

行政院原子能委員會
委託研究計畫研究報告

CFD 在核能特殊組件之分析技術發展
Development of CFD Application to the Specific
Components in Nuclear Plant

計畫編號：1042001INER032

受委託機關(構)：國立清華大學

計畫主持人：白寶實

聯絡電話：03-5715131 分機 42673

E-mail address：bspei@hotmail.com

核研所聯絡人員：陳彥旭

報告日期： 104 年 11 月 30 日

摘要

本研究擬就計算流體力學分析技術應用於核二廠上池(upper pool)貯存舊有燃料之熱流分析與核一廠高壓注水(High Pressure Coolant Injection, HPCI)系統誤啟動之應用案例進行分析，並針對各項參數對熱流特性之影響靈敏度進行探討。其中，核二廠上池貯存舊有燃料之熱流分析將基於核研所既有之分析模式進行延伸，並針對不同熱負載與邊界條件時所造成的水位變化及整體熱流特性逐一進行分析。而在核一廠高壓注水系統誤啟動造成之分析案中，則主要係將核一廠雷傳輸入模式與計算流體力學軟體(Computational Fluid Dynamic, CFD)進行整合分析，將雷傳程式之分析結果作為 CFD 邊界參數以進行暫態分析，以求得爐心各燃料束進口溫度，並針對網格尺寸、紊流模式與熱性質等條件進行靈敏度分析，以更進一步的評估其對爐心進口次冷度之影響。預期經由本研究之執行將有助於進一步釐清相關應用案中之參數靈敏度與保守性分析結果將可作為未來分析之參數選擇依據。

關鍵字：計算流體力學、核二上池、核一高壓注水系統、靈敏度分析

ABSTRACT

In this study, the Computational Fluid Dynamics (CFD) methodology has been employed to further investigate the thermal hydraulic influence of parameters in two existed CFD applications cases. For the one of the both cases, the upper pool of Kuoshan NPP has been used to store the spent fuels. Therefore, the fuel bundle design type, burnup rate, cooling time and the cooling condition of containment will be further investigate the sensitivity of parameters for the maximum temperature of spent fuels. For another one applications case, the CFD has been utilized to evaluate the sub-cooling temperature of coolant as the high pressure coolant injection (HPCI) event occurs on the reactor of Chinshan NPP. In this work, the CFD will be combined with RETRAN. The results original from the RETRAN will be the boundary conditions of CFD model as evaluating the sub-cooling temperature for each fuel of core.. We expect that the result forms the sensitivity and conservative of study can provide a basis for future analysis application.

Keywords: CFD, upper pool, HPCI, sensitivity study

目錄

摘要	II
ABSTRACT	III
目錄	IV
圖目錄	V
表目錄	VII
1. 計畫緣起與目的	1
1.1. 軟體評選與所需研究資料蒐集	1
1.1.1 核二廠上池貯存舊有燃料之熱流分析工作	1
1.1.2 核一高壓注水誤啟動事故分析工作	2
2. 研究方法與過程	3
2.1. HPCI模式規劃與節點評估	3
2.2. HPCI分析模式建立	6
2.2.1 降流區與飼水、補水管路	6
2.2.2 降流區與噴射泵、RECIRC環路	14
2.2.3 爐心下盤區與燃料座塊	19
2.3. 核二上池分析模式建立	27
2.4. 數值分析設定與邊界條件	31
3. 參數靈敏度測試	32
3.1. 網格靈敏度分析	33
3.2. 紊流模式靈敏度分析	34
3.3. 熱性質與餘項熱源對分析結果之靈敏度分析	35
3.4. 模型確認與驗證	37
4. 模擬結果	39
4.1. 核一廠HPCI誤啟動之模擬結果	39
4.2. 核二廠上池不同燃料熱負載邊界條件之模擬結果	44
5. 使用者自定義參數	57
5.1. RECIRC取水口流量UDF	57
5.2. RECIRC取水口溫度UDF	60
5.3. JET-PUMP進水口流量UDF	63
5.4. JET-PUMP進水口溫度UDF	65
5.5. UDF內容與掛載	67
6. 主要發現與結論	69
7. 參考文獻	70
附錄A	72
附錄B	83
附錄C	84

圖目錄

圖 1	RETRAN分析模式節點圖.....	5
圖 2	噴射泵構造圖[1].....	5
圖 3	反應爐壓力槽及內部組件[1].....	7
圖 4	降流區與爐心底部空間構造尺寸圖[2].....	8
圖 5	各環路標高位置圖[3].....	9
圖 6	飼水管噴嘴構造圖[1].....	9
圖 7	飼水管路位置圖[2].....	10
圖 8	飼水管路尺寸圖[4].....	11
圖 9	飼水噴灑環噴嘴尺寸圖[5].....	12
圖 10	飼水管路與降流區之幾何模型示意圖.....	12
圖 11	噴射泵標高位置與間距圖[6].....	14
圖 12	噴射泵位置對應圖[2][7].....	15
圖 13	噴射泵尺寸圖[8].....	16
圖 14	RECIRC進口管路尺寸圖[9].....	16
圖 15	降流區與噴射泵、RECIRC環路之幾何模型示意圖.....	17
圖 16	核一廠爐心配置暨控制棒導管位置對應圖[3][10].....	20
圖 17	控制棒導管尺寸工程圖[11].....	21
圖 18	控制棒導管尺寸工程圖[6].....	21
圖 19	不同位置之控制棒導管尺寸工程圖[11].....	22
圖 20	核一廠爐心配置尺寸間距圖[12].....	22
圖 21	外圍式燃料座塊構造圖[1].....	23
圖 22	流孔式燃料座塊構造圖[1].....	23
圖 23	外圍式燃料座塊尺寸圖[13].....	24
圖 24	流孔式燃料座塊尺寸圖[14].....	24
圖 25	爐心下盤區內部組件與燃料座塊孔洞之幾何模型示意圖.....	25
圖 26	核二上池全池CFD分析模式示意圖.....	28
圖 27	計算所得之核二上池側視圖.....	29
圖 28	計算所得之核二上池、燃料格架之模型與網格分佈上視圖.....	30
圖 33	核一廠反應爐三維模型網格圖.....	32
圖 34	不同網格數在降流區內的溫度分布.....	33
圖 35	不同紊流模式在降流區內的溫度分布.....	34
圖 36	模型內噴射泵系統之精度驗證。.....	37
圖 37	CSNPP模型爐心驗證 (a) 爐心分佈座標，.....	38

圖 38	每束燃料 160W 之上池壓力分佈	45
圖 39	每束燃料 160W 之上池溫度分佈	46
圖 40	每束燃料 160W 之上池溫度分佈(只有燃料格架部分)	47
圖 41	每束燃料 160W 之上池溫度與流線分佈(XY 截面)	48
圖 42	每束燃料 320W 之上池壓力分佈	49
圖 43	每束燃料 320W 之上池溫度分佈	50
圖 43	每束燃料 320W 之上池溫度分佈(只有燃料格架部分)	51
圖 44	每束燃料 320W 之上池流線分佈	52
圖 45	每束燃料 500W 之上池壓力分佈	53
圖 46	每束燃料 500W 之上池溫度分佈	54
圖 47	每束燃料 500W 之上池溫度分佈(只有燃料格架部分)	55
圖 48	每束燃料 500W 之上池流線分佈	56

表目錄

表 1、降流區與飼水、補水管路之重要幾何參數.....	13
表 2、降流區與噴射泵、RECIRC環路之重要幾何參數.....	18
表 3、爐心下盤區模型之重要幾何參數.....	26
表 4、本研究模擬相關分析設定與收斂條件.....	31
表 5、模擬核一廠各組件運轉時之設定狀態.....	31
表 6、分析所引用之熱物理性質.....	36
表 7、各參數對分析所得爐心進口流量之影響列表.....	36
表 8、各參數對分析所得爐心進口溫度之影響列表.....	36
表 9、RETRAN與CFD之邊界條件名稱.....	57

1. 計畫緣起與目的

核能電廠之熱流分析技術在歷經多年的研究與精進後，已有長足之進步，舉凡以往僅能以較為簡易模式進行之分析工作，透過計算流體力學(Computational Fluid Dynamics, CFD)分析技術的發展，使得更多的局部熱流特性與其對系統之影響能逐一的被發現或改進。例如，核研所近來於核電廠系統的分析中，利用 CFD 分析工具進行了用過燃料乾式貯存、大修時替代冷卻、燃料池熱流分析與圍阻體噴灑系統熱水流分析等案之熱水流分析，對於電廠之實際問題提供更佳的改善建議。但考量分析技術的一日千里，以及分析時的參數靈敏度與保守度係為 CFD 應用於核能電廠熱流之關鍵，故本研究擬就核研所提出之兩項分析技術，持續進行分析模式的精進與參數靈敏度分析；以期透過探討各參數變化所造成的影響，來確認分析模式之可靠度與保守性。此兩項工作項目包括有：(1)核二廠上池(upper pool)貯存舊有燃料之熱流分析，計算燃料在無水冷卻時的最高溫度；(2)核一廠高壓注水(High Pressure Coolant Injection, HPCI)系統誤啟動時，反應爐中的水溫分佈狀況。

其中，核二廠上池(upper pool)貯存舊有燃料之熱流分析一案，係針對核二廠圍阻體內之上池裝載冷卻超過 10 年以上之舊有燃料進行熱流評估。由於核二上池原始設計係於大修期間用以暫存燃料，以往的安全評估中並未長期貯存老舊用過核子燃料。然而，有鑑於我國核二廠用過燃料池貯存容量將罄之故，核二上池亦是有可能貯放用過燃料的選擇，為避免核二廠用過燃料貯存空間不足，導致無法運轉，進而影響我國能源供應之穩定性。因此若要能完整探討該設施於不同狀況期間之熱流特性與分析保守性，本研究針對上池內裝載不同類型、熱負載之燃料進行參數靈敏度分析。

而在「核一廠高壓注水系統誤啟動造成之反應爐水溫分佈」分析工作中，因此誤動作事故將因為反應器之實際運轉功率、反應爐內注水環幾何形狀、飼水流

量以及進口次冷度等條件而形成不同程度之影響，本研究亦擬針對實際的核一反應爐內注水環位置、爐心發熱功率與入口次冷度等條件進行靈敏度分析，以評估其影響。然因核一廠 HPCI 流量較大，事故時爐心冷卻效果較佳，但若誤啟動時，其影響亦較顯注，故目前僅少數研究[1-5]針對此一議題建立 CFD 與 RETRAN 發展整合分析之技術探討此熱流現象，其研究結果指出由於核一噴射泵的設置，使得反應器之降流區溫度呈現非均勻現象，更進一步的影響了爐心進口之溫度分佈；然而，上述研究成果僅針對額定運轉功率狀況進行分析，其分析技術尚未能更廣泛地探討不同額定功率下之結果。本研究擬針對此一問題進行模式發展與精進，並透過靈敏度測試來確定各參數對結果之影響程度。

本研究各章節所載之內容，除用以記錄各項工作之成果外，其內容可更作為滿足以下各項合約工作之佐證：

- (一) 核二上池貯存充份冷卻之用過核燃料之分析模式建立
- (二) 各熱流參數對核二上池貯存充份冷卻之影響程度
- (三) 核一廠高壓注水系統於非額定功率之分析模式建立
- (四) 各熱流參數對核一廠高壓注水系統於非額定功率之影響程度

其中工作項目(一)、(三)如本報告第二章所載，而各分析結果依其測試參數之不同，則如本報告第三章、第四章所述。

1.1. 軟體評選與所需研究資料蒐集

由於我國核二上池與核一 HPCI 誤啟動事件之現有分析成果皆僅考量特定運轉條件或裝載配置下所得之結果，而並未對更多可能造成熱流特性改變之參數進行完整地分析。但有鑑於安全分析結果與事故狀況研判及處置作業之決策正確性息息相關，事故期間的熱水流分析結果之保守性與完整性將直接影響其效果。因此，不論是分析工具的選用、模式的選擇、方法論的適用性以及分析模型的正確性皆需逐一檢核，方能確保分析結果之合理與適用性。因此本研究擬選擇目前於核能電廠特殊組件之分析領域中，已有實例之 ANSYS FLUENT [6]分析軟體作為分析工具。這是因為該軟體已完成相關分析方法論[11,12]並通過原能會之審查，而且核研所內亦已建立相關的分析技術，故採用與該分析方法論相同之分析軟體將有利於提昇本計畫所完成之分析技術的應際應用性。除此之外，本研究團隊對此分析軟體之使用者自定函數(User Defined Function, UDF)之擴充與建立已有充足之經驗[1-5]；故透過此一擴充技術之應用，更可針對所需之分析模式進行發展，而達到預期之研究目標。

而針對本研究執行期間擬完成之核二上池分析以及核一 HPCI 誤啟動事件之分析所需資料之蒐集狀況，則如本章以下各節所述。

1.1.1 核二廠上池貯存舊有燃料之熱流分析工作

如原計畫書所載，本研究擬於計畫開始之初，針對上池所需熱流分析之文獻、工程圖面、暫態與事故資料的蒐集與研析，以作為後續分析工作之參考依據，而所得結果則已詳如參考文獻[7-10]。透過已蒐集之工程圖面，本團隊將逐一針對圍阻體內部空間、核二上池幾何形狀以及燃料束格架與燃料束進行分析模式的建立，以下將逐一對各處空間進處置方式進行說明，並作為後續分析模式建立之依據：

- A. 有鑑於整體分析工作中，圍阻體內空間所佔體積最大，故若加以詳細分析恐將造成額外不必要的計算負載。因此在本研究中擬先行以一假設性短暫態案例進行實際幾何狀況之模擬，並與採用能量守衡方式進行圍阻體空間簡化之模式加以比對，並於確認簡化模式之保守性與合理性後再

於後續的靈敏度分析中，採用 UDF 簡化模式來免除不必要的圍阻體空間分析。

- B. 相較於圍阻體內部空間對整體分析的低重要性，燃料池空間因為體積有限且直接影響事故期間之熱流分析，故於研究中將採實際模型予以考量其內部對流特性。
- C. 燃料束與格架內之流場往往因為內部複雜之幾何形狀而受到極高流阻，並促使內部之對流特性程現近似於均勻分佈整之流場，採用實際幾何形狀將令分析負載劇增數百倍。因此本研究擬用多孔性材質模式，將其進行均質化，並利用 FLUENT 中的動量方程式的源項，將燃料束之流阻加以描述；

$$\frac{\partial P}{\partial x} = -\left(\frac{\mu}{K}\bar{V} + \rho\frac{1}{2}C_2\bar{V}^2\right)$$

其中， μ 為流體黏滯係數， ρ 為流體密度， V 則為流體速度， K 與 C_2 則分別為滲透率與慣性阻力係數。

在完成上述之模式建立所需之資料蒐集工作後，本研究即可利用已蒐集之資料進一步的針對核二廠上池貯存舊有燃料之熱流分析工作進行所需之分析模式建立與靈敏度分析，進而完成此部分之工作。

1.1.2 核一高壓注水誤啟動事故分析工作

有別於前項工作項目具有極大的分析區域，核一高壓注水系統分析一案只需針對反應器壓力槽內由降流區至爐心下盤區之範圍進行分析；且考量此區域之幾何形狀將直接影響分析結果，故在分析模式中將不再採行任何均質化或是過度簡化之處置方式。但由於此一分析工作主要是擬探討 HPCI 系統於誤啟動狀況下對爐心進口所造成的熱流影響，故對於整體之系統響應與暫態熱水流事故，則仍需藉由邊界條件模式的發展來達成。故研究中擬以 RETRAN 分析程式所獲之暫態數據作為邊界，並利用 UDF 功能將其轉換為適用於 CFD 分析模式之邊界條件以達成此一模擬工作。

因此所有的分析資訊蒐集除了包括 RETRAN 之案例資料外，單純幾何分析之資料則只需著眼於壓力槽內至燃料座塊之部分即可，而蒐集所獲之資料如參考文獻[11-26]所示。

2. 研究方法與過程

HPCI 發生誤動作時，其低溫流體將會不對稱地經由連接爐心飼水噴灑環之管路進入降流區(Downcomer)內，再藉由其內的噴射泵與再循環迴路之吸抽效應而混合，最後再流至爐心下盤區 (Lower Plenum)並經燃料座塊之孔隙流進燃料束底端。考量 HPCI 注入的低溫冷卻水在此一區間之流動與混合效應，將進一步對爐心進口溫度之次冷度造成影響，本分析模式發展計算書中即針對上述之流場範圍進行模式發展；除作為未來整合分析之用外，亦藉由本模式發展計算書之記錄，所為後續引用與品保作業之依據。

2.1. HPCI 模式規劃與節點評估

圖 1 為整體核一廠 HPCI 事故之 RETRAN 分析模式節點圖，而整體 HPCI 之影響係由節點 8 以下，至爐心進口之節點 1 為止。故本分析模式亦將就此部分之幾何形狀進行模擬，以下將就各節點處之後續 CFD 建模作業進行初期評估與模擬規劃：

A · 節點 8：

此區段係為一環形流道，其內部包含 RCIC500、FW600 與 HPCI400 等管路，並由 JUNCTION8 流入汽液分離器之液態水，經混合後由 JUNCTION9 流出。

經評估此部分之 RCIC、FW 與 HPCI 管路將影響事故發生時之上游之 HPCI 混合效應，故於此節點中之所有管路將詳實描繪；此外，基於分析所需，需由 RETRAN 讀入 JUNCTION8、HPCI 400、RCIC 500 與 FW 600 之流量與溫度，共計 8 個參數。

B · 節點 9、10、11、16 與 17：

此區段係為降流區之主要區段，其中內含 20 組噴射泵(節點 16、17)與兩個 RECIRC 迴路取水管(節點 10、11)。

噴射泵與 RECIRC 迴路取水管將直接影響上游冷卻水之溫合特性，因此本區段之幾何形狀亦需詳實模擬。然而考量用以趨動噴射泵之羊角(圖 2)過於複雜，將於後續建模型略作簡化。此外，本區段雖無需透過輸入 RETRAN 資料來作為邊界條件，但仍有以下數據需進行處理：RECIRC 出口流速與平均溫度、噴射泵驅動流(DRIVING FLOW)注水溫度與流量。

C · 節點 12、13、14、15：

此區段係為反應器之兩套 RECIRC 環路，其藉由 JUNCTION 14 與 15 向節點 10 與 11 抽取冷卻水後再經泵浦加壓再打入噴射泵以作為驅動流。

由於此區段對熱水流之影響較小，但其管路配置將極為複雜，故於分析模型中將加以簡化，再以能量與質量守恆求取兩套環路之出口流速與溫度，並轉換為兩組噴射泵(節點 16 與 17)之進口條件。

D · 節點 1：

本區段係為反應器之下盤區，並將由 20 支噴射泵注入之冷卻水於其中透過控制棒驅動裝置與燃料座塊等元件進行混合後，再由 junction100 流進爐心。

有鑑於此區段內部幾何將直接影響各燃料進口之水溫分佈，故於本模式中，需就此進行詳細模擬。此外，若將 CFD 分析所得之爐心進口結果依原 RETRAN 規劃加以平均(如 junction 100)時，將失去利用 CFD 進行模擬分析之價值；故本報告所述模式將針對 408 組燃料束之出口溫度分別加以定義，以求得所更為詳盡之分析數據，並供作未來分析之用。

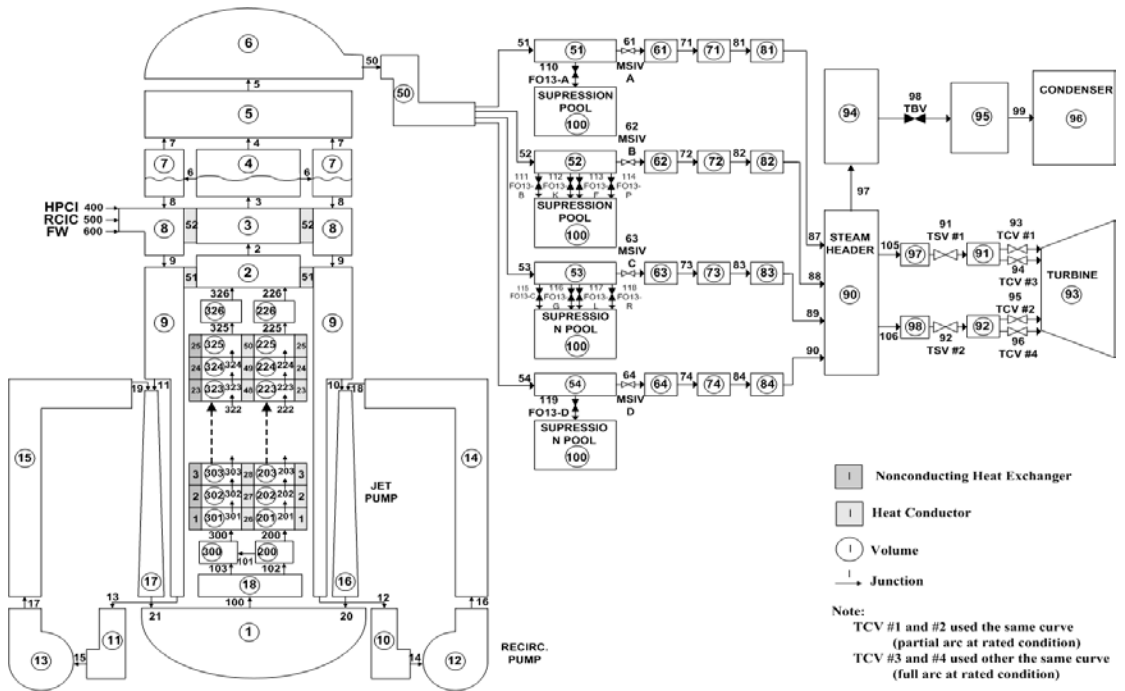


圖 1 IRETRAN 分析模式節點圖

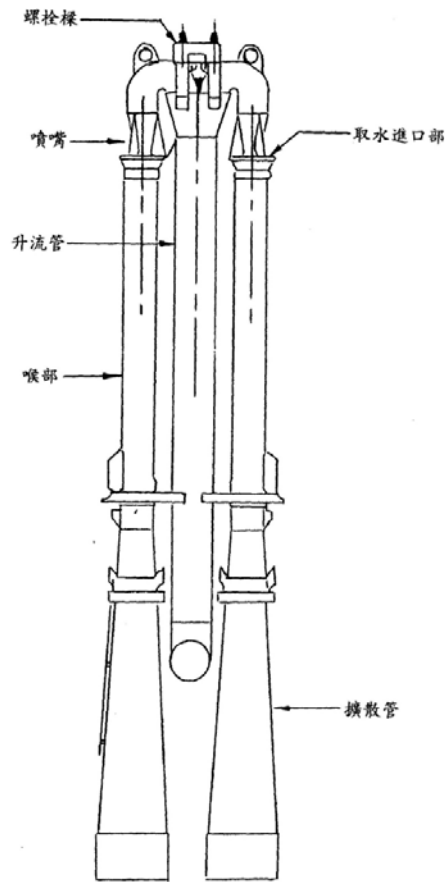


圖 2 噴射泵構造圖[1]

2.2. HPCI 分析模式建立

基於 3.1 節所述，除 RECIRC 迴路因不致明顯影響降流區流場特性，而擬以守恆式進行簡化評估外，其餘各區之幾何模型建置過程將依流場流動之先後順序逐一說明如下：

2.2.1 降流區與飼水、補水管路

如圖 3 所示，進行本區段模型建構之主要幾何資料係包括降流區之內徑、外徑、飼水噴灑環、飼水管路等結構，在經相關資料蒐集後，所獲之資料圖 4-圖 9 所示，並可進一步匯整如表一。

基於以上之幾何參數，本報告所建置而成之幾何模型則如圖 10 所示，其為模型半視圖，左半部為完整模型，包括降流區、飼水噴灑環與飼水管路等結構，右半部則特別展示模型內部之飼水管路與飼水噴灑環構造。

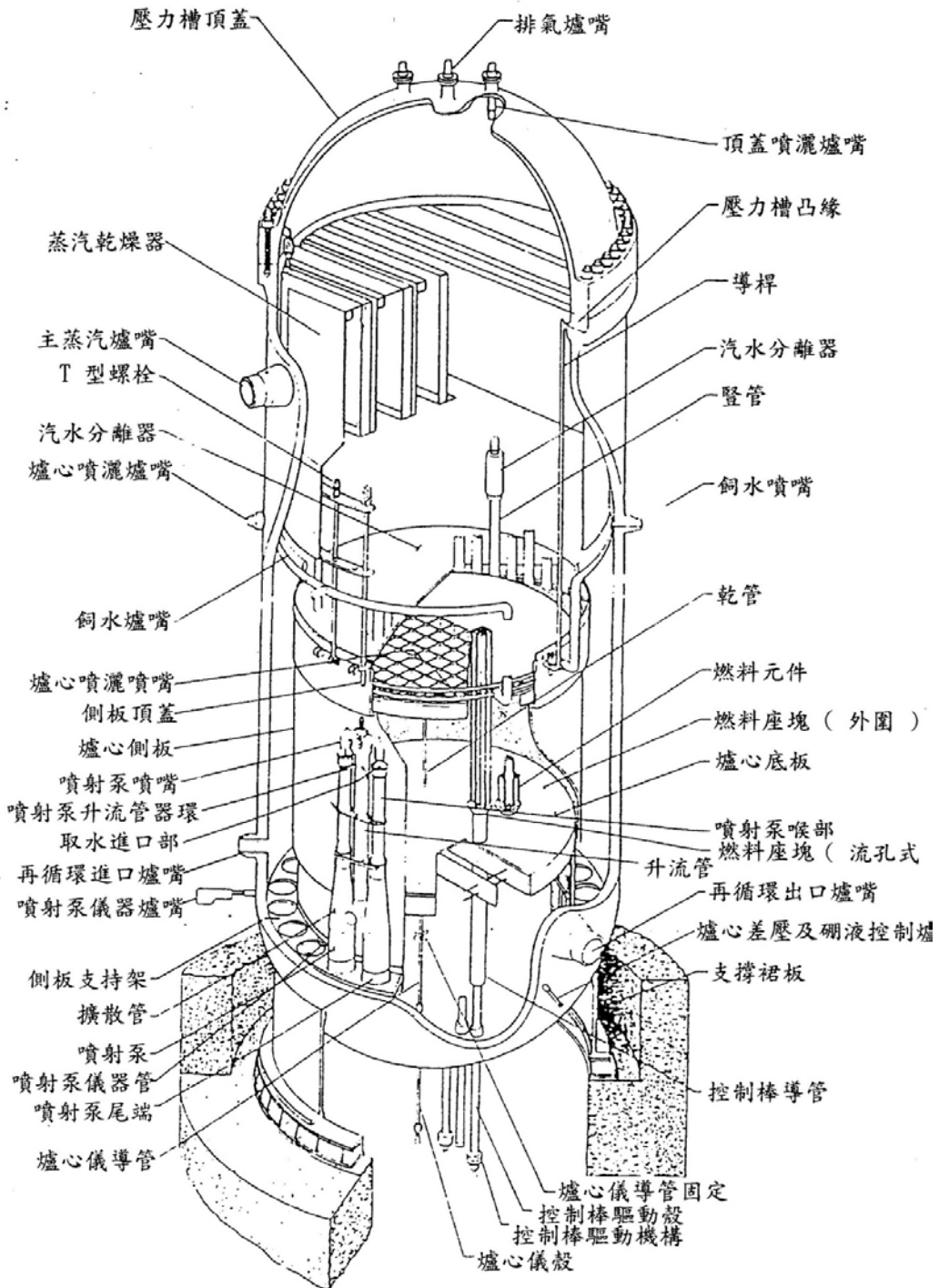


圖 3 反應爐壓力槽及內部組件[1]

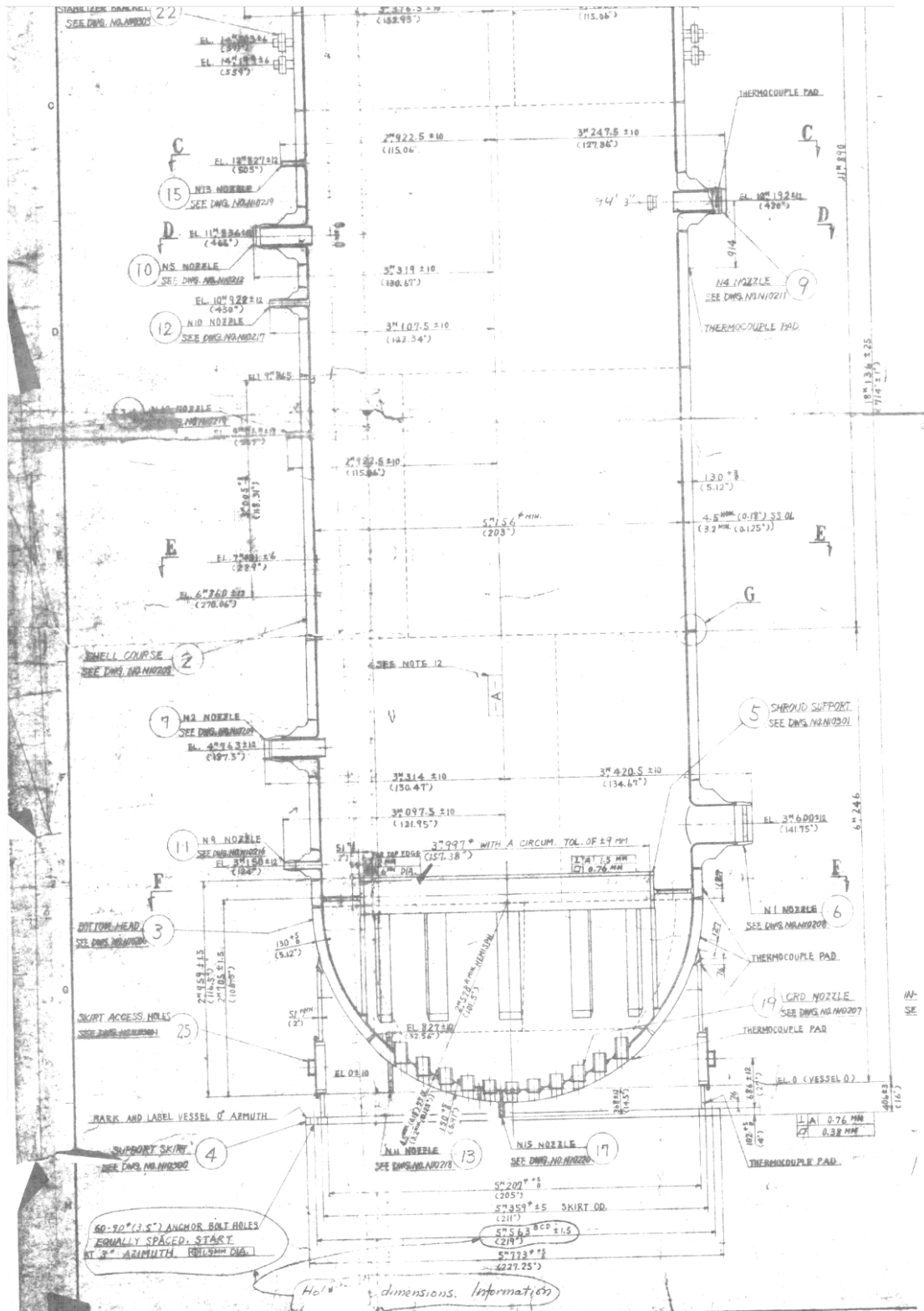
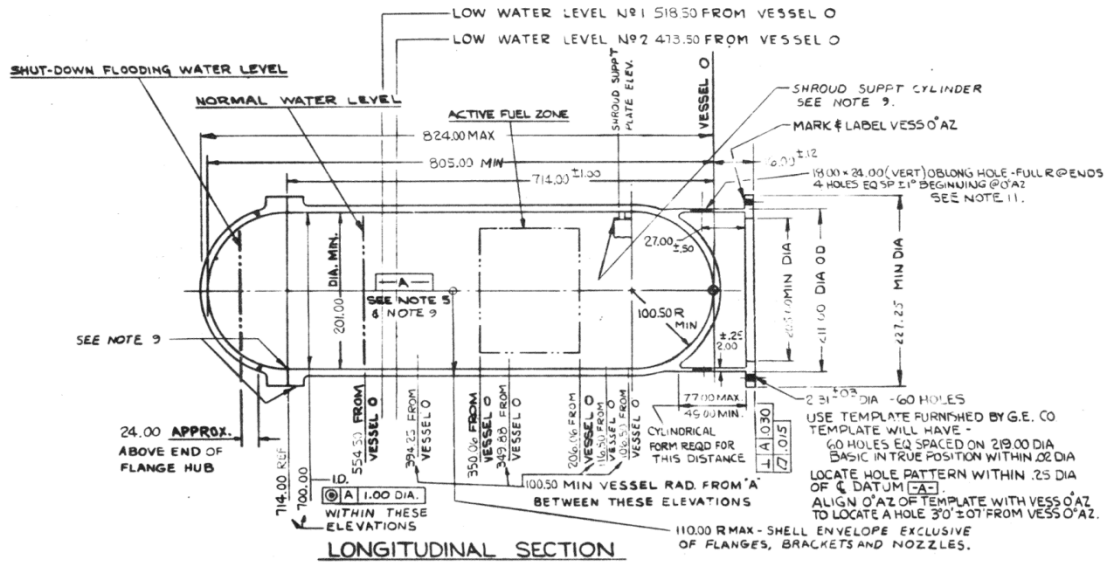


圖 4 降流區與爐心底部空間構造尺寸圖[2]



NOZZLE SCHEDULE

NOZZLE NO	QUAN.	SIZE	FUNCTION	AZIMUTH ±15°	DISTANCE FROM VESSEL O ±.10	RADIAL DISTANCE FROM VESSEL O ±.10		IPS	SCH. OR WALL	MATERIAL
						MIN	MAX			
N1	2	2.00	RECIRCULATION OUTLET	0° 180°	141.75	124.00	137.33	2.00	SCH. 80	SA106-GR.B
N2	10	1.00	RECIRCULATION INLET	30° 60° 90° 120° 150°	187.50	122.00	192.33	1.00	1.472 MIN.	SA240-TP304
				210° 240° 270° 300° 330°						
N3	4	2.00	STEAM OUTLET	72° 108° 252° 288°	263.00	127.00	135.00	2.00	.728 MIN.	SA106-GR.B
N4	4	1.00	FEEDWATER	45° 135° 225° 315°	480.00	124.00	130.00	1.00	SCH. 100	SA106-GR.B
N5	3	1.00	CORE SPRAY	90° 270°	466.00	122.00	134.00	1.00	SCH. 80	SA 240 TP304
N7	2	2.00	HEAD SPRAY - SPARE	0° (HD SPRAY) 150° (SPARE) ON TOP HEAD	840.00 MAX TO FG FACE					
N8	1	2.00	VENT	DN @ OF TOP HEAD	113.00	125.00	4.00	SCH. 80	SA312-TP304	
N9	2	4.00	JET PUMP INSTRUMENTATION	105° 180°	470.00	117.00	127.00	3.00		SA312-TP304
N10	1	3.00	CONT ROD DRV HYD SYS RETURN	51.2° BOTTOM HEAD PLAN VIEW						SA312-TP304
N11	1	2.00	CORE DIFF PRESS & LIQUID CONTROL	3.2° 210°	357.00	114.00	124.00	2.00		SA106-GR.B
N12	2	2.00	INSTRUMENTATION	110° 170°	505.00	114.00	124.00	2.00	SCH. 80	SA106-GR.B
N13	2	2.00	INSTRUMENTATION	20° 100°	199.00	114.00	124.00	2.00	SCH. 80	SA106-GR.B
N14	1	1.00	SEAL LEAK DETECTION	BETWEEN HEAD BOLTS, 0° APPROX.						
N15	1	2.00	DRAIN	SEE BOTTOM HEAD PLAN VIEW						
N15	97	6 SPL	CONTROL ROD DRIVE	SEE BOTTOM HEAD PLAN VIEW						
	34	2 SPL	IN-CORE	SEE BOTTOM HEAD PLAN VIEW						

圖 5 各環路標高位置圖[3]

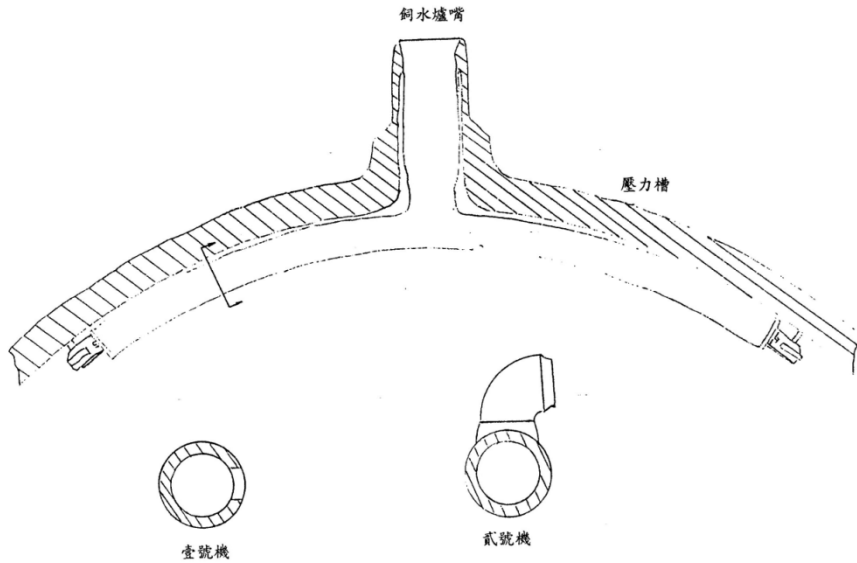


圖 6 銅水管噴嘴構造圖[1]

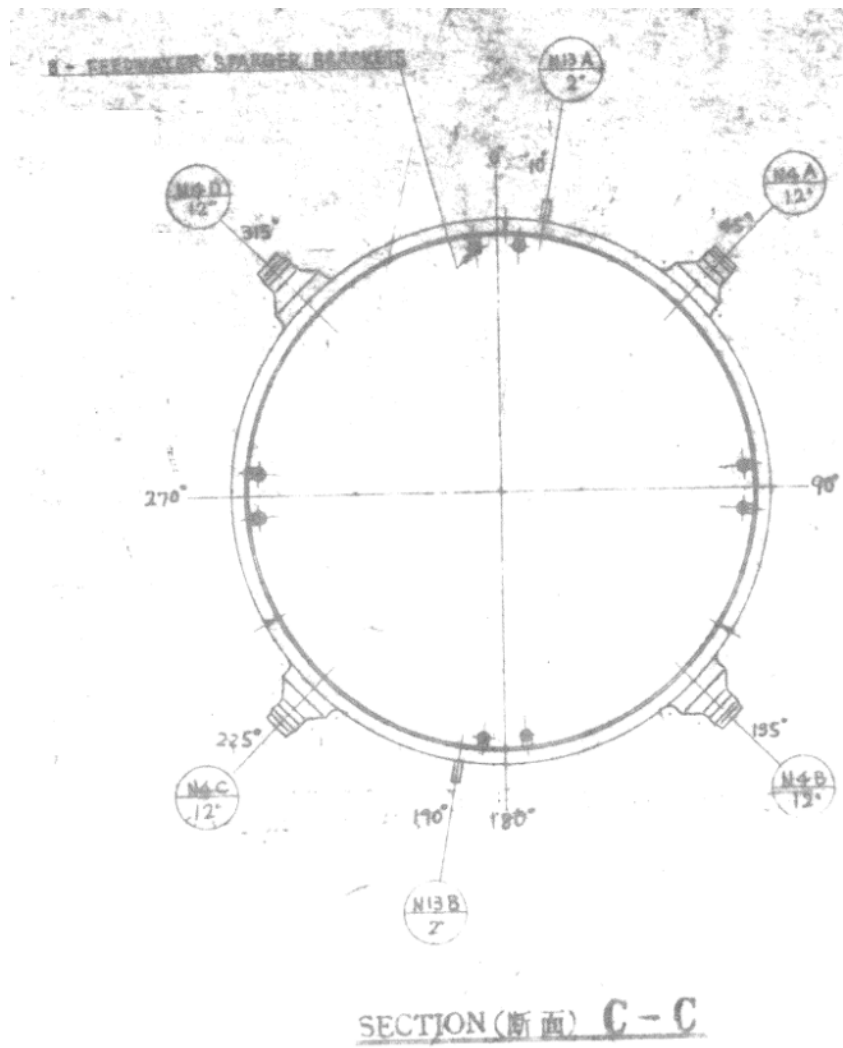


圖 7 飼水管路位置圖[2]

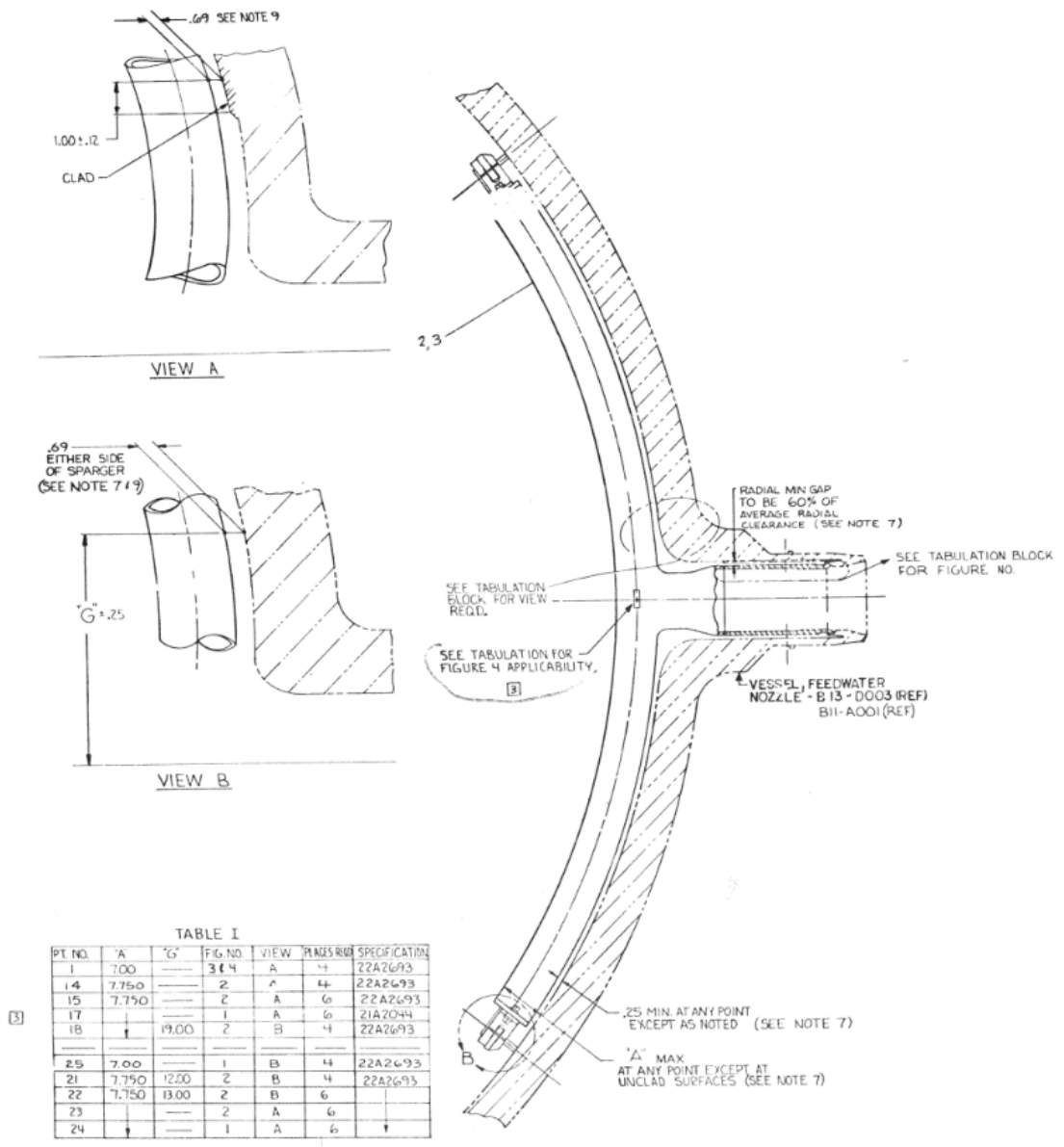


圖 8 飼水管路尺寸圖[4]

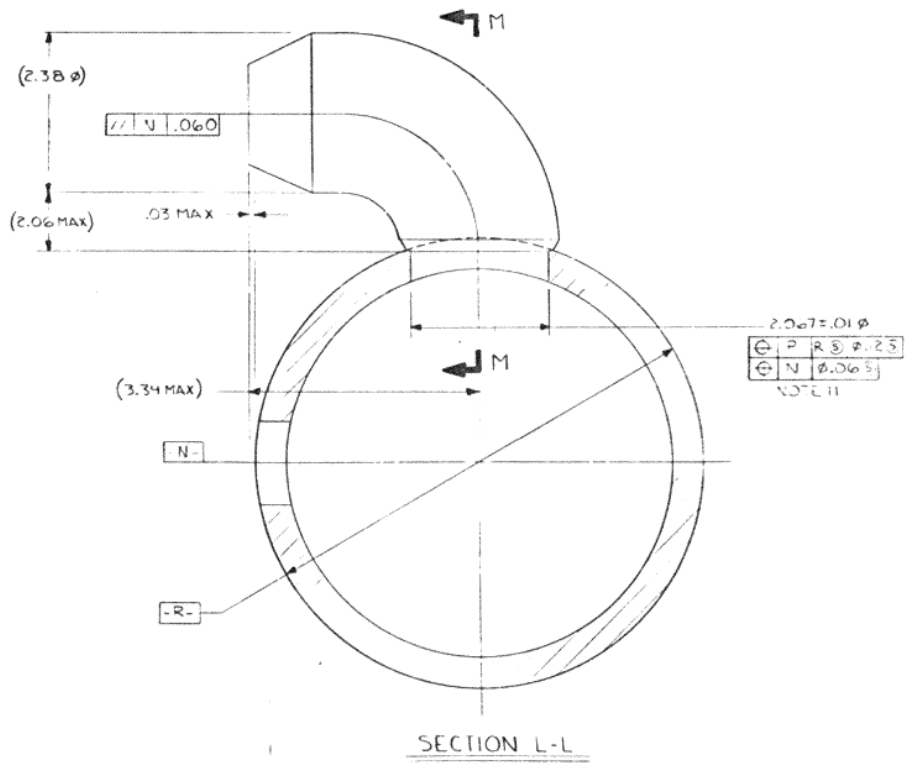


圖 9 飼水噴灑環噴嘴尺寸圖[5]

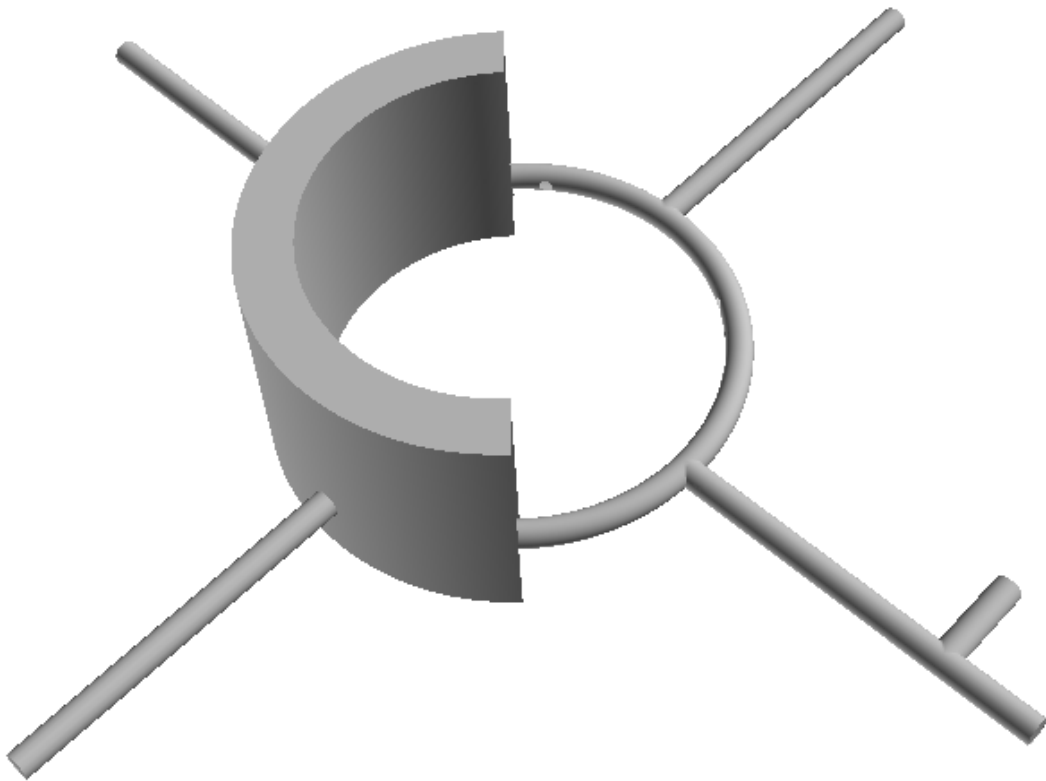


圖 10 飼水管路與降流區之幾何模型示意圖

表 1、降流區與飼水、補水管路之重要幾何參數

名稱	尺寸	參考資料
降流區外徑	203"	[2]、[3]
降流區內徑	161.38"	[2]、[3]
飼水管路進口角度	45°、135°、225°、315°	[2]
飼水管路標高	480"	[3]
飼水環直徑	7.5"	[4]
飼水管路直徑	12"	[2]、[3]
飼水噴灑環噴嘴尺寸	3.31"	[5]
飼水噴灑環噴嘴位置	0°、90°、180°、270°	[2]

2.2.2 降流區與噴射泵、RECIRC 環路

本區段模型建構之主要幾何資料係包括噴射泵、RECIRC 環路結構，根據取得之相關資料分析後，由資料圖 11-圖 14 提供之數據製作幾何模型，其重要幾何參數彙整於表 2。

本報告所建置而成之幾何模型則如圖 15 所示，其為模型半視圖，左半部為完整模型，包括降流區、噴射泵與 RECIRC 環路等結構，右半部則特別展示模型內部之噴射泵與 RECIRC 環路構造。

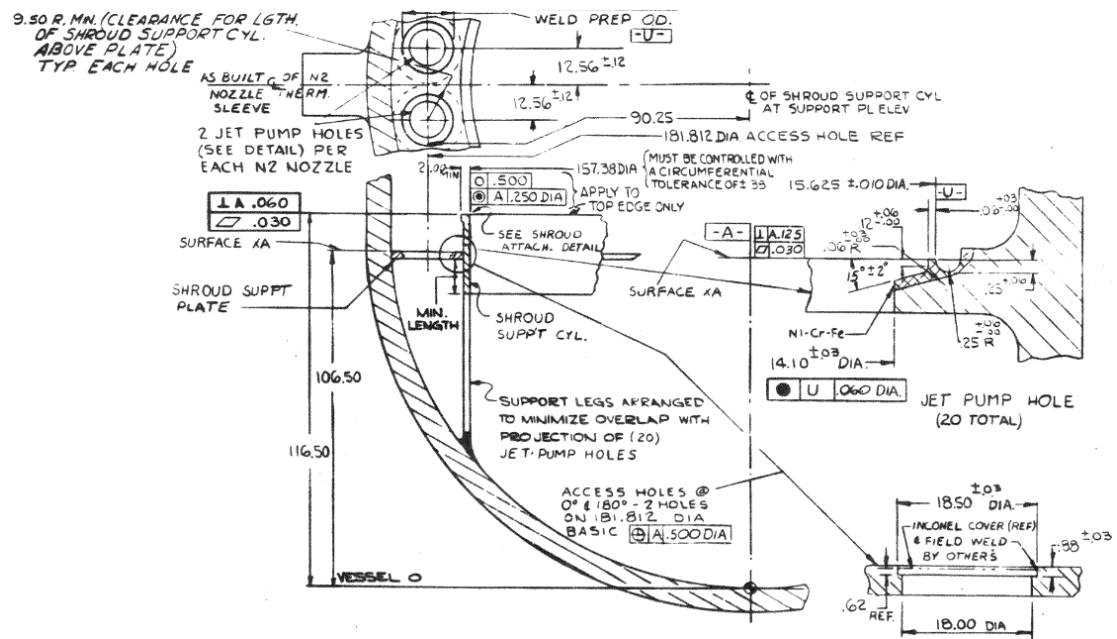


圖 11 噴射泵標高位置與間距圖[6]

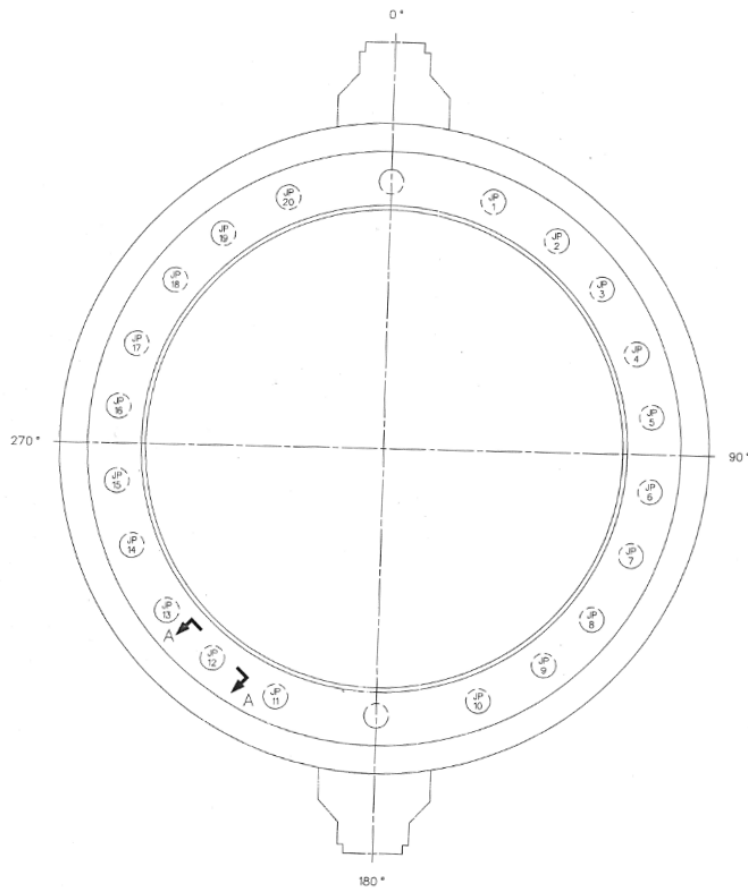
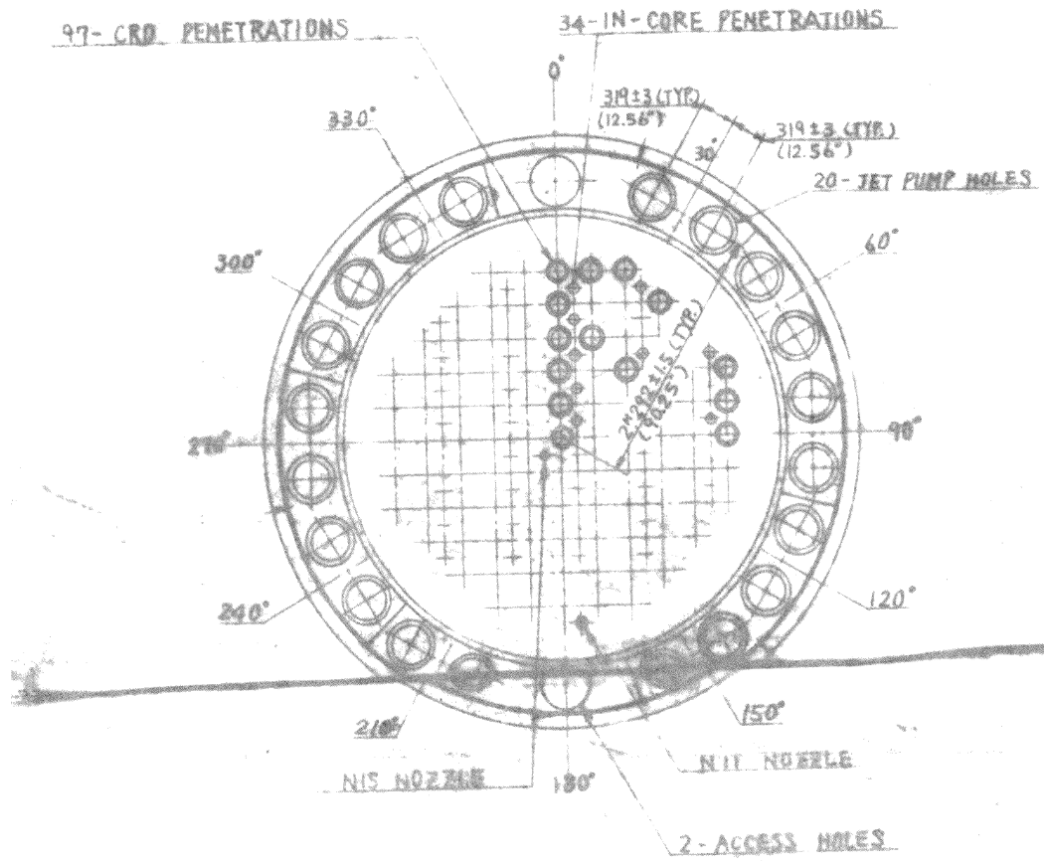


圖 12 噴射泵位置對應圖[2][7]

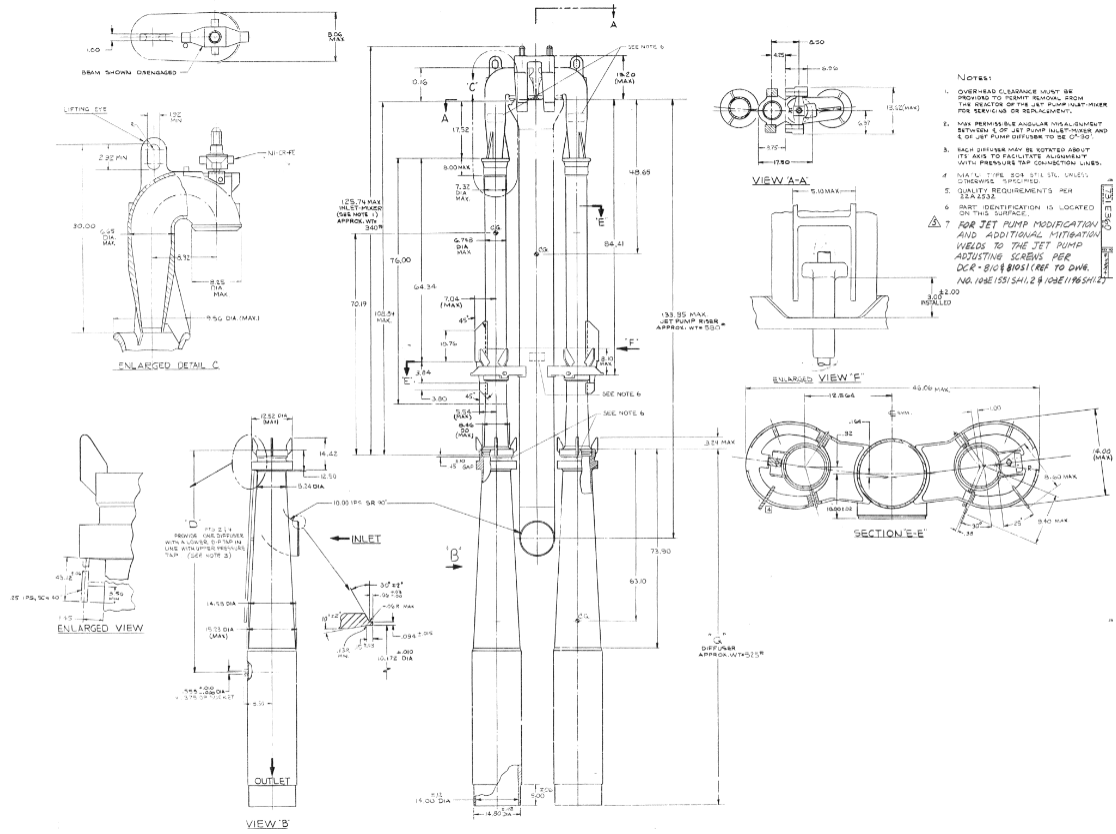


圖 13 噴射泵尺寸圖[8]

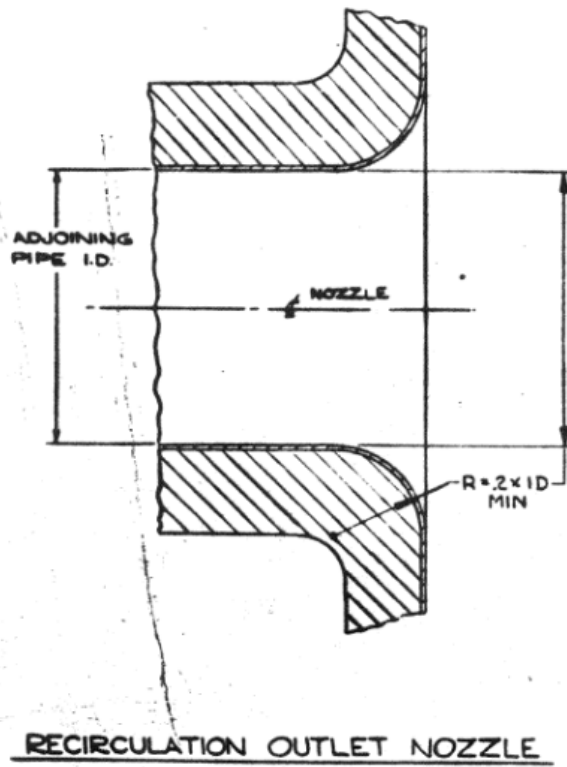


圖 14 RECIRC 進口管路尺寸圖[9]

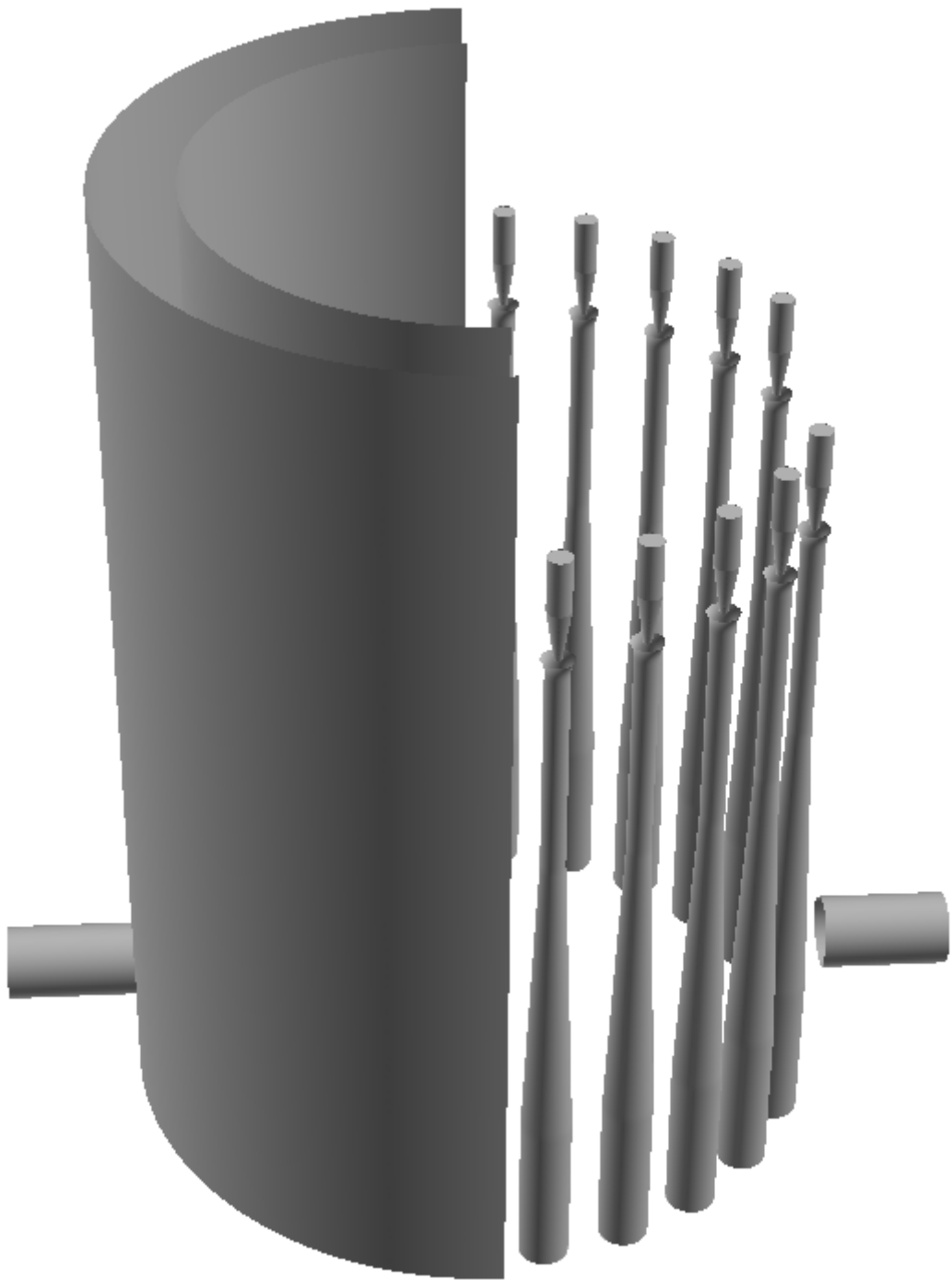


圖 15 降流區與噴射泵、RECIRC 環路之幾何模型示意圖

表 2、降流區與噴射泵、RECIRC 環路之重要幾何參數

名稱	尺寸	參考資料
噴射泵標高	106.5''	[6]
噴射泵位置角度(1 組 2 支)	30°、60°、90°、120°、 150°、210°、240°、270°、 300°、330°	[2][7]
噴射泵間距	25.12''	[6][8]
噴射泵取水進口部直徑	8.9''	[8]
噴射泵取水進口部長度	4''	[8]
噴射泵喉部直徑	7.32''	[8]
噴射泵喉部長度	60.34''	[8]
噴射泵擴散管長度	141.28''	[8]
噴射泵擴散管出口直徑	14.8''	[8]
RECIRC 環路標高	141.75''	[3]
RECIRC 直徑	22''	[3][9]

2.2.3 爐心下盤區與燃料座塊

爐心下盤區模型建構之主要幾何資料係包括爐心下盤區外徑、爐心側板、控制棒驅動導管與燃料座塊流孔等結構尺寸及位置，相關資料如圖 16-圖 24 所示，並根據相關資料所提供之數據製作爐心下盤區幾何模型，表三為重要幾何參數之彙整。

圖 25 為本小節所建置之幾何模型，其為模型半視圖，上圖為隱藏爐心下盤區外殼以展示內部爐心側板與控制棒導管構造，下圖則為完整模型半視圖，藍色區塊標示為噴射泵出口位置，紅色區塊則為燃料座塊孔隙之位置，流孔式燃料座塊與外圍式燃料座塊孔洞尺寸與安裝位置皆不同，流孔式燃料座塊以間隔 90 度角安裝於控制棒導管內側，外圍式燃料座塊則位於無控制棒導管處，以上座塊位置皆參考核一廠爐心配置圖[10]。

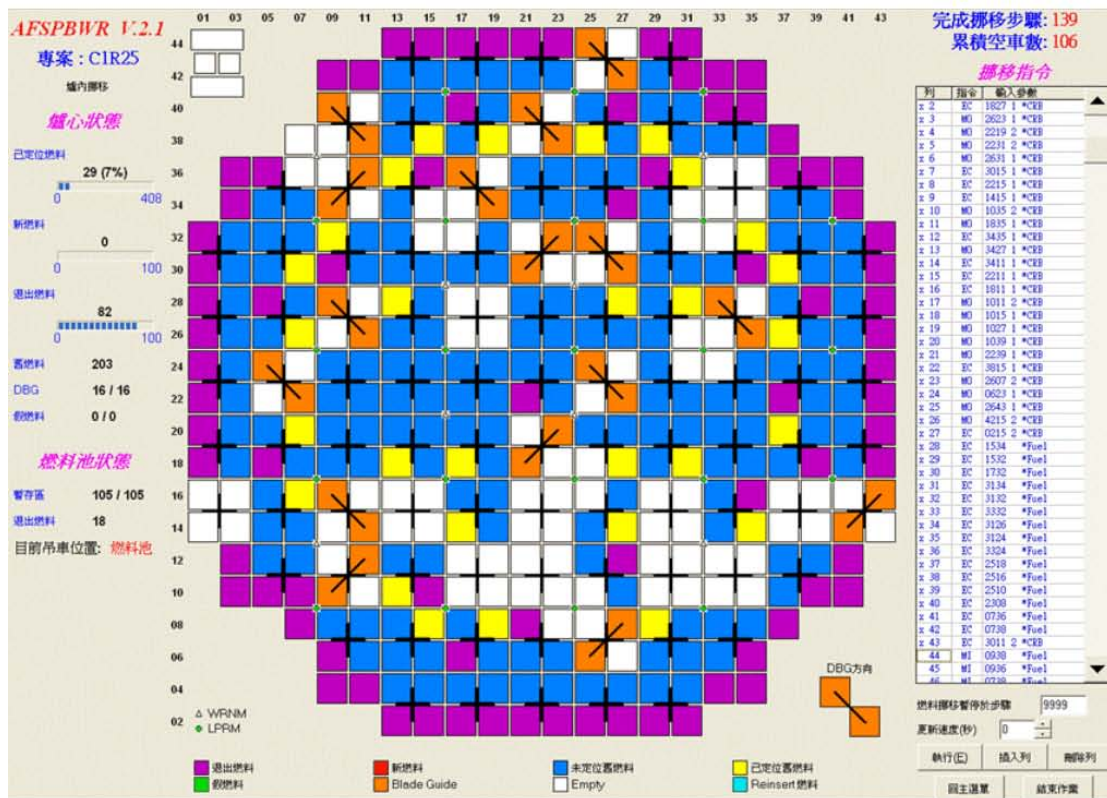
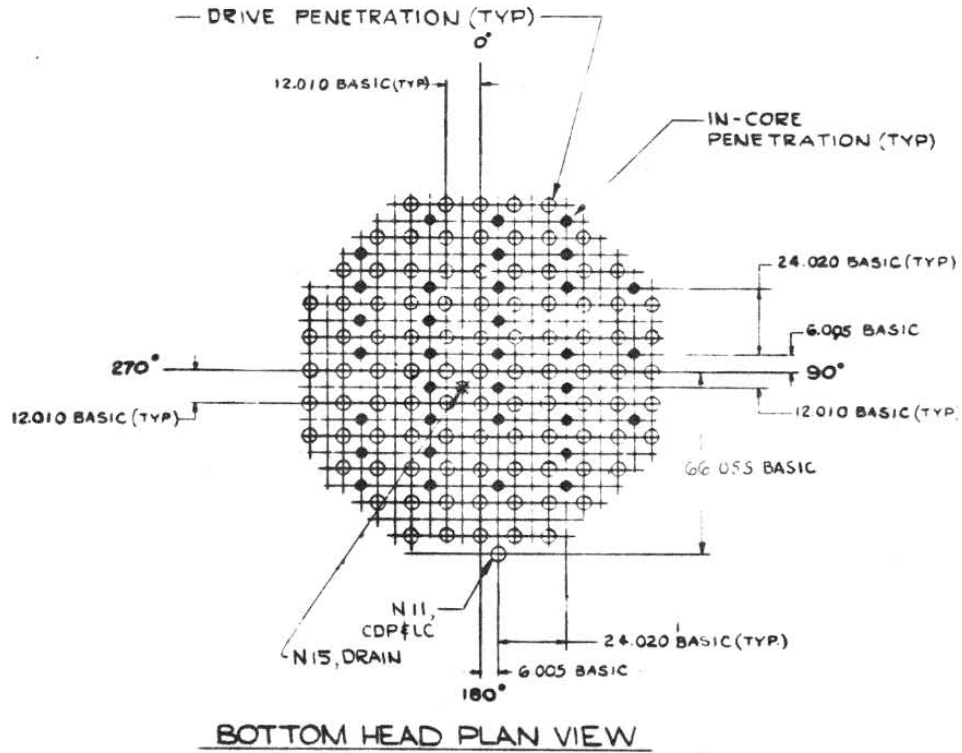


圖 16 核一廠爐心配置暨控制棒導管位置對應圖[3][10]

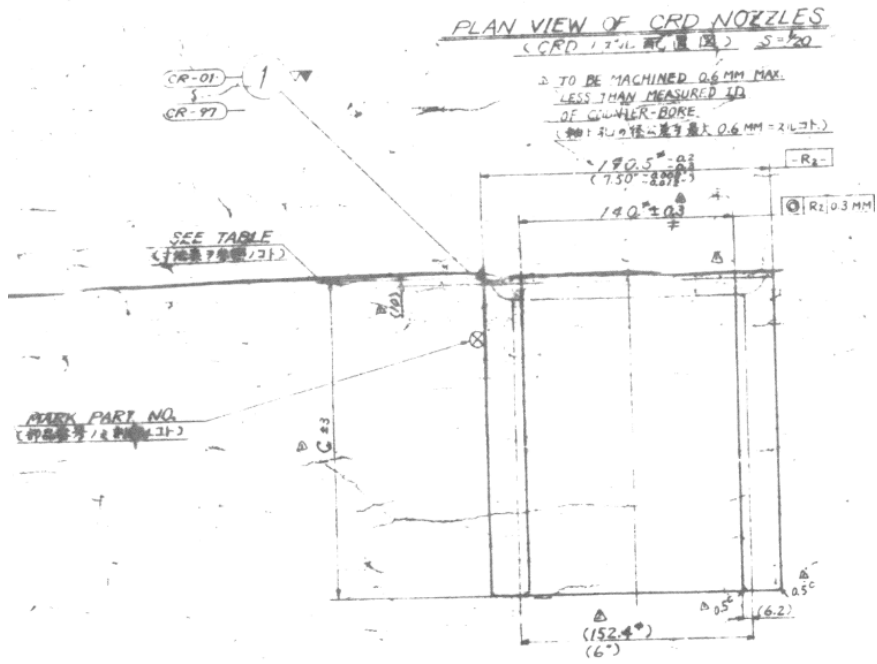


圖 17 控制棒導管尺寸工程圖[11]

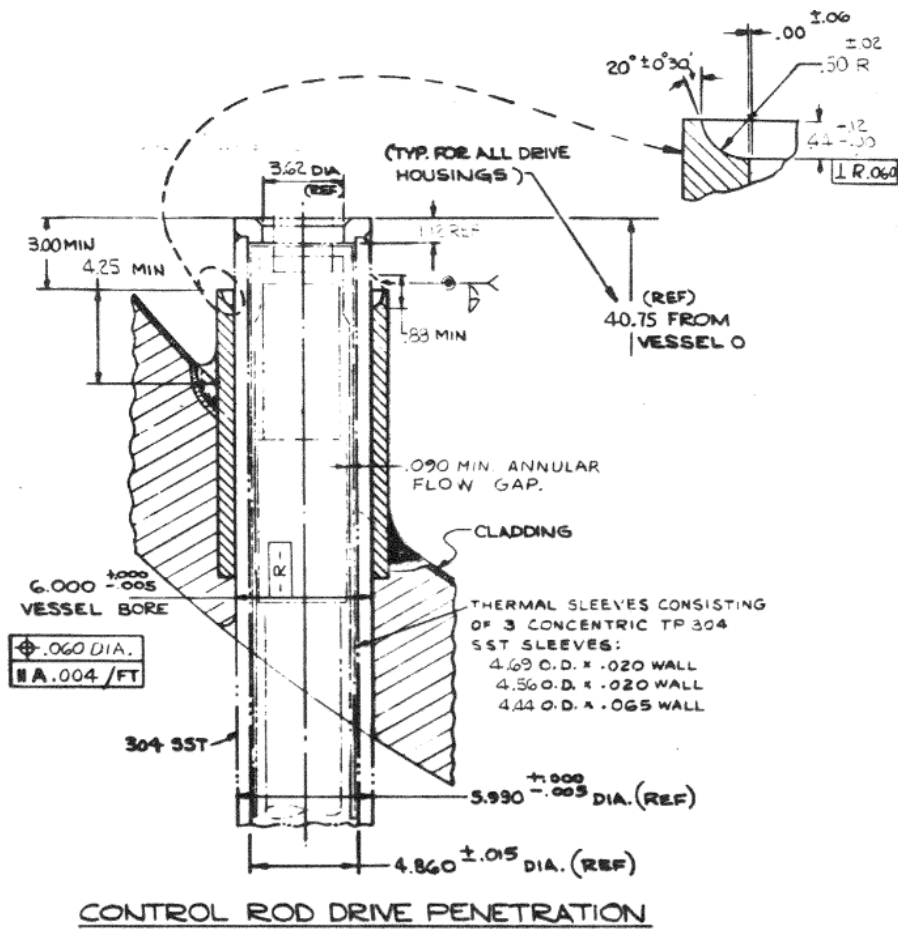


圖 18 控制棒導管尺寸工程圖[6]

DIMENSIONS FOR CRD NOZZLE
(CRD / 石化管通氣)

GROUP NO.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
CRd NO.	CR-38 CR-48 CR-50 CR-60	CR-27 CR-47 CR-51 CR-71	CR-17 CR-46 CR-52 CR-81	CR-09 CR-45 CR-53 CR-89	CR-03, CR-08 CR-12, CR-13 CR-21, CR-44 CR-34, CR-77 CR-85, CR-86 CR-92, CR-93	CR-37 CR-39 CR-59 CR-61	CR-26 CR-36 CR-40 CR-58 CR-62 CR-70 CR-72	CR-16 CR-28 CR-35 CR-41 CR-49 CR-63 CR-80 CR-82	CR-08 CR-10 CR-34 CR-42 CR-56 CR-64 CR-88 CR-90	CR-02 CR-06 CR-30 CR-43 CR-45 CR-49 CR-73 CR-96	CR-25 CR-29 CR-69 CR-93	CR-14 CR-19 CR-13 CR-24 CR-28 CR-74 CR-83	CR-07 CR-11 CR-23 CR-31 CR-67 CR-75 CR-87 CR-91	CR-01 CR-05 CR-32 CR-37 CR-66 CR-76 CR-84 CR-97	CR-04 CR-20 CR-78 CR-94	CR-19 CR-20	CR-49
DIMENSION	A	B	C														
	166	190	216	246	284	175	195	220	250	288	211	231	263	302	254	143	
	133	156	182	213	250	142	162	187	217	254	178	200	229	268	221	110	
	176	200	226	256	294	185	205	230	260	298	221	243	273	312	264	153	

圖 19 不同位置之控制棒導管尺寸工程圖[11]

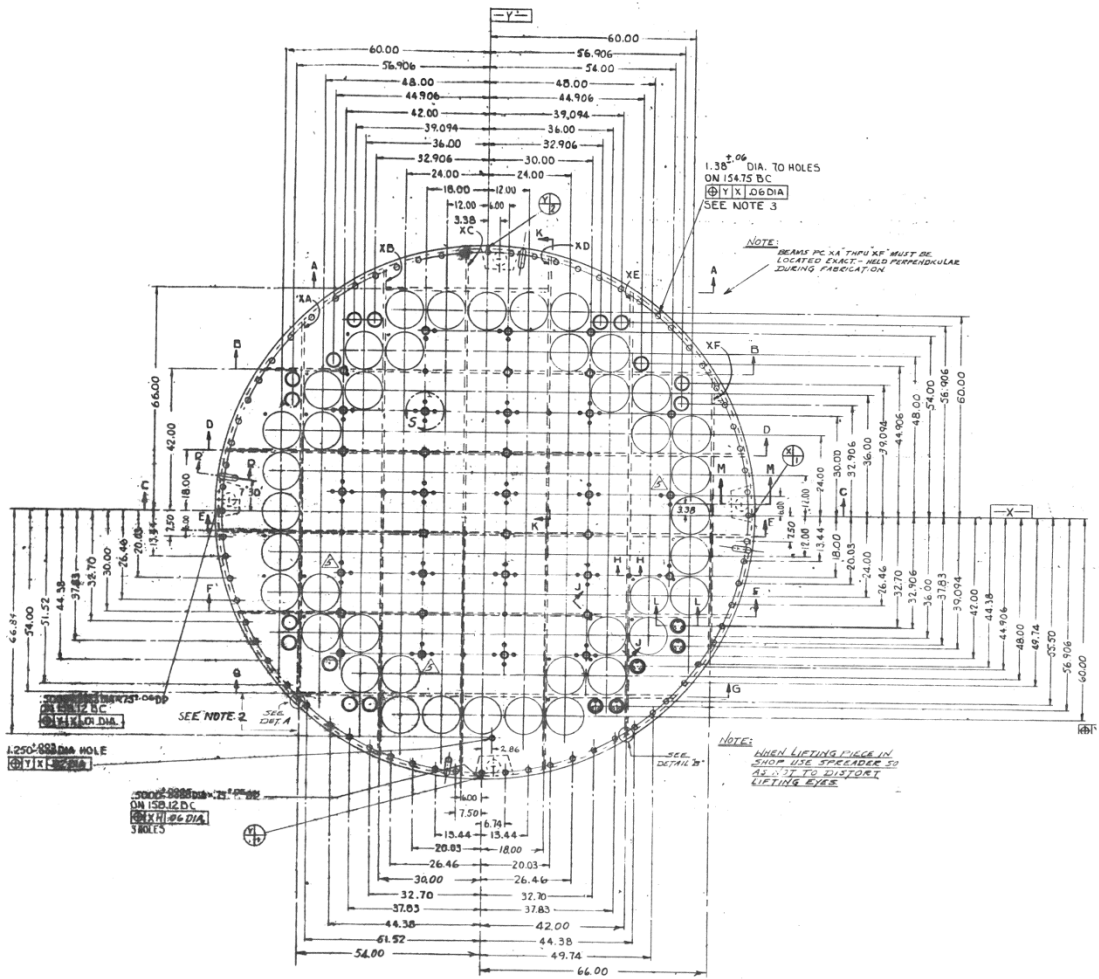


圖 20 核一廠爐心配置尺寸間距圖[12]

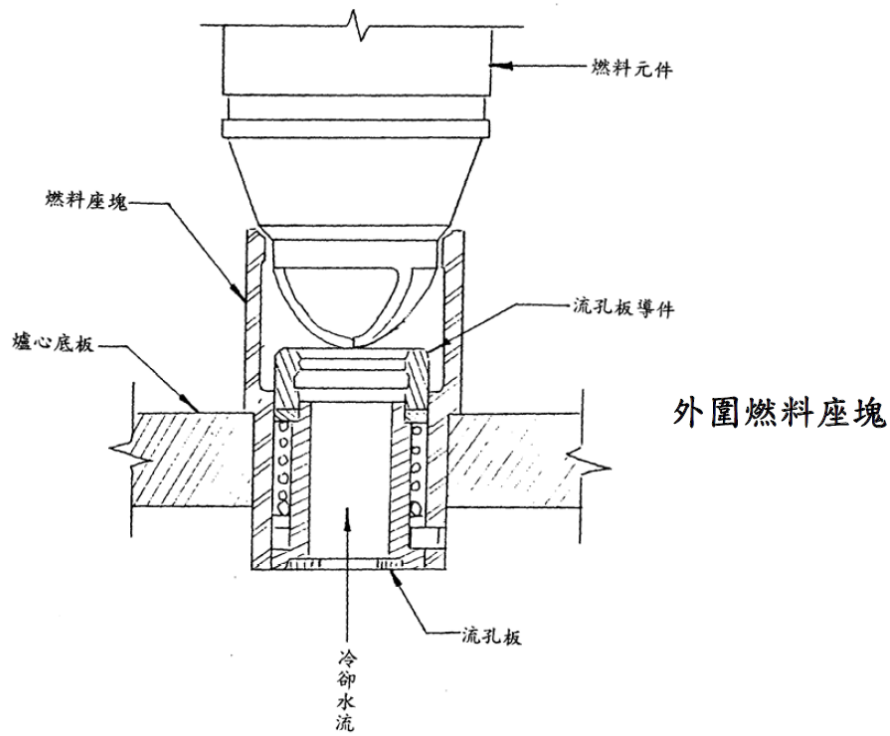


圖 21 外圍式燃料座塊構造圖[1]

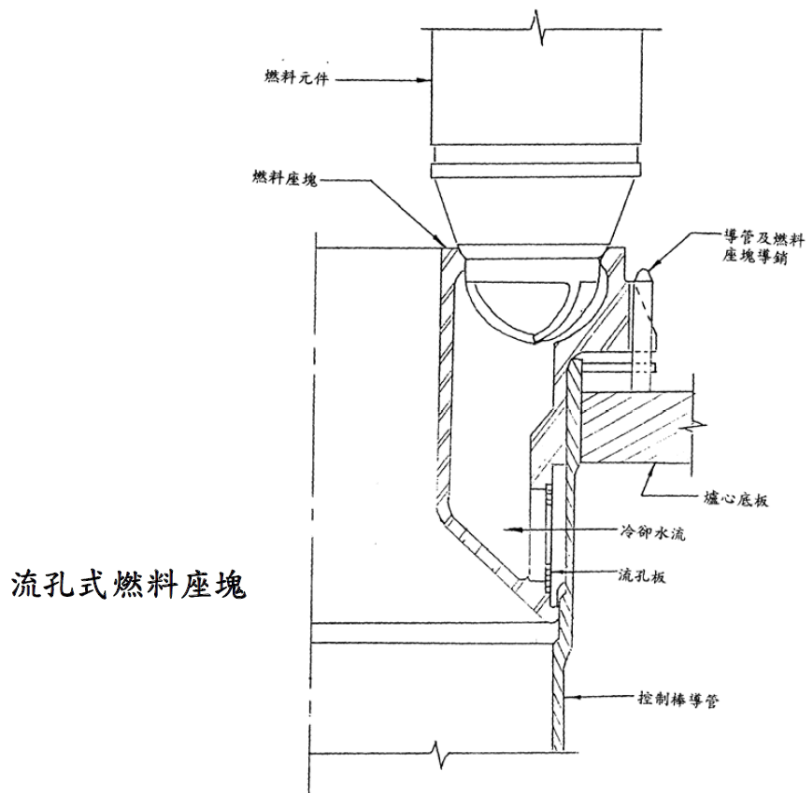


圖 22 流孔式燃料座塊構造圖[1]

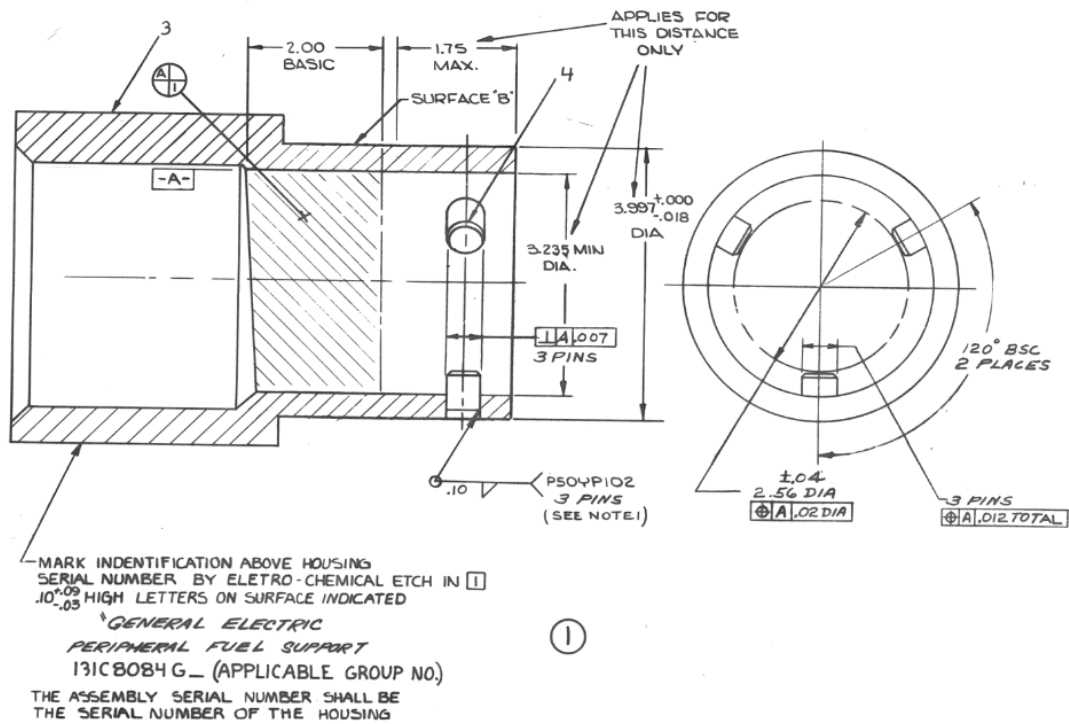


圖 23 外圍式燃料座塊尺寸圖[13]

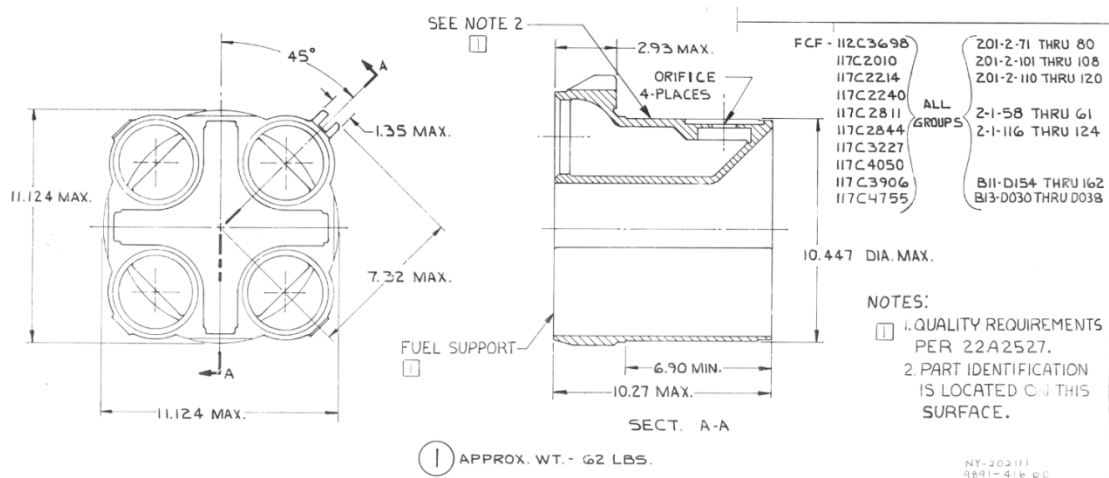


圖 24 流孔式燃料座塊尺寸圖[14]

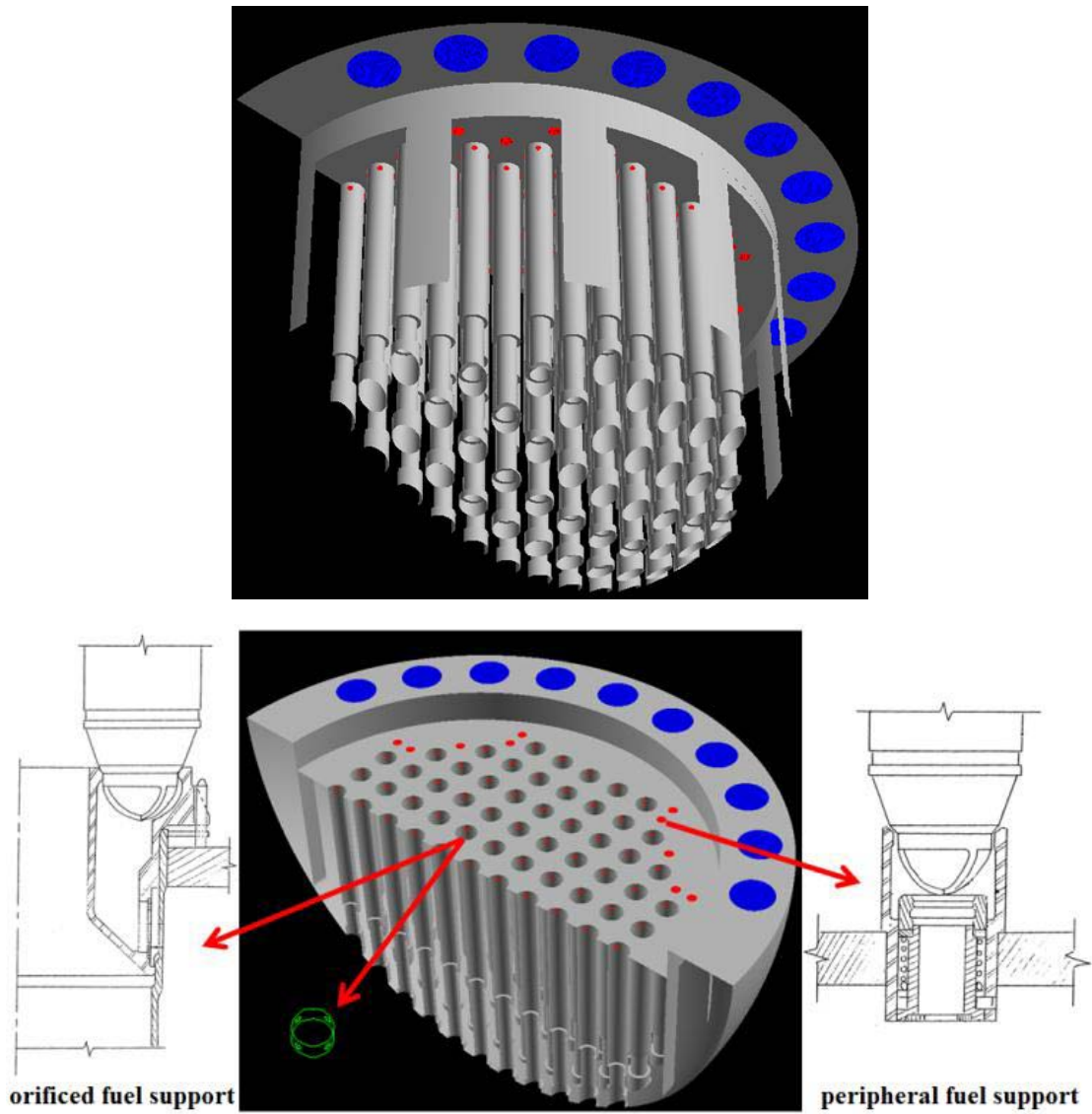


圖 25 爐心下盤區內部組件與燃料座塊孔洞之幾何模型示意圖

表 3、爐心下盤區模型之重要幾何參數

名稱	尺寸	參考資料
爐心下盤區直徑	203"	[2]
控制棒導管直徑	6"	[6][11]
控制棒導管間距	12.01"	[11]
外圍式燃料座塊孔洞直徑	2.56"	[13]
流孔式燃料座塊孔洞直徑	2.36"	[14]
流孔式燃料座塊孔洞標高	90.94"	[3]
爐心底板支撐架寬度	12.36"	[2]
爐心底板支撐架長度	40.47"	[2]
爐心底板支撐架位置	0°、30°、60°、90°、 120°、150°、180°、210°、 240°、270°、300°、330°	[2]

2.3. 核二上池分析模式建立

本計畫工作之執行係針對核研所為滿足台電公司擬於核二廠上池存放退出較久(總燃料熱負載約為 160W)燃料時，其上池所具有的熱流特性。為滿足此一分析需求，本工作遂利用向台電與核研所蒐集而得之核二上池參數，進行分析模式、網格生成與水位計算模式之建立與測試。

依蒐集所得之相關條件與尺寸，所建立之分析模型如圖 26-圖 28 所示，其中共計包含有三組燃料格架，每組可裝載 221 束燃料，共計 663 根。此模型係依循原有 TITRAM 分析方法論之中模擬爐心替代冷卻案之方式，詳略描繪每一格架之外型及格架之壁面，但利用 FLUENT 分析軟體中內建的多孔性介質模式，將燃料束幾何形狀及格架厚度予以均質化。其中單一燃料之截面部分，採用了 4*4 個網格來加以表現(如圖 28)，燃料高度部分則區分為 120 個格點(如圖 28)，並依此網格生成條件來產生全池網格，其總網格數約為 700 萬左右。

而後續將針對本案例在採用不同熱負載與邊界條件時所造成的水位變化及整體熱流特性逐一進行測試。

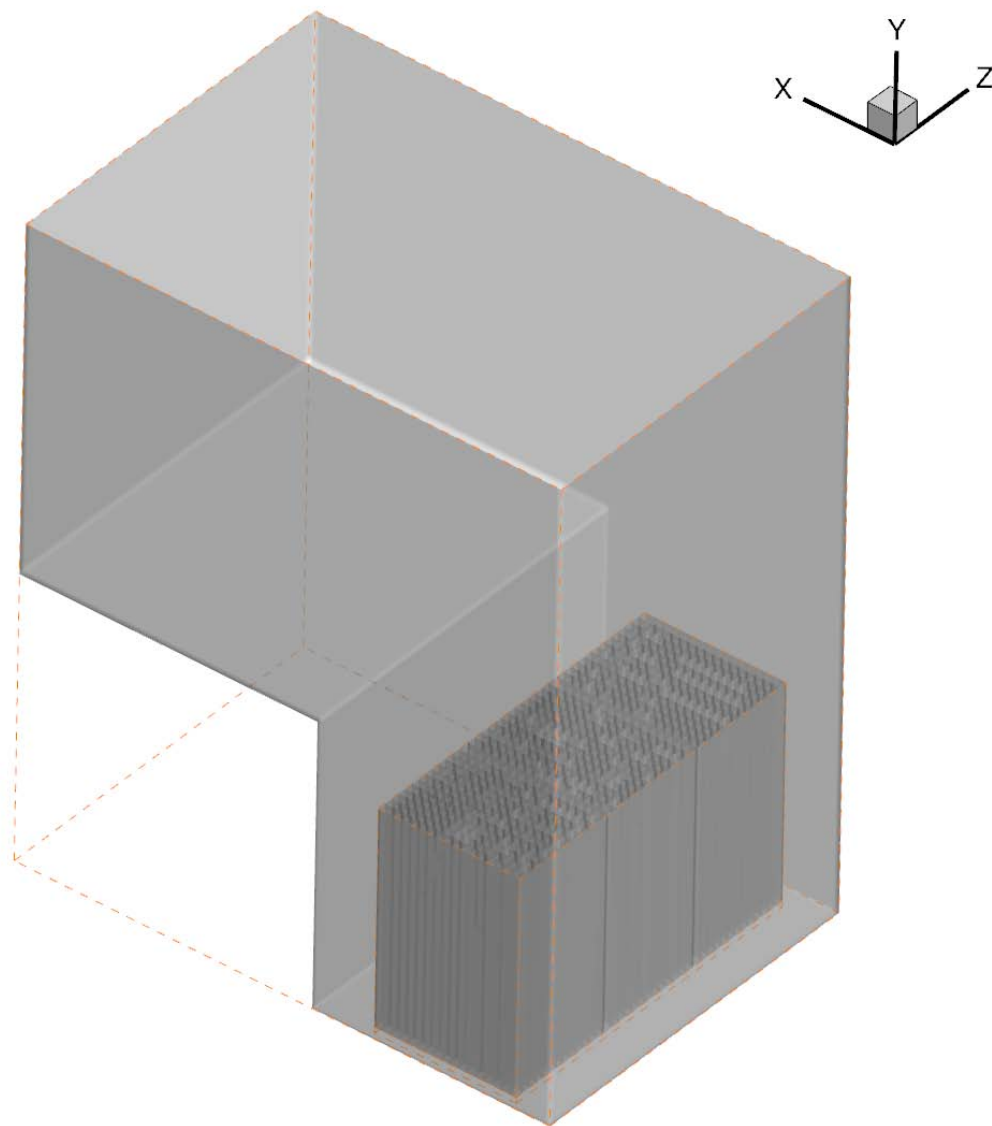


圖 26 核二上池全池 CFD 分析模式示意圖

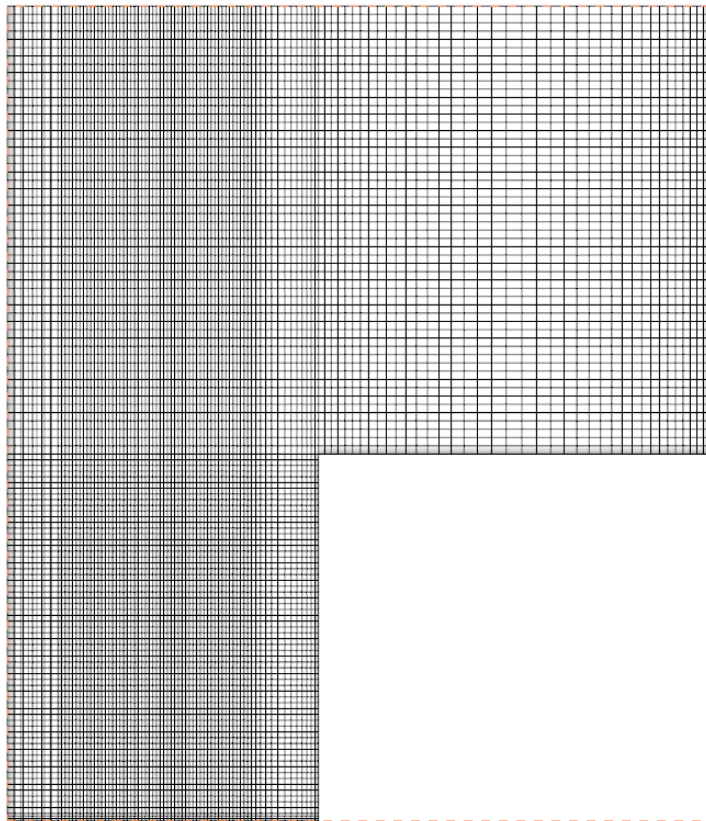
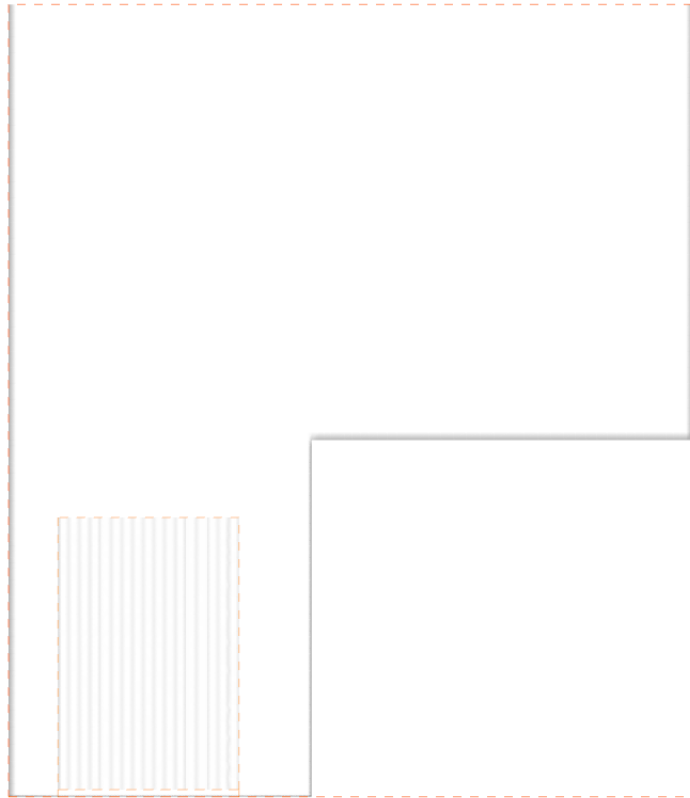


圖 27 計算所得之核二上池側視圖

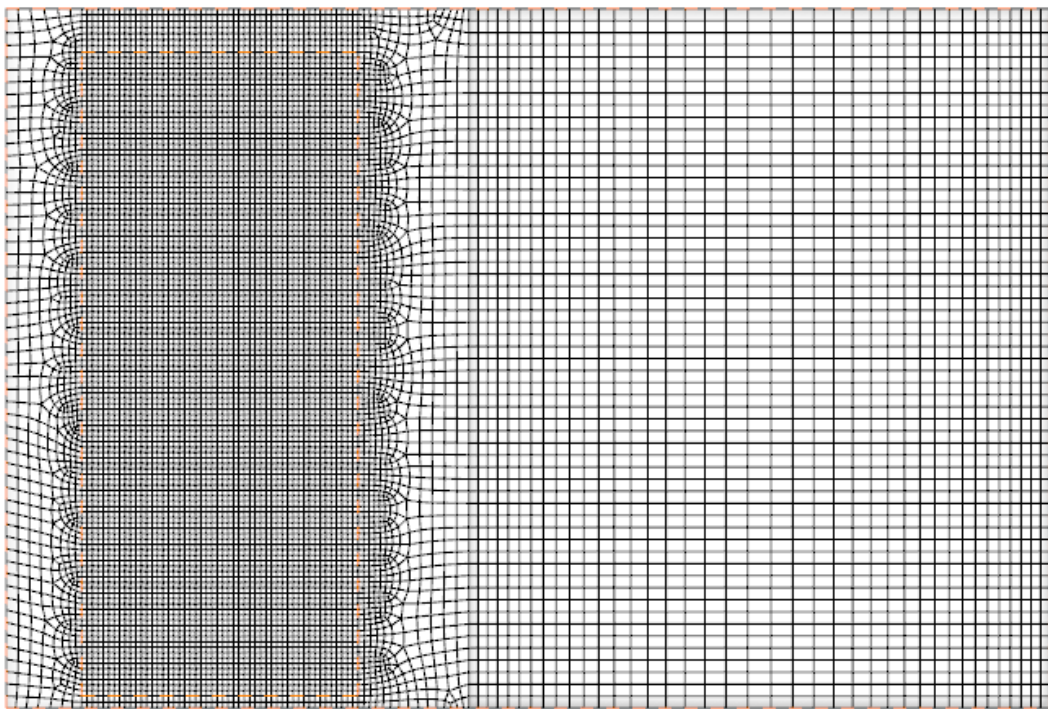


圖 28 計算所得之核二上池、燃料格架之模型與網格分佈上視圖

2.4. 數值分析設定與邊界條件

不論是核二上池抑或是高壓注水誤啟動事故，在本研究所選用的 FLUENT 分析工具中，皆將以有限體積法(Finite Volume Method, FVM)來進行離散，利用將計算域分割為數量龐大的控制體積以簡化其邊界條件，再針對每個控制體積之各個統御方程式以數值方法進行求解，即可獲得所需之分析結果。

本次模擬相關分析設定與收斂條件如表 4 所示，並依照電廠提供之正常運轉狀態或是擬分析之案例分別進行穩態與暫態邊界條件之設計與求解。

表4、本研究模擬相關分析設定與收斂條件

Pressure-Velocity Coupling	
Scheme	Simple-C
Spatial Discretization	
Gradient	Least Squares Cell Based
Pressure	Standard
Momentum	Second Order Upwind
Turbulent Kinetic Energy	Second Order Upwind
Specific Dissipation Rate	Second Order Upwind
收斂條件(殘差值)	Energy : 10^{-5} Others : 10^{-4}

表5、模擬核一廠各組件運轉時之設定狀態

邊界條件	溫度(K)	質量流率(kg/s)
汽水分離器	560	5682
飼水流體	485.011	243
噴射泵驅動流	取決於 RECIRC 迴路	取決於 RECIRC 迴路
RECIRC 迴路	計算取得	1920
HPCI 流體	291.5	269

3. 參數靈敏度測試

為進一步測試上述作業所完成的核一廠反應爐降流區(Downcomer)與爐心下盤區(Lower Plenum)之模式，本節擬針對正常運轉情況下，反應器降流區與下盤區之熱水流特性進行網格測試。於此狀況下，飼水將由四支飼水管線進入飼水噴灑環，透過飼水噴嘴注入降流區並與汽水分離器回流的熱水混合，混合後的流體會被噴射泵及 RECIRC 迴路吸收，並透過噴射泵打入爐心下盤區，在爐心下盤區內流經爐心底板支撐架、控制棒導管，最後流經燃料座塊孔隙抵達爐心進口區。模型內部包含 4 條飼水管線、飼水噴灑環、降流區、20 支噴射泵、2 個再循環迴路、爐心下盤區、12 個爐心側板支撐架、97 支控制棒導管與 408 個燃料座塊孔隙，而分析所用之網格配置則如圖 33 所示。

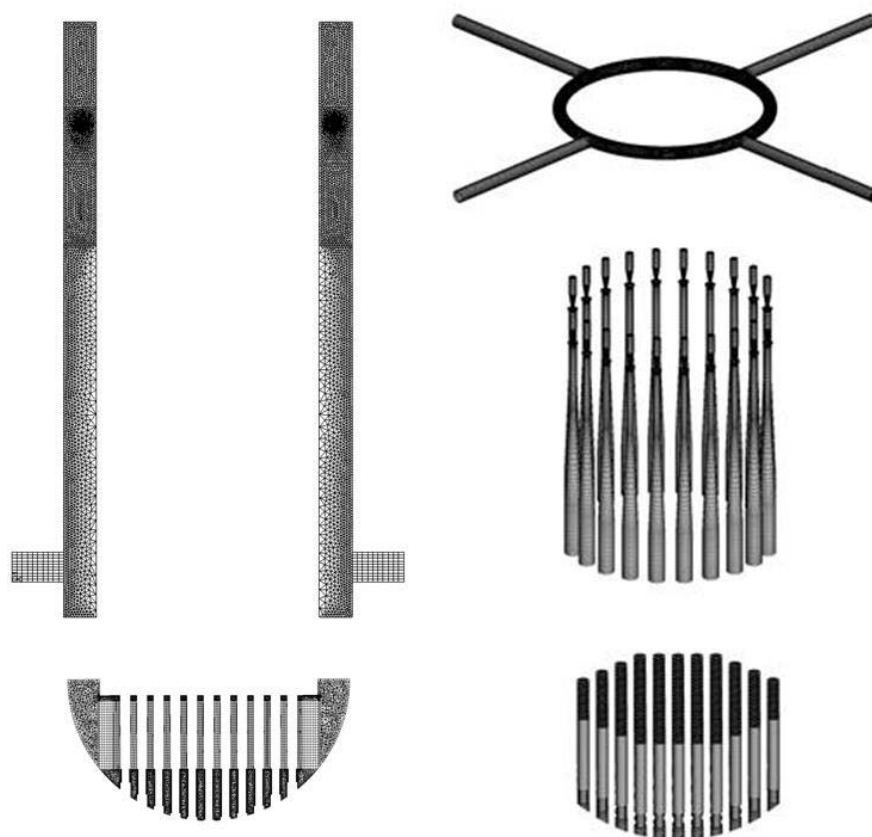


圖 29 核一廠反應爐三維模型網格圖

3.1. 網格靈敏度分析

網格配置是否合適將對模擬結果有顯著的影響，且本研究使用之模型幾何形狀複雜，網格設定需更加謹慎。由於複雜的幾何構造，使得絕大部分網格配置需使用非結構化網格，但仍可藉由控制整體線網格和面網格的數量配置網格分布。

在本研究中，為取得節省資源且結果有一定精度的模擬，利用配置網格分別控制降流區內徑向與周向網格數而繪製了三種不同密度的網格分布，網格數分別為 502 萬、661 萬與 778 萬，紊流模式選用 Shear-Stress Transport (SST) $k-\omega$ 模擬內部流場情況，比較不同網格配置在降流區的溫度變化差異。圖 4.2 為降流區內靠近飼水噴嘴橫截面的溫度分布，將三種不同網格數的模擬結果進行比較，其最大誤差小於 5%，顯示其結果十分相近，為了節省計算時間，本文將採用 502 萬網格數作為之後模擬的網格。

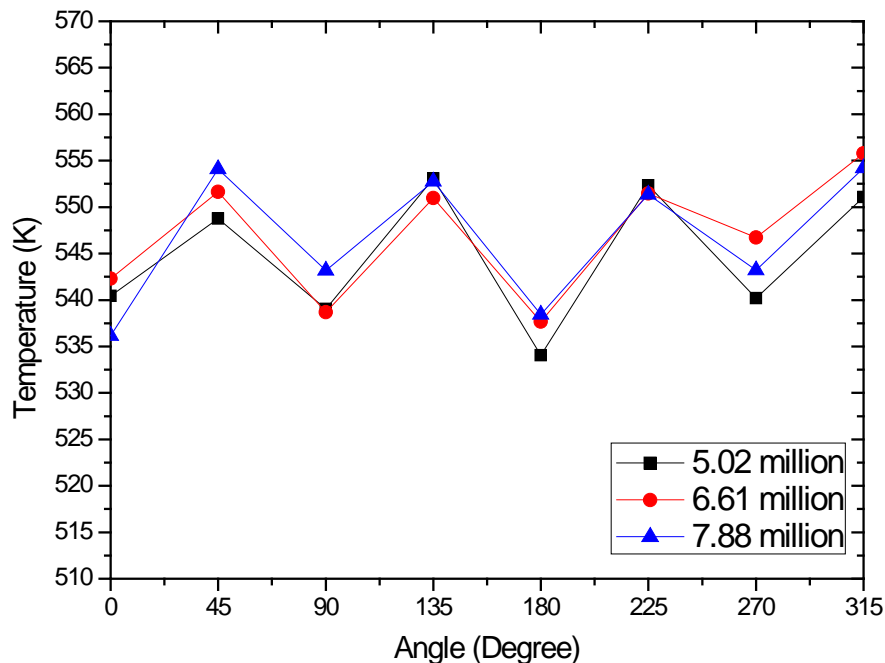


圖 30 不同網格數在降流區內的溫度分布

3.2. 紊流模式靈敏度分析

由於高速流的紊流效應在複雜幾何模型內將顯著地影響流場型態與混合情形，因此選擇適當的紊流模式十分重要。為了評估不同紊流對熱水力現象的預測性能，本文選擇三種常見的紊流模式對反應器模型進行穩態模擬，包括 Standard $k-\varepsilon$ 紊流模式、Realizable $k-\varepsilon$ 紊流模式與 SST $k-\omega$ 紊流模式，擷取不同紊流模式下的降流區內靠近飼水噴嘴橫截面溫度分布進行比較，如圖 35 所示，可得到三條分佈相似的溫度曲線，其最大誤差值約為 2.7%，可說明此三種紊流模式對模型的影響極其相似。由於本模型將應用於暫態事故分析，而 $k-\varepsilon$ 紊流模式對壁面邊界層網格密度要求比 $k-\omega$ 紊流模式較高，因此在之後的模擬將採用 SST $k-\omega$ 紊流模式。

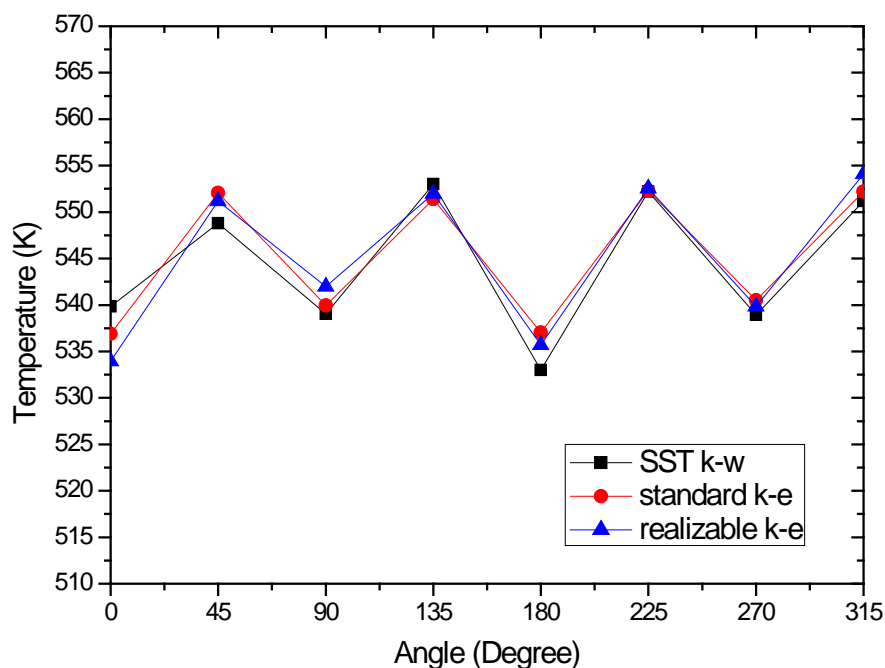


圖 31 不同紊流模式在降流區內的溫度分布

3.3. 熱性質與餘項熱源對分析結果之靈敏度分析

為確保未來在計算 HPCI 事件時，分析結果受到分析模式中各項細微參數(如流體性質與結構件熱源)之影響降致最低，以期減少 CFD 分析結果與 RETRAN 之不一致性，本節即針對整體分析模式中尚未進行設定之細微節構件熱源與流體性質受運轉條件改變所致之影響進行探討。

在冷卻水性質之測試方面，則主將要以往的定值參數轉換為函數型參數，以期冷卻水的熱性質隨著不同供水系統之特性而改變，在此測試中係以實際流體性質[28]來進行設定，其主要性質如表 6 所示。

另一方面，經審視 RETRAN 分析模式後可以發現 HPCI 分析模式中，受其它元件之熱傳或耗能而使冷卻水之焓增加途徑主要包括：J51 之結構熱傳以及 NODE12 與 NODE13 兩個再循環泵之功耗；在考量再循環泵之功耗約為熱結構件影響之 10^2 倍，故於本靈敏度測試中選擇以 NODE12 與 NODE13 之熱源作為測試之基準。

表 7 之結果顯示，本系統所建立之分析模式，足以掌握整體分析流場內質量之守恆性，其流量變異量約為 0.014Kg/s，僅為整體流量之 $2.0 \times 10^{-4}\%$ 。此外，此一結果亦證實本分析模式之邊界進口，如飼水、汽水分離器供水等皆擷取 RETRAN 之對應結點之數據，故其結果將不受流體性質之影響，也無需因流體性質之變更而重新修正。

爐心進口部分之溫度比較(表 8)則指出，當不考慮材料性質隨運轉條件改變時，所獲得的爐心進口溫度將比考慮材料性質改變時更大，這是因為冷卻水的比熱將會隨著溫度的增加而提高，因此若考慮此一效應，將使得較冷流體(如飼水、或 HPCI 注水)所攜入模式之熱容積比重(質量×比熱)被高估，進而使計算結果低估。因此若要合理低抑低 CFD 分析模式與 RETRAN 之誤差值，則需將冷卻水性質隨運轉條件之改變納入考慮。

最後，計算結果指出，若忽略熱結構件或元件之熱源，將略率分析結果低於實際狀況，且其影響程度將隨著整體爐心流量的減低(例如在非額定功率案例中)而放大，進而使分析結果之保守度略增；故未來 RETRAN 與 CFD 進行整合作業時，可就分析之需要將熱結構件之影響納入考慮，而對於能量過小之熱結構件影響，則建議將其視為分析之保守考量而加以忽略。

表 6、分析所引用之熱物理性質

	更動前	更動後
密度	988.2(kg/m ³)	759.652(kg/m ³)
定壓比熱容(Cp)	4.182(kj/kgK)	2.3902179(kj/kgK)
黏度	0.0001003(kg/ms)	0.0009559(kg/ms)
熱傳導率	0.6(W/mK)	0.0780723(W/mK)

表7、各參數對分析所得爐心進口流量之影響列表

	爐心進口平均流量(kg/s)	與 Retran-3D 之誤差(kg/s)*
未考慮函數型熱性質 與 PUMP POWER	6677.876	0.014
考慮 PUMP POWER	6677.876	0.014
考慮函數型熱性質	6677.876	0.014

* Retran-3D J100 : 14722.22(lbm/sec)=6677.89(kg/s)

表8、各參數對分析所得爐心進口溫度之影響列表

	爐心進口均溫(°F)	與 Retran-3D 之誤差(°F)*
未考慮函數型熱性質 與 PUMP POWER	526.044	2.156
考慮函數型熱性質/ 不考慮 PUMP POWER	527.81	0.39
考慮函數型熱性質與 PUMP POWER	528.086	0.114

* Retran-3D vol200 : 爐心平均進口溫度 528.2F

3.4. 模型確認與驗證

由於本模型將會應用於模擬反應器內降流區與爐心底部空間的熱水流現象，因此模型必須透過驗證，以評估選擇的建模方式與數值方法是否合適，透過比較 FLUENT 模擬結果、AREVA 資料與 CSNPP 電廠數據可實現此模型驗證。圖五與圖六顯示本模型能夠準確地捕捉在反應器內噴射泵系統及爐心的流體混合現象，結果表明模擬數據與電廠數據最大誤差值小於 6% [4, 5]，可得知本模型選擇之建模方式與數值方法非常合適應用於 CSNPP 反應器模擬分析。

[4] Yung-Shin Tseng, Chih-Hung Lin, Yng-Ruey Yuann, Jong-Rong Wang and F. Peter Tsai, “Analyzing the Alternative Shutdown Cooling Behaviors for Chinshan Nuclear Power Plant Using CFD Simulation,” *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 38 (11), pp.2557-2568, 2011.

[5] AREVA, “Startup and Operations Report Chinshan Unit 1 Cycle 24,” ANP-2772(P) Rev. 0, AREVA NP Inc., 2008.

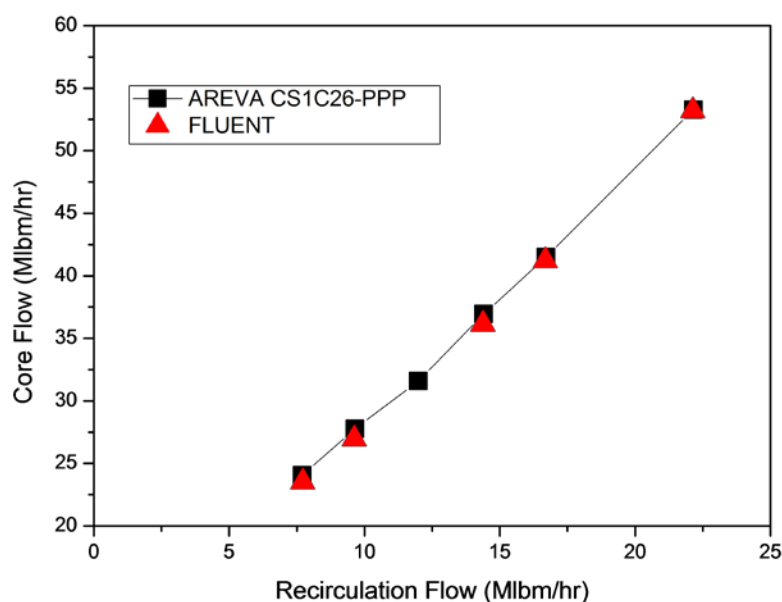


圖32模型內噴射泵系統之精度驗證。

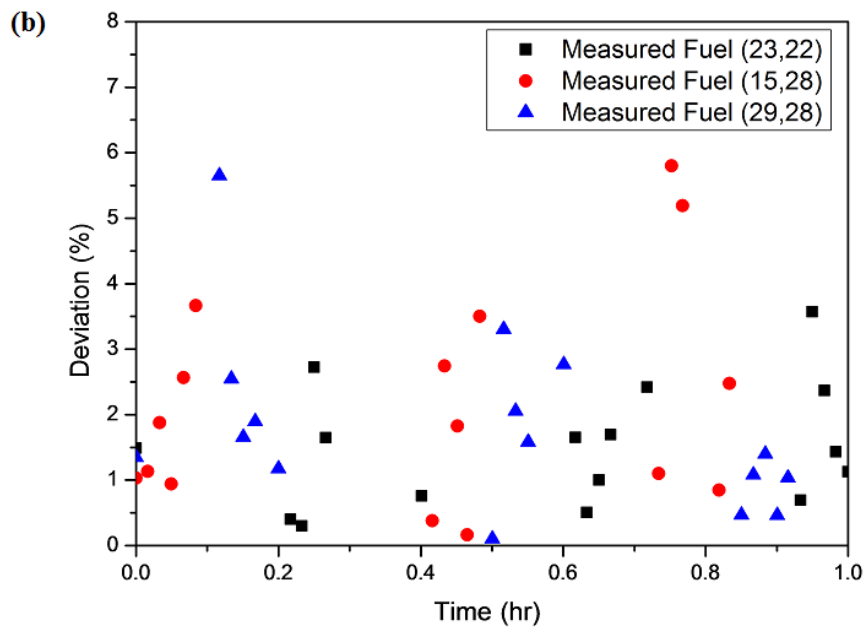
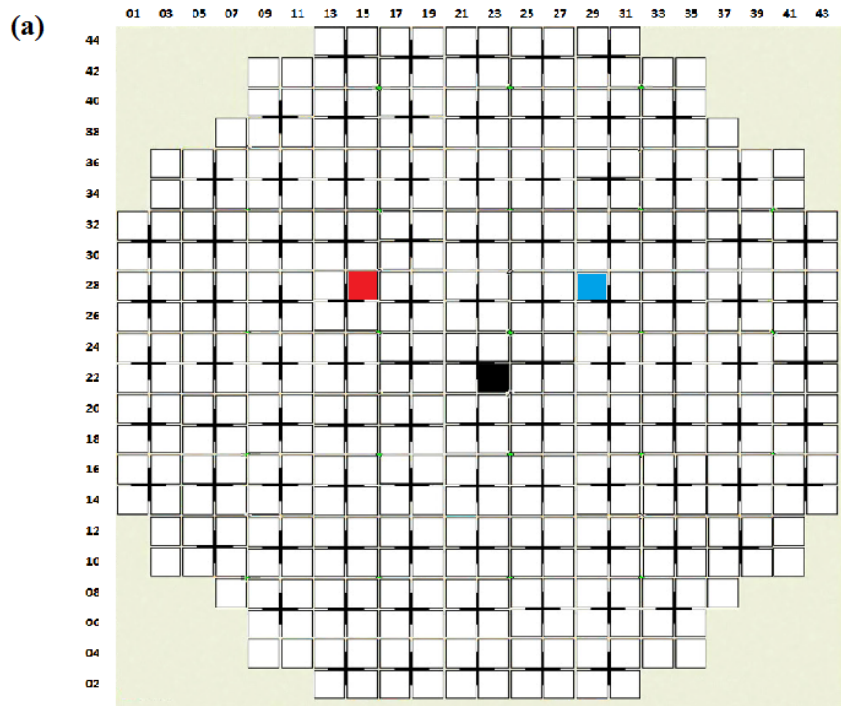


圖33CSNPP模型爐心驗證 (a) 爐心分佈座標，
 (b) 特定燃料位置之溫度與電廠數據誤差比較。

4. 模擬結果

以下將各別針對核一廠 HPCI 誤啟動與核二廠上池不同燃料熱負載邊界條件之模擬結果進行結果分析。

4.1. 核一廠 HPCI 誤啟動之模擬結果

一旦 HPCI 發生誤啟動，次冷液態水便會從 HPCI 管線注入，並經過飼水噴嘴進入反應器，圖 5.5 可發現 HPCI 液態水與飼水具有非常大的溫差($\Delta T > 180 \text{ K}$)。飼水與 HPCI 液態水在飼水噴嘴中稍微混合後即被噴灑至降流區，而混合後的液態水在降流區內與汽水分離器的飽和水再次混合，如圖 5.6 所示。因此在降流區內靠近飼水噴嘴處可以發現一個明顯的溫度降，靠近 HPCI 管線的右側降流區更為明顯。

然而，降流區內的混合效應並不能使液態水在此均勻混合，尚未均勻混合的液態水在 $H = -3.6 \text{ m}$ 處即被吸入至噴射泵，此時降流區內左側與右側的最大溫差分別高於 40 K 與 15 K 。而不均勻的溫度分布並未在爐心底部空間獲得改善，圖 5.7 顯示在爐心底部空間內的流線分布，不同顏色的流線代表由不同的噴射泵注入，可發現並無較強的橫向穿越水流，每支噴射泵注入水流之間的混合效應並不高，大多直接抵達爐心進口區。圖 5.8 則為爐心底部空間內不同高度溫度分布，亦可看出控制棒導管間無強烈的橫向穿越水流混合效應，其軸向溫度分布沿著高度方向有相同的趨勢。而徑向溫度分佈則為一顯著的非均勻溫度分布，由此可推論爐心進口區亦會形成一較大溫差的溫度分布。

圖 5.9 顯示在爐心進口區的平均溫度變化，HPCI 啟動後需約 5 秒才能抵達爐心進口區，因此 5 秒前並無溫度變化。當混合了 HPCI 的次冷液態水抵達爐心底部空間，便會取代空間內熱水，在 5 秒至 30 秒內溫度將陡降，直到次冷液態水與熱水取得平衡，爐心進口區的溫度緩降至穩定狀態。由於爐心進口區的次冷

溫度分布將顯著地影響運轉穩定性與運轉餘裕，因此當 HPCI 事件發生時，爐心進口區的次冷溫度變化便十分重要，本文的模擬結果亦可得知每個燃料組件的入口溫度，以用於定量比較次冷度變化。

圖 5.10 為第 120 秒爐心進口區的次冷度分布模擬結果，可發現最大次冷度 28.2 K 發生在燃料組件(5, 10)，而最小次冷度 14.6 K 則位於燃料組件(39, 36)，最大次冷度幾乎為最小次冷度的兩倍，且位置坐落於對角線的兩端，推論應是受到再循環迴路與噴射泵排列的影響。在相鄰的燃料組件(21, 24)、(23, 24)以及(13, 22)、(13, 24)...等也發現超過 4 K 的溫差，此結果表明，相鄰的通道間可能存在不同的局部沸騰現象，這對反應器穩定性分析將是一個重要的問題。

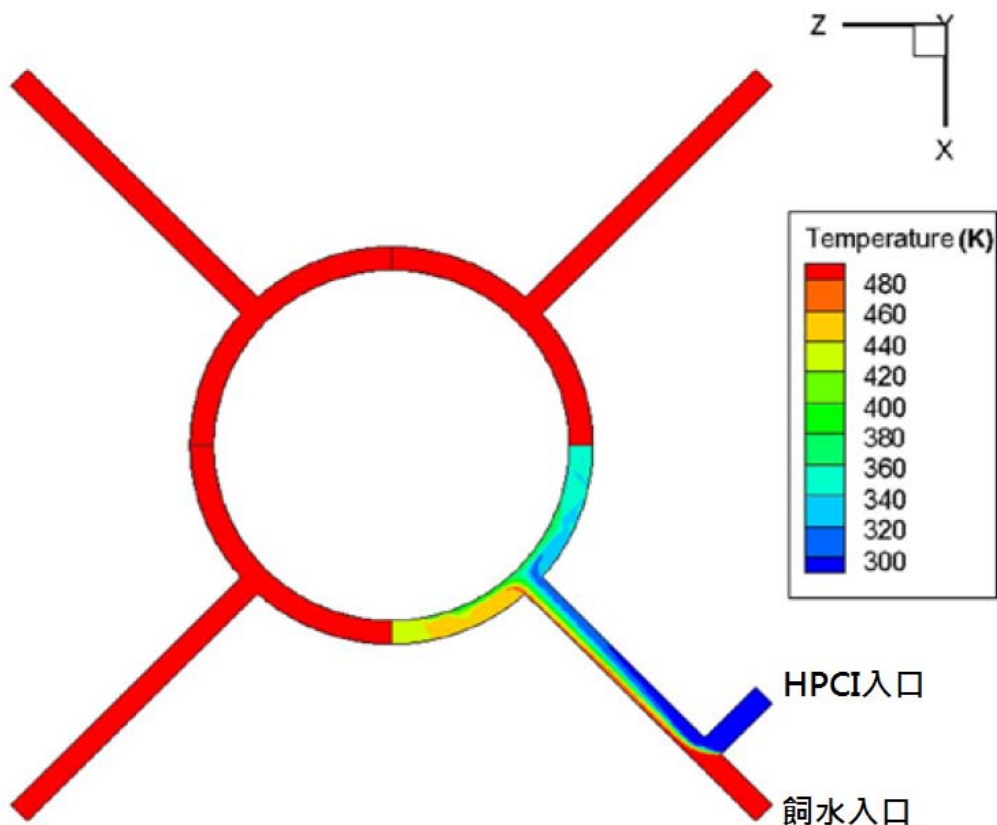


圖 5.5 HPCI 發生時飼水管線內的溫度分佈

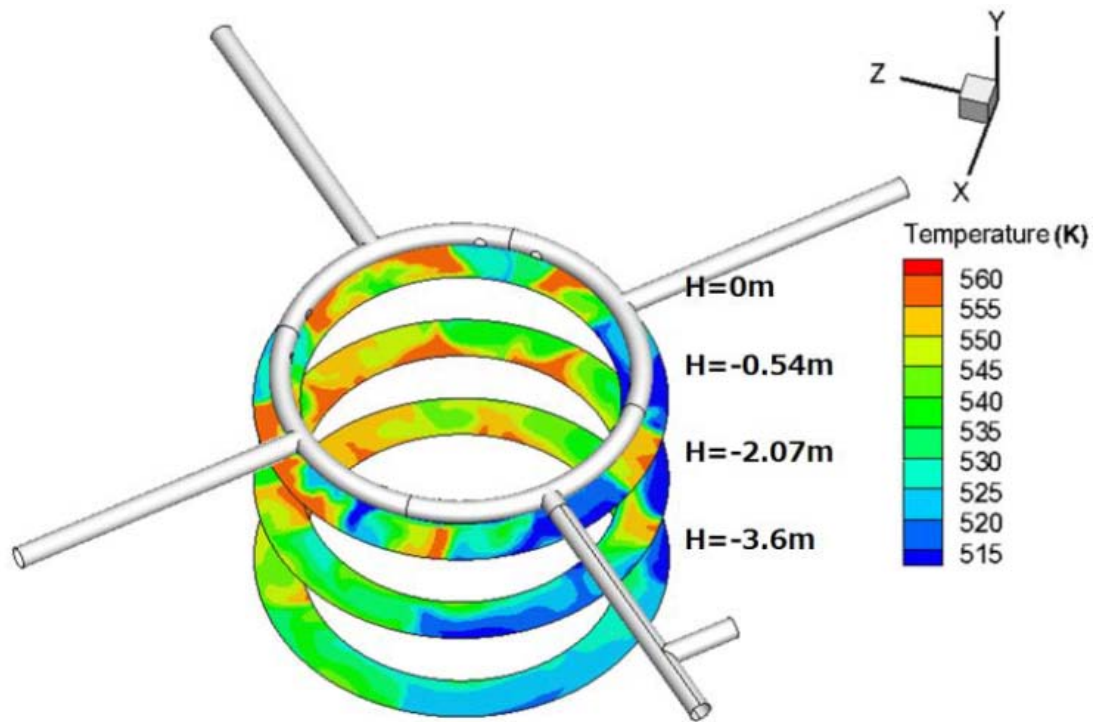


圖 5.6 HPCI 發生時降流區內的溫度分佈

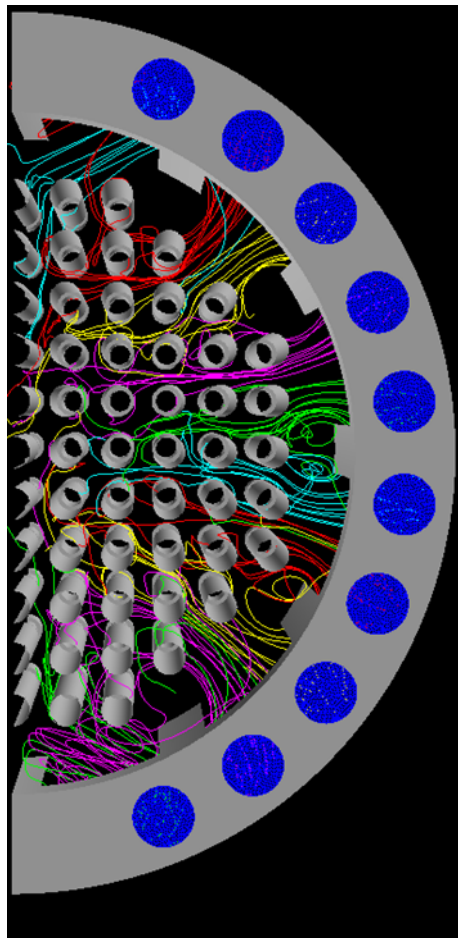


圖 5.7 爐心底部空間內的流線分布

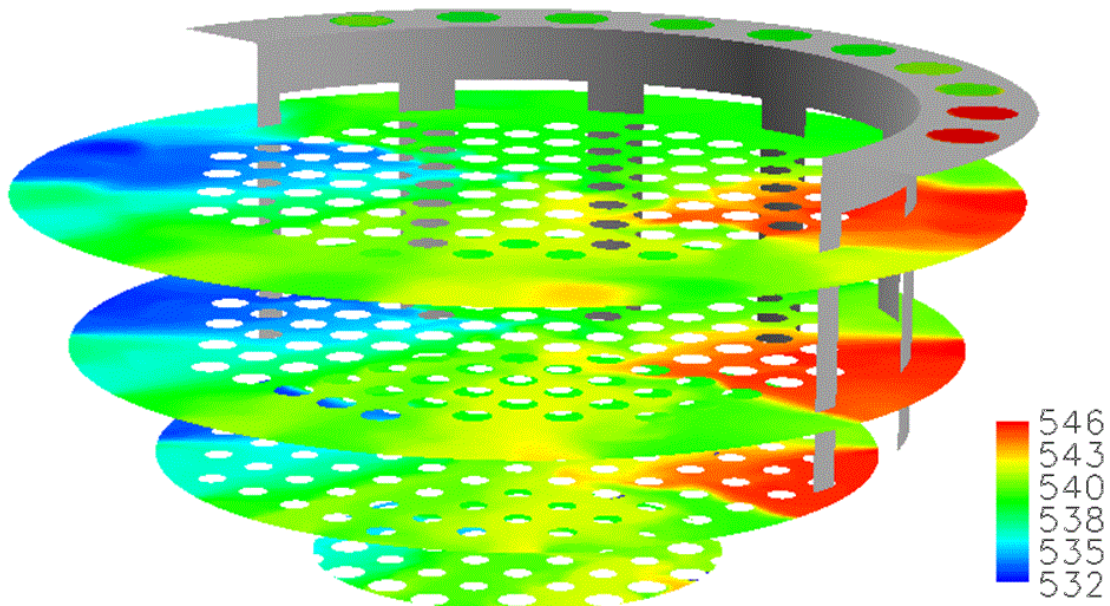


圖 5.8 爐心底部空間內不同高度的溫度分布

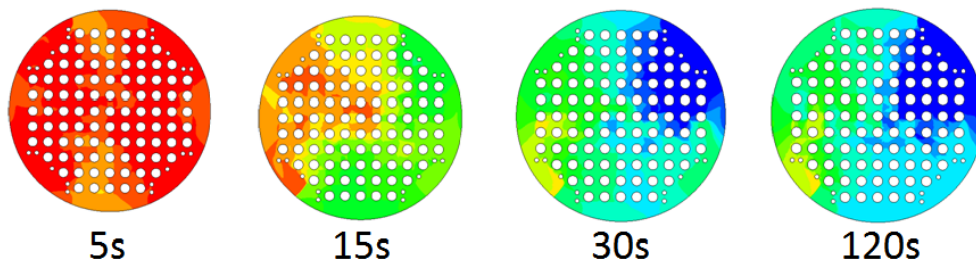
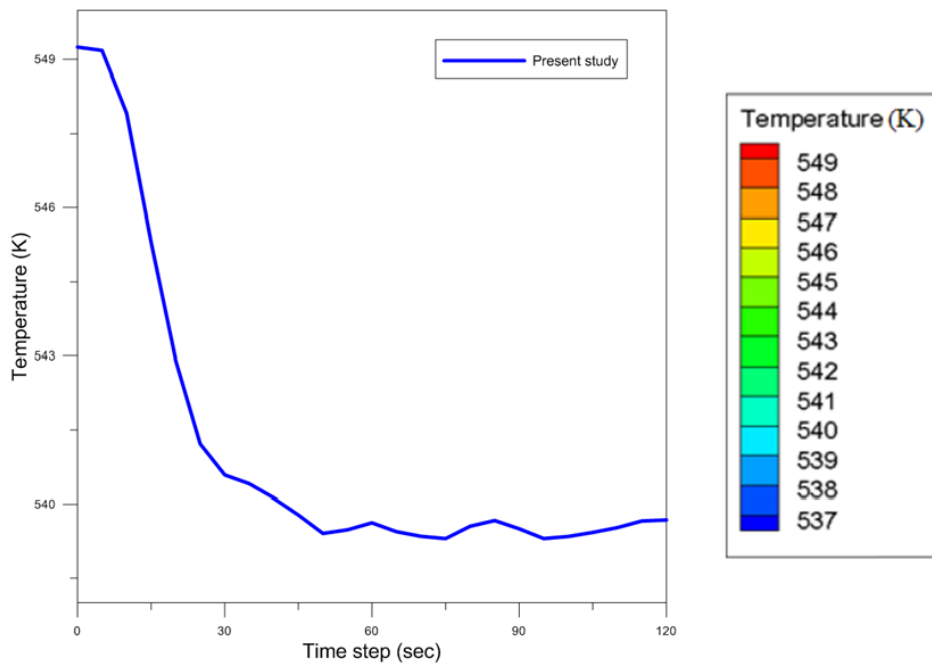


圖 5.9 HPCI 事件發生後第 0~120 秒內爐心進口區的平均溫度變化

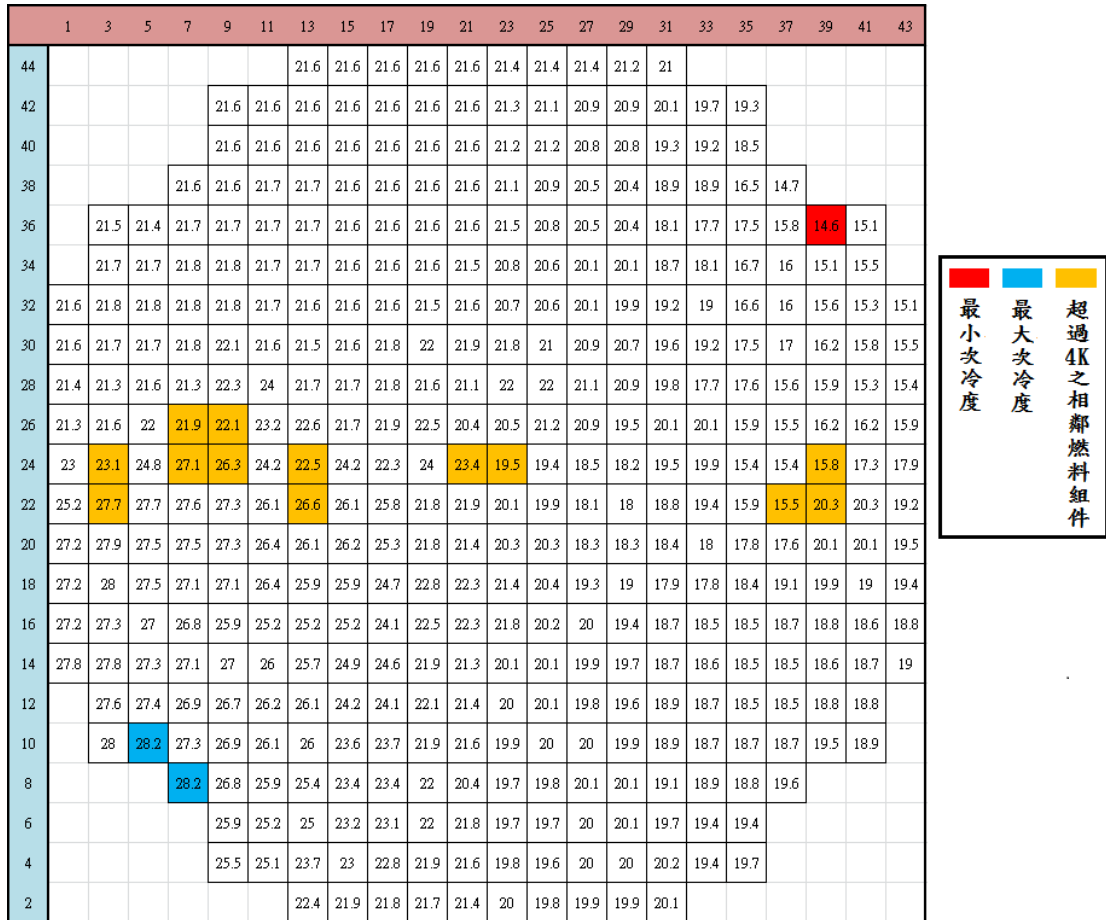


圖 5.10 第 120 秒爐心進口區的次冷度分布模擬結果

4.2. 核二廠上池不同燃料熱負載邊界條件之模擬結果

160W

最高溫 419.1507K

最低溫 322.0377K

燃料格架中心的燃料束最熱，但高度位置不會在正中心，而是偏下方。

燃料格架全高 4.2979m(底部為起始高度 0m)，高度中心位置為 2.1490m

最熱點高度位置則為 1.5902m，估計是受到自然對流散熱的影響。

而圖 41 的流線分布可發現靠近轉角處有大量迴流出現(這邊不知道怎麼解釋)

320W

最高溫 505.6512K

最低溫 322.0379K

最熱點高度位置為 1.461359m

500W

最高溫 539.3767K

最低溫 322.0379K

最熱點高度位置為 1.504359m

(這個 case 跑的時間不夠長，可能還要時間收斂)

因為散熱的形狀不是像前他兩個 case 那樣蛋型

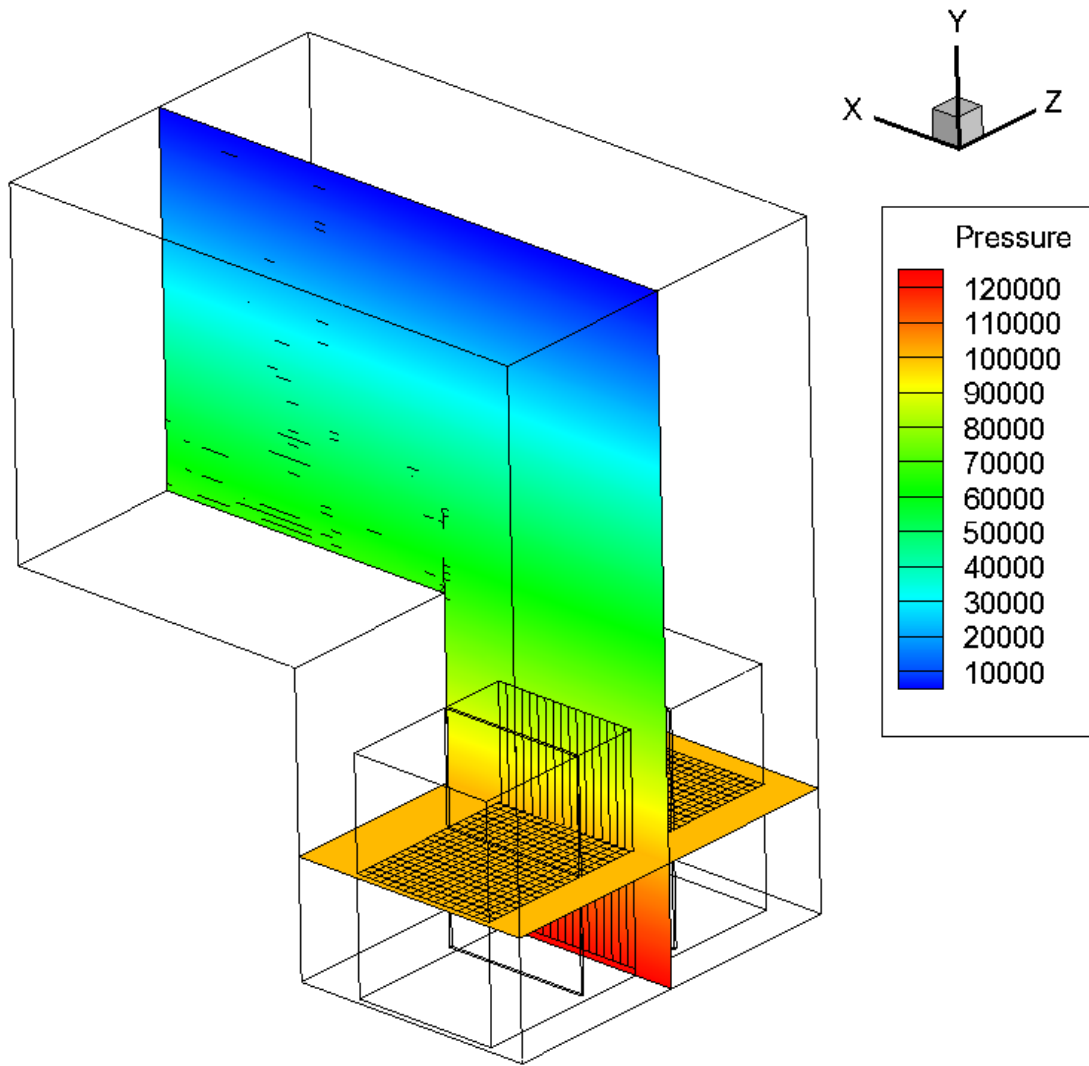


圖 34 每束燃料 160W 之上池壓力分佈

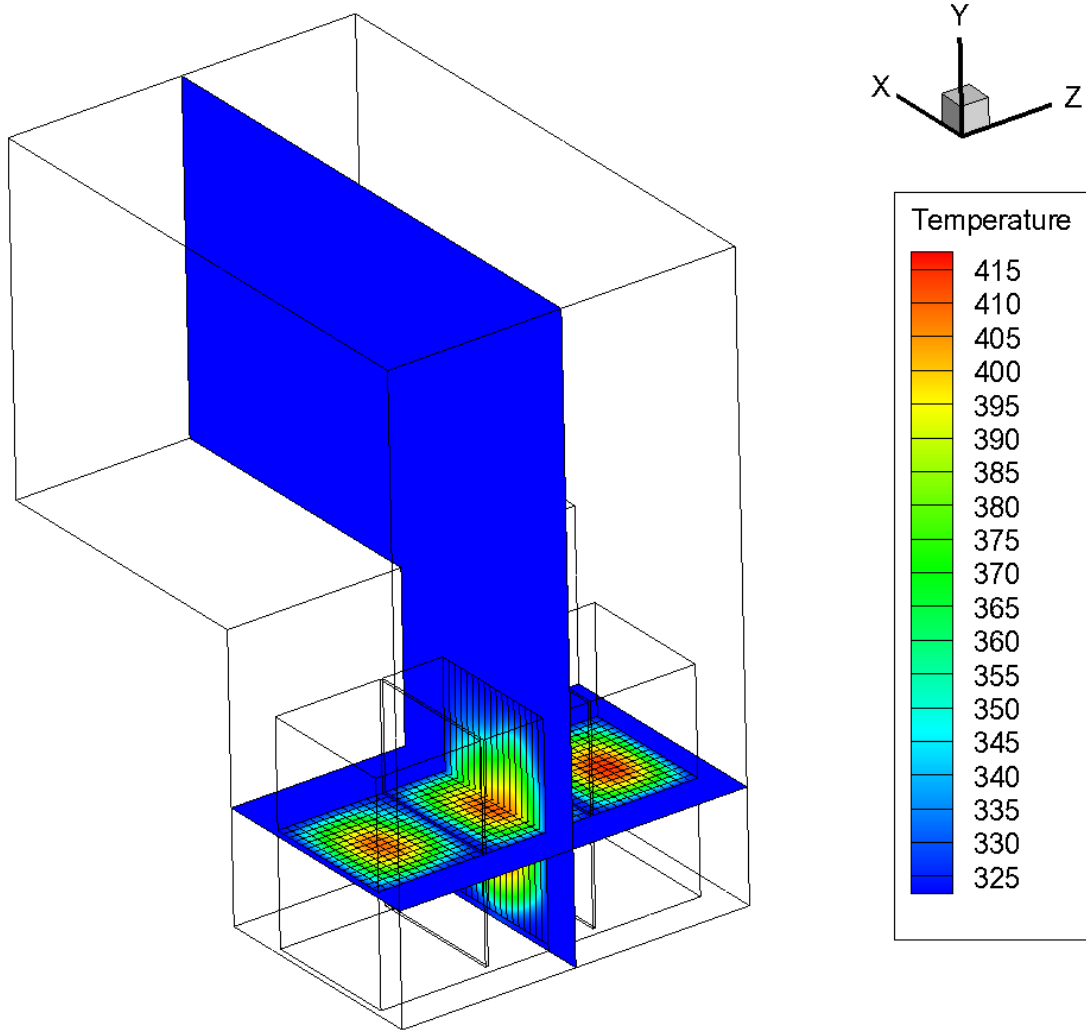


圖 35 每束燃料 160W 之上池溫度分佈

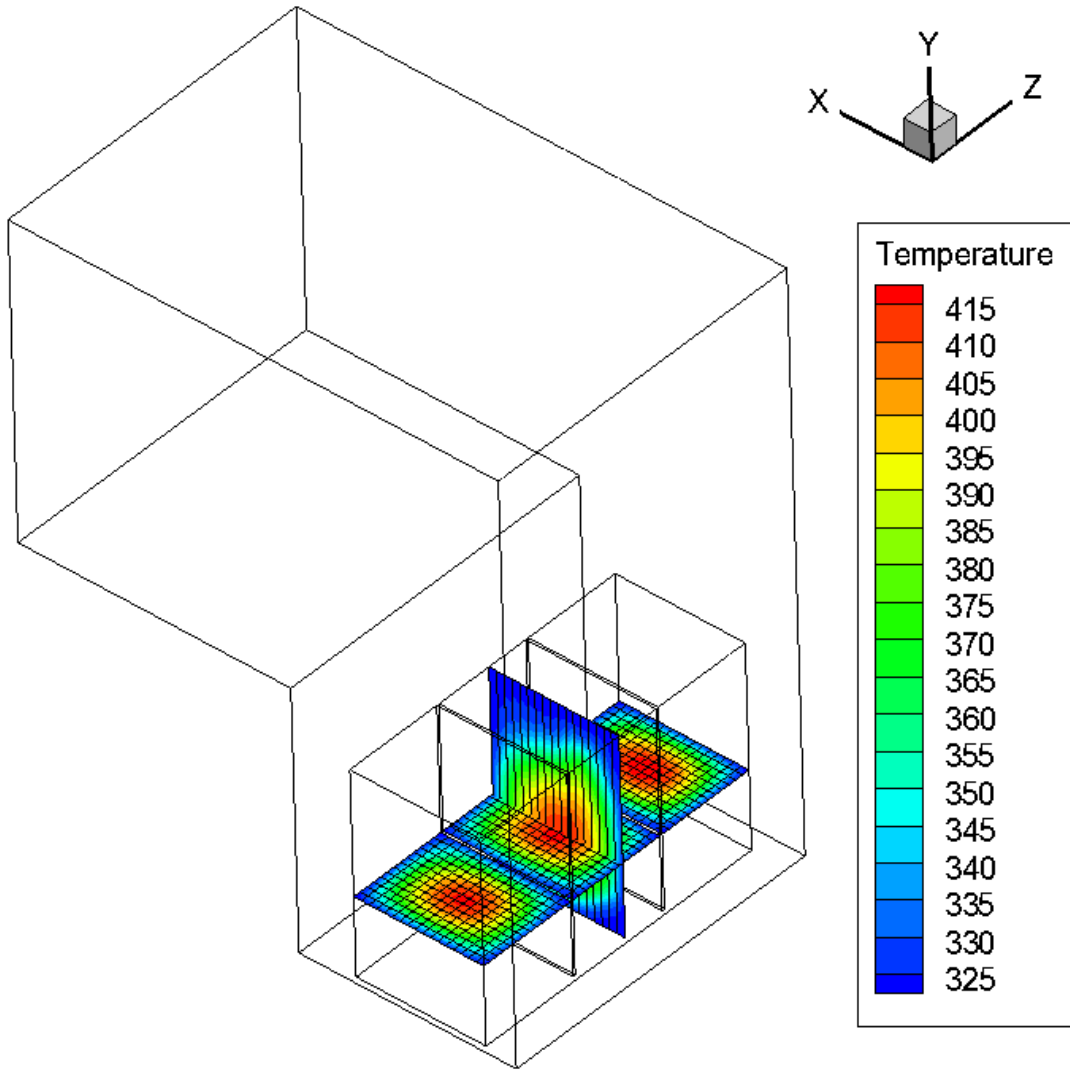


圖 36 每束燃料 160W 之上池溫度分佈(只有燃料格架部分)

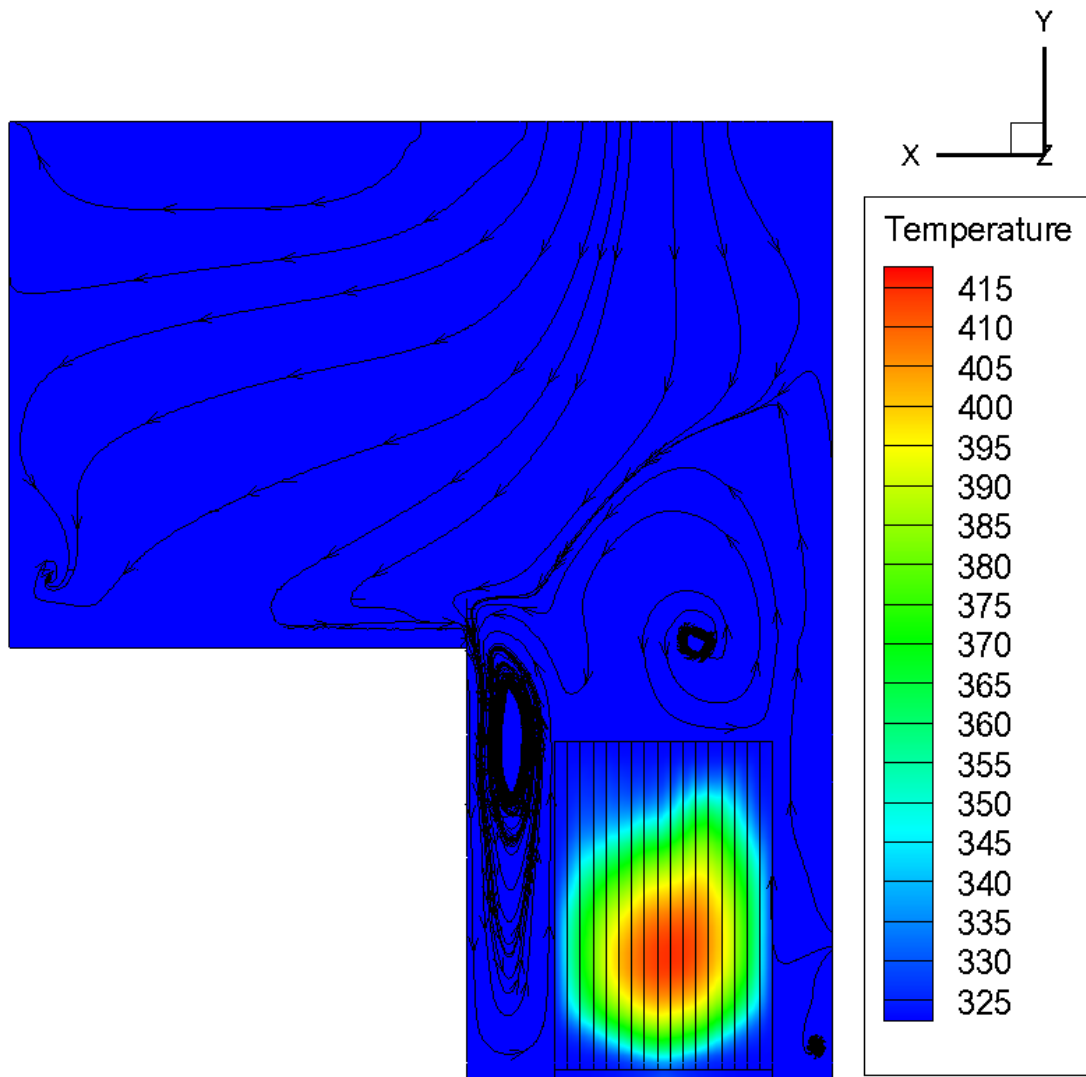


圖 37 每束燃料 160W 之上池溫度與流線分佈(XY 截面)

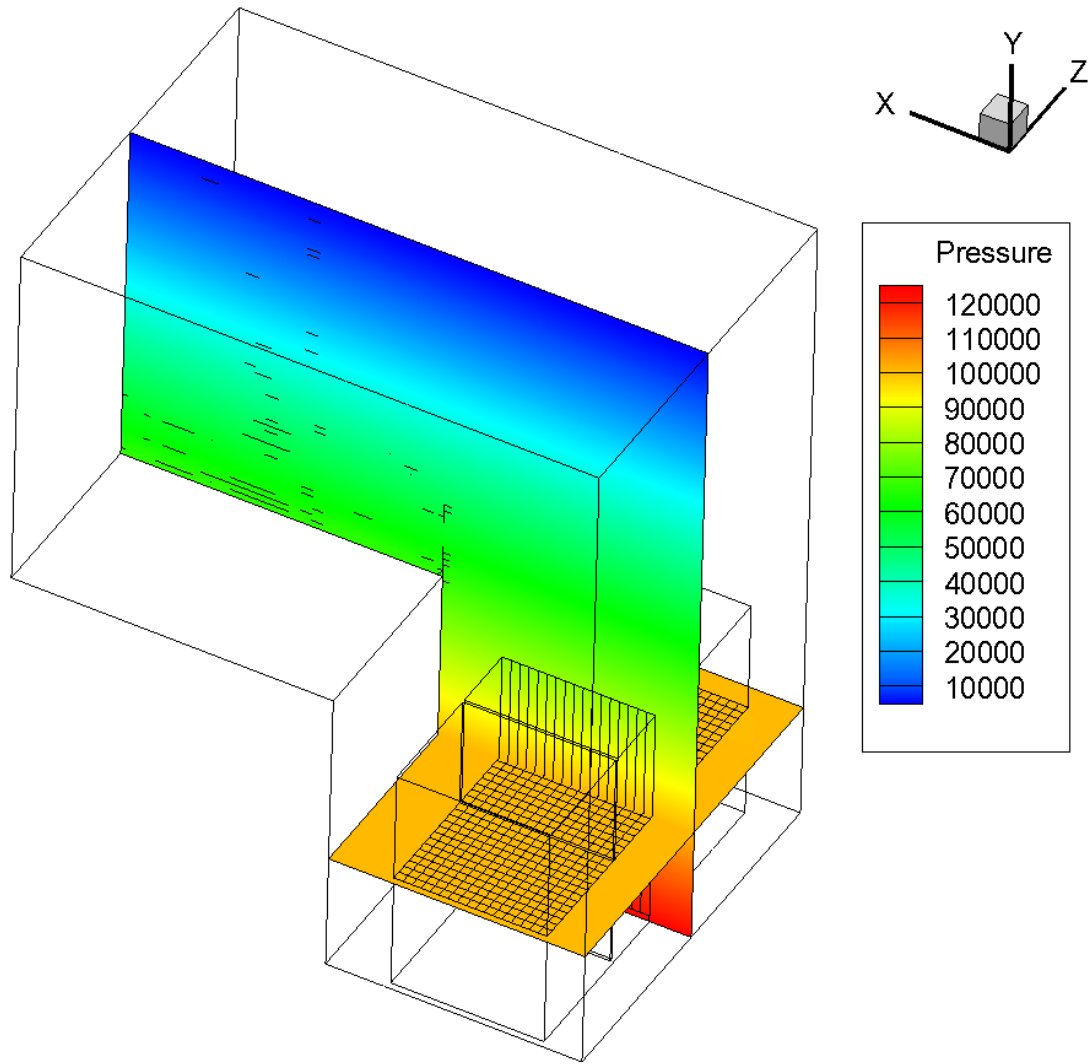


圖 38 每束燃料 320W 之上池壓力分佈

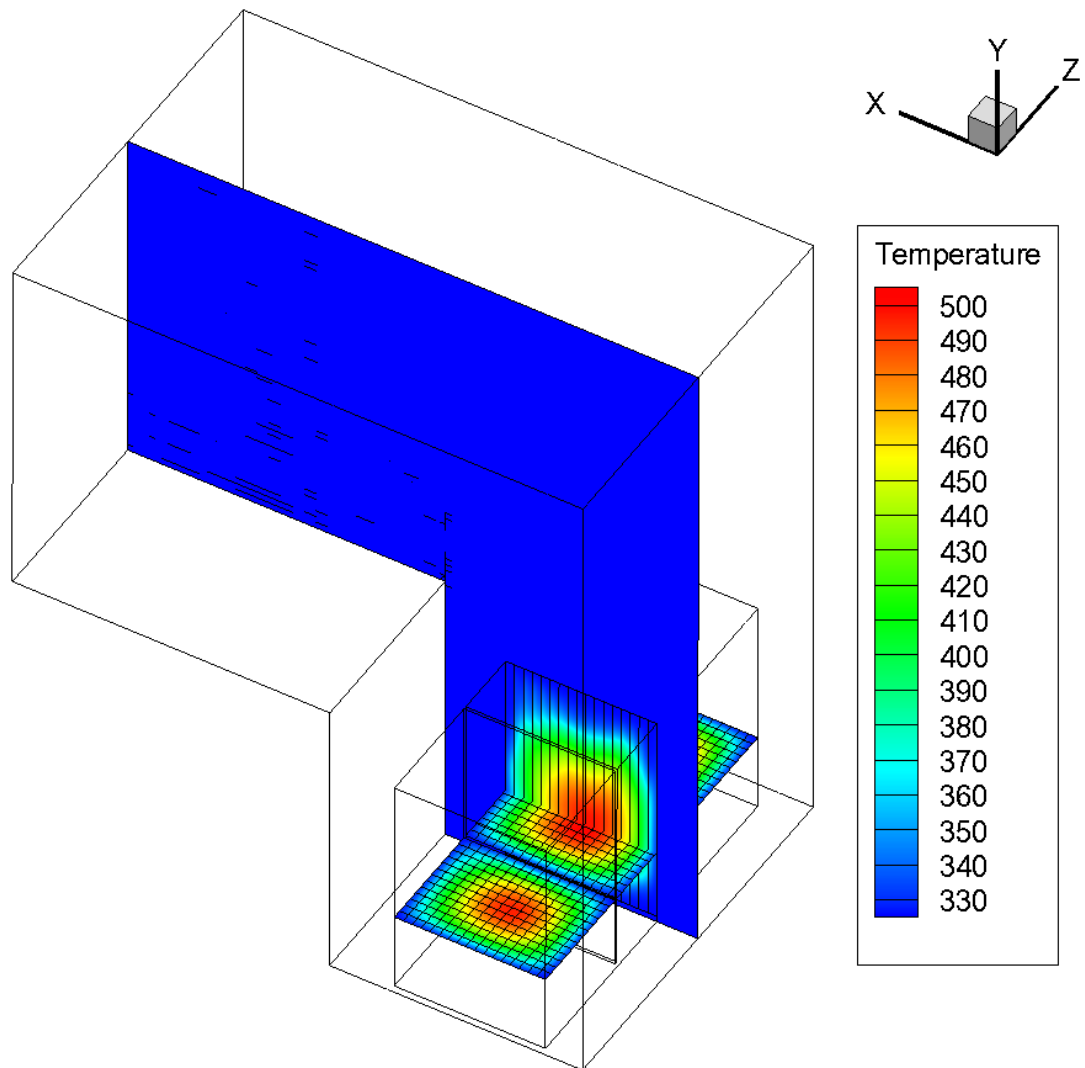


圖 39 每束燃料 320W 之上池溫度分佈

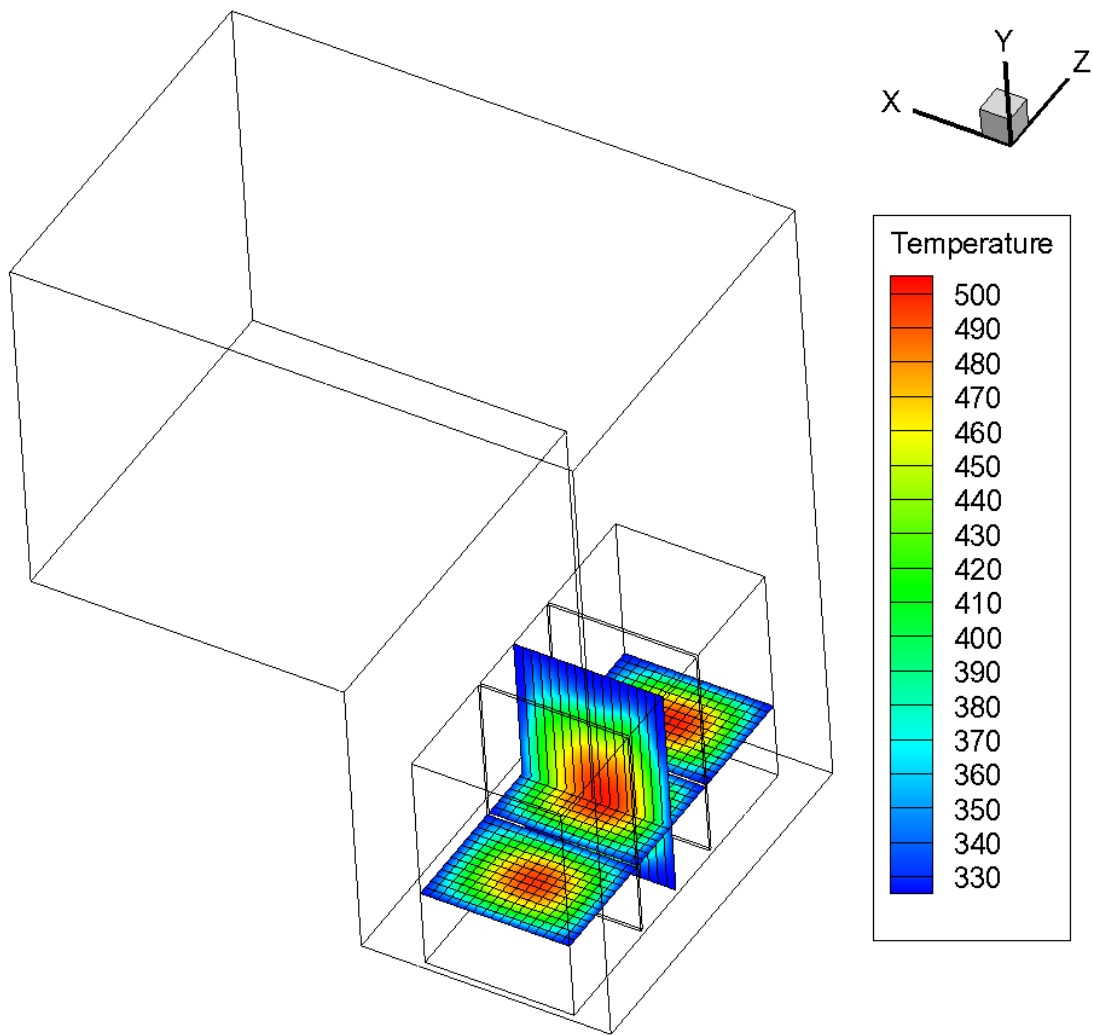


圖 40 每束燃料 320W 之上池溫度分佈(只有燃料格架部分)

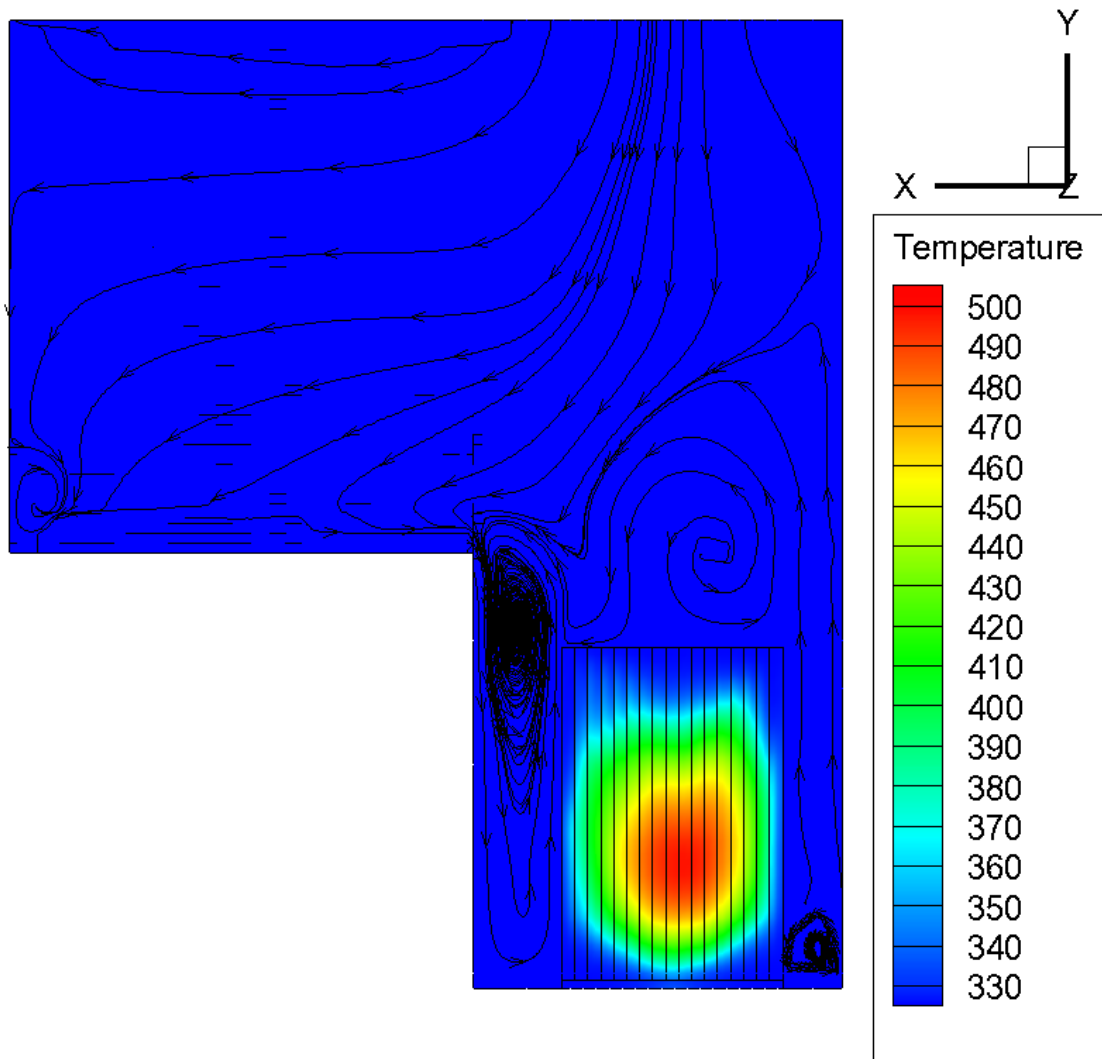


圖 41 每束燃料 320W 之上池流線分布

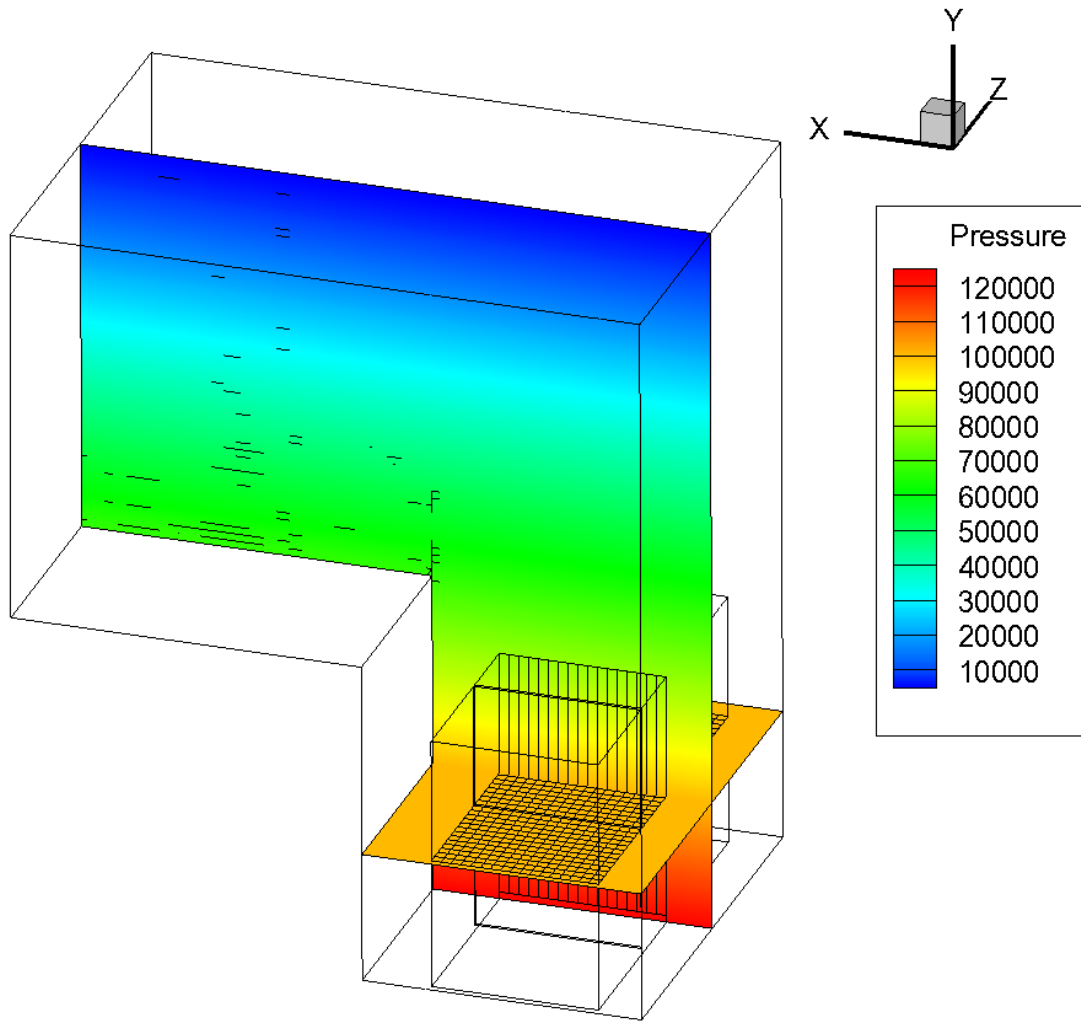


圖 42 每束燃料 500W 之上池壓力分布

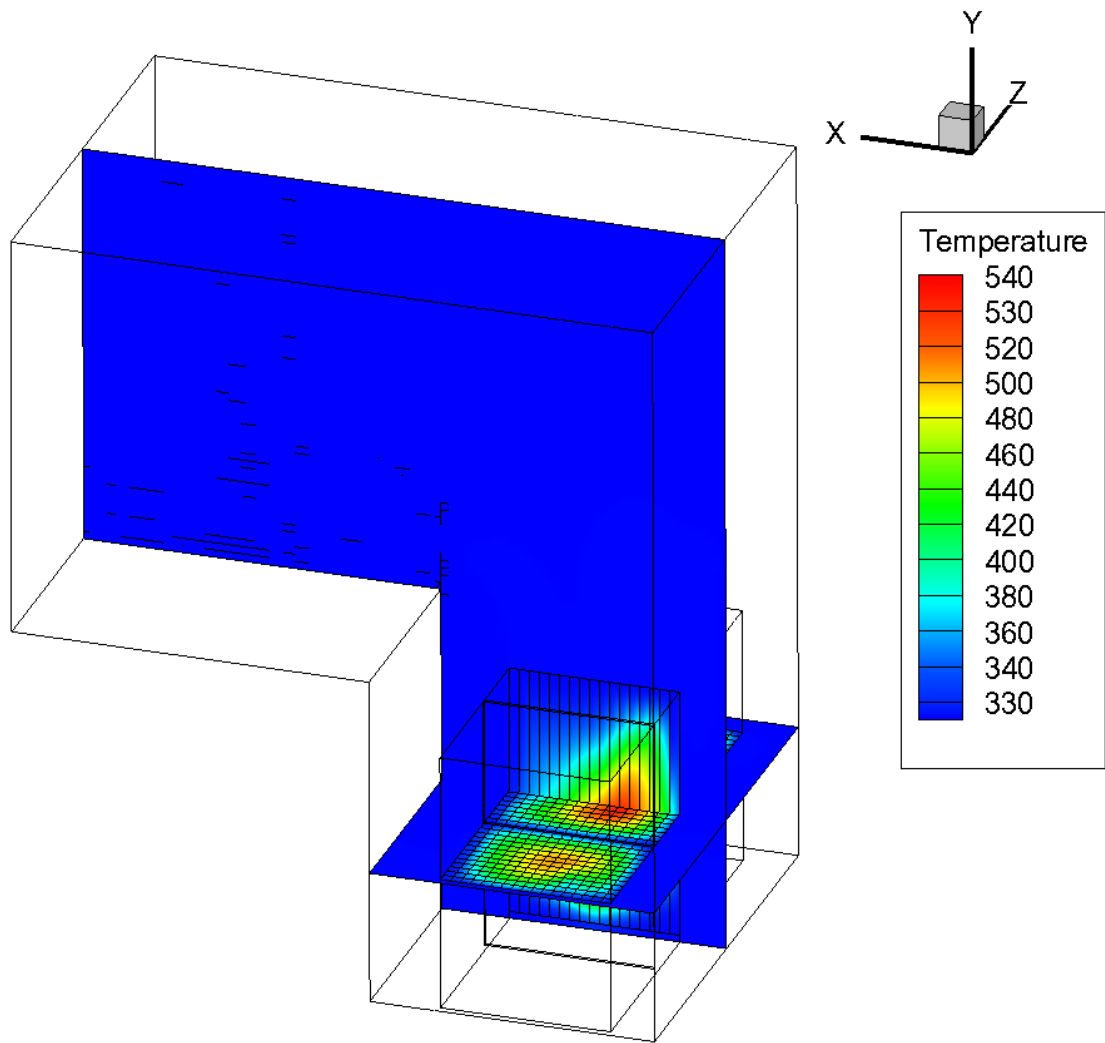


圖 43 每束燃料 500W 之上池溫度分布

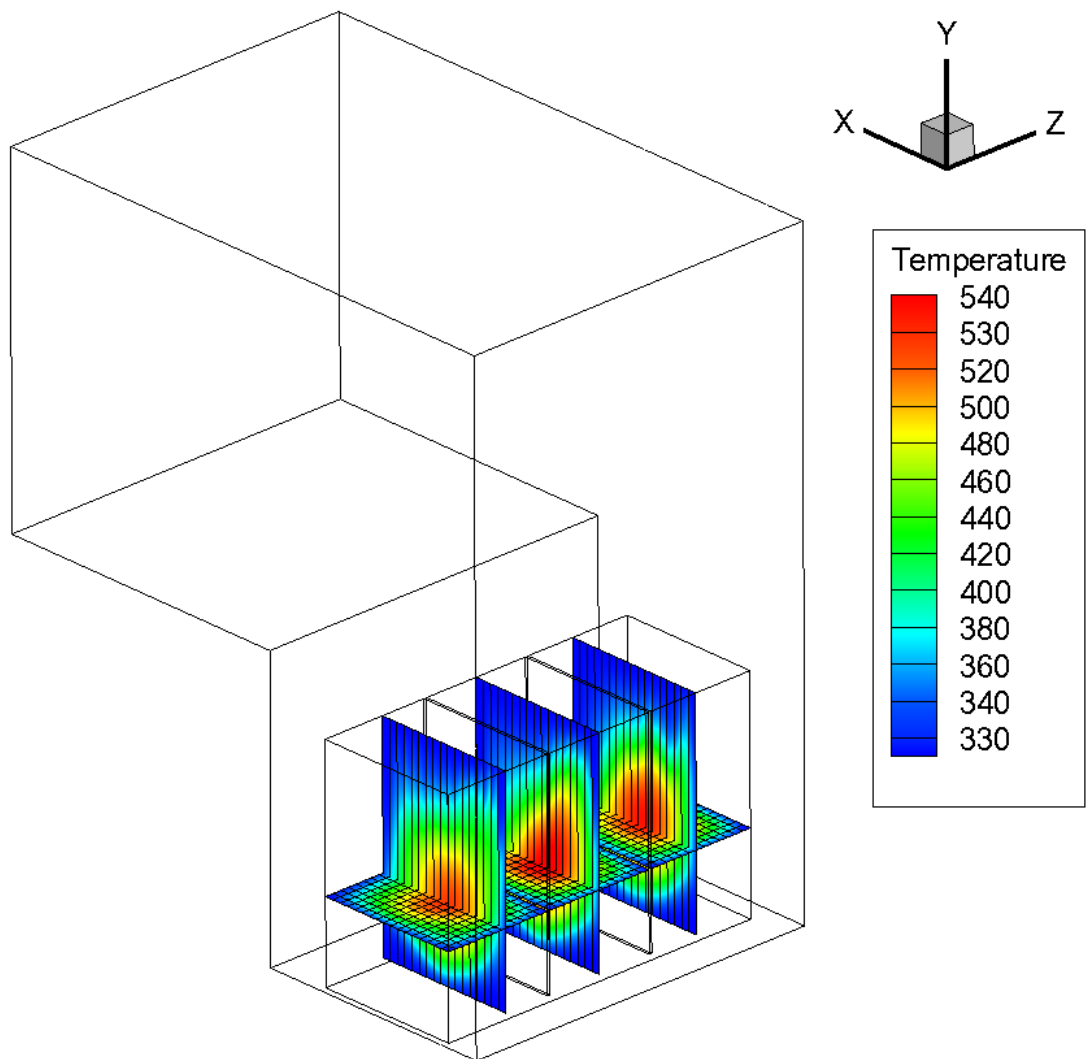


圖 44 每束燃料 500W 之上池溫度分布(只有燃料格架部分)

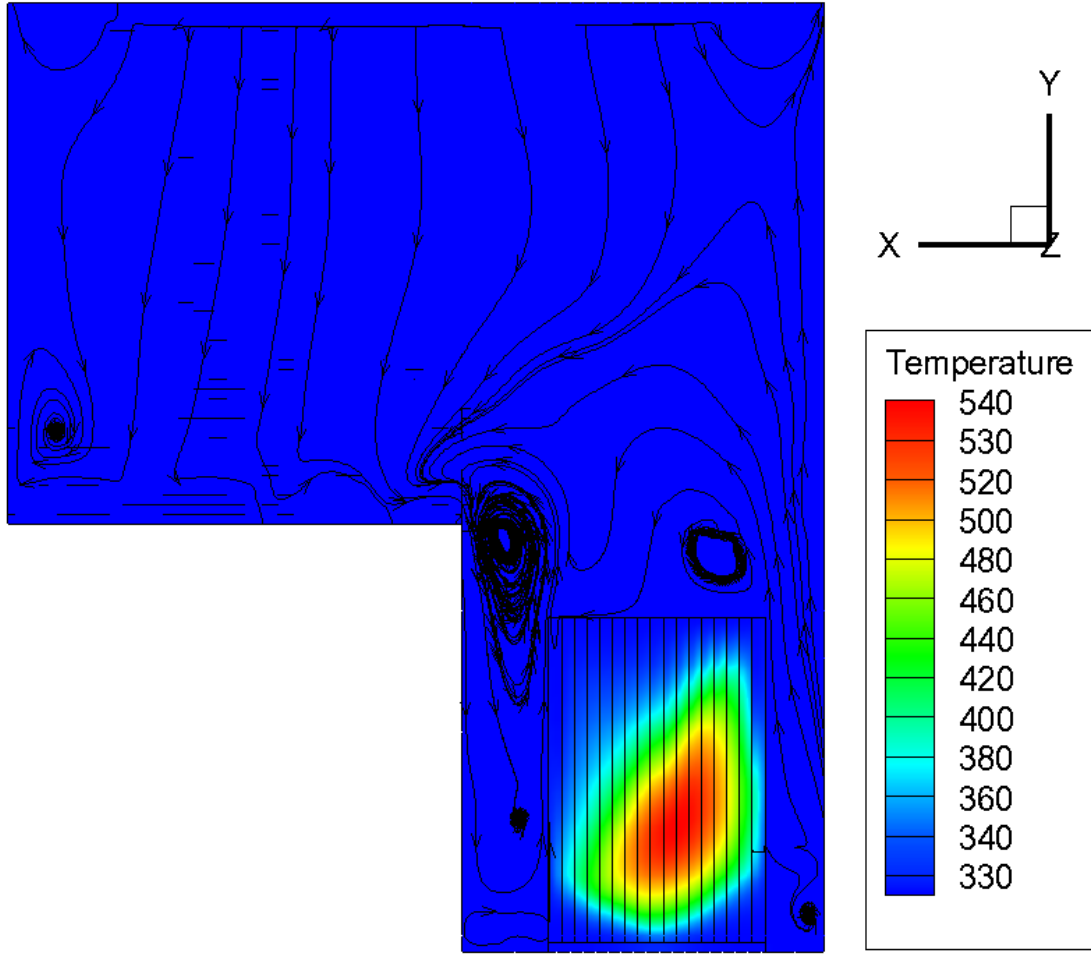


圖 45 每束燃料 500W 之上池流線分布

5. 使用者自定義參數

有鑑於本分析模式簡化了 RECIR 環路系統，並以 UDF 程式碼進行此環路內之質量與能量守恆進行計算；以下將就兩組 RECIRC 環路之進、出口流量與溫度之相關程式碼發展與掛載作業逐一進行說明。

上述提及之程式碼主要係掛載於兩組 RECIRC 取水口(J12、J13)與噴射泵供水口(J18、J19)等處，並將 RETRAN 之數據轉換為各邊界條件之流量與冷卻水溫度，其相關邊界條件與對應之 UDF 則如表 9 所列，以將逐一就各 udf 之程式碼開發過程進行說明，唯考量兩串系統之相關程式碼皆相同，故僅就編號 1 之系統組件(J13 與 J19)進程式碼說明。

表 9、RETRAN 與 CFD 之邊界條件名稱

RETRAN 節點		CFD BC 名稱	類型	對應之 UDF
J12		out_rcic_2	流量	recirc_2_vel
			溫度	recirc_2_temp
J13		out_rcic_1	流量	recirc_1_vel
			溫度	recirc_1_temp
J18		in_jet-pump2	流量	jp_2_vel
			溫度	jp_2_temp
J19		in_jet-pump1	流量	jp_1_vel
			溫度	jp_1_temp

5.1. RECIRC 取水口流量 UDF

編號為 1 之 RECIRC 系統於本分析中係屬於 RETRAN 之 J13、N11、N13、與 N15 所構成，並將其抽入之水由 J19 注入噴射泵中，而此流程所需讀入之 RETRAN 流量係為 J13 之 RECIRC 流量即可完成資料之讀入：

```
extern real j13;
face_t f;
j13=1397.4097;
```

在獲得 J13 之流量後，本段程式碼將先行計算此 CFD 邊界(out_rcic_1)之各網格的流體密度與流量，並藉以求取在此質流率下之平均流體密度；

```
begin_f_loop(f, thread)
{
    flow_flux+=F_FLUX(f,thread);
    ro_avg+=F_FLUX(f,thread)*F_R(f,thread);
}
end_f_loop(f, thread)
```

再轉換為邊界條件之進口速度：

```
F_PROFILE(f, thread, position) =-j13/(ro_avg/flow_flux)/0.22117029;
```

基於以上各項所需功能，在考量程式碼之計算邏輯與數值處理後，本節之完整之程式碼如下：

```
DEFINE_PROFILE(recirc_1_vel,thread, position)
{
    real    ro_avg, flow_flux;
    extern real j13;
    face_t f;
    j13=1397.4097; /*未來可由其它udf直接將每個步階下的所有資料一併送至extern real，此行即可刪除*/
    n13=7.4746110E+06;
    #if !PR_HOST
    flow_flux=0;
    ro_avg=0;
    begin_f_loop(f, thread)
    {
        flow_flux+=F_FLUX(f,thread);
        ro_avg+=F_FLUX(f,thread)*F_R(f,thread);
    }
    end_f_loop(f, thread)

    begin_f_loop(f, thread)
    {
        F_PROFILE(f, thread, position) =-j13/(ro_avg/flow_flux)/0.22117029;
```

```

}
end_f_loop(f, thread)
#endif /* !PR_HOST*/
#if !RP_NODE
flow_flux=0;
ro_avg=0;
begin_f_loop(f, thread)
{
    flow_flux+=F_FLUX(f,thread);
    ro_avg+=F_FLUX(f,thread)*F_R(f,thread);
}
end_f_loop(f, thread)

    begin_f_loop(f, thread)
{
    F_PROFILE(f, thread, position) =-j13/(ro_avg/flow_flux)/0.22117029;
}
end_f_loop(f, thread)

#endif /* !RP_NODE*/

#if !PARALLEL
flow_flux=0;
ro_avg=0;
begin_f_loop(f, thread)
{
    flow_flux+=F_FLUX(f,thread);
    ro_avg+=F_FLUX(f,thread)*F_R(f,thread);
}
end_f_loop(f, thread)

    begin_f_loop(f, thread)
{
    F_PROFILE(f, thread, position) =-j13/(ro_avg/flow_flux)/0.22117029;
}
end_f_loop(f, thread)

#endif /* !PARRLLEL*/

```

```
}
```

5.2. RECIRC 取水口溫度 UDF

同上節所述，編號為 1 之 RECIRC 系統於本分析中係屬於 RETRAN 之 J13、N11、N13、與 N15 所構成，在完成此系統之流量計算並將冷卻水抽離 CFD 模式時，將同時需要計算抽取出來之流體的平均溫度，即可：

```
recirc_1=0;
flow_flux=0;
power_flux=0;
begin_f_loop(f, thread)
{
    flow_flux+=F_FLUX(f,thread);
    power_flux+=F_FLUX(f,thread)*F_T(f,thread);
}
end_f_loop(f, thread)
```

但由於本計算所得之結果將回送之噴射泵進口端進行進口溫度計算，故此計結果需藉由 extern 變數將期儲存於程式碼外的記憶體空間；而下行中的判斷式主要係為了避免在平行處理中，某特定 CPU 在分配到 RECIRC 之計算時，直接以空值計算所造成的問題。

```
extern real recirc_1; /*define the temp_out is a enternal variable*/
.
    end_f_loop(f, thread)
        if (abs(flow_flux) >0.)
recirc_1=power_flux/(flow_flux);
        else
            recirc_1=0.0;
.

```

基於以上各項所需功能，在考量程式碼之計算邏輯與數值處理後，本節之完整之程式碼如下：

```

DEFINE_PROFILE(recirc_1_temp,thread, position)
{
    real    flow_flux,power_flux, Tmax;
extern real recirc_1;    /*define the temp_out is a enternal variable*/
    face_t f;

#ifdef !PR_HOST
    recirc_1=0;
    flow_flux=0;
    power_flux=0;
    begin_f_loop(f, thread)
    {
        flow_flux+=F_FLUX(f,thread);
        power_flux+=F_FLUX(f,thread)*F_T(f,thread);
    }
    end_f_loop(f, thread)
        if (abs(flow_flux) >0.)
recirc_1=power_flux/(flow_flux);
        else
            recirc_1=0.0;

#ifdef !PR_HOST*/

#ifdef !RP_NODE
    recirc_1=0;
    flow_flux=0;
    power_flux=0;
    begin_f_loop(f, thread)
    {
        flow_flux+=F_FLUX(f,thread);
        power_flux+=F_FLUX(f,thread)*F_T(f,thread);
    }
    end_f_loop(f, thread)
        if (abs(flow_flux) >0.)
recirc_1=power_flux/(flow_flux);
        else

```

```
        rercic_1=0.0;
#endif /* !RP_NODE*/

#if !PARALLEL
rercic_1=0;
flow_flux=0;
power_flux=0;
begin_f_loop(f, thread)
{
    flow_flux+=F_FLUX(f,thread);
    power_flux+=F_FLUX(f,thread)*F_T(f,thread);
}
end_f_loop(f, thread)
    if (abs(flow_flux) >0.)
rercic_1=power_flux/(flow_flux);
    else
        rercic_1=0.0;
#endif /* !PARRLLEL*/
}
```

5.3. JET-PUMP 進水口流量 UDF

編號為 1 之 JET-PUMP 系統於本分析中係屬於 RETRAN 之 J19，此部分係需承接由 RECIRC 環路計算所得之流量，並將其注入降流區中，因此本此需讀入之資 RETRAN 流量係為 J13 之 RECIRC 流量。但實際上由於 j13 已於 5.1 節中之 UDF 以 extern 變數存於記憶體中，故本段程式碼亦可將第三行加以刪除。

```
extern real j13;  
face_t f;  
j13=1397.4097;
```

在獲得 J13 之流量後，本段程式碼只需將其轉換為邊界條件之進口速度即可：

```
F_PROFILE(f, thread, position) =j13/F_R(f,thread)/0.2212372;
```

基於以上各項所需功能，在考量程式碼之計算邏輯與數值處理後，本節之完整之程式碼如下：

```
DEFINE_PROFILE(jp_1_vel,thread, position)  
{  
    real    ro_avg, flow_flux;  
    extern real j13;  
    face_t f;  
    j13=1397.4097; /*未來可由其它udf直接將每個步階下的所有資料一併送至extern real，此行即可刪除*/  
    #if !PR_HOST  
  
        begin_f_loop(f, thread)  
        {  
            F_PROFILE(f, thread, position) =j13/F_R(f,thread)/0.2212372;  
        }  
        end_f_loop(f, thread)  
  
    #endif /* !PR_HOST*/  
  
    #if !RP_NODE
```



```
        begin_f_loop(f, thread)
    {
        F_PROFILE(f, thread, position) = j13/F_R(f,thread)/0.2212372;
    }
    end_f_loop(f, thread)

#endif /* !RP_NODE*/

#if !PARALLEL

        begin_f_loop(f, thread)
    {
        F_PROFILE(f, thread, position) = j13/F_R(f,thread)/0.2212372;
    }
    end_f_loop(f, thread)

#endif /* !PARRLLEL*/
}
```

5.4. JET-PUMP 進水口溫度 UDF

經 RECIR 所得的水溫度，在經過計算後，即可供 jet-pump 之 udf 取用。 ，其中編號為 1 之 JET-PUMP 系統於本分析中係屬於 RETRAN 之 J19，由於此處之注水溫度係與流量、recirc 進口溫度以及 pump power 有關，故於本程式碼中需將 n13，j13 與 recirc_1 讀入：

```
real Tin, Tfluid;
extern real  recirc_1, n13 ,j13;
face_t f;
```

在獲得 J13 之流量後，本段程式碼只需將其以能量方程式轉換為邊界條件之進口溫度即可，但值得注意的是，由於可能僅有部分 CPU 負責進口溫度計算，故若直接讀取時將可能獲得空值，因此在程式碼將需加以判斷將非空值之結果加以讀入即可：

```
Tfluid=PRF_GRHIGH1(recirc_1);
F_PROFILE(f, thread, position) =Tfluid+n13*0.293/4200./j13;
```

基於以上各項所需功能，在考量程式碼之計算邏輯與數值處理後，本節之完整之程式碼如下：

```
DEFINE_PROFILE(jp_1_temp,thread, position)
{
    real Tin, Tfluid;
extern real  recirc_1, n13 ,j13;
    face_t f;

    #if !PR_HOST
Tfluid=PRF_GRHIGH1(recirc_1);
begin_f_loop(f, thread)
    {
        F_PROFILE(f, thread, position) =Tfluid+n13*0.293/4200./j13;
    }
    end_f_loop(f, thread)
#endif /* !PR_HOST*/
```

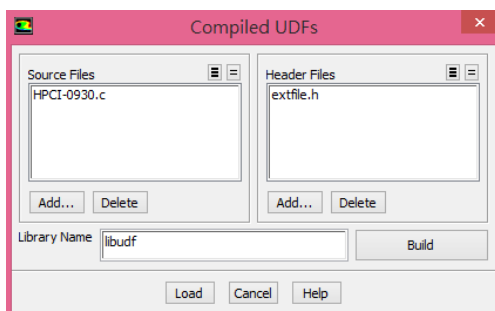
```
#if !RP_NODE
Tfluid=PRF_GRHIGH1(ercic_1);
begin_f_loop(f, thread)
{
    F_PROFILE(f, thread, position) =Tfluid+n13*0.293/4200./j13;
}
end_f_loop(f, thread)
#endif /* !RP_NODE*/

#if !PARALLEL
Tfluid=PRF_GRHIGH1(ercic_1);
begin_f_loop(f, thread)
{
    F_PROFILE(f, thread, position) =Tfluid+n13*0.293/4200./j13;

}
end_f_loop(f, thread)
#endif /* !PARRLLEL*/
}
```

5.5. UDF 內容與掛載

由於本案所需之 UDF 係為多邊界條件需互傳資料以計算兩邊界條件之溫度等條件差異，故其 UDF 於編譯時，需同時將 HPCI-0519.c 與 extfile.h 同如掛載(如下圖)。並點選 bulid 按鍵完成編譯後，再選 load 鍵將 udf 讀入分析模式中。



在完成上述編譯作業後，即可依循表 9 所載之內容，將各 UDF 與 CFD 邊界條件加以掛載，由於掛載作業主要分為溫度與流量兩項，以下將針對此二項掛載作業進行圖例說明，以確保作業之正確性。

A · 速度型式之 UDF 掛載

開啟所對應之 CFD 邊界條件之控制面板(如圖 35)，並依表 9 所示，掛載對應之速度 UDF 即可。

B · 溫度型式之 UDF 掛載

將同一控制面板切換至第二頁(THERMAL)，並依表 9 所示，掛載對應之溫度計算 UDF 即可。

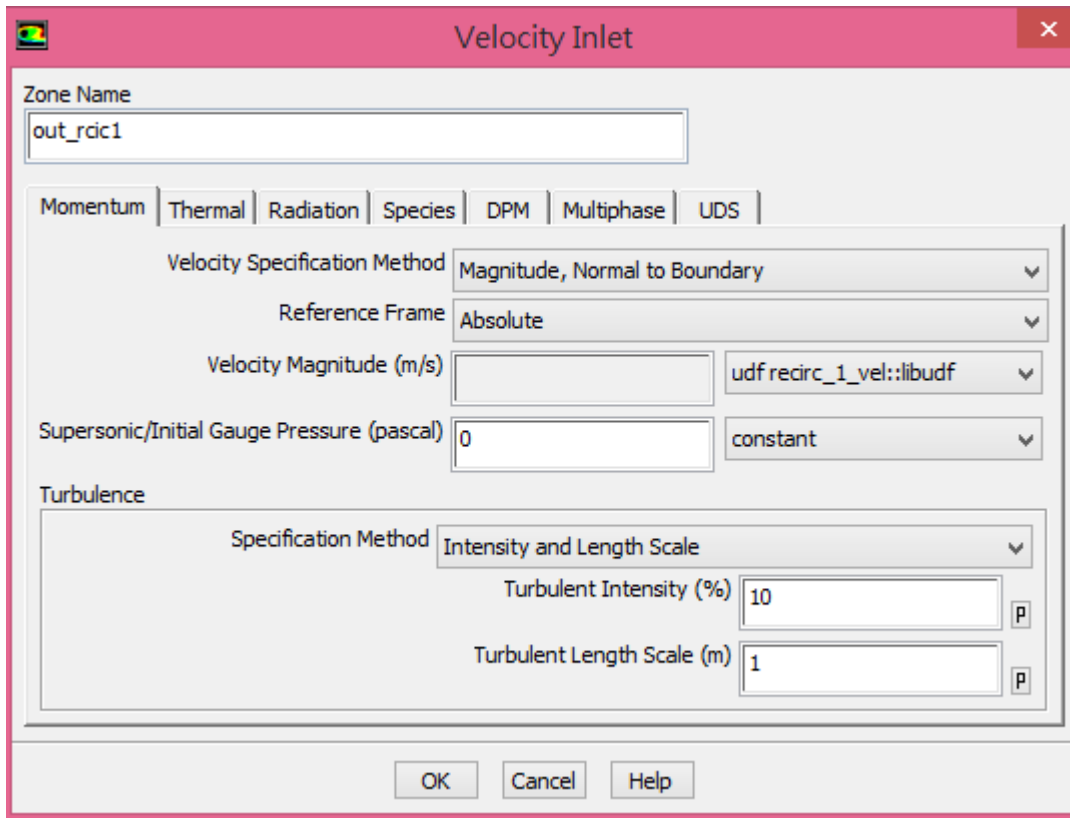


圖 36 速度邊界條件掛載

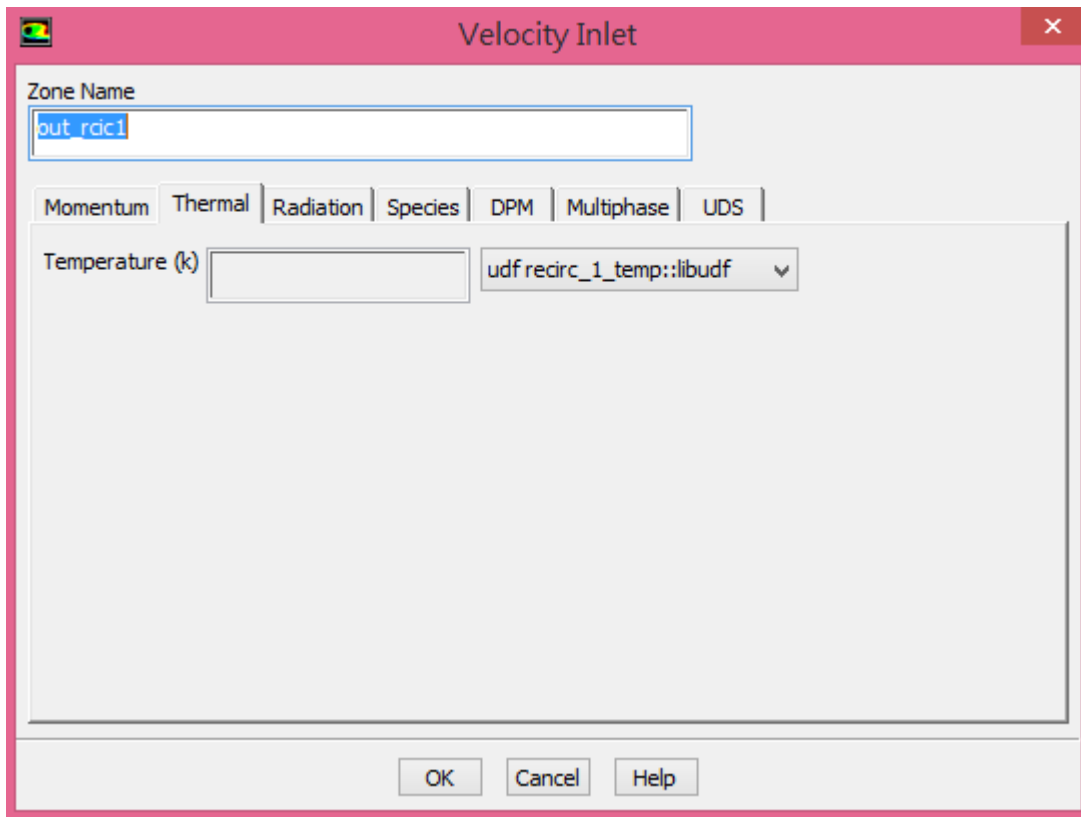


圖 37 溫度邊界條件掛載

6. 主要發現與結論

本 HPCI 之分析模式發展報告係基於所蒐集而得之核一廠 RETRAN 分析結果與各工程圖建構而成，所有幾何形狀係在考量最低簡化之條件下完成，並於模式發展過程註記各項尺寸與引用數據之來源，故此分析模式與實際幾何尺寸將具有其一致性。

在完成相關分析模式之發展後，本報告亦針對所需之各項模式、網格與邊界條件進行測試，其結果顯示，選用 502 萬網格之模式足以符合分析之所需。而更進一步的參數測試發現，若要求得與 RETRAN 具有最高一致性之分析結果，則於 CFD 分析中需要冷卻水隨運轉條件變換之現象加以考慮，並將再循環迴路之 PUMP POWER 納入考慮，而由其它節點之微量熱傳影響則可予以忽略，以略為增加分析之保守性。

最後，本報告就所需之 UDF 程式進行了相關之發展與掛載說明，以作為未來進行分析報告之引用及檢核依據，並詳錄於本報告之附錄中。

7. 參考文獻

1. Jan-Ru Tang, Chih-Chung Chung, Yung-Shin Tseng, “Analysis of the Inadvertent Start of HPCI Event for the Chinshan Nuclear Power Plant with CSAU Approach,” FEDSM2010-ICNMM2010, Montreal, Canada , August 2010
2. Chih-Wei Su, Yung-Shin Tseng, Jong-Rong Wang, Chun-Kuan Shih, “Analysis of the thermal hydraulic behavior in lower plenum of BWR through CFD simulation with HPCI event,” ANS 2011 Winter Meeting and Nuclear Technology Expo, Washington DC, USA, Nov. 2011.
3. Yu-Ting Ku, Yung-Shin Tseng, Chih-Wei Su, Jong-Rong Wang, Chunkuan Shih, “The Thermal Hydraulic Behavior in Core Inlet Region of BWR with the Inadvertent Startup of HPCI,” NUTHOS-9, Kaohsiung, Taiwan, September 9-13, 2012.
4. 辜郁庭、曾永信、王仲容、施純寬、馮玉明，“利用計算流體力學模擬金山核能發電廠降流區與爐心底部空間之穩態熱水流分析，”中國機械工程師學會第 30 屆全國學術研討會，宜蘭，102 年 12 月。
5. Sahoshih Ma, SusenHsu, Yung-Shin Tseng, “EVALUATION OF THE ASYMMETRIC EFFECTS ON CORE THERMAL LIMITS FOR THE INADVERTENT COLD COOLANT INJECTION TRANSIENT IN CHINSHAN BWR-4 PLANT,” 2014.
6. ANSYS, “FLUENT Theory Guide,” Ver. 12, 2009.
7. 陳柏諺、葉佳霖，“核二廠上池喪失冷卻能力之水位計算書，”核能研究所，民國 102 年。
8. 陳柏諺、葉佳霖，“核二廠上池喪失冷卻能力之衰變熱計算書，”核能研究所，民國 102 年。
9. 葉佳霖，“核二廠上池喪失冷卻能力之計算流體力學計算書，”核能研究所，民國 103 年。

10. 陳柏諺，葉佳霖，魏偉哲，陳彥旭，“核二廠上池貯存退出時間較長用過燃料之只用空氣冷卻 CFD 分析，” 民國 103 年。
11. 曾永信等人，“乾式貯存與大修機組冷卻之熱流分析應用，” SER：NRD-SER-99-06，民國 99 年。
12. 湯簡如、鍾志忠、曾永信等人，“核一廠高壓注水系統誤啟動暫態分析，” SER：NRD-SER-99-04，民國 99 年。
- 13 台灣電力公司，“第一核能發電廠 BWRT 訓練教材”，第一章，1982。
- 14 台灣電力公司，第一核能發電廠工程圖，B11-U0072630-422-1-N10120-R0。
- 15 台灣電力公司，第一核能發電廠工程圖，B11-A001921D873 SH.1-R8。
- 16 台灣電力公司，第一核能發電廠工程圖，B11-D081767E576-R3。
- 17 台灣電力公司，第一核能發電廠工程圖，B11-D081768E565 SH.2-R2。
- 18 台灣電力公司，第一核能發電廠工程圖，B11-A001921D873 SH.2-R8。
- 19 台灣電力公司，第一核能發電廠工程圖，B11-D254 796E818 -R0。
- 20 台灣電力公司，第一核能發電廠工程圖，B11-D233731E360-R5。
- 21 台灣電力公司，第一核能發電廠工程圖，B11-A001921D873 SH.3-R8。
- 22 台灣電力公司，第一核能發電廠一號機爐周心期 25 之挪移狀況。
- 23 台灣電力公司，第一核能發電廠工程圖，B11-U0072630-253-5-N10207-R0。
- 24 台灣電力公司，第一核能發電廠工程圖，B11-D0013181-14-7-42561-4SH.1-R6。
- 25 台灣電力公司，第一核能發電廠工程圖，B11-D241131C8084-R1。
- 26 台灣電力公司，第一核能發電廠工程圖，B11-D154158B8602-R1。
- 27 ANSYS，“FLUENT User’s Manual,” 2008。
- 28 Frank P. Incropera, “Fundamentals of Heat and Mass Transfer ,” 4th, Wiley, New York.

附錄 A

HPCL-0519

```
#include "udf.h"
#include "extfile.h"
#include "mem.h"
/*本程式重要邏輯*/
/*1· 利用c語言之全域變數使資料能於udf之間傳輸，fluent手冊有誤；主要作法是在要用的所有程式裡宣告
extern real 在.h中宣告為real */
/*2· 利用fleunt之function PRF_GRHIGH1(x)讀到各node之間的最大值，作為所有node的input，以防止其中
有一個node的input因為平行處理的切割而出現空值*/
DEFINE_PROFILE(jp_1_vel,thread, position)
{
    real ro_avg, flow_flux;
    extern real j13;
    face_t f;
    j13=1397.4097; /*未來可由其它udf直接將每個步階下的所有資料一併送至extern real，此行即可刪除*/
    #if !PR_HOST

        begin_f_loop(f, thread)
        {
            F_PROFILE(f, thread, position) =j13/F_R(f,thread)/0.2212372;
        }
        end_f_loop(f, thread)

    #endif /* !PR_HOST*/

    #if !RP_NODE

        begin_f_loop(f, thread)
        {
            F_PROFILE(f, thread, position) =j13/F_R(f,thread)/0.2212372;
        }
        end_f_loop(f, thread)

    #endif /* !RP_NODE*/
```

```
#if !PARALLEL
```

```
    begin_f_loop(f, thread)
    {
        F_PROFILE(f, thread, position) =j13/F_R(f,thread)/0.2212372;
    }
    end_f_loop(f, thread)
```

```
#endif /* !PARRLLEL*/
```

```
}
```

```
DEFINE_PROFILE(jp_2_vel,thread, position)
```

```
{
    real    ro_avg, flow_flux;
    extern real j12;
    face_t f;
```

j12=1397.4097; /*未來可由其它udf直接將每個步階下的所有資料一併送至extern real，此行即可刪除*/

```
#if !PR_HOST
```

```
    begin_f_loop(f, thread)
    {
        F_PROFILE(f, thread, position) =j12/F_R(f,thread)/0.2212372;
    }
    end_f_loop(f, thread)
```

```
#endif /* !PR_HOST*/
```

```
#if !RP_NODE
```

```
    begin_f_loop(f, thread)
    {
        F_PROFILE(f, thread, position) =j12/F_R(f,thread)/0.2212372;
    }
    end_f_loop(f, thread)
```

```

#endif /* !RP_NODE*/

#if !PARALLEL

    begin_f_loop(f, thread)

    {
        F_PROFILE(f, thread, position) =j12/F_R(f,thread)/0.2212372;
    }
    end_f_loop(f, thread)
#endif /* !PARRLLEL*/
}

DEFINE_PROFILE(recirc_1_vel,thread, position)
{
    real    ro_avg, flow_flux;
    extern real j13;
    face_t f;
j13=1397.4097; /*未來可由其它udf直接將每個步階下的所有資料一併送至extern real，此行即可刪除*/
n13=7.4746110E+06;
#if !PR_HOST
flow_flux=0;
ro_avg=0;
begin_f_loop(f, thread)
    {
        flow_flux+=F_FLUX(f,thread);
        ro_avg+=F_FLUX(f,thread)*F_R(f,thread);
    }
end_f_loop(f, thread)

    begin_f_loop(f, thread)
    {
        F_PROFILE(f, thread, position) =-j13/(ro_avg/flow_flux)/0.22117029;
    }
    end_f_loop(f, thread)

#endif /* !PR_HOST*/

```

```

#if !RP_NODE
flow_flux=0;
ro_avg=0;
begin_f_loop(f, thread)
{
    flow_flux+=F_FLUX(f,thread);
    ro_avg+=F_FLUX(f,thread)*F_R(f,thread);
}
end_f_loop(f, thread)

    begin_f_loop(f, thread)
{
    F_PROFILE(f, thread, position) =-j13/(ro_avg/flow_flux)/0.22117029;
}
end_f_loop(f, thread)

#endif /* !RP_NODE*/

#if !PARALLEL
flow_flux=0;
ro_avg=0;
begin_f_loop(f, thread)
{
    flow_flux+=F_FLUX(f,thread);
    ro_avg+=F_FLUX(f,thread)*F_R(f,thread);
}
end_f_loop(f, thread)

    begin_f_loop(f, thread)
{
    F_PROFILE(f, thread, position) =-j13/(ro_avg/flow_flux)/0.22117029;
}
end_f_loop(f, thread)

#endif /* !PARRLLEL*/
}

```

```

DEFINE_PROFILE(recirc_2_vel,thread, position)
{
    real    ro_avg, flow_flux;
    extern real j12;
    face_t f;
j12=1397.4097; /*未來可由其它udf直接將每個步階下的所有資料一併送至extern real，此行即可刪除*/
n12=7.4746110E+06;
#ifdef !PR_HOST
    flow_flux=0;
    ro_avg=0;
    begin_f_loop(f, thread)
    {
        flow_flux+=F_FLUX(f,thread);
        ro_avg+=F_FLUX(f,thread)*F_R(f,thread);
    }
    end_f_loop(f, thread)

        begin_f_loop(f, thread)
    {
        F_PROFILE(f, thread, position) =-j12/(ro_avg/flow_flux)/0.22117029;
    }
    end_f_loop(f, thread)

#endif /* !PR_HOST*/

#ifdef !RP_NODE
    flow_flux=0;
    ro_avg=0;
    begin_f_loop(f, thread)
    {
        flow_flux+=F_FLUX(f,thread);
        ro_avg+=F_FLUX(f,thread)*F_R(f,thread);
    }
    end_f_loop(f, thread)

        begin_f_loop(f, thread)

```

```

{
    F_PROFILE(f, thread, position) = -j12/(ro_avg/flow_flux)/0.22117029;
}
end_f_loop(f, thread)

#endif /* !RP_NODE*/

#if !PARALLEL
    flow_flux=0;
ro_avg=0;
begin_f_loop(f, thread)
{
    flow_flux+=F_FLUX(f,thread);
    ro_avg+=F_FLUX(f,thread)*F_R(f,thread);
}
end_f_loop(f, thread)

    begin_f_loop(f, thread)
{
    F_PROFILE(f, thread, position) = -j12/(ro_avg/flow_flux)/0.22117029;
}
end_f_loop(f, thread)

#endif /* !PARRLLEL*/
}

DEFINE_PROFILE(recirc_1_temp,thread, position)
{
    real    flow_flux,power_flux, Tmax;
extern real recirc_1;    /*define the temp_out is a external variable*/
    face_t f;

#if !PR_HOST
recirc_1=0;
flow_flux=0;
power_flux=0;

```

```

begin_f_loop(f, thread)
{
    flow_flux+=F_FLUX(f,thread);
    power_flux+=F_FLUX(f,thread)*F_T(f,thread);
}
end_f_loop(f, thread)
    if (abs(flow_flux) >0.)
rercic_1=power_flux/(flow_flux);
    else
        rercic_1=0.0;

#endif /* !PR_HOST*/

#if !RP_NODE
rercic_1=0;
flow_flux=0;
power_flux=0;
begin_f_loop(f, thread)
{
    flow_flux+=F_FLUX(f,thread);
    power_flux+=F_FLUX(f,thread)*F_T(f,thread);
}
end_f_loop(f, thread)
    if (abs(flow_flux) >0.)
rercic_1=power_flux/(flow_flux);
    else
        rercic_1=0.0;
#endif /* !RP_NODE*/

#if !PARALLEL
rercic_1=0;
flow_flux=0;
power_flux=0;
begin_f_loop(f, thread)
{
    flow_flux+=F_FLUX(f,thread);
    power_flux+=F_FLUX(f,thread)*F_T(f,thread);
}

```

```

    }
    end_f_loop(f, thread)
        if (abs(flow_flux) > 0.)
    rercic_1=power_flux/(flow_flux);
        else
            rercic_1=0.0;
#endif /* !PARRLLEL*/
    }

DEFINE_PROFILE(recirc_2_temp,thread, position)
{
    real    flow_flux,power_flux,Tmax;
    extern real rercic_2;    /*define the temp_out is a external variable*/
    face_t f;

#if !PR_HOST
    rercic_2=0;
    flow_flux=0;
    power_flux=0;
    begin_f_loop(f, thread)
    {
        flow_flux+=F_FLUX(f,thread);
        power_flux+=F_FLUX(f,thread)*F_T(f,thread);
    }
    end_f_loop(f, thread)
        if (abs(flow_flux) > 0.)
    rercic_2=power_flux/(flow_flux);
        else
            rercic_2=0.0;

#endif /* !PR_HOST*/

#if !RP_NODE
    rercic_2=0;
    flow_flux=0;
    power_flux=0;
    begin_f_loop(f, thread)
    {

```



```

        flow_flux+=F_FLUX(f,thread);
        power_flux+=F_FLUX(f,thread)*F_T(f,thread);
    }
    end_f_loop(f, thread)
        if (abs(flow_flux) >0.)
rercic_2=power_flux/(flow_flux);
        else
            rercic_2=0.0;

#endif /* !RP_NODE*/

#if !PARALLEL
    rercic_2=0;
    flow_flux=0;
    power_flux=0;
    begin_f_loop(f, thread)
    {
        flow_flux+=F_FLUX(f,thread);
        power_flux+=F_FLUX(f,thread)*F_T(f,thread);
    }
    end_f_loop(f, thread)
        if (abs(flow_flux) >0.)
rercic_2=power_flux/(flow_flux);
        else
            rercic_2=0.0;

#endif /* !PARRLLEL*/
}

/*for cavity inlet temp*/

DEFINE_PROFILE(jp_1_temp,thread, position)
{
    real Tin, Tfluid;
extern real rercic_1, n13 ,j13;
    face_t f;

```

```

#if !PR_HOST
Tfluid=PRF_GRHIGH1(ercic_1);
begin_f_loop(f, thread)
{
    F_PROFILE(f, thread, position) =Tfluid+n13*0.293/4200./j13;
}
end_f_loop(f, thread)
#endif /* !PR_HOST*/

```

```

#if !RP_NODE
Tfluid=PRF_GRHIGH1(ercic_1);
begin_f_loop(f, thread)
{
    F_PROFILE(f, thread, position) =Tfluid+n13*0.293/4200./j13;
}
end_f_loop(f, thread)
#endif /* !RP_NODE*/

```

```

#if !PARALLEL
Tfluid=PRF_GRHIGH1(ercic_1);
begin_f_loop(f, thread)
{
    F_PROFILE(f, thread, position) =Tfluid+n13*0.293/4200./j13;

}
end_f_loop(f, thread)
#endif /* !PARRLLEL*/
}

```

```

/*for SFP inlet temp*/
DEFINE_PROFILE(jp_2_temp,thread, position)
{
    real Tin, Tfluid;
extern real   ercic_2, j12, n12;

```

```

face_t f;

#if !PR_HOST
    Tfluid=PRF_GRHIGH1(ercic_2);
begin_f_loop(f, thread)
    {
        F_PROFILE(f, thread, position) =Tfluid+n12*0.293/4200./j12;

    }
    end_f_loop(f, thread)
#endif /* !PR_HOST*/

#if !RP_NODE
    Tfluid=PRF_GRHIGH1(ercic_2);
begin_f_loop(f, thread)
    {
        F_PROFILE(f, thread, position) =Tfluid+n12*0.293/4200./j12;

    }
    end_f_loop(f, thread)
#endif /* !RP_NODE*/

#if !PARALLEL
    Tfluid=PRF_GRHIGH1(ercic_2);
begin_f_loop(f, thread)
    {
        F_PROFILE(f, thread, position) =Tfluid+n12*0.293/4200./j12;

    }
    end_f_loop(f, thread)
#endif /* !PARRLLEL*/
}

```

附錄 B

```
/* extfile.h
```

```
Header file that contains the external variable declaration for
```

```
volume */
```

```
real  rercic_2, rercic_1, j12, j13, n13, n12;
```

附錄 C

Jet-pump.c

```
// Apply P70001 dPT5 outlet conditions to P70001 dPT4 inlet
```

```
// P70001_dPT5 : K-Omega standard model, Momentum by 2nd-order
```

```
#include <udf.h>
```

```
real JP2[200]=
```

```
{  
551.06671, 550.95416, 550.66138, 550.02032, 548.87952, 547.28668, 545.13861, 543.11646, 542.46344,  
542.65125, 542.81158, 542.68634, 542.30005, 541.03918, 539.20081, 537.34088, 535.55603, 534.01886,  
533.17377, 533.26617, 533.82874, 533.98969, 533.41479, 532.46088, 531.73962, 531.70209, 532.38806,  
533.13068, 533.29199, 533.28821, 533.65179, 534.45209, 535.22229, 535.58026, 535.55035, 534.97601,  
534.1676, 533.66388, 533.36633, 533.12152, 533.09937, 532.72723, 532.17834, 531.9715, 531.94818, 531.80566,  
531.41785, 531.06647, 531.07422, 531.33661, 531.50702, 531.54547, 531.57611, 531.6236, 531.63806,  
531.79272, 532.06775, 532.03955, 531.82971, 531.849, 532.27216, 532.53839, 532.24109, 531.81537, 531.66907,  
531.99139, 532.39954, 532.35284, 531.99371, 531.90887, 532.2431, 532.67761, 532.67706, 532.30701,  
532.10419, 532.49469, 533.38171, 534.24176, 534.45685, 533.9375, 533.27948, 532.87726, 532.65979, 532.8374,  
533.66583, 534.31683, 533.8006, 532.80182, 532.29468, 532.49762, 533.00659, 533.17426, 532.71381,  
531.97131, 531.46643, 531.63397, 532.40344, 533.30328, 533.81415, 533.48535, 532.63513, 532.11572,  
532.56622, 533.29468, 533.27478, 532.73236, 532.44537, 532.73492, 533.24438, 533.50519, 533.74799,  
534.11035, 534.09589, 533.49683, 532.85632, 532.6864, 532.77222, 532.66571, 532.37225, 532.16547,  
532.05933, 532.31476, 532.83966, 532.7912, 532.35931, 531.94244, 531.77783, 531.87585, 532.04547,  
532.39935, 532.82916, 532.94562, 532.77716, 532.3158, 531.91101, 531.70557, 531.62988, 531.63525,  
531.80243, 532.0094, 531.86774, 531.461, 531.18921, 531.43964, 532.14673, 532.71173, 532.79871, 532.48242,  
531.90527, 531.48016, 531.61969, 532.25922, 533.03577, 533.05176, 532.20978, 531.58667, 531.78241,  
532.16364, 532.30219, 532.73724, 533.08167, 532.44049, 531.79388, 532.34515, 533.30212, 533.71191,  
533.63281, 533.56799, 533.38446, 532.87384, 532.12592, 531.56537, 531.48828, 531.65881, 531.89319,  
532.32092, 532.63611, 532.40344, 531.73309, 531.12085, 531.42206, 532.34406, 533.23401, 533.75403,  
533.76221, 533.22437, 532.46857, 531.89722, 532.13745, 533.09406, 534.0296, 534.22284, 533.73376,  
533.57477, 534.02405, 534.4549, 534.24164, 533.19873, 531.88416, 531.04211  
};
```

```
DEFINE_PROFILE(jp2,t,i)
```

```
{  
face_t f;  
int index;
```

```
begin_f_loop(f,t)
{
    index=N_TIME;
F_PROFILE(f,t,i)=JP2[index-1];
}
end_f_loop(f,t)
}
```