

行政院原子能委員會
委託研究計畫研究報告

數位儀控多樣性與深度防禦電廠模擬模式研究
**Research of Digital Instrumentation and Control Diversity and
Defense-in-Depth Simulation Modeling**

計畫編號： 992001INER005

受委託機關（構）：國立清華大學核子工程研究所

計畫主持人：施純寬

核研所聯絡人員：黃揮文

聯絡電話：03-5727991 Ext. 42371

E-mail address：ckshih@ess.nthu.edu.tw

報告日期：中華民國九十九年十一月十八日

目 錄

中文摘要.....	I
ABSTRACT.....	II
致謝.....	III
壹、計畫緣起與目的.....	1
貳、研究方法與過程.....	2
一、前言.....	2
二、預期暫態未急停事件與緩和設備介紹.....	3
(一)預期暫態未急停事件介紹.....	3
(二)預期暫態未急停緩和設備.....	4
(三)PCTTRAN-ABWR 中的預期暫態未急停緩和設備.....	9
(四)精進 PCTTRAN-ABWR 預期暫態未急停系統設定與介面....	11
三、緊急爐心冷卻系統 (ECCS) 簡介.....	13
(一)緊急爐心冷卻系統之安全保護功能.....	13
(二)爐心隔離冷卻系統 (RCIC).....	14
(三)高壓爐心灌水系統 (HPCF).....	15
(四)低壓灌水系統 (LPFL).....	16
四、數位儀控系統多樣性與深度防禦研究設施介紹及模擬分析.....	18
(一)數位儀控系統多樣性與深度防禦研究設施介紹.....	18
(二)HPCF 運轉模式控制邏輯分析.....	19
(三)高壓灌水管路斷管伴隨預期暫態未急停模擬分析.....	26
(四)低壓灌水管路斷管伴隨預期暫態未急停模擬分析.....	31
(五)高壓灌水管路不同破口伴隨預期暫態未急停模擬分析.....	37
參、主要發現與結論.....	69
肆、參考文獻.....	70

圖 目 錄

圖 2.1	PCTTRAN-ABWR 之 SSLC 介面圖	12
圖 4.1	ATWS 緩抑邏輯(ARI, FMCRD Run-In, RPT, Manual Initiation)	44
圖 4.2	ATWS 緩抑邏輯(SLC Initiation, Feedwater Runback)	45
圖 4.3	預期暫態未急停緩抑設施硬體建置架構.....	46
圖 4.4	HPCF 系統控制邏輯架構圖	47
圖 4.5	HPCF 備用模式控制邏輯.....	48
圖 4.6	HPCF 測試模式控制邏輯.....	49
圖 4.7	HPCF 啟動模式控制邏輯.....	50
圖 4.8	預期暫態未急停之高壓灌水管路斷管事故_ SSLC 介面操作圖	51
圖 4.9	預期暫態未急停之高壓灌水管路斷管事故_ PCTTRAN-ABWR 內建介面操作圖.....	51
圖 4.10	預期暫態未急停之高壓灌水管路斷管事故_ ARI_1.....	52
圖 4.11	預期暫態未急停之高壓灌水管路斷管事故_ ARI_2.....	52
圖 4.12	預期暫態未急停之高壓灌水管路斷管事故_ ARI_3.....	53
圖 4.13	預期暫態未急停之高壓灌水管路斷管事故_ ARI_4.....	53
圖 4.14	預期暫態未急停之高壓灌水管路斷管事故_ FMCRD_1	54
圖 4.15	預期暫態未急停之高壓灌水管路斷管事故_ FMCRD_2	54
圖 4.16	預期暫態未急停之高壓灌水管路斷管事故_ FMCRD_3	55
圖 4.17	預期暫態未急停之高壓灌水管路斷管事故_ FMCRD_4	55
圖 4.18	預期暫態未急停之高壓灌水管路斷管事故_ SLC_1	56
圖 4.19	預期暫態未急停之高壓灌水管路斷管事故_ SLC_2	56
圖 4.20	預期暫態未急停之高壓灌水管路斷管事故_ SLC_3	57
圖 4.21	預期暫態未急停之高壓灌水管路斷管事故_ SLC_4	57

圖 4.22 預期暫態未急停之低壓灌水管路斷管事故_ SSLC 介面操作 圖	58
圖 4.23 預期暫態未急停之低壓灌水管路斷管事故_ PCTRAN-ABWR 內建介面操作圖	58
圖 4.24 預期暫態未急停之低壓灌水管路斷管事故_ ARI_1.....	59
圖 4.25 預期暫態未急停之低壓灌水管路斷管事故_ ARI_2.....	59
圖 4.26 預期暫態未急停之低壓灌水管路斷管事故_ ARI_3.....	60
圖 4.27 預期暫態未急停之低壓灌水管路斷管事故_ ARI_4.....	60
圖 4.28 預期暫態未急停之低壓灌水管路斷管事故_ FMCRD_1	61
圖 4.29 預期暫態未急停之低壓灌水管路斷管事故_ FMCRD_2	61
圖 4.30 預期暫態未急停之低壓灌水管路斷管事故_ FMCRD_3	62
圖 4.31 預期暫態未急停之低壓灌水管路斷管事故_ FMCRD_4	62
圖 4.32 預期暫態未急停之低壓灌水管路斷管事故_ SLC_1	63
圖 4.33 預期暫態未急停之低壓灌水管路斷管事故_ SLC_2	63
圖 4.34 預期暫態未急停之低壓灌水管路斷管事故_ SLC_3	64
圖 4.35 預期暫態未急停之低壓灌水管路斷管事故_ SLC_4	64
圖 4.36 高壓管路破管伴隨 ATWS 之不同破口大小比較_ARI on_1 65	
圖 4.37 高壓管路破管伴隨 ATWS 之不同破口大小比較_ARI on_2 65	
圖 4.38 高壓管路破管伴隨 ATWS 之不同破口大小比較_ARI on_3 66	
圖 4.39 高壓管路破管伴隨 ATWS 之不同破口大小比較_ARI on_4 66	
圖 4.40 高壓管路破管伴隨 ATWS 之不同破口大小比較_ARI on_5 67	
圖 4.41 高壓管路破管伴隨 ATWS 之不同破口大小比較_ARI on_6 67	
圖 4.42 高壓管路破管伴隨 ATWS 之不同破口大小比較_ARI on_7 68	
圖 4.43 高壓管路破管伴隨 ATWS 之不同破口大小比較_ARI on_8 68	

表 目 錄

表 2.1 預期暫態未急停緩和設備功能.....	6
表 3.1 緊急爐心灌水系統設備邏輯與設定點.....	17
表 4.1 備用模式控制邏輯輸出入訊號種類與數量統計列表	41
表 4.2 備用模式控制邏輯輸出入訊號種類與數量統計列表	42
表 4.3 啟動模式控制邏輯輸出入訊號種類與數量統計	43

中文摘要

本研究計畫的成立是為了支援原能會執行龍門電廠安全管制之施政目標。核能電廠的數位儀控設計的設備，可使核能電廠的系統更容易操控，且設定值無漂移問題而易於維持。然而，儀控系統數位化亦可能產生新的失效模式，而影響核能電廠安全所依賴的「多重性(Redundancy)」與「多樣性與深度防禦(Diversity and Defense in Depth)」設計的特性。

因此，法規要求應進行深度防禦能力分析，以瞭解核能電廠是否有足夠的深度防禦能力面對殘存的軟體設計缺失。本計畫將藉著二項重要工作，(1) 擴充數位儀控系統多樣性與深度防禦測試平台之 PCTTRAN-ABWR 預期暫態未急停系統，包括高壓灌水管路單根管路斷管事故以及低壓灌水管路單根管路斷管事故，依照 FSAR 中 LOCA 事故所描述之各個設定值作設定並模擬預期暫態未急停事故，使 PCTTRAN-ABWR 分析預期暫態未急停事故的功能更加完備。(2) 針對上列事故進行更進一步的分析，透過調整管路破口大小以了解不同的破口流量對電廠所造成的影響，藉此了解電廠的多樣性與深度防禦能力。研究成果預期將協助分析人員瞭解事故之過程，建立分析數位儀控系統深度防禦之潛在設計弱點，藉以降低數位儀控系統失效事故之可能性，有助於提升數位儀控系統之安全性，並可支援原能會核電廠數位儀控系統審查管制工作。

關鍵字：PCTTRAN-ABWR、多重性、多樣性與深度防禦

ABSTRACT

The main purpose of this research proposal is to support the regulatory activities of Atomic Energy Council on the construction and operation of Lungmen Nuclear Power Plant. Deployments of modern digital I&C Systems on nuclear power plants make them easier to maneuver than they were before. The I&C set point drift problems can be eliminated. However, digitalization of I&C could induce new failure modes, and impact the redundancy and defense-in-depth design characteristic which nuclear power plants rely on. The redundancy characteristic can be defeated by software common mode failure. The complexity of software could possess some paths that can interrupt or bypass defense-in-depth design. Therefore, the regulation requests that the new digitalized I&C NPP designs shall be performed defense-in-depth analysis to understand whether the defense-in-depth design is capable to resist the software design defects.

This proposal focuses on the following two items to investigate how accidents may propagate following failure of certain defense-in-depth design. (1) Expand the Digital I&C Diversity and Defense-in-Depth test facility, including HPCF and LPFL double-ended line break. PCTTRAN-ABWR is modified according to the LOCA setting and simulation FSAR described. Hence it has better ability to analyze the ATWS cases. (2) To realize the Diversity and Defense-in-Depth, we have further analysis for the above cases, by adjusting the size of pipe break to learn about the impact of power plants.

By simulating various case studies for defense-in-depth failure, the research people can understand and realize the event sequence, and can also derive various possible events to identify any possible design vulnerability. This will help to upgrade the safety of digital I&C systems and also to support AEC's regulatory affairs.

Keywords: PCTTRAN-ABWR, Redundancy, Diversity and Defense in Depth

致謝

首先，感謝計畫主持人清華大學核子工程與科學研究所施純寬教授在此計畫實行過程中不遺餘力地指導並且教導計畫參與人員許多電廠安全分析所必須注意到的知識。感謝計畫協同主持人大華技術學院潘郁仁教授撥冗指導核能儀器設備信號傳遞的邏輯，使得本計畫中高壓注水系統邏輯能建立完成。感謝核研所聯絡人黃揮文先生在本次計畫中不辭艱辛的指導計畫參與人員，並使整個計畫進度能有良好的表現，最後，感謝核研所核儀組工作同仁在自己公務繁忙之際，依舊能提供援助給本計畫，使得計畫執行中所面臨到的問題大幅減少。感謝上述所有人員的努力，使得這份報告能呈現給大家。

壹、計畫緣起與目的

本委託研究計畫係配合支援原能會，執行本土化核能安全與管制技術建立施政目標。核能電廠儀控設備正朝向全面更換為數位式設計，數位儀控系統可使核能電廠的系統更容易操控，且設定值無漂移問題而易於維持。然而儀控系統數位化亦可能產生新的失效模式，而影響核能電廠安全所依賴的多重性(Redundancy)與多樣化與深度防禦(Diversity and Defense-in-Depth)設計的特性。多重性可因軟體共因故障而失效，軟體的高度複雜性則可能潛藏能中斷或繞道深度防禦設計功能的路徑。因此核能法規 BTP19「Guidance for Evaluation of Defense-in-Depth and Diversity in Digital Computer-Based Instrumentation and Control Systems」要求應進行深度防禦能力分析，以瞭解核能電廠是否有足夠的多樣化與深度防禦能力，以類比式自動控制或硬接線路手動起動緩和殘存的軟體設計缺失所引起的事件。

根據龍門電廠之最終安全分析報告與台電訓練教材中預期暫態未急停以及緊急注水系統相關邏輯與設定，來精進 PCTAN-ABWR 並模擬 FSAR 中的相關案例來驗證程式，且以多樣性與深度防禦能力分析為重點。在多樣化與深度防禦分析方法中，核能電廠數位儀控系統之電腦程式模擬為重要技術之一，此技術可分析數位儀控軟體失效時，多樣化備用設備運作時之動態反應。

貳、研究方法與過程

一、前言

PCTRAN-ABWR 核能電廠模擬軟體由台電公司所引進，因其快速的分析能力能在短時間內分析完各個事故的暫態，國立清華大學在過去幾年來業已建立了分析核能電廠各種暫態事故的能力，其中以 PCTRAN 程式作為探討核能電廠數位儀控系統多重性失靈之電廠動態反應之模擬工具，歷經各屆學長姐的努力，技術趨於成熟。本計畫主要有兩項重要工作，(1) 擴充數位儀控系統多樣性與深度防禦測試平台之 PCTRAN-ABWR 預期暫態未急停系統，包括高壓灌水管路單根管路斷管事故以及低壓灌水管路單根管路斷管事故，依照 FSAR 中 LOCA 事故所描述之各個設定值作設定並模擬預期暫態未急停事故，使 PCTRAN-ABWR 分析預期暫態未急停事故的功能更加完備。(2) 針對上列事故進行更進一步的分析，透過調整管路破口大小以了解不同的破口流量對電廠所造成的影響，藉此了解電廠的多樣性與深度防禦能力。

本報告之章節架構如下:首先說明此計畫緣起與目的，接著在第二章介紹預期暫態未急停事件與緩和設備，將描述預期暫態未急停所需的緩和設備與其動作機制，第三章則是介紹 FSAR 第十五章第 E 節中有關預期暫態未及停的事故描述並且利用我們精進過後的 PCTRAN_ABWR 模擬 FSAR 中的事故並相互比較討論，第四章內容則是介紹數位儀控系統多樣性與深度防禦研究設施的擴充建立及初步的測試表現，文章最後將對此論文做一個總結，說明主要發現與結論。

二、預期暫態未急停事件與緩和設備介紹

本章節參考龍門電廠訓練教材及 FSAR 中對於預期暫態未急停的緩和設備介紹，將各項設備的動作機制與目的做出整理。

(一)預期暫態未急停事件介紹

當電廠發生事故，而產生危及電廠安全的暫態時，如反應爐內壓力過高（1100 psia）或反應器水位過低（Level-3, Top of Fuel (TAF) 上方 364.4 cm）等，反應器保護系統便會驅使控制棒插入爐心使反應器達到停機狀態，以避免事故嚴重性擴大，電廠的設施及安全遭遇危害。由於現今核能電廠已朝向全面數位化發展，軟體共因失效可能損害電廠安全的多重性原則，軟體中可能潛藏著能夠中斷或繞道軟體路徑的缺陷，藉由軟體控制的設備也可能因此失效。如此的顧慮也可能發生在反應器保護系統（Reactor Protect System, RPS）之上，一但反應器保護系統失效，將對核電廠的安全性有極大的衝擊，若此時有事故發生需使反應器緊急停機，反應器保護系統無法正常發揮作用，控制棒無法置入爐心使反應器停機，此時即進入了預期暫態未急停狀態。

預期暫態未急停，係指反應器發生事故而產生應停機的暫態，卻因為控制軟體缺失或硬體失效等因素，而無法順利完成插入控制棒急停者稱之。此現象將會使反應器進入一個更劇烈的暫態，若繼續任事故發展下去將有可能形成嚴重事故。例如：燃料護套表面產生局部高溫、護套受損、偏離核沸騰或達到臨界熱通率等，對電廠的安全運轉具有很大的威脅性。因此，在電廠中緩和預期暫態未急停的設備是不可或缺的，本論

文即針對電廠進入預期暫態未急停狀態時的預期暫態未急停緩和設備進行擴充及改進，並以改進後的模組模擬龍門核能電廠終期安全分析報告第 15 章第 E 節中挑選出的預期暫態未急停事故以驗證之。並確認事故的發展符合其規範，包括燃料護套尖峰溫度不得超過 1204°C，局部的氧化層不得超過護套厚度的 17% 以維護燃料的完整性，圍阻體最大壓力不得超過圍阻體結構的設計壓力 0.31Mpag 以維持其完整性，限制系統暫態壓力，避免反應爐冷卻水壓力邊界(RCPB)的壓力超過 1500 Psig (ASME Code, Section III)，以及必須能夠使反應器安全停機並且維持於冷停機狀態等規範。

(二)預期暫態未急停緩和設備

當反應器進入預期暫態未急停的狀態時，正常的插棒動作無法執行，無法讓反應器停機，此時，可藉由預期暫態未急停緩和設備來緩和此緊急狀況。預期暫態未急停緩和設備分為替代性控制棒插棒系統 (Alternative Rod Insertion, ARI)、微調控制棒驅動機構 (Fine Motion Control Rod Drive Run-in, FMCRD Run-in) 與備用硼液控制系統 (Standby Liquid Control system, SLCS) 三大部份，三者具有相同的壓力設定點與水位設定點，替代性控制棒插棒系統及微調控制棒驅動機構是藉由將控制棒插入爐心的動作來緩和反應器的功率，而備用硼液控制系統則是將中子捕獲能力特佳的五硼酸鈉 (含 B10, Boron-10) 水溶液打入爐心，吸收反應爐內的中子，給予反應器一個負反應度來達到停機效果。替代性控制棒插棒系統及微調控制棒驅動機構最大的不同點在於其插棒的速度與驅動力，替代性控制棒插

棒系統是利用水力於 25 秒內將控制棒推入爐心；微調控制棒驅動機構則是利用步進式馬達（Step Motor）在 150 秒內將控制棒慢慢推進爐心。達到啟動的設定點時，替代性控制棒插棒系統與微調控制棒驅動機構經過其特定的延遲時間後都會正常啟動，這樣的設計也說明了電廠多重性的防禦概念。同時，我們必須考慮任何可能發生之情況，因此在事故模擬及分析過程中也考慮到上述兩大緩和設備正常無法作動的情況。備用硼液系統在接收到預期暫態未急停訊號時，便會啟動其計時器，在備用硼液系統收到訊號算起 180 秒後，反應爐功率仍處在 6 % 以上，電廠儀控介面將會出現警告信號，此時運轉員可自行判斷是否手動啟動備用硼液控制系統，將硼液注入反應爐中。值得注意的是備用硼液控制系統啟動後，雖然可以緩和整起事故，但也會對反應器造成極大的損害，因此備用硼液控制系統的使用必須相當謹慎。

替代性控制棒插棒系統與微調控制棒驅動機構啟動的設定點分別是低水位 LEVEL 2（TAF 上方 321.7 cm）以及高壓力（壓力大於 1140 psia）。由設定點可知，替代性控制棒插棒系統以及微調控制棒驅動機構都是屬於正常狀況下不會使用的設備，只有反應器進入預期暫態未急停狀況時才有機會啟動。然而，為了反應器的運轉安全，我們必須假設各種可能發生的情況，因此替代性控制棒插棒系統及微調控制棒驅動機構對電廠安全哲學『Diversity & Defense in-Depth (D3)』有指標性的意義。

預期暫態未急停緩和設備是電廠奉行的安全哲學中相當

重要的一環，其與反應器保護系統中的急停插棒系統具有相同的功能。當電廠發生事故而產生某些危險的暫態時，如壓力上升使爐頂壓力超過 1100psia 或是水位過低（低於 Level-3）等，反應器保護系統都會產生跳機（Reactor Scram）訊號使控制棒快速置入爐心內，因為控制棒是由吸收中子能力很強的物質製成的，其會吸收大量的中子，進而停止分裂連鎖反應，讓反應器達到停機的狀態。然而，若控制棒無法插入爐心內而進入了預期暫態未急停狀態，可能發展的暫態有反應器壓力持續升高、水位持續下降、燃料溫度上升、燃料護套表面溫度上升等。這時，電廠能夠因應這些暫態的設施就是預期暫態未急停緩和設備。預期暫態未急停緩和設備的功能與設定如表 2.1。

表 2.1 預期暫態未急停緩和設備功能

設備名稱	替代性控制棒插棒系統	微調控制棒驅動機構	備用硼液控制系統
緩和方式	利用水力將控制棒推入爐心。	利用步進馬達將控制棒推入爐心。	將儲硼槽中的五硼酸鈉溶液經由 HPCF-B 管路注入爐心。
延遲時間（自接收到預期暫態未急停訊號起至啟動）	0 秒（無延遲）	1 秒	180 秒
設備自接收訊號至設備作動所需時間	15 秒	16 秒	276 秒
設備作動時程	10 秒	150 秒	60 分鐘

1. 替代性控制棒插棒系統

替代性控制棒插棒系統，是預期暫態未急停緩和設備的第一道防護，藉由水力將控制棒帶入爐心以達到停機的效果。其設定點如前面所述為低水位或爐頂高壓力。當電廠無法正常入棒而進入預期暫態未急停狀態，並且爐頂壓力或反應器水位達到以上任何一個設定點都會啟動替代性控制棒插棒系統、微調控制棒驅動機構及備用硼液控制系統的計時器。替代性控制棒插棒系統與停機入棒系統的差異除了插棒速度之外，還有驅動來源的差異。反應器保護系統觸發停機入棒系統時，其空氣洩放閥會開始將集管的空氣排放掉，以便利用強力的水流將控制棒快速推入爐心；而替代性控制棒插棒系統在急停導引閥空氣供給集管上，有三條平行的排氣路徑。排氣閥是以直流電賦能操作，如同反應器保護系統的空氣洩放閥，它們會將集管的空氣洩放掉，以便利用水流將控制棒推入爐心。由替代性控制棒插棒系統賦能開始到使所有控制棒開始移動的設計時間為 15 秒。而由替代性控制棒插棒系統賦能開始到使所有控制棒全入的設計時間共 25 秒以將反應器停機。另外，替代性控制棒插棒系統不具有安全相關的功能，但喪失所有廠外電源時仍能執行其功能。

2. 微調控制棒驅動機構

微調控制棒驅動機構是預期暫態未急停緩和設備的第二道防護，其驅動方式是以步進馬達分成 200 步在 150 秒內將控制棒推進爐心中。當電廠無法正常入棒而進入預期暫態未急停狀態，並且爐頂壓力或反應器水位達到以上任何一個

設定點都會啟動替代性控制棒插棒系統、微調控制棒驅動機構及備用硼液控制系統的計時器。微調控制棒驅動機構於系統達到啟動設定點時，自觸發到其作動中間有 1 秒的延遲時間，之後步進馬達開始將控制棒推入爐心，觸發後 150 秒內控制棒全入，以達到停機的效果。

3. 備用硼液控制系統

備用硼液控制系統是預期暫態未急停緩和設備的最後一道防線，也是電廠從業人員最不願意看到的最終手段。備用硼液控制系統一旦將硼液注入爐心，電廠必須花非常長的一段時間做整理與修復，電廠的損失將不計其數。當電廠無法正常入棒而進入預期暫態未急停狀態，並且爐頂壓力或反應器水位達到以上任何一個設定點都會啟動替代性控制棒插棒系統、微調控制棒驅動機構及備用硼液控制系統的計時器。倘若前述兩大系統都無法作動，並且電廠功率在觸動備用硼液控制系統計時器之後的三分鐘內無法降到 6% 以下，則運轉員可以自行判斷是否手動將備用硼液控制系統啟動，將硼液注入到反應爐中。自觸動 ATWS 訊號後 276 秒硼液將到達爐心。備用硼液控制系統由兩個全流量迴路組成，這兩迴路在電氣與機械上是完全分離的，為耐震強度第一類設計。其他組件尚有儲硼槽 (Storage Tank)、試驗槽 (Test Tank)、兩台排量式閥、兩個馬達式注入閥、兩條獨立 100% 注硼液管路及閥，經 HPCF-B 管注入反應爐、例行試驗管路以及儀控系統。其中主要注液管路為避免硼液在測試時不慎滲漏到爐心中，特別採用爆炸式閥來防止這一類情況。在

初始燃料填放或機組起動前，SLCS 系統即要置於備用狀態。SLCS 不使用軟體做安全有關的功能。其緩和方式是將五硼酸鈉溶液（含 Boron-10）注入到爐心中，以對中子吸收能力非常好的 Boron-10 將中子消耗掉，使爐心處於次臨界的狀態，進而達到停機的效果。注液時，會盡量要求將儲硼槽排空，避免當爐水冷溫時再次臨界。

(三)PCTRAN-ABWR 中的預期暫態未急停緩和設備

上面的章節已經介紹電廠中的預期暫態未急停緩和設備的運作情況，以下將開始介紹我們如何在 PCTRAN 中模擬預期暫態未急停緩和設備。

1. 替代性控制棒插棒系統

在 PCTRAN-ABWR 中，替代性控制棒插棒系統沒有獨立的介面，而是內建於控制棒表單（CRD Form）中，當電廠的狀態達到了替代性控制棒插棒系統啟動設定點時，將會啟動替代性控制棒插棒系統，由於電廠實際上必須有一洩壓的動作才能將氣壓閥打開，使水從底部往爐心流動並藉此水力將控制棒推進爐心，達到停機的效果。替代性控制棒插棒系統由啟動到控制棒全入共歷時 25 秒，其中前 15 秒是等待氣壓閥洩壓，真正的插棒動作發生於剩下的 10 秒間。因此當替代性控制棒插棒系統啟動時，我們在 PCTRAN-ABWR 中多加了 15 秒鐘的延遲時間來模擬等待氣壓閥洩壓的時間，並且以每秒推入十分之一的控制棒長度的速率來驅動控制棒模擬其入棒情形。

2.微調控制棒驅動機構

在 PCTTRAN-ABWR 中，微調控制棒驅動機構與替代性控制棒插棒系統一樣沒有獨立的介面，同樣是內建於控制棒表單中，當電廠的狀態達到了微調控制棒驅動機構啟動設定點時，將會同時啟動替代性控制棒插棒系統與微調控制棒驅動機構，而微調控制棒驅動機構不若替代性控制棒插棒系統一樣需要洩壓才能入棒，且延遲時間只有一秒控制棒就開始移動，但移動速度較替代性控制棒插棒系統慢非常多，只要替代性控制棒插棒系統正常啟動，微調控制棒驅動機構的緩和效果就變得不明顯，並且在程式控制上切換系統插棒速度不易做到，因此採行較保守的作法。如同前文所述，一旦替代性控制棒插棒系統正常啟動，微調控制棒驅動機構的緩和效果就變的不明顯，因此即使不考慮替代性控制棒插棒系統啟動前微調控制棒驅動機構的插棒距離對結果的影響很小而趨向保守。在 PCTTRAN-ABWR 中，我們假設微調控制棒驅動機構有延遲時間且為 16 秒，比替代性控制棒驅動系統延遲時間多一秒，也就是說，假如替代性控制棒驅動系統未能正常啟動，微調控制棒驅動機構將立刻取而代之進行入棒的動作。微調控制棒驅動機構之入棒過程共耗費 150 秒，因此我們在程式中令微調控制棒驅動機構每秒的插棒距離為總長度的 150 分之一。

3.備用硼液控制系統

同上述兩大緩和設備，備用硼液控制系統同樣內建於控制棒表單中。有別於其他模擬程式以硼液濃度或反應截面的

方式來模擬硼液注入的情況，PCTRAN-ABWR 是以加入負反應度的方式來模擬硼液注入情形。我們觀察 GE 的圖表，推算出注硼時單位時間硼液帶入爐心的負反應度，並依此負反應度來定出 PCTRAN-ABWR 中硼液注入時的負反應度增率，並假設其增率為線性，如此便完成了備用硼液控制系統的模擬。

(四)精進 PCTRAN-ABWR 預期暫態未急停系統設定與介面

FSAR 第十五章第 E 節分別對壓力與水位來詳細描述預期暫態未急停事件模擬的邏輯與設定點，其內容如下：當壓力到 1140psia (7.76MPaG) 時，四個未連接至 M/G 系統的爐內幫浦會立即跳脫，剩餘的六個爐內幫浦與飼水系統則開始回退至最小流量，並且發送各項緩和功率設備的啟動信號給各個緩和功率設備系統，如：ARI、FMCRD 以及 SLC，緩和設備動作機制如前面一節所敘述。而當水位降至 LEVEL 2 (321.7cm) 時，三個有連接至 M/G 系統的爐內幫浦會立即跳脫，其餘爐內幫浦開始回退至最小流量，並且發送各項緩和功率設備的啟動信號給各個緩和功率設備系統，水位降至 LEVEL 2 六秒後，另外三個有連接至 M/G 系統的爐內幫浦接著跳脫，此外，一旦進入預期暫態未急停，自動洩壓系統必須關閉。

本研究將 FSAR 所述內容以及台電訓練教材中的系統敘述兩邊的電廠資訊作整合後，以整合後的電廠資訊為基礎來精進 PCTRAN-ABWR，調整 PCTRAN-ABWR 各個設定點確保各個緩和設備的動作機制可以正常啟動且保持原有系統的正常運作，此外，我們建立了預期暫態未急停的操控介面，並以不影

響原程式運行為原則新增了數個案例邏輯，需要注意的是，原本的 PCTran-ABWR 並未仔細分出 ECCS 子系統發生破口後，其子系統相對流量的改變，因此本論文也針對此點精進程式，使得操作員可以在此介面上單獨操控事件並順利模擬出暫態，此外，爐心水位、爐頂壓力、爐心功率與 ECCS 各個系統的運作流量等重要的數值都在此介面上觀察到，使操作員能隨時掌握電廠的資訊，如圖 2.1 所示。

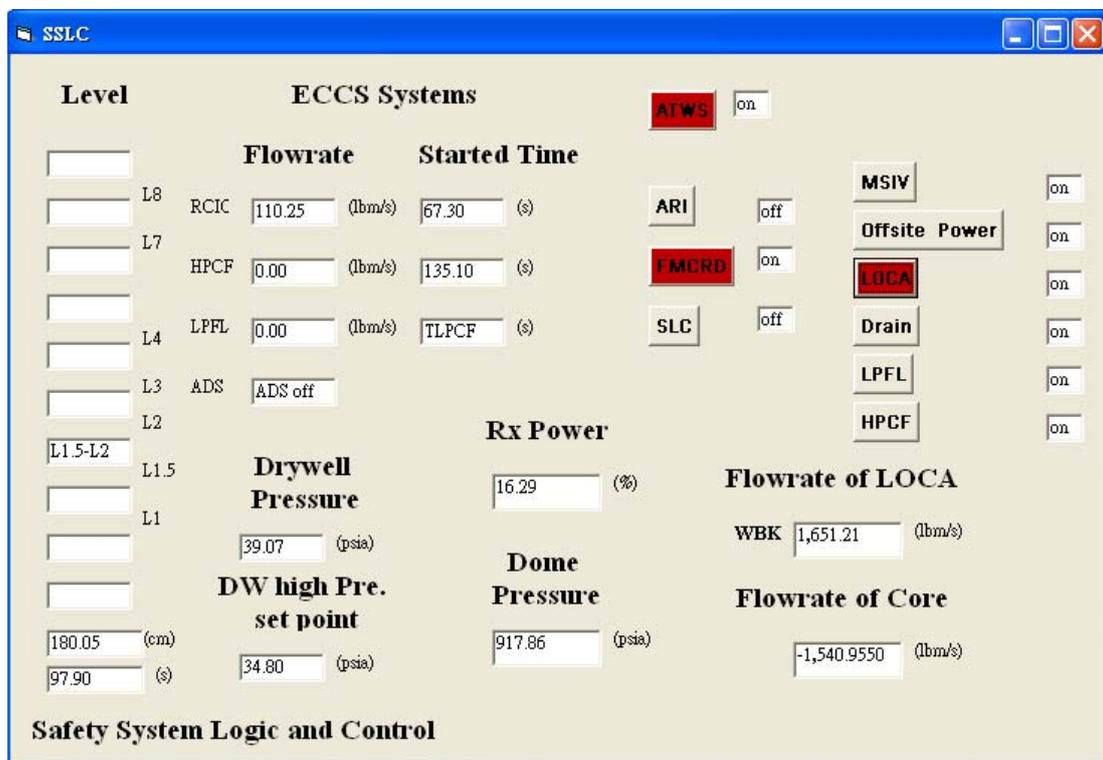


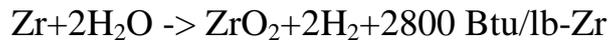
圖 2.1 PCTran-ABWR 之 SSLC 介面圖

三、緊急爐心冷卻系統（ECCS）簡介

下面將介紹本研究所用到的主要爐心灌水模式，由於本研究將專注於爐心的暫態分析，所以這邊只簡略介紹三個主要的爐心灌水系統，包括：緊急爐心隔離冷卻系統，高壓爐心灌水系統以及低壓灌水系統。

(一)緊急爐心冷卻系統之安全保護功能

當核能電廠發生爐水喪失事故或任何會導致爐心水位下降的事故後，燃料有可能因為爐水的流失而露出，此時，燃料護套的溫度將會大幅上升，溫度升高之熱源，除來自燃料之衰變熱外，尚有鋳與水作用所產生之熱能。鋳與水作用方程式如下：



鋳與水作用為放熱化學反應，且反應速率將隨溫度上升而加快，故護套溫度也將升得更高；當護套（Zr）溫度上升到1205°C（2200°F）時，鋳、水作用所產生之熱能將不容忽視，而反應中產生之氫氣如果太多，有引起爆炸的可能。再者，鋳、水作用發生後，護套與水接觸面將產生一層較脆的二氧化鋳（ZrO₂），而二氧化鋳層內之一層鋳金屬，將因高溫而喪失延長性，變成較脆金屬相；這兩個脆化層如果太厚，則護套就被脆化了，可能無法忍耐冷卻時之熱應力而破碎，燃料丸中之分裂產物外洩，因此，避免爐心水位過低是電廠所極力重視的課題。

緊急爐心冷卻系統（Emergency Core Cooling System，ECCS）係由多種冷卻系統所構成，在反應爐爐心低水位發生

時，可迅速補水入反應爐，維持爐心燃料經常被冷卻水淹覆，再配合乾井及圍阻體有關設備，可限制放射性物質外洩，具有可靠性、重複性與多樣性，分為三個獨立區，彼此互相分隔，每一區有一高壓補水泵與一低壓補水。第一、二、三區的高壓補水泵分別為爐心隔離冷卻系統（RCIC）、高壓噴灑系統（HPCF B&C），而第一、二、三區的低壓補水泵則分別為（LPCF A、B&C）。

緊急爐心冷卻系統三個子系統之反應爐水位跳脫設定點依喪失冷卻水事故嚴重程度，採取不同的保護機制：當反應爐水位下降到 LEVEL 2 時，爐心隔離冷卻系統（Reactor Core Isolation Cooling System，RCIC）會啟動一串高壓灌水泵，當 RCIC 無法緩和水位下降的趨勢，爐心水位持續下降到 LEVEL1.5 時，高壓爐心灌水系統（High Pressure Core Flooder，HPCF）將會啟動另外兩串高壓灌水泵，當高壓灌水系統仍然無法維持反應爐水位時，反應爐水位會持續下降至 LEVEL1，此時，如果爐內壓力足夠低，低壓灌水系統（Low Pressure Flooder，LPFL）將會啟動三串獨立的餘熱移除系統（Residual Heat Removal System，RHR）幫助灌水，使爐心水位能夠維持在燃料棒上方。

(二)爐心隔離冷卻系統（RCIC）

爐心隔離冷卻系統（Reactor Core Isolation Cooling System，RCIC）採用汽機推動幫浦，利用反應爐跳脫後衰變熱產生之蒸汽推動，在電廠發生全黑的情況下仍能提供足夠的水量，經由飼水管路 B 灌水進入爐心。

爐心隔離冷卻系統主要運轉模式可分為自動啟動模式或手動啟動模式，自動啟動模式啟動信號為反應爐第二階段低水位或乾井高壓力（ $>0.138 \text{ kg/cm}^2$ ）時，反應爐爐心隔離冷卻信號自動觸發，蒸汽供給閥全開，反應爐爐心隔離冷卻汽機及水泵起動，灌水閥全開，由冷凝水儲存槽取水，全流量補至反應爐，直到反應爐第八階段高水位，使蒸汽供給閥、灌水閥全關及反應爐爐心隔離冷卻汽機及水泵停止，當反應爐水位又掉回第三階段低水位，則供汽閥及灌水閥關閉之自保信號將自動復歸，若有乾井高壓力信號，反應爐爐心隔離冷卻系統將自動啟動，否則需等掉至反應爐第二階段低水位時，反應爐爐心隔離冷卻系統才自動啟動。冷凝水儲存槽低水位或抑壓池高水位時，反應爐爐心隔離冷卻泵進口水源由冷凝水儲存切至抑壓池。手動運轉模式則是由運轉員依照電廠爐心水位的變化是情形啟動，如爐心水位已降至第二階段或是第二階段以下，但反應爐爐心隔離冷卻系統無法自動起動時，可按下控制室之手動按鈕，系統即啟動補水至反應爐。爐心隔離冷卻系統幫浦設計運轉壓力為 $20.47\sim 99.49 \text{ kg/cm}^2$ ，單根管路面積為 324 cm^2 ，其額定出口流量維持在 $180 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

(三)高壓爐心灌水系統（HPCF）

高壓爐心灌水系統（High Pressure Core Flooder，HPCF）設計上為反應爐爐心隔離冷卻系統（RCIC）之後備，灌水入反應爐，以恢復正常水位。本系統有兩個功能相同的獨立迴路，各迴路包括 100% 容量 HPCF 泵，管路，閥門及儀控設備。在喪失冷卻水事故和喪失廠外電源時，緊急柴油發電機於 20

秒內完成供電，HPCF 幫浦 30 秒內啟動達額定轉速，反應爐灌水閥在 16 秒內全開，即由反應爐低水位 LEVEL1.5 至 HPCH 幫浦灌水進入反應爐之時間應小於 46 秒。

高壓爐心灌水系統主要運轉模式分為手動啟動模式與自動啟動模式兩種，自動啟動模式啟動信號為反應爐低水位 LEVEL1.5 或乾井高壓力 ($\geq 14\text{kPaG}$)，兩串 HPCF 同時啟動；自動停止信號為反應爐高水位 LEVEL8、幫浦進口低壓力、取水閥未全開。

HPCF 幫浦進口壓力為 $116.9\sim 790\text{kPaA}$ ，額定出口壓力為 9.78MPaA ，額定流量 $744\text{ m}^3/\text{h}$ ，最大失速流量 $781\text{ m}^3/\text{h}$ ，其單根管路面積為 1297cm^2 。

(四)低壓灌水系統 (LPFL)

低壓灌水系統 (Low Pressure Flooder, LPFL) 是餘熱移除系統 (RHR) 下的一個運轉模式，分為自動啟動與手動啟動兩種操作模式，自動啟動信號為反應爐低水位 LEVEL1 或是乾井壓力高於 18.3kPaG ，且反應爐壓力降至 3MPaG ；當爐心發生低水位事故且爐心隔離冷卻系統及高壓爐心灌水系統啟動後依然維持水位時，反應器會啟動 ADS 系統洩壓，使爐內壓力下降至 3MPaG ，低壓灌水系統才能開始運轉，將水注入爐心內部維持爐心水位。當此模式運轉時會自動終止餘熱移除系統 (RHR) 其他運轉模式。

LPFL 額定流量為 $954\text{ m}^3/\text{hr}$ (4200gpm)，最大失速流量為 $1130\text{ m}^3/\text{hr}$ (4975gpm)，其單根管路面積約為 1642cm^2 。共有三個管線打水注入爐心，當反應器發生破口事故且水位急速下

降時，LPFL 能有效的維持住水位，避免爐心發生熔毀情形。

表 3.1 緊急爐心灌水系統設備邏輯與設定點

	管路面積 (cm ² /條)	幫浦數 (個)	幫浦額定 流量(kg/s)	啟動設定點	設備延遲 時間(s)
RCIC	324	1	50.5	1.反應爐低水位 (LEVEL 2, 321.7 cm)。 2.乾井高壓力 (> 16.53psia)。	29
HPCF	1297	2	50.5 to 202	1.反應爐低水位 (L1.5, 177.5cm)。 2.乾井高壓力 (> 16.53psia)。	46
LPFL	1642	3	265	1.反應爐低水位 (L1, 101.7cm)。 2.乾井高壓力 (> 16.53psia)。	20

四、數位儀控系統多樣性與深度防禦研究設施介紹及模擬分析

(一) 數位儀控系統多樣性與深度防禦研究設施介紹

此設施之目的主要針對龍門 ABWR 電廠預期暫態未急停 (ATWS) 緩抑設施，利用現場可程式化閘陣列 (FPGA) 技術實現 ATWS 緩抑設施之功能，並與電廠模擬程式 PCTTRAN/ABWR 連接，建置預期暫態未急停緩抑測試設備平台。本平台能模擬電廠相關安全系統行為並進行控制測試與評估，以確認 ABWR 電廠在發生任何 ATWS 事故下，仍能確保電廠處於安全狀態，進而達成實際電廠數位儀控系統多樣性與深度防禦之研究。

現場可程式化閘陣列 (Field Programmable Gate Array, FPGA) 的應用範圍隨著積體電路 (Integrated Circuit, IC) 製程的演變，在其容量及效能上皆有長足的進展。FPGA 可透過預先建立的邏輯區塊與可程式化路由資源，不需更改麵包板或焊錫部分，即可設定這些晶片以建置客制化的硬體功能。使用者可於軟體中開發數位運算系統並將之編譯為組態檔案或位元資料流 (Bitstream)。此外，FPGA 完全為可重設性質，當使用者重新編譯不同的電路設定時，可立刻擁有不同的特性。在過去，工程師必須深入了解數位硬體設計，才能夠使用 FPGA 技術。然而，高階設計工具的新技術可針對圖形化程式區或 C 程式碼，轉換為數位硬體電路，即變更了 FPGA 程式設計的規則。FPGA 具有硬體時脈的速度與可靠性，且其僅需少量即可進行作業；可降低客制化 Application-Specific Integrated Circuit (ASIC) 設計的費用。可重新程式設計的晶片，具有與軟體相同的彈性，卻不受限於處理核心的數量。與處理器不同的是，

FPGA 為實際的平行架構，因此不同的處理作業並不需要佔用相同資源。每個獨立的處理作業均將指派至專屬的晶片區塊，不需影響其他邏輯區塊即可自動產生功能。因此，當新增其他處理作業時，應用某部分的效能亦不會受到影響。主要建置，如圖 4.1 ATWS 緩抑邏輯(ARI, FMCRD Run-In, RPT, Manual Initiation)與圖 4.2 ATWS 緩抑邏輯(SLC Initiation, Feedwater Runback)。預期暫態未急停緩抑系統硬體架構係採用美商儀器公司(National Instruments, NI)所提供之平台。

此設施分為三個部分，第一個部分是儀控系統包括反應器跳機系統 (Reactor Trip System, RTS)、數位儀控系統 (Digital I&C System)、預期暫態未急停多樣性系統 (ATWS Mitigation Diverse System) 以及高壓爐心灌水系統 (HPCF)，第二個部分是核能電廠的模擬程式，此部份則是用 PCTran-ABWR 來做電廠模擬的分析，第三個部分是介面系統，此部份則是透過許多元件與線路來模擬電廠的訊號線路配置。

(二) HPCF 運轉模式控制邏輯分析

本章節將分別介紹 HPCF 之三種運轉模式控制邏輯。相關控制邏輯皆是參考自 GE 公司所提供之邏輯圖(LD)，旨在說明 HPCF 系統在每個運轉模式下各種重要邏輯控制訊號，以及 HPCF 迴路各種相關泵閥元件控制邏輯之重要邏輯控制訊號。

整個 HPCF 系統控制邏輯架構如圖 4.4，該架構主劃分為兩個層級，分別為上層控制邏輯與下層控制邏輯。因 HPCF 兩個迴路控制邏輯完全相同，故在此說明的上層控制邏輯與下層控制邏輯之每個邏輯單元並不特別加註迴路 B 或迴路 C，而僅

以控制邏輯單元之代碼代替，因此每個控制邏輯單元皆可適用至迴路 B 或迴路 C 之相對應控制邏輯單元。

上層控制邏輯是以“Standby Mode”、“Test Mode”、“Initiation Mode”等控制邏輯單元所組成，相關單元分別控制 HPCF 備用模式、HPCF 測試模式、HPCF 啟動模式等運作，即該層控制邏輯負責主控整個 HPCF 系統之三種運轉模式。在上層控制邏輯中，每個控制邏輯單元除了可輸出/輸入控制邏輯連鎖訊號外，另外還提供其他不同種類的訊號輸出/輸入。在輸入訊號方面有：來自感測器或經由其他系統傳遞過來的現場訊號(Field Signals)、VDU 操控介面或硬接線路所送入的控制訊號(Control Signals)。另外，在輸出訊號方面有：提供 VDU 顯示用的顯示訊號(Display Signals)；至於下層控制邏輯則分別由“P-0001”、“MBV-0001”、“MBV-0004”、“MBV-0007”、“MCV-0009”、“MBV-0010”、“AUV-0005”等控制邏輯單元所組成，該層控制邏輯負責依據上層控制邏輯所指示之運轉模式，控制 HPCF 迴路相關泵、閥之個別運作，該層之每個控制邏輯單元除了可輸出/輸入控制邏輯連鎖訊號外，另外還提供其他不同種類的訊號輸出/輸入。在輸入訊號方面有：來自感測器的現場訊號(Field Signals)、VDU 操控介面或硬接線路所送入的控制訊號(Control Signals)。另外，在輸出訊號方面有：提供 VDU 顯示用的顯示訊號(Display Signals)、控制相對應泵或閥運作(即 Start/Stop、Open/Close)等控制訊號。

1. 備用模式(Standby Mode)控制邏輯分析

“Standby Mode”控制邏輯如圖 4.5，本控制邏輯所需的輸

出入參數如圖 4.5 所述。在輸入訊號方面，本模式啟動方式可透過手動方式啟動（即“Return to Standby-Arm”與“Return to Standby-Initiate”兩輸入訊號），而“HPCF Initiation”、“HPCF System Test”、“HPCF Restart”則可重置(Reset)備用模式狀態訊號(即 HPCF Return to Standby)；至於“MBV-0001 100% Close”、“MBV-0007 100% Open”、“MBV-0001 100% Open”、“MBV-0007 100% Close”、“MBV-0004 100% Close”、“MCV-0009 100% Close”、“MBV-0010 100% Close”等訊號則是用來判定各相關閥之開啟或關閉狀態是否達到進入備用模式所要求之狀態。

在輸出訊號方面，“HPCF Return to Standby(TD)”訊號則是用來延遲備用模式狀態控制訊號，目的是要讓受控端之 HPCF 迴路相關泵閥有餘裕的時間進入備用狀態。若本“HPCF Return to Standby(TD)”訊號尚在延遲的時間內，則此時若啟動“HPCF Initiation”、“HPCF System Test”等其他運轉模式控制訊號，該控制訊號將無法順利致能(Enable)，必須等到“HPCF Return to Standby(TD)”訊號完成延遲的時間後才可被致能。其最大之目的是在於確保系統在有足夠時間進入備用狀態下才能被轉換至 HPCF 測試模式或 HPCF 啟動模式等其他運轉模式；“HPCF Return to Standby(Inst)”訊號則是備用狀態啟動控制訊號；“HPCF in Standby Mode”訊號用來指示 HPCF 各相關閥之開啟或關閉狀態是否合乎備用模式所要求之狀態；“Return to Standby Timed Out”訊號用來指示各相關閥並未在規定之時間內完成進入備用模式所要求之狀

態，導致 HPCF 系統無法正確進入備用狀態模式。

備用狀態模式控制邏輯之兩個主要輸出訊號“HPCF Return to Standby(TD)”與“HPCF Return to Standby(Inst)”可用來控制各受控端相關泵閥動作，使 HPCF 系統正確進入備用狀態。本“Standby Mode”控制邏輯單元之輸出訊號可控制：開啟/關閉 MBV-0001、關閉 MBV-0004、停止 P-0001、開啟/關閉 MBV-0007、關閉 MCV-0009。另外，該輸出控制訊號也會送至“Test Mode”、“Initiation Mode”等控制邏輯單元做連鎖控制用。

表 4.1 為依據“Standby Mode”控制邏輯輸出入控制訊號所整理出之重要輸入輸出控制訊號列表。表中 Field Signals 類別表示現場硬接線路訊號；Control Signals 表示手動輸入之控制訊號(如來自硬接線、Button 或 VDU Touch Panel 之控制訊號)；Logic Signals 類別為各控制邏輯之間傳遞之控制邏輯連鎖訊號；Indicator Signals 為狀態指示訊號(如燈號指示或在 VDU 上顯示狀態)。

2.測試模式(Test Mode)控制邏輯分析

“Test Mode”控制邏輯如圖 4.6，本控制邏輯所需之輸出入參數如圖 4.6 所述。在輸入訊號方面，本模式之啟動方式可透過手動方式啟動(即“HPCF System Test-Arm”與“HPCF System Test-Initiate”兩輸入訊號)，而“HPCF Return to Standby(Inst)”與“HPCF Initiation(Sealed in)”則可重置(Reset)測試模式狀態訊號。而“HPCF Return to Standby(TD)”與“HPCF Return to Standby(Inst)”兩訊號之結合，其功能主要是

讓受控端之相關泵閥有餘裕的時間進入備用狀態。若“HPCF Return to Standby(TD)”訊號尚在延遲的時間內，此時若啟動“HPCF System Test”測試模式控制訊號，該控制訊號將無法順利致能(Enable)，必須等到“HPCF Return to Standby(TD)”訊號完成延遲的時間後才可被致能。其最大之目的是在於確保系統在備用模式的狀態下才能被轉換至測試模式；至於“MBV-0001 100% Close”、“MBV-0007 100% Open”、“MBV-0001 100% Open”、“MBV-0007 100% Close”、“MBV-0004 100% Close”、“MCV-0009 100% Close”、“MBV-0010 100% Close”等訊號則是用來判定各相關管閥之開啟或關閉狀態是否達到進入測試模式所要求之狀態。

在輸出訊號方面，“Close MBV-0001”與“Open MBV-0007”訊號分別為用來控制關閉 MBV-0001 與開啟 MBV-0009 之控制訊號；“Throttle MCV-0009”與“Close and Inhibit Open MBV-0004”訊號分別為用來控制開啟 MCV-0009 與關閉 MBV-0004 之控制訊號；“HPCF System Test”與“Start HPCF Pump P-0001”訊號分別為與“Standby Mode”控制邏輯之連鎖訊號以及啟動 P-0001 之控制訊號；“HPCF System Test Timed Out”訊號用來指示各相關泵閥並未在規定的時間內合乎進入測試模式所要求之狀態，導致 HPCF 系統無法正確進入測試模式狀態；“HPCF in Test Mode”訊號用來指示 HPCF 各相關泵閥之開啟/啟動或關閉/停止狀態是否達到進入測試模式所要求之狀態。

表 4.2 為依據“Test Mode”控制邏輯輸出入控制訊號所

整理出之重要輸入輸出控制訊號列表。表中 Field Signals 類別表示現場硬接線路訊號；Control Signals 表示手動輸入之控制訊號(如來自硬接線 Button 或 VDU Touch Panel 之控制訊號)；Logic Signals 類別為各控制邏輯之間傳遞之控制邏輯連鎖訊號；Indicator Signals 為狀態指示訊號(如燈號指示或在 VDU 上顯示狀態)。

3. 啟動模式(Initiation Mode)控制邏輯分析

“Initiation Mode”控制邏輯如圖 4.7，本控制邏輯所需之輸出入參數如圖 4.7 所述。在輸入訊號方面，本模式可透過自動以及手動等兩種方式啟動。其中自動啟動方式為，透過“Rx WTR LEVEL<L1.5”及“Drywell Pressure High”等四取二(2 out of 4)邏輯訊號，若前述兩者訊號只要有任何一者成立，將使得“HPCF Auto Initiation”HPCF 自動啟動模式控制訊號成立；手動啟動方式則可透過硬接線控制或 VDU 控制等方式啟動，不論是透過硬接線控制或 VDU 控制，兩者都需“Manual Initiation-Arm”與“Manual Initiation-START”兩輸入訊號同時致能(Enable)，才能使得“Manual Init”手動 HPCF 啟動模式控制訊號成立。而“HPCF Return to Standby(TD)”與“HPCF Return to Standby(Inst)”兩訊號之結合，其功能主要是讓受控端之相關泵閥有餘裕的時間進入備用狀態。若“HPCF Return to Standby(TD)”訊號尚在延遲的時間內，此時若啟動“HPCF Initiation”啟動模式控制訊號，則該控制訊號將無法順利致能(Enable)，必須等到“HPCF Return to Standby(TD)”訊號完成延遲的時間後才可被致能。其最大之目的是在於確保系

統在備用狀態下才能被轉換至啟動模式。

在輸出訊號方面，“Rx LVL < L1.5”訊號可用來維持 MBV-0004 不自動關閉之封持(Sealed in)訊號(當反應爐水位 >L8 時，可清除該封持訊號並使 MBV-0004 自動關閉)；“Manual Init”訊號可用來清除 MBV-0004 之封持訊號以及重置 “Manual Override”訊號(即當進入啟動模式後，若手動關閉 MBV-0004 或者水位達到反應爐水位>L8 使得 MBV-0004 自動關閉，此後若再發生 LOCA 時，將使得 MBV-0004 無法開啟，除非透過手動方式啟動灌水模式才可使 “Manual Init”訊號成立，並透過該訊號重置“Manual Override”訊號，以重新進入啟動模式)；“Open MBV-0001”、“Open MBV-0004”與 “Close MCV-0009”訊號分別為用來控制開啟 MBV-0001、開啟 MBV-0004 與關閉 MCV-0009 之控制訊號；“Start Pump P-0001”與 “Start EDG”訊號分別用來控制啟動 Pump P-0001 與啟動緊急柴油發電機(EDG)之控制訊號；“HPCF Initiation(Sealed in)”訊號為與 “Standby Mode”控制邏輯和 “Test Mode”控制邏輯以及 “AUV-0005”控制邏輯之連鎖控制訊號。

表 5-3 為依據 “Initiation Mode”控制邏輯輸出入控制訊號所整理出之重要輸入輸出控制訊號列表。表中 Field Signals 類別表示現場硬接線路訊號；Control Signals 表示手動輸入之控制訊號(如來自硬接線 Button 或 VDU Touch Panel 之控制訊號)；Logic Signals 類別為各控制邏輯之間傳遞之控制邏輯連鎖訊號；Indicator Signals 為狀態指示訊號(如燈號指示或

在 VDU 上顯示狀態)。

(三)高壓灌水管路斷管伴隨預期暫態未急停模擬分析

模擬此案例時，操作者需先點選 SSLC 介面中的“ATWS”按鍵，讓程式進入本研究所新增的事件邏輯中計算，而後由操作者自行決定所要使用的緩和設備，並將其設備點選至“on”，使緩和設備能順利運作，再將“LOCA”點選至“on”以讓程式能模擬反應爐發生喪失冷卻水事故的計算，最後將“HPCF Break”點選至“on”，如圖 4.8 所示，由於此處是模擬高壓灌水管路斷管事故，因此必須藉由點選 PCTAN-ABWR 內建的破管模式來幫助模擬此案例，如圖 4.9 所示，並在其介面輸入破口面積，高壓灌水管路面積約為 1297 cm²，因此輸入 1300 cm² 以利程式的計算。

在龍門電廠中，有兩根高壓灌水管路幫助冷卻水進入爐心，此事故假設其中一根發生斷管事故，反應器應該立刻急停，但因為某些因素使得急停失敗進入預期暫態未急停的狀態。由於高壓灌水管路斷管，使得冷卻水流失，造成爐內水位迅速下降，當水位持續下降至 LEVEL 2 時，電廠會送出啟動信號至 ARI/FMCRD/SLC 等緩和設備幫助爐心停機，而當乾井到達高壓力設定點時，會發送 ECCS 啟動信號至各補水系統，使 ECCS 啟動灌水保護爐心。

值得注意的是，G.E.所出版的 FSAR 中，可查到高壓灌水管路斷管事故相關案例，其最嚴重的破口事故中，流量約為 300 kg/s，並將此假設當成最嚴重的案例，因此，我們可以了解到此案例所作的完全斷管假設伴隨預期暫態未急停

必定會帶給反應爐更大的危害。

1. 替代性控制棒插棒系統正常啟動緩和事故

(1) 事故說明

此案例為高壓灌水管路斷管事故使得爐內冷卻水大量流失，在此，我們假定電廠急停系統因故失效，爐心冷卻水持續下降並且進入預期暫態未急停的情形，而後，水位會降至 LEVEL 2 達到緩和設備啟動的設定點，此案例中，替代性控制棒插棒系統將會立即送出啟動信號並經過 15 秒延遲時間後啟動，在 10 秒內以水壓將控制棒全數推入以達到緩和事故的效果。

(2) 結果分析與討論

當高壓灌水管路斷管發生後，主蒸汽隔離閥會立即送出關閉信號，飼水流量將減少至完全喪失，10 個爐內幫浦會立即全數跳脫，使得爐心流量降低以幫助爐心功率的緩和，如圖 4.10 所示。同時，由於高壓灌水管路的斷管造成冷卻水大量往外洩漏，爐頂壓力開始降低，乾井壓力逐漸升高，爐心水位則迅速下降至 LEVEL 2，如圖 4.11 所示。在破口事件發生之後四秒左右，主蒸汽隔離閥完成關閉的動作，使得爐心壓力暫時得以平衡。當水位到達 LEVEL 2 後，偵測系統會立即送出信號通知替代性控制棒插棒系統啟動，替代性控制棒插棒系統在接收到信號 15 秒後即啟動將控制棒置入爐內緩和爐心功率，如圖 4.10 所示；在控制棒置入後爐心蒸汽產生量即大幅減少，爐頂壓力也跟著變少，如圖 4.10 所示，成功緩和事故。由此案例我們可以觀

察到斷口流出的大量冷卻水造成水位急速下降。事故發生後，透過緩和設備的啟動，使得爐心可以安全停機。圖 4.12 為此案例之破口流量，由此圖可以清楚觀察到大量的冷卻水從斷管流出，直至水位降至 TAF，才稍微緩和。此案例中，緊急爐心冷卻系統（ECCS）中，爐心隔離冷卻系統（RCIC）及高壓灌水系統（HPCF）會在乾井高壓力設定點（16.53 psia）到達後，如圖 4.13 所示，啟動高壓灌水幫浦打水進入爐心，幫助爐心維持水位，由於此事故為高壓灌水管路有一斷管，因此 HPCF 只剩一個幫浦的流量，LPFL 則是等到壓力降到足夠低時，才開始灌水進入爐心。

2. 微調控制棒驅動機構緩和事故

(1) 事故說明

此案例為高壓灌水管路斷管事故使得爐內冷卻水大量流失，在此，我們假定電廠急停系統因故失效，爐心冷卻水持續下降並且進入預期暫態未急停的情形，而後，水位會降至 LEVEL 2 達到緩和設備啟動的設定點，在此我們假設替代性控制棒插棒系統因故失效，因此微調控制棒驅動機構在替代性控制棒插棒系統失效後啟動，並藉由步進馬達將控制棒置入爐心達到停機的效果，由於步進式馬達需要 150 秒的動作時間，此事故對爐心的衝擊會比 ARI 啟動的事故要嚴重。

(2) 結果分析與討論

當高壓灌水管路斷管發生後，主蒸汽隔離閥會立即送出關閉信號，飼水流量將減少至完全喪失，10 個爐內幫浦

會立即全數跳脫，使得爐心流量降低以幫助爐心功率的緩和，如圖 4.14 所示。同時，由於高壓灌水管路的斷管造成冷卻水大量往外洩漏，爐頂壓力開始降低，乾井壓力逐漸升高，爐心水位則迅速下降至 LEVEL 2，如圖 4.15 所示。在破口事件發生之後四秒左右，主蒸汽隔離閥完成關閉的動作，使得爐心壓力暫時得以平衡。當水位到達 LEVEL 2 後，偵測系統會立即送出信號通知替代性控制棒插棒系統與微調控制棒機構啟動，但此事故假設該系統因故失效，因此微調控制棒機構會收到啟動信號，經過 16 秒後即啟動將控制棒置入爐內緩和爐心功率，如圖 4.14 所示；在控制棒置入後爐心蒸汽產生量即大幅減少，爐頂壓力也跟著變少，如圖 4.14 所示，成功緩和事故。由此案例我們可以觀察到斷口流出的大量冷卻水造成水位急速下降。事故發生後，透過緩和設備的啟動，使得爐心可以安全停機。圖 4.16 為此案例之破口流量，由此圖可以清楚觀察到大量的冷卻水從斷管流出，直至水位降至 TAF，才稍微緩和。此案例中，緊急爐心冷卻系統（ECCS）中，爐心隔離冷卻系統（RCIC）及高壓灌水系統（HPCF）會在乾井高壓力設定點（16.53 psia）到達後，如圖 4.17 所示，啟動高壓灌水幫浦打水進入爐心，幫助爐心維持水位，由於此事故為高壓灌水管路有一斷管，因此 HPCF 只剩一個幫浦的流量，LPFL 則是等到壓力降到足夠低時，才開始灌水進入爐心。

透過此事故的水位暫態圖，可以預知到當電廠發生高壓灌水管路事故伴隨預期暫態未急停時，電廠人員一定要

盡力確保控制棒驅動系統能正常運作，否則在硼液系統將硼液打入爐心前，爐心即會發生熔毀，造成危險。

3. 備用硼液控制系統緩和事故

(1) 事故說明

由於發生高壓灌水管路斷管事故對爐心的水位造成極大的影響，水位無法維持到硼液系統啟動時間即會發生熔毀，因此，在此案例中，使用 FSAR 所模擬出的破口流量 300 kg/s 作為模擬的依據，但仍然假設高壓灌水系統只有單根管路能成功灌水進入爐心，藉由這樣的假設來了解電廠防禦特性。

當系統進入預期暫態未急停並達到緩和設備啟動設定點時，替代性控制棒插棒系統應該立即啟動，同時自動啟動備用硼液控制系統的計時器。若替代性控制棒插棒系統未能正常啟動，則微調控制棒驅動機構將自動啟動以緩和事故。然而我們在此假設替代性控制棒插棒系統與微調控制棒驅動機構皆不可用，因此當備用硼液控制系統計時器自啟動後 180 秒，反應爐的功率依舊大於 6%，此時運轉員可手動開啟備用硼液控制系統，使硼液注入爐心達到停機的效果。

(2) 結果分析與討論

當高壓灌水管路斷管發生後，主蒸汽隔離閥會立即送出關閉信號，飼水流量將減少至完全喪失，10 個爐內幫浦會立即全數跳脫，使得爐心流量降低以幫助爐心功率的緩和，如圖 4.18 所示。同時，由於高壓灌水管路的斷管造成

冷卻水大量往外洩漏，爐頂壓力開始降低，乾井壓力逐漸升高，爐心水位則迅速下降至 LEVEL 2，如圖 4.19 所示。在破口事件發生之後四秒左右，主蒸汽隔離閥完成關閉的動作，使得爐心壓力暫時得以平衡。當水位到達 LEVEL 2 後，偵測系統會立即送出信號通知替代性控制棒插棒系統啟動，此案例假設替代性控制棒插棒系統和微調控制棒驅動機構因故失效，在接收到預期暫態未急停信號後，只剩下備用硼液系統可使用，達到 LEVEL 2 設定點 180 秒後，如果爐心功率依舊 $>6\%$ ，運轉員可決定啟動硼液系統，將硼液注入爐心緩和功率，如圖 4.18 所示；事故發生後，透過硼液的注入，使得爐心可以安全停機。圖 4.20 為此案例之破口流量。此案例中，緊急爐心冷卻系統（ECCS）中，爐心隔離冷卻系統（RCIC）、高壓灌水系統（HPCF）會啟動幫助維持水位。當乾井壓力上升至 16.53 psia 時，如圖 4.21 所示，RCIC 會先接收到啟動信號並於 29 秒的延遲後啟動，HPCF 接收到啟動信號後並延遲 46 秒後啟動。由於爐頂壓力並未下降至 LPFL 能灌水進入爐心的程度，因此在此案例中 LPFL 無法啟動幫助維持爐心水位，如圖 4.19 所示。

(四)低壓灌水管路斷管伴隨預期暫態未急停模擬分析

模擬此案例時，操作者需先點選 SSLC 介面中的“ATWS”按鍵，讓程式進入本研究所新增的事件邏輯中計算，而後由操作者自行決定所要使用的緩和設備，並將其設備點選至“on”，使緩和設備能順利運作，再將“LOCA”點選

至“on”以讓程式能模擬反應爐發生喪失冷卻水事故的計算，最後將“LPFL Break”點選至“on”，如圖 4.22 所示，由於此處是模擬低壓灌水管路斷管事故，因此必須藉由點選 PCTAN-ABWR 內建的破管模式來幫助模擬此案例，如圖 4.23 所示，並在其介面輸入破口面積，低壓灌水管路面積約為 1642 cm²，因此輸入 1650 cm² 以利程式的計算。

在龍門電廠中，有三根低壓灌水管路幫助冷卻水進入爐心，此事故假設其中一根發生斷管事故，反應器應該立刻急停，此案例假設某些因素的發生使得反應器急停失敗因而進入預期暫態未急停的狀態。由於低壓灌水管路斷管，使得冷卻水迅速流失，造成爐內水位迅速下降，當水位持續下降至 LEVEL 2 時，電廠會送出啟動信號至 ARI/FMCRD/SLC 等緩和設備幫助爐心停機，隨後緩和設備會根據其延遲時間進行動作，而當乾井到達高壓力設定點時，會發送 ECCS 啟動信號至各緊急補水系統，使 ECCS 啟動灌水保護爐心。

值得注意的是，G.E.所出版的 FSAR 中，可查到低壓灌水管路斷管事故相關案例，其最嚴重的破口事故中，流量約為 320kg/s，並將此假設當成最嚴重的案例，因此，我們可以了解到此案例所作的完全斷管假設伴隨預期暫態未急停必定會帶給反應爐更大的危害。

1. 替代性控制棒插棒系統正常啟動緩和事故

(1) 事故說明

此案例為低壓灌水管路斷管事故使得爐內冷卻水大量流失，在此，我們假定電廠急停系統因故失效，爐心冷卻

水持續下降並且進入預期暫態未急停的情形，而後，水位會降至 LEVEL 2 達到緩和設備啟動的設定點，此案例中，替代性控制棒插棒系統將會立即送出啟動信號並經過 15 秒延遲時間後啟動，在 10 秒內以水壓將控制棒全數推入以達到緩和事故的效果。

(2)結果分析與討論

當低壓灌水管路斷管發生後，主蒸汽隔離閥會立即送出關閉信號，由於喪失了推動飼水幫浦的蒸汽來源，使得飼水流量逐漸減少然後完全喪失，而 10 個爐內幫浦會在主蒸汽隔離閥關閉信號送出後立即全數跳脫，使得爐心流量降低以幫助爐心功率的緩和，如圖 4.24 所示。同時，由於低壓灌水管路的斷管造成冷卻水大量往外洩漏，爐頂壓力開始降低，乾井壓力逐漸升高，爐心水位則迅速下降至 LEVEL 2，如圖 4.25 所示。在破口事件發生之後四秒左右，主蒸汽隔離閥完成關閉的動作，使得爐心壓力暫時得以平衡。當水位到達 LEVEL 2 後，偵測系統會立即送出信號通知替代性控制棒插棒系統啟動，替代性控制棒插棒系統在接收到信號 15 秒後即啟動將控制棒置入爐內緩和爐心功率，如圖 4.24 所示；在控制棒置入後爐心蒸汽產生量即大幅減少，爐頂壓力也跟著變少，如圖 4.24 所示，成功緩和事故。由此案例我們可以觀察到斷口流出的大量冷卻水造成水位急速下降。事故發生後，透過緩和設備的啟動，使得爐心可以安全停機。圖 4.26 為此案例之破口流量，由此圖可以清楚觀察到大量的冷卻水從斷管流出，直至水位降

至 TAF，才稍微緩和。此案例中，緊急爐心冷卻系統(ECCS)中，爐心隔離冷卻系統(RCIC)及高壓灌水系統(HPCF)會在乾井高壓力設定點(16.53 psia)到達後，如圖 4.27 所示，啟動高壓灌水幫浦打水進入爐心，幫助爐心維持水位，由於此事故為低壓灌水管路有一斷管，因此 LPFL 只剩兩個幫浦的流量，且必須等到壓力降到足夠低時，才始能灌水進入爐心。

2. 微調控制棒驅動機構緩和事故

(1) 事故說明

此案例為低壓灌水管路斷管事故使得爐內冷卻水大量流失，在此，我們假定電廠急停系統因故失效，爐心冷卻水持續下降並且進入預期暫態未急停的情形，而後，水位會降至 LEVEL 2 達到緩和設備啟動的設定點，在此我們假設替代性控制棒插棒系統因故失效，因此微調控制棒驅動機構在替代性控制棒插棒系統失效後啟動，並藉由步進馬達將控制棒置入爐心達到停機的效果，由於步進式馬達需要 150 秒的動作時間，此事故對爐心的衝擊會比 ARI 啟動的事故要嚴重。

(2) 結果分析與討論

當低壓灌水管路斷管發生後，主蒸汽隔離閥會立即送出關閉信號，飼水流量將減少至完全喪失，10 個爐內幫浦會立即全數跳脫，使得爐心流量降低以幫助爐心功率的緩和，如圖 4.28 所示。同時，由於低壓灌水管路的斷管造成冷卻水大量往外洩漏，爐頂壓力開始降低，乾井壓力逐漸

升高，爐心水位則迅速下降至 LEVEL 2，如圖 4.29 所示。在破口事件發生之後四秒左右，主蒸汽隔離閥完成關閉的動作，使得爐心壓力暫時得以平衡。當水位到達 LEVEL 2 後，偵測系統會立即送出信號通知替代性控制棒插棒系統與微調控制棒機構啟動，但此事故假設該系統因故失效，因此微調控制棒機構會收到啟動信號，經過 16 秒後即啟動將控制棒置入爐內緩和爐心功率，如圖 4.28 所示；在控制棒置入後爐心蒸汽產生量即大幅減少，爐頂壓力也跟著變少，如圖 4.28 所示，成功緩和事故。由此案例我們可以觀察到斷口流出的大量冷卻水造成水位急速下降。事故發生後，透過緩和設備的啟動，使得爐心可以安全停機。圖 4.30 為此案例之破口流量，由此圖可以清楚觀察到大量的冷卻水從斷管流出，直至水位降至 TAF，才稍微緩和。此案例中，緊急爐心冷卻系統（ECCS）中，爐心隔離冷卻系統（RCIC）及高壓灌水系統（HPCF）會在乾井高壓力設定點（16.53 psia）到達後，如圖 4.28 所示，啟動高壓灌水幫浦打水進入爐心，幫助爐心維持水位，由於此事故為低壓灌水管路有一斷管，因此 LPFL 只剩兩個幫浦的流量，等到壓力降到足夠低時，才開始灌水進入爐心。

透過此事故的水位暫態圖，可以預知到當電廠發生低壓灌水管路事故伴隨預期暫態未急停時，電廠人員一定要盡力確保控制棒驅動系統能正常運作，否則在硼液系統將硼液打入爐心前，爐心即會發生熔毀，造成危險。

3. 備用硼液控制系統緩和事故

(1)事故說明

由於發生低壓灌水管路斷管事故對爐心的水位造成極大的影響，水位無法維持到硼液系統啟動時間即會發生熔毀，因此，在此案例中，使用 FSAR 所模擬出的破口流量 320 kg/s 作為模擬的依據，但仍然假設低壓灌水系統只有兩條管路能成功灌水進入爐心，藉由這樣的假設來了解電廠防禦特性。

當系統進入預期暫態未急停並達到緩和設備啟動設定點時，替代性控制棒插棒系統應該立即啟動，同時自動啟動備用硼液控制系統的計時器。若替代性控制棒插棒系統未能正常啟動，則微調控制棒驅動機構將自動啟動以緩和事故。然而我們在此假設替代性控制棒插棒系統與微調控制棒驅動機構皆不可用，因此當備用硼液控制系統計時器自啟動後 180 秒，反應爐的功率依舊大於 6%，此時運轉員可手動開啟備用硼液控制系統，使硼液注入爐心達到停機的效果。

(2)結果分析與討論

當低壓灌水管路斷管發生後，主蒸汽隔離閥會立即送出關閉信號，飼水流量將減少至完全喪失，10 個爐內幫浦會立即全數跳脫，使得爐心流量降低以幫助爐心功率的緩和，如圖 4.32 所示。同時，由於低壓灌水管路的斷管造成冷卻水大量往外洩漏，爐頂壓力開始降低，乾井壓力逐漸升高，爐心水位則迅速下降至 LEVEL 2，如圖 4.33 所示。在破口事件發生之後四秒左右，主蒸汽隔離閥完成關閉的

動作，使得爐心壓力暫時得以平衡。當水位到達 LEVEL 2 後，偵測系統會立即送出信號通知替代性控制棒插棒系統啟動，此案例假設替代性控制棒插棒系統和微調控制棒驅動機構因故失效，在接收到預期暫態未急停信號後，只剩下備用硼液系統可使用，達到 LEVEL 2 設定點 180 秒後，如果爐心功率依舊 $>6\%$ ，運轉員可決定啟動硼液系統，將硼液注入爐心緩和功率，如圖 4.32 所示；事故發生後，透過硼液的注入，使得爐心可以安全停機。圖 4.34 為此案例之破口流量。此案例中，緊急爐心冷卻系統 (ECCS) 中，爐心隔離冷卻系統 (RCIC)、高壓灌水系統 (HPCF) 會啟動幫助維持水位。當乾井壓力上升至 16.53 psia 時，如圖 4.35 所示，RCIC 會先接收到啟動信號並於 29 秒的延遲後啟動，HPCF 接收到啟動信號後並延遲 46 秒後啟動。等爐頂壓力並下降至 LPFL 能灌水進入爐心的程度，LPFL 會開始啟動灌水進入爐心，但由於此案例的假設，因此只能觀察到兩個幫浦的流量。

(五)高壓灌水管路不同破口伴隨預期暫態未急停模擬分析

此案例與先前高壓灌水管路斷管事故邏輯相似，但此案例將藉由不同的破口大小來調整破口流量，進行大、中、小各種破口的暫態分析，藉此深入了解不同的破口情形下，電廠安全系統如何去運作與互動以保護爐心的安全。

同樣地，模擬此案例時，操作者需先點選 SSLC 介面中的“ATWS”按鍵，讓程式進入本研究所新增的事件邏輯中計算，而後由操作者自行決定所要使用的緩和設備，並將其設備

點選至“on”，使緩和設備能順利運作，再將“LOCA”點選至“on”以讓程式能模擬反應爐發生喪失冷卻水事故的計算，最後將“HPCF Break”點選至“on”，由於此處是模擬高壓灌水管路斷管事故，因此必須藉由點選 PCTAN-ABWR 內建的破管模式來幫助模擬此案例，並在其介面輸入破口面積，高壓灌水管路面積約為 1297 cm^2 ，因此輸入 1300 cm^2 以利程式的計算，此外本研究另外選擇了 800 cm^2 與 300 cm^2 的破口面積進行模擬，藉由這三種面積來了解電廠的安全特性。

在龍門電廠中，有兩根高壓灌水管路幫助冷卻水進入爐心，此事故假設其中一根發生斷管事故，反應器應該立刻急停，但因為某些因素使得急停失敗進入預期暫態未急停的狀態。由於高壓灌水管路斷管，使得冷卻水流失，造成爐內水位迅速下降，當水位持續下降至 LEVEL 2 時，電廠會送出啟動信號至 ARI 等緩和設備幫助爐心停機，而當乾井到達高壓力設定點時，會發送 ECCS 啟動信號至各補水系統，使 ECCS 啟動灌水保護爐心，由於此案例中有三種不同的破口面積，因此不同的破口流量所造成的後續影響也可以在各個 ECCS 子系統的動作上觀察到。

1. 替代性控制棒插棒系統正常啟動緩和事故

(1) 事故說明

此案例為高壓灌水管路斷管事故使得爐內冷卻水大量流失，在此，我們假定電廠急停系統因故失效，爐心冷卻水持續下降並且進入預期暫態未急停的情形，而後，水位會降至 LEVEL 2 達到緩和設備啟動的設定點，此案例中，

替代性控制棒插棒系統將會立即送出啟動信號並經過 15 秒延遲時間後啟動，在 10 秒內以水壓將控制棒全數推入以達到緩和事故的效果。

(2) 結果分析與討論

圖 4.36 為此案例之破口流量，由此圖可以清楚觀察到不同破口大小造成的破口流量， 1300 cm^2 的破口流量為 4200 kg/s ， 800 cm^2 的破口流量為 2550 kg/s ，而 300 cm^2 的破口流量則為 950 kg/s ，當高壓灌水管路發聲破管後，冷卻水會從破口處迅速流出，主蒸汽隔離閥會立即送出關閉信號，飼水流量將減少而後完全喪失，10 個爐內幫浦會立即全數跳脫，使得爐心流量降低以幫助爐心功率的緩和，如圖 4.40 所示，可以發現無論破口大小為何，爐心流量會在同一時間回退。同時，由於高壓灌水管路的斷管造成冷卻水大量往外洩漏，管路發生破口會導致爐頂壓力開始降低，乾井壓力逐漸升高，爐心水位則會迅速下降，如圖 4.39 所示，我們可以看到爐心水位迅速下降，大破口與中破口面積會使得水位掉至 TAF 以下，而後隨著反應器停機以及 ECCS 的啟動慢慢回升。在破口事件發生之後四秒左右，主蒸汽隔離閥完成關閉的動作，使得爐心壓力暫時得以平衡。當水位到達 LEVEL 2 後，偵測系統會立即送出信號通知替代性控制棒插棒系統啟動，替代性控制棒插棒系統在接收到信號 15 秒後即啟動將控制棒置入爐內緩和爐心功率，如圖 4.37 所示，由於 1300 cm^2 的破口面積會造成爐心水位下降的速度遠比另外兩種面積還要快，造成

ARI 的動作比另外兩者還早動作以保護爐心，而 300 cm^2 的破口面積造成的冷卻水流失較少，因此會 ARI 會比較晚起動；在控制棒置入後爐心蒸汽產生量即大幅減少，爐頂壓力也跟著變少，由於 300 cm^2 的破口流量較小使得爐頂壓力得以在反應器停機後獲得平衡，如圖 4.38 所示，最後緩和設備成功啟動事故中止。由此案例我們可以觀察到斷口流出的大量冷卻水造成水位急速下降。事故發生後，透過緩和設備的啟動，使得爐心可以安全停機。此案例中，緊急爐心冷卻系統 (ECCS) 中，爐心隔離冷卻系統 (RCIC) 及高壓灌水系統 (HPCF) 會在乾井高壓力設定點 (16.53 psia) 到達後，啟動高壓灌水幫浦打水進入爐心，幫助爐心維持水位，由於此事故為高壓灌水管路有一斷管，因此 HPCF 只剩一個幫浦的流量，LPFL 則是等到壓力降到足夠低時，才開始灌水進入爐心。透過圖 4.41、圖 4.42 與圖 4.43，可以看到不同破口面積的情形下，各個 ECCS 子系統的運作情形，由於大破口面積所洩漏到乾井的壓力最大，因此造成 RCIC 比另外兩種面積還早啟動，HPCF 的情形也是相同，此外大破口面積造成爐內壓力洩漏的速度較快，使得 HPCF 的流量會上升的比另外兩者快，在此三種破口中只有 1300 cm^2 情況下會有 LPFL 啟動幫忙灌水進入爐心保護爐心。

表 4.1 備用模式控制邏輯輸出入訊號種類與數量統計列表

	訊號類別	數量	輸入訊號名稱	輸入訊號來源物件或名稱
輸	Field Signals	7	MBV-0001 100%Close	“MBV-0001”(Hardware Sensor)
			MBV-0001 100%Open	“MBV-0001” (Hardware Sensor)
			MBV-0007 100%Close	“MBV-0007” (Hardware Sensor)
			MBV-0007 100%Open	“MBV-0007” (Hardware Sensor)
			MBV-0004 100%Close	“MBV-0004” (Hardware Sensor)
			MCV-0009 100%Closed	“MCV-0009” (Hardware Sensor)
			MBV-0010 100%Close	“MBV-0010” (Hardware Sensor)
入	Control Signals	2	Return to Standby Arm	VDU
			Return to Standby Initiate	VDU
	Logic Signals	3	HPCF Auto Initiation	“Initiation Mode”
HPCF Initiation(Auto or Man)			“Initiation Mode”	
HPCF System Test			“Test Mode”	
輸	訊號類別	數量	輸出訊號名稱	
	Logic Signals	2	HPCF Return to Standby (TD)	
			HPCF Return to Standby (Inst)	
	Indicator Signals	2	HPCF in Standby Mode	
Return to Standby Timed Out				

表 4.2 備用模式控制邏輯輸出入訊號種類與數量統計列表

			輸入訊號名稱	輸入訊號來源物件或名稱
	訊號類別	數量		
輸 入	Field Signals	7	MBV-0001 100% Close	“MBV-0001” (Hardware Sensor)
			MBV-0001 100% Open	“MBV-0001” (Hardware Sensor)
			MBV-0007 100% Close	“MBV-0007” (Hardware Sensor)
			MBV-0007 100% Open	“MBV-0007” (Hardware Sensor)
			MBV-0004 100% Close	“MBV-0004” (Hardware Sensor)
			MCV-0009 100% Closed	“MCV-0009” (Hardware Sensor)
			MBV-0010 100% Close	“MBV-0010” (Hardware Sensor)
	Control Signals	2	HPCF System Test-Arm	VDU
			HPCF System Test-Initiate	VDU
	Logic Signals	3	HPCF Return to Standby (TD)	“Standby Mode”
HPCF Return to Standby (Inst)			“Standby Mode”	
HPCF Initiation (Sealed in)			“Initiation Mode”	
輸 出	訊號類別	數量	輸出訊號名稱	
	Logic Signals	6	Close MBV-0001	
			Open MBV-0007	
			Open MCV-0009	
			Close MBV-0004	
			HPCF System Test	
			Start HPCF Pump P-0001	
	VDU Signals	2	HPCF System Time Out	
			HPCF In Test Mode	

表 4.3 啟動模式控制邏輯輸出入訊號種類與數量統計

輸 入	訊號類別	數量	輸入訊號名稱	輸入訊號來源物件或名稱
	輸 入	FIELD SIGNALS	3	REACTOR WATER LEVEL
DRYWELL PRESSURE				HARDWARE SENSOR
PUMP RUNNING				“P-0001B” (HARDWARE SENSOR)
CONTROL SIGNALS		4	MANUAL INITIATION ARMED (VDU)	VDU
			MANUAL INITIATION-ARM (HW)	HARDWIRE CONTROL
			MANUAL INITIATION START (VDU)	VDU
			MANUAL INITIATION-START (HW)	HARDWIRE CONTROL
LOGIC SIGNALS		2	HPCF RETURN TO STANDBY (TD)	“STANDBY MODE”
			HPCF RETURN TO STANDBY (INST)	“STANDBY MODE”
輸 出		訊號類別	數量	輸出訊號名稱
	LOGIC SIGNALS	8	RX LVL <L1.5	
			HPCF AUTO INITIATION	
			L8 & MBV-0004B MAN. OVERRIDE RESET	
			OPEN MBV-0001	
			OPEN MBV-0004	
			CLOSE MCV-0009	
			START PUMP P-0001	
			HPCF INITIATION (SEALED IN)	

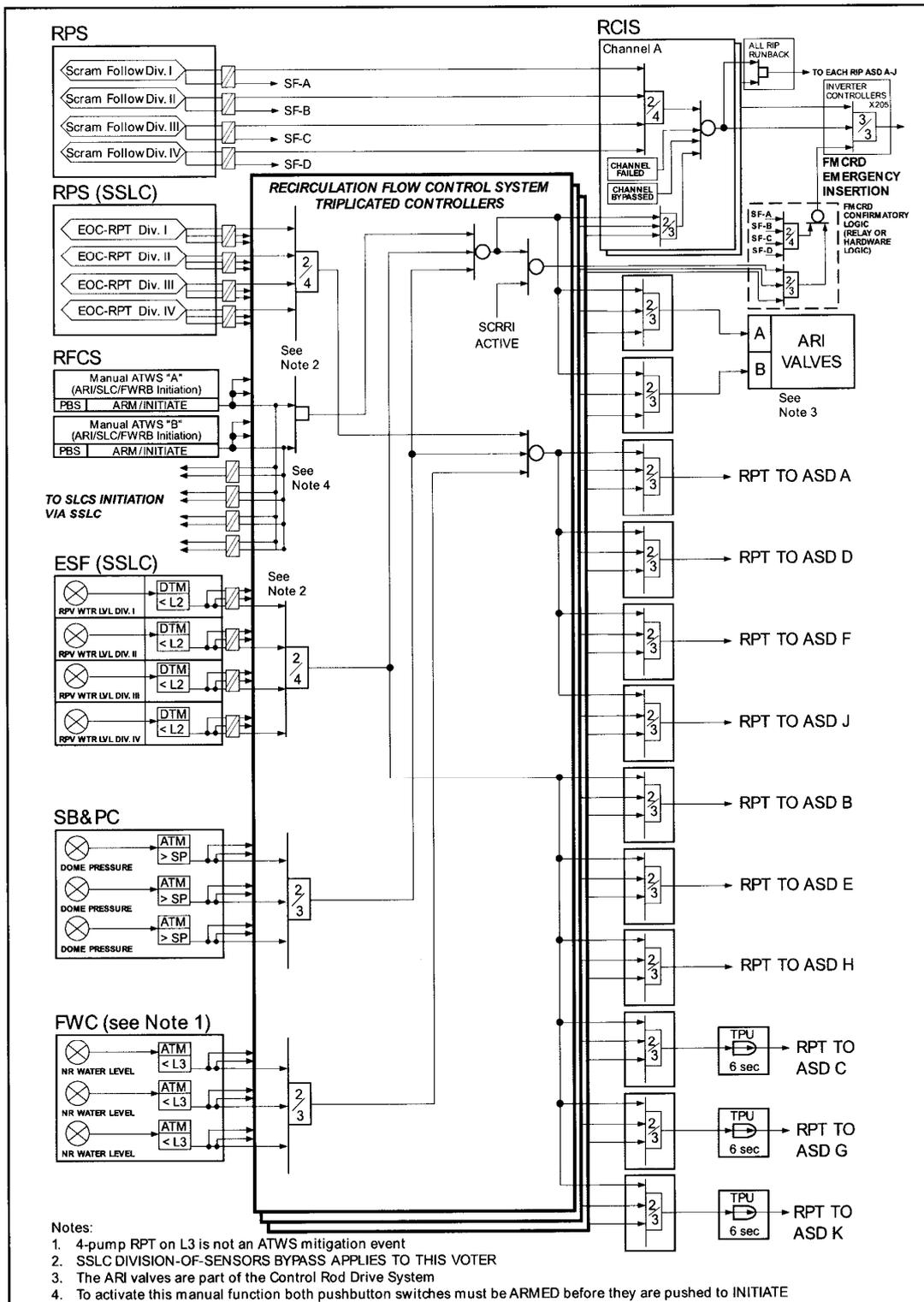


圖 4.1 ATWS 緩抑邏輯(ARI, FMCRD Run-In, RPT, Manual Initiation)

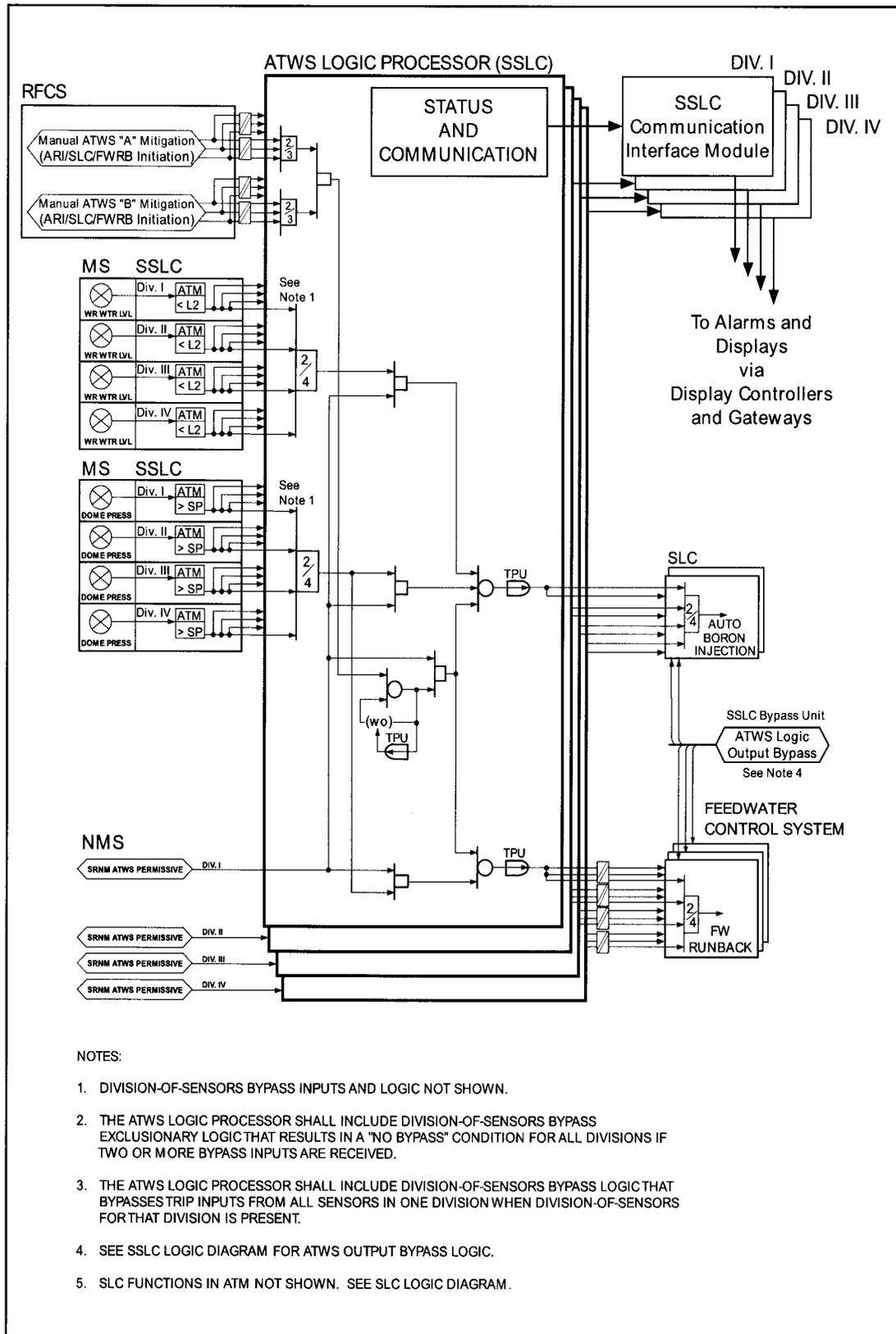


圖 4.2 ATWS 緩抑邏輯(SLC Initiation, Feedwater Runback)

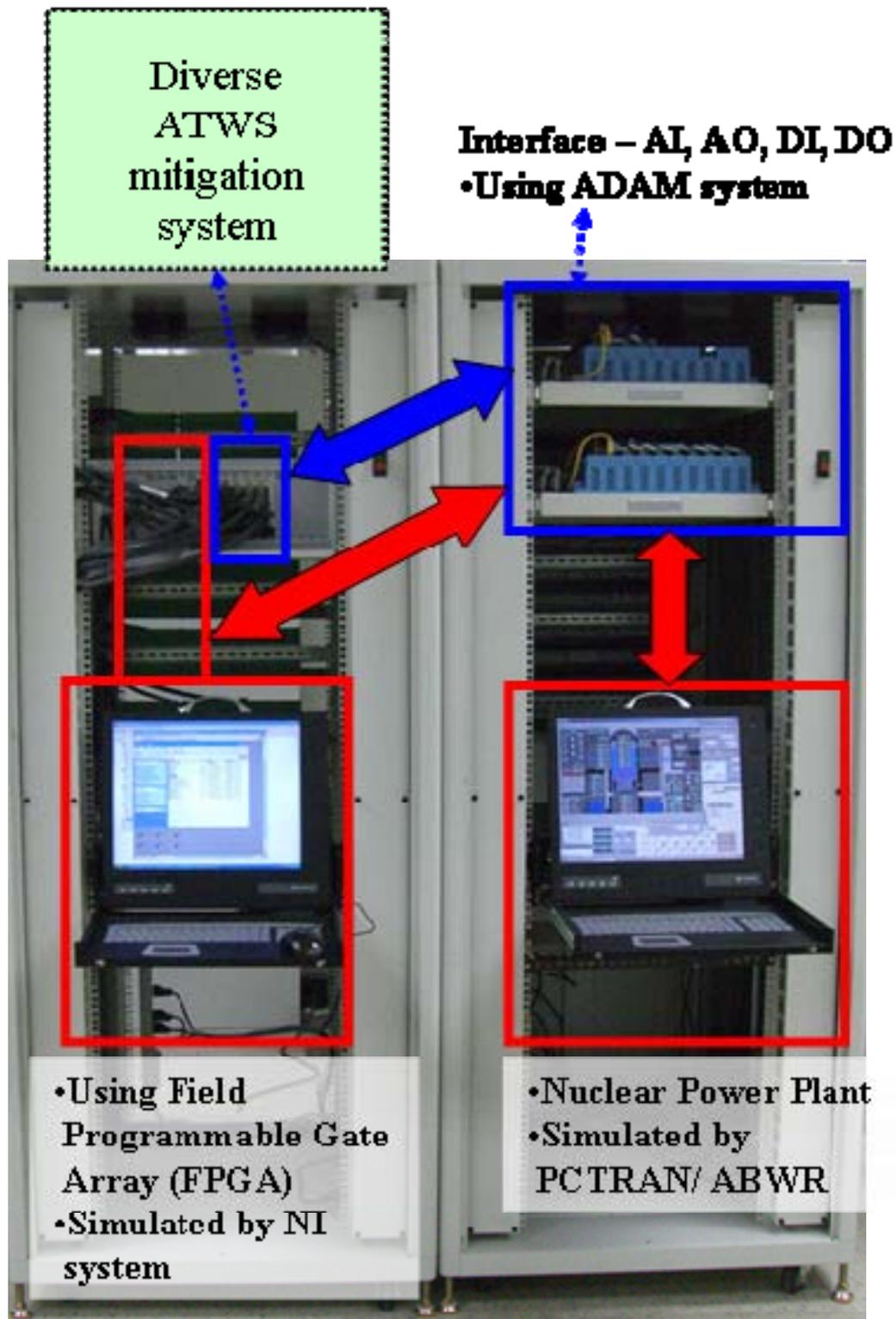


圖 4.3 預期暫態未急停緩抑設施硬體建置架構

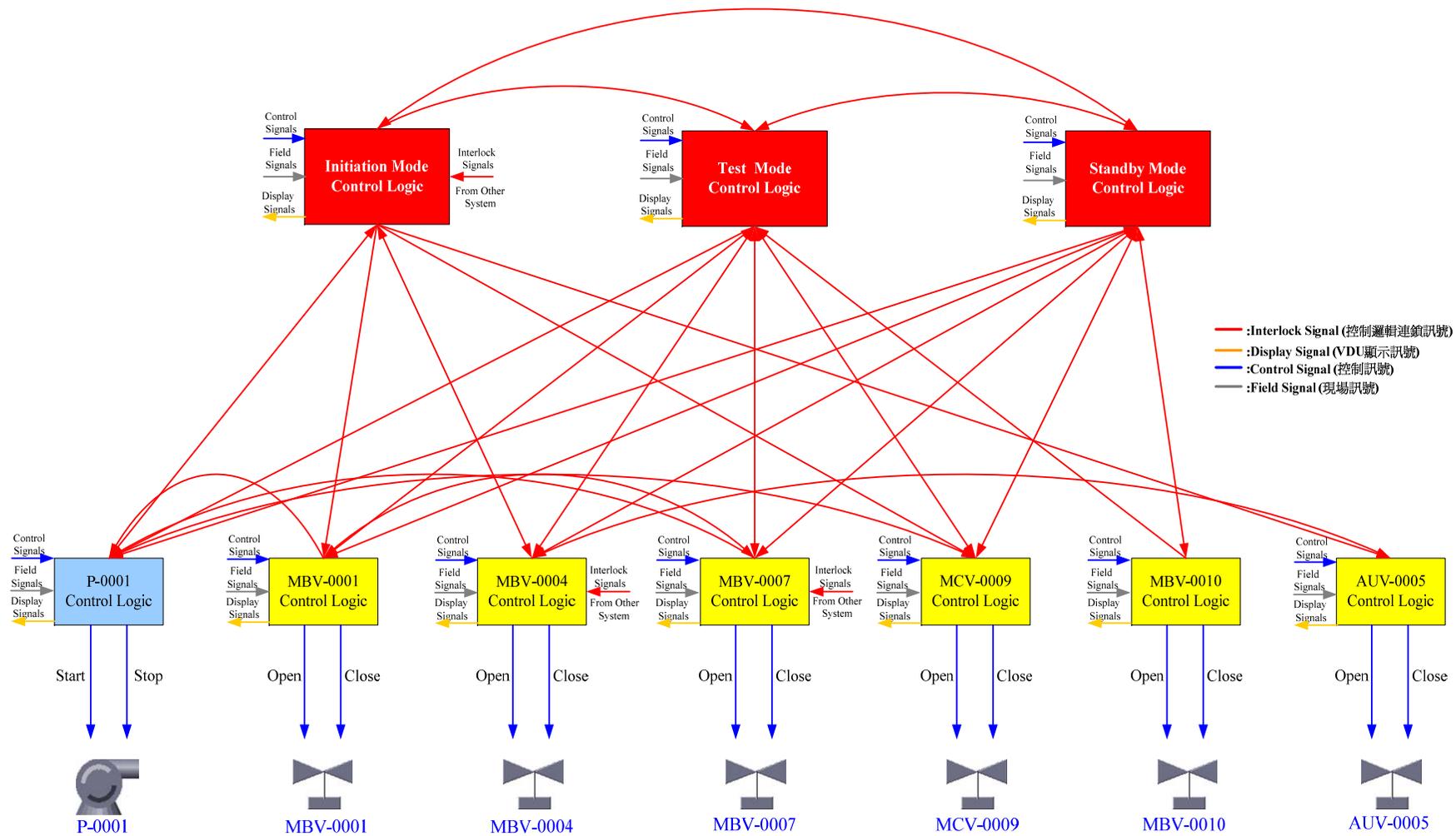


圖 4.4 HPCF 系統控制邏輯架構圖

HPCF Return to Standby : (Ref:31113-1E22-K1001D)

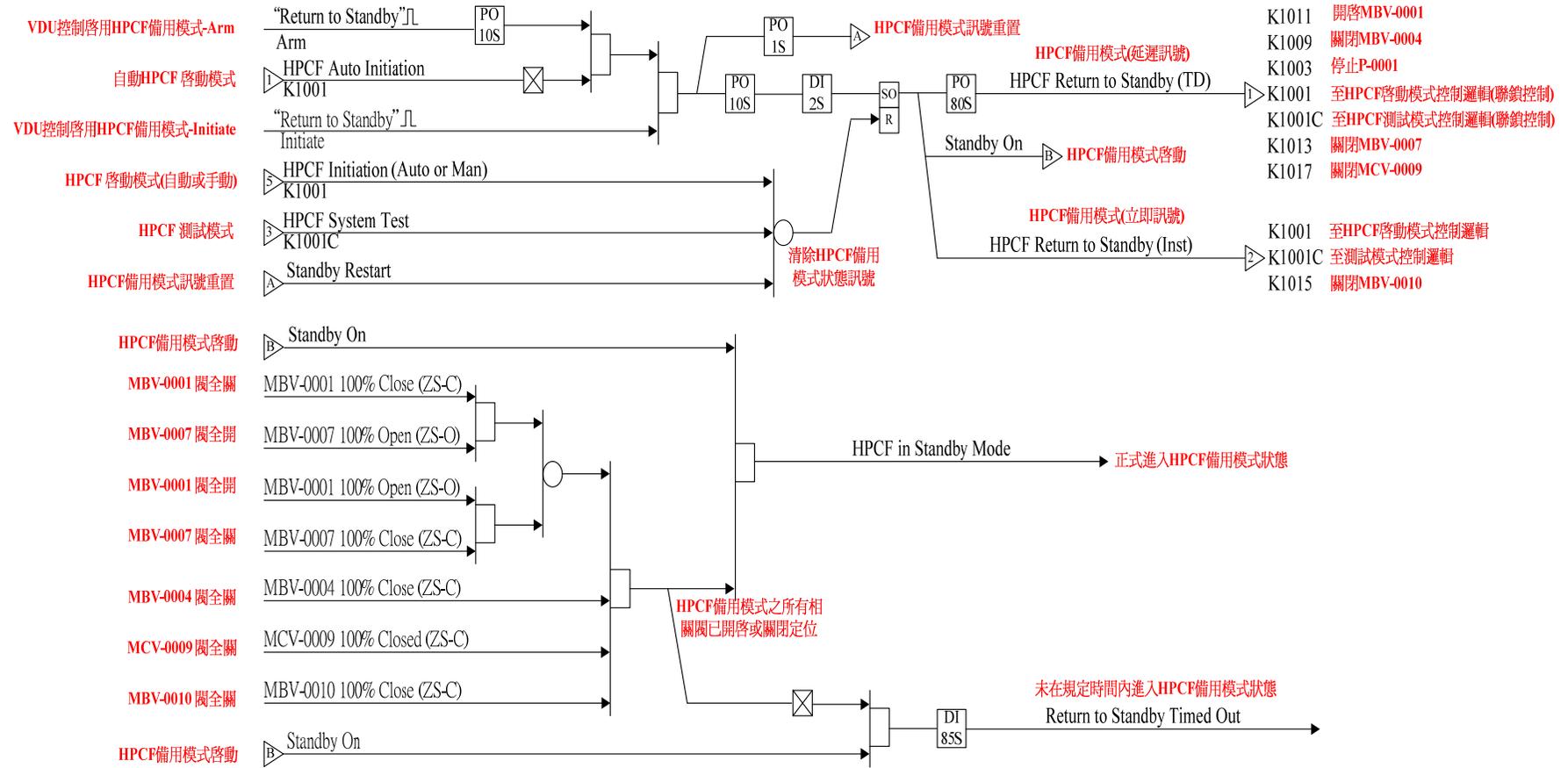


圖 4.5 HPCF 備用模式控制邏輯

Test Mode : (Ref:31113-1E22-K1001C)

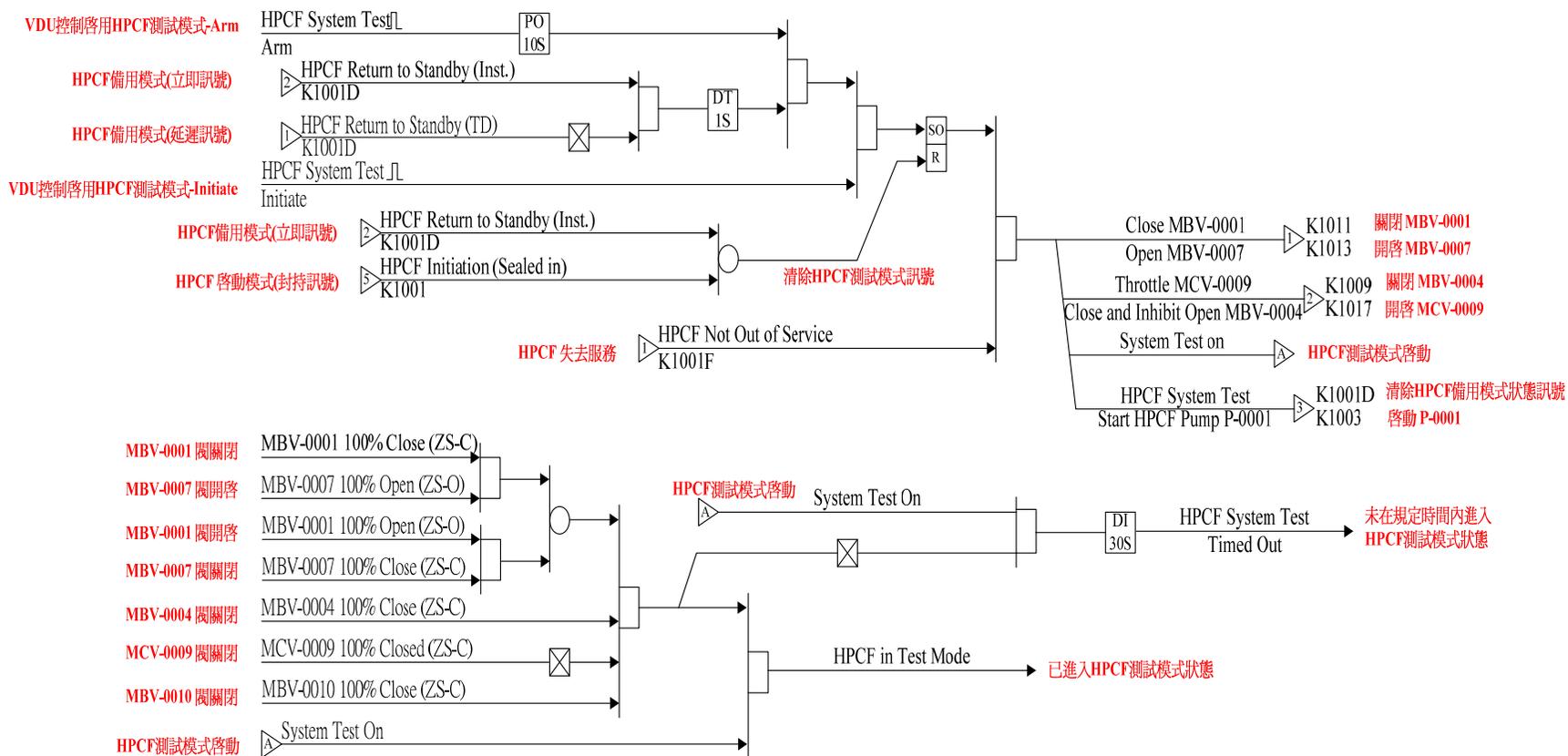


圖 4.6 HPCF 測試模式控制邏輯

HPCF INITIATION : (Ref:31113-1E22-K1001,K1001A)

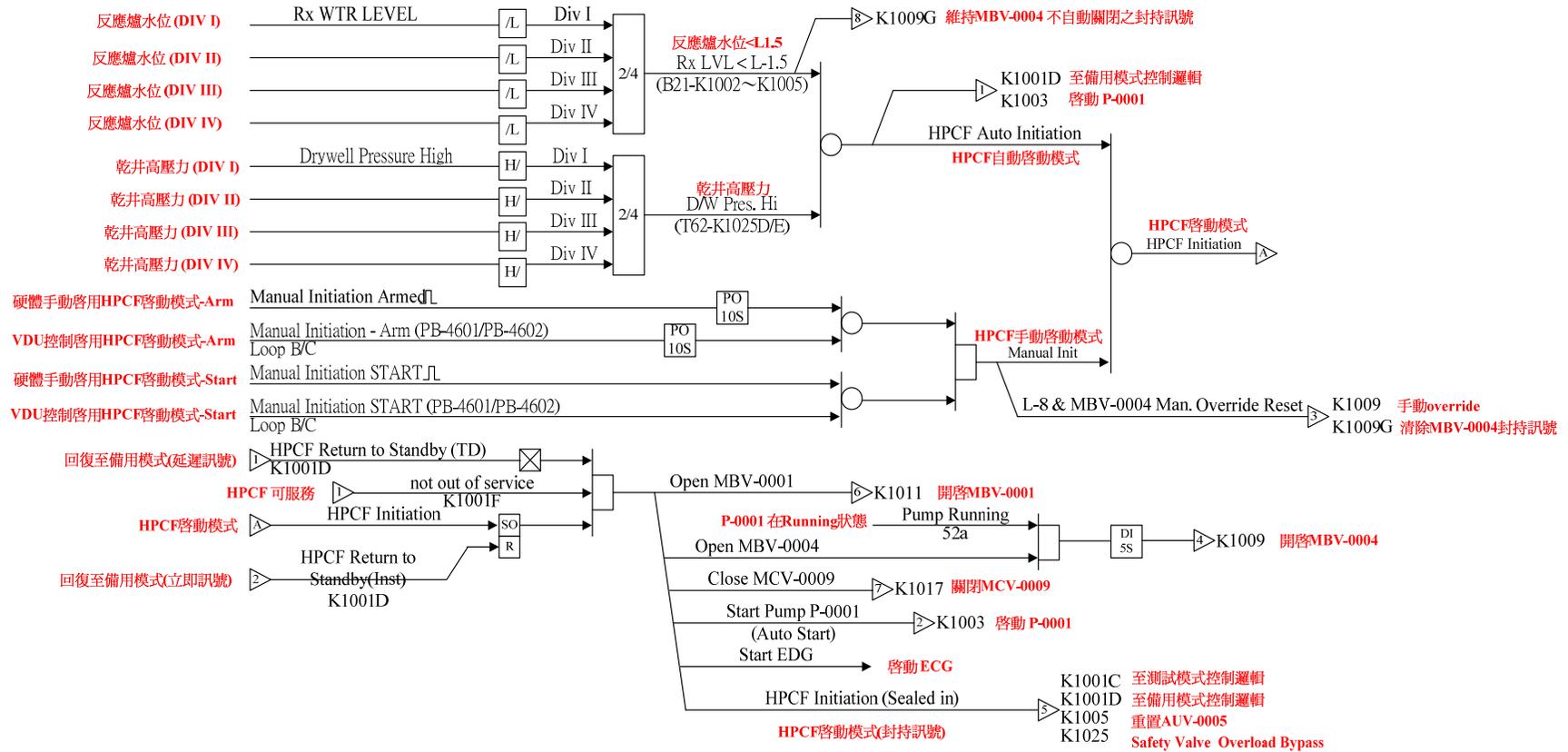


圖 4.7 HPCF 啟動模式控制邏輯

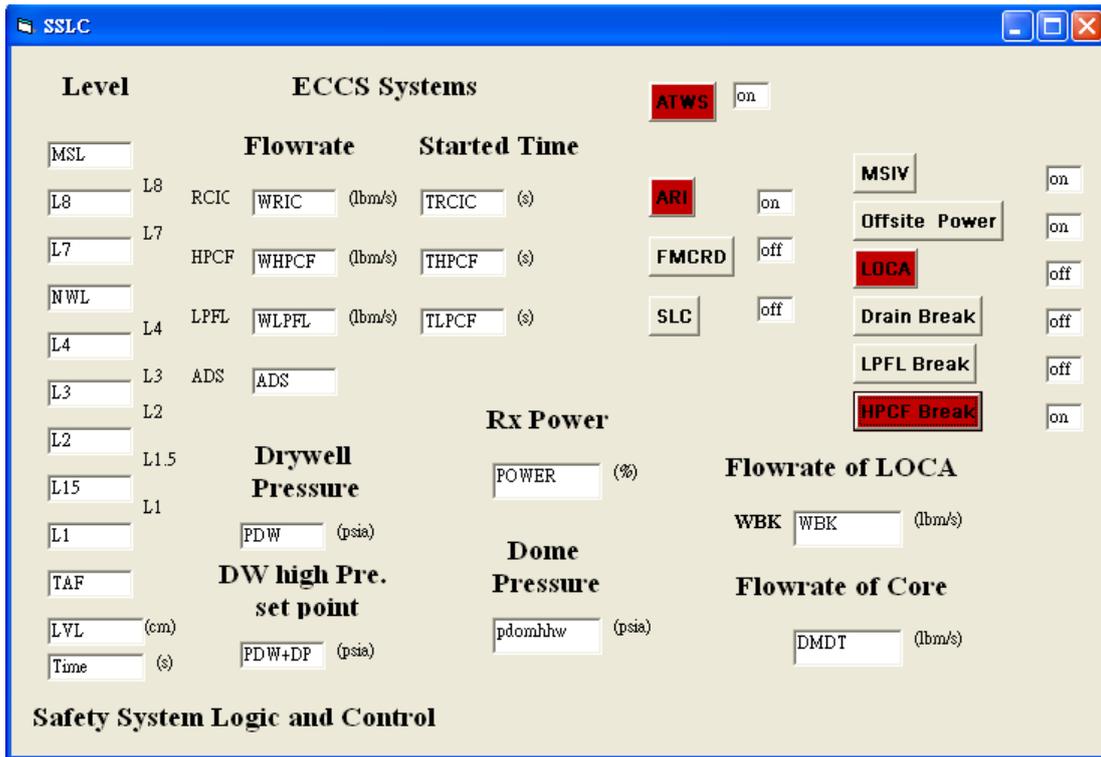


圖 4.8 預期暫態未急停之高壓灌水管路斷管事故_ SSLC 介面操作

圖

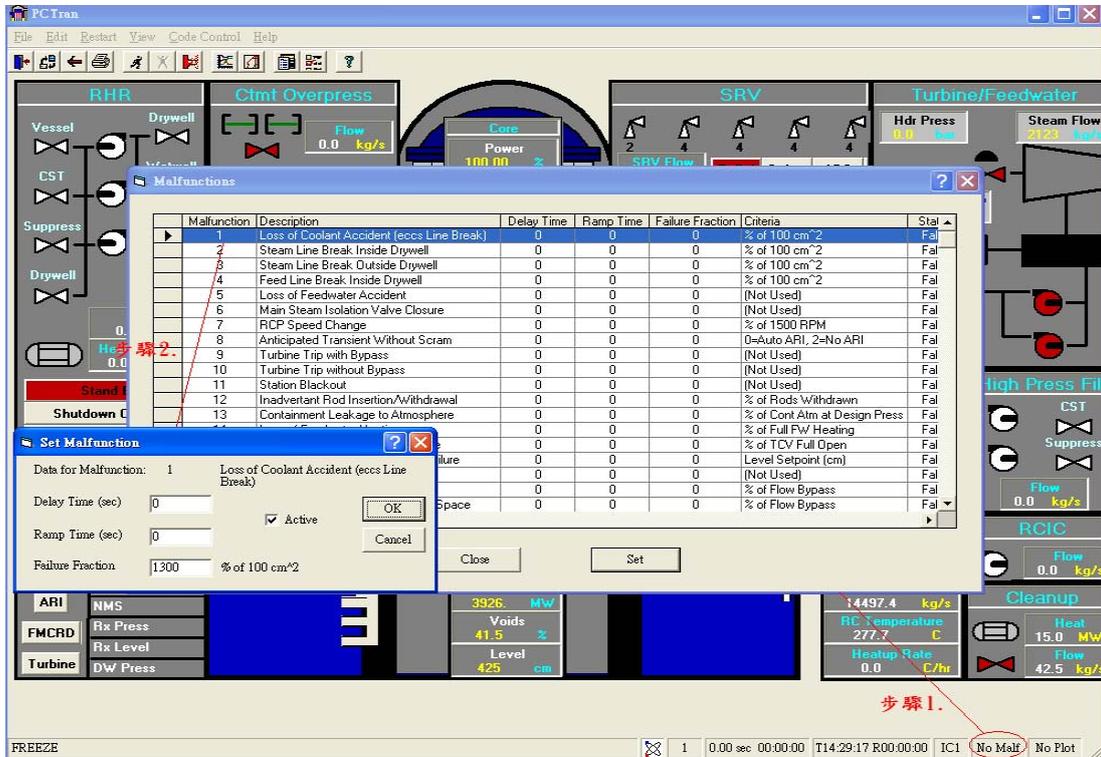


圖 4.9 預期暫態未急停之高壓灌水管路斷管事故_

PCTRAN-ABWR 內建介面操作圖

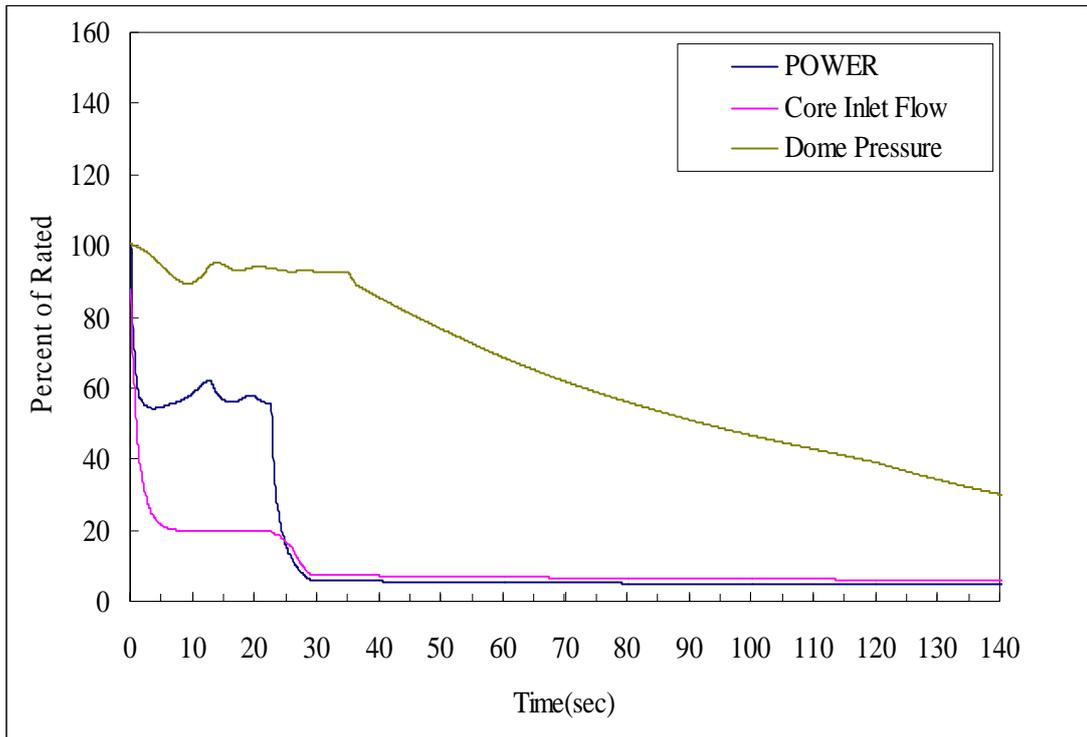


圖 4.10 預期暫態未急停之高壓灌水管路斷管事故_ARI_1

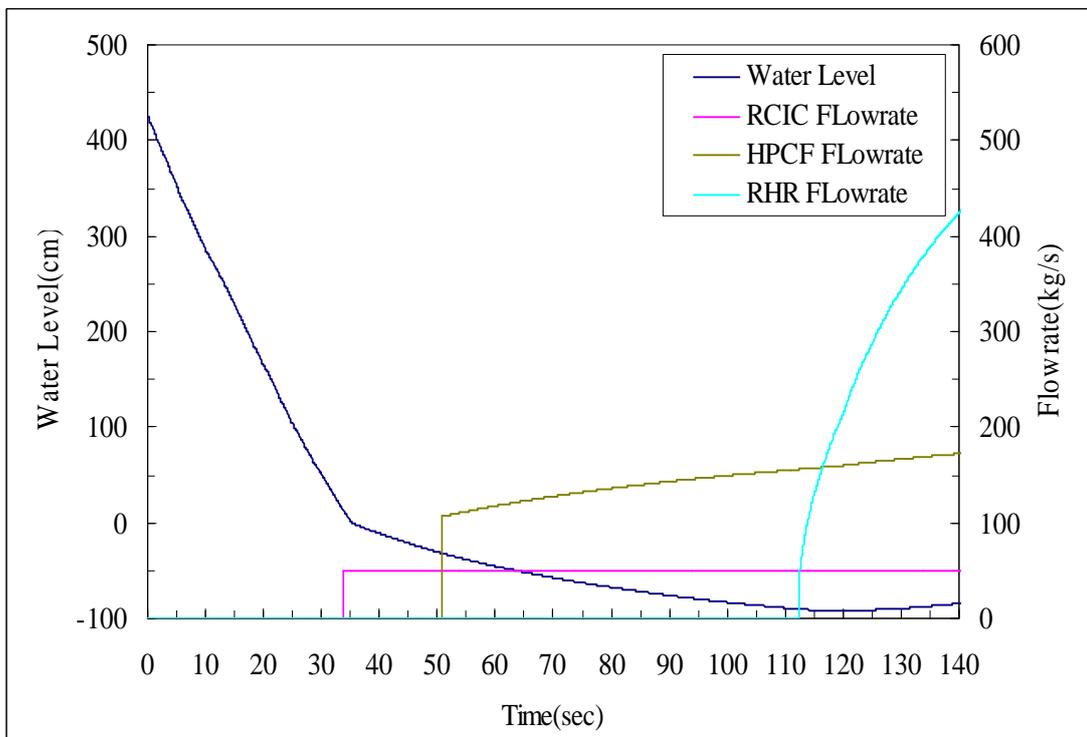


圖 4.11 預期暫態未急停之高壓灌水管路斷管事故_ARI_2

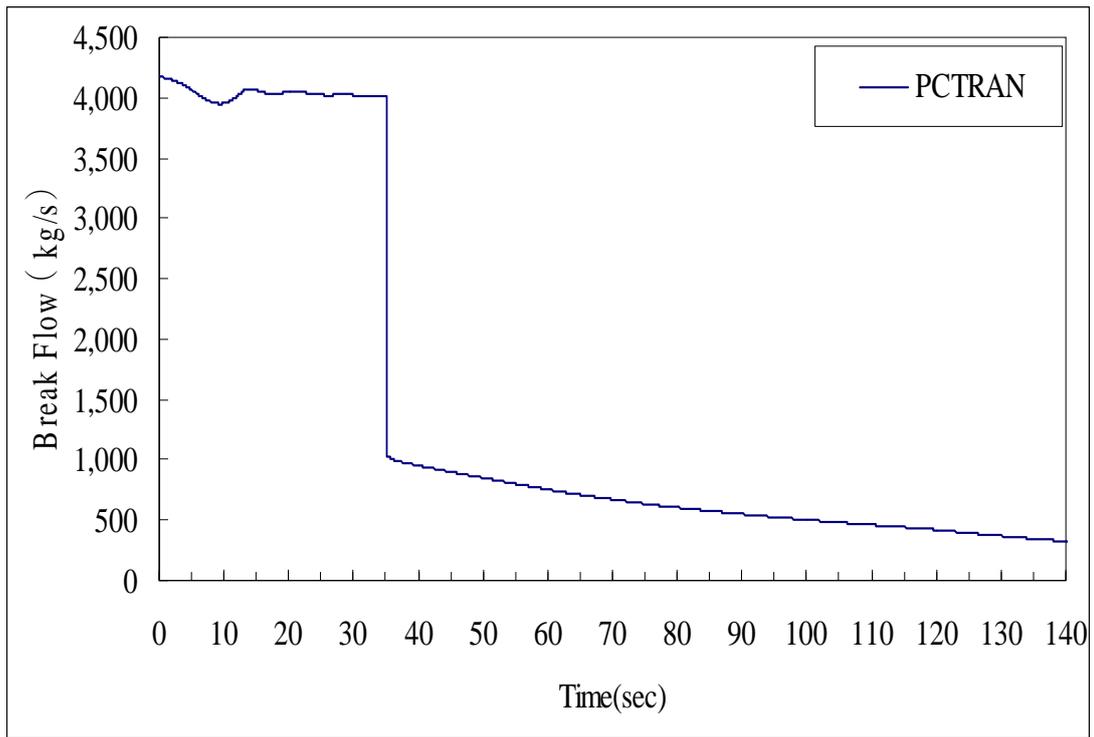


圖 4.12 預期暫態未急停之高壓灌水管路斷管事故_ARI_3

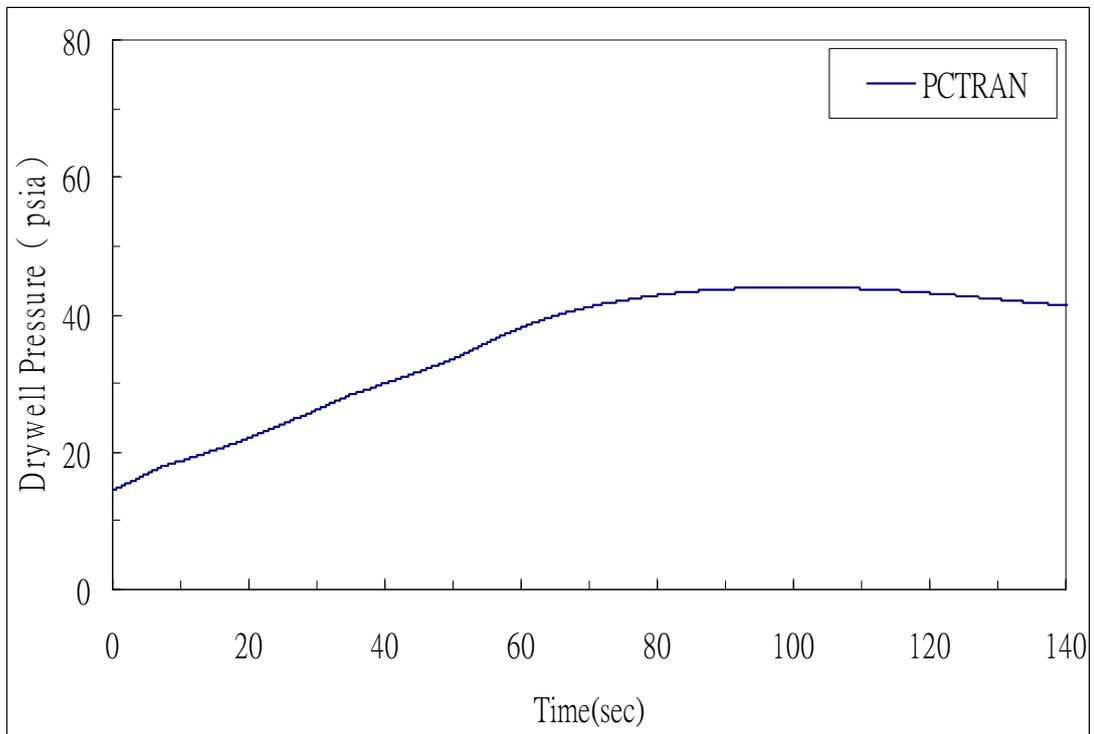


圖 4.13 預期暫態未急停之高壓灌水管路斷管事故_ARI_4

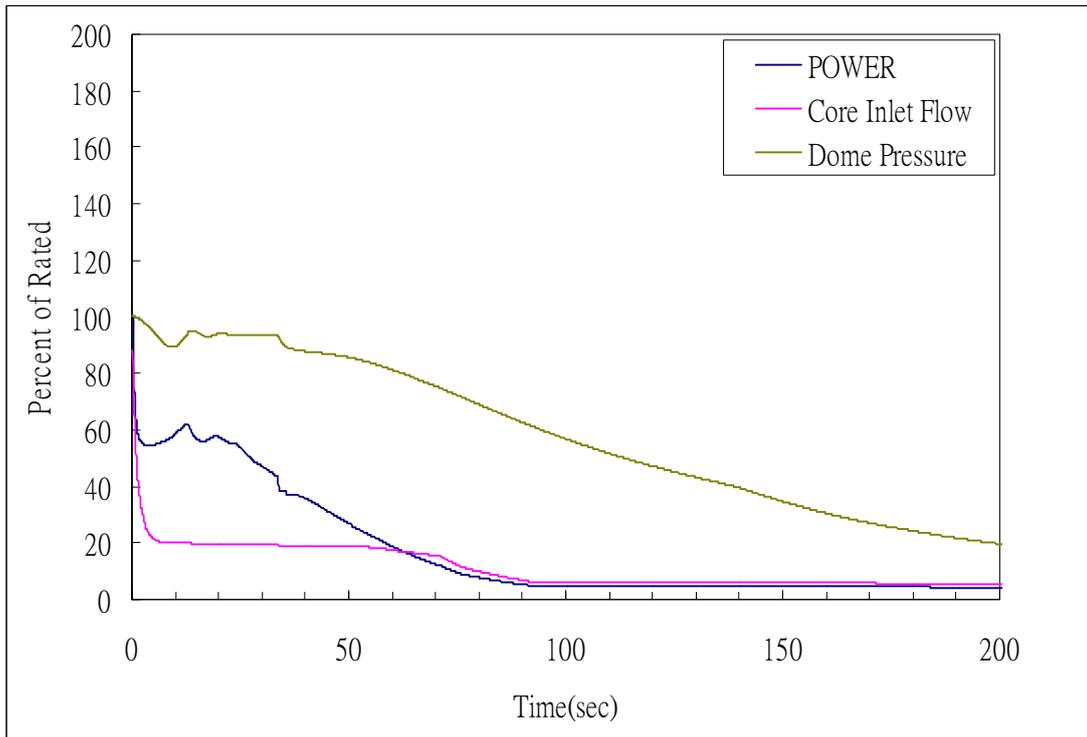


圖 4.14 預期暫態未急停之高壓灌水管路斷管事故_FMCRD_1

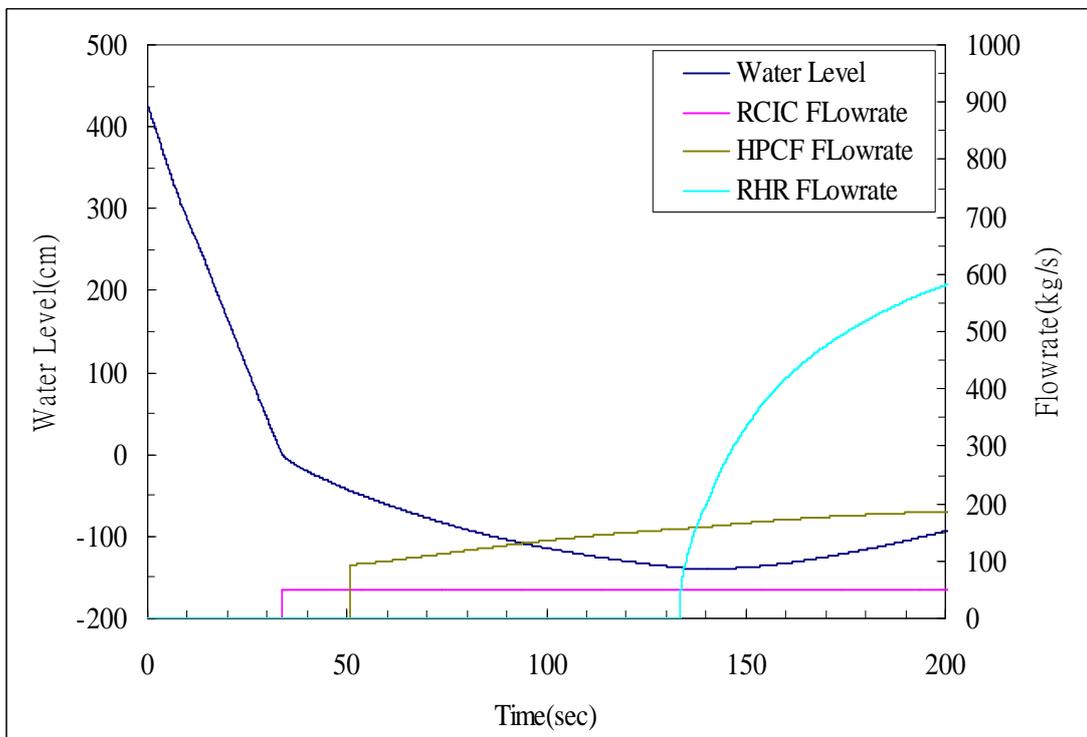


圖 4.15 預期暫態未急停之高壓灌水管路斷管事故_FMCRD_2

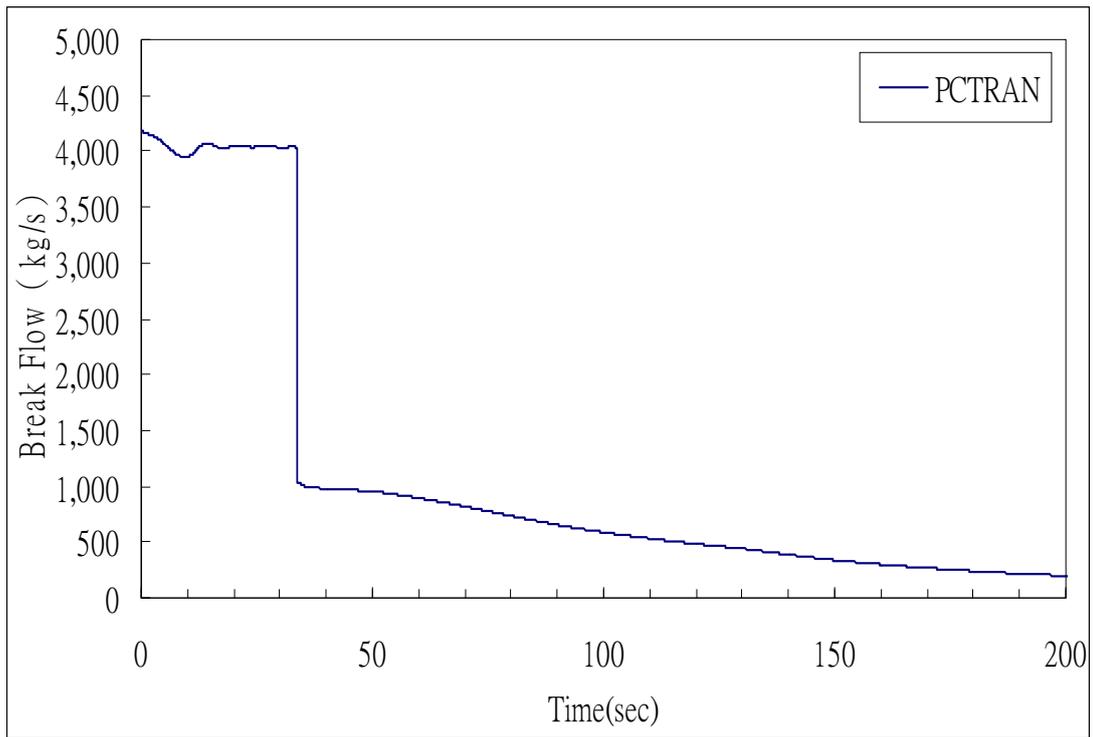


圖 4.16 預期暫態未急停之高壓灌水管路斷管事故_FMCRD_3

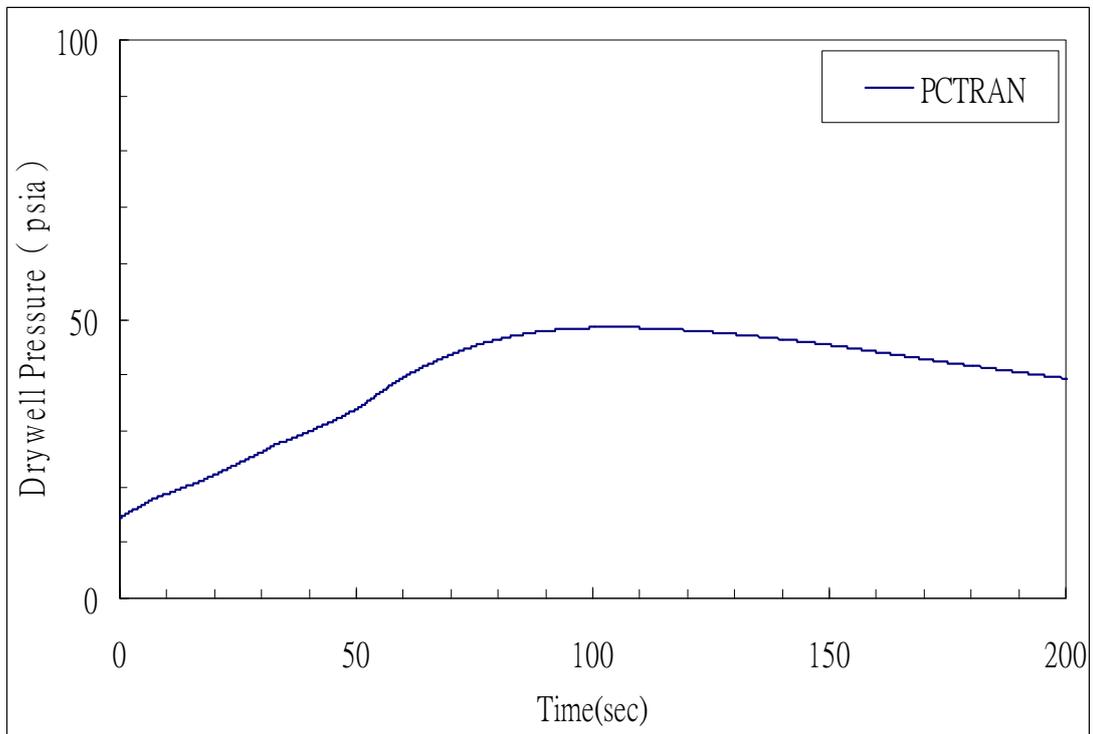


圖 4.17 預期暫態未急停之高壓灌水管路斷管事故_FMCRD_4

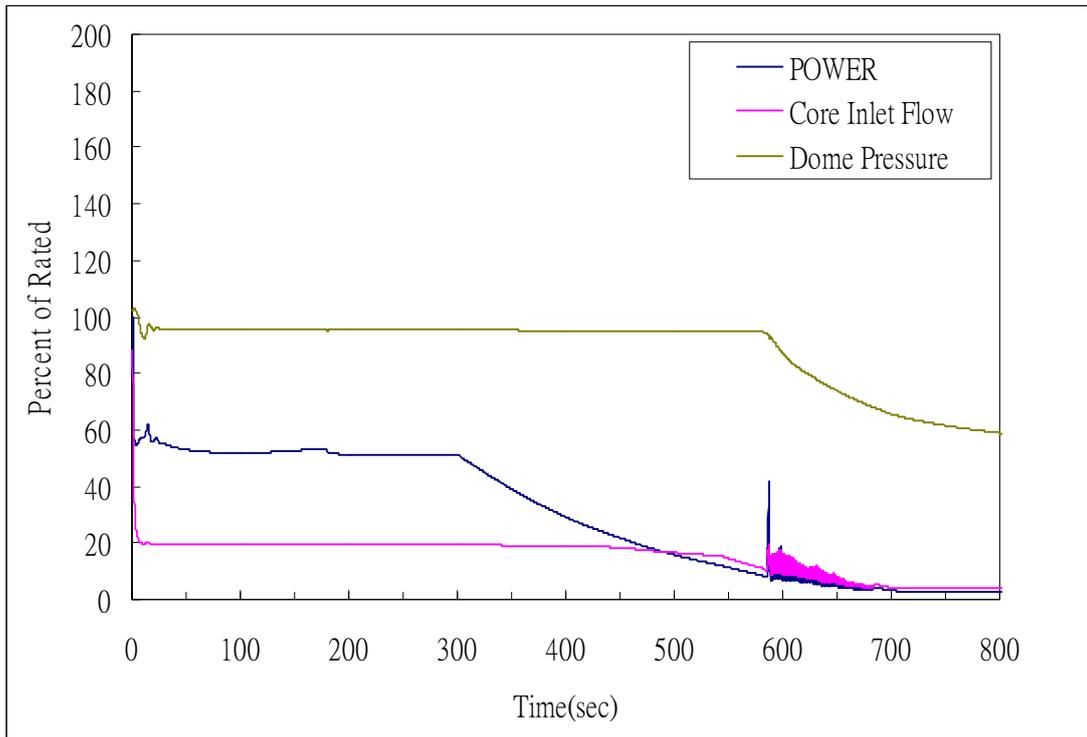


圖 4.18 預期暫態未急停之高壓灌水管路斷管事故_SLC_1

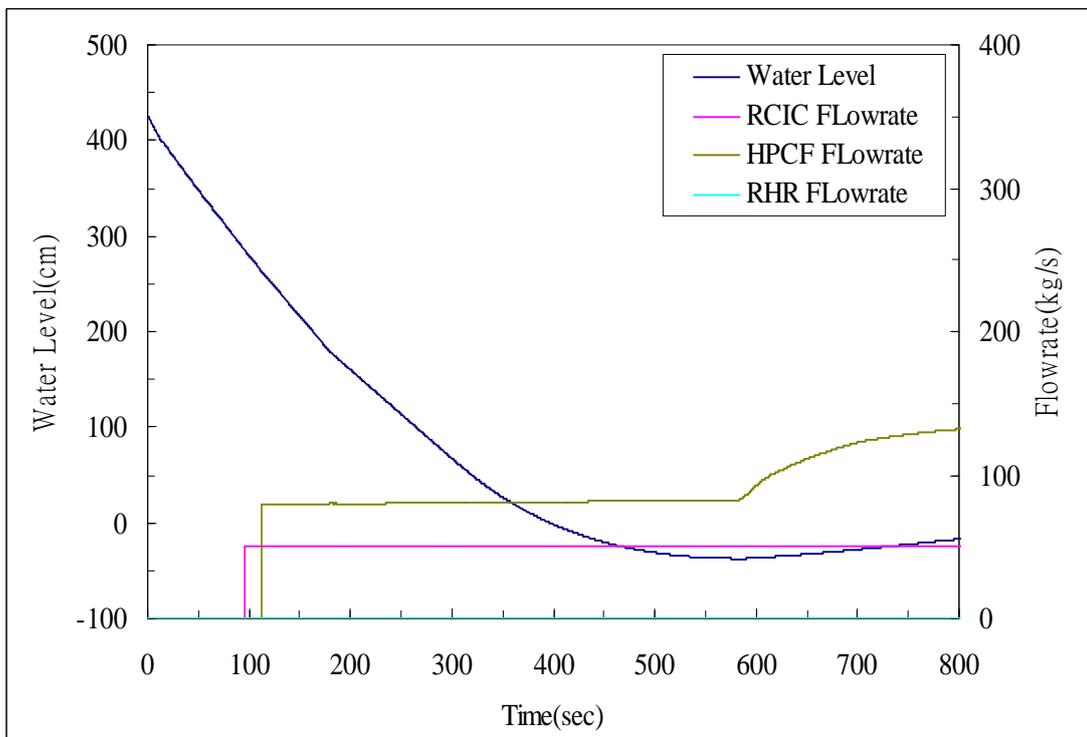


圖 4.19 預期暫態未急停之高壓灌水管路斷管事故_SLC_2

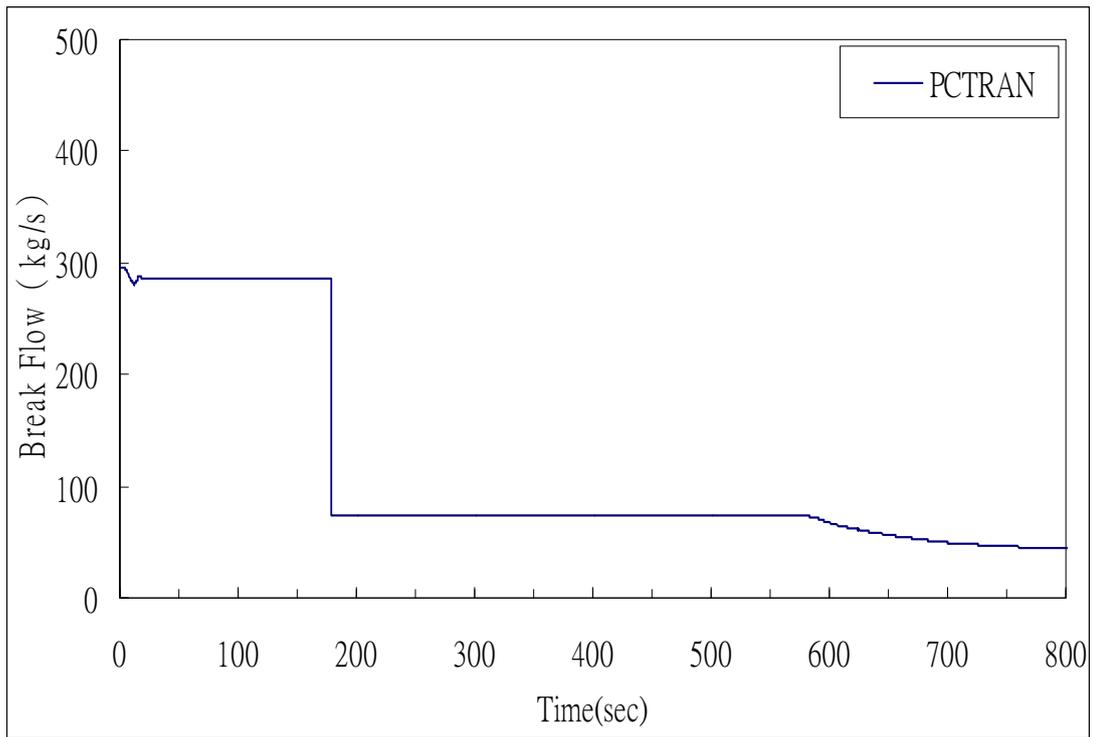


圖 4.20 預期暫態未急停之高壓灌水管路斷管事故_SLC_3

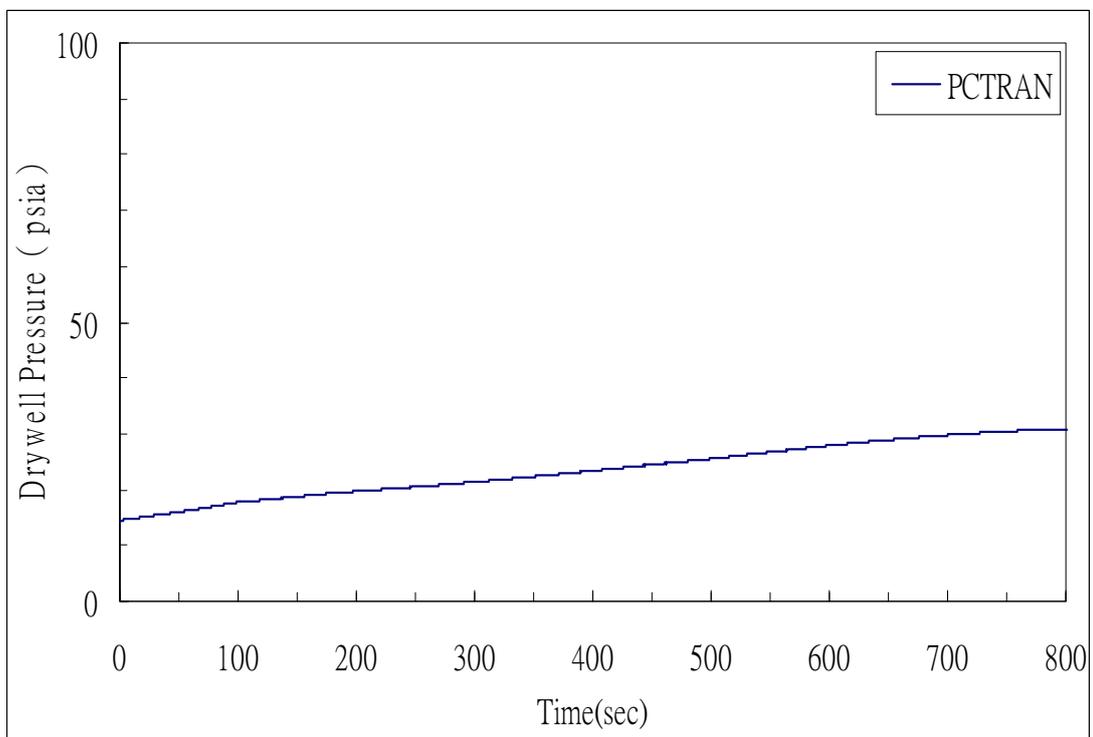


圖 4.21 預期暫態未急停之高壓灌水管路斷管事故_SLC_4

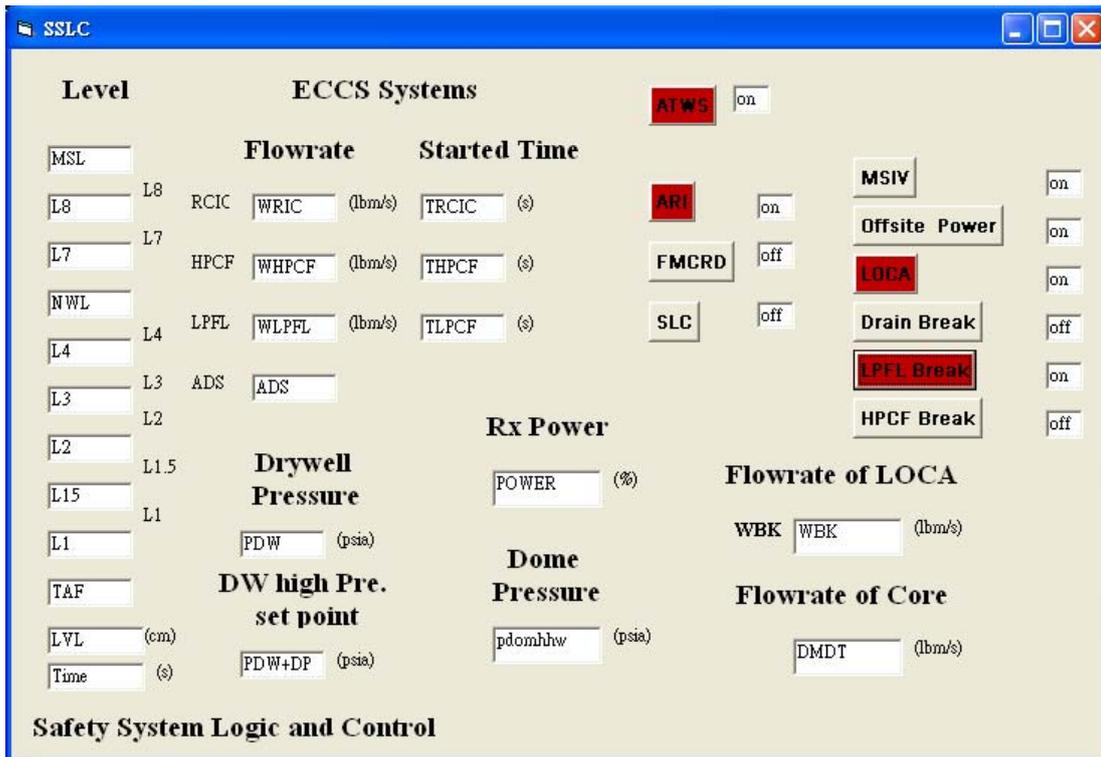


圖 4.22 預期暫態未急停之低壓灌水管路斷管事故_ SSLC 介面操作圖

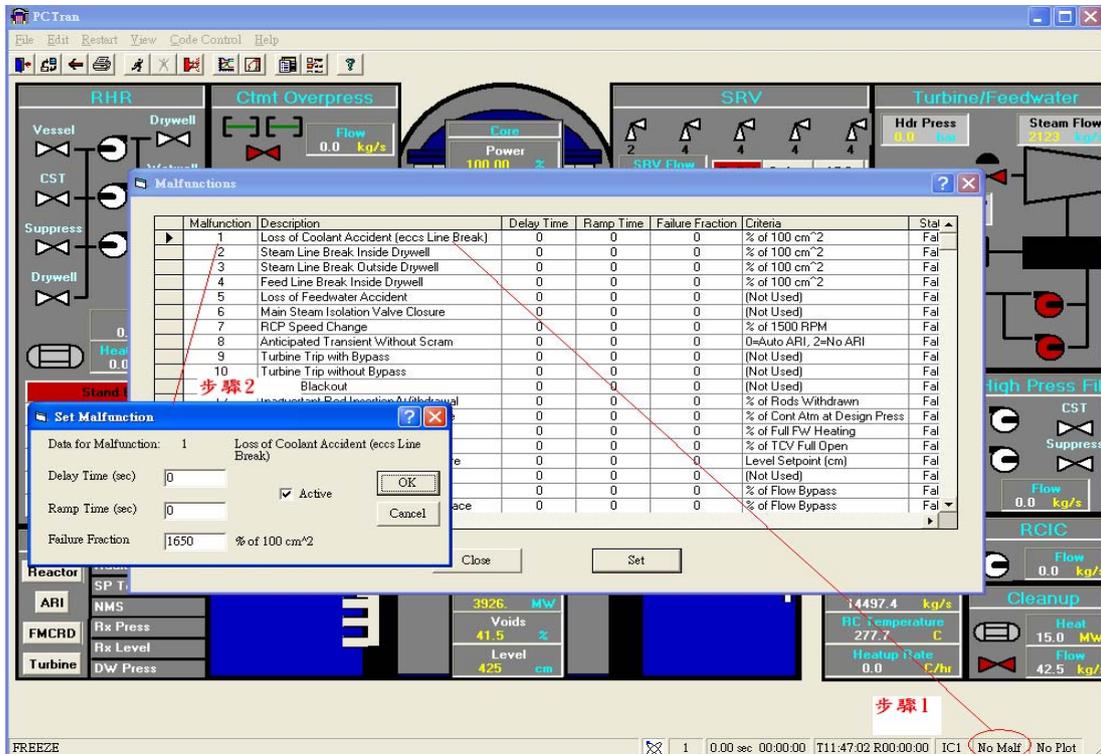


圖 4.23 預期暫態未急停之低壓灌水管路斷管事故_

PCTRAN-ABWR 內建介面操作圖

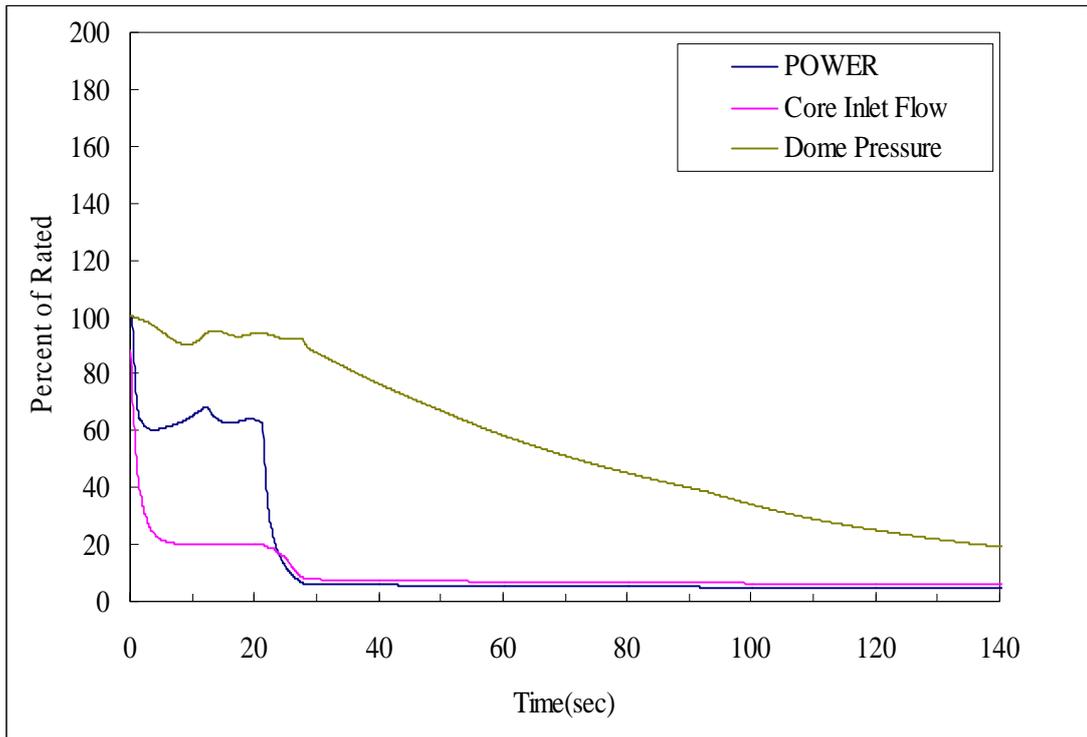


圖 4.24 預期暫態未急停之低壓灌水管路斷管事故_ARI_1

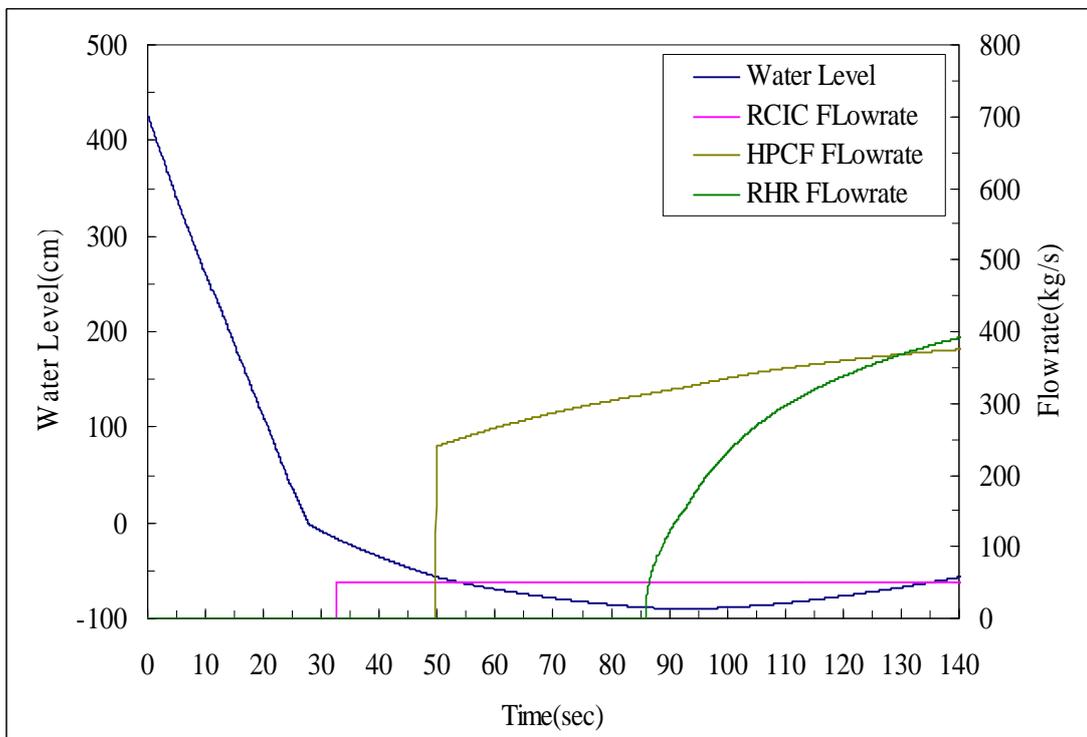


圖 4.25 預期暫態未急停之低壓灌水管路斷管事故_ARI_2

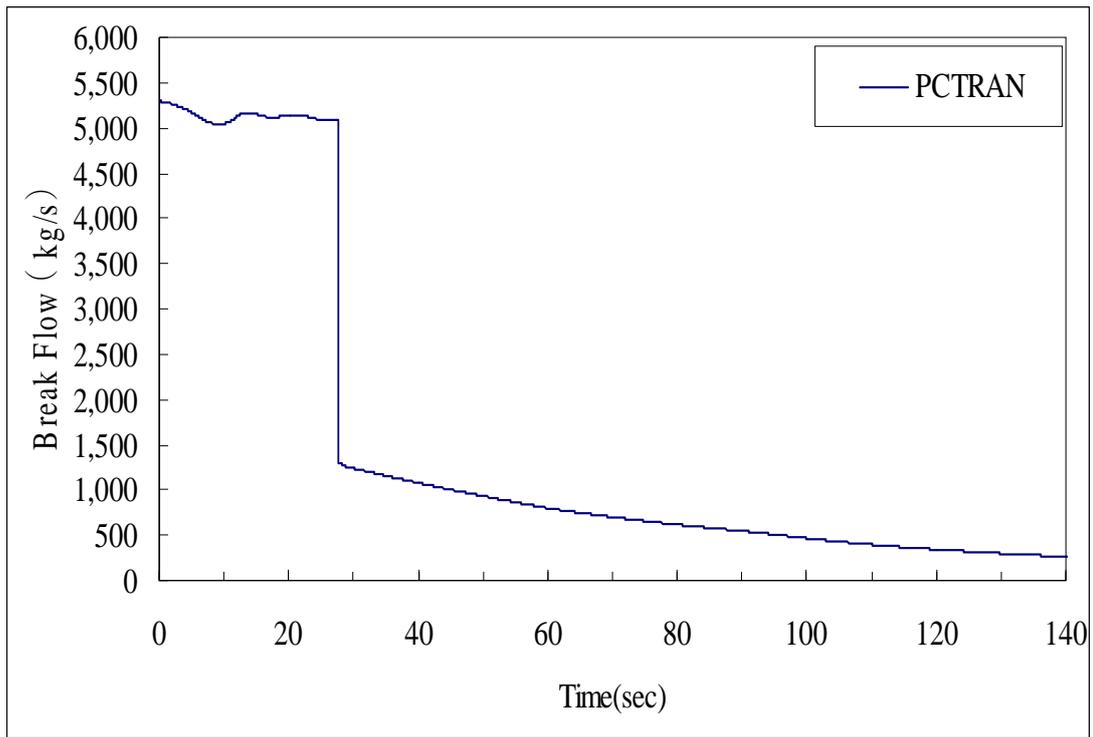


圖 4.26 預期暫態未急停之低壓灌水管路斷管事故_ARI_3

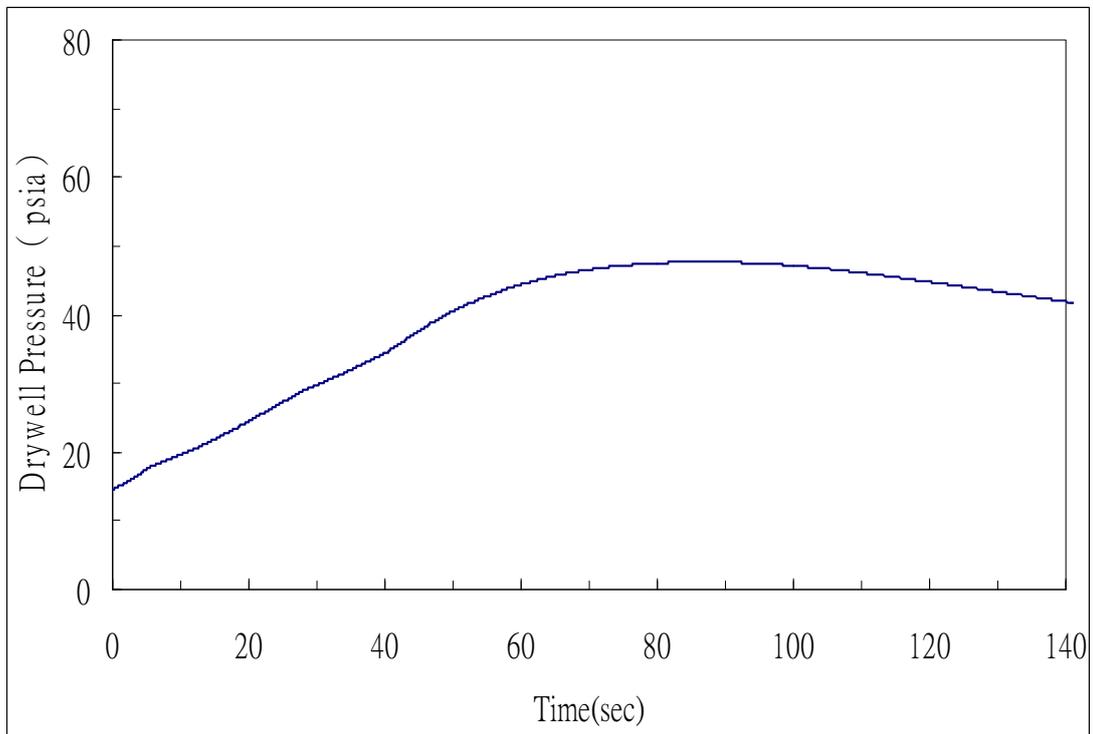


圖 4.27 預期暫態未急停之低壓灌水管路斷管事故_ARI_4

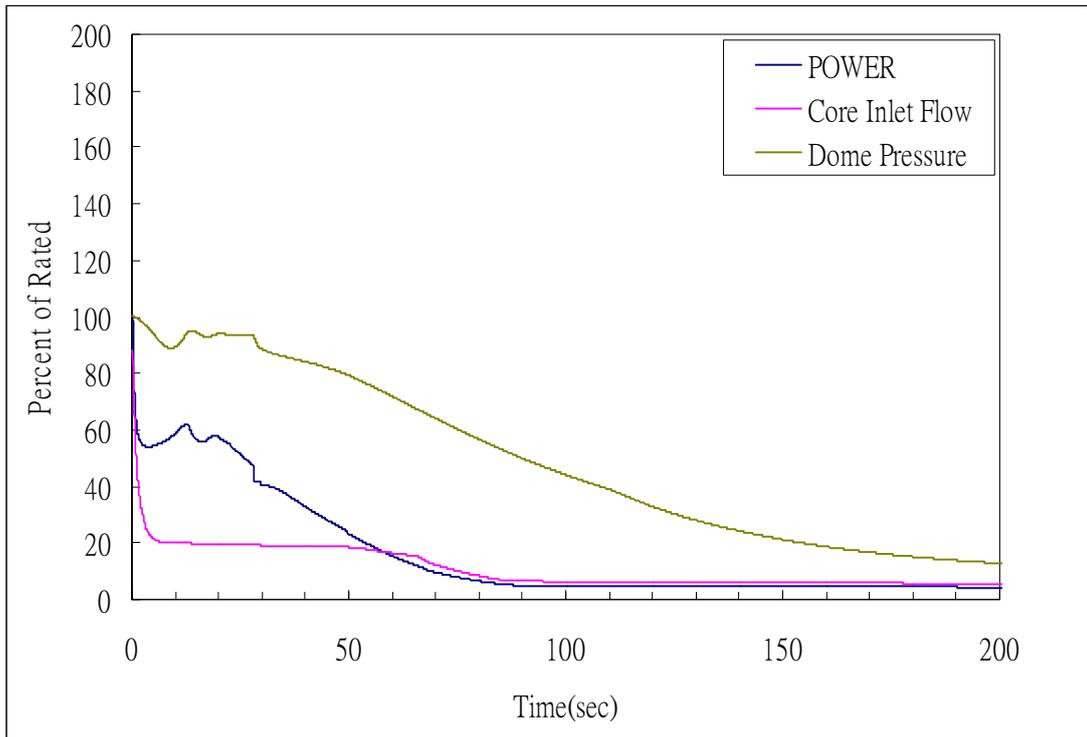


圖 4.28 預期暫態未急停之低壓灌水管路斷管事故_FMCRD_1

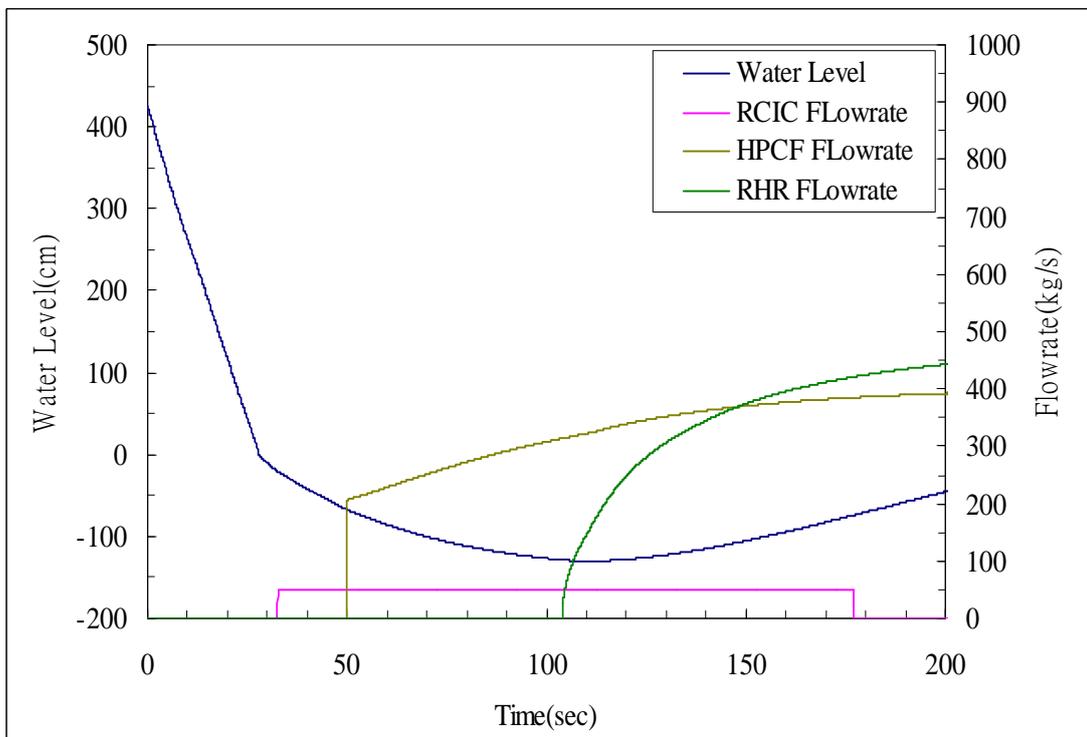


圖 4.29 預期暫態未急停之低壓灌水管路斷管事故_FMCRD_2

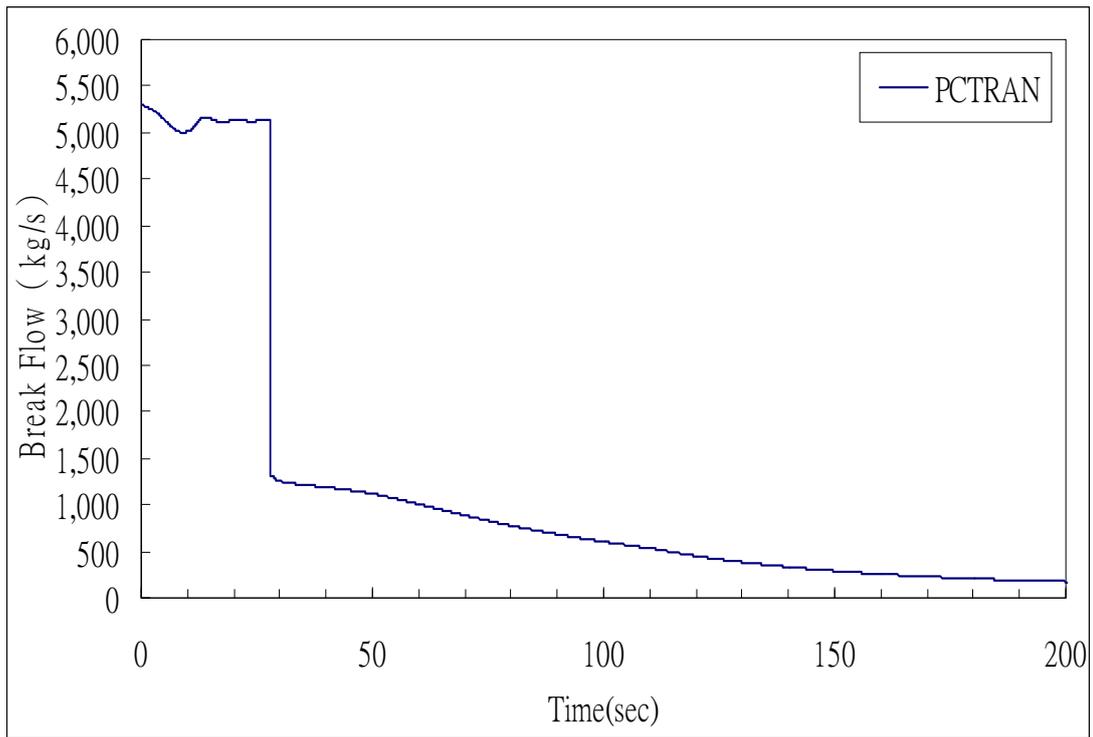


圖 4.30 預期暫態未急停之低壓灌水管路斷管事故_FMCRD_3

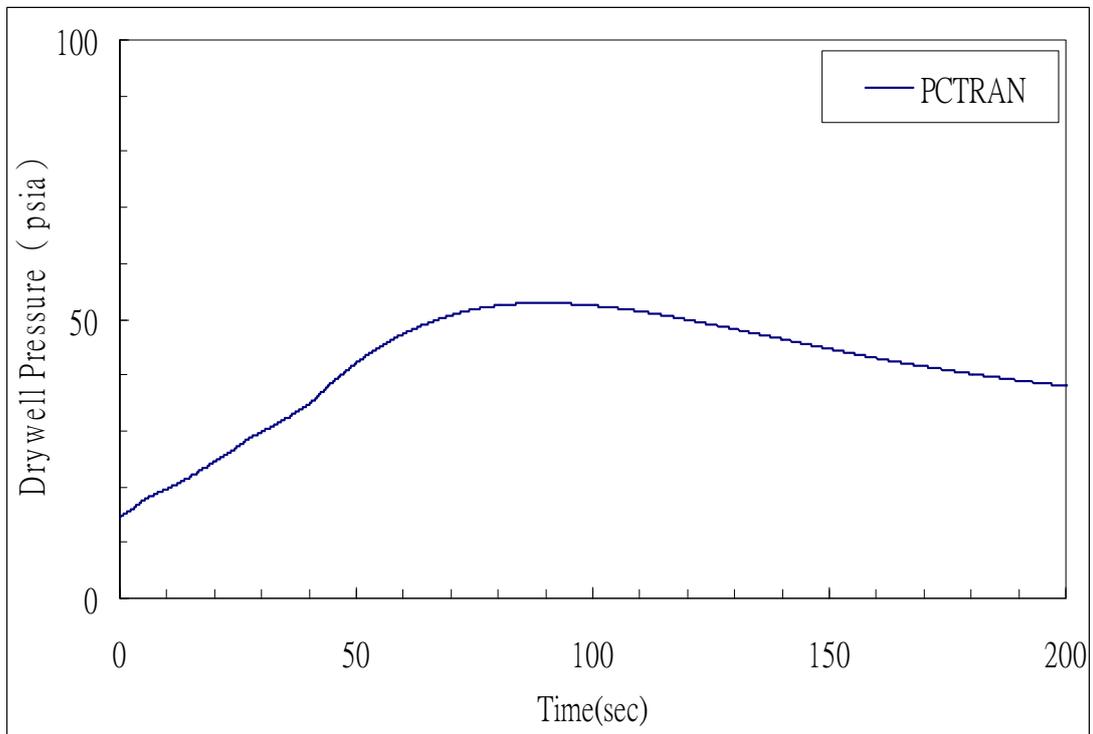


圖 4.31 預期暫態未急停之低壓灌水管路斷管事故_FMCRD_4

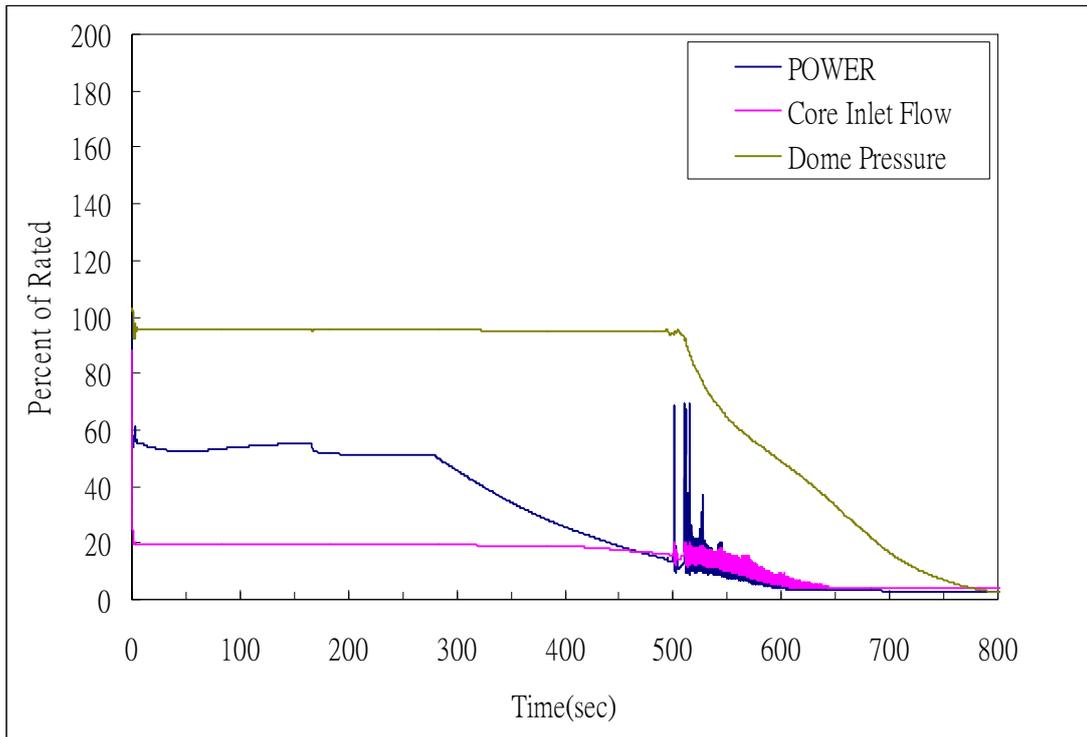


圖 4.32 預期暫態未急停之低壓灌水管路斷管事故_SLC_1

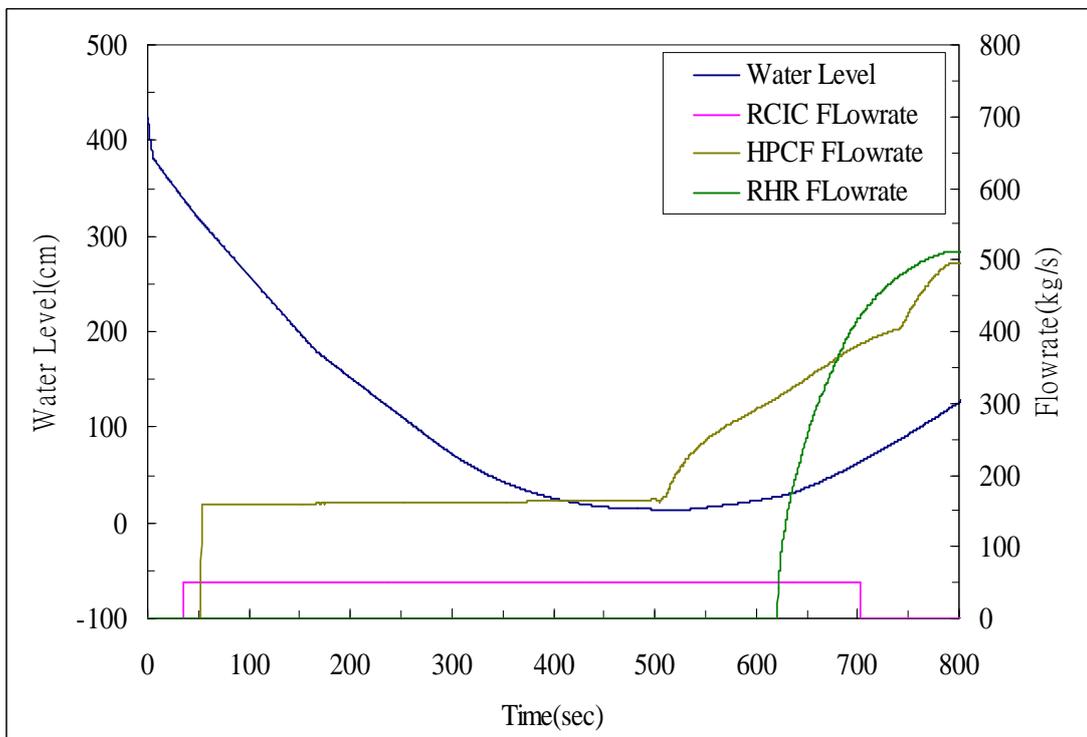


圖 4.33 預期暫態未急停之低壓灌水管路斷管事故_SLC_2

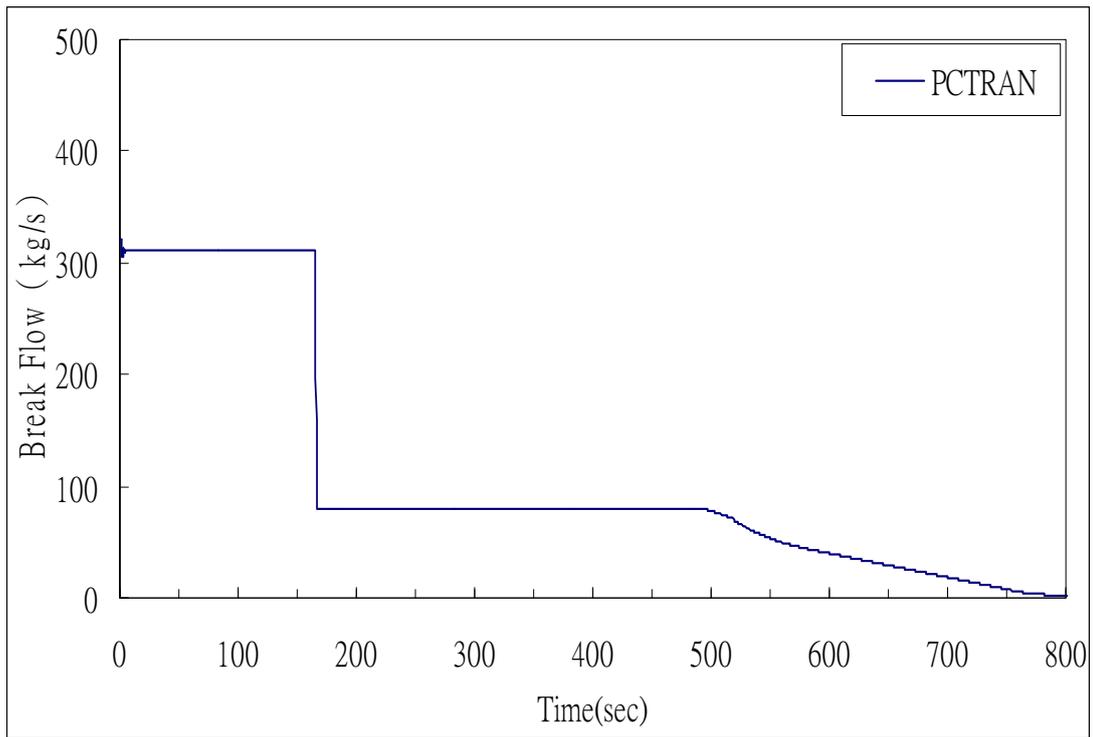


圖 4.34 預期暫態未急停之低壓灌水管路斷管事故_SLC_3

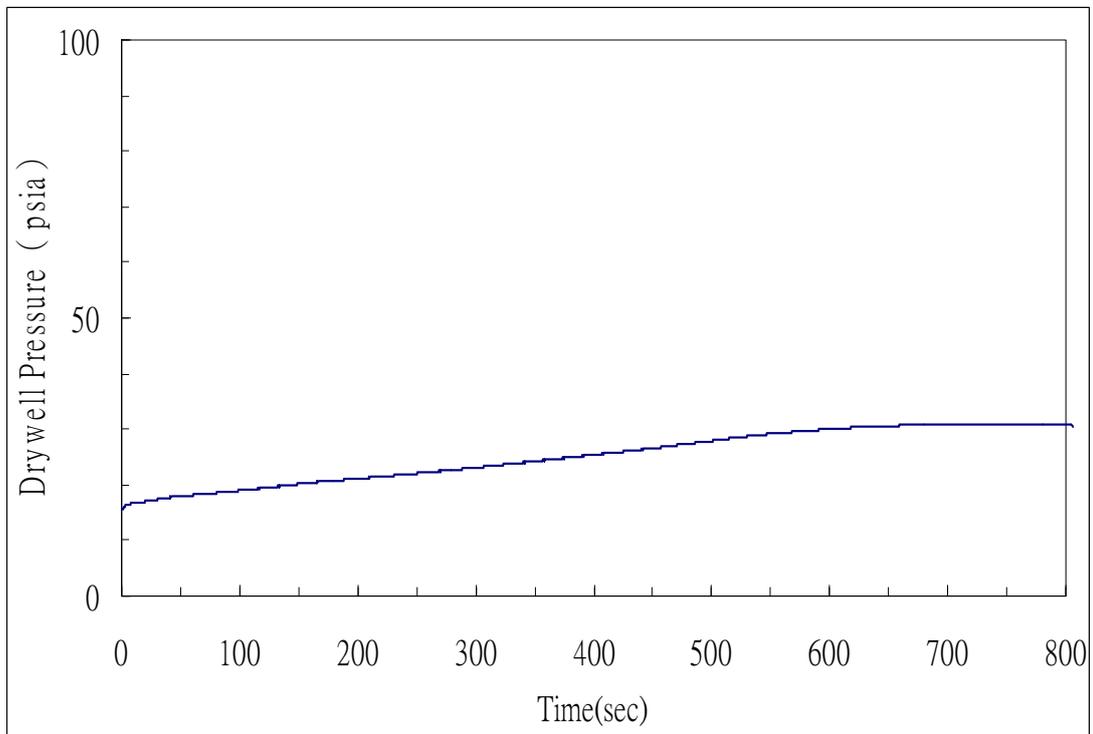


圖 4.35 預期暫態未急停之低壓灌水管路斷管事故_SLC_4

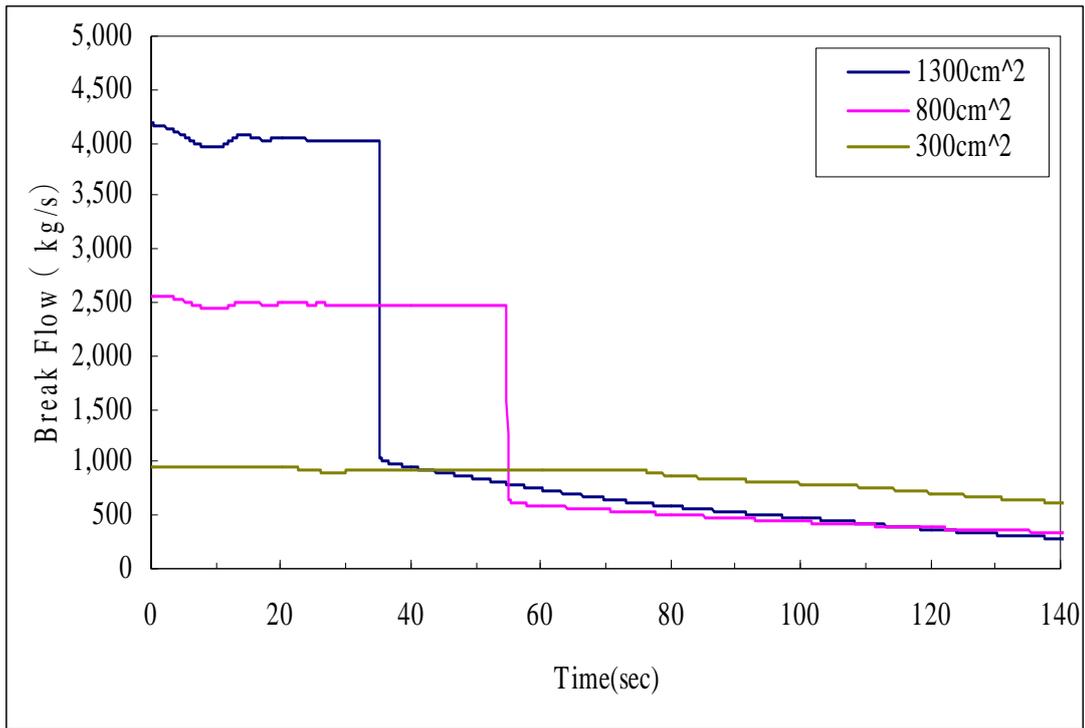


圖 4.36 高壓管路破管伴隨 ATWS 之不同破口大小比較_ARI on_1

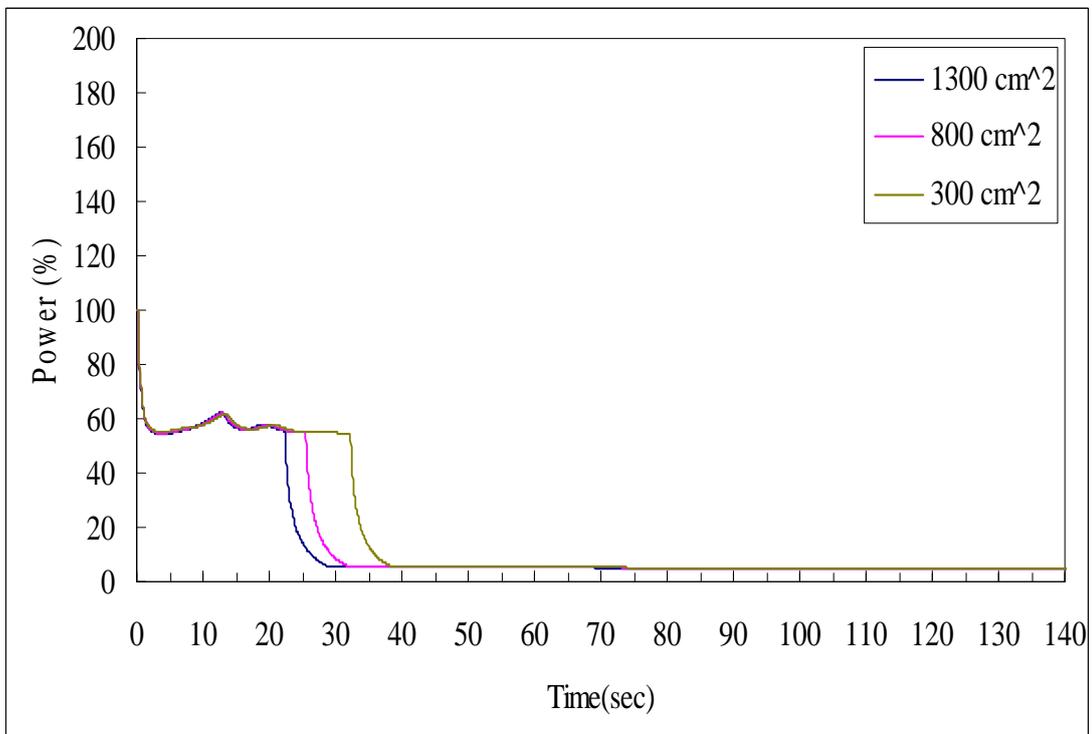


圖 4.37 高壓管路破管伴隨 ATWS 之不同破口大小比較_ARI on_2

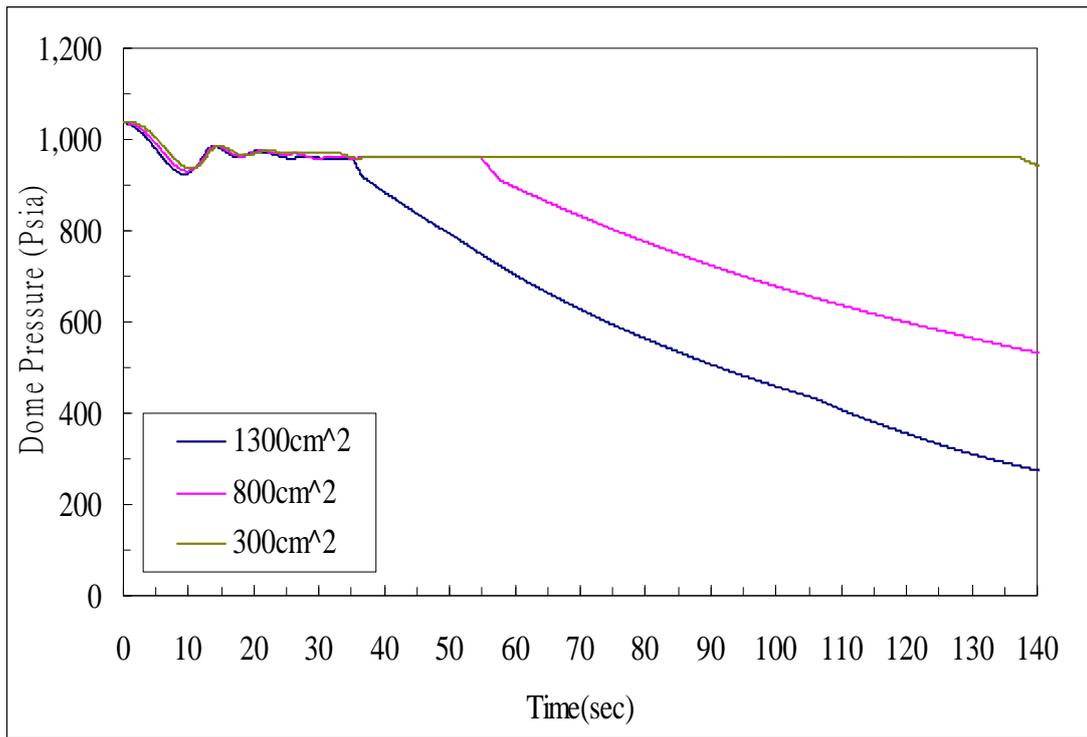


圖 4.38 高壓管路破管伴隨 ATWS 之不同破口大小比較_ARI on_3

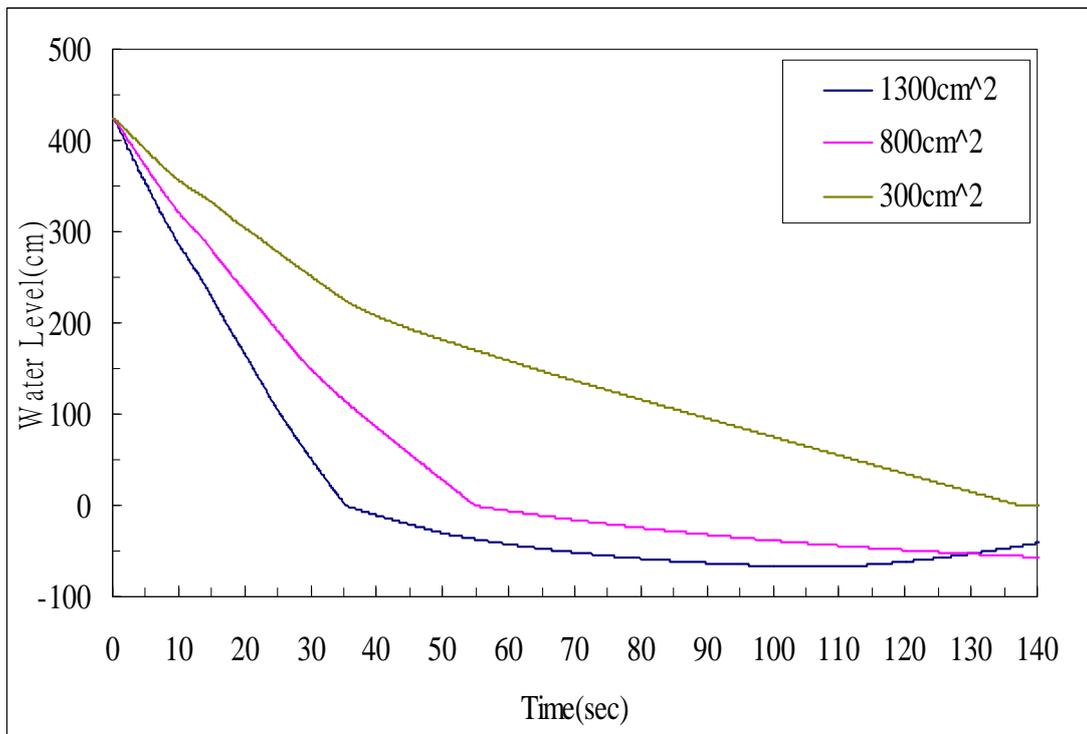


圖 4.39 高壓管路破管伴隨 ATWS 之不同破口大小比較_ARI on_4

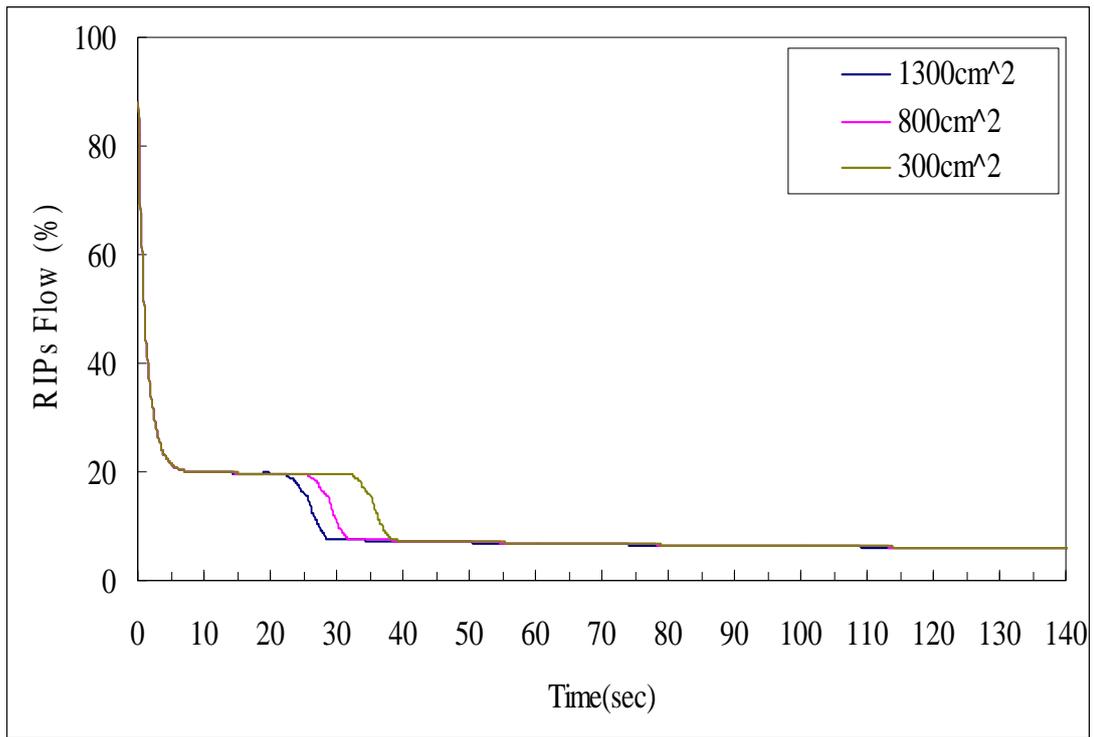


圖 4.40 高壓管路破管伴隨 ATWS 之不同破口大小比較_ARI on_5

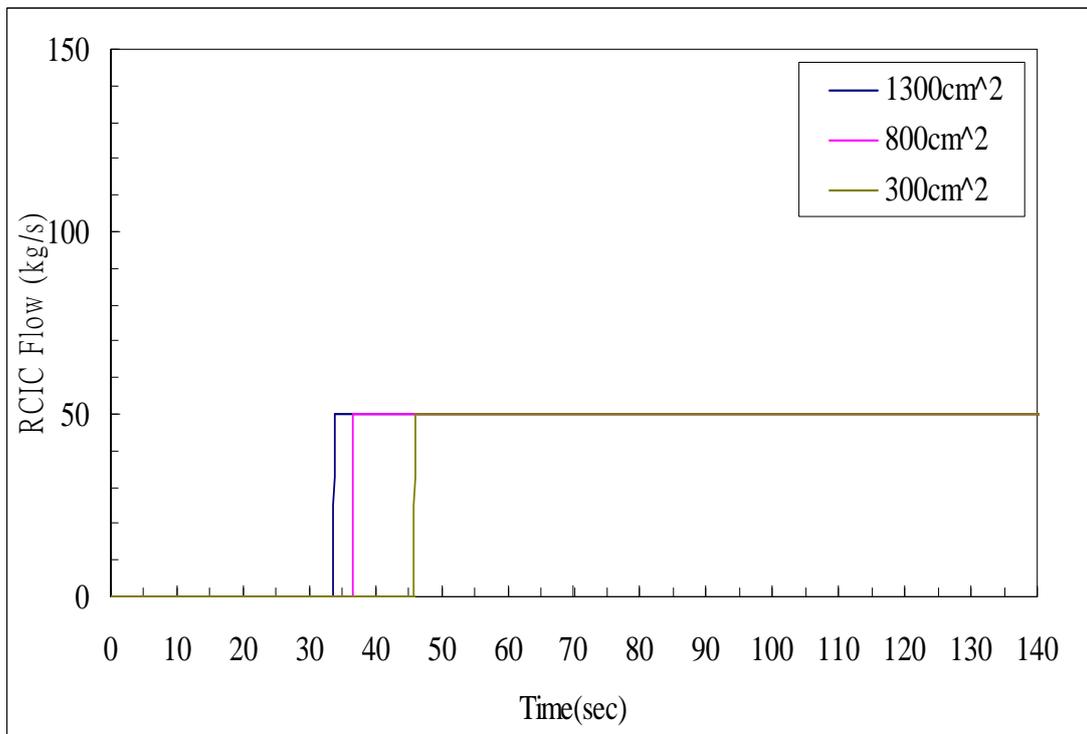


圖 4.41 高壓管路破管伴隨 ATWS 之不同破口大小比較_ARI on_6

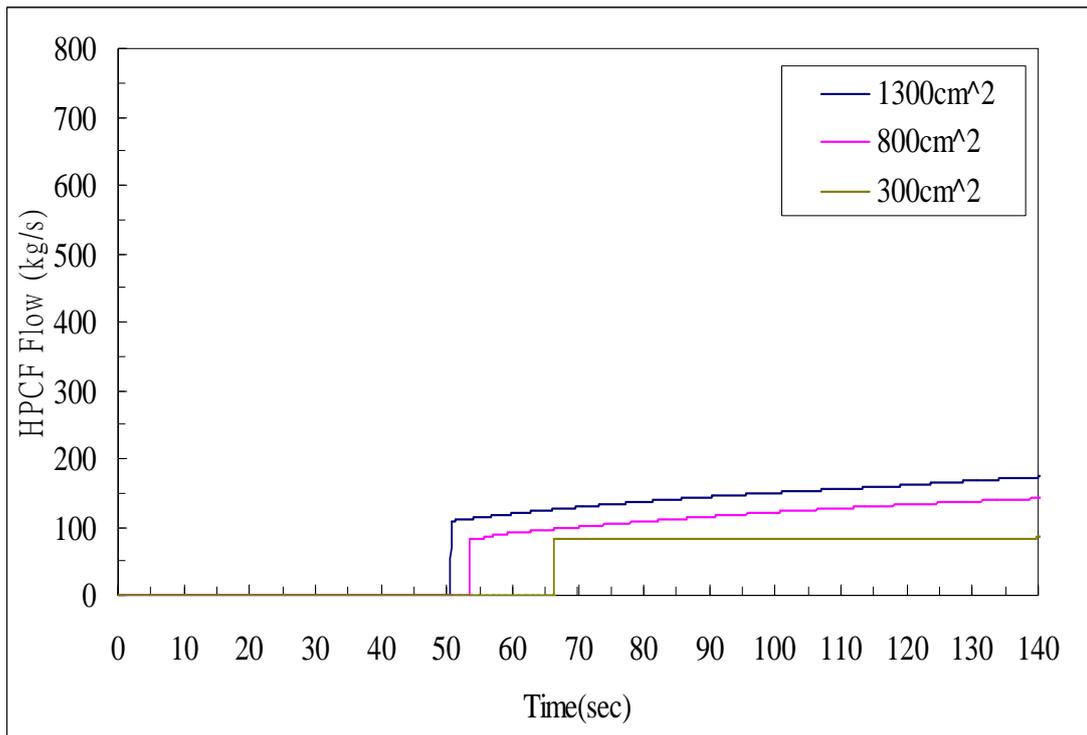


圖 4.42 高壓管路破管伴隨 ATWS 之不同破口大小比較_ARI on_7

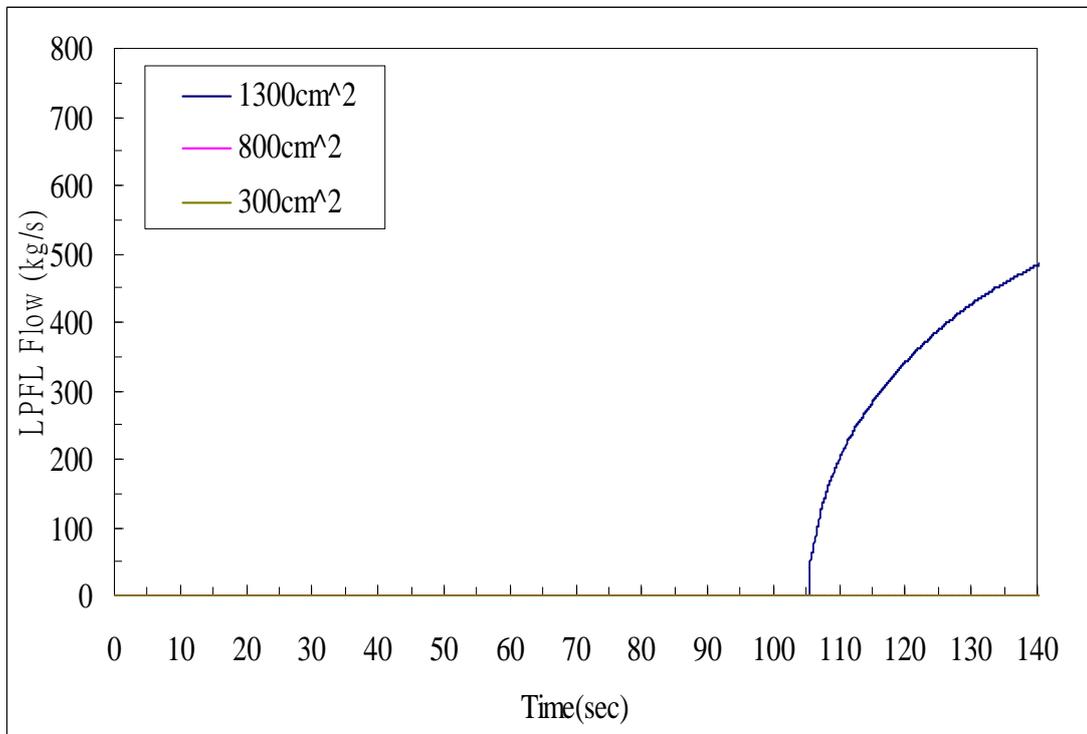


圖 4.43 高壓管路破管伴隨 ATWS 之不同破口大小比較_ARI on_8

參、主要發現與結論

本計畫主要工作為精進 PCTRAN-ABWR 模擬核電廠預期暫態未急停事故的能力與介面並新增 ECCS 破管事件相關邏輯，而後與核能研究所核能儀器組工作同仁一同在數位儀控系統多樣性與深度防禦研究設施上進行案例模擬以了解深度防禦的測試。

在先前精進 PCTRAN-ABWR 能力與介面的工作中，我們根據 FSAR 第十五章第 E 節預期暫態未急停的邏輯與設定，重新再對 PCTRAN-ABWR 作細部的調整，包括了控制棒緩和設備與備用硼液系統機構的延遲時間與動作時間，然後依照 FSAR 中所提及的事故做模擬，確認 PCTRAN-ABWR 有足夠能力模擬預期暫態未急停事件。

首先，我們經由在數位儀控系統多樣性與深度防禦研究設施上模擬電廠事故來驗證電廠發生信號錯誤時，仍能透過電廠的多樣性與深度防禦性質使電廠維持在安全的狀態，經過與所內同仁的合作，使 PCTRAN-ABWR 已能順利在設備上模擬 ECCS 破口相關事故之模擬分析，接著我們透過不同破口大小的案例來深入了解電廠各個防禦系統的特性。

此研究中，PCTRAN-ABWR 經過擴充以及精進後，皆已經能模擬出 FSAR 中各個事件的暫態圖，且各個事件相關的動作也都能成功的模擬，藉由本計劃的執行使得數位儀控系統多樣性與深度防禦研究設施能有更加的能力去執行案例的模擬與分析，也幫助計畫參與人員更加了解電廠的深度防禦特性與電廠深度防禦相關信號輸送運作邏輯。

肆、參考文獻

1. General Electric Company, “LUNGMEN UNITS Final Safety Analysis Report”, 2008。
2. Kai-Lan Chang, Chunkuan Shih, Hui-Wen Huang, Transient Analysis of Anticipated Transient Without Scram (ATWS) Events for Lungmen by Modified PCTRAN-ABWR Code, ICAPP'10, San Diego, CA, USA, June 13-17, 2010。
3. 台灣龍門核能發電廠，“進步型沸水式反應器(ABWR)訓練教材”，第六版。
4. 黃揮文，“運轉員與數位儀控系統介面互動表現對核能電廠安全影響之研究”，國立清華大學工程與系統科學系，2007。
5. 施純寬、邱茗秀、楊朝裕、鄭源傑、陳俊宇、楊偉義、黃揮文，「儀控軟體風險分析發展及應用」委辦計畫 94 年結案告, INER- A0854R, 民國 94 年 12 月。
6. 楊偉義，“龍門核能電廠預期暫態未急停之蒸汽管路系統事故 PCTRAN 模擬分析”，國立清華大學工程與系統科學系，2007。
7. 杜宛慈，“龍門核能電廠預期暫態未急停之飼水系統事故 PCTRAN 模擬分析”，國立清華大學工程與系統科學系，2007。
8. 施純寬、陳俊宇、楊偉義、杜宛慈、黃揮文，「數位儀控系統深度防禦能力模擬研究」委辦計畫 95 年結案報告，INER-A1225R, 民國 95 年 12 月。
9. 洪宏志，“龍門核能電廠 PCTRAN 飼水系統模式擴充及其驗證”，國立清華大學工程與系統科學系，2008。