	309.82	318.19	330.75
Emissivity	0.75			

表 7、燃料丸(UO₂)熱傳特性

熱 傳 特 性	溫 度 (K)				
	296.72	383.94	508.94	633.94	758.94
Conductivity (W/m-K)	7.89	7.20	5.75	4.90	4.40
Density(Kg/m ³)	1578	1716	1855	1965	2021
Specific Heat (J/Kg-K)	1658				
Emissivity	0.85				

表 8、混凝土熱傳特性

熱 傳 特 性	溫 度 (K)		
	296.72	352.27	407.83
Conductivity (W/m-K)	1.89	1.85	1.79
Density (Kg/m ³)	2243		
Specific Heat (J/Kg-K)	837.4		
Emissivity	0.9		
Absorptivity	0.6		

此外，考量本研究中涉及多樣護箱列置與廠房設計，為能合理將研究能量聚焦於關鍵參數之探討，故本研究對於廠房外層結構採用混凝土或是鋼構之部分，係以等效熱傳導性質進行修正，不再將兩者之幾何形狀予以區分。得以採用此法之原因係因為鋼構廠房之熱傳機制可視為一薄殼熱傳，因此其兩側的溫度差與材料性質之關係可以利用熱傳導公式進行定義：

$$q'' = -kA \frac{dt}{dx}$$

其中， q'' 為熱通量，而 k 與 A 則分別為材料的熱傳導係數與面積。 $\frac{dt}{dx}$ 則為熱傳方向之溫度梯度。是故若吾人擬利用調整熱傳係數之方式來簡化混凝土廠房與鋼構廠房模式共同之問題時，僅需將 k 與 dx 依據修正後之鋼構廠房壁厚(dx_{mod})進行比例調整即可。例如，假設研究中所選用之鋼板厚為1cm而模型厚為45cm時，則僅需將熱源傳導方向之熱傳導係數增加為45倍，其餘方向維持不變即可。：

$$k_{mod} = k \frac{dx_{original}}{dx_{mod}} ;$$

$$\rho_{mod} = \rho \frac{dx_{mod}}{dx_{original}} ;$$

而據此所獲之材料熱流特性則如下表所示。

表 9、修正後鋼構廠房蒙皮之熱傳特性

熱 傳 特 性	溫 度 (K)					
	296.72	352.27	463.38	518.94	630.05	685.60
Conductivity@ normal direction (W/m-K)	1861.2	1871.55	1884.6	1845.45	1744.65	1689.3
Conductivity@ parallel direction (W/m-K)	41.36	41.59	41.88	41.01	38.77	37.54
Density (Kg/m ³)	8029					
Specific Heat (J/Kg-K)	473.10					
Emissivity	0.8					

4.2.2 流體材料

考量本研究主要著眼於貯存期間之熱流特性探討，故研究中所需之流體性質僅需考慮填充於護箱內的氦氣(表 10)以及廠房中之空氣(表 11)即可：

表 10、氦氣熱傳性質

	溫度(K)					
	300	400	500	600	700	800
DENSITY (Kg/m ³)	0.1625	0.1219	0.09754	0.0834	0.06969	0.0611
Cp (J/Kg-K)	5193					
Viscosity (N-s/ m ²)	1.99e-5	2.43e-5	2.83e-5	3.20e-5	3.50e-5	3.82e-5
Thermal Conductivity (W/m-K)	0.152	0.187	0.220	0.252	0.278	0.304
Thermal Expansion Coefficient	3.33e-3					

表 11、空氣熱傳性質

	溫度(K)					
	300	400	500	600	700	800
DENSITY (Kg/m ³)	1.1614	0.8711	0.6964	0.5804	0.4975	0.4354
Cp (J/Kg-K)	1007	1014	1030	1051	1075	1099
Viscosity (N-s/ m ²)	1.846e-5	2.301e-5	2.701e-5	3.058e-5	3.388e-5	3.698e-5
Thermal Conductivity (W/m-K)	0.0263	0.0338	0.0407	0.0469	0.0524	0.0573
Thermal Expansion Coefficient	3.33e-3					

4.2.3 燃料束均質化性質

針對本研究擬探討之貯存階段材料性質將需採用均質化模式將其與填充之氬氣加以均質化，以簡化計算模型。

表 12、貯存作業時燃料束均質化等效熱傳性質

溫度 (K)	熱傳導係數(W/m-K)		比熱 (kJ/kg-K)	密度 (kg/m ³)
	徑向	軸向		
248.95	0.30904	3.91887	0.2328	4008.05
360.15	0.40084	3.76331	0.2583	4008.05
472.45	0.56595	3.54025	0.2772	4008.05
585.75	0.78485	3.36019	0.2927	4008.05
699.75	1.07126	3.36434	0.3052	4008.05
814.35	1.38840	3.41917	0.3140	4008.05

4.3 燃料熱源配置

考量本研究於案例分析時需能反應我國近期因除役而需進行乾貯作業的核一廠用過核子燃料之外，於分析模式發展之初為求分析模式之正確無誤，亦需在參考 HI-STAR[19]與 HI-STORM[20]安全分析報告所載之熱源資訊進行平行驗證。這是因為對於本研究擬探討的參數進行案例研析時，應合理納入我國用過核子燃料裝載需求；反之，平行驗證作業則需與原參考文件採用一致之設計參數，方具有比對之意義。是故，本節將依據審查導則第八章之要求，分別描述與熱源相關之各項設定，除呈現其邊界條件的合適性外，亦留存並作為檢核之依據。

4.3.1 驗證用熱源配置

基於 HI-STAR 100 模式進行平行驗證所需，本研究參考原安全分析報告[19]所載之 18.5KW 總熱源並以平均方式進行熱源配置，經計算此案例之單束燃料熱負載係為 272W/束。而針對 HI-STORM 100 護箱，本研究則依據其安分析報告[20]中圖 18 所示之結果選擇以 X=0.5 之熱源配置進行驗證。此圖面中所指之參

數 X 係為圖 19 所示內外圈之熱源比例值。依本團隊於 104FCMA011 中針對不同列置之影響可以得知，當內圈熱源較外圈熱源高時，將導致內部對流機制受限，而使元件溫度上升。因此本研究於各項校驗中針對 HI-STORM 選擇中央 32 束 355W/束、外圍 36 束燃料則為 710W/束之配置。各模式驗證用之熱源配置如圖 19 所示。

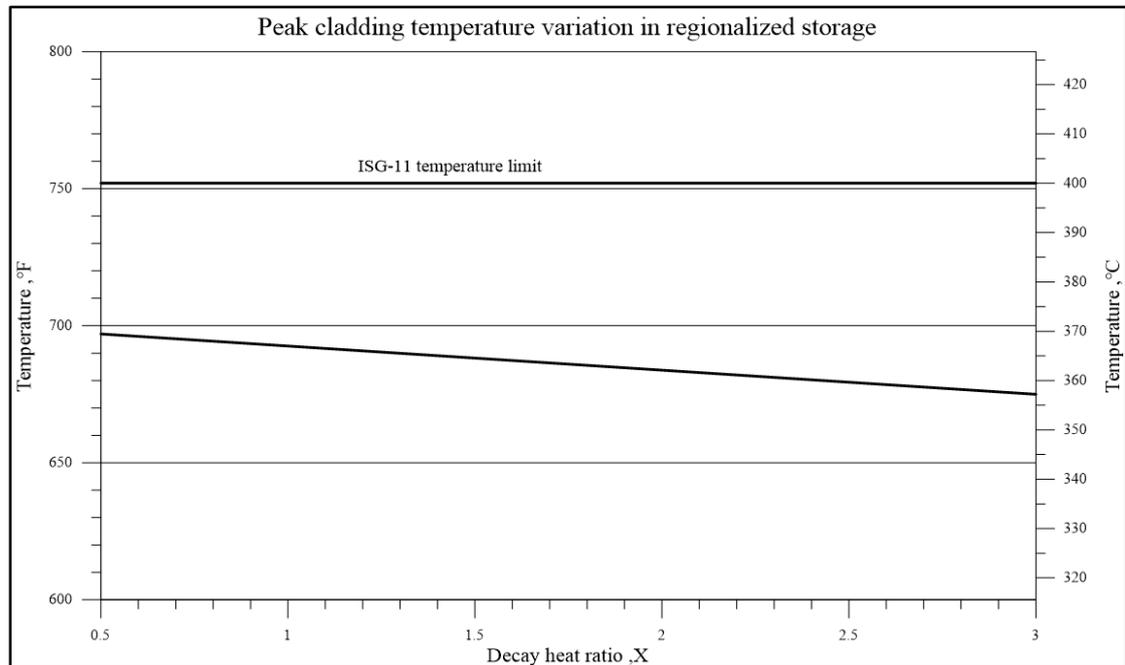


圖 18、HI-STORM 100 安全分析報告之熱源配置保守性檢核

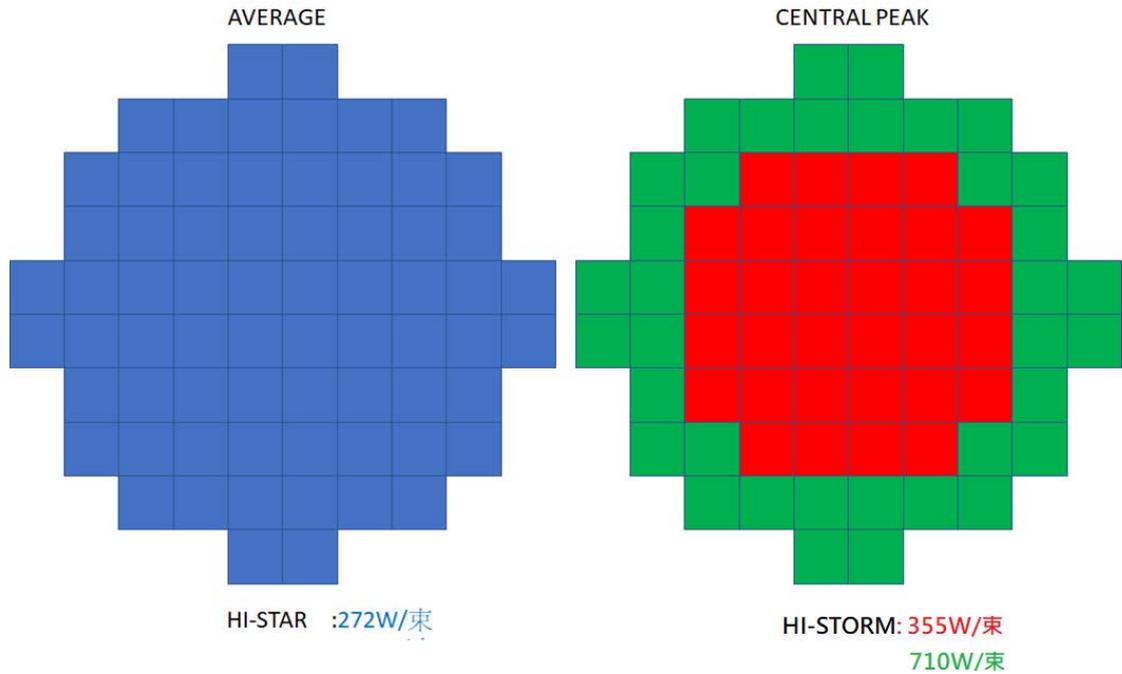


圖 19、本研究於模式平行驗證所採用之熱源配置

4.3.2 案例分析用熱源配置

經檢索物管局於 108 年已完成之研究計畫後發現該研究計畫內已對台電核一廠兩座機組停機後之衰變熱[28]進行完整評估，並合理獲得實際進行室內乾貯裝載之時燃料最短可冷卻之時間將超過 5 年之結論。而依據此一評估發現，該研究推估未來核一乾貯實際裝載時之任一燃料束，其單束燃料之最大熱負載將合理低於 400W/束。該研究於後續分析時採用集中式配置，並以 16 束具 500W 熱源並搭配 52 束 125W 之配置組合出一組總熱源為 17KW/CASK 之保守配置，並與平均配置之結果進行比對而獲得更為保守之熱流分析結果。基於以上所述，並考量研究工作之延續性，本研究將引用該研究報告所選用之熱負載配置(如圖 20 所示)以進行後續案例計算與熱流特性研析。

CENTRAL PEAK

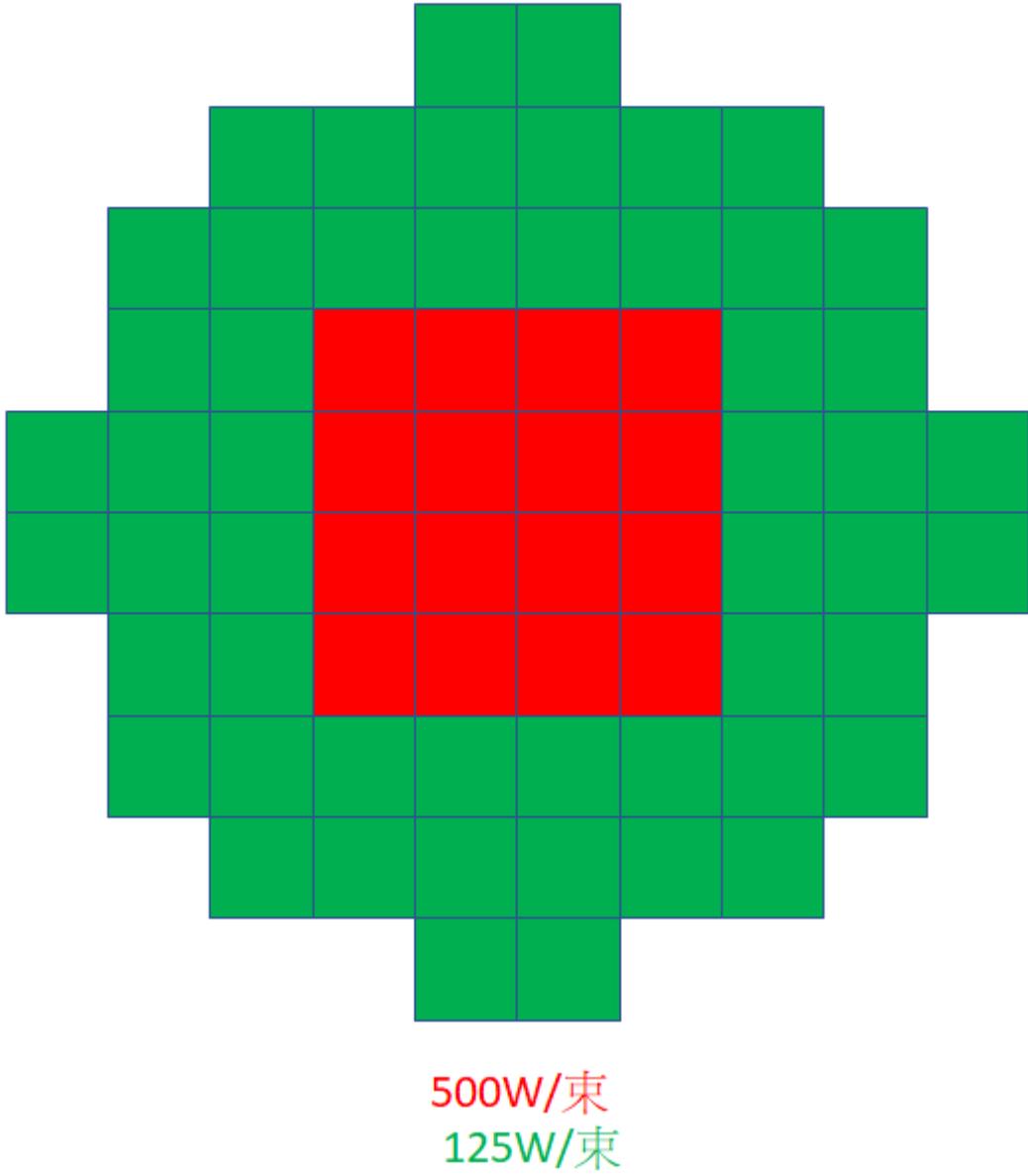


圖 20、本研究於案例分析工作中所採用之熱源配置

4.3.3 軸向功率配置

考量燃料設計特性與核一廠運轉歷史皆將影響用過核子燃料軸向功率之分佈；是故，本研究選用圖 21 所示之 ATRIUM-10 燃料之軸向功率配置，該配置係引用自物管局 107 年之計畫成果並曾經於 108 年研究計畫中多次引用。

該軸向功率配置為求燃料特性能於曲線適配(Curve-fitting)化後具有易於設定的優勢，是故將分析模式之燃料位置由幾何模型的絕對座標，並將燃料棒底部至有效發熱段轉化為相對座標。如此在不同的分析工作中若需要調整有效發熱段的位置、長度時，皆不會影響相關程式碼之設定。而曲線適配所獲得之各項與發熱段原點相關之參數值，亦將以使用者自定函式(User Defined Function, UDF)程式碼進行撰寫，其實際熱產生率：

$$Q'''(W/m^3) = P_{fuel} \times V_{fuel} \times f_{axial Y} \quad (19)$$

其中， Q''' 為單位體積熱產生率； P_{fuel} 為該燃料總衰變熱功率； V_{fuel} 為具熱源燃料總體積； $f_{axial Y}$ 為軸向位置的功率係數：

$$f_{axial Y} = -61.266Y_{active}^6 + 168.83Y_{active}^5 - 187.29Y_{active}^4 + 109.4Y_{active}^3 - 38.146Y_{active}^2 + 8.1456Y_{active} + 0.3738 \quad (20)$$

其中， Y_{active} 代表自有效發熱段起點至該點之軸向距離。

而對於平行驗證所需之軸向功率配置，本研究則引用上述所載方法，將原安全分析報告中所載之軸向功率分佈(如圖 22)依相同程序加以適配化並進行 UDF 程式之撰寫，詳細流程與細節於此不再重複說明。

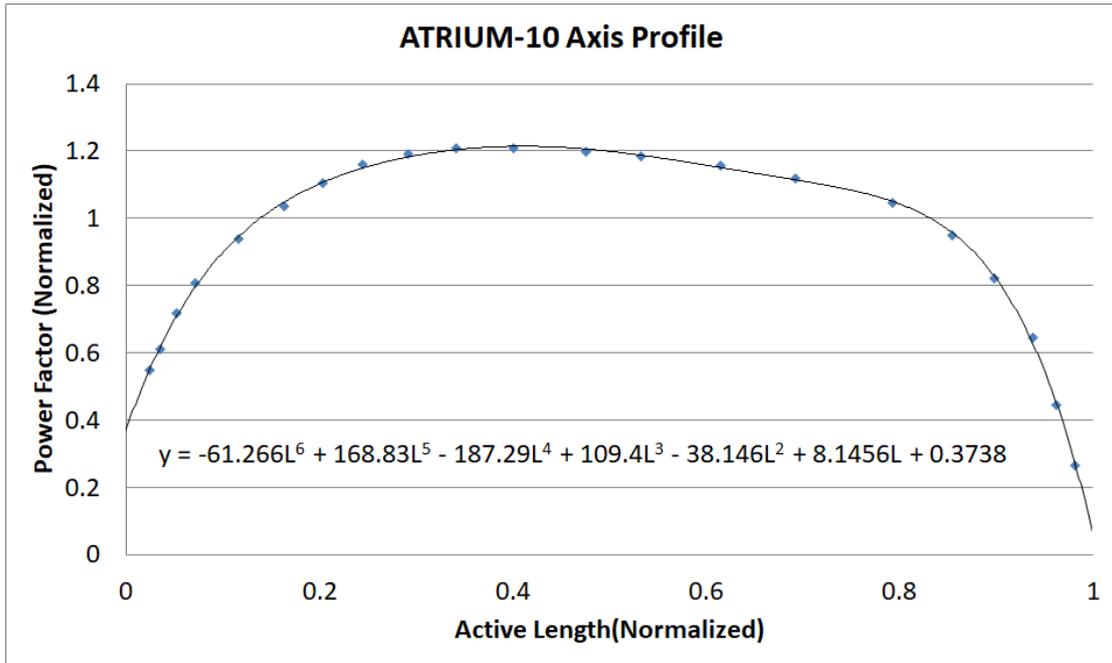


圖 21、本研究所採用之燃料軸向功率配置圖

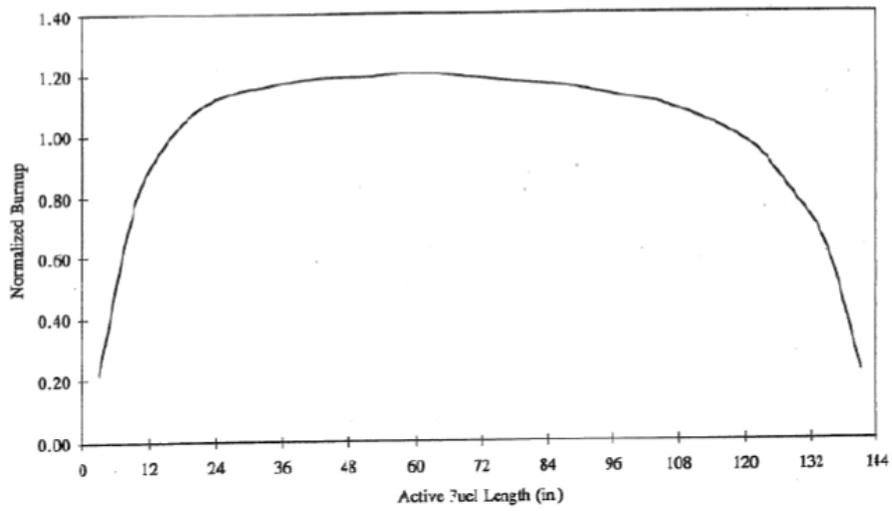


圖 22、本研究平行驗證所採用之燃料軸向功率配置圖[20]

4.3.4 各式護箱於廠房內貯存時之視因子

有鑑於 108FCMA003 之研究計畫發現，若將廠房與護箱分別以較為精細模型進行評估時，需於獨立護箱模式之表面納入熱輻射視因子(View Factor)因列置所造成的影響。為此，本研究考量依據前述各類假想設施規劃與護箱列置節距所造成的視因子，將同步利用前述之分析模式，以 DO 輻射熱傳模式求解輻射傳輸方程式，並獲得特定護箱對其他表面之整體視因子之參數。

而處理方式即是將特定護箱設定為 500K 並將廠房各表面設為 300K，以求取得位於該護箱對外的表面輻射熱，進而反推其視因子：

$$Q''_{CFD} = AF\varepsilon\sigma(T_{cask}^4 - T_{wall}^4);$$

由於本計算主要係以求得視因子為目標，故於計算中需將所有表面設定為黑體輻射($\varepsilon = 1$)，即可獲得如表 13 所示意之視因子；值得注意的是此視因子係隨護箱列置與廠房設計參數相關，未來各分析工作需自行依實際設計條件求取，而無法直接引用之。

其中各式護箱於頂部之視因子因本研究係為單廳廠房，且廠房頂部面積與護箱頂部面積差異極大且廠房佔地面積不隨護箱節距之變化而縮小，故於不同護箱間距下所獲之頂部視因子差距極小；此結果利用視因子之解析解公式亦可再次驗證無誤：

$$F_{ij} = 1/2 \left\{ S \left[S^2 - 4(r_i - r_j)^2 \right]^{1/2} \right\} > 0.9999;$$

其中 r_i 與 r_j 分別為護箱與廠房頂部面積轉換之水力半徑，而 S 則為其面積之比例係數：

$$S = 1 + \frac{1+r_i^2}{r_j^2}。$$

在實際分析之作業期間，由於 FLUENT 本身於模型計算域之邊界並未提供無任簡易的設定方法將視因子納入計算，故於分析中需依據上式中 F 與 ε 同為係數乘積參數的關係，進行實際物質表面放射率的修正。例如，某一混凝土護箱

側面(假設放射率為 0.9)之表面視因子為 0.5 時，其修正 ϵ_{mod} 應設定為：

$$F\epsilon = 0.9 \times 0.5 = 0.45。$$

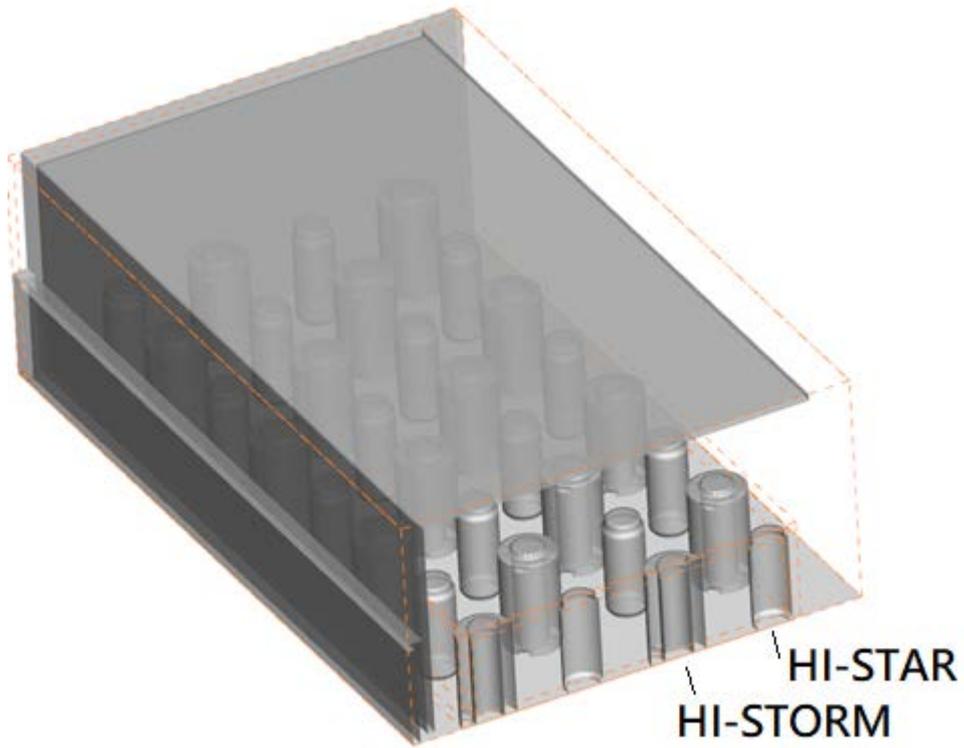


圖 23、本研究計算輻射熱傳視因子之分析模式

表 13、本研究於不同護箱間距下之護箱視因子

護箱節距	HI-STORM		HI-STAR	
	頂部	側邊	頂部	側邊
5.8	0.9999	0.552	0.9999	0.630
5.0		0.487		0.543
4.2		0.432		0.507

4.4 分析模式驗證

雖然本研究係著重於熱流特性之探討與解析，而非安全分析之量化探討，但為求於後續執行的案例分析結果及所獲熱流特性與建議仍有其可信度，本研究仍依循一般安全分析或審查之規格，於分析工作展開前，先行就本章所建立之分析模式進行驗證。

4.4.1 HI-STAR 100 分析模式驗證

為能確保本研究所建立之 HI-STAR 模式具有一定之精確度，故於本節依據該護箱製造商 HOLTEC 向 NRC 提出執照申請時檢附的安全分析報告[19]進行平行驗證；該安全分析報告係與本研究採用類似之 CFD 分析技術進行分析模式建立與案例分析，該技術所採用的各項假設可概述如下：

1. 以 HI-STAR 100 安全分析報告[19]分析中所載的 18.5KW 熱負載數據進行驗證。
2. 忽略護箱內部對流，將內部空間假設為固體；
3. 依據護箱列置間距，將所得之視因子作為輻射熱傳量之修正係數；
4. 採用 HI-STAR 100 安全分析報告所載之各項材料性質；
5. 環境溫度以安全分析報告所載 80°F(26.67°C)作為分析基準；
6. 底部與廠房基座接觸之表面係採用絕熱邊界，其他計算域邊界則以自然對流邊界條件進行設定。
7. 日照條件依據 10CFR 72 進行頂部與側邊日照輻射通量設定。

分析結果之正確與可信度除了進行分析結果之量化比對之外，更重要的是針對分析結果所獲之溫度場分佈以及能量守衡之結果進行檢核，方能證實分析模式之合適性。如圖 24 所示，分析所獲之燃料束軸向溫度分佈係呈現近乎上下對稱的分佈；此點特徵係因本研究所選用之軸向功率分佈係近乎對稱，且於分析模式

中不考慮自然對流，而使熱源主要透過徑向熱傳來加以移除之故。除此之外，由護箱頂部與底部之溫度差亦可發現護箱底部溫度約較頂部高出 30-40°C 左右。這是因為在本模式中護箱頂部為自然對流，但底部採絕熱邊界之故，進而造成在不考慮自然對流條件時，頂部散熱能力較底部為高之故。

若進一步由分析模式所呈現的徑向溫度分佈進行檢視則可發現，提籃之各燃料束所具有的徑向熱傳能力遠較提籃各套筒(sleeve)與燃料匣之氬氣間隙為高，故在提籃處的溫度分佈間呈現平緩與快速降低之溫度分佈，而當衰變熱向外傳遞時，亦可發現其熱源作用於加馬屏蔽層與外側鏟式中子吸收材時，將因為兩處所具有的等效徑向熱阻不同，而呈現顯著的溫度變化差異。

進一步的能量守恆檢核後發現，透過本研究撰寫之 UDF 程式碼設定於模型中的熱源項總計為 18.495kW，主要差異係來自於離散化後，由各軸向網格節點中心位置計算所得之熱源項與該網格大小之平均熱源項之誤差；而計算收斂後所獲之模式熱散失則為 18.493 kW，其誤差遠低於 0.1%，符合原預定案例條件，故可本案分析結果符合進一步量化比對之條件。

經後處理取得各元件之溫度最大值表 14 所示，整體而言自燃料溫度與提籃溫度等內部元件溫度差異極小，可證實分析模式、材料性質與各項假設及設定符合安全分析之要求。進一步比對 MPC-68 密封容器殼體與中子吸收材之部分略低於安全分析報告，此處主要係 MPC 殼體之阻值較原安全分析報告略小之故，而使該殼體與中子吸收材等元件所獲溫度較低；但因為本研究並無法就安全分析報告中取得精確之加馬屏蔽材與各殼體之加工誤差，故此處之差異於現有資訊下應屬可接受之誤差。在相同的熱源下若衰變熱透過徑向進行熱傳的能力減低時，則勢必需由它處進行熱傳；故使 OVERPACK 的內殼體與底部出現較原安全分析報告所載溫度更高之結果。

最後，在將上述結果進一步轉化圖 25 所示之誤差分佈圖後可以發現，本分析模式計算所得之差異率約在±0.1%之間，顯見分析模式的精確性已足以符合本

研究所需，保守度、餘裕等安全分析細部要求已無需於此科研性質之研究工作中進一步細究。

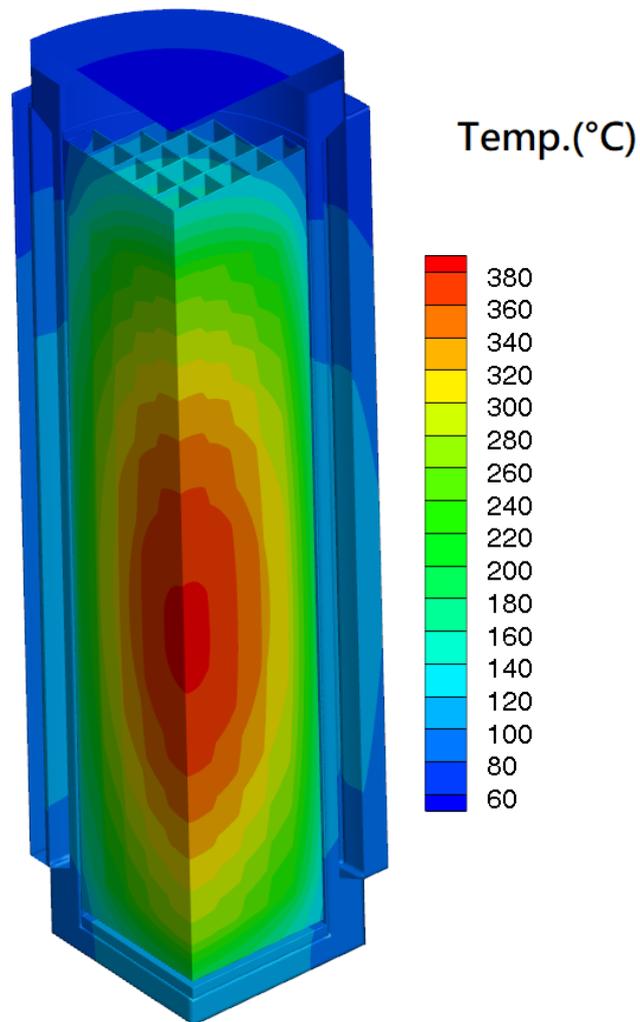


圖 24、HI-STAR 分析模式於長期貯存之溫度分佈

表 14、HI-STAR 分析模式計算量化結果比對表

元件名稱	安全分析報告(°C)	本分析模式(°C)
Fuel Cladding	394	393.0
MPC -68	385	383.4
MPC outer Shell	166	158.1
Holtite-A	134	129.2
Overpack Inner Surface	109	112.4
BOLTED PLATE	68	68.1
Overpack bottom	101	108.5

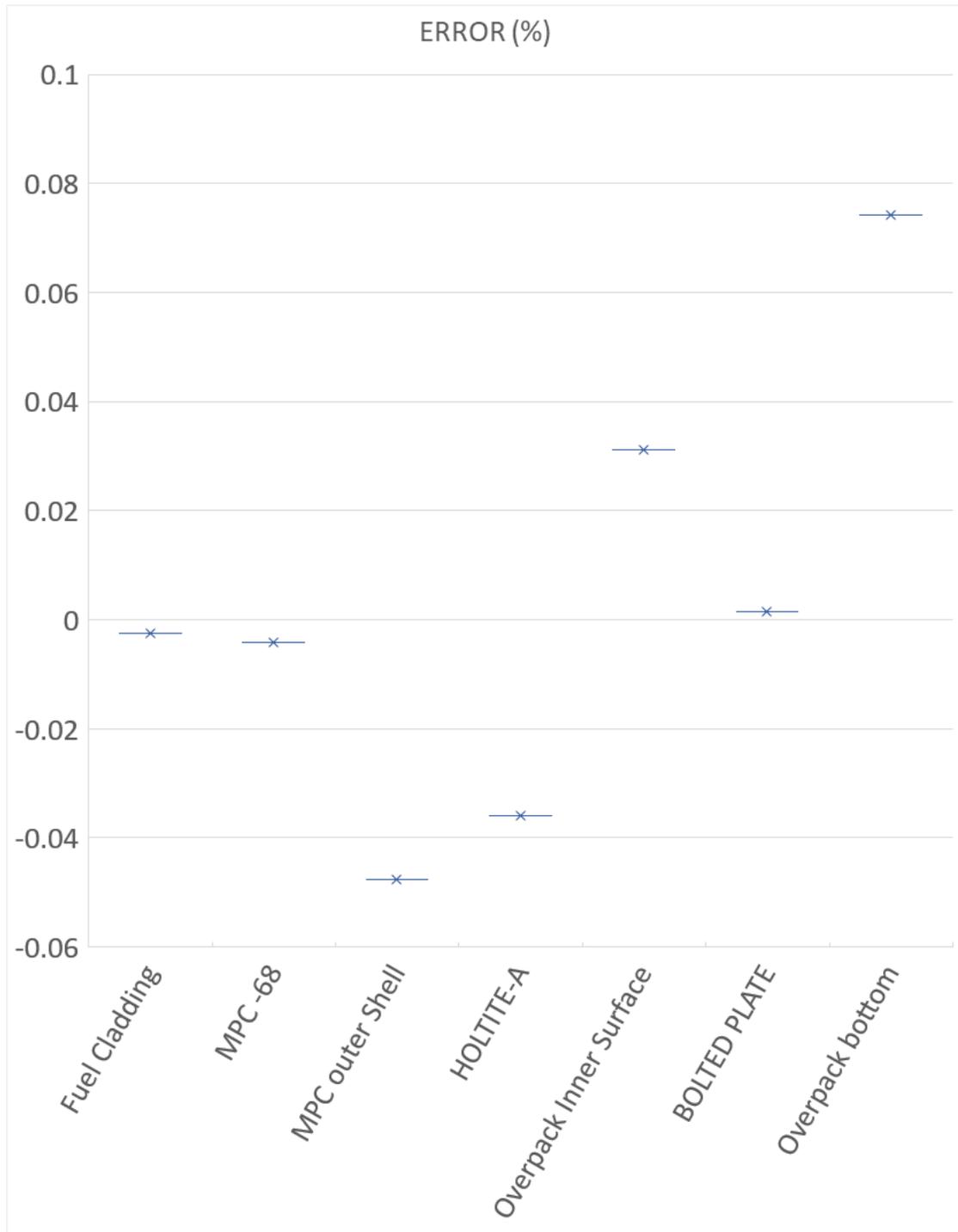


圖 25、HI-STAR 分析模式誤差圖

4.4.2 HI-STORM 100 護箱模式驗證

為能確認本研究所建立之 HI-STORM 100 模式具有一定之精確度，本節亦參照相同的作業流程，在參考護箱原始設計公司 HOLTEC 之資訊，進行下述各項假設以作為模式驗證之基礎：

1. 以 HI-STORM 100 安全分析報告[20]中所載的熱負載配置，其熱源係採 Regionalized Loading 之方式以內部 32 束 500W/束，外部 36 束 275W/束之密集式擺置，其配置狀況詳見第 4.3.1 節圖 19 所示。
2. 忽略護箱內部對流，將內部空間假設為固體；
3. 依據護箱列置間距，將所得之視因子作為輻射熱傳量之修正係數；
4. 採用 HI-STORM 100 安全分析報告所載之各項材料性質；
5. 環境溫度以安全分析報告所載 80°F(26.67°C)作為分析基準；
6. 日照條件依據 10 CFR 72 進行頂部與側邊日照輻射通量設定。

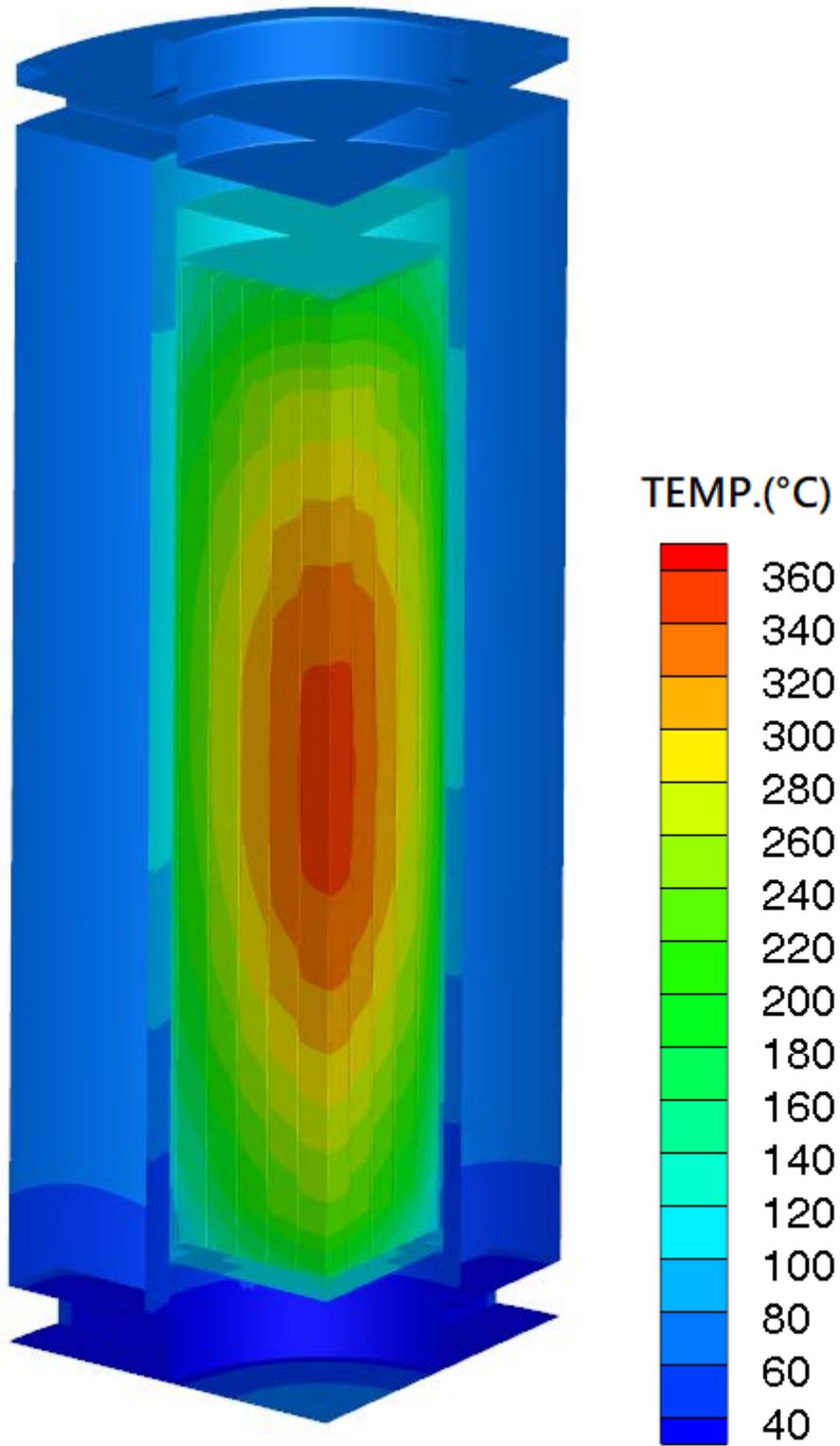
本案例分析所獲結果如圖 26 所示，由於不考慮 MPC-68 內部自然對流之故，護箱內燃料束之軸向溫度分佈仍以近似對稱之分佈呈現於燃料軸向，而中央至外側燃料束亦呈現階梯狀之溫度分佈，顯見各燃料束與提籃的間隙將因為具有較低的热傳導係數而使溫度梯度增加，而在 MPC 外側殼體與內襯(LINER)所形成的空氣流道，將提供足夠的移熱能力促使熱源由 MPC 表面移除。由於本研究之分析模式考慮空氣流道的自然對流與輻射熱傳，因此 MPC 表面之熱通量除了主要以熱對流進行移除外，部分熱源將藉由輻射熱傳輸送至內襯，並由內襯的內外表面以自然對流及混凝土屏蔽層的傳導進行散熱。也因此，圖中所顯示的內襯溫度分佈可明顯看到中央段的溫度遠高於上下游。

藉由上述機制輸送至空氣流道的熱量，最終將由此處的自然對流移除至護箱外，因此可見護箱底部的進氣口將因為吸入新鮮的低溫空氣而具有較低的溫度，而出口處則可顯示因為熱空氣的加熱效果，使該處的溫度接近於護箱上蓋。

由於 HI-STORM 護箱內設置了空氣流道並以自然對流進行移熱，因此在進行量化的比對前，除了仿照前章對 HI-STAR 100 進行能量守恆的檢核之外，亦需進行進出氣口的空氣流量的質量守恆檢核。在能量守恆檢核的部分，由於本章所採用的模式皆採用同一 MPC-68 模式之故，因此其輸入熱源僅受到 UDF 內所填燃料熱源之影響，總計輸入與輸出之熱源誤差僅有 60.84W；誤差值僅約總熱源之 0.2%，符合原預定案例條件。而在質量守恆的部分，經檢核所得之流量約為 0.602kg/s 進出氣口差異為 8.9×10^{-5} kg/s，其誤差值約為 0.01% 亦可被分析工作所接受。

經後處理取得各元件之溫度最大值表 15 所示；整體而言，自燃料溫度與提籃溫度等內部元件溫度差異極小，可證實分析模式、材料性質與各項假設及設定符能符合安全分析之要求。而外部的護箱組成元件，如內襯、混凝土、上蓋以及防塵殼體等則有略大的溫度差異，主要係因本研究無法取得原安全分析報告所載之輻射熱傳模式設定參數之故，導致兩者在共軛熱傳與輻射熱傳效應耦合之機制下，具有較大的差異。但因為此一差異仍在可接受範圍之內，且整體溫度分佈亦無不符合熱傳機制與學理；故可判定此處之差異於現有資訊下應屬可接受之誤差。最後，在將上述結果進一步轉化為誤差分佈圖後，則如圖 27 所示；本分析模式計算所得之最大差異率係為外殼混凝土護箱處主要源自於混凝土護箱材料性質的些微差異受其厚度累計之影響；但其值仍在 4% 左右，其正確性已足以符合本研究所需。

除此之外，本研究建議未來廠家所提具之分析方法論若將密封容器內部之自然對流納入考慮時廠家在未提供計算結果佐證前，不得逕將集中熱源配置視為保守假設。



g

圖 26、HI-STORM 分析之溫度分佈

表 15、HI-STORM 分析模式計算量化結果比對表

元件名稱	安全分析報告(°C)	本分析模式(°C)
basket	366.67	355.32
BORAL	366.67	355.32
cask	233.33	226.36
concrete	120	123.5
dust shell	79	77.8
fuel	369.44	372.34
lid	150	154.51
liner	161	155.9

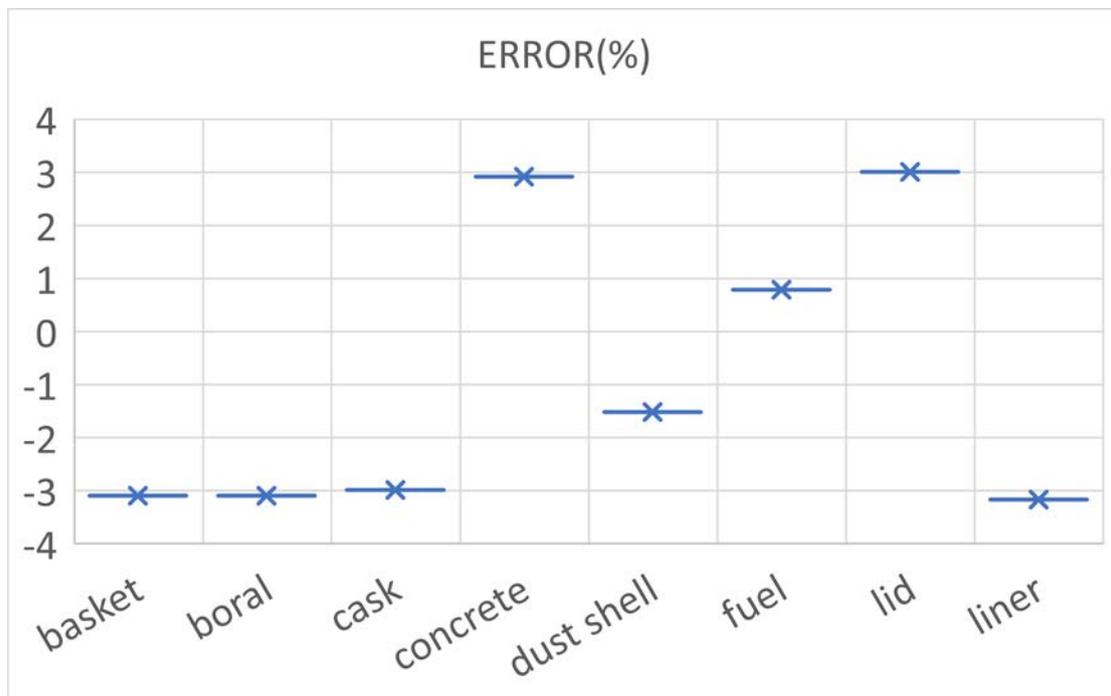


圖 27、HI-STORM 分析模式誤差圖

第五章、案例分析與結果討論

為能探究室內乾貯設施裝有兩種不同形式護箱時之熱流特性，本研究在完成兩組乾貯護套之模式建立與不同配置條件下之廠房模式建立後，將逐一進行其熱流特性研究。然而受限於分析參數組合之繁多(如圖 28)，若逕行針對各項參數組合所獲得的案例進行研析，將使分析負擔增加至無法以電腦程式分析之程度。為能避免影響研究工作的進行，本研究遂將其分為“單一設施存不同類型護箱之熱傳效應研析”以及“單一設施貯存不同類型護箱之異常與意外情境研析”。前者主要著眼於正常貯存下兩種護箱在不同廠房、護箱間距、配置方式與護箱比例下之熱流特性變化，以瞭解各項參數對於熱流特性與護表面/進氣口熱流資訊之影響，並作為後續探討護箱內部熱流特性與各類貯存條件(如異常與意外事故)之基礎比對條件。因此，本章於 5.1 節中將著眼於廠房內熱流特性的計算與解析，第 5.2 節中再就兩種護箱於各種列置條件下所致之元件溫度特性探討，並於 5.3 節中對各項影響進行統整，以提出具參考價值的室內乾貯設施熱傳分析審查重點，供主管機關參考。

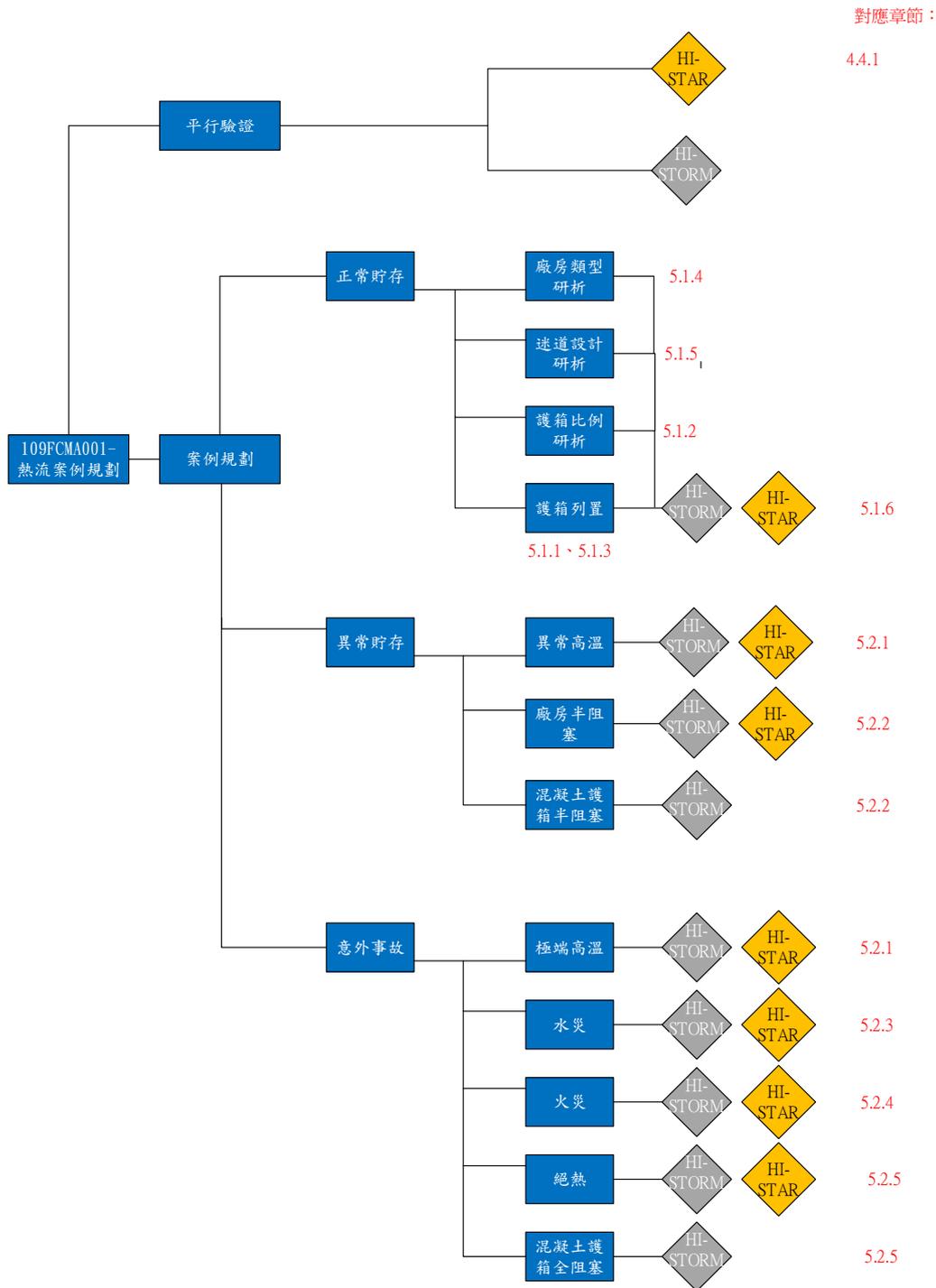


圖 28、本研究分析案例與章節對照表

5.1 單一設施貯存不同類型護箱之熱傳效應研析

為能有效進行參數的探討，本研究選定以護箱比例為 1:1 之假想案例作為基礎案例，其相關參數之配置如表 16 所示。在考慮本假想設施共具有 120 組護箱之前提下，HI-STORM 與 HI-STAR 護箱分別佔有 60 組護箱，且因兩者所搭載之密封容器皆為 MPC-68 並選用相同的熱源配置，故即使改變兩種護箱的比例，亦不會影響其基礎熱流條件。此外，有鑑於金屬護箱與混凝土護箱之設計不同，預期將因為主要散熱機制的差異，而對廠房內的熱流特性造成影響。研究中為能進一步探求不同擺置與間距之影響，亦將此類參數納入探討。

表 16、基準案例之參數列表

參數名稱	參數值
HI-STORM 護箱	60
HI-STAR 護箱	60
配置條件	交錯配置
護箱節距	5.8m
廠房進口溫度	32°C
護箱熱源	17.5KW

如圖 29 所示，當同一廠房中裝載有兩種不同形式之護箱，並採用交錯之列置之方式進行擺置時，可以預期位於圖面左側的廠房迷道所提供新鮮的低溫空氣將由此流入並冷卻各個護箱。也因此由圖上所呈現的溫度分佈可以明顯地看到，在靠近迷道處最前排護箱，不論是金屬護箱迎風面或是混凝土護箱的進氣口，皆存在最低的溫度表現。且相較於後排的護箱，兩種護箱間約略存在有：

1. 混凝土護箱約有 5-10°C 之進氣口溫度差，表面溫度約有 20-25°C 之溫差；
2. 前排之金屬護箱最低與最高溫度約差異 30°C 左右，此一差異隨著護箱的尾流發展而減低，最後排之護箱溫度差明顯僅餘約 10°C 左右；

3. 前後排金屬護箱的最高溫度差異約 10°C 左右。

由以上的初步量化檢核可以預期混凝土護箱因為列置所造成的冷卻效應減損或將小於金屬護箱；這是因為混凝土護箱主要移熱機制係源自於空氣流道的對流效應；因此在進氣口差異有限之狀況下該類護箱所受到的影響應較不明顯。反之，在金屬護箱的表現上可以很明顯的看到，前排護箱因為直接受到冷的空氣吹拂之故，其底部之溫度明顯低於護箱上半部，且因為處於上游之故，其溫度邊界層亦將比後排護箱更薄。

上述的描述可以進一步的由圖 30 與圖 32 所示的廠房溫度獲得證實，其中垂直切面的溫度分佈顯示，在靠近進口端(左側切面)的底部將因為迷道的低溫流體流入而有最低的溫度，但此一流場因為狹小迷道的設計之故而呈現低溫、高流速之特性。

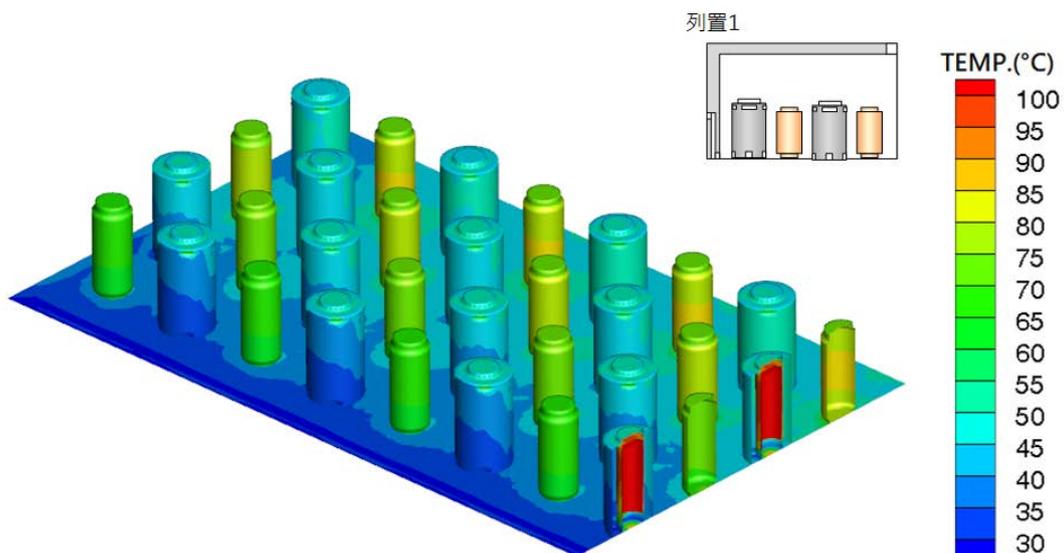


圖 29、兩種護箱以 1:1 配比進行交錯列置(列置 1)之溫度分佈

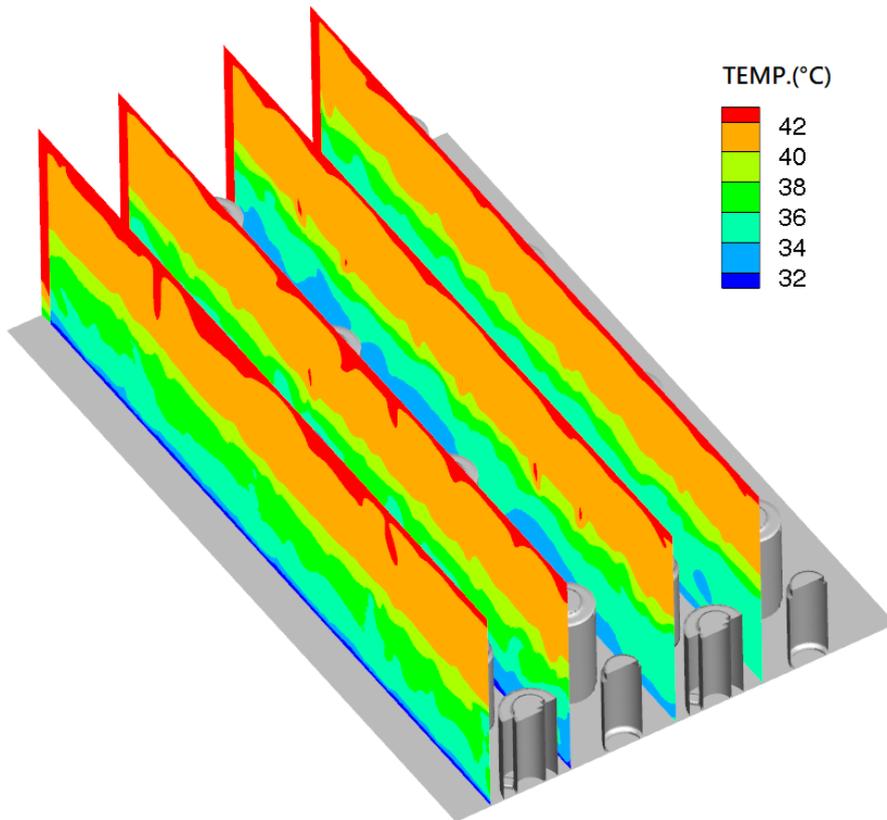


圖 30、兩種護箱在 1:1 配比搭配列置 1 之廠房溫度分佈

然而，此一流場由於貼近廠房基座之故，因此對於兩種護箱間有著以下不同的效應值得加以提出：

1. 迷道進氣口的低溫高速流體將在進入廠房後，因為流動面積的增加而擴散至廠房底部；
2. 隨著金屬護箱對廠房的加熱，此流體將因為整體的流動牽引與本身的受熱而向上移動，因此明顯在圖 30 的第二組護箱前，其截面出現明顯冷空氣向上擴散的分佈，才使得進口流體對第二列的金屬護箱有較佳的冷卻效果；
3. 此一擴散效應使用第二列以後之混凝土護箱進氣口溫度逐漸上升；而第三列以後的金屬護箱受到擴散氣流與第二列護箱尾流的交互影響，使其獲得的冷卻效應亦逐步降低；
4. 由於出氣口處於廠房中央部，因此廠房頂部的熱氣體累積之厚度將由上

游逐步向下游薄化；

5. 由圖 32 進氣口迷道牆面之溫度分佈可以明顯發現，金屬護箱對於廠房壁面的加熱效果顯著；亦可證實混凝土護箱有助於減少此一輻射熱傳效應，對於廠房整體之溫度有所助益。
6. 由表 17 可見，不同列置間對於混凝土護箱溫度之最大影響較小，約略僅有 1-8°C 之差異，而對於金屬護箱而言，表面平均溫度差即存在有約 20 度之差異。

而基於以上之熱流特性之基礎案例探討，本研究已獲得充足的熱流特性可作為後續各參數變換時之影響探討。

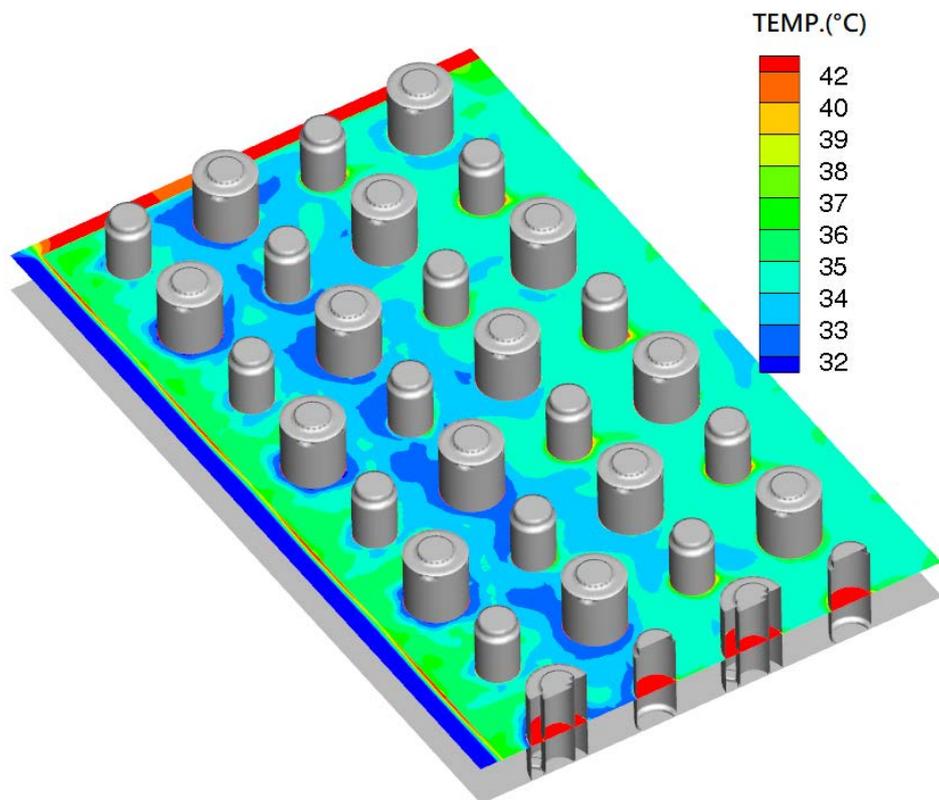


圖 31、兩種護箱在 1:1 配比搭配列置 1 之廠房水平切面溫度分佈

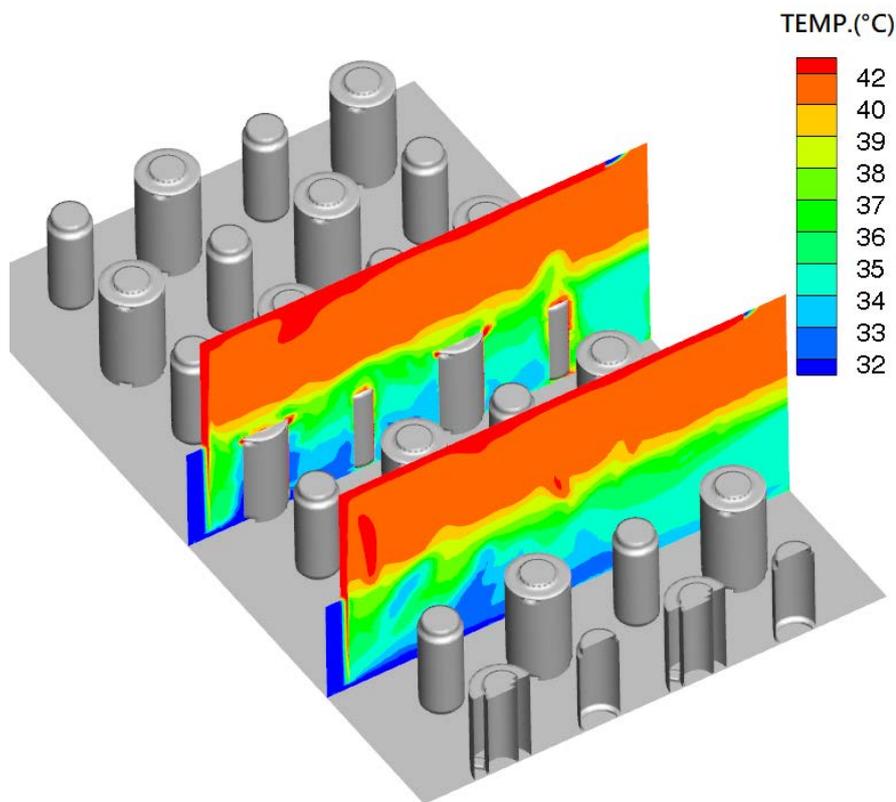


圖 32、兩種護箱在 1:1 配比搭配列置 1 之廠房縱向切面溫度分佈

5.1.1 不同列置狀況對通風路徑之影響

基於前述基礎案例所獲資訊，吾人可以得知迷道所提供的低溫空氣流體在流出迷道時可能呈現貼低之高速流動，然而此一流動預期對於金屬護箱而言，僅能冷卻到護箱底部無燃料束之部分；但對於混凝土護箱而言，或有機會改善進氣口之溫度進而提供較低的散熱能力。

然而上述的推論僅止於局部流場特性於單一護箱下之可能效應，對於密集式貯存之室內乾貯而言，是否能提供預期的效果仍值得深入研究。而本節為能探討此一特性對護箱列置之影響，故規劃三種分區存放之案例並與前述之基礎案例進行比對。

如圖 33 所示，若在不改變各護箱裝載熱源條件與護箱比例之前提下，混凝土護箱挪移至靠近迷道進氣口時，則可發現混凝土受惠於迷道的冷空氣以及混凝土護箱表面溫度較低的特性，使得前兩排的混凝土護箱進氣口溫度變異量比交錯

式擺置為低。然而，此擺置方式並非全部僅有正面效益，由於混凝土護箱之直徑遠大於金屬護箱之故，當上游皆列置了混凝土護箱時將導致冷空氣不易流經兩排混凝土護箱的間隙，進而導致金屬護箱需藉由較高的表面溫度來誘發較強的自然對流，進而使得金屬護箱表面最高溫度上升約 10°C。透過以上的討論可以很明顯的瞭解到在採用自然對流進行熱移除之室內乾貯設施中熱流效應將會因為多種機制的交互作用而對各式護箱造成影響。

若更進一步的探討此種配置下的流場的表現，則可發現以下數點發現：

1. 將混凝土護箱擺置在上游的作法可以延緩空氣被加熱之狀況，使得第三排與第四排之間的空氣溫度約較交錯擺置之案例低約 2-4°C；
2. 第三排的金屬護箱由於混凝土並未明顯加熱空氣之故，因此其表面仍接觸到低溫之空氣，其冷卻效果雖受尾流影響，但仍較第四排為佳；
3. 第四排的金屬護箱與交錯擺置之溫度表面相近；
4. 金屬護箱對於廠房的加熱效果將因為擺置之關係被侷限於廠房內側，對於整體廠房溫度之管理效益為正向；
5. 由於金屬護箱共同對廠房進行輻射熱傳之故，密集擺置使得金屬護箱無獲得額外的輻射熱傳效益。

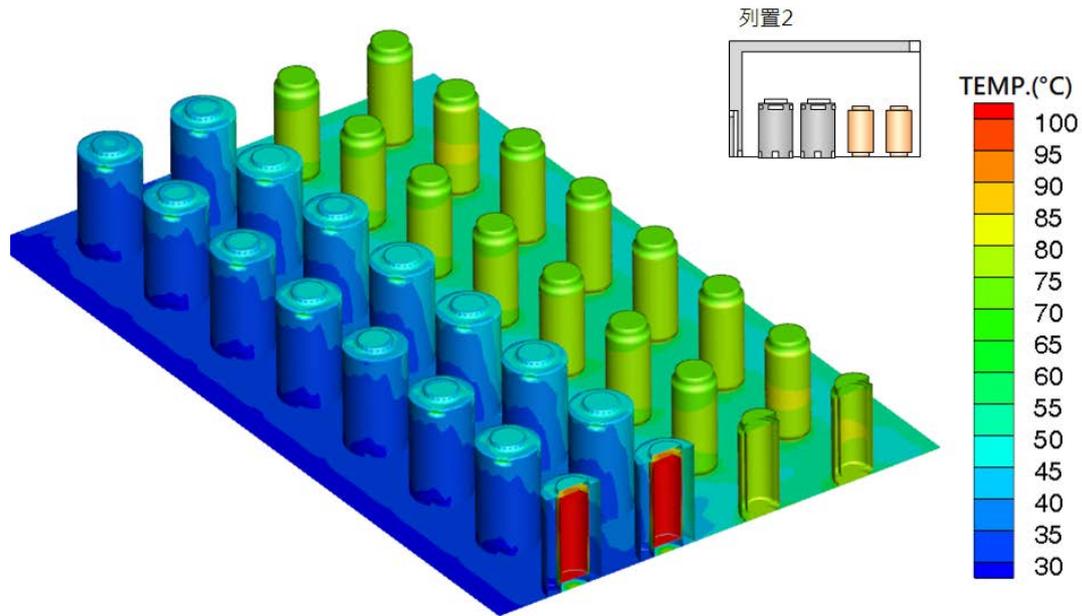


圖 33、混凝土護箱靠外側(列置 2)之方式進行列置時室內乾貯設施之溫度分佈

若如同圖 35 般，進一步將金屬護箱與混凝土護箱擺置之至置予以調換，則可發現金屬護箱之表面因為直接冷卻之故，而有較佳的溫度表現。這是因為，相較於前節的標準交錯列置，當將混凝土護箱擺設於廠房中央時因為護箱之間的間隙較小且表面溫度較低之故，將使得空氣流經混凝土護箱的量較其它案例為低。這一現象加速迷道進口流入的空氣擴散並流經金屬護箱底部，故使得金屬護箱表面的軸向溫度分佈較基準案例明顯。此外，若進一步將護箱列置轉換為分區集中列置之設計，則其溫度分佈則如同圖 36 所示。於此列置下之溫度分佈除了在兩種護箱之相鄰邊界處略有差異之外，各區之同排護箱溫度分佈已約略呈現一致化之狀況，這代表著在此配置下異種護箱間交互影響的效應幾乎可以被忽略不計。

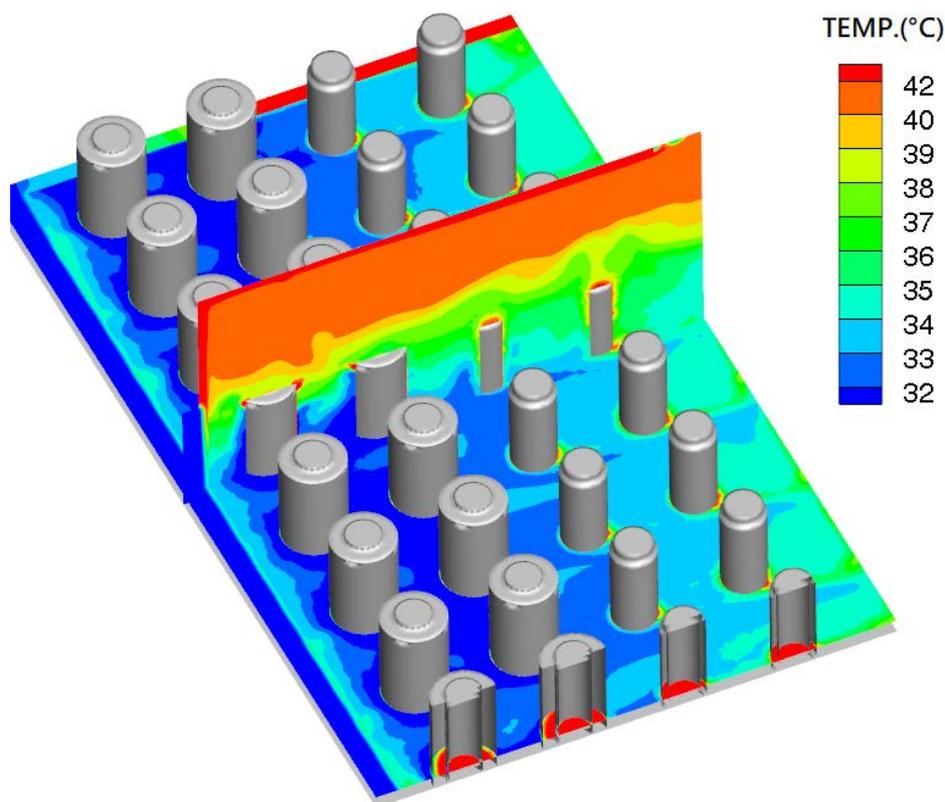


圖 34、混凝土護箱靠外側(列置 2)之方式進行列置時室內乾貯設施之廠房空氣溫度

若進一步將上述的四種配置狀況下所得之混凝土護箱進氣口溫度與金屬護箱表面平均溫度進行量化(表 17)，則可發現本研究用以探討的四種代表型護箱列置方式，其金屬護箱的表面溫度差異最大不超過 12°C ，而混凝土護箱的底部進氣口之流體溫度則約略在 8°C 左右，可見室內乾貯各式的護箱在不同列置中因為同時受到廠房進氣口、護箱間尾流與邊界層的綜合影響，但彼此間並非存在數量級(order)上的溫度差異，預期廠家在進行安全分析時亦會將相關影響納入考慮。考量各種護箱於列置中之實際散熱能力可以“表面平均”溫度與空氣溫度之差異加以量化如下：

1. 列置 1 較列置 3 有更大的混凝土溫度進口溫差，主要係因為交錯擺置將使混凝土護箱吸收金屬護箱之熱，並加熱底部空氣所致，但差異僅有約 2°C ，並不明顯；

2. 列置 4 較列置 2 具有更多排的混凝土護箱，因此進氣口溫度微幅高於列置 2，但因為混凝土護箱之表面加熱效果有限，故兩者相異小於 1°C ；
3. 由列置 2 與列置 4 可以得知，受到空氣溫度與尾流效應的影響，金屬護箱列置排數愈密集且愈處於下游時，其表面溫度將相對較高；其差異與列置 3 將護箱置於前排的設計差異可接近 10°C 。

其主要原因來自於本研究所規劃之假想設施係以自然對流為其散熱設計，故於當護箱間存在有散熱效差之狀況時，將自然形成較強的表面溫度(無論金屬護箱或是混凝土護箱之 MPC-68 表面)，並誘使較強的自然對流機制強化該處之散熱能力。

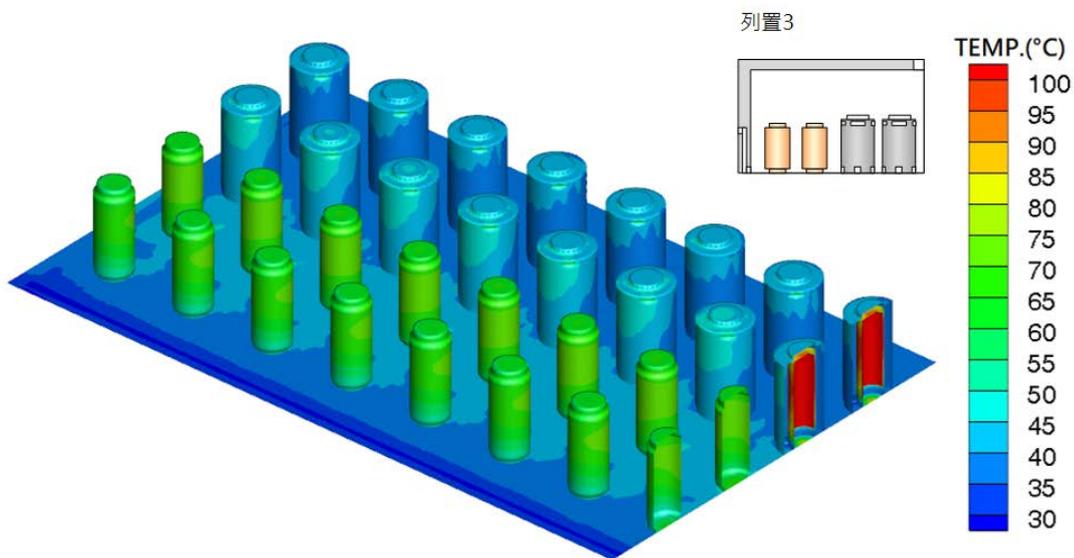


圖 35、以金屬護箱靠外側(列置 3)之方式進行列置時室內乾貯設施之溫度分佈

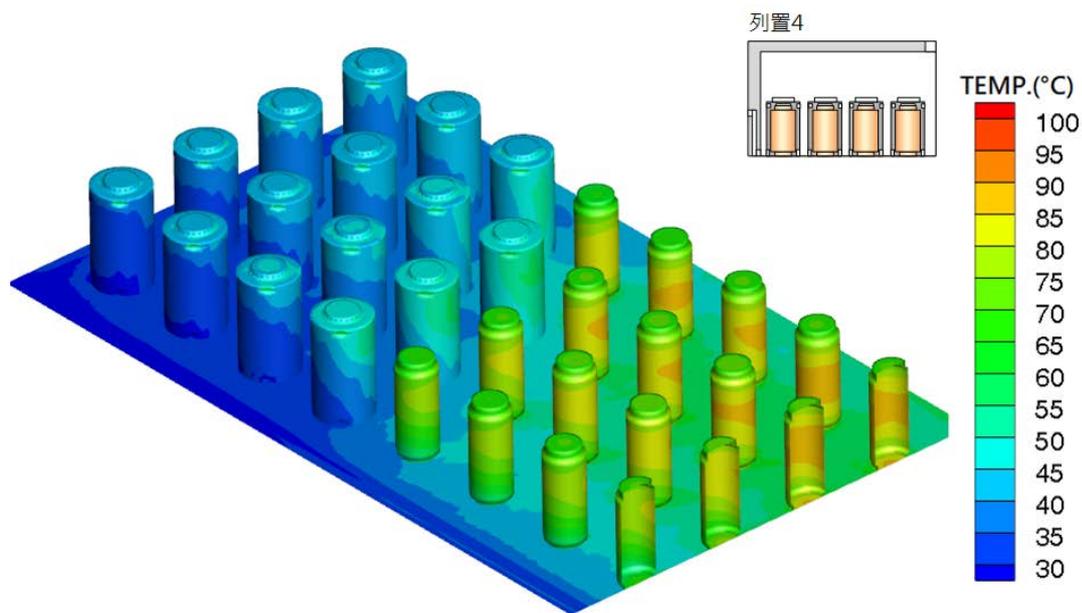


圖 36、兩種護箱分區列置(列置4)時室內乾貯設施之溫度分佈

表 17、四種配置狀況下所得之混凝土護箱進氣口溫度與金屬護箱表面分別與進口溫度之平均差(°C)

護箱 列置 方式		列置 1： 兩種護箱交 錯列置	列置 2： 混凝土護箱靠 外側	列置 3： 金屬護箱靠 外側	列置 4： 兩種護箱分 區列置
表面 平均	金屬	41.23	49.34	38.52	48.99
	混凝土	4.06	2.2	4.98	2.8
表面 最高	金屬	49.6	53.51	48.89	61.58
	混凝土	8.03	4.02	6.41	5.18
表面 最低	金屬	28.13	43.82	20.36	24.37
	混凝土	1.34	1.043	3.99	1.08

5.1.2 不同護箱比例對於熱流特性之影響

經過上一節對護箱列置之探討，吾人可以得知不同類型之護箱僅會有限的影響鄰近護箱的熱流效應；此一現象在將混凝土護箱縮減至 32 顆時並採用密集之列置(如圖 37 所示)時，可發現不同護箱之間的交互影響仍僅限於兩種護箱的交界處，且由圖 38 所示之護箱間流場分佈亦可進一步證實各列護箱側邊仍然維持極薄的邊界層，僅有在護箱背風面受尾流覆蓋區有較厚的邊界層。這是因為在流場在間隔一列(排)之護箱後，其影響將因為護箱本身的熱輻射視因子與護箱間流場面積縮減所形成的加速效應而減弱。此一現象即使是在護箱以棋盤式配置(圖 40)的案例甚至是將其比例調整為 16:104(如圖 41-圖 44)時亦未見顯著改變。基於此一發現，利用分區貯存之列置方法進行護箱混案例中，可以逕行將其視為單純混凝土護箱、單純金屬護箱，以及混合列置之狀況；且僅有混和列置之區域會發現兩種護箱交互影響之狀況。但無論各區護箱彼此是否受到不同護箱類型之影響，在進一步準備以護箱模式進行不同情境下的元件溫度分時，護箱表面的視因子與環境溫度的取得，則無方法上的差異。綜合以上對護箱比例與列置參數之探討，吾人可以綜合出以下發現：

1. 無論設施採用何種護箱列置或是護箱數量之比例；若要進行安全分析結果之審查，仍可藉由護箱邊界；包含視因子、表面熱對流係數與空氣溫度之保守性來確認分析所得結果的保守性；
2. 相較於交錯列置，全金屬護箱密集列置的方式將使得有效的側向輻射熱傳效果最低；這意味著安全分析工作中可以在提出佐證後，以單一視因子進行輻射熱傳效益的保守設定；
3. 混凝土護箱雖然表面的輻射熱傳機制並非主要的熱傳途徑，但亦可採用前項之保守作法，於混和貯存的設施中直接以相同的方法來進行評估，並作為護箱模式分析時的邊界條件；

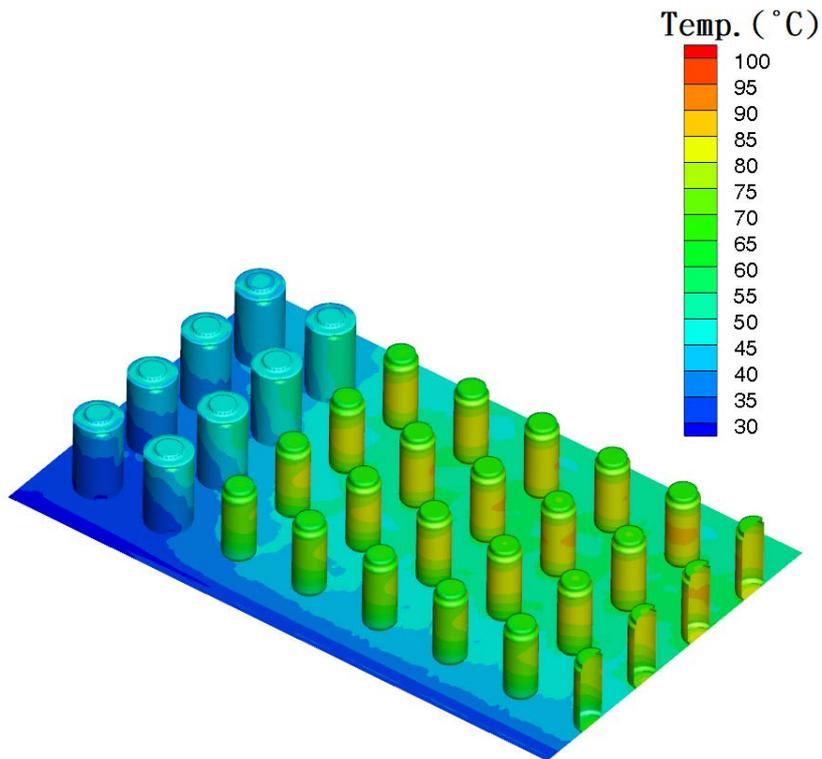


圖 37、護箱比例改變為 32:88 並密集列置之室內乾貯設施之溫度分佈

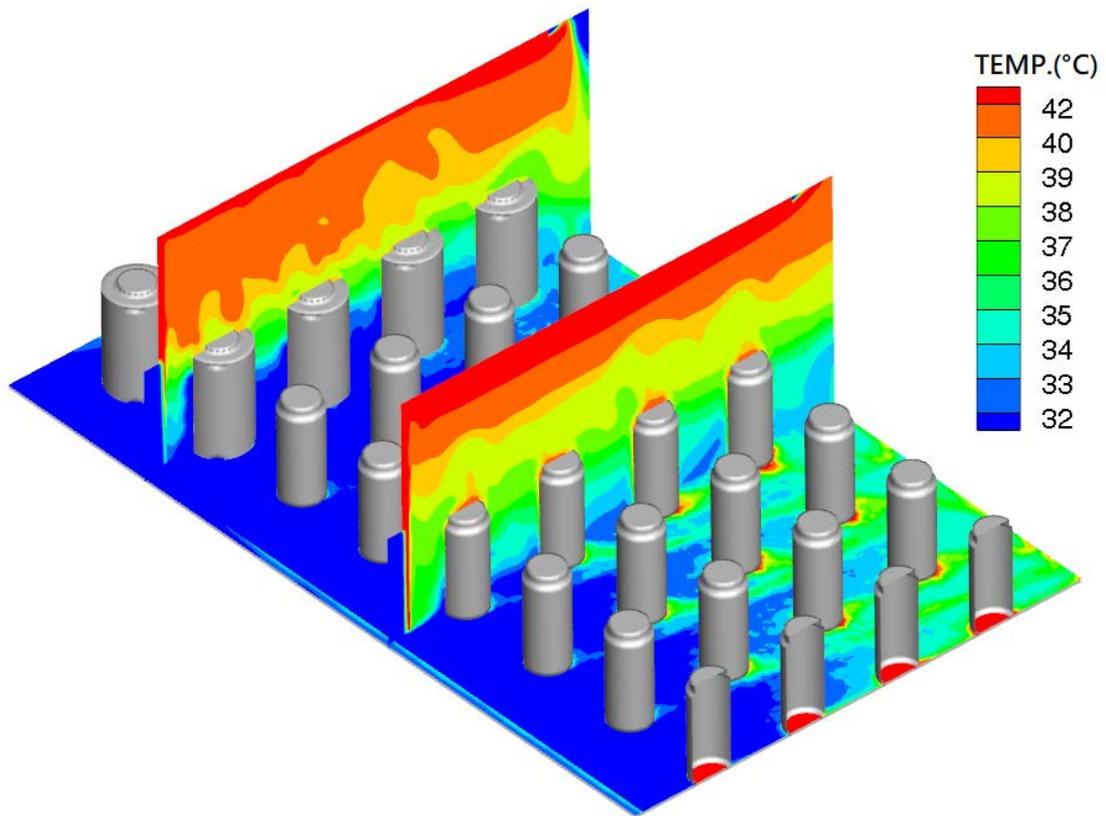


圖 38、護箱比例改變為 32:88 並密集列置之室內空氣溫度分佈

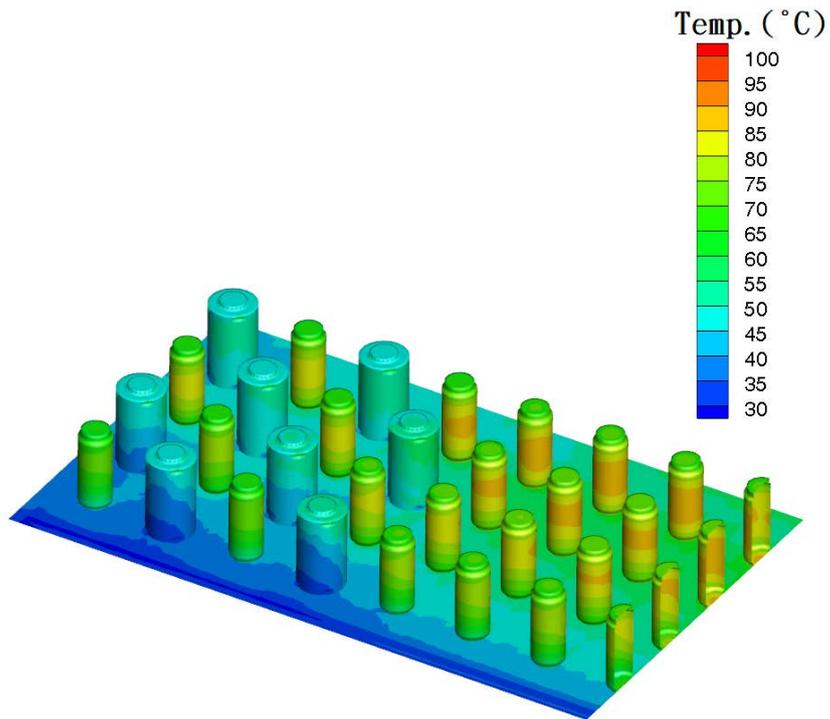


圖 39、護箱比例改變為 32:88 並以棋盤列置之室內乾貯設施溫度分佈

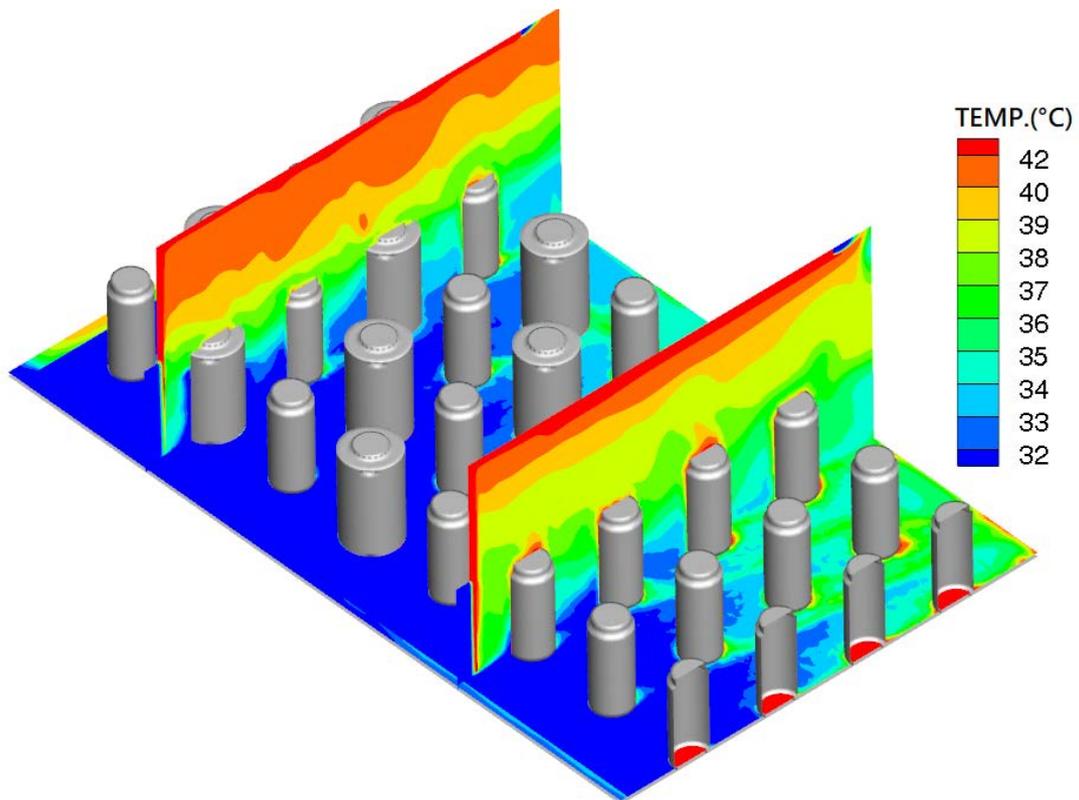


圖 40、護箱比例改變為 32:88 並以棋盤列置之室內空氣溫度分佈

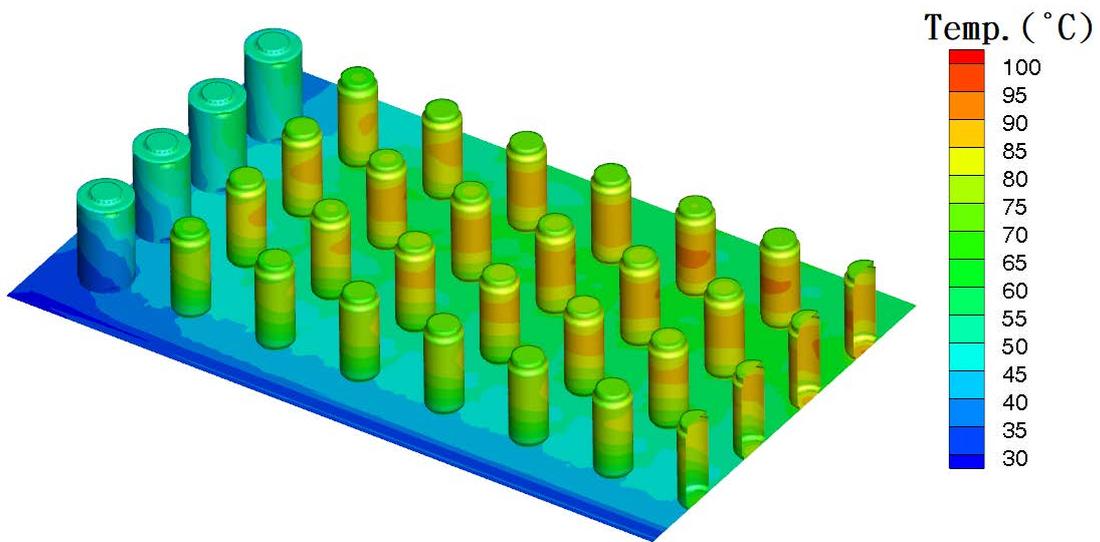


圖 41、護箱比例改變為 16:104 並密集列置之室內乾貯設施之溫度分佈

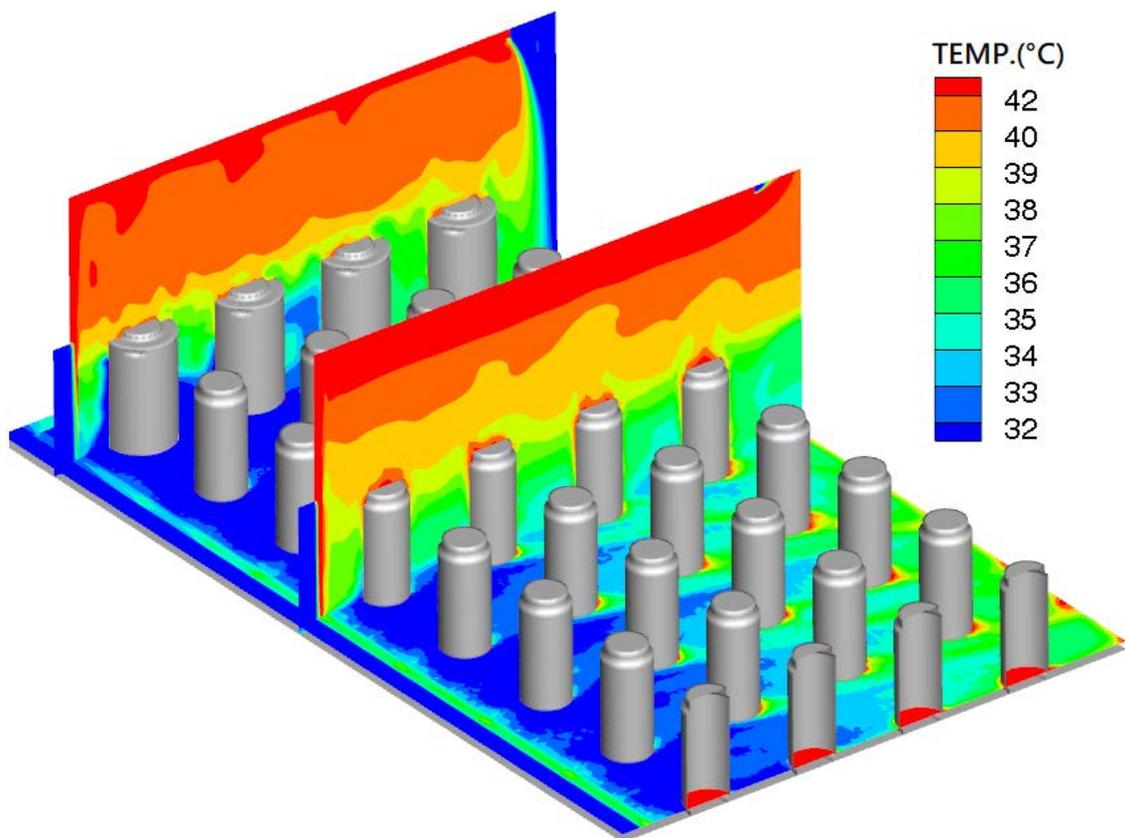


圖 42、護箱比例改變為 16:104 並密集列置之室內空氣溫度分佈

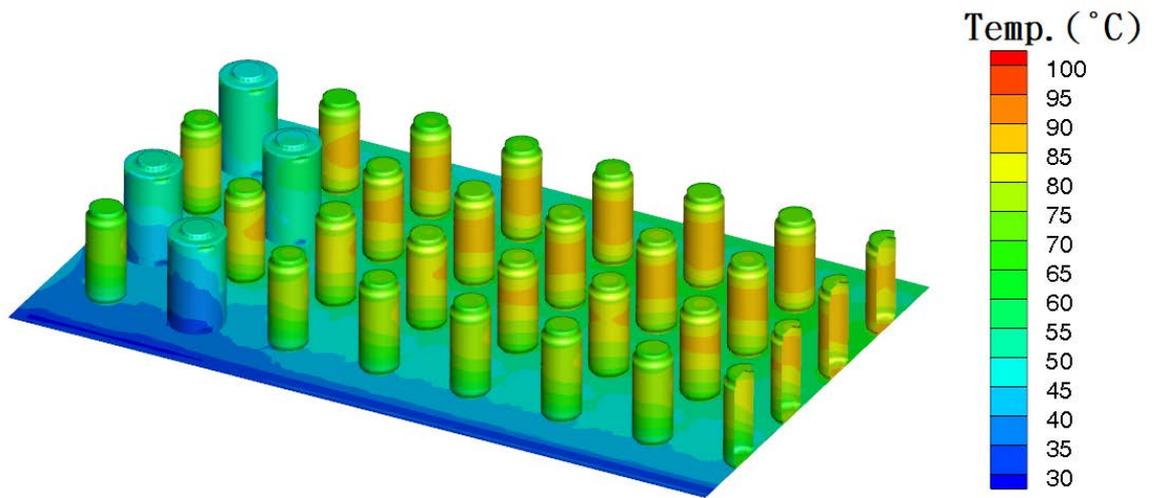


圖 43、護箱比例改變為 16:104 並採棋盤列置之室內乾貯設施之溫度分佈

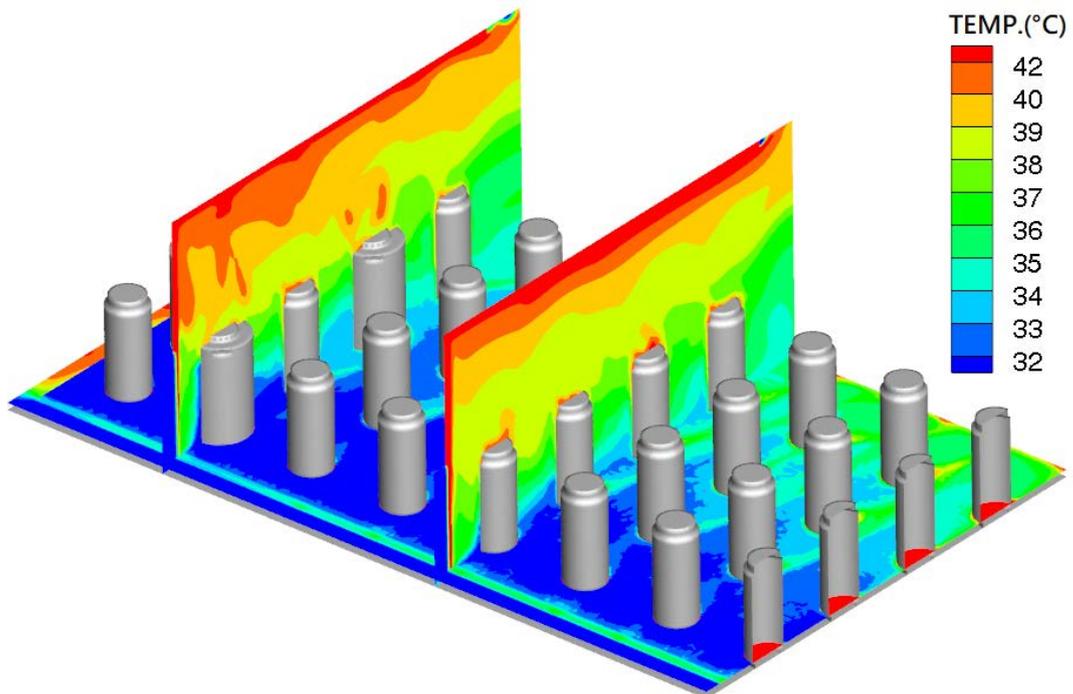


圖 44、護箱比例改變為 16:104 並採棋盤列置之室內空氣溫度分佈

5.1.3 不同護箱間距對於熱流特性之影響

相較於前述以 5.8m 護箱間距進行計算所獲得的結果，當維持整體廠房空間不變之前提下，將護箱間距縮小至 5.0m 甚至是 4.2m 時，則可以預期護箱的熱傳效果因為間距的縮小而造成影響。此一影響除了包括前述探討的視因子影響外，預期亦將會因為護箱間流道的縮小而引發更大的流阻。但由於自然對流的誘發使得驅動力與流阻間的效應將彼此相互抗衡因此其對整體溫度分佈造成的影響仍需進一步加以探討方能得知。

如圖 45 所示，在將護箱距離縮小為 5.0m 時則可發現，由於間距縮小的流場加速效果，使得護箱間的流體溫度(圖 46)明顯低於先前的案例，甚至在流至第三排護箱之時仍有與進口迷道相近的溫度表現。而此一強化的對流能力與低溫的空氣亦使得護箱表面的溫度約略為 85°C，明顯較先前的 5.8m 護箱節距的溫度值低約 5°C。但在此密集的配置下若採用分區配置的方式進行貯存時，則可發現部份金屬護箱的溫度將會上升至 95°C 左右，反而比原始的列置間距下所獲結果更高。除此之外，當護箱間距縮小時因為護箱間流阻的增加，使得較熱的氣體在只能集中於護箱上方，以致出現了比寬鬆護箱間距更高的廠房頂部溫度。

若更進一步探討護箱間距縮小之各項影響(表 18)，則可發現隨著護箱間隙(Gap)的縮小除了直接影響輻射熱傳的視因子之外，更將使得護箱前後排的流體溫度差呈現非線性的變化；除此之外，由於護箱距離的變化將同時對護箱表面速度與護箱邊界層受到影響，進而使得表面的熱對流係數出現明顯變化而令護箱的散熱效果變差。而依據此一節的探討，吾人可以得知縮小間距所造成的散熱效應影響遠比其他參數的影響更為顯著，但其影響將造成多種護箱散熱機制的競合，需與其它參數共同探討而難以由簡單線性關係加以涵蓋，建議平行驗證之單位不可逕以護箱間距的寬度作為散熱效果優劣的判定依據。

表 18、縮小護箱間距對熱傳機制指標之影響

護箱間距(m)	5.8	5.0	4.2
側邊視因子	0.63	0.543	0.507
流體溫度變化	5°C	2°C	4°C
表面熱對流係數	6.9	5.7	5.1

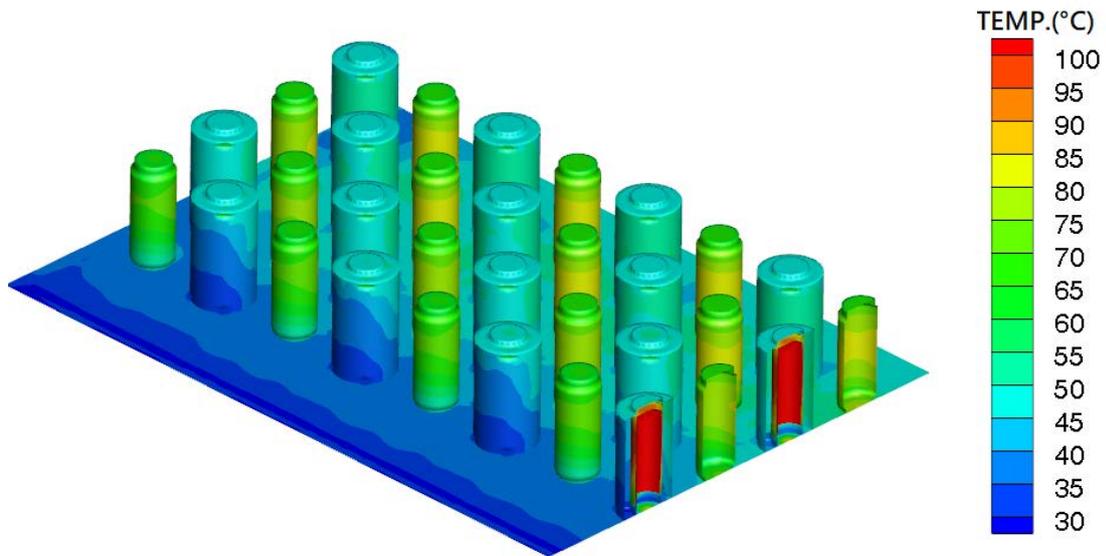


圖 45、兩種護箱以 1:1 棋盤式配置，並將護箱節距改為 5.0m 之溫度分佈

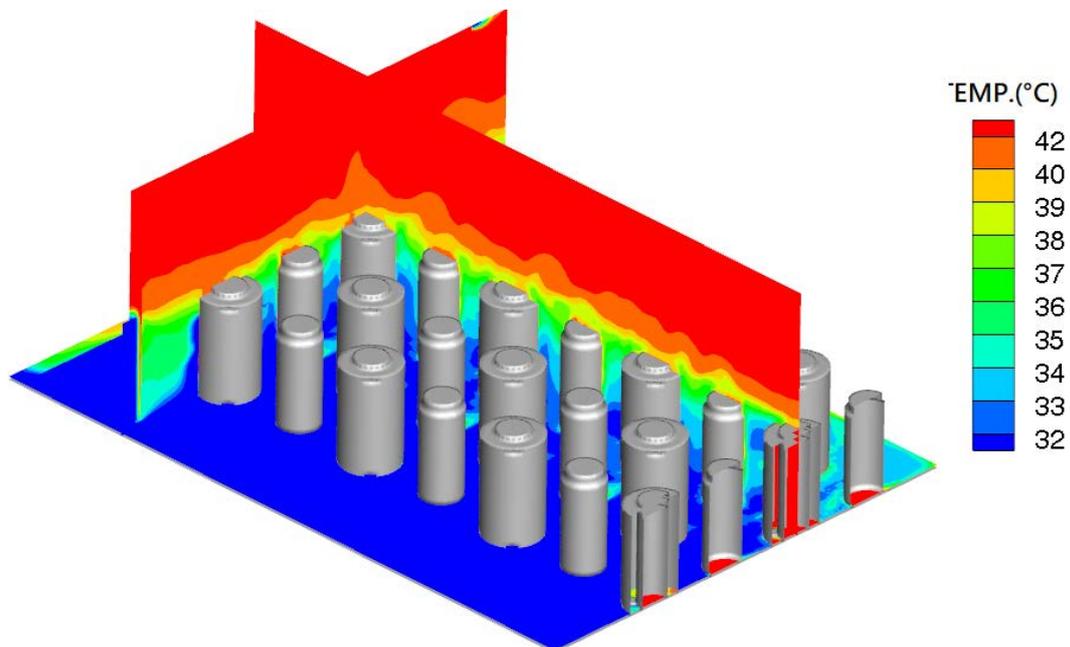


圖 46、兩種護箱以 1:1 棋盤式配置，並將護箱節距改為 5.0m 之廠房內空氣溫度分佈

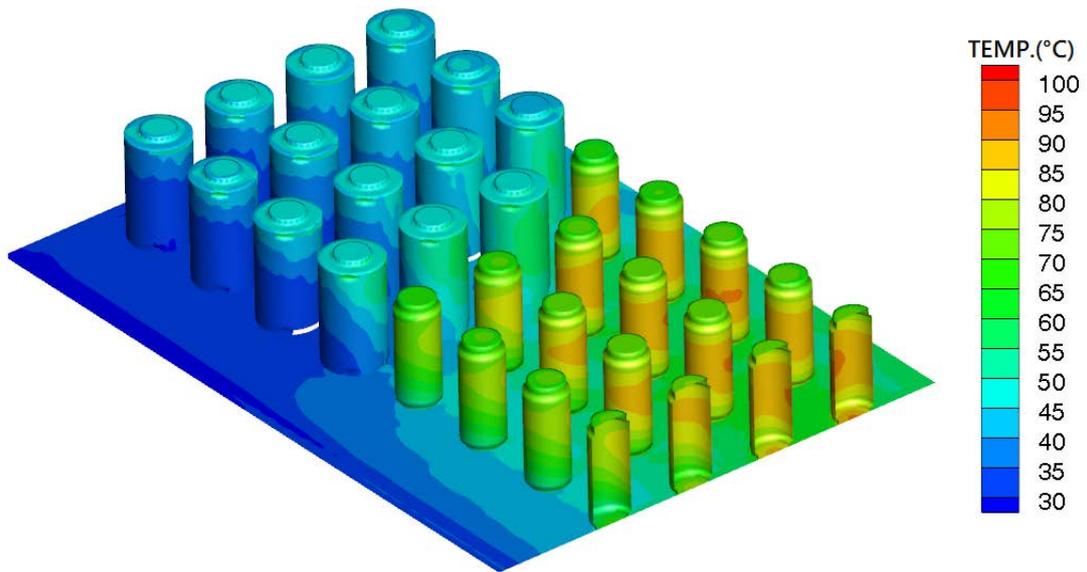


圖 47、兩種護箱以分區列置並將護箱節距改為 5.0m 之溫度分佈

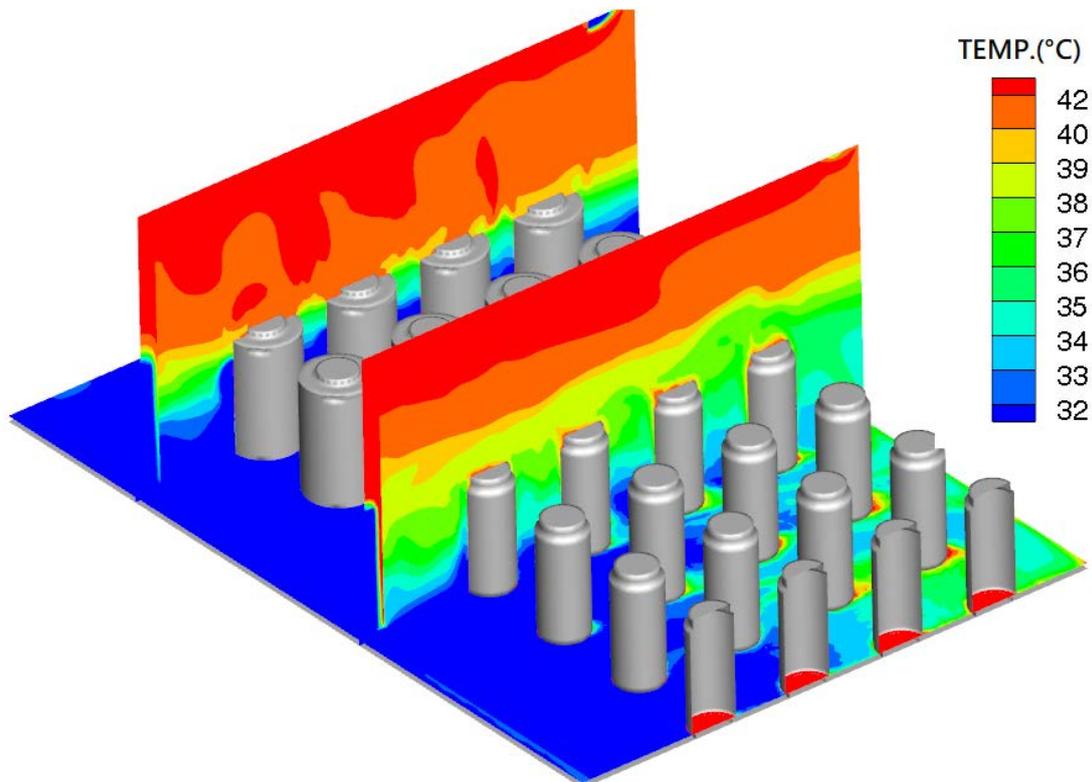


圖 48、兩種護箱以分區列置並將護箱節距改為 5.0m 之廠房內空氣溫度分佈

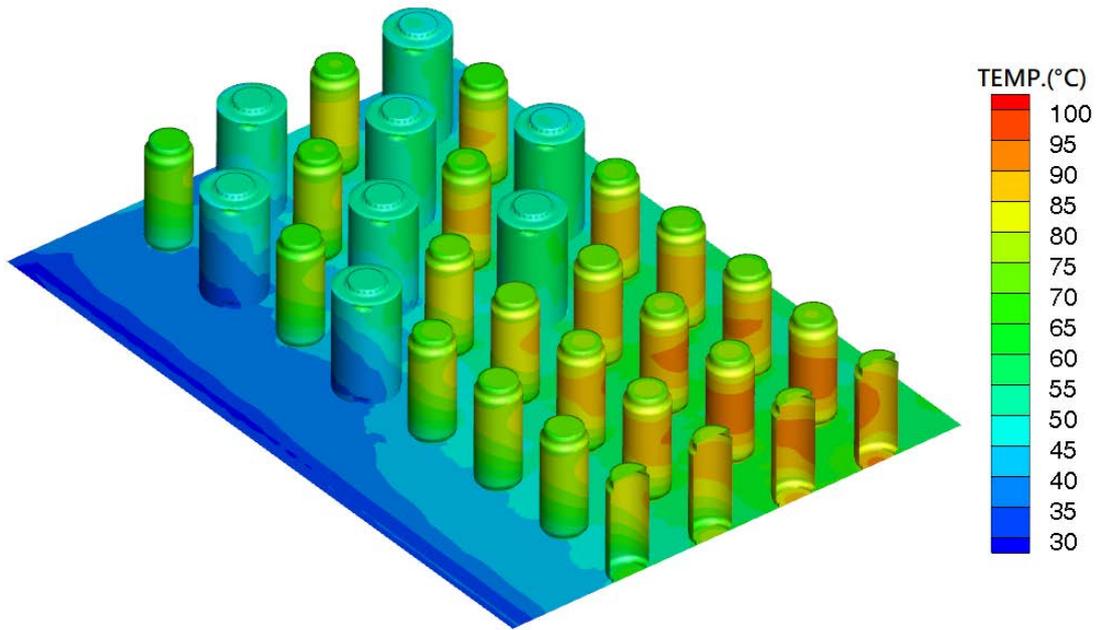


圖 49、兩種護箱以 32:88 之棋盤式配置，並將護箱節距改為 5.0m 之溫度分佈

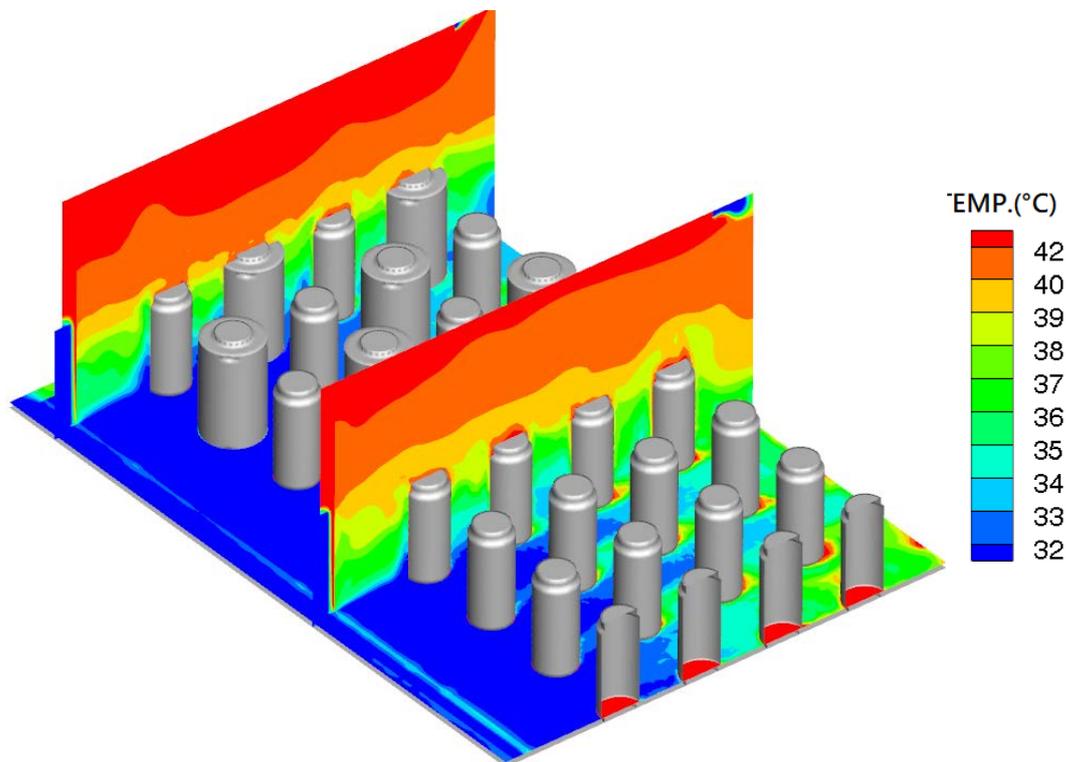


圖 50、兩種護箱以棋盤式列置並將護箱節距改為 5.0m 之廠房內空氣溫度分佈

5.1.4 採用鋼構廠房對熱流特性之影響

除了上述的各種參數的影響探討，本研究為能落實瞭解室內貯存設施因為設計與結構之不同所造成的影響，故特別就採用金屬廠房進行貯存之案例進行研究，以便與前述採用混凝土廠房之案例進行比較。

如圖 51 與圖 52 所示，當採用鋼構廠房時，日照輻射將會透過無隔熱之廠房屋頂傳入廠房內，除了導致廠房底部與進氣口溫度的明顯上升，亦會使廠房頂部之空氣溫度與護箱間的空氣溫度明顯上升 3-5°C，使得整體廠房在不考慮煙囪引導的換氣效益下會具有更熱的廠房溫度；且因為此一機制來自於廠房所受日照之影響，所以不會因為前述三節所探討之參數而改變。這意味著在選用此類廠房設計時，將會對整體內貯護箱造成全面性的影響，使得護箱同時受到來自於列置方式、間距與廠房特性對其熱傳邊界(廠房內空氣)造成影響。

綜合上述所獲得溫度結果可知，即使是選用無隔熱設計的鋼構廠房，並確實對護箱的熱傳邊界條件造成影響。但其廠房底部溫度(~37°C)與護箱頂部溫度(~42°C)仍與核一廠 1 期乾貯之異常溫度案例之邊界條件相仿(約 42°C)，亦與所蒐集得之 SZB 設施資訊相仿。由此可知，縱使將本章所載之各項參數所造成之效益加以疊加，其造成的影響應不致與過往進行異常溫度案例之護箱結果有太大差異；通常廠家會於安全分析報告評估護箱熱負載限值及廠房之整體最適化設計評估，而不致造成安全管制之議題。而基於以上各節之討論，本研究將以第 5.2 節中就上述各項參數組合之條件為基礎進行正常、異常與意外事故之護箱元件溫度探討。

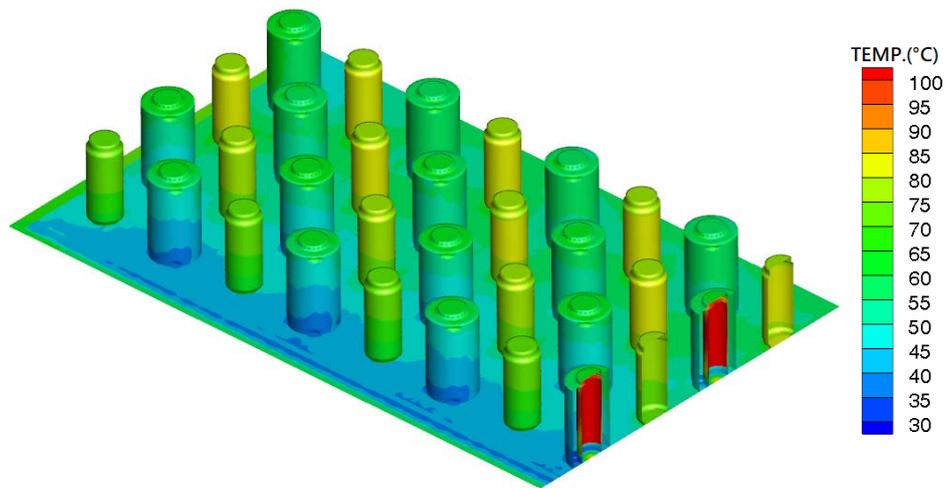


圖 51、以鋼構廠房進行貯存之護箱溫度分佈

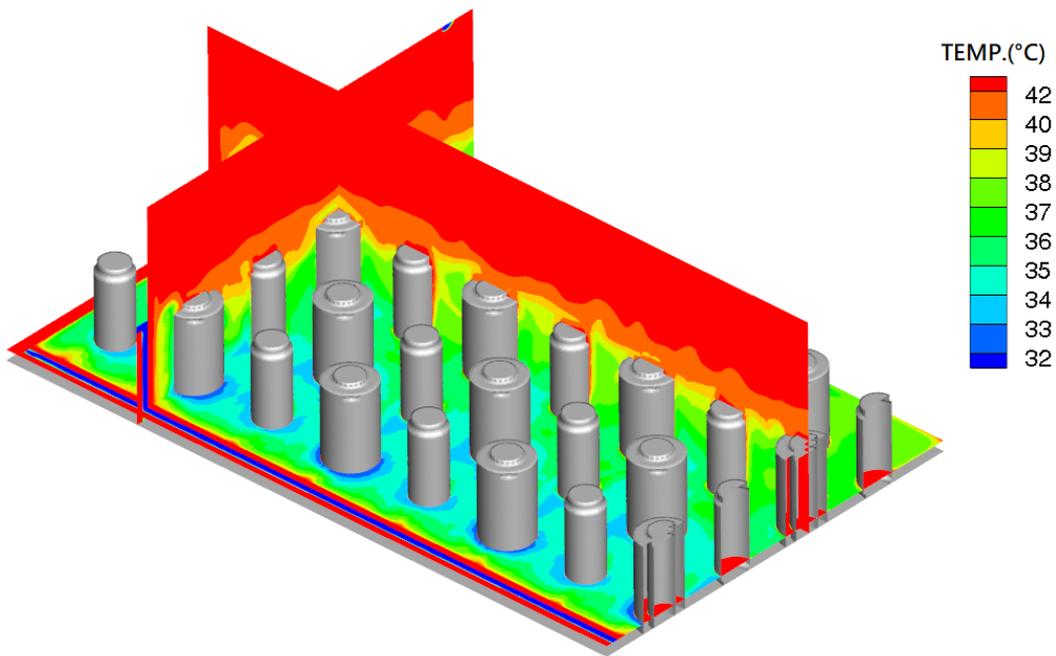


圖 52、以鋼構廠房進行貯存之廠房溫度分佈

5.1.5 考慮迷道與否對通風路徑之影響研析

綜合以上對國際設施之資訊研析可以得知，室內乾貯設施之進氣口一般而言將會設計迷道以減低用過核子燃料廠界之輻射劑量，僅有 SZB 因為主要的防護設計都已由護箱負擔而採用簡單鋼構廠房的設計，是故並無迷道之設計。由以上資訊可以知道對於屏蔽而言，迷道屬於正向設計；相反的，對於熱流分析而言，迷道狹長的通道預期將成為一個額外的流阻，減少廠房通風能力。

而為能證實本研究前述各節中，選用具迷道之廠房設計係具有熱流保守性，故本節特別採用無迷道之設計，以探討有無迷道對於整體廠房通風能力與通風路徑之影響。如圖 53 所示，在將原本置於廠房側牆之迷道變更為直接由底部進風後，雖然可以預期空氣可以更容易的流入廠房中。但在進一步與圖 29 之溫度分佈相比後，兩者並無顯著之差異。甚至進一步檢視廠房整體之流量後可以發現，雖然不考慮迷道的設計可以增加些許的流量，但整體而言並不足以提供顯著的影響。這是因為整體空氣流動的流阻可以概以下式表示：

$$\begin{aligned}\Delta P_{total} = & \Delta P_{form,inlet} + \Delta P_{friction,maze} + \Delta P_{form,outlet} + \Delta P_{friction,cask} \\ & + \Delta P_{form,cask} + \Delta P_{friction,outlet} + \Delta P_{form,outlet}\end{aligned}$$

其中，下標 *form* 代表形狀阻力，*friction* 代表摩擦阻力；*inlet*，*cask*，*outlet* 則代表廠房中各處之壓差。由上式可見，有無考慮迷道的兩種設計，其壓差異止於迷道內流阻之差異；整體影響比例有限。

由圖 54 所示的流線分佈圖亦可進一步得知，在無迷道之設計中，進口流體仍然受到護箱的阻礙，因此在第一排護箱前緣形成滯流點，並因為滯流體壓力較大之故，促使流體往護箱的間隙以及護箱上方的廠房空間流動。流動到護箱上方的空氣將不再對護箱提供有效的散熱，僅有流經護箱間隙的流體才能供應護箱冷卻之用。

而透過此一流場特性的探討可以得知，考慮迷道設計對於熱流分析而言確屬

較保守之條件，惟迷道設計所造成的流阻以及對流量的影響極為有限，且亦未對整體內部空氣流動路徑有顯著影響。故本研究於後續分析中仍將以具迷道設計之廠房作為研析之基準。

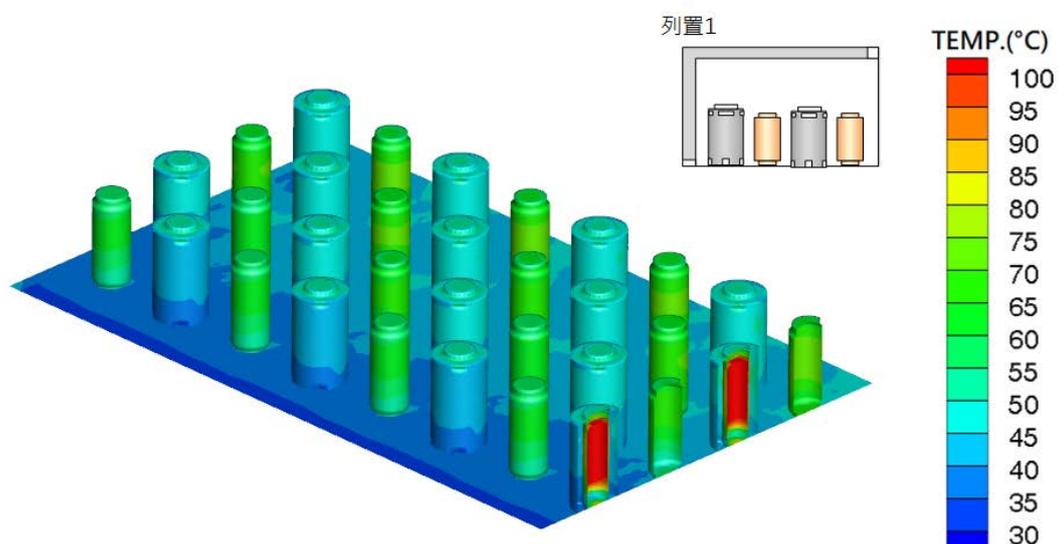


圖 53、採用列置 1 且不考慮迷道設計時之護箱溫度分佈

表 19、有無迷道對於廠房流量之影響

	考慮迷道	不考慮迷道	差異(%)
流量(m ³ /s)	38.37	39.3	2.4

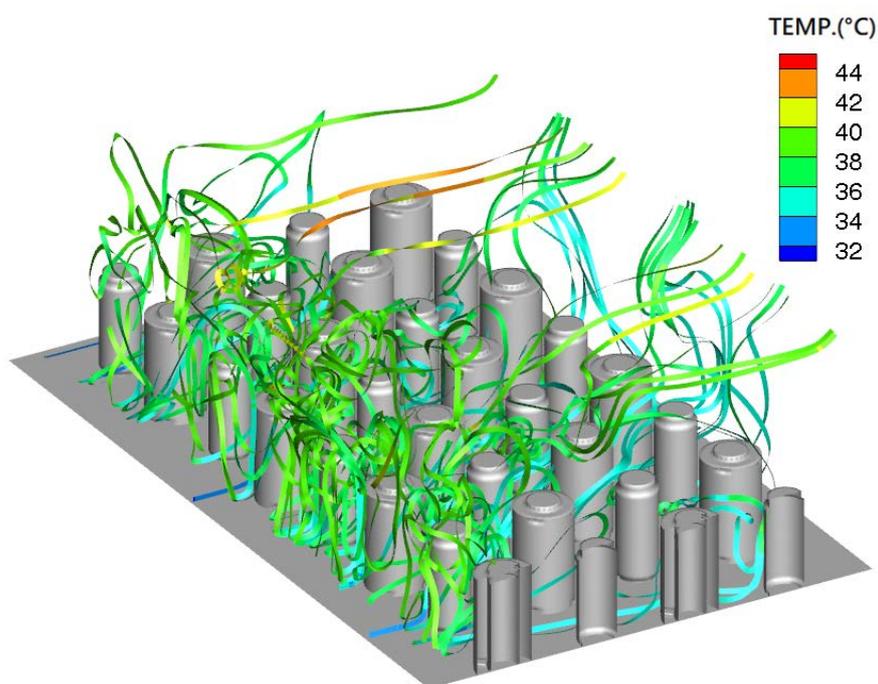


圖 54、採用列置 1 且不考慮迷道設計時之廠房內流線分佈

5.1.6 各式參數對正常貯存之最大影響

綜合本報告於第 5.1.1-5.1.5 探討之種現象，以及本研究在發展模式時，利用輻射熱傳邊界(環境溫度、視因子)以及對流邊界(環境溫度、表面對流係數)等參數之綜合探討可以得知：

1. 廠房中最前列護箱將具有最低的環境溫度與較大的視因子；
2. 最後列之護箱將具有相對較高的環境溫度與最低表面對流係數；
3. 中列護箱因遠離廠房中央通道，且被護箱包圍，故具有最低之視因子。

是故為能進一步將上述各類參數之影響加以量化，本研究擬就上述各項參數之影響進一步加總，以提出一組最為保守之邊界條件，用以計算金屬護箱與混凝土護箱於廠房中最保守之狀態下的元件溫度，並與該護箱原始室外設計之結果比對，即可量化室內乾貯對該類護箱所造成的最大影響。進一步經參數匯整後可以得知混凝土護箱主要進氣口之溫度在各類的組合下，其最末排進氣口溫度與廠房進口溫度差異僅有 5-8°C 左右，相差並不明顯。因此可將其護箱模型之邊界條件加以整合為最保守流體溫度(32°C+8°C=40°C)以及最小表面熱傳係數(5.1W/m²-k)與視因子(0.507)作為邊界條件以進行正常案例計算。而所獲得之元件溫度分佈則如圖 55 所示，其護箱表面溫度約為 60-70°C 左右。更進一步的量化結果則如表 20 所示，其量值顯示於此貯存條件下高燃料溫度約為 344°C 左右，且外部混凝土元件之最高溫度亦不超過 96.2°C，整體而言最小餘裕出現在燃料護套處，但仍有約 56°C 之餘裕，遠大於本研究中各項案例組合可能存在之最大溫度變異量(8°C)。而透過此一保守參數之組合邊界之計算結果即可證實列置對於混凝土護箱之影響實為有限。

若利用相同之處理方式，將各類廠房參數可能導致之最保守條件加以歸納並置入 HI-STAR 護箱模式之對應邊界中，則可獲如圖 56 與表 21 所示之分析結果；各類元件亦有明顯的溫度餘裕且最小餘裕落於其中子吸收材 Holtite-A 之處，

與燃料護套所具有之餘裕皆約為 45°C 左右，但由於金屬護箱需藉由護箱表面進行直接散熱，故前節中各項護箱間距、列置方式、間距所造成的對流係數及尾流影響，預期將造成約 20°C 之溫度變異量。

綜合以上之各項探討可以發現，在裝載有兩種不同護箱形式之室內廠房中，各項可能之參數組合所造成的影響將因為護箱形式的不同而造成不同程度的散熱機制影響，其中則以金屬護箱所受到的影響較顯著，值得於未來安全審查時多加注意分析者所選用之參數合適性。但無論如何，各類護箱即使在所有保守的邊界條件下，再加計可能之各項參數組合所造成的變異量後，其分析結果仍顯示元件具有合適的溫度餘裕。這意味著室內廠址與護箱搭配的乾貯設施安全審查時，仍應將重點著置於護箱初始設計之主要散熱設計與其餘裕是否可以涵括室內乾貯各式參數所造成的次要效應，並滿足後續事故評估之操作、行政管制之要求，而無需著眼於室內乾貯對護箱造成的個體溫度偏差。

據此，本研究將基於此一發現，將各項正常貯存之護箱保守結果作為後續 5.2 節之異常與意外事故之特性研析。

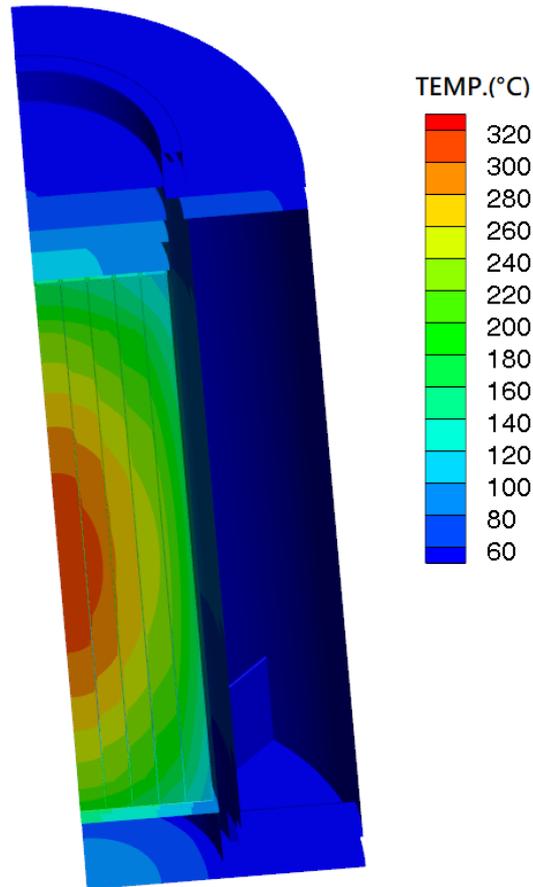


圖 55、HI-STORM 於各式邊界條件中最保守組合之溫度分佈

表 20、各式參數對於 HI-STORM 護箱之最大影響

元件名稱	室內最保守溫度 (°C)	室外貯存元件溫度 (°C)	溫度變異量 (°C)	限值餘裕 (°C)
Basket	314.9	298.6	16.3	111.7
BORAL	315.4	298.6	16.8	139
Cask	163.3	153.9	9.4	263.3
concrete	96.2	90.2	6	80.4
Dust Shell	53.4	58.3	-4.9	373.2
Fuel	344.2	330.0	14.2	55.8
Lid	104.6	100.4	4.2	322
Liner	97.0	90.8	6.2	329.6

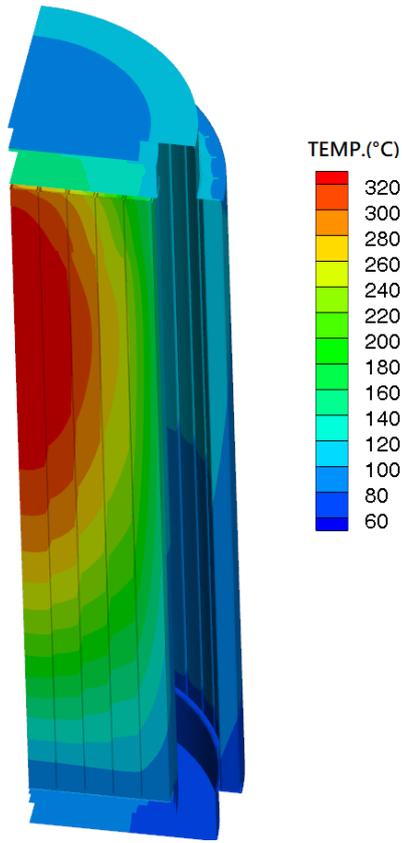


圖 56、HI-STAR 於各式邊界條件中最保守組合之溫度分佈

表 21、各式參數對於 HI-STAR 護箱之最大影響

元件名稱	室內最保守溫度 (°C)	室外貯存元件溫度 (°C)	溫度變異量 (°C)	限值餘裕 (°C)
Basket	350.3	346.8	3.5	88.5
BORAL	350.3	346.9	3.4	116.3
Cask	113.5	109.2	4.3	317.7
Overpack	98.0	108.3	-10.3	337.2
Holtite-A	103.3	99.3	4	45.1
Fuel	365.9	362.6	3.3	45.9
Lid	149.2	147.3	1.9	333.9
Grmma_shielding	110.5	103.3	7.2	329.6

5.2 單一設施貯存不同類型護箱之異常與意外情境研析

經過本報告前述各節的討論結果與情境規劃，並進一步考慮設施所處經緯度及通風系統之設計後，本研究決定以環境溫度因故上升至異常溫度、極高環境溫度與以及廠房半阻塞(含護箱半阻塞)案例作為異常狀態之案例；而廠房全阻塞事故則以護箱絕熱案例進行保守涵蓋。此外，研究中更假設護箱在裝載期間遭遇不同情境之天然災害而衍生出水災意外案例以及貯存期間因為機具或公用設備導致之火災納入研析，以作為本節討論之重點。

5.2.1 單一設施貯存不同類型護箱之環溫變化案例研析

如圖 57 與圖 58 所示，當設施因為環境異常而導致異常高溫甚至達到極高環境溫度(56.1°C)，進氣口之溫度亦將隨外界環溫度的升高而提升。由熱傳理論而言此一現象會造成所有元件溫度(如圖 59 與圖 60)隨進口溫度的上升而線性增加。但實際上，上述的分析結果為穩態分析所獲得之保守結果，此類異常事故若因為氣候(如焚風)或是日照等影響，其時間往往僅能維持一小段時間。在進一步針對廠房之每小時熱質流率與廠房內護箱熱質相比，可以發現其比例相對較小。這意味著即使乎略熱傳遞與熱阻值所造成的散熱遲滯，要藉由空氣溫度的改變對已穩定貯存於廠房內的護箱造成溫度的影響，則其改變的時間往往需要數小時甚至數天。

$$\frac{30 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 3600\text{s} * 1004 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} * 1\text{K}}{100\text{T} * 1000\text{kg} * 32 * 500 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{k}}} \sim 0.1$$

此外，經檢視兩種護箱的溫度分佈(如圖 59 與圖 60)以及量值(表 22 表 23)亦可發現在單一設施裝載不同護箱，並如前述般考慮各種護箱列置參數所造的影響後，仍未見此種護箱混合貯存之情境會因為溫度異常增加而衍生其它的特殊熱流狀況；整體事故之情境如同熱流基礎理論般，大致依環境溫度呈現線性變化；

彼此間僅因為溫度增加所導致的輻射熱傳效益而略有溫度值的偏差；因此主管機關無需對此一貯存規劃之安全分析進行額外之安全審查。

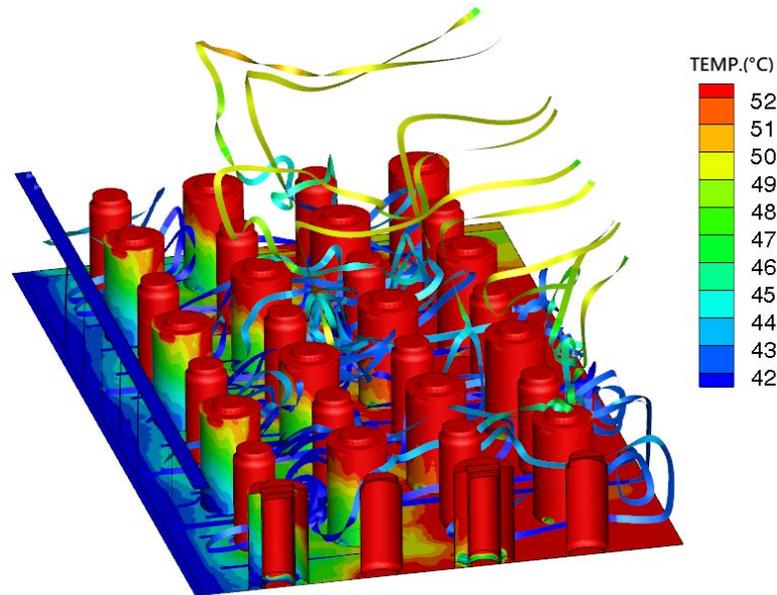


圖 57、單一設施裝載不同護箱之狀況下發生異常高溫之溫度分佈

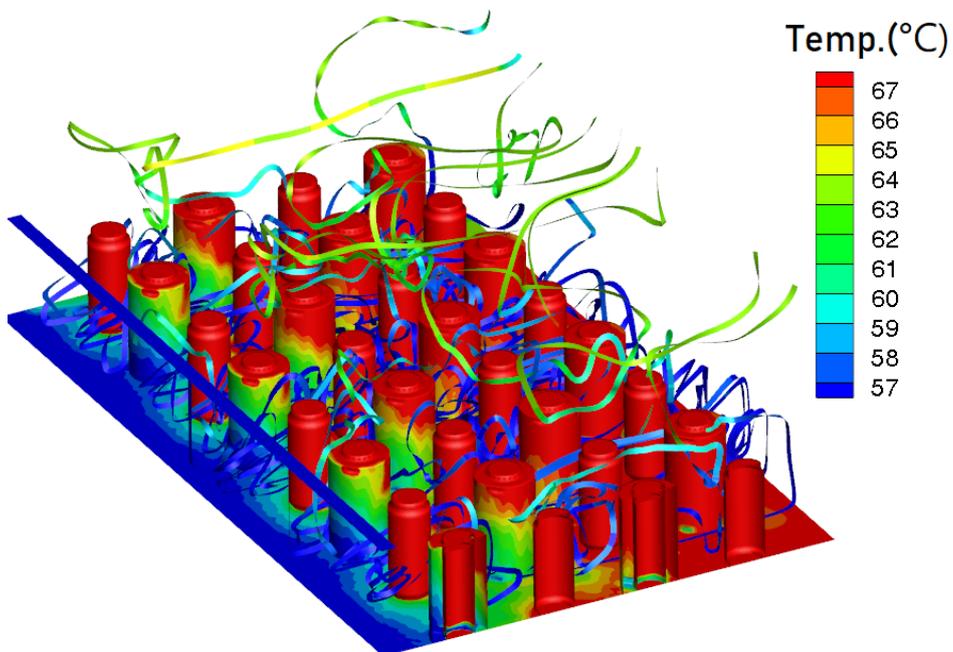


圖 58、單一設施裝載不同護箱之狀況下發生極端高溫之溫度分佈

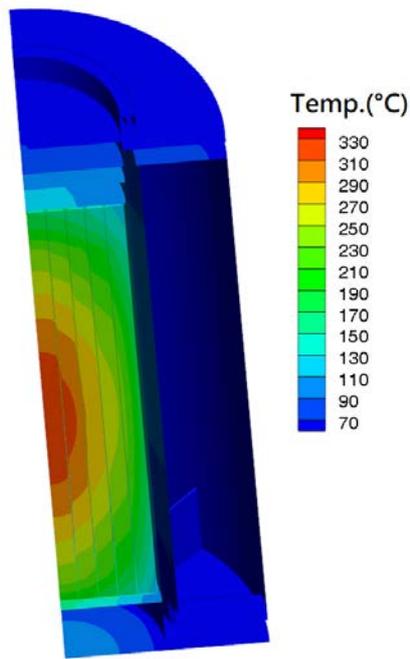


圖 59、HI-STORM 於溫度異常事故下之溫度分佈

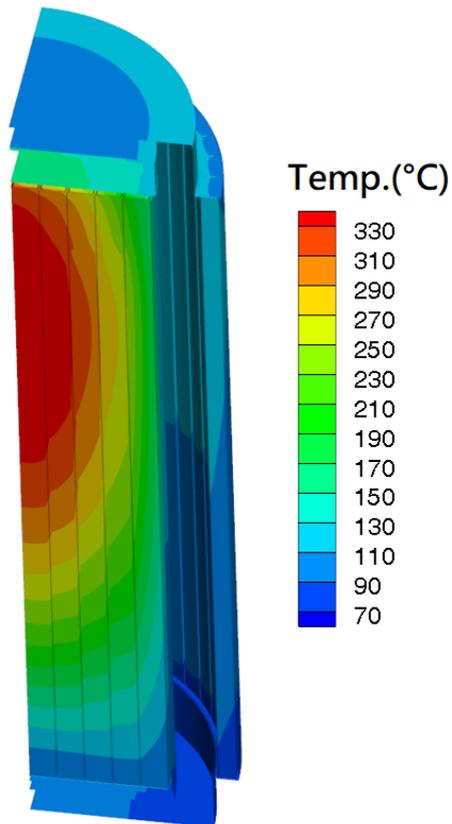


圖 60、HI-STAR 於溫度異常事故下之溫度分佈

表 22、溫度出現異常時對於 HI-STORM 護箱之最大影響

元件名稱	溫度異常之 元件溫度(°C)	極高環溫之 元件溫度(°C)	溫度限值(°C)
Basket	325.4	339.1	426.6
BORAL	325.7	339.2	454.4
Cask	163.4	177.2	426.6
concrete	106.7	120.5	176.6
Dust Shell	63.4	77.2	426.6
Fuel	354.2	368.1	570.0
Lid	116	129.8	426.6
Liner	107.6	121.4	426.6

表 23、溫度出現異常時對於 HI-STAR 護箱之最大影響

元件名稱	溫度異常之 元件溫度(°C)	極高環溫之 元件溫度(°C)	溫度限值(°C)
Basket	360.6	374.1	426.6
BORAL	360.7	374.2	454.4
Cask	123.7	137.3	426.6
Overpack	108.3	122.0	426.6
Holtite-A	113.5	127.2	148.4
Fuel	376.1	389.8	570.0
Lid	159.4	173.2	471.3
Grmma_shielding	120.7	134.5	428.3

5.2.2 進氣口半阻塞事故

本進氣口半阻塞之事故除探討廠房進氣口半阻塞之情節外，針對內部貯存的 HI-STORM 護箱因具有進氣口設計，故一併探討其護箱進氣口半阻塞之狀況。

為求事故情節之顯著化，本研究對於廠房進氣口半阻塞事故擬採流量減半之假設性邊界條件進行設定，將原始分析所獲之廠房流量 39.7Kg/s 折減為 19.85Kg/s 作為進口流量。可以預期的，雖然此一邊界條件不會影響內部流場的發展，但由能量方程式的推算則可以得知，該條件下的廠房內流體溫度將提升一倍，以及進口流場速度減少一半。此一廠房流場的改變進一步造成如圖 61 所示般的護箱表面溫度上升，以克服進口流速減低以及廠房溫度增加所造成的自然對流散熱能力的損失。在進一步與圖 29 所示的正常廠房護箱溫度進行比對後，可以很明顯的發現，後排金屬護箱溫度由最熱的 70°C 左右，上升至 90°C 左右；此溫度的變化不僅證實前述廠房的流場因為流量減少的溫度上升問題，進而導致後排護箱溫度上昇。由位於中間的第二、三排護箱其表面更高達 95°C 的證據更可明確瞭解到由進氣口噴流所造成的貢獻亦隨之減弱。由圖 62 之廠房 2m 高處之流體溫度可以發現，此事故下流體之溫度已然從圖 30 所示的 32-42°C 上升至 44-52°C，且因為進口強制流的速度較慢之故，令其無法在第二、三排中央形成較冷的上升氣流，故使得這兩列護箱的溫度顯著上昇。由圖 62 所示的流線分佈可以很明顯的見到，進口強制流動的能力減低後，整體的流場發展將更趨於純自然對流，故使得位於圖面右側處的廠房中央，具有較先前正常貯存案例更為明顯的上升流動，並進一步造成圖 62 廠房中線鄰近區域的氣體溫度下降。

在進一步將流場所致的護箱表面邊界條件綜合，並置於護箱模型進行求解後，可以得知兩種護箱之元件仍符合原始設計限值；惟在金屬護箱中，因為護箱隨著廠房溫度的更加嚴苛，使得原 HI-STAR 護箱用溫度餘裕最小的吸收中子的 Holtite-A 材料更加接近材料限值。

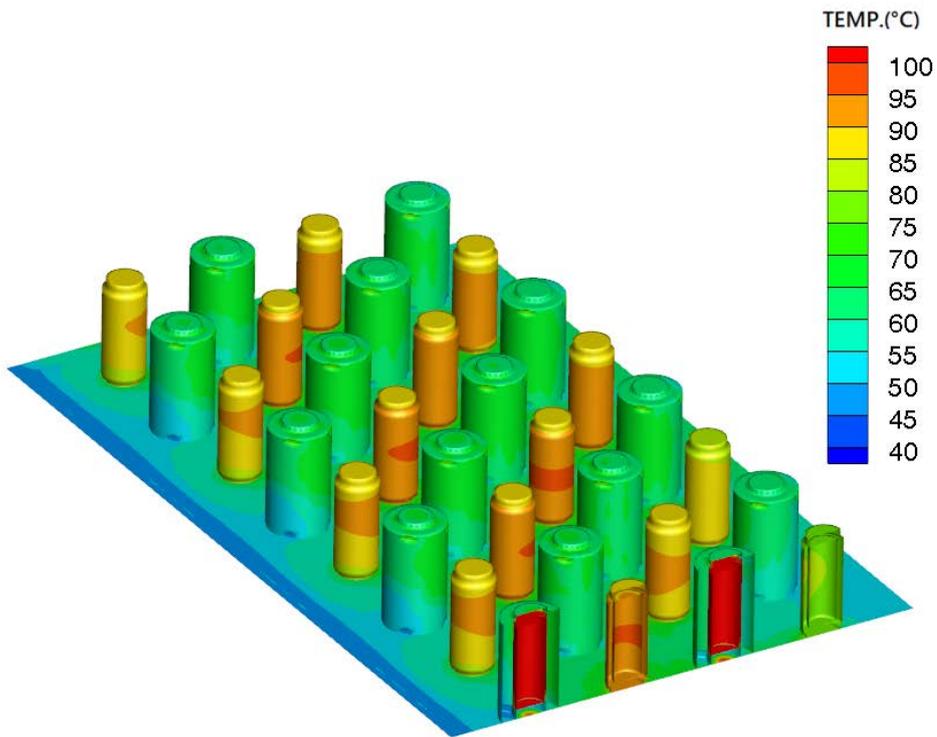


圖 61、發生廠房進口半阻塞事故之全廠護箱溫度分佈

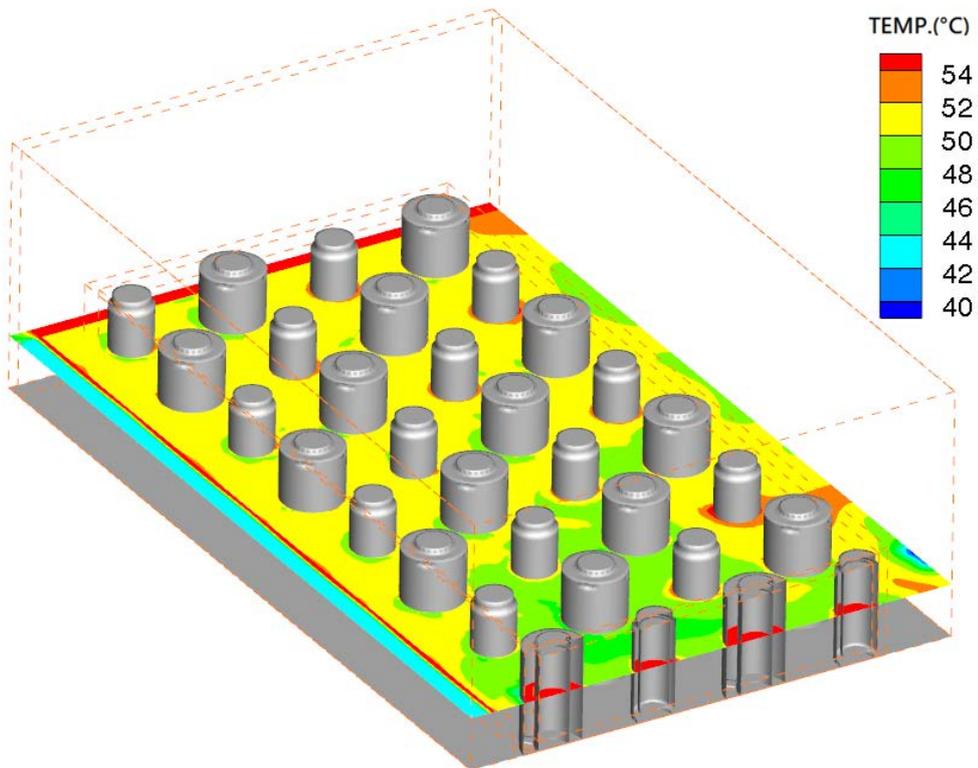


圖 62、發生廠房進口半阻塞事故下之廠房流場溫度分佈

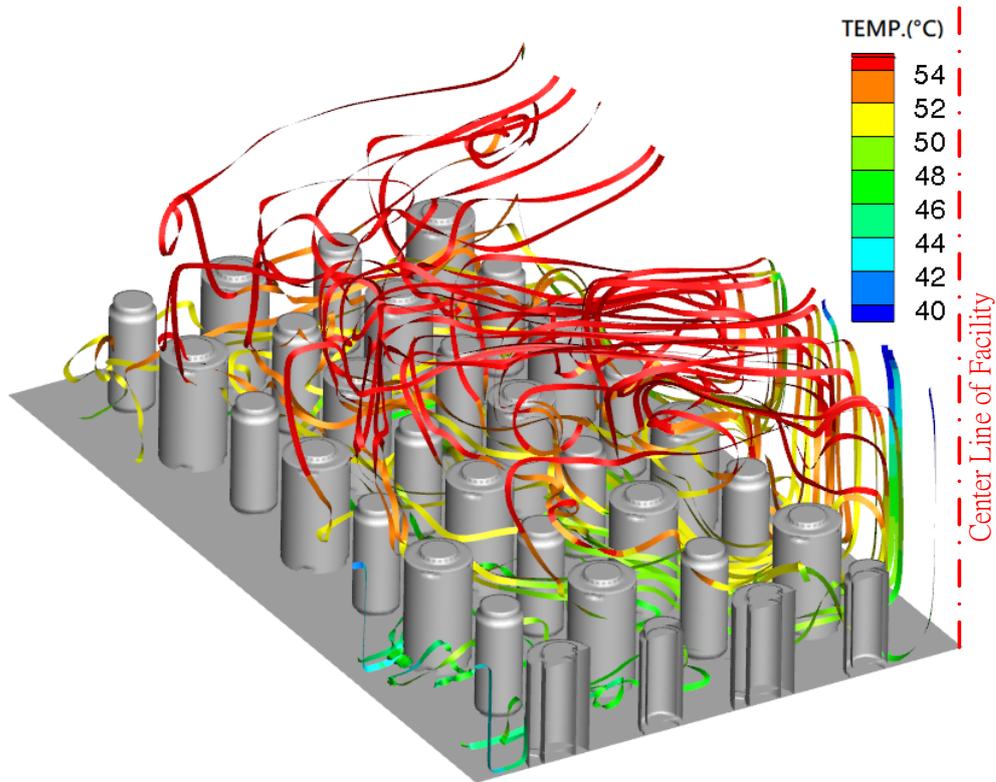


圖 63、發生廠房進口半阻塞事故下之廠房流線分佈

表 24、廠房進口半阻塞事故對於 HI-STAR 護箱之最大影響

元件名稱	元件溫度(°C)	溫度限值(°C)
Basket	368.0	426.6
BORAL	368.0	454.4
Cask	131.2	426.6
Overpack	115.8	426.6
Holtite-A	121.1	148.4
Fuel	383.3	570.0
Lid	166.8	471.3
Grmma_shielding	128.3	428.3

表 25、廠房進口半阻塞事故對於 HI-STORM 護箱之最大影響

元件名稱	元件溫度(°C)	溫度限值(°C)
Basket	315.2	426.6
BORAL	315.2	454.4
Cask	170.6	426.6
concrete	112.2	176.6
Dust Shell	67.5	426.6
Fuel	345.2	570.0
Lid	116	426.6
Liner	112.9	426.6

同前述對廠房進氣口半阻塞之事故討論，針對 HI-STORM 護箱之進氣口事故，本研究亦將其護箱進氣口之流量加以折減；原分析案中 HI-STORM 護箱於最保守之條件下，單一護箱進氣口流量為 0.524kg/s，研究中則將其設定為 0.262kg/s，以作為分析模式設定之依據。如圖 65 所示，整體護箱之溫度分佈與其它案例並無顯著差異，這是因為雖然流量減半，但空氣流道仍可提供有效的移熱能力。若進一步透過表 26 與表 25 之元件溫度比對，則可發現護箱進氣口阻塞案例對混凝土護箱而言，其影響將較廠房半阻塞顯著。這是因為護箱半阻塞將直接影響空氣流道內的流量，而廠房半阻塞時雖然會造成廠房出氣口溫度的提升，但對於混凝土護箱的主要散熱機制是來自於廠房基座的冷空氣，故廠房半阻塞事故並不會顯著造成混凝土護箱元件溫度的上升。

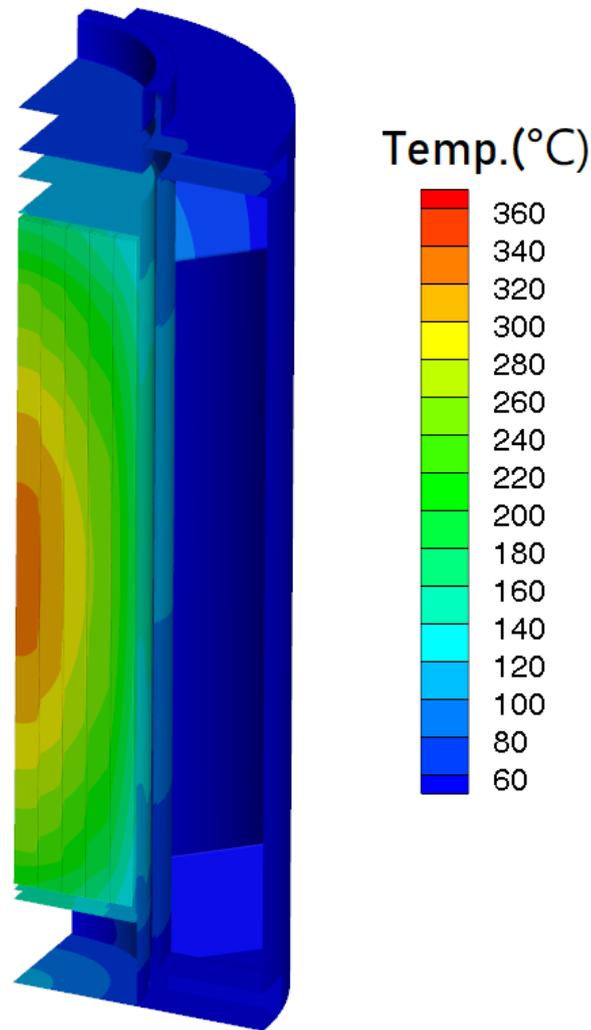


圖 64、HI-STORM 發生進氣口半阻塞事故下之元件溫度分佈

表 26、護箱進口半阻塞事故對於 HI-STORM 護箱之影響

元件名稱	元件溫度(°C)	溫度限值(°C)
Basket	328.8	426.6
BORAL	328.8	454.4
Cask	174.4	426.6
concrete	110.3	176.6
Dust Shell	54.8	426.6
Fuel	355.6	570.0
Lid	120.1	426.6
Liner	111.2	426.6

5.2.3 單一設施貯存不同類型護箱之水災意外情境研析

假設本研究所探討之假想設施在完成裝載容器之接收，並將其於地坑完成包封容器(含 HI-STAR 與 HI-STORM)裝載之同時，發生假想性水災事故，並導致護箱被水淹沒，此時即可透過此類水災意外事故進行情境研析；於此狀況下護箱之邊界條件如歸納如下：

1. 水災意外發生時，液態水受裝載用地坑受限之故，而使該處之水溫達到 100°C；護箱各處原與空氣接觸之範圍被水淹沒；
2. 混凝土護箱之空氣流道設定為恆溫 100°C 之水體，以表現洪水淹沒後之最保守物理特性；
3. 不考慮日照效應；
4. 不考慮外部輻射熱源；
5. 預期分析結果不致超過設計限值，故以穩態方法進行求解。

而分析結果顯示，由於水的物理特性將在相變化時帶走大量熱量，故護箱與水接觸之面積(如圖 65 與圖 66)將能有效的限制於 100°C；故雖然環境溫度上升但卻也同時增加了自然對流的能力。這使得金屬護箱與混凝土護箱的外層皆無需擔心溫度超出設計限值之狀況(如表 27 與表 28)；然而，也因為主要影響護箱熱流狀況之邊界將直接作用在護箱表面，因此亦與室內貯存之設計條件無關，即亦單一設施內貯存多種不同類型或是不同列置之護箱規劃，皆不會影響此類熱流分析結果。

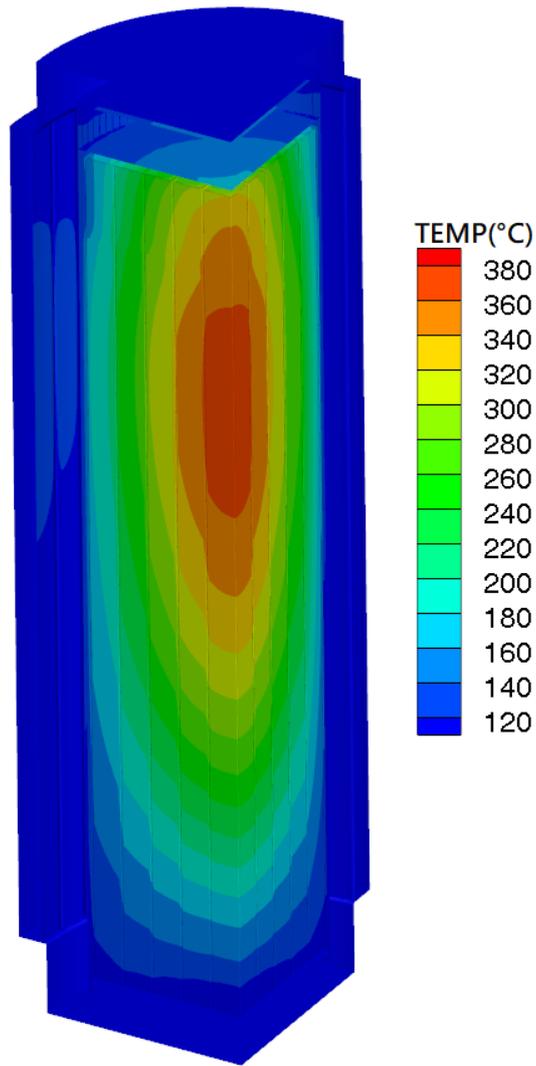


圖 65、HI-STAR 於水災事故下之溫分佈

表 27、水災事故下 HI-STAR 護箱之元件溫度

元件名稱	元件溫度(°C)	限值餘裕 (°C)
Basket	363.14	75.66
BORAL	363.15	103.45
Cask	121.73	309.47
Overpack	115.72	319.48
Holtite-A	110.92	37.48
Fuel	378.32	191.68
Lid	155.34	327.76
Grmma_shielding	113.87	326.23

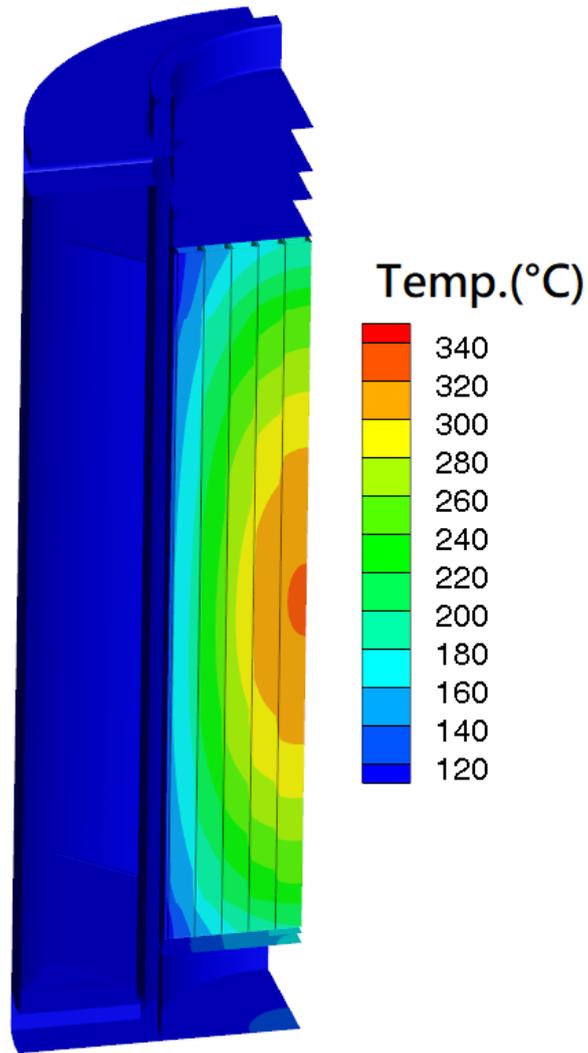


圖 66、HI-STORM 於水災事故下之溫分佈

表 28、水災事故下 HI-STORM 護箱之元件溫度

元件名稱	元件溫度 (°C)	限值餘裕 (°C)
Basket	321.34	117.46
BORAL	321.34	145.26
Cask	164.30	266.90
concrete	100.0	48.40
Dust Shell	100.0	335.20
Fuel	349.35	220.65
Lid	117.76	365.34
Liner	100.0	340.10

5.2.4 單一設施貯存不同類型護箱之火災意外情境研析

為探討單一設施裝載不同護箱後對於火災狀況之影響，本研究擬以下邊界條件進行火災模擬：

1. 火災意外發生時，火源溫度設定為 800°C 並維持 10 分鐘；
2. 不考慮日照效應；
3. 不考慮外部輻射熱源，且假設火災可能發生於任一護箱處，故忽略護箱列置之輻射熱傳遮蔽效果，視因子設定為 1；
4. 預期分析結果不致超過設計限值，故以穩態方法進行求解；
5. 以 5.1.5 節正常貯存案例中之結果作為暫態計算之初始條件。

於分析模式之邊界條件設置時，即已將最保守之條件設定於單一護箱模式之邊界上，其分析方法與設施中是否貯存多種護箱並無直接關聯，僅需導入對應於正常貯存下之護箱溫度作為初始條件即可獲得所需結果。

當 HI-STAR 發生火災事故時(如圖 67 所示)，其熱源將從外而內傳遞，故外側元件溫度將快速上升，而隨著外包封容器(OVERPACK)的升溫，亦將導致內部中子屏蔽材的升溫；此趨勢與 108 年研究案中指出該類護箱因為中子屏蔽材接近外側而近受火災影響之結果一致。也由於中子屏蔽材(Holtite-A)熱傳導效果不佳之故，間接減少了火災期間對於外包封容器內層加馬屏蔽與護箱殼體之升溫現象，而更內部的燃料護套溫度當然亦不會受到火災影響。

相同的現象亦可於 HI-STORM 之護箱分析中發現，惟 HI-STORM 因具有空氣流道之故，將使得事故期間火災所導致的熱空氣進入護箱內部，並直接的密封鋼筒表面進行加熱。也因此圖 68 所示之溫升趨勢在外殼 DUST SHELL 被加熱後，逐步的出現混凝土、內襯與密封鋼筒殼體升溫的現象，而燃料束則不會受到火災事故的影響。但值得注意的是，由於密封鋼筒殼體厚度遠低於內襯之故，導致火災之熱空氣進入時，其溫升趨勢較內襯更快。

整體而言，此案例評估結果已印證，對於已將保守條件設定於單一護箱模式以探討事故情境之案例，於分析時僅需帶入合適之邊界條件與初始條件即可，無需進一步考量護箱間彼此之交互作用以及所帶來的技術挑戰，亦即此類分析不會因為護箱類型、比例與列置條件而對主管機關之審查造成額外的管制事項。

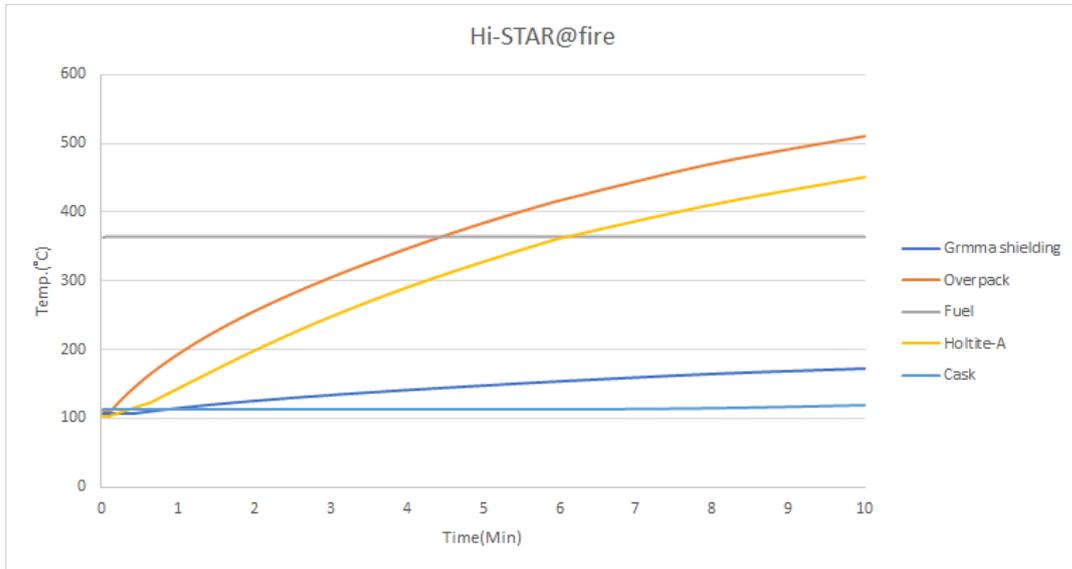


圖 67、HI-STAR 於火災事故下溫度分佈

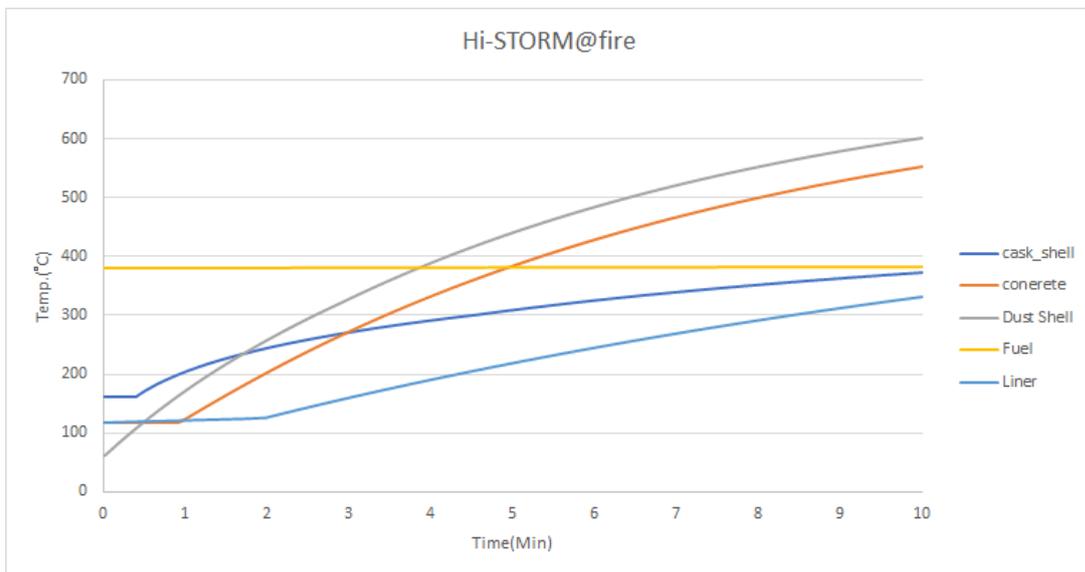


圖 68、HI-STORM 於火災事故下溫度分佈

5.2.5 單一設施貯存不同類型護箱之絕熱意外情境研析

與前述各式意外事故案例相比，可以發現本類案例為能符合審查導則所要求之絕熱案例分析要求，則勢必需以下述之邊界條件進行分析：

1. 假設護箱因極端外力而全部聚集，進而使護箱因為彼此邊界條件的相似性與具有相同熱源而於表面呈現溫度梯度為零的狀況，故可視為絕熱案例；
2. 忽略護箱表面可能存在之材料(如空氣、水或其它固態物質)以獲得保守之熱質量；
3. 不考慮日照效應；
4. 不考慮外部輻射熱源亦不考慮護箱對外之輻射熱；
5. 預期分析結果將超過設計限值，故以暫態方法進行求解；
6. 以 5.1.5 節正常貯存案例中之結果作為暫態計算之初始條件；
7. 考慮事故狀態之初期有較大之元件溫度趨勢之變化，且本案並非實際之安全分析案，故無需求解至關鍵元件皆超出設計限值；是故本研究選擇以 0-140 小時作為事故期間之計算範圍。

由於暫態分析主要係求取元件於事故後之溫度曲線，故於本案例中將不再進行元件溫度分佈的探討，而逕行就元件溫度變化之趨勢進行研析。圖 69 所示，在絕熱事故與火災事故的最大不同處在於，此事故下護箱將會因為內部熱源而逐步的被加熱。是故整體的升溫趨勢主要係由內而外逐步增加，不致像火災事故般，在極短的時間內就導致中子吸收材失效。然而，由原來護箱溫度分佈可以發現，除 MPC 及內部元件因為靠近燃料而有較高的初始溫度，因此在護箱最外部的散熱機制消失後，整體的元件即會逐步升溫。就熱傳學理而言，溫度高的元件將會持續向低溫的元件傳遞熱量，而使得外包封從內而外的各個元件逐一被加熱。

隨著事故時間的發展整體元件溫度的變化將會趨於新的平衡，並使得各元件的溫度差維持恆定並持續增加。此時，元件失效的時間就與其原有的材料性質與容許溫度有關；其中最為嚴峻的就是屬於高分子聚合物 Holtite-A 構成的中子吸收材。該元件於事故後約 30 小時到達設計限值，但其餘元件因為皆為金屬製材料，因此即使超過 140 小時仍未到達設計限值；燃料束甚至僅有 440°C，離容許溫度 570°C 仍有相當餘裕。

對具有較大混凝土外殼的 HI-STORM 護箱而言，絕熱狀態下密封鋼筒內部的組件將因空氣流道的對流消失而在事故初期即迅速升溫。如圖 70 所示，屬於外包封中關鍵的混凝土結構，則因為有空氣流道的阻隔而使溫度值明顯低於前述的各項密封鋼筒內部組件。值得注意的是與外殼在因為與內襯與密封鋼筒上蓋相鄰而被直接加熱，故在事故後期滿將因為金屬傳導之效果而使溫度略高於混凝土。

而綜合此一溫度變化趨勢，並將各元件之容許溫度納入比對，則可發現，燃料護套即使經過了 140 小時的加熱，其溫度仍遠低於 570°C，故不會對護套完整性有所影響；各項提籃、外部 MPC 護箱殼體等元件亦能符合材料設計限值。整體而言，僅有混凝土可能超過原設計要求，但由於 HI-STORM 100 的混凝土護箱係用一金屬殼體所構成且混凝土結晶水實際上需接近 580°C 才會解離[42]，因此混凝土可能因為超過設計溫度而需於事故後進行檢測，但不致造成顯著之性質變化。此外，由於 HI-STORM 100 的混凝土護箱的外殼體設計，使其在事故期間與處理過程中仍不會導致混凝土與組件分離，故對於事故排除作業亦無需顧慮原有輻射屏蔽組件構型改變之狀況。

此外，在進一步將混凝土護箱全阻塞之案例導入，並與前述混凝土護箱絕熱之案例進行探討則可發現如圖 71 所示之元件變化趨勢。進氣口全阻塞時，混凝土護箱雖仍可藉由護箱表面進行散熱，但因為混凝土護箱的熱傳效果不佳，整體散熱機制預期將只比絕熱案例略佳，但整體而言仍能有減低元件的溫升速度；其效果與元件所在位置到護箱表面之距離有直接關係。這意味著在室內乾貯設施中，

若需針對護箱進氣口全阻塞以及絕熱案例進行探討，則可以選擇以絕熱案例進行涵蓋，無需重複對結果相近之案例進行計算。

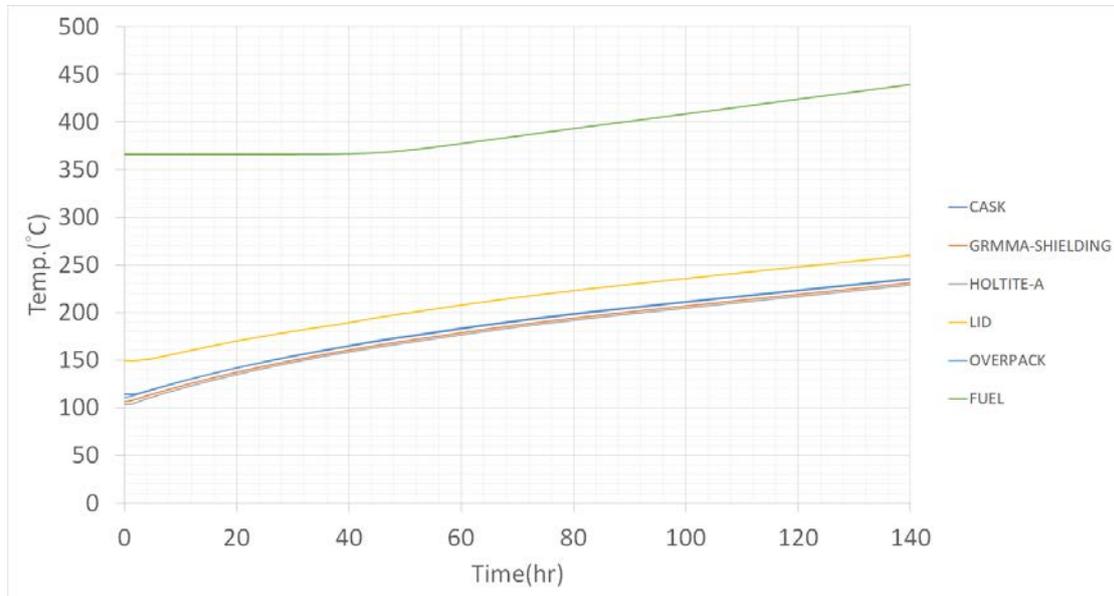


圖 69、HI-STAR 於絕熱事故下溫度分佈

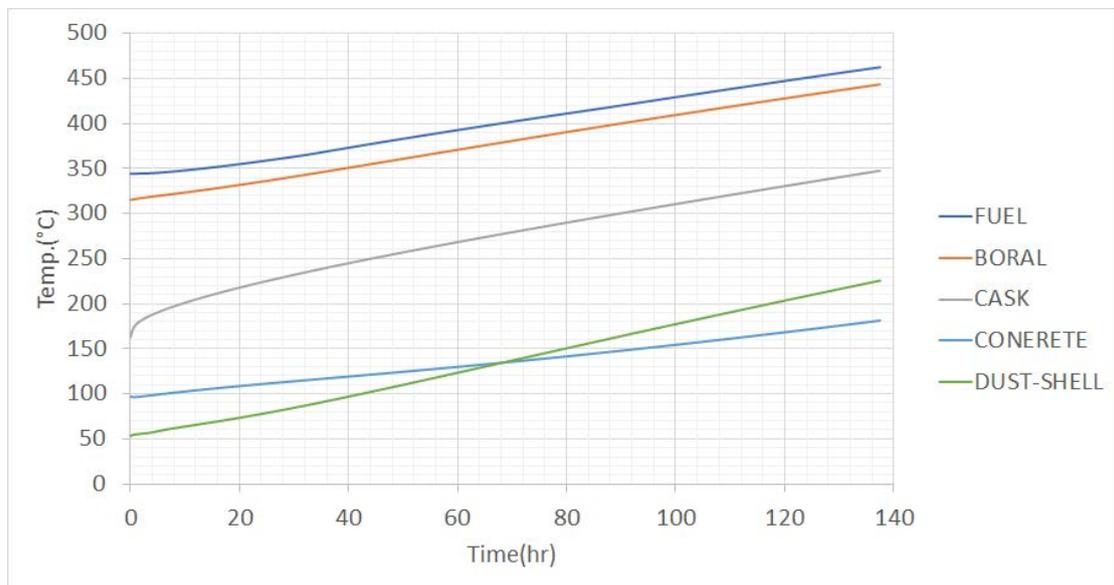


圖 70、HI-STORM 於絕熱事故下溫度分佈

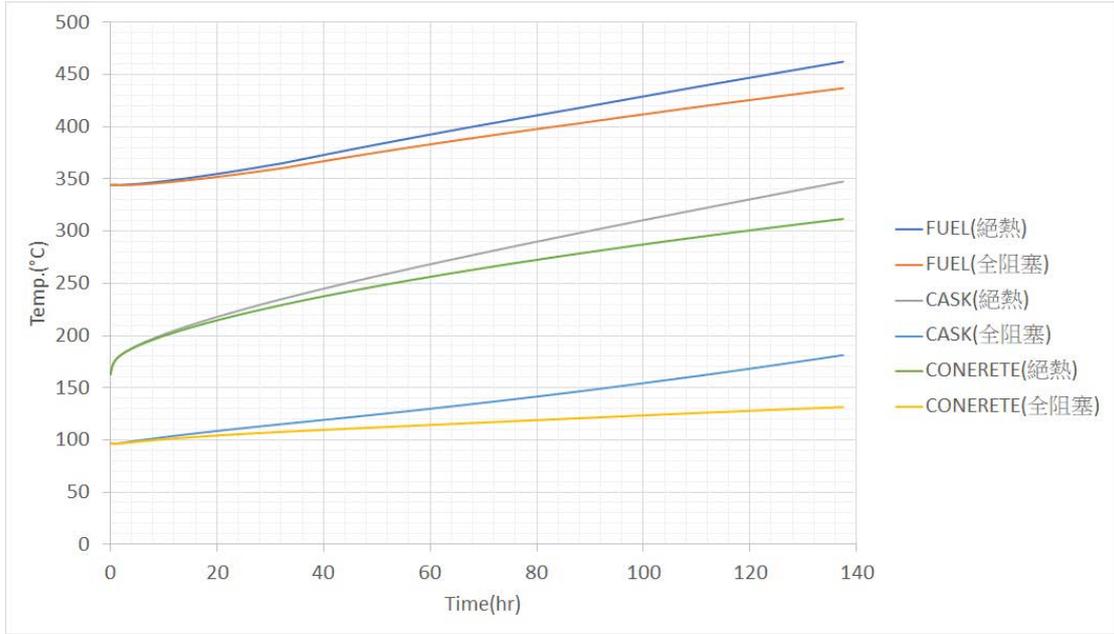


圖 71、HI-STORM 於全阻塞與絕熱事故下之溫度變化趨勢比較

5.3 熱流參數影響之彙整

綜合第五章之各項研析結果，本研究可將各式各種熱流參數對於護箱影響之資訊進一步以定性方式加以匯整並解析如下：

1. 整體而言，任何式樣之廠房裝載不同護箱於正常、異常與事故下並無分析技術需求之差異，所有廠房與護箱構型以及參數之組合皆為 CFD 擅於分析的幾何構型而成之流場；
2. 基於 CFD 對於幾何參數的可分析性，護箱比例、列置方式與迷道設計主要係為低影響參數，且可經由直接就分析模式所採用之資訊以及部分於方法論定義之邊界條件(如對流係數、環境溫度以及輻射視因子)進行確認。
3. 相較於影響較小之參數，護箱間距的影響較為顯著，但主要係作用於金屬護箱上，混凝土護箱只要進氣口溫度不受影響，即與本參數無直接關聯。此外，此參數的影響程度主要作用於正常貯存條件，異常與意外事故下之影響程度將隨分析標的與溫度限値之放寬而降低。
4. 而廠房類型之影響亦與上述參數相近，惟廠房的設計可能導入較顯著之日照熱源使整體溫度上升；此參數在正常貯存的影響較其它參數為高，但亦將因異常案例前隨分析標的的不同與容許溫度限値的放寬而降低。但值得注意的是，因此參數將直接影響元件的正常存溫度，因此金屬護箱的中子屏蔽材在意外事故中(如火災、絕熱)，將因為初始條件受影響而更值得關注。
5. 最後，綜合以上之技術差異與參數影響，本研究建議對於單一設施貯存多種護箱時，僅需針對護箱使用實蹟以及安全分析之參數(如邊界條件、複始條件)進行確認。相關要項可由現行審查導則第一章第一項之 1 以及第八章第五項明確管制。

表 29、各式熱流參數對分析技術與管制要點之匯整

狀態	護箱類別	護箱間距	護箱列置	迷道設計	護箱比例	廠房類型	技術重點
正常貯存	金屬護箱	中	低	低	低	高	BC 設定
	混凝土護箱	低	低	低	低	高	
異常事件	金屬護箱	中	低	低	低	中	BC 設定
	混凝土護箱	低	低	低	低	中	
意外事故	金屬護箱	低	低	低	低	中	IC 合適性
	混凝土護箱	低	低	低	低	低	
管制重點	依審查導則管制	作業程序合適性	具彈性，可依屏蔽需求規劃	具彈性，可依屏蔽需求規劃	方法論檢視護箱邊界代表性	具彈性，可依結構分析需求規劃	<u>現有審查導則已有對應管制條文</u>

BC：邊界條件

IC：初始條件

註：本表中各項參數之影響程度係依據本研究之假想設施與參數組合進行研析，具有不同設計之

設施不可逕行引用其量化結果，惟可參考本表之歸納邏輯進行資訊整理與探討。

第六章、室內乾貯設施熱傳分析審查重點研析

為能將本報告透過文件檢索、假想設施分析技術發展等工作之研究經驗與發現，充分應用於未來安全報告審查與室內乾貯管制工作，本章遂將前述各章經由國際資料蒐集以及案例研析所獲成果加以分類彙整，以供主管機關參考之用：

壹、國際資訊研析

1. 依據所蒐集之資料顯示，部分室內乾貯設施在進行護箱裝載作業時係採用地坑方式進行裝載，該設計有助於避免傾倒、屏蔽等安全議題，但可能會造成熱傳效果的減低，通常廠家會在安全分析報告提出安全評估；
2. 經檢視 ZZL 設施之相關文獻，可以得知該設施並未對單一設施裝載不同護箱之情境進行特別要求，不論是裝載或是營運間的規劃仍以滿足該國法規對乾貯設施要求即可；
3. 經研析 ONR 所提供之資訊，目前 SZB 乾貯設施並無設有再取出狀置，英國主管機關 ONR 可接受 SZB 利用廠內燃料池作為再取出之設施，惟需於提交作業規劃與評估結果並通過審查後方可施行。

貳、分析方法合適性

1. 未來廠家採用之分析方法論若考慮密封容器內部自然對流時，不得在未提供佐證資訊前，逕以集中熱源配置視為保守假設。
2. 正常貯存與意外案例間可能存在邊界保守度的相異性，故廠家於事故分析時建議充份陳述該邊界條件在事故分析下之合適性；例如正常貯存時保守考慮護箱貯存時的視因子值，並不見得可直接使用於火災分析中。
3. 火災或絕熱等具時效性之事故案例，經檢視後發現其護箱之熱流條件已是極保守地將熱流條件設定於單一護箱模式邊界上，建議無需擔心各式護箱列置、貯存規劃所造成的額外效應；
4. 對於半阻塞、環境溫度變化等廠房類事故，可能因為進口溫度、廠房內

溫度受到護箱列置之加乘效應而使溫度限值較低的元件接近限值，通常廠家會在安全分析報告提出安全評估。

參、分析結果彙整

1. 護箱分析結果與廠房內熱流邊界習習相關，故分析方法論中對於廠房內平均空氣溫度之定義有可能影響邊界條件量值；若未來廠家之分析方法涉及引用廠房內環境溫度時，建議於安全分析報告評估廠房內平均溫度定義之合適性與保守性。
2. 綜合本研究之熱流分析結果顯示，單一廠房貯存不同類型護箱時，護箱類型之效應僅限於局部，且其影響不致對分析方法論、分析結果審查以及未來管制施行有顯著影響。

第七章、結論

本研究於完成 HI-STAR 100 與 HI-STORM 護箱之模式建立與驗證後，進一步依據蒐集所得之國際文獻進行合適之廠房參數規劃，並在考量護箱比例、間距、配置方式與廠房型式之組合，藉以探討各項幾何參數組合之熱流特性差異。

本研究證實在基於相同熱負載與 MPC 型式所進行的室內乾貯設施中，不同護箱類型列置所造成的效應僅會作用於鄰近一排的護箱上，且其效應隨著護箱節距的縮小而減低。且由於自然對流機制將自動在散熱較差的區域形成更強的驅動力，故不致因為不同型式的護箱列置而對熱傳造成顯著的負面效應。因此主管機關仍可依據整體廠房內之散熱指標；如平均空氣溫度、表面對流係數以及護箱對廠房之有效輻射熱傳參數(如視因子與平均廠房溫度等)之管制來確保分析結果的保守性，而無需對於廠房內裝載有不同護箱時進行過於繁瑣的管制。

透過各種案例的研析，本研究發現所選用的兩種護箱確實將因為各參數所造成的熱傳機制影響不同而具有不同的溫度變異量；但無論如何，考量主管機關所頒佈的審查導則中，對於各項意外事故之分析要求，在熱流的分析工作中即已隱含對各類護箱邊界條件的保守性，因此對於事故期間的分析方法與應注意事故項並無需額外進行管制之事項。而綜合各項分析工作之發現，本研究亦研提數項熱流分析技術之相關建議，以作為主管機關未來施行相關審查之依據。

參考文獻

- 1 台灣電力股份有限公司，“核能一廠除役計畫環境影響評估報告書，”初稿，106年12月。
- 2 台灣電力股份有限公司，“核一廠用過燃料式貯存設施安全分析報告，”97年1月。
- 3 台灣電力股份有限公司，“核二廠用過核子燃料乾式貯存設施熱傳安全驗證研究，”101年12月。
- 4 施純寬、曾永信，“除役核電廠用過核燃料室內乾式貯存安全管制技術，”期末報告，106年12月。
- 5 Luis E. Herranz, Jaime Penalva, Francisco Feria, “CFD analysis of a cask for spent fuel dry storage: Model fundamentals and sensitivity studies,” *Annals of Nuclear Energy*, Vol, 76, pp.54–62,2015.
- 6 Jie Li, Yung Y. Liu, “Thermal modeling of a vertical dry storage cask for used nuclear fuel,” *Nuclear Engineering and Design*, Vol,301, pp.74–88, 2016.
- 7 Seung Hun Yoo, Hee Cheon NO*, Hyeun Min Kim, Eo Hwak Lee, “CFD-assisted scaling methodology and thermal-hydraulic experiment for a single spent fuel assembly,” *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 240 ,pp.4008–4020, 2010.
- 8 Hirofumi Takeda, Masumi Wataru, Koji Shirai, Toshiari Saegusa, “Heat removal verification tests using concrete casks under normal condition,” *Nuclear Engineering and Design*, Vol, 238, pp.1196–1205 ,2008.
- 9 Masumi Wataru, Hirofumi Takeda, Koji Shirai, Toshiari Saegusa, “Heat removal verification tests of full-scale concrete casks under accident conditions,” *Nuclear Engineering and Design*, Vol, 238, pp.1206–1212 ,2008.
- 10 WOLFGANG von HEESSEN et.al, “HEAT TRANSFER FROM TRANSPORT

- CASK STORAGE FACILITIES FOR SPENT FUEL ELEMENTS,” NUCLEAR FUELS, Vol, 304, pp.1-10 ,1982.
- 11 Y.S. Tseng, C.H. Lin, C. Shih, J.R. Wang, “Evaluating the feasibility of new surveillance concept for Dry Storage System through CFD methodology,” Annals of Nuclear Energy, Vol, 304, pp.1-10 ,2016.
- 12 Hyeun Min Kim, Hee Cheon No, Kyoung Sik Bang, Ki Seog Seo, Sang Hoon Lee, “Development of scaling laws of heat removal and CFD assessment in concrete cask air path,” Nuclear Engineering and Design, Vol. 278 ,pp.7–16, 2014.
- 13 Thomas E. Michener, David R. Rector, and Judith M. Cuta, “COBRA-SFS Thermal-Hydraulic Analysis Code for Spent-Fuel Storage and Transportation Casks: Models and Methods,” Nuclear Technology, Vol, 199, pp.330–349 ,2017.
- 14 許榮鈞等人，“除役核電廠用過核燃料室內乾式貯存安全管制技術，” 期末報告，106 年 12 月。
- 15 許榮鈞等人，“精進用過核燃料室內乾式貯存設施安全審查技術之研究，” 期末報告，107 年 12 月。
- 16 許榮鈞等人，“核電廠除役之室內乾貯安全分析平行驗證研究，108 年 12 月。
- 17 行政院原子能委員會放射性物料管理局，“申請設置用過核子燃料乾式貯存設施安全分析報告導則，” 108 年 1 月 18 日，會物字第 10800005641 號令。
- 18 行政院原子能委員會放射性物料管理局，“用過核子燃料乾式貯存設施安全分析報告審查導則，” 108 年 1 月 18 日，會物字第 10800005551 號令。
- 19 HOLTEC INC, “Final Safety Analysis Report OF HI-STAR 100 Cask System,” ML093070147, Rev. 3.I.
- 20 HOLTEC INC, “Final Safety Analysis Report OF HI-STORM 100 Cask System,” ML1638A100.
- 21 U.S.NRC, “ADAMS,” <https://www.nrc.gov/reading-rm/adams/web-based.html>.
- 22 NRC, “, HOLTEC INTERNATIONAL HI-STORM 100CASK SYSTEM SAFETY

- EVALUATION REPORT,” ML003711779.
- 23 C.J. Werner¹, et. al, “Monte Carlo N-Particle® Transport Code System Version 6.2,” LA-UR-17-29981, Los Alamos National Laboratory report , 2017.
- 24 B.T. Rearden, M.A. Jessee, et. al “SCALE Code System,” ORNL/TM-2005/39, Version 6.2.2, Oak Ridge National Laboratory, 2017.
- 25 American Concrete Institute, “Code Requirement for Nuclear Safety Related Concrete Structures and Commentary,” ACI 349-13, 2013.
- 26 U.S.NRC, " Standard Review Plan for Spent Fuel Dry Storage Systems and Facilities-DRAFT," NUREG-2215, 2017.
- 27 U.S. Nuclear Regulatory Commission, “Standard Review Plan for Spent Fuel Dry Storage Facilities,” NUREG-1567, March, 2000.
- 28 台灣電力公司，“核電廠特殊燃料進行乾貯作業之熱流特性及燃料護套完整性研究”中華民國 106 年 11 月，pp74。
- 29 The American Society of Mechanical Engineers, “Standard for Verification and Validation in Computational Fluid Dynamics and Heat Transfer”, ASME V&V 20-2009, November 2009.
- 30 <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/cfr/part072/part072-0214.html>
- 31 U.S. Nuclear Regulatory Commission, “Computational Fluid Dynamics Best Practice Guidelines for Dry Cask Applications: Final Report;” NUREG-2152 , March, 2013.
- 32 曾永信，“計算流體力學分析方法論/乾式貯存與大修機組冷卻之熱流分析應用，” TITRAM/CS/KS-CFD-MHD-01，2010 年 10 月。
- 33 ENSI, “Auslegung und Betrieb für von Lagern radioaktive Abfälle und abgebrannte Brennelemente,” ENSI-G04, 2010.
- 34 ENSI, “Dual Purpose Casks in Dry Storage in Switzerland,” ENSI-G05.
- 35 F. Kochy, “Dual Purpose Casks in Dry Storage in Switzerland,” 2014.
- 36 F. ENSI, “Regulatory Oversight Report,” 2018.
- 37 F. NDA, “Packaging of Sizewell B Spent Fuel (Pre-Conceptual stage) Summary of Assessment Report,” 2011.

- 38 劉志添，“參加第34屆除役與放射性廢棄物管理研習並參訪英國室內乾貯設施，”出國報告，107年9月。
- 39 ONR, “CHIEF NUCLEAR INSPECTOR’S ANNUAL REPORT ON GREAT BRITAIN’S NUCLEAR INDUSTRY,” page 31, 2019.
- 40 Holtec, “Holtite-A: Development History and Thermal Performance Data,” HI-2002396, Jun 2000.
- 41 IAEA, “REPORT OF THE OPERATIONAL SAFETY REVIEW TEAM (OSART) MISSION TO THE SIZEWELL B NUCLEAR POWER STATION,” 2017.
- 42 朱煌林，“探討混凝土之耐火性評估(中)，”台灣省土木技師公會，中華民國94年5月。

附錄-程式碼

```

/* developed for 109FCMA001      cell_t c;      }
proj_e, idcludes HI-STORM, HI-   Dh=12.3225E-3; /* Hydrolic      end_c_loop(c,t)
STAR V&V fuel */                 Diameter*/

#include "udf.h"

DEFINE_PROFILE(friction_fact     begin_c_loop(c,t)
or_ATRIUM_10,t,i)               {
{
    real x[ND_ND];                F_PROFILE(c,t,i) =
    real a,Dh;                    32./Dh/Dh/1.7812096;
    cell_t c;                     }
Dh=12.3225E-3; /* Hydrolic      end_c_loop(c,t)
Diameter*/                       }

DEFINE_PROFILE(K_LTP_C,t,i)     )
{
    begin_c_loop(c,t)             {
    {
        a=sqrt(C_U(c,t)*C_U(c,   real x[ND_ND];
t)+C_V(c,t)*C_V(c,t)+C_W(c,   real a,Dh;
t)*C_W(c,t));                   cell_t c;
        F_PROFILE(c,t,i) =       Dh=12.3225E-3; /* Hydrolic
0.1015*pow(a*C_R(c,t)*Dh/C_M   Diameter*/
U_L(c,t),0.8)/Dh/Dh*1.7812096;
    }
    end_c_loop(c,t)              }

}

DEFINE_PROFILE(friction_fact     a=sqrt(C_U(c,t)*C_U(c,
or_LAM,t,i)                       t)+C_V(c,t)*C_V(c,t)+C_W(c,
{
    real x[ND_ND];                t)*C_W(c,t));
    real a,Dh;                    F_PROFILE(c,t,i) =
                                (156.9+168.1*pow(a*C_R(c,t)*D
                                h/C_MU_L(c,t),-
                                0.546))/2.301875*1.7812096*1.7
                                812096;
                                }
                                end_c_loop(c,t)
                                }

                                DEFINE_PROFILE(K_FUEL,t,i)
                                {
                                real x[ND_ND];
                                real a,Dh,Re;
                                cell_t c;
                                Dh=12.3225E-3; /* Hydrolic
                                Diameter*/

```

```

begin_c_loop(c,t)          TRIUM_10, c, t, dS, eqn          pitch=0.160122;
{
Re=sqrt(C_U(c, t)*C_U(c,          {
/*108FCMA003 check*/
t)+C_V(c, t)*C_V(c, t)+C_W(c,          int row, columes;
t)*C_W(c,          real x[ND_ND];
t)*C_R(c,t)*Dh/C_MU_L(c,t);          real Fxz[5][5]=
F_PROFILE(c,t,i) =          {
((0.620*4+0.4646*2)+(108.6*po          /*X軸方向→*/
w(Re,-0.58)*4+2.196*pow(Re,-          /*
0.084)+235.7*pow(Re,-          */500.,500.,250.,125.,125.,
0.686)*2))/4.362577*1.7812*1.78          /*108FCMA003 check*/
12096;          /*Z
}          */500.,500.,250.,125.,0.0,
end_c_loop(c,t)          /*108FCMA003 check*/
}          /*軸
DEFINE_PROFILE(K_UTP,t,i)          */方          if (p0< height &&
{          height < (p0+act_length) )
real x[ND_ND];          /*125.,125.,125.,0.0 ,0.0,          {
real a,Dh,Re;          /*向*/125.,0.0 ,0.0 ,0.0 ,0.0          f=-61.266*pow(A,
cell_t c;          /*108FCMA003 check*/          6)+168.83*pow(A, 5)-
Dh=12.3225E-3; /* Hydrolic          /*↓*/);          187.298*pow(A,
Diameter*/          38.146*pow(A,
begin_c_loop(c,t)          real A, B, f, p0, source,          2)+8.1456*A+0.3738;
{          height, Maxpower, act_length,          }
Re=sqrt(C_U(c, t)*C_U(c,          pitch, fuel_map, axis_x, axis_z,          else
t)+C_V(c, t)*C_V(c, t)+C_W(c,          shift_z, shift_x;
t)*C_W(c,          C_CENTROID(x, c, t);          f=0;
t)*C_R(c,t)*Dh/C_MU_L(c,t);          height= x[1];          source =
F_PROFILE(c,t,i) = (-          p0=0.3291975;          Maxpower*f*fuel_map;
9.68+9.526*pow(Re,0.0046))/0.6          /*108FCMA003 check*/          return source;
4389*1.7812*1.7812096;          act_length=3.796;          #if !PR_HOST
}          /*108FCMA003 check*/          if (p0< height
end_c_loop(c,t)          A=(height-p0)/act_length;          && height < (p0+act_length) )
}          Maxpower=1.0/(0.0181364          {
DEFINE_SOURCE(core_peak_A          /*108FCMA003 check*/          f=-61.266*pow(A,

```

```

6)+168.83*pow(A, 5)-
187.298*pow(A,
4)+109.4*pow(A, 3)-
38.146*pow(A,
2)+8.1456*A+0.3738;
}
else
f=0;

source =
Maxpower*f*fuel_map;
return source;
#endif /* !PR_HOST*/
#if !RP_NODE
if (p0< height &&
height < (p0+act_length) )
{
f=-61.266*pow(A,
6)+168.83*pow(A, 5)-
187.298*pow(A,
4)+109.4*pow(A, 3)-
38.146*pow(A,
2)+8.1456*A+0.3738;
}
else
source =
Maxpower*f*fuel_map;
return source;
#endif /* !PARALLEL*/
}
int row, columes;
real x[ND_ND];
real Fxz[5][5]=
{
/*X軸方向→*/
/*
*/250.,250.,250.,250.,250.,
/*108FCMA003 check*/
/*Z
*/250.,250.,250.,250.,0.0,
/*108FCMA003 check*/
/*軸
*/250.,250.,250.,250.,0.0,
/*108FCMA003 check*/
/*方
*/250.,250.,250.,0.0 ,0.0,
if (p0< height &&
height < (p0+act_length) )
/*108FCMA003 check*/
/*向*/250.,0.0 ,0.0 ,0.0 ,0.0
/*108FCMA003 check*/
/*↓*/);
real A, B, f, p0, source,
height, Maxpower, act_length,
pitch, fuel_map, axis_x, axis_z,
shift_z, shift_x;
C_CENTROID(x, c, t);
height= x[1];
p0=0.3291975;
/*108FCMA003 check*/
act_length=3.796;
/*108FCMA003 check*/
A=(height-p0)/act_length;
Maxpower=1.0/(0.0181364
39847*act_length);
/*108FCMA003 check*/
pitch=0.160122;
/*108FCMA003 check*/
shift_x=0.014975;
/*108FCMA003 check*/
shift_z=0.014975;
/*108FCMA003 check*/
axis_x= (x[0]-
shift_x)/pitch;
/*108FCMA003 check*/
axis_z= (x[2]-
shift_z)/pitch;
/*108FCMA003 check*/
row=axis_x;
columes=axis_z;
fuel_map=Fxz[row][columes];
if (p0< height &&
height < (p0+act_length) )

```

```

        {
            f=-61.266*pow(A,
6)+168.83*pow(A, 5)-
187.298*pow(A,
4)+109.4*pow(A, 3)-
38.146*pow(A,
2)+8.1456*A+0.3738;
        }
        else
            f=0;

        source =
Maxpower*f*fuel_map;
        return source;
    #if !PR_HOST
        if (p0< height
&& height < (p0+act_length) )
        {
            f=-61.266*pow(A,
6)+168.83*pow(A, 5)-
187.298*pow(A,
4)+109.4*pow(A, 3)-
38.146*pow(A,
2)+8.1456*A+0.3738;
        }
        else
            f=0;

        source =
Maxpower*f*fuel_map;
        return source;
    #endif /* !PR_HOST*/
    #if !RP_NODE
        if (p0< height &&
height < (p0+act_length) )
        {
            f=-61.266*pow(A,
6)+168.83*pow(A, 5)-
187.298*pow(A,
4)+109.4*pow(A, 3)-
38.146*pow(A,
2)+8.1456*A+0.3738;
        }
        else
            f=0;

        source =
Maxpower*f*fuel_map;
        return source;
    #endif /* !PARRLLEL*/
    }

}
DEFINE_SOURCE(checkboard_
ATRIUM_10, c, t, dS, eqn)
{
    int row, columes;
    real x[ND_ND];
    real Fxz[5][5]=
    {
        /*X軸方向→*/
        /*
        */361.12,125.,361.12,125.,361.12,
        /*108FCMA003 check*/
        /*Z
        */125.,361.12,125.,361.12,0.0,
        /*108FCMA003 check*/
        /*軸
        */361.12,125.,361.12,125.,0.0,
        /*108FCMA003 check*/
        /*方
        */125.,361.12,125.,0.0 ,0.0,
        /*108FCMA003 check*/
        /*向
        */361.12,0.0 ,0.0 ,0.0 ,0.0
        /*108FCMA003 check*/
        /*↓*/};

    real A, B, f, p0, source,
height, Maxpower, act_length,
pitch, fuel_map, axis_x, axis_z,
shift_z, shift_x;

    C_CENTROID(x, c, t);
    height= x[1];
    p0=0.3291975;
    /*108FCMA003 check*/
    act_length=3.796;
    /*108FCMA003 check*/
    A=(height-p0)/act_length;
}

```

```

Maxpower=1.0/(0.0181364
39847*act_length);
/*108FCMA003 check*/
pitch=0.160122;
/*108FCMA003 check*/
shift_x=0.014975;
/*108FCMA003 check*/
shift_z=0.014975;
/*108FCMA003 check*/
axis_x=(x[0]-
shift_x)/pitch;
/*108FCMA003 check*/
axis_z=(x[2]-
shift_z)/pitch;
/*108FCMA003 check*/
row=axis_x;
columes=axis_z;
fuel_map=Fxz[row][columes];

if (p0< height &&
height < (p0+act_length) )
{
f=-61.266*pow(A,
6)+168.83*pow(A, 5)-
187.298*pow(A,
4)+109.4*pow(A, 3)-
38.146*pow(A,
2)+8.1456*A+0.3738;
}
else
f=0;

source =
Maxpower*f*fuel_map;
return source;
#endif /* !PR_HOST */
#if !RP_NODE

if (p0< height &&
height < (p0+act_length) )
{
f=-61.266*pow(A,
6)+168.83*pow(A, 5)-
187.298*pow(A,
4)+109.4*pow(A, 3)-
38.146*pow(A,
2)+8.1456*A+0.3738;
}
else
f=0;

source =
Maxpower*f*fuel_map;
return source;
#endif /* !PARRLLEL */
}
DEFINE_SOURCE(regionalized_
500_275w, c, t, dS, eqn)
{
int row, columes;
real x[ND_ND];
real Fxz[5][5]=
{
/*X軸方向→*/
/*
*/500.,500.,500.,275.,275.,
/*108FCMA003 check*/
/*Z
*/500.,500.,500.,275.,0.0,
/*108FCMA003 check*/
/*軸
*/500.,500.,275.,275.,0.0,

```

```

/*108FCMA003 check*/
/*方
*/275.,275.,275.,0.0 ,0.0,
/*108FCMA003 check*/
/*向*/275.,0.0 ,0.0 ,0.0 ,0.0
/*108FCMA003 check*/
/*↓*/);
real A, B, f, p0, source,
height, Maxpower, act_length,
pitch, fuel_map, axis_x, axis_z,
shift_z, shift_x;
C_CENTROID(x, c, t);
height= x[1];
p0=0.3291975;
/*108FCMA003 check*/
act_length=3.796;
/*108FCMA003 check*/
A=(height-p0)/act_length;
Maxpower=1.0/(0.0181364
39847*act_length);
/*108FCMA003 check*/
pitch=0.160122;
/*108FCMA003 check*/
shift_x=0.014975;
/*108FCMA003 check*/
shift_z=0.014975;
/*108FCMA003 check*/
axis_x= (x[0]-
shift_x)/pitch;
/*108FCMA003 check*/
axis_z= (x[2]-
shift_z)/pitch;
/*108FCMA003 check*/
row=axis_x;
columes=axis_z;
fuel_map=Fxz[row][columes];
if (p0< height &&
height < (p0+act_length) )
{
f=-61.266*pow(A,
6)+168.83*pow(A, 5)-
187.298*pow(A,
4)+109.4*pow(A, 3)-
38.146*pow(A,
2)+8.1456*A+0.3738;
}
else
f=0;
source =
Maxpower*f*fuel_map;
return source;
#if !PR_HOST
if (p0< height
&& height < (p0+act_length) )
{
f=-61.266*pow(A,
6)+168.83*pow(A, 5)-
187.298*pow(A,
4)+109.4*pow(A, 3)-
38.146*pow(A,
2)+8.1456*A+0.3738;
}
else
f=0;
source =
Maxpower*f*fuel_map;
return source;
#endif /* !PR_HOST*/
#if !RP_NODE
source =
if (p0< height &&
height < (p0+act_length) )
{
f=-61.266*pow(A,
6)+168.83*pow(A, 5)-
187.298*pow(A,
4)+109.4*pow(A, 3)-
38.146*pow(A,
2)+8.1456*A+0.3738;
}
else
f=0;
source =
#endif
#endif

```



```

#endif /* !RP_NODE*/

#if !PARALLEL

    if (p0 < height &&
height < (p0+act_length) )
    {
        f=-61.266*pow(A,
6)+168.83*pow(A, 5)-
187.298*pow(A,
4)+109.4*pow(A, 3)-
38.146*pow(A,
2)+8.1456*A+0.3738;
    }
    else

        f=0;

    source =
Maxpower*f*fuel_map;
    return source;
#endif /* !PARRLLEL*/
}

```