

行政院原子能委員會  
放射性物理管理局

乾貯系統密封鋼筒再包封可行性之熱流評估  
期末報告

財團法人核能與新能源教育研究協進會

施純寬

105FCMA002

中華民國 105 年 12 月 7 日

# 乾貯系統密封鋼筒再包封可行性之 熱流評估

受委託單位：財團法人核能與新能源教育研究協進會

研究主持人：施純寬

協同主持人：無

研究期程：中華民國 105 年 3 月至 105 年 12 月

研究經費：新臺幣七十一萬元

放射性物料管理局 委託研究

中華民國 105 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

為求能增進核一廠乾式貯存設施於貯存期間密封邊界之可靠度並預先建立假設性因應措施，本研究利用計算流體力學分析技術所發展之二維熱流分析技術，先行瞭解核一乾貯系統各元件與密封鋼筒在施行再包封作業後之溫度分布與熱流可行性。經過本計畫的執行，本團隊已依計畫原訂之工作時程，完成模式發展、參數靈敏度分析與設計基準事故(含正常、異常及意外事故貯存)案例之熱流分析。參數靈敏度測試結果顯示，變更外包封幾何形狀對原有的混凝土護箱所餘留的空氣流道面積減少至 35% 前，其流量仍有原有標準系統的 90% 左右，故不致影響整體對流移熱能力。研究更發現，相較於流量減少所造成的熱流影響，再包封作業所造成的隙縫將是影響整體移熱能力的主要關鍵，但透過合適的再包封設計將不致使再包封設計於任何設計基準事故下出現系統元件溫度超出限值之狀況。此外，研究中針對全阻塞的分析結果更顯示，當核一乾貯處於較低的熱負載(7kW)時，系統各元件仍可長期維持足夠的移熱能力以確保元件符合設計限值；另外 14KW 的暫態分析則顯示此一系統即使進行再包封作業，仍不致於 72 小時內出現元件超出設計限值之狀況。

關鍵字：核一廠乾貯系統、計算流體力學、再包封、設計基準事故

## ABSTRACT

The goal of study is to investigate the thermal hydraulic behavior of Chinshan dry storage system (CSDSS) as a re-encapsulated method has been applied to improve the reliability of sealing boundary. A computational fluid dynamics (CFD) technology has been employed to develop a useful 2d thermal analysis method for this study, which can not only be preparatory used to evaluate the thermal behavior but also to examine the components temperature. Through hard work in this year, the model developing, validation, parameters sensitivity test and design basis accident (DBA) case analysis, including normal, off-normal and accident, simulations have been completed by the research team on schedule. The results initially show that the influence of air-channel area reducing will not significantly increase the components temperature. The quantized values indicate that the flow rate will slightly reduce to the 90% as the flow area reduced to 35%, which indicates that the flow area reducing will not be the major thermal resistance for the DSS heat transfer. The majorly thermal resistance in the re-encapsulation process is original from the static gases layer between the TSC and additional metal canister, but it can be further mitigated by suitable parameter design. The simulation results also show that the re-encapsulated DSS still can meet all requirements of DBAs and ensure the temperature of components below than design limit. Moreover, the simulation result shows that the re-encapsulated CSDSS can allow a long time full-block accident and ensure the temperature does not exceed the limits as the thermal load is 7KW. Even if the thermal load increase to 14kw, the re-encapsulated CSDSS still can ensure the components safety within 72 hours.

Keywords : CSDSS, CFD, re-encapsulation process, DBA

# 目錄

摘要.....	i
ABSTRACT.....	ii
目錄.....	iii
圖目錄.....	v
表目錄.....	vii
一、研究背景、目的與規劃.....	1
二、統御方程式與數值模式.....	6
2.1 統御方程式.....	6
2.2 數值模式.....	7
2.2.1 DO 熱輻射模式.....	7
2.2.2 紊流模式.....	9
2.2.3 自然對流模式.....	10
三、密封鋼筒再包封之設計概念與作業流程研析.....	11
3.1 核一廠乾貯系統系統結構.....	11
3.2 材料性質.....	16
3.2.1 流體熱傳性質.....	16
3.2.2 固體熱傳性質.....	16
3.2.3 燃料束流阻係數.....	19
3.3 燃料衰變熱設定.....	21
3.4 燃料軸向功率分佈.....	22
3.5 再包封作業之設計概念與作業流程.....	26
四、再包封熱流分析之計算流體力學分析技術建立.....	29
4.1 三維模式發展與網格生成.....	29

4.2 二維分析模式建立.....	35
4.3 邊界條件設定.....	40
4.4 靈敏度測試規劃.....	41
4.5 三維與二維模型之平行驗證.....	43
五、核一廠乾貯系統再包封後之系統熱流現象研析.....	46
5.1 密封鋼筒再包封後對熱流特性之影響.....	46
5.2 再包封作業後之正常貯存案例分析.....	56
5.3 再包封作業後系統之異常案例分析.....	64
5.3.1 異常低溫.....	64
5.3.2 異常高溫.....	67
5.3.3 半阻塞事故.....	70
5.4 再包封作業後系統之意外事故案例分析.....	73
5.4.1 極高環境溫度.....	73
5.4.2 全阻塞事故.....	77
六、密封鋼筒再包封安全設計之作業中需考慮因子評估與建議.....	84
七、結論.....	87
參考文獻.....	89
附錄一 FLUENT 燃料源項程式嗎.....	90
附錄二 二維模式 udf.....	97

## 圖目錄

圖 1 整體研究計畫流程圖.....	5
圖 2 核一乾貯系統示意圖.....	13
圖 3 核一乾貯系統功率配置圖(a)164W，(b)139W 及(c)99W.....	14
圖 4 核一各式可能貯存燃料之軸向功率分佈曲線.....	24
圖 5、GE-8X8-2、GE9B 燃料之軸向功率分佈.....	25
圖 6、ATRIUM-10 燃料軸向功率分佈.....	25
圖 7、核一乾貯系統之外加屏蔽層、護箱與密封鋼筒組合圖.....	27
圖 8、核一乾貯系統施行外再包封作業之假設程序示意圖.....	28
圖 9、核一乾貯系統幾何示意圖.....	31
圖 10、核一乾貯系統幾何示意圖(a)無再包封之幾何(b)有再包封之幾何模型.....	32
圖 11、核一乾貯提籃、中子屏蔽板與燃料束示意圖.....	33
圖 12、核一乾貯系統整體網格分佈.....	34
圖 13、核一乾貯系統二維模型示意圖.....	36
圖 14、核一乾貯系統二維模型網格示意圖.....	37
圖 15、空氣流道面積減少至 18%之乾貯系統二維模型.....	38
圖 16、空氣流道面積減少至 65%之乾貯系統二維模型.....	39
圖 17 核一乾貯系統熱之(a)三維分析模式；(b) 二維分析模式於正常狀況下計算所獲之溫度(K)結果.....	44
圖 18 核一乾貯系統熱之(a)溫度(K)分佈以及(b)流道內速度分佈(m/s).....	49
圖 19 施行再包封作業後之，流道面積減少至 68%時的系統溫度(K)分佈.....	50

圖 20 不同流道面積減損後，空氣流道之壓力分佈(Pa)狀況.....	51
圖 21 施行再包封作業後之，流道面積減少至 18%時的系統溫度(K)分佈.....	52
圖 22 不同流道面積減損後，空氣流道之軸向溫度變化.....	54
圖 23 不同流道面積減損後，空氣流道之徑向溫度梯度變化.....	54
圖 24 各案例組合下乾貯系統之徑向無因次化溫度分佈.....	55
圖 25 各案例組下之再包封容器與原始 TSC 之溫度趨勢比較 .....	63
圖 26 三維與二維模式於全阻塞暫態之平行驗證結果.....	78
圖 27 三維模式內部對流特性示意圖.....	79
圖 28 假設性再包封容器因子評估合適性示意圖.....	85
圖 29 假設性再包封容器設置位置示意圖.....	86



## 表目錄

表 1 核一乾貯系統重要尺寸列表.....	15
表 2 氦氣熱傳性質.....	16
表 3 空氣熱傳性質.....	16
表 4 中子屏蔽(NS-4)熱傳性質.....	17
表 5 不銹鋼(304 及 304L)熱傳特性.....	17
表 6 碳鋼(A-36、A-533 及 SA-588)熱傳特性.....	17
表 7 鉛屏蔽熱傳特性.....	17
表 8 鋁合金(6061-T651)熱傳特性.....	18
表 9 鋳合金熱傳特性.....	18
表 10 燃料丸(UO <sub>2</sub> )熱傳特性.....	18
表 11 混凝土熱傳特性.....	18
表 12 ATRIUM-10 燃料組件重要幾何尺寸：.....	21
表 13 ATRIUM-10 燃料各項局部損失係數及摩擦因子.....	21
表 14、靈敏度測試參數組合表.....	42
表 15、二維及三維分析模式於不同熱負載下的比對結果.....	45
表 16、不同再包封設計下對於空氣流道面積與流量之變化比較表....	53
表 17、以碳鋼為包封材料並回充氦氣時之元件溫度(°C).....	59
表 18、以不銹鋼為包封材料並回充氦氣時之元件溫度(°C).....	60
表 19、以鋼為包封材料並回充空氣時之元件溫度(°C).....	61
表 20、以不銹鋼為包封材料並回充空氣時之元件溫度(°C).....	62
表 21、所有參數組合之靈敏度評估結果.....	63
表 22、7kW 熱負載條件於異常低溫案例時之元件溫度(°C).....	65
表 23、14kW 熱負載條件於異常低溫案例時之元件溫度(°C).....	66

表 24、7kW 熱負載條件於異常高溫案例時之元件溫度(°C).....	68
表 25、14kW 熱負載條件於異常高溫案例時之元件溫度(°C).....	69
表 26、7kW 熱負載條件於半阻塞案例時之元件溫度(°C).....	71
表 27、14kW 熱負載條件於半阻塞案例時之元件溫度(°C).....	72
表 28、7kW 熱負載條件於極高環境溫度時之元件溫度(°C).....	75
表 29、14kW 熱負載條件於極高環境溫度時之元件溫度(°C).....	76
表 30、7kW 熱負載於全阻塞事故下以穩態分析所獲之元件溫度(°C)	82
表 31、14kW 熱負載於全阻塞事故發生 72 小時後之元件溫度(°C)....	83

## 一、研究背景、目的與規劃

我國核一與核二廠係美國奇異公司之沸水式反應器(Boling Water Reactors, BRWs),其爐心燃料束依系統設計熱功率之不同而分別具有為 408 與 624 束燃料。依據此二電廠之爐心佈局規劃,每次大修時需退出 1/3 左右之燃料,剩餘燃料在加入新的燃料束並經過挪移以滿足下一循環之設計需求。也因此核一二廠四部機組運轉至今,已退出總數逾萬之用過燃料束。即使兩座電廠的燃料池已於早年依據原能會所頒佈之「核能電廠用過燃料池貯存格架改裝安全分析報告審查規範」[1]進行格架改裝工程而增加了貯存空間,但仍無法滿足現有核電廠運轉 40 年之貯存需求。因此台電公司參照歐美日等先進國家之成熟做法,於核電廠現有廠區內規劃並興建乾式貯存設施,再將目前貯存於燃料池中多年、已充份冷卻之用過燃料移往乾式貯存設施進行乾式貯存,以確保電廠燃料池具有充足空間來滿足原能會之運轉要求。目前核一廠乾式貯存設施[2]已完成功能驗證測試,而核二廠乾式貯存設施[3]則已完成安全審查。

為能強化我國乾貯系統之安全性,物管局於民國 100 年起,即陸續進行了許多與乾式貯存熱流、臨界、屏蔽等相關之研究工作,以期能透過與學術界的技術合作與交流,針對國際最新之安全議題與國內各界對乾貯系統所提出之質疑進行澄清。上述眾多研究之成果顯示,無論面臨設計基準事故[1,2]或是超越設計基準事故(Beyond Design-Basis Accident)[3-6]甚至是設計封命期間的老化狀況[7, 8],我國現已核照之兩套乾貯系統皆有充足的餘裕與救援時間可供處置因應。

此外,物管局於 102 年著手進行的燃料再取出分析結果已顯示,貯存設施的燃料再取出作業由熱流角度來看,係為可行且不致對燃料護套造成顯著影響之措施;此結果除了證實乾貯作業在未來與燃料終期貯存作業接續的過程中將不致出現如同外界所述的安全疑慮外,其結果更可作為乾貯密封鋼筒在出現安全疑慮時的設備更換進程序之參考依據。

再取出作業預期係將原有乾貯作業反向操作之作業程序,其程序將逐步地把混凝土護箱中的密封鋼筒,利用傳送護箱將其取出;再移至燃料池或再取出池中以進行密封上蓋焊道刨除、注水、開蓋及燃料再取出之作業,最後再重新

依原安全分析報告中所載的裝載作業進行再次裝載。若暫不將燃料檢測時間考量在此作業過程中，則此一程序可以合理的預估將比傳送作業所需時間更長。

因此，若能預先採用額外再包封之方式，以外覆在原密封鋼筒周圍的再包封容器(re-encapsulate)，將密封鋼筒連同內部燃料與提籃結構等元件再次進行包封，得以令密封鋼筒獲得額外的保護；因此本研究擬以此構想為基礎，探討假設進行再包封作業後之熱流特性與可行性評估，為乾貯設施未來營運時提供額外的備選方案，進而達到增進營運安全性、減少作業人員劑量之可能性。

有鑑於再包封作業，主要係針對密封鋼筒利用外覆一層阻隔物之方式來改善其密封邊界的完整性，故需盡可能減少對原有系統元件之影響方具有可行性；因此對於原有安全分析報告中已妥善分析之屏蔽、結構等議題，所受到之影響將遠低於熱流特性與移熱能力因整體受結構改變之影響。故本研究擬於計畫作業期間，利用計算流體力學分析技術，先行就核一廠用過核燃料乾貯系統於密封鋼筒進行假設性再包封作業後，系統元件與內貯燃料在各種不同狀況下所受之熱流影響進行評估，以作為未來之備選方案，進而提昇我國乾貯系統長期貯存與老化管理相關之管制技術。

整體而言，本計畫之工作項目依物管局原訂研究目標可概分如下：

1. 密封鋼筒再包封類型之設計概念與可行性資料研析
2. 密封鋼筒再包封安全設計要項應考慮因子
3. 核一乾貯設施再包封後之正常狀況熱流現象評估
4. 核一乾貯設施再包封後之異常狀況熱流現象評估
5. 核一乾貯設施再包封後之事故狀況熱流現象評估
6. 撰寫研究計畫成果報告

依據工作所需時程與研究之相依性，本計畫擬於本計畫執行期間完成以下工作項目，以符合物管局對計畫之要求：

1. 建立適用於再包封熱流分析之計算流體力學分析技術(含模型建立技術)
2. 密封鋼筒再包封之可行性、設計概念、作業流程等資料研析
3. 評估核一廠進行乾貯系統再包封作業後，於正常貯存狀態下之熱流現象之影響。
4. 評估核一廠進行乾貯系統再包封作業後，於異常貯存狀態下之熱流現

象之影響。

- 5· 評估核一廠進行乾貯系統再包封作業後，對事故狀態下之熱流現象之影響。
- 6· 密封鋼筒再包封安全設計之作業中需考慮因子評估與建議
- 7· 撰寫研究計畫期中與期末成果報告

為能如期達成上述各項工作，本研究計畫之整體執行工作可劃分如圖 1 所示之流程圖。研究開始之初，本團隊即將針對既有系統之申照幾何模式進行精進，以克服其模型幾何形狀將無法符合於本研究需求之問題。這是因為再包封作業的熱流分析，需著手針對密封鋼筒與空氣流道之間的幾何形狀因為再包封作業而造成的改變進行描述，以反應此一作業對熱流特性之影響。此外，預期整體分析工作將導入大量分析參數而使計算量大增，故為求能增進計算效能，此模式發展作業將結合三維與二維模型之方式來建立乙套適用於再包封作業的乾貯系統熱流分析之技術。

另外，在執行上述之分析技術之發展與精進之工作的同時，本研究亦將著手針進行各國乾貯系統相關申照法規及核一廠乾貯系統之安全分析報告進行研析，以評估再包封作業的執行情序中，是否有需納入考量或檢核之要點。而在作業流程評估與模式建立完成後，本研究即會針對各式參數組合進行模式發展與補充程式碼撰寫，以完成整個分析技術的建立工作。

其後，本研究將逐一針對正常、異常與事故案例進行分析；而為了能減少不必要的案例分析，本研究擬於正常存案例之參數靈敏度分析(如隙縫尺寸、再包封鋼筒厚度、材料與回充條件等)後，評估再包封作業後系統各元件之溫度餘裕。隨後，本研究將依據已擬定之計畫書，持續就具有涵蓋性的案例並搭配各式異常與意外事故，如異常高溫、異常低溫、半阻塞等事故之分析。以便瞭解再包封的熱流特性之影響探討與元件設計限制之檢核。最後，所有分析結果，將與相關法規及安全分析報告之檢核資訊將進行匯整，並與國內實務專家討論後，依據相關

作業程序、設計限制與參數等資訊進行綜合探討，以提出此一構想對原有設施與作業之影響，以作為未來可行性評估之建議。

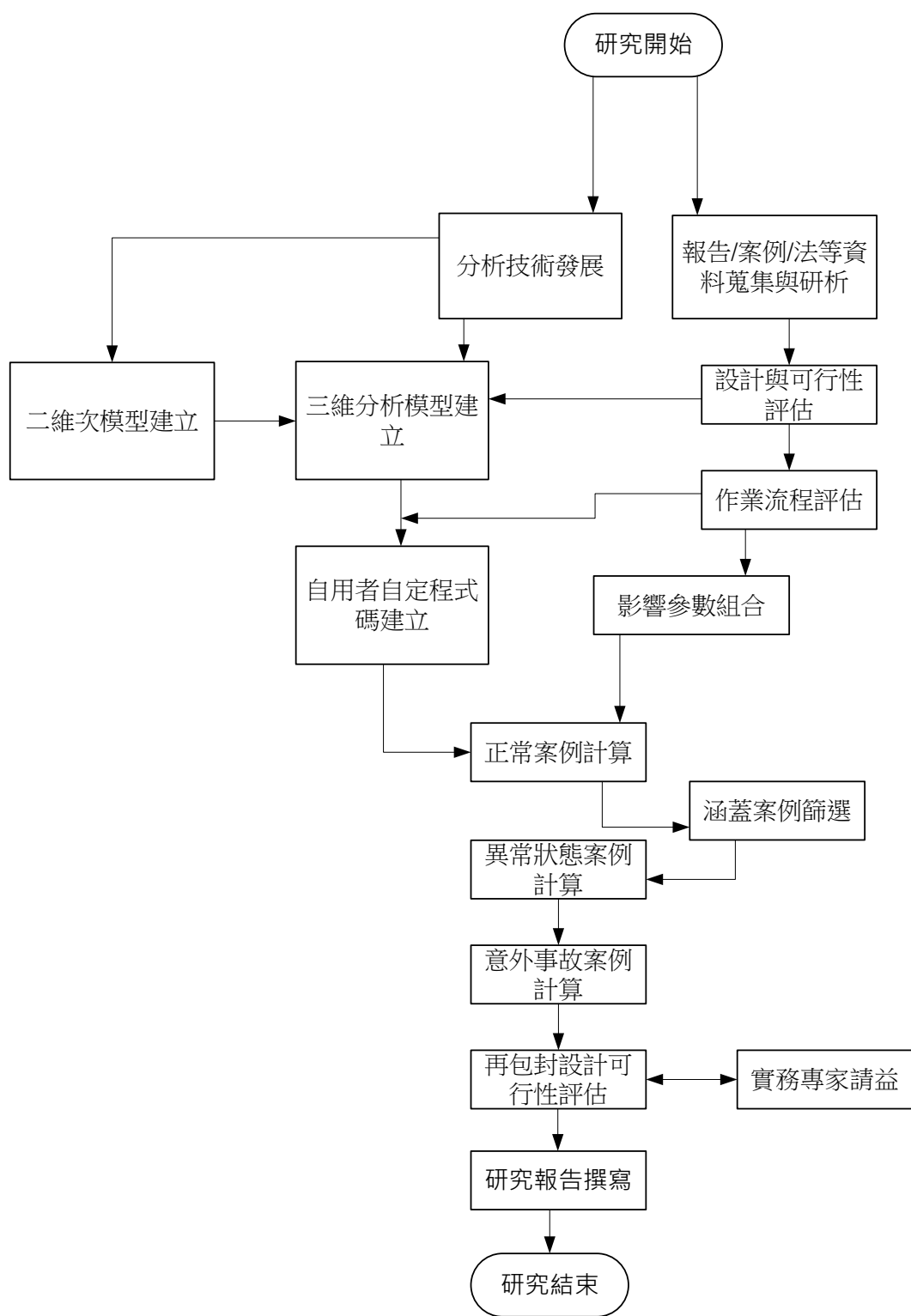


圖 1 整體研究計畫流程圖

## 二、統御方程式與數值模式

### 2.1 統御方程式

本研究以係採用與美國 NRC NUREG-2174[6]相同，並已多次應用於我國乾貯相關熱流分析作業[9-8]之商用計算流體力學軟體 FLUENT 為基礎。在進行一系列之模式建立、網格生成與測試、數值模式測試與比對、假設、簡化以及邊界條件靈敏度測試等工作後，本研究順利完成乙套符合本分析需求之分析技術建立，並藉以完成核二乾貯系統在設計壽命期間之熱流特性、應力腐蝕可能性分析。基於設計壽命期間之熱流特性主要係以針對乾貯系統之混凝土護箱於正常狀態下長期貯存，故其熱流特性可由以下之穩態統御方程式[5]來加以描述：

#### 質量守恆方程式

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

其中，

$\rho$  為流體密度；

而  $\vec{v}$  為速度向量。

#### 動量守恆方程式

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

其中， $p$  為靜壓力， $\rho \vec{g}$  為體積力項；

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

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

其中，



$\mu$  為流體黏滯係數；

$I$  則為單位張量。

### 能量守恆方程式

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

其中，

$E$  為單位質量之總能量；

$h$  為焓值；

$p$  為靜壓力；

$\bar{v}$  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。

## 2.2 數值模式

### 2.2.1 DO 熱輻射模式

上述統御方程式雖可描述熱流現象中的流場以及傳導對流等熱傳機制，但仍無法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於前一期研究中已充份校驗之熱輻射模擬模式-DO 模式。DO 模式除已於許多乾貯相關的研究中被加以應用外，本研究團隊更有充份的使用經驗與嚴謹的校驗程序來確保分析模式之精確性。

DO 模式主要乃是求解輻射傳輸方程式(Radiation Transport Equation)來計算有限體積法中各網格之熱輻射效應，其式可以寫為：

$$\nabla \cdot (I_\lambda(\vec{r}, \vec{s}) \vec{s}) + (a_\lambda + \sigma_s) I_\lambda(\vec{r}, \vec{s}) = a_\lambda n^2 I_{b\lambda} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I_\lambda(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s}, \vec{s}') d\Omega' ; (6)$$

其中， $I(\vec{r}, \vec{s})$  為  $\vec{r}$  點沿著  $\vec{s}$  方向之總輻射強度其式可以寫為：

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

$\lambda$  為波長；

$a_\lambda$  為吸收係數；

$I_{b\lambda}$  為黑體輻射強度；

$\sigma_s$  為散射係數；

$n$  為折射率(refractive index)。

### 2.2.2 紊流模式

由於乾貯系統所包含的傳送護箱與貯存用混凝土護箱，其高度皆在 5m 以上，因此高度所造成的自然對流動強度將促使內部對流呈現紊流流場。為求能精確的掌握紊流所造成的熱水流效應，本研究擬在相關分析採用適用性已受認同的 k- $\omega$  作為紊流模擬之數值模式，k- $\omega$  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，而  $\omega$  則為消散率； $\tilde{G}_k$  為紊流動能梯度， $\tilde{G}_\omega$  為消散率梯度； $Y_k$  與  $Y_\omega$  分別為  $k$  與  $\omega$  因為紊流所造成的消散量； $S_k$  與  $S_\omega$  分別為  $k$  方程式與  $\omega$  方程式之源項。 $\Gamma_k$  與  $\Gamma_\omega$  則為等效擴散項，上述變數之定義可以表示為：

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

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

其中， $\mu$  為流體黏滯係數， $\sigma_k$  與  $\sigma_\omega$  為紊流普蘭特常數(turbulent Prandtl number)而， $\mu_t$  則為：

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

其中，紊流阻尼  $\alpha^*$  可以定義為

$$\alpha^* = \alpha_\infty^* + \left( \frac{\alpha_0^* + \text{Re}_t / \text{R}_k}{1 + \text{Re}_t / \text{R}_k} \right); \quad (13)$$

而， $\alpha_\infty^*$  為阻尼；

$$\text{Re}_t = \frac{\rho k}{\mu \omega}; \quad (14)$$

$$\text{R}_k = 6; \quad (15)$$

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

$$\beta_i = 0.072。 \quad (17)$$

### 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體積力項( $\rho \bar{g}$ )的計算。由於重力場乃是一常數，因此如何模擬流體密度之變化即是建立自然對流模擬之重要參數。

在 FLUENT 中，用以設定流體密度變化的機制可以分為三種，其一為直接設定法，直接於材料性質表中，將材料性質設定為溫度之函數；或利用布希尼克(Boussinesq)近似法與理想氣體方程式來進行密度之計算。有鑑於採用布希尼克近似法來進行求解有助於增進求解之效率與收斂性，故本研究遂選用此法進行流體性質與體積力之設定。

### 三、密封鋼筒再包封之設計概念與作業流程研析

我國目前共有核一廠[2]及核二廠兩套乾貯系統[3]，現我國核一乾貯設施將待水保計畫通過後進行熱測試作業；核二乾貯設施，已於 104 年 8 月獲原能會核準；此二套乾貯系統之相關設計資料更已於先前研究工作中[8-13]中加以蒐集並歸納。在考量兩套乾貯系統之作業時程與研究工作之計算負載，本研究將先行針對核一乾貯系統進行模式發展並藉以進行後續之分析工作；故以下將僅針對本期擬探討之核一乾貯系統進行材料、設計概念與作業流程等資訊進行說明。

#### 3.1 核一廠乾貯系統系統結構

核一乾貯系統(INER-HPS)是由核研所協助台電核一廠，引進自美國 NAC 公司之 UMS 乾貯系統，其最大容許容量為 56 束沸水式(Boiling Water Reactor, BWR)用過核子燃料束。燃料束於本系統中乃是裝載於燃料套管內並由盤式元件組成之提籃進行承載與定位。此提籃主要之構成元件包括有中子吸收板 BORAL、燃料套筒(Sleeve)、碳鋼製承載圓盤(Supporter disk)、鋁製導熱圓盤(Conduction disk)以及用於固定上述元件之上下鉸件與繫桿(Tie rod)等元件。此系統與 NAC 公司 UMS 系統最大的不同在於本系統為確保此系統之屏蔽能力符合我國之相關法規，故於承載密封鋼筒的混凝土護箱外，額外加裝一外加屏蔽層以降低輻射劑量。

整體系統之重要尺寸經整理後如表 1 所示，其中密封鋼筒直徑約為 1.7033 公尺，高度約為 4.835 公尺，其中內裝之鋼製承載盤約為 1.587 公分厚，總數量為 43 片；而鋁製之導熱圓盤厚度約為 1.27 公分，數量為 17 片，並於提籃中段位置採用與承載盤交錯配置之方式進行組合。上述板件利用繫桿穿過上下焊件再經鎖固而成為護箱中之提籃。而核一廠之混凝土護箱直徑約為 3.454 公尺，高度約為 5.74 公尺；外加混凝土屏蔽層係為與混凝土護箱等高厚度約為 35 公分之圓殼物體；此一屏蔽層於護箱安裝完畢後會於貯存場址，以吊車逐塊吊運並堆疊於

護箱外圍。

而在裝載功率的配置上，核一對於實際裝載時的功率係將整個燃料提籃之裝載空間分別三區(圖 3)並分別裝載具有：(A) 0.1644 kW、(B) 0.139 kW 與(C) 0.099 kW 三種功率之燃料，但相關安全分析報告中仍採用較保守之總熱負載 14kW、單束燃料具有 250W 衰變熱之條件進行分析。而考量本研究之目的係用以探討核一乾貯系統在進行假設性再包封作業後對熱流特性造成之影響，本研究除考慮可涵蓋所有條件之 14kW 裝載條件外，亦針對核一申照時允諾之實際熱負載(7kW)一併採平均配置(120W/BUNDLE)進行評估。

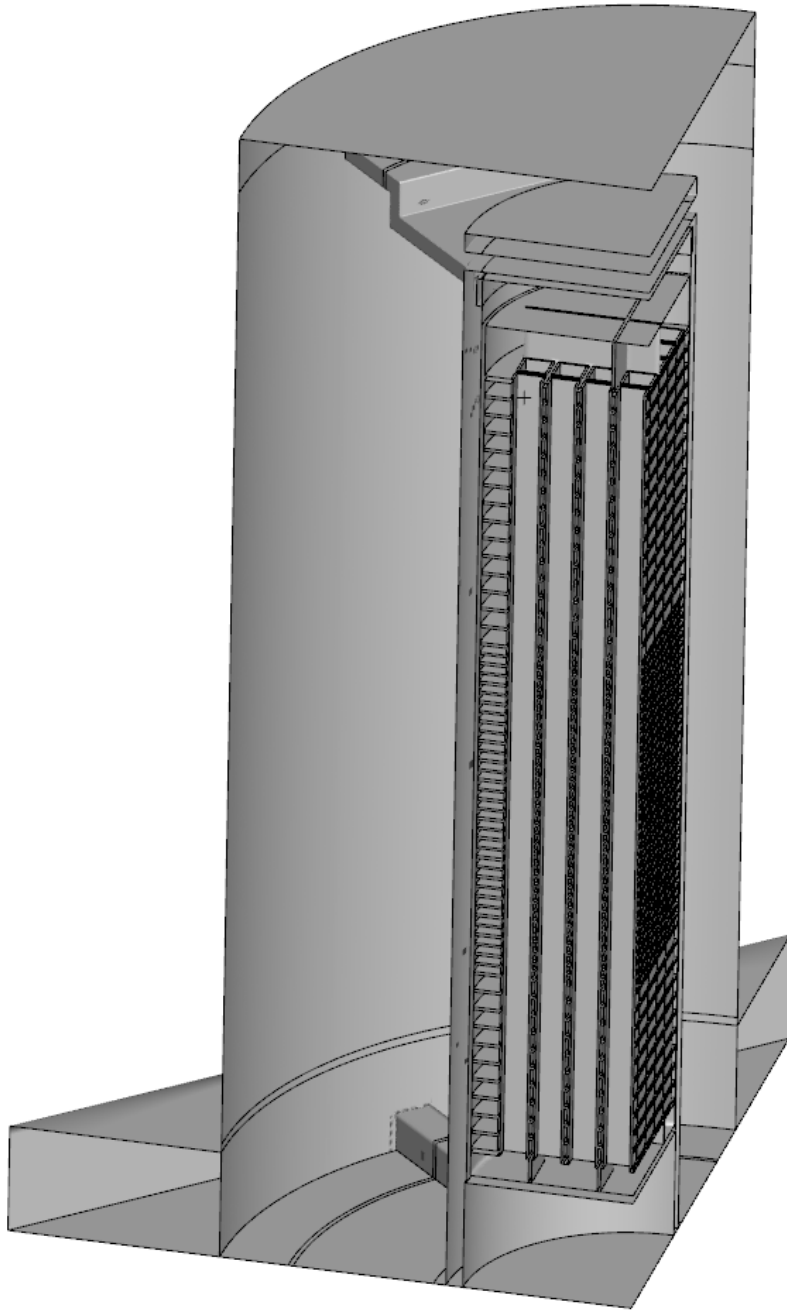


圖 2 核一乾貯系統示意圖

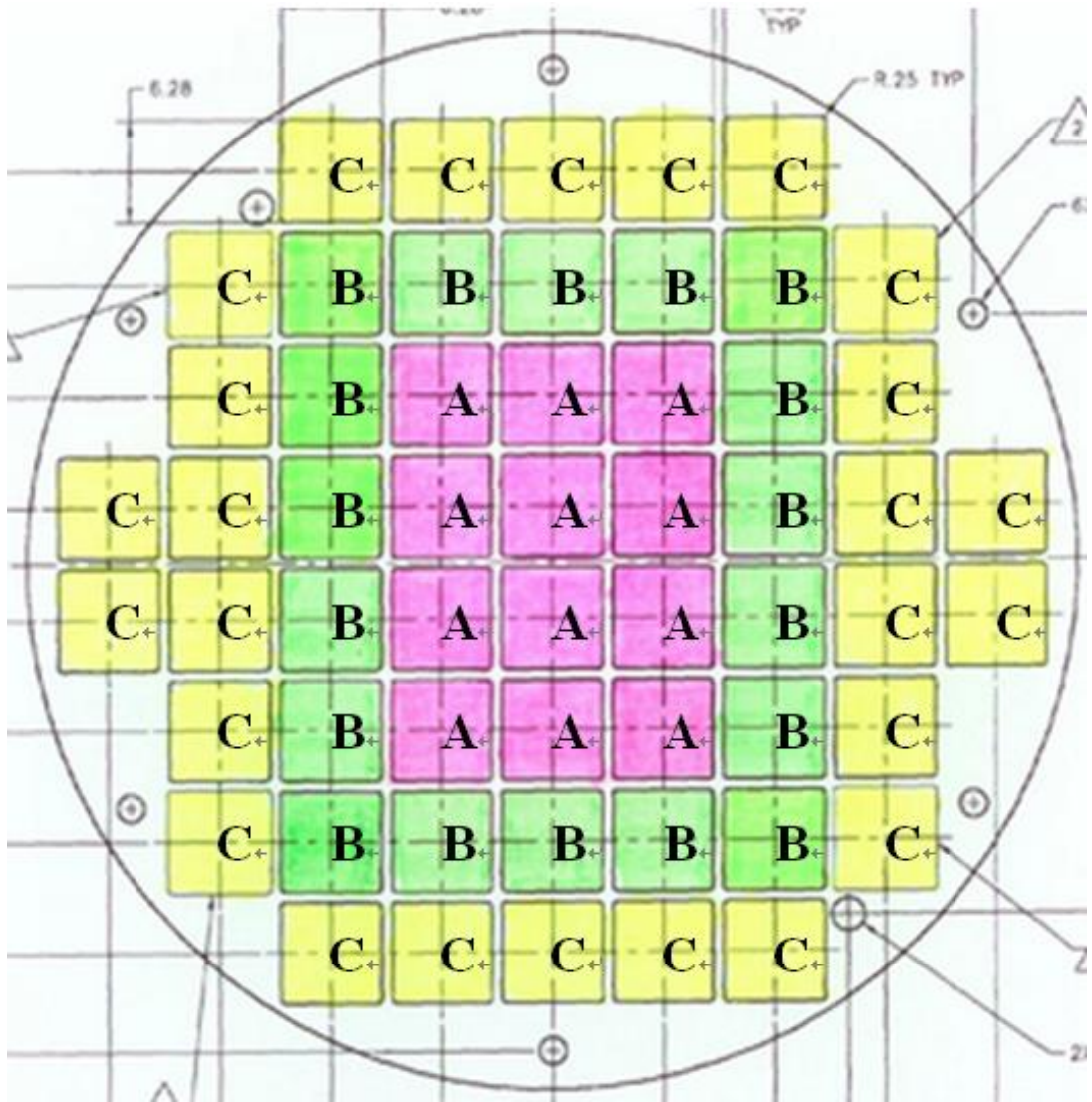


圖 3 核一乾貯系統功率配置圖(a)164W，(b)139W 及(c)99W



表 1 核一乾貯系統重要尺寸列表

系統組件	元件	特徵尺寸	數值(公尺)
密封鋼筒		外直徑	1.7033
		總長	4.835
		厚度	0.016
燃料提籃	承載圓盤	厚度	0.01587
	導熱圓盤	厚度	0.0127
	結構上蓋	厚度	0.076
	屏蔽上蓋	厚度	0.178
	底部焊件	高度	0.127
混凝土護箱	內襯	厚度	0.064
		外徑	2.019
	混凝土護箱	高度	5.70
		外徑	3.454
		厚度	0.719
	外加屏蔽層	厚度	0.35

### 3.2 材料性質

核一系統各元件材料之熱傳特性經蒐集後整理為流體與固體兩類，並分別描述如下。

#### 3.2.1 流體熱傳性質

本系統使用到的流體僅有長期貯存所需之氦氣以及傳送與貯存過程中用以冷卻之空氣。而所蒐集到之材料性質如下表[1]所示：

表 2 氦氣熱傳性質

熱 傳 特 性	溫度(K)					
	300	400	500	600	700	800
Density (Kg/m <sup>3</sup> )	0.1625	0.1219	0.09754	0.0834	0.06969	0.0611
Specific Heat (J/Kg-K)	5193					
Viscosity(N.s/ m <sup>2</sup> )	1.99e-5	2.43e-5	2.83e-5	3.20e-5	3.50e-5	3.82e-5
Conductivity(W/m-K)	0.152	0.187	0.220	0.252	0.278	0.304
Thermal Expansion Coefficient(1/K)	3.33e-3					

表 3 空氣熱傳性質

熱 傳 特 性	溫度(K)					
	300	400	500	600	700	800
Density (Kg/m <sup>3</sup> )	1.1614	0.8711	0.6964	0.5804	0.4975	0.4354
Specific Heat (J/Kg-K)	1007	1014	1030	1051	1075	1099
Viscosity(N.s/ m <sup>2</sup> )	1.846e-5	2.301e-5	2.701e-5	3.058e-5	3.388e-5	3.698e-5
Conductivity(W/m-K)	0.0263	0.0338	0.0407	0.0469	0.0524	0.0573
Thermal Expansion Coefficient(1/K)	3.33e-3					

#### 3.2.2 固體熱傳性質

本系統使用到的固體包括有金屬類的碳鋼、不銹鋼、鉛、含硼鋁板、鋳合金等以及非金屬類的中子吸收材、混凝土、鈾燃料丸等。所蒐集到之材料性質如下表所示：

表 4 中子屏蔽(NS-4)熱傳性質

熱傳特性	NS-4-FR
Conductivity (W/m-K)	0.65
Density (Kg/m <sup>3</sup> )	1630.4
Specific Heat (J/Kg-K)	1335.6

表 5 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
DENSITY(Kg/m <sup>3</sup> )	8016.4	7994.2	7949.9	7908.4	7858.6
Specific Heat (J/Kg-K)	483.98	503.24	533.38	550.13	567.30
Conductivity(W/m-K)	15.05	16.09	18.00	19.21	20.76
Emissivity	0.36				

表 6 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	546.72	630.05	685.60
DENSITY(Kg/m <sup>3</sup> )	7861.36					
Specific Heat (J/Kg-K)	473.10					
Conductivity(W/m-K)	41.36	41.59	41.88	41.01	38.77	37.54
Emissivity	0.8					

表 7 鉛屏蔽熱傳特性

熱傳特性	溫度(K)			
	371.45	477.55	578.15	605.35
DENSITY(Kg/m <sup>3</sup> )	11380			
Specific Heat (J/Kg-K)	125.60			
Conductivity(W/m-K)	33.87	31.69	25.12	20.93
Emissivity	0.28			

表 8 鋁合金(6061-T651)熱傳特性

熱 傳 特 性	溫度(K)					
	352.27	407.83	463.38	518.94	574.49	657.83
DENSITY(Kg/m <sup>3</sup> )	7861.36					
Specific Heat (J/Kg-K)	962.94					
Conductivity(W/m-K)	171.30	174.00	176.28	176.28	176.28	176.28
Emissivity	0.2					

表 9 鋁合金熱傳特性

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

表 10 燃料丸(UO<sub>2</sub>)熱傳特性

熱 傳 特 性	溫度(K)			
	296.72	383.94	508.94	633.94
DENSITY(Kg/m <sup>3</sup> )	1578	1716	1855	1965
Specific Heat (J/Kg-K)	1658			
Conductivity(W/m-K)	7.89	7.20	5.75	4.90
Emissivity	0.85			

表 11 混凝土熱傳特性

熱 傳 特 性	溫度(K)		
	296.72	352.27	407.83
DENSITY(Kg/m <sup>3</sup> )	2243		
Specific Heat (J/Kg-K)	837.4		
Conductivity(W/m-K)	1.89	1.85	1.79
Emissivity	0.9		
Absorptivity	0.6		

### 3.2.3 燃料束流阻係數

不同於以往乾貯系統的分析中，往往採用均質化固體來簡化燃料棒的特性，本研究採用多孔性材質(POROUS MEDIA)模式以發展合為合乎實際熱流特性的燃料束模擬技術。目前常見的多孔性材質模式可以概分為平衡型與非平衡型模式，其中非平衡型模式係考慮本身固體與流體間因為熱通率而造成的額外熱阻，但考量合乎乾貯作業之燃料丸內外溫度差由解析解：

$$T_c - T = (q'''r^2/4k)$$

進行計算後僅約 1°C，故可知對於燃料束乾貯作業時的熱流分析，僅需採用平衡型多孔性介質模式即可滿足分析需求。

基於分析嚴謹性之要求，本研究於執行案例計算與討論前，先行針對本研究所採用之多孔性介質模式進行檢驗。表 12 為 AREVA 公司所提供之 ATRIUM-10 燃料元件之重要幾何尺寸；而表 13 則是 ATRIUM-10 之際實際流阻係數。

多孔性介質模式在動量方程式中是以一個額外之源( $\vec{F}$ )項來加以描述，：

$$\vec{F} = -\left(\frac{\mu}{\alpha}\vec{V} + C_2\frac{\rho\vec{V}^2}{2}\right) \quad (18)$$

上式中  $\frac{\mu}{\alpha}\vec{V}$  與  $C_2\frac{\rho\vec{V}^2}{2}$  分別代表黏滯壓降項以及慣性壓降項，

$C_2=K/L$ =單位長度之形狀阻力係數。

$\frac{1}{\alpha}$  為單位長度之黏滯阻力係數；

$\mu$  為流體黏滯係數；

$\vec{V}$  為流體速度；

$\rho$  為流體密度；

如上式所示，FLEUNT 於動量方程式中的外力源項，主要可以表示為單位長度下的黏滯阻力以及慣性阻力兩項，考量單位長度之原因係因 CFD 模擬時往往

需考慮模型之實際長度，而非如系統程式中，係將流道長度與幾何之體積獨立為不同變數，故以往在系統程式中常用的阻力係數，需額外與建模過程中給定之多孔介質長度進行處理，以求得單位長度下的流阻係數；其式分別以速度之一次及二次項方程式加以描述：

慣性阻力(Inertia Resistance)：

$$\Delta p / L = C_2 \frac{\rho \vec{V}^2}{2} ; \quad (19)$$

黏滯阻力(Viscous Resistance)：

$$\Delta p / L = \frac{\mu}{\alpha} \vec{V} . \quad (20)$$

由上式可以得知，FLUENT中用以估算慣性阻力之係數 $C_2$ 等於 $K/L$ 值。故FLEUNT中之慣性阻力項可以將燃料廠家所提供之AUTIUM-10直接處理資料；而在黏滯阻力項之處理部分，則可藉由以下計算而得：

$$f \frac{L}{D} \frac{\rho \vec{V}^2}{2} = \frac{\mu}{\alpha} \vec{V} \times L \quad (21)$$

$$\Rightarrow \frac{1}{\alpha} = \frac{f}{2 \times D^2} \times \frac{\rho \vec{V} D}{\mu}$$

$$\Rightarrow \frac{1}{\alpha} = \frac{f}{2 \times D^2} \times \text{Re} \quad (22)$$

若流場處於紊流時， $f = 0.203 \times \text{Re}^{-0.200}$ ；則上式可以寫為：

$$\begin{aligned} \frac{1}{\alpha} &= \frac{0.203}{\text{Re}^{0.200}} \frac{1}{2 \times D^2} \times \text{Re} \\ &= 0.1015 / D^2 \times \text{Re}^{0.8} . \end{aligned} \quad (23)$$

若對流流場為層流時，此時 $f = \frac{64}{\text{Re}}$ ；故 $\frac{1}{\alpha}$ 可以被寫為：

$$= \frac{32}{D^2} . \quad (24)$$

經由以上的處理，即可將AUTIUM-10之燃料特性加以處理為FLUENT可接受之參數，而相關程式碼亦詳錄於附錄1&2中。

表 12 ATRIUM-10 燃料組件重要幾何尺寸：

有效長度	3.796 m
流面積	9454.8 mm <sup>2</sup>
溼周長(wetted perimeter)	3527.8 mm
水力直徑(Hydraulic Diameter)	10.720 mm

表 13 ATRIUM-10 燃料各項局部損失係數及摩擦因子

Location	Loss Coefficient	Friction factor
Bare rod	-	$0.203 \times Re^{-0.200}$
Central Orifice (ID: 2.430 in)	$21.47 + 168.1 \times Re^{-0.546}$	-
Peripheral Orifice (ID: 1.488 in)	$156.9 + 168.1 \times Re^{-0.546}$	-
Bottom four Spacer	$0.620 + 108.6 \times Re^{-0.58}$	-
Third Spacer	$2.196 \times Re^{-0.084}$	-
Top Two Spacer	$0.4646 + 235.7 \times Re^{-0.686}$	-
UTP	$-9.68 + 9.526 \times Re^{-0.0046}$	-

### 3.3 燃料衰變熱設定

考量本研究之目的，係針對裝載有設計熱負載台電允諾負載之核一乾貯系統，在經過再封裝作業後設施內的熱流特性進行探討，故無需像以往的設計壽命期間熱流評估般，考量乾貯系統內衰變熱隨時間變化之現象，故逕行以固定之數值進行分析即可。因此本研究所選定之 14kW 與 7kW 熱負載並在平均分佈之配置考量下，單束燃料之熱負載分別為 250W 與 125W。

### 3.4 燃料軸向功率分佈

雖然本研究需同時著手進行核一乾貯系統二維與三維模式之模擬時，可以透過均質化模式的處理方式讓材料性質可於兩模式中通用；但對於燃料熱功率而言，二維軸對稱的均質化作業仍會使燃料的周向分佈與等效功率係數因為簡化而略有不同。故對於本研究於後續分析工作前，需就燃料軸向功率之分佈進行相關處置。

為了順利完成此分析技術之建立，本研究採用 FLUENT 程式前內建之使用者自定函數(User Defined Function, UDF)[7]功能來進行技術發展，其主要機制係利用 c 語言程式，針對各燃料束有效發熱段區間之網格座標，輸入一個隨高度而變的軸向分佈係數(圖 5、圖 6)而達到所需之功率分佈模擬目的。

其中 GE-8X8 與 GE-9B 燃料之軸向功率因子(圖 5) $f(y)$ ，可以被分段定義為：

$$\begin{cases} F(y) = 8y; 0 < y \leq 0.15 \\ F(y) = 1.0; 0.15 < y \leq 0.55 \\ F(y) = 0.95833; 0.55 < y \leq 0.8 \\ F(y) = -5.6y + 0.95833; 0.8 < y \leq 1.0 \end{cases}$$

而 ATRIUM-10 之軸向功率因子(圖 6) $f(y)$ ，可以採多項式來加以表示：

$$F(y) = -61.266y^6 + 168.83y^5 - 187.298y^4 + 109.4y^3 - 38.146y^2 + 8.1456y + 0.3788$$

以往的分析經驗指出在選用 GE-8X8 時將因為其階梯狀燃料功率與幾何結構而具有較為保守之分析結果，故本研究於後續之分析工作中將採用與原安全分析報告中相同的燃料設定進行分析。此外，由於 FLUENT 的熱源係以體積產生率( $W/m^3$ )為單位，因此若只將上述的修正係數與平均分佈之衰變熱產生率帶入網格時，將導致整體熱源項將因為前後端功率減少而低估整體熱源，因此，為了修正此數值處理上的差異，最直接的方式即是利用軸向功率分佈的整體積分值來作為修正基準；例如，在三角型的軸向功率分佈下，其整體軸向功率係數僅為均勻



分佈的 1/2；故在經由軸向位置求得其分佈係數後，僅需再除上此整體軸向功率係數以修正此一係數所造成的模擬差異。本研究中所選定之燃料束-GE 8X8 之整體軸向修正係數，於二維與三維分析模式中分別為：

$$\begin{cases} 2D \text{ MODEL: } 0.95833 \\ 3D \text{ MODEL: } 1.0127 \end{cases}。$$

最後，經由上述作業程序而建立之軸向功率程式碼則如附件一與附件二所示。

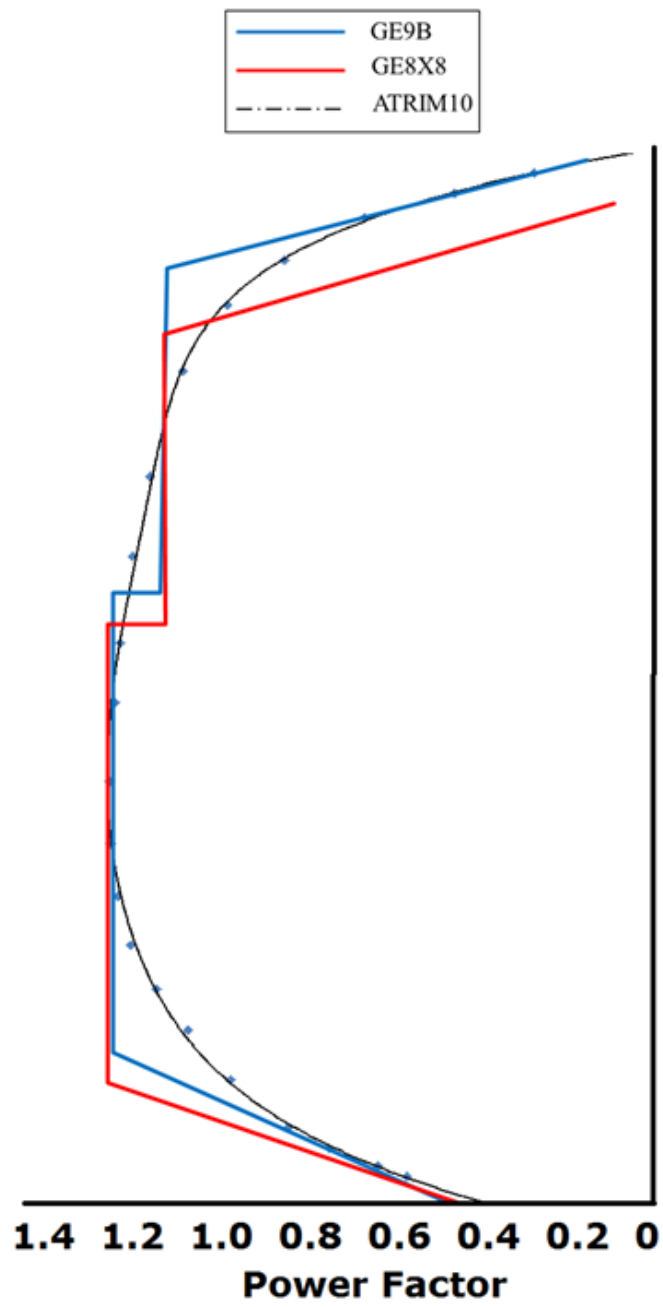


圖 4 核一各式可能貯存燃料之軸向功率分佈曲線

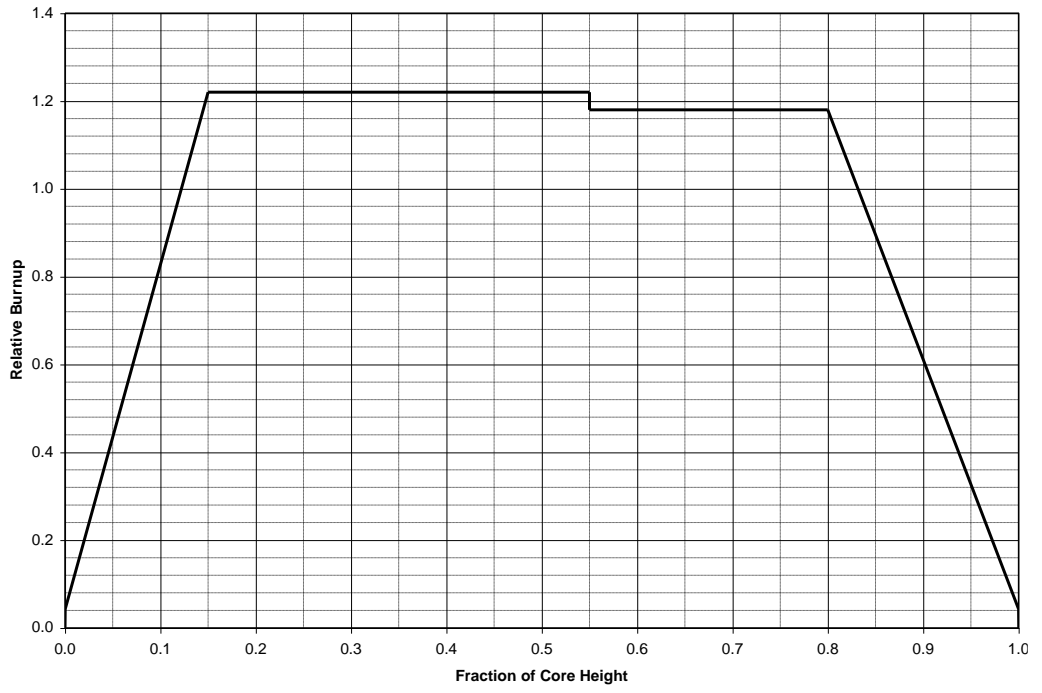


圖 5、GE-8X8-2、GE9B 燃料之軸向功率分佈

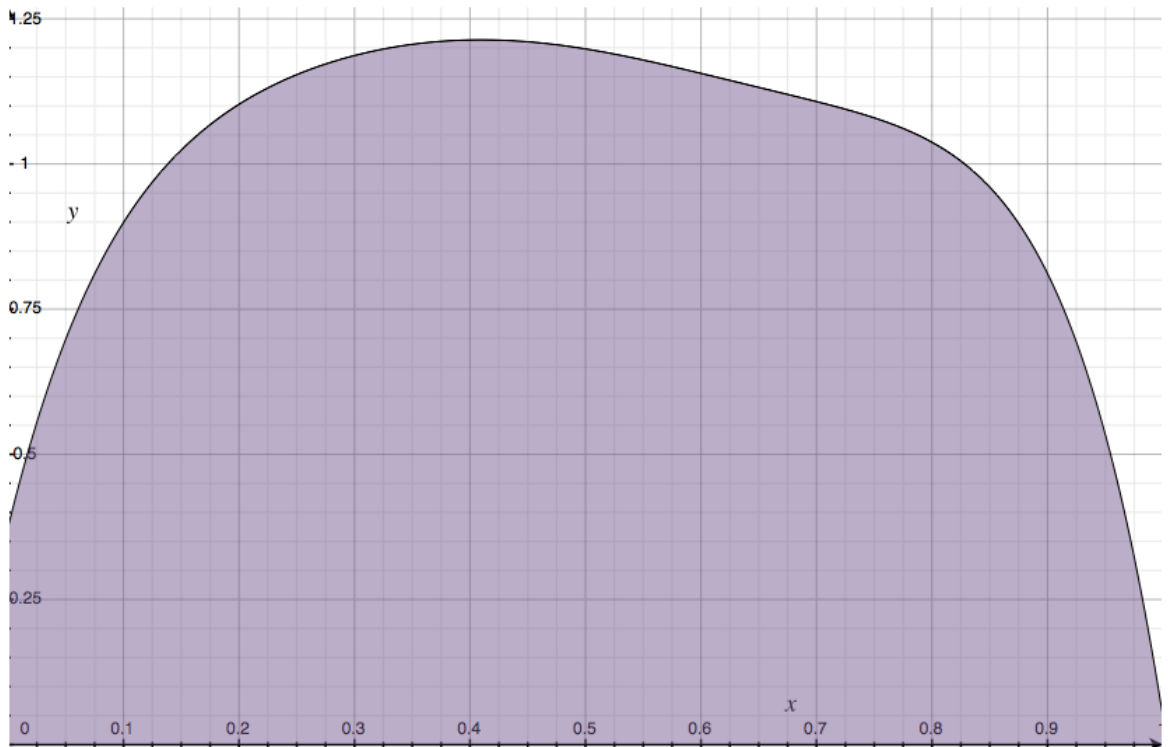


圖 6、ATRIUM-10 燃料軸向功率分佈

### 3.5 再包封作業之設計概念與作業流程

由於再包封作業係假設藉由覆包於原密封鋼筒的外加容器，強化系統密封邊界可靠度，故在不考慮額外造成其它作業程序變更與設備的前提下，勢必需妥善利用既有混凝土護箱及傳送護箱等元件。在對現有乾貯設施之空間餘裕進行評估後可發現，混凝土護箱內襯與 TSC 之間所具有的空气流道將具有較大的空間來進行再包封設計(如圖 7 所示)。然而，考量此一空間原本係設計供空氣對流之用，故在進行再包封處置後，仍需保有一定之對流能力，以符合原始之設計理念。

經參考原有安全分析報告[1]之第三章與第五章後，本研究於善用現有傳送護箱及混凝土護箱等設備的前提下，暫時將整個再包封程序暫時規劃為：

1. 如圖 9 所示，移除 AOS 之上蓋與外圍護箱塊；
2. 依循核定將護箱移回燃料廠房一樓，再移除混凝土上蓋與屏蔽塞；
3. 將 TFR 與 VCC 結合，並拉開底部屏蔽門；
4. 以吊運機具將 TSC 拉昇至 TFR 內，並關閉底部屏蔽門；
5. 將 TFR 吊離 VCC，此時之容許作業時間可更進一步進行評估；
6. 將再包封容器置入 VCC 貯存空間內，並安置合適之定位設備；
7. 利用 TFR 將 TSC 移至再包封容器內；
8. 施以合適之密封作業，如螺絲鎖固或封焊，甚至是氣體回充作業等；
9. 依核定傳送程序將設施回送原場址，並裝回混凝土屏蔽塞、AOS 護箱塊與 AOS 上蓋等元件，完成再包封作業。

若是於系統裝載之初即額外增設再包封容器，則僅需依循正常作業程序，並於裝載密封鋼筒前先行置入再包封容器即可。在評估後發現此一作業將僅影響核一乾貯將密封鋼筒裝載至混凝土護箱後的熱流特性，故以下將針對此一作業於各式設計基準事故中，對乾貯系統熱傳機制與元件溫度所造成的影響，進行所需之分析技術發展與案例分析。

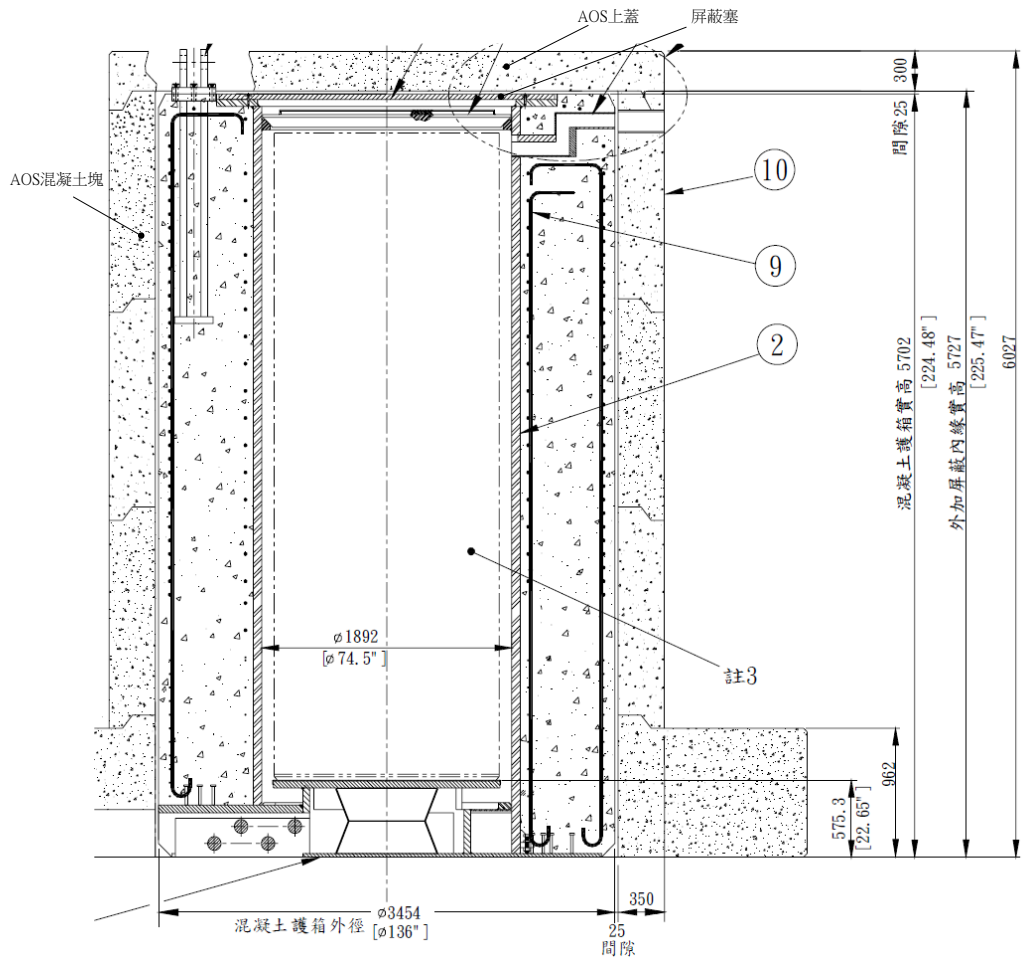


圖 7、核一乾貯系統之外加屏蔽層、護箱與密封鋼筒組合圖

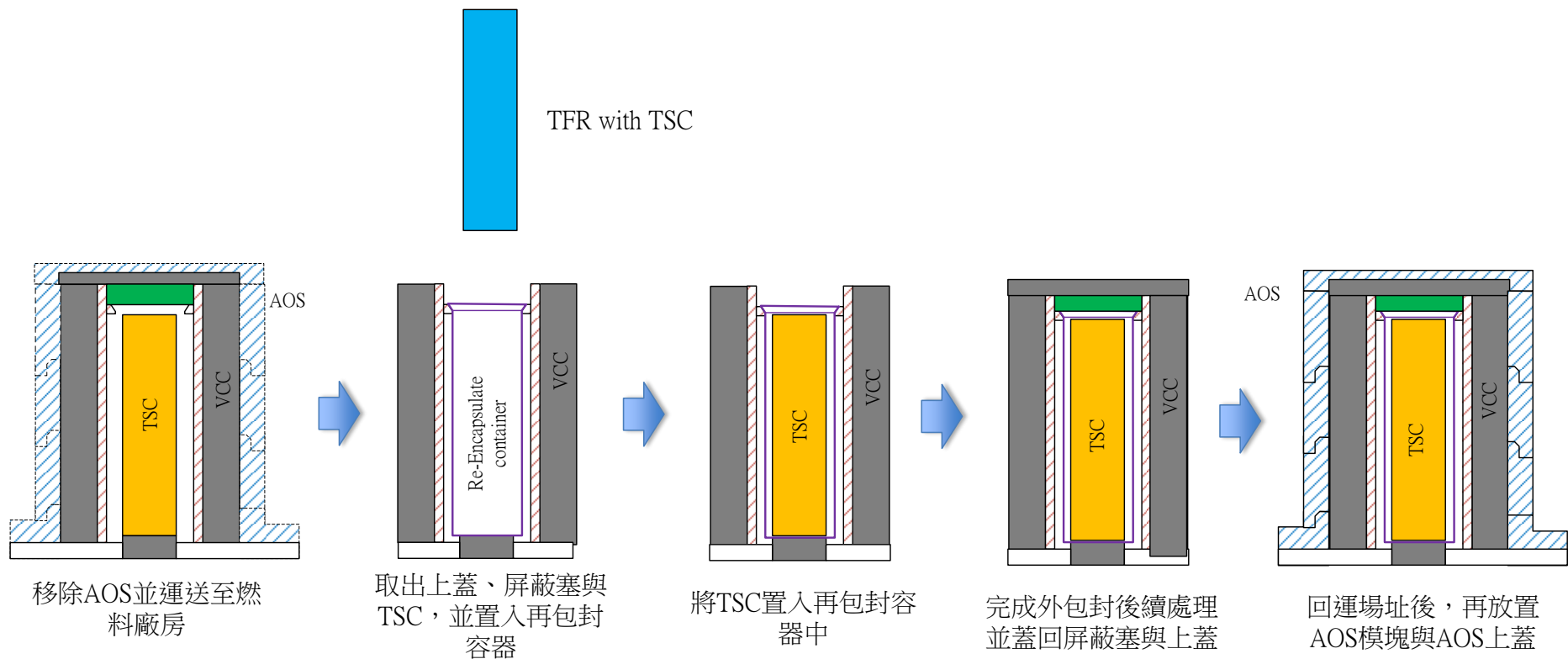


圖 8、核一乾貯系統施行外再包封作業之假設程序示意圖

## 四、再包封熱流分析之計算流體力學分析技術建立

基於以上所蒐集之系統幾何與作業資訊，本團隊利用 FLUENT 之前處理程式-GAMBIT 將所獲得之幾何形狀資訊進行幾何模型建立，並據以產生網格及區分邊界條件類型，以建立後續模擬分析所需的幾何模式。而為能同時獲得良好的計算校能與精度，本研究擬建立乙套二維分析技術，以改善單純以三維分析模式進行計算時所造成的耗時問題，而為能確保兩套分析模式所得結果之一致性，以下將逐一就各階段模式發展狀況與校驗結果進行說明。

### 4.1 三維模式發展與網格生成

如圖 9 所示，考量核一乾貯系統為 1/4 對稱之幾何設計且其原始設計中亦採用裝載上限之熱負載來加以涵蓋各式燃料之故，其內部對流的邊界條件亦可視為對稱。因此，本研究採用 1/4 對稱模式之設定來進行分析模型之發展，除了希望減少計算所需之資源外，亦藉由適度減少不必要的計算域範圍，而將 TSC 內外兩側之對流區間之網格予以加密，以符合本計畫流場分析需求。

為了能充份瞭解進氣口對於整體系統於貯存期間之對系統對流與熱傳之影響，本研究所建立之模型將不同於以往忽略 TSC 以下結構之幾何模型，而是採用詳實模擬之方式來進行幾何模型發展，故於模型中可清楚見到 AOS 底座方型之結構以及 TSC 下方承載座等結構物。

此外，基於此重新規劃之幾何模型，本研究得以在相同的網格配置下，快速的調整不同封裝狀況之幾何形狀，例如，圖 10a 為未考慮再封裝設計之幾何模型，而圖 10b 則是考慮了進行再包封後，流道面積略為減小之狀況。另外，有鑑於本計畫已於前章建立了一套符合研究需求且功能強大的燃料配置 UDF，故已無需再藉由人工逐一對此 1/4 模型中的各個燃料束進行流阻、熱負載與軸向功率進行設定。所有燃料束將以不分區方式統整為一個邊界條件，以利後續資料擷取

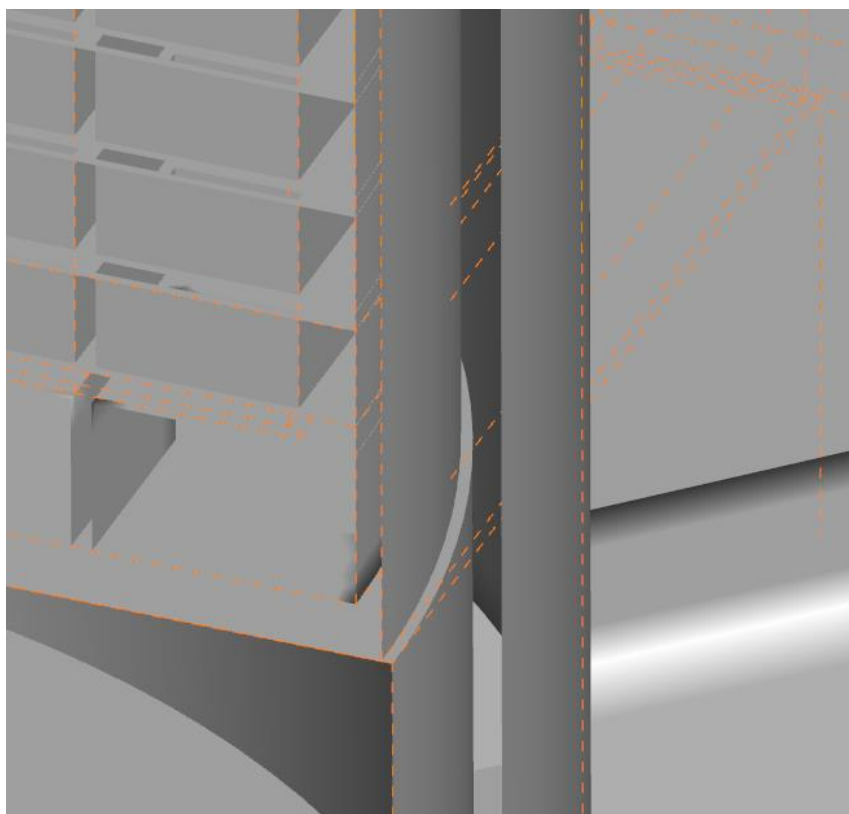
與模式設定等作業之進行。不過，由於燃料束仍然存在所謂的有效發熱段與無熱源兩部分，故在分析模式中仍將兩者分割為兩個獨立的邊界條件，以避免交界處之熱功率為網格分佈而造成無謂的計算誤差；最後所獲得之三維幾何模型與其網格分佈則如圖 12 所示，共計約 350 萬個網格。





圖 9、核一乾貯系統幾何示意圖

(a)



(b)

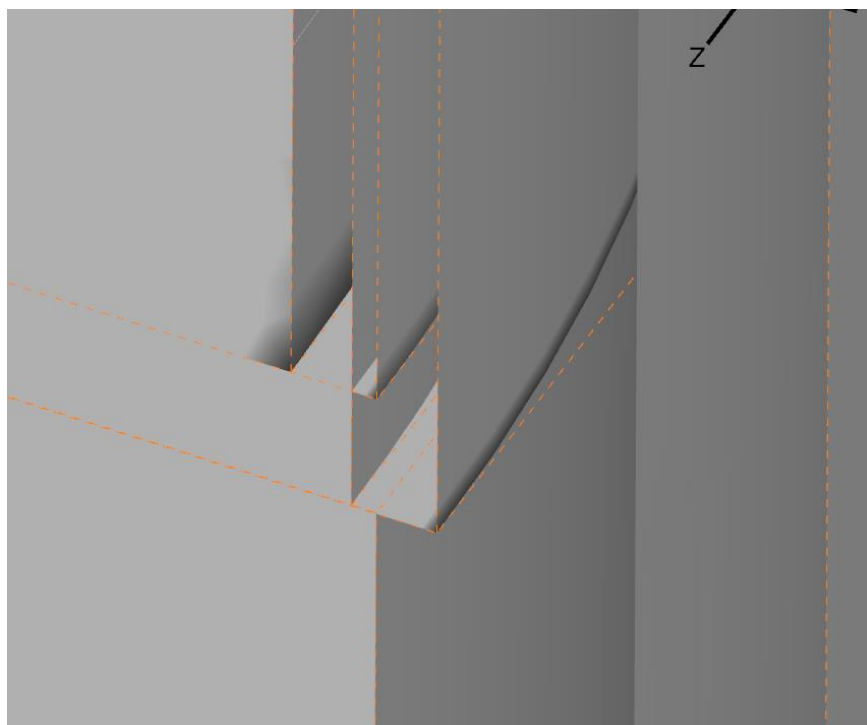


圖 10、核一乾貯系統幾何示意圖(a)無再包封之幾何(b)有再包封之幾何模型

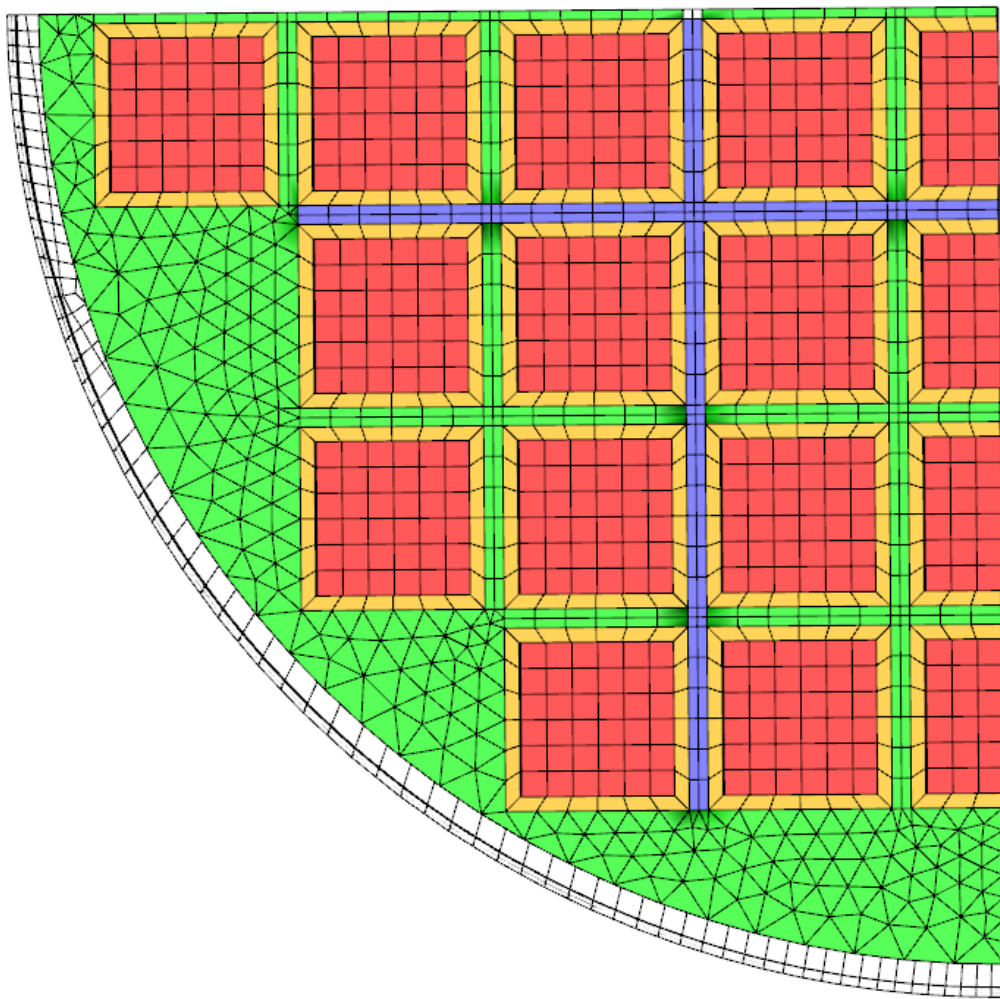


圖 11、核一乾貯提籃、中子屏蔽板與燃料束示意圖

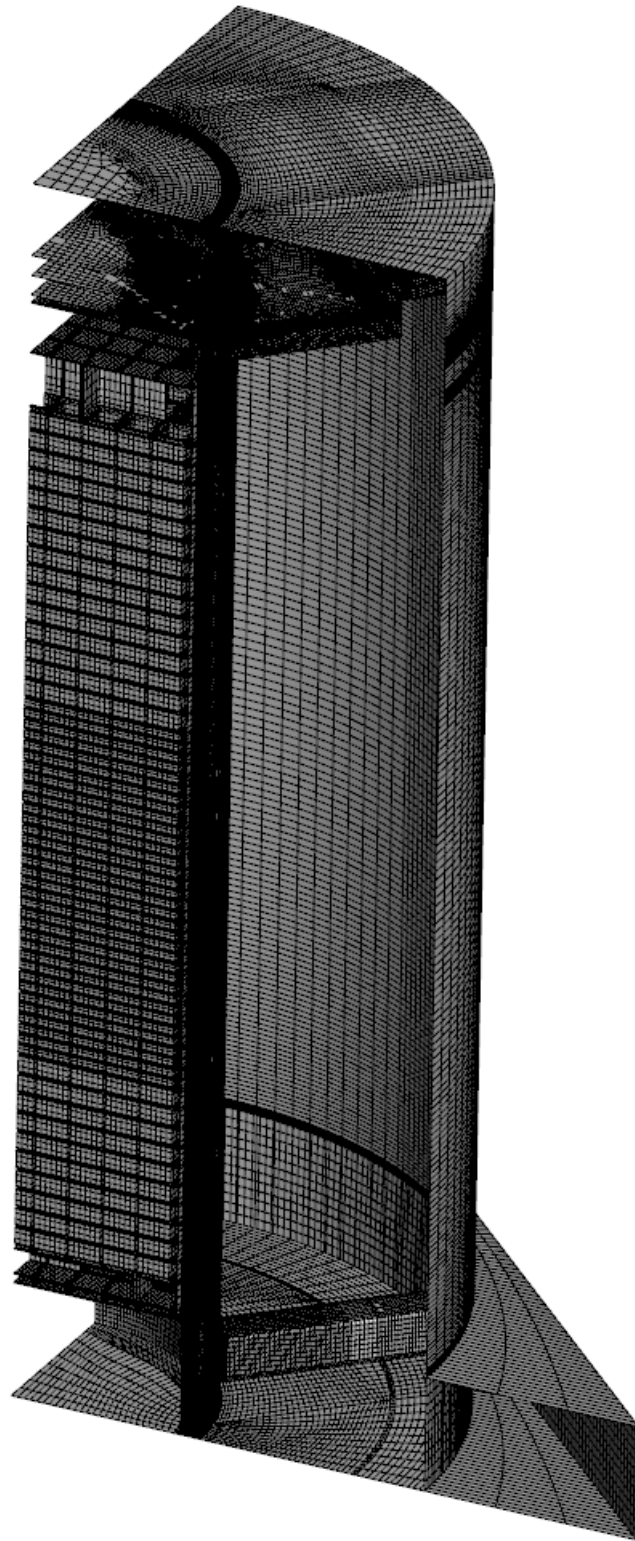


圖 12、核一乾貯系統整體網格分佈

## 4.2 二維分析模式建立

104 年原子能共同研究計畫「乾式貯存系統於日常貯存狀況下之熱流特性模擬」中，利用二維分析模式來加速整體分析時效的模擬技術；此一研究中指出，利用合宜的均質化處置程序以及符合熱傳基礎的簡化假設，將不致於影響分析所得之溫度趨勢與其量值，且因其假設基礎與三維模式無異，故在應用時亦無需重新估算材料性質。因此為能加快本研究數量龐大的靈敏度分析作業；本研究遂導入此技術，在進行三維模式發展之時同步進行二維分析模式之建立。

依據核一乾貯之幾何形狀進行二維簡化後之幾何形模型與網格分布分別如圖 13 與圖 14 所示；其中，原本位於提籃各處以用固定各燃料套筒及導熱承載圓盤，在簡化後仍以片狀分佈呈現於模型中，其所提供的徑向熱傳之能力能提高內外環燃料束之間的移熱能力。在各燃料區間中，則是採用 udf 程式模擬其軸向功率，並配合二維模型中的燃料束體積來產生對應的燃料衰變熱。而在其它如燃料束套筒、VCC 內襯以及 AOS 方型底座部分，則是透過簡易的水力直徑換算方式來確保整體結構體積與熱質量與三維模式一致。

基於第三章所述的再包封分析需求，本研究所建立之二維分析模式亦可依分析需求，分別針對不同的再封包設計進行描述，以作為後續熱流分析之依據。此外，也因為在此模型建立時已充份進行模組化之處置作業，因此利用此二維分析模式時，無論系統是否進行再包封作業，皆可採用同一網格分佈進行分析求解進而減少分析結果受網格影響之機會；例如圖 15 係為本研究中假設空長流道面積被再包封容器大幅佔據的模型，而圖 16 則流道面積受限狀況最小的情形。此二維模型之總網格數約為 6.7 萬，僅為三維模型之 1.9%，預期在以二維模式取代三維分析模式後，將可增加逾佰倍的求解速度。

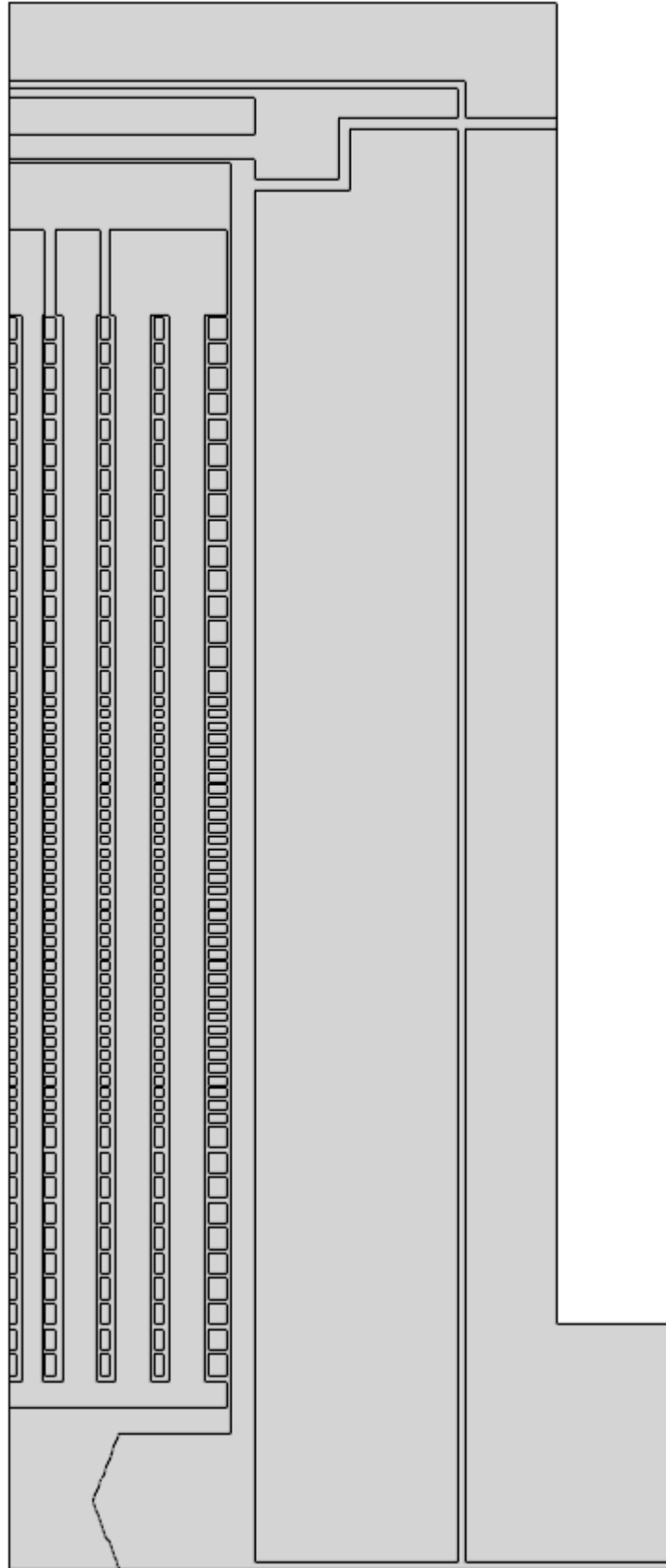


圖 13、核一乾貯系統二維模型示意圖

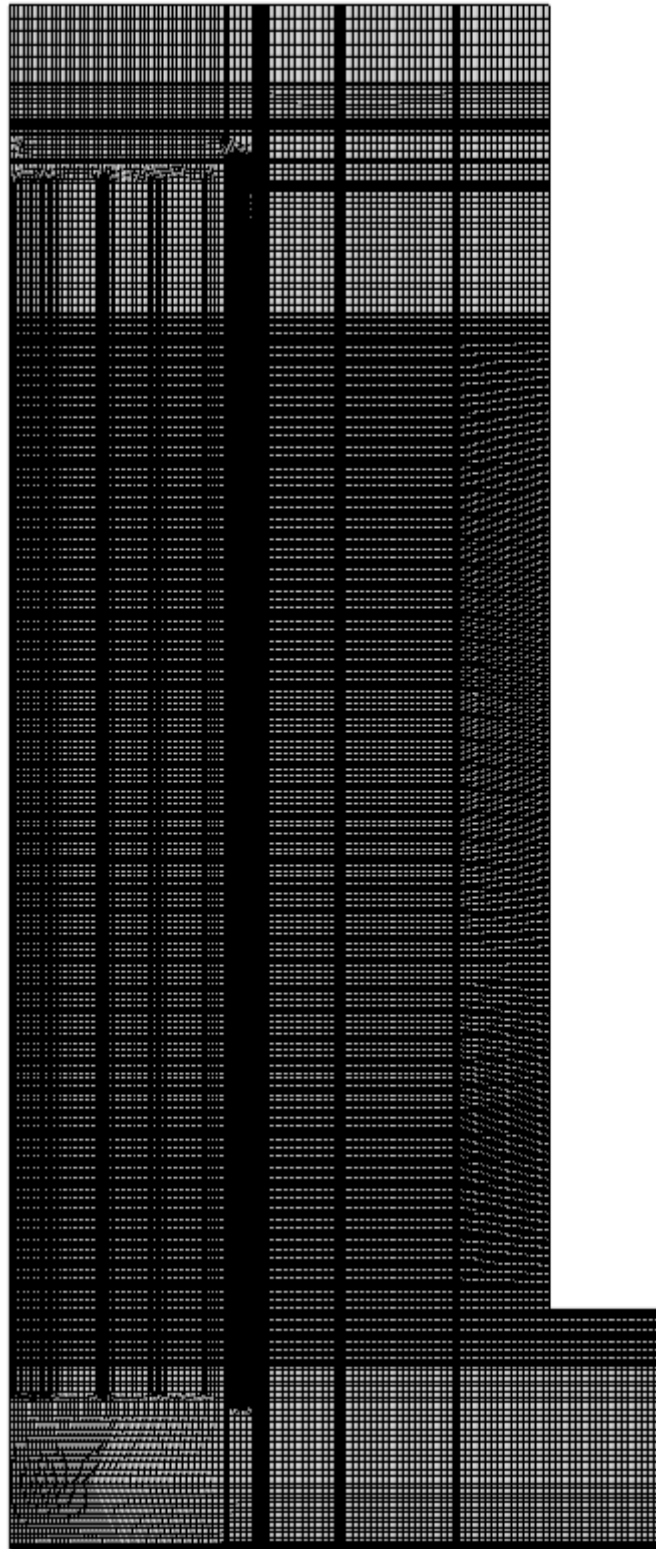


圖 14、核一乾貯系統二維模型網格示意圖

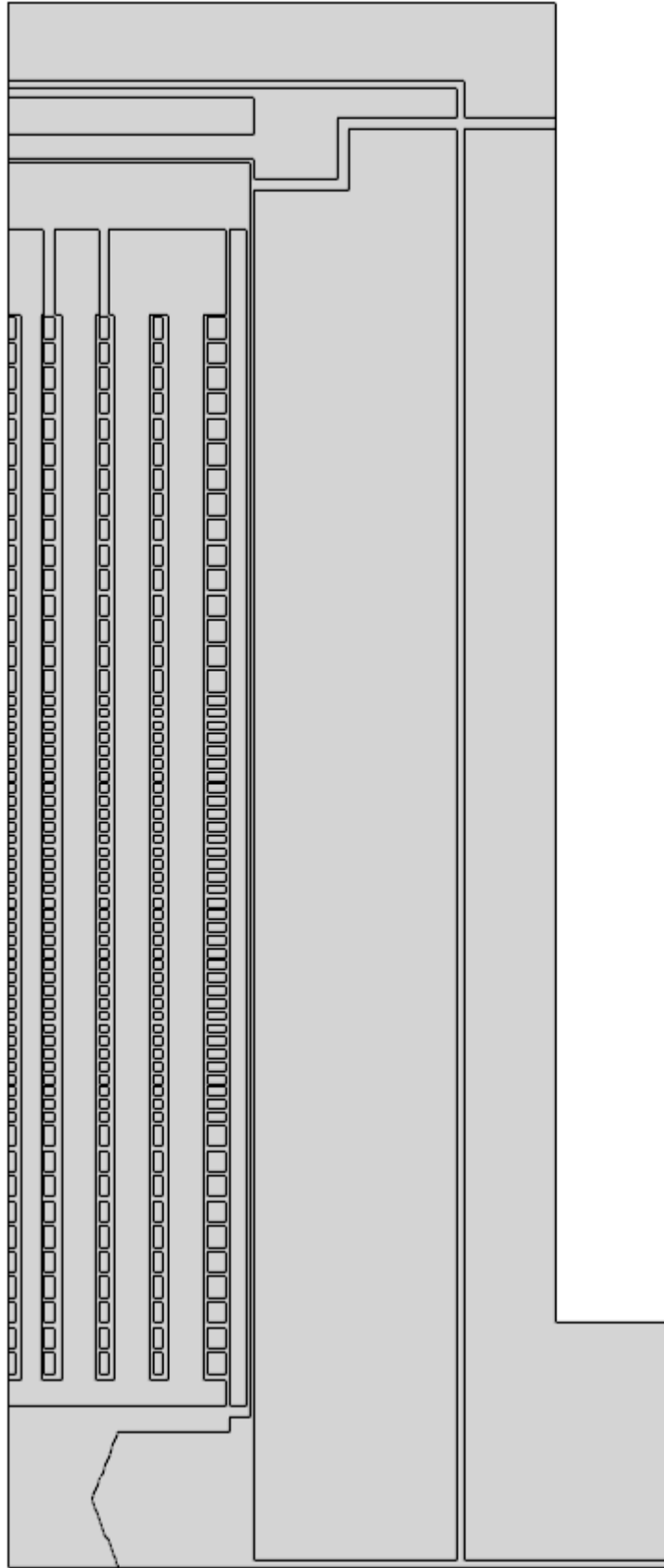


圖 15、空氣流道面積減少至 18%之乾貯系統二維模型



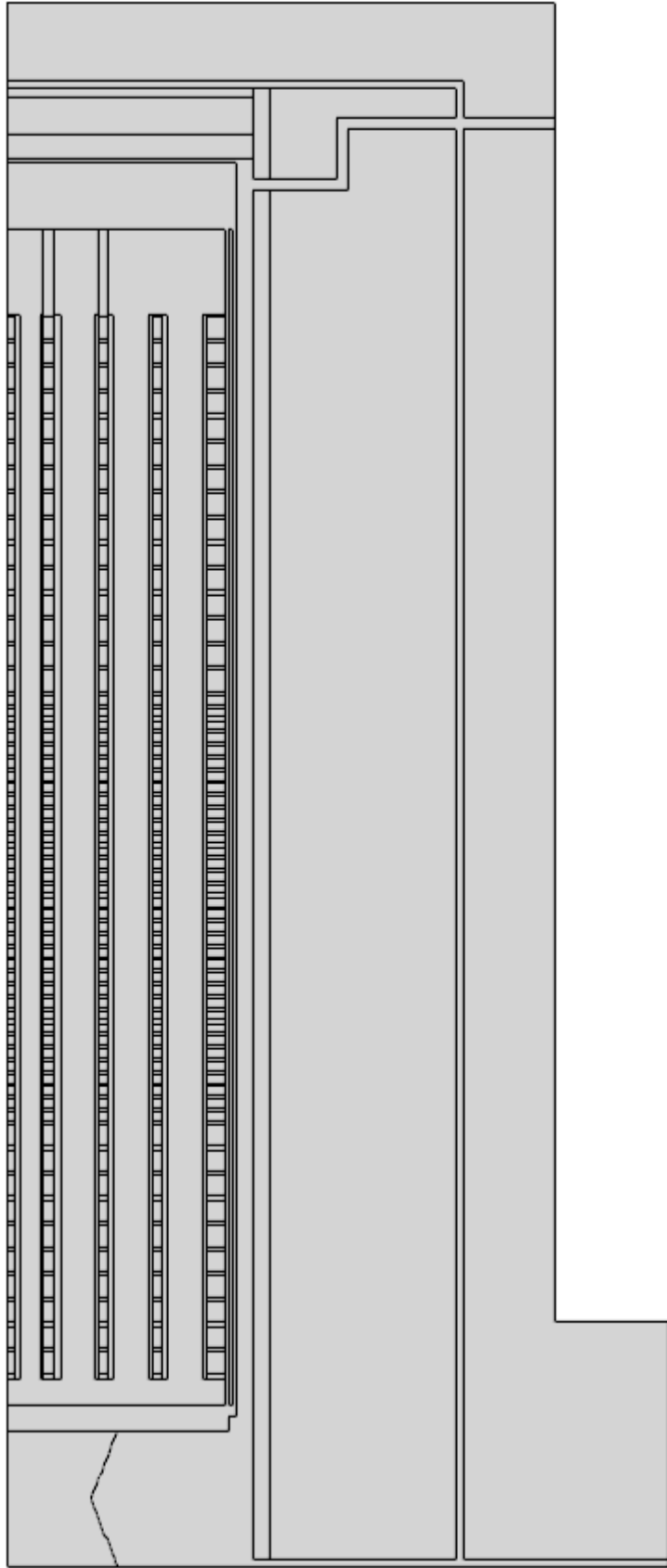


圖 16、空氣流道面積減少至 65%之乾貯系統二維模型

### 4.3 邊界條件設定

考量本計畫各項熱流分析皆是針對貯存狀況下之系統熱流狀況進行研析，僅需就可能出現之再包封作業之參數，如燃料衰變熱、包封材料以及回充氣體等進行靈敏度測試；故本研究依據台電現有 SAR 之分析設定[3]，將二維與三維分析模式之各邊界條件歸納如下：

- 在無特殊需求下，皆考慮輻射熱傳機制；
- 由於考慮燃料束內部對流效應，故以多孔性材質模擬，並以均質化處理進行材料性質設定；
- 假設空氣通道之對流機制已經建立，並假設正常貯存條件之環境溫度為 32°C，而在異常與事故案例中則依需求進行調整；
- 底部假設為絕熱，其它邊界考慮輻射與對流效應；
- 假設總熱負載為 14&7kW，並依照靈敏度分析調整各燃料束之發熱量，其負載配置與 UDF 之建立則如第三章所述；
- 日照輻射熱對混凝土護箱之影響以 10 CFR 71 規範為依據；
- 混凝土底座等與場址相接觸之表面假設為絕熱邊界。

除此之外，對於數值模式的部分，此計劃之各項邊界條件可臚列如下：

- 所有流固之共軛熱傳邊界，假設為速度為 0 之無滑動邊界條件；
- 所有進口之邊界設定為壓力進口邊界，其溫度係依案例環境溫度進行調整；
- 所出口邊界設定為壓力出口邊界，其溫度係依案例環境溫度進行調整，而在而在異常與事故案例中則依需求進行調整；
- 所有計算域之固體邊界(如 VCC 外表面)，係假設為混合邊界，並依實際材料狀況填入表面放射率、表面熱對流係數與環境溫度，以模擬對流、輻射熱傳等效應。

#### 4.4 靈敏度測試規劃

由於本分析目的係儘可能在不改動核一乾貯系統既有組件前提下，探討再封裝作業後對整體熱流特性影響；故可預期再包封作業之設計將會受到原本空氣流道與密封鋼筒等結構件尺寸之影響。而為能確保此一假設性分析仍能具有實際施作之可行性，本研究擬於各個正常、異常與意外事故分析工作前，先行針對各式可能之包封尺寸與材料之組合進行規劃，以作為參數靈敏度設定基準。

考量外包封材料必需具有合理之結構強度以滿足作業程序；如，空容器之吊運、製造所需的結構強度、焊接作業時的深度與材料厚度比之限制等為前提。本研究保守並合理地假設再包封容器之厚度近似密封鋼筒之材料厚度，以承載作業期間之可能受力狀況。經檢索原安全分析報告第三章之內容後可以確認，原始核一乾貯系統之空氣流道係由密封鋼筒(OD:1703.3mm)及混凝土護箱內襯(ID:1892mm)所組成之環狀通道，其流道寬度為 94.5mm 約略為密封鋼筒殼體(15.85mm)厚度的 6 倍。故本研究將現有之空氣流道尺寸分割為六等分，並依不同比例進行組合，以作為假設性再包封作業後之空氣流道寬度(Channel)、再包封筒殼厚度(Overpack thickness)以及與原有密封鋼筒之間隙(Gap)此三項參數之組合依據。

如表 14 所示，除以 G000C6 編號表示核一原始設計中無再包封容器及間隙之案例外，依照先前所述的流道尺對配置進行組合後，可以設計出 8 種不同再包封容器厚度、夾層間隙之組合；此一組合表在搭配兩種熱負載(7&14kW)、包封容器材料(碳鋼與不銹鋼)以及間隙氣體材料(氬氣與空氣)納入考量並組合後，計有：

8 組幾何 × 2 組熱負載 × 2 種包封材料 × 2 種回充氣體 × 2 種案例類型 = 384

個再包封案例；在考慮此案例組合龐大之故，後續將會逐一於靈敏度評估的過程，依實際結果進行適度篩選，以增進案例計算之效率。

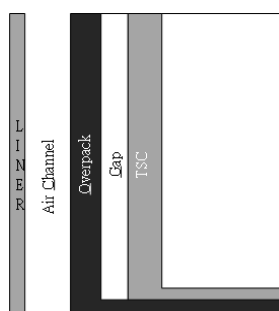
表 14、靈敏度測試參數組合表

參數組合	描述	包封容器厚度 (mm)	容器內側與 TSC 之間隙 寬度(mm)	流道面 積比(%)
G0O0C6	無包封之原設計	N/A	N/A	100
G1O1C4	保留最大空氣通道之再 包封設計	15.8	15.8	68
G1O2C3	測試增加包封厚度之影 響案例(I)	15.8	31.6	52.4
G1O3C2	測試增加包封厚度之影 響案例(II)	15.8	47.4	35.5
C1O4C1	測試增加包封厚度之影 響案例(III)	15.8	63.2	18
G2O1C3	測試增加間隙厚度之影 響案例(I)	31.6	15.8	52.4
G2O2C2	測試增加間隙厚度之影 響案例(II)	31.6	31.6	35.5
G3O1C2	測試增加間隙厚度之影 響案例(III)	47.4	15.8	35.5
G4O1C1	具最小流道，最大間隙 之保守案例	63.2	15.8	18

G：代表再包封容器與原 TSC 容器之間隙等級

O：代表再包封容器厚度等級

C：剩餘空氣流道寬度等級



#### 4.5 三維與二維模型之平行驗證

為確保本研究所建立之二維與三維分析模式能精確模擬核一乾貯系統在貯存期間的熱流特性，本研究於進行再封系統之熱流評估作業前，先行針對兩套乾貯系統計算所得之結果進行驗證，以確保分析結合之可靠性。

由圖 17 之整體截面溫度分佈可以發現，利用本研究所建立之二維與三維分析模式所完成的正常狀態案例計算結果具有極高的溫度分佈相似度。其中，燃料束之溫度值皆以中央燃料束具有最高之溫度，且其上下呈現近似對稱之溫度分佈。此外，在 VCC 與 AOS 等組件處則可清楚發現，位於空氣流道進口處與 AOS 之方型底座處，皆因為遠離熱源之故而具有較低的溫度；類似的情況亦可在 VCC 之出氣口附近發現。經此初步的定性比對可以發現，本研究於第三章所發展之技術並搭配第四章所建立的二維及三維模式，確能正確掌握核一乾貯系統之熱流特性，不致因為幾何形狀的簡化而出現不符合物理現象之情況。

在更進一步將兩個分析模式於不同熱負載之下進行模擬計算之結果進行匯整並進行量化比對後可以發現(如表 15 所示)；不論在 7kW 或是 14kW 甚至是 23kW 的熱負載下，本研究分析所得之燃料束溫度誤差約為 3%，而更外圍的 TSC 等元件之溫度差異值則僅有 1.3% 左右，此一結果即足以證實本研究所建立的二維分析模式足以符合後續分析所需。此外，分析結果亦顯示，採用二維分析模式之故，將使得原本位於混凝土護箱頂部的空氣出口，其流道與混凝土護箱的表面積在二維化的過程中被加略為放大(為了流道面積的一致性)，故使得二維模擬所得的混凝土護箱溫度皆比三維分析模型更加保守；此一保守度亦有助於本研究獲得更為保守之混凝土護箱溫度，以因應可能垂直流道被包封容器佔據而對混凝土之熱流特性造成影響。

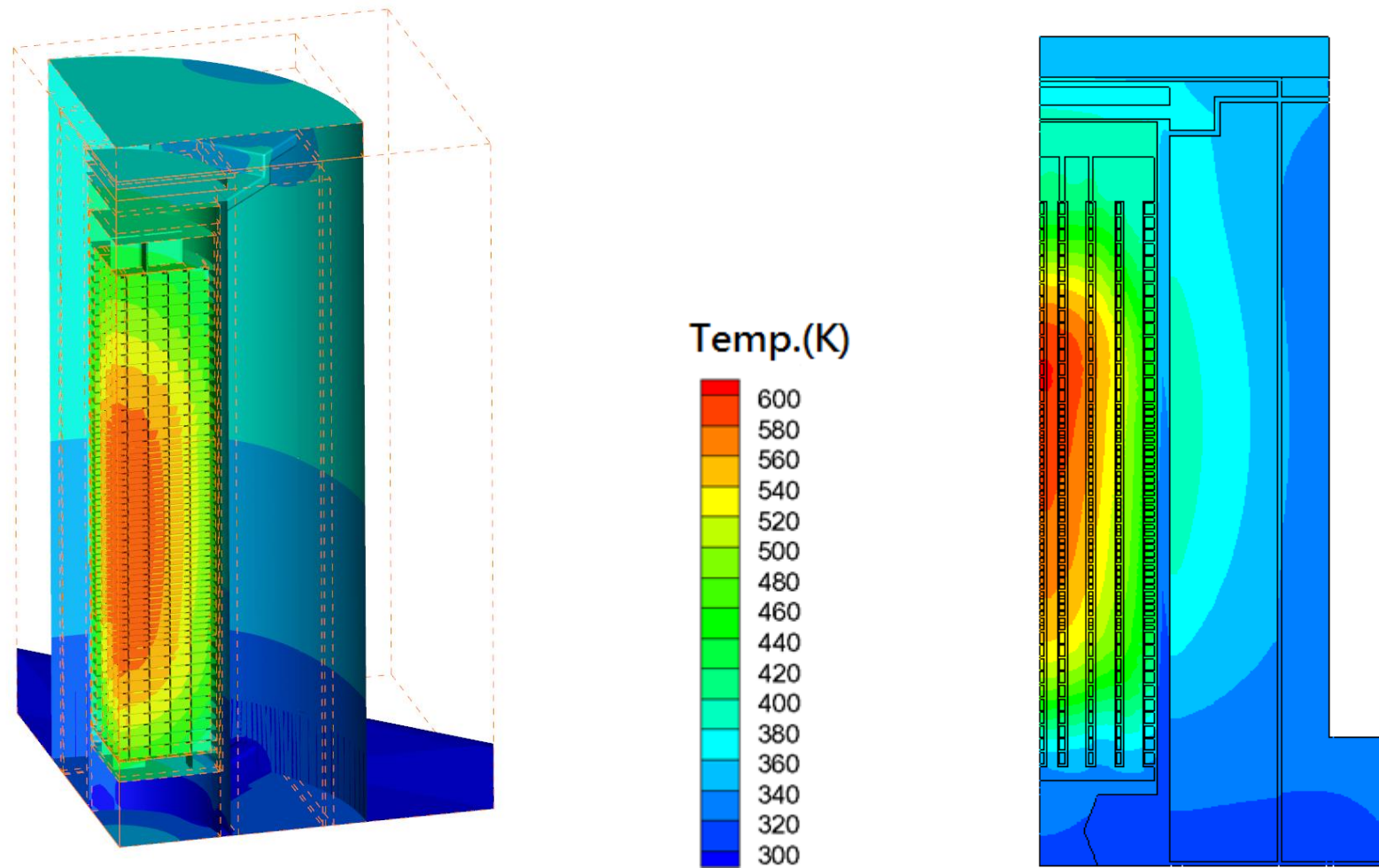


圖 17 核一乾貯系統熱之(a)三維分析模式；(b) 二維分析模式於正常狀況下計算所獲之溫度(K)結果

表 15、二維及三維分析模式於不同熱負載下的比對結果

Normal (ambient T=32°C)	T <sub>MAX</sub> (°C)					
	Fuel	Supporter Disk	Conduction Disk	TSC	VCC	AOS
7kW-2D	149.0	148.5	143.7	93.0	69.4	60.2
7kW-3D	153.6	148.0	144.3	94.2	64.5	57.8
14kW-2D	234.3	233.7	227.7	130.7	92.7	68.4
14kW-3D	242.8	234.2	226.7	131.7	73.4	62.5
法規限值	400.0	371.1	343.3	426.6	93.3	93.3

## 五、核一廠乾貯系統再包封後之系統熱流現象研析

在完成前述之分析技術發展與模式建立、平行驗證等工作後，本研究即可針對再包封後系統於各式正常、異常與意外事故進行案例計算與現象分析；以下將於各節針對上述各項工作所得成果進行說明與描述。

### 5.1 密封鋼筒再包封後對熱流特性之影響

為探討核一乾貯設施在進行假設性再包封作業而使其熱流機制因為幾何形狀而受到的影響，本節遂利用乾貯系統於正常狀況之案例先行探討系統所受之熱流影響，以作為後續靈敏度分析之探討依據。

圖 18 係為將乾貯系統護箱底座與進口區納入模擬後所得之分析結果；在與安全分析報告所載結果相互比對後可以發現，空氣流道進口至密封鋼筒底板之彎蜒流場對護箱將造成預熱效果，其影響可進一步歸納如下：

1. 在考慮混凝土護箱(VCC)與外加屏蔽層(AOS)之底座後，VCC 與外 AOS 之間於底座處所存在的共用流道(如圖 10-13 所示)，將使 AOS 與 VCC 之間的空氣夾層不再因為封閉而呈靜止狀態。此處所具有的對流效果將促使 VCC 與 AOS 的移熱能力增加；故於此夾層處，AOS 與 VCC 之溫度將具有較低之溫度；
2. 底部承載座具內凹的幾何形狀使得進口區具有較大的空間，並促使空氣於此處積存並產生迴流，預期將會使鹽霧在此處滯留較長時間，並使質較大的液珠更難藉由氣體的挾帶移動到 TSC 表面；
3. 雖然底部承載座之對流與以往不同，但此區域之空氣溫度並未被明顯加溫；與原有安全分析報告之結果相比可以證實，原先安全分析報告中將 TSC 底部之邊界條件假設為絕熱係為合理之保守設定；

當密封鋼筒外側因為作業需求包覆一層再包封容器時，預期將會對空氣流道



造成不同程度的影響(如圖 15 圖 16)，因此在進行後續的參數靈敏度之前將著手針對各種不同的包封設計所造成的流量及溫度分佈等特性進行探討。

如圖 19 所示，在系統外側再裝上一層再包封容器時，其所減少的流道面積並未對流量造成顯著影響；經量化比對後發現，若再包封作業使流道面積減少至原有(如表 16)的 68%時，僅會減少約 1.2%左右的空氣流量。甚至當採用更為厚實的再包封設計，而致使空氣流道面積減少至原來的 18%時，空氣流道仍將具有至少 73%的流量。而此一結果可以證實，採用設計合理的再包封之作業不致使系統出現如同全阻塞事故般，造成完全無對流現象之情事發生，而初步地證明再包封作業的可行性。

然而，透過進一步檢視圖 19 之溫度範圍卻可以發現，即使是在流量幾乎不受到影響的排列組合下，其最高溫度仍由原來的 410K 左右大幅上冊至 460K。這是因為整體再包封設計影響主要係來自於包封元件對於密封鋼筒以及其內部元件所造成的額外熱阻!此一推論可以透過進一步與流道面積受限更為嚴重案例進行比對而加以證實：

1. 由圖 20 中所呈現的空氣流道壓力分佈可以清楚的發現，在不同的包封設計下整體壓力分佈僅有局部改變，並未因為流面積改變的慣性阻力 (inertia resistance)而有大幅變化。這意味著對於空氣流道而言，在流動面積未大幅前少的狀況下，主要之對流流阻係來自於進出口的形阻以及對 TSC 與護箱內襯的摩擦阻力(friction resistance)所致；
2. 而由圖 21 所呈現的案例更可充份證實，在流面積由 68%大幅減少至原來的 18%時，兩者系統溫度之最大並無明顯差異；此一發現可以再次證實再包封對於密封鋼筒表面所造成的額外熱阻是為整體熱阻影響的主要 (major)關鍵，而流量減少所造成的影響僅為次要(minior)因子。

更進一步的比對空氣流道中沿軸線方向的溫度變化(圖 22)則可發現，不同的再包封狀況對空氣流道所造成的減少狀況，並不會明顯影響其溫度的變化趨勢。這意味著整體再包封的表面溫度係與原始密封鋼筒近似，僅因為空氣流道限縮而

使通道中的溫度徑向溫度分佈更為陡峭 (圖 23)。除此之外，若仔細比對各案時則可發現。空氣流道較寬時，位於底部承載座所造成的迴流效應將促使進口段出現較為明顯的流場變化與邊界層重新發展的狀況，進而使得空氣流道的溫度在高度約在 0.5m 處出現一個溫度峰值，並持續至 1.5m 處方才消失；反之，因為邊界層發展已趨於完整，故當高度大於 1.5m 時，不同再包封狀況下的軸向溫度趨勢並未出現明顯的不同。

如圖 24 所示，在將各個幾何形狀的分析結果進行無因次化後可明顯發現，在考量再包封容器之影響後，最大的熱阻係出現在於半徑 0.8m 至 0.9m 處空氣流道。其結果更顯示，當空氣流道較寬時，流道中央往往不致因為密封鋼筒與 AOS 內襯溫度邊層(圖 23)合併(merge)而能保有較低的 VCC 溫度(如 G1O1C4 案例)；但當空氣流道大幅縮減時，則將使得空氣流道中的傳導效應提高，並促使空氣流道的溫度呈趨於線性的變化(如 G1O4C1)，進而造成 AOS 溫度的上昇。

最後，綜合以上的熱流討論可以瞭解到若在核一乾貯系統施行再包封作業時，對於整體的熱流機制與移熱能力(如，流量)並不致有太大的影響；但整體系統的趨勢與元件溫度仍會因為流道寬度的改變及額外造成的熱阻，進一步造成系統元件的溫度變化。此外，預期不同的再包封材料與填充氣體亦會對上述關鍵熱阻區的量值造成影響，故本研究於後續將針對不同材料、幾何與負載之參數組合，逐一透過正常、異常與事故等設計基準事故來進行靈敏度分析，以得知各參數組合下的最適及最保守配置，並用以判定再包封設計對乾貯之熱流影響與可行性。

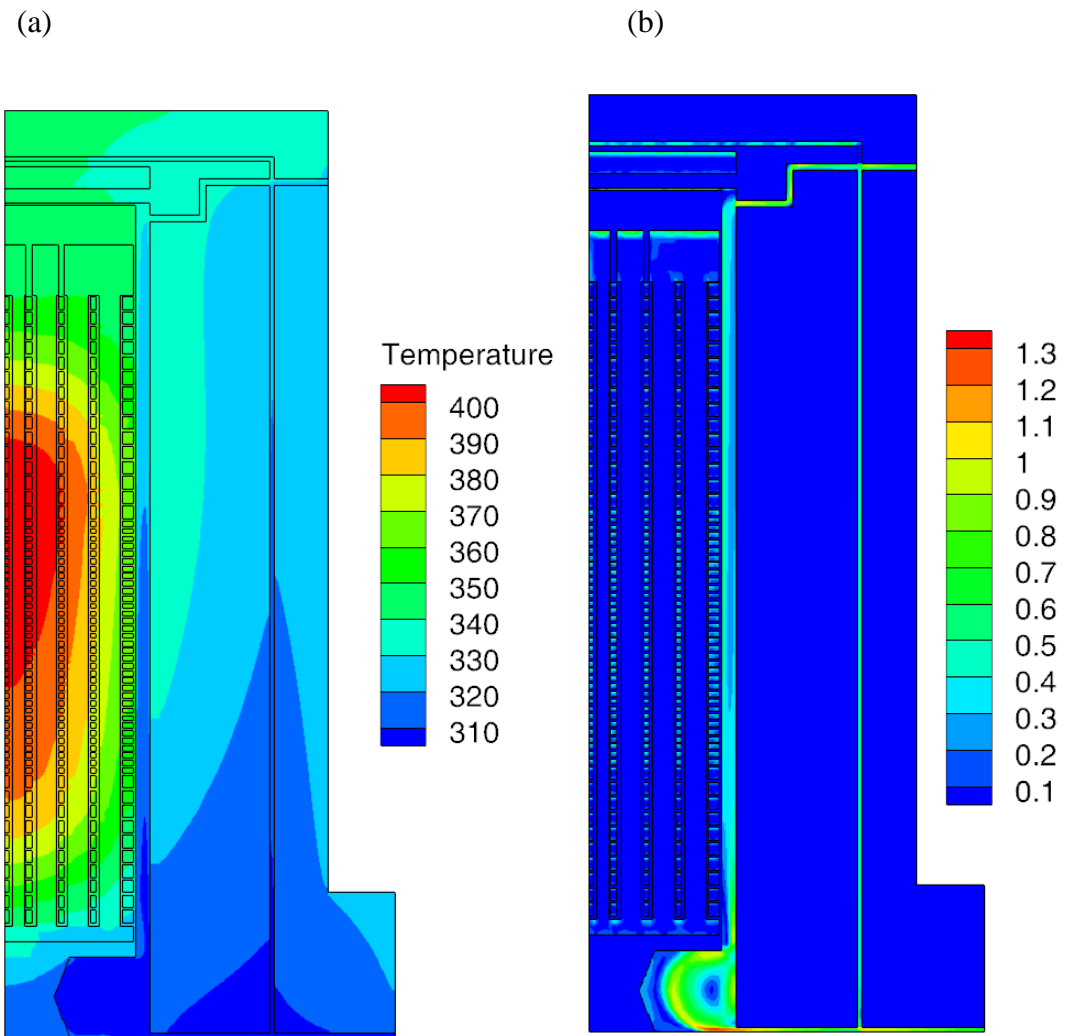


圖 18 核一乾貯系統熱之(a)溫度(K)分佈以及(b)流道內速度分佈(m/s)

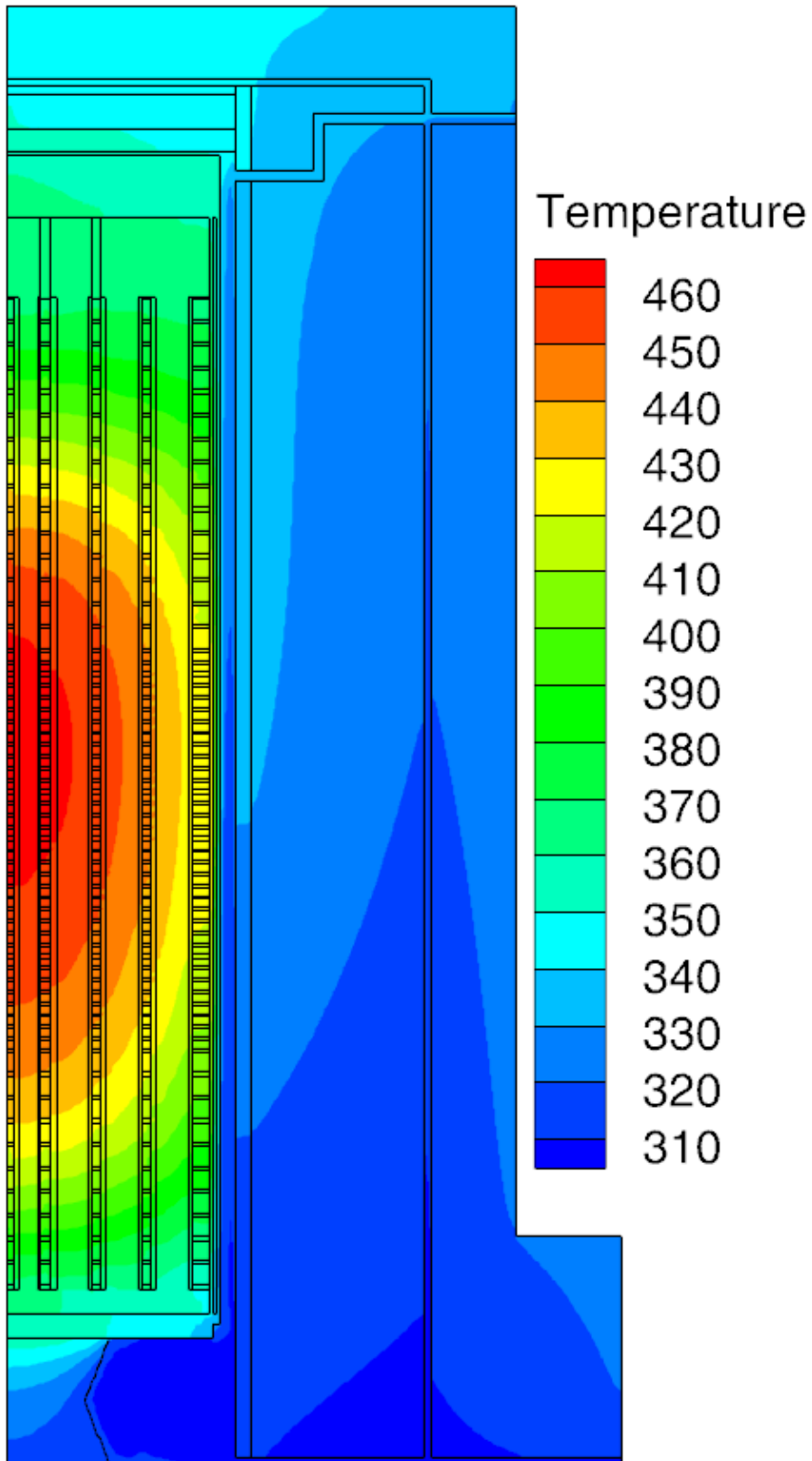


圖 19 施行再包封作業後之，流道面積減少至 68%時的系統溫度(K)分佈

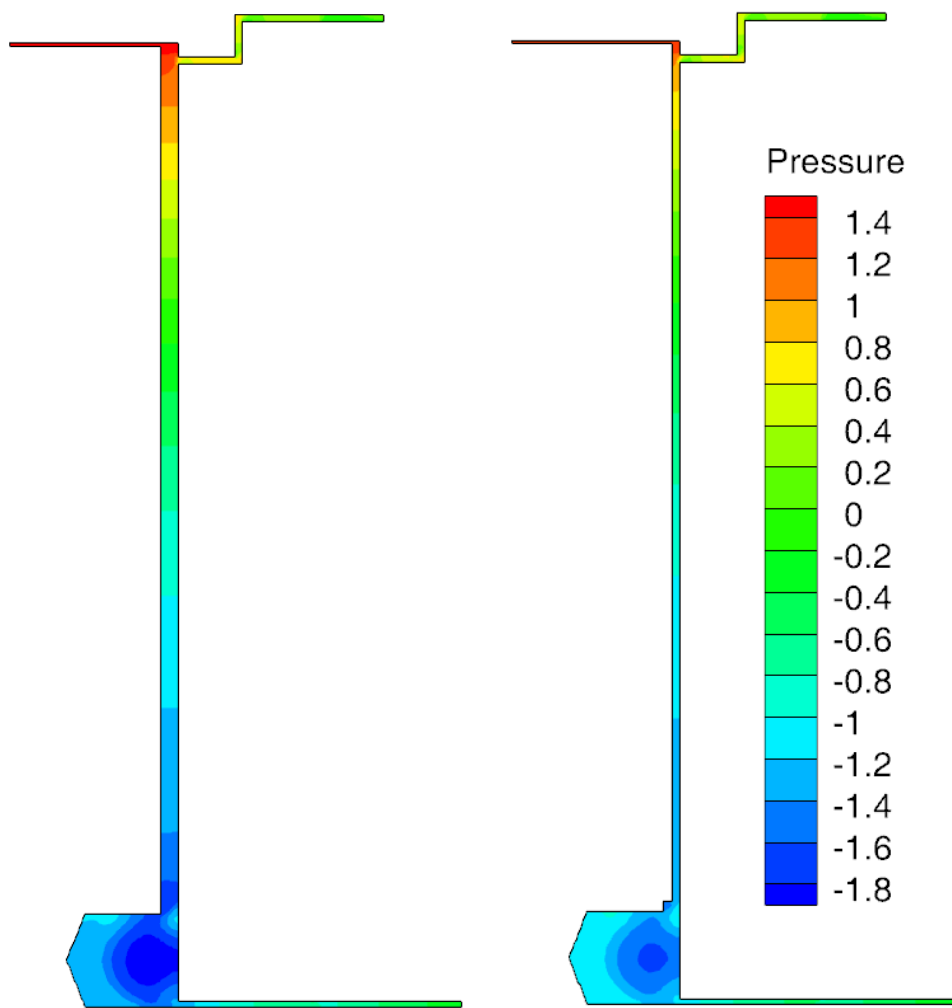


圖 20 不同流道面積減損後，空氣流道之壓力分佈(Pa)狀況

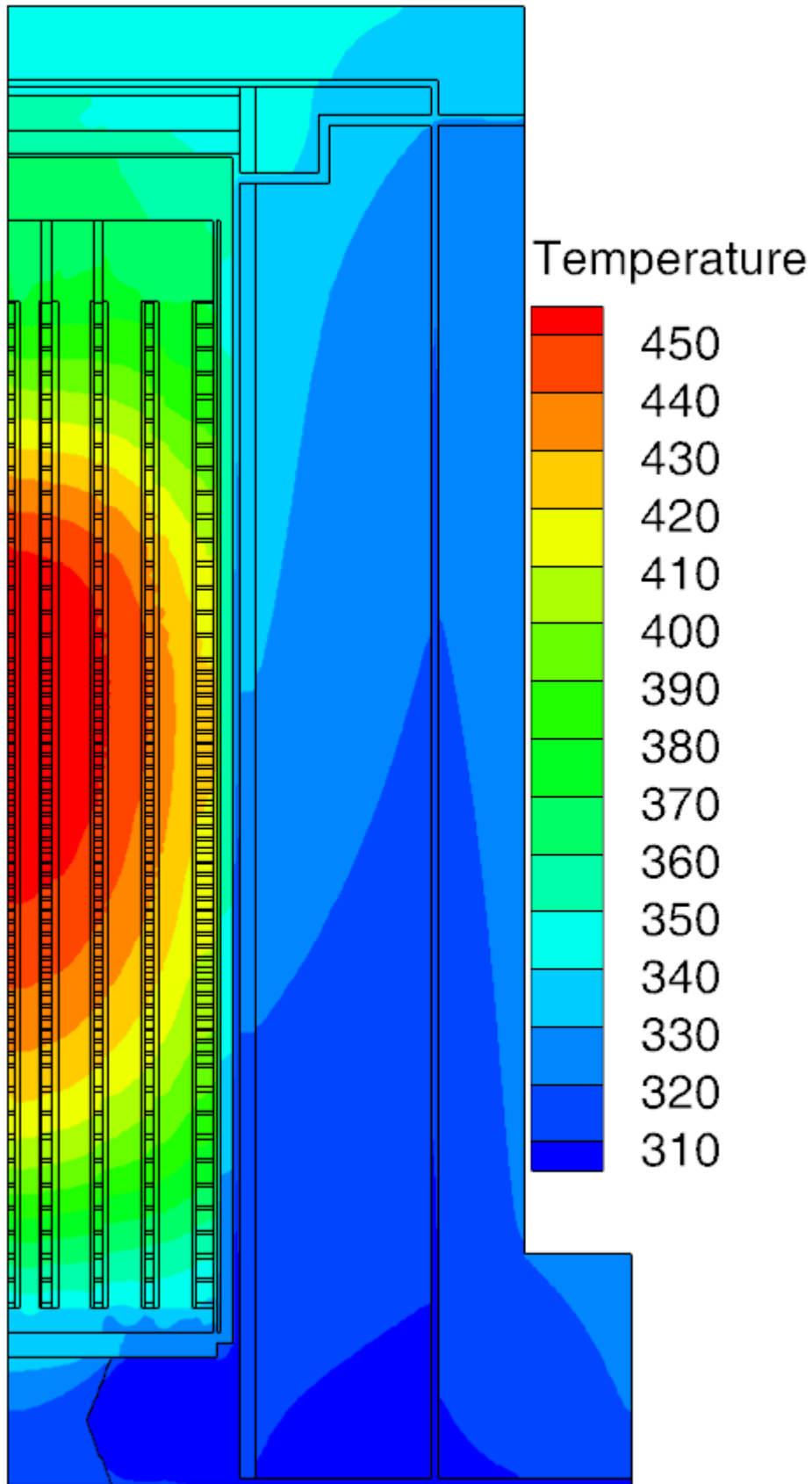


圖 21 施行再包封作業後之，流道面積減少至 18%時的系統溫度(K)分佈

表 16、不同再包封設計下對於空氣流道面積與流量之變化比較表

	流量 (Kg/S)	流量比	流道面積比(%)
G000C6	0.447	100.0%	100
G101C4	0.442	98.9%	68
G102C3	0.435	97.3%	52.4
G103C2	0.403	90.2%	35.5
G104C1	0.328	73.4%	18
G201C3	0.413	92.4%	52.4
C102C2	0.390	87.2%	35.5
G301C2	0.380	85.0%	35.5
G401C1	0.327	73.2%	18

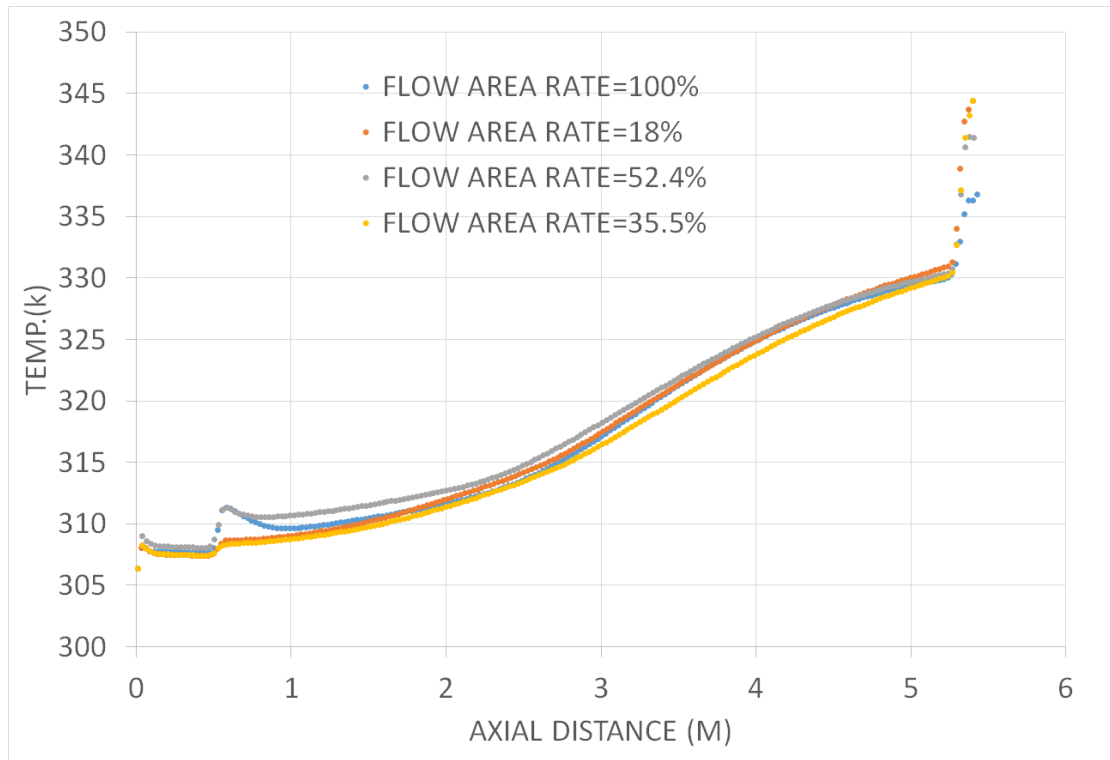


圖 22 不同流道面積減損後，空氣流道之軸向溫度變化

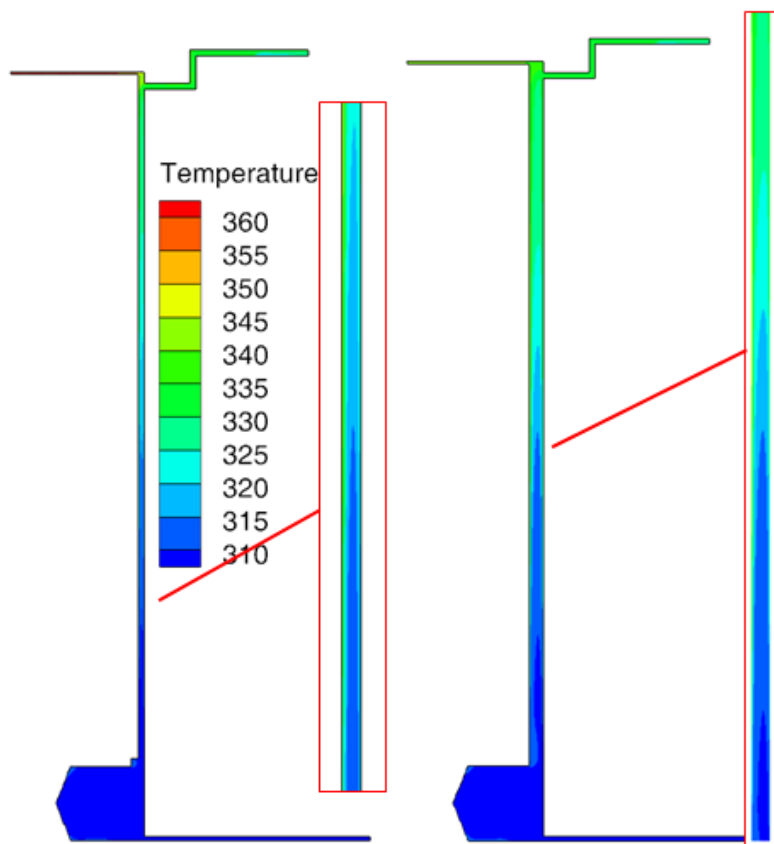


圖 23 不同流道面積減損後，空氣流道之徑向溫度梯度變化



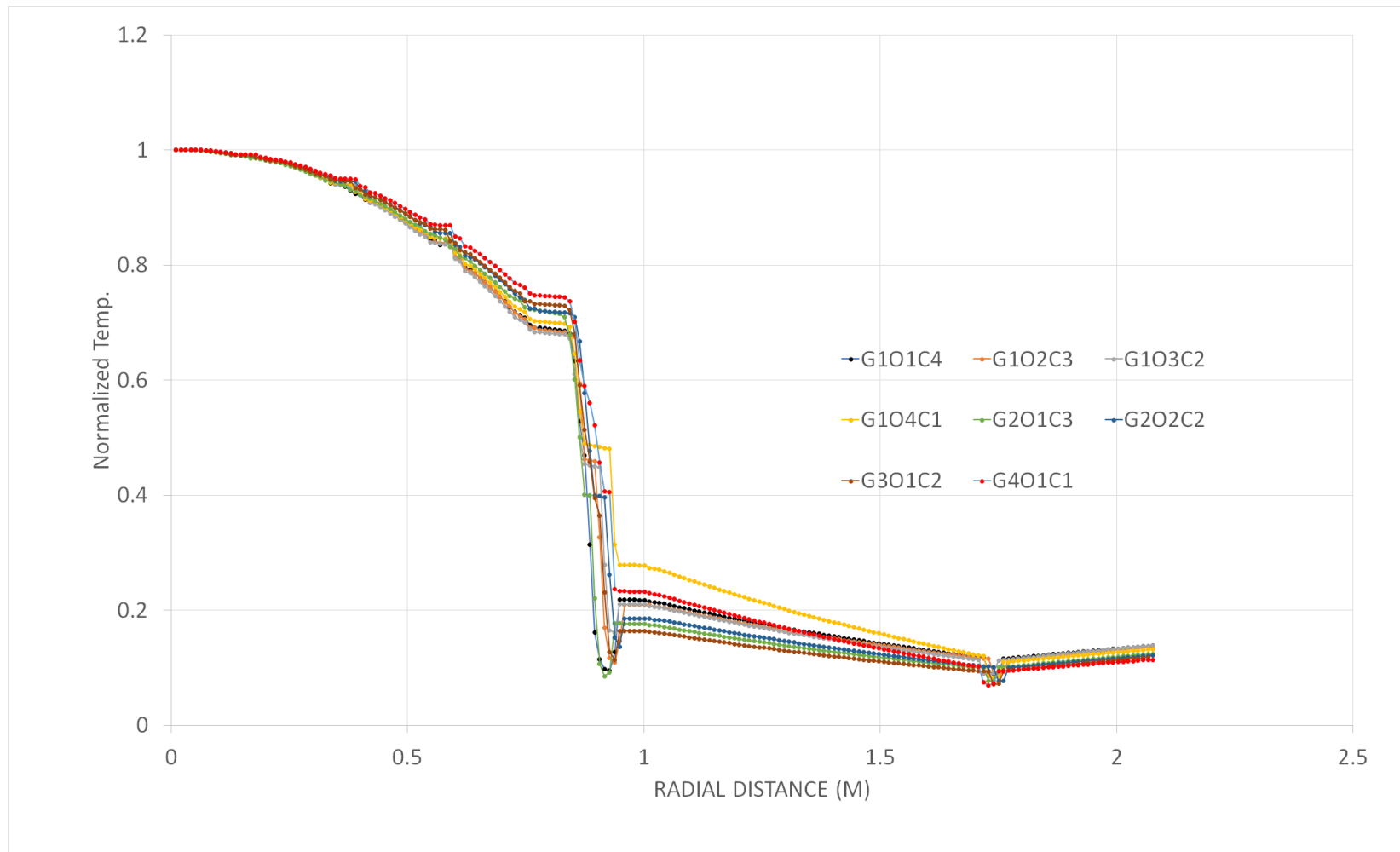


圖 24 各案例組合下乾貯系統之徑向無因次化溫度分佈

## 5.2 再包封作業後之正常貯存案例分析

由前節對密封鋼筒施行再包封作業後的熱流現象探討可以得知，乾貯系統的整體熱流現象並未因為再包封作業而出現特殊變化；惟包封後所造成的幾何形狀改變，仍將使得整體熱阻及各部分元件溫度因為各項參數而出現不同程度的變化。為能進一步確認密封鋼筒於再包封後，各元件之最高溫度是否仍能符合設計限值，本節遂針對先前所提之各式包封組合及夾層回充氣體與再包封材料之影響進行正常貯存案例之量化討論。

若假設採用碳鋼為材質的再包封容器並搭配氬氣填充來進行核一乾貯系統之再包封作業時；系統之各元件分析所獲之溫度之值將如表 17 所示；其結果顯示不論是裝載具有 7 或是 14kW 之用過核子燃料，乾貯系統的各项零組件溫度仍然符合原始安全分析之溫度設計限值。除此之外，進一步比較密封鋼筒與外包封容器之溫度後可以發現，由於兩容器(TSC 與再包封容器)之間存在的氣體熱阻，使得兩容器在 7kW 與 14kW 的熱負載下約有 27-48°C 以及 48-75°C 不等的溫度差。此一結果顯示，密封鋼筒與再包封容器之夾層確實存在極高的溫度差；在更進一步比較兩熱負載之間的溫度差可以發現，溫度的增加將導致熱輻射效果提昇，進而使得兩個熱負載之間的溫度差異呈現非單純線性比例之關係。

更進一步比對幾何形狀的改變時則可發現，在相同的流道面積下(如 G1O2C3 與 G2O1C3)氣體夾層的厚度將直接影響內部元件之溫度，並使其溫度提高約 12°C 的溫差。反之，若能改變氣體夾層的厚度，則即使增加外包封容器的厚度甚至造成空氣流道面積進一步縮小(如 G1O3C2)，其所造成的內部元件溫升仍將小於空氣夾層過厚的是可接受 G2O1C3 組合。此一特性可廣泛於類似的參數組合中發現，直至流面積大幅減少(例如 G1O4C1)時，才會使元件溫度因為對流流量的減少而增加。

另一方面，隨著夾層寬度的縮小以及包封容器厚度的增加，雖然增加了整體護箱的總熱阻；但由於此時的再包封容器將成為主要的移熱途徑，故在內部熱源、

流量、環境溫度與表面對流係數相仿的條件下，可以預期再包封容器的之元件溫度將與原始設計下之密封鋼筒無異。如圖 25 所示，原始無再包封措施的設計中，密封鋼筒將會因為直接受到內部承載圓盤的影響，而呈現明顯的溫度趨勢的振盪；反之，當系統外圍罩上一層包封容器後，其夾層與容器的傳導及輻射效果，將使其溫度趨勢更加的平均化。因此在空氣流道的流量尚因再包封作業而受明顯影響的前提下，再包封容器殼體於 4m 的高度以下的溫度趨勢將與原始密封鋼筒的溫度趨勢無太大差異；僅有大幅增厚夾層或再包封容器的厚度的狀況，才會因為限縮空氣流道之流量並使再包封容器的溫度分佈出現較大的差異。相反的，於再包封容器 4m 以上高度的範圍時，系統內部向下流動的自然對流機制將額外帶來更大的熱通量，因此該區域的溫度將會因為再包封容器所增加的熱阻而出現較為明顯差異。

上述的比較結果證實，未來若施行再包封措施時，其設計應在合理的條件下，並盡可能縮小夾層與再包封容器的厚度，如此除了可以減少使元件熱阻增加的狀況之外，更可令再包封後的容器表面具有與原本相近的溫度分佈。而此一結果更可證實，透過合理的參數組合，除了可以避免因再包封作業而導致原本預估的應力腐蝕特性出現改變外；再包封所造成的傳導熱阻，將使容器上半部殼體溫度提高，而延緩了該區域可能落入鹽類再潮解範圍的時間。

相較於具有熱源的包封容器側，混凝土護箱內襯的溫度將會因為輻射熱傳與空氣熱傳導而昇溫，因此在空氣流道面積最小的(G1O4C1 與 G4O1C1)兩個參數組合中，混凝土護箱的溫度將明顯上昇並超出原始設計限值。雖然由先前的平行驗證可以得知，混凝土護箱的溫度預估值係具有充足之保守度，但就本研究之考量與管制單位嚴格審查的角度而言，此一結果仍應視為對混凝土護箱溫度有著顯著影響，故在後續的異常與意外事故中將不再考慮進行此類設計之靈敏度分析。

若進一步將此再包封殼體與回充氣體之材料進行交叉搭配與模擬計算後可以發現(如表 18-表 20)，選用熱傳導特性更差的不銹鋼作為包封容器後，所得的熱流分析結果雖然會略高於先前以碳鋼作為材料的分析結果，但，對於整體趨勢

並無顯著之影響。反之，當選用以空氣作為回充氣體時，則不論以碳鋼或是不銹鋼作為包封材料，不僅會使燃料、提籃各元件的溫度大幅增加之外，更將因為熱阻的增加所造成的熱通量再分佈現象，進而額外造成 G2C2O2 以及 G3O1C2 兩組參數組合下的混凝土溫度超出設計限值。

上述的比對結果證實，若無其它額外防止銹蝕的考量下，即使在再包封作業中未採用氦氣回充，僅利用系統自身具有的熱源來加熱空氣後即進行再包封作業，仍不致使系統超出溫度設計限值。但若在上述作業條件下同時採用空氣流道面積較少的極度守設計；如表 21 中所示的  $G_xO_yC_1$  與  $G_xO_yC_2$  組合，則可能造成混凝土護箱溫度超出設計限值之狀況。故基於本章所述的靈敏度分析結果，本研究將進一步排除不符設計限值之設計組合後，選擇以各元件皆保有充份溫度餘裕之 G1O1C4、G1O2C3、G1O3C2 與 G2O1C3 參數組合，來進行設計基準事故中的異常與意外事故分析。

表 17、以碳鋼為包封材料並回充氦氣時之元件溫度(°C)

<b>7kW</b>	<b>G1O1C4</b>	<b>G1O2C3</b>	<b>G1O3C2</b>	<b>G1O4C1</b>	<b>G2O1C3</b>	<b>C2O2C2</b>	<b>G3O1C2</b>	<b>G4O1C1</b>	<b>溫度限值</b>
燃料束	157.09	159.04	157.67	165.07	171.50	173.37	177.92	188.80	400
外包封	90.29	89.74	87.89	96.41	87.46	88.00	85.67	98.79	371.1
承載圓盤	157.07	159.00	157.59	164.98	171.49	173.35	177.79	188.73	371.1
上支撐件	79.34	85.60	86.99	98.98	89.93	93.66	98.63	114.76	371.1
AOS	61.28	62.09	63.74	69.68	61.66	64.03	63.41	71.16	93.3
混凝土內襯	64.70	66.47	69.07	81.16	66.33	70.24	70.46	85.84	371.1
導熱圓盤	157.08	158.96	157.45	164.50	171.48	173.31	177.56	188.14	398.8
密封鋼筒	117.32	117.40	115.63	122.69	130.68	131.81	136.66	146.99	426.6
混凝土護箱	64.63	66.32	68.85	81.25	66.21	70.04	70.21	85.75	93.3
<b>14kW</b>	<b>G1O1C4</b>	<b>G1O2C3</b>	<b>G1O3C2</b>	<b>G1O4C1</b>	<b>G2O1C3</b>	<b>C2O2C2</b>	<b>G3O1C2</b>	<b>G4O1C1</b>	<b>溫度限值</b>
燃料束	255.65	258.43	256.37	265.72	277.76	279.34	282.63	296.72	400
外包封	127.59	125.87	123.05	134.83	122.10	121.63	119.77	138.22	371.1
承載圓盤	255.63	258.26	256.13	265.65	277.58	279.10	282.42	296.67	371.1
上支撐件	107.87	126.39	128.21	145.69	135.29	139.53	144.70	168.64	371.1
AOS	68.22	70.42	73.92	85.51	69.03	73.64	72.82	87.76	93.3
混凝土內襯	78.63	82.85	87.52	107.50	82.99	88.84	89.37	113.86	371.1
導熱圓盤	255.61	258.00	255.77	264.52	277.27	278.72	281.78	295.27	398.8
密封鋼筒	175.60	174.68	172.16	181.38	195.22	195.54	200.06	213.47	426.6
混凝土護箱	78.25	82.38	87.10	107.96	82.53	88.41	88.85	114.00	93.3

表 18、以不銹鋼為包封材料並回充氦氣時之元件溫度(°C)

<b>7kW</b>	<b>G1O1C4</b>	<b>G1O2C3</b>	<b>G1O3C2</b>	<b>G1O4C1</b>	<b>G2O1C3</b>	<b>C2O2C2</b>	<b>G3O1C2</b>	<b>G4O1C1</b>	<b>溫度限值</b>
燃料束	157.76	160.06	159.07	167.01	172.05	174.16	178.50	189.01	400
外包封	91.19	91.02	89.81	98.89	88.30	89.28	86.44	100.05	371.1
承載圓盤	157.74	160.03	158.99	166.91	172.04	174.14	178.37	188.94	371.1
上支撐件	79.24	85.79	87.27	99.80	90.24	94.03	99.00	115.26	371.1
AOS	61.26	62.14	63.82	69.79	61.74	64.04	63.53	71.32	93.3
混凝土內襯	64.69	66.47	69.20	81.60	66.51	70.38	70.70	85.86	371.1
導熱圓盤	157.75	159.98	158.86	166.45	172.04	174.11	178.14	188.32	398.8
密封鋼筒	118.13	118.50	117.19	124.83	131.31	132.71	137.29	147.20	426.6
混凝土護箱	64.62	66.32	68.98	81.71	66.36	70.17	70.45	85.77	93.3
<b>14kW</b>	<b>G1O1C4</b>	<b>G1O2C3</b>	<b>G1O3C2</b>	<b>G1O4C1</b>	<b>G2O1C3</b>	<b>C2O2C2</b>	<b>G3O1C2</b>	<b>G4O1C1</b>	<b>溫度限值</b>
燃料束	256.80	259.96	258.29	268.19	278.47	280.43	283.27	296.76	400
外包封	128.77	127.98	125.92	138.21	123.36	123.67	120.80	140.51	371.1
承載圓盤	256.79	259.82	258.04	268.11	278.30	280.18	283.08	296.72	371.1
上支撐件	108.27	127.02	128.68	146.90	135.82	140.77	145.94	169.59	371.1
AOS	68.30	70.45	74.02	85.61	69.19	73.71	72.81	87.97	93.3
混凝土內襯	78.84	83.08	87.64	107.96	83.28	89.16	89.99	114.20	371.1
導熱圓盤	256.76	259.59	257.68	267.01	277.99	279.80	282.36	295.30	398.8
密封鋼筒	176.55	176.33	174.36	184.15	196.05	196.86	200.72	213.61	426.6
混凝土護箱	78.38	82.61	87.22	108.40	82.81	88.72	89.46	114.24	93.3

表 19、以鋼為包封材料並回充空氣時之元件溫度(°C)

<b>7kW</b>	<b>G1O1C4</b>	<b>G1O2C3</b>	<b>G1O3C2</b>	<b>G1O4C1</b>	<b>G2O1C3</b>	<b>C2O2C2</b>	<b>G3O1C2</b>	<b>G4O1C1</b>	<b>溫度限值</b>
燃料束	190.56	188.28	191.68	197.38	192.29	193.18	190.34	195.92	400
外包封	88.64	85.61	87.24	96.11	84.87	85.77	87.60	100.49	371.1
承載圓盤	190.52	188.26	191.66	197.37	192.27	193.15	190.24	195.86	371.1
上支撐件	92.21	97.97	102.02	112.64	103.68	106.24	107.17	118.59	371.1
AOS	61.50	61.62	64.43	70.69	61.89	63.95	63.61	70.26	93.3
混凝土內襯	67.17	67.51	72.10	84.16	68.91	72.21	72.48	85.26	371.1
導熱圓盤	190.55	188.27	191.67	197.38	192.23	193.07	190.04	195.18	398.8
密封鋼筒	151.90	148.56	151.44	157.10	151.95	152.22	149.45	154.61	426.6
混凝土護箱	66.93	67.24	71.75	84.10	68.65	71.90	72.14	85.04	93.3
<b>14kW</b>	<b>G1O1C4</b>	<b>G1O2C3</b>	<b>G1O3C2</b>	<b>G1O4C1</b>	<b>G2O1C3</b>	<b>C2O2C2</b>	<b>G3O1C2</b>	<b>G4O1C1</b>	<b>溫度限值</b>
燃料束	302.70	298.34	302.90	310.73	303.90	307.19	300.74	306.75	400
外包封	125.84	119.73	122.29	134.49	118.44	120.62	121.34	140.15	371.1
承載圓盤	302.65	298.31	302.90	310.65	303.74	307.03	300.49	306.70	371.1
上支撐件	128.79	147.55	150.64	167.57	154.19	159.71	158.36	174.09	371.1
AOS	68.91	69.06	75.22	87.32	69.40	74.46	72.99	86.39	93.3
混凝土內襯	82.93	84.84	92.15	112.03	87.24	93.13	92.56	112.61	371.1
導熱圓盤	302.68	298.30	302.87	310.51	303.43	306.75	299.96	305.25	398.8
密封鋼筒	224.09	217.79	221.58	229.06	222.42	224.36	218.90	224.60	426.6
混凝土護箱	82.32	84.13	91.49	112.26	86.60	92.53	91.90	112.43	93.3

表 20、以不銹鋼為包封材料並回充空氣時之元件溫度(°C)

<b>7kW</b>	<b>G1O1C4</b>	<b>G1O2C3</b>	<b>G1O3C2</b>	<b>G1O4C1</b>	<b>G2O1C3</b>	<b>C2O2C2</b>	<b>G3O1C2</b>	<b>G4O1C1</b>	<b>溫度限值</b>
燃料束	191.00	188.91	188.02	198.60	192.69	196.23	195.68	195.73	400
外包封	89.37	86.43	85.66	98.03	85.57	88.97	91.43	102.10	371.1
承載圓盤	190.97	188.89	188.01	198.58	192.67	196.22	195.65	195.69	371.1
上支撐件	93.06	98.68	99.88	113.75	104.59	108.77	111.01	119.37	371.1
AOS	61.60	61.70	63.32	70.73	61.95	64.50	64.62	69.94	93.3
混凝土內襯	67.34	67.34	70.30	84.60	69.15	73.52	74.40	85.37	371.1
導熱圓盤	190.99	188.90	187.99	198.59	192.63	196.22	195.58	194.93	398.8
密封鋼筒	152.42	149.29	148.29	158.43	152.39	155.28	154.57	154.43	426.6
混凝土護箱	67.07	67.42	69.98	84.52	68.88	73.19	74.03	85.12	93.3
<b>14kW</b>	<b>G1O1C4</b>	<b>G1O2C3</b>	<b>G1O3C2</b>	<b>G1O4C1</b>	<b>G2O1C3</b>	<b>C2O2C2</b>	<b>G3O1C2</b>	<b>G4O1C1</b>	<b>溫度限值</b>
燃料束	302.57	299.06	297.53	312.52	304.02	307.93	309.81	307.21	400
外包封	126.54	121.71	119.46	137.64	119.04	123.91	129.01	143.80	371.1
承載圓盤	302.49	299.04	297.47	312.42	303.85	307.79	309.73	307.16	371.1
上支撐件	129.86	146.36	147.57	169.15	155.06	160.81	165.59	175.88	371.1
AOS	68.82	69.03	72.31	88.01	69.29	74.33	75.94	86.26	93.3
混凝土內襯	83.21	84.96	88.89	112.81	87.43	93.56	96.58	112.86	371.1
導熱圓盤	302.55	299.02	297.34	312.22	303.51	307.51	309.57	305.73	398.8
密封鋼筒	224.25	218.88	217.04	231.08	222.56	225.14	227.21	225.01	426.6
混凝土護箱	82.58	84.23	88.21	112.93	86.77	92.93	95.89	112.71	93.3



表 21、所有參數組合之靈敏度評估結果

參數組合	靈敏度評估結果	是否符合繼續分析需求
G1O1C4	各元件具有充足餘裕	是
G1O2C3	各元件具有充足餘裕	是
G1O3C2	各元件具有充足餘裕	是
G1O4C1	混凝土護箱超溫	否
G2O1C3	各元件具有充足餘裕	是
C2O2C2	混凝土護箱超溫	否
G3O1C2	混凝土護箱超溫	否
G4O1C1	混凝土護箱超溫	否

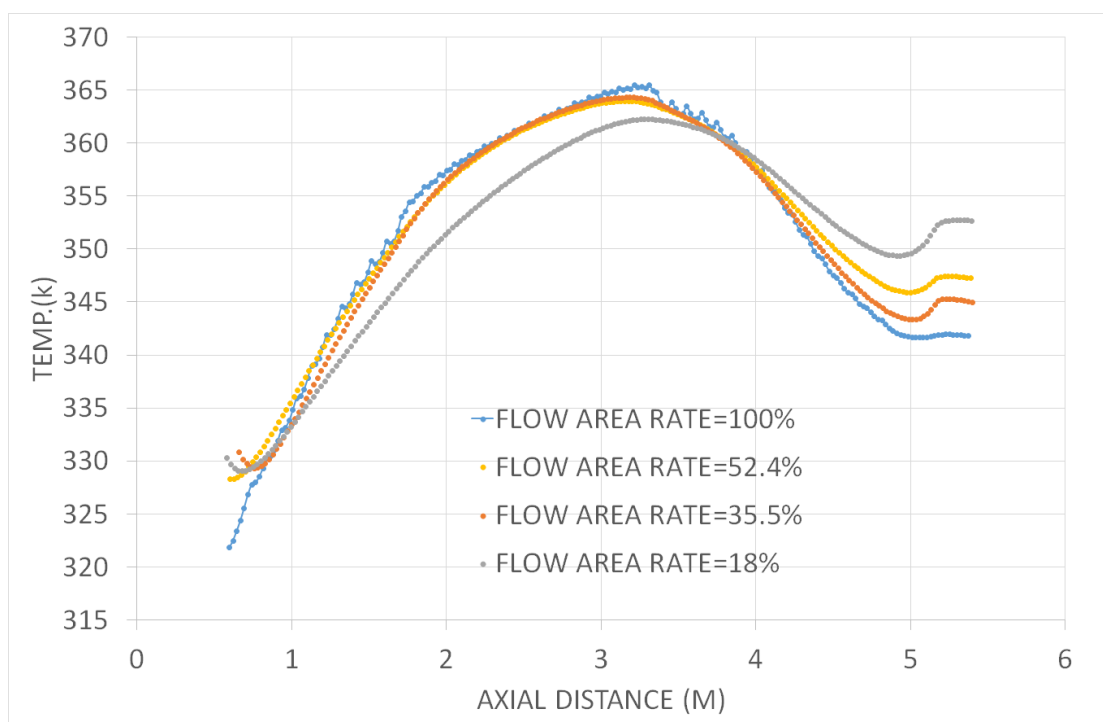


圖 25 各案例組下之再包封容器與原始 TSC 之溫度趨勢比較

### 5.3 再包封作業後系統之異常案例分析

本節依據原有安全分析報告內所載之內容，將考慮設計基準事故中的異常低溫、異常高溫、半阻塞等三項事件，並同時考慮已於前節參數測試後挑選出的 G1O1C4、G1O2C3、G1O3C2 與 G2O1C3 等四組參數組合，搭配兩種熱負載 (7&14kW) 及材料性質 (氬氣 VS 空氣以及碳鋼 VS 不銹鋼) 共計 96 種案例組合逐一進行探討。

#### 5.3.1 異常低溫

##### 案例設定

基於安全報告對此類案例之條件說明，本研究於分析中引用所建立之二維分析技術並依循以下設定，以調整分析案例：

1. 選擇裝載規劃值(7kW)、設計基準(14kW)熱負載並搭配平均燃料配置；
2. 既有之元件與材料性質係引用安全分析報告之設定，惟新增之再包封容器與則分別考慮碳鋼、304 不銹鋼，而及內部空間氣體性質則分別引用氬氣與空氣，故共有四種組合；
3. 考量此案例分析係要求取最為保守(最低溫)之分析結果，故忽略日照輻射作用於 AOS 表面之熱通量；
4. 環境溫度依循案例考量，設定為 233.15 K(-40°C)；
5. 以穩態方式進行求解。

##### 分析結果與討論

在將所有選擇的再包封參數組合併同材料配置進行組合後以 7kW 及 14kW 熱負載進行計算後之結果如表 22 與表 23 所示；分析結果顯示，由於系統處於假設性異常低溫之狀況，故整體溫度比正常貯存案例(如表 17~表 20 所示)明顯降低；其溫度差異約略等於環境溫度由 32°C 下降至零下 40°C 之變化值。此外，由其結果比對可以得知，進行再包封後之系統於 7 或 14kW 之熱負載下，燃料將具有 300-470°C 之溫度餘裕。

表 22、7kW 熱負載條件於異常低溫案例時之元件溫度(°C)

<b>He/Steel</b>	<b>G1O1C4</b>	<b>G1O2C3</b>	<b>G1O3C2</b>	<b>G2O1C3</b>	<b>He/SS304</b>	<b>G1O1C4</b>	<b>G1O2C3</b>	<b>G1O3C2</b>	<b>G2O1C3</b>	<b>溫度限值</b>
燃料束	96.67	100.84	96.93	122.32	燃料束	95.96	99.71	95.37	121.95	570
外包封	25.18	26.45	22.61	26.9	外包封	24.23	24.65	20.35	25.79	371.1
承載圓盤	96.65	100.83	96.81	122.32	承載圓盤	95.93	99.69	95.24	121.93	371.1
上支撐件	11.98	21.08	20.24	28.98	上支撐件	12.11	20.8	20.09	31.35	371.1
AOS	-1.92	-0.59	0.15	-0.54	AOS	-1.86	-0.68	0.42	-0.33	176.6
混凝土內襯	-2.12	0.5	1.83	2.38	混凝土內襯	-2.13	0.24	1.77	2.37	371.1
導熱圓盤	96.66	100.81	96.63	122.31	導熱圓盤	95.94	99.67	95.05	121.94	398.8
密封鋼筒	57.24	59.46	55.17	81.37	密封鋼筒	56.47	58.14	53.4	80.84	426.6
混凝土護箱	-1.87	0.62	1.88	2.3	混凝土護箱	-1.82	0.31	1.82	2.35	176.6
<b>Air/Steel</b>	<b>G1O1C4</b>	<b>G1O2C3</b>	<b>G1O3C2</b>	<b>G2O1C3</b>	<b>Air/SS304</b>	<b>G1O1C4</b>	<b>G1O2C3</b>	<b>G1O3C2</b>	<b>G2O1C3</b>	<b>溫度限值</b>
燃料束	135.85	142.27	140.74	141.11	燃料束	135.85	142.27	140.74	141.11	570
外包封	23.17	25.73	24.36	22.84	外包封	23.17	25.73	24.36	22.84	371.1
承載圓盤	135.81	142.26	140.72	141.09	承載圓盤	135.81	142.26	140.72	141.09	371.1
上支撐件	28.48	40.77	38.96	44.92	上支撐件	28.48	40.77	38.96	44.92	371.1
AOS	-1.79	0.02	2.08	-0.85	AOS	-1.79	0.02	2.08	-0.85	176.6
混凝土內襯	0.73	3.89	6.69	3.81	混凝土內襯	0.73	3.89	6.69	3.81	371.1
導熱圓盤	135.84	142.24	140.74	141.1	導熱圓盤	135.84	142.24	140.74	141.1	398.8
密封鋼筒	97.53	102.12	100.53	100.98	密封鋼筒	97.53	102.12	100.53	100.98	426.6
混凝土護箱	0.7	3.79	6.53	3.65	混凝土護箱	0.7	3.79	6.53	3.65	176.6

表 23、14kW 熱負載條件於異常低溫案例時之元件溫度(°C)

<b>He/Steel</b>	<b>G1O1C4</b>	<b>G1O2C3</b>	<b>G1O3C2</b>	<b>G2O1C3</b>	<b>He/SS304</b>	<b>G1O1C4</b>	<b>G1O2C3</b>	<b>G1O3C2</b>	<b>G2O1C3</b>	<b>溫度限值</b>
燃料束	201.55	208.87	206.22	237.49	燃料束	200.47	206.86	204.54	231.84	570
外包封	65.81	68.25	64.98	66.25	外包封	64.46	65.04	61.63	60.44	371.1
承載圓盤	201.54	208.77	206.04	237.47	承載圓盤	200.46	206.75	204.26	231.64	371.1
上支撐件	42.75	65.56	70.82	76.25	上支撐件	42.84	68.92	68.63	78.18	371.1
AOS	4.67	7.71	10.42	7.74	AOS	4.9	7.17	10.4	6.17	176.6
混凝土內襯	11.55	18.48	22.66	20.43	混凝土內襯	11.96	17.72	22.66	18.1	371.1
導熱圓盤	201.51	208.65	205.77	237.46	導熱圓盤	200.42	206.59	203.89	231.32	398.8
密封鋼筒	121.99	125.38	122.31	155.46	密封鋼筒	120.82	123.02	119.89	149.13	426.6
混凝土護箱	11.23	17.98	22.17	19.96	混凝土護箱	11.68	17.22	22.16	17.63	176.6
<b>Air/Steel</b>	<b>G1O1C4</b>	<b>G1O2C3</b>	<b>G1O3C2</b>	<b>G2O1C3</b>	<b>Air/SS304</b>	<b>G1O1C4</b>	<b>G1O2C3</b>	<b>G1O3C2</b>	<b>G2O1C3</b>	<b>溫度限值</b>
燃料束	258.2	262.2	262.26	272.13	燃料束	258.2	262.2	262.26	272.13	570
外包封	64.33	66.09	64.83	67.44	外包封	64.33	66.09	64.83	67.44	371.1
承載圓盤	258.19	262.19	262.25	272.12	承載圓盤	258.19	262.19	262.25	272.12	371.1
上支撐件	77.04	100.99	93.48	112.42	上支撐件	77.04	100.99	93.48	112.42	371.1
AOS	5.66	8.15	12.39	8.81	AOS	5.66	8.15	12.39	8.81	176.6
混凝土內襯	16.68	23.2	28.62	27.43	混凝土內襯	16.68	23.2	28.62	27.43	371.1
導熱圓盤	258.16	262.17	262.23	272.1	導熱圓盤	258.16	262.17	262.23	272.1	398.8
密封鋼筒	177.75	181.11	180.77	189.96	密封鋼筒	177.75	181.11	180.77	189.96	426.6
混凝土護箱	16.09	22.45	27.88	26.7	混凝土護箱	16.09	22.45	27.88	26.7	176.6

### 5.3.2 異常高溫

#### 案例設定

基於安全報告對此類案例之條件說明，本研究於分析中引用所建立之二維分析技術並依循以下設定，以調整分析案例：

1. 選擇裝載規劃值(7kW)、設計基準(14kW)熱負載並搭配平均燃料配置；
2. 既有之元件與材料性質係引用安全分析報告之設定，惟新增之再包封容器與則分別考慮碳鋼、304 不銹鋼，而及內部空間氣體性質則分別引用氦氣與空氣，故共有四種組合；
3. 考量此案例分析係要求取最為保守(最高溫)之分析結果，故考慮日照輻射作用於 AOS 表面之熱通量；依據導則 NUREG-1536[14]與法規 10 CFR Part 71[15]，考慮 24 小時平均之日照熱通量，即設施頂表面日照熱通量為 387.6 W/m<sup>2</sup>，側表面為 193.8 W/m<sup>2</sup>；
4. 環境溫度依循案例考量，設定為 315.15K(42°C)；
5. 以穩態方式進行求解。

#### 分析結果與討論

由於此一事故係假設系統所處之環境溫度由原定之正常環境溫度(32°C)因故上升至 42°C；由於此一變化僅影響整體熱流之最終熱沉溫度，故分析所得之結果(表 24、表 25)僅上升約 8-10°C 左右；這是因為隨著溫度的上升熱輻射效應將以溫度的四次方增加，故隨著環境溫度的增加系統各元件之溫度上升未達 10°C 係為合理之現象。

整體而言，進行再包封後之系統於 7 或 14kW 之熱負載下，燃料仍具有 270-400°C 之溫度餘裕，而混凝土結構則具有近 100°C 之溫度餘裕，足以證實系統即使進行再包封作業仍可維持其熱流安全性，並符合本設計基準事故之要求。

表 24、7kW 熱負載條件於異常高溫案例時之元件溫度(°C)

He/Steel	G1O1C4	G1O2C3	G1O3C2	G2O1C3	He/SS304	G1O1C4	G1O2C3	G1O3C2	G2O1C3	溫度限值
燃料束	163.5	164.5	160.67	177.14	燃料束	164.12	165.57	163.46	177.75	570
外包封	97.2	95.96	91.31	94.3	外包封	97.96	97.4	94.47	95.16	371.1
承載圓盤	163.5	164.46	160.57	177.13	承載圓盤	164.1	165.54	163.39	177.74	371.1
上支撐件	84.83	91.16	90.67	95.49	上支撐件	84.95	91.21	92.08	95.67	371.1
AOS	68.32	69	70.16	68.75	AOS	68.23	69.06	70.93	68.64	176.6
混凝土內襯	70.93	72.5	74.21	72.37	混凝土內襯	70.88	72.42	75.12	72.52	371.1
導熱圓盤	163.48	164.41	160.42	177.13	導熱圓盤	164.1	165.49	163.27	177.74	398.8
密封鋼筒	123.75	122.95	118.68	136.48	密封鋼筒	124.45	124.17	121.61	137.14	426.6
混凝土護箱	70.92	72.42	74.13	72.29	混凝土護箱	70.89	72.34	75	72.44	176.6
Air/Steel	G1O1C4	G1O2C3	G1O3C2	G2O1C3	Air/SS304	G1O1C4	G1O2C3	G1O3C2	G2O1C3	溫度限值
燃料束	193.76	196.4	195.7	197.77	燃料束	195.02	196.73	192.76	198.28	570
外包封	92.21	95.67	91.96	91.78	外包封	93.99	96.32	90.84	92.51	371.1
承載圓盤	<b><u>193.72</u></b>	<b><u>196.37</u></b>	<b><u>195.67</u></b>	<b><u>197.75</u></b>	承載圓盤	<b><u>194.99</u></b>	<b><u>196.71</u></b>	<b><u>192.75</u></b>	<b><u>198.27</u></b>	371.1
上支撐件	103.82	97.68	105.5	109.25	上支撐件	103.98	98.92	104.69	110.08	371.1
AOS	68.51	68.44	71.21	68.8	AOS	68.74	68.53	70.38	68.61	176.6
混凝土內襯	73.58	73.12	77.63	74.94	混凝土內襯	74.01	73.53	76.22	75.08	371.1
導熱圓盤	193.75	196.39	195.69	197.75	導熱圓盤	195.01	196.72	192.75	198.26	398.8
密封鋼筒	154.04	158.02	155.55	157.51	密封鋼筒	155.41	158.19	152.97	158.02	426.6
混凝土護箱	73.36	72.94	77.35	74.72	混凝土護箱	73.8	73.34	75.96	74.84	176.6

表 25、14kW 熱負載條件於異常高溫案例時之元件溫度(°C)

He/Steel	G1O1C4	G1O2C3	G1O3C2	G2O1C3	He/SS304	G1O1C4	G1O2C3	G1O3C2	G2O1C3	溫度限值
燃料束	260.7	261.37	259.95	293.28	燃料束	262.17	264.86	261.96	283.75	570
外包封	129.64	134.08	127.23	129.11	外包封	135.17	134.07	130.14	130	371.1
承載圓盤	260.51	261.36	259.71	283.18	承載圓盤	262.16	264.74	261.73	283.63	371.1
上支撐件	128.93	113.43	132.08	140.09	上支撐件	113.89	131.59	132.39	140.98	371.1
AOS	75.35	74.63	80.05	75.48	AOS	74.69	76.58	80.01	75.44	176.6
混凝土內襯	86.95	85.52	92.73	88.88	混凝土內襯	85.83	88.75	92.85	89.01	371.1
導熱圓盤	260.23	261.32	259.33	282.98	導熱圓盤	262.13	264.53	261.37	283.41	398.8
密封鋼筒	177.37	181.3	175.79	200.94	密封鋼筒	182.27	181.58	178.09	201.45	426.6
混凝土護箱	86.45	84.7	92.28	88.81	混凝土護箱	84.99	88.24	92.41	88.53	176.6
Air/Steel	G1O1C4	G1O2C3	G1O3C2	G2O1C3	Air/SS304	G1O1C4	G1O2C3	G1O3C2	G2O1C3	溫度限值
燃料束	303.59	307.67	306.38	309.23	燃料束	304.87	308.39	302.23	309.8	570
外包封	126.73	132.23	126.59	125.53	外包封	128.88	133.28	124.83	126.54	371.1
承載圓盤	<b><u>303.54</u></b>	<b><u>307.63</u></b>	<b><u>306.38</u></b>	<b><u>309.13</u></b>	承載圓盤	<b><u>304.83</u></b>	<b><u>308.34</u></b>	<b><u>302.2</u></b>	<b><u>309.72</u></b>	371.1
上支撐件	151.27	133.77	155.79	159.59	上支撐件	152.5	135.28	152.33	160.89	371.1
AOS	75.48	75.22	81.37	75.75	AOS	75.47	75.15	79	75.73	176.6
混凝土內襯	90.5	88.7	97.61	92.72	混凝土內襯	90.93	88.8	94.76	92.85	371.1
導熱圓盤	303.58	307.65	306.35	308.94	導熱圓盤	304.86	308.38	302.16	309.53	398.8
密封鋼筒	223.31	229.11	225.03	227.82	密封鋼筒	224.72	230.04	221.63	228.43	426.6
混凝土護箱	89.77	88.06	96.94	92.07	混凝土護箱	90.18	88.15	94.06	92.17	176.6

### 5.3.3 半阻塞事故

#### 案例設定

基於安全報告對此類案例之條件說明，本研究於分析中引用所建立之二維分析技術並依循以下設定，以調整分析案例：

1. 選擇裝載規劃值(7kW)、設計基準(14kW)熱負載並搭配平均燃料配置；
2. 既有之元件與材料性質係引用安全分析報告之設定，惟新增之再包封容器與則分別考慮碳鋼、304 不銹鋼，而及內部空間氣體性質則分別引用氦氣與空氣，故共有四種組合；
3. 考量此案例分析係要求取最為保守(最高溫)之分析結果，故考慮日照輻射作用於 AOS 表面之熱通量；依據導則 NUREG-1536[14]與法規 10 CFR Part 71[15]，考慮 24 小時平均之日照熱通量，即設施頂表面日照熱通量為 387.6 W/m<sup>2</sup>，側表面為 193.8 W/m<sup>2</sup>；
4. 假設事故期間，護箱進氣口有一半面積因為事故而受阻；
5. 環境溫度依循案例考量，設定為 305.15K(34°C)；
6. 以穩態方式進行求解。

#### 分析結果與討論

在將所有選擇的再包封參數組合併同材料配置進行組合後以 7kW 及 14kW 熱負載進行計算後之結果如表 26 與表 27 所示，其結果顯示雖然空氣進口流道之面積因為假設性事故而減少一半，但由所造成的對流阻抗並不顯著之故，自然對流機制仍可加以調整。故此一事故下的元件溫度與正常貯存案例(如表 17~表 20 所示)之間的溫度差約在 7-8°C 範圍，除不隨其它幾何或材料參數性質而出現顯改變，亦未在任何參數組合下超出原設計限值。

整體而言，進行再包封後之系統於 7 或 14kW 之熱負載下，燃料仍具有 270-300°C 之溫度餘裕，而混凝土結構則具有超過 70°C 之溫度餘裕，足以證實系統即使進行再包封作業仍可維持其熱流安全性，並符合本設計基準事故之要求。



表 26、7kW 熱負載條件於半阻塞案例時之元件溫度(°C)

<b>He/Steel</b>	<b>G1O1C4</b>	<b>G1O2C3</b>	<b>G1O3C2</b>	<b>G2O1C3</b>	<b>He/SS304</b>	<b>G1O1C4</b>	<b>G1O2C3</b>	<b>G1O3C2</b>	<b>G2O1C3</b>	<b>溫度限值</b>
燃料束	165.18	166.15	164.83	179.81	燃料束	165.8	166.88	167.2	181.1	570
外包封	99.45	97.73	96.16	97.29	外包封	100.28	98.9	98.99	98.93	371.1
承載圓盤	165.16	166.04	164.67	179.78	承載圓盤	165.76	166.76	167.06	181.07	371.1
上支撐件	89.95	95.36	95.83	100.7	上支撐件	90.24	95.25	96.81	101.71	371.1
AOS	67.49	67.97	68.95	67.93	AOS	67.6	67.96	69.6	68.4	176.6
混凝土內襯	74.68	75.8	77.2	76.54	混凝土內襯	74.73	75.63	77.85	77.14	371.1
導熱圓盤	165.17	165.86	164.44	179.73	導熱圓盤	165.79	166.59	166.85	181.02	398.8
密封鋼筒	125.44	124.29	122.79	138.78	密封鋼筒	126.1	125.14	125.31	140.18	426.6
混凝土護箱	74.49	75.6	77.05	76.34	混凝土護箱	74.55	75.43	77.73	76.94	176.6
<b>Air/Steel</b>	<b>G1O1C4</b>	<b>G1O2C3</b>	<b>G1O3C2</b>	<b>G2O1C3</b>	<b>Air/SS304</b>	<b>G1O1C4</b>	<b>G1O2C3</b>	<b>G1O3C2</b>	<b>G2O1C3</b>	<b>溫度限值</b>
燃料束	197.95	196.34	195.03	200.02	燃料束	198.08	196.97	196.03	204.18	570
外包封	97.97	95.42	93.86	95.57	外包封	98.61	96.65	95.66	99.33	371.1
承載圓盤	197.94	196.34	195.01	199.99	承載圓盤	198.07	196.96	196.01	204.16	371.1
上支撐件	103.21	108.5	108.55	114.17	上支撐件	103.49	109.36	109.84	117.45	371.1
AOS	68.06	68.14	69.15	68.27	AOS	67.98	68.19	69.11	69.8	176.6
混凝土內襯	77.7	78.09	79.24	79.54	混凝土內襯	77.73	78.18	79.5	81.61	371.1
導熱圓盤	197.93	196.31	195.02	199.92	導熱圓盤	198.05	196.94	196.03	204.17	398.8
密封鋼筒	159.19	156.5	155.08	159.59	密封鋼筒	159.46	157.25	156.25	163.62	426.6
混凝土護箱	77.36	77.75	78.92	79.23	混凝土護箱	77.38	77.83	79.16	81.29	176.6

表 27、14kW 熱負載條件於半阻塞案例時之元件溫度(°C)

He/Steel	G1O1C4	G1O2C3	G1O3C2	G2O1C3	He/SS304	G1O1C4	G1O2C3	G1O3C2	G2O1C3	溫度限值
燃料束	266.07	267.41	266.29	293.55	燃料束	266.85	270.05	268.31	289.24	570
外包封	139.86	136.93	135.38	140.78	外包封	141.03	140.3	138.27	137.42	371.1
承載圓盤	<u>266.06</u>	<u>267.17</u>	<u>266.11</u>	<u>293.41</u>	承載圓盤	<u>266.83</u>	<u>269.79</u>	<u>268.11</u>	<u>289.04</u>	371.1
上支撐件	123.71	139.43	140.8	154.59	上支撐件	123.81	140.93	141.25	150.55	371.1
AOS	79.76	80.556	83.4	83.176	AOS	79.82	81.75	83.55	81.44	176.6
混凝土內襯	95.49	97.048	99.955	102.23	混凝土內襯	95.72	97.88	100.01	99.09	371.1
導熱圓盤	266.02	266.65	265.43	293.15	導熱圓盤	266.81	269.35	267.47	288.69	398.8
密封鋼筒	185.95	183.59	182.36	210.46	密封鋼筒	186.86	186.49	184.69	206.84	426.6
混凝土護箱	94.65	96.914	99.967	102.03	混凝土護箱	94.87	97.78	100.03	98.83	176.6
Air/Steel	G1O1C4	G1O2C3	G1O3C2	G2O1C3	Air/SS304	G1O1C4	G1O2C3	G1O3C2	G2O1C3	溫度限值
燃料束	311.6	309.23	310.22	314.24	燃料束	313.26	316.34	310.69	314.6	570
外包封	138.17	133.9	133.96	133.24	外包封	139.89	141.53	134.74	136.01	371.1
承載圓盤	<u>311.58</u>	<u>309.2</u>	<u>310.18</u>	<u>314.11</u>	承載圓盤	<b><u>313.21</u></b>	<b><u>316.32</u></b>	<b><u>310.67</u></b>	<b><u>314.45</u></b>	371.1
上支撐件	143.75	160.68	162.66	168.42	上支撐件	143.72	167.16	161.97	170.08	371.1
AOS	80.4	81.21	84.44	81.91	AOS	80.9	85.01	83.47	81.05	176.6
混凝土內襯	98.43	100.79	104.54	103.44	混凝土內襯	98.48	105.26	103.47	103.77	371.1
導熱圓盤	311.54	309.19	310.13	313.86	導熱圓盤	313.25	316.33	310.69	314.15	398.8
密封鋼筒	232.95	228.65	229.19	232.73	密封鋼筒	234.27	235.3	229.62	233.08	426.6
混凝土護箱	97.99	100.26	104.14	102.88	混凝土護箱	98.06	104.76	102.96	103.17	176.6

## 5.4 再包封作業後系統之意外事故案例分析

本節依據原有安全分析報告內所載之內容，將考慮設計基準事故中屬於意外事故的極高環境溫度與全阻塞等二項事件，並同時考慮已於前節參數測試後挑選出的 G1O1C4、G1O2C3、G1O3C2 與 G2O1C3 等四組參數組合，搭配兩種熱負載(7&14kW)及材料性質(氬氣 VS 空氣以及碳鋼 VS 不銹鋼)共計 64 種案例組合；其中極高環境溫度之案例係全部採用穩態分析，而全阻塞案例則依系統熱負載之不同而分別採用穩態與暫態進行計算。

### 5.4.1 極高環境溫度

#### 案例設定

基於安全報告對此類案例之條件說明，本研究於分析中引用所建立之二維分析技術並依循以下設定，以調整分析案例：

6. 選擇裝載規劃值(7kW)、設計基準(14kW)熱負載並搭配平均燃料配置；
7. 既有之元件與材料性質係引用安全分析報告之設定，惟新增之再包封容器與則分別考慮碳鋼、304 不銹鋼，而及內部空間氣體性質則分別引用氬氣與空氣，故共有四種組合；
8. 考量此案例分析係要求取最為保守(最高溫)之分析結果，故考慮日照輻射作用於 AOS 表面之熱通量；依據導則 NUREG-1536[14]與法規 10 CFR Part 71[15]，考慮 24 小時平均之日照熱通量，即設施頂表面日照熱通量為 387.6 W/m<sup>2</sup>，側表面為 193.8 W/m<sup>2</sup>；
9. 環境溫度依循案例考量，設定為 329.25K(56.1°C)；
10. 以穩態方式進行求解。

## 分析結果與討論

在將所有選擇的再包封參數組合併同材料配置進行組合後以 7kW 熱負載進行計算後之結果如表 28 所示，結果顯示由於負載較低之故，系統元件即使在進行再包封作業後，仍存有極大的溫度餘裕；其中，燃料束依不同參數與材料之組合將有 370-400°C 左右之溫度餘裕，而密封鋼筒則具有超過 250°C 之溫度餘裕；縱使是材料溫度限值最低的混凝土護箱與外加屏蔽層，仍約有 80°C 左右之餘裕。此一結果顯示，進行密封鋼筒再包封作業不致使系統溫度超出設計限值。在 14kW 熱負載之計算結果(表 29)中亦可發現相同的結果，惟兩者間僅因為熱負載的增加而使系統各元件溫度更進一步上升，但仍符合設計限值。

若更進一步的比對則可以發現，不論材料或是幾何參數的組合中，內部元件如燃料束、承載圓盤、導熱圓盤等元件的溫度差，皆較外部元件；如，混凝土內襯、混凝土護箱或外加屏蔽層具有更明顯的溫度差；這是因為內部元件是為整體熱量之主要傳遞途徑，故其溫度差將會隨功率呈近線性正相關趨勢變化；反之，當大多數系統熱源由空氣流道移除後，將僅有少部分會透過輻射熱傳對外部元件進行加熱，導致其溫度隨負載變化之趨勢不甚明顯。

最後，若進一步比對各式幾何參數之影響則可發現，其影響程度約為 10-20°C 之間，其元件溫度將隨著包封容器與間隙的增加而提高，但可透過具有較佳熱傳特性之回充氣體及包封容器材料加以改善；惟此一改善程度約略僅有 10°C 左右，且明顯小於前述所提及的數十至數百度溫度餘裕。故於未來之應用中或可依其它作業或設計需求進行材料選擇，而忽略材料本身熱傳特性對此一作業之影響。

表 28、7kW 熱負載條件於極高環境溫度時之元件溫度(°C)

<b>He/Steel</b>	<b>G1O1C4</b>	<b>G1O2C3</b>	<b>G1O3C2</b>	<b>G2O1C3</b>	<b>He/SS304</b>	<b>G1O1C4</b>	<b>G1O2C3</b>	<b>G1O3C2</b>	<b>G2O1C3</b>	<b>溫度限值</b>
燃料束	173.46	171.67	169.43	185.77	燃料束	173.94	172.44	170.41	186.24	570
外包封	108.34	103.51	100.58	103.29	外包封	109.03	104.66	102.01	103.99	371.1
承載圓盤	173.43	171.63	169.36	185.77	承載圓盤	173.92	172.4	170.34	186.24	371.1
上支撐件	95.47	99.49	100	105.03	上支撐件	95.38	99.47	99.96	105.37	371.1
AOS	79.1	79.59	81.21	79.68	AOS	79.06	79.41	81	79.56	176.6
混凝土內襯	81.44	82.21	84.61	82.99	混凝土內襯	81.34	82.12	84.43	82.98	371.1
導熱圓盤	173.45	171.57	169.24	185.75	導熱圓盤	173.94	172.34	170.23	186.21	398.8
密封鋼筒	133.87	130.05	127.48	144.85	密封鋼筒	134.45	130.94	128.61	145.36	426.6
混凝土護箱	81.47	82.23	84.57	82.95	混凝土護箱	81.38	82.12	84.39	82.91	176.6
<b>Air/Steel</b>	<b>G1O1C4</b>	<b>G1O2C3</b>	<b>G1O3C2</b>	<b>G2O1C3</b>	<b>Air/SS304</b>	<b>G1O1C4</b>	<b>G1O2C3</b>	<b>G1O3C2</b>	<b>G2O1C3</b>	<b>溫度限值</b>
燃料束	205.08	202.2	201.61	205.94	燃料束	205.69	203.05	201.45	206.53	570
外包封	106.61	101.17	99.5	100.7	外包封	107.44	102.5	100.19	101.51	371.1
承載圓盤	205.05	202.2	201.61	205.93	承載圓盤	205.65	203.05	201.44	206.52	371.1
上支撐件	108.24	112.51	113.27	117.97	上支撐件	108.55	113.3	113.81	118.72	371.1
AOS	79.29	79.61	81.53	79.9	AOS	79.34	79.6	81.19	79.63	176.6
混凝土內襯	83.59	83.9	86.7	85	混凝土內襯	83.73	84.05	86.55	85.21	371.1
導熱圓盤	205.06	202.17	201.59	205.93	導熱圓盤	205.68	203.02	201.44	206.51	398.8
密封鋼筒	166.47	162.33	161.49	165.61	密封鋼筒	167.12	163.25	161.5	166.22	426.6
混凝土護箱	83.43	83.74	86.51	84.84	混凝土護箱	83.58	83.87	86.32	85.01	176.6

表 29、14kW 熱負載條件於極高環境溫度時之元件溫度(°C)

<b>He/Steel</b>	<b>G1O1C4</b>	<b>G1O2C3</b>	<b>G1O3C2</b>	<b>G2O1C3</b>	<b>He/SS304</b>	<b>G1O1C4</b>	<b>G1O2C3</b>	<b>G1O3C2</b>	<b>G2O1C3</b>	<b>溫度限值</b>
燃料束	270.38	269.34	265.06	290.79	燃料束	271.23	272.42	267.37	291.89	570
外包封	144.34	139.52	133.25	138.87	外包封	145.47	143.02	136.36	140.36	371.1
承載圓盤	270.37	269.15	264.8	290.66	承載圓盤	271.22	272.26	267.15	291.76	371.1
上支撐件	123.37	138.55	138.5	149.14	上支撐件	123.25	140.39	139.4	149.98	371.1
AOS	85.17	85.83	89.28	85.76	AOS	85.15	86.36	89.7	85.9	176.6
混凝土內襯	96.8	97	101	98.58	混凝土內襯	97.04	98.09	101.44	98.72	371.1
導熱圓盤	270.32	268.83	264.41	290.39	導熱圓盤	271.17	272	266.8	291.52	398.8
密封鋼筒	190.34	185.94	181.01	208.36	密封鋼筒	191.46	189.1	183.58	209.52	426.6
混凝土護箱	95.95	96.46	100.56	98.09	混凝土護箱	96.19	97.54	101	98.24	176.6
<b>Air/Steel</b>	<b>G1O1C4</b>	<b>G1O2C3</b>	<b>G1O3C2</b>	<b>G2O1C3</b>	<b>Air/SS304</b>	<b>G1O1C4</b>	<b>G1O2C3</b>	<b>G1O3C2</b>	<b>G2O1C3</b>	<b>溫度限值</b>
燃料束	315.51	311.73	307.71	317.02	燃料束	316.18	312.8	309.12	317.53	570
外包封	142.72	136.81	130.28	135.78	外包封	143.74	138.84	132.86	136.9	371.1
承載圓盤	315.48	311.7	307.68	316.96	承載圓盤	316.11	312.75	309.08	317.46	371.1
上支撐件	142.89	160.35	159.38	167.94	上支撐件	143.37	160.73	159.83	168.79	371.1
AOS	85.57	85.98	89.27	86.1	AOS	85.57	85.96	89.22	86.2	176.6
混凝土內襯	98.25	100.48	103.74	101.87	混凝土內襯	98.38	100.73	104.16	102.51	371.1
導熱圓盤	315.5	311.71	307.69	316.84	導熱圓盤	316.17	312.79	309.12	317.32	398.8
密封鋼筒	236.98	231.25	226.7	235.57	密封鋼筒	237.79	232.46	228.38	236.1	426.6
混凝土護箱	97.61	99.73	103.09	101.24	混凝土護箱	97.74	99.95	103.46	101.86	176.6

## 5.4.2 全阻塞事故

### 案例設定

基於安全報告對此類案例之條件說明，本研究於分析中引用所建立之二維分析技術並依循以下設定，以調整分析案例：

1. 選擇裝載規劃值(7kW)、設計基準(14kW)熱負載並搭配平均燃料配置；
2. 既有之元件與材料性質係引用安全分析報告之設定，惟新增之再包封容器與則分別考慮碳鋼、304 不銹鋼，而及內部空間氣體性質則分別引用氬氣與空氣，故共有四種組合；
3. 考量此案例分析係要求取最為保守(最高溫)之分析結果，故考慮日照輻射作用於 AOS 表面之熱通量；依據導則 NUREG-1536[14]與法規 10 CFR Part 71[15]，考慮 24 小時平均之日照熱通量，即設施頂表面日照熱通量為 387.6 W/m<sup>2</sup>，側表面為 193.8 W/m<sup>2</sup>；
4. 假設事故期間，護箱進氣口有一半面積因為事故而受阻；
5. 環境溫度依循案例考量，設定為 305.15K(34°C)；
6. 由於 7kW 時採用穩態分析之結果將可符合各元件設計限值，故僅用 14kW 案例採用暫態方式進行求解，並以正常貯存案例作為初始條件。

### 二維暫態驗證

不同於先前的穩態案例平行驗證，本研究為確保利用二維分析模式進行暫態分析時能獲得與三維分析模式一致之分析結果，本節於進行 14kW 熱負載的暫態分析前，先行就二維與三維模式於全阻塞事故下的暫態分析結果進行平行驗證。由圖 26 之比對結果可以發現，二維與三維分析模式於燃料護套溫度係為完全一致；此一結果證實在利用二維分析模式確有其可信度。而在承載圓盤與導勢圓盤等內部元件，二維分析模式所獲得結果較三維分析模式更為保守，且趨近於燃料溫度；這是因為在採用二維均質化的技術中，核一乾貯系統由燃料束與圓盤結果交錯組成的幾何形狀，將會導致部分的承載圓盤與導熱圓盤被圍於燃料束之內(如圖 13 所示)，而導致其成為二維模式的對稱中心軸並具有溫度梯度為零之特

性。而在密封鋼筒的升溫趨勢，則可發現二種分析模式之最高溫度略有差異，這是因為實際三維模式中最外圍的燃料束與 TSC 的距離並不完全一致(圖 27)，故其所形成局部熱點使得採用均勻化的二維分析模式與存在有些許的差異。最後，在比較全阻塞事故中往往最快達到設計限值的 VCC 與 AOS 等元件後即可充份證實，採用二維分析模式確實可以掌握整體系統於全阻塞事故下的溫升趨勢。

此外，上述的平行驗證作業亦顯示，利用二維分析模式於暫態案例之求解過程中，僅需較要藉由單一處理器進行計算，並於 4-6 小時內完成 72 小時之全阻塞案例計算；此一計算時間較以往採用三維分析模式時，需同時利用多顆同級處理器並持續計算約 1 周方可完成求解，兩者之計算效能約略增進近百倍。基於此驗證結果，本研究以將逐一針對所選定的全阻塞案例進行結果分析與探討。

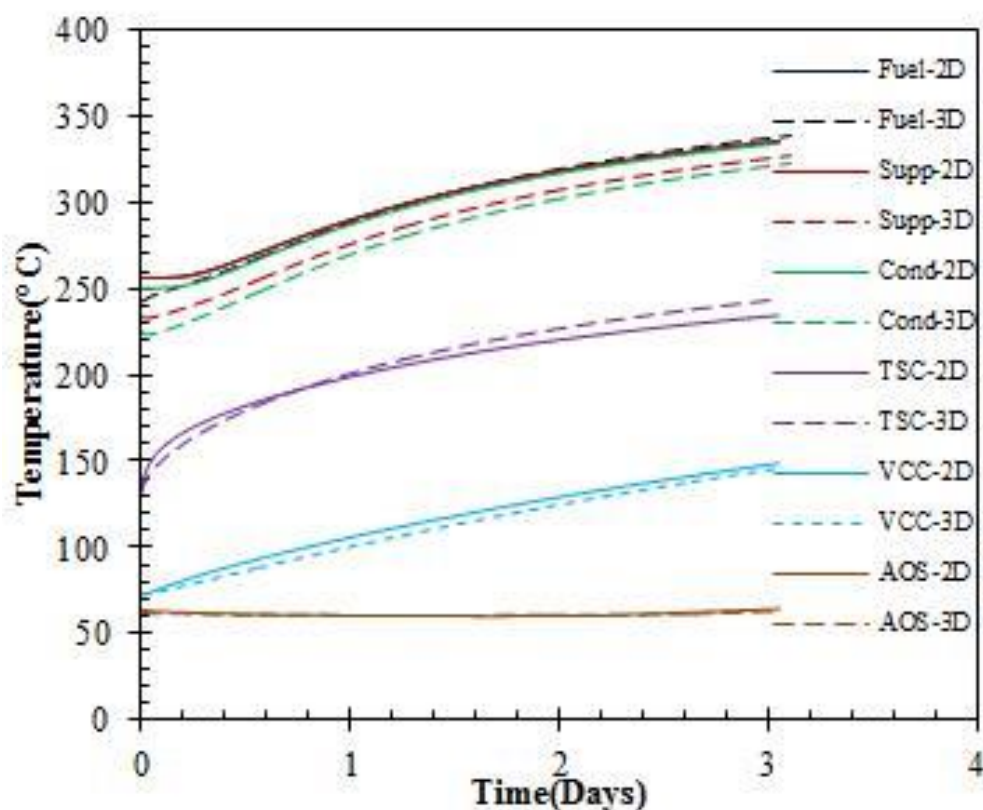


圖 26 三維與二維模式於全阻塞暫態之平行驗證結果



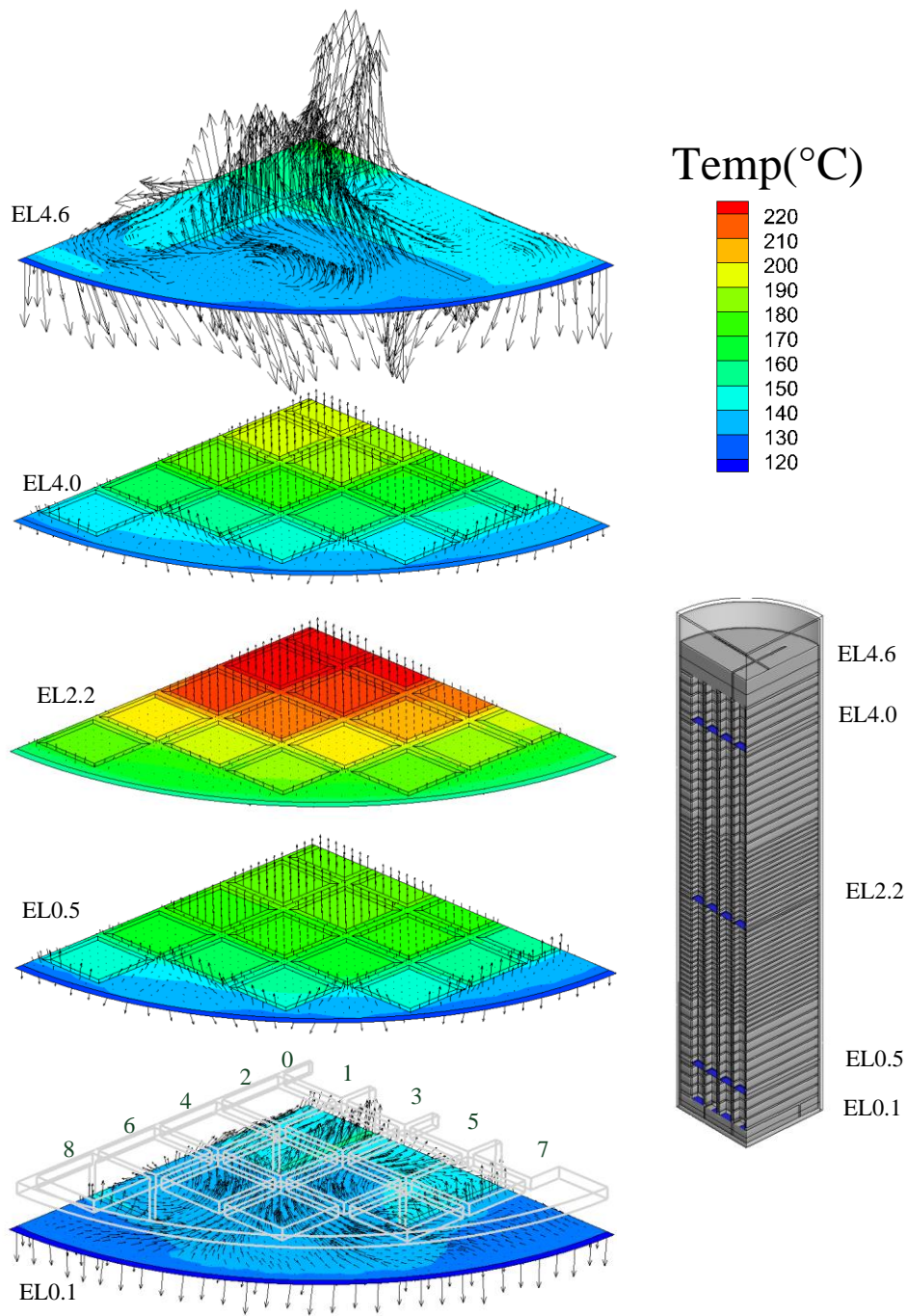


圖 27 三維模式內部對流特性示意圖

## 分析結果與討論

### **A · 7kW 熱負載**

將所選定的四組再包封參數組合搭配材料性質之變化後，以 7kW 熱負載進行穩態分析之結果可彙整如表 30 所示；整體而言，此一結果顯示即使在採用再包封處置，並將裝載有 7kW 熱負載的乾貯系統設定為進氣口阻塞之狀況下，整體系統仍不會有任何元件發生溫度超過設計限值之狀況。這不僅意味著再包封作業不致影響核一乾貯設施之設計功能，更證實核一乾貯設施在實際可能裝載的熱負載條件下，實則沒有排除全阻塞事故之作業時限；因此在考量其事故狀態仍需加以排除以符合原有設計規劃之前題下，需依循安全分析報告中的行政管制時限 600 小時來作為管制基準即可確保設施之可靠性。

另外，若更進一步比對不同材料之組合下的元件溫度則可發現，不論是選用鋼或是不銹鋼作為再包封容器，並不致於對燃料束與各元件造成明顯的溫度差異；整體對包封容器以內的溫度值影響僅有 2°C 左右。反之，當比對包封容器內是否充氬或是單純佈滿空氣時則可發現，在採用空氣的案例中；其燃料溫度將比採用氬氣的元件高出約 20°C 左右，但整體而言仍與燃料溫度限值有著近 300°C 的溫差。

最後，若將各種再包封幾何之影響進行比對後則可瞭解，雖然隨著包封容器與密封鋼筒之間間隙增加，將會使燃料束或其它內部元件的溫度明顯上升，但仍不致使系統元件出現不符設計限值之問題；此外，對於密封鋼筒以外的元件；如，混凝土護箱、AOS 或是混凝土內襯等元件，改變其幾何參數的組合並不會明顯影響其溫度。

### **B · 14kW 熱負載**

不同於 7kW 熱負載的案例可以採用穩態方法進行分析，當核一乾貯系統在 14kW 的設計熱負載條件時，系統元件溫度將會隨著事故時間的增加而導致溫度逐步上升，並超過部分元件之設計溫度限值。因此本負載下的全阻塞案例需藉由

暫態求解方式求取事故發生後 72 小時之系統元件溫度，以證實即使在進行再包封作業後仍可符合原熱流設計與法規需求。

表 31 為分析所獲得之事故計算結果；整體所呈現之趨勢與先前 7KW 採用穩態分析有數點同異之處，可逐一詳述如下：

1. 回充氬氣與空氣之間的案例差異增加至 40°C 左右，此一差異值增大的原因除部分是因為熱負載增加之故，另一方面亦是此負載下之結果係為暫態結果而非 7KW 之穩態結果；
2. 採用碳鋼或是不銹鋼所造成的溫度差異與 7kW 所獲趨勢相近，皆不致於造成顯著的溫度差異；
3. 所有元件於事故發生 72 小時後，皆低於原始設計之溫度限值；
4. 混凝土或外加屏蔽層等元件，因系統尚未達到穩態之故，而使其溫度低於 7kW 之案例。

表 30、7kW 熱負載於全阻塞事故下以穩態分析所獲之元件溫度(°C)

<b>He/Steel</b>	<b>G1O1C4</b>	<b>G1O2C3</b>	<b>G1O3C2</b>	<b>G2O1C3</b>	<b>He/SS304</b>	<b>G1O1C4</b>	<b>G1O2C3</b>	<b>G1O3C2</b>	<b>G2O1C3</b>	<b>溫度限值</b>
燃料束	255.80	254.20	251.53	265.79	燃料束	257.10	256.88	254.85	266.87	570
外包封	197.05	194.87	191.69	196.64	外包封	198.56	197.96	195.64	198.06	371.1
承載圓盤	255.80	254.19	251.52	265.78	承載圓盤	257.10	256.86	254.84	266.87	371.1
上支撐件	143.70	146.61	147.13	149.79	上支撐件	142.65	144.95	144.72	148.88	371.1
AOS	89.68	89.93	89.69	91.09	AOS	89.66	90.10	89.86	91.06	176.6
混凝土內襯	166.36	165.69	164.49	167.16	混凝土內襯	167.41	167.83	167.13	168.08	371.1
導熱圓盤	255.78	254.20	251.52	265.77	導熱圓盤	257.08	256.87	254.85	266.85	398.8
密封鋼筒	216.83	214.91	212.04	226.55	密封鋼筒	218.21	217.75	215.64	227.74	426.6
混凝土護箱	163.50	163.60	162.43	165.62	混凝土護箱	165.27	165.69	165.01	166.52	176.6
<b>Air/Steel</b>	<b>G1O1C4</b>	<b>G1O2C3</b>	<b>G1O3C2</b>	<b>G2O1C3</b>	<b>Air/SS304</b>	<b>G1O1C4</b>	<b>G1O2C3</b>	<b>G1O3C2</b>	<b>G2O1C3</b>	<b>溫度限值</b>
燃料束	278.71	278.23	275.76	282.27	燃料束	279.68	280.25	278.58	283.16	570
外包封	197.10	195.68	192.57	197.04	外包封	198.48	198.39	196.21	198.36	371.1
承載圓盤	278.71	278.20	275.74	282.26	承載圓盤	279.67	280.24	278.57	283.15	371.1
上支撐件	155.08	158.54	158.70	158.41	上支撐件	154.37	157.25	156.94	157.72	371.1
AOS	92.11	93.05	92.22	93.02	AOS	92.10	92.70	92.49	93.01	176.6
混凝土內襯	167.13	167.16	166.19	168.07	混凝土內襯	167.95	168.80	168.27	168.83	371.1
導熱圓盤	278.69	278.22	275.75	282.27	導熱圓盤	279.65	280.24	278.57	283.14	398.8
密封鋼筒	240.12	239.34	236.71	243.29	密封鋼筒	241.17	241.50	239.74	244.27	426.6
混凝土護箱	165.04	165.08	164.14	166.52	混凝土護箱	165.82	166.67	166.16	167.27	176.6

表 31、14kW 熱負載於全阻塞事故發生 72 小時後之元件溫度(°C)

<b>He/Steel</b>	<b>G1O1C4</b>	<b>G1O2C3</b>	<b>G1O3C2</b>	<b>G2O1C3</b>	<b>He/SS304</b>	<b>G1O1C4</b>	<b>G1O2C3</b>	<b>G1O3C2</b>	<b>G2O1C3</b>	<b>溫度限值</b>
燃料束	305.49	301.50	296.05	319.08	燃料束	307.03	304.25	299.28	320.55	570
外包封	193.52	187.85	181.13	187.59	外包封	195.45	191.33	185.59	189.58	371.1
承載圓盤	305.39	301.44	296.01	319.03	承載圓盤	306.94	304.19	299.24	320.49	371.1
上支撐件	129.88	134.88	135.41	141.39	上支撐件	128.92	133.39	133.54	140.97	371.1
AOS	64.23	64.93	65.94	64.56	AOS	64.26	64.97	66.01	64.63	176.6
混凝土內襯	129.91	127.65	124.89	125.52	混凝土內襯	131.00	129.63	127.11	126.75	371.1
導熱圓盤	305.45	301.43	295.97	319.02	導熱圓盤	306.99	304.19	299.22	320.49	398.8
密封鋼筒	230.61	225.89	220.00	243.72	密封鋼筒	232.32	228.93	223.75	245.31	426.6
混凝土護箱	126.07	123.89	121.23	122.73	混凝土護箱	127.10	125.77	123.33	123.92	176.6
<b>Air/Steel</b>	<b>G1O1C4</b>	<b>G1O2C3</b>	<b>G1O3C2</b>	<b>G2O1C3</b>	<b>Air/SS304</b>	<b>G1O1C4</b>	<b>G1O2C3</b>	<b>G1O3C2</b>	<b>G2O1C3</b>	<b>溫度限值</b>
燃料束	343.12	336.04	335.68	342.99	燃料束	342.15	337.88	333.35	343.44	570
外包封	194.38	183.80	181.33	186.32	外包封	192.69	187.00	180.86	187.71	371.1
承載圓盤	343.09	335.95	335.59	342.88	承載圓盤	342.12	337.78	333.30	343.35	371.1
上支撐件	148.77	152.23	155.03	155.59	上支撐件	149.00	151.23	150.73	155.33	371.1
AOS	64.59	64.66	66.51	64.85	AOS	64.60	64.64	65.59	64.84	176.6
混凝土內襯	130.36	123.04	125.81	124.08	混凝土內襯	129.67	124.53	121.85	124.64	371.1
導熱圓盤	<u>343.08</u>	<u>336.01</u>	<u>335.65</u>	<u>342.95</u>	導熱圓盤	<u>342.11</u>	<u>337.84</u>	<u>333.27</u>	<u>343.40</u>	398.8
密封鋼筒	268.99	261.43	260.24	268.15	密封鋼筒	267.85	263.58	258.82	268.79	426.6
混凝土護箱	126.49	119.38	122.14	121.31	混凝土護箱	125.85	120.78	118.20	121.85	176.6

## 六、密封鋼筒再包封安全設計之作業中需考慮因子評估

### 與建議

以上各章對於再包封作業所進行的熱流特性與參數組合之影響評估可進一步繪製如圖 28 所示之評估結果示意圖；由最初的 8 組幾何參數規劃開始，透過本研究證實在保有 1/3 流道之前提(G1O3C2)下即可確保核一乾貯系統各元件之溫度值是否符合法規。在初步剔除較不適之幾何參數配置後，本研究亦已針對各項可能的材料參數與案例進行評估，發現 G1O1C4、G1O2C3、G1O3C2 與 G2O1C3 之幾何參數在任何材料性質之參數組合下，皆能符合各項熱流設計基準事故之法規限值。

然而上述的分析結果僅意味著再包封之容器於外徑小於 1763.3mm (1703.3mm+94.5mm×2×1/3)之前提下皆符合法規限值，並可於第 5 章之各項分析結果中尋得保守涵蓋結果。但與核一乾貯之原結構設計專家進一步討論後，除了確認第三章中依循原作業程序置入再包封容器作法之可行性之外；該專家更指出上述之包封容器外徑尚需考慮原設計時混凝土內襯上緣之屏蔽塞支撐環尺寸(如圖 29 所示)，方能在不改動任何原結構設計之前提下施行再包封作業。因此，本研究在檢索原設計後確認此支撐環之內徑尺寸係為 1767.3mm，故與密封鋼筒外徑形成寬度為 32mm 之環狀空隙。在進一步與先前所篩選出的四種幾何組合後確認，選用 G1O1C4 之組合洽為最適之再包封組合；除了因該組合可保有最佳之熱傳效果之外，其所需再包封空間洽與核一設施保留之環狀空隙相符，故可在不改動既有零組件前提下達成增置再包封容器之目的。

基於以上最適因子組合之選定，預期施行再包封後之乾貯系統構造可由圖 29 加以呈現；且若假設不考慮再包封容器內氣體性質的維持與作業所需的抽換氣作業，則可逕行以屏蔽塞進行封蓋作業；此時包封容器之外形狀呈現與 TSC 幾

何相近之圓筒，惟頂部為一擴口設計，用以與原有之屏蔽塞及支撐環貼合，以成為一封閉之空間，並令內部氣體受燃料衰變熱的作用而升溫。此舉除了為 TSC 提供額外的防護層以避免鹽霧附著密封鋼筒表面，更可將密封鋼筒表面之空氣溫度調整至不致誘發 SCC 之範圍(高溫、低溼度、無鹽類)。反之，若考慮以氦氣回充的繁複作業，則需考慮為了維持氦氣而利用支撐環下方與密封鋼筒頂部存在的 95mm 空間進行頂蓋設計；但由本報告第 5 章所載之評估結果可知，採用氦氣回充並未具有關鍵性的熱流效益，又需同時考慮機構的密封機制與對再取出程序之影響，故傾向不建議此繁複之作業方式。

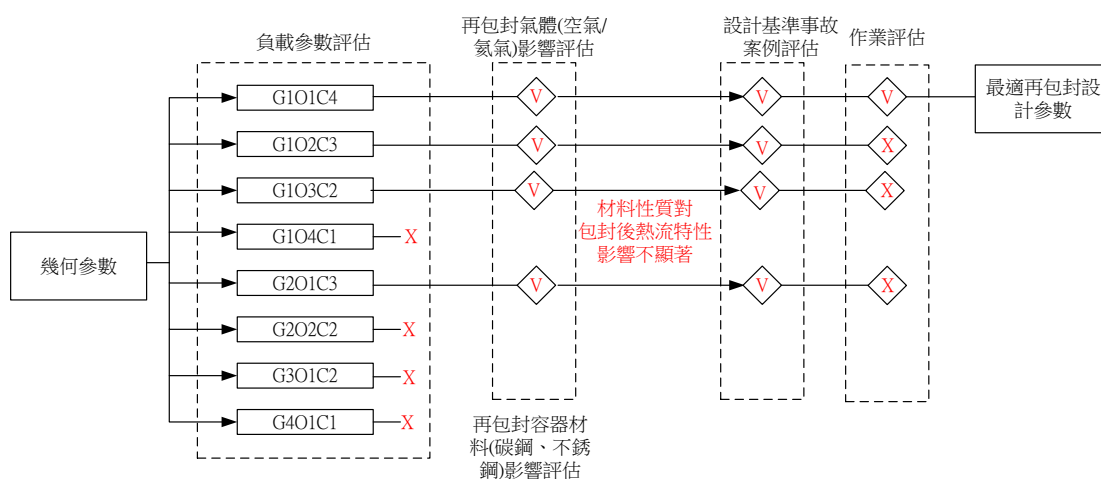


圖 28 假設性再包封容器因子評估合適性示意圖

此外，在與核研所結構專家討論後，本研究更對安全分析報告第五章有關擦拭測試(smear test)之程序進行檢視；由 5.1.2-1 頁(二)搬運乙節中所載之傳送護箱擦拭取樣計測輻射污染之程序第(6)條之描述“略為吊起密封鋼筒約 1 cm 高，開啟傳送護箱屏蔽門，就每個屏蔽門上密封鋼筒座落區域，擦拭取樣計測輻射污染。”之描述可進一步確定，主要擦拭測試係利用混凝土護箱之接合界面來執行，故在未影響此一接合界面之前提下可證實再包封作業不致影響擦拭測試之進行。

最後，綜合整理本研究各章對再包封措施於熱流影響及作業可行性等面向之討論結果後，本研究確認利用屏蔽塞支撐環內餘下之空間進行厚度與間隙各約16mm之再包封容器設計，將對系統熱流設計不致造成顯著影響。且若進一步考慮十年再檢測之需求，或許更可透過對再包封容器的檢視、內表面擦拭甚至採用嚴謹的更換程序，來取代現行具有較高人員劑量及作業困難度的密封鋼筒表面檢視作業，進而使十年再評估作業更具效益且符合原規劃目的。

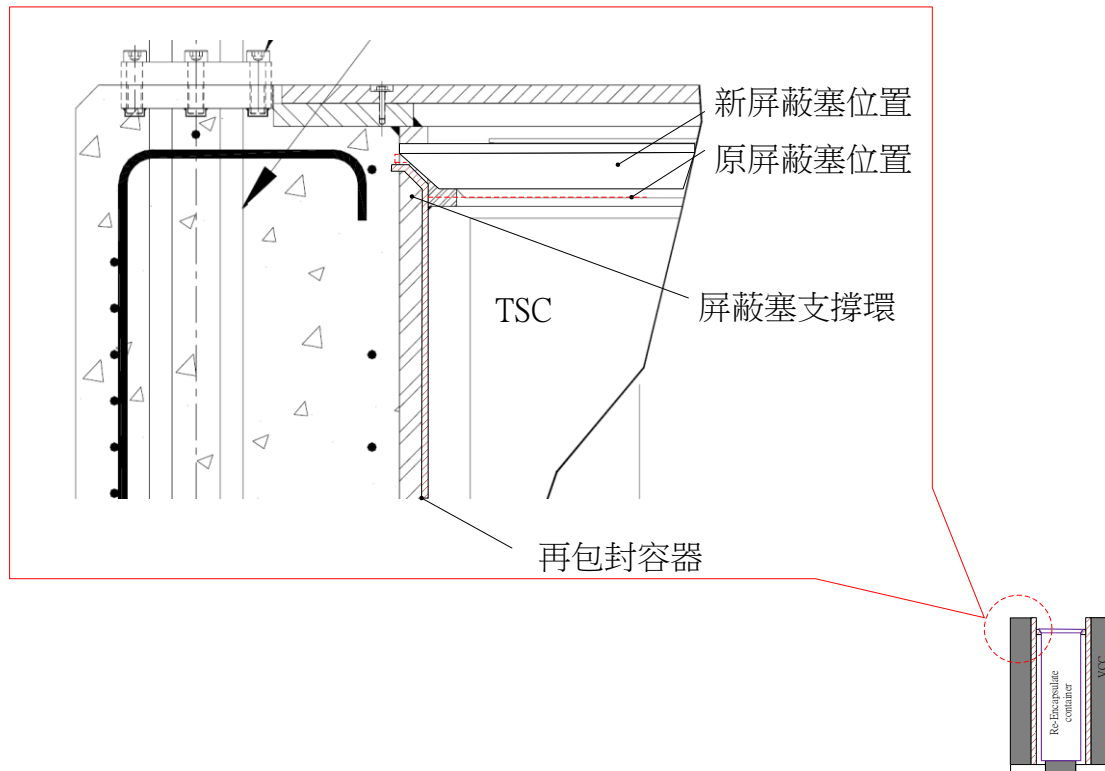


圖 29 假設性再包封容器設置位置示意圖



## 七、結論

本計畫已依完成所有假設核一乾貯設施在考慮假設性 TSC 安全疑慮之前提下，額外評估再包封作業對系統之可行性與熱流影響，以作為再取出作業之備選方案。本研究完成乙套核一乾貯二維及三維分析模式與平行驗證，並針對正常、異常及及意外事故等設計基準案例共計逾 200 例之再包封參數靈敏度測試案例，據以瞭解核一乾貯系統在進行再包封作業後對系統熱流特性及元件溫度之影響。

由二維分析模式與三維分析模式的發展過程中，本研究將以往皆未考量的護箱與外加屏蔽層底座納入模擬，進而發現核一乾貯系統所具有的承載座，將使得流入乾貯系統的空氣在流進密封鋼筒表面之前，具有更長的時間透過底座空間的迴流現象進行氣體的再分佈與液滴分離，故能更有效的避免液滴附著於密封鋼筒表面。此外，透過二維與三維分析模式的平行驗證過程工作，不僅印證了本研究所建立的二維分析技術能精確掌握穩態分析時的元件溫度，在全阻塞的暫態分析中更可求得與三維模式一致的元件溫升趨勢，這意味著本研究所建立的新分析技術，得以在不影響計算精度的前提下將計算效能大幅提升逾百倍。

而在針對正常案例進行靈敏度分析後，本研究發現即使因再包封作業而造成空氣流道面積減少至原本的 35%，但仍可保有近 90% 的對流流量。此結果除了初步證實再包封作業於熱流設計之可行性之外，更進一步的量化結果更顯示採用 G1O1C4、G1O2C3、G1O3C2 與 G2O1C3 四組參數組合皆有潛力令再包封後的核一乾貯系統符合原有熱流設計之溫度限值。

進一步透過彙整考慮熱負載、幾何組合、材料搭配並考慮 5 種設計基準事故，總計 160 例的設計基準案例之熱流結果，本研究證實無論是在 7kw 或是 14kw 的熱負載，並於不考慮利用氬氣來增進熱傳能力之前提下，再包封後的核

一乾貯系統仍能符合各項設計基準事故；尤其是在 7kw 全阻塞案例中，分析結果顯示此一系統將不會有任何事故時限，僅需以行政管制進行規範即可確保系統安全；而 14kw 的暫態分析結果亦顯示，再包封後的系統仍可滿足 72 小時內無任何元件出現超溫之設計要求。

最後，本研究在與原設計專家討論後更已確定此一構想之可行性，並證實利選用 G10IC4 之參數組合，洽可將目前乾貯系統於混凝土內襯頂部所設置的屏蔽塞支撐環與 TSC 之間保留的 32mm 環狀空間，設計一厚度與 TSC 相近之金屬再包封容器，以增到提升密封鋼筒表面空氣溫度，並避免鹽霧附著與溼氣侵入之疑慮，從而令密封鋼筒表面避免同時出現於高溼度含鹽霧之環境，進而達到提升護箱密封能力保護之構想。

## 參考文獻

- 1 行政院原子能委員會，“核能電廠用過燃料池貯存格架改裝安全分析報告審查規範，”民國 79 年 2 月 29 日，（79）會核字第 1710 號。
- 2 台灣電力公司，“核一乾貯系統安全分析報告，”民國 97 年 11 月。
- 3 台灣電力公司，“核二廠乾貯系統安全分析報告，”民國 100 年 12 月。
- 4 施純寬、曾永信“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。
- 5 ANSYS Inc., FLUENT 12.0 User's Manuals, 2009.
- 6 NRC, “Impact of Variation in Environmental Conditions on the Thermal Performance of Dry Storage Casks,” U.S. NRC, NUREG-2174, 2015.
- 7 ANSYS Inc., “FLUENT UDF Manual,” 2009.
- 8 台電/核能研究所，“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，”民國 99 年 12 月，ITITRAM CS/KS-CFD-MHD-01。
- 9 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。
- 10 施純寬、曾永信，“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。
- 11 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。
- 12 施純寬、曾永信，“乾式貯存設施設計壽命期間熱傳行為分析，”民國 103 年 12 月。
- 13 施純寬、曾永信，“核二廠用過核子燃料乾式貯存設施熱傳安全驗證研究，”民國 101 年 12 月。
14. U.S. Nuclear Regulatory Commission, “Standard Review Plan for Dry Cask Storage Systems,” NUREG-1536, U.S., January 1997.
15. U.S. Nuclear Regulatory Commission, “PACKAGING AND TRANSPORTATION OF RADIOACTIVE MATERIAL,” 10 CFR Part 71, U.S., July 2015.

## 附錄一 FLUENT 燃料源項程式碼

```

}
#include "udf.h"
#include "mem.h"
DEFINE_PROFILE(friction_factor_ATRIUM_10,t,i)
{
    real x[ND_ND];
    real a,Dh;
    cell_t c;
    Dh=12.3225E-3; /* Hydrolic
Diameter*/
    begin_c_loop(c,t)
    {
        F_PROFILE(c,t,i) =
        32./Dh/Dh/1.7812096;
    }
    end_c_loop(c,t)
}
DEFINE_PROFILE(K_LTP_C,t,i)
{
    real x[ND_ND];
    real a,Dh;
    cell_t c;
    Dh=12.3225E-3; /* Hydrolic
Diameter*/
    begin_c_loop(c,t)
    {
        a=sqrt(C_U(c,t)*C_U(c,
t)+C_V(c,t)*C_V(c,t)+C_W(c,
t)*C_W(c,t));
        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(friction_factor_LAM,t,i)
{
    real x[ND_ND];
    real a,Dh;
    cell_t c;
    Dh=12.3225E-3; /* Hydrolic
Diameter*/
    begin_c_loop(c,t)
    {
        F_PROFILE(c,t,i) =
(21.47+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_LTP_P,t,i)
)
{
    real x[ND_ND];
    real a,Dh;
    cell_t c;
    Dh=12.3225E-3; /* Hydrolic
Diameter*/
    begin_c_loop(c,t)
    {
        a=sqrt(C_U(c,t)*C_U(c,
t)+C_V(c,t)*C_V(c,t)+C_W(c,
t)*C_W(c,t));
        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)
    {
        Re=sqrt(C_U(c,t)*C_U(c,

```

```

t)+C_V(c, t)*C_V(c, t)+C_W(c,
t)*C_W(c,
t))*C_R(c,t)*Dh/C_MU_L(c,t);
    F_PROFILE(c,t,i) =
((0.620*4+0.4646*2)+(108.6*po
w(Re,-0.58)*4+2.196*pow(Re,-
0.084)+235.7*pow(Re,-
0.686)*2))/4.362577*1.7812*1.78
12096;
    }
    end_c_loop(c,t)
}

DEFINE_PROFILE(K_UTP,t,i)
{
    real x[ND_ND];
    real a,Dh,Re;
    cell_t c;
    Dh=12.3225E-3; /* Hydraulic
Diameter*/
    begin_c_loop(c,t)
    {
    Re=sqrt(C_U(c, t)*C_U(c,
t)+C_V(c, t)*C_V(c, t)+C_W(c,
t)*C_W(c,
t))*C_R(c,t)*Dh/C_MU_L(c,t);
        F_PROFILE(c,t,i) = (-
9.68+9.526*pow(Re,0.0046))/0.6
4389*1.7812*1.7812096;
    }
    end_c_loop(c,t)
}

DEFINE_SOURCE(ZONE_A, c,
t, dS, eqn)
{
    real x[ND_ND];
    real A, B, C, L1, L2, L3, f,
p0, source, height,
MaxPower,Fxz,fuel_13,fuel_14,f
uel_15,fuel_16,row_1,row_2,row
_3,row_4,cloumn_1, cloumn_2,
wide , deep, act_length;
    C_CENTROID(x, c, t);
    wide =x[0];
    height= x[1];
    deep= x[2];
    p0=0.1715;
    fuel_13=0.995391705;
    fuel_14=0.903225806;
    fuel_15=1.087557604;
    fuel_16=1.013824885;
    row_1=0.06703;
    row_2=0.243;
    row_3=0.41897;
    row_4=0.59494;
    cloumn_2=-0.33098;
    cloumn_1=-0.15501;
    act_length=3.81;
    A = p0+0.15*act_length;
    B = p0+act_length*0.55;
    C = p0+act_length*0.8;
    L1 = act_length*0.15;
    L2 = act_length*0.4;
    L3 = act_length*0.2;
    MaxPower=108.5/(0.01797
208*act_length)/0.810417;
    /* 給定擺置係數*/
    if(wide < row_1)
    {
        if(deep >
cloumn_1)
            Fxz=fuel_15;
        else
            Fxz=fuel_13;
        source =
    }
    else if (wide > row_1)
    {
        if (deep >cloumn_1)
            Fxz=fuel_16;
        else
            Fxz=fuel_14;
    }
    /*給定擺置係數完成*/
    if (A> height)
    {
        f=1-(A-height)/L1;
    }
    else if (A< height &&
height<B)
    {
        f=1;
    }
    else if (B< height &&
height <C)
    {
        f=0.95833;
    }
    else if (height>C)
    {
        if ((p0+act_length)>
height)
        {
            f=0.95833*(1-(height-
C)/L3);
        }
        else
            f=0;
    }
}

```

```

MaxPower*f*Fxz;
    return source;
#endif !PR_HOST

    if (A> height)
    {
        f=1-(A-height)/L1;
    }
    else if (A< height &&
height<B)
    {
        f=1;
    }
    else if (A< height &&
height<B)
    {
        f=1;
    }
    else if (B< height &&
height <C)
    {
        f=0.95833;
    }
    else if (height>C)
    {
        f=0.95833;
    }
    else if ((p0+act_length)>
height)
    {
        f=0.95833*(1-(height-
C)/L3);
    }
    else
    {
        f=0;
    }
    source =
MaxPower*f*Fxz;
    return source;
#endif /* !PARRLLEL*/
}

source =
MaxPower*f*Fxz;
return source;
#endif /* !PR_HOST*/
#endif !RP_NODE

    if (A> height)
    {
        real x[ND_ND];

```

```

real A, B, C, L1, L2, L3, f,           {
p0, source, height,                   Fxz=fuel_9;
MaxPower,Fxz,fuel_8,fuel_9,fuel      }
_10,fuel_11,fuel_12,row_1,row_2      else if (wide > row_2)
,row_3,row_4,cloumn_1,               {
cloumn_2, wide , deep,               {
act_length;                           {
    C_CENTROID(x, c, t);               Fxz=fuel_12;           f=0;
    wide=x[0];                          }                       }
    height= x[1];                        else if (deep >
    deep= x[2];                           cloumn_2)             source =
    p0=0.1715;                             {                       MaxPower*f*Fxz;
    fuel_8=0.96875;                       Fxz=fuel_11;         return source;
    fuel_9=1.0;                            }                       #if !PR_HOST
    fuel_10=0.953125;                     else
    fuel_11=1.046875;                     Fxz=fuel_10;        if (A> height)
    fuel_12=1.03125;                       {
    row_1=0.06703;                          }                       f=1-(A-height)/L1;
    row_2=0.243;                             }
    row_3=0.41897;                          /* 给定擺置係數完成*/
    row_4=0.59494;                          if (A> height)      else if (A< height &&
    cloumn_2=-0.33098;                       {                       height<B)
    cloumn_1=-0.15501;                       f=1-(A-height)/L1;   {
    act_length=3.81;                          }                       f=1;
    A = p0+0.15*act_length;                  else if (A< height &&
    B = p0+act_length*0.55;                  height<B)            else if (B< height &&
    C = p0+act_length*0.8;                   {                       height <C)
    L1 = act_length*0.15;                    f=1;                 {
    L2 = act_length*0.4;                      }                       f=0.95833;
    L3 = act_length*0.2;                     else if (B< height &&
    MaxPower=64.0/(0.017972                  height <C)          else if (height>C)
08*act_length)/0.810417;                   {                       {
/* 给定擺置係數*/                          f=0.95833;          height)
    if (wide < row_1)                        }                       {
    {                                         else if (height>C)   f=0.95833*(1-(height-
        Fxz=fuel_8;                          {                       C)/L3);
    }                                         if ((p0+act_length)>
    else if (wide < row_2)                  height)
        height)

```

```

else
    f=0;
}

source =
MaxPower*f*Fxz;
return source;
#endif /* !PR_HOST*/
#endif /* !RP_NODE

if (A> height)
{
    f=1-(A-height)/L1;
}
else if (A< height &&
height<B)
{
    f=1;
}
else if (B< height &&
height <C)
{
    f=0.95833;
}
else if (height>C)
{
    if ((p0+act_length)>
height)
    {
        f=0.95833*(1-(height-
C)/L3);
    }
    else
        f=0;
}

f=0;
}

source =
MaxPower*f*Fxz;
return source;
#endif /* !PARRLLEL*/
}
DEFINE_SOURCE(ZONE_C, c,
t, dS, eqn)
{
    real x[ND_ND];
    real A, B, C, L1, L2, L3, f,
p0, source, height,
MaxPower,Fxz,fuel_1,fuel_2,fuel
_3,fuel_4,fuel_5,fuel_6,fuel_7,ro
w_1,row_2,row_3,row_4,cloumn
_1, cloumn_2, wide , deep,
act_length;
    C_CENTROID(x, c, t);
    wide=x[0];
    height= x[1];
    deep= x[2];
    p0=0.1715;
    fuel_1=0.977653631;
    fuel_2=0.977653631;
    fuel_3=0.997206704;
    fuel_4=1.075418994;
    fuel_5=1.134078212;
    fuel_6=0.918994413;
    fuel_7=0.918994413;
    row_1=0.06703;
    row_2=0.243;
    row_3=0.41897;
    row_4=0.59494;
    cloumn_2=-0.33098;
    cloumn_1=-0.15501;
    act_length=3.81;
    A = p0+0.15*act_length;
    B = p0+act_length*0.55;
}

```





```

        {
            f=1;
        }
        else if (B< height &&
height <C)
        {
            f=0.95833;
        }
        else if (height>C)
        {
            f=0.95833;
        }
        else if (height>C)
        {
            if ((p0+act_length)>
height)
            {
                f=0.95833*(1-(height-
C)/L3);
            }
            else
            {
                f=0;
            }
        }
        else
        {
            f=0;
        }
        source =
MaxPower*f*Fxz;
        return source;
    }
#endif /* !PARRLLEL */
#endif /* !RP_NODE */

```

```

#if !PARALLEL

```

```

    if (A> height)
    {
        f=1-(A-height)/L1;
    }
    else if (A< height &&
height<B)
    {
        f=1;
    }

```

```

附錄二 二維模式 udf
#include "udf.h"
#include "mem.h"
DEFINE_PROFILE(friction_factor_ATRIUM_10,t,i)
{
    real x[ND_ND];
    real a,Dh;
    cell_t c;
    Dh=12.3225E-3; /* Hydrolic
Diameter*/

    begin_c_loop(c,t)
    {
        a=sqrt(C_U(c,t)*C_U(c,
t)+C_V(c,t)*C_V(c,t)+C_W(c,
t)*C_W(c,t));
        F_PROFILE(c,t,i) =
0.1015*pow(a*C_R(c,t)*Dh/C_M
U_L(c,t),0.8)/Dh/Dh*1.7812096;
    }
    end_c_loop(c,t)
}

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

    begin_c_loop(c,t)
    {
        F_PROFILE(c,t,i) =
32./Dh/Dh/1.7812096;
    }
    end_c_loop(c,t)
}

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

    begin_c_loop(c,t)
    {
        a=sqrt(C_U(c,t)*C_U(c,
t)+C_V(c,t)*C_V(c,t)+C_W(c,
t)*C_W(c,t));
        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)
    {
        Re=sqrt(C_U(c,t)*C_U(c,
t)+C_V(c,t)*C_V(c,t)+C_V(c,
t)*C_V(c,
t))*C_R(c,t)*Dh/C_MU_L(c,t);
        F_PROFILE(c,t,i) =
((0.620*4+0.4646*2)+(108.6*po
w(Re,-0.58)*4+2.196*pow(Re,-
0.084)+235.7*pow(Re,-

```

```

0.686)*2))/4.362577*1.7812*1.78      C = p0+act_length*0.8;
12096;                                  L1 = act_length*0.15;                DEFINE_SOURCE(fuel_14_a, c,
}                                          L2 = act_length*0.4;                t, dS, eqn)
end_c_loop(c,t)                          L3 = act_length*0.2;                {
}                                          height=x[0];
                                           Maxpower=1400/0.810417;            real x[ND_ND];
                                           real A, B, C, L1, L2, L3, f, p0,
DEFINE_PROFILE(K_UTP,t,i)                 if (A> height)                      source, height, Maxpower,
{                                           {                                     act_length;
  real x[ND_ND];                           {                                     C_CENTROID(x, c, t);
  real a,Dh,Re;                             f=0.95833*(1-(A-                    act_length=3.81;
  cell_t c;                                 height)/L1);                          p0=0.7211;
Dh=12.3225E-3; /* Hydrolic                }                                     A = p0+0.15*act_length;
Diameter*/                                  else if (A< height &&                B = p0+act_length*0.55;
begin_c_loop(c,t)                           height<B)                             {                                     C = p0+act_length*0.8;
{                                           {                                     L1 = act_length*0.15;
Re=sqrt(C_U(c, t)*C_U(c,                    f=0.95833;                          L2 = act_length*0.4;
t)+C_V(c, t)*C_V(c, t)+C_W(c,              }                                     L3 = act_length*0.2;
t)*C_W(c,                                   else if (B< height &&                height=x[0];
t)*C_R(c,t)*Dh/C_MU_L(c,t);               height <C)                             {                                     Maxpower=2800/0.810417;
  F_PROFILE(c,t,i) = (-                     {                                     f=1;
9.68+9.526*pow(Re,0.0046))/0.6            }                                     if (A> height)
4389*1.7812*1.7812096;                    }                                     {
}                                           else if (height>C)                   {
end_c_loop(c,t)                             {                                     f=0.95833*(1-(A-
}                                           if ((p0+act_length)>                height)/L1);
DEFINE_SOURCE(fuel_7_a, c, t,               height)                                }
dS, eqn)                                     {                                     else if (A< height &&
{                                           f=1-(height-                        height<B)
real x[ND_ND];                               C)/L3;                               {
real A, B, C, L1, L2, L3, f, p0,            }                                     f=0.95833;
source, height, Maxpower,                  }                                     }
act_length;                                else if (B< height &&                else if (B< height &&
C_CENTROID(x, c, t);                        height <C)                             height <C)
act_length=3.81;                             {                                     {
p0=0.7211;                                  f=1;
A = p0+0.15*act_length;                     }                                     f=1;
B = p0+act_length*0.55;                    }                                     }
}                                           return source;                       else if (height>C)
}                                           {

```

```
        if ((p0+act_length)>
height)
        {
            f=1-(height-
C)/L3;
        }
        else

            f=0;
    }

    source = Maxpower*f;
    return source;
}
```