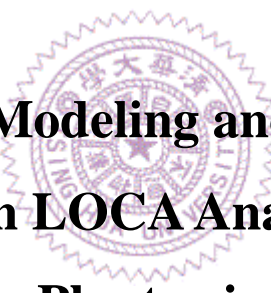


國立清華大學

碩士論文

馬鞍山電廠 RELAP5-3D LOCA

爐心與降流區多維度模擬分析



**Multi-Dimensional Modeling and Simulation of Core  
and Downcomer in LOCA Analysis of Maanshan  
Nuclear Power Plant using RELAP5-3D**

系別：核子工程與科學研究所 組別：工程組

指導教授：李敏 Min Lee

學號姓名：9713509 黃議輝 Yi-Huei Huang

中華民國九十九年七月

## 摘要

本研究利用 RELAP5-3D 模擬馬鞍山核電廠大破口冷卻水流失事故 (Large Break Loss of Coolant Accident, LBLOCA)，將壓力槽降流區及爐心做多維度模擬分析，觀察與傳統一維模式模擬結果的差異。

研究發現降流區多維度的模擬，造成降流區的反向極限流限制(Counter Current Flow Limitation)提早 5 到 10 秒解除，使緊急爐心冷卻水提早接觸爐心底部，進入再泛水期 (Reflood)。使燃料護套溫度較一維模式提早下降，造成燃料護套尖峰溫度降低約 10°F。且暫態過程中降流區橫向流動情形更為平順，減少了大幅度的來回震盪。

爐心多維度模擬則發現暫態開始不久後的爐心回吸水流能力減弱，以及再泛水後蒸汽挾帶液態水向上離開爐心的能力減弱，無法像一維爐心般讓冷卻水流重複通過爐心形成強烈的自體循環，冷卻爐心上部燃料；並且發現爐心入口水流集中往功率最高的流體通道流入冷卻的效果減弱，使得爐心多維度模擬的燃料護套尖峰溫度高於傳統一維模式，約 240°F 到 500°F，隨通道數增多而上升但有收斂的趨勢。

同時結合多維度爐心與降流區模擬時，研究發現結果除同時保有上述結果的特性外，並看到降流區多維度模式使再泛水階段提早外，提高爐心多維度模式的液態水挾帶能力，但仍不及一維模式的爐心自體循環能力，因此燃料護套溫度仍較一維模式來得高 30°F 到 120°F，但比起單純只有爐心多維度模式而言已降低許多。

## Abstract

In present Study, RELAP5-3D code is used to simulate the large break loss of coolant accident (LBLOCA) of Maanshan Nuclear Power Plant. The Plant employs a Westinghouse designed three-loop Pressurized Water Reactor (PWR). In the simulation, the multi-dimensional components of RELAP5-3D code are used to simulate the downcomer and core regions within the reactor pressure vessel (RPV). The Results of the simulation are compared with RELAP5-3D results obtained from the traditional one-dimensional modeling of these regions.

In the multi-dimensional simulation of downcomer, the limits of counter current flow (CCFL) in downcomer ends earlier by five to ten seconds than that in the 1D simulation. It makes core reflood starting early and lowers the peak cladding temperature (PCT) by 10°F. The oscillations of cross flow between the downcomer regions connected to intact and broken loops are less violent than these observed in the 1D simulations.

In the multi-dimensional simulations of core, the predicted PCTs are between 240 and 500 °F higher than that in the 1D simulation. It is observed that the capability of core sucking back the coolant is less during the early period of transient. But the major phenomenon that affects the predicted PCT is the core self circulation that caused by liquid entrainment in core region during the reflood period. The entrained Liquid falls back to lower plenum through the core bypass region. Heat transfer in the upper part of the core is improved significantly improved due to the liquid flow through the bypass region. In the 1D simulation, larger amount of liquid is predicted to be entrained by the steam. The amount of liquid entrained is higher when the core is modeled by finer meshes in the X-Y plan.

When both downcomer and core are modeled multi-dimensionally, the earlier termination of CCFL and enhancement of self circulation in the 3D simulation of downcomer have a tendency to lower the predicted PCTs. The predicted PCT is still about 30 °F to 120 °F higher than that of 1D model.



## 誌謝詞

感謝這段期間老師的耐心指導，同學的熱情陪伴，研究室學弟妹們超熱情活潑，照亮了枯燥的菸酒生生活，感謝爸媽默默的支持，感謝所有我愛和愛我的人，謝謝你們！

這段日子以來我覺得最美的莫過於清大的校園，每每走過都覺得這是個很美的地方令人捨不得離開，最美的時候是在下雨過後，不論是清晨或是晚間，清晨夾帶淡淡的水汽與草香，傍晚則隨著路燈那橙黃色吐露出深邃的氣息，朦朧悠遠，看著三兩行人走過，踩著濕潤的落葉，一切美極了，一切的一切又是如此的令人不捨。

遙想當年，大一剛進來校園，連數個月都是陰雨綿綿，緊接著到來的冬季，除了寒風外，下不停的雨絲更是一針針刺向臉頰，覺得新竹這天氣真是令人不喜歡；曾幾何時開始喜歡上這裡的多樹，這裡的寬闊，學校裡到處都有的松樹，隨處掉落的毬果和松針，三不五時還能瞥見那害羞的小松鼠下樹開伙；下雨過後更是生機盎然，駐警隊旁探出頭來的小螃蟹，小水溝那活力十足的小蝌蚪們，台積館前那一望無際的草坪，謝謝這麼美麗的校園，一路陪伴我遠行到新竹的求學生涯。

感謝從出生以來，辛苦拉拔我長大的爸媽，辛勤不倦，耐心教導還有鼓勵我的老師們，能有今天要感謝你們，還有一路上不同階段遇到的同學們、朋友們，雖然相處只有短短的時光，但和你們的在一起的快樂時光，陪伴我一起學習、成長，感謝你帶我去買衣服褲子和鞋子，這是我長這麼大以來，第一次有勇氣面對自己，稍稍照顧自己，謝謝你。雖然在地球上我的存在不過為不足道，但因為爸媽、老師、朋友們的支持讓我感受到真實存在的人生，感謝所有愛我和我愛的人，謝謝你們。

# 目 錄

摘 要	i
Abstract	ii
誌謝詞	iv
目 錄	v
表目錄	viii
圖目錄	ix
第一章 序 章	1
1.1 研究動機	1
1.2 研究方法	1
1.3 論文架構	1
第二章 RELAP5 程式簡介	2
2.1 RELAP5 程式簡介	2
2.2 多維度元件介紹	2
第三章 馬鞍山電廠及一維輸入模式簡介	6
3.1 馬鞍山電廠簡介 <sup>[3]</sup>	6
3.2 RELAP5-3D 馬鞍山電廠一維輸入模式簡介	6
第四章 爐心與降流區多維度輸入檔的建構	13
4.1 降流區多維度建構	13
4.1.1 幾何結構建立	13
4.1.2 熱結構建立	13
4.2 爐心多維度建構	14
4.2.1 幾何結構建立	14
4.2.2 熱結構建立	15
4.2.3 輻射熱傳模式建立	16
4.2.4 其他設定	17

4.3 爐心與降流區多維度建構	18
第五章 爐心與降流區多維度冷卻水流失事故暫態模擬分析	28
5.1.1 燃料護套尖峰溫度結果比較	28
5.1.2 降流區流體流動情形比較	29
5.1.3 其他參數比較	31
5.1.4 結語	31
5.2 爐心多維度暫態分析	32
5.2.1 燃料護套尖峰溫度結果比較	32
5.2.2 降流區水流移動比較	33
5.2.3 爐心水流比較	34
5.2.4 爐心自體循環現象之觀察	37
5.2.5 其他參數比較	39
5.2.6 結語	39
5.3 爐心與降流區多維度暫態分析	40
5.3.1 燃料護套尖峰溫度結果比較	40
5.3.2 降流區水流移動比較	41
5.3.3 爐心水流比較	42
5.3.4 其他參數比較	44
5.3.5 結語	44
第六章 結 論	121
參考文獻	124
附錄 A	124
A.1 RELAP5 使用問題	125
A.2 RELAP5-3D 多維原件使用問題討論	129
A.2.1 前言	129
A.2.2 多維度爐心流道驗證	129
A.2.2.1 RELAP5-3D 驗證模式介紹	129
A.2.2.2 RELAP5-3D 驗證結果	130
A.2.2.3 結論	131
附錄 B	138
B.1 模式轉換的原因	138
B.2 模式加入輻射熱傳模式	139

B.3 最佳估算模式與 Appendix K 模式轉換 <sup>[5][6]</sup> .....	139
---	-----



## 表目錄

表 5.1 一維模式與多維度模式事故時序.....	46
表 5.2 一維模式與多維度模式護套尖峰溫度及發生時間.....	46
表 A 2.2.1 測試模式.....	131



## 圖目錄

圖 2.1 RELAP 程式發展史	4
圖 2.2.1 控制體積面編號	5
圖 2.2.2 順時針旋轉 180 度控制體積接面編號	5
圖 3.1.1 壓水式反應爐示意圖	8
圖 3.1.2 反應爐環路示意圖	9
圖 3.1.3 首次循環之爐心燃料佈局	10
圖 3.2.1 核三廠輸入模式節點圖	11
圖 3.2.2 壓力槽節點圖	12
圖 4.1 多維降流區模式與一維降流區模式比較情形	19
圖 4.2.1 多維爐心模式與一維爐心模式節點比較示意圖	19
圖 4.2.2 爐心多維度模擬熱流通道與爐心燃料束實際相關位置與多維度元件代號與熱結構代號 (通道數 13)	20
圖 4.2.3 爐心多維度模擬熱流通道與爐心燃料束實際相關位置與多維度元件代號與熱結構代號 (通道數 37)	21
圖 4.2.4 爐心多維度模擬熱流通道與爐心燃料束實際相關位置與多維度元件代號與熱結構代號 (通道數 69)	22
圖 4.2.5 核三廠特定周期爐心各燃料束熱功率分佈	23
圖 4.2.6 通道熱結構功率計算方法	24
圖 4.2.7 多維爐心熱流通道功率百分比(通道數 13)	24
圖 4.2.8 多維爐心熱流通道功率百分比(通道數 37)	25
圖 4.2.9 多維爐心熱流通道功率百分比(通道數 69)	26
圖 4.2.10 輻射熱傳熱結構相對關係	27

圖 4.2.11 輻射熱傳熱結構視角因子相對關係 (以通道數 13 為例).....	27
圖 5.1.1 燃料護套最高溫度發生位置與溫度.....	47
圖 5.1.2 燃料護套最熱處臨界熱通量.....	47
圖 5.1.3 燃料護套最熱處熱通量.....	48
圖 5.1.4 燃料護套最熱處熱通量(0 到 75 秒).....	48
圖 5.1.5 最熱棒淬冷邊界位置.....	49
圖 5.1.6 最熱棒淬冷邊界位置(0 到 100 秒).....	49
圖 5.1.7 爐心熱通道水位.....	50
圖 5.1.8 爐心熱通道水位(0 到 60 秒).....	50
圖 5.1.9 爐心旁通流道水位.....	51
圖 5.1.10 破口累計流出冷卻水質量.....	51
圖 5.1.11 有效緊急爐心注水累計質量.....	52
圖 5.1.12 破口側降流區頂部體積 34 向上累計流出質量.....	52
圖 5.1.13 完整側降流區頂部體積向上累計流出質量.....	53
圖 5.1.14 完整側降流區頂部體積向上累計流出質量(0 到 50 秒).....	53
圖 5.1.15 降流區頂部淨往上流出累計質量.....	54
圖 5.1.16 降流區完整側水位高度.....	54
圖 5.1.17 降流區橫向流體接點質量流率比較(最上層).....	55
圖 5.1.18 降流區橫向流體接點質量流率比較(最二層).....	55
圖 5.1.19 降流區橫向流體接點質量流率比較(第三層).....	56
圖 5.1.20 降流區橫向流體接點質量流率比較(第四層).....	56
圖 5.1.21 降流區橫向流體接點累計質量比較(最上層).....	57
圖 5.1.22 降流區橫向流體接點累計質量比較(第二層).....	57

圖 5.1.23 降流區橫向流體接點累計質量比較(第三層).....	58
圖 5.1.24 降流區橫向流體接點累計質量比較(第四層).....	58
圖 5.1.25 降流區橫向流體接點淨質量流率比較.....	59
圖 5.1.26 降流區橫向流體接點淨累計質量比較.....	59
圖 5.1.27 壓力槽底部區間質量變化 .....	60
圖 5.1.28 壓力槽頂部壓力 .....	60
圖 5.1.29 反應器總功率變化.....	61
圖 5.1.30 壓力槽底部區間硼濃度變化 .....	61
圖 5.1.31 進入爐心平均通道流體接點液體體積分率隨時間變化 .....	62
圖 5.1.32 進入爐心平均通道流體接點液體體積分率隨時間變化 .....	62
圖 5.2.1 燃料護套最高溫度發生位置與溫度 .....	63
圖 5.2.2 燃料護套最高溫度發生位置與溫度(0 到 100 秒).....	63
圖 5.2.3 燃料護套最熱處臨界熱通量 .....	64
圖 5.2.4 燃料護套最熱處臨界熱通量(0 到 50 秒).....	64
圖 5.2.5 燃料護套最熱處熱通量 .....	65
圖 5.2.6 燃料護套最熱處熱通量(0 到 50 秒).....	65
圖 5.2.7 最熱棒淬冷邊界位置 .....	66
圖 5.2.8 最熱棒淬冷邊界位置(0 到 100 秒).....	66
圖 5.2.9 爐心通道水位 .....	67
圖 5.2.10 爐心通道水位(0 到 50 秒).....	67
圖 5.2.11 爐心旁通流道水位.....	68
圖 5.2.12 爐心旁通流道水位(0 到 100 秒).....	68
圖 5.2.13 破口累計流出冷卻水質量 .....	69

圖 5.2.14 破口累計流出冷卻水質量(0 到 100 秒).....	69
圖 5.2.15 有效緊急爐心注水累計質量.....	70
圖 5.2.16 破口側降流區頂部體積向上累計流出質量.....	70
圖 5.2.17 完整側降流區頂部體積向上累計流出質量.....	71
圖 5.2.18 降流區頂部淨往上流出累計質量(0 到 100 秒).....	71
圖 5.2.19 降流區完整側水位高度.....	72
圖 5.2.20 降流區完整側水位高度(0 到 100 秒).....	72
圖 5.2.21 壓力槽底部區間質量.....	73
圖 5.2.22 壓力槽底部區間與爐心下方體積所夾區間質量.....	73
圖 5.2.23 爐心下方體積質量.....	74
圖 5.2.24 爐心下方體積質量(0 到 50 秒).....	74
圖 5.2.25 進入爐心通道流體接點液體體積分率.....	75
圖 5.2.26 進入爐心通道流體接點液體體積分率 (0 到 75 秒).....	75
圖 5.2.27 爐心下方體積進入最熱棒所在通道每單位燃料元件累計質量.....	76
圖 5.2.28 爐心下方體積進入最熱棒所在通道每單位燃料元件累計質量(0 到 100 秒).....	76
圖 5.2.29 由下方體積進入爐心總累計質量.....	77
圖 5.2.30 爐心下方體積進入爐心旁通通道總累計質量.....	77
圖 5.2.31 最熱棒通道與爐心總通道每單位燃料元件由下進入爐心累計質量比(0 到 150 秒).....	78
圖 5.2.32 最熱棒通道與爐心總通道每單位燃料元件由下進入爐心累計質量比(150 到 400 秒).....	78
圖 5.2.33 最熱棒所在通道每單位燃料元件向上離開累計質量.....	79
圖 5.2.34 最熱棒所在通道每單位燃料元件向上離開累計質量(0 到 100 秒).....	79
圖 5.2.35 最熱棒所在通道每單位燃料元件總橫向流入累計質量.....	80
圖 5.2.36 最熱棒所在通道每單位燃料元件總橫向流入累計質量(穩態).....	80

圖 5.2.37 最熱棒所在通道每單位燃料元件橫向流入累計質量(第一階).....	81
圖 5.2.38 最熱棒所在通道每單位燃料元件橫向流入累計質量(第二階).....	81
圖 5.2.39 最熱棒所在通道每單位燃料元件橫向流入累計質量(第三階).....	82
圖 5.2.40 最熱棒所在通道每單位燃料元件橫向流入累計質量(第四階).....	82
圖 5.2.41 最熱棒所在通道每單位燃料元件橫向流入累計質量(第五階).....	83
圖 5.2.42 最熱棒所在通道每單位燃料元件橫向流入累計質量(第六階).....	83
圖 5.2.43 最熱棒所在通道每單位燃料元件橫向流入累計質量(第七階).....	84
圖 5.2.44 最熱棒所在通道每單位燃料元件橫向流入累計質量(第八階).....	84
圖 5.2.45 最熱棒所在通道每單位燃料元件橫向流入累計質量(第九階).....	85
圖 5.2.46 爐心上方體積向上流體接點累計總質量 .....	85
圖 5.2.47 爐心上方體積向上流體接點累計液體質量 .....	86
圖 5.2.48 爐心向上進入爐心上方體積累計液體質量 .....	86
圖 5.2.49 爐心旁通通道向上進入爐心上方體積之累計液體質量 .....	87
圖 5.2.50 爐心通道出口液體體積分率 .....	87
圖 5.2.51 壓力槽底部區間硼濃度 .....	88
圖 5.2.52 壓力槽底部區間硼濃度(0 到 50 秒).....	88
圖 5.2.53 壓力槽頂部壓力 .....	89
圖 5.2.54 反應器總功率 .....	89
圖 5.3.1 燃料護套最高溫度發生位置與溫度 .....	90
圖 5.3.2 燃料護套最高溫度發生位置與溫度(0 到 100 秒).....	90
圖 5.3.3 燃料護套最熱處臨界熱通量 .....	91
圖 5.3.4 燃料護套最熱處臨界熱通量(0 到 50 秒).....	91
圖 5.3.5 燃料護套最熱處熱通量 .....	92

圖 5.3.6 燃料護套最熱處熱通量(0 到 50 秒).....	92
圖 5.3.7 最熱棒淬冷邊界位置 .....	93
圖 5.3.8 最熱棒淬冷邊界位置(0 到 100 秒).....	93
圖 5.3.9 爐心通道水位 .....	94
圖 5.3.10 爐心通道水位(0 到 50 秒).....	94
圖 5.3.11 爐心旁通流道水位.....	95
圖 5.3.12 爐心旁通流道水位(40 到 100 秒).....	95
圖 5.3.13 破口累計流出冷卻水質量 .....	96
圖 5.3.14 破口累計流出冷卻水質量(0 到 100 秒).....	96
圖 5.3.15 有效緊急爐心注水累計質量 .....	97
圖 5.3.16 破口側降流區頂部體積向上累計流出質量 .....	97
圖 5.3.17 破口側降流區頂部體積向上累計流出質量(0 到 100 秒) .....	98
圖 5.3.18 完整側降流區頂部體積向上累計流出質量 .....	98
圖 5.3.19 完整側降流區頂部體積向上累計流出質量(0 到 100 秒) .....	99
圖 5.3.20 降流區頂部淨往上流出累計質量 .....	99
圖 5.3.21 降流區頂部淨往上流出累計質量(0 到 50 秒).....	100
圖 5.3.22 降流區完整側水位高度 .....	100
圖 5.3.23 降流區完整側水位高度(0 到 100 秒) .....	101
圖 5.3.24 降流區橫向流體接點質量流率比較(最上層) .....	101
圖 5.3.25 降流區橫向流體接點質量流率比較(第二層) .....	102
圖 5.3.26 降流區橫向流體接點質量流率比較(第三層) .....	102
圖 5.3.27 降流區橫向流體接點質量流率比較(第四層) .....	103
圖 5.3.28 降流區橫向流體接點累計質量比較(最上層) .....	103

圖 5.3.29 降流區橫向流體接點累計質量比較(第二層).....	104
圖 5.3.30 降流區橫向流體接點累計質量比較(第三層).....	104
圖 5.3.31 降流區橫向流體接點累計質量比較(第四層).....	105
圖 5.3.32 壓力槽底部區間質量.....	105
圖 5.3.33 壓力槽底部區間質量(0 到 50 秒).....	106
圖 5.3.34 爐心下方體積質量.....	106
圖 5.3.35 爐心下方體積質量(0 到 50 秒).....	107
圖 5.3.36 進入爐心通道流體接點液體體積分率.....	107
圖 5.3.37 進入爐心通道流體接點液體體積分率(0 到 50 秒).....	108
圖 5.3.38 爐心下方體積進入最熱棒所在通道每單位燃料元件累計質量.....	108
圖 5.3.39 爐心下方體積進入最熱棒所在通道每單位燃料元件累計質量(0 到 100 秒).....	109
圖 5.3.40 爐心下方體積進入爐心總累計質量.....	109
圖 5.3.41 爐心進入爐心上方體積累計液體質量.....	110
圖 5.3.42 旁通通道進入爐心上方體積累計液體質量.....	110
圖 5.3.43 爐心進入爐心上方體積流體接點液體體積分率.....	111
圖 5.3.44 最熱棒通道與爐心總通道每單位燃料元件由下進入爐心累計質量比(0 到 150 秒).....	111
圖 5.3.45 最熱棒通道與爐心總通道每單位燃料元件由下進入爐心累計質量比(150 到 400 秒).....	112
圖 5.3.46 最熱棒所在通道每單位燃料元件向上離開累計質量.....	112
圖 5.3.47 最熱棒所在通道每單位燃料元件向上離開累計質量(0 到 100 秒).....	113
圖 5.4.48 最熱棒所在通道每單位燃料元件總橫向流入累計質量.....	113
圖 5.3.49 最熱棒所在通道每單位燃料元件橫向流入累計質量(第一階).....	114
圖 5.3.50 最熱棒所在通道每單位燃料元件橫向流入累計質量(第二階).....	114
圖 5.3.51 最熱棒所在通道每單位燃料元件橫向流入累計質量(第三階).....	115

圖 5.3.52 最熱棒所在通道每單位燃料元件橫向流入累計質量(第四階).....	115
圖 5.3.53 最熱棒所在通道每單位燃料元件橫向流入累計質量(第五階).....	116
圖 5.3.54 最熱棒所在通道每單位燃料元件橫向流入累計質量(第六階).....	116
圖 5.3.55 最熱棒所在通道每單位燃料元件橫向流入累計質量(第七階).....	117
圖 5.3.56 最熱棒所在通道每單位燃料元件橫向流入累計質量(第八階).....	117
圖 5.3.57 最熱棒所在通道每單位燃料元件橫向流入累計質量(第九階).....	118
圖 5.3.58 壓力槽底部區間硼濃度.....	118
圖 5.3.59 壓力槽底部區間硼濃度(20 到 33 秒).....	119
圖 5.3.60 壓力槽頂部壓力.....	119
圖 5.3.61 反應器總功率.....	120
圖 5.3.62 累計進入旁通通道熱量.....	120
圖 A.1.1 最熱棒第七節點護套溫度比較圖.....	127
圖 A.1.2 程式使用時步比較圖.....	127
圖 A.1.3 計算淬冷邊界位置比較圖.....	128
圖 A.1.4 不同模式計算底部及頂部淬冷邊界位置比較圖.....	128
圖 A.2.2.1 輸入模式結點圖.....	132
圖 A.2.2.2 991 到 934 質量流率.....	133
圖 A.2.2.3 992 到 934 質量流率.....	133
圖 A.2.2.4 991 到 934 質量流率.....	134
圖 A.2.2.5 992 到 934 質量流率.....	134
圖 A.2.2.6 左側通道到 934 質量流率.....	135
圖 A.2.2.7 右側通道到 934 質量流率.....	135
圖 A.2.2.8 橫向流體接點面積為 0 節點圖.....	136

圖 A.2.2.9 程式無法求解訊息 .....	137
圖 B.1 燃料尖峰溫度與衰變熱及總功率關係圖 .....	142
圖 B.2 一維模式與降流區多維度模式使用輻射熱傳模式前後燃料護套尖峰溫度 .....	142
圖 B.3 爐心多維度模式使用輻射熱傳模式前後燃料護套尖峰溫度 .....	143
圖 B.4 爐心與降流區多維度模式使用輻射熱傳模式前後燃料護套尖峰溫度 .....	143



# 第一章 序 章

## 1.1 研究動機

當前利用 RELAP5 系列程式進行輕水式反應器電廠事故分析時，係以一維元件模擬反應器組件，本論文利用 RELAP5-3D 程式，嘗試以多維度模式模擬反應器壓力槽重要組件，如爐心與降流區，進行雙邊斷裂(Double Ended)冷卻水流失事故(Loss of Coolant Accident, LOCA)分析，探討在最佳估算模式(Best Estimate)下，多維與一維模式計算下結果差異。

## 1.2 研究方法

以核三廠 RELAP5/3DK 一維模式輸入檔<sup>[1]</sup>為基礎，修改成最佳估算模式輸入檔，並參考核三廠 RELAP5/3DK 一維輸入模式建立計算書<sup>[2]</sup>，在保持元件尺寸及流力參數等相同條件下，將降流區與爐心由一維模式改為多維度模式，在建立多維度模式穩態輸入檔後，進行大破口冷卻水流失事故分析，並比較一維與多維度模式分析結果。

## 1.3 論文架構

本論文共分六章，第一章介紹研究動機與研究方法及論文架構，第二章簡介紹 RELAP5 程式與 RELAP5-3D 多維度元件模式，第三章簡介馬鞍山電廠及所使用的一維輸入模式，第四章為 RELAP5-3D 多維降流區與爐心輸入檔的建構，第五章為爐心與降流區多維度冷卻水流失事故暫態模擬分析，第六章為結論，附錄 A 為多維度元件建立時所遇到的問題，附錄 B 為輸入檔模式改為最佳估算模式的改變及兩種分析模式差異。

## 第二章 RELAP5 程式簡介

### 2.1 RELAP5 程式簡介

RELAP程式全名為Reactor Excursion and Leak Analysis Program，由美國愛達荷國家實驗室(Idaho National Laboratory, INL)，在美國核能管制委員會(Nuclear Regulatory Commission, NRC)資助下發展的模擬輕水式反應器(Light Water Reactor, LWR)暫態事故程式。可廣泛應用於包括：冷卻水流失(Loss of Coolant)，預期暫態未停機(Anticipated Transients Without Scram, ATWS)，喪失飼水(Loss of Feedwater)，喪失廠外電源(Loss of Offsite Power)，汽機跳脫(Turbine Trip)等暫態模擬，模擬的流體可以是蒸汽、液體或不可凝固氣體及非揮發性溶質。其用途可以做為：

- 1.核能管制執照審查計算
- 2.電廠設計與安全分析
- 3.簡化的電廠分析器(Plant Analyzer)



目前使用的 RELAP5-3D 是美國能源部 (Department of Energy, DOE) 資助下，由美國核管會(NRC)的 RELAP5/MOD3 版本發展而來，程式發展沿革如圖 2.1，程式使用雙流體(Two Fluids)，雙相均勻混合態(Non-Homogeneous)，雙相非平衡態(Non-Equilibrium)模式，是一個使用最少經驗式且模組化之最佳估算系統熱水流程式，RELAP5-3D 與先前的版本重要的差異是加入多維度(Multi-Dimensional)熱水流與中子分析的能力，並加入新的矩陣求解器求解三維問題，以及加入新修正的三相水參數查照表。

### 2.2 多維度元件介紹

在RELAP5-3D中的多維度元件模式的開發，讓使用者能更精確的模擬流體多維流動現象，

多維度流動現象通常發生在反應器的爐心底部(Lower Plenum)、上部空間(Upper Plenum)或降流區(Downcomer)。在某些特定類型反應器或暫態分析的模擬，流體多維流動的現象特別重要，使用一維模式將無法探討多維流動的影響。多維度元件應用並不只侷限於壓力槽內，亦可模擬管路或其他系統元件。使用多維度元件需定義一、二或三維控制體積陣列，及指定內部流體接點做為控制體積間的相互連接；幾何形狀可以是直角坐標(x, y, z)或圓柱座標(r,  $\theta$ , z)形狀。

多維度元件與一維模式相同點在於同樣需指定流動面積、高度、流力直徑、表面粗糙度，不同點在於：

- 多維度元件求解三維方程式。
- 指定元件特定幾何形狀如長方體(x,y,z)與圓柱體(r, $\theta$ ,z)，一維模式只能指定圓管狀或單一不特定型狀控制體積。
- 圓柱體可做中空圓柱， $\theta$  值可介於 0 到 360 之間,可做楔型或半圓形柱，一維模式圓管則無此功能。
- 多維元件需給定各座標軸上的各別區間數(Interval Number)，並指定各區間的區間大小(Mesh Interval)，建成多維的控制體積矩陣。在單一元件內最多可計有 999 個小區塊，坐落於三維空間中，有別於一維模式中的圓管,單一元件內最多指定 99 個控制體積，且需位於同一座標軸上。
- 控制體積的各個面都帶有接面編號，如圖 2.2.1(圓柱座標同理)所示，可指定特定編號做為此控制體積與其他元件或控制體積相接的指定面。
- 單一元件內的控制體積須使用元件的內部流體接點(Inner Junctions)依相鄰位置指定接面編號做相互連接。
- 考慮每個控制體積內可能有固體結構體，可藉由體積因子(Volume Factor)個別指定每個控

制體積實際大小，以及藉由流體接點面積因子(Junction Area Factor)對個別流體接點面積做調整。

- 可對多維元件做空間上的旋轉。但空間接面編號也會跟著做轉動，如圖 2.2.2。

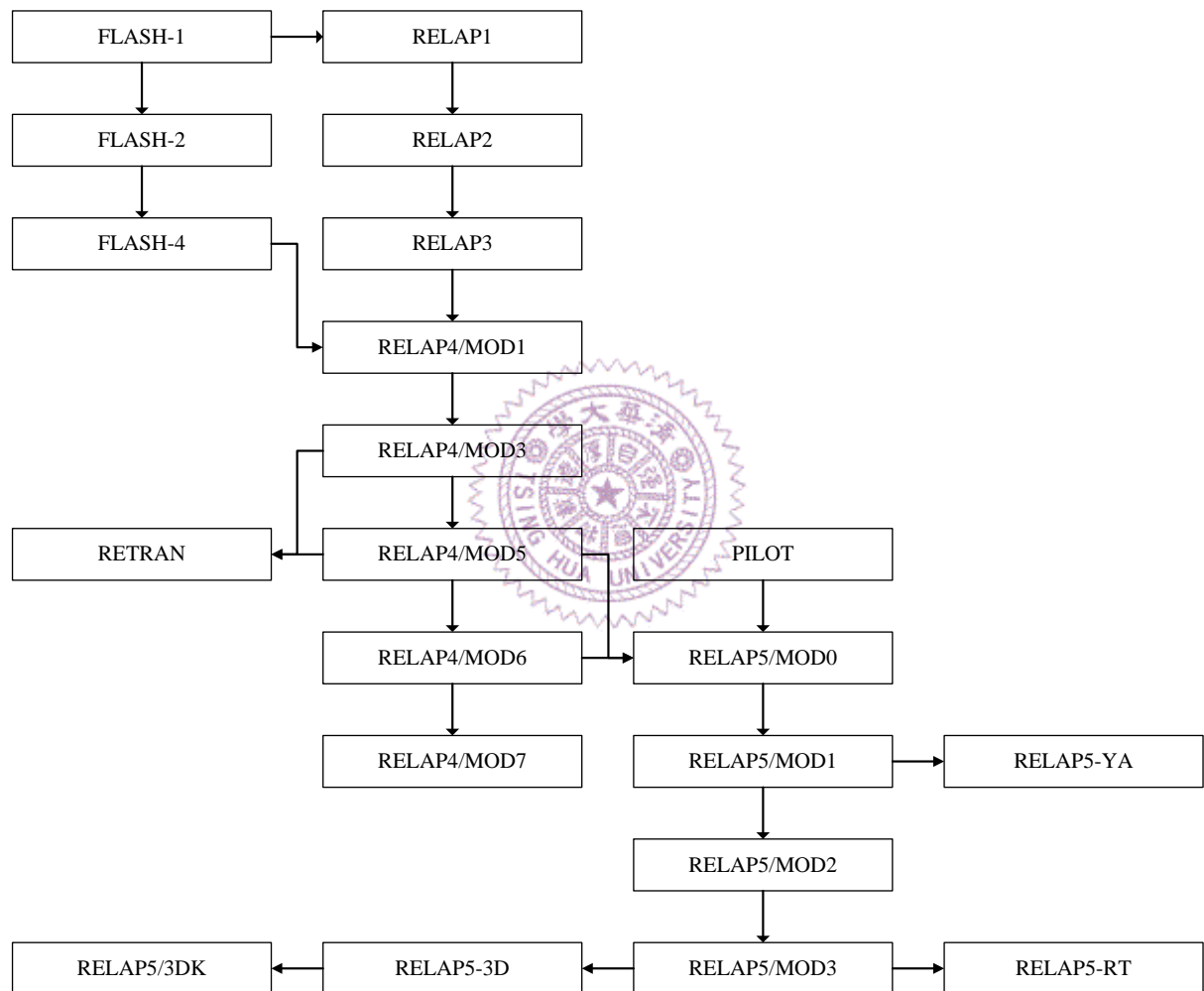


圖 2.1 RELAP 程式發展史

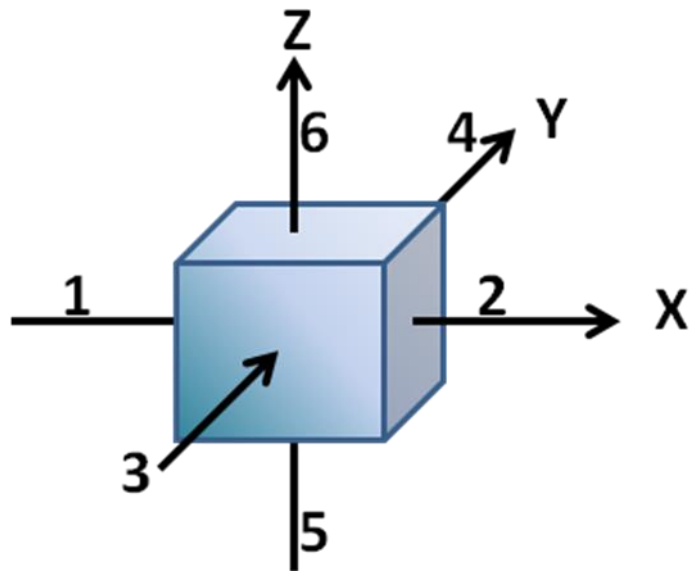


圖 2.2.1 控制體積面編號

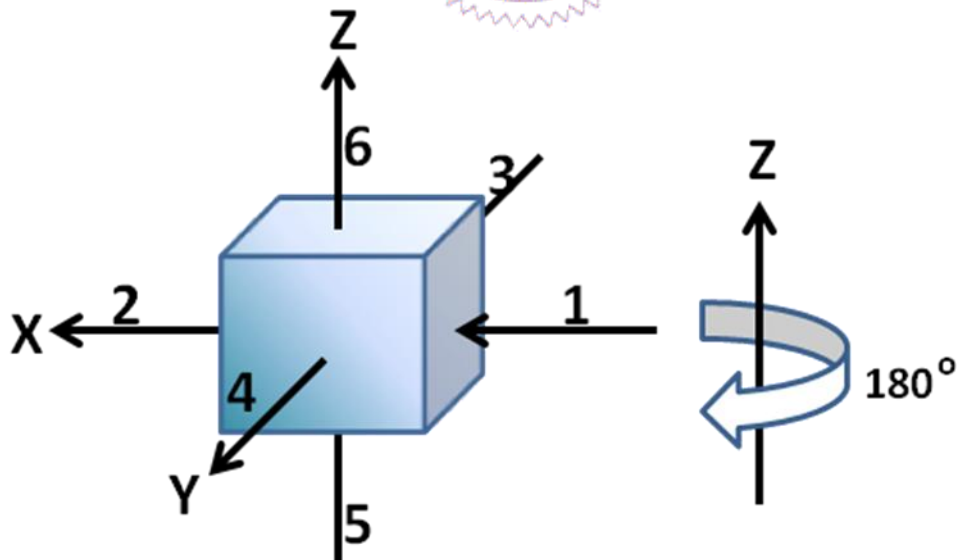


圖 2.2.2 順時針旋轉 180 度控制體積接面編號

## 第三章 馬鞍山電廠及一維輸入模式簡介

### 3.1 馬鞍山電廠簡介<sup>[3]</sup>

馬鞍山電廠為台灣第三座核能電廠，也是第一座壓水式核能電廠，裝置兩部完全相同的核能機組，圖 3.1.1 為其示意圖<sup>[3]</sup>。電廠採用西屋公司設計製造的壓水式反應爐(Pressurized Water Reactor, PWR)，與奇異公司製造的汽輪發電機和各項附屬設備所組成，反應爐最大熱功率 2775MWt，反應爐冷卻水泵產生熱功率 10MWt，故核能蒸氣供應系統(Nuclear Steam Supply System, NSSS)總功率為 2785MWt，汽輪發電機可發出 951.75MWe 之最大發電量。

反應爐冷卻水系統(Reactor Coolant System, RCS)共有三條迴路，每條迴路有一個反應爐冷卻水泵(Reactor Coolant Pump, RCP)和一個蒸氣產生器(Steam Generator)，如圖 3.1.2<sup>[3]</sup> 所示。在第二迴路上聯有一調壓槽(Pressurizer, PZR)，藉電熱器加熱或冷水噴灑以調節反應爐及各 RCS 迴路的壓力，RCS 壓力維持在  $157\text{Kg/cm}^2$  (2,235psig) 左右使反應爐冷卻水保持在過冷狀態不至沸騰。

反應爐爐心共有 157 組燃料元件，每組燃料元件之構造均相同，但鈾-235 濃度則不相同。首次爐心裝置之燃料，概分為 3.1 w/o、2.4 w/o 和 1.6 w/o 三種，分置於爐心三個區域。位於爐心外圍之第三區域的濃度最高 (3.1 w/o)，第一區域 (1.6 w/o) 與第二區域 (2.40 w/o) 則在爐心中間部份呈棋盤式分佈，如圖 3.1.3<sup>[3]</sup>，這樣安排使爐心徑向中子通量分佈比較平均。每次燃料更換時，依預定下次燃料週期需要，更換並重新安排燃料分佈，原則上換置約三分之一的新燃料元件。

### 3.2 RELAP5-3D 馬鞍山電廠一維輸入模式簡介

本輸入檔係由國立清華大學認證分析技術研發與應用實驗室，所提供之馬鞍山

RELAP5/3DK 輸入檔<sup>[1]</sup>，做部分修改成為 RELAP5-3D 輸入檔，兩版本間差異詳見於附錄 B。

使用 RELAP5 程式需將電廠系統管路分割成許多控制體積(Control Volume)，控制體之間由流體接點(Junction)相接，再使用熱結構(Heat Structure)模擬熱的產生和交換，而電廠系由許多主系統與附屬系統所組成，如須一一模擬之則須耗費許多時間與人力資源，因此部分系統使用依時體積(Time Dependent Volume)或依時流體接點(Time Dependent Junction)作為邊界條件，如圍阻體壓力，高低壓安全注水量，汽機，二次側飼水等，且二次側飼水在暫態發生後立即跳脫，未有詳細模擬之需求；此外電廠重要控制系統亦可由 RELAP5 程式所支援，例如：調壓槽調控壓力、蒸氣產生器飼水三元控制、跳脫保護等重要系統都已經由控制卡建入輸入檔中。

馬鞍山 RELAP5-3D 輸入檔節點如圖 3.2.1 所示，因空間關係只畫出三環路中的第一及第二環路，第二環路上有一調壓槽，第三環路與第一環路相同，並且破口在第一環路之冷端發生；輸入模式由 268 個控制體積，322 個流體接點，174 個熱結構所組成，並使用點動態中子模式(Point Kinetic Model)計算爐心功率。

如圖 3.2.2 降流區方面分成兩部分：破口側(30、31、33、34)與完整側(60、64)；完整側的體積與流動面積為破口側的兩倍，破口側降流區連接環路一的冷端，完整側降流區連接環路二與三冷端，與降流區控制體積相接的縱向流體接點均設有反向極限流限制(Counter Current Flow Limitation, CCFL)模式，模擬事故發生後冷卻水無法直接抵達壓力槽底部現象。

爐心上下分別連接壓力槽上下方體積，通道由上到下分成 9 段，水平則分成三部分，分別是熱通道(Hot Channel)，平均通道(Average Channel)，與旁通通道(Bypass Channel)，熱通道模擬水流通過一束最熱燃料元件，平均通道則模擬爐心其他 156 束燃料元件，熱通道與平均通道之間設有橫向流體接點，模擬真實爐心流體會橫向流動情形，共計 9 個橫向流體接點；旁通通道內沒有燃料，並且水流不與熱通道或平均通道相通。爐心通道中設有熱結構，模擬燃料束，垂

直方向分成 16 個區間數，燃料棒徑向分成 7 個區間數，模擬由內而外從燃料丸到燃料護套表面的熱傳遞；在熱通道裡設有一最熱燃料棒熱結構與最熱燃料束熱結構，平均通道裡則是其他燃料束總和的熱結構，燃料熱結構之間有輻射熱傳模式模擬相互傳遞熱量，模式詳述於 4.2.3；爐心旁通通道含兩組熱結構，一組做為結構體儲存熱能，另一組模擬爐心水流經燃料加熱後，將熱量透過爐心隔板(Baffle Plates)傳入與燃料桶(Core Barrel)間流動的旁通通道水流。

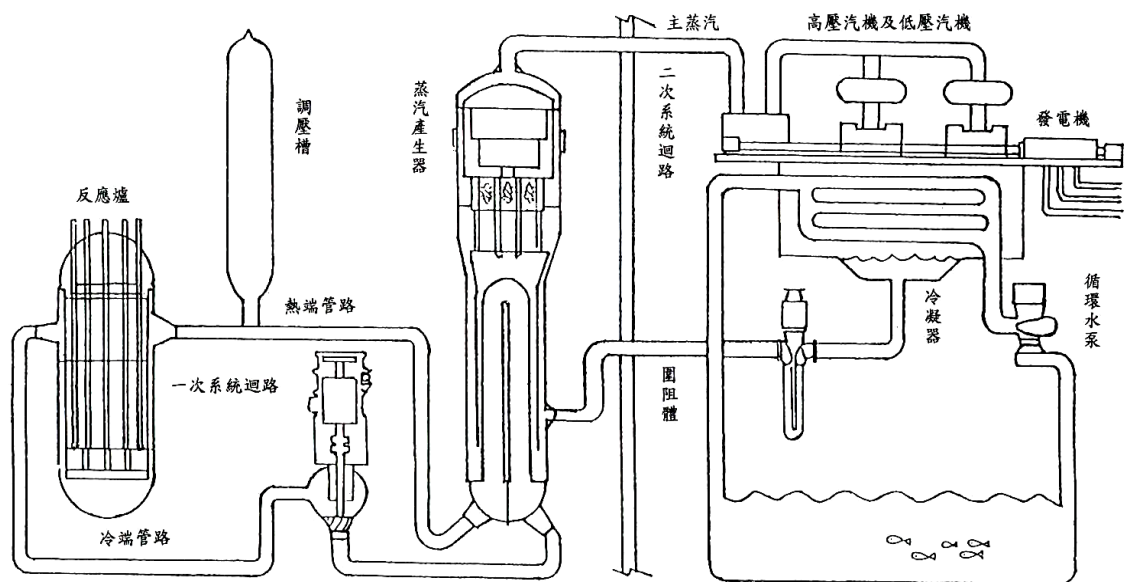


圖 3.1.1 壓水式反應爐示意圖

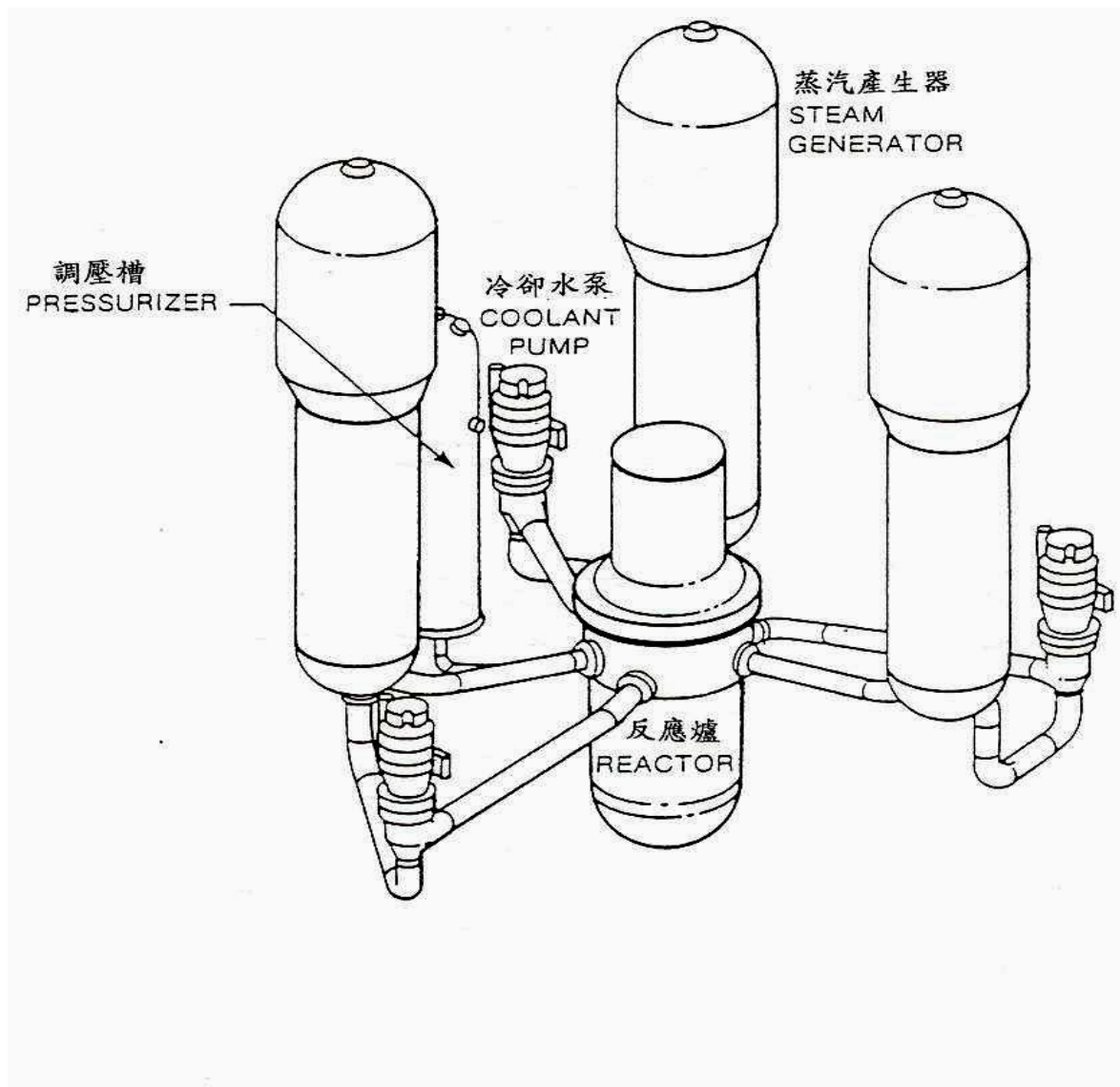


圖 3.1.2 反應爐環路示意圖






	First Core	3 Region Reload Core
	1.6 w/o	燃燒一循環之燃料
	2.4 w/o	燃燒一循環之燃料
	3.1 w/o	新燃料

圖 3.1.3 首次循環之爐心燃料佈局

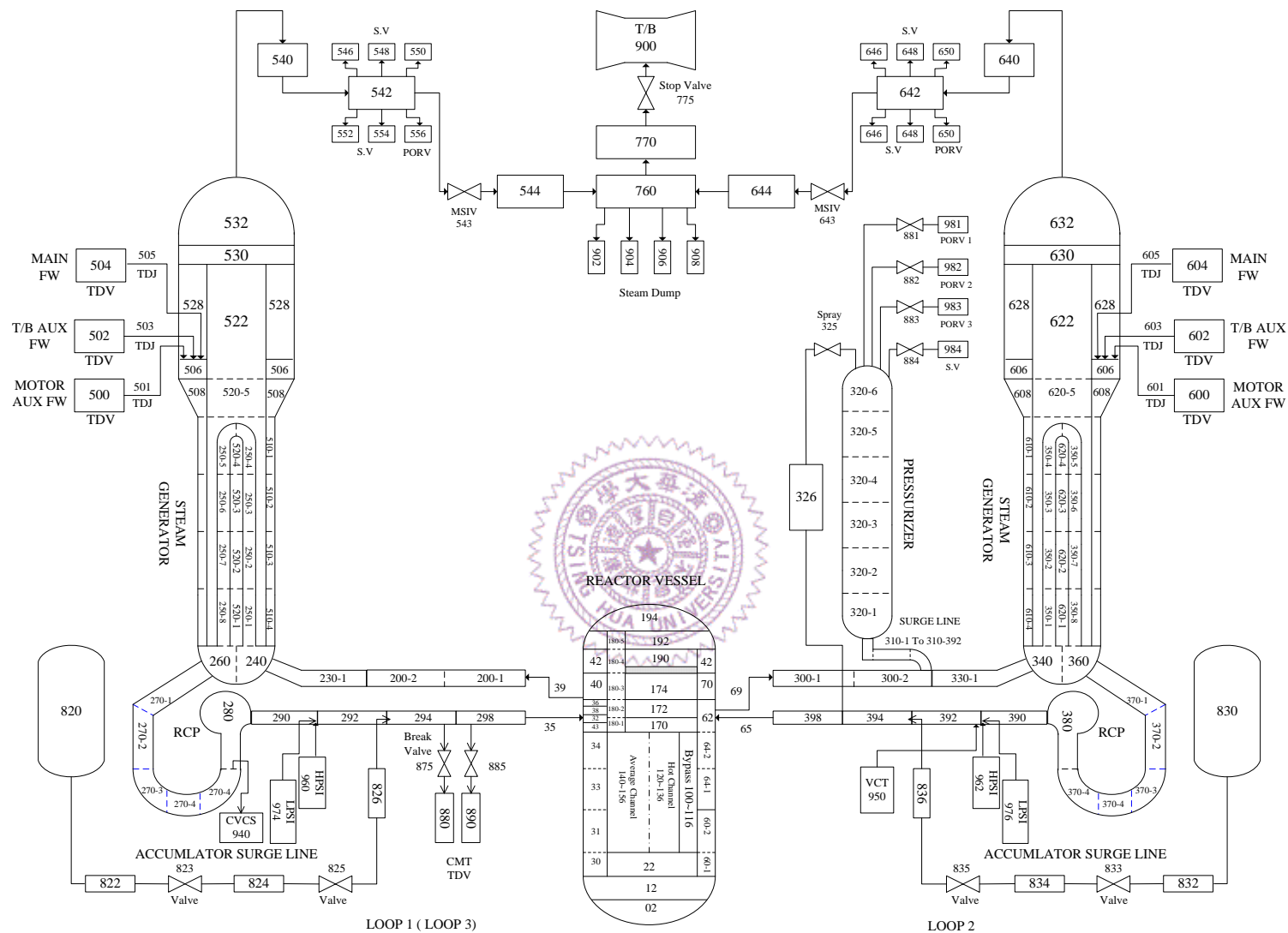


圖 3.2.1 核三廠輸入模式節點圖

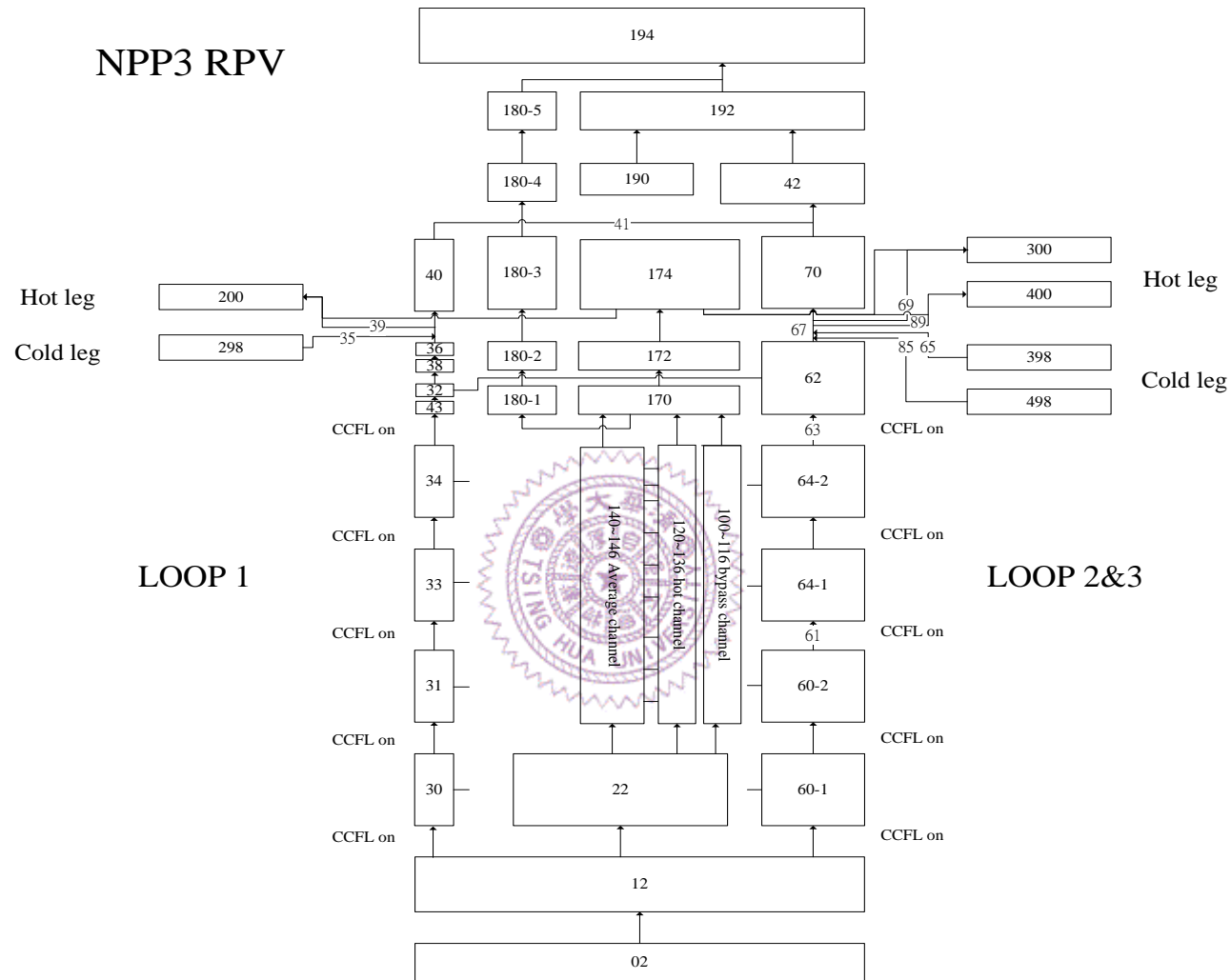


圖 3.2.2 壓力槽節點圖

## 第四章 爐心與降流區多維度輸入檔的建構

### 4.1 降流區多維度建構

#### 4.1.1 幾何結構建立

降流區多維度的建構上，依實際形狀選擇圓柱座標，使用中空圓管狀通道， $z$  方向區間數與區間大小均與一維模式一致，從上到下由四個多維度元件組成；原因如下：(1)降流區實際內徑從上到下都不盡相同，多維度元件只能設定單一固定內徑大小，(2)多維度元件的內部流體接點(Internal Junction)無法設置反向極限流模式(Counter Current Flow Limitation, CCFL)，現象的模擬需要使用外部流體接點(External Junction)。降流區縱向流體接點均設定反向極限流模式，位置可參考圖 3.2.2。 $r$  方向使用一個區間數， $\theta$  方向則使用三個區間數，各別為 120 度，環繞相接成一完整中空圓管通道，將原本一維模式合併的完整側降流區拆開，模擬等分的三個環路降流區。

破口側(環路一)連接  $\theta$  方向的一個區間，完整側(環路二和三)連接  $\theta$  方向剩下兩個區間，比照一維模式，如 3.2 所述，與一維降流區模式節點比較如圖 4.1；內徑則根據一維模式建立計算書<sup>[2]</sup>做設定，外徑根據流動面積大小推得，將建置完的多維降流區取代一維降流區完成幾何結構建立。

#### 4.1.2 熱結構建立

原本建置於一維模式的降流區體熱結構共分成三等份，卡號依序為 0300 到 0303、0600 到 0603、0800 到 0803，分別與三個環路的由上到下四個降流區控制體積相連，環路二與環路三為完整側，由上到下控制體積編號為 64-2、64-1、60-2、60-1，如圖 3.2.2 所示；0600 到 0603 與 0800 到 0803 皆各別由上而下對應到這四個控制體積中，0300 到 0303 則對應到破口側降流區。

多維模式則將 0600 到 0603、0800 到 0803 分開各別置於環路二與環路三的降流區中，做為結構物儲存熱能的熱結構。完成上述設定後，利用 RELAP5-3D 程式進行穩態計算，先將功率固定，調整熱水流性質如爐頂壓力、爐心進口流量達到穩定，並與一維模式一致；再使用中子點動態模式，考慮爐心水流與燃料溫度的反應度做回饋，完成多維降流區穩態輸入檔的建置。

## 4.2 爐心多維度建構

### 4.2.1 幾何結構建立

燃料元件為長方體，因此選擇直角座標系統來建置爐心，z 方向與一維模式有相同的區間數與區間大小，區間數有 9 個，但這些區間彼此均以多維度元件的內部流體接點相互連接。x-y 平面上，旁通通道維持原本的一維模式不做更動，具燃料燃料棒的流體通道則不再分成熱通道與平均通道，爐心燃料束以每個大小都相同的正方形流道來模擬，在總流動面積相同的條件下，將燃料束等分到各模擬流道，每個流道內均包含超過一束燃料元件，三維模式與一維模式比較如圖 4.2.1。在建構三維模式時發現，當三維流體通道截面積差異很大時，會有不合理的結果詳見附錄 A。故無法採用一維模式之平均通道與熱通道方式模擬爐心，僅能將爐心分為截面積相等的通道。

為了解 X-Y 平面分割數對暫態分析結果的影響，在建構模式時，流道數目採用 13、37、69 個三種，進行靈敏度分析。因爐心近似圓形而非正四方型，因此爐心需由數個多維度元件藉外部流體接點做橫向相互連接構成，單一多維度元件內則以內部流體接點將各控制體積相連接，以完成近似真實爐心幾何形狀。圖 4.2.2、4.2.3、4.2.4 三種流道總數排成的形狀與實際爐心形狀的比較，虛線所圍的每個方框為一束實際爐心燃料元件，共 157 束。每個實線所圍的方型均為模擬用流道，每個深色實線所圍代表一個多維度元件。以圖 4.2.2 為例，爐心由 5 個多維度元件組成，共計 13 個模擬用流道，圖上的三碼長度的數字表示此多維元件在輸入檔中的元件

編號。

爐心總流道面積與總體積與一維模式相等，而垂直方向體積因燃料元件有燃料隔架(Grid Spacer)而有所變化，因此使用體積因子來做調整，流力參數如粗糙度(Roughness)、水力直徑(Hydraulic Diameter)均與一維模式做相同輸入；爐心頂部與爐心底部，分別藉由外部流體接點連接到爐心上下方體積，總流體接點面積與一維模式一致設定，完成爐心多維度幾何結構建置。

#### 4.2.2 熱結構建立

燃料熱結構方面，進行冷卻水流失事故分析時，燃料丸大小、燃料丸與護套之間的間隔、及間隔中的氣體組成分率都需使用其他程式進行燃耗計算後才能得到，且每束燃料均不相同，需詳細燃料資訊，所以本研究略過每束燃料各別燃耗計算步驟。爐心多維度熱結構所需數值如：燃料丸半徑、護套間隔大小、護套間隔氣體組成分率、燃料丸由中心往外各區間的功率比例、燃料束 z 方向功率曲線等均參考一維模式的平均燃料元件熱結構數值做設定，而最熱棒則與一維模式使用相同熱結構數值輸入，本研究假設最熱棒位於最熱流體通道中。熱結構分佈如圖 4.2.2 到圖 4.2.4 所示。

多維爐心模擬熱結構不再分成熱通道與平均通道熱結構，而是每個爐心通道都有相同非整數數目的燃料束熱結構，且在最熱的熱結構通道內置入最熱棒熱結構；功率在 x-y 平面分佈參考三廠某特定週期下各個燃料束所輸出熱功率<sup>[4]</sup>，資訊如圖 4.2.5 所示，著色區塊為較高功率區。圖示之數值總和為 157 也就是燃料元件總數，數值除以 157，也就是單根燃料束佔爐心總輸出功率比；流體通道內含有超過一束燃料元件，流體通道內熱結構的燃料功率算法如圖 4.2.6 所示。根據圖 4.2.2 到圖 4.2.4 所示之流體通道與實際爐心燃料對應情形，逐一算出各通道功率值。計算時採用四分之一對稱原則。計算後數值如圖 4.2.7 到圖 4.2.9，數值代表該熱功率佔爐心總功率百分比，藉由此數值設定各通道的燃料熱結構輸出功率值。圖 4.2.2 到圖 4.2.4 所示之

四碼數字代表熱結構在輸入檔中的代號，前三碼代號相同者則有著相同的功率值。本研究假設最熱棒位於最熱流體通道內，因此選擇圖 4.2.7 到圖 4.2.9 中間下方最高功率通道位置，置入與一維模式相同的最熱棒燃料熱結構，代號為 1202，位置示於如圖 4.2.2 到圖 4.2.4，並將該位置原本的熱結構扣除最熱棒的熱傳面積與功率值，除了最熱棒所在通道有兩個燃料熱結構外其餘通道均有一個燃料熱結構。

爐心水流除了流經燃料通道，亦會經由旁通道，而旁通通道水流大多經由爐心外圈的阻板 (Baffle Plates) 與燃料桶間 (Core Barrel) 間隙通過，燃料通道水流熱量可透過爐心阻板與旁通通道水流相互傳遞，因此一維模式時旁通通道熱結構設定與平均通道水流做熱交換，而爐心多維度模擬時則將一維模式使用的熱結構平均分攤到所有模擬用最外圈的流體通道，也就是當模擬用通道的 +X、-X、+Y、-Y 方向缺少一個以上通道與它相鄰時，則視之為最外圈通道，並置入一個與旁通通道做熱交換的熱結構，因此圖 4.2.2 需置入八個旁通通道熱結構，圖 4.2.3 則需十六個，圖 4.2.4 需二十四個；到此完成爐心多維度模擬的熱結構輸入。

### 4.2.3 輻射熱傳模式建立

馬鞍山電廠 RELAP5/3DK 一維模式輸入檔<sup>[1]</sup>原本並不包括輻射熱傳模式，因暫態過程燃料護套尖峰溫度過高(詳見附錄 B.2)，故額外加入輻射熱傳模式<sup>[5]</sup>於一維模式輸入檔中。

考慮燃料產生的熱量除了在燃料護套表面由流體強制對流帶走或少部分直接散佈在流體外，還可透過熱輻射在燃料束與結構體之間相互傳遞熱量，在建立熱輻射輸入模式時需遵守下面兩條等式：

$$A_i F_{ij} = A_j F_{ji} \quad \cdots \cdots (1)$$

$$\sum_{j=1}^N F_{ij} = 1 \quad \cdots \cdots (2)$$

等式 1 指的是 i 的面積乘上 i 看到 j 的視角因子(View Factor)與 j 的面積乘上 j 看到 i 的視角

因子相等。等式 2 則是包覆模式(Enclosure Model)下當  $i$  為  $j$  所包覆時， $i$  到所有  $j$  的視角因子總和為 1。

一維模式的爐心輻射熱傳模式輸入檔<sup>[5]</sup>，假設輻射熱傳只侷限於爐心燃料熱結構，不包含燃料以外的熱結構，且熱輻射只在相同高度的 X-Y 平面相鄰燃料間傳遞，不與不同高度的熱結構做熱輻射傳遞，一維模式時熱通道包覆最熱棒，平均通道包覆熱通道，幾何上可簡化成圖 4.2.9，最熱棒輻射熱給熱通道，熱通道對內輻射一小部分到最熱棒大部分仍為熱通道自己吸收，同理應用到熱通道及平均通道的輻射。

爐心多維度模擬輻射熱傳模式，參考一維模式的輻射熱傳輸入檔，最熱棒及最熱棒所在通道的熱結構模擬方法同上，不同的是在爐心的通道熱結構，輻射熱會往+X、-X、+Y、-Y 相鄰的四個通道的熱結構傳去，因此假設爐心內圈的熱結構對周圍四個熱結構的視角因子均為 0.25，而最外圈的燃料熱結構則因只能對爐心的燃料熱結構做熱輻射，且須滿足等式 1 及 2，所以扣除傳給相鄰的通道數乘上 0.25 後，剩餘的視角因子則保留給熱結構本身，如圖 4.2.11。燃料熱結構 Z 方向有 16 個區間數所以每個區間均做此模式設定，完成輻射熱傳模式建立。

#### 4.2.4 其他設定

其它設定包括：(1)修改中子點動態模式於反應度回饋計算所用的流體通道，與燃料溫度反應度回饋所用的熱結構。在一維模式中分別設定的流體通道為熱通道，熱結構為平均燃料束熱結構，在爐心多維度模式中則使用爐心最中間的流體通道與熱結構，此一修改對暫態發生後功率變化影響不大。圖 5.2.54 為暫態發生後一維模式與多維爐心模式總功率變化圖，可看出並無太大差異，主因為暫態發生後模擬控制棒插入的負反應度係數主導了功率變化。(2)一維模式中開啟再泛水計算是當反應槽底部硼濃度大於  $10^{-5} \text{ kg/m}^3$ ，且進入平均熱功率流體通道的入口流體接點的液體體積比大於 0.4 時啟動，在爐心多維度模式則將此流體接點的判斷位置改在爐心

代表位置的中央流體通道入口流體接點。

當建構模式輸入完成後，同樣利用 RELAP5-3D 程式進行穩態建立，首先使用固定功率調整整個系統的熱水流趨於穩定後，調節爐心進口流阻值使爐心總質量流率與一維模式一致，而爐心入口反向流阻設定值則參考計算書<sup>[2]</sup>所算數值做設定。最後如 4.1 節所述，重置整個系統參數初始值後，加入點中子動態模式，完成多維爐心模擬穩態輸入檔。

### 4.3 爐心與降流區多維度建構

承上述之建構，將所述修改結合在同一輸入檔中，再採用相同的步驟建立穩態。

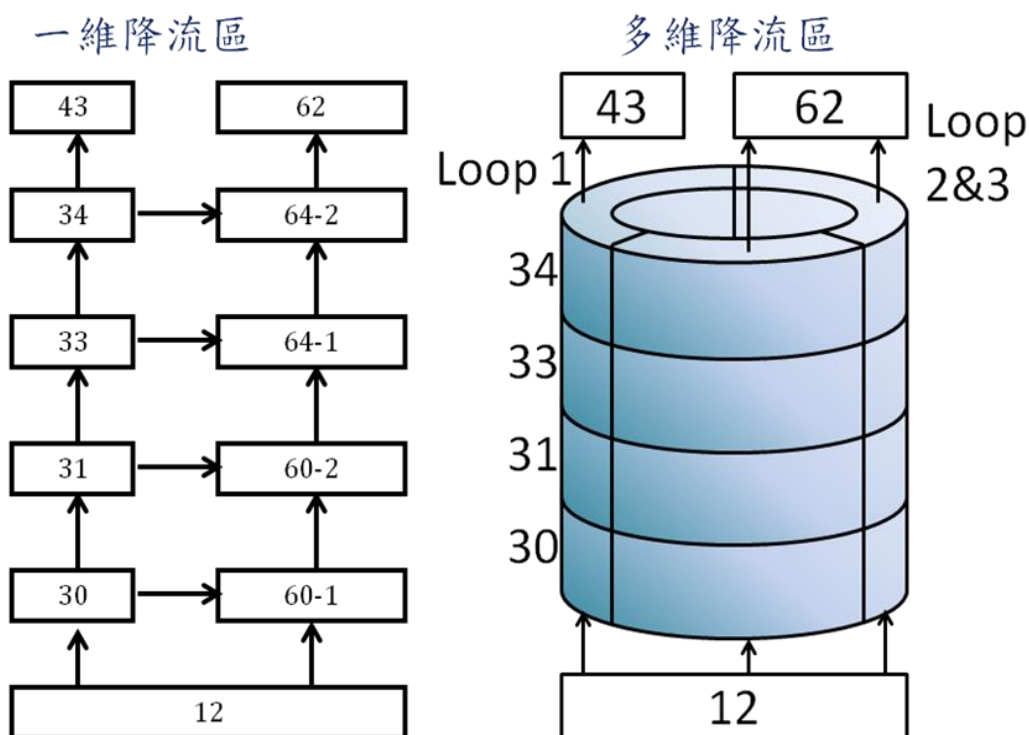


圖 4.1 多維降流區模式與一維降流區模式比較情形

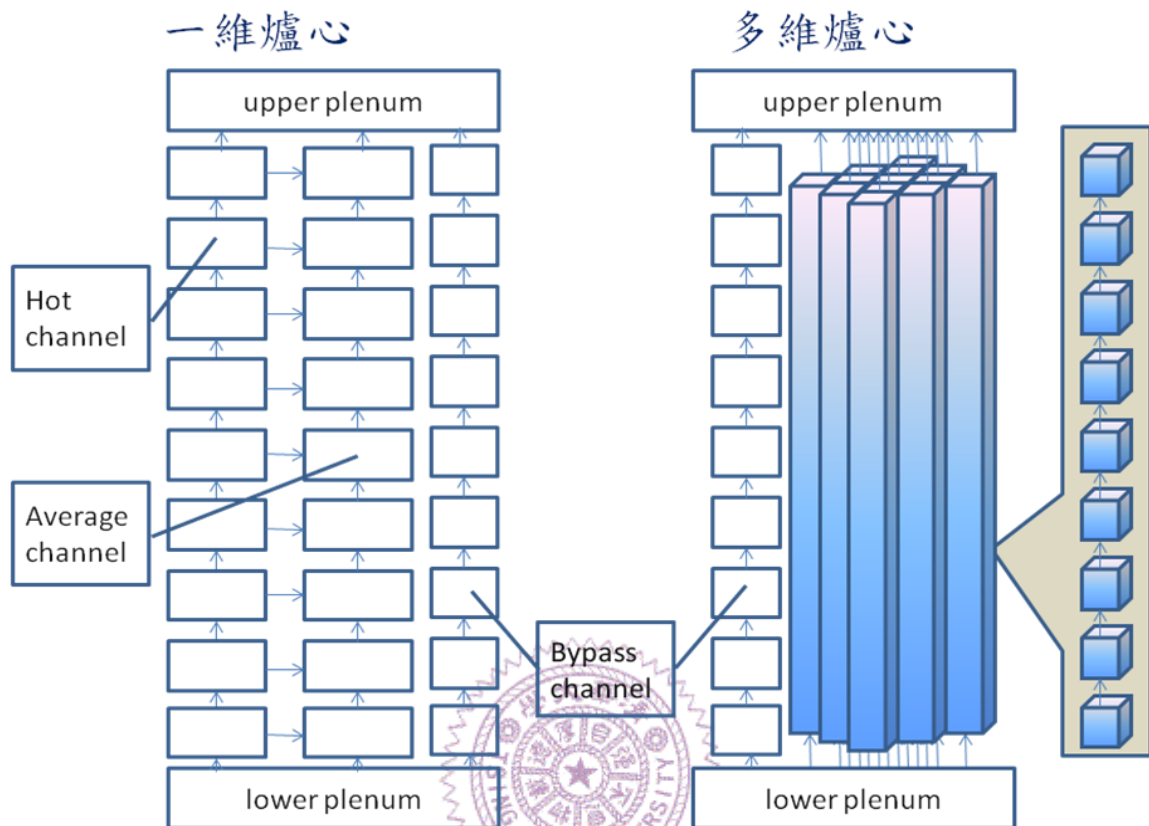


圖 4.2.1 多維爐心模式與一維爐心模式節點比較示意圖

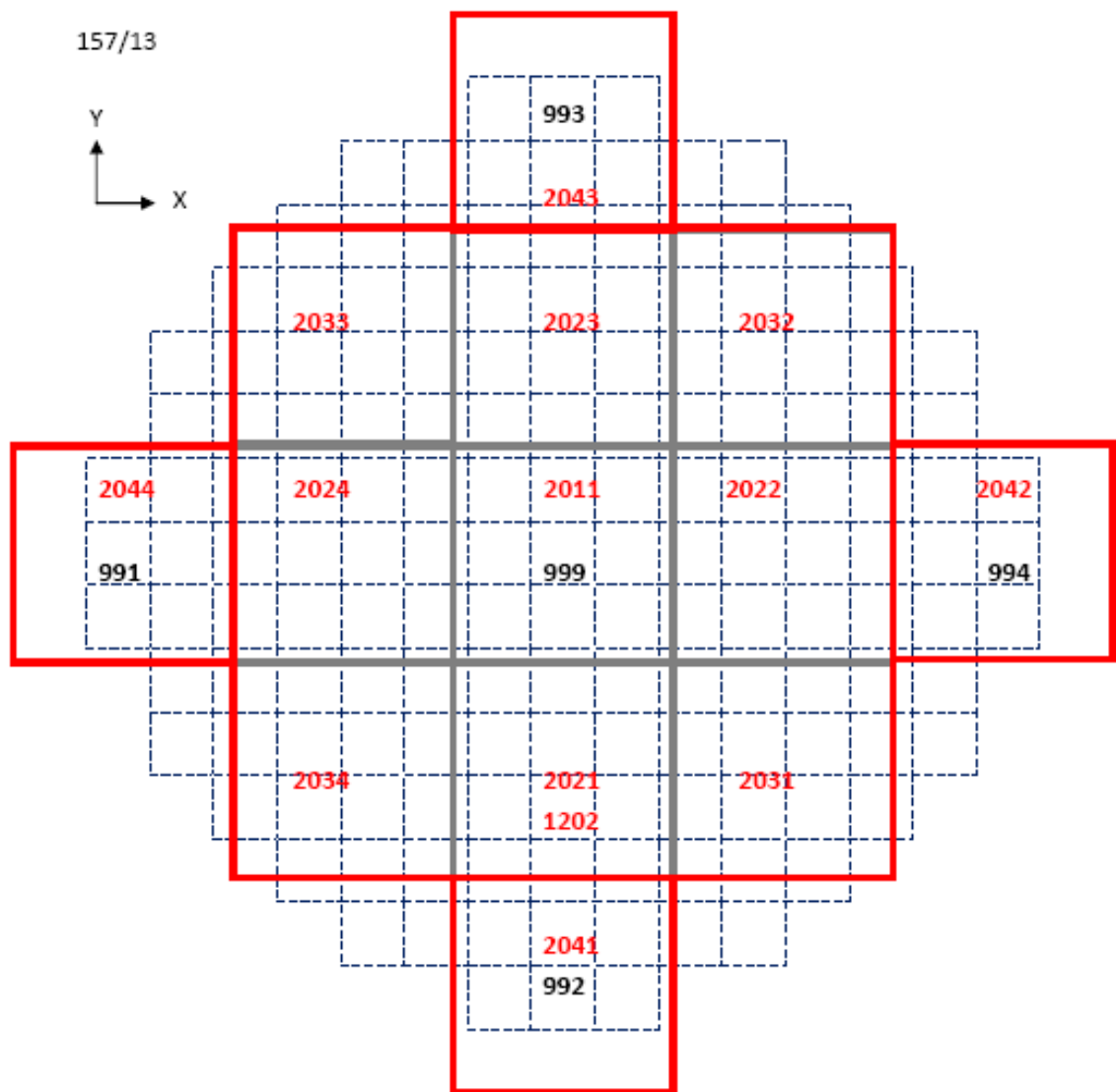


圖 4.2.2 爐心多維度模擬熱流通道與爐心燃料束實際相關位置與多維度元件代號與熱結構代號

(通道數 13)

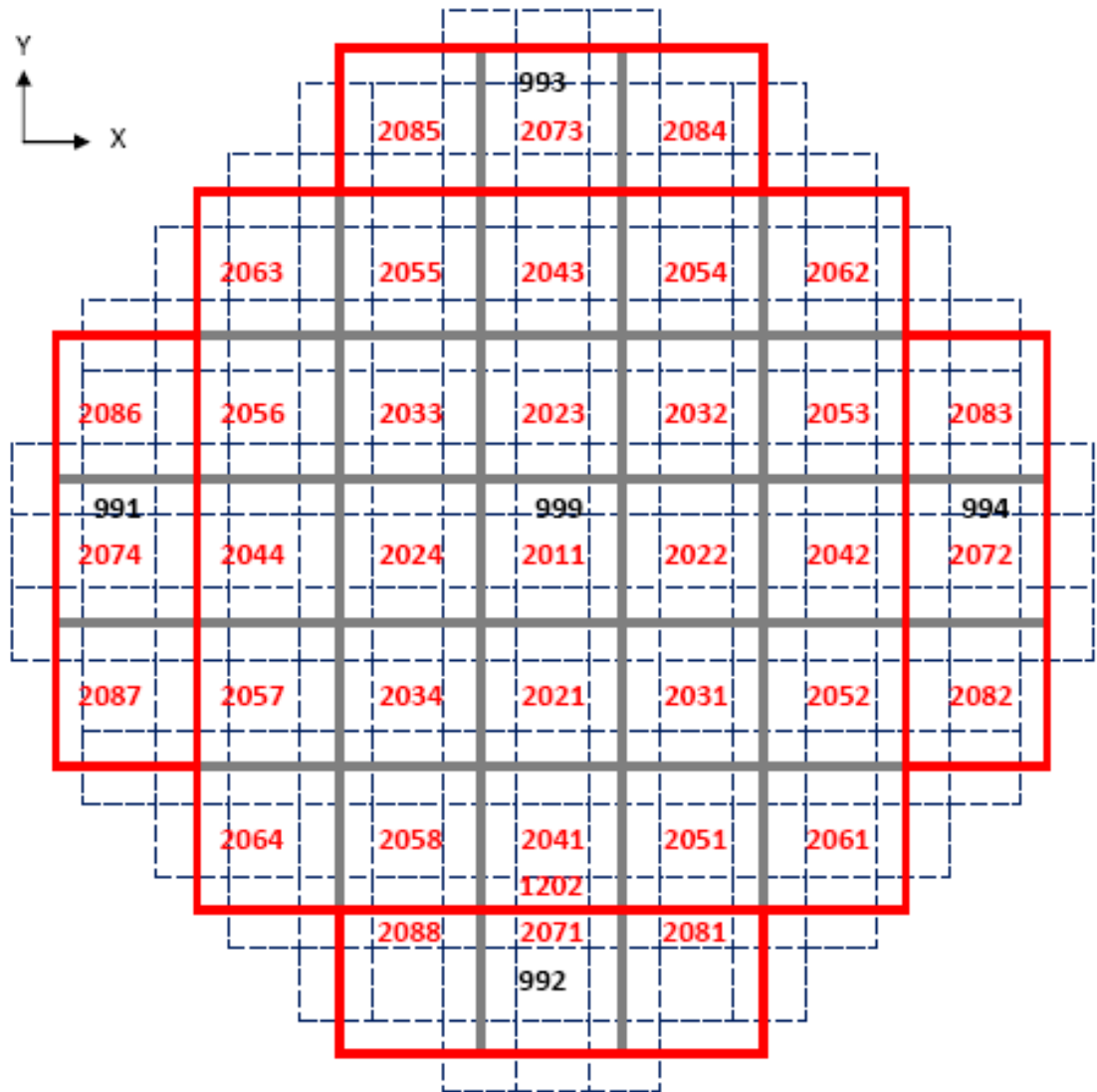


圖 4.2.3 爐心多維度模擬熱流通道與爐心燃料束實際相關位置與多維度元件代號與熱結構代號

(通道數 37)

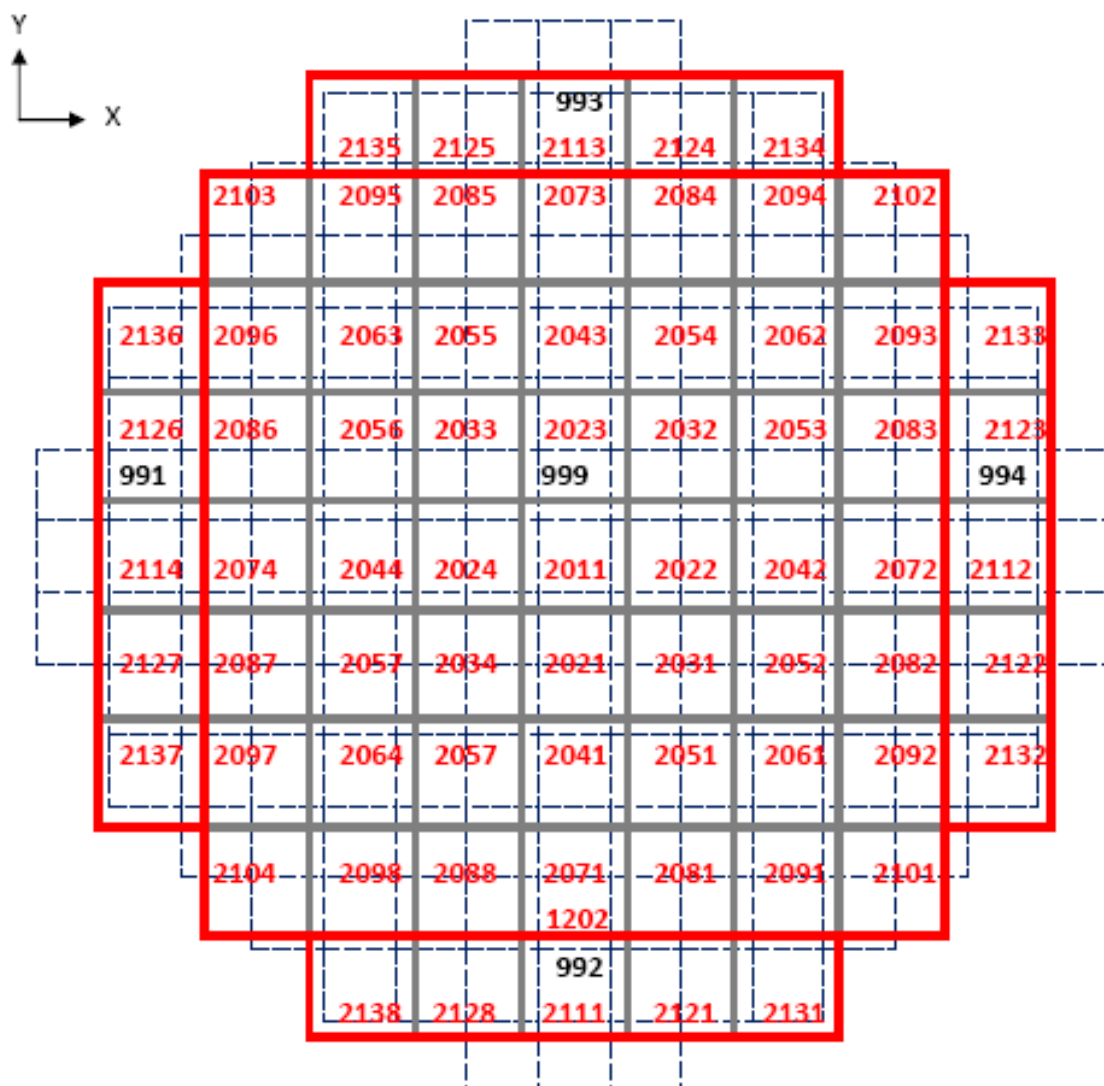
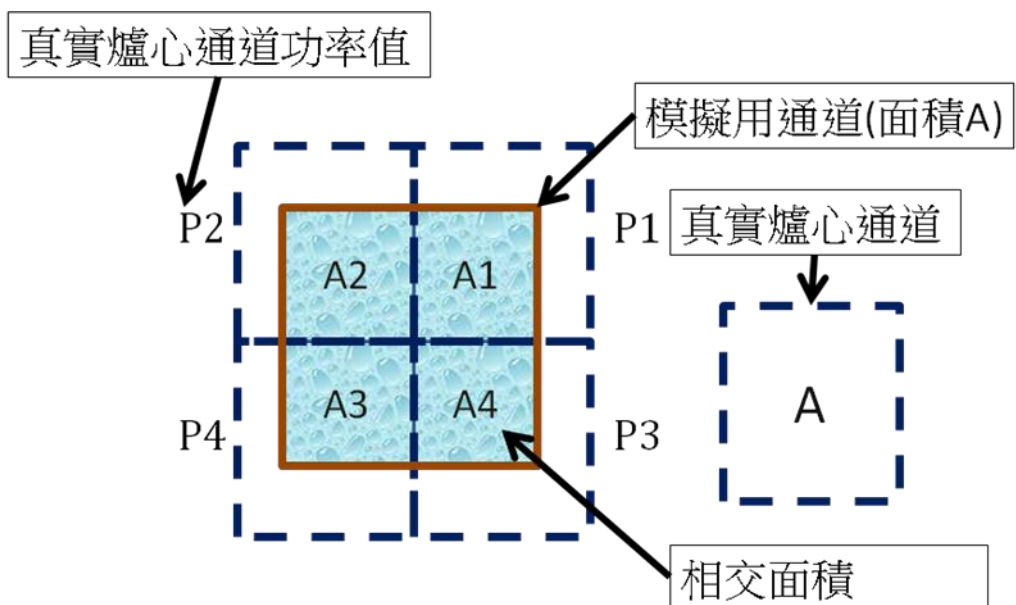


圖 4.2.4 爐心多維度模擬熱流通道與爐心燃料束實際相關位置與多維度元件代號與熱結構代號

(通道數 69)

	R	P	N	M	L	K	J	H	G	F	E	D	C	B	A
1							0.28	0.32	0.28						
2					0.39	0.61	1.11	1.13	1.12	0.62	0.39				
3				0.43	1.11	1.3	1.38	1.1	1.4	1.32	1.11	0.43			
4			0.43	1.14	1.36	1.13	1.12	1.37	1.13	1.15	1.36	1.15	0.42		
5		0.38	1.1	1.35	1.03	1.05	1.32	1.08	1.33	1.06	1.05	1.35	1.09	0.38	
6		0.61	1.29	1.13	1.07	1.07	1.27	0.97	1.27	1.08	1.06	1.14	1.31	0.62	
7	0.28	1.11	1.37	1.13	1.34	1.28	1	0.89	1	1.27	1.33	1.15	1.4	1.11	0.28
8	0.33	1.13	1.09	1.4	1.09	0.96	0.89	1.18	0.89	0.96	1.09	1.43	1.1	1.11	0.32
9	0.28	1.12	1.41	1.13	1.29	1.25	0.98	0.89	1.01	1.27	1.33	1.14	1.41	1.12	0.28
10		0.62	1.31	1.13	1.05	1.06	1.24	0.96	1.28	1.07	1.06	1.15	1.32	0.63	
11		0.38	1.11	1.36	1.06	1.05	1.32	1.1	1.34	1.06	1.05	1.32	1.07	0.36	
12			0.43	1.15	1.37	1.14	1.12	1.42	1.14	1.14	1.35	1.14	0.38		
13				0.43	1.11	1.31	1.41	1.11	1.42	1.31	1.1	0.4			
14					0.39	0.62	1.13	1.15	1.13	0.63	0.38				
15							0.28	0.33	0.28						

圖 4.2.5 核三廠特定周期爐心各燃料束熱功率分佈



$$\text{Channel Power} = P1 * (A1/A) + P2 * (A2/A) + P3 * (A3/A) + P4 * (A4/A)$$

圖 4.2.6 通道熱結構功率計算方法

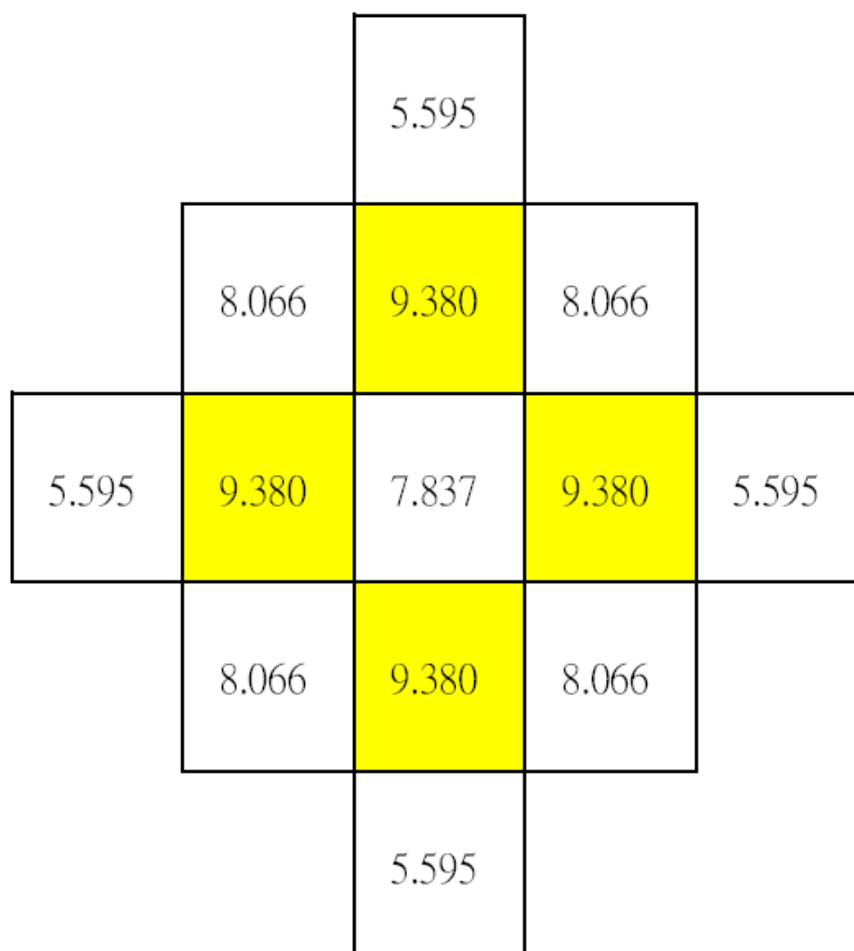


圖 4.2.7 多維爐心熱流通道功率百分比(通道數 13)

		2.880	3.662	2.880		
	2.880	3.737	5.305	3.737	2.880	
2.880	3.737	4.826	4.693	4.826	3.737	2.880
3.662	5.305	4.693	4.191	4.693	5.305	3.662
2.880	3.737	4.826	4.693	4.826	3.737	2.880
	2.880	3.737	5.305	3.737	2.880	
		2.880	3.662	2.880		

圖 4.2.8 多維爐心熱流通道功率百分比(通道數 37)

		1.061	1.888	2.233	1.888	1.061		
	1.312	2.598	2.840	2.855	2.840	2.598	1.312	
1.061	2.598	2.570	2.676	2.682	2.676	2.570	2.598	1.061
1.888	2.840	2.676	2.619	2.269	2.619	2.676	2.840	1.888
2.233	2.855	2.682	2.269	2.345	2.269	2.682	2.855	2.233
1.888	2.840	2.676	2.619	2.269	2.619	2.676	2.840	1.888
1.061	2.598	2.570	2.676	2.682	2.676	2.570	2.598	1.061
	1.312	2.598	2.840	2.855	2.840	2.598	1.312	
		1.061	1.888	2.233	1.888	1.061		

圖 4.2.9 多維爐心熱流通道功率百分比(通道數 69)

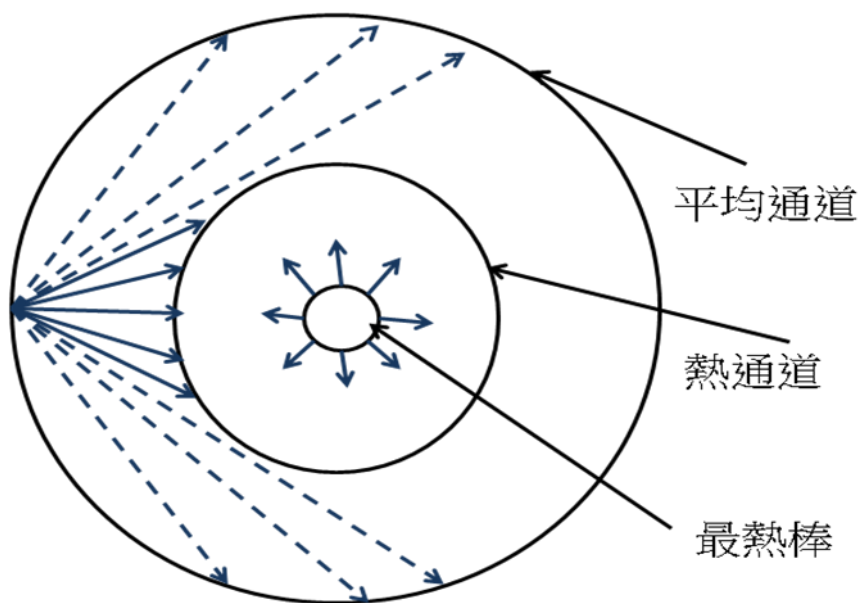


圖 4.2.10 輻射熱傳熱結構相對關係

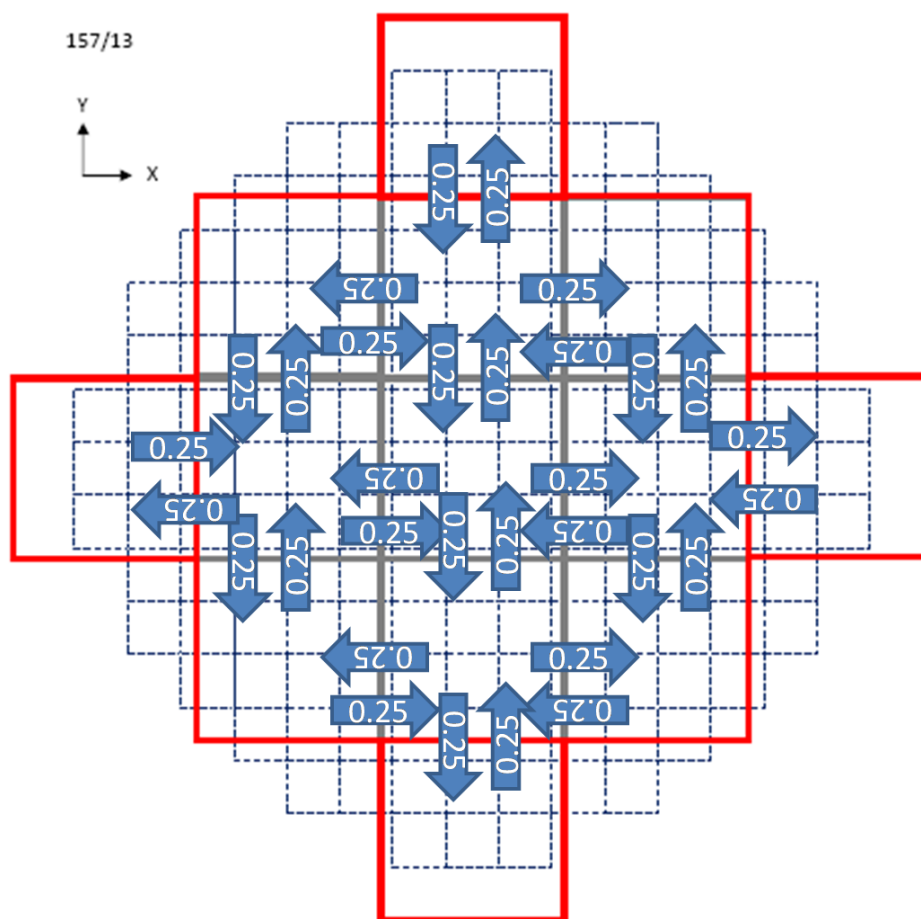


圖 4.2.11 輻射熱傳熱結構視角因子相對關係 (以通道數 13 為例)

## 第五章 爐心與降流區多維度冷卻水流失事故暫態模擬分析

如表 5.1 與表 5.2 所列，本研究共執行八個分析案例，包括一維模式分析；降流區多維度分析；三個案例之多維度爐心分析，分別為 13、37、69 個爐心流道；以及三個案例之降流區與爐心多維度合併分析。分析結果的比較與討論如下列章節所述。

緊急爐心冷卻系統包含三部分，蓄壓槽硼液、高壓注水、低壓注水；當冷端環路小於蓄壓槽壓力(615 psi)時，硼液自動經由逆止閥注入冷端環路，而高壓及低壓注水啟動時間為調壓槽頂端壓力小於 1715 psi 時，經過 27 秒的時間延遲後開始注入冷端管路。

事故過程中壓力槽歷經過程為冷卻流體流失，緊急爐心冷卻水注入，壓力槽再注水，爐心再泛水；壓力槽再注水的定義為壓力槽底部區間(Lower Plenum，爐心下方 8.38 ft 處)含硼濃度大於  $10^{-5} \text{ kg/m}^3$ ，也就是蓄壓槽硼液能穿越降流區的反向極限流限制抵達爐心底部；再泛水的定義為進入在注水階段後，爐心下方體積(爐心下方 1.875 ft)進入爐心之流體接點，液體體積分率大於 0.4，此時視為緊急爐心冷卻水已注滿壓力槽底部區間及爐心下方體積向上進入爐心，並且因已填滿爐心下方體積，故流入爐心之冷卻流體液態的比例相當高；一維模式判斷再泛水位置為爐心平均通道的入口流體接點，而爐心多維度模式則為爐心代表位置：中央的流體通道的入口流體接點。

### 5.1 降流區多維度分析

#### 5.1.1 燃料護套尖峰溫度結果比較

一維模式與降流區多維度模式模擬比較中，有效緊急爐心冷卻系統(環路二與環路三的系統)啟動時間，再注水開始時間以及再泛水時間如表 5.1 所列，除緊急爐心冷卻系統啟動時間相同外，再注水及再泛水開始時間降流區多維度模式皆早於一維模式。

圖 5.1.1 為一維模式與降流區多維度模式模擬燃料護套尖峰溫度及其所在位置。一維模式與降流區多維度模式燃料護套尖峰溫度同樣發生在燃料棒距底部的第十個節點，即燃料棒從填有燃料丸所在位置起算往上 7.5 英尺處，且由圖可看到降流區多維度模式燃料護套尖峰溫度發生在沖放期(Blowdown)，而一維模式燃料護套尖峰溫度則發生在再泛水期(Reflood)，且燃料護套尖峰溫度降流區多維度模式較一維模式來得低約 10°F。

圖 5.1.2 為一維模式與降流區多維度模式預測燃料護套發生最高溫度位置臨界熱通量隨時間變化圖，圖 5.1.3 與圖 5.1.4 為一維模式與降流區多維度模式預測燃料護套發生最高溫度位置之熱通量隨時間變化圖，圖中較明顯差異為降流區多維度模式因較早進入再泛水期，因此熱通量較一維模式提早由零回升。因此從圖 5.1.1 可看出，兩種模式的燃料護套尖峰溫度也在此時間點後逐漸分開，且其再泛水期間的熱通量也較高。圖 5.1.5 與圖 5.1.6 為一維模式與降流區多維度模式之熱通道最熱棒淬冷邊界位置與時間變化圖，由圖可看出降流區多維度模式案例的淬冷發生時間稍早於一維模式，且降流區多維度模式於淬冷初期往上淬冷邊界之移動速度也較快。

圖 5.1.7 與圖 5.1.8 為一維模式與降流區多維度模式模擬爐心熱通道之液態水位(Collapsed Water Level)時變圖的比較。從 0 秒破口發生後爐心冷卻水位急速下降，到 10 秒之間經爐心回吸完整側降流區水流後水位小幅上升，之後退回到零，緊接著因再泛水開始，水位逐漸震盪回升，而爐心回吸流體現象只發生在有燃料加熱區域，無燃料直接加熱旁通通道則的未有回吸現象發生，如圖 5.1.9 為爐心旁通通道水位，則無短暫水位回升情形。如圖所示，一維模式與降流區多維度模式爐心水位的預測結果，除降流區多維度模式水位回升時間較早外，並沒有顯著差異。

## 5.1.2 降流區流體流動情形比較

圖 5.1.10 為一維模式與降流區多維度模式模擬冷卻水從破口流出之累計流量圖，除了在 20

到 50 秒之間因降流區多維度模式較一維模式提早進入再注水階段，部分水流開始填入空的壓力槽底部區間，流體往破口移動的量減少，因此出現破口流量差異，之後因相同的緊急爐心冷卻注水累計水量(如圖 5.1.11)及相近的爐心水位高低(如圖 5.1.7)，使得累計破口流量又趨一致。圖 5.1.12 為破口側頂部降流區，方向往上的累計流出質量，可以看到即使已進入再注水階段，但水流仍由破口側降流區持續離開，圖 5.1.13 與圖 5.1.14 為完整側降流區頂部向上累計流出質量，可以看到當破口發生後水流會經由完整側頂部降流區向上離開，之後因爐心回吸而回到低於 0，回吸開始的時間與圖 5.1.8 爐心水位開始回升的發生時間同為暫態開始後第 3 秒。

圖 5.1.15 為經由整個降流區(包含完整側與破口側)頂部淨往上流出的累計質量圖，可以看出雖然圖 5.1.12 破口側與圖 5.1.13 完整側差異極大，但加總後為圖 5.1.15，兩模式流量差異有限，也就是降流區的多維度化改變了水流流動情形，但總體經由降流區流入的水量仍然接近。降流區多維度模式於 20 秒時有少部分水流穿越降流區反向極限流限制，因 15 秒後冷卻水環路開始含有蓄壓槽注入的含硼的冷卻流體，因此流體抵達爐心底部後提早進入再注水階段，但整體而言反向極限流限制尚未結束；故水流並未開始大量湧入降流區，最後降流區多維度模式只約提早 2 秒，水流才大量由降流區頂部湧入降流區，但降流區多維度模式也因 20 秒時少量水流開始反轉向下，使得累計經由降流區向上離開的質量較少。圖 5.1.16 為降流區完整側水位高度圖，由圖可以看出，降流區多維度模式 20 秒時因少量水流進入而瞬間提高水位，並提早進入再注水階段，之後隨著反向極限流限制解除，水流才開始大量湧入並補滿降流區水位。

圖 5.1.17 到圖 5.1.20 為降流區不同高度(由上到下)破口側往完整側橫向流體接點質量流率比較圖，可看出在降流區流體橫向流動上，多維度模式的震盪較不劇烈；圖 5.1.21 到圖 5.1.24 為 5.1.17 到 5.1.20 各圖的質量流率對時間積分的結果。圖 5.1.25 為圖 5.1.17 到圖 5.1.20 的加總，可以觀察出一維模式在經過加總後震盪幅度減少，顯示一維模式於降流區有不同高度水流橫向

流動互補的震盪，有就是當某破口側降流區體積質量大幅往完整側流動時，則降流區其它體積會有質量大幅往破口側移動的互補震盪，降流區多維度模式則相對穩定；圖 5.1.26 為圖 5.1.21 到圖 5.1.24 的加總，於 50 秒時降流區多維度模擬淨往破口側移動的水量較多，和圖 5.1.12 破口側往上流出較多的水量一致。由以上觀察，可以看出降流區多維度模擬的結果，不會改變整體的效應，但會改變流體流動的分佈狀況。

### 5.1.3 其他參數比較

圖 5.1.27 為壓力槽底部區間質量隨時間變化圖，發生破口後質量迅速流入降流區離開，之後再經由降流區補水填滿，由圖 5.1.16 可看出降流區多維度模式比一維模式較早開始有水回填，但圖 5.1.27 一維模式補滿壓力槽底部區間的速度較早，不過補滿壓力槽底部區間時間的早晚，對爐心水位開始回升(圖 5.1.8)的先後沒有影響，因為降流區多維度模式比一維模式水位較早回升。圖 5.1.28 為壓力槽頂部壓力變化圖，從發生暫態開始壓力快速降低至高於大氣壓 4 到 5 個 psi 後小幅震盪，兩個案例壓力槽壓力變化並無明顯差異。圖 5.1.29 為反應器總功率隨時間變化圖，暫態開始後反應器插入控制棒急停，功率快速下降，兩案例功率變化無明顯差異。

圖 5.1.30 為壓力槽底部硼濃度隨時間變化圖，當底部區間硼濃度大於  $10^{-5} \text{ kg/m}^3$  時即視為再注水階段開始，如圖所示降流區多維度模式較早開始再注水，圖 5.1.31 與圖 5.1.32 為進入平均通道之流體接點液體體積分率隨時間變化圖，當再注水開始後，流體接點的液體體積分率大於 0.4 時，則視為水已開始往上觸及爐心，因此為再泛水期開始時間，如圖所示降流區多維度模式較一維模式提早開始再泛水。

### 5.1.4 結語

降流區多維度模式與一維模式的差異為降流區破口側與完整側流體流動情形改變，但總進入降流區累計質量仍相近；降流區的多維度模擬使得不同高度的降流區不再出現互補的震盪，

並且橫向流動也較為平順，少了許多瞬間的水流；降流區多維度模擬的最重要差異為使部分水流提早穿越降流區，並且反向極限流限制解除的時間也較一維模式提早，使得爐心較早接觸到冷卻水並開始降溫，此為降流區多維度模式燃料護套尖峰溫度較低的主要原因。其他參數比較上一維模式與降流區多維度模式模擬結果顯示其它參數的差異不大。

## 5.2 爐心多維度暫態分析

本節討論爐心多維度模式與一維模式的差異，並探討爐心流道數多寡對結果的影響，計有一維模式、爐心多維度模式通道數分別為 13、37、69 共四個案例，分別對應到表 5.1 與表 5.2 的 case 1、與 case 3 到 case 5，其結果為爐心多維度模式燃料護套尖峰溫度均高於一維模式，並有通道數越多溫度越高並且收斂的趨勢。

### 5.2.1 燃料護套尖峰溫度結果比較

一維模式與爐心多維度模式模擬比較，爐心多維度模式的再注水與再泛水開始時間皆稍晚於一維模式，時間如表 5.1 所列，且爐心多維度模式從再注水階段開始到再泛水開始時間間隔也較長。

圖 5.2.1 為一維模式與爐心多維度模式模擬發生燃料護套尖峰溫度位置，及其溫度隨時間變化圖，尖峰溫度及時間如表 5.2 所列。位置同樣在燃料棒底部向上第十個節點處，燃料護套尖峰溫度皆發生在再泛水期。由圖可看出爐心多維度模式的燃料護套尖峰溫度明顯高於一維模式，且隨著通道數的增加有逐漸上升且收斂的趨勢，合理推測上升原因之一為當流體通道越多時，每個流體通道包含的燃料束越少，功率高與功率低的燃料束平均效果減弱，包覆最熱棒的通道熱結構單位燃料元件的功率提高，使得暫態時溫度提高；圖 5.2.2 為 0 到 100 秒的燃料尖峰溫度比較圖，可看出一維模式在再泛水時間後護套溫度開始持平震盪，但爐心多維度模式的護套溫度則在較晚之後才開始發生震盪，且未能有效使溫度停止上升，同時從圖上也可看出，隨

著破口發生後爐心回吸水，使溫度降低程度，一維模式最佳，爐心多維度模式則隨著通道數增加而變差。

圖 5.2.3 與圖 5.2.4 為一維模式與爐心多維度模式預測燃料護套發生尖峰溫度位置的臨界熱通量隨時間變化圖，圖 5.2.5 與圖 5.2.6 為一維模式與爐心多維度模式護套尖峰溫度位置之熱通量隨時間變化圖，3 到 8 秒爐心回吸水時，當爐心多維度模式通道數為最多的 69 狀況下，燃料護套傳出的熱通量最少，而一維模式於再泛水開始後熱通量開始回升，因此使護套溫度不再升高，燃料尖峰溫度走勢也在此時間點後逐漸分開。圖 5.2.7 與圖 5.2.8 為一維模式與爐心多維度模式之最熱棒淬冷邊界位置與時間變化圖，由圖可看出一維模式於再泛水開始時間後不久即開始快速的將燃料護套淬冷，爐心多維度模式則有通道數越多，淬冷開始時間越往後移的趨勢，且相較於一維模式，淬冷發生初期的淬冷高度成長速度也較差。

圖 5.2.9 與圖 5.2.10 為一維模式與爐心多維度模式模擬爐心之液態水位與時間關係圖。0 秒破口發生爐心冷卻水位急速下降，3 到 8 秒期間水位經由爐心回吸到最高點後退去，因此圖 5.2.6 熱通量也因水流退去而下降，之後再泛水開始，水位逐漸震盪回升，一維模式最早，爐心多維度模式通道數越多，則水位開始回升的時間越晚；爐心回吸流體現象同樣只發生在有燃料直接加熱區域，無燃料直接加熱的旁通通道則未有回吸現象發生，如圖 5.2.11 與 5.2.12 為爐心旁通通道水位，3 到 8 秒未有水位回升，且 40 秒後的水位回升也可做為較清晰的爐心水位回升的佐證，因冷卻水觸及高溫燃料護套造成大量水蒸汽，使得爐心水流呈獻劇烈震盪，而位於相同度的旁通通道在水位回升時可藉聯通管原理了解爐心水位，所以與圖 5.2.10 都同樣是一維模式最早，爐心多維度模式則是通道數越多開始回升時間越晚。

## 5.2.2 降流區水流移動比較

圖 5.2.13 與 5.2.14 為一維模式與爐心多維度模式模擬冷卻水從破口流出之累計流量圖。為

顯示出差異，圖 5.2.14 的縱座標的最小值不為 0。前 100 秒的差異來自於部分水流開始填補空的壓力槽體積，使水流往破口流動時間不同，造成累計流出流量差異，100 秒之後因相同的有效緊急爐心注水累計質量(圖 5.2.15)，相近的爐心水位(圖 5.2.9)，相近的降流區水位高度(圖 5.2.19)所以總流出水量仍趨於一致。圖 5.2.16 為破口側頂部降流區上方流體接點，方向往上的累計流出質量，破口發生後水流持續由此離開，較不同的是爐心多維度模式通道數 69 在約暫態發生後 30 秒，出現水流反轉由破口側降流區頂端流入，而圖 5.2.17 完整側降流區頂部向上累計流出質量，爐心多維度模式通道數 69，出現緊急爐心冷卻注水水流從環路 2 和 3 由冷端進入，經由降流區上方環型區流向破口側，再向下進入破口側降流區，同樣類似的現象也出現在 300 到 400 秒之間，爐心多維度模式案例的破口側降流區頂端水流反轉流入，完整側降流區頂端反轉流出；此外完整側水流在破口發生後流出不久即因爐心回吸而短暫回流後又繼續流出，30 秒時又因反向極限流限制解除，水流才大量流入降流區。

圖 5.2.18 為經由整個降流區頂部淨往上流出的累計質量圖也就是包含完整側與破口側，可以看出破口側與完整側水流交替流出或流入並不會造成降流區淨流出量的明顯差異，也可看到一維模式最早突破反向極限流限制，爐心多維度模式的各通道數模式則在與彼此相近的時間突破反向極限流限制，突破時間約較一維模式晚了二到四秒，突破後直到 100 秒前，累計流入的質量以一維模式最多，爐心多維度模式則通道數越多累計質量越少。圖 5.2.19 與圖 5.2.20 為降流區水位高度圖，水位在突破反向極限流後開始回升，一維模式最早觸頂，100 秒後一維模式與爐心多維度模式在降流區水位或累計流入質量都趨於一致。

### 5.2.3 爐心水流比較

圖 5.2.21 為壓力槽底部區間之質量隨時間變化圖，發生破口後質量迅速減少，之後再經由降流區補水填滿，由圖可看出一維模式與爐心多維度模式通道數 13 於相同時間填滿，通道數

37 與 69 則於 40 秒後才填滿；圖 5.2.22 為事故初期壓力槽底部區間與爐心下方之間的體積(爐心下方 5.5 ft)質量隨時間變化圖，圖 5.2.23 與圖 5.2.24 為連接爐心下方體積質量隨時間變化圖，破口發生後質量流失，之後隨著爐心回吸質量短暫回升後退去，相較於圖 5.2.22 此時質量並非填滿狀態，也證明圖 5.2.10 爐心水位短暫回升，並非藉由回填補滿壓力槽下部體積後繼續上升觸及爐心造成，此外圖 5.2.21 初始值有些微差異起因於壓力槽底部區間溫度，經過爐心多維度模擬後會改變，造成密度變化，但圖 5.2.22 與圖 5.2.24 爐心下方體積的溫度未有改變，因此質量初始值相同。

圖 5.2.25 與圖 5.2.26 為一維模式進入平均通道，爐心多維度模式進入爐心中央通道之流體接點液體體積分率隨時間變化圖，可看出一維模式在再泛水開始後，水流持續進入爐心底部，而爐心多維度模式於再泛水後，雖然連接爐心的下方空間已滿補水，且有部分水流觸及爐心底部，但整體水流持續進入仍須等到 50 秒之後。

圖 5.2.27 與圖 5.2.28 為水流由爐心下方體積往上進入爐心最熱棒所在通道底部，每單位燃料元件大小的累計質量，可看出一維模式在再泛水開始後，立即有水流大量湧入，之後則穩定持續進入，相反的爐心多維度模式於再泛水開始後水流雖然開始進入，但累計進入水量增加速度相較於一維模式明顯少了許多，且有通道數越多進入水量越少的趨勢。圖 5.2.29 為水流由下往上進入爐心底部的總累計流量，與圖 5.2.27 相似的是一維模式均有較大進水量，爐心多維度模式則通道數越多進水量越少，而通道數 37 與通道數 69 已趨於一致，而對照降流區頂部累計淨流出質量圖 5.2.18 可以看出流體從降流區進入的量各模式相近，且數值小於進入爐心的總量，也就是進入爐心底部水流來源不單只有降流區，還從爐心上方體積向下經過旁通通道抵達爐心下方體積。

圖 5.2.30 為爐心下方體積流入爐心旁通通道底部體積 100 的向上累計流量圖，可以看到從

破口開始，水流就不斷從爐心旁通通道流入與爐心底部相接的爐心下方體積，最明顯的差異在於從 60 秒開始一維模式累計質量開始增加，而爐心多維度模式則持續持平，原因來自爐心自體循環能力不同所致，觀察與討論降見 5.2.4 節。

圖 5.2.31 與圖 5.2.32 為水流由下往上進入最熱棒所在通道與爐心總通道每單位燃料元件大小累計流量比，比值等於 1 時，流體累計流入最熱棒所在通道相等於累計流入爐心所有通道的總平均值，由圖 5.2.31 可看出一維模式 40 秒後，即再泛水開始後有大於平均值許多的流體流入最熱棒所在通道；50 秒之前為負值是因為爐心總體累計進入質量仍為負值，而最熱棒所在通道已為正值，也就是再泛水後水流集中進入最熱棒所在通道入口；爐心多維度模式隨著通道數越多這種效果就越不明顯。從圖 5.2.32 可看出事故發生後期累計進入最熱棒所在通道的水流逐漸趨於平均值，除了爐心多維度模式通道數 69 低於平均外，其他皆由高於平均值並趨近平均值，也就是事故初期爐心多維度模式顯示通道數越多則水流越不往最熱棒所在通道集中進入。

圖 5.2.33 與圖 5.2.34 為水流向上離開最熱棒所在通道頂部體積，每單位燃料元件大小累計質量，比對圖 5.2.27 入口累計進入質量，可看出並未有煙囪效應，也就是未出現從爐心底部冷卻流體進入後，經由熱通道加熱吸引周遭通道流體橫向流入後，提高出口流體流量的現象，反而出口流量較少，且對照時間可看出圖 5.2.2 的 10 到 20 秒燃料護套溫度持平，甚至下降與通道頂端冷卻流體從爐心頂部掉回有關。

圖 5.2.35 為最熱棒所在通道每單位燃料元件大小，總橫向流入累計質量，可以看出一維模式最熱棒所在通道在再泛水後水流由底部流入後經由橫向流體接點持續離開，而非煙囪效應的吸入，而爐心多維度模式在再泛水後橫向流動情形相較並不明顯；但於穩態檔同樣觀察，最熱棒所在通道每單位燃料元件大小，總橫向流入累計質量如圖 5.2.36，可以看到爐心水流橫向進入最熱燃料元件通道，一維模式最佳，而多維爐心通道數越多越佳，也就是穩態時有煙囪效應，

但暫態時無法觀察到煙囪效應。圖 5.2.37 到圖 5.2.45 為最熱棒所在通道每單位燃料元件大小橫向流入累計質量，爐心通道垂直方向共分 9 個區間數，因此圖依序為由下到上分九階的橫向流動情形，由圖可以觀察到較明顯橫向流動情形為一維模式下，再泛水開始後流體在最底層的第一階，因冷卻水接觸到爐心快速沸騰膨脹並向上離開，並將水流從橫向流體接點引入最熱棒所在通道向上噴出，之後噴出力道減弱使流體大量在第二到三階橫向流出，且流出質量大於在第一階橫向引入的質量，相較之下爐心多維度模式第一階加熱膨脹挾帶水流的效果不好使得入口流入質量較少，使得引入橫向流體相對一維模式來的不明顯，因此只有少量流體進出最熱棒所在通道。

#### 5.2.4 爐心自體循環現象之觀察

爐心自體循環現象流體移動路徑為：緊急爐心冷卻注入之液態水，經由降流區進入爐心下部空間，向上觸及高溫燃料，經過燃料加熱後體積膨脹變成水蒸汽並挾帶液態水形成雙相混合流體向上流出爐心，離開爐心之流體於爐心上方體積開始出現汽水分離現象，汽體繼續向上離開，液體則因重力而向下掉落，經由旁通通道回到爐心下部空間與通過降流區的緊急爐心冷卻水混合，重複上述循環過程稱之為爐心自體循環。

而爐心自體循環重要之處在於再泛水開始後，流體向上通過的上方燃料時，暫態前期均為單相汽體對流熱傳，而流體所含的液體比例越高熱傳效果越好；冷卻水對下方燃料的護套淬冷時吸收了大量熱量，變成蒸氣並挾帶大量液態水向上流出，下方則引入更多冷卻流體補充，而被挾帶離開爐心的液體又經由旁通通道落回重新補充爐心下部體積液態水，液態水藉蒸汽推動不斷做爐心自體循環，重複通過爐心，在事故中有效藉由蒸氣對流熱傳降低燃料棒上半段的燃料護套溫度(燃料護套尖峰溫度發生於燃料棒上半段)。

爐心自體循環現象的觀察，首先由圖 5.2.18，除 50 秒時反向極限流剛解除，進入爐心的累

計水流有較大差異外，之後時間點經由降流區補充之冷卻水總量各模式約為一致，而與爐心相接的爐心上方體積，橫向流動除事故初期有小部分水流進入外，其餘時間流量是可以忽略，重點在於圖 5.2.46 爐心上方體積向上流體接點累計總質量，與圖 5.2.47 爐心上方體積向上流體接點累計液體質量，可以看出各模式爐心上方體積之流出總質量相近，而液體於 50 秒後向上離開的累計值量增加緩慢，相扣除也就時離開爐心上方體積主要為相近的蒸汽質量，和少量液態水繼續向上繼續離開；再泛水後補充爐心冷卻水的來源為流入降流區的冷卻水，而各模式所補充的冷卻流體又相當接近，但對照圖 5.2.29 各模式進入爐心之累計流量有相當大的差異，唯一的可能性為離開爐心的質量會有部分回到爐心下方體積重複進入。

圖 5.2.48 為爐向上進入爐心上方體積之累計液體質量，圖 5.2.49 爐心旁通通道向上進入爐心上方體積之累計液體質量，兩圖對照可看出兩者有對稱關係，一維模式由爐心向上離開之液體質量於在泛水後逐漸快速累積，並且經由降流區又大量掉落，而爐心多維度模式再泛水後則遲遲未出現夾帶大量液態水向上流出的情形，若觀察一維爐心平均通道連接爐心上部體積與多維爐心中央通道連接上部體積之流體接點的液體體積分率如圖 5.2.50，可以看出在泛水發生後冷缺水接觸到一維爐心後向上夾帶約 1%體積分率的液態水離開，反觀多維爐心於再泛水發生後夾帶離開的液體體積分率非常少；夾帶離開之液體體積分率大，則更多流體從爐心下方體積引入冷爐心補充被帶走的液態水，且對照爐心上方體積向上離開的液態水累計質量並沒有成長，也就是發生大量液態水被夾帶通過爐心，而又掉回爐心下方體積補充，單位時間通過爐心的流體越多，則藉由氣體對流熱傳使上方燃料護套溫度降低的效果越有效。

也因一維模式與爐心多為模式計算再泛水後流體受熱蒸發夾帶液體離開的能力不同，使得從爐心下方體積引入冷卻流體補充的能力不同並使得一維模式的爐心能像是強力馬達，不斷通動冷卻水通過爐心，重複爐心自體循環，反觀爐心多維度模式的結果，冷卻水接觸到流體後並

不會立即挾帶大量液態水離開，結果是爐心下方體積水流不做大量引入補充，經由旁通掉回的液態水較少，自體循環效果較一維模式差，因此最熱棒燃料護套相對在少量的流體通過下，溫度持續上升，造成燃料護套尖峰溫度的差異。

### 5.2.5 其他參數比較

圖 5.2.51 與圖 5.2.52 為壓力槽底部硼濃度隨時間變化圖，顯示一維模式緊急冷卻水最早觸及壓力槽底部，爐心多維度模式 69 通道數次之，通道數 37 最晚，對照圖 5.2.22 壓力槽底部質量圖，可看出觸及底部的早晚與填滿壓力槽底部時間未有一定相關，只能證明緊急爐心冷卻水有部分水流經過降流區觸及爐心底部。圖 5.2.53 為壓力槽頂部區間壓力變化圖，兩個種模式壓力槽壓力變化並無明顯差異。圖 5.2.54 為反應器總功率隨時間變化圖，同樣功率變化無明顯差異。



### 5.2.6 結語

爐心多維度模式與一維模式的差異可以分成幾點：

- (1) 爐心多維度模式使降流區反向極限流結束時間晚 3 到 5 秒，直接影響到冷卻水接觸爐心的時間，爐心較晚開始冷卻，直接影響到再泛水燃料護套的開始降溫的時間。
- (2) 爐心多維度模式的加入使得一維降流區的不穩定性增強，使得破口側與完整側降流區水流交替流出，但其結果並不影響總體進入降流區的水量。
- (3) 爐心多維度模式於冷卻水接觸到高溫燃料後，液體受熱蒸發膨脹挾帶液態水離開能力差，使得爐心自體循環效果較一維模式來的不明顯，累計通過爐心的流體質量少，對燃料上方的護套降溫效果變差，直接影響再泛水開始後燃料護套尖峰溫度降溫的效果。
- (4) 冷卻流體集中往最高功率通道底部流入的效果差，且最高功率通道第一到三階爐心橫向流體接點，因多維爐心挾帶水流向上離開能力差，因此未出現第一階橫向引入，再從二、三

階橫向流出。

上述第一點及第三點為造成爐心多維度模式燃料護套尖峰溫度高於一維模式的主要原因；而爐心多維度模式通道數多寡所造成的主要差異為爐心水位隨通道數增多而延後開始上升的時間，且隨通道數增多爐心自體循環效果逐漸減弱，也是除了因流道數增多使得最熱棒所在單位通道功率提高外使護套溫度上升的原因之一，但燃料護套尖峰溫度雖隨流道數增多而上升，但其有收斂的趨勢。

### 5.3 爐心與降流區多維度暫態分析

本節比較的有一維模式、降流區多維度模式、爐心與降流區多維度模式 3 種流道數的比較，共計 5 個案例，分別為表 5.1 與表 5.2 的 case1、case2、case6 到 case8；結果為爐心與降流區多維度模式燃料護套尖峰溫度仍高於一維模式，並且同樣隨通道數增多而上升並收斂的趨勢。

#### 5.3.1 燃料護套尖峰溫度結果比較

爐心與降流區多維度模式的再注水時間與降流區多維度模式相仿，且再泛水時間早於一維模式或降流區多維度模式，整體而言爐心與降流區多維度模式相對於其它模式的再注水或再泛水時間都提早，時間如表 5.1 所列。

圖 5.3.1 為燃料護套尖峰溫度位置，及其溫度隨時間變化圖，同樣都在燃料棒底部向上第十個節點，且爐心與降流區多維度模式燃料護套尖峰溫度皆發生在再泛水期，其溫度皆高於一維模式或降流區多維度模式，且與爐心多維度模式相似的是，同樣都隨著通道數的增加有逐漸上升且收斂的趨勢；圖 5.3.2 為 0 到 100 秒的燃料尖峰溫度比較圖，可以看出爐心與降流區多維度模式的通道數 13 在爐心回吸水期下降到溫度與一維模式和降流區多維度模式一致，而通道數 37 和 69 則一致的較高，且爐心與降流區多維度模式和其他模式不同的是再泛水後溫度雖然有震盪，但仍有向上增溫的趨勢，於是爐心與降流區多維度模式的溫度都較高，尖峰溫度及時間

如表 5.2 所列。

圖 5.3.3 與圖 5.3.4 為燃料護套發生尖峰溫度位置的臨界熱通量隨時間變化圖，圖 5.3.5 與圖 5.3.6 為護套尖峰溫度位置之熱通量隨時間變化圖，3 到 8 秒爐心回吸水階段，通道數 37 和 69 所釋出的熱通量都較少，也使圖 5.3.2 護套尖峰溫度下降較少，而降流區多維度模式在爐心回吸水階段及再泛水初期熱通量均為最高，使得護套尖峰溫度最低。圖 5.3.7 與圖 5.3.8 為最熱棒淬冷邊界位置與時間變化圖，淬冷發生先後分別為通道數 37，通道數 13 及 69 在相近時間開始，之後為降流區多維度模式最後則是一維模式，一維模式 50 到 150 秒雖然淬冷高度不如降流區多維度模式或爐心與降流區多維度模式，但護套尖峰度仍低於爐心與降流區多維度模式。

圖 5.3.9 與圖 5.3.10 爐心之液態水位與時間關係圖。爐心回吸時高度最高的是一維模式與降流區多維度模式，其次是通道數 13，最低的是通道數 37 與 69，與圖 5.3.6 回吸階段熱通量變化成正相關，35 秒後各模式開始水位逐漸回升，一維模式則是接近 40 秒時開始水位回升，圖 5.3.11 與 5.3.12 為爐心旁通通道水位變化圖，與爐心水位同於 35 秒後開始上升，之後各模式高度成長相近，事故後期最先完全填滿的依序是通道數 13、降流區多維度模式、一維模式、通道數 37、通道數 69，與護套尖峰溫度最後降下溫度的先後順序無一定相關。

### 5.3.2 降流區水流移動比較

圖 5.3.13 與 5.3.14 為冷卻水從破口流出之累計流量圖，差異同樣來自於初期流體分佈於壓力槽內質量不同所致，最後總流出水量仍然一致，圖 5.3.15 為有效緊急爐心注水累計流量。圖 5.3.16 與圖 5.3.17 為破口側頂部降流區，方向往上的累計流出質量，破口發生後水流持續由此離開，降流區多維度模式和爐心與降流區多維度模式同樣有一致行為是：水流大量離開到直到破口發生後 40 秒才減少流出速度；同樣完整側降流區向上的水流也有相對應的行為，如圖 5.3.18 與圖 5.3.19 為完整側降流區向上離開的累計流量圖，降流區多維度模式和爐心與降流區多維度

模式同樣比一維模式較早解除反向極限流限制，水流大量流入降流區，直到補滿降流區水位(約 40 秒，圖 5.3.23)後才減少進入的流量；降流區多維度模式的加入使得降流區水流更穩定，並未出現如圖 5.2.16 與圖 5.2.17 水流交替由降流區破口側與完整側流出。

圖 5.3.20 與圖 5.3.21 為經由整個降流區頂部淨往上流出的累計質量圖，含降流區多維度的模式均較早且相同時間(約 20 秒)開始有流體穿越反向極限流限制，因此累計流出水量較少。圖 5.3.22 與圖 5.3.23 為降流區水位高度圖，含降流區多維度的模式均較早填補降流區水位(於 20 秒)且也較早補滿(40 秒)，且補滿後到 100 秒前也不會出現像一維模式一樣的水位降低情況。

圖 5.3.24 到圖 5.3.27 為降流區由上到下橫向由破口側流向完整側質量流率比較，可以看出爐心與降流區多維度模式和降流區多維度模式有相同的特性，也就是事故發生後橫向流動速度均較小，且較少劇烈橫向流動情形，圖 5.3.28 到圖 5.3.31 為圖 5.3.24 到圖 5.3.27 各圖的積分，可看出多維度降流區模式加入多維度爐心後，各爐心通道數的橫向水流有相當穩定且一致的現象。

### 5.3.3 爐心水流比較

圖 5.3.32 與 5.3.33 為壓力槽最底部區間質量隨時間變化圖，由圖可看出與降流區水位情況不同的是一維模式最早填滿，之後才是通道數 13，最後是剩下的其他模式，此參數變化對爐心下方體積的填滿(圖 5.3.35)或開始接觸到爐心(圖 5.3.37)的早晚順序並無影響。圖 5.3.34 與圖 5.3.35 為爐心下方體積質量隨時間變化圖，由圖可看出降流區多維度模式與一維模式有相同的一維爐心，因此爐心回吸所增加的質量相同，而爐心與降流區多維度模式則不論通道數多寡，回吸所增加的量均相同，且都較一維爐心來的高，之後同樣退去，補滿的時間約略相同，此外圖 5.3.33 初始值發生與爐心多維度模式(圖 5.2.21)相同情形，都因爐心多維度化而使壓力槽底部溫度改變造成質量初始值差異，但圖 5.3.35 爐心下方體積的溫度同樣未改變因此初始質量相同。

圖 5.3.36 與圖 5.3.37 為一維模式進入平均通道，爐心多維度模式則是進入爐心中央通道之流體接點液體體積分率隨時間變化圖，同樣可以看到爐心多維度模擬爐心回吸水時，因爐心下方體積質量較大(圖 5.3.35)使得回吸得液體空泡分率較大，且可看出爐心與降流區多維度模式較早開始有水流觸及爐心底部，之後才是降流區多維度模式與一維模式。

圖 5.3.38 與圖 5.3.39 為水流由下往上進入爐心最熱棒所在通道底部，每單位燃料元件的累計質量，與圖 5.2.27 相同，可看出有擁有爐心多維度模式的累計進水量均較擁有一維爐心模式來的少，但因加入降流區多維度模式而小幅增加，且可看出爐心與降流區多維度模式回吸水時，雖然流體接點空泡分率較高，且連接爐心的下方體質量也較多，但與圖 5.2.28 一樣吸回的累計質量卻較少，是燃料護套初期溫度較高的原因。圖 5.3.40 為水流由下往上進入爐心底部的總累計流量，與圖 5.2.29 相同的是一維爐心模式的總進水量都較大，有爐心多維度模式則通道數越多則總進水量越少，原因同樣來自爐心自體循環的影響，但比單純只有爐心多維度模式來的高；圖 5.3.41 為爐心向上進入爐心上方體積累計液體質量，圖 5.3.42 為旁通通道進入爐心上方體積累計液體質量，兩圖對照後可發現由爐心向上離開的液體又經由降流區掉回，做爐心自體循環，與圖 5.2.30 相同的是爐心通道數變多，自體循環效果有減弱的趨勢；自體循環能力的強弱與爐心挾帶液態水向上離開的能力有關，圖 5.3.43 為爐心通道連接爐心上方體積之流體接點液體體積分率，一維爐心為平均通道，多維爐心為中央通道，由圖可看出幾點，第一點同樣都一維爐心，再泛水階段開始，降流區多維度模式離開爐心的液體體積分率較一維模式高，第二點與圖 5.2.50 相比，同樣擁有多維爐心，但加入降流區多維度模式後，離開爐心的液體體積分率明顯提高，綜合兩點結果顯示出再泛水階段的提早，有助於提高爐心的液體挾帶現象和自體循環，使燃料護套降溫；圖 5.3.44 與圖 5.3.45 為水流由下往上進入最熱棒所在通道與爐心總通道每單位燃料元件累計流量比，與圖 5.2.32 相同的是爐心多維化並不會特別使水流往功率最高的熱通

道集中進入，爐心多維度模式隨著通道數越多這種效果就越不明顯，不同的是暫態後期通道數 69 未出現比值小於一的情況。

圖 5.3.46 與圖 5.3.47 為水流向上離開最熱棒所在通道頂部體積，每單位燃料元件累計質量，爐心與降流區多維度模式因從底部流入的水流較少，所以頂端流出的累計質量也較少。圖 5.3.48 為最熱棒所在通道每單位燃料元件，總橫向流入的累計質量，可以看出一維爐心模式和降流區多維度模式的流體都經由橫向流體接點持續離開，也沒有煙囪效應的吸入，而爐心與降流區多維度模式橫向流動情形不明顯，也沒有淨流入情形發生；圖 5.3.49 到圖 5.3.57 為最熱棒所在通道每單位燃料元件由下而上各區間橫向流入累計質量隨時間變化情形，由圖可以觀察到一維模式與降流區多維度模式皆在一二階流入流體，然後於三四階又相繼流出，再往上則橫向流動情形相對小了許多，而爐心與降流區多維度模式與圖 5.2.37 到圖 5.2.45 都因有多維爐心而使各區間的橫向流動情形並不明顯。



### 5.3.4 其他參數比較

圖 5.3.58 與圖 5.3.59 為壓力槽底部硼濃度隨時間變化圖，顯示有多維度降流區模式的均因較早開始突破降流區而較早有硼液進入爐心底部，但與圖 5.3.32 填滿壓力槽底部早晚無關，只與圖 5.3.21 降流區較早開始反轉有關。圖 5.3.60 為壓力槽頂部區間壓力變化圖，圖 5.3.61 為反應器總功率隨時間變化圖，同樣不同模式並未造成明顯差異。

### 5.3.5 結語

降流區多維度模式結合後，仍舊保持各自模式與一維模式的差異：降流區多維度模式的存 在，使得反向極限流限制較一維模式提早解除，並較早開始進入再泛水階段冷卻爐心，除改變降流區水流分佈情形，並使降流區橫向流動變的穩定平緩；爐心多維度模式的存在使得爐心回 吸水階段，能力較一維模式弱，因此回吸水階段護套溫度下降較一維模式少，此外於在泛水階

段後，爐心多維度模式挾帶液態水離開，使爐心自體循環的能力同樣較一維模式不足，並且從爐心下方體積進爐心冷卻水也同樣較不集中進入爐心功率最高的通道，因此綜合降流區多維度模式和爐心多維度模式的結果顯示，暫態過程中燃料護套尖峰溫度仍然高於一維模式；但因降流區多維度模式的加入使再泛水階段提早開始，並使得爐心自體循環能力較單純只有爐心多維度模式來的好，因此降低燃料護套尖峰溫度。



表 5.1 一維模式與多維度模式事故時序

案例 編號	模式名稱	有效緊急爐心冷卻 系統啟動時間(s)	再注水 (s)	再泛水 (s)
Case 1	一維模式	14	30.3	38.0
Case 2	降流區多維度模式	14	19.7	35.6
Case 3	爐心多維度模式-流道數 13	14	32.4	41.3
Case 4	爐心多維度模式-流道數 37	14	30.6	42.7
Case 5	爐心多維度模式-流道數 69	14	31.7	43.0
Case 6	爐心與降流區多維度模式-流道數 13	14	20.3	34.5
Case 7	爐心與降流區多維度模式-流道數 37	14	22.3	31.3
Case 8	爐心與降流區多維度模式-流道數 69	14	21.0	31.8

表 5.2 一維模式與多維度模式護套尖峰溫度及發生時間

案例編號	模式名稱	護套尖峰溫度(°F)	發生時間(s)
Case 1	一維模式	1535.5	44.6
Case 2	降流區多維度模式	1525.4	4.0
Case 3	爐心多維度模式-流道數 13	1773.0	109.0
Case 4	爐心多維度模式-流道數 37	1966.4	117.0
Case 5	爐心多維度模式-流道數 69	2028.5	113.3
Case 6	爐心與降流區多維度模式-流道數 13	1568.1	78.0
Case 7	爐心與降流區多維度模式-流道數 37	1640.5	81.2
Case 8	爐心與降流區多維度模式-流道數 69	1658.0	105.0

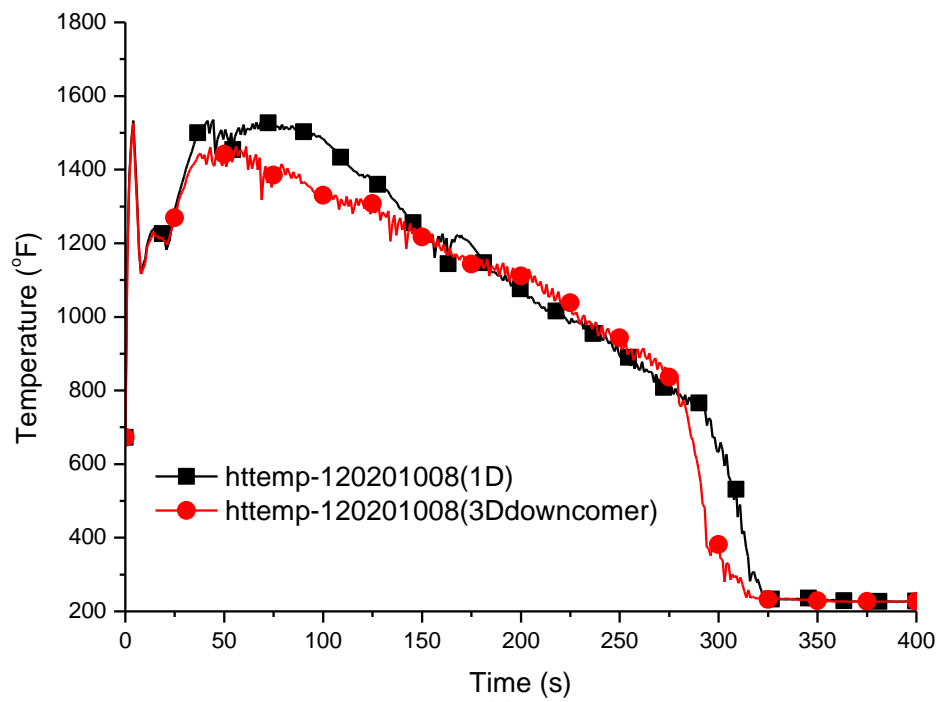


圖 5.1.1 燃料護套最高溫度發生位置與溫度

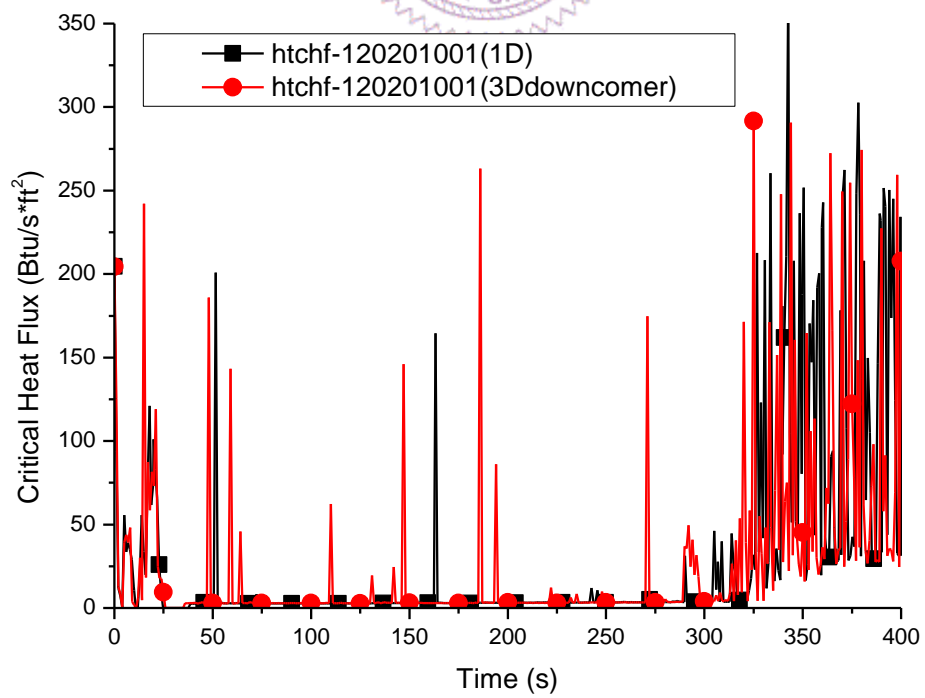


圖 5.1.2 燃料護套最熱處臨界熱通量

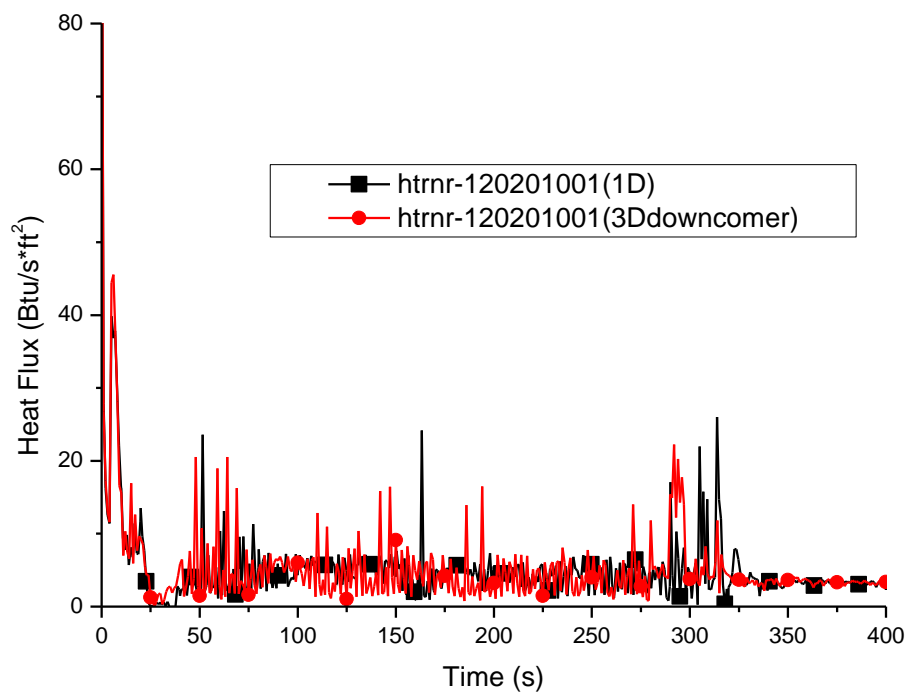


圖 5.1.3 燃料護套最熱處熱通量

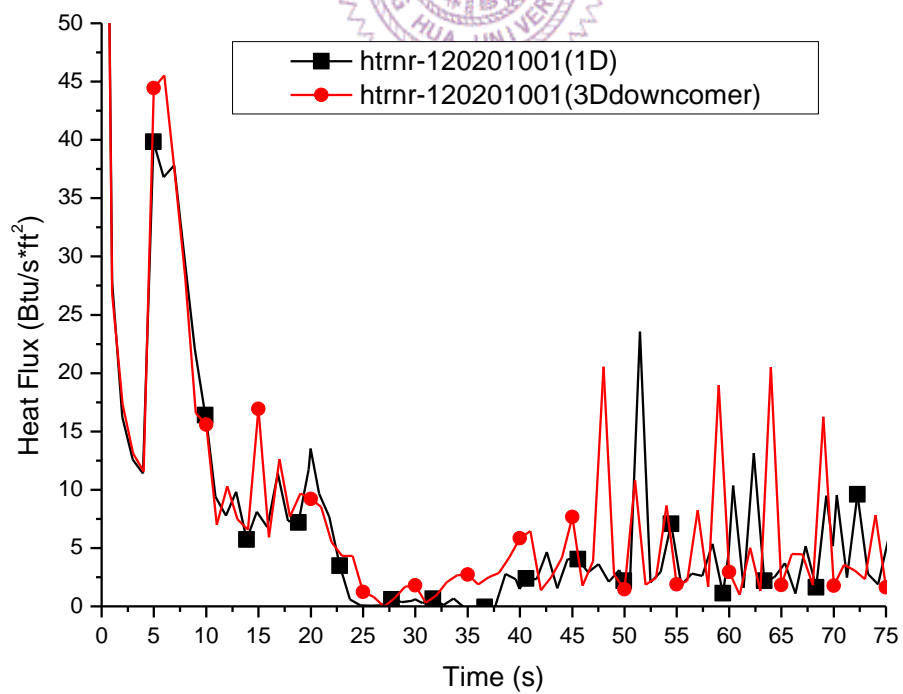


圖 5.1.4 燃料護套最熱處熱通量(0 到 75 秒)

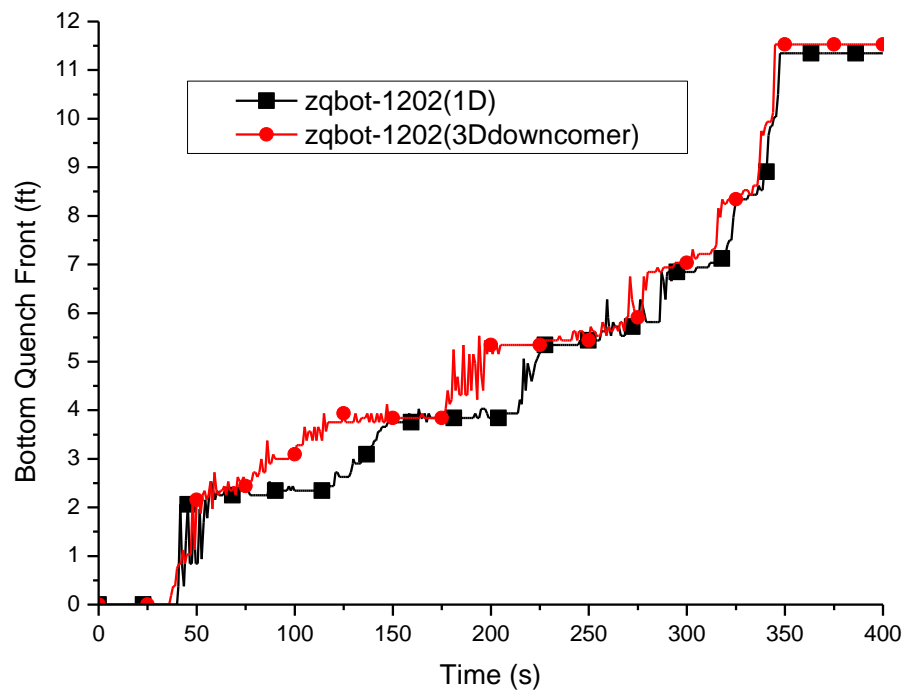


圖 5.1.5 最熱棒淬冷邊界位置

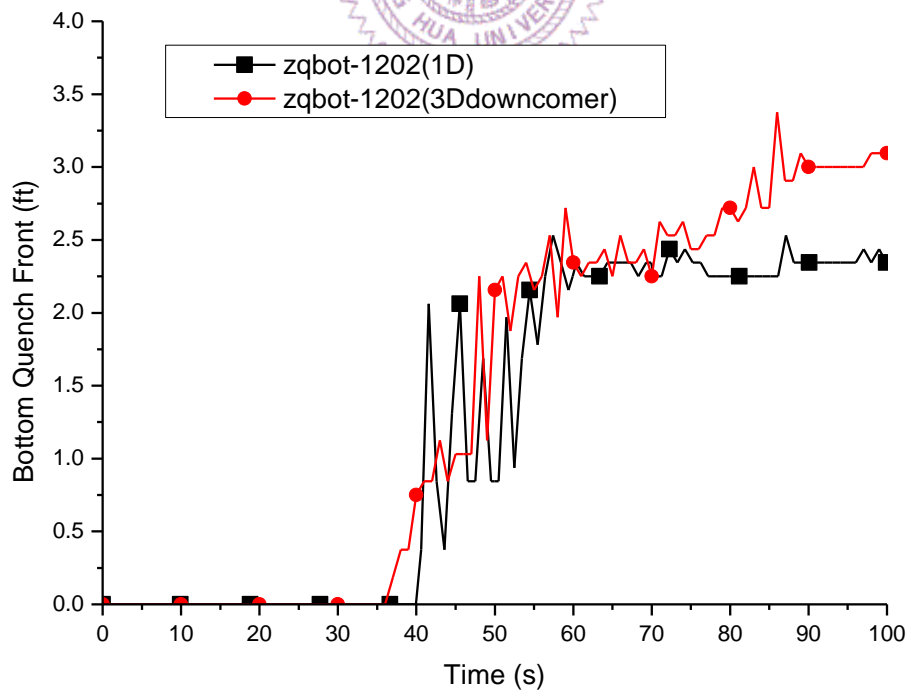


圖 5.1.6 最熱棒淬冷邊界位置(0 到 100 秒)

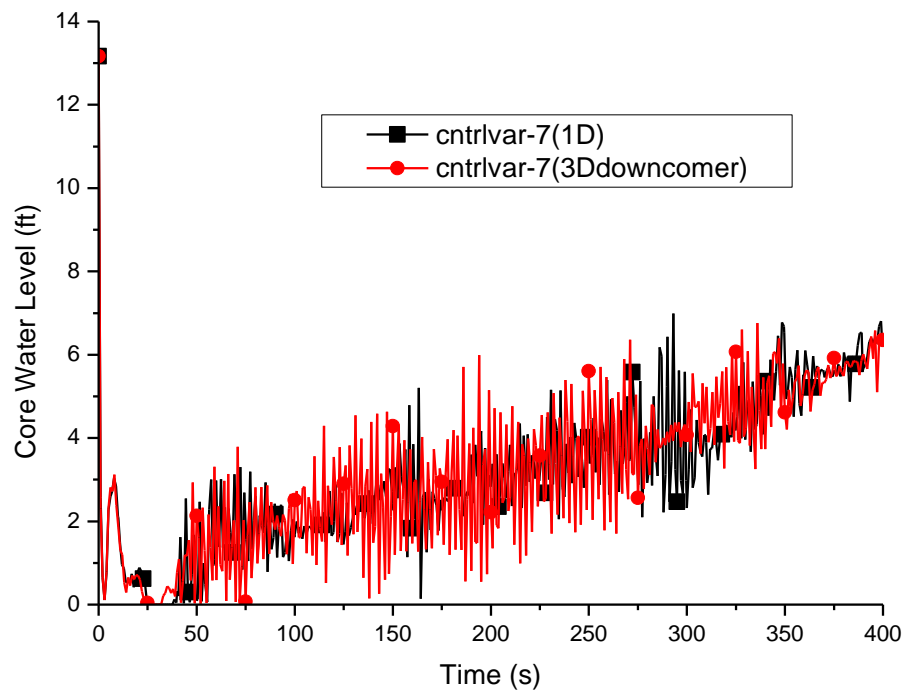


圖 5.1.7 爐心熱通道水位

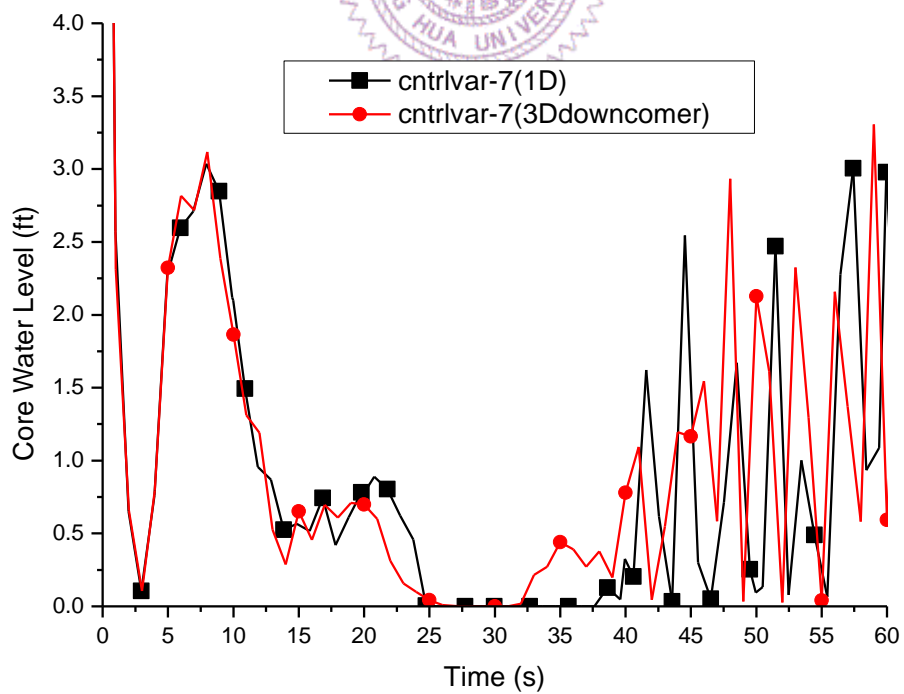


圖 5.1.8 爐心熱通道水位(0 到 60 秒)

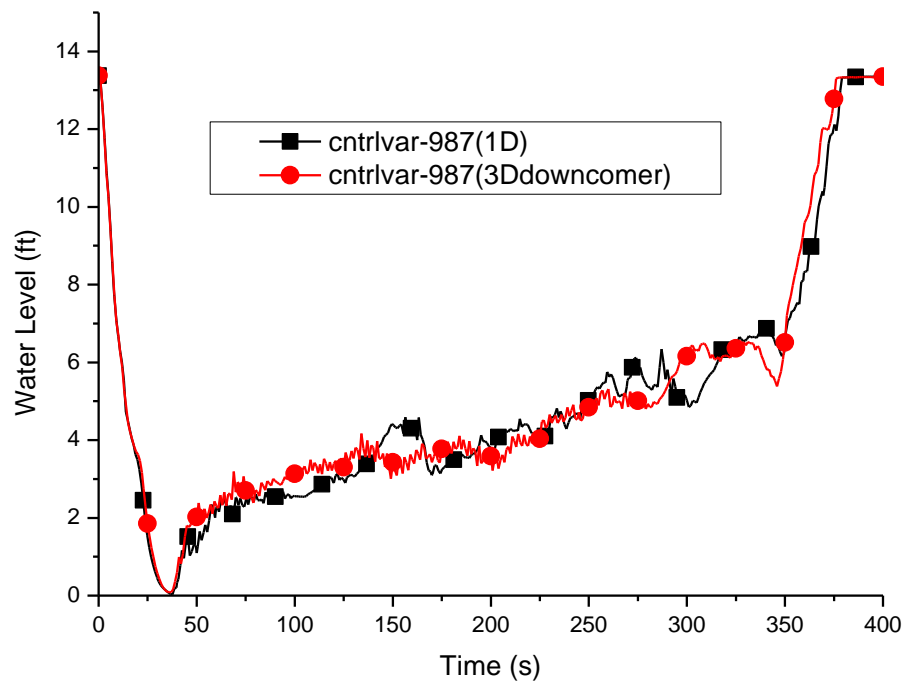


圖 5.1.9 爐心旁通流道水位

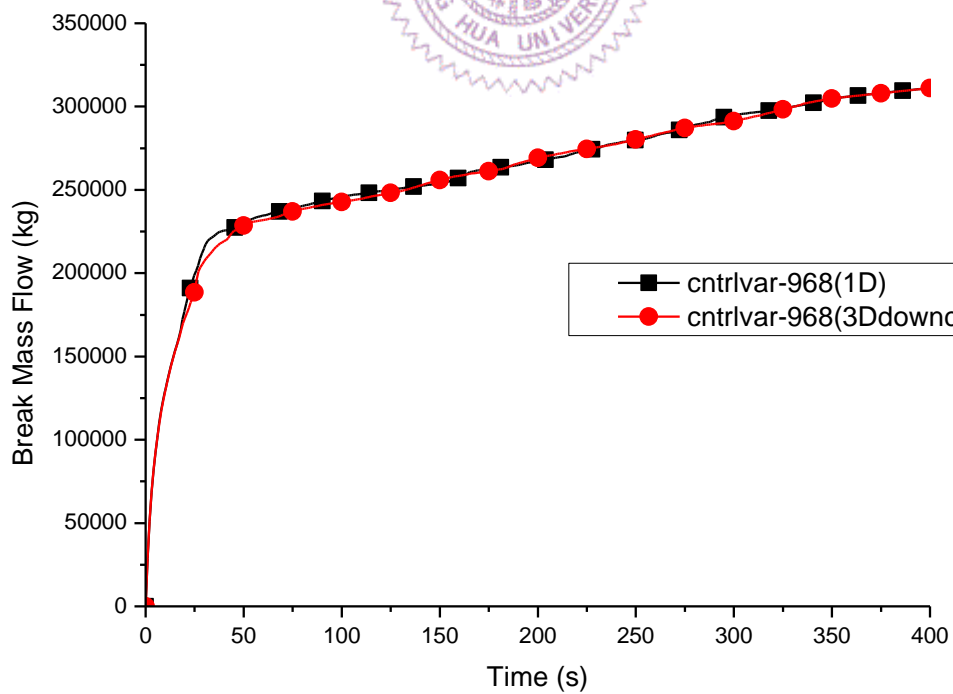


圖 5.1.10 破口累計流出冷卻水質量

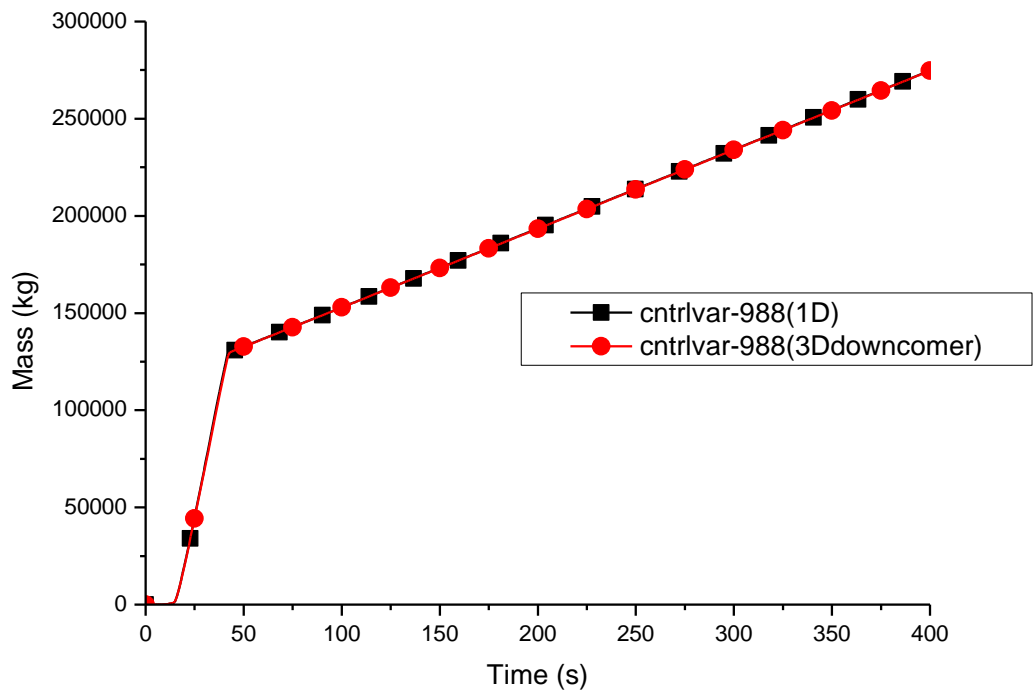


圖 5.1.11 有效緊急爐心注水累計質量

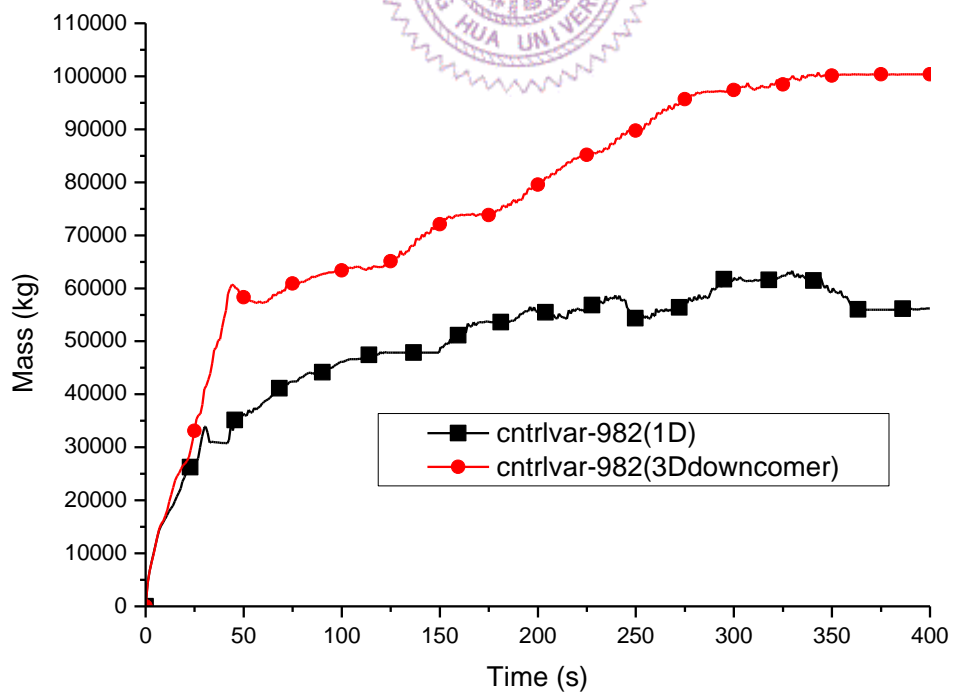


圖 5.1.12 破口側降流區頂部體積 34 向上累計流出質量

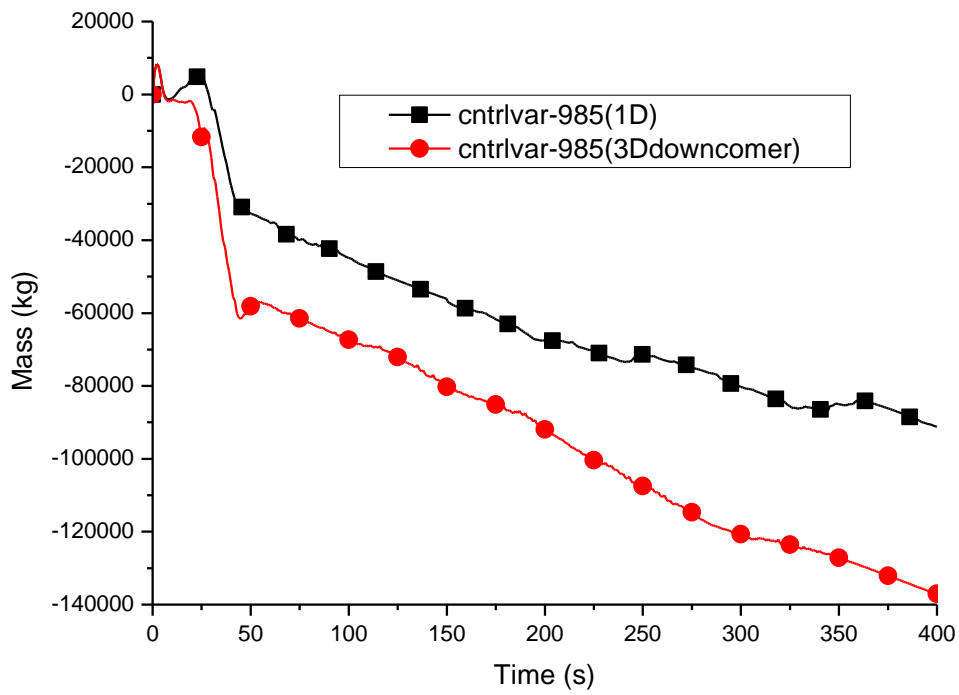


圖 5.1.13 完整側降流區頂部體積向上累計流出質量

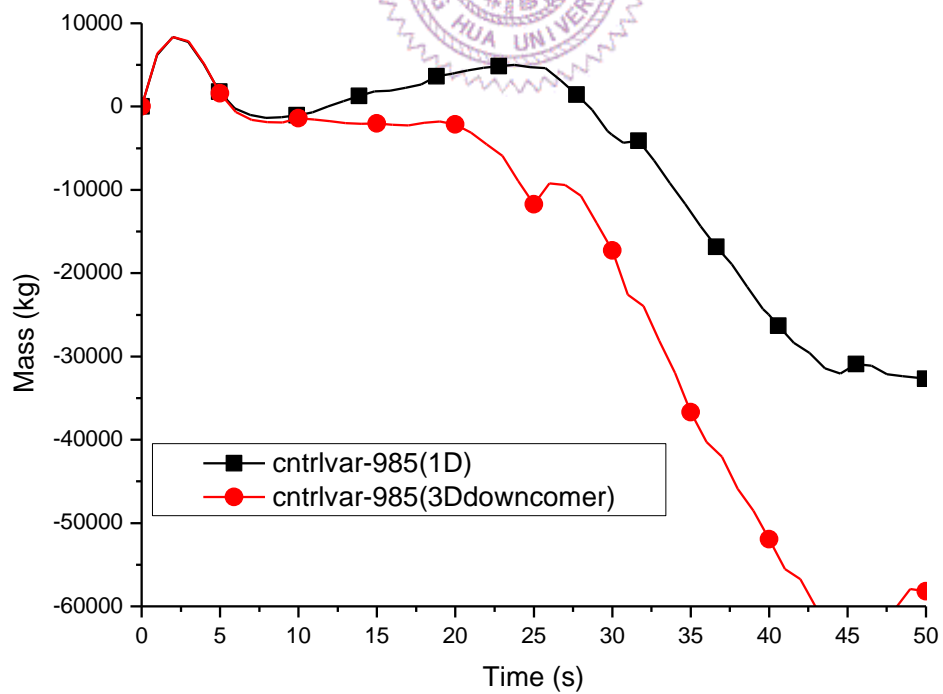


圖 5.1.14 完整側降流區頂部體積向上累計流出質量(0 到 50 秒)

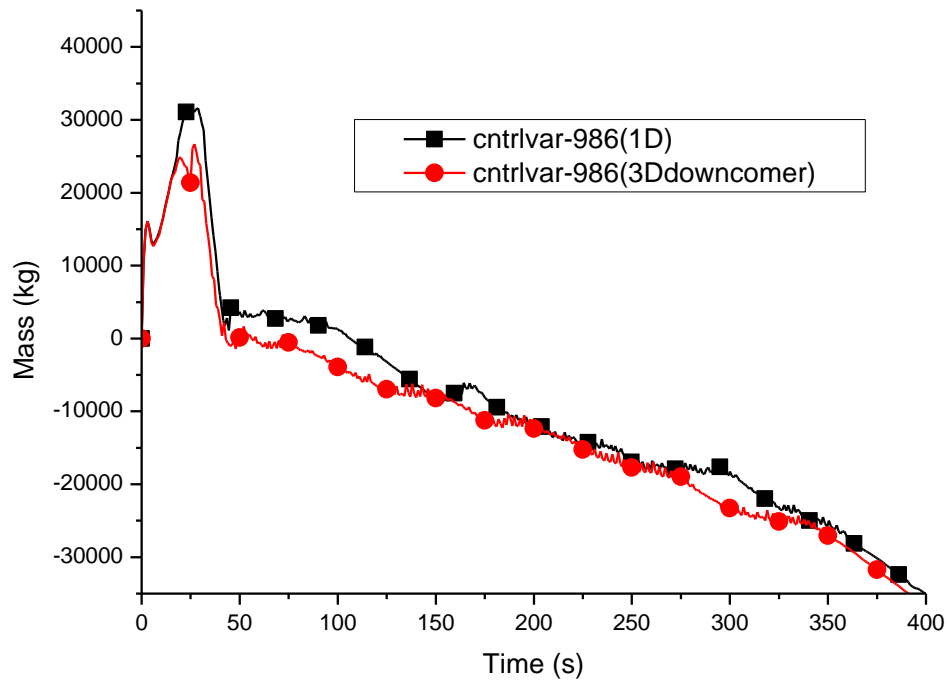


圖 5.1.15 降流區頂部淨往上流出累計質量

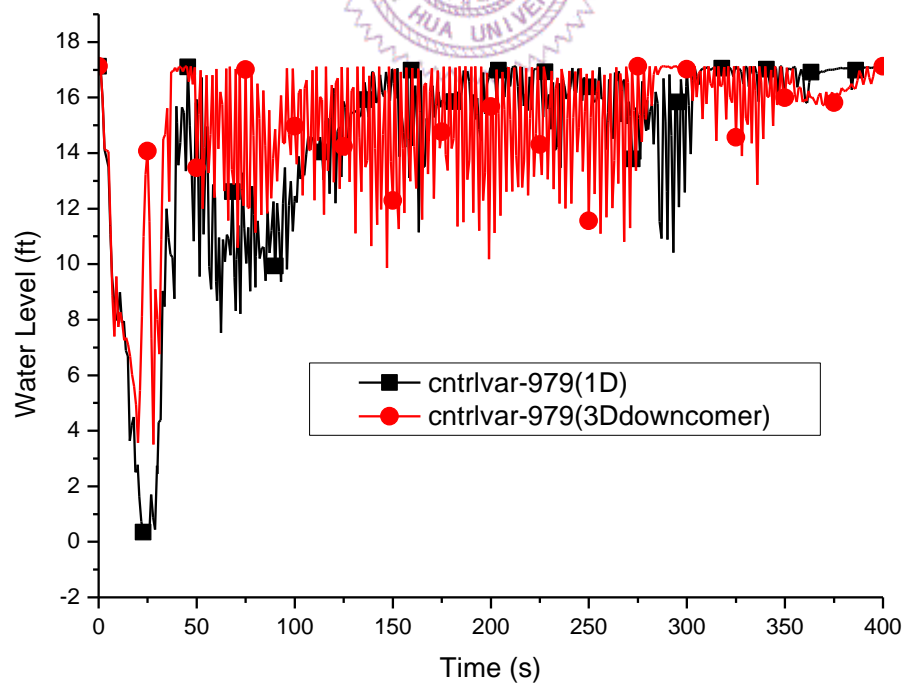


圖 5.1.16 降流區完整側水位高度

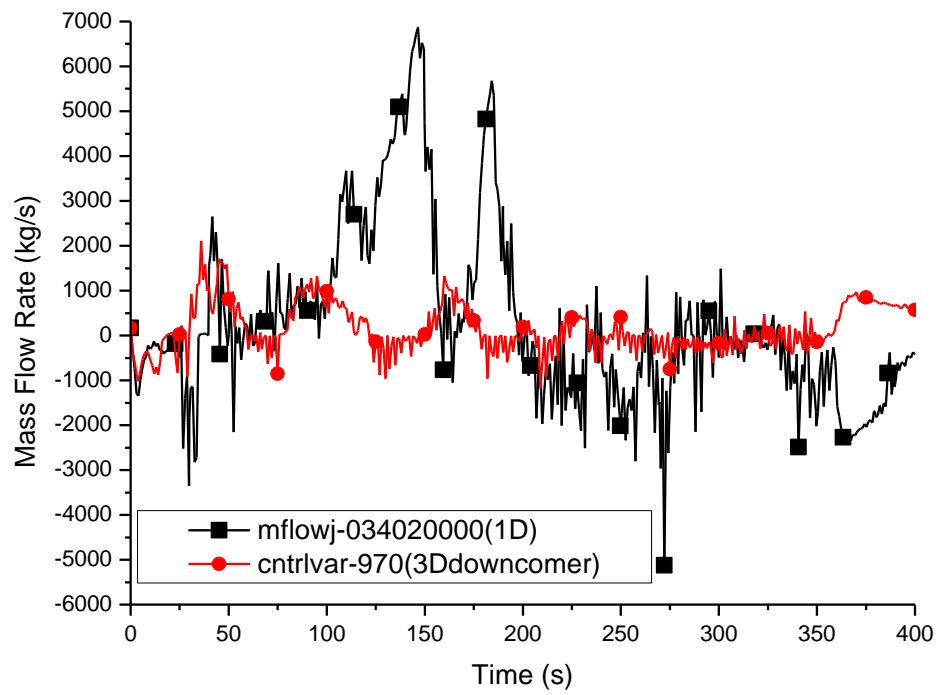


圖 5.1.17 降流區橫向流體接點質量流率比較(最上層)

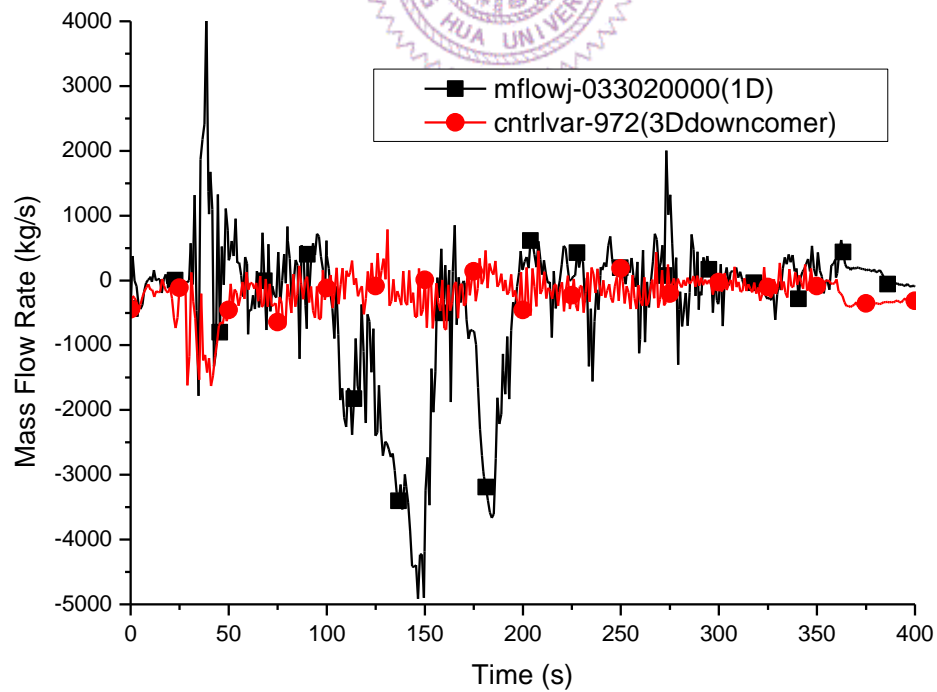


圖 5.1.18 降流區橫向流體接點質量流率比較(最二層)

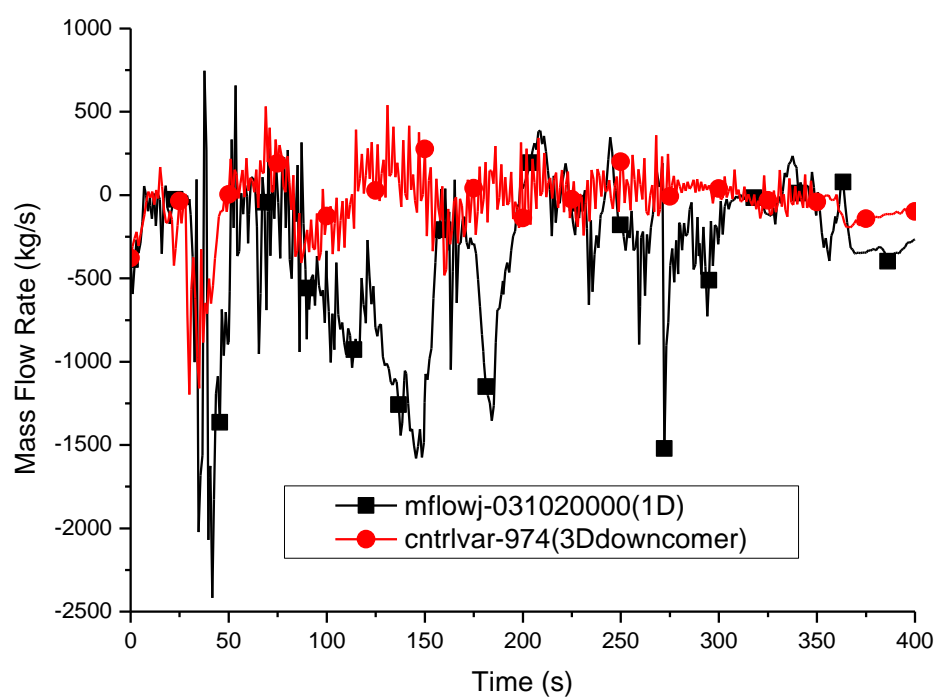


圖 5.1.19 降流區橫向流體接點質量流率比較(第三層)

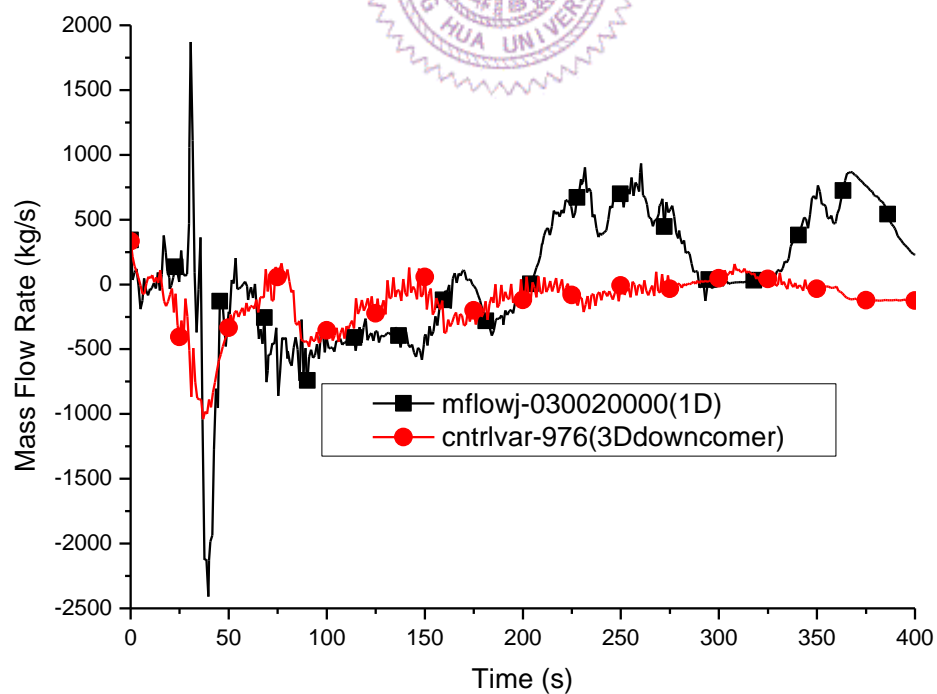


圖 5.1.20 降流區橫向流體接點質量流率比較(第四層)

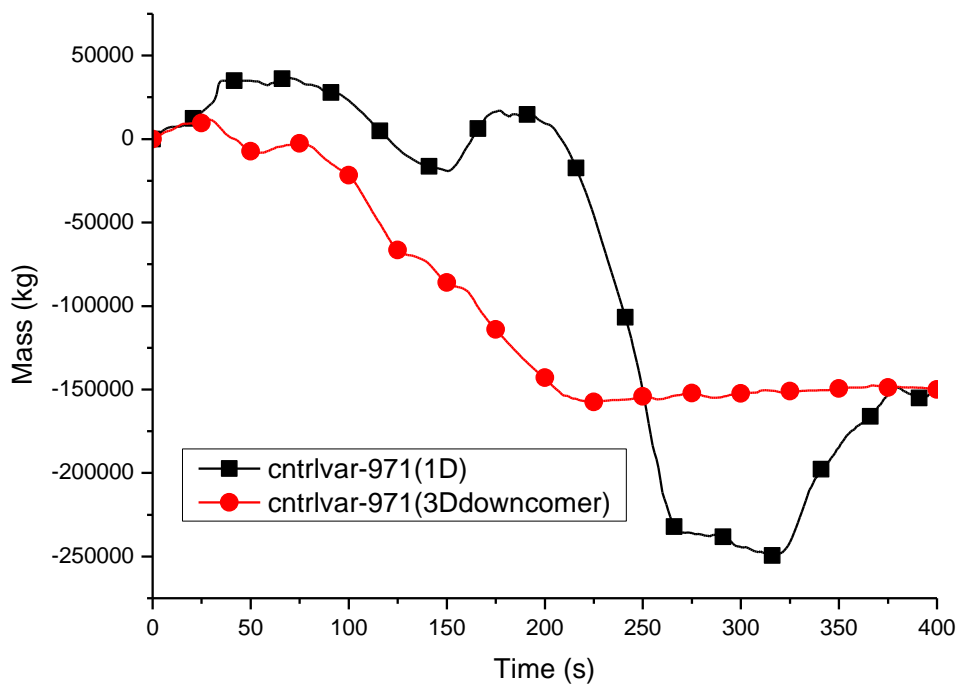


圖 5.1.21 降流區橫向流體接點累計質量比較(最上層)

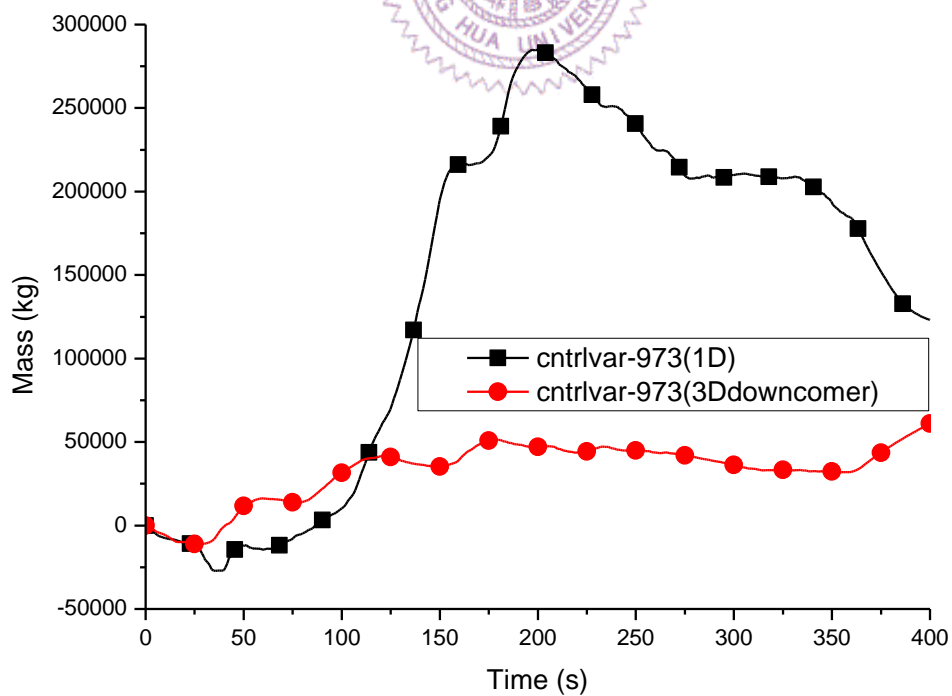


圖 5.1.22 降流區橫向流體接點累計質量比較(第二層)

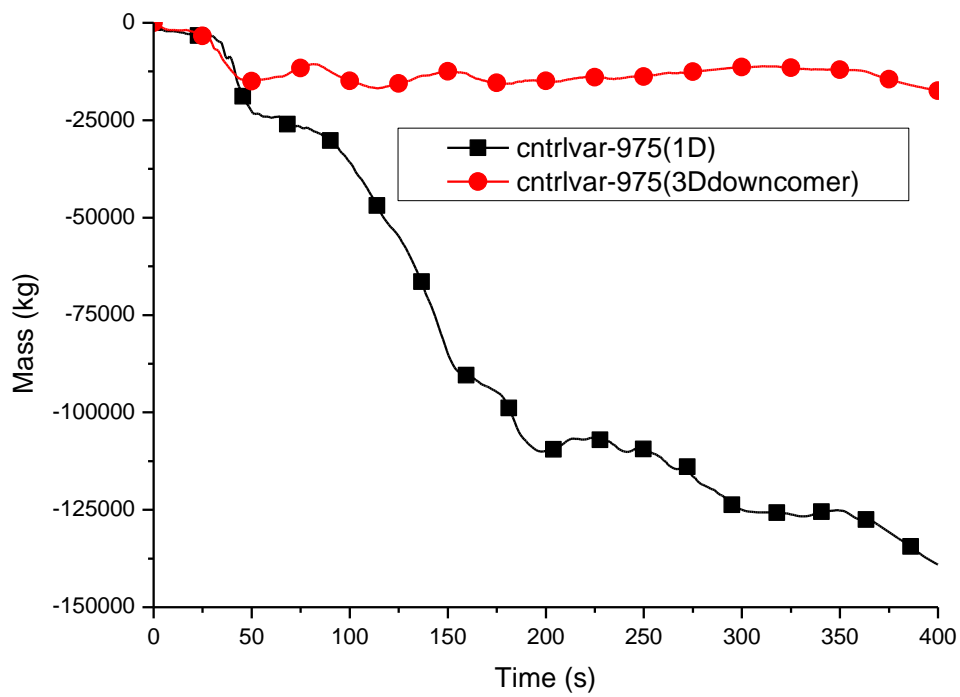


圖 5.1.23 降流區橫向流體接點累計質量比較(第三層)

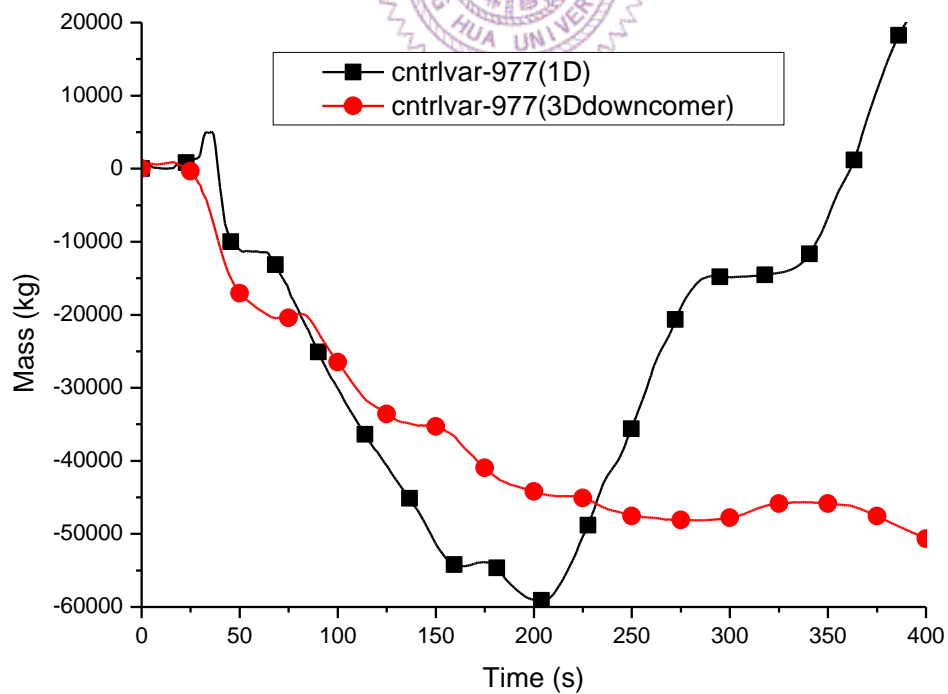


圖 5.1.24 降流區橫向流體接點累計質量比較(第四層)

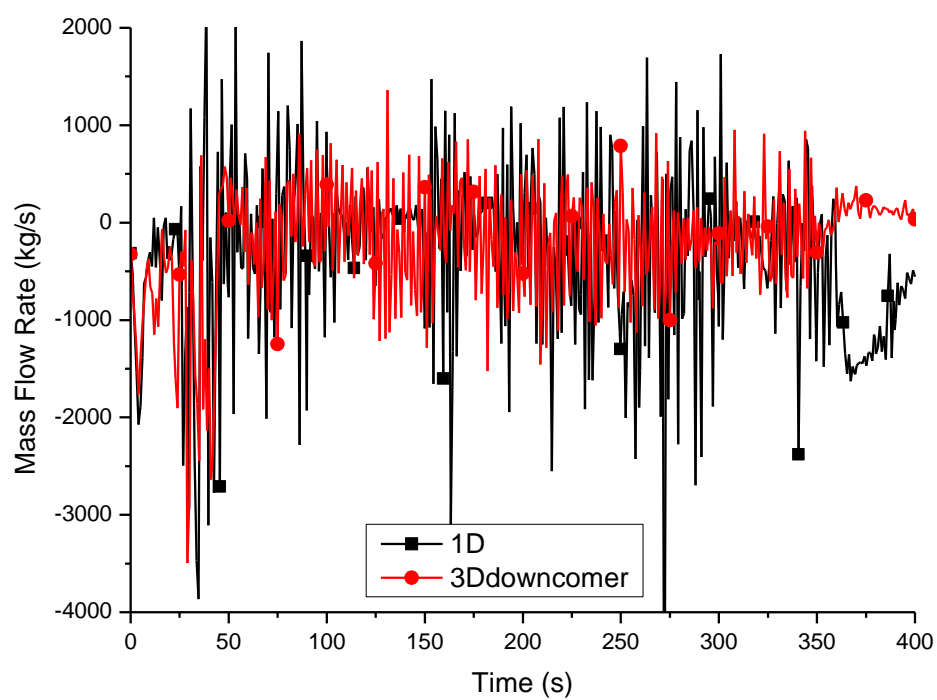


圖 5.1.25 降流區橫向流體接點淨質量流率比較

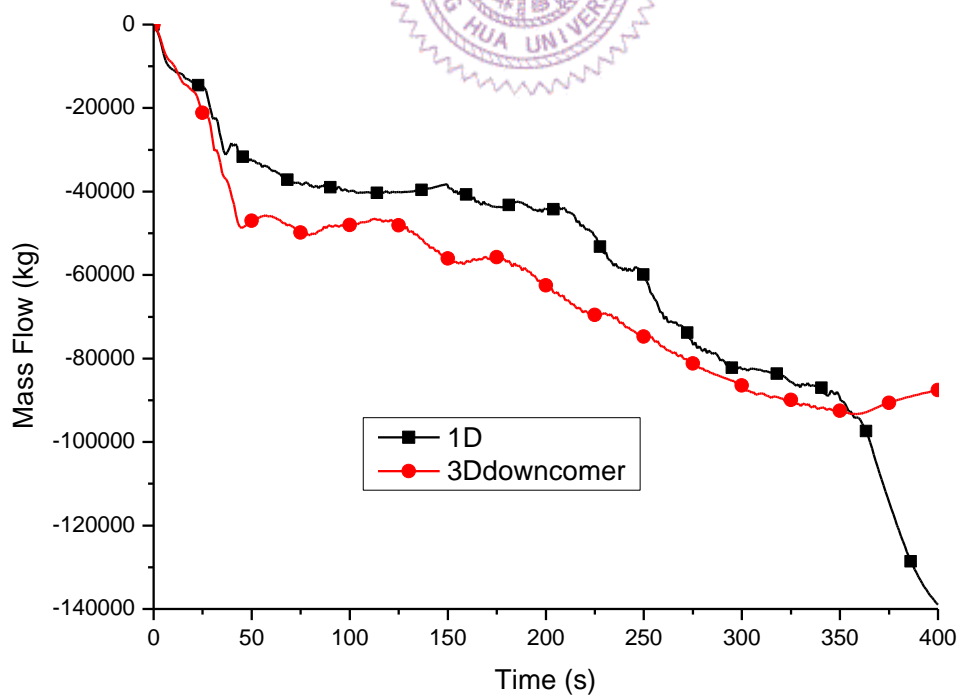


圖 5.1.26 降流區橫向流體接點淨累計質量比較

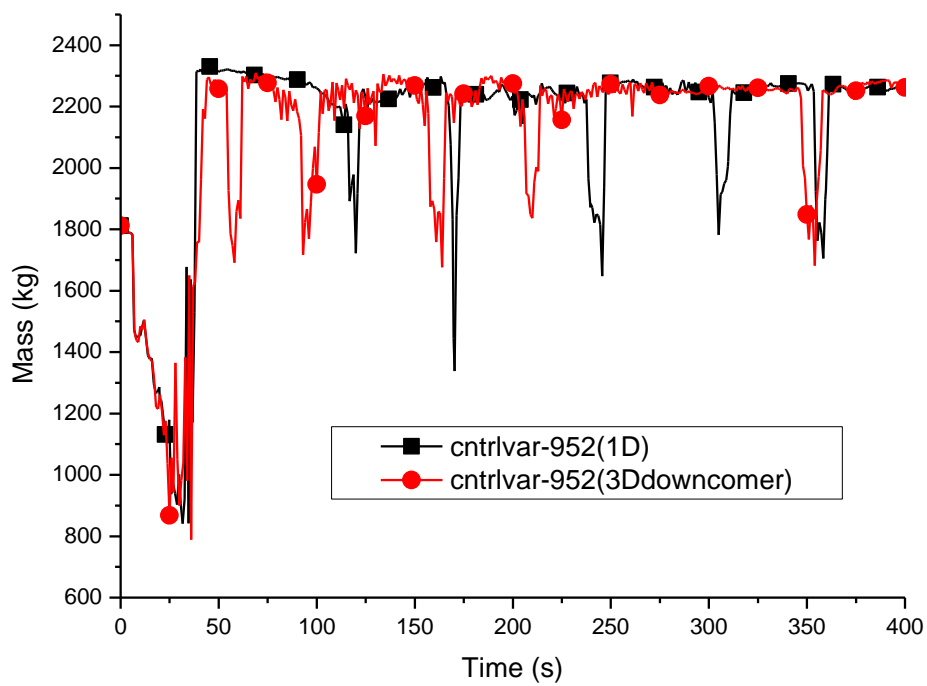


圖 5.1.27 壓力槽底部區間質量變化

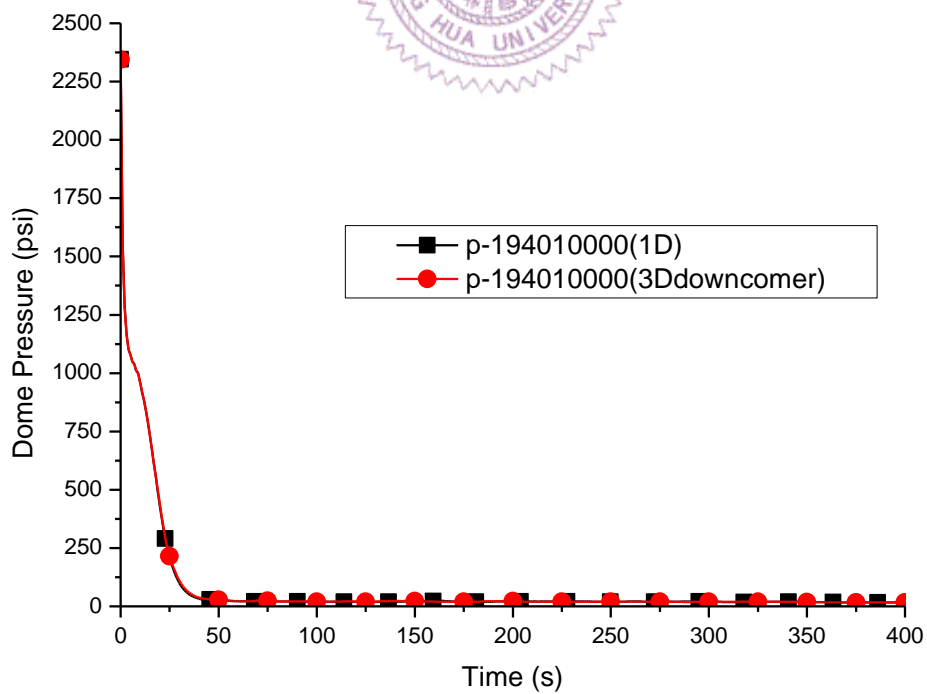


圖 5.1.28 壓力槽頂部壓力

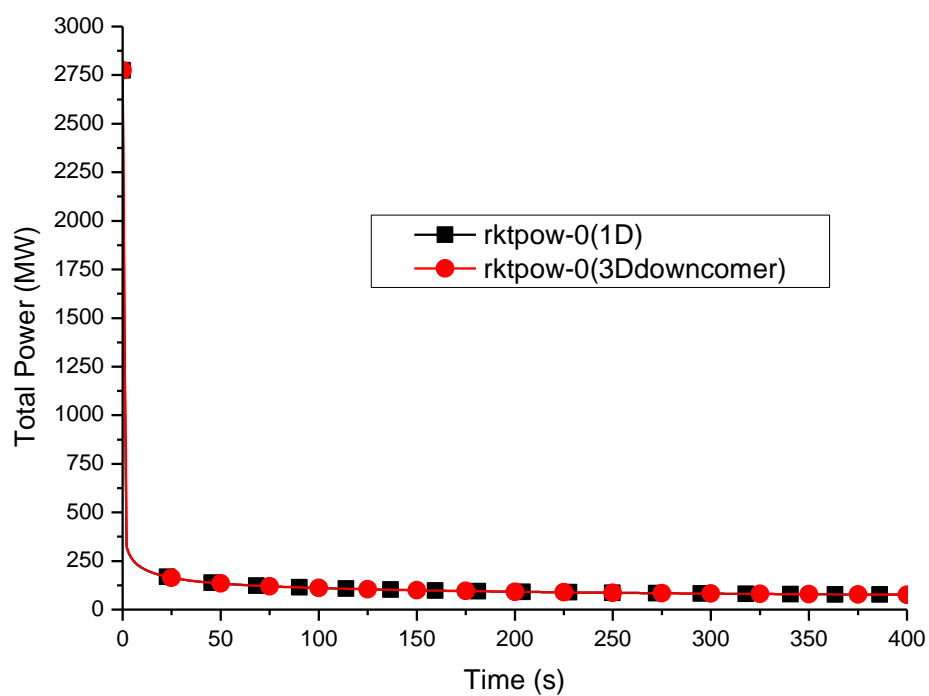


圖 5.1.29 反應器總功率變化

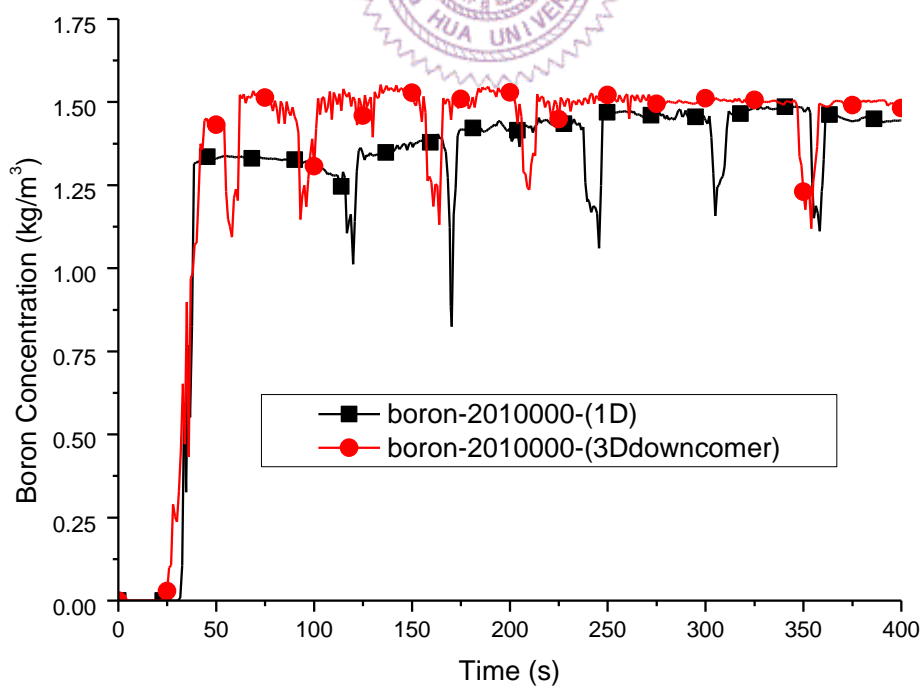


圖 5.1.30 壓力槽底部區間硼濃度變化

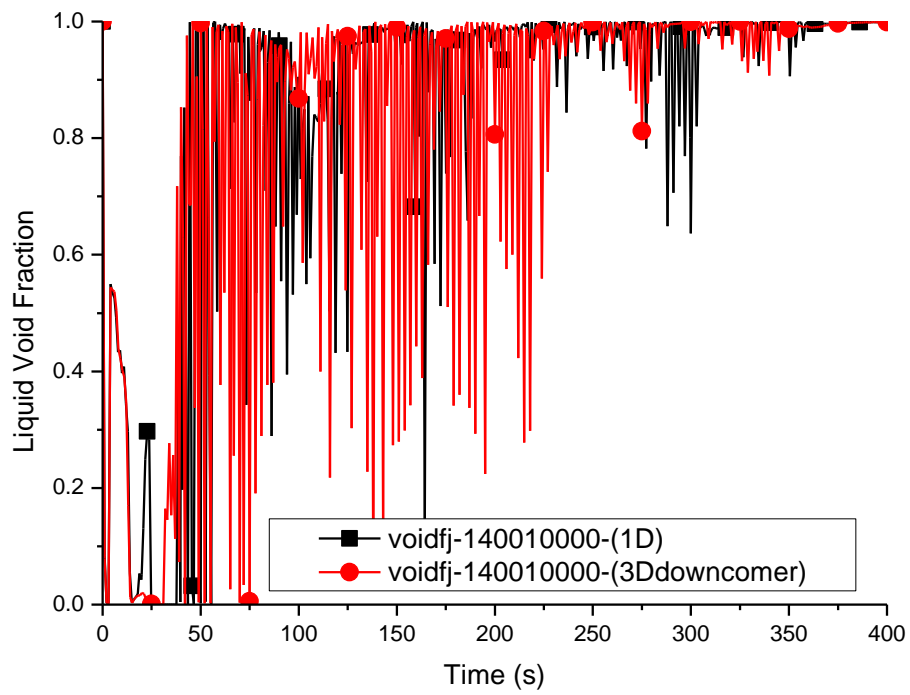


圖 5.1.31 進入爐心平均通道流體接點液體體積分率隨時間變化

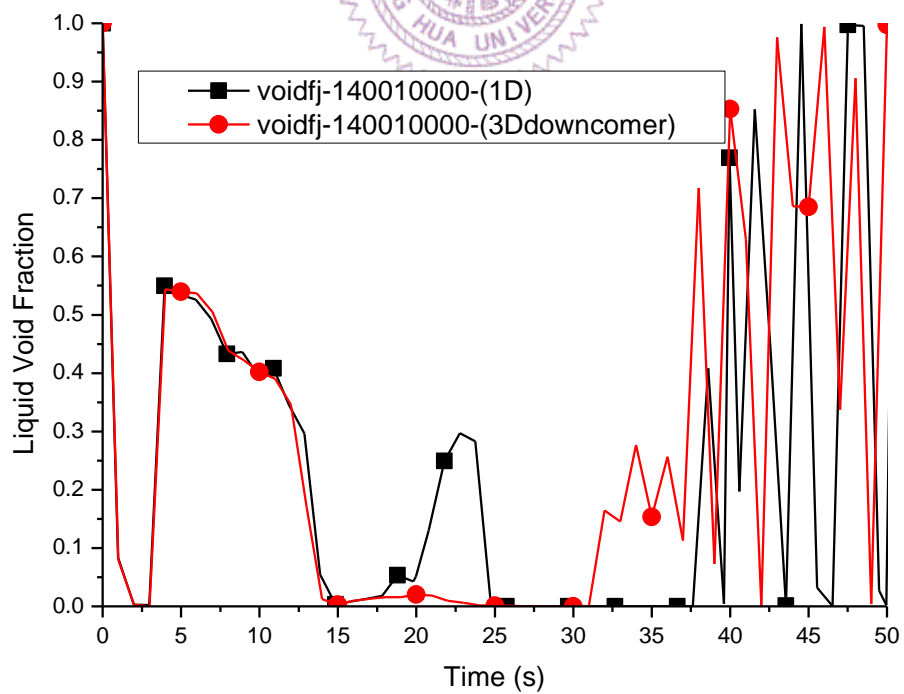


圖 5.1.32 進入爐心平均通道流體接點液體體積分率隨時間變化

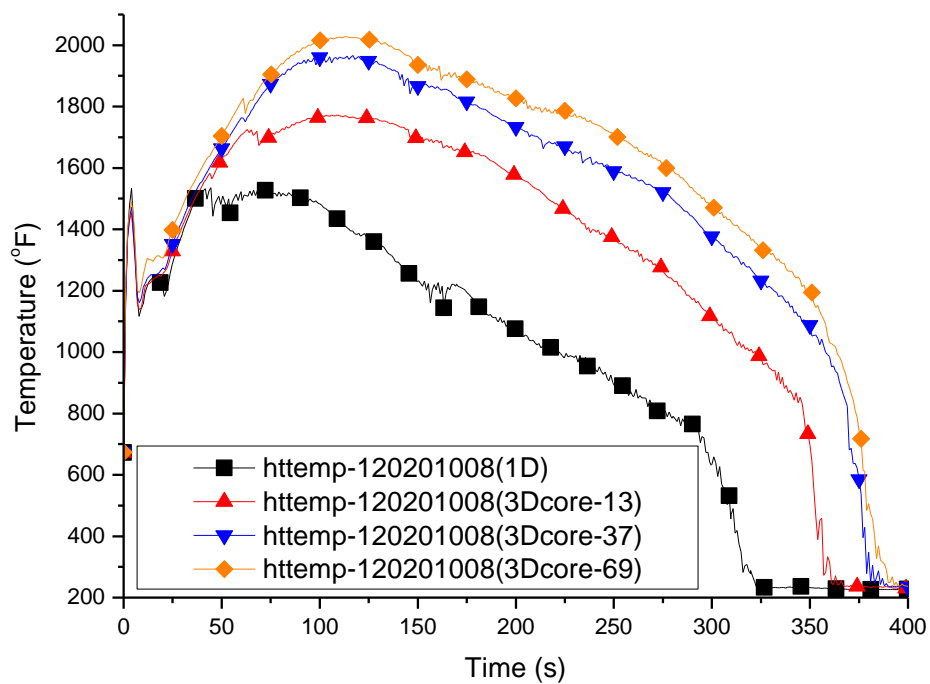


圖 5.2.1 燃料護套最高溫度發生位置與溫度

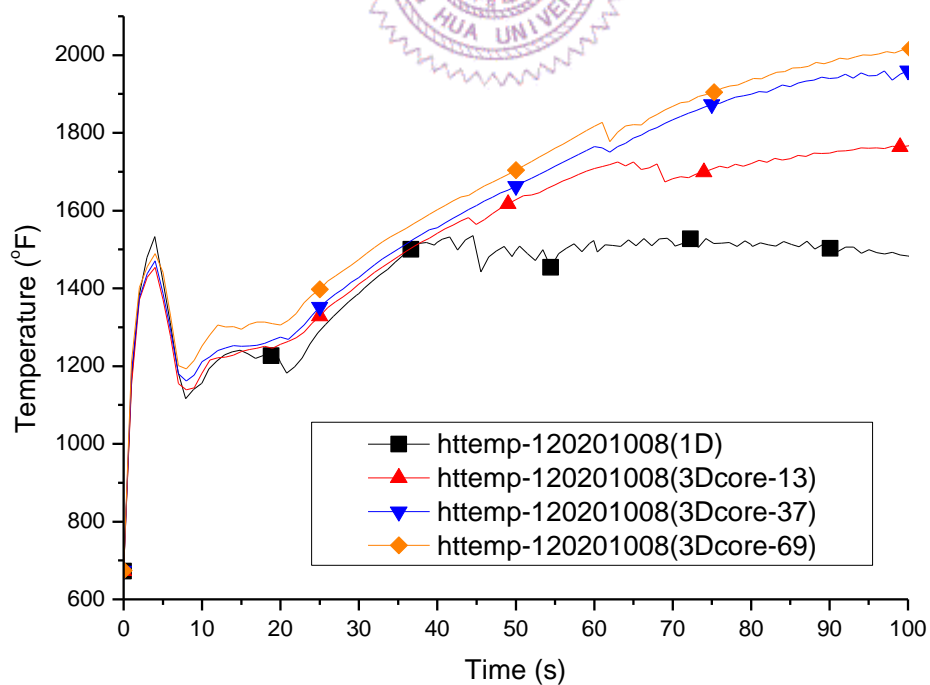


圖 5.2.2 燃料護套最高溫度發生位置與溫度(0 到 100 秒)

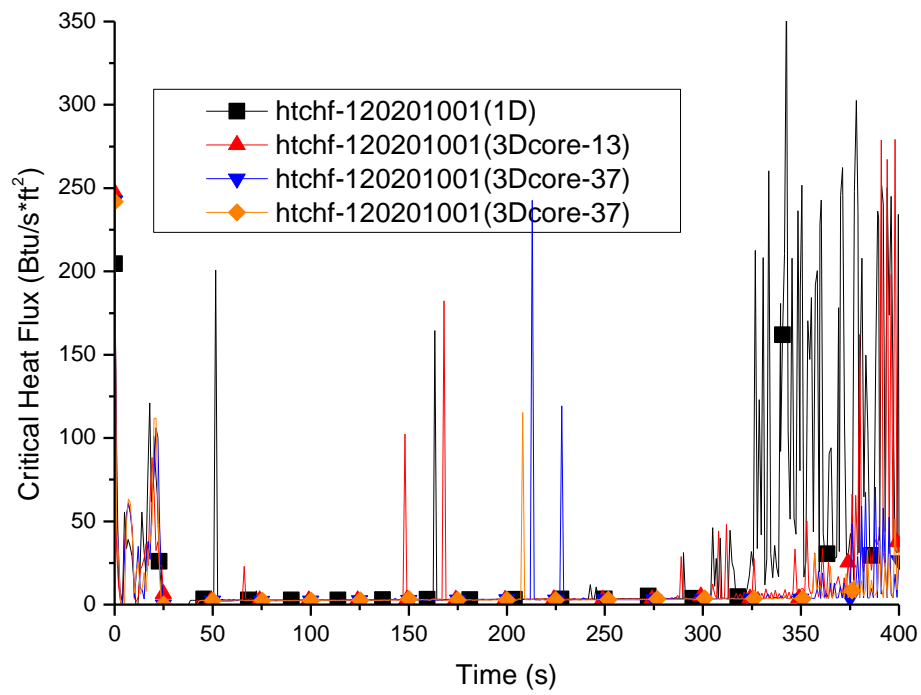


圖 5.2.3 燃料護套最熱處臨界熱通量

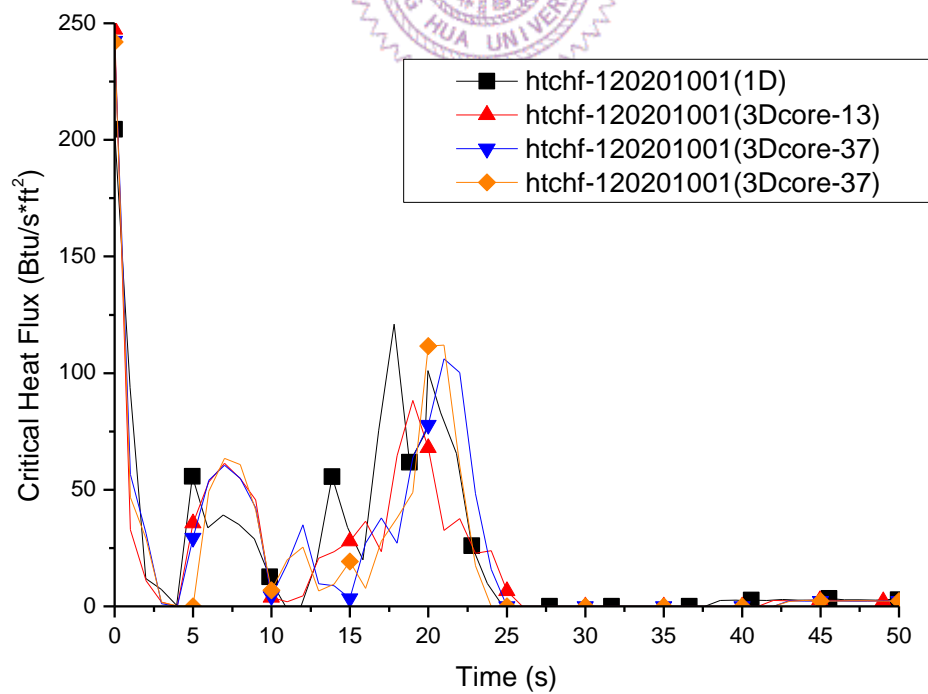


圖 5.2.4 燃料護套最熱處臨界熱通量(0 到 50 秒)

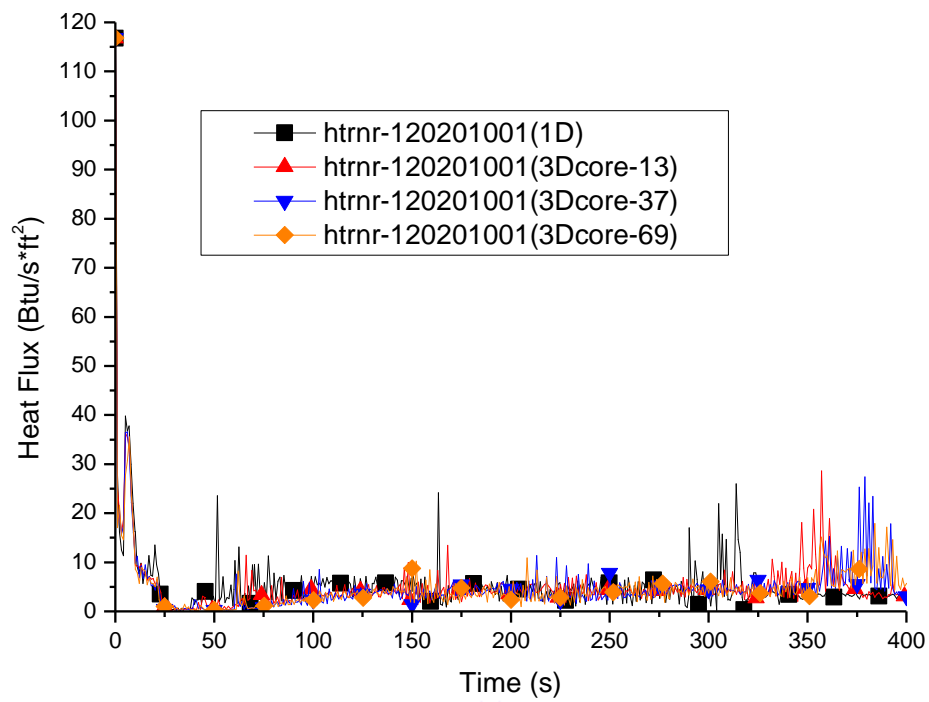


圖 5.2.5 燃料護套最熱處熱通量

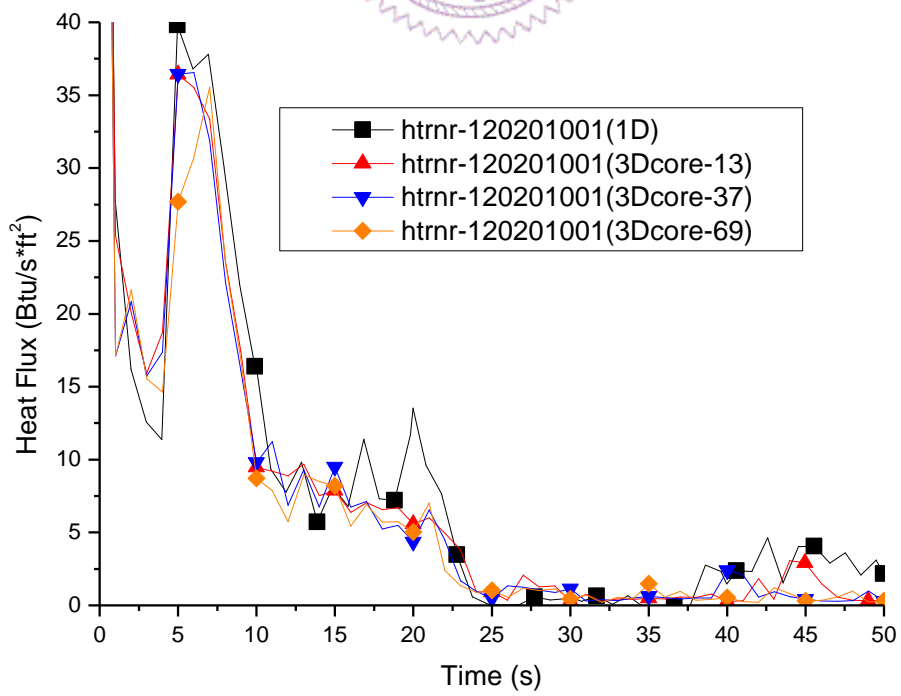


圖 5.2.6 燃料護套最熱處熱通量(0 到 50 秒)

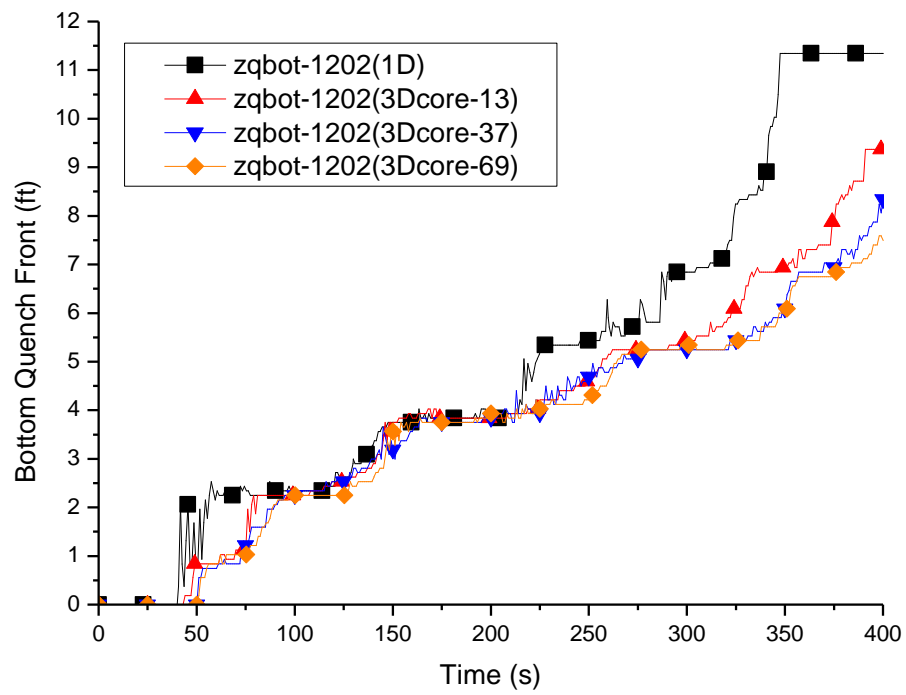


圖 5.2.7 最熱棒淬冷邊界位置

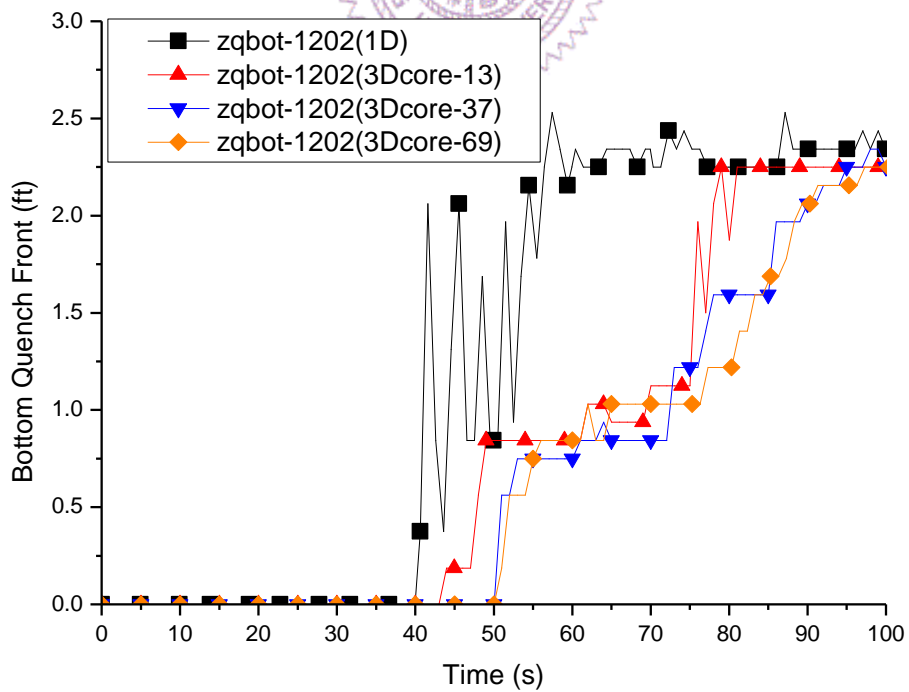


圖 5.2.8 最熱棒淬冷邊界位置(0 到 100 秒)

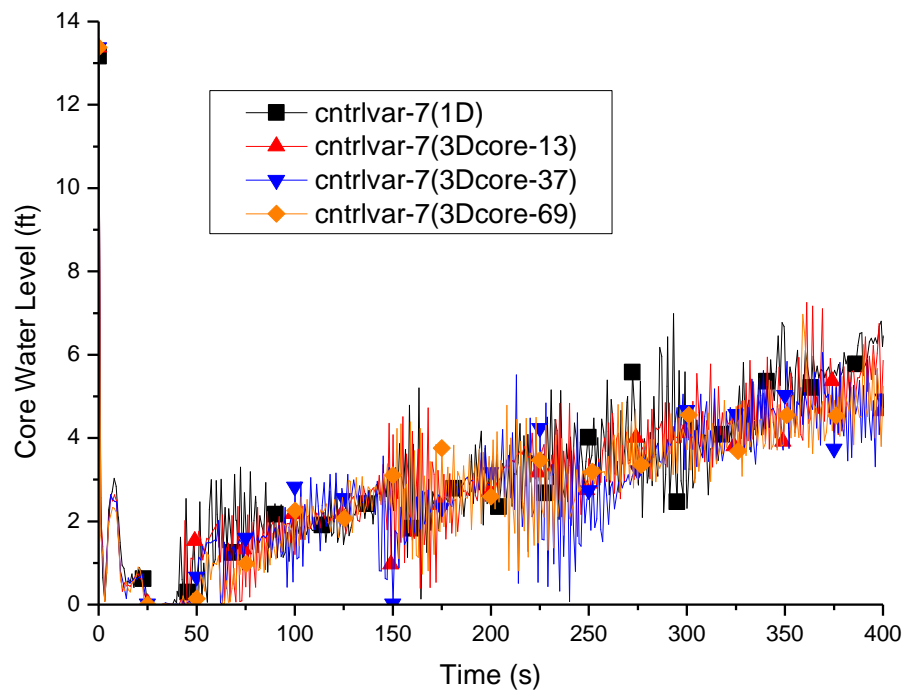


圖 5.2.9 爐心通道水位

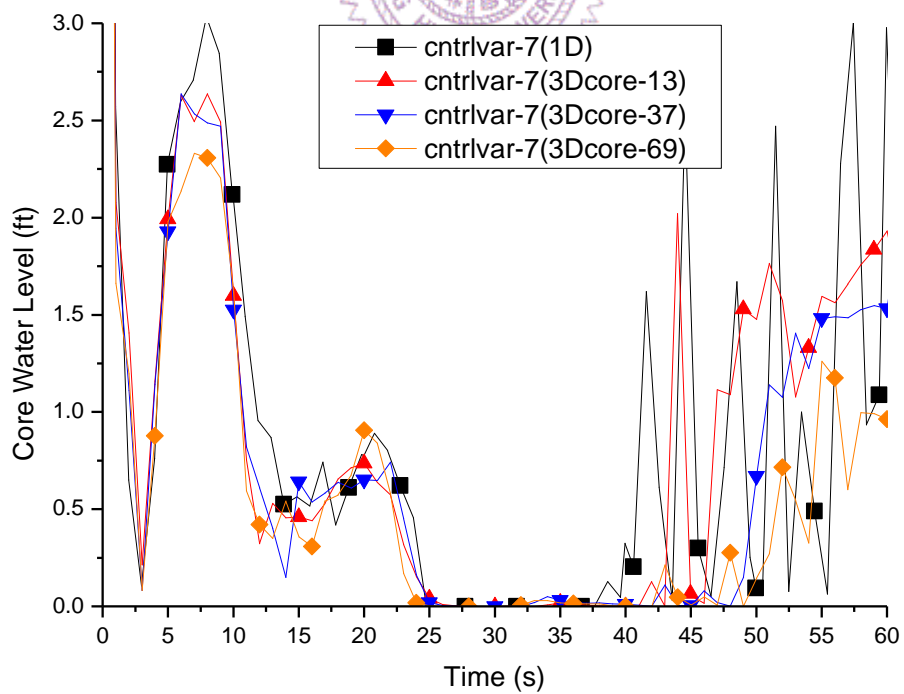


圖 5.2.10 爐心通道水位(0 到 50 秒)

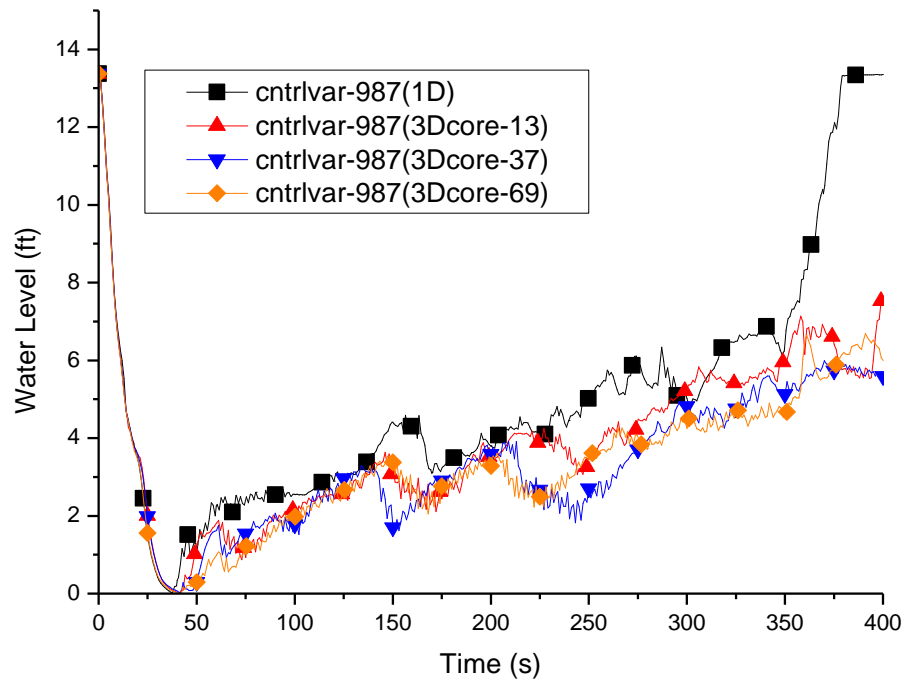


圖 5.2.11 爐心旁通流道水位

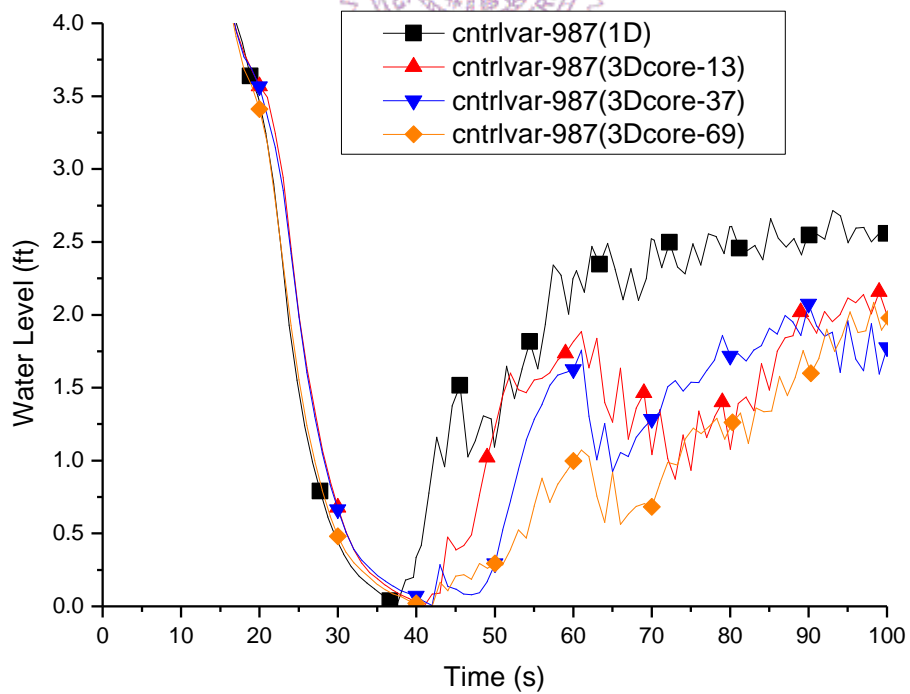


圖 5.2.12 爐心旁通流道水位(0 到 100 秒)

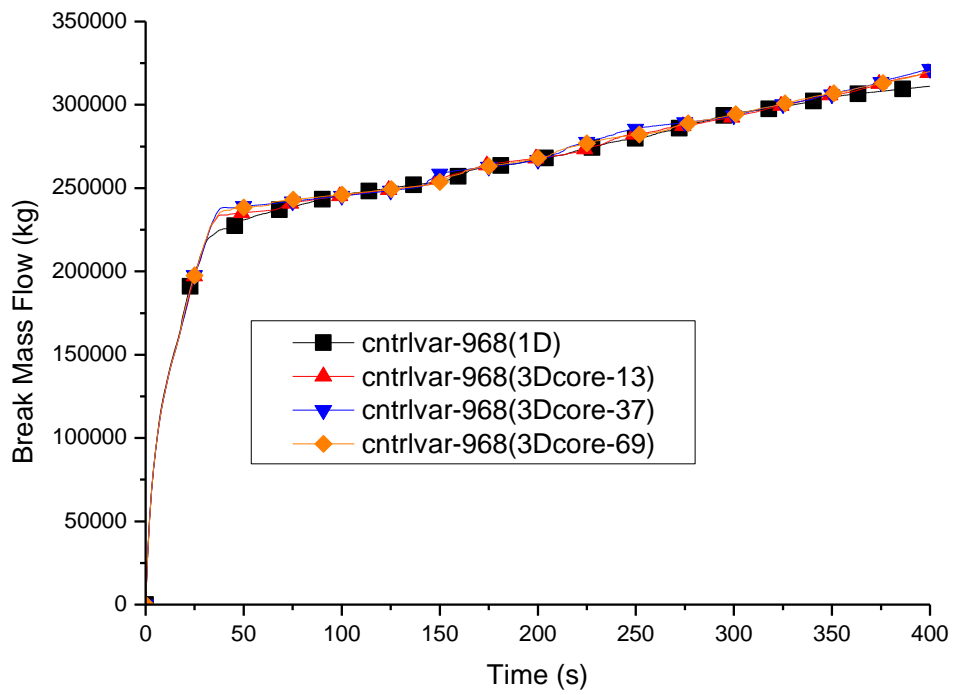


圖 5.2.13 破口累計流出冷卻水質量

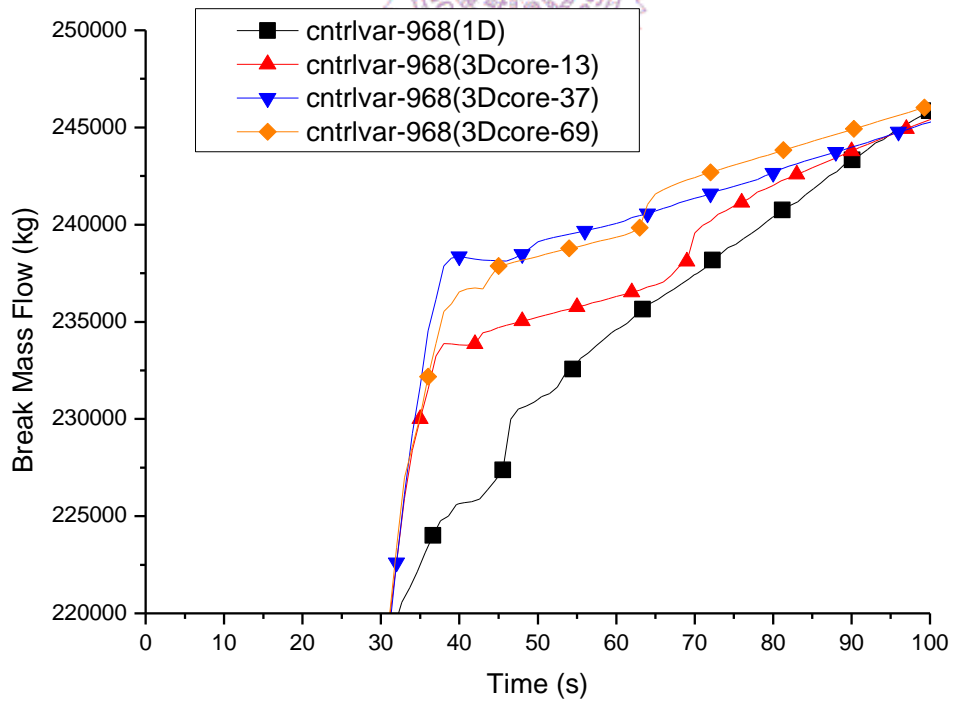


圖 5.2.14 破口累計流出冷卻水質量(0 到 100 秒)

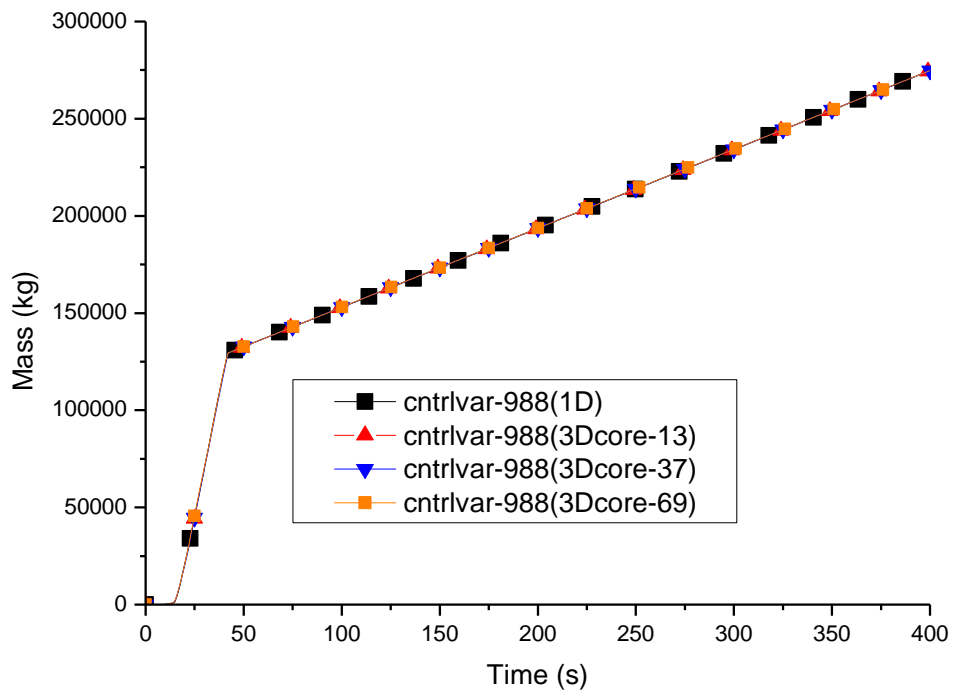


圖 5.2.15 有效緊急爐心注水累計質量

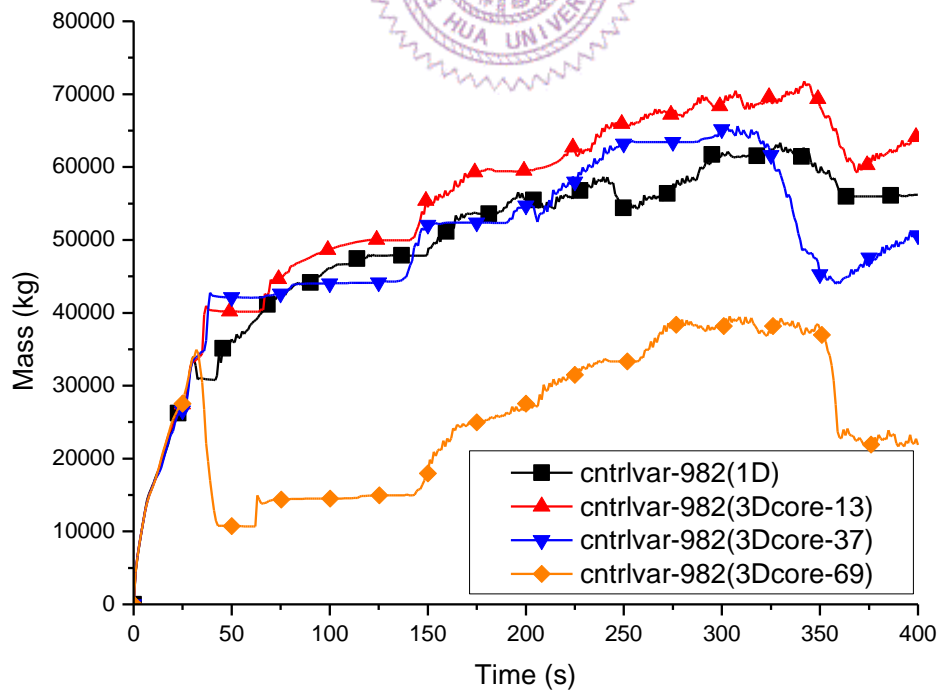


圖 5.2.16 破口側降流區頂部體積向上累計流出質量

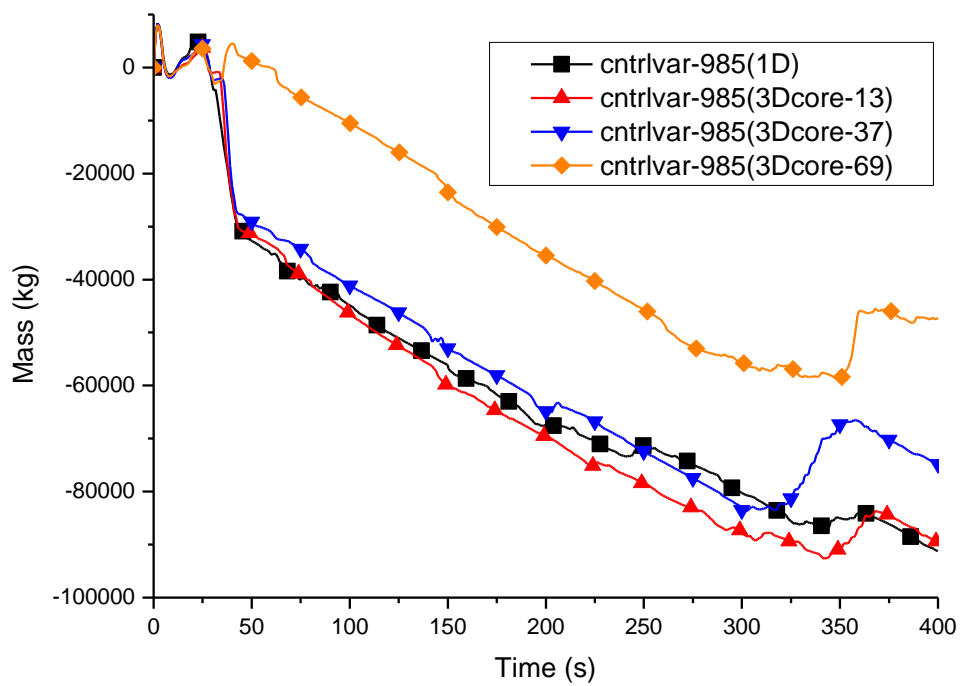


圖 5.2.17 完整側降流區頂部體積向上累計流出質量

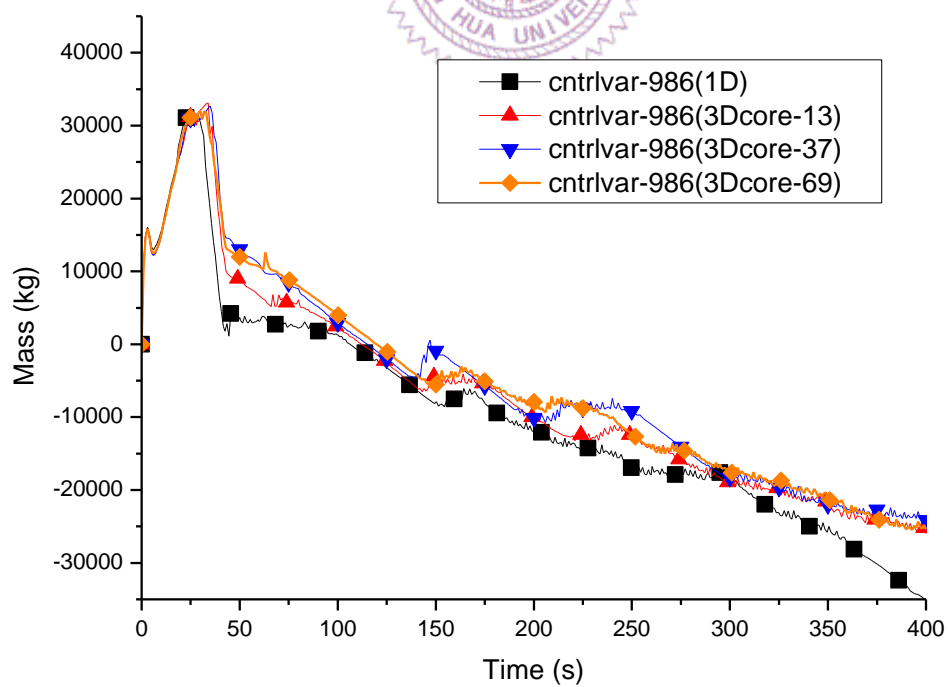


圖 5.2.18 降流區頂部淨往上流出累計質量(0 到 100 秒)

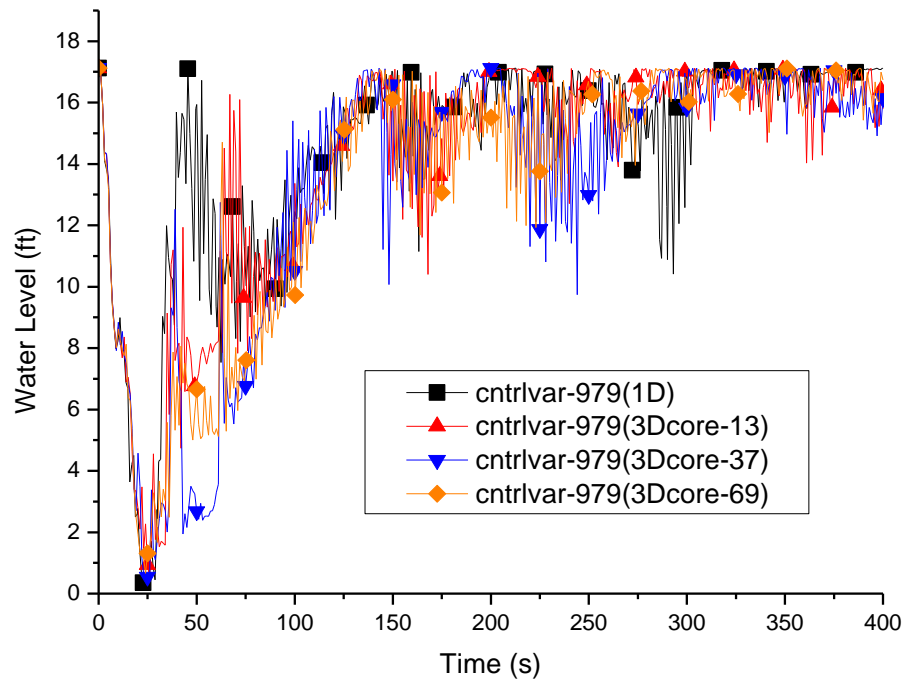


圖 5.2.19 降流區完整側水位高度

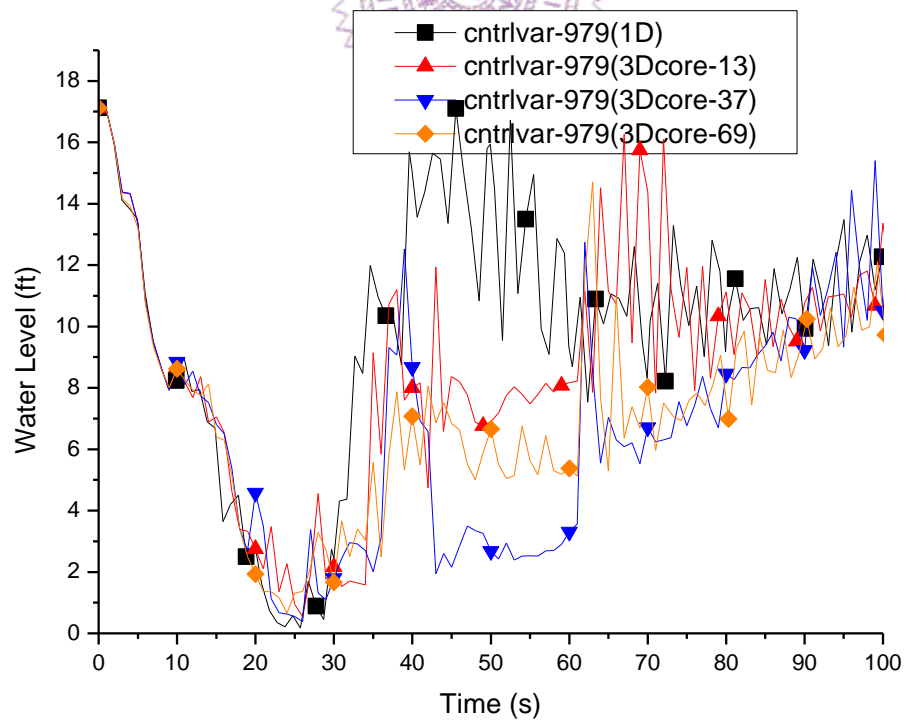


圖 5.2.20 降流區完整側水位高度(0 到 100 秒)

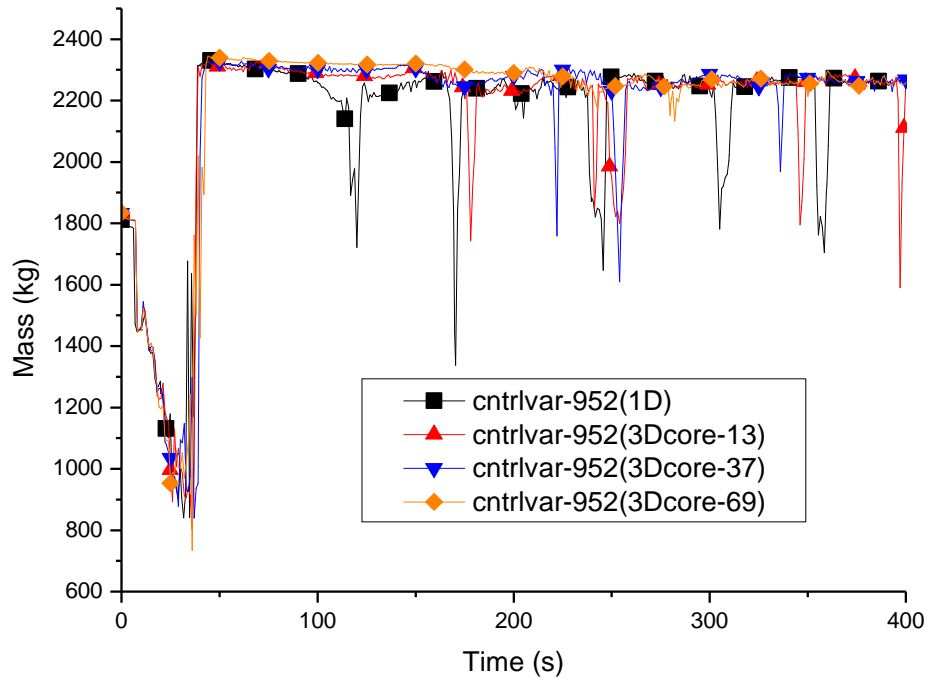


圖 5.2.21 壓力槽底部區間質量

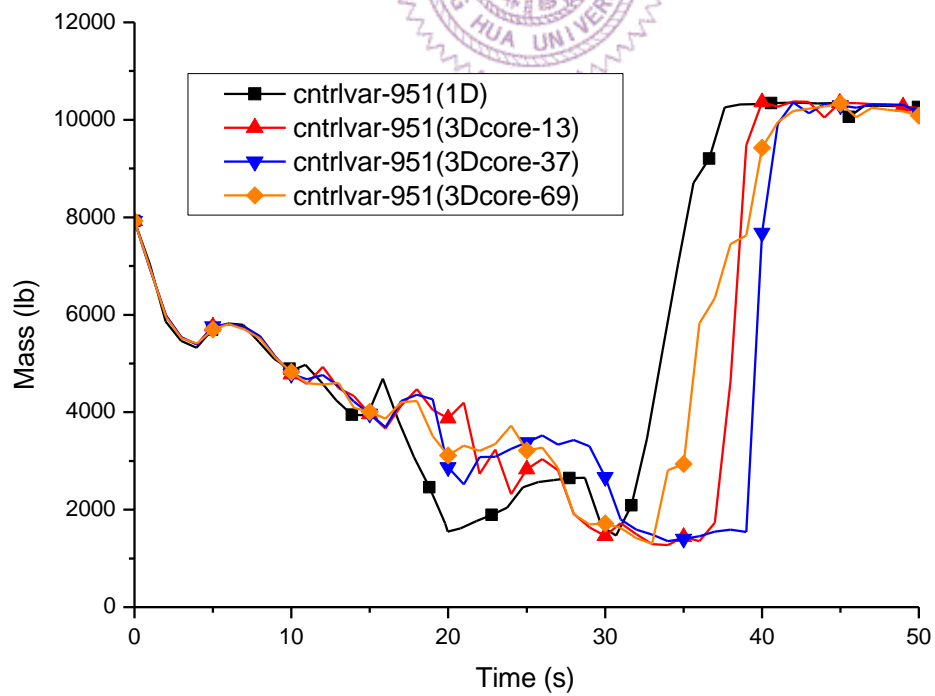


圖 5.2.22 壓力槽底部區間與爐心下方體積所夾區間質量

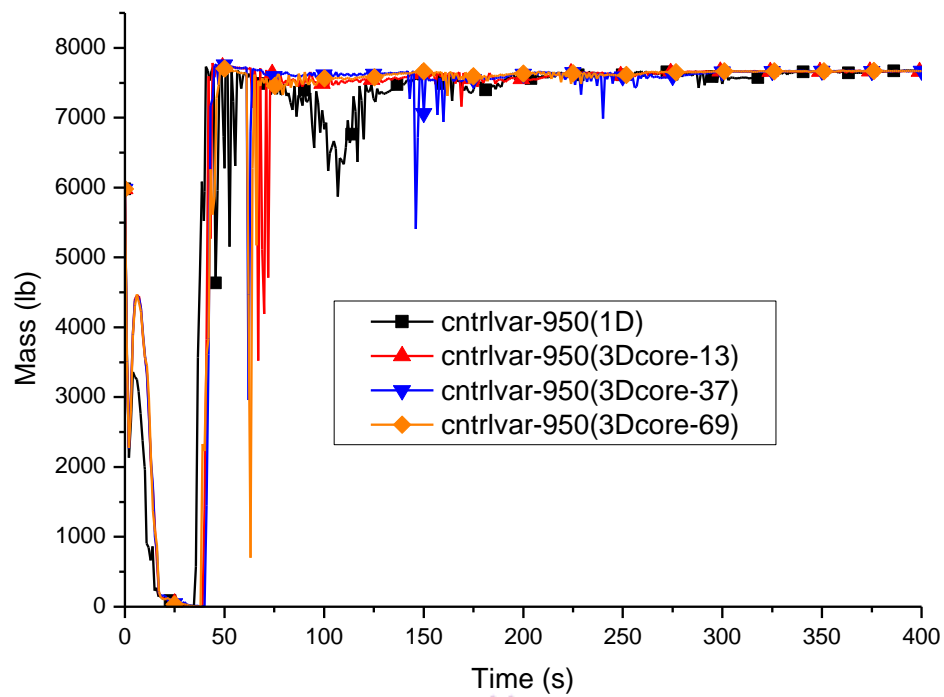


圖 5.2.23 爐心下方體積質量

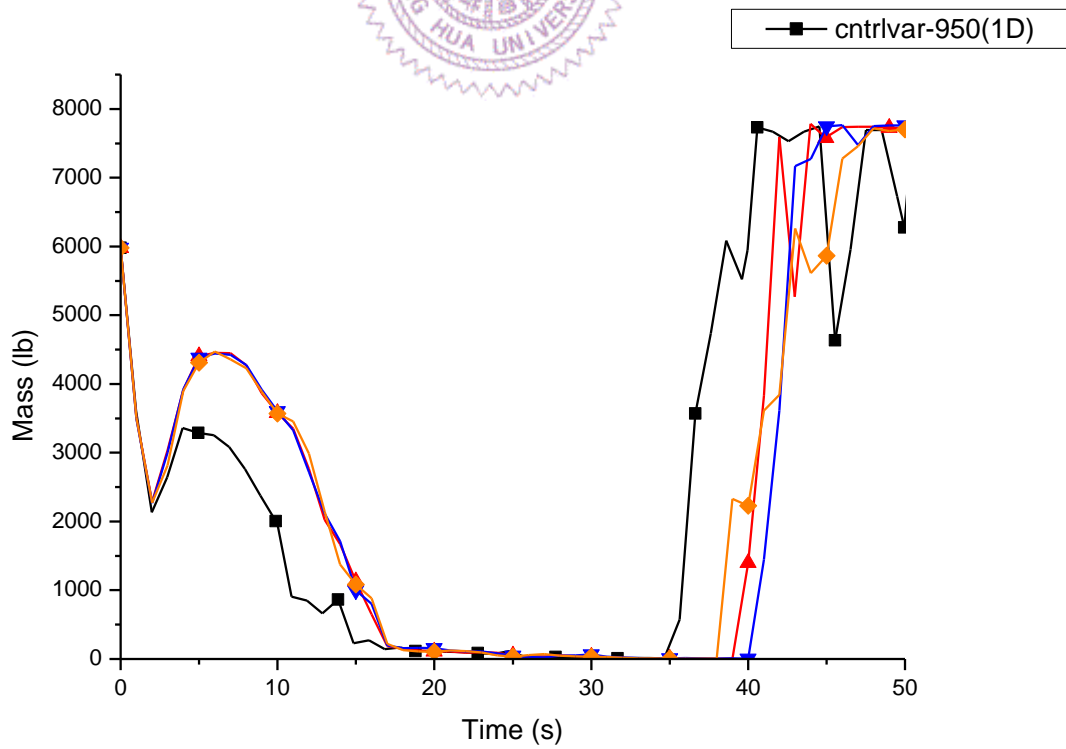


圖 5.2.24 爐心下方體積質量(0 到 50 秒)

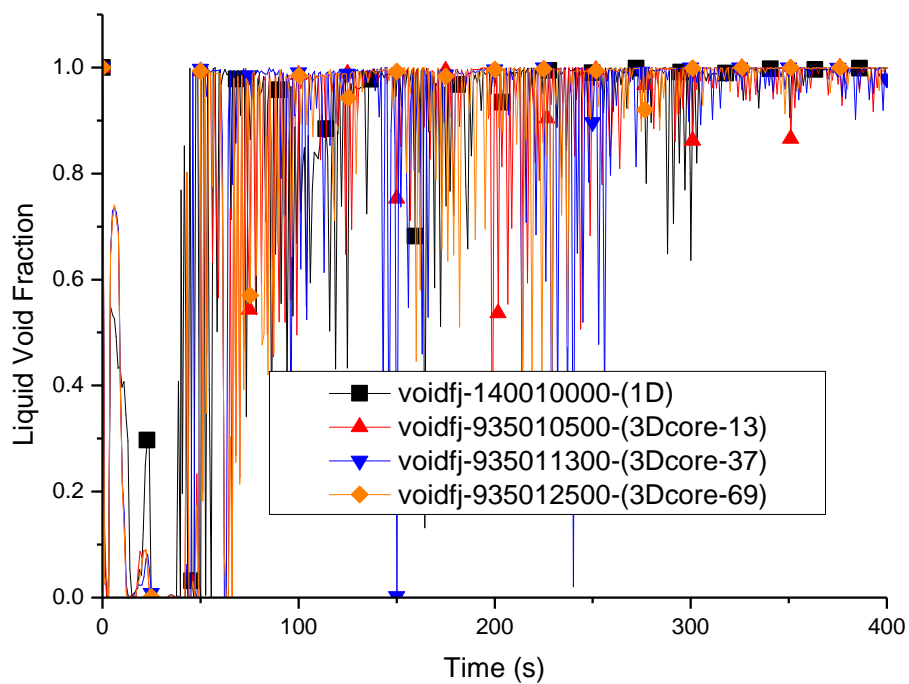


圖 5.2.25 進入爐心通道流體接點液體體積分率

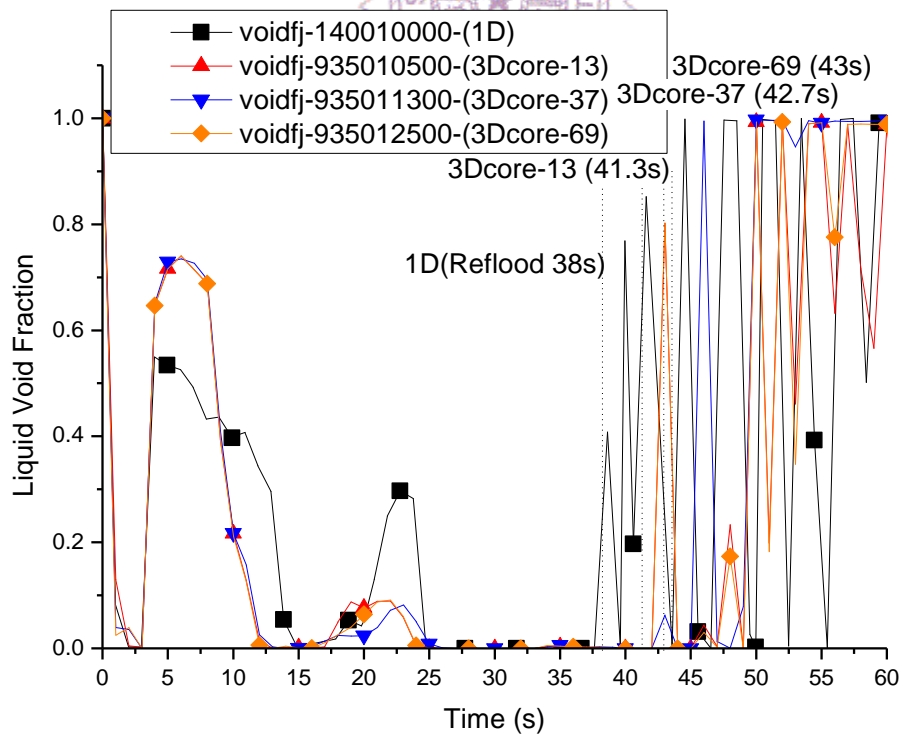


圖 5.2.26 進入爐心通道流體接點液體體積分率 (0 到 75 秒)

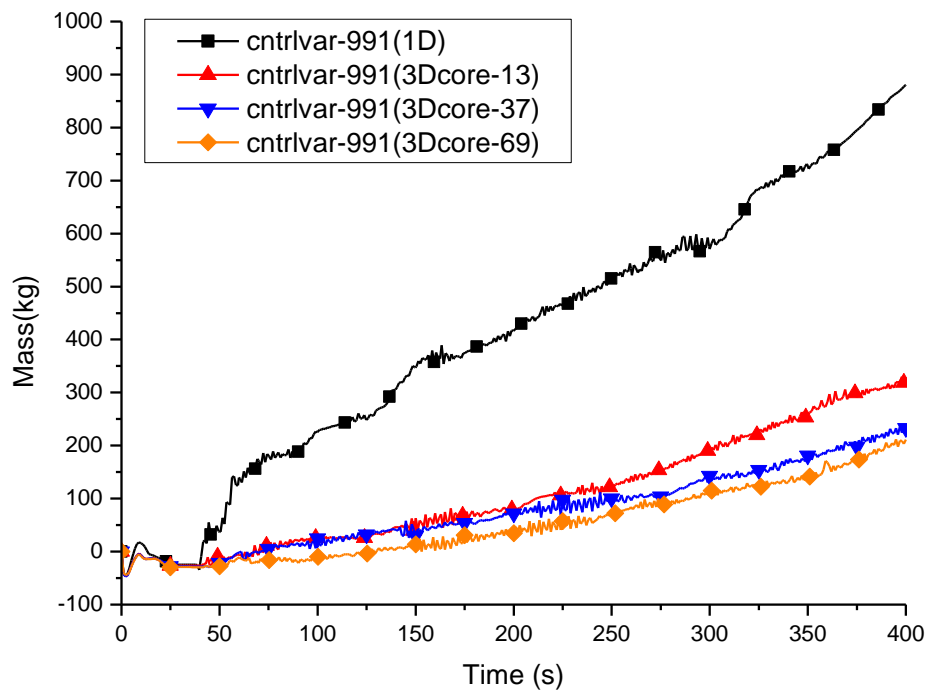


圖 5.2.27 爐心下方體積進入最熱棒所在通道每單位燃料元件累計質量

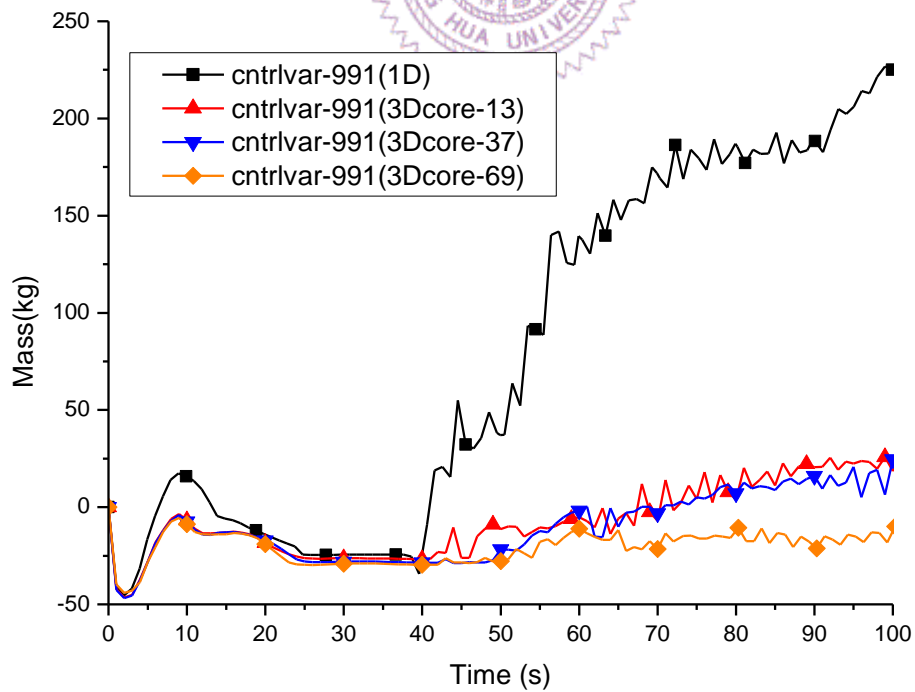


圖 5.2.28 爐心下方體積進入最熱棒所在通道每單位燃料元件累計質量(0 到 100 秒)

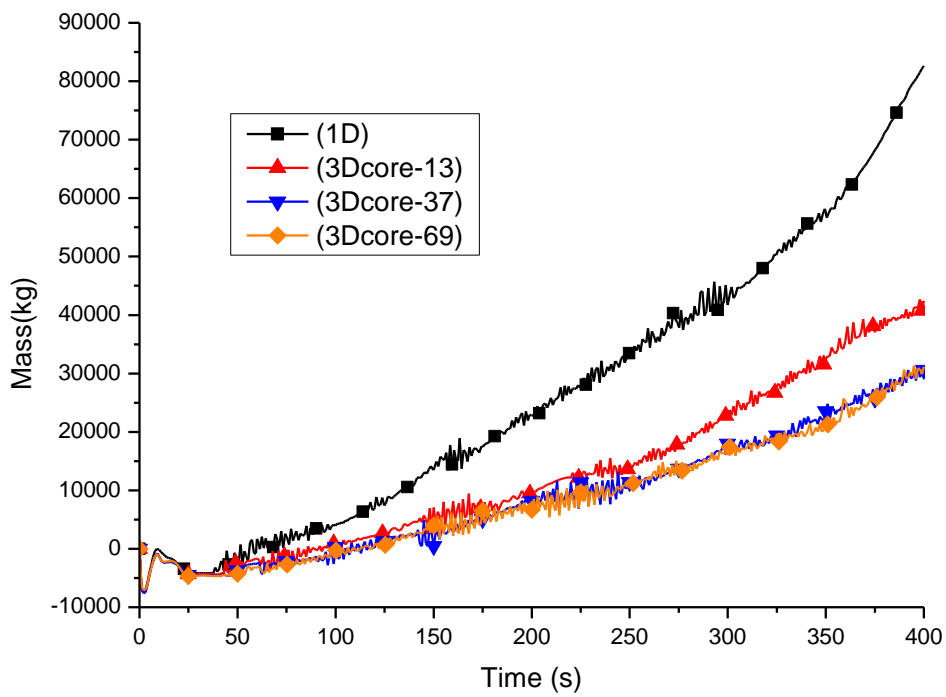


圖 5.2.29 由下方體積進入爐心總累計質量

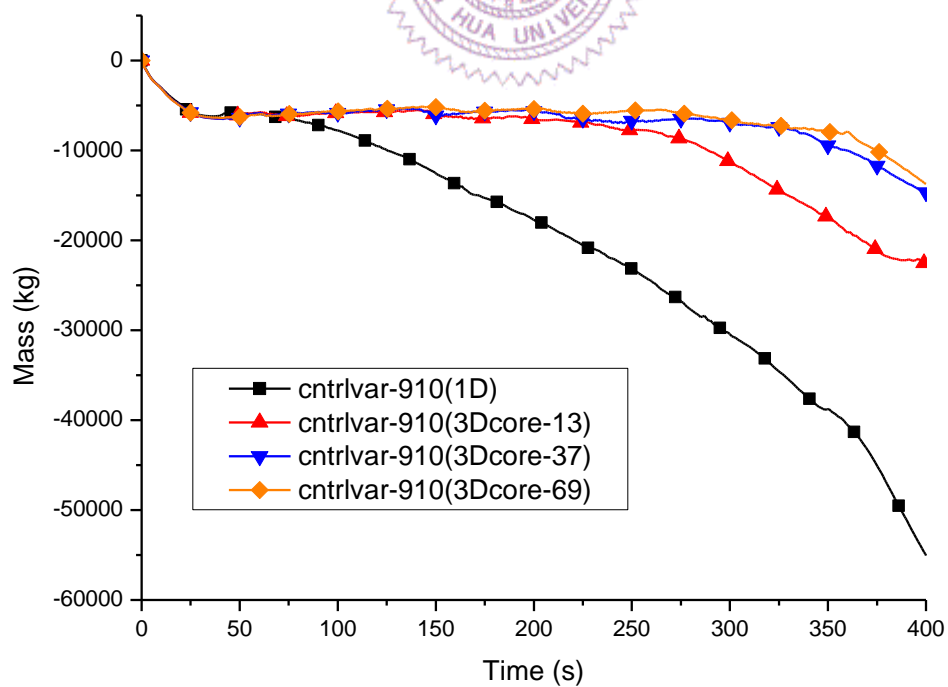


圖 5.2.30 爐心下方體積進入爐心旁通通道總累計質量

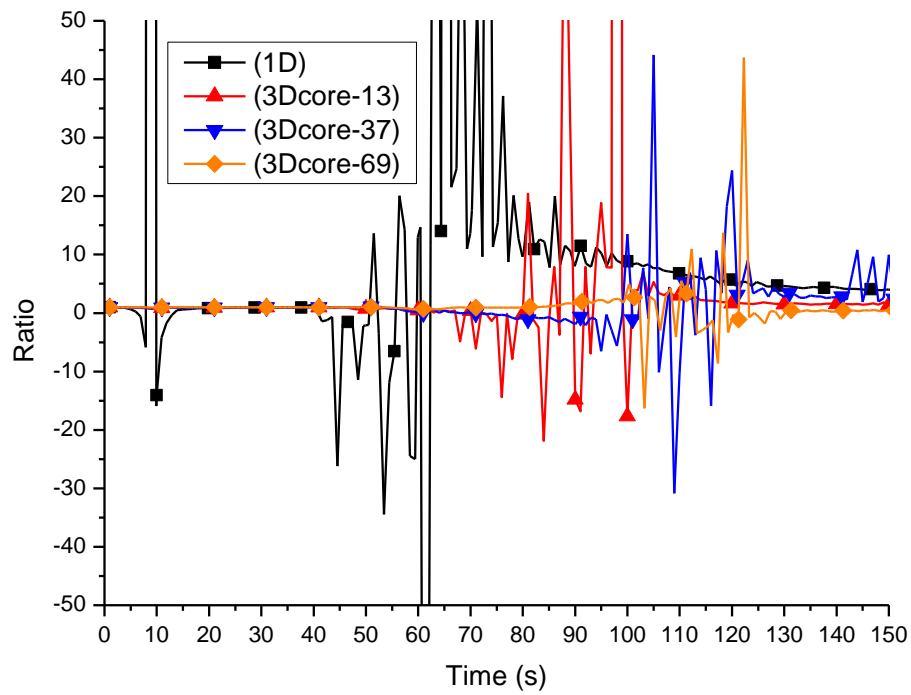


圖 5.2.31 最熱棒通道與爐心總通道每單位燃料元件由下進入爐心累計質量比(0 到 150 秒)

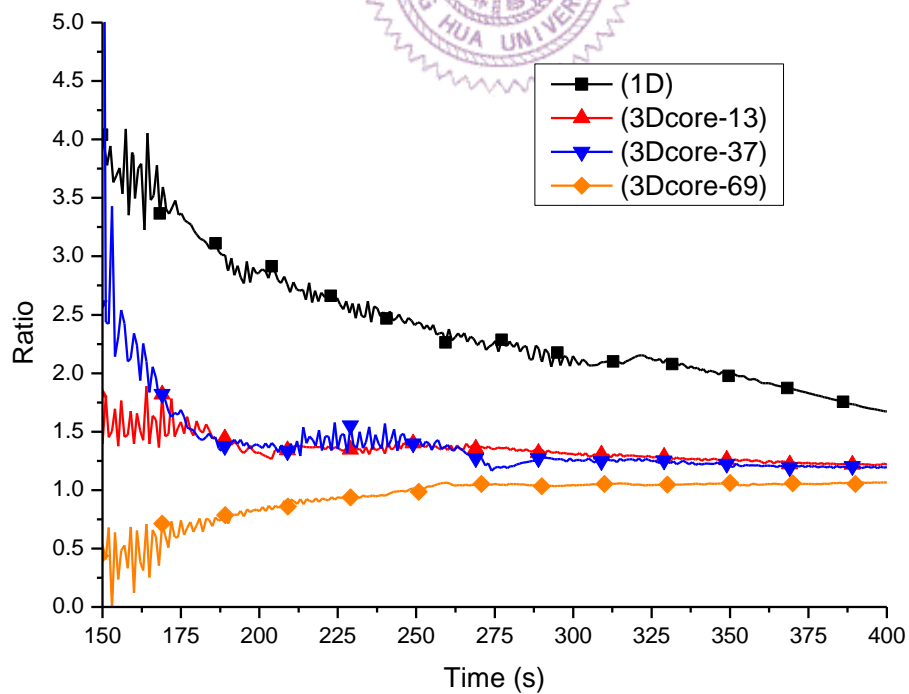


圖 5.2.32 最熱棒通道與爐心總通道每單位燃料元件由下進入爐心累計質量比(150 到 400 秒)

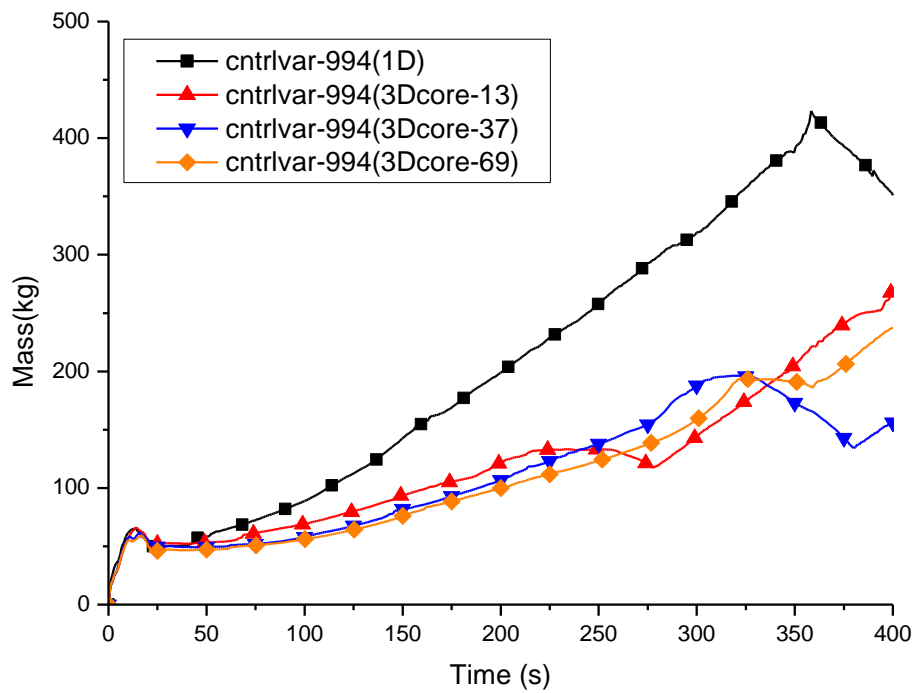


圖 5.2.33 最熱棒所在通道每單位燃料元件向上離開累計質量

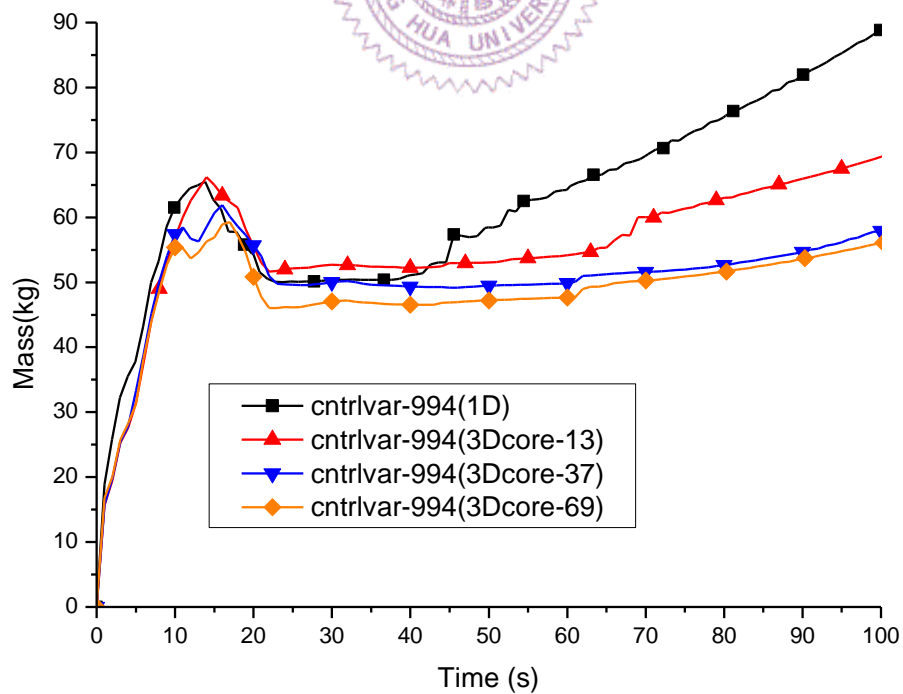


圖 5.2.34 最熱棒所在通道每單位燃料元件向上離開累計質量(0 到 100 秒)

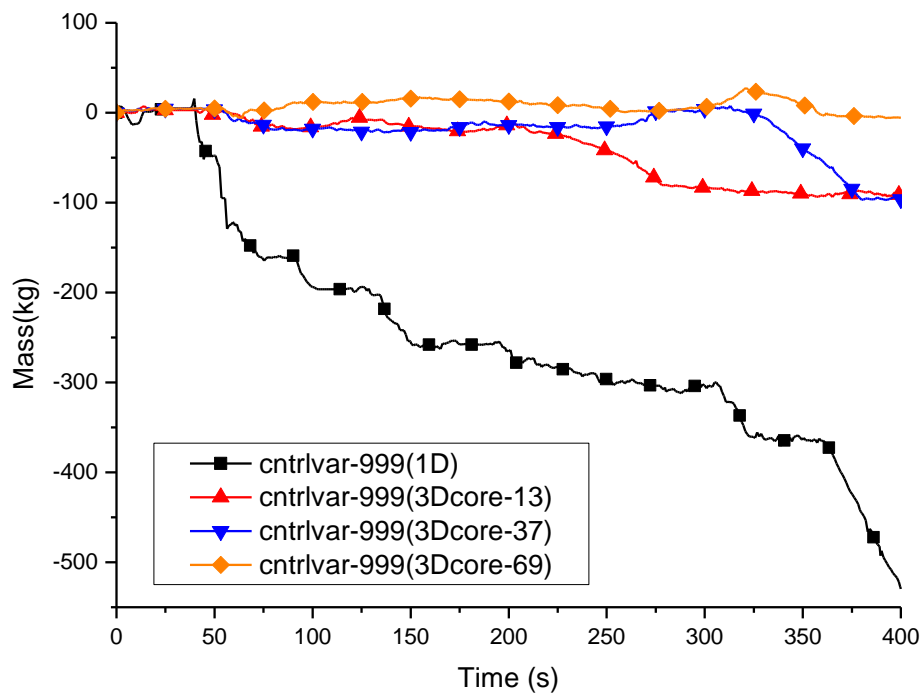


圖 5.2.35 最熱棒所在通道每單位燃料元件總橫向流入累計質量

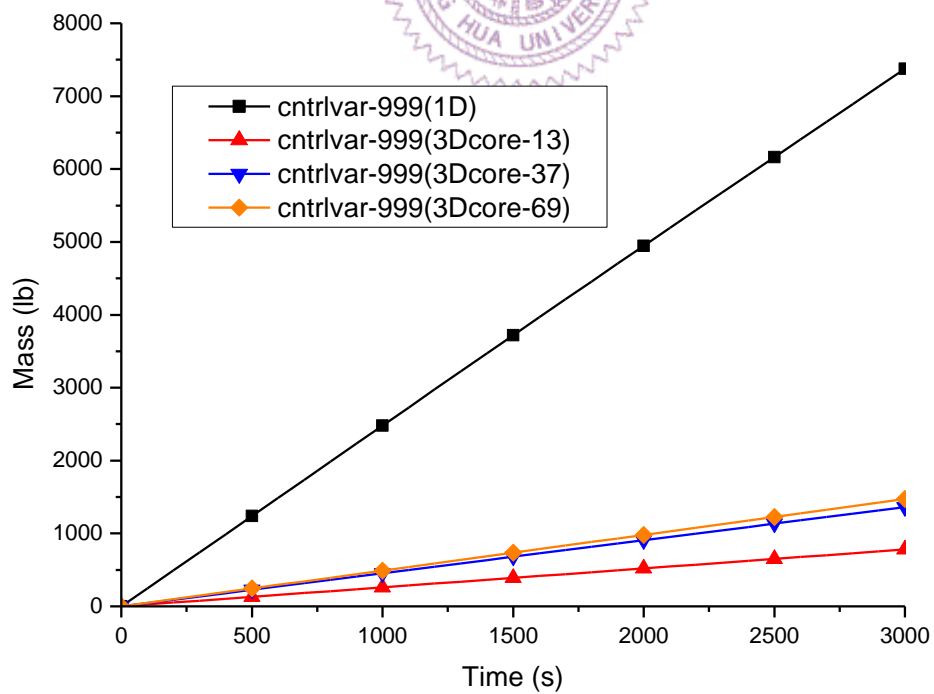


圖 5.2.36 最熱棒所在通道每單位燃料元件總橫向流入累計質量(穩態)

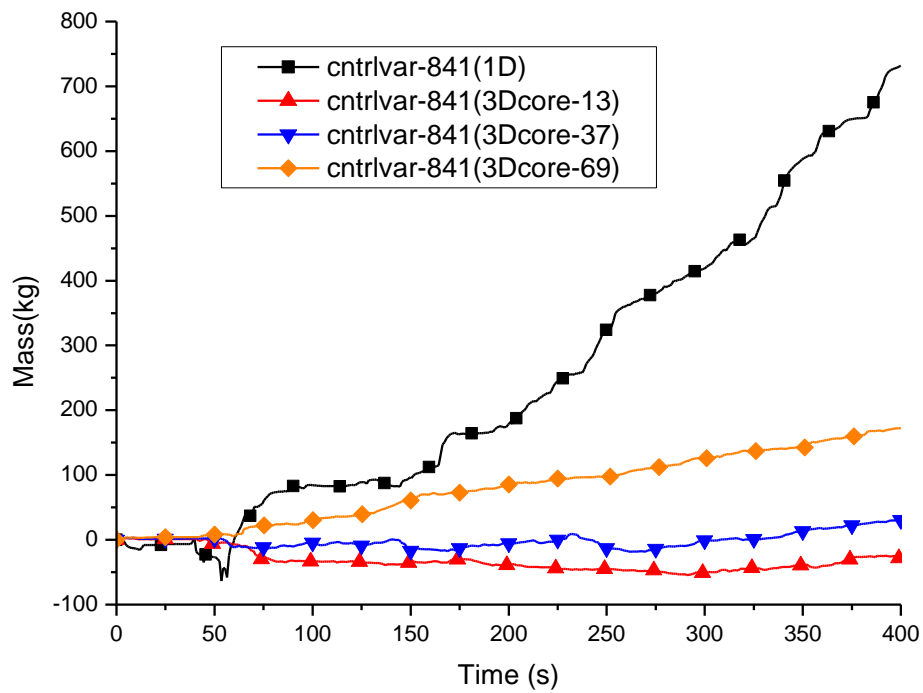


圖 5.2.37 最熱棒所在通道每單位燃料元件橫向流入累計質量(第一階)

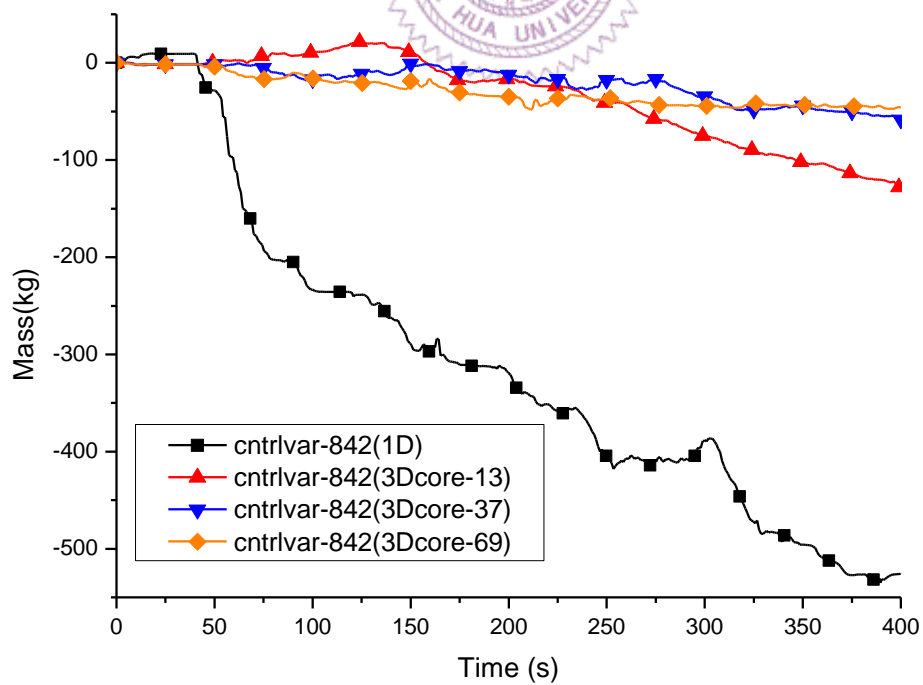


圖 5.2.38 最熱棒所在通道每單位燃料元件橫向流入累計質量(第二階)

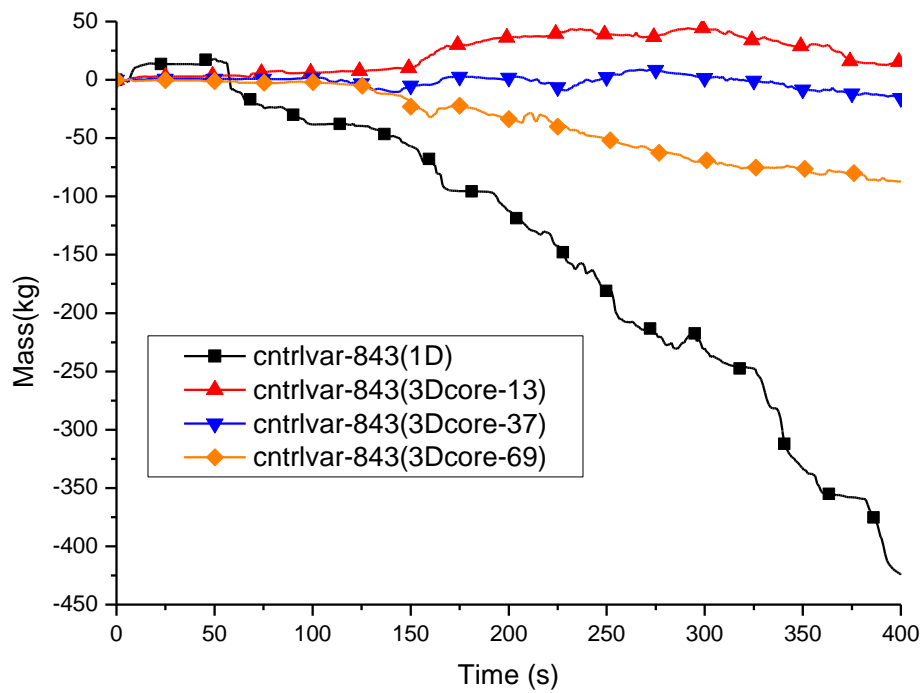


圖 5.2.39 最熱棒所在通道每單位燃料元件橫向流入累計質量(第三階)

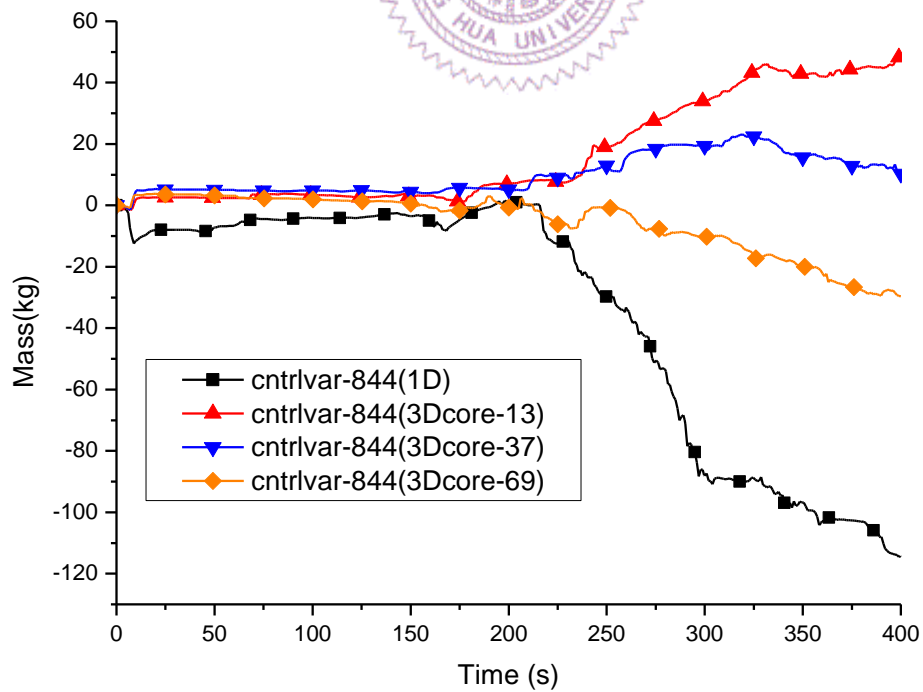


圖 5.2.40 最熱棒所在通道每單位燃料元件橫向流入累計質量(第四階)

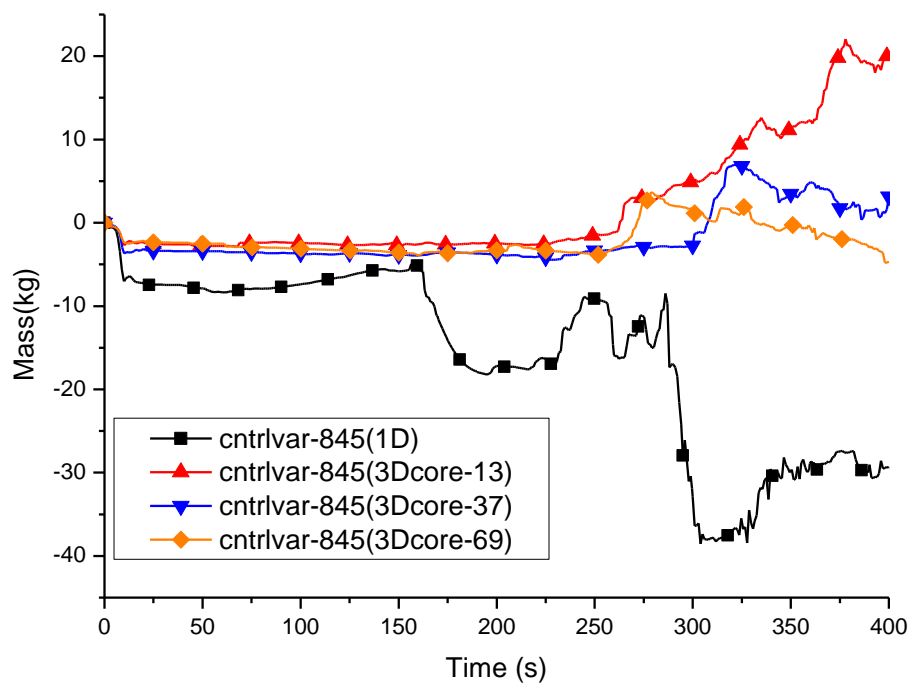


圖 5.2.41 最熱棒所在通道每單位燃料元件橫向流入累計質量(第五階)

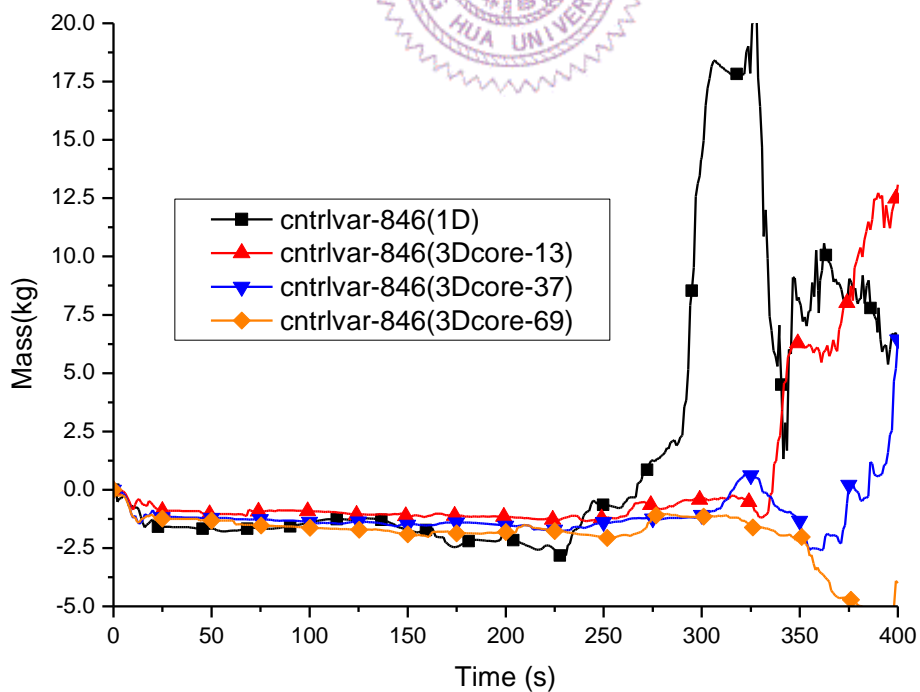


圖 5.2.42 最熱棒所在通道每單位燃料元件橫向流入累計質量(第六階)

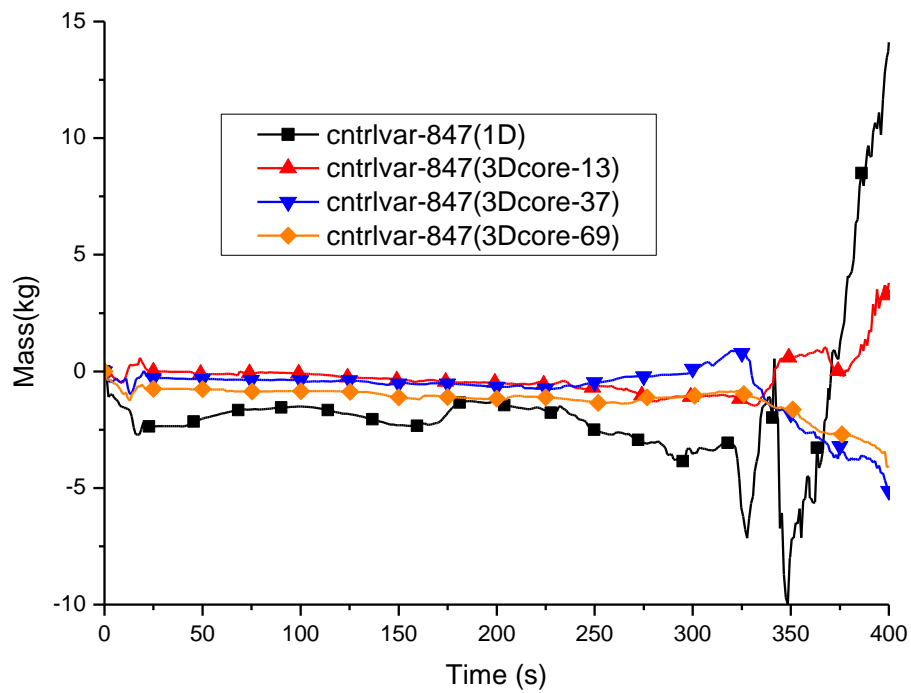


圖 5.2.43 最熱棒所在通道每單位燃料元件橫向流入累計質量(第七階)

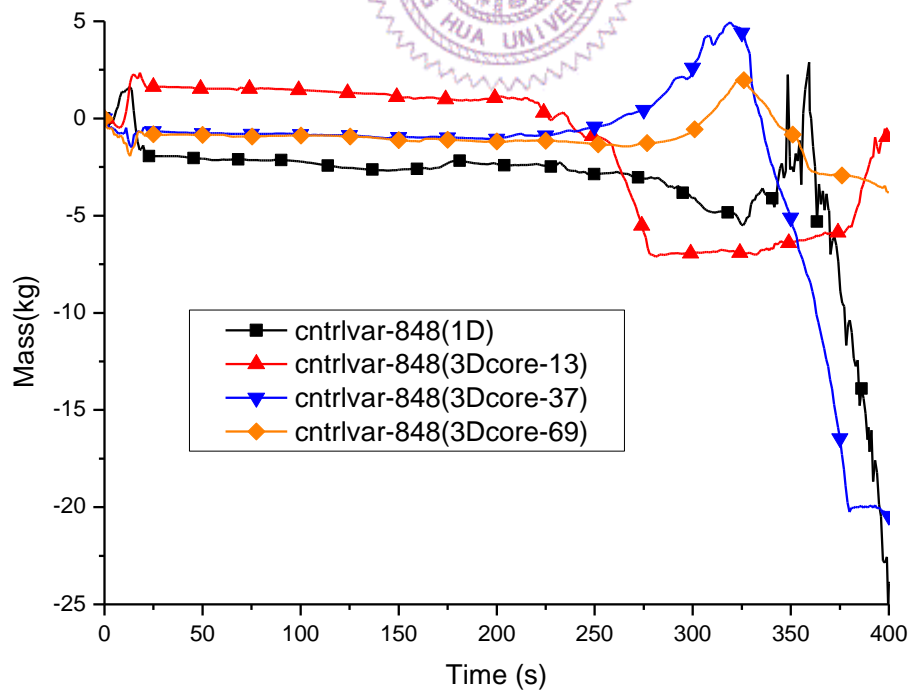


圖 5.2.44 最熱棒所在通道每單位燃料元件橫向流入累計質量(第八階)

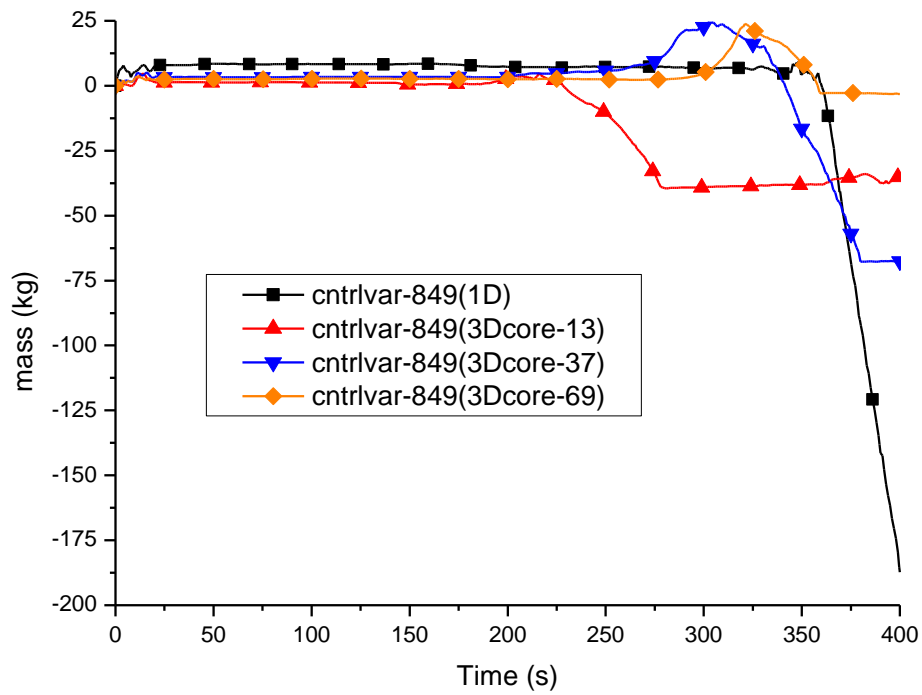


圖 5.2.45 最熱棒所在通道每單位燃料元件橫向流入累計質量(第九階)

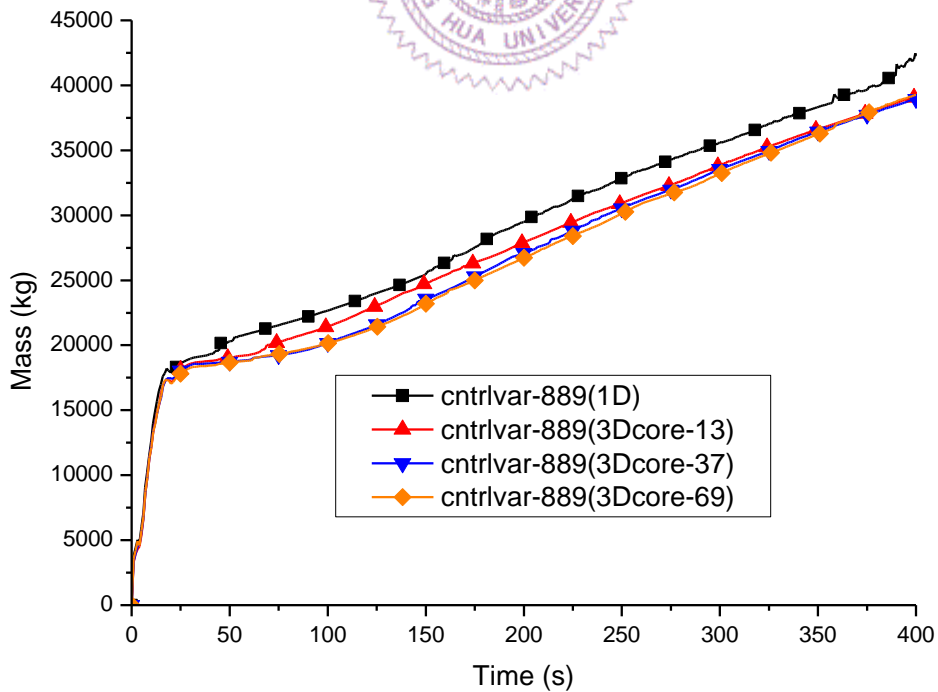


圖 5.2.46 爐心上方體積向上流體接點累計總質量

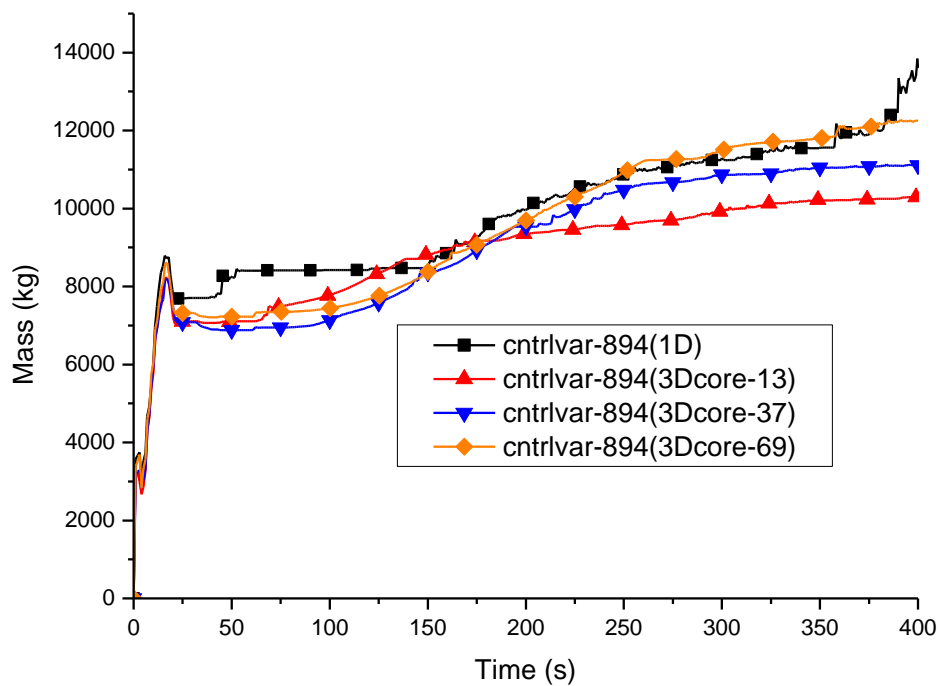


圖 5.2.47 爐心上方體積向上流體接點累計液體質量

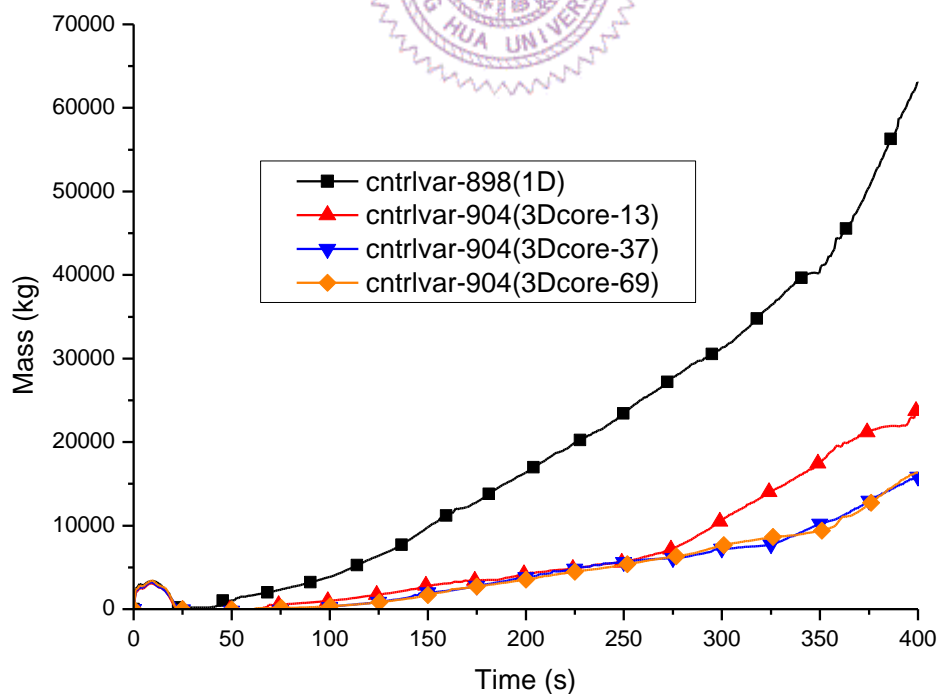


圖 5.2.48 爐心向上進入爐心上方體積累計液體質量

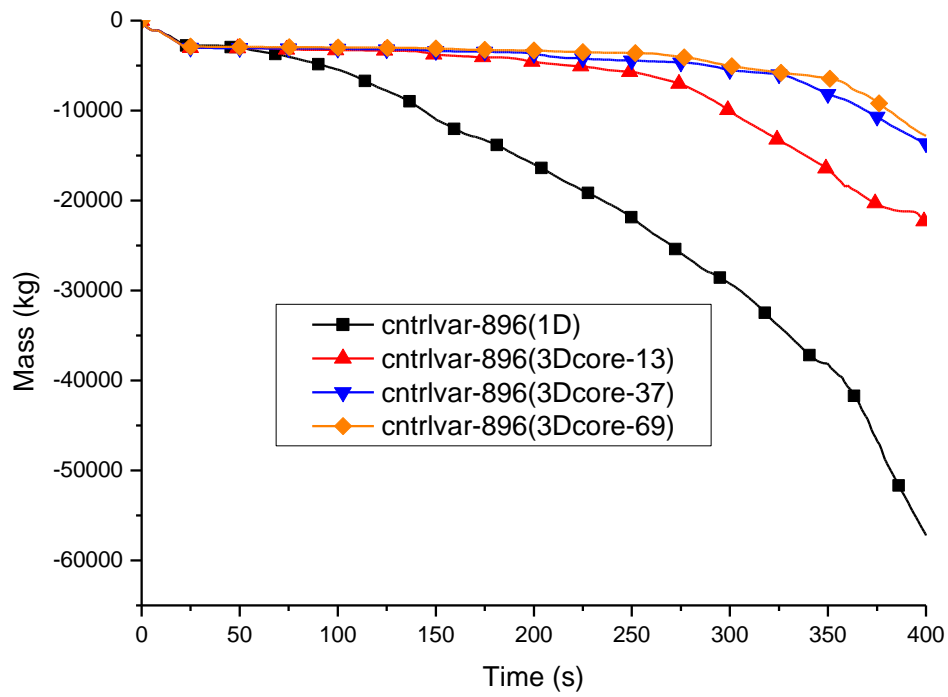


圖 5.2.49 爐心旁通通道向上進入爐心上方體積之累計液體質量

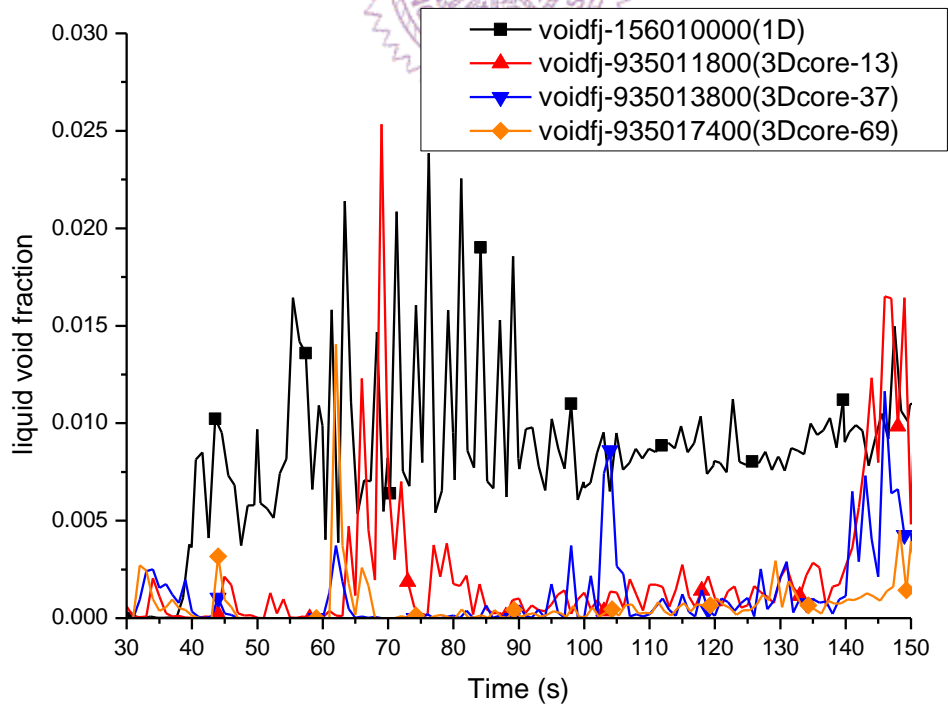


圖 5.2.50 爐心通道出口液體體積分率

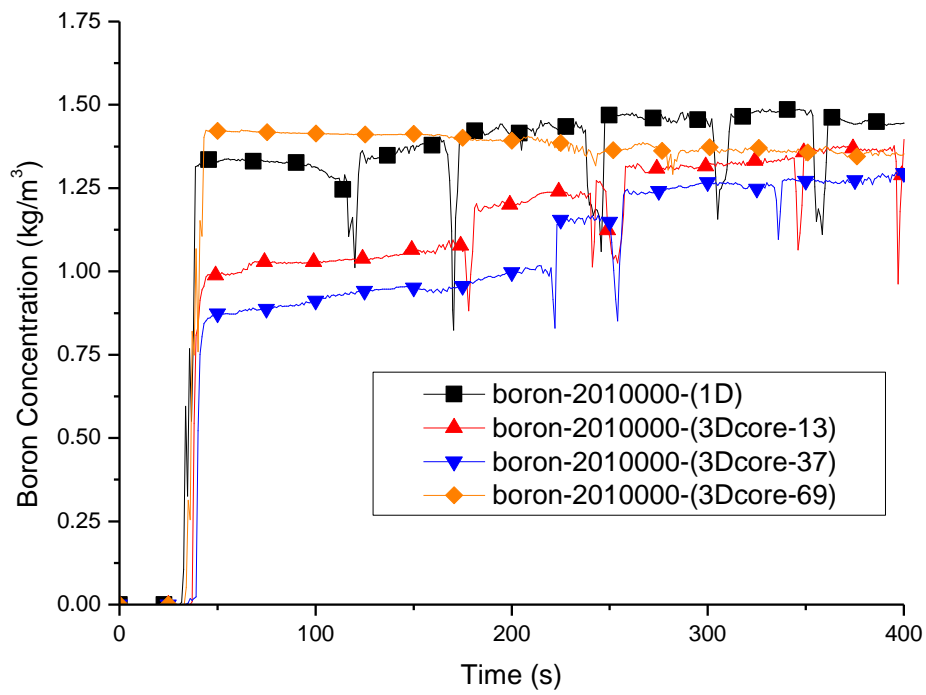


圖 5.2.51 壓力槽底部區間硼濃度

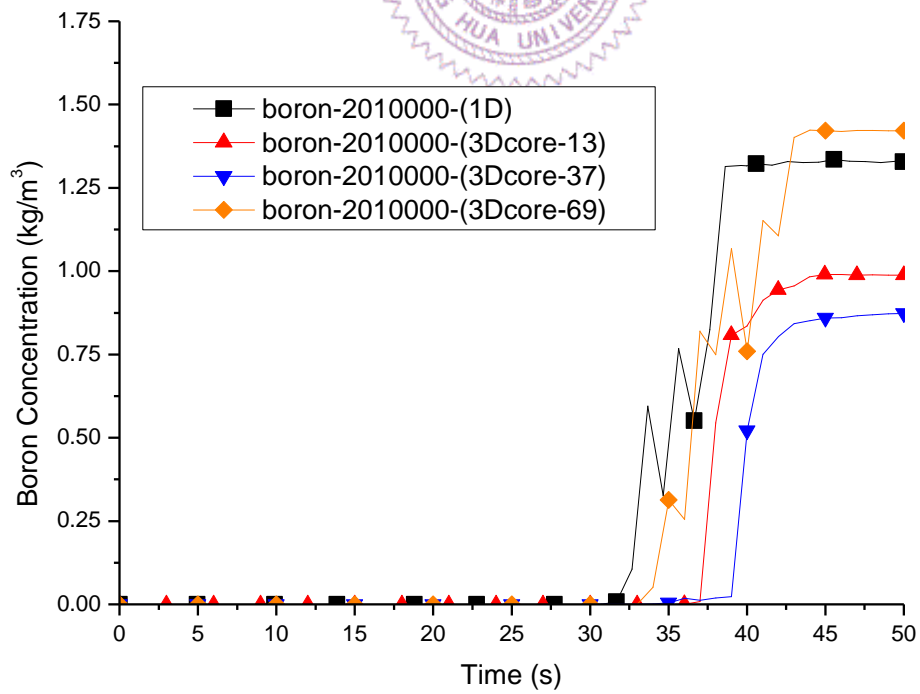


圖 5.2.52 壓力槽底部區間硼濃度(0 到 50 秒)

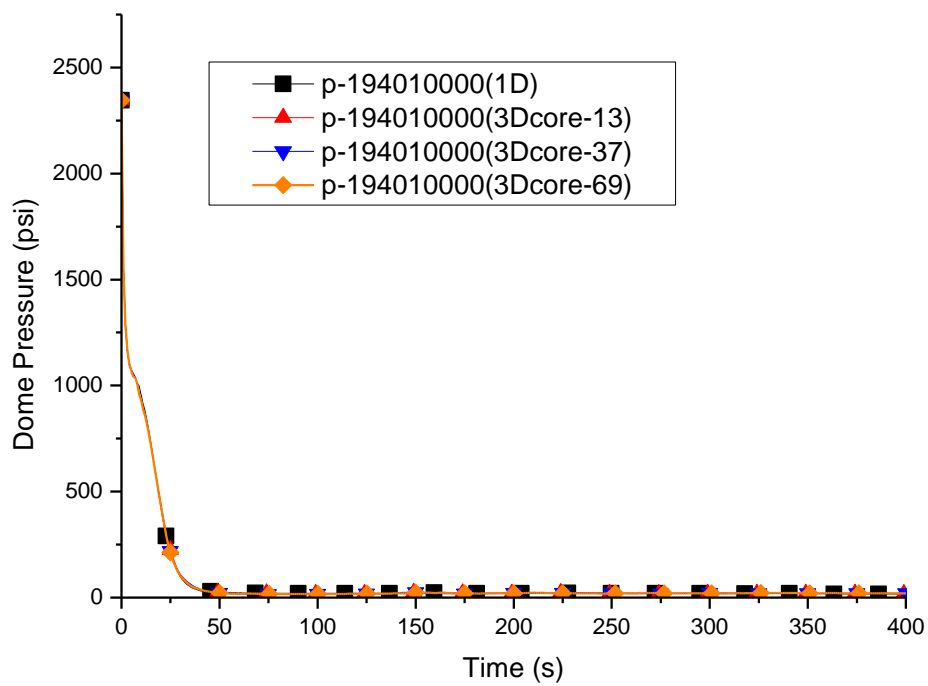


圖 5.2.53 壓力槽頂部壓力

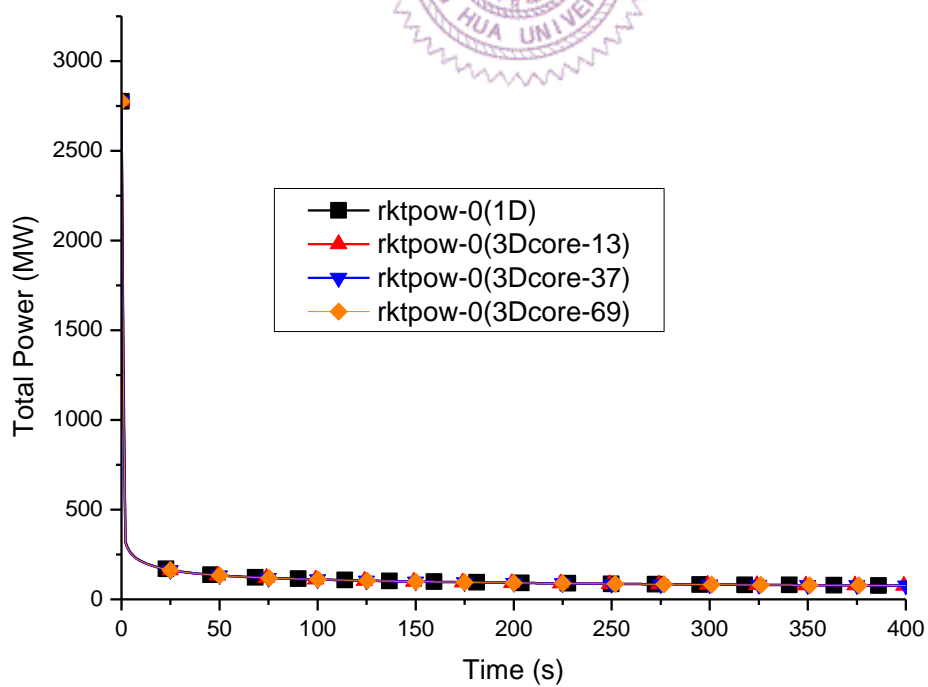


圖 5.2.54 反應器總功率

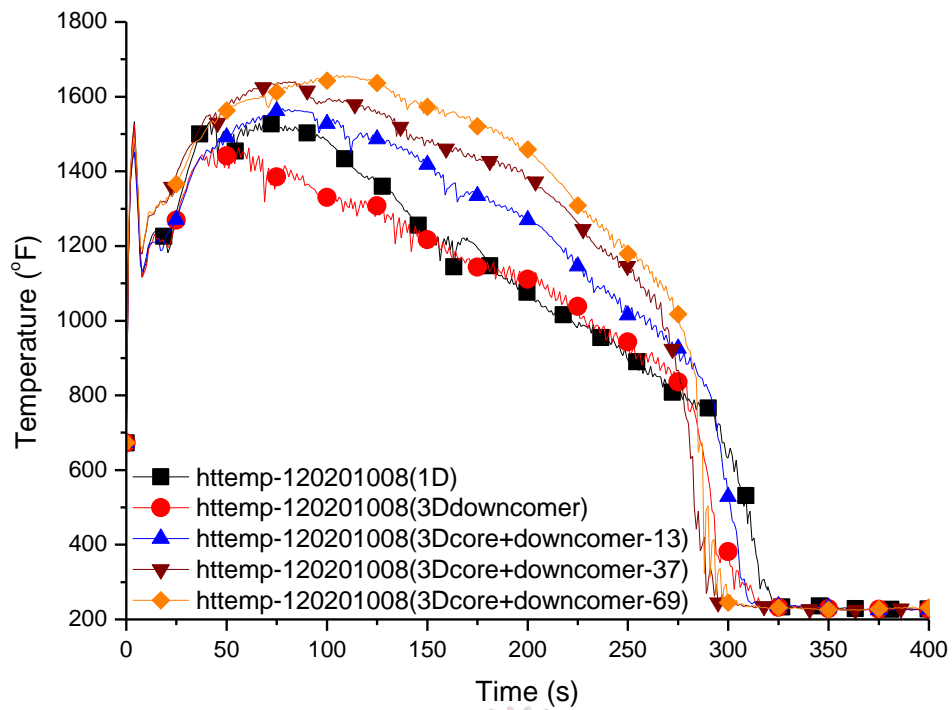


圖 5.3.1 燃料護套最高溫度發生位置與溫度

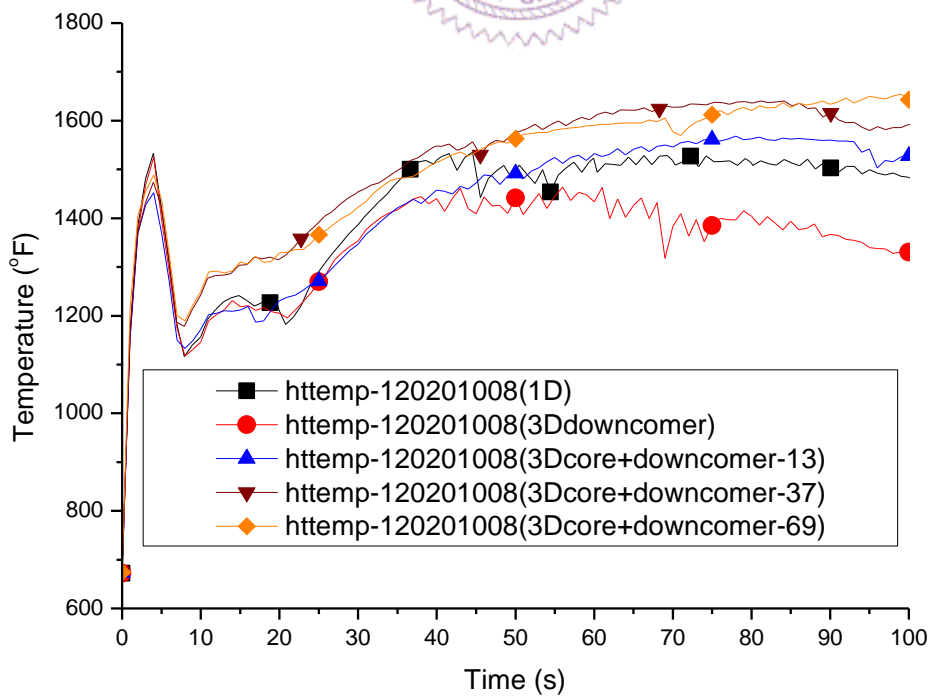


圖 5.3.2 燃料護套最高溫度發生位置與溫度(0 到 100 秒)

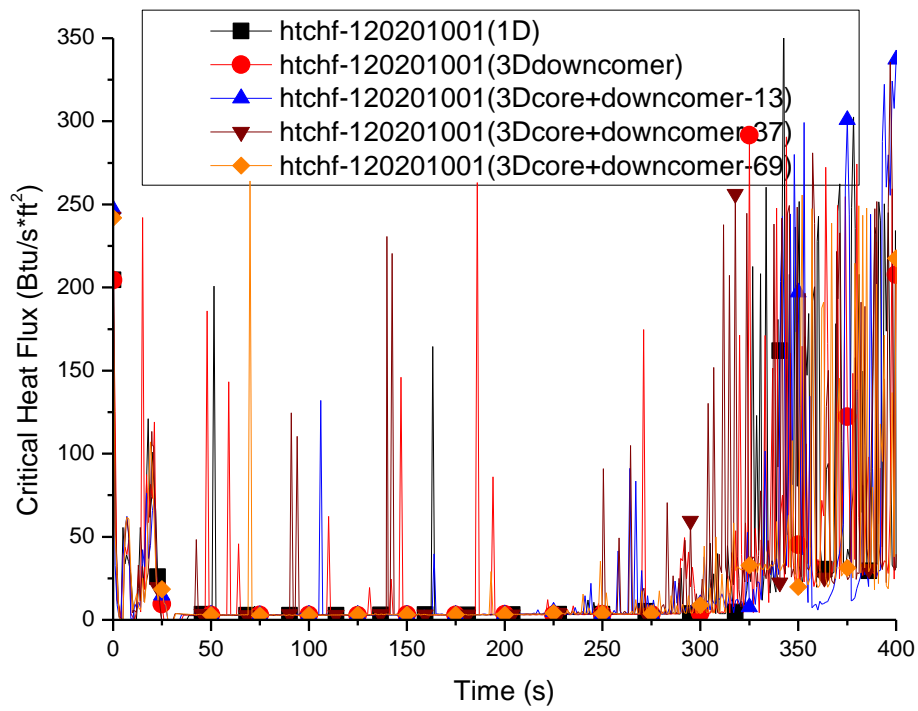


圖 5.3.3 燃料護套最熱處臨界熱通量

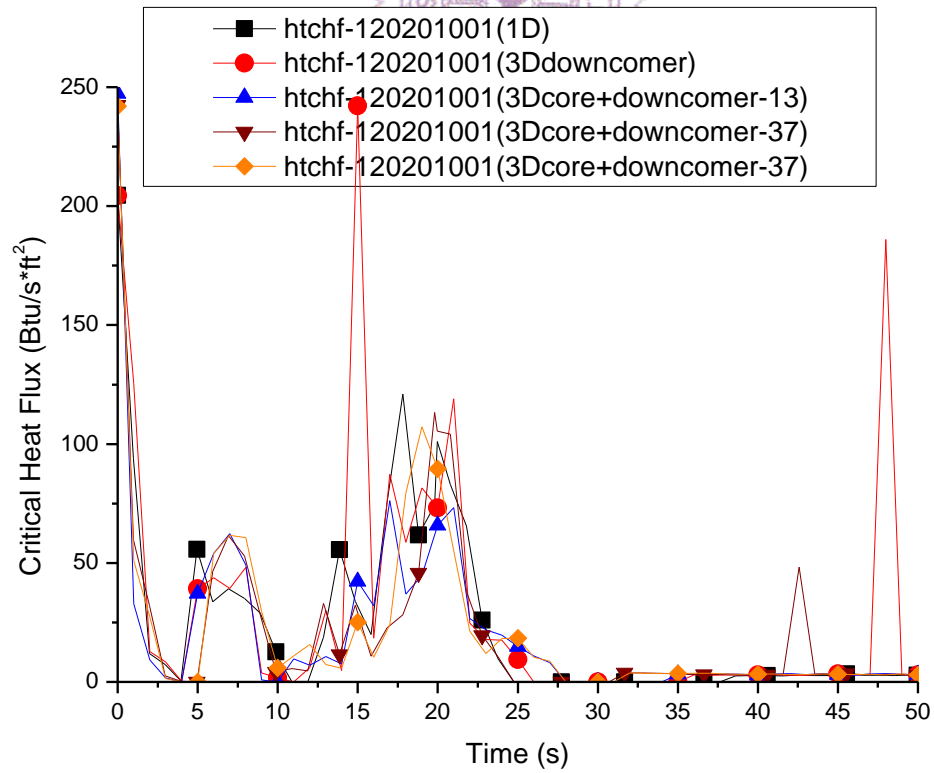


圖 5.3.4 燃料護套最熱處臨界熱通量(0 到 50 秒)

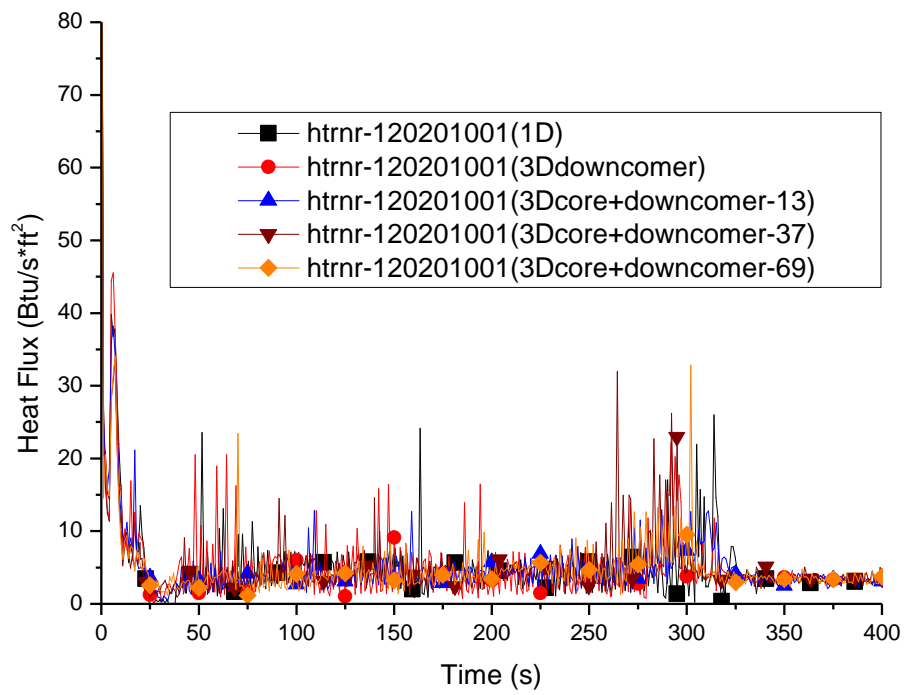


圖 5.3.5 燃料護套最熱處熱通量

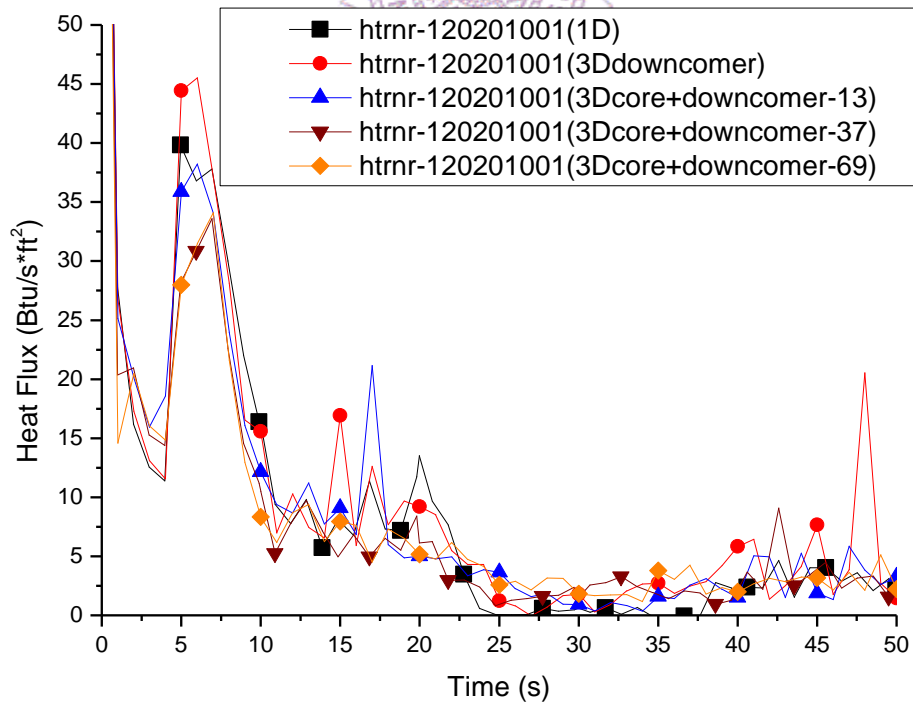


圖 5.3.6 燃料護套最熱處熱通量(0 到 50 秒)

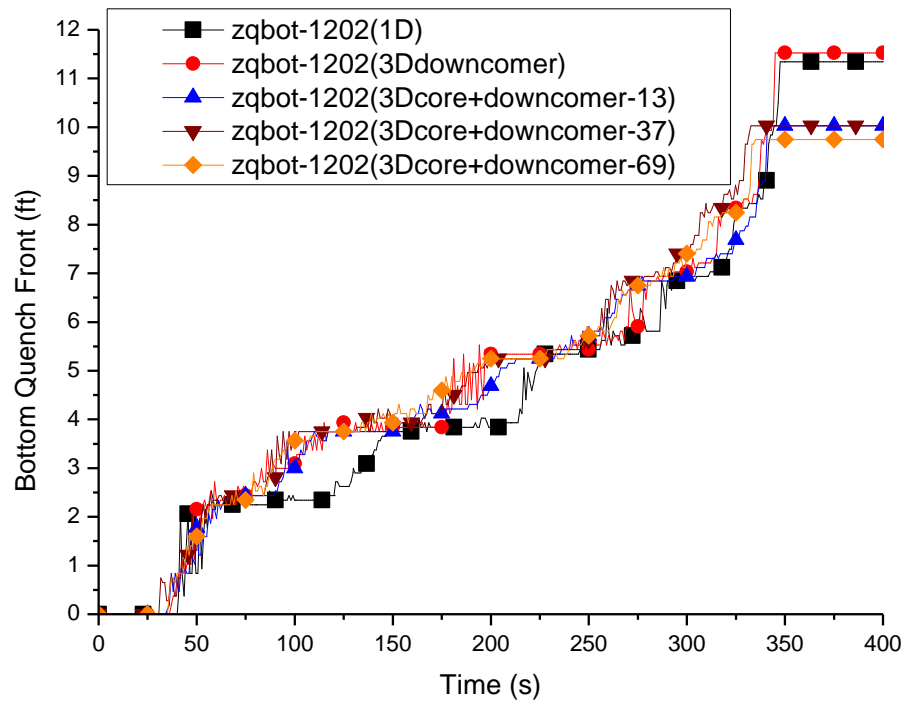


圖 5.3.7 最熱棒淬冷邊界位置

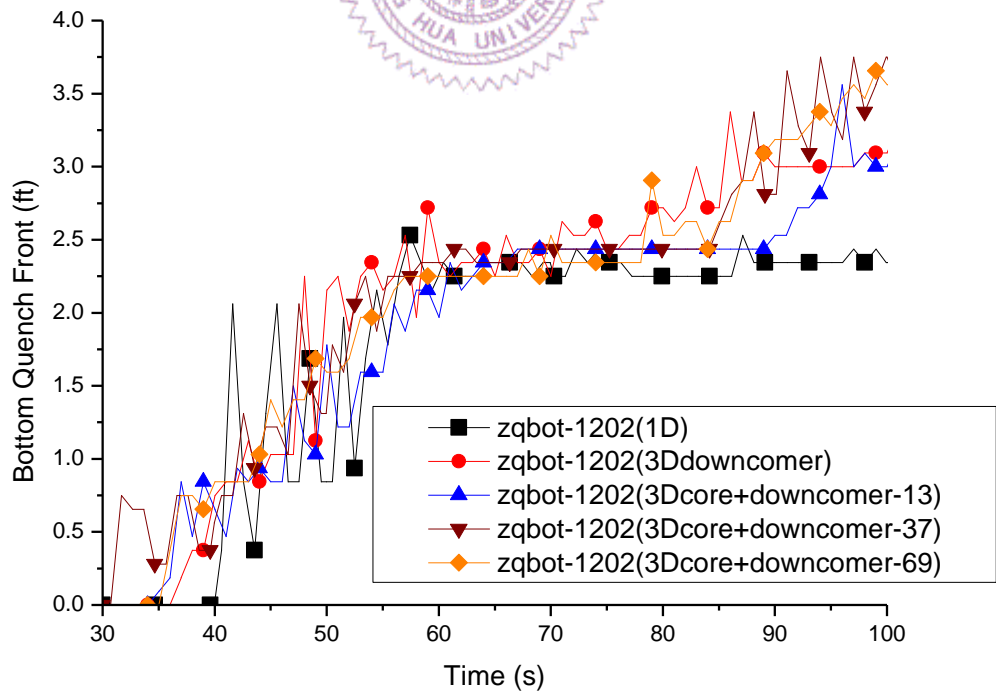


圖 5.3.8 最熱棒淬冷邊界位置(0 到 100 秒)

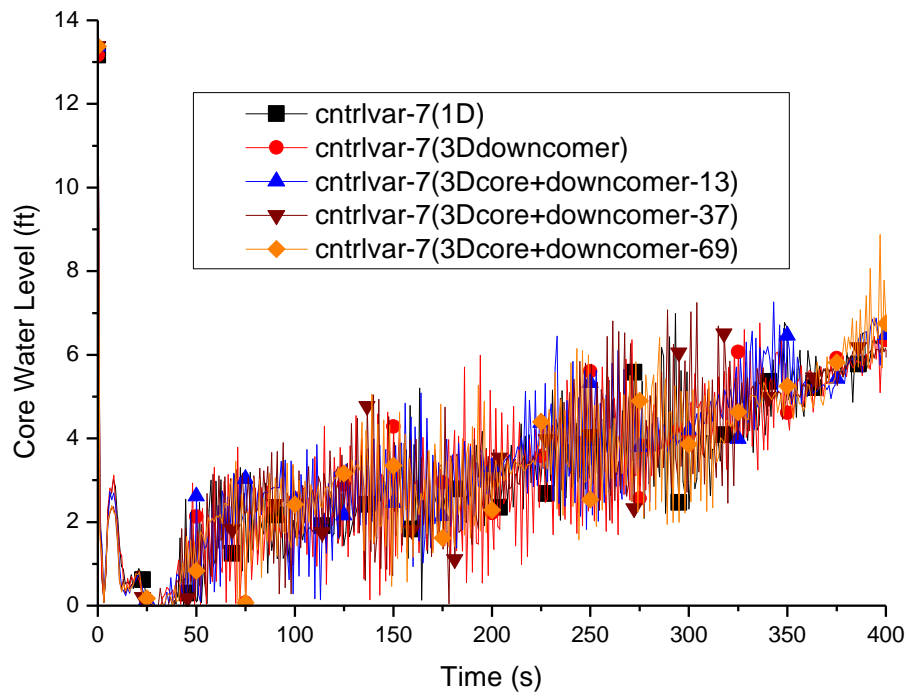


圖 5.3.9 爐心通道水位

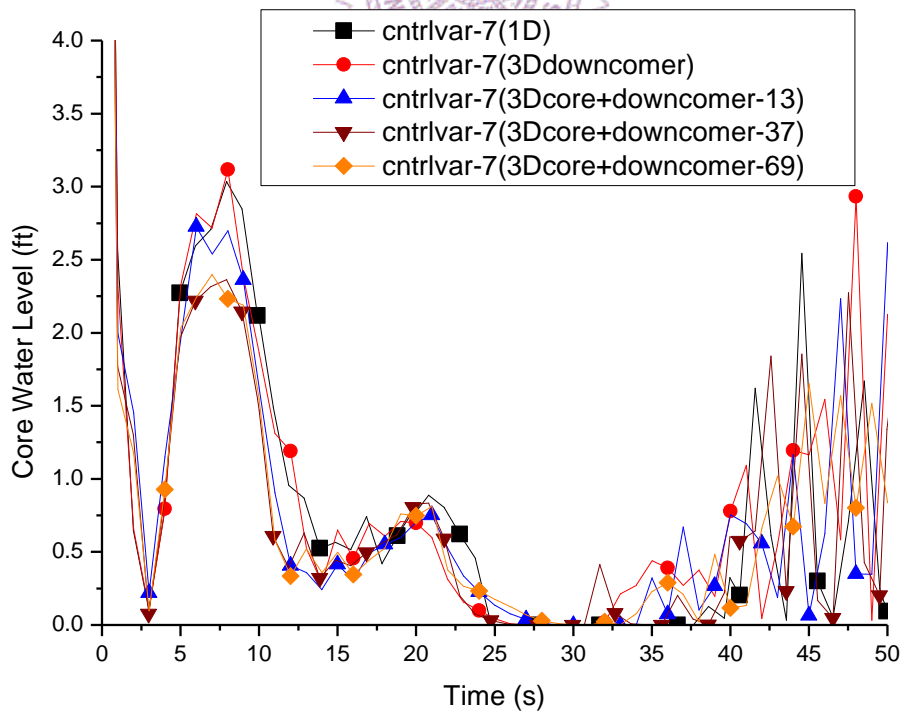


圖 5.3.10 爐心通道水位(0 到 50 秒)

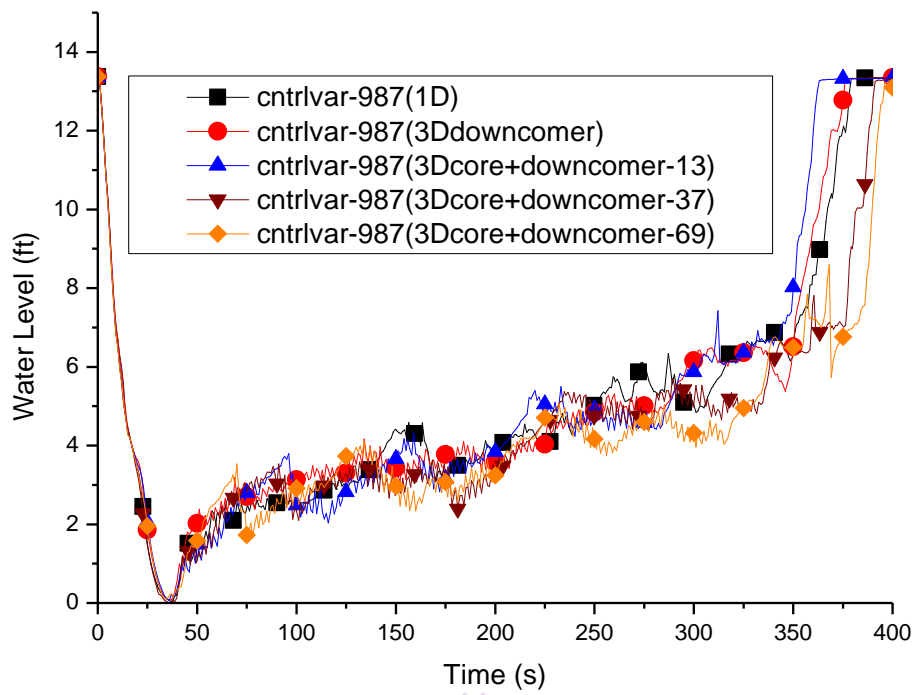


圖 5.3.11 爐心旁通流道水位

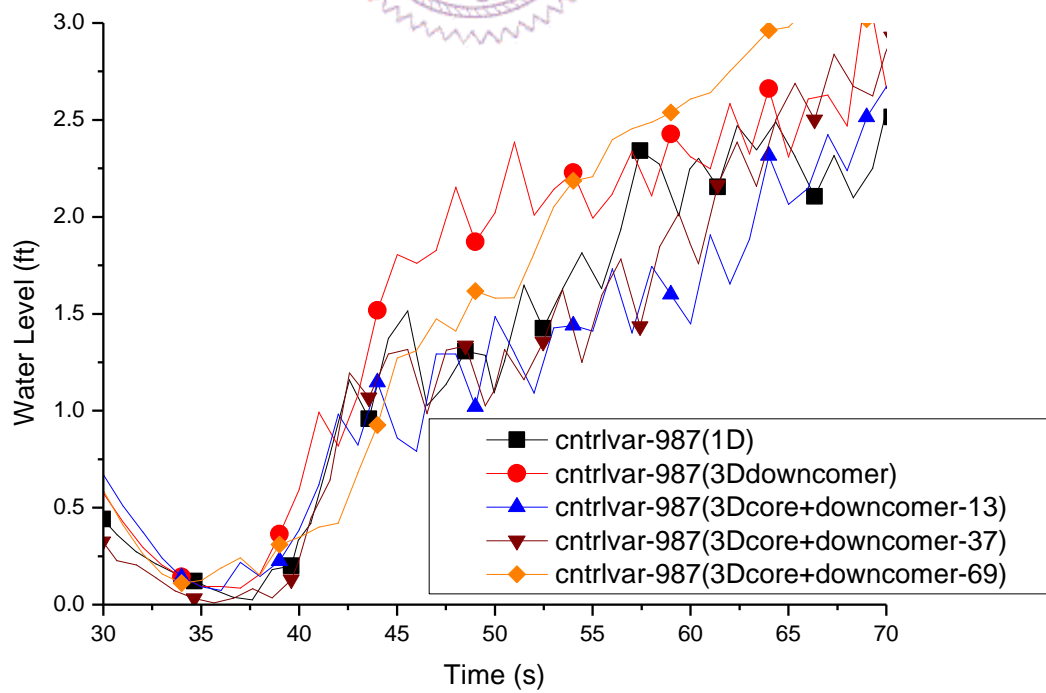


圖 5.3.12 爐心旁通流道水位(40 到 100 秒)

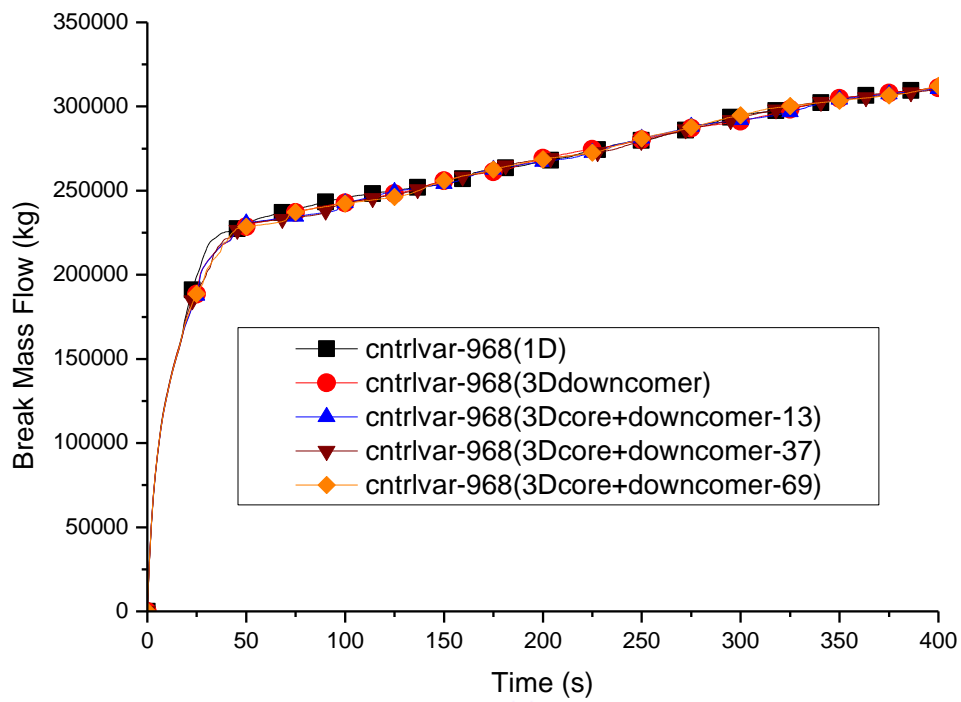


圖 5.3.13 破口累計流出冷卻水質量

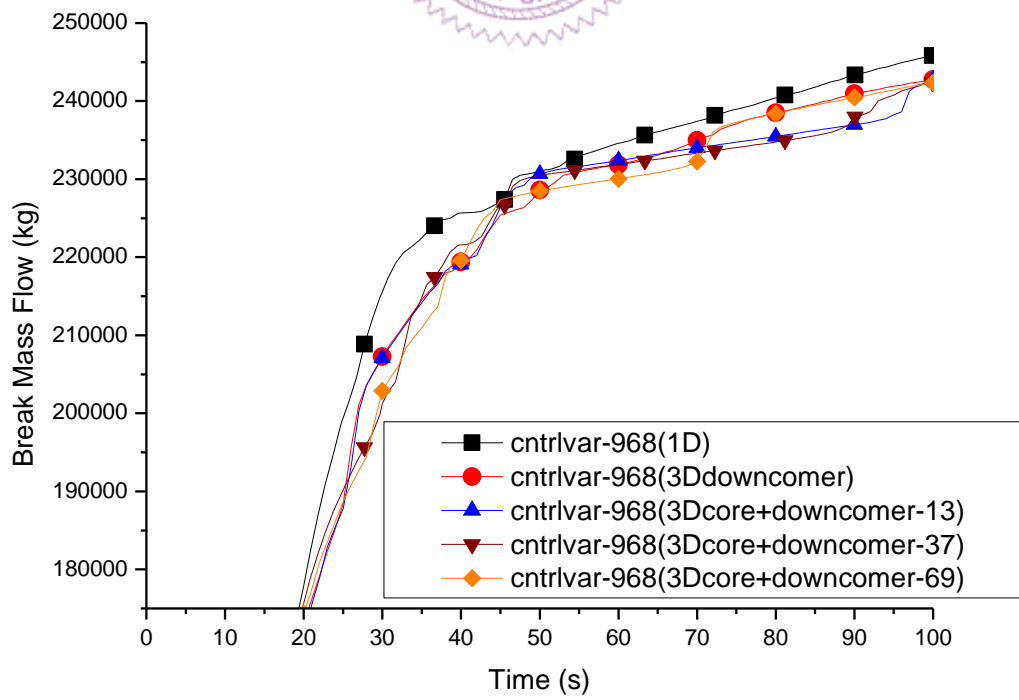


圖 5.3.14 破口累計流出冷卻水質量(0 到 100 秒)

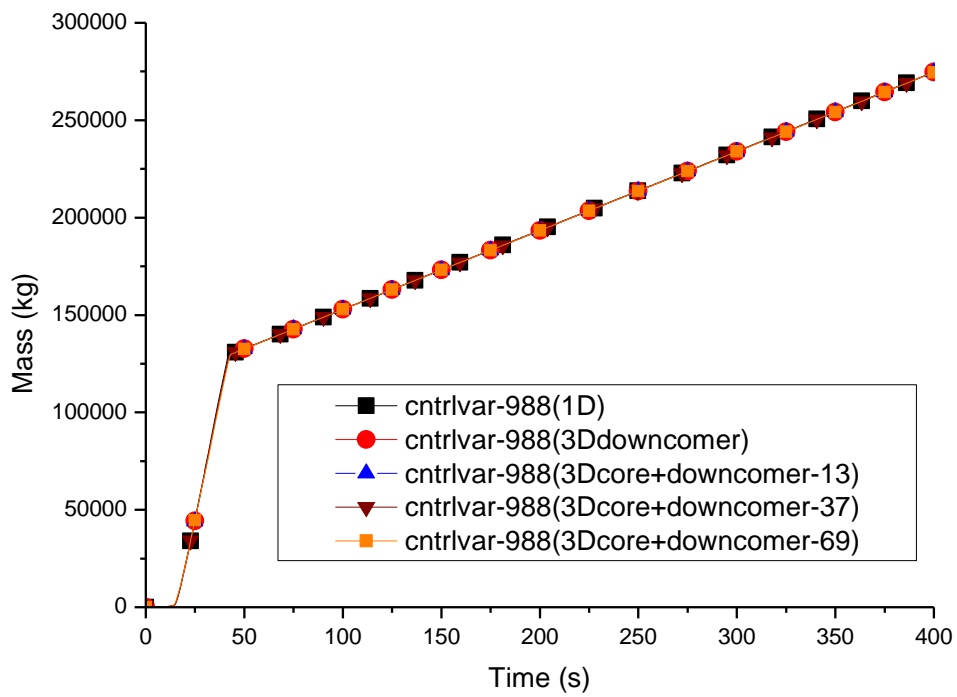


圖 5.3.15 有效緊急爐心注水累計質量

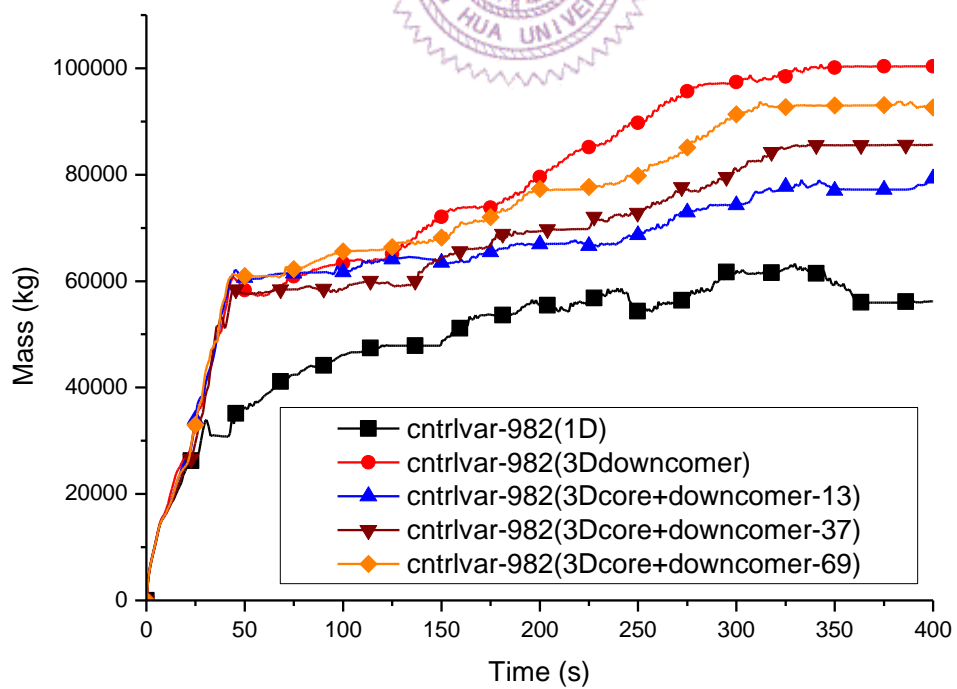


圖 5.3.16 破口側降流區頂部體積向上累計流出質量

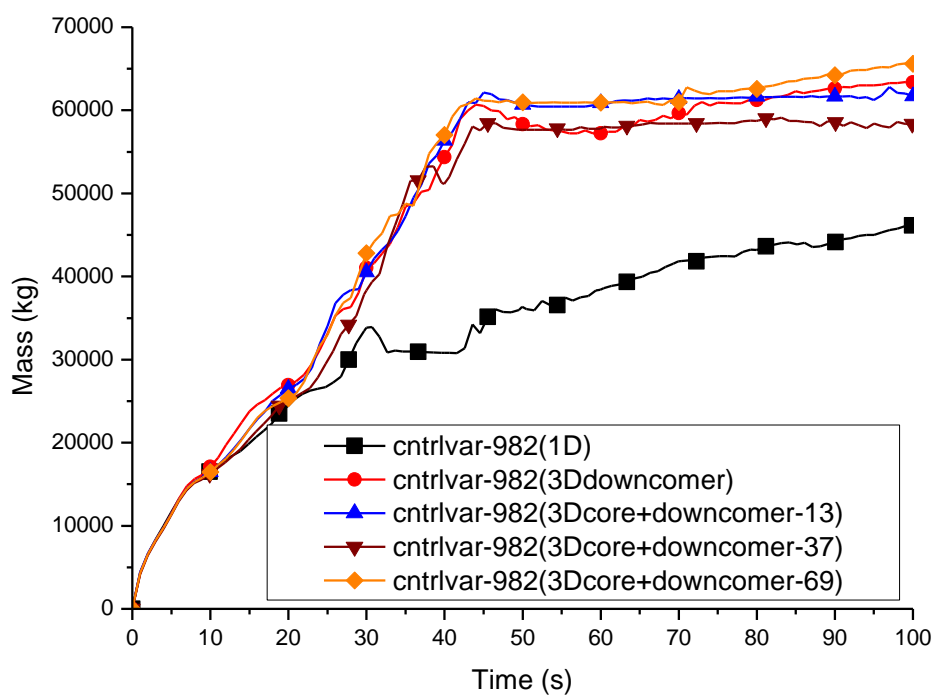


圖 5.3.17 破口側降流區頂部體積向上累計流出質量(0 到 100 秒)

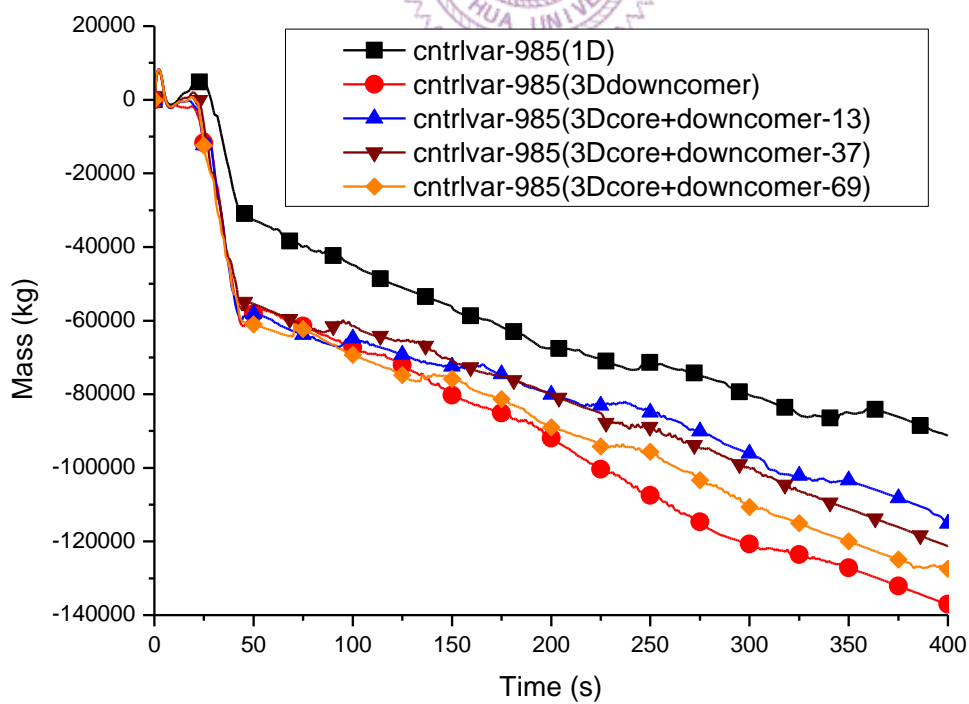


圖 5.3.18 完整側降流區頂部體積向上累計流出質量

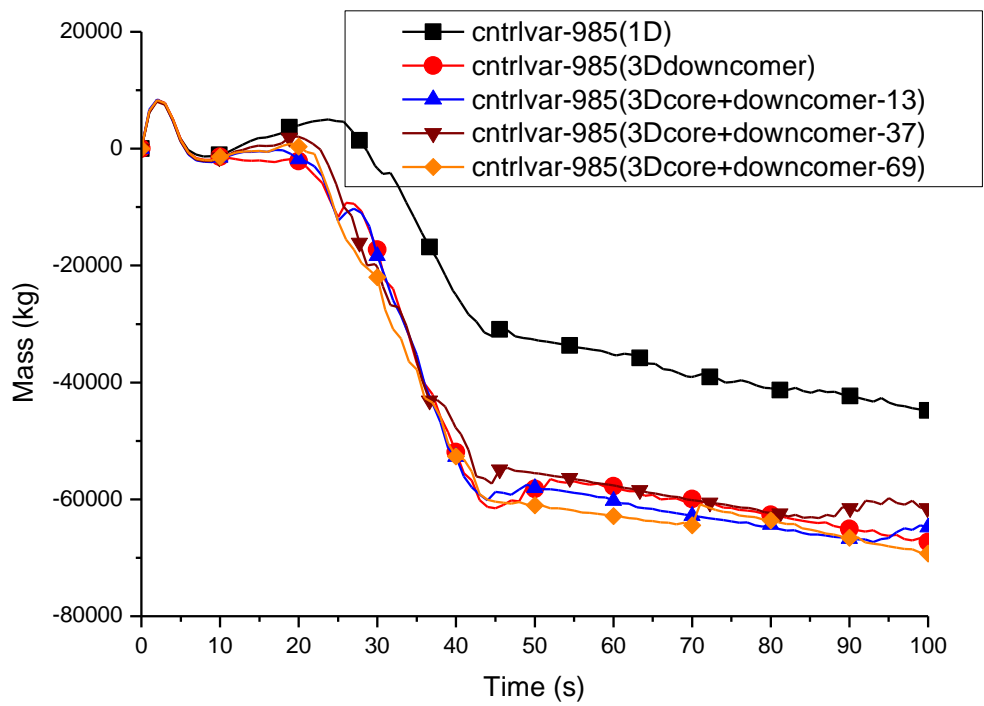


圖 5.3.19 完整側降流區頂部體積向上累計流出質量(0 到 100 秒)

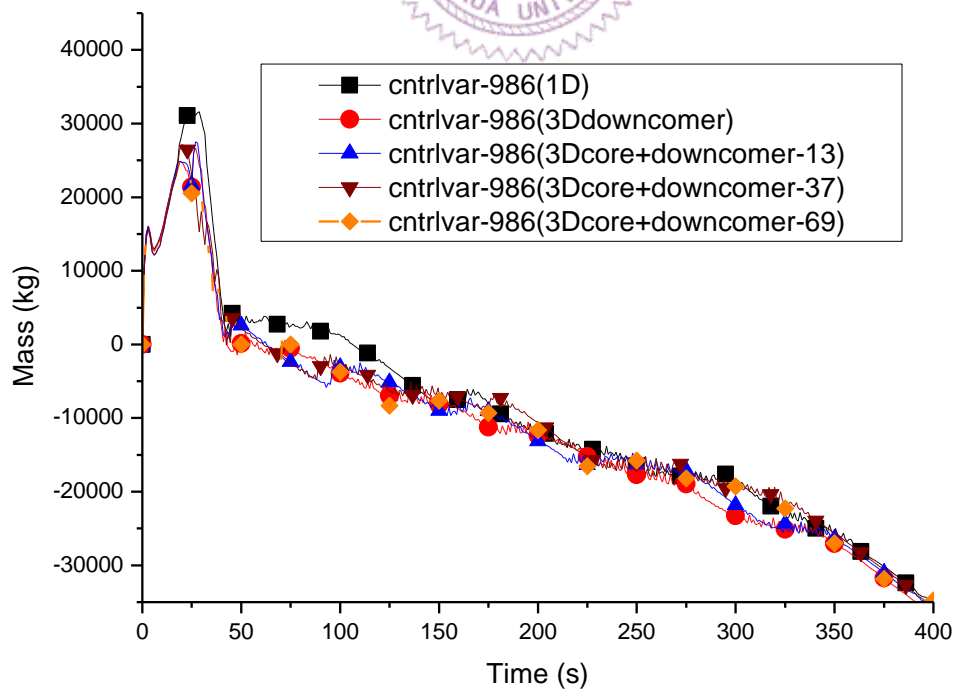


圖 5.3.20 降流區頂部淨往上流出累計質量

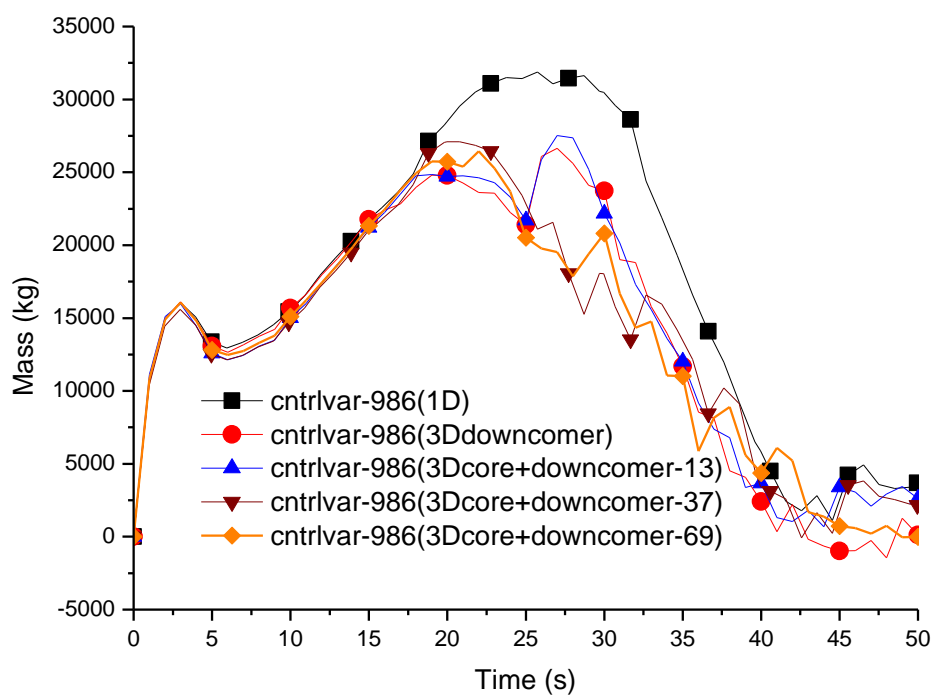


圖 5.3.21 降流區頂部淨往上流出累計質量(0 到 50 秒)

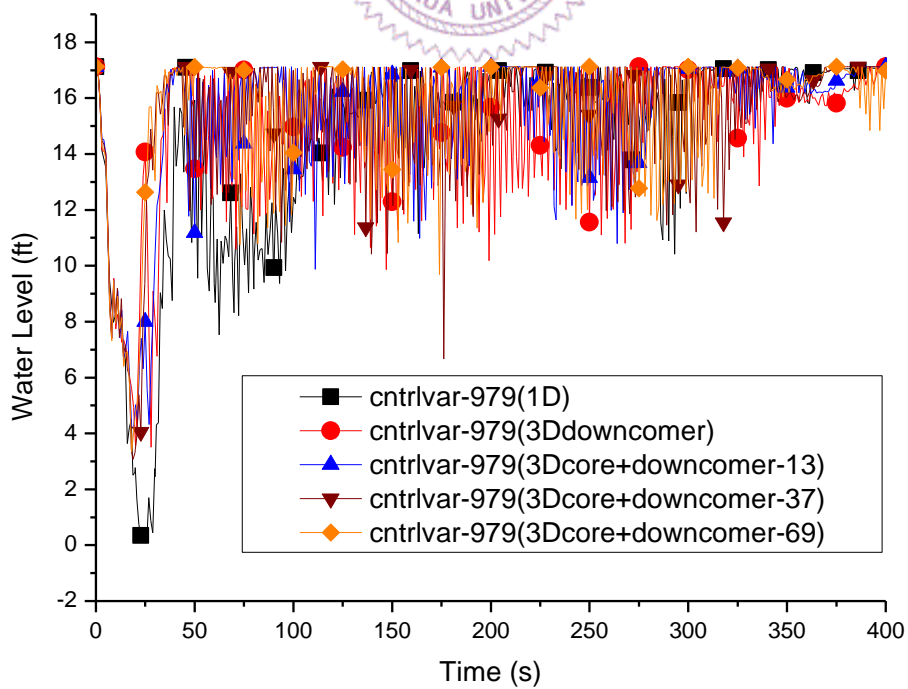


圖 5.3.22 降流區完整側水位高度

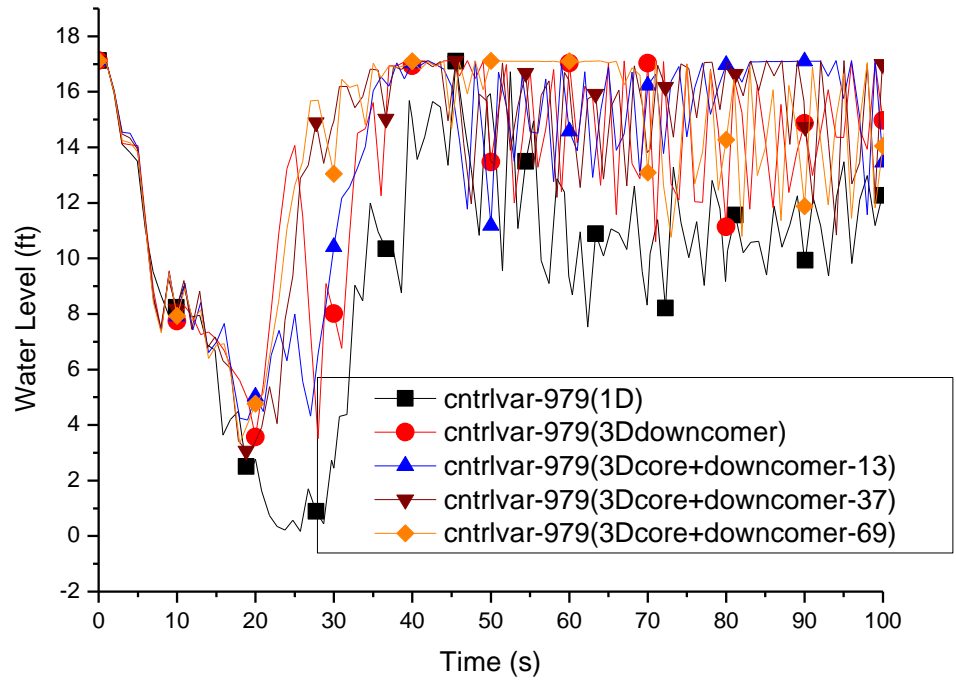


圖 5.3.23 降流區完整側水位高度(0 到 100 秒)

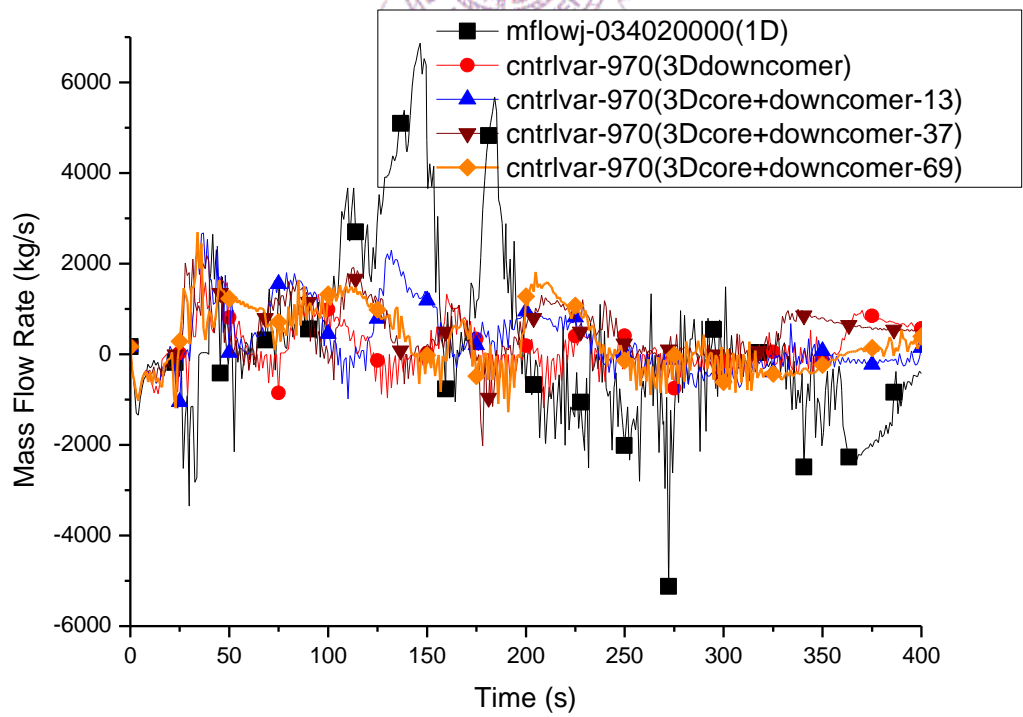


圖 5.3.24 降流區橫向流體接點質量流率比較(最上層)

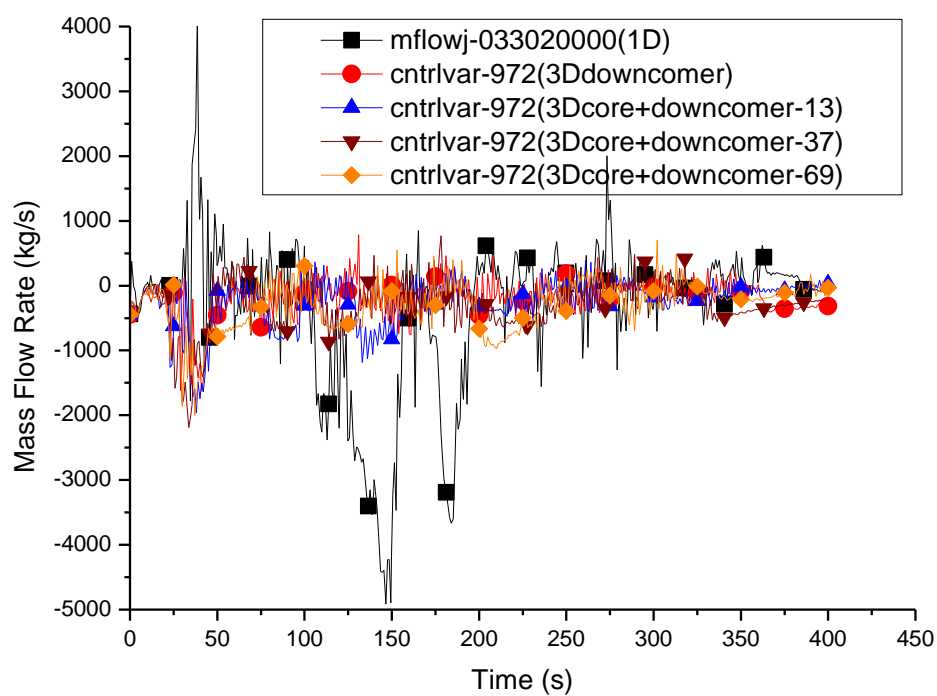


圖 5.3.25 降流區橫向流體接點質量流率比較(第二層)

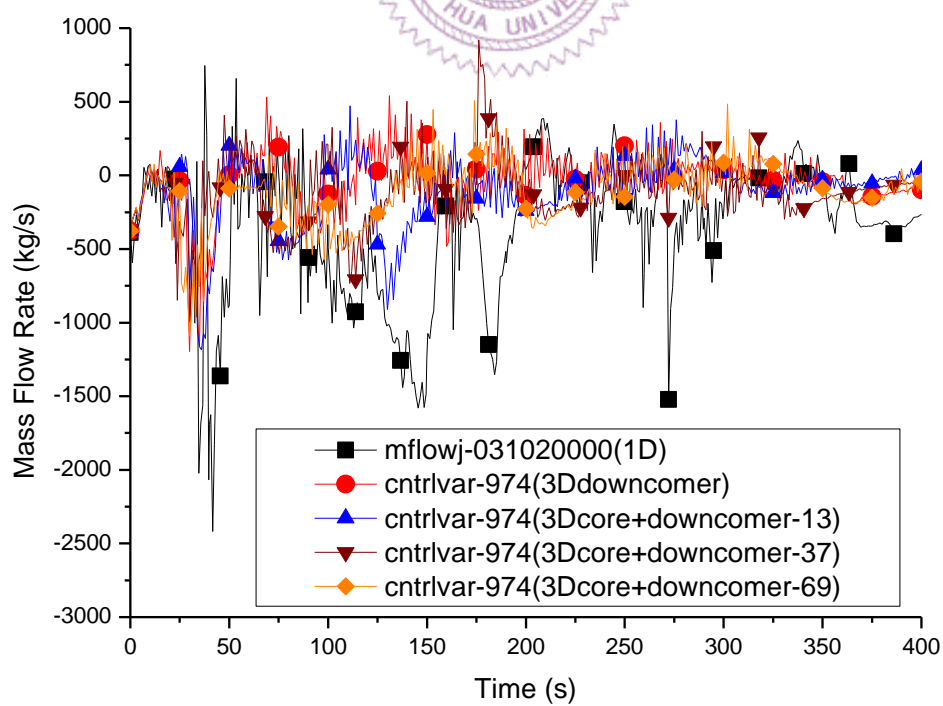


圖 5.3.26 降流區橫向流體接點質量流率比較(第三層)

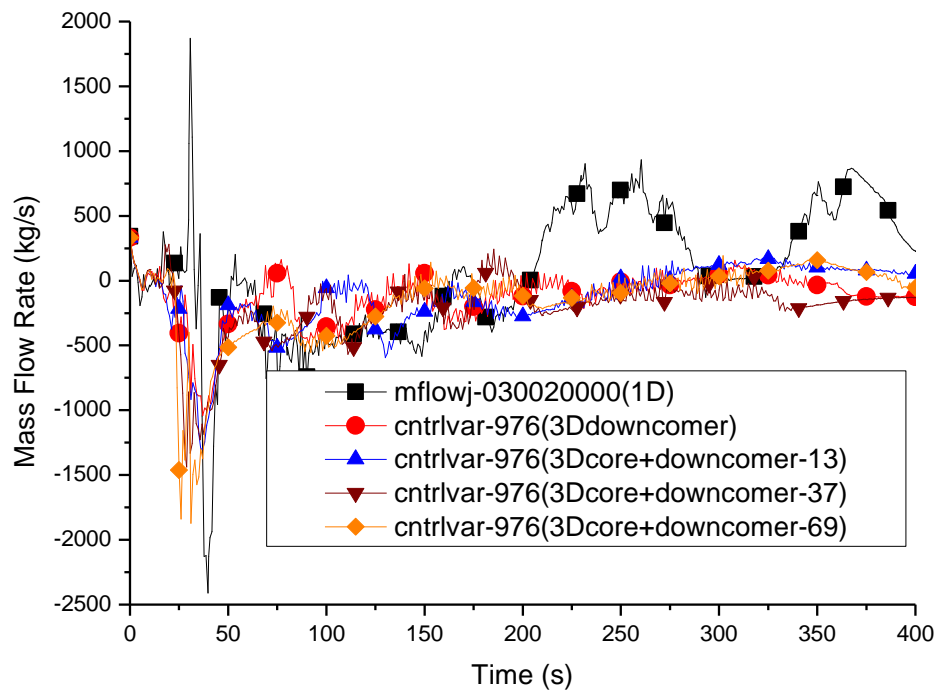


圖 5.3.27 降流區橫向流體接點質量流率比較(第四層)

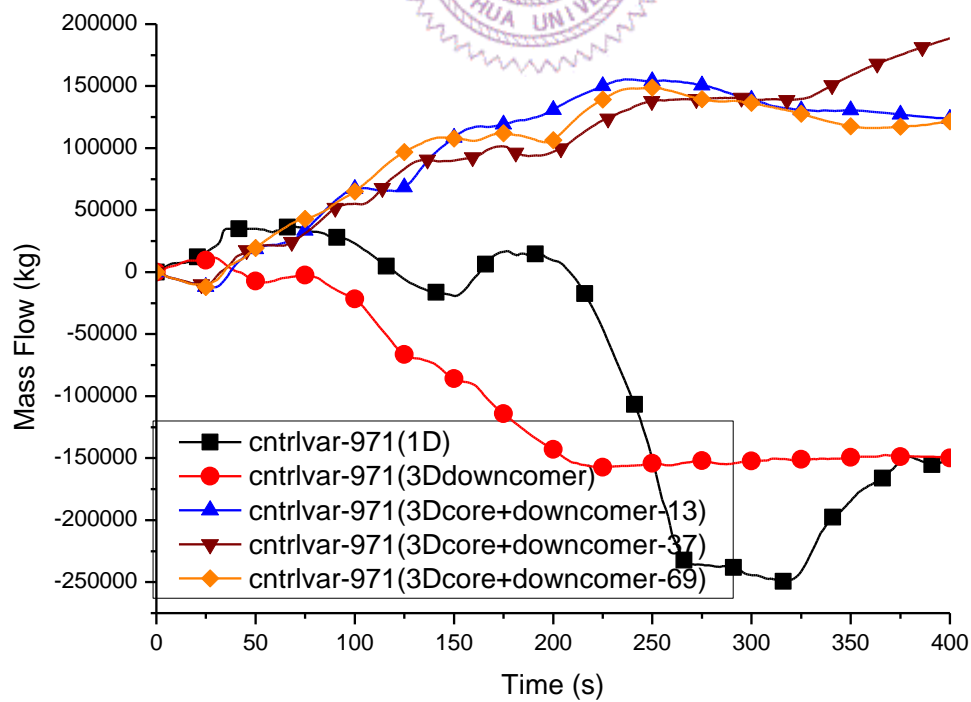


圖 5.3.28 降流區橫向流體接點累計質量比較(最上層)

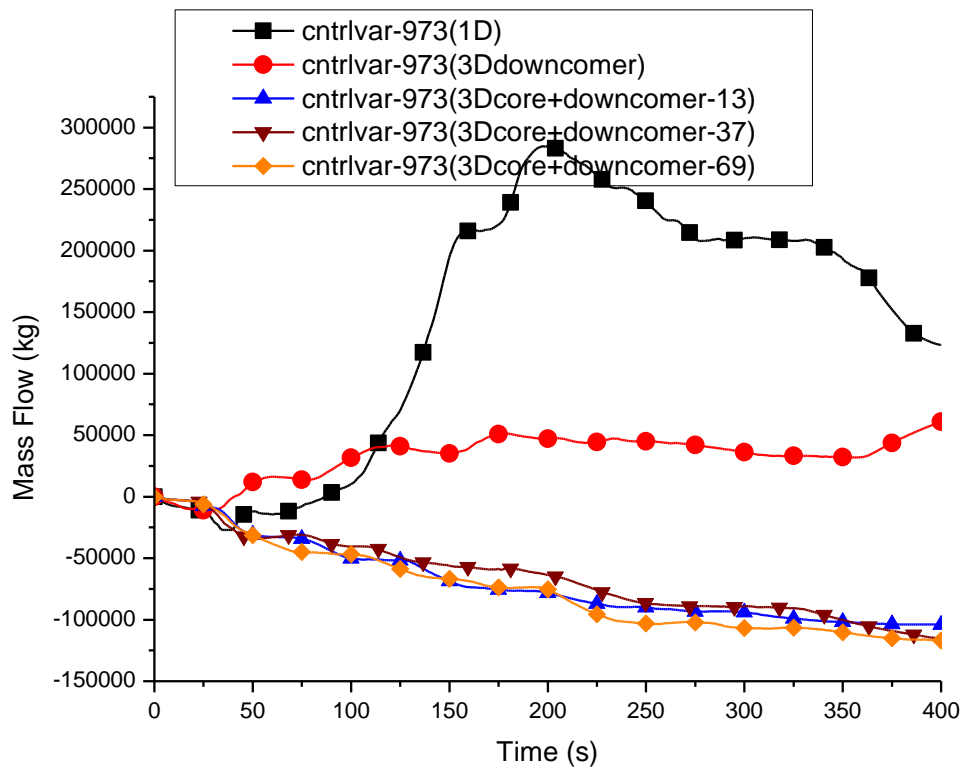


圖 5.3.29 降流區橫向流體接點累計質量比較(第二層)

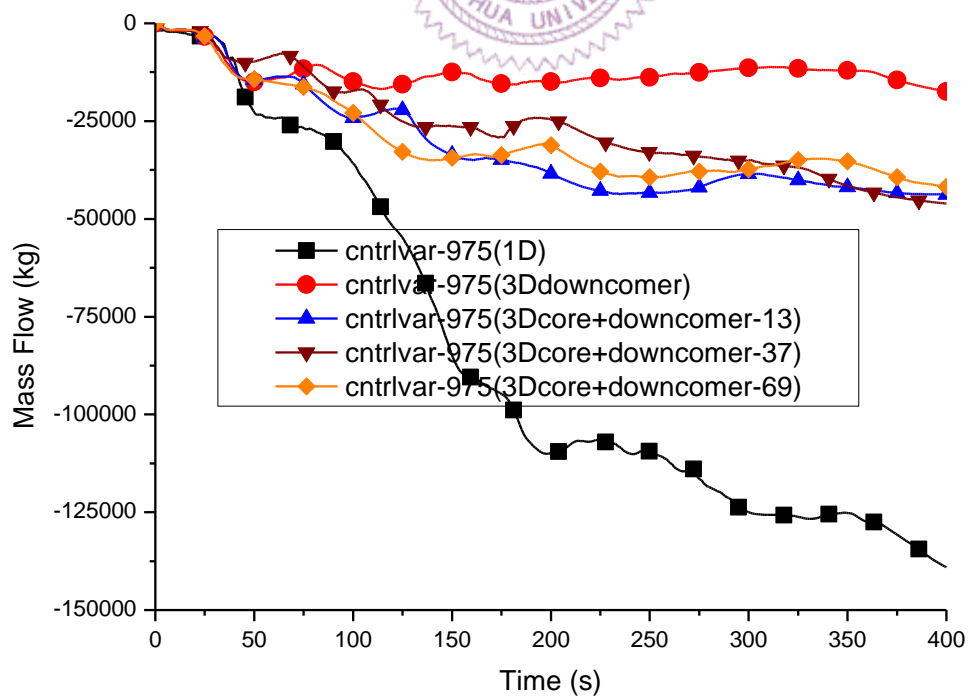


圖 5.3.30 降流區橫向流體接點累計質量比較(第三層)

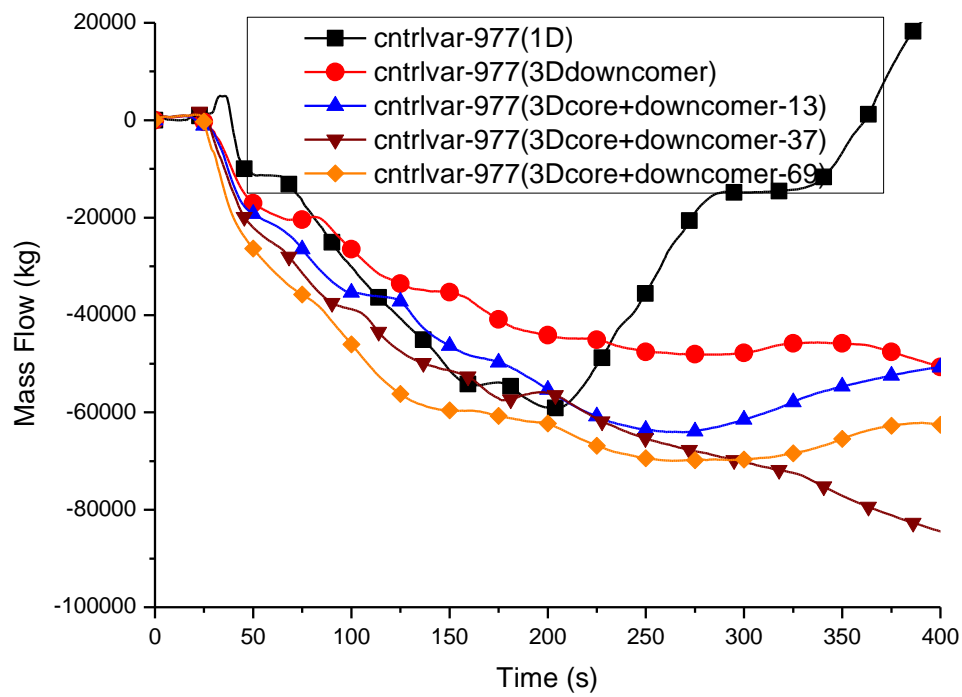


圖 5.3.31 降流區橫向流體接點累計質量比較(第四層)

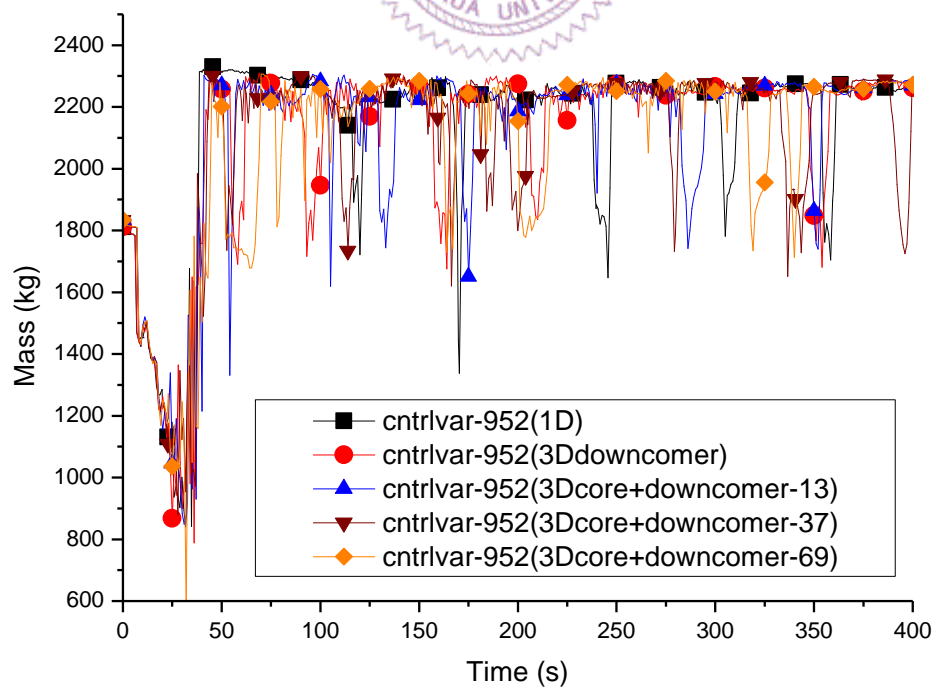


圖 5.3.32 壓力槽底部區間質量

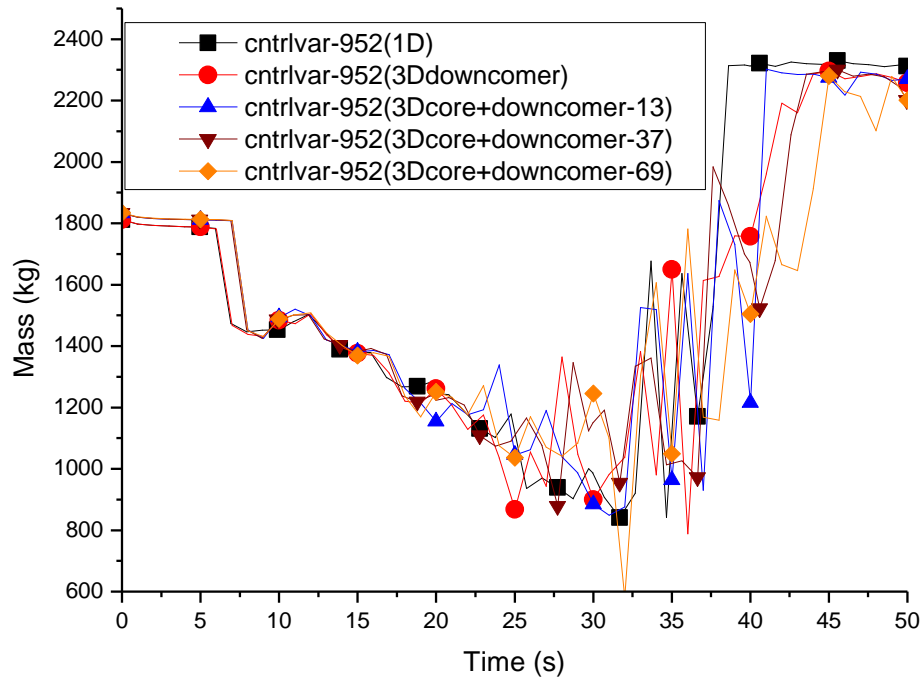


圖 5.3.33 壓力槽底部區間質量(0 到 50 秒)

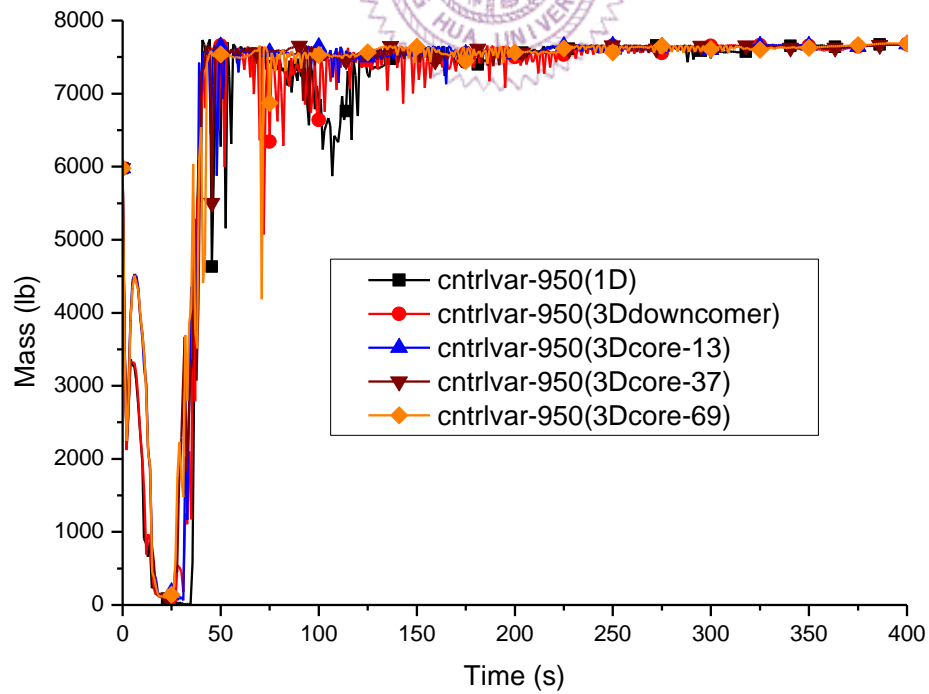


圖 5.3.34 爐心下方體積質量

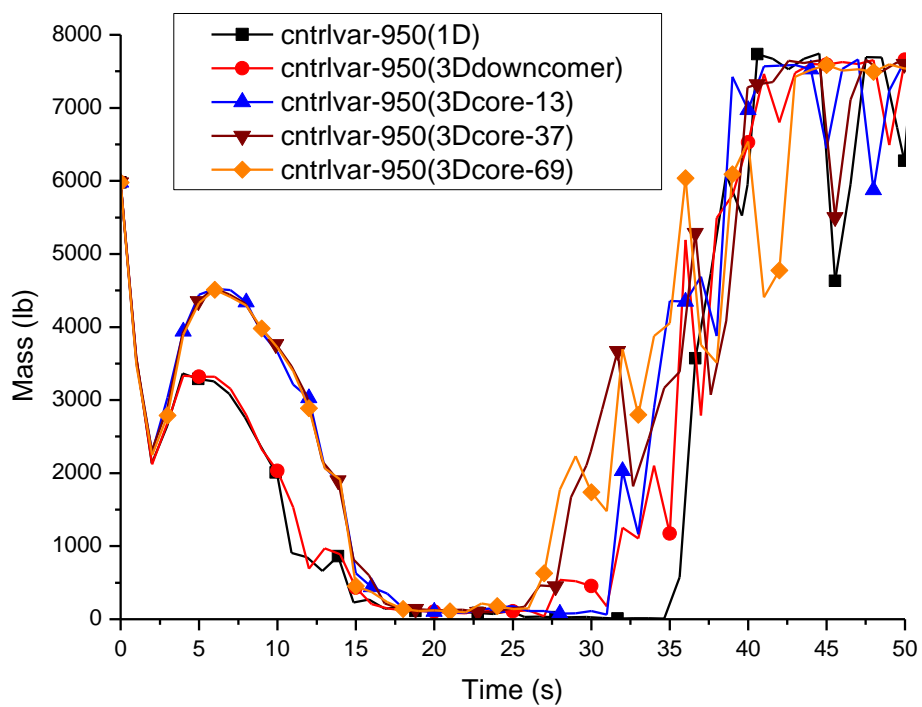


圖 5.3.35 爐心下方體積質量(0 到 50 秒)

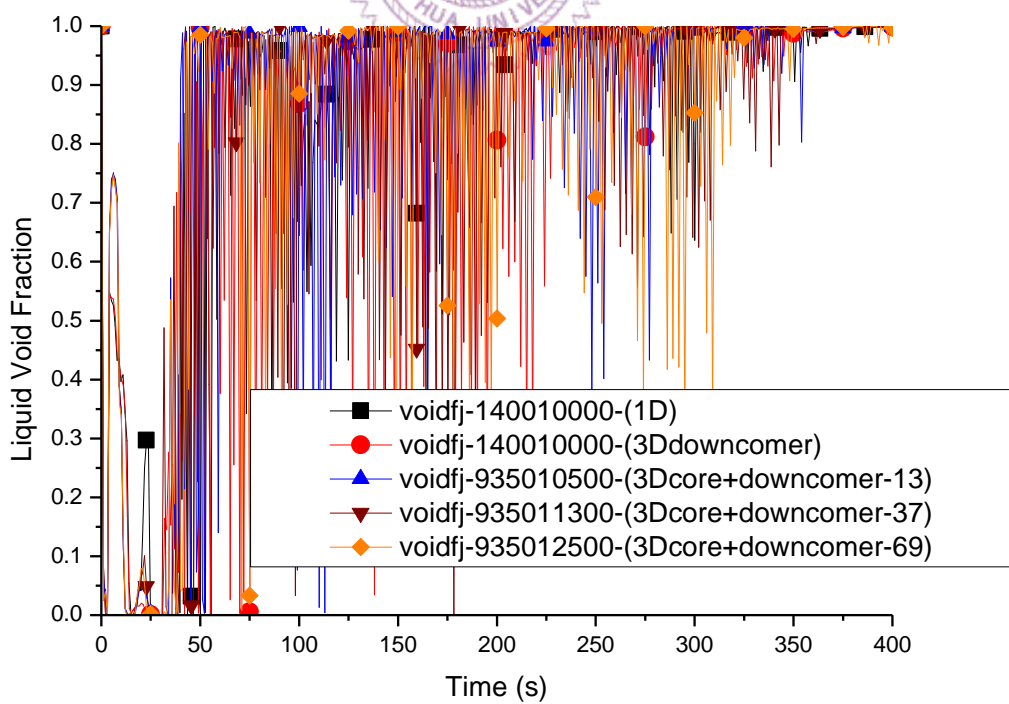


圖 5.3.36 進入爐心通道流體接點液體體積分率

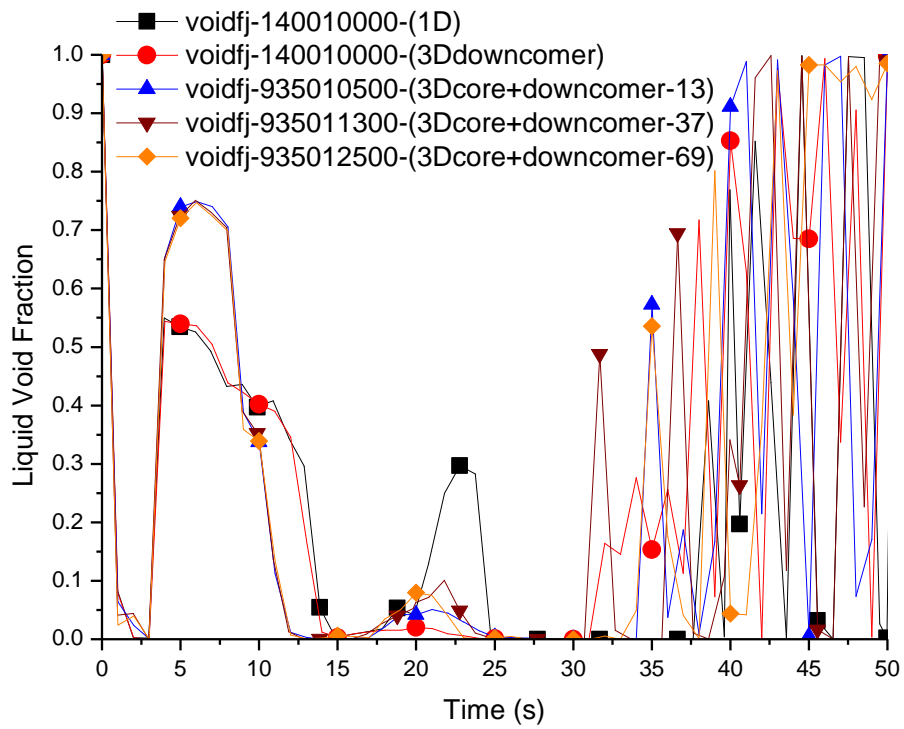


圖 5.3.37 進入爐心通道流體接點液體體積分率(0 到 50 秒)

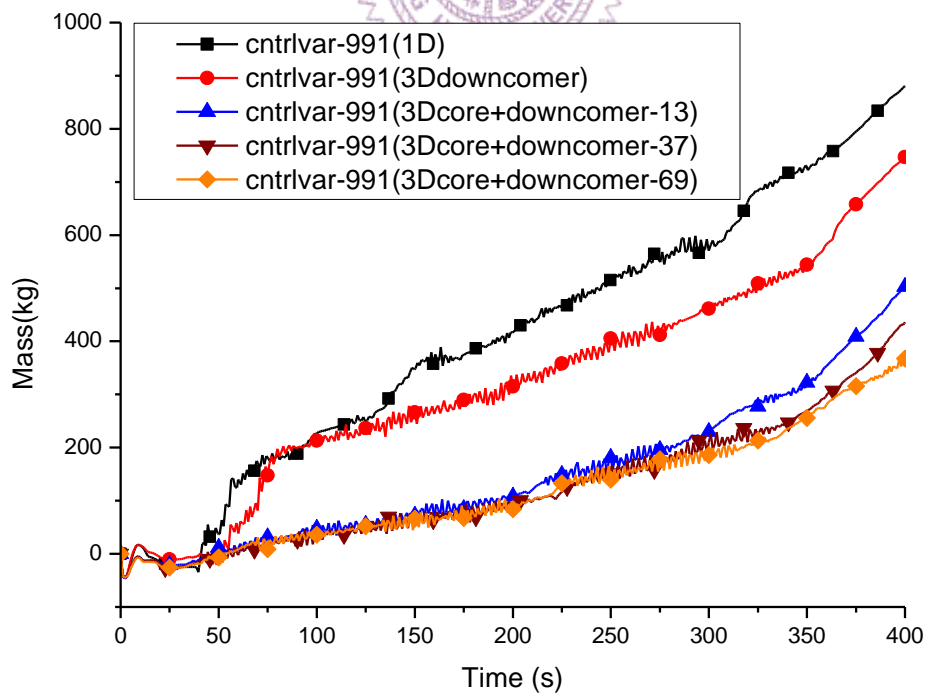


圖 5.3.38 爐心下方體積進入最熱棒所在通道每單位燃料元件累計質量

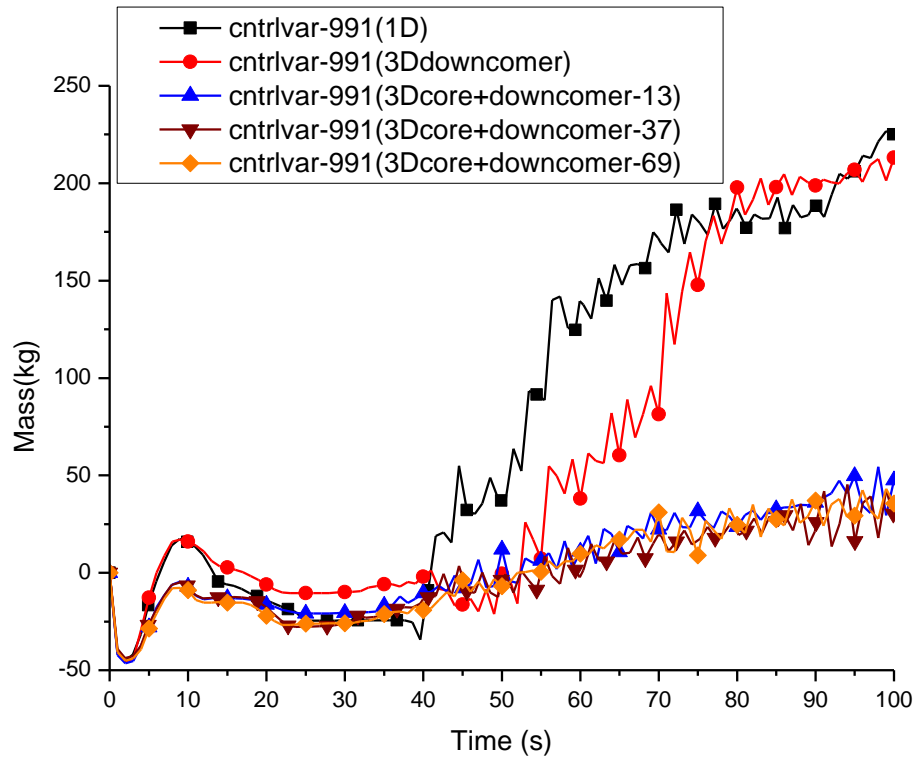


圖 5.3.39 爐心下方體積進入最熱棒所在通道每單位燃料元件累計質量(0 到 100 秒)

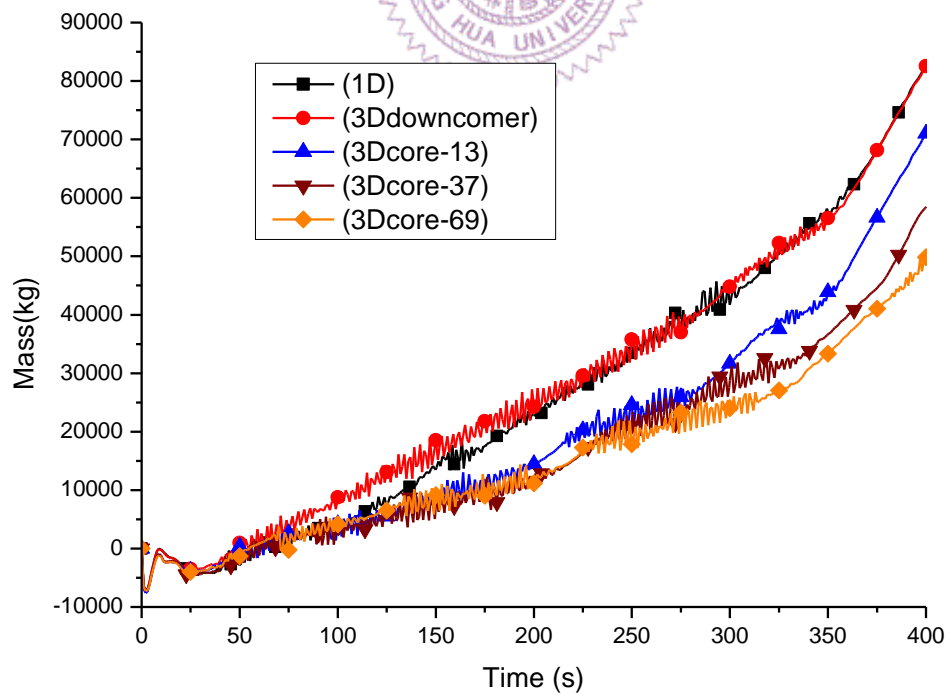


圖 5.3.40 爐心下方體積進入爐心總累計質量

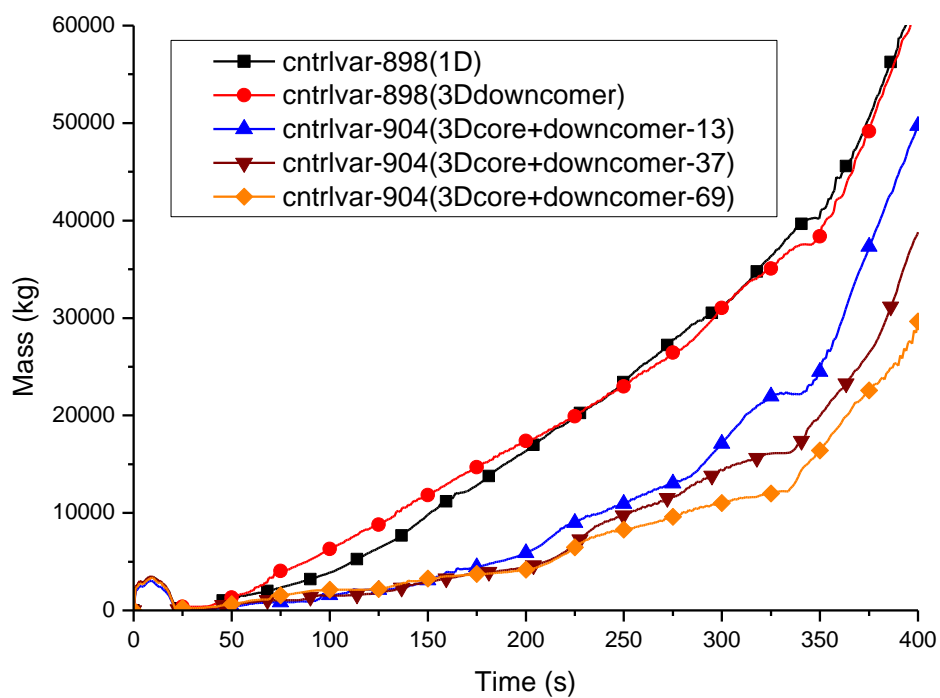


圖 5.3.41 爐心進入爐心上方體積累計液體質量

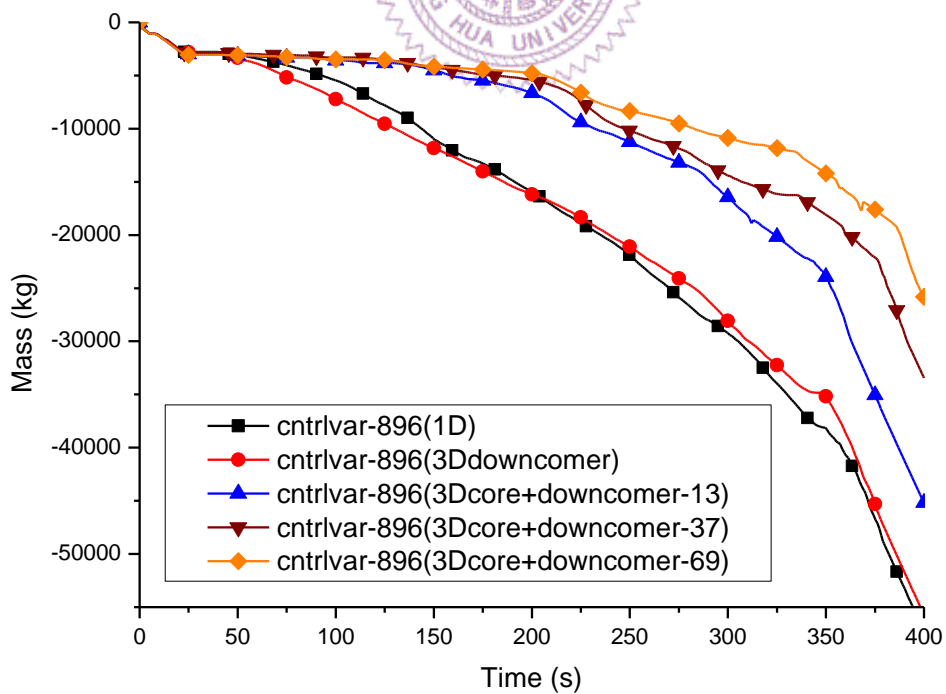


圖 5.3.42 旁通通道進入爐心上方體積累計液體質量

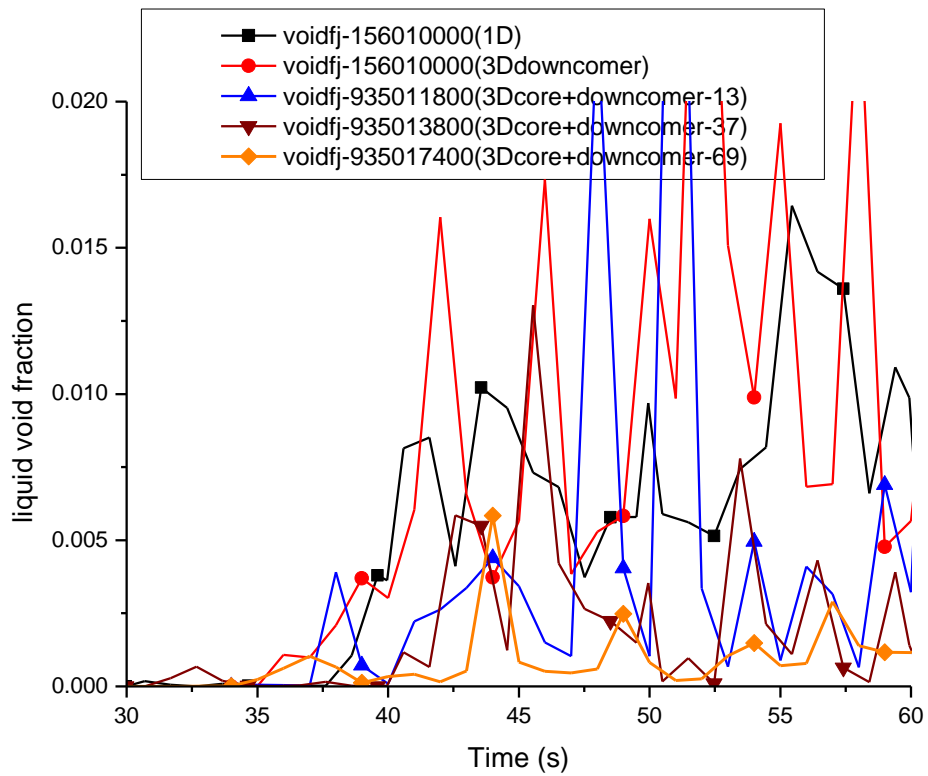


圖 5.3.43 爐心進入爐心上方體積流體接點液體體積分率

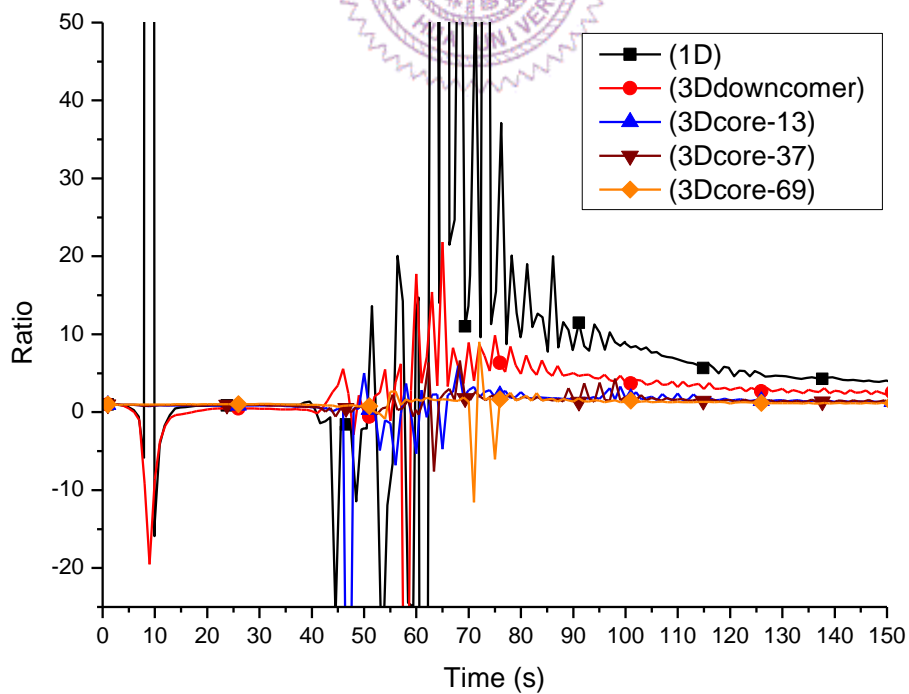


圖 5.3.44 最熱棒通道與爐心總通道每單位燃料元件由下進入爐心累計質量比(0 到 150 秒)

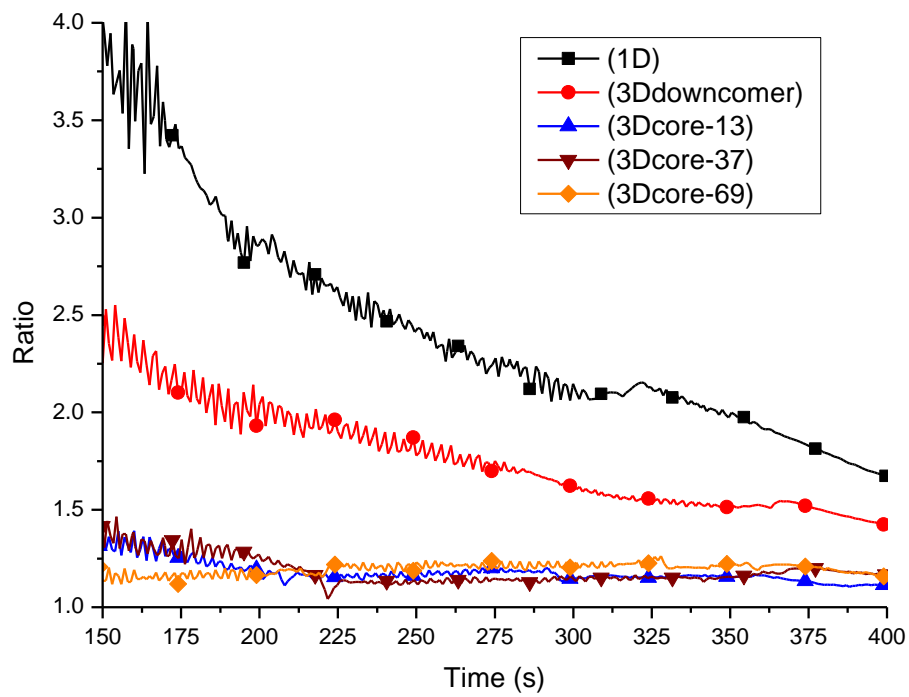


圖 5.3.45 最熱棒通道與爐心總通道每單位燃料元件由下進入爐心累計質量比(150 到 400 秒)

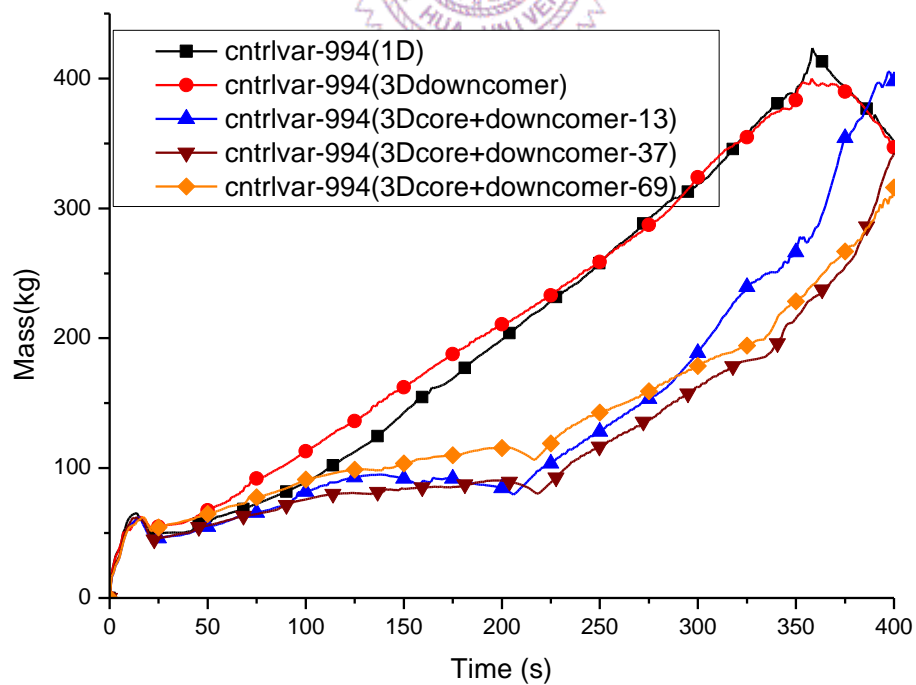


圖 5.3.46 最熱棒所在通道每單位燃料元件向上離開累計質量

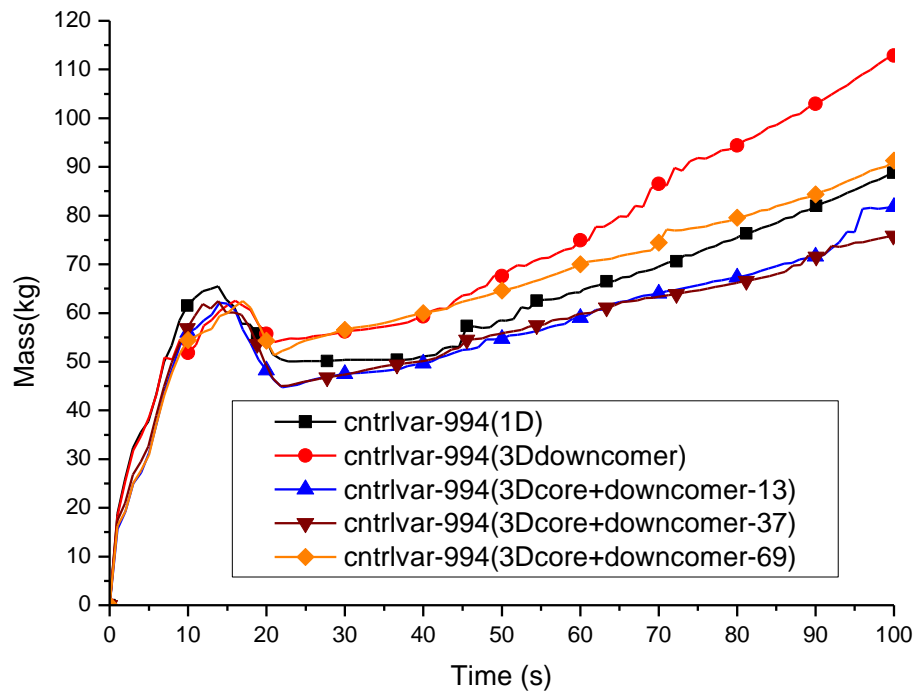


圖 5.3.47 最熱棒所在通道每單位燃料元件向上離開累計質量(0 到 100 秒)

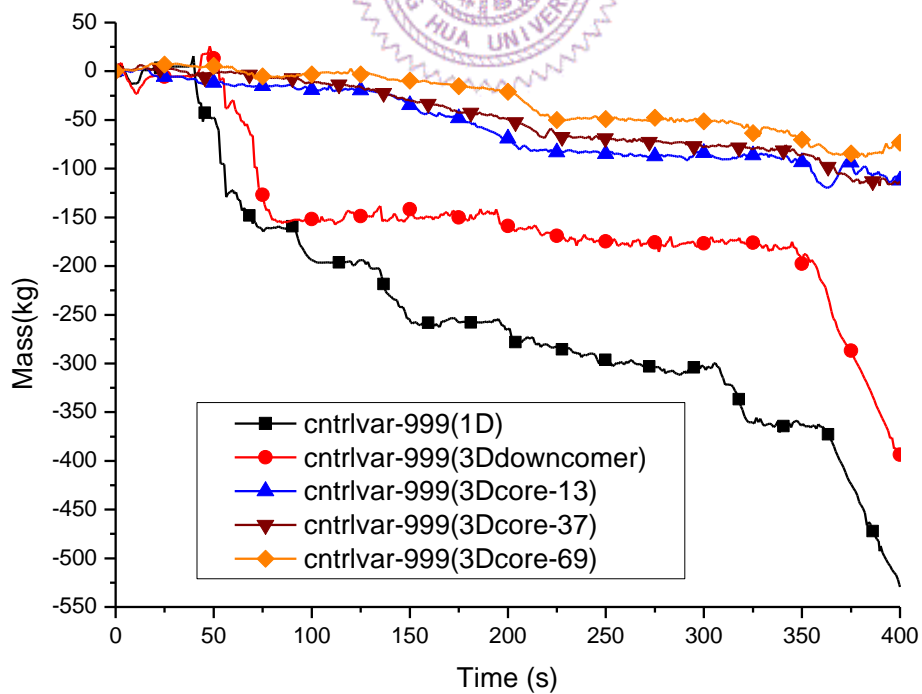


圖 5.4.48 最熱棒所在通道每單位燃料元件總橫向流入累計質量

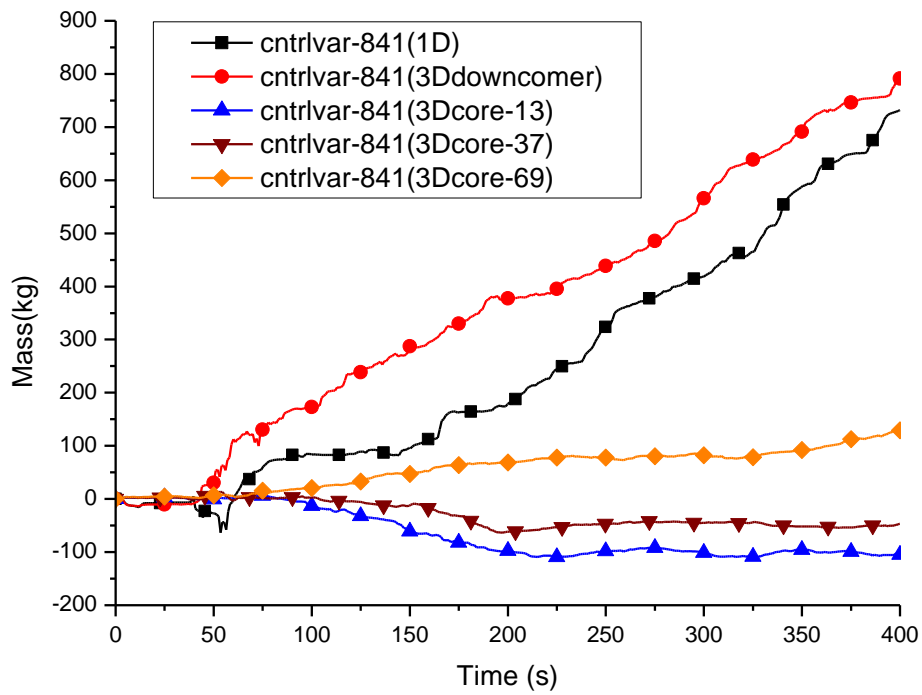


圖 5.3.49 最熱棒所在通道每單位燃料元件橫向流入累計質量(第一階)

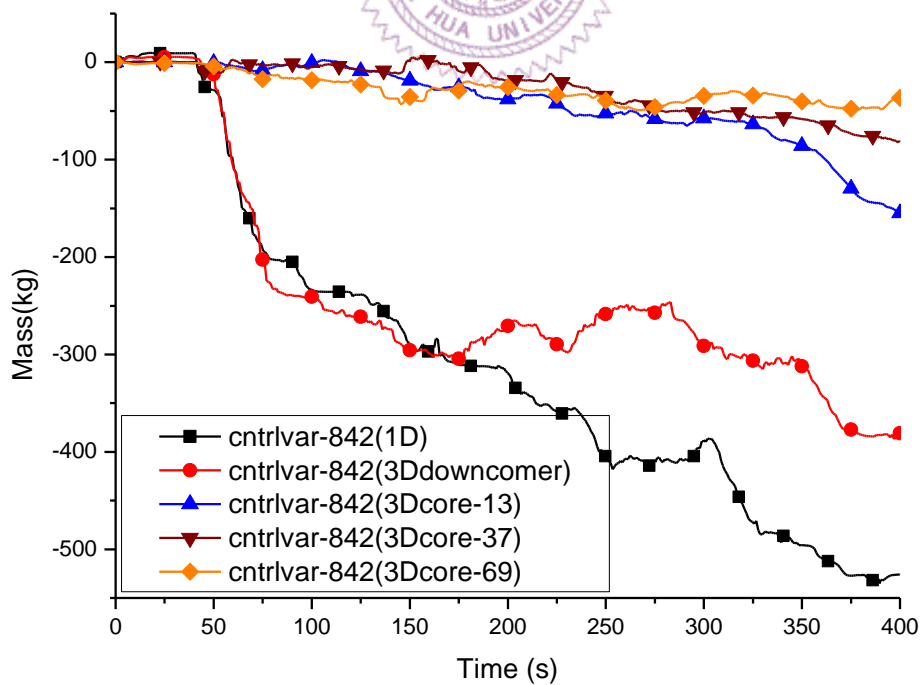


圖 5.3.50 最熱棒所在通道每單位燃料元件橫向流入累計質量(第二階)

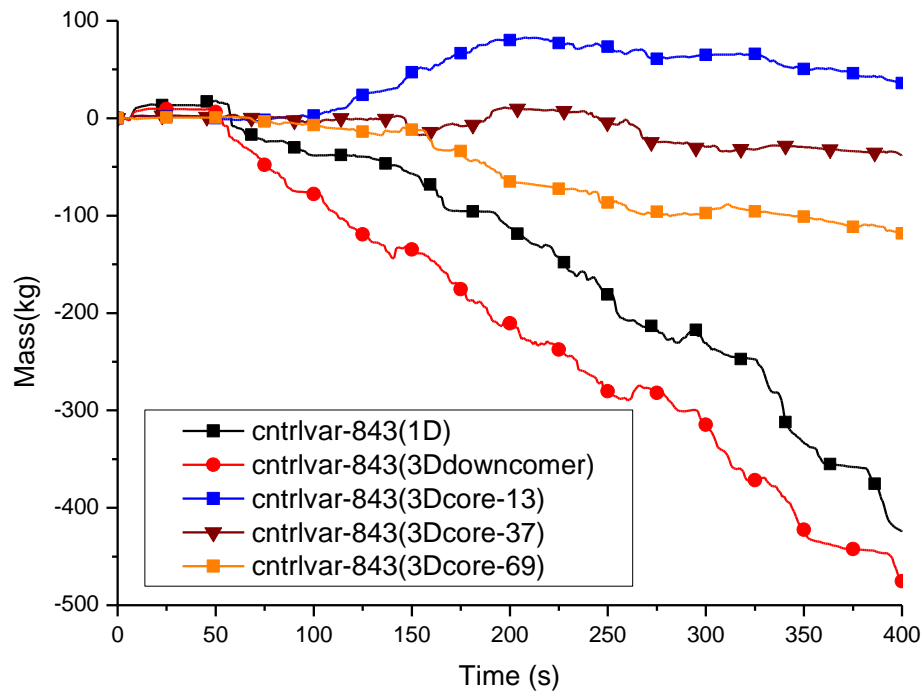


圖 5.3.51 最熱棒所在通道每單位燃料元件橫向流入累計質量(第三階)

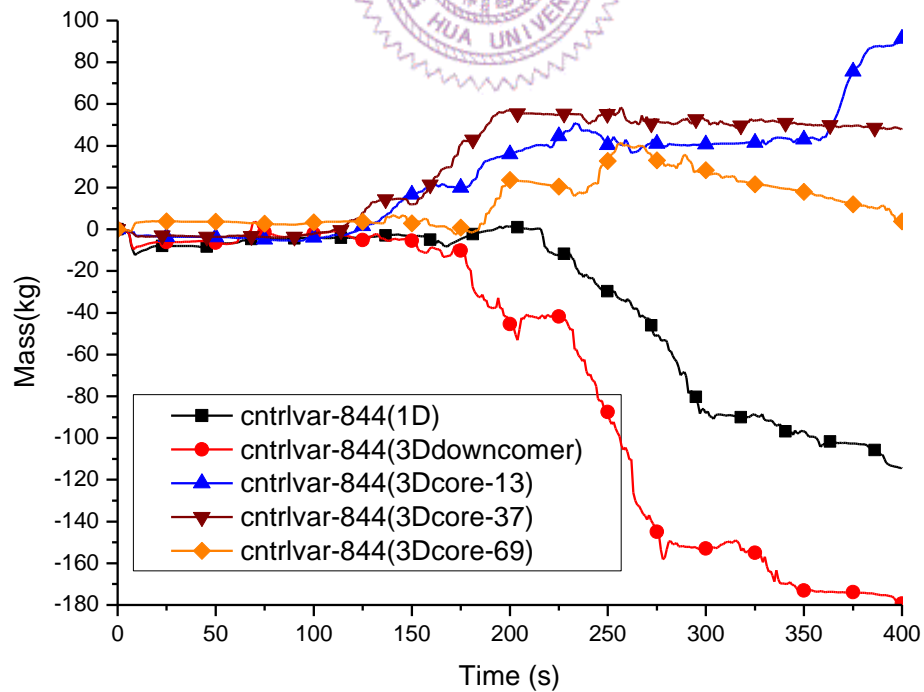


圖 5.3.52 最熱棒所在通道每單位燃料元件橫向流入累計質量(第四階)

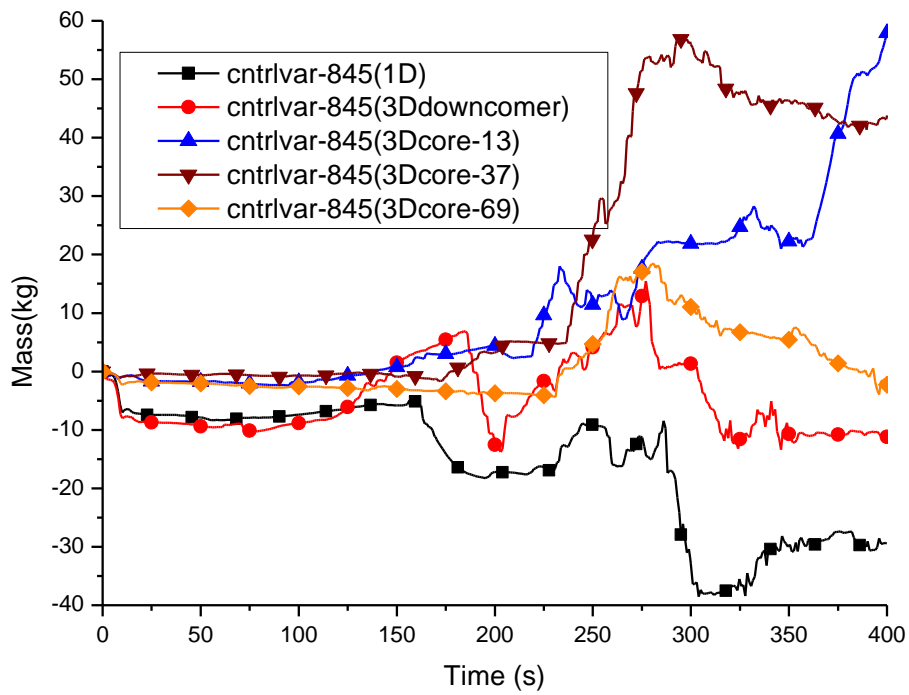


圖 5.3.53 最熱棒所在通道每單位燃料元件橫向流入累計質量(第五階)

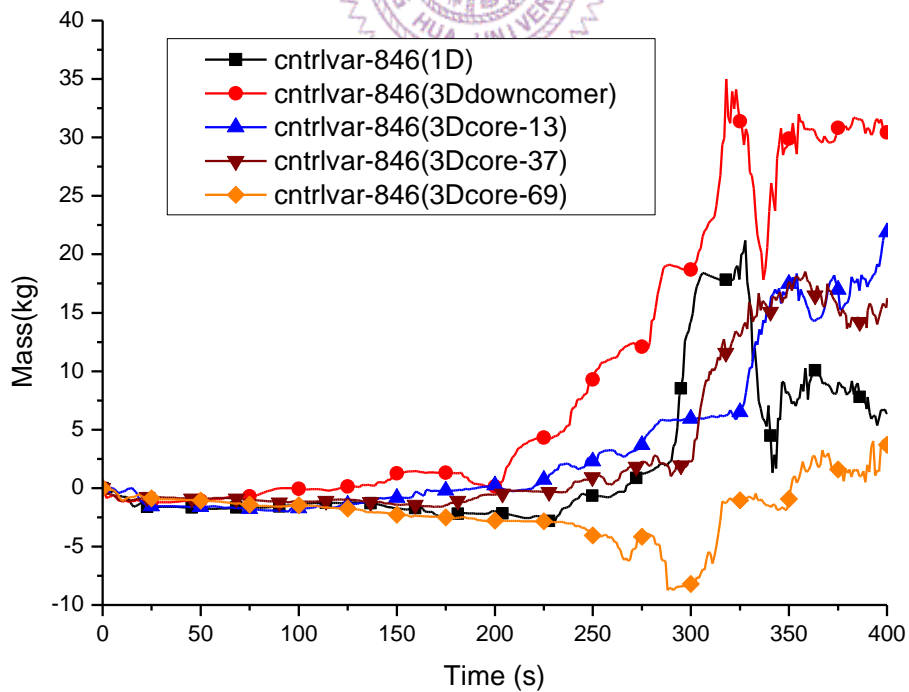


圖 5.3.54 最熱棒所在通道每單位燃料元件橫向流入累計質量(第六階)

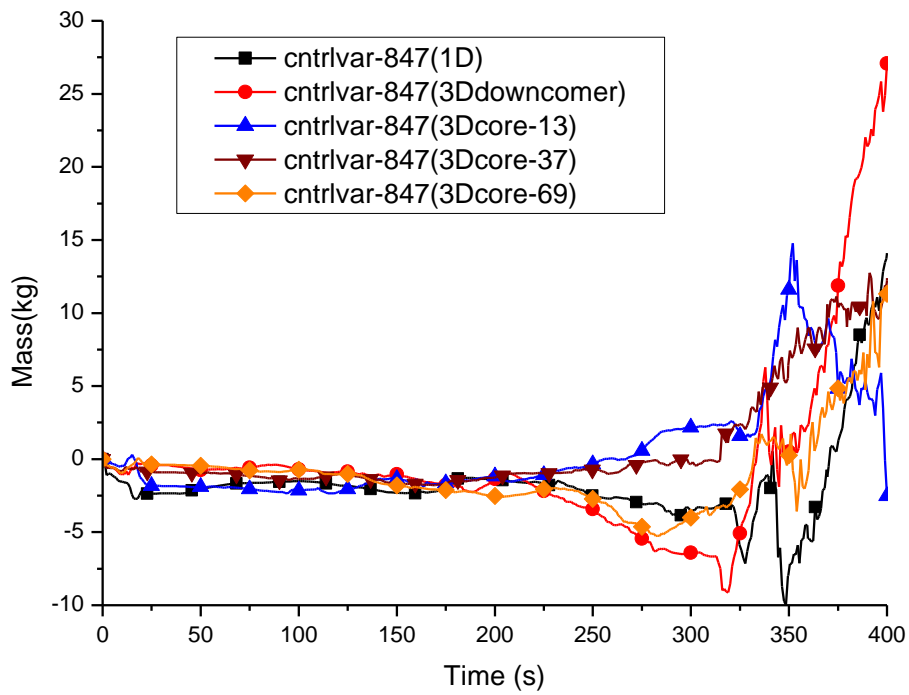


圖 5.3.55 最熱棒所在通道每單位燃料元件橫向流入累計質量(第七階)

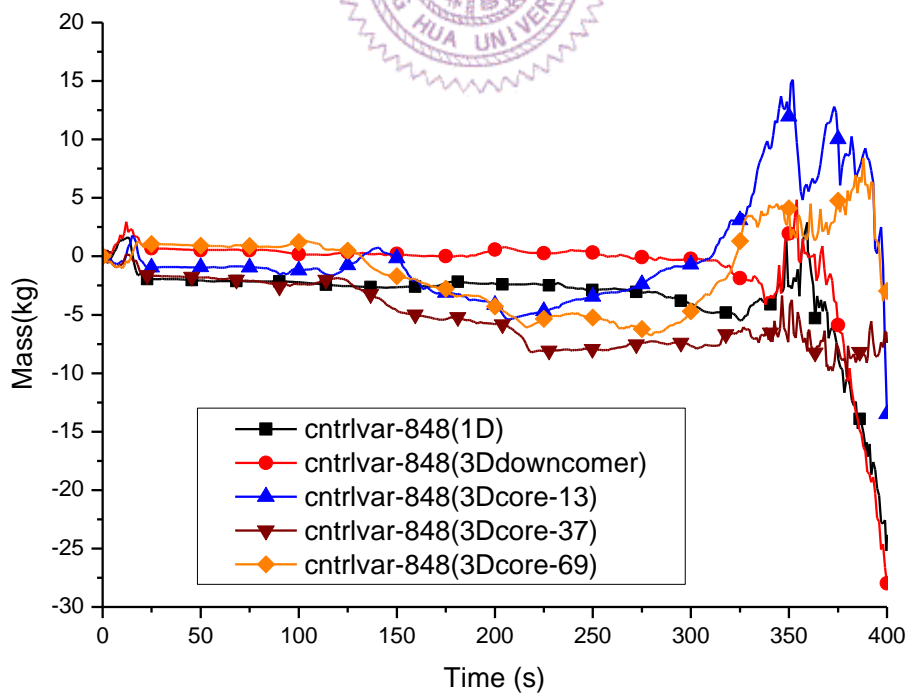


圖 5.3.56 最熱棒所在通道每單位燃料元件橫向流入累計質量(第八階)

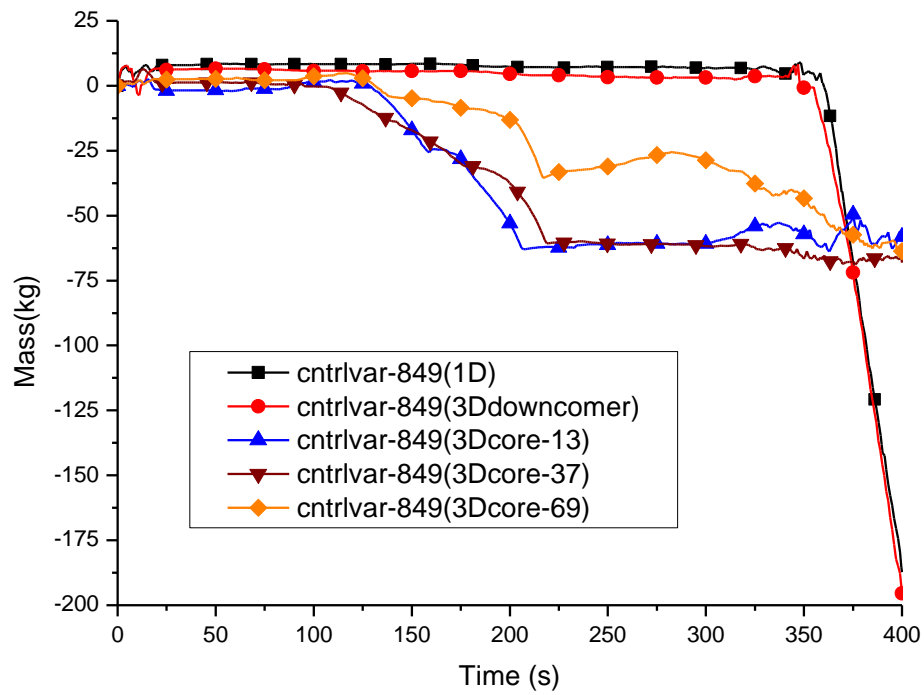


圖 5.3.57 最熱棒所在通道每單位燃料元件橫向流入累計質量(第九階)

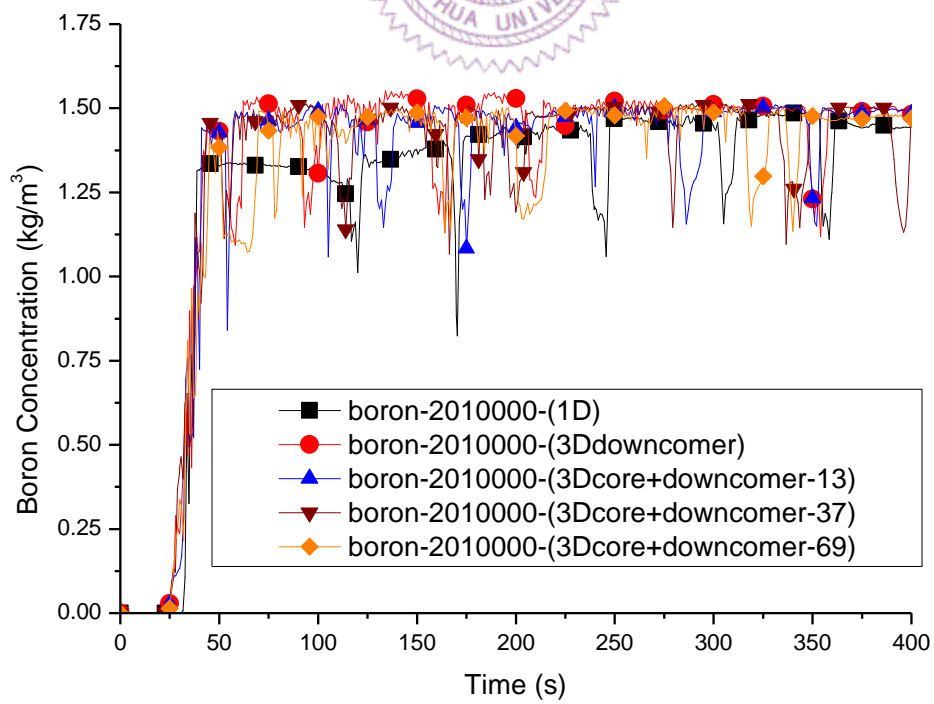


圖 5.3.58 壓力槽底部區間硼濃度

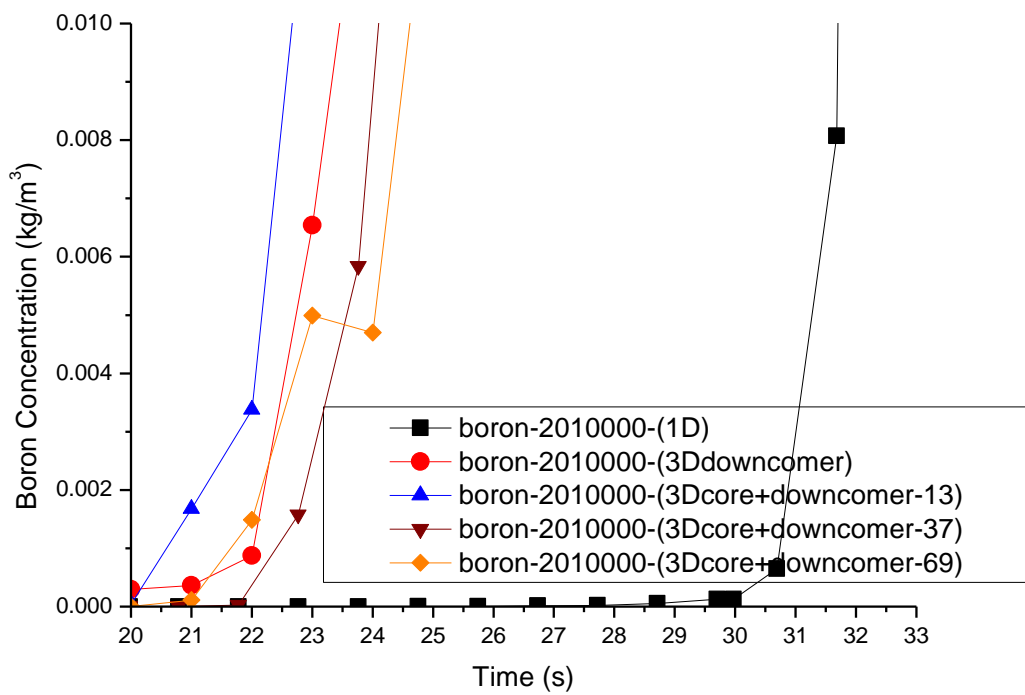


圖 5.3.59 壓力槽底部區間硼濃度(20 到 33 秒)

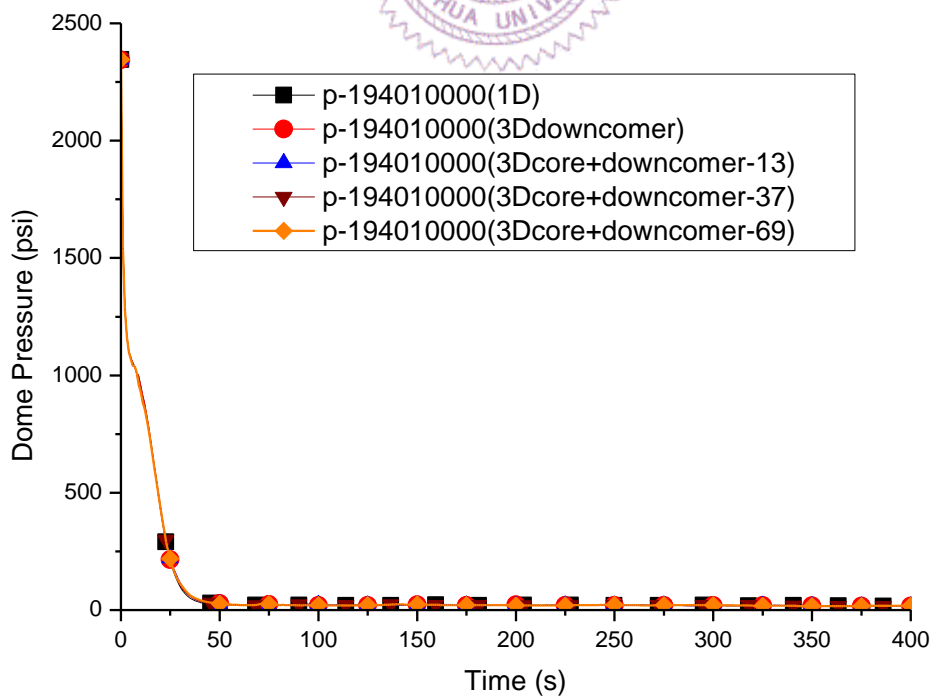


圖 5.3.60 壓力槽頂部壓力

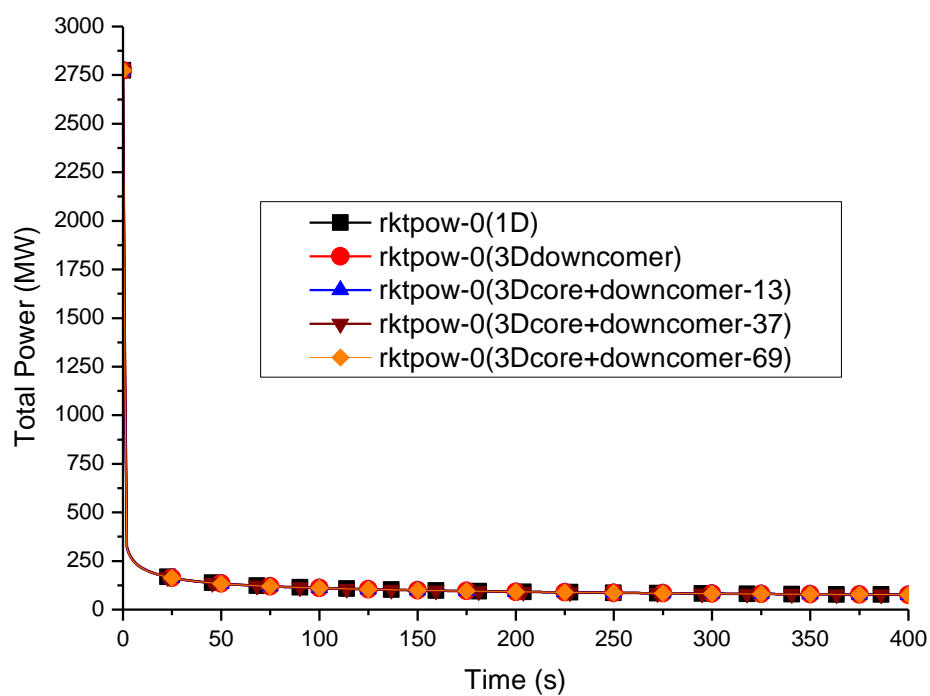


圖 5.3.61 反應器總功率

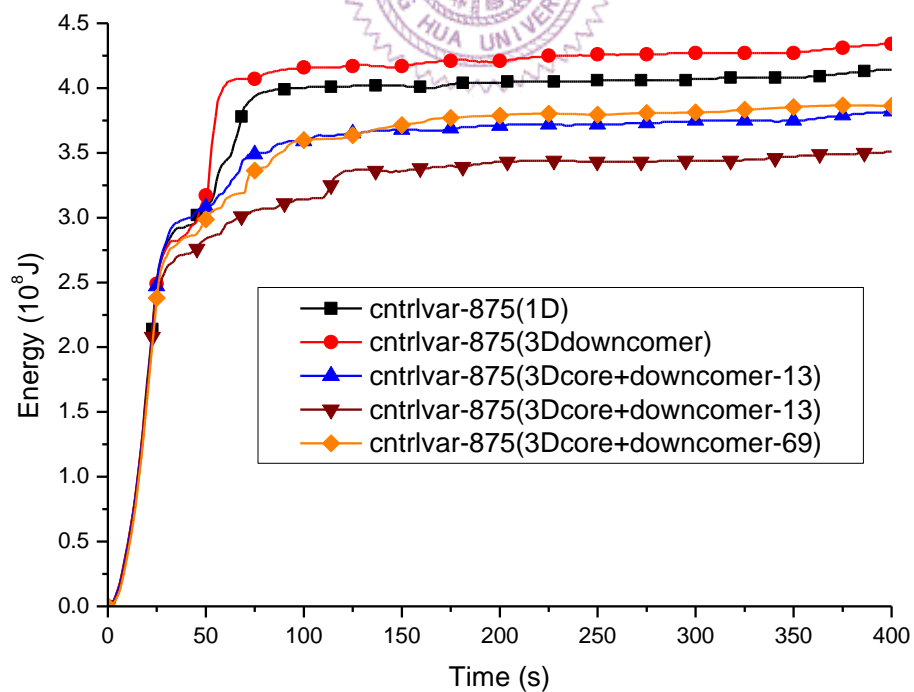


圖 5.3.62 累計進入旁通通道熱量

## 第六章 結 論

本研究利用 RELAP5-3D 模擬馬鞍山電廠大破口冷卻水流失事故 (Large Break Loss of Coolant Accident, LBLOCA)，將壓力槽降流區及爐心做多維度模擬分析，觀察與傳統一維模式的差異；分析的案例共有一維模式、降流區多維度模式、爐心多維度模式流道數 13、37、69，以及將降流度多維度模式與爐心多維度模式結合後爐心流道數 13、37、69，總計八個案例分析。

降流區多維度的模擬使得暫態過程中，與一維模式相比橫向流動緩和許多，且降流區多維度的模擬使得事故初期或後期，均不會出現緊急爐心冷卻水繞過降流區上部環型空間，使得破口側與完整側交替向上流出流體情形，整體而言相較於一維模式穩定，在事故過程中與一維模式最大的差異在於，會使部分水流提早穿越降流區抵達爐心底部，且較早結束反向極限流限制使水流較早接觸爐心底部。

爐心多維度的模擬，雖然無法做到全爐心每束燃料逐一模擬，但從分析案例中可看到隨著通道數的增加，燃料護套尖峰溫度的增加會有收斂的趨勢，也就是通道數 37 增加到 69 時，增加的通道數目將近一倍，但其整體過程或行為已然相當接近，亦指不需進行耗時耗工的逐束燃料進行模擬。爐心多維度模式或一維模式均未觀察到破口發生後，水流橫向集中往功率最高的流體通道流動，並從出口大量流出形成煙囪效應的情形，爐心多維度模式與一維模式結果最大的差異在於，爐心多維度模式回吸能力較弱，不論爐心水位或回吸質量都較差，因此暫態初期燃料護套降溫較差。再泛水發生後蒸氣挾帶液態水流向上離開的效果也不如一維模式，使得爐心自體循環效果薄弱，對再泛水階段燃料護套降溫效果不如一維模式來得有效；爐心多維度模式除主要因為爐心自體循環較弱外，同時向上流入爐心的水流，也較不往最熱棒所在的流體通道集中進入，使得爐心多維度模式的燃料護套溫度較一維模式高了 240 到 500°F。

降流區多維度模式與爐心多維度模式的結合模擬顯示，降流區多維度模式保有原本的特性並不因加入爐心多維度模式而改變，也就是仍然較早有流體穿越降流區，較早結束反向極限流限制進入再泛水，較早使得冷卻水流接觸爐心底部，以及保有降流區橫向流動的穩定性；爐心多維度模式的加入並未使得再泛水的時間晚於單純只有降流區多維度模式的模擬，但爐心多維度模式也同樣保有它的特性，暫態初期爐心回吸水量同樣較一維模式少；雖因降流區的多維度化而較早進入再泛水期，但總進入爐心水量仍維持爐心多維度模式的特性，因挾帶液體向上離開所造成的爐心自體循環能力較差，因此累計通過爐心的冷卻流體質量較一維模式少；但降流區多維度化的加入使爐心提早接觸冷卻水，因此自體循環能力明顯提高，但仍低於一維模式；而水流同樣較不集中進入最熱棒所在的最高功率通道，橫向流動也較一維模式不明顯，也均未形成煙囪效應帶走最高功率通道的能量，使得溫度雖比一維模式高，但比起單純只有爐心多維度模式而言溫度下降約 200 到 400°F。

總結影響護套尖峰溫度的關鍵是：40 秒前為爐心回吸的質量，降流區反向極限流限制解除的時間所造成的再泛水觸及爐心底部燃料的時間早晚，40 秒後則主要被爐心挾帶液態水上升離開爐心所造成的爐心自體循環能力所影響；總結爐心一維模式不論是爐心回吸能力或爐心自體循環能力均優於爐心多維度模式，而降流區多維度模式在降流區水流的穩定性或在泛水時間的提早上均優於一維模式。

爐心多維度的建構因程式的問題，使得獨立最熱燃料束於穩態模擬時水流異常，因而需將每個流道均做等大小模擬，而燃料護套變型模式因太常出現程式計算錯誤而難以使用，且需繁複計算各流道功率值，逐一設定各燃料束間的輻射熱傳，幾何連接，熱結構連接等等，且計算速度相對緩慢太多，最重要的是模擬結果燃料護套尖峰溫度均較一維爐心模式來的高，因此可排除於未來增加 RELAP5/3DK 法制化大破口模擬餘裕的模式中，相對的降流區多維度模式的

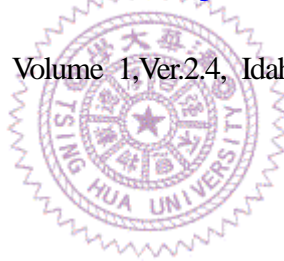
模擬計算速度與一維模式相當，建構繁複程度低，模擬結果對爐心一維模式或爐心多維模式的燃料護套尖峰溫度均有改善，法制化模擬餘裕的增加可望藉由降流區的多維度化來達到；值得一提的是進行爐心多維度模式模擬時，程式常出現計算過程中，材料性質常因超出給定範圍而頻頻停止計算的現象，在加入降流區多維度模式後，程式計算過程變得十分穩定，不再容易出現。

未來可探討爐心多維度模擬造成液態水挾帶能力下降原因及可能性，以及將爐心多維度模式縱軸做靈敏度分析，研究是否有相同情形；未來壓力槽中的其它體積如爐心上下方體積、爐心底部區間、冷端入口與降流區之間的環狀體積均具有多維度流動的特性，因此可做為壓力槽下一步多維度化的目標，研究其多維度流動對暫態的影響。



## 參考文獻

- [1] 馬鞍山電廠 RELAP5/3DK 一維輸入檔，由國立清華大學認證分析技術研發與應用實驗室，梁國興博士提供
- [2] 國立清華大學認證分析技術研發與應用實驗室，「核三 REDLP5\_3d\_ISO 計算書」
- [3] 台灣電力公司，「核三廠核能發電訓練教材」
- [4] 核三廠特定周期爐心燃料束功率資訊，由台灣電力公司，周齡曜先生提供
- [5] 馬鞍山電廠 RELP5/3DK 一維輸入檔搭配之輻射熱傳模式輸入檔，由國立清華大學認證分析技術研發與應用實驗室，梁國興博士提供
- [6] <http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/cfr/part050/part050-appk.html>, U.S. NRC
- [7] “RELAP5-3D code manual” , Volume 1, Ver.2.4, Idaho National Laboratory, June 2005



## 附錄 A

## A.1 RELAP5 使用問題

(1) 使用 RELAP5 程式進行大破口爐心模擬時，熱結構會使用再泛水模式計算，但使用 RELAP5/MOD3 (RBIC/3.3gl)時只要開始再泛水模式計算，爐心中的不特定控制體積便會過熱超出水的三相表所涵蓋範圍，並結束計算；RELAP5-3D (R5-ATHENA/Ver: 2.4.2)進行再泛水模式計算時，當進入計算時則會無故結束，而未留下任何錯誤訊息，因此均未能使用再泛水模式計算；本研究使用核研所為滿足 10 CFR Appendix K 而對 RELAP5-3D V.1.3.5 修改而成的 i8\_jessie4 版本做模擬程式。

(2) 當進行大破口暫態模擬分析時，程式常會發生間隔一段時間不記錄任何數據點，而在過一段時間後又重新開始記錄，此時需要反覆調整最大時步重新接續暫態直至正常。

(3) 在進行暫態模擬時意外發現使用不同電腦，即使是相同程式(i8\_jessie4)相同輸入檔，結果也不完全相同，後來發現為電腦計算核心 CPU 廠牌不同，例如 AMD 或 Intel，則暫態過程所使用的時步則會不同；大破口事故發生後在相同燃料位置護套溫度模擬結果如圖 A.1.1，初始給定的最大時步皆為 0.02 秒，而程式計算所用時步如圖 A.1.2，為此本研究所有案例均統一使用 AMD 的 CPU 做計算。

(4) 程式計算高度計算明顯有問題，例如淬冷邊界高度大於實際燃料熱結構高度。使用 RELAP5-3D 程式計算燃料棒熱結構淬冷時，程式會將淬冷邊界位置所在的區間依使用者設定如 2、4、8、16、32、64、128，再行細分區間，更精確計算淬冷邊界所在位置。淬冷指的是當爐心經過大破口冷卻水流失事故後，緊急爐心冷卻系統注入冷卻流體，當流體可以貼上燃料護套，也就是燃料護套表面溫度低於臨界溫度時，熱傳模式由過渡沸騰回到核沸騰時即稱為淬冷。

為了確定程式所算出來的淬冷邊界位置與實際燃料護套表面熱傳模式進入核沸騰的位置

是否一致，因此將燃料熱結構的 16 個區間各別熱傳模式資料取出，算出再泛水後由下往上連續皆為核沸騰的最高區間，並計算此區間的高度，高度值取兩種，其一為燃料底部到此區間頂部的高度，其二為燃料底部到此區間中間的高度；以一維模式最熱棒熱結構為例，取出程式計算出的總淬冷長度(23.7778ft)，除以燃料熱結構總長(12ft)做為放大因子，乘上之前所計算的兩種核沸騰區間高度值，將這 3 條線畫在同一張圖如圖 A.1.3。程式淬冷分為兩部分，一部分為底部開始，另一部分從頂部開始淬冷，除了 350 秒後，程式計算底部淬冷邊界位置因與頂部淬冷邊界位置重合，亦即整束燃料熱結構均已淬冷，所以從底部往上淬冷邊界位置不再增加而與手算淬冷邊界位置有差距外，其餘時間程式計算的淬冷邊界位置大約都介於手算的此兩種淬冷高度之間，證明程式計算的淬冷發生情形的確位於燃料熱結構，只是算出無法理解的高度；此外不同爐心模式下，雖然使用相同的最熱棒熱結構與相同爐心幾何高度，但計算出來頂部開始淬冷高度並不相同如圖 A.1.4，因此本研究所有淬冷邊界位置圖均除以各別放大因子，以符合實際燃料熱結構高度。

(5) 使用者雖然在輸入檔設定使用英制單位，但控制系統諸如加總、積分等，所取參數及計算後數值皆為公制單位，因此需額外計算轉換因子甚為不便，容易忽略而出錯。

(6) 使用輻射熱傳模式後，當需使用重新接續計算(Restart)方法，接續未計算完的暫態時，則在輸出檔.o 會出現一系列以下的文字：

0\*\*\*\*\* Inconsistent view factors and areas for surfaces 2032016 and 2011016

意指各熱結構不滿足 4.2.3 的等式(1)，而無法做接續計算，因此每次需做接續計算時，需在輸入檔內重新再將輻射熱傳模式輸入一次。

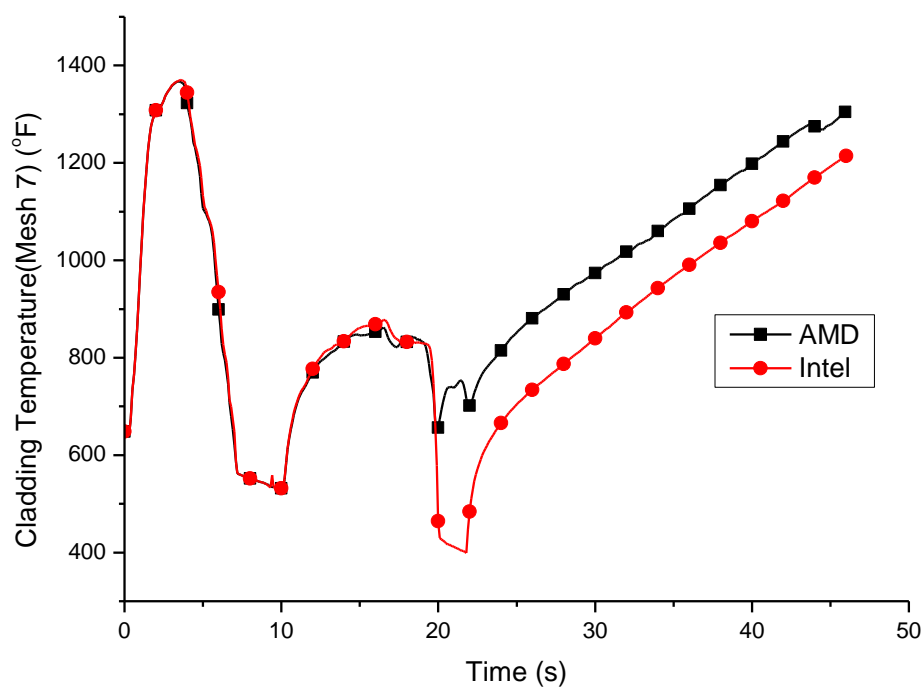


圖 A.1.1 最熱棒第七節點護套溫度比較圖

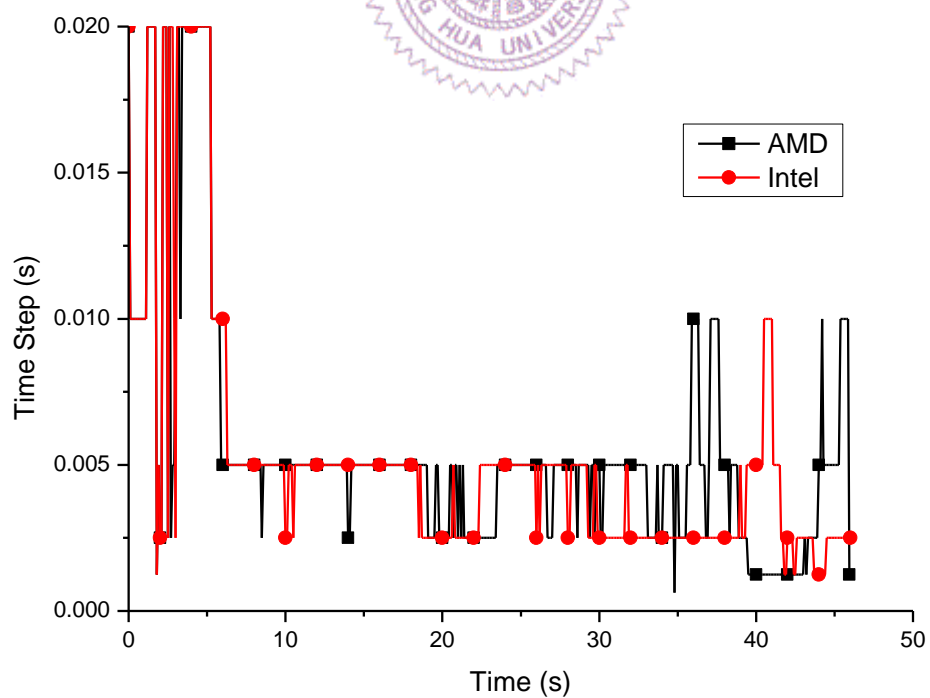


圖 A.1.2 程式使用時步比較圖

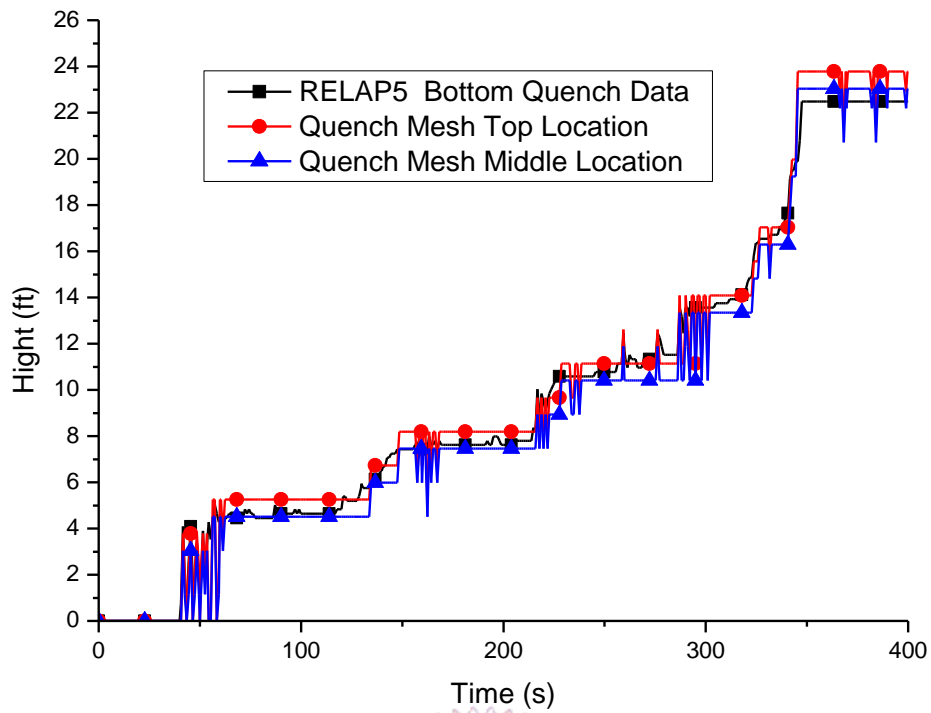


圖 A.1.3 計算淬冷邊界位置比較圖

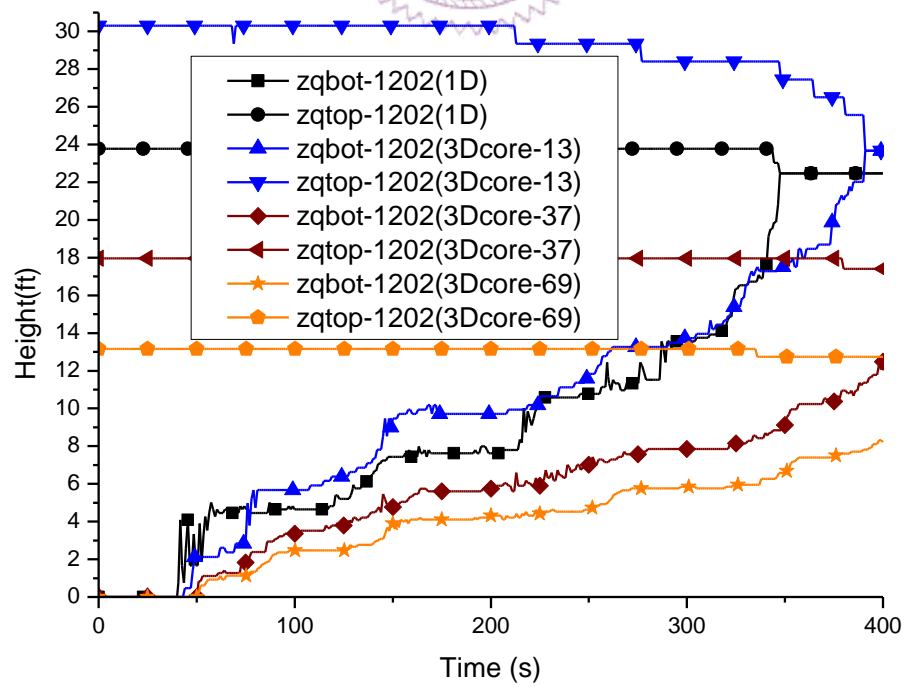


圖 A.1.4 不同模式計算底部及頂部淬冷邊界位置比較圖

## A.2 RELAP5-3D 多維原件使用問題討論

### A.2.1 前言

本研究建立一多維度爐心模擬 PWR 系統，原本希望在模擬最熱燃料元件及周圍原件時能以一個燃料元件做為一流道來模擬，更外圍則用數個燃料元件流體通道合併之相鄰接合，構成擬真爐心幾何形狀，但卻發現部分通道出口質量流率異常增多，甚至逆流等奇怪現象，因此建立一些簡單模型驗證 RELAP5-3D 的多維原件(Multi-Dimensional Component)應用問題。

### A.2.2 多維度爐心流道驗證

#### A.2.2.1 RELAP5-3D 驗證模式介紹

選擇 PWR 系統中爐心及上下方體積來設計此驗證系統。以控制體積 931 及 935 做為溫度及壓力的邊界條件，932 為依時流體接點(Time Dependent Junction)，提供穩定進口流量，933 及 934 為單一體積(Single Volume)，各別做為與爐心相接的底部區間(Lower Plenum)及頂部區間(Upper Plenum)，爐心部分選用多維度原件的直角座標系統，兩個正方形流體通道，且有相同的區間數(9 個)與區間大小，垂直方向的控制體積間由多維度元件的內部流體接點相連接，爐心與上下方體積則藉由外部流體接點相連接，調整入口流阻係數使流體通道每單位面積的流過的質量流率差異在正負 5% 以內，並在流體通道內加入主動發熱熱結構(Active Heat Structure)，功率比與熱傳面積比均與流體通道面積比相同；使用的最大時步(maximum time step)為 0.001，做三種不同的爐心建構，並且每種爐心建構均做 4 種案例分析，測試 0 功率,100%功率,以及在熱結構上是否有燃料護套變形模式如表 A 2.2.1 所列，這三種爐心建構為：

- (1) 兩流體通道各別由多維度原件構成，左側代號 991 與右側代號 992，橫向由外部流體接點相連接，如圖 A.2.2.1，991 與 992 垂直流動面積比為 1 比 156。
- (2) 兩流體通道同樣由不同的多維度元件構成，991 與 992 垂直流動面積比改為 1 比 1。

(3) 兩流體通道改由同一多維度元件構成，亦即橫向由內部流體接點連接，垂直接點面積同樣為 1 比 1。

### A.2.2.2 RELAP5-3D 驗證結果

圖 A.2.2.2 為爐心建構(1) 991 到 934 的質量流率比較圖，圖 A.2.2.3 為爐心建構(1) 992 到 934 的質量流率比較圖。由圖可看出模擬爐心時如果流道截面積有明顯差異，不論是否有功率，如果未使用燃料護套變形模式則較小通道(991)出口質量流率為負值，出現逆流情形，而在使用燃料護套變形模式後，較小流道(991)出口質量流率則異常增加；且在此爐心建構下如果使用燃料護套變形模式，即使 0 功率，使用較大時步如 0.01，則燃料護套會發生破裂如輸出檔副檔名.o 中所述：

1Heat structure 2001-016 ruptured at 33.262 seconds with a channel blockage of 50.968  
imw= 23046pgas= 4.16872E+06。  
0\$\$\$\$\$\$ Advancement 18019 for time = 3.326246E+01 had excessive error at the minimum  
time step。

圖 A.2.2.4 為爐心建構(2) 991 到 934 的質量流率比較圖，圖 A.2.2.5 為爐心建構(2) 992 到 934 的質量流率比較圖。不論是否有功率，此種爐心建構會使流道出口質量流率不對稱，有無使用燃料護套變形模式只是出口流量不對稱的通道互換。

圖 A.2.2.6 為爐心建構(3) 左側通道到 934 的質量流率比較圖，圖 A.2.2.7 為爐心建構(3) 右側通道到 934 的質量流率比較圖。在此模式中不論是否有功率，如果沒有使用燃料護套變形模式則出口出現流量不對稱情形，而在使用燃料護套模式後兩流體通道出口的質量流率一致；在此模式發現，若將有主動發熱熱結構所在的體積，將與之相連的橫向內部流體接點面積因子 (Junction Area Factor) 設為 0，模擬此處無橫向流動，如圖 A.2.2.8，將出現程式無法求解的情形，

如圖 A.2.2.9。

### A.2.2.3 結論

使用多維度原件且有橫向流特性時,流體通道截面積大小盡量一致,避免出口發生逆流或異常質量流率;當用來模擬爐心時,應在熱結構加入燃料護套變型模式,避免出口質量流率不對稱,不過本研究並未使用燃料護套變型模式,原因如附錄 B.1,同時在爐心多維度模擬中也未發現出口質量流率不對稱,且將附錄 A.2.1 的爐心建構(3)延伸成 2 乘 2 的四個流體通道則未發生此問題,推測是多維元件流體通道數太少所致;程式無法求解可能原因之一為與主動熱結構所在的體積相連的內部流體接點的流體接點面積因子被設為 0;並且在本附錄爐心建構模擬中也發現,即使為同一控制體積的多維原件,做出完全對稱的兩流道,流道入口質量流率也未必會相同,仍需調整流阻來達到接近的數值。



表 A 2.2.1 測試模式

	Power	Fuel cladding deformation model
Case1	0%	有
Case2	100%	有
Case3	0%	無
Case4	100%	無

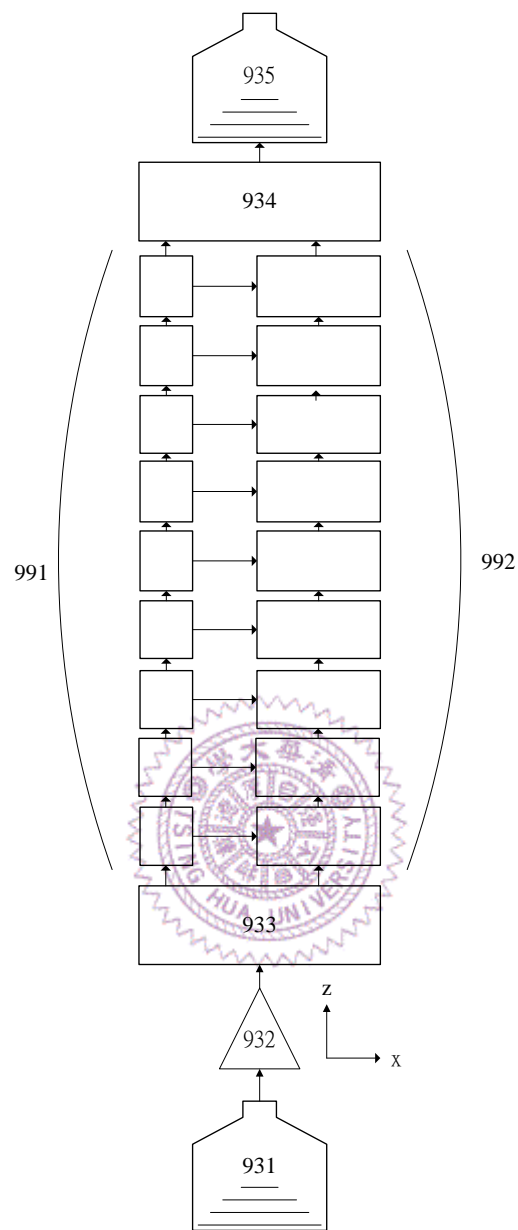


圖 A.2.2.1 輸入模式結點圖

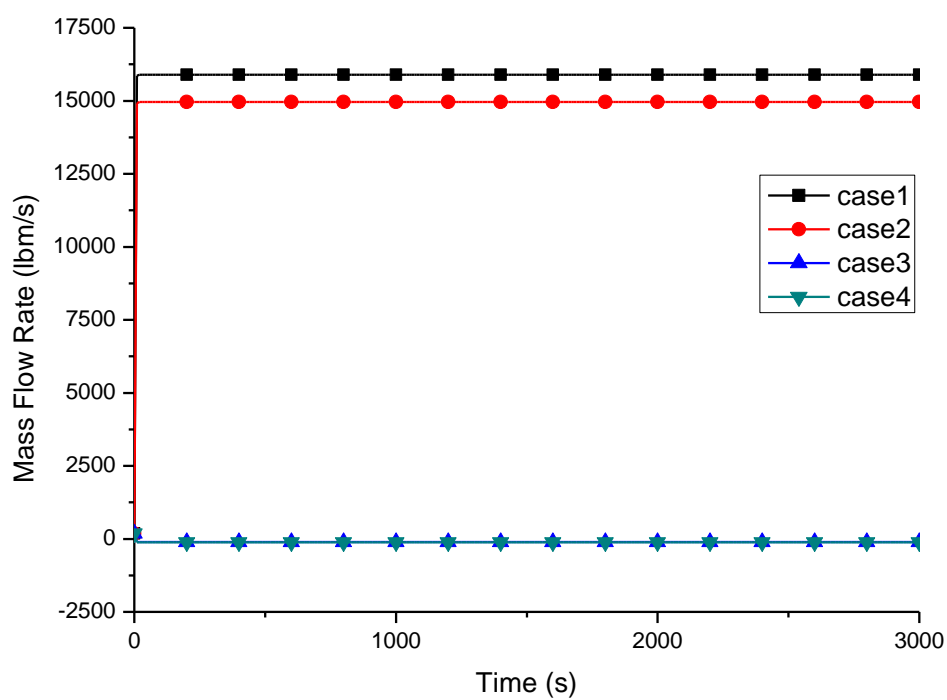


圖 A.2.2.2 991 到 934 質量流率

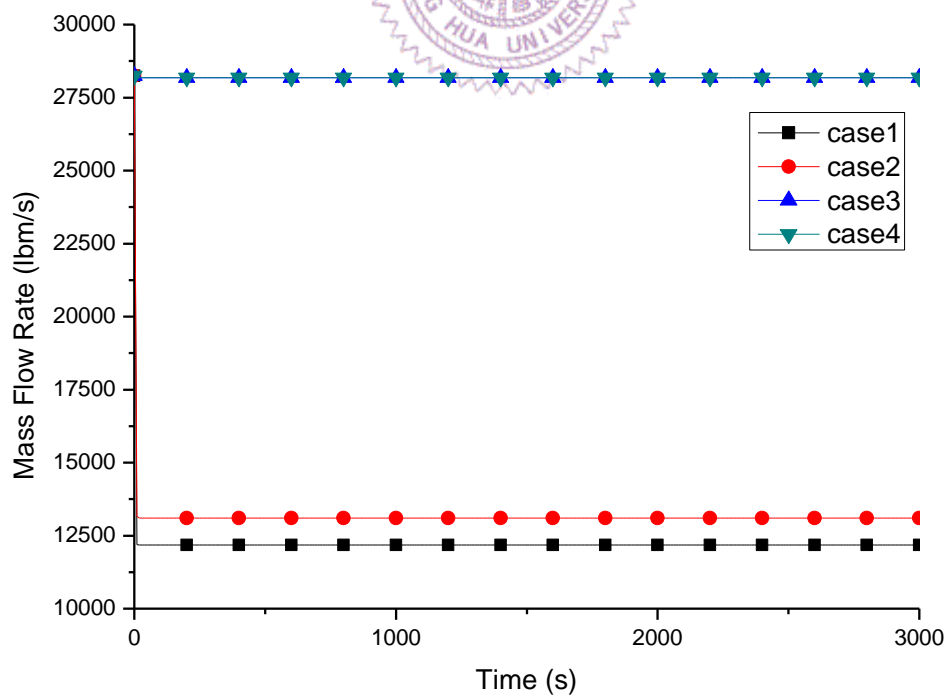


圖 A.2.2.3 992 到 934 質量流率

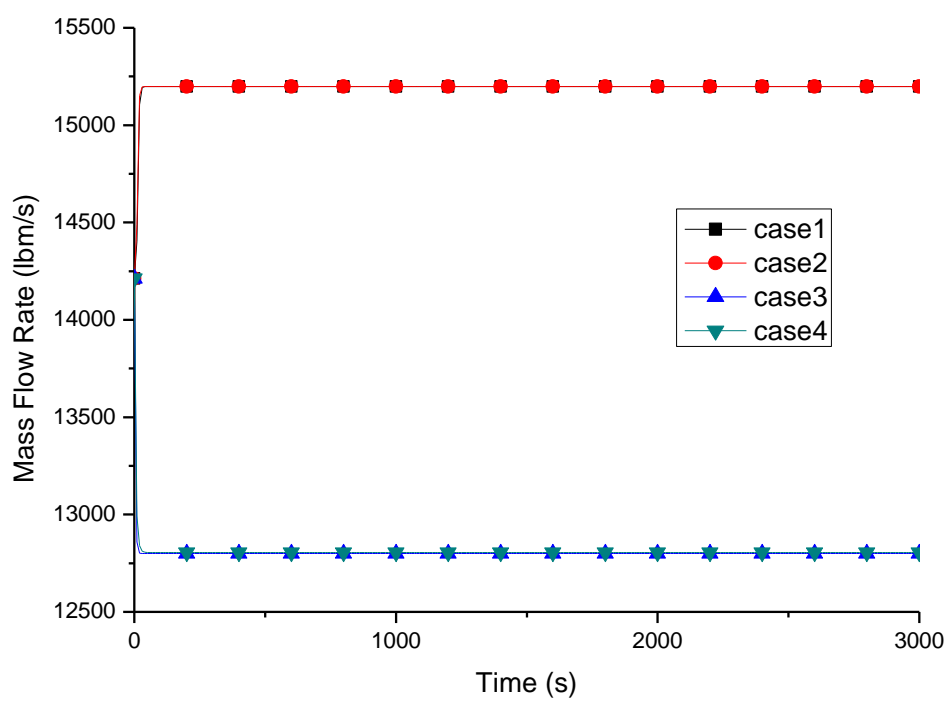


圖 A.2.2.4 991 到 934 質量流率

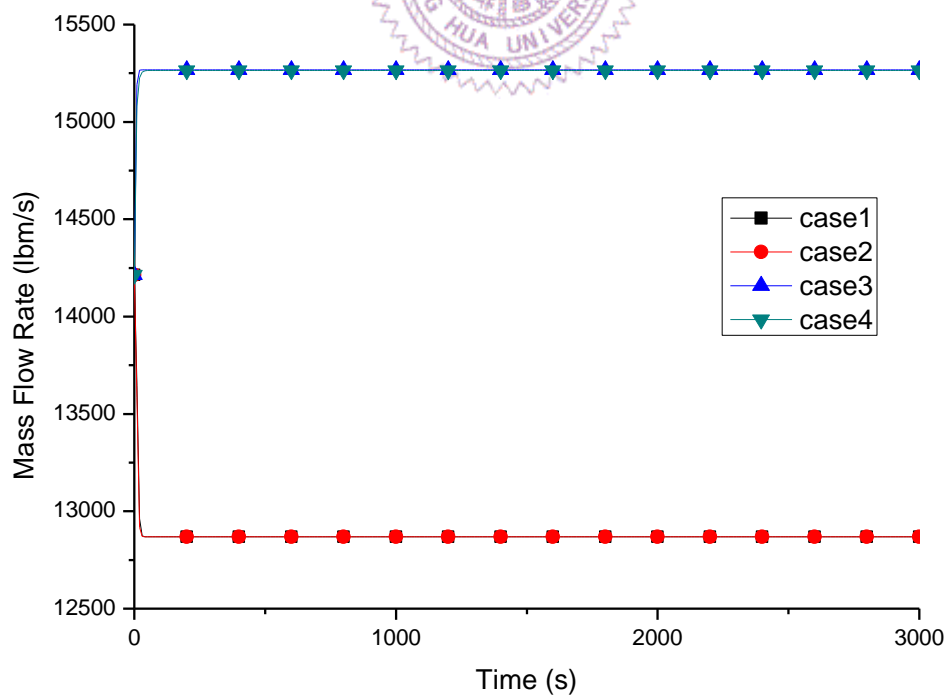


圖 A.2.2.5 992 到 934 質量流率

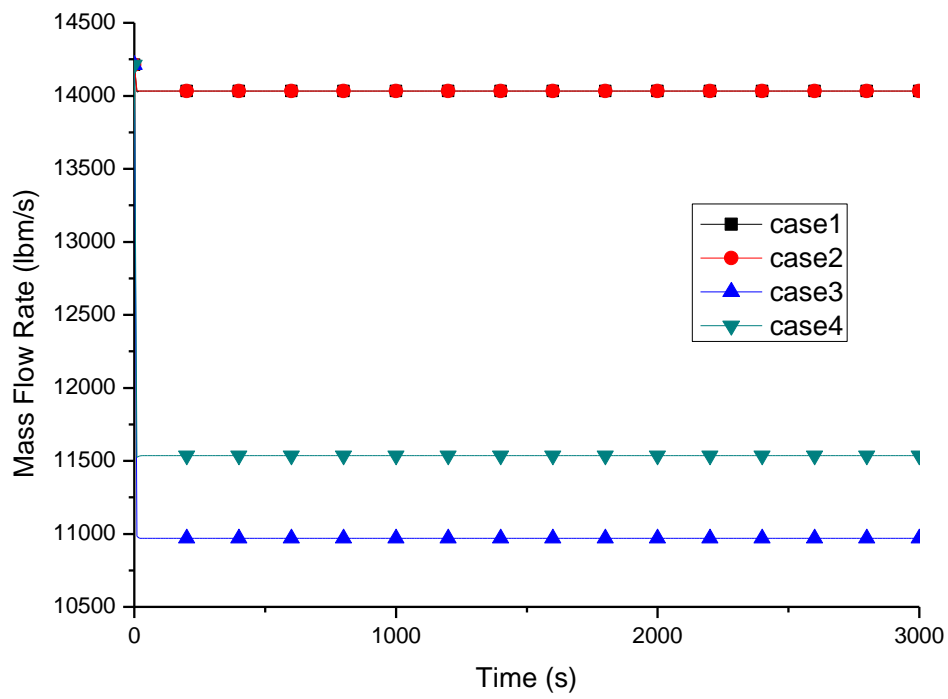


圖 A.2.2.6 左側通道到 934 質量流率

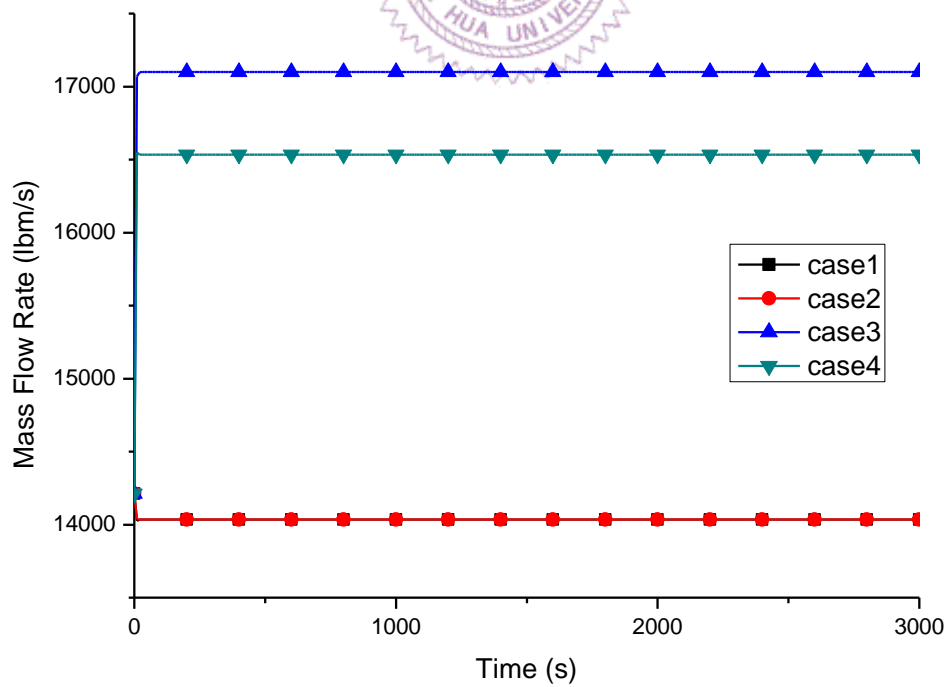


圖 A.2.2.7 右側通道到 934 質量流率

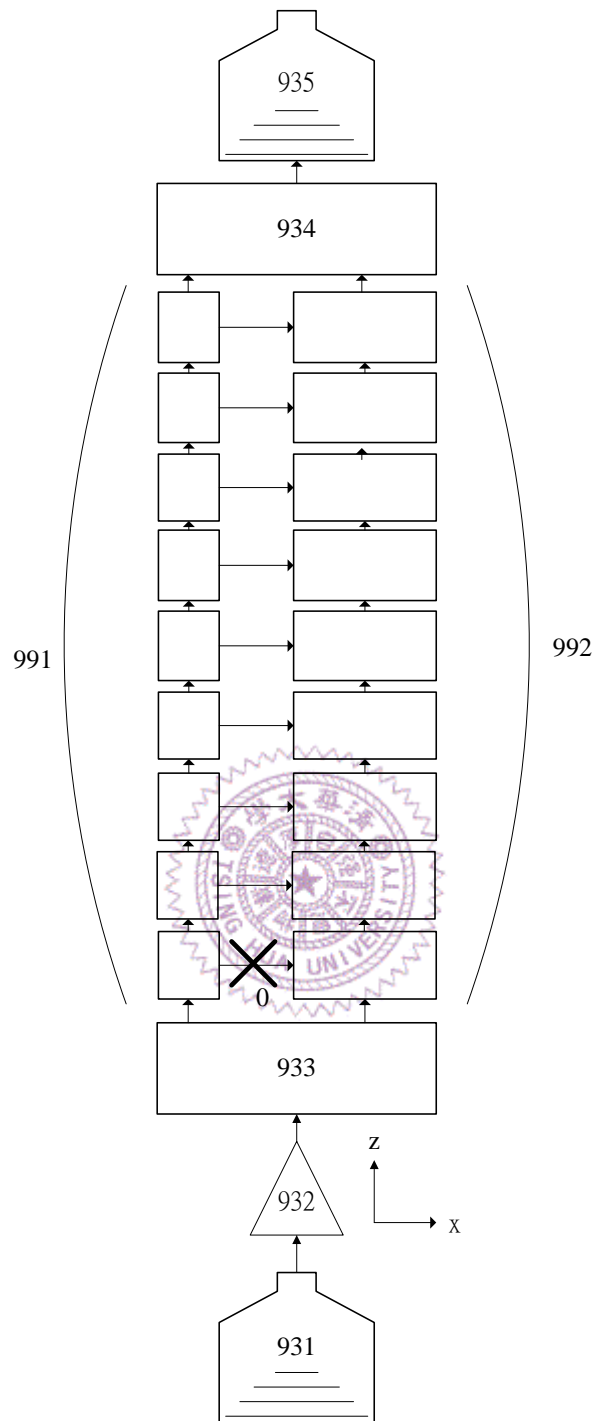


圖 A.2.2.8 橫向流體接點面積為 0 節點圖

```

C:\WINDOWS\system32\cmd.exe
tpfh2o -W tpfh2on
RELAP5-3D:1/Ver:1.3.5  RELAP5-3D INEEL Proprietary Version

:
: Copyright :
: Bechtel BWXT Idaho, LLC :
: 1997, 1999 :
: All Rights Reserved :
:

Thermodynamic properties files used by this problem:

Thermodynamic properties file for h2o obtained from lfn tpfh2o,
tpfh2o version 1.1.1, tables of thermodynamic properties of light water

generated on 07/01/05 at 11:17:07 by stgh2o 1.1 (09/07/91)

Start time: 12:34:50
  cputime  prob.time    time step  err.est    Crnt.limit  adv.cnt.
    0.0    0.00000    1.000000E-03  0.00000    0.00000    0

run-time error M6201: MATH
- sqrt: DOMAIN error
Image      PC          Routine      Line      Source
relap5_i8_jessie4 0063E459 Unknown      Unknown      Unknown
relap5_i8_jessie4 0063E253 Unknown      Unknown      Unknown
relap5_i8_jessie4 0063E411 Unknown      Unknown      Unknown
relap5_i8_jessie4 006404D8 Unknown      Unknown      Unknown
relap5_i8_jessie4 0065ED50 Unknown      Unknown      Unknown
relap5_i8_jessie4 0065AF98 Unknown      Unknown      Unknown
relap5_i8_jessie4 0052B72F Unknown      Unknown      Unknown
relap5_i8_jessie4 004639B0 Unknown      Unknown      Unknown
relap5_i8_jessie4 0040C1EC Unknown      Unknown      Unknown
relap5_i8_jessie4 004039D1 Unknown      Unknown      Unknown
relap5_i8_jessie4 004010BF Unknown      Unknown      Unknown
relap5_i8_jessie4 00667F89 Unknown      Unknown      Unknown
relap5_i8_jessie4 006505F4 Unknown      Unknown      Unknown
kernel32.dll      7C817077 Unknown      Unknown      Unknown

G:\relap\bugcase\i8case2>_

```

圖 A.2.2.9 程式無法求解訊息

## 附錄 B

### B.1 模式轉換的原因

本研究未使用 NRC 的 10 CFR Appendix K 模式(以下簡稱 Appendix K 模式)原因如下所列：

- (1) 使用 Appendix K 模式計算多維度元件內中燃料護套表面穩態臨界熱通量，臨界熱通量值計算過小，相同條件下使用一維元件則無此問題，可能是 Appendix K 所使用的臨界熱通量模式在獲取多維度原件結構內的水流性質發生預期外的問題。
- (2) Appendix K 模式要求需計算護套破裂變形與燃料通道阻塞情形，但使用燃料護套變型模式計算暫態時，只要燃料護套發生破裂則出現如附錄 A.2.2.2 所提的破裂訊息與超過設定的最小時步訊息，此經常伴隨如附錄 A.1 所提程式不記錄數據點問題，且程式也常因此發生錯誤而停止運算；燃料護套在暫態中破裂現象應肇始於燃料與護套間隔中的氣體快速受熱而膨脹撐破燃料護套後洩壓，因此理論上此燃料只應破裂一次，但此使用此模式則發生同一燃料熱結構軸向上多處破裂；在一維模式下只有最熱棒，熱通道燃料，平均通道燃料三組熱結構，爐心多維模擬時則有十至數十個燃料熱結構，因此有更多破裂情形發生，也使模擬計算上變得困難，因此使用最佳估算模式時不選用此模式。
- (3) Appendix K 模式要求將最熱棒所在的周圍熱區域獨立出一通道單獨模擬，並且需與平均通道做橫向流動，且獨立出來的通道大小不得超過一個燃料元件大小；因程式計算能力，無法將爐心中每個燃料元件都獨立出來模擬，因此若須單獨獨立一個燃料元件出來模擬時，會有通道大小不同而相併鄰的情形，但如附錄 A.2.2.2 爐心建構(1)，在進行爐心多維度穩態模擬時，鄰近大通道水流會大量經由橫向流體接點流入小通道，使小通道出口水流

激增，違反現實爐心水流情形，因此只能將爐心通道都做成方型且一致大小，再依真實爐心幾何形狀做近似排列，因而無法滿足 Appendix K 模式的要求。

- (4) Appendix K 模式要求衰變熱乘 1.2 倍，總功率乘 1.02 倍；但使用最佳估算模式下，經一維模式模擬結果發現燃料護套尖峰溫度高於 2200°F，在此溫度下燃料護套必然變型與破裂並發生爐心熔毀，使得模擬結果不具正確性與參考性(因模式並未包含護套變型與爐心熔毀)，因此需將衰變熱乘 1.0 倍，總功率也乘 1.0 倍，則其燃料護套尖峰溫度模擬結果則遠低於 2200°F，比較如圖 B.1；因此無法滿足 Appendix K 模式的要求。

## B.2 模式加入輻射熱傳模式

本研究雖然去除 Appendix K 的保守假設使用 100% 功率及 1.0 的衰變熱，但在爐心多維度模擬時，最熱棒燃料護套溫度仍高於 2200°F，此種情況下燃料護套必然發生嚴重破裂及變形，但與本研究移除燃料護套變型模式相悖，由國立清華大學認證分析技術研發與應用實驗室建議下加入輻射熱傳模式，因此一維模式加入爐心熱結構輻射熱傳模式輸入檔<sup>[1]</sup>，爐心多維度模擬熱輻射模式則參考此輸入檔並按照 4.2.3 輻射熱傳模式建立之方式完成，圖 B.2 為一維模式與降流區多維度模式使用輻射熱傳模式前後燃料護套尖峰溫度比較，圖 B.3 為爐心多維度模式使用輻射熱傳模式前後燃料護套尖峰溫度的比較，圖 B.4 為爐心與降流區多維度模式使用輻射熱傳模式前後燃料護套尖峰溫度的比較，可以看出加入輻射熱傳模式後燃料護套尖峰溫度均有效降低，並且爐心多維度模式的燃料護套尖峰溫度已低於 2200°F 許多，同時加入輻射熱傳模式前後，爐心多維度模式或爐心與降流區多維度均有通道數越多，燃料護套尖峰溫度越高的情形。

## B.3 最佳估算模式與 Appendix K 模式轉換<sup>[5][6]</sup>

(1) 將緊急注水旁通的依時體積，依時接點及計算邏輯移除，此模式功能為從暫態開始到再注水發生這段時間內，將與緊急爐心注水質量相同的水流從環路中扣除。

(2) 將輸入檔卡號 30000001 第二位改為 1.0 倍的總功率大小；第 5 位改為 1.0 倍，此為衰變熱大小所乘上的放大因子。

(3) 將輸入檔卡號 1 與燃料熱結構起始卡 1CCCG000 第九與第十位輸入資料消去，做為將

APPENDIX K OF 10 CFR 50.46 所特定要求的模式關閉，改為程式預設模式：

- ANS 1971 標準衰變熱模式，程式預設使用 ANS 1973 標準衰變熱模式。
- Baker-Just 鋯金屬-水反應模式(Baker, L. Just, L.C., " Studies of Metal Water Reactions at High Temperatures, III. Experimental and Theoretical Studies of the Zirconium-Water Reaction," ANL-6548, page 7, May 1962),程式預設使用Cathcart 模式(J. V. Cathcart et al., Reaction Rate Studies, IV, Zirconium Metal-Water Oxidation Kinetics ORNL/NUREG-17, Oak Ridge National Laboratory, August 1977.模式).
- Moody臨界流模式(F.J. Moody, "Maximum Flow Rate of a Single Component, Two-Phase Mixture." Journal of Heat Transfer, Trans American Society of Mechanical Engineers, 87, No.1 February, 1965),程式預設使用integral model (J. A. Trapp and V. H. Ransom, "A Choked-Flow Calculation Criterion for Nonhomogeneous, Nonequilibrium Two-Phase Flows," International Journal of Multiphase Flow, 8, 6, 1982,pp. 669-681.)
- 臨界熱通量關係式,根據法規使用以下關係式：
  - A. W 3. L. S. Tong, "Prediction of Departure from Nucleate Boiling for an Axially Non-uniform Heat Flux Distribution," Journal of Nuclear Energy, Vol. 21, 241-248, 1967.

- B. B&W-2. J. S. Gellerstedt, R. A. Lee, W. J. Oberjohn, R. H. Wilson, L. J. Stanek, "Correlation of Critical Heat Flux in a Bundle Cooled by Pressurized Water," Two-Phase Flow and Heat Transfer in Rod Bundles, ASME, New York, 1969.
- C. Hench-Levy. J. M. Healzer, J. E. Hench, E. Janssen, S. Levy, "Design Basis for Critical Heat Flux Condition in Boiling Water Reactors," APED-5186, GE Company Private report, July 1966.
- D. Macbeth. R. V. Macbeth, "An Appraisal of Forced Convection Burnout Data," Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers, 1965-1966.
- E. Barnett. P. G. Barnett, "A Correlation of Burnout Data for Uniformly Heated Annuli and Its Uses for Predicting Burnout in Uniformly Heated Rod Bundles," AEEW-R 463, 1966.
- F. Hughes. E. D. Hughes, "A Correlation of Rod Bundle Critical Heat Flux for Water in the Pressure Range 150 to 725 psia," IN-1412, Idaho Nuclear Corporation, July 1970.

預設使用查表法(D. C. Groeneveld, S. C. Cheng, and T. Doan, "1986 AECL-UO Critical Heat Flux Lookup Table," Heat Transfer Engineering, 7, 1-2, 1986, pp. 46-62.).

沖放中後臨界熱通量薄膜沸騰使用Groeneveld flow film boiling correlation (equation 5.7 of D.C. Groeneveld, "An Investigation of Heat Transfer in the Liquid Deficient Regime," AECL-3281, revised December 1969)壓力低於奇異點時使用Modified Dittus-Boelter Correlation,預設使用L. A. Bromley, "Heat Transfer in Stable Film Boiling," Chemical Engineering Progress, 46,1950, pp. 221-227.

- 進入再泛水階段前的熱傳模式鎖定以防止熱傳模式返回成核沸騰及過渡沸騰的熱傳模式。
- 壓水式反應器的再注水與再泛水熱傳模式。

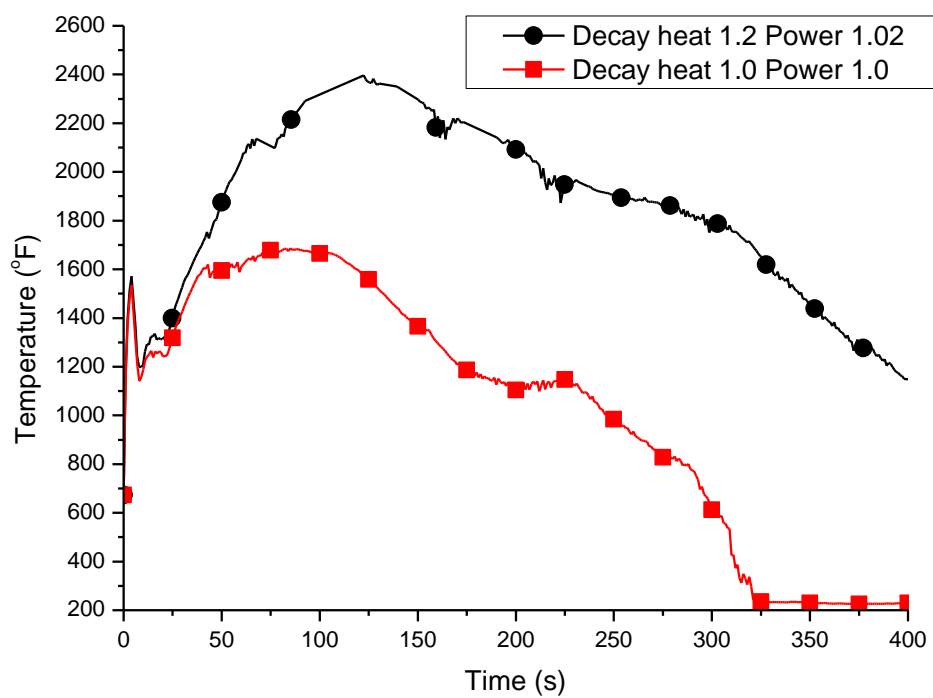


圖 B.1 燃料尖峰溫度與衰變熱及總功率關係圖

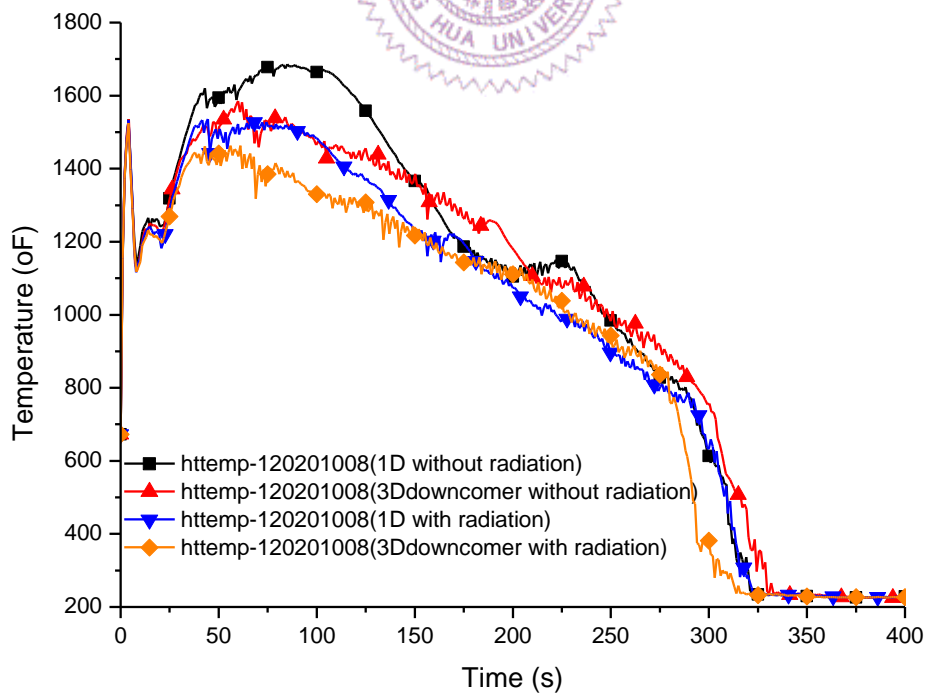


圖 B.2 一維模式與降流區多維度模式使用輻射熱傳模式前後燃料護套尖峰溫度

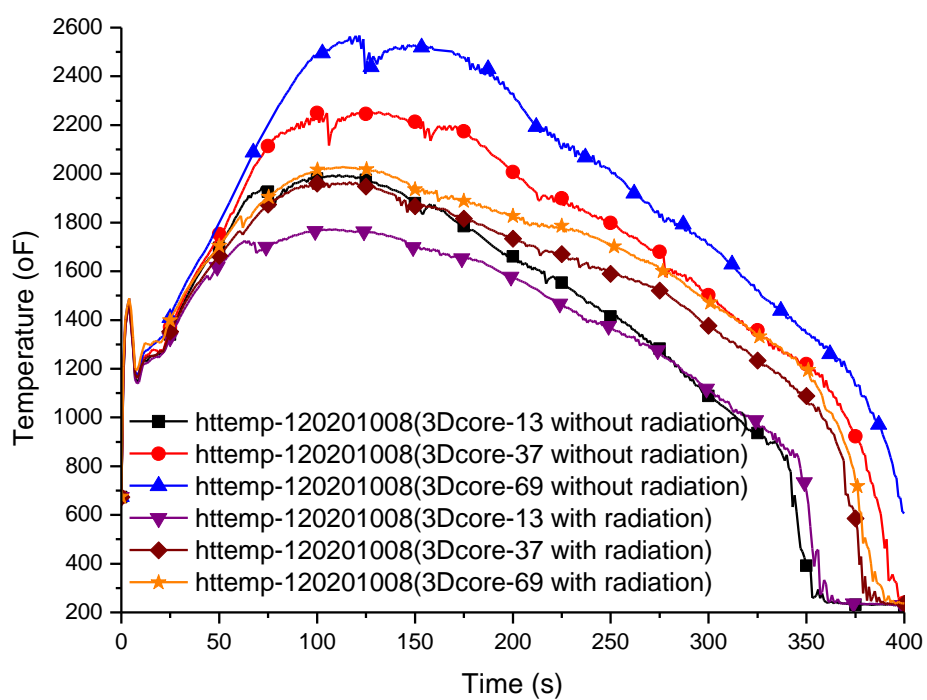


圖 B.3 爐心多維度模式使用輻射熱傳模式前後燃料護套尖峰溫度

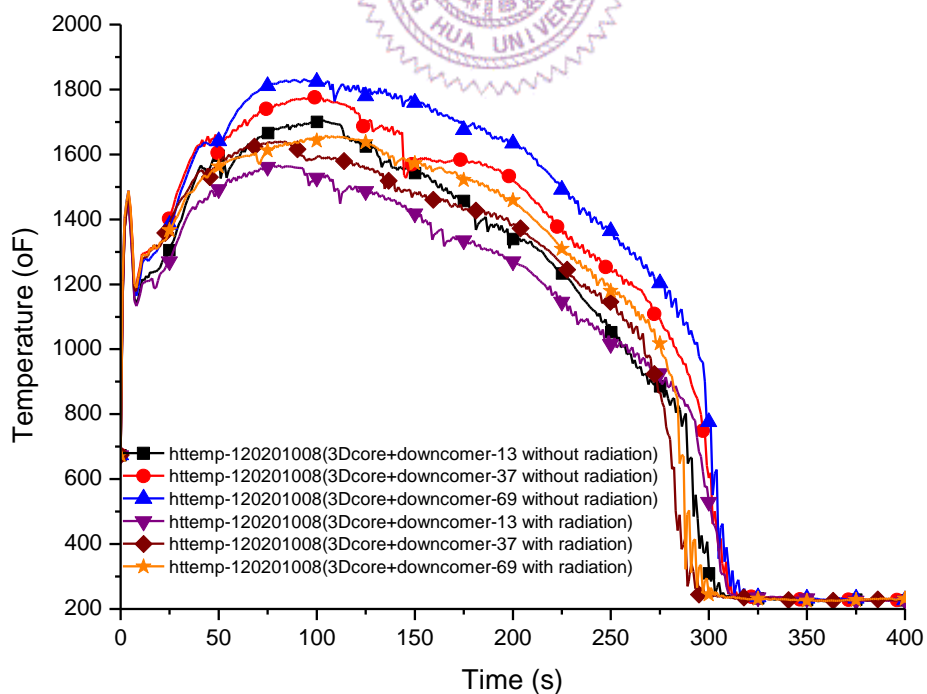


圖 B.4 爐心與降流區多維度模式使用輻射熱傳模式前後燃料護套尖峰溫度