

行政院原子能委員會
委託研究計畫研究報告

核二廠用過燃料池正常運作時之局部水溫計算
Calculating the Local Temperature of KSNPP SFP
under Normal Operating Condition

計畫編號：1062001INER015

受委託機關(構)：國立清華大學

計畫主持人：曾永信

聯絡電話：03-5715131 分機 42858

E-mail address：yungshintseng@gmail.com

協同主持人：

研究期程：中華民國 106 年 3 月至 106 年 11 月

研究經費：新臺幣 90 萬元

核研所聯絡人員：陳柏諺

報告日期：106 年 11 月 21 日

目 錄

目 錄.....	I
中文摘要.....	1
ABSTRACT.....	2
壹、計畫緣起與目的.....	3
一、軟體評選與所需研究資料蒐集.....	5
(一) 核二廠反應器與上池之幾何結構資料蒐集.....	6
(二) 核二廠反應器與上池模型之熱水力特性與流阻資料蒐集.....	6
貳、 研究方法與過程.....	8
一、 核二廠反應器與上池資料蒐集與分析模型建立.....	8
(一)降流區.....	9
(二)壓力槽下部空間.....	9
(三)爐心區.....	10
(四)壓力槽上部空間與爐穴.....	10
(五)連通管道與上燃料池.....	11
(六)Interface 介面連通.....	11
二、模型網格配置與生成.....	30
三、網格靈敏度測試.....	32
四、冷卻系統與系統流阻之邊界條件程式碼開發.....	35
(一) 冷卻系統邊界條件程式碼開發.....	35

(二) 系統流阻程式碼開發	37
五、數值分析設定與邊界條件	39
(一) 數值分析設定	39
(二) 邊界條件設定	40
參、模擬結果.....	42
肆、主要發現與結論.....	54
伍、參考文獻.....	55
附錄 A.....	58
附錄 B.....	65

中文摘要

為因應我國核電廠不延役之政策，核二廠預期將於未來著手提出除役計畫書，以符合法規之要求。而為能先行著手因應未來可能遇上用過燃料無法退出之需求，核研所勢必先行針對核二廠反應爐與上池連通狀況下之流場分析進行分析技術之開發，以因應未來機組停機後，爐心內燃料束需持續冷卻之需求。為此，本研究擬著利用計算流體力學分析技術，著手建立一套核二反應爐與上池之連通模式，並就其分析所需，建立相關之元件流阻係數及冷卻系統模擬模式，以期能針對此一除役期間之燃料池進行正常運轉條件下之局部熱水流進行探討。預期經由本研究之成果將可作為未來所內業務之拓展基礎。

關鍵字：計算流體力學、核二上燃料池、冷卻系統、除役

Abstract

In order to response the policy decision of non-nuclear homes, the TPC will purpose the decommissioning project of Kuosheng Nuclear power plant (KSNPP) to meet the regulatory requirement in near future. In this study, the Computational Fluid Dynamics (CFD) methodology has been employed to develop a thermal hydraulic prediction model for KSNPP reactor with upper pool under decommissioning stage. The model can be utilized to investigate the thermal behavior as the loaded reactor core combined with upper pool and continuity cooling via some cooling system. Therefore, the fuel bundle design type, ability of cooling system will be modeled by an apposite approach. Through the efforts of the study, an integrated simulation model will be developed for thermal hydraulic analysis of decommissioning KSNPP pool under normal operating condition. We expect that the model forms this study can provide a basis for future analysis application of INER.

Keywords: CFD, KSNPP, upper pool, decay heat cooling system, decommissioning.

壹、計畫緣起與目的

核能電廠之分析技術全性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之預估進行整體分析之工作，透過計算流體力學(Computational Fluid Dynamics, CFD)分析技術的發展，使得更多的細微熱流特性與其對系統之影響逐一的被發現並迅速改進。例如，我國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、核一廠大修時替代冷卻、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，並對電廠之實際問題提供了更佳的改善途徑。然而，基於我國目前 2025 年非核家園之政策，除核一廠已提交除役計劃書備審，並著手針對除役計畫進行作業規劃之外。核二廠近年亦將需正視著手除役之狀況。然而事實上，目前該廠兩部機組的用過燃料池已不足容納全爐退出的所有燃料束，故而提出核二上池之改裝工程，以求能置入三個 221 束之燃料束格架，進而額外提供約略 2 個周期所需之燃料束空間。

此一機組現況意味著，如果在機組完成最後兩個可運轉周期之任務後，原本在池中及爐心內的用過燃料無法完全移出爐心，致使於機組除役初期呈現仍可能有部分用過核子燃料放置於反應爐內之狀況。鑑於，此時反應爐已呈開蓋狀態，並將蒸汽產生器與乾燥器等組件移除。而使得反應爐在與上池連通後被視為用過燃料池之一部分。此外，在考量未來除役作業期間，部分設施將可能逐步排除拆除作業，而使該冷卻系統呈現不可用之狀態，因此核研所勢必需於機組營運至此狀態前，先行針對上述之可能情境進行分析技術之建立，以因應未來所需之任務。而在能全盤探討此一機組狀態下之事故與作業需求前，則需先行針對此爐心與上池所組成之廣義燃料池進行探討，以瞭解該區

域於正常狀況下是否能有充足之移熱能力，以避免局部水溫過高，並符合原能會公佈之燃料池改裝審查導則中，於正常運轉條件下，池水溫度能低於 60°C 並且無任何局部沸騰之要求。本研究已應用於核一廠大修時替代冷卻模擬，核一廠於 2008 年時，曾因大修時需針對餘熱移除系統 AB 串共管進行維修而需藉由該廠燃料池新增冷卻系統進行爐心移熱之訴求相同，皆是需考量爐心部分仍具有燃料束之狀況下，探討各式冷卻系統於不同可用狀態下之熱水流特性。此一研究工作順利讓核一廠維修餘熱移除系統共管之任務順利達成，且在未額外增設冷卻設施或延後大修期間之前提下，為電廠之營運與維護提實質之績效貢獻。若回顧電廠除役期間長達 20 年之作業期程，冷卻設施的運轉與維護若能適時的縮減，將有助於作業排程及後續營運成本的控制，其效益更遠大於大修替代冷卻應用。

依據本計畫招標規範所載之研究目標，若要建構乙套分析技術以探討「核二廠用過燃料池正常運作時之局部水溫計算」則需著手針對「分析模式」及「冷卻系統設施之邊界條件程式碼」兩部分進行開發。其中，「分析模式」乙案中，係針對核二廠之「反應爐」及「上燃料池」進行模式開發。故本研究擬於計畫執行開始後，依據所蒐集之核二廠反應器及上池之工程圖，利用合適之 CAD 軟體將其工程圖轉換為實體模型；期間將移除不必要之零件(如反應器蒸汽產生器及汽液分離器等，並對燃料束施以簡化作業，以流阻預估模式進行取代之，進而建立一套可以模擬核二廠反應器上池連通時之幾何模式。另外，對於「冷卻系統設施之邊界條件程式碼」乙項工作，則將針對該廠設置於反應器及上池之各式冷卻設施，如餘熱移除系統或是燃料池冷卻系統，以符合分析所需。這是因為上述之各項冷卻設施之能力係與其流量與熱

交換器效率及燃料池運轉條件有關，因此無法逕行以一常數來進行表達。

而預期在完成上述分析模式與邊界條件之建立後，本研究將協助核研建立核二廠反應器與上池連通時之局部流場分析技術，並藉以完成「核二廠用過燃料池正常運作時之局部水溫計算」，為我國非核家園之政策與規劃提供必要之助力。

一、軟體評選與所需研究資料蒐集

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安全作業之效果。本「核二廠用過燃料池正常運作時之局部水溫計算」案，係與未來電廠於大修或除役期間，於爐心燃料未淨空之條件下進行長時間之冷卻作業，故其分析結果與後續除役、大修作業之規劃與時程安排息息相關，而需謹慎評估，以確保電廠無論於大修或除役期間皆能同時兼具安全與運轉效益之兩大目標。因此，不論是分析工具選用、模式選擇、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。

本研究擬選擇目前於核一廠替代冷卻分析案[1]中，已有實例之 ANSYS FLUENT [2]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[3,4]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實際應用性。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[5-9]；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。

以下針對本研究執行期間擬完成之核二廠反應器與上池分析技術建立所需資料之蒐集狀況，則如本章以下各節所述。

(一) 核二廠反應器與上池之幾何結構資料蒐集

如計劃書內容所載，本研究擬於計畫開始之初的兩個月進行分析所需之文獻、工程圖面、系統運轉歷史及冷卻系統資料的蒐集與研析，以作為後續分析工作之參考依據。而在進行資料蒐集的同時，本研究亦將著手進行所蒐集得的反應器圖面進行排除，將不必要分析之零組件，如反應器汽液分離器等加以排除後，所有必需分析的元件(如噴射泵、上池燃料格架)，將利用 CAD 輔以 GAMBIT 之方式進行幾何模型建立。

(二) 核二廠反應器與上池模型之熱水力特性與流阻資料蒐集

在完成上述相關的核二廠反應器模型建立後，本研究將進行流阻係數之測試，並作為模式簡化、UDF 程式碼撰寫之依據，針對各項冷卻系統之能力及流阻係數進程式碼建立之工作，以期作為分析模式之邊界條件。

其中，冷卻模式之建立，本研究將透過所蒐集之資料，進行冷卻能力、流量及熱交換器效率之模式化工作，以求可以免除不必要之管路及熱交換系統之分析負擔。而在系統流阻之部分，由於此一分析工作主要是擬探討反應爐及上燃料池連通而成為一除役作業之燃料暫存空間，故需針對燃料束、反應器噴射泵等幾何結構對於系統於自然對流下之冷卻流量之影響，因此本研究將於工作期間，探討各項細部結構之流阻，並評估限流孔、底部座塊或其它元件對於流場影響之程度，

以作為其簡化與否之依據。而對於適用簡化模式表達之元件，將利用在分析模型中所設施之均質化多孔性介質體積，進行流阻特性之表達，以確保整體模式符合實際情況。

在完成上述之模型程式碼立後，本研究將進一步地針對各項重要熱流參數與核研所進行討論，以決定一代表性案例，作為模式功能之證明及後續分析之基礎。透過以上之研究方法與工作規劃，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：

1. 針對核二反應器、上燃料池、燃料束格架、燃料束、噴射泵內部組件進行分析模式建立與網格生成；
2. 進行冷卻設施、系統元件流阻之程式碼開發；
3. 完成「核二廠用過燃料池正常運作時之局部水溫計算」分析模式開發；

最後本研究除將交付所有研究成果與所建立之模式、程式碼及技術外，更將匯集所有計算結果，並依據核研所於招標文件上之各項標的名稱進行分類與成果報告撰寫，以完成整體研究工作。

貳、研究方法與過程

有鑑於未來核二廠於大修或除役期間，於爐心燃料未淨空之條件下進行長時間之冷卻作業，考量其分析結果與後續除役、大修作業之規劃與時程安排息息相關，而需謹慎評估。因此本研究即針對核二廠反應器與上燃料池之流場範圍進行分析模式發展，並藉由分析結果所得之流場分佈提供建議，以確保電廠無論於大修或除役期間皆能同時兼具安全與運轉效益之兩大目標。本章節將詳述建模過程、程式碼開發與模擬條件設定等，逐步建立完整乙套核二廠反應器與上燃料池 CFD 分析模式。

一、核二廠反應器與上池資料蒐集與分析模型建立

為了模擬核二廠於大修或除役期間反應器與上池內部熱水流現象與混合情形，本研究擬建立一個三維反應器與上燃料池連通之 CFD 模型。首先根據核電廠工程圖、核二廠訓練教材等資料找出各組件位置與實際尺寸，利用合適之 CAD 軟體將其工程圖轉換為實體模型；在爐心上部空間則因機組已經開蓋並移除蒸汽產生與與乾燥器等設備，故呈現全空之狀況，並對燃料元件施以簡化作業，以流阻預估模式進行取代之，並評估組件建構複雜度進行適當的簡化與假設，以及忽略各結構間之加工間隙與結構本身所具有之熱容量(Heat capacity)。有鑑於本模式未來可能因為各式需求而出現不同考量，故若以傳統方式直接進行模型繪製，將致使此一模型未來之功能性減低。為此，本研究先將模型拆成降流區、壓力槽下部空間、爐心區、壓力槽上部空間與爐穴、連通管道與上燃料池等五個區域，建構出上述之各項元件後，使用 Interface 介面連通各個模型運算時的資料傳遞，進而建立一套可

以模擬核二廠反應器上池連通時之幾何模式。Interface 介面除了方便模型組合與網格生成外，更可加速未來模型修正變更與測試時之網格變更作業。以下將於各小節詳述本研究模型之建構過程與文獻來源，並於最後說明如何將各分區模型透過 Interface 介面進行模型連通。

(一) 降流區

根據核二廠台電訓練教材[10]所述，降流區由 10 組噴射泵(每組由 2 台噴射泵組成)、反應器壓力槽壁、爐心桶外壁、爐心側板支持架構成，上述之組件參考資料如圖 1-5 所示，因簡化模型之緣故，噴射泵內之衝擊彎管、浸水升流管撐臂、熱套管、噴射泵流量感測管、擴散管等複雜之細部結構，因對流場影響甚小，故省略或簡化成一平滑的幾何組件，而其餘圍繞於反應器 RPV 外側之管路，因不影響其內部流場，故本研究中僅就噴嘴結構之幾何形狀進行描繪。繪製完成之降流區 CFD 模型如圖 6，結構尺寸則詳列於表一。

(二) 壓力槽下部空間

誠如上一小節圖 5 所示，根據核二廠訓練教材[10]，壓力槽下部空間內由反應爐壓力槽下部空間弧壁、控制棒導管(圖 7)、側板支撐架、爐心儀導管、燃料座塊、爐心底板構成，爐心底板位置略高於噴射泵出口處。由於壓力槽下部空間資料不足，故此區域以均質化處理方式取代上述之忽略組件，並引用核一廠模型進行測試，確定使用多孔性流阻取代壓力槽下部空間對分析結果影響微小。未來若將下部空間資料蒐集齊全，本研究所使用之模型分區方法可快速將須修正區域之結構與網格替換，而不須更動其他區域之網格，使得進行模型精進、網

格靈敏度分析等等未來可能從事之研究工作更加方便，壓力槽下部空間 CFD 模型如圖 8，詳細結構尺寸則列於表二。

(三) 爐心區

根據台電工程圖與 ATRIUM-10 之燃料資訊[20]提供之資料可以得知，國聖電廠共有 624 束燃料元件，若詳細描繪各個燃料元件細節進行運算將對工作站造成巨大的時間與資源耗損，為了節省運算資源與時間，本研究擬依循既有且經多次驗證之燃料束多孔性材質均質化技術，將燃料元件內的燃料束、水棒、間隔板、底部繫板、頂部繫板等對流場影響有限的組合元件之複雜幾何簡化為一均質平滑構造，並設為多孔性材質區以將忽略組件可能產生之流阻加入 CFD 運算中，避免簡化模型造成結果可信度降低。燃料元件在爐心的位置排列則依據電廠實際爐心燃料排列方式(圖 10)，並省略爐心區其他核儀組件，爐心區之 CFD 模型如圖 11，結構尺寸則列於表三。

(四) 壓力槽上部空間與爐穴

經參考核二廠工程圖面(圖 12-13)，並假設考慮原本在池中及爐心內的用過燃料無法完全移出爐心，致使於機組除役初期呈現仍可能有部分用過核子燃料放置於反應爐內之狀況，此時反應爐已呈開蓋狀態，蒸汽產生器與乾燥器等組件已經移除，而使得反應爐在與上池連通後被視為用過燃料池之一部分，因此本部分模型組件僅壓力槽壁及爐穴外壁(圖 14)，其他對流場影響甚小之結構與管道孔洞則忽略，詳細尺寸詳列於表四。

(五) 連通管道與上燃料池

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，上燃料池假設經改建後放入 3 組燃料格架，每組可裝載 221 束燃料，共計 663 根，並利用 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，其餘幾何尺寸則維持原始台電工程圖之設計[23]。由圖 15 可知上池與爐穴經由一連通管道使其水流相通，因此本部分模型包含連通管道、上燃料池壁與燃料元件。本案例中上燃料池尚未放入燃料，但考量未來可能應用於上池暫態分析，因此將燃料元件之結構在本研究中一併納入模型設計。依照上列敘述所完成之上燃料池 CFD 模型如圖 16 所示，結構尺寸詳列於表五。

(六) Interface 介面連通

為了節省計算資源與時間，並且方便大量使用結構式網格，因此使用 FLUENT 程式中的 Interface 功能，係以將模型本應連通的部分切割，使其變成兩個可獨立生成不同網格的模型，在 FLUENT 設置中將兩個模型的切割面設定為對應的 Interface 組合，進行運算時 FLUENT 便會自動傳遞組合間的各项系統參數，使模擬結果與未切割之模型幾乎無異。組合完成之模型與 Interface 介面連通組別對應位置圖如 17，組合名稱則詳列於表六。

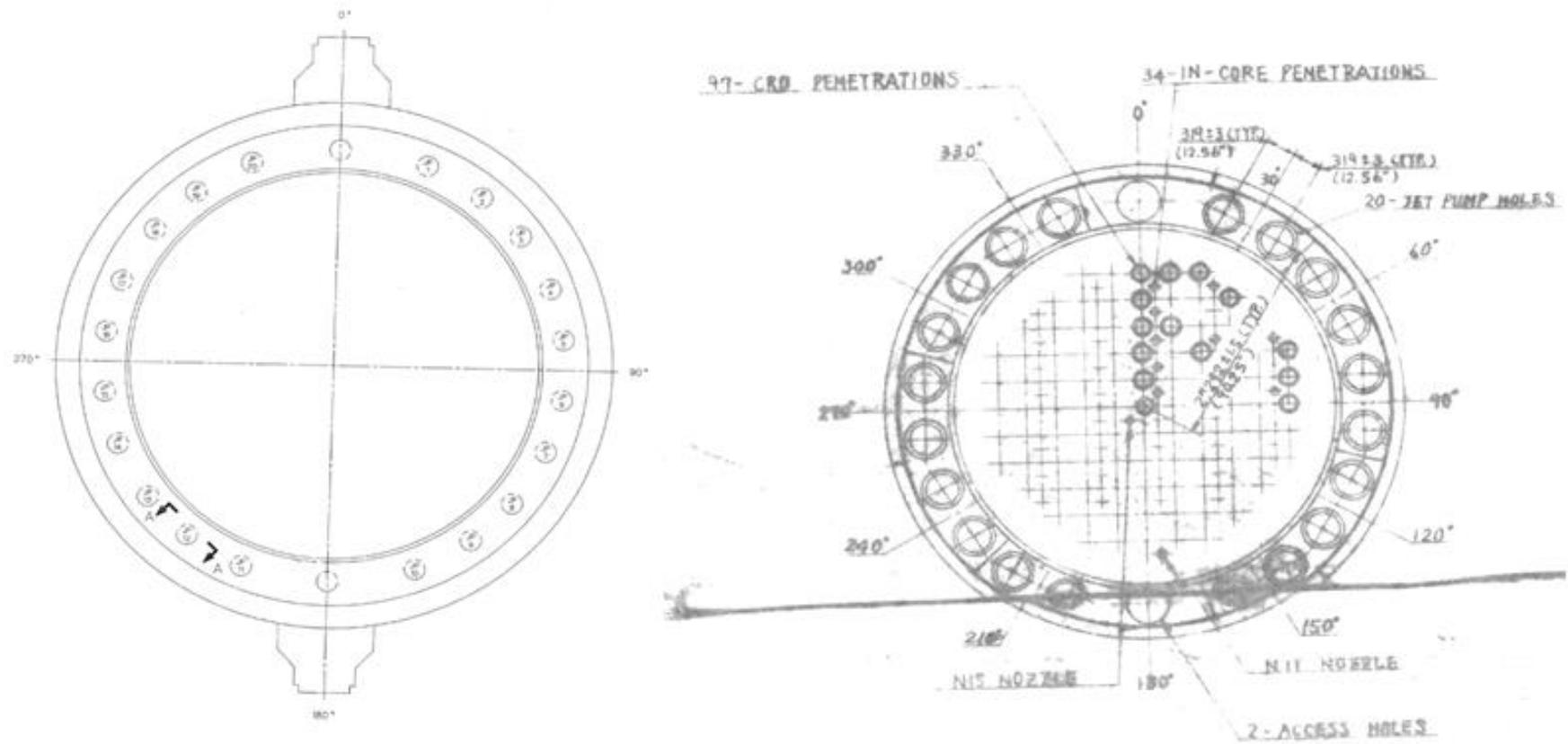


圖 3 噴射泵位置對應圖[13][14]

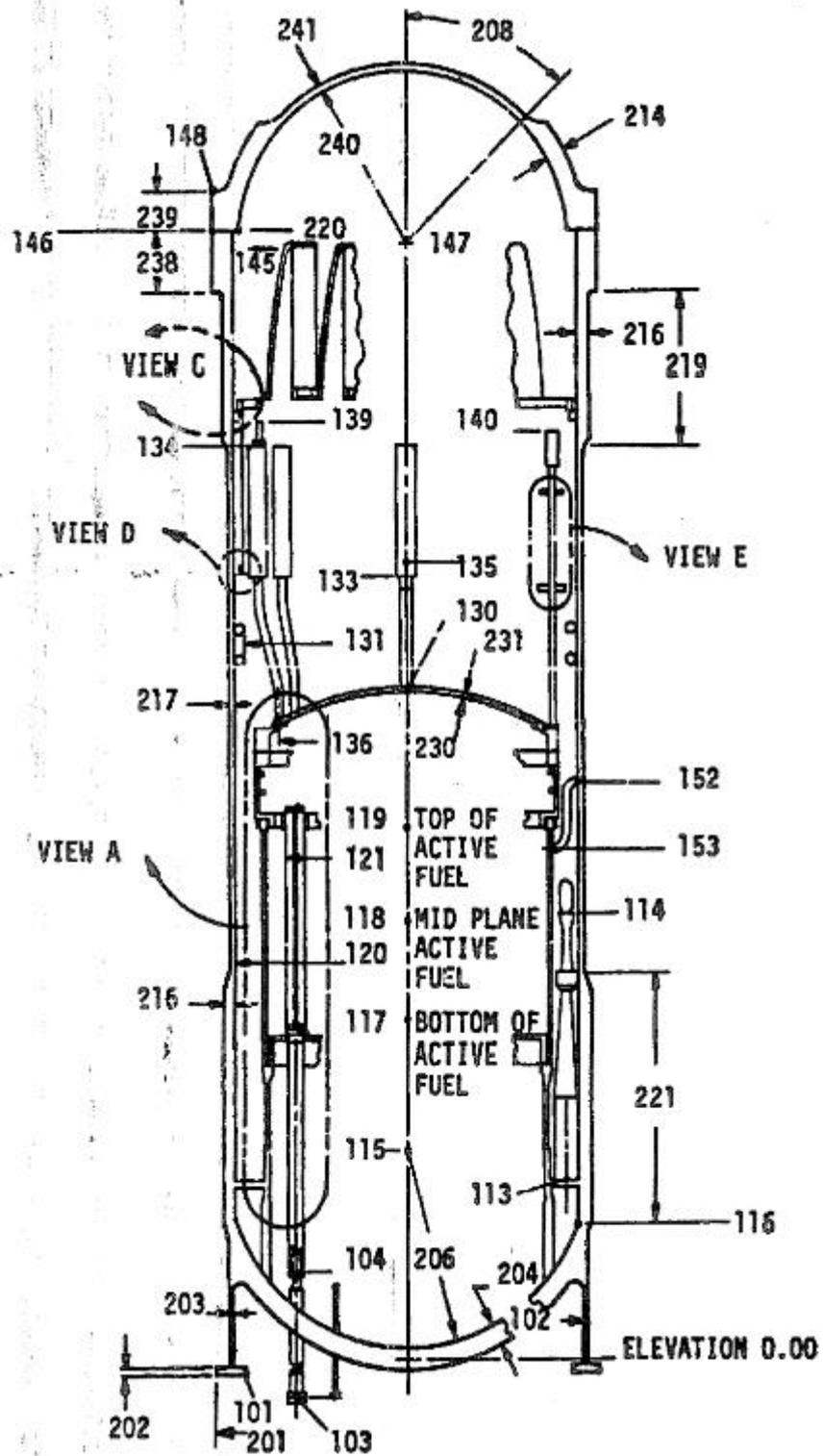


圖 4 反應爐壓力槽組件尺寸代號圖[11]

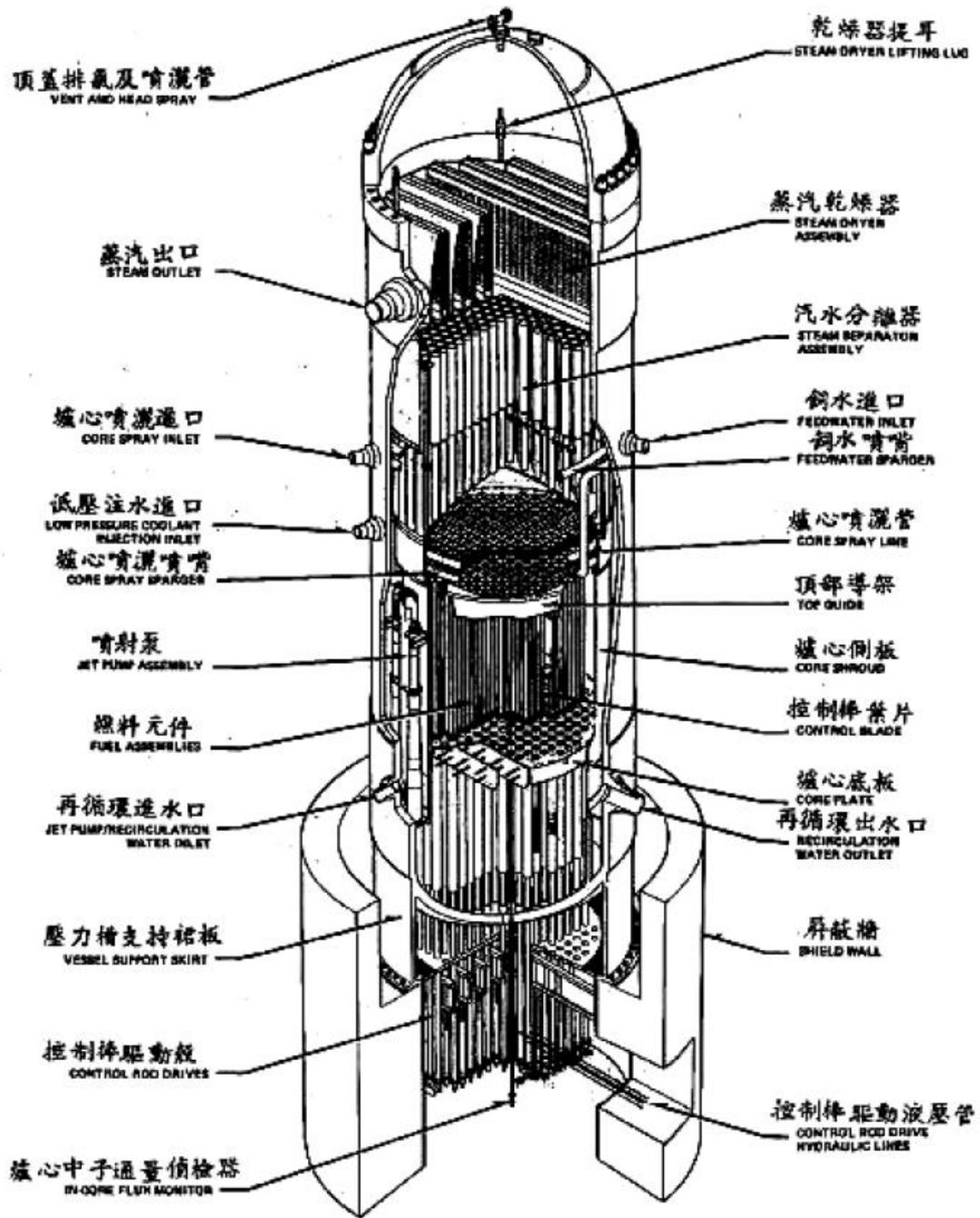


圖 5 反應爐壓力槽組件位置圖[10]

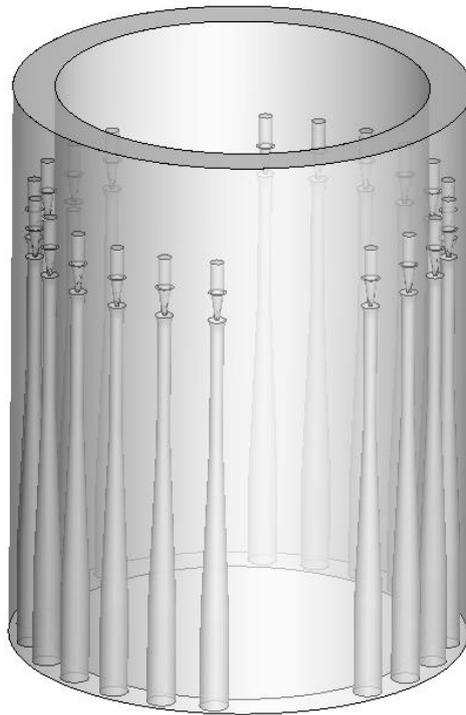


圖 6 核二廠分區模型之降流區 CFD 模型

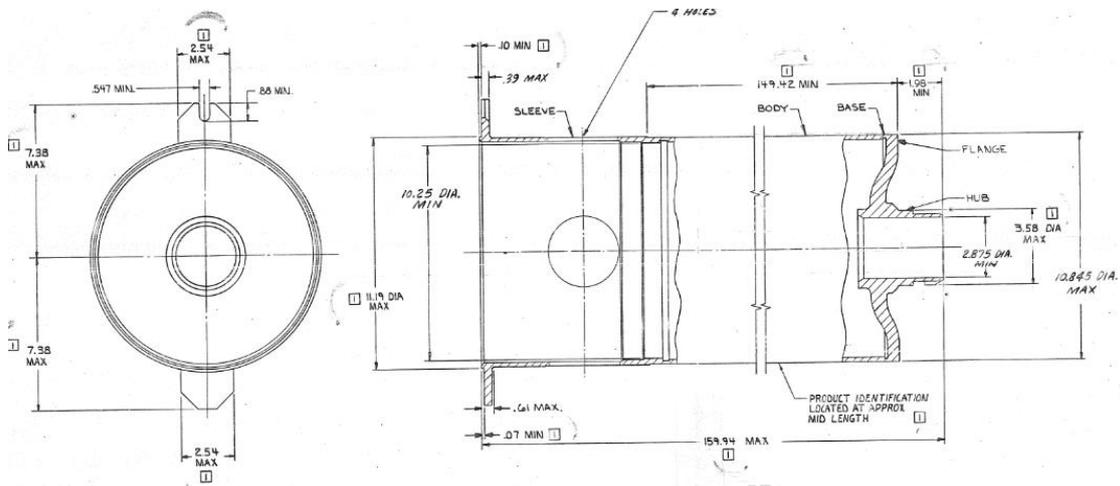


圖 7 控制棒導管工程圖[19]

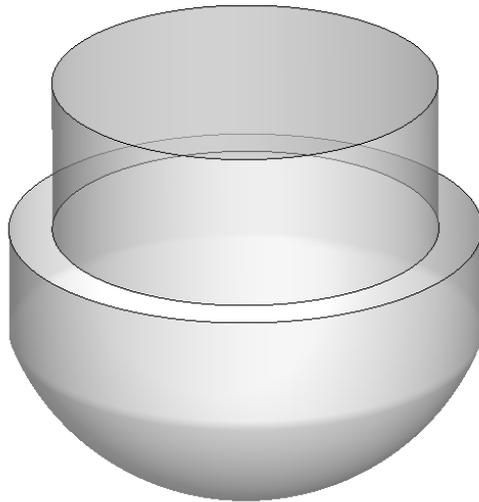
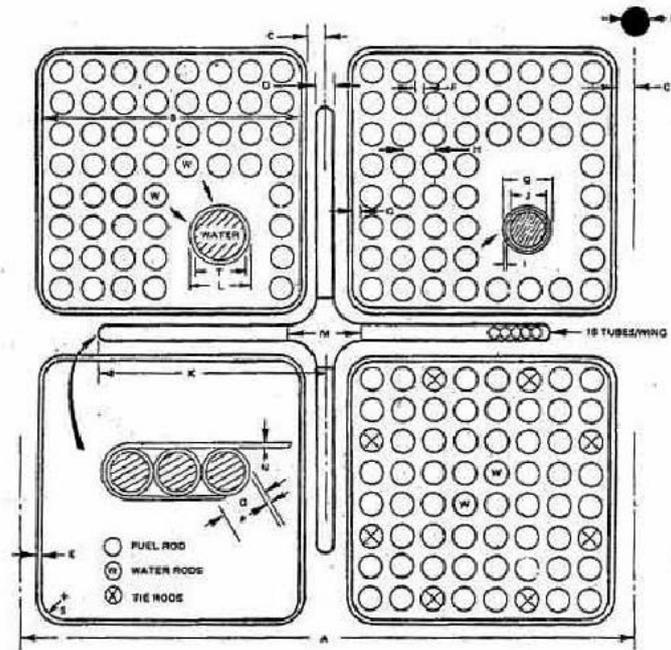


圖 8 核二廠分區模型之壓力槽下部空間 CFD 模型



DIM. IDENT	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
DIM. INCHES	12.0	5.215	0.2725	0.328	0.120	0.153	0.140	0.636	0.032	0.410
DIM. CMS	30.48	13.250	0.69	0.83	0.30	0.39	0.36	1.62	0.08	1.04
DIM. IDENT	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
DIM. INCHES	4.902	0.591	1.550	0.045	0.220	0.027	0.483	1.000	0.380	0.531
DIM. CMS	12.443	1.51	3.94	0.11	0.56	0.07	1.23	2.54	0.97	1.35

圖 9 ATRIUM-10 燃料元件尺寸圖[20]

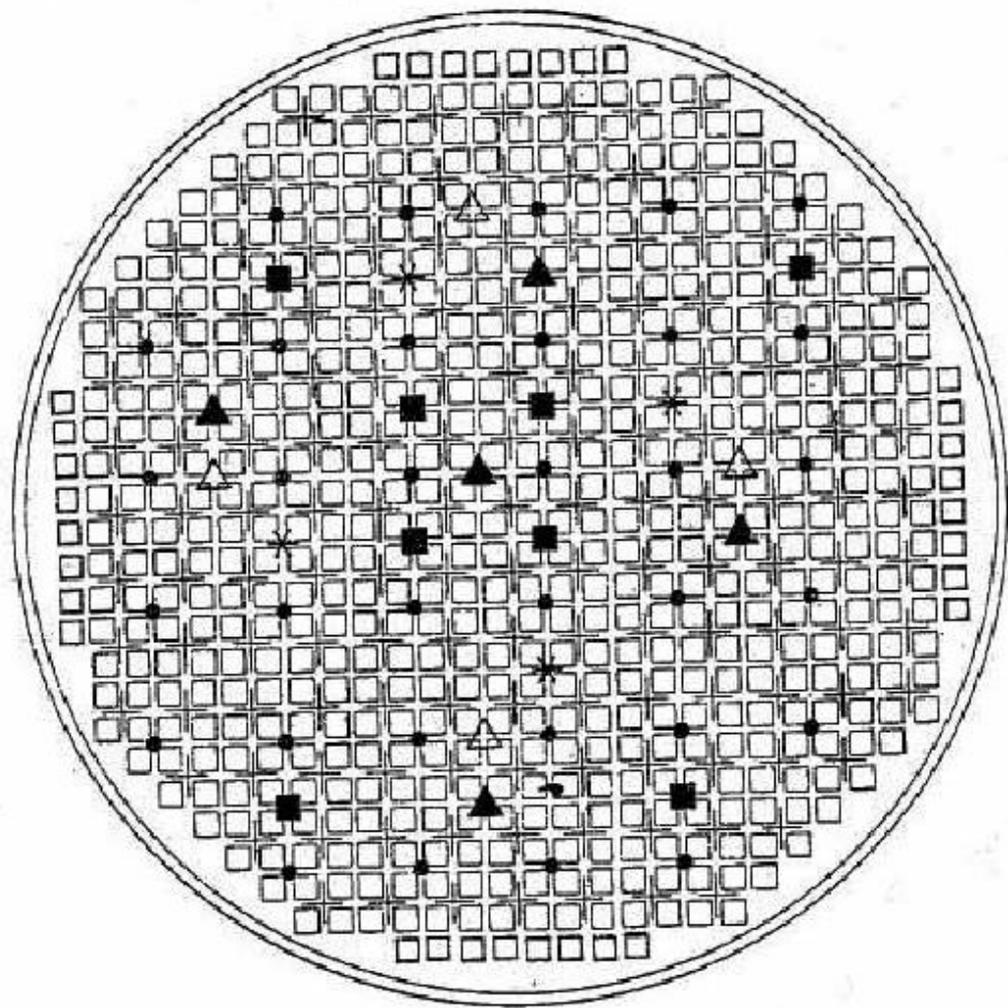


圖 10 核二廠爐心配置[20]

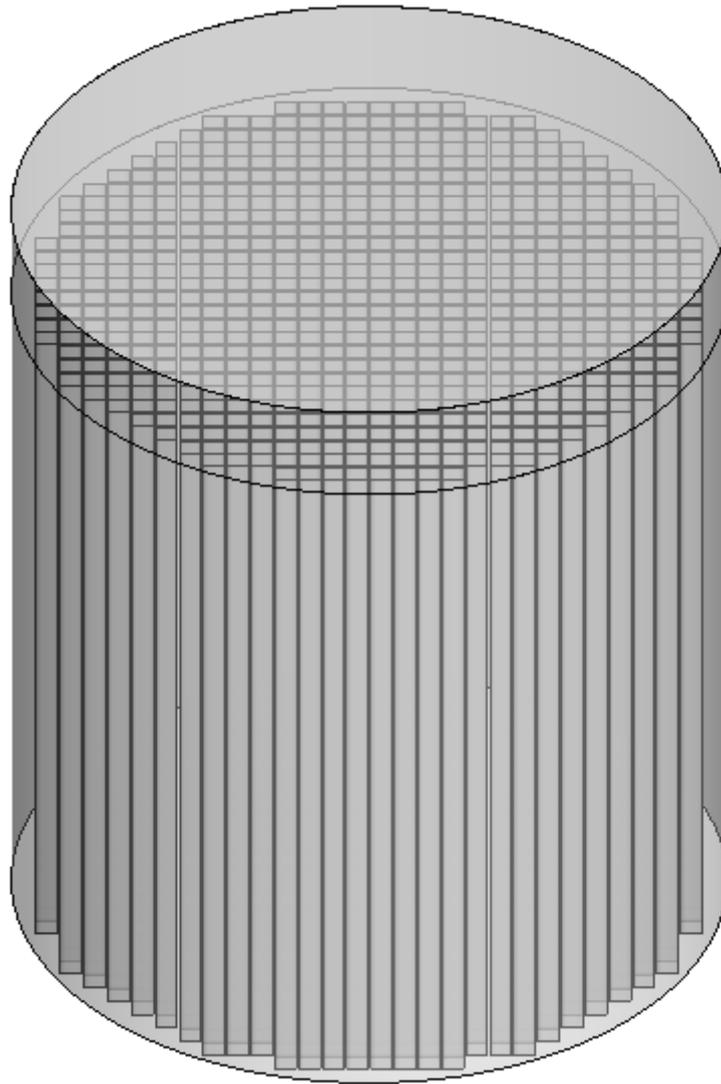


圖 11 爐心區 CFD 模型

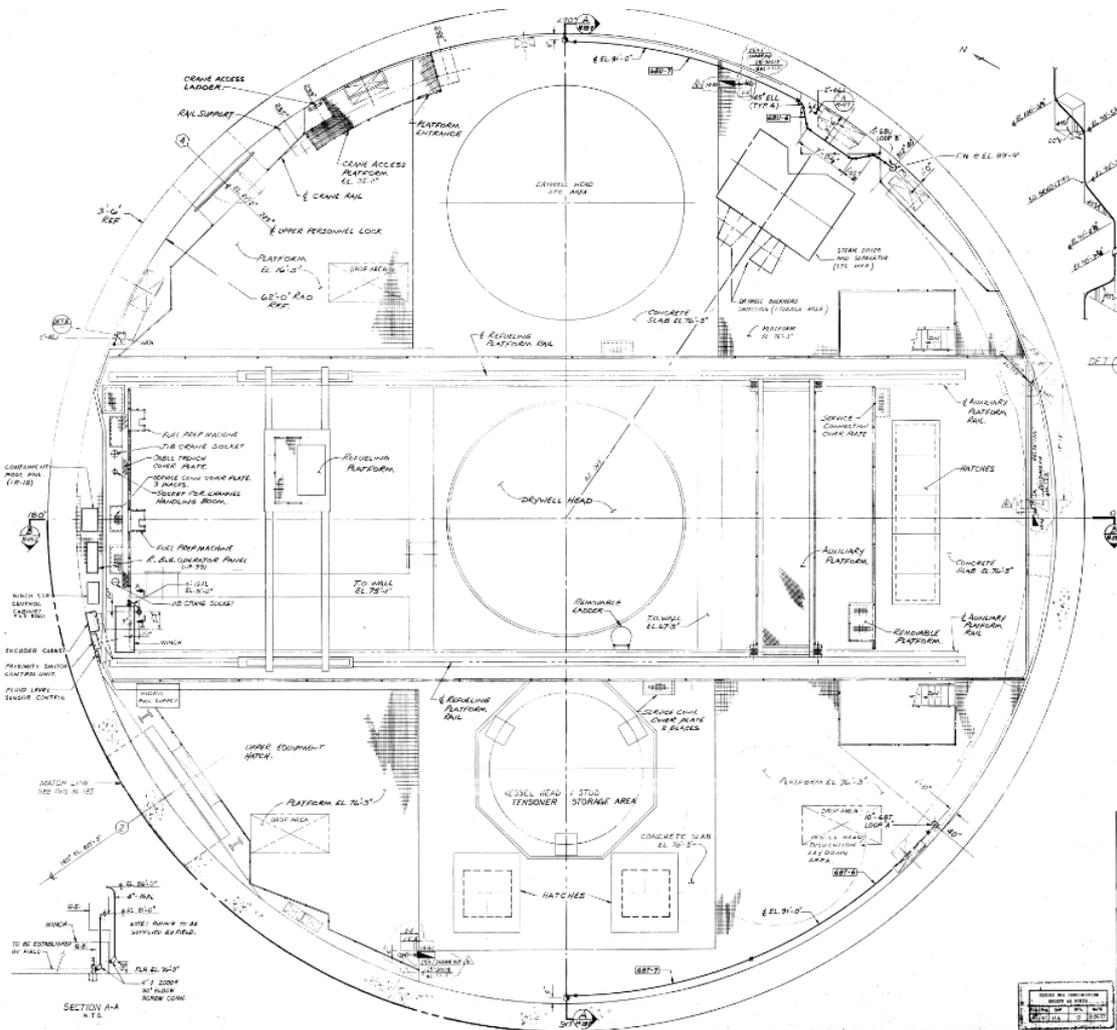


圖 12 爐穴與上燃料池上視工程圖[22]

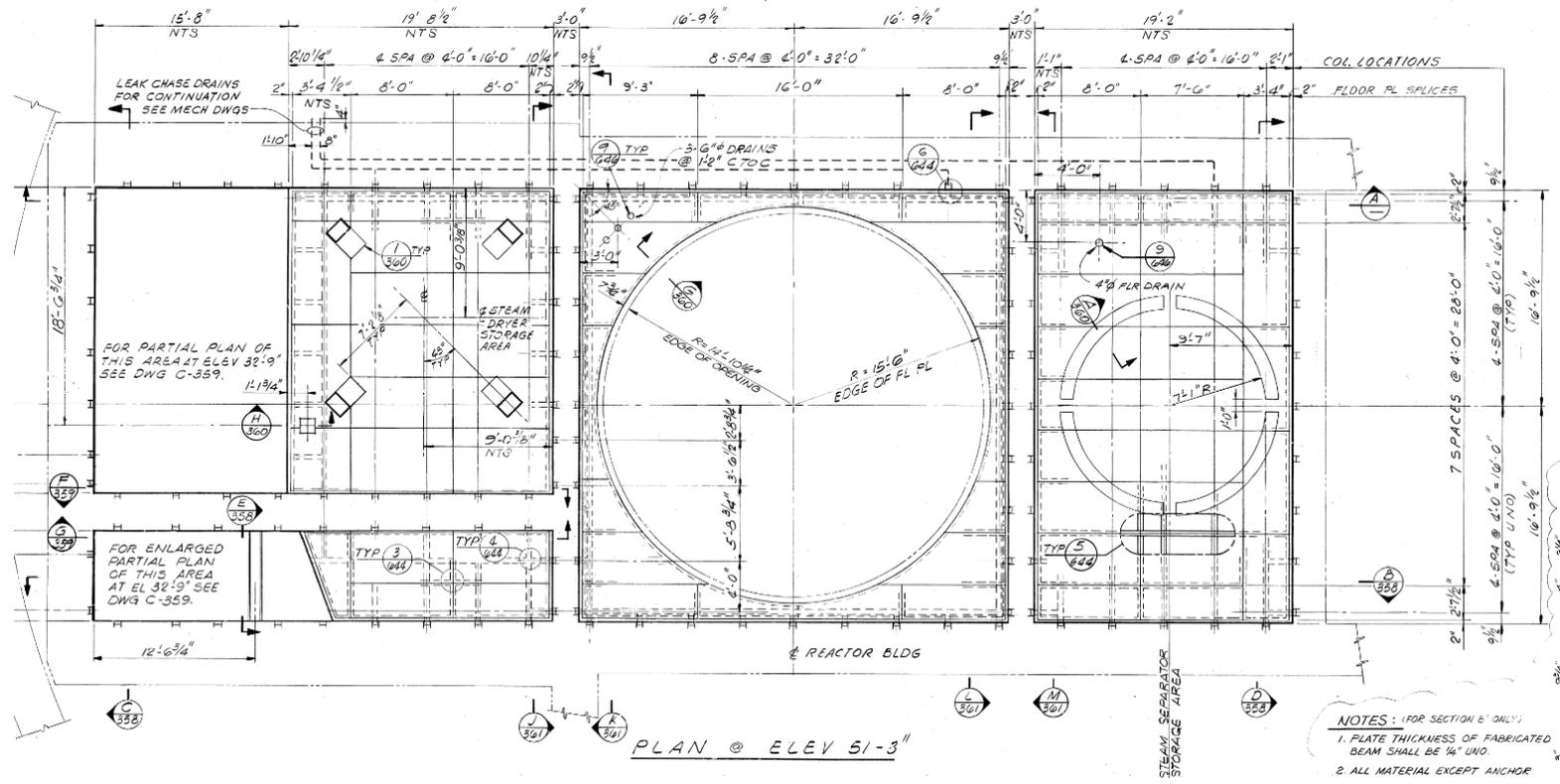


圖 13 爐穴工程圖[23]

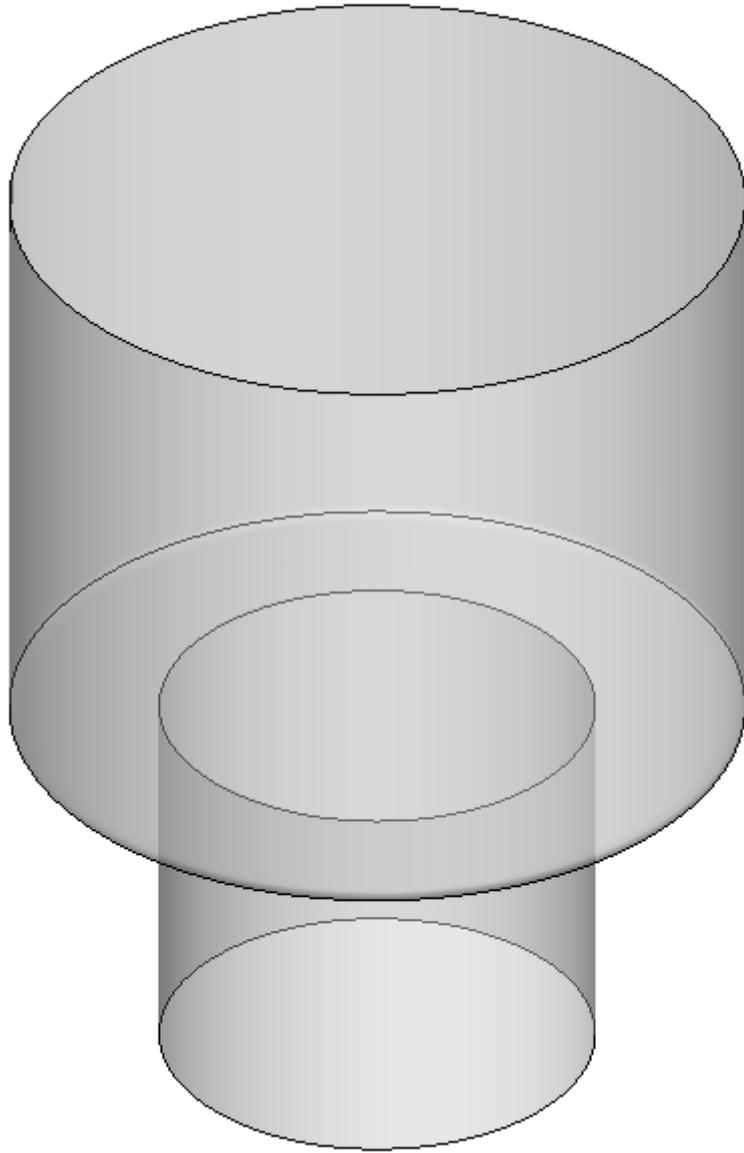


圖 14 壓力槽上部空間與爐穴 CFD 模型

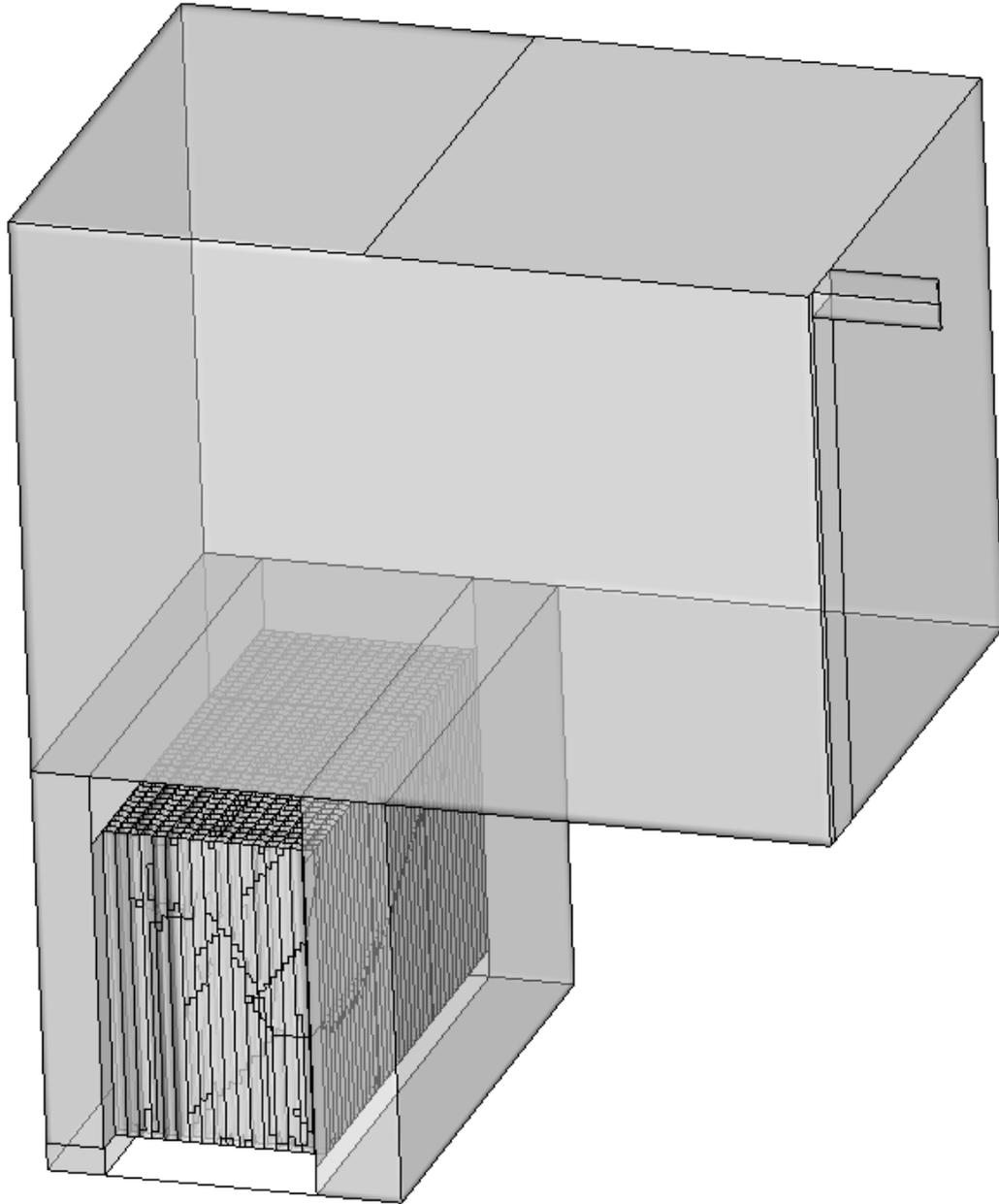


圖 16 連通管道與上燃料池之 CFD 模型

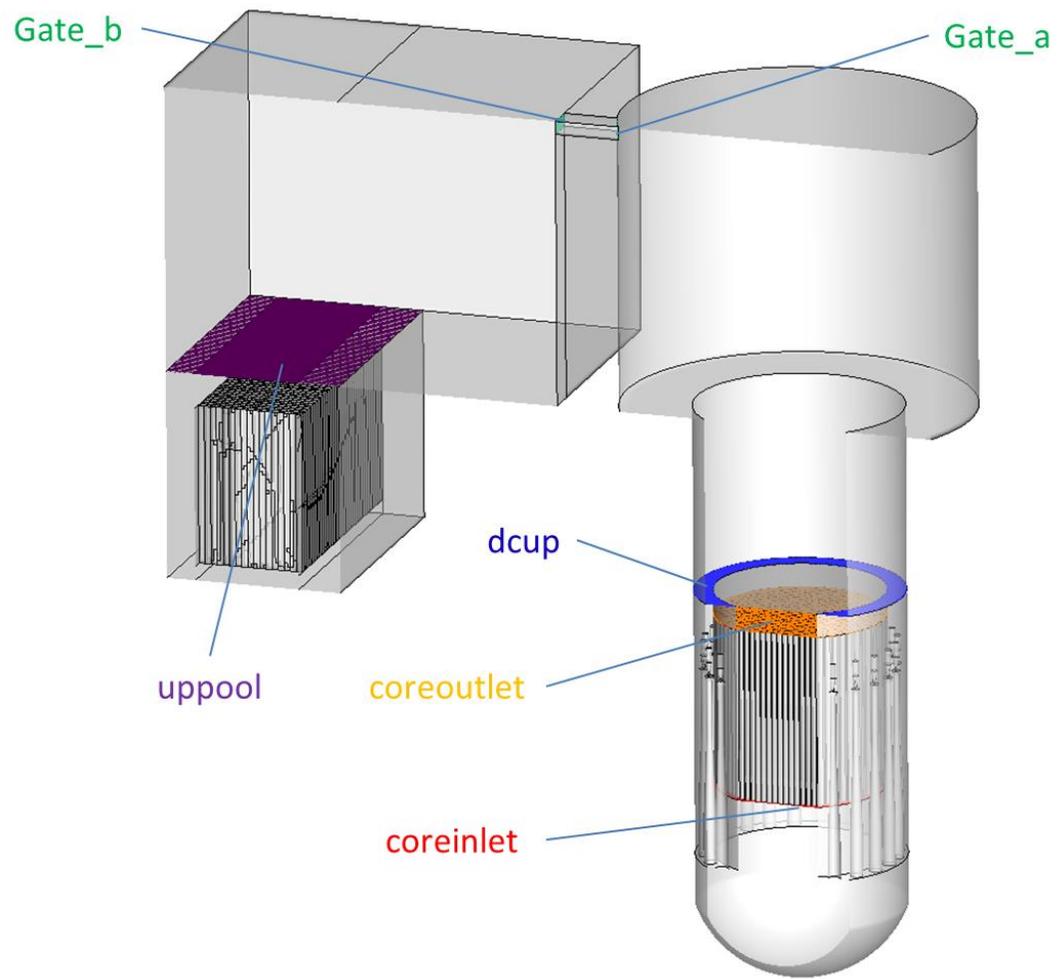


圖 17 Interface 連通介面對應位置圖

表 1、核二廠 CFD 分區模型之降流區結構尺寸

名稱	尺寸	參考資料
噴射泵起始標高	129.25”	[11][12]
噴射泵位置角度(1 組 2 支)	30°、60°、90°、120°、150°、210°、 240°、270°、300°、330°	[13][14]
噴射泵間距	25.12”	[15][16]
噴射泵取水進口部直徑	8.9”	[16]
噴射泵取水進口部長度	4”	[16]
噴射泵喉部直徑	7.32”	[16]
噴射泵喉部長度	60.34”	[16]
噴射泵擴散管長度	141.28”	[16]
噴射泵擴散管出口直徑	14.8”	[16]
爐心桶外壁直徑	90”	[11][12]
反應爐壓力槽壁直徑	220.5”	[11][12]
降流區頂部標高	416.503”	[11][12]

表 2、核二廠 CFD 分區模型之壓力槽下部空間結構尺寸

名稱	尺寸	參考資料
爐心底板高度	173.965”	[12][17]
壓力槽下部空間弧壁半徑	118”	[11][18]
弧壁頂端標高	68.65”	[11][12]
控制棒導管間距	12.02”	[12]
控制棒導管管徑	10.25”	[19]

表 3、核二廠 CFD 分區模型之爐心區結構尺寸

名稱	尺寸	參考資料
燃料元件間距	0.545”	[20]
燃料元件寬度	5.455”	[20]
爐心桶直徑	90”	[21]
燃料元件長度	182.59144”	[12][17]
燃料元件數量	624 束	[20]

表 4、核二廠 CFD 分區模型之壓力槽上部空間與爐穴結構尺寸

名稱	尺寸	參考資料
爐穴高度	186”	[22]
爐穴起始標高	718.5”	[22]
爐穴外壁半徑	186”	[22][23]
壓力槽上部空間槽壁高度	306.247”	[22]

表 5、核二廠 CFD 分區模型之連通管道與上燃料池結構尺寸

名稱	尺寸	參考資料
連通管道長度	36”	[22]
連通管道寬度	36”	[23]
連通管道深度	19”	[22]
上燃料池長度	483.5”	[22]
上燃料池寬度	329”	[22]
上燃料池放置格架處底部標高	457”	[22]
上燃料池未置格架處底部標高	717”	[22]
上燃料池放置格架處長度	218”	[22]

表 6、邊界連接 Interface 介面對應名稱

連結邊界名稱	Interface 組別名稱	FLUENT 邊界名稱
爐心進口與壓力槽下部空間	coreinlet	INTER_Corinlet1, 2
降流區與壓力槽上部空間	dcup	INTER_DCup1, 2
爐心出口與壓力槽上部空間	coreoutlet	INTER_Coreoutlet1, 2, 3
爐穴與連接通道	Gate_a	INTER_GateA1, A2
上燃料池與連接通道	Gate_b	INTER_GateB1, B2
上燃料池放置燃料區連接	uppool	INTER_UPPOOL1, 2

二、模型網格配置與生成

為能確保分析模式於後續計算中不致因為網格分佈之故，而造成不必要的計算誤差，本研究進行以下之網格配置與生成作業。其中，整體之網格生成方式是盡可能採用六面體或三角柱沿軸線堆疊之結構化網格進行生成，除了降流區內因有造成流道幾何形狀明顯變化之噴射泵結構以及壓力槽下部空間弧形底壁造成流場改變，必須使用非結構化四面體網格配置，但模型整體網格扭曲率控制在 0.6 以下，極少數網格最大扭曲率在 0.8 左右，仍在不影響模擬計算的範圍內。噴射泵部分採用 cooper 之堆疊式網格，以確保軸向網格無扭曲區狀況。在燃料元件模型則全數採用 4x4 網格配置，並考慮燃料周邊流場為重要分析區域，因此燃料元件所在之爐心區與上燃料池區皆在燃料元件周邊之流場網格進行加密。本模型總網格數為 558 萬，模型各區網格配置則如圖 18 所示，藉由上述條件所生成之網格靈敏度測試將於後續章節中逐一進行說明。

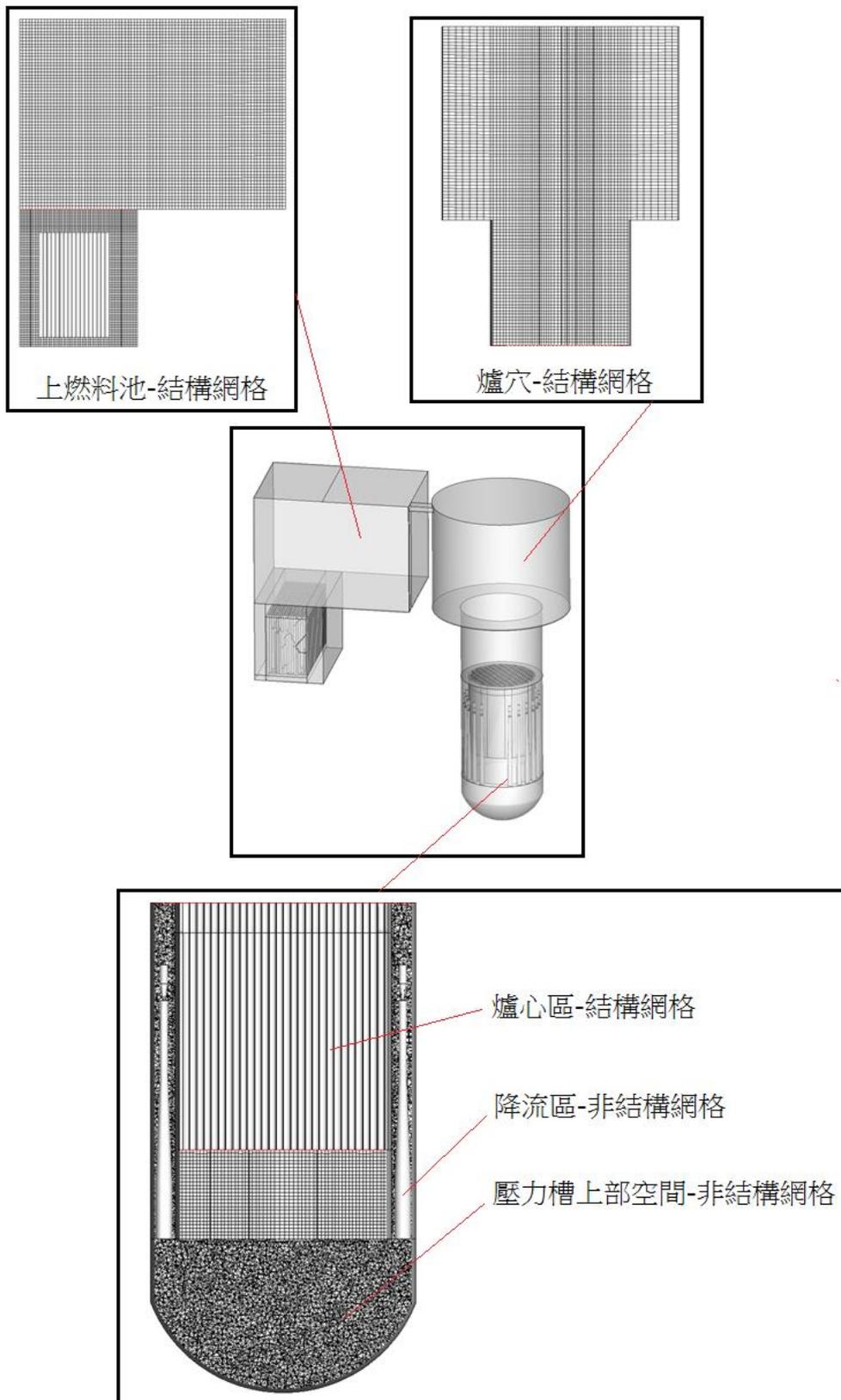


圖 18 核二廠反應器與上燃料池 CFD 模型網格

三、網格靈敏度測試

針對 CFD 進行分析時，為了避免因網格所造成的不準度，本分析採用 ASME V&V 20-2009 [24]報告中所建議之誤差計算方式來進行不準度評估，此方法之估算流程依續為：

計算代表網格大小(Representative Grid size, h)

對於非結構性網格而言： $h = [(\sum_{i=1}^N \Delta V_i)/N]^{1/3}$ ；

其中 ΔV_i 為網格i之體積， N 為網格數目。

計算格點加密因子 (Grid Refinement Factor, r)；

$$r_{i+1,i} = \frac{h_{i+1}}{h_i} > 1.3,$$

其中， $r_{i+1,i}$ 為標準網格(較粗)對較細網格的加密因子。

計算準確度等級 (Order of Accuracy, p)

由前面得到之格點加密因子與各格點之變數可算出準確度等級

$$p = \left[\frac{1}{\ln(r_{21})} \right] \left[\ln \left| \frac{\varphi_3 - \varphi_2}{\varphi_2 - \varphi_1} \right| + q(p) \right],$$

其中， $q(p)$ 為超越函數，可定義為： $q(p) = \ln \left(\frac{r_{21}^p - s}{r_{32}^p - s} \right)$ ，

而 s 定義為： $1 \cdot \text{sign} \left(\frac{\varphi_3 - \varphi_2}{\varphi_2 - \varphi_1} \right)$ ；

其中， sign 則為邏輯函數，係用以判斷實數正負值，其定義為：

$$\text{sign} = \begin{cases} -1: x < 0, \\ 0: x = 0, \\ 1: x > 0, \end{cases}$$

而 φ_i 則是第i組格點分佈下之計算結果。

計算格點收斂指標 (Grid Convergence Index, GCI)

$$GCI_{fine}^{21} = \frac{Fs}{r_{21}^p - 1} \left| \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{\varphi_1} \right|$$

其中 Fs 係數，是依據 ASME V&V 20-2009 之建議，以修正利用不同格點分佈進行評估之修正係數，當採用三格點進行誤差評估時，其值為 1.25；而採用二格點分佈時其值為 2。

1. 不準度 (Uncertainty, Unum)；

$$u_{mesh} = \frac{GCI}{k} = \frac{U_{mesh}}{k},$$

其中 k 為分佈係數因子，與誤差分佈有關；在 95% 信心水準且為常態分佈之條件下，其 k 值為 1.15。針對以上 ASME 校驗報告所述之方法，本評估選用降流區內系統壓力差作為分析目標，其結果壓力差值與網格數目如表 7 所示。

經上述計算後，網格不準度 (u_{mesh}) 可量化為：
 $1.158958/1.15=1.0078\%$ ，為確保分析結果之嚴謹性，本研究擬將此分析模式之標準網格進行求解。

表 7、不同網格之模擬結果

網格質量	網格數量	壓力差 (pascal)
粗網格 (Coarse)	532,486	5281.291
標準網格 (Standard)	1,865,648	5119.7549
細網格 (Fine)	3,284,214	5104.5708

四、冷卻系統與系統流阻之邊界條件程式碼開發

除了上述幾何分析模式的建構外，本研究於前小節中曾提及部分管路、幾何結構與輔助系統因涉及過於繁瑣且無需詳盡分析之管路，而於本分析模式發展中採用 UDF 程式加以簡化；惟在進程式碼之開發前仍需就此一簡化工作進行定義，以作為後續 UDF 建立之依據。

(一) 冷卻系統邊界條件程式碼開發

由於反應爐安全停機後爐心仍有大量衰變熱產生，因此在停機狀態下仍需持續將衰變熱移出爐心。停機大修狀態下爐心有兩套冷卻系統持續移除爐心衰變熱，分別是餘熱移除系統(Residual Heat Removal, RHR)及燃料池冷卻與淨化系統(The Fuel Pool Cooling and Purification System, FPCPS)。

RHR 系統包含三串支系統，其中 A 和 B 串支系統設有熱交換器，由緊急或外部循環水系統供給冷卻水，可執行包括低壓爐心注水模式、試驗運轉模式、停機冷卻模式、圍阻體噴灑模式、蒸氣冷凝模式與抑壓池冷卻模式；C 串支系統則因無熱交換器，僅能執行低壓爐心注水模式及試驗運轉模式。FPCPS 系統則利用池水冷卻上池與下池，其作用包括移除用過燃料衰變熱、維持池水適當水溫、保持用過燃料池正常水位、維持池水水質，減少池中腐蝕及分裂產物濃度等功用。執

行停機冷卻模式下，RHR 系統從再循環管路取水，經 RHR 泵打到 RHR 熱交換器，最後經由噴射泵將冷卻水打回反應器。而 FPCPS 系統的池水則沿著池邊溢流口流至洩水槽，透過燃料池泵將池水送至熱交換器和過濾式除礦器，最後從上燃料池底部之擴散管流回。

根據上列敘述，使用 UDF 計算 RHR 系統出口處溫度後，將 RHR 進口面設定成抓取 RHR 出口處水溫並計算與熱交換器作用後之水溫 (考慮 27% 熱交換器效率)，最後由噴射泵入口將冷卻水注入反應器中。而 FPCPS 系統效率則設為 84.27%，並利用 UDF 寫入方程式計算冷卻系統可帶走之餘熱溫度，藉此達到模擬 RHR 系統與 FPCPS 系統在反應器內運作方式。其出口邊界公式可寫為：

$$P_{out} = P_{1atm} ;$$

$$\dot{m}_{outlet} = \vec{V}_{,udf} \cdot \vec{A}_{,udf} ;$$

$$T_{out} = T_{udf,inlet} \text{ 。}$$

其中 \dot{m}_{outlet} 為出口流量，係利用 udf 針對出口之法向速度與面積內積而得。而冷卻水經由熱交換器冷卻後再流回系統之設定，公式則可寫為：

$$\dot{m}_{inlet} = \dot{m}_{outlet} ;$$

$$T_{out} = (\dot{m}_{inlet} \times c_p \times T_{out} - Q_{HX}) / \dot{m}_{inlet} \text{ 。}$$

其中， \dot{m}_{inlet} 係依據出口邊界計算所得之流量進行設計，而其溫度 (T_{out}) 則依據熱交換器之效率與對應之移熱能力 (Q_{HX}) 來計算其出口溫度。燃料池冷卻系統亦使用相同的 UDF 模式，在燃料池注水進口與出口處進行設定，附錄 A 為詳細程式碼。

(二) 系統流阻程式碼開發

有鑑於本分析程式將燃料元件幾何簡化成一長方體模型，為了避免因忽略之幾何結構流阻造成模擬結果失真，使用 FLUENT 設定中之多孔性介質模式設定，將燃料元件材質設為一均質化的多孔性材料，並參考 105 年度 CFD 在核能特殊組件之分析技術發展[25]中計算所得之 ATRIUM-10 燃料流阻係數，進行 UDF 的編寫與運行。為此本研究採用 FLUENT 中所包含的多孔性介質模式進行流阻係數之建立，此一模式是藉由在動量方程式額外增加一額外力源(\vec{F})來進行數值處理，以描述流體流經結構時受摩擦或形阻之影響；其方程式如下所示，藉由此式之應用，即可計算不同流速下之壓力降。

$$F = \left(\frac{\mu V}{K} + C_2 \frac{\rho V^2}{2} \right)$$

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

C_2 = 單位長度之形狀阻力係數。

$\frac{1}{K}$ 為單位長度之黏滯阻力係數；

μ 為流體黏滯係數；

\vec{V} 為流體速度；

ρ 為流體密度；

而經轉換後所得之流阻係數則如**錯誤！找不到參照來源**。8 所示，

完整程式碼則列於附錄 B。

表 8、ATRIUM-10 燃料軸向流阻係數[25]

	孔隙率 α	黏滯阻力係數 (viscous losses term, $1/m^2$)	慣性阻力係數C2 (inertial loss term, $1/m$)
ATRIUM-10	0.59	3.3633E6	8.79903

五、數值分析設定與邊界條件

(一) 數值分析設定

本計畫將沿用 105 年計畫案中所選用的 FLUENT 分析工具與數值分析設定進行模擬，該分析工具將以有限體積法(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 9 所示。

表9、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
Convergent residues	Energy : 10^{-5} Others : 10^{-3}

(二) 邊界條件設定

表 10 為核二廠提供之大修狀態下 RHR 系統與 FPCPS 系統之進出口邊界條件，反應器在停機冷卻模式下，RHR 系統由噴射泵注入冷卻水，而 FPCPS 系統的冷卻水則由上燃料池底部擴散管流入，在本案例中兩個系統設定皆從上燃料池溢流口將冷卻水排至熱交換器。在本案例中，所有計算域外圍壁面皆設為絕熱，這將使得計算結果略微保守。FLUENT 將利用下表分別進行穩態邊界條件之設計與求解，UDF 之內容已於上一小節介紹並詳列於附錄 A 至 B。

表10、模擬核二廠停機冷卻模式下之設定狀態

邊界條件	質量流率(kg/s)
反應器 RHR 系統	
噴射泵進口	113.3579
RHR 出口(熱交換器進口)	113.3579
上燃料池 FPCPS 系統	
冷卻水進口	75.57
FPCPS 出口(熱交換器進口)	75.57
分析引用之冷卻水物理性質	數值
密度	998.2 (kg/m ³)
定壓比熱容	4.182 (kj/kgK)
黏度	0.0001003 (kg/ms)
熱傳導率	0.6 (W/mK)

叁、模擬結果

圖 19 為核二廠反應器與上燃料池連結之整體速度分布之 XZ 方向截面圖，圖面顯示整體速度場符合預期之流場走向。首先 RHR 系統在噴射泵入口處注入冷卻水，並抽吸入口處噴嘴外圍的流體進入噴射泵，此時因噴嘴出口形成高速使擴散室的喉部吸入室造成真空，從而使被抽吸流體不斷進入並與冷卻水混合，然後通過擴散室將混合後的流體注入反應器下部空間，圖 20 則更詳細地呈現噴射泵入口處抽吸效應與內部混合狀況，顯示本模型之噴射泵功能符合實際情況。進入反應器下部空間之流體沿著碗型底部注入而改變流向，形成混合渦流在空間內持續混合流體並造成流速下降，在靠近爐心底板區流速約莫在 0.08m/s 左右，圖 21 顯示在壓力槽下部空間內有一明顯渦流產生，上視圖(圖 22)則詳細地呈現注入流體改變流向而產生渦流之現象。在爐心區則因受到燃料元件幾何與流阻影響，多數流體從燃料外圍通過爐心，部分流體則進入燃料元件間通道且越靠近爐心中央處速度越快，係因在壓力槽下部空間之冷卻水流向改變，流體從 20 支噴射泵射出後沿著碗型底部往中央匯集，進入爐心區時中央處流量較大所致，圖 23 為爐心區整體流場四分之一視圖，而從局部視圖(圖 24)可清楚看到爐心區中央底部流場呈現一明顯速度梯度，而越靠近外圍區之燃料元件間通道流速亦有升高趨勢，則是因沒有燃料元件區之流體流速

較高，帶動周圍二次流進而影響外圍區通道流體流速，圖 25 則可發現因燃料元件流阻造成流速明顯低於非燃料元件區。圖 26 解釋離開爐心區出口之工作流體進入壓力槽上部空間的流場狀態，由於移除汽水分離器與蒸汽乾燥器後流體有極大空間可進行混合，在此區域也可發現流速驟降之現象，在爐穴邊緣區流體甚至出現停滯的現象，從爐穴往上燃料池通道之流體則因流道限縮而增加流速(圖 27)。上燃料池整體流場可由圖 28 完整呈現，從通道注入之流體進入上燃料池後開始擴散並撞擊壁面，冷卻水流沿著壁面往用過燃料格架下方移動，並因流向改變與幾何結構之影響，離開燃料格架之流體速度已漸趨緩，持續在燃料格架上方空間進行混合，圖 29 則進一步顯示流體注入上燃料池之流線分布。而在上燃料池內部連接通道位置正下方處，由於未在冷卻水流動路徑上，造成該處流體幾乎停滯的狀態。整體流場分區最高流速與最低流速列於表 11。

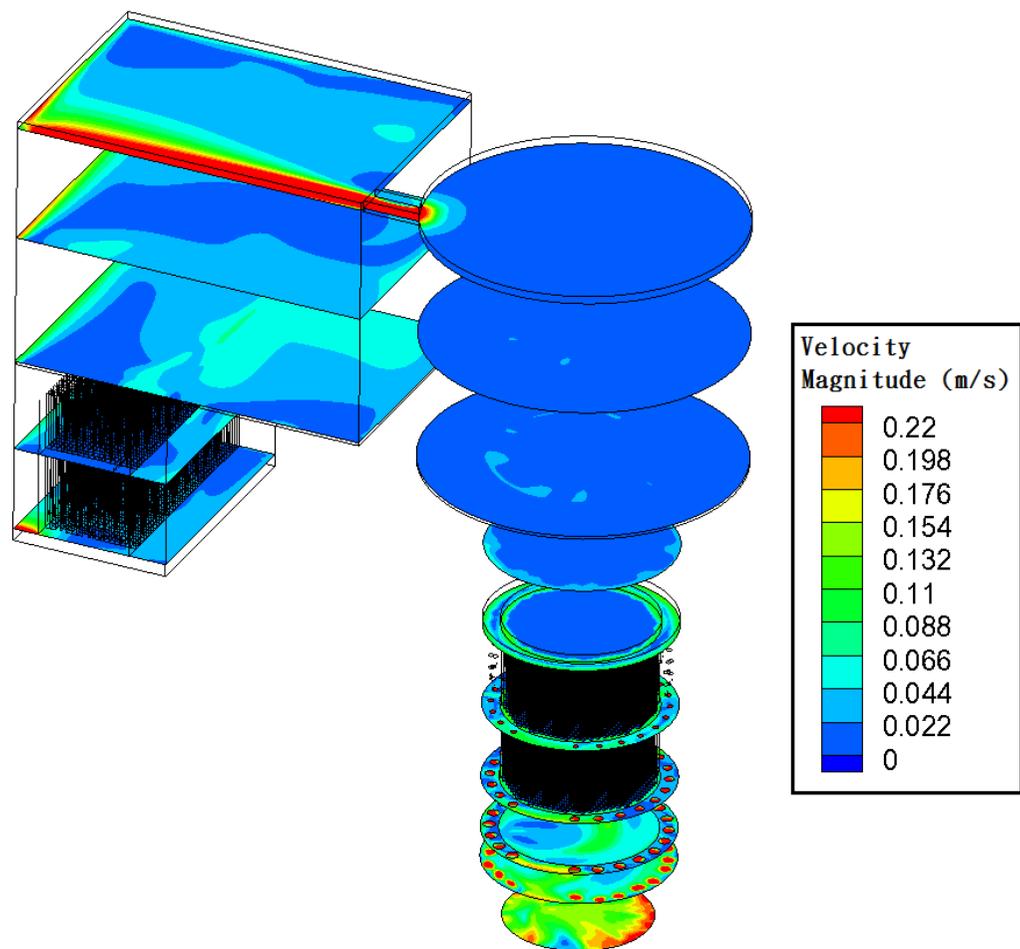


圖 19 核二廠反應器與上燃料池整體速度場

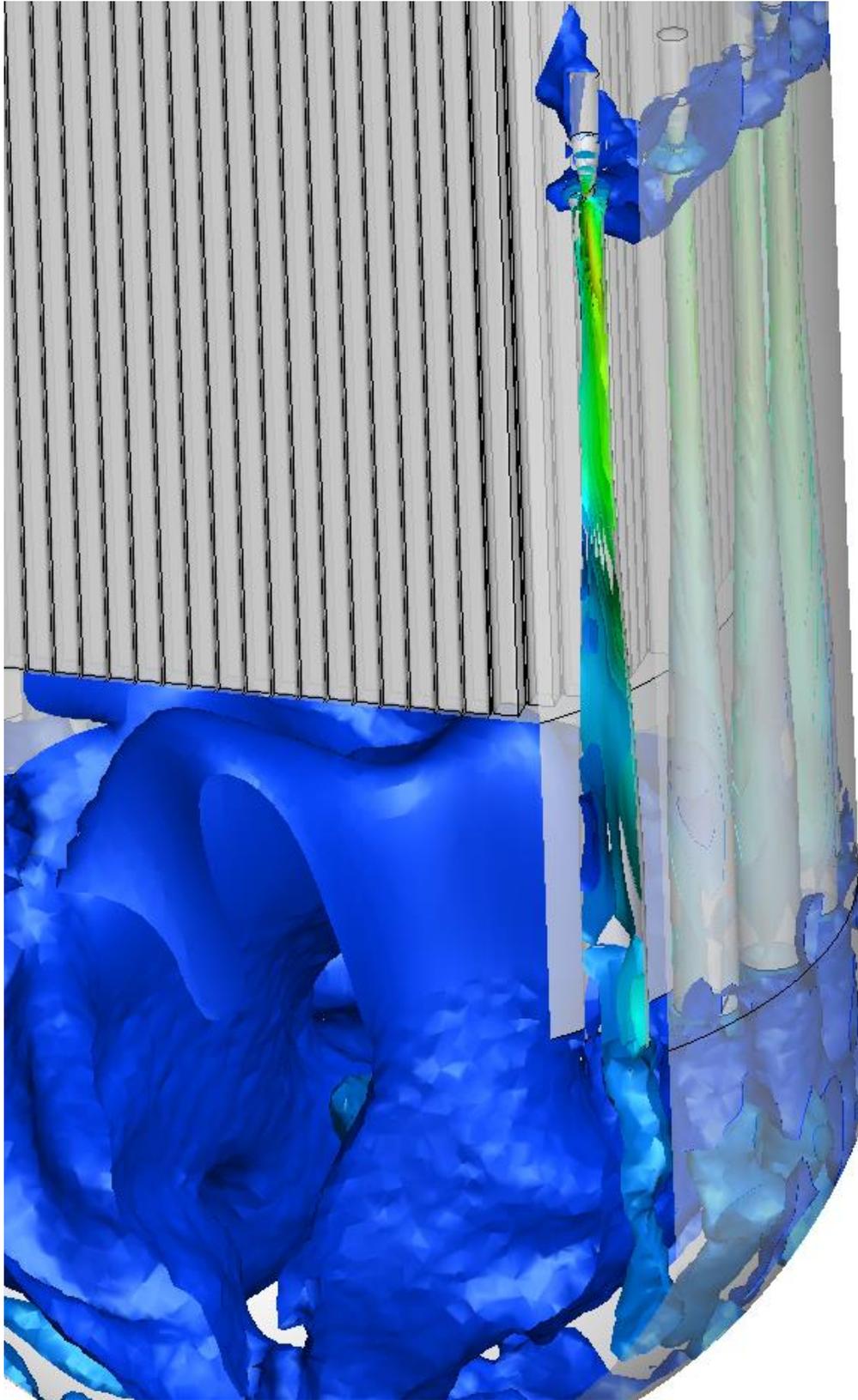


圖 20 噴射泵內部流場圖

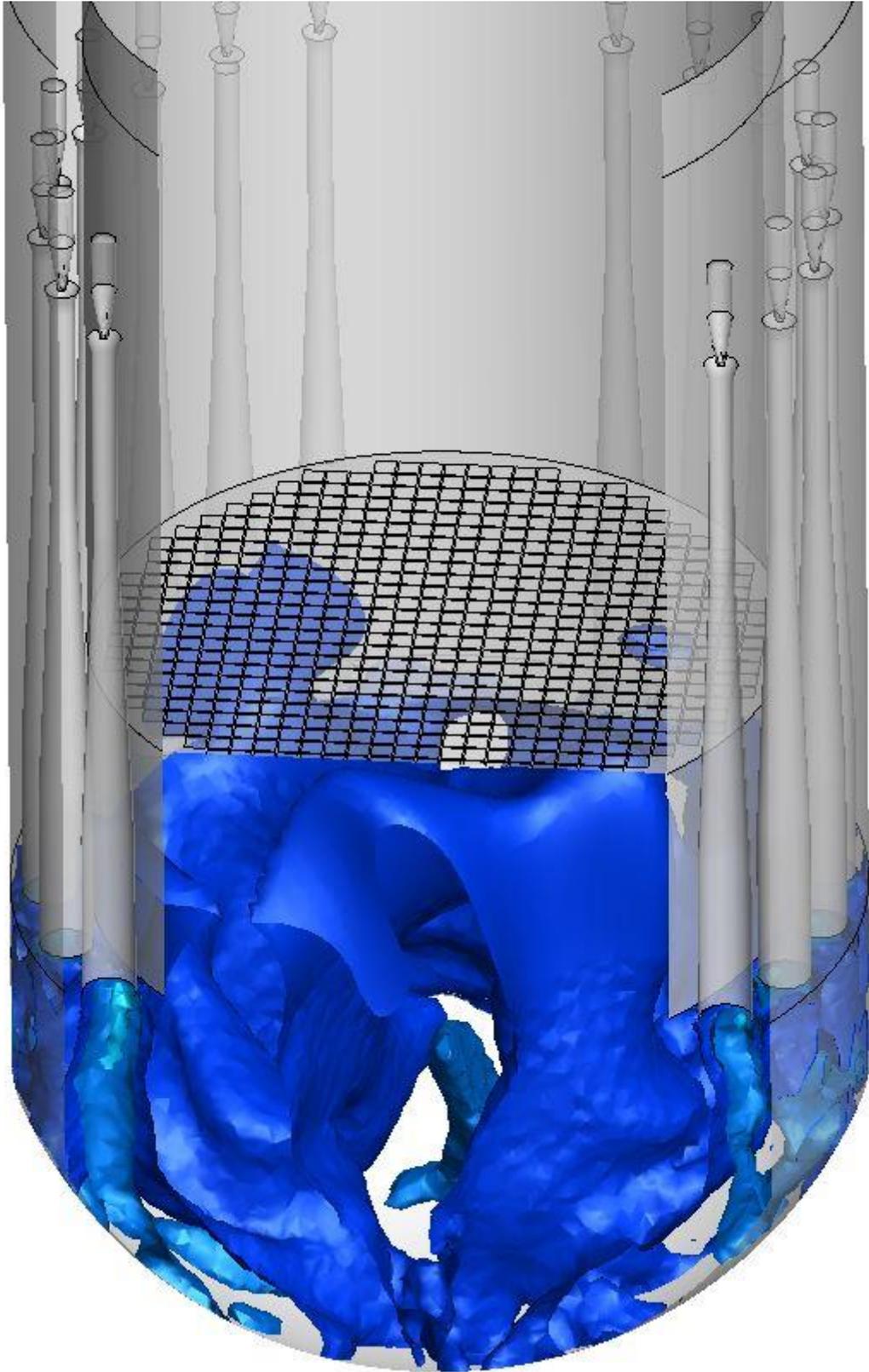


圖 21 壓力槽下部空間流場圖

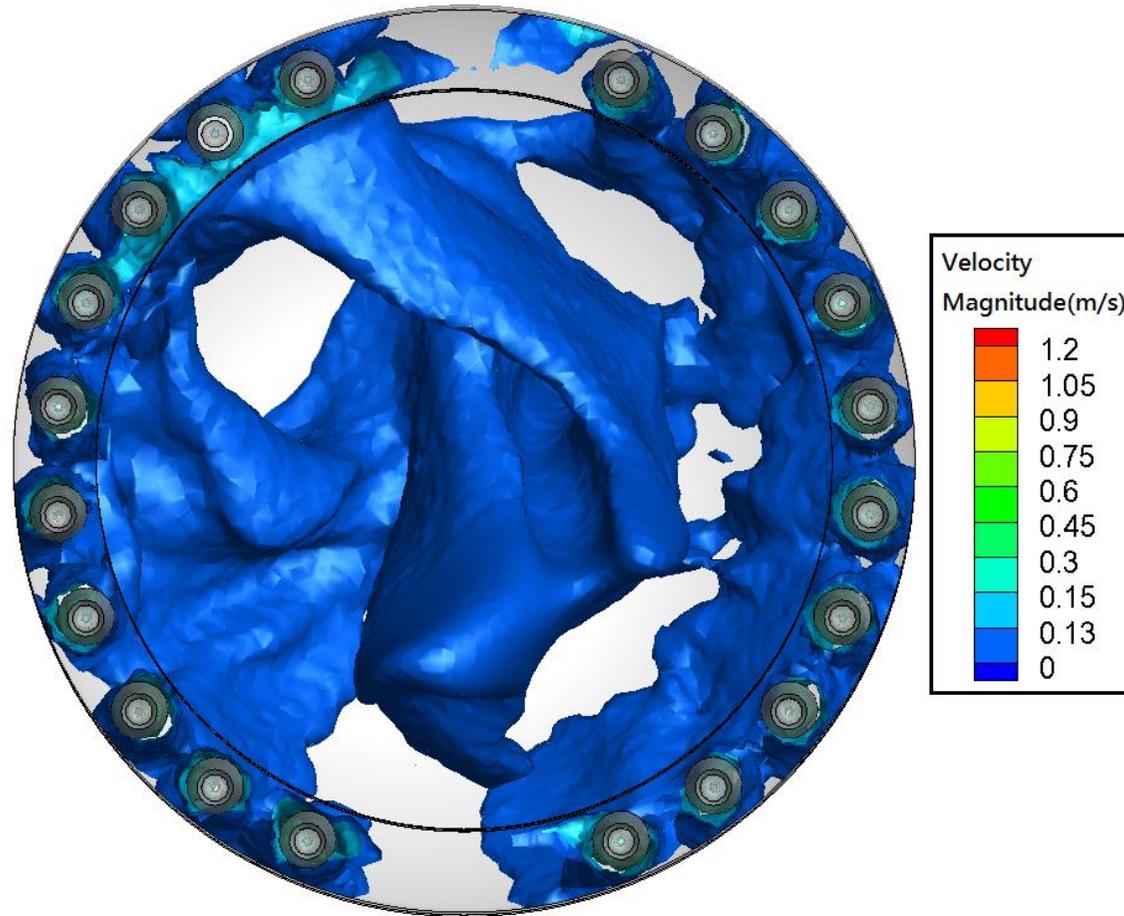


圖 22 壓力槽下部空間流場上視圖

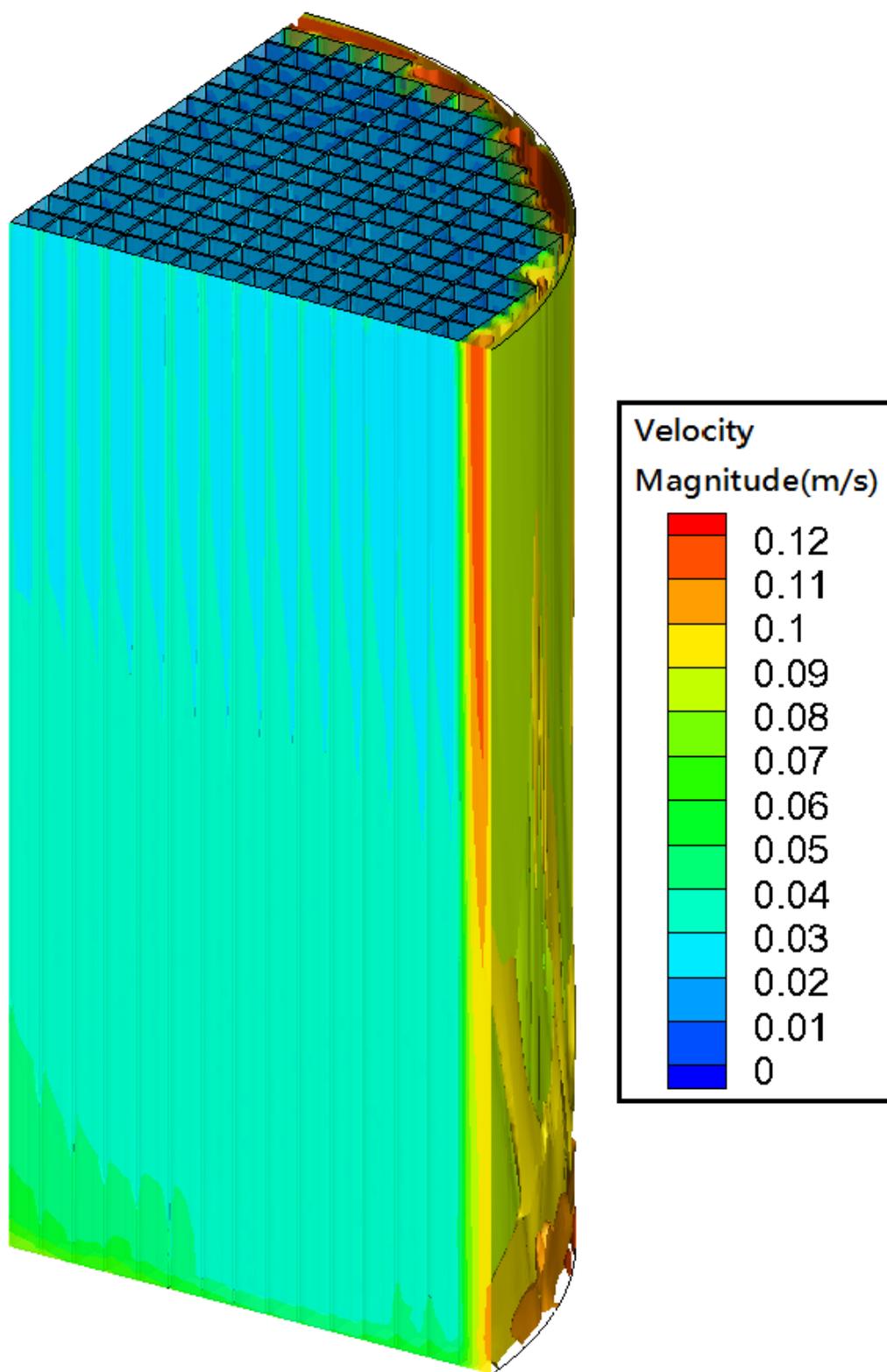


圖 23 爐心區流場

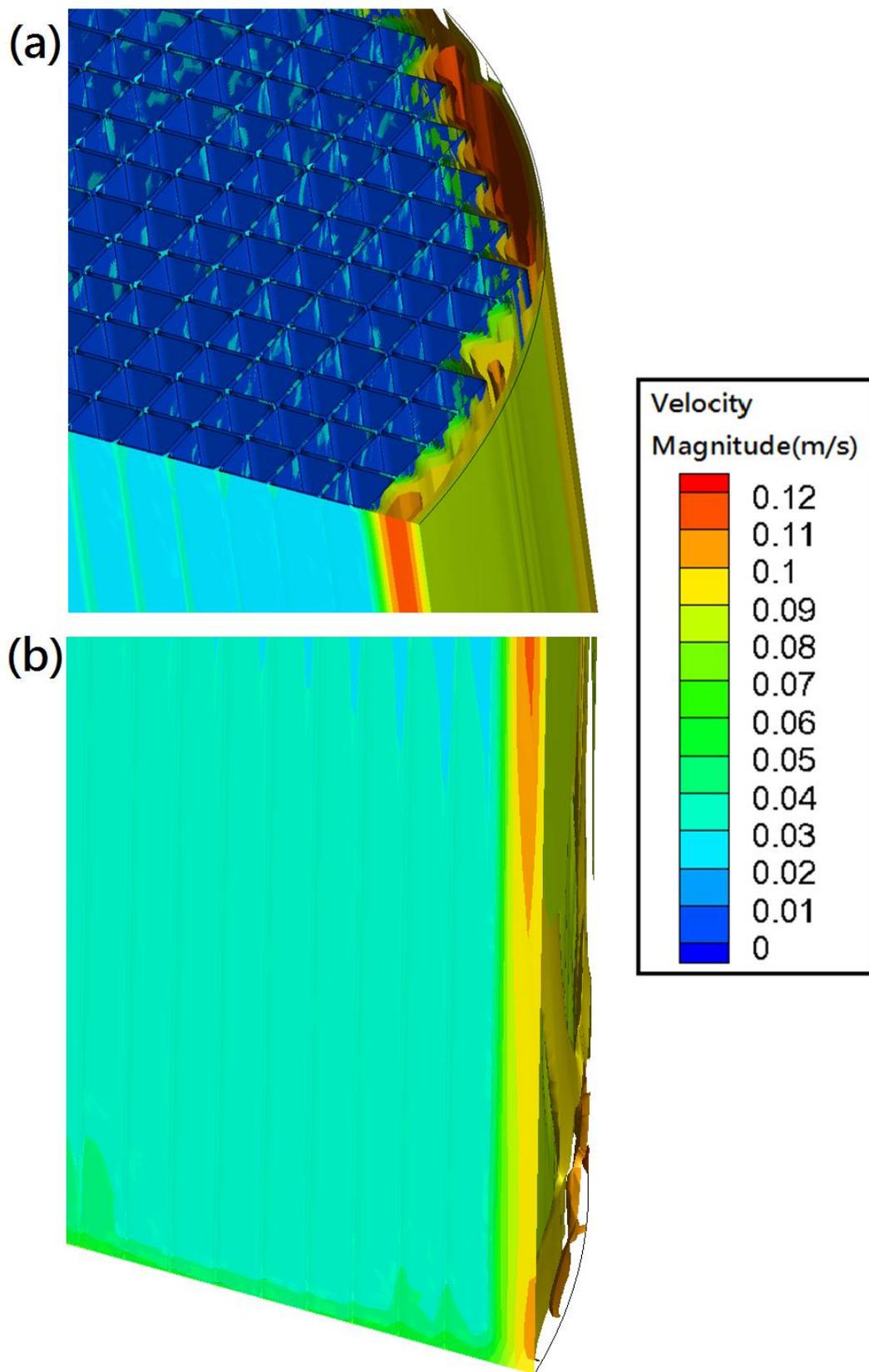


圖 24 爐心區局部流場圖 (a)爐心出口 (b)爐心進口

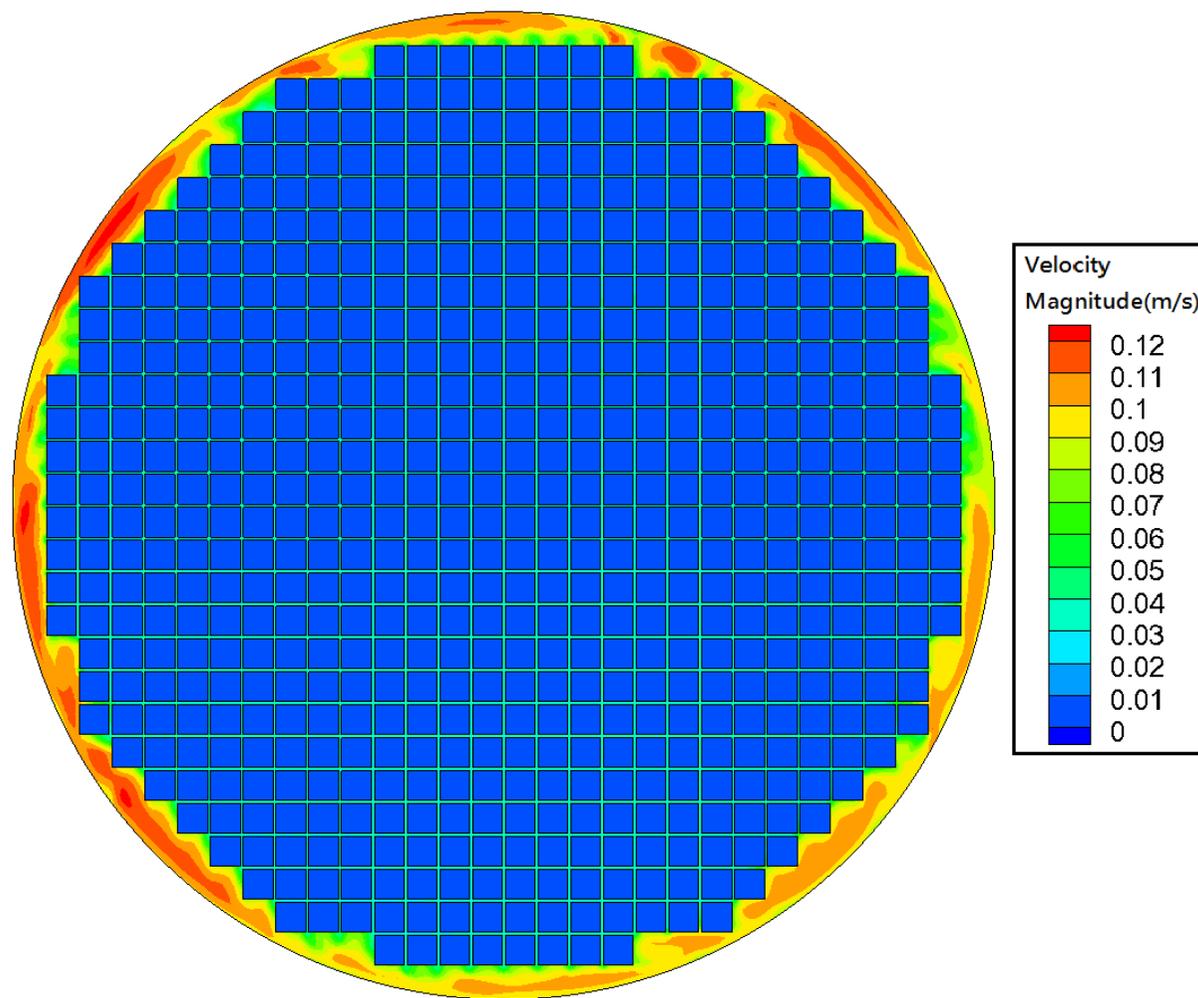


圖 25 爐心區流場上視圖

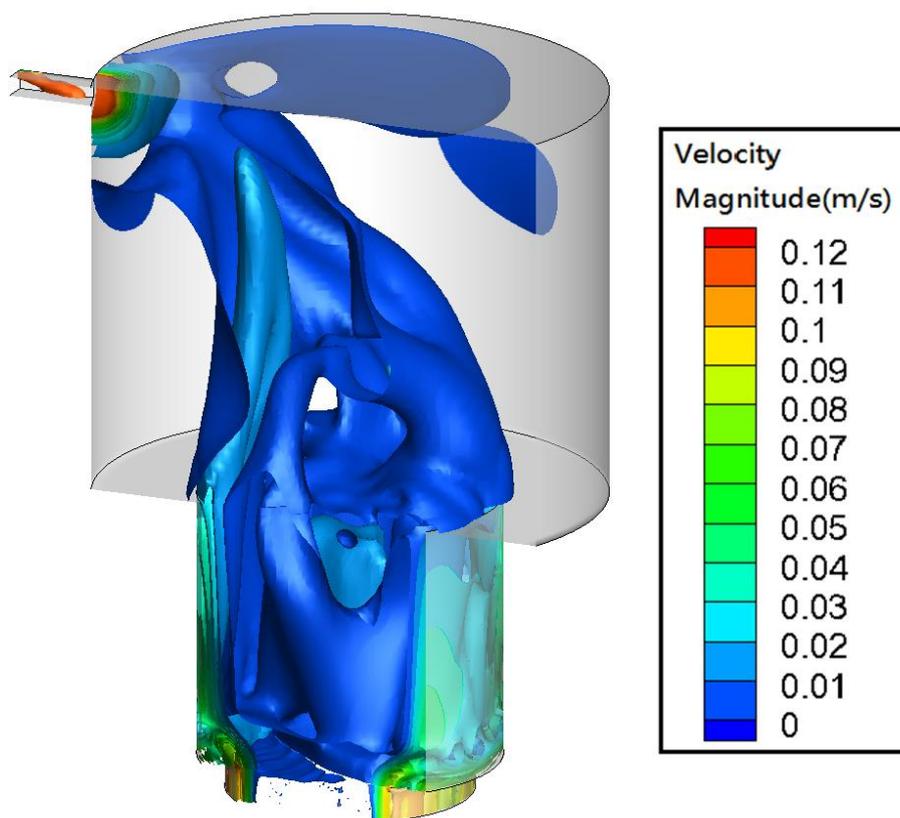


圖 26 反應器上部空間與爐穴流場圖

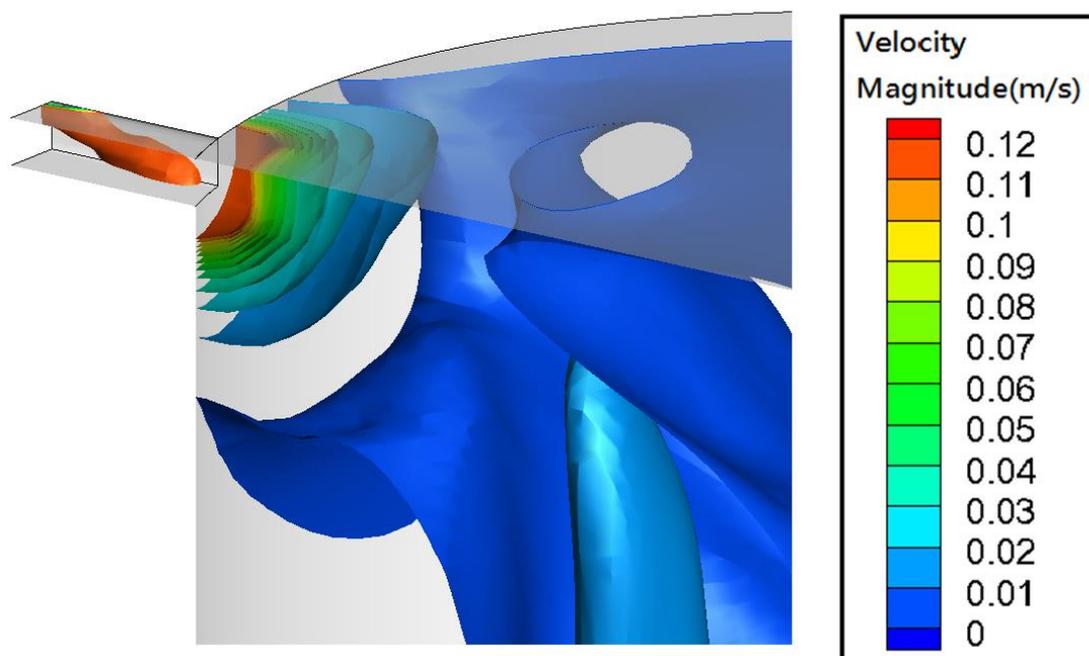


圖 27 爐穴局部流場圖

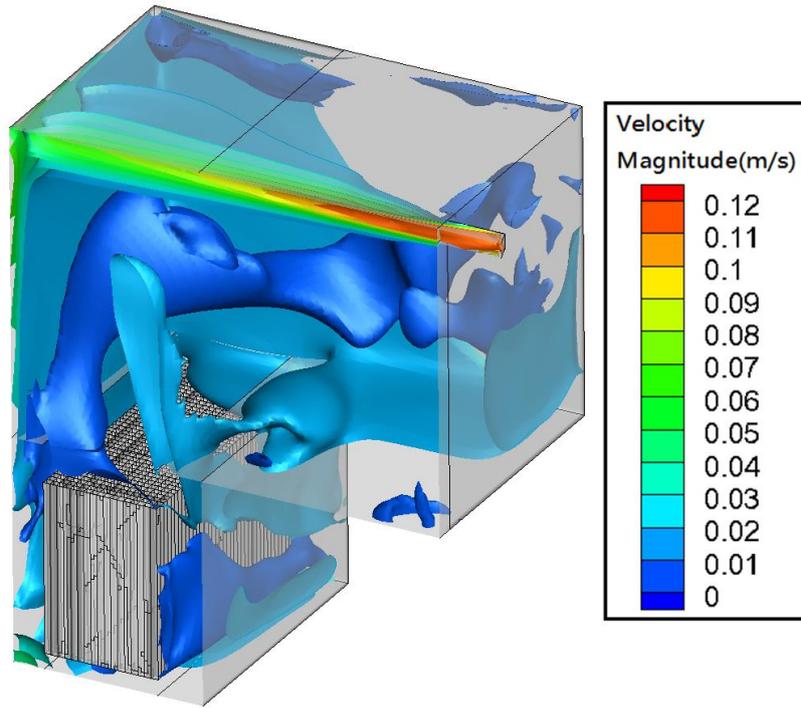


圖 28 上燃料池流場圖

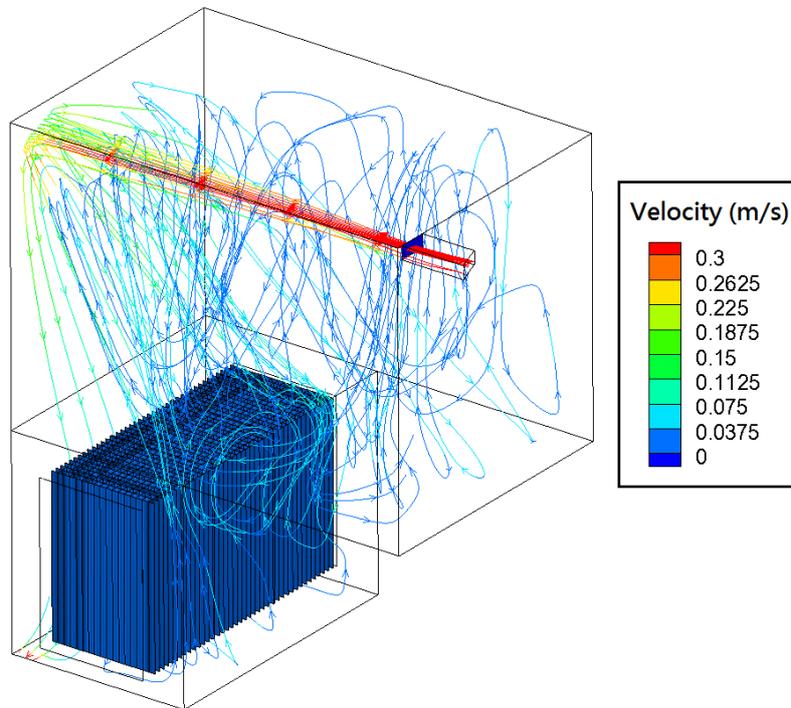


圖 29 上燃料池流線圖

表 11、核二廠分區模型各區最高與最低流速

區域名稱	最高速度(m/s)	最低速度(m/s)
降流區	0.73	2.56×10^{-4}
噴射泵	3.97	2.55×10^{-3}
壓力槽下部空間	0.74	1.071×10^{-3}
爐心區	0.13	8.00×10^{-5}
壓力槽上部空間	0.13	2.00×10^{-4}
爐穴區	0.33	1.41×10^{-4}
連結通道	0.60	1.74×10^{-2}
上燃料池	0.57	2.09×10^{-6}

肆、主要發現與結論

本計畫已於年度工作執行之同時，將計算流體力學分析技術應用於核二反應爐與上池之連通模式之案例進行分析，研究計畫之初，本團隊即透過與核研所及台電工程人員之討論，取得建立分析模式所需之各項工程資訊，完成整體燃料池、爐穴及反應器壓力槽之模式建立，並針對相關之元件流阻係數、衰變熱估算模式及冷卻系統模擬模式進行開發。

本分析案成功建立核二廠反應器與上燃料池連通之三維 CFD 模型，為能加速整體分析技術之實用性，除使用分區模型與 Interface 介面外，更引入 FLUENT 程式中 UDF 功能，將燃料束流阻、熱交換器冷卻模式等採用全程式化之方式進行設置；此舉除減輕工作人員於未來應用之辛勞外，透過全然程式化之作業程序更可確保分析結果不致因為人員不慎之誤失而出錯。

在完成各項分析模式之建構工作後，使用該 CFD 模型求得整體流場分布情形，包括分析整體流動趨勢與幾何影響狀況，並求得分區模型內最高與最低流速，方便進一步評估整體流場對冷卻水混合之影響。預期經由本研究之執行，將有助於進一步建立未來相關事故應用分析。

伍、參考文獻

1. 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).
2. ANSYS, “FLUENT Theory Guide,” Ver. 12, 2009.
3. 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。
4. 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。
5. 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,” EDSM2010-ICNMM2010, Montreal, Canada , August 2010
6. 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.
7. 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.
8. 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。
9. Sahoshih Ma, Susen Hsu, 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.
 10. 台灣電力公司, 核二廠訓練教材, 2006.
 11. 台灣電力公司, 第二核能發電廠工程圖, 213A5309_02_05。
 12. 台灣電力公司, 第二核能發電廠工程圖, 213A5309C_01+02。
 13. 台灣電力公司, 第一核能發電廠工程圖, B11-U0072630-422-1-N10120-R0。
 14. 台灣電力公司, 第一核能發電廠工程圖, B11-D254 796E818-R0。
 15. 台灣電力公司, 第一核能發電廠工程圖, B11-A001921D873 SH.2-R8。
 16. 台灣電力公司, 第一核能發電廠工程圖, B11-D233731E360-R5。
 17. 台灣電力公司, 第二核能發電廠工程圖, 213A5309_03_05。
 18. 台灣電力公司, 第二核能發電廠工程圖, 213A5309C_03。
 19. 台灣電力公司, 第二核能發電廠工程圖, 105D6196_01_01。
 20. EMF-2577(P) Revision 0, Chinshan ATRIUMTM-10 Mechanical Design Evaluation Report and Chinshan Unit 2 Reload CS2-R18 ATRIUMTM-10 Mechanical and Thermal-Hydraulic Report, Framatome ANP Richland Inc., May 2001.
 21. 台灣電力公司, 第二核能發電廠工程圖, 762E568_01_15。
 22. 台灣電力公司, 第二核能發電廠工程圖, 9713QM-116。

23. 台灣電力公司，第二核能發電廠工程圖，9713QC-356。
24. The American Society of Mechanical Engineers, —Standard for Verification and Validation in Computational Fluid Dynamics and Heat Transfer, ASME V&V 20-2009, 2009.
25. 曾永信等人，「CFD 在核能特殊組件之分析技術發展，」
1052001INER025。

附錄 A

```
#include "udf.h"
#include "extfile.h"
#include "mem.h"

DEFINE_PROFILE(nsfpc_thi,thread, position)    /*UDF1*/
{
    real    flow_flux,power_flux, T_hi, T_ci;
extern real nsfpc_inlet;    /*define the temp_out is a external variable*/
    face_t f;

    nsfpc_inlet=0;
        T_ci=34.2;
    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)>0.0)
            {
T_hi=power_flux/flow_flux-273.15;
nsfpc_inlet=273.15+T_hi-0.8427*(T_hi-T_ci);
            }

        #if !PR_HOST
    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)>0.0)
            {
```

```

T_hi=power_flux/flow_flux-273.15;
nsfpc_inlet=273.15+T_hi-0.8427*(T_hi-T_ci);
    }
#endif /* !PR_HOST*/
#if !RP_NODE
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)>0.0)
        {
T_hi=power_flux/flow_flux-273.15;
nsfpc_inlet=273.15+T_hi-0.8427*(T_hi-T_ci);
        }
#endif /* !RP_NODE*/

#if !PARALLEL
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)>0.0)
        {
T_hi=power_flux/flow_flux-273.15;
nsfpc_inlet=273.15+T_hi-0.8427*(T_hi-T_ci);
        }

#endif /* !PARRLLEL*/

} /*UDF1*/
DEFINE_PROFILE(nsfpc_tho,thread, position) /*UDF2*/
{

```

```

real Tin, Tfluid;
extern real nsfpc_inlet;
face_t f;

Tfluid=PRF_GRHIGH1(nsfpc_inlet);
begin_f_loop(f, thread)
{
    F_PROFILE(f, thread, position) =Tfluid;
}
end_f_loop(f, thread)

#ifdef !PR_HOST
Tfluid=PRF_GRHIGH1(nsfpc_inlet);
begin_f_loop(f, thread)
{
    F_PROFILE(f, thread, position) =Tfluid;
}
end_f_loop(f, thread)

#endif /* !PR_HOST*/

#ifdef !RP_NODE
Tfluid=PRF_GRHIGH1(nsfpc_inlet);
begin_f_loop(f, thread)
{
    F_PROFILE(f, thread, position) =Tfluid;
}
end_f_loop(f, thread)

#endif /* !RP_NODE*/

#ifdef !PARALLEL
Tfluid=PRF_GRHIGH1(nsfpc_inlet);

```

```

begin_f_loop(f, thread)
{
    F_PROFILE(f, thread, position) = Tfluid;
}
end_f_loop(f, thread)

#endif /* !PARRLLEL */
} /*UDF2*/

DEFINE_PROFILE(rhr_thi, thread, position) /*UDF3*/
{
    real flow_flux, power_flux, T_hi, T_ci;
extern real rhr_inlet; /*define the temp_out is a external variable*/
    face_t f;

    rhr_inlet=0;
        T_ci=25; /*重要參數*/
/*base on CS1EOC25_80F_161216_BoYan 改成符合報告的
rhr 25C*/
    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)>0.0)
    {
T_hi=power_flux/flow_flux-273.15;
rhr_inlet=273.15+T_hi-0.27*(T_hi-T_ci);
    }

#if !PR_HOST
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)>0.0)
        {
T_hi=power_flux/flow_flux-273.15;
rhr_inlet=273.15+T_hi-0.27*(T_hi-T_ci);
        }          /*base on CS1EOC25_80F_161215 增加所遺漏之大括號*/
#endif /* !PR_HOST*/

#if !RP_NODE
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)>0.0)
        {
T_hi=power_flux/flow_flux-273.15;
rhr_inlet=273.15+T_hi-0.27*(T_hi-T_ci);
        }          /*base on CS1EOC25_80F_161215 增加所遺漏之大括號*/
#endif /* !RP_NODE*/

#if !PARALLEL
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)>0.0)
        {
T_hi=power_flux/flow_flux-273.15;

```

```

rhr_inlet=273.15+T_hi-0.27*(T_hi-T_ci);
    }          /*base on CS1EOC25_80F_161215 增加所遺漏之大括號*/

#endif /* !PARALLEL */

} /*UDF3*/

DEFINE_PROFILE(rhr_tho,thread, position) /*UDF4*/
{
    real Tin, Tfluid;
extern real rhr_inlet;
    face_t f;

Tfluid=PRF_GRHIGH1(rhr_inlet);
begin_f_loop(f, thread)
    {
        F_PROFILE(f, thread, position) =Tfluid;
    }
end_f_loop(f, thread)

    #if !PR_HOST
Tfluid=PRF_GRHIGH1(rhr_inlet);
begin_f_loop(f, thread)
    {
        F_PROFILE(f, thread, position) =Tfluid;
    }
end_f_loop(f, thread)

#endif /* !PR_HOST*/

#if !RP_NODE
Tfluid=PRF_GRHIGH1(rhr_inlet);
begin_f_loop(f, thread)
    {
        F_PROFILE(f, thread, position) =Tfluid;
    }
end_f_loop(f, thread)

```

```
#endif /* !RP_NODE*/

#if !PARALLEL
Tfluid=PRF_GRHIGH1(rhr_inlet);
begin_f_loop(f, thread)
{
    F_PROFILE(f, thread, position) =Tfluid;
}
end_f_loop(f, thread)
#endif /* !PARRLLEL*/
} /*UDF4*/
```

附錄 B

```
/* Viscous Resistance Profile UDF in a Porous Zone that utilizes F_PROFILE*/

#include "udf.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*/

    #if !PR_HOST
        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_MU_L(c,t),0.8)/Dh/Dh*1.7812096*2;
        }
        end_c_loop(c,t)
    #endif /* !PR_HOST*/

    #if !RP_NODE
        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_MU_L(c,t),0.8)/Dh/Dh*1.7812096*2;
        }
        end_c_loop(c,t)
    #endif /* !RP_NODE*/

    #if !PARALLEL
        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_MU_L(c,t),0.8)/Dh/Dh*1.7812096*2;
        }
    #endif
}
```

```

}
end_c_loop(c,t)
#endif /* !PARRLLEL */

}

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

#if !PR_HOST
begin_c_loop(c,t)
{
F_PROFILE(c,t,i) = 32./Dh/Dh/1.7812096*2;
}
end_c_loop(c,t)

#endif /* !PR_HOST*/

#if !RP_NODE
begin_c_loop(c,t)
{
F_PROFILE(c,t,i) = 32./Dh/Dh/1.7812096*2;
}
end_c_loop(c,t)

#endif /* !RP_NODE*/

#if !PARALLEL
begin_c_loop(c,t)
{
F_PROFILE(c,t,i) = 32./Dh/Dh/1.7812096*2;
}
end_c_loop(c,t)

```

```
#endif /* !PARALLEL */
```

```
}
```

```
DEFINE_PROFILE(K_LTP_C,t,i)
```

```
{
```

```
    real x[ND_ND];
```

```
    real a,Dh;
```

```
    cell_t c;
```

```
Dh=12.3225E-3; /* Hydrolic Diameter*/
```

```
#if !PR_HOST
```

```
    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) =
```

```
(21.47+168.1*pow(a*C_R(c,t)*Dh/C_MU_L(c,t),-0.546))/2.301875*1.7812096*1.7812096*2;
```

```
    }
```

```
    end_c_loop(c,t)
```

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

```
#if !RP_NODE
```

```
    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) =
```

```
(21.47+168.1*pow(a*C_R(c,t)*Dh/C_MU_L(c,t),-0.546))/2.301875*1.7812096*1.7812096*2;
```

```
    }
```

```
    end_c_loop(c,t)
```

```
#endif /* !RP_NODE*/
```

```
#if !PARALLEL
```

```
    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) =
```

```

(21.47+168.1*pow(a*C_R(c,t)*Dh/C_MU_L(c,t),-0.546))/2.301875*1.7812096*1.7812096*2;
}
end_c_loop(c,t)
#endif /* !PARRLLEL */

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

#if !PR_HOST
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)*Dh/C_MU_L(c,t),-0.546))/2.301875*1.7812096*1.7812096*2;
}
end_c_loop(c,t)

#endif /* !PR_HOST */

#if !RP_NODE
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)*Dh/C_MU_L(c,t),-0.546))/2.301875*1.7812096*1.7812096*2;
}
end_c_loop(c,t)
#endif /* !RP_NODE */

#if !PARALLEL
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)*Dh/C_MU_L(c,t),-0.546))/2.301875*1.7812096*1.7812096*2;
    }
    end_c_loop(c,t)
#endif /* !PARRLLEL */
}

DEFINE_PROFILE(K_FUEL,t,i)
{
    real x[ND_ND];
    real a,Dh,Re;
    cell_t c;
Dh=12.3225E-3; /* Hydrolic Diameter */
#if !PR_HOST
    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*pow(Re,-0.58)*4+2.196*pow(Re,-0.084)+235.7*pow(Re,-0.686)*2))/4.3625
77*1.7812*1.7812096*2;
    }
    end_c_loop(c,t)

#endif /* !PR_HOST */
#if !RP_NODE
    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*pow(Re,-0.58)*4+2.196*pow(Re,-0.084)+235.7*pow(Re,-0.686)*2))/4.3625
77*1.7812*1.7812096*2;
    }
    end_c_loop(c,t)
#endif /* !RP_NODE */
#if !PARALLEL
    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*pow(Re,-0.58)*4+2.196*pow(Re,-0.084)+235.7*pow(Re,-0.686)*2))/4.3625
77*1.7812*1.7812096*2;
}
end_c_loop(c,t)
#endif /* !PARRLLEL */
}
DEFINE_PROFILE(K_UTP,t,i)
{
    real x[ND_ND];
    real a,Dh,Re;
    cell_t c;
Dh=12.3225E-3; /* Hydrolic Diameter*/
#if !PR_HOST
    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))/0.64389*1.7812*1.7812096*2;
    }
end_c_loop(c,t)

#endif /* !PR_HOST*/
#if !RP_NODE
    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))/0.64389*1.7812*1.7812096*2;
    }
end_c_loop(c,t)
#endif /* !RP_NODE*/
#if !PARALLEL
    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))/0.64389*1.7812*1.7812096*2;
    }
end_c_loop(c,t)
#endif
}

```

```
}  
end_c_loop(c,t)  
#endif /* !PARRLLEL */  
}
```