

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

核二廠用過核子燃料乾式貯存  
設施熱傳分析技術研究  
期末報告

受委託機關：國立清華大學

計畫主持人：施純寬

計畫編號：100FCMA006

報告日期：中華民國 100 年 11 月

## 摘要

本計畫採用計算流體力學技術(Computational Fluid Dynamics, CFD)發展一乾貯系統熱水流平行驗證技術，經本期計畫執行後已依計畫書原訂之工作項目完成了資料蒐集、模式建立技術開發與分析用模式建立，所獲得分析模式在經過網格測試後，已應用於相關傳送與裝載階段之分析技術建立並獲得合理之分析結果。最後，本研究於計畫執行期間之所有發現亦已彙整為審查要點供原能會作為審查安全分析報告熱傳安全關鍵議題之參考資料。

關鍵字：計算流體力學、台電、平行驗證、審查要點

## **ABSACT**

In the study, the Computational Fluid Dynamics (CFD) technology has been utilized to develop a thermal hydraulic parallel validation methodology. Since the project implementation from April to June, the working items about data collection, geometries model developing, mesh sensitivity test and numerical scheme selection have been completed. The loading and transfer analysis methodology are also been developed based on the completed working items. Finally, all findings in the project are generalized as the guidelines for AEC SAR review committee.

Keywords: CFD, Taipower, Parallel Validation, Review Comment

# 目錄

摘要.....	ii
ABSACT.....	iii
目錄.....	iv
圖目錄.....	vi
表目錄.....	viii
一、研究背景與目的.....	1
二、數值模式與軟體選用.....	2
2.1 統御方程式.....	2
2.2 數值模式.....	3
2.2.1 DO 熱輻射模式.....	3
2.2.2 S2S 熱輻射模式.....	4
2.2.3 紊流模式.....	5
2.2.4 自然對流模式.....	6
2.3 軟體選用.....	7
2.3.1 審查要點.....	8
三、核二廠乾貯系統資料蒐集與匯整.....	9
3.1 廠址與氣候特性.....	9
3.1.1 審查要點.....	10
3.2 系統幾何.....	11
3.2.1 審查要點.....	12
3.3 材料性質.....	20
3.3.1 流體熱傳性質[9].....	20
3.3.2 固體熱傳性質.....	21

四、分析技術建立.....	24
4.1 幾何模型建構.....	24
4.1.1 傳送階段模型.....	24
4.1.2 貯存階段模型.....	32
4.2 網格建構與靈敏度測試.....	34
4.2.1 網格靈品質與敏度測試.....	34
4.2 模型與數值模式測試.....	39
4.3 視因子計算技術.....	45
4.3.1 技術建立.....	45
4.3.2 計算結果.....	47
4.3.3 審查重點.....	47
4.4 模擬所需經驗式匯整與 UDF 建立.....	51
4.4.1 對流係數.....	51
4.4.2 軸向功率.....	53
4.4.3 審查要點.....	54
4.5 系統傳送與裝載階段之分析技術建立.....	55
4.5.1 審查要點.....	55
4.6 貯存階段之分析技術建立.....	57
4.6.1 審查要點.....	58
五、已獲得之熱流評估要點匯整.....	62
六、結論與未來工作.....	64
參考文獻.....	65
附錄.....	66

## 圖目錄

圖 1 核二廠廠址.....	10
圖 2 燃料提籃結構.....	13
圖 3 密封鋼筒.....	14
圖 4 傳送護箱.....	15
圖 5 混凝土護箱.....	16
圖 6 凝鋼質底座.....	17
圖 7 混凝土內襯.....	18
圖 8 1/4 傳送護箱模型示意圖 .....	27
圖 9 1/4 傳燃料提籃模型示意圖 .....	28
圖 10 整體燃料套筒結構與內部中子吸收板貼附狀況.....	29
圖 11 燃料組件示意圖(紅色：active length) .....	30
圖 12 傳送階段模擬用模型示意圖.....	31
圖 13 貯存階段模型.....	33
圖 14 傳送階段模型之網格分佈.....	36
圖 15 貯存階段模型之網格分佈.....	37
圖 16 燃料提籃之網格精進；(a)原始網格；(b)精進後網格。 .....	38
圖 17 傳送護箱試跑溫度分佈結果-整體 .....	42
圖 18 傳送護箱試跑溫度分佈結果-軸向截面 .....	43
圖 19 傳送護箱試跑溫度分佈結果-軸向截面 .....	43
圖 20 混凝土護箱試跑溫度分佈結果-軸向截面 .....	44
圖 21 混凝土護箱試跑速度分佈結果-軸向截面 .....	44
圖 22 核二廠乾貯廠址護箱擺置方式.....	48
圖 23 視因子計算用模型示意圖.....	49

圖 24 視因子計算結果.....	49
圖 25 混凝土護箱視因子分佈(a)內側；(b)外側 .....	50
圖 26 核二廠待貯燃料軸向功率分佈圖.....	53
圖 27 正常貯存邊界條件之測試結果.....	59
圖 27 進氣口半阻塞案例之測試結果.....	60
圖 27 進氣口全阻塞案例之測試結果.....	61

## 表目錄

表 1 核二乾貯系統重要尺寸列表.....	19
表 2 液態水熱傳性質.....	20
表 3 氬氣熱傳性質.....	20
表 4 空氣熱傳性質.....	21
表 5 中子屏蔽(NS-4)熱傳性質.....	21
表 6 不銹鋼(304 及 304L)熱傳特性.....	21
表 7 碳鋼(A-36、A-533 及 SA-588)熱傳特性.....	22
表 8 鉛屏蔽熱傳特性.....	22
表 9 鋁合金(6061-T651)熱傳特性.....	22
表 10 鋁合金熱傳特性.....	22
表 11 燃料丸(UO <sub>2</sub> )熱傳特性.....	23
表 12 混凝土熱傳特性.....	23
表 13 模型試跑用之固體元件性質表.....	40
表 14 模型試跑用之流體材料性質表.....	41
表 15 模型試跑用所選用之數值模式.....	41
表 16 傳送與裝載階段模式變更設定表.....	56
表 17 貯存階段傳送與裝載階段模式變更設定表.....	58



## 一、研究背景與目的

台電公司核二廠商業運轉至今已逾 30 年，更換下來之用過核子燃料均暫存於用過燃料池，由於用過燃料池貯存容量設計不足存放 40 年運轉之用過核子燃料，因此台電公司規劃於核二廠內興建乾式貯存設施。經濟部已於 98 年 8 月底核定核二廠用過核子燃料乾式貯存設施計畫，規劃之貯存容量為 2,400 束之用過核子燃料。該計畫之環差分析報告，環保署已於 99 年 1 月審查通過。台電公司並於 99 年 11 月完成本案之招標作業，由我國俊鼎公司與美國 NAC 公司共同承攬。

依據台電公司原訂之時程規劃，其將於 100 年 11 月提送核二廠用過核子燃料乾式貯存設施建造執照申請案，其中乾式貯存設施熱傳之安全評估為設施安全的關鍵議題。行政院原子能委員會放射性物料管理局為確保台電提交之相關分析報告確實足以用於證實其乾貯系統之實際熱流行為，遂委託本團隊執行「核二廠用過核子燃料乾式貯存設施熱傳分析技術研究」一案，以先期掌握核二廠用過核子燃料乾式貯存設施熱傳安全關鍵議題，以確保核子燃料貯存之安全。

本研究計畫之全程目的，乃是蒐集核二廠用過核子燃料乾貯系統中與熱傳機制相關之設計資料，並建立用過核子燃料乾式貯存設施之熱傳分析技術，建立核二廠用過核子燃料乾貯系統熱傳評估之平行驗證模式，以商用計算流體力學程式進行乾貯系統之熱傳分析技術，包括乾貯系統資料之蒐集、模式建立與簡化影響評估，假設與參數靈敏度分析等工作，整理乾貯系統之熱傳分析審查要點，以供未來審查作業之用，提昇熱傳安全分析審查品質。

## 二、數值模式與軟體選用

### 2.1 統御方程式

本研究將以商用計算流體力學軟體為基礎，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，以獲得足夠之分析結果供台電提交之安全分析報告進行比對，以完成平行驗證之工作。基於乾貯系統於貯存於裝載、傳送以及貯存之不同狀態下，其熱流特性可由以下統御方程式[1]加以描述：

#### 質量守恆方程式

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

其中，

$\rho$  為流體密度；

而  $\vec{v}$  為速度向量。

#### 動量守恆方程式

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

其中， $p$  為靜壓力， $\rho \vec{g}$  為重力項；

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

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

其中，

$\mu$  為流體黏滯係數；

$I$  則為單位張量。

## 能量守恆方程式

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

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，但對於熱輻射機制之模擬仍無法藉由以上模式來描述。在 FLUENT 中內建有許多的熱輻射模擬模式，例如：S2S、DO 模式、P1 模式等。其中 DO 模式除已於許多乾貯相關的研究中被加以應用外，於本研究團隊中經過妥善的校驗，且具有充份的使用經驗。故於本計畫中，擬採用 DO 模式進行乾貯系統內之熱輻射機制之模擬，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：

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

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

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

$\lambda$  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 S2S 熱輻射模式

除了以往常用於乾貯之 DO 輻射模式外，FLUENT 程式中亦具備了 Surface to Surface (S2S) 模式，此一模式藉由計算各表面間的輻射熱通量的方法來達成模擬輻射熱傳之目的，其基本定義可以藉由下式表示：

$$q_{1,2}'' = \sigma \times \varepsilon \times F_{1,2} \times (T_1^4 - T_2^4) [2] , \quad (8)$$

其中， $q_{1,2}''$  代表兩平面之輻射熱通率， $\sigma$  為波茲曼常數， $\varepsilon$  則為材料表面放射率。而任兩表面之視因子(View Factor)， $F_{1,2}$ ，則可被表示為下式：

$$F_{1,2} = \frac{1}{A_1} \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{\cos\theta_1 \cos\theta_2}{\pi r^2} dA_1 dA_2 . \quad (9)$$

本平行驗證工作將此法納入之原因在於 DO 模式由於是求解輻射傳輸方程式來進行輻射模擬，故其模擬期間將不會計算表面間之視因子。這使得本驗證工作在進行混凝土護箱表面之有效視因子計算時，需得採用輻射通量進行轉換；故為確保計算所得之有效視因子正確無誤，本平行驗證工作中，一併將此法納入以作為比對之依據。

### 2.2.3 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[3, 4]可以表示為：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \tilde{G}_k - Y_k + S_k \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + \tilde{G}_\omega - Y_\omega + S_\omega \quad (11)$$

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：

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} ; \quad (12)$$

$$\Gamma_\omega = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} ; \quad (13)$$

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：

$$\mu_t = \alpha^* + \frac{\rho k}{\omega} ; \quad (14)$$

其中，紊流阻尼  $\alpha^*$  可以定義為

$$\alpha^* = \alpha_\infty^* + \left( \frac{\alpha_0^* + \text{Re}_t / \text{R}_k}{1 + \text{Re}_t / \text{R}_k} \right); \quad (15)$$

而， $\alpha_\infty^*$  為阻尼；

$$\text{Re}_t = \frac{\rho k}{\mu \omega}; \quad (16)$$

$$\text{R}_k = 6; \quad (17)$$

$$\alpha_0^* = \frac{\beta_i}{3}; \quad (18)$$

$$\beta_i = 0.072。 \quad (19)$$

#### 2.2.4 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；而對於理想氣體而言，則可令 FLUENT 直接以理想氣體方程式來進行密度之計算；然而由於本分析中除了屬於理想氣體之空氣與氬氣外，仍有不適用於理想氣體方程式之水；故採用此法並非最壓之處置方式。目前最常用的方法乃是採用博欣尼克近似法 (Boussinesq approximation) 來針對流體密度的變化進行處理：

$$\rho = \rho_0(1 - \beta(T - T_\infty))， \quad (20)$$

而其中流體之  $\beta$  值為流體之熱膨脹係數。

由於博欣尼克近僅法具有較易收斂之特性，因此在本研究中將採用此法來處理乾貯內部自然對流之現象。

## 2.3 軟體選用

透過以上統御方程式之描述以及所需之數值模式的說明，本平行驗證計畫即針對市售商用 CFD 軟體進行評選，最後在考量軟體成熟度、使用經驗與軟體適用性後，決定以美國 ANSYS 公司之 FLUENT V12.0[1]作為分析技術之核心，以完成本校驗技術之發展工作。相關評選依據條列如下：

1. 本團隊使用 FLUENT 進行分析已有多年經驗，近年更以此軟體完成許多與核能或乾貯相關之研究工作(REFERENCE)；
2. FLUENT 本身具有強大的平行計算能力，考量本平行驗證將花費許多計算資源，此能力將有助於縮減計算時間；
3. FLUENT 的使用者自定函數功能(UDF)[5]可用於擴充邊界條件，使其詳實模擬真實物理現象；
4. 核研所於民國 99 年藉由 FLUENT 發展一套適用於乾貯存之分析方法論[6]，該方法論已經原能會審查通過，故選用此套分析軟體對於平行驗證有其實際意義。

### 2.3.1 審查要點

1. 核二廠乾貯熱流分析報告所使用之軟體與模式是否提供充足之計算書以確認其正確性；
2. 核二廠乾貯熱流分析報告所使用之軟體是否已經過完整的精確性與適用性評估；例如與已核准之軟體分析結果或具可信度之實驗數據比對，並說明其差異性。



### 三、核二廠乾貯系統資料蒐集與匯整

本章主要用以陳述所蒐集到的相關廠址特性、系統幾何與材料性質等資訊，以供後續之執行審查工作與平行驗證之用。其中，相關廠址特性主要來自於氣象與地理資料蒐集，其可作為環境溫度與日照之設定依據。而系統幾何資料與材料性質則是用以進行分析模式建立，並依據其加工方法，評估熱流分析報告中所使用假設之保守性。

#### 3.1 廠址與氣候特性

核二廠座落於新北市萬里區(25.207235, 121.65971)，此處依氣象局之統計資料，其夏日平均最高溫度達 28.5°C 而冬季平均為 15.1°C。全年降雨天數約為 184 天，主要集中於 10 月~3 月期間。

基於所蒐集之資料核二廠乾貯之貯存廠址與熱流分析有關之資訊可條列如下：

- 夏季為高溫且具有長日照之天候，其夏季平均溫度為 28.5°C；
- 冬季濕冷，平均冬季溫度為 15.1°C，但無下雪之疑慮。
- 座標為(25.207235, 121.65971)，在不考慮遮蔽效應下，正午最大日照強度約為 1030W/m<sup>2</sup>。

依據以上所述，若假設每日日照為 8 小時，並忽略其單日中日照角度改變所造成的輻射量變化，則核二廠廠址之最大平均直射日照輻射量仍僅有 343 W/m<sup>2</sup>，仍小於 10 CFR 71[7]中所規範之 387.6 W/m<sup>2</sup>，因此選用 10CFR 71 將可確保有最佳保守度。

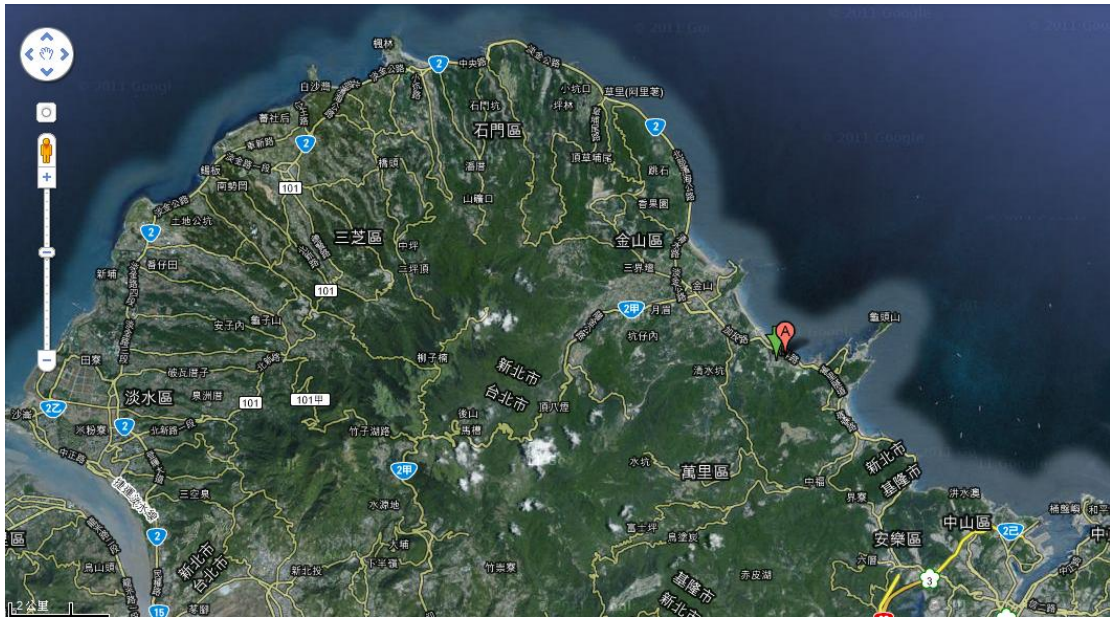


圖 1 核二廠廠址

### 3.1.1 審查要點

熱流分析之結果將會受最終熱沉與日照效應之影響，故核二乾貯熱流分析於送審時需注意其所採用之環境溫度與日照輻射強度是否符合其廠址特性：

A·依中央氣相局資料顯示，核二乾貯廠址屬於夏季少雨之條件，平均溫度為  $28.5^{\circ}\text{C}$  以上，故正常貯存溫度需定義高於此溫度。

B·未來審查過程中需注意其日照假設乃是依 10 CFR 71 為之。

## 3.2 系統幾何

依據台電所提供之 MAGNASTOR 系統第 0 版 FSAR [8] 之 1.8 節-已核准之圖面(License Drawing)之資料得知，核二乾貯系統為一可容納 87 束 BWR 用過核子燃料之系統，其單一燃料套筒為一外徑 6.59 吋之方型管，內嵌中子吸收板與其蒙皮後，內徑為 5.86 吋。此外值得注意的是，此系統與核一乾貯系統不同，核一之系統中各個待貯燃料皆是裝入燃料提籃之套筒中；但核二系統採用交錯式組合法，四個相臨的套筒藉由螺栓扣鎖而形成一組額外的容納空間(如圖 2 所示)；此一配置周期性地出現於整個系統中，直到最外側處，再以額外之護板加以固定，進而組合出可容納 89 個燃料組件的空間，其中由於 2 個空格將設計供抽排水之用，故整個系統中有兩個空格不存放燃料。

這此一組合後的提籃將會置於一外徑為 72 吋，高度為 191.8 吋之密封鋼筒(見圖 3) 內；鋼筒的上蓋為 9 吋厚而下底則為 2.75 吋厚，鋼筒厚度則為 0.5 吋厚。在用過燃料置入筒內後，上蓋將會施以焊接以達密封之目的。

由於傳送之屏蔽需求，密封鋼筒需置於傳送護箱內以降低輻射強度，此一護箱之高度約為 197.6 吋，外徑約為 88 吋，其結構乃是以四層材料-包括-鋼、鉛以及中子吸收材所組成(見圖 4)配合一鋼質底殼所構成。另外，值得一提的是，此系統之傳送護箱具有水封，可於各種階段的工作期間由側邊底部注水進行冷卻，而被加熱的水將由側邊上方流出系統。

透過傳送護箱傳送後的密封鋼筒，將會置入一混凝土護箱(圖 5)中進行長期貯存。此一護箱外徑約為 136 吋，高約 225.3 吋，其內部有一鋼質底座(圖 6)提供密封鋼筒乘載之用。值得注意的是，此一底部有四個四個通氣口供空氣流入護箱內，並令空氣得以沿密封鋼筒表面與護箱內襯(圖 7)之間約 3.75 吋之間隙向上流動而達冷卻之目的；最後受熱後的空氣將會經由混凝土護箱上方的出氣孔排出系統外。以上為所蒐集之乾貯系統各元件之主要尺寸與功能描述，而相關重要尺寸經整理後如表 1 所示。

### 3.2.1 審查要點

經由以上對系統結構之描述，為確保元件設計加工所可能存在之公差已於分析中加以考慮，故需注意以下項目：

- A · 燃料套筒之結合栓為活動件，其中必存在加工公差，因此於分析過程中需使用合理之處置，以確保此處之接觸熱阻已被保守考量；
- B · 模擬時傳送護箱表面是否採用保守之邊界條件為之，例如冷卻水流量及溫度以及環形冷卻設計之進水口可能存在較高壓降故需注意泵浦於此壓損下之實際水量；
- C · 未來實際審查時需注意相關元件之幾何與模型是否有進行更動，且相關計算書是否反應此一更重或是證明原有設定之保守性。

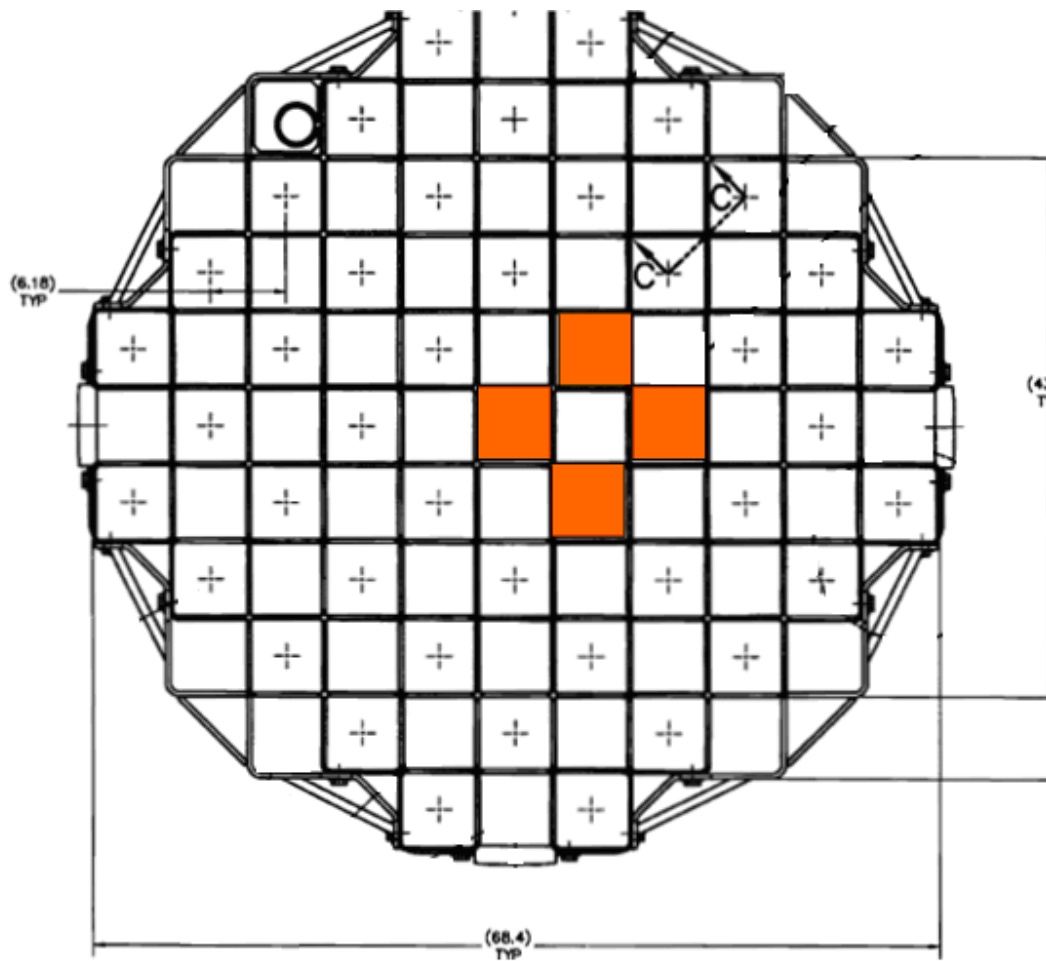


圖 2 燃料提籃結構

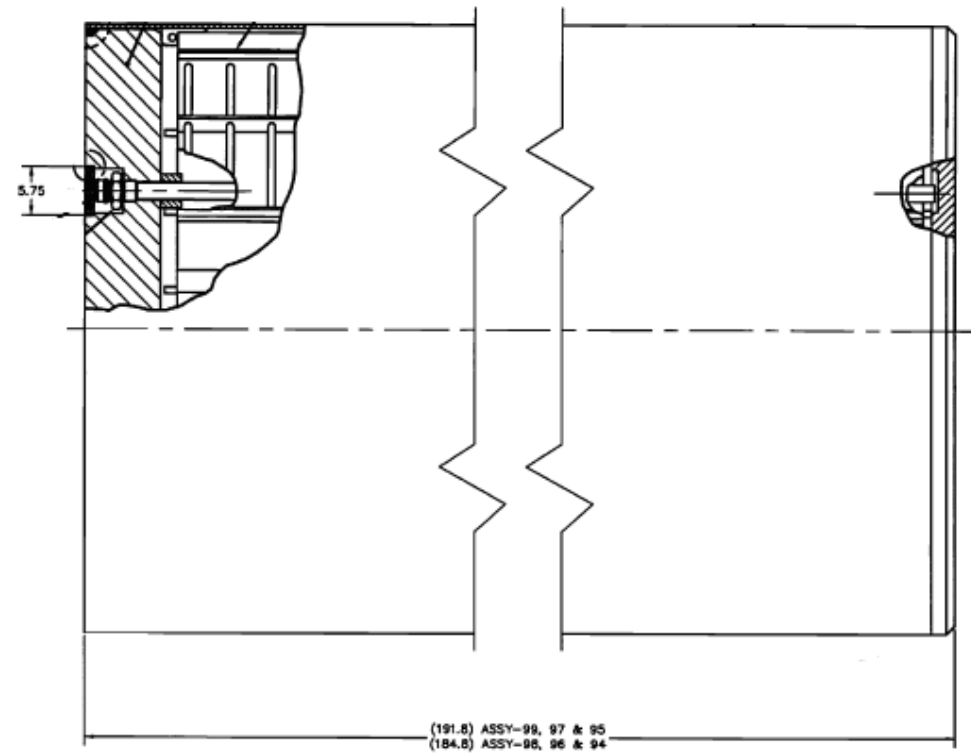
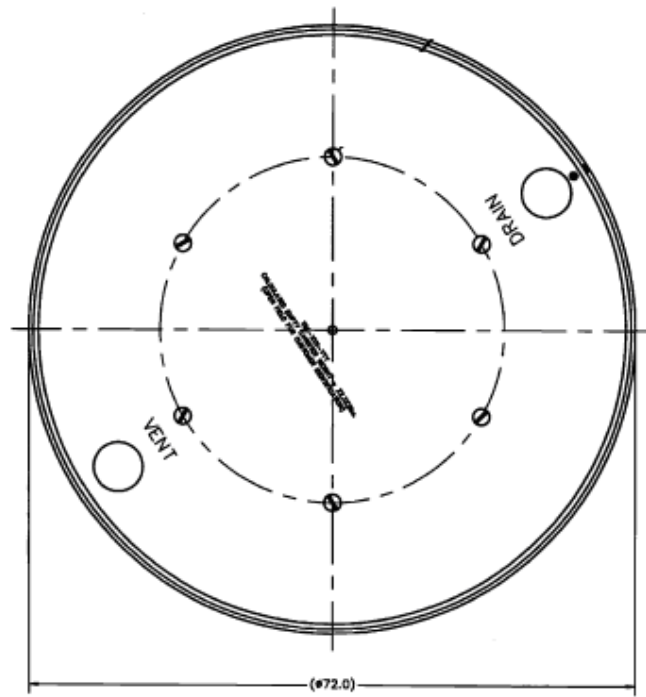


圖 3 密封鋼筒

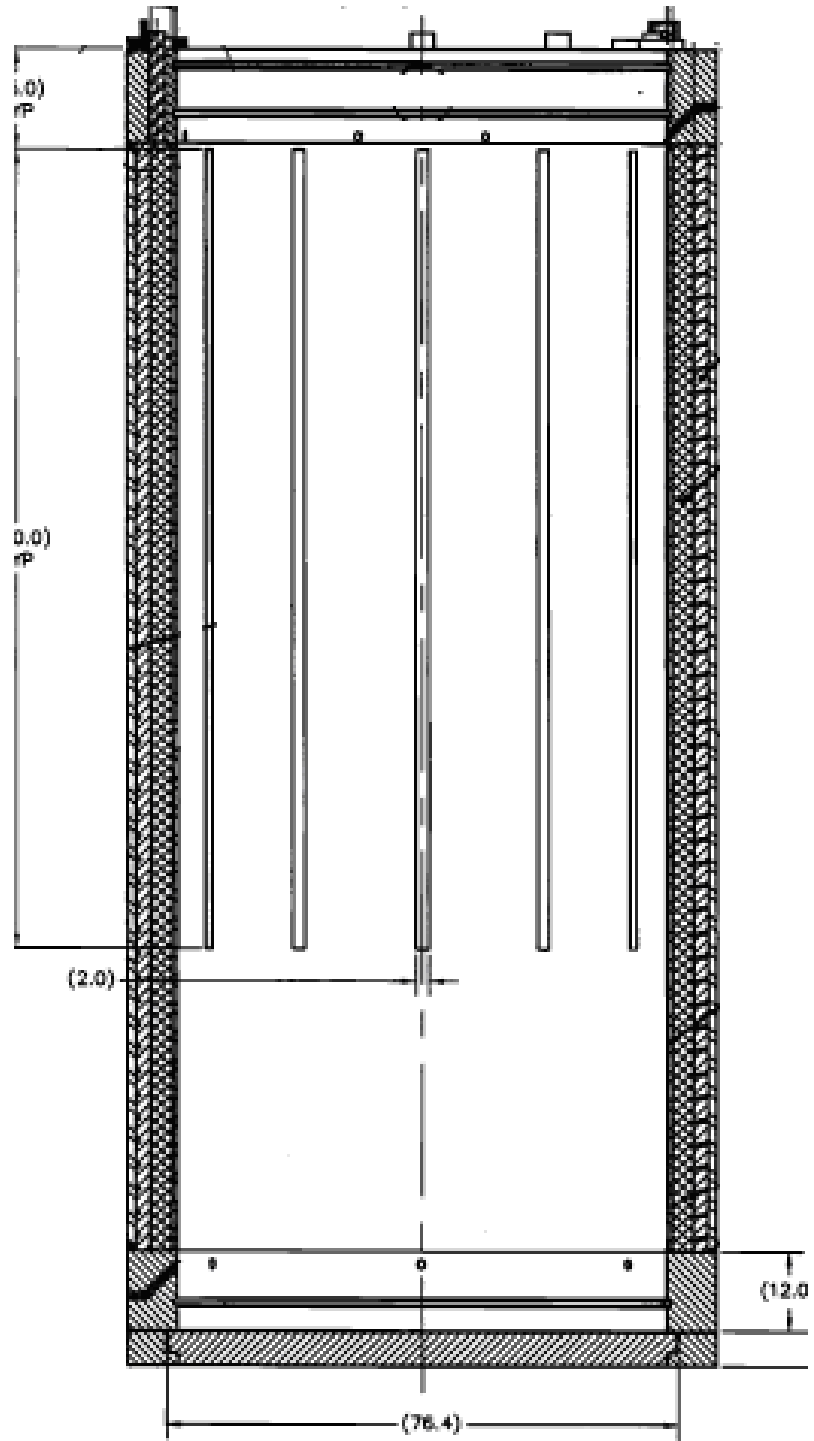


圖 4 傳送護箱

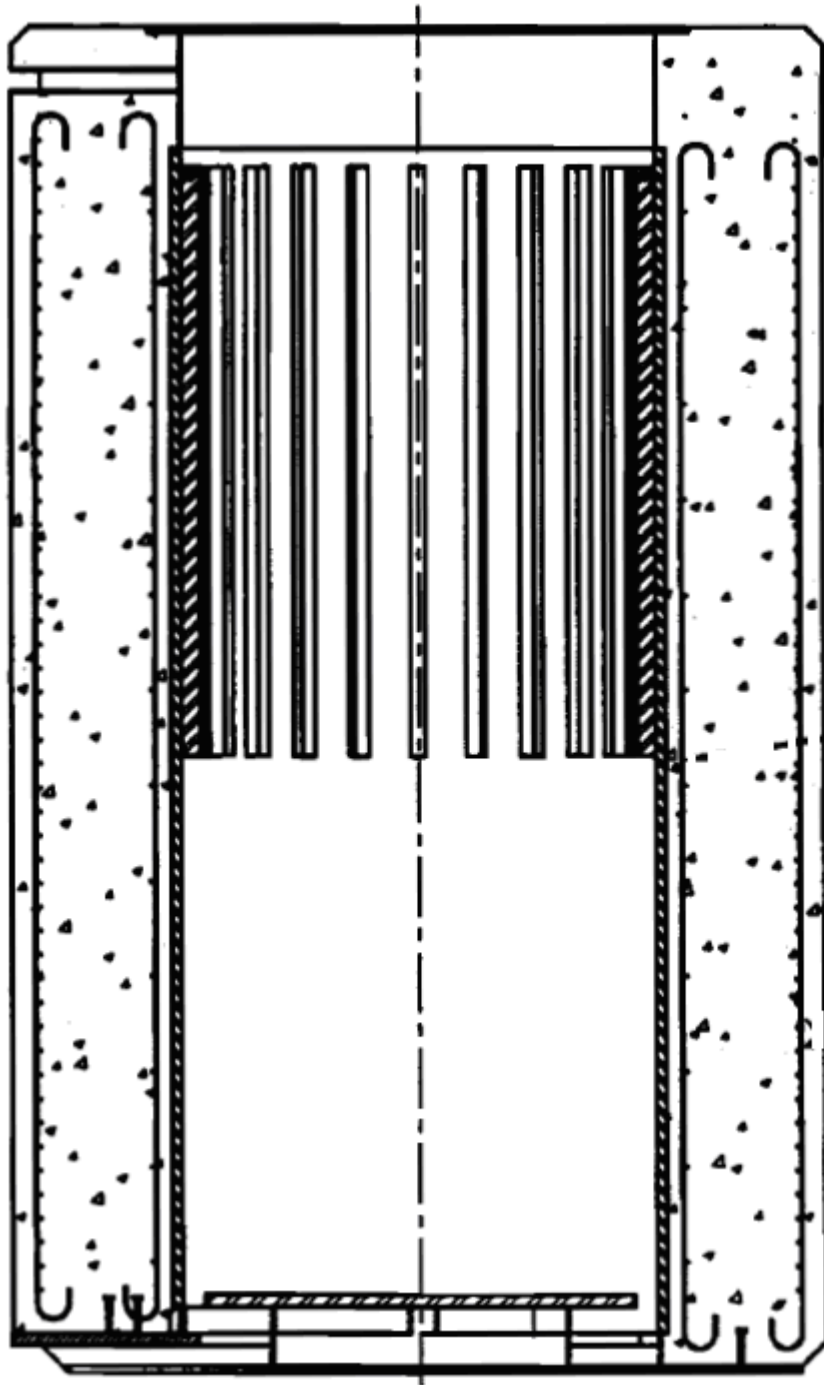


圖 5 混凝土護箱



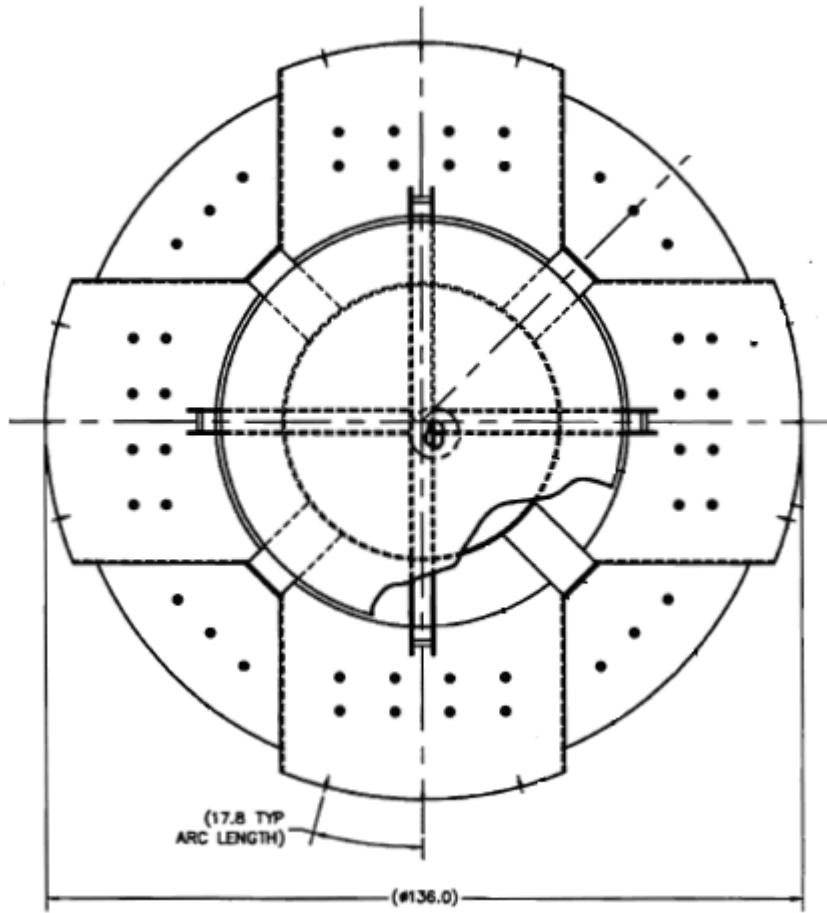


圖 6 凝鋼質底座

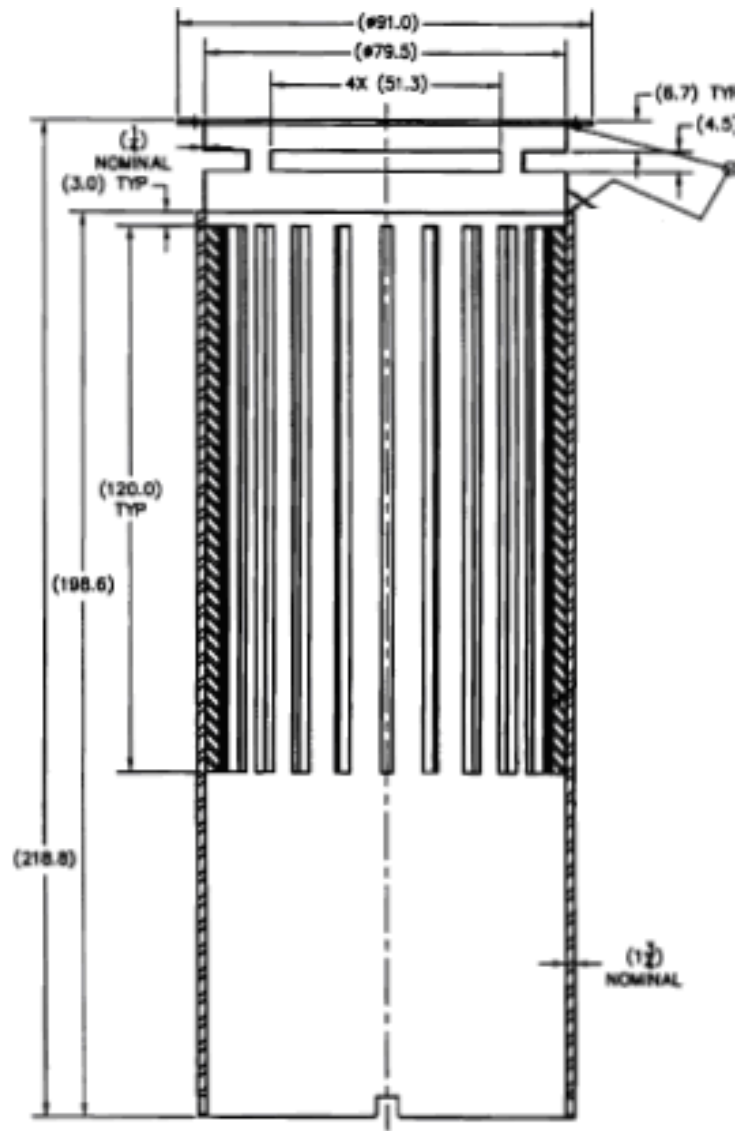


圖 7 混凝土內襯

表 1 核二乾貯系統重要尺寸列表

系統組件	元件	特徵尺寸	數值(吋)
密封鋼筒		直徑	72
		長度	191.8
		厚度	0.5
燃料提籃		長度	179.5
		直徑	70.76
		總貯存量	87
		套筒數	45
混凝土護箱	內襯	厚度	1.75
		外徑	83
	通氣孔	高度	2
		寬度	136
	混凝土	厚度	26.5
傳送護箱	內殼板	厚度	0.75
	外殼板	厚度	1.25
	鉛屏蔽	厚度	3.2
	中子屏蔽	厚度	2.25
	屏蔽門	厚度	5

### 3.3 材料性質

核二廠乾貯系統各元件之熱傳特性經蒐集後整理為流體與固體兩類，以下將分析詳述所蒐集到之材料與其處理後之結果。

#### 3.3.1 流體熱傳性質[9]

本系統使用到的流體主要包括，裝載與冷卻所需之液態水、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所示：

表 2 液態水熱傳性質

	溫度(K)					
	300	320	340	350	360	373.15
DENSITY (Kg/m <sup>3</sup> )	997.009	989.120	979.4319	973.710	967.118	957.854
Cp (J/Kg-K)	4179	4180	4188	4195	4203	4217
Viscosity (N-s/ m <sup>2</sup> )	8.55e-4	5.77e-4	4.20e-4	3.65e-4	3.24e-4	2.79e-4
Thermal Conductivity (W/m-K)	0.613	0.640	0.660	0.668	0.674	0.680

表 3 氦氣熱傳性質

	溫度(K)					
	300	400	500	600	700	800
DENSITY (Kg/m <sup>3</sup> )	0.1625	0.1219	0.09754		0.06969	
Cp (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
Thermal Conductivity (W/m-K)	0.152	0.187	0.220	0.252	0.278	0.304

表 4 空氣熱傳性質

	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
Cp (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
Thermal Conductivity (W/m-K)	0.0263	0.0338	0.0407	0.0469	0.0524	0.0573

### 3.3.2 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 5 中子屏蔽(NS-4)熱傳性質

熱 傳 特 性	NS-4-FR	NS-3
Conductivity (BTU/h-in-°F)	0.0311	0.0407
Density (lbm/in <sup>3</sup> )	0.0589	0.0621
Specific Heat (BTU/lbm-°F)	0.319	0.149

表 6 不銹鋼(304 及 304L)熱傳特性

熱 傳 特 性	溫 度 (°F)				
	100	200	400	550	750
Conductivity (BTU/h-in-°F)	0.7250	0.7750	0.8667	0.9250	1.0000
Density (lbm/in <sup>3</sup> )	0.2896	0.2888	0.2872	0.2857	0.2839
Specific Heat (BTU/lbm-°F)	0.1156	0.1202	0.1274	0.1314	0.1355
Emissivity	0.36				

表 7 碳鋼(A-36、A-533 及 SA-588)熱傳特性

熱 傳 特 性	溫 度 (°F)					
	100	200	400	500	700	800
Conductivity (BTU/h-in-°F)	1.992	2.003	2.017	1.975	1.867	1.808
Density (lbm/in <sup>3</sup> )	0.284					
Specific Heat (BTU/lbm-°F)	0.113					
Emissivity	0.8					

表 8 鉛屏蔽熱傳特性

熱 傳 特 性	溫 度 (°F)			
	209	400	581	630
Conductivity (BTU/h-in-°F)	1.6308	1.5260	1.2095	1.0079
Density (lbm/in <sup>3</sup> )	0.411			
Specific Heat (BTU/lbm-°F)	0.03			
Emissivity	0.28			

表 9 鋁合金(6061-T651)熱傳特性

熱 傳 特 性	溫 度 (°F)					
	200	300	400	500	600	750
Conductivity (BTU/h-in-°F)	8.25	8.38	8.49	8.49	8.49	8.49
Specific Heat (BTU/lbm-°F)	0.23					
Emissivity	0.22					

表 10 鋁合金熱傳特性

熱 傳 特 性	溫 度 (°F)			
	392	572	752	932
Conductivity (BTU/h-in-°F)	0.69	0.73	0.80	0.87
Density (lbm/in <sup>3</sup> )	0.237			
Specific Heat (BTU/lbm-°F)	0.072	0.074	0.076	0.079
Emissivity	0.75			

表 11 燃料丸(UO<sub>2</sub>)熱傳特性

熱 傳 特 性	溫 度 (°F)				
	100	257	482	707	932
Conductivity (BTU/h-in-°F)	0.380	0.347	0.277	0.236	0.212
Specific Heat (BTU/lbm-°F)	0.057	0.062	0.067	0.071	0.073
Density (lbm/in <sup>3</sup> )	0.396				
Emissivity	0.85				

表 12 混凝土熱傳特性

熱 傳 特 性	溫 度 (°F)		
	100	200	300
Conductivity (BTU/h-in-°F)	0.091	0.089	0.086
Density (lbm/in <sup>3</sup> )	140		
Specific Heat (BTU/lbm-°F)	0.2		
Emissivity	0.9		
Absorptivity	0.6		

## 四、分析技術建立

本計畫在完成相關廠址、幾何與材料之資料蒐集後，隨即進行分析技術之建立，相關工作項目包括有幾何模型建構、網格生成與測試、視因子計算與計算案例之條件轉換技術建立等工作。

### 4.1 幾何模型建構

考量本計畫所建立之乾貯模式，未來將應用於核二廠乾貯系統之熱傳分析平行驗證上。因此需建立完整且足夠精確之乾貯系統模型，以期在最佳預估之前提下進行模式的設定與相關熱傳分析，而作為申照審查之依據。有鑑於此，模型的建立於本計畫中將為首要之關鍵工作。依據 3.1 節所蒐集而得之細部工程圖本研究採用了適當的 CAD/CAM 軟體先行進行二維圖面繪製，以獲得足以表達所有元件斷面狀況之特徵圖面，再結合 FLUENT 之前處理程式-GAMBIT 進行 3-D 模型之建立與參數設置。

#### 4.1.1 傳送階段模型

此一模型包含傳送護箱及密封鋼筒兩個重要組件，在參照圖 2~圖 4 之幾何形狀與表 1 所列之重要尺寸後即利用 CAD 軟體進行模型截面繪製，並匯入 GAMBIT 中進行三維模型建立。

由於實際幾何形狀包含有許多不影響熱傳分析或是可藉由熱傳理論加以簡化之處，例如：螺栓、倒角、間隙與吊耳等；這些部分在模型建立先必需先行加以評估並擬定其簡化方式，以確保本分析模式之可靠性。以下將逐項陳述相關假設與簡化設定：

1. 傳送護箱底部側邊以鑽孔方式作為環狀冷卻系統之注水進口。考量此一熱傳機制主要作用於密封鋼筒表面，並與流量、間隙有直接關



係，故進口處之分佈差異所造成之影響有限；故將此進口假設為一環狀進口；

2. 傳送護箱底部屏蔽門具有複雜之機構，以令其有閉合與開啟之功能因不影響熱傳評估結果，故將此屏蔽門假設為單純鋼板；
3. 傳送護箱之外側由四層不同材質之片狀結構組成，考量此處為不可動件，且其公差間隙所造成之熱傳阻抗可以由各層材料之性質處置來表現，故於模型建立時忽略其實際間隙；
4. 傳送護箱之吊耳、嵌板、螺絲、導槽與水封因所在之處並非主要熱傳途徑，故於模擬過程中予以忽略；
5. 密封鋼筒上下緣之倒角對於熱傳影響有限，故於模擬中予以忽略；
6. 燃料提籃之中子吸收板雖採用螺絲鎖固，但由於其所佔面積比極小，因此予以忽略；
7. 雖然中子吸收板可能與提籃存在間隙，但由於提籃內總體積固定，因此在元件尺寸固定之前提下，各元件與間隙所佔之體積比並無不同，因此於建模時予以忽略；
8. 實際系統中之燃料套筒間採用螺栓扣鎖之方式進行，為節省計算資源此處之結構簡化為各套筒間存在一間隙，並於模擬時以一維熱阻加以表現，此熱阻之性質依提籃內之流體性質而改變，而厚度則依實際加工可能存在之公差(0.1mm)進行設置。
9. 燃料匣由於厚度有限(0.254cm)，且若忽略時可降低燃料組件之整理熱傳導係數，故於模擬中將其簡化；
10. 燃料組件內之燃料束與格架若進行實體模擬時將導致計算資源暴增，因此燃料組件內之結構將以多孔性材質進行均質化處置；
11. 中子吸收板表面覆有一層極薄之保護層，由於此為一單純之平板結構因此於模擬中將其與中子吸收板合併為一元件，並利用等效熱傳導係數進行模擬。

經上述之簡化與處置後，所獲得之傳送護箱與密封鋼筒等各元件之幾何模型如圖 8~圖 11 所示，而將相關模型結合後可用於核二乾貯系統傳送階段熱流分析之模型則如圖 12 所示。

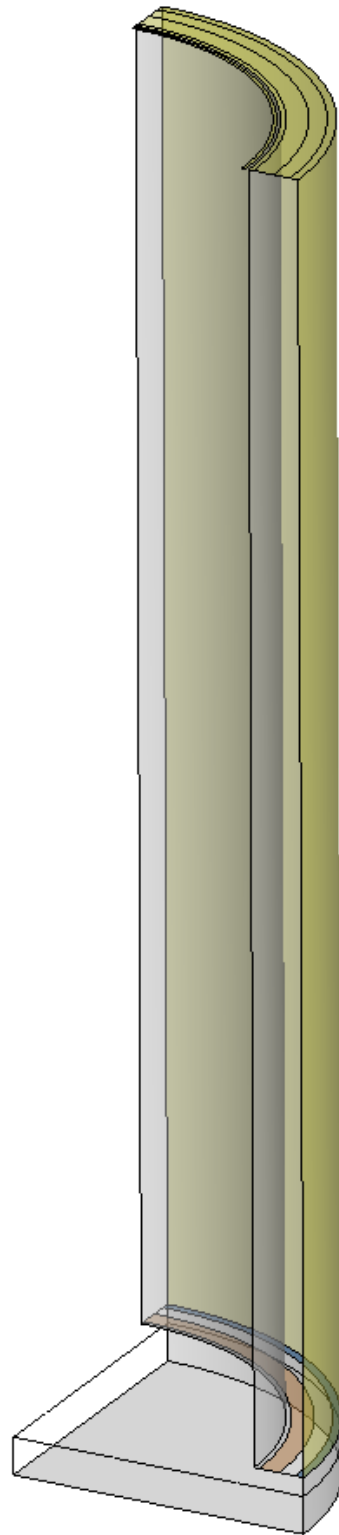


圖 8 1/4 傳送護箱模型示意圖



圖 9 1/4 傳燃料提籃模型示意圖

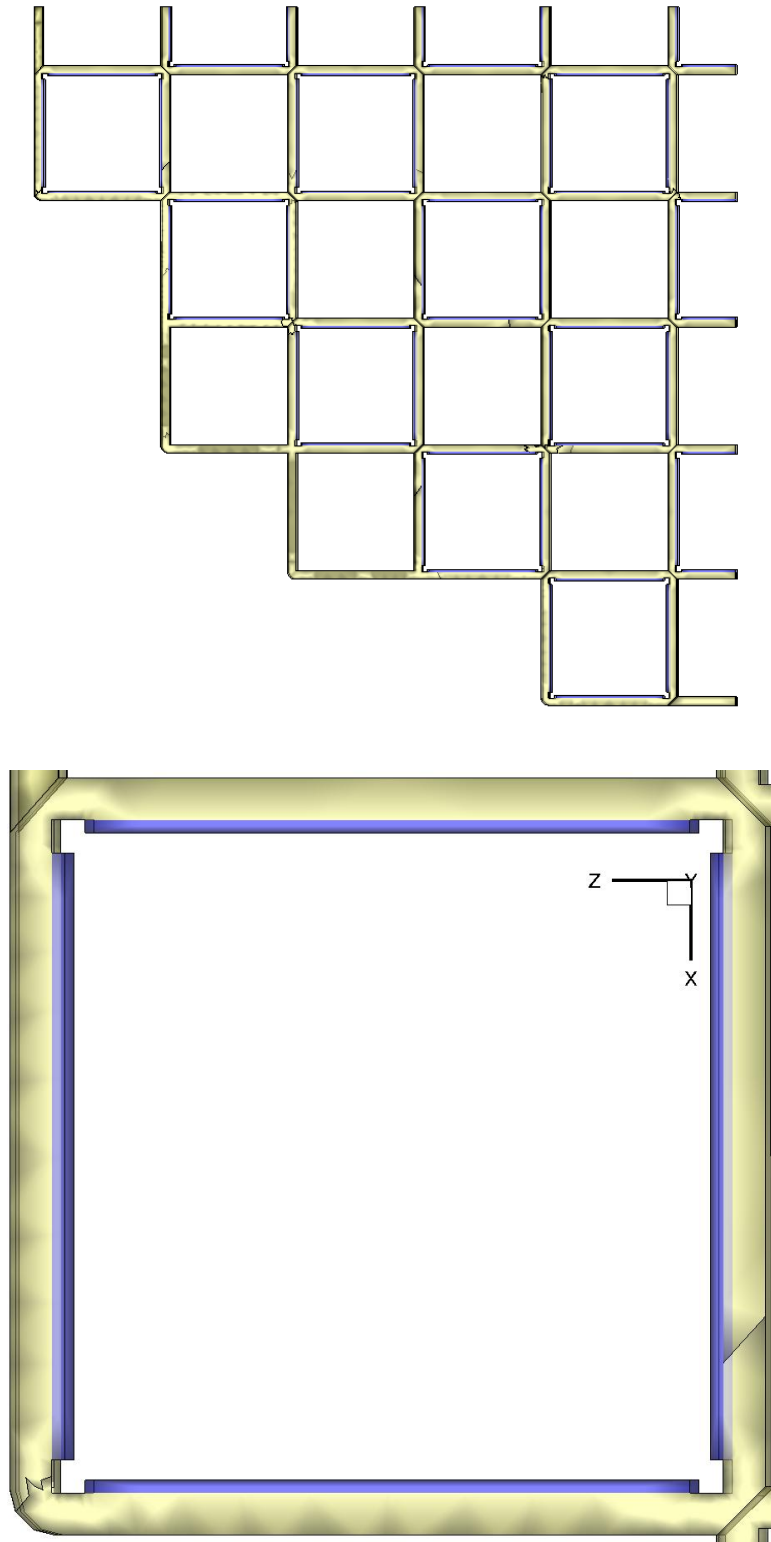


圖 10 整體燃料套筒結構與內部中子吸收板貼附狀況

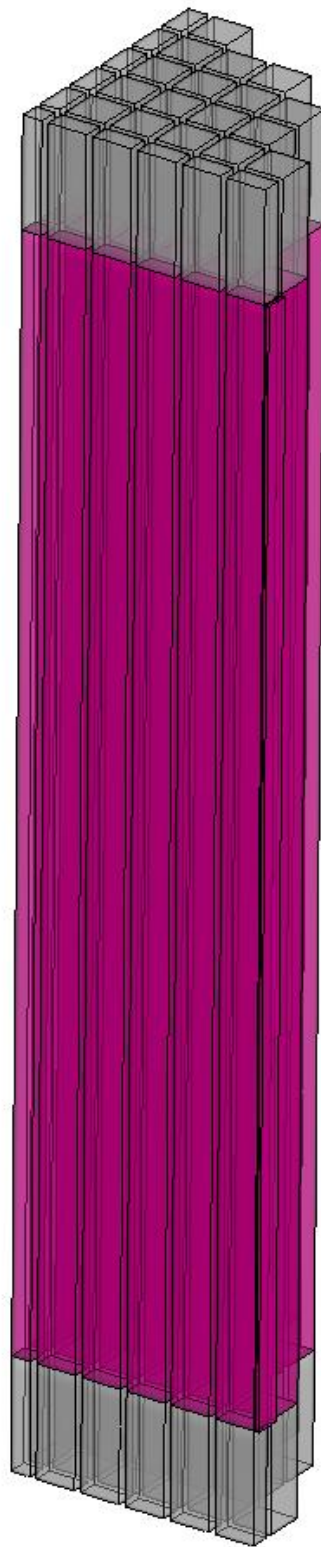


圖 11 燃料組件示意圖(紅色：active length)

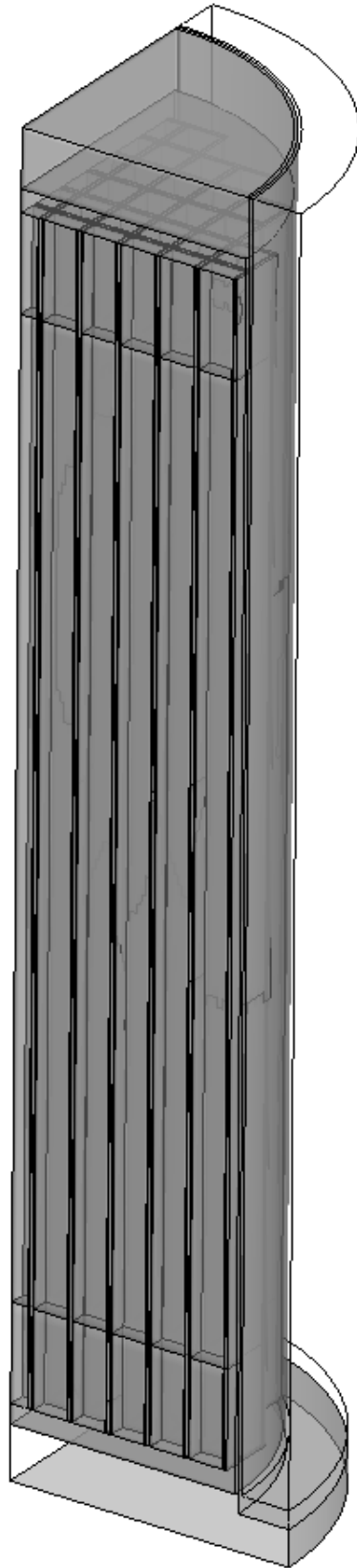


圖 12 傳送階段模擬用模型示意圖

#### 4.1.2 貯存階段模型

乾貯系統之貯存階段泛指貯存於混凝土護箱時可能遭遇到的正常、異常與事故狀況，由於上述階段皆可用單一分析模型進行熱流分析，因此統稱為貯存階段，而用以分析此一階段之分析模型，即稱為貯存階段模型。

與傳送階段模型相同，在建模的過程中需要將真實型狀進行若干的簡化，以符合分析之需求：

1. 忽略護箱內襯之上緣之薄鋼板，以簡化模型之建構過程；此一假設並不會影響整體之熱傳途徑，因此對於分析結果之影響有限；
2. 密封鋼筒底座乃是用許多鈹件焊接而成，在模擬過程中忽略此類鈹件之影響，僅以一壁面進行模擬；
3. 通氣口與混凝土結構間原本存在有一薄金屬板，在考量此一厚度無法造成明顯之熱傳效應之前提下，予以忽略，但仍保留其表面放射率，以減少對輻射效應之影響；
4. 密封鋼筒與底座間之間隙因兩者間之作用力達百噸，且考量此部分之熱傳並非主要散熱機制，故將兩者間之接觸熱阻予以忽略不計；
5. 考量忽略混凝土護箱內的箍筋有助於增進材料性質之保守度，故將此部分之材料影效忽略不計；

經由上述所列之假設，本工作所完成之混凝土護箱模型如圖 13 所示。



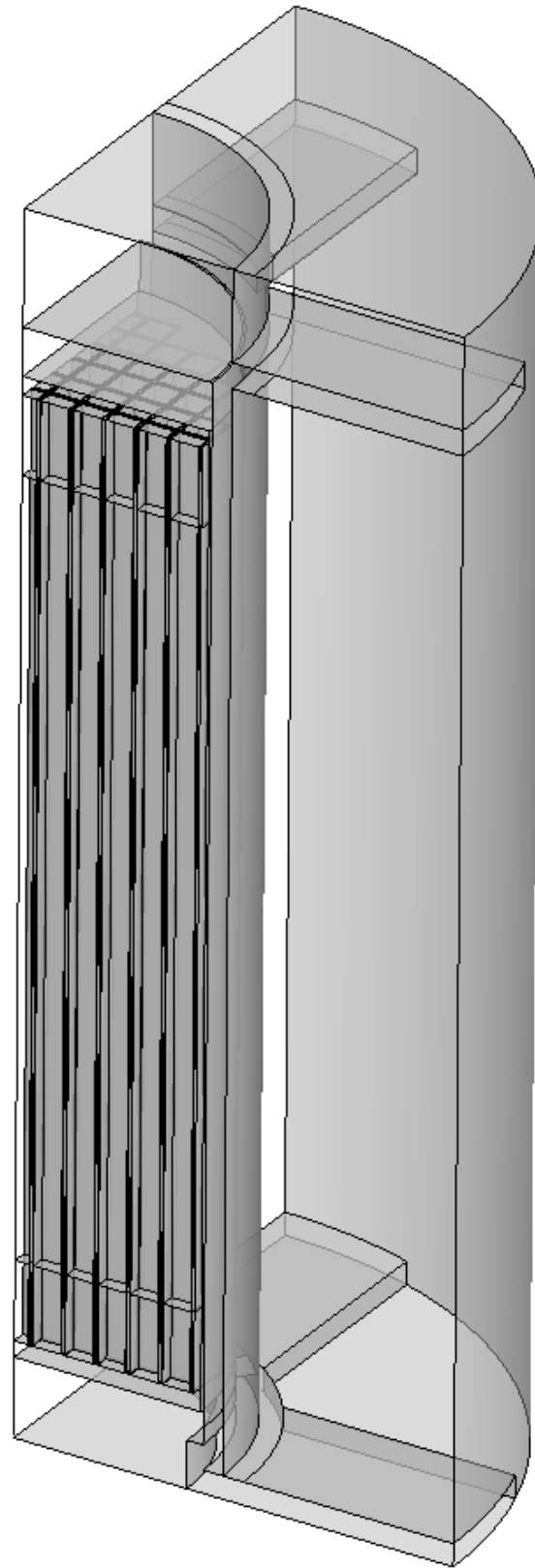


圖 13 貯存階段模型

## 4.2 網格建構與靈敏度測試

在完成相關的模型建構後，所得之幾何模型仍無法用於 CFD 模擬分析，這是由於 CFD 乃是將幾何形狀離散為數量龐大之控制體積，再藉由求解器進行計算。然而由於在利用求解器求解時，網格的品質將會影響求解之精確性，因此若期望獲得精確的模擬結果前，必需先行建立優秀的網格，以進行求解計算。本研究採用非結構網格系統配合六面體與四面體之網格單元進行分析網格生成，主要之網格生成之考量點包括有：

1. 降低網格扭曲度，建立與流場或結構正交之網格以減少數值擴散；
2. 於流場複雜處使用較密的網格以增進流場解析度；
3. 在流場單純或是純傳導之部分使用較粗之網格以節省計算資源；

所產生之網格則如圖 14 與圖 15 所示，其總網格數分別為 350 萬與 550 萬。

### 4.2.1 網格品質與靈敏度測試

上述模型與網格在用於核二廠乾貯系統之熱流模擬校驗前，必需先行網格品質提升與靈敏度測試，以確認因為網格變化所造成的結果差異小於一定程度，並加速計算求解過程。

本研究工作在獲得圖 14 與圖 15 之網格後即進行計算與收斂測試，其測試結果顯示。雖然此一網格已足以滿足分析所需之，但考量未來應用於計算求解時，重大的材料性質變化(如變換填充氣體)或是模式變更(如開/閉輻射模式)，將可能需進一步的調整鬆弛係數，以防止計算不穩定。然而此一設定將會使收斂時間增長，故為求未來採用上述模式進行分析之時效，故有必要針對網格品質作更進一步的加強。強化網格的方式是採用更繁鎖的建模程序將其中的四面體網格(如圖 16a)改為高品質之六面體網格(如圖 16b)；經網格精進後，未來計算將可於 3000 次迭代次數並維持預設鬆弛係數之前提下獲得計算結果，此舉將有助於節省 2/3~4/5 之計算時間。經網格品質強化後之網格將定為標準網格，並進行後

續之靈敏度測試。

本研究採用結果調適法(solution adaptive)進行網格靈敏度測試，此法係將模型中之流-固界面或具有高物理量梯度之網格將被部分以各軸向增加一倍之方式進行加密，以令總網格數達到原始網格之 1.5 與 2 倍。此一作法相較於整體加密之方式，可利用較少之網格數獲得網格靈敏度之測試結果。這是由於流場中大多數的網格其溫度、速度梯度或是紊流強度等物理值之變化並不甚顯著，故增進該區之網格對結果之影響有限；然而，若採用局部加密甚至配合結果調適法之網格增密技術即可在利用較少的網格測試網格分佈對結果之影響程度。

經測上述之網格靈敏度測試後發現原始網格於速度與溫度之分佈與加密 2 倍之結果之差異量約為 1.6% 與 2%，其影響程度極為有限，故未來分析將採用標準網格進行模擬。

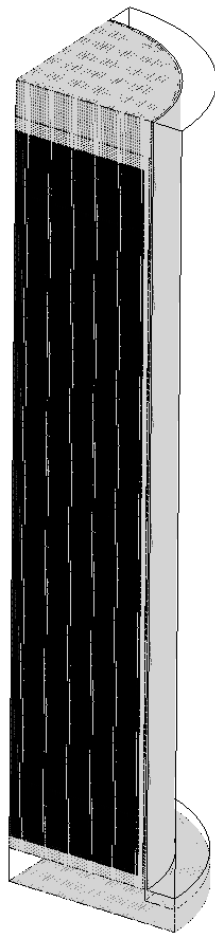
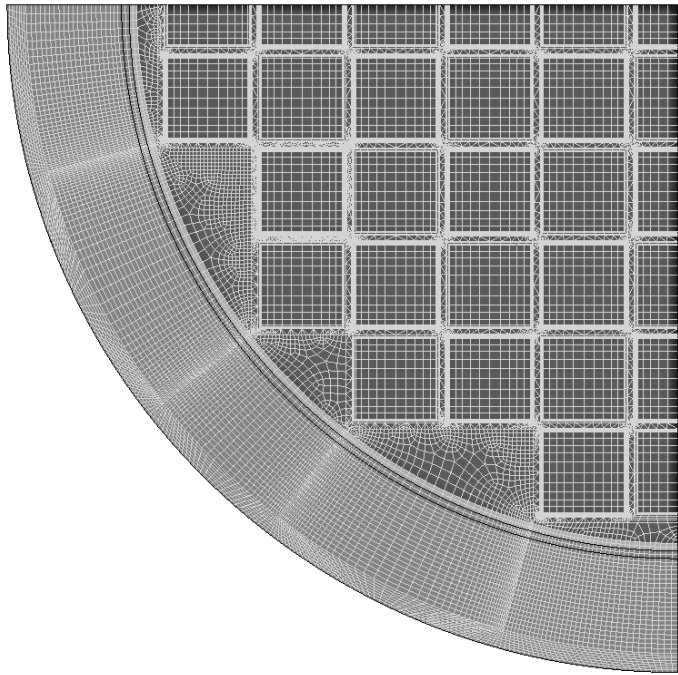


圖 14 傳送階段模型之網格分佈

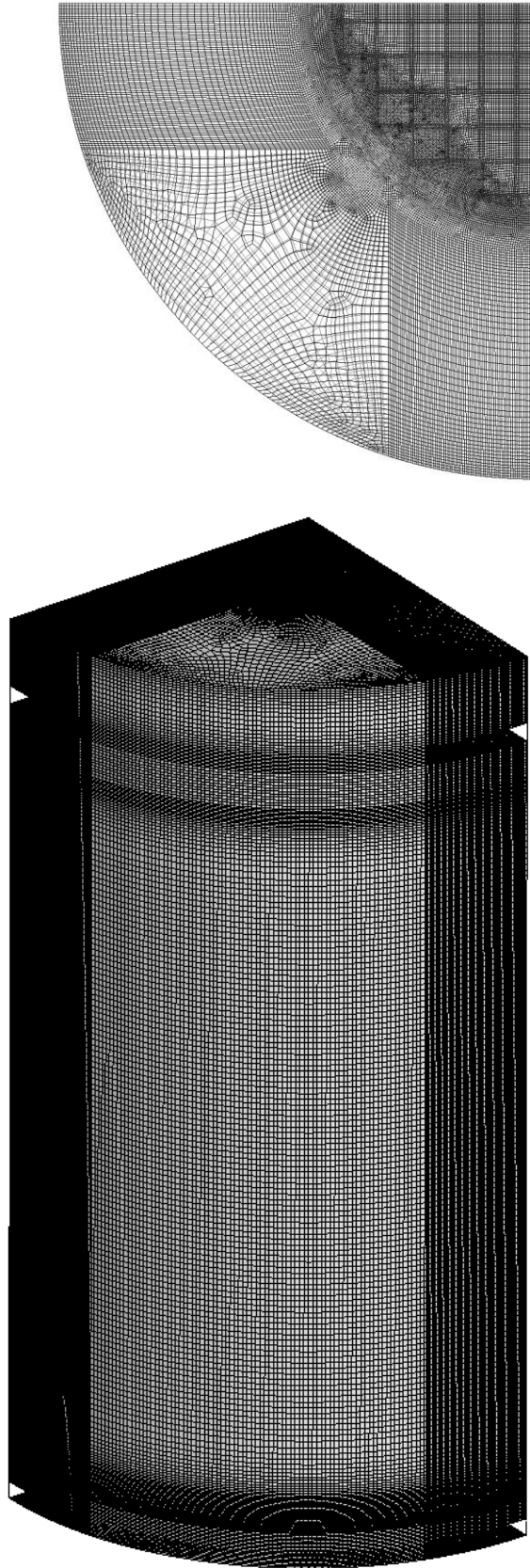
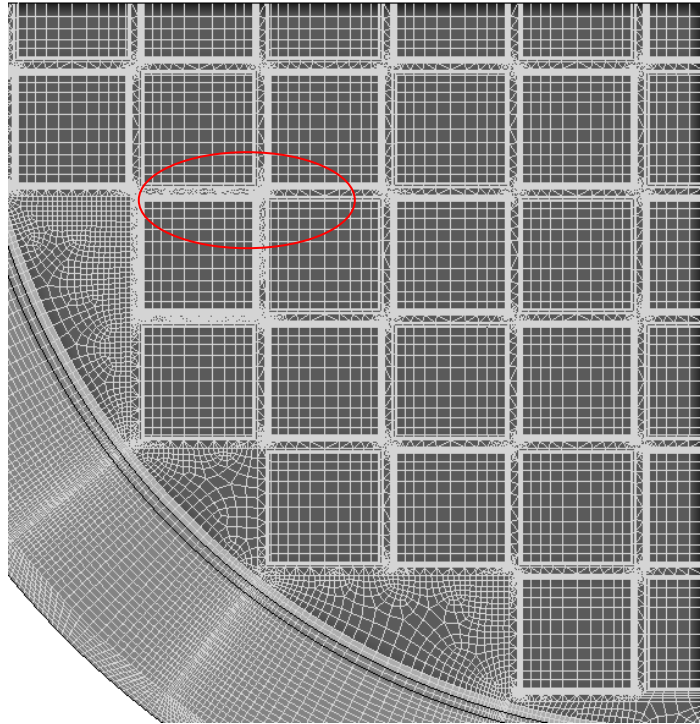


圖 15 貯存階段模型之網格分佈

(a)



(b)

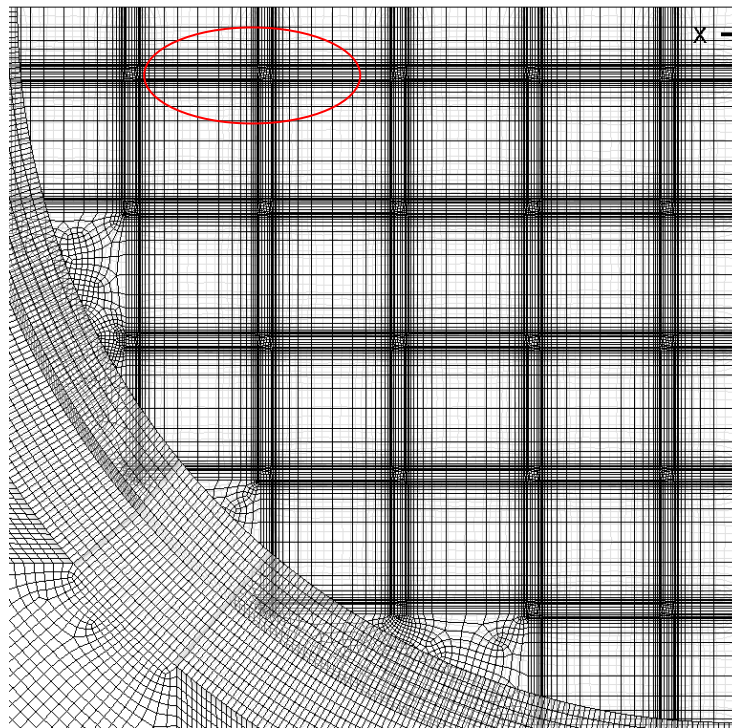


圖 16 燃料提籃之網格精進；(a)原始網格；(b)精進後網格。

## 4.2 模型與數值模式測試

為確保已建立之模型及第三章中選用之數值模式經整合後確實可以成功地求解乾貯系統中之所有熱傳機制。本節利用已完成之幾何模式，進行測試案例設定與試跑。由於此一動作之目的並非求取其計算結果，而是檢驗模型之適用性與幾何設置之正確性，故在邊界條件的設定上將不完全與核二廠之分析案例一致；例如：材料性質之隨溫度之變化以及功率分佈以及隨表面溫度而有不同對流係數等細節並不被納入此項測試工作中。本節所使用之邊界條件設定分別詳列於表 13 與表 14，而選用之數值模式則如表 15 所示。

經試跑後傳送護箱之整體溫度分佈如圖 17 與圖 18 所示；溫度分佈合理地由內向外降低，此現象意味著燃料所產生的熱源藉由內部的機制向外傳遞。若更進一步的觀察截面之速度(圖 19)可以發現，燃料之衰變熱所形成的自然對流使得流體在具有孔隙之燃料間，以極小的速度向上流動(正值)。基於相同的原因，靠近提籃附近之流體亦因自然對流而向上流動，但由於其流動並不受流阻影響，故其速度遠大於燃料內的流動。除此之外，在靠近密封鋼筒表面之區域，因為受到外側冷卻水之降溫，故其對流方向乃是往下流動(負值)，進而在密封鋼筒內形成一完整的熱對流循環。而混凝土護箱之試跑結果亦證實所有熱傳機制皆可藉由本模式順利模擬成功，其溫度分佈(圖 20)與流動趨勢(圖 21)亦與傳送護箱模式相仿。

基於以上之試跑結果，本工作所完成之模式與選用之數值模式確實可以掌握乾貯系統內之熱傳機制，並藉此呈現出系統內部所存在的熱流現象。未來本團隊將使用此一發展完成之分析模式，進行核二乾貯之熱水平行驗證工作。

表 13 模型試跑用之固體元件性質表

元件	性質	傳送護箱模式	混凝土護箱模式
燃料組件	熱功率(W/m <sup>3</sup> )	3000	3000
	流阻係數(1/m)	2e6	2e6
	孔隙度	0.45	0.45
燃料提籃	熱傳導係數(W/m-K)	35	35
	密度(Kg/m <sup>3</sup> )	8000	8000
	比熱(J/Kg-K)	400	400
密封鋼筒	熱傳導係數(W/m-K)	35	35
	密度(Kg/m <sup>3</sup> )	8000	8000
	比熱(J/Kg-K)	400	400
護箱內襯	熱傳導係數(W/m-K)	N/A	35
	密度(Kg/m <sup>3</sup> )		8000
	比熱(J/Kg-K)		400
混凝土護箱	熱傳導係數(W/m-K)	N/A	2
	密度(Kg/m <sup>3</sup> )		8000
	比熱(J/Kg-K)		400
中子屏蔽板	熱傳導係數(W/m-K)	200	200
	密度(Kg/m <sup>3</sup> )	1400	1400
	比熱(J/Kg-K)	400	400
傳送護箱內外殼板	熱傳導係數(W/m-K)	200	N/A
	密度(Kg/m <sup>3</sup> )	1400	
	比熱(J/Kg-K)	400	
鉛屏蔽	熱傳導係數(W/m-K)	200	N/A
	密度(Kg/m <sup>3</sup> )	1400	
	比熱(J/Kg-K)	400	
中子吸收材	熱傳導係數(W/m-K)	200	N/A
	密度(Kg/m <sup>3</sup> )	1400	
	比熱(J/Kg-K)	400	



表 14 模型試跑用之流體材料性質表

材料	性質	傳送護箱模式	混凝土護箱模式
水	熱傳導係數(W/m-K)	0.6	N/A
	密度(Kg/m <sup>3</sup> )	998.2	
	比熱(J/Kg-K)	4182	
	黏滯係數(Kg/m-s)	0.001003	
空氣	熱傳導係數(W/m-K)	0.0242	0.0242
	密度(Kg/m <sup>3</sup> )	1.225	1.225
	比熱(J/Kg-K)	1006.43	1006.43
	黏滯係數(Kg/m-s)	1.789e-5	1.789e-5
氦	熱傳導係數(W/m-K)	0.152	0.152
	密度(Kg/m <sup>3</sup> )	0.1625	0.1625
	比熱(J/Kg-K)	5193	5193
	黏滯係數(Kg/m-s)	1.99e-5	1.99e-5

表 15 模型試跑用所選用之數值模式

Variable	Scheme
Pressure	Body Force Weighted
Momentum	Second Order Upwind
turbulent model	k- $\omega$ SST
Turbulent Kinetic Energy	Second Order Upwind
Specific Dissipation Rate	Second Order Upwind
Energy	Second Order Upwind
Radiation	DO model
Discrete Ordinates	Second Order Upwind

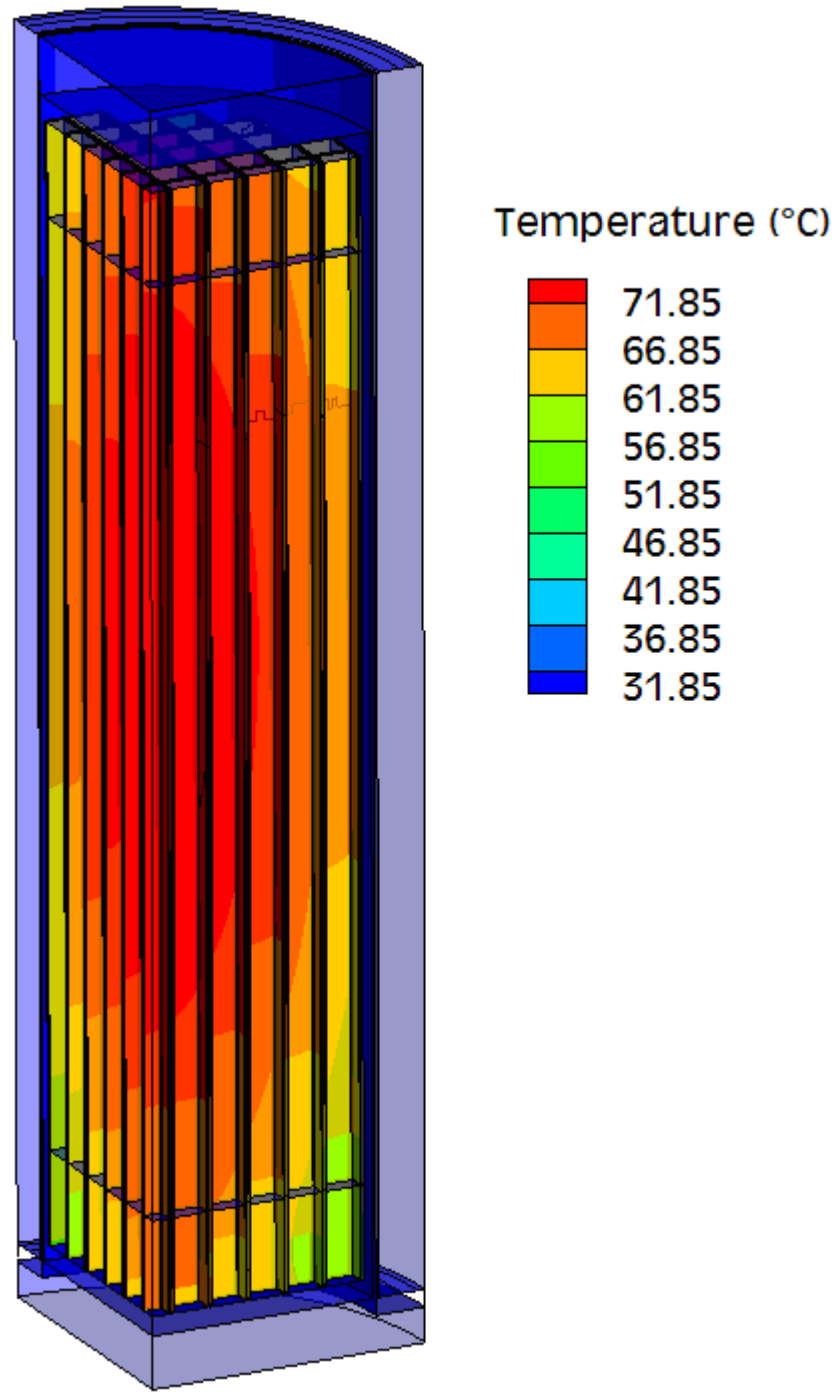


圖 17 傳送護箱試跑溫度分佈結果-整體

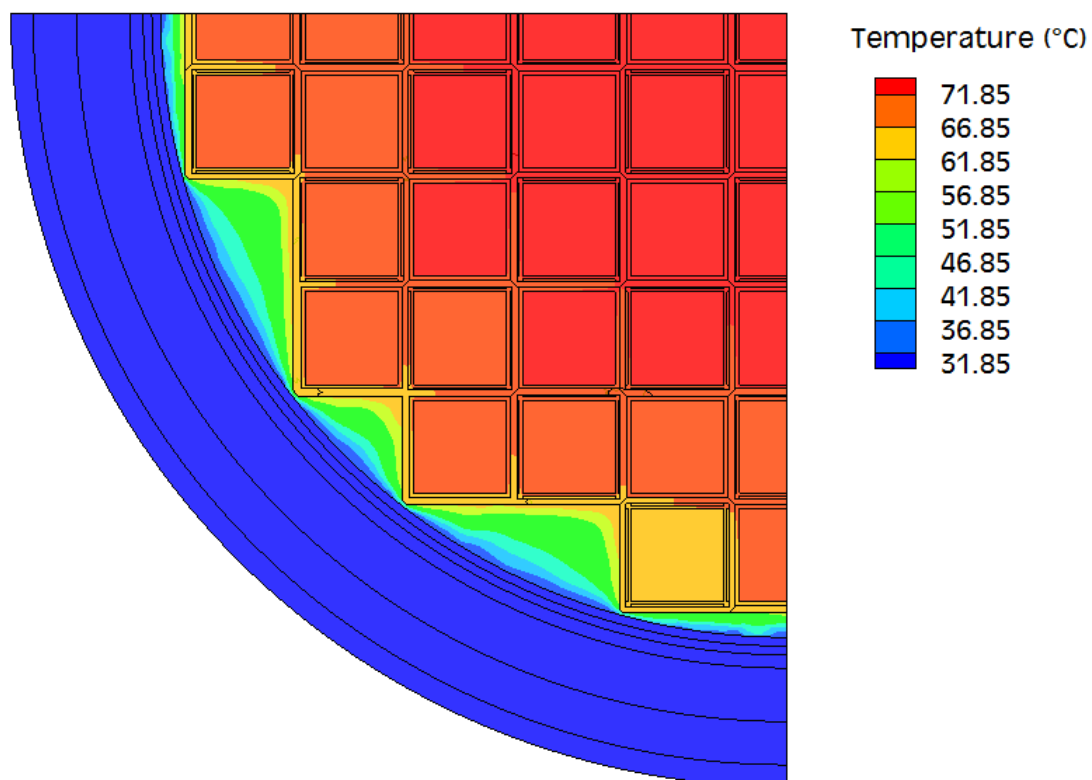


圖 18 傳送護箱試跑溫度分佈結果-軸向截面

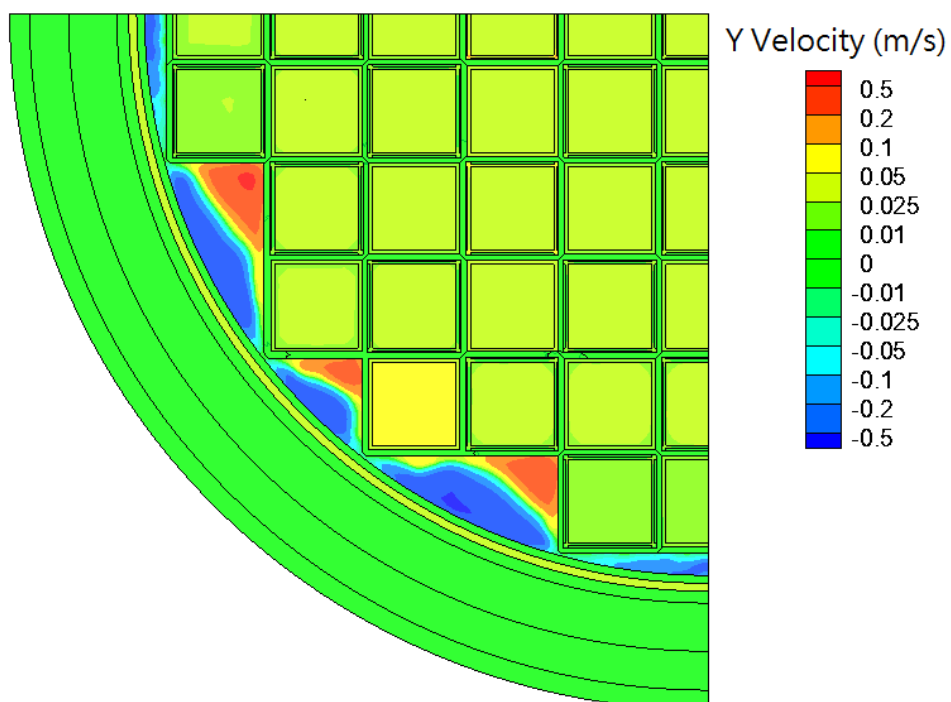


圖 19 傳送護箱試跑速度分佈結果-軸向截面

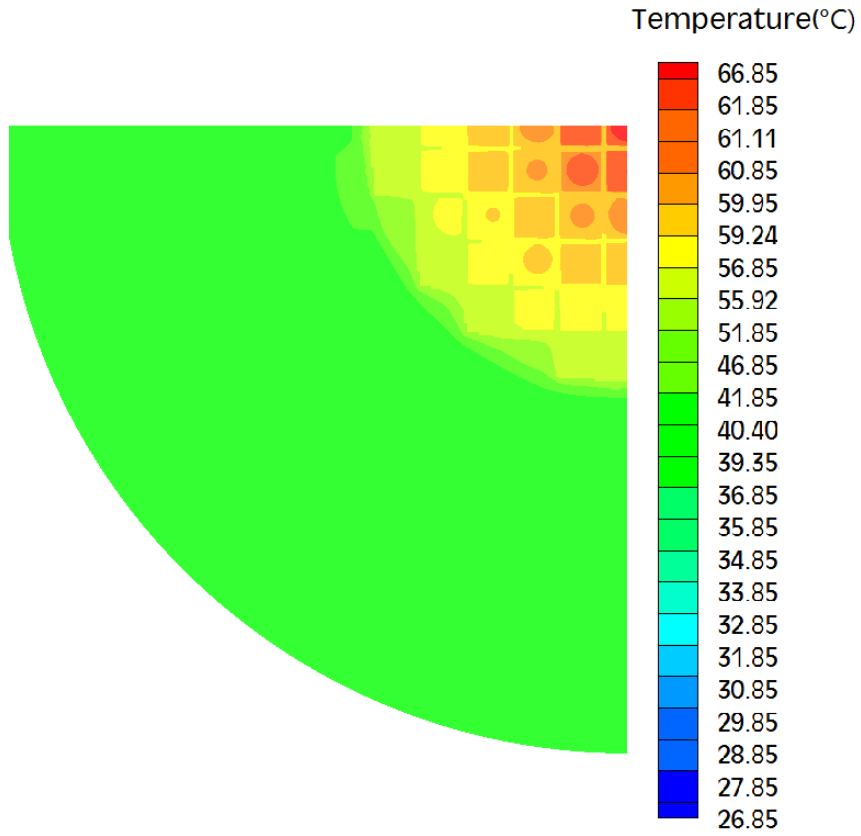


圖 20 混凝土護箱試跑溫度分佈結果-軸向截面

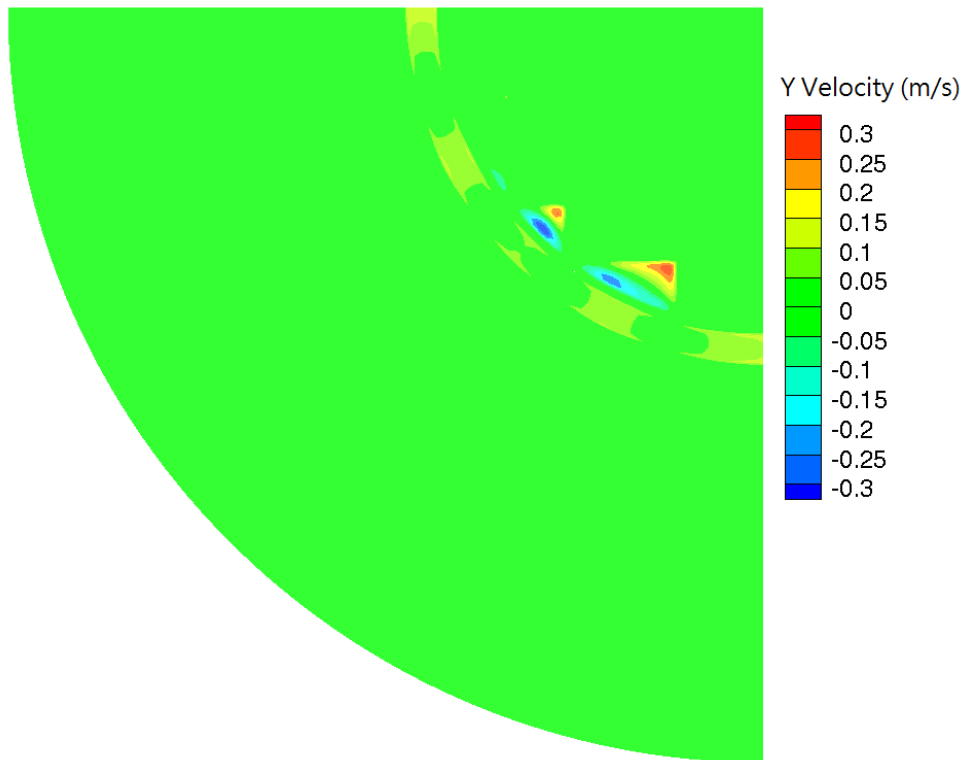


圖 21 混凝土護箱試跑速度分佈結果-軸向截面

## 4.3 視因子計算技術

### 4.3.1 技術建立

此技術之開發主要乃是用於評估廠家進行長期貯存之熱流分析時，對於混不同之護箱擺置狀況下所使用之混凝土護箱表面對大氣環境之輻射視因子的保守度。此值將會影響混凝土護箱長貯存時，輻射散熱機制之能力，因此若選用不夠保守之數值將會影響分析結果之保守度。

本技術乃是建構於 FLUENT 所提供的熱輻射模式上，利用軟體內建之模式進行視因子數值估算，以檢驗台電公司所使用之視因子是否保守。由於視因子可視因任二個表面間之面積投影量，因此在進行視因子計算前，需先行獲得實際之幾何形狀。在此計畫中，將藉由已蒐集資料(圖 22)進行模式建立，而所得之幾何模型則如圖 23 所示。

在完成相關模型與網格之建立後，即可將模式匯入 FLUENT 中，並利用 FLUENT 之 DO 或是 S2S 熱輻射模式來進行視因子計算。其中，由於 S2S 模式乃是直接求解各個網格表面彼此間的視因子，因此可以在其計算後直接輸出其視因子；但由於此一計算過程十分複雜且冗長，因此對於未來的實際應用將較有時效上的限制。相反的，DO 模式因為採用輻射傳輸方程式進行輻射熱傳的計算，而不直接求解表面之視因子，故可省去視因子計算所帶來的耗時。但由於此法並不直接求解視因子，因此必需將計算所得之輻射熱傳量利用輻射熱傳公式加以轉換，進而獲得相對之視因子：

$$F = Q'' / \left( \sigma \varepsilon A (T_w^4 - T_\infty^4) \right) \quad (21)$$

雖然 DO 模式之適用性較廣，且於未來整體模擬時仍擬採用其進行輻射計算，但考量本計畫現今是以建立分析技術並提交審查要點為第一要務，因此仍將利用 S2S 模式進行計算，並與 DO 模式之結果進行比對，以確保計算結果之

正確性。

### 4.3.2 計算結果

兩種不同熱輻射模式經算後所得之視因子如圖 24 所示，整體而言，兩者所獲得之結果差異十分有限；其差異主要乃是因為 S2S 模式乃是直接利用積分方進行視因子計算，但 DO 模式乃是求解輻射傳輸方程式，再經由輻射量轉換而獲得，此法於計算期間需進行迭代求解，並計算各網格間的輻射傳輸量，因此將會稍微引入數值誤差，但整體而言其影響仍十分有限。

此外，若進一步比對計算後所得之各混凝土護箱視因子值之分佈狀況可以發現，位於護箱陣列外圍的護箱，因僅有單側受到其它護箱之遮蔽故整體視因子較同列中其它護箱為高。除此之外，位於陣列中央的護箱並未明顯因為其排列位置而有明顯差異。

若更進一步的將各護箱表面之視因子分佈進行繪製則可獲得如圖 25 之分佈。由圖上之分佈可知，在內側的視因子會因為護箱內部的屏蔽而低於外側的視因子，因此最小視因子將發生於相鄰護箱之最短間距上，其值約為 0.187。此一分佈亦顯示，外側的視因子分佈將因為護箱表面的屏蔽逐漸影響而隨著護箱的高度增加而提高，其最大約為 0.98 左右，而最小值約為 0.7。

### 4.3.3 審查重點

經計算結果檢視台電提交之 NAC 公司之最終安全報告(FSAR)後可以發現，核二廠於分析中採用之視因子為 0.182；其值不僅小於實際混凝土護箱配置中所存在之最小視因子(0.187)，更小於各護箱之最小平均視因子 0.52。故其原始分析已採用較保守之係數進行安全分析。未來在台電正式提交核二廠之安全分析報告時，除會再次檢視其使用其實際護箱配置狀況外，更將於來年之平行驗證工作加以比對其視因子與輻射機制之保守性。

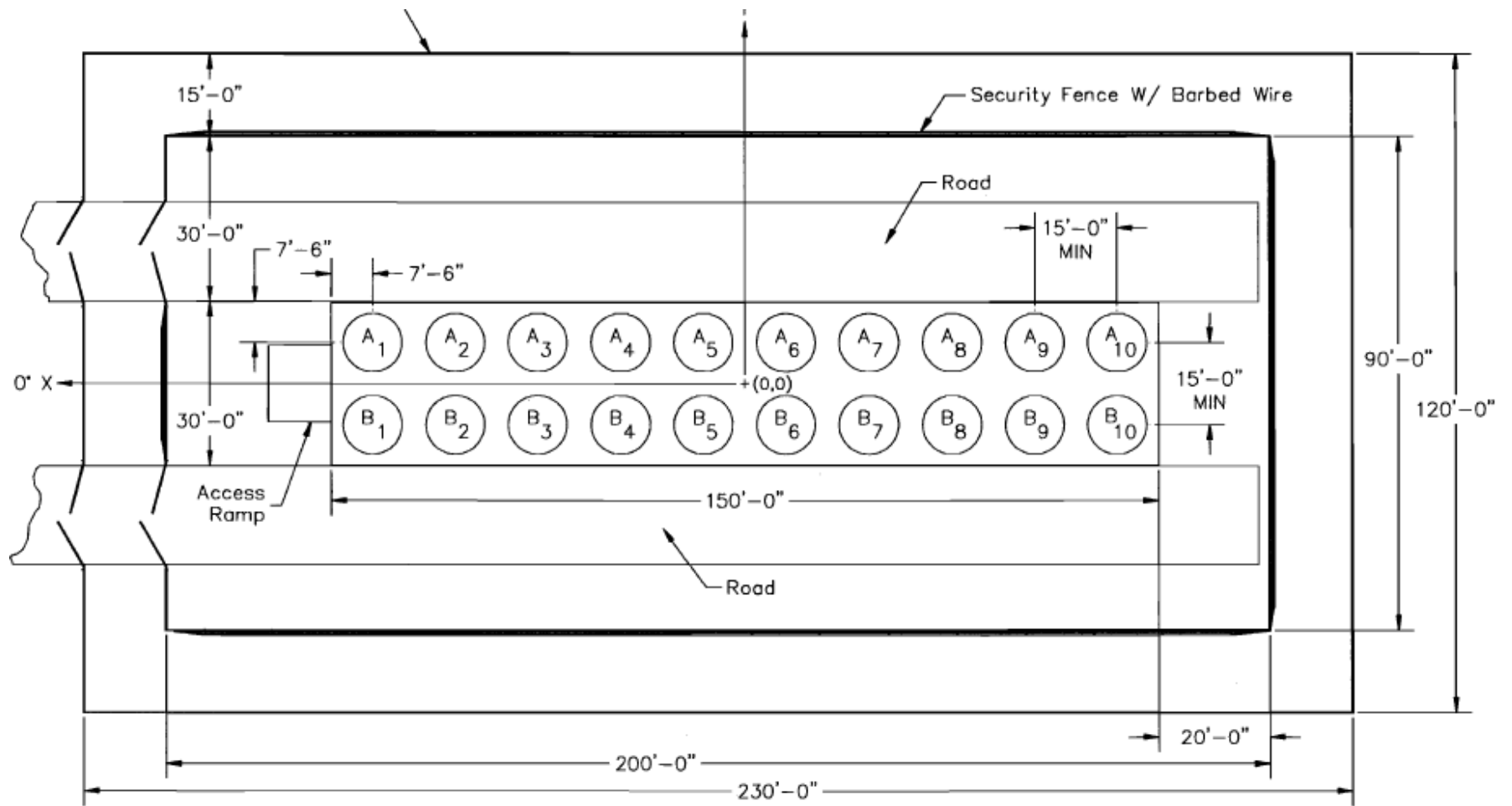


圖 22 核二廠乾貯廠址護箱擺置方式



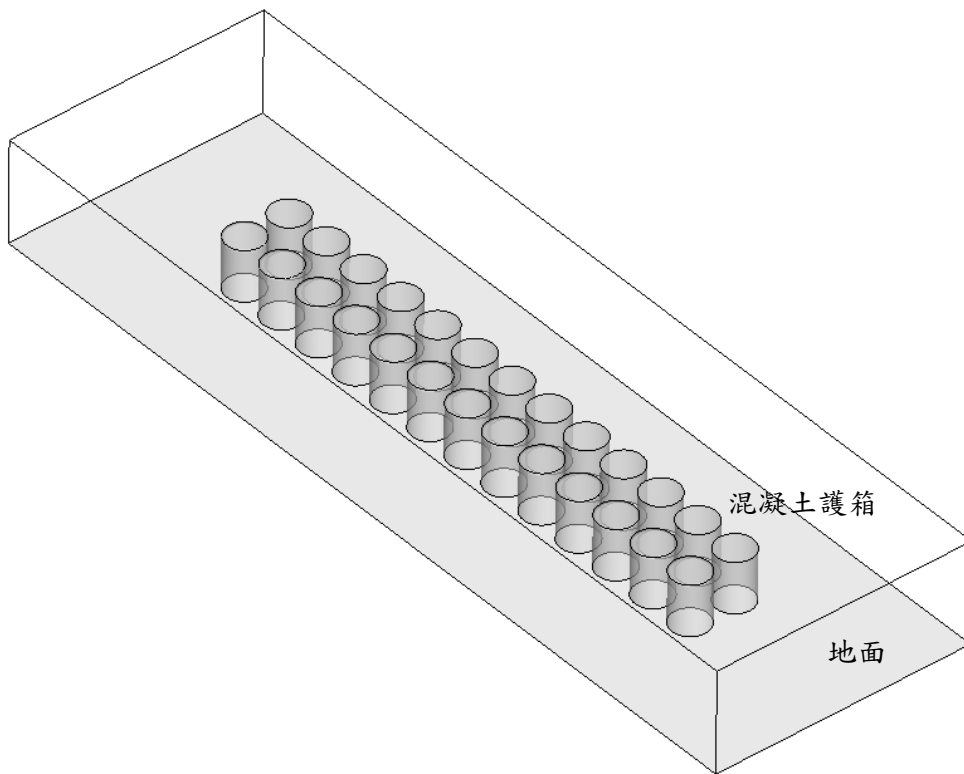


圖 23 視因子計算用模型示意圖

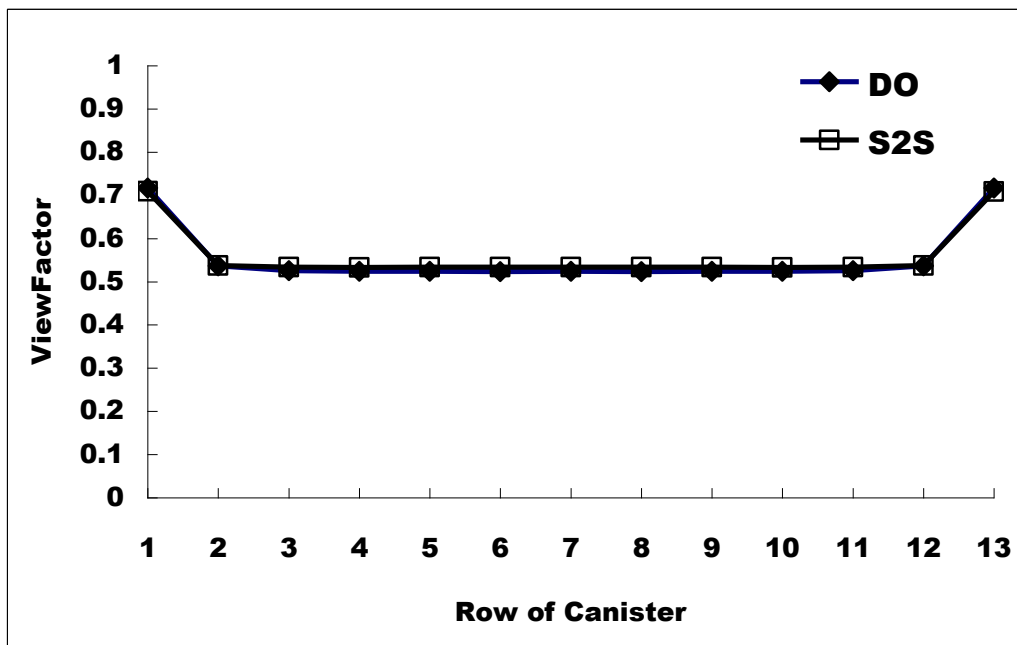
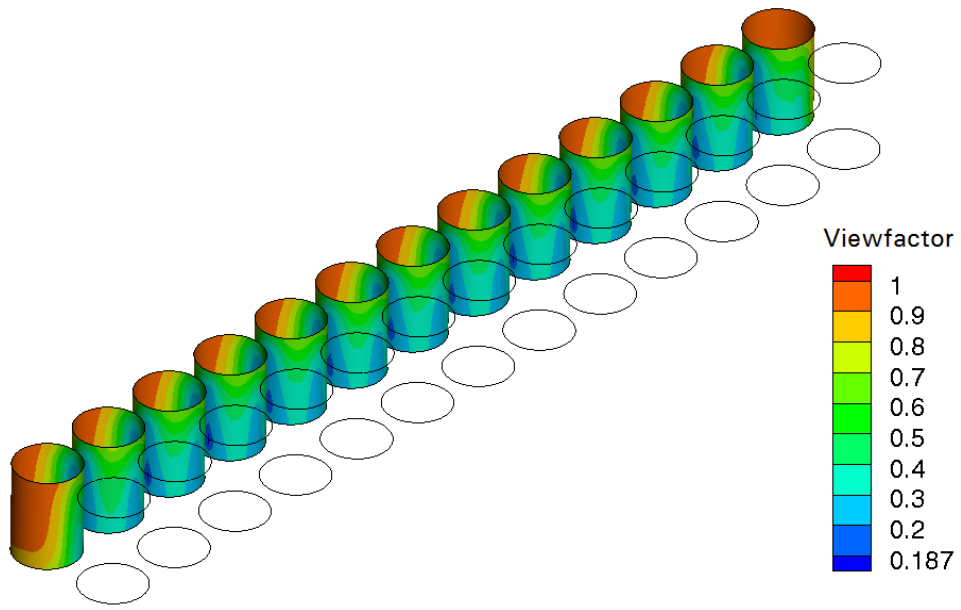


圖 24 視因子計算結果

(a)



(b)

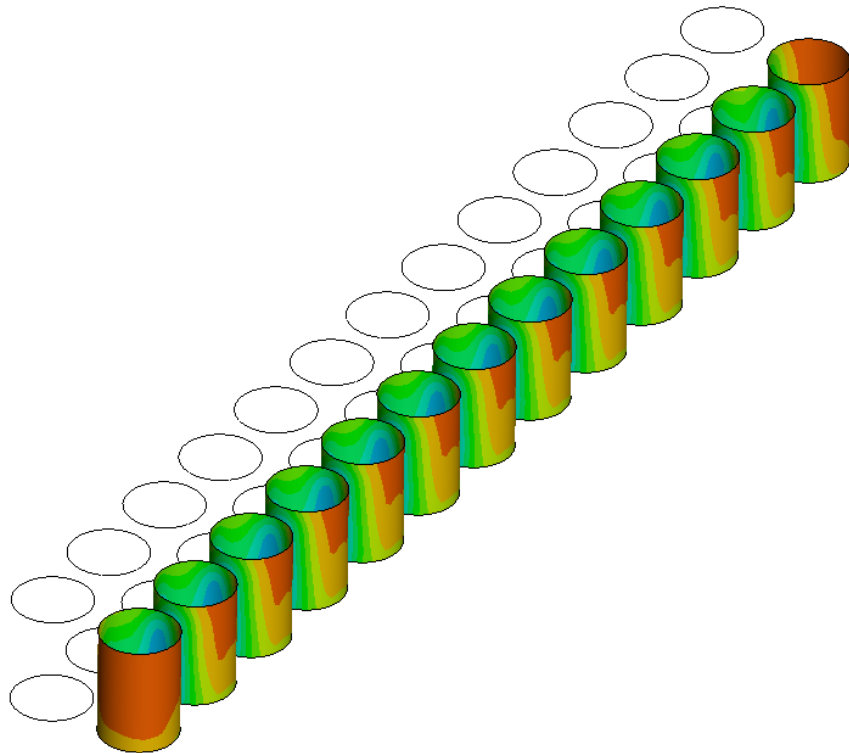


圖 25 混凝土護箱視因子分佈(a)內側；(b)外側

## 4.4 模擬所需經驗式匯整與 UDF 建立

此部分之工作主要用來建立乾貯模擬所需之 UDF 程式，這是因為透過先前的假設處理與計算域設定，有部分之區域被排除計算工作之外，但由於這些邊界條件仍對熱流現象有所影響，因此必需使用適當的方法來進行處置。

而 UDF 程式即是利用 C 語言之架構，將對應於上述狀況之邊界條件，依照熱流原理加以定義，而達到將其影響納入分析之目的。

此部分需建立之技術包括有：護箱表面對外界之熱對效應之模擬、燃料軸向功率非均勻分佈之模擬兩項，以下將分別加以敘述。

### 4.4.1 對流係數

在自然對流條件下，其對流強度將因為其表面擺置方向而有所差異，在乾貯系統中因為並不存在朝下的發熱表面，因此其自然對流邊界可以分為垂直之側邊(side surface)及向上之頂部(Top Surface)兩類，針對此兩種類型，可以採用之經驗式如下：

A · 垂直表面

$$Nu = 0.13 \times Ra^{1/3}$$

B · 向上之頂部

$$Nu = 0.15 \times Ra^{1/3}$$

其中，

Nu 為紐塞特數；

Ra 則為雷利數。

其中，雷利數可被定義為：

$$\frac{g\beta(T_w - T_{surr})L^3}{\nu\alpha}$$

值得注意的是，由於此經驗式乃是用估算表面之平均熱對流係數，因此此處

的  $T_w$  應以平均溫度為之。最後，利用上述經驗式之紐塞特數回推為  $h$  值後即可作為模擬之邊界條件：

$$h = \frac{Nu \times k}{L} ;$$

$k$  為流體熱傳導係數；

$L$  為特徵長度，於側邊表面為護箱之高度，而在頂部表面時則代表護箱之直徑。

上述經驗公式在處理後所得之 UDF 程式分別如附錄 B 與 C 所示。

#### 4.4.2 軸向功率

由於核子燃料在軸向功率的分佈並非均勻(見圖 26)，因此若要詳實模擬軸向功率對溫度分佈之影響，則勢必需要對軸向功率的分佈利用使用者自訂函數(UDF)來進行軸向功率如處理。

若觀察整個軸向功率，吾等可以將其區分為數個區間；由 0~0.15 之無因次長度間其功率呈線性增加；而在 0.15~0.55 間其值約為 1.2；0.55 至 0.8 則約為 1.15；最後，在大於 0.8 之後其值呈線性下降。故軸向功率之 UDF 遂依據此分佈進行功率係數之估算，將此一分佈轉換為功率係數，而建立所得之 UDF 程式則如附錄 D 所示。

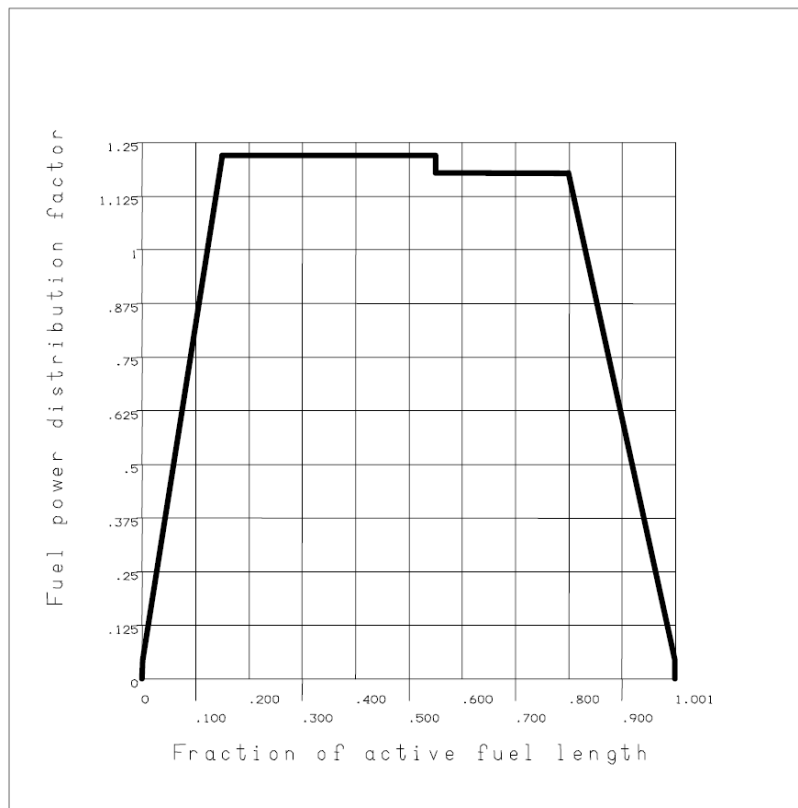


圖 26 核二廠待貯燃料軸向功率分佈圖

#### 4.4.3 審查要點

在建立 UDF 程式之過程中發現若相關程式之撰寫選用錯誤之參數時，將可能導致分析結果產生誤差，因此未來於審查時，需注意以下幾點：

- A · 估算熱對流係數時，相關特徵長度需正確定義；
- B · 估算熱對流係數時，壁面溫度應定義為特定邊界之平均溫度；
- C · 軸向功率之設定需注意其總功率與最大單位長度之發熱功率皆為保守；

## 4.5 系統傳送與裝載階段之分析技術建立

由於本研究所開發之分析技術可以利用同一模型與軟體完成所有裝載與傳送作業中需包含之所有分析案例，例如裝載過程中密封鋼筒充滿水的狀態、為了達到長期貯存要求所作的抽真空排水作業以及完成氬氣填充後置入混凝土護箱(簡稱裝載階段)前的運送作業。這些作業階段的本質上皆是用於處理傳送護箱內的密封鋼筒，因此整體之幾何形狀並未有所改變，僅有系統內所填充的流體，因為不同階段之訴求而有所改變。而上述的改變亦牽涉到數值模式的調整；例如：在將充水階段轉換為真空階段時，需將原本不需要考慮的熱輻射模式開啟；同時也因為此時不存在顯著自然對流機制，故可將密封鋼筒內之狀態改為無傳導能力之固體並關閉重力場以忽略自然對流效應。表 16 將所有案例所需之邊界調整與模式選用逐項列出，未來在執行系統傳送作業下之各階段分析時，僅需按照表格內之設定修改，並參照已蒐集之材料性質進行設定，即可完成各階段分析之模型設定。

### 4.5.1 審查要點

本分析技術建立過程中發現 FLUENT 程式本身具有 Input Summary 之輸出功能，可將模式、材料、邊界條件與求解器設定等項目以條列方式加以記錄。此功能於審查過程中有助於確認相關設定是否與廠家於安全分析報告中所提之描述一致。因此建議未來於審查時，執行乾貯系統熱水流分析之單位應提供此一輸出或是類似之模式設定清單。

表 16 傳送與裝載階段模式變更設定表

	充水階段	真空階段	氮氣階段	裝載階段
密封鋼筒 流體選用	液態水	透明固體	氮氣	N/A
冷卻流道 流體選用	液態水	N/A	N/A	空氣
重力場	開啟	關閉	開啟	N/A
博欣尼克近僅法	開啟	關閉	開啟	N/A
DO 輻射模式	關閉	開啟	N/A	N/A
求解器	視計算需求			
暫態求解之 初始條件	初始溫度 41°C	沿用充水 階段結果	沿用真空 階段結果	沿用氮氣 階段結果
壓力離散法	Body Force Weighted	Standard	Body Force Weighted	N/A
其它離散法	2 <sup>nd</sup> Order Upwind			

\*N/A 表沿用上一階段無需調整



## 4.6 貯存階段之分析技術建立

相同地，本研究所建立之貯存階段分析技術可以利用同一模型與軟體完成所有貯存階段之所有分析案例，例如：正常、異常高溫、異常低溫、極度高溫等環境溫度之變化僅需進行環境溫度之變更即可，而在進口半阻塞與全阻塞之案例，本分析技術則僅需針對進口邊界條件進行類型變更，將其由原本的壓力邊界條件轉換為壁面邊界即可。表 17 將所有案例所需之邊界調整與模式選用逐項列出，未來在執行系統傳送作業下之各階段分析時，僅需按照表格內之設定修改，即可完成各階段分析之模型設定。

考量正常、溫度異常之案例僅需改變環境溫度之日照功率，故在本研究報告中將不逐一測試，僅以選擇三種類型進行計算，以證明本分析技術之適用性：

- (1)通氣口全開案例
- (2)進氣口半阻塞
- (3)進氣口全阻塞

而所得之分析結果則如圖 27~圖 29 所示。

其中圖 27 所呈現之溫度分佈證實，較冷的空氣確實由底部之進氣口流入護箱內之空氣流道，並沿流道向上流動進而冷卻密封鋼筒之表面；而受熱之空氣最後將由上方的出氣孔排出。此外，密封鋼筒內的貯存燃料因到氦氣之對流，進而達到移熱之效果，並呈現內熱外冷之溫度分佈趨勢。

而相似的溫度分佈亦可於圖 28 中發現，但由於此時半數之進氣口受到阻塞而無法吸入冷空氣故使得系統之最高溫度較前例高約  $10^{\circ}\text{C}$ ，這是因為冷空氣的流量因為進口半阻塞而減少並導致最高溫度的增加。而當空氣進口全阻塞時，所有的冷空氣將因此無法對混凝土護箱內的密封鋼筒進行有較的對流冷卻。所有的熱皆需傳導致混凝土護箱外表面才能移除，故導致溫度遠高於其它案例。經由上述的測試可以證明本研究所建立之分析模式，在依表 17 所列之設定進行模式修改後，確實可以用於分析乾貯系統於貯存狀態下之所有案例。

#### 4.6.1 審查要點

若台電送審之案全分析報告所使用之分析技術係採複合模式分析技術，且於不同案例間涉及暫態變換時，需確認不同分析模式轉換時，其初始條件不致因為模式之不同而存在不保守性。

表 17 貯存階段傳送與裝載階段模式變更設定表

	正常	異常溫度變化	半阻塞	全阻塞
環境溫度設定	依台電 SAR 設定為之	依案例之環境溫度進行環境溫度設置，例如： 41°C；-40°C 與 56°C	NA	NA
日照輻射	10 CFR 71	除-40°C 案例需關閉外 其餘不變	NA	NA
求解器	視計算需求**			
暫態求解之 初始條件	NA	NA	NA	沿用正常貯 存結果
其它離散法	2 <sup>nd</sup> Order Upwind			

\*N/A 表沿用正常貯存案例無需調整

\*\*視計算需求是意味著若此系統在特定案例下無法以穩態結果滿足設計條件，而需增加作業時限時，可以將求解器由原先之穩態求解轉換為暫態求解。

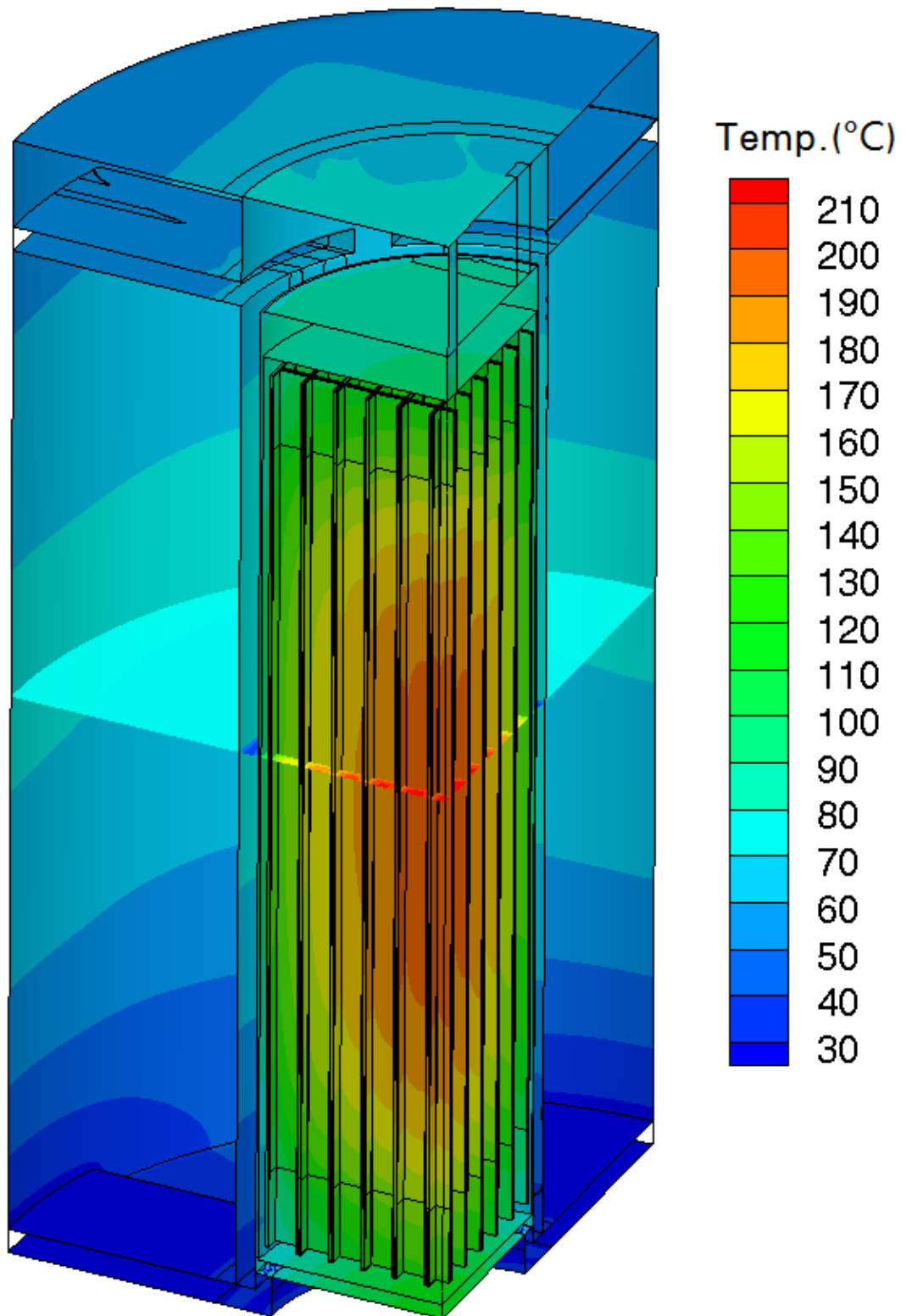


圖 27 正常貯存邊界條件之測試結果

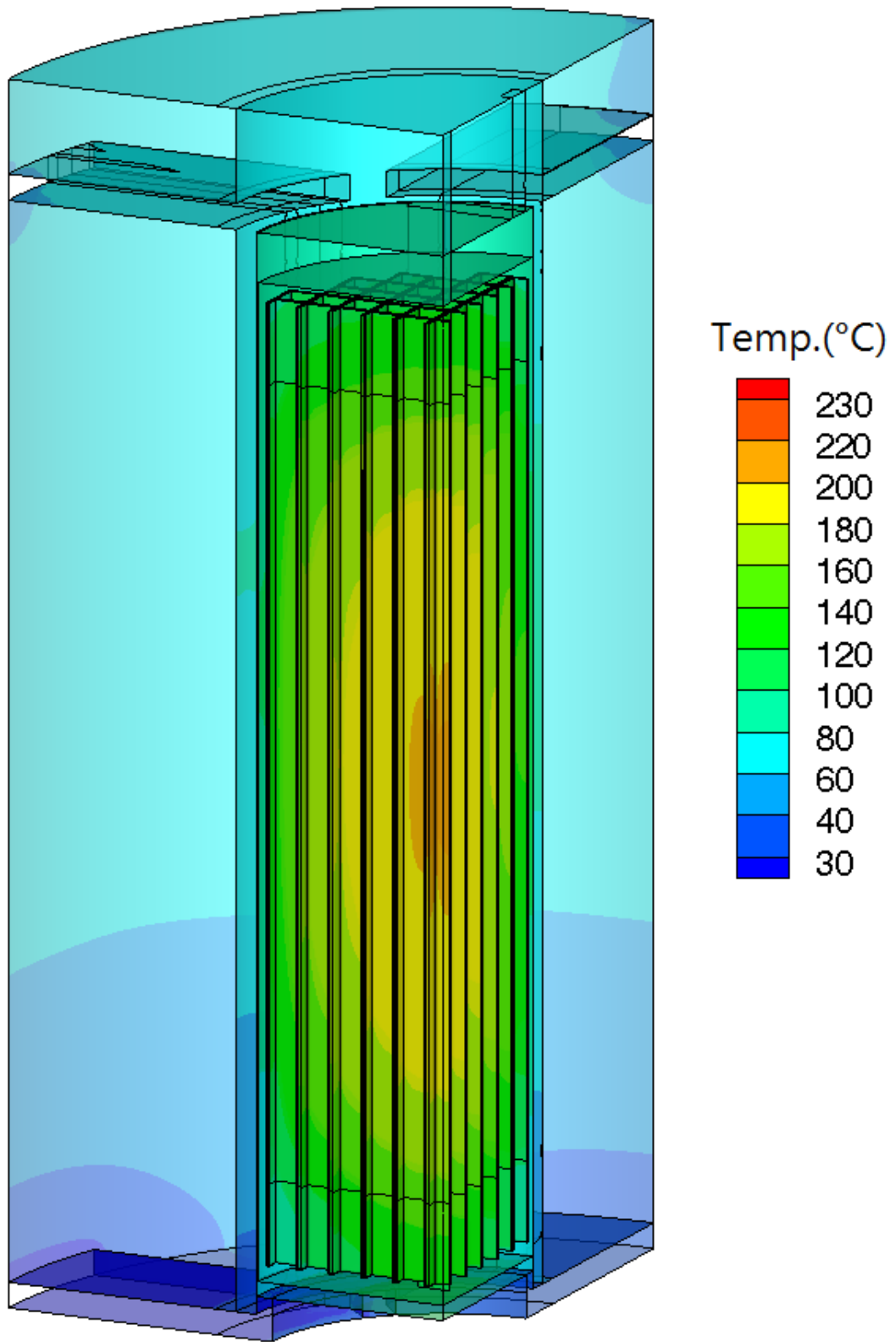


圖 28 進氣口半阻塞案例之測試結果

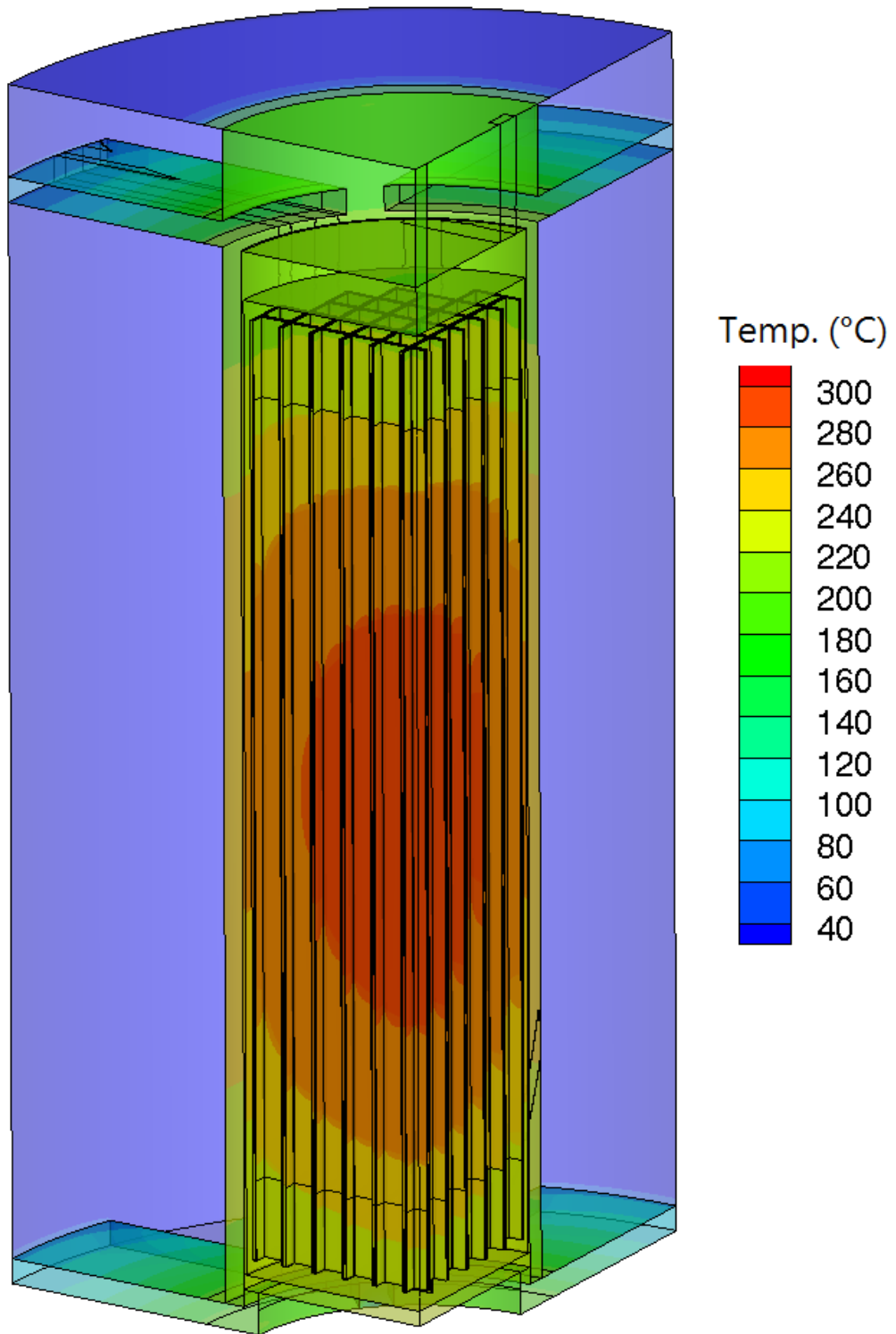


圖 29 進氣口全阻塞案例之測試結果

## 五、已獲得之熱流評估要點匯整

依據本計畫目前已執行之工作項目，發現許多分析假設或設定將影響乾貯熱水流分析結果之精確性與可靠度，為確保台電所提交之安全分析報告之內容確實符合原能會對核能安全之要求，遂建議未來執相關審查時，需將以下要點納入考量：

1. 所使用之軟體與方法論是否有充足之校驗或分析報告以證明其軟體適用性與模式之保守度；
2. 是否採用具可信度之分析結果或實驗數據作為校驗之依據；
3. 環境溫度與邊界條件是否比實際廠址之狀況更為保守；
4. 是否依循 10 CFR 71 之日照要求進行日照輻射評估；
5. 在分析模式建立過程中，是否將加工可能造成的誤差反應於分析模式中；
6. 傳送護箱採用強制冷卻系統進行移熱，需確保該系統之泵浦確實能在該系統壓降下提供充足之流量；
7. 所有系統之設計變更之處是否已於分析報告中反應或已被原有分析保守評估；
8. 分析模式所使用之網格系統是否已經過靈敏度測試，以排除網格差異之誤差；
9. 混凝土護箱表面之有效視因子是否採用足夠保守之值進行分析；
10. 模擬過程中是否確認燃料總功率與功率密度皆採保守值進行設定；
11. 自然對流下之對流係數是否採用正確之經驗式進行估算，且其特徵長度與處置方式是否符合物理意義；
12. 台電送審之安全分析報告所使用之分析技術係採複合模式分析技術，且於不同案例間涉及暫態變換時，需確認不同分析模式轉換時，

其初始條件不致因為模式之不同而存在不保守性。

13. 縱使分析之方法論已獲得接受，但 CFD 在模式建立過程中需設定許多之參數，這些參數並無法由報告中完整呈現，目前 FLUENT 有提供 INUPT SUMMAY 之功能，未來審查時建議台電公司應提供相同或相等功能之資料供審查委員參考。

## 六、結論與未來工作

本計畫由四月執行至今，已依計畫書原訂之工作項目完成了資料蒐集、模式建立技術開發與分析用模式建立。所獲得分析模式在經過網格測試後，已應用於相關傳送與裝載階段之分析技術建立上；最後，利用該模式進行傳送與裝載期間之模擬後，所獲得之熱流結果亦符合實際物理現象。上述研究成果顯示，本計畫藉由 FLUENT 所建立之核二廠乾貯系統熱流分析技術已符合原訂計畫之需求與時程規劃，未來將持續藉由上述之模型進行相關之貯存案例分析技術開發以完成乾貯熱流分析所需之分析技術。

除了技術開發的工作之外，本計畫在發展各個分析技術的期間，亦針對相關分析技術之適用性與模擬條件設置之保守性進行評估，並條列式之方式整理成審查依據以供未來審查時，用以評估廠家送審之分析結果的合適性與嚴謹程度。預期明年將本研究年度成果應用於核二乾貯系統之熱流平行驗證時將有助於提昇核二廠乾貯系統之安全性。



## 參考文獻

- 1 ANSYS, “FLUENT V12 Theoretical Manual,” ANSYS Inc., 2009.
- 2 Incropera, F. P., and DeWitt, D. P., 1996, “Fundamentals of Heat and Mass Transfer-4th ed.,” Wiley, New York, pages.719 and 733, Chap. 13.
- 3 F. R. Menter, M. Kuntz, and R. Langtry, “Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications,” *AIAA Journal*, 32(8):1598-1605, August 1994.
- 4 In K. Hanjalic, Y. Nagano, and M. Tummers, editors, “Ten Years of Experience with the SST Turbulence Model,” *Turbulence, Heat and Mass Transfer 4*, pages 625-632. Begell House Inc., 2003.
- 5 ANSYS Inc., “FLUENT UDF Manual,” 2009.
- 6 核能研究所, “TITRAM 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。
- 7 U.S. NRC, “Packaging and Transportation of Radioactive Material,” 10 CFR Part 71, April 1996.
- 8 NAC Inc., “MAGNASTOR System FSAR,” Docket No 72-1031 Rev. 0, 2009.
- 9 Frank P. Incropera and David P. Dewitt, “Fundamentals of Heat and Mass Transfer,” 4th edition, Appendix A.

# 附錄

## A · 案例測試之輸出檔

FLUENT

Version: 3d, pbns, sstk (3d, pressure-based, SST k-omega)

Release: 12.0.16

Title:

Models

-----

Model	Settings
Space	3D
Time	Steady
Viscous	k-omega turbulence model
Heat Transfer	Enabled
Solidification and Melting	Disabled
Radiation	Discrete Ordinate Model
Species Transport	Disabled
Coupled Dispersed Phase	Disabled
Pollutants	Disabled
Pollutants	Disabled
Soot	Disabled

Material Properties

-----

Material: water-liquid (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)
Density	kg/m3	constant	998.2
Cp (Specific Heat)	j/kg-k	constant	4182

Thermal Conductivity	w/m-k	constant	0.6
Viscosity	kg/m-s	constant	0.001003
Molecular Weight	kg/kgmol	constant	18.0152
Absorption Coefficient	1/m	constant	0
Scattering Coefficient	1/m	constant	0
Scattering Phase Function		isotropic	#f
Thermal Expansion Coefficient	1/k	constant	0
Refractive Index		constant	1
Speed of Sound	m/s	none	#f

Material: helium (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)
-----			
Density	kg/m3	boussinesq	
0.16249999			
Cp (Specific Heat)	j/kg-k	constant	5193
Thermal Conductivity	w/m-k	constant	0.152
Viscosity	kg/m-s	constant	
1.9900001e-05			
Molecular Weight	kg/kgmol	constant	4.0026002
Absorption Coefficient	1/m	constant	0
Scattering Coefficient	1/m	constant	0
Scattering Phase Function		isotropic	#f
Thermal Expansion Coefficient	1/k	constant	0.00333
Refractive Index		constant	1
Speed of Sound	m/s	none	#f

Material: air (fluid)

Property	Units	Method	Value(s)
-----			
Density	kg/m3	constant	1.225
Cp (Specific Heat)	j/kg-k	constant	1006.43
Thermal Conductivity	w/m-k	constant	0.0242
Viscosity	kg/m-s	constant	1.7894e-05
Molecular Weight	kg/kgmol	constant	28.966
Absorption Coefficient	1/m	constant	0

Scattering Coefficient	1/m	constant	0
Scattering Phase Function		isotropic	#f
Thermal Expansion Coefficient	1/k	constant	0
Refractive Index		constant	1
Speed of Sound	m/s	none	#f

Material: aluminum (solid)

Property	Units	Method	Value(s)
-----			
Density	kg/m3	constant	2719
Cp (Specific Heat)	j/kg-k	constant	871
Thermal Conductivity	w/m-k	constant	202.4
Absorption Coefficient	1/m	constant	0
Scattering Coefficient	1/m	constant	0
Scattering Phase Function		isotropic	#f
Refractive Index		constant	1

Solver Settings

-----

Equations

Equation	Solved
-----	
Flow	yes
Turbulence	yes
Energy	yes
Discrete Ordinates	yes

Numerics

Numeric	Enabled
-----	
Absolute Velocity Formulation	yes

Relaxation

Variable	Relaxation Factor
Pressure	0.3
Density	1
Body Forces	1
Momentum	0.7
Turbulent Kinetic Energy	0.8
Specific Dissipation Rate	0.8
Turbulent Viscosity	1
Energy	1
Discrete Ordinates	1

### Linear Solver

	Solver	Termination	Residual
Reduction	Type	Criterion	Tolerance
Pressure	V-Cycle	0.1	
X-Momentum	Flexible	0.1	0.7
Y-Momentum	Flexible	0.1	0.7
Z-Momentum	Flexible	0.1	0.7
Turbulent Kinetic Energy	Flexible	0.1	0.7
Specific Dissipation Rate	Flexible	0.1	0.7
Energy	Flexible	0.1	0.7
Discrete Ordinates	Flexible	0.1	0.7

### Pressure-Velocity Coupling

Parameter	Value
Type	SIMPLEC
Skewness Correction	1

### Discretization Scheme

Variable	Scheme
----------	--------

Pressure	Body Force Weighted
Momentum	Second Order Upwind
Turbulent Kinetic Energy	Second Order Upwind
Specific Dissipation Rate	Second Order Upwind
Energy	Second Order Upwind
Discrete Ordinates	Second Order Upwind

#### Solution Limits

Quantity	Limit
-----	
Minimum Absolute Pressure	1
Maximum Absolute Pressure	5e+10
Minimum Temperature	1
Maximum Temperature	5000
Minimum Turb. Kinetic Energy	1e-14
Minimum Spec. Dissipation Rate	1e-20
Maximum Turb. Viscosity Ratio	100000

B · 對流係數 UDF (SIDE SURFACE)

```
#include "udf.h"

DEFINE_PROFILE (hside, t, position)
{
    real Tsum, Tavg, Tref, area, A[3], Ra, Length, h_value, thermal_k;
    face_t f;
    Tsum=0;
    Tref=300;
    thermal_k=0.0242;
    Length =5.02;
    begin_f_loop(f, t)
    {
        F_AREA(A, f, t);
        Tsum+=F_T(f, t)* NV_MAG(A);
        area += NV_MAG(A);
    }
    end_f_loop(f, t)
    Tavg=Tsum/area;
    Ra=9.81*3.33e-3*(Tavg-Tref)*pow(Length,3)/(16.2e-6*22.9e-6);
    begin_f_loop(f, t)
    {
        h_value=0.13*pow(Ra,0.33333)*thermal_k/Length;

        F_PROFILE(f, t, position)=h_value;
    }
    end_f_loop(f, t)
}
```

C · 對流係數 UDF (TOP SURFACE)

```
#include "udf.h"

DEFINE_PROFILE (hside, t, position)
{
    real Tsum, Tavg, Tref, area, A[3], Ra, Length, h_value, thermal_k;
    face_t f;
    Tsum=0;
    Tref=300;
    thermal_k=0.0242;
    Length =3;
    begin_f_loop(f, t)
    {
        F_AREA(A, f, t);
        Tsum+=F_T(f, t)* NV_MAG(A);
        area += NV_MAG(A);
    }
    end_f_loop(f, t)
    Tavg=Tsum/area;
    Ra=9.81*3.33e-3*(Tavg-Tref)*pow(Length,3)/(16.2e-6*22.9e-6);
    begin_f_loop(f, t)
    {
        h_value=0.15*pow(Ra,0.33333)*thermal_k/Length;

        F_PROFILE(f, t, position)=h_value;
    }
    end_f_loop(f, t)
}
```



## D · 燃料軸向功率分佈 UDF

```
#include "udf.h"

DEFINE_SOURCE(suorce_BWR, c, t, dS, eqn)
{
    real x[ND_ND];
    real A, B,C, L1, L2, Active_length, f, p0, source, height,
Power_Density, Power_Per_Fuel, Volume_factor;
    C_CENTROID(x, c, t);
    height= x[1];
    p0=0.67873955;
Active_length=3.6576;
Power_Per_Fuel=197;
Volume_factor=0.9725/1.2;
    L1 = 0.15* Active_length;
        L2= Active_length *0.8;
        A = L1+p0;
        C= L2+p0;
B=p0+ Active_length*0.55;
        Power_Density = Power_Per_Fuel /0.06578/ Volume_factor;
    if (C> height)
    {
        f=1.15-(height-C)/L2;
    }
    else if (C>height && height> B)
    {
        f=1.15;
    }
    else if (B>height && height> A)
    {
        F=1.2;
    }
    else if (A>height)
        f=1.2-(A-height)/L1;
    source = Power_Density *f;
    return source;
}
```