

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

除役核電廠用過核燃料室內乾式貯存  
安全管制技術

子計劃三:除役核電廠用過核燃料室內乾式貯存  
之熱傳管制技術研析  
期末報告

委託單位： 行政院原子能委員會  
執行單位： 國立清華大學  
計畫主持人： 許榮鈞 教授  
子項主持人： 施純寬、錢景常 教授  
研究人員： 曾永信  
計畫編號： 105FCMA009  
報告日期： 中華民國 106 年 12 月 8 日

# 目錄

1. 中文摘要.....	III-1
2. 英文摘要.....	III-2
3. 計畫緣起與目的 .....	III-3
4. 執行方法以及進行步驟 .....	III-5
4.1 熱流研析執行方法.....	III-5
4.2 研析時程與查核點規劃.....	III-9
5. 完成之工作項目及具體成果 .....	III-13
5.1 國際間乾貯設施之護箱、廠房與作業資訊研析.....	III-13
5.1.1 各式乾貯護箱熱流設計資訊.....	III-14
5.1.2 各式室內乾貯設施廠房熱流設計資訊.....	III-22
5.1.3 各式室內乾貯設施熱流相關之作業程序資訊彙整.....	III-32
5.2 蒐集國際間室內乾貯之熱傳法規要求.....	III-38
5.2.1 各國熱流相關法規、指引與溫度限制之彙整.....	III-41
5.3 研析室內乾貯之熱傳安全分析工具及方法論適用性評估.....	III-43
5.3.1 分析軟體適用性評估.....	III-43
5.3.2 程式功能、數值模式與邊界條件適用性評估.....	III-47
5.3.3 室內乾貯熱流分析模式建立.....	III-50
6. 室內乾貯熱流分析技術研析 .....	III-55
6.1 室內乾貯護箱熱傳分析技術研析.....	III-55
6.2 室內乾貯廠房熱傳分析技術研析.....	III-59
6.2.1 廠房通風機制之影響評估.....	III-59
6.2.2 廠房厚度與材質之影響.....	III-66
6.3 室內與露天乾貯之熱傳的差異研析.....	III-68
7. 建議室內乾貯之熱傳評估的管制重點 .....	III-71
8. 結論.....	III-73
9. 參考文獻.....	III-74

## 圖目錄

圖 1、室內乾貯熱流研析方法與步驟流程圖.....	III-8
圖 2、台電公司申照完成的 INER-HPS 系統 [10].....	III-18
圖 3、德國 CASTOR 系統概略設計尺寸資訊[3].....	III-18
圖 4、HOLTEC 公司的 HI-STROM 100 護箱[24].....	III-19
圖 5、Areva 公司的 NUHOMS 混凝土模組式[25].....	III-19
圖 6、Holtec 公司的 HI-STAR100 金屬護箱與多層上外包裝示意圖[25].....	III-20
圖 7、日本 Mutsu Recycle Fuel Storage Center 乾式貯存系統[8]。.....	III-20
圖 8、英國 SIZE WELL B 電廠之鋼構結構室內乾貯廠房(a)廠房頂部結構、(b) 廠房資訊預估、(c)廠房可能進出氣口位置圖.....	III-28
圖 9、各國鋼筋混凝土結構之室內乾貯廠房(a)德國 STEAG[23]、(b)德國 WTI[23]、 (c)日本 RFS[8]、(d)荷蘭 HABOG[32].....	III-29
圖 10、荷蘭 HABOG[32]設施貯存(a)發熱廢棄物、(b)非發熱廢棄物之區域及(c) 整體場區配置圖.....	III-30
圖 11、德國巴登-符騰堡州坑道式室內乾貯廠房[23](a)側視圖、(b)上視圖.....	III-31
圖 12、INER-HPS 傳送護箱[10].....	III-36
圖 13、HI-TRAC 傳送護箱.....	III-37
圖 14、屏蔽-熱流共同分析模型.....	III-52
圖 15、室內乾貯設施搭配混凝土護箱模式之分析模型.....	III-53
圖 16、室內乾貯設施搭配金屬護箱模式之分析模型.....	III-53
圖 17、室內乾貯設施分析模型之網格分佈.....	III-54
圖 18、混凝土護箱於室內廠房中之流場分佈.....	III-57
圖 19、金屬護箱於室內廠房中之流場分佈.....	III-57
圖 20、(a)混凝土護箱、(b)金屬護箱於室內廠房中之鄰近流場分佈.....	III-58
圖 21、假想鋼構設施在發生全阻塞事故下之內部流場與溫度示意圖.....	III-61
圖 22、假想混凝土設施在發生全阻塞事故下之內部流場與溫度示意圖.....	III-61
圖 23、假想室內乾貯設施搭配不同強制通風系統之示意圖.....	III-64
圖 24、假想室內乾貯設施搭配 A 型強制通風系統之流場分佈.....	III-64
圖 25、假想室內乾貯設施搭配 B 型強制通風系統之流場分佈.....	III-65
圖 26、假想室內乾貯設施搭配 C 型強制通風系統之流場分佈.....	III-65
圖 27、不同廠房材料與厚度對廠房內部加熱效果之影響；(a)2mm 鋼板；(b)1.7m 混凝土.....	III-66

## 表目錄

表 1、本子項計畫甘梯圖.....	III-11
表 2、各式可能應用於電廠除役乾貯系統之密封容器與屏蔽設計資訊比對	III-21
表 3、各式既有室內乾貯廠房與熱流相關之設計資訊比對.....	III-27
表 4、各式可能應用於電廠除役之乾貯系統之作業程序比對.....	III-36
表 5、各國乾式貯存之相關法規、安全分析限值等資料彙整.....	III-42
表 6、CFD 分析軟體功能、分析模式需求評估表.....	III-49
表 7、屏蔽-熱流共同分析模式 .....	III-50
表 8、煙囪出口高度對廠房換氣率之影響煙囪出口高度(m).....	III-62
表 9、煙囪出口高度對廠房換氣率之影響煙囪出口高度(m).....	III-63
表 10、採用鋼構廠房時對假想廠房換氣率之影響.....	III-67
表 11、室內外乾貯設施於不同護箱之搭配下熱流相關資訊比對彙整表....	III-70

# 1. 中文摘要

為能協助管制單位因應我國廠家未來因除役需求而提出的室內乾貯設施申照作業，本子項研究針對室內乾貯設施之熱流安全評估進行研究，透過蒐集德、日、荷、英、美各國乾貯設施與熱流相關之法規、法規指引、標準與設施特性進行研析，以期瞭解上述可能之室內乾貯與我國既有乾貯設施之設計與管制差異。本子項經研究後發現目前各國法規與我國既有乾貯設施之管制與審查除了有燃料護套溫度限值、日照輻射標準、設施結構限值等之差異外，針對室內乾貯作業更需額外考量通風能力、廠房溫度、作業差異與量測機制因素。而在分析方法論與工具適用性部分，考量現有分析技術係採用計算流體力學為主，本計畫透過核視目前對 CFD 分析技術規範最為完整的 ISG-21 與 NUREG-2152 進行研析，並確認目前已有乾貯設施分析實例之 CFD 軟體足以滿足室內乾貯熱流分析所需。透過以上研究成果之彙整，本計畫更透過技術面的研析結果提出多項建議以供管制單位參考。

關鍵字：除役、室內乾貯系統、熱流安全分析、管制技術、計算流體力學

## 2. 英文摘要

The objective of this sub-project is to assist the regulatory body in strengthening the technical review capabilities to examine the thermal safety analysis of the indoor dry storage system of spent nuclear fuels in nuclear power plant decommissioning. Through the collected thermal related analysis report, guidance, standard, and design specification from the Germany, Japan, Netherlands and United States, differences between the indoor and existed outdoor dry storage system, such as the regulatory limit for the cladding temperature, solar irradiation intensity, component of facility were identified and discussed. The additional design requirements, such as the ventilation capability, operating difference, surveillance technology are also been addressed in this report. Finally, all found key issues related to indoor dry storage system, facility, thermal simulation are also identified for future regulatory action.

Keywords : Decommissioning, indoor dry storage, thermal safety analysis, CFD

### 3. 計畫緣起與目的

依據國家能源政策規劃，台灣電力公司核一廠一、二號機將面臨運轉 40 年屆齡除役之先期作業規劃階段；其中核一廠一號機組將於民國 107 年底面臨執照到期，因此台電公司已依法令要求，於民國 104 年 12 月底前提提交核一廠除役計畫供管制單位審查。考量我國目前用針對過核子燃料管理是採用「近程採廠內水池貯存、中程以廠內乾式貯存、長程推動最終處置」之策略，因此在電廠著手進行除役規劃的同時，勢必要研擬除役作業所需之乾式貯存設施；除確保反應器及燃料池廠房於拆除作業可以如除役計畫書所述般如期展開之外，亦有助於電廠各項必要設備(如餘熱移除系統等)之除役規劃及整體除役成本之評估與管控。

然而，依據行政院於 105 年 9 月 2 日政策指示經濟部應督促台電公司提出室內乾式貯存計畫之訊息，以及台電研擬之除役計畫書中所載之核子燃料之遴選、貯存規劃[1]與所選用之乾貯護箱型式[2]所載資訊，未來國內用過核子燃料乾貯設施預期有 UMS (INER-HPS) 混凝土護箱(裝載 56 束)、HI-STORM 混凝土護箱(裝載 68 束)、NUHOMS 混凝土模組(裝載 61 束)及 HI-STAR 金屬護箱(Metal Cask)(裝載 68 束)等型式。而上述可能出現之金屬或混凝土護箱、混凝土模式之乾貯系統，在搭配世界上已有先例之室內乾貯廠房，如鋼筋混凝土廠房[3-8]抑或如 Sizewell B [9]等廠房型式而構成之的室內貯存設施之組合，形成與目前國內既有的核一與核二露天混凝土護箱式(Concrete Cask)設計[10、11]有所不同之乾貯設施。因此在考量室內乾貯系統於設計考量、運轉條件、審查作業與安全分析方法等，皆可能與國內既有核一、二廠第一期乾貯設施不同；為能確保我國核一、二廠除役時程能如期展開，國內放射性物料管制單位-物管局遂於民國 106 年委託國立清華大學執行「除役核電廠用過核燃料室內乾式貯存安全管制技術」[12]研究工作，針對未來所需之室內乾式貯存設施(以下簡稱室內乾貯)安全管制技術著手研析，並作為未來審查台電公司室內乾貯相關安全分析報告之基礎。

為能確保所建立之安全管制技術能涵蓋安全分析報告第六章之主要範圍，本整合研究計畫概分為五項子計畫，分別針對「用過核燃料乾式貯存設施風險比較」、「除役核電廠用過核燃料室內乾式貯存之結構及密封管制技術」、「除役核電廠用過核燃料室內乾式貯存之熱傳管制技術」、「除役核電廠用過核燃料室內乾式貯存之輻射屏蔽管制技術」以及「除役電廠破損用過核燃料處理貯存管制之國際資訊」等重點工作進行研究。

本子項三「除役核電廠用過核燃料室內乾式貯存之熱傳管制技術」除了針對涉及安全分析報告第六章第三節「熱流安全評估」相關之分析方法論適用性、分析與審查要點進行研析與評估外，其所提供的資訊更是燃料護套完整性、結構評估、風險評估與設施運轉限值(如壓力限值條件、容許事故時間)等安全評估要項之參考依據。

為能確保室內乾式貯存設施之設計與運轉規劃，確能保證工作人員與國人之安全，未來我國廠家所引入並提出建議製造申請的室內乾貯系統，必需依循我國用過核子燃料乾式貯存審查要點所載各項要點進行檢視與專家審查通過後方可核發其執照，而本研究之目的即是透過廣泛的國際間資料蒐集與運轉中室內乾貯設施設計經驗研析，協助管制單位針對未來所需之管制要點進行發展與精進。

為能達到上述之計畫目的，本研究將透過一系列之資料研析、室內乾貯類型規納、分析方法論適用性評估與案例研究等工作，本研究將逐步針對熱流安全分析及其相關資訊進行檢視，除建立起未來所需之管制建議之外，亦將於期末時完成室內、外乾貯系統於熱流及其相關議題之差異評估，以利瞭解兩類乾貯設施之異同點與設計標的。



## 4. 執行方法以及進行步驟

依據原計畫書之時程規劃，本子項計畫「除役核電廠用過核燃料室內乾式貯存之熱傳管制技術」需於期中查核時提交國際間設施相關安全分析報告、技術資料、法規指引等文獻蒐集與研析成果、並將現有法規安全分析資料與匯整以及室內乾貯熱傳安全分析工具及方法論適用性評估等進行研析與比較，進而達成協助管制要點建立之計畫目標。此外，為能符合開工會議時委託單位所提出要求，本研究亦將適度導入以往露天乾貯的研究經驗[13-18]，來探討室內及露天乾貯熱流分析的共通性與相異性。

### 4.1 熱流研析執行方法

經初步研擬，本子項計畫將藉由如圖 1 所示之研究流程來完成本研究工作，其主要工作流程可概列為：

- (1)設計資訊、法規、工具及方法論進行國際間既有設施之資訊蒐集；
- (2)熱流分析軟體應用實例與熱流分析軟體(如 FLUENT、STAR/CD、CFX)適用性評估；
- (3)綜合考量廠房通風設計、場址特性及護箱型式後擬定安全分析基準設計基準事故規劃；
- (4)方法論實測及案例分析；
- (5)熱流差異性探討及資訊回饋等項目。

而採取此一程序進行研究的原因是因為目前既有乾貯系統在進行熱流分析時，主要依循美國 NRC 之 10 CFR 71[19]與 10 CFR 72[20]所載之各項運送與貯存作業要求，並以 ISG-11 Rev.3[21]或對燃料護套於長期存不得大於 400°C 而短期作業不得超過 570°C 之溫度限值要求為基礎，再整合各領域就材料與結構限值而成的 NUREG-1536[22]法規指引來進行設計。但隨著乾貯設施類型出現如 Sizewell B[9]或是德國 CASTOR 搭配 WTI 或 STEAG[23]的組合，其系統設計與

審查所需的法規指引預期將出現一定程度的調整，以求能在不同設施設計或場址特性之需求下，仍能確保受貯燃料的完整性。因此，預期燃料護套本身所需滿足的護套完整性之目的並不會因為所採用之護箱型式不同而改變，但仍必須就室內乾貯設施於安全設計與審查期間所引用的法規、法規指引及使用之材料進行資料蒐集與彙整，以求作為熱流分析方法論適用性與審查作業之依據。

在完成相關資料之蒐集後，本子項將進一步透過基礎熱流理論，檢視室內乾貯系統之熱流機制。乾貯系統內部所貯存的用過核子燃料，將會因為持續的衰變而使其燃料丸釋出熱量，並藉由燃料丸表面的輻射熱傳及氦氣熱傳導將熱量傳送至護套內層，再由護套外表面經過熱傳導、輻射或是設計時考量在內的熱對流，將熱量傳送至金屬密封鋼筒外表面，最後散逸至大氣中。因此無論是室內與露天乾貯其於金屬密封鋼筒以內的內部熱傳機制可視為僅受系統設計幾何影響，而與採用室內或露天乾貯無直接關聯；僅有自密封鋼筒表面至大氣環境之外部熱傳，才會受露天貯存或不同通風規劃(強制、自然或空調)等設計考量之影響而使熱流特性所有不同。

因此，本團隊擬藉由以往參與露天乾貯系統熱流研析從中所獲之經驗與技術為基礎，探討目前已具充分應用經驗並受管制單位認可的相關技術，應用於室內乾貯系統暨廠房熱流安全分析之適用性。這是因為對外部熱傳機制而言，室內乾貯系統將可能因為其廠房尺寸之故，而需對目前已採用的紊流模式、輻射熱傳機制及日照評估模式進行適用性檢核。故以期能透過既有之管制與分析經驗進行熱流研究，進而將既有方法論加以延伸；除了加速審查能量的建立之外，最後更希望能所建立之管制技術能與既有露天乾貯之部分整合為一體，令管制單位於未來所建立之法規指引具有對各式乾貯設施一體適用的特性。

為求進一步證實此精進後之方法論確實適用於室內乾貯設施之熱流評估，本子項計畫在完成上述的熱流方法論研析後透過所蒐集之室內乾貯設施文獻，評選合適之熱流分析程式(如 ANSYS FLUENT)，以建立一假想之室內乾貯系統分析模型。除進行室內乾貯設施暨廠房熱流分析以證實分析方法論適用性外，更希望

能先行透過此模擬工作，獲得初步室內乾貯熱流特性，以協助提供管制技術建立時所需之資訊。例如，設計基準事故探討、熱流特性與環境參數靈敏度影響評估等。最後，本研究將著手就既有乾貯設施與室內乾貯設施之熱流特性，透過針對廠房、護箱及其他子項所需之資訊；例如，風險評估中可能之洩漏率、或是裝載破損燃料時之熱流特性進行細部研析，以釐清各項重要議題對熱流特性之影響。

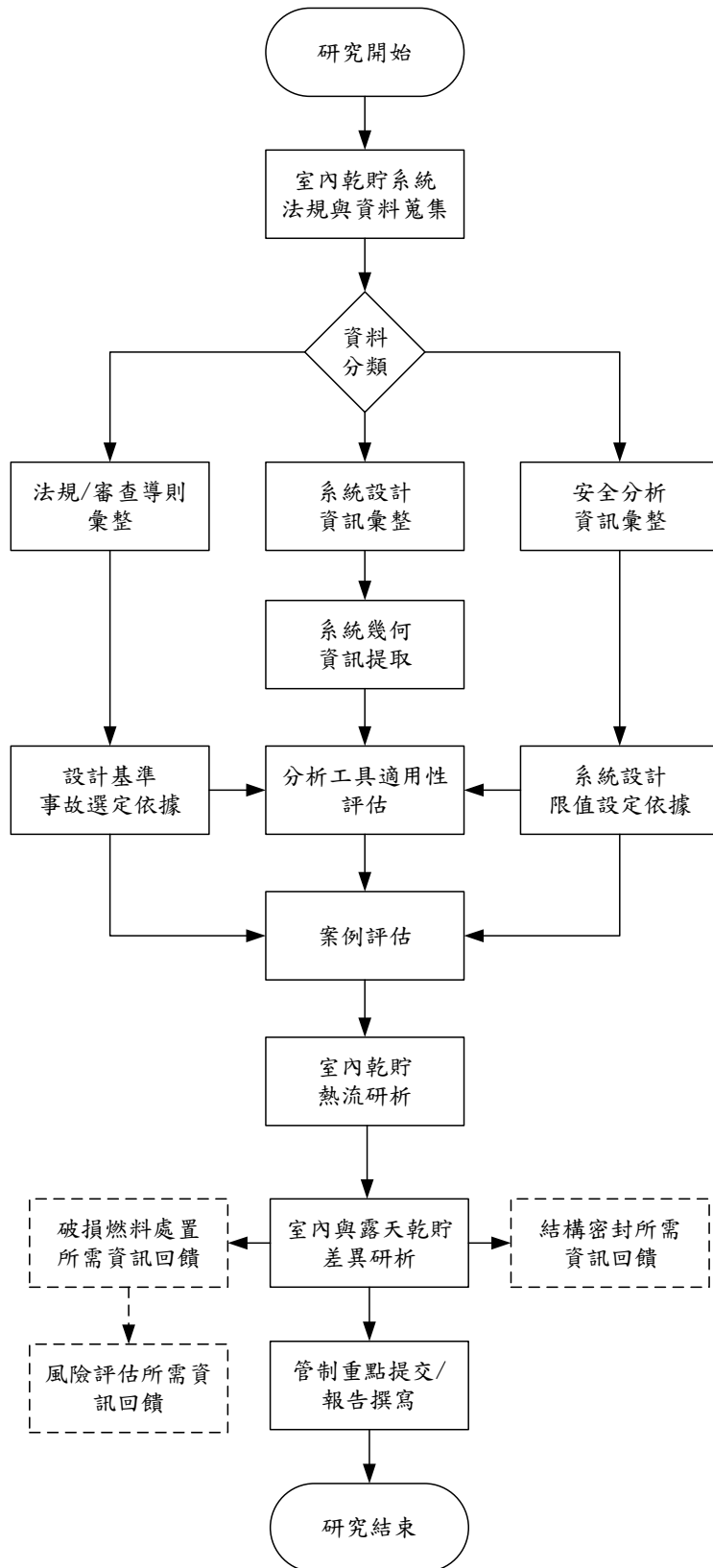


圖 1、室內乾貯熱流研析方法與步驟流程圖

## 4.2 研析時程與查核點規劃

透過前節的研究流程與工作規劃，本子項預計於年度工作完成後提出與管制要點相關之意見回饋，甚至透過自行建立的分析技術之分析發現作為其它子項；如結構密封特性、風險評估等子項計畫之研析線索；以期將熱流分析結果與本計畫之其它子項充分整合進而發揮最大之研究效益。

為能達成以此目標，本計畫於原計畫合約書內擬定以下六項工作要點，並規劃執行時程如表 1 所示：

1. 蒐集國際間室內乾貯之熱流設計之法規要求、法規指引及安全分析報告，彙整國際各式熱流分析軟體之應用實例，以作為軟體選用、分析模式精進。
2. 針對室內乾貯之廠房熱流安全分析工具及方法論適用性進行評估。
3. 參考文獻資料建立一乾貯系統熱流分析模型，以合適之程式(如 FLUENT)進行室內乾貯設施暨廠房熱流分析，以證實分析工具之適用性。
4. 對室內乾貯作熱流分析並與露天乾貯進行差異研析。
5. 針對本計畫其他子項提供其分析所需資訊。
6. 針對室內乾貯設施，研提熱傳評估管制重點，藉以精進我國用過核子燃料貯存安全。

為便於委託單位進行進度審查，本報告於第五、六章中逐節描述各項工作之成果：

- 5.1 節：蒐集並研讀國際間室內乾貯設施之安全分析報告、技術資料、法規指引、技術報告及文獻等；
- 5.2 節：現有法規安全分析資料調查與彙整；
- 5.3 節：室內乾貯之熱傳安全分析工具及方法論適用性評估；
- 6.1 節：室內乾貯護箱熱傳分析技術研析；
- 6.2 節：室內乾貯廠房熱傳分析技術研析

6.3 節：室內外乾貯護施熱流特性比對彙整；

7 章 建議室內乾貯之熱傳評估管制重點

表 1、本子項計畫甘梯圖

工作項目	年月												備註
	106 1	106 2	106 3	106 4	106 5	106 6	106 7	106 8	106 9	106 10	106 11	106 12	
蒐集並研讀國際間室內乾貯設施之安全分析報告、技術資料、法規指引、技術報告及文獻等。	■												
現有的法規、安全分析資料之調查與匯整。	■												
室內乾貯之熱傳安全分析工具及方法論適用性評估			■										查核點： 6/10 期中報告
室內乾貯廠房熱傳分析技術研析							■						
室內乾貯護箱熱傳分析技術研析								■					
建議室內乾貯之熱傳評估的管制重點									■				
整理與歸納研究結果，106 年 12 月初舉辦期末報告審查會，並於 106 年 12 月底完成計畫成果報告。										■			查核點： 11/15 期末報告
工作進度估計百分比 ( 累積數 )	8	16	24	32	40	50	58	66	74	84	92	100	
預定查核點	1：收集並整理室內乾貯設施相關技術資料、法規指引、技術報告及文獻等，參酌現有與新取得之各項資訊，進行詳細研讀和分析； 2：針對室內乾貯之熱傳安全分析工具及方法論適用性進行實例計與測試，並於 6 月 10 日前提出期中報告； 3：完成室內與室外之熱傳機制差異進行研析，以瞭解相關法規中管制條件之制定緣由； 4：針對評估結果提出建議室內乾貯之熱傳評估的管制重點； 5：提出計畫執行進度報告說明以供審查，11 月 15 日前提出研究成果期末報告初稿，並舉辦期末報告審查會，12 月底完成計畫成果報告。												





## 5. 完成之工作項目及具體成果

為便於委託單位進行本子項計畫之進度管考與驗收，本期末報告所完成之工作項目及具體成果將依原計畫書所載之工作項目逐一進行彙整；各項工作項目之完成狀況與具體成果，將於以下各節逐一進行說明。

### 5.1 國際間乾貯設施之護箱、廠房與作業資訊研析

有鑑於本研究係透過管制之角度對未來可能出現的乾貯系統進行廣泛研析，而不似廠家招標般，需對各護箱與裝載需求進行細部評估。因此，在考量各家公司所設計乾貯護箱及廠房設施其熱流特性，主要係因為護箱類型(如混凝土護箱、混凝土模組或金屬護箱)或廠房類型(如鋼構、鋼筋混凝土結構)而有所差異為前提。由所蒐集之各類系統或具有潛在應用於除役作業之設施[2-10]中，歸納出具代表性之乾貯設施參數以進行評估與討論，以涵蓋同型護箱間因裝載需求或工程考量而存在之設計差異。

經檢索後發現，截至 2016 年 12 月為止世界各國共計 134 座乾貯設施，其中 129 座係屬營運中而 5 座則處於待啟用狀態。在歐洲方面，德國自最初 1993 年啟用實驗室用乾貯設施 Julich 及 1995 年啟用之 Greifswald 中期商用貯存設施等 16 個乾貯設施皆採用 CASTOR 系統之金屬護箱進行乾貯作業；而捷克的三座、比利時的一座、瑞士的兩座乾貯設施以及保加利亞的 Kozloduy 設施也皆是採用金屬護箱進行裝載；俄羅斯、匈牙利則是採用混凝土窖式之貯存設施，而西班牙、立陶宛則是混凝土與金屬護箱混用之狀況。

不同於歐洲各國以金屬護箱為主，美國目前的 76 個乾貯場址中除 DRESDEN、Hatch 部分採用金屬護箱與混凝土護箱混用，Idaho、Fort St. Vrain 電廠採用混凝土貯存窖，North ANNA、Maine Yankee、Peach Bottom、Surry、Prairie Island 等電廠採用金屬護箱外，其餘皆採用混凝土護箱，且以露天乾貯為主。而同為美洲的加拿大及墨西哥等國家，則同樣以混凝土模組或是混凝土護箱為主要乾貯設施。

而在臨近我國的亞洲國家則可大略區分為以混凝土護箱/模式中國、印度、韓國、亞美尼亞及混合使用金屬護箱及混凝土護箱的日本兩大區塊。

上述各國所選用的設施類型與系統型號可更進一步的歸納成若干種商用化且具有普及性之類型；而這些類型更因為基本之熱流、屏蔽、結構與安全考量而有著更多的相似性。為能有系統地進行各項設計資訊比較，以下各將分別就護箱、廠房設施及作業程序資訊進行深入討論。

### 5.1.1 各式乾貯護箱熱流設計資訊

經資料檢索後，本研究由已蒐集之各式護箱中挑選具代表性之核研所 INER-HPS(NAC-UMS)[10]、Holtec 公司之 HI-STORM[24]與 HI-STAR[25]、Areva 之 NUHOMS[26]及日本 RFS 設施所採用的 Hitachi 或三菱公司之護箱與德國 GNS 之 CASTOR 等六種已有申照實例並可能成為我國未來除役乾貯護箱類型之設計作為代表，進一步的針對其熱流設計與差異進行探討；其中 INER-HPS(圖 2)係為我國核一廠目前已申照完成之乾貯系統，具有 56 束/14kW 之裝載能力。該系統與圖 4 所示之 HI-STORM 及圖 5 所示的 NUHOMS 系統皆利用混凝土作為屏蔽材料；惟 NUHOMS 系統因採用水平擺置之方式，故稱之為混凝土模組式設計。此三種系統除設計負載與裝載容量，除了因規格需求而有所不同外；其主要熱流設計資訊，如直徑、護箱長(高)度、主要散熱途徑與材料及加工製作方式(如表 2 所示)皆因加工技術與材料選用而有其極其相似之處。例如因護箱之密封鋼筒(canister)因無需考量屏蔽效果，故其直徑主要取決於裝載量與提籃設計需求；這使得這三種密封鋼筒的直徑與壁厚約略為 1.7m 及 0.5 吋(1.27cm)左右。相同的，考慮護箱頂部在進行密封作業時所需的屏蔽能力後，上述護箱在裝載 BWR 用過核子燃料時，將因為所裝載的燃料束長度、必要的護箱密封與結構強度與約 10cm 左右之屏蔽上蓋厚度，而令其高度約為 4.8-4.9m。

更值得注意的是，此類乾貯系統因採用熱傳導能力較差( $\sim 2\text{W/m-K}$ )的混凝土作為屏蔽材料，故無法逕由混凝土表面進行散熱；需於密封鋼筒與貯存護箱

(storage cask)之間，保留足夠的間隙來讓空氣流經密封鋼筒表面以建立自然對流，避免水泥之傳導熱阻造成系統元件溫度大幅上升。也因為此一設計，該類以混凝土為屏蔽材料之乾貯系統，其所保留的對流間隙(以下稱空氣流道)將成為主要熱傳途徑，並使得空氣流道阻塞議題成為此類系統之設計基準事故(Design Basis Accident, DBA)。

此外，得利於屏蔽護箱與密封鋼筒之分離的設計概念，此類之系統往往朝向薄殼鋼筒之方式進行設計；廠家在符合美國機械工程師學會鍋爐與壓力槽規則(ASME B&PV Code, Section III, Subsection NB) [27]之前提下，合理地選用比金屬護箱更薄的容器厚度來達成密封邊界的設計需求。也因為其所需強度可透過既有板材滾軋成型，此類系統往往採用 304L 或 316L 系列之沃斯田鐵系不銹鋼材透過銲接方式將其筒身、底板與上蓋進行組裝；其裝載後的密封作業，亦往往受限於密封鋼筒與上蓋的厚度差異，而多以層層銲接之方式進行密封，並導入如 ANSI N14.5[28]等 PT 或其它非破壞檢測技術以確保銲道品質符合要求。

不同於上述的混凝土護箱之設計理念，金屬護箱在設計之初即決定以金屬容器搭配中子吸收材料來滿足屏蔽需求；故其設計時就採用較厚的金屬容器以提供足夠的加馬及中子屏蔽能力。也由於所採用之材料[29]往往係為所具有的高熱傳導能力(16~42 W/m-K)之鐵系金屬，使得該種護箱在較厚的容器厚度(~0.4m)下，仍可以透過護箱之熱傳導及表面熱對流來進行熱移除。

然而，也因為採用了較厚護箱的設計，若在考量無縫加工技術之要求時，該類護箱將僅能以鑄造或鍛造技術來施作，故亦需選擇具有合適性質之材料來搭配此一製程。例如日本 RFS 設施所採用之金屬護箱(圖 7)與德國 CASTOR 護箱(圖 3)皆是採用此類方式(如表 2)搭鑄鐵材料進行設計。惟如圖 6 所示 Holtec 公司設計的 HI-STAR 系統，因並未考慮採用無縫加工技術；其內部仍採用與 HI-STORM 系統同為 MPC 之多功能密封鋼筒(Multi-Purpose Canister)進行裝載，再放置到稱為外包裝(OVERPACK)之金屬容器中，並於上方覆以利用螺栓鎖固之金屬密封上盤(closure plate)來達成整體系統屏蔽設計。也因為 HI-STAR 之特殊設計，其雖

採用金屬護箱作為屏蔽體之設計，但仍可由薄板材料以銲接方式進行製造與組合；故其材料亦與日本 RFS 設施所採用之護箱及德國 CASTOR 系統有所不同，反而與前述混凝土護箱採用相同的 304L/316L 系列不銹鋼[29]及核一乾貯[10]混凝土護箱之內襯(Liner)具有較相近之熱傳性質。值得注意的是，該護箱所使用的多層結構的堆疊方式，熱傳分析時需依將各層板件間的接觸熱阻選用依循 ISG-21 法規指引之要求，將其納入熱流分析模式之中。

密封鋼筒內部回充之氣體因需同時滿足低化學活性及高熱傳導率之特性，以達到保護燃料護套之要求，現今各式不同密封鋼筒之回充氣體皆以惰性氣體(如，氬氣)進行施作；惟其回充壓力因各式作業與設計需求而有所不同。例如，INER-HPS 系統採用盤式提籃結構而無需利用高壓氬氣來增加移熱能力，僅於密封鋼筒內回充常壓氬氣來滿足防止護套劣化。反之，在熱負載較大或是極為依賴內部對流的乾貯系統；例如，MAGANSTOR、HI-STORM、HI-STAR 等則是回充高壓氬氣來增進其移熱能力。更值得注意的是，德國、日本之系統中，因為需考慮氣體洩漏之監測，故於燃料貯存空間採負壓回充(德：0.5/日 0.81Bar)，並於兩層上蓋間氣密室(air-tight chamber)回填高壓(德：6.0/日 4.0 Bar)氬氣，以作為其監測其各層密封界是否洩漏的機制。上述各式內部壓力之設計除需考慮其作搭配的作業程序外，更需將實際回充作業可能造成的過高或低壓力對安全分析之影響納入考慮；例如，壓力過低可能造成移熱效果不符安全分析基準，過高壓力可能造成事故期間密封鋼筒內壓力超設基準之問題。

綜合上述整合與歸納，未來可能因核一除役而需引入之各式乾貯系統，無論其設計廠家為何，其系統大致可歸納出以下幾點：

- (1) 採用混凝土屏蔽體設計之護箱，其密封鋼筒厚度約為 1.25cm 左右、高度主要受限於燃料束長度而落於 4.8m 左右、護箱直徑約為 1.7m，而外部混凝土屏蔽則依輻射劑量允諾值而有不同，但約略落於 0.8-1.1m 左右；此數據範圍可供管制單位參考，並作為熱流分析方法論可行性評估之用。

- (2) 採用金屬護箱之設計，其護箱厚度約為 0.4m 左右、高度則因考量頂部向天輻射之屏蔽能力，而使整體高度約略為 5.4-5.78m 左右；此一數據可供選定合適之參數條件以供熱流評估之用。
- (3) 混凝土護箱(模組)與金屬護箱之主要熱傳途徑分別為混凝土護箱內部的空氣流道與金屬護箱表面之自然對流；預期兩者的熱傳機制將因為主要移熱表面是否能直視廠房而進一步影響廠房內的溫度分佈；未來管制單位或可於審查作業時檢視其分析假設，而本計畫亦將於報告第 6.2 節中進一步評估其對熱傳機制之影響。
- (4) 密封鋼筒皆以回充氬氣作為強化移熱與減少燃料護套劣化之措施；惟考量不同作業條件與設計考量，而採常壓、負壓或高壓回充。考量各式回充作業往往可能造成壓力過高或過低並影響安全分析涵蓋性，故無論是否為室內乾貯系統，管制單位仍需針對各式系統的氬氣回充壓力進行檢視，以確保熱流、事故、密封與結構受實際壓力及相關作業程序皆可被涵蓋。
- (5) 德、日乾貯系統採用二次蓋內氣密室進行監測，並利用此一機制杜絕貯存區於監測異常之事故發生前出現任何分裂產物(氣體)洩漏之可能；為確保此機制之有效性，管制單位應於審查時對其高壓空間設計進行檢視依據，以確認在一二次蓋內空間之壓力均衡後，仍維持負壓。舉例來說，若此類系統之主要上蓋發生密封不實問題，雖於監測後立即施行修復作業，但若能確保氣密室之壓力與貯存室之壓力均衡後仍為負壓，即可確保在開啟二次蓋時，仍無需考慮分裂氣體外釋之情境，將有助於減少人員作業風險與評估之困難度。
- (6) Holtec 之 MPC(含 Hi-STOMR 與 Hi-STAR 系列)可依廠家設計需求而裝載於混凝土、金屬護箱或是地下貯存設施型式，與其他單一用途的護箱有不同的工程設計思維。

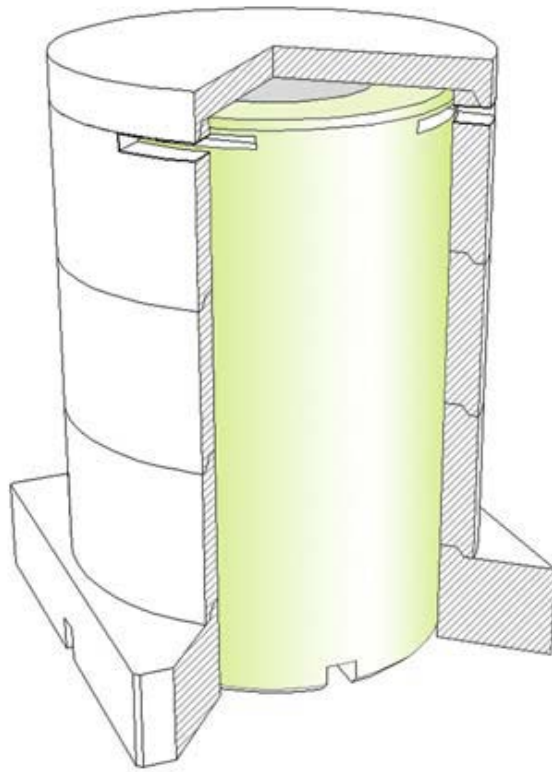


圖 2、台電公司申照完成的 INER-HPS 系統 [10]

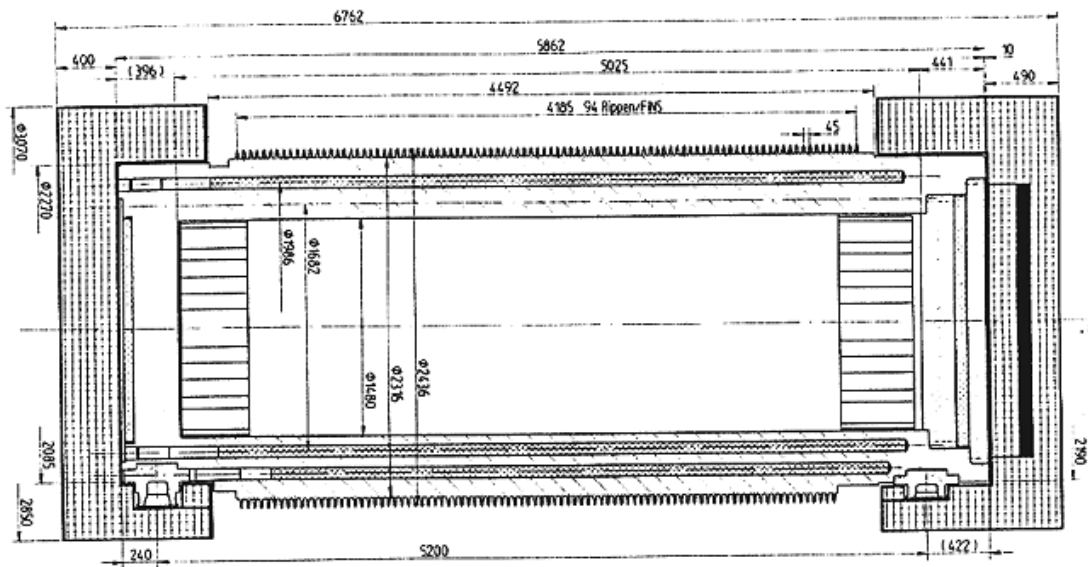


圖 3、德國 CASTOR 系統概略設計尺寸資訊[3]

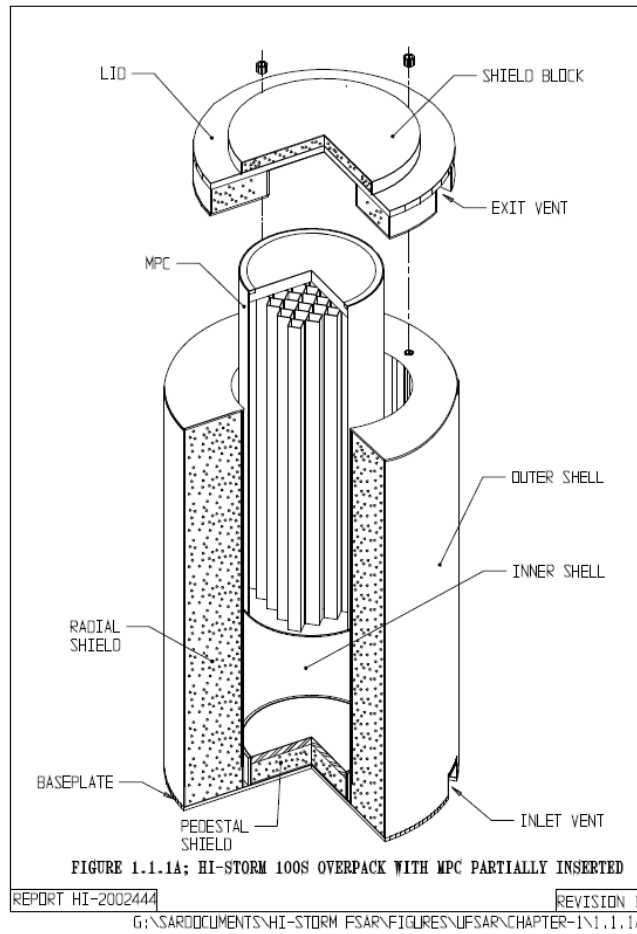


圖 4、Holtec 公司的 HI-STROM 100 護箱[24]

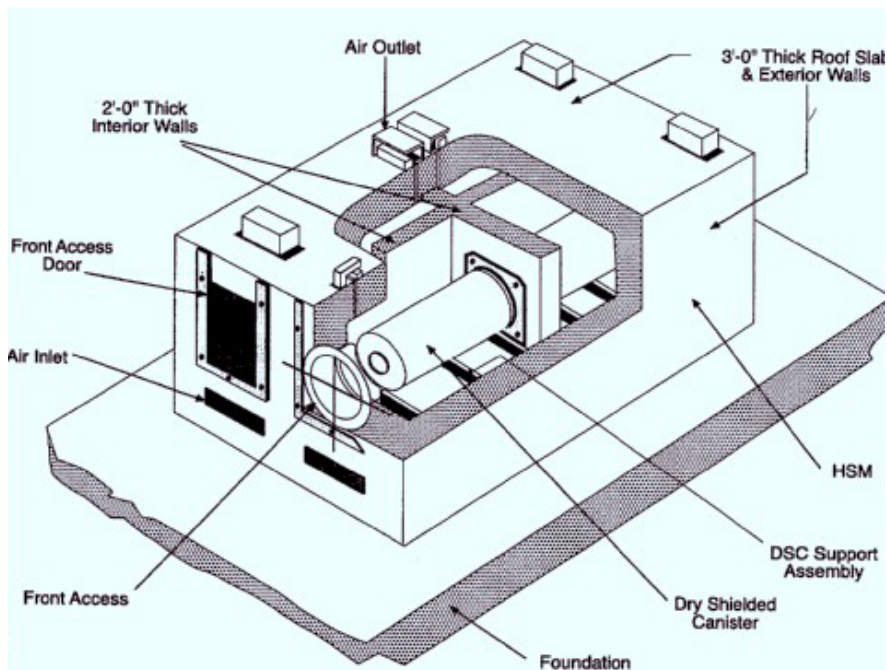


圖 5、Areva 公司的 NUHOMS 混凝土模組式[25]

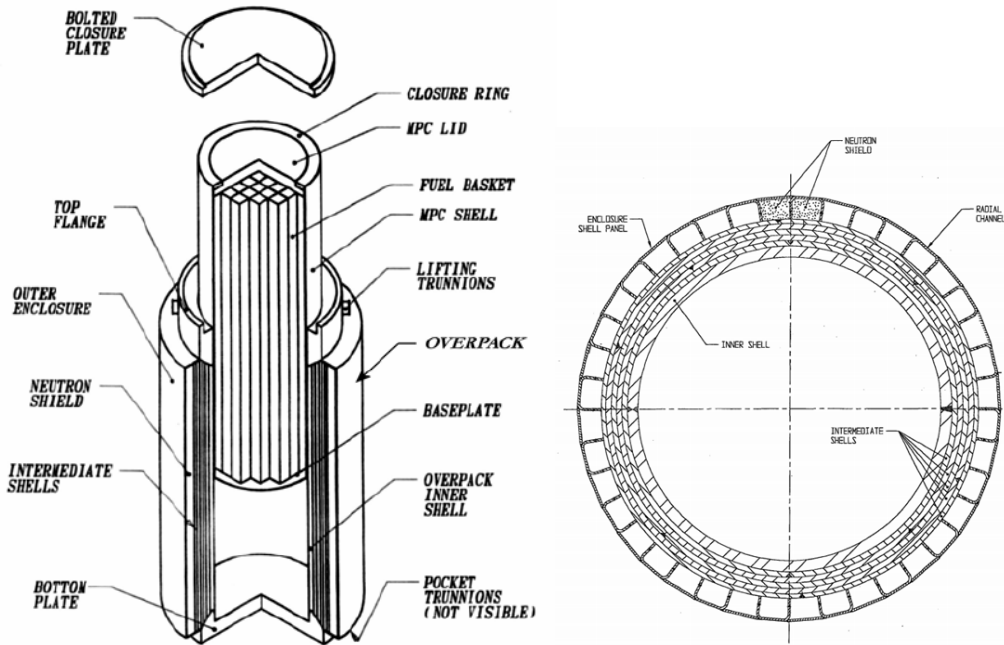


圖 6、Holtec 公司的 HI-STAR100 金屬護箱與多層上外包裝示意圖[25]

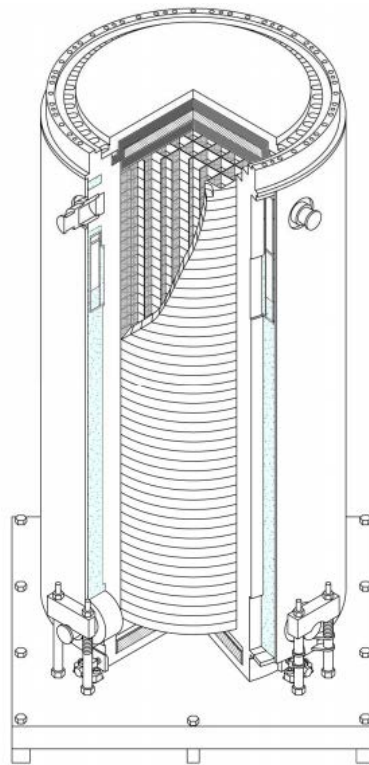


圖 7、日本 Mutsu Recycle Fuel Storage Center 乾式貯存系統[8]。



表 2、各式可能應用於電廠除役乾貯系統之密封容器與屏蔽設計資訊比對

	INER-HPS	HI-STORM	NUHOMS	HI-STAR	日本大型護箱	CASTOR
類型	混凝土護箱		混凝土模組	金屬護箱		
裝載容量(束)	56	68	61	68	69	52
設計負載(kW)	14	28.74	22	28.2	19	34
密封容器外徑(m)	1.703	1.736	1.708	1.736	~2.6	2.77
密封容器高度(m)	4.835	4.838	4.979	4.838	5.4	5.78
護箱總高(m)	5.6	6.08	5.64	5.159		
密封容器厚度(m)	~0.0127(0.5")				~0.4	~0.478
屏蔽厚度(m)	~1.0			0.358		
密封鋼筒材料	304/316 不銹鋼				球墨鑄鐵/鍛鋼[29]	
主要散熱路徑	空氣流道			護箱表面		
作業所需護箱	貯存護箱/運送護箱				無	
密封鋼筒功能	包(密)封				貯存/運送	
護箱製造方式	銲接				鑄造/鍛造	
上蓋密封方式	銲接				螺栓鎖固	
燃料貯存區氣體	常壓氦氣	高壓氦氣			0.81bar 氦氣	0.5 bar 氦氣
二次蓋內氣體	N/A				6.0 bar 氦氣	4.0 bar 氦氣

## 5.1.2 各式室內乾貯設施廠房熱流設計資訊

經蒐集國內外目前各式設施資訊[3-25]；目前世界各國之室內乾貯廠房主要可以區分為：1、鋼構廠房(Steel Structure Building)；2、鋼筋混凝土廠房(Reinforced concrete Building)；3、地質設施(如坑道式)等三種。鑑於本計畫子項一、二之主要任務係針對各國室內乾貯之類型及廠房結構更深入研析，本子項僅就各廠房與熱傳相關資訊進行檢核。

其中，鋼構廠房目前僅有英國 Sizewell B 電廠乾貯設施採用，並搭配 HI-STORM 混凝土護箱與 MPC-24 密封鋼筒來構成其室內乾貯設施，以存放其境內之壓水式反應器用過核子燃料。該設施之設計壽命為 60 年，並擬於 2020 至 2080 年期間最終處置設施[30]完成前扮演英國用過核子燃料中期貯存貯存設施之角色。經檢索後該設施容量約為 150 個護箱，其頂部與側邊係為鋼構廠房之設計，並以電鍍或烤漆鋼板包覆；經檢索各式廠房圖面資料後發現其內側並未額外施以隔熱材料包覆；故其廠房厚度合理推估約為 2mm 以下。預期在此設計下，日照輻射熱對鋼構廠房內部空氣之加熱作用將更為有效且直接。然而，由於該設施方於 2017 年 3 月施行第一個護箱的裝載後，仍未見其公佈更為詳細之廠房與護箱資訊；故本報告僅能透過比例尺之推估方式，估算其廠房高度約為 14m、整體設施高(含屋頂結構)約 22m(如表 3 所示)；且其進氣口與出氣口位置則如圖 8 所示，約略位於廠房之底部與頂部。另外，雖無任何資訊顯示，但在合理考量核子設施通氣口預期應設有隔離網，以滿足核子保防與防止外物入侵之目的；但由於其廠房設計時即未考慮其屏蔽能力，故其進氣口推測亦未設置迷道式進口以減低對外界之輻射劑量。

最後綜合目前已蒐集之 Sizewell B 鋼構廠房之設計，可發現此類設施未針對乾貯設施之移熱或防護進行額外之強化設計；其廠房功能主要是減少貯存對護箱表面之日照、增進核子保防與實體防護能力、些微增進對天候變化之抵禦能力、減少外來物質阻塞進氣口機率並減少社會大眾嫌惡感等效果。

不同於鋼構廠房設計，目前被德、日、荷廣泛應用的廠房類型則是鋼筋混凝土結構之室內廠房(圖 9)；如，STEAG、WTI、RFS、HABOG 等設施皆屬此類廠房。此類設施之廠房高度約在 12m-14m 之間；其中 STEAG 係為單廳式設計，而 WTI 與日本之廠房則為多廳式設計。多廳式設計除用以增大設施之貯存空間外，亦可透過隔間的設計來減低不必要的人員劑量，而以熱流基礎知識評估，可知多廳設計亦有助於維持內部流場的一致性，以避免過於混亂的流動或在廠區局部出現滯流點而影響該區護箱之移熱能力。值得一提的是 HABOG 設施則是採用如圖 10 分別貯存之設計方式；其貯存區是以貯存井之方式來存放高熱源廢棄物，並利用密封管式設計與廢棄物罐/密封鋼筒分別對具熱源之廢棄物(High Power Waste, HPW)及用過核子燃料達成雙層包件(PACKAGE)之設計，避免利用自然對流移熱的同時造成罐體與空氣直接接觸；而此處雙層包件與介質之熱阻亦需納入分析模式中予以保守考慮。對於非發熱廢棄物，HABOG 則是利用強制對流系統來進行抽風對流使其空氣流動路徑由低污染區流向高污染區，再於出口處加裝濾材來減低污染外釋之機率。

鋼筋混凝土廠房因考慮廠房換氣率之故，往往設施有遠高於天花板的排氣孔或排氣煙囪，以達到設計所需的換氣能力；因此其設施總高可能因為設計需求由 WTI 的 18m 大幅變化至 HABOG 的 40m。此外，本研究所蒐集的資料[31]更顯示德國的乾貯設施(WTI/STEAG)具有約每小時 20 次的換氣率；亦即將其廠房出氣口的排氣流量需符合每 180 秒排出一個廠房空間體積( $m^3$ )之要求。雖然 HABOG 設施未提到其自然對流的設計流量，但經所蒐集到的參考資料顯示，其系統僅需透過自然對流即可達到安全移熱之目的，機械式通風系統僅用於控制發熱廢棄物貯存區熱邊界溫度(如混凝土)低於限值；甚至在進氣口阻塞達 95% 的事故狀況下，仍能確保發熱廢棄物溫度低於溫度限值。其相關報告指出，在不合常理的進氣口全阻塞事故下，HABOG 設施仍可確保設施數月內，不致使內部貯存之用過核子燃料發生元件超溫之狀況。由此推斷，此類混凝土設施之自然通風、

換氣能力除了是室內乾貯設施的關鍵因子外，其設計條件將與室內環境溫度、事故時的系統初始溫度息息相關，故需納入未來研析工作中。

基於此點，在進一步將所有鋼筋混凝土結構之廠房設計資訊整理如表 3 所示，並進行比對後可以發現，所有鋼筋混凝土廠房貯存區壁面，皆列置成排且具有迷道設計之進氣口，以作為空氣進入設施之進通道。而為能減低溼氣影響、人員入侵及天然災害(如土石流或海嘯)之風險並減少場界輻射劑量，其進氣口位置皆設於離地數米且高於護箱頂部(~7m)之處。

在此設計下各國對於現行廠址設計有其不同的溫度要求，例如：荷蘭 HABOG 對進出口溫度之分別為 27°C 與 56°C；且在此條件下，而該設施實際作業時鋼筋混凝土結構最高則是常保持於 78°C 左右，並未超過 95°C 限值；而德國則是在 29°C 之環境溫度條件下，將貯存區溫度控制在 35°C。

此外，鋼筋混凝土廠房具有較鋼構廠房更強結構強度抵禦飛射物的攻擊，因此若將其廠房對飛射物抵抗力之設計需求納入時，其厚度將會比未考慮時更厚；例如 WTI 設施所僅有 0.7m 壁厚，但 STEAG 設施之廠房厚度則有 1.2m，甚至荷蘭的 HABOG 廠房厚度更達 1.7m。此外，相較於前述之鋼構廠房，鋼筋混凝土廠房預期將因為材料厚度與熱傳導性質的不同，使日照輻射對廠房內的溫度與熱傳造成不同程度之影響，值得本研究持續深入討論。

不同於人造廠房之設計理念，位於德國巴登-符騰堡州的內卡爾海姆(Neckarwestheim)，則是奠基於兩條襯有混凝土結構之坑道(cavern)所構成的貯存設施。其位於地質結構中的廠房除了可以避免輻射劑量因放射性廢棄物而增加之外，亦無其它鋼筋混凝土結構需考慮日照輻射影響之問題；惟此一坑道式進氣口與排風口位置(圖 11)將因為貯存區流場與護箱擺置之方式而形成類似管束(Tube Array)之流場，進一步造成護箱表面對流係數減低及空氣溫度沿流動路徑而逐漸上升之問題。因此可能造成護箱裝載能力受限於擺置與流場分佈之狀況。此一現象顯示，在採用此類室內乾貯廠房進行護箱存放時，其熱流分析不可逕行以護箱裝載能力進行申照，而需綜合考慮廠房通風與熱流途徑之影響。

綜合上述整合與歸納，未來可能因我國電廠除役需求而引入之各式室內乾貯廠房；其系統設計資訊大致可歸納出以下數點，並值得更進一步研析後納為管制或安全審查時之參考：

- (1) 針對廠房之日照熱傳影響與廠房材料之影響，可透過合適之熱傳導模式進行檢核；惟各國法規之差異將於 5.2 節各國法規、法規指引與標準之討論中再行定義，並於 5.3 節中進行評估；
- (2) 目前各設施所蒐集之事故評估資訊係以荷蘭 HABOG 設施最為完整，其熱流分析除正常狀況下之元件溫度外，更針對設施部分阻塞與全阻塞時之狀況進行評估，此一資訊亦可供管制單位參考；
- (3) 所有設施廠房皆以自然對流為設計目標，而機械通風設施主要用以過濾、隔絕熱源、維持特定區域邊界溫度或局部區域適居性等目的，此發現或可作為我國管制單位審查未來室內廠房設計之依據；
- (4) 相較於鋼筋混凝土結構或是坑道式設計，鋼構廠房並無顯著之設計來強化乾貯設施之移熱或防護功能；其廠房功能主要是減少貯存時對護箱表面之直接日照、略為增進核子保防與實體防護能力、些微增進對天候之抵禦能力、減少外來物質阻塞進氣口之機率與社會大眾之嫌惡感等功能；
- (5) 依據所蒐集之資料顯示，換氣率或將成為室內乾貯廠房之重要設計指標，惟廠房空間在設施建構完後將因為設備之裝置與護箱之貯存量而變化；故管制單位未來若於檢視安全分析報告期間發現有相關設計參數時，應檢視其廠房空間定義與換氣率計算基準是否一致。
- (6) 採用不同室內乾貯廠房進行護箱存放時，其熱流分析不可逕行以護箱裝載能力進行申照，而需綜合考慮廠房通風與熱流途徑之影響，並瞭解其設計對於流體溫度之影響；此項議題將於第六章進一步研析並證實。
- (7) 由於不同類型之廠房所具有的質量與熱容量(Heat Capacity)不同，且預期將受到不同程度的日照影響；故針對上述參數於廠房進氣口全阻塞或大

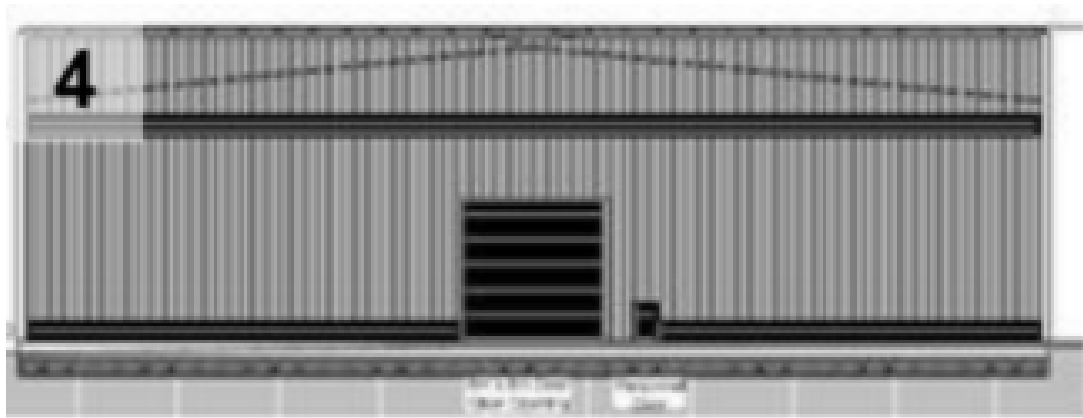
幅阻塞事故之影響將於第六章進一步加以研析。

表 3、各式既有室內乾貯廠房與熱流相關之設計資訊比對

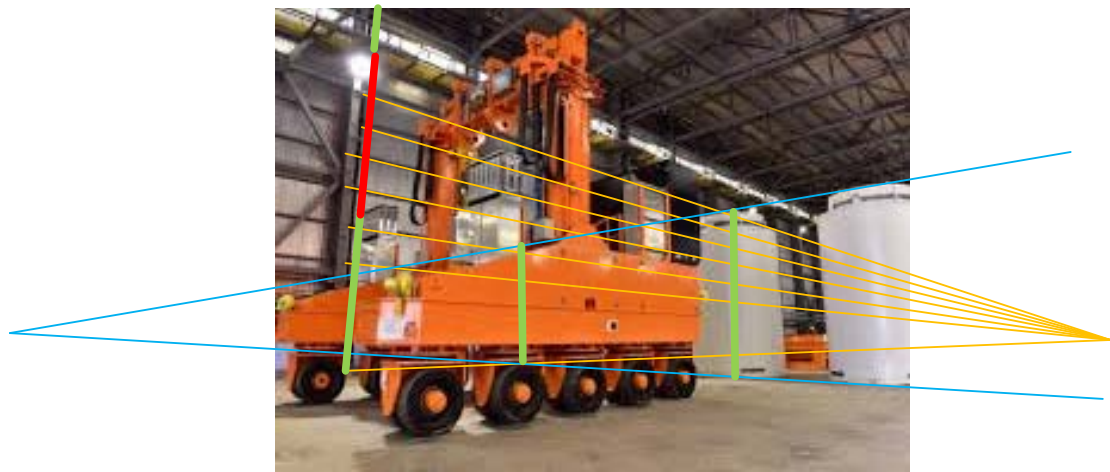
	SIZE WELL B	德國 STEAG	德國 WTI	日本 RFS	荷蘭 HABOG [32]	德國 Neckarwestheim
類型	鋼構廠房	RC	RC	RC	RC	坑道式
廠房容量	150	~100	~152	500	-	~200
頂部厚度	<0.002	1.3	0.55	1.0	1.7	N/A
側牆厚度	<0.002	1.2	0.7	1.5	1.7	N/A
設施高度	~22	23	18	28	40	51
廠房高度	~14	14	15	15	12	18.8
通風口設計	-	迷道式				GATE
進氣口位置	底部	牆上離地數米				坑道口
換氣機制	自然對流					
換氣率(次)	N/A	20/h[31]	-	-	-	-
日照輻射	-	800W/m <sup>2</sup>	-	-	-	N/A
出口過濾設備	無*					
進口過濾設備	隔離網					-
進口溫度(°C)	N/A	29	-	27	29	
出口溫度(°C)	N/A	-	-	56	-	
廠房溫度(°C)	N/A	35	-	-	-	

\*其中 HABOG 僅針對發熱廢棄物(V-HPW 及用過核子燃料而言)

(a)



(b)



(c)

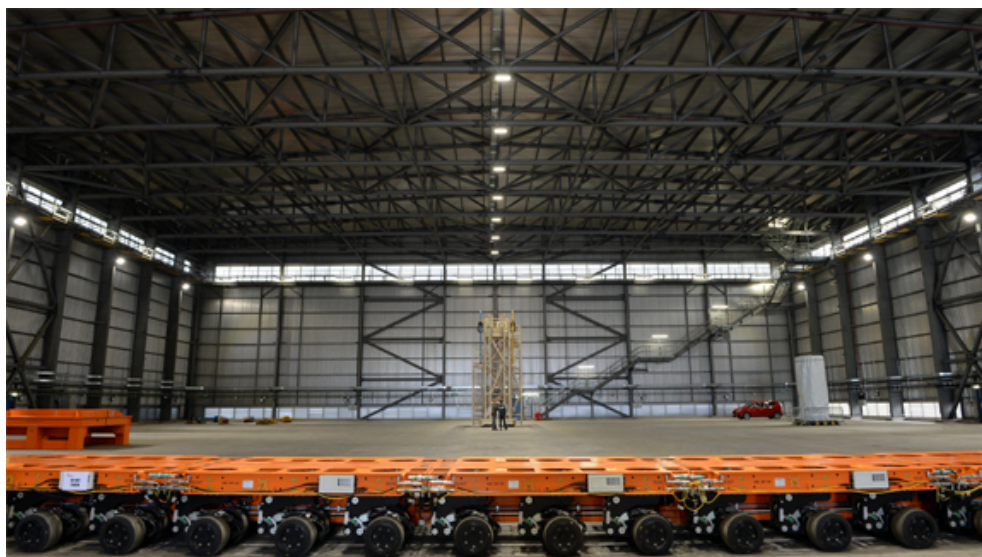


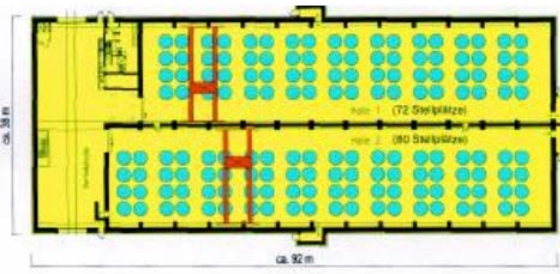
圖 8、英國 SIZE WELL B 電廠之鋼構結構室內乾貯廠房(a)廠房頂部結構、(b)廠房資訊預估、(c)廠房可能進出氣口位置圖



(a)



(b)



(c)



(d)

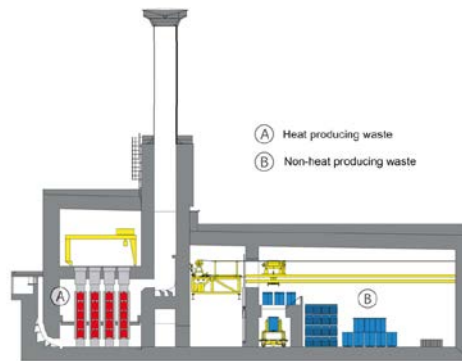


圖 9、各國鋼筋混凝土結構之室內乾貯廠房(a)德國 STEAG[23]、(b)德國 WTII[23]、(c)日本 RFS[8]、(d)荷蘭 HABOG[32]

(a)



(b)



(c)

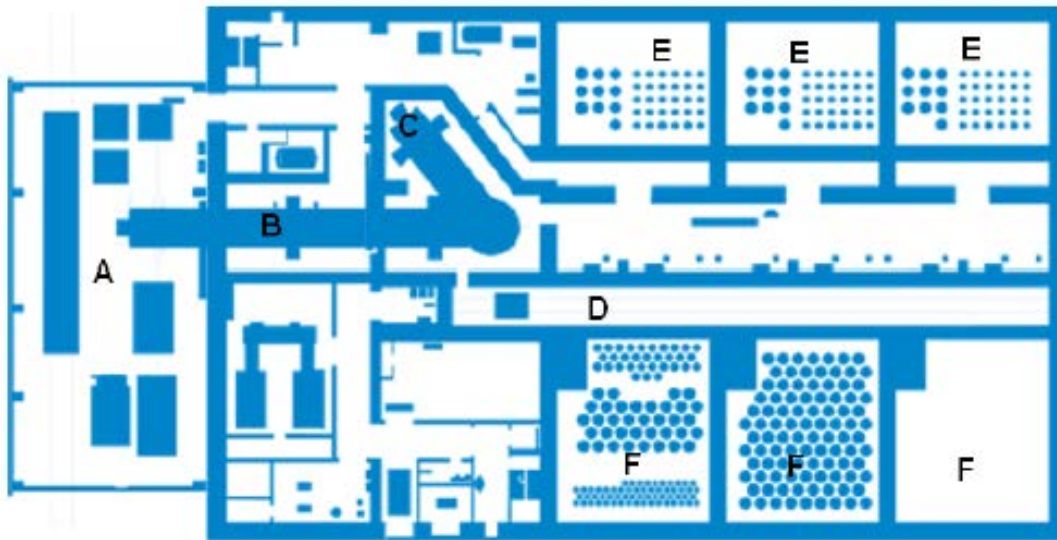
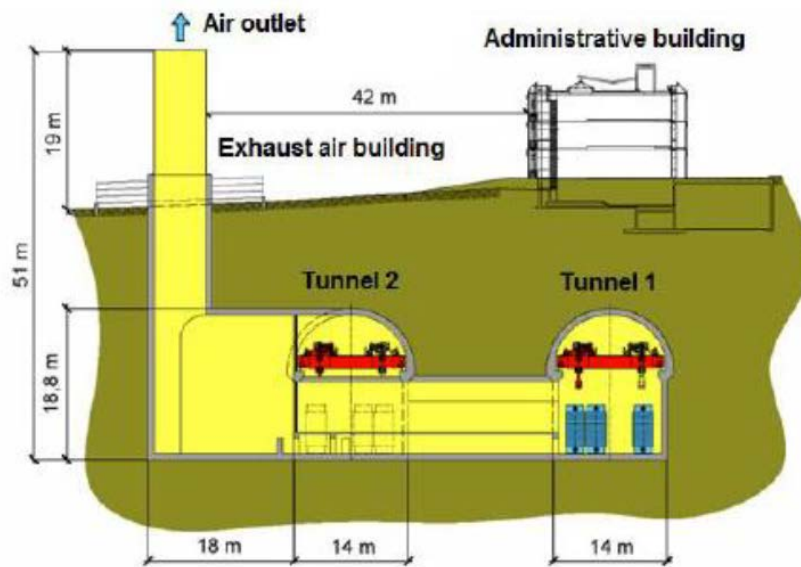


圖 10、荷蘭 HABOG[32]設施貯存(a) 發熱廢棄物、(b)非發熱廢棄物之區域及(c) 整體場區配置圖

(a)



(b)

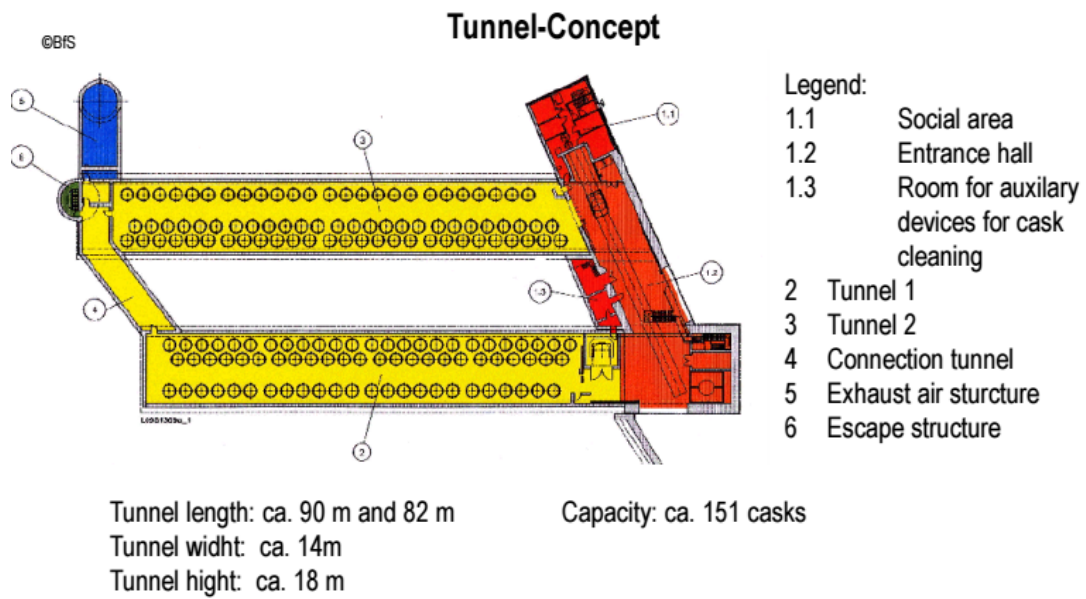


圖 11、德國巴登-符騰堡州坑道式室內乾貯廠房[23](a)側視圖、(b)上視圖

### 5.1.3 各式室內乾貯設施熱流相關之作業程序資訊彙整

經由上述對各式護箱之討論結果可以得知，各式乾貯系統間存在若干相似性與涵蓋性；彼此之間可透過合理的評估與篩選來避免不必要的重複討論，進而將各式護箱歸納為最少可涵蓋類型，以作為後續方法論評估之依據。本節考量 INER-HPS 與 NUHORMS 系統之幾何與熱傳設計除擺置方式外，其餘熱傳機制幾近相同；而 HI-STROM 與 HI-STAR 本身皆利用 MPC 來進行裝載，故可逕由 HI-STAR 作為代表；而日本與德國的一體成形護箱則是具有相近的幾何設計、材料與貯存場所特性，故以管制單位曾邀集專家進行演講之 CASTOR 為代表進行比較。最後，本研究篩選出 INER-HPS、HI-STAR 與 CASTOR 來進行以下的作業流程比對與探討。

如表 4 所示，當密封鋼筒擬進行裝載與傳送作業時，除了 CASTOR 系統因同時具有傳送與貯存兩用護箱執照而無需再透過傳送護箱來進行裝載與運送作業外；其餘採用較薄外殼的密封鋼筒設計，因為傳送的安全需求與屏蔽能力，皆需將密封鋼筒裝入額外準備的傳送護箱中；例如 INER-HPS 採用 TFR 傳送護箱(圖 12)，而 HI-STROM 則是採用 HI-TRAC(圖 13)；此一差異意味著不同的護箱設計將導致裝載與作業期間的熱流分析與作業規劃將有所不同；例如：INER-HPS 設置有水封環裝置並於密封鋼筒與傳送護箱間注入除礦水以避免金屬護箱表面存在鬆散污染而衍生表面除污之困擾；反之，當採用如 CASTOR 等傳送/貯存兩用護箱時，因護箱本身已可提供充足的屏蔽能力，故只需在裝載完成後針對護箱表面進行除污並確認符合相關規定即可運送。此一差異除顯示各式護箱將因設計而有不同的作業程序與分析規劃；惟經評估後發現各式作業之熱流特性，可概略被既有核一乾貯設施裝載階段的作業程序與熱流審查經驗所涵蓋。

當燃料裝載入密封鋼筒後，為能降低護箱頂部後續作業時之人員作業劑量，所有系統皆會於水池中先行安置用以屏蔽輻射之一次蓋；例如 INER-HPS 的屏蔽上蓋或是德日乾貯設施的主要上蓋(Primary lid)。隨後，當系統吊運至工作場所

後，隨即展開上蓋密封作業；其方式主要可分為混凝土護箱所採用的封銲及金屬護箱所採用的鎖固兩種方式。鑑於此作業程序無論在有無傳送護箱的乾貯系統上，皆將呈現與正常貯存不同的狀態(例如，內部介質、上蓋密封狀況、環境溫度)，並且需注意水溫與液態水體積之變化。經與我國核一、二既有之一次蓋封銲作業之熱流評估規劃進行比對，既有作業之管制經驗在搭配各式護箱之設計規範後皆可涵蓋其餘護箱之密封作業；故未來我國管制單位可延伸既有系統之上蓋封銲作業之審查經驗，以涵蓋其它護箱的安全管制需求。

為能符合長期貯存之需求，一次蓋密封後的護箱需要進行一連串的作業以確保內部貯存條件不致造成燃料護套的劣化，其中尤以排除液態水後如何將護箱內的剩餘水氣完全移除最為重要。這是因為此一階段往往是乾貯作業期間燃料護套可能經歷之最高溫度；且其乾燥作業的程序亦將影響回充氦氣的純度是否能符合允收準則。目前常見的乾燥方法有二；其一，是利用抽真空的作業方式逐步利用衰變熱來蒸發水氣，並利用若仍有殘留水氣若持續蒸發時將無法滿足真空負載之方式來加以判定。而另一種方式則是如 Holtec 所採用的高壓乾燥方法，在對護箱充填高壓氦氣以確保其移熱能力無虞之前提下，讓系統溫度上升並貯存較多的熱量；隨後透過洩壓方式來降低水的沸點並利用各元件之顯熱來促使殘留水蒸發。此二種機制預期對貯存之燃料護套將具有不同程度的應力影響，故建議管制單位未來或可針對此作業階段，要求業者提具對護套完整性之評估或分析結果以供管制單位參考。經檢視兩種乾燥作業分析之熱傳分析技術皆相似，僅在真空乾燥方式中將因為輻射熱傳比重較高而更為精準的分析不準度控制；故現有的分析方法仍可原則上地涵蓋其它金屬護箱的乾燥作業需求，惟未來仍需針對廠家提出之實際作業方式、作業時間與允收準則進行審查。

在完成上述真空作業後，準備進行貯存的護箱往往需進行二次蓋之密封作業，以增進密封效果；甚至 RFS 設施所採用的金屬護箱更利用彈性止洩墊圈與第三層密封。經檢視各式設施之二次或後續上蓋之安裝與密封作業，其設施熱流狀態與完成充氦作業後並無明顯不同；故可依循既有之核一乾貯審查經驗將二次(含

其它)上蓋作業所需時間，併入一次蓋之密封作業時間內，以求在增進保守度之前提下簡化管制作業。此外，未來若管制單位針對如 CASTOR 所裝設之壓力監測系統進行審查時。除需檢視其合理填充時間與差異所造成之影響外，因預期密閉定容空間的壓力將因為溫度變化而改變；管制單位需進一步檢視業者於運轉程序書中所提的壓力變異範圍；例如，透過理想氣體方式進行評估可以得知，當環境溫度變化逾 20°C 時，定容空間的高壓氣體或將出現逾 6% 的壓力差異：

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2} = \frac{320K}{300K} = 1.067。$$

最後，所有系統在完成相關作業並運送至貯存場址時，皆需有適當防撞、防傾設施以確保運送過程安全無虞；其中 INER-HPS 與 HI-STROM 則是於乾燥作業完後，直接裝載至混凝土護箱中，並利用低底盤多軸油壓板車以直立方式進行運送而排除其傾覆之風險。CASTOR 因其為兩用護箱之故，僅於護箱兩端加裝防撞設施後即可以水平方式運送。經初步評估後可知，當 INER-HPS、HI-STORM、HI-STAR 裝載至混凝土護箱或外包裝後，雖然其風險與事故類型仍與貯存階段不同，但仍可被正常貯存狀態之熱流特性所涵蓋，且不受運送至露天或室內乾貯設施而有顯著之不同；反之，未來採用不同於貯存方式進行運送的系統，如 CASTOR、NUHOS 則需額外對此一階段進行分析，或以工程評估證實其熱流特性可被其它已分析案例涵蓋。

無論是室內或是露天乾貯，在貯存期間因作業程序而引起的事故，當屬燃油火災最需注意；例如在運送途中因為多軸油壓板車之火災事故，或是廠房內採用門型吊車或是其它機具所引起之火災。我國既有乾貯設施燃油火災係採 801.7°C 並維持 8 分鐘之境況進行評估[10, 11]，而德國則針對其運送作業與貯存階段採用 600/800°C 並分別維持 1hr/30min 之條件進行此類事故分析。其中，801.7°C 與 800°C 之差異推測係為單位轉換與管制文件書寫之差異。兩國考量事故之時間差異，主要源自於我國廠家在申照作業時，已於安全分析報告中說明將藉由行政管理措施限值機具燃油量，並經管制單位同意後擬定，兩者間並無相違之處。

最後，若貯存期間發生問題，則 INER-HPS 或 HI-STORM 等系統可能需逆向執行既有之作業程序，並將系統回送至水池內(如燃料池或除役後設施檢整用水池)；金屬護箱則因其已具有充份之屏蔽，且其原有設計即可於合適區域針對護箱表面或二次屏蔽蓋進行檢修作業。因此，預期在檢修作業之熱流狀況將可直接被既有分析結果涵蓋或是透過既有之分析技術來額外進行評估。

綜合以上對作業程序之熱流研析，本節所獲之建議或發現可整理如下：

- (1) 我國核一乾貯之上蓋封鐸作業之熱流分析經驗足以涵蓋其它護箱之分析需，而管制單位既有的審驗經驗，亦可應用於其它護箱之密封作業之熱流審查中；
- (2) 若護箱具備有壓力監測功能時，需針對可能因廠房溫度出現之合理壓力變化進行預估並明列於運轉規範中，以作為判定正常或異常之依據；
- (3) 整體而言，不同型式之乾貯系統熱流分析所需之分析方法論相近，彼此間並未因設施類型之不同而有技術性差異；
- (4) 不同設施所採用的乾操作業可概分為真空乾燥與洩壓乾燥兩種，在預期兩種作業或將對於護套造成不同程度之應力影響，建議管制單位可對業者所提供之乾操作業進行檢視；此外，採用洩壓乾燥之方式，廠家或需證明護箱於洩壓前的溫升及所累積之熱量足以在作業完畢後仍高於該作業之水蒸汽氣體分壓，以確保所有殘留水皆會被蒸乾；
- (5) 經比對我國與德國之火災事故後，發現德國與我國之間並無相違之處；故未來管制單位亦可依循既有之管制經驗，檢視申請單位是否有提具合理的行政作業程序與相符的事故情境分析。

表 4、各式可能應用於電廠除役之乾貯系統之作業程序比對

	INER-HPS	HI-STAR	CASTOR
傳送護箱名稱	TFR	HI-TRAC	N/A
裝載階段額外措施	密封鋼筒水封系統	-	N/A
一次蓋安裝	水池中		
一次蓋密封	多層銲接		鎖固
乾操作業	真空乾燥	洩壓乾燥	真空乾燥
氣體回充作業	常壓氦氣	高壓氦氣	負壓氦氣
二次蓋密封	銲接		鎖固
第二層氣體回充	N/A		高壓回充
廠內運送作業	混凝土護箱傳送	HI-TRAC	N/A
運送期間熱流事故	燃油火災		
檢修作業	傳送護箱回運至水池		於檢修區作業

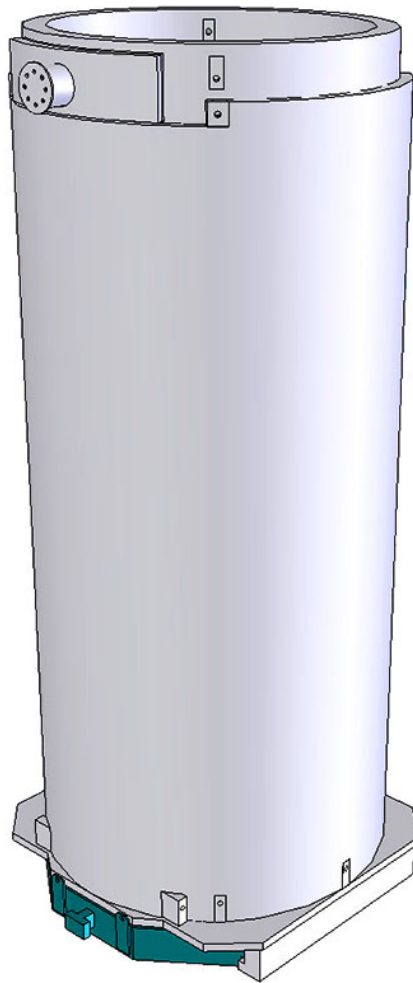


圖 12、INER-HPS 傳送護箱[10]





圖 13、HI-TRAC 傳送護箱

## 5.2 蒐集國際間室內乾貯之熱傳法規要求

依據 IAEA 的 SSG-15[33]中對於核燃料乾貯作業之熱流要求，主要係包含於 I.36 與 I.37 中，其要求僅提及原則性之指引，如：

**I.36 乾貯設施之設計需考慮氣候變遷及環境溫度漸增之可能，並在不利的天候下保持足夠的冷卻條件，包括護箱的自然循環設施(natural circulation)、強制循環(forced circulation)與設施的通風(ventilation)系統。**

**I.37 核燃料乾貯應盡最大可能程度採行輻射、對流及熱傳導之被動式冷卻以達最小維護訴求，並將移熱系統的操作及監測考量最小化；若採用強制冷卻循環，則需證實系統於正常下具有足夠的可靠性，並不致於事故下影響重要系統、結構及元件之可靠性。**

而其它部分如 I38、I39、I.68、I.70 等是需要進一步透過熱流分析提供安全評估條件之項次：

**I.38 當用過燃料的完整性仰賴容器內部氣體之前提下，其容器設計應確保介質的保存能力，或應監測並維持其存在與質量，以保證該介質在設計壽命內能符合設計需求**

**I.39 設施應設計成便於監測其貯存與密封性，若不連續監測則應進行觀測或定期測量及驗證；對於密封鋼筒而言，則包括了螺栓封閉設計的密封完整性。**

而基於相同的理念，各國的法規實規範原則性要求，多是在「法規指引」與「技術規範層次」進行相關說明與要求；此一作法有利於推動安全管制並可即時因應日新月異的貯存科技，而無需頻繁修改相關的「法規」層級之文件。

舉例來說：德國用過核子燃料貯存作業相關之法規標準，包括原子能法(Atomic Energy Act)、輻射防護條例(Radiation Protection Ordinance)以及安全指引(Safety Guidelines for Dry Cask Storage of Spent Fuel and Heat-generating Waste)等[34-36]；而詳細之相關規定與法規指引係訂定於用過核子燃料與發熱廢棄物乾式

護箱貯存指引(Guidelines for Dry Cask Storage of Spent Fuel and Heat-generating Waste)之中；其指引中熱流相關之重要指引包括：

1. 第二章 2.2 節：針對貯存護箱需具備充足的被動安全功能，以滿足放射性物質的圍阻、穩定的餘熱移除、維持燃料次臨界狀態與避免不必要的劑量曝露等要求。
2. 第 7 節結構物通風之進口與出口應納入設計及給予一定尺寸與空間，以確保足夠的餘熱移除能力。由貯存護箱所產生之熱量對結構物所造成的溫度負載與老化抵抗能力亦需納入設計考量。

而在規範與標準部分，德國採則廣泛參考 DIN、KTA 與 ISO 之標準，故材料之容許溫度僅需依設計需求與材料規範為之。

荷蘭用過核子燃料貯存作業相關之法規標準包括有：2012 年制定之「核能法」(Atomic Energy Act, Kew)、2014 年之「輻射防護條例」(Radiation Protection Decree, Bs)以及「核子設施、可分裂物質與礦物條例」(Nuclear Installations, Fissionable Materials and Ores Decree, Bkse)等法規[37-39]。相關核安規定(NVRs)則是依循國際原子能總署(IAEA)發布的相關規範修訂而來。而依據該國「聯合公約國家報告」所述之資訊，荷蘭之核設施特色係為規模小但種類多，因此管制作法並未如台灣、美國與德國般制定通案性指引；而是針對個案於執照要求中列入細部規定或引用其他的標準，而主要的乾貯設施 HABOG 高放射性廢棄物貯存庫之基本設計準則係參考美國 ANSI/ANS 57.9-1992[40]相關規定來進行設計。高放熱廢棄物與用過核子燃料之溫度則分別依廢棄物或燃料制定為 500/250°C，並於事故期間不得超過 610/425°C；而主要廠房於正常及事故時之溫度限值則是分別定義為 95/180°C，與我國現有乾貯設施之 93.3/176.6°C 極為相近。

上述資訊經綜合評估(如表 5 所示)後發現，目前所蒐集的日照輻射評估要求中，核一廠露天乾貯設施[10]係依據 10CFR71[19]與 NUREG-1536[22]之建議採 24 小時平均，故其日照射值定義為：頂部 387.6 W/m<sup>2</sup>，側面 193.8 W/m<sup>2</sup>；惟德國則是採用 800 W/m<sup>2</sup>之日照輻射量進行評估。而針對此一管制要求之差異，本

研究特別檢索 NUREG-1567[41]後發現，該法規指引第 6.5.1 節基本考量中提及，日照周期對於直接受太陽日照之乾貯系統將可能會有重要影響，並於 15.5.1.4 節中提及廠址的日照輻射或熱通量將需被進一步驗證，但在最低環境溫度的事故情境下則需將日照輻射假定為零。

為能瞭解上述各法規指引要求之差異對熱流之影響，本研究引用前節護箱與廠房研析所彙整之資訊，再利用熱傳理論對日照量影響進行評估；經廠房遮蔽及護箱表面熱傳比重等資訊進行判別後發現，日照之影響主要係以露天金屬護箱所受之影響最大，而混凝土護箱次之；但相較於露天乾貯設施易直接受日照影響外，室內乾貯設施將僅有傳送作業期間可能需考慮日照效應。故管制單位或可保守依循上述各國法規指引之精神，詳細考量場址緯度所能接受之最大日照輻射量；而此因日照輻射所造成之影響亦將於本報告第 6.2 節加更進一步地加以討論。

最後在比較各國對燃料護套之溫度限值後可以發現，我國所依循的美國法規指引係引用自 ISG-11[42]所載內容；其內容要求，為確保長期貯存狀況下護套不致發生潛變(creep)需將其溫度控制於 400°C 以下；而事故或短期之作業，則係以事故時不致發生確性破壞為依據將其定義為 570°C，並於 NUREG-1536、1567 中述明，若可證明護套環應力不致超過 90MPa 則可適度放寬其限值。此一溫度或與荷蘭(250/425°C)及德國(370°C)之要求有所差異，故在進一步透過對 HABOG 設施之設計條件進行檢視後發現，荷蘭 HABOG 設施以貯存 100 年為設計基準進行規劃，故可理解在較長的貯存時間下若要確保護套之完整性，其單位時間的潛變量更需嚴格要求。德國所引用之 370°C 則與 ISG-11 的 400°C 要求相近，主要亦源自於長期貯存之潛變考量；惟其引用之研究資料係以 1%之環應變為基準而訂出該值。另外，子項五[43]針對日本 BWR 與 PWR 於 50 及 48GWd/t 燃耗之燃料資訊進行研析後發現；該國係針對兩種護套環應力分別為 70MPa 與 100MPa、溫度為 265 及 275°C 之條件下求得其潛變量分別為 0.3 及 0.7%，足以確保護套之完整性。上述資訊證實各國對於護套溫度之限制係基於各式護套完整性劣化之研究以避免貯存期間因為潛變而導致燃料完整性出現改變；惟各國因考量之

裝載條件、燃料運轉歷史與設施使用年限不同，進而制定出不同的護套溫度限值。

### 5.2.1 各國熱流相關法規、指引與溫度限制之彙整

依據上述所蒐集之各國標準可以進一步規納出以下要求：

- 1· 採用被動式散熱設計，且有充足的移熱能力；
- 2· 其燃料護套溫度可被上述移熱能力控制在潛變溫度以下，以確保護套長期貯存的完整性；
- 3· 其它元件之溫度則依設計時所需之結構強度與工業標準為之；
- 4· 而值得進一步提醒國人的是，上述各項溫度限值主要係考量護套之完整性，故不因採用室內或露天乾貯方式而有所差別！

表 5、各國乾式貯存之相關法規、安全分析限值等資料彙整

		我國	美國	德國	荷蘭
法規/條例		10 CFR 71&72		AtG	Kew, Bs, Bkse
法規指引/建議		NUREG-1536 ISG		ESK、RSK、SSK	ANVS
國家、國際標準		ISO、CNS、ASME		DIN、KTA、ISO	ANSI/ANS57.9-1992
日照強度(W/m <sup>2</sup> )		頂部 387.6 /側邊 193.8		800	-
正常 限值 (°C)	燃料護套溫度	400		370	250
	發熱廢棄物	N/A		-	500
	護箱表面溫度	N/A		75	-
	混凝土溫度	93.3		75	95
異常 限值 (°C)	燃料護套溫度	570		370	610
	發熱廢棄物	N/A		-	425
	護箱表面溫度	N/A		-	-
	混凝土溫度	176.6		-	180

## 5.3 研析室內乾貯之熱傳安全分析工具及方法論適用性評估

### 5.3.1 分析軟體適用性評估

經由以上護箱、廠房與作業程序之研析與比對，發現無論何種室內乾貯系統搭配任何一種廠房設施結構，並執行包含：水池階段、乾燥階段、運輸階段與貯存階段之標準作業時，其熱流特性將可歸納為一暫態自然對流之共軛熱傳，並包含熱輻射之熱流問題；故其統御方程式可以歸納為：

質量守恆方程式

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

其中，

$\rho$  為流體密度；

而  $\mathbf{v}$  為速度向量。

動量守恆方程式

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

其中， $p$  為靜壓力， $\rho \mathbf{g}$  為體積力項；

$\mathbf{F}$  為額外力源， $\overline{\boldsymbol{\tau}}$  為應力張量，其形式可以寫為：

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

其中，

$\mu$  為流體黏滯係數；

$\mathbf{I}$  則為單位張量。

能量守恆方程式

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

其中，

$E$  為單位質量之總能量；

$h$  為焓值；

$P$  為靜壓力；

$\mathbf{v}$  為速度向量；

$\kappa_{eff}$  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。

### 美國對熱流分析軟體之要求研析

經資料檢索後，目前熱流分析工具與軟體之發展與管制主要係以美國最為興盛，故本子項特別檢索美國 NRC 所公佈之 ISG-21[45]及 NUREG-2152[46]以作為相關熱流分析工具與方法論之管制依據。其中，ISG-21 主要是提醒管制單位貯存護箱或運輸包裝的熱流分析審查中應注意之處。此 ISG 僅適用於利用計算模式軟體(Computational Model Software, CMS)針對熱傳與結構分析，但不包括屏蔽以及臨界的分析。目前 NRC 僅列舉數種屬於熱流分析領域之主流軟體(如 FLUENT、CFX、STAR-CD 等)但並沒有特別認可哪一個套裝軟體為合適工具，故審查者需透過 SAR 或是相關文件(如計算書或是程式驗證報告)，並確認其包含以下資訊：

- (1) 詳細的分析方法論，包括程式裡面各計算模式以及理論基礎的整



合。

- (2) 與其它分析程式的比對，或是與合適的已出版數據的驗證，或是與其它技術上夠資格或有關的數據的已出版文件的驗證。
- (3) 利用套裝分析之平行驗證報告，包含該軟體之分析與理論預測結果的比較。
- (4) 使用之版本及適用的分析平台。

NUREG-2152[46]則是針對計算流體力學應用於護箱熱流模擬時之施行指引，主要是基於 ASME2009 中對 CFD 最佳預估 [47]要求而制定，其內容除說明計算流體力學應用於此類分析可能的誤差類型、不準度並提出如何建議及驗證、校驗、校正之處置。此外，該文件提出最佳施行指引，並分別指引如何由網格、離散模式、收斂調控及不準度之定義、結果靈敏度分析等工作來確保分析的可靠度。

基於以上各節對護箱、設施與作業程序之探討，可以得知室內乾貯設施內的燃料衰變熱主要係透過被動式散熱而產生的自對流、共軛熱傳及輻射熱傳等機制散逸至環境中。故室內乾貯熱流分析所需之熱流數值模式或技術並未與露天乾貯分析工作有任何顯著之差異，且相關指引亦無針對各項工具與技術應用於室內外乾貯設施進行應用限制。

### **德國對熱流分析軟體之要求研析**

除了上述針對美國管制單位要求的研析之外，本研究亦透過物管局所辦理之「核能電廠用過燃料室內乾式貯存安全審查及管制研討會」[23]以及對該國管制法令與導則[34-36]進行檢視後，發現各國管制單位亦未對熱流分析工作可使用之軟體或方法加以明文限制。而為能更進一步的瞭解其國內相關作業方式與管制單位態度，本研究進一步蒐集得 TUV、BAM 與聯邦輻防辦公室參加歷年放射性廢棄物管理研討會之論文；其內容指出，TUV 與 BAM 多年的經驗所採用的方法主要依循 AtG 與 BfS 之要求，採用最先進的(the state of the art)之分析技術，例如 ANSYS(FLUENT)來進行分析。綜合以上所蒐集得之資訊可以瞭解，德國於乾貯系統熱流分析方法的選用或管制係與美國 NRC 一致，希望透過較為開放之方式，

令各分析工作得以選用合適之方法或軟體為之。這是因為相同的熱流問題在不同的護箱設計與模式建立的思維下，或有可能以不同的簡化技術來保守考量其熱流特性，故適合以不同方法或軟體搭配其技術進行評估。因此透過以上之檢索，本研究建議管制單位可以參考美、德之管制方式，要求執照申請者以符合當代技術之先進分析方法進行分析，並於審查時同時提交相關軟體之使用實例、驗證報告等佐證文件，以確保分析方法之可信度。

#### 5.3.1.1 熱流分析軟體適用性評估結果

依據以上評估結果，本研究建議室內乾貯分析若採用計算流體力學軟體，如：FLUENT、STAR-CD、CFX 等主流或其它分析軟體進行分析時，除需引用其它室內外、乾貯系統熱流安全分析之申照案例作為該軟體之適用性證明實例(例如 Holtec 公司的 HI-STOMR[44]採用 FLUENT 進行分析)之外，更建議其安全分析報告或相關佐證文件中需進一步參採計算流體力學技術與應用指引發展最為領先的美國；依據目前 NRC 所提出之：ISG-21[45]、NUREG-2152[46]及引用的 ASME2009[47]等乾貯系統或計算流體力學熱流分析之相關指引，進一步證明申請者所提交之安全分析報告所載熱流分析方法、模式與結果具有足夠之可靠度與分析餘裕足以涵蓋上述指引提及之各項不準度。

### 5.3.2 程式功能、數值模式與邊界條件適用性評估

基於 5.3.1 節中述之軟體適用性評估，本節更進一步將室內乾貯設施熱流分析所需之各項程式功能、數值模式與所需之邊界條件整理如表 6 所示，以確保相關分析軟體確能順利符合乾貯系統熱流分析之目的：

- (1) 項次一、預期正常、異常、事故及傳送作業往往涉及穩定熱流狀態之改變，因此常常需要先行求解一穩態結果，並據以作為暫態(傳送、事故)之初始條件，進而求取其容許時間，故相關軟體需能直接或間接達成此一需求；
- (2) 項次二、材料性質的變化往往存在於傳送作業之階段，因此相關軟體需能直接或間接達成此一需求，並於相關計算書中提具材料性質詳細資訊；
- (3) 項次三、網格係為計算流體力學求解之最小單元，其分佈之差異將同步影響結果正確性與效能；故相關軟體需能提供良好品質之網格，並符合 NUREG-2152 及 AMSE 2009[47]對網格品質之相關要求；
- (4) 項次四、由於熱流分析主要係求取各元件之最高、最低或平均溫度以供檢核是否符合設計規範，故相關軟體需能直接或間接達成此一需求；
- (5) 項次五、由於乾貯分析中可能存在非均勻分佈(如燃料束功率、時變(如事故邊界條件)、隨溫度變化(如對流係數)之現象，故相關軟體需能直接或間接達成此一需求；
- (6) 項次六、由於乾貯分析中需考慮各不同性質之材料與各式不同流體之熱傳機制，故該軟體需能提供共軛熱傳分析功能，並依據 ISG-21 所要求，提具其分析值與解析解之驗證結果或證明文件；
- (7) 項次七、由於乾貯分析中需考慮固體表面之間的輻射熱傳機制，故該軟體需能提供合適的輻射熱傳模式(如 DO、DTRM、S2S 等)，並依據 ISG-21 所要求，提具其分析值與解析解之驗證結果或證明文件；

- (8) 項次八、由於乾貯分析中需考慮自然對流所造成的紊流現象，惟目前各式紊流模式之選用尚未有完整之定見，故該軟體需能提供充足的紊流模式(如  $k-\varepsilon$ 、 $k-\omega$  等)，並依據 NUREG-2152 提具平行驗證之結果或模式合適性之證明文件；
- (9) 項次九、由於乾貯分析中需考慮簡化燃料束或其它元件幾何外型之可能，惟該簡化元件若存在流動現象時，其流阻特性仍需藉由合適之模式加以表現，故該軟體需能提供合適之流阻表示模式(如多孔性材質)以描述該區域之流動阻力及等效熱傳導係數；相關簡化區需域依據 NUREG-2152、ASME 2009 提具平行驗證之結果或模式合適性之證明文件；
- (10) 項次十-十二、為能符合分析時可能出現之對稱模式、絕熱保守性假設及接觸熱阻或薄殼熱傳等簡化模式，因此相關軟體需能直接或間接達成此一需求，並於相關計算書中提具邊界條件之設定資訊；

表 6 、CFD 分析軟體功能、分析模式需求評估表

項次	分析需求	功能說明
1	暫態、穩態計算與重啟及 切換能力	因應正常、異常、或傳送作業時，往往需接 續計算
2	可於計算過程中抽換材 料性質	裝載與真空乾燥作業之計算時所需功能
3	良好的前處理器與網格 生成能力	針對廠房、護箱幾何形狀模擬之用
4	記錄或整體局部溫度變 化之能力	記錄元件之最高溫度、平均溫度之變化趨勢 之能力
5	設定或擴充非均勻分 佈、時變邊界條件之能力	針對燃料軸向功率分佈、環溫變化之設定能 力
6	具有自然對流及共軛熱 傳模擬能力	模擬廠房內或護箱內之自然對流與共軛熱 傳機制
7	具有輻射熱傳模擬能力	模擬燃料護套至護箱以及護箱至廠房之輻 射熱傳
8	紊流模式	針對護箱或是廠房於自然對流下所形成的 紊流需有合適之模擬機制來進行模擬其對 室內乾貯護箱移熱能力之影響
9	多孔性材質	用以作為燃料束或其它結構件簡化之用
10	對稱邊界模式	對稱幾何與熱流邊界時，用以降低計算需求
11	絕熱邊界	用以保守保設熱流邊界之條件
12	接觸熱阻、薄殼熱傳模式	針對極薄內襯或是元件間因加工而存在的 接觸熱阻進行設定之能力

### 5.3.3 室內乾貯熱流分析模式建立

在與子計畫四-屏蔽分析溝通後，本研究以貯存 4×2 個乾貯護箱(圖 14)為目標共同擬定一假想式室內乾貯廠房以進行分析；其中廠房之護箱間距、廠房高度等資訊則依前節所載資訊，共同由熱流-屏蔽分析之考慮擬定參數分析範圍(如表 7 所示)；惟部分因為屏蔽與熱流分析思維相左之參數，則分別採用保守假設之方式進行設定。

表 7 、屏蔽-熱流共同分析模式

	參數代碼	參數範圍	參考依據
廠房壁厚(m)	T	0.002~1.5	SWB[30]-HABOG[32]
護箱厚度(m)	∅	1 – 0.3	INER-HPS [10]&CASTOR[3]
煙囪出口高度(m)	H	14.0~40	SWB[30]-HABOG [32]
進氣面積(m <sup>2</sup> )	A	~8.0	WIT[23]

在考量較低高度將減少其自然對流強度較密間距影響表面對流能力之原則，將護箱中心間距下限設定為 4m(上限則為依屏蔽分析以護箱直徑加 3.4m 進行設定)、廠房高度選擇 12m。最後依據合理的廠址面積所得之廠房模式則如圖 15 所示；其廠房體積為 5630 m<sup>3</sup> 左右。而考量設施外牆之混凝土傳導可逕由分析軟體所提供的薄殼熱傳模式進行簡化，故於此模式中不再額外針對其厚度加以描述以節省計算資源。

除了上述的評估與廠房設定之外，依據 5.1.2 節鋼筋混凝土廠房之設計規劃，將其進氣口設置於離地約 7m 左右之位置，並依照前述所提之 WTI 廠房換氣率 (20/h)與合理進氣口風速(低於 2 級風下限：1.94m/s)來進行合理進氣口面積與高度之計算：

$$1/2 \text{ 廠房換氣量} = \text{廠房體積} / \text{換氣率} : 2815(\text{m}^3) / 180(\text{s}) = 15.6\text{m}^3/\text{s} ;$$

廠房通風面積=廠房換氣量/合理進口速度： $15.6(\text{m}^3/\text{s})/1.94(\text{m}/\text{s})\cong 8.0(\text{m}^2)$ ；

如圖 15 與圖 16 所示，為能充分瞭解廠房內分別放置混凝土與金屬護箱時之熱流狀況，本研究分別選用 INER-HPS 與 CASTOR 設施作為裝載護箱，並分別描繪其主要之外型與結構；惟因考量各式護箱內之熱傳機制並無不同，且本研究並非如同平行驗證般求取定量數值為目標，故此階段尚未將護箱內部結構詳加描繪以求縮短計算時間。

然而即便透過上述簡化，此裝載 8 個護箱的室內乾貯設施，在選用 1/2 對稱模式進行分析後其網格數量仍然高達 400 萬(圖 17)；且若進一步依據核一除役所需乾貯之燃料總量，並考慮以 INER-HPS 所擁有的 56 束裝載容量來進行估算；則預計核一除役時需以 1 座 WTI 設施方能完全裝載。此時超過 132 組護箱之廠房空間，將需耗費數千萬網格甚至近億的格點方能進行模擬；因此預期申照單位對於廠房之評估或將採用 CFD 模式或是其它分析方法(例如，能量守恆)等方式來因應廠房熱流評估之需求，惟管制單位需確保所使用之方法可以合理保守地提供護箱分析所需的熱流邊界條件。

此外，預期實際安全分析可能涉及各安全分析領域(如屏蔽、結構、熱流)之間繁複的交互影響，其所衍生大量的模式改動與計算分析工作有時僅需針對護箱內之熱流特性與溫度進行計算，而無需重新求取整個廠房內的熱流特性。因此未來針對廠房散熱與護箱熱傳的獨立分析模式或將出現於室內乾貯系統熱流分析工作中；此時，如何確保兩獨立分析模式的保守性與聯動亦將是值得進一步對安全分析方法論進行管制與檢視之處。

為能預先提供相關熱流資訊以利管制單位參採，本研究於第六章的室內乾貯熱流研析乙章中，將就各式廠房與護箱之可能搭配進行模擬分析，以作為第七章管制重點之撰寫依據。

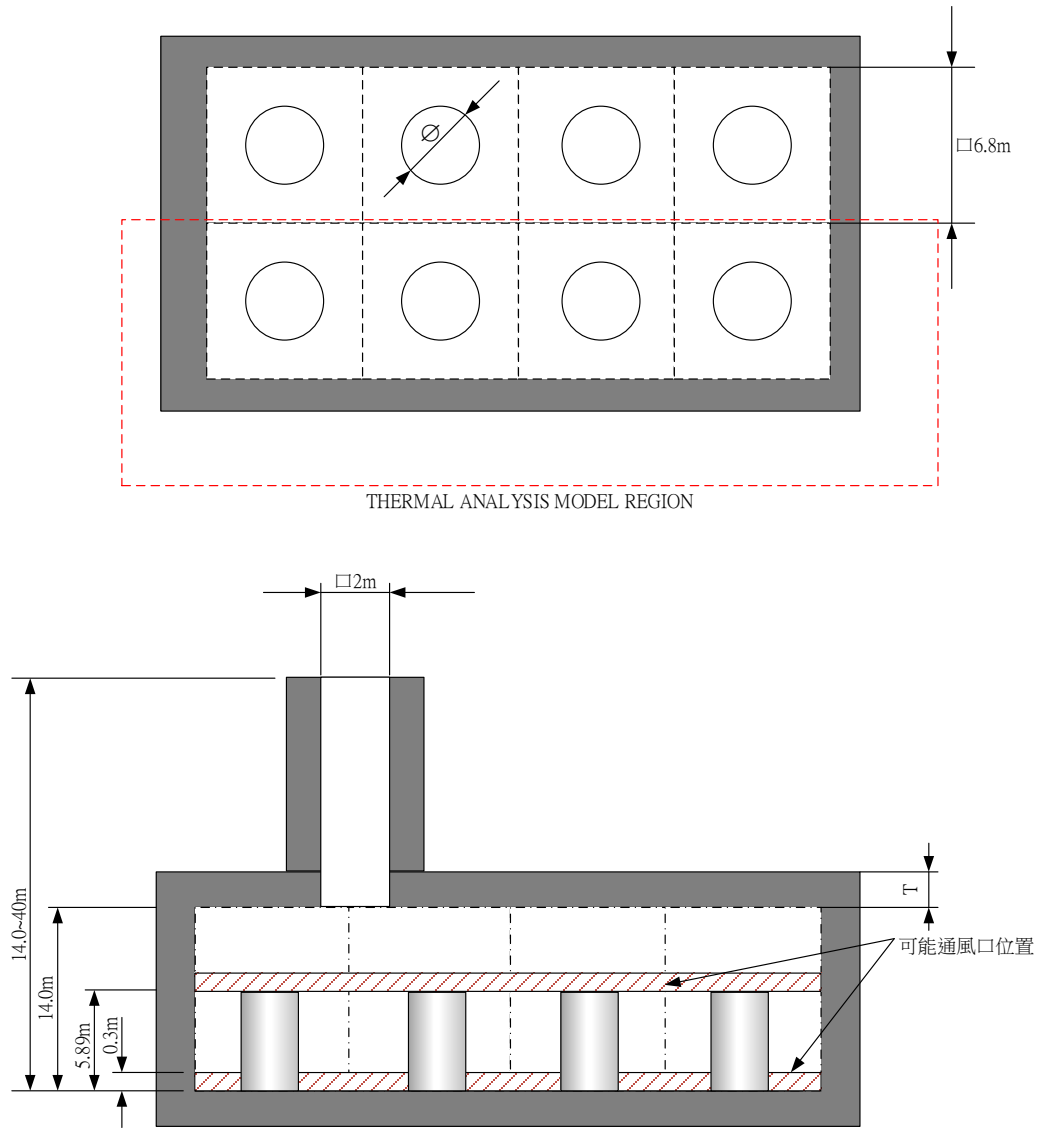


圖 14、屏蔽-熱流共同分析模型



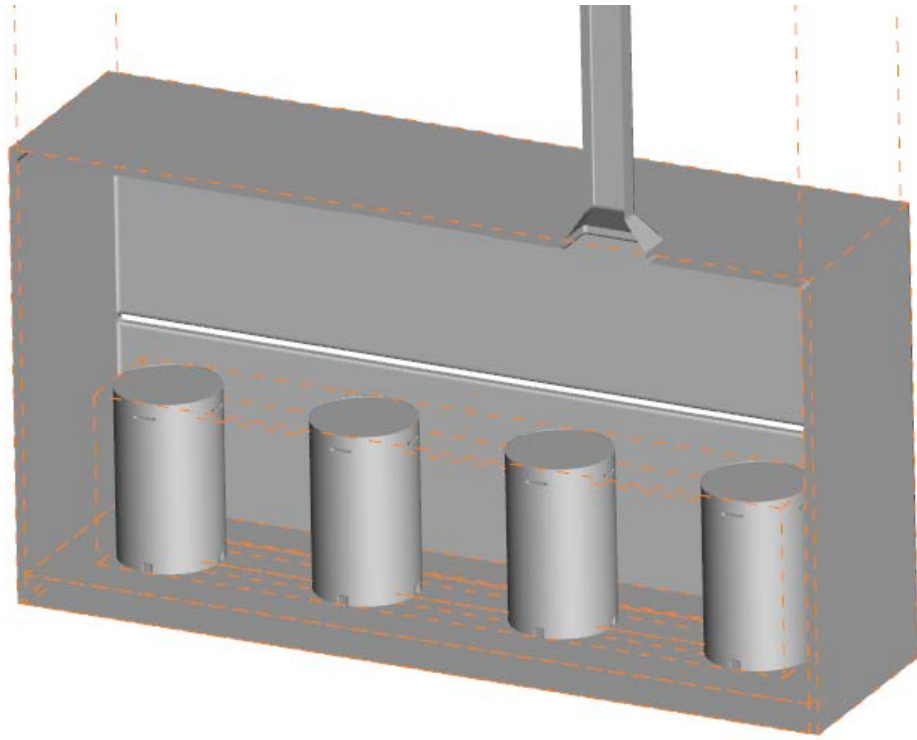


圖 15、室內乾貯設施搭配混凝土護箱模式之分析模型

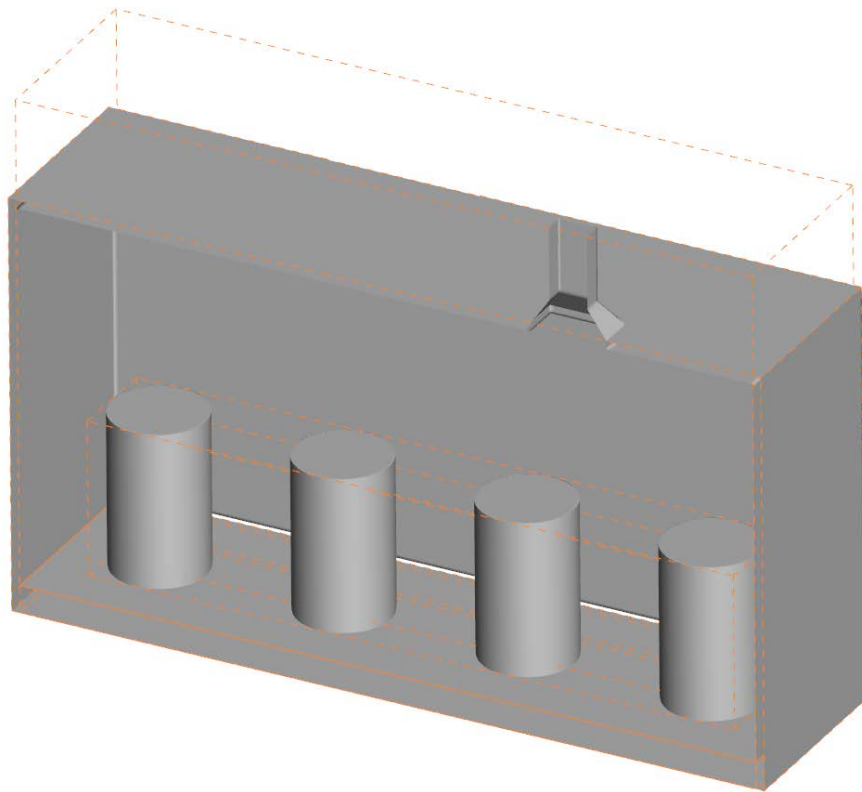


圖 16、室內乾貯設施搭配金屬護箱模式之分析模型

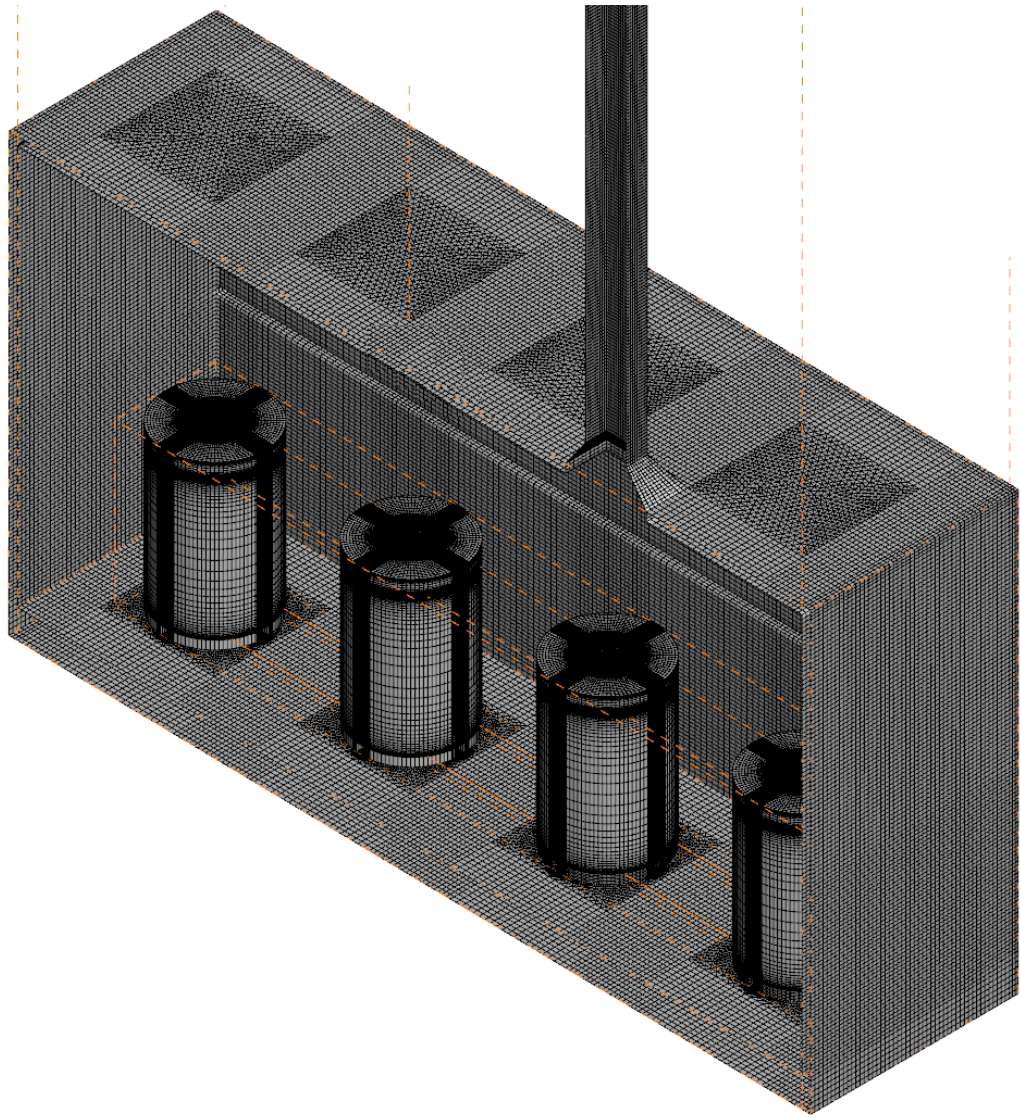


圖 17、室內乾貯設施分析模型之網格分佈

## 6. 室內乾貯熱流分析技術研析

為能進一步協助管制單位獲取室內乾貯之可能熱流特性，本研究將基於第 5 章所建立的分析模式進行案例計算，並分別就護箱與廠房所獲之熱流資訊進行探討；惟本章之探討係以自行假設之涵蓋模式為之，故在未能獲取特定室內乾貯設施之精確資訊並予以建模前，其分析結果應僅著眼於定性之熱流探討而不可逕行引用計算所得之定量結果進行判讀，以避免造成不必要之誤解。

### 6.1 室內乾貯護箱熱傳分析技術研析

如圖 18 所示，當將混凝土護箱置入室內廠房時，透過混凝土護箱與密封鋼筒間隙進行熱移除之機制仍未有任何改變，惟因護箱處於室內故其所逸散出來的熱量不可如露天乾貯般逕行忽略，而需要進一步的評估其對內部流場與平均溫度之影響。

也由於混凝土護箱係透過位於底部的進氣口進行吸氣，故導入至空氣流道內的空氣溫度將合理地比廠房平均溫度更低；反之，當室內乾貯廠房搭配如圖 19 所示之金屬護箱時，因為金屬護箱的表面即是主要的移熱面，故流經護箱的表面的空氣溫度必將隨整體廠房之平均溫度上升而提高，而使兩者間對於廠房環境溫度影響之靈敏度略有不同。除此之外，也由於金屬護箱直接透過表面進行熱移除，其表面的溫度亦將進一步對廠房造成較大的輻射熱傳，並使廠房溫度靠近人員作業高度之範圍具有比貯存混凝土護箱時更高的溫度。

若進一步的將混凝土護箱與金屬護箱於廠房中的流場與溫度分佈以 1/2 護箱高度處之截面進行比較後更可發現，裝載於廠房內的混凝土護箱，由於其主要移熱機制因混凝土護箱的阻隔之故，而不易使空氣流道的流動受到廠房通風設計影響(圖 20)，因此即使混凝土護箱表面可能因為護箱列置問題而造成的流場阻礙仍不易影響各個護箱的移熱能力。反之，在金屬護箱的部分，則可明顯發現位於迎風面(上方)與側邊的流動將具有較薄的速度邊界層，而能提供較佳的移熱能力；

但在背風面或是位於行列下游的護箱，其移熱能力則可能因為空氣溫度的上昇以及邊界層的發展而略受影響。此點即可初步證實本報告於第 5.1.2 節中對於內卡爾海姆(Neckarwestheim)設施(圖 11)之熱流推測；故基於以上之討論內容，本研究建議管制單位於審查設施申請者所提交之安全分析報告時，應就以下要點進行檢視：

- (1) 申請者於分析時應確保護箱之列置對流體溫度與熱對流係數所造成的影響已被加以考慮；
- (2) 若管制作業包含人員作業之環境溫、溼度項目，則護箱表面所造成的輻射熱傳效應亦需合理納入考量之中。

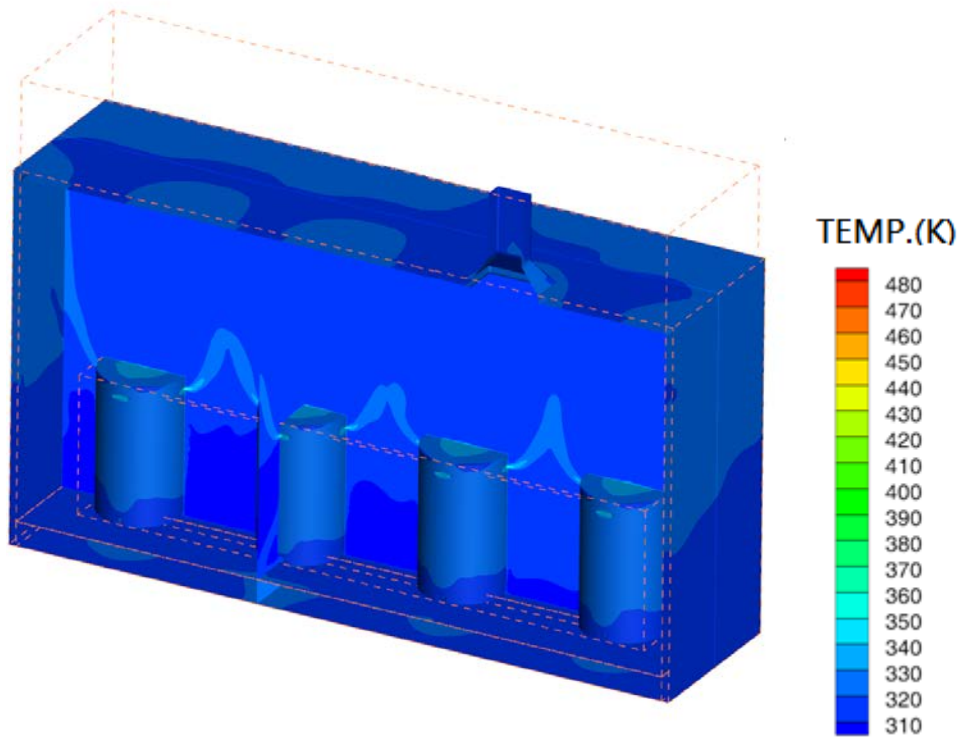


圖 18、混凝土護箱於室內廠房中之流場分佈

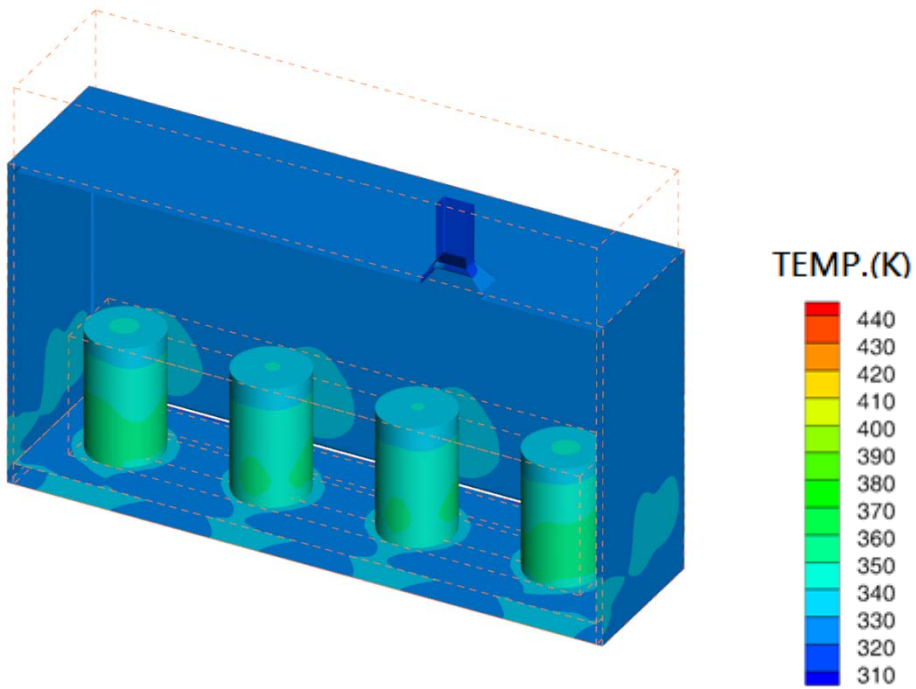
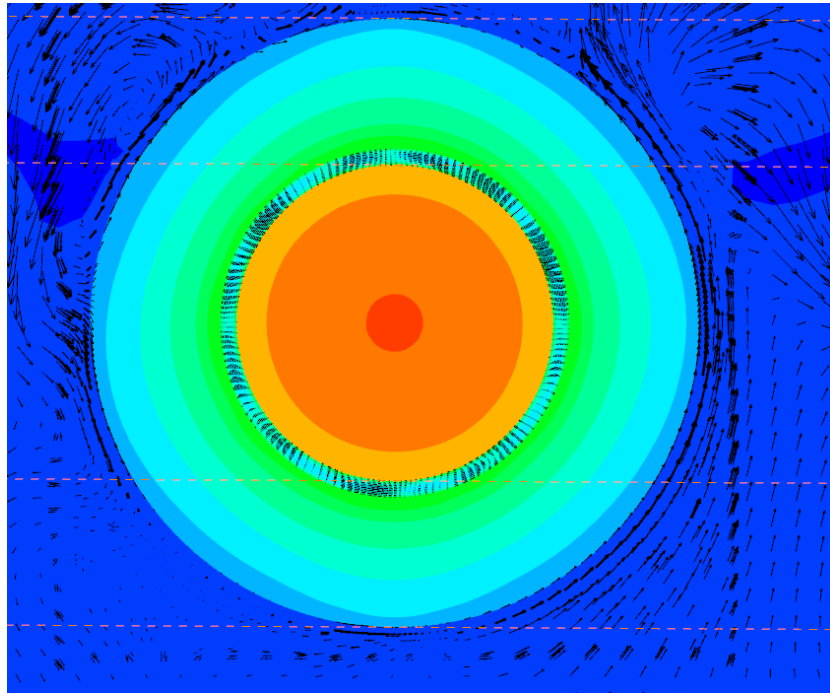


圖 19、金屬護箱於室內廠房中之流場分佈

(a)



(b)

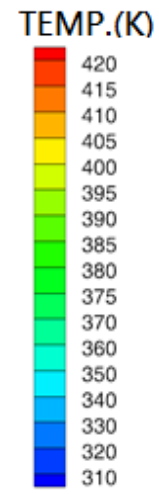
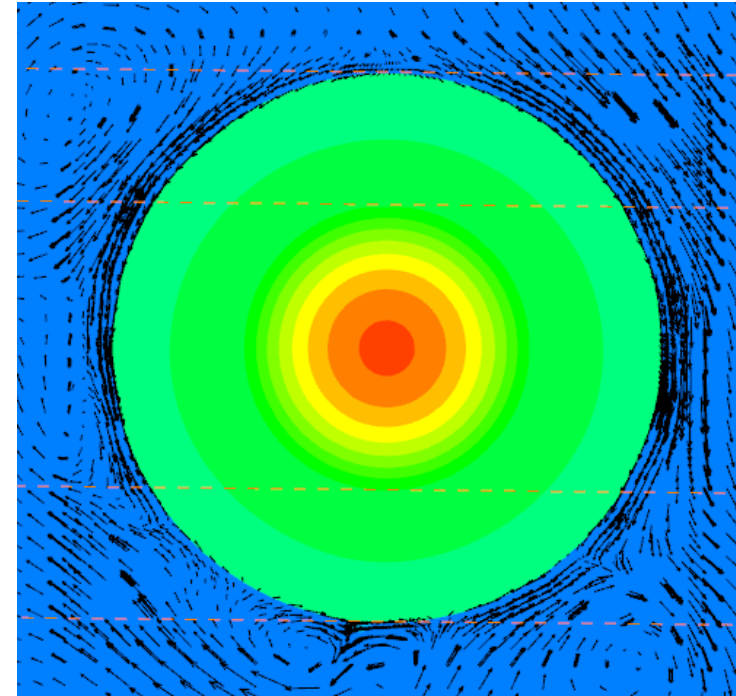


圖 20、(a)混凝土護箱、(b)金屬護箱於室內廠房中之鄰近流場分佈

## 6.2 室內乾貯廠房熱傳分析技術研析

透過前節對於室內乾貯設施貯存不同類型護箱之熱流特性可以得知，護箱的類型雖然會影響局部之流場與廠房內的溫度分佈，但仍未能完整地評估設施通風受影響之全貌；本節遂針對排煙設計、強制排氣等通風機制以及廠房類型不同所引起的壁面材質之影響進行探討，以求能更進一步瞭解廠房之熱流特性。

### 6.2.1 廠房通風機制之影響評估

#### 正常、異常狀況之通風機制研析

由於目前已蒐集的各國室內乾貯設施，對於發熱放射性廢棄物，皆是採用自然對流之方式進行熱移除，若乾貯設施賴以移熱的通風路徑若發生如阻塞時，則勢必會對整體熱傳能力造成影響。由於自然對流的移熱能力可以雷利數(Rayleigh number)來進行定義；考量其強度將會與高度的3次方呈正比之關係下，本研究亦同步就廠房煙囪出氣口高度對流整體設施移熱能力之影響進行如表8所示之參數測試。測試結果顯示，在此一假想廠房與護箱之組合下，所裝載的護箱種類並未對設施流量造成顯著影響；但隨著煙囪高度的增加以及廠房出氣口面積的改變，則會對設施的換氣量造成顯著的影響，更進一步影響廠房內的環境溫度。惟評估建物之通風系統、排風系統等設施除與熱流評估相關外預期更涉及建築、消防法規等部分，故建議管制單位可將此部分之資訊，納入安全分析報告第三章設施設計基準-輔助系統及公用系統之審查工作，並與第安全分析報告6.6節之資訊整合後進行相關審查作業。

#### 全阻塞事故之移熱機制研析

除了上述通風條件的不同，室內乾貯設施可能因為廠房原本預先規劃的對流通道受阻，而使得廠房對護箱形成密封的包覆狀態；但與露天乾貯最明顯不同之處在於，若室內乾貯發生廠房全阻塞事故，將因為廠房仍有充足的空間可供對流，

而使事故發生後護箱所產生的熱量仍可如第 5 章對 HABOG 之研析資訊所呈現的：設施發生全阻塞後透過廠房內的對流與廠房壁面的對外熱傳減緩護箱與燃料之溫升。為能證實此點，本研究基於假想設施所訂定的廠房空間、護箱尺寸與發熱量以穩態分析方法進行計算；所獲得之熱流結果則如圖 21、與圖 22 所示。

在比對兩個案例後可以明顯發現，當鋼構設施(圖 21、)進氣口發生全阻塞事故時，雖然內部的空氣無法透過熱對流向外傳逸散，但護箱所產生的熱仍會藉由自然對流攜往廠房內壁面，並藉由廠房壁面的熱傳導與外壁面的對流將熱移除。但也因為此一移熱機制效益不彰，故雖然整體護箱的最高溫度並未明顯上升，但廠房內的溫度則已因為成為主要的熱傳遞介質而大幅升溫。

相同的狀況在鋼筋混凝土結構之廠房中亦可發現，且因為混凝土所具有的更厚壁面與更低的傳導效果而使情況更為嚴峻(圖 22)；整體而言全阻塞事故下的混凝土設施，其熱傳機制與途徑並未與鋼構廠房不同，兩者僅因為廠房於全阻塞事故下所造成的熱阻不同，而使護箱及燃料需要提升到較高的溫度才能克服熱阻進而將熱向外傳遞。

而基於上述所發現之異同點，本研究建議管制單位於室內乾貯設施之審查時，可著手針對以下兩點進行確認：

- (1) 綜合 5.1.2 節對廠房壁面熱容量之研析以及本章廠房於全阻塞事故之評估結果，建議管制單位應於審查過程中關注廠房於全阻塞事故中所造成的熱阻抗與熱容量是否已被合理評估或加以保守假設；
- (2) 本案例雖以穩態方式分析，但透過合理之理論推測可以得知室內溫度必然於事故後逐步上升，故相關輔助、公用系統於高溫下之可用性或是內部設施可能隱含消防防護疑慮；建議管制單位於未來審查時，應就第六章所載之廠房事故溫度進一步檢核安全分析報告第三章設施設計基準-輔助系統及公用系統以及第八章消防防護計畫之內容是否一致。



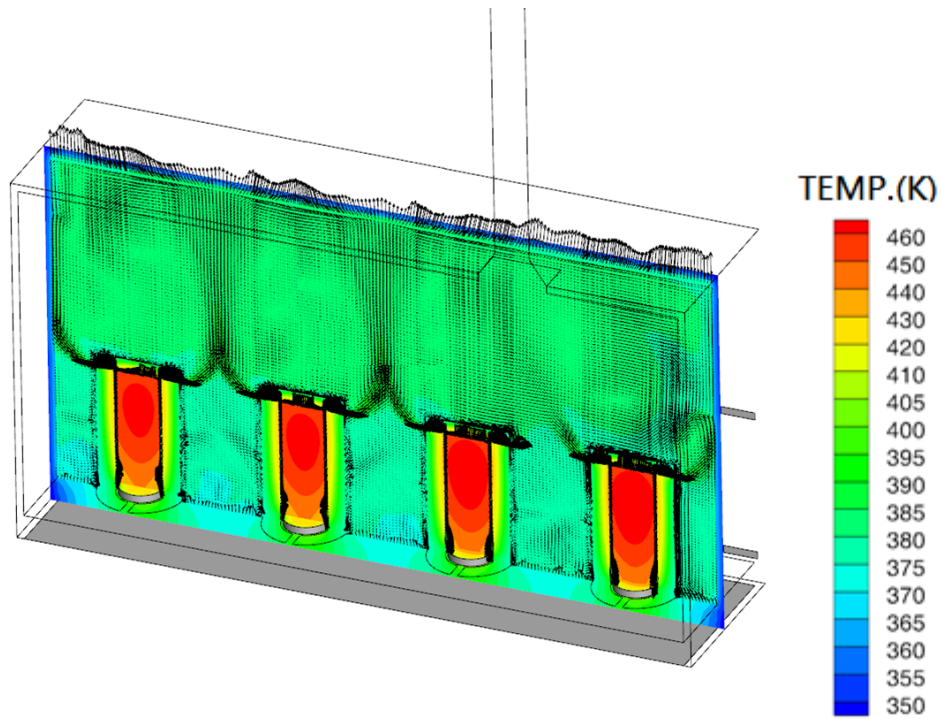


圖 21、假想鋼構設施在發生全阻塞事故下之內部流場與溫度示意圖

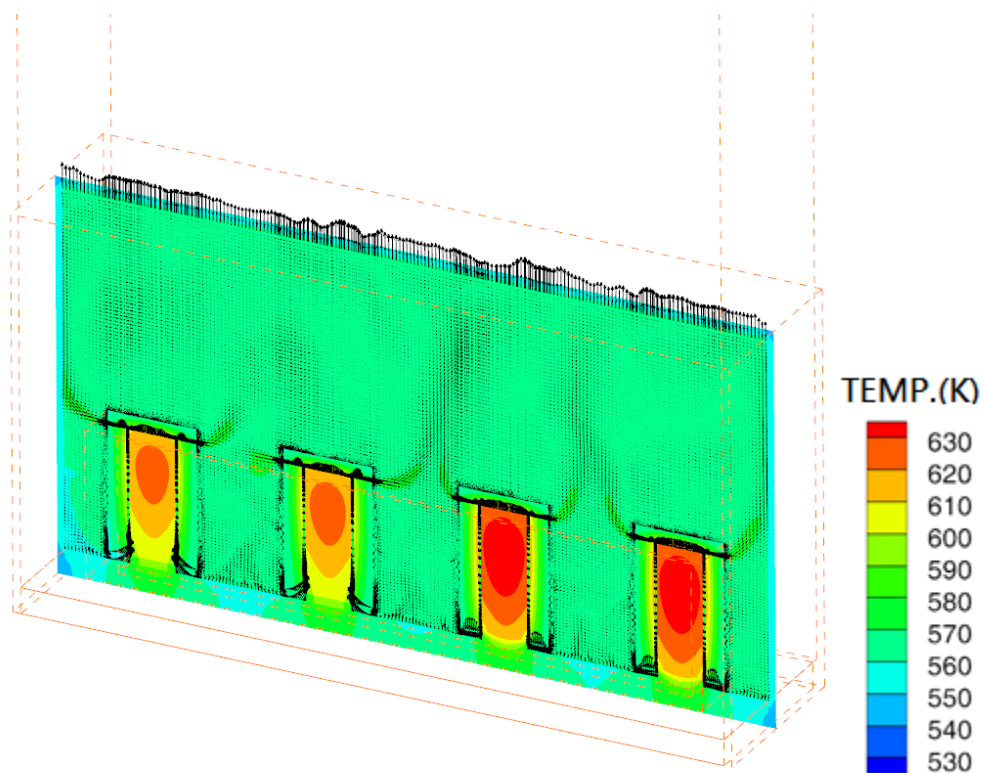


圖 22、假想混凝土設施在發生全阻塞事故下之內部流場與溫度示意圖

表 8、煙囪出口高度對廠房換氣率之影響煙囪出口高度(m)

設施高度\護箱類型	半阻塞流量(kg/s)		正常狀態流量(kg/s)	
	金屬護箱	混凝土護箱	金屬護箱	混凝土護箱
14	~4.7		~6.8	
18	~5.5		~8.1	
40	~6.1		~9.0	

### 強制通風之機制研析

除了上述自然對流的研析，本研究為能進一步瞭解設施採行強制通風時對廠房內熱特性之影響，並協助管制單位確認是否需強制要求廠家使用強制通風進行冷卻，故設計具有不同強制換氣量之案例來探討此一設計對於廠房內流場特性之影響。

考量強制對流設施必定增設於系統之進或出氣口，且預期強制對流於廠房內所造成的對流效應將因為廠房寬闊而僅作用於局部；，故本研究擬定如圖 23 所示之三種案例以證實，其中：

- A. 假設強制通風系統設置於流動路徑下游，如煙囪；
- B. 假設強制通風系統設置於流動路徑上游，如進氣口，並考慮輻射防護需求而高於護箱；
- C. 假設強制通風系統設置於流動路徑上游，並考慮冷空氣流動之路徑而設置於接近樓板處。

如圖 24 所示，在將強制冷卻系統裝置於出氣口(煙囪)時，抽風所產生的負壓將會使溫度低的空氣由廠房所列置的進氣口吸入廠房內，並因為內部溫度的分佈、護箱的擺置而分流；一部分將會直接與熱空氣混合後向上流動，而一部分則會向流往護箱的進氣口，再經加熱後向護箱的出氣口流動。由於此類型的設置因為與自然對流時之驅動機制相近，其流場亦無顯著差異。

若於進氣口處以鼓風方式將空氣往內部送，則其流場分佈將因為所在位置而如圖 25 與圖 26 所示。其中，與 A 型式同樣將進氣口開於護箱高度以上的 B 型式，將會因為鼓風設備所提供的壓力源之故，而使進氣方向與前者略有不同，但整體而言廠房內的溫度皆因為進氣口所在位置而與廠房內之熱空氣呈現混和之現象。反之，採用於底部進氣的 C 型式，則可明顯發現其流場將由樓板向上發展；這意味著將有更多低溫的流體可以靠近護箱，並提供較佳的冷卻效果。

但值得管制單位注意的，無論採用是何種強制規劃設計，整體廠房內靠近護箱的流場除在廠房進氣口處略有不同外，整體與採用自然對流之廠房並無顯著差異。這是因為強制對流在龐大的廠房空間內難以直接對護箱關鍵移熱機制(如混凝土護箱之進氣口或金屬護箱側表面)造成顯著的影響所致。

若進一步檢視不同流量下的強制對流案例(如表 9 所示)亦可發現，隨著流量的減少將使廠房內空氣與護箱溫度的上昇，反之則會造成其溫度的下降；但整體而言各式的通風系統設計，與流量或將略為影響廠房內的溫度分佈與護箱、元件溫度，但只要廠房設計具有足夠的換氣率以維持合適的室內溫度，並可將所有燃料的衰變熱移除，以確保燃料與元件溫度符合限值即可符合熱流設計之需求。

綜合以上對廠房於自然對流與強制對流條件下對廠房熱流特性的討論可以得知，廠房設施之材料、設計與進出氣口資訊之搭配具有多樣性且具有一定程度之設計自由度。故管制單位於室內乾貯設施安全審查過程中，應優先就第 6.6 節「異常狀況、意外事故及天然災害事件之安全評估」及第九章核子保防相關資訊進行考量，再同步檢視申請者所提交的分析資訊可以確保冷卻能力無虞即可確保熱流設計之安全。

表 9、不同廠房換氣率對護箱溫度與出氣口溫度之影響

設施高度\護箱類型	2 倍流量	正常流量	1/2 流量
出氣口溫度 °C	45.0	48.2	50.3
護箱溫度 °C	154.9	156.3	157.9

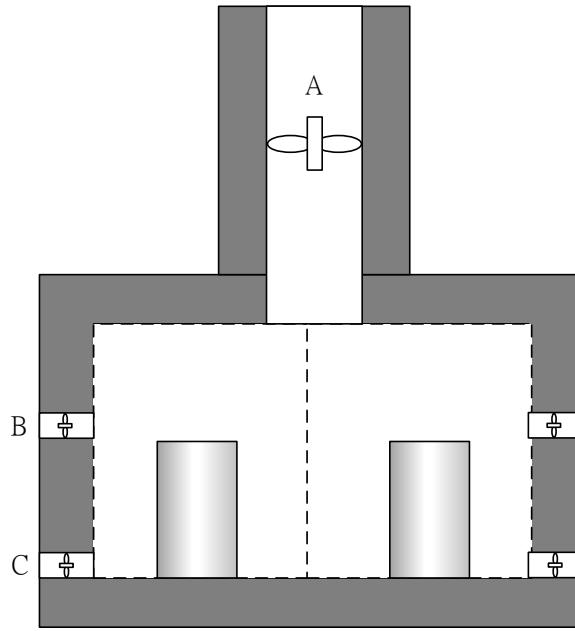


圖 23、假想室內乾貯設施搭配不同強制通風系統之示意圖

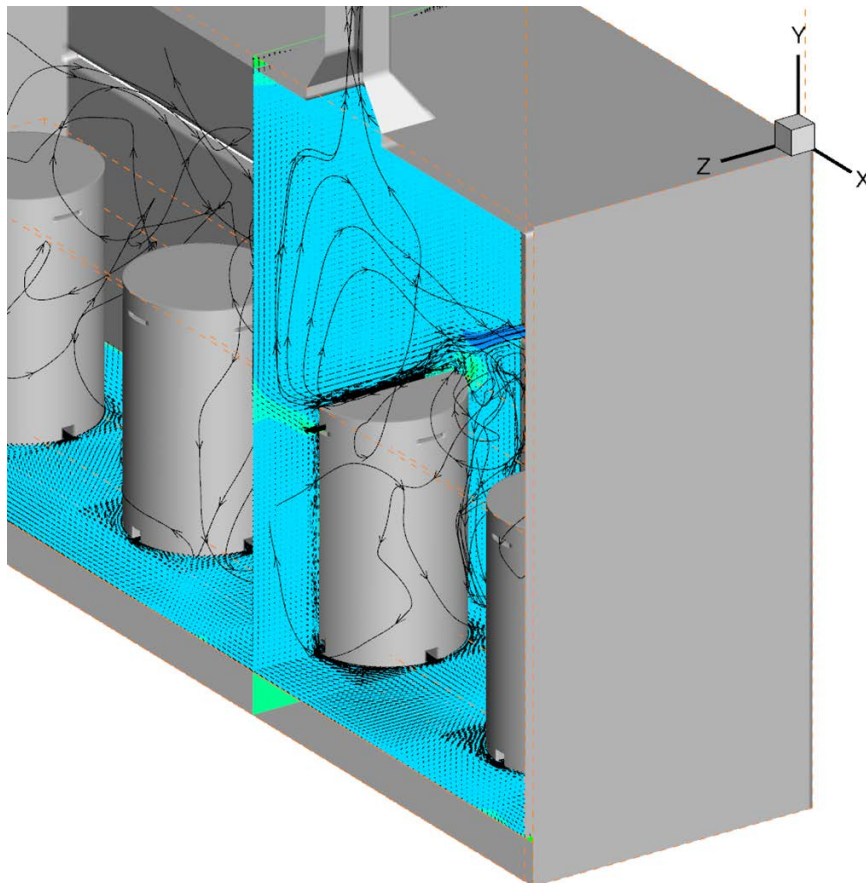


圖 24、假想室內乾貯設施搭配 A 型強制通風系統之流場分佈

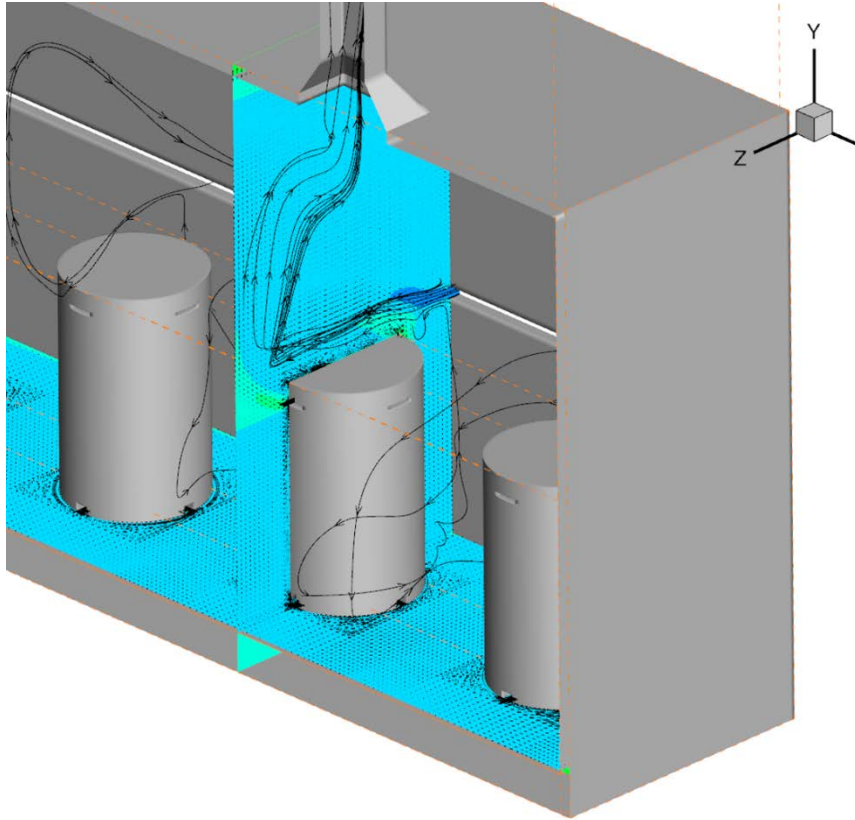


圖 25、假想室內乾貯設施搭配 B 型強制通風系統之流場分佈

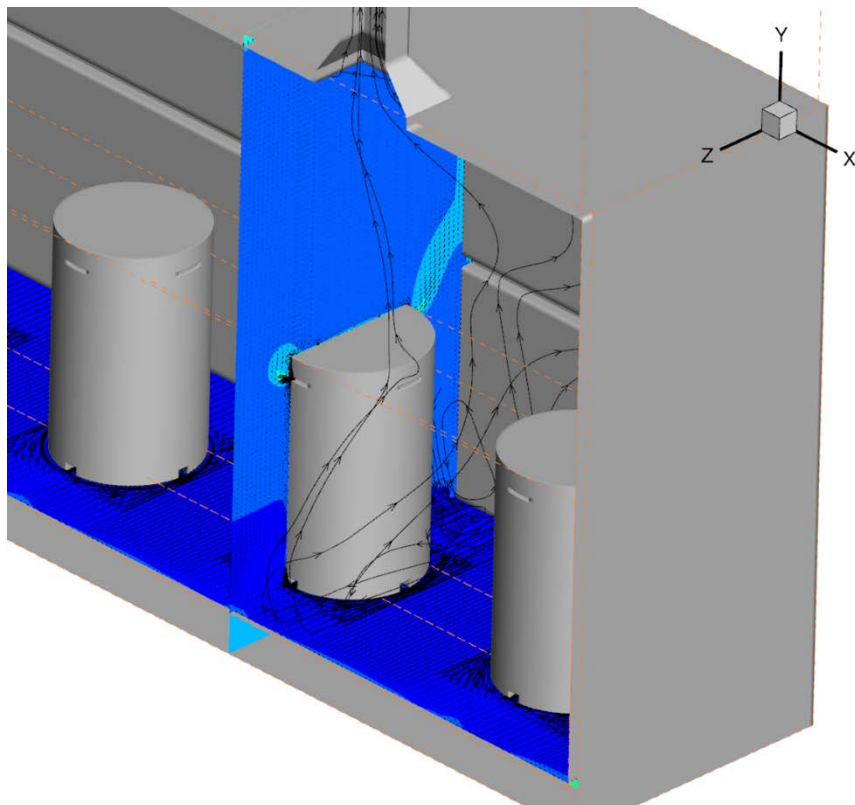


圖 26、假想室內乾貯設施搭配 C 型強制通風系統之流場分佈

## 6.2.2 廠房厚度與材質之影響

為能更進一步就 5.1.2 節所提及的日照輻射議題對廠房內熱流之影響進行探討，本研究特別以 SWB 廠房所採用的蒙皮與以及 HABOG 所具有的 1.7m 厚的混凝土於日照輻射之影響比較(如圖 27)；其結果顯示，在依據 10CFR71[19]與 NUREG-1536[22]於頂部日照建議值：387.6 W/m<sup>2</sup>，進行加熱，並考慮壁面兩側受自然對流之影響後，其廠房內壁面所得溫度分別約為 325K 與 308K。此一結果顯示，金屬廠房在未考慮隔熱材時將會有大量的熱透過熱傳導往室內傳遞，而廠房內的空氣溫度，亦將因為廠房壁面溫度的增加而提高為原來的：

$\frac{(325^4 - 305.15^4)}{(308^4 - 305.15^4)} = 7.57$  倍。表 10 所載之分析結果亦顯示，採用較薄且高傳導效果的材料作為廠房壁面材料時，將使廠房內的空間有機會獲得多從壁面傳遞至廠房的

熱量，在對廠房內空氣進行加熱後，造成比混凝土廠房更大的換氣率；此點更加印證 6.2.1 節中，建議管制單位應將此類議題納入安全報告第三章之審議工作中，並且會同第 6.3 節審查人員於審查作業時，檢視其廠房特性是否已於熱流分析之中合理考慮。

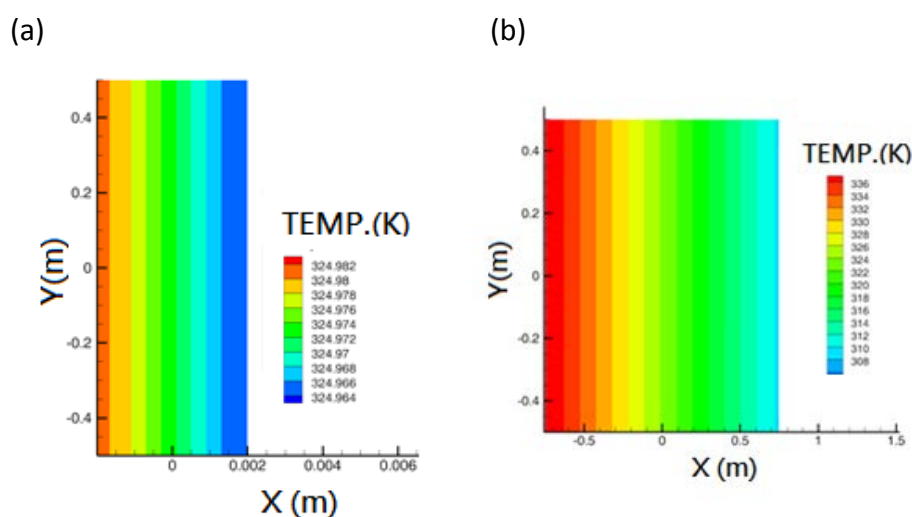


圖 27、不同廠房材料與厚度對廠房內部加熱效果之影響；(a)2mm 鋼板；  
(b)1.7m 混凝土

表 10、採用鋼構廠房時對假想廠房換氣率之影響

煙囪出口高度 (m)	鋼構廠房		混凝土廠房
	半阻塞流量 (kg/s)	正常狀態流量 (kg/s)	正常狀態流量 (kg/s)
14	~6.3	~8.7	~6.8
18	~7.3	~10.5	~8.1
40	~8.1	~11.7	~9.0

## 6.3 室內與露天乾貯之熱傳的差異研析

本研究基於第 5 與第 6 章上述各章所得之各項資訊，以金屬護箱及混凝土護箱為代表，將其搭配露天貯存或是利用鋼構、鋼筋混凝土廠房等設計進行室內貯存時之熱流設計與分析重點彙整於表 11，並可逐一說明如下。

- (1) 經過本研究之研析，混凝土及金屬護箱採露天、鋼構廠房存放或是鋼筋混凝土廠房存放之各項搭配組合中，僅剩鋼筋混凝土廠房 vs 混凝土護箱及鋼構廠房 vs 金屬護箱之組合尚未有裝載實例；其原因並非源自於安全或是法令考量，而單純是成本與需求設計之故；例如：鋼筋混凝土廠房 vs 混凝土護箱之組合將勢必於結構強度與屏蔽等項出現過嚴謹之設計；
- (2) 無論採用何種系統與設施之搭配，目前大多數的廠家於設計時皆以 the state of the art 之精神，採用計算流體力學搭配部分其他方法進行熱流分析，而各國管制單位亦未要求採用熱流分析工具進行分析；而是以應用實例來證明其適用性，並搭配嚴謹之分析結果審查程序來確保分析結果的可靠度；
- (3) 無論採用何種護箱與廠房設計進行搭配，基於合理的場址氣候條件進行模式邊界條件的設置是合理且廣泛的作法；但考量未來執照申請人可能將廠房與護箱分別進行計算，故需進一步對分析時邊界條件的保守性與涵蓋性進一步加以檢視；若獨立進行護箱熱流分析，則需加計廠房阻礙散熱所造成的影響；
- (4) 而在設施通風系統過濾之需求方面，所有露天乾貯皆無列置相關設備之必要，而經檢索後亦發現目前營運中的德、荷等國的室內乾貯設施，亦無明文要求設置過濾設備之要求；
- (5) 此外，經過檢索後發現，目前所有營運中的乾貯系統皆採用自然對流之通風型式進行移熱，在無需增設任何空調或強制通風設備下即可確保護箱移熱無虞；而少數(HABOG)設置有強制對流設施之系統，其主要目的



係用於同一廠址之非發熱源放射性廢棄物貯存之用，與用過核子燃料之貯存需求無關；

- (6) 所有乾貯系統於設計時所採用的護套溫度可能因燃料類型、運轉歷史及設計貯存年限不同而有差異，但其溫限值仍是以確保用過核子燃料之護套於長期貯存下不致因為潛變而造成劣化為原則制定而成，故管制單位對於我國之待貯燃料所訂定之燃料護套限值亦無需因為乾貯設施的類型不同而有所變動；
- (7) 而為能符合此一溫度限值，各類乾貯系統或將採用不同的工程設計思維以同時克服熱傳、屏蔽、結構及密封所構成之設計挑戰。而因為所選用的設計思維不同之故，其內部壓力可能採用正壓或負壓方式；其主要原因可概分為：焊接密封之系統多利用正壓來增進內部移熱能力，以提升裝載能力；而螺栓鎖固之系統則利用負壓設計並搭配一層高壓夾層來達到監測密封性之目的；
- (8) 採用螺栓鎖固的系統為確保機械力不致造成氣密面的變形，往往選用具有較厚殼體的金屬護箱，並同時將傳送所需的屏蔽需求一併進行整合設計；惟需注意此差異主要源自於上述的護箱設計思維，而與廠房類型無直接關係；
- (9) 最後，綜合本研究所蒐集解析之資訊，以及利用假想模式進行分析後，確定上述各式護箱與廠房搭配之組合，並未發現熱傳技術上不可行的疑慮；故管制單位暫無需對各式護箱與廠房之室內乾貯組合加以禁止，僅需於未來透過相關法規與技術層面進行熱流部分之審查，即可確保其安全性。

表 11 、室內外乾貯設施於不同護箱之搭配下熱流相關資訊比對彙整表

護箱類型	比較項次	露天乾貯	室內乾貯	
			鋼構廠房	鋼筋混凝土廠房
混凝土護箱	是否有營運中設施	已有實例	已有實例	尚無實例
	主要熱流分析方法	計算流體力學	計算流體力學	計算流體力學
	設施邊界條件	廠址氣候資料	廠址氣候資料並考量廠房熱流對空氣之影響	
	設施通風過濾系統	無需設置	無	-
	移熱機制	自然對流	自然對流	自然對流
	護套溫度限值定義基準	長期貯存不得發生潛變	長期貯存不得發生潛變	長期貯存不得發生潛變
	密封鋼筒內壓力	正壓/常壓	正壓	正壓
	傳送方式	視系統設計	視系統設計	視系統設計
	是否存在技術不可行之疑慮	無	無	無
金屬護箱	是否有營運中設施	已有實例	尚無實例	已有實例
	主要熱流分析方法	計算流體力學	計算流體力學	計算流體力學
	設施邊界條件	廠址氣候資料	廠址氣候資料並考量廠房熱流對空氣之影響	
	設施通風過濾系統	N/A	-	無
	移熱機制	自然對流	自然對流	自然對流
	護套溫度限值定義基準	長期貯存不得發生潛變	長期貯存不得發生潛變	長期貯存不得發生潛變
	密封鋼筒內壓力	負壓/正壓	負壓/正壓	負壓/正壓
	傳送方式	視系統設計	視系統設計	視系統設計
	是否存在技術不可行之疑慮	無	無	無

## 7. 建議室內乾貯之熱傳評估的管制重點

依據先前各章就國際資訊、系統設計資訊瞭解、方法論適用性研析與系統熱流特性評估等工作之成果，本章進一步將值得管制單位關注之議題加以彙整，以供管制單位參考。

- (1) 若系統透過監測氣密室壓力來確保密封能力，往往於貯存空間採用負壓，以杜絕分裂產物(氣體)洩漏之可能；為確保此一能力，可於審查時對其兩層封蓋內之密封空間進行檢視，以確認在一二次蓋內空間之壓力均衡後，貯存空間仍為負壓，確保此機制之有效性；
- (2) 若護箱具備有壓力監測功能時，需針對因廠房溫度所造成的合理壓力變化進行預估並明列於運轉規範中，以作為判定正常或異常之依據；
- (3) 不同設施所採用的乾操作業可概分為真空乾燥與洩壓乾燥兩種，在預期兩種作業或將對於護套造成不同程度之應力影響，建議管制單位可對執照申請者所提供之乾操作業進行檢視；並確保護箱內部的殘餘水，可以於作業後被蒸乾；
- (4) 無論採用何種系統與設施之搭配，目前大多數的廠家於設計時皆以 the state of the art 之精神，採用計算流體力學搭配部分其他方法進行熱流分析；各國管制單位亦未要求採用特定工具進行熱流分析，而是以應用實例來證明其適用性，並搭配嚴謹之審查程序及品保作業來保證分析結果的可靠度；
- (5) 經比對我國與德國之火災事故後，發現德國與我國之間並無相違之處；故未來管制單位亦可依循既有之管制經驗，檢視申請單位是否有提具合理的行政作業程序與相符的事故情境分析。
- (6) 室內乾貯系統於分析時，若未將廠房與護箱進行耦合計算，則管制單位需確保其「計算邊界溫度」已合理保守地考量室內通風限制所造成的環境溫度變化；反之，若採用耦合之分析模式進行分析，則可參照露天乾

貯之處理原則，由場址所在之氣候資訊訂定「計算邊界溫度」；

- (7) 以往室內乾貯可能因為設計或廠房舒適性之需求而設置有不同用途之強制通風、排風等系統，惟其設計基準除涉及熱流之外尚與其他建築法規有關；因此建議管制單位可將強制通風系統、排風系統(煙囪)等機制，納入安全分析報告第三章設施設計基準-輔助系統及公用系統之審查工作，並就涉及廠房移熱能力之部分並會同安全分析報告第 6.6 節進行整合審查；
- (8) 建議管制單位應於審查過程中關注廠房於全阻塞事故中所造成的熱阻抗與熱容量是否已被合理評估或保守假設；並針對事故過程中可能造成的高溫對相關輔助、公用系統之可用性或是內部設施可能隱含消防防護疑慮進行審查。未來審查時，應就安全分析報告第 6.3 節所載之廠房事故溫度進一步檢核安全分析報告第三章設施設計基準-輔助系統及公用系統以及第八章消防防護計畫之內容；
- (9) 管制單位需確保申請者於分析時應確保護箱之列置對流體溫度與熱對流係數所造成的影響已被加以考慮；若管制作業包含人員作業之環境溫度、溼度等舒適性議題時，則護箱表面所造成的輻射熱傳效應亦需合理納入考量之中。

## 8. 結論

本子項三「除役核電廠用過核燃料室內乾式貯存之熱傳管制技術研析」之計畫目的係研析各國室內乾貯設施與熱流相關之法規、法規指引、標準與設施特性，並與我國既有乾貯設施進行比較進而整理出室內與露天乾貯系統之設計與管制差異，以供管制單位參考。經過本年度的研析，已充分蒐集、日本、德國、荷蘭等國既有運行中之室內乾貯設施，並整理如各國指引以瞭解各國對於熱流安全分析之要求與管制限值。

而在分析方法的研析工作中，本研究透過檢索美、德等國之相關分析資訊，後建議管制單位僅需於未來審查時著眼於申請者所採用之方法是否具有實例並且充份驗證即可，如此可令熱流分析人員具有較大彈性選擇最適合之先進方法(the state of the art)進行評估。

此外本研究亦透過檢索各式護箱、廠房及作業程序，以評估現有分析工具與方法論之可用性；其結果顯示，各式護箱之設計需求將進一步導致其結構與散熱途徑之不同，但可將多種乾貯系統透過系統化的參數進行簡化，進而有效率的完成方法論適用性評估。而依據此一結果，本研究已與子項四共同制定了一組合宜之參數範圍，並據以完成可用於金屬護箱及混凝土護箱分析之通用模式；並於參考德國 WTI 設施之設計基準進行進口面積之設定，以促使廠房內的自然對流可以順利滿足移熱需求。

最後經過本年度之執行，本子項已依原合約時程完成各項工作要求，其研究結果證實各類乾貯護箱在搭配不同廠房型式下並發現任何熱流技術不可行之狀況；而各項研析或評估所得之心得與發現更已匯整於報告最末章，以供管制單位參考。

## 9. 參考文獻

- 1.台灣電力公司，“核一廠除役計畫書-第九章第五節，”頁次 9-46，106 年 2 月。
- 2.台灣電力公司，“核一廠除役計畫書-第十章第一節，”頁次 10-24，106 年 2 月。
- 3.Dr. R. Diersch, Dr. G. Dreier, H. Stelzer, “CASTOR V - THE PACKAGE SYSTEM FOR TRANSPORT AND STORAGE OF SPENT FUEL ASSEMBLIES,”
- 4.青森県原子力立地対策課，“使用済燃料中間貯蔵施設に係る安全性チェック・検討会結果”，Jun 2008
- 5.日東京電力株式会社，“福島第一原子力発電所共用プール建屋から 乾式キャスク仮保管設備への既設の乾式貯蔵キャスク 1 基の構内輸送について”，Apr 2013
- 6.日本原子力発電株式会社，“平成 25 年度 東海発電所・東海第二発電所の年間主要事業計画について”，Apr 2013
- 7.中部電力株式会社，“浜岡原子力発電所 使用済燃料乾式貯蔵施設の建設計画の変更について”，Jul 2014
- 8.Recycle-Fuel Storage Company, “Metal Cask Storage Schedule of Recyclable Fuel Storage Center in Mutsu”, Nov 2010
- 9.Office for Nuclear Regulation, “Dry fuel storage inspection,” <http://www.onr.org.uk/intervention-records/2014/sizewell-b-14-214.htm>.
- 10.台灣電力公司，“核一廠用過燃料式貯存設施安全分析報告，”民國 97 年 1 月。
- 11.台灣電力公司，“核二廠用過燃料式貯存設施安全分析報告，”民國 101 年 3 月。
- 12.國立清華大學核子工程與科學研究所，“除役核電廠用過核燃料室內乾式貯存安全管制技術研究計畫書，”民國 106 年 2 月。

- 13.施純寬，“核二廠用過核子燃料乾式貯存設施熱傳分析技術研究，”民國 100 年 12 月。
- 14.施純寬、曾永信，“假設複合式災害情節對乾式貯存設施營運影響分析期末報告，”民國 100 年 12 月。
- 15.施純寬，“核二廠用過核子燃料乾式貯存設施熱傳安全驗證研究期末報告，”民國 101 年 12 月。
- 16.施純寬、曾永信，“乾式貯存設施於假設複合式災害事故下之熱流分析暨密封鋼筒內部對流監測機制研究期末報告，”民國 102 年 12 月。
- 17.施純寬，“乾式貯存設施設計壽命期間熱傳行為分析期末報告，”民國 103 年 12 月。
- 18.施純寬，“核二廠乾式貯存設施設計壽命期間熱傳行為分析，期末報告，”民國 104 年 12 月。
19. U.S. Nuclear Regulatory Commission, “PACKAGING AND TRANSPORTATION OF RADIOACTIVE MATERIAL,” 10 CFR 71.
20. U.S. Nuclear Regulatory Commission, “LICENSING REQUIREMENTS FOR THE INDEPENDENT STORAGE OF SPENT NUCLEAR FUEL, HIGH-LEVEL RADIOACTIVE WASTE, AND REACTOR-RELATED GREATER THAN CLASS C WASTE,” 10 CFR 72.
- 21.U.S. Spent Fuel Storage and Transportation Interim Staff Guidance, Cladding Considerations for the Transportation and Storage of Spent Fuel,” ISG-11, Rev. 3.
- 22.U.S. Nuclear Regulatory Commission, “Standard Review Plan for Dry Cask Storage Systems,” NUREG-1536, U.S., January 1997.
23. 放射性物料管理局，“核能電廠用過燃料室內乾式貯存安全審查及管制研討會，”台北，永和，民國 106 年 4 月 19-20 日。
24. Holtec Inc., FSAR “GENERAL DESCRIPTION OF HI-STORM 100 System,” REPORT HI-2002444, Rev. 3.I.

25. Holtec INC, “Final Safety Analysis Report OF HI-STAR 100 Cask System,” ML093070147, Rev. 3.I.
26. Areva, “NUHOMS HD SYSTEM SAFETY ANALYSIS REPORT,” ML041540170, Rev. 0, 4/04.
27. ASME, “Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Subsection NB. go.asme.org/bpvc13, 2013.
28. ANSI N 14.5 – 1997, “American National Standard for Radioactive Materials – Leakage Tests on Package for Shipment,” ANSI, Inc., February 1998.
29. 葉宗洸、黃爾文、王美雅, “除役核電廠用過核燃料乾式存安全管制技術-子項二,” 期中報告, 民國 106 年 7 月。
30. Radioactive Waste Management Directorate, “Packaging of Sizewell B Spent Fuel (Pre-Conceptual stage) Summary of Assessment Report,” Issue date of Assessment Report: 23 December 2011.
31. Gunter Pretzsch, Ralph Maier, “GERMAN APPROACH TO ESTIMATE POTENTIAL RADIOLOGICAL CONSEQUENCES FOLLOWING A SABOTAGE ATTACK AGAINST NUCLEAR INTERIM STORAGEES,” IAEA INIS Issue 26, Vol. 35, 2003.
32. NRG, “Complementary Safety margin Assessment COVRA N.V. (HABOG),” 23254/ 13.118712, 2013。
33. IAEA, “Storage of Spent Nuclear Fuel,” Specific Safety Guide, No. SSG-15, 2012.
34. 德國 2002 年原子能法, 2002 年 4 月 22 日修訂。
35. 德國輻射防護條例(Radiation Protection Ordinance), 2001.7.20.
36. 德國用過核燃料乾式貯存安全指引(Guidelines for Dry Cask Storage of Spent Fuel and Heat-generating Waste), 2013.10.06.
37. Kingdom of the Netherlands, “Atomic Energy Act, Kew,” 2012.
38. ANVS, “Radiation Protection Decree,” 2014.



39. Kingdom of the Netherlands, Nuclear Facilities Fissionable Materials and Ores Decree, 2014.
40. ANSI/ANS, "Design criteria for an independent spent fuel storage installation (dry type)," 57.9-1992.41. U.S. Nuclear Regulatory Commission, "Standard Review Plan for Dry Cask Storage Facilities," NUREG-1567, U.S., January 2000.
42. NRC, "Cladding Considerations for the Transportation and Storage of Spent Fuel," Division of Spent Fuel Storage and Transportation Interim Staff Guidance No. 11 REV3," 2003.
43. 梁正宏、王仲容，"除役核電廠用過核燃料乾式存安全管制技術-子項五，"期中報告，民國 106 年 7 月。
44. HOLTEC INTERNATIONAL COPYRIGHTED MATERIAL REPORT HI-2114830, REV.5.
45. U.S.NRC, "SFST ISG-21, Rev. 3," USE OF COMPUTATIONAL MODELING SOFTWARE," Division of Spent Fuel Storage and Transportation Interim Staff Guidance No. 21, 2006.
46. U.S.NRC, "Computational Fluid Dynamics Best Practice Guidelines for Dry Cask Applications," UREG-2152, 2013.
47. ASME, "Standard for Verification and Validating in Computation Fluid Dynamics and Heat Transfer," ASME, 2009.
48. W. Botsch, et.al, "Safety Aspects of Dry Spent Fuel Storage and Spent Fuel Management," WM2013 Conference, Phoenix, Arizona USA, February 24 – 28, 2013.
49. Bruno Thomauske, "REALIZATION OF THE GERMAN CONCEPT FOR INTERIM STORAGE OF SPENT NUCLEAR FUEL – CURRENT SITUATION AND PROSPECTS," WM'03 Conference, February 23-27, 2003, Tucson, AZ.

50. Mike Weber, et.al, "Numerical Analysis of Cask Accident Scenarios in Storage Facilities," WM2014 Conference, March 2-6, 2014, Phoenix, Arizona, USA.