

國立清華大學

碩士論文

題目：利用電廠嚴重事故分析軟體 MAAP4.0.4.對 PCTran
KuoSheng 程式的驗證

系所別：工程與系統科學系研究所

學號姓名：903192 范光運

Kuang-Yun Fan

指導教授：李 敏 博士

Dr. Min Lee

中華民國九十二年九月

摘要

本論文的工作內容為利用 MAAP4.0.4 程式針對國聖電廠的沸水式反應器及圍阻體驗證 PCTran KuoSheng 程式模擬電廠事故的能力。研究中將分析三種類型的嚴重事故，包括電廠全黑事故(Station Blackout)、冷卻水流失事故(Loss of Coolant Accident, LOCA)，以及預見暫態未急停(Anticipated Transient Without Scram, ATWS)。驗證的重點為比對兩個程式所預測之系統熱水流反應上的差異，再依據 MAAP4.0.4 的結果，修正 PCTran KuoSheng 輸入數據或程式邏輯與控制邏輯，以增加 PCTran KuoSheng 程式的正確性。

MAAP4.0.4 為一整合性之核電廠嚴重事故分析程式，可模擬冷卻水系統及圍阻體於嚴重事故中之主要化學及物理現象；PCTran KuoSheng 是一個簡單快速之熱水流分析程式，具有人性化之操作介面，以及互動式控制介面等優點。PCTran KuoSheng 可以分析反應器冷卻水系統，以及圍阻體於事故中之熱水流反應，對於放射性物質的外釋，也僅考慮存在於燃料棒護套間隙之揮發性較高的放射性物質的外釋。從核電廠嚴重事故分析的角度來看，PCTran KuoSheng 最大的問題是，在程式執行時，當燃料護套達 2,500K，溫度隨即便維持不便，故 PCTran KuoSheng 程式並沒有模擬爐心的熔損；因此許多與熔融爐心相關現象，例如熔融爐心與水於壓力槽底部區間的作用、壓力槽底部失效，以及熔融爐心與混凝土作用等，均無法模擬。

由於兩個程式分析模式上的差異，故無法要求兩個程式有完全相同的結果，僅能尋求趨勢上的一致性。經過比對與修正，針對論文所分析的三個事故序列而言，PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 的預測結果已大致相同。

目錄

摘要	-----
目錄	-----
圖目錄	-----
表目錄	-----
第一章 序論	-----1-1
1.1 研究動機	-----1-1
1.2 國聖電廠簡介	-----1-2
1.3 PCTran 程式介紹	----- 1-3
1.4 MAAP 4.0.4 程式介紹	-----1-4
第二章 核電廠嚴重事故現象介紹	-----2-1
2.1 反應器壓力槽內的現象	-----2-1
2.1.1 冷卻水系統及圍阻體的反應	-----2-1
2.1.2 壓力槽內分裂產物的釋放	-----2-2
2.2 壓力槽破裂後圍阻體內的現象	-----2-3
2.2.1 熔融爐心與混凝土間的作用	-----2-3
2.2.2 壓力槽外放射性物質的釋放	-----2-4
第三章 電廠全黑事故模擬	-----3-1
3.1 前言	-----3-1
3.2 國聖電廠電廠全黑事故模擬 (案例一)	-----3-1
3.2.1 背景	-----3-1
3.2.2 國聖電廠電廠全黑事故 MAAP4.0.4 模擬結果 (案例一)	-----3-2
3.2.3 國聖電廠全黑事故 PCTran KuoSheng 模擬結果 (案例一)	----- 3-3
3.2.4 MAAP 4.0.4 與 PCTran KuoSheng 結果比較分析 (案例一)	-----3-4
3.3 國聖電廠電廠全黑事故模擬 (案例二)	-----3-20
3.3.1 背景	-----3-20
3.3.2 國聖電廠電廠全黑事故 MAAP 4.0.4g 模擬結果 (案例二)	-----3-20
3.3.3 國聖電廠電廠全黑事故 PCTran KuoSheng 模擬結果 (案例二)	-----3-22
3.3.4 MAAP 4.0.4 與 PCTran KuoSheng 結果比較分析 (案例二)	-----3-23
3.4 國聖電廠電廠全黑事故模擬結論	-----3-39
第四章 電廠冷卻水流失事故模擬	-----4-1
4.1 前言	-----4-1

4.2 大破口冷卻水流失事故模擬 (案例一)	4-1
4.2.1 背景	4-1
4.2.2 國聖電廠大破口冷卻水流失事故 MAAP 4.0.4 模擬結果 (案例一)	4-2
4.2.3 國聖電廠大破口冷卻水流失事故 PCTran KuoSheng 模擬結果 (案例一)	4-3
4.2.4 MAAP 4.0.4 與 PCTran KuoSheng 結果比較分析 (案例一)	4-4
4.3 大破口冷卻水流失事故模擬 (案例二)	4-19
4.3.1 背景	4-19
4.3.2 國聖電廠大破口冷卻水流失事故 MAAP 4.0.4 模擬結果 (案例二)	4-19
4.3.3 國聖電廠大破口冷卻水流失事故 PCTran KuoSheng 模擬結果 (案例二)	4-20
4.3.4 MAAP 4.0.4 與 PCTran KuoSheng 結果比較分析 (案例二)	4-21
4.4 中破口冷卻水流失事故模擬 (案例一)	4-36
4.4.1 背景	4-36
4.4.2 國聖電廠中破口冷卻水流失事故 MAAP 4.0.4 模擬結果 (案例一)	4-36
4.4.3 國聖電廠中破口冷卻水流失事故 PCTran KuoSheng 模擬結果 (案例一)	4-38
4.4.4 MAAP 4.0.4 與 PCTran KuoSheng 結果比較分析 (案例一)	4-38
4.5 中破口冷卻水流失事故模擬 (案例二)	4-54
4.5.1 背景	4-54
4.5.2 國聖電廠中破口冷卻水流失事故 MAAP 4.0.4 模擬結果 (案例二)	4-54
4.5.3 國聖電廠中破口冷卻水流失事故 PCTran KuoSheng 模擬結果 (案例二)	4-56
4.5.4 MAAP 4.0.4 與 PCTran KuoSheng 結果比較分析 (案例二)	4-57
4.6 再循環管中破口冷卻水流失事故模擬	4-74
4.6.1 背景	4-74
4.6.2 國聖電廠再循環管中破口冷卻水流失事故 MAAP 4.0.4 模擬結果	4-74
4.6.3 國聖電廠再循環管中破口冷卻水流失事故 PCTran KuoSheng 模擬結果	4-76
4.6.4 MAAP 4.0.4 與 PCTran KuoSheng 結果比較分析	4-76
4.7 小破口冷卻水流失事故模擬	4-91
4.7.1 背景	4-91
4.7.2 國聖電廠小破口冷卻水流失事故 MAAP 4.0.4 模擬結果	4-91
4.7.3 國聖電廠小破口冷卻水流失事故 PCTran KuoSheng 模擬結果	4-93
4.7.4 MAAP 4.0.4 與 PCTran KuoSheng 結果比較分析	4-94
4.8 國聖電廠電廠冷卻水流失事故模擬結論	4-110

第五章 電廠預見暫態未急停事故模擬	5-1
5.1 前言	5-1
5.2 國聖電廠 ATWS 事故 MAAP4.0.4 模擬	5-2
5.2.1 國聖電廠 ATWS 事故 MAAP4.0.4 模擬結果	5-2
5.2.2 國聖電廠 ATWS 事故 MAAP4.0.4 結果比較分析	5-5
5.3 國聖電廠 ATWS 事故 PCTran KuoSheng 模擬	5-24

5.3.1 國聖電廠 ATWS 事故 PCTran KuoSheng 模擬結果-----	5-24
5.3.2 國聖電廠 ATWS 事故 PCTran KuoSheng 結果比較分析-----	5-26
5.4 國聖電廠 ATWS 事故 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 模擬結果比較-----	5-42
5.5 國聖電廠電廠預見暫態未急停事故模擬結論-----	5-54

第六章 結論與未來展望-----	6-1
------------------	-----

參考文獻

附錄

附錄一 PCTran KuoSheng 程式邏輯修正

附錄二 PCTran KuoSheng 程式參數修正

圖目錄

圖 1.1 PCTran KuoSheng 程式控制介面示意圖-----	1-6
圖 1.2 MAAP4.0.4 圍阻體區間與流徑示意圖-----	1-7
圖 3.1 電廠全黑事故冷卻水系統壓力(案例一)-----	3-8
圖 3.2 電廠全黑事故壓力槽降流區水位(案例一)-----	3-9
圖 3.3 電廠全黑事故燃料棒最高溫度(案例一)-----	3-10
圖 3.4 電廠全黑事故乾井與濕井壓力(案例一)-----	3-11
圖 3.5 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠全黑事故冷卻水系統壓力(案例一)----	3-12
圖 3.6 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠全黑事故安全釋壓閥流率(案例一)----	3-13
圖 3.7 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠全黑事故壓力槽降流區水位(案例一)--	3-14
圖 3.8 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.04 水位計算示意圖-----	3-15
圖 3.9 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠全黑事故燃料棒最高溫度(案例一)----	3-16
圖 3.10 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠全黑事故抑壓池溫度(案例一)-----	3-17
圖 3.11 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠全黑事故濕井壓力(案例一)-----	3-18
圖 3.12 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠全黑事故氫氣產生量(案例一)-----	3-19
圖 3.13 電廠全黑事故冷卻水系統壓力(案例二)-----	3-27
圖 3.14 電廠全黑事故壓力槽降流區水位(案例二)-----	3-28
圖 3.15 電廠全黑事故燃料棒最高溫度(案例二)-----	3-29
圖 3.16 電廠全黑事故乾井與濕井壓力(案例二)-----	3-30
圖 3.17 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠全黑事故冷卻水系統壓力(案例二)----	3-31
圖 3.18 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠全黑事故安全釋壓閥流率(案例二)----	3-32
圖 3.19 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠全黑事故壓力槽降流區水位(案例二)—	3-33
圖 3.20 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠全黑事故爐心隔離冷卻系統流率 (案例二)-----	3-34
圖 3.21 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠全黑事故燃料棒最高溫度(案例二)---	3-35
圖 3.22 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠全黑事故抑壓池溫度(案例二)-----	3-36
圖 3.23 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠全黑事故濕井壓力(案例二)-----	3-37
圖 3.24 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠全黑事故氫氣產生量(案例二)-----	3-38
圖 4.1 電廠大破口冷卻水流失事故冷卻水系統壓力(案例一)-----	4-8
圖 4.2 電廠大破口冷卻水流失事故壓力槽降流區水位(案例一)-----	4-9
圖 4.3 電廠大破口冷卻水流失事故燃料棒最高溫度(案例一)-----	4-10
圖 4.4 電廠大破口冷卻水流失事故乾井與濕井壓力(案例一)-----	4-11
圖 4.5 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠大破口冷卻水流失事故冷卻水系統壓 力(案例一)-----	4-12
圖 4.6 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠大破口冷卻水流失事故破口流率 (案例一)-----	1-13

圖 4.7 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠大破口冷卻水流失事故壓力槽降流區 水位(案例一)-----	4-14
圖 4.8 CTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠大破口冷卻水流失事故燃料棒最高溫度 (案例一)-----	4-15
圖 4.9 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠大破口冷卻水流失事故抑壓池溫度 (案例一)-----	4-16
圖 4.10 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠大破口冷卻水流失事故濕井壓力 (案例一)-----	4-17
圖 4.11 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠大破口冷卻水流失事故氫氣產生量 (案例一)-----	4-18
圖 4.12 電廠大破口冷卻水流失事故冷卻水系統壓力(案例二)-----	4-25
圖 4.13 電廠大破口冷卻水流失事故壓力槽降流區水位(案例二)-----	4-26
圖 4.14 電廠大破口冷卻水流失事故燃料棒最高溫度(案例二)-----	4-27
圖 4.15 電廠中破口冷卻水流失事故乾井與濕井壓力(案例二)-----	4-28
圖 4.16 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠破口冷卻水流失事故冷卻水系統壓力 (案例二)-----	4-29
圖 4.17 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠大破口冷卻水流失事故低壓爐心灑水 系統流率(案例二)-----	4-30
圖 4.18 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠大破口冷卻水流失事故破口流率 (案例二)-----	4-31
圖 4.19 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠大破口冷卻水流失事故壓力槽降流區 水位(案例二)-----	4-32
圖 4.20 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠大破口冷卻水流失事故燃料棒最高溫 度(案例二)-----	4-33
圖 4.21 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠大破口冷卻水流失事故抑壓池溫度 (案例二)-----	4-34
圖 4.22 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠大破口冷卻水流失事故濕井壓力 (案例二)-----	4-35
圖 4.23 電廠中破口冷卻水流失事故冷卻水系統壓力(案例一)-----	4-42
圖 4.24 電廠中破口冷卻水流失事故壓力槽降流區水位(案例一)-----	4-43
圖 4.25 電廠中破口冷卻水流失事故燃料棒最高溫度(案例一)-----	4-44
圖 4.26 電廠中破口冷卻水流失事故乾井與濕井壓力(案例一)-----	4-45
圖 4.27 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠中破口冷卻水流失事故冷卻水系統壓 力(案例一)-----	4-46
圖 4.28 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠中破口冷卻水流失事故破口流率 (案例一)-----	4-47
圖 4.29 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠中破口冷卻水流失事故安全釋壓閥流 率(案例一)-----	4-48

圖 4.30 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠中破口冷卻水流失事故壓力槽降流區水位 (案例一)	4-49
圖 4.31 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠中破口冷卻水流失事故燃料棒最高溫 度(案例一)	4-50
圖 4.32 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠中破口冷卻水流失事故抑壓池溫度 (案例一)	4-51
圖 4.33 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠中破口冷卻水流失事故濕井壓力 (案例一)	4-52
圖 4.34 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠中破口冷卻水流失事故氫氣產生量 (案例一)	4-53
圖 4.35 電廠中破口冷卻水流失事故冷卻水系統壓力(案例二)	4-61
圖 4.36 電廠中破口冷卻水流失事故壓力槽降流區水位(案例二)	4-62
圖 4.37 電廠中破口冷卻水流失事故燃料棒最高溫度(案例二)	4-63
圖 4.38 電廠中破口冷卻水流失事故乾井與濕井壓力(案例二)	4-64
圖 4.39 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠中破口冷卻水流失事故冷卻水系統壓 力(案例二)	4-65
圖 4.40 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠中破口冷卻水流失事故高壓爐心灑水 系統流率(案例二)	4-66
圖 4.41 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠中破口冷卻水流失事故破口流率 (案例二)	4-67
圖 4.42 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠中破口冷卻水流失事故安全釋壓閥流 率(案例二)	4-68
圖 4.43 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠中破口冷卻水流失事故壓力槽降流區 水位(案例二)	4-69
圖 4.44 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠中破口冷卻水流失事故燃料棒最高溫 度(案例二)	4-70
圖 4.45 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠中破口冷卻水流失事故抑壓池溫度 (案例二)	4-71
圖 4.46 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠中破口冷卻水流失事故濕井壓力 (案例二)	4-72
圖 4.47 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠中破口冷卻水流失事故氫氣產生量 (案例二)	4-73
圖 4.48 電廠再循環管中破口冷卻水流失事故冷卻水系統壓力	4-80
圖 4.49 電廠再循環管中破口冷卻水流失事故壓力槽降流區水位	4-81
圖 4.50 電廠再循環管中破口冷卻水流失事故燃料棒最高溫度	4-82
圖 4.51 電廠再循環管中破口冷卻水流失事故乾井與濕井壓力	4-83
圖 4.52 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.04 電廠再循環管中破口冷卻水流失事故冷卻 水系統壓力	4-84

圖 4.53 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.04 電廠再循環管中破口冷卻水流失事故破口 流率-----	4-85
圖 4.54 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.04 電廠再循環管中破口冷卻水流失事故壓力 槽降流區水位-----	4-86
圖 4.55 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.04 電廠再循環管中破口冷卻水流失事故燃料 棒最高溫度-----	4-87
圖 4.56 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.04 電廠再循環管中破口冷卻水流失事故抑壓 池溫度-----	4-88
圖 4.57 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.04 電廠再循環中破口冷卻水流失事故濕井壓 力-----	4-89
圖 4.58 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.04 電廠再循環中破口冷卻水流失事故氫氣產 生量-----	4-90
圖 4.59 電廠小破口冷卻水流失事故冷卻水系統壓力-----	4-98
圖 4.60 電廠小破口冷卻水流失事故壓力槽降流區水位-----	4-99
圖 4.61 電廠小破口冷卻水流失事故燃料棒最高溫度-----	4-100
圖 4.62 電廠小破口冷卻水流失事故乾井與濕井壓力-----	4-101
圖 4.63 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠小破口冷卻水流失事故冷卻水系統 壓力-----	4-102
圖 4.64 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠小破口冷卻水流失事故破口流率---	4-103
圖 4.65 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠小破口冷卻水流失事故安全釋壓閥流 率-----	4-104
圖 4.66 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠小破口冷卻水流失事故壓力槽降流區 水位-----	4-105
圖 4.67 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠小破口冷卻水流失事故燃料棒最高 溫度-----	4-106
圖 4.68 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠小破口冷卻水流失事故抑壓池溫度-	4-107
圖 4.69 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠小破口冷卻水流失事故乾井與濕井 壓力-----	4-108
圖 4.70 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠小破口冷卻水流失事故氫氣產生量—	4-109
圖 5.1 MAAP4.0.4 電廠預見暫態未急停事故爐心功率-----	5-9
圖 5.2 MAAP4.0.4 電廠預見暫態未急停事故冷卻水系統壓力-----	5-10
圖 5.3 MAAP4.0.4 電廠預見暫態未急停事故安全釋壓閥流率-----	5-11
圖 5.4 MAAP4.0.4 電廠預見暫態未急停事故爐心隔離冷卻系統流率-----	5-12
圖 5.5 MAAP4.0.4 電廠預見暫態未急停事故壓力槽降流區水位-----	5-13
圖 5.6 MAAP4.0.4 電廠預見暫態未急停事故燃料棒最高溫度-----	5-14
圖 5.7 MAAP4.0.4 電廠預見暫態未急停事故抑壓池溫度-----	5-15
圖 5.8 MAAP4.0.4 電廠預見暫態未急停事故濕井壓力-----	5-16
圖 5.9 MAAP4.0.4 電廠預見暫態未急停事故氫氣產生量-----	5-17

圖 5.10 MAAP4.0.4 電廠預見暫態未急停事故爐心功率積分變化比較-----	5-19
圖 5.11 MAAP4.0.4 電廠預見暫態未急停事故爐心隔離冷卻系統流率變化-----	5-20
圖 5.12 MAAP4.0.4 電廠預見暫態未急停事故壓力槽降流區水位變化比較-----	5-21
圖 5.13 MAAP4.0.4 電廠預見暫態未急停事故抑壓池溫度變化比較-----	5-22
圖 5.14 MAAP4.0.4 電廠預見暫態未急停事故濕井壓力變化比較-----	5-23
圖 5.15 PCTran KuoSheng 電廠預見暫態未急停事故爐心功率-----	5-29
圖 5.16 PCTran KuoSheng 電廠預見暫態未急停事故冷卻水系統壓力-----	5-30
圖 5.17 PCTran KuoSheng 電廠預見暫態未急停事故安全釋壓閥流率-----	5-31
圖 5.18 PCTran KuoSheng 電廠預見暫態未急停事故爐心隔離冷卻系統流率-----	5-32
圖 5.19 PCTran KuoSheng 電廠預見暫態未急停事故壓力槽降流區水位-----	5-33
圖 5.20 PCTran KuoSheng 電廠預見暫態未急停事故燃料棒最高溫度-----	5-34
圖 5.21 PCTran KuoSheng 電廠預見暫態未急停事故抑壓池溫度-----	5-35
圖 5.22 PCTran KuoSheng 電廠預見暫態未急停事故濕井壓力-----	5-36
圖 5.23 PCTran KuoSheng 電廠預見暫態未急停事故氫氣產生量-----	5-37
圖 5.24 PCTran KuoSheng 電廠預見暫態未急停事故爐心功率積分變化比較-----	5-38
圖 5.25 PCTran KuoSheng 電廠預見暫態未急停事故壓力槽降流區水位變化比較---	5-39
圖 5.26 PCTran KuoSheng 電廠預見暫態未急停事故抑壓池溫度變化比較-----	5-40
圖 5.27 PCTran KuoSheng 電廠預見暫態未急停事故濕井壓力變化比較-----	5-41
圖 5.28 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠預見暫態未急停事故爐心功率積分 比較-----	5-45
圖 5.29 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠預見暫態未急停事故冷卻水系統壓力-	5-46
圖 5.30 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠預見暫態未急停事故安全釋壓閥流率-	5-47
圖 5.31 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠預見暫態未急停事故爐心隔離冷卻系 統流率-----	5-48
圖 5.32 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠預見暫態未急停事故壓力槽降流區水 位-----	5-49
圖 5.33 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠預見暫態未急停事故燃料棒最高溫度 -----	5-50
圖 5.34 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠預見暫態未急停事故抑壓池溫度----	5-51
圖 5.35 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠預見暫態未急停事故濕井壓力-----	5-52
圖 5.36 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠預見暫態未急停事故氫氣產生量----	5-53

表目錄

表 1.1 MAAP4.0.4 圍阻體各區間簡要說明-----	1-8
表 1.2 MAAP4.0.4 圍阻體各流徑簡要說明-----	1-8
表 3.1 MAAP4.04 程式模擬國聖電廠電廠全黑事故重要時序(案例一)-----	3-7
表 3.2 PCTran KuoSheng 程式模擬國聖電廠電廠全黑事故重要時序(案例二)-----	3-7
表 3.3 MAAP4.04 程式模擬國聖電廠電廠全黑事故重要時序(案例二)-----	3-26
表 3.4 PCTran KuoSheng 程式模擬國聖電廠電廠全黑事故重要時序(案例二)-----	3-26
表 3.5 PCTran KuoSheng 程式模擬國聖電廠電廠全黑事故程式修改表-----	3-41
表 4.1 MAAP4.04 程式模擬國聖電廠大破口冷卻水流失事故重要時序(案例一)-----	4-7
表 4.2 PCTran KuoSheng 程式模擬國聖電廠大破口冷卻水流失事故重要時序 (案例一)-----	4-7
表 4.3 MAAP4.04 程式模擬國聖電廠大破口冷卻水流失事故重要時序(案例二)----	4-24
表 4.4 PCTran KuoSheng 程式模擬國聖電廠大破口冷卻水流失事故重要時序 (案例二)-----	4-24
表 4.5 MAAP4.04 程式模擬國聖電廠中破口冷卻水流失事故重要時序(案例一)----	4-41
表 4.6 PCTran KuoSheng 程式模擬國聖電廠中破口冷卻水流失事故重要時序 (案例一)-----	4-41
表 4.7 MAAP4.04 程式模擬國聖電廠中破口冷卻水流失事故重要時序(案例二)----	4-60
表 4.8 PCTran KuoSheng 程式模擬國聖電廠中破口冷卻水流失事故重要時序 (案例二)-----	4-60
表 4.9 MAAP4.04 程式模擬國聖電廠再循環中破口冷卻水流失事故重要時序-----	4-79
表 4.10 PCTran KuoSheng 程式模擬國聖電廠再循環中破口冷卻水流失事故重要時 序-----	4-79
表 4.11 MAAP4.04 程式模擬國聖電廠小破口冷卻水流失事故重要時序-----	4-97
表 4.12 PCTran KuoSheng 程式模擬國聖電廠小破口冷卻水流失事故重要時序-----	4-97
表 5.1 MAAP4.0.4 程式模擬國聖電廠預見暫態未急停事故重要時序-----	5-8
表 5.2 MAAP4.0.4 程式模擬國聖電廠預見暫態未急停事故重要時序比較-----	5-18
表 5.3 PCTran KuoSheng 程式模擬國聖電廠預見暫態未急停事故重要時序-----	5-28

第一章 序論

1.1 研究動機

核能發電可以說是原子能眾多和平用途當中與我們有最密切的關係，但卻也是受到最為爭議的一項原子能利用方式。再經歷美國三哩島事件以及前蘇聯車諾比等兩次嚴重的核能事故後，對於核能發電所帶來不穩定因素，大部分民眾的恐懼更是與日倍增，雖然目前所採用的是輕水式核子反應器，不可能發生類似車諾比災變的事故，但類似美國三里島的爐心熔損事故亦有可能的會發生，因此，對於核電廠在發生事故時爐心、圍阻體內所發生的各種現象，我們應進行更深入研究以及了解。

本論文的工作內容為利用 MAAP4.0.4 程式【1】針對國聖電廠所選用的沸水式反應器及圍阻體之設計進行研究，以驗證 PCTran KuoSheng 程式【2】模擬電廠事故的結果。研究中將分析三種類型的嚴重事故，包括電廠全黑事故(Station Blackout)、冷卻水流失事故(Loss of Coolant Accident, LOCA)，以及預見暫態未急停(Anticipated Transient Without Scram, ATWS)；借此三種嚴重事故的分析來修正 PCTran KuoSheng 程式。每類型事故的分析中，細分幾個不同的案例，以驗證 PCTran KuoSheng 程式的分析能力，例如在冷卻水流失事故分析中，除了主蒸汽閥的破口分大破口、中破口以及小破口外，另外也分析了再循環管破裂的案例。

驗證內容包括事故中之熱水流的反應。由於 PCTran KuoSheng 程式中燃料溫度達到 2,500K 時，即不再改變，因此許多的爐心熔損現象都無法模擬。故在於驗證工作時，僅能以爐心熔損前之熱水流分析結果做為比較。雖然兩個程式所預測之暫態變化趨勢相當的一致，但在一些重要時序以及參數的變化上均有很大的差距。

本論文首先將針對國聖電廠、PCTran KuoSheng 程式、MAAP4.0.4 程式做簡要的介紹，隨後在第二章中介紹核電廠嚴重事故現象，接下來第三章至第五章則描述所模擬的嚴重事故結果並做兩程式間的比較，並於最後一章中提出對於模擬結果的心得及建議。

1.2 國聖電廠簡介

國聖電廠【3】隸屬於台灣電力公司，為台灣電力公司第二座核能發電廠。所在位置為台北縣萬里鄉野柳村，佔地約 220 公頃，其反應器則採用美國奇異公司所設計之第六代沸水式反應器(BWR-6)【4】，廠址共設置兩部機組，控制室組廢料廠房以及部分系統為兩部機組所共用，其他系統則個各自獨立，為台灣電力供應系統中，裝置容量最大的發電機組。

反應器所用之燃料為二氧化鈾燃料丸，由鉛-2 合金所製成之燃料護套管所包覆，反應器爐心由 624 個燃料組件所組成，以及 145 根十字形控制棒【4】，自反應爐下方抽出或插入爐心內，以控制反應度的大小。

國聖電廠圍阻體採用奇異公司所設計的 Mark III 型圍阻體【4】，用來包容整個蒸汽供應系統，防止萬一核能事故後，分裂產物或放射性物質的外洩，其兼有屏蔽和壓力界限的作用。

國聖電廠於民國六十三年九月開始興建，於民國六十四年十一月完成第一部機反應器基礎混凝土澆置。民國六十七年二月二日吊放第一部機 450 噸重的發電機定子，同年五月九日吊放重約 600 噸的反應器壓力槽。六十八年八月十五日，一號機緊急起動變壓器及相關匯流排、高低配電盤與馬達控制中心，由系統受電運轉成功。一號機於七十年一月完成鈾燃料裝填；第二部機工程較第一部機延後一年開工，第二部機發電機定子於民國六十七年六月九日吊放完成。反應器壓力槽繼於同年十一月二十二日吊裝完成。七十一年三月完成鈾燃料裝填。一、二號機分別於民國七十年十二月及七十二年三月商業運轉。

1.3 PCTran KuoSheng 程式介紹

PCTran 程式的研發是由美國 Micro-Simulation Technology(MST)公司所發展，這

套軟體的特點在於能夠使用個人電腦即可完成大型模擬器的大部份功能，以減少分析所須要的成本，並且加快其模擬速度以減少分析的時間。PCTran 程式則針對目前國內四座核能電廠，分別的發展出四套獨立之模式及操作介面。PCTran KuoSheng 程式則是針對核二廠所發展之模擬程式。

MST 公司成立於西元 1985 年，以編寫快速執行程式為其主要的工作，模擬核電廠嚴重事故，以協助電廠安全度評估的執行及緊急應變計畫的演練。PCTran KuoSheng 程式使用 Microsoft Visual Basic 6.0 版所編寫而成，適用於 Windows 作業系統，其主要優點為具有人性化的操作介面，以及互動式控制介面等，示意圖請參見圖 1.1。對於 Westinghouse、KWU、Framatome、C-F、B&W 等公司的壓水式反應器及 GE、ABB 等公司的沸水式反應器都建立了詳細的模型。

PCTran KuoSheng 是一個簡單快速的熱水流分析程式，由於在程式執行時，當燃料護套達 2,500K 時，溫度隨即便維持不便，故 PCTran KuoSheng 程式並沒有模擬爐心的熔損；對於放射性物質的外釋，也僅考慮存在於燃料棒護套間隙之揮發性較高的放射性物質的外釋。對於計算放射性物質於冷卻水系統之沉積情形，由於 PCTran KuoSheng 並未詳細模擬冷卻水系統的流徑，故無法計算得知，PCTran KuoSheng 也無法計算放射性物質空浮於圍阻體之沉積行為。PCTran KuoSheng 中許多參數的決定也包含有非常大程度的任意性。

對電力公司而言，PCTran KuoSheng 可以提供以下幾個用途：

1. 意外事故發生之進程、事故序列及發生時間之模擬；
2. 事故發生後嚴重程度之評估，如圍阻體壓力、爐心溫度、分裂產物外釋等；
3. 瞭解設備正常運轉與否對系統之影響；
4. 用於核電廠安全度評估（Probabilistic Safety Assessment）之事故序列分析。

1.4 MAAP4.0.4 程式介紹

MAAP(Modular Accident Analysis Program)【5】是一針對嚴重事故發生後，反應

器爐心、冷卻水系統、以及圍阻體內所發生之現象進行模擬之程式。1979 年 3 月 28 日，位於美國賓州三哩島的壓水式反應器發生了首次商業用反應器爐心熔損事件，根據事後的研究發現，大約有 50%的爐心在事故中熔毀，雖然早在 19 7 5 年的 WASH-1400 研究報告中已提及其發生的可能性，但當時的核能工業界並不認為這樣的事務可能真正的發生，直到三哩島事件，改變了當時對於爐心不可能熔損的觀念。

1980 年美國核能工業界成立了 IDCOR 計畫(Industry Degraded Core Rulemaking Program)從事爐心熔損事故之研究，MAAP 程式便是此計畫中的一部分，由 Fruske & Associates, Inc. (FAI)負責發展，MAAP 1 即為第一個版本。目前 MAAP 的最新版本為 MAAP4.0.4，可模擬沸水式反應器 (Boiling Water Reactor, BWR) 及壓水式反應器 (Pressurized Water Reactor, PWR) 兩大類。

MAAP4.0.4 程式為一整合性分析程式，可以同時分析反應器冷卻水系統及圍阻體於嚴重事故中的熱水流反應，以及放射性物質釋出後於冷卻水系統與圍阻體內的傳遞現象。在熱水流現象方面 MAAP4.0.4 程式所能模擬的嚴重事故現象包括：一次側系統的冷卻水流失事故(Loss of Coolant Accident, LOCA)中的沖放(blow down)及沸騰蒸發(Boil Off)、爐心的裸露(Core Uncovered)後的燃料溫度升高、爐心熔毀(Core Meltdown)與反應器壓力槽熔穿(Reactor Vessel Failure)，鋯合金的氧化(Zircaloy Oxidation)、氫氣的產生與燃燒、熔融爐心與混凝土的作用(Molten Core Concrete Interaction, MCCI)等之熱水流及熱傳現象【6】。在放射性物質外釋方面，MAAP4.04 考慮分裂產物自燃料棒的外釋、放射性物質在冷卻水系統的沉積與傳遞，以及沉積之放射性物質的再蒸發現象。

MAAP4.0.4 程式由 Fortran 編寫而成。在 MAAP4.0.4 程式模擬中，將圍阻體區分為數個區域及流徑，示意圖請參見圖 1.2，各圍阻體區間之說明請見表 1.1，各流徑之簡要說明請見表 1.2【1】。因此使用者可針對想要了解的區域得到較為精確的數據；與 PCTran KuoSheng 程式的比較，MAAP4.0.4 程式提供了較完整的分析範圍。對於爐心熔毀後的分析以及圍阻體的失效等情況，MAAP4.0.4 提供了完整性的分析，這是 PCTran KuoSheng 程式所無法分析的。對反應器製造廠商及電力公司而言，MAAP 可以提供以下

幾個用途：

- 1.意外事故發生之進程、事故序列及發生時間之模擬；
- 2.事故發生後嚴重程度評估，如圍阻體壓力、氫氣產量、分裂產物外釋時間等；
- 3.瞭解設備正常運轉與否對系統之影響；
- 4.特設安全裝置（Engineered Safety Features，ESFs）對事故序列之影響；
- 5.用於核電廠安全度評估（Probabilistic Safety Assessment）之事故序列分析；
- 6.協助電力公司發展核電廠嚴重事故處理導則（Severe Accident Management Guideline，SAMG）。

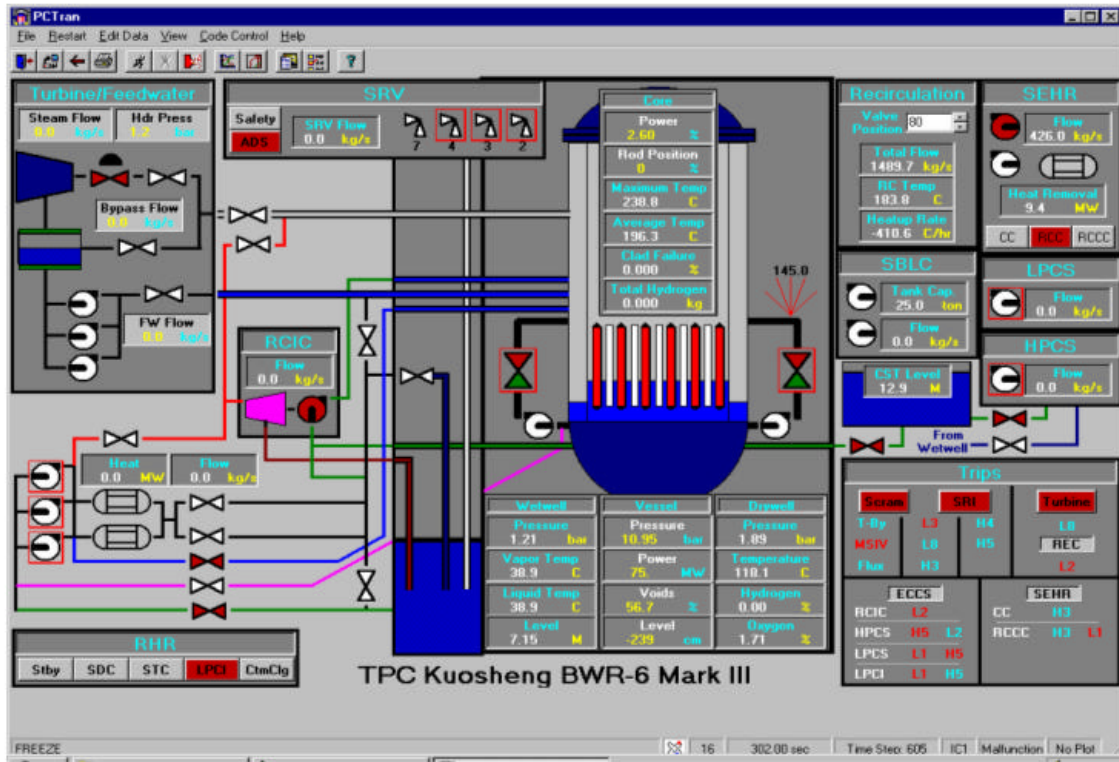


圖 1.1 PCTran KuoSheng 程式控制介面示意圖

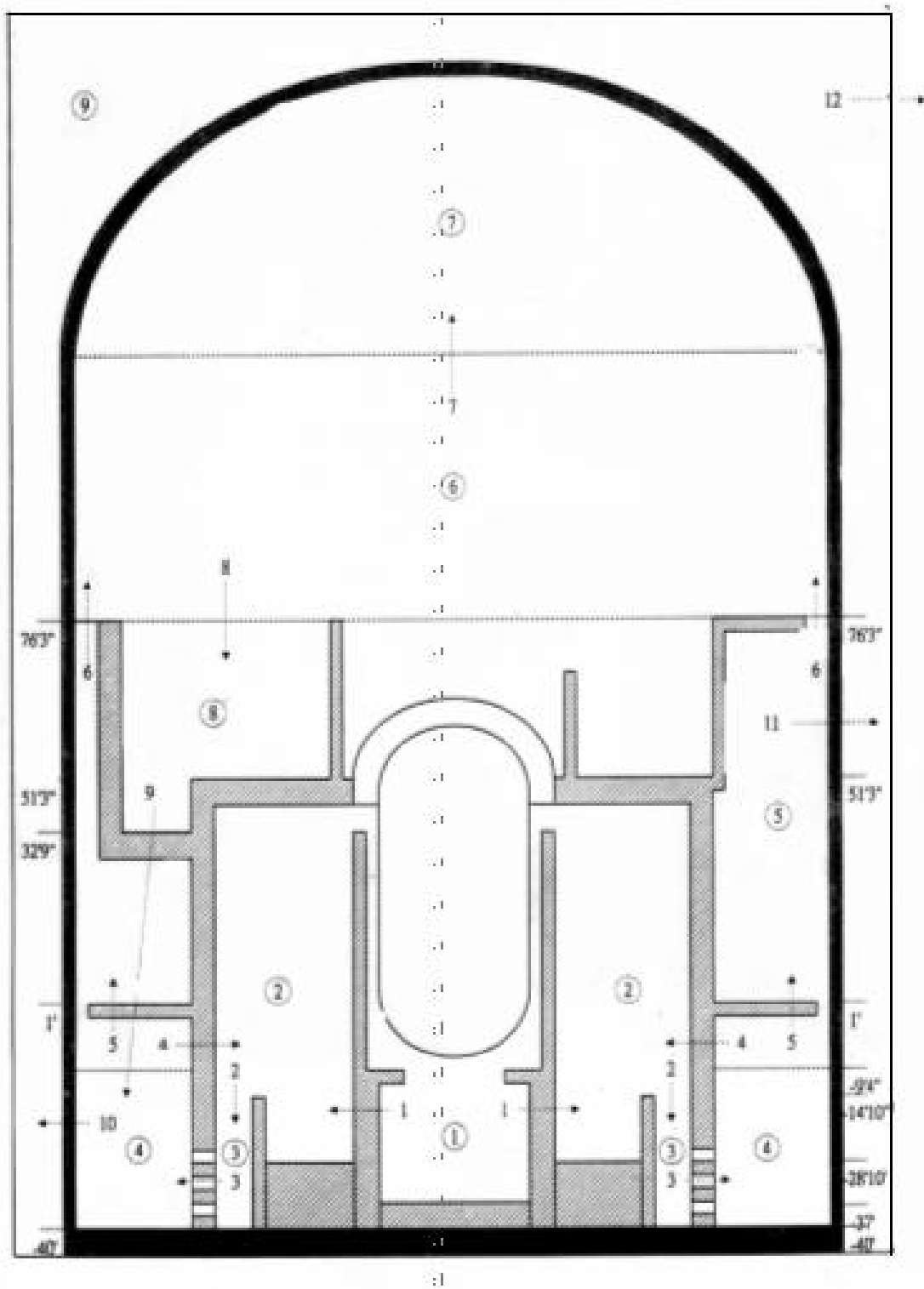


圖 1.2 MAAP4.0.4 圖阻牆區間與流徑示意圖

表 1.1 MAAP4.0.4 圍阻體各區間簡要說明

區間編號	名稱說明
1	Pedestal
2	Drywell
3	Downcomer
4	Wetwell
5	Compartment A
6	Lower Dome
7	Upper Down
8	Upper Fuel Pool
9	Gap

表 1.2 MAAP4.0.4 圍阻體各流徑簡要說明

流徑編號	名稱說明
1	Pedestal--Drywell
2	Drywell-- Vent/Downcomer
3	Top Vent/ Downcomer-- Wetwell
4	Vacuum Breaker
5	Wetwell-Compartment A
6	Compartment A--Lower Dome
7	Lower Dome--Upper Dome
8	Upper Fuel Pool--Lower Dome
9	Upper Fuel Pool-- Wetwell
10	Leakage At Anchorage In Wetwell
11	Leakage At Wetwell Gas Space
12	Leakage From The Gap Into The Ambient
13	Middle Vent/Downcomer-- Wetwell
14	Bottom Vent/Downcomer-- Wetwell

第二章 核電廠嚴重事故現象介紹

2.1 反應器壓力槽內的現象

2.1.1 冷卻水系統及圍阻體的反應

對於輕水式反應器而言，爐心熔損事故的原因是因為爐心所產生的熱無法移除，造成這種現象的原因是因為冷卻水從系統中流失而無法補充，事故發生時，冷卻水可經由反應器冷卻水系統中的破口或著是安全釋壓閥流失。假設反應器冷卻水系統發生大破口的意外事故，此時冷卻水系統中高溫的水將迅速汽化成蒸氣，經由反應器的破口流失，此現象稱為沖放(Blow Down)【6】。另一事故現象為沸騰蒸發(Boil Off)【6】，反應器發生暫態事故，由於系統喪失了強制對流的功能，使爐心的冷卻水會靜止於反應器裡面而不移動，此時冷卻水的溫度會因為爐心溫度持續升高而慢慢的達到沸騰，由於系統沒有破口，最後造成壓力槽的壓力過高使得安全釋壓閥開啟，冷卻水的沸騰所形成的蒸氣則經由安全釋壓閥流失。

由於沖放或沸騰蒸發的發生，使得反應器無法獲得冷卻水的補充，造成爐心因為冷卻水的流失而使得燃料棒的頂端不再被水所覆蓋，此現象就是所謂的爐心裸露(Core Uncovered)，由於水蒸氣的熱傳效果遠低於水，因此裸露於水面上的燃料棒所產生的熱將難以被移除，此時燃料棒的溫度持續的升高，當護套溫度達到 1300K 時，水蒸氣開始和做為護套材料的鋯合金發生化學反應，即鋯—水反應(Metal-Water Reaction)【6】，此反應會產生氫氣與熱，可對圍阻體的完整性造成極大的威脅，當燃料棒仍然無法獲得冷卻時，爐心即會開始熔化，順著仍然完整的燃料護套外表往下移動，此現象類似蠟燭燃燒時熔蠟下移的現象。

當足夠的熔融爐心掉落壓力槽底部時，壓力槽底部的所殘存的水會被熔融爐心所產生的熱所蒸乾。損毀爐心殘餘物中所產生的衰變熱足以使壓力槽熔穿。再反應器壓力槽

的熔穿過程中，壓力槽內壓力的高低對於事故的發展有極大的影響，假設熔穿時，壓力槽內處於低壓狀態，那麼所發生的通常是壓力槽內某處的器壁因熔穿而破口，然後熔融爐心往下落入圍阻體內的爐穴當中；如果熔穿時，壓力槽內處於高壓狀態，那麼所發生的通常是因為壓力槽底部的儀器或控制棒通道焊接處，因溫度升高而發生破口，此時熔融爐心會從壓力槽高壓向外噴出，產生所謂的高壓熔融物排放現象(High Pressure Melt Ejection)【6】。當發生這個現象時，熔融爐心會碎裂成很小的粒子，快速的放出熱量到圍阻體大氣中，再加上熔融爐心中部分尚未氧化的銦金屬也會在此時被氧化，而放出大量的化學反應熱，這些熱將會使得圍阻體內的壓力迅速的升高，對圍阻體的完整性造成極大的威脅，此種現象稱之為圍阻體直接受熱現象(Direct Containment Heating, DCH)【6】。

2.1.2 壓力槽內分裂產物的釋放

當爐心溫度升高以致於熔解時，惰性氣體如 Kr 及 Xe 以及揮發性較高的分裂產物，如 Cs、I、Rb、Br 及 Te 會從燃料中以蒸氣形式自爐心釋放出來，所釋放出的量則受到幾個因素影響，其中最重要的因素是燃料所能達到的最高溫度及燃料停留在該溫度的時間長短，第二個因素則是從爐心通過之水蒸汽與氫的流量及其組成。

分裂產物在反應器及圍阻體中可能以氣體、懸浮物或沉積物的形式存在，並且隨著通過爐心的水、水蒸汽和氫氣流動，如果反應器冷卻水系統有破口存在，此時的分裂產物會隨著流體從破口進入圍阻體；如果反應器冷卻水系統沒有破口，則可能經由安全釋壓閥外釋到抑壓池。

當分裂產物隨著水蒸汽及氫氣流出爐心區域，進入上方較冷的反應器頂部後，可能會發生幾個現象，而這些現象都足以證明所釋放出來的分裂產物，並不會釋放到外界環境並且造成廠址附近居民的生命威脅。

- (1) 分裂產物的蒸氣經過反應器冷卻水系統內溫度較低的金屬表面時，會被凝結在表面上，而後有可能再度的被蒸發；

- (2) 分裂產物的蒸氣會凝結於不帶放射性的懸浮物質上，凝結後的分裂產物亦有可能再度蒸發；
- (3) 自行凝結成大小不一但細小的懸浮物質，再和其他的懸浮物質互相碰撞而改變其大小；
- (4) 和其他物質的蒸氣與懸浮物質發生化學反應；
- (5) 和不鏽鋼的金屬表面發生化學變化。

2.2 壓力槽破裂後圍阻體內的現象

2.2.1 熔融爐心與混凝土間的作用

反應器壓力槽破裂後，熔融的爐心會掉入位於壓力槽下方的爐穴當中，此時如果爐穴中沒有水，高溫的熔融爐心會形成熔融爐心池(Molten Core Pool)。熔融爐心池會造成爐穴結構混凝土的分解與熔化，這就是所謂的熔融爐心混凝土作用(Molten Core Concrete Interactions, MCCI)【6】。

當熔融爐心池形成後，混凝土分解後所產生的氣體(C_2O 及 H_2O)會因浮力向上升起，通過熔融爐心池，使各熔融層的厚度增加，及造成熔融池表面的升高，進而改變了熔融爐心池的形狀。混凝土分解所產生的 C_2O 及 H_2O 通過熔融爐心池時，會與其中的金屬物如 Zr、Cr、Ni 等起化學作用，被還原成 H_2 、CO 或 C，同時亦將金屬氧化成氧化物，這些化學反應會改變熔融爐心池的組成，同時也會產生大量的熱，亦會產生大量的可燃性氣體 H_2 及 CO，對圍阻體的完整性造成潛在的威脅。

在 MCCI 過程中，隨著時間的改變，熔融爐心池會因熔融混凝土的混入而逐漸的變大，同時其表面積亦會隨著時間加大，衰變熱會隨著時間降低；因此熔融爐心池的溫度及表面熱通率會降低，此時熔融爐心池有可能會開始凝結。但因為爐心熔融物的凝結點高於混凝土的熔點，所以混凝土的分解在熔融爐心故化後亦會持續的進行。

2.2.2 壓力槽外放射性物質的釋放

在 MCCI 中，當混凝土分解氣體形成氣泡，從熔融爐心池通過時會與其中的物質起化學反應，各個氣泡與熔融爐心池的接觸面亦提供了放射性物質氣化所需要的表面積，揮發性非常低的放射性物質如 Ba、Sr、La 等，在 MCCI 中亦有可能因化學反應改變其存在的化學形式，在熔融爐心池的高溫下揮發散出並且進入混凝土分解氣體所形成氣泡中，當帶著分裂產物的氣泡進入圍阻體後，氣泡內的氣化放射性物質會在較冷的大氣中凝結成非常小的懸浮物質，漂浮在圍阻體大氣當中【6】。

對於某些的圍阻體設計而言，有些特殊事故序列的壓力槽外 MCCI 放射性物質的外釋要比壓力槽內的外釋來得重要。以沸水式反應器而言，在壓力槽內即外釋的放射性物質，會直接進入抑壓池內，抑壓池可以將大部分的放射性物質過濾，使其無法進入圍阻體大氣，更無法外洩到外界環境中，而壓力槽外 MCCI 放射性物質的外釋，發生於圍阻體的乾井中，如果圍阻體破裂的位置在乾井，則放射性物質將不會經由抑壓池而直接的外釋到外界環境，因而造成重大的災害。

第三章 電廠全黑事故模擬

3.1 前言

本章將利用 MAAP4.0.4 程式與 PCTran KuoSheng 程式，模擬分析國聖電廠電廠全黑事故，分析中考慮兩個案例；3.2 節為案例分析一【7】，假設電廠喪失包括全部柴油發電機的所有交流電源，所有的爐心注水系統包含爐心隔離冷卻系統(Reactor Core Isolation Cooling System, RCIC)均無法正常運作，由於低壓注水系統無法啟動，因此自動釋壓系統(Automatic Depressurization System, ADS)未自動啟動，故冷卻水系統於事故中維持高壓狀態；3.3 節為案例分析二，假設電廠喪失包括全部柴油發電機的所有交流電源，所有注水系統，除 RCIC 外皆無法正常運作，由於低壓注水系統(Low Pressure Core Injection, LPCI)失效，故 ADS 未自動啟動，冷卻水系統於事故中亦維持高壓狀態；3.4 節為國聖電廠電廠全黑事故模擬結論。

3.2 國聖電廠電廠全黑事故模擬（案例一）

3.2.1 背景

國聖電廠全黑事故分析中，假設事故開始時，電廠喪失包含柴油發電機在內的所有交流電源，所有的爐心注水系統均無法執行其功能，爐心隔離冷卻系統亦假設失效。主蒸汽隔離閥(Main Steam Lines Isolation Valves, MSIVs)在事故開始時即關閉，因此反應器隨即因為主系統的壓力過高而急停。反應器在急停後，爐心的衰變熱不斷的產生，使冷卻水不斷的汽化，造成爐心的水位逐漸的降低，又因無冷卻水的補充，不久後爐心開始裸露，逐漸的熔毀向下流動落入壓力槽底部，並且將該處的積水蒸乾，並且使該處反應器槽壁溫度逐漸升高，最後造成控制棒焊道失效。由於假設自動釋壓系統不會

啟動，因此主系統仍保持在高壓狀態，控制棒焊道失效之後，熔融爐心受壓而向外噴出，並碎裂成高溫的熔渣，飛濺四散最後落入爐穴，並且與混凝土發生熔融爐心混凝土作用 (Molten Core Concrete Interaction, MCCI)。在熔融爐心混凝土作用中所產生的氣體，使得圍阻體內的壓力不斷的升高，最終圍阻體失效，造成放射性物質的外釋。

3.2.2 國聖電廠電廠全黑事故 MAAP4.0.4 模擬結果（案例一）

MAAP4.0.4 程式計算所得之重要事故時序詳如表 3.1。程式的初始條件依照程式輸入檔 (Input File) 內的設定，交流電源及柴油發電機均在事故開始(0.0 秒)時失效，包含爐心隔離冷卻系統，以及所有高低壓注水系統均失效。發生全黑事故的同時，主蒸汽隔離閥與飼水水泵關閉，急停信號產生使汽機跳脫，接著在 1.84 秒時反應器急停。此時爐心的衰變熱不斷的產生，壓力槽降流區的水位持續的下降，故在事故開始後 29 分鐘 (1,740 秒)，壓力槽降流區的水位降到爐心燃料頂端，但爐心內之雙相水位直到 34.2 分鐘 (2,054 秒)時，才低於燃料頂端的高度。由於水蒸汽的熱傳效果遠低於水，裸露於水面上的燃料棒所產生的熱將難以被移除，因此燃料棒的溫度持續的升高，燃料開始融毀。熔融爐心在 2.2 小時 (7,891 秒)開始向下流至反應器壓力槽底部區間，3.8 小時 (13,734 秒)壓力槽底部之控制棒焊道失效，造成反應器壓力槽破裂，熔融爐心開始自高壓反應器向外噴出並碎裂成高溫的熔渣，飛濺四散，最後落入爐穴當中，與圍阻體混凝土基座發生 MCCI 作用，產生大量可燃性氣體，造成圍阻體在事故發生後 47.7 小時 (171,679 秒)失效，大量的放射性物質外釋到外界環境。本事故由於 ADS 無法啟動，使得壓力槽在高壓狀態下失效。

圖 3.1 為電廠全黑事故冷卻水系統壓力變化，模擬結果顯示，在壓力槽破裂前，冷卻水系統壓力因安全釋壓閥的開啟與關閉，有明顯的震盪，在 3.8 小時 (13,734 秒)，由於壓力槽底部控制棒失效，冷卻水系統壓力驟降到圍阻體的壓力，隨後與圍阻體的壓力達到平衡。

圖 3.2 為電廠全黑事故壓力槽降流區水位變化，模擬結果顯示，由於爐心的衰變熱

不斷的產生，使冷卻水不斷的汽化，所有的爐心注水系統均無法執行其功能，造成壓力槽降流區水位逐漸降低，在 29 分鐘 (1,740 秒)時，到達爐心頂部的高度，直到 6.5 小時 (23,472 秒)水位降至降流區底部。圖 3.3 為電廠全黑事故燃料棒最高溫度變化，模擬結果顯示，在 29 分鐘 (1,740)秒爐心裸露後，溫度開始上升。在 2.2 小時 (7,897 秒)，熔融爐心開始掉落至壓力槽底部，接著在 3.8 小時 (13,734 秒)的時候，由於壓力槽失效，熔融爐心掉落離開壓力槽。熔融爐心掉落前，爐心燃料溫度直線上升，形成一個小尖峰的原因不是很清楚，可能是程式計算的問題。

圖 3.4 為電廠全黑事故乾井與濕井壓力變化，模擬結果顯示，圍阻體壓力在事故開始即隨著安全釋壓閥排放蒸氣而逐漸上升，由於熔融爐心掉落至壓力槽的底部，造成壓力槽底部水分的蒸發，這些水蒸汽經由安全釋壓閥進入液壓池中，造成圍阻體壓力的升高。壓力槽在 3.8 小時 (13,734 秒)失效，大量的熔融爐心自壓力槽底部向外噴出，造成圍阻體壓力急劇上升，隨後在 47.7 小時 (171,679 秒)，因為圍阻體失效，使得壓力驟降。由於濕井裡有抑壓池，會將蒸氣凝結，故濕井的壓力會略低於乾井。如圖所示，在壓力槽失效後，圍阻體壓力會產生數個小尖峰，此原因是因為圍阻體內氫氣燃燒所造成的。

3.2.3 國聖電廠電廠全黑事故 PCTran KuoSheng 模擬結果 (案例一)

PCTran KuoSheng 程式計算所得之重要事故時序詳如表 3.2。程式的初始條件在 PCTran KuoSheng 程式內建事故 (Malfunction) 中設定，分別設定為 Main Steam Isolation Valve Closure 與 Station Blackout。故廠內電力的喪失依 PCTran KuoSheng 程式之設定在事故開始(0.0 秒)時失效。包含爐心隔離冷卻系統以及所有高低壓注水系統均全部失效。發生全黑事故的同時，主蒸汽隔離閥與飼水水泵關閉，急停信號產生使汽機跳脫，接著在 2 秒時反應器急停。

事故開始第 8 秒時，壓力槽降流區水位下降至 382.8 公分處(低於 Level 3)，18.5

秒時，水位降至 361.5 公分處(低於 Level 2)，11.1 分鐘 (667.5 秒)時，水位達到 64.4 公分(低於 Level 1)。由於爐心的衰變熱不斷的產生，壓力槽降流區水位持續的下降，在事故開始後的 15.9 分鐘 (955 秒)，壓力槽降流區水位達到爐心頂部，但爐心內之雙相水位直到 21 分鐘 (1,258 秒)時，才低於燃料頂端的高度。由於 PCTran KuoSheng 程式並沒有模擬爐心的熔損，故當燃料護套達 2,500K 時，溫度隨即便維持不變。本事故由於 ADS 無法啟動，使得壓力槽在高壓狀態下失效。由於程式模擬能力的限制，本研究之 PCTran 分析在燃料溫度達到 2,500K 時即停止。

3.2.4 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 結果比較分析 (案例一)

圖 3.5 為 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠全黑事故冷卻水系統壓力變化。圖中所示之冷卻水系統壓力的上下震盪是因為安全釋壓閥的開關所造成的，震盪的頂點為安全釋壓閥的開啟點，震盪的最低點為安全釋壓閥的關閉點。冷卻水系統壓力上下震動的頻率慢慢的減少，是因為衰變熱的減少導致而成的。如圖所示，PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 所預測壓力的震盪頻率有明顯的差別，MAAP4.0.4 程式中，將冷卻水系統細分為數個控制體積，分別計算其溫度與壓力，而 PCTran KuoSheng 程式將冷卻水系統視為單一的體積，只有一個溫度與壓力，故 PCTran KuoSheng 程式之冷卻水系統壓力變化速率較 MAAP4.0.4 所預測的為緩慢，造成安全釋壓閥開啟與關閉的頻率亦不一樣。

圖 3.6 為 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠全黑事故安全釋壓閥流率變化。由於主蒸汽管路隔離閥於事故開始時即關閉，蒸汽的累積造成冷卻水系統壓力的快速上升。PCTran KuoSheng 所預測之壓力最大值為 7.8 Mpa，造成 9 個安全釋壓閥的開啟，總流率為 2528 公斤/秒；MAAP4.0.4 所預測之最大流率為 870 公斤/秒。如圖所示，兩程式間所預測之安全釋壓閥開啟時間及頻率有所差異，基本上其趨勢與冷卻水系統壓力變化的趨勢一致。

圖 3.7 為 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠全黑事故壓力槽降流區水位變化。PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 在計算水位時的參考點並不一樣，圖 3.8 為兩個程式水

位計算的示意圖。為了方便結果的比較，圖 3.7 所示之壓力槽降流區水位變化圖是以燃料頂部(Top of Active Fuel, TAF)為零點，亦即當水位高度低於零時，壓力槽降流區水位達爐心燃料頂部高度。如圖所示，PCTran KuoSheng 預測壓力槽降流區水位於 15.9 分鐘 (955 秒)達到爐心燃料的頂端，較 MAAP4.0.4 程式所預測之時間早了 13.1 分鐘。此項差異是由於 PCTran KuoSheng 所預測之安全釋壓閥流量較大所導致。如圖所示，兩個程式所預測的水位均呈階梯狀的下降，此種趨勢與冷卻水系統安全釋壓閥的開啟與關閉有關。當安全釋壓閥開啟的瞬間，壓力的驟降造成冷卻水汽化成水蒸汽，使得水位會瞬間的降低，然後緩慢的下降；當安全釋壓閥關閉的瞬間，壓力的驟升造成水蒸汽的凝結，使得水位瞬間的跳升。以上所述現象，充分的反應於 MAAP4.0.4 的結果，PCTran KuoSheng 的結果顯示，壓力槽降流區水位在安全釋壓閥關閉時，不會改變，當安全釋壓閥開啟時會快速的降低。

圖 3.9 為 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠全黑事故燃料棒最高溫度變化。PCTran KuoSheng 模擬顯示，壓力槽降流區水位在 15.9 分鐘 (955 秒)到達爐心頂部，隨後不久燃料棒溫度開始上升；1.5 小時 (5,400 秒)的時候，燃料棒溫度達 2,500K，此時溫度即不再變化，比較 MAAP4.0.4 與 PCTran KuoSheng 的結果，由於兩程式在計算爐心裸露的時間不同，因此在燃料棒溫度上升的時間也不同。如圖所示 MAAP4.0.4 所預測的燃料棒溫度上升速率大於 PCTran KuoSheng 所預測的結果，這是由於 MAAP4.0.4 所預測之鋯-水反應速率較 PCTran KuoSheng 為快所導致。如圖所示 PCTran KuoSheng 所預測之燃料溫度大幅持續升高前，有一個小尖峰。PCTran KuoSheng 燃料溫度計算是以爐心雙相水位為準，當爐心雙向水位低於爐心頂部的時，熱傳變差，燃料溫度開始上升。安全釋壓閥開啟的瞬間，系統壓力的降低，會造成爐心雙相水位的上升；如果水位的上升會超過爐心頂部高度，即會造成燃料溫度的下降。

圖 3.10 為 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠全黑事故抑壓池溫度變化。PCTran KuoSheng 模擬顯示，由於反應器壓力槽內的水蒸汽經由釋壓閥進入抑壓池，造成抑壓池溫度緩慢上升。如圖所示，抑壓池溫度呈階梯狀上升的趨勢，此原因在於安全釋壓閥的開啟會造成抑壓池水溫的上升。兩程式預測抑壓池溫度是相當的接近。

圖 3.11 為 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠全黑事故濕井壓力變化。事故開始後，由於反應器裡面的水蒸汽，經由安全釋壓閥進入抑壓池內，造成濕井的壓力緩慢上升，並且造成圍阻體內其他區間壓力亦緩慢上升。比較 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 的結果，兩程式所預測的值相當接近，但 PCTran KuoSheng 的預測值較 MAAP4.0.4 的預測值為高。

圖 3.12 為 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠全黑事故氫氣產生量變化。PCTran KuoSheng 模擬顯示，事故開始後 1.2 小時 (4,175 秒) 的時候，護套中的鋁金屬與水發生反應，開始產生氫氣。在 MAAP4.0.4 程式模擬結果顯示，在事故發生 59.1 分鐘 (3,544 秒) 的時候，水蒸汽開始和做為護套材料的鋁合金發生化學反應而產生氫氣與熱，由於剛開始產生的氫氣量極小，因此在圖中無法明顯的顯示出開始點，故以箭頭指示。如圖所示，兩程式所預測氫氣開始產生的時間與氫氣產生量有所不同，MAAP4.0.4 爐心裸露的時間較 PCTran KuoSheng 為晚，但氫氣開始產生的時間較早。

表 3.1 MAAP4.0.4 程式模擬國聖電廠電廠全黑事故重要時序（案例一）

時間(sec)	發生之重要事件
0.0	MSIV Closure
0.0	Feedwater Pumps Trip, Turbine Trip
1.84	Ractor Scrammed
1,740 (29 min)	Level Reaches TAF (downcomer)
2,054 (34.2 min)	Level Reaches TAF (core mixture water)
3,544 (59.1 min)	Hydrogen Generation
7,891 (2.2 hr)	Relocation Of Core Materials To Lower Head
13,734 (3.8 hr)	Vessel Failed By Ejection Of CRD Tubes
171,679 (47.7 hr)	Containment Failure

表 3.2 PCTran KuoSheng 程式模擬國聖電廠電廠全黑事故重要時序（案例二）

時間(sec)	發生之重要事件
0.0	MSIV Closure
0.0	Feedwater Pumps Trip, Turbine Trip
2.0	Reactor Scrammed
955 (15.9 min)	Level Reaches TAF (downcomer)
1,258 (21 min)	Level Reaches TAF (core mixture water)
4,175 (1.2 hr)	Hydrogen Generation
5,385 (1.5 hr)	Fuel Temperature Reaches 2500K

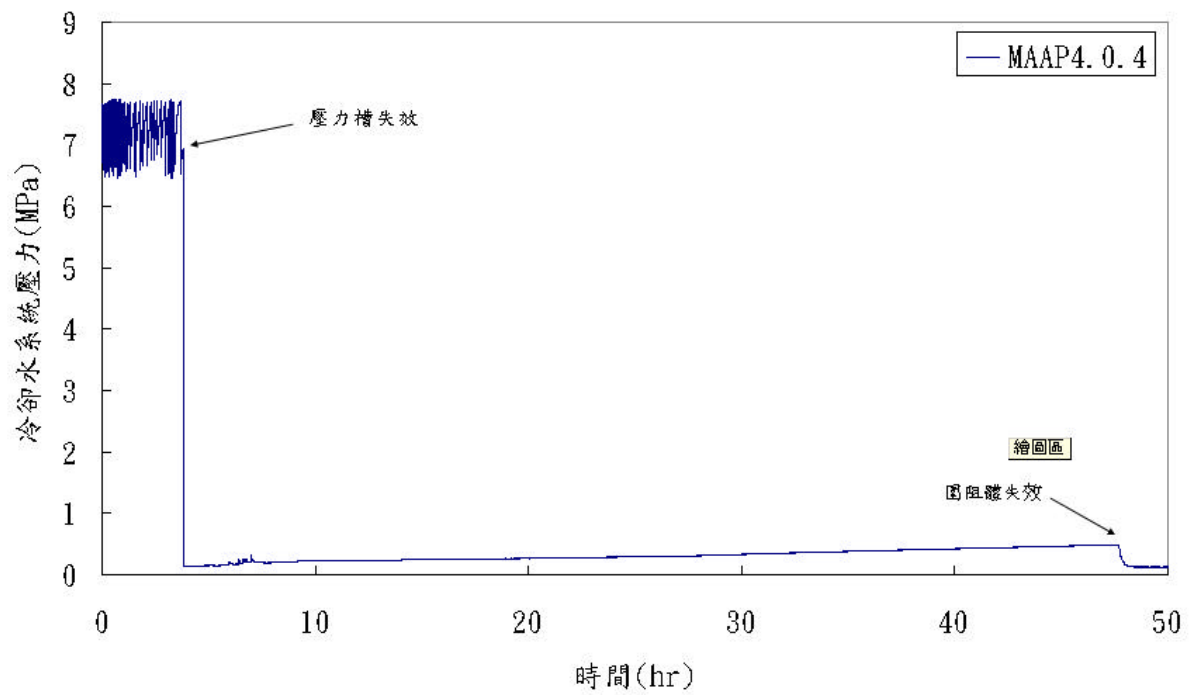


圖 3.1 電廠全黑事故冷卻水系統壓力(案例一)

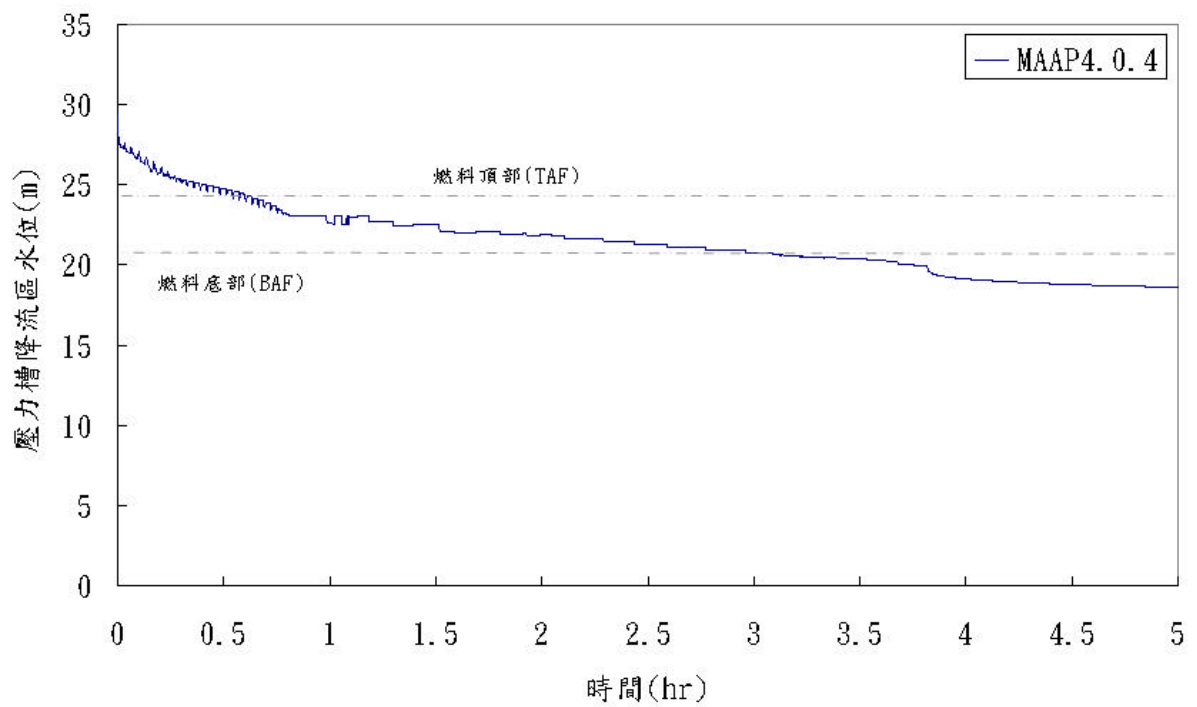


圖 3.2 電廠全黑事故壓力槽降流區水位(案例一)

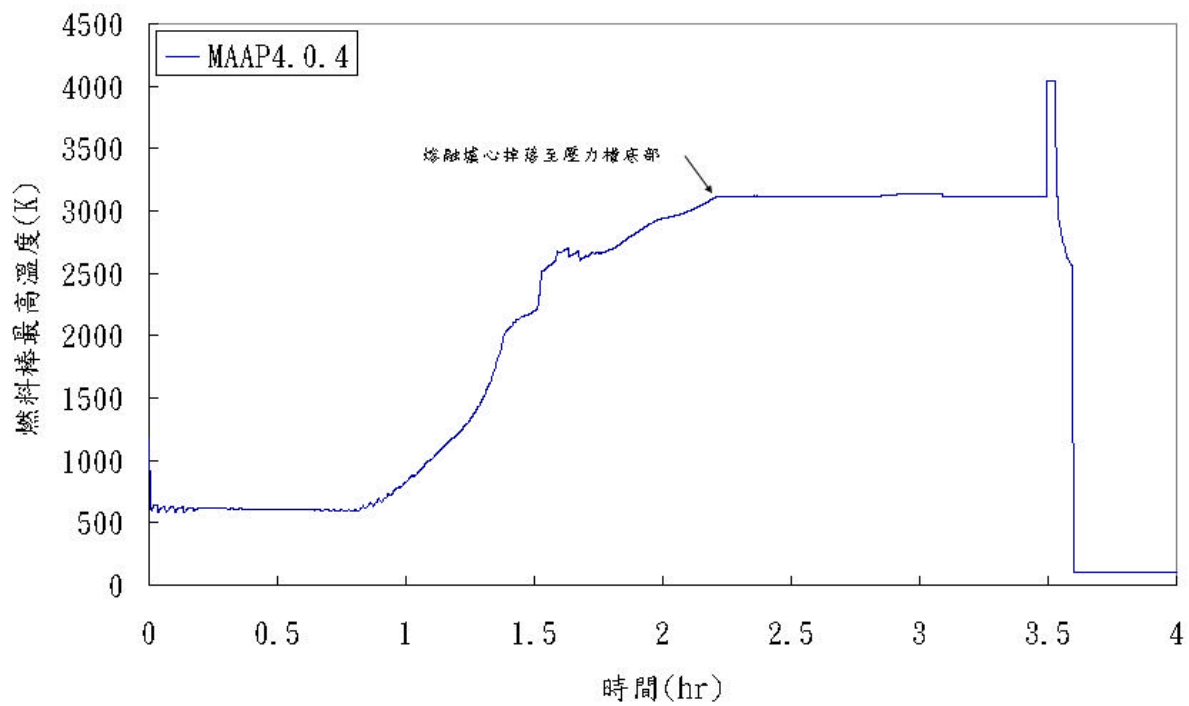


圖 3.3 電廠全黑事故燃料棒最高溫度(案例一)

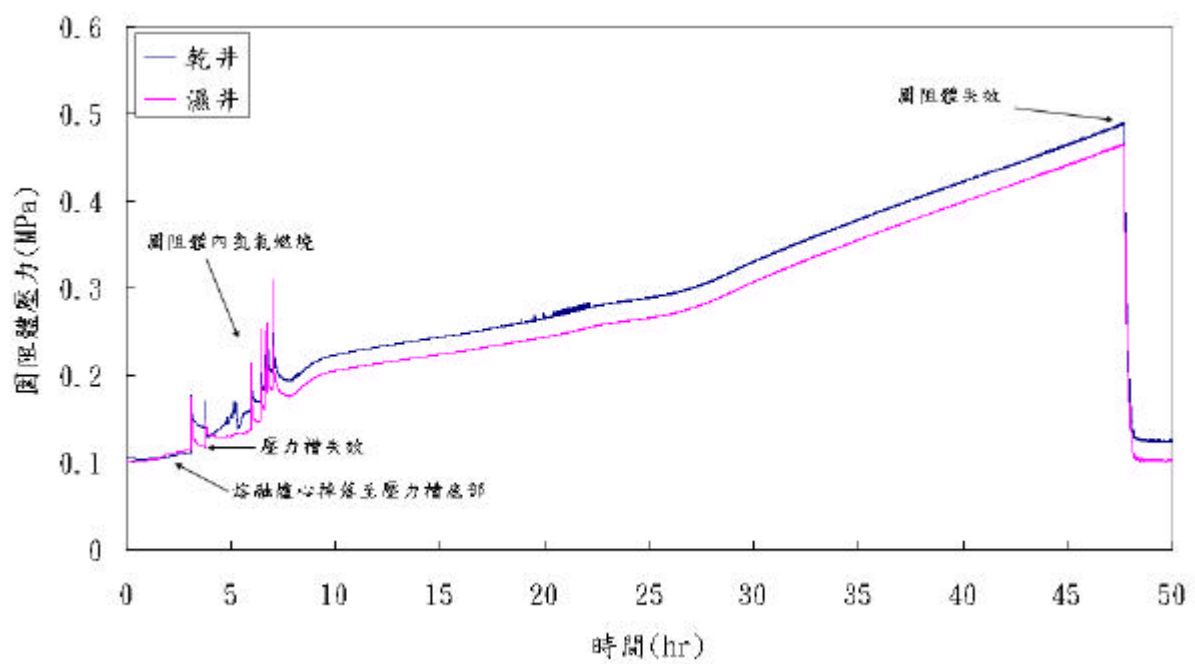


圖 3.4 電廠全黑事故乾井與濕井壓力(案例一)

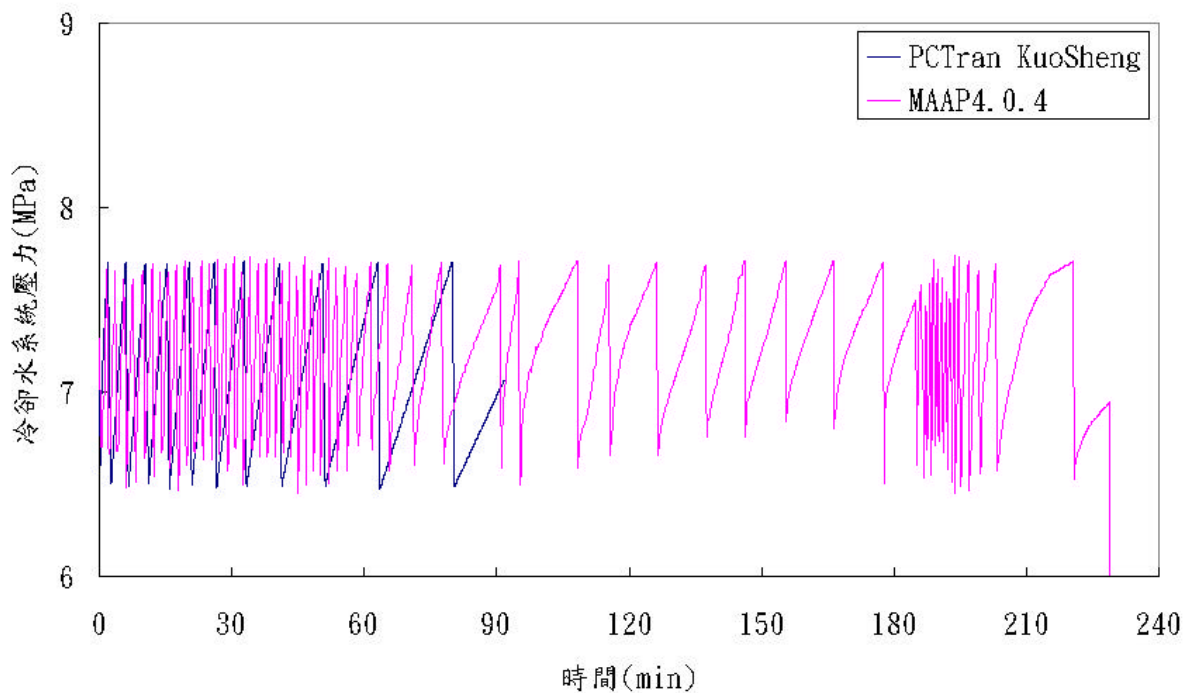


圖 3.5 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠全黑事故冷卻水系統壓力(案例一)

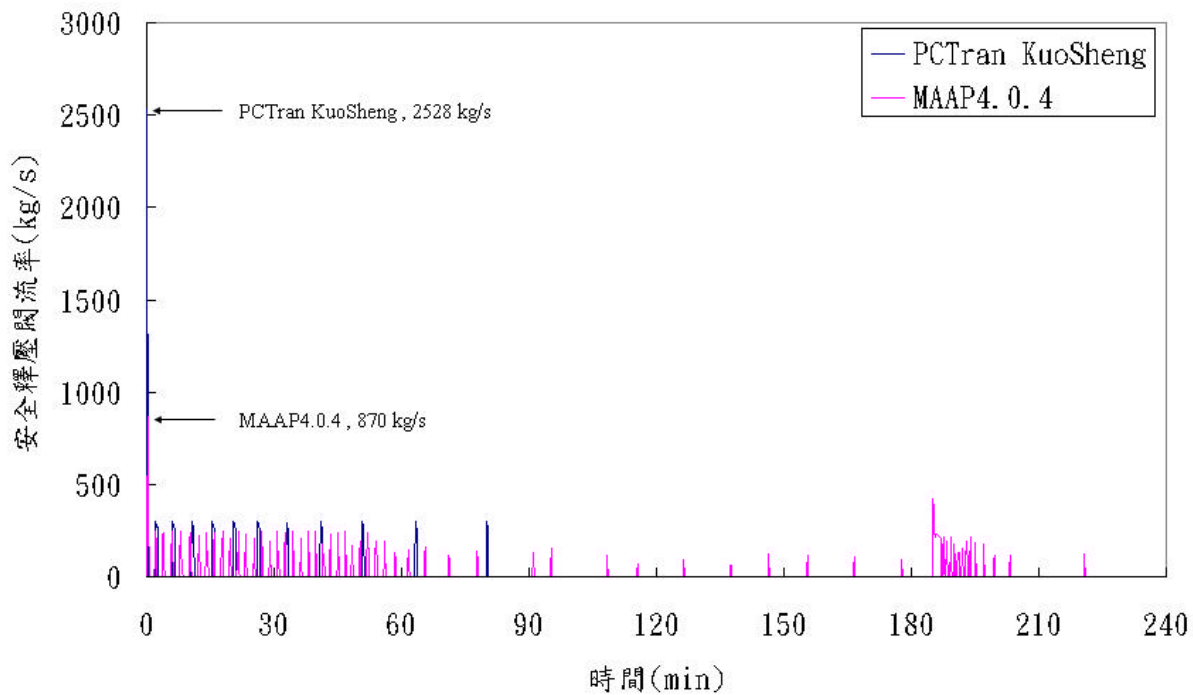


圖 3.6 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠全黑事故安全釋壓閥流率(案例一)

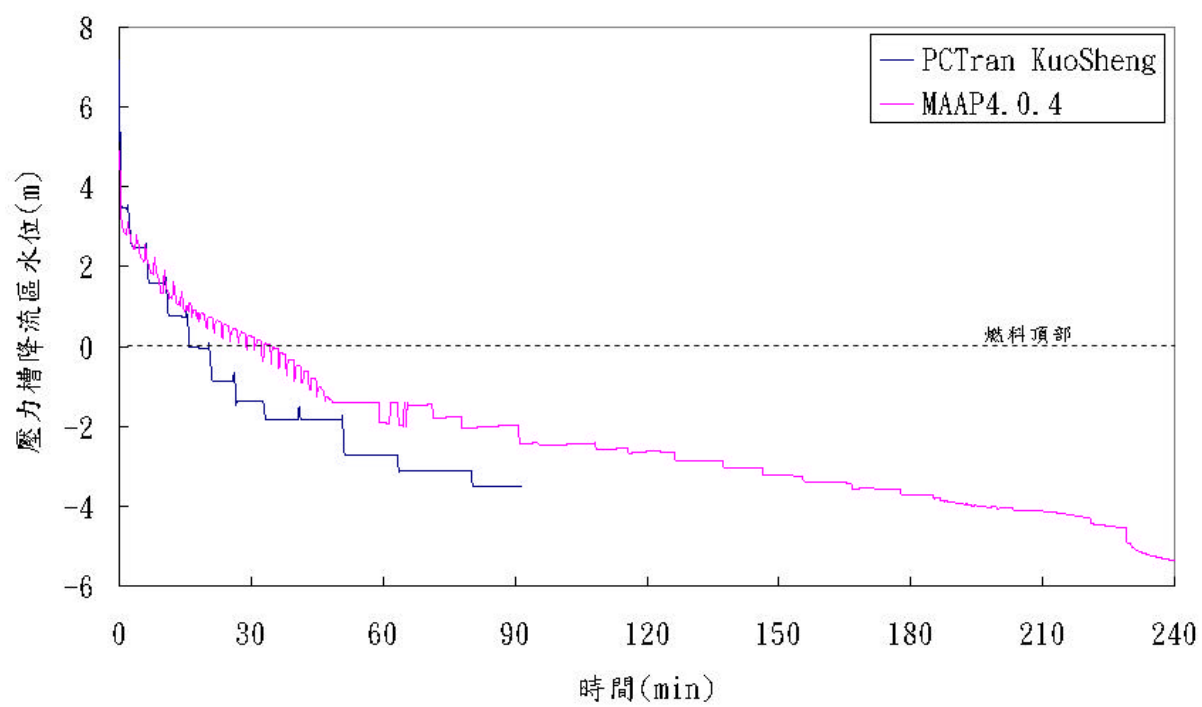


圖 3.7 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠全黑事故壓力槽降流區水位(案例一)

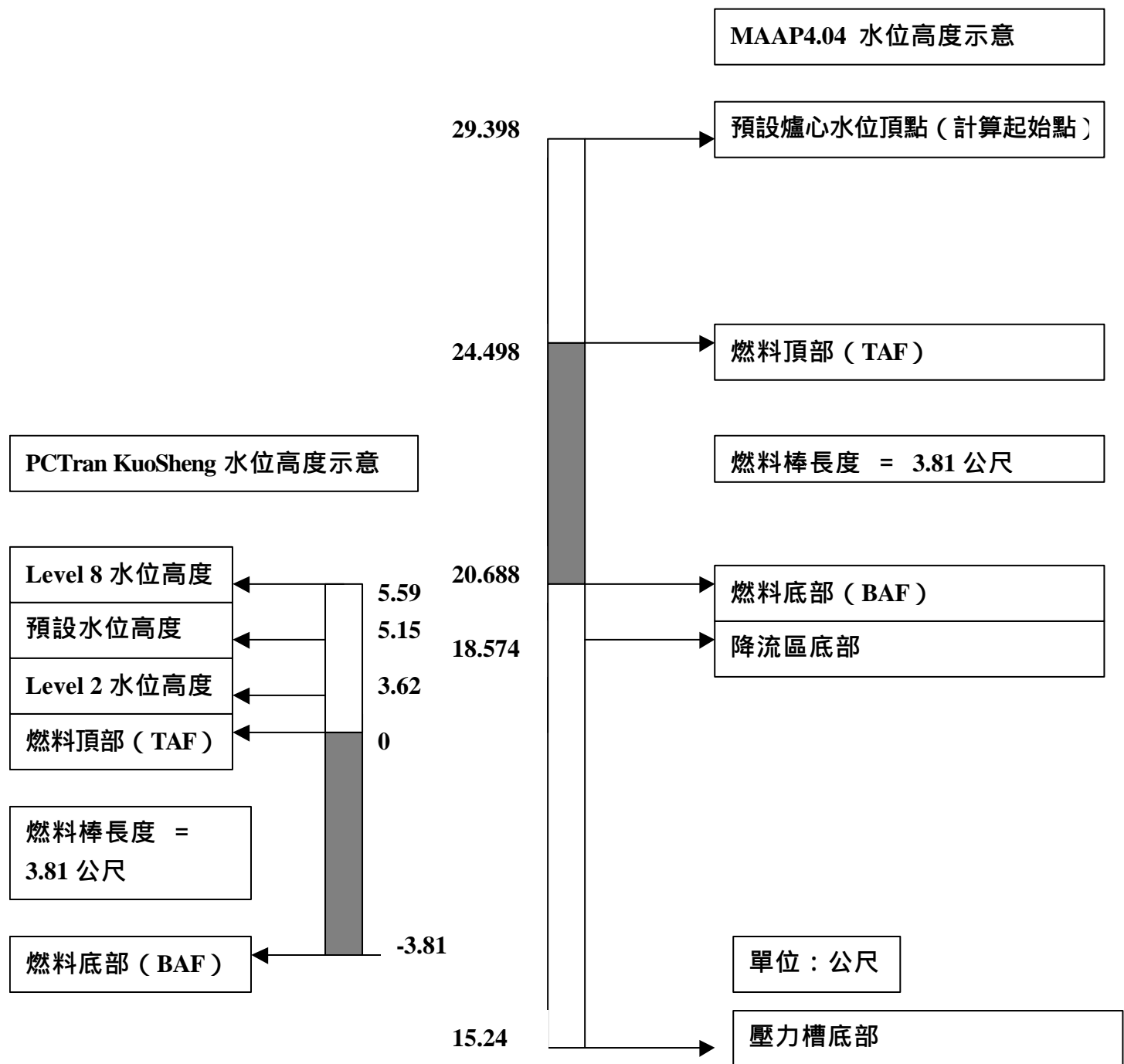


圖 3.8 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.04 水位計算示意圖

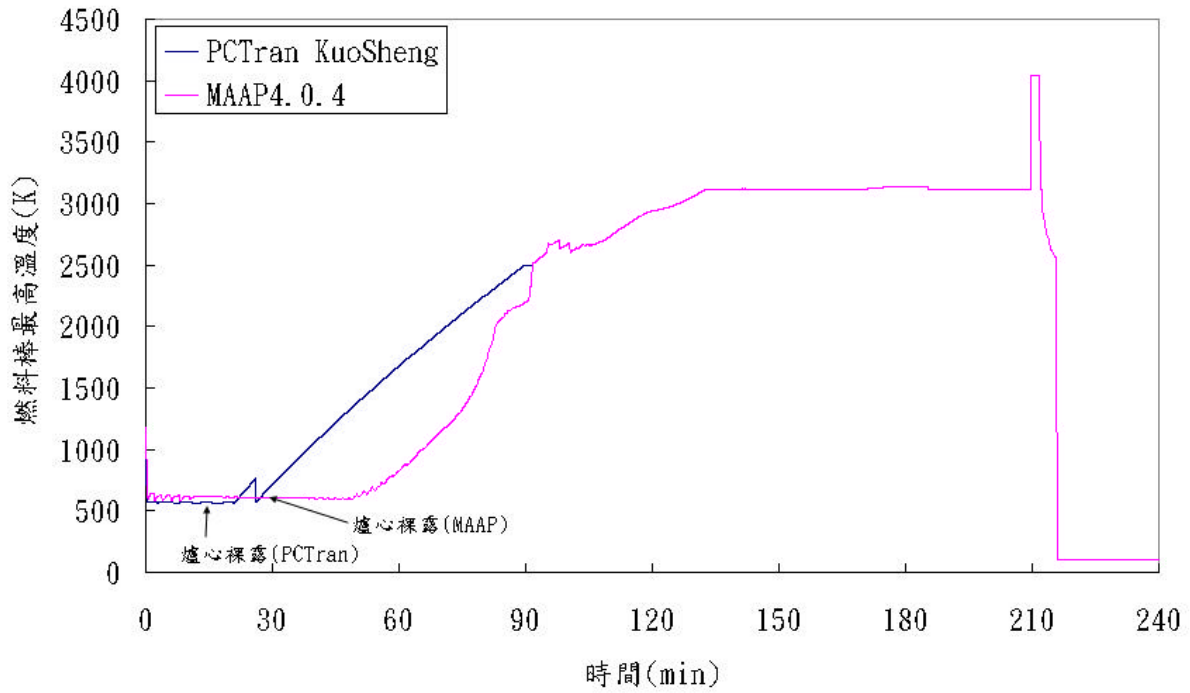


圖 3.9 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠全黑事故燃料棒最高溫度(案例一)

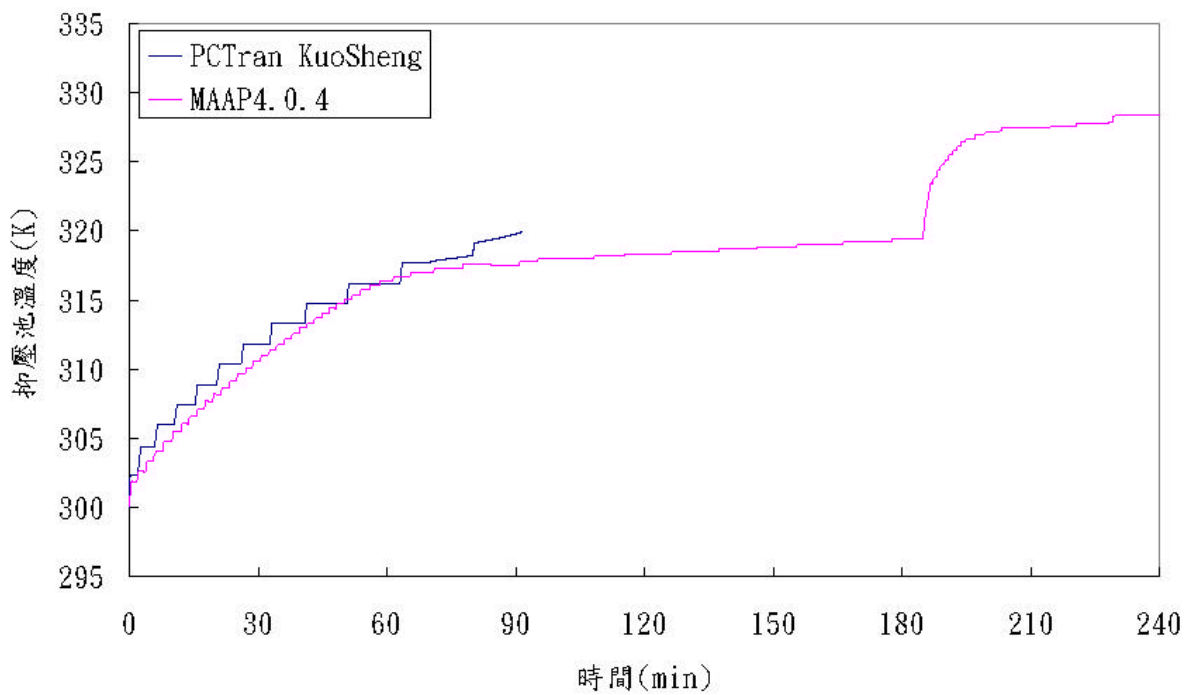


圖 3.10 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠全黑事故抑壓池溫度(案例一)

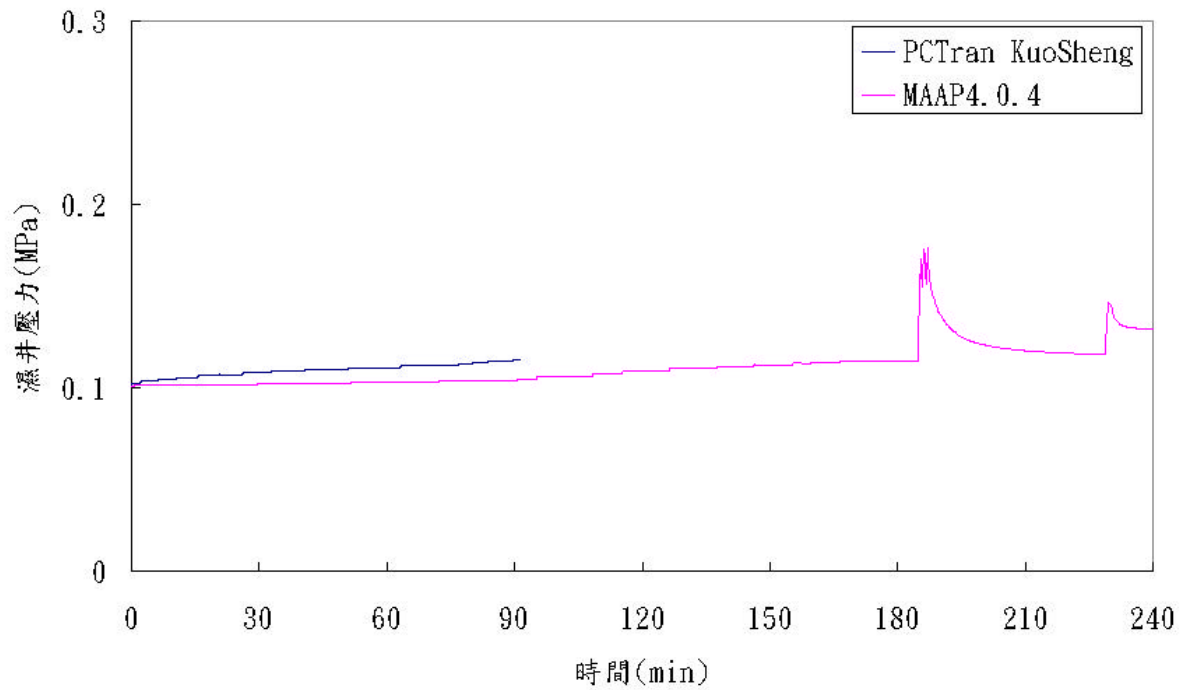


圖 3.11 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠全黑事故濕井壓力(案例一)

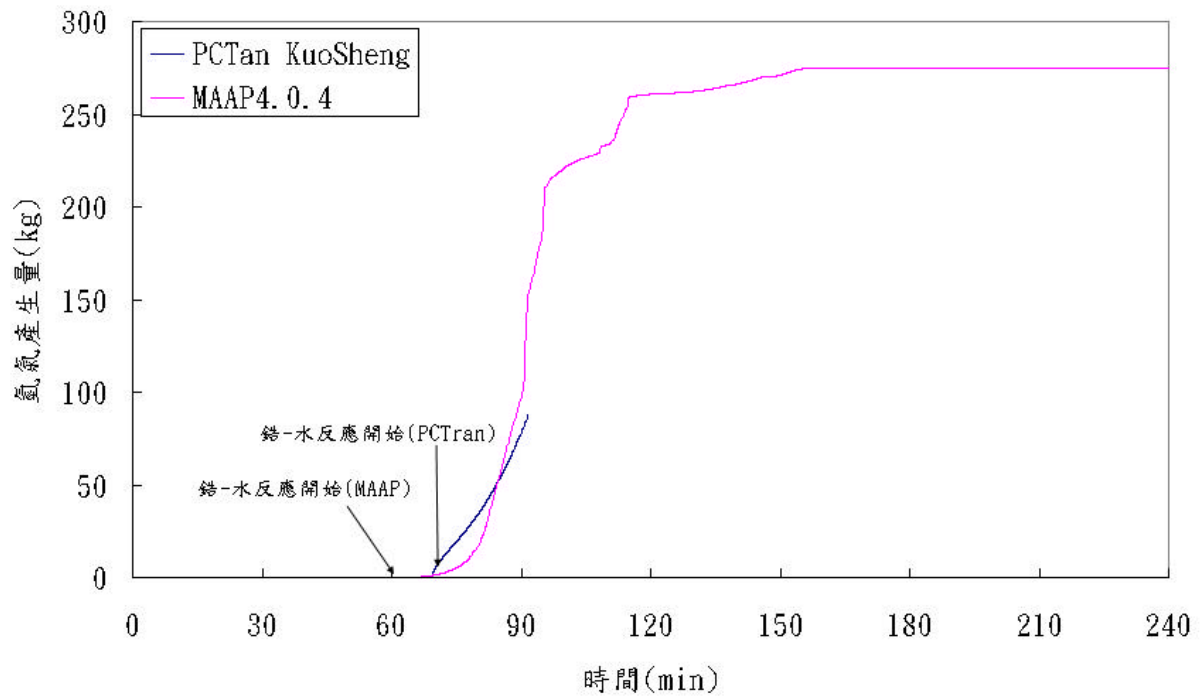


圖 3.12 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠全黑事故氫氣產生量(案例一)

3.3 國聖電廠全黑事故模擬（案例二）

3.3.1 背景

本事故的肇因是電廠全黑事故，除爐心隔離冷卻系統外，所有的緊急爐心冷卻系統全部失效，且反應器壓力槽無法釋壓。本事故與案例一之電廠全黑事故，最大的差異為爐心隔離冷卻系統在案例二中，可以正常運作；分析中假設，在抑壓池溫度達六十度或模擬時間達八小時後，爐心隔離冷卻系統即關閉。

假設事故開始時，電廠喪失包含柴油發電機在內的所有交流電源，所有的爐心注水系統均無法執行其功能，由於爐心隔離冷卻系統不需要交流電源運作，因此正常運作，隨後因為抑壓溫度過高造成爐心隔離冷卻系統失效。爐心隔離冷卻系統失效後，爐心的衰變熱不斷的產生，使冷卻水不斷的汽化，造成爐心的水位逐漸的降低，又因無冷卻水的補充，不久後爐心開始裸露，逐漸的熔毀向下流動落入壓力槽底部，並且將該處的積水蒸乾，並且使該處反應器槽壁溫度逐漸升高，最後造成控制棒焊道失效。控制棒焊道失效之後，由於自動釋壓系統不會啟動，因此主系統仍保持在高壓狀態，熔融爐心受壓而向外噴出，並碎裂成高溫的熔渣，飛濺四散最後落入爐穴，並且與混凝土發生熔融爐心混凝土作用(Molten Core Concrete Interaction, MCCI)。在熔融爐心混凝土作用中所產生的氣體，使得圍阻體內的壓力不斷的升高，最終圍阻體失效，造成放射性物質的外釋。

3.3.2 國聖電廠全黑事故 MAAP4.0.4 模擬結果（案例二）

MAAP4.0.4 程式計算所得之重要事故時序詳如表 3.3。程式的初始條件依照程式輸入檔案 (Input File) 內的設定，交流電源及柴油發電機均在事故開始(0.0 秒)時失效，除了爐心隔離冷卻系統正常運作外，其他所有高低壓注水系統均失效。發生全黑事故的同時，主蒸汽隔離閥與飼水水泵關閉，急停信號產生使汽機跳脫，接著在 1.84 秒

時反應器急停。

此時爐心的衰變熱不斷的產生，壓力槽內的水位持續的下降，在事故開始後 81.7 秒爐心隔離冷卻系統啟動，開始由凝結水貯存池（Condensate Storage Tank，CST）取水注入反應器，隨後因為抑壓池水位過高，爐心隔離冷卻系統改由抑壓池取水。由於爐心隔離冷卻系統的注水使得壓力槽內的降流區水位回復至 Level-8，爐心隔離冷卻系統即關閉。接下來燃料衰變熱不斷將冷卻水汽化，使水位再度降低，造成爐心隔離冷卻系統的再啟動。事故發生後 6.2 小時（22,170 秒）因抑壓池水溫過高（333K）造成爐心隔離冷卻系統的跳脫，跳脫前爐心隔離冷卻系統四度開啟將爐心水位回復至 Level-8，事故開始後 8.5 小時（30,573 秒），壓力槽降流區水位降到爐心燃料頂端，但爐心內之雙相水位直到 8.8 小時（31,486 秒）時，才低於燃料頂端的高度。由於水蒸汽的熱傳效果遠低於水，因此裸露於水面上的燃料棒所產生的熱將難以被移除，因此燃料棒的溫度持續的升高，燃料開始融毀。熔融爐心在 11.4 小時（41,086 秒）開始向下流至反應器壓力槽底部區間，14.1 小時（50,874 秒）壓力槽底部之控制棒焊道失效，造成反應器壓力槽破裂，熔融爐心開始自高壓反應器向外噴出並碎裂成高溫的熔渣，飛濺四散，最後落入爐穴當中，與圍阻體混凝土基座發生 MCCI 作用，產生大量可燃性氣體，造成圍阻體在事故發生後 41.9 小時（150,937 秒）失效，大量的放射性物質外釋到外界環境。本事故由於 ADS 無法啟動，使得壓力槽在高壓狀態下失效。

圖 3.13 為電廠全黑事故冷卻水系統壓力變化，模擬結果顯示，在壓力槽破裂前，冷卻水系統壓力因安全釋壓閥的開啟與關閉而有明顯的震盪，如圖所示，爐心隔離冷卻系統的開啟會造成冷卻水系統壓力的降低。在 14.1 小時（50,874 秒），由於壓力槽底部控制棒焊道失效，冷卻水系統壓力驟降到圍阻體壓力，隨後與圍阻體的壓力達到平衡。

圖 3.14 為電廠全黑事故壓力槽降流區水位變化，模擬結果顯示，壓力槽降流區水位因爐心隔離冷卻系統的開啟與關閉而有明顯大幅度的震盪，隨後由於爐心隔離冷卻系統的失效，因此爐心的衰變熱不斷的產生，使冷卻水不斷的汽化，此時所有的爐心注水系統均無法執行其功能，造成壓力槽降流區水位逐漸降低，在 8.5 小時（30,573 秒）時，到達爐心頂部的高度，直到 15.6 小時（56,130 秒）水位降至降流區底部。圖 3.15 為電

廠全黑事故燃料棒最高溫度變化，模擬結果顯示，在 8.5 小時(30,573 秒)壓力槽降流區水位到達爐心頂部後，溫度開始上升。在 11.4 小時 (41,086 秒)，熔融爐心開始掉落至壓力槽底部，接著在 14.1 小時 (50,874 秒)的時候，由於壓力槽失效，熔融爐心掉落離開壓力槽。熔融爐心掉落前，爐心燃料溫度直線上升，形成一個尖峰的原因不是很清楚，可能是程式計算的問題。

圖 3.16 為電廠全黑事故乾井與濕井壓力變化，模擬結果顯示，圍阻體壓力在事故開始即隨著安全釋壓閥排放蒸汽而逐漸上升，由於熔融爐心掉落至壓力槽的底部，造成壓力槽底部水分的蒸發，這些水蒸汽經由安全釋壓閥進入抑壓池中，造成圍阻體壓力的升高。壓力槽在 14.1 小時 (50,874 秒)失效，大量的熔融爐心自壓力槽底部向外噴出，造成圍阻體壓力急劇上升，隨後在 41.9 小時 (150,937 秒)，因為圍阻體失效，使得壓力驟降。由於濕井裡有抑壓池，會將蒸氣凝結，故濕井的壓力會略低於乾井。如圖所示，在壓力槽失效後，圍阻體壓力會產生數個小尖峰，此原因是因為圍阻體內氫氣燃燒所造成的。

3.3.3 國聖電廠全黑事故 PCTran KuoSheng 模擬結果 (案例二)

PCTran KuoSheng 程式計算所得之重要事故時序詳如表 3.4。程式的初始條件在 PCTran KuoSheng 程式內建事故 (Malfunction) 中設定，分別設定為 Main Steam Isolation Valve Closure 與 Station Blackout。故廠內電力的喪失依 PCTran KuoSheng 程式之設定在事故開始(0.0 秒)時失效。除爐心隔離冷卻系統外，其他所有高低壓注水系統均全部失效。發生全黑事故的同時，主蒸汽隔離閥與飼水水泵關閉，急停信號產生使汽機跳脫，接著在 2 秒時反應器急停。

事故開始第 8 秒時，壓力槽降流區水位下降至 382.8 公分處(低於 Level 3)，18.5 秒時，水位降至 361.5 公分處(低於 Level 2)，此時爐心隔離冷卻系統開啟，開始由凝結水貯存池 (Condensate Storage Tank, CST) 取水注入反應器，隨後因為抑壓池水位過高，爐心隔離冷卻系統改由抑壓池取水。由於爐心隔離冷卻系統的注水使得壓力槽內

的水位回復至 Level-8，爐心隔離冷卻系統即關閉。由於爐心的衰變熱不斷的產生，使壓力槽降流區水位再度降低，造成爐心隔離冷卻系統的再啟動。事故發生後 5.6 小時 (20,193 秒)因抑壓池水溫過高 (333K) 造成爐心隔離冷卻系統的跳脫，跳脫前爐心隔離冷卻系統七度開啟將爐心水位回復至 Level-8，隨後在事故開始後 6.9 小時 (24,727 秒)壓力槽降流區水位低於燃料頂端的高度，但爐心內之雙相水位直到 7.1 小時 (25,421 秒)時，由於 PCTran KuoSheng 程式並沒有模擬爐心的熔損，故當燃料護套達 2,500K 時，溫度隨即便維持不變。本事故由於 ADS 無法啟動，使得壓力槽在高壓狀態下失效。由於程式模擬能力的限制，本研究之 PCTran 分析在燃料溫度達到 2,500K 時即停止。

3.3.4 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 結果比較分析 (案例二)

圖 3.17 為 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠全黑事故冷卻水系統壓力變化。圖中所示之冷卻水系統壓力的上下震盪是因為安全釋壓閥的開關所造成，震盪的頂點為安全釋壓閥的開啟點，震盪的最低點為安全釋壓閥的關閉點；爐心隔離冷卻系統的開啟與關閉均會導致冷卻水系統壓力的降低。冷卻水系統壓力上下震動的頻率慢慢的減少，是因為衰變熱的減少導致而成的。如圖所示，PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 所預測壓力的震盪頻率有明顯的差別，MAAP4.0.4 程式中，將冷卻水系統細分為數個控制體積，分別計算其溫度與壓力，而 PCTran KuoSheng 程式將冷卻水系統視為單一的體積，只有一個溫度與壓力，故 PCTran KuoSheng 程式之冷卻水系統壓力變化速率較 MAAP4.0.4 所預測的為緩慢，造成安全釋壓閥開啟與關閉的頻率亦不一樣。

圖 3.18 為 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠全黑事故安全釋壓閥流率變化。由於主蒸汽管路隔離閥於事故開始時即關閉，蒸汽的累積造成冷卻水系統壓力的快速上升。PCTran KuoSheng 所預測之壓力最大值為 7.8 Mpa，造成 9 個安全釋壓閥的開啟，總流率為 2528 公斤/秒；MAAP4.0.4 所預測之最大流率為 870 公斤/秒。如圖所示，兩程式間所預測之安全釋壓閥開啟時間及頻率有所差異，基本上其趨勢與冷卻水系統壓力

變化的趨勢一致。

圖 3.19 為 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠全黑事故壓力槽降流區水位變化。PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 在計算水位時的參考點並不一樣，圖 3.8 為兩個程式水位計算的示意圖。為了方便結果的比較，圖 3.19 所示之壓力槽降流區水位變化是以燃料頂部(Top of Active Fuel, TAF)為零點，亦即當水位高度低於零時，壓力槽降流區水位達爐心燃料頂部高度。如圖所示，PCTran KuoSheng 預測壓力槽降流區水位於 6.9 小時 (24,727 秒)達到爐心燃料的頂端，較 MAAP4.0.4 程式所預測之時間早了 1.6 小時。此項差異是由於 PCTran KuoSheng 所預測之安全釋壓閥流量較大所導致。如圖所示，兩個程式所預測的水位均呈階梯狀的下降的趨勢，此種趨勢與冷卻水系統安全釋壓閥的開啟與關閉有關。

圖 3.20 為 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠全黑事故爐心隔離冷卻系統流率變化。MAAP4.0.4 模擬顯示，事故發生後 81.7 秒時，爐心隔離冷卻系統首度啟動，至 54 分鐘 (3,244 秒)時，壓力槽降流區水位回復至 Level -8，爐心隔離冷卻系統關閉，但此時的水位還會持續上升一小段時間，此原因為 MAAP4.0.4 程式中，將冷卻水系統細分為數個控制體積，停止注水後，冷卻水在數個控制體間的重新分配，使得降流區內的水增加。在爐心隔離冷卻系統跳脫之前，曾四度啟動將水位回復至 Level -8。PCTran KuoSheng 模擬顯示，事故發生後 25 秒時，爐心隔離冷卻系統首度啟動，至 21.2 分鐘 (1,270 秒)時，壓力槽降流區水位回復至 Level -8，爐心隔離冷卻系統關閉。在爐心隔離冷卻系統跳脫之前，曾七度啟動將水位回復至 Level -8。如圖所示，兩程式預測爐心隔離冷卻系統之開啟時間與次數都不相同，此原因為程式計算壓力槽內水位的方式不同。

圖 3.21 為 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠全黑事故燃料棒最高溫度變化。PCTran KuoSheng 模擬顯示，壓力槽降流區水位在 6.9 小時 (24,727 秒)達到爐心頂部，燃料棒溫度開始上升；9.3 小時 (33,310 秒)的時候，燃料棒溫度達 2,500K，此時溫度即不再變化，比較 MAAP4.0.4 與 PCTran KuoSheng 的結果，由於兩程式在計算爐心裸露的時間不同，因此在燃料棒溫度上升的時間也不同。

圖 3.22 為 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠全黑事故抑壓池溫度變化。PCTran

KuoSheng 模擬顯示，由於反應器壓力槽內的水蒸汽經由釋壓閥進入抑壓池，造成抑壓池溫度緩慢上升。如圖所示，抑壓池溫度呈階梯狀上升的趨勢，此原因在於安全釋壓閥的開啟會造成抑壓池水溫的上升。兩程式預測抑壓池溫度是相當的接近。

圖 3.23 為 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠全黑事故濕井壓力變化。事故開始後，由於反應器裡面的水蒸汽，經由安全釋壓閥進入抑壓池內，造成濕井的壓力緩慢上升，並且造成圍阻體內其他區間壓力亦緩慢上升。比較 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 的結果，兩程式所預測的值相當接近，但 PCTran KuoSheng 的預測值較 MAAP4.0.4 的預測值為高。

圖 3.24 為 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠全黑事故氫氣產生量變化。PCTran KuoSheng 模擬顯示，事故開始後 8.7 小時 (31,220 秒) 的時候，護套中的鋁金屬與水發生反應，開始產生氫氣。在 MAAP4.0.4 程式模擬結果顯示，在事故發生 9.3 小時 (33,415 秒) 的時候，水蒸汽開始和做為護套材料的鋁合金發生化學反應而產生氫氣與熱，由於剛開始產生氫氣量極小，因此在圖中無法明顯的顯示出開始點，故以箭頭指示。如圖所示，兩程式所預測氫氣開始產生的時間與氫氣產生量有所不同。

表 3.3 MAAP4.0.4 程式模擬國聖電廠電廠全黑事故重要時序 (案例二)

時間(sec)	發生之重要事件
0.0	MSIV Closure
0.0	Feedwater Pumps Trip, Turbine Trip
1.84	Ractor Scrammed
22,170 (6.2 hr)	RCIC Off due to High Suppression Pool Temp.
30,573 (8.5 hr)	Level Reaches TAF (downcomer)
31,486 (8.8 hr)	Level Reaches TAF (core mixture water)
33,415 (9.3 hr)	Hydrogen Generation
41,086 (11.4 hr)	Relocation Of Core Materials To Lower Head
50,874 (14.1 hr)	Vessel Failed By Ejection Of CRD Tubes
150,937 (41.9 hr)	Containment Failure

表 3.4 PCTran KuoSheng 程式模擬國聖電廠電廠全黑事故重要時序 (案例二)

時間(sec)	發生之重要事件
0.0	MSIV Closure
0.0	Feedwater Pumps Trip, Turbine Trip
2.0	Reactor Scrammed
20,193 (5.6 hr)	RCIC Off due to High Suppression Pool Temp.
24,727 (6.9 hr)	Level Reaches TAF (downcomer)
25,421 (7.1 hr)	Level Reaches TAF (core mixture water)
31,220 (8.7 hr)	Hydrogen Generation
33,310 (9.3 hr)	Fuel Temperature Reaches 2500K

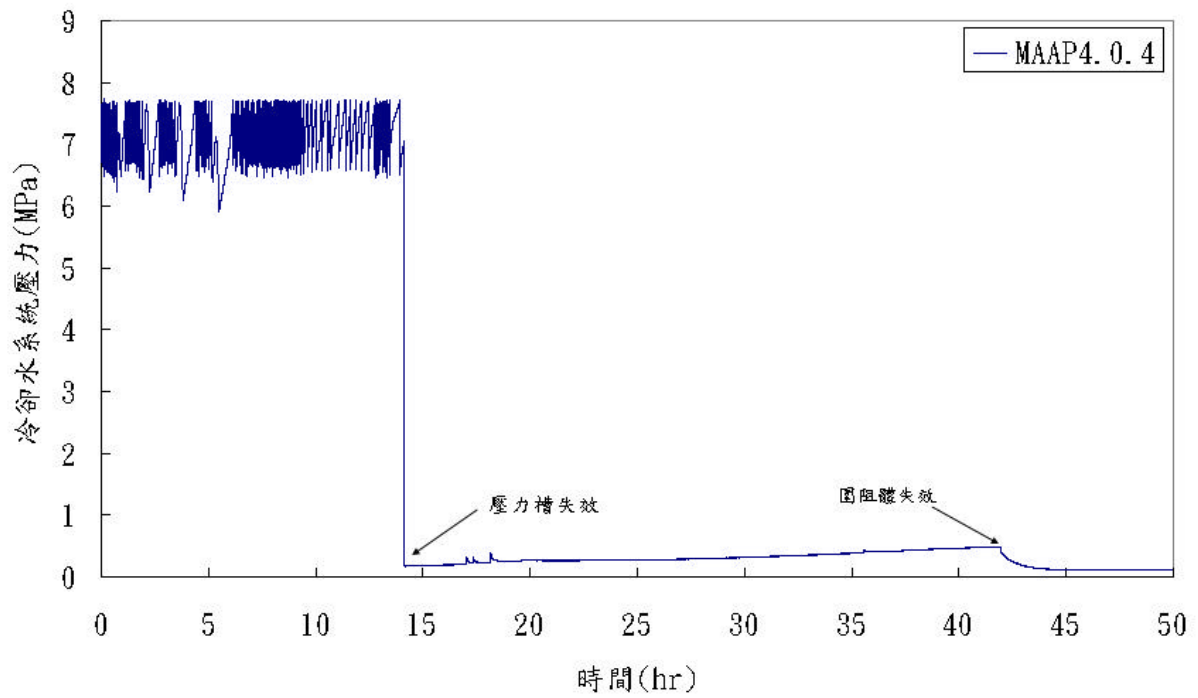


圖 3.13 電廠全黑事故冷卻水系統壓力(案例二)

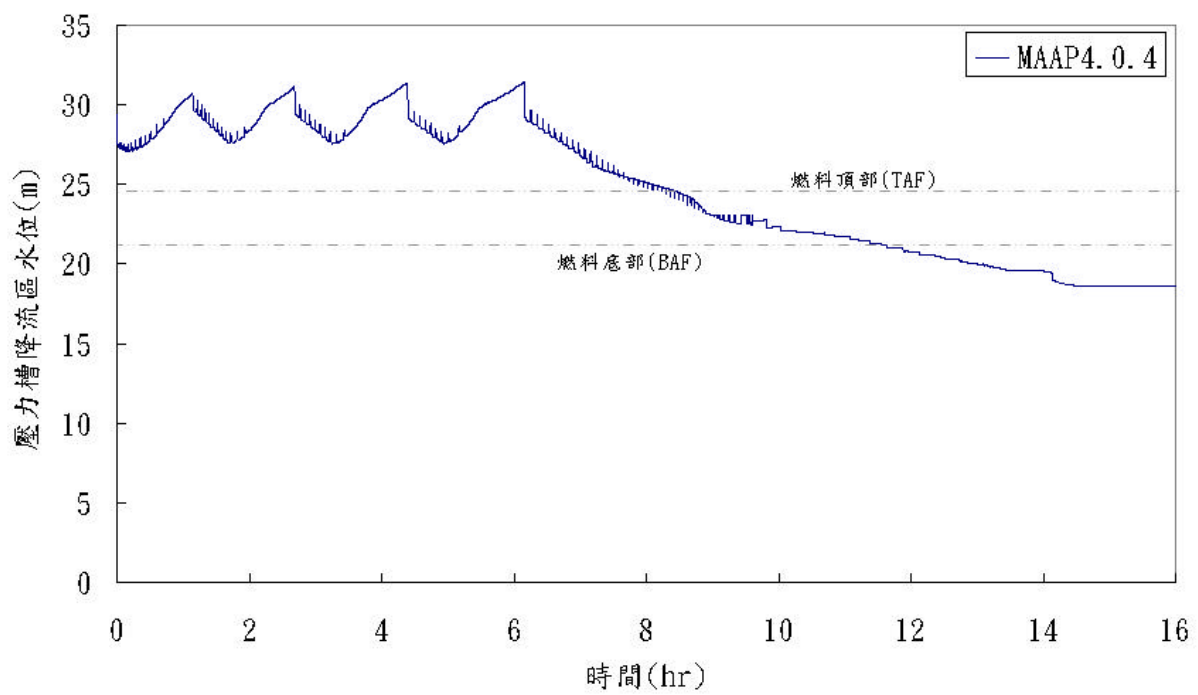


圖 3.14 電廠全黑事壓力槽降流區水位(案例二)

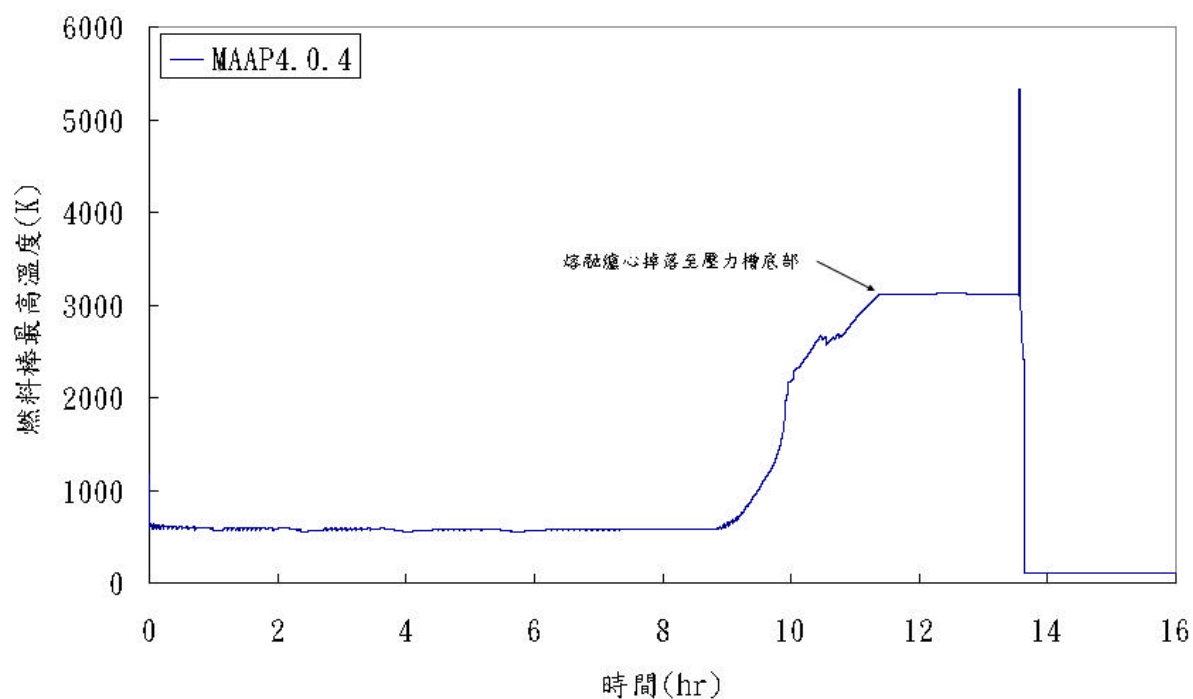


圖 3.15 電廠全黑事故燃料棒最高溫度(案例二)

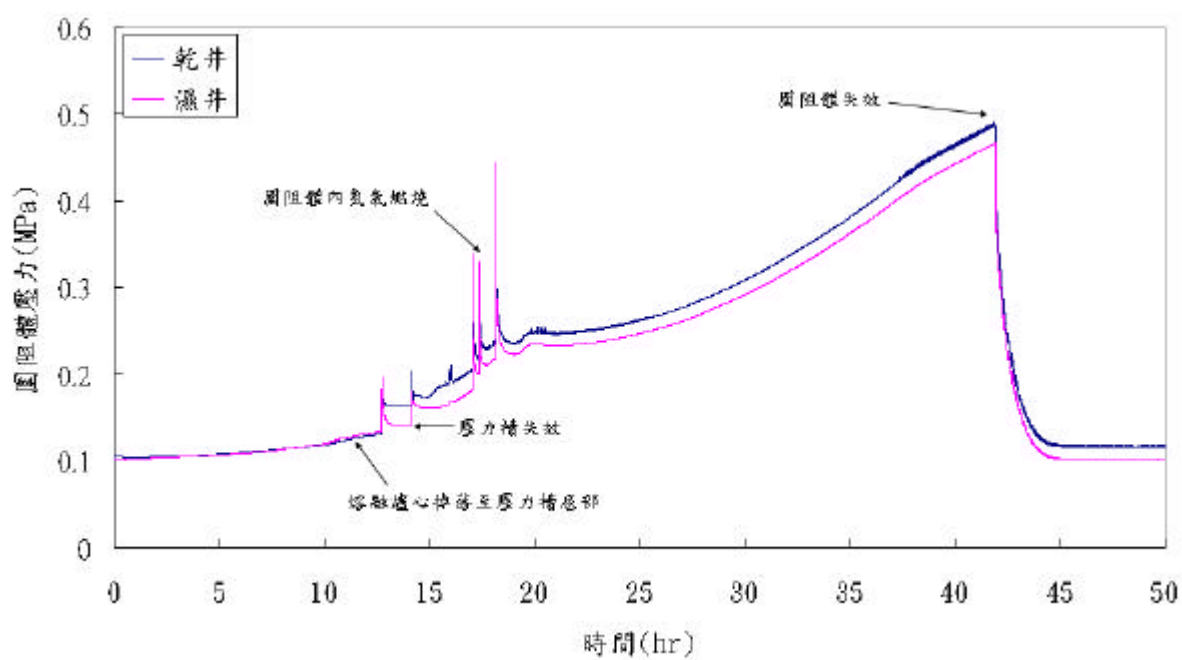


圖 3.16 電廠全黑事故乾井與濕井壓力(案例二)

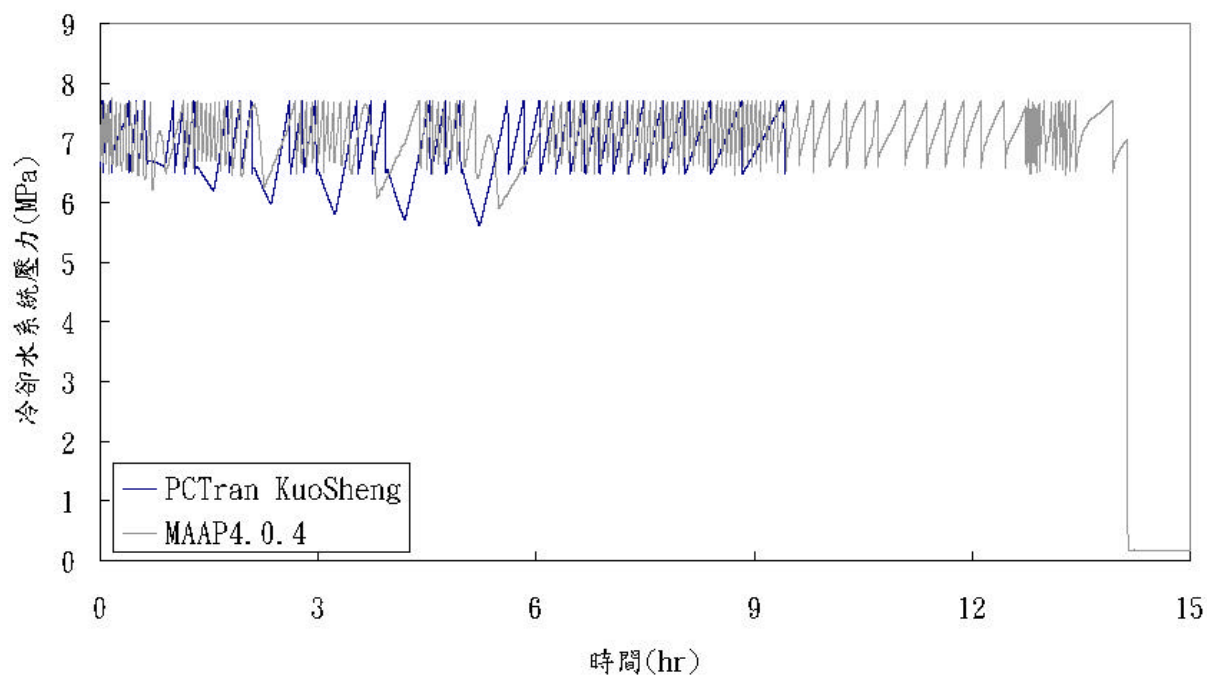


圖 3.17 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠全黑事故冷卻水系統壓力(案例二)

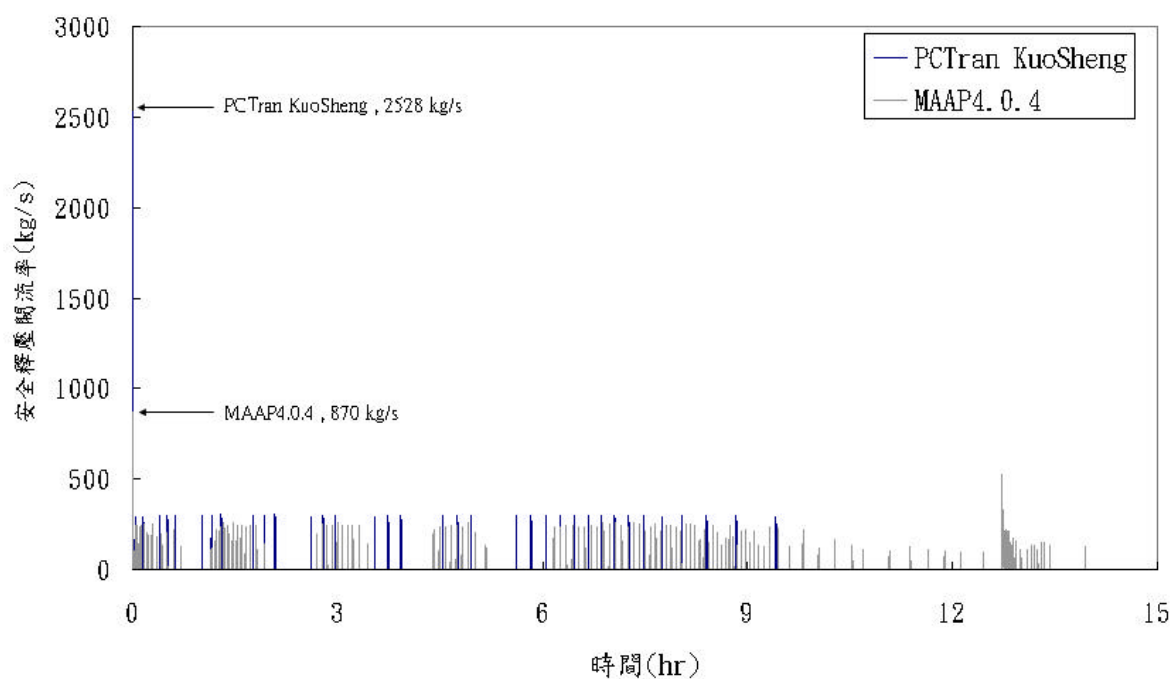


圖 3.18 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠全黑事故安全釋壓閥流率(案例二)

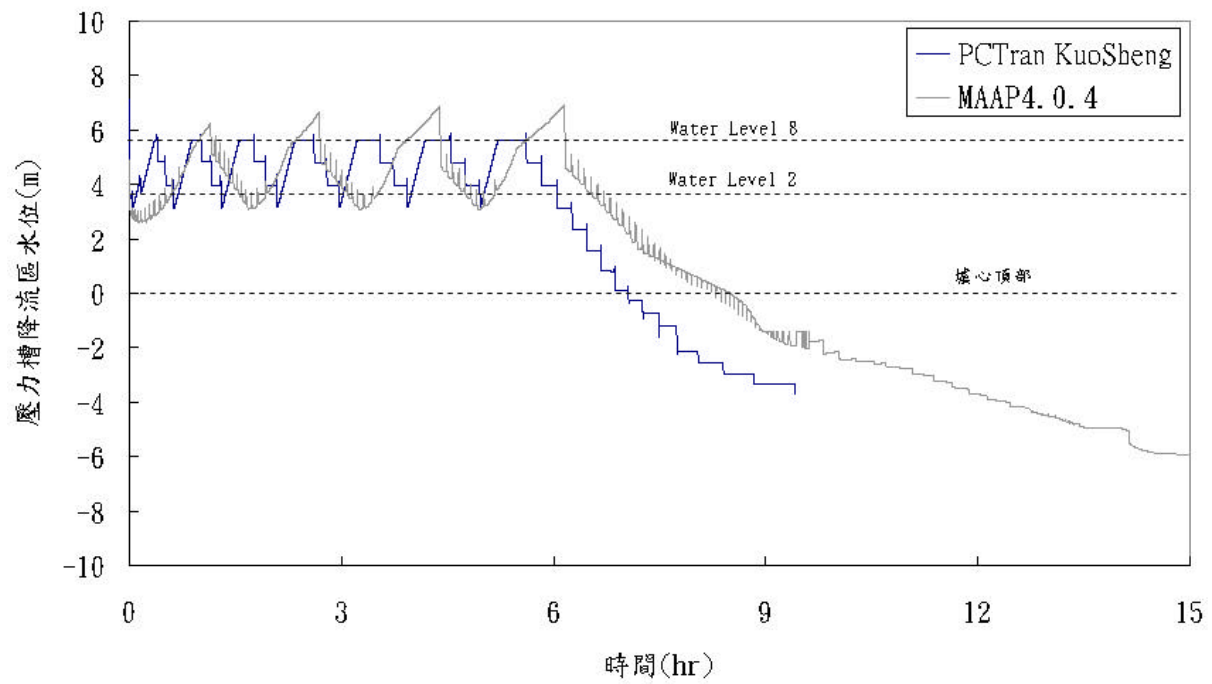


圖 3.19 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠全黑事故壓力槽降流區水位(案例二)

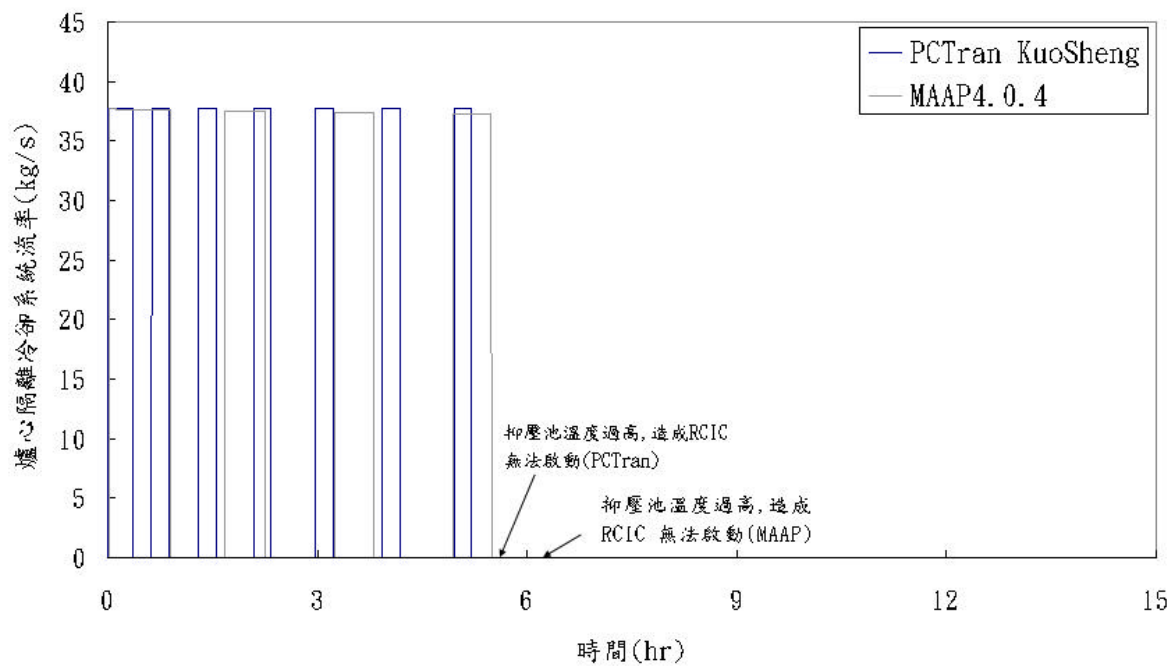


圖 3.20 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠全黑事故爐心隔離冷卻系統流率(案例二)

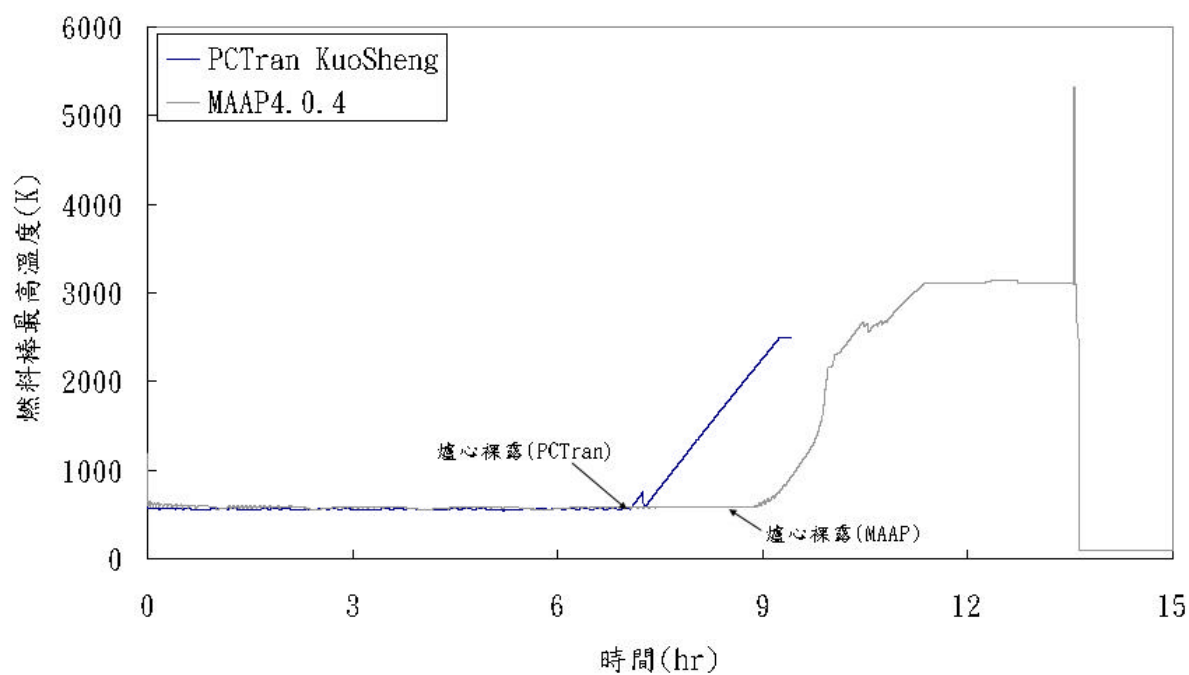


圖 3.21 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠全黑事故燃料棒最高溫度(案例二)

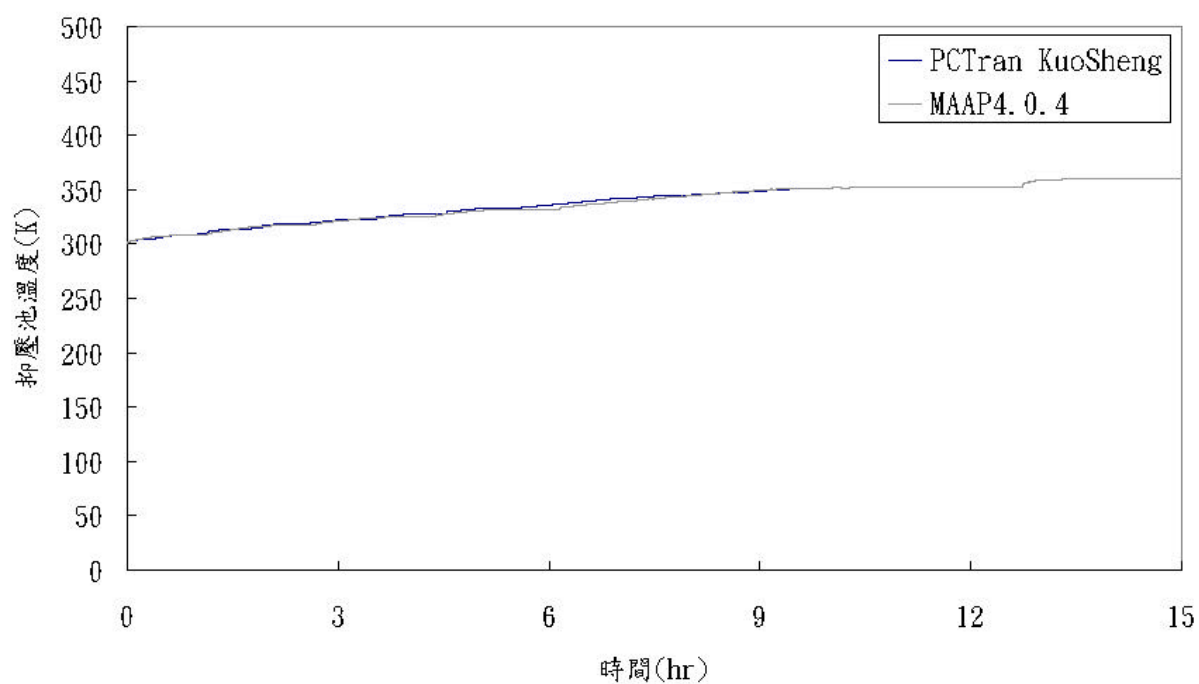


圖 3.22 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠全黑事故抑壓池溫度(案例二)

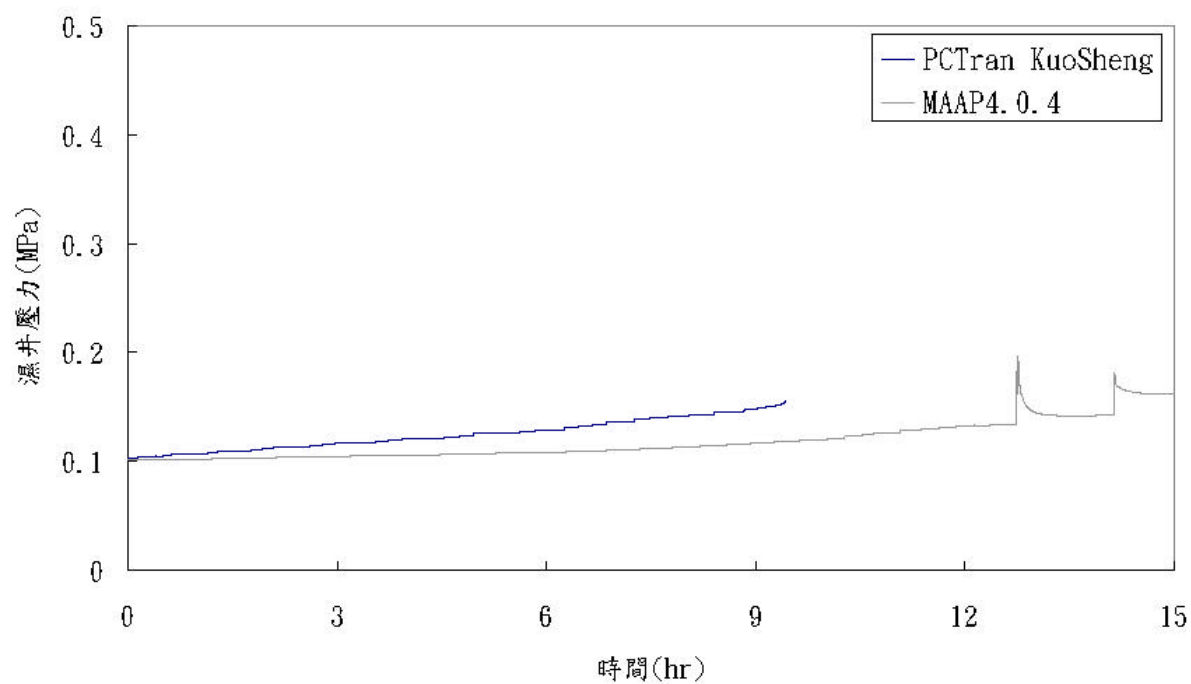


圖 3.23 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠全黑事故濕井壓力(案例二)

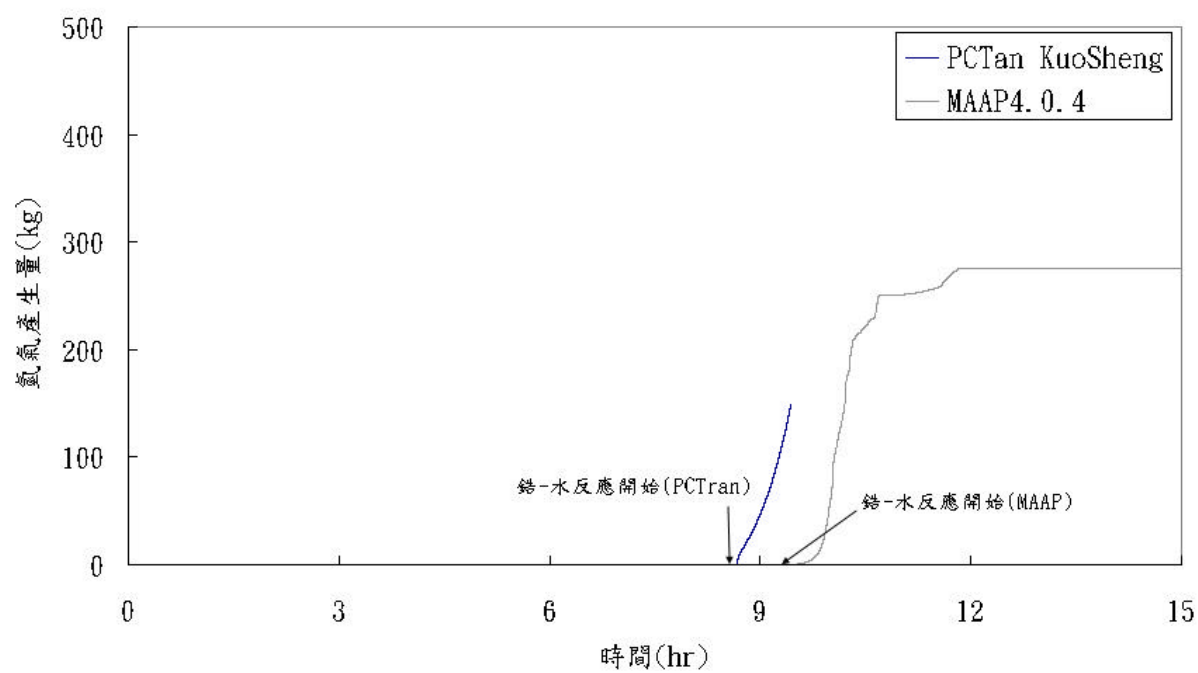


圖 3.24 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠全黑事故氫氣產生量(案例二)

3.4 國聖電廠電廠全黑事故模擬結論

PCTran KuoSheng 是一個簡單快速之熱水流分析程式，具有人性化之操作介面，以及互動式控制介面等優點。PCTran KuoSheng 可以分析反應器冷卻水系統，以及圍阻體於事故中之熱水流反應；對於放射性物質的外釋，也僅考慮存在於燃料棒護套間隙之揮發性較高的放射性物質的外釋。從核電廠嚴重事故分析的角度來看，PCTran KuoSheng 最大的問題是，在程式執行時，當燃料護套達 2,500K 時，溫度隨即便維持不便，故 PCTran KuoSheng 程式並沒有模擬爐心的熔損；因此許多與熔融爐心相關現象，例如熔融爐心與水於壓力槽底部區間的作用，壓力槽底部失效，以及熔融爐心與混凝土作用等，均無法模擬。

由於兩程式間在基本參數的輸入值上有明顯的差異以及 PCTran KuoSheng 程式部分邏輯有所瑕疵，因此在做電廠全黑事故分析比較前，針對部分參數及程式邏輯進行修改，如表 3.5 所示，在安全釋壓閥方面，調整其安全釋壓閥的個數及組數，以及安全釋壓閥的初始流量；在自動釋壓系統方面，由於電廠全黑事故中的兩個案例皆未啟動自動釋壓系統，因此在程式邏輯中，將自動釋壓系統的開啟延遲時間設定為 99999 秒；爐心隔離冷卻系統方面，針對程式開啟與關閉，以及抑壓池溫度過高時，爐心隔離冷卻跳脫的邏輯進行修正；最後針對氫氣產生量的變化方面，對燃料溫度計算以及氫氣產生之方程式進行修改。

比較兩程式模擬電廠全黑事故結果，在冷卻水系統壓力方面，PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 所預測壓力的震盪頻率有明顯的差別，MAAP4.0.4 程式中，將冷卻水系統細分為數個控制體積，分別計算其溫度與壓力，而 PCTran KuoSheng 程式將冷卻水系統視為單一的體積，只有一個溫度與壓力，故 PCTran KuoSheng 程式之冷卻水系統壓力變化速率較 MAAP4.0.4 所預測的為緩慢，造成安全釋壓閥開啟與關閉的頻率亦不一樣。

在水位計算方面，兩程式間對於降流區水位以及雙相水位的計算方式並不相同，因此造成燃料溫度上升的時間上的差異。整體而言，雖然兩個程式所預測之暫態變化趨勢相當一致，但有時在重要事件時序上仍有不少的差異，重要參數的變化有時亦有頗大的

差異。

表 3.5 PCTran KuoSheng 程式模擬國聖電廠電廠全黑事故程式修改表

1.安全釋壓閥數目
2.安全釋壓閥開啟及關閉壓力
3.安全釋壓閥初始流率
4.自動釋壓系統開啟延遲時間
5.爐心隔離冷卻系統初始流率
6.爐心隔離冷卻系統開啟及關閉邏輯
7.冷卻水系統初始壓力
8.抑壓池初始溫度
9.抑壓池截面積
10.抑壓池水位初始高度
11.凝結水貯存池內池水體積
12.燃料棒數目及內外徑
13.氫氣產生量程式邏輯

第四章 電廠冷卻水流失事故模擬

4.1 前言

本章將利用 MAAP4.0.4 程式與 PCTran KuoSheng 程式，模擬分析國聖電廠電廠冷卻水流失事故。4.2 節中為大破口冷卻水流失事故的案例分析一【7】，假設破口面積等同於主蒸汽管截面積；4.3 節則為大破口冷卻水流失事故的案例分析二，假設低壓爐心灑水系統(Low Pressure Core Spray, LPCS)可用，探討系統啟動時對電廠大破口冷卻水流失事故演變的影響；4.4 節中為中破口冷卻水流失事故的案例分析一，假設破口面積等同於主蒸汽管截面積的 $1/10$ ；4.5 節則為中破口冷卻水流失事故的案例分析二，在此假設高壓爐心灑水系統 High Pressure Core Spray, HPCS)為可用，探討電廠啟動時對電廠中破口冷卻水流失事故演變的影響；4.6 節為再循環管的破口，假設破口面積等同於再循環管截面積的 $1/10$ ；4.7 節中將破口縮小為主蒸汽管截面積的 $1/75$ (小破口)【7】。此處大破口、中破口及小破口事故的分類是指破口的相對大小，與傳統事故分析及安全度評估中之事故分類方法並不一致。4.8 節為國聖電廠電廠冷卻水流失事故模擬結論。

4.2 大破口冷卻水流失事故模擬 (案例一)

4.2.1 背景

本事故的肇因是大破口冷卻水流失，發生破口的位置是主蒸汽管。事故發生後，冷卻水系統中的水會迅速的汽化成蒸汽，並且從破口流失進入乾井，此時的乾井壓力上升到急停的設定點，引發急停信號，使得主蒸汽隔離閥關閉、飼水泵跳脫以及反應器急停。由於事故的模擬中假設所有的爐心注水系統皆無法啟動，因此無任何的緊急冷卻水

系統進入反應器壓力槽內，爐心的衰變熱不斷的產生，使冷卻水不斷的汽化，造成爐心的水位逐漸的降低，又因無冷卻水的補充，不久後爐心開始裸露，逐漸的熔毀向下流動落入壓力槽底部，並且將該處的積水蒸乾，並且使該處反應器槽壁溫度逐漸升高，最後熔融爐心所產生的衰變熱將壓力槽底部熔穿，落入爐穴，並且與混凝土發生熔融爐心混凝土作用(Molten Core Concrete Interaction, MCCI)。在熔融爐心混凝土作用中所產生的氣體，使得圍阻體內的壓力不斷的升高，最終圍阻體失效，造成放射性物質的外釋。

4.2.2 國聖電廠大破口冷卻水流失事故 MAAP4.0.4 模擬結果（案例一）

MAAP4.0.4 程式計算所得之重要事故時序詳如表 4.1。程式的初始條件依照程式輸入檔案 (Input File) 內的設定，破口面積為 0.2356 平方公尺，事故中假設爐心隔離冷卻系統，以及所有高低壓注水系統均失效。主蒸汽隔離閥與飼水水泵的關閉與反應器急停動作，由程式自行計算。事故發生後 2.01 秒，反應器因乾井壓力過高急停，隨即在 4.79 秒時因為主系統壓力過低造成主蒸汽隔離閥隔離及飼水水泵的跳脫。

爐心的衰變熱不斷的產生，壓力槽內的水位持續的下降，故在事故開始後的 2.8 分鐘 (167 秒)，壓力槽內降流區水位達爐心頂部高度；爐心內之雙相水位直到 8.5 分鐘 (511 秒)時，才低於燃料頂端的高度。由於水蒸汽的熱傳效果遠低於水，因此裸露於水面上的燃料棒所產生的熱將難以被移除，燃料棒的溫度持續的升高，燃料開始熔毀。熔融爐心在第 2.2 小時 (7,908 秒)開始向下流至反應器壓力槽底部區間，5.5 小時 (19,939 秒)壓力槽底部溫度過高，將反應器壓力槽融穿，熔融爐心落入爐穴當中與圍阻體混凝土基座發生 MCCI 作用，產生大量可燃性氣體，造成圍阻體在事故發生後第 39.1 小時 (140,721 秒)失效，大量的放射性物質外釋到外界環境。

圖 4.1 為電廠大破口冷卻水流失事故冷卻水系統壓力變化，模擬結果顯示，大破口事故發生後，系統壓力迅速降低與圍阻體的壓力達到平衡，由於融熔爐心在 2.2 小時 (7,908 秒)的時候，開始下滑掉落至壓力槽底部，被該處的積水淬熄，造成大量的蒸汽產生，如圖所示明顯壓力上升的尖峰，事故後第 5.5 小時 (19,939 秒)，因為壓力槽內

溫度過高，造成壓力槽破裂，隨後在 39.1 小時 (140,721 秒)的時候，圍阻體的失效，使得冷卻水系統壓力隨著圍阻體壓力降低。

圖 4.2 為電廠大破口冷卻水流失事故壓力槽降流區水位變化，模擬結果顯示，由於爐心的衰變熱不斷產生，使冷卻水不斷的汽化，所有的爐心注水系統均無法執行其功能，造成壓力槽降流區的水位逐漸降低，在 2.8 分鐘(167 秒)時，低於燃料頂端的高度，直到 7.4 小時 (26,647 秒)水位降至降流區底部。圖 4.3 為電廠大破口冷卻水流失事故燃料棒最高溫度變化，模擬結果顯示，由於事故發生後 2.8 分鐘 (167 秒)壓力槽降流區水位達到爐心頂部，隨後不久燃料溫度上升。在 2.2 小時 (7,908 秒)，熔融爐心開始掉落至壓力槽底部，接著在 5.5 小時 (19,939 秒)的時候，由於壓力槽失效，熔融爐心掉落離開壓力槽。熔融爐心掉落前，爐心燃料溫度產生兩個尖峰，形成的原因不是很清楚，可能是程式計算的問題。

圖 4.4 為電廠大破口冷卻水流失事故乾井與濕井壓力變化，模擬結果顯示，由於破口的位置在主蒸汽管，因此由破口流出的蒸汽進入了乾井，造成圍阻體的壓力上升，在 2.2 小時 (7,908 秒)的時候，由於熔融爐心開始掉落至壓力槽底部，造成圍阻體壓力上升的小尖峰，壓力槽在 5.5 小時 (19,939 秒)失效，大量的熔融爐心自壓力槽底部向外流出，造成圍阻體壓力急劇上升，隨後在 39.1 小時 (140,721 秒)，因為圍阻體失效，使得壓力驟降。由於濕井裡有抑壓池，會將蒸汽凝結，故濕井的壓力會略低於乾井。如圖所示，在壓力槽失效後，圍阻體壓力會產生小尖峰，此原因是因為圍阻體內氫氣燃燒所造成的。

4.2.3 國聖電廠大破口冷卻水流失事故 PCTran KuoSheng 模擬結果 (案例一)

PCTran KuoSheng 程式計算所得之重要事故時序詳如表 4.2。程式的初始條件在 PCTran KuoSheng 程式內建事故 (Malfunction) 中設定為 Steam Line Break Inside Drywell(破口大小為 0.2356 平方公尺)。事故開始包含爐心隔離冷卻系統以及所有高低壓注水系統均全部失效。主蒸汽隔離閥以及飼水泵關閉及跳脫時間則由程式自行計算，

事故發生後第 6 秒主蒸汽隔離閥、飼水泵跳脫以及反應器急停，接著在第 9.5 秒汽機跳脫。

事故開始第 7.5 秒時，壓力槽降流區水位下降至 445.1 公分處(低於 Level 3)，第 14 秒時，水位降至 358.9 公分處(低於 Level 2)，第 52.5 秒時，水位降低至 84.2 公分(低於 Level 1)。由於爐心的衰變熱不斷的產生，壓力槽內的水位持續的下降，在事故開始後的第 73 秒，壓力槽降流區水位達到爐心頂部，但爐心內之雙相水位直到 3.2 分鐘 (192.5 秒)時，才低於燃料頂端的高度。由於 PCTran KuoSheng 程式並沒有模擬爐心的熔損，故當燃料護套達 2,500K 時，溫度隨即便維持不變。由於程式模擬能力的限制，本研究之 PCTran KuoSheng 分析在燃料溫度達到 2,500K 時即停止。

4.2.4 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 結果比較分析 (案例一)

圖 4.5 為 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠大破口冷卻水流失事故冷卻水系統壓力變化。在事故開始後，冷卻水系統壓力隨即快速的降低，直到與圍阻體壓力平衡。兩程式間預測之冷卻水系統壓力變化相當的接近。

圖 4.6 為 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠大破口冷卻水流失事故破口流率變化。PCTran KuoSheng 模擬顯示，事故開始破口蒸汽以每秒 1873 公斤的流率湧出，在 3.6 分鐘之後破口流率則降到每秒 191 公斤左右的流量流出。MAAP4.0.4 模擬結果顯示，事故一開始，破口蒸汽以每秒 1912 公斤的流率湧出，之後破口流量逐漸緩慢降低到接近零。由於破口事故發生在主蒸汽管路，破口所流出的全都是水蒸汽。

圖 4.7 為 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠大破口冷卻水流失事故壓力槽降流區水位變化。事故發生造成大量蒸汽從壓力槽流失，由於無任何的爐心注水系統開啟，因此壓力槽降流區的水位持續下降。PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 在計算水位時的參考點並不一樣，圖 3.8 為兩個程式水位計算的示意圖。為了方便結果的比較，圖 4.7 所示之壓力槽降流區水位變化圖是以燃料頂部(Top of Active Fuel, TAF)為零點。如圖所示，PCTran KuoSheng 預測壓力槽降流區水位在事故發生後 1.2 分鐘 (73 秒)到達爐心

頂端，較 MAAP4.0.4 程式的預測值早了 1.6 分鐘。如圖所示，PCTran KuoSheng 所預測的水位會持續的下降，並沒有合理的解釋，可能是因為水位低於燃料底部高度時，水仍然會持續蒸發。

圖 4.8 為 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠大破口冷卻水流失事故燃料棒最高溫度變化。PCTran KuoSheng 模擬顯示，壓力槽降流區水位在 1.2 分鐘 (73 秒) 達到爐心頂部，隨後不久燃料棒溫度開始上升；31.4 分鐘 (1,884 秒) 的時候，燃料棒溫度達 2,500K，此時溫度即不再變化，比較 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 的結果，由於兩程式在計算爐心裸露的時間不同，因此在燃料棒溫度上升的時間也不同。

圖 4.9 為 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠大破口冷卻水流失事故抑壓池溫度變化。事故發生後由於蒸汽持續由破口流出，造成抑壓池溫度的明顯上升。PCTran KuoSheng 模擬結果顯示，抑壓池之溫度變化趨勢呈階梯狀上升，此原因無法解釋，應該與程式計算邏輯有關。比較 PCTan KuoSheng 與 MAAP4.0.4 兩程式預測結果，如圖所示，MAAP4.0.4 所預測抑壓池溫度上升速度大於 PCTran KuoSheng 所預測結果。

圖 4.10 為 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠大破口冷卻水流失事故濕井壓力變化。事故開始後，由於反應器裡面的水蒸汽，經由破口進入圍阻體內，造成濕井內的壓力緩慢上升，並且造成圍阻體內其他區間壓力亦緩慢上升，比較 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 的結果，兩程式所預測的值相當接近。

圖 4.11 為 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠大破口冷卻水流失事故氫氣產生量變化。PCTran KuoSheng 模擬顯示，事故開始後 26.3 分鐘 (1,575 秒) 的時候，護套中的鋯金屬與水發生反應，開始產生氫氣。MAAP4.0.4 程式模擬結果顯示，在事故發生 27.5 分鐘 (1,652 秒) 的時候，水蒸汽開始和做為護套材料的鋯合金發生化學反應而產生氫氣與熱，由於剛開始產生的氫氣量極小，因此在圖中無法明顯的顯示出開始點，故以箭頭指示。如圖所示，兩程式所預測氫氣開始產生的時間與氫氣產生量有所不同。

表 4.1 MAAP4.0.4 程式模擬國聖電廠大破口冷卻水流失事故重要時序 (案例一)

時間(sec)	發生之重要事件
0.0	Break in Primary System
2.01	Ractor Scrammed
4.79	Feedwater Pumps Trip, MSIV Closed
167 (2.8 min)	Level Reaches TAF (downcomer)
511 (8.5 min)	Level Reaches TAF (core mixture water)
1,652 (27.5 min)	Hydrogen Generation
7,908 (2.2 hr)	Relocation Of Core Materials To Lower Head
19,939 (5.5 hr)	Vessel Failed By Ejection Of CRD Tubes
140,721 (39.1 hr)	Containment Failure

表 4.2 PCTran KuoSheng 程式模擬國聖電廠大破口冷卻水流失事故重要時序 (案例一)

時間(sec)	發生之重要事件
0.0	Break in Primary System
6.0	Feedwater Pumps Trip, Reactor Scrammed , MSIV Closure
9.5	Turbine Trip
73	Level Reaches TAF (downcomer)
192.5 (3.2 min)	Level Reaches TAF (core mixture water)
1,575 (26.3 min)	Hydrogen Generation
1,885 (31.41 min)	Fuel Temperature Reaches 2500K

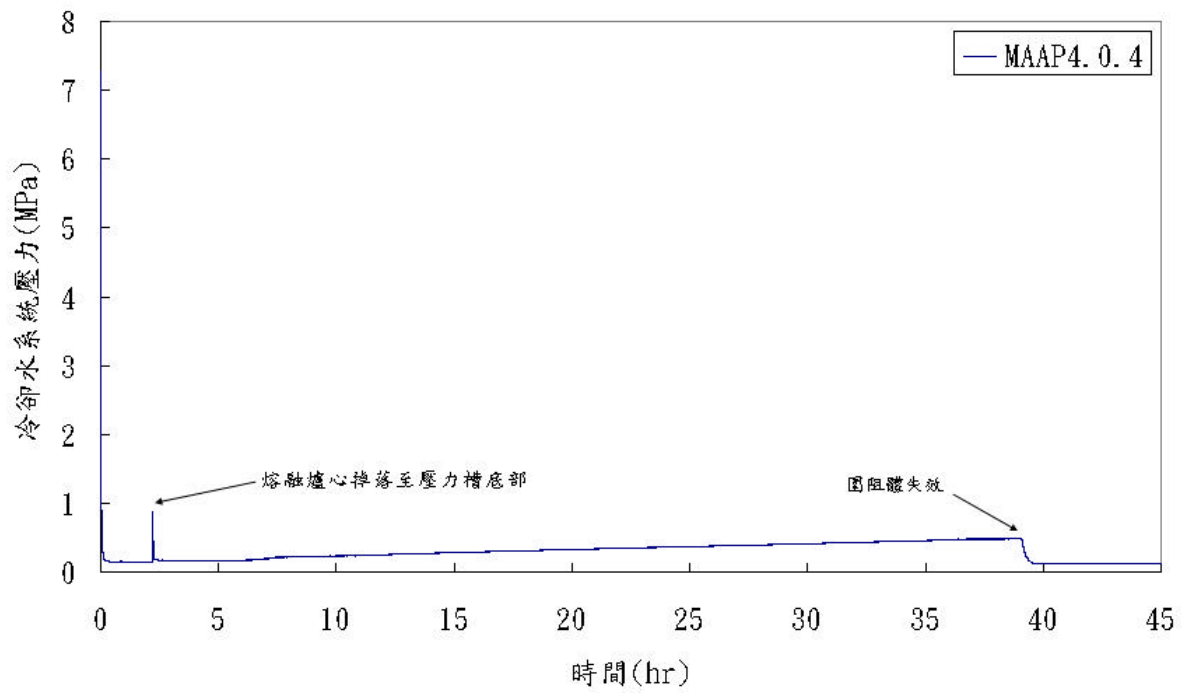


圖 4.1 電廠大破口冷卻水流失事故冷卻水系統壓力(案例一)

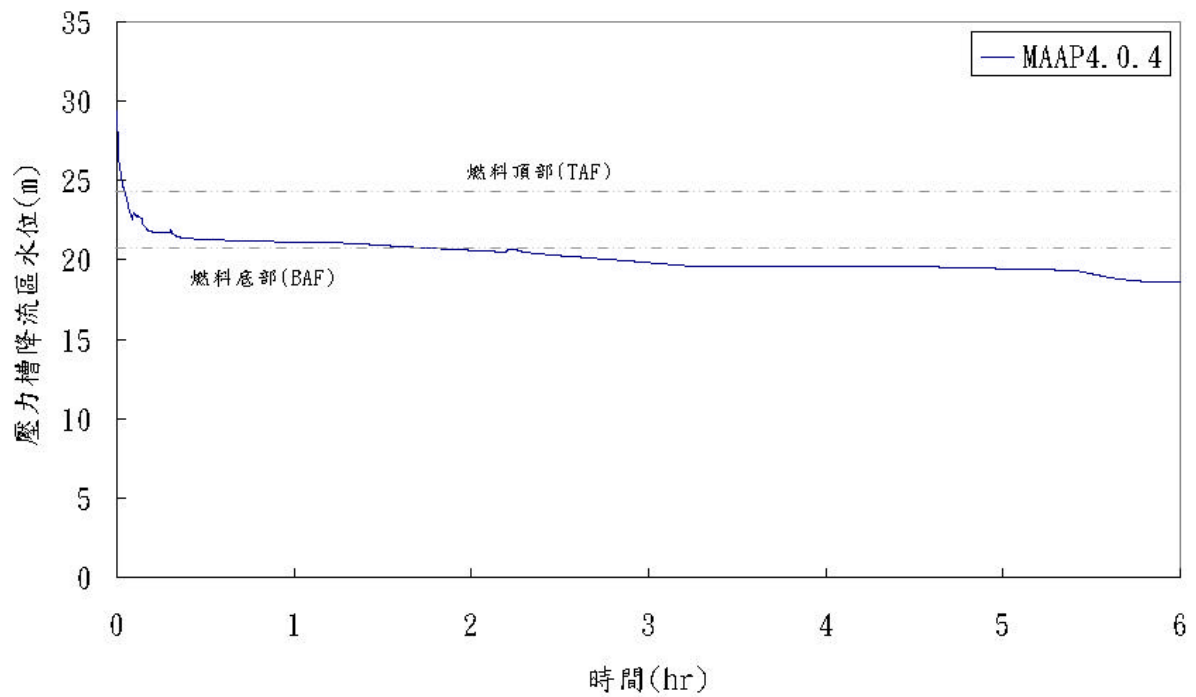


圖 4.2 電廠大破口冷卻水流失事故壓力槽降流區水位(案例一)

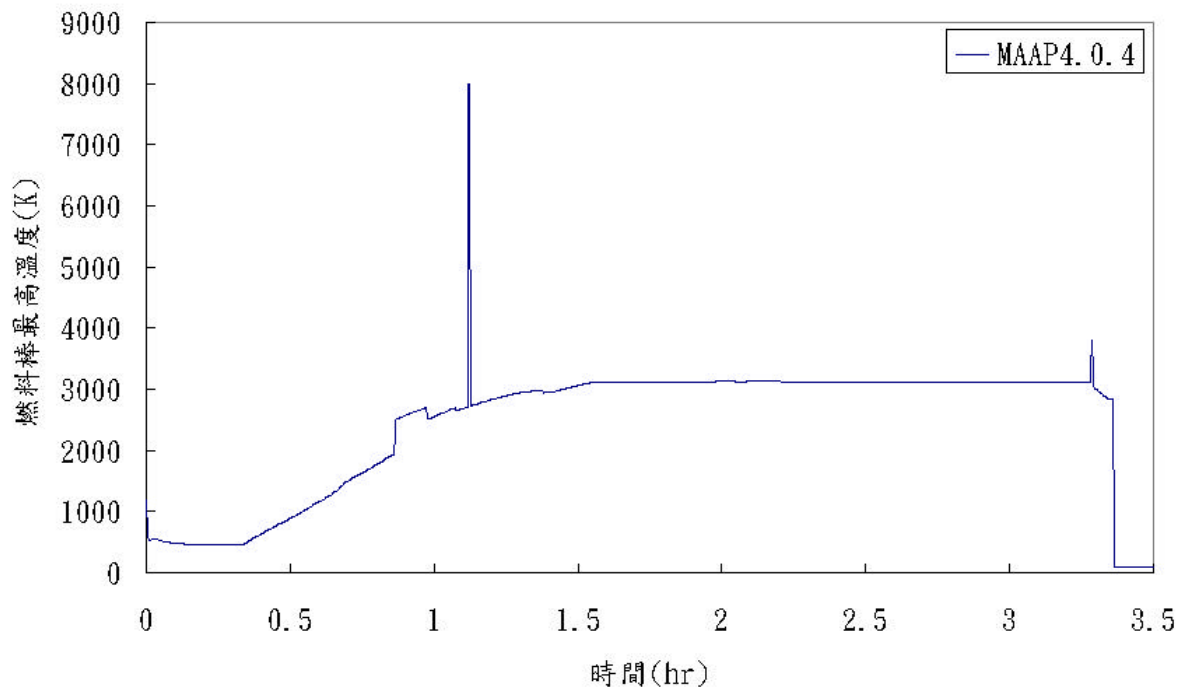


圖 4.3 電廠大破口冷卻水流失事故燃料棒最高溫度(案例一)

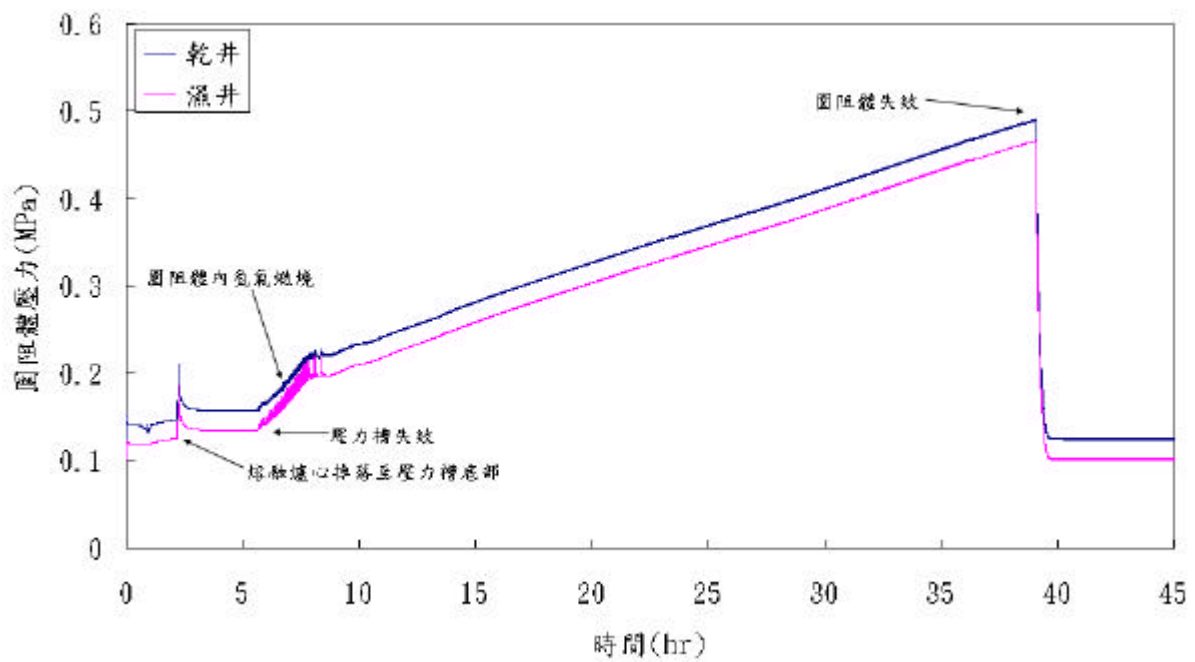


圖 4.4 電廠大破口冷卻水流失事故乾井與濕井壓力(案例一)

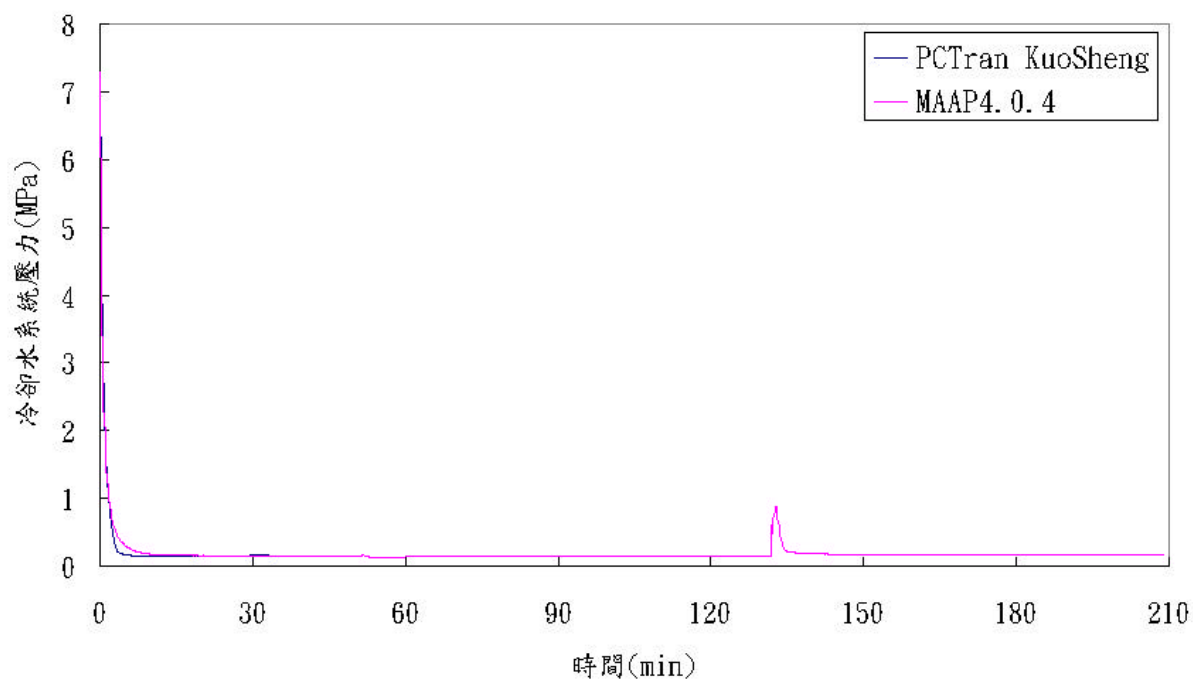


圖 4.5 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠大破口冷卻水流失事故冷卻水系統壓力(案例一)

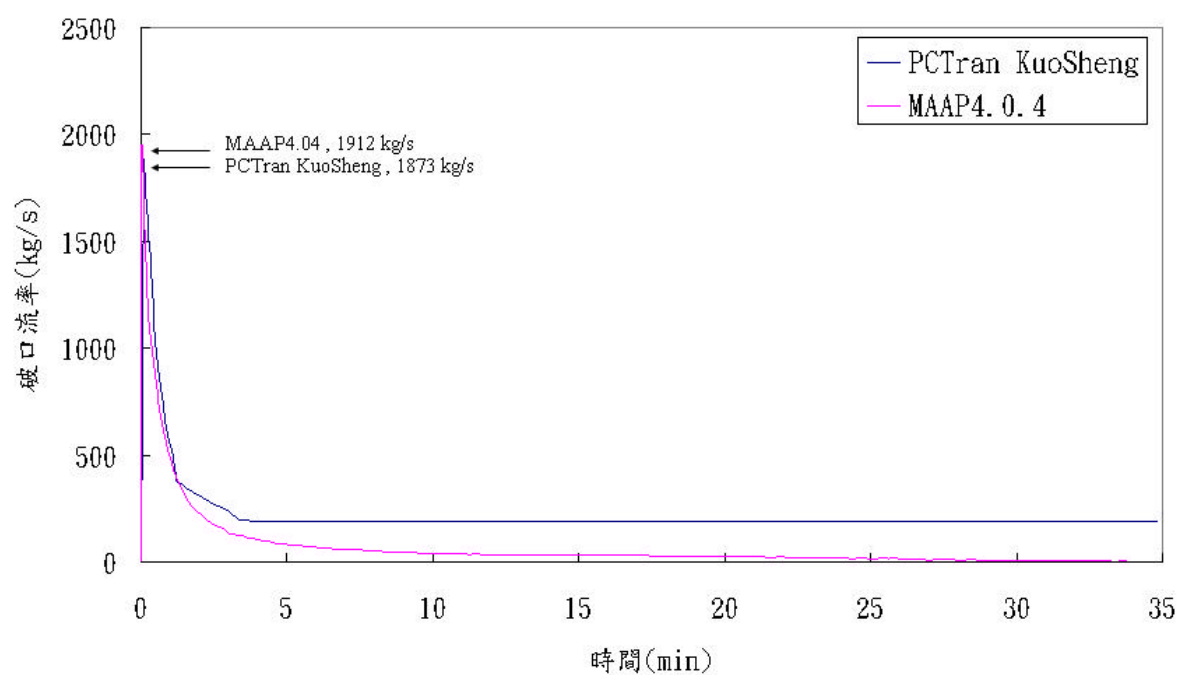


圖 4.6 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠大破口冷卻水流失事故破口流率(案例一)

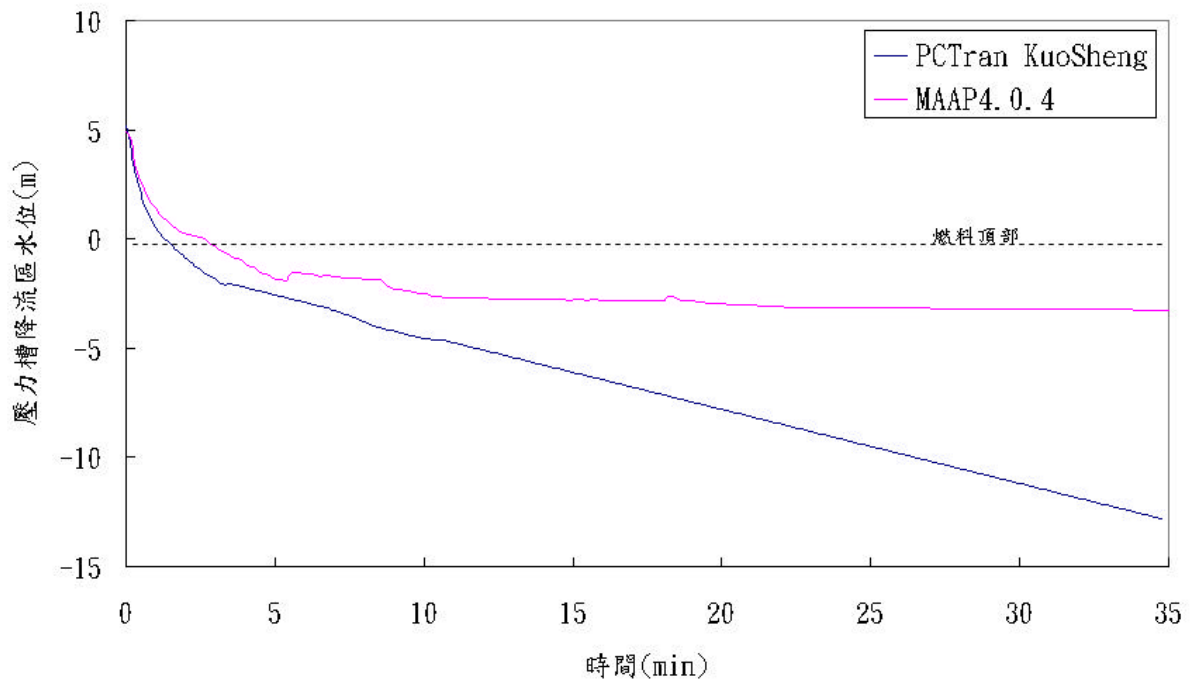


圖 4.7 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠大破口冷卻水流失事故壓力槽降流區水位 (案例一)

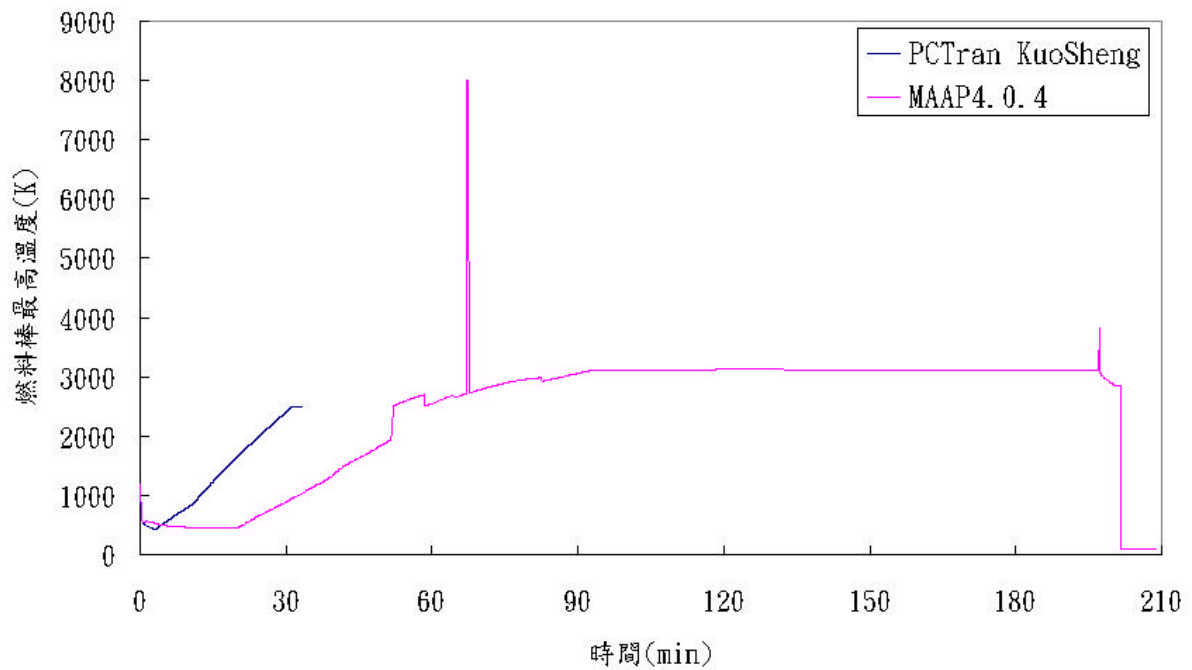


圖 4.8 CTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠大破口冷卻水流失事故燃料棒最高溫度 (案例一)

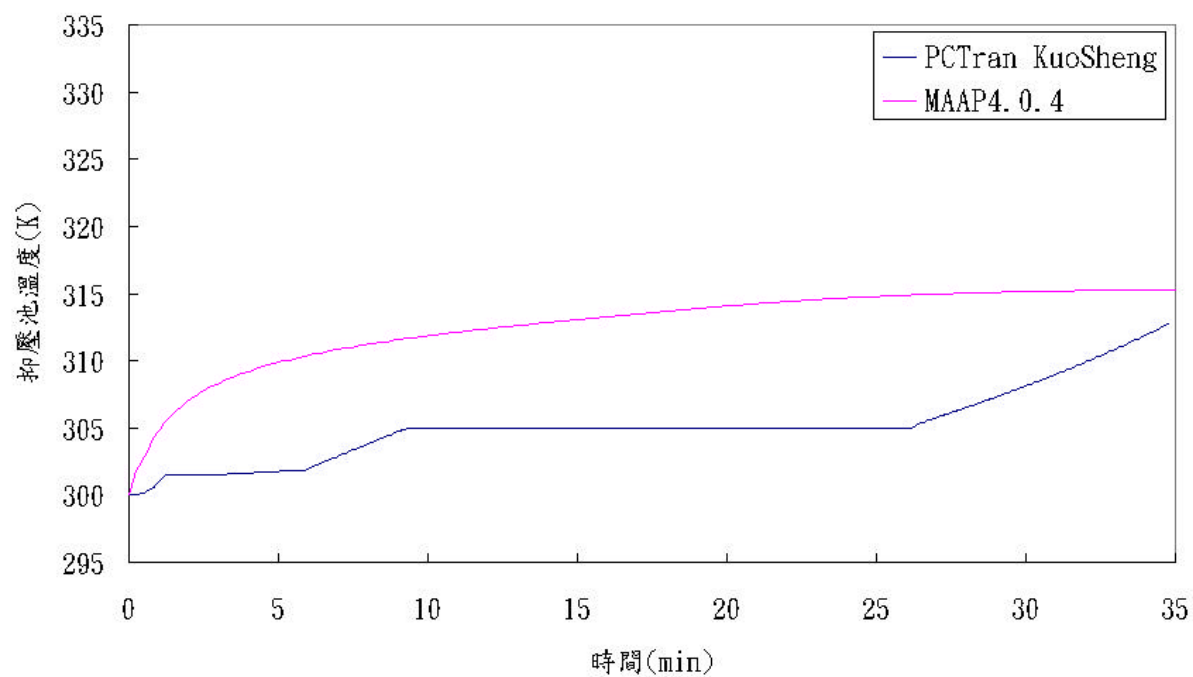


圖 4.9 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠大破口冷卻水流失事故抑壓池溫度(案例一)

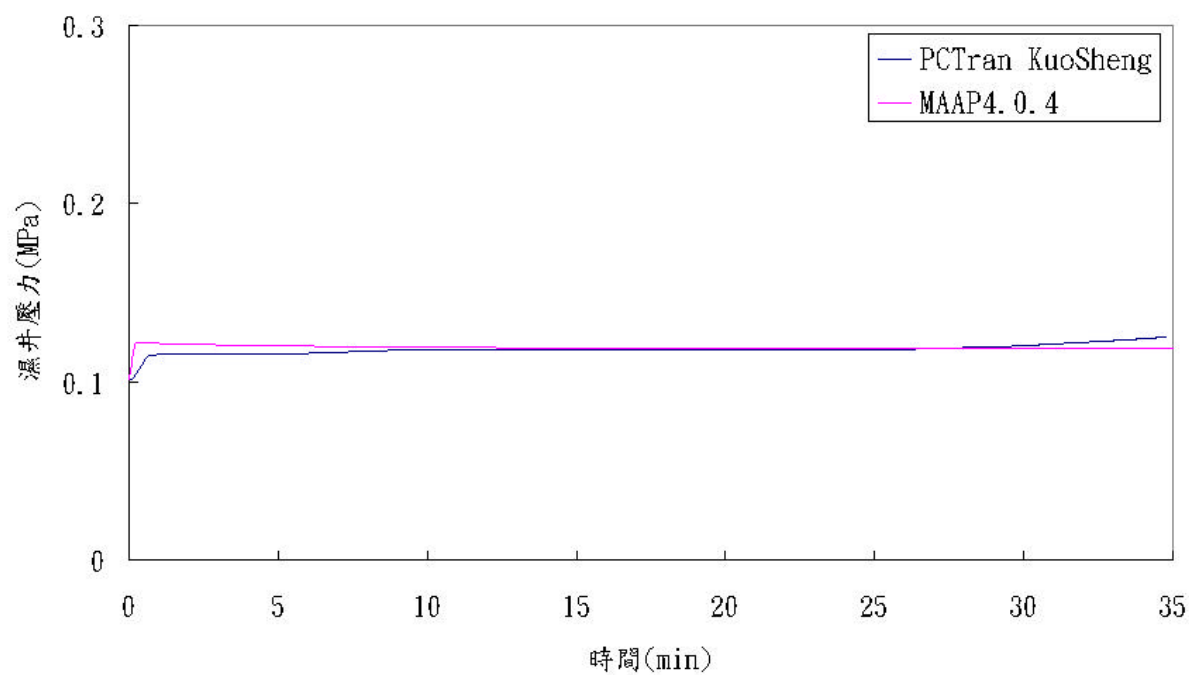


圖 4.10 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠大破口冷卻水流失事故濕井壓力(案例一)

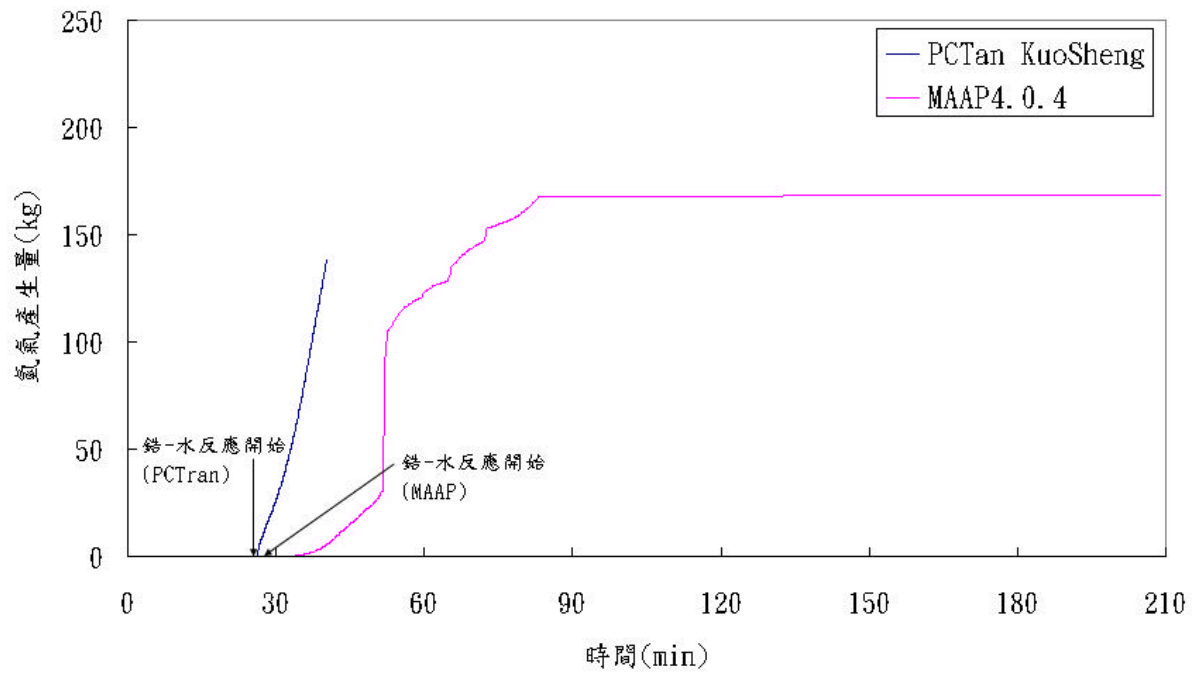


圖 4.11 PCTan KuoSheng與MAAP4.0.4電廠大破口冷卻水流失事故氫氣產生量(案例一)

4.3 大破口冷卻水流失事故模擬（案例二）

4.3.1 背景

本事故的肇因為主蒸汽管破口造成之冷卻水流失事故，發生破口的位置是主蒸汽管，其破口面積為主蒸汽管截面積，在本報告中稱大破口冷卻水流失。本事故與案例一之大破口冷卻水流失事故，最大的差異為低壓爐心灑水系統 Low Pressure Core Spray, LPCS)在案例二中，可以正常運作。事故發生後，冷卻水系統中的水會迅速的汽化成蒸汽，並且從破口流失進入乾井，此時的乾井壓力上升到急停的設定點，引發急停信號，使得主蒸汽隔離閥關閉、飼水泵跳脫以及反應器急停。由於低壓爐心灑水系統的正常運作，因此壓力槽內水位始終維持在一定的高度，但是低壓爐心灑水系統不具有熱交換器，只能將熱自爐心移到圍阻體，因圍阻體的壓力持續的升高，最終圍阻體失效，造成放射性物質的外釋。

4.3.2 國聖電廠大破口冷卻水流失事故 MAAP4.0.4 模擬結果（案例二）

MAAP4.0.4 程式計算所得之重要事故時序詳如表 4.3。程式的初始條件依照程式輸入檔案 (Input File) 內的設定，破口面積為 0.2356 平方公尺，除了低壓爐心灑水系統正常運作外，其他所有高低壓注水系統均失效。主蒸汽隔離閥與飼水水泵的關閉與反應器急停動作，則由程式自行計算，事故發生後 2.01 秒，反應器因乾井壓力過高急停，隨即在 4.79 秒時因為主系統壓力過低造成主蒸汽隔離閥隔離及飼水水泵的跳脫。

爐心的衰變熱不斷的產生，壓力槽降流區的水位持續的下降，故在事故開始後 61.9 秒低壓爐心灑水系統啟動，由於低壓爐心灑水系統的注水使得水位回復至 Level -8，低壓爐心灑水系統即關閉，隨後壓力槽降流區水位在低壓爐心灑水系統的開關下，維持在一定之高度。事故發生後第 20.2 小時 (72,821 秒)因為圍阻體壓力過高，造成圍阻體失效。

圖 4.12 為電廠大破口冷卻水流失事故冷卻水系統壓力變化，模擬結果顯示，大破口事故發生後，系統壓力迅速降低與圍阻體的壓力達到平衡，隨後在 20.2 小時 (72,82 秒)的時候，圍阻體的失效，使得冷卻水系統壓力隨著圍阻體壓力降低。

圖 4.13 為電廠大破口冷卻水流失事故壓力槽降流區水位變化，模擬結果顯示，壓力槽降流區水位因低壓爐心灑水系統的開啟與關閉而有明顯的震盪，如圖所示，震盪的頂點大約在 30.4 公尺，但在 MAAP4.0.4 設定低壓爐心灑水系統的關閉條件是 Level-8 (29.8602 公尺)，造成水位在 Level-8 後持續上升，是因為 MAAP4.0.4 程式中，將冷卻水系統細分為數個控制體積，停止注水後，冷卻水在數個控制體積間的重新分配，使得降流區內的水增加。在圍阻體失效前，由於低壓爐心灑水系統的注水，使得水位並未低於爐心頂部。圖 4.14 為電廠大破口冷卻水流失事故燃料棒最高溫度變化，模擬結果顯示，燃料棒溫度維持在 400K 左右，如圖所示，很多的小尖峰產生，此原因為低壓爐心灑水系統的開啟與關閉造成。

圖 4.15 為電廠中破口冷卻水流失事故乾井與濕井壓力變化，模擬結果顯示，由於破口的位置在主蒸汽管，因此由破口流出的蒸汽進入了乾井，造成圍阻體的壓力上升，隨後在 20.2 小時 (72,82 秒)，因為圍阻體失效，使得壓力驟降。由於濕井裡有抑壓池，會將蒸汽凝結，故濕井的壓力會略低於乾井。

4.3.3 國聖電廠大破口冷卻水流失事故 PCTran KuoSheng 模擬結果 (案例二)

PCTran KuoSheng 程式計算所得之重要事故時序詳如表 4.4。程式的初始條件在 PCTran KuoSheng 程式內建事故 (Malfunction) 中設定為 Steam Line Break Inside Drywell (破口大小為 0.2356 平方公尺)。事故開始除了低壓爐心灑水系統外，其他所有高低壓注水系統均全部失效。主蒸汽隔離閥以及飼水泵關閉及跳脫時間則由程式自行計算，事故發生後第 6 秒主蒸汽隔離閥、飼水泵跳脫以及反應器急停，接著在第 9.5 秒汽機跳脫。

事故開始後，由於爐心的衰變熱不斷的產生，壓力槽降流區的水位持續的下降，在

事故開始後的第 40 秒，低壓爐心灑水系統啟動。由於低壓爐心灑水系統的注水使得水位回復至 Level-8，低壓爐心灑水系統即關閉，隨後壓力槽降流區水位在低壓爐心灑水系統的開關下，維持在一定之高度。本事故的模擬時間為 5 小時，模擬結果顯示，低壓爐心灑水系統的注水造成整個系統的穩定。

4.3.4 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 結果比較分析（案例二）

圖 4.16 為 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠破口冷卻水流失事故冷卻水系統壓力變化。在事故開始後，冷卻水系統壓力隨即快速的降低，直到與圍阻體壓力平衡；在此 PCTran KuoSheng 所預測的值略大於 MAAP4.0.4 的預測。

圖 4.17 為 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠大破口冷卻水流失事故低壓爐心灑水系統流率變化。MAAP4.0.4 模擬顯示，事故發生後 61.9 秒，低壓爐心灑水系統首度啟動，至 15.6 分鐘（936.8 秒）時，壓力槽降流區水位回復至 Level-8，低壓爐心灑水系統關閉，隨後則依照程式所設定之開啟與關閉條件動作。PCTran KuoSheng 模擬顯示，事故發生後 40 秒時，低壓爐心灑水系統首度啟動，至 8.4 分鐘（505 秒）時，壓力槽降流區水位回復至 Level-8，低壓爐心灑水系統關閉，隨後則依照程式所設定之開啟與關閉條件動作。如圖所示，兩程式預測低壓爐心灑水系統之開啟時間與次數都不相同，此原因為程式計算壓力槽內水位的方式不同。

圖 4.18 為 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠大破口冷卻水流失事故破口流率變化。PCTran KuoSheng 模擬顯示，破口蒸汽以每秒 1873 公斤的流率湧出，隨後破口流率則下降至每秒 188.6 公斤左右。MAAP4.0.4 模擬結果顯示，事故一開始，破口蒸汽以每秒 1912 公斤的流率湧出，隨後破口流率則下降，如圖所示，分為破口蒸汽流率與破口冷卻水流率，此原因為 MAAP4.0.4 預測壓力槽降流區水位時，所預測的水位高度值高於破口高度，因此造成冷卻水從破口流出。

圖 4.19 為 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠大破口冷卻水流失事故壓力槽降流區水位變化。PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 在計算水位時的參考點並不一樣，圖 3.8

為兩個程式水位計算的示意圖。為了方便結果的比較，圖 4.19 之壓力槽降流區水位變化圖是以燃料頂部(Top of Active Fuel, TAF)為零點。壓力槽降流區水位在事故發生後，由於低壓爐心灑水系統的開啟與關閉，水位持續的震盪，比較兩程式所預測結果，PCTran KuoSheng 所預測的水位值較 MAAP4.0.4 低的原因為，PCTran KuoSheng 所設定低壓爐心灑水灑水系統開啟的條件為水位高度 Level -1，而 MAAP4.0.4 所設定的條件則多加一個為乾井壓力過高($>0.1135\text{Mpa}$)，如圖所示，MAAP4.0.4 所預測水位的上升，其條件是因為乾井壓力過高引起低壓爐心灑水系統開啟的原因，所以造成兩程式預測水位震盪的振幅不同。

圖 4.20 為 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠大破口冷卻水流失事故燃料棒最高溫度變化。事故開始後，由於反應器的急停使得控制棒插入，因此燃料棒溫度急速的下降，隨後低壓爐心灑水系統的開啟，燃料棒溫度一直維持在 400K 左右；兩程式所預測的燃料棒最高溫度相當接近。

圖 4.21 為 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠大破口冷卻水流失事故抑壓池溫度變化。事故發生後由於蒸汽持續由破口流出，造成抑壓池溫度的明顯上升。PCTran KuoSheng 模擬結果，抑壓池溫度上升到 301.6 K 後就不再改變。比較 PCTan KuoSheng 與 MAAP4.0.4 兩程式預測結果，MAAP4.0.4 所預測抑壓池溫度上升速度大於 PCTran KuoSheng 所預測結果。

圖 4.22 為 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠大破口冷卻水流失事故濕井壓力變化。事故開始後，由於反應器裡面的水蒸汽，經由破口進入圍阻體內，造成濕井內的壓力緩慢上升，並且造成圍阻體內其他區間壓力亦緩慢上升，比較兩程式模擬結果，PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 所預測的值相當接近。

表 4.3 MAAP4.0.4 程式模擬國聖電廠大破口冷卻水流失事故重要時序 (案例二)

時間(sec)	發生之重要事件
0.0	Break in Primary System
2.01	Ractor Scrammed
4.79	Feedwater Pumps Trip, MSIV Closed
61.9	LPCS Auto Starts (first)
936.8 (15.6 min)	LPCS Off At Level 8 (first)
72,821 (20.2 hr)	Containment Failure

表 4.4 PCTran KuoSheng 程式模擬國聖電廠大破口冷卻水流失事故重要時序 (案例二)

時間(sec)	發生之重要事件
0.0	Break in Primary System
6	Feedwater Pumps Trip, Reactor Scrammed , MSIV Closure
9.5	Turbine Trip
40	LPCS Auto Starts (first)
505 (8.4 min)	LPCS Off At Level 8 (first)

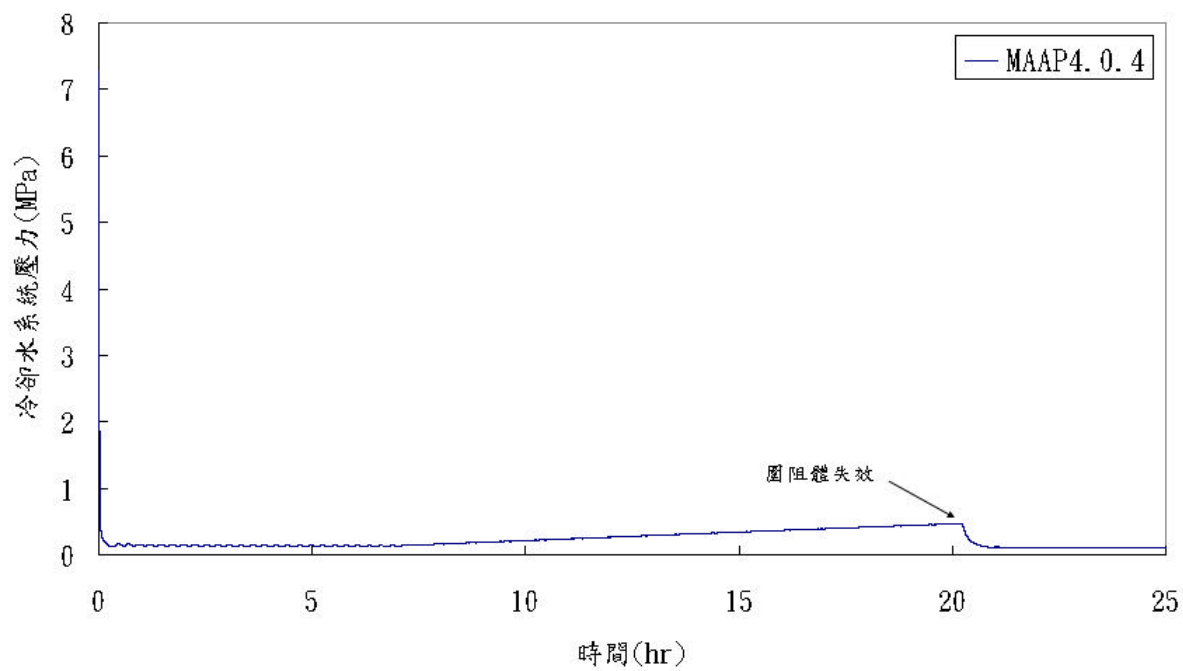


圖 4.12 電廠大破口冷卻水流失事故冷卻水系統壓力(案例二)

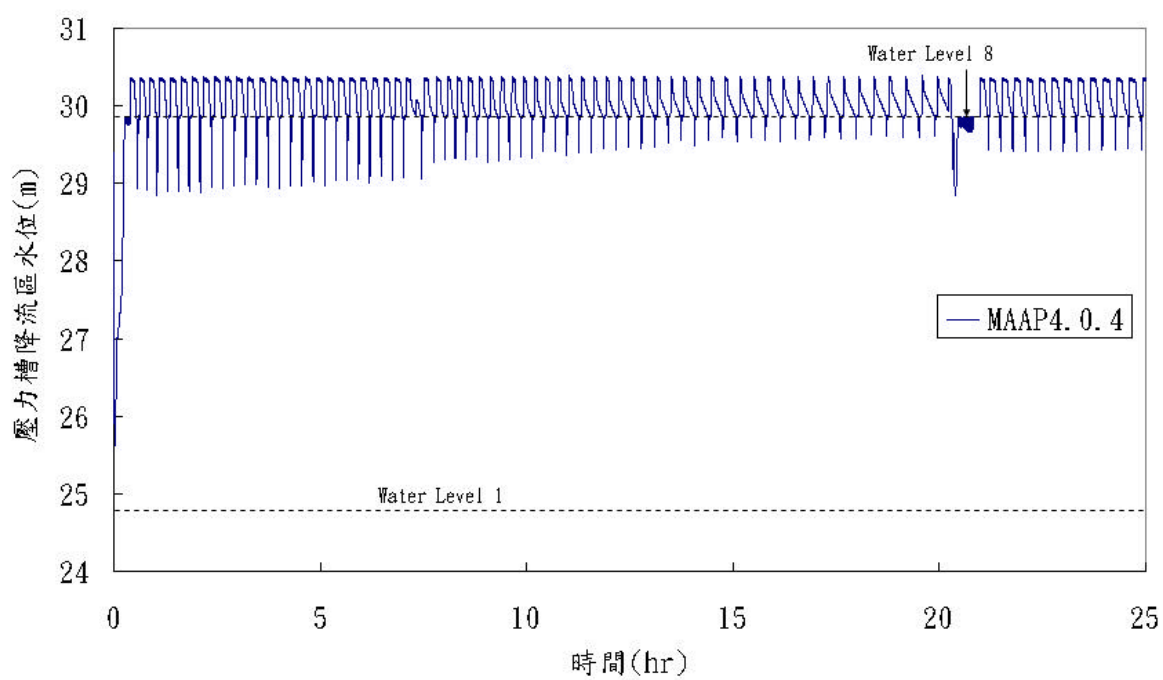


圖 4.13 電廠大破口冷卻水流失事故壓力槽降流區水位(案例二)

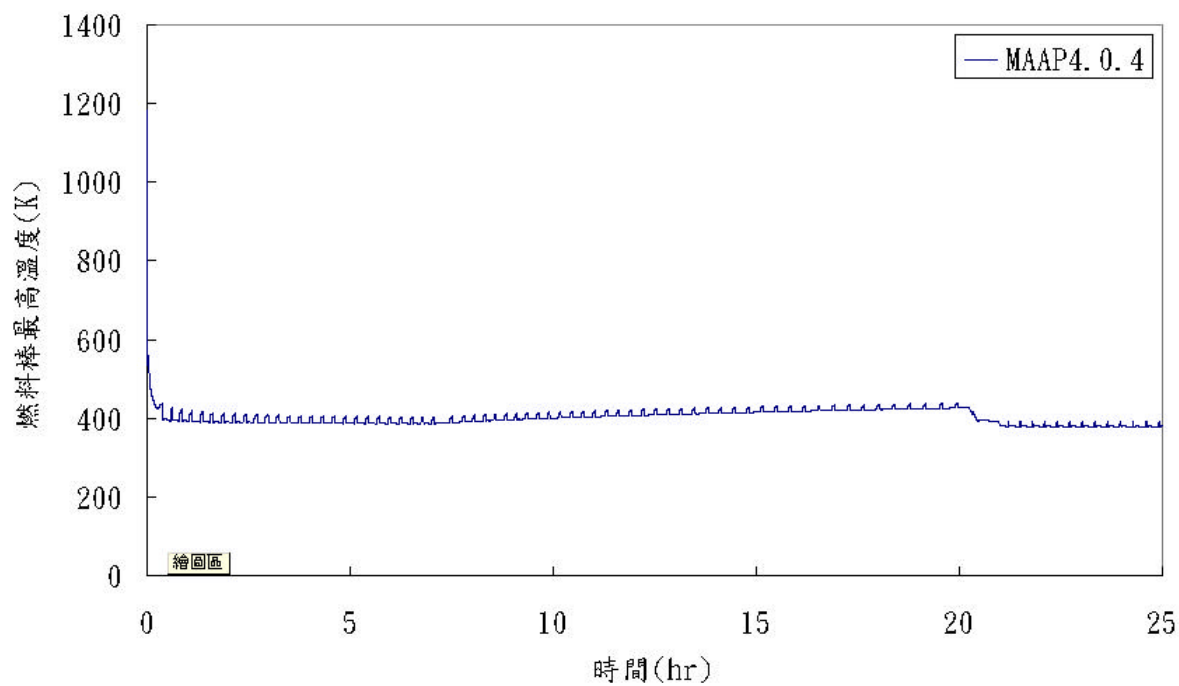


圖 4.14 電廠大破口冷卻水流失事故燃料棒最高溫度(案例二)

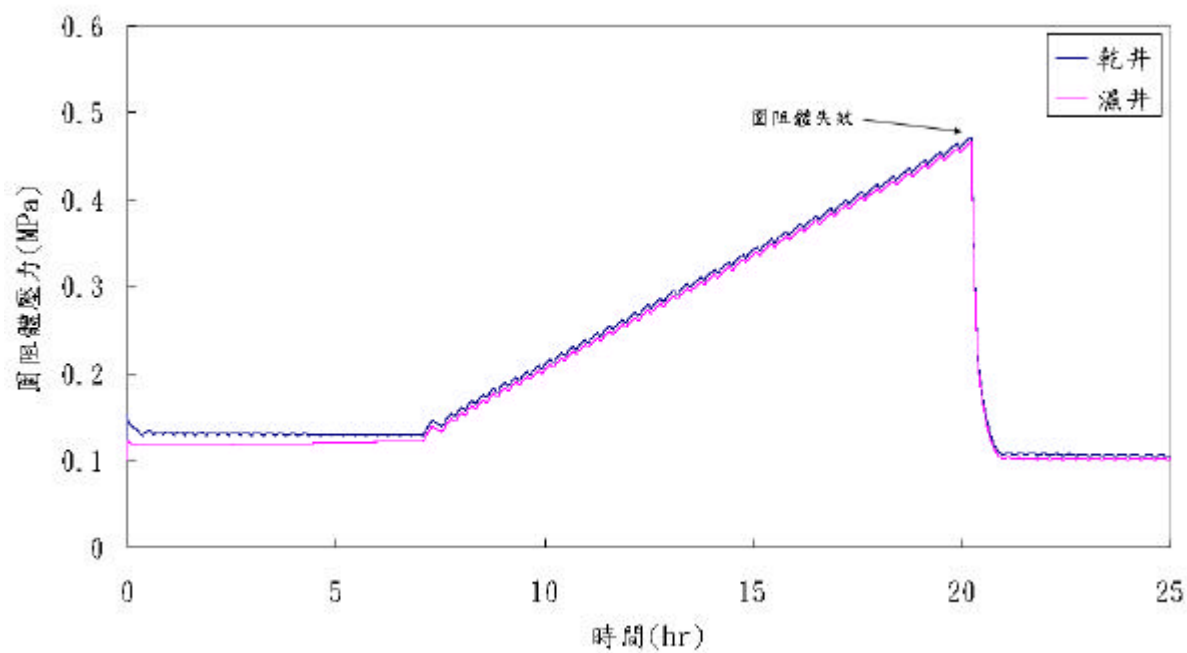


圖 4.15 電廠大破口冷卻水流失事故乾井與濕井壓力(案例二)

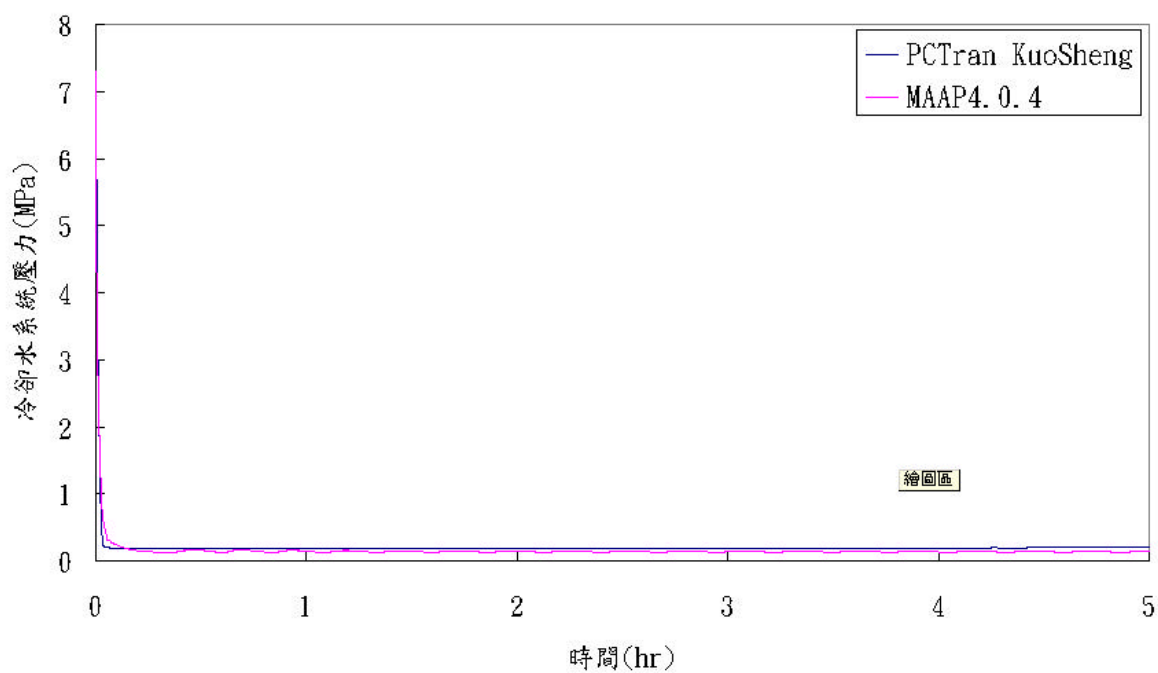


圖 4.16 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠大破口冷卻水流失事故冷卻水系統壓力(案例二)

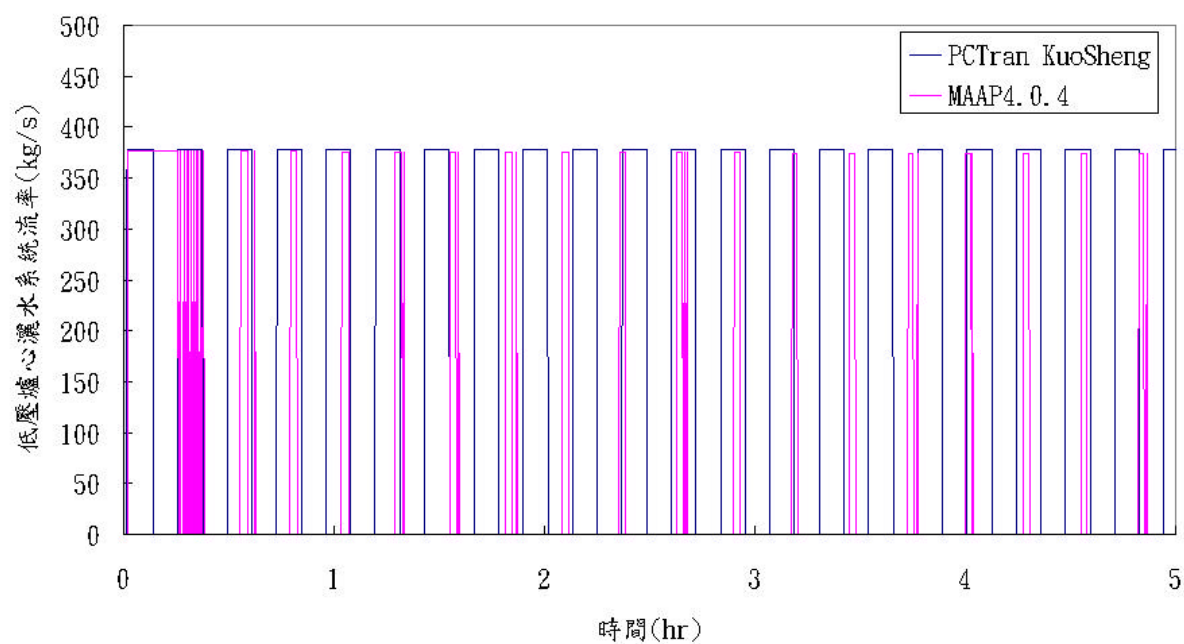


圖 4.17 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠大破口冷卻水流失事故低壓爐心灑水系統流率(案例二)

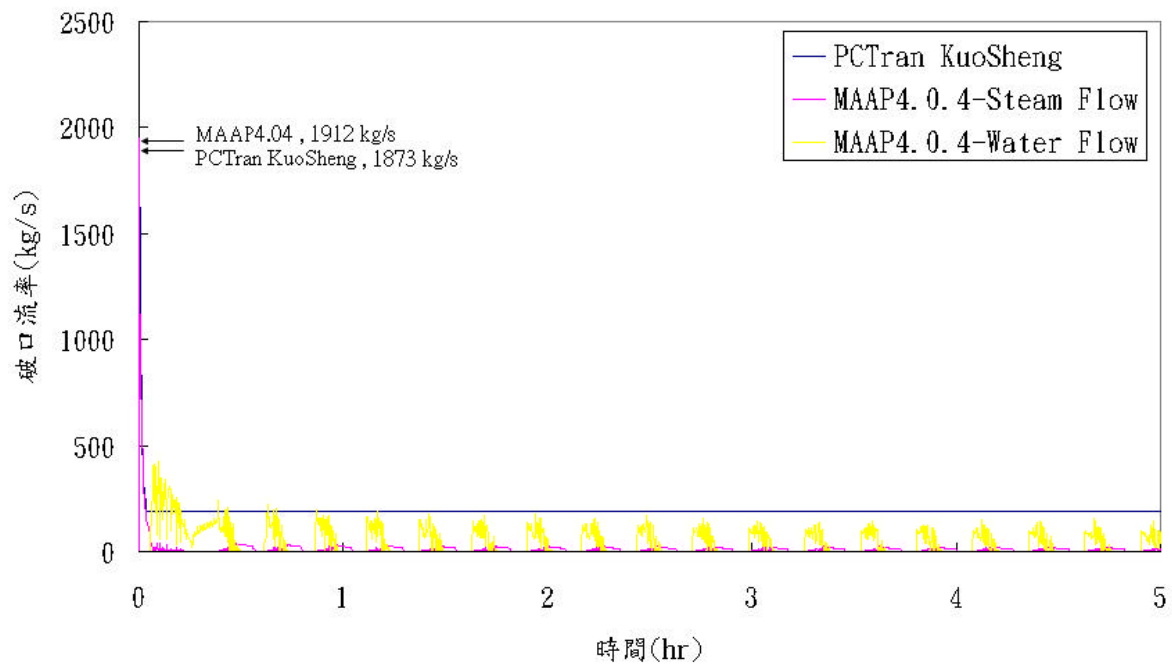


圖 4.18 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠大破口冷卻水流失事故破口流率(案例二)

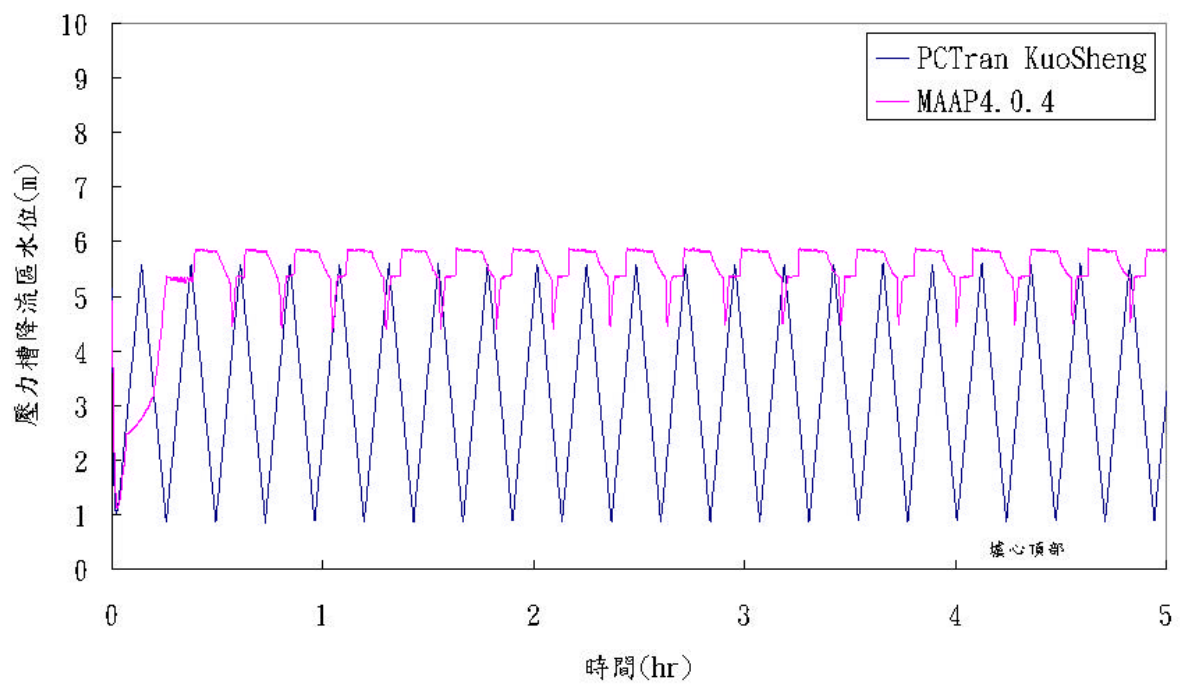


圖 4.19 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠大破口冷卻水流失事故壓力槽降流區水位 (案例二)

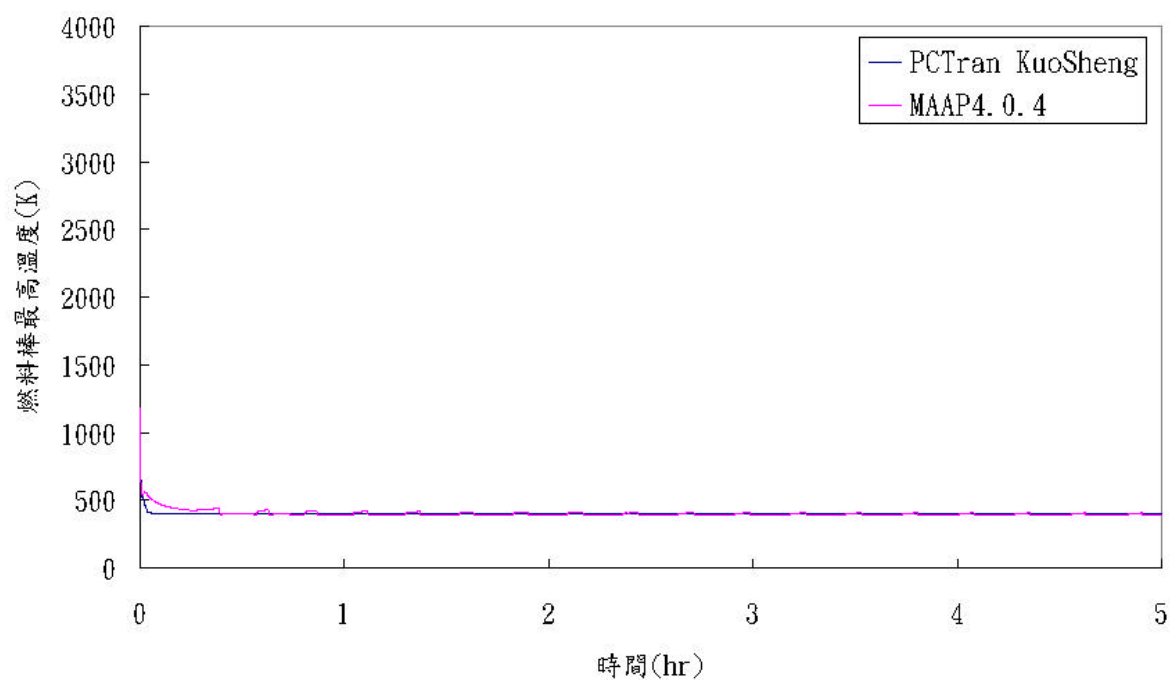


圖 4.20 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠大破口冷卻水流失事故燃料棒最高溫度(案例二)

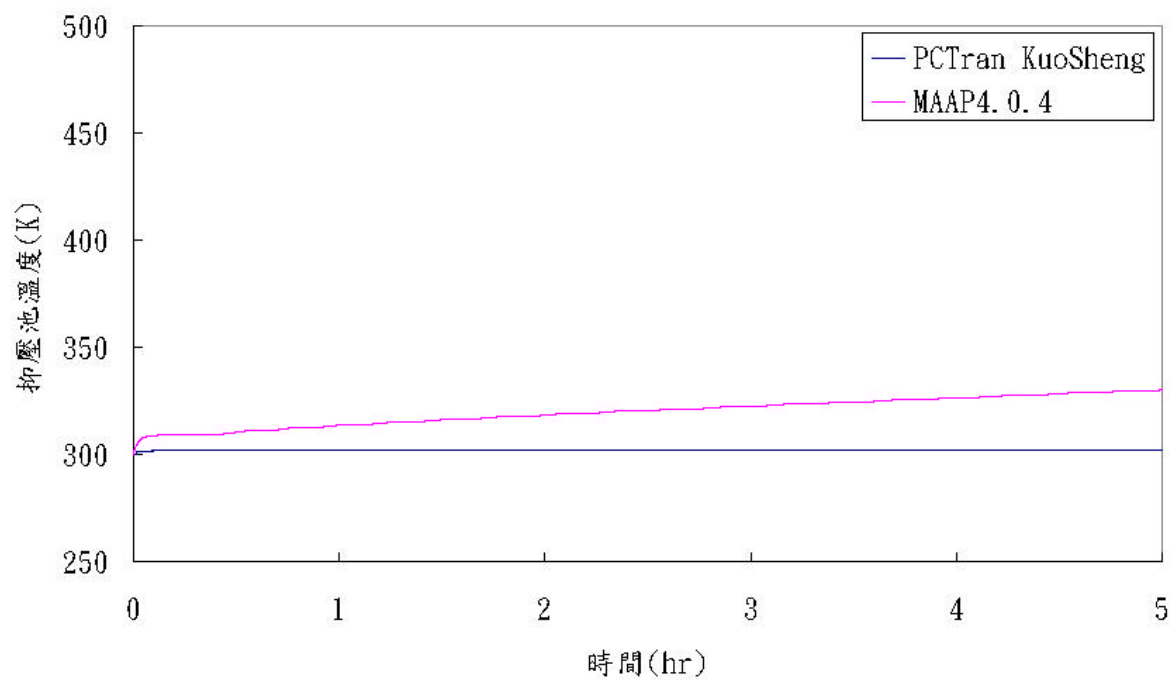


圖 4.21 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠大破口冷卻水流失事故抑壓池溫度(案例二)

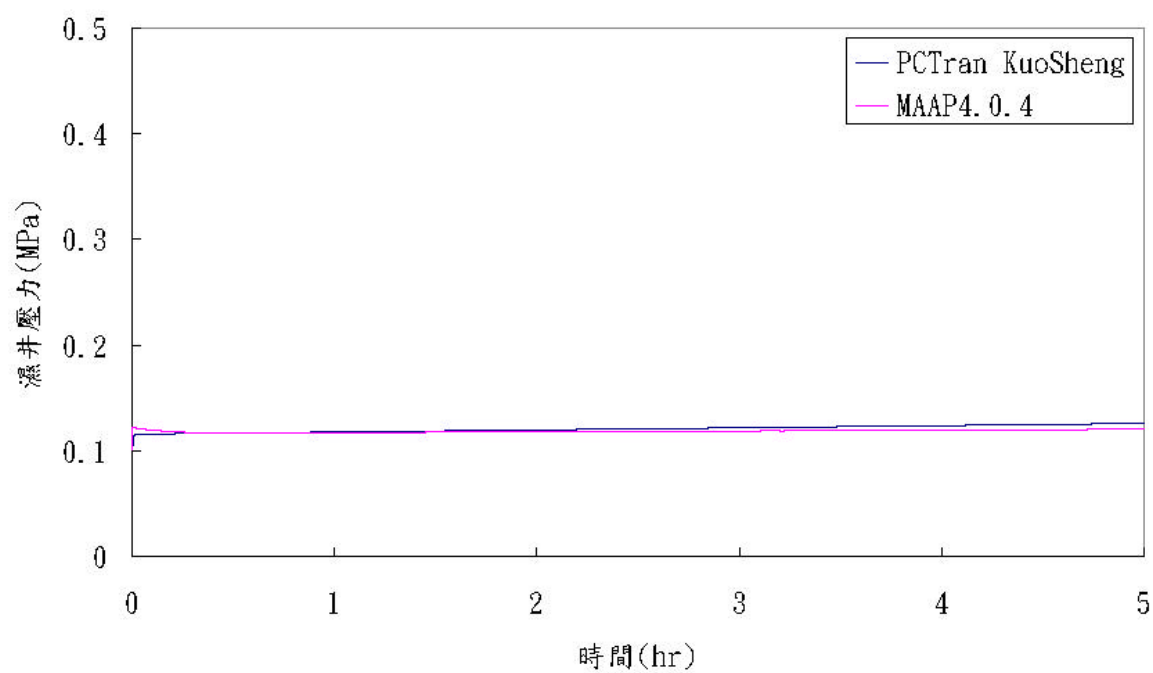


圖 4.22 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠大破口冷卻水流失事故濕井壓力(案例二)

4.4 中破口冷卻水流失事故模擬（案例一）

4.4.1 背景

本事故的肇因為主蒸汽管破口造成之冷卻水流失事故，發生破口的位置是主蒸汽管，其破口面積為 1/10 的主蒸汽管截面積，在本報告中稱中破口冷卻水流失。事故發生後，冷卻水系統中的水會迅速的汽化成蒸汽，並且從破口流失進入乾井，此時的乾井壓力上升到急停的設定點，引發急停信號，使得主蒸汽隔離閥關閉、飼水泵跳脫以及反應器急停。由於事故的模擬中假設所有的爐心注水系統皆無法啟動，因此無任何的緊急冷卻水系統進入反應器壓力槽內，爐心的衰變熱不斷的產生，使冷卻水不斷的汽化，造成爐心的水位逐漸的降低，又因無冷卻水的補充，不久後爐心開始裸露，逐漸的熔毀向下流動落入壓力槽底部，並且將該處的積水蒸乾，並且使該處反應器槽壁溫度逐漸升高，最後熔融爐心所產生的衰變熱將壓力槽底部熔穿，熔融爐心落入爐穴，與混凝土發生熔融爐心混凝土作用(Molten Core Concrete Interaction, MCCI)。在熔融爐心混凝土作用中所產生的氣體，使得圍阻體內的壓力不斷的升高，最終圍阻體失效，造成放射性物質的外釋。

4.4.2 國聖電廠中破口冷卻水流失事故 MAAP4.0.4 模擬結果（案例一）

MAAP4.0.4 程式計算所得之重要事故時序詳如表 4.5。程式的初始條件依照程式輸入檔案 (Input File) 內的設定，破口面積為 0.02356 平方公尺，事故中假設爐心隔離冷卻系統，以及所有高低壓注水系統均失效。主蒸汽隔離閥與飼水水泵的關閉與反應器急停動作，則由程式自行計算，事故發生後 3.58 秒，反應器因乾井壓力過高急停，隨即在 15.9 秒時因為主系統壓力過低造成主蒸汽隔離閥隔離及飼水水泵的跳脫。

爐心的衰變熱不斷的產生，壓力槽降流區的水位持續的下降，在事故開始後的第 13.7 分鐘 (823 秒)，壓力槽內降流區水位降至爐心頂部高度，但爐心內之雙相水位直

到 36.2 分鐘(2,173 秒)時，才低於燃料頂端的高度。由於水蒸汽的熱傳效果遠低於水，因此裸露於水面上的燃料棒所產生的熱將難以被移除，因此燃料棒的溫度持續的升高，燃料開始熔毀。熔融爐心在第 2.7 小時 (9,690 秒)時開始向下流至反應器壓力槽底部區間。5.8 小時 (20,706 秒)壓力槽底部溫度過高，將反應器壓力槽融穿，熔融爐心落入爐穴當中與圍阻體混凝土基座發生 MCCI 作用，產生大量可燃性氣體，造成圍阻體在事故發生後第 39.5 小時 (142,305 秒)失效，大量的放射性物質外釋到外界環境。

圖 4.23 為電廠中破口冷卻水流失事故冷卻水系統壓力變化，模擬結果顯示，由於融熔爐心在 2.7 小時 (9,690 秒)的時候，開始下滑掉落至壓力槽底部，被該處的積水淬熄，產生大量蒸汽，造成冷卻水系統壓力快速上升，形成圖示中尖峰，事故後第 5.8 小時 (20,706 秒)，因為壓力槽內溫度過高，造成壓力槽破裂，隨後在 39.5 小時 (142,305 秒)的時候，圍阻體的失效，使得冷卻水系統壓力隨著圍阻體壓力降低。

圖 4.24 為電廠中破口冷卻水流失事故壓力槽降流區水位變化，模擬結果顯示，由於爐心的衰變熱不斷產生，使冷卻水不斷的汽化，所有的爐心注水系統均無法執行其功能，造成壓力槽降流區的水位逐漸降低，在 13.7 分鐘(823 秒)時，降流區水位低於燃料頂端的高度，直到 8.2 小時 (29,412 秒)水位降至降流區底部。圖 4.25 為電廠中破口冷卻水流失事故燃料棒最高溫度變化，模擬結果顯示，由於事故發生後 13.7 分鐘 (823 秒) 壓力槽降流區水位達到爐心頂部，隨後不久，當爐心雙相水位低於燃料頂部高度時，燃料溫度上升。在 2.7 小時 (9,690 秒)，熔融爐心開始掉落至壓力槽底部，接著在 5.8 小時 (20,706 秒)的時候，由於壓力槽失效，熔融爐心掉落離開壓力槽。

圖 4.26 為電廠中破口冷卻水流失事故乾井與濕井壓力變化，模擬結果顯示，由於破口的位置在主蒸汽管，因此由破口流出的蒸汽進入了乾井，造成圍阻體的壓力上升，在 2.7 小時 (9,690 秒)的時候，熔融爐心開始掉落至壓力槽底部，造成圍阻體壓力上升的小尖峰。壓力槽在 5.8 小時 (20,706 秒)失效，大量的熔融爐心自壓力槽底部向外流出，造成圍阻體壓力急劇上升，隨後在 39.5 小時 (142,305 秒)，因為圍阻體失效，使得壓力驟降。由於濕井裡有抑壓池，會將蒸汽凝結，故濕井的壓力會略低於乾井。如圖所示，在壓力槽失效後，圍阻體壓力會產生小尖峰，此原因是因為圍阻體內氫氣燃燒

所造成的。

4.4.3 國聖電廠中破口冷卻水流失事故 PCTran KuoSheng 模擬結果 (案例一)

PCTran KuoSheng 程式計算所得之重要事故時序詳如表 4.6。程式的初始條件在 PCTran KuoSheng 程式內建事故 (Malfunction) 中設定為 Steam Line Break Inside Drywell (破口大小為 0.02356 平方公尺)。事故開始包含爐心隔離冷卻系統以及所有高低壓注水系統均全部失效。主蒸汽隔離閥以及飼水泵關閉及跳脫時間則由程式自行計算，事故發生後第 44 秒主蒸汽隔離閥、飼水泵跳脫以及反應器急停，接著在第 47 秒汽機跳脫。

事故開始第 50.5 秒時，壓力槽降流區水位下降至 374.6 公分處(低於 Level 3)，第 58.5 秒時，水位降至 350.1 公分處(低於 Level 2)，第 5.5 分鐘 (329.5 秒)時，水位降低至 85.9 公分(低於 Level 1)。由於爐心的衰變熱不斷的產生，壓力槽降流區的水位持續的下降，在事故開始後的第 7.6 分鐘 (458.5 秒)，壓力槽降流區水位達到爐心頂部，但爐心內之雙相水位直到 11.3 分鐘 (680.5 秒)時，才低於燃料頂端的高度。由於 PCTran KuoSheng 程式並沒有模擬爐心的熔損，故當燃料護套達 2,500K 時，溫度隨即便維持不變。由於程式模擬能力的限制，本研究之 PCTran KuoSheng 分析在燃料溫度達到 2,500K 時即停止。

4.4.4 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 結果比較分析 (案例一)

圖 4.27 為 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠中破口冷卻水流失事故冷卻水系統壓力變化。PCTran KuoSheng 模擬顯示，事故開始後第 45 秒時，冷卻水系統壓力突然的上升產生一個尖峰，這是由於主蒸汽隔離閥關閉，造成部分蒸汽的累積而使冷卻水系統壓力上升，隨後冷卻水系統壓力則迅速的降低，直到與圍阻體壓力平衡。在 MAAP4.0.4 模擬顯示，冷卻水系統壓力在事故發生後迅速的降低，並未有壓力的尖峰產生，兩程式

在此有明顯的差異。

圖 4.28 為 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠中破口冷卻水流失事故破口流率變化。PCTran KuoSheng 模擬顯示，破口蒸汽以每秒 205 公斤的流率湧出，在 45 秒時因為冷卻水系統壓力突然的上升，造成破口流量驟升至每秒 723 公斤，隨後破口流率則小幅緩慢的下降，在 37.2 分鐘時，破口流率降至零點。MAAP4.0.4 模擬結果顯示，事故一開始，破口蒸汽以每秒 191 公斤的流率湧出，由於冷卻水系統壓力沒有升高，因此破口流率沒有驟升的情況產生，事故發生後破口流量逐漸緩慢降低，但並未降低至零點。由於破口事故發生在主蒸汽管路，破口流出的全都是蒸汽。

圖 4.29 為 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠中破口冷卻水流失事故安全釋壓閥流率變化。PCTran KuoSheng 模擬顯示，由於主蒸汽隔離閥在事故後 44 秒關閉，部分蒸汽累積造成冷卻水系統壓力的上升，所預測之壓力最大值為 7.8MPa，造成 9 個安全釋壓閥的開啟，總流量為 255 公斤/秒；在 MAAP4.0.4 模擬顯示安全釋壓閥沒有開啟。

圖 4.30 為 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠中破口冷卻水流失事故壓力槽降流區水位變化。PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 在計算水位時的參考點並不一樣，圖 3.8 為兩個程式水位計算的示意圖。為了方便結果的比較，圖 4.30 所示之壓力槽降流區水位變化圖是以燃料頂部(Top of Active Fuel, TAF)為零點。PCTran KuoSheng 模擬顯示，由於在 45 秒時安全釋壓閥的開啟，大量蒸汽從壓力槽流失，因此水位突然的下降，壓力槽降流區水位在事故發生後 7.6 分鐘 (458.5 秒)降到爐心燃料頂部高度。如圖所示，較 MAAP4.0.4 程式所預測之時間早了 6.1 分鐘。此項差異是因為 PCTran KuoSheng 所預測安全釋壓閥開啟，造成水位下降迅速，而 MAAP4.0.4 預測結果，安全釋壓閥並沒有開啟。

圖 4.31 為 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠中破口冷卻水流失事故燃料棒最高溫度變化。事故開始後，由於反應器的急停使得控制棒插入，因此燃料棒溫度急速的下降，PCTran KuoSheng 模擬顯示，壓力槽降流區水位達爐心頂部後，隨後不久燃料棒溫度開始上升；37.7 分鐘 (2,260 秒)時燃料棒溫度達 2,500K，此時溫度即不再變化。比較 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 的結果，由於兩程式在計算爐心裸露的時間不同，因

此在燃料棒溫度上升的時間也不同。

圖 4.32 為 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠中破口冷卻水流失事故抑壓池溫度變化。PCTran KuoSheng 模擬顯示，事故發生後 45 秒由於安全釋壓閥的開啟，使的大量的蒸汽經由此進入抑壓池，造成抑壓池的溫度突然的升高，隨後由於蒸汽持續由破口流出，造成抑壓池溫度的明顯上升。比較 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 的結果，兩程式所預測的值相當接近。

圖 4.33 為 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠中破口冷卻水流失事故濕井壓力變化。事故開始後，由於反應器裡面的水蒸汽，經由破口進入圍阻體內，造成濕井內的壓力緩慢上升，並且造成圍阻體內其他區間壓力亦緩慢上升，比較 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 的結果，兩程式所預測的值相當接近。

圖 4.34 為 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠中破口冷卻水流失事故氫氣產生量變化。PCTran KuoSheng 模擬顯示，事故開始後 31.4 分鐘 (1,885 秒)的時候，護套中的鋯金屬與水發生反應，開始產生氫氣；MAAP4.04 程式模擬結果顯示，在事故發生 46.6 分鐘 (2,795 秒)的時候，水蒸汽開始和做為護套材料的鋯合金發生化學反應而產生氫氣與熱，由於剛開始產生的氫氣量極小，因此在圖中無法明顯的顯示出開始點，故以箭頭指示。如圖所示，兩程式所預測氫氣開始產生的時間與氫氣產生量有所不同。

表 4.5 MAAP4.0.4 程式模擬國聖電廠中破口冷卻水流失事故重要時序（案例一）

時間(sec)	發生之重要事件
0.0	Break in Primary System
3.58	Ractor Scrammed
15.85	Feedwater Pumps Trip, MSIV Closed
823 (13.7 min)	Level Reaches TAF (downcomer)
2,173 (36.2 min)	Level Reaches TAF (core mixture water)
2,795 (46.6 min)	Hydrogen Generation
9,690 (2.7 hr)	Relocation Of Core Materials To Lower Head
20,706 (5.8 hr)	Vessel Failed By Ejection Of CRD Tubes
142,305 (39.5 hr)	Containment Failure

表 4.6 PCTran KuoSheng 程式模擬國聖電廠中破口冷卻水流失事故重要時序（案例一）

時間(sec)	發生之重要事件
0.0	Break in Primary System
44.0	Feedwater Pumps Trip, Reactor Scrammed , MSIV Closure
47.0	Turbine Trip
458.5 (7.6 min)	Level Reaches TAF (downcomer)
680.5 (11.3 min)	Level Reaches TAF (core mixture water)
1,884 (31.4 min)	Hydrogen Generation
2,260 (37.67 min)	Fuel Temperature Reaches 2500K

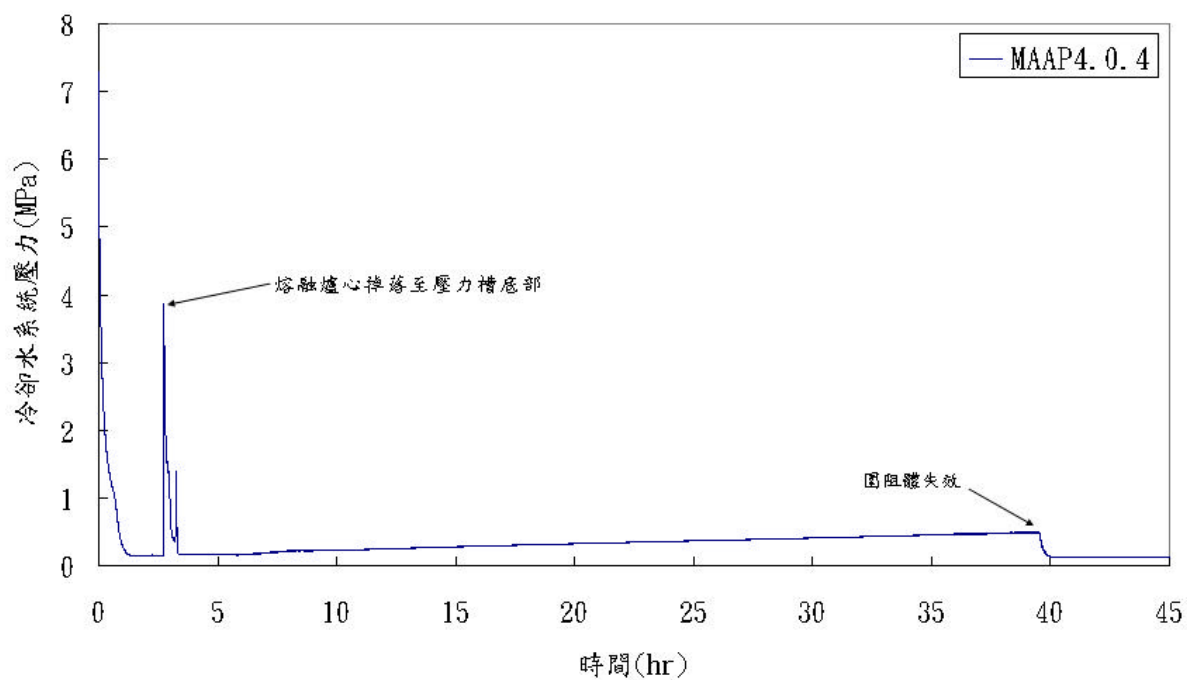


圖 4.23 電廠中破口冷卻水流失事故冷卻水系統壓力(案例一)

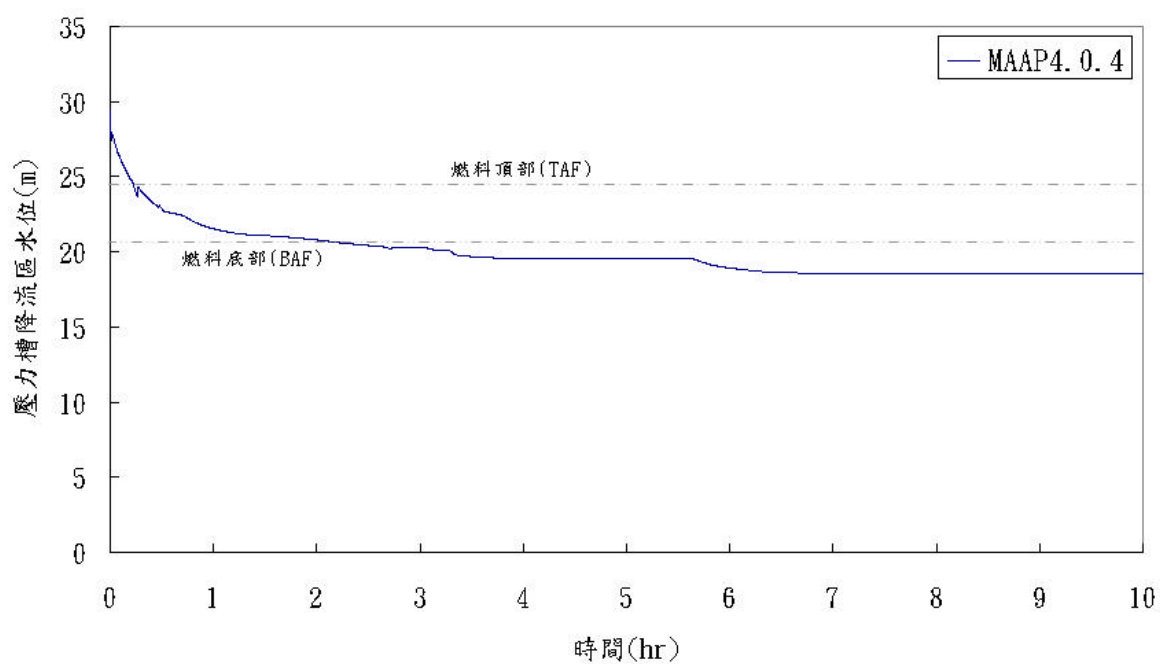


圖 4.24 電廠中破口冷卻水流失事故壓力槽降流區水位(案例一)

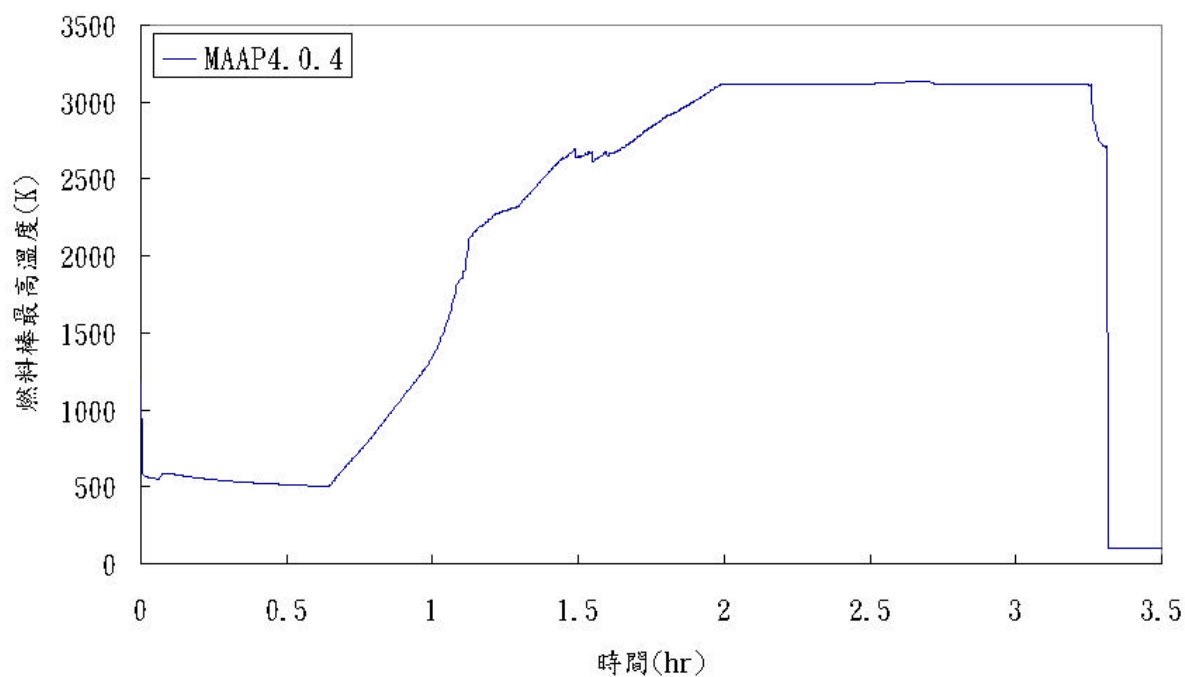


圖 4.25 電廠中破口冷卻水流失事故燃料棒最高溫度(案例一)

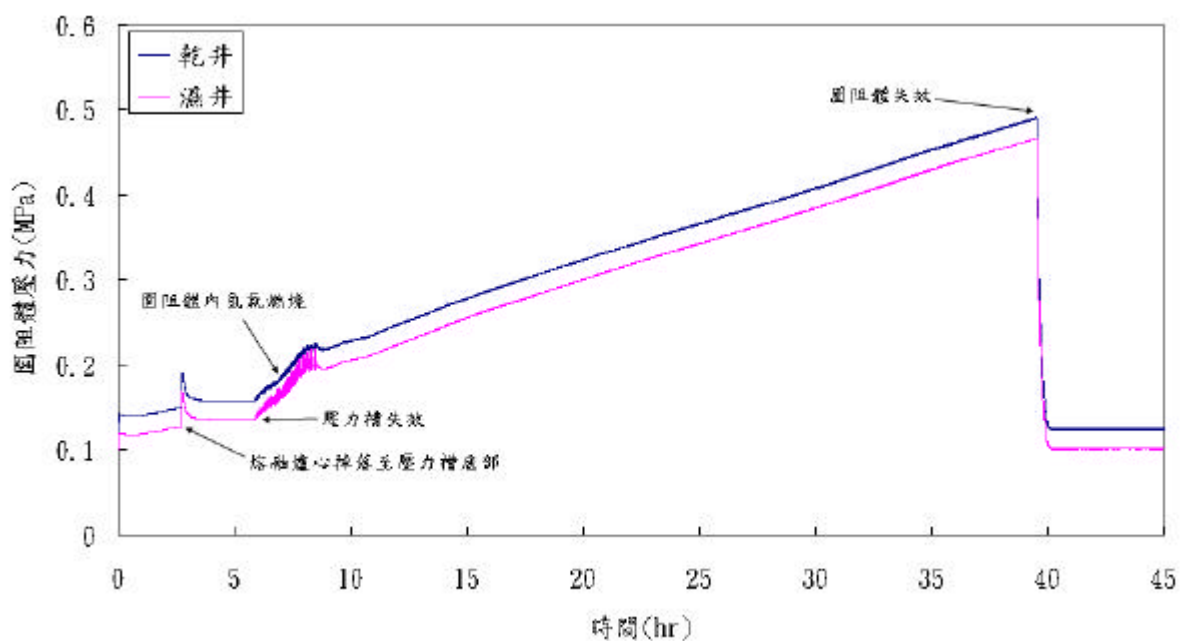


圖 4.26 電廠中破口冷卻水流失事故乾井與濕井壓力(案例一)

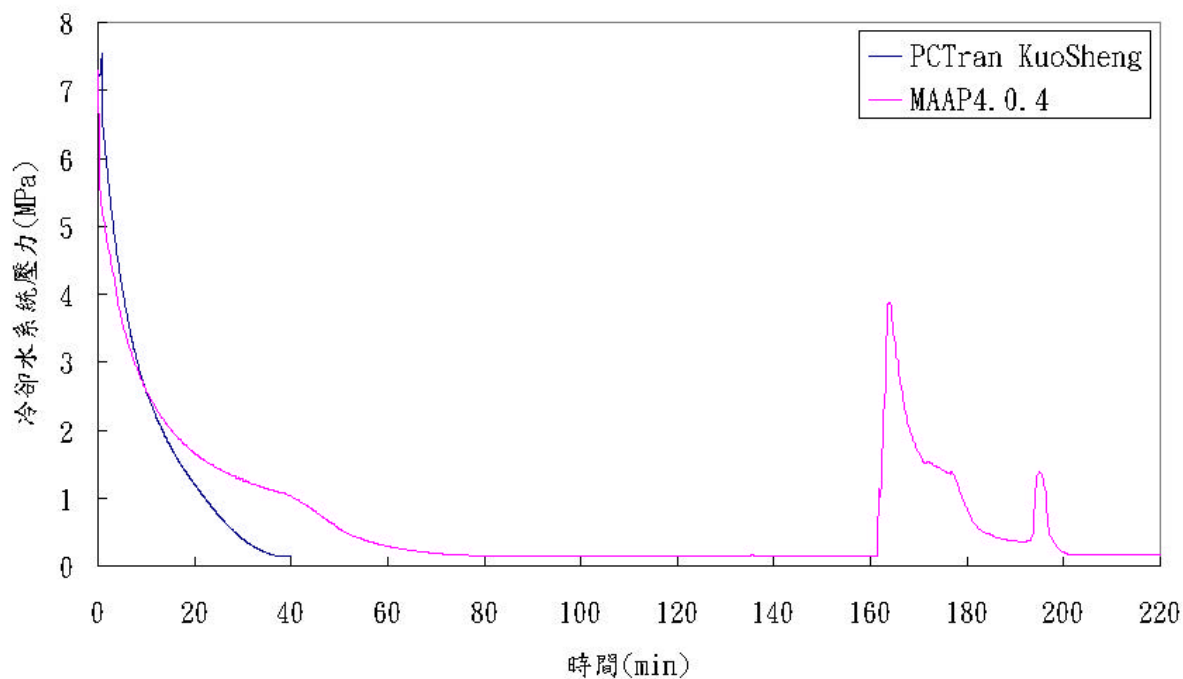


圖 4.27 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠中破口冷卻水流失事故冷卻水系統壓力(案例一)

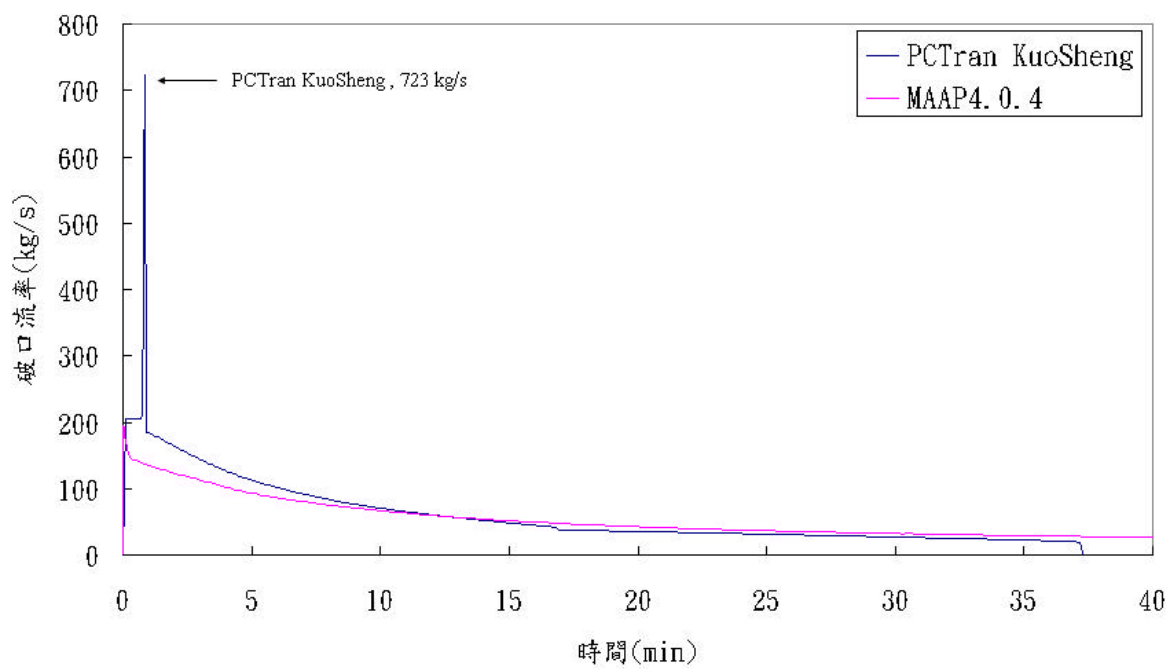


圖 4.28 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠中破口冷卻水流失事故破口流率(案例一)

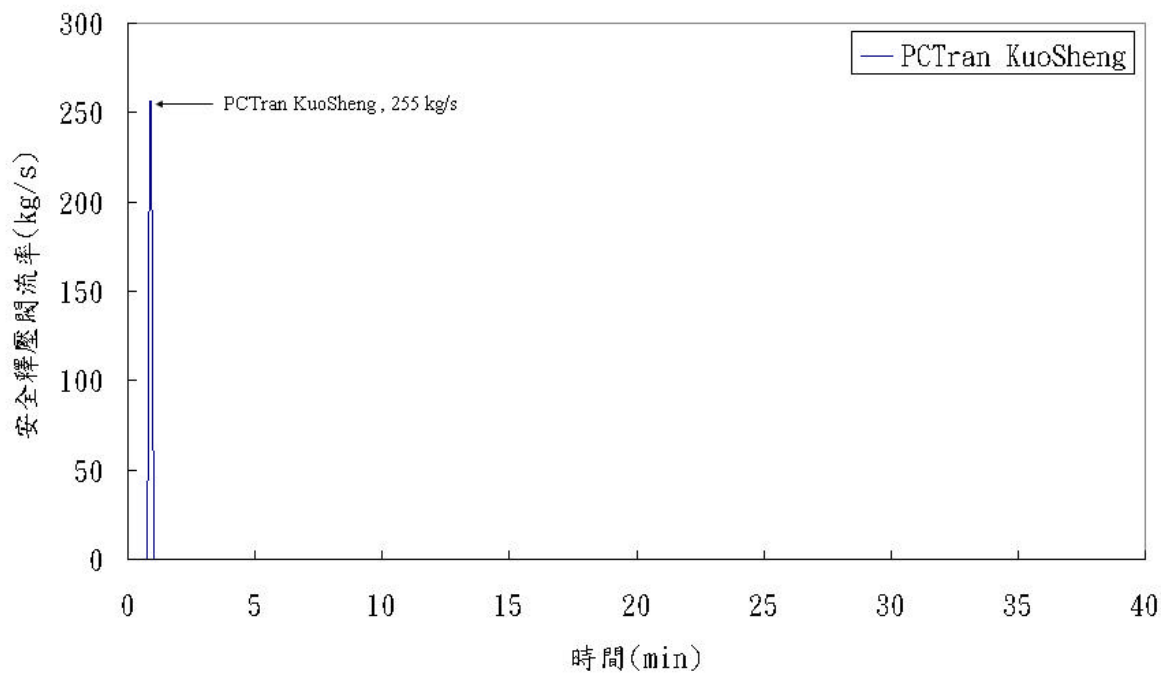


圖 4.29 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠中破口冷卻水流失事故安全釋壓閥流率(案例一)

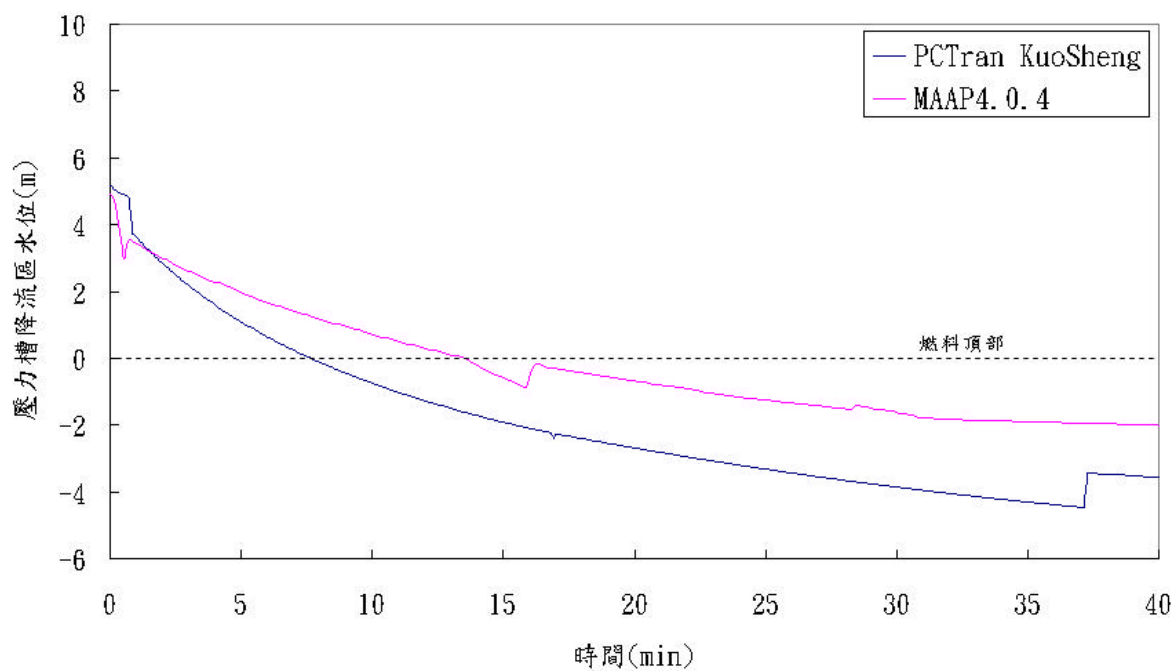


圖 4.30 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠中破口冷卻水流失事故壓力槽降流區水位(案例一)

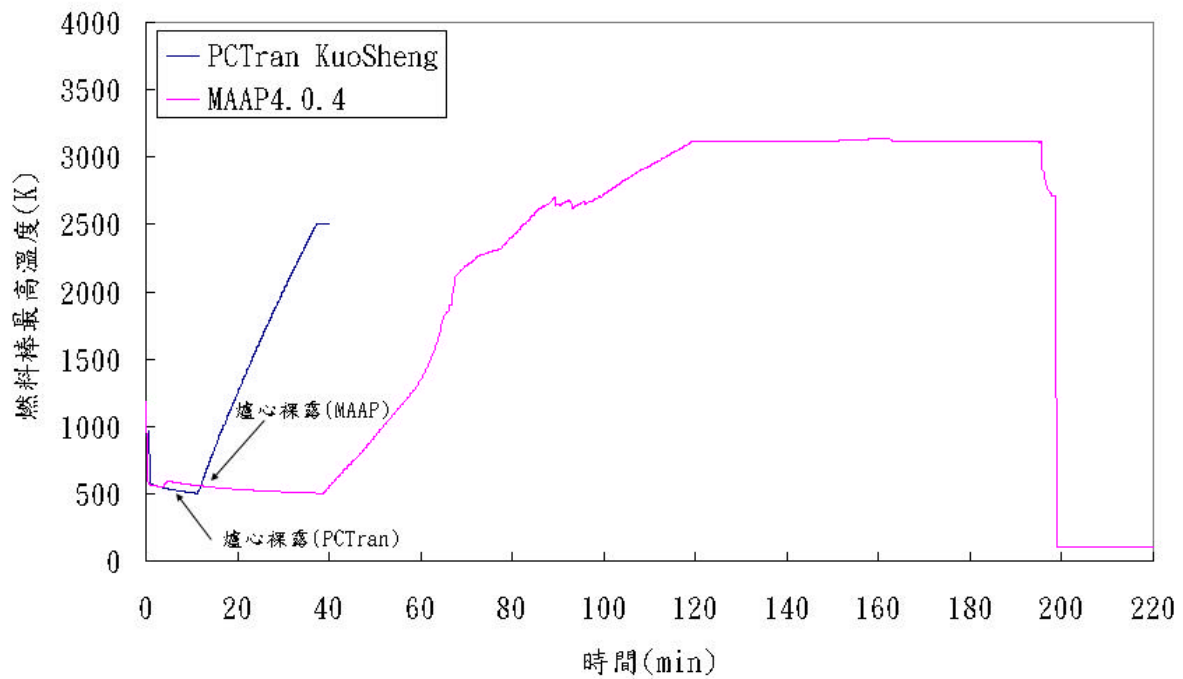


圖 4.31 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠中破口冷卻水流失事故燃料棒最高溫度(案例一)

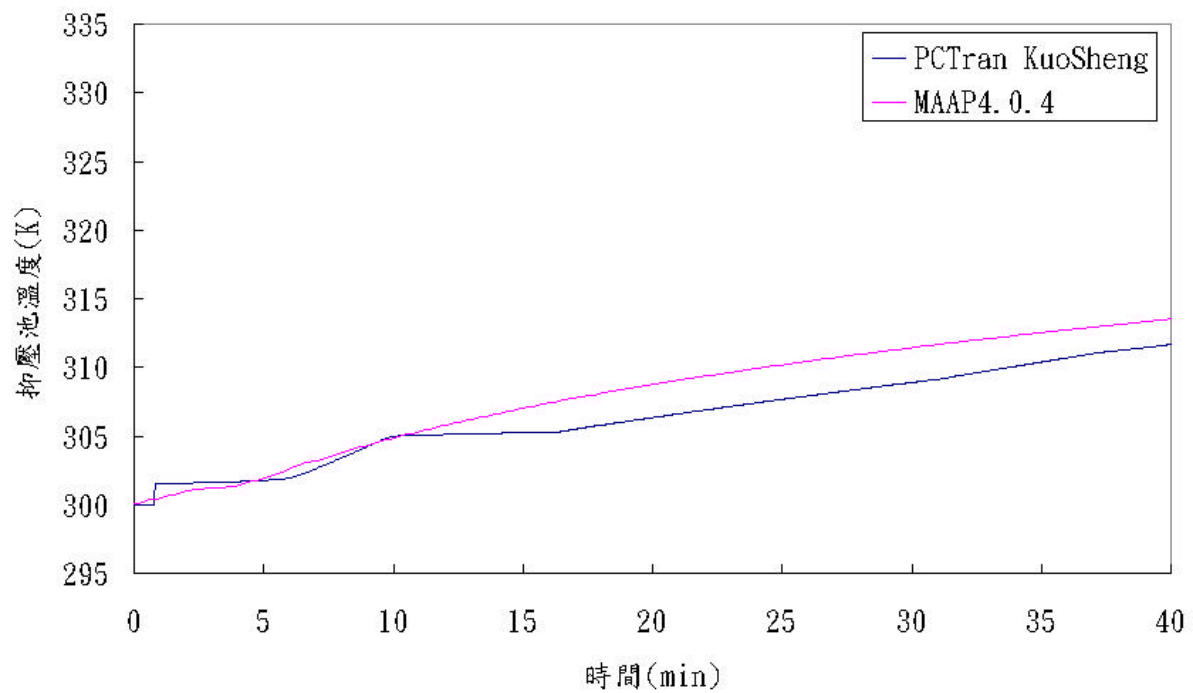


圖 4.32 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠中破口冷卻水流失事故抑壓池溫度(案例一)

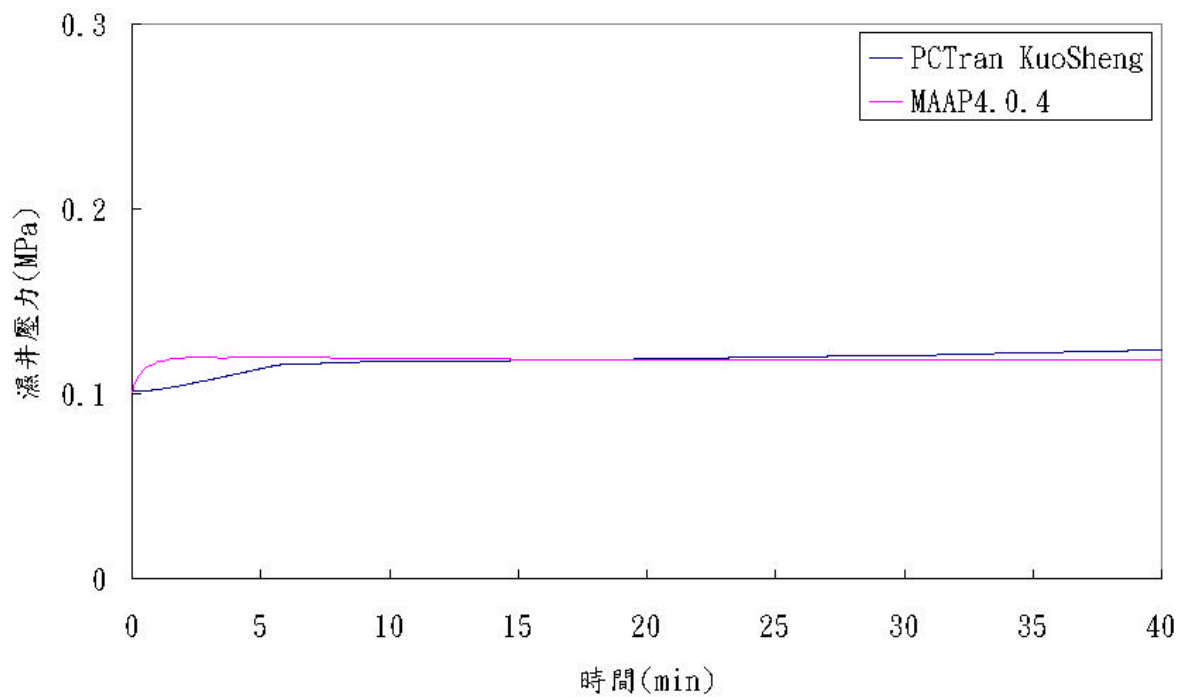


圖 4.33 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠中破口冷卻水流失事故濕井壓力(案例一)

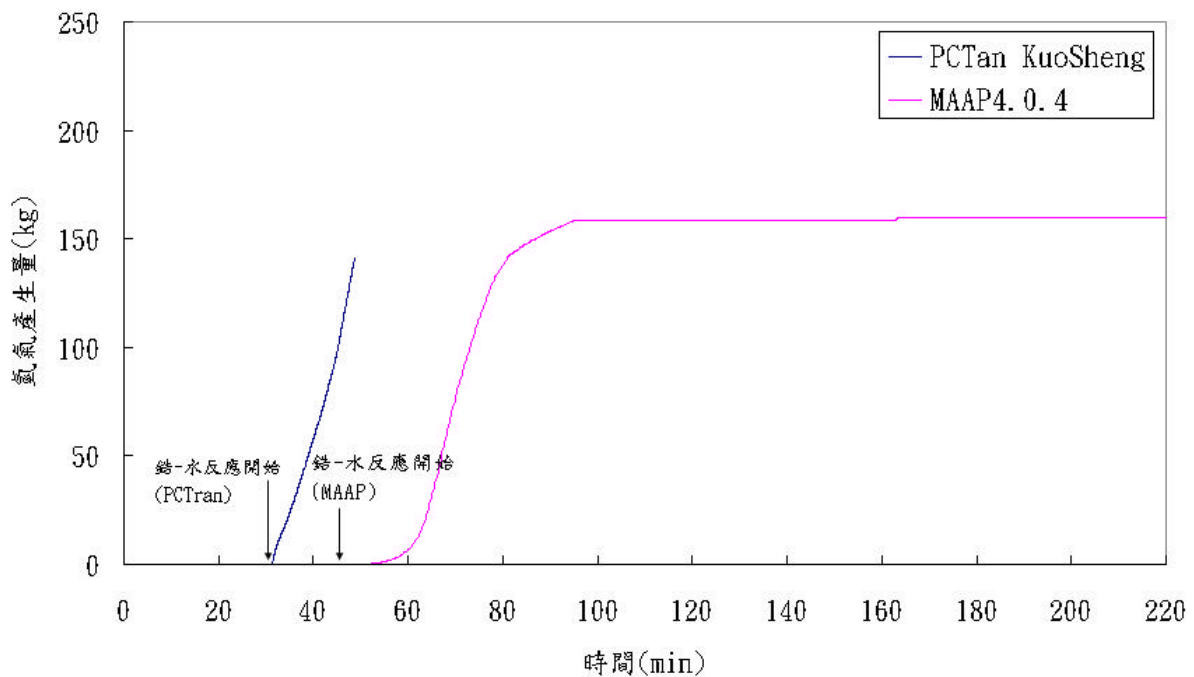


圖 4.34 PCTran KuoSheng與 MAAP4.0.4 電廠中破口冷卻水流失事故氫氣產生量(案例一)

4.5 中破口冷卻水流失事故模擬（案例二）

4.5.1 背景

本事故的肇因為主蒸汽管破口造成之冷卻水流失事故，發生破口的位置是主蒸汽管，其破口面積為 1/10 的主蒸汽管截面積，在本報告中稱中破口冷卻水流失。本事故與案例一之中破口冷卻水流失事故，最大的差異為高壓爐心灑水系統 High Pressure Core Spray, HPCS) 在案例二中，可以正常運作。事故發生後，冷卻水系統中的水會迅速的汽化成蒸汽，並且從破口流失進入乾井，此時的乾井壓力上升到急停的設定點，引發急停信號，使得主蒸汽隔離閥關閉、飼水泵跳脫以及反應器急停。由於高壓爐心灑水系統的正常運作，因此壓力槽內水位始終維持在一定的高度，隨後因為抑壓溫度過高造成高壓爐心灑水系統失效。高壓爐心灑水系統失效後，爐心的衰變熱不斷的產生，使冷卻水不斷的汽化，造成爐心的水位逐漸的降低，又因無冷卻水的補充，不久後爐心開始裸露，逐漸的熔毀向下流動落入壓力槽底部，並且將該處的積水蒸乾，並且使該處反應器槽壁溫度逐漸升高，最後熔融爐心所產生的衰變熱將壓力槽底部熔穿，熔融爐心落入爐穴，與混凝土發生熔融爐心混凝土作用 (Molten Core Concrete Interaction, MCCI)。在熔融爐心混凝土作用中所產生的氣體，使得圍阻體內的壓力不斷的升高，最終圍阻體失效，造成放射性物質的外釋。

4.5.2 國聖電廠中破口冷卻水流失事故 MAAP4.0.4 模擬結果（案例二）

MAAP4.0.4 程式計算所得之重要事故時序詳如表 4.7。程式的初始條件依照程式輸入檔案 (Input File) 內的設定，破口面積為 0.02356 平方公尺，除了高壓爐心灑水系統正常運作外，其他所有高低壓注水系統均失效。主蒸汽隔離閥與飼水水泵的關閉與反應器急停動作，則由程式自行計算，事故發生後 3.58 秒，反應器因乾井壓力過高急停，隨即在第 15.9 秒時因為主系統壓力過低造成主蒸汽隔離閥隔離及飼水水泵的跳脫。

爐心的衰變熱不斷的產生，壓力槽降流區的水位持續的下降，故在事故開始後 30.6 秒高壓爐心灑水系統啟動，開始由凝結水貯存池(Condensate Storage Tank, CST)取水注入反應器，隨後因為抑壓池水位過高，高壓爐心灑水系統改由抑壓池取水。由於高壓爐心灑水系統的注水使得水位回復至 Level -8，高壓爐心灑水系統即關閉，隨後壓力槽降流區水位在高壓爐心灑水系統的開關下，維持在一定之高度。事故發生後 5.2 小時 (18,538 秒)因抑壓池水溫過高 (333K) 造成高壓爐心灑水系統的失效，事故開始後的第 8.6 小時 (30,920 秒)，壓力槽降流區水位降到爐心燃料頂端，但爐心內之雙相水位直到 10.2 小時(36,841 秒)時，才低於燃料頂端的高度。由於水蒸汽的熱傳效果遠低於水，因此裸露於水面上的燃料棒所產生的熱將難以被移除，因此燃料棒的溫度持續的升高，燃料開始熔毀。熔融爐心在第 14.3 小時 (51,645 秒)時開始向下流至反應器壓力槽底部區間。20.4 小時 (73,372 秒)壓力槽底部溫度過高，將反應器壓力槽融穿，熔融爐心落入爐穴當中與圍阻體混凝土基座發生 MCCI 作用，產生大量可燃性氣體，造成圍阻體在事故發生後第 54.8 小時 (197,312 秒)失效，大量的放射性物質外釋到外界環境。

圖 4.35 為電廠中破口冷卻水流失事故冷卻水系統壓力變化，模擬結果顯示，由於融熔爐心在 14.3 小時 (51,645 秒)的時候，開始下滑掉落至壓力槽底部，被該處的積水淬熄，產生大量蒸汽，造成冷卻水系統壓力快速上升，形成圖示中尖峰，事故後第 20.4 小時 (73,372 秒)，因為壓力槽內溫度過高，造成壓力槽破裂，隨後在 54.8 小時 (197,312 秒)的時候，圍阻體的失效，使得冷卻水系統壓力隨著圍阻體壓力降低。

圖 4.36 為電廠中破口冷卻水流失事故壓力槽降流區水位變化，模擬結果顯示，壓力槽降流區水位因高壓爐心灑水系統的開啟與關閉而維持在一定的水位，隨後由於高壓爐心灑水系統的失效，因此爐心的衰變熱不斷的產生，使冷卻水不斷的汽化，此時所有的爐心注水系統均無法執行其功能，造成壓力槽降流區水位逐漸降低，在 8.6 小時 (30,920 秒)時，到達爐心頂部的高度，直到 19.1 小時 (68,755 秒)水位降至降流區底部。圖 4.37 為電廠中破口冷卻水流失事故燃料棒最高溫度變化，模擬結果顯示，由於事故發生後 8.6 小時 (30,920 秒) 壓力槽降流區水位達到爐心頂部，隨後不久燃料溫度上升。在 14.3 小時 (51,645 秒)，熔融爐心開始掉落至壓力槽底部，接著在 20.4 小

時 (73,372 秒)的時候，由於壓力槽失效，熔融爐心掉落離開壓力槽。熔融爐心掉落前，爐心燃料溫度直線上升，形成一個尖峰的原因不是很清楚，可能是程式計算的問題。

圖 4.38 為電廠中破口冷卻水流失事故乾井與濕井壓力變化，模擬結果顯示，由於破口的位置在主蒸汽管，因此由破口流出的蒸汽進入了乾井，造成圍阻體的壓力上升，在 14.3 小時 (51,645 秒)的時候，熔融爐心開始掉落至壓力槽底部，造成圍阻體壓力上升的小尖峰。壓力槽在 20.4 小時 (73,372 秒)失效，大量的熔融爐心自壓力槽底部向外流出，造成圍阻體壓力急劇上升，隨後在 54.8 小時 (197,312 秒)，因為圍阻體失效，使得壓力驟降。由於濕井裡有抑壓池，會將蒸汽凝結，故濕井的壓力會略低於乾井。如圖所示，在壓力槽失效後，圍阻體壓力會產生數個小尖峰，此原因是因為圍阻體內氫氣燃燒所造成的。

4.5.3 國聖電廠中破口冷卻水流失事故 PCTran KuoSheng 模擬結果 (案例二)

PCTran KuoSheng 程式計算所得之重要事故時序詳如表 4.8。程式的初始條件在 PCTran KuoSheng 程式內建事故 (Malfunction) 中設定為 Steam Line Break Inside Drywell (破口大小為 0.02356 平方公尺)。事故開始除了高壓爐心灑水系統外，其他所有高低壓注水系統均全部失效。主蒸汽隔離閥以及飼水泵關閉及跳脫時間則由程式自行計算，事故發生後第 44 秒主蒸汽隔離閥、飼水泵跳脫以及反應器急停，接著在第 47 秒汽機跳脫。

事故開始後，由於爐心的衰變熱不斷的產生，壓力槽降流區的水位持續的下降，在事故開始後的第 80 秒，高壓爐心灑水系統啟動，開始由凝結水貯存池 (Condensate Storage Tank, CST) 取水注入反應器，隨後因為抑壓池水位過高，高壓爐心灑水系統改由抑壓池取水。由於高壓爐心灑水系統的注水使得水位回復至 Level -8，高壓爐心灑水系統即關閉，隨後壓力槽降流區水位在高壓爐心灑水系統的開關下，維持在一定之高度。事故發生後 4.3 小時 (15,414 秒)因抑壓池水溫過高 (333K) 造成高壓爐心灑水系統的失效，事故開始後的第 6.2 小時 (22,359 秒)，壓力槽降流區水位達到爐心頂部，

但爐心內之雙相水位直到 6.7 小時 (24,222 秒)時，由於 PCTran KuoSheng 程式並沒有模擬爐心的熔損，故當燃料護套達 2,500K 時，溫度隨即便維持不變。由於程式模擬能力的限制，本研究之 PCTran KuoSheng 分析在燃料溫度達到 2,500K 時即停止。

4.5.4 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 結果比較分析 (案例二)

圖 4.39 為 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠中破口冷卻水流失事故冷卻水系統壓力變化。在事故開始後，冷卻水系統壓力隨即快速的降低，直到與圍阻體壓力平衡；在此 MAAP4.0.4 所預測的值略大於 PCTran KuoSheng 的預測。

圖 4.40 為 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠中破口冷卻水流失事故高壓爐心灑水系統流率變化。MAAP4.0.4 模擬顯示，事故發生後 30.6 秒時，高壓爐心灑水系統首度啟動，至 6.9 分鐘 (416.2 秒)時，壓力槽降流區水位回復至 Level-8，高壓爐心灑水系統關閉，隨後則依照程式所設定之開啟與關閉條件動作。PCTran KuoSheng 模擬顯示，事故發生後 80 秒時，高壓爐心灑水系統首度啟動，至 4 分鐘 (240 秒)時，壓力槽降流區水位回復至 Level-8，高壓爐心灑水系統關閉，隨後則依照程式所設定之開啟與關閉條件動作。如圖所示，兩程式預測高壓爐心灑水系統之開啟時間與次數都不相同，此原因為程式計算壓力槽內水位的方式不同。

圖 4.41 為 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠中破口冷卻水流失事故破口流率變化。PCTran KuoSheng 模擬顯示，破口蒸汽以每秒 205 公斤的流率湧出，在 50 秒時因為冷卻水系統壓力突然的上升，造成破口流量驟升至每秒 723 公斤，隨後破口流率則下降至每秒 20 公斤左右震盪；震盪產生的原因應與高壓爐心灑水系統注水有關，但高壓注水停止後，破口流量仍有相同的震盪，產生原因無法解釋。MAAP4.0.4 模擬結果顯示，事故一開始，破口蒸汽以每秒 191 公斤的流率湧出，由於冷卻水系統壓力沒有升高，因此破口流率沒有驟升的情況產生，事故發生後破口流量則下降至每秒約 10 公斤。由於破口事故發生在主蒸汽管路，破口流出的全都是蒸汽。

圖 4.42 為 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠中破口冷卻水流失事故安全釋壓閥

流率變化。PCTran KuoSheng 模擬顯示，由於主蒸汽隔離閥在事故後 44 秒關閉，部分蒸汽累積造成冷卻水系統壓力的上升，所預測之壓力最大值為 7.8MPa，造成 9 個安全釋壓閥的開啟，總流量為 255 公斤/秒；在 MAAP4.0.4 模擬顯示安全釋壓閥沒有開啟。

圖 4.43 為 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠中破口冷卻水流失事故壓力槽降流區水位變化。PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 在計算水位時的參考點並不一樣，圖 3.8 為兩個程式水位計算的示意圖。為了方便結果的比較，圖 4.43 所示之壓力槽降流區水位變化圖是以燃料頂部(Top of Active Fuel, TAF)為零點。壓力槽降流區水位則在事故發生後由於高壓爐心灑水系統的開啟，水位持續維持在一定高度，但在高壓爐心灑水系統失效後，壓力槽降流區水位則開始下降，比較兩程式所預測結果，PCTran KuoSheng 所預測的水位下降時間較 MAAP4.0.4 早，此原因為 PCTran KuoSheng 所預測高壓爐心灑水系統因抑壓池溫度過高而失效的時間較早。如圖所示，PCTran KuoSheng 所預測之壓力槽降流區水位在高壓爐心灑水系統關閉後，產生明顯逐漸向下的震盪，此原因為破口流率產生造成水位的下降，但破口流率變成零後，水位又上升。

圖 4.44 為 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠中破口冷卻水流失事故燃料棒最高溫度變化。事故開始後，由於反應器的急停使得控制棒插入，因此燃料棒溫度急速的下降，隨後高壓爐心灑水系統的開啟，燃料棒溫度一直維持在 450K 左右，最後因為高壓爐心灑水系統失效，使得壓力槽降流區水位開始下降，PCTran KuoSheng 模擬顯示，壓力槽降流區水位在 6.2 小時 (22,359 秒)達到爐心頂部，隨後燃料棒溫度開始上升；8.7 小時 (31,275 秒)的時候，燃料棒溫度達 2,500K，此時溫度即不再變化。比較 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 的結果，由於兩程式在計算爐心裸露的時間不同，因此在燃料棒溫度上升的時間也不同。

圖 4.45 為 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠中破口冷卻水流失事故抑壓池溫度變化。PCTran KuoSheng 模擬顯示，事故發生後 50 秒由於安全釋壓閥的開啟，使得大量的蒸汽經由此進入抑壓池，造成抑池的溫度突然的升高，隨後由於蒸汽持續由破口流出，造成抑壓池溫度的明顯上升。比較兩程式預測的結果，PCTran KuoSheng 所預測的值高於 MAAP4.0.4。

圖 4.46 為 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠中破口冷卻水流失事故濕井壓力變化。事故開始後，由於反應器裡面的水蒸汽，經由破口進入圍阻體內，造成濕井內的壓力緩慢上升，並且造成圍阻體內其他區間壓力亦緩慢上升，比較兩程式模擬結果，PCTran KuoSheng 所預測的值較 MAAP4.0.4 的值高。

圖 4.47 為 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠中破口冷卻水流失事故氫氣產生量變化。PCTran KuoSheng 模擬顯示，事故開始後 8.5 小時 (30,555 秒) 的時候，護套中的鋁金屬與水發生反應，開始產生氫氣；MAAP4.04 程式模擬結果顯示，在事故發生 10.8 小時 (38,729 秒) 的時候，水蒸氣開始和做為護套材料的鋁合金發生化學反應而產生氫氣與熱，由於剛開始產生的氫氣量極小，因此在圖中無法明顯的顯示出開始點，故以箭頭指示。如圖所示，兩程式所預測氫氣開始產生的時間與氫氣產生量有所不同。

表 4.7 MAAP4.0.4 程式模擬國聖電廠中破口冷卻水流失事故重要時序 (案例二)

時間(sec)	發生之重要事件
0.0	Break in Primary System
3.58	Ractor Scrammed
15.9	Feedwater Pumps Trip, MSIV Closed
30.6	HPCS On (first)
18,538 (5.2 hr)	HPCS Off due to High Suppression Pool Temp.
30,920 (8.6 hr)	Level Reaches TAF (downcomer)
36,841 (10.2 hr)	Level Reaches TAF (core mixture water)
38,729 (10.8 hr)	Hydrogen Generation
51,645 (14.3 hr)	Relocation Of Core Materials To Lower Head
73,372 (20.4 hr)	Vessel Failed By Ejection Of CRD Tubes
197,312 (54.8 hr)	Containment Failure

表 4.8 PCTran KuoSheng 程式模擬國聖電廠中破口冷卻水流失事故重要時序 (案例二)

時間(sec)	發生之重要事件
0.0	Break in Primary System
44	Feedwater Pumps Trip, Reactor Scrammed , MSIV Closure
47	Turbine Trip
80	HPCS On (first)
15,414 (4.3 hr)	HPCS Off due to High Suppression Pool Temp.
22,359 (6.2 hr)	Level Reaches TAF (downcomer)
24,222 (6.7 hr)	Level Reaches TAF (core mixture water)
30,555 (8.5 hr)	Hydrogen Generation
31,275 (8.7 hr)	Fuel Temperature Reaches 2500K

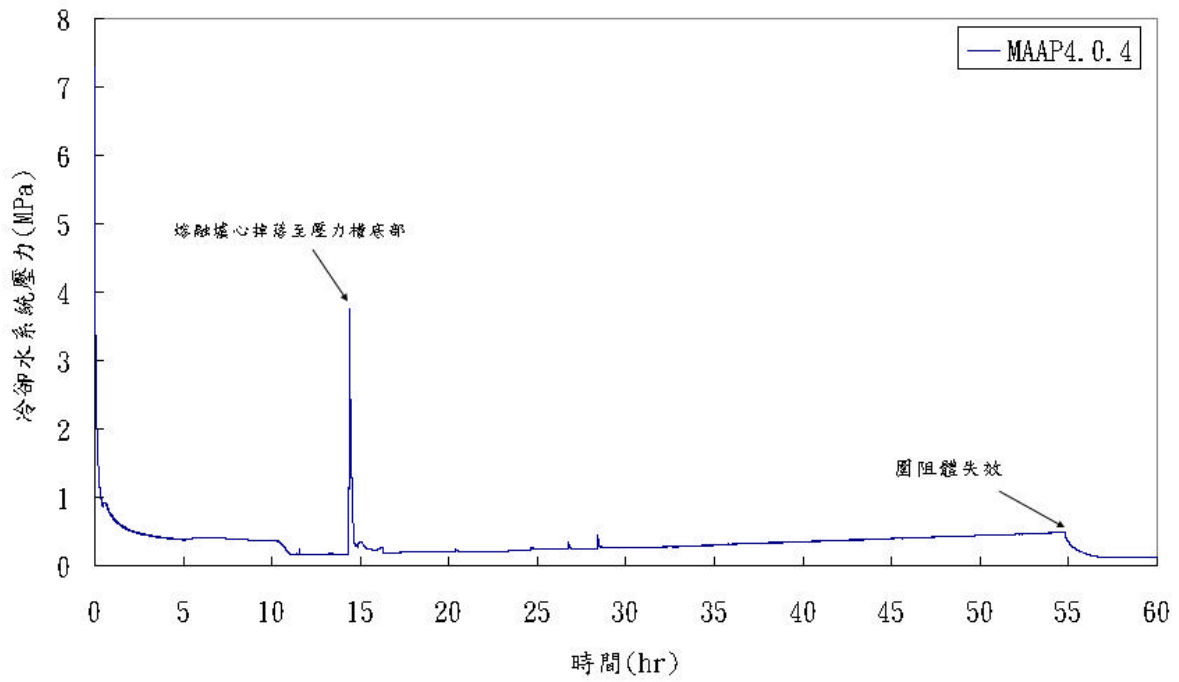


圖 4.35 電廠中破口冷卻水流失事故冷卻水系統壓力(案例二)

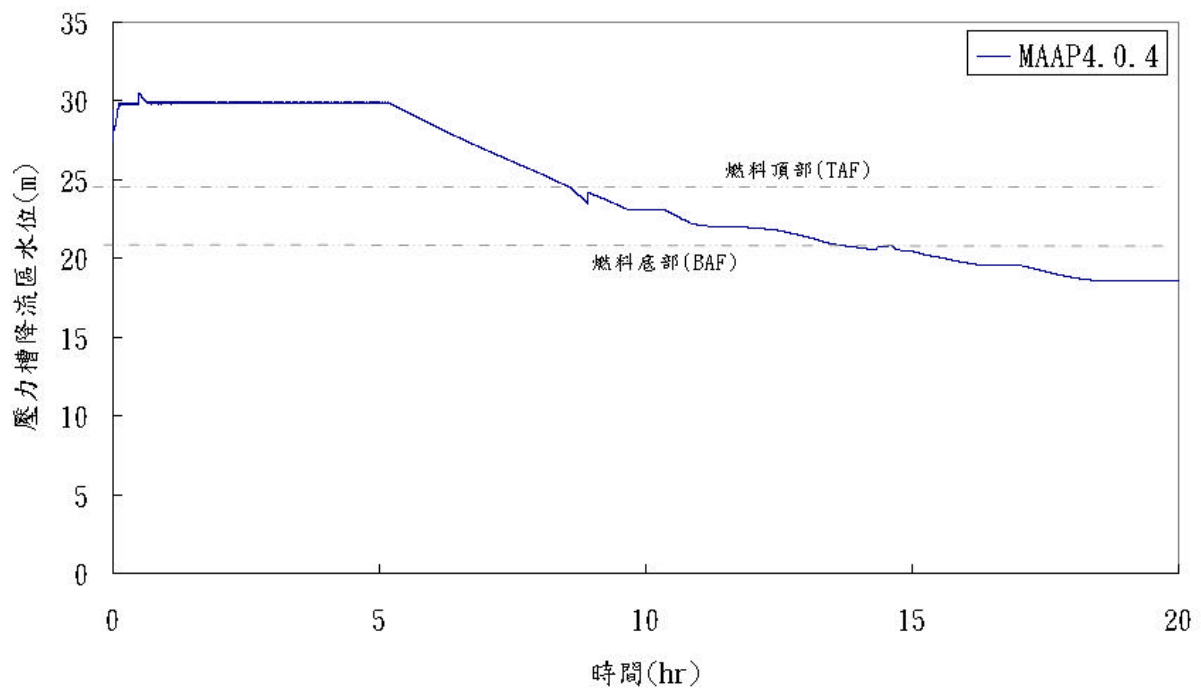


圖 4.36 電廠中破口冷卻水流失事故壓力槽降流區水位(案例二)

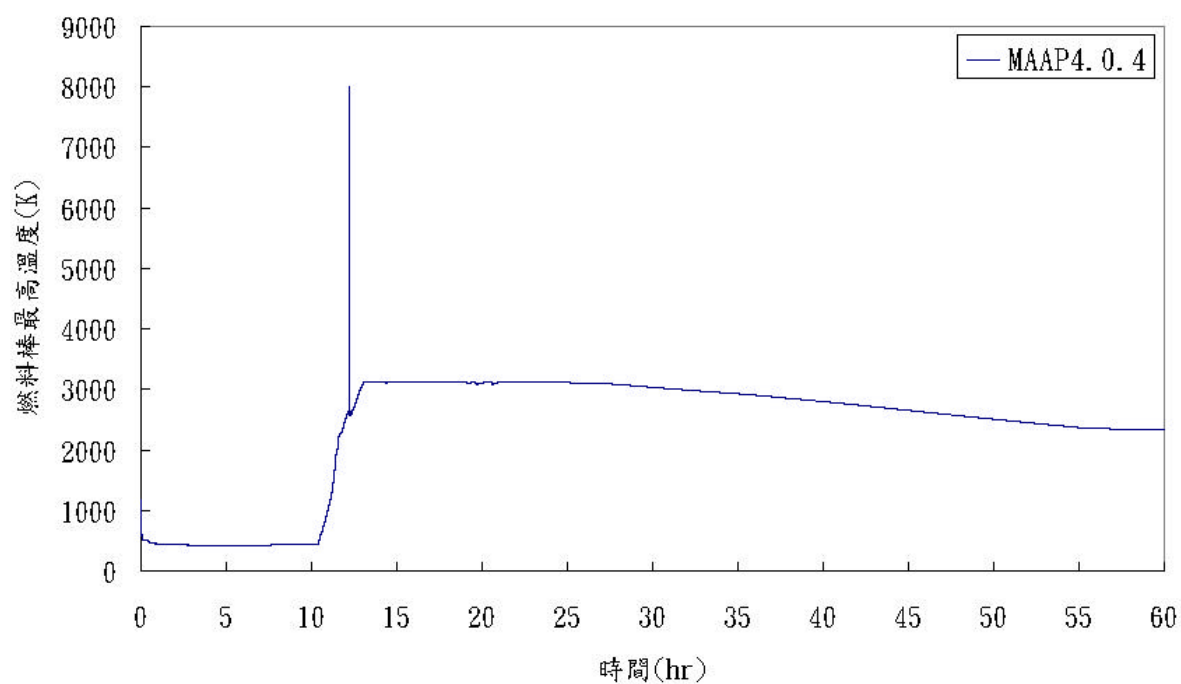


圖 4.37 電廠中破口冷卻水流失事故燃料棒最高溫度(案例二)

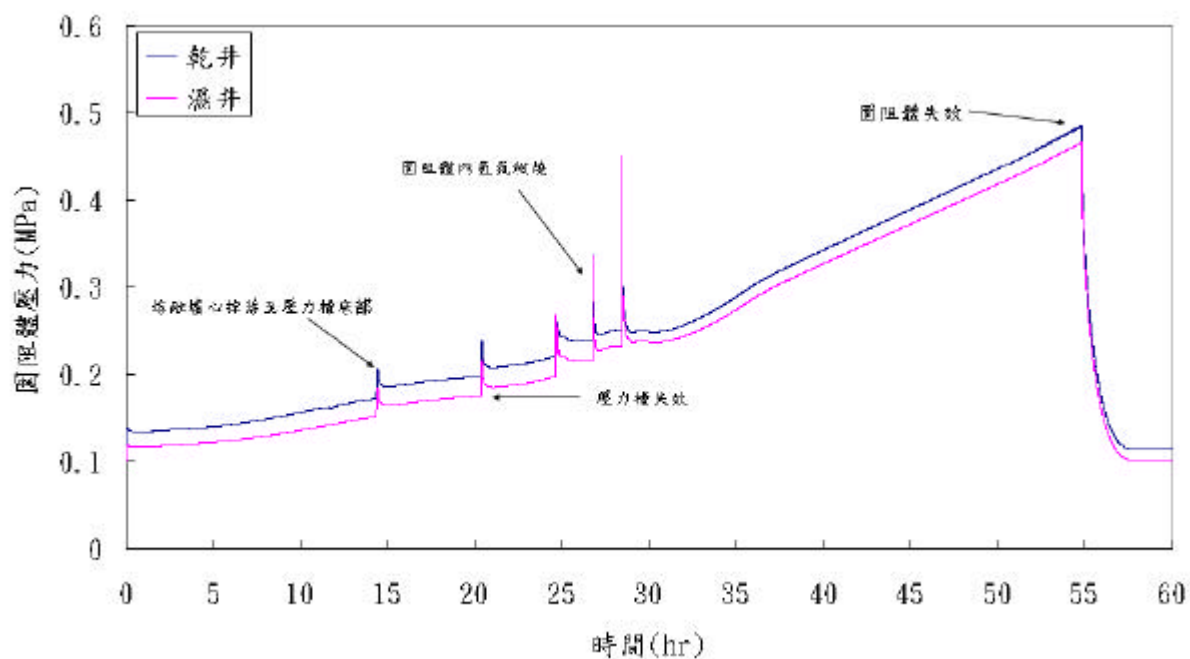


圖 4.38 電廠中破口冷卻水流失事故乾井與濕井壓力(案例二)

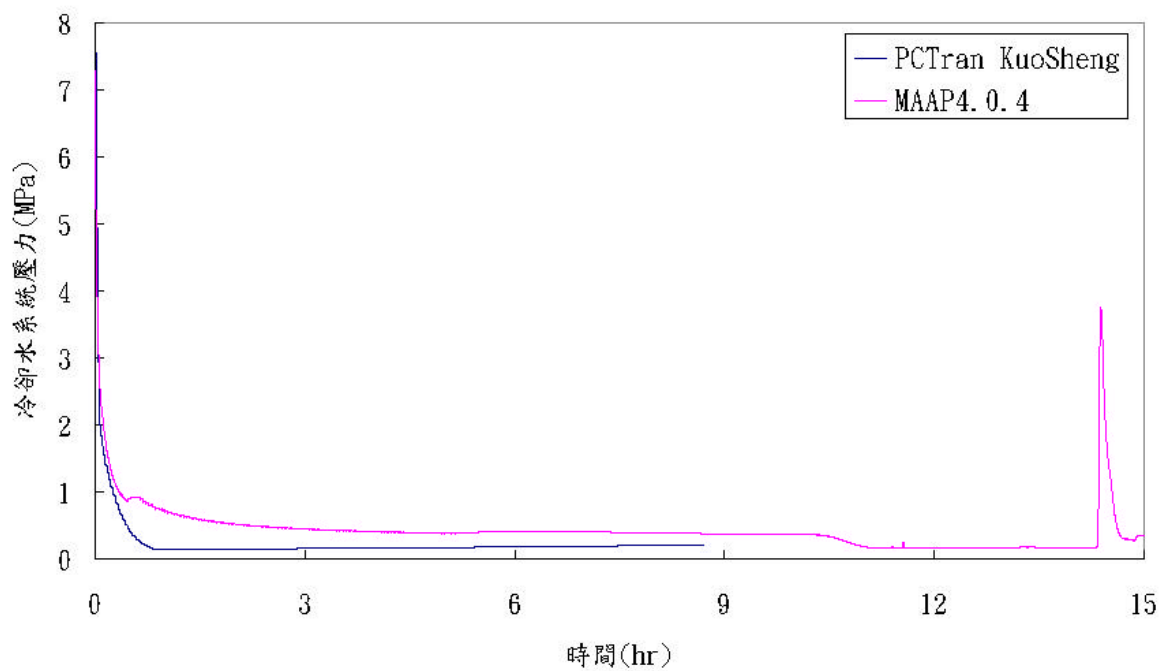


圖 4.39 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠中破口冷卻水流失事故冷卻水系統壓力(案例二)

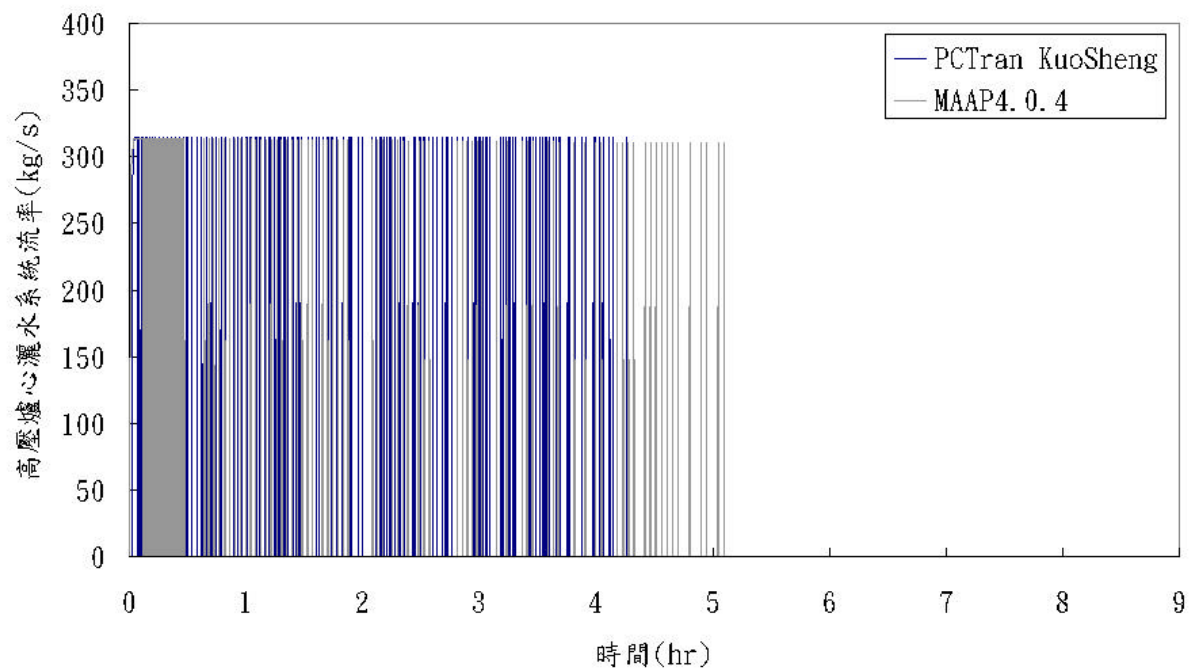


圖 4.40 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠中破口冷卻水流失事故高壓爐心灑水系統流率(案例二)

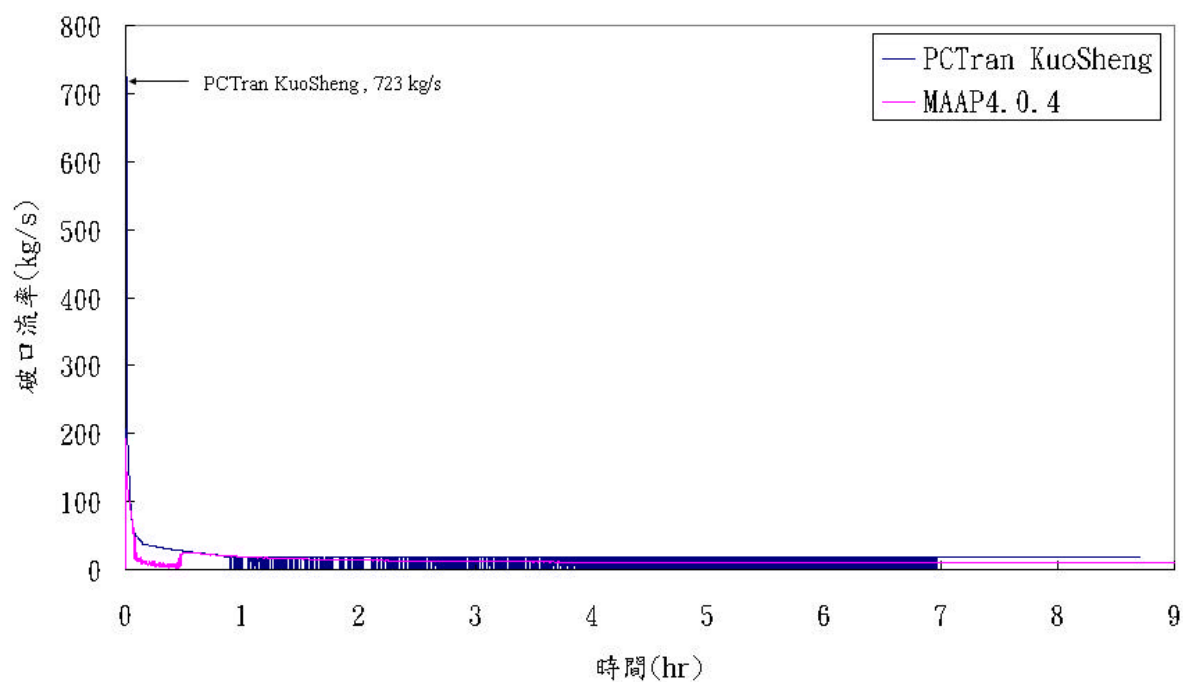


圖 4.41 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠中破口冷卻水流失事故破口流率(案例二)

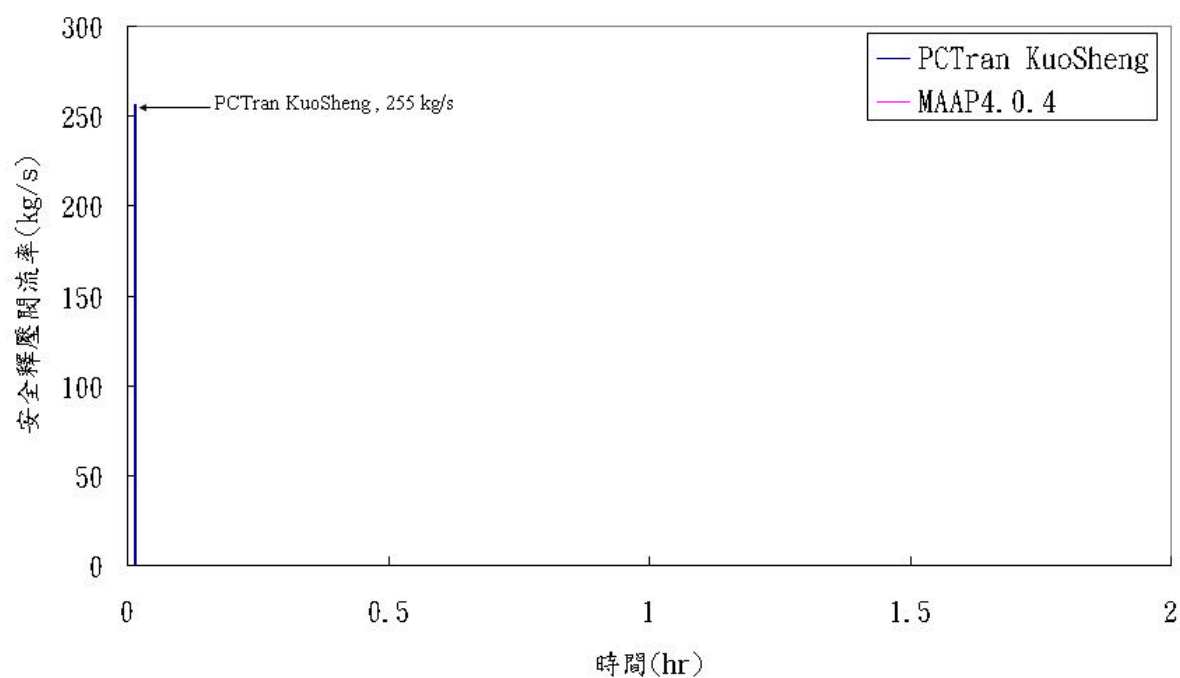


圖 4.42 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠中破口冷卻水流失事故安全釋壓閥流率(案例二)

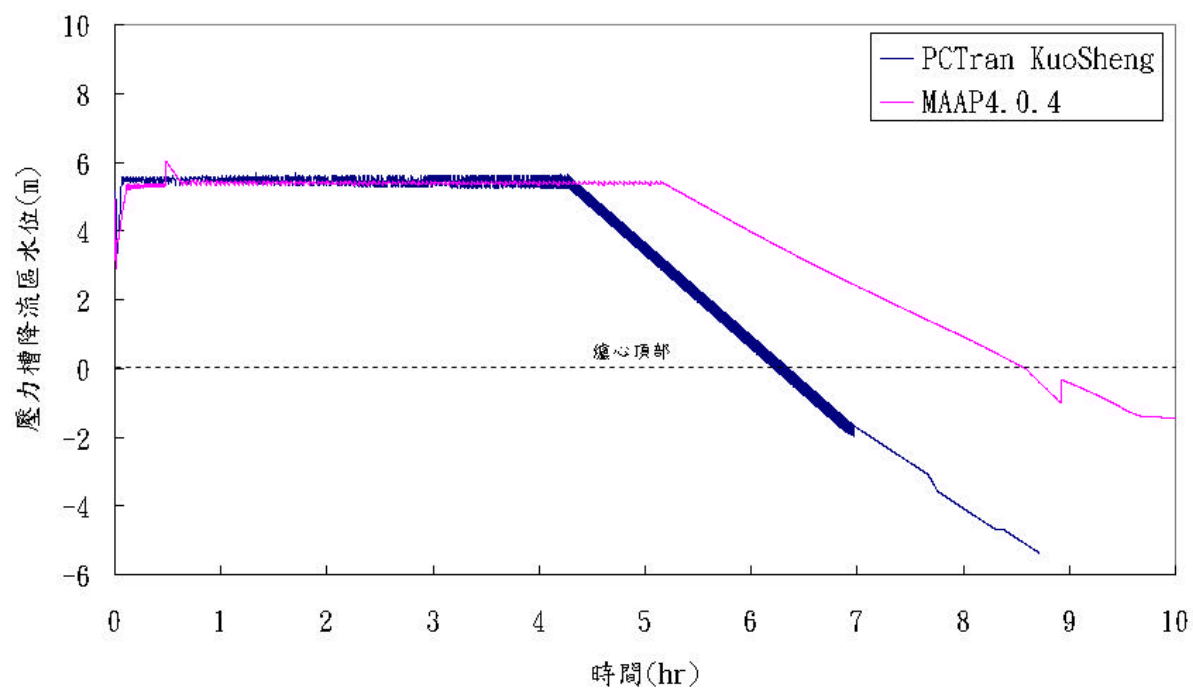


圖 4.43 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠中破口冷卻水流失事故壓力槽降流區水位 (案例二)

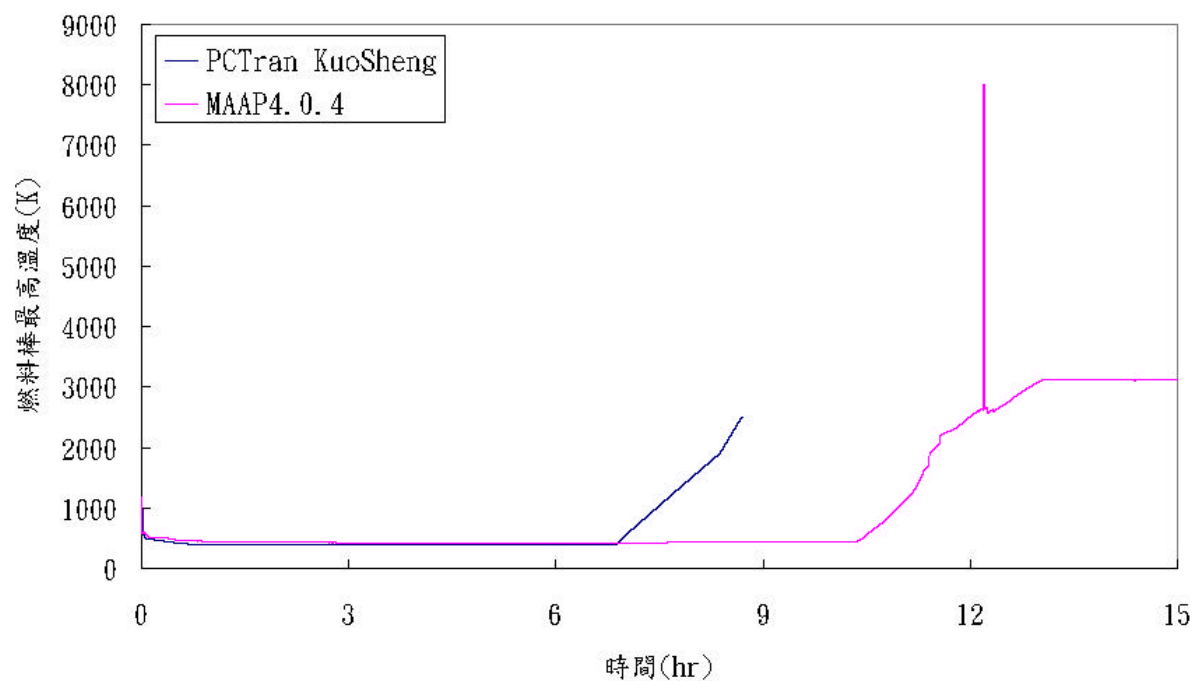


圖 4.44 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠中破口冷卻水流失事故燃料棒最高溫度 (案例二)

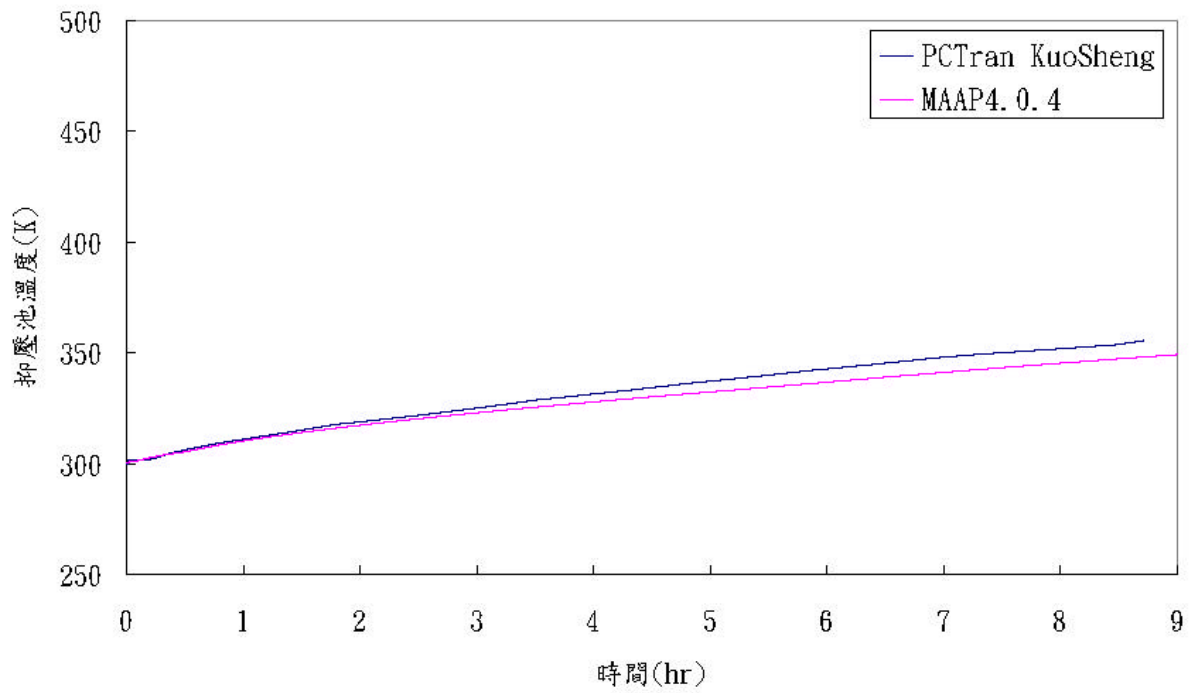


圖 4.45 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠中破口冷卻水流失事故抑壓池溫度(案例二)

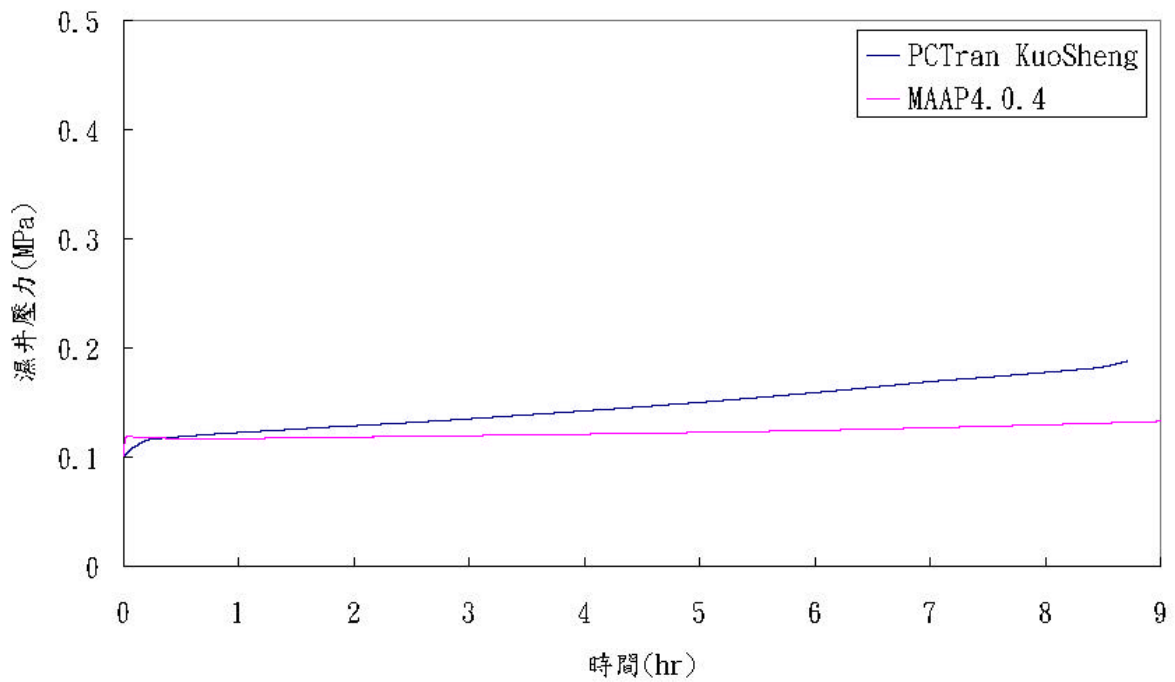


圖 4.46 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠中破口冷卻水流失事故濕井壓力(案例二)

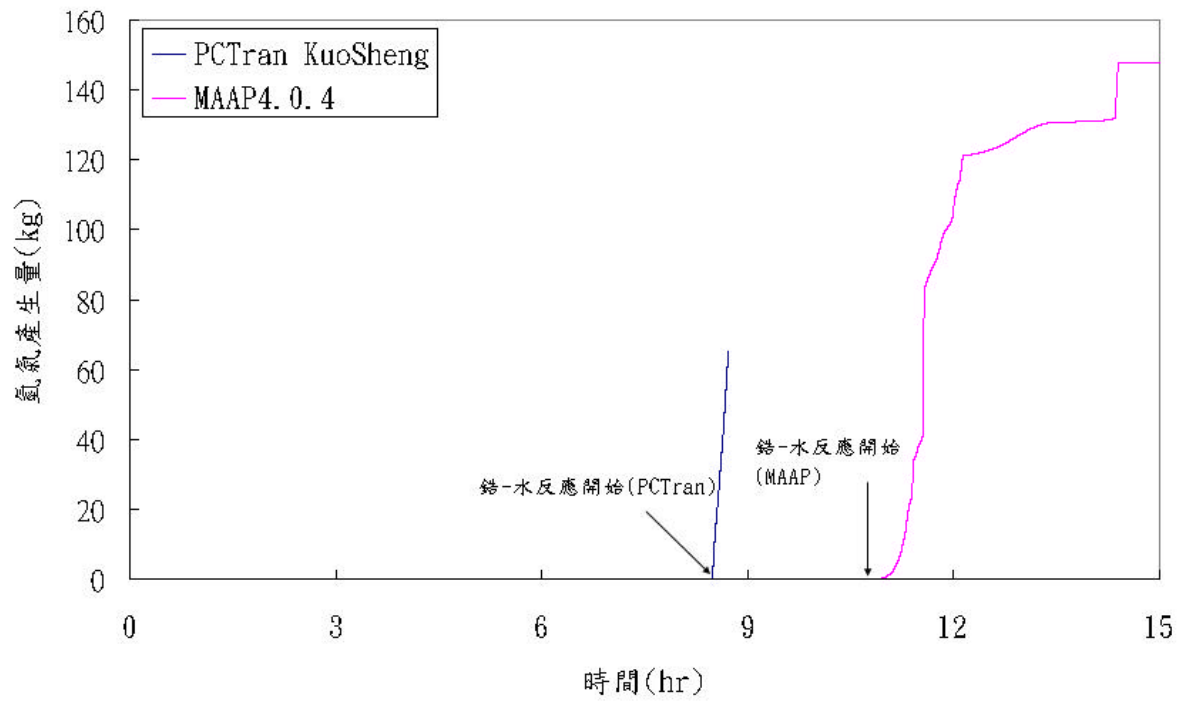


圖 4.47 PCTran KuoSheng與MAAP4.0.4電廠中破口冷卻水流失事故氫氣產生量(案例二)

4.6 再循環管中破口冷卻水流失事故模擬

4.6.1 背景

本事故的肇因為再循環管的破口造成冷卻水流失事故，發生破口的位置為再循環管路，其破口面積為 1/10 的再循環管截面積，在本報告中稱再循環管中破口冷卻水流失。事故發生後，壓力槽內的冷卻水以及汽化的蒸汽會從破口流失進入乾井，使得水位降低達到反應器急停的設定點，反應器急停，隨即不久汽機跳脫。由於大量冷卻水及蒸汽進入乾井，使得乾井壓力升高，造成主蒸汽隔離閥關閉、飼水泵跳脫。事故的模擬中假設所有的爐心注水系統皆無法啟動，因此無任何的緊急冷卻水系統進入反應器壓力槽內，爐心的衰變熱不斷的產生，使冷卻水不斷的汽化，造成爐心的水位逐漸的降低，又因無冷卻水的補充，不久後爐心開始裸露，逐漸的熔毀向下流動落入壓力槽底部，並且將該處的積水蒸乾，並且使該處反應器槽壁溫度逐漸升高，最後熔融爐心所產生的衰變熱將壓力槽底部熔穿，熔融爐心落入爐穴，與混凝土發生熔融爐心混凝土作用(Molten Core Concrete Interaction, MCCI)。在熔融爐心混凝土作用中所產生的氣體，使得圍阻體內的壓力不斷的升高，最終圍阻體失效，造成放射性物質的外釋。

4.6.2 國聖電廠再循環管中破口冷卻水流失事故 MAAP4.04 模擬結果

MAAP4.04 程式計算所得之重要事故時序詳如表 4.9。程式的初始條件依照程式輸入檔案 (Input File) 內的設定，破口面積為 0.0174 平方公尺，事故開始爐心隔離冷卻系統，以及所有高低壓注水系統均失效。主蒸汽隔離閥與飼水水泵的關閉與反應器急停動作，則由程式自行計算，事故發生後 3.64 秒反應器因乾井壓力過高急停，隨即在第 18.2 秒時因為主系統壓力過低造成主蒸汽隔離閥隔離及飼水水泵的跳脫。

爐心的衰變熱不斷的產生，壓力槽降流區的水位持續下降，故在事故開始後的第 2.9 分鐘 (177 秒)，壓力槽降流區水位降至爐心頂部的高度，但爐心內之雙相水位直到

5 分鐘(299 秒)時，才低於燃料頂端的高度。由於水蒸汽的熱傳效果遠低於水，因此裸露於水面上的燃料棒所產生的熱將難以移除，燃料棒的溫度持續的升高，燃料開始熔毀。熔融爐心在第 1.4 小時 (5,089 秒)時開始向下流至反應器壓力槽底部區間。3.9 小時 (14,001 秒)壓力槽底部溫度過高，將反應器壓力槽融穿，熔融爐心落入爐穴當中與圍阻體混凝土基座發生 MCCI 作用，產生大量可燃性氣體，造成圍阻體在事故發生後第 36 小時 (129,611 秒)失效，大量的放射性物質外釋到外界環境。

圖 4.48 為電廠再循環管中破口冷卻水流失事故冷卻水系統壓力變化，模擬結果顯示，由於融熔爐心在 1.4 小時 (5,089 秒)的時候，開始下滑掉落至壓力槽底部，被該處的積水淬熄，產生大量蒸汽，造成冷卻水系統壓力快速上升，形成圖示中之尖峰。隨後在 36 小時 (129,611 秒)的時候，圍阻體的失效，使得冷卻水系統壓力隨著圍阻體壓力降低。

圖 4.49 為電廠再循環管中破口冷卻水流失事故壓力槽降流區水位變化，模擬結果顯示，由於爐心的衰變熱不斷產生，使冷卻水不斷的汽化，所有的爐心注水系統均無法執行其功能，造成壓力槽降流區水位逐漸降低，在 2.9 分鐘 (177 秒)時，低於燃料頂端的高度，直到 2.4 小時 (8,532 秒)水位降至降流區底部。圖 4.50 為電廠再循環管中破口冷卻水流失事故燃料棒最高溫度變化，模擬結果顯示，由於事故發生後 2.9 分鐘 (177 秒)壓力槽降流區水位達到爐心頂部，隨後不久，當爐心雙相水位低於燃料頂部高度時，燃料溫度上升。在 1.4 小時 (5,089 秒)，熔融爐心開始掉落至壓力槽底部，接著在 3.9 小時 (14,001 秒)的時候，由於壓力槽失效，熔融爐心掉落離開壓力槽。

圖 4.51 為電廠再循環管中破口冷卻水流失事故乾井與濕井壓力變化，模擬結果顯示，由於破口的位置在再循環管，因此由破口流出的蒸汽進入了乾井，造成圍阻體的壓力上升，在 1.4 小時 (5,089 秒)的時候，由於熔融爐心開始掉落至壓力槽底部，造成圍阻體壓力上升的小尖峰，壓力槽在 3.9 小時 (14,001 秒)失效，大量的熔融爐心自壓力槽底部向外流出，造成圍阻體壓力急劇上升，隨後在 36 小時 (129,611 秒)，因為圍阻體失效，使得壓力驟降。由於濕井裡有抑壓池，會將蒸汽凝結，故濕井的壓力會略低於乾井。如圖所示，在壓力槽失效後，圍阻體壓力會產生小尖峰，此原因是因為圍阻體

內氫氣燃燒所造成的。

4.6.3 國聖電廠再循環管中破口冷卻水流失事故 PCTran KuoSheng 模擬結果

PCTran KuoSheng 程式計算所得之重要事故時序詳如表 4.10。程式的初始條件在 PCTran KuoSheng 程式內建事故 (Malfunction) 中設定為 Loss of Coolant Accident (REC line break)，所設定之破口大小為 0.0174 平方公尺。事故開始包含爐心隔離冷卻系統以及所有高低壓注水系統均全部失效。主蒸汽隔離閥以及飼水泵關閉及跳脫時間則由程式自行計算，事故發生後第 20 秒爐心水位降至低於 Level 3 使得反應器急停，隨後在第 24 秒汽機跳脫；由於乾井壓力過高，造成主蒸汽隔離閥及飼水泵在 40.5 秒時跳脫。

事故開始第 20 秒時，壓力槽降流區水位下降至 450.3 公分處(低於 Level 3)，第 122 秒時，水位降至 361.9 公分處(低於 Level 2)，第 8.7 分鐘 (520.5 秒)時，水位降低至 85.9 公分(低於 Level 1)。由於爐心的衰變熱不斷的產生，壓力槽降流區的水位持續的下降，在事故開始後的第 11.7 分鐘 (704 秒)，壓力槽降流區水位達到爐心頂部，但爐心內之雙相水位直到 15.5 分鐘 (931.5 秒)時，才低於燃料頂端的高度。由於 PCTran KuoSheng 程式並沒有模擬爐心的熔損，故當燃料護套達 2,500K 時，溫度隨即便維持不變。由於程式模擬能力的限制，本研究之 PCTran 分析在燃料溫度達到 2,500K 時即停止。

4.6.4 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.04 結果比較分析

圖 4.52 為 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.04 電廠再循環管中破口冷卻水流失事故冷卻水系統壓力變化。PCTran KuoSheng 模擬顯示，冷卻水系統壓力在事故發生後迅速的降低，在 MAAP4.04 模擬顯示，事故開始後第 30 秒後，冷卻水系統壓力突然的上升產生一個尖峰，這是由於主蒸汽隔離閥關閉，造成部分蒸汽的累積而使冷卻水系統壓力上升，隨後冷卻水系統壓力則迅速的降低，直到與圍阻體壓力平衡。兩程式比較結果，

PCTran KuoSheng 並未預測到主蒸汽隔離閥關閉後，冷卻水系統壓力上升的尖峰，這是由於主蒸汽隔離閥預測關閉時間較 MAAP4.04 慢的原因。

圖 4.53 為 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.04 電廠再循環管中破口冷卻水流失事故破口流率變化。PCTran KuoSheng 模擬顯示，事故開始後破口以每秒 562 公斤的流率湧出，並逐漸的降低。如圖所示，在 25 秒時破口流率突然的下降至 147.8kg/s，原因在於程式計算破口流率時，以壓力槽降流區水位為其標準，水位在破口高度以上時，是以冷卻水計算破口流率；低於破口高度時，則是以水蒸汽來計算破口流率，故在 25 秒時，水位突然低於破口高度，造成計算的方式不同。在 PCTran KuoSheng 程式中並未對蒸汽及冷卻水的流率作個別的計算。MAAP4.04 模擬顯示，事故一開始，破口冷卻水以每秒 566 公斤的流率湧出，隨即在壓力槽降流區水位低於破口高度後，液態水流率降為零；事故發生 4 分鐘 (240 秒)後破口蒸氣流率則以每秒 140 公斤開始流出，並且逐漸緩慢降低到接近零。

圖 4.54 為 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.04 電廠再循環管中破口冷卻水流失事故壓力槽降流區水位變化。事故發生造成大量冷卻水及蒸汽從壓力槽流失，由於無任何的爐心注水系統開啟，因此壓力槽降流區的水位持續下降。PCTran KuoSheng 與 MAAP4.04 在計算水位時的參考點並不一樣，圖 3.8 為兩個程式水位計算的示意圖。為了方便結果的比較，圖 4.54 所示之壓力槽降流區水位變化圖是以燃料頂部(Top of Active Fuel, TAF)為零點。如圖所示，PCTran KuoSheng 預測降流區水位在事故發生後 11.7 分鐘 (704 秒) 到達爐心頂端，較 MAAP4.04 程式的預測值晚了 8.8 分鐘；MAAP4.0.4 預測水位下降速度明顯較 PCTtan KuoSheng 快，隨後則因為水位降至降流區底部時才趨於平緩。

圖 4.55 為 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.04 電廠再循環管中破口冷卻水流失事故燃料棒最高溫度變化。事故開始後，由於反應器的急停使得控制棒插入，因此燃料棒溫度急速的下降，PCTran KuoSheng 模擬顯示，壓力槽降流區水位達到爐心頂部，隨後不久燃料棒溫度開始上升；48.8 分鐘 (2930 秒)時燃料棒溫度達 2,500K，此時溫度即不再變化。比較 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.04 的結果，由於兩程式在計算爐心裸露的時間不同，因此在燃料棒溫度上升的時間也不同。

圖 4.56 為 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.04 電廠再循環管中破口冷卻水流失事故抑壓池溫度變化。PCTran KuoSheng 模擬顯示，事故發生後由於蒸汽持續由破口流出，造成抑壓池溫度的明顯上升。在 MAAP4.04 模擬結果顯示抑壓池溫度在事故發生後迅速上升，但在 25 分鐘後則趨近於平衡。

圖 4.57 為 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.04 電廠再循環破口冷卻水流失事故濕井壓力變化。事故開始後，由於反應器裡面的水蒸汽，經由破口進入圍阻體內，造成濕井內的壓力緩慢上升，並且造成圍阻體內其他區間壓力亦緩慢上升，比較 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.04 的結果，兩程式所預測的值相當接近。

圖 4.58 為 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.04 電廠再循環破口冷卻水流失事故氫氣產生量變化。PCTran KuoSheng 模擬顯示，事故開始後 37.3 分鐘 (2,240 秒) 的時候，護套中的鋯金屬與水發生反應，開始產生氫氣。MAAP4.04 程式模擬結果顯示，在事故發生 8.4 分鐘 (503 秒) 的時候，水蒸汽開始和做為護套材料的鋯合金發生化學反應而產生氫氣與熱，由於剛開始產生的氫氣量極小，因此在圖中無法明顯的顯示出開始點，故以箭頭指示。如圖所示，兩程式所預測氫氣開始產生的時間與氫氣產生量有所不同，此原因為兩程式在計算氫氣產生量的公式不同。

表 4.9 MAAP4.0.4 程式模擬國聖電廠再循環中破口冷卻水流失事故重要
 時序

時間(sec)	發生之重要事件
0.0	Break in Primary System
3.6	Ractor Scrammed
18.2	Feedwater Pumps Trip, MSIV Closed
177 (2.9 min)	Level Reaches TAF (downcomer)
299.1 (5 min)	Level Reaches TAF (core mixture water)
503 (8.4 min)	Hydrogen Generation
5,089 (1.4 hr)	Relocation Of Core Materials To Lower Head
14,001 (3.9 hr)	Vessel Failed By Ejection Of CRD Tubes
129,611 (36 hr)	Containment Failure

表 4.10 PCTran KuoSheng 程式模擬國聖電廠再循環中破口冷卻水流失事故重要時序

時間(sec)	發生之重要事件
0.0	Break in Primary System
20	Reactor Trip
24	Turbine Trip
40.5	Feedwater Pumps Trip, MSIV Closure
704 (11.7 min)	Level Reaches TAF (downcomer)
931.5 (15.5 min)	Level Reaches TAF (core mixture water)
2,240 (37.3 min)	Hydrogen Generation
2,630 (48.8 min)	Fuel Temperature Reaches 2500K

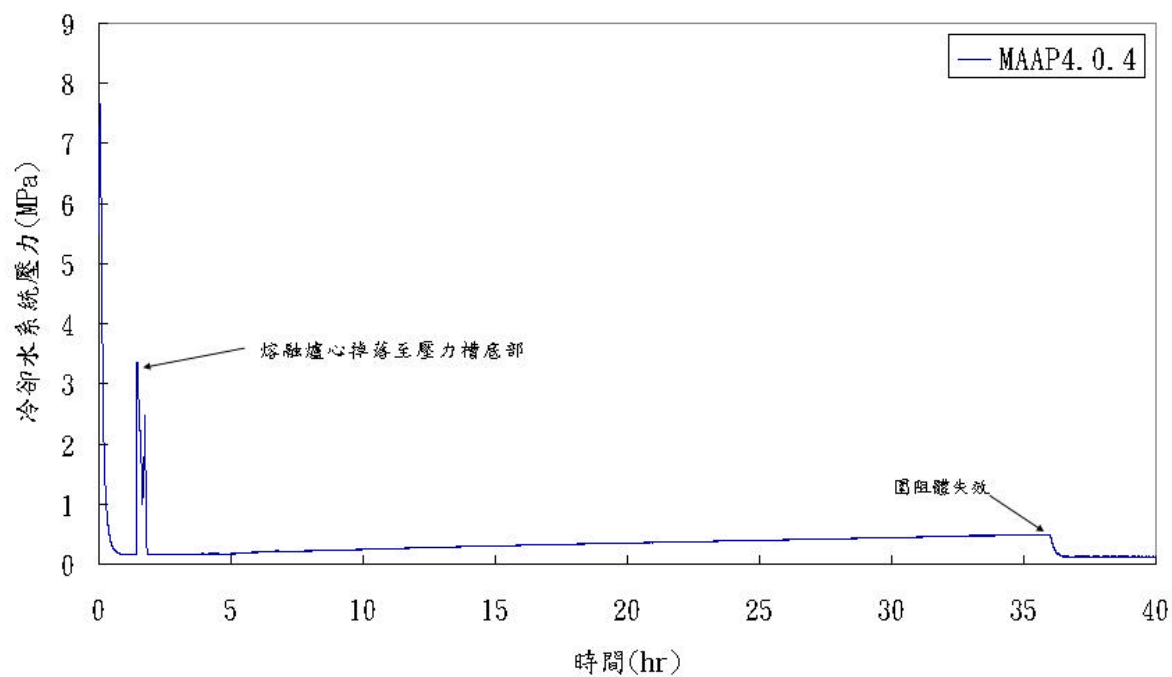


圖 4.48 電廠再循環管中破口冷卻水流失事故冷卻水系統壓力

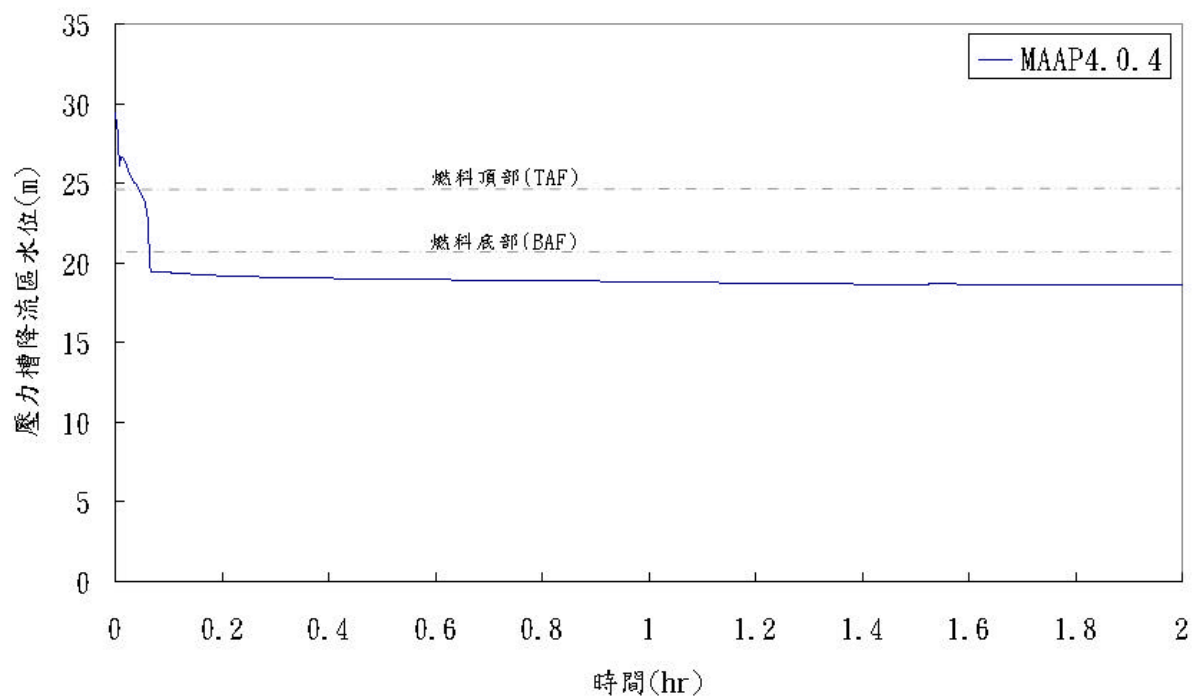


圖 4.49 電廠再循環管中破口冷卻水流失事故壓力槽降流區水位

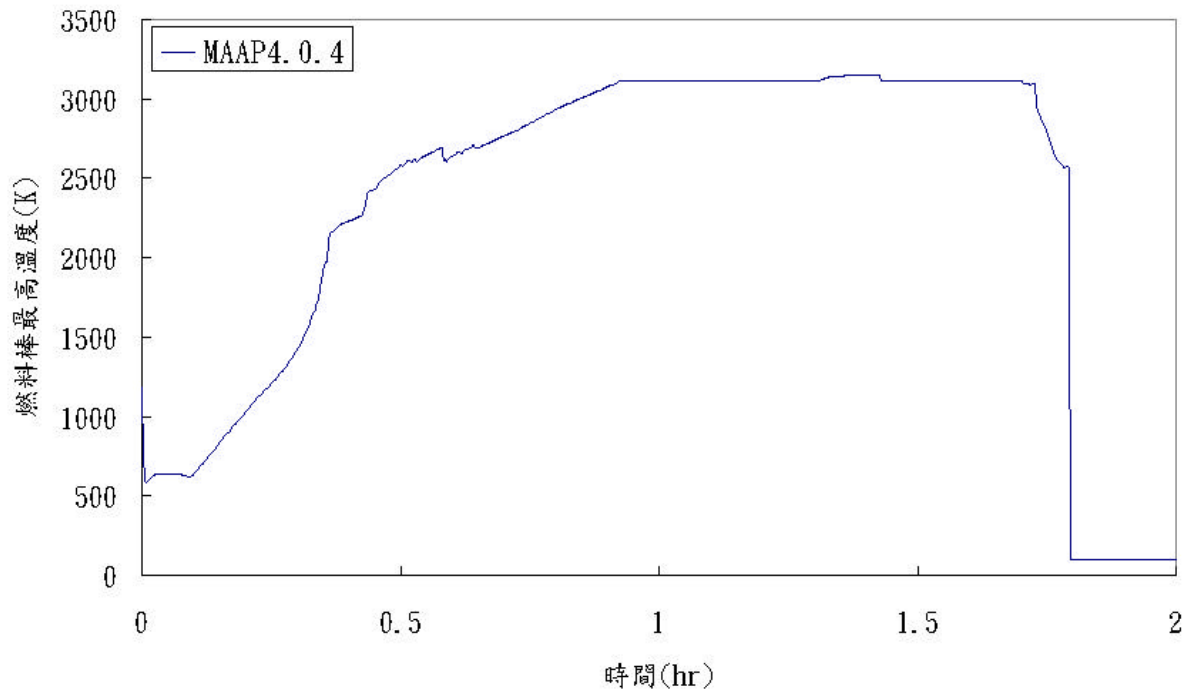


圖 4.50 電廠再循環管中破口冷卻水流失事故燃料棒最高溫度

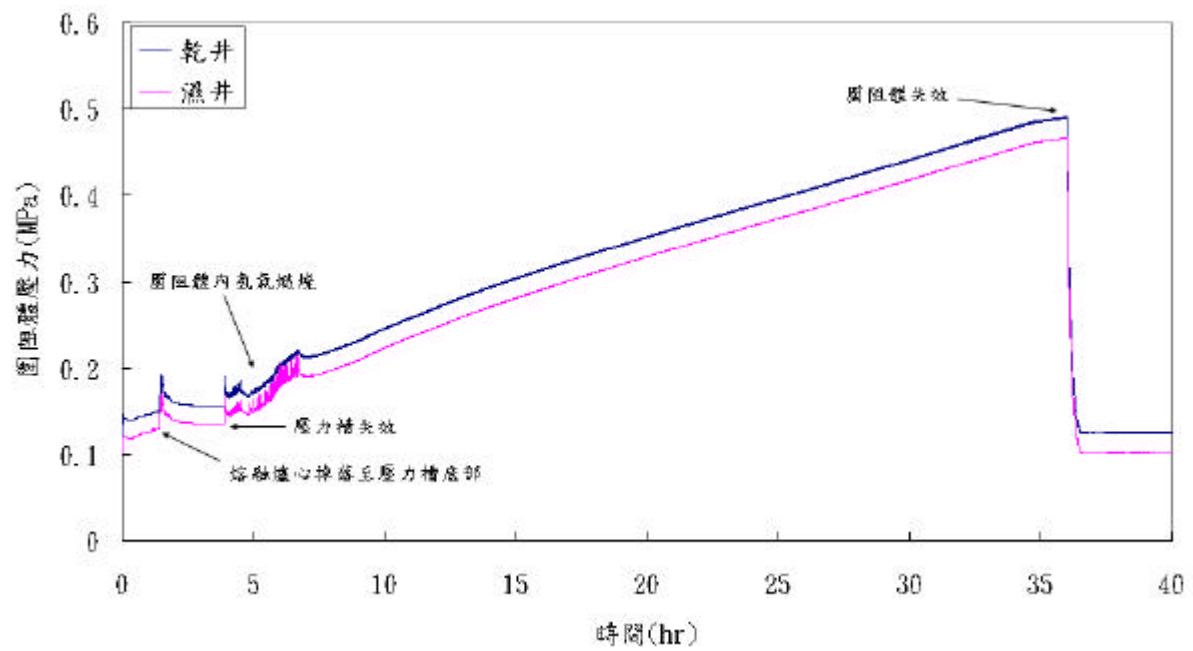


圖 4.51 電廠再循環管中破口冷卻水流失事故乾井與濕井壓力

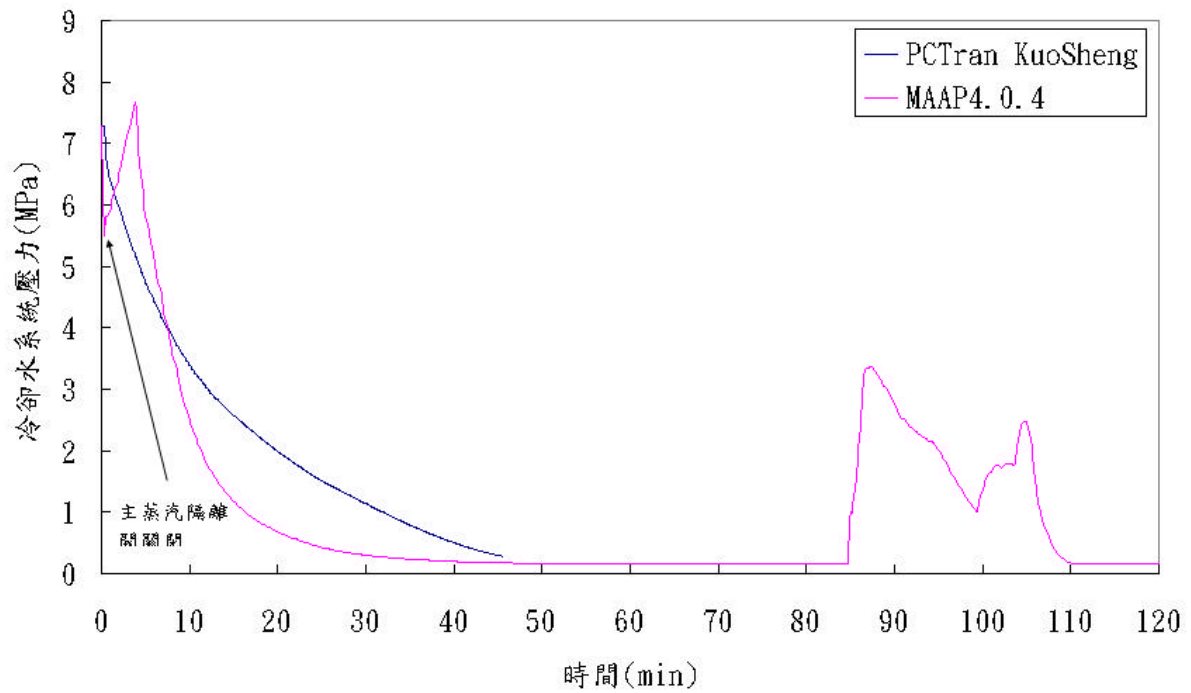


圖 4.52 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.04 電廠再循環管中破口冷卻水流失事故冷卻水系統壓力

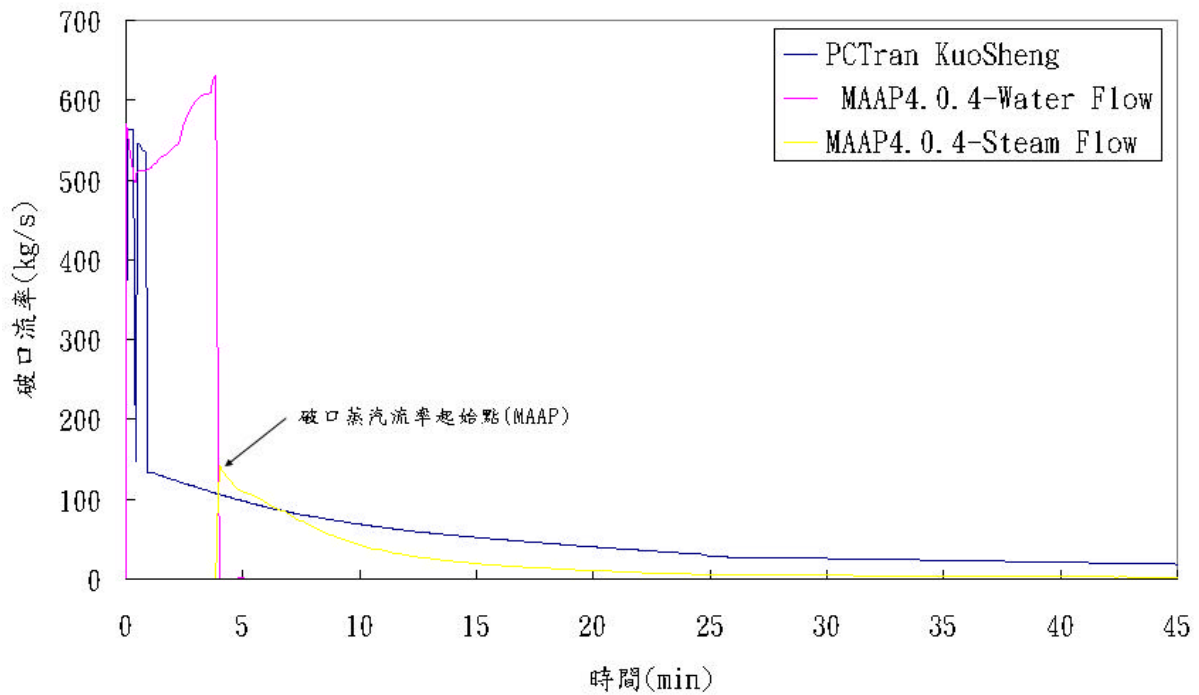


圖 4.53 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.04 電廠再循環管中破口冷卻水流失事故破口流率

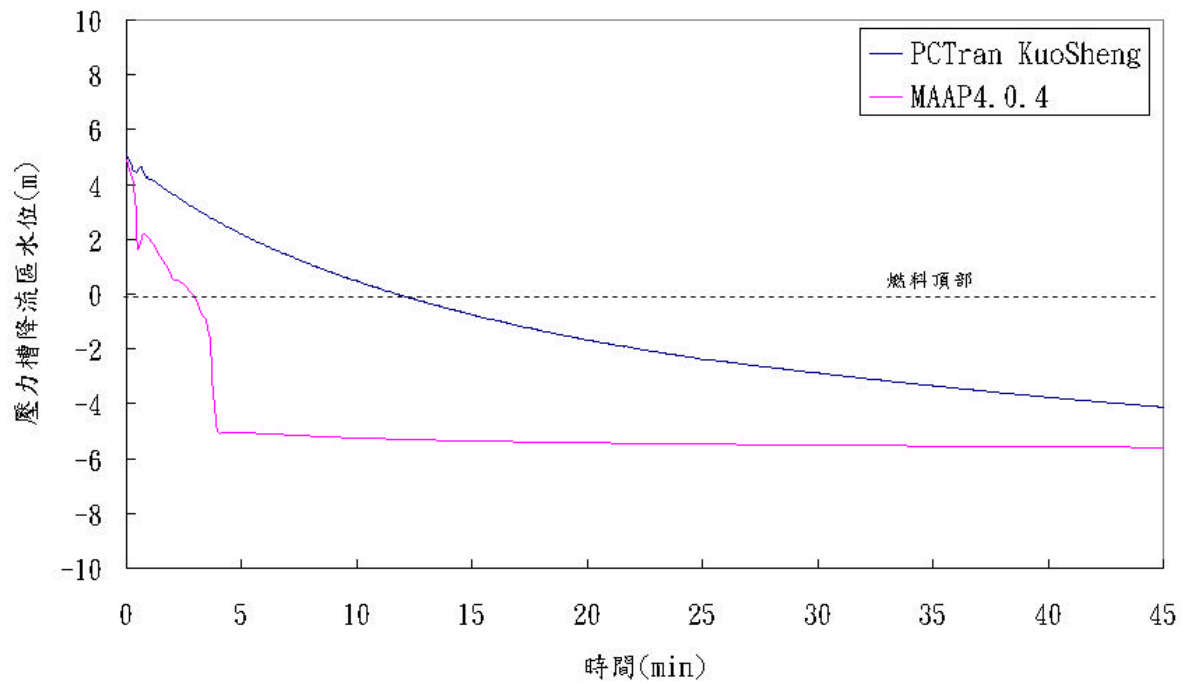


圖 4.54 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.04 電廠再循環管中破口冷卻水流失事故壓力槽降流區水位

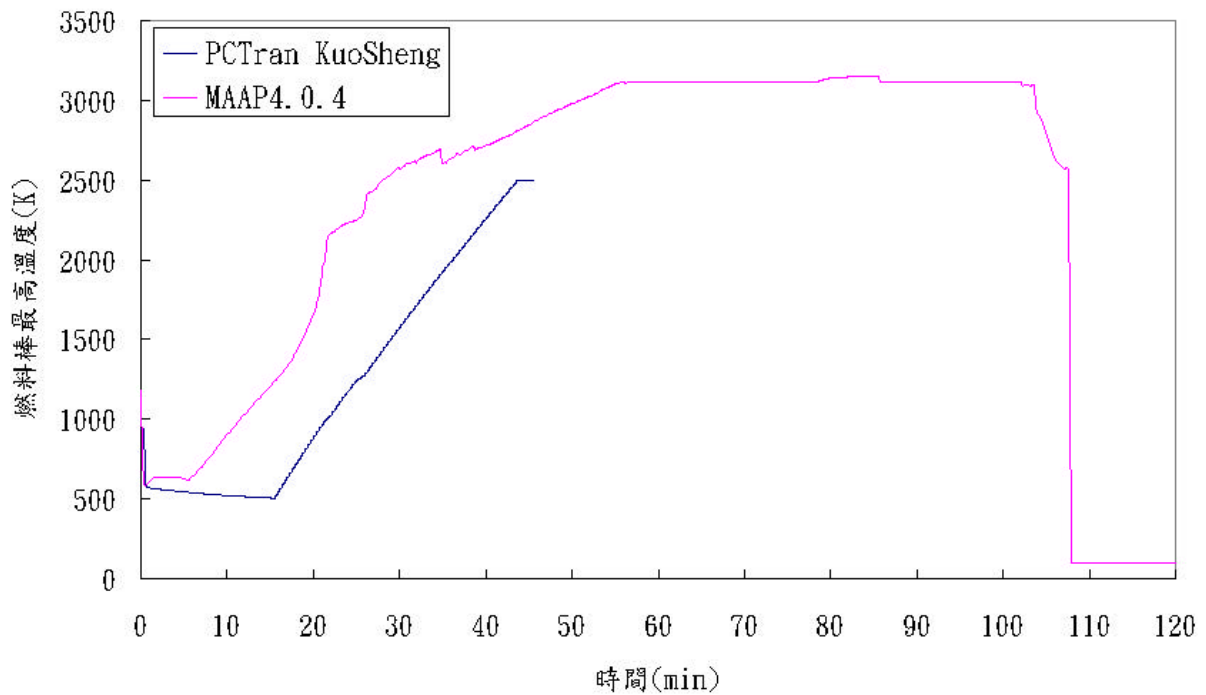


圖 4.55 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.04 電廠再循環管中破口冷卻水流失事故燃料棒最高溫度

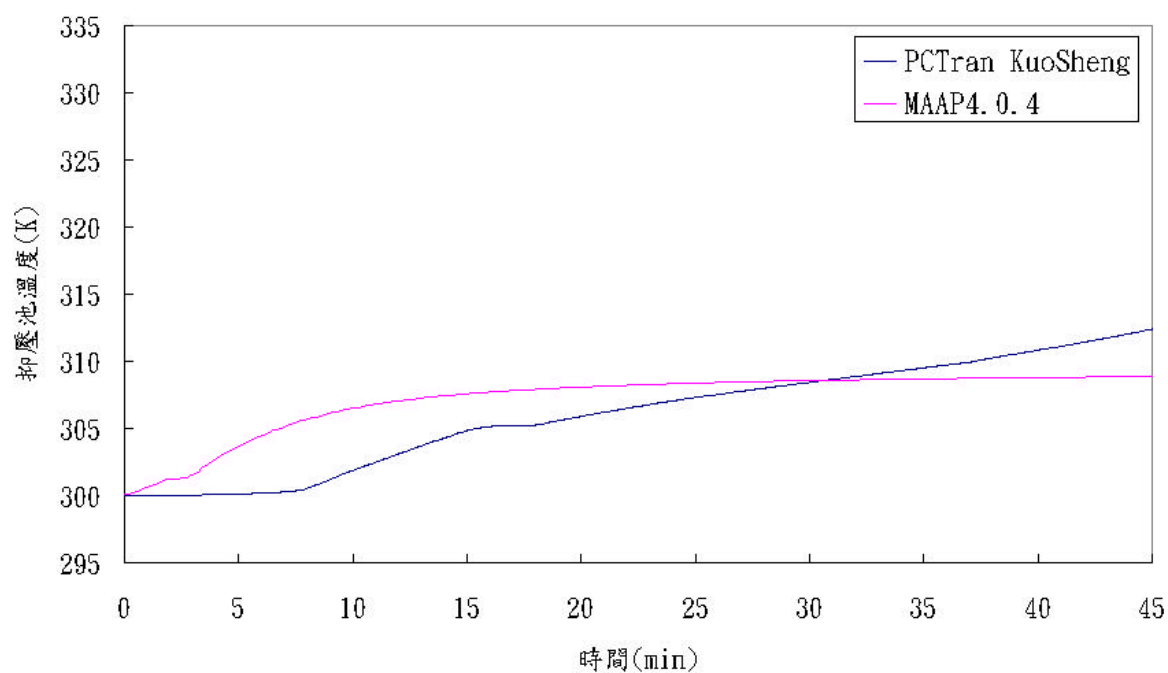


圖 4.56 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.04 電廠再循環管中破口冷卻水流失事故抑壓池溫度

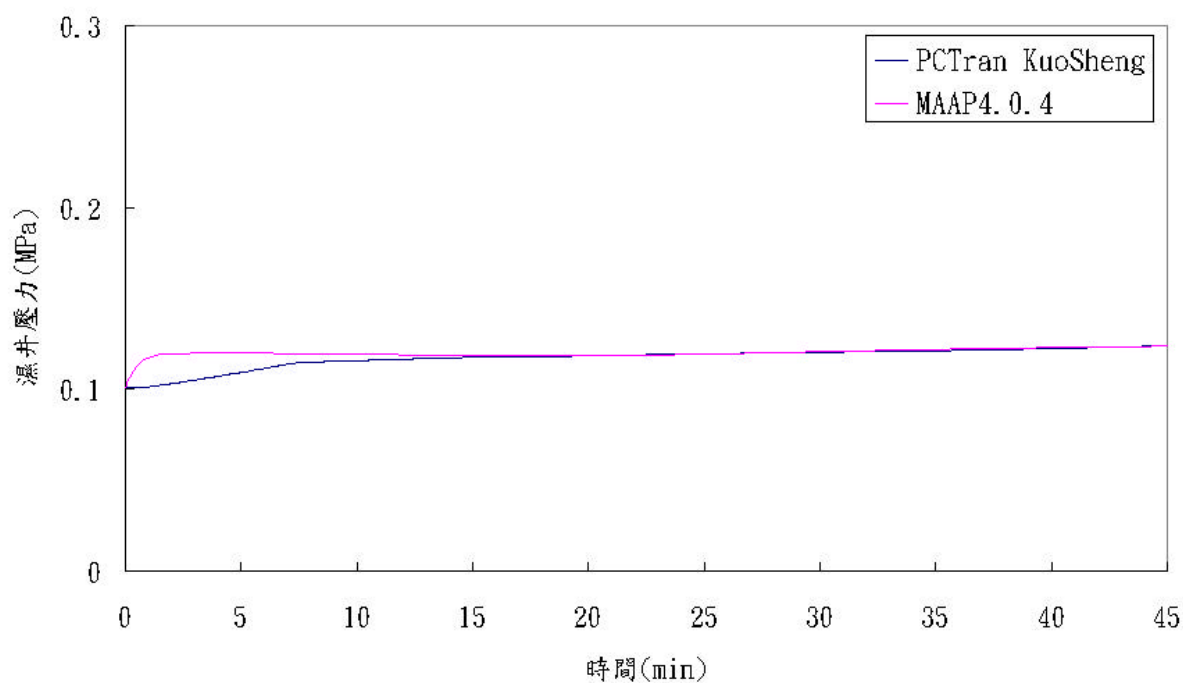


圖 4.57 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.04 電廠再循環中破口冷卻水流失事故濕井壓力

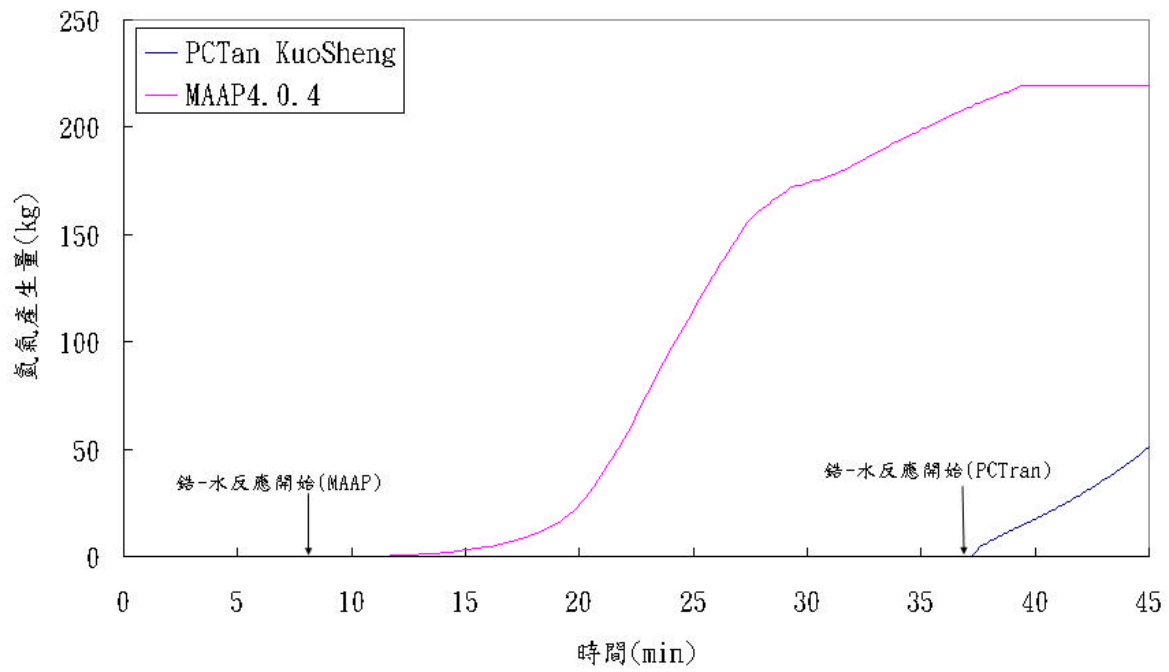


圖 4.58 PCTan KuoSheng 與 MAAP4.04 電廠再循環中破口冷卻水流失事故氫氣產生量

4.7 小破口冷卻水流失事故模擬

4.7.1 背景

本事故的肇因為主蒸汽管破口造成之冷卻水流失事故，發生破口的位置是主蒸汽管，其破口面積為 0.0032 平方公尺，在本報告中稱小破口冷卻水流失。事故發生後，冷卻水系統中的水會迅速的汽化成蒸汽，並且從破口流失進入乾井，此時的乾井壓力上升到急停的設定點，引發急停信號，使得主蒸汽隔離閥關閉、飼水泵跳脫以及反應器急停。由於事故的模擬中假設所有的爐心注水系統皆無法啟動，因此無任何的緊急冷卻水系統進入反應器壓力槽內，爐心的衰變熱不斷的產生，使冷卻水不斷的汽化，造成爐心的水位逐漸的降低，又因無冷卻水的補充，不久後爐心開始裸露，逐漸的熔毀向下流動落入壓力槽底部，並且將該處的積水蒸乾，並且使該處反應器槽壁溫度逐漸升高，最後熔融爐心所產生的衰變熱將壓力槽底部熔穿，熔融爐心落入爐穴，與混凝土發生熔融爐心混凝土作用(Molten Core Concrete Interaction, MCCI)。在熔融爐心混凝土作用中所產生的氣體，使得圍阻體內的壓力不斷的升高，最終圍阻體失效，造成放射性物質的外釋。

4.7.2 國聖電廠小破口冷卻水流失事故 MAAP4.0.4 模擬結果

MAAP4.0.4 程式計算所得之重要事故時序詳如表 4.11。程式的初始條件依照程式輸入檔案 (Input File) 內的設定，破口面積為 0.0032 平方公尺，事故中假設爐心隔離冷卻系統，以及所有高低壓注水系統均失效。主蒸汽隔離閥與飼水水泵的關閉與反應器急停動作，則由程式自行計算，事故發生後 14.8 秒，反應器因乾井壓力過高急停，隨即在 29.7 秒時因為主系統壓力過低造成主蒸汽隔離閥隔離及飼水水泵的跳脫。

爐心的衰變熱不斷的產生，壓力槽降流區的水位持續的下降，在事故開始後的第 48 分鐘 (2,871 秒)，壓力槽內降流區水位降至爐心頂部高度，但爐心內之雙相水位直

到 62 分鐘 (3,722 秒)時，才低於燃料頂端的高度。由於水蒸汽的熱傳效果遠低於水，因此裸露於水面上的燃料棒所產生的熱將難以被移除，因此燃料棒的溫度持續的升高，燃料開始熔毀。熔融爐心在第 3.3 小時 (11,783 秒)時開始向下流至反應器壓力槽底部區間。5.8 小時 (20,894 秒)壓力槽底部溫度過高，將反應器壓力槽融穿，熔融爐心落入爐穴當中與圍阻體混凝土基座發生 MCCI 作用，產生大量可燃性氣體，造成圍阻體在事故發生後第 40.2 小時 (144,787 秒)失效，大量的放射性物質外釋到外界環境。

圖 4.59 為電廠小破口冷卻水流失事故冷卻水系統壓力變化，模擬結果顯示，事故發生初期冷卻水系統壓力因安全釋壓閥的開啟與關閉，有明顯的震盪，隨後因衰變熱蒸發壓力槽內的冷卻水，降流區水位下降，使得產生的水蒸汽變少並且從破口流出，造成安全釋壓閥無法開啟，因此冷卻水系統壓力迅速的下降。由於融熔爐心在 3.3 小時 (11,783 秒)的時候，開始下滑掉落至壓力槽底部，被該處的積水淬熄，產生大量蒸汽，造成冷卻水系統壓力快速上升，形成圖示中尖峰，事故後第 5.8 小時 (20,894 秒)，因為壓力槽內溫度過高，造成壓力槽破裂，隨後在 40.2 小時 (144,787 秒)的時候，圍阻體的失效，使得冷卻水系統壓力隨著圍阻體壓力降低。

圖 4.60 為電廠小破口冷卻水流失事故壓力槽降流區水位變化，模擬結果顯示，由於爐心的衰變熱不斷產生，使冷卻水不斷的汽化，所有的爐心注水系統均無法執行其功能，造成壓力槽降流區的水位逐漸降低，在 48 分鐘 (2,871 秒)時，降流區水位低於燃料頂端的高度，直到 6.3 小時 (22,510 秒)水位降至降流區底部。圖 4.61 為電廠小破口冷卻水流失事故燃料棒最高溫度變化，模擬結果顯示，由於事故發生後 48 分鐘 (2,871 秒)壓力槽降流區水位達到爐心頂部，隨後不久，當爐心雙相水位低於燃料頂部高度時，燃料溫度上升。在 3.3 小時 (11,783 秒)，熔融爐心開始掉落至壓力槽底部，接著在 5.8 小時 (20,894 秒)的時候，由於壓力槽失效，熔融爐心掉落離開壓力槽。熔融爐心掉落前，爐心燃料溫度產生尖峰，形成的原因不是很清楚，可能是程式計算的問題。

圖 4.62 為電廠小破口冷卻水流失事故乾井與濕井壓力變化，模擬結果顯示，由於破口的位置在主蒸汽管，因此由破口流出的蒸汽進入了乾井，造成圍阻體的壓力上升，

在 3.3 小時 (11,783 秒)的時候，熔融爐心開始掉落至壓力槽底部，造成圍阻體壓力上升的小尖峰。壓力槽在 5.8 小時 (20,894 秒)失效，大量的熔融爐心自壓力槽底部向外流出，造成圍阻體壓力急劇上升，隨後在 40.2 小時 (144,787 秒)，因為圍阻體失效，使得壓力驟降。由於濕井裡有抑壓池，會將蒸汽凝結，故濕井的壓力會略低於乾井。如圖所示，在壓力槽失效後，圍阻體壓力會產生小尖峰，此原因是因為圍阻體內氫氣燃燒所造成的。

4.7.3 國聖電廠小破口冷卻水流失事故 PCTran KuoSheng 模擬結果

PCTran KuoSheng 程式計算所得之重要事故時序詳如表 4.12。程式的初始條件在 PCTran KuoSheng 程式內建事故 (Malfunction) 中設定為 Steam Line Break Inside Drywell (破口大小為 0.0032 平方公尺)。事故開始包含爐心隔離冷卻系統以及所有高低壓注水系統均全部失效。主蒸汽隔離閥以及飼水泵關閉及跳脫時間則由程式自行計算，事故發生後第 5.2 分鐘 (312.5 秒)主蒸汽隔離閥、飼水泵跳脫以及反應器急停，接著在第 5.25 分鐘 (315 秒)汽機跳脫。

事故開始第 5.3 分鐘 (319 秒)時，壓力槽降流區水位下降至 411.4 公分處(低於 Level 3)，第 8.1 分鐘 (483.5 秒)時，水位降至 361.9 公分處(低於 Level 2)，第 23.8 分鐘 (1,430.5 秒)時，水位降低至 85.9 公分(低於 Level 1)。由於爐心的衰變熱不斷的產生，壓力槽降流區的水位持續的下降，在事故開始後的第 30.3 分鐘 (1,818.5 秒)，壓力槽降流區水位達到爐心頂部，但爐心內之雙相水位直到 33.2 分鐘 (1,994 秒)時，才低於燃料頂端的高度。由於 PCTran KuoSheng 程式並沒有模擬爐心的熔損，故當燃料護套達 2,500K 時，溫度隨即便維持不變。由於程式模擬能力的限制，本研究之 PCTran KuoSheng 分析在燃料溫度達到 2,500K 時即停止。PCTran KuoSheng 所預測之反應器急停時間遠較 MAAP4.0.4 所預測的為晚。

4.7.4 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 結果比較分析

圖 4.63 為 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠小破口冷卻水流失事故冷卻水系統壓力變化。PCTran KuoSheng 模擬顯示，事故開始後第 5.2 分鐘（312.5 秒）時，冷卻水系統壓力突然的上升產生一個尖峰，這是由於主蒸汽隔離閥關閉，造成部分蒸汽的累積而使冷卻水系統壓力上升，隨後冷卻水系統壓力因安全釋壓閥的開啟與關閉，有明顯的震盪，隨後因衰變熱蒸發壓力槽內的冷卻水，使得水位下降，產生的水蒸汽變少並且從破口流出，使得安全釋壓閥無法開啟，因此冷卻水系統壓力則迅速的降低，直到與圍阻體壓力平衡。在 MAAP4.0.4 模擬顯示，冷卻水系統壓力在事故發生後迅速的降低，並沒有因為主蒸汽隔離閥關閉，造成壓力快速上升的情況，兩程式在此有明顯的差異。如圖所示，PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 所預測壓力的震盪頻率有明顯的差別，MAAP4.0.4 程式中，將冷卻水系統細分為數個控制體積，分別計算其溫度與壓力，而 PCTran KuoSheng 程式將冷卻水系統視為單一的體積，只有一個溫度與壓力，故 PCTran KuoSheng 程式之冷卻水系統壓力變化速率較 MAAP4.0.4 所預測的為緩慢，造成安全釋壓閥開啟與關閉的頻率亦不一樣。

圖 4.64 為 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠小破口冷卻水流失事故破口流率變化。PCTran KuoSheng 模擬顯示，破口蒸汽以每秒 28 公斤的流率湧出，在 5.2 分鐘（312.5 秒）時因為冷卻水系統壓力突然的上升，造成破口流量驟升至每秒 106 公斤，隨後破口流率則小幅緩慢的下降。MAAP4.0.4 模擬結果顯示，事故一開始，破口蒸汽以每秒 26 公斤的流率湧出，由於冷卻水系統壓力沒有升高，因此破口流率沒有驟升的情況產生，事故發生後破口流量逐漸緩慢降低。由於破口事故發生在主蒸汽管路，破口流出的全都是蒸汽。如圖所示，兩程式間所預測之破口流率有所差異，基本上其趨勢與冷卻水系統壓力變化的趨勢一致。

圖 4.65 為 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠小破口冷卻水流失事故安全釋壓閥流率變化。PCTran KuoSheng 模擬顯示，由於主蒸汽隔離閥在事故後 5.2 分鐘（312.5 秒）關閉，部分蒸汽累積造成冷卻水系統壓力的上升，所預測之壓力最大值為 7.78MPa，造成 9 個安全釋壓閥的開啟，總流量為 2715 公斤/秒；如圖所示，兩程式間所預測之安

全釋壓閥開啟時間及頻率有所差異，基本上其趨勢與冷卻水系統壓力變化的趨勢一致。

圖 4.66 為 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠小破口冷卻水流失事故壓力槽降流區水位變化。PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 在計算水位時的參考點並不一樣，圖 3.8 為兩個程式水位計算的示意圖。為了方便結果的比較，圖 4.66 所示之壓力槽降流區水位變化圖是以燃料頂部(Top of Active Fuel, TAF)為零點。PCTran KuoSheng 模擬顯示，由於在 5.2 分鐘 (312.5 秒)時安全釋壓閥的開啟，大量蒸汽從壓力槽流失，因此水位突然的下降，壓力槽降流區水位在事故發生後 30.3 分鐘 (1,818.5 秒)降到爐心燃料頂部高度，所預測的時間較MAAP4.0.4 程式所預測之時間早了 17.7 分鐘。如圖所示，PCTran KuoSheng 在預測壓力槽降流區水位，在 5.2 分鐘 (312.5 秒)時產生一個大尖峰，此原因為主蒸汽隔離閥關閉所造成。

圖 4.67 為 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠小破口冷卻水流失事故燃料棒最高溫度變化。事故開始後 5.2 分鐘 (312.5 秒)，由於反應器的急停使得控制棒插入，因此燃料棒溫度急速的下降，PCTran KuoSheng 模擬顯示，壓力槽雙相水位達爐心頂部後，燃料棒溫度開始上升；1.4 小時 (4,915 秒)時燃料棒溫度達 2,500K，此時溫度即不再變化。比較 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 的結果，由於兩程式在計算爐心裸露的時間不同，因此在燃料棒溫度上升的時間也不同。

圖 4.68 為 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠小破口冷卻水流失事故抑壓池溫度變化。PCTran KuoSheng 模擬顯示，事故發生後 5.2 分鐘 (312.5 秒)由於安全釋壓閥的開啟，使得大量的蒸汽經由此進入抑壓池，造成抑壓池的溫度階梯狀的升高，由於蒸汽持續由破口流出，明顯造成抑壓池溫度的明顯上升。比較兩程式所預測的結果，PCTran KuoSheng 所預測的值小於 MAAP4.0.4。如圖所示，PCTran KuoSheng 所預測之抑壓池溫度只有在安全釋壓閥開啟時才會改變。

圖 4.69 為 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠小破口冷卻水流失事故乾井與濕井壓力變化。事故開始後，由於反應器裡面的水蒸汽，經由破口進入圍阻體內，造成濕井內的壓力緩慢上升，並且造成圍阻體內其他區間壓力亦緩慢上升，比較兩程式所預測的結果，PCTran KuoSheng 所預測的乾井與濕井壓力值皆分別小於 MAAP4.0.4。如圖所示，

PCTran KuoSheng 所預測之濕井壓力上升速度非常的緩慢。本事故之破口面積為主蒸汽管截面積之 1/75 (0.0032 平方公尺)，並非 1/100 (0.002356 平方公尺)；此原因為破口面積過小(<0.0032 平方公尺)，導致由破口流出之蒸汽量太少，因此造成圍阻體內乾井壓力無法上升，無法達到急停條件。

圖 4.70 為 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠小破口冷卻水流失事故氫氣產生量變化。PCTran KuoSheng 模擬顯示，事故開始後 71.2 小時 (4,370 秒)的時候，護套中的鋁金屬與水發生反應，開始產生氫氣；MAAP4.0.4 程式模擬結果顯示，在事故發生 1.2 小時 (4,421 秒)的時候，水蒸汽開始和做為護套材料的鋁合金發生化學反應而產生氫氣與熱，由於剛開始產生的氫氣量極小，因此在圖中無法明顯的顯示出開始點，故以箭頭指示。如圖所示，兩程式所預測氫氣開始產生的時間與氫氣產生量有所不同。

表 4.11 MAAP4.0.4 程式模擬國聖電廠小破口冷卻水流失事故重要時序

時間(sec)	發生之重要事件
0.0	Break in Primary System
14.8	Ractor Scrammed
29.7	Feedwater Pumps Trip, MSIV Closed
2,871 (48 min)	Level Reaches TAF (downcomer)
3,722 (62 min)	Level Reaches TAF (core mixture water)
4,421 (1.2 hr)	Hydrogen Generation
11,783 (3.3 hr)	Relocation Of Core Materials To Lower Head
20,894 (5.8 hr)	Vessel Failed By Ejection Of CRD Tubes
144,787 (40.2 hr)	Containment Failure

表 4.12 PCTran KuoSheng 程式模擬國聖電廠小破口冷卻水流失事故重要時序

時間(sec)	發生之重要事件
0.0	Break in Primary System
312.5 (5.2 min)	Feedwater Pumps Trip, Reactor Scrammed , MSIV Closure
315 (5.3 min)	Turbine Trip
1,818.5 (30.3 min)	Level Reaches TAF (downcomer)
1,994 (33.2 min)	Level Reaches TAF (core mixture water)
4,370 (1.2 hr)	Hydrogen Generation
4,915 (1.4 hr)	Fuel Temperature Reaches 2500K

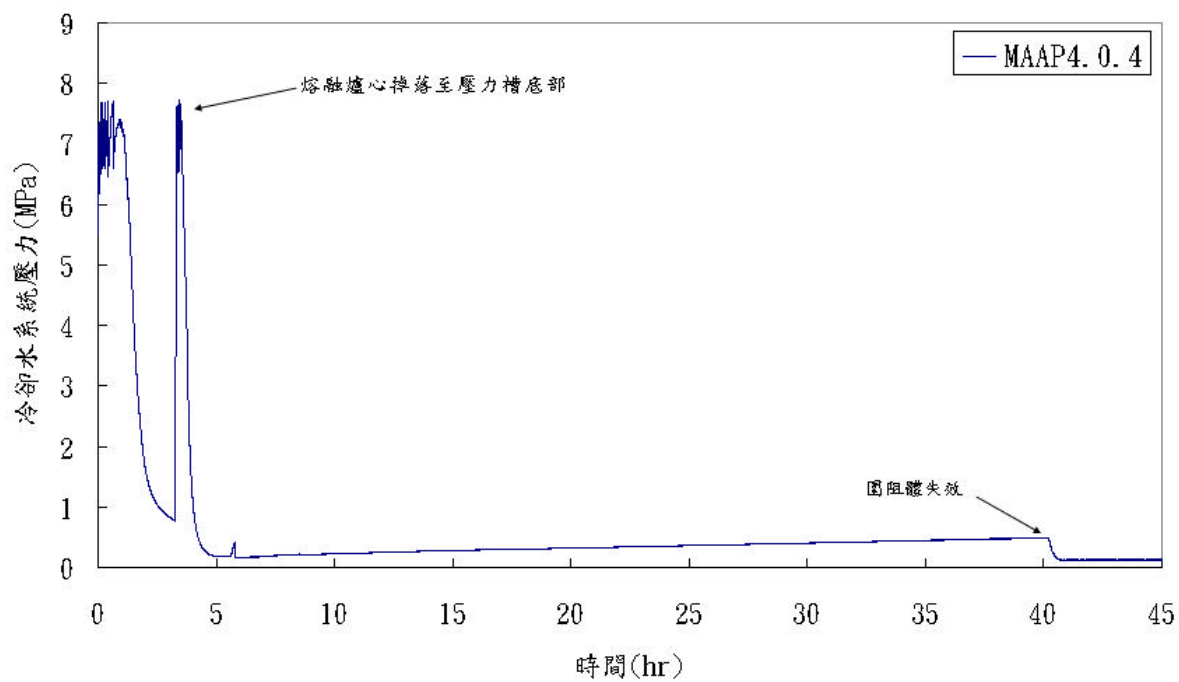


圖 4.59 電廠小破口冷卻水流失事故冷卻水系統壓力

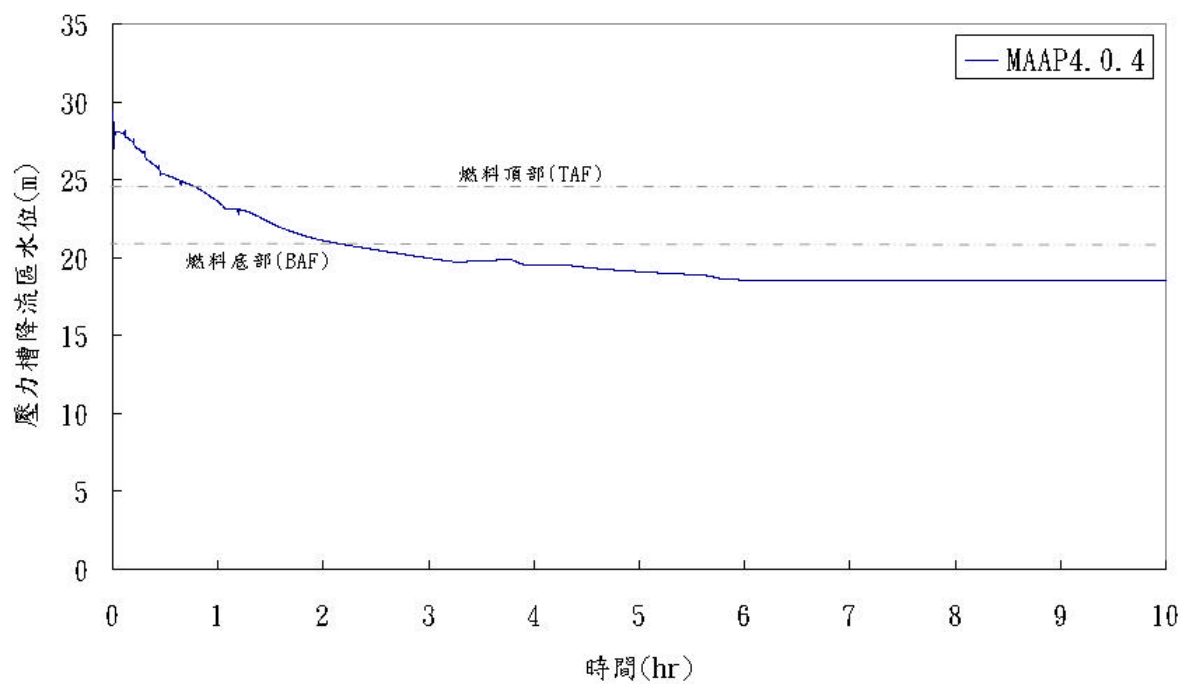


圖 4.60 電廠小破口冷卻水流失事故壓力槽降流區水位

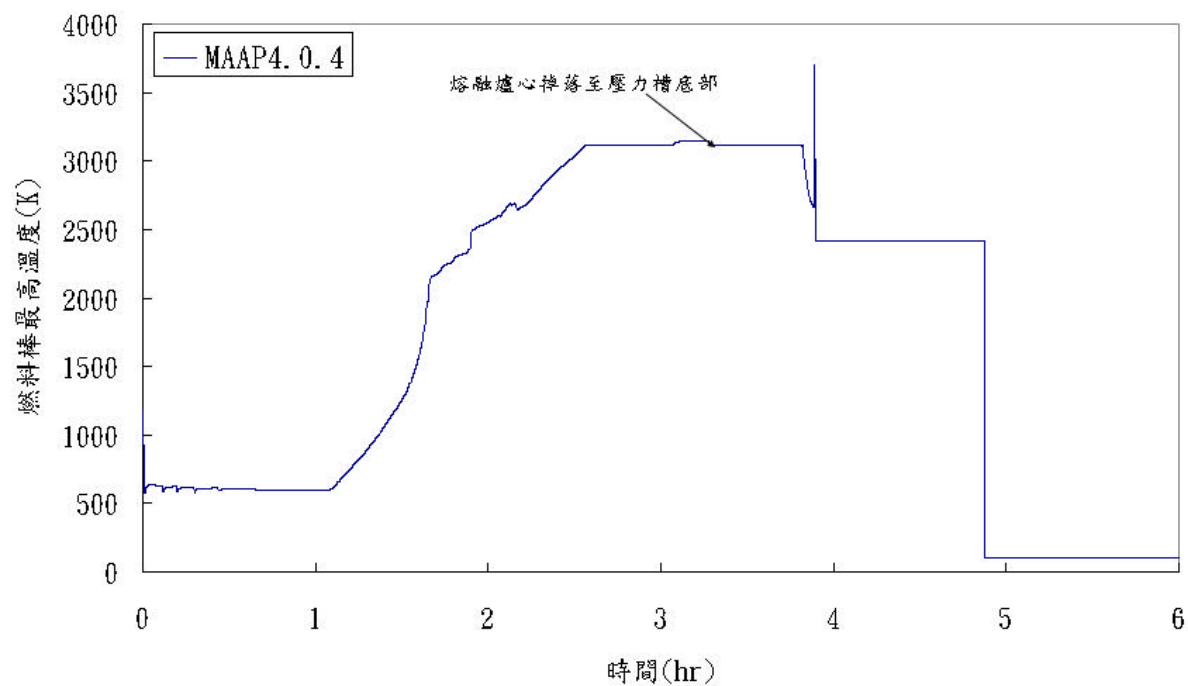


圖 4.61 電廠小破口冷卻水流失事故燃料棒最高溫度

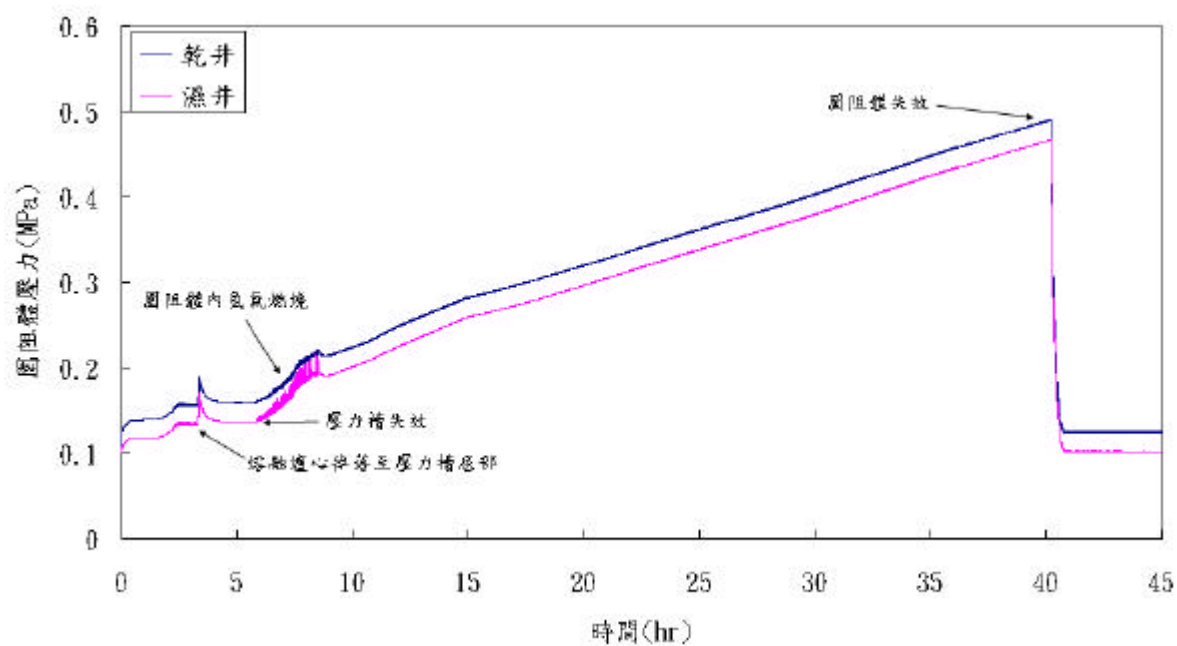


圖 4.62 電廠小破口冷卻水流失事故乾井與濕井壓力

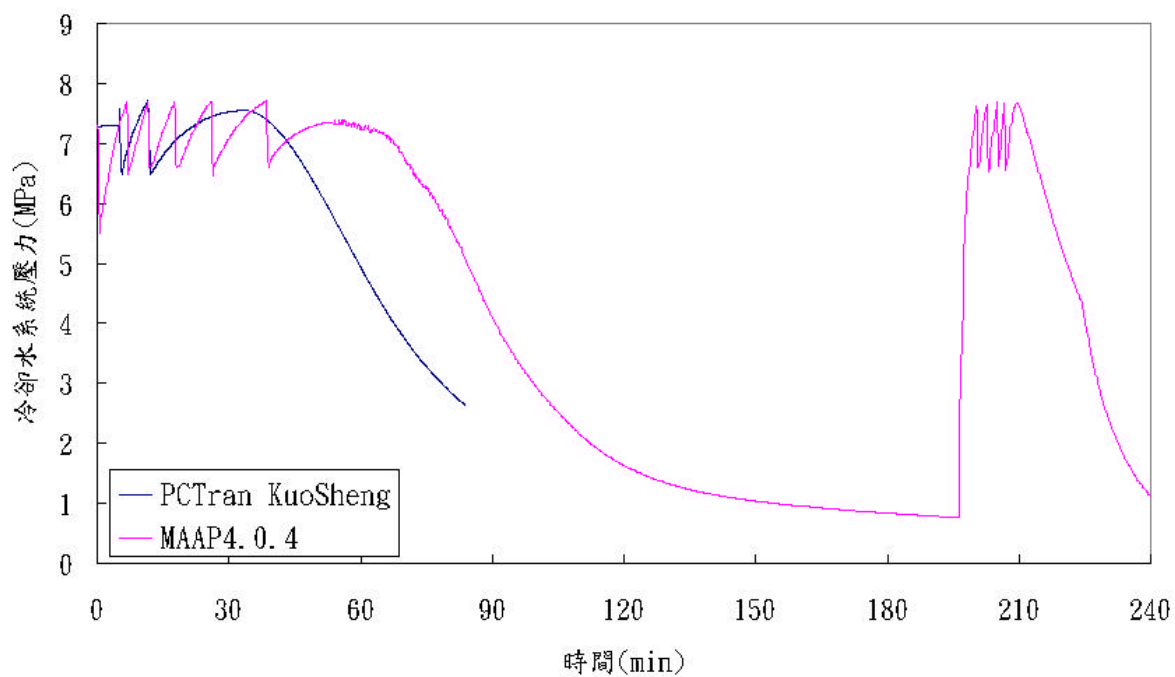


圖 4.63 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠小破口冷卻水流失事故冷卻水系統壓力

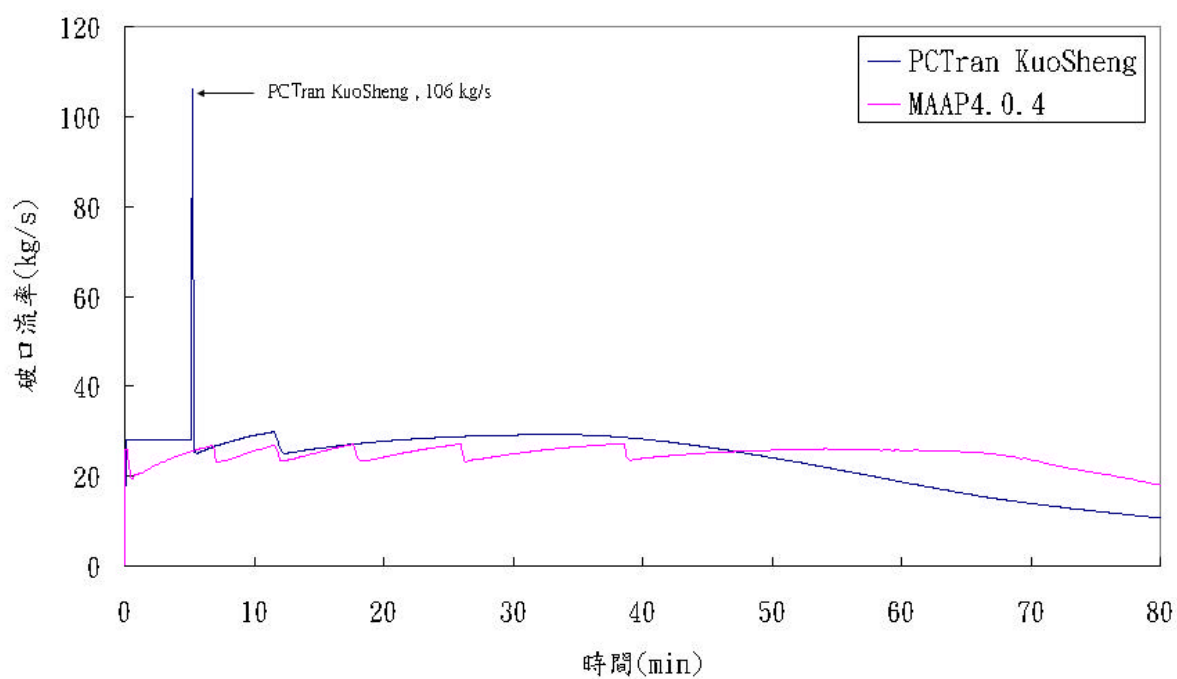


圖 4.64 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠小破口冷卻水流失事故破口流率

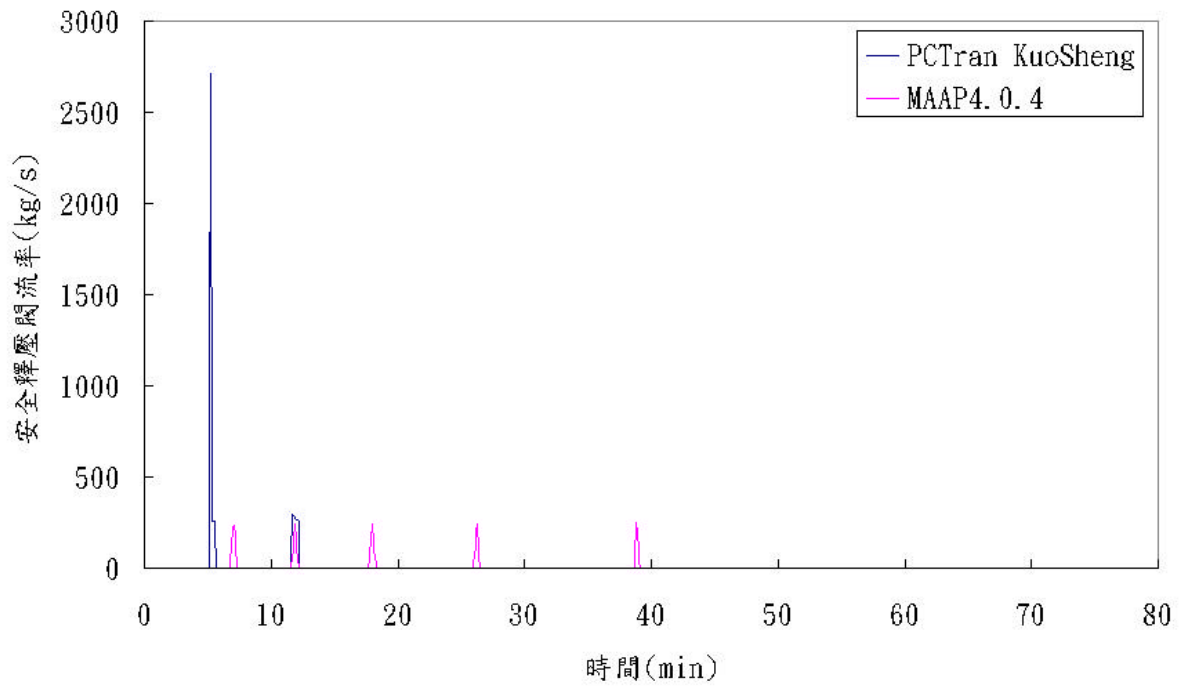


圖 4.65 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠小破口冷卻水流失事故安全釋壓閥流率

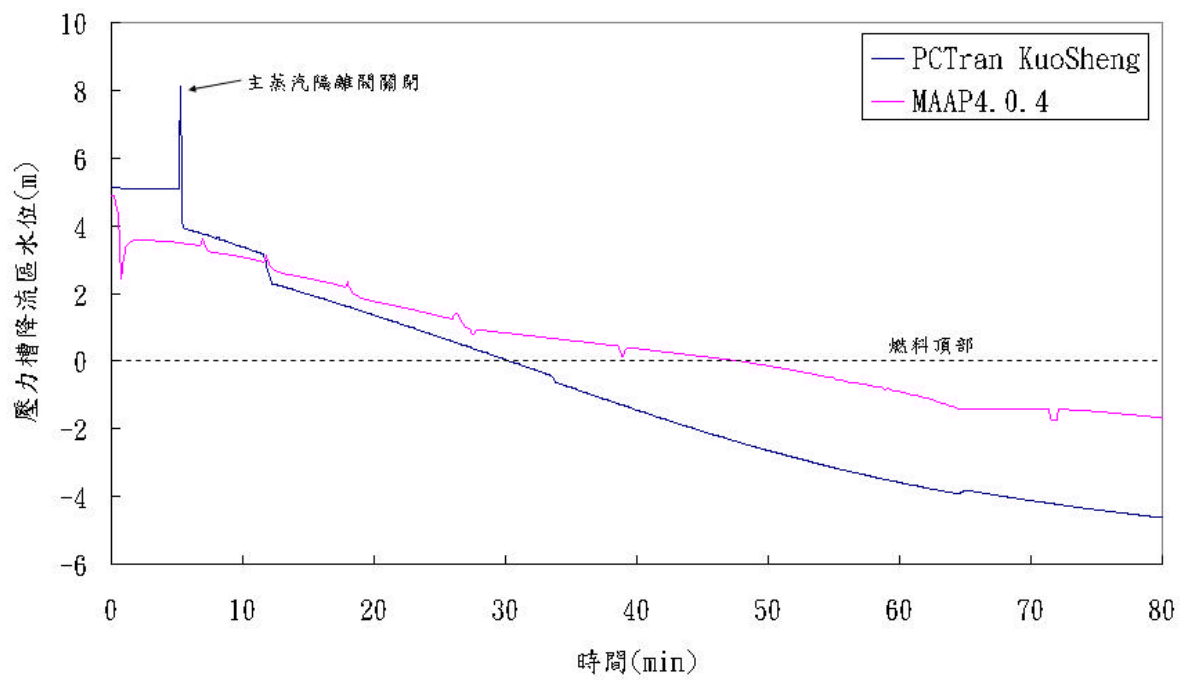


圖 4.66 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠小破口冷卻水流失事故壓力槽降流區水位

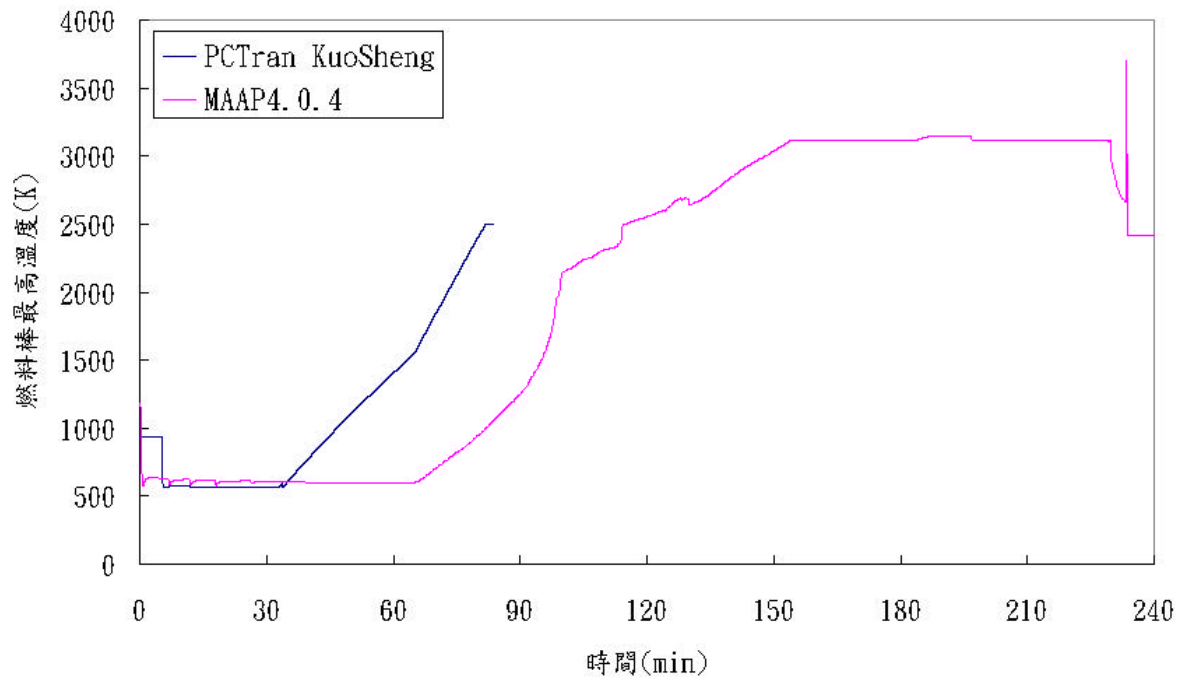


圖 4.67 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠小破口冷卻水流失事故燃料棒最高溫度

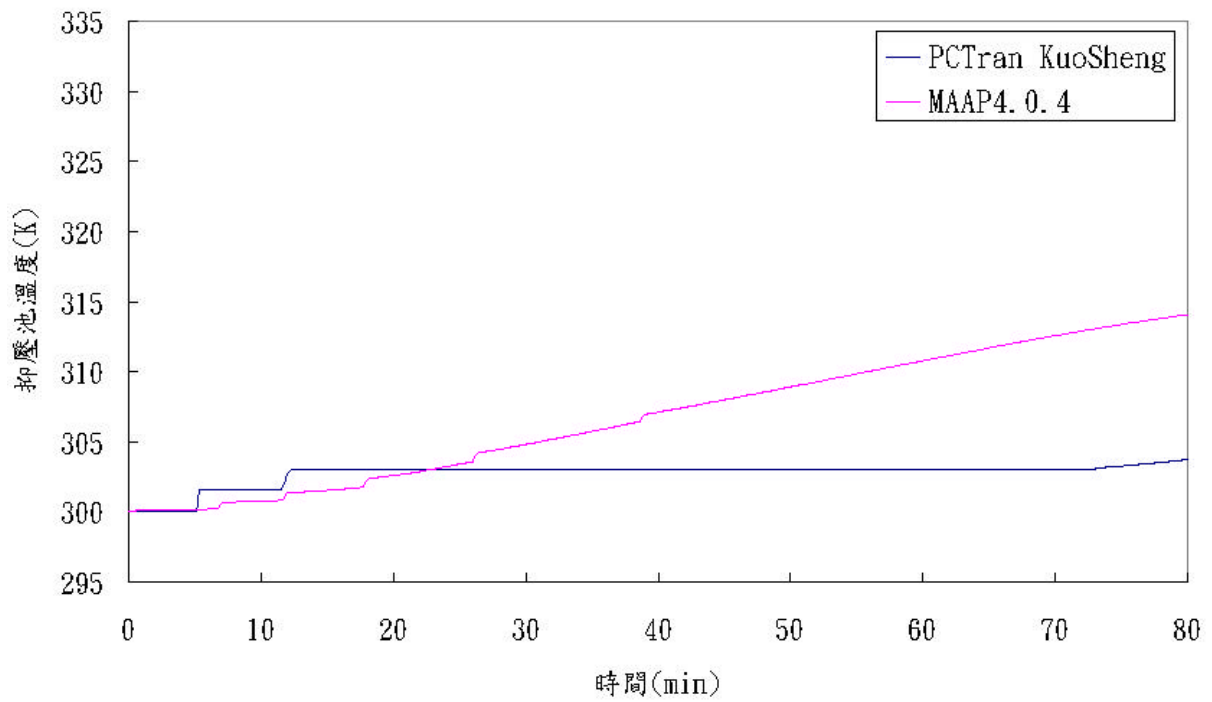


圖 4.68 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠小破口冷卻水流失事故抑壓池溫度

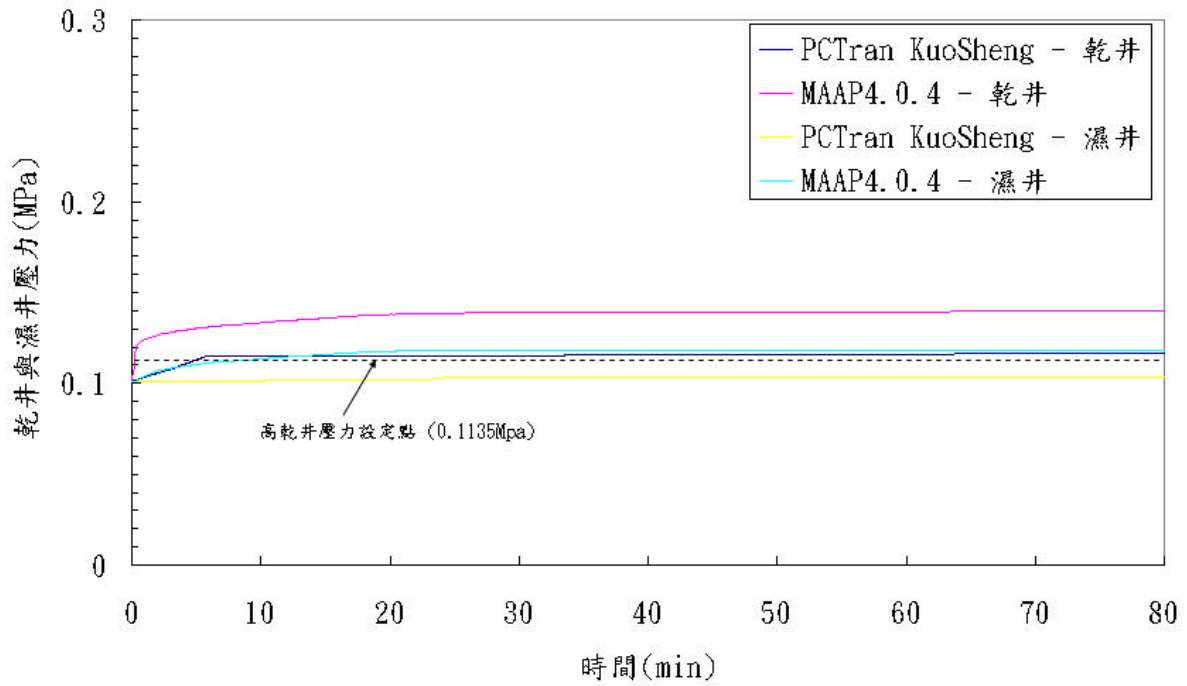


圖 4.69 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠小破口冷卻水流失事故乾井與濕井壓力

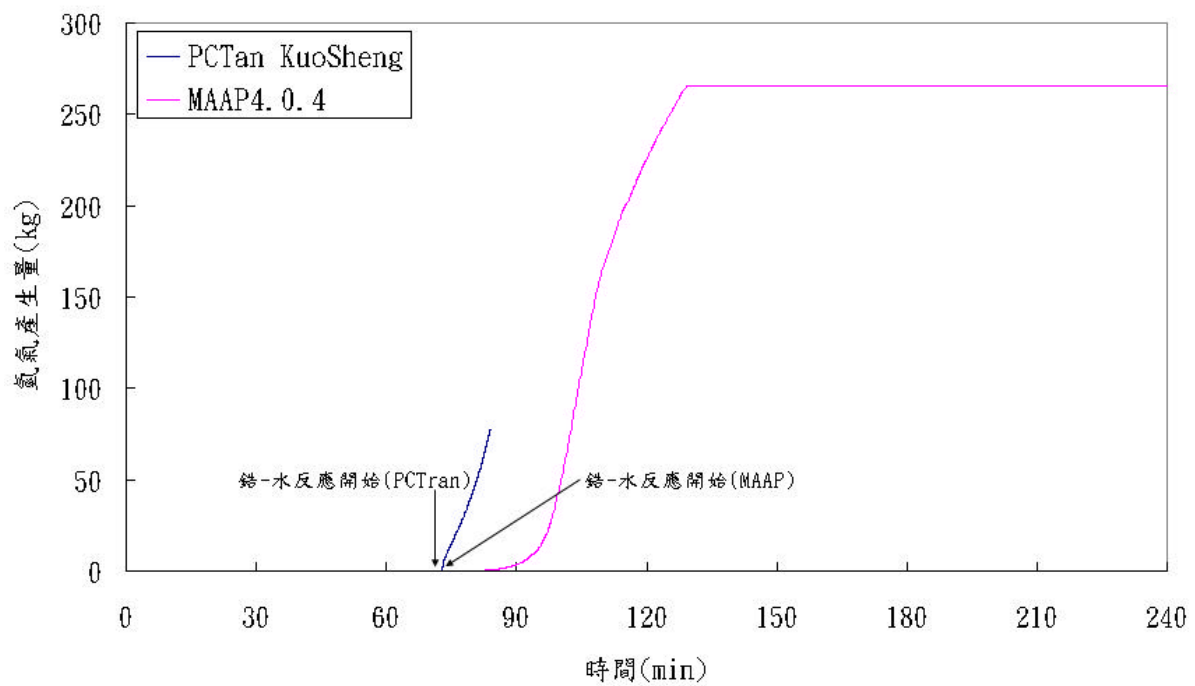


圖 4.70 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠小破口冷卻水流失事故氫氣產生量

4.8 國聖電廠電廠冷卻水流失事故模擬結論

在電廠冷卻水流失事故當中，增加了高壓爐心灑水系統及低壓爐心灑水系統的運轉，因此針對此兩種爐心灑水系統的開啟邏輯及關閉邏輯進行修正，在高壓爐心灑水系統方面，增加了因抑壓池溫度過高造成高壓爐心灑水系統跳脫的邏輯。並且針對兩灑水系統中，水泵的開啟壓力以及流量進行修正。

冷卻水流失事故分析結果顯示，MAAP4.0.4 程式中，將冷卻水系統細分為數個控制體積，分別計算其溫度與壓力，而 PCTran KuoSheng 程式將冷卻水系統視為單一的體積，只有一個溫度與壓力，故 PCTran KuoSheng 程式之冷卻水系統壓力變化速率較 MAAP4.0.4 所預測的為緩慢，造成安全釋壓閥開啟與關閉的頻率，因此在抑壓池溫度以及壓力上亦不一樣。在破口流率方面，由於 PCTran KuoSheng 並未分別探討破口流率中，冷卻水以及水蒸汽的量，而在 MAAP4.0.4 程式中，則有詳細的說明。在水位計算方面，兩程式間對於降流區水位以及雙相水位的計算方式並不相同，因此也造成燃料溫度上升的時間上的差異。由於 PCTran KuoSheng 程式模擬中，當燃料護套達 2,500K 時，溫度隨即便維持不變，因此兩程式間的比較也以 PCTran KuoSheng 模擬嚴重事故在燃料棒最高溫度達 2,500K 以前，做為探討範圍。

比較兩個程式預測的結果，PCTran KuoSheng 所預測的乾井與濕井壓力值分別小於 MAAP4.0.4 的預測值，當破口面積過小($<0.0032\text{m}^2$)，時，圍阻體乾井壓力不會上升達到反應器急停的條件。

PCTran KuoSheng 所預測之氫氣產生量也數倍於 MAAP4.0.4 所預測之結果；兩程式間除了計算氫氣產生的方程式不同外，在 MAAP4.0.4 程式中，燃料棒護套鋁合金氧化後，會形成保護層，減緩甚至防止鋁合金的氧化，大量減少了氫氣的產生量。

針對 PCTran KuoSheng 程式，所預測之抑壓池溫度在部分事故中，出現無法解釋之現象，應與其溫度計算邏輯有關；在小破口方面，其破口面積過小造成乾井壓力無法上升，反應器無法急停，此現象之程式邏輯應予以修正。

整體而言，兩個程式所預測之暫態變化趨勢相當一致，但有時在重要事件時序上仍

有不少的差異，重要參數的變化上亦有頗大的差異。



第五章 電廠預見暫態未急停事故模擬

5.1 前言

預見暫態未急停(ATWS)【7】是指反應器系統，因設備故障發生暫態，系統產生急停訊號，但反應器保護系統(Reactor Protection System, RPS)故障，控制棒無法插入爐心的事故。ATWS 事件發生後，反應器飼水泵及再循環水泵皆會跳脫；主蒸汽隔離閥(Main Steamline Isolation Valves, MSIVs)關閉；冷卻水系統壓力上升，造成冷卻水系統安全釋壓閥(Safety Relief Valves, SRVs)開啟；冷卻水汽化成為水蒸汽後，由安全釋壓閥流失；反應器壓力槽水位下降，各類型之補水系統啟動，將冷卻水注入反應器壓力槽。事故發生後，運轉人員可以啟動備用液態硼注水系統(Stand by Liquid Control System, SBLC)，將硼液注入壓力槽，控制中子反應速率。

預見暫態未急停事故中，反應器爐心內產生的分裂熱會經由釋壓閥進入圍阻體的抑壓池。抑壓池水的蒸發會造成乾井壓力的上升，引動反應器自動洩壓系統(Automatic Depressurization System, ADS)；冷卻水系統的洩壓，引入大量的低壓注水，造成爐心功率的上升。在系統安全功能的設計上，當抑壓池溫度上升時，反應器餘熱排除系統(Residue Heat Removal System, RHRs)的抑壓池冷卻功能(Suppression Pool Cooling)會自動啟動。如果抑壓池移熱能力小於爐心功率時，抑壓池的溫度會持續上升，終至沸騰。抑壓池池水沸騰會造成高低壓注水系統的跳脫，自此反應器冷卻水系統無法獲得補水，爐心水位開始降低，造成爐心裸露，導致爐心融毀，成為嚴重事故。

模擬預見暫態未急停事故時，最重要的部分為爐心功率的計算部分，MAAP4.0.4 程式可以輸入降流區水位與爐心功率間的關係，或者是利用 Chexal-Layman 關係式計算功率，Chexal-Layman 關係式提供了降流區水位與爐心功率間的關係，其中亦包括了系統壓力的影響。Chexal-Layman 關係式如下：

$$P = \left[3.7 \left(\frac{P_{PS}}{1110} \right)^3 \cdot h^{0.7} \right] \cdot (1 + 0.03 \Delta H_s^{0.75}) + P_d$$

where:

P = percent of rated reactor power,

P_{ps} = primary system pressure (psia)

$$h = \text{Max} \left\{ \left[(Z_{WPS} - Z_{TAF}) + 8 \left(\frac{P_{PS}}{1110} \right)^{0.45} \right], 0 \right\}, \text{ (ft)}$$

Z_{WPS} = elevation of downcomer water level (collapsed) (ft),

Z_{TAF} = elevation at top of active fuel (ft),

P_d = decay power, percent of rated reactor power, and

H_s = core inlet subcooling (Btu/lbm).

本章利用 MAAP4.0.4 程式與 PCTran KuoSheng 程式，分析沸水式反應器之預見暫態未急停事故 (Anticipated Transient Without Scram, ATWS)。5.2 節為利用 MAAP4.0.4 程式，分析三種預見暫態未急停事故案例的結果；5.3 節為利用 PCTran KuoSheng 程式，分析三種預見暫態未急停事故案例的結果；5.4 為國聖電廠預見暫態未急停事故 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 模擬結果比較；5.5 節為國聖電廠預見暫態未急停事故模擬結論。

5.2 國聖電廠 ATWS 事故 MAAP4.0.4 模擬

5.2.1 國聖電廠 ATWS 事故 MAAP4.0.4 模擬結果

本事故分析中，假設運轉員採取動作，防止自動洩壓系統的啟動，冷卻水系統將維持在高壓的狀態；在此狀態下，除了爐心隔離冷卻系統外，其他所有的爐心注水系統均無法執行其功能，本案例並假設反應器餘熱排除系統之抑壓池冷卻功能中的兩台 RHRs 熱交換器均失效。

MAAP4.0.4 程式計算所得之重要事故時序詳如表 5.1。事故開始時，主蒸汽隔離閥關閉，引發暫態事故，反應器飼水泵立即跳脫，主蒸汽隔離閥的關閉造成壓力槽壓力快速的上升，事故發生後 1.4 秒，壓力槽壓力達到急停設定點，但反應器保護系統故障，控制棒無法插入爐心。事故發生後 61 秒時，爐心隔離冷卻系統啟動，由於抑壓池水位過高，因此爐心隔離冷卻系統由抑壓池取水注入反應器。由於主蒸汽管路隔離閥於事故開始時即關閉，蒸汽的累積造成冷卻水系統壓力的快速上升，因此壓力槽降流區水位急速下降，在事故開始後 2.1 分鐘 (123.6 秒)，壓力槽降流區水位降到爐心燃料頂端，而爐心內之雙相水位直到 6 分鐘 (359.2 秒) 時，才低於燃料頂端的高度。隨後由於爐心隔離冷卻系統的注水，使得水位維持在一固定高度。但由於兩台 RHRs 熱交換器皆失效，因此抑壓池溫度持續升高，在事故發生後 1 小時 (3,708 秒)，爐心隔離冷卻系統因抑壓池溫度過高 (333K) 而失效。由於水蒸汽的熱傳效果遠低於水，因此裸露於水面上的燃料棒所產生的熱將難以被移除，因此燃料棒的溫度持續的升高，燃料開始融毀。熔融爐心在 2.3 小時 (8,317 秒) 開始向下流至反應器壓力槽底部區間，3.9 小時 (14,200 秒) 壓力槽底部之控制棒焊道失效，造成反應器壓力槽破裂，熔融爐心開始自高壓反應器向外噴出並碎裂成高溫的熔渣，飛濺四散，最後落入爐穴當中，與圍阻體混凝土基座發生 MCCI 作用，產生大量可燃性氣體，造成圍阻體在事故發生後 32.8 小時 (118,014 秒) 失效，大量的放射性物質外釋到外界環境。

圖 5.1 為 MAAP4.0.4 電廠預見暫態未急停事故爐心功率變化。主蒸汽隔離閥的關閉，造成系統壓力上升，會造成爐心內水蒸汽的凝結，使得爐心內中子緩和劑(moderator) 的密度增加，密度增加應該會造成功率的上升，但隨即會因都普勒效應而拉回。MAAP4.04 程式沒有中子動態分析模式，故無法模擬此一現象。MAAP4.04 程式計算結果顯示，爐心功率會先因爐心水位降低而下降，隨著爐心隔離冷卻系統的注水，使得水位開始回升，爐心功率亦開始上升；但又因安全釋壓閥的開啟，造成水位的下降，爐心功率亦開始下降，而產生明顯的小尖峰。

圖 5.2 為 MAAP4.0.4 電廠預見暫態未急停事故冷卻水系統壓力變化。圖中所示之冷卻水系統壓力的上下震盪是因為安全釋壓閥的開關所造成的，震盪的頂點為安全釋壓

閥的開啟點，震盪的最低點為安全釋壓閥的關閉點。冷卻水系統壓力上下震動的頻率慢慢的減少，是因為衰變熱的減少導致而成的。在 3.9 小時 (14,200 秒)，由於壓力槽底部控制棒失效，冷卻水系統壓力驟降到圍阻體的壓力，隨後與圍阻體的壓力達到平衡。

圖 5.3 為 MAAP4.0.4 電廠預見暫態未急停事故安全釋壓閥流率變化。由於主蒸汽管路隔離閥於事故開始時即關閉，蒸汽的累積造成冷卻水系統壓力的快速上升。MAAP4.0.4 所預測之最大流率為 1824 公斤/秒。如圖所示，程式所預測之安全釋壓閥開啟時間及頻率，基本上其趨勢與冷卻水系統壓力變化的趨勢一致。

圖 5.4 為 MAAP4.0.4 電廠預見暫態未急停事故爐心隔離冷卻系統流率變化。模擬結果顯示，在 61 秒時，爐心隔離冷卻系統因壓力槽降流區水位低於 Level-2 而開始注水進入爐心，由於兩台 RHRs 熱交換器失效，因此造成抑壓池內的溫度無法下降，因此在 1 小時後，抑壓池水溫過高 (333K) 造成爐心隔離冷卻系統的失效。

圖 5.5 為 MAAP4.0.4 電廠預見暫態未急停事故壓力槽降流區水位變化。由於安全釋壓閥流率在事故開始最大流率為 1824 公斤/秒，造成壓力槽降流區水位的急速下降，並且低於爐心頂部高度，隨後因為爐心隔離冷卻系統的注水以及安全釋壓閥穩定的流率，因此將水位維持在一定高度；事故發生後 1 小時 (3,708 秒)，爐心隔離冷卻系統因抑壓池溫度過高 (333K) 而失效，因此爐心的衰變熱不斷的產生，使冷卻水不斷的汽化，此時所有的爐心注水系統均無法執行其功能，造成壓力槽降流區水位逐漸降低，在 7.3 小時 (26,415 秒) 水位降至降流區底部。

圖 5.6 為 MAAP4.0.4 電廠預見暫態未急停事故燃料棒最高溫度變化。模擬結果顯示，燃料棒溫度震盪與壓力槽降流區水位的趨勢是相符合的，在事故發生 1 小時 (3,708 秒) 後，爐心隔離冷卻系統失效，此時水位開始下降，造成燃料棒溫度迅速上升。在 2.3 小時 (8,317 秒)，熔融爐心開始掉落至壓力槽底部，接著在 3.9 小時 (14,200 秒) 的時候，由於壓力槽失效，熔融爐心掉落離開壓力槽。

圖 5.7 為 MAAP4.0.4 電廠預見暫態未急停事故抑壓池溫度變化。模擬結果顯示，由於反應器壓力槽內的水蒸汽經由釋壓閥進入抑壓池，造成抑壓池溫度持續上升，最後因為圍阻體的失效，造成溫度的下降。

圖 5.8 為 MAAP4.0.4 電廠預見暫態未急停事故濕井壓力變化。濕井壓力在事故開始即隨著安全釋壓閥排放蒸汽而逐漸上升，由於熔融爐心掉落至壓力槽的底部，造成壓力槽底部水分的蒸發，這些水蒸汽經由安全釋壓閥進入抑壓池中，造成圍阻體壓力的升高。壓力槽在 3.9 小時 (14,200 秒)失效，大量的熔融爐心自壓力槽底部向外噴出，造成圍阻體壓力急劇上升，隨後在 32.8 小時 (118,014 秒)，因為圍阻體失效，使得壓力驟降。

圖 5.9 為 MAAP4.0.4 電廠預見暫態未急停事故氫氣產生量變化。模擬結果顯示，在事故發生 82.4 秒的時候，水蒸汽開始和做為護套材料的鋯合金發生化學反應而產生氫氣與熱，由於剛開始產生氫氣量極小，因此在圖中無法明顯的顯示出開始點，故以箭頭指示。

5.2.2 國聖電廠 ATWS 事故 MAAP4.0.4 結果比較分析

本章節將針對事故中，熱交換器的開啟數目做為 MAAP4.0.4 分析的重點，並討論其間的差異性。表 5.2 為 MAAP4.0.4 程式模擬國聖電廠預見暫態未急停事故重要時序比較。

圖 5.10 MAAP4.0.4 電廠預見暫態未急停事故爐心功率積分變化比較，模擬結果如圖所示，開啟較多的熱交換器，造成抑壓池水溫的降低，使得注回爐心的水有較高的次冷度，故總功率值亦較高。

在冷卻水系統壓力變化方面，冷卻水系統壓力的上下震盪是因為安全釋壓閥的開關所造成的，模擬結果顯示，由於無任何熱交換器的啟動，因此系統在 3.9 小時 (14,200 秒)壓力槽失效，造成冷卻水系統壓力驟降。此外，如果兩台 RHRs 熱交換器正常運轉，將造成整個系統的穩定，因此並無壓力槽失效，冷卻水系統壓力驟降的情況發生；但如果只啟動一台 RHRs 熱交換器，最後還是會因為爐心隔離冷卻系統的失效，而使得燃料棒溫度上升，在 8.1 小時 (29,097 秒)壓力槽失效。

安全釋壓閥流率變化方面，由於主蒸汽管路隔離閥於事故開始時即關閉，蒸汽的累

積造成冷卻水系統壓力的快速上升；MAAP4.0.4 所計算之最大流率皆為 1824 公斤/秒。對於程式所預測之安全釋壓閥開啟時間及頻率，基本上其趨勢與冷卻水系統壓力變化的趨勢一致。

圖 5.11 為爐心隔離冷卻系統流率變化，如圖所示，如果兩台 RHRs 熱交換器正常運轉，使得爐心隔離冷卻系統正常的運作；但假設無任何熱交換器的啟動，則事故發生後 1 小時，爐心隔離冷卻系統失效。此外，如果只啟動一台 RHRs 熱交換器，由於抑壓池之熱移除能力較啟動兩台 RHRs 熱交換器的結果差，因此爐心隔離冷卻系統開啟次數比較不頻繁，並且在 5.7 小時 (20,565 秒) 後，爐心隔離冷卻系統會因為抑壓池溫度過高而失效。

圖 5.12 為 MAAP4.0.4 電廠預見暫態未急停事故壓力槽降流區水位變化比較。模擬結果顯示，由於無任何熱交換器的啟動，事故發生後 1 小時 (3,708 秒)，爐心隔離冷卻系統因抑壓池溫度過高 (333K) 而失效，造成壓力槽降流區水位逐漸降低。此外，如果兩台 RHRs 熱交換器正常運轉，使得水位維持在一定高度；但如果只啟動一台 RHRs 熱交換器，則在 5.7 小時 (20,565 秒) 後，爐心隔離冷卻系統失效，無任何的注水系統進入，壓力槽降流區水位逐漸下降，最後在 11.1 小時 (40,070 秒) 達到降流區底部。

燃料棒最高溫度變化方面，模擬結果顯示，由於無任何熱交換器的啟動，在事故發生 1 小時 (3,708 秒) 後，爐心隔離冷卻系統失效，此時水位開始下降，造成燃料棒溫度迅速上升，在 2.3 小時 (8,317 秒)，熔融爐心開始掉落至壓力槽底部，接著在 3.9 小時 (14,200 秒) 的時候，壓力槽失效。此外，兩台 RHRs 熱交換器的正常運轉，使得燃料棒溫度維持在一定溫度範圍；但如果只啟動一台 RHRs 熱交換器，則因為壓力槽降流區水位下降，造成燃料棒溫度的上升，在 5.7 小時 (20,562 秒) 爐心熔毀並掉落至壓力槽。

圖 5.13 為 MAAP4.0.4 電廠預見暫態未急停事故抑壓池溫度變化比較。模擬結果顯示，由於無任何熱交換器的啟動，抑壓池溫度持續的上升。此外，兩台 RHRs 熱交換器的正常運轉，可降低抑壓池溫度，但又因安全釋壓閥的開啟而使得溫度再升高，因此造成抑壓池溫度小幅度的震盪；但如果只啟動一台 RHRs 熱交換器，在 8.1 小時 (29,097

秒)時，壓力槽失效，造成熔融爐心掉落至爐穴。因此，即使安全釋壓閥的開啟，也沒有將熱帶到抑壓池內，而抑壓池溫度則開始下降。

圖 5.14 為 MAAP4.0.4 電廠預見暫態未急停事故濕井壓力變化比較，模擬結果顯示，由於反應器裡面的水蒸汽，經由安全釋壓閥進入抑壓池內，造成濕井壓力的升高，並且造成圍阻體內其他區間壓力亦緩慢上升，在 32.8 小時 (118,014 秒)時圍阻體失效。此外，如果開啟兩台 RHRs 熱交換器，因抑壓池溫度有效控制，使得濕井壓力非常緩慢的上升；如果只啟動一台 RHRs 熱交換器，則濕井壓力會因為熔融爐心掉落至壓力槽，產生大量蒸汽，造成圍阻體壓力的上升，模擬結果，圍阻體不會失效。

氫氣產生量變化方面，模擬結果顯示，假設開啟兩台 RHRs 熱交換器，爐心中水蒸汽開始和做為護套材料的鋯合金發生化學反應而產生氫氣與熱，但由於水蒸汽的量極小，因此所產生的氫氣量也相對的很小，不到 1 kg；無 RHRs 熱交換器運轉，氫氣產生最大量約 280kg；開啟一台 RHRs 熱交換器，則氫氣產生最大量約 540 kg，此差距在於參與反應之水蒸汽量的大小有關。

表 5.1 MAAP4.0.4 程式模擬國聖電廠預見暫態未急停事故重要時序

時間(sec)	發生之重要事件
0.0	Feedwater Pumps Trip, MSIV Closed
0.0	S.P. Cooling Start
1.36	High Vvessel Pressure Scram
61	RCIC ON (first)
126 (2.1 min)	Level Reaches TAF (downcomer)
360 (6 min)	Level Reaches TAF (core mixture water)
3,708 (1 hr)	RCIC OFF (last)----- High S.Pool Temp.
8,317 (2.3 hr)	Relocation Of Core Materials To Lower Head
14,200 (3.9 hr)	Vessel Failed By Ejection Of CRD Tubes
118,014 (32.7 hr)	Containment Failure

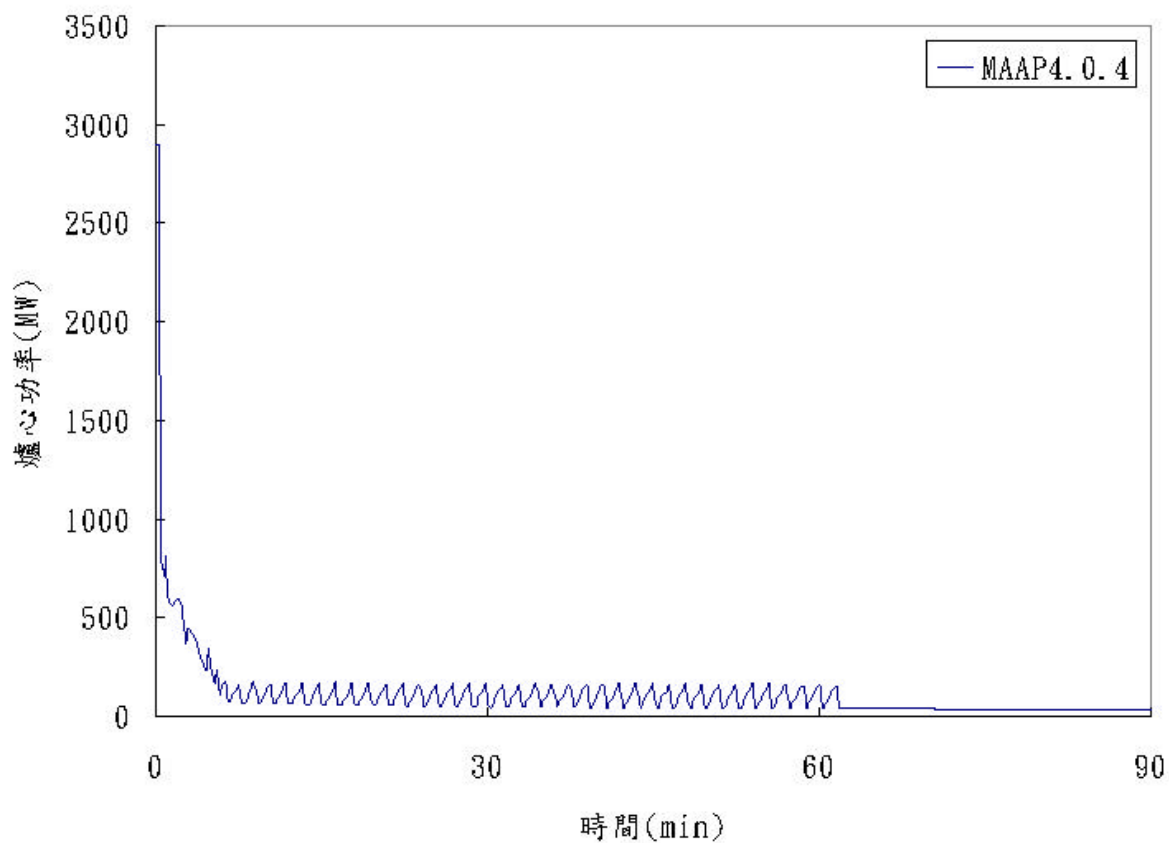


圖 5.1 MAAP4.0.4 電廠預見暫態未急停事故爐心功率

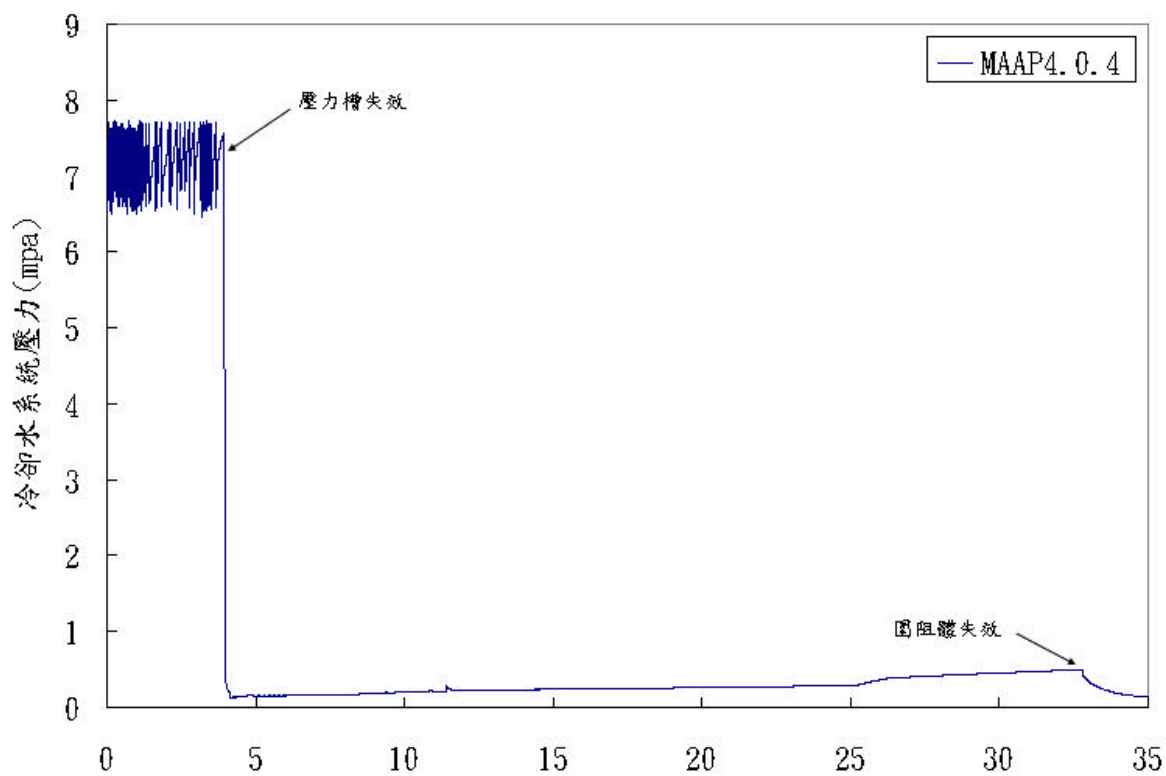


圖 5.2 MAAP4.0.4 電廠預見暫態未急停事故冷卻水系統壓力

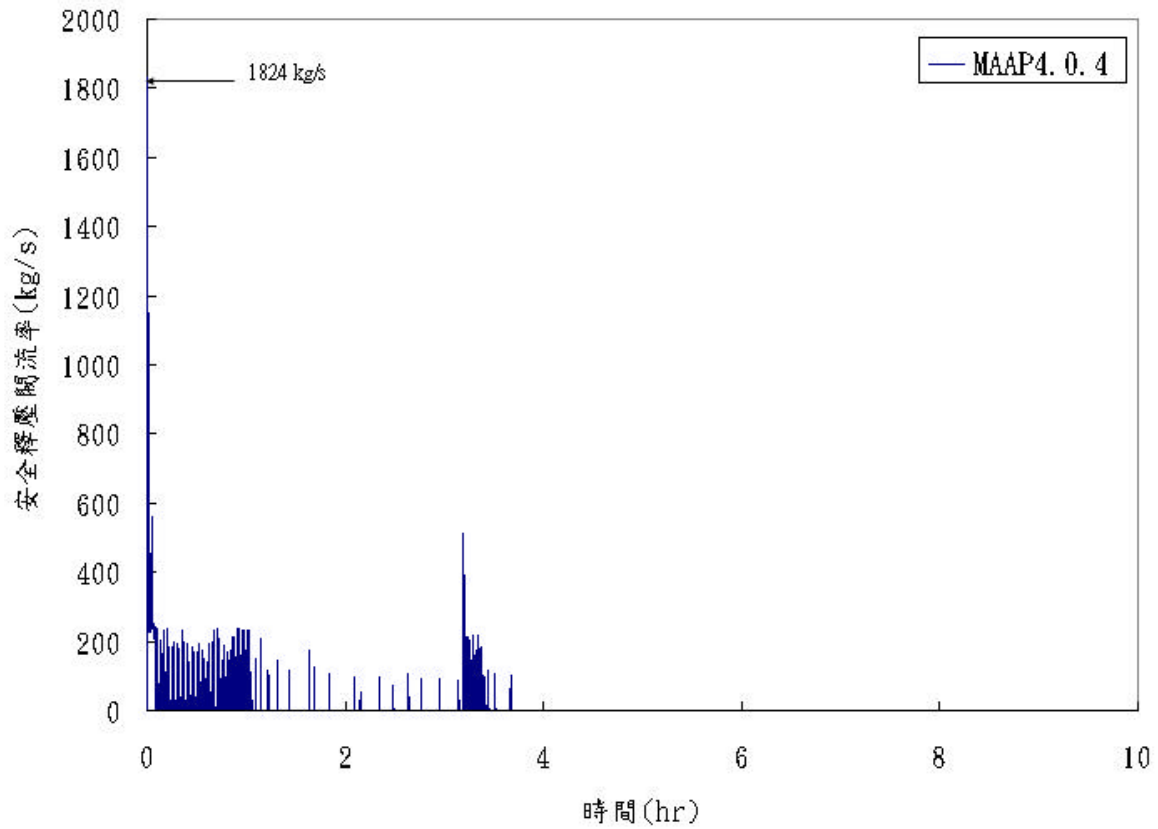


圖 5.3 MAAP4.0.4 電廠預見暫態未急停事故安全釋壓閥流率

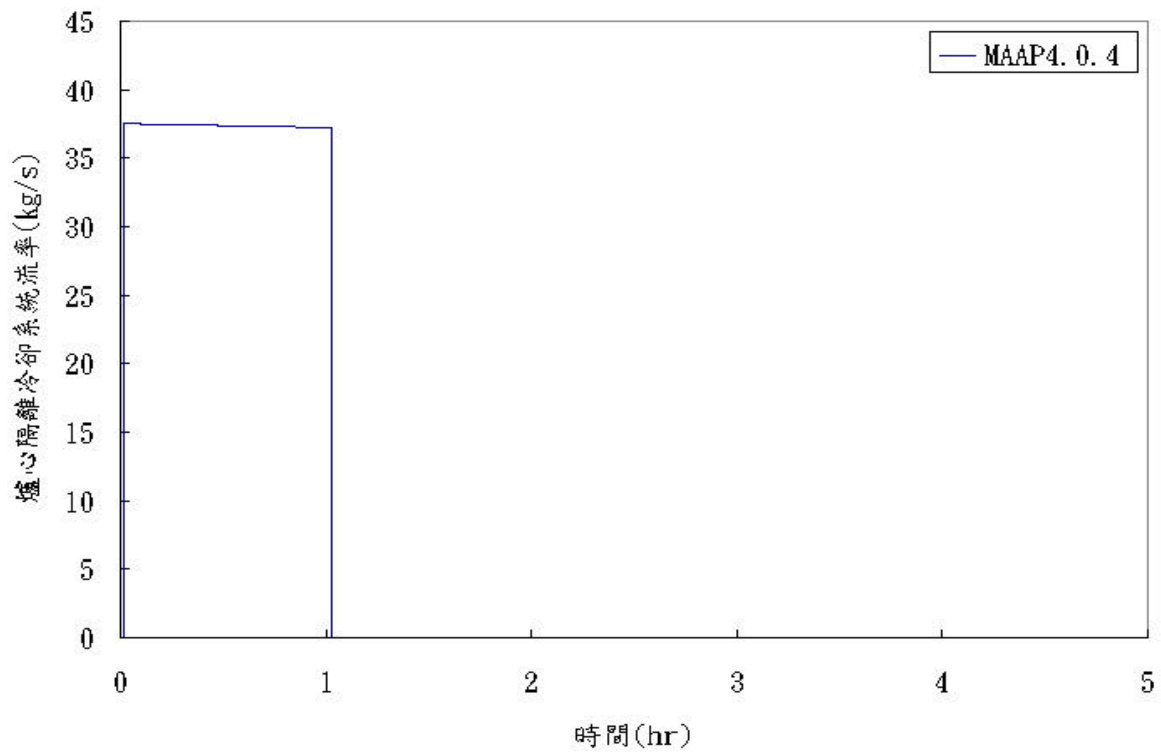


圖 5.4 MAAP4.0.4 電廠預見暫態未急停事故爐心隔離冷卻系統流率

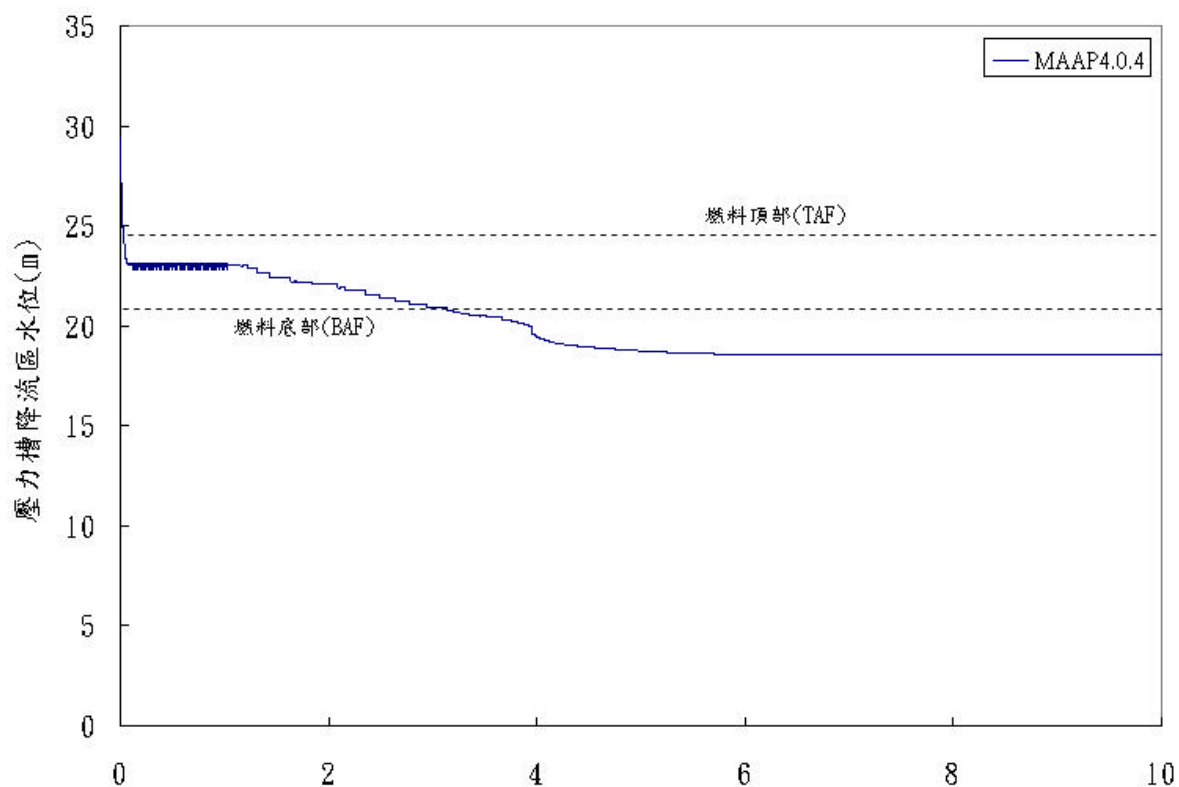


圖 5.5 MAAP4.0.4 電廠預見暫態未急停事故壓力槽降流區水位

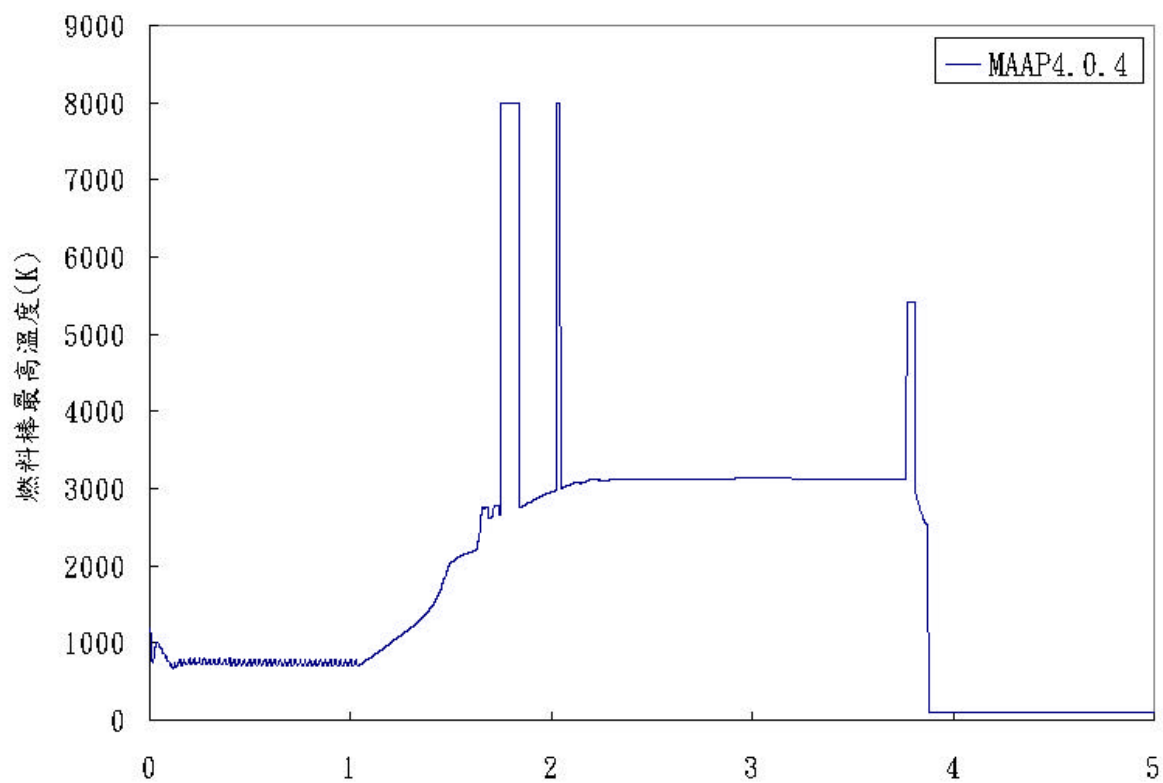


圖 5.6 MAAP4.0.4 電廠預見暫態未急停事故燃料棒最高溫度

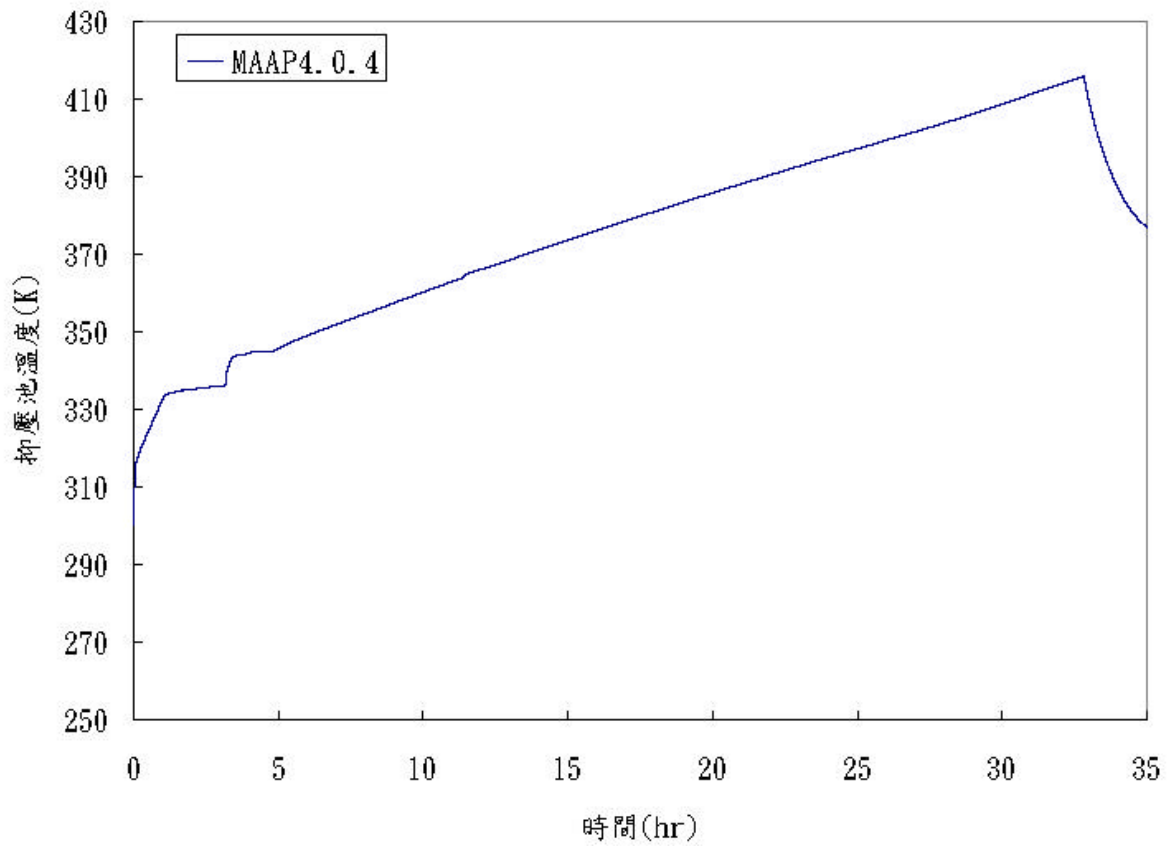


圖 5.7 MAAP4.0.4 電廠預見暫態未急停事故抑壓池溫度

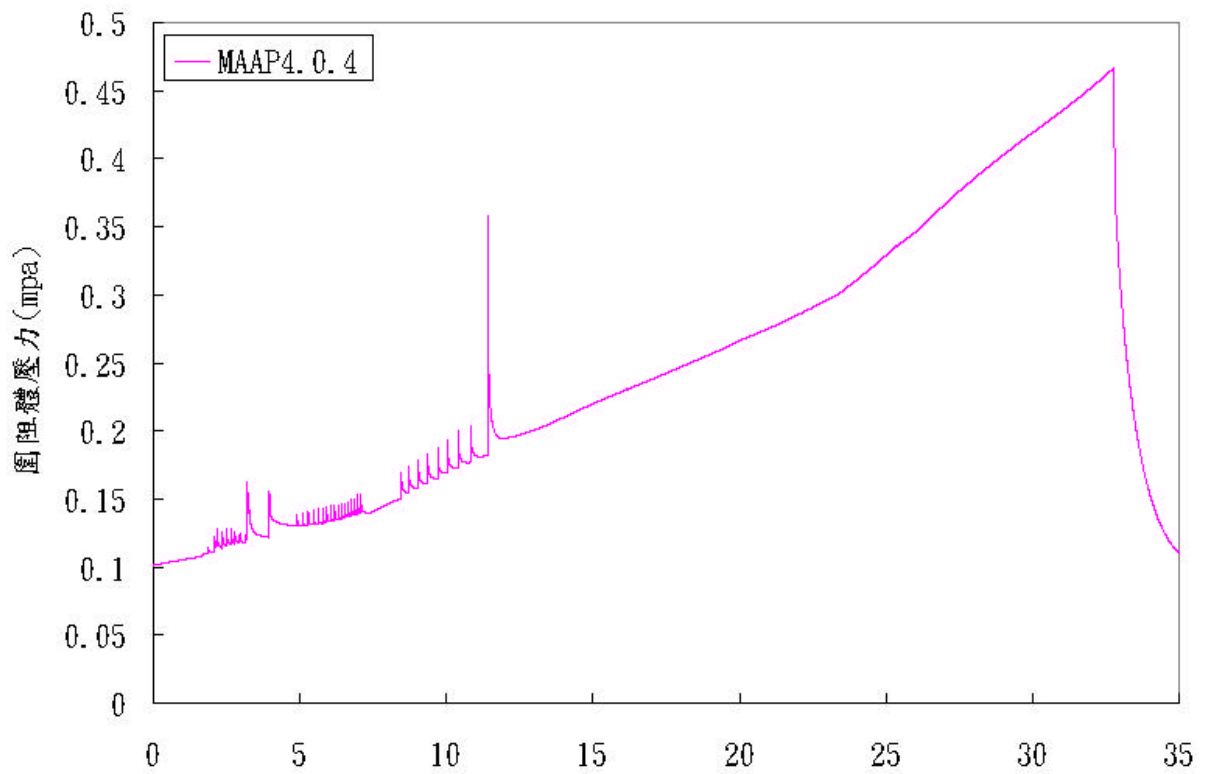


圖 5.8 MAAP4.0.4 電廠預見暫態未急停事故濕井壓力

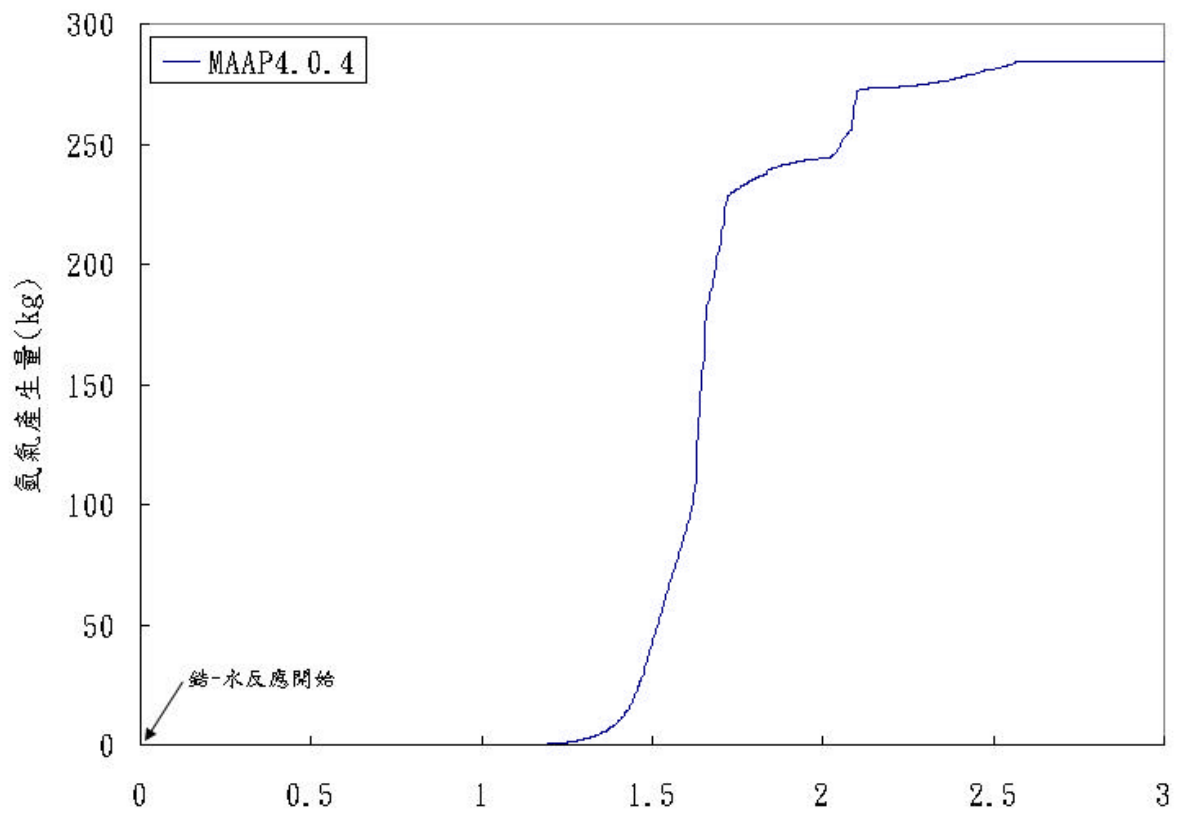


圖 5.9 MAAP4.0.4 電廠預見暫態未急停事故氫氣產生量

表 5.2 MAAP4.0.4 程式模擬國聖電廠預見暫態未急停事故重要時序比較

<div> <div>案例</div> <div>重要事故</div> <div>時間</div> </div>	啟動兩個 熱交換器	啟動一個 熱交換器	無任何熱交換器 啟動
MSIV Closed	0.0 sec	0.0 sec	0.0 sec
Feedwater Pumps Trip	0.0 sec	0.0 sec	0.0 sec
Reactor Scrammed	1.36 sec	1.36 sec	1.36 sec
RCIC ON (first)	61 sec	61 sec	61 sec
Level Reaches TAF (downcomer)	126 sec (2.1 min)	126 sec (2.1 min)	126 sec (2.1 min)
Level Reaches TAF (core mixture water)	360 sec (6 min)	360 sec (6 min)	360 sec (6 min)
RCIC OFF (last)----- High S.Pool Temp.	none	20,565 sec (5.7 hr)	3,708 sec (1 hr)
Relocation Of Core Materials To Lower Head	none	20,562 sec (5.7 hr)	8,317sec (2.3 hr)
Vessel Failed By Ejection Of CRD Tubes	none	29,097 sec (8.1 hr)	14,200 sec (3.9 hr)
Containment Failure	none	none	118,014 sec (32.8 hr)

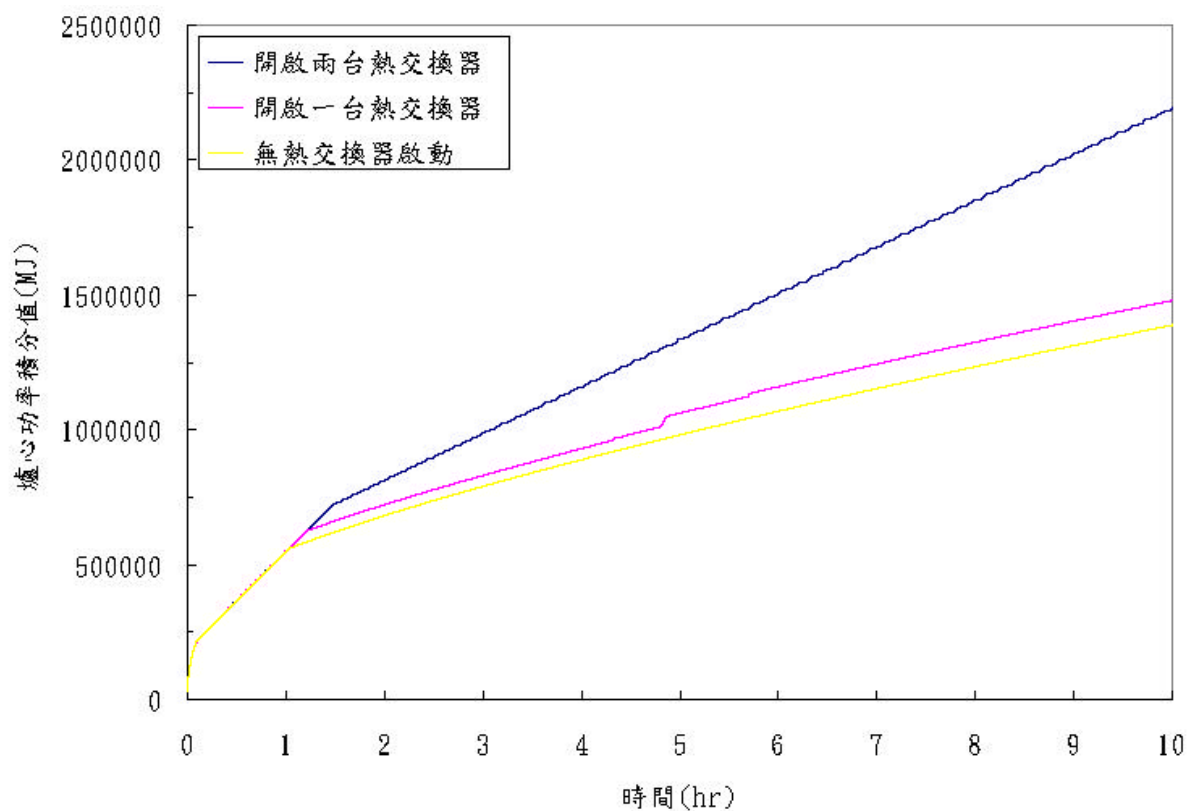


圖 5.10 MAAP4.0.4 電廠預見暫態未急停事故功率積分變化比較

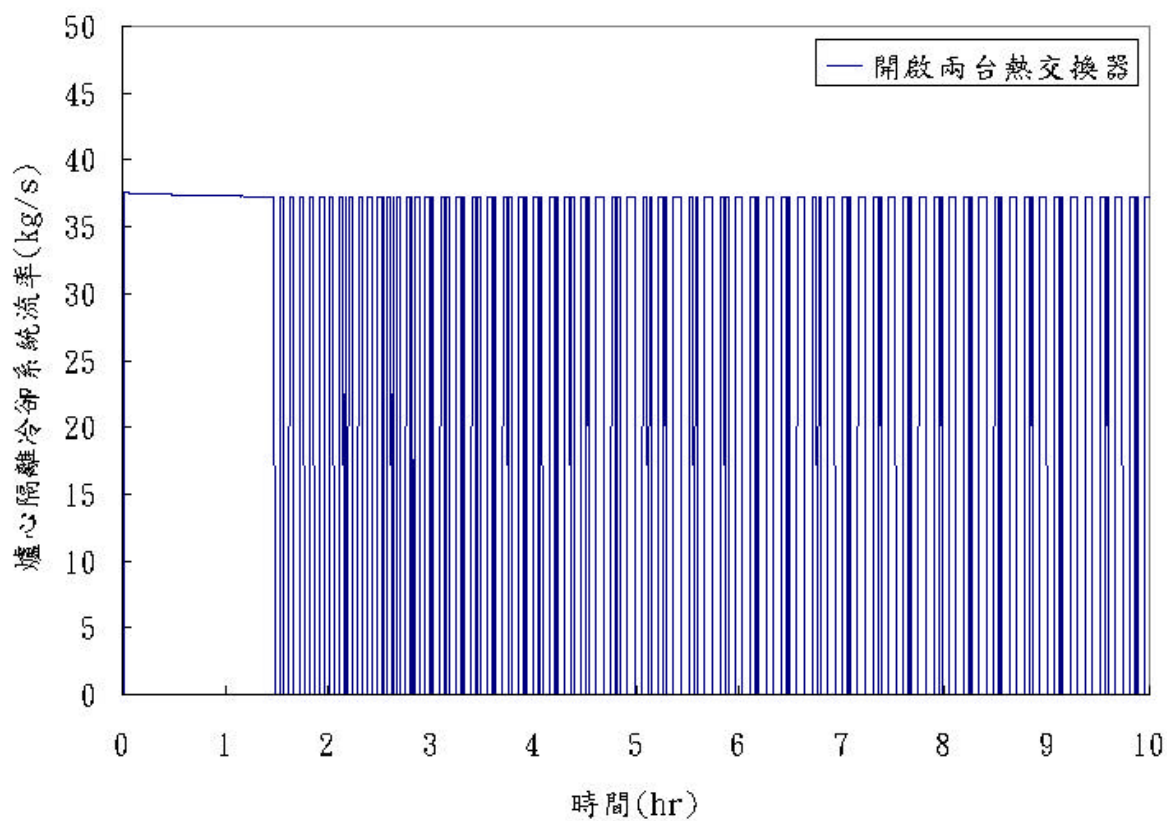


圖 5.11 MAAP4.0.4 電廠預見暫態未急停事故爐心隔離冷卻系統流率變化

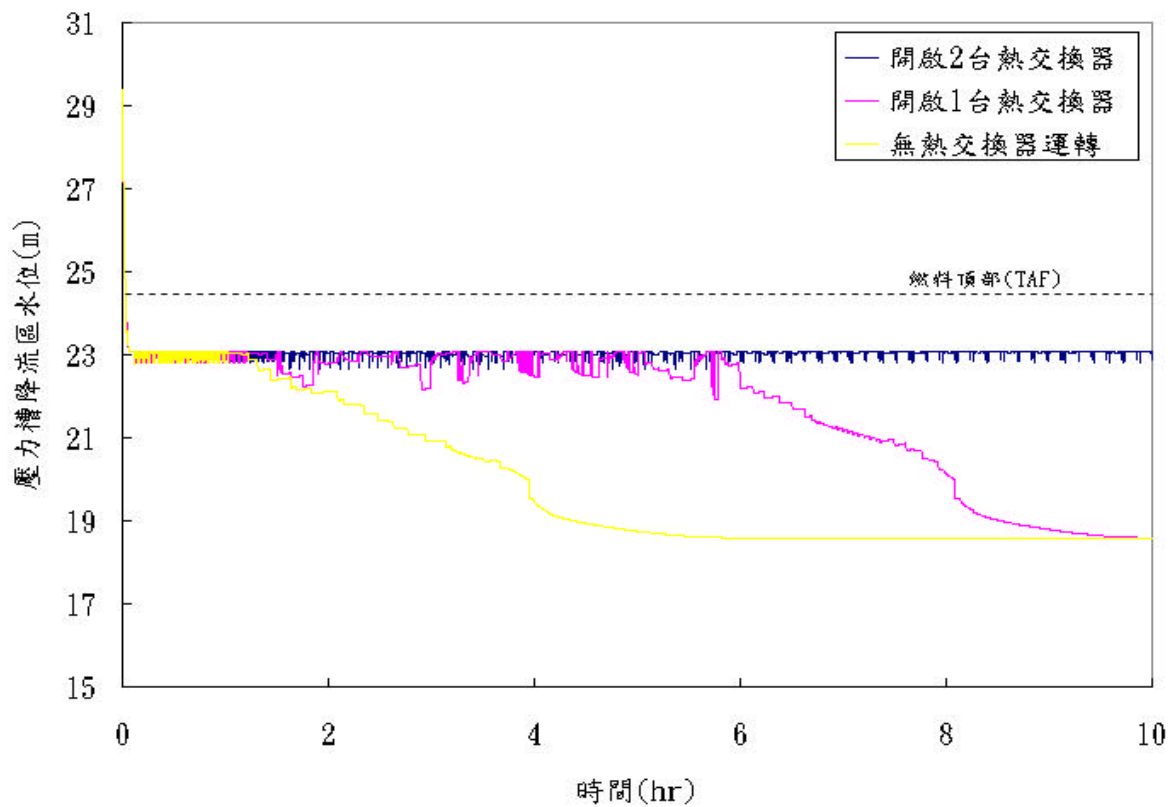


圖 5.12 MAAP4.0.4 電廠預見暫態未急停事故壓力槽降流區水位變化比較

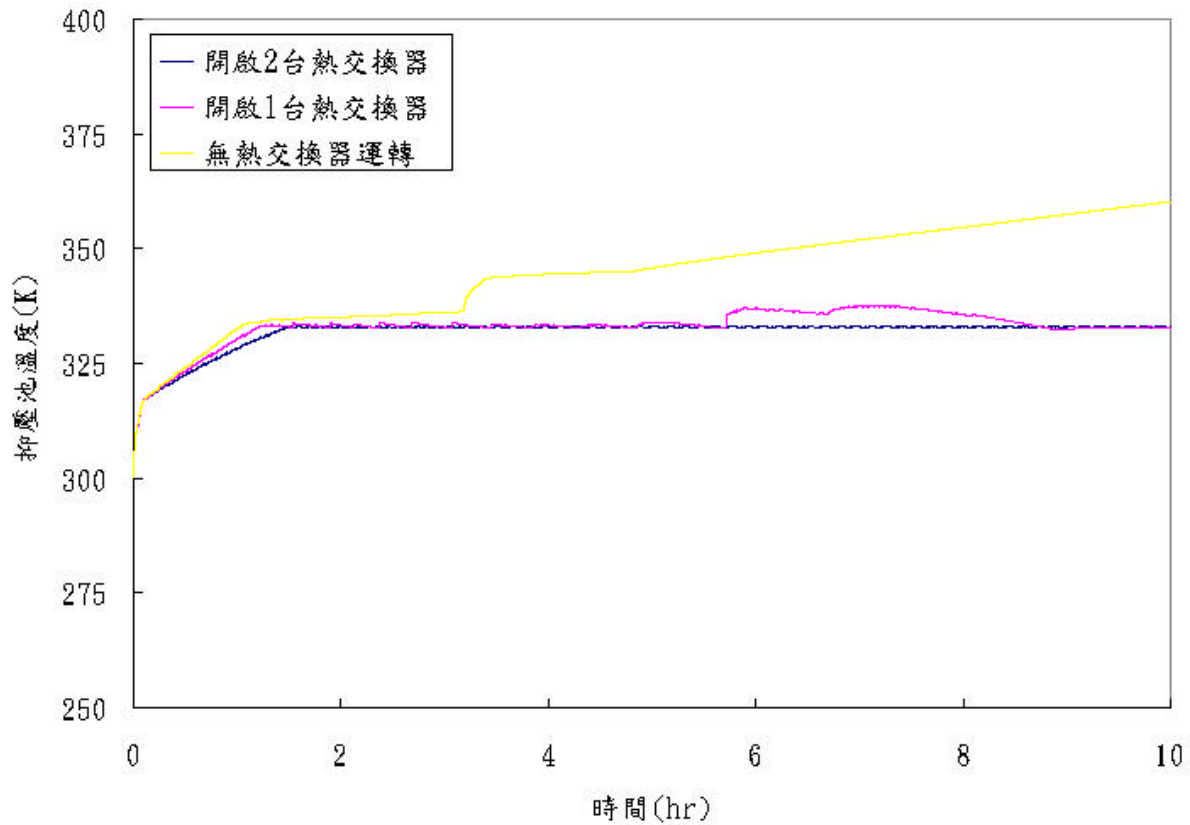


圖 5.13 MAAP4.0.4 電廠預見暫態未急停事故抑壓池溫度變化比較

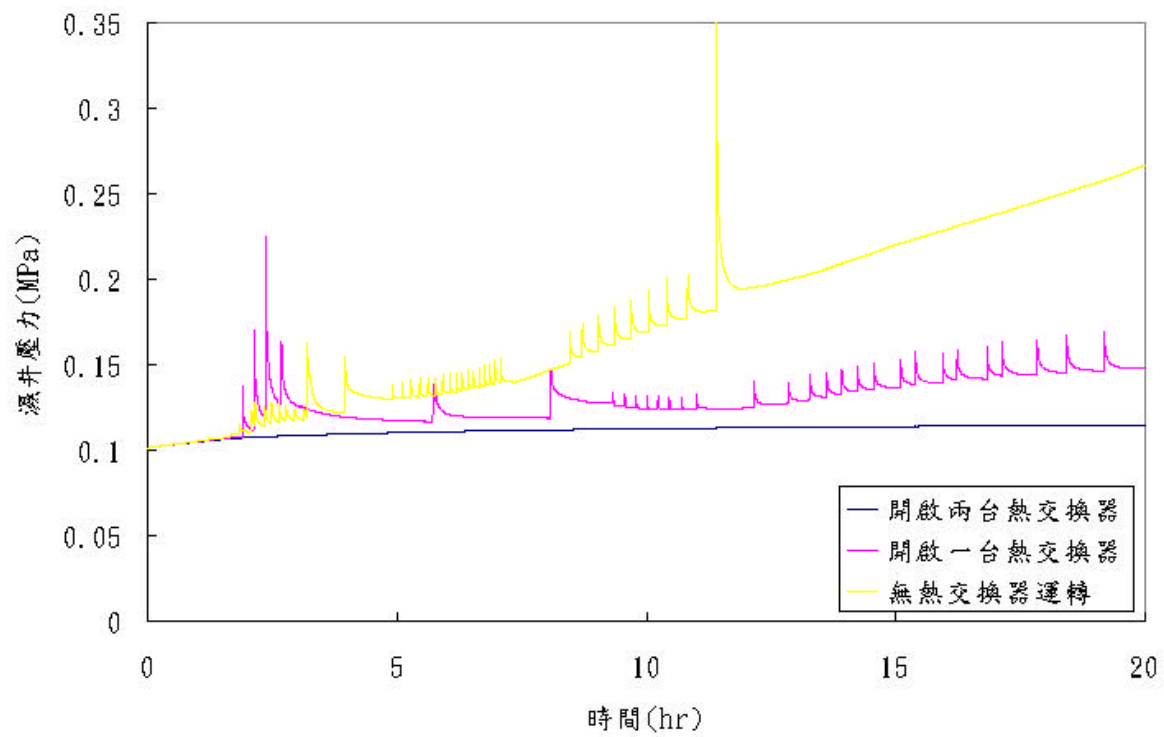


圖 5.14 MAAP4.0.4 電廠預見暫態未急停事故濕井壓力變化比較

5.3 國聖電廠 ATWS 事故 PCTran KuoSheng 模擬

5.3.1 國聖電廠 ATWS 事故 PCTran KuoSheng 模擬結果

本事故分析中，假設運轉員採取動作，防止自動洩壓系統的啟動，冷卻水系統將維持在高壓的狀態；在此狀態下，除了爐心隔離冷卻系統外，其他所有的爐心注水系統均無法執行其功能，本案例並假設反應器餘熱排除系統之抑壓池冷卻功能中的兩台 RHRs 熱交換器均失效。

PCTran KuoSheng 程式計算所得之重要事故時序詳如表 5.3。事故開始時，主蒸汽隔離閥關閉，引發暫態事故，反應器飼水泵立即跳脫，主蒸汽隔離閥的關閉造成壓力槽壓力快速的上升，事故發生後 3 秒，壓力槽壓力達到急停設定點，但反應器保護系統故障，控制棒無法插入爐心。事故發生後 24.5 秒時，爐心隔離冷卻系統啟動，由於抑壓池水位過高，因此爐心隔離冷卻系統由抑壓池取水注入反應器。由於主蒸汽管路隔離閥於事故開始時即關閉，蒸汽的累積造成冷卻水系統壓力的快速上升，因此壓力槽降流區水位急速下降，在事故開始後 56 秒，壓力槽降流區水位降到爐心燃料頂端，而爐心內之雙相水位直到 75 秒時，才低於燃料頂端的高度。因為爐心隔離冷卻系統的注水，仍無法有效控制壓力槽降流區水位，使得水位持續的下降，燃料棒溫度迅速升高；由於 PCTran KuoSheng 程式並沒有模擬爐心的熔損，故當燃料護套達 2,500K 時，溫度隨即便維持不變。由於程式模擬能力的限制，本研究之 PCTran 分析在燃料溫度達到 2,500K 時即停止。

圖 5.15 為 PCTran KuoSheng 電廠預見暫態未急停事故爐心功率變化。PCTran KuoSheng 程式計算結果顯示，爐心功率會先因爐心水位降低而下降，隨著爐心隔離冷卻系統的注水，使得水位開始回升，爐心功率亦開始上升，但又因安全釋壓閥的開啟，造成水位的下降，爐心功率亦開始下降，而產生明顯的尖峰。

圖 5.16 為 PCTran KuoSheng 電廠預見暫態未急停事故冷卻水系統壓力變化。圖中所示之冷卻水系統壓力的上下震盪是因為安全釋壓閥的開關所造成的，震盪的頂點為安

全釋壓閥的開啟點，震盪的最低點為安全釋壓閥的關閉點。冷卻水系統壓力上下震動的頻率慢慢的減少，是因為衰變熱的減少導致而成的。

圖 5.17 為 PCTran KuoSheng 電廠預見暫態未急停事故安全釋壓閥流率變化。由於主蒸汽管路隔離閥於事故開始時即關閉，蒸汽的累積造成冷卻水系統壓力的快速上升，PCTran KuoSheng 所預測之壓力最大值為 7.88 Mpa，造成 16 個安全釋壓閥的開啟，最大流率為 2744 公斤/秒。如圖所示，程式所預測之安全釋壓閥開啟時間及頻率，基本上其趨勢與冷卻水系統壓力變化的趨勢一致。

圖 5.18 為 PCTran KuoSheng 電廠預見暫態未急停事故爐心隔離冷卻系統流率變化。模擬結果顯示，在 24.5 秒時，爐心隔離冷卻系統因壓力槽降流區水位低於 Level-2 而開始注水進入爐心。由於抑壓池溫度在事故模擬中未超過 333 K，如圖所示，爐心隔離冷卻系統並未關閉。

圖 5.19 為 PCTran KuoSheng 電廠預見暫態未急停事故壓力槽降流區水位變化。由於安全釋壓閥流率在事故開始時最大流率為 2744 公斤/秒，造成壓力槽降流區水位的急速下降，並且低於爐心頂部高度，隨後因為爐心隔離冷卻系統的注水以及安全釋壓閥的開啟，造成水位水位變化呈階梯狀。

圖 5.120 為 PCTran KuoSheng 電廠預見暫態未急停事故燃料棒最高溫度變化。模擬結果顯示，爐心雙相水位在 75 秒時達到爐心頂部，燃料棒溫度開始上升；17.8 分鐘 (1,070 秒) 的時候，燃料棒溫度達 2,500K，此時溫度即不再變化

圖 5.21 為 PCTran KuoSheng 電廠預見暫態未急停事故抑壓池溫度變化。模擬結果顯示，由於反應器壓力槽內的水蒸汽經由安全釋壓閥進入抑壓池，造成抑壓池溫度階梯狀的上升。

圖 5.22 為 PCTran KuoSheng 電廠預見暫態未急停事故濕井壓力變化。事故開始後，由於反應器裡面的水蒸汽，經由安全釋壓閥進入抑壓池內，造成濕井的壓力緩慢上升，並且造成圍阻體內其他區間壓力亦緩慢上升。

圖 5.23 為 PCTran KuoSheng 電廠預見暫態未急停事故氫氣產生量變化。模擬結果顯示，在事故發生 12.3 分鐘 (740 秒) 的時候，水蒸汽開始和做為護套材料的鋯合金發

生化學反應而產生氫氣與熱。

5.3.2 國聖電廠 ATWS 事故 PCTran KuoSheng 結果比較分析

本章節將針對事故中，熱交換器的開啟數目做為 PCTran KuoSheng 分析的重點，並討論其間的差異性。

圖 5.24 PCTran KuoSheng 電廠預見暫態未急停事故爐心功率積分變化比較，模擬結果如圖顯示，在開啟二台、一台熱交換器下，系統所提供的總功率值是一樣的，此原因為爐心隔離冷卻系統由抑壓池注水回反應器時，程式所計算的冷卻水溫度偏低造成的結果。但如果未開熱交換器，則使得系統提供總功率值相對的降低許多，此原因與壓力槽降流區水位及爐心注水之次冷度有關。

在冷卻水系統壓力變化方面，冷卻水系統壓力的上下震盪是因為安全釋壓閥的開關所造成的，模擬結果顯示，三種不同事故，在冷卻水系統壓力變化上，並無太大差異。安全釋壓閥流率變化方面，由於主蒸汽管路隔離閥於事故開始時即關閉，蒸汽的累積造成冷卻水系統壓力的快速上升；PCTran KuoSheng 所計算之最大流率皆為 2744 公斤/秒。對於程式所預測之安全釋壓閥開啟時間及頻率，基本上其趨勢與冷卻水系統壓力變化的趨勢一致。

爐心隔離冷卻系統流率變化方面，模擬結果顯示，由於無任何熱交換器的啟動，爐心隔離冷卻系統在 36.8 分鐘 (2,205 秒)失效。此外，如果兩台 RHRs 熱交換器及一台 RHRs 熱交換器運轉，都可使得爐心隔離冷卻系統正常的運作。

圖 5.25 為 PCTran KuoSheng 電廠預見暫態未急停事故壓力槽降流區水位變化比較。模擬結果顯示，由於無任何熱交換器的啟動，事故發生後 36.8 分鐘 (2,205 秒)，爐心隔離冷卻系統因抑壓池溫度過高(333K)而失效，造成壓力槽降流區水位逐漸降低。此外，如果兩台及一台 RHRs 熱交換器正常運轉，所預測的水位趨勢是相同的，皆可使得水位維持在一定高度，此原因為爐心隔離冷卻系統由抑壓池注水回反應器時，程式所計算的冷卻水溫度偏低造成的結果。

燃料棒最高溫度變化方面，模擬結果顯示，由於 PCTran KuoSheng 程式並沒有模擬爐心的熔損，故當燃料護套達 2,500K 時，溫度隨即便維持不變，在三種不同事故的模擬上，由於壓力槽降流區水位達到燃料頂端的時間皆相同，因此在預測之燃料棒最高溫度的趨勢上，三種事故的結果非常接近。

圖 5.26 為 PCTran KuoSheng 電廠預見暫態未急停事故抑壓池溫度變化比較。模擬結果顯示，由於無任何熱交換器的啟動，抑壓池溫度持續的上升。此外，兩台及一台 RHRs 熱交換器的正常運轉，皆可有效控制抑壓池溫度。

圖 5.27 為 PCTran KuoSheng 電廠預見暫態未急停事故濕井壓力變化比較。模擬結果顯示，由於反應器裡面的水蒸汽，經由安全釋壓閥進入抑壓池內，造成濕井壓力的升高，並且造成圍阻體內其他區間壓力亦緩慢上升，程式所預測之濕井壓力基本上其趨勢與抑壓池溫度變化的趨勢一致。

表 5.3 PCTran KuoSheng 程式模擬國聖電廠預見暫態未急停事故重要時序

時間(sec)	發生之重要事件
0.0	Feedwater Pumps Trip, MSIV Closed
3	Reactor Scrammed, Turbine Trip
24.5	RCIC ON
39	S.P. Cooling Start
56	Level Reaches TAF (downcomer)
75	Level Reaches TAF (core mixture water)
740 (12.3 min)	Hydrogen Generation
1,070 (17.8 min)	Fuel Temperature Reaches 2500K
2,205 (37 min)	RCIC OFF ----- High S.Pool Temp.

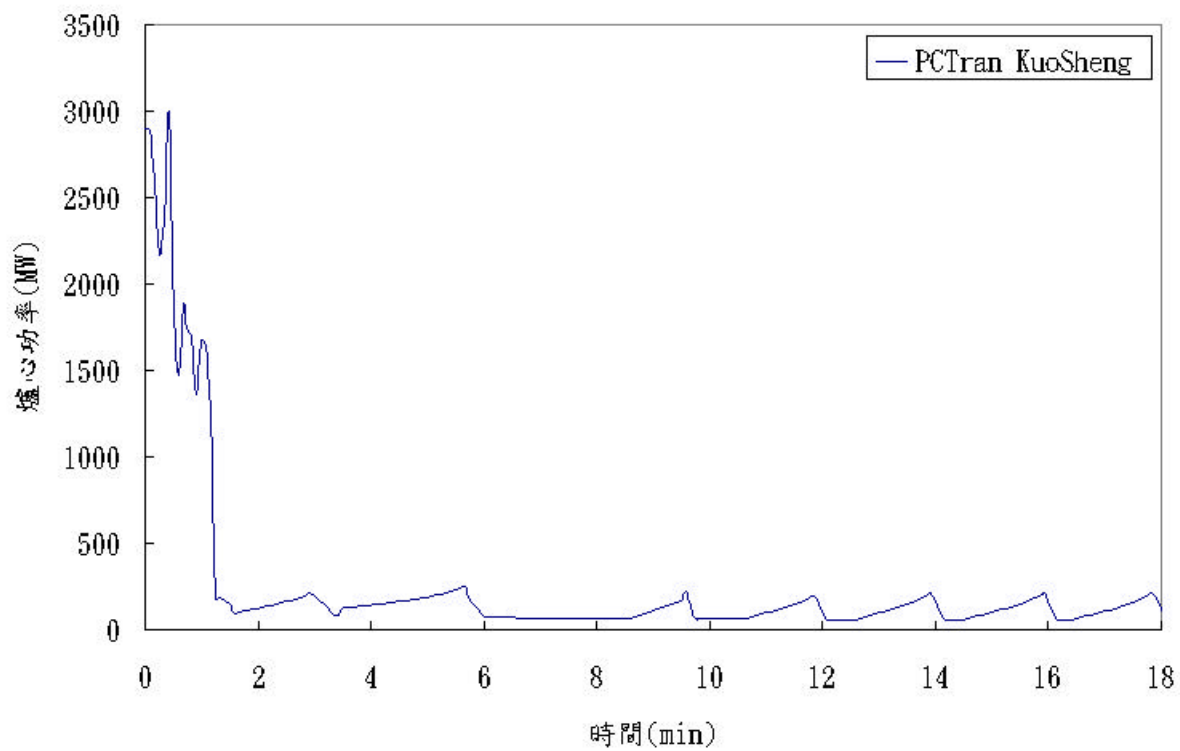


圖 5.15 PCTran KuoSheng 電廠預見暫態未急停事故爐心功率

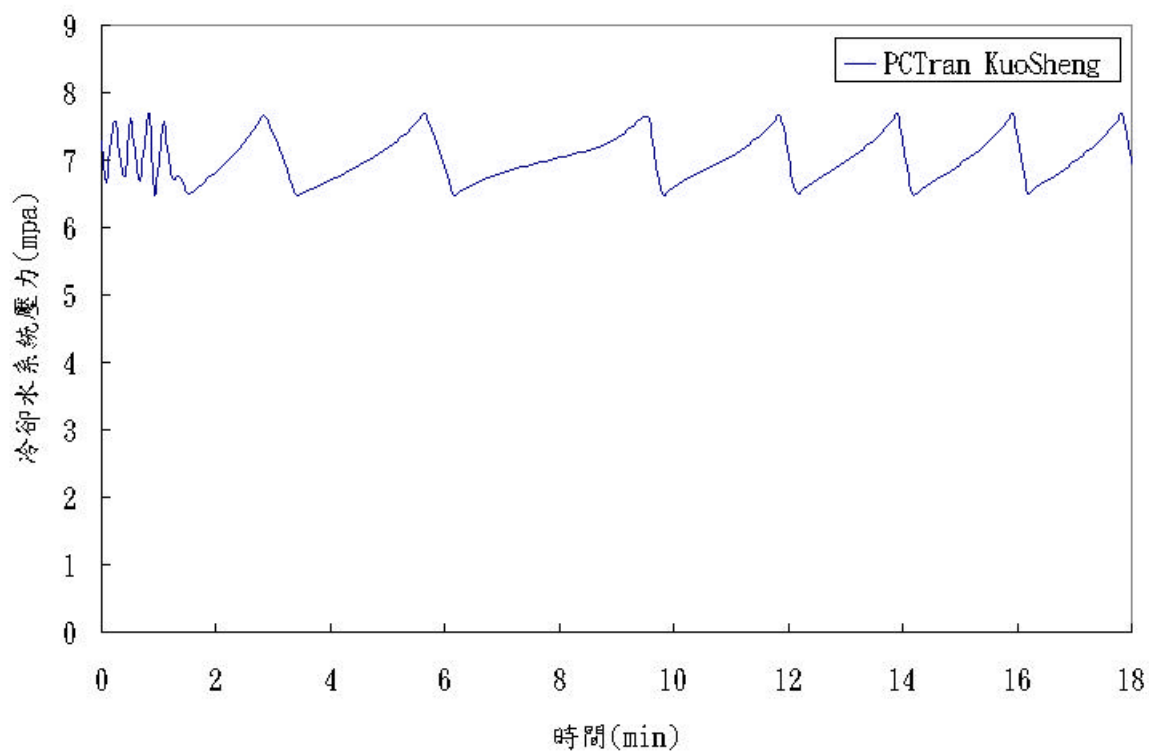


圖 5.16 PCTran KuoSheng 電廠預見暫態未急停事故冷卻水系統壓力

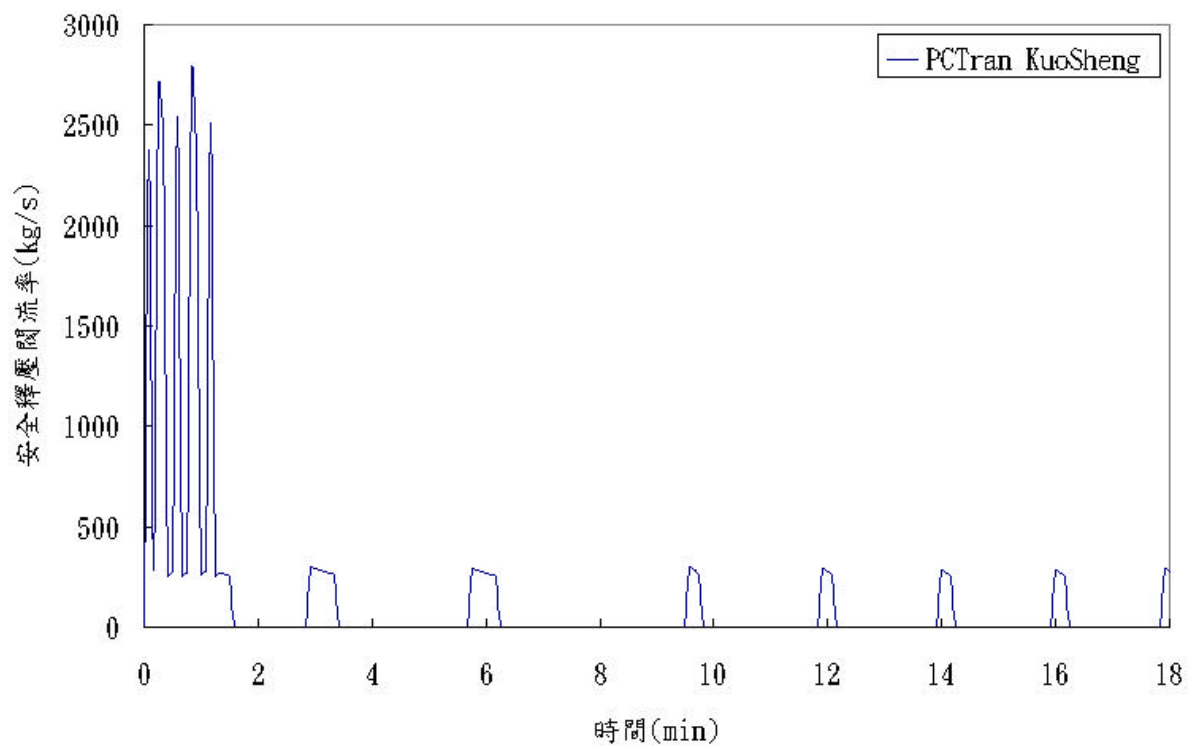


圖 5.17 PCTran KuoSheng 電廠預見暫態末急停事故安全釋壓閥流率

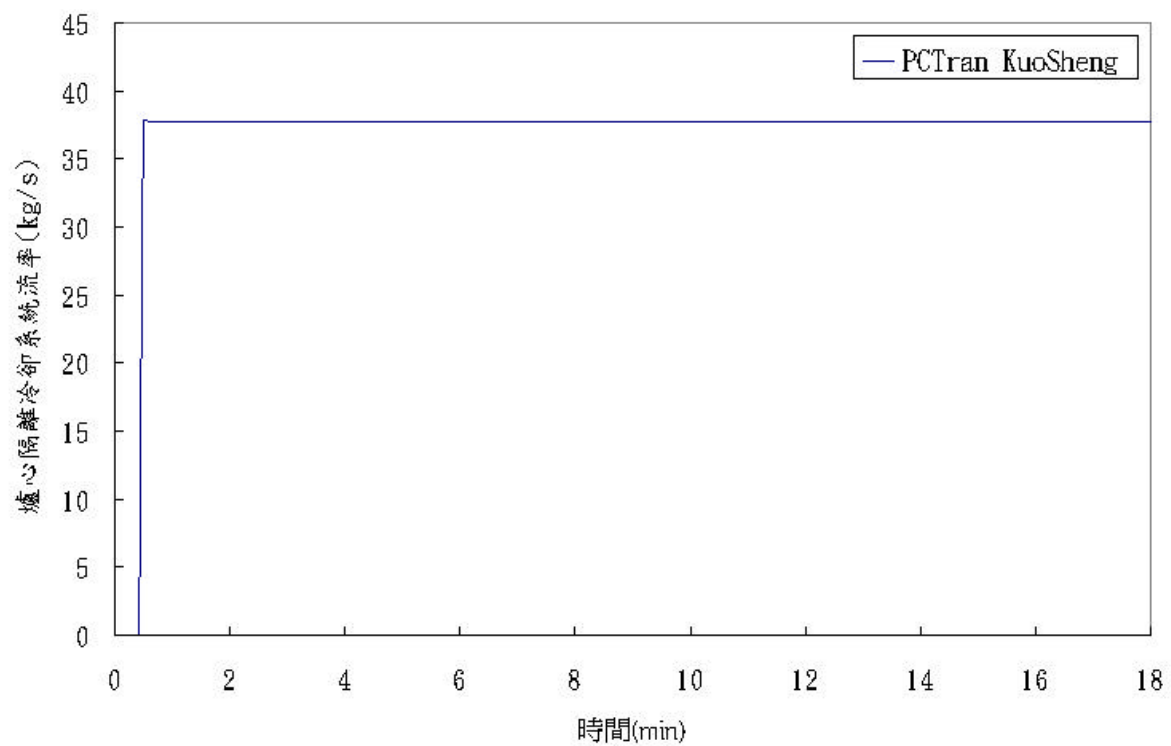


圖 5.18 PCTran KuoSheng 電廠預見暫態末急停事故爐心隔離冷卻系統流率

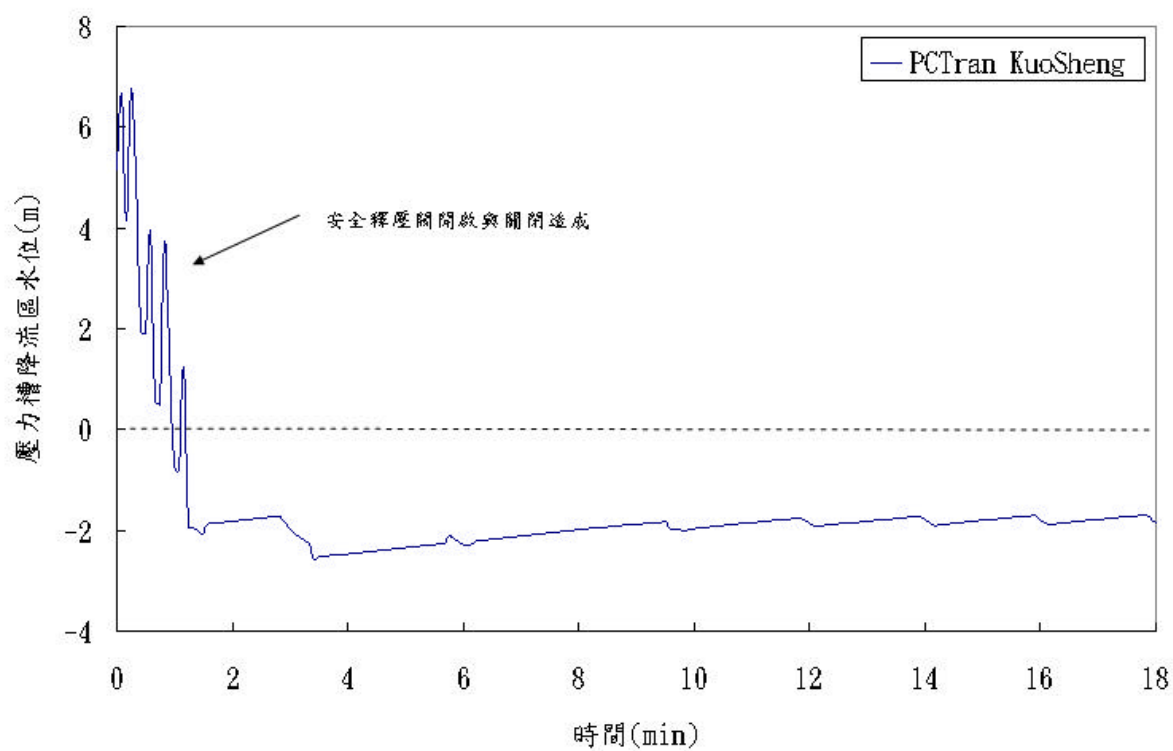


圖 5.19 PCTran KuoSheng 電廠預見暫態末急停事故壓力槽降流區水位

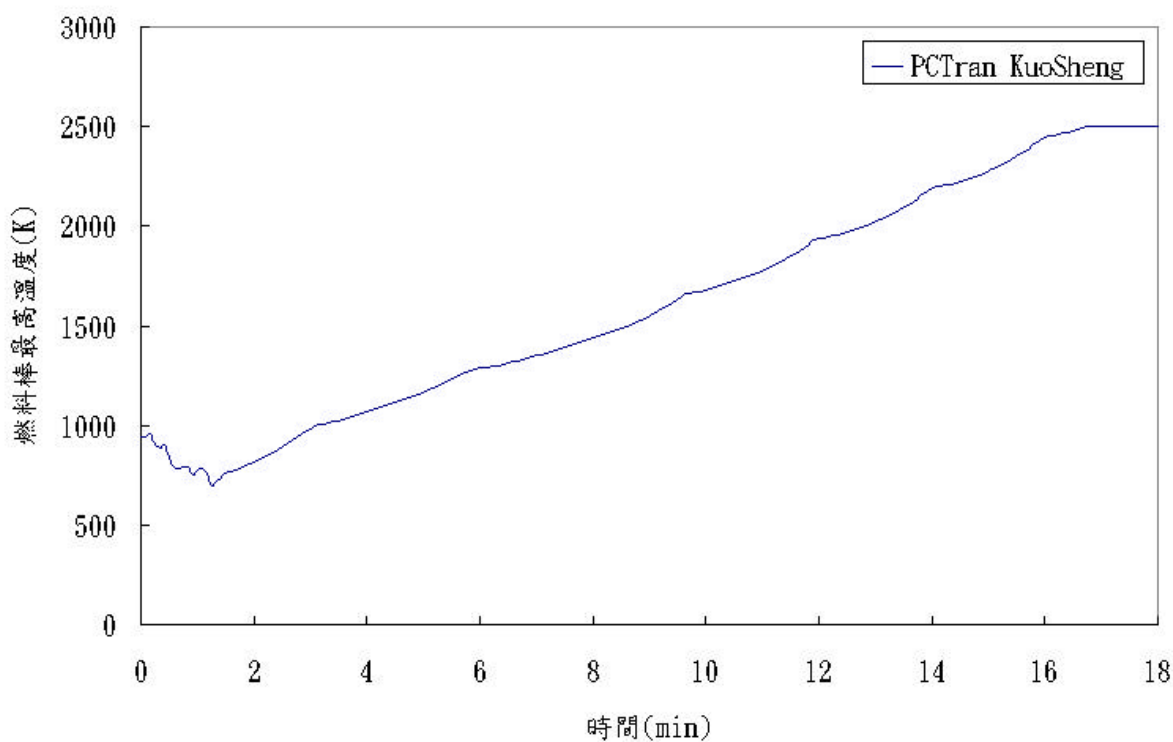


圖 5.20 PCTran KuoSheng 電廠預見暫態末急停事故燃料棒最高溫度

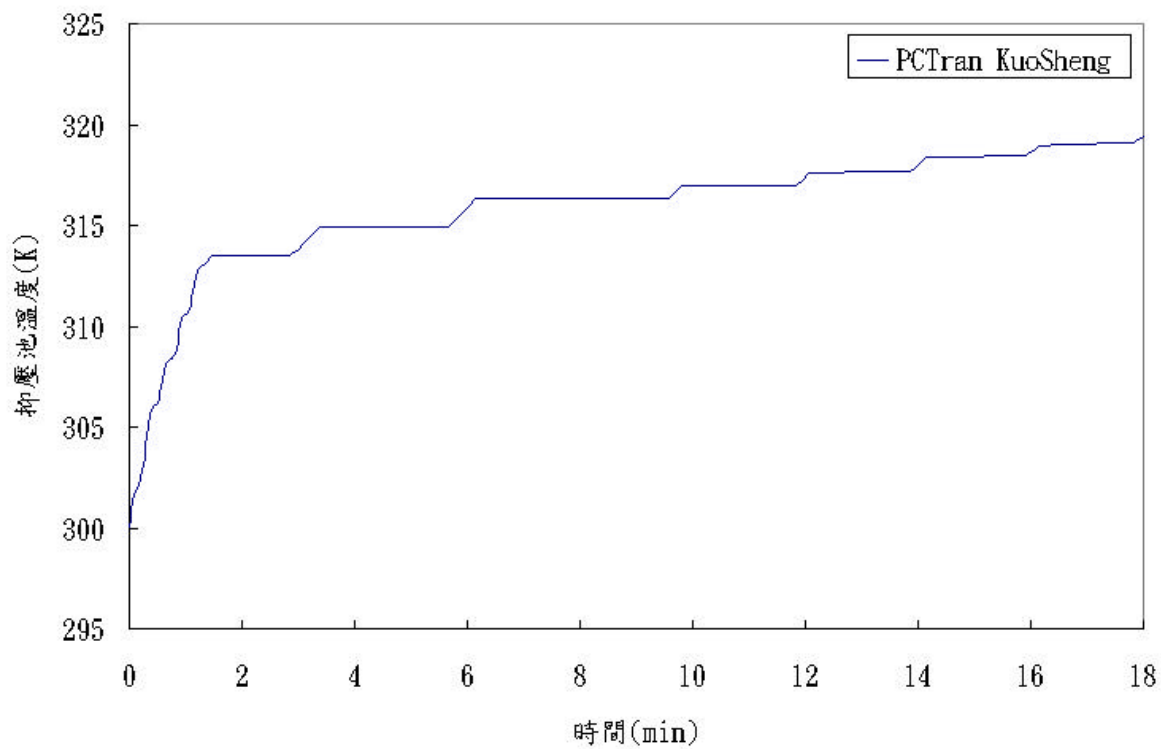


圖 5.21 PCTran KuoSheng 電廠預見暫態未急停事故抑壓池溫度

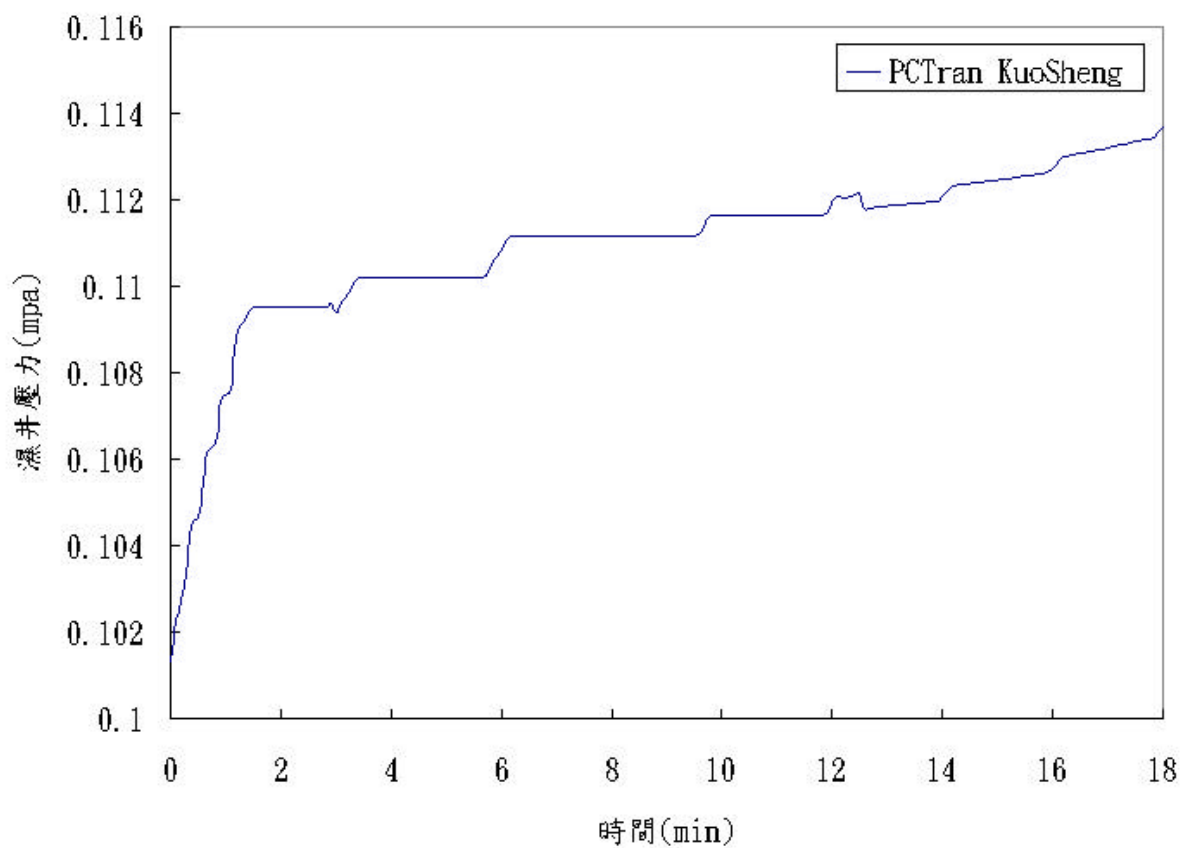


圖 5.22 PCTran KuoSheng 電廠預見暫態未急停事故濕井壓力

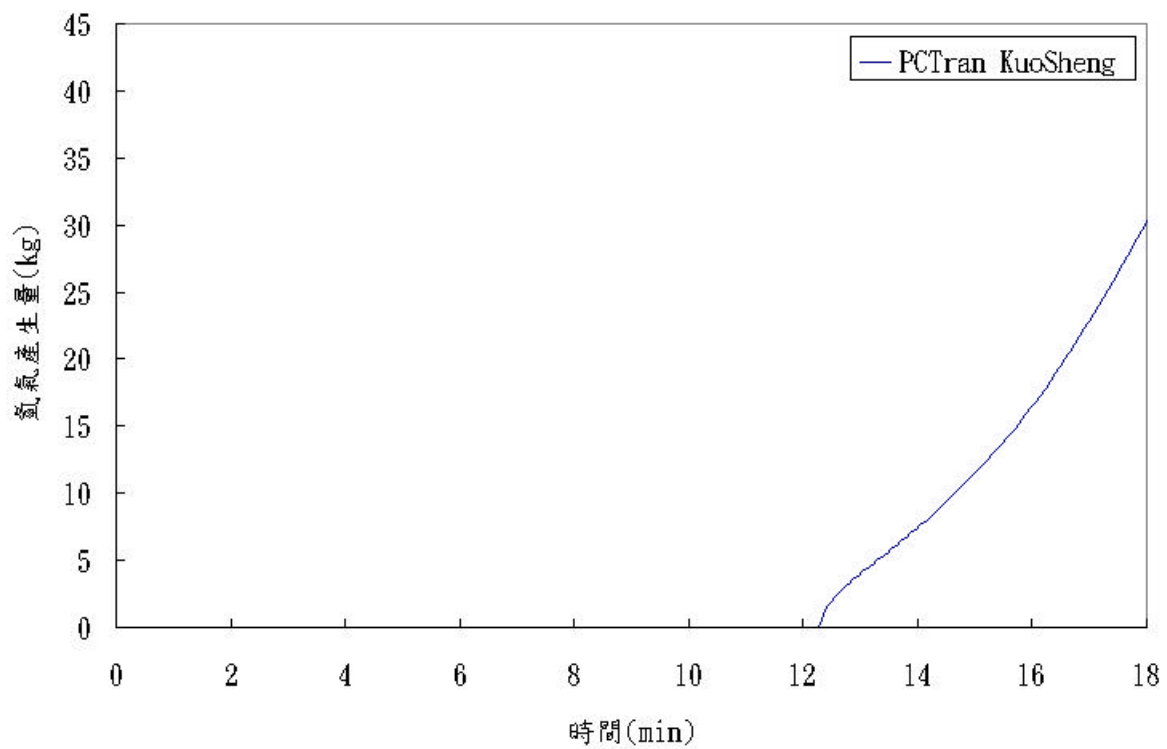


圖 5.23 PCTran KuoSheng 電廠預見暫態未急停事故氫氣產生量

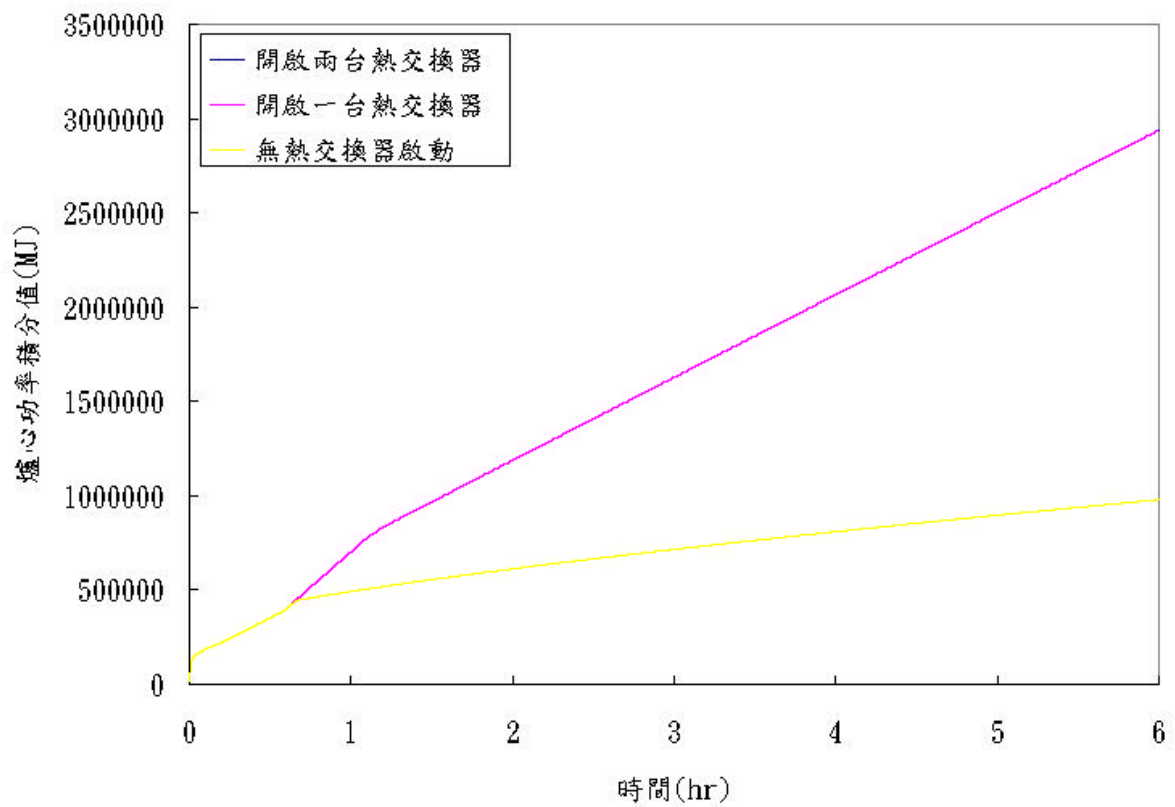


圖 5.24 PCTran KuoSheng 電廠預見暫態未急停事故爐心功率積分變化比較

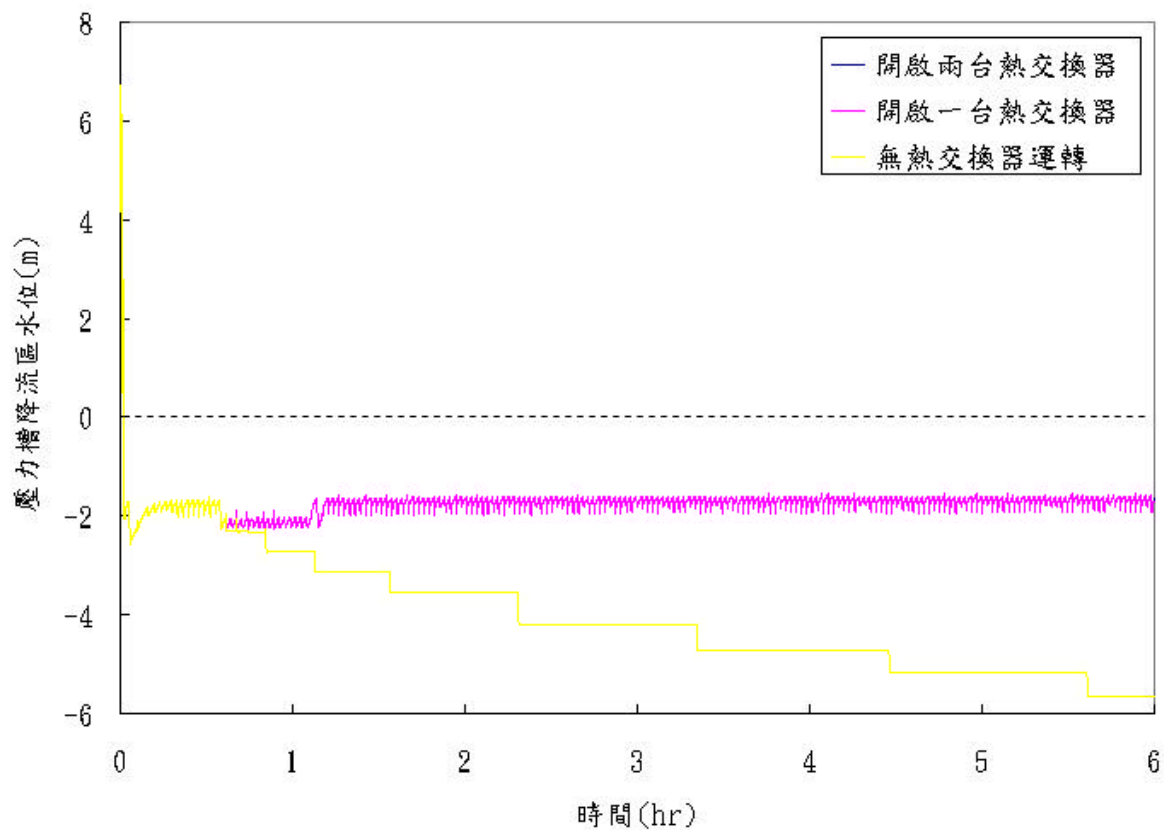


圖 5.25 PCTran KuoSheng 電廠預見暫態未急停事故壓力槽降流區水位變化比較

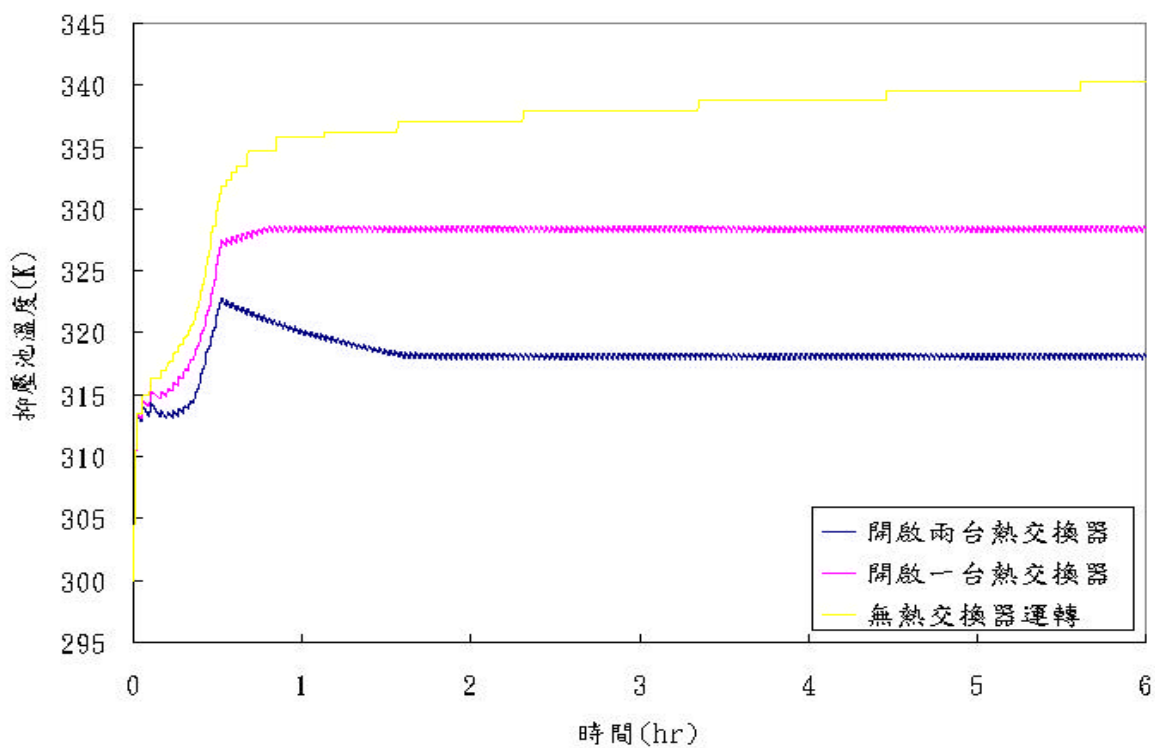


圖 5.26 PCTran KuoSheng 電廠預見暫態未急停事故抑壓池溫度變化比較

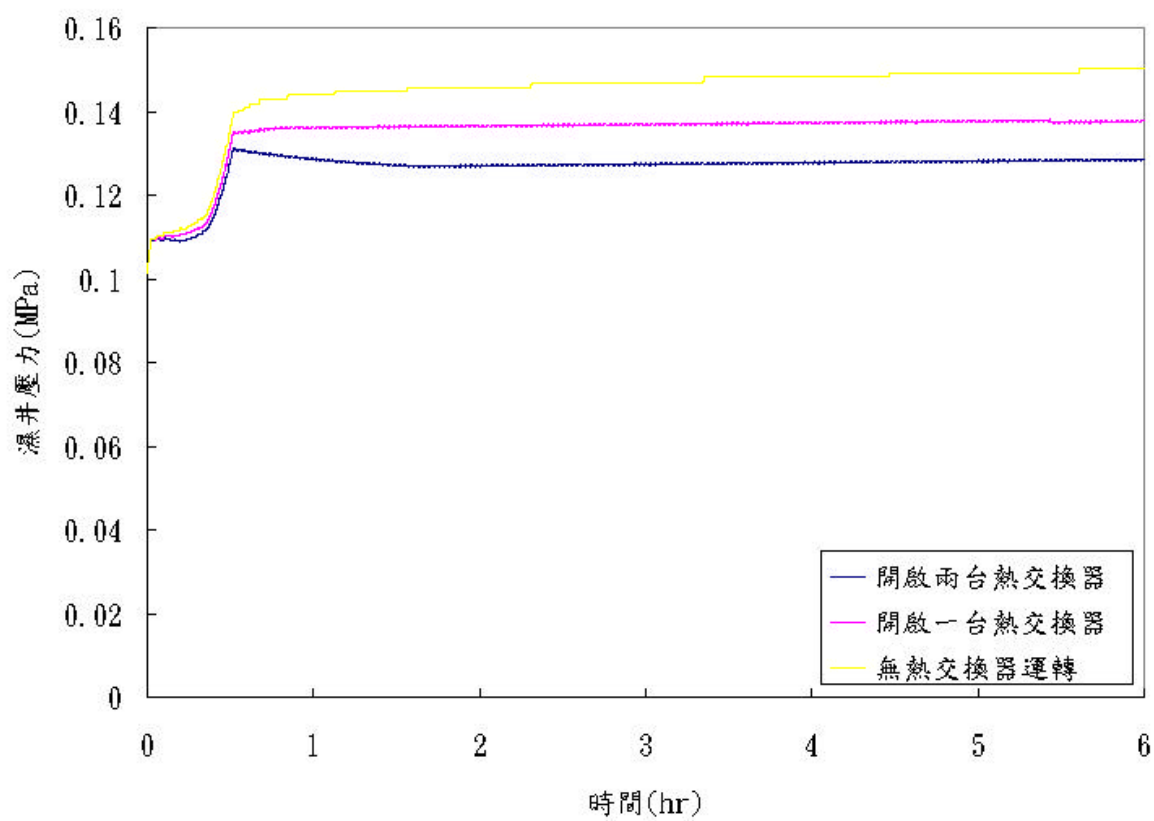


圖 5.27 PCTran KuoSheng 電廠預見暫態未急停事故濕井壓力變化比較

5.4 國聖電廠 ATWS 事故 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 模擬結果比較

本章節將探討電廠預見暫態未急停，兩個 RHRs 熱交換器失效，PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 模擬結果比較。表 5.1 及 5.3 分別為兩程式之重要時序比較。

圖 5.28 為 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠預見暫態未急停事故爐心功率積分變化。比較在未開熱交換器的情況下，MAAP4.0.4 所預測的值較 PCTran KuoSheng 的值高，此原因與壓力槽降流區水位有關，MAAP4.0.4 所預測的水位整體來說高於 PCTran KuoSheng，因此在計算總功率值時，MAAP4.0.4 較高。

圖 5.29 為 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠預見暫態未急停事故冷卻水系統壓力變化。圖中所示之冷卻水系統壓力的上下震盪是因為安全釋壓閥的開關所造成，震盪的頂點為安全釋壓閥的開啟點，震盪的最低點為安全釋壓閥的關閉點；爐心隔離冷卻系統的開啟與關閉均會導致冷卻水系統壓力的降低。冷卻水系統壓力上下震動的頻率慢慢的減少，是因為衰變熱的減少導致而成的。如圖所示，PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 所預測壓力的震盪頻率有明顯的差別，MAAP4.0.4 程式中，將冷卻水系統細分為數個控制體積，分別計算其溫度與壓力，而 PCTran KuoSheng 程式將冷卻水系統視為單一的體積，只有一個溫度與壓力，故 PCTran KuoSheng 程式之冷卻水系統壓力變化速率較 MAAP4.0.4 所預測的為緩慢，造成安全釋壓閥開啟與關閉的頻率亦不一樣。

圖 5.30 為 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠預見暫態未急停事故安全釋壓閥流率變化。由於主蒸汽管路隔離閥於事故開始時即關閉，蒸汽的累積造成冷卻水系統壓力的快速上升。PCTran KuoSheng 所預測之壓力最大值為 7.88 Mpa，造成 16 個安全釋壓閥的開啟，總流率為 2744 公斤/秒；MAAP4.0.4 所預測之最大流率為 1824 公斤/秒。如圖所示，兩程式間所預測之安全釋壓閥開啟時間及頻率有所差異，基本上其趨勢與冷卻水系統壓力變化的趨勢一致。

圖 5.31 為 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠預見暫態未急停事故爐心隔離冷卻系統流率變化。MAAP4.0.4 模擬顯示，事故發生後 61 秒時，爐心隔離冷卻系統啟動，至 54 分鐘 (3,3708 秒)時，抑壓池溫度過高 (333K)，爐心隔離冷卻系統跳脫。PCTran

KuoSheng 模擬顯示，事故發生後 24.5 秒時，爐心隔離冷卻系統首度啟動，至 37 分鐘 (2,205 秒)時，抑壓池溫度過高 (333K)，爐心隔離冷卻系統跳脫。比較兩程式模擬結果，MAAP4.0.4 所預測抑壓池溫度達 333 K 的時間較 PCTran KuoSheng 慢 17 分鐘。

圖 5.32 為 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠預見暫態未急停事故壓力槽降流區水位變化。PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 在計算水位時的參考點並不一樣，圖 3.8 為兩個程式水位計算的示意圖。為了方便結果的比較，圖 5.29 所示之壓力槽降流區水位變化是以燃料頂部(Top of Active Fuel,TAF)為零點，亦即當水位高度低於零時，壓力槽降流區水位達爐心燃料頂部高度。如圖所示，PCTran KuoSheng 預測壓力槽降流區水位於 56 秒達到爐心燃料的頂端，較 MAAP4.0.4 程式所預測之時間早了 1.2 分鐘。此項差異是由於 PCTran KuoSheng 所預測之安全釋壓閥流量較大所導致。如圖所示，兩個程式所預測的水位均呈階梯狀的下降的趨勢，此種趨勢與冷卻水系統安全釋壓閥的開啟與關閉有關。

圖 5.33 為 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠預見暫態未急停事故燃料棒最高溫度變化。PCTran KuoSheng 模擬顯示，壓力槽降流區水位在 56 秒達到爐心頂部，燃料棒溫度開始上升；17.8 分鐘 (1,070 秒)的時候，燃料棒溫度達 2,500K，此時溫度即不再變化。MAAP4.0.4 模擬結果顯示，在爐心隔離冷卻系統的注水下，燃料棒溫度維持在一溫度範圍內並不會上升，但爐心隔離冷卻系統跳脫後，燃料棒溫度則開始上升，兩程式再此有明顯的差異。

圖 5.34 為 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠預見暫態未急停事故抑壓池溫度變化。PCTran KuoSheng 模擬顯示，由於反應器壓力槽內的水蒸汽經由釋壓閥進入抑壓池，造成抑壓池溫度緩慢上升。如圖所示，抑壓池溫度呈階梯狀上升的趨勢，此原因在於安全釋壓閥的開啟會造成抑壓池水溫的上升。兩程式預測抑壓池溫度相當的接近。

圖 5.35 為 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠預見暫態未急停事故濕井壓力變化。事故開始後，由於反應器裡面的水蒸汽，經由安全釋壓閥進入抑壓池內，造成濕井的壓力緩慢上升，並且造成圍阻體內其他區間壓力亦緩慢上升。比較 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 的結果，PCTran KuoSheng 所預測濕井壓力的值較 MAAP4.0.4 高，但由於

PCTran KuoSheng 並未模擬爐心熔損情況，因此並沒有壓力尖峰的產生。

圖 5.36 為 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠預見暫態未急停事故氫氣產生量變化。PCTran KuoSheng 模擬顯示，事故開始後 12.3 分鐘（740 秒）的時候，護套中的鋁金屬與水發生反應，開始產生氫氣。在 MAAP4.0.4 程式模擬結果顯示，在事故發生 1.4 分鐘（82.4 秒）的時候，水蒸汽開始和做為護套材料的鋁合金發生化學反應而產生氫氣與熱，由於剛開始產生氫氣量極小，因此在圖中無法明顯的顯示出開始點，故以箭頭指示。如圖所示，兩程式所預測氫氣開始產生的時間與氫氣產生量有所不同；MAAP4.0.4 所預測之爐心裸露時間較 PCTran KuoSheng 晚，但氫氣產生的時間卻比較早。

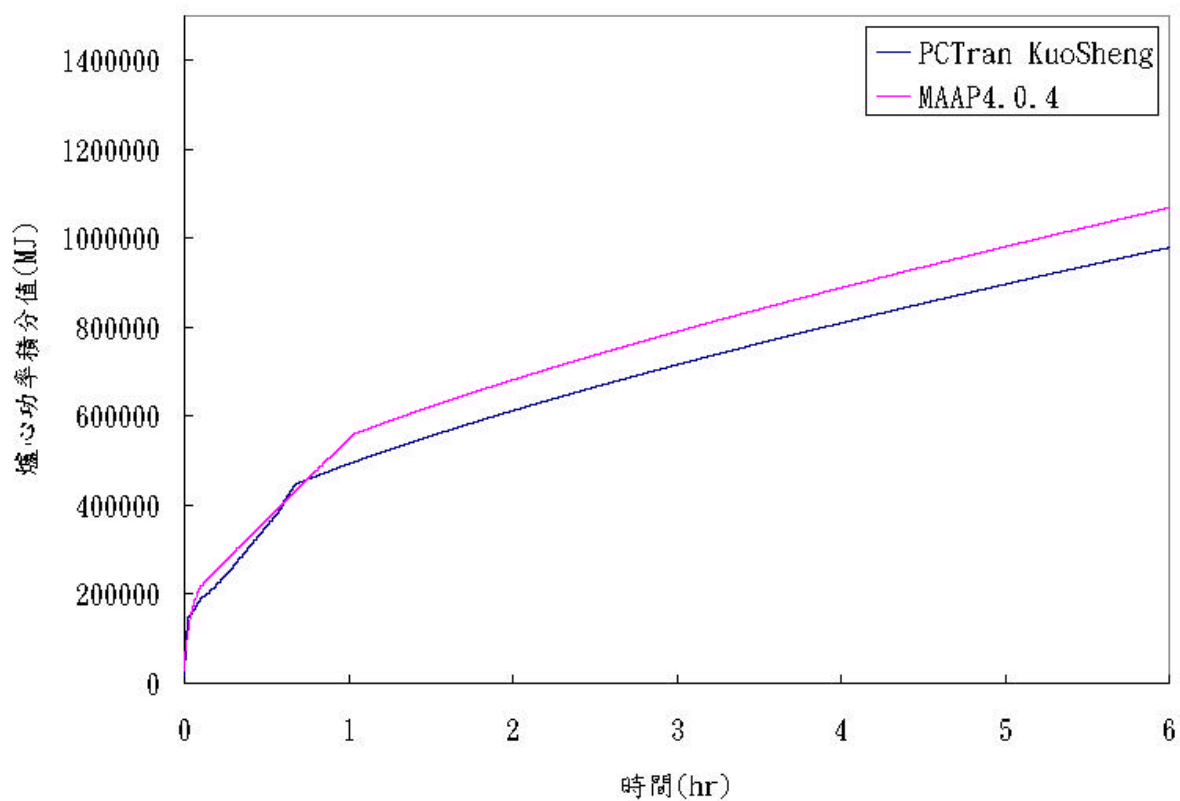


圖 5.28 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠預見暫態未急停事故爐心功率

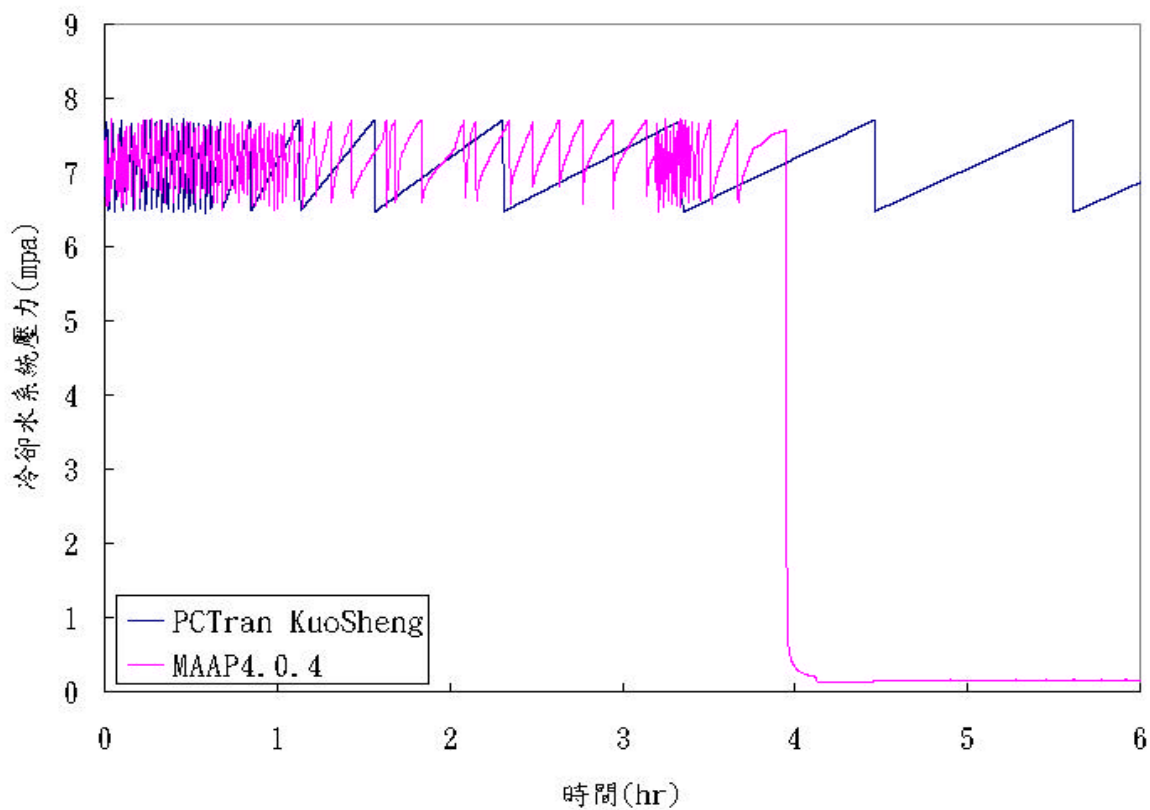


圖 5.29 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠預見暫態未急停事故冷卻水系統壓力

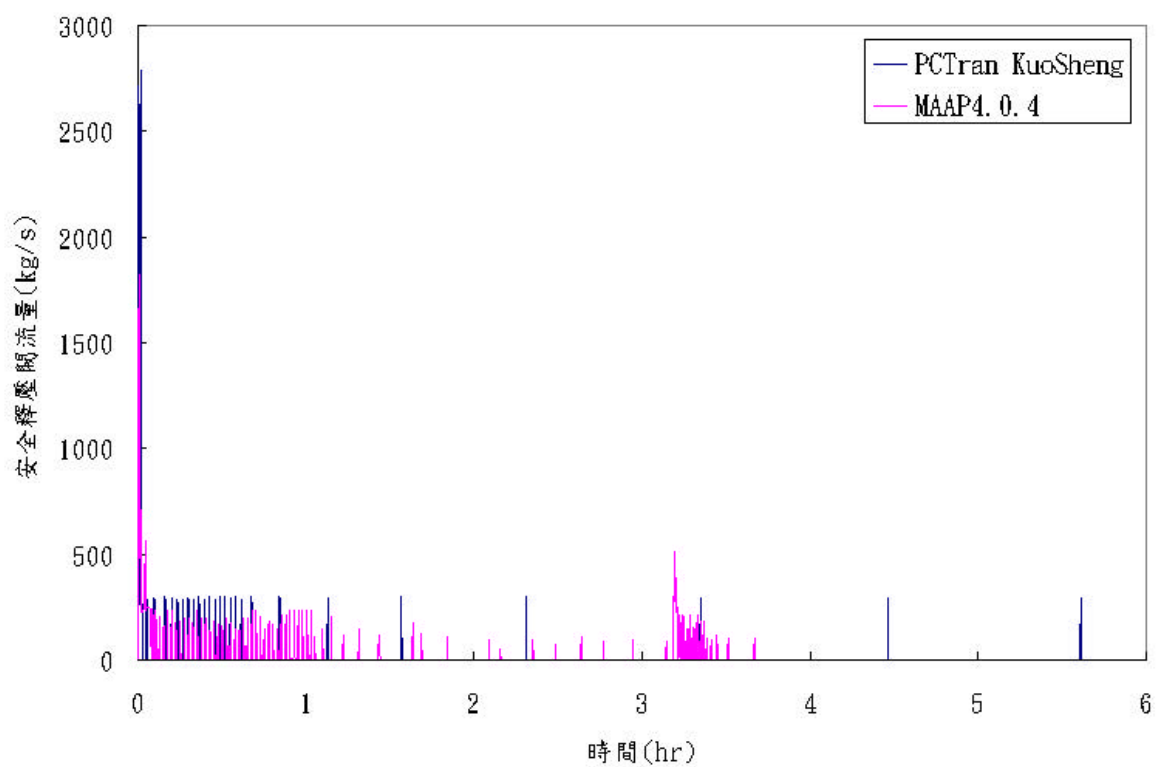


圖 5.30 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠預見暫態未急停事故安全釋壓閥流率

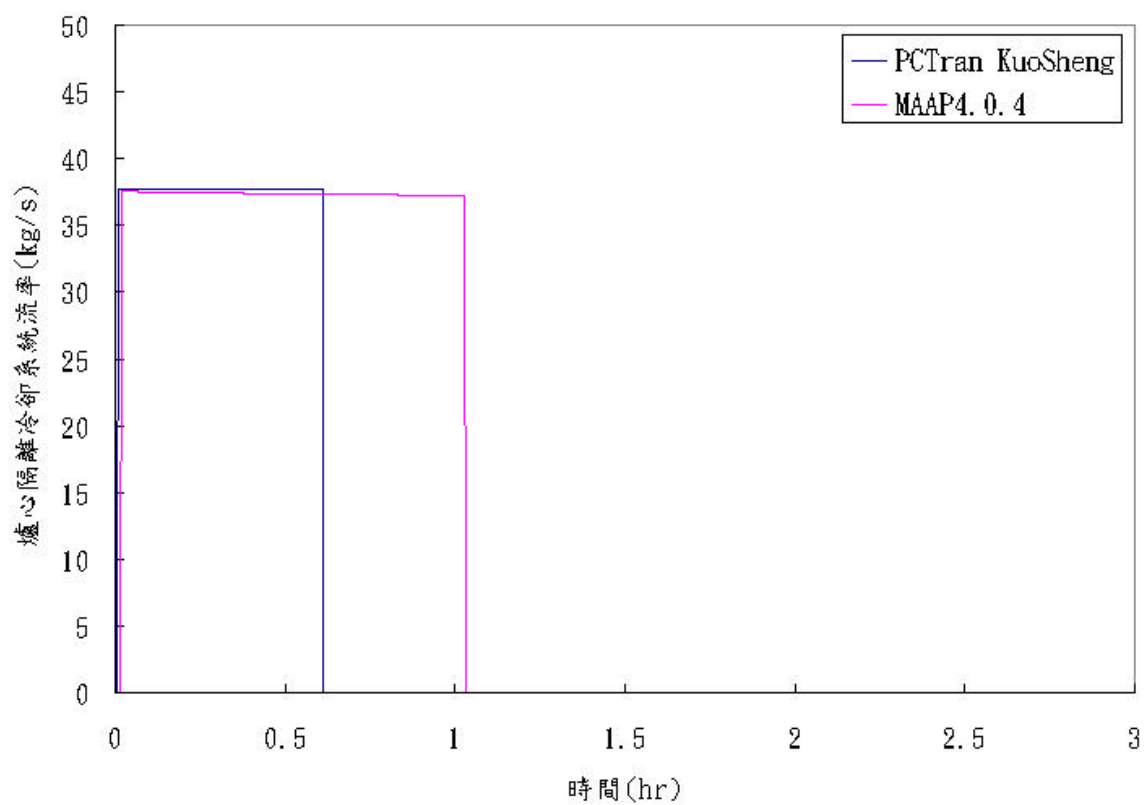


圖 5.31 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠預見暫態未急停事故爐心隔離冷卻系統流率

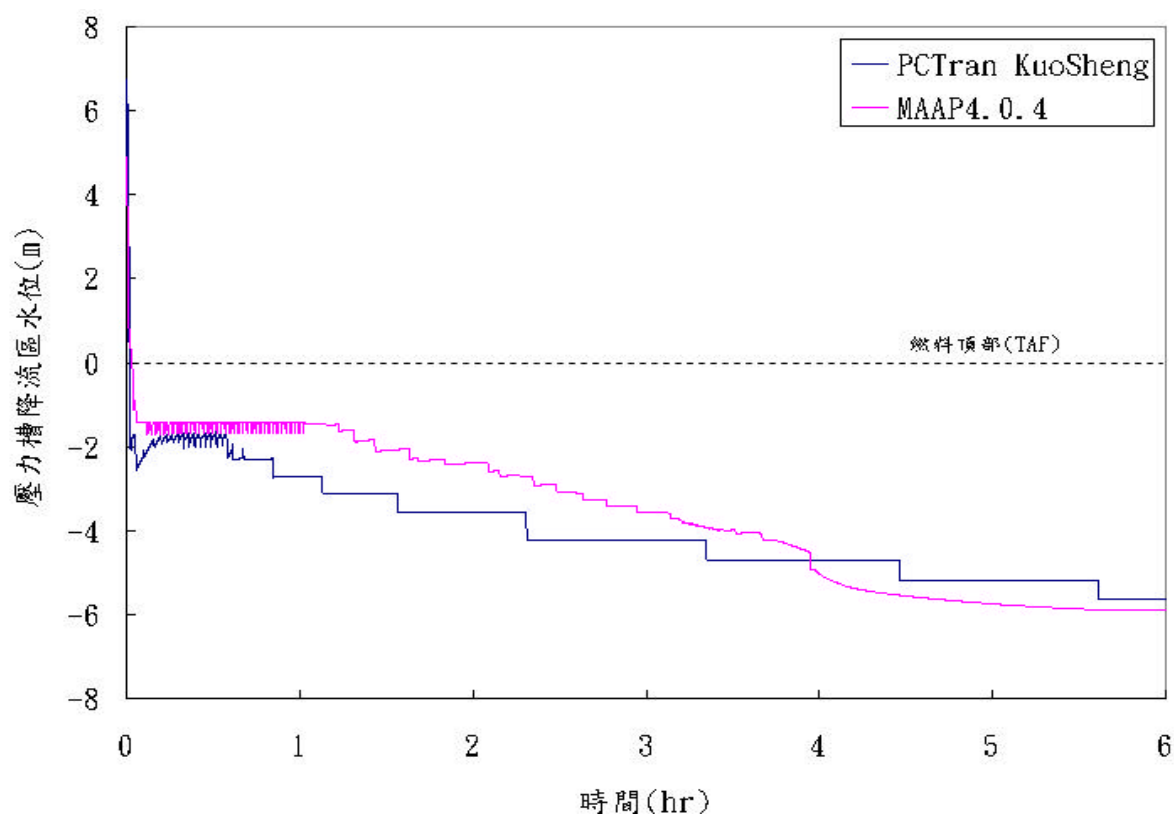


圖 5.32 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠預見暫態未急停事故壓力槽降流區水位

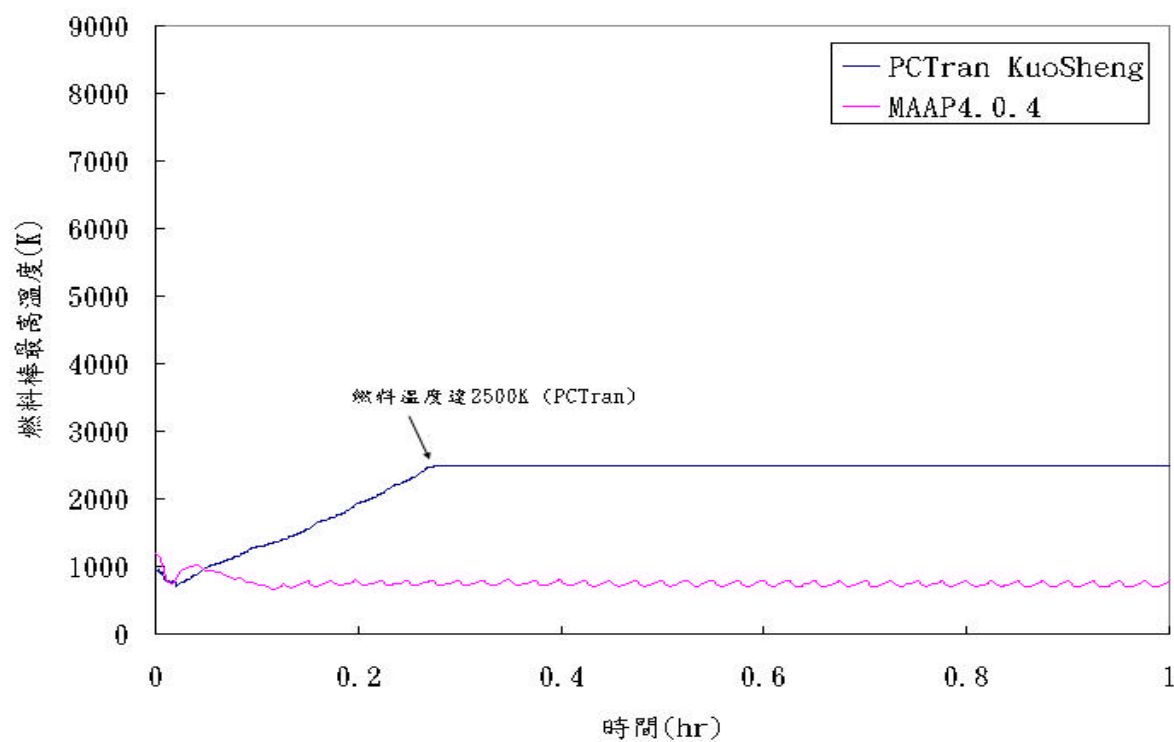


圖 5.33 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠預見暫態未急停事故燃料棒最高溫度

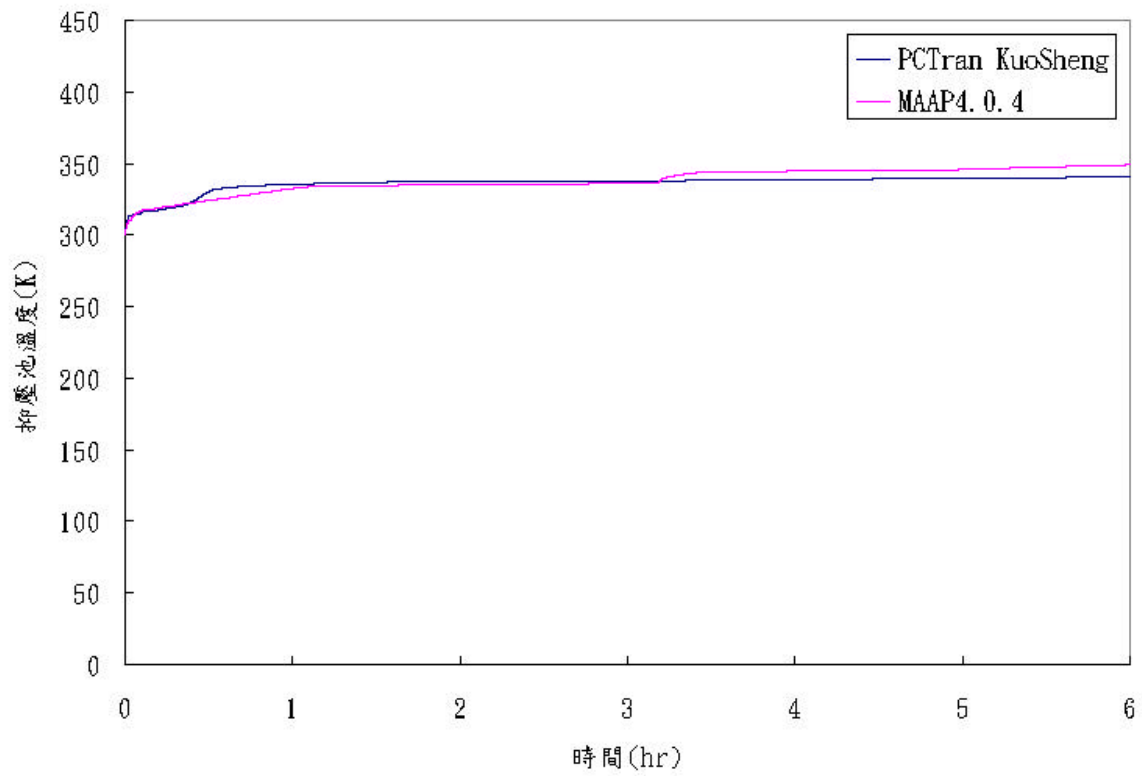


圖 5.34 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠預見暫態未急停事故抑壓池溫度

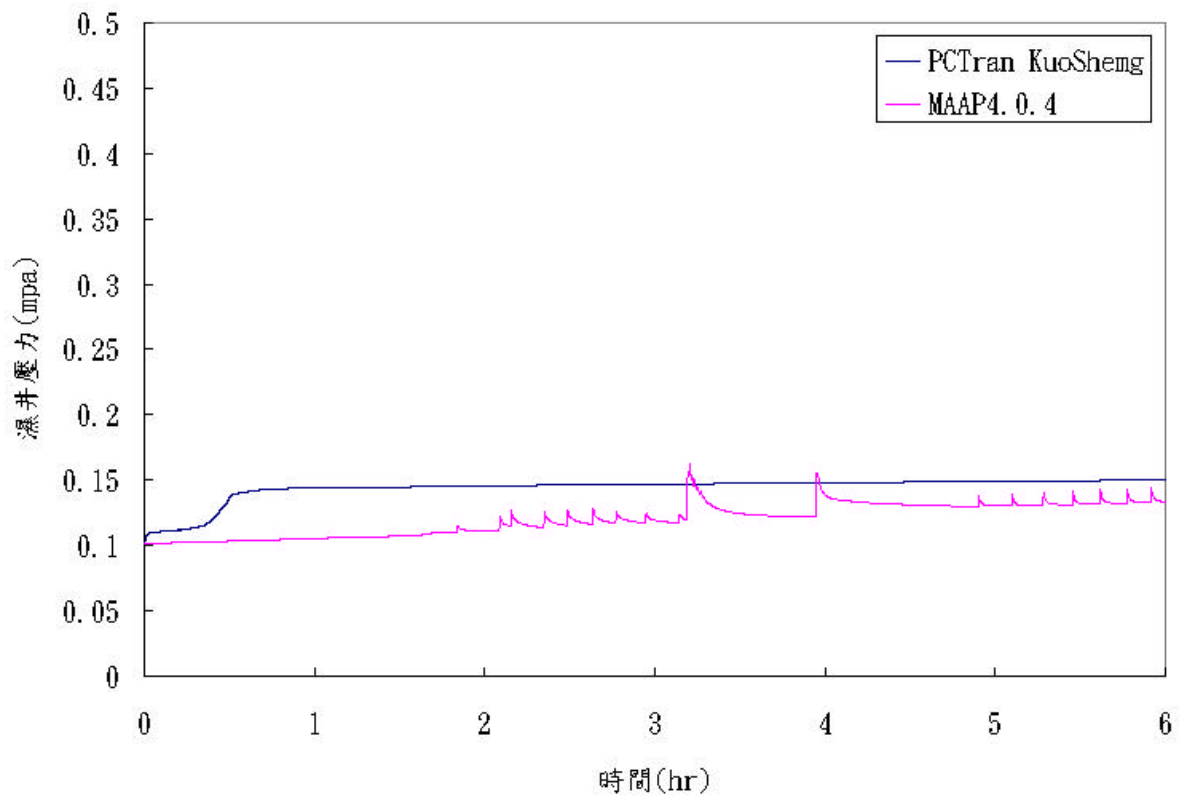


圖 5.35 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠預見暫態未急停事故濕井壓力

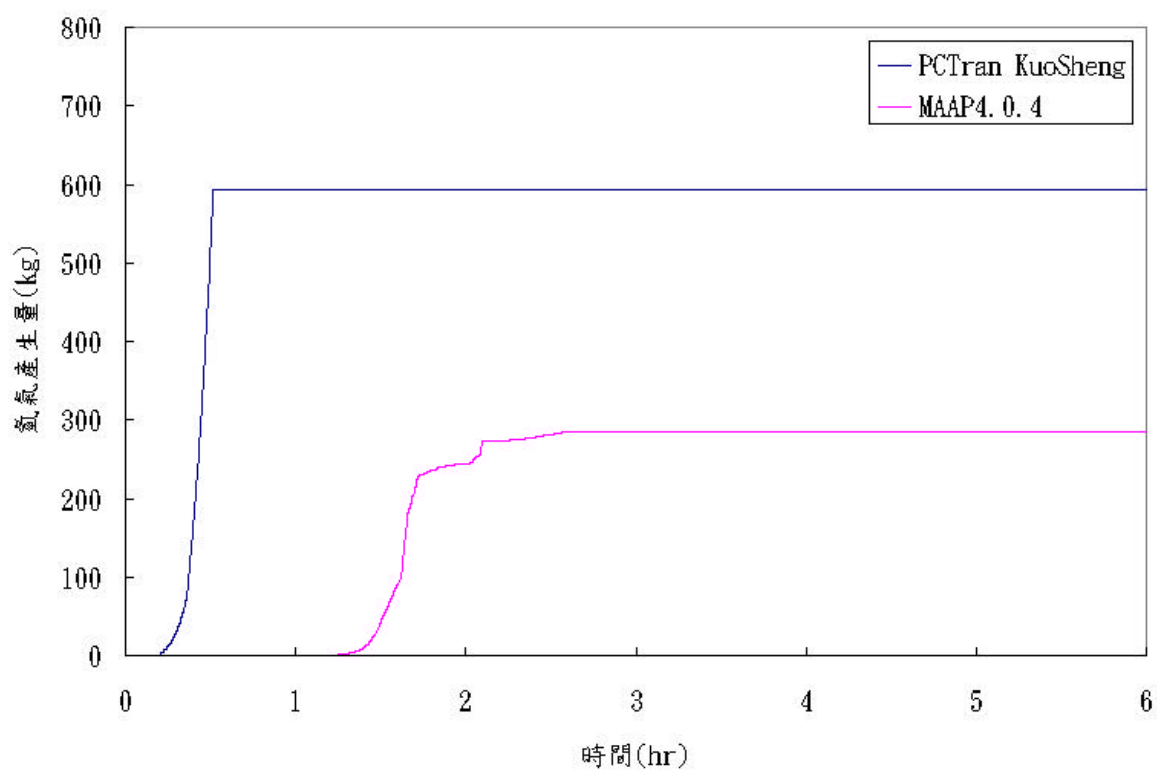


圖 5.36 PCTran KuoSheng 與 MAAP4.0.4 電廠預見暫態未急停事故氫氣產生量

5.5 國聖電廠預見暫態未急停事故模擬結論

在電廠預見暫態未急停事故當中，增加了餘熱移除系統的運作，暫態事故發生後，抑壓池溫度逐漸上升，最後造成爐心隔離冷卻系統的跳脫，因此針對餘熱移除系統中抑壓池冷卻的機制，做重點的討論，在 PCTran KuoSheng 程式模擬事故之前，首先修正了 Chexal-Layman 關係式，以及 RHRs 熱交換器的熱移除能力。由於 PCTran KuoSheng 程式模擬中，當燃料護套達 2,500K 時，溫度隨即便維持不變，因此兩程式間的比較也以 PCTran KuoSheng 模擬嚴重事故在燃料棒最高溫度達 2,500K 以前，做為探討範圍。

在計算爐心功率時，冷卻水系統壓力與壓力槽降流區水位為重要計算參數，但由於兩程式在計算冷卻水系統壓力及壓力槽降流區水位上仍有明顯的差別，因此可發現，兩程式所預測的趨勢並不相同。再爐心隔離冷卻系統方面，兩程式在預測開啟次數與時間上皆不相同，此原因與安全釋壓閥流率及抑壓池冷卻機制中熱交換器的移熱能力有關，在 PCTran KuoSheng 模擬中，假設降低熱交換器的移熱能力，則會造成抑壓池溫度上升到達 333K，造成爐心隔離冷卻系統的開啟與關閉。

在爐心溫度預測方面，PCTran KuoSheng 所預測之爐心溫度上升太快，與實際情況的差距甚大，顯示出在雙相水位高度的計算上，有著嚴重的不完備性，此原因與空泡分率的計算有著密切的關係，在計算空泡分率數值當中，所預測之數值偏低，造成水位高度的不足，而使爐心溫度快速上升。在爐心功率積分數值上，兩程式在未開啟熱交換器上所預測的數值 MAAP4.0.4 較 PCTran KuoSheng 高，但開啟熱交換器後，PCTran KuoSheng 所預測的數值會較 MAAP4.0.4 高出許多。雖然兩程式計算功率的方程式是相同的，但卻有著明顯的差異性，顯示在計算上，兩程式在部分參數間的計算，仍有差距。

第六章 結論

PCTran KuoSheng 是一個簡單快速之熱水流分析程式，具有人性化之操作介面，以及互動式控制介面等優點。PCTran KuoSheng 可以分析反應器冷卻水系統，以及圍阻體於事故中之熱水流反應；對於放射性物質的外釋，也僅考慮存在於燃料棒護套間隙之揮發性較高的放射性物質的外釋。從核電廠嚴重事故分析的角度來看，PCTran KuoSheng 最大的問題是，在程式執行時，當燃料護套達 2,500K 時，溫度隨即便維持不便，故 PCTran KuoSheng 程式並沒有模擬爐心的熔損；因此許多與熔融爐心相關現象，例如熔融爐心與水於壓力槽底部區間的作用，壓力槽底部失效，以及熔融爐心與混凝土作用等，均無法模擬，嚴格的來說，PCTran KuoSheng 並不具有模擬核電廠嚴重事故的能力。

由於兩程式間在基本參數的輸入值上有明顯的差異以及 PCTran KuoSheng 程式部分邏輯有所瑕疵，因此在做電廠全黑事故分析比較前，針對部分參數及程式邏輯進行修改，如安全釋壓閥與爐心隔離冷卻系統初始流率，並針對爐心隔離冷卻系統的開啟與跳脫邏輯進行修正，最後針對氫氣產生量的變化方面，對燃料溫度計算以及氫氣產生之方程式進行修改。

比較兩程式模擬電廠全黑事故結果，在冷卻水系統壓力方面，PCTran KuoSheng 程式之冷卻水系統壓力變化速率較 MAAP4.0.4 所預測的為緩慢，造成安全釋壓閥開啟與關閉的頻率亦不一樣。在水位計算方面，兩程式間對於降流區水位以及雙相水位的計算方式並不相同，因此造成燃料溫度上升的時間上的差異。整體而言兩程式預測暫態趨勢上的結果是很相似的，但部份的重要參數的變化有時亦有頗大的差異。

在電廠冷卻水流失事故當中，增加了高壓爐心灑水系統及低壓爐心灑水系統的運轉，因此針對此兩種爐心灑水系統的開啟邏輯及關閉邏輯進行修正，比較兩程式模擬電廠全黑事故結果，針對 PCTran KuoSheng 程式，所預測之抑壓池溫度在部分事故中，出現無法解釋之現象，應與其溫度計算邏輯有關；在小破口方面，其破口面積過小造成乾井壓力無法上升，反應器無法急停，此現象之程式邏輯應予以修正。整體而言，兩個程

式所預測之暫態變化趨勢相當一致，但在重要事件時序以及重要參數的變化上仍有不少的差異；在小破口事故中，主蒸汽隔離閥的跳拖時間，兩程式所預測的時間上，有著將近 5 分鐘的差距。

在預見暫態未急停事故中，以三種不同的案例測試兩程式模擬結果的差異。在爐心隔離冷卻系統開啟與關閉上，兩程式所預測之開啟時間是相當的接近，但在跳脫時間上卻有極大的差異，在開啟熱交換器的狀況下，PCTran KuoSheng 所預測之爐心隔離冷卻系統不會因為抑壓池溫度過高而跳脫，而 MAAP4.0.4 則會因抑壓池溫度的過高以及抑壓池的降溫，而有重複開啟與關閉的現象產生，應與兩程式之餘熱移除冷卻系統的移熱能力有關。在爐心溫度模擬方面，PCTran KuoSheng 所預測之爐心溫度上升太快，與實際情況的差距甚大，顯示出在雙相水位高度的計算上，有著嚴重的不完備性，此原因與空泡分率的計算有著密切的關係，在計算空泡分率數值當中，所預測之數值偏低，造成水位高度的不足，而使爐心溫度快速上升。在爐心功率積分數值上，兩程式在未開開啟熱交換器上所預測的數值 MAAP4.0.4 較 PCTran KuoSheng 高，但開啟熱交換器後，PCTran KuoSheng 所預測的數值會較 MAAP4.0.4 高出許多。雖然兩程式計算功率的方程式是相同的，但卻有著明顯的差異性，顯示在計算上，兩程式在部分參數間的計算，仍有著不同的差距。

PCTran KuoSheng 程式與 MAAP4.0.4 程式所討論的三種不同嚴重事故分析上，兩程式所預測的重要參數趨勢，有不少現象釋無法去解釋的，在 MAAP4.0.4 程式方面，針對燃料棒最高溫度，在壓力槽失效之前，部分事故所模擬的結果發現有明顯的尖峰產生，以物理觀念分析，是因為熔融爐心掉落至壓力槽底部，造成壓力槽底部的積水淬熄熔融爐心，產生大量蒸汽以至於燃料棒溫度升高，但以重要事件時序表上的發生時間來看，卻又無法與上述情況配合。PCTran KuoSheng 程式方面，由於在前面章節強調了 PCTran KuoSheng 程式的模擬限制，因此對於很多的嚴重事故現象無法模擬，相對的縮小了兩程式間更多的比較空間。

參考文獻

- (1) 李敏, “核二廠 MAAP4.0 輸入模式參數計畫書”, 國立清華大學工程與系統科學系, 2000
- (2) 陳玉柱, “核電廠事故分析程式 PCTran KuoSheng 之引進與應用”, 國立清華大學工程與系統科學系, 1999
- (3) “沸水式核能電廠訓練教材”, 台灣電力公司, 第二核能發電廠, 1997
- (4) 歐陽敏盛, “核能發電工程學”, 國立清華大學工程與系統科學系, 1997
- (5) 陳健智, “利用 MAAP4.0.4 程式評估龍門電廠嚴重事故下圍阻體物理現象及抑緩措施功能”, 國立清華大學工程與系統科學系, 2001
- (6) 李敏等, “核電廠安全度評估方法之理論與應用”, 國立清華大學工程與系統科學系, 1996
- (7) 李敏等, “核二廠 MAAP4.0 程式嚴重事故案例分析”, 國立清華大學工程與系統科學系, 2000

附錄

附錄一 PCTran KuoSheng 程式邏輯修正

1. ADS 邏輯部分

' ADS RESET

If (P < PWW And IADS = 2) Then

IADS = 0

If Not fMainForm.SRV(0).DisableState Then fMainForm.SRV(0).Position = 0

If Not fMainForm.SRV(1).DisableState Then fMainForm.SRV(1).Position = 0

If Not fMainForm.SRV(2).DisableState Then fMainForm.SRV(2).Position = 0

TADS = 99999

fReportsForm.AddToList (Format(TIME, "000000.0") & " sec, ADS Reset")

End If

註：網底部分為新增邏輯，安全釋壓閥為三組，但原程式邏輯部分僅撰寫兩組

' ADS STARTS

If (TIME > TADS And IADS = 1) Then

IADS = 2

fReportsForm.AddToList (Format(TIME, "000000.0") & " sec, ADS Start")

fMainForm.ControlSRV.State = 1

If Not fMainForm.SRV(0).DisableState Then fMainForm.SRV(0).Position = NV1_ / 1#
* 100

If Not fMainForm.SRV(1).DisableState Then fMainForm.SRV(1).Position = NV2_ / 8#
* 100

If Not fMainForm.SRV(2).DisableState Then fMainForm.SRV(2).Position = NV3_ / 7#
* 100

End If

註：MAAP4.0.4 參數輸入中，安全釋壓閥為 3 組共 16 個，分別為 1、8、7

If (IADS = 0# And IT.L1 And IT.I4) Then

IADS = 1

TADS = TIME + 99999 ' KS

fReportsForm.AddToList (Format(TIME, "000000.0") & " sec, L1 ADS Timer 120_
sec")

ElseIf (IADS = 0# And TWW > H3) Then

IADS = 1

TADS = TIME + 99999 ' KS

fReportsForm.AddToList (Format(TIME, "000000.0") & " sec, DAK Temp H3 ADS_
Timer 120 sec")

End If

註：網底部分為，ADS TIME DELAY，目的在於使 ADS 在事故模擬中，在時間未到 99999 秒時，ADS 不會啟動

WVP = WRV * P / P0 * (1 * fMainForm.SRV(0).Position / 100 + _

8 * fMainForm.SRV(1).Position / 100 + 7 * fMainForm.SRV(2).Position / 100)

註：網底部分為邏輯更改部份

2. RCIC 邏輯部分

If (IRCIC = 1 And IT.L8) Then

IRCIC = 0

If(fMainForm.PumpRCIC.Capacity=100AndNotfMainForm.PumpRCIC.DisableState)_

Then fMainForm.PumpRCIC.Capacity = 0

If(fMainForm.ValveSTC(3).Position=100 AndNot fMainForm.ValveSTC(3).DisableState)_

Then fMainForm.ValveSTC(3).Position = 0

If(fMainForm.ValveSTC(0).Position = 100 AndNot fMainForm.ValveSTC(0).DisableState)

Then fMainForm.ValveSTC(0).Position = 0

fMainForm.TurbineRCIC.State = False

fReportsForm.AddToList (Format(TIME, "000000.0") & " sec, RCIC OFF ON LEVEL8")

TRCIC = TIME + 999999

End If

註：此段新增邏輯為 RCIC 在壓力槽降流區水位達 L8 時自動關閉

If (Not IIRCIC = 1 And fMainForm.ValveSTC(2).Position = 100 And TWW > 140) Then

IIRCIC = 1

If fMainForm.PumpRCIC.Capacity = 100 Then fMainForm.PumpRCIC.Capacity = 0

If fMainForm.ValveSTC(0).Position = 100 Then fMainForm.ValveSTC(0).Position = 0

If fMainForm.ValveSTC(2).Position = 100 Then fMainForm.ValveSTC(2).Position = 0

fMainForm.TurbineRCIC.State = False

fReportsForm.AddToList (Format(TIME, "000000.0") & " sec, RCIC OFF due to HIGH_
S.P. TEMP.")

End If


```

If (IIRCIC = 1 And TWW <= 140 And fMainForm.ValveSTC(2).Position = 0) Then
    IIRCIC = 0
    If (fMainForm.PumpRCIC.Capacity = 0 And Not fMainForm.PumpRCIC.DisableState)
    Then fMainForm.PumpRCIC.Capacity = 100
    If fMainForm.ValveSTC(0).Position = 0 Then fMainForm.ValveSTC(0).Position = 100
    If fMainForm.ValveSTC(2).Position = 0 Then fMainForm.ValveSTC(2).Position = 100
    fMainForm.TurbineRCIC.State = True
    fReportsForm.AddToList (Format(TIME, "000000.0") & " sec, RCIC Auto Restart")
End If
註：此段新增邏輯為 RCIC 在抑壓池溫度高 60°C 時關閉，低於 60°C 時恢復運作

```

3. 電廠全黑事故邏輯部分

```

If (NotfMainForm.PumpFeed(0).DisableState) Then fMainForm.PumpFeed(0).DisableState_
    = True
If (NotfMainForm.PumpFeed(1).DisableState) Then fMainForm.PumpFeed(1).DisableState_
    = True
If (Not fMainForm.PumpFeed(2).DisableState) Then fMainForm.PumpFeed(2).DisableState_
    = True
If (Not fMainForm.ValveSteam(1).DisableState) Then fMainForm.ValveSteam(1)._
    DisableState = True
If (NotfMainForm.ValveSteam(2).DisableState) Then fMainForm.ValveSteam(2)._
    DisableState = True
If (NotfMainForm.ValveSteam(3).DisableState) Then fMainForm.ValveSteam(3)._
    DisableState = True
If (Not fMainForm.ValveFeed.DisableState) Then fMainForm.ValveFeed.DisableState = True
If (Not fMainForm.ValveSTC(1).DisableState) Then fMainForm.ValveSTC(1).DisableState_
    = True
If (Not fMainForm.PumpRHR(0).DisableState) Then fMainForm.PumpRHR(0)._
    DisableState = True
If (Not fMainForm.PumpRHR(1).DisableState) Then fMainForm.PumpRHR(1)._
    DisableState = True
If (Not fMainForm.PumpRHR(2).DisableState) Then fMainForm.PumpRHR(2)._
    DisableState = True
If (Not fMainForm.HeatExchangerRHR(0).DisableState) Then fMainForm.HeatExchanger_
    RHR(0).DisableState = True
If (Not fMainForm.HeatExchangerRHR(1).DisableState) Then fMainForm.HeatExchanger_
    RHR(1).DisableState = True

```

```

If (Not fMainForm.ValveRHRDischarge(0).DisableState) Then fMainForm.ValveRHR_
    Discharge(0).DisableState = True
If (Not fMainForm.ValveRHRDischarge(1).DisableState) Then fMainForm.ValveRHR_
    Discharge(1).DisableState = True
If (Not fMainForm.ValveRHRDischarge(2).DisableState) Then fMainForm.ValveRHR_
    Discharge(2).DisableState = True
If (Not fMainForm.ValveRHRSupply(0).DisableState) Then fMainForm.ValveRHR_
    Supply(0).DisableState = True
If (Not fMainForm.ValveRHRSupply(1).DisableState) Then fMainForm.ValveRHR_
    Supply(1).DisableState = True
If (Not fMainForm.PumpSLC(0).DisableState) Then fMainForm.PumpSLC(0)._
    DisableState = True
If (Not fMainForm.PumpSLC(1).DisableState) Then fMainForm.PumpSLC(1)._
    DisableState = True
If (Not fMainForm.PumpLPCS.DisableState) Then fMainForm.PumpLPCS._
    DisableState = True
If (Not fMainForm.PumpHPCS.DisableState) Then fMainForm.PumpHPCS._
    DisableState = True
If (Not fMainForm.ValveHPCS(0).DisableState) Then fMainForm.ValveHPCS(0).+
    DisableState = True
If (Not fMainForm.ValveHPCS(1).DisableState) Then fMainForm.ValveHPCS(1)._
    DisableState = True

```

註：此段新增邏輯為，程式模擬電廠全黑事故時，程式自動設定各種閥及泵為失效

4. 氫氣產生量程式邏輯部分

```

Dim ROUT As Single
    Dim RIN As Single
    Dim RODS As Single
    Dim AP As Single
    Dim DRP1 As Single
    Dim DRP2 As Single
    Dim DZR As Single
    Dim DH2O As Single
    Dim DMW As Single
    Dim D75 As Single
    Dim D50 As Single
    Dim ZrDen As Single

```

Dim ADUM As Single

Dim BDUM As Single

Dim TPCTK As Single

On Error GoTo HYDROERROR

ROUT = 0.242

RIN = 0.207

RODS = 38688#

D75 = -3.98396

D50 = -5.07002

ADUM = 76.3848

BDUM = -150691

ZrDen = 6393 'kg/m3

' METAL-WATER REACTION

' ZR DENSITY = 0.231 LBM/IN3, FUEL LENGTH = 12 FT = 144 IN

' BAKER-JUST CORRELATION RETRAN MANUAL P.V-15

' HGEN = TOTAL MOLES OF HYDROGEN GENERATED IN DRYWELL

' DH2 = HYDROGEN GENERATED DURING DT (MOLES)

' RODS = TOTAL NUMBER OF RODS

' ROUT = CLAD OUTSIDE RADIUS (IN), RIN = INSIDE RADIUS

If (TPCT > 1800#) Then

TPCTK = (TPCT - 32) / 1.8 + 273 'change to K

If (TPCTK >= 1875) Then

AP = $2.0369 \times 10^{-5} \times \text{Exp}(-2.26606 \times 10^4 / \text{TPCTK}) \times 10000 / (2.54^2)$ 'in2/sec

ElseIf (TPCTK > 1850 And TPCTK < 1875) Then

AP = $\text{Exp}(\text{ADUM} + \text{BDUM} / \text{TPCTK}) / (2 \times 8.174 \times 10^7) \times 10000 / (2.54^2)$

ElseIf (TPCTK <= 1875) Then

AP = $1.7984 \times 10^{-6} \times \text{Exp}(-1.98942 \times 10^4 / \text{TPCTK}) \times 10000 / (2.54^2)$

End If

DRP1 = Sqr(DRP * DRP + AP)

If (DRP1 < (ROUT - RIN)) Then

DZR = $3.1416 \times 0.231 \times (2 \times \text{ROUT} \times (\text{DRP1} - \text{DRP}) - \text{AP}) \times \text{H.HCOR} \times \text{UNC}$

DH2O = $\text{POWER} \times \text{AK8} / \text{AK9} \times \text{PWITH} \times (1 - \text{UNC} + \text{UNC} \times \text{USTC}) \times \text{DT} / \text{D} \times _$
453.6 / 18 / 100

DMW = $\text{DZR} / 91 \times 2 \times \text{RODS} \times 453.6$

If (DMW > DH2O) Then DH2 = DH2O

If (DMW <= DH2O) Then DH2 = DMW

If (DH2 > TMIN * 453.6 / 18) Then DH2 = 0

Else

```

    DH2 = 0
End If
    HGEN = HGEN + DH2
    DRP2 = ROUT - Sqr((ROUT - DRP) ^ 2 - DH2 / 2 / 3.1416 * 91 / 453.6 / 0.231 _
    / H.HCOR / RODS / UNC)
If (DRP2 < DRP1) Then
    DRP = DRP2
Else
    DRP = DRP1
End If
    CNH2 = HGEN * 22400# / (VDW * 30.48 ^ 3 + HGEN * 22400) * 100
    If (CNH2 < 0) Then CNH2 = 0

```

End If

註：網底部分為新增之邏輯，計算氫氣產生量

5. 爐心裸露邏輯部分

```

If (Not INDcov = 1 And LEV < 0) Then
    INDcov = 1
    fReportsForm.AddToList (Format(TIME, "000000.0") & " sec, Core Uncovered")
End If
If (Not INDcov1 = 1 And H.HMXL < 0) Then
    INDcov1 = 1
    fReportsForm.AddToList (Format(TIME, "000000.0") & " sec, Core Mixture Level_
    Uncovered")
End If

```

註：此段新增邏輯為，可在 Output file 中，容易的知道爐心裸露時間

6. 高、低壓爐心灑水系統邏輯部分

```

' fMainForm.LabelTripHPCSH5.ForeColor = &HFF
' If(Not fMainForm.ValveHPCS(0).DisableState) Then fMainForm.ValveHPCS(0)._
    Position = 100
' fReportsForm.AddToList (Format(TIME, "000000.0") & " sec, LPCS starts ")
' fMainForm.LabelTripLPCSH5.ForeColor = &HFF
' If (Not fMainForm.PumpLPCS.DisableState) Then fMainForm.PumpLPCS.Capacity_
    = 100

```

註：此段原 LPCS 開啟邏輯已被 comma，另寫一段新的開啟邏輯

If (IHPCS = 1 And IT.L8) Then

IHPCS = 0

If (fMainForm.PumpHPCS.Capacity = 100 And Not fMainForm.PumpHPCS.DisableState)_
Then fMainForm.PumpHPCS.Capacity = 0

If (fMainForm.ValveHPCS(0).Position=100 And Not fMainForm.ValveHPCS(0)._
DisableState) Then fMainForm.ValveHPCS(0).Position = 0
fReportsForm.AddToList (Format(TIME, "000000.0") & " sec, HPCS OFF AT LEVEL 8")

End If

註：此段新增邏輯為 HPCS 在壓力槽降流區水位達 L8 時自動關閉

If (Not IIHPCS = 1 And fMainForm.ValveHPCS(1).Position = 100 And TWW > 140) Then_
IIHPCS = 1

If (Not fMainForm.PumpHPCS.DisableState) Then fMainForm.PumpHPCS.DisableState_
= True

If fMainForm.PumpHPCS.Capacity = 100 Then fMainForm.PumpHPCS.Capacity = 0

If (Not fMainForm.ValveHPCS(1).DisableState) Then fMainForm.ValveHPCS(1)._
DisableState = True

If fMainForm.ValveHPCS(1).Position = 100 Then fMainForm.ValveHPCS(1).Position = 0
fReportsForm.AddToList (Format(TIME, "000000.0") & " sec, HPCS OFF due to HIGH_
S.P. TEMP.")

End If

註：此段新增邏輯為 HPCS 在抑壓池溫度高於 60°C 時關閉

If (ILPCS = 0 And (IT.L1 Or IT.I4 Or P <= 397.71) And Not IT.L8) Then
ILPCS = 1

If (fMainForm.PumpLPCS.Capacity = 0 And Not fMainForm.PumpLPCS._
DisableState) Then fMainForm.PumpLPCS.Capacity = 100

If (Not fMainForm.PumpLPCS.DisableState) Then fReportsForm.AddToList (Format_
(TIME, "000000.0") & " sec, LPCS Auto Starts ")
fMainForm.LabelTripLPCSH5.ForeColor = &HFF

End If

If (ILPCS = 1 And IT.L8) Then
ILPCS = 2

If (fMainForm.PumpLPCS.Capacity = 100 And Not fMainForm.PumpLPCS._
DisableState) Then fMainForm.PumpLPCS.Capacity = 0
fReportsForm.AddToList (Format(TIME, "000000.0") & " sec, LPCS OFF AT_
LEVEL 8")

```

End If
If (ILPCS = 2 And IT.L1 And Not IT.L8) Then
    ILPCS = 1
If (fMainForm.PumpLPCS.Capacity = 0 And Not fMainForm.PumpLPCS._
    DisableState) Then fMainForm.PumpLPCS.Capacity = 100
If (Not fMainForm.PumpLPCS.DisableState) Then fReportsForm.AddToList_
    (Format(TIME, "000000.0") & " sec, LPCS Auto Starts ")
    fMainForm.LabelTripLPCSH5.ForeColor = &HFF
End If

```

註：此段新增邏輯為 LPCS 開啟及關閉邏輯

7. 爐心功率計算部分

```

' CHEXAL-LAYMAN EXCLUDING DECAY HEAT
If LEV / 12 + 8 * (P / 1110) ^ 0.45 > 0# Then
    HHF1 = HFLD(P)
    Factor = 1#
    If (HHF1 > H1) Then Factor = (1 + 0.03 * (HHF1 - H1) ^ 0.75)
    QN = 0.037 * (P / 1110) ^ 3 * (LEV / 12 + 8 * (P / 1110) ^ 0.45) ^ 0.7 * Factor + QDecay
Else
    Dummy1 = LEV / 12 + 8 * (P / 1110) ^ 0.45
    QN = QDecay
End If

```

註：此段修正邏輯為爐心功率計算方程式，參考 MAAP4.0.4

8. RHR 餘熱移除系統部份

```

If (fMainForm.ControlRHR.State = 0 And (IT.L1 Or IT.I4)) Then
    fMainForm.ControlRHR.State = 4
End If

```

註：此段新增程式為 RHR 餘熱移除系統之抑壓池冷卻開啟邏輯，如果在程式

```

DAKC (Wetwell cooling)
If (fMainForm.PumpRHR(0).Capacity=0 And Not fMainForm.HeatExchangerRHR(1)._
    DisableState) Then
    fMainForm.HeatExchangerRHR(1).Capacity = 0
End If
If (fMainForm.PumpRHR(1).Capacity=0 And Not fMainForm.HeatExchangerRHR(0)._

```

DisableState) Then

fMainForm.HeatExchangerRHR(0).Capacity = 0

End If

註：此段新增程式為 RHR 餘熱移除系統中，水泵與熱交換器的邏輯；水泵關閉，則相對的熱交換器不動作，原程式在邏輯上有錯誤，

附錄二 PCTran KuoSheng 程式參數修正

參數名稱	修正前	修正後	說明
PSRV1	75 bar	77.065 bar	1 st SRV set open pressure
PSRV1P	72 bar	64.875 bar	1 st SRV set closing pressure
PSRV2	76 bar	77.755 bar	2 nd SRV set open pressure
PSRV2P	71 bar	65.555 bar	2 nd SRV set closing pressure
PSRV3	77 bar	78.444 bar	3 rd SRV set open pressure
PSRV3P	70 bar	70.854 bar	3 rd SRV set closing pressure
NV1	2	1	Number of valves in the first (1 valves) group work as ADS
NV2	2	3	Number of valves in the first (7 valves) group work as ADS
NV3	4	4	Number of valves in the first (8 valves) group work as ADS
WSTC0	10 kg/s	0 kg/s	Nominal steam extraction rate (STC) at P0
WRCIS0	20 kg/s	0 kg/s	Nominal RCIC steam extraction rate at P0
DPVB	0.1	0.035	Vacuum breaker open pressure DP
RCIC0	37.9 kg/s	37.7 kg/s	RCIC flow rate
TWW0	30 ⁰ C	27 ⁰ C	Wetwell water initial temperature
H5	1.13 bar	1.1335 bar	High DW pressure for RX scram
P0	71.7 bar	72.928 bar	Reactor dome pressure set point
VRCS	233 m ³	163.1 m ³	Subcooled volume of RPV
VSAT	402 m ³	281.4 m ³	Saturate 2-phase volume of RPV
VSTM	213.91 m ³	149.737 m ³	Steam space volume in the RPV
MKAKO1	570000 m ³	2732 m ³	Nominal CST tank water volume
AWW	575 m ²	783.23 m ²	Wetwell cross section area at the center
LWW0	7 m	5.8422 m	Wetwell initial water level
PHS(1)	0 bar	33.69 bar	1 st data of pressure HPCS pump head curve
PHS(2)	10 bar	51.19 bar	2 nd data of pressure HPCS pump head curve

PHS(3)	30 bar	70.01 bar	3 rd data of pressure HPCS pump head curve
PHS(4)	60 bar	86.86 bar	4 th data of pressure HPCS pump head curve
PHS(5)	70 bar	89.30 bar	5 th data of pressure HPCS pump head curve
PHS(6)	90 bar	93.33 bar	6 th data of pressure HPCS pump head curve
PHS(7)	100.4 bar	94.64 bar	7 th data of pressure HPCS pump head curve
WHS(1)	380 kg/s	314.1 kg/s	1 st data of flow HPCS pump head curve
WHS(2)	350 kg/s	283.2 kg/s	2 nd data of flow HPCS pump head curve
WHS(3)	320 kg/s	236.3 kg/s	3 rd data of flow HPCS pump head curve
WHS(4)	318 kg/s	188.4 kg/s	4 th data of flow HPCS pump head curve
WHS(5)	312 kg/s	125.6 kg/s	5 th data of flow HPCS pump head curve
WHS(6)	97 kg/s	62.9 kg/s	6 th data of flow HPCS pump head curve
WHS(7)	0 kg/s	0 kg/s	7 th data of flow HPCS pump head curve
PLS(1)	0 bar	14.64 bar	1 st data of pressure LPCS pump head curve
PLS(2)	5 bar	23.88 bar	2 nd data of pressure LPCS pump head curve
PLS(3)	8 bar	25.91 bar	3 rd data of pressure LPCS pump head curve
PLS(4)	10 bar	28.87 bar	4 th data of pressure LPCS pump head curve
PLS(5)	15 bar	29.82 bar	5 th data of pressure LPCS pump head curve
PLS(6)	19.6 bar	30.09 bar	6 th data of pressure LPCS pump head curve
PLS(7)	90 bar	30.32 bar	7 th data of pressure LPCS pump head curve

WLS(1)	330 kg/s	377.9 kg/s	1 st data of flow LHPCS pump head curve
WLS(2)	320 kg/s	283 kg/s	2 nd data of flow LPCS pump head curve
WLS(3)	312 kg/s	251.2 kg/s	3 rd data of flow LPCS pump head curve
WLS(4)	300 kg/s	188.4 kg/s	4 th data of flow LPCS pump head curve
WLS(5)	150 kg/s	157.5 kg/s	5 th data of flow LPCS pump head curve
WLS(6)	0 kg/s	125.6 kg/s	6 th data of flow LPCS pump head curve
WLS(7)	0 kg/s	0 kg/s	7 th data of flow LPCS pump head curve

EG(1)	0.381 MeV	0.38 MeV	1 ST isotope average gamma energy
EG(2)	2.333 MeV	2.279 MeV	1 ST isotope average gamma energy
EG(3)	0.608 MeV	0.6070 MeV	1 ST isotope average gamma energy
EG(4)	2.529 MeV	2.610 MeV	1 ST isotope average gamma energy
EG(5)	1.635 MeV	1.593 MeV	1 ST isotope average gamma energy
EG(6)	0.002 MeV	0.0005238 MeV	1 ST isotope average gamma energy
EG(7)	0.159 MeV	0.1573 MeV	1 ST isotope average gamma energy
EG(8)	0.002 MeV	0.002210 MeV	1 ST isotope average gamma energy
EG(9)	0.793 MeV	0.7879 MeV	1 ST isotope average gamma energy
EG(10)	1.95 MeV	1.949 MeV	1 ST isotope average gamma energy
EG(11)	0.02 MeV	0.003213 MeV	1 ST isotope average gamma energy
EG(12)	0.042	0.02404	1 ST isotope average gamma energy

	MeV	MeV	
EG(13)	0.045 MeV	0.03035 MeV	1 ST isotope average gamma energy
EG(14)	0.432 MeV	0.4276 MeV	1 ST isotope average gamma energy
EG(15)	0.247 MeV	0.2469 MeV	1 ST isotope average gamma energy
EG(16)	1.183 MeV	1.122 MeV	1 ST isotope average gamma energy
HL(1)	193.2 hr	192.96 hr	Half life of 1 st isotope
HL(2)	2.3 hr	2.3 hr	Half life of 2 nd isotope
HL(3)	20.3 hr	20.8 hr	Half life of 3 rd isotope
HL(4)	0.9 hr	0.87667 hr	Half life of 4 th isotope
HL(5)	6.7 hr	6.61 hr	Half life of 5 th isotope
HL(6)	287 hr	1.83 hr	Half life of 6 th isotope
HL(7)	54.2 hr	4.48 hr	Half life of 7 th isotope
HL(8)	126.5 hr	94033 hr	Half life of 8 th isotope
HL(9)	0.3 hr	1.2717 hr	Half life of 9 th isotope
HL(10)	9.1 hr	2.84 hr	Half life of 10 th isotope
HL(11)	0.3 hr	285.6 hr	Half life of 11 th isotope
HL(12)	11.9 hr	52.512 hr	Half life of 12 th isotope
HL(13)	4.5 hr	125.88 hr	Half life of 13 th isotope
HL(14)	94300 hr	0.26083 hr	Half life of 14 th isotope
HL(15)	1.3 hr	9.09 hr	Half life of 15 th isotope
HL(16)	2.8 hr	0.23617 hr	Half life of 16 th isotope