

國立清華大學

碩士論文

LOFT 設施 L2-5 測試之 RELAP5-3D/K 爐心與降流區多  
維度模擬結果與分析

**Phenomenal Investigations of the Thermal-hydraulic  
Responses of Multi-Dimensional Simulation and  
Modeling in Core and Downcomer during the L2-5  
Test of LOFT Using RELAP5-3D/K**

系別：工程與系統科學系

組別：核子工程組

指導教授：李敏 Min Lee

學號姓名：9611513 江庚晏 Keng-Yen Chiang

中華民國九十八年七月

## 中文摘要

本研究利用 RELAP5-3D/K 模擬 LOFT (Loss of Fluid Test) 設施 L2-5 冷卻水流失事故 (Loss of Coolant Accident, LOCA) 測試。分析時，爐心和降流區 (Downcomer) 元件立體化的模擬採用程式之多維度元件 (Multi-Dimensional Component)。期望量化以多維度元件模擬爐心和降流區，可以增加冷卻水流失事故分析的安全餘裕 (Safety Margin)，以利於提升核電廠的功率。分析結果顯示，採用 RELAP5-3D 立體化多維度元件模擬爐心與降流區所預測之燃料護套溫度較原先一維度案例低約 180°F。爐心立體化會造成沖放期 (Blowdown) 之燃料護套尖峰溫度較未立體化的分析結果為高。立體化的爐心可以觀測到煙囪效應，即冷卻水會自較冷的區域進入溫度較高的熱通道，有效地降低事故中的護套最高溫度。多維度降流區模擬所預測之降流區橫向流動 (Cross Flow) 情形較一維度降流區模擬結果低，亦即有較多之注入的緊急冷卻水可以由降流區進入壓力槽底部區間，而提早進入再泛水階段 (Reflood); 提早進入再泛水階段亦可降低冷卻水流失事故之燃料棒護套尖峰溫度。

關鍵字：核能安全、暫態分析、冷卻水流失事故

## Abstract

In this study, RELAP5-3D/K code is used to simulate the L2-5 test of Loss of Fluid Test (LOFT) facility. RELAP5-3D is a multi-dimensional reactor system thermal-hydraulic analysis code. In the present simulation, the core and downcomer are modeled as inconnected three dimensional components. The results of the simulation are compared with the results of the RELAP5-3D/K one-dimensional analysis. The purpose of this study is to qualify the margin of the safety analysis related to the design criteria of loss of coolant accident.

The results show that the peak cladding temperatures (PCT) as predicted by the 3-D model of core and downcomer is about 180°F lower than that of the 1-D model of the corresponding components. The results show that the predicted rise of cladding temperature in the blowdown phase of accident is higher in the case that core is simulated three-dimensionally. It is also demonstrated that the chimney effect in the 3-D core simulation is stronger than the case of 1-D simulation of core, which tends to lower the PCT in LOCA analysis. Chimney effect is referred as the coolant flow rate in a hot channel will increase by sucking in the coolant from nearby colder region. Modeling the downcomer three-dimensionally has a tendency to reduce the predicted crossflow in the annular region surrounded the core barrel. It implies that large amount of injected emergency cooling water will flow downward into the lower plenum. The initiation of core reflooding will be earlier for the core with three-dimensional simulation of downcomer.

Keywords: Nuclear Safety 、 Transient Analysis 、 LOCA

## 致 謝 辭

天道酬勤。

努力是有回報的。雖然，回報不見得會顯現在最近的結果中，但我確信，沒有一條路是白走的…所付出過的努力，都會刻劃在靈魂中，成為你的一部份。也許，回報是在過程中，是在一次又一次對自己挑戰成功後，縱聲豪邁地長笑；也許，回報是在結果中，是在關鍵時刻擊出紅不讓後，狂野興奮地怒吼。六年清華歲月中，我體悟到，凡努力過必留下痕跡。

在實驗室，無數個 RELAP5 程式畫面閃過腦海；在圖書館，有念不完的書，還有 GRE 陪我到閉館。在重量訓練室，我和黑人同學比臥推，槓片越掛越多、黑人同學的眼睛越睜越大…最後他把已經沒力的我從史密斯機解救下來時，我們大笑。在籃球場，接球、出手、得分！我總是能在這找回我的信心和活力。在清華的日子是充實又快樂的。

當然，也有過的很不順的時候。大一剛進去，看著室友對著一張三位數分數的考卷喃喃唸著「幹麻扣我分數？」，再算一算寢室其他三個人加起來總分竟還沒他多的時候，我真想把他的頭插進他的電腦螢幕裡。還有，大二的時候呢，電子學期中考拿了「B」。咦？等等，為什麼電子學這種理工科會有「B」這種評分出現啊？又不是魯迅文學選修或是論語的考卷。再仔細看，噢，原來不是「B」，是「13」…我也只能對自己說，這分數跟名震兩岸三地的神射手羅興樑的背號是一樣的，他是你最喜歡的球員之一，很酷吧？

接著，大三的時候我，嗯，丟臉的事已經夠多了，不、說、了，哈，跳過。

感謝爸媽一路給予的物質上和精神上的強力支持，讓我能在清華屢屢克服困難、順利畢業。感謝在交大唸書的老弟，一起把清大宵夜街從頭吃到尾，一起挑戰留學的夢想，別人都說我們是長的很像的好朋友。感謝實驗室夥伴們的相互切磋砥礪和陪伴，也感謝梁博士在上海交大時細心地指點論文，以及生活上給予的照顧。

感謝我的指導教授李敏老師的指導。除了招牌熱力學之外，我還從老師那學到了很多核工的相關知識以及生涯規劃的安排。參加第四代核反應器國際研討會，親眼目睹眾多核工專家以流利的英文發表談話後，更堅定了我向美國留學挑戰的決心。對我來說，核工是這個世界上最酷的學問。

感謝李敏老師另外為我開的「李大俠中文寫作私塾坊」系列課程。真的很感謝老師一次又一次、很有耐心地修改我的論文內容，還告訴我為什麼要這樣改，為什麼敘述的順序要這樣安排之類的細節。我和老師之間把論文 word 檔來來回回地寄了十幾次，最後終於完成了現在大家看到的這篇文稿。對我來說，李老師是這星球上最棒的教授~！

# 目錄

中文摘要	i
英文摘要	ii
致謝詞	.iii
目錄	iv
圖目錄	vii
表目錄	xv
第一章 序論	1
1.1 前言	1
1.2 研究動機	3
1.3 研究方法	4
1.4 論文架構	5
第二章 Loss-of-Fluid Test 介紹	6
2.1 LOFT 簡介	6
2.1.1 LOFT 的主要附屬設施	6
2.1.2 LOFT 的爐心參數	7
2.2 LOFT L2-5 試驗簡介	9
2.2.1 LOFT L2-5 試驗	9
2.2.2 LOFT L2-5 事件序列 (Scenario) 和實驗初始條件	10
第三章 RELAP5 程式介紹	18

3.1	RELAP5 發展簡介	18
3.2	RELAP5-3D 簡介	19
3.3	保守性冷卻水流失事故分析方法簡介	22
3.4	RELAP5-3D 多維度元件簡介	31
3.4.1	座標軸	32
3.4.2	各項參數	32
第四章	RELAP5-3D 多維度爐心模式的建構	36
4.1	爐心的建構	36
4.1.1	RELAP5-3D LOFT 一維輸入模式	36
4.1.2	多維度爐心輸入模式	36
4.2	建構多維度爐心所遭遇的困難及解決方法	38
4.2.1	多維度元件和一維度元件的相互連接	38
4.2.2	Branch 元件連接點數上限	38
4.2.3	爐心周圍元件相連接的問題	39
4.2.4	多維度爐心格點數之選取	40
4.2.5	多維度爐心最大時步之選取	42
第五章	多維度爐心的模擬結果	53
5.1	燃料護套尖峰溫度值預測結果比較	53
5.2	煙囪效應的觀測	55
5.2.1	煙囪效應簡介	56
5.2.2	煙囪效應的驗證	57

5.3	冷卻水流動情形比較	59
5.4	其他參數比較和結語	66
第六章	降流區立體化及分析結果	90
6.1	壓力槽降流區模式建構	91
6.1.1	降流區一維度模式說明	91
6.1.2	降流區三維度降流區模式的建構	92
6.2	三維度降流區模擬結果和一維度降流區模擬結果的比較	94
6.2.1	燃料護套尖峰溫度值預測結果比較	94
6.2.2	冷卻水流動情形比較	96
6.2.3	其他參數比較和結語	99
第七章	爐心和降流區立體化結果及分析	116
7.1	立體化爐心和降流區案例預測結果和未立體化案例預測結果比較	116
7.1.1	燃料護套尖峰溫度值	116
7.1.2	冷卻水流動情形比較	119
7.1.3	其他參數比較和結語	121
第八章	結論與建議	136
8.1	結論	136
8.2	建議與未來工作	137
參考文獻		140
附錄 A		142
附錄 B		143

## 圖目錄

圖 2.1	LOFT 實驗設備示意圖	12
圖 2.2	LOFT 燃料模塊組件示意圖	13
圖 2.3	LOFT 壓力槽截面示意圖	14
圖 2.4	LOFT 爐心截面示意圖	15
圖 3.1	RELAP 程式發展簡史	34
圖 4.1	LOFT 一維輸入模式節點	45
圖 4.2	一維爐心模式之示意圖	46
圖 4.3	LOFT 爐心截面示意圖	47
圖 4.4	多維度爐心建構過程示意圖	48
圖 4.5	多維度爐心結構示意圖	48
圖 4.6	LOFT 一維爐心和三維度爐心連接情形比較圖	49
圖 4.7	爐心格點數靈敏度分析之 2 x 2 x 12 切割示意圖	50
圖 4.8	爐心格點數靈敏度分析之 4 x 4 x 9 切割示意圖	51
圖 4.9	針對爐心分割細緻度所做靈敏度分析燃料護套尖峰溫度值比較情形	52
圖 4.10	針對最大時步所做靈敏度分析燃料護套尖峰溫度值比較情形	53
圖 5.1	發生燃料護套尖峰溫度值處之護套溫度和實驗資料 (立體化爐心模擬的影響)	69
圖 5.2	發生燃料護套尖峰溫度值處之臨界熱通量 (立體化爐心模擬的影響)	70
圖 5.3	燃料護套尖峰溫度值處之熱通量 (立體化爐心模擬的影響)	70
圖 5.4	發生燃料護套尖峰溫度值處所釋放之累積熱通量	



(立體化爐心模擬的影響) . . . . .	71
圖 5.5 爐心熱通道之覆水淬冷 (Quench) 位置 (立體化爐心模擬的影響) . .	71
圖 5.6 爐心熱通道液態水位 (Collapsed Water Level)	
(立體化爐心模擬的影響) . . . . .	72
圖 5.7 冷卻水流入熱通道入口之累積流量 (立體化爐心模擬的影響) . . . .	72
圖 5.8 熱通道第四階 (Elevation 4) 冷卻水液態速度	
(立體化爐心模擬的影響) . . . . .	73
圖 5.9 熱通道第四階 (Elevation 4) 冷卻水汽態速度	
(立體化爐心模擬的影響) . . . . .	73
圖 5.10 熱通道第七階 (Elevation 7) 冷卻水液態速度	
(立體化爐心模擬的影響) . . . . .	74
圖 5.11 熱通道第七階 (Elevation 7) 冷卻水汽態速度	
(立體化爐心模擬的影響) . . . . .	74
圖 5.12 熱通道第十一階 (Elevation 11) 冷卻水液態速度	
(立體化爐心模擬的影響) . . . . .	75
圖 5.13 熱通道第十一階 (Elevation 11) 冷卻水汽態速度	
(立體化爐心模擬的影響) . . . . .	75
圖 5.14 熱通道第四階 (Elevation 4) 冷卻水液態表相速度	
(立體化爐心模擬的影響) . . . . .	76
圖 5.15 熱通道第七階 (Elevation 7) 冷卻水液態表相速度	
(立體化爐心模擬的影響) . . . . .	76

圖 5.16	熱通道第十一階 (Elevation 11) 冷卻水液態表相速度 (立體化爐心模擬的影響)	77
圖 5.17	熱通道第四階 (Elevation 4) 冷卻水汽態表相速度 (立體化爐心模擬的影響)	77
圖 5.18	熱通道第七階 (Elevation 7) 冷卻水汽態表相速度 (立體化爐心模擬的影響)	78
圖 5.19	熱通道第十一階 (Elevation 11) 冷卻水汽態表相速度 (立體化爐心模擬的影響)	78
圖 5.20	熱通道出口冷卻水累積流量 (立體化爐心模擬的影響)	79
圖 5.21	近冷端破口之質量流率 (立體化爐心模擬的影響)	79
圖 5.22	近熱端破口之質量流率 (立體化爐心模擬的影響)	80
圖 5.23	破口兩端流出冷卻水累積流量加總結果 (立體化爐心模擬的影響)	80
圖 5.24	反應器壓力槽噴嘴破口側冷端迴路之質量流率 (立體化爐心模擬的影響)	81
圖 5.25	反應器壓力槽噴嘴破口側冷端迴路之累積流量 (立體化爐心模擬的影響)	81
圖 5.26	壓力槽入口下部環型體積之流體橫流接點冷卻水質量流率 (立體化爐心模擬的影響)	82
圖 5.27	壓力槽入口下部環型體積之流體橫流接點冷卻水累積流量 (立體化爐心模擬的影響)	82
圖 5.28	破口側降流區頂部體積流向降流區中部體積之冷卻水質量流率	

	(立體化爐心模擬的影響) . . . . .	83
圖 5.29	破口側降流區頂部體積流向降流區中部體積之冷卻水累積流量	
	(立體化爐心模擬的影響) . . . . .	83
圖 5.30	降流區中部體積流體橫流接點之冷卻水質量流率	
	(立體化爐心模擬的影響) . . . . .	84
圖 5.31	降流區中部體積流體橫流接點之冷卻水累積流量	
	(立體化爐心模擬的影響) . . . . .	84
圖 5.32	冷卻水於降流區下部體積流向反應器底部空間之質量流率	
	(立體化爐心模擬的影響) . . . . .	85
圖 5.33	冷卻水於降流區下部體積流向反應器底部空間之累積流量	
	(立體化爐心模擬的影響) . . . . .	85
圖 5.34	降流區水位高度 (立體化爐心模擬的影響) . . . . .	86
圖 5.35	反應器底部空間之冷卻水質量 (立體化爐心模擬的影響) . . . . .	86
圖 5.36	冷卻水於熱通道入口之質量流率 (立體化爐心模擬的影響) . . . . .	87
圖 5.37	連接第四階熱通道和第四階一般通道之流體橫流接點質量流率	
	(立體化爐心模擬的影響) . . . . .	87
圖 5.38	連接第四階熱通道和第四階一般通道之流體橫流接點累積流量	
	(立體化爐心模擬的影響) . . . . .	88
圖 5.39	熱通道爐心入口處冷卻水液態溫度 (立體化爐心模擬的影響) . . . . .	88
圖 5.40	熱通道爐心入口處冷卻水汽態溫度 (立體化爐心模擬的影響) . . . . .	89
圖 5.41	一次側迴路系統壓力 (立體化爐心模擬的影響) . . . . .	89

圖 5.42	熱通道進出口壓差（立體化爐心模擬的影響）	90
圖 6.1	立體化降流區示意圖	103
圖 6.2	於發生燃料護套尖峰溫度值處之護套溫度和實驗資料 （立體化降流區模擬的影響）	104 105
圖 6.3	燃料棒護套最熱處臨界熱通量（立體化降流區模擬的影響）	105
圖 6.4	燃料棒護套最熱處熱通量（立體化降流區模擬的影響）	105
圖 6.5	爐心熱通道之覆水淬冷（Quench）位置 （立體化降流區模擬的影響）	106 106
圖 6.6	熱通道爐心液態水位（Collapsed Water Level） （立體化降流區模擬的影響）	106 106
圖 6.7	破口流出累積流量隨時間變化情形（立體化降流區模擬的影響）	107
圖 6.8	反應器壓力槽噴嘴破口側冷端迴路之累積流量 （立體化降流區模擬的影響）	107 107
圖 6.9	破口側壓力槽入口底部環型體積流向降流區頂部體積之冷卻水累積流量 （立體化降流區模擬的影響）	108 108
圖 6.10	降流區中部體積流體橫流接點之質量流率 （立體化降流區模擬的影響）	108 108
圖 6.11	降流區中部體積流體橫流接點之累積流量 （立體化降流區模擬的影響）	109 109
圖 6.12	降流區底部體積流體橫流接點之質量流率 （立體化降流區模擬的影響）	109 109

圖 6.13	降流區底部體積流體橫流接點之累積流量	
	(立體化降流區模擬的影響)	110
圖 6.14	降流區底部流向反應器底部空間冷卻水質量流率	
	(立體化降流區模擬的影響)	110
圖 6.15	降流區底部流向反應器底部空間冷卻水累積流量	
	(立體化降流區模擬的影響)	111
圖 6.16	降流區液態水位高度 (Collapsed Water Level)	
	(立體化降流區模擬的影響)	111
圖 6.17	反應器底部空間之冷卻水存量	
	(立體化降流區模擬的影響)	112
圖 6.18	一次側系統壓力 (立體化降流區模擬的影響)	112
圖 6.19	爐心熱通道進出口壓力差 (立體化降流區模擬的影響)	113
圖 6.20	反應器底部空間之硼濃度 (立體化降流區模擬的影響)	113
圖 6.21	爐心熱通道入口之液態空泡分率 (立體化降流區模擬的影響)	114
圖 6.22	緊急爐心旁通冷卻水質量流率 (立體化降流區模擬的影響)	114
圖 6.23	緊急爐心旁通冷卻水累積流量 (立體化降流區模擬的影響)	115
圖 6.24	緊急爐心冷卻系統輸出冷卻水累積流量	
	(立體化降流區模擬的影響)	115
圖 7.1	於發生燃料護套尖峰溫度值處之護套溫度和實驗資料比較情形	
	(立體化爐心和立體化降流區模擬的影響)	122
圖 7.2	燃料護套尖峰溫度值比較情形	

(立體化爐心和立體化降流區模擬的影響) . . . . .	123
圖 7.3 爐心熱通道之覆水淬冷 (Quench) 位置	
(立體化爐心和立體化降流區模擬的影響) . . . . .	124
圖 7.4 熱通道爐心液態水位 (Collapsed Water Level)	
(立體化爐心和立體化降流區模擬的影響) . . . . .	124
圖 7.5 燃料棒護套最熱處臨界熱通量	
(立體化爐心和立體化降流區模擬的影響) . . . . .	125
圖 7.6 燃料棒護套最熱處熱通量	
(立體化爐心和立體化降流區模擬的影響) . . . . .	125
圖 7.7 燃料棒護套最熱處累積熱通量	
(立體化爐心和立體化降流區模擬的影響) . . . . .	126
圖 7.8 冷卻水流入熱通道中累積流量	
(立體化爐心和立體化降流區模擬的影響) . . . . .	126
圖 7.9 破口流出累積流量 (立體化爐心和立體化降流區模擬的影響) . . .	127
圖 7.10 破口側壓力槽入口底部環型體積流向降流區頂部體積之冷卻水累積流量	
(立體化爐心和立體化降流區模擬的影響) . . . . .	127
圖 7.11 降流區中部體積流體橫流接點之累積流量	
(立體化爐心和立體化降流區模擬的影響) . . . . .	128
圖 7.12 降流區底部體積流體橫流接點之質量流率	
(立體化爐心和立體化降流區模擬的影響) . . . . .	128
圖 7.13 降流區底部體積流體橫流接點之累積流量	

	(立體化爐心和立體化降流區模擬的影響)	129
圖 7.14	降流區底部流向反應器底部空間冷卻水累積流量	
	(立體化爐心和立體化降流區模擬的影響)	129
圖 7.15	降流區液態水位高度 (Collapsed Water Level)	
	(立體化爐心和立體化降流區模擬的影響)	130
圖 7.16	反應器底部空間之冷卻水存量	
	(立體化爐心和立體化降流區模擬的影響)	130
圖 7.17	爐心熱通道入口冷卻水質量流率	
	(立體化爐心和立體化降流區模擬的影響)	131
圖 7.18	一次側系統壓力 (立體化爐心和立體化降流區模擬的影響)	131
圖 7.19	反應器底部空間之硼濃度	
	(立體化爐心和立體化降流區模擬的影響)	132
圖 7.20	爐心熱通道入口之液態空泡分率	
	(立體化爐心和立體化降流區模擬的影響)	132
圖 7.21	緊急爐心旁通冷卻水累積流量	
	(立體化爐心和立體化降流區模擬的影響)	133
圖 7.22	熱通道第十一階冷卻水汽態速度	
	(立體化爐心和立體化降流區模擬的影響)	133
圖 7.23	熱通道第十一階冷卻水液態速度	
	(立體化爐心和立體化降流區模擬的影響)	134



## 表目錄

表 2.1	L2-5 試驗重要事件依時列表	16
表 2.2	L2-5 試驗各項參數初始條件	17
表 3.1	RELAP5-3D/K/INER 爐心熱傳所選用之模組封包	35
表 3.2	由 RELAP5-3D/INER 轉換成 RELAP5-3D/K/INER 之程式修正列表	36
表 7.1	未立體化案例和立體化案例比較情形	135





# 第一章 序 論

## 1.1 前言

功率提升 (Power Uprate) 是當今國際核能發電的潮流，意指將當前商用核電廠所運轉之最大功率值在安全許可的範圍內做向上提升，使得反應器中產生更多熱能，透過汽機所轉換的電能也因此增加。

國際石化燃料價格的飆漲以及呼籲降低二氧化碳排放量的趨勢都讓核能發電的重要性日益突顯。奇異公司 (General Electric) 總裁兼核子運轉部門執行長 Andy White 說：“就經濟層面考量，同樣是發出百萬瓦的電，比較燃煤和天然氣發電機組和核能機組之後，你會發現核能發電的價值所在。也正是因為如此，我們嘗試著將核能發電的效益發揮到最大。”

美國核能管制委員會 (Nuclear Regulatory Commission, NRC) 於 1977 年核准了第一個功率提升申請案。通過委員會審查後，Baltimore Gas and Electric's Calvert Cliffs 一號機組順利地將輸出功率提升 5.5 %，約兩個月後，該電廠的二號機組亦順利通過功率提升計畫的審查，輸出功率提升幅度同一號機組。截至 2006 年七月為止，總計美國核管會通過了 110 件功率提升的提案，全美國的電力輸出共增加了 4,845 MW。

一般而言，電廠申請進行功率提升的幅度範圍從 0.4 % 到 20 %，且根據所申請功率提升幅度之不同，所應進行的相關調整或是設備更換也各不相同。美國核管會指出，功率提升共分成三種類型，簡述如下：

第一類為 Measurement Uncertainty Recapture Power Uprates，簡稱為 MUR

Power Uprates。功率提升的幅度小於 2.0 %，所增加之安全餘裕來自電廠流量測量裝置不準度 (Uncertainty) 的下降。核能電廠於設計階段之安全分析，對於反應器所能產生的最高熱功率乃是以 102.0 % 額定值為基準。多出來 2.0 % 餘裕，是預留給影響爐心功率計算主要參數—飼水流量 (Feedwater Flow) 的數值在量測時因儀器不準度而造成最多 2.0 % 誤差之空間。然而，隨著科技的日新月異，若採用較先進的量測儀器與技術；比如說，採用較先進的超音波流量計取代原有的文氏管流量計 (Venturi Flowmeter) 即可有效降低飼水流量和蒸汽旁通 (Steam Bypass) 流量不準度，能將測量誤差由原先的 2.0 % 降至約 0.3 %，則電廠可將原設計時保留 2.0 % 之部分餘裕釋放出來運用，於安全無虞的情況下進行功率提升，此即小幅度功率提升。

第二類為 Stretch Power Uprates，所進行功率提昇的幅度高達 7.0 %。此類功率提升是針對原先個別電廠設計即擁有之運轉餘裕所做的餘裕釋放結果，個別電廠進行安全餘裕釋放所需要進行的細節也不盡相同。所增加之餘裕來自於各項子系統運作設定點 (Set point)、運轉程序書 (Operating Procedure) 和技術指引 (Technical Specification) 的修改。在比較少見的情況下，進行此類功率提升時須進行電廠部分零件的更動，像是閥 (Valve) 或泵渦輪推動葉片 (Pump Impeller)。一般而言都是進行小零件更換，不會牽涉到電廠主要設備。

第三類是 Extended Power Uprates，功率提升幅度高達 20.0 %。所進行的工程相當浩大，將電廠的電廠平衡系統 (Balance-of-Plant, BOP) 設備做大幅度的更換，包含高壓渦輪汽機 (High Pressure Turbine)、凝結水泵 (Condensate Pump) 和主要發電機 (Main Generator) …等，除此之外還須更換大量的閥和泵。一般而言，此類功率提升較常見於沸水式反應器 (Boiling Water Reactors, BWRs)，因為沸水式電廠

當初在設計時較壓水式反應器擁有更大的運轉餘裕。

## 1.2 研究動機

冷卻水流失事故 (Loss of Coolant Accident, LOCA) 是核能電廠設計基準事故 (Design Basis Accident, DBA) 中最嚴重的一種。就輕水式反應器而言，特別是壓水式反應器，冷卻水流失事故的嚴重程度會限制反應器運轉功率的提昇幅度。研究報告指出，若於冷卻水流失事故發生期間之燃料護套尖峰溫度值 (Peak Cladding Temperature, PCT) 能降低  $100^{\circ}\text{F}$  的話，則電廠運轉之功率就有再向上提升 10.0 % 之餘裕<sup>[1]</sup>。

壓水式反應器發生冷卻水流失事故後，系統之熱水流反應係在 RELAP5 電腦計算程式上建構一仿真之核電廠反應器系統進行模擬，根據模擬得到的各項參數結果，判定電廠設計與爐心佈局是否符合法規要求。

現有輕水式反應器 (Light Water Reactor, LWR) 預測結果是在全部電廠元件 (Component) 均以一維 (One-Dimensional) 方式進行模擬得到的，包含反應器中較為重要的爐心和降流區部分，亦是以一維的方式來進行模擬。

以 RELAP5 熱流程式模擬反應器系統的暫態或事故反應時，全部的電廠元件，包含反應器中較為重要的爐心和降流區部分，均以一維方式進行模擬，所得重要參數結果，如燃料護套尖峰溫度值 (Peak Cladding Temperature, PCT)、臨界熱通量 (Critical Heat Flux, CHF)、進入再注水 (Refill) 和再泛水 (Reflood) 階段時間點…等等，都是在以一維模擬的前提下所得到的。實際上反應器爐心是立體多維 (Multi-Dimensional Component) 之熱流結構；而降流區為一立體環型通道結構。本研究嘗試將爐心和降流區以更貼近實際情況的多維度方式來進行熱流模擬，能觀測出

於一維模擬中所無法呈現的熱流現象；並對於事故發生後之燃料護套尖峰溫度有更準確之預測。

### 1.3 研究方法

核子動力反應器系統熱流模擬程式 RELAP5-series 中的 RELAP5-3D 具有多維度模擬的功能；模擬時若採用多維度元件 (Multi-Dimensional Component) 來模擬反應器中的元件，將能呈現流體多維度流動的行為。在設置多維度元件時，使用者必須自行鍵入所需元件的形狀、尺寸、流經元件的工作流體性質、和外部相連接的流體接點 (Junction) …等必要資訊，並自行設定相對應的立體座標位址，使得該立體元件能精準的和其他反應器元件相連接，工作流體能在由多維度元件和一維度元件所組成的迴路中流通。關於多維度元件說明和設定將於 3.6 節詳加敘述。本研究將針對 LOFT (Loss of Fluid Test) L2-5<sup>[2]</sup> 熱流試驗 RELAP5-3D 輸入設定檔案 (Input Deck) 的爐心部分做巨幅修改，將原本設定為一維的爐心元件，在不更動原本物理尺寸、形狀和功率分佈的前提下，切割成立體的數百個小區塊來進行熱流模擬。降流區部分則是參考了由梁國興博士所指導的上海交通大學李永兵同學的部分碩士畢業論文內容，略作修改，將降流區切割成 12 個小塊，完成降流區部分的立體化。

本研究共進行了四個模擬案例的模擬和探討。除傳統之一維分析案例外，再分別將降流區和爐心元件立體化並觀察、分析所呈現之效應。接著，將立體化爐心元件和立體化降流區元件同時接上系統，觀察並分析所呈現之熱流效應。

## 1.4 論文架構

本研究共分為七章。第一章為序論，包括前言、研究動機、研究方法以及論文架構。第二章為 LOFT 冷卻水流失事故實驗介紹，簡要介紹 LOFT 的發展簡史和設施構造，另外敘述試驗 L2-5 的詳細情形，包括其事件序列 (Scenario) 和實驗結果。第三章是 RELAP5-3D/K 介紹，扼要陳述熱流模擬程式 RELAP5 的發展歷史、RELAP5-3D 的特色、為了符合安全法規 10 CFR 50.46 Appendix K 中法規的要求將 RELAP5-3D 程式所做修改內容以及設定多維度元件的細節。第四章為立體化爐心模擬輸入檔的建構，首先闡述原先的一維爐心模擬架構，本研究採取的多維度爐心模擬架構，以及在建構多維度爐心時所遇上的問題和所採取的解決方式。第五章為多維度爐心的預測結果。另有煙囪效應的簡介和探討。第六章為多維度降流區的建構，說明降流區的立體化過程，以及呈現多維度降流區和一維度降流區預測結果比較。第七章將第五章提及之立體化爐心和第六章提及之立體化降流區合併進行分析，並討論結果。第八章為結論與建議。最末則為參考資料和附錄。

## 第二章 Loss-of-Fluid Test 介紹

本章介紹 Loss-of-Fluid Test 實驗設施（簡稱為 LOFT），將扼要的介紹其發展簡史、設施構造、和爐心參數。另外概要的說明試驗 L2-5，包含簡介以及事件序列。

### 2.1 LOFT 簡介

#### 2.1.1 LOFT 的發展簡史

LOFT (Loss-of-Fluid Test) 實驗設施為一功率為 50 MW 的壓水式反應器，此設備是設計用以模擬當商用壓水式反應器發生冷卻水流失事故時之反應。該設備位於美國愛達荷州的愛達瀑布城 (Idaho Falls)，於 1970 年代末期至 1980 年代中期間運轉。該設備的詳細尺寸是依據功率對體積縮尺 (Power-to-volume Rationale) 的理論。

LOFT 計畫是美國愛達荷州 (Idaho) 愛達荷國家實驗室 (Idaho National Laboratory, INL) 為美國核能管制委員會 (Nuclear Regulatory Commission, NRC) 所執行的其中幾個輕水式反應器研究的實驗計畫之一。LOFT 設施實體模擬商用四環路壓水式反應爐主要組件，以獲取在冷卻水流失事故發生時預期在熱量傳遞、流體動力、核子 (Neutronic) 及結構 (Structural) 過程之實驗資料。LOFT 的計畫目的為透過實驗獲得的數據，評估目前商用壓水式反應器假想冷卻水流失事故分析方法的適切性，及提供改進分析程式所需的資料。其中最重要的專案為評估安全設備的功能，特別是在緊急爐心冷卻系統 (Emergency Core Cooling System, ECCS) 安全餘裕 (Safety Margin) 的量化。

愛達荷國家實驗室坐落於愛達荷州南側，位於愛達荷瀑布城 (Idaho Falls) 西側



40 英哩處，共佔地 569135 英畝。該實驗室為一核子工程科技實驗室，同時也是進行許多核子科技測試的地點，另外於此處也進行放射性廢棄物的處理和貯存任務。此處的核子反應器設施共有 52 座，其中尚有 13 座能運轉，許多核電廠的相關試驗都於此實驗室進行，本研究所探討的試驗 LOCE L2-5 亦於此實驗室所建構的 LOFT 設施上所進行。

如圖 2.1 所示，LOFT 設備包含兩個主要冷卻水環路 (Coolant Loop)；其中一個模擬事故中之完整的正常環路 (Intact Loop)，類比四環路壓水式反應器中的三個環路。此完整冷卻水環路包括了正常運作的蒸氣產生器 (Steam Generator) 以及兩個主冷卻水泵 (Coolant Pump)。調壓槽 (Pressurizer) 亦連接至此正常環路。另一個環路則模擬破口環路 (Broken Loop)。LOFT 的破口環路可藉由流孔 (Orifice) 來模擬各種大小和任意位置的破口。冷卻水管的破裂以快速開啟沖放閥 (Quick-opening Blowdown Valve, QOBV) 模擬。沖放過程的流出的冷卻水由沖放抑壓槽 (Blowdown Suppression Tank) 所收集。由沖放抑壓槽所收集的冷卻水經過淨化的步驟後再注入冷卻水系統。

### 2.1.2 LOFT 的主要附屬設施

LOFT 設備包括五項子系統，分別是反應器、主要冷卻水、沖放抑制、緊急爐心冷卻、及次要冷卻水等五項子系統。各子系統均包含儀器量測裝置，提供在假設冷卻水流失事故及異常暫態情形下系統的熱水流實驗資料以及爐心的反應數據。其設備構造示意圖如圖 2.1<sup>[3]</sup>所示。

LOFT 的反應器中包含環狀的降流區、反應器底部空間、爐心下部支撐板 (Lower Core Support Plate)、爐心和反應器頂部空間。LOFT 設施的緊急爐心冷卻系統

(Emergency Core Cooling System) 包含了氮氣充壓蓄壓槽 (Nitrogen Pressurized Accumulator)、高壓注水系統 (High Pressure Injection System, HPIS) 和低壓注水系統 (Low Pressure Injection System, LPIS)；其功能與商用核能電廠反應器的緊急爐心冷卻系統的功能相同，但在流率以及注水位置上具有更大的選擇彈性。高壓注水泵在揚程 (Head) 為 99.0 公尺的情況下能調整流率的範圍為 0.12 L/s 至 1.7 L/s，氮氣充壓蓄壓槽含有 1.16 立方公尺容積的氮氣，可運作範圍為 0.0 MPa 至 6.9 MPa，並具有一可調整高度之給水用豎管 (Standpipe) 以模擬各種不同大小的液態氮體積。

主要、次要冷卻水和緊急爐心冷卻系統的重要位置會進行流體壓力、溫度、和流率的量測。完整環路和破口環路各有兩處位置設有三射束加瑪密度儀 (Three-beam Gamma Densitometer) 用以測量流體密度，另有 196 個熱偶 (Thermal Couple) 置於爐心內用以偵測燃料棒護套和支撐管 (Supporting Tube) 的溫度。中子通量則是由四個設於固定位置的偵檢器 (Detector) 偵測；另有四個橫越爐心的探針測量穩態時通量的軸向分佈。

### 2.1.3 LOFT 的爐心參數

如圖 2.2<sup>[4]</sup>所示，LOFT 燃料模塊組件 (Fuel Module) 高 5.3 公尺，重 800 公斤；包含了燃料棒 (Fuel Bundle)、上部支撐結構 (Upper Support Structure) 和量測儀器子元件 (Instrumentation Penetration Subassembly)。爐心部分的尺寸為：直徑 0.6 公尺，燃料棒長度 1.68 公尺。如圖 2.3<sup>[5]</sup>和圖 2.4<sup>[4]</sup>所示。爐心部分有九組燃料元件，就截面上來看是五個正方形和四個三角形，每組燃料組件內部均為 15 x 15 的陣列，用以模擬商用壓水式反應爐的燃料組件。LOFT 爐心燃料棒總數為 1300 根，於



正方形的燃料元件中包含 204 根燃料棒，三角形的燃料元件則包括 72 根燃料棒。如圖 2.4 所示，於爐心中含有四組控制棒，另於爐心中設有多種量測儀器如熱電偶 (Thermocouple)、中子通量偵檢器 (Neutron Flux Detector)、流量計 (Flowmeter)、液態水位探測器 (Liquid Level Detector) 等以便於記錄事故發生時系統各項參數的變化情形，總計於爐心內進行量測擷取實驗數據的位置多達 346 處。此外，於控制棒驅動裝置外覆 (Control Rod Drive Mechanism Housing)，設有 40 個磁簧開關 (Reed Switch) 提供控制棒於事故發生時下落直入反應器的各項數據。

## 2.2 LOFT L2-5 試驗簡介

### 2.2.1 LOFT L2-5 試驗

冷卻水流失事故試驗 L2-5 是 LOFT 功率升高實驗系列 L2 中所執行的第三項實驗，於西元 1982 年的 6 月 16 日進行試驗。其目的為，提供在各種緊急爐心冷卻系統條件下，發生冷端管路雙重破口時的熱水流以及燃料行為的實驗數據。此類資料可用於評估和驗證壓水式反應器冷卻水流失事故分析電腦程式中的各項模式。

L2-5 試驗中所達成的主要的初始情況如下：第一，反應器已在穩態功率下運轉了相當長的時間，建立起一近似平衡的分裂產物濃度。第二，在冷卻水流失事故發生的同時也喪失了廠外電力供應來源 (Off-site Power) 且緊急爐心冷卻注水將延遲一段時間，此時間長度將與商用電廠緊急柴油機輸出功率補上電源供應時的延遲時間長度一致。第三，使用最少的緊急爐心冷卻功能。使高壓、低壓注水系統之流率減少，以模擬在每一系統中只有兩具中的一具泵能發揮其功能的情形。

LOCE L2-5 試驗是模擬一個典型的壓水式反應器於冷卻水冷端管路 (Cold Leg) 發生剪應力破壞而造成 200% 雙重裂口的冷卻水流失事故 (LOCA)。試驗起始於破口生

成，主冷卻水泵 (Primary Coolant Pump, PCP) 於破口生成的一秒內跳脫 (Trip)，以模擬廠內電源喪失。於此情況下，高、低壓注水系統的啟動時間也發生延遲。試驗過程起始自冷端管路破裂及其後的沖放階段 (Blowdown)，接著反應槽底部的空間 (Lower plenum) 再被冷卻水注滿，隨後爐心逐漸為冷卻水覆蓋 (Core Reflood)，終止至爐心完全被冷卻水覆蓋 (Corewide Quench)。緊急爐心冷卻系統的運作使得爐心重新為水所覆蓋 (Recovering)、護套淬冷 (Quench)，沒有爐心熔毀的跡象。試驗所得到的燃料護套尖峰溫度值為  $1078 \pm 13 \text{ K}$ 。

### 2.2.2 LOFT L2-5 事件序列 (Scenario) 和實驗初始條件

L2-5 實驗破口事故分析概述情況如下：實驗破口事故起始於 0.0 秒時，在破口環路中的冷卻水流失事故，實驗過程自事故發生冷端管路破裂開始及其後的沖放階段，接著反應槽底部的空間再被冷卻水注滿，然後爐心逐漸再被冷卻水灌滿，最後終止於整個爐心被冷卻水完全覆蓋。

LOFT 實驗設施之 L2-5 試驗之重要事件序列為<sup>[5]</sup>：0.0 秒時試驗開始，破口於冷端管路生成、0.02 秒反應器跳脫 (Trip) 信號送出、0.04 秒模擬破口的快速打開沖放閥門 (Quick Opening Blowdown Valve, QOBV) 進入全開的狀態、0.94 秒一次側冷卻水迴路泵跳脫、9.38 秒蒸氣控制閥門 (Steam Control Valve) 全關、15.4 秒調壓槽淨空、16.8 秒蓄壓槽注水啟動、23.90 秒高壓注水系統啟動、28.47 秒出現燃料護套尖峰溫度值、37.32 秒低壓注水系統啟動、49.60 秒蓄壓槽淨空、65 秒出現燃料護套淬冷 (Quench)。詳細情形請見表 2.1<sup>[5]</sup>。至於試驗各項初始條件請見表 2.2<sup>[5]</sup>。

於 L2-5 試驗輸入設定卡 (Input Deck) 定義進入再注水階段 (Refill) 的條件為：反應器底部空間 (Lower Plenum, Component 215) 的硼濃度超過  $1.0\text{e-}5 \text{ kg/m}^3$ 。

進入再泛水 (Reflood) 的條件則是：反應器底部空間的硼濃度超過  $1.0\text{e-}5 \text{ kg/m}^3$  且  
爐心熱通道入口處 (Junction 225010000) 之液態空泡係數 (Liquid Void Fraction)  
大於 0.4。



## LOFT System Configuration

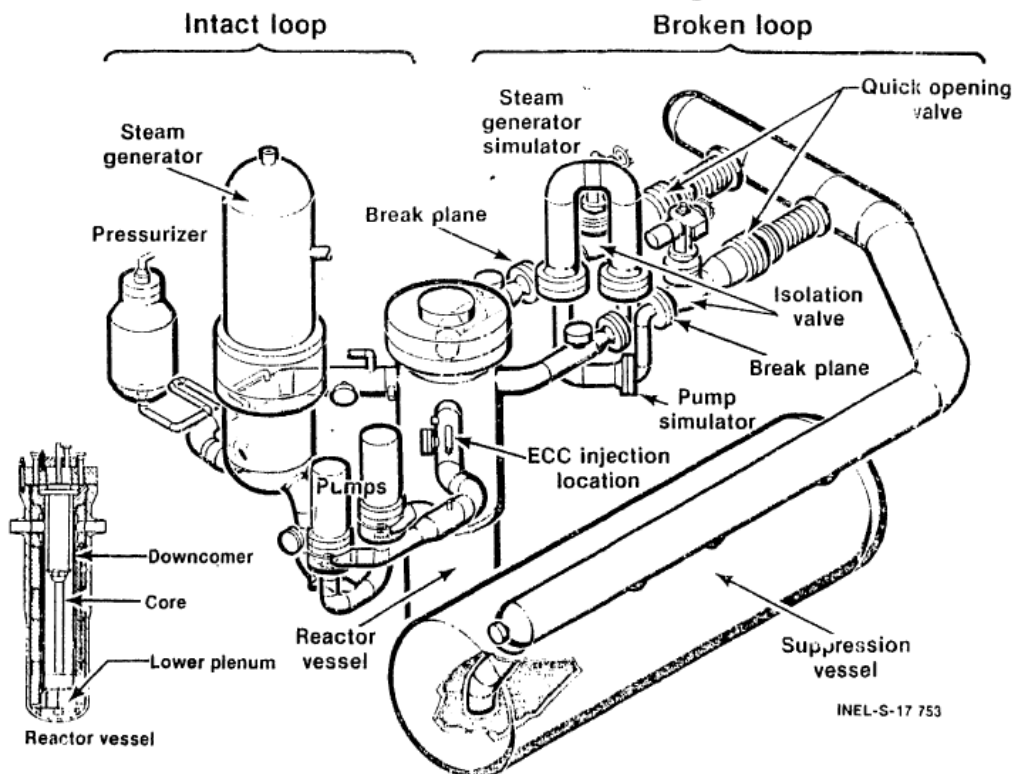


圖 2.1 LOFT 實驗設備示意圖<sup>[3]</sup>

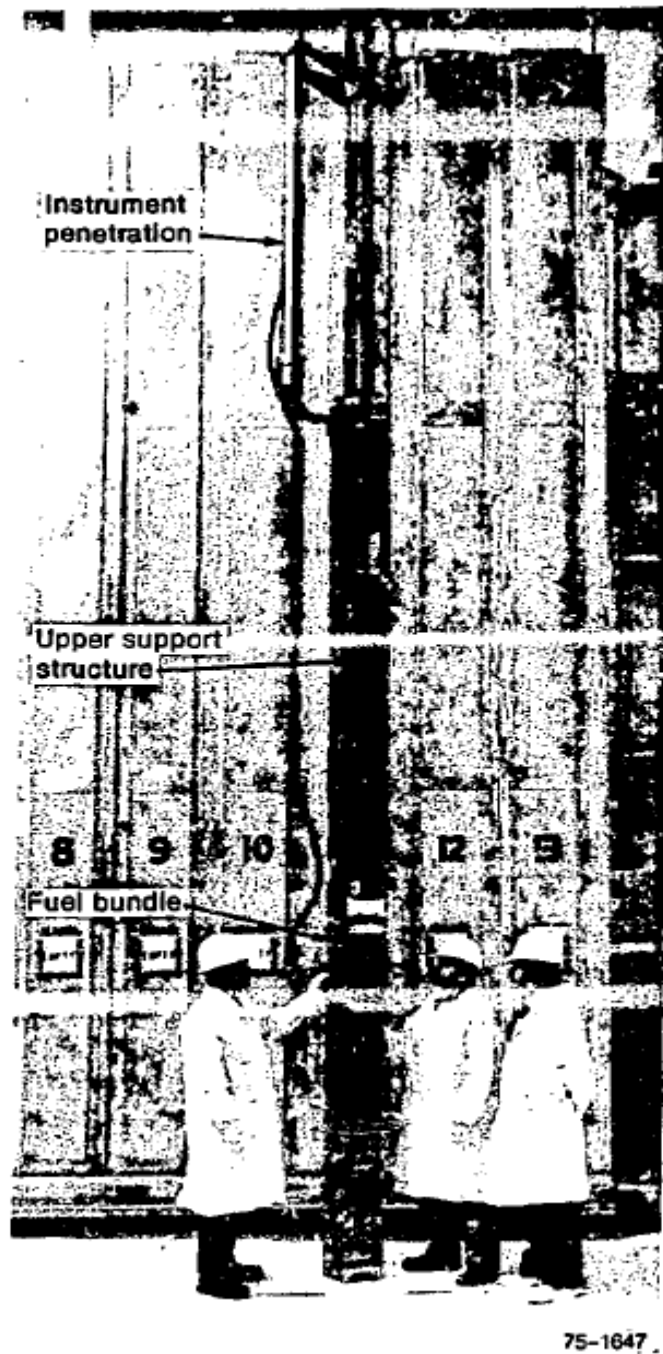


圖 2.2 LOFT 燃料模塊組件示意圖<sup>[4]</sup>

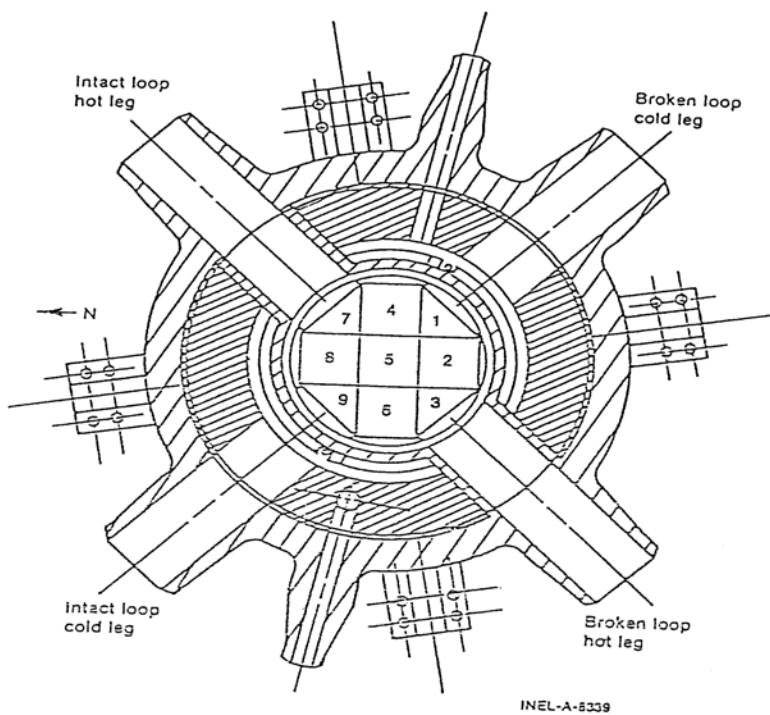


圖 2.3 LOFT 壓力槽截面示意圖<sup>[5]</sup>



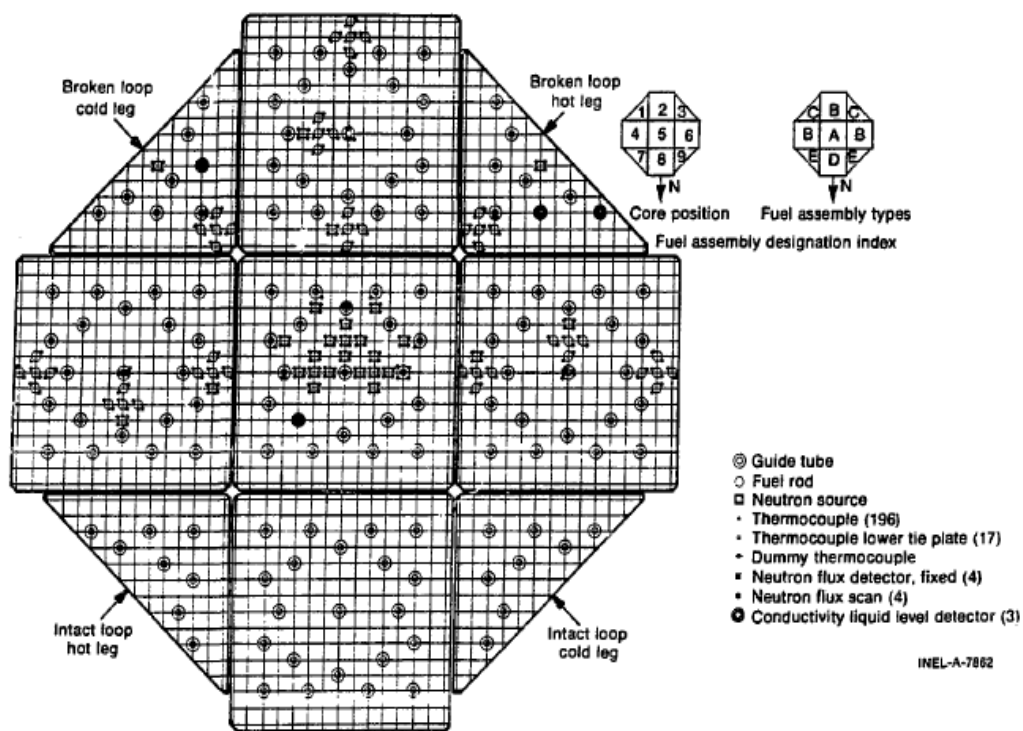


圖 2.4 LOFT 爐心截面示意圖<sup>[4]</sup>

表 2.1 L2-5 試驗重要事件依時列表<sup>[5]</sup>

Event	Time after rupture ( s )
Test initiated	0.0
Reactor trip signal	$0.02 \pm 0.01$
Quick opening blowdown valve fully open	$0.04 \pm 0.01$
Primary coolant pumps tripped	$0.94 \pm 0.01$
Steam control valve fully closed	$9.38 \pm 0.05$
Pressurizer emptied	$15.4 \pm 1.0$
Accumulator injection initiated	$16.8 \pm 0.1$
HPIS injection initiated	$23.90 \pm 0.02$
Maximum cladding temperature reached	$28.47 \pm 0.02$
LPIS injection initiated	$37.32 \pm 0.02$
Accumulator emptied	$49.6 \pm 0.1$
Core cladding quenched	$65 \pm 2$



表 2.2 L2-5 試驗各項參數初始條件<sup>[5]</sup>

Parameter	Measured Value
Intact loop	
Mass flow (kg/s)	$192.4 \pm 7.8$
Hot leg pressure (MPa)	$14.94 \pm 0.06$
Cold leg temperature (K)	$556.6 \pm 4.0$
Hot leg temperature (K)	$589.7 \pm 1.6$
Pressurizer liquid level (m)	$1.14 \pm 0.03$
Average pump speed (rad/s)	$131.5 \pm 1.2$
Pump differential pressure (kPa)	$73.3 \pm 9.2$
Reactor Vessel	
Power (MW)	$36.0 \pm 1.2$
Maximum fuel centerline temperature (K)	$1660 \pm 57$
Differential pressure (kPa)	$28.0 \pm 1.4$
Broken loop	
Cold leg temperature (K)	$554.3 \pm 4.2$
Hot leg temperature (K)	$561.9 \pm 4.3$
Pressurizer	
Liquid level (m)	$1.13 \pm 0.18$
Steam generator secondary side	
Pressure (MPa)	$5.85 \pm 0.06$
Mass flow (kg/s)	$19.1 \pm 0.4$
Feedwater temperature (K)	$482.0 \pm 1.2$
Accumulator	
Pressure (MPa)	$4.29 \pm 0.06$
Temperature (K)	$303.2 \pm 6.1$
Liquid level above standpipe (m)	$1.17 \pm 0.01$
Borated water storage tank	
Temperature (K)	$301.7 \pm 6.1$



### 第三章 RELAP5 程式介紹

#### 3.1 RELAP5 發展簡介

熱流模擬程式 RELAP 擁有長遠的發展歷史，其發展歷史與沿革如圖 3.1 所示。RELAP5 程式各種模組和程式版本的發展約起始於約 25 年前的 RELAP3，是藉由長期且持續的模擬經驗累積才逐漸發展出今日功能強大的 RELAP5 程式版本。其經驗的累積來自於模擬輕水式反應器在發生事故時的爐心行為以及雙相流的變化情形。程式的日漸發展成熟得歸功於大量於實驗設施所取得的實驗數據和程式碼分析結果的相互比對過程。LOFT、PBF、Semiscale、LOBI、ROSA-IV/LSTF、BETHSY 和其他一些實驗計畫都對 RELAP5 程式碼的發展做出了貢獻。

電廠系統熱流分析程式 RELAP5 為輕水式反應器 (Light Water Reactor, LWR) 冷卻系統各式假想事故的最佳估算 (Best-estimate) 程式，是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) 支助下所發展。

RELAP5 程式發展的用途是：提供執照審查計算、評估減輕電廠事故意外影響決策之適切性、評估運轉員指導手冊方針之適切性、以及進行試驗之策劃分析。另可用來驗證使用較簡化模式之電廠分析器 (Plant Analyzer) 的結果，作為分析比對基礎及依據。另可協助相關熱流研究計畫之擬定、執行試驗進行前的預測分析以及試驗後的結果分析以增進試驗結果之實用性。

RELAP5 熱流模擬程式能模擬輕水式反應器的特定暫態，例如：發生冷卻水流失事故時爐心和爐心冷卻系統的耦合行為 (Coupling)，以及暫態像是預期暫態未急停 (Anticipated Transients Without Scram, ATWS)、喪失飼水 (Loss of Feedwater)、

喪失廠外電源 (Loss of Offsite Power)、電廠全黑 (Station Blackout) 和汽機跳脫 (Turbine Trip) … 等等。

RELAP5 是個應用範圍相當廣泛的熱流模擬程式，除了計算反應器冷卻系統之外，尚能用來模擬多種暫態，像是由蒸汽、水、不可濃縮物質和溶質所組成的混合物的暫態。RELAP5 程式中包含了各式模組，以模擬反應器系統中的元件，像是泵 (Pump)、閥門 (Valve)、管路 (Pipe)、熱量釋放/吸收的結構 (Heat Structure)、電加熱裝置 (Electric Heaters)、噴射泵 (Jet Pump)、汽機 (Turbine)、分離器 (Separator)、蓄壓槽 (Accumulator) 和控制系統 (Control System)。此外，尚設有特殊模擬的模組如：Form Loss、反應器點動力學 (Point Kinetics)、工作流體所流經截面積突變 (Flow at an Abrupt Area Change)、工作流體分流 (Branching)、臨界流 (Choked Flow)、硼元素追蹤 (Boron Tracking)、以及不可壓縮氣體粒子之遷移 (Noncondensable Gas Transport) 等。

RELAP5 程式設有高階的輸入卡複查能力，能幫助使用者發現在編製輸入卡時所犯的錯誤或是進行相關設置時的前後不一致性。在輸入卡的設置上也給予多種輸入格式選擇的自由度。另外，尚具有可設定於特定時間點接續模擬 (Restart) 的功能。

### 3.2 RELAP5-3D 簡介

RELAP5/MOD3 是愛達荷國家實驗室在美國核能管制委員會支助下所發展出來的一維熱流模擬程式，RELAP5-3D 是 RELAP5/MOD3 所衍生的一個分支版本，其特色為多維度流體動力學模組 (Multi-dimensional Hydrodynamic Model)、多維度反應器動力學模組 (Multi-dimensional Reactor Kinetics Model) 以及 BPLU 矩陣運算法則 (BPLU Matrix Solver)。

早先於 1980 左右，為了滿足反應器安全評估的需求，美國能源部（Department of Energy, DOE）開始資助 RELAP5 程式的發展。車諾比（Chernobyl）事故發生後，由於 RELAP5 程式本身的廣泛接受度和高應用度，美國能源部選擇 RELAP5 程式作為熱水流分析工具，同時開始支助 RELAP5 的發展，美國能源部總計砸下數百萬美元的資金在 RELAP5 程式的改進和功能增強上，寄望分析結果能具有更高的參考價值，於全美的核電廠安全分析上扮演更重要的角色。

隨著模擬電廠對象的增加，RELAP5 程式本身的模組也跟著增加，才能廣泛且適切地適應各種電廠的特性。就實際的例子而言，沙瓦納河反應器（Savannah River Reactor）的模擬過程就需要進行三維度流體流動模組（Three-dimensional Flow Model）的開發。稍後在計畫資金的挹注下，實驗室團隊又開發出多維度反應器動力學模組，使得程式更趨完善。

在 1980 年美國能源部（DOE）開始發展 RELAP5 系列後，單一版本的程式原始碼可分別符合美國核管會和美國能源部的需求。此單一版本程式原始碼在進行編譯（Compile）之前可進行部分原始碼之修改以符合核管會或是能源部方面的需求。當時間推進到接近 1995 年末左右時，實驗團隊發現，與其維持一個單一版本的程式原始碼，於編譯前做額外的修改以符合能源部或是核管會的不同、甚至有時候是相互衝突的需求，還倒不如將單一版本的程式原始碼逕行劃分為兩個版本，去做個別的細部調整來的有效率。單一版本的程式原始碼就此劃分為兩個版本：其一為核管會版本，即 RELAP5/Mod3；其二為能源部版本，即 RELAP5-3D。

兩個版本中，能源部的版本相較於核管會版本較為優異的地方為完善整合的多維度水力模組和多維度動力學的模擬能力，即能順利的進行各式的假想反應器事故模

擬。其他關於程式方面的加強部分為：針對多維度空間的模擬運算問題置入新的矩陣運算器、新修正過的三相水參數查照表 (Steam Table) 以及運算過程中時步推進 (Time Advancement) 的方式。

多維度流體動力學模組 (Multi-Dimensional Hydrodynamic Model) 讓使用者能精確地進行三維度流體行為做模擬分析。一般而言，此模組大多應用於反應器底部空間 (Lower Plenum)、爐心、反應器頂部空間 (Upper Plenum) 以及降流區 (Downcomer)。此模組不只限定用於反應器壓力槽內的組件，亦可應用於輕水式反應器中的任何區域或是元件。

多維度流體動力學模組藉由小區塊陣列的設定和內建的流體接點，定義出一個多維度元件，並且能依使用者所選取的兩種座標軸建構出多種外型的元件，詳細敘述請見本研究 3.4 小節 “RELAP5-3D 多維度元件簡介”。

在愛達荷國家實驗室的倡議下，北卡州立大學 (North Carolina State University) 的 Paul Turinsky 和他的同事們發展了程式碼 NESTLE code3，為 RELAP5-3D 中的多維度中子動力學模組 (Multi-Dimensional Neutron Kinetics) 奠定了穩固的基礎<sup>[4]</sup>。

NESTLE 程式能計算直角座標 (Cartesian Geometry) 或是六角座標 (Hexagonal Geometry) 中的兩群或四群中子擴散方程式，其計算方法為 Nodal Expansion Method 和非線性疊代法則 (Non-linear Iteration Technique)。該程式於在爐心幾何對稱選項設定上也擁有很大的自由度，在直角座標能選取四分之一、二分之一或者是完整的爐心，而在六角座標中能選取六分之一、三分之一或是完整的爐心。另外，在邊界條件上能選擇的設定有：零通量邊界 (Zero Flux)、單方面允許流通邊界

(Non-reentrant Current)、反射邊界 (Reflective) 和循環邊界條件 (Cyclic Boundary Condition)。另外尚擁有處理穩態特徵值 (Eigenvalue) 和時變中子通量的能力。

BPLU 矩陣運算法則 (Border Profiled Lower Upper Matrix Solver) 的引入使得 RELAP5 程式能在三維度流體行為預測方面運作的更快。對於一維的案例計算, BPLU 矩陣運算法則的引入沒有加速的效應, 但在處理多維度問題的時候 BPLU 矩陣運算法則的引入能顯著的提升計算速度。根據愛達荷實驗室的 RELAP5-3D 程式介紹, DEC alpha 4100 工作站的資料顯示, 針對簡單的三維度運算案例, 引入 BPLU 矩陣運算法則後的運算速度提升了 2.1~3.5 倍<sup>(6)</sup>, 詳細情形請見附錄 A。

### 3.3 保守性冷卻水流失事故分析方法簡介

根據於 1988 年進行修訂的美國聯邦法規 10 CFR50.46 (Acceptance Criteria for Emergency Core Cooling System for Light Water Reactors), 冷卻水流失事故的分析可採用兩種模式; 分別是真實性冷卻水流失事故分析方法 (Realistic LOCA Methodology) 和保守性冷卻水流失事故分析方法 (Conservative LOCA Methodology)。

真實性冷卻水流失事故分析方法所採用的是最佳估計模組 (Best Estimate Model, BE Model), 它的特色是分析冷卻水流失事故的系統反應時, 能提供較符合實際狀況或較準確的計算結果, 唯其結果必須加上不準度 (Uncertainty) 的估算。一般認為, 本方法所擁有的安全餘裕較保守性冷卻水流失事故分析方法所得出之安全餘裕為大。但它的缺點為發展此模式所需要投注的金錢、時間、和資源都是相當可觀的。舉例來說,



西屋公司 (Westinghouse Company) 共動用了 50 人-年的資源，花了約 10 年的時間才完成了真實性冷卻水流失事故分析方法於大破口案例之應用，在 1995 年之前是唯一一案從美國核管會獲到真實性冷卻水流失事故分析方法最終階段認可的公司。

保守性冷卻水流失事故分析方法乃是根據安全法規 10 CFR 50 附錄 K 中之緊急爐心冷卻系統分析評估模式 (ECCS Evaluation Model, EM Model) 部份所發展。它未能像真實性冷卻水流失事故分析方法提供一準確數值外加不準度，但它能對它做出計算結果之保守性做出絕對的保證。

於安全法規 10 CFR 50 附錄 K 中的第一部分可劃分為四個小部份，分別是：於冷卻水流失事故發生時的熱量來源、燃料護套的腫脹和破裂以及燃料棒熱力參數設定、沖放階段的現象、沖放階段後的現象。

RELAP5-3D 為最佳估計模組，行政院原子能委員會核能研究所將安全法規 10 CFR 50 附錄 K 之緊急爐心冷卻系統分析評估模式的要求，納入 RELAP5-3D 成為 RELAP5-3D/K 版本，可提供保守的估算數值。期望日後通過驗證後，可用來執行燃料填換時的冷卻水流失事故執照申請分析。

本研究所使用的熱流模擬程式 RELAP5-3D/K/INER 是由 RELAP5-3D 1.3.5 版所修改而成的。所修改的部分乃是依據安全法規 10 CFR 50 附錄 K 的中所列求事項，分別為分裂產物衰變熱量估算 (Fission Product Decay)、金屬-水反應速率 (Metal-Water Reaction Rate)、臨界流模式 (Discharge Model)、沖放階段的緊急爐心冷卻旁通模式 (ECC Bypass During Blowdown)、臨界熱通量的估算 (Critical Heat Flux, CHF)、沖放階段時熱傳模式的鎖定以防止熱傳模式返回核沸騰和過渡沸騰的熱傳模式 (Prevention to Return to Nucleate Boiling and Transition Boiling during

Blowdown)、沖放階段之後臨界熱通量的熱傳 (Post-CHF Heat Transfer during Blowdown)、沖放階段的爐心水流分佈 (Core Flow Distribution during Blowdown)、壓水式電廠的再泛水速率 (Reflood Rate Calculation for PWRs)、壓水式電廠再注水和再泛水的熱傳 (Refill and Reflood Heat Transfer for PWRs)。

現有的 RELAP5-3D 程式而言，有十點需要做進一步的評估或是做修改以符合安全法規 10 CFR 50 附錄 K 中所列要求，如下所列：

#### (1) 分裂產物衰變熱之估算

RELAP5-3D 中的點式反應爐動態模式 (Point Reactor Kinetics Model) 將瞬發中子 (Prompt Neutrons)、延遲中子 (Delayed Neutrons) 所引發的核分裂反應熱能以及核分裂產物衰變所產生的熱能均都併入計算結果而模擬出冷卻水流失事故發生時的燃料溫度。安全法規 10 CFR 50 附錄 K 中要求：分裂產物衰變熱量必須以 ANS 於 1971 年所訂定的衰變熱功率釋出標準 (American Nuclear Society Standards

“Decay Energy Release Rates Following Shutdown of Uranium-Fueled Thermal Reactors”, October 1971) 之 1.2 倍計算，而運轉期間為無限長。根據 RELAP5-3D 操作手冊<sup>[4]</sup>所述，使用者在進行衰變熱估算時，可選擇以 1973 ANS 或是 1979 ANS/ANSI 為基準的衰變熱估算模組。為了符合安全法規 10 CFR 50 附錄 K 的要求，RELAP5-3D 程式已將 1971 ANS 併入。

#### (2) 金屬-水反應速率

安全法規 10 CFR 50 附錄 K 要求鋁 - 水化學反應所之釋出熱功率、氫氣產生速率、和燃料護套的氧化速度都必須用 Baker-Just 方程式 (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) 計算。現有的 RELAP-3D 程式中所使用的是 Cathcart 模式 (J.V. Cathcart, et al., “Zirconium Metal-Water Oxidation Kinetics IV. Reaction Rate Studies, ” ORNL/NUREG-17, August 1977.)，因此必須將 Cathcart 模式置換成 Baker-Just 方程式才符合安全法規 10 CFR 50 附錄 K 中的規定。Baker-Just 中計算護套氧化速率的式子為：

$$\left(\frac{dr}{dt}\right) = \frac{B}{R_o - r} \text{Exp}\left(-\frac{G}{T_s}\right)$$

其中  $r$  為未進行鋳 - 水反應之金屬半徑自變數， $t$  為時間。 $R_o$  為原先未進行鋳 - 水反應之金屬半徑值。 $B$  為  $\frac{10^{-6} \times A}{2 \times \rho_m^2}$ ， $A$  為指前因子 (Pre-exponential Factor)，其值為  $29.5 \times 10^{-6} \frac{(mg/cm^2)^2}{sec}$ 。 $\rho_m$  為金屬密度，單位為  $mg/cm^2$ 。 $G$  為  $\frac{\Delta E}{R}$ ，其中  $\Delta E$  為活化能 (Activation Energy)，其值為  $45.5 \text{ kcal/mole}$ ， $R$  則是氣體常數 (Gas Constant)，其值為  $1.987 \frac{cal}{mole \cdot K}$ 。 $T_s$  則是氧化物表面溫度值。

再經過推導，最後置入程式中用以計算護套氧化的式子為：

$$AP = 6.98E - 5 \times \text{Exp}\left(\frac{-22898.8}{T_s}\right) \Delta t$$

$$DRP1 = (DRP^2 + AP)^{1/2}。$$

$\Delta t$  為時步 (Time Step) 長短間格， $T_s$  則是氧化物表面溫度值。 $DRP$  為於進入該時步前鋳 - 水反應所蝕刻燃料護套的深度， $DRP1$  則為於進入該時步結束前鋳 - 水反應所蝕刻燃料護套的深度。

以 Cathcart 實驗數據<sup>[8]</sup>評估 Baker-Just 模式置入程式後的結果顯示，



Baker-Just 模式對於 鈾-4 金屬管置於 1500 °C 蒸汽環境之結果有明顯的保守性，對於 鈾-4 金屬管置於 1000 °C 蒸汽環境之結果則預測的相當準確。

### (3) 臨界流模式

根據安全法規 10 CFR 50 附錄 K 的要求，由流體接點流出之流體為雙相流時，流體的流率就必須採用 Moody Model (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) 估算。因此必須在 RELAP5-3D 程式中置入 Moody Critical Flow Model。

### (4) 沖放階段的緊急爐心冷卻旁通模式

安全法規 10 CFR 50 附錄 K 要求，於旁通 (Bypass) 階段由緊急爐心冷卻系統注入反應器壓力槽中的冷卻水必須扣除。RELAP-3D 中並未設有緊急爐心冷卻水旁通模式，程式透過反向極限流限制 (Counter Current Flow Limit, CCFL) 模式的計算結果，決定緊急爐心冷卻水由降流區向下進入反應器壓力槽底部區間 (Lower Plenum) 的流量。程式修改時，另外於反應器頂部空間附近設置一組時變流體接點 (Time Dependent Junction) 和時變流體體積 (Time Dependent Volume)，以扣除旁通階段之流入反應器壓力槽底部區間冷卻水流量。根據反應器頂部試驗設施 (Upper Plenum Test Facility, UPTF) 試驗結果而發展之降流區灌水模式 (Downcomer Flooding Model)，其反向極限流限制之式子為：

$$j_g^{*1/2} + 2.193 j_f^{*1/2} = 0.6208。$$

其中  $j_f^*$  和  $j_g^*$  分別代表無因次液態表相速度和無因次汽態表相速度。

RELAP5-3D 程式中設有硼遷移計算模式，當模式偵測到反應器底部空間的冷卻水

中所含硼濃度超過一定值時，會送出緊急爐心旁通模式終止的信號，時變流體接點和時變體積即停止運作，不再吸取由緊急爐心系統所送入壓力槽的冷卻水。

#### (5) 臨界熱通量 (Critical Heat Flux, CHF) 的估算

安全法規 10 CFR 50 附錄 K 中列出了數個由穩態和暫態的臨界熱通量試驗數據所發展出的關係式。RELAP5-3D 程式採用 1986 AECL-UO Critical Heat Flux Lookup Table 去做臨界熱通量的預測，但這套預測方法並不在安全法規 10 CFR 50 附錄 K 中所列之許可關係式內，因此所用以預測臨界熱通量的關係式必須進行置換。當壓力大於 10.34 MPa 時，所套用的關係式為 B & W-2 (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)。當壓力介於 8.96 和 6.89 MPa 之間時所套用的關係式為 Barnett (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)。當壓力小於 5 MPa 時所套用之關係式則為 Hughes (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)，又稱為 Modified Barnett。當壓力介於以上所列之區間時，所用以估算臨界熱通量之式子為：

$$q_{CHF} = \frac{(P_H - P)q_{CHF_L} + (P_L - P)q_{CHF_H}}{P_H - P_L}。$$

$q_{CHF}$  為臨界熱通量， $P$  為壓力。下標符號  $H$  和  $L$  分別表示執行內插計算時所引用的上端點和下端點。

(6) 沖放階段時熱傳模式的鎖定以防止熱傳模式返回核沸騰和過渡沸騰的熱傳模式

安全法規 10 CFR 50 附錄 K 中規定，在沖放階段期間，一旦某點之熱通率超過臨界熱通率後，在計算時即不允許使用核沸騰和過渡沸騰的式子去估算熱量傳遞。此限制一直存在直到進入再泛水階段後才解除。RELAP5-3D 中並沒有設立類似的邏輯控制去限制熱傳關係式的選取，因此必須於程式碼內補上此邏輯控制。

(7) 沖放階段之後臨界熱通量的熱傳

安全法規 10 CFR 50 附錄 K 規定，薄膜沸騰 (Film Boiling) 熱傳所採用的式子是 Groeneveld 5.7 (Equation 5.7 of D.C. Groeneveld, "An Investigation of Heat Transfer in the Liquid Deficient Regime," AECL-3281 revised December 1969)，過渡沸騰熱傳所使用的式子則是 McDonough-Milich-King (J.B. McDonough, W. Milich, E.C. King, "An Experimental Study of Partial Film Boiling Region with Water at Elevated Pressures in a Round Vertical Tube," Chemical Engineering Progress Symposium Series, Vol. 57, No. 32, pages 187-208, 1961)。然而如安全法規 10 CFR 50 附錄 K 中所述，Groeneveld 5.7 在系統壓力靠近其低壓奇異點 (Singularity) 時不得使用。於是在愛達荷國家實驗室團隊的建議下，當壓力低於 1.38 MPa 且爐心水流量高時，以 Modified Dittus-Boelter Correlation 來取代原先的 Groeneveld 5.7；而當爐心水流不大時，則以 Modified Bromley Correlation by Hsu 來修正於 Groeneveld 5.7 中之低壓奇異點。至於爐心水量高低之判斷依據為，當上昇水流符合：

$$j_g^{*1/2} + j_f^{*1/2} > 1.36$$

且下降水流符合：

$$j_g^{*1/2} + j_f^{*1/2} > 3.5$$

時，即如先前所述，以 Modified Dittus-Boelter Correlation 來取代原先的 Groeneveld 5.7。

#### (8) 沖放階段的爐心水流分佈

安全法規 10 CFR 50 附錄 K 針對此點所做出的要求為，最終所得出之熱通道流量必須將在沖放期間燃料護套發生腫脹、破裂情形而阻絕部分水流的現象，進而使得燃料間有橫向水流產生的效應併入考量。此外要求所得之水流必須是平順的，於 0.1 秒的時距間不得出現劇烈震盪的情形。於 RELAP5-3D 程式中，為了真實的反應流體橫向流動的情形，設定了流體橫流接點以符合要求。至於模擬因燃料護套腫脹、破裂而阻絕部分水流，進而使得工作流體出現橫向流動的模組則是參考兩個由 EPRI 所做的流體阻絕試驗數據，將之納入 RELAP5-3D 程式中。

#### (9) 壓水式電廠的再泛水速率

RELAP5-3D 規定，利用挾帶比值 (Carryover Ratio)，也就是爐心出口水流和爐心入口水流的比例，來計算爐心出口的水流，且此水流大小必須和可用實驗數據相符。RELAP5-3D 程式中的 PSI 灌水模組 (PSI Flooding Model) 將爐心和反應器系統的熱水流特性納入考慮，計算出爐心灌水的速率和所需時間，得出挾帶比值，最後計算出爐心出口水流。經過五項 FLECHT-SEASET<sup>[14]</sup> 試驗結果比對和評估顯示，PSI 灌水模式對於灌水速率的估算有效且具有一定程度的保守性，故繼續沿用。

#### (10) 壓水式電廠再注水和再泛水的熱傳

根據安全法規 10 CFR 50 附錄 K 的描述，當灌水速率大於 1 英吋/秒時，再泛水熱傳係數必須根據實驗數據如 FLECHT 來估算。當灌水速率小於 1 英吋/秒時，再泛水熱傳係數之估算必須在以只有蒸汽進行冷卻、帶走熱量，且考慮因護套腫脹、破裂而影響蒸汽流和熱量傳遞的條件下做出計算。RELAP5-3D 之 PSI 灌水模組在灌水速率大於 1 英吋/秒的情況必須進行修改才能符合安全法規 10 CFR 50 附錄 K 中的要求。PSI 灌水模組之過度沸騰熱傳關係式方面，分別以 Modified Weisman Correlation 和 Modified Dittus-Boelter 來計算液態熱傳和氣態熱傳，取代原有的 Chen Transition Boiling Correlation。在薄膜沸騰熱傳方面，於液態薄膜係數之估算中，選擇採取 Modified Bromley Correlation 之估計值和 Forslund-Rohsenow Coefficient 兩者中較大者，最後再加上輻射對於液滴之影響予以納入液態薄膜係數中。至於氣態薄膜熱傳則是參照氣態過渡沸騰熱傳，同樣採用 Modified Dittus-Boelter Correlation 去做估算。在 PSI 灌水模組在灌水速率小於 1 英吋/秒時，將之修改為符合安全法規 10 CFR 50 附錄 K 所敘述之只有蒸汽進行冷卻、帶走熱量的情況。為了要限制於同一高度燃料棒之燃料護套尖峰溫度值，因此在灌水速率大於 1 英吋/秒的情況下，將原先由 PSI 灌水模組所估算之熱傳係數再乘上 0.6 以確保其保守性。

根據安全法規 10 CFR 50 附錄 K 要求所做修改後的 RELAP5-3D 於爐心熱傳選用之熱傳模組封包 (Heat Transfer Package) 如表 3.1 所示<sup>[7]</sup>，於程式碼中做修改的部分則如表 3.2 所列<sup>[7]</sup>。

### 3.4 RELAP5-3D 多維度元件簡介

RELAP5-3D 多維度元件在輸入卡 CCC0000 中以 MULTID 設定，MULTID 是 Multi-Dimensional Component 的簡稱。此元件是由排成陣列的小區塊所組成，且這些小區塊之間有內部連結（Inner Junctions）使工作流體能相互流通。一個多維度元件所包含的小區塊數量上限為 999 個。

#### 3.4.1 座標軸

RELAP5-3D 在進行多維度元件的建構時，依據欲模擬的實際元件形狀，RELAP5-3D 設有兩種座標軸可供使用者挑選。藉由設定三個座標軸上的節點間距（Mesh Interval）來定義出一三維度、正交（Orthogonal）的格點（Grid）陣列。

其一為直角座標（Cartesian Coordinate），即最常見的  $(X, Y, Z)$  座標。選取此座標軸時，能調整  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  三個方向的長度建構出任何尺寸的虛擬立方體，適用於方正外觀的反應器元件模擬。其二為圓柱座標軸（Cylindrical Coordinate），三個座標軸參數分別為  $R$ 、 $\theta$ 、 $Z$ ，使用者能建構出任意尺寸的圓柱體，適用於外觀為環狀或是柱狀的反應器元件，例如壓力槽降流區（Downcomer）。就圓柱座標軸而言，在設定半徑參數  $R$  時，能設定一為零或是大於零的值為欲建構元件的內徑數值，由此建構出一實心圓柱或空心圓柱。在設定角度參數  $\theta$  時，能選擇 360 度或是小於 360 度的值建構出一半圓柱、 $3/4$  圓柱或是類似楔子外觀的立體區塊。於  $Z$  方向的設定則決定該立體區塊的高度值。

#### 3.4.2 各項參數

考慮到與實際元件形狀的契合度和建構多維度元件的方便性，本研究建構多維度爐心時所採取的座標為直角座標軸（Cartesian Coordinate），建構多維度降流區時所



採取的座標軸則是圓柱座標軸 (Cylindrical Coordinate)。

就直角座標軸而言，標定一多維度元件中的小區塊格式為 CCCXYZZF。CCC 為元件之編號，X 為該小區塊於多維度元件中位於 X 座標方向的序碼，其輸入值限定為 1 ~ 9，即於 X 方向所能設置的小區塊數目上限為 9。YY 為該小區塊於多維度元件中位於 Y 座標軸方向的序碼，其值限定為 01 ~ 99，即於 Y 方向所能設置的小區塊數目上限為 99。ZZ 為該小區塊在多維度元件中位於 Z 座標軸方向的序碼，其值限定為 01 ~ 99，即於 Z 軸方向所能設置的小區塊數目上限為 99。位於最末的 F 碼則是用以指定該小區塊的特定面以便於標定多維度元件與外部其他元件的連接點所在位置。F 的輸入數值限定為 1 ~ 6，其中 1、2 分別代表 X 軸的負向面和正向面，3、4 分別代表 Y 軸的負向面和正向面，5、6 分別代表 Z 軸的負向面和正向面。

就圓柱座標而言，標定一多維度元件中的小區塊格式為 CCCR $\theta\theta$ ZZF。CCC 為元件之編號，R 為該小區塊於多維度元件中位於 R 座標軸方向的序碼，同卡式座標軸之 X 軸設定，其輸入值限定為 1 ~ 9，即於 R 方向所能設置的小區塊數目上限為 9。 $\theta\theta$  為該小區塊於多維度元件中位於  $\theta$  座標軸方向的序碼，其輸入值限定為 01 ~ 99，即於  $\theta$  方向軸所能設置的小區塊數目上限為 99。ZZ 之小區塊指定方式和小區塊數目上限則和直角座標軸中之設定完全相同。位於最末的 F 碼則是用以指定該小區塊的特定面以便於標定多維度元件與外部其他元件的連接點所在位置。F 的輸入數值亦限定為 1 ~ 6，其中 1、2 分別代表 R 軸的負向面和正向面，3、4 分別代表  $\theta$  軸的負向面和正向面，5、6 則分別代表 Z 軸的負向面和正向面。



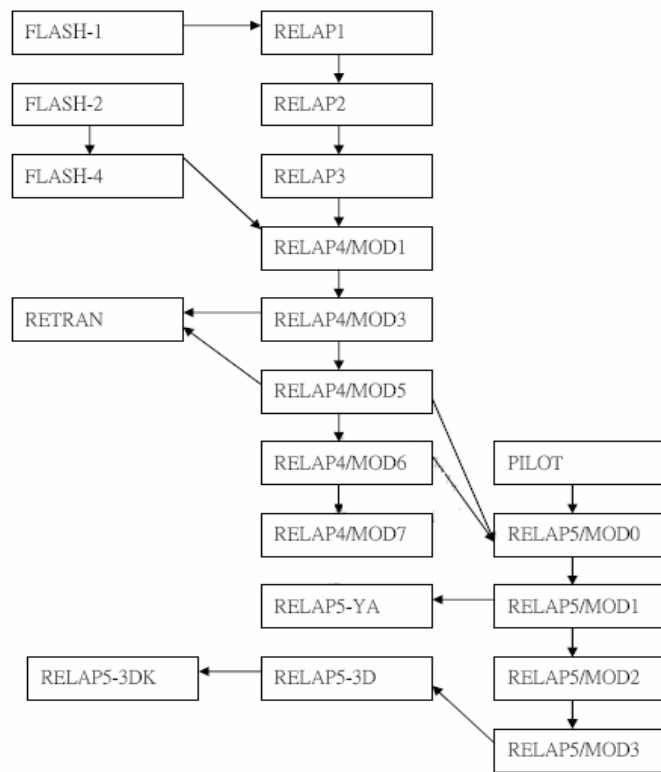


圖 3.1 RELAP 程式發展簡史

表 3.1 RELAP5-3D/K/INER 爐心熱傳所選用之模組封包<sup>[7]</sup>

Phrases of LBLOCA	Pre CHF	CHF	Transition Boiling	Film Boiling
Blowdown	Original BE pre-DNB Package of RELAP5-3D	(1) $p > 10.34\text{Mpa}$ B&W-2 (2) $6.89 < P(\text{Mpa}) < 8.96$ Barnet (3) $p < 5.0\text{Mpa}$ Modified Barnet (4) P between ranges interpolation by P	McDonough- Milich-Kin g	(1) $p > 13.8\text{ Mpa}$ Groeneveld 5.7 (2) $p < 13.8\text{ Mpa}$ - high flow modified Dittus - low flow modified Bromley by Hsu
Refill	Only steam cooling allowed	Only steam cooling allowed	Steam convection by Dittus	Steam convection by Dittus
Reflood	Original PSI reflood model	(1) $G < 100\text{kg/m}^2\text{s}$ Modified Zuber (2) $G > 200\text{ kg/ m}^2\text{s}$ Groeneveld (3) $100 < G(\text{kg/ m}^2\text{s}) < 200$ interpolation by G	Original PSI reflood model	(1) flooding rate > 1 inch/s modified PSI model (2) flooding rate < 1 inch/s steam cooling by Dittus

表 3.2 由 RELAP5-3D/INER 轉換成 RELAP5-3D/K/INER 之程式修正列表<sup>[7]</sup>

Model Requirement	RELAP5-3D Subroutines	Status
Fission Heat	rrkin & rkin	Apply the existing model of the code
Decay of Actinides	Rkin	Apply the existing model of the code
Fission Product Decay	rrkin & rkin	Change to 1971 ANS Standard Model
Metal-Water Reaction Rate	Qmwr	Change to Baker-Just correlation
Swell & Rupture of the Cladding and Fuel Rod Thermal Parameters	Madata, gapcon,cplexp,ruplas,plstm,k loss	Apply the existing model of the code
Discharge Model	Jchoke	Change to Moody model
End of Blowdown	None	Apply the CCFL model suggested by UPTF test along with on-line ECC water subtraction scheme
Frictional Pressure Drops	Fwdrag	Apply the existing model of the code
Momentum Equation Requirements	vexplt(semi-implicit)	Apply the existing model of the code
Critical Heat Flux	chfcal & chftab	Change to B&W-2, Barnett and modified Barnett correlations
Prevent Return to Nucleate Boiling	Htrcl	Modify the existing heat transfer selection logic
Post-CHF Heat Transfer Correlations: Film Boiling	Pstdnb & suboil	Change to Groenveld 5.7, modified Dittus-Boelter and modified Bromley correlations
Post-CHF Heat Transfer Correlations: Transition Boiling	Pstdnb	Change to McDonough, Milich, and King correlation
Prevent Return to Transition Boiling Heat Transfer Prior to Reflood	Pstdnb	Modify the existing heat transfer selection logic.
Pump Model	Pump	Apply the existing model of the code
Core Flow Distribution during Blowdown		Apply the existing cross-flow junction model of the core by assessments and apply core flow smoothing if necessary
Calculation of Reflood Rate for PWRs	rhtcmp, htrcl, qfmove	Modifying the existing PSI model by performing separate-effect assessments
Steam Interactions with ECC Water	eccmxj & eccmxv	Apply the existing model of the code
Refill and Reflood Heat Transfer for PWRs	rhtcmp, htrcl, qfmove,	Modifying the existing PSI model

## 第四章 RELAP5-3D 多維度爐心模式的建構

### 4.1 爐心的建構

#### 4.1.1 RELAP5-3D LOFT 一維輸入模式

LOFT 爐心截面示意圖見圖 2.4。RELAP5-3D LOFT 一維輸入模式的節點圖示於圖 4.1。爐心示於圖 4.1 之中間偏下的部分，連接於爐心上部連接箱（Upper end box，元件編號 225）和爐心下部支撐結構（Lower Core Support Structure，元件編號 240）之間的元件即為爐心。圖中位於爐心左側、亦連接於爐心上部連接箱和爐心下部支撐結構的是以三個管路元件（Pipe Component）來模擬爐心旁通區（Core Bypass，元件編號 235）。

一維爐心模式之示意圖見圖 4.2。如圖所示，爐心部分包括兩排共 24 個 branch 元件，其中 12 個元件用以模擬高功率輸出的中央燃料束（Central Fuel），另 12 個元件則是用以模擬低功率輸出的周圍燃料束（Peripheral fuel）。兩種燃料束均於垂直方向共分成 12 個小段。兩排 branch 元件之間設有流體橫流接點（Cross-flow Junction）相互連通，以確保冷卻水能於模擬兩種功率輸出大小之 branch 元件間流動，此建構方式亦較貼近冷卻水除了縱向流動之外，亦有穿越中央燃料束和周圍燃料束橫向流動的實際情況。另在功率的配置上，就中央、周圍燃料束群中的個別燃料棒而言是沒有差異的，於一維的爐心模擬中並未就燃料棒於爐心中相對位置設置熱棒（Hot Rod）。分別就高、低功率燃料束群來看，於輸入設定檔中設定每根燃料棒所輸出之功率大小是一致的。

#### 4.1.2 多維度爐心輸入模式

多維度爐心的建構利用 RELAP5-3D 的多維度元件 (Multi-Dimensional Component) 來完成的。因考慮到爐心內部燃料組件 (Fuel Assembly) 為方正形狀之特質，故本研究選用直角座標軸 (Cartesian Coordinate) 來完成爐心部分的建構。

LOFT 爐心構造如圖 4.3 所示，共有九個小塊。就截面上來看，是由五個正方形和四個三角形所組成的。由於直角座標所建構的虛擬多維度元件只限定於長方體外觀，很明顯地，位於 LOFT 爐心角落側的三角柱部分無法依其外型依樣建構，因此本研究將採取把四個三角柱體積平均分攤到外側四個長方體的方法，在仍然保持對稱原則的情況下完成多維度爐心模式的建構，如圖 4.4 所示。

本研究進行一系列分析後 (詳見 4.2.4 小節)，將中央燃料束於 X-Y 截面切割成一  $3 \times 3$  的陣列，於 Z 方向切割成 12 個小區塊。周圍燃料束的部分比照中央燃料束，將四個角落的三角柱體積以平均分攤的方式附加到四個長方體之後，於 X-Y 截面亦切割成一  $3 \times 3$  的陣列，於 Z 方向亦切割成 12 個小區塊。建構完成之多維度爐心示意圖如圖 4.4 所示。

原先和一維度爐心相連接的元件連接設定也做了更動，將堆疊成鳥巢狀的 branch 元件置入，以連接多維度元件和一維度元件，細節部分請見 4.2.3 節。

如圖 4.5 所示，本研究分別以一個多維度元件來模擬中央燃料束、四個多維度元件來模擬周圍燃料束。延用一維度爐心之建構概念，本研究進行多維度爐心之建構時，於模擬中央燃料束的多維度元件之側面亦建立流體橫流接點，使之與模擬周圍燃料束的四個多維度元件相連接，使得工作流體得以相互流通於其間的小區塊，亦符合工作流體除了縱向流動之外、亦有橫向流動跨越中央燃料束和周圍燃料束之實際情況。

多維度爐心之熱結構 (Heat Structure) 部分，仍依照原先一維度爐心的功率分

佈設定。就功率而言，一維度爐心分成兩種功率的燃料束，分別為中央燃料束和周圍燃料束。本研究在建構多維度爐心時，於爐心輸出總功率、中央燃料束輸出總功率和周圍燃料束輸出總功率不予以更動的情況下，將中央燃料束的總輸出功率均分至多維度爐心的中央燃料束部分，同樣地也將周圍燃料束的總輸出功率均分至多維度爐心的周圍燃料束部分。軸向功率分佈同一維度爐心之設定。

就中央燃料束的熱結構而言，將原先一維度爐心中所設定的一個熱結構拆為九個熱結構，分別對應於多維度爐心中 X-Y 截面上切割為九小塊的爐心小區塊。在多維度爐心的功率設定上，僅在 X-Y 平面將原先一維度爐心於該平面的總功率輸出值以平均分攤的方式分配到該平面的多個熱結構，在縱向是不做更動的。因此，就縱向的爐心功率分佈曲線而言，一維度爐心和多維度爐心所做的輸入設定是一致的。

## 4.2 建構 3-D 爐心所遭遇的困難及解決方法

### 4.2.1 多維度元件和一維度元件的相互連接

於本研究中，多維度元件和一維元件的相互連接所選用的元件為 branch。在設置 branch 元件時，需留意所設置 branch 元件的截面積大小和水平高度最好能和所建構的多維度元件在欲連接一維元件面向之截面積大小和水平高度相符，以免發生不可預測之錯誤，例如兩元件之間接點的相對位置錯亂情形。

### 4.2.2 Branch 元件連接點數上限

一個 branch 元件所能連接的接點數目上限為 9。然而於多維度元件中某一面的小區塊數目往往大於這個數字，舉例來說，現欲建構一設置為  $4 \times 4 \times 9$  的多維度元件且將於 X-Z 平面和一維元件做連接，則需要 36 個流體接點。因此所採取的方法是，於多維度元件和一維元件之間建立一排 branch 元件來完成連接的動作。就此情

況而言，必須至少置入 5 個 branch 才能確保多維度元件中的每個小區塊都能確實地透過 branch 元件連接到一維元件，使得工作流體得以流通。

於本研究中，多維度爐心於 X-Y 平面和一維的爐心上部連接箱和爐心下部支撐結構元件相連接，且多維度爐心在 X-Y 平面欲進行連接的小區塊數目多達數十個。考慮到接點數目需求之龐大、單以一排 branch 元件不足以完成連接，因此本研究必須在多維度元件和一維元件之間建立兩排 branch 元件以鳥巢堆疊 (Nest) 的方式來進行連接。連接情況示意圖如圖 4.5 所示。

### 4.2.3 爐心周圍元件相連接的問題

承上段所述，考慮到接點數目的需求，本研究必須在多維度元件和一維元件之間建立兩排 branch 元件以鳥巢堆疊 (Nest) 的方式進行連接，也就是說將多維度爐心和爐心上部連接箱 (Upper end box, 元件編號 225) 和爐心下部支撐結構 (Lower Core Support Structure, 元件編號 240) 做連接。然而，branch 元件本身亦具有長度，若是於原先設置的爐心上部連接箱、爐心下部支撐結構、爐心既有的相對位置設置情形下逕行置入兩排 branch 元件的話，將會造成元件和元件之間流體接點的相對位置錯亂情形，於 RELAP5 輸出檔案 (Output File) 顯示，於 X、Y、Z 三個方向均出現流體接點相對位置和所建立的體積相對位置有錯排 (Dislocation) 的錯誤訊息，也就是說所設置的環路無法連貫，工作流體於環路間無法流通，無法進行熱流模擬。

簡單的說，想於既有的元件間連接情況加入新元件於其中的話，必須留意由流體接點定義出的元件相對位置和由環路所定義出的元件相對位置兩者是否具有一致性。

在本研究中，解決上述情況所採取的做法為，保持爐心上部連接箱、爐心下部支撐結構的截面積原先設定，不予以更動，削減爐心上部連接箱、爐心下部支撐結構的



高度，將所削減的高度值設定為鳥巢狀堆疊的 branch 元件高度值，以此方式確保由爐心上部連接箱、巢狀堆疊的 branch 元件、多維度爐心元件和爐心下部支撐結構所組成的結構體總高度值和原先由爐心上部連接箱、一維爐心元件和爐心下部支撐結構所組成的結構體之總高度值保持一致。

本研究將爐心上部連接箱、爐心下部支撐結構的高度削減為原本的三分之一，其原本三分之二的高度空間留給堆疊成巢狀的 branch 元件。連結於爐心頂部的一排 branch 元件佔爐心上部連接箱原有高度的三分之一，兩排堆疊成巢狀的 branch 元件共佔爐心上部連接箱原有高度的三分之二。同理，連結於爐心底部的一排 branch 元件佔爐心下部支撐結構原有高度的三分之一，兩排堆疊成巢狀的 branch 元件共佔爐心下部支撐結構原有高度的三分之二。連結情形如圖 4.5 所示。

至於原先即連接於爐心上部連接箱和爐心下部支撐結構的爐心旁通流道 (Core Bypass)，本研究採取將其長度延長至修改過高度的爐心上部連接箱和爐心下部支撐結構的兩端，維持原先爐心旁通流道即和爐心上部連接箱和爐心下部支撐結構相連接的情形。連結情形如圖 4.6 所示。

#### 4.2.4 多維度爐心格點數之選取

排除種種困難、完成建構多維度爐心之構思後，必須決定多維度爐心格點 (Grid) 數以及進行案例運算時的最大時步 (Maximum Time Step)，俾於進行和未立體化案例之比較分析。本研究將以類似靈敏度分析 (Sensitivity Study) 的手法進行分析，選取適當的多維度爐心格點數和最大時步做為和未立體化案例比較之基準。

靈敏度分析是一種藉由調整某輸入參數值來觀察所得到輸出結果變化情形、藉此來評估不準度 (Uncertainty) 對於輸出結果中可能帶來的效應、或是藉由比對輸出結

果來驗證所進行模擬之模組是否具有呈現某效應之行為能力、是否輸出結果如預期一樣的一種方法。

於本小節所選取要將進行調整、用以觀測燃料護套尖峰值所產生相對應變化情形之輸入參數為多維度爐心元件格點數和最大時步。

將爐心分割細緻度做調整，即以重新切割爐心的方式來做靈敏度分析。如同 4.1.2 小節之敘述，將中央燃料束和周圍燃料束均切割成一  $3 \times 3 \times 12$  三維度小塊陣列的方式來進行模擬，爐心切割示意圖請見圖 4.5。此外，另行採用兩種多維度爐心分割方式，分別為  $2 \times 2 \times 12$  和  $4 \times 4 \times 9$  之多維度陣列配置，分別如圖 4.7 和 4.8 所示。以  $2 \times 2 \times 12$  分割方法切割的每個爐心小塊較大，該小塊所包含之燃料棒數目較多；以  $4 \times 4 \times 9$  分割方法切割的每個爐心小塊則較小，該小塊所包含之燃料棒數目亦較少。

至於選用  $4 \times 4 \times 9$  的分割配置而不用  $4 \times 4 \times 12$  的原因在於，當採用  $4 \times 4 \times 12$  時疑似因為所建構之多維度元件之節點數過多而導致 RELAP5 程式於運行時發生無法運作的情況。參照輸出檔案中由 RELAP5 程式所寫入的錯誤訊息推測，應是所設定的節點數過多超出記憶體所能運作的範圍，而導致模擬無法繼續進行。輸出檔案所顯示的錯誤訊息如附錄 B 所列。因此本研究只得選用  $4 \times 4 \times 9$  的分割配置來進行針對爐心分割細緻度所作的靈敏度分析。

然而，原先爐心切割基準案例  $3 \times 3 \times 12$  之總節點數為 540 個，而以  $2 \times 2 \times 12$  和  $4 \times 4 \times 9$  之分割配置所切割完成之多維度爐心總節點數則分別為 240 和 720 個。儘管本研究將原先預定的  $4 \times 4 \times 12$  分割配置改成了  $4 \times 4 \times 9$  的切割方式，亦即多維度爐心節點數從 960 個減少為 720 個，但這並未違反當初預定各建構

一爐心總節點數分別較基準案例總節點數多、少來進行靈敏度分析之初衷。爐心分割配置  $2 \times 2 \times 12$  和  $4 \times 4 \times 9$  之總節點數是分別符合較基準切割案例為少、多之情況的。

圖 4.9 為三個多維度爐心切割案例燃料護套尖峰溫度值隨時間變化比較情形。如圖所示，三個立體化爐心案例所預測之燃料護套尖峰溫度值由高至低依序為  $3 \times 3 \times 12$  案例、 $4 \times 4 \times 9$  案例、 $2 \times 2 \times 12$  案例。

三個案例預測燃料護套溫度值向下滑落之時間點非常接近，均在破口生成後約 50 秒開始出現下滑情形。然而於  $4 \times 4 \times 9$  案例中，燃料護套溫度值向下滑落之速度不若其他兩個案例來得快，約慢了 8 秒才下滑至和其他案例最終預測燃料護套溫度值之結果。

本研究最終選取  $3 \times 3 \times 12$  案例為基準。 $3 \times 3 \times 12$  案例所預測燃料護套尖峰溫度值是三個案例中最高的，為了能明確估量爐心立體化後較未立體化案例所增加之安全餘裕，本研究選取  $3 \times 3 \times 12$  案例為和未立體化案例進行比較之基準。

#### 4.2.5 多維度爐心最大時步之選取

選定多維度爐心格點數後，本研究接著進行最大時步 (Maximum Time Step) 之決選。最大時步和 RELAP5 熱流模擬程式進行運算時的收斂準則 (Converge Criteria) 有關。選取不同的最大時步會影響最終的預測結果，一般而言，選取越小的最大時步越可能得到數值穩定 (Numerically Stable) 的預測結果。以下扼要陳述進行模擬時關於時步推進 (Time Advancement) 之相關概念。

程式預設以輸入卡中設定之最大時步做為第一個預定推進時步值，接著進行一連串的分析，包含核對流體質量誤差值 (Mass Error)、柯倫限制 (Material Courant

Limit)、材料物理性質 (Material Property)，爾後決定時步推進大小。

核對流體質量誤差之過程簡述如下：若計算流體質量誤差值低於某門檻值，預定推進時步值倍增；若高於另一門檻值，預定推進時步值減半。

柯倫限制指的是數學物理領域著名之 Courant–Friedrichs–Lewy Condition<sup>[11]</sup>，其根本精神為：為了確保預測結果之數值收斂度 (Numerical Convergence) 和數值準確性 (Accuracy)，進行模擬所選用時步值必須小於流體流經相鄰格點所耗費時間。

核對材料物理性質以決定推進時步值過程為：若程式預測之材料物理性質，如壓力或密度逾越合理範圍 (違背基本物理認知或是超出程式內附材料物理性質表範圍)，則預定推進時步值減半。此時程式會再嘗試以減半之時步值進行預測、直到預定推進時步值縮小至最小時步值 (Minimum Time Step)，程式強制終止。

以上核對過程乃程式內建，可提供使用者相當程度之預測結果準確性。

就本研究中多維度爐心最大時步設定值而言，原先  $3 \times 3 \times 12$  爐心分割配置設定之最大時步為 0.01 秒。圖 4.10 為立體化爐心  $3 \times 3 \times 12$  案例選用不同最大時步後所得燃料護套尖峰溫度值結果。如圖 4.10 所示，將最大時步增大為 0.05 後所預測燃料護套尖峰溫度值略為增高，然而再進一步將最大時步增為 0.08 後卻發現所預測燃料護套尖峰溫度值向下降；將最大時步值減少為 0.008 後發現，所預測燃料護套尖峰溫度值非常接近最大時步為 0.01 之結果，且曲線隨時間變化情形亦雷同，僅燃料護套尖峰溫度值預測結果稍低。所預測結果收斂，因此本研究最終選定最大時步為 0.01。



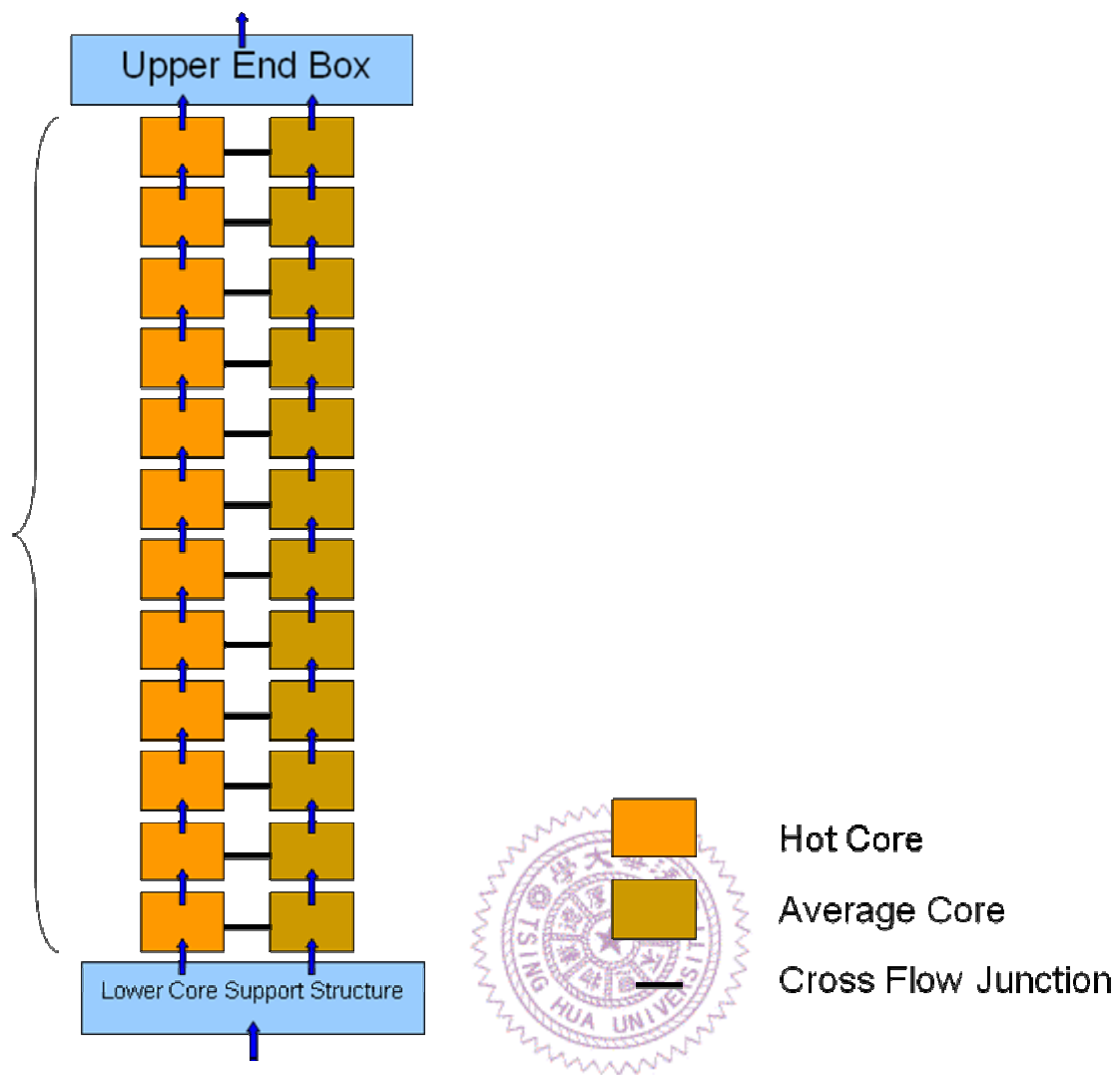


圖 4.2 一維爐心模式之示意圖

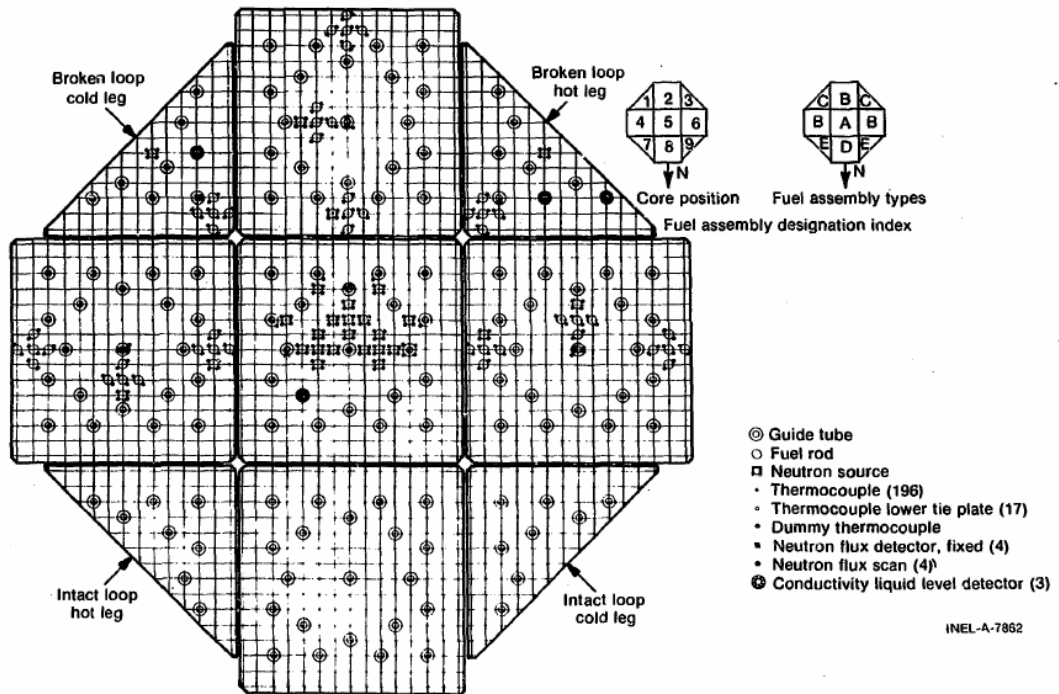


圖 4.3 LOFT 爐心截面示意圖



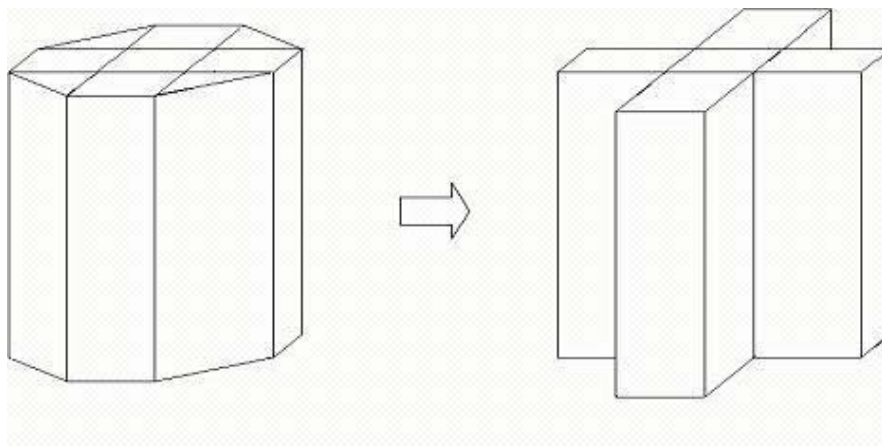


圖 4.4 多維度爐心建構過程示意圖

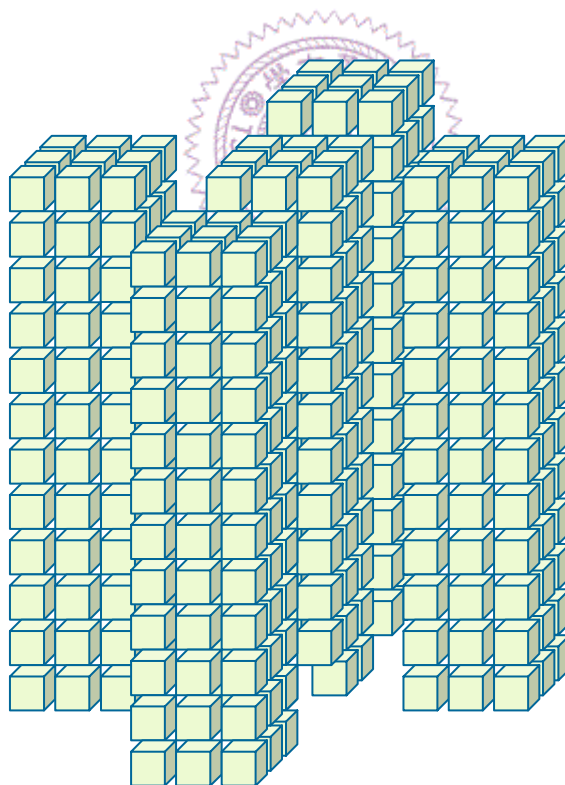


圖 4.5 多維度爐心結構示意圖

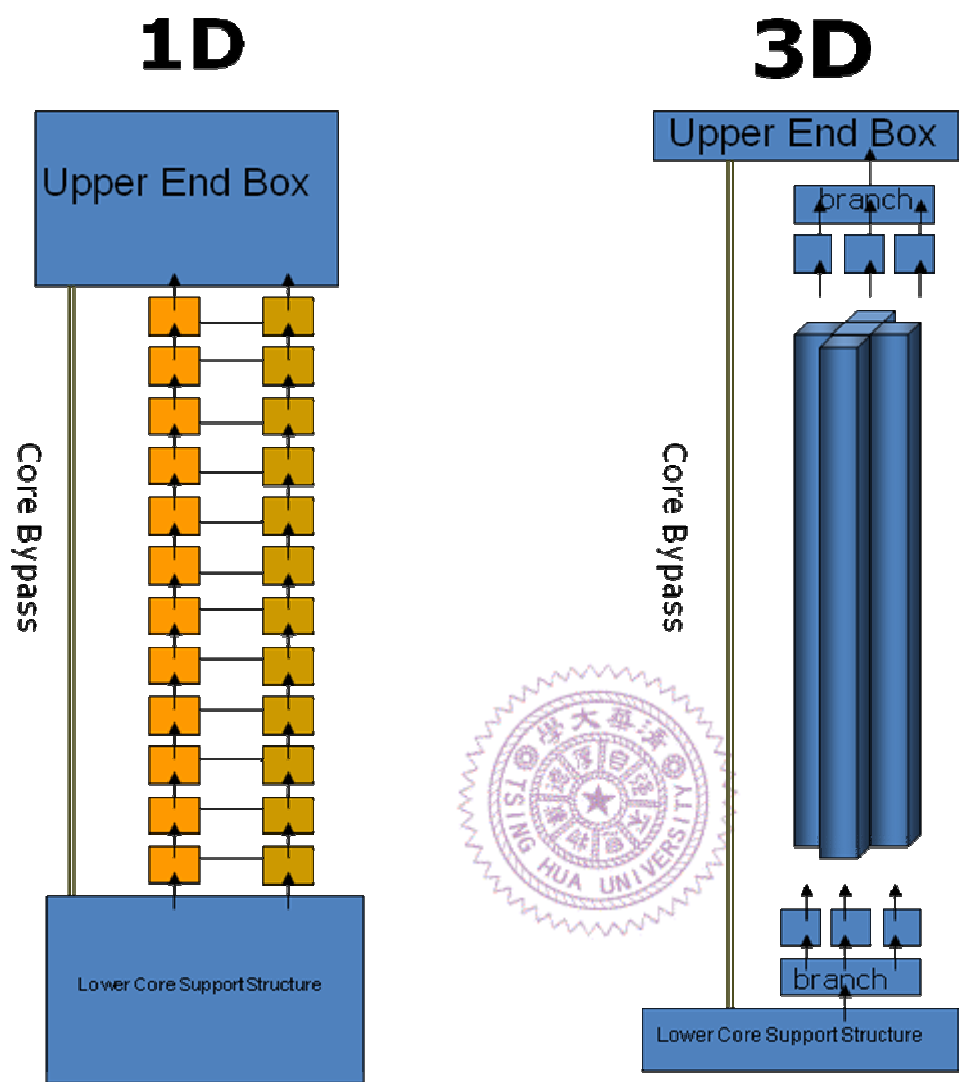


圖 4.6 LOFT 一維爐心和三維度爐心連接情形比較圖

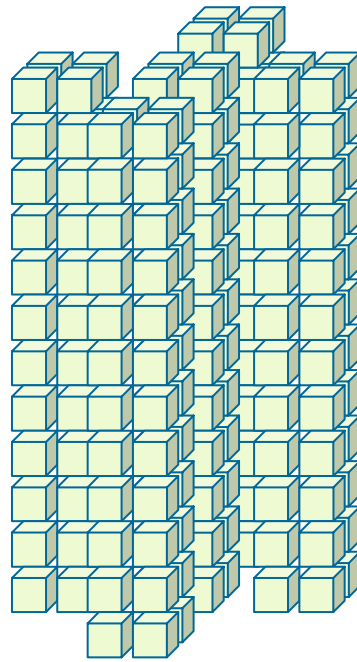


圖 4.7 爐心格點數靈敏度分析之  $2 \times 2 \times 12$  切割示意圖

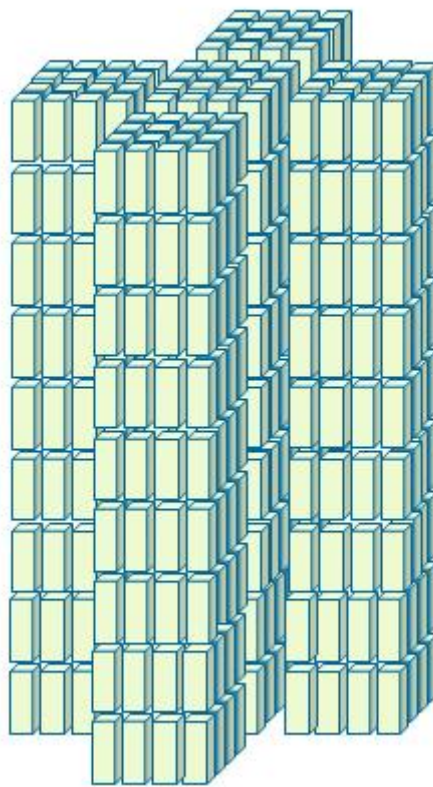


圖 4.8 爐心格點數靈敏度分析之 4 x 4 x 9 切割示意圖



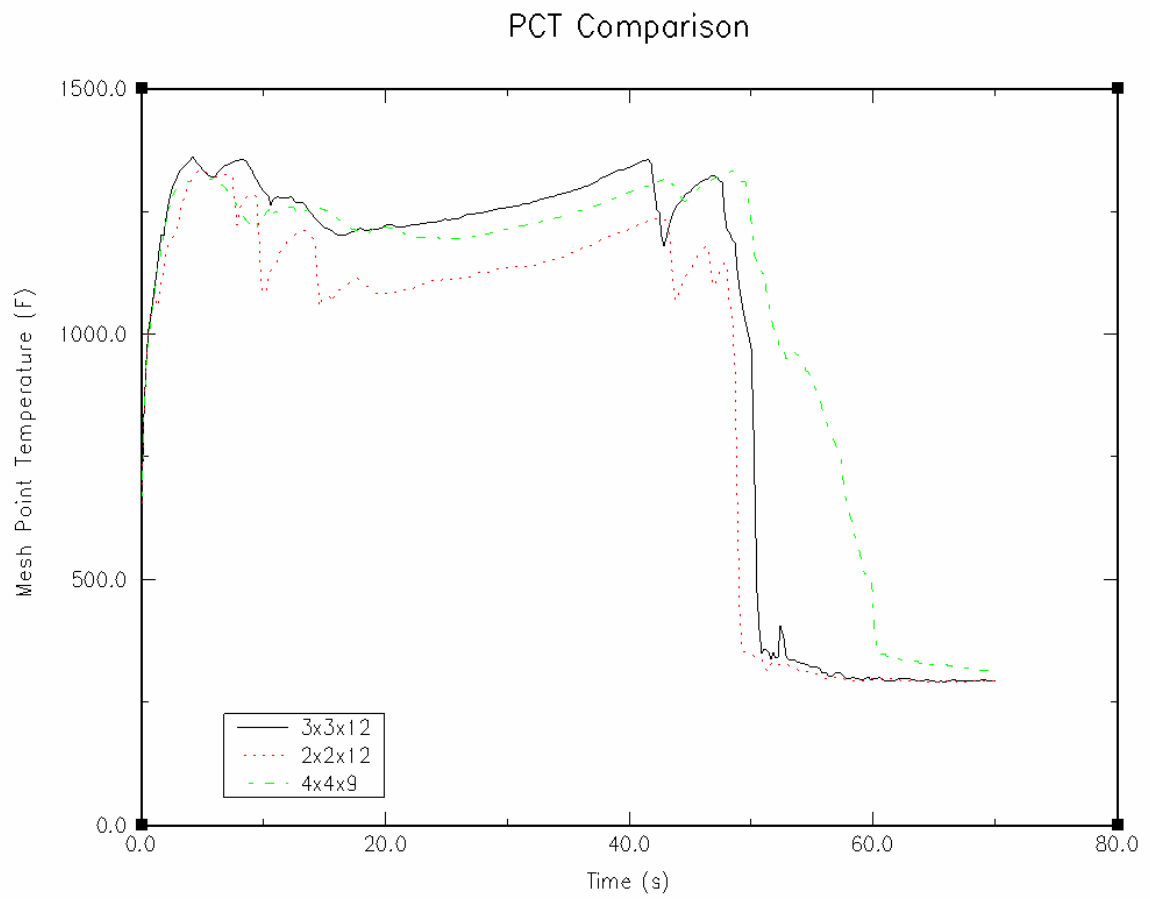


圖 4.9 針對爐心分割細緻度所做靈敏度分析燃料護套尖峰溫度值比較情形

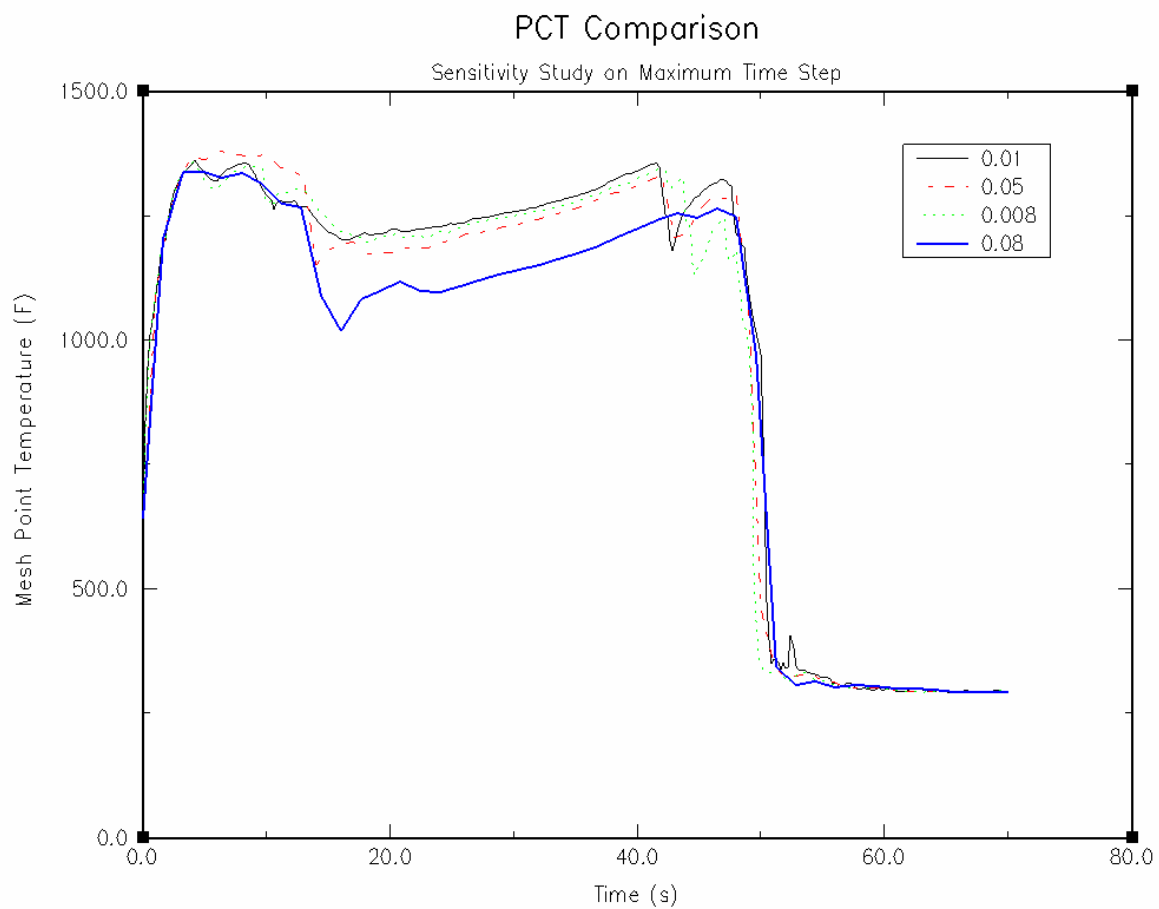


圖 4.10 針對最大時步所做靈敏度分析燃料護套尖峰溫度值比較情形



## 第五章 多維度爐心的模擬結果

本章為立體化爐心案例和未立體化爐心案例之模擬結果探討，包含燃料護套尖峰溫度值、煙囪效應簡介及驗證、冷卻水流於兩個模擬案例所呈現的差異和各項參數比較。

### 5.1 燃料護套尖峰溫度值預測結果比較

圖 5.1 為立體化爐心案例和未立體化爐心案例離熱通道底部 0.49 公尺處預測之燃料護套溫度值和位於同一高度之實驗結果比較。兩個案例均將高度 1.68 公尺的爐心熱通道於縱向分成 12 個小節，立體化爐心案例預測燃料護套尖峰溫度值發生的高度和非立體化爐心案例預測的之結果一致，均位於由底部向上數第四節處，即離熱通道底部 0.49 公尺處。另外，燃料護套尖峰溫度值於兩個案例而言，均於再泛水階段發生。

如圖 5.1 所示，立體化爐心案例預測燃料護套尖峰溫度值較非立體化爐心案例結果低約 180 °F。另外，立體化爐心案例預測燃料護套尖峰溫度向下滑落時間點較未立體化爐心案例提早約 10 秒。於沖放階段 (Blowdown)，立體化爐心案例預測護套溫度值下滑、未立體化爐心案例預測溫度持平，此差異源自兩案例預測冷卻水質量流率於爐心熱通道入口之差異，如圖 5.36 所示：立體化爐心案例預測冷卻水於該時段流入熱通道，熱量傳遞情形明顯，因而護套溫度下滑；未立體化爐心案例預測冷卻水於該時段未流入熱通道，因此護套溫度未下降。未立體化爐心案例預測燃料護套溫度值高於實驗資料約 40 °F，立體化爐心案例預測值則和實驗資料接近。進入再注水階段 (Refill)，實驗值和未立體化爐心案例預測結果相仿，均較立體化爐心案例高約 80 °F。進入再泛水階段 (Reflood) 後，兩個案例預測燃料護套溫度值均較實驗值高，立

體化案例預測燃料護套溫度值較未立體化案例低約  $170^{\circ}\text{F}$ ，但高於實驗值約  $30^{\circ}\text{F}$ 。

另外，如圖 5.1 所示，於破口生成後 8 秒內立體化爐心案例預測燃料護套溫度值向上攀升的速度較為立體化案例快。

綜上所述，立體化爐心案例預測燃料護套尖峰溫度值較未立體化爐心案例為低，就安全餘裕的空間釋放而言，確實有所助益。然而，由圖 5.1 觀之，立體化爐心案例於 RELAP5-3D/K/INER 所展現之預測結果保守性不甚明顯，僅於再泛水階段展現其保守性。或許，在不違背安全法規 10 CFR 50 附錄 K 所列規定前提下，小幅更動程式碼選用於冷卻水流失事故不同階段所使用熱傳封包（如表 3.1 所列），再配合多維度元件模擬方式，能於預測燃料護套尖峰溫度值方面展現保守性，且同時達到安全餘裕空間釋放的目的。

圖 5.2 和圖 5.3 分別為立體化爐心案例和非立體化爐心案例預測燃料護套尖峰溫度值發生處之臨界熱通量和熱通量隨時間變化情形。如圖 5.2 所示，立體化爐心案例預測之臨界熱通量和熱通量於破口生成後 40 秒內均較未立體化爐心案例預測值高，且立體化爐心案例預測臨界熱通量較未立體化爐心案例早出現大幅度的震盪，顯示液態冷卻水於立體化爐心案例中較早接觸燃料棒護套外側。此外，就進入再泛水階段兩個案例預測之臨界熱通量大小而言，特別是在破口生成後約 40 秒之時間點，立體化爐心案例預測值較未立體化爐心案例為高。如圖 5.3 所示，同臨界熱通量，立體化爐心案例預測臨界熱通量較未立體化爐心案例早產生大幅度的震盪。且就熱通量最大值而言，依然是立體化爐心案例預測值較未立體化爐心案例為高。

圖 5.4 為立體化爐心案例和非立體化爐心案例預測於發生燃料護套尖峰溫度值處所釋放之累積熱通量隨時間變化情形。如圖所示，立體化爐心案例於前 8 秒所釋出

的累積熱通量較未立體化爐心案例所釋出的量來的少，這解釋了為何於圖 5.1 一開始立體化爐心案例燃料護套尖峰溫度值向上攀升的速度較未立體化爐心案例快。在圖 5.4 可明顯看出於破口生成後 8 秒至 L2-5 試驗結束這段期間，立體化爐心案例預測累積熱通量均較未立體化爐心案例來的高，與圖 5.1 該段時間立體化爐心案例預測溫度值較未立體化爐心案例低之結果呈現一致。

圖 5.5 為立體化爐心案例和非立體化爐心案例預測爐心熱通道之覆水淬冷 (quench) 位置隨時間變化情形。如圖所示，立體化爐心案例預測於爐心熱通道覆水淬冷位置於破口生成後約 18 秒即有向上攀升的情況，爾後下降，於破口生成後約 42 秒再度上升。非立體化爐心案例預測結果則於破口生成後約 43 秒始向上攀升。

圖 5.6 為立體化爐心案例和非立體化爐心案例預測爐心熱通道液態水位 (Collapsed Water Level) 隨時間變化情形。如圖所示，兩個模擬案例預測爐心熱通道液態水位隨時間變化的趨勢雷同，唯於破口生成後約 20 秒後，立體化爐心案例預測之爐心熱通道液態水位下探至爐心底部，非立體化爐心案例預測之結果於同一時間則仍是保有約略超過爐心底部高度的水位值。

圖 5.7 為立體化爐心案例和非立體化爐心案例預測冷卻水流入熱通道入口累積流量隨時間變化情形。如圖所示，於破口生成後約 16 秒，立體化爐心案例預測冷卻水大量湧入爐心熱通道入口，累積流量急速上升，未立體化爐心案例則否。最終，立體化爐心案例預測冷卻水於熱通道入口累積流量較未立體化爐心案例為多。

觀察圖 5.7 最終結果，且考量多維度爐心為一立體流體通道且熱通道 (Hot Channel) 內工作流體溫度值高於一般通道工作流體溫度值之事實，本研究將嘗試進行熱通道煙囪效應之觀測，藉由多維度爐心和一維度爐心參數比對方式來驗證煙囪效應

是否存在，詳見 5.2 小節。

## 5.2 煙囪效應的觀測

本小節利用為煙囪效應解釋多維度爐心和一維爐心之預測結果差異。包含煙囪效應 (Chimney Effect) 的簡介以及在多維度爐心中煙囪效應的驗證。

### 5.2.1 煙囪效應簡介

煙囪效應 (Chimney Effect) 常見於建築物的進出排氣口、煙囪、樓梯天井 (Stairwell)、天窗或是暖氣管。其推動來源是由室內、外空氣溫度差異所造成之浮力。於正常情形下，流體傾向選擇流動阻力最小的路徑流動，由壓力高處向壓力低處流動即為一例。

在冬天，由於室內的空氣溫度值高於室外，建築物中的熱空氣有向上爬升的現象而使得建築物底部出現了負壓。於建築物中的熱空氣向上爬升、積聚於建築物頂部形成正壓使得這些熱空氣由建築物頂部之空隙流出，而建築物中所流出的熱空氣隨後為由建築物底部進入的冷空氣所取代。溫度較低的流體由接近底部的空隙流入建築物，於建築物中向上流動，最後從建築物頂部的空隙流出，這就是在冬天時於建築物內所發生的煙囪效應，在夏天則流體進出建築物所在位置和於建築物中流動方向則反之。

室內、外的空氣存在溫度差，造成了密度差，進而導致壓差使得室內之流體於垂直方向有自然流動的趨勢。一般而言，隨著進出口流體熱力性質的差異越大或是流體所流通的該建築物高度越高，浮力就越大。煙囪效應對於流體在通道內的自然流動以及從通道外向內的滲透現象均有正面的助益，建築物中空氣的流通即為一例。

推動流體流動的動力為由溫度差所導致的壓差，一般而言，計算壓力差的公式為：

$$\Delta P = C \cdot a \cdot h \cdot \left( \frac{1}{T_o} - \frac{1}{T_i} \right)^{[9]}$$

其中  $\Delta P$  和  $a$  分別為壓力差和所在地之大氣壓力值，單位為 Pa。  $C$  為一常數，其值為 0.0342。  $h$  為建築物高度，單位為公尺。  $T_o$  和  $T_i$  分別為室外和室內的絕對溫度值，單位為 K。

另外，由煙囪效應所引導之流體質量流率其計算之公式為<sup>[9]</sup>：

$$Q = C \cdot A \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h \cdot \frac{T_i - T_o}{T_i}}$$

$Q$  是由煙囪效應所引導之流體流率，單位為  $\text{m}^3/\text{s}$ 。  $A$  指的是流體所流過之通道截面積，單位為  $\text{m}^2$ 。  $C$  是流體釋放係數 (Discharge Coefficient)，通常採計數值範圍為 0.65 到 0.7 之間。  $g$  是重力加速度，其數值和單位為  $9.81\text{m}/\text{s}^2$ 。  $h$  是流體所流通之通道高度， $T_i$  和  $T_o$  則分別是室內、外的流體溫度值，單位為 K。

### 5.2.2 煙囪效應的驗證

多維度爐心為一立體流體通道，類似於 5.2.1 小節所敘述之建築物進出排氣口、樓梯天井等結構，且熱通道 (Hot Channel) 內之工作流體溫度值高於一般通道之工作流體溫度值。因此本研究將嘗試進行熱通道煙囪效應之觀測，藉由進行多維度爐心和一維爐心參數比對的方式來驗證煙囪效應是否存在。換言之，觀測於多維度爐心中，工作流體被熱通道底部吸入、於熱通道內部向上流動、最後由熱通道出口排出之現象是否較一維度爐心來得明顯。進行比對的參數為：爐心熱通道出口處的累積流體質量



(Cumulative Mass) 和於爐心結構體中不同水平高度的流體液態速度、汽態速度、液態表相速度 (Superficial Liquid Velocity) 和汽態表相速度 (Superficial Vapor Velocity)。

熱通道的總高度為 1.68 公尺，本研究擷取離熱通道底端約 0.42、0.84 和 1.54 公尺處，即熱通道中第四、七、十一階高度之流體液態速度、汽態速度、液態表相速度和汽態表相速度來進行兩個模擬案例之比對以進行煙囪效應之驗證。

圖 5.8、5.10、5.12 分別為立體化爐心案例和非立體化爐心案例預測於 0.42 公尺 (第四階)、0.84 公尺 (第七階)、1.54 公尺 (十一階) 冷卻水液態速度隨時間變化情形，圖 5.9、5.11、5.13 則分別為立體化爐心案例和非立體化爐心案例預測 0.42 公尺 (第四階)、0.84 公尺 (第七階)、1.54 公尺 (十一階) 冷卻水汽態速度隨時間變化情形。

圖 5.14、5.15、5.16 分別為立體化爐心案例和非立體化爐心案例預測於 0.42 公尺 (第四階)、0.84 公尺 (第七階)、1.54 公尺 (十一階) 冷卻水液態表相速度隨時間變化情形。圖 5.17、5.18、5.19 則分別為立體化爐心案例和非立體化爐心案例預測於 0.42 公尺 (第四階)、0.84 公尺 (第七階)、1.54 公尺 (十一階) 冷卻水汽態表相速度隨時間變化情形。

於上述所列圖中均可觀測到於破口生成後 40 秒前後，兩個案例預測情形均呈現劇烈震盪，是因為液態冷卻水觸及爐心底端高溫燃料棒護套、水蒸汽生成、上沖、爾後自爐心熱通道進口引入大量冷卻水、帶動附近的冷卻水流所致。

另於上述所列圖中均可觀測到，立體化爐心案例預測之冷卻水液態速度、汽態速度、液態表相速度和汽態表相速度都較非立體化爐心案例預測之結果為大且擁有較大



的震盪幅度，且隨著高度的增加，立體化爐心案例預測值震盪情形越明顯。

圖 5.20 為立體化爐心案例和非立體化爐心案例預測於熱通道出口冷卻水累積流量隨時間變化情形。如圖所示，立體化爐心案例預測於熱通道出口冷卻水累積流量較非立體化爐心案例預測之結果為多。

經過一系列比對，可觀察到立體化爐心案例預測於爐心結構體中不同水平高度的流體液態速度、汽態速度、液態表相速度和汽態表相速度大多較非立體化爐心案例預測結果為大且擁有較大的震盪幅度。另外，立體化爐心案例預測於爐心熱通道進、出口處的累積流體質量均較非立體化爐心案例預測結果為大。由以上可驗證，熱通道中存在煙囪效應，使得立體化爐心案例預測燃料護套尖峰溫度值較非立體化爐心案例低，即於立體化爐心案例較非立體化爐心案例有更多冷卻水流經熱通道，是故其預測之燃料護套尖峰溫度值較低，如 5.1 小節所示。

### 5.3 冷卻水流動情形比較

未立體化爐心案例預測之緊急爐心冷卻系統啟動時間點 (ECCS Initiation)、進入再注水階段 (Refill) 和進入再泛水階段 (Reflood) 時間點分別為 13.37、19.21、40.16 秒。立體化爐心案例預測之緊急爐心冷卻系統啟動時間點、進入再注水階段和進入再泛水階段的時間點則分別為 13.58、16.86、17.94 秒。其中最顯著的差異在於，爐心立體化後進入再泛水階段時間點較未立體化案例提早 22.22 秒。L2-5 輸入設定卡中 (Input Deck) 針對進入再注水和再泛水階段之定義詳見 2.2.2 小節。

在案例預測進入再泛水階段之時間點前即觀察到大量冷卻水由爐心熱通道底部吸入情形之可能性有二：其一為在進入再泛水階段時間點之前已有少量液態冷卻水由爐心熱通道底部進入、生成蒸汽沖向熱通道出口、帶動附近水蒸汽流動。其二為逆流

凝結現象 (Reflux Condensation)。當冷卻水流失事故發生時，反應器壓力槽內水位降低，蒸氣產生器 (Steam Generator) 垂直 U 型管充滿水蒸汽，蒸氣產生器殼側 (Shell Side) 的冷卻水將流動於蒸氣產生器垂直 U 型管中之水蒸汽凝結成液態水。源自蒸氣產生器之液態水流穿越來自反應器壓力槽之水蒸汽流、流入反應器壓力槽中、自爐心頂端落入爐心熱通道、生成蒸汽沖向熱通道出口、帶動附近水蒸汽流動。然而，觀其反應器壓力槽熱端管路液態冷卻水質量流率，並未發現有液態冷卻水逆流現象。因此，排除第二種可能性。RELAP5-3D 2.4.2 版本具有預測逆流凝結現象之能力<sup>[10]</sup>，然而本研究所使用之 RELAP5-3D/K 程式是以 RELAP5-3D 1.3.5 版本依據安全法規 10 CFR 50.46 修改而成，詳見 3.3 小節，未能觀測到反應器壓力槽熱端管路液態冷卻水之回流現象。

如 2.2.2 小節所述，進入再泛水階段的定義為反應器底部空間的硼濃度超過  $1.0\text{e-}5 \text{ kg/m}^3$  且爐心熱通道入口處 (Junction 225010000) 之液態空泡係數 (Liquid Void Fraction) 大於 0.4，然而，這並不表示液態冷卻水於案例預測進入再泛水階段之時間點前均未觸及爐心底部之燃料棒護套外側。以未立體化案例為例，預測進入再泛水階段的時間點為破口生成後 40.16 秒，但在此時間點幾秒之前即可能有少量的液態冷卻水已觸及爐心底部之高溫燃料棒護套外側、產生水蒸汽沖向熱通道出口。因為冷卻水是兩相相互挾帶流動的，在爐心熱通道入口液態空泡係數超過 0.4 之前，很可能已有少量液態水進入爐心熱通道、接觸燃料棒護套外側、生成蒸汽沖向熱通道出口、帶動附近水蒸汽流動了。

圖 5.21、圖 5.22 分別是立體化爐心案例和未立體化爐心案例近冷端破口、近熱端破口之質量流率隨時間變化情形。圖 5.23 則是立體化爐心案例和未立體化爐心案

例預測由破口兩端流出冷卻水累積流量加總結果隨時間變化情形。

於試驗起始時，如圖 5.21 所示，破口生成、擴大，冷卻水開始大量外流。爾後，反應器壓力槽水位降低，因此由破口流出的冷卻水質量流率逐漸下降。於破口生成後約 16 秒，由緊急爐心冷卻系統注入反應器壓力槽之冷卻水已突破降流區之反向極限流限制 (Counter-Current Flow Limit, CCFL) 進入反應器底部空間，和反應器底部空間的高溫蒸汽混合，使得雙相流體由反應器底部空間向上沖。因此可觀察到兩個模擬案例預測近冷端破口冷卻水質量流率於破口生成後約 20 ~ 38 秒呈現短暫回升的震盪情形。

立體化爐心案例進入再注水階段的時間點較未立體化爐心案例稍早，於圖 5.1 中亦呈現立體化爐心案例預測冷卻水質量流率回升時間點較早之情形。另立體化爐心案例於此段期間冷卻水質量流率震盪幅度大於未立體化爐心案例結果，爾後兩個模擬案例預測結果則幾無差異，均呈現已無冷卻水於此破口流出之情形。

如圖 5.22 所示，非立體化爐心案例預測之近熱端處破口之質量流率於破口生成後 8 ~ 20 秒約略高於立體化爐心案例預測之結果。近熱端處破口冷卻水質量流率對於進入再注水階段相應之反應不若近冷端處破口明顯，幾無變化，於此之後，兩個模擬案例預測結果幾無差異，均呈現已無冷卻水於此破口流出之情形。

圖 5.23 為立體化爐心案例和未立體化爐心案例破口兩端流出冷卻水累積流量隨時間變化情形。如圖所示，最終兩個模擬案例預測結果接近，唯立體化爐心案例預測冷卻水於破口處流出總量較立體化爐心案例預測結果略高。主要差異源自破口生成後約 20 秒立體化爐心案例預測於近冷端管路處生成破口處流出之冷卻水質量流率在破口生成後約 20 秒略高於未立體化爐心案例結果，如圖 5.21 所示。

圖 5.24 為立體化爐心案例和非立體化爐心案例預測於反應器壓力槽噴嘴破口側冷端迴路之質量流率隨時間變化情形。如圖所示，破口生成，冷卻水大量由破口湧出，反應器壓力槽內壓力與水位降低，因此由反應器壓力槽噴嘴破口側冷端迴路流向破口之冷卻水量開始下降。隨後，如同兩個案例近冷端管路處生成破口所流出之冷卻水質量流率，於破口生成後約 20 ~ 38 秒呈現震盪情形一樣地，兩個模擬案例預測於反應器壓力槽噴嘴破口側冷端迴路之質量流率於破口生成後約 20 ~ 38 秒亦有震盪情形，此亦為兩個案例皆進入再注水階段之故。進入再注水階段後，反應器壓力槽內水位逐漸上升，由反應器底部空間向上逐漸累積的冷卻水接觸爐心底部高溫燃料棒護套，瞬間釋出大量高溫水蒸汽沖向爐心熱通道出口，爾後吸引大量冷卻水由爐心熱通道底部湧入熱通道。因此，如圖 5.24 所示，於破口生成後約 40 秒兩個模擬案例均預測，冷卻水改變原先流出反應器壓力槽的趨勢，轉而短暫地流回反應器壓力槽中，呈現了大量冷卻水流向爐心熱通道入口，以平衡大量水蒸汽生成並向上流動所導致之壓力差情形。於此之後，反應器壓力槽噴嘴破口側冷端迴路不再有冷卻水流動，兩個案例預測之質量流率均為零。

圖 5.25 則為立體化爐心案例和非立體化爐心案例預測於反應器壓力槽噴嘴破口側冷端迴路之累積流量隨時間變化情形。如圖所示，立體化爐心案例預測由反應器壓力槽噴嘴破口側流向破口之冷卻水累積流量略高於非立體化爐心案例之結果。

圖 5.26 為立體化爐心案例和非立體化爐心案例於壓力槽入口下部環型體積 (Inlet Annulus Lower Volume) 之流體橫流接點冷卻水質量流率隨時間變化情形。如圖所示，於破口生成後約 40 秒兩個模擬案例均呈現劇烈震盪之情形。於破口生成後約 38 秒，少量液態冷卻水觸及爐心底端燃料棒護套、高溫水蒸汽生成、上沖、爾後

自爐心熱通道進口引入大量冷卻水、帶動附近的冷卻水流，因此兩個案例預測於壓力槽入口下部環型體積流體橫流接點中的冷卻水出現反向流動的情形、質量流率呈現負值，即冷卻水由流體橫流接點入口處流回壓力槽入口下部環型體積（可視為冷卻水由完整端流向破口端）。接著，進入再泛水階段，大量生成的水蒸汽推動冷卻水、帶動附近的冷卻水流動，因此於破口生成後約 44 秒，如圖 5.26 所呈現，冷卻水大量地湧回流體橫流接點。

圖 5.27 為立體化爐心案例和非立體化爐心案例於壓力槽入口下部環型體積之流體橫流接點冷卻水累積流量隨時間變化情形。如圖所示，最終立體化爐心案例預測於壓力槽入口下部環型體積之流體橫流接點冷卻水累積流量略高於非立體化爐心案例之預測結果。

圖 5.28 為立體化爐心案例和非立體化爐心案例於破口側降流區頂部體積流向降流區中部體積之冷卻水質量流率隨時間變化情形。如圖所示，預測曲線變化情形和導致變化之原因和圖 5.24 相似，此後不再複述。於破口生成後 40 秒前後兩個模擬案例均呈現劇烈震盪之情形。於破口生成後約 38 秒兩個模擬案例預測於破口側降流區頂部體積流向降流區中部體積之冷卻水質量流率出現突增的情形，即冷卻水由降流區頂部體積流向降流區中部體積的量瞬間增大。隨後，於破口生成後約 44 秒，冷卻水短暫地改變原先的流動趨勢，由降流區中部體積向上流至降流區頂部體積。此情況和圖 5.26 中兩個模擬案例預測於壓力槽入口下部環型體積之流體橫流接點冷卻水質量流率於破口生成後約 40 秒前後的變化情形呼應。於破口生成後約 38 秒，大量由流體橫流接點流出之冷卻水使得由降流區頂部體積流向中部體積之冷卻水流量增加。令同理，於破口生成後約 44 秒，冷卻水大量湧入壓力槽入口下部環型體積之流體橫流



接點，使得降流區中流動的冷卻水亦改變其原先的流動趨勢，反由降流區中部體積流向降流區頂部體積。

圖 5.29 為立體化爐心案例和非立體化爐心案例於破口側降流區頂部體積流向降流區中部體積之冷卻水累積流量隨時間變化情形。如圖所示，最終立體化爐心案例預測於破口側降流區頂部體積流向降流區中部體積之冷卻水累積流量大於未立體化爐心案例之結果。

圖 5.30 為立體化爐心案例和非立體化爐心案例降流區中部體積 (Downcomer Middle Volume) 流體橫流接點之冷卻水質量流率隨時間變化情形。其結果與壓力槽入口下部環型體積之流體橫流接點冷卻水質量流率在破口生成後約 40 秒前後的變化情形一致，降流區中部體積流體橫流接點之冷卻水質量流率亦呈現相同的變化，於此不再複述。圖 5.31 為立體化爐心案例和非立體化爐心案例降流區中部體積流體橫流接點之冷卻水累積流量隨時間變化情形。如圖所示，最終立體化爐心案例預測於降流區中部體積流體橫流接點之冷卻水累積流量較未立體化爐心案例之結果為高。

圖 5.32 為立體化爐心案例和非立體化爐心案例冷卻水於降流區下部體積流向反應器底部空間之質量流率隨時間變化情形。如圖所示，於破口生成後 40 秒前後兩個模擬案例均呈現劇烈震盪之情形。於破口生成後約 38 秒兩個模擬案例預測冷卻水於降流區下部體積流向反應器底部空間之質量流率瞬間增大。隨後，於破口生成後約 44 秒，冷卻水短暫地改變原先的流動趨勢，由反應器底部空間向上流至降流區下部體積。

圖 5.33 是立體化爐心案例和非立體化爐心案例預測冷卻水於降流區下部體積流向反應器底部空間之累積流量隨時間變化情形。如圖所示，最終非立體化爐心案例預測冷卻水於降流區下部體積流向反應器底部空間之累積流量大於立體化爐心案例之結



果。

圖 5.34 為立體化爐心案例和非立體化爐心案例預測降流區水位高度隨時間變化情形。圖 5.35 則是立體化爐心案例和非立體化爐心案例預測反應器底部空間之冷卻水質量隨時間變化情形。同圖 5.32，於圖 5.34 和圖 5.35 中，兩個模擬案例預測情形是相近的，唯立體化爐心案例結果較未立體化爐心案例延遲約 2 秒。

圖 5.36 為冷卻水於熱通道入口之質量流率隨時間變化情形，破口生成後 7 秒內立體化爐心案例預測冷卻水流入熱通道，未立體化爐心案例則否。此對比情形和圖 5.1 立體化爐心案例預測護套最熱點處溫度於該時段下降、未立體化爐心案例預測溫度持平的結果是相符的。此外，於進入再泛水階段之冷卻水質量流率震盪情形而言，未立體化爐心案例較為明顯。

圖 5.37 為立體化爐心案例和非立體化爐心案例預測冷卻水於連接第四階熱通道和第四階一般通道之流體橫流接點質量流率隨時間變化情形，圖 5.38 則是立體化爐心案例和非立體化爐心案例預測冷卻水於連接第四階熱通道和第四階一般通道之流體橫流接點累積流量隨時間變化情形。如圖 5.38 所示，兩個案例預測於發生最高燃料護套溫度處的第四階位置之流體橫流接點中，冷卻水由熱通道流向一般通道之質量流率於破口生成後約 40 秒前趨近於零，爾後方有震盪，此乃因液態冷卻水觸及爐心熱通道底部之高溫燃料棒護套外側、生成水蒸汽沖向熱通道出口、帶動附近冷卻水流動情形所致，且由圖 5.28 可觀得，當液態冷卻水觸及爐心熱通道底部之高溫燃料棒護套時，未立體化爐心案例預測冷卻水於流體橫流接點之流動情形較立體化爐心案例明顯，此應為爐心立體化之效應。

立體化爐心案例預測之第四階熱通道和第四階一般通道之流體橫流接點累積流量

較為立體化爐心案例為低，如圖 5.38 所示，破口生成後冷卻水由一般通道流向熱通道，直至 L2-5 試驗結束前此趨勢幾乎不曾改變過。未立體化爐心案例預測之第四階熱通道和第四階一般通道之流體橫流接點累積流量於破口生成後約 40 秒前接近零，爾後短暫地出現冷卻水由一般通道流回熱通道的情形，隨後大量地由熱通道湧入一般通道。於發生燃料護套尖峰溫度處的第四階位置之流體橫流接點冷卻水累積流量比較結果或可解釋何以立體化爐心案例預測於此處之燃料護套尖峰溫度值低於未立體化爐心案例之結果。

#### 5.4 其他參數比較和結語

圖 5.39 和圖 5.40 分別為立體化爐心案例和非立體化爐心案例預測於熱通道爐心入口處冷卻水液態和汽態溫度隨時間變化情形。就兩個模擬案例預測之熱通道爐心入口處冷卻水液態溫度而言，於破口生成之後 40 秒內兩個模擬案例預測之結果趨於一致，均呈現緩緩下降的情形。隨後，破口生成後約 40 秒，因進入再泛水階段，大量於爐心熱通道底部生成的高溫水蒸汽使得爐心熱通道進口之液態冷卻水溫度上升，立體化爐心案例預測之於熱通道爐心入口處冷卻水液態溫度高於非立體化爐心案例預測之結果直至試驗結束。未立體化爐心案例於熱通道爐心入口處冷卻水汽態溫度於破口生成後約 40 秒出現劇烈震盪，這是由於此時冷卻水開始接觸到位於爐心底部的燃料棒護套，開始進入再泛水階段，液態冷卻水吸收來自燃料棒護套的熱量後瞬間生成高溫水蒸汽，使得位於爐心熱通道入口處之汽態冷卻水溫度急遽升高。

圖 5.41 為立體化爐心案例和非立體化爐心案例預測之一次側迴路系統壓力隨時間變化情形。如圖所示，兩個模擬案例預測之系統壓力隨時間變化情形相當一致。

圖 5.42 為立體化爐心案例和非立體化爐心案例預測爐心熱通道進出口壓力差隨

時間之變化情形。兩個模擬案例預測之爐心熱通道進出口壓力差皆於破口生成後約 40 秒出現正向震盪情形，和圖 5.36 兩個案例預測之冷卻水於爐心熱通道入口質量流率於破口生成後約 40 秒亦呈現大幅震盪情形相符合。就非立體化爐心案例預測之結果而言，於圖 5.41 可觀得，破口生成後約 40 秒壓力差值出現第一個劇烈的震盪，此現象和圖 5.36 所呈現之非立體化爐心案例預測質量流率於破口生成後約 40 秒出現一幅度相當大的震盪相符合。立體化爐心案例於破口生成後約 40 秒，液態冷卻水接觸爐心熱通道底端燃料棒護套、產生水蒸汽、沖向熱通道出口的效應於圖 5.27 中不及未立體化爐心案例來地明顯。

最終，立體化爐心案例預測燃料護套尖峰溫度值較未立體化爐心案例低約 180 °F。經過一系列比對，可觀察立體化爐心案例預測於爐心結構體中不同水平高度之流體液態速度、汽態速度、液態表相速度和汽態表相速度大多較非立體化爐心案例預測結果為大且擁有較大的震盪幅度，且此現象隨著水平高度的增加益為明顯。另外，立體化爐心案例預測於爐心熱通道進、出口處的累積流體質量均較非立體化爐心案例預測結果為大。由以上可驗證，熱通道中的確存在煙囪效應，使得立體化爐心案例預測燃料護套尖峰溫度值較非立體化爐心案例低，且如圖 5.38 所示，立體化爐心案例預測於熱通道最熱點處冷卻水經由流體橫流皆點流向一般通道的量小於未立體化爐心案例，亦促成了立體化爐心案例預測之燃料護套尖峰溫度值較低之事實。

立體化爐心案例煙囪效應較未立體化爐心案例明顯，然其進入再泛水階段冷卻水質量流率於相關位置所呈現之震盪情形不若未立體化爐心案例明顯。立體化爐心案例預測之緊急爐心冷卻系統啟動時間點、進入再注水階段和進入再泛水階段的時間點則分別為 13.58、16.86、17.94 秒。其中最顯著的差異在於，爐心立體化後進入再泛水

階段時間點較未立體化案例提早 22.22 秒。

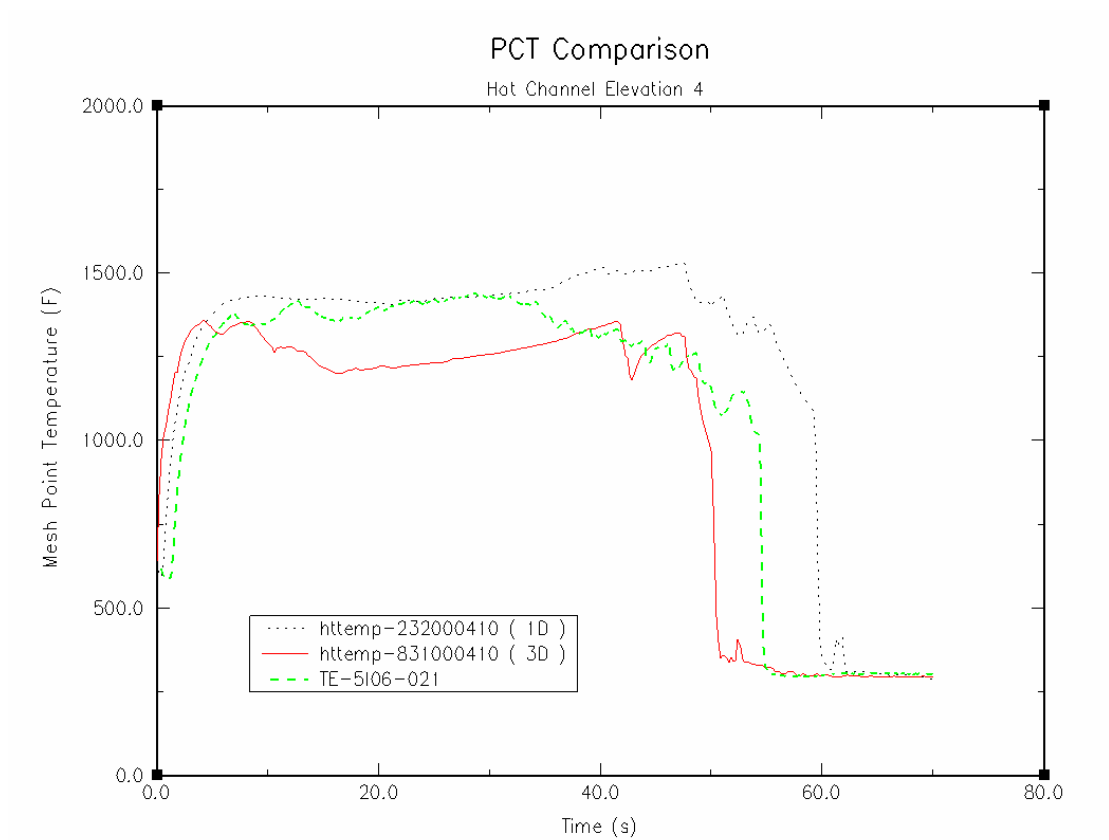


圖 5.1 發生燃料護套尖峰溫度值處之護套溫度和實驗資料  
(立體化爐心模擬的影響)

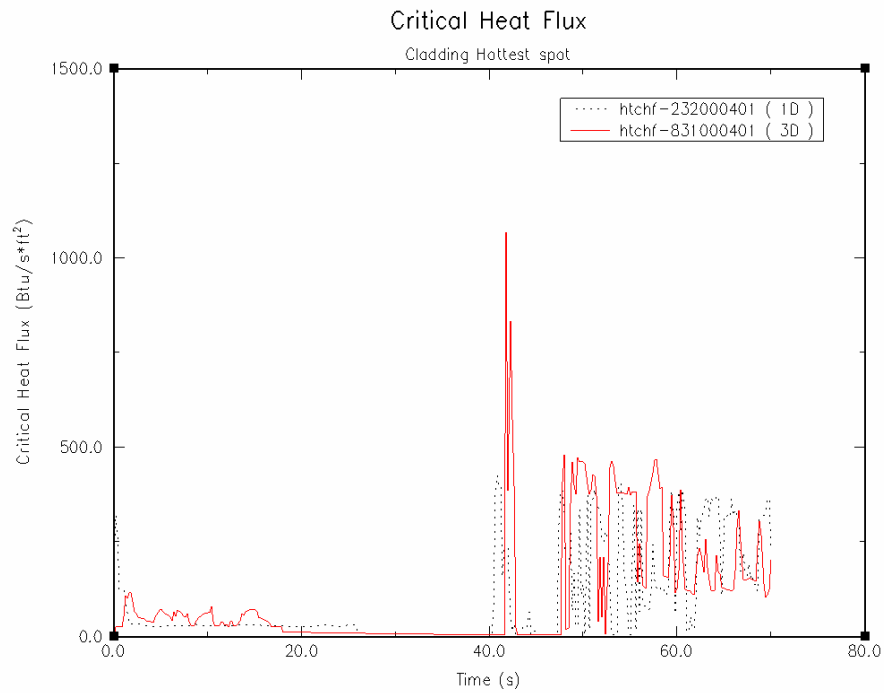


圖 5.2 發生燃料護套尖峰溫度值處之臨界熱通量  
(立體化爐心模擬的影響)

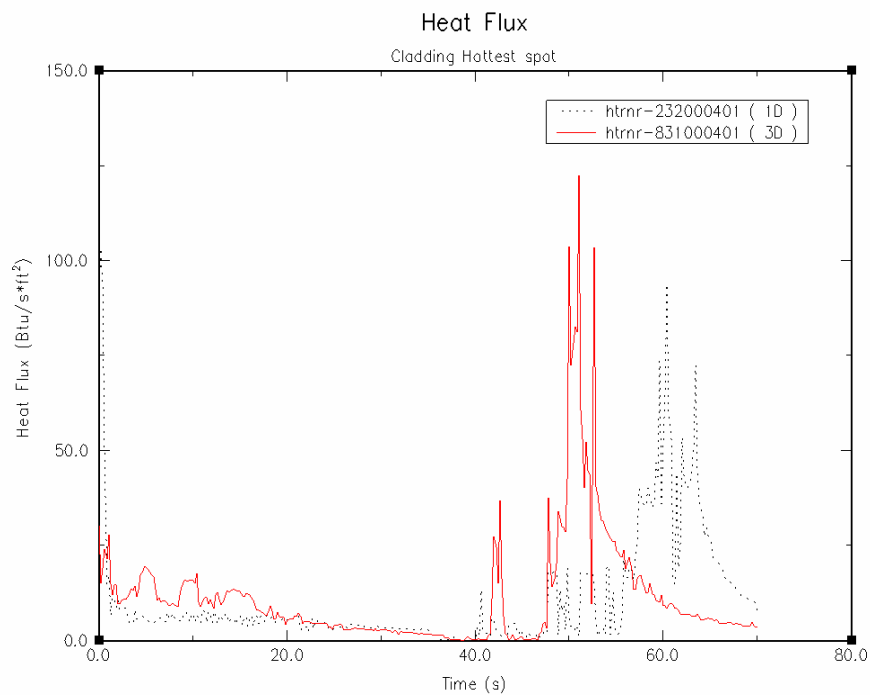


圖 5.3 燃料護套尖峰溫度值處之熱通量 (立體化爐心模擬的影響)

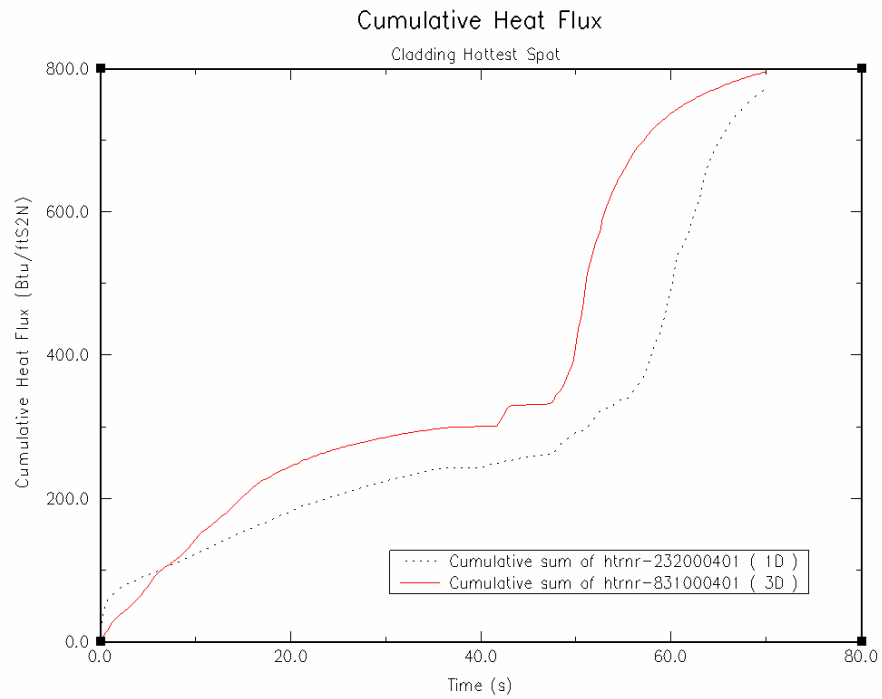


圖 5.4 發生燃料護套尖峰溫度值處所釋放之累積熱通量  
(立體化爐心模擬的影響)

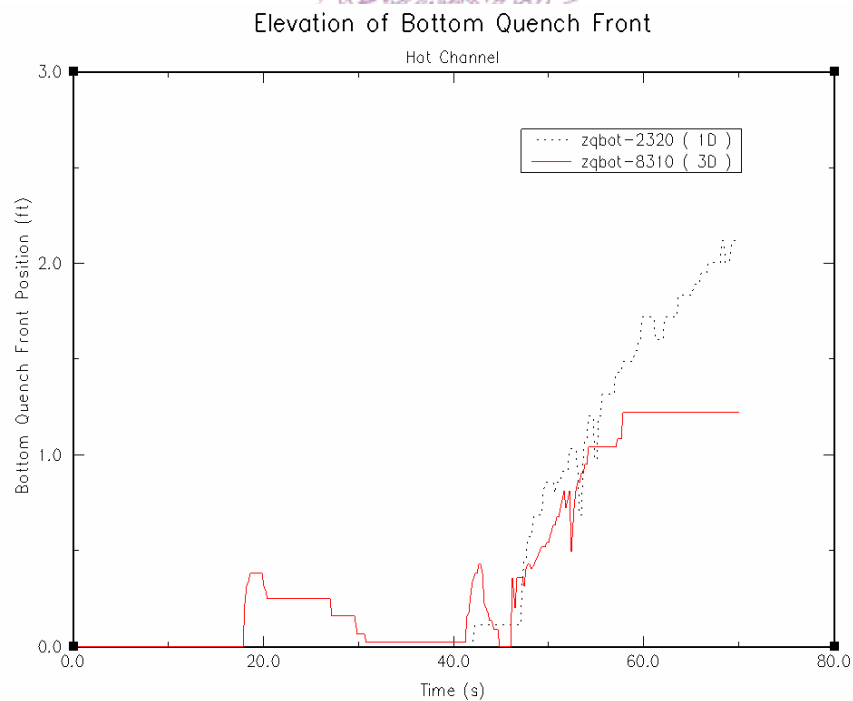


圖 5.5 爐心熱通道之覆水淬冷 (Quench) 位置  
(立體化爐心模擬的影響)



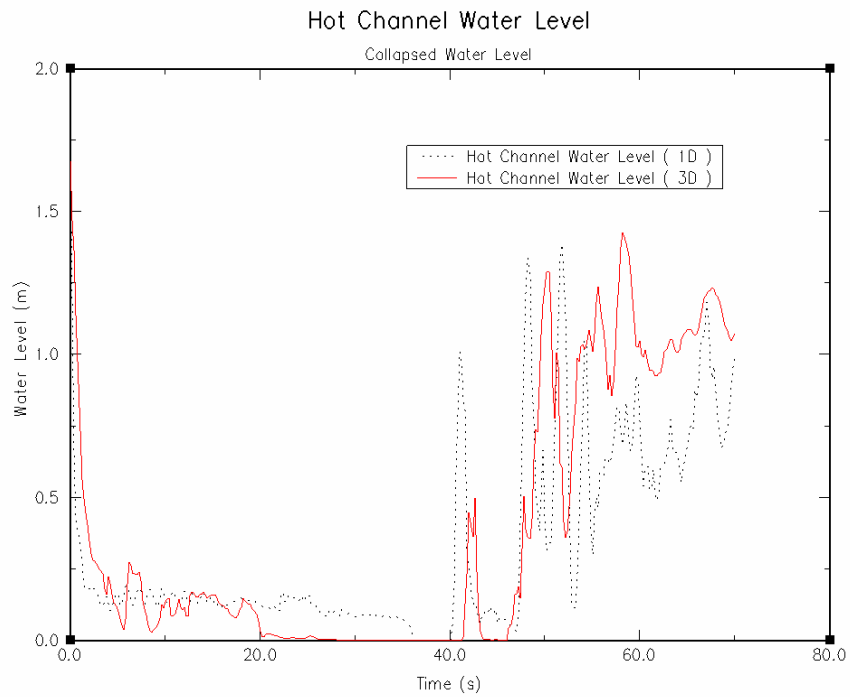


圖 5.6 爐心熱通道液態水位 (Collapsed Water Level)  
(立體化爐心模擬的影響)

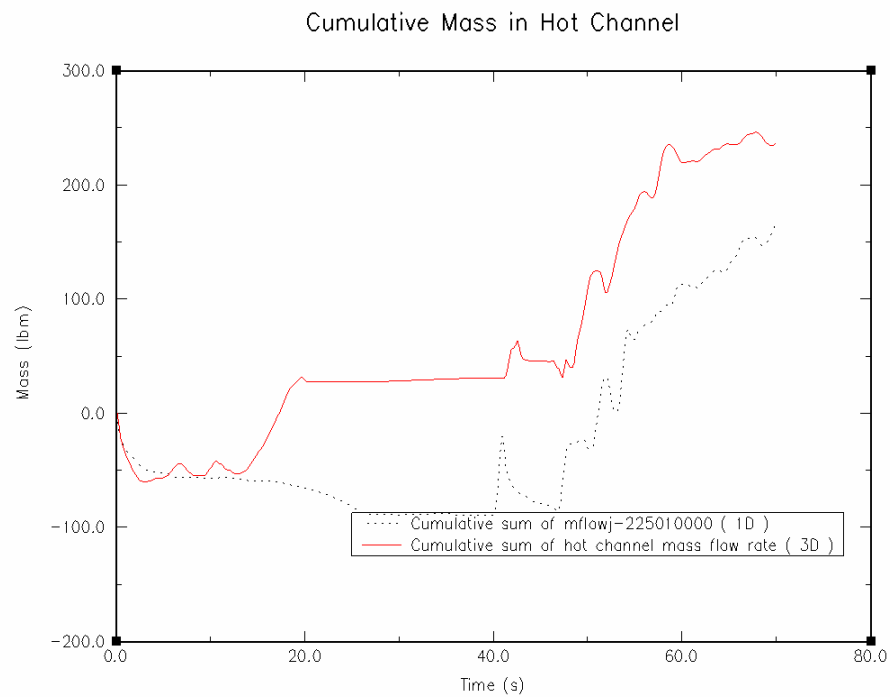


圖 5.7 冷卻水流入熱通道入口之累積流量  
(立體化爐心模擬的影響)

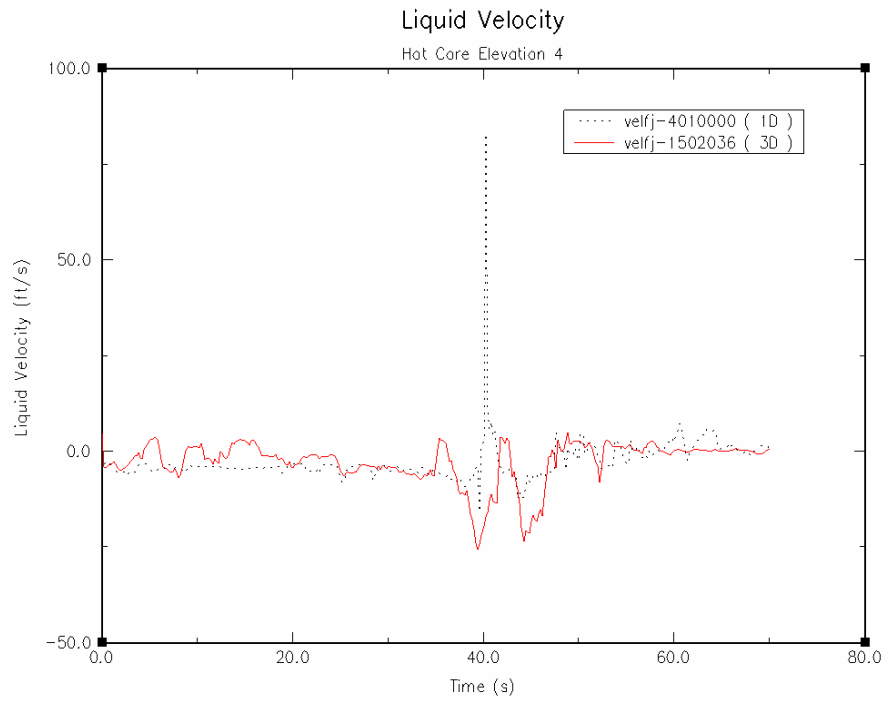


圖 5.8 熱通道第四階 (Elevation 4) 冷卻水液態速度  
(立體化爐心模擬的影響)

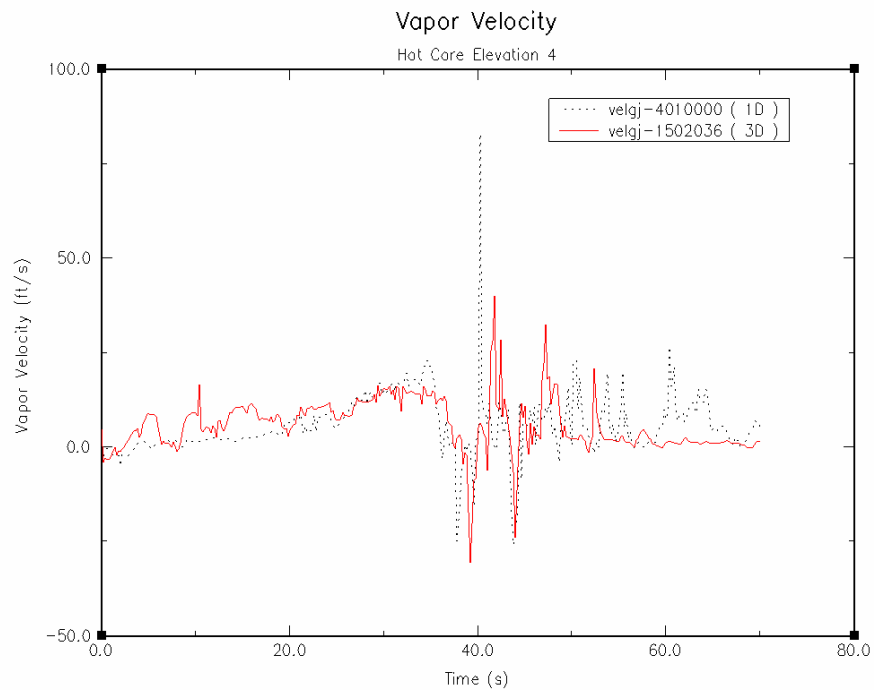


圖 5.9 熱通道第四階 (Elevation 4) 冷卻水汽態速度  
(立體化爐心模擬的影響)

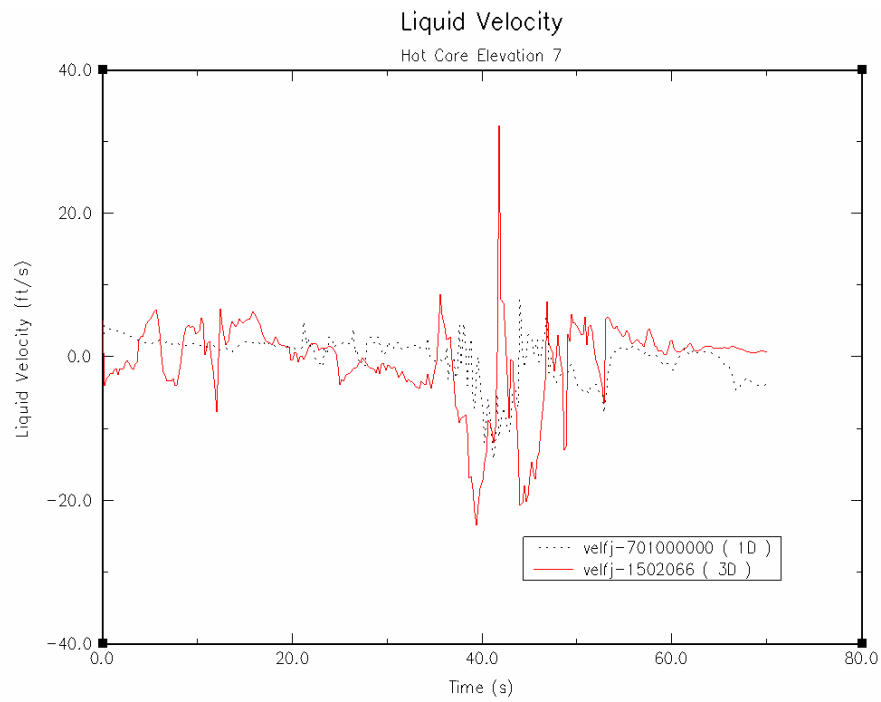


圖 5.10 熱通道第七階 (Elevation 7) 冷卻水液態速度  
(立體化爐心模擬的影響)

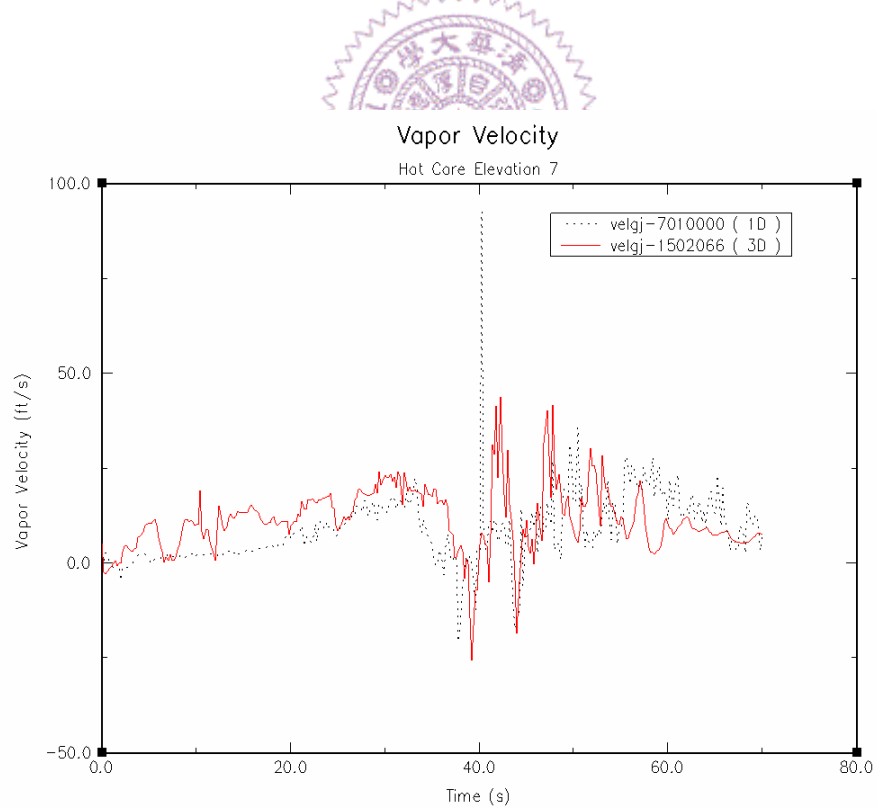


圖 5.11 熱通道第七階 (Elevation 7) 冷卻水汽態速度  
(立體化爐心模擬的影響)

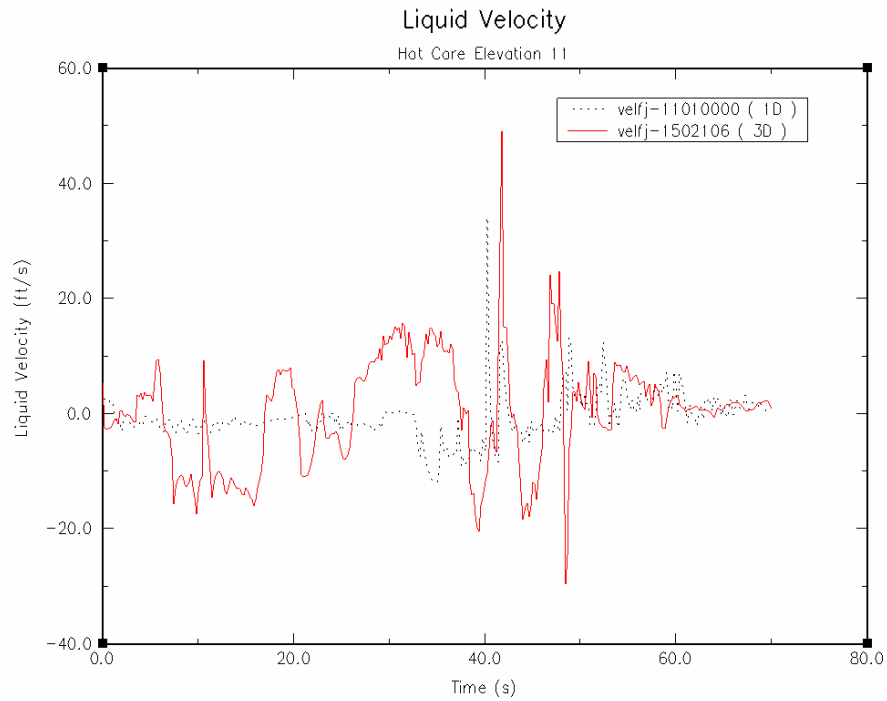


圖 5.12 熱通道第十一階 (Elevation 11) 冷卻水液態速度  
(立體化爐心模擬的影響)

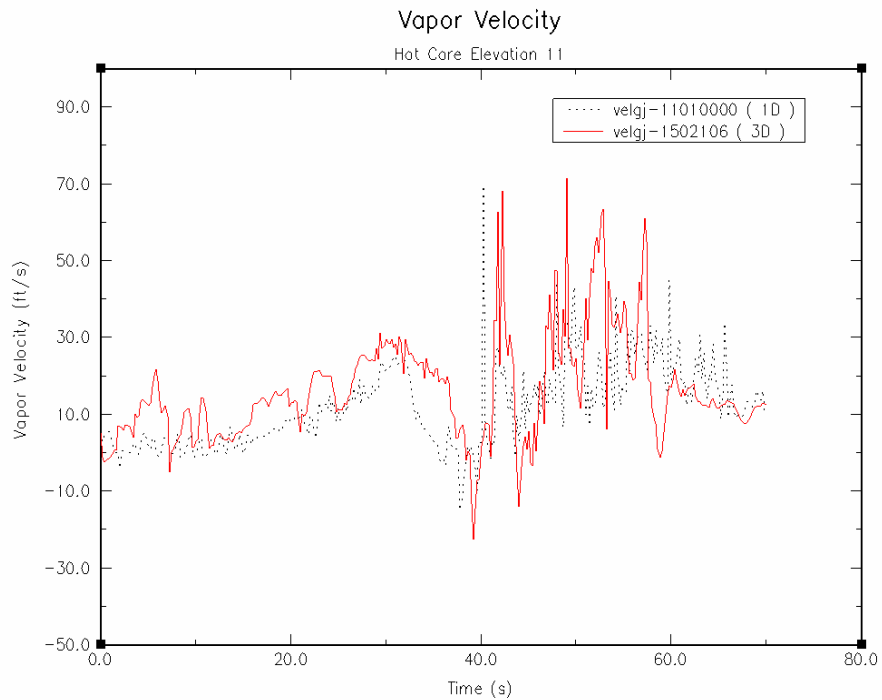


圖 5.13 熱通道第十一階 (Elevation 11) 冷卻水汽態速度  
(立體化爐心模擬的影響)

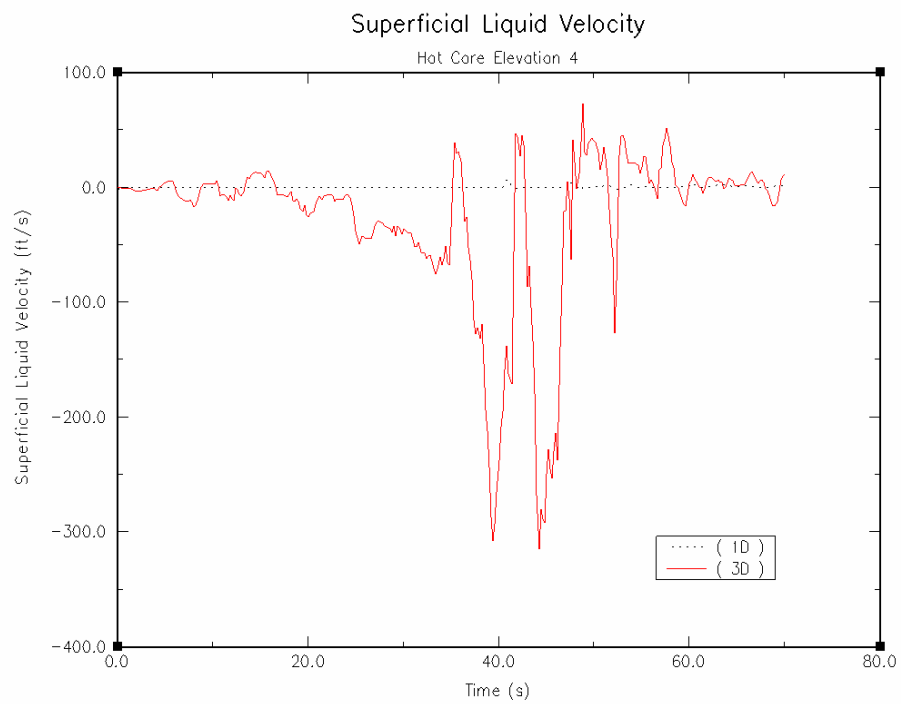


圖 5.14 熱通道第四階 (Elevation 4) 冷卻水液態表相速度  
(立體化爐心模擬的影響)

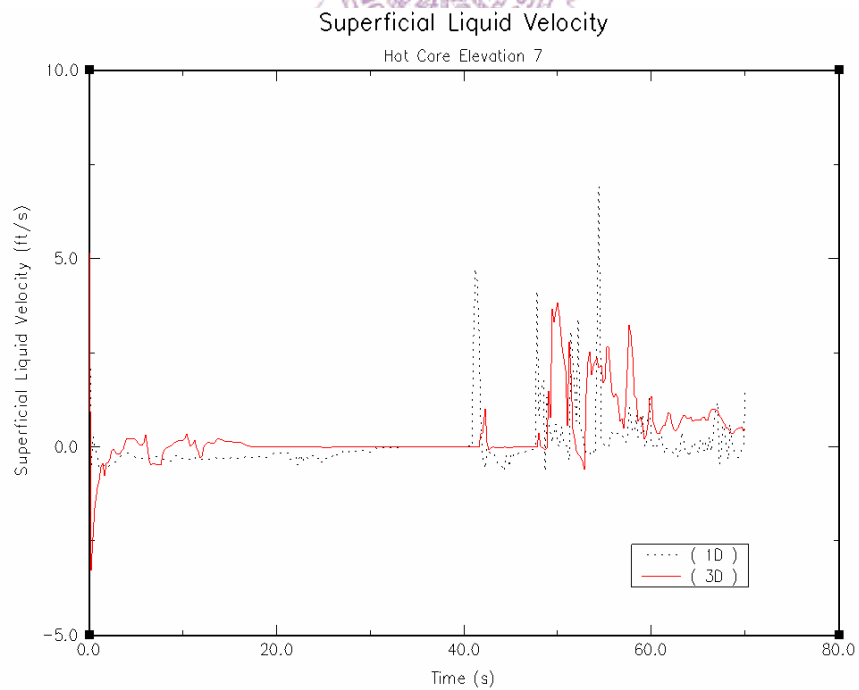


圖 5.15 熱通道第七階 (Elevation 7) 冷卻水液態表相速度  
(立體化爐心模擬的影響)

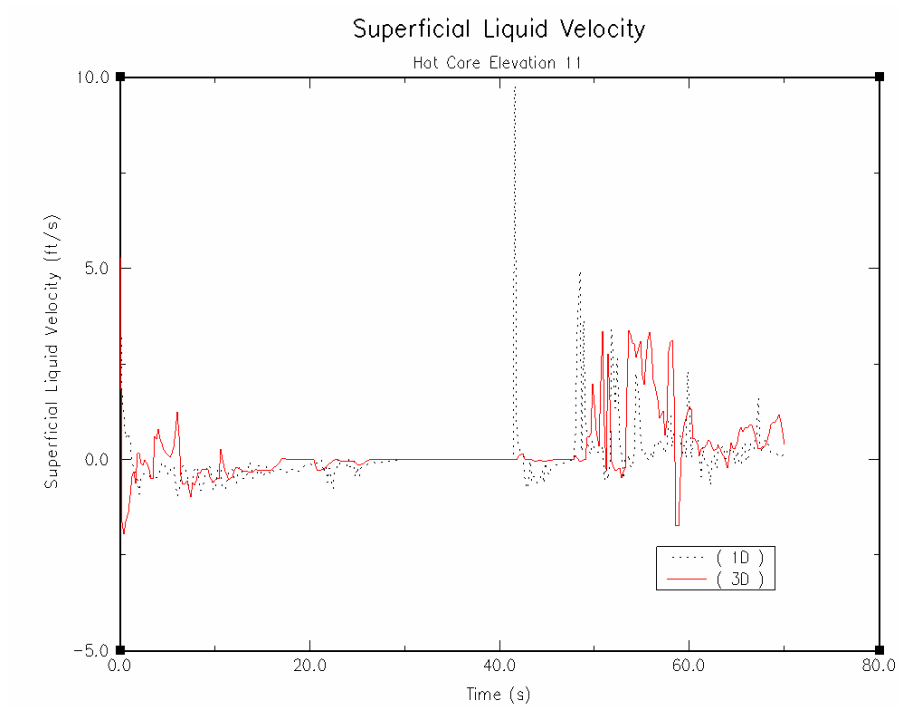


圖 5.16 熱通道第十一階 (Elevation 11) 冷卻水液態表相速度  
(立體化爐心模擬的影響)

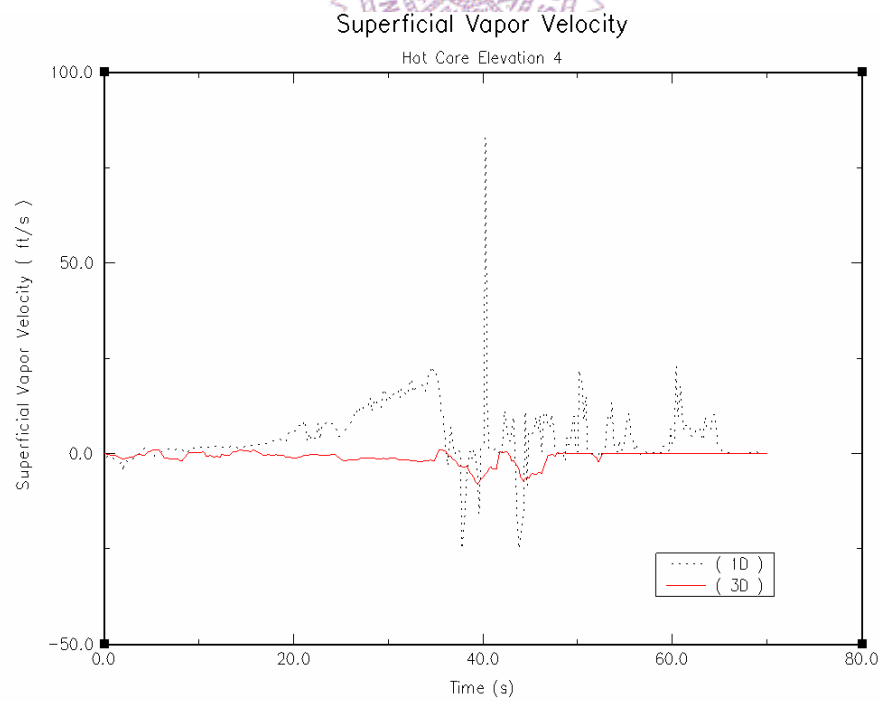


圖 5.17 熱通道第四階 (Elevation 4) 冷卻水汽態表相速度  
(立體化爐心模擬的影響)

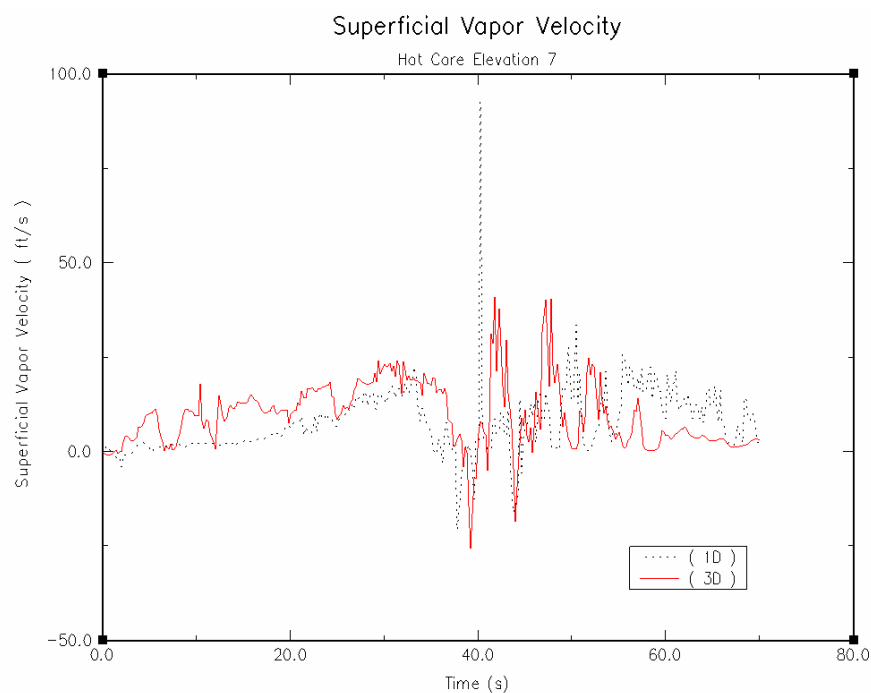


圖 5.18 熱通道第七階 (Elevation 7) 冷卻水汽態表相速度  
(立體化爐心模擬的影響)

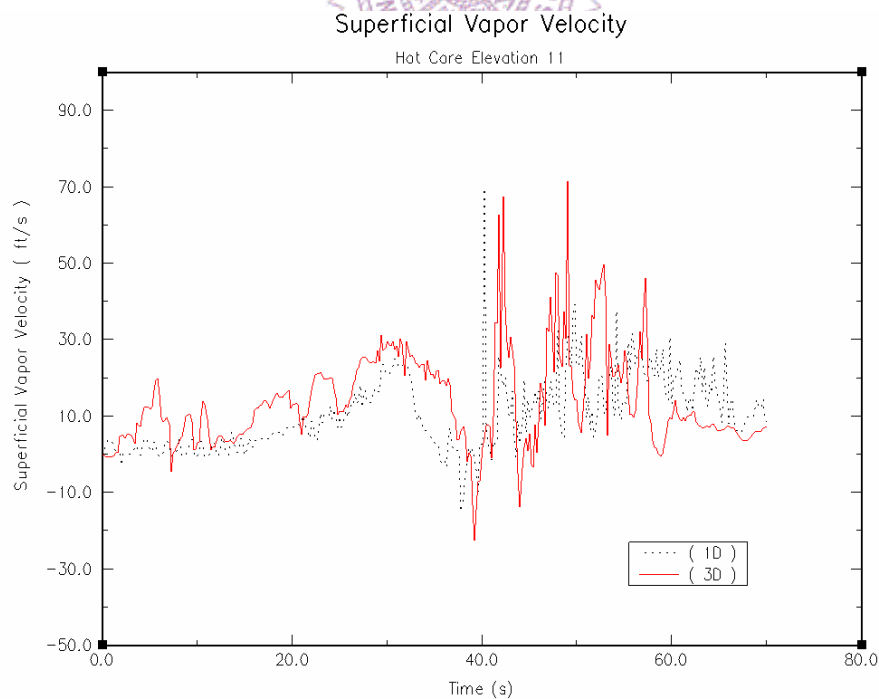


圖 5.19 熱通道第十一階 (Elevation 11) 冷卻水汽態表相速度  
(立體化爐心模擬的影響)



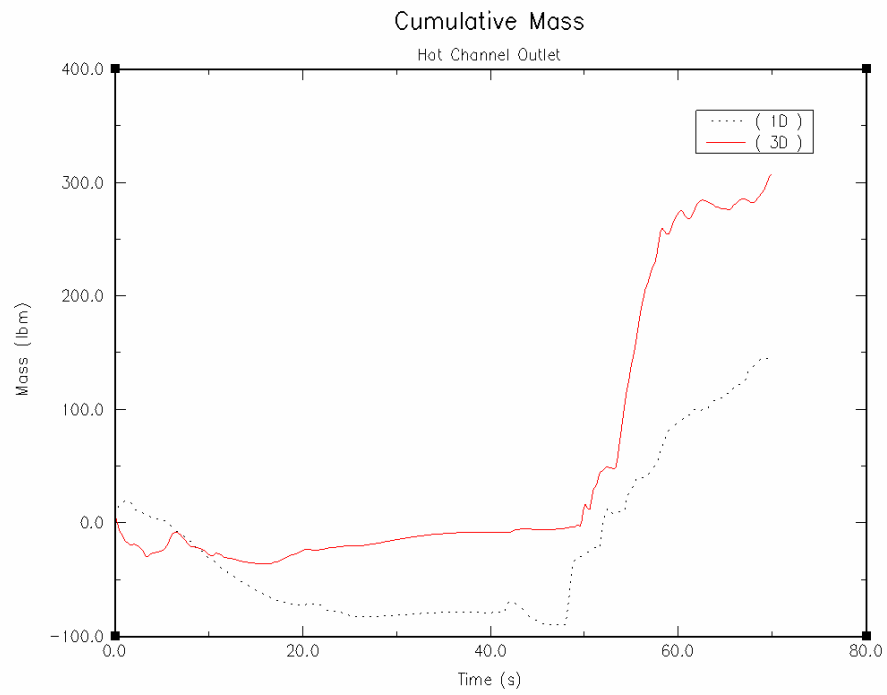


圖 5.20 熱通道出口冷卻水累積流量（立體化爐心模擬的影響）

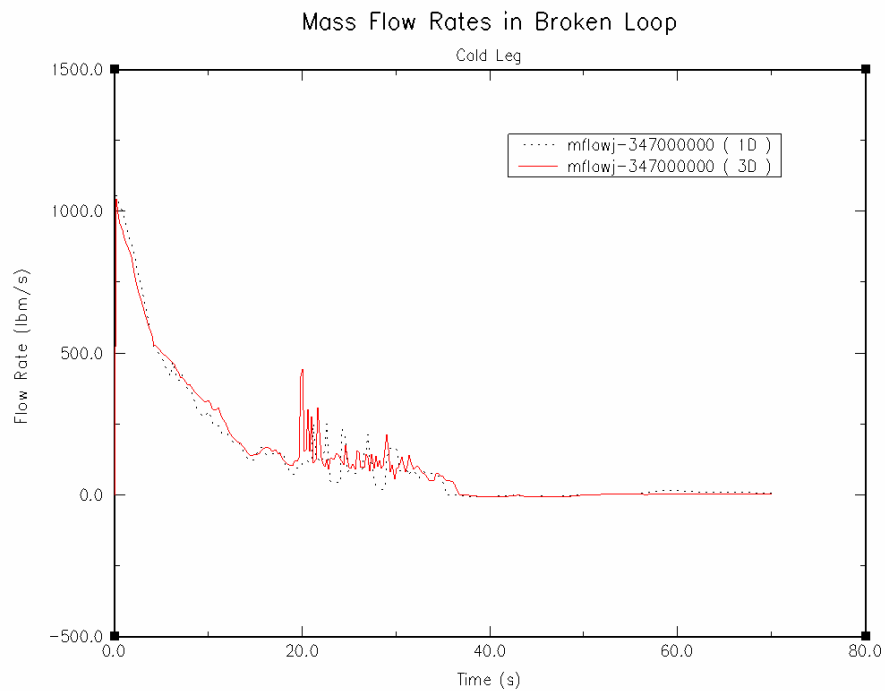


圖 5.21 近冷端破口之質量流率（立體化爐心模擬的影響）

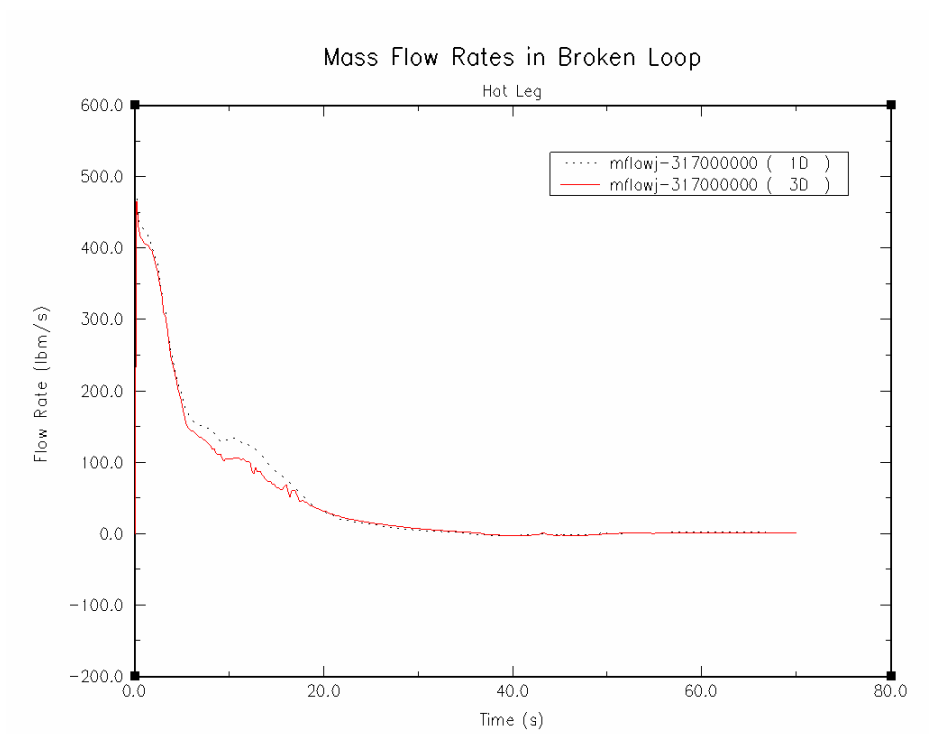


圖 5.22 近熱端破口之質量流率（立體化爐心模擬的影響）

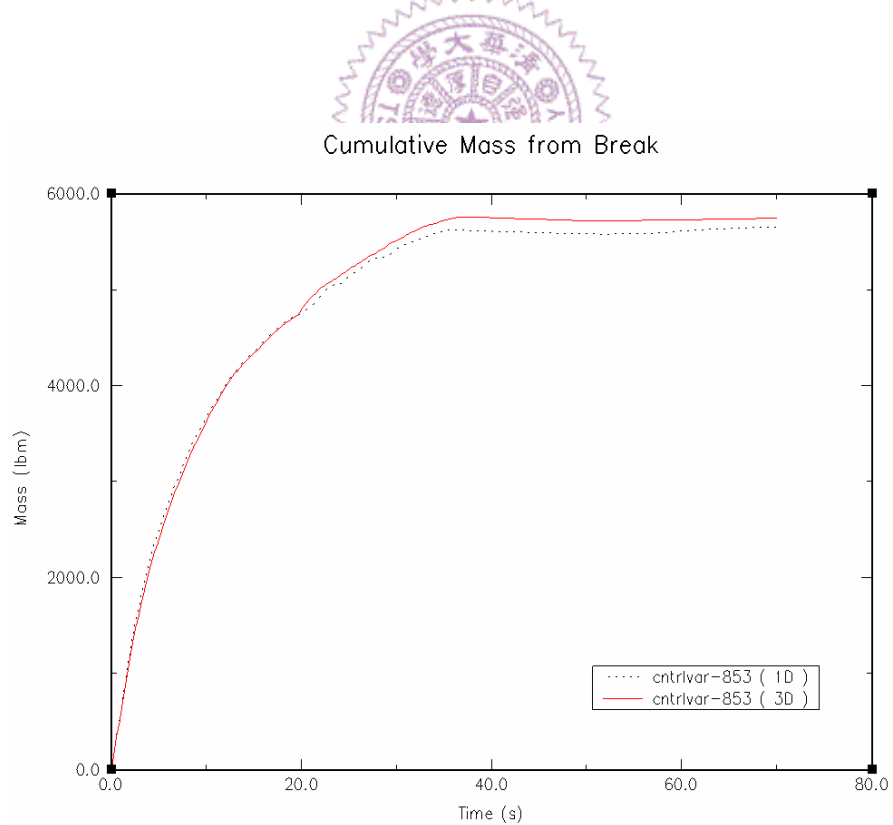


圖 5.23 破口兩端流出冷卻水累積流量加總結果  
（立體化爐心模擬的影響）

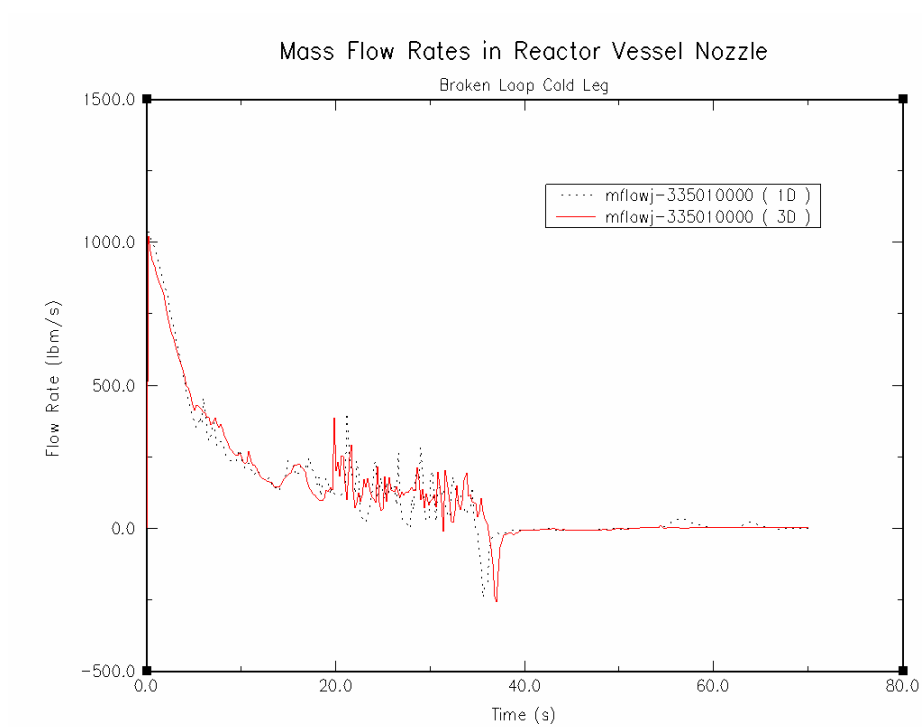


圖 5.24 反應器壓力槽噴嘴破口側冷端迴路之質量流率  
(立體化爐心模擬的影響)

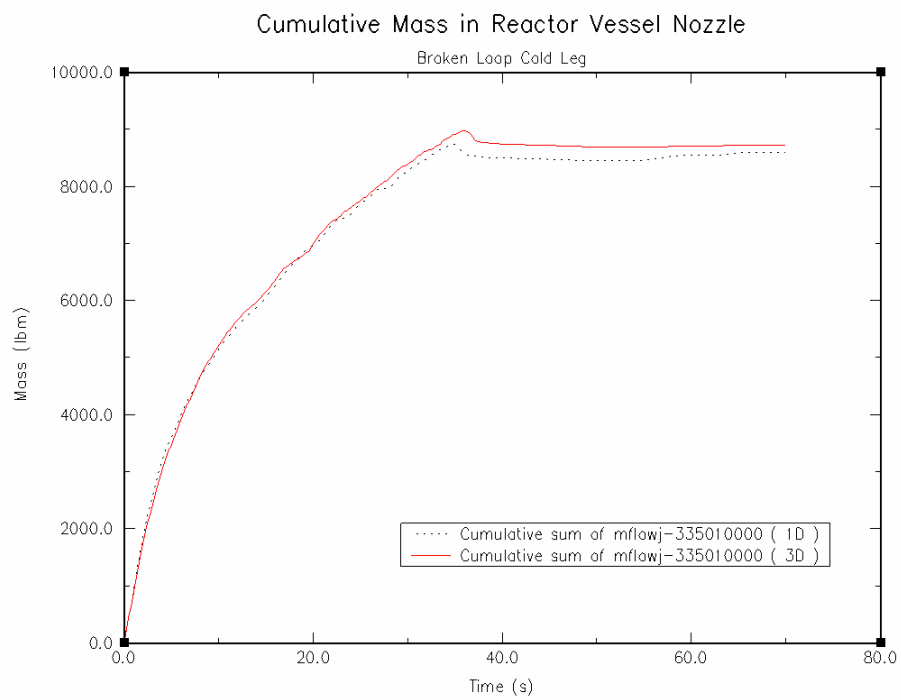


圖 5.25 反應器壓力槽噴嘴破口側冷端迴路之累積流量  
(立體化爐心模擬的影響)

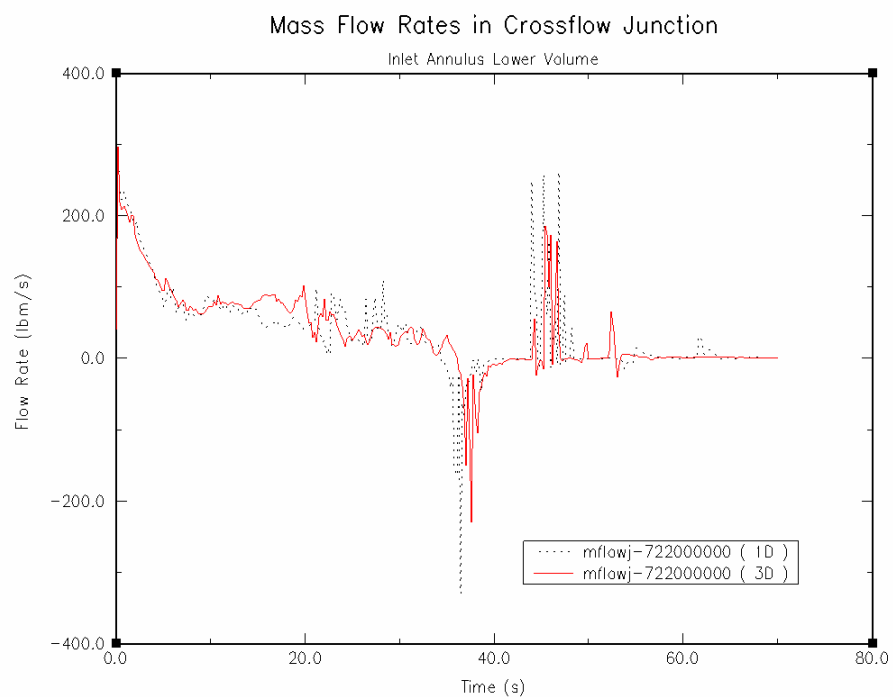


圖 5.26 壓力槽入口下部環型體積之流體橫流接點冷卻水質量流率  
(立體化爐心模擬的影響)

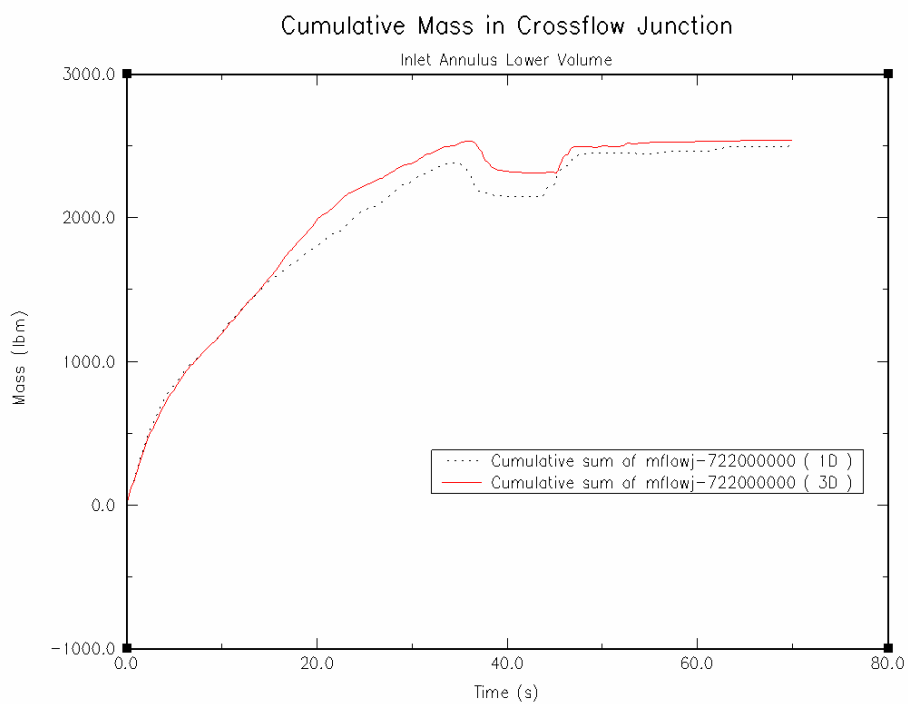


圖 5.27 壓力槽入口下部環型體積之流體橫流接點冷卻水累積流量  
(立體化爐心模擬的影響)

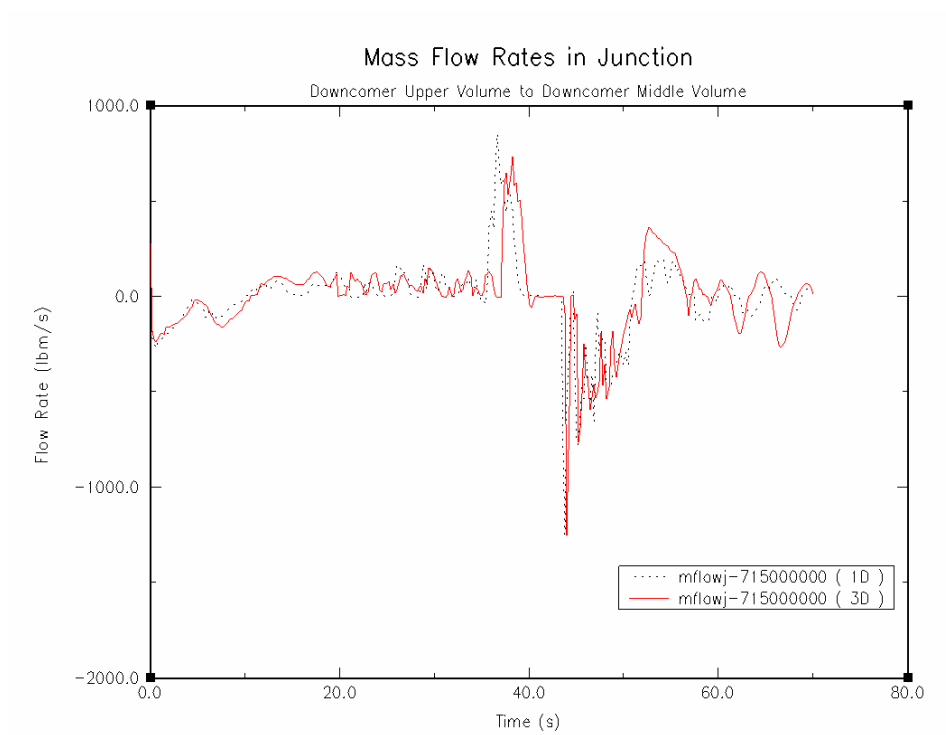


圖 5.28 破口側降流區頂部體積流向降流區中部體積之冷卻水質量流率  
(立體化爐心模擬的影響)

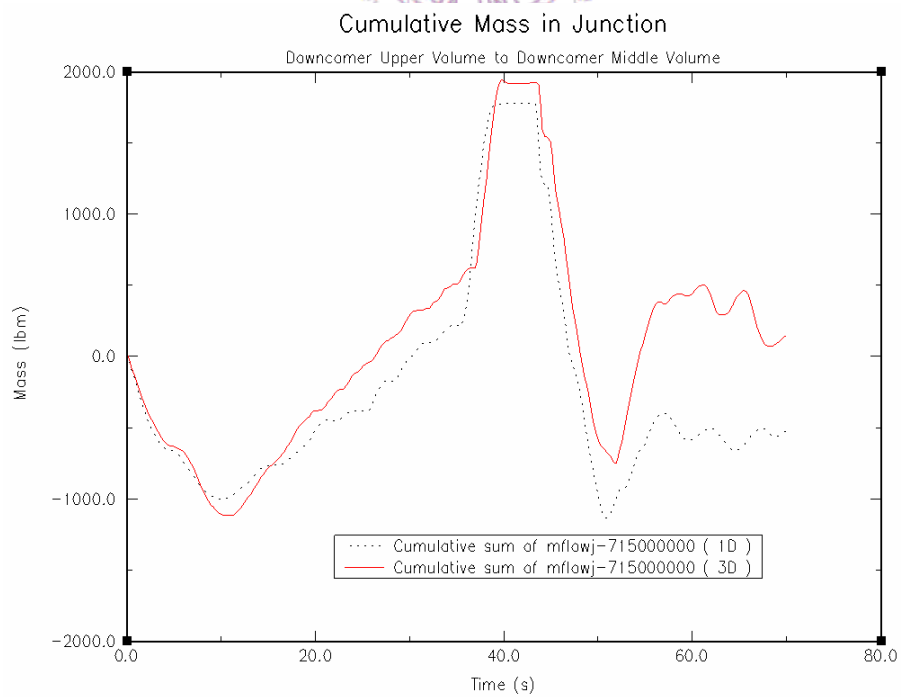


圖 5.29 破口側降流區頂部體積流向降流區中部體積之冷卻水累積流量  
(立體化爐心模擬的影響)

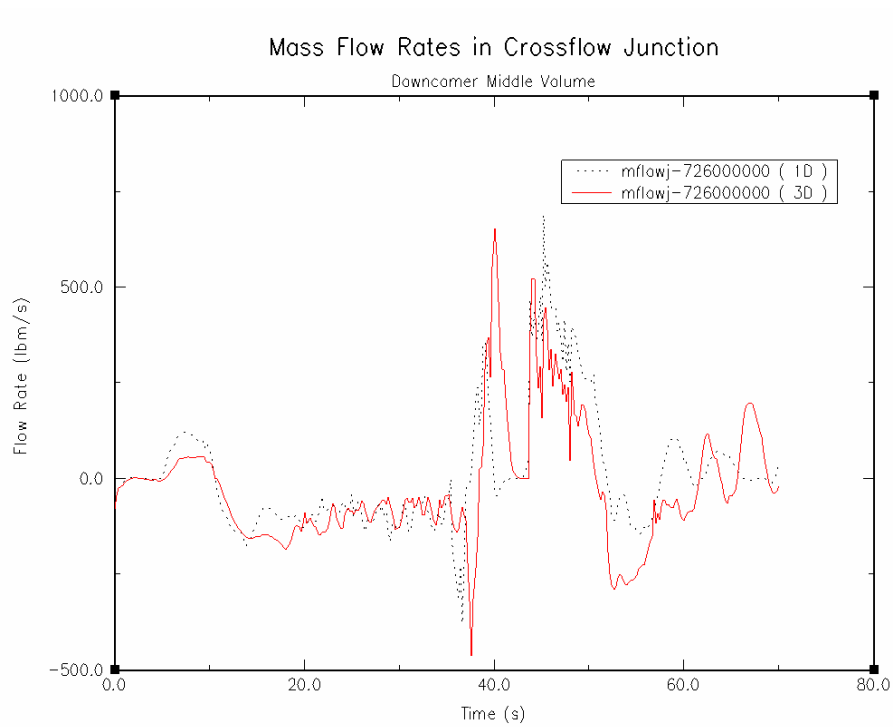


圖 5.30 降流區中部體積流體橫流接點之冷卻水質量流率  
(立體化爐心模擬的影響)

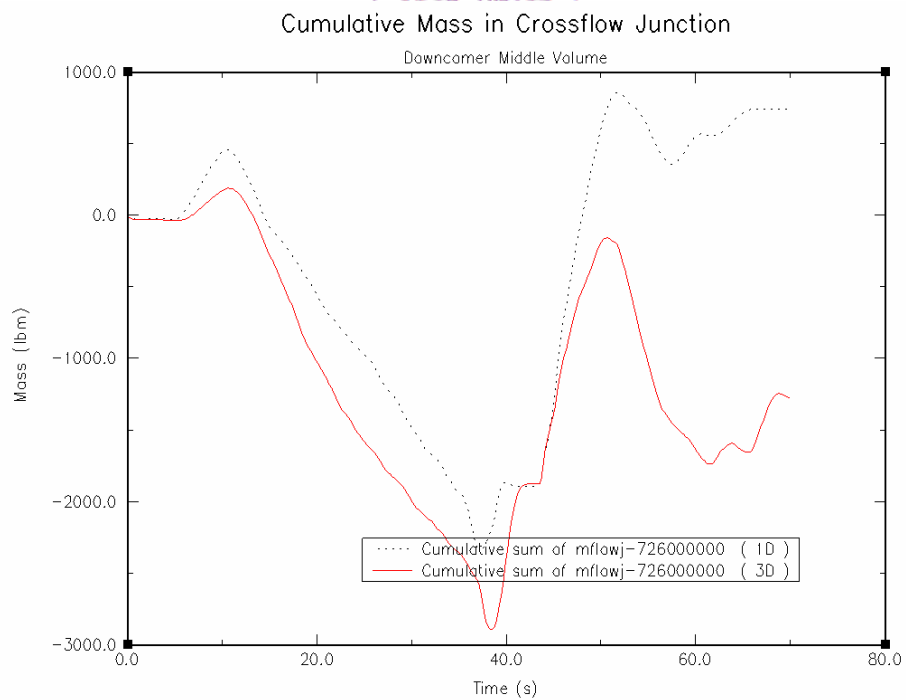


圖 5.31 降流區中部體積流體橫流接點之冷卻水累積流量  
(立體化爐心模擬的影響)



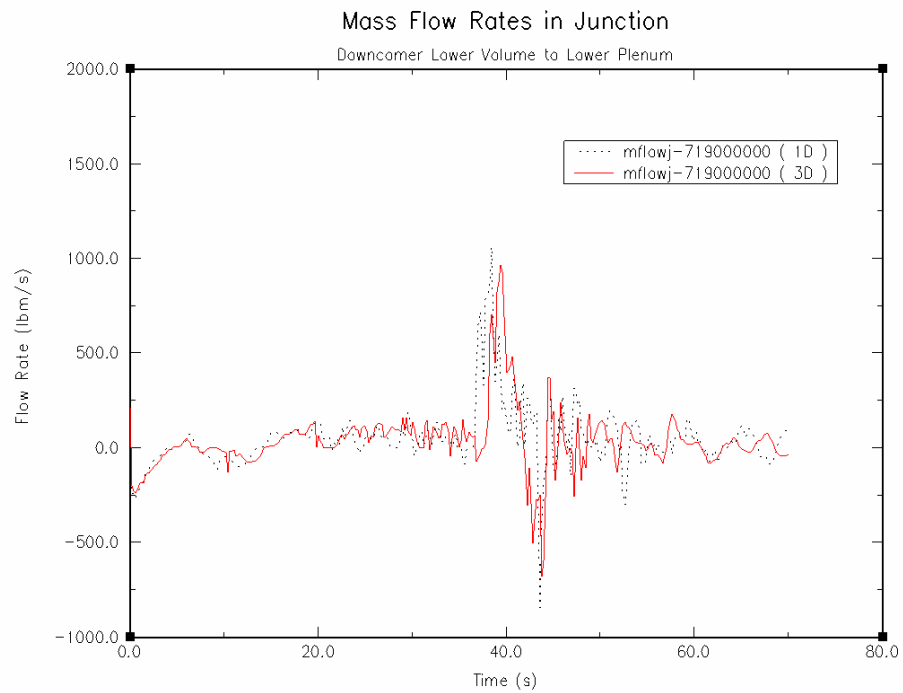


圖 5.32 冷卻水於降流區下部體積流向反應器底部空間之質量流率  
(立體化爐心模擬的影響)

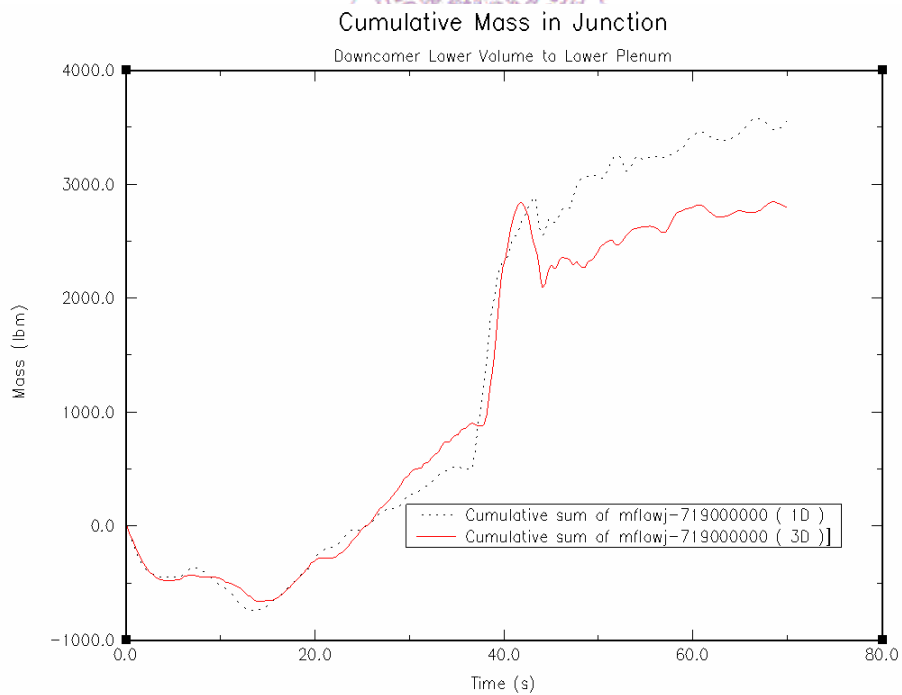


圖 5.33 冷卻水於降流區下部體積流向反應器底部空間之累積流量  
(立體化爐心模擬的影響)

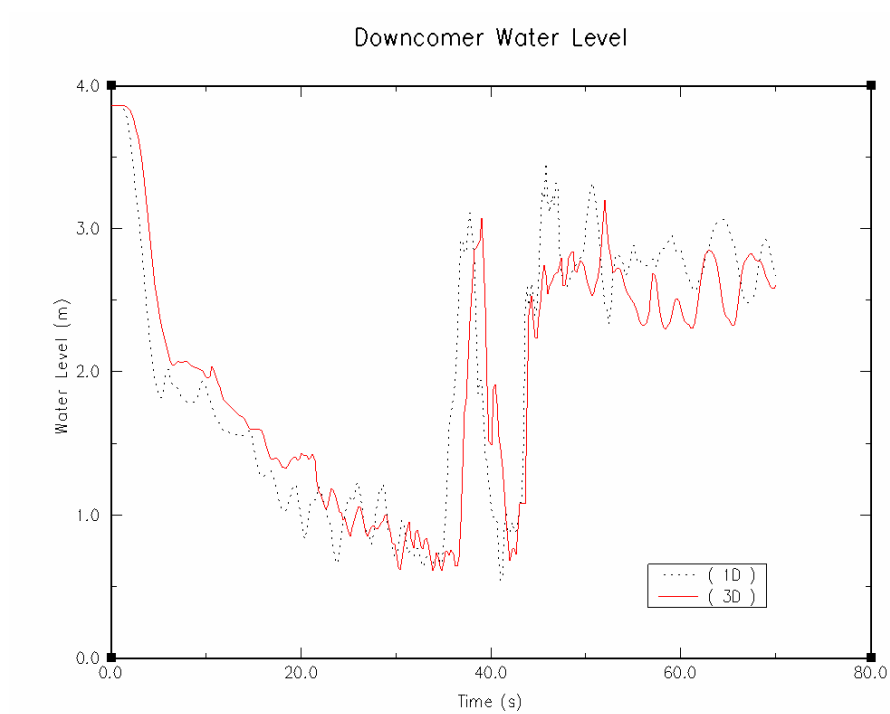


圖 5.34 降流區水位高度（立體化爐心模擬的影響）

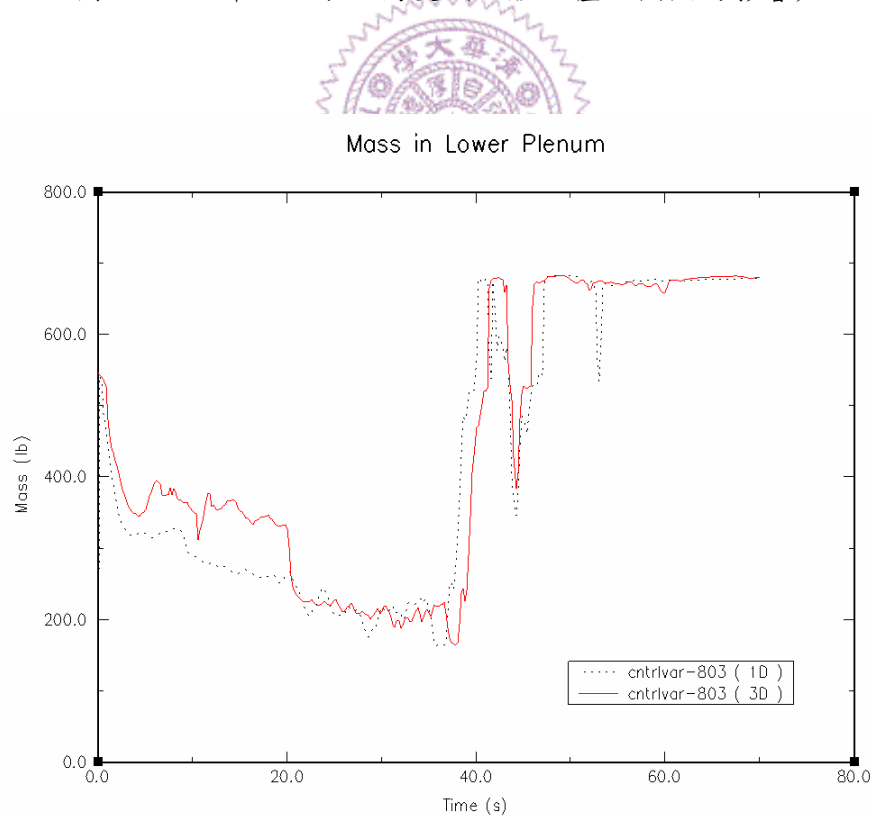


圖 5.35 反應器底部空間之冷卻水質量（立體化爐心模擬的影響）

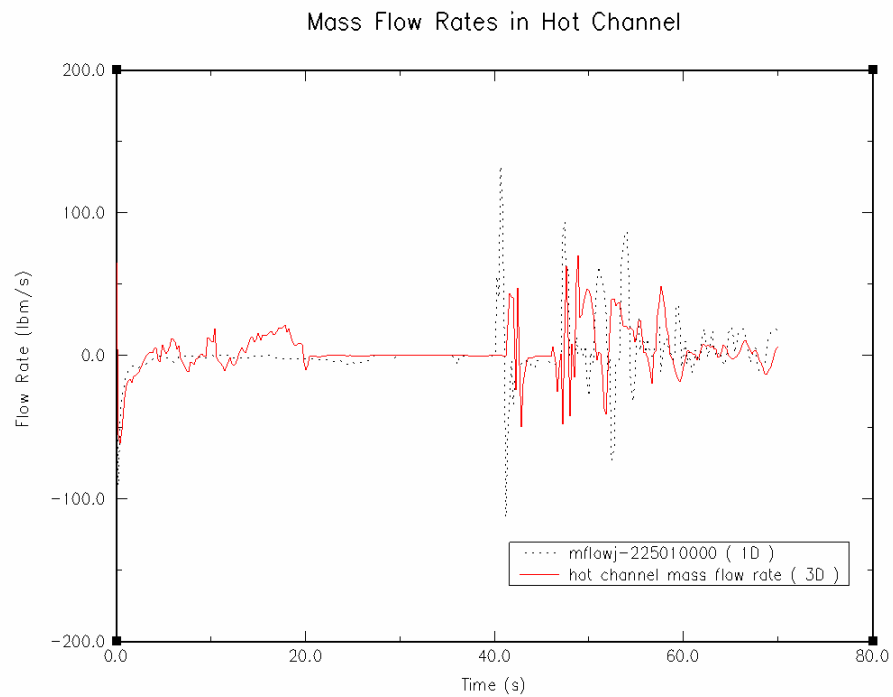


圖 5.36 冷卻水於熱通道入口之質量流率（立體化爐心模擬的影響）

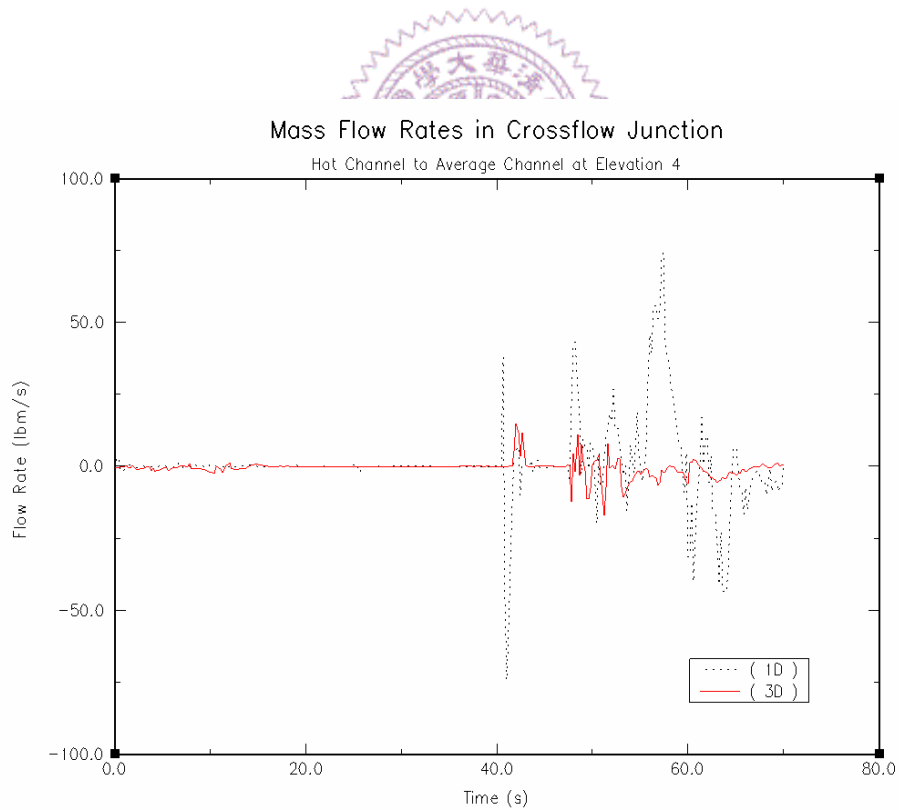


圖 5.37 連接第四階熱通道和第四階一般通道之流體橫流接點質量流率  
（立體化爐心模擬的影響）

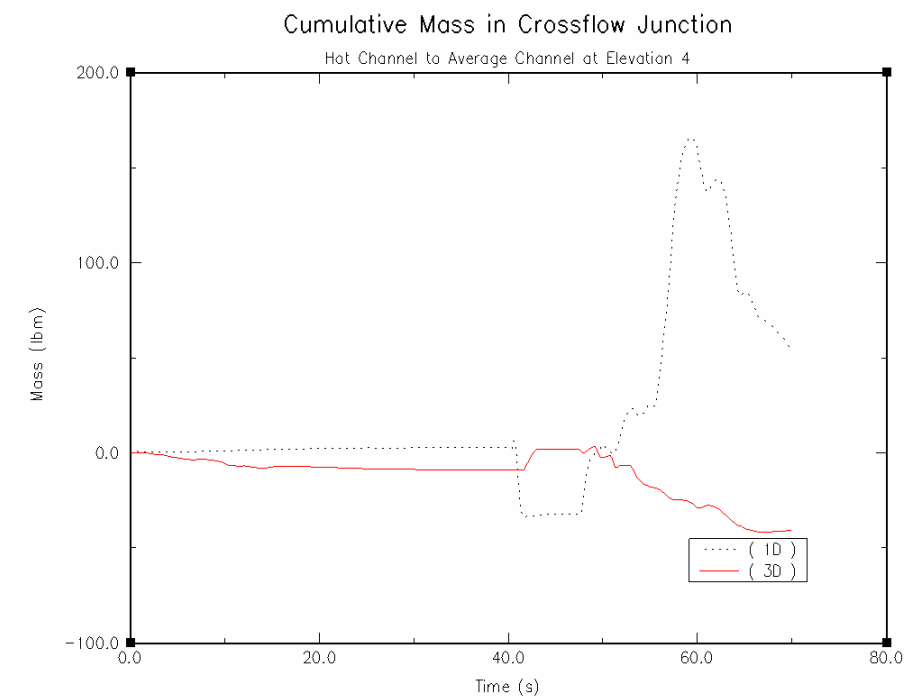


圖 5.38 連接第四階熱通道和第四階一般通道之流體橫流接點累積流量  
(立體化爐心模擬的影響)

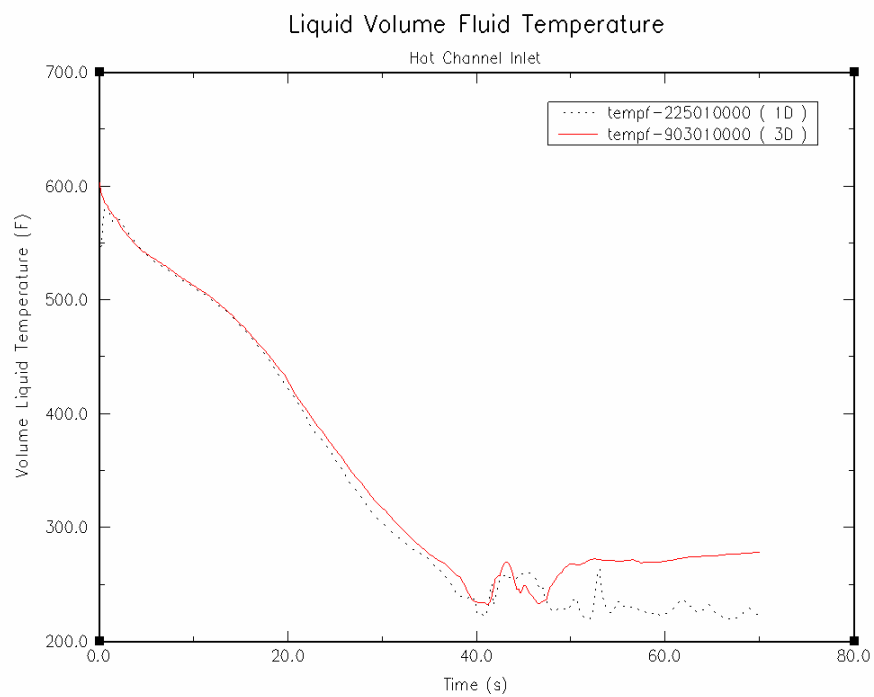


圖 5.39 熱通道爐心入口處冷卻水液態溫度  
(立體化爐心模擬的影響)

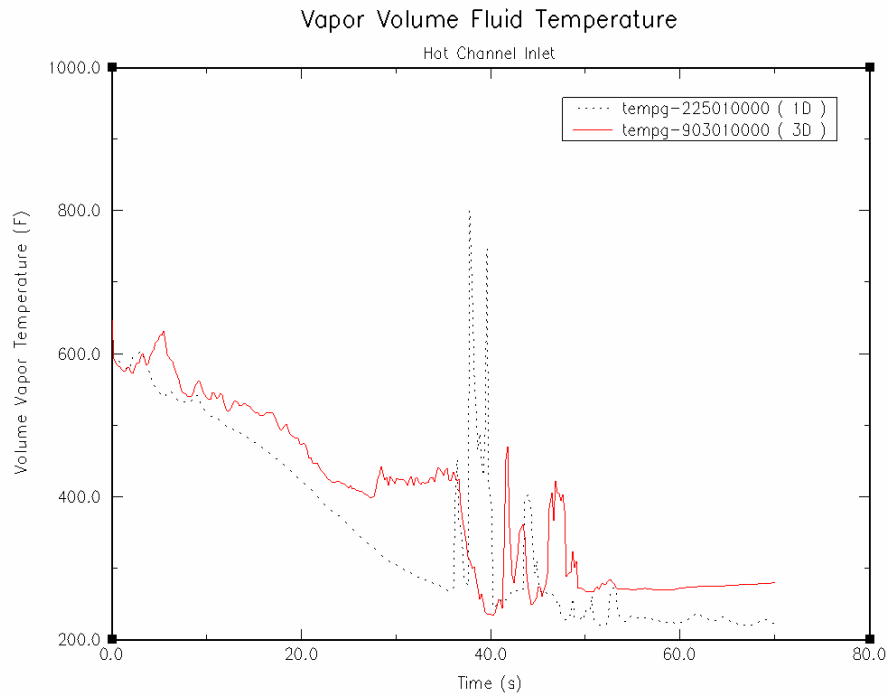


圖 5.40 熱通道爐心入口處冷卻水汽態溫度  
(立體化爐心模擬的影響)

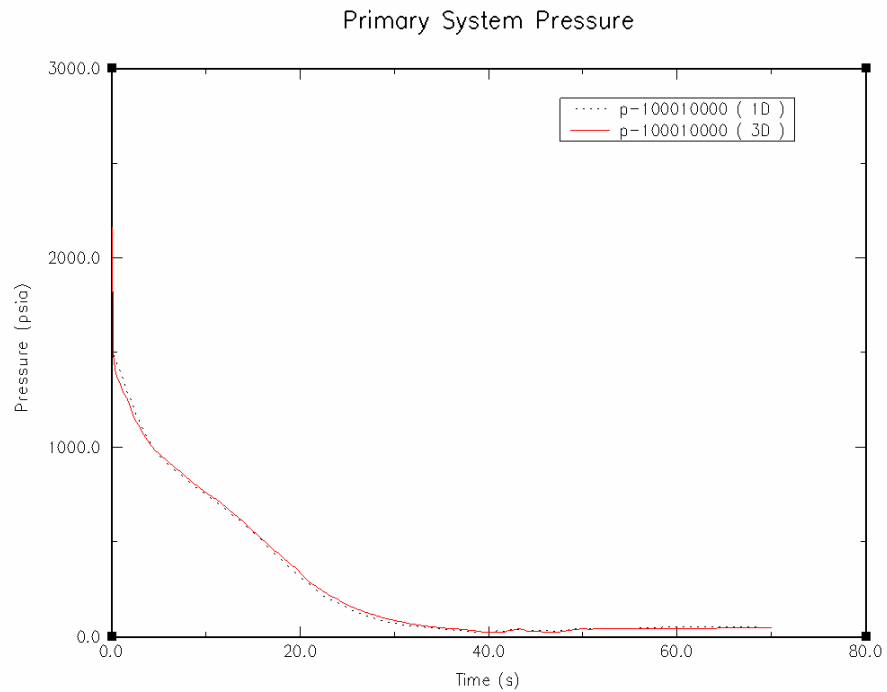


圖 5.41 一次側迴路系統壓力 (立體化爐心模擬的影響)

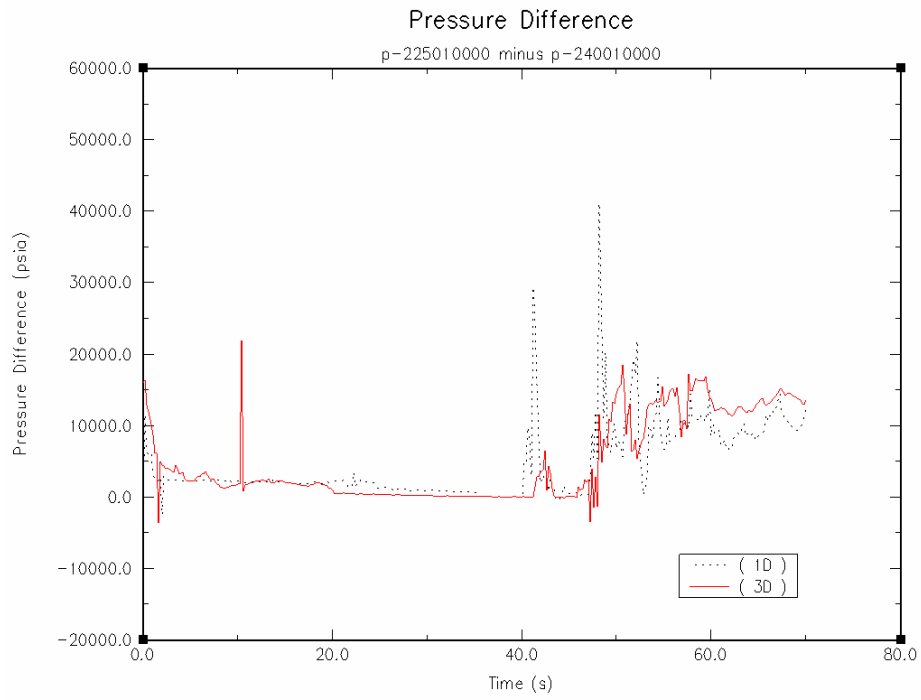


圖 5.42 熱通道進出口壓差（立體化爐心模擬的影響）



## 第六章 降流區立體化及分析結果

### 6.1 壓力槽降流區模式建構

#### 6.1.1 降流區一維度模式說明

如節點圖 4.1 所示，編號為 700、730、702 的體積分別代表完整迴路側的入口環形體積 (Inlet Annulus) 之上部、中部和下部區塊，710、740、712 則分別是破口迴路側的入口環形體積之上部、中部和下部區塊。此六塊體積下所連接的是降流區，元件代號 704、706、708 分別表示完整迴路側的降流區上部、中部和下部區塊，而 714、716、718 三個元件代碼則表示降流區元件於破口迴路側的上部、中部和下部區塊。

降流區於完整迴路側和破口迴路側兩邊的區塊間均設有流體橫流接點 (Crossflow Junction) 使得冷卻水能自由流動於位於擁有相同水平高度的兩個區塊之間。舉例來說，元件代號 704 和 706 兩區塊間即設有流體橫流接點，使得由元件代號 702 和元件代號 712 所輸送來的冷卻水得以相互流通於元件 704 和元件 706 之間。這樣的流體接點設定也較貼近工作流體於實際降流區其流動方向不僅僅限於垂直方向之事實。於降流區中流體橫流接點共設置了三個，分別介於元件 704 和 714、元件 706 和 716、元件 708 和 718 之間。

入口環形體積和降流區均以 RELAP5-3D 中的環型元件 (Annulus) 來進行模擬。入口環形體積的流體橫流接點設置和降流區一樣，都是在兩兩成對的區塊間安裝一流體橫流接點使得工作流體能相互流通於其間。

流體接點 731、703、705、707、709、741、713、715、717、719 均設有反向極限流之流動限制 (Counter Current Flow Limit, CCFL) 使得由緊急爐心系統所注入



之冷卻水不至於即刻貫穿降流區，以符合安全法規 10 CFR 50 Appendix K 之緊急爐心旁通相關事項要求。反向極限流式子之型式為：

$$j_g^{*1/2} + m \cdot j_f^{*1/2} = c \quad (6.1)$$

$m$  和  $c$  為常數，分別表示該式之斜率和截距。下標  $g$  和  $f$  分別表示汽態和液態。 $j_i^*$  為無因次表相速度，又稱為華勒斯參數 (Wallis Parameter)，其定義為

$$j_i \cdot \sqrt{\frac{\rho_i}{g \cdot D \cdot (\rho_L - \rho_G)}}。其中 j_i 為表相速度，\rho 為流體密度，g 為重力加速度，D$$

為管路內徑 (Inner Diameter)。

實際於未立體化降流區之反向極限流式乃是依據 UPTF 降流區灌水模組 (Upper Plenum Test Facility Flooding Model) 所設定：

$$j_g^{*1/2} + 2.193 \cdot j_f^{*1/2} = 0.6208 \quad (6.2)$$

### 6.1.2 降流區三維度降流區模式的建構

本研究參照共同由梁國興博士所指導上海交通大學李永兵同學之部分論文內容，選取 RELAP5-3D 中的多維度元件並採用圓柱座標 (Cylindrical Coordinate) 來建構降流區三維度模式，就外觀上而言降流區為一環狀工作流體通道，因此選取圓柱座標來立體化降流區較為方便。所建模式中將降流區切割成 12 個小塊，如圖 6.1 所示。

一維度模擬案例中的 700、710、730、740、702、712、704、714、706、716、708、

718 共 12 塊區塊在三維度模擬案例中由一個被設定切割成 24 塊之多維度元件所替代。如 3.3.1 小節所述，在空間上來看圓柱座標有三個參數，分別為  $R$ 、 $\Theta$ 、 $Z$ 。於本研究中，在立體化降流區的過程裡在半徑軸做一個分割、角度軸做四個分割、高度軸做三個分割，將降流區劃分為 12 個小塊進行 L2-5 試驗模擬。

入口環形體積部分同降流區部分之設定，亦於半徑軸做一個分割、角度軸做四個分割、高度軸做三個分割。將其劃分為 12 個小塊來進行模擬。

入口環型體積和降流區區塊之高度軸方向所做的分割設定延用一維模擬案例之設定。舉例來說，於一維模擬案例中，元件 700 和 730 所設定的高度值分別為 0.187 和 0.285 公尺，基於數據擷取之便利性以比較兩模擬案例參數之考量，本研究亦將立體化之入口環型體積頂部區塊和中部區塊之高度分別設定為 0.187 和 0.285 公尺。就一維模擬案例之節點圖來看，入口環型體積和降流區每一小塊之高度在三維模擬案例中均未予以更動。

三維度模擬案例中亦修正了原先在一維度模擬案例中與入口環型體積和降流區相連接的元件連結設定，比如說頂部元件 (Upper Head, 252)、完整迴路端之冷端管路 (Cold Leg of Intact Loop, 185)、破口迴路端之冷端管路 (Cold Leg of Broken Loop, 335)、反應器底部空間之上部體積 (Lower Plenum Top Volume, 215) … 等，以維持系統連接之完整性。

如先前所述，降流區是由一個被切割成 12 塊的多維度元件去進行模擬的。由於多維度元件內建之流體接點無法模擬反向極限流，即無法於多維度元件內建之流體接點設定 6.1 式。因此，所採取的變通方法為，於降流區和反應器底部空間相接處的流體接點來進行依據 UPTF 降流區灌水模組所擬定之反向極限流式之設定，即於立體化

降流區和反應器底部空間相連的四個流體接點處進行 6.2 式之設定，於立體化降流區之反向極限流式子同未立體化降流區案例之設定，詳見 6.1.1 小節。

## 6.2 三維度降流區模擬結果和一維度降流區模擬結果的比較

### 6.2.1 燃料護套尖峰溫度值預測結果比較

圖 6.2 為立體化降流區案例和非立體化降流區案例預測於發生燃料護套尖峰溫度值處之護套溫度和所擷取與立體化降流區案例預測發生燃料護套尖峰溫度值位置等之實驗資料隨時間變化情形。立體化降流區案例預測發生燃料護套尖峰溫度值的位置較非立體化降流區案例之結果高約 0.13 公尺，位於從底部由下向上數來第五節之位置，且預測之燃料護套尖峰溫度值較非立體化降流區案例之結果約低 190 °F，如圖 6.2 所示。關於爐心熱通道高度及其模擬方式詳見 5.1.2 小節。另外，立體化降流區案例預測燃料護套尖峰溫度向下滑落時間點較未立體化降流區案例提早約 12 秒。燃料護套尖峰溫度值於未立體化案例和立體化爐心案例而言，均於再泛水階段發生，然而就立體化降流區案例預測結果而言，燃料護套尖峰溫度值於再注水階段產生，即該段曲線之高原區 (Platform Region)。

綜上所述，立體化爐心案例預測燃料護套尖峰溫度值較未立體化爐心案例為低，就安全餘裕的空間釋放而言，確實有所助益。然而，由圖 6.2 觀之，立體化爐心案例於 RELAP5-3D/K/INER 所展現之預測結果保守性不甚明顯。或許，在不違背安全法規 10 CFR 50 附錄 K 所列規定前提下，小幅更動程式碼選用於冷卻水流失事故不同階段所使用熱傳封包（如表 3.1 所列），再配合多維度元件模擬方式，能於預測燃料護套尖峰溫度值方面展現保守性，且同時達到安全餘裕空間釋放的目的。

圖 6.3 為立體化降流區案例和非立體化降流區案例預測於燃料棒護套最高溫處

之臨界熱通量隨時間變化情形。如圖所示，立體化降流區案例預測臨界熱通量較未立體化降流區案例早產生大幅度的震盪，顯示液態冷卻水於立體化降流區案例中較早接觸燃料棒護套外側。就進入再泛水階段兩個案例預測之臨界熱通量大小而言，未立體化降流區案例預測之值較高。圖 6.4 為立體化降流區案例和非立體化降流區案例預測燃料棒護套最高溫處之熱通量隨時間變化情形。如圖所示，同臨界熱通量，立體化降流區案例預測臨界熱通量較未立體化降流區案例早產生大幅度的震盪。就熱通量最大值而言，兩個案例預測值相當接近。

圖 6.5 是立體化降流區案例和非立體化降流區案例預測於爐心熱通道之覆水淬冷 (Quench) 位置隨時間變化情形。如圖所示，立體化降流區案例預測之爐心熱通道之覆水淬冷位置較非立體化降流區案例預測之結果有提早向上移動的情形，這表示於立體化降流區案例中冷卻水較早覆蓋至燃料護套外側，和圖 6.17 兩個案例預測冷卻水於反應器底部空間之存量隨時間變化情形相符。此外，就冷卻水覆蓋燃料護套高度位置而言，於圖 6.5 中尚可觀測到立體化降流區案例預測之結果於試驗結束時較非立體化降流區案例預測之結果來得高。

圖 6.6 為立體化降流區案例和非立體化降流區案例預測於熱通道爐心液態水位 (Collapsed Water Level) 隨時間變化情形。如圖所示，於破口生成時，兩個模擬案例預測之爐心熱通道水位皆呈現急劇下滑的情形。破口生成後約 30 秒，立體化降流區案例預測之爐心熱通道水位開始上昇，較非立體化降流區案例預測結果於破口生成後約 40 秒才開始上升之情況來得早，即立體化降流區案例預測進入再泛水 (Reflood) 階段之時間點較非立體化降流區案例來得早。

## 6.2.2 冷卻水流動情形比較

未立體化降流區案例預測之緊急爐心冷卻系統啟動時間點、進入再注水階段 (Refill) 和進入再泛水階段 (Reflood) 的時間點分別為 13.37、19.21、40.16 秒。立體化降流區案例預測之緊急爐心冷卻系統啟動時間點、進入再注水階段和進入再泛水階段的時間點則分別為 12.96、22.58、25.26 秒。其中最顯著的差異在於，降流區立體化後進入再泛水階段的時間點較未立體化案例提早 14.90 秒。另外，根據 RELAP5 輸出檔案 (Output File) 顯示，在未立體化降流區案例冷卻水突破反向極限流限制流至反應器底部空間耗時約 6 秒，於立體化降流區案例則須需要將近 10 秒才突破反向極限流限制流至反應器底部空間。此結果與圖 6.20 兩個案例之硼濃度於反應器底部空間隨時間變化情形呈現結果顯然不符。造成此明顯差異的原因在於 L2-5 輸入設定卡中針對進入再注水階段之定義。L2-5 輸入設定卡中 (Input Deck) 針對進入再注水和再泛水階段之定義詳見 2.2.2 小節。若將硼於反應器底部空間濃度進入再注水階段之門檻值更動為  $1.0 \times 10^{-4}$  或是  $1.0 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$  的話，則兩個案例預測進入再注水階段時間點先後順序方與圖 6.20 一致。然而，為了為了忠於輸出檔預測結果，儘管本研究確定立體化降流區案例進入再注水的時間點較早，但本研究中仍以 RELAP5 輸出檔案所列時間點作為預測結果。

圖 6.7 是立體化降流區案例和非立體化降流區案例預測破口兩端流出累積流量隨時間變化情形。如圖所示，非立體化降流區案例預測之結果於破口生成 18 秒後開始和立體化降流區案例之結果有明顯的差距，最終立體化降流區案例預測冷卻水由破口兩端累積流出總量小於未立體化降流區案例，與立體化爐心案例最終和未立體化案例預測結果接近之情況是不一致的。

圖 6.8 為立體化降流區案例和非立體化降流區案例預測於壓力槽入口下部環型



體積之流體橫流接點冷卻水累積流量隨時間變化情形。圖 6.8 顯示，立體化降流區案例預測於壓力槽入口下部環型體積之流體橫流接點冷卻水累積流量較非立體化降流區案例預測結果為少。

為了觀察降流區立體化之效應，本研究將位於破口側的降流區上部體積劃分為兩塊並分別以流體接點 713 和 813 連接壓力槽入口底部環型體積，取代原先的單一環型體積 (Annulus Volume) 和流體接點 713。

圖 6.9 為立體化降流區案例和非立體化降流區案例預測於破口側壓力槽入口底部環型體積流向降流區頂部體積之冷卻水累積流量隨時間變化情形。圖 6.9 顯示，最終立體化降流區案例預測於降流區頂部體積流向破口側壓力槽入口底部環型體積之冷卻水累積流量較非立體化降流區案例預測之結果多。

圖 6.10 為立體化降流區案例和非立體化降流區案例預測於降流區中部體積流體橫流接點之質量流率隨時間變化情形。如圖所示，非立體化降流區案例預測於流體橫流接點中之質量流率震動幅度很大，於進入再注水階段和再泛水階段時兩相流體相應呈現的流動情形非常明顯，例如破口生成後約 38 秒，少量液態冷卻水觸及爐心底端燃料棒護套、高溫水蒸汽生成、上沖、爾後自爐心熱通道進口引入大量冷卻水、帶動附近的冷卻水流…相較之下，立體化降流區案例預測之結果顯得平順，只有破口生成後約 22 秒進入再泛水階段時兩相流體的流動情形略有震盪情形。

圖 6.11 為立體化降流區案例和非立體化降流區案例預測於降流區中部體積流體橫流接點之累積流量隨時間變化情形。如圖所示，非立體化降流區案例模擬結果於約 40 秒出現轉折點，原先冷卻水餘流體橫流接點反向流動之情況於破口生成約 40 秒後開始轉為正向流動。最終結果顯示，立體化降流區案例預測於降流區中部體積流體橫

流接點之累積流量較非立體化降流區案例預測之結果少。如圖所示，非立體化降流區案例預測冷卻水於流體橫流接點中累積流量震動幅度很大，相較之下，立體化降流區案例預測之結果顯得穩定平順，變動幅度亦小。

圖 6.12 為立體化降流區案例和非立體化降流區案例預測於降流區底部體積流體橫流接點之質量流率隨時間變化情形。和圖 6.10 類似，如圖 6.12 所示，非立體化降流區案例預測於流體橫流接點中之質量流率震動幅度很大，相較之下，立體化降流區案例預測之結果顯得平順，變動幅度亦小。兩個模擬案例預測冷卻水質量流率於降流區底部震盪情形較降流區中部之結果為大。由於更接近爐心熱通道入口，因此於進入再注水、再泛水階段冷卻水之流動情形更明顯。圖 6.13 為立體化降流區案例和非立體化降流區案例預測於降流區底部體積流體橫流接點之累積流量隨時間變化情形。如圖所示，非立體化降流區案例模擬結果於破口生成後約 20 秒急遽上升，立體化降流區案例模擬結果則維持平穩勢態直至試驗結束。最終結果顯示，立體化降流區案例預測降流區底部體積流體橫流接點之累積流量較非立體化降流區案例預測之結果少。

圖 6.14 為立體化降流區案例和非立體化降流區案例預測冷卻水於降流區底部體積流向反應器底部空間質量流率隨時間變化情形。如圖所示，兩個案例進入再泛水階段時，均能觀察到冷卻水觸及高溫燃料棒護套外側、生成蒸汽、帶動附近冷卻水流動之情形，唯未立體化降流區案例之震盪較立體化降流區案例更為明顯。圖 6.15 則是立體化降流區案例和非立體化降流區案例預測冷卻水於降流區底部體積流向反應器底部空間累積流量隨時間變化情形。如圖 6.15 所示，最終立體化降流區案例預測降流區底部體積流向反應器底部空間累積流量遠小於未立體化降流區案例。

圖 6.16 為立體化降流區案例和非立體化降流區案例預測降流區水位高度



(Collapsed Water Level) 隨時間變化情形。如圖所示，立體化降流區案例所呈現的降流區水位隨時間變化情況為：破口生成後降流區水位開始急遽下降，直到緊急爐心冷卻旁通 (ECC Bypass) 階段結束，也就是反向極限流限制 (Countercurrent Flow Limitation, CCFL) 現象消失後，由緊急爐心冷卻系統所輸送的水才得以向下流至反應器底部空間，使得降流區水位開始回升，至試驗結束前水位有上下震盪情形。從破口生成 18 秒後，立體化降流區預測的降流區水位都比未立體化降流區的模擬結果來的高，然而就兩個案例中的降流區水位隨時間變化情形而言，趨勢都是一樣地先向下急遽滑落、持平震盪、爾後回升。

由圖 6.9 立體化降流區案例預測於降流區頂部體積流向破口側壓力槽入口底部環型體積之冷卻水累積流量較非立體化降流區案例預測之結果多、圖 6.11 立體化降流區案例預測於降流區中部體積流體橫流接點之累積流量較非立體化降流區案例預測之結果少、圖 6.13 立體化降流區案例預測降流區底部體積流體橫流接點之累積流量較非立體化降流區案例預測之結果少可和圖 6.16 立體化降流區案例預測之降流區水位大多時候均較未立體化降流區案例高之情形相呼應。

圖 6.17 為立體化降流區案例和非立體化降流區案例預測於反應器底部空間之冷卻水存量隨時間變化情形。如圖所示，立體化降流區案例預測於反應器底部空間之冷卻水存量於破口生成約 20 秒開始增加，表示此時冷卻水已突破反向極限流限制，開始流入反應器底部空間，即緊急爐心冷卻旁通階段已結束。另於破口生成後約 33 秒，立體化降流區案例顯示，反應器底部空間已為來自緊急爐心冷卻系統的冷卻水所注滿，之後注入的冷卻水開始向上累積至降流區底部。非立體化降流區案例預測之結果則是於破口生成後冷卻水開始流失、水位下降，直到破口生成後約 38 秒才出現回升的

情形，於破口生成後約 42 秒冷卻水注滿反應器底部空間，但隨後水位出現劇烈震盪情形，直到破口生成後約 55 秒才穩定地持平於反應器底部空間的頂端高度。

### 6.2.3 其他參數比較和結語

圖 6.18 為立體化降流區案例和非立體化降流區案例預測系統壓力隨時間變化情形。如圖所示，兩個模擬案例預測之系統壓力隨時間變化除了於破口生成後約 19 ~ 30 秒期間非立體化降流區案例結果略高於立體化降流區案例結果外無明顯差異。

圖 6.19 為立體化降流區案例和非立體化降流區案例預測爐心熱通道進出口壓力差時間變化情形。如圖所示，於破口生成瞬間爐心熱通道入口處呈現負壓的情形，此現象迫使冷卻水於爐心入口處逆流。另外，於圖 6.19 中可觀測到立體化降流區案例預測之壓力差值於 30 秒左右有較大幅度的震盪情形，此時冷卻水因熱通道進入口壓差而流入熱通道。就非立體化降流區案例預測之結果而言，於圖 6.19 可觀得，破口生成後約 40 秒壓力差值出現第一個劇烈的震盪，推測是因為此時進入再泛水階段所致。

圖 6.20 為立體化降流區案例和非立體化降流區案例預測於反應器底部空間之硼濃度隨時間變化情形。於 L2-5 輸入卡中，關於進入再注水 (Refill) 階段的判定方式為，當反應器底部空間 (Lower Plenum, 215) 之硼濃度超過  $1.0\text{e-}5 \text{ kg/m}^3$  時，表示已有一定數量的冷卻水突破降流區中之反向極限流限制、向下流動注入反應器底部空間，即表示於此刻已從蒸汽沖放階段進入再注水階段。如圖 6.20 所示，立體化降流區案例預測於反應器底部空間之硼濃度向上突增的時間點較非立體化降流區案例預測之結果來得早，此現象表示於立體化降流區案例中進入再注水階段時間點較非立體化降流區案例來得早，和圖 6.17 所呈現之立體化降流區案例預測於反應器底部空間

之冷卻水存量向上增加的時間點較非立體化降流區模擬結果來得早之情形相符合。

圖 6.21 為立體化降流區案例和非立體化降流區案例預測於爐心熱通道入口之液態空泡分率隨時間變化情形。如圖 6.21 所示，破口生成後，冷卻水大量流失，兩個模擬案例中均相應地呈現出液態空泡分率急遽下降的情形。另可觀察到立體化降流區案例預測於爐心熱通道入口處之液態空泡係數向上突增時間點較未立體化降流區案例預測之結果來得早，此現象表示於，立體化降流區案例中進入再泛水階段時間點較未立體化降流區案例來得早，和圖 6.6 立體化降流區案例預測爐心熱通道液態水位 (Collapsed Water Level) 上升時間點較未立體化降流區案例預測結果來得早之情形相符，亦和圖 6.5 呈現之立體化降流區案例預測於爐心熱通道覆水淬冷 (Quench) 位置向上攀升時間點較未立體化降流區案例預測結果來得早之情形相符。另圖 6.2 中呈現立體化降流區案例預測於發生燃料護套尖峰溫度值處護套溫度向下滑落時間點較未立體化降流區案例預測結果早之情形亦和圖 6.21 呈現立體化降流區案例中進入再泛水階段時間點較未立體化降流區案例早之情形相符合。

圖 6.22 和圖 6.23 分別是立體化降流區案例和非立體化降流區案例預測緊急爐心旁通冷卻水質量流率和緊急爐心旁通冷卻水累積流量隨時間變化情形。如圖 6.22 所示，立體化降流區案例預測緊急爐心旁通流量較非立體化降流區案例預測結果來的多。L2-5 輸入卡中關於緊急爐心旁通流量大小設定和緊急爐心冷卻系統冷卻水輸出質量流率大小有關。更精確的說，緊急爐心旁通流量大小和緊急爐心冷卻系統冷卻水輸出質量流率成正比，由圖 6.22 和圖 6.23 所呈現模擬案例於緊急爐心旁通流量差異對照圖 6.24 之緊急爐心冷卻系統冷卻水輸出流量大小於兩個模擬案例所顯現之差異，發現他們是相符合的，於該時段立體化降流區案例預測值約略大於未立體化降流

區案例之值。圖 6.24 為立體化降流區案例和非立體化降流區案例預測緊急爐心冷卻系統輸出冷卻水累積流量隨時間變化情形。如圖所示，兩個模擬案例預測之緊急爐心冷卻系統輸出冷卻水累積流量最終是相同的。

最終，立體化降流區預測燃料護套尖峰溫度值低於未立體化降流區案例約 190 °F。立體化降流區案例預測之緊急爐心冷卻系統啟動時間點、進入再注水階段和進入再泛水階段的時間點則分別為 12.96、22.58、25.26 秒。其中最顯著的差異在於，降流區立體化後進入再泛水階段時間點較未立體化案例提早 14.90 秒。另外，在未立體化降流區案例冷卻水突破反向極限流限制流至反應器底部空間耗時約 6 秒，於立體化降流區案例則須需要將近 10 秒才突破反向極限流限制流至反應器底部空間。

然而，由圖 6.5 和圖 6.6 可觀察到立體化降流區案例預測進入再泛水之時間點較未立體化降流區案例提前。這是因為於冷卻水事故發生期間，立體化降流區所預測降流區流體橫流接點中冷卻水流動情形較未立體化降流區案例理想，並未出現大幅震盪情形，冷卻水大多於降流區環狀體積間流動，而非於降流區流體橫流接點接流竄，如圖 6.11 所示。

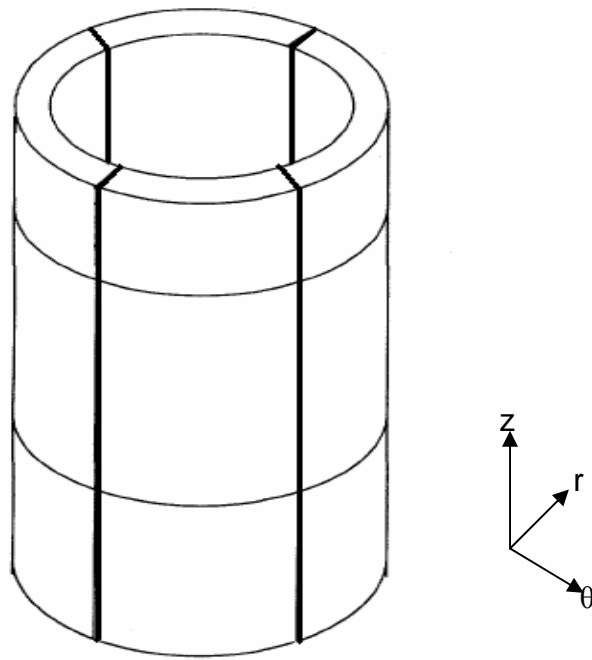


圖 6.1 立體化降流區示意圖

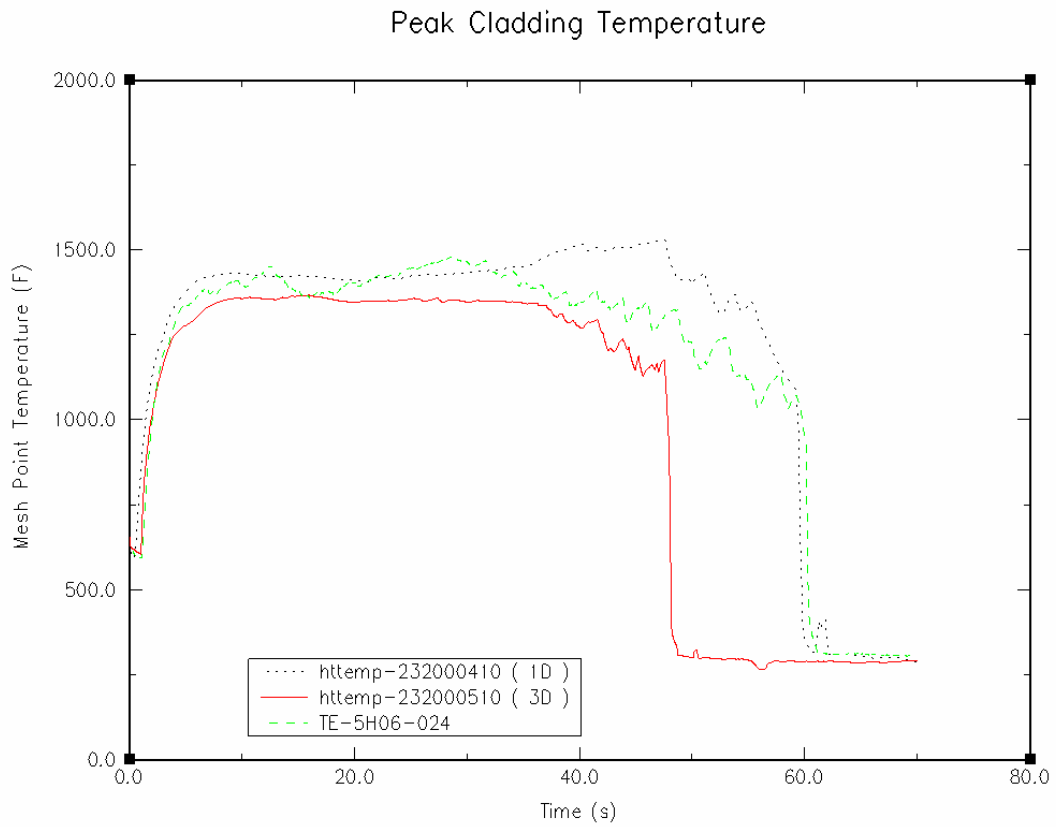


圖 6.2 於發生燃料護套尖峰溫度值處之護套溫度和實驗資料  
(立體化降流區模擬的影響)

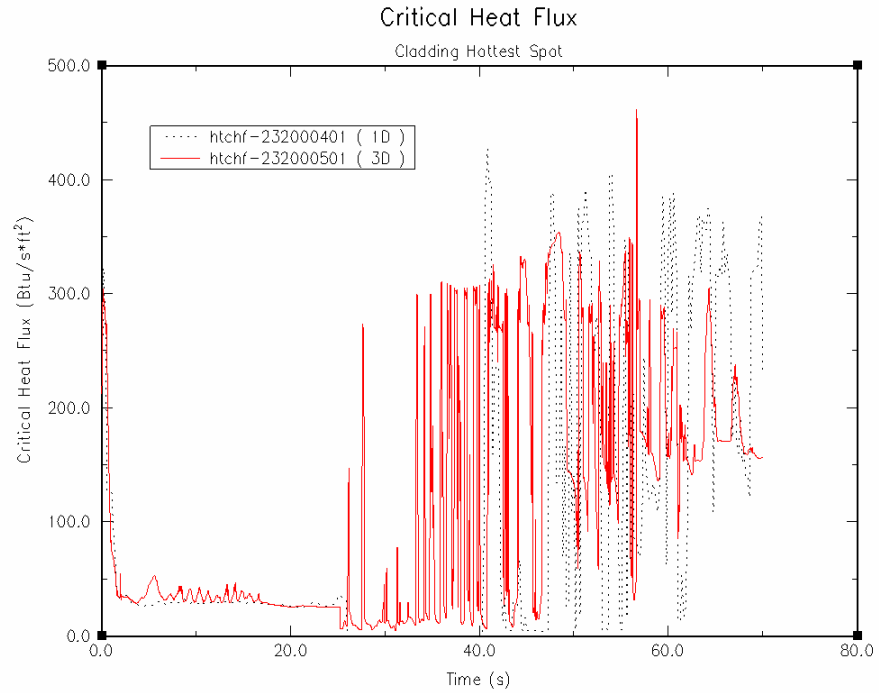


圖 6.3 燃料棒護套最熱處臨界熱通量（立體化降流區模擬的影響）

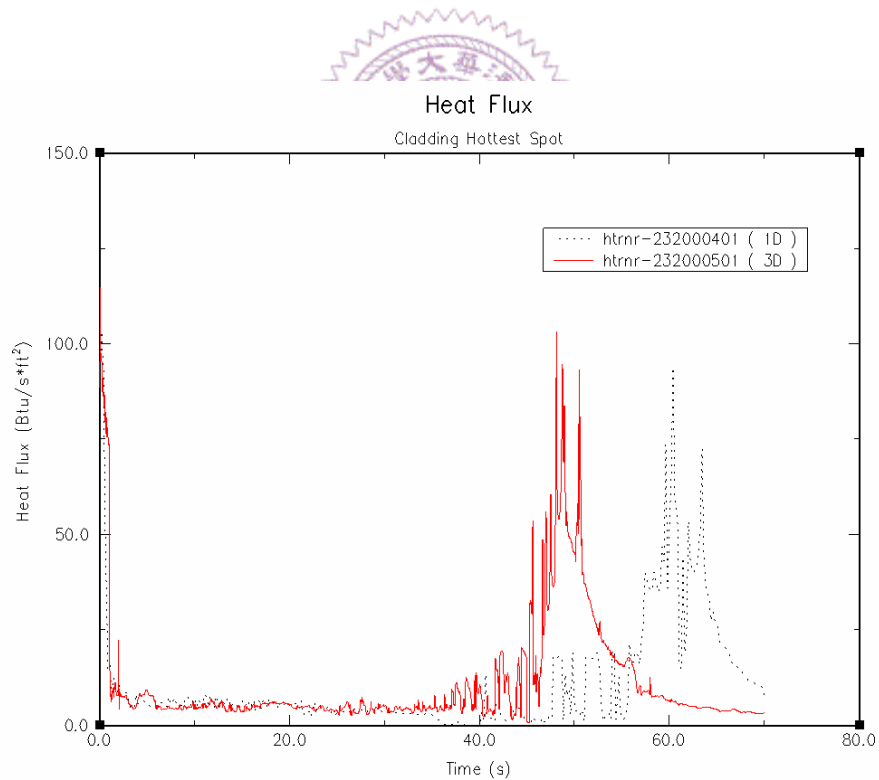


圖 6.4 燃料棒護套最熱處熱通量（立體化降流區模擬的影響）



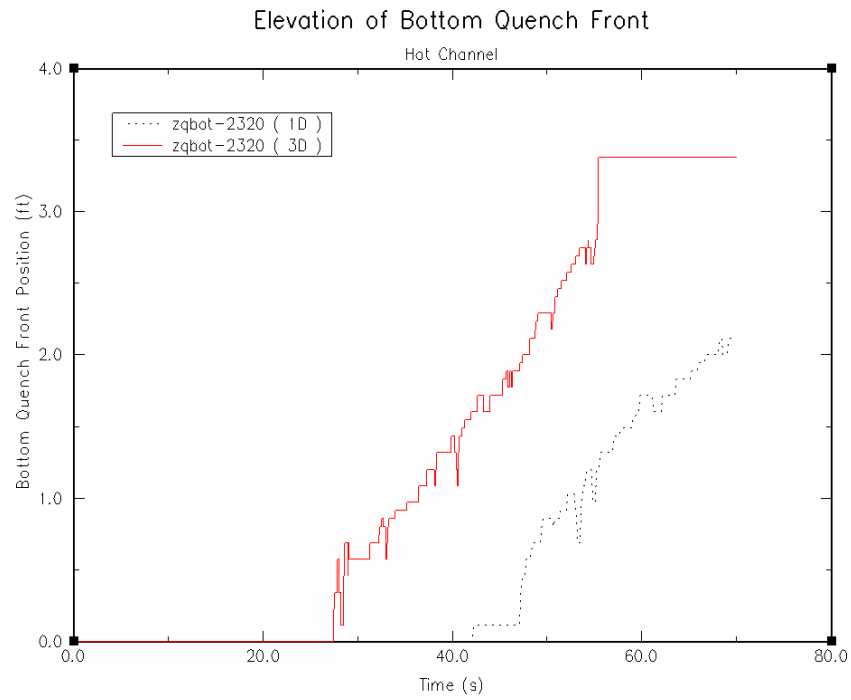


圖 6.5 爐心熱通道之覆水淬冷 (Quench) 位置  
(立體化降流區模擬的影響)

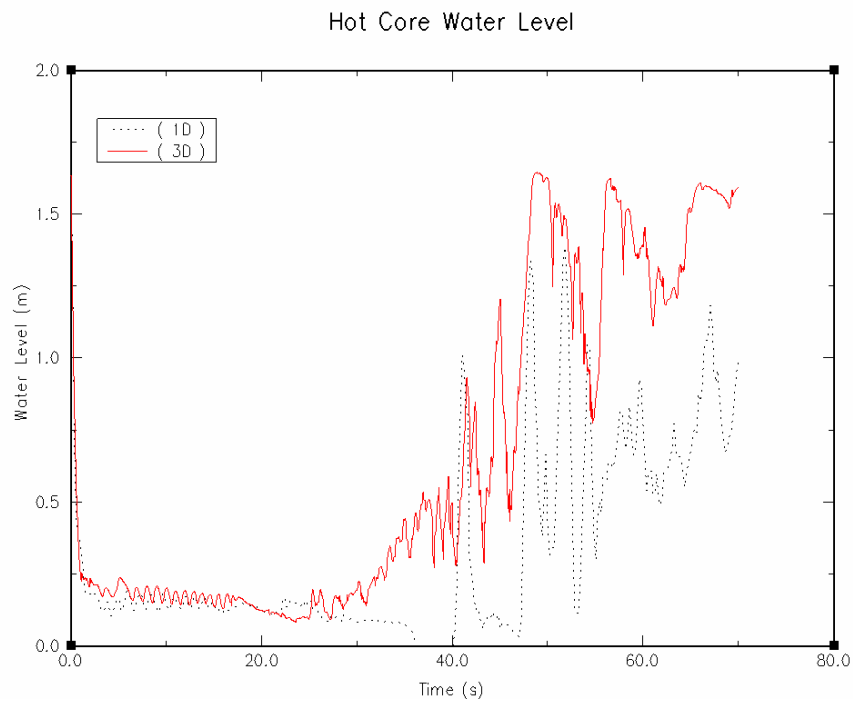


圖 6.6 熱通道爐心液態水位 (Collapsed Water Level)  
(立體化降流區模擬的影響)

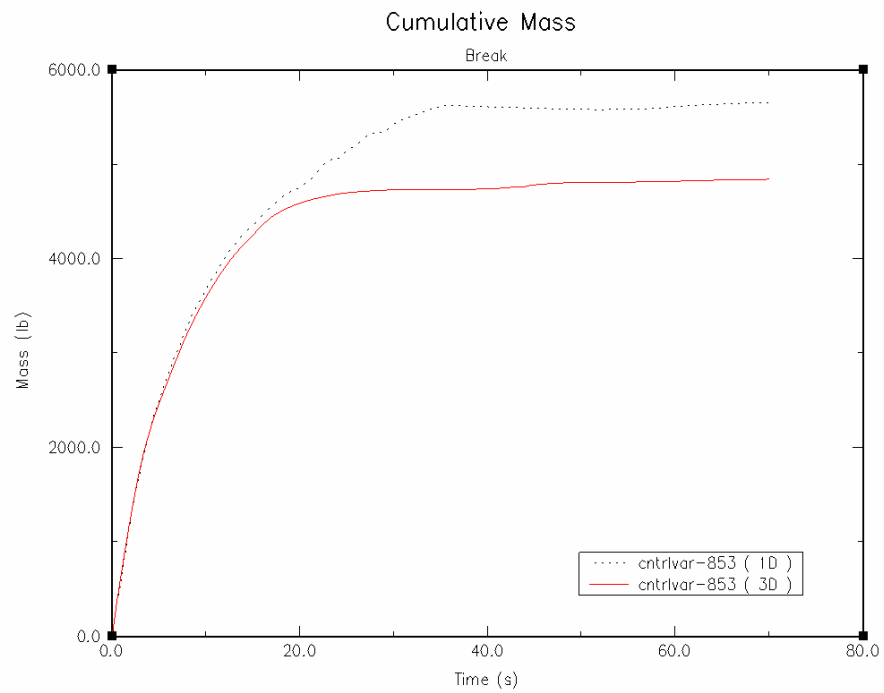


圖 6.7 破口流出累積流量（立體化降流區模擬的影響）

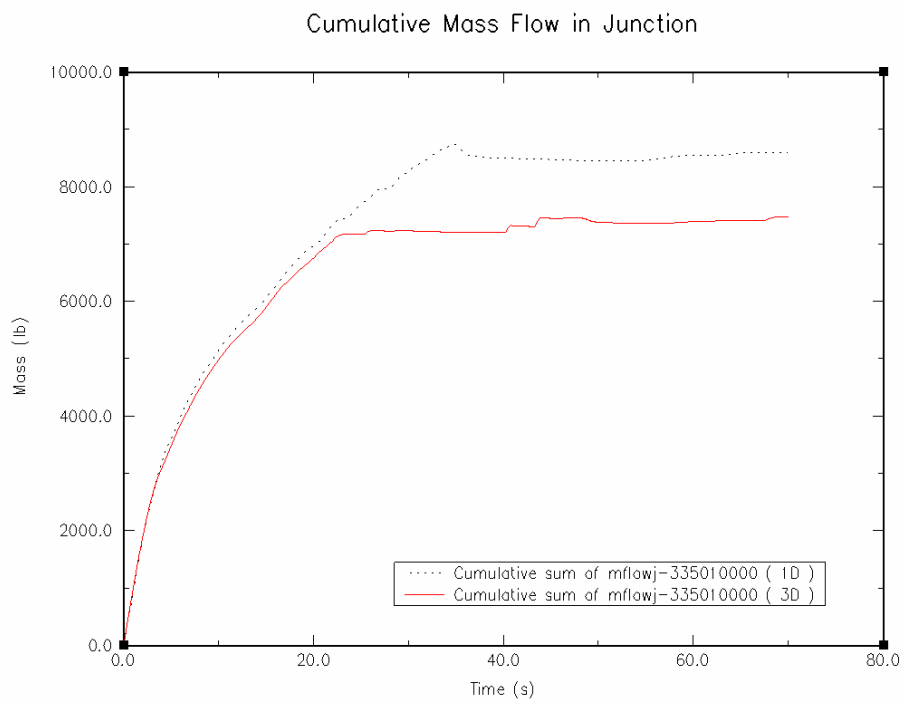


圖 6.8 反應器壓力槽噴嘴破口側冷端迴路之累積流量  
（立體化降流區模擬的影響）

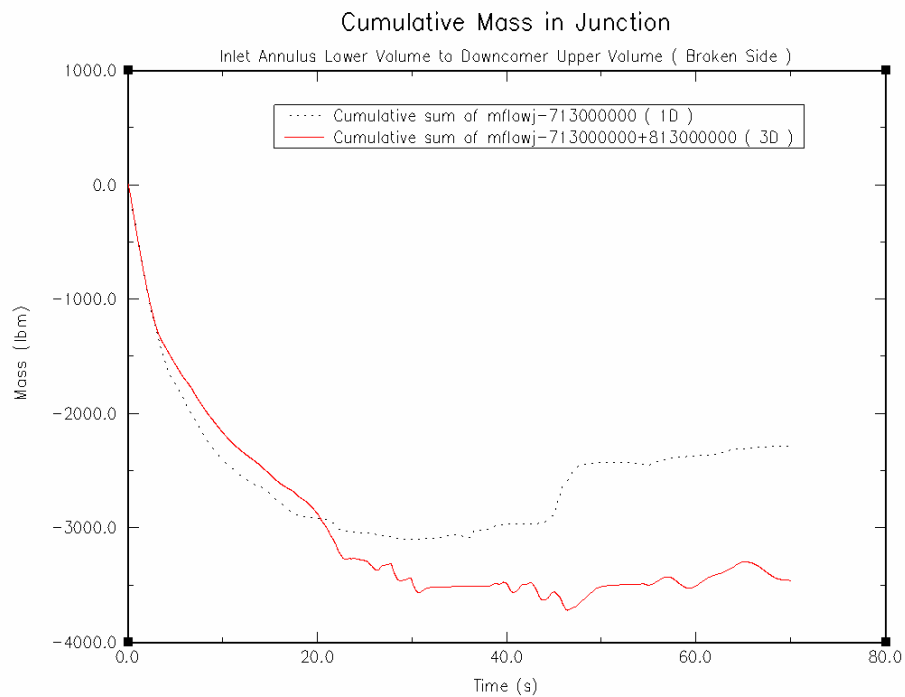


圖 6.9 破口側壓力槽入口底部環型體積流向降流區頂部體積之冷卻水累積流量  
(立體化降流區模擬的影響)

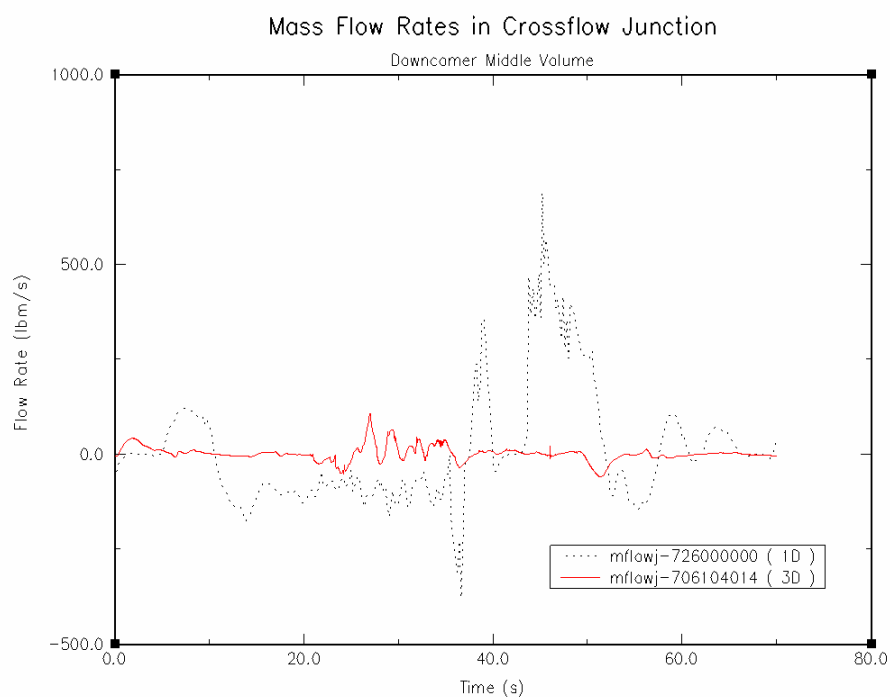


圖 6.10 降流區中部體積流體橫流接點之質量流率  
(立體化降流區模擬的影響)

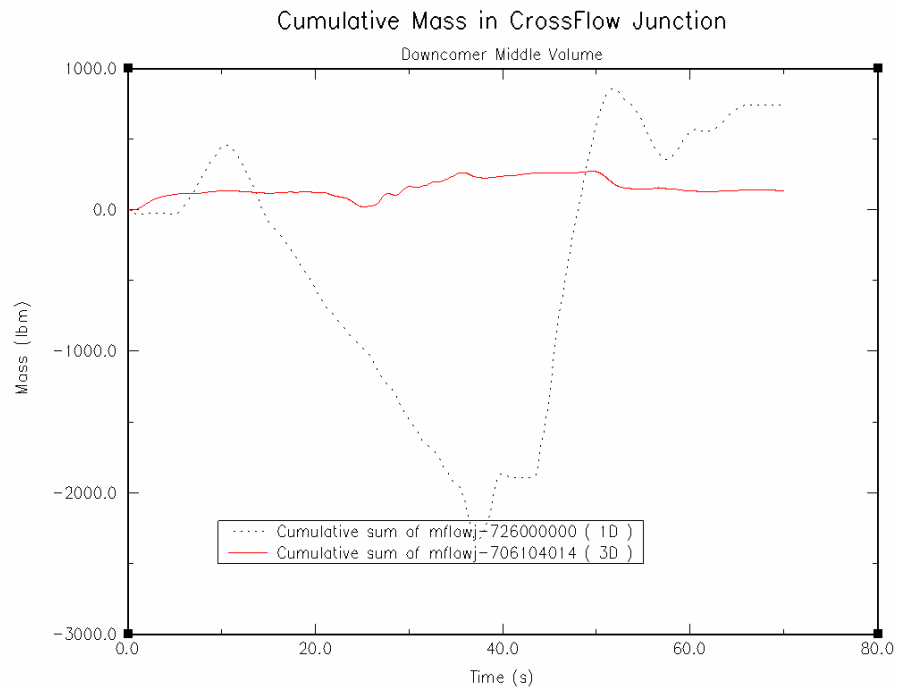


圖 6.11 降流區中部體積流體橫流接點之累積流量  
(立體化降流區模擬的影響)



圖 6.12 降流區底部體積流體橫流接點之質量流率  
(立體化降流區模擬的影響)

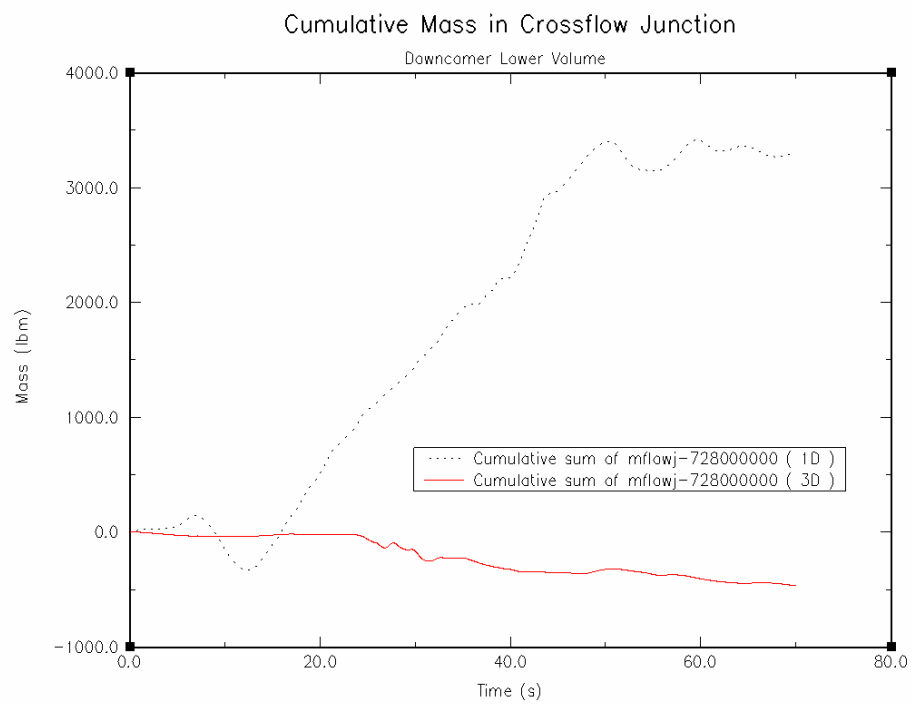


圖 6.13 降流區底部體積流體橫流接點之累積流量  
(立體化降流區模擬的影響)

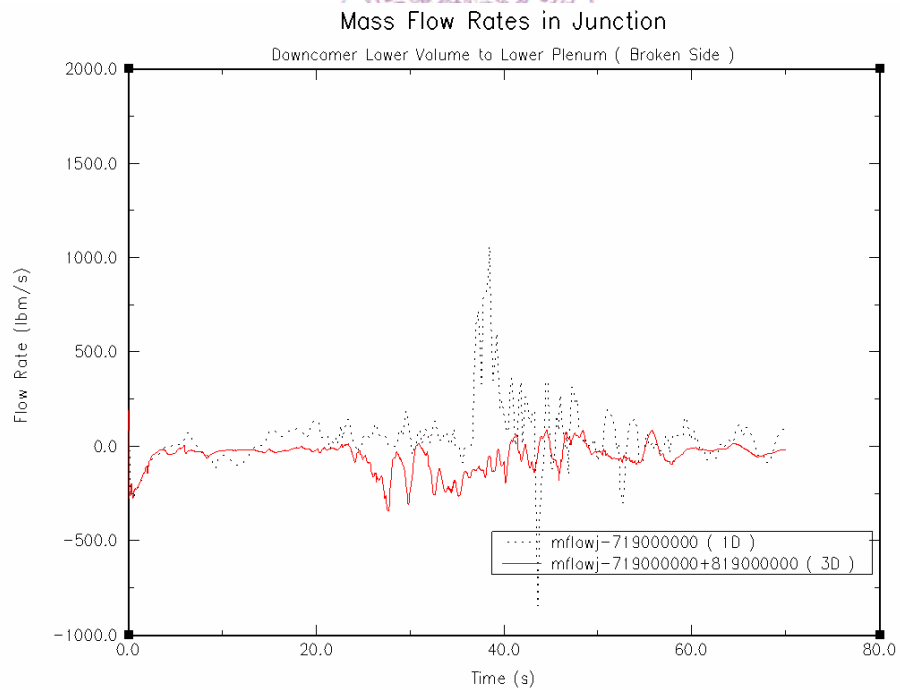


圖 6.14 降流區底部流向反應器底部空間冷卻水質量流率  
(立體化降流區模擬的影響)

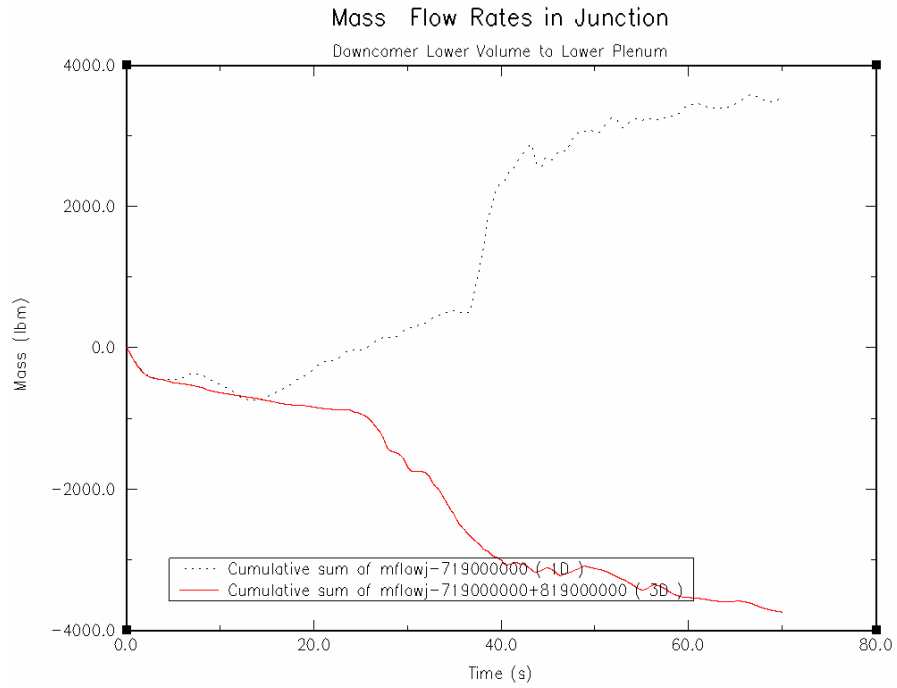


圖 6.15 降流區底部流向反應器底部空間冷卻水累積流量  
(立體化降流區模擬的影響)

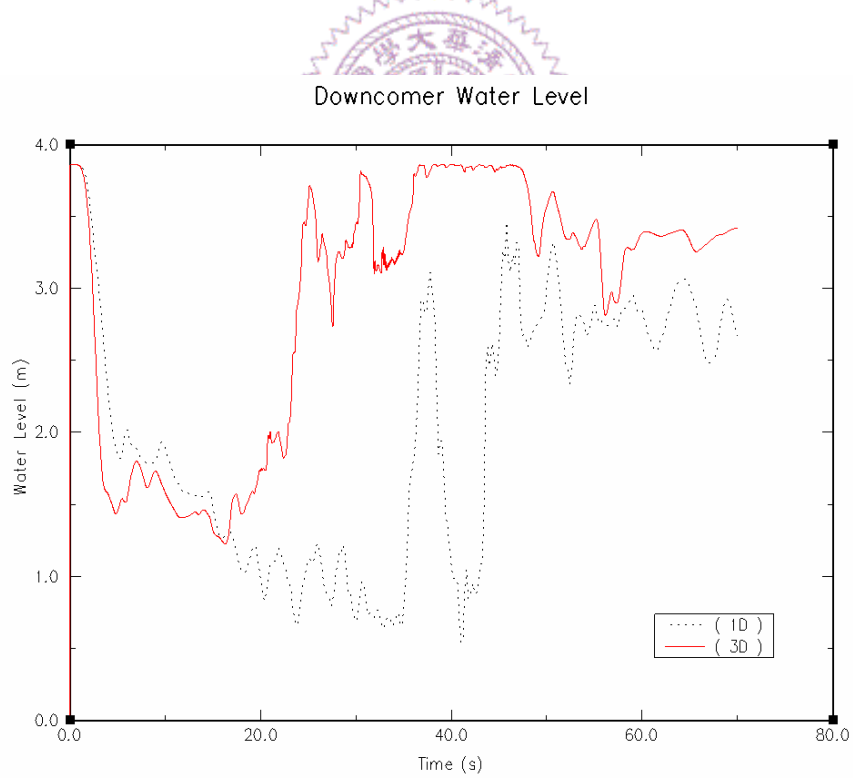


圖 6.16 降流區液態水位高度 (Collapsed Water Level)  
(立體化降流區模擬的影響)

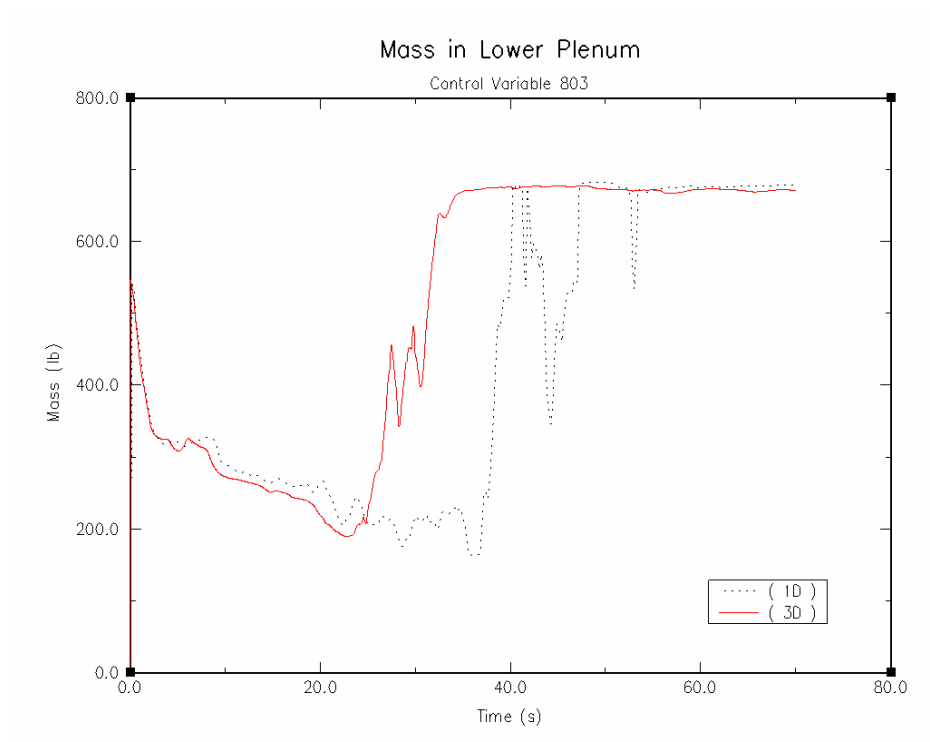


圖 6.17 反應器底部空間之冷卻水存量  
(立體化降流區模擬的影響)

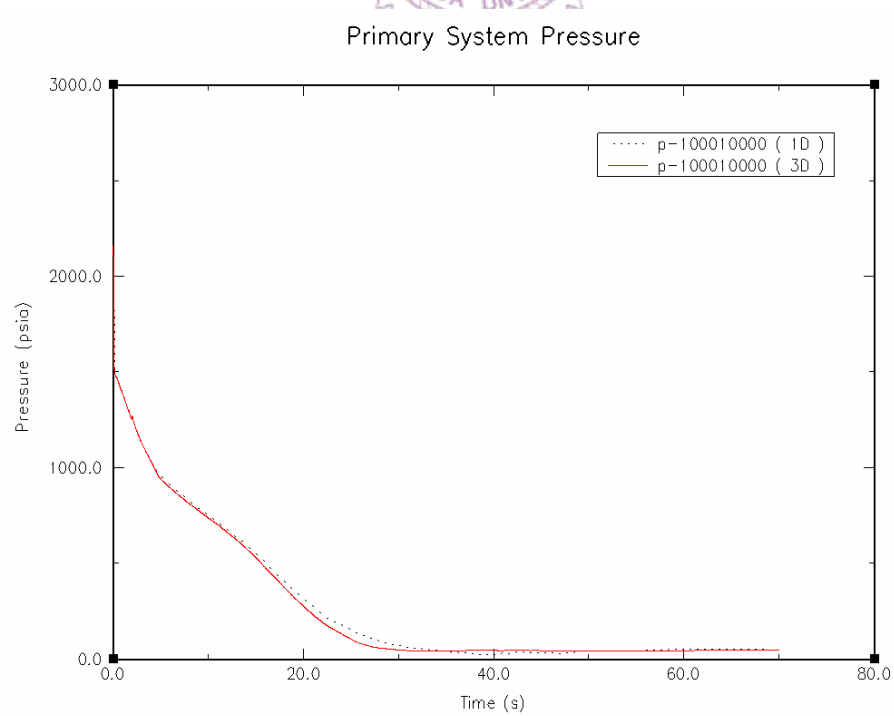


圖 6.18 一次側系統壓力 (立體化降流區模擬的影響)



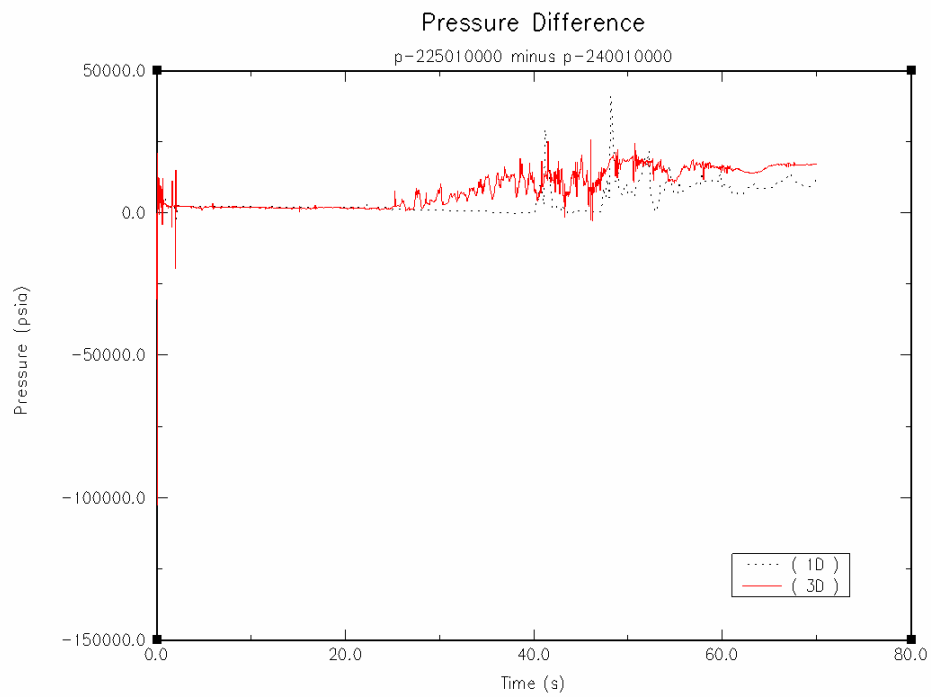


圖 6.19 爐心熱通道進出口壓力差（立體化降流區模擬的影響）

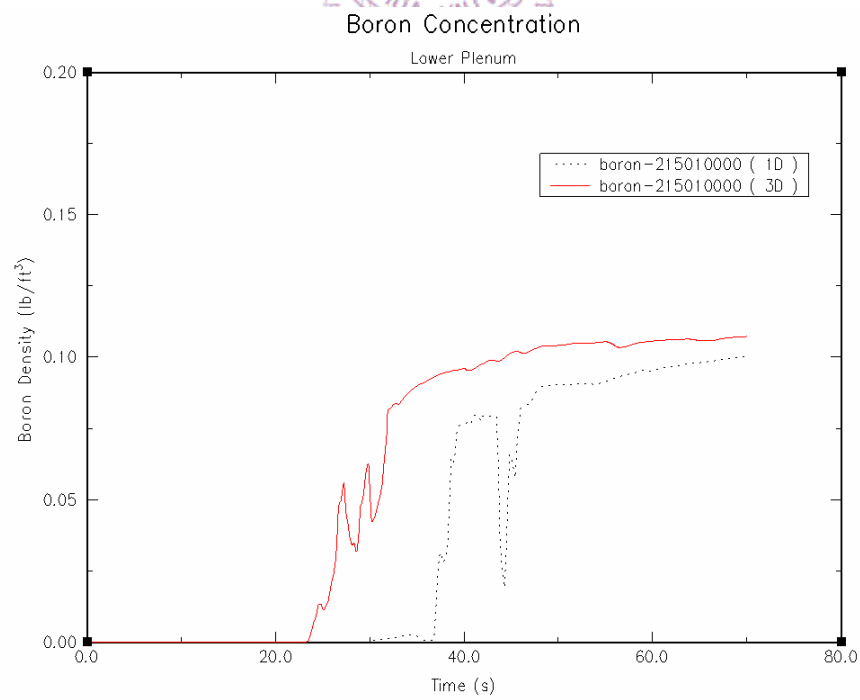


圖 6.20 反應器底部空間之硼濃度（立體化降流區模擬的影響）

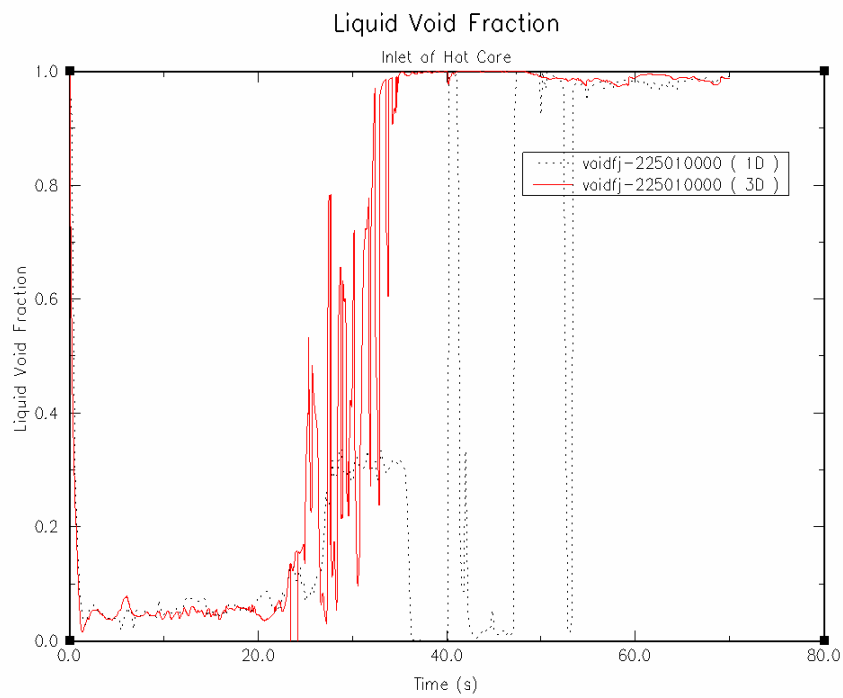


圖 6.21 爐心熱通道入口之液態空泡分率  
(立體化降流區模擬的影響)

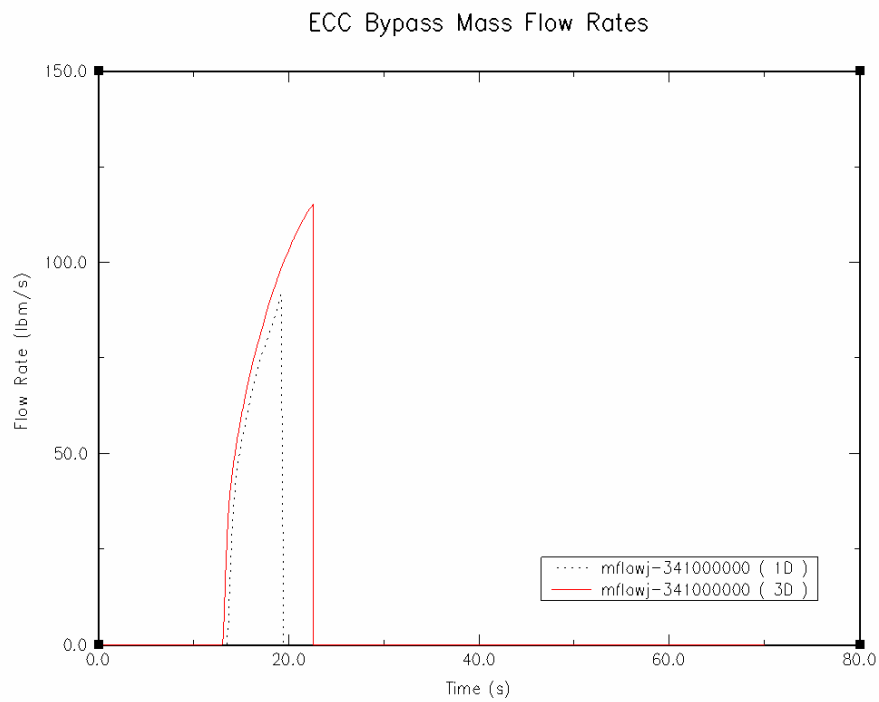


圖 6.22 緊急爐心旁通冷卻水質量流率  
(立體化降流區模擬的影響)

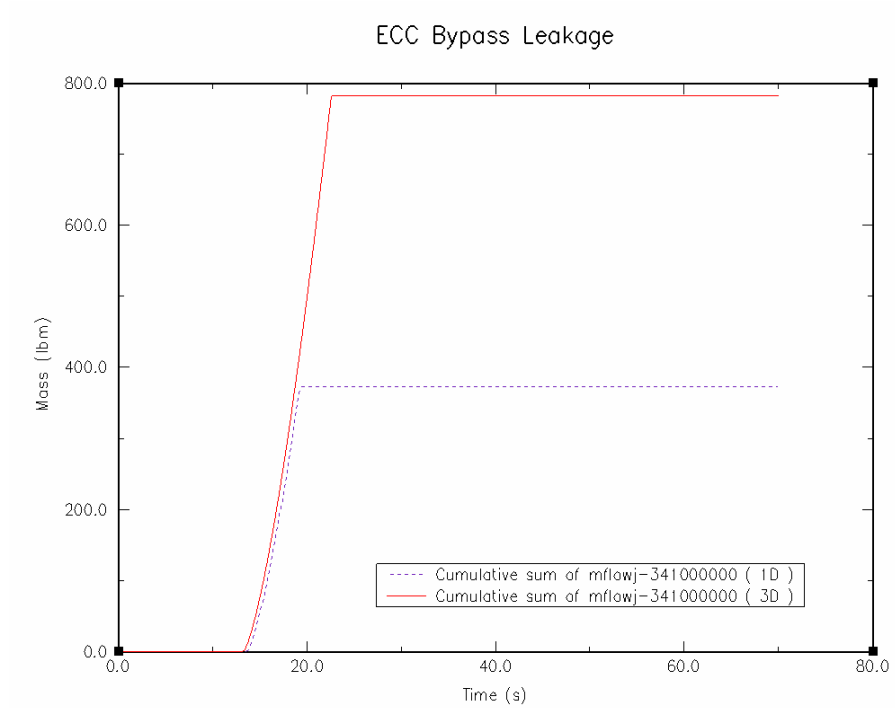


圖 6.23 緊急爐心旁通冷卻水累積流量  
(立體化降流區模擬的影響)

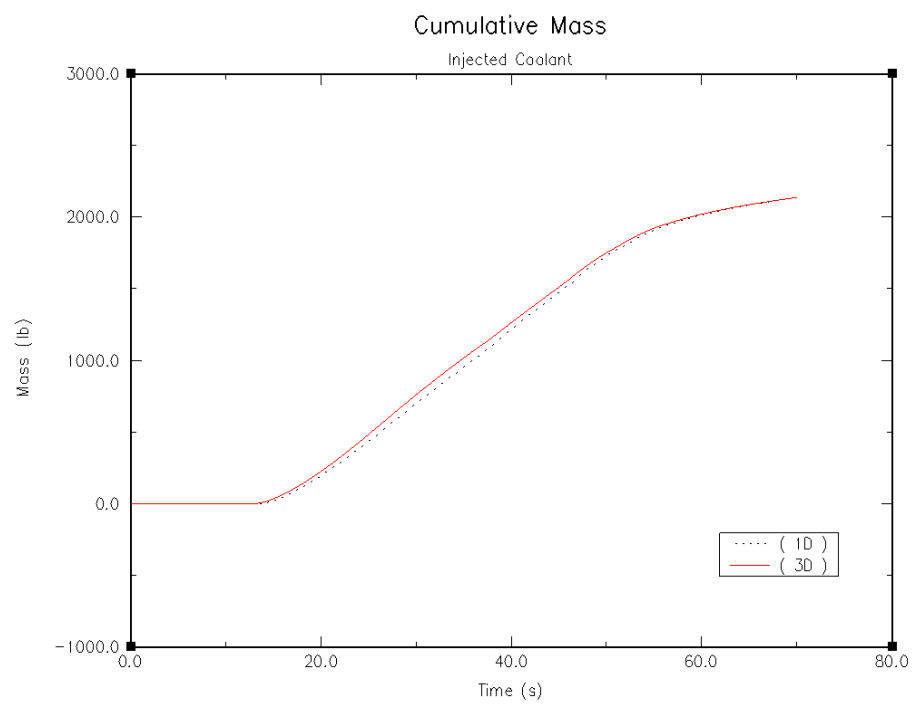


圖 6.24 緊急爐心冷卻系統輸出冷卻水累積流量  
(立體化降流區模擬的影響)

## 第七章 爐心和降流區立體化結果及分析

### 7.1 立體化爐心和降流區案例預測結果和未立體化案例預測結果比較

本研究將第五章提及之爐心多維度元件和第六章提及之降流區多維度元件一併接上系統。本小節為立體化爐心和降流區案例和未立體化案例之模擬結果探討，包含冷卻水流於兩個模擬案例所呈現的差異、燃料護套尖峰溫度值和各項參數比較，此外尚有兩個模擬案例預測之其他系統參數比較。

於此章節中，為了方便起見，將以”立體化案例”代稱以同時以多維度爐心元件和多維度降流區元件進行模擬之案例，並以”未立體化案例”代指所有元件均為一維度之模擬案例。

#### 7.1.1 燃料護套尖峰溫度值

圖 7.1 為比較由立體化案例和非立體化案例預測之燃料護套尖峰溫度值和實驗結果的比較。兩個案例均將高度 1.68 公尺的爐心熱通道於縱向分成 12 個小節，如圖 7.1 所示，立體化案例預測尖峰值發生的高度和非立體化案例預測結果一致，均位於由底部向上數第四節處，即離熱通道底部 0.49 公尺。立體化案例預測之燃料護套尖峰溫度值較非立體化案例之結果約低 140 °F。另外，立體化案例預測之燃料護套尖峰溫度向下滑落之時間點較未立體化案例提早約 25 秒。有別於立體化爐心案例之再泛水階段和立體化降流區案例之再注水階段，立體化案例預測之燃料護套尖峰溫度出現於沖放階段。

於沖放階段 (Blowdown)，未立體化爐心案例預測燃料護套溫度值高於實驗資料約 40 °F，立體化案例預測值則和實驗資料接近但略高。進入再注水階段 (Refill)，實

驗值和未立體化爐心案例預測結果相仿，均較立體化爐心案例高約 120 °F。進入再泛水階段 (Reflood) 後，立體化案例預測值則和實驗資料接近但略低，立體化案例預測燃料護套溫度值較未立體化案例低約 110 °F。

綜上所述，立體化爐心案例預測燃料護套尖峰溫度值較未立體化爐心案例為低，就安全餘裕的空間釋放而言，確實有所助益。然而，由圖 7.1 觀之，同立體化爐心案例，立體化案例於 RELAP5-3D/K/INER 所展現之預測結果保守性不甚明顯，僅於再泛水階段展現其保守性。或許，在不違背安全法規 10 CFR 50 附錄 K 所列規定前提下，小幅更動程式碼選用於冷卻水流失事故不同階段所使用熱傳封包（如表 3.1 所列），再配合多維度元件模擬方式，能於預測燃料護套尖峰溫度值方面展現保守性，且同時達到安全餘裕空間釋放的目的。

圖 7.2 為未立體化案例、立體化爐心案例、立體化降流區案例和爐心和降流區均立體化案例之燃料護套尖峰溫度值之比較情形。如圖所示，預測燃料護套尖峰溫度值從高到低依序為：未立體化案例、爐心和降流區均立體化案例、立體化爐心案例和立體化降流區案例。除了未立體化案例預測之燃料護套尖峰溫度值高於其他案例約 180 °F 外，其餘三個立體化案例預測燃料護套尖峰溫度值彼此差異不大，差距在 30 °F 以內，如表 7.1 所示。

將爐心立體化之後，該案例預測之燃料護套尖峰溫度值於破口生成後 5 秒內向上攀升的速度大於未立體化案例。將降流區立體化之後，該案例預測之燃料護套尖峰溫度值於破口生成後 5 秒內向上攀升的速度和未立體化案例一致。

未立體化案例預測之燃料護套尖峰溫度值於接近試驗結束、向下滑落前 10 秒左右會出現向上攀升之情形，如圖 7.2 所示，破口生成後約 50 秒之溫度值為未立體化

案例預測之燃料護套尖峰溫度值。爐心立體化之後，該案例預測之燃料護套尖峰溫度變化情形如同未立體化案例，亦於向下滑落前 10 秒左右出現最大值。降流區立體化案例則否，該案例預測之燃料護套尖峰溫度值出現於再注水階段，即曲線之高原區 (Platform Region)。

圖 7.3 是立體化案例和非立體化案例預測於爐心熱通道之覆水淬冷 (Quench) 位置隨時間變化情形。如圖所示，立體化案例預測之爐心熱通道之覆水淬冷位置較非立體化案例預測之結果有提早向上移動的情形，這表示於立體化降流區案例中冷卻水較早覆蓋至燃料護套外側，和圖 7.16 兩個案例預測冷卻水於反應器底部空間存量隨時間變化情形相符。此外，就冷卻水覆蓋燃料護套高度位置而言，於圖 7.12 中尚可觀測到立體化降流區案例預測結果於試驗結束時較非立體化降流區案例預測結果來得低，和立體化爐心案例最終預測結果相似。

圖 7.4 為立體化案例和非立體化案例預測於熱通道爐心液態水位 (Collapsed Water Level) 隨時間變化情形。如圖所示，於破口生成時，兩個模擬案例預測之爐心熱通道水位皆呈現急劇下滑的情形。破口生成後約 25 秒，立體化案例預測之爐心熱通道水位開始上昇，較非立體化降流區案例預測結果於破口生成後約 40 秒才開始上昇之情況來得早，即立體化降流區案例預測進入再泛水 (Reflood) 階段之時間點較非立體化降流區案例來得早，和立體化降流區案例結果相似。

圖 7.5 為立體化案例和非立體化案例預測於燃料棒護套最高溫處之臨界熱通量隨時間變化情形，整體而言和立體化降流區預測結果類似。如圖 7.5 所示，立體化案例預測臨界熱通量較未立體化案例早產生大幅度震盪。就進入再泛水階段兩個案例預測之臨界熱通量大小而言，未立體化案例預測值略高。圖 7.6 為立體化案例和非立體

化案例預測燃料棒護套最高溫處之熱通量隨時間變化情形，和立體化爐心案例類似。如圖所示，同臨界熱通量，立體化案例預測臨界熱通量較未立體化降流區案例早產生大幅度的震盪。就熱通量最大值而言，立體化案例預測值較未立體化案例為高

圖 7.7 為立體化案例和非立體化案例預測於發生燃料護套尖峰溫度值處所釋放之累積熱通量隨時間變化情形，整體而言和立體化爐心預測結果類似。如圖 7.7 所示立體化案例於前 5 秒所釋出的累積熱通量較未立體化案例所釋出的量來的少，這解釋了為何於圖 7.1 中一開始立體化案例燃料護套溫度值向上攀升的速度較未立體化案例來的快。在圖 7.7 中可明顯看出於破口生成後約 5 秒至 L2-5 試驗結束這段期間，立體化案例模擬的所釋放之累積熱通量均較未立體化案例來的高，與立體化爐心案例預測溫度值較未立體化爐心案例低的結果一致。

圖 7.8 為立體化案例和非立體化案例預測冷卻水流入熱通道中累積流量隨時間變化情形，和立體化爐心案例呈現類似預測結果。如圖 7.8 所示，立體化案例預測冷卻水流入熱通道中最終累積流量大於非立體化降流區案例預測之結果

### 7.1.2 冷卻水流動差異

未立體化案例預測之緊急爐心冷卻系統啟動時間點、進入再注水階段 (Refill) 和進入再泛水階段 (Reflood) 的時間點分別為 13.37、19.21、40.16 秒。立體化案例預測之緊急爐心冷卻系統啟動時間點、進入再注水階段和進入再泛水階段的时间點則分別為 13.17、20.93、25.05 秒。其中最顯著的差異在於，爐心和降流區元件立體化之後，進入再泛水階段的时间點較未立體化案例提早 15.11 秒。另外，如 6.2.2 小節所示，未立體化降流區案例冷卻水突破反向極限流限制流至反應器底部空間耗時約 6 秒，於立體化降流區案例則須需要將近 10 秒才突破反向極限流限制流至反應器



底部空間，然而於本章案例預測之結果顯示，自緊急爐心冷卻系統啟動至冷卻水突破反向極限流限制流至反應器底部空間之時距在兩個案例是相當接近的。

圖 7.9 為立體化案例和非立體化案例預測破口兩端流出累積流量隨時間變化情形，和立體化降流區案例預測結果相似。如圖所示，非立體化降流區案例預測之結果於破口生成 18 秒後開始和立體化降流區案例之結果有明顯的差距，最終立體化降流區案例預測冷卻水由破口兩端累積流出總量小於未立體化降流區案例。

圖 7.10 為立體化案例和非立體化案例預測於破口側壓力槽入口底部環型體積流向降流區頂部體積之冷卻水累積流量隨時間變化情形。圖 7.11 為立體化案例和非立體化案例預測於降流區中部體積流體橫流接點之累積流量隨時間變化情形。圖 7.12 為立體化案例和非立體化案例預測降流區底部體積流體橫流接點之質量流率隨時間變化情形。圖 7.13 為立體化案例和非立體化案例預測降流區底部體積流體橫流接點之累積流量隨時間變化情形。圖 7.14 是立體化案例和非立體化案例預測冷卻水於降流區底部體積流向反應器底部空間累積流量隨時間變化情形。圖 7.15 為立體化案例和非立體化案例預測降流區水位高度 (Collapsed Water Level) 隨時間變化情形。圖 7.16 為立體化案例和非立體化案例預測於反應器底部空間之冷卻水存量隨時間變化情形。以上預測結果均和立體化降流區案例預測結果相似，因此不再贅述。

圖 7.17 為立體化案例和非立體化案例預測冷卻水流入熱通道入口之質量流率隨時間變化情形，所呈現預測結果可說是立體化爐心案例和立體化降流區案例綜合結果。如圖所示，於破口生成後約 8 秒，同立體化爐心案例預測冷卻水於熱通道入口之質量流率呈現震盪情形，冷卻水流入爐心熱通道，未立體化案例則否。如圖所示，兩個案例進入再泛水階段時，均能觀察到冷卻水觸及高溫燃料棒護套外側、生成蒸汽、

帶動附近冷卻水流動之情形，唯未立體化案例之震盪較立體化案例更為明顯。

### 7.1.3 其他參數比較和結語

圖 7.18 為立體化案例和非立體化案例預測之一次側迴路系統壓力隨時間變化情形。如圖所示，兩個模擬案例預測之系統壓力隨時間變化情形相當一致，唯於破口生成後 18 ~ 30 秒未立體化案例預測之壓力值約略高於立體化案例預測結果。

圖 7.19 為立體化案例和非立體化案例預測於反應器底部空間之硼濃度隨時間變化情形。圖 7.20 為立體化案例和非立體化案例預測於爐心熱通道入口之液態空泡分率隨時間變化情形。圖 7.21 是立體化案例和非立體化案例預測之緊急爐心旁通冷卻水累積流量隨時間變化情形。以上均和立體化降流區案例預測結果相似。

圖 7.22 和圖 7.23 分別為爐心熱通道第十一階，離熱通道底端約 1.5 公尺處之冷卻水之汽、液態速度。同立體化爐心案例，立體化案例擁有較為立體化案例明顯之煙囪效應。

最終，立體化案例預測之燃料護套尖峰溫度值較非立體化案例之結果約低 140 °F。另外，立體化案例預測之燃料護套尖峰溫度向下滑落之時間點較未立體化案例提早約 25 秒。立體化案例綜合了立體化爐心案例的煙囪效應和立體化降流區案例再泛水階段提早之情形，不但於熱通道中有更多冷卻水流過，且提前進入再泛水階段情形非常明顯，如圖 7.1 所示。

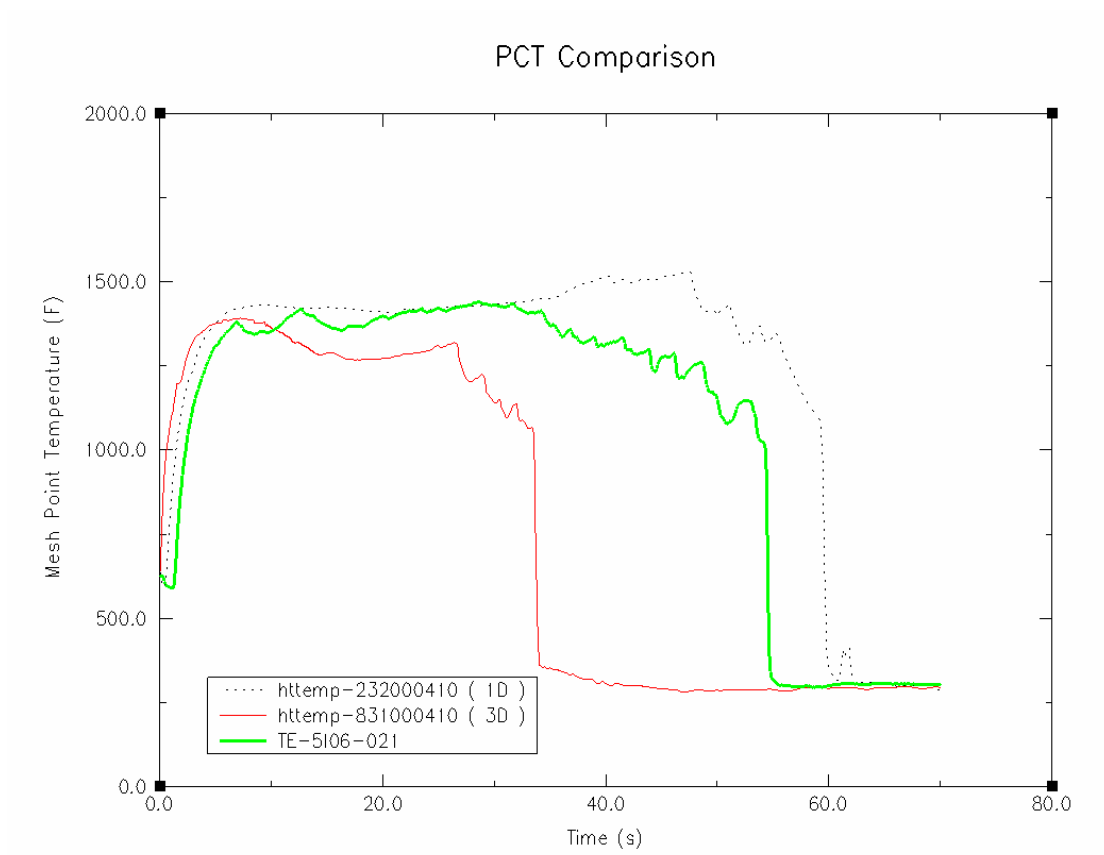


圖 7.1 於發生燃料護套尖峰溫度值處之護套溫度和實驗資料比較情形  
(立體化爐心和立體化降流區模擬的影響)

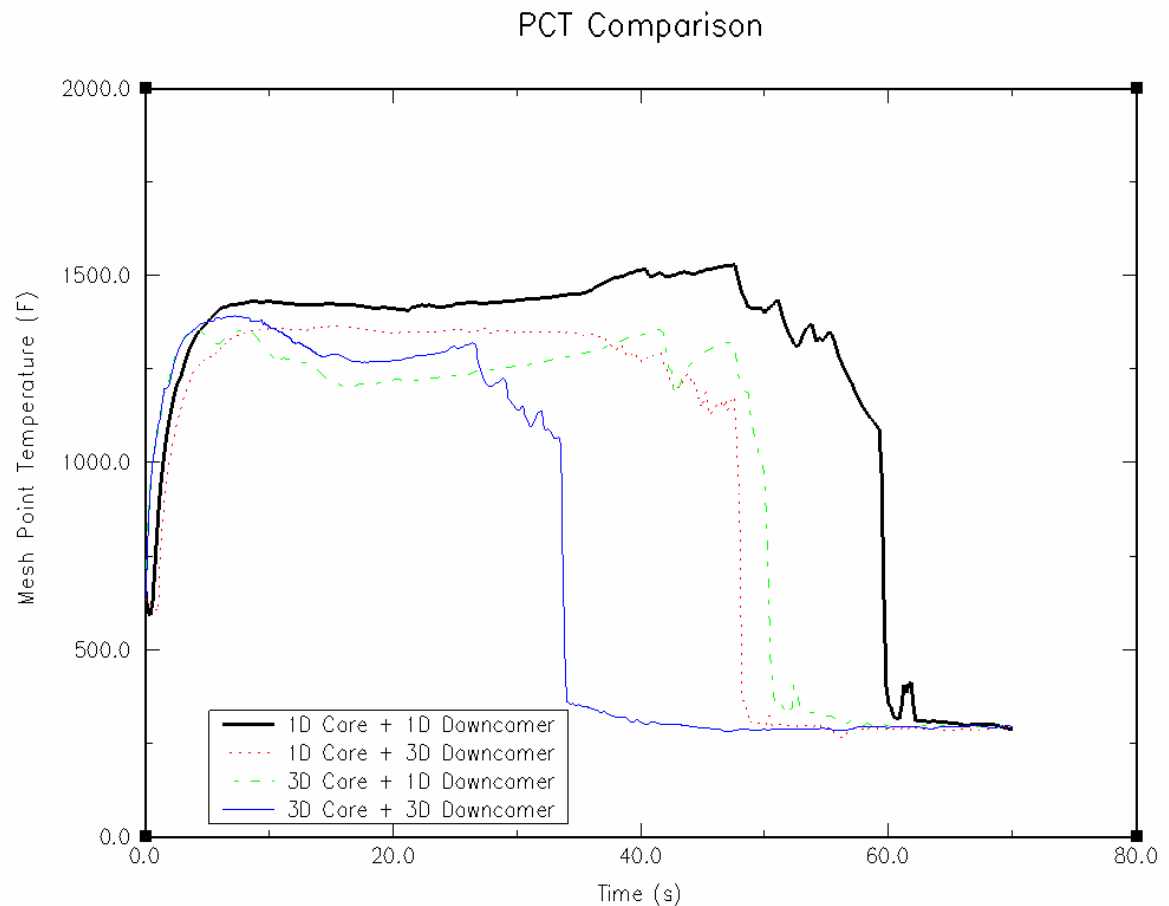


圖 7.2 燃料護套尖峰溫度值比較情形（立體化爐心和立體化降流區模擬的影響）

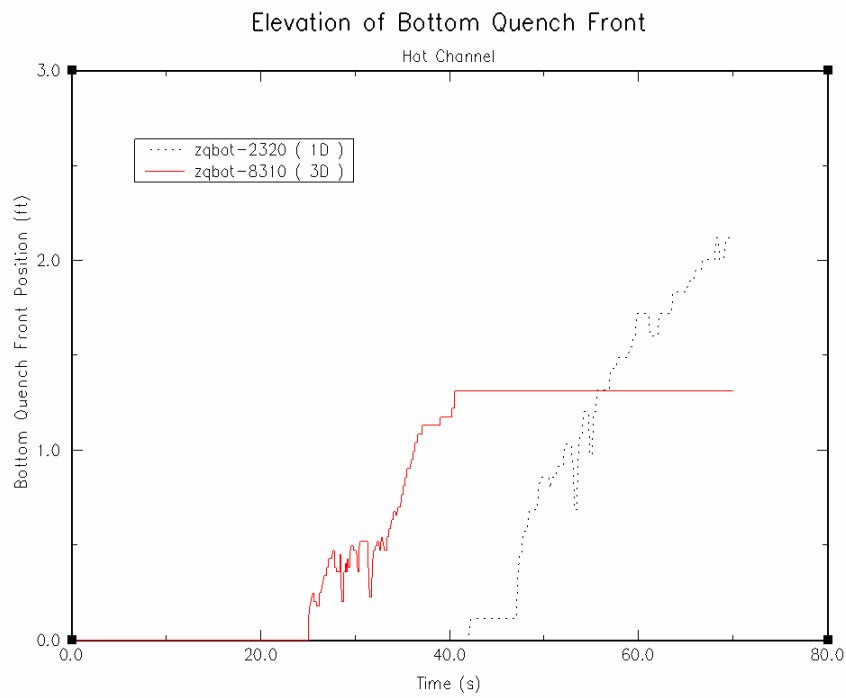


圖 7.3 爐心熱通道之覆水淬冷 (Quench) 位置  
(立體化爐心和立體化降流區模擬的影響)

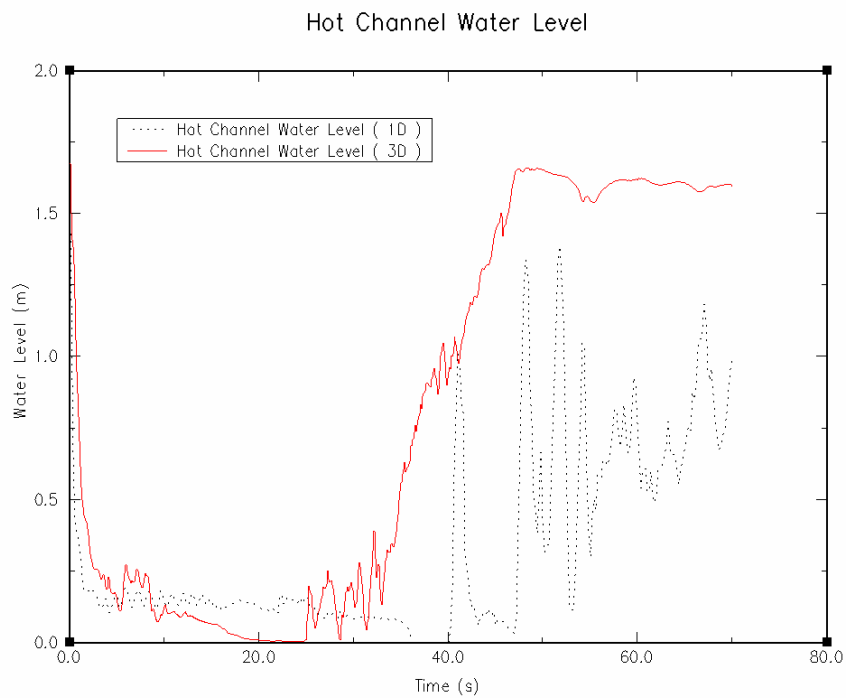


圖 7.4 熱通道爐心液態水位 (Collapsed Water Level)  
(立體化爐心和立體化降流區模擬的影響)

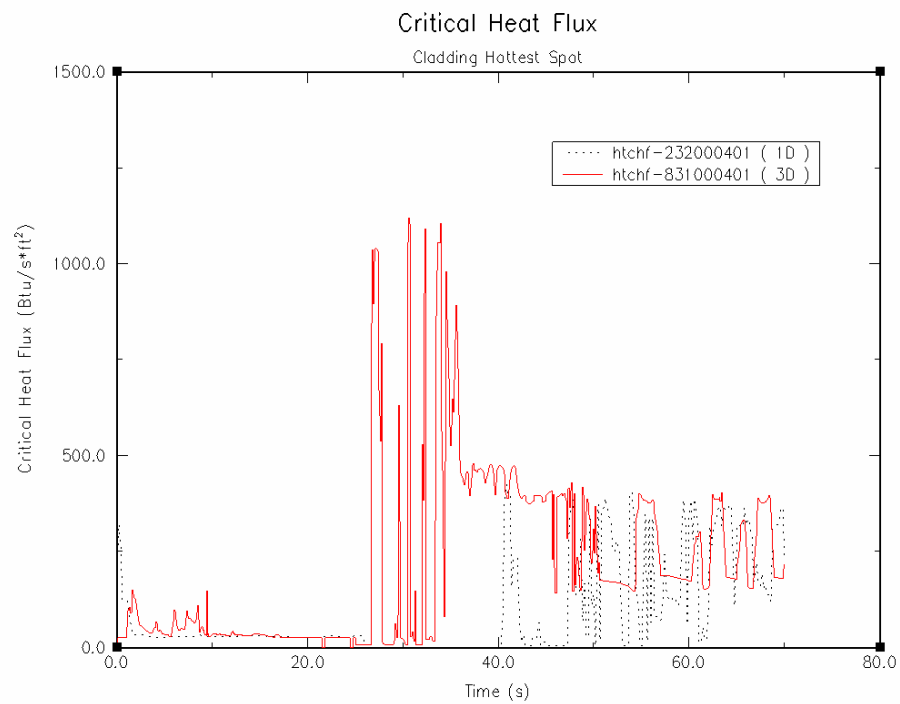


圖 7.5 燃料棒護套最熱處臨界熱通量  
(立體化爐心和立體化降流區模擬的影響)

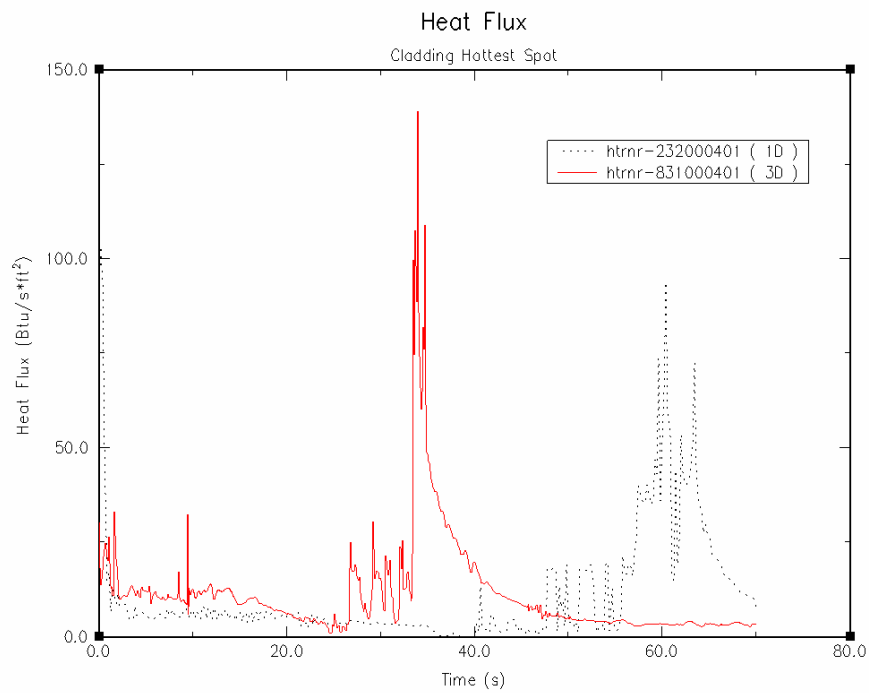


圖 7.6 燃料棒護套最熱處熱通量  
(立體化爐心和立體化降流區模擬的影響)

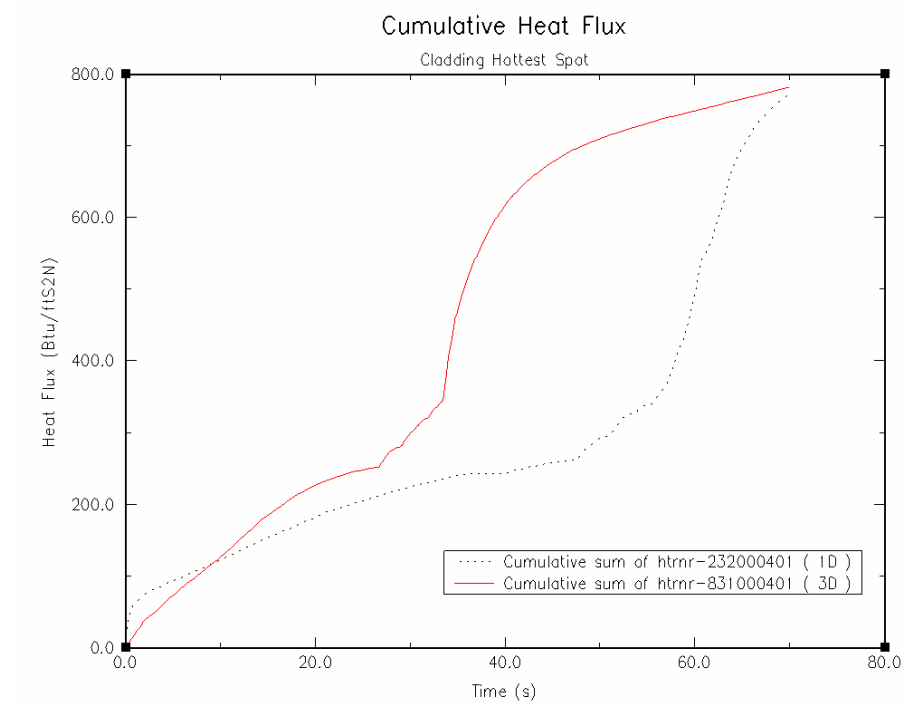


圖 7.7 燃料棒護套最熱處累積熱通量  
(立體化爐心和立體化降流區模擬的影響)

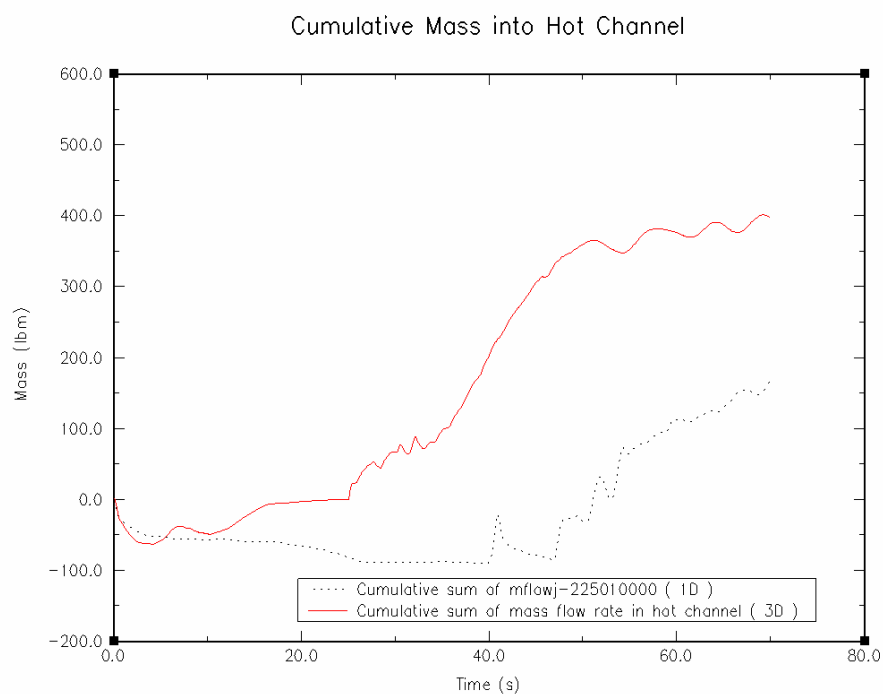


圖 7.8 冷卻水流入熱通道中累積流量  
(立體化爐心和立體化降流區模擬的影響)



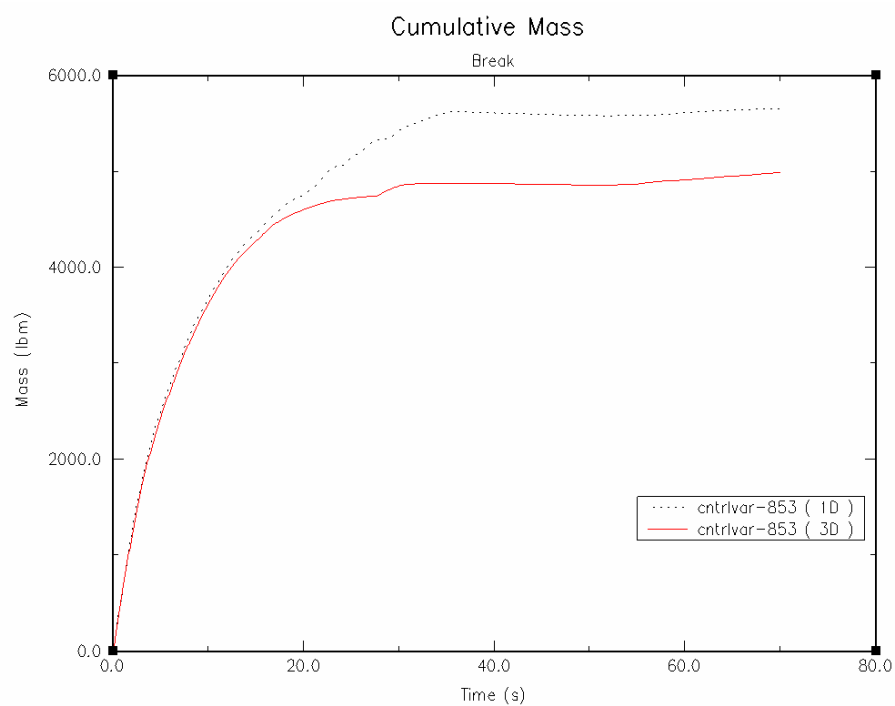


圖 7.9 破口流出累積流量  
(立體化爐心和立體化降流區模擬的影響)

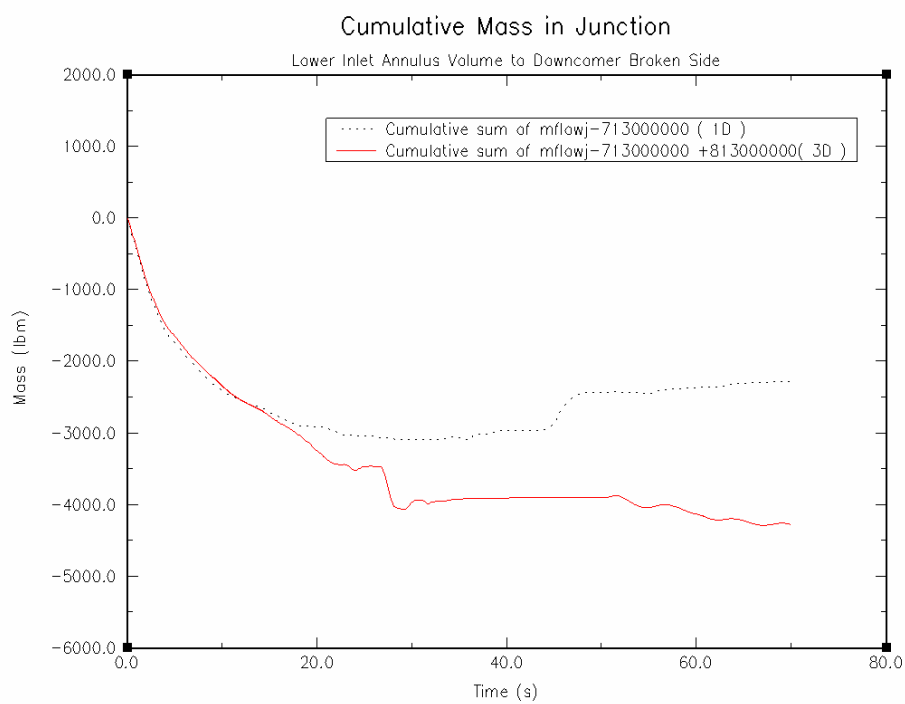


圖 7.10 破口側壓力槽入口底部環型體積流向降流區頂部體積之冷卻水累積流量  
(立體化爐心和立體化降流區模擬的影響)

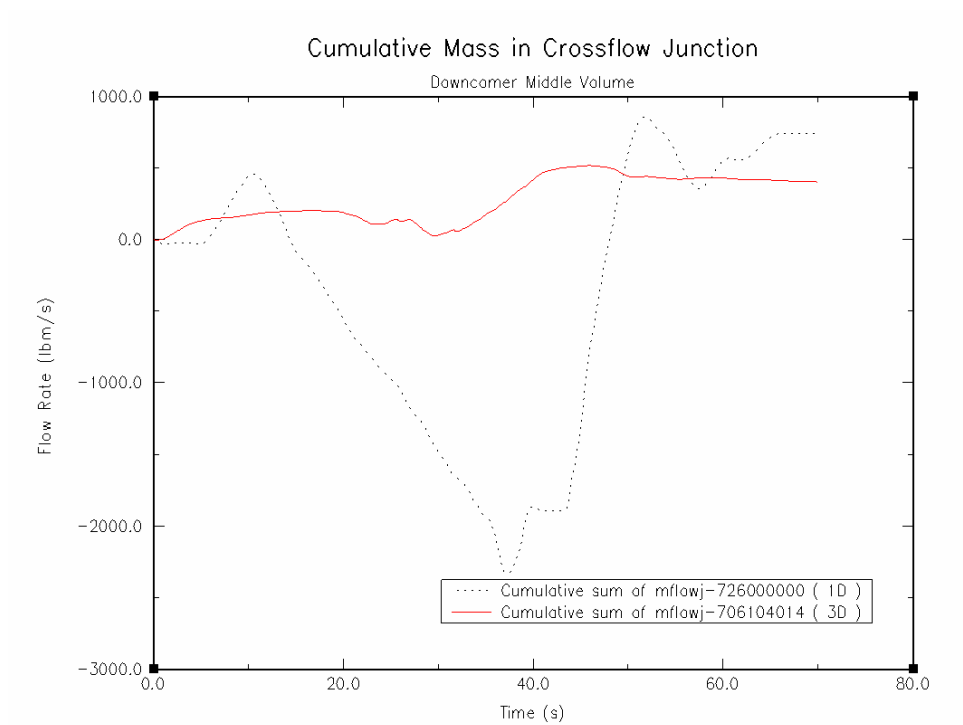


圖 7.11 降流區中部體積流體橫流接點之累積流量  
(立體化爐心和立體化降流區模擬的影響)

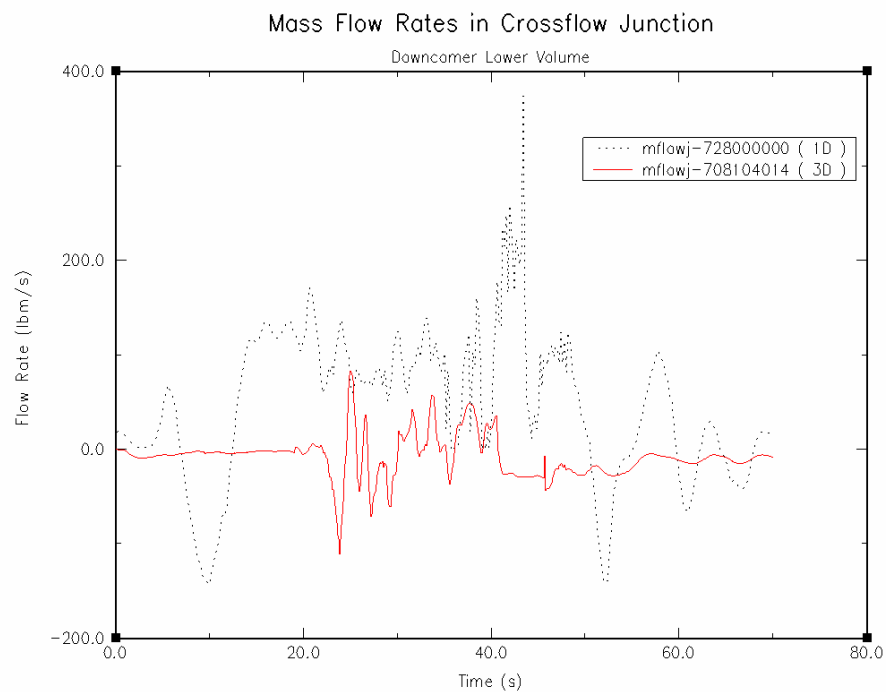


圖 7.12 降流區底部體積流體橫流接點之質量流率  
(立體化爐心和立體化降流區模擬的影響)

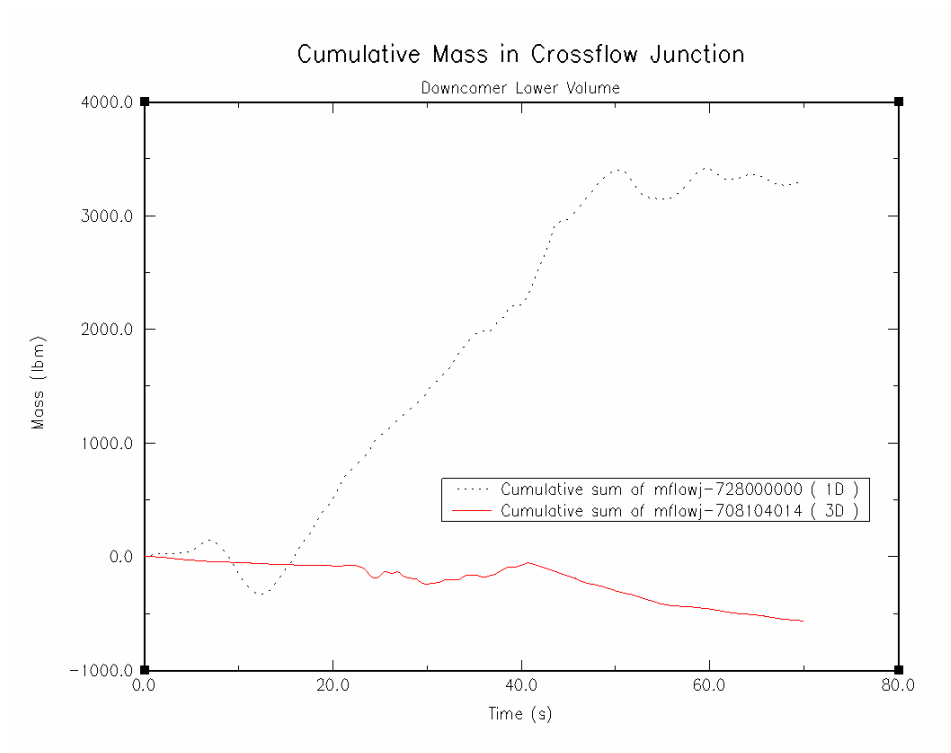


圖 7.13 降流區底部體積流體橫流接點之累積流量  
(立體化爐心和立體化降流區模擬的影響)

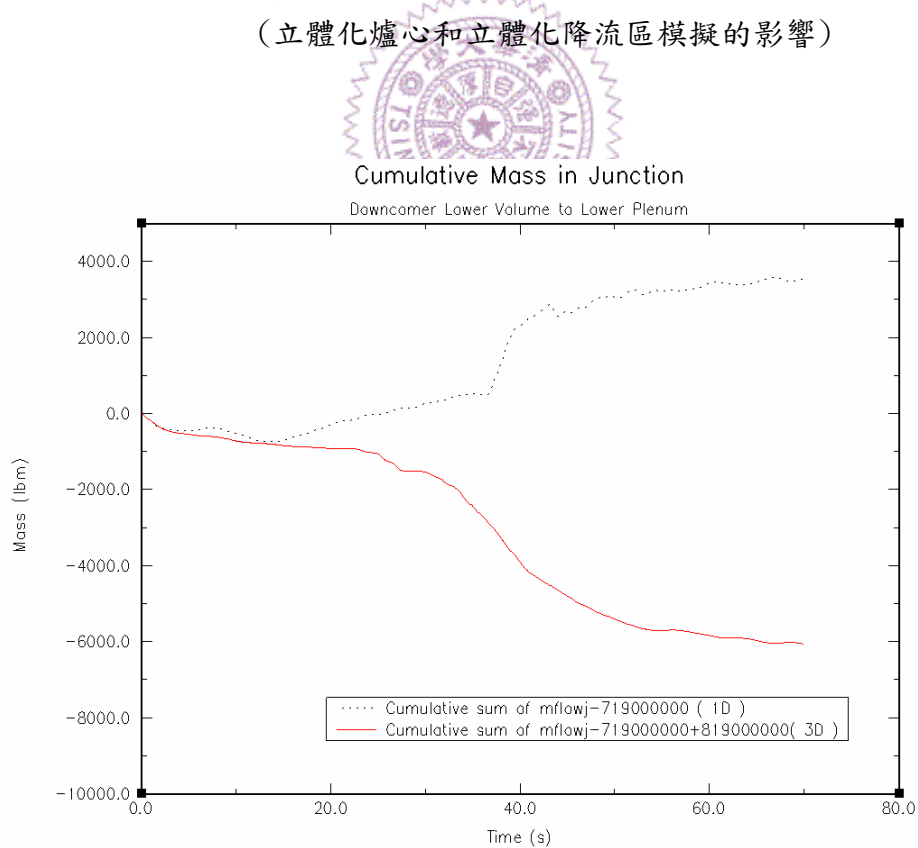


圖 7.14 降流區底部流向反應器底部空間冷卻水累積流量  
(立體化爐心和立體化降流區模擬的影響)

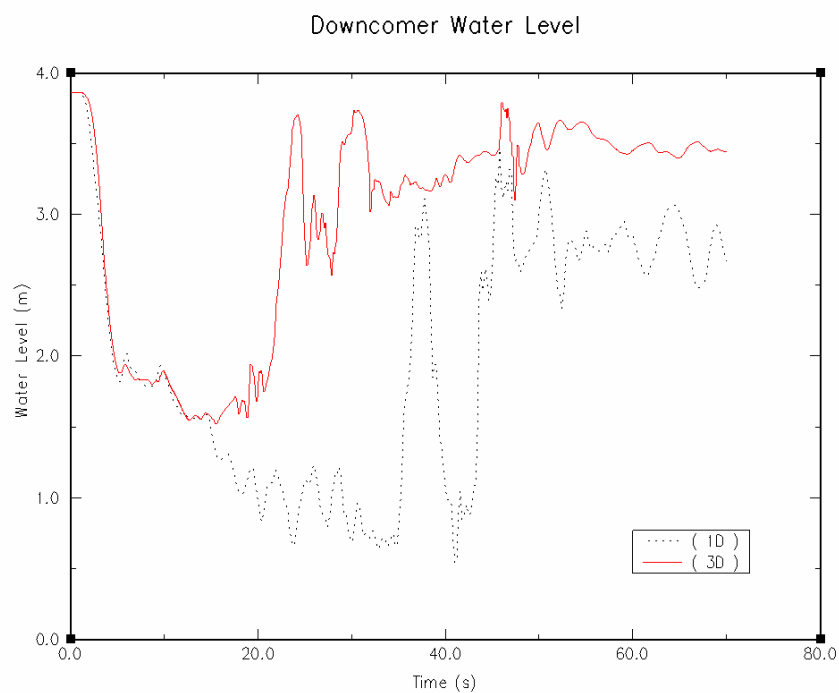


圖 7.15 降流區液態水位高度 (Collapsed Water Level)  
(立體化爐心和立體化降流區模擬的影響)

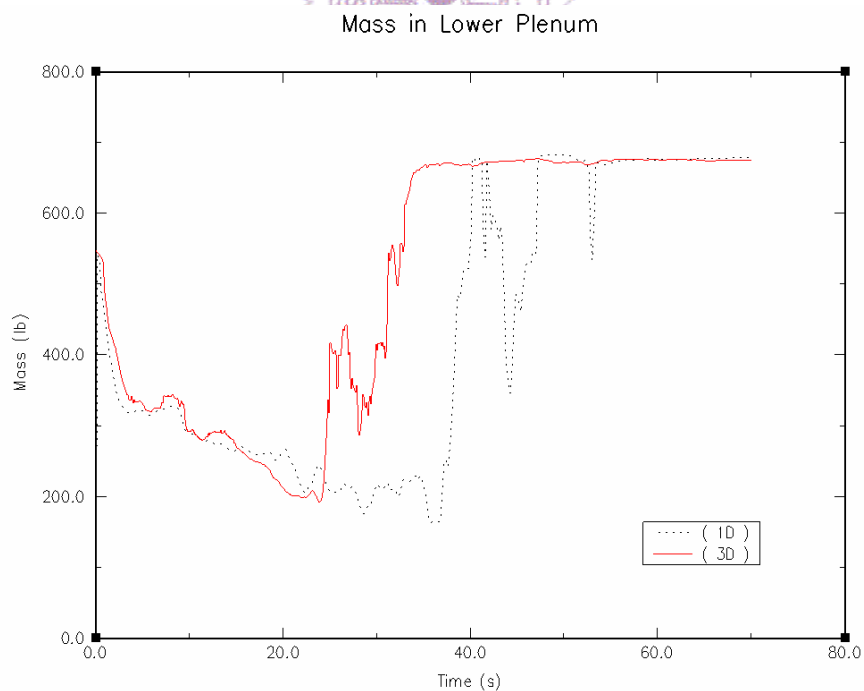


圖 7.16 反應器底部空間之冷卻水存量  
(立體化爐心和立體化降流區模擬的影響)

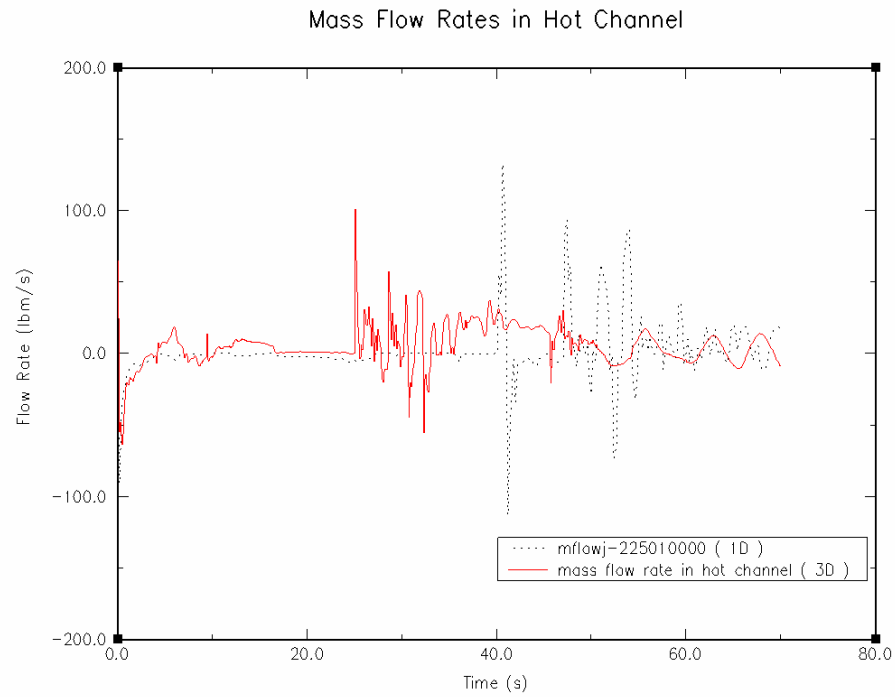


圖 7.17 爐心熱通道入口冷卻水質量流率  
(立體化爐心和立體化降流區模擬的影響)

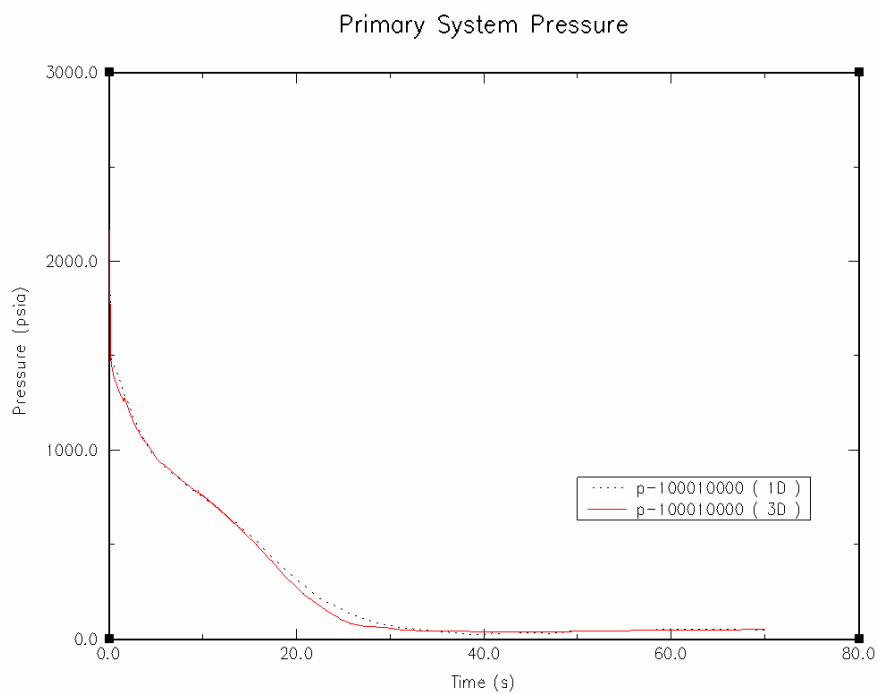


圖 7.18 一次側系統壓力 (立體化爐心和立體化降流區模擬的影響)

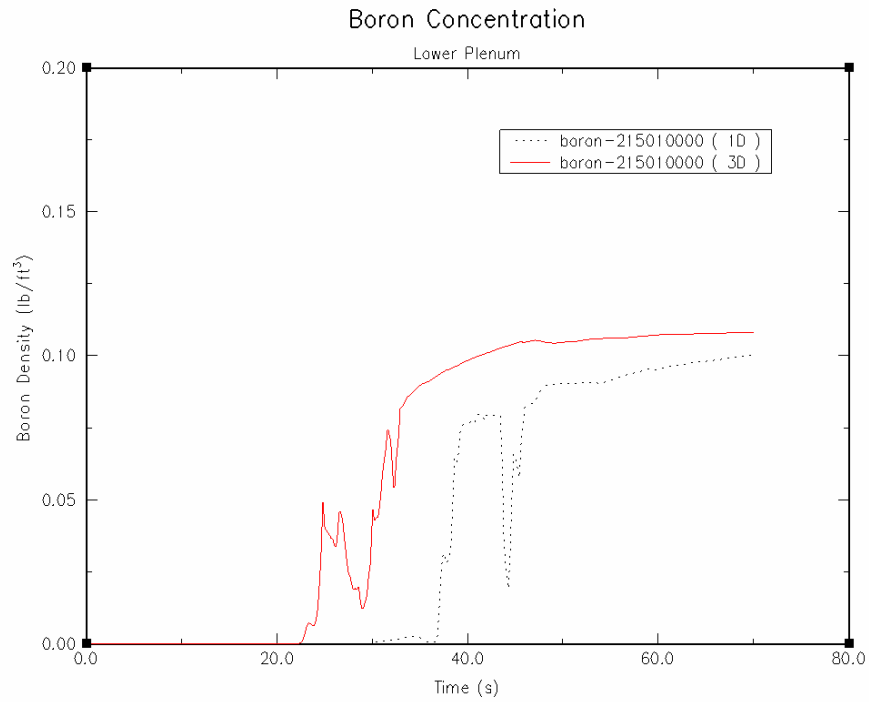


圖 7.19 反應器底部空間之硼濃度  
(立體化爐心和立體化降流區模擬的影響)

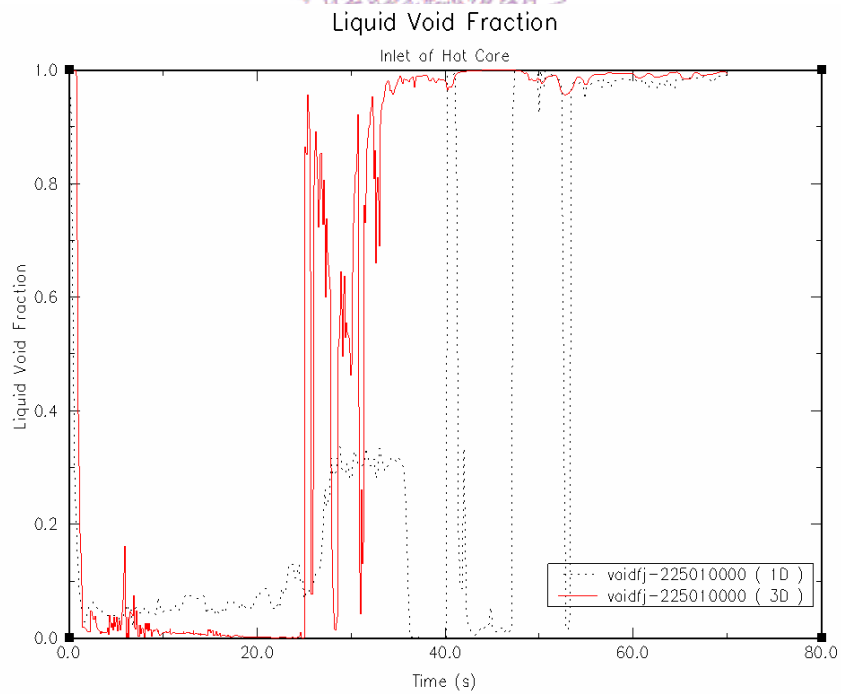


圖 7.20 爐心熱通道入口之液態空泡分率  
(立體化爐心和立體化降流區模擬的影響)

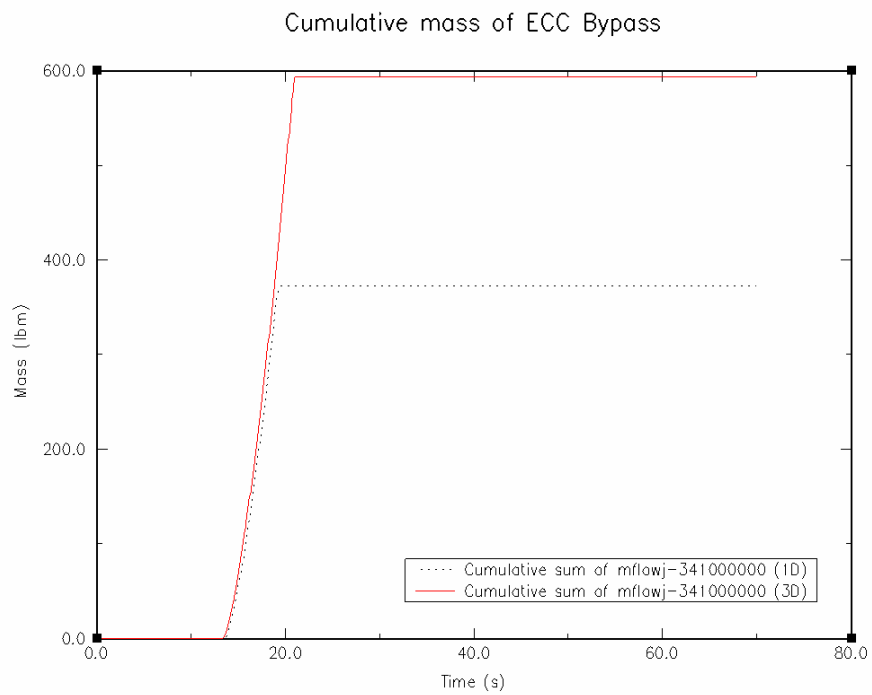


圖 7.21 緊急爐心旁通冷卻水累積流量  
(立體化爐心和立體化降流區模擬的影響)

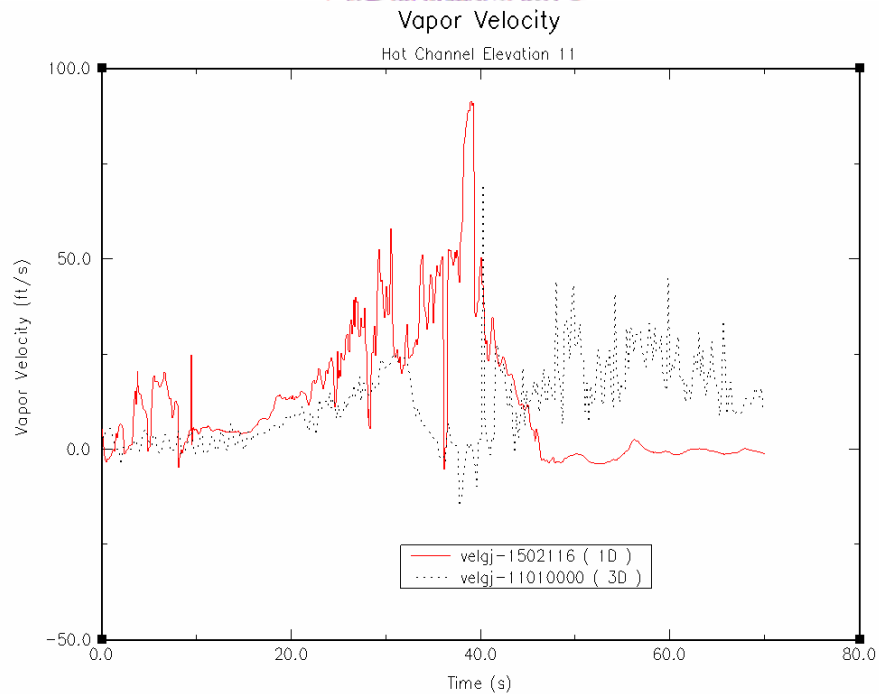


圖 7.22 熱通道第十一階冷卻水汽態速度  
(立體化爐心和立體化降流區模擬的影響)

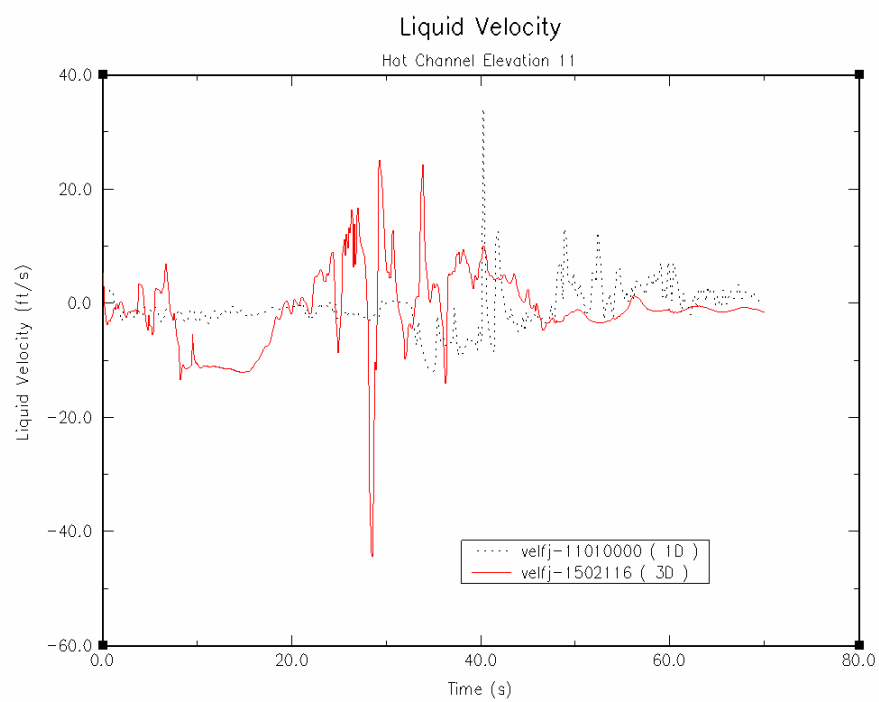


圖 7.23 熱通道第十一階冷卻水液態速度  
(立體化爐心和立體化降流區模擬的影響)



表 7.1 未立體化案例和立體化案例比較情形

案例/預測事項	燃料護套 尖峰溫度 值 (°F)	緊急爐心冷 卻系統啟動 時間點 (sec)	預測進入再 注水階段時 間點 (sec)	預測進入再 泛水階段時 間點 (sec)
未立體化案例	1533	13.37	19.21	40.16
立體化爐心案例	1361	13.58	16.86	17.94
立體化降流區案例	1371	12.96	22.59	25.27
立體化案例	1390	13.17	20.93	25.05



## 第八章 結論與建議

### 8.1 結論

立體化爐心案例預測燃料護套溫度尖峰值較未立體化爐心案例下降了約 180 °F，經過探討和各項參數比對，推測是熱通道中所發生之煙囪效應促成了燃料護套尖峰溫度值較低的事實。經過驗證，發現熱通道底部吸入工作流體、頂部排出工作流體之情形確實較未立體化爐心案例來的明顯，另外，於破口生成初期，立體化爐心案例預測燃料護套溫度向上攀升速度較為立體化爐心案例快。立體化降流區案例預測燃料護套溫度尖峰值較未立體化降流區案例下降了約 190 °F；將降流區和爐心均立體化之案例預測燃料護套溫度尖峰值較未立體化案例下降了約 140 °F。

於本研究中分別將爐心和降流區立體化並進行模擬後預測結果顯示，於燃料護套溫度尖峰值方面較原先之一維度案例預測之結果為低。另外，將降流區和爐心均立體化之案例預測燃料護套溫度尖峰值亦較一維度案例預測結果為佳，就安全餘裕的提升而言是有所助益的。

就爐心立體化所帶來的效應而言，於本研究中預測之結果顯示，於冷卻水流失事故其間之燃料護套尖峰溫度值較原先未立體化爐心案例結果降低約 180 °F。經過探討和各項參數比對，推測是熱通道中所發生之煙囪效應促成了燃料護套尖峰溫度值較低的事實。經過驗證，發現熱通道底部吸入工作流體、頂部排出工作流體之情形確實較爐心未立體化案例來的明顯。於沖放階段，冷卻水流入熱通道情形較未立體化案例明顯，因此立體化爐心案例於該時段預測之護套溫度較低。另外，也觀察到立體化爐心案例進入再泛水階段較未立體化案例時間點為早之情形。

就降流區立體化所帶來的效應而言，於本研究中預測之結果顯示，於冷卻水流失事故其間的燃料護套尖峰溫度值較原先降流區未立體化案例預測結果下降約 190 °F，且預測燃料護套溫度有較早向下掉的趨勢，在於破口生成後約 40 秒左右後即下降至一溫度值並保持平穩至試驗結束。經過一連串的比對和分析，推測是由於降流區之水位於破口生成後上漲的時間點較早，而導致降流區水位於破口生成後回升較快，使得再泛水的時間點較早所導致，另外冷卻水於立體化降流區流體橫流接點較為理想的流動情形亦為促成較低燃料護套尖峰溫度值之因素。同立體化爐心案例，立體化降流區案例預測進入再泛水階段較未立體化案例時間點為早，且更為明顯。

## 8.2 建議與未來工作

立體化模組所模擬之燃料護套尖峰溫度值的確較一維度模組下降許多，然而略嫌美中不足的是，如圖 5.1、圖 6.2、圖 7.1 所示，多維度模組未能像一維度模組於 RELAP5-3D/K 展現其保守性。或許，在不違背安全法規 10 CFR 50 附錄 K 所列規定前提下，小幅更動程式碼選用於冷卻水流失事故不同階段所使用熱傳封包（如表 3.1 所列），再配合多維度元件模擬方式，能於預測燃料護套尖峰溫度值方面展現保守性，且同時達到安全餘裕空間釋放的目的。抑或以多維度模組於 RELAP5-3D 平臺介面進行預測，即最佳估計方法（Best Estimate），再和一維度模組進行比較，亦能達成安全餘裕空間釋放的目的。

然而，本研究於此 LOCE L2-5 中所觀測到的是定性的結果，爐心和降流區元件分別、一併立體化之後，的確能獲取更大的安全餘裕。建議未來可進一步地將此立體化技術應用至現有的電廠模擬案例中，以多維度爐心元件、多維度降流區元件分別、一併置換原先的一維度爐心和一維度降流區元件，實際去量化立體化技術於安全餘裕方

面所帶來的效應，並估算不準度，爾後方可應用在實際的商用電廠中，為電廠功率提升方面帶來實質的助益。

在實際量化爐心和降流區元件立體化所增加之安全餘裕時，建議建構多種分割方式的多維度爐心元件和多維度降流區元件，將之隨機組合並和其他電廠中的元件做連結，針對多維度元件總節點數目做靈敏度分析，模擬出燃料護套尖峰溫度值隨時間之變化情形。之後，觀察不同多維度元件總節點數所對應之燃料護套尖峰溫度值，燃料護套尖峰溫度值若出現逐漸逼近某上限數值並收斂的情形，則該尖峰燃料護套尖峰值所對應之多維度元件總節點數或為最終決定值。

於確定該組多維度元件總節點數預測之燃料護套尖峰溫度值為最高時，接著就此配置進行各項參數，如最大時步、進入再注水和再泛水階段之設定（反應器底部空間硼濃度門檻值和爐心熱通道入口處液態空泡係數門檻值）之靈敏度分析，調整該參數，確認最終結果一致性（避免發生如 6.2.2 小節陳述之矛盾情形），最後得出燃料護套尖峰溫度值收斂結果，並和以原先設定預測之結果進行比對，以確認該配置預測之燃料護套尖峰值向上提升之數值大小，方能於燃料護套尖峰溫度值之預測做出最保守的估計。

考量到 LOFT 設施本身為一壓水式反應器之特質，因此，就台灣現有電廠而言，建議可將元件立體化技術應用到同樣是壓水式反應器之核能三廠之模擬過程中，實際量化元件立體化所增加安全餘裕大小，對於當前積極推動之核電廠功率提升計畫是個高可行性的好選擇，蓋立體化元件模擬技術之發展已大致趨於成熟，毋須另行研發新技術。

就多維度元件技術之改進空間而言，於多維度元件中，可自行設置所需要的小區

塊個數，以及連接小區塊間的流體接點選項，如 PV 項 (PV Term)、反向極限流限制 (Counter-Current Flow Limitation, CCFL)、拉伸 (Stratification Model) 等等。然而美中不足的是，進行小區塊間的流體接點設定時，無法如同 RELAP5-3D 中的單一流體接點 (Single Junction) 元件中的 CCC0110 卡中一樣地進行反向極限流限制之細部設定；反向極限流限制的選項在多維度元件內是無法開啟的，殊為可惜。

若欲於所設置之多維度元件中某兩個小區塊間之流體接點進行反向極限流限制的話，其變通的方法為：將多維度元件一分為二，於該流體接點截面處將原先的一個多維度元件劃分為兩個，中間以單一流體接點 (Single Junction) 陣列相連，再於該單一流體接點陣列一一進行細部的反向極限流限制設定，即進行 6.1 式中之斜率值和截距值之設定。然而，此手法過於繁瑣，就便利性而言是不盡理想的。因此，若能進一步於程式碼進行修改，於多維度元件內建流體接點亦能進行反向極限流限制之設定，即能於多維度元件內建流體接點進行 6.1 式設定的話，就使用者而言會更加便利，就預測結果而言也更有說服力。

## 參考文獻

1. U. S. NRC, “Compendium of ECCS Research for Realistic LOCA Analysis,” NUREG-1230, April 1987.
  2. Paul D. Bayless and Janice M. Divine, “Experiment Data Report for LOFT Large Break Loss-of-Coolant Experiment L2-5,” August 1982.
  3. D. L. Reeder and V. T. Berta, “THE LOSS-OF-FLUID TEST (LOFT) FACILITY,” OSTI ID: 6267439, CONF-790803-13, 1979 Jan 01.
  4. M. L. Russell, “LOFT Instrumented Fuel Design and Operating Experience,” OSTI ID: 6267431, CONF-790803-14, 1979 Jan.
  5. Liang Kuo-Shing, Tsai Yuan-Shing, “Integral-effect assessment in RELAP5-3DK/INER against L2-5 experiment”, Institute of Nuclear Energy research, INER-T2856, August 2002
  6. RELAP5-3D Code Development Team, “RELAP5-3D Code Manual Volume I: Code Structure, System Models and Solution Methods,” INEEL-EXT-98-00834 Revision 2.4 June 2005
- 
7. Thomas K. S. Liang, Chin-Jang Chang, Huan-Jen Hung, “Development and Assessment of the Appendix K Version of RELAP5-3D for LOCA Licensing Analysis,” Nuclear Technology, September 2002, Volume 139, Number 3, Pages 233-252.
  8. J.V. Cathcart, et al., “Zirconium Metal-Water Oxidation Kinetics IV. Reaction Rate Studies,” ORNL/NUREG-17, August 1977.
  9. Andy Walker, “Natural Ventilation Lecture 2 & Lecture 3,” National Renewable Energy Laboratory, US Department of Energy
  10. Woods, B. G., Collins, B., “RELAP5-3D modeling of PWR steam generator condensation experiments at the Oregon State University APEX facility.” Nucl. Eng. Des. (2009), doi:10.1016/j.nucengdes.2009.04.007

11. R. Courant, K. Friedrichs and H. Lewy, "On the partial difference equations of mathematical physics", *IBM Journal*, March 1967, pp. 215-234



## 附錄 A

BPLU 運算法和傳統運算法比較情形如下表所示。

( 摘錄自 INL 網頁 <http://www.inl.gov/relap5/relap5-3.htm> )

Case	Default Solver (CPU sec.)	BPLU Solver (CPU sec.)	Ratio
1	7.180	2.437	2.946
2	7.142	2.110	3.385
3	6.903	2.718	2.540
4	6.142	2.422	2.536
5	5.513	2.117	2.604
6	5.818	2.698	2.156
7	6.167	2.432	2.535
8	7.404	2.116	3.499
9	6.396	2.697	2.372
Note: All times on a DEC Alpha 4100 Workstation			
The results show speed-ups ranging from 2.1 to 3.5 for this simple three-dimensional problem.			



## 附錄 B

在進行立體化爐心模擬案例時選用 4 x 4 x 12 之分割配置時於 RELAP5 輸出檔案所顯示之錯誤訊息如下：

0\*\*\*\*\* Insufficient space for 733966 words of scratch space.

