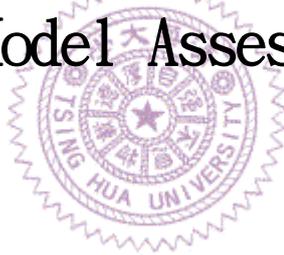


國立清華大學

碩士論文

核一廠RELAP5/MOD3.3輸入模式建立與模式驗證

ChinShan Nuclear Power Plant
REALP5/MOD3.3 Input Deck Development
and Model Assessment



系別：工程與系統科學系 組別：核工組

指導教授：李敏 Min Lee

學號姓名：9511506 游子堯 Tzu-Yao Yu

中華民國九十八年七月

摘要

本論文研究之目的，係以現有核一廠 RELAP5/MOD3 輸入模式為基礎，參考核一廠雷傳程式核一廠輸入檔，建構 RELAP5/MOD3.3 核一廠輸入模式；在建立完成輸入檔及完成穩態計算後，以核一廠二項功率測試數據驗證輸入模式與程式之精確性。二項功率測試暫態為 97% 功率單台再循環泵跳脫暫態及 100% 功率負載棄載暫態。

核一廠 RELAP5/MOD3.3 之輸入檔建立，除了將原本單一蒸汽管路更新至符合電廠現狀之四條蒸汽管路外，在控制系統方面，參考雷傳程式核一廠輸入檔，增修了飼水三元控制系統及壓力控制系統，並用電廠功率測試數據來驗證所建立控制系統之正確性。

二個暫態模擬結果顯示，壓力控制系統預測暫態模擬數據趨勢大致接近電廠測試結果；但爐心流量及飼水三元控制系統則仍有改善的空間，藉由暫態測試模擬找出控制系統問題所在，進一步調整輸入模式參數改善控制系統，同時減少誤差以增進暫態模擬分析的能力。



ABSTRACT

In this study, the RELAP5/MOD3.3 input deck of ChinShan Nuclear Power Plant is constructed based on the existing RELAP5/MOD3 input deck of the station. The single steamline model of the original deck is updated to four steamline-line model. The control logic of the input deck is revised based on the ChinShan input deck of the RETRAN code. The control systems revised include three-element feedwater control system and the pressure regulator system. The input deck is initialized successfully to a steady state condition and then used to simulate two power test transients of the plant e.g. 97% power one recirculation pump trip and 100% power load rejection.

The simulation results are compared with the data of power test. The results of comparison show that the pressure regulator control system can predict the trend similar to the power test data, but there is room for improvement for the three-element feedwater control system. The input deck constructed in this study does not model the systems of Balance of Plant (BOP), which is the major reason of the discrepancy between the simulation results of the code and the power test data.

致謝

在清華大學的七個年頭，從懵懂無知的大一新鮮人，大學畢業後又經過了入伍服役及擔任助理，到現在取得碩士學位，跌跌撞撞的過程之中除了感觸萬分外，更多的是對於我身邊種種人事物的感恩之情。

首先要感謝的是母校清華大學，母校除了給予我傳授知識外，更對於我思維邏輯及道德操守有碩大的啟發。我的指導教授李敏老師更是我由衷感謝的人，除了論文指導外，李老師對於教學的熱忱、指導學生的熱心、公眾事務上的努力以及他本人的人格操守無一不是值得我一生學習的對象，在此要對老師致上十二萬分的謝意。

另外還要感謝徐郁芬小姐、周鈴曜學長及研究室同學的協助，讓我在遭遇困難時有請教的對象，讓我能夠順利完成論文。

最後要特別感謝女友及家人，讓我能夠沒有後顧之憂的在順利完成碩士班的學業，有你們的支持我才能夠完成這些工作，在此衷心的感謝你們。



目錄

摘要.....	I
ABSTRACT	II
致謝.....	III
目錄.....	IV
表目錄.....	VII
圖目錄.....	VIII
第一章 緒論.....	1
1.1 前言：.....	1
1.2 研究範圍：.....	1
1.3 資料來源.....	2
1.4 論文架構：.....	2
第二章 RELAP5/MOD3.3 程式介紹	3
2.1 RELAP程式發展.....	3
2.2 RELAP5/MOD3.3 模式介紹.....	3
第三章 核一廠RELAP5/MOD3.3 輸入模式蒸汽管路及控制系統模式更新測試.....	6
3.1 簡介.....	6
3.2 蒸汽管路模擬介紹.....	7
3.3 蒸汽管路修改說明.....	8
3.4 壓力調節系統(PRESSURE REGULATOR)	10
3.5 飼水控制系統(FEEDWATER CONTROL SYSTEM).....	11
3.6 再循環水控制系統.....	14
3.7 核一廠RELAP5/MOD3.3 控制系統測試.....	15

3.7.1 飼水控制系統測試.....	15
3.7.2 壓力控制系統測試.....	16
第四章 暫態分析結果與驗證.....	14
4.1 前言：.....	14
4.2 核一廠RELAP5/MOD3.3 穩態建立.....	14
4.3 97%功率單台再循環泵跳脫測試.....	16
4.3.1 測試說明.....	16
4.3.2 模擬測試說明.....	16
4.3.3 模擬測試結果.....	17
4.3.4 模擬測試結果分析.....	17
4.3.5 模擬測試比較及結論.....	19
4.4 100%功率發電機負載棄載測試.....	19
4.4.1 測試說明.....	19
4.4.2 模擬測試說明.....	20
4.4.3 模擬測試結果.....	21
4.4.4 模擬測試結果分析.....	21
4.4.5 模擬測試調整.....	24
4.4.6 模擬測試比較及結論.....	27
第五章 結論與建議.....	61
5.1 結論.....	61
參考文獻.....	62
附錄A：核一廠RELAP5/MOD3.3 水位計算方法.....	63
A.1 前言.....	63
A.2 RELAP5/MOD3.3 壓力差計算水位方法.....	63
A.2.1 RELAP5/MOD3.3 窄幅水位計算過程.....	63

A.2.2 RELAP5/MOD3.3 寬幅水位計算過程.....	64
A.2.3 結論	66
附錄B：核一廠RELAP5/MOD3.3 分離器(SEPARATOR)模式分析討論	71
B.1 前言.....	71
B.2 RELAP5/MOD3.3 分離器模式驗證.....	71
B.2.1 RELAP5/MOD3.3 分離器模式.....	71
B.2.2 RELAP5/MOD3.3 分離器驗證結果.....	72
B.2.3 結論.....	72



表目錄

表 3-1 核一廠RELAP5 輸入模式安全釋壓閥設定值.....	18
表 5.1 97%功率單台再循環泵跳脫初始狀態比較.....	29
表 5.2 97%功率單台再循環泵跳脫時序(SCENARIO)比較.....	29
表 5.3 100%全功率負載棄載初始狀態比較.....	30
表 5.4 100%全功率負載棄載時序(SCENARIO)比較.....	31
表B.1 汽水分離器質量及能量平衡比較表.....	73
表B.2 系統能量平衡比較表.....	73



圖目錄

圖 2.1 RELAP系列程式發展圖	5
圖 3.1 核一廠RELAP5 單條蒸汽管路輸入模式示意圖	19
圖 3.2 核一廠RELAP5 四條蒸汽管路輸入模式示意圖	1
圖 3.3 核一廠安全釋壓閥排列順序示意圖	1
圖 3.4 核一廠壓力調節器控制邏輯方塊圖	2
圖 3.5 核一廠汽機控制閥特性曲線-控制閥需求VS.控制閥桿位(參考核一廠雷傳程式).....	3
圖 3.6 核一廠汽機控制閥特性曲線-控制閥桿位VS.控制閥面積(參考核一廠雷傳程式).....	3
圖 3.7 核一廠汽機旁通閥特性曲線-旁通閥需求VS.旁通閥面積(參考核一廠雷傳程式).....	4
圖 3.8 核一廠水位設定圖	5
圖 3.9 核一廠水位定義圖	6
圖 3.10 核一廠偵測水位儀器設定點.....	7
圖 3.11 核一廠飼水三元控制控制邏輯方塊圖.....	8
圖 3.12 飼水控制輸出訊號線性轉換(參考核一廠雷傳程式).....	9
圖 3.13 飼水控制系統高水位測試圖.....	9
圖 3.14 飼水控制系統低水位測試圖.....	10
圖 3.15 飼水控制系統高蒸汽流量測試圖	10
圖 3.16 飼水控制系統低蒸汽流量測試圖	11
圖 3.17 蒸汽集管(STEAM HEADER)高壓力設定汽機控制閥測試圖	11
圖 3.18 蒸汽集管(STEAM HEADER)高壓力設定汽機旁通閥測試圖	12
圖 3.19 蒸汽集管(STEAM HEADER)低壓力設定汽機控制閥測試圖	12

圖 3.20 汽機控制閥功率改變測試圖	13
圖 3.21 蒸汽頂槽壓力功率改變測試圖	13
圖 4.1 100%全功率穩態功率時變圖.....	32
圖 4.2 100%全功率穩態爐心流量時變圖	32
圖 4.3 100%全功率穩態蒸汽頂槽壓力時變圖.....	33
圖 4.4 100%全功率穩態飼水流量時變圖	33
圖 4.5 100%全功率穩態蒸汽流量時變圖	34
圖 4.6 100%全功率穩態窄幅水位時變圖	34
圖 4.7 97%功率穩態功率時變圖	35
圖 4.8 97%功率穩態爐心流量時變圖.....	35
圖 4.9 97%功率穩態蒸汽頂槽壓力時變圖	36
圖 4.10 97%功率穩態飼水流量時變圖.....	36
圖 4.11 97%功率穩態蒸汽流量時變圖.....	37
圖 4.12 97%功率穩態窄幅水位時變圖.....	37
圖 4.13 97% ONE RECIRC.PUMP TRIP爐心功率比較時變圖(預設再循環泵跳脫轉速曲線).....	38
圖 4.14 97% ONE RECIRC.PUMP TRIP蒸汽頂槽壓力比較時變圖(預設再循環泵跳脫轉速曲線)	38
圖 4.15 97% ONE RECIRC.PUMP TRIP再循環泵跳脫轉速比較時變圖	39
圖 4.16 97% ONE RECIRC.PUMP TRIP爐心功率比較時變圖.....	39
圖 4.17 97% ONE RECIRC.PUMP TRIP蒸汽頂槽壓力比較時變圖	40
圖 4.18 97% ONE RECIRC.PUMP TRIP水位比較時變圖	40
圖 4.19 97% ONE RECIRC.PUMP TRIP爐心流量比較時變圖.....	41
圖 4.20 97% ONE RECIRC.PUMP TRIP爐心流量比較時變圖(LINEAR FIT).....	41

圖 4.21 97% ONE RECIRC.PUMP TRIP 飼水與蒸汽流量比較時變圖.....	42
圖 4.22 97% ONE RECIRC.PUMP TRIP 汽機控制閥閥開度比較時變圖	42
圖 4.23 97% ONE RECIRC.PUMP TRIP 爐心功率比較時變圖.....	43
圖 4.24 97% ONE RECIRC.PUMP TRIP 蒸汽頂槽壓力比較時變圖	43
圖 4.25 97% ONE RECIRC.PUMP TRIP 蒸汽頂槽壓力比較時變圖(與舊有輸入模式比較).....	44
圖 4.26 97% ONE RECIRC.PUMP TRIP 爐心流量比較時變圖(LINEAR FIT)(與舊有輸入模式比較).....	44
圖 4.27 汽機控制閥(TCV)閥關閉曲線(參考核一廠雷傳程式).....	45
圖 4.28 汽機旁通閥(BPV)閥開啟及關閉曲線(參考核一廠雷傳程式).....	45
圖 4.29 100%LOAD REJECTION 爐心功率時變圖.....	46
圖 4.30 100%LOAD REJECTION 爐心流量時變圖.....	46
圖 4.31 100%LOAD REJECTION 蒸汽頂槽壓力時變圖	47
圖 4.32 100%LOAD REJECTION 蒸汽流量時變圖.....	47
圖 4.33 100%LOAD REJECTION 降流區水位時變圖	48
圖 4.34 100%LOAD REJECTION 飼水流量時變圖.....	48
圖 4.35 100%LOAD REJECTION 安全釋壓閥閥門開度時變圖	49
圖 4.36 100%LOAD REJECTION 汽機旁通閥閥門開度時變圖	49
圖 4.37 100%LOAD REJECTION 暫態流量比較時變圖	50
圖 4.38 100%LOAD REJECTION 爐心流量比較時變圖(假設A串再循環泵跳脫)	50
圖 4.39 100%LOAD REJECTION 蒸汽頂槽壓力比較時變圖(假設A串再循環泵跳脫).....	51
圖 4.40 100%LOAD REJECTION 蒸汽流量比較時變圖(假設A串再循環泵跳脫)	51
圖 4.41 100%LOAD REJECTION 飼水流量比較時變圖(假設A串再循環泵跳脫)	52
圖 4.42 100%LOAD REJECTION 降流區水位比較時變圖(假設A串再循環泵跳脫).....	52

圖 4.43 100%LOAD REJECTION安全釋壓閥閥門開度比較時變圖(假設A串再循環泵跳脫).....	53
圖 4.44 100%LOAD REJECTION汽機旁通閥閥門開度比較時變圖(假設A串再循環泵跳脫).....	53
圖 4.45 100%LOAD REJECTION降流區(VOLUME268)密度比較時變圖(假設A串再循環泵跳脫).....	54
圖 4.46 100%LOAD REJECTION汽機旁通閥開度比較時變圖(調整汽機旁通閥開度).....	54
圖 4.47 100%LOAD REJECTION蒸汽頂槽壓力比較時變圖(調整汽機旁通閥開度).....	55
圖 4.48 100%LOAD REJECTION安全釋壓閥開度比較時變圖(調整汽機旁通閥開度).....	55
圖 4.49 100%LOAD REJECTION蒸氣流量比較時變圖(調整汽機旁通閥開度).....	56
圖 4.50 100%LOAD REJECTION飼水流量比較時變圖(調整汽機旁通閥開度).....	56
圖 4.51 100%LOAD REJECTION降流區水位比較時變圖(調整汽機旁通閥開度).....	57
圖 4.52 100%LOAD REJECTION飼水流量比較時變圖(調整飼水控制系統水位信號).....	57
圖 4.53 100%LOAD REJECTION降流區水位比較時變圖(調整飼水控制系統水位信號).....	58
圖 4.54 100%LOAD REJECTION飼水流量比較時變圖(調整飼水控制系統水位信號及延遲時間).....	58
圖 4.55 100%LOAD REJECTION降流區水位比較時變圖(調整飼水控制系統水位信號及延遲時間).....	59
圖 4.56 100%LOAD REJECTION飼水流量比較時變圖(與核一廠雷傳程式比較).....	59
圖 4.57 100%LOAD REJECTION蒸汽頂槽壓力比較時變圖(與核一廠雷傳程式比較).....	60
圖 4.58 100%LOAD REJECTION水位比較時變圖(與核一廠雷傳程式比較).....	60
圖A.1 窄幅水位計算示意圖.....	67
圖A.2 窄幅水位計算方法比較示意圖.....	68
圖A.3 寬幅水位計算示意圖.....	69
圖A.2 寬幅水位計算方法比較示意圖.....	70
圖B.1 反應爐汽水分離器(SEPARATOR)模擬示意圖.....	74

第一章 緒論

1.1 前言：

美國三哩島核能電廠發生事故後，美國核管會 (U.S Nuclear Regulatory Commission, NRC) 有鑑於核能電廠分析之準確預測的重要性，因此要求相關重要研究機構發展一能快速預測各重要暫態及事故變化之熱水流系統分析程式；可用於事故發生時，協助電廠運轉人員瞭解及緩和事故狀況，以期進一步增進核能電廠之運轉安全。

我國的核能一廠位於北台灣台北縣石門鄉，屬美國奇異公司 (General Electric, GE) BWR/4 型，發電機組則為西屋公司 (Westing House, WH) 所出品之 "氫內冷式型" (Hydrogen Inner Cooling) 機組，而包封容器 (Containment) 則為馬克一型 (Mark I)，為台灣電力公司所擁有之第一座核能電廠，其廠址上共有同型機組兩座。

為了使電廠分析器 (Plant Analyzer) 能準確的預估及描述核一廠運轉期間可能發生之暫態或事故，因此必須先完整評估核一廠電廠分析器的準確性，因此將以核一廠功率測試數據與電廠分析器結果比較驗證，以評估電廠分析器是否有足夠的能力預估實際電廠的狀況。本研究工作即採用美國核管會斥資，愛德華國家工程實驗室 (INEL) 主持發展之最佳理論化，最精確可靠的核電廠熱水流分析程式 RELAP (Reactor Excursion and Leak Analysis Program, RELAP) 作為分析之主要工具。

1.2 研究範圍：

本研究工作重點為利用 RELAP5/MOD3.3 Patch03 程式，更新並驗證核一廠之輸入檔案，並以功率測試及暫態數據驗證其正確性。研究成果如下：

1. 以 RELAP5/MOD3.3 Patch03 程式為基礎分析工具，更新核一廠輸入資料。
2. 建立核一廠 RELAP5/MOD3.3 程式更新後之穩態 (Steady State) 初始狀況。
3. 增加並改進核一廠之控制系統，並以相關暫態測試其正確性。

1.3 資料來源

本研究依據的資料，係參考張世勳學長於民國 86 年 11 月台電與清華大學合作研究計畫報告【5】中所建立的暫態輸入檔為基礎，並參考由核能研究所提供之 RETRAN 程式【8】核一廠輸入檔，而建立穩態輸入檔。另外功率測試及暫態分析則參考核能研究所「核一廠雷傳模式起爐測試報告」【6】。

1.4 論文架構：

本論文共分為五章，第一章為緒論，介紹研究範圍、資料來源及論文架構。第二章介紹 RELAP5/MOD3.3 程式源起，程式整體架構及其使用能力。第三章則介紹更新蒸汽管路的過程、壓力調節器、再循環水控制系統、水位計算及飼水控制系統，並對控制系統做出反應測試。第四章介紹核一廠 RELAP5/MOD3.3 穩態輸入資料並討論利用 RELAP5/MOD3.3 模擬暫態之結果與功率測數據比對之精確性，並與 RETRAN 程式作出比較。第五章則為本研究所做之結果作結論，並將提出未來改善建議。



第二章 RELAP5/MOD3.3 程式介紹

2.1 RELAP程式發展

RELAP 電廠系統熱水流分析程式係由美國愛達荷國家工程實驗室(INEL)，在美國核管會支持下發展出來之輕水式核能電廠(Light Water Reactor, LWR)暫態與事故模擬分析之程式，其發展之過程，如圖 2.1。發展此程式之主要目的為提供一運算較快，計算結果準確且使用方便之最佳估算分析程式，以作為下列各類用途：

1. 作為核能管制法規製訂與核電廠運轉執照申請等之評估作業基礎，以及驗證使用簡化模式之電廠分析器的結果，作為分析比對基礎及依據。
2. 提昇其他相關核能機構進一步之核能電廠系統暫態及事故分析之能力，以作為其設計分析、安全分析及執照申請作業所需。
3. 協助熱流實驗計劃擬定，執行實驗進行前預測分析之所需，同時執行實驗完成後之分析工作，以增進實驗結果之準確性。

RELAP5/MOD3.3 版本，主要乃由美國核管會及參與 ICAP (International Code Assessment and Applications Program)計劃的國家，以及其接續計畫 CAMP(Code Applications and Maintenance Program, CAMP)的成員，以 RELAP5/MOD2 版本為基礎，針對所需及不及處，加以改善及延伸模式而發展完成的。其目的為發展一套程式版本，可以作為所有暫態(Transient)及可推論之意外事故如大破口及小破口冷卻水流失事故分析之用。

2.2 RELAP5/MOD3.3 模式介紹

RELAP5/MOD3.3 熱水流分析程式是由 EG&G Idaho, Inc.採用 FORTRAN 程式語言建立之熱水流分析程式，針對先前版本 RELAP5/MOD2 程式中某些分析能力的缺陷，加以修改或增加模式而發展完成的。其理論模式乃基於雙相非均勻態(non-homogeneous)，雙相非穩態(Non-equilibrium)及雙流體(Two fluids)模型研究發展出之最佳理論化(Best

Estimate),使用最少經驗式之輕水式反應器(Light Water Reactor, LWR)系統暫態與事故模擬分析程式。主要由以下四個主程式組合而成：

1. 熱水流環路程式(Thermal and Hydraulic Loop Code)。
2. 熱水流核心程式(Thermal and Hydraulic Core Code)。
3. 熱傳導程式(Thermal Conduction Code)。
4. 核反應程式(Nuclear Reaction Code)。

而整個程式包括五個系統模式，如下：

1. 流體動力(Hydrodynamics)模式。
2. 熱結構體(Heat Structure)模式。
3. 控制系統(Control System)模式。
4. 啟動或跳脫邏輯信號(Trip and Control System)。
5. 中子反應點動態(Point Kinetic)模式。

RELAP5 程式由 MOD2 版本後，採用的流體模式為雙相流體分離模型(Separated Model)，共用 6 個基本雙流體三大守恆公式來描述，包括：

1. 汽相質量守恆公式。
2. 液相質量守恆公式。
3. 汽相動量守恆公式。
4. 液相動量守恆公式。
5. 汽相能量守恆公式。
6. 液相能量守恆公式。

利用此六個公式，解得相關之熱流參數作為分析參考之用。詳細之程式架構及模式可參考 RELAP5/MOD3.3 使用手冊說明 1【3】。

另外也針對 RELAP5/MOD3.3 的缺陷及不足處做修正如下，詳細請見 RELAP5/MOD3.3 使用手冊第一卷第一節處【3】。

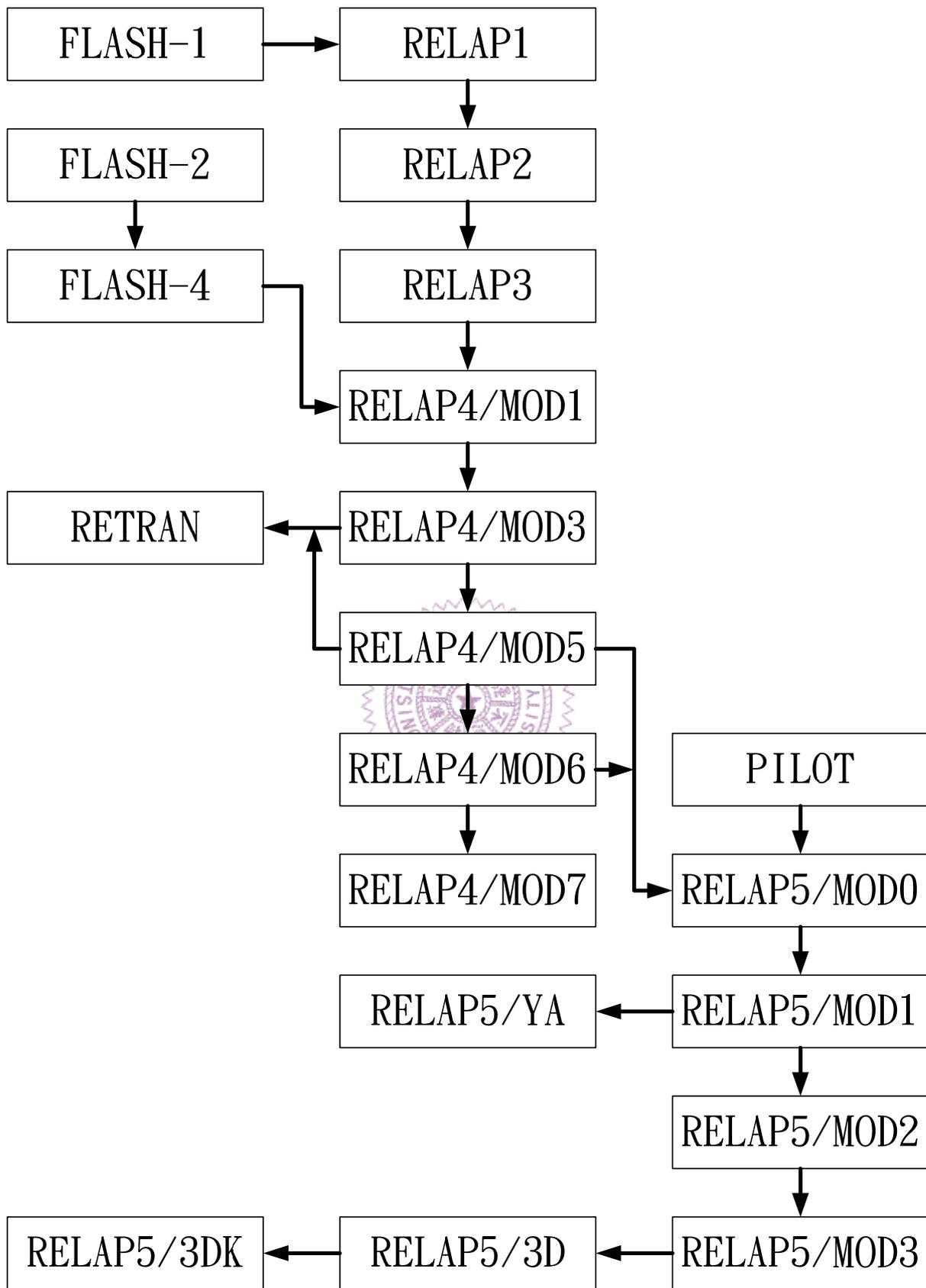


圖 2.1 RELAP 系列程式發展圖

第三章 核一廠 RELAP5/MOD3.3 輸入模式蒸汽管路及 控制系統模式更新測試

3.1 簡介

核一廠 RELAP5/MOD3.3 輸入模式，基本上是參考張世勳學長於民國 86 年 11 月台電與清華大學合作研究計畫報告【5】中所建立的暫態輸入檔為基礎，並參考由核能研究所提供之 RETRAN 程式【8】核一廠輸入檔，更新蒸汽管路及壓力、飼水控制系統而建立穩態輸入檔。另外功率測試及暫態分析則參考核能研究所「核一廠雷傳模式起爐測試報告」【6】。

核一廠 RELAP5/MOD3.3 輸入模式建立過程中主要之修改如下：

1. 舊有核一廠 RELAP5/MOD3 輸入模式之分離器(Separator Model)模式，會有能量不平衡(Energy Balance)之現象，因此仍採用 RELAP5/YA 汽水完全分離的方法。本論文將內建之汽水分離器模式代入更新後，驗證過後發現能量及質量皆能守恆，固採用內建之分離器模式，詳細請見附錄 B。
2. 將單一蒸汽管路更新為符合電廠實際狀況的四條蒸汽管路。
3. 參考核一廠雷傳程式修改飼水控制系統。
4. 參考核一廠雷傳程式修改壓力調整系統。
5. 將單一飼水管線分為兩串相同飼水管路，飼水泵以依時接點(Time-Dependent Jun.401, 411)模擬之，各具備有 55%的額定流量的容量，由飼水三元控制系統控制。
6. 水位計算方式由空泡計算方法(Collapsed Water Level)更改為壓力差(Pressure difference)計算方法，以符合電廠實際偵測計算水位方法。
7. 新增汽機旁通閥(BPV)壓力調節功能，以及當汽機控制閥(TCV)快速關閉時，會立刻打開汽機旁通閥(BPV)並將蒸汽旁通(SB)。

8. 再循環水泵(Recirculation Pump)，增加了當飼水流量小於 25%(T+D15 秒)或泵出口閥未全開 (<90%)。再循環泵會回退至 27% 泵速，以確保再循環泵入口有足夠靜水頭(NPSH)。

而在更新之後，有以下需注意之特性：

1. 緊急爐心冷卻系統(ECCS)組件在穩態分析下皆不使其啟動，依照暫態分析案例需求，再依個案調整使用。
2. 運用了點動態中子模式(Point Kinetic Model)，來計算爐心中子通率時變之情況。然而由於點動態中子模式忽略了功率空間分佈的變動性，僅僅考慮了時間的相關性。因此，在模擬沸水式電廠時，由於反應爐內空泡(Void)的存在，加上空泡回饋(Feedback)對功率回應(Power Response)的影響，所以點動力模式並無法正確預測出爐心中子行徑(Neutronic Behavior)。

反應器爐心部份，舊有的空泡回饋(Void Feedback)、都卜勒反應度回饋(Doppler Reactivity Feedback)及控制棒反應度進入(Control Rod Reactivity Insertion)三者因輸入模式及其中資料來源皆已不可考，且無法取得較適合之資料，因此仍沿用舊有輸入模式的資料，但舊有輸入模式並無考慮正反應度的回饋效果，接續研究者可依此一研究方向修改更新。

以上即為核一廠 RELAP5/MOD3.3 輸入模式建立過程中修改的介紹，以下將介紹蒸汽管路修改過程。

3.2 蒸汽管路模擬介紹

現有之沸水式核能電廠分析模擬皆以單一蒸汽管路來模擬電廠四條管路的實際情況。這樣的分析技術有其傳統背景，且咸認在過壓(Over-Pressurization)暫態如負載棄載(Load Rejection)，汽機跳脫(Turbine Trip)的分析有較保守的結果。因此目前許多電力公司進行獨立執照分析或電廠運轉分析時，亦多採用此一簡化模式來進行分析。

核一廠 RELAP5 輸入模式係根據電廠之設計文件工程圖、安全分析報告、技術規範、功率測試等資料而建立。當進行暫態模擬及事故分析時，再根據起始條件，邊界條件及

事件特殊需求，修改基礎模式進行模擬分析。圖 3.1 為核一廠 RELAP5 單條蒸汽管路輸入模式示意圖，模式中包含了 121 個控制體積(Volume)、150 個流體節點(Junction)、143 個熱結構體(Heat Structure)、爐心分為爐心高功率區、爐心平均功率區、外圍低功率區及爐心旁通區(Core Bypass Region)，輸入模式是以一條主蒸汽管路(Main Steam Line)來模擬電廠的四條蒸汽管路。蒸汽管路模式共分為四個體積(Vol.542,544,546-1,546-2)。蒸汽由反應器蒸汽頂槽進入管路後，經過主蒸汽隔離閥(MSIV, Jun.547)及蒸汽管路(Vol.548)後，進入蒸汽集管(Steam Header, Vol.540)和汽機控制閥(Turbine Control Valve, TCV, Jun.549)進入汽機。蒸汽旁通部份則由蒸汽集管，經汽機旁通閥(Turbine Bypass Valve, BPV, Jun.571)進入凝結器(Condenser, Vol.570)。蒸汽管線上的 10 只安全釋壓閥(Safety Relief Valve, SRV, Valve 670, 671, 672, 673, 674, 675, 676, 677, 678, 679)則依功能與開啟設定點的不同模擬安全釋壓閥及自動洩壓系統(Automatic Depressurization System, ADS)。汽機、冷凝器及凝結器則均以一大體積熱沉(Heat Sink)加以模擬。接下來為核一廠 RELAP5 四條蒸汽管路輸入模式的修改過程。

3.3 蒸汽管路修改說明

圖 3.2 為核一廠 RELAP5 四條蒸汽管路輸入模式示意圖，在蒸汽管路模式的修改，主要是參考建立核一廠單一蒸汽管路輸入模式時的設計計算書【4】以及核一廠雷傳輸入模式設計計算書【8】所建立。

實際電廠的四條蒸汽管路中，管路 A 與 D 及 B 與 C 是相互對稱的，並且考慮其角度及高度變化，以下為更新過程。

蒸汽管路(Main Steamline)

核一廠蒸汽頂槽的蒸汽，在四個不同位置流入蒸汽管路 A、B、C 及 D；然而因四條蒸汽管線角度(Angle)及高度變化(Elevation)的限制，RELAP5/MOD3.3 程式在檢查輸入模式時，四條蒸汽管路會有高度變化檢查不正確的狀況，因此在考慮對稱性的情況下，將反應爐槽蒸汽管路接口(Vol.250)切割成相等體積的兩部份(Vol.242 及 250)，蒸汽管線

A與D接至控制體積 242，B與D則接至 250。蒸汽管路的體積則依照既有核一廠 RELAP5 輸入模式計算書中數據【4】分割成四個部分，體積的編號識別如下：

蒸汽管路 A 體積：601~607

蒸汽管路 B 體積：611~617

蒸汽管路 C 體積：621~627

蒸汽管路 D 體積：631~637

基本上管路 A 與 D 及 B 與 C 是相互對稱的，第一段蒸汽管路(Vol.601,611,621,631)是從反應爐槽接出的管線，第二段蒸汽管路(Vol.603,613,623,633)則是十個安全釋壓閥(SRV)的連結體積。第三、四段蒸汽管路之間(Jun.605,615,625,635)則是圍阻體外的主蒸汽隔離閥；四條管路之後會彙集到蒸汽集管(Vol.640)。

蒸汽集管 (Steam Header)及蒸汽汽櫃 (Steam Chest)

由於核一廠 RELAP5 計算書【4】並無模擬蒸汽汽櫃(Steam Chest)的部分，因此採用核一廠雷傳程式輸入模式所使用，而雷傳模式的蒸汽汽櫃體積，是以三段 2 呎長的蒸汽管路來計算汽櫃的參數；由於並不是精確的數據來源，因此蒸汽汽櫃部份仍然是未來研究更新努力的方向。

安全釋壓閥 (Safety Relief Valve)

核一廠共有十只閥位於四條蒸汽管路上，它們都具有釋壓閥(Relief Valve)和安全閥(Safety Valve)的功能，圖 3.3 為安全釋壓閥排列位置示意圖。表 3-1 列出核一廠 RELAP5 輸入模式安全釋壓閥設定值。在 10 只釋壓閥功能中分成五組釋壓開啟設定點，分別是 1060.7 psia、1100.7 psia、1110.0 psia、1120.7 psia 和 1130.7 psia；每組具有兩只釋壓閥，其中在對稱的蒸汽管線 A 與 D 上各具有一只釋壓閥，對稱的蒸汽管線 B 與 C 則各具有八只釋壓閥。十只釋壓閥中的五只兼具有自動洩壓閥的功能，在自動洩壓系統啟動(ADS)時，這五只釋壓閥會打開將反應爐槽的高壓蒸汽洩至抑壓池，而抑壓池則是以一大體積的熱沉模擬，詳細位置請參考表 3-1 及圖 3-3。

主蒸汽隔離閥 (Main Steamline Isolation Valve, MSIV)

核一廠四條蒸汽管路穿出圍阻體，位於乾井的內側與圍阻體外側處，各配置一只主蒸汽隔離閥(MSIV)，目的在防止管路斷裂時，避免爐水流失或放射性物質的洩漏。核一廠 RELAP5 輸入模式在每一條蒸汽管路的圍阻體外的位置，各模擬一只主蒸汽隔離閥 (Valve 605, 615, 625, 635)；每一只主蒸汽隔離閥皆由跳脫卡(Trip Card)控制開度，在跳脫訊號產生時，可以關閉主蒸汽隔離閥。

汽機斷止閥 (Turbine Stop Valve, TSV)

汽機斷止閥又稱節流閥(Valve 660, 665)，目的在作為緊急動作閥，防止控制閥失靈或負載跳脫時汽機超速。在正常運轉中閥全開，停機時用以關閉隔斷蒸汽。

汽機控制閥(Turbine Control Valve, TCV)

汽機控制閥又稱調速閥(Valve 662, 663, 667, 668)，汽機起動時，控制進入汽機的蒸汽量，達到汽機轉速控制目的；並且接受蒸汽旁通(Steam Bypass, SB)與壓力調節系統(Pressure Regulator, PR)信號，控制反應爐壓力。管路連結上，因汽機斷止閥是直接連結兩只汽機控制閥，但在 RELAP5 程式中不允許閥與閥相接，因此以一極小體積，面積相當於兩汽機控制閥的控制體積(Vol.661,666)做為連接點。

汽機旁通閥(Turbine Bypass Valve, BPV)

汽機旁通閥共有三只，在 RELAP5 輸入模式則僅模擬一只旁通閥，由蒸汽集管(Steam Header)，經由蒸汽汽櫃(Steam Chest)再經過旁通閥(BPV)排入冷凝器。旁通閥功能在於將多餘的蒸汽排至主冷凝器，藉以控制反應爐壓力；三只旁通閥全開總流量為汽機全載流量的 29.9%。

3.4 壓力調節系統(Pressure Regulator)

圖 3.4 為核一廠壓力調節器控制邏輯方塊圖，壓力調節系統取反應爐頂槽壓力 (Vol.240)為輸入，經由壓力調節器及蒸汽管路補償器後所產生的訊號，控制汽機控制閥 (TCV)及汽機旁通閥(BPV)開度以調節蒸汽流量，並維持系統壓力。

反應爐頂槽壓力即模式中控制體積 240 的壓力，在與壓力調整器的設定值 934.7 psia 相減後(P-2)，將此差額信號送入控制器處理後再將信號送入蒸汽補償器(P-5)，由此信號

分為二路經過回饋偵測器及控制器，最後均回饋至控制方塊 P-10，之後出來的信號又分成兩路處理，一路和負載需求比較後取最小值(P-12)。即當控制信號大於負載需求時，則負載需求會是控制的主要訊號。負載需求定在 100% 功率，另外再加上負載偏差(Load Bias)10%，也就是汽機控制閥(TCV)最多可以釋放出 110% 功率的蒸汽。經過最小值比較後，控制信號就經由兩組汽機控制閥特性曲線轉換成四只閥的開度(TCV A 與 B 及 TCV C 與 D)，其中汽機控制閥 A 與 B 及 C 與 D 在相同控制邏輯下會有相同的開度。另一路線經控制器出來的信號直接和負載需求相減，如果是負值，就是控制信號小於負載需求，信號經過旁通閥特性曲線轉換後就等於零，不會去動作旁通閥；如果是正值，也就是控制信號已經超過負載需求，此時經由特性曲線轉換，即產生正值信號去開啟旁通閥。最後，兩組控制閥及旁通閥都會再轉換閥開度為閥面積，作為控制系統的輸出，圖 3.5 為汽機控制閥需求與控制閥桿位的轉換曲線，圖 3.6 則是汽機控制閥桿位與控制閥面積的轉換曲線，圖 3.7 則為汽機旁通閥需求與旁通閥面積的轉換曲線。

另外壓力控制系統另增加控制閥快速關閉邏輯，當跳脫訊號起始後，閥位控制將依照控制閥關閉曲線(約 1.5 秒全關的速度)將兩組控制閥的開啟面積關閉至零開度。另外汽機旁通閥(BPV)會依照其開啟特性曲線開啟將多餘蒸汽排至冷凝器，直到蒸汽頂槽壓力(Vol.240)低於 934.7psia，汽機旁通閥(BPV)會再依照其關閉特性曲線關閉。

3.5 飼水控制系統(Feedwater Control System)

飼水控制系統其功用為在反應器功率運轉期間依系統需求，調節飼水流量，維持反應爐水位於正常運轉範圍內，並防止爐心曝露。核一廠飼水控制系統，可分為自動和手動控制；在反應爐低飼水流量或特殊運轉情況之需要下，可採用手動控制。自動控制則可分以下二種：

1. 一元控制(One-element Control)：一元控制是僅以反應爐水位信號作為唯一的控制參數，直接藉由此信號和設定水位比較的差值來調整飼水之流量。
2. 三元控制(Three-element Control)：三元自動控制所採用自動控制輸入參數有三，包括反應爐水位信號，蒸汽流量和飼水流量。依據飼水流量和蒸汽流量相減所

得之差值，以及水位設定值與反應爐水位間的差值，來決定輸出信號，而水位設定值則依蒸汽流量變化程度而變化，如此所得輸出控制信號，得一飼水流量來控制爐心水位。

以上二者的目的是在因應預期之各種運轉需要，控制飼水流量控制閥以調節送入反應爐之飼水流量，將反應爐水位維持於正常的設定範圍 (Level 4~Level 7)，由此限制水位騰帶(Carry over)和蒸汽潛挾(Carry under)回至爐心，避免因此造成汽機葉片損壞或降低爐心冷卻作用，以及提供控制、指示和警報信號及其他相關系統。

飼水三元控制系統是在運轉中主要使用之控制模式，輸入訊號為水位訊號、蒸汽流量訊號及飼水流量訊號三者，分別在以下逐項討論。

水位訊號

飼水控制系統的主要功能在於調節飼水流量以穩定水位，圖 3.8 及圖 3.9 所示為反應爐水位設定值及其定義，其中 Level 4 和 Level 7 之間為正常運轉水位，Level 4 為低水位警報，Level 為 7 高水位警報。當反應爐水位高於 Level 8 時，飼水泵會自動跳脫，而當水位低於 Level 2 時，電廠極有可能發生冷卻水流失事故，此時緊急爐心冷卻系統 (ECCS) 將會啟動，飼水控制系統即不再發揮功能。在實際運轉狀況下，爐心水位無法直接測量，因此利用兩壓力偵測器偵測所得之壓差估算，如窄幅水位(Narrow Range Water Level)即為偵測儀器 N13 與 N14 之間的壓差所推算之水位高度；寬幅水位(Wide Range Water Level)則為偵測儀器 N12 與 N14 之間的壓差所推算之水位高度，如圖 3.10。

蒸汽流量訊號

核一廠任一機組有四支主蒸汽管，採用四個 P/I 壓力傳送器 N003 A、B、C、D 分別測取蒸汽通過每支主蒸汽管限流器(Flow Restrictor)產生之前後靜壓力差，運用柏努利定律(Bernoulli's Theorem)，當流體通過收斂管段時，其前後靜壓力之差與流體之質量流量成比例之關係；對應至 1000 Tons/hr 蒸汽流量產生 10 至 50 ma 之輸出電流信號，經絕熱膨脹效應之修正後之蒸汽流量信號。

飼水流量訊號

飼水流量量測系統係經由 P/I 差壓傳送器 N002A 和 B，分別測取設在通往反應器二路飼水管之文氏管(Venturi Tube)流量差壓，並對應飼水流量差壓而產生成正比之 10~50ma 輸出電流信號，再利用溫度係數修正所測得流量，以此做為飼水流量訊號。飼水流量控制閥共有二只，各具 55% 額定飼水量，由於此閥之控制信號與流量具有線性關係之特性，因此直接根據飼水控制信號來調整飼水控制閥之開度，決定飼水流量。

核一廠 RELAP5/MOD3.3 輸入模式之中，飼水三元控制系統也是依此三種訊號做為控制的輸入訊號。舊有的水位計算法是將控制體積的空泡分率與其體積相乘，推算液態水的高度後再累加成為偵測水位，然而實際上偵測水位是以壓力差(Pressure difference)推算而得，因此經過修改後改用壓力差(Pressure difference)推算方式計算水位高度，並以此方法計算所得之窄幅水位(NRWL)作為飼水三元控制的水位訊號來源，詳細過程請見附錄 A。蒸汽訊號是直接以自反應爐槽流出至四個蒸汽管路的流量和(Jun.242-02, 242-03, 250-01, 250-02)為飼水三元控制系統的蒸汽訊號來源。而在輸入模式之中飼水管路模擬係以依時接點方式模擬流量供給，因此流量訊號是直接以依時接點(Time Dependent Jun.401, 411)的流量和為飼水三元控制的流量訊號來源。

圖 3.11 即為核一廠 RELAP5/MOD3.3 輸入模式飼水三元控制系統邏輯圖，需有三項暫態參數作為輸入，分別為：

1. 反應爐水位(FW-1)、
2. 總蒸汽流量(FW-3)、
3. 總飼水流量(FW-5)。

水位信號採用反應爐窄幅水位(NRWL)，另外飼水流量及蒸汽流量如上述討論為將兩飼水管線及四串蒸汽管線流量加總而得。以上三訊號均與其額定值相除後歸一化(Normalized)同時並以 LAG 邏輯方塊模擬信號延遲(FW-2, FW-4, FW-6)；蒸汽流量和飼水流量信號相減，得一流差額後再乘上一個轉換增益(kM)即成為電壓信號(FW-7)，並以之代表淨飼水流量。

水位再與流量差額相加處理後來代表預估水位(FW-8)，復再經一補償回饋(FW-9)，再和修正設定水位作比較(FW-10)；預估水位放大信號和修正水位比較後所得值，經過

一比例-積分飼水控制器(FW-11,FW-12)後再與蒸汽頂槽壓力(Steam Dome Pressure, Vol.240)比較而得到一控制信號輸出(FW-15),控制信號再經過圖 3.12 的飼水控制線性轉換的曲線(FW-16),再乘以額定流量 2117.5,即為飼水三元控制系統的輸出流量。

3.6 再循環水控制系統

再循環水系統主要目的及功用為:

1. 供給通過爐心強制冷卻水以容許較高的出力。
2. 變動流量,以調節反應爐功率。
3. 聯結 D E H 汽機控制系統,以提供自動跟隨負載變動能力。(核一廠沒有使用此功能)

核一廠 RELAP5/MOD3.3 輸入模式中之再循環水控制系統分為兩個迴路,因自動負載跟隨的功能並沒有使用,因此除了在測試時借由調整再循環泵浦速度(Pump 310,360)來調節再循環水流量,進而調整爐心流量外,另外在下列情況時會使再循環泵發生回退(Run Back):

1. 當僅一台飼水泵運轉及反應爐低水位警報信號(Level 4)出現,再循環泵會回退至 35% 泵速。
2. 當飼水流量小於 25%(T+D15 秒)或泵出口閥未全開 (<90%)。再循環泵會回退至 27% 泵速,以確保再循環泵入口有足夠靜水頭(NPSH)。
3. 手動回退:如反應爐在穩定區運轉,功率>60%,爐心流量(>45%)可利用主控器上之手動回退開關,將功率回退至 60%,爐心流量不小於 45%,穩定運轉區運轉。

在舊有的輸入模式之中,並無相關的控制系統,對於不同暫態的需求,則依需求不同而調整其輸入模式,而更新後的核一廠 RELAP5/MOD3.3 輸入模式中則新增上述第二項之控制邏輯,當飼水流量小於 25%時,如再循環泵泵速大於 27%,即產生回退訊號,以每秒降低 5% 泵速的速度將再循環泵泵速降低至 27%,以期更忠實模擬系統控制。而第一項及手動回退控制則依暫態需要另外調整。

3.7 核一廠RELAP5/MOD3.3 控制系統測試

本章介紹增修後的核一廠 RELAP5/MOD3.3 的控制系統，為了測試控制系統是否能發揮其功能，本節會對於新增修的控制系統做出簡單的測試，然而因為難以取得真實電廠控制系統的數據，因此將重點針對於控制系統反應的正確與否。

3.7.1 飼水控制系統測試

飼水控制系統主要是以三元訊號做為控制系統輸入，分別為水位、蒸汽流量及飼水流量，因此藉由改變以上三種訊號以確定飼水控制系統能夠做出正確的反應。

圖 3.13 為穩態運轉中將飼水控制系統的水位偵測訊號以較正常水位值高的常數帶入，飼水控制系統讀入較正常水位值為高的訊號輸入後，在控制系統的作用下會降低飼水流量；然而飼水流量減少的同時，蒸汽流量也會同時減少，交互作用之下，飼水則會不斷的降低。

圖 3.14 為穩態運轉中將飼水控制系統的水位偵測訊號以較正常水位值低的常數帶入，飼水控制系統讀入較正常水位值為低的訊號輸入後，在控制系統的作用下增加飼水流量，以求將水位帶至正常水位範圍；然而因水位是以常數帶入，飼水流量增加的同時，蒸汽流量也會增加，交互作用之下飼水流量不斷的增加，直到達到了飼水最大流量 110%。

圖 3.15 為穩態運轉中將飼水控制系統的蒸汽流量訊號以較正常流量值高的常數帶入，飼水控制系統讀入較正常蒸汽流量為高的訊號輸入後，在控制系統的作用下會提高飼水流量以維持反應爐槽內水位的穩定；然而因飼水控制系統內的蒸汽流量訊號是以常數值帶入，流入反應爐槽內的飼水流量增加，水位不斷提高後，飼水控制系統在高水位和高蒸汽流量訊號交互作用下，飼水流量會逐漸降低。

圖 3.16 為穩態運轉中將飼水控制系統的蒸汽流量值以較正常流量值低的常數帶入，飼水控制系統讀入較正常蒸汽流量為低的訊號輸入後，在控制系統的作用下會降低飼水流量以維持反應爐槽內水位的穩定；然而因飼水控制系統內的蒸汽流量訊號是以常

數值帶入，流入反應爐槽內的飼水流量減少，水位不斷降低後，飼水控制系統在低水位和低蒸汽流量訊號交互作用下，會使飼水流量產生震盪的情形。

飼水流量因為是採用依時接點的方式模擬飼水閥的流量，而飼水控制系統最終的輸出也是控制此閥，因此在此不多做測試。

由以上的四組測試可發現，飼水系統對於不同輸入的反應都屬正確，因此在暫態測試應該具有一定程度的暫態模擬能力。

3.7.2 壓力控制系統測試

壓力控制系統主要的輸入訊號為蒸汽集管(Steam Header)的壓力，壓力控制系統偵測到的壓力會與設定值(Set Point)作比較後，經過一連串的控制邏輯方塊，最後決定汽機控制閥(Turbine Control Valve, TCV)及汽機旁通閥的開度(Turbine Bypass Valve, BPV)。

圖 3.17 為將壓力控制系統蒸汽集管(Steam Header)壓力的輸入訊號設定較正常壓力值為高，因此壓力控制系統經過控制邏輯計算之後，汽機控制閥(TCV)開度會增加以降低蒸汽集管壓力，另外如圖 3.18 汽機旁通閥(BPV)也會打開排除多餘蒸汽，然而因為蒸汽集管壓力輸入訊號手動設定為常數，因此汽機控制閥及汽機旁通閥會一直持續打開。

圖 3.19 為將壓力控制系統蒸汽集管(Steam Header)壓力的輸入訊號設定較正常壓力值為低，因此壓力控制系統經過控制邏輯計算之後，汽機控制閥(TCV)開度會降低以維持蒸汽集管壓力，然而因為蒸汽集管壓力輸入訊號手動設定為常數，因此汽機控制閥會一直維持關閉狀態。

因以上測試為將壓力控制系統輸入訊號手動設定為定值的測試，因此只能觀察到汽機控制閥(TCV)及汽機旁通閥(BPV)是否有正確的控制反應。圖 3.20 為將 100%全功率穩態運轉中的輸入模式在 200 秒時更改為 70%功率的測試圖，可觀察到因反應爐爐心無法提供足夠的能量維持 100%全功率的蒸汽流量，蒸汽流量下降導致蒸汽集管(Steam Header)壓力下降，汽機控制閥(TCV)在壓力調節系統的作用之下減少開度以維持壓力，圖 3.21 則為同一測試下蒸汽頂槽(Steam Dome)的壓力變化，可觀察到壓力調節控制系統

藉由減少汽機控制閥(TCV)的開度以維持系統的壓力，使系統不會因為功率驟降而使系統產生過大的壓力變化。

由以上測試可知，壓力控制系統對於暫態壓力變化都能夠有正確的反應，因此對於暫態模擬應具有一定的模擬能力。



表 3-1 核一廠 RELAP5 輸入模式安全釋壓閥設定值

閥代號	RELAP5 卡號	所在 蒸汽管線	開啟壓力 (psia)	關閉壓力 (psia)	自動釋壓系統 (ADS)功能
FO13-A	670	A	1060.7	1003.66	具備
FO13-B	671	B	1100.7	1057.26	具備
FO13-K	672	B	1110.0	1066.86	不具備
FO13-F	673	B	1120.7	1076.46	具備
FO13-P	674	B	1130.7	1086.06	不具備
FO13-C	675	C	1100.7	1057.26	具備
FO13-G	676	C	1120.7	1076.46	不具備
FO13-L	677	C	1110.0	1066.86	不具備
FO13-R	678	C	1130.7	1086.06	不具備
FO13-D	679	D	1060.7	1003.66	具備

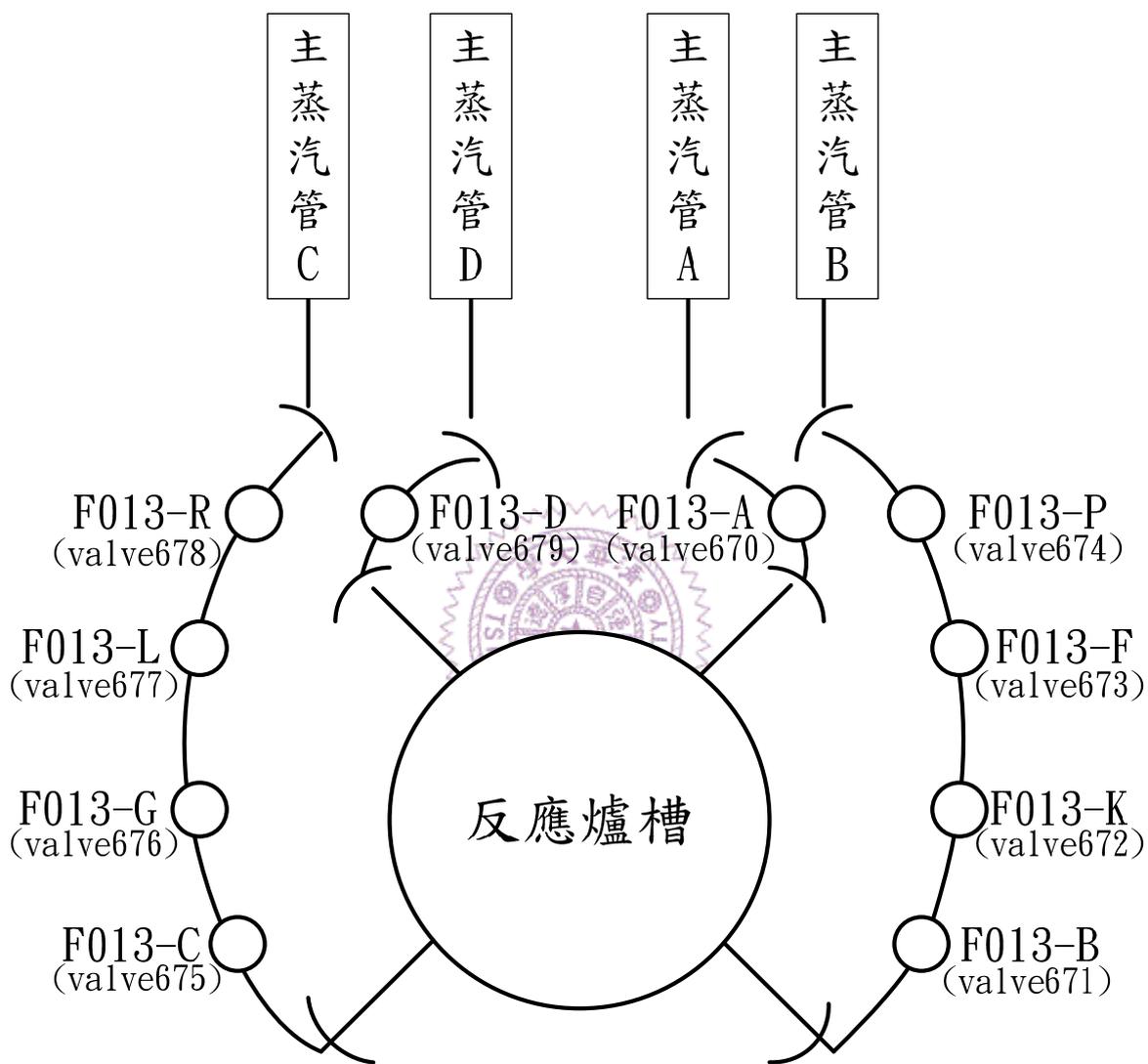


圖 3.3 核一廠安全釋壓閥排列順序示意圖

Chinshan Pressure Regulator Control

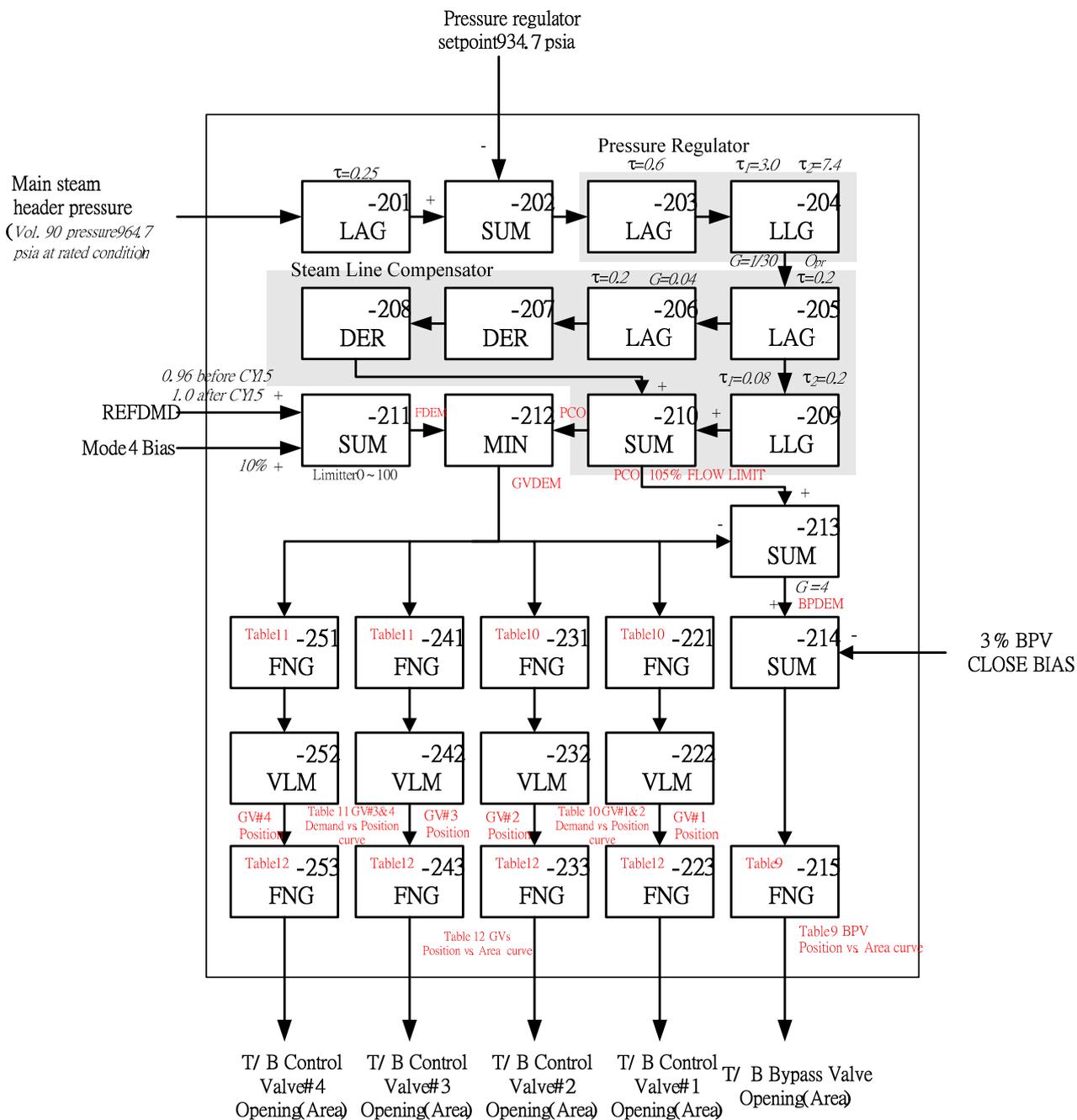


圖 3.4 核一廠壓力調節器控制邏輯方塊圖

TCV Demand Signal vs. Valve Stem Position

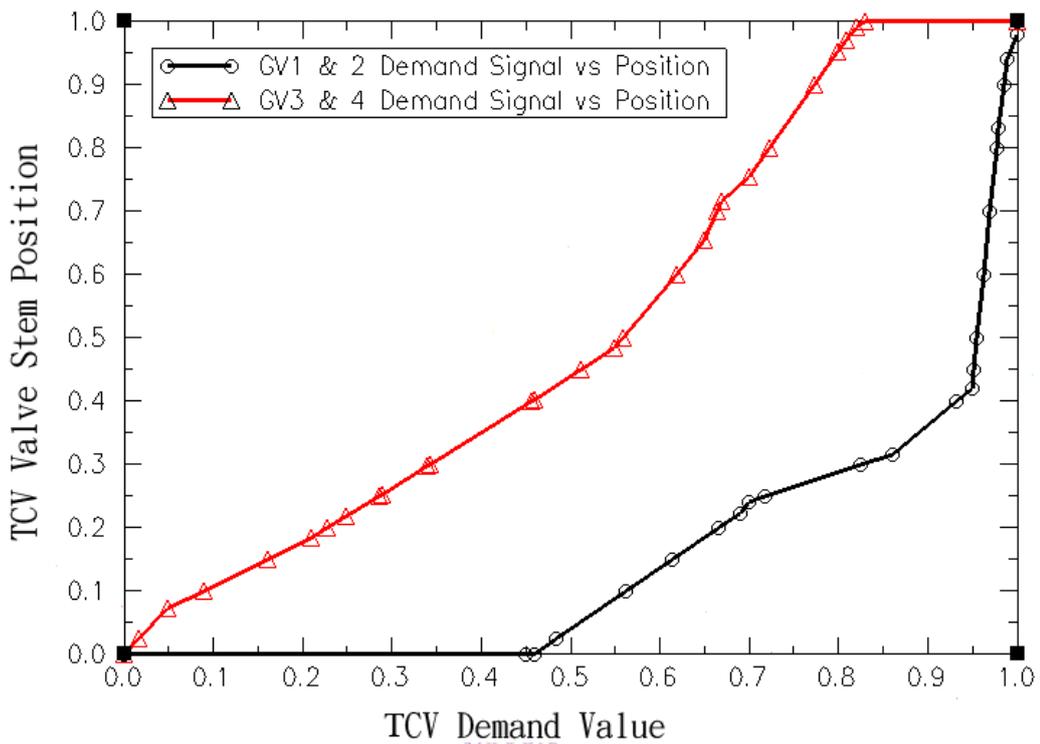


圖 3.5 核一廠汽機控制閥特性曲線-控制閥需求 VS.控制閥桿位(參考核一廠雷傳程式)

TCV Stem Position vs. Normalized Area

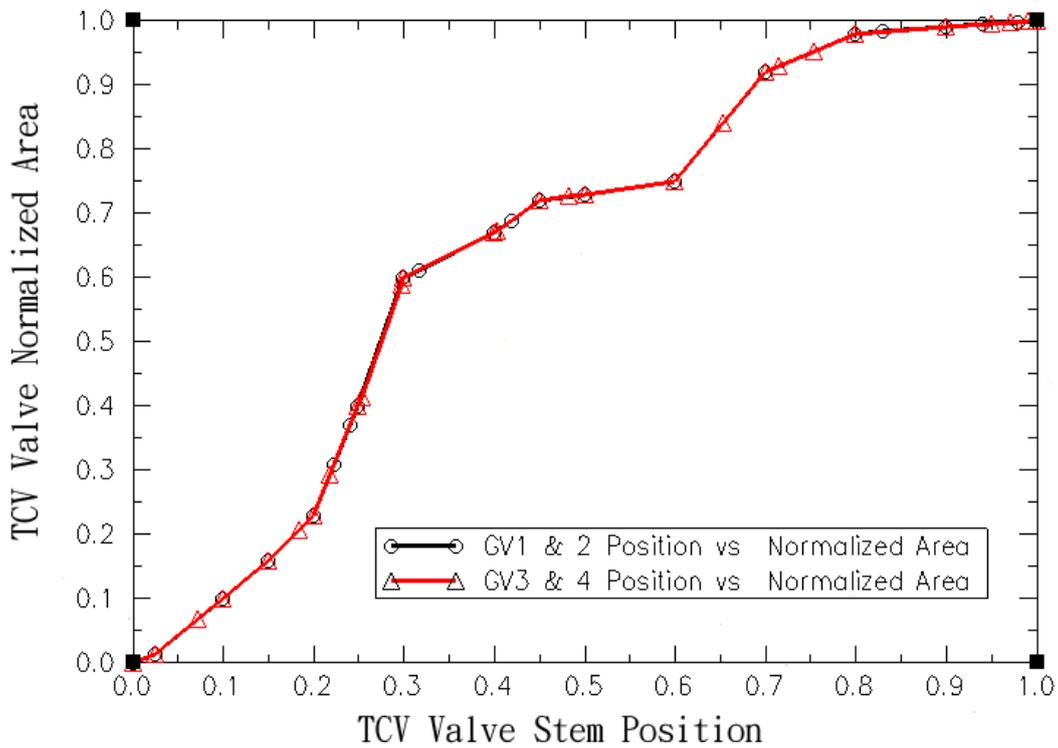


圖 3.6 核一廠汽機控制閥特性曲線-控制閥桿位 VS.控制閥面積(參考核一廠雷傳程式)

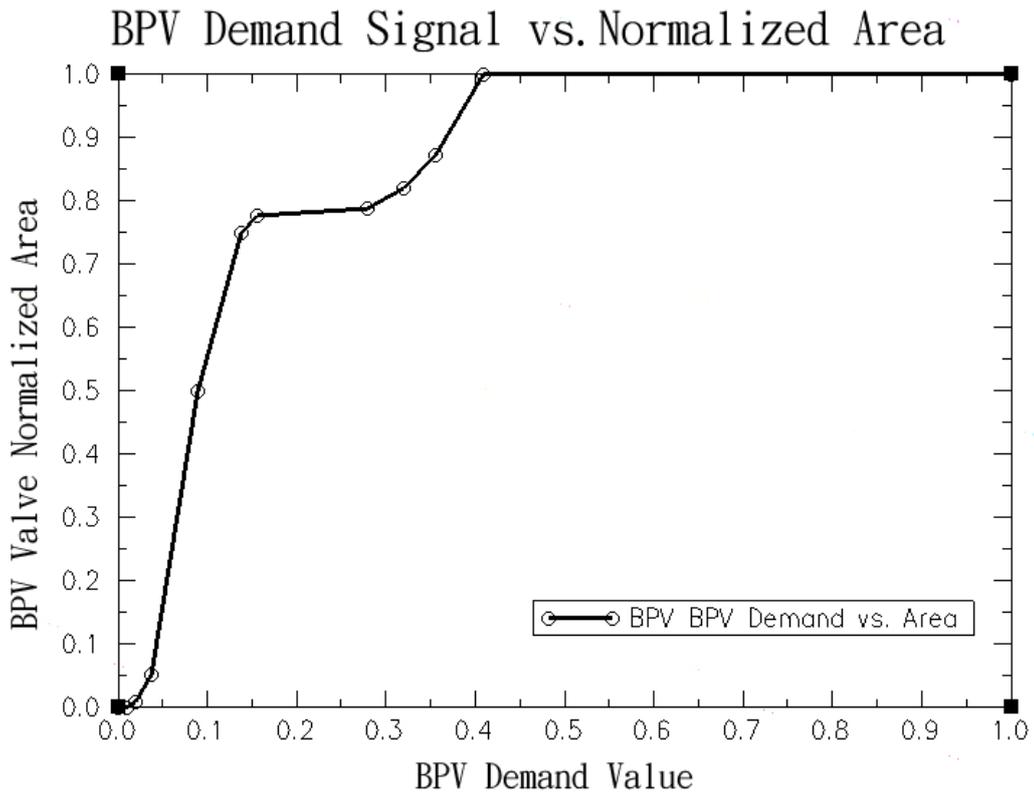


圖 3.7 核一廠汽機旁通閥特性曲線-旁通閥需求 VS.旁通閥面積(參考核一廠雷傳程式)

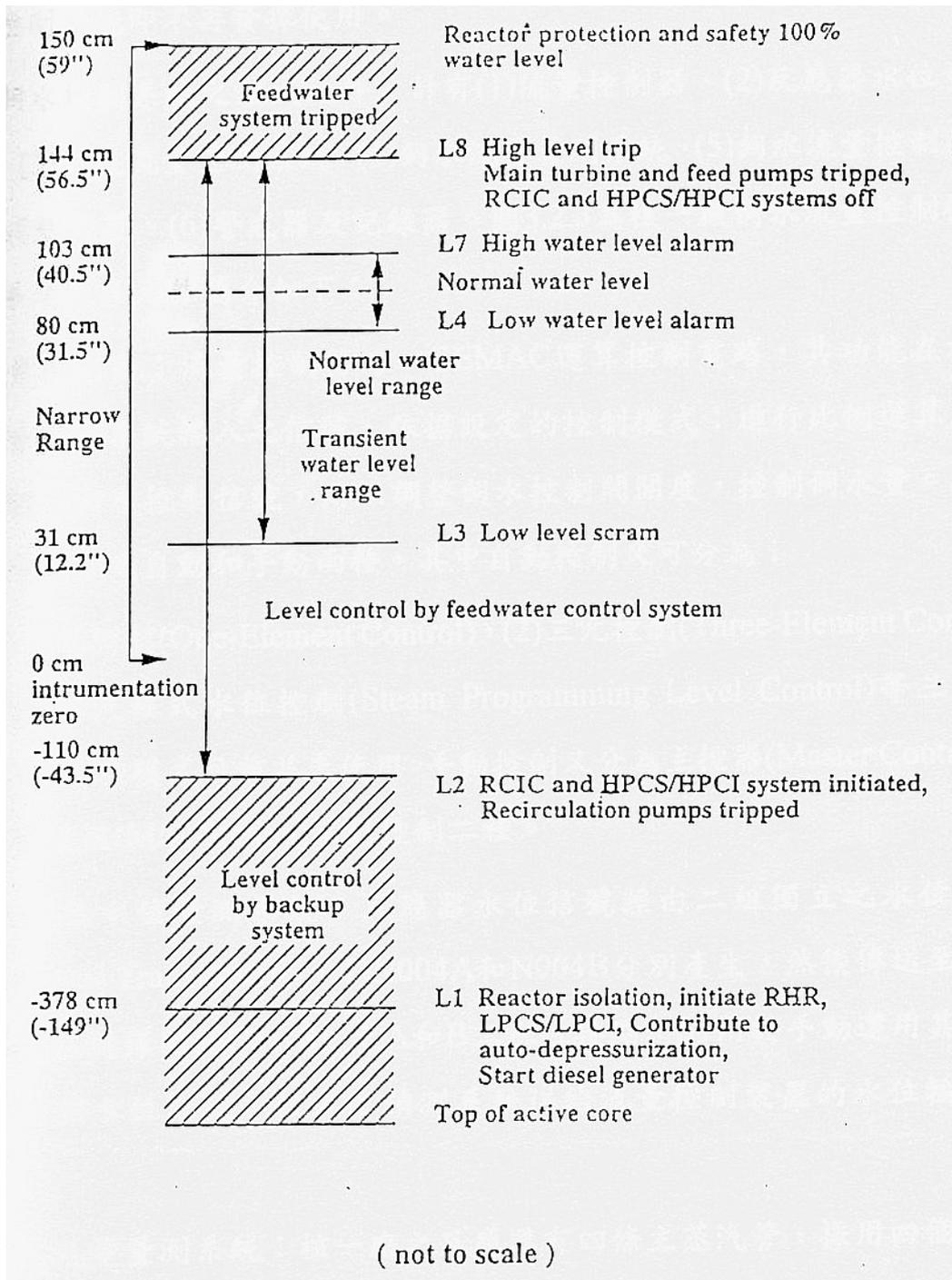


圖 3.8 核一廠水位設定圖

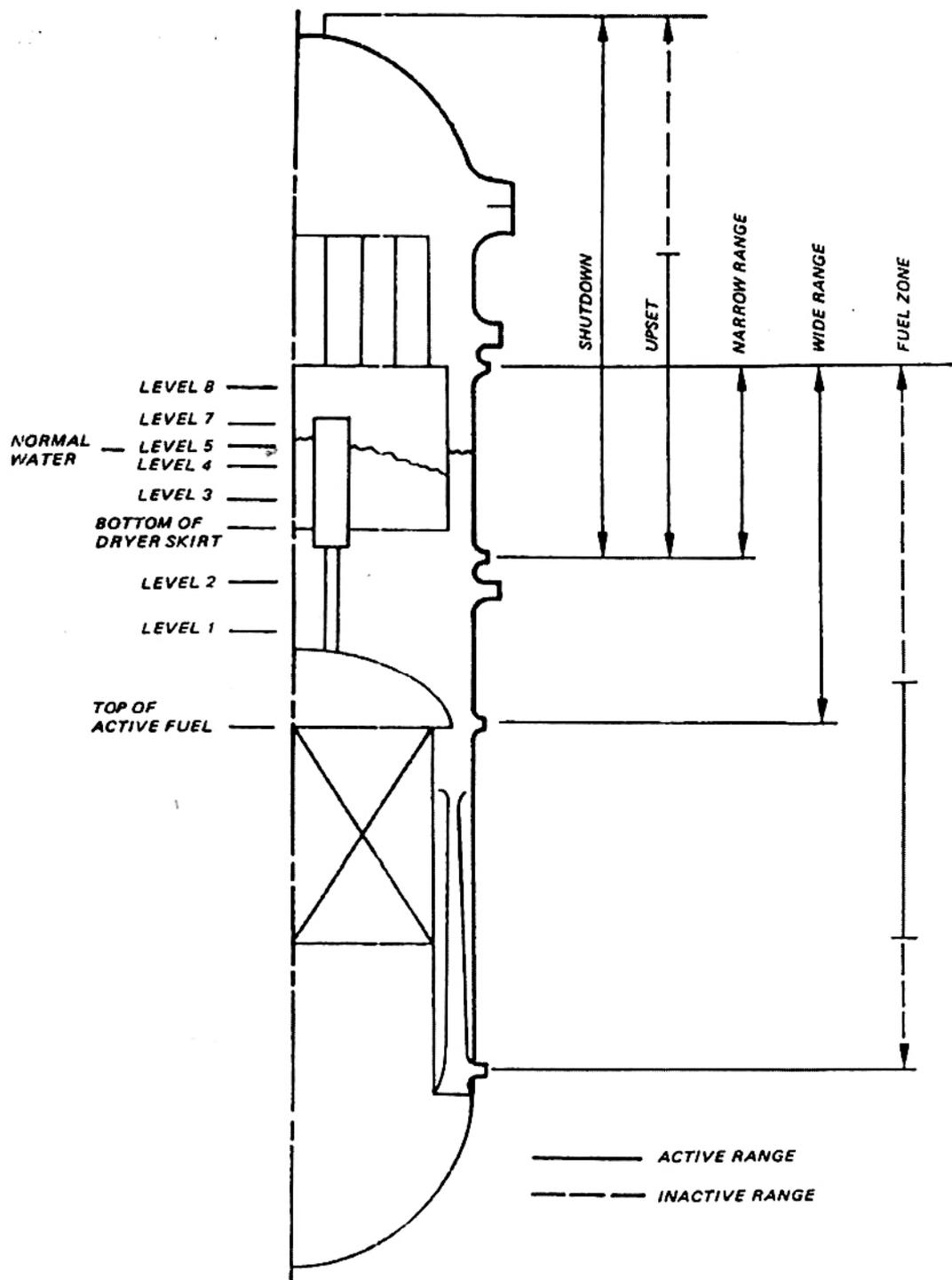


圖 3.9 核一廠水位定義圖

Chin Shan Unit #1 & #2 RPV

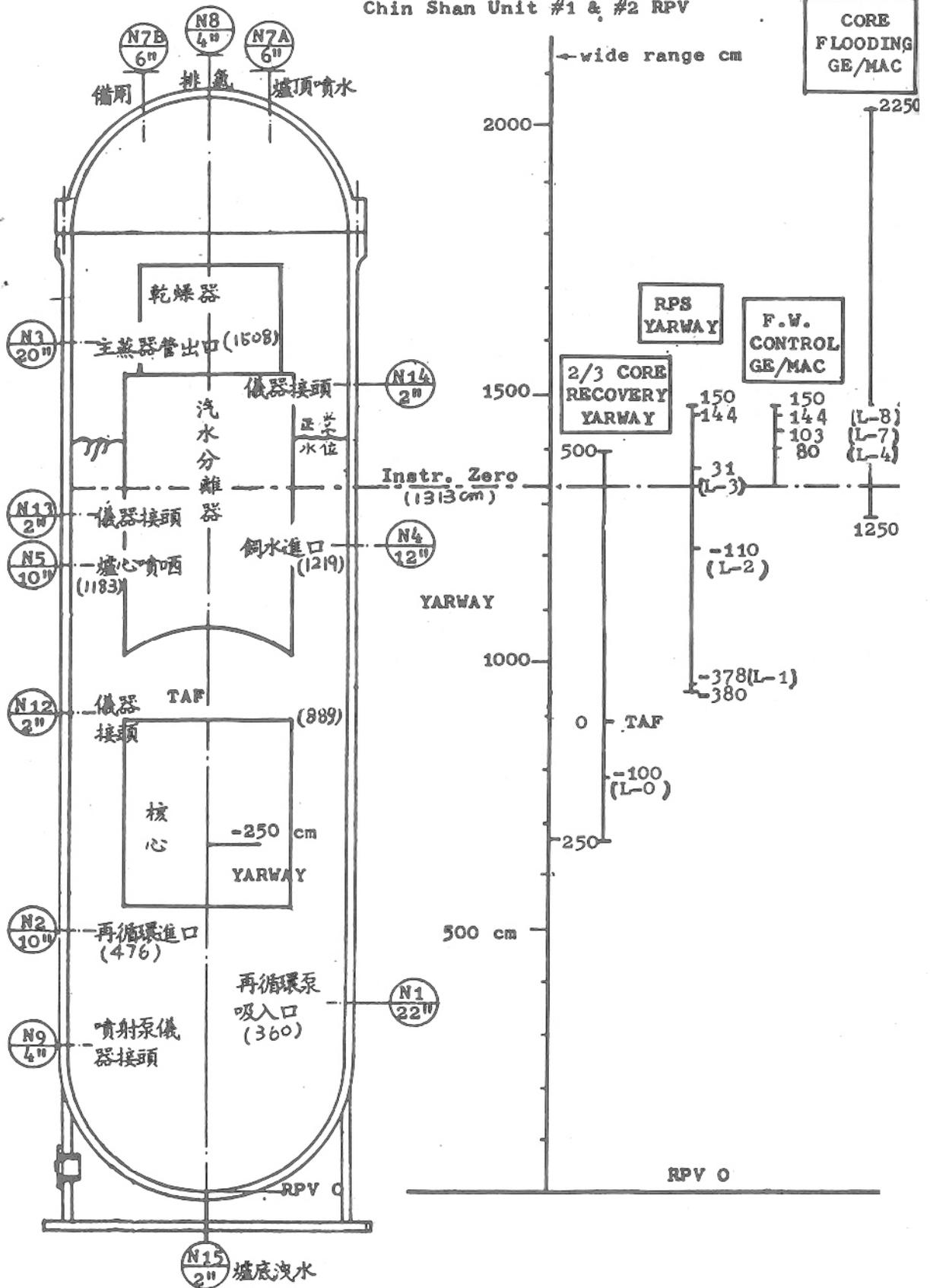


圖 3.10 核一廠偵測水位儀器設定點

Chinshan Feedwater Control

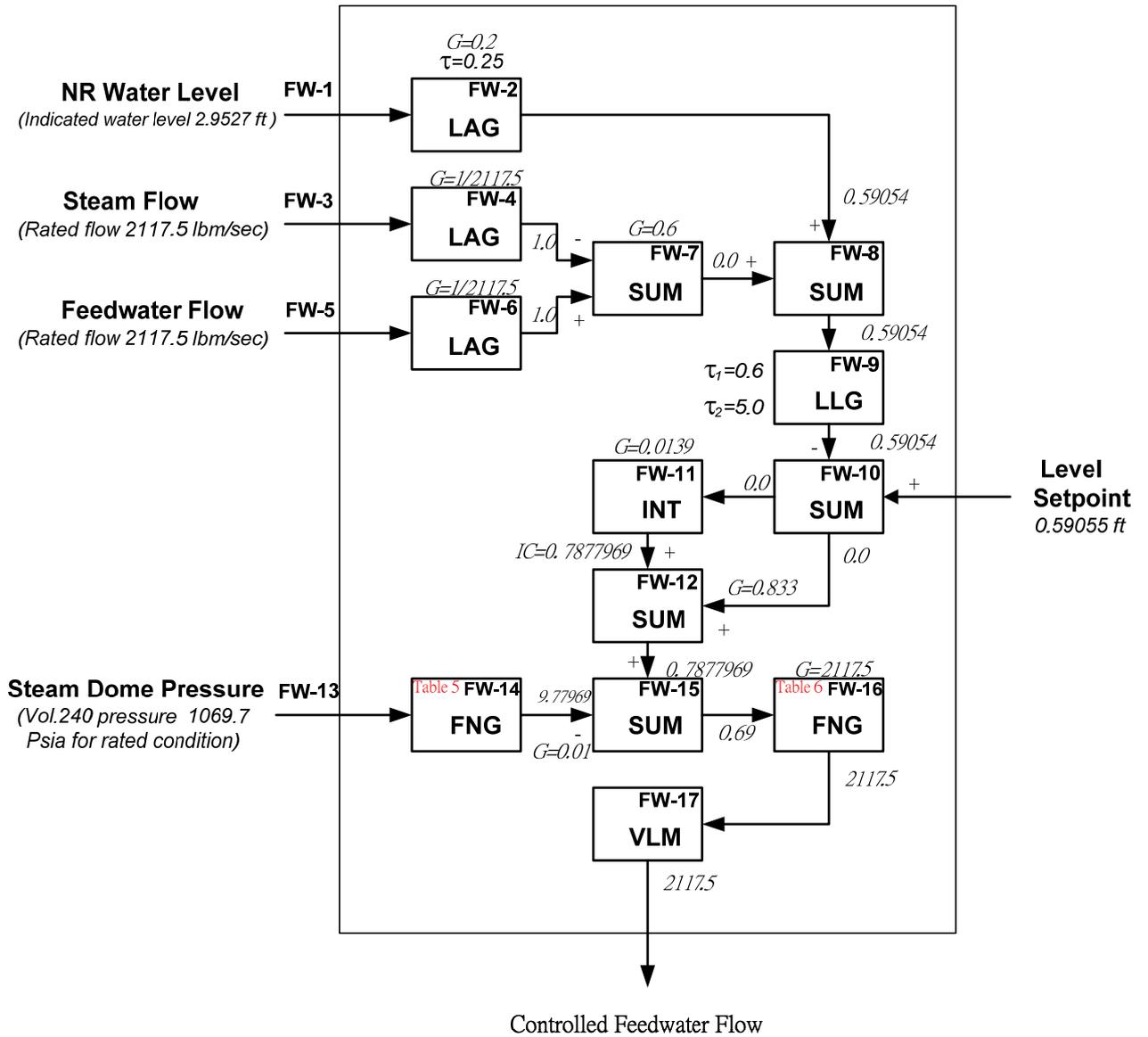


圖 3.11 核一廠飼水三元控制控制邏輯方塊圖

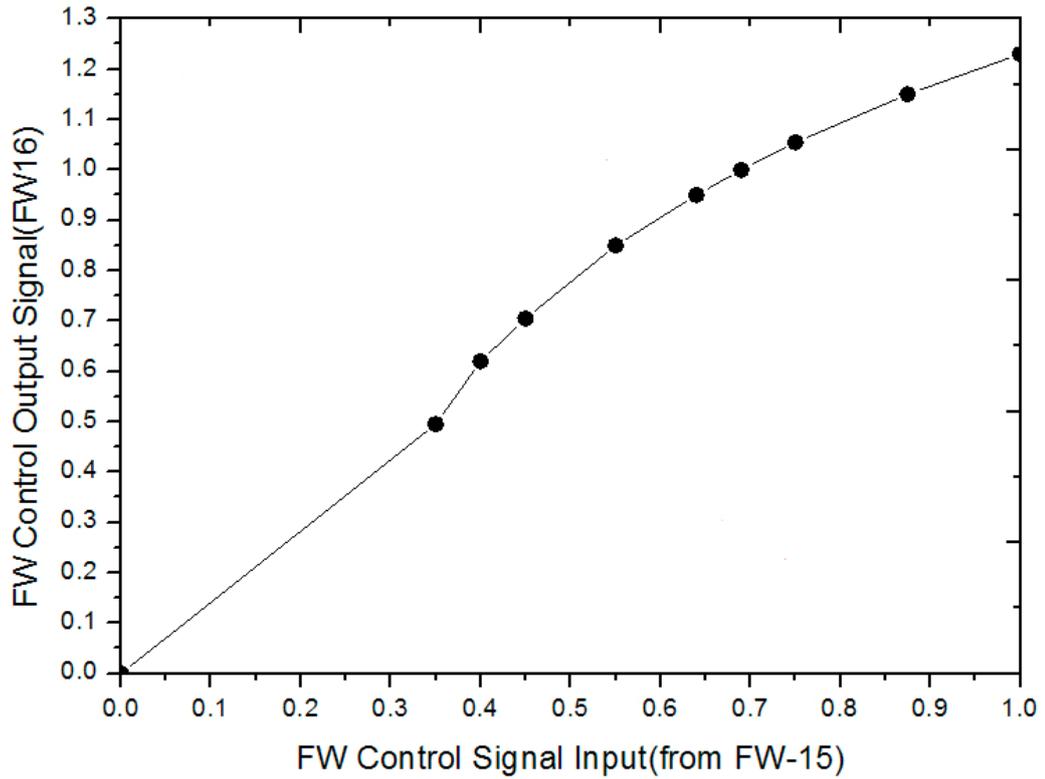


圖 3.12 飼水控制輸出訊號線性轉換(參考核一廠雷傳程式)

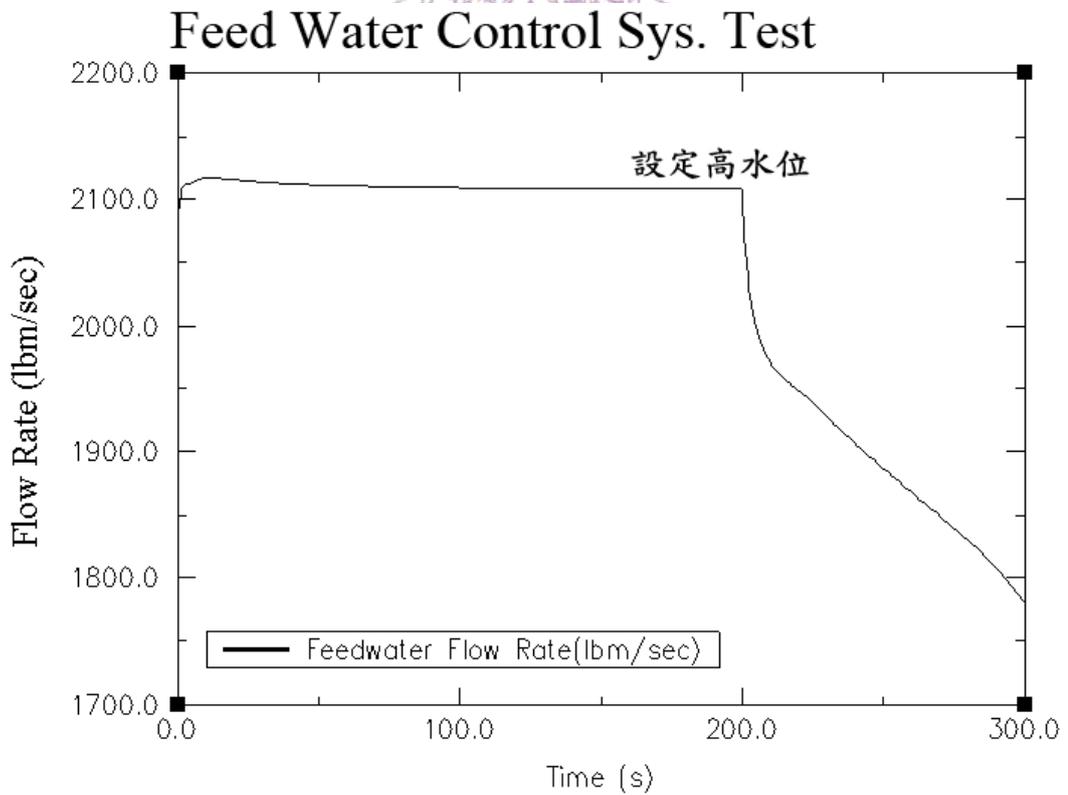


圖 3.13 飼水控制系統高水位測試圖

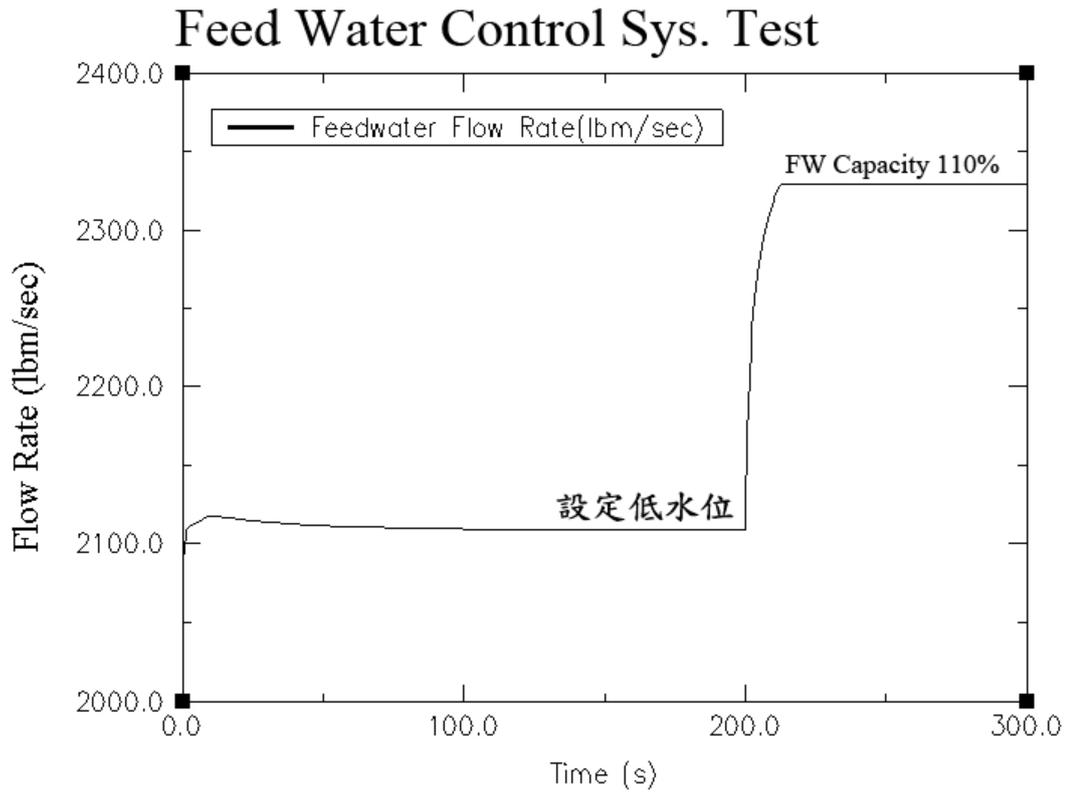


圖 3.14 飼水控制系統低水位測試圖

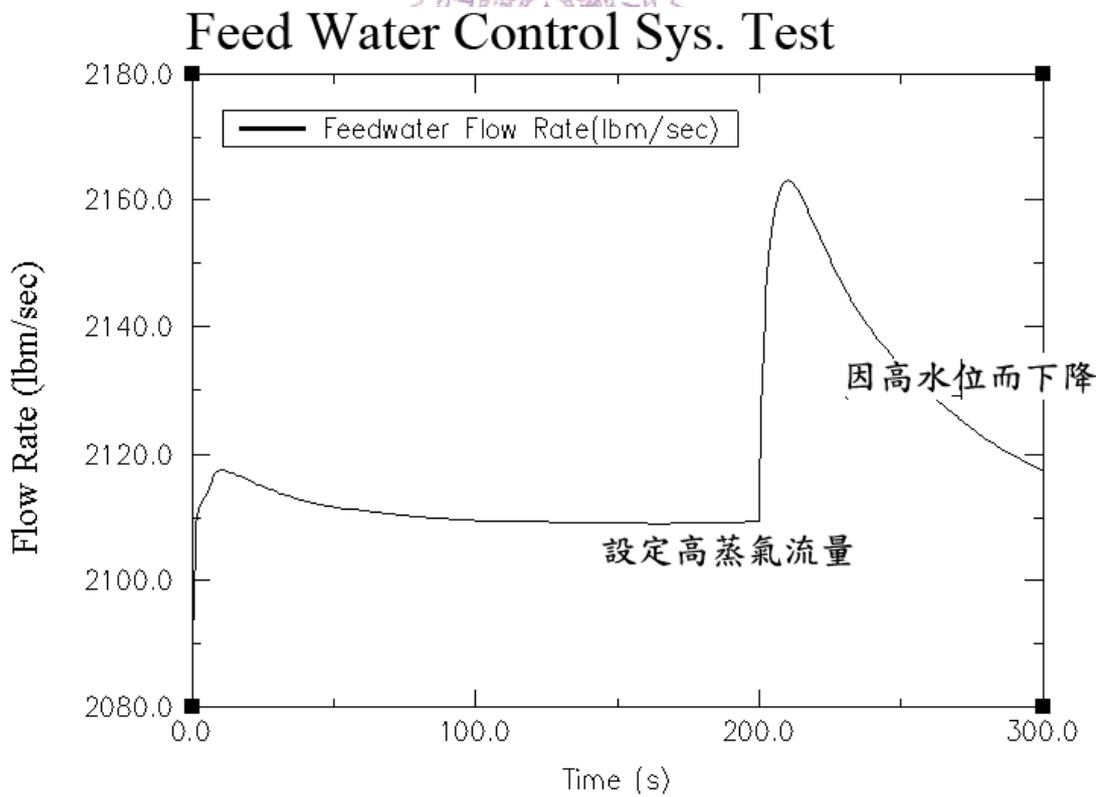


圖 3.15 飼水控制系統高蒸汽流量測試圖

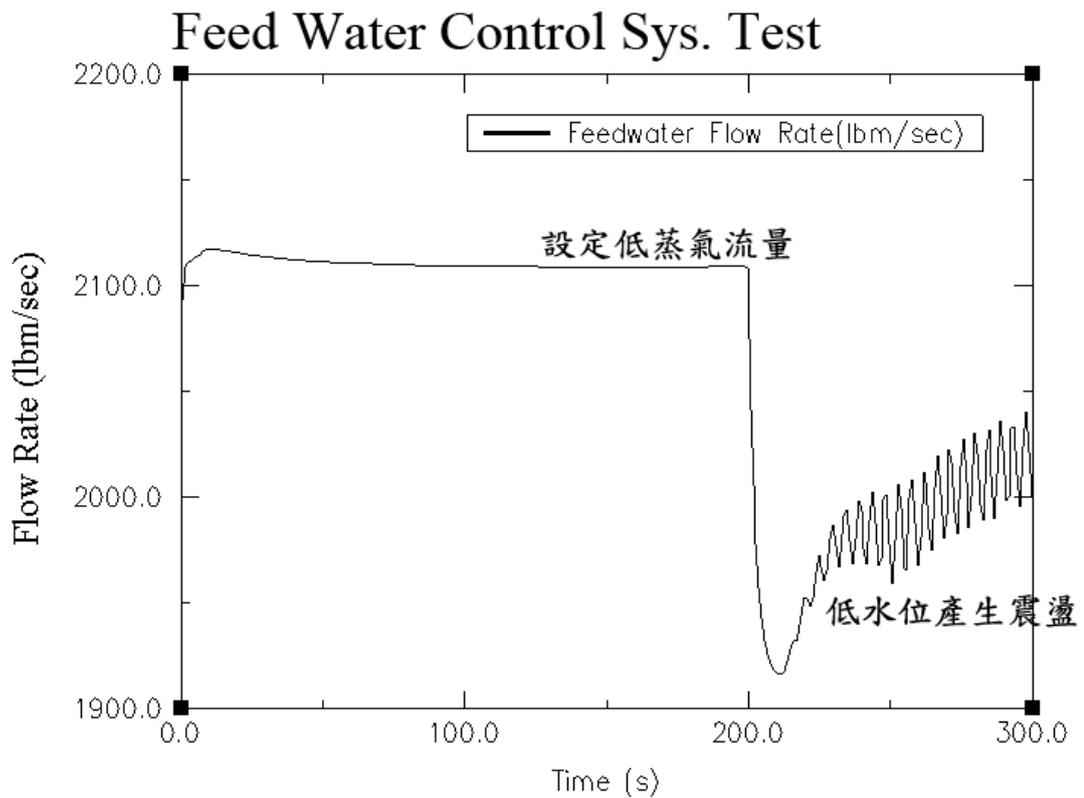


圖 3.16 飼水控制系統低蒸汽流量測試圖

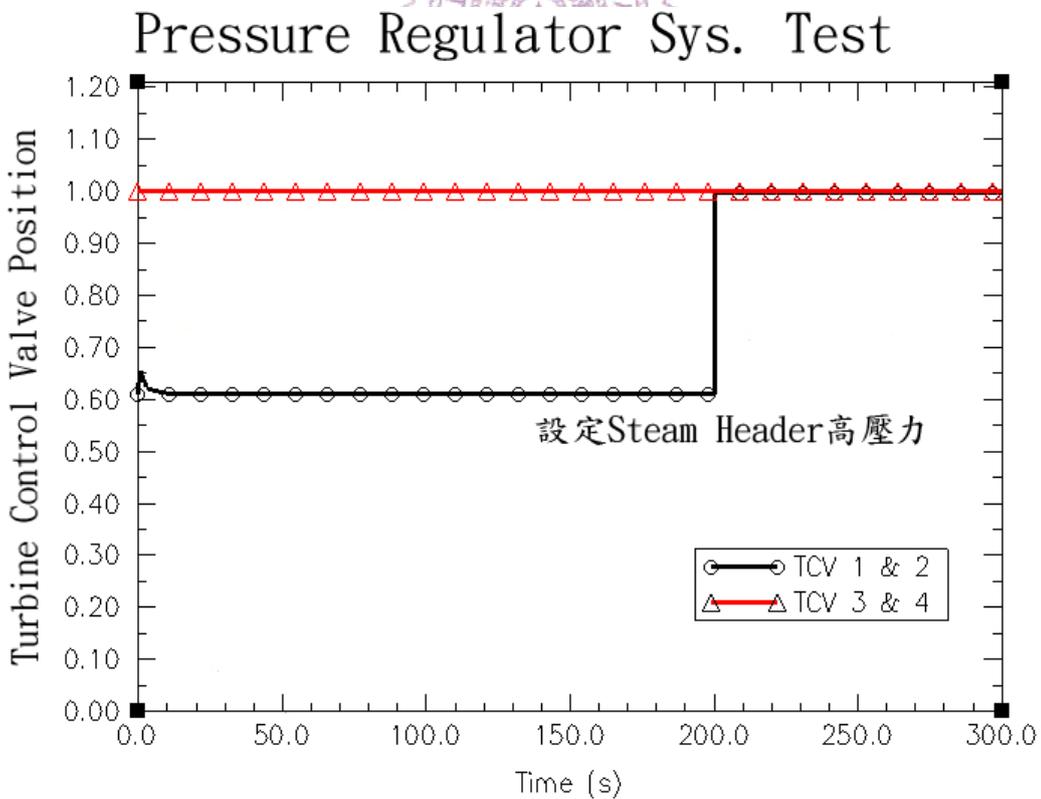


圖 3.17 蒸汽集管(Steam Header)高壓力設定汽機控制閥測試圖

Pressure Regulator Sys. Test

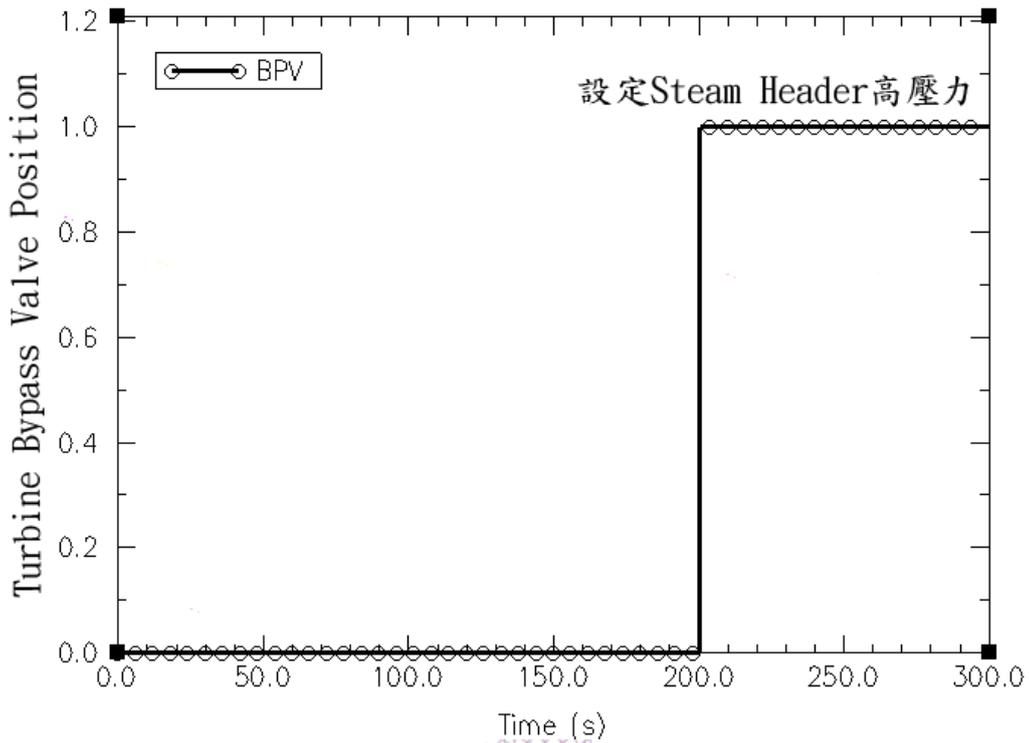


圖 3.18 蒸汽集管(Steam Header)高壓力設定汽機旁通閥測試圖

Pressure Regulator Sys. Test

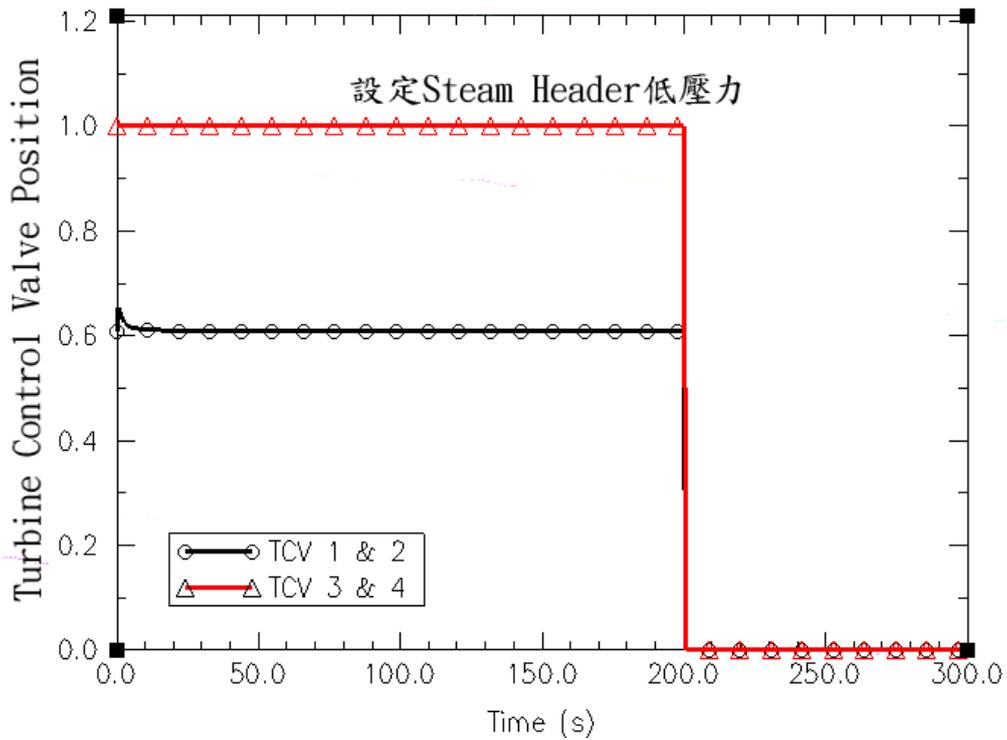


圖 3.19 蒸汽集管(Steam Header)低壓力設定汽機控制閥測試圖

Pressure Regulator Sys. Test

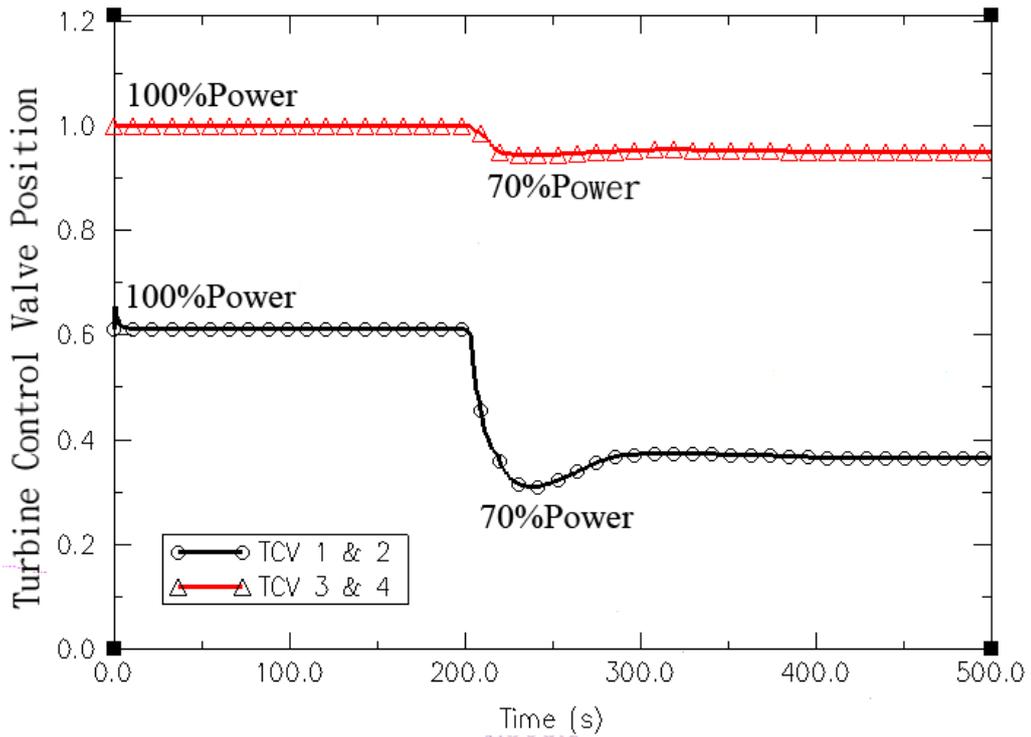


圖 3.20 汽機控制閥功率改變測試圖

Pressure Regulator Sys. Test

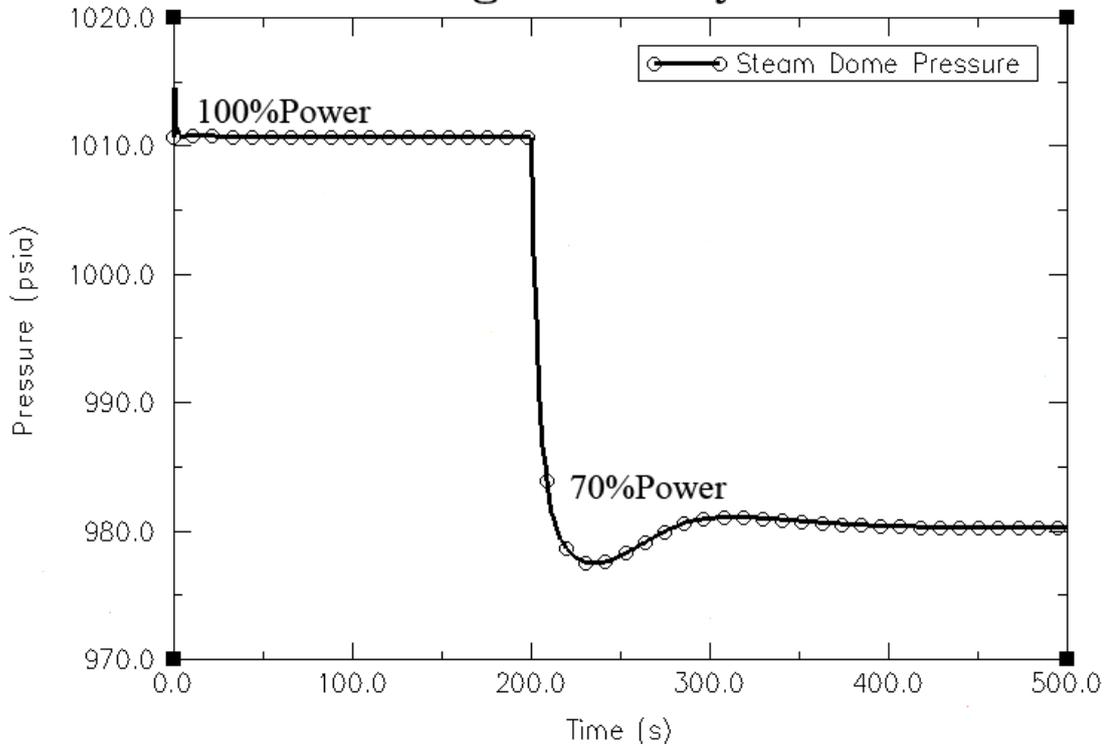


圖 3.21 蒸汽頂槽壓力功率改變測試圖

第四章 暫態分析結果與驗證

4.1 前言：

完成控制系統增修並測試後，本章將以核一廠之功率測試數據來驗證更新後的核一廠 RELAP5/MOD3.3 輸入模式之精確性。本章將選用二組功率測試數據來驗證其精準性，其中包含：

1. 97% 功率單台再循環泵跳脫測試(97% Power One Recirculation Pump Trip)、
2. 100% 功率發電機負載棄載測試(100% Power Generator Load Rejection)。

此二組功率測試數據用來驗證核一廠 RELAP5/MOD3.3 程式之精準性，並據以作為未來模擬分析校驗之用。由於各個測試的初始狀態都不相同，必須先將程式中之相關參數調整至測試時之初始狀態，而針對初始狀態的建立，必須將重要參數如反應爐蒸汽頂槽壓力、爐心流量、降流區水位及飼水流量先調整至穩態初始狀況，再進行暫態模擬分析之執行。

以下將先建立並確認核一廠 RELAP5/MOD3.3 輸入模式穩態，再就校驗分析的測試內容，測試目的及校驗結果詳細說明之後，並將計算結果與測試結果比對，在分析過程中，針對分析結果對測試暫態現象之模擬調整分析模式，並與舊有的輸入資料及雷傳程式比對，以建立最佳之基本模式。

4.2 核一廠 RELAP5/MOD3.3 穩態建立

在進行暫態事故分析前，須先調整系統至穩態收斂，使分析系統內各體積內之壓力、溫度、流量及熱焓變化值，在暫態事故模擬測試前，能達成穩態運轉需求。

不同的暫態事故測試，皆有不同的初始狀態值，因此除穩態的建立之外，還需要調整各項參數與暫態事故初始數據接近，甚至達到相同的數值，如爐心功率、蒸汽爐頂壓力、爐心流量、降流區水位及飼水溫度等，以上各個參數初始值都對暫態變化影響很大，

因此建立正確的初始狀態是十分重要的工作，所以在進行暫態或事故分析前，須先完成正確穩態初始狀況之建立。

在核一廠 RELAP5/MOD3.3 輸入模式之中，反應爐功率、飼水溫度及汽機壓力都作為邊界條件輸入，再利用飼水及壓力調節控制系統來調整核一廠系統達到適當之穩態壓力、水位、爐心流量，蒸汽流量及飼水流量等。所要調整之參數包括如下：蒸汽頂槽壓力(Steam Dome Pressure)、爐心流量(Core Flow Rate)及降流區水位(Downcomer Water Level)。蒸汽頂槽壓力可藉由調節蒸汽流量來調整，爐心流量則可由再循環泵轉速(Recirc. Pump Speed)來調節，而降流區水位則藉由飼水流量來調整，詳細之控制模式，可參考第三章所述。然而各項調節之動作會相互影響，因此要調整至預期電廠初始狀態是件費時且繁雜的工作。

而在調整輸入模式至穩態的過程中，也利用了一自動化穩態程式(Pygmalion, Pygi)，將運算後產生各控制體積(Volume)及流體接點(Junction)穩態數值替換原始輸入模式之初始狀況值，並將穩態熱結構數值手動帶入輸入資料之中即完成，對於暫態及事故分析非常有用。

圖 4.1 至圖 4.6 為 100% 全功率穩態時功率、爐心流量、蒸汽頂槽壓力、蒸汽流量、飼水流量及窄幅水位時變圖。圖 4.7 至圖 4.12 為利用控制系統調整為 97% 功率後的各項參數時變圖，分別為 97% 功率穩態時功率、爐心流量、蒸汽頂槽壓力、蒸汽流量、飼水流量及窄幅水位時變圖。

由各圖形可知除了在模擬計算開始時前幾秒會有擾動之外，之後皆可保持穩態持續至 200 秒，另外窄幅水位也可維持在正常水位高度，因此可確定在兩種功率之下皆可保持穩態計算。

4.3 97%功率單台再循環泵跳脫測試

4.3.1 測試說明

本測試測試編號為 STP-30，於 1978 年 3 月 24 日進行，反應器在 97% 功率穩定運轉下，經由手動打開趨動馬達斷路器(Breaker)於 2.5 秒跳脫單台再循環泵開始。再循環泵跳脫一台，造成爐心流量減少，而使爐心空泡增加，中子緩和(Moderate)效果變差，空泡增加造成負反應度(Reactivity)增加，爐心功率因而降低，蒸汽頂槽壓力在壓力調節器控制下快速降低後，反應爐內變化逐漸趨於穩定，暫態反應於 45 秒時結束。

本測試之目的有二：

1. 獲得再循環泵跳脫時，系統參數諸如飼水流量和蒸汽流量變化、泵減速特性、泵再啟動及流量引發震動等變化情形。
2. 證實於再循環表中顯示模擬結果與測試值相當接近。跳脫的情形下，飼水控制系統可以有效地控制反應爐水位而不致造成汽機跳脫或反應爐急停(SCRAM)。

4.3.2 模擬測試說明

本測試是在 97% 功率下進行，因此在將功率設定為 97% 後，再由控制系統自動將系統帶至穩態，本測試整體事件序列較為單純，只在暫態發生 2.5 秒後跳脫單一臺再循環泵以觀察系統整體反應，調整模擬測試的穩態初始值比較，請見表 5.1，由表可看出各項參數的差異都在百分之一以下。

初步測試結果如圖 4.13 及 4.14 所示，爐心功率變化及蒸氣頂槽壓力都較測試數據為高，因此與核一廠雷傳程式測試結果比較顯示，再循環泵跳脫轉速曲線關係到此次測試的準確性，但測試數據並無再循環泵轉速變化資料，因此與雷傳程式單串再循環泵跳脫比較，測試結果如圖 4.15，可發現核一廠 RELAP5/MOD3.3 輸入模式的再循環泵轉速從 2.5 秒跳脫開始，至 29 秒左右轉速就降至 0 rpm，而雷傳程式的再循環泵跳脫後，則

是靠著再循環泵本身的慣性(inertia)而維持較低轉速的運轉，然而雷傳程式本身也是採用表列方式將時間對轉速的曲線輸入，因此本測試將採用雷傳程式的再循環泵跳脫轉速表列。

4.3.3 模擬測試結果

單串再循環泵跳脫之後，再循環泵轉速將因慣性隨時間減速下來；爐心流量亦隨之減少，造成的影響是爐心的空泡(void)增加，使得中子減緩(Moderate)的效果變差，爐心功率將因而降低，爐頂壓力亦隨之下降。最後，飼水控制系統適時回復反應爐水位，而不致使反應爐因低水位而跳脫，爐心功率在約 11.9 秒時，達到最低值 68.8%。

4.3.4 模擬測試結果分析

圖 4.16 至 4.22 所示分別為反應爐功率、蒸汽頂槽壓力、爐心流量、水位、飼水及蒸汽流量等參數的暫態模擬與測試數據的變化情形，由於測試數據並無飼水及蒸汽流量資料，因此只列出模擬值。

97%全功率單台再循環泵跳脫暫態開始於 2.5 秒，因再循環驅動的冷卻水減少，爐心流量也因此下降，而反應爐內因冷卻水不足將熱移除而使爐心空泡增加，中子緩和(Moderate)效果變差，空泡增加造成負反應度(Reactivity)增加，爐心功率因而降低，蒸汽頂槽壓力在壓力調節器的微調控制下緩慢降低，反應爐內在暫態末期變化逐漸趨於穩定，暫態反應於 45 秒時結束。表 5.2 為暫態模擬分析與測試數據之事件時序比較。在暫態發生過程中，並無反應爐急停(SCRAM)及閘的開關動作產生，各參數分析討論如下：

1. 反應爐功率：圖 4.16 為反應爐功率暫態比較，暫態開始 2.5 秒後單台再循環泵跳脫，爐心流量降低造成空泡增加，並由於空泡負反應度之影響，使功率下降至最低大約 68.8%左右，而後逐漸趨於穩定。模擬值與測試值趨勢大致吻合，但模擬值功率在暫態後半段則是較測試數據高，參照其他參數，可發現爐心流量會是影響反應爐功率的主要原因，爐心流量平均而言較測試數據高，而反應爐爐心幾乎是與爐心流量成正比關係，因此推論是爐心流量造成反應爐功率會

維持在較高的主因，另外 RELAP5/MOD3.3 只能使用點中子動態模式，其準確性也是有相當的影響。

2. 蒸汽頂槽壓力：圖 4.17 為反應爐蒸汽頂槽壓力之比較，暫態開始後，壓力即隨著反應爐功率下降而逐漸趨至於穩態，暫態蒸汽頂槽壓力初始值及大於測試數據 7 psia，而圖中結果顯示模擬值與測試值的差距也幾乎都是初始值誤差造成的，整體來說模擬值與測試數據非常接近。
3. 降流區水位：圖 4.18 為反應爐降流區水位之比較，由於單串再循環泵跳脫，冷卻水流動降低，蒸汽流量隨著功率減少而減少，因此水位會微幅的上升。圖中可觀察到，模擬結果與測試值趨勢相當接近，飼水控制系統可以維持水位在正常水位範圍之中。
4. 爐心流量：圖 4.19 為爐心流量之暫態模擬結果比較，由於暫態開始再循環泵跳脫，爐心流量因而迅速降低，暫態末期而漸趨穩定。測試數據在 25-30 秒間有一尖峰，參考別的測試數據參數並無觀察到相關參數的突升，因此推論可能為測試數據偵測干擾(noise)所造成，因此圖 4.20 嘗試將測試數據線性擬合(Linear Fit)後，可觀察出線性擬合後測試數據與模擬值趨勢相當吻合，但整體流量仍較測試數據為高，因此也影響了反應爐功率的預測。
5. 蒸汽與飼水流量：因無測試數據，故只列出模擬值的結果，圖 4.21 為飼水與蒸汽流量比較圖，由於壓力調節系統為了維持反應爐槽內的壓力，因此會調節汽機控制閥(TCV)以降低蒸汽流量，圖 4.22 即為兩組汽機控制閥(TCV)閥開度的變化比較，可觀察出兩組閥都因為功率的降低而略微減少閥的開度，因此蒸汽流量也隨之減少。飼水三元控制系統在前述水位變動不大的情況下，因為蒸汽流量下降，因此也會降低飼水的流量供給，整體來說皆符合反應爐暫態的反應。

4.3.5 模擬測試比較及結論

由上述討論可知，核一廠 RELAP5/MOD3.3 輸入模式對於 97% 功率單串再循環泵跳脫暫態事故具有相當程度的模擬能力，而本輸入模式控制系統由核一廠雷傳程式修改而來，因此以下針對差異較大的參數比較。

圖 4.23 為核一廠 RELAP5/MOD3.3 輸入模式與核一廠雷傳程式功率比較圖，由圖可發現雷傳程式功率模擬較接近測試數據，應該是雷傳程式使用一維中子動態模型模擬爐心功率變化，同時爐心流量模擬也較為準確之故，因此有較佳的預測值。圖 4.24 為蒸汽頂槽壓力變化比較情形，可發現兩者初始值與測試數據皆不同，而趨勢則是接近，而在此參數表現上，RELAP5 程式則較雷傳程式為佳。另外也針對改進幅度較大的參數與舊有的輸入模式比較，如圖 4.25 及圖 4.26，可觀察到舊有核一廠 RELAP5 輸入模式對於壓力及爐心流量預測皆不如更新過後的輸入模式。

整體而言核一廠 RELAP5/MOD3.3 輸入模式爐心功率有一些誤差，推論結果應該是爐心流量預測差異造成的影響，且核一廠 RELAP5/MOD3.3 輸入模式內建的空泡及都卜勒反應度回饋表列並未考慮正反應度的情況，才有此差異，因此接續工作者應朝此方向更新改進。

4.4 100%功率發電機負載棄載測試

4.4.1 測試說明

本測試之測試編號為 STI-27，是在 1978 年 4 月 11 日進行，反應爐乃在滿載功率下穩定運轉，測試人員手動將主發電機輸出斷路器(breaker)跳脫而開始測試。接下來的汽機控制閥(TCV)關閉與汽機旁通閥(BPV)開啟，導致暫態發生及反應爐急停(SCRAM)。測試目的是為了確定汽機控制閥(TCV)能否快速關閉，並對汽機旁通閥(BPV)、安全釋壓閥(SRV)以及反應爐保護系統之回應做評估。此測試之目的為：

1. 測試飼水控制系統可否將水位控制良好以避免造成蒸汽管路被過高的水位淹蓋 (Flooding)。
2. 測試飼水控制系統是否能維持反應爐槽水位高度，不致因水位過低而使主蒸汽隔離閥(MSIV)關閉或是造成緊急爐心冷卻系統(ECCS)啟動。
3. 測試汽機控制閥(TCV)能否快速關閉，及測試汽機旁通閥(BPV)、安全釋壓閥(SRV)以及反應爐保護系統的回應。

此次 100% 功率發電機負載棄載測試(100%Power Load Rejection, 100LR)，在 100% 額定功率穩定運轉下，在 1.5 秒手動打開發電機之兩個斷路器(Breaker)，導致汽機控制閥(TCV)在 0.4 秒內快速關閉；蒸汽旁通系統啟動打開汽機旁通閥(BPV)。當控制閥快速關閉達 90% 後延遲 0.1 秒送出信號使反應爐急停(SCRAM)。由於汽機控制閥(TCV)快速關閉造成系統壓力快速上昇，暫態發生 3.1 秒後壓力達到釋壓閥(Relief valve)第一組設定點，第一組釋壓閥開啟使頂槽壓力迅速下降，並於 9.9 秒時閥重置，此時壓力由於旁通閥打開而持續下降，在 19 秒時壓力低於設定點並使旁通閥開始重置，壓力因此往上略昇，暫態模擬於 21 秒結束。

4.4.2 模擬測試說明

由於負載棄載測試是在全功率情形下進行，因此暫態模式的建立可由基本模式略為修改後直接應用。手動設定的部分，因為更新後的核一廠 RELAP5/MOD3.3 輸入模式是將汽輪機部份以邊界條件並設定其為定壓的方式模擬，因此為了要充分驗證負載跳脫暫態，將汽機控制閥(TCV)在暫態開始 1.5 秒以手動跳脫，汽機控制閥關閉特性曲線則以電廠的測試數據(TEST DATA)代入，由圖 4.27 可知汽機控制閥(TCV)完全關閉需要 0.4 秒的時間；另外汽機旁通系統偵測到汽機控制閥(TCV)的快速關閉，必須在 0.1 秒內開啟汽機旁通閥(BPV)，且在 0.3 秒內開啟至 80% 設計容量(Design Capacity)的開度。汽機旁通閥(BPV)關閉的控制則是根據蒸汽頂槽(Steam Dome)壓力低於 934.7psia 時開始關閉，圖 4.28 則為汽機旁通閥(BPV)的閥開啟及關閉特性曲線，由圖可知開啟及關閉皆需要 0.4 秒的時間，皆以電廠數據代入。

模式分析的起始值與測試數據的比較，可見表 4.3，各項參數的差異都在百分之一以下，其中測試數據(TEST DATA)中的初始飼水及蒸汽流量差距過大，但在核一廠 RELAP5/MOD3.3 輸入模式穩態之中，進出系統的質量相等，因此會與測試數據有所差距，不過仍是在合理及可接受的範圍之內。

4.4.3 模擬測試結果

模擬結果顯示，測試結果都可符合測試要求項目，汽機旁通閥在控制閥關閉後約 0.011 秒打開，並在 0.102 秒後，開至 80% 開度。而飼水控制系統能將窄幅偵測水位維持在 Level 3 以上，寬幅水位也能維持在儀器零點(instrumentation zero)上下，對引起主蒸汽隔離閥(MSIV)關閉及蒸汽管路被水淹蓋的可能，仍有相當大的餘裕度(Margin)。蒸汽預測壓力增加值 65.91psia (1076.65psia)也與測試數據相近，第一組安全釋壓閥(SRV)按照其壓力設定點打開，整體測試並沒有造成緊急爐心冷卻系統(ECCS)啟動的訊號產生。

4.4.4 模擬測試結果分析

圖 4.29 至 4.38 所示分別為反應爐功率、爐心流量、蒸汽頂槽壓力、飼水流量、蒸汽流量、寬幅及窄幅水位、安全釋壓閥(SRV)及汽機旁通閥(BPV)等八個參數的暫態模擬與測試數據的變化情形。

100%全功率發電機負載棄載暫態開始於 1.5 秒，汽機控制閥(TCV)立即關閉，此時汽機旁通閥(BPV)也立刻開啟；蒸汽流量因汽機控制閥(TCV)之關閉，由 100% 蒸汽流量降至 29.9% 汽機旁通閥(BPV)流量，而當汽機控制閥(TCV)開度達 90% 位置時，反應爐於 1.61 秒急停(SCRAM)；反應爐蒸汽頂槽(Steam Dome)壓力，因汽機控制閥(TCV)快速關閉而升高，在 3.48 秒時達到 1075.59psia 使第一組安全釋壓閥(SRV)打開，隨後因反應爐急停(SCRAM)以及汽機旁通閥(BPV)開啟及安全釋壓閥(SRV)打開而快速下降，當蒸汽頂槽壓力降到 934.7psia 時，汽機旁通閥(BPV)會關閉，壓力也隨即略昇；水位於暫態發生之初，因反應爐急停(SCRAM)，再加上反應爐蒸汽頂槽壓力上升，爐心空泡(Void)消

失造成水位下降。暫態中 ECCS 並未啟動。表 5.4 為模擬結果與測試數據之時序比較。另模擬分析結果各參數分析討論如下：

1. 反應爐功率：圖 4.29 為暫態功率之比較，暫態開始由於汽機控制閥(TCV)快速關閉至 90%開度，導致反應爐於 1.61 秒急停，功率因而驟降而剩衰變熱(Decay Heat)，圖中顯示模擬值與測試值下降趨勢幾乎相同，但圖中下降之最低點模擬值與測試值略有差異可能因測試值所採用為中子通量 APRM 之結果，但實際上反應爐急停(SCRAM)後應該有衰變熱(Decay Heat)產生。
2. 爐心流量：圖 4.30 為爐心流量之比較，測試數據顯示，暫態初期由於反應爐急停(SCRAM)造成空泡陷縮，且爐心頂槽壓力上升，使雙相摩擦損耗係數(Two-phase Friction Loss coefficient)及形狀損耗係數(Form loss coefficient)下降，而使爐內壓降減少，爐心流量因而上昇，而後逐漸趨於穩定。模擬值則是在暫態發生時略升後即維持穩定狀態，此模擬值與測試數據明顯不符，在下一節會有相關討論。
3. 蒸汽頂槽壓力：圖 4.31 為暫態蒸汽頂槽壓力之比較，由於汽機控制閥(TCV)快速關閉動作，使蒸汽頂槽壓力迅速上升，於 3.48 秒時達安全釋壓閥(SRV)設定點打開一組釋壓閥壓力隨即下降，在 7.12 秒時達安全釋壓閥(SRV)重置(Reset)設定點時安全釋壓閥(SRV)重置，但因反應爐急停(SCRAM)及蒸汽經由旁通閥(Bypass Valve)排至冷凝器(Condenser)雙重之影響，壓力持續下降，當壓力達到蒸汽槽頂 934.7psia 後，汽機旁通閥(BPV)開始關閉而使壓力略往上升。圖中顯示模擬結果趨勢與測試數據相同，在 3.53 秒時壓力達到最高 1076.65psia，因安全釋壓閥(SRV)和汽機旁通閥(BPV)持續排除高壓冷卻水，壓力下降至 7.12 秒時安全釋壓閥(SRV)重置，可在此觀察到壓力下降斜率的改變，之後即是由汽機旁通閥(BPV)旁通蒸汽主導蒸汽槽頂的壓降，而程式模擬降壓較快，蒸汽槽頂壓力也較快達到 934.7psia。
4. 蒸汽流量：圖 4.32 為蒸汽流量之比較圖，由於汽機控制閥(TCV)快速關閉及汽機旁通閥(BPV)的快速開啟，導致蒸汽流量快速下降，蒸汽流量由原來 100%

(2117.5 lbm/sec) 迅速在 3.41 秒時降低至汽機旁通閥的最大流量約 29.9%(635.2 lbm/sec)，之後又因為 3.48 秒時第一組安全釋壓閥(SRV)打開，且第一組安全釋壓閥(SRV)位於蒸汽管線 A 及蒸汽管線 D 上，因此造成蒸汽流量震盪的情形，7.12 秒時安全釋壓閥(SRV)關閉，蒸汽流量漸趨穩定，直到 15.41 秒汽機旁通閥(BPV)關閉後，蒸汽流量又開始產生小幅震盪，但此時蒸汽流量已趨近於 0，由圖可知模擬值與測試值趨勢大致吻合。

5. 降流區水位：圖 4.33 為反應爐降流區水位之比較，圖中測試值為寬幅偵測水位，暫態開始由於汽機控制閥(TCV)快速關閉，造成反應爐槽內的壓力上升，造成空泡瞬間被冷凝成液態，因此可觀察到測試值在暫態開始時有略升的趨勢，但之後反應爐急停(SCRAM)造成空泡陷縮，使得水位下降，而後因壓力下降及飼水流量補入而逐漸上升。模擬值在暫態開始並無觀測到水位有略升的現象，而後寬幅水位趨勢與測試值結果大致相同，但約在 15.1 秒左右汽機旁通閥(BPV)開始關閉，造成反應爐槽內壓力開始上升，水位也因蒸汽被冷凝成液態水而上升，但隨著蒸汽流量及飼水流量的降低，寬幅水位維持儀器零點左右。
6. 飼水流量：圖 4.34 為飼水流量之比較圖，由第三章討論可知，飼水三元控制系統會依據水位、蒸汽流量及飼水流量決定飼水的多寡，因此暫態開始時，由於汽機控制閥(TCV)快速關閉造成蒸汽流量迅速降低，雖同時水位也降低，但交互影響下飼水會降低飼水供給量，但隨著水位不斷的下降，飼水流量逐漸得增加，直到 15.1 秒左右汽機旁通閥(BPV)開始關閉，造成水位的突升及蒸汽流量的減少，讓飼水流量顯著的降低，由圖也可知模擬值與測試值有顯著的不同，在下一節會有相關討論。
7. 安全釋壓閥(SRV)：圖 4.35 為第一組安全釋壓閥(SRV)(Valve 670,679)的開度變化圖，兩閥分別位於蒸汽管線 A 及蒸汽管線 D 上，3.48 秒時由於反應爐槽內壓力達到設定點而開啟，於 7.12 秒時重置，各閥最大流量約為 209.4(lbm/sec)。
8. 汽機旁通閥(BPV)：圖 4.36 為汽機旁通閥(BPV)模擬比較之結果，模擬值與測試值開啟的時間及特性曲線都相同，但是汽機旁通閥(BPV)關閉的機制是當蒸汽頂

槽壓力小於 934.7psia 後開始關閉，由圖可知模擬值較測試值早關閉，顯示系統模擬結果較實際測試值壓力下降為快。

9. 流量比較圖：圖 4.37 為暫態模擬各流量比較變化，由圖可知各流量變化的相關性，如蒸汽流量的震盪變化與汽機旁通閥(BPV)及安全釋壓閥(SRV)有顯著的關係，其中較為特殊的是暫態發生時，蒸氣流量下降且因急停(SCRAM)功率迅速下降，測試資料中顯示爐心流量降低並產生震盪，但是模擬值卻維持在較原穩態更高的流量值，此問題將會在下一節會有相關的討論。

4.4.5 模擬測試調整

由上述討論可知，核一廠 RELAP5/MOD3.3 輸入模式對於 100%全功率發電機負載棄載暫態事故的幾項重要參數，如壓力變化、功率及水位控制等都能夠有相當程度的模擬能力，但有幾項參數如爐心流量及飼水流量仍不盡理想，本節將嘗試調整以期能發現輸入模式的問題，並作出更好的改進。

單串再循環泵跳脫

因本模擬測試參考核能研究所「核一廠雷傳模式起爐測試報告」【6】，而在此測試報告同一暫態測試之中，增加了再循環管路 A 串的再循環泵於暫態發生 3 秒時跳脫的假設，因此接下來以同樣假設測試。

圖 4.38 為假設再循環管路 A 串泵跳脫後爐心流量變化情形，因爐心流量主要為再循環泵所驅動，因此將其中之一的再循環泵跳脫後，只剩下單一再循環泵驅動反應爐內冷卻水流，因此爐心流量會逐漸下降。

圖 4.39 為蒸汽頂槽壓力之比較圖，可發現由於爐心流量下降，反應爐槽系統整體壓力下降情形趨緩，因此也延長了安全釋壓閥(SRV)及汽機旁通閥(BPV)關閉的時間點，如圖 4.43 及圖 4.44。另外圖 4.41 為飼水流量變化情形，可發現飼水模擬的情況較測試值差距更大，如蒸氣流量前後模擬差異不大，那麼主要影響飼水變化即為圖 5.42 的水位變化情形，由圖可發現與前節模擬(圖 4.33)最大的差別在於 3.0 秒時產生了轉折，可以推測為再循環泵跳脫造成的影響，因爐心流量下降，在蒸氣流量幾乎相同的前提之下，將

造成反應爐降流區(Downcomer)流量的增加，而水位變化也因此加劇，如圖 4.45 所示，單串再循環泵跳脫的案例之中，關係到寬幅水位偵測計算的控制體積(Vol.268)密度因流量較小，空泡也較少，因此較最初的模擬案例密度為高，因此水位也會較高，進而造成飼水流量會較最初的模擬案例為低。

將單串再循環泵跳脫的假設或許可以將爐心流量降低，但是反而在飼水流量以及水位變化情形上反而較最初的模擬更不準確。理論上系統跳機但再循環泵沒有跳脫的情況下，爐心流量變化應該不大，而在跳機的暫態開始時，爐心的流量應該也會略微上升，因此測試資料中的爐心流量有值得商榷的地方，而最初的模擬測試結果也符合物理特性，而跳脫一台再循環泵的假設也與電廠功率測試數據不相符，因此這樣的修改並不會讓輸入模式更加精準。

調整汽機旁通閥(BPV)關閉時間

由上述假設跳脫單串再循環泵的模擬案例之中，發現輸入模試相對於測試數據，壓力下降都較快，系統壓力的來源除了爐心產生的熱之外，就是反應爐高壓冷卻水，汽機旁通閥額定旁通流量為 29.9%，然而測試數據之中只有汽機旁通閥(BPV)開度變化，並無實際汽機旁通閥的流量數據，且原本汽機旁通閥為三個閥的設計，在模擬簡化為單一閥的情況下，是有值得討論的地方，因此接下來的微調，嘗試將汽機旁通流量降低，進而將汽機旁通閥(BPV)關閉的時間點調至相同。

圖 4.46 至 4.51 為調整汽機旁通閥後(BPV)所得參數圖，圖 4.46 為調整汽機旁通閥流量後的開度比較圖，調整後的汽機旁通閥(BPV)開啟及關閉時間點幾乎相同，最直接的影響就是圖 4.47 的蒸汽頂槽壓力變化的情形，由圖可觀察到因汽機旁通閥(BPV)的冷卻水排放流量減少，因此蒸汽頂槽的壓力會較原始模擬及測試數據為高，但是差距皆很小，又因汽機旁通閥(BPV)關閉時間點延後，因此壓力在暫態末期的轉折點也延後而更接近測試數據。壓力則較原始的模擬為高，可以預期的是安全釋壓閥(SRV)開啟的時間點也會提早，圖 4.48 為安全釋壓閥(SRV)閥開度比較，可觀察到因暫態壓力增高，安全釋壓閥(SRV)的開啟會提早，關閉的時間點也會延後。調整汽機旁通閥(BPV)流量另一個可以預期的結果是蒸汽流量會因此而下降，圖 4.49 為蒸汽流量比較圖，調整汽機旁通閥

(BPV)後的蒸汽流量會更接近測試數據，震盪情形也較不嚴重。圖 4.50 為飼水流量變化圖，由圖 4.51 水位比較圖可發現，水位模擬較原始模擬更接近，但差異仍不大，因此在蒸汽流量減少之下，圖 4.50 中的飼水流量會較原始模擬值低，由飼水三元控制來試著解析此現象，蒸汽與飼水的流量是相對的控制信號輸入，蒸汽流量下降會連帶導致飼水流量下降，在核一廠 RELAP5/MOD3.3 輸入模式之中，飼水是由依時接點(time-dependent junction)模擬，因此在蒸汽管線的流量因汽機旁通閥(BPV)流量減少的情況下，水位信號將會是主導飼水流量的主因。

飼水控制系統中水位訊號是由儀器零點開始計算的水位信號(0~150cm)，不管由圖 4.33 或圖 4.51 的水位比較圖，都可發現窄幅水位(NRWL)與寬幅水位(WRWL)計算出的誤差。在本輸入模式中窄幅及寬幅水位計算都是以儀器零點為基準，而寬幅水位是將偵測計算出的結果平移至儀器零點，理論上兩種偵測系統計算出的水位差距應該極小，然而暫態時卻出現較大的差距，綜合將單串再循環泵跳脫以降低爐心流量的模擬案例來推測，應該是過大的爐心流量將空泡帶至降流區(Downcomer)，因此造成水位計算的不準確，考慮圖 3.2 中控制體積 264，在其之上的控制體積 262 即為窄幅水位計算參考點之一，爐心回落的冷卻水、飼水管線的冷卻水及由蒸汽管線逆流回來的蒸汽交會於此，造成此處之震盪情形，而寬幅水位偵測儀器計算參考點則是在控制體積 268，較可以真實計算出水位變化的情形，因此以下嘗試修改飼水三元控制系統的水位信號。

修改飼水三元控制系統的水位信號

由上述討論可知，飼水三元控制系統的水位信號可能無法充分反應出水位變化的情形，因此接下來將飼水三元控制系統的水位輸入訊號改由寬幅水位計算提供，預期較準確的水位計算應該會改善飼水供給情形。

更動飼水輸入訊號，對於其他參數變動微乎其微，因此只列出有明顯變化的參數，及飼水流量及水位變化。圖 4.52 為調整飼水控制系統水位信號為寬幅水位後的飼水流量比較圖，可發現飼水的確因為偵測到較低水位而增加了飼水流量，圖 4.53 為窄幅水位及寬幅水位變化情形，因飼水流量增加，因此水位也較原始模擬高。

飼水流量雖然已經有所改善，卻無法充分反應在暫態初期蒸汽流量瞬間下降所造成的影響，因此在暫態初期飼水流量與測試數據(TEST DATA)有不小的差距，皆因為蒸汽流量下降的同時，飼水控制系統更敏銳的反應水位輸入訊號的變化，因此接下來嘗試增加水位信號反應時間，降低飼水控制系統對水位變化的靈敏度，延遲飼水控制系統對於水位的反應，以避免暫態時降流區的水位偵測誤差。

圖 4.54 是以寬幅水位作為水位輸入訊號，並延遲水位訊號反應時間後的飼水流量變化圖，由圖可發現飼水流量已經可以接近暫態時飼水的變化量，並可維持一小段時間的最大設計容量(Design Capacity 110%)，而在 15 秒左右時，由於汽機旁通閥(BPV)達到關閉壓力設定值 934.7psia，關閉後造成反應爐槽系統壓力上升，可在圖 4.55 觀察到水位有突升的情況，且同時蒸汽流量急遽下降到 0 左右，因此飼水流量因此也同時降低。

4.4.6 模擬測試比較及結論

由上述討論可知，核一廠 RELAP5/MOD3.3 輸入模式對於 100%全功率發電機負載棄載暫態事故具有相當程度的模擬能力，而因本輸入模式控制系統由核一廠雷傳程式修改而來，因此以下針對差異較大的參數數值作出比較，但須注意的是，雷傳程式因為一樣具有爐心流量無法下降的問題，因此增加了單串再循環泵跳脫的假設。

圖 4.56 為 100%全功率發電機負載棄載暫態的核一廠 RELAP5/MOD3.3 輸入模式與核一廠雷傳程式飼水流量比較圖，由圖可發現雷傳程式飼水模擬與核一廠 RELAP5/MOD3.3 輸入模式皆與測試數據有一段差距，圖 4.57 為蒸汽頂槽壓力變化比較情形，可發現雷傳程式初始值較測試數據高，但三者趨勢則是接近，圖 4.58 則是水位比較圖，雷傳程式與核一廠 RELAP5/MOD3.3 輸入模式有水位無法下降的相同問題，且雷傳程式甚至還增加了再循環泵跳脫的假設。核一廠 RELAP5/MOD3.3 輸入模式有許多參數設定及控制系統是參考核一廠雷傳程式修改而來，因此推測有許多問題也是共通的，模擬的結果也相類似，不過綜合比較來看，兩者模擬結果相差不遠。

整體而言，藉由以上三項修改測試模擬及與雷傳程式的比較，可發現核一廠 RELAP5/MOD3.3 輸入模式中的問題，一是爐心流量過大，另一是飼水控制系統流量控

制。由暫態開始爐心流量會上昇的模擬結果來看，當急停跳機的情況發生時，爐心流量應會瞬間微幅增加，又因再循環泵皆無跳脫，因此爐心流量應該會保持不變，因此測試結果應該是與理論推測較接近的，然而測試數據卻顯示由於跳機造成爐心流量瞬間下降，之後爐心流量則是產生較大的震盪，並在暫態結束前有突升的情形；另外爐心過大的流量也會影響到暫態時反應爐降流區(Downcomer)的空泡變化，進而影響了飼水控制系統水位輸入的訊號，因此推論反應爐內整體壓力降有需要重新調整。而以上靈敏度調整的測試結果顯示，飼水控制系統的水位輸入訊號也有類似的問題，因此調整飼水控制系統前，先必須調整反應爐內的壓力分布狀態後，再重新測試並調整飼水控制系統的輸入訊號。



表 5.1 97% 功率單台再循環泵跳脫初始狀態比較

Initial Condition(97% One Recirc.Pump Trip)		
Paramters	Test	RELAP5/MOD3.3
Power (MWt)	1721.75	1721.82
Steam Dome Pressure (psi)	1000	1007
Core flow (lbm/sec)	14100	14001
Recir flow(lbm/sec)	--	2961.98
Feedwater flow (lbm/sec)	--	2051.92
Steam flow (lbm/sec)	--	2052.15
Pump speed (of rated)	--	0.848

表 5.2 97% 功率單台再循環泵跳脫時序(Scenario)比較

Transient Scenario(97% One Recirc.Pump Trip)		
Events(sec)	Test	RELAP5/MOD3.3
Recirc. pump A trip	2.5	2.5
End of the analysis	45	45

表 5.3 100%全功率負載棄載初始狀態比較

Initial Condition(100%Load Rejection)		
Paramters	Test	RELAP5/MOD3.3
Power (MWt)	1775	1775.04
Steam Dome Pressure (psi)	1007	1010.74
Core flow (lbm/sec)	14940	14904.8
Recir flow(lbm/sec)	--	3150.5
Feedwater flow (lbm/sec)	2119	2115.44
Steam flow (lbm/sec)	2021	2115.73
Pump speed (of rated)	--	0.864

表 5.4 100%全功率負載棄載時序(Scenario)比較

Transient Scenario(100%Load Rejection)		
Events(sec)	Test	RELAP5/MOD3.3
TCVs start to close	1.5	1.50
BPVs start to open	1.5	1.51
Reactor trip	1.6	1.60
SRV1 start to open	3.1	3.48
SRV1 reset	9.9	7.12
BPVs reset	18.9	15.41
End of the analysis	21	21

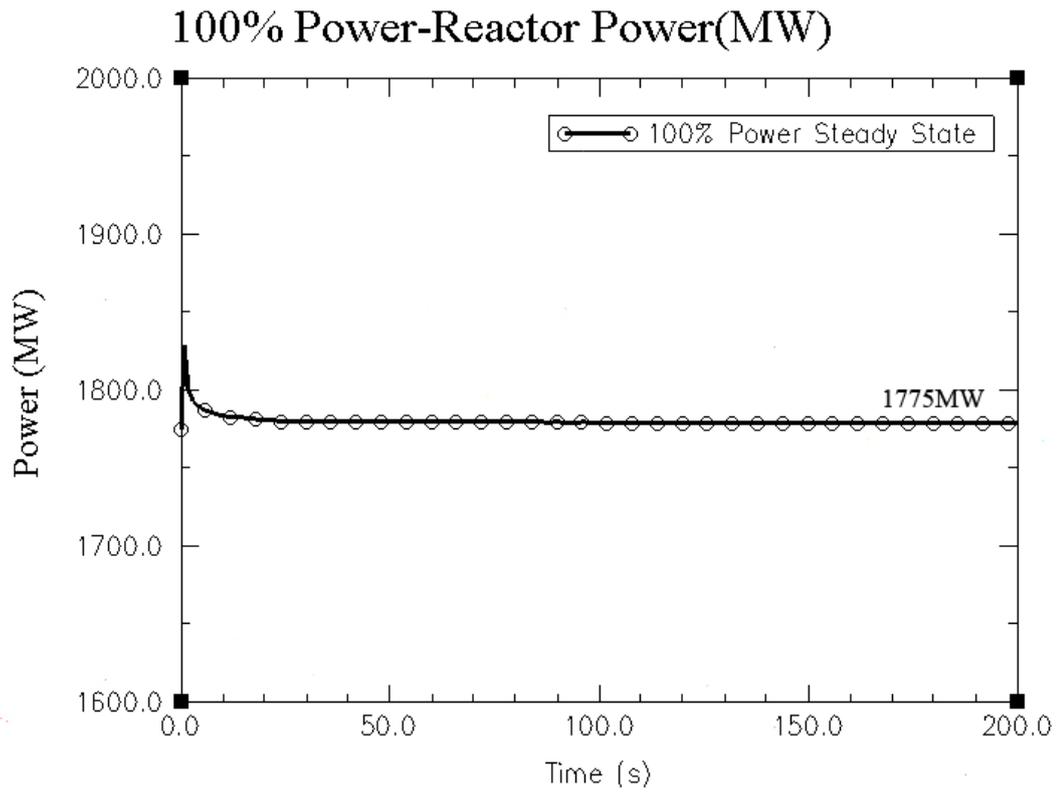


圖 4.1 100%全功率穩態功率時變圖

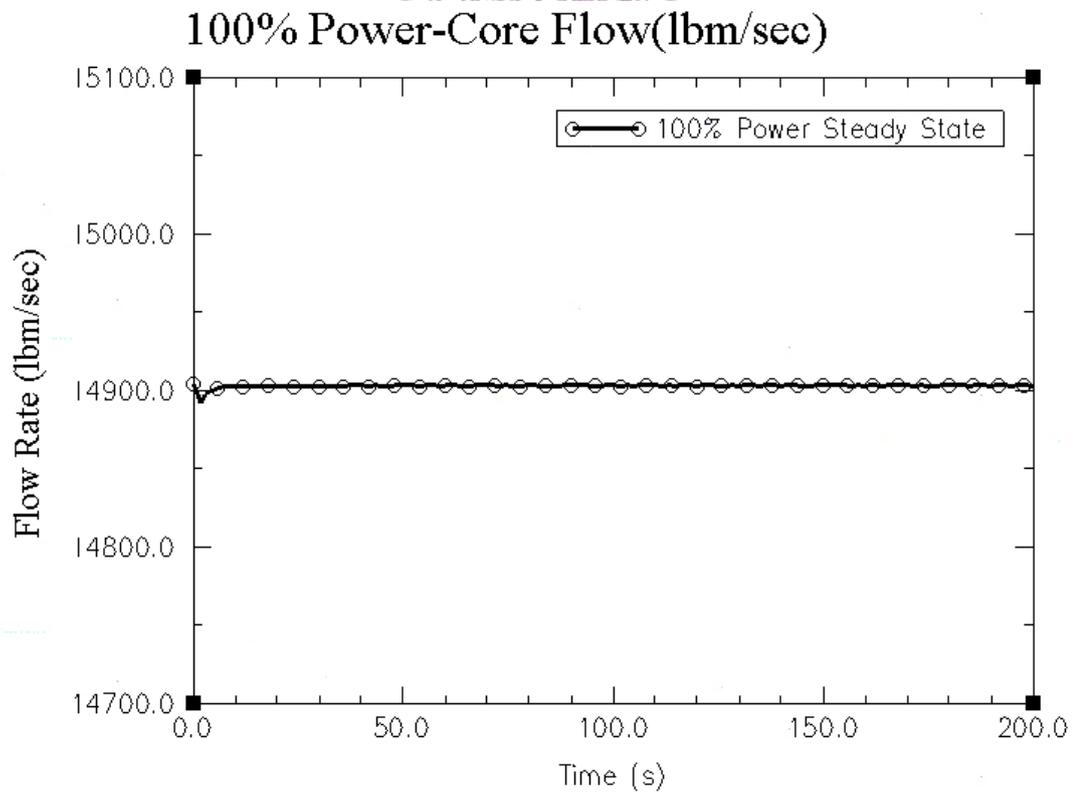


圖 4.2 100%全功率穩態爐心流量時變圖

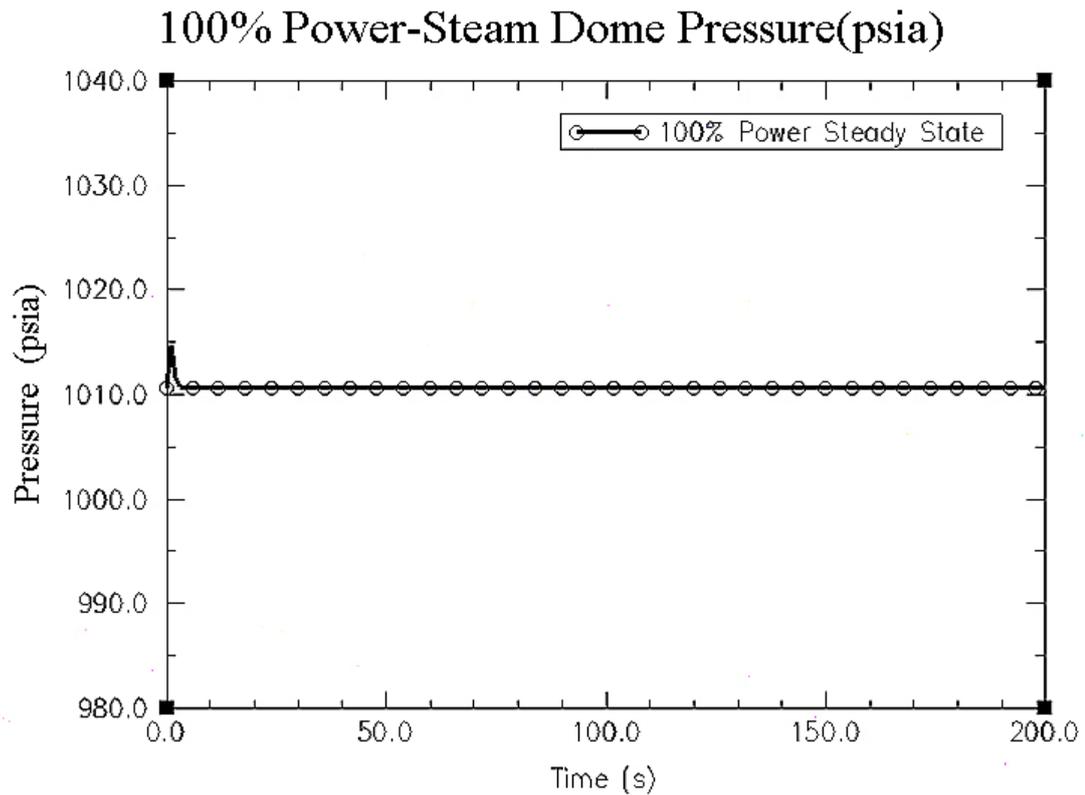


圖 4.3 100%全功率穩態蒸汽頂槽壓力時變圖

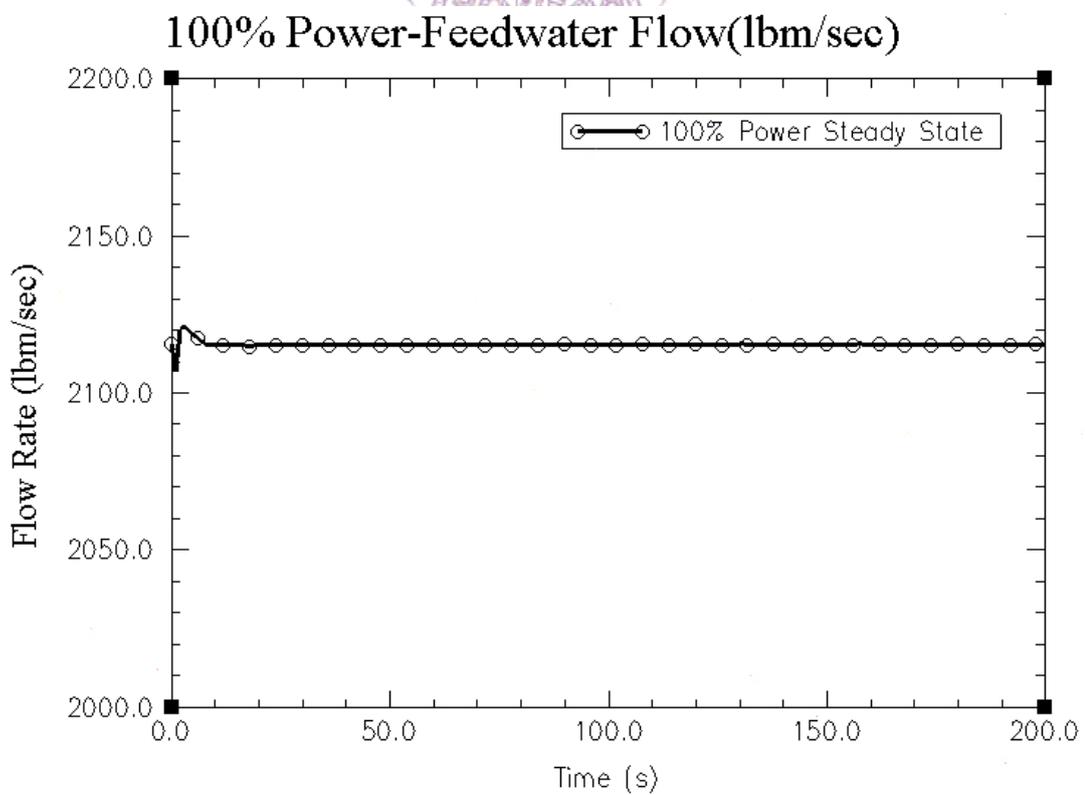


圖 4.4 100%全功率穩態飼水流量時變圖

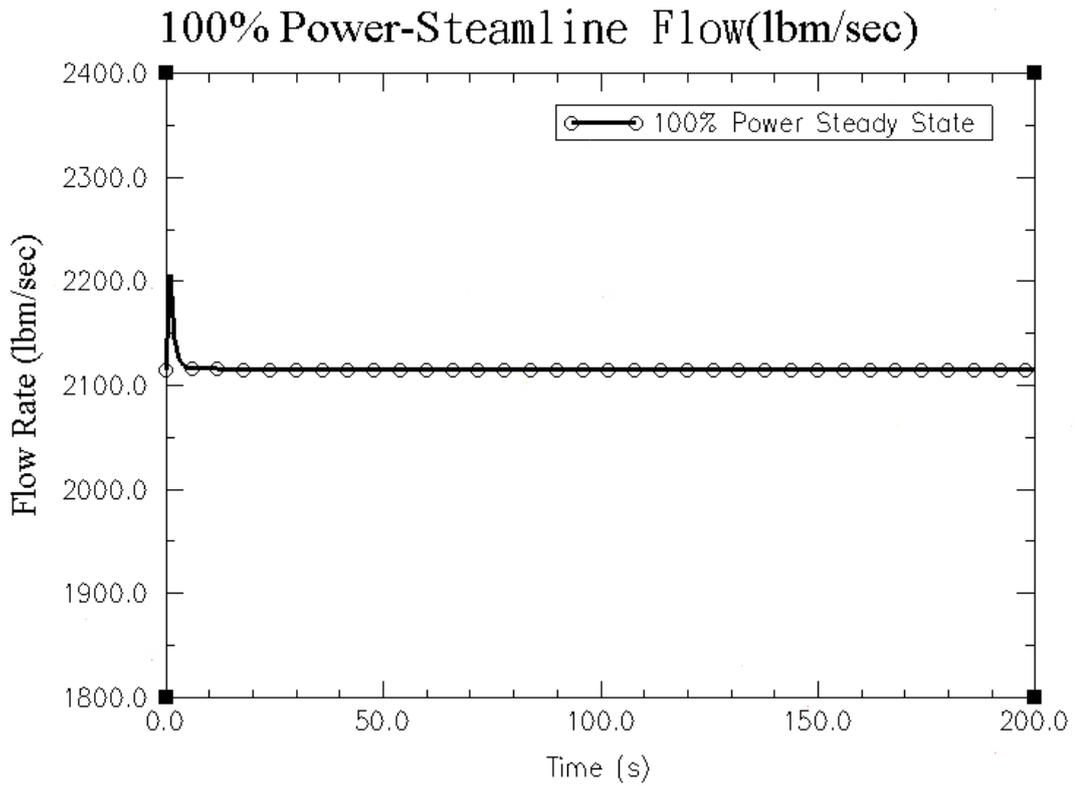


圖 4.5 100%全功率穩態蒸汽流量時變圖

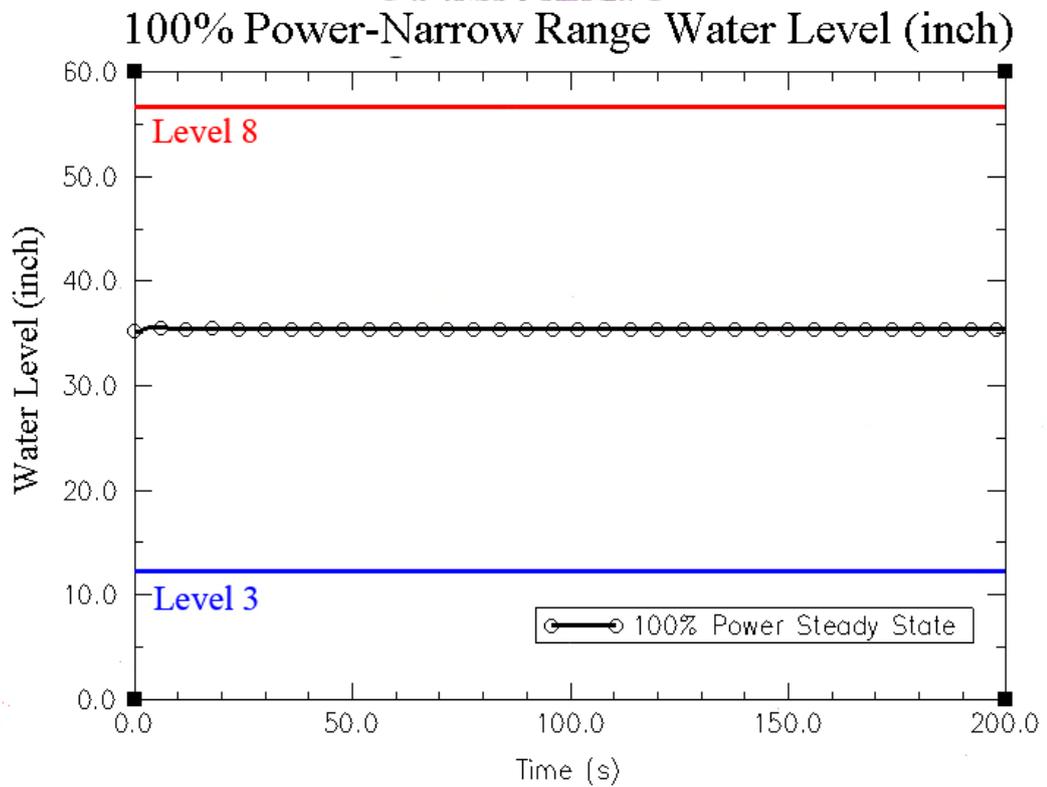


圖 4.6 100%全功率穩態窄幅水位時變圖

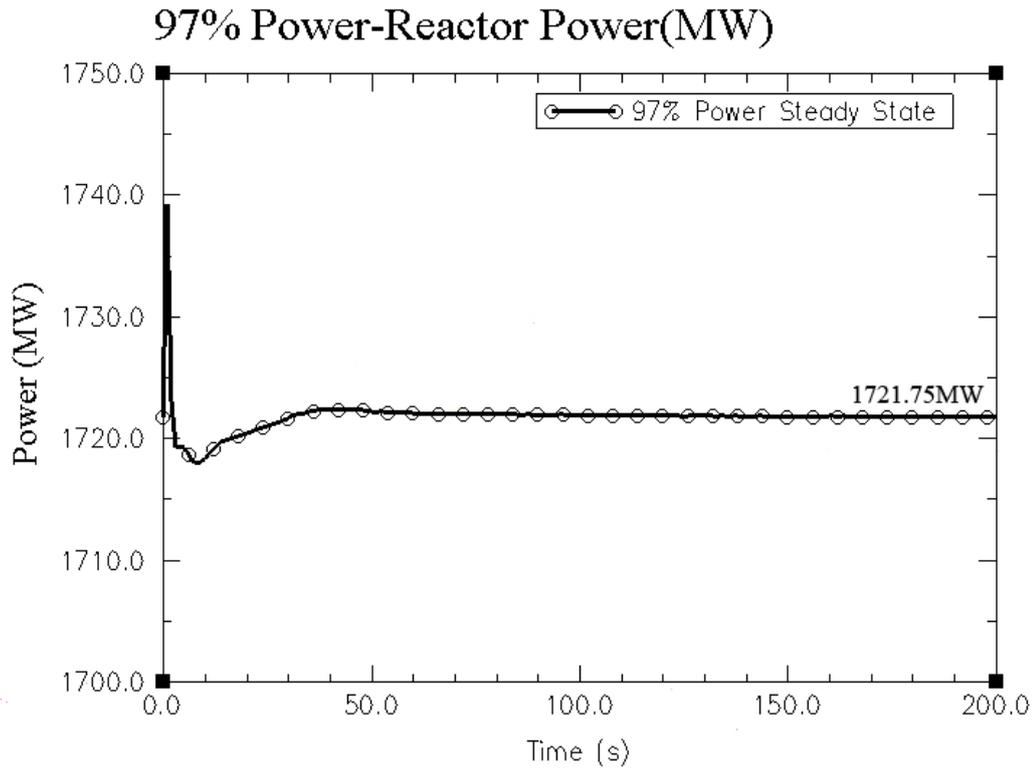


圖 4.7 97% 功率穩態功率時變圖

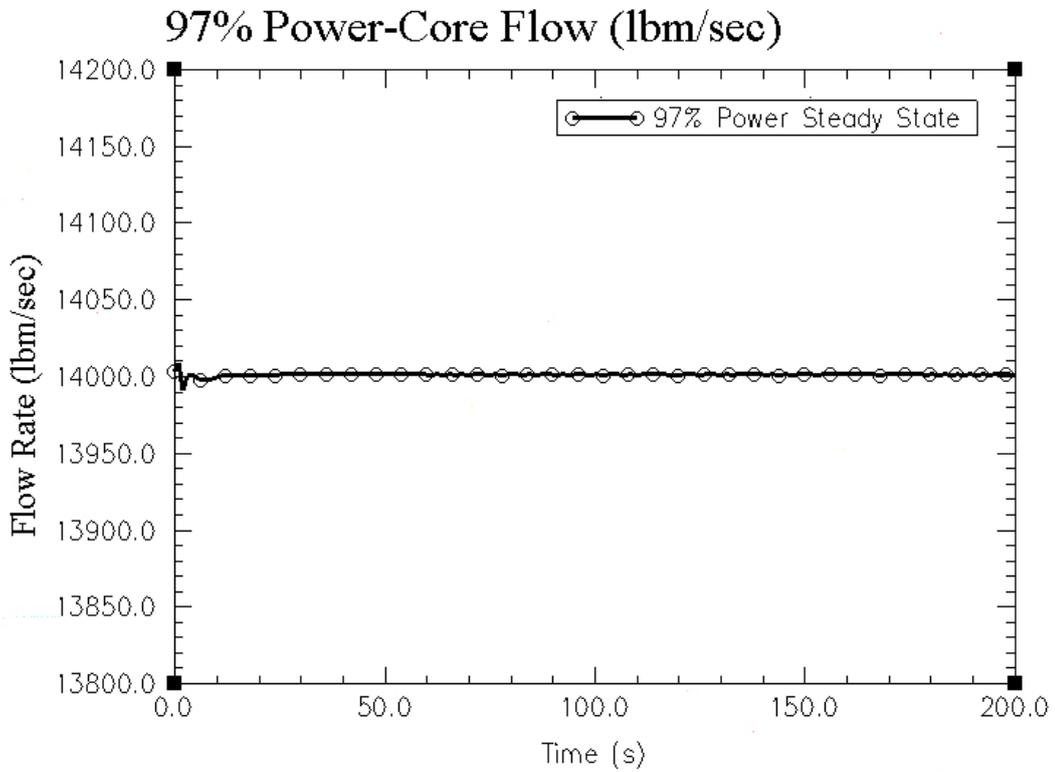


圖 4.8 97% 功率穩態爐心流量時變圖

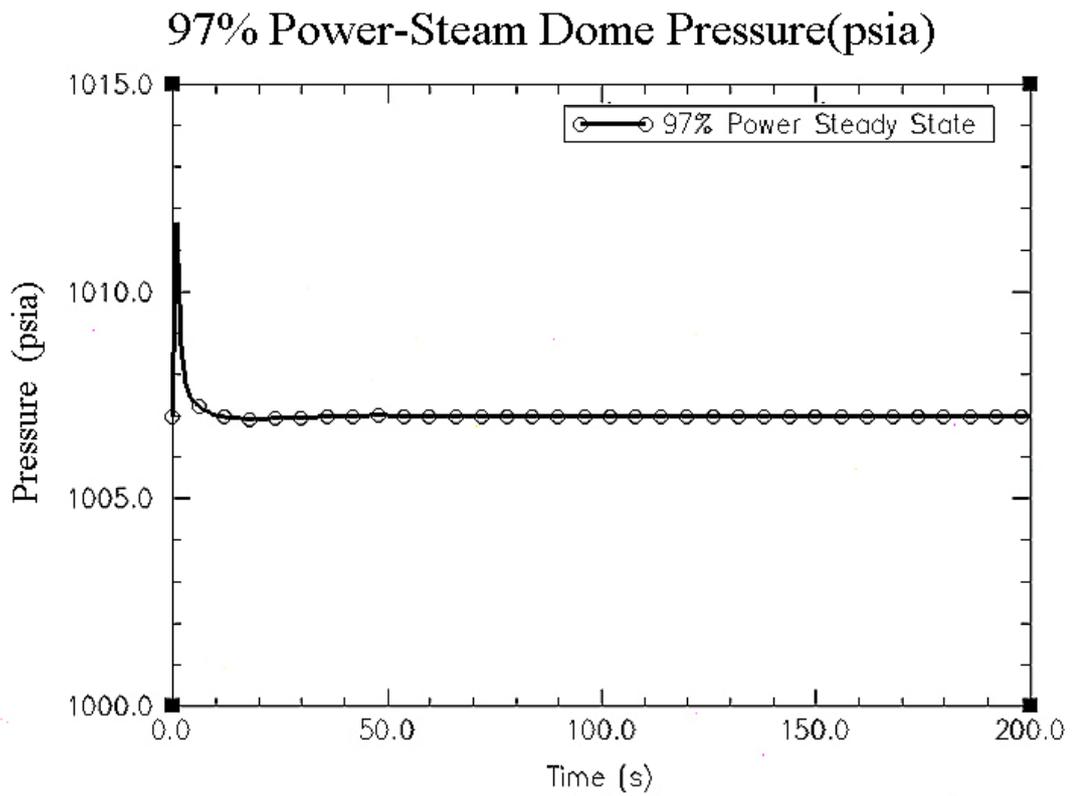


圖 4.9 97% 功率穩態蒸汽頂槽壓力時變圖

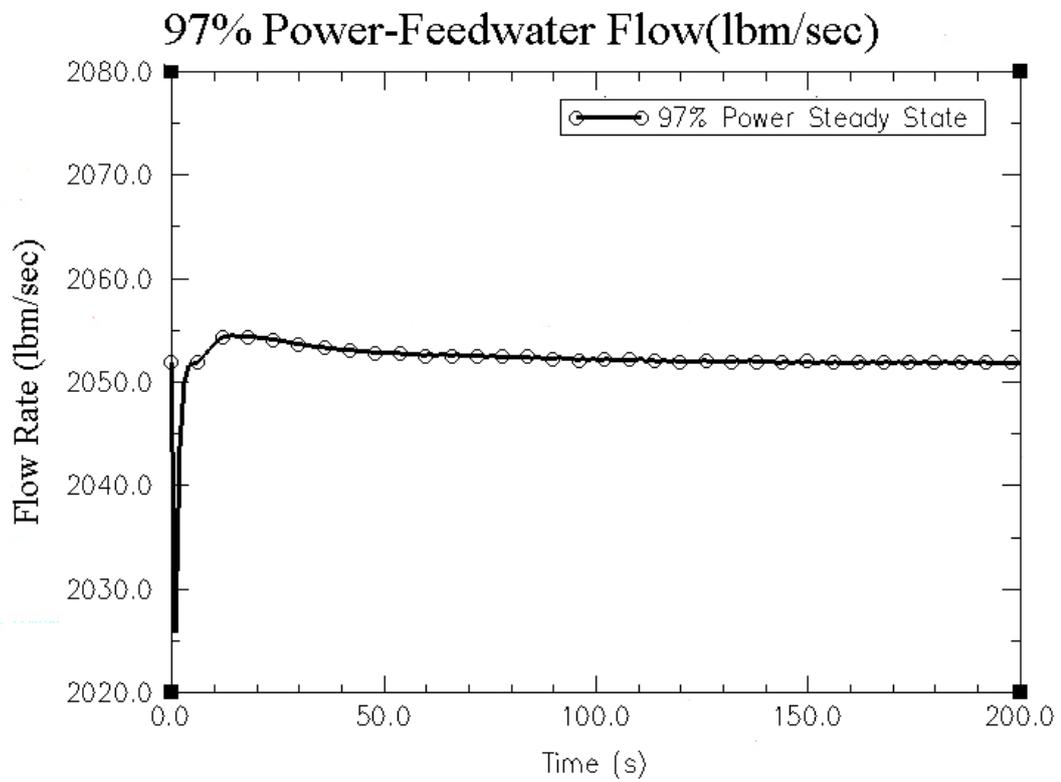


圖 4.10 97% 功率穩態飼水流量時變圖

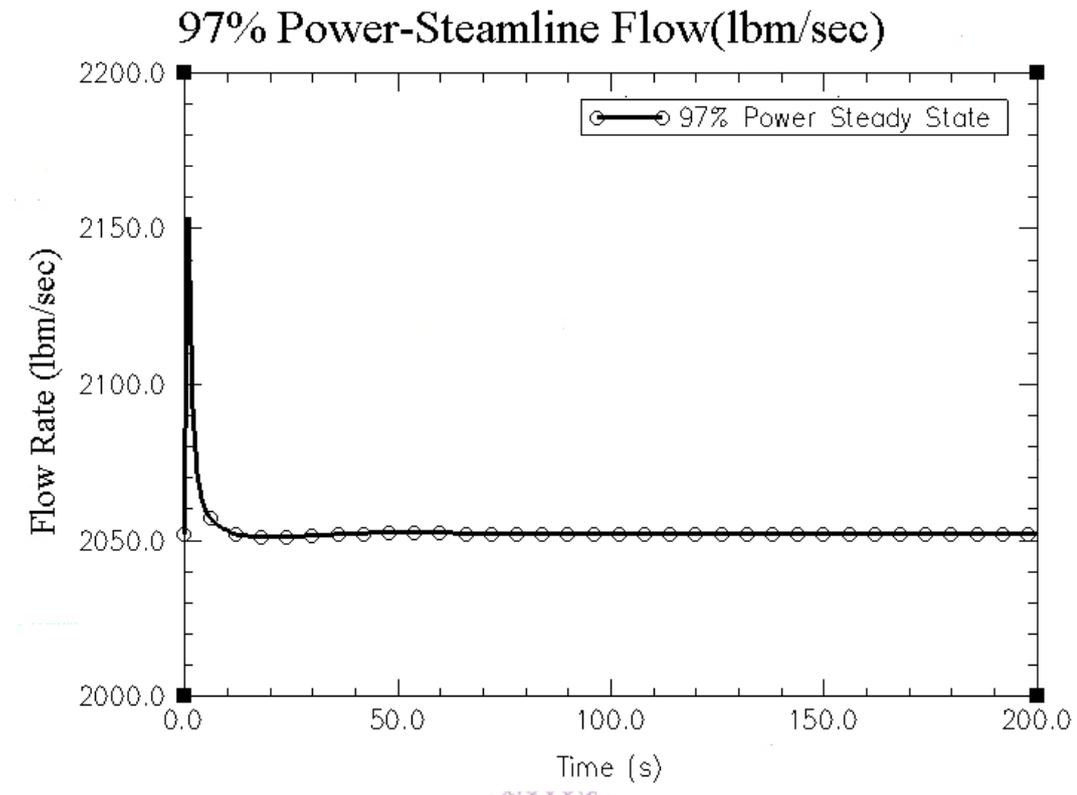


圖 4.11 97%功率穩態蒸汽流量時變圖

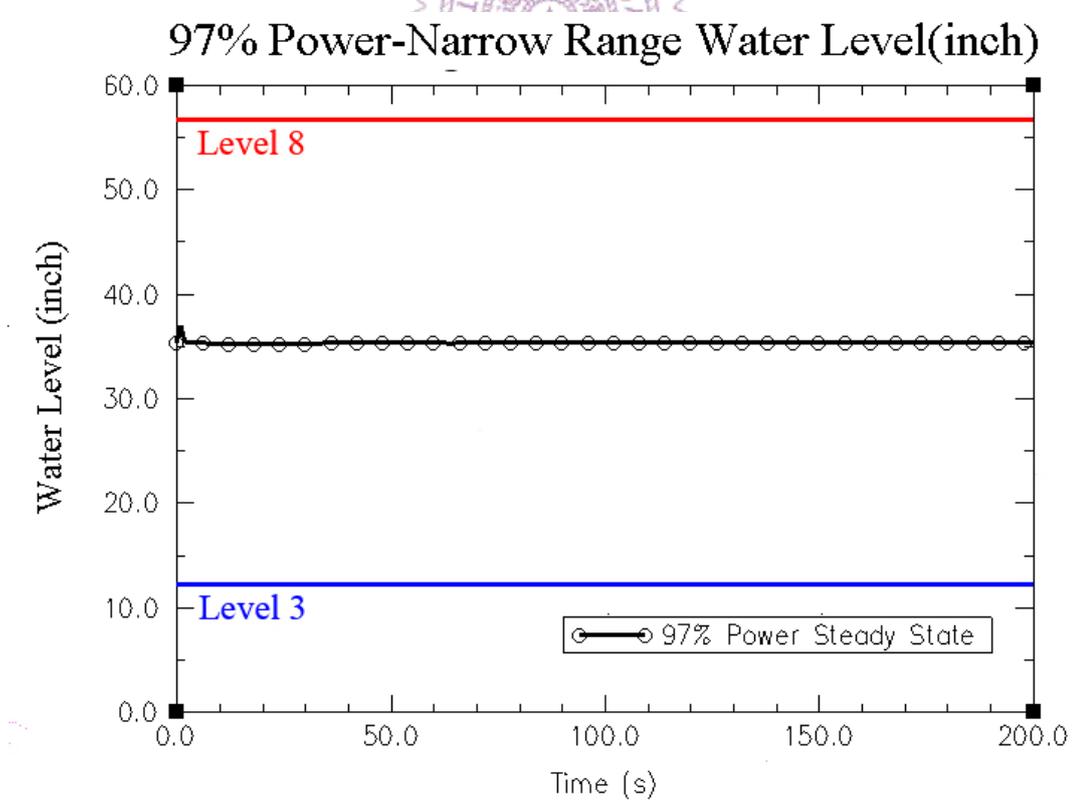


圖 4.12 97%功率穩態窄幅水位時變圖

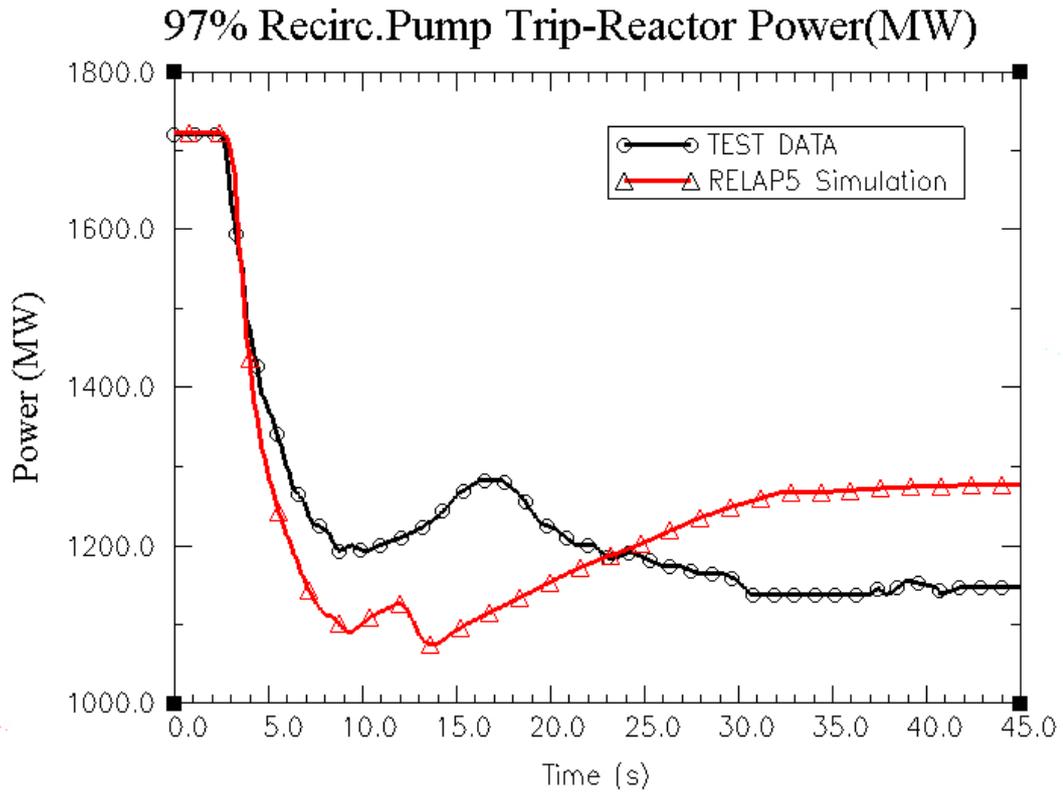


圖 4.13 97% One Recirc.Pump Trip 爐心功率比較時變圖(預設再循環泵跳脫轉速曲線)

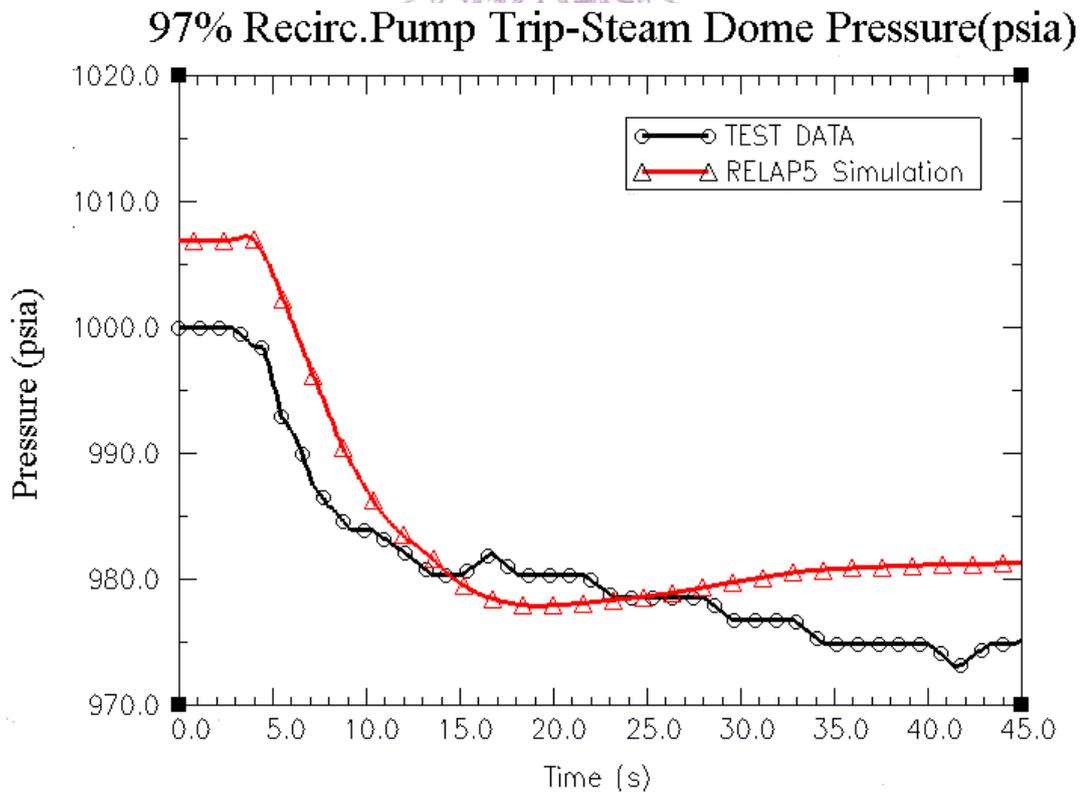


圖 4.14 97% One Recirc.Pump Trip 蒸汽頂槽壓力比較時變圖(預設再循環泵跳脫轉速曲線)

97% Recirc.Pump Trip-Recirc.Pump Velocity(RPM)

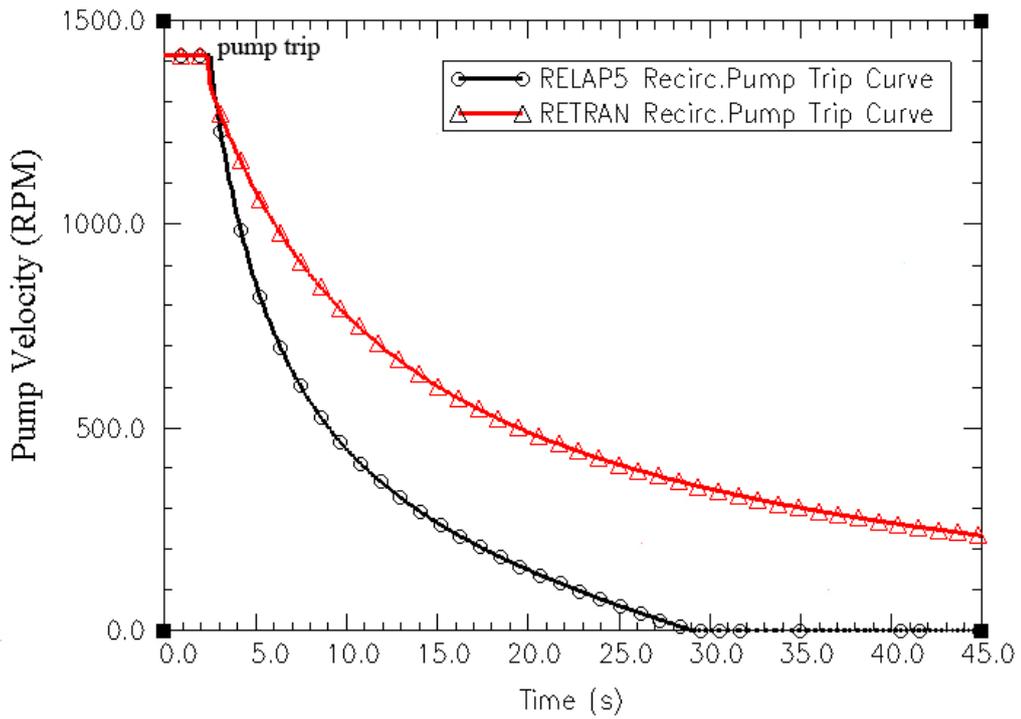


圖 4.15 97% One Recirc.Pump Trip 再循環泵跳脫轉速比較時變圖

97% Recirc.Pump Trip-Reactor Power(MW)

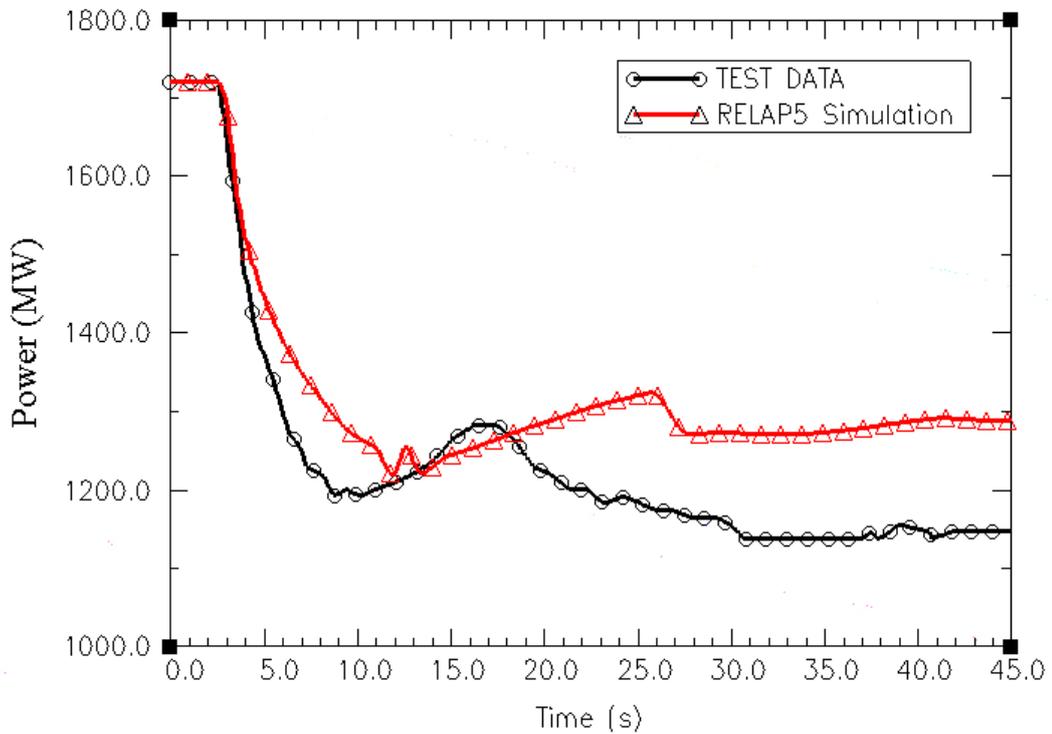


圖 4.16 97% One Recirc.Pump Trip 爐心功率比較時變圖

97% Recirc.Pump Trip-Steam Dome Pressure(psia)

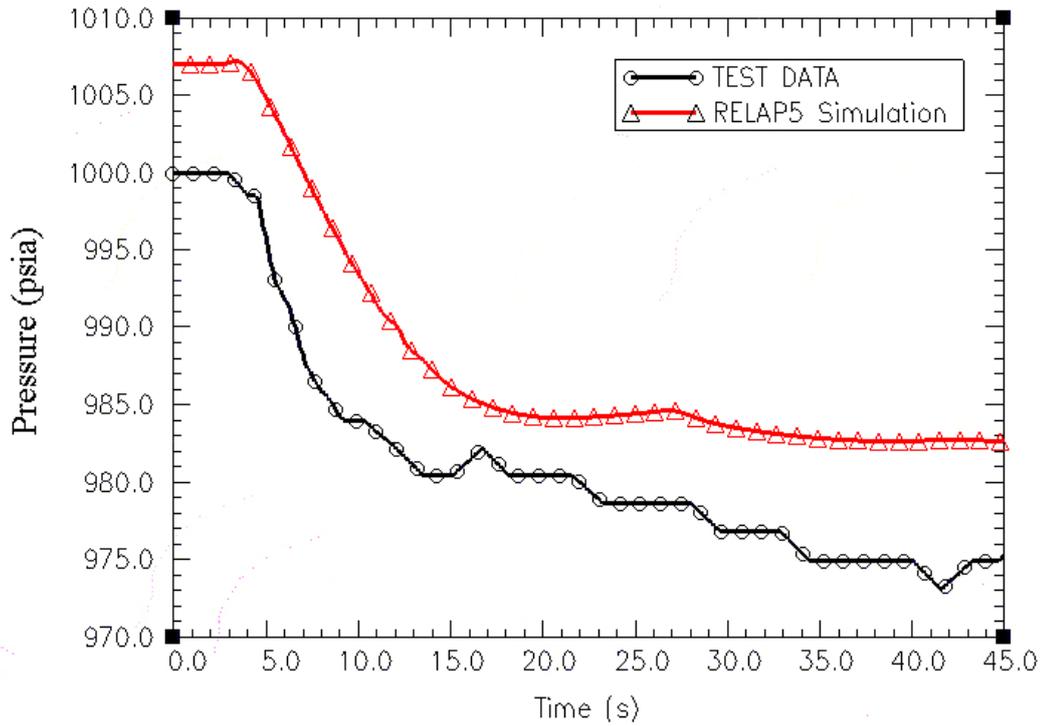


圖 4.17 97% One Recirc.Pump Trip 蒸汽頂槽壓力比較時變圖

97% Recirc.Pump Trip-Water Level(inch)

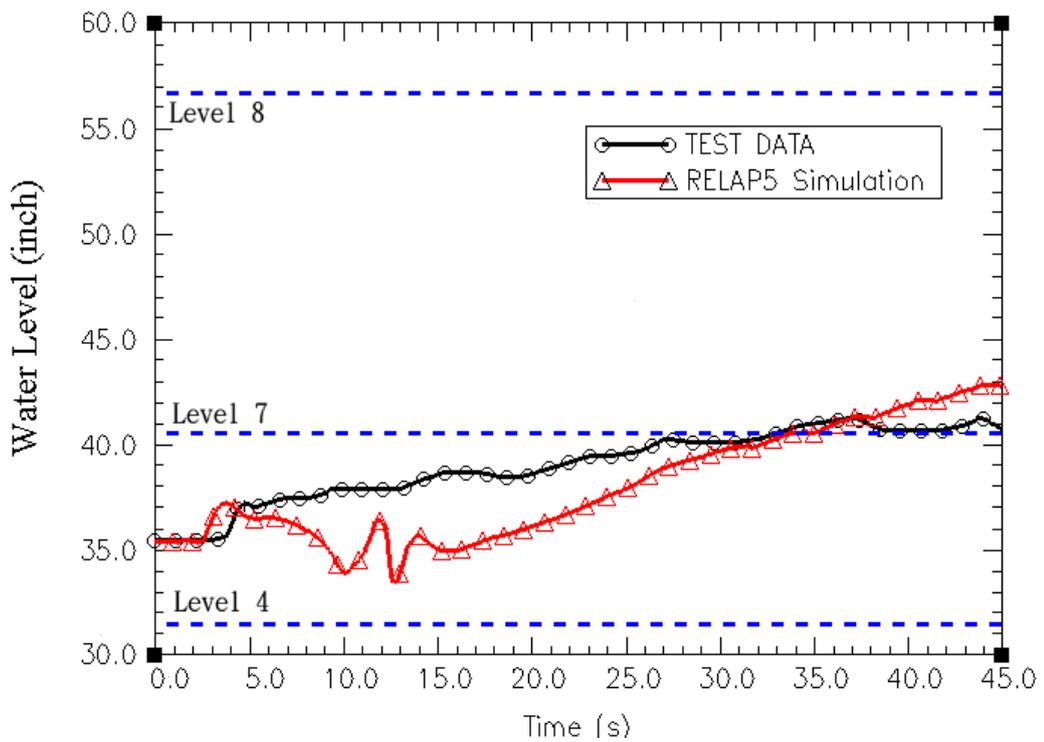


圖 4.18 97% One Recirc.Pump Trip 水位比較時變圖

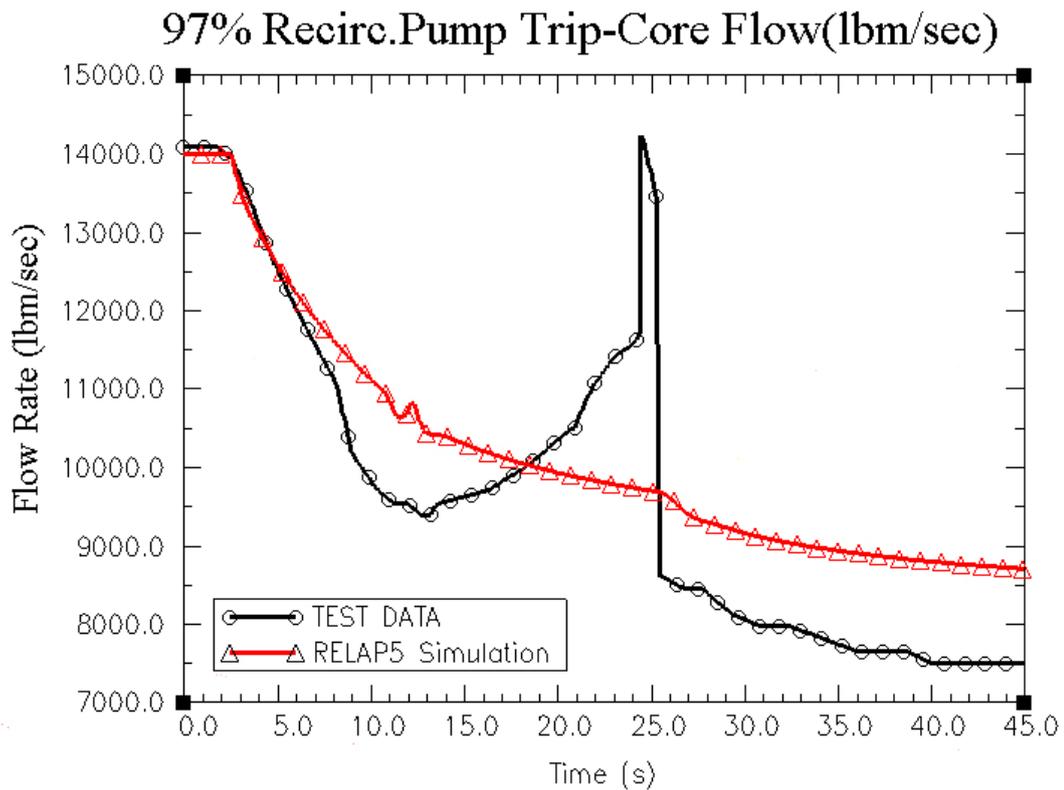


圖 4.19 97% One Recirc.Pump Trip 爐心流量比較時變圖

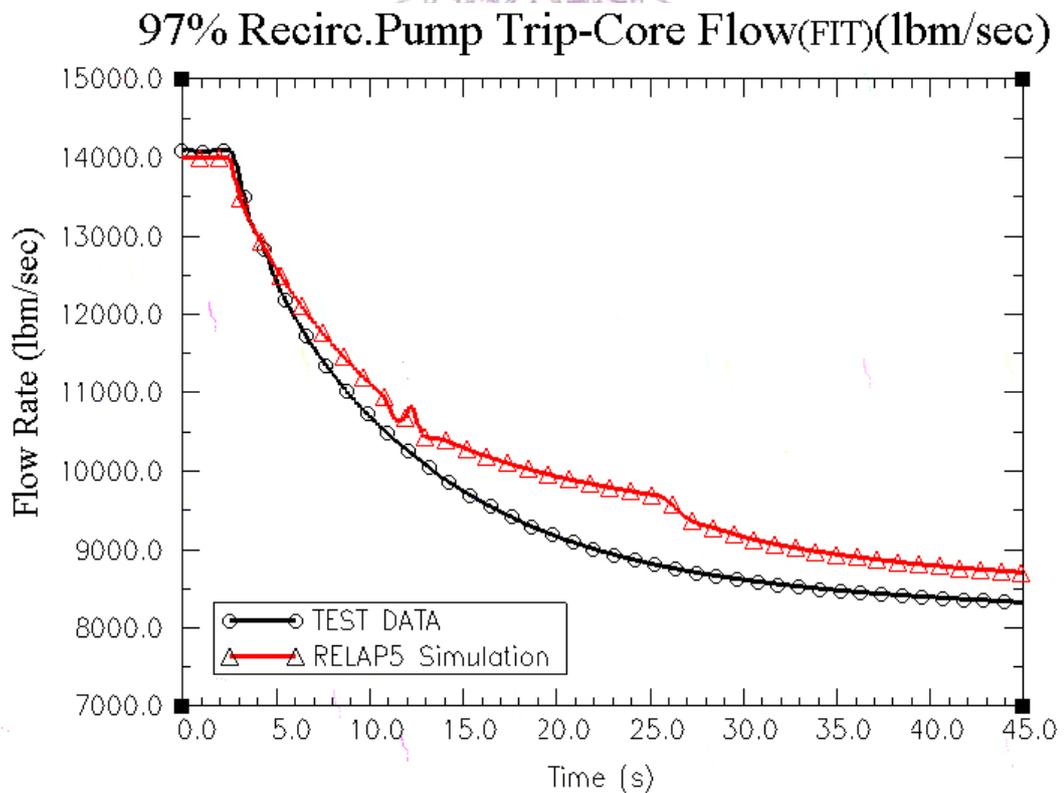


圖 4.20 97% One Recirc.Pump Trip 爐心流量比較時變圖(Linear Fit)

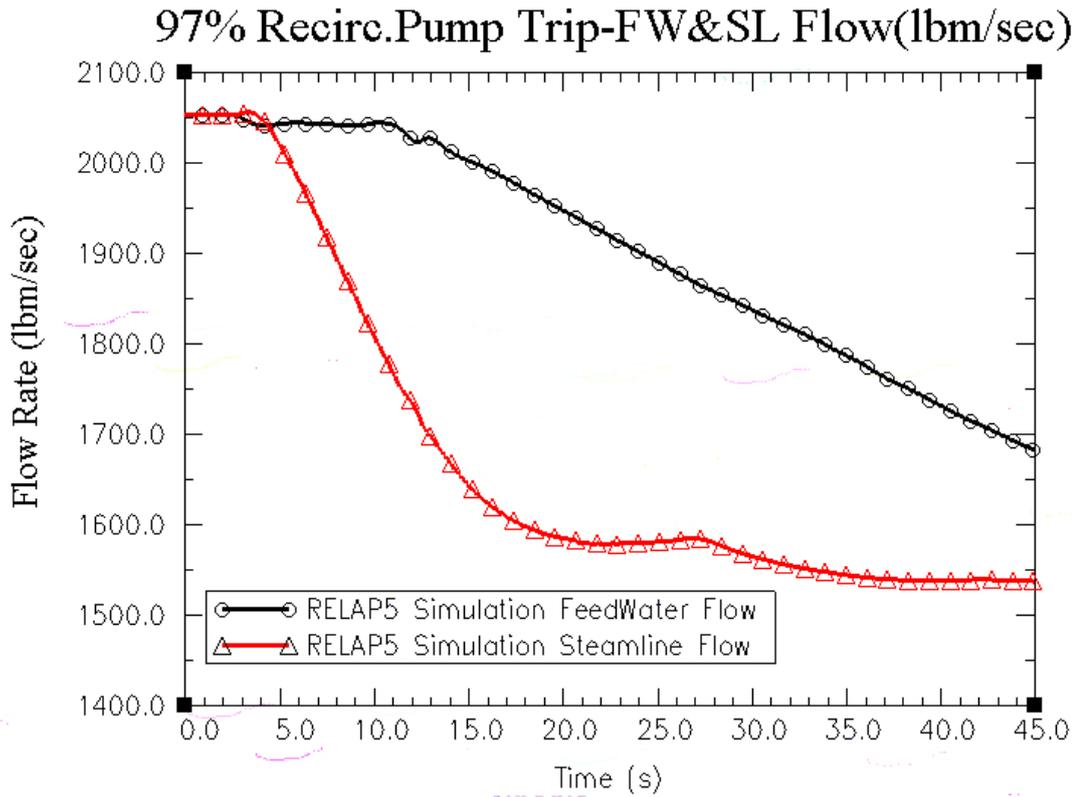


圖 4.21 97% One Recirc.Pump Trip 飼水與蒸汽流量比較時變圖

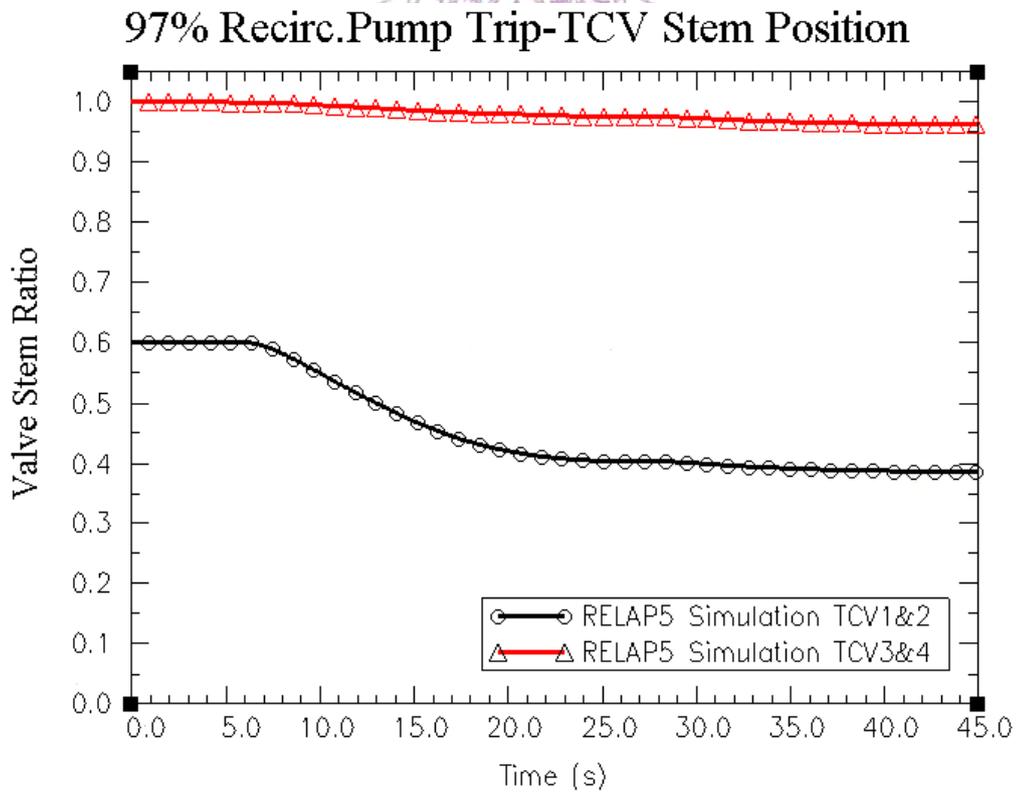


圖 4.22 97% One Recirc.Pump Trip 汽機控制閥閥開度比較時變圖

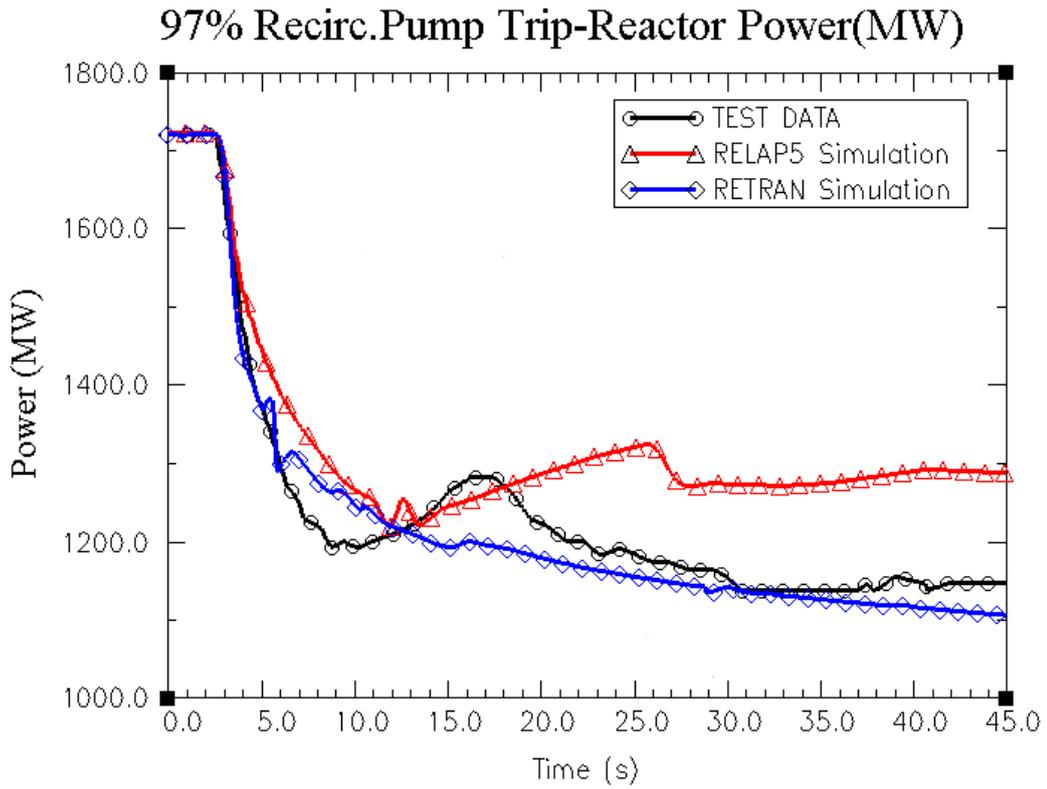


圖 4.23 97% One Recirc.Pump Trip 爐心功率比較時變圖

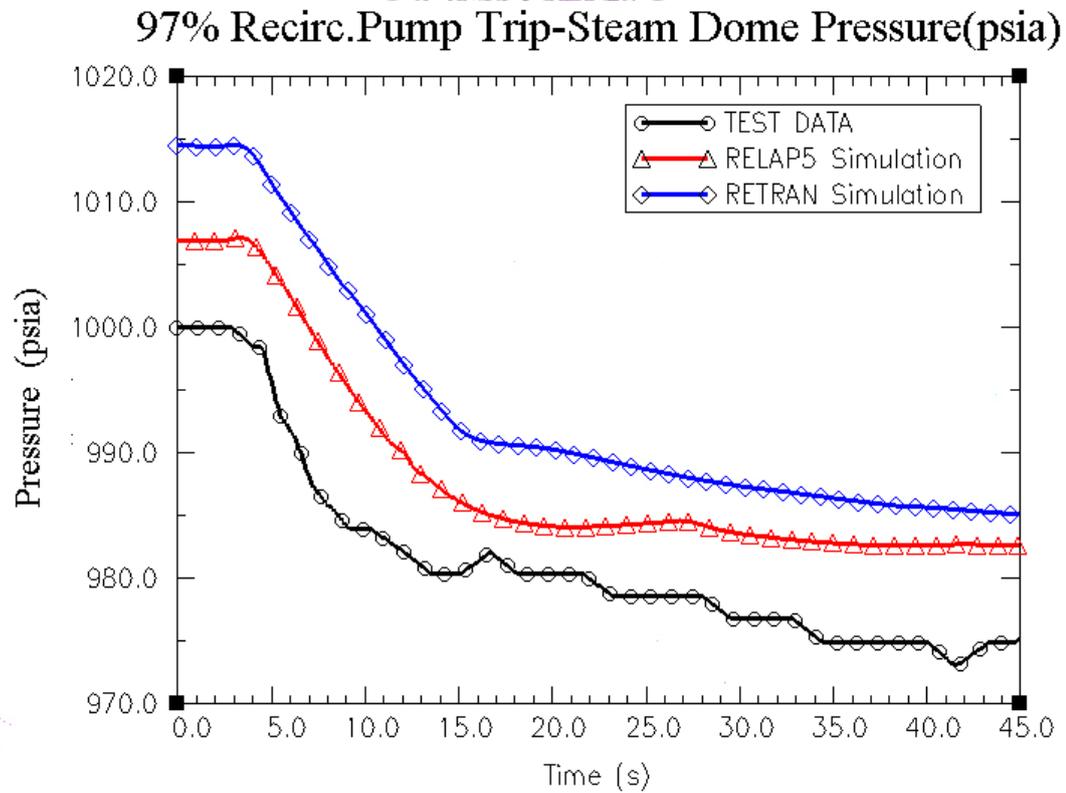


圖 4.24 97% One Recirc.Pump Trip 蒸汽頂槽壓力比較時變圖

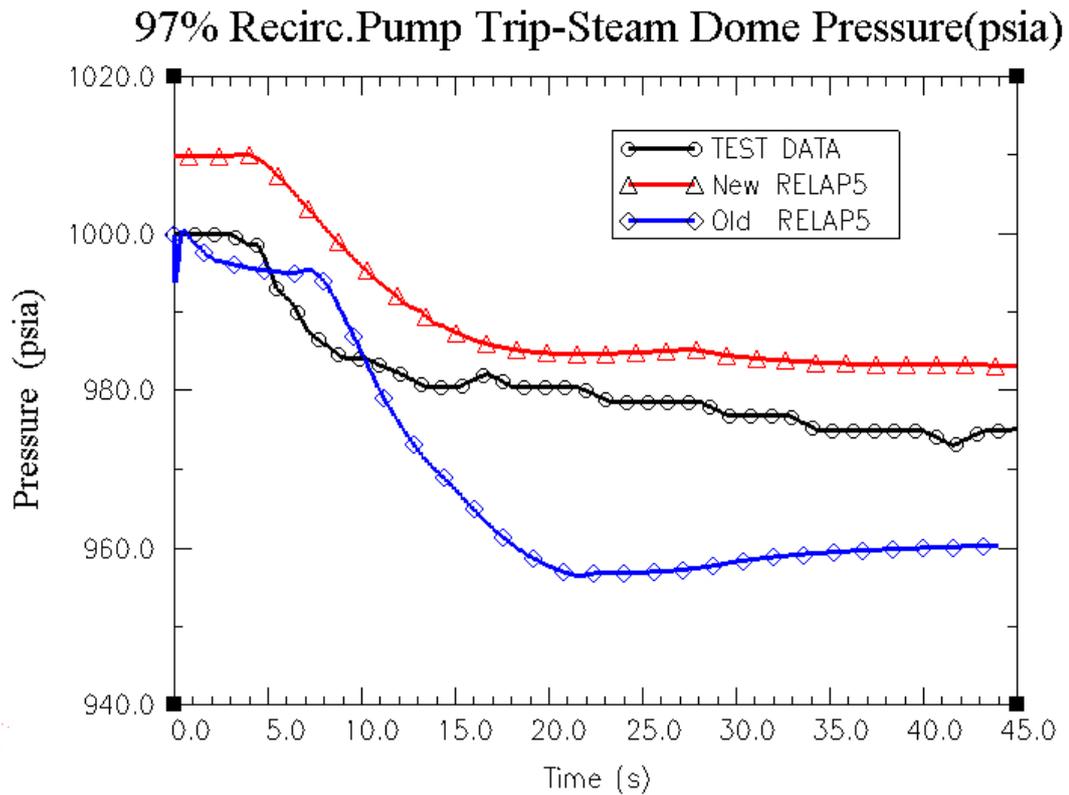


圖 4.25 97% One Recirc.Pump Trip 蒸汽頂槽壓力比較時變圖(與舊有輸入模式比較)

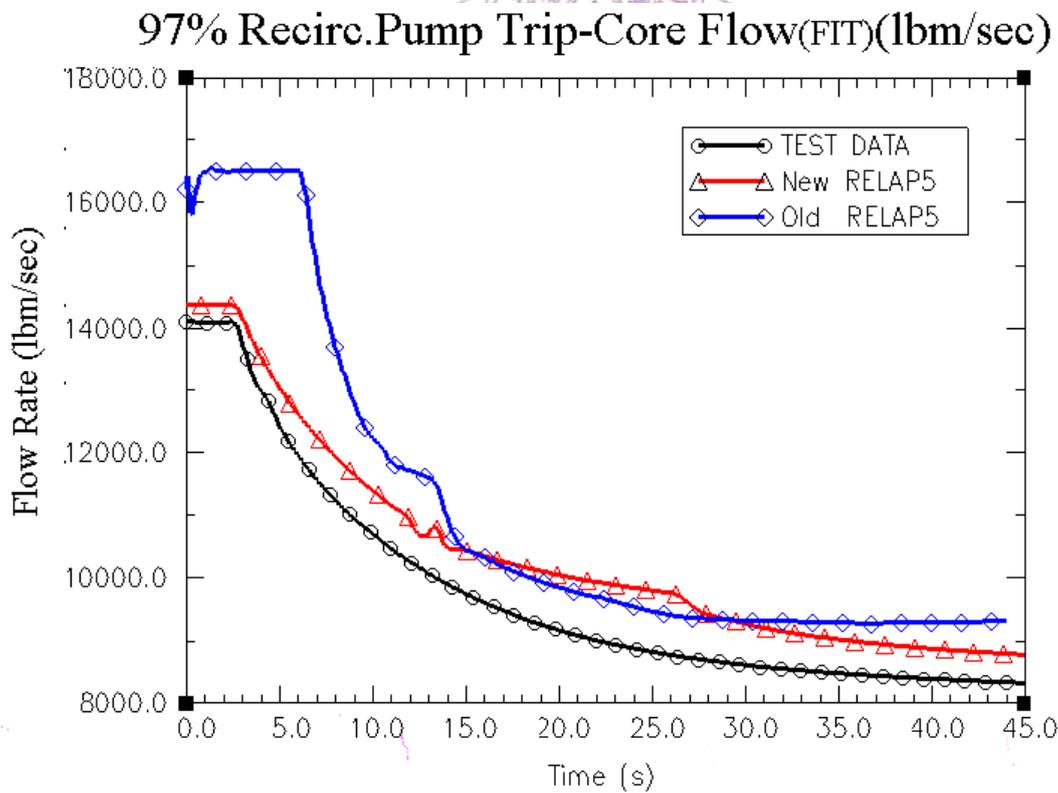


圖 4.26 97% One Recirc.Pump Trip 爐心流量比較時變圖(Linear Fit)
(與舊有輸入模式比較)

Turbine Control Valve Closure Curve

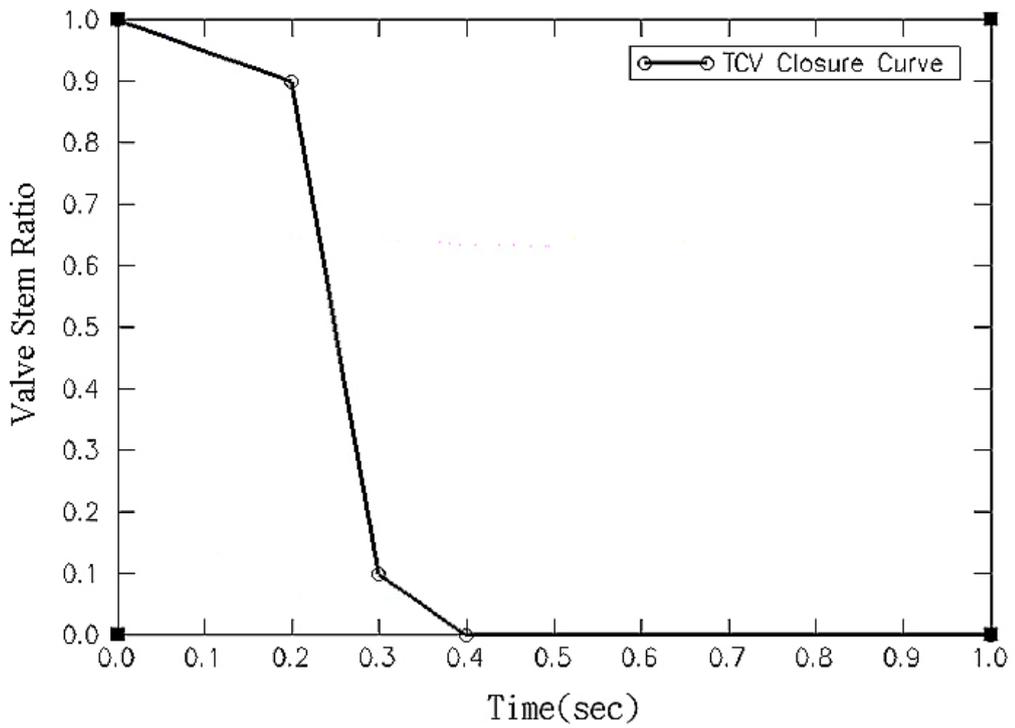


圖 4.27 汽機控制閥(TCV)閥關閉曲線(參考核一廠雷傳程式)

Turbine Bypass Valve Open & Closure Curve

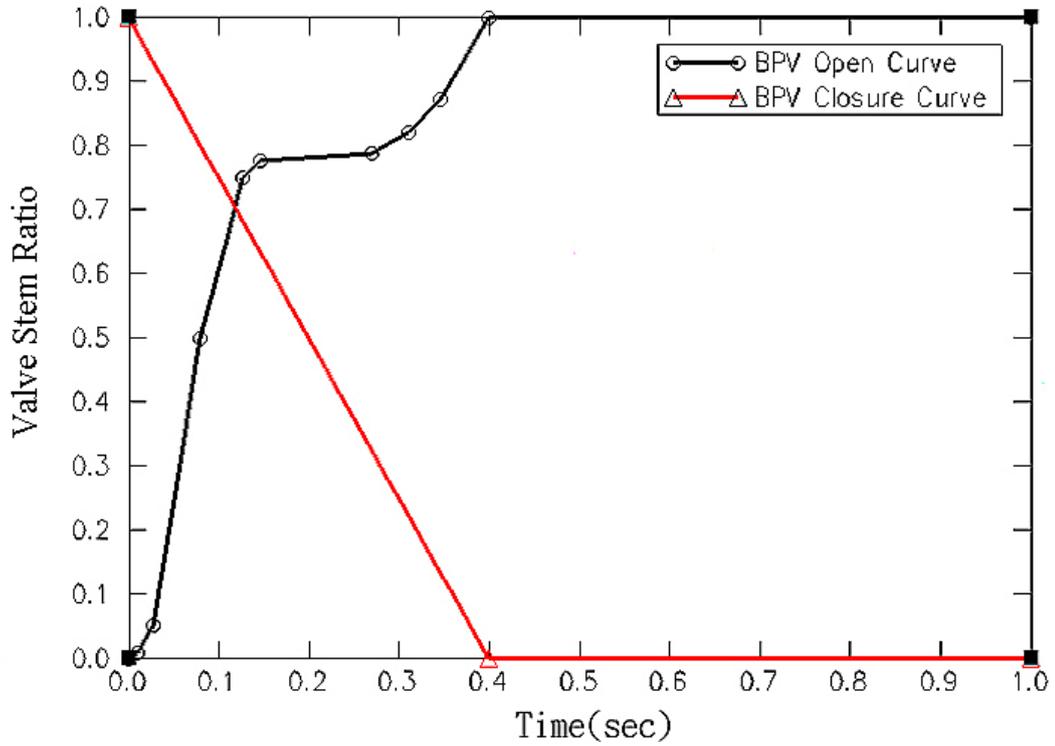


圖 4.28 汽機旁通閥(BPV)閥開啟及關閉曲線(參考核一廠雷傳程式)

100% Load Rejection-Reactor Power(MW)

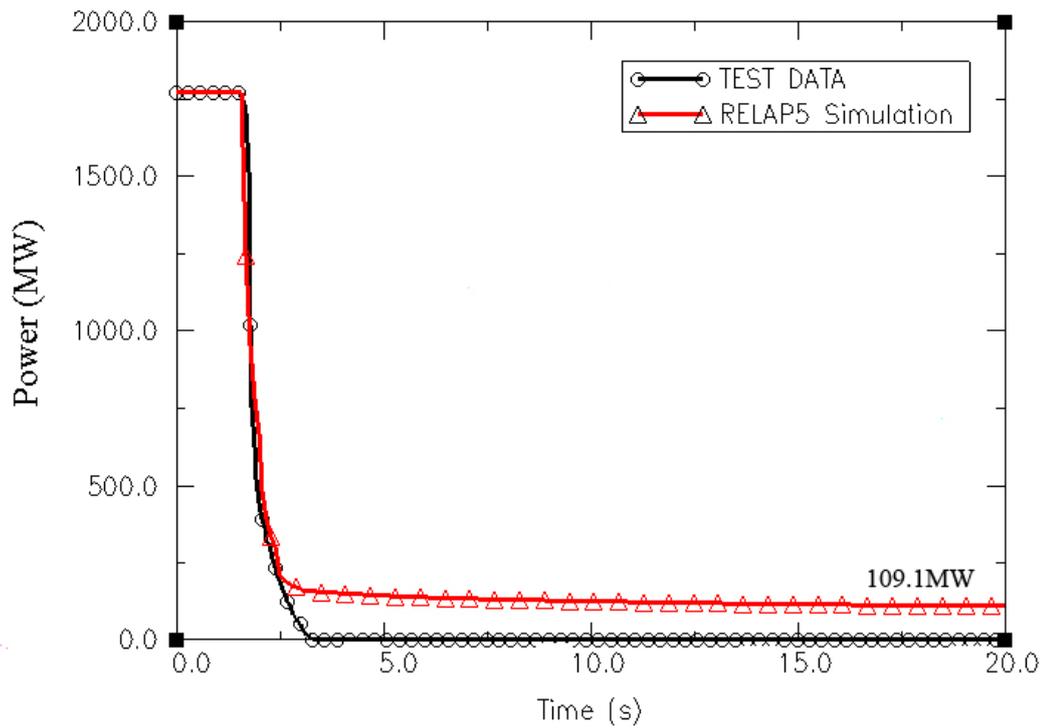


圖 4.29 100%Load Rejection 爐心功率時變圖

100% Load Rejection-Core Flow (lbm/sec)

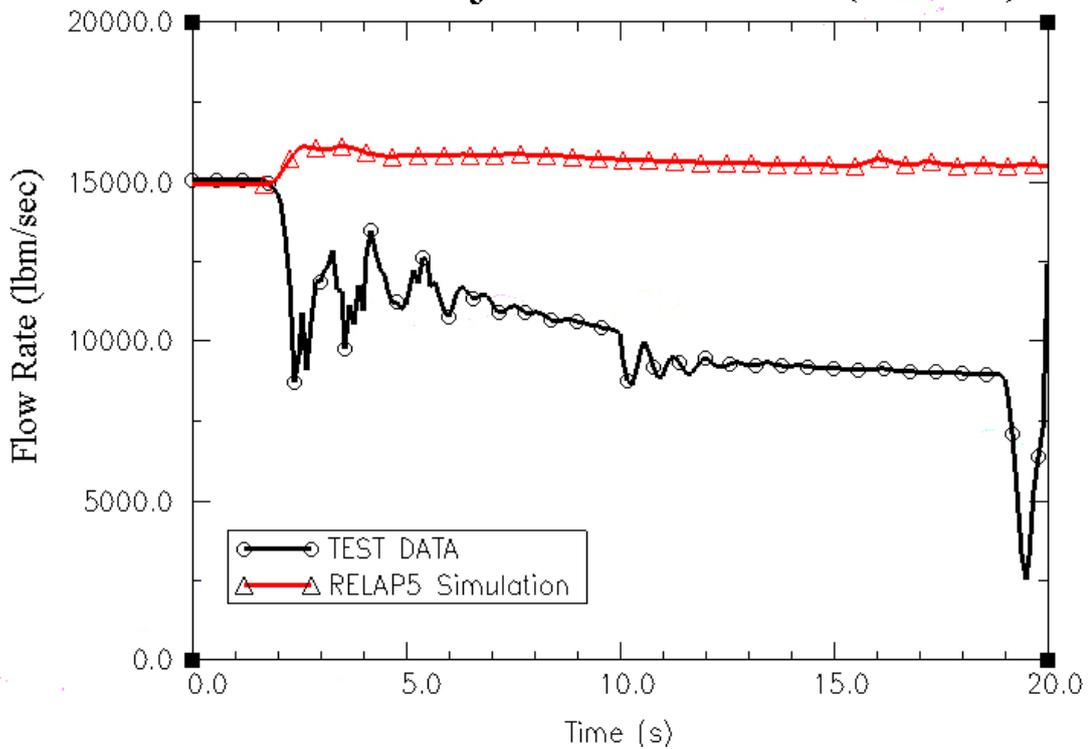


圖 4.30 100%Load Rejection 爐心流量時變圖

100% Load Rejection-Steam Dome Pressure(psia)

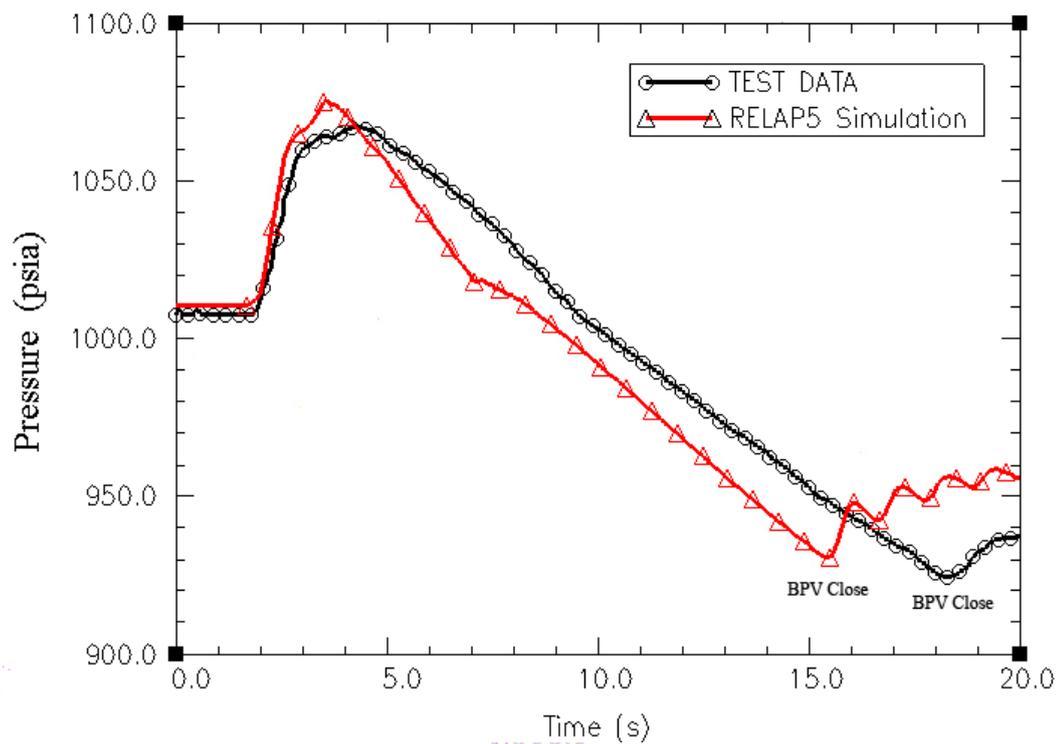


圖 4.31 100%Load Rejection 蒸汽頂槽壓力時變圖

100% Load Rejection-Steamline Flow(lbm/sec)

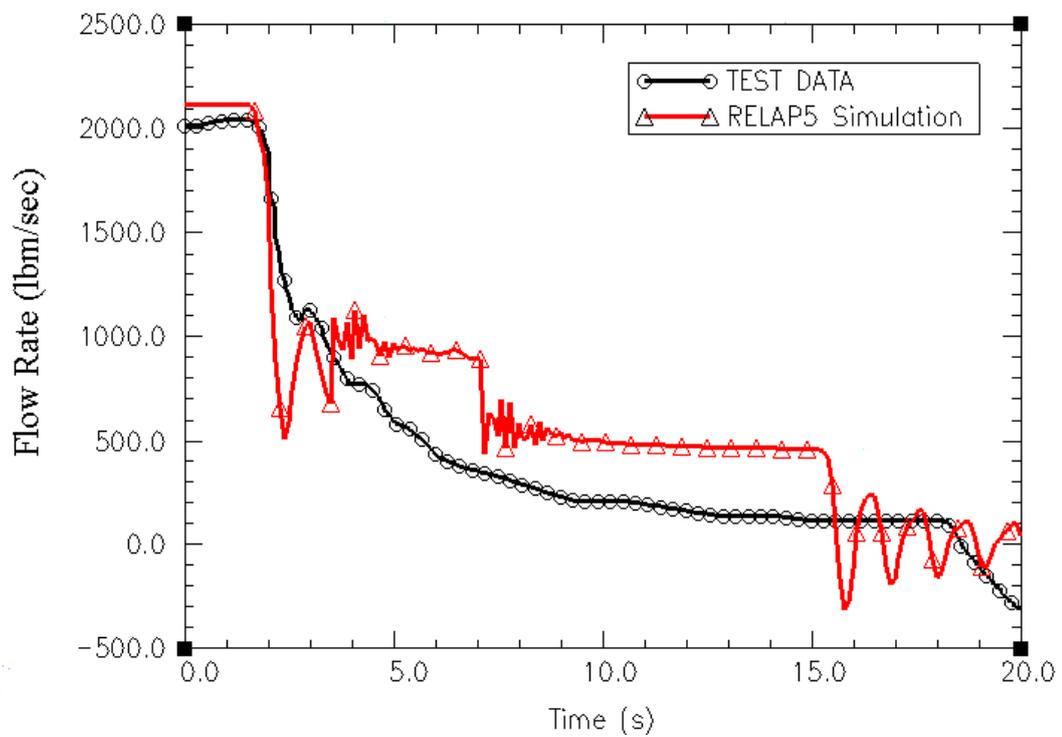


圖 4.32 100%Load Rejection 蒸汽流量時變圖

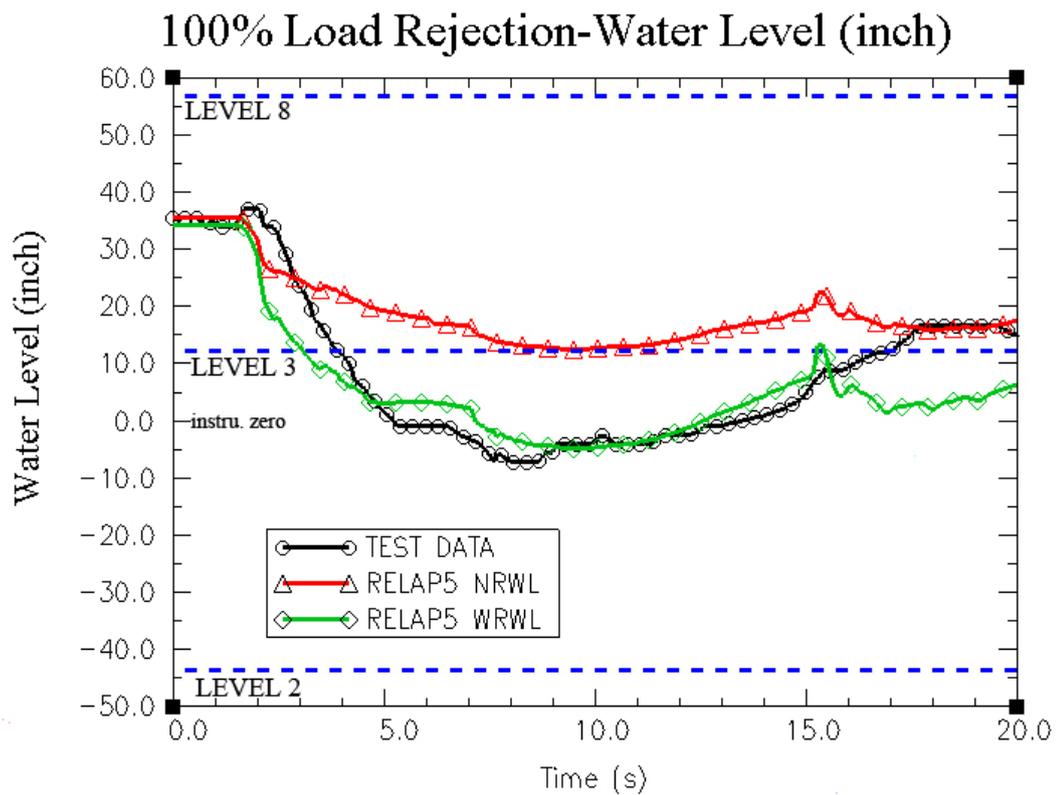


圖 4.33 100%Load Rejection 降流區水位時變圖

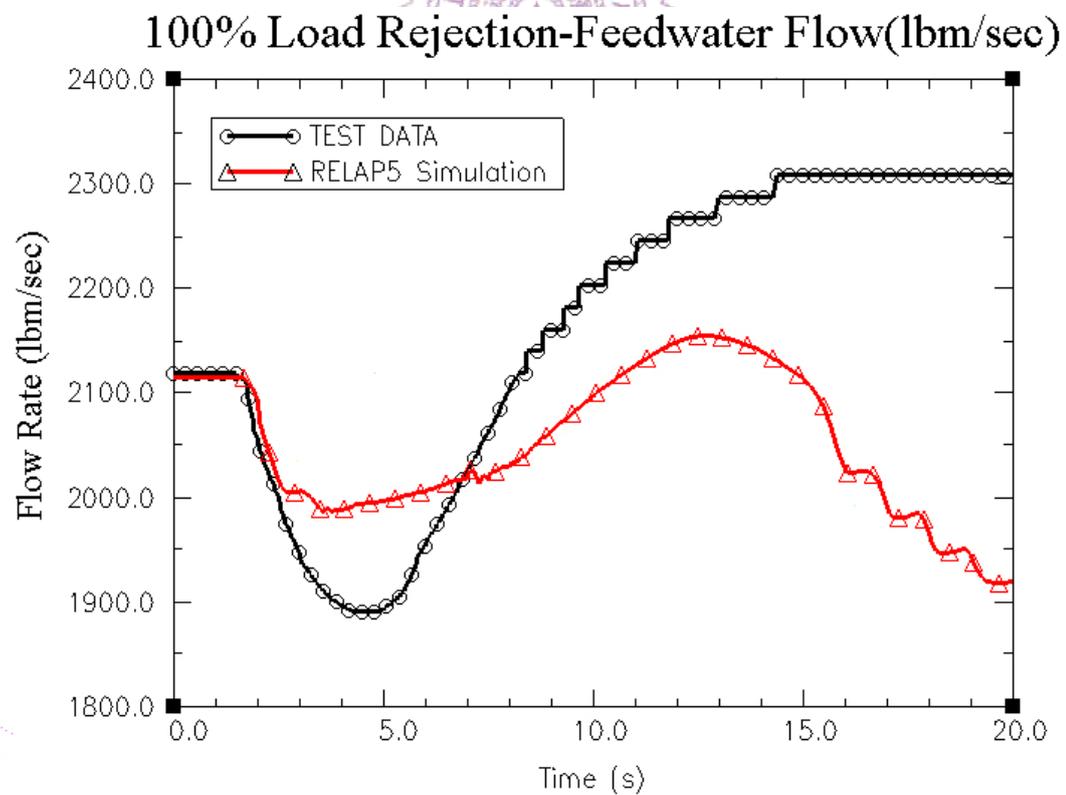


圖 4.34 100%Load Rejection 飼水流量時變圖

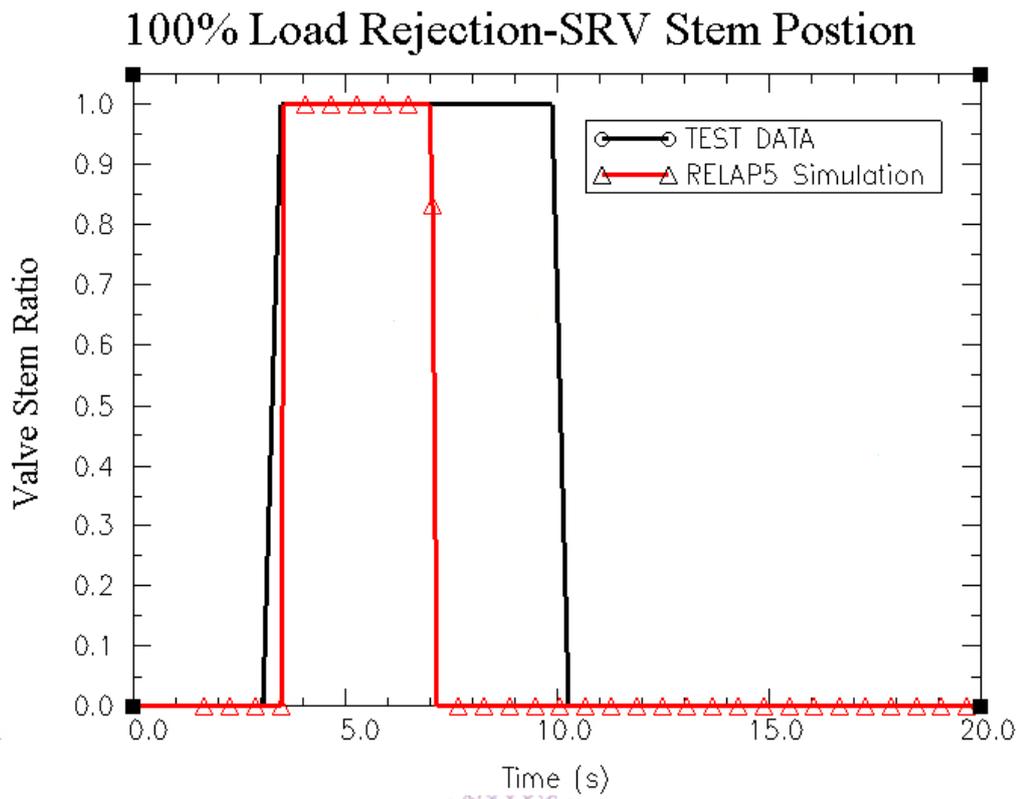


圖 4.35 100%Load Rejection 安全釋壓閥閥門開度時變圖

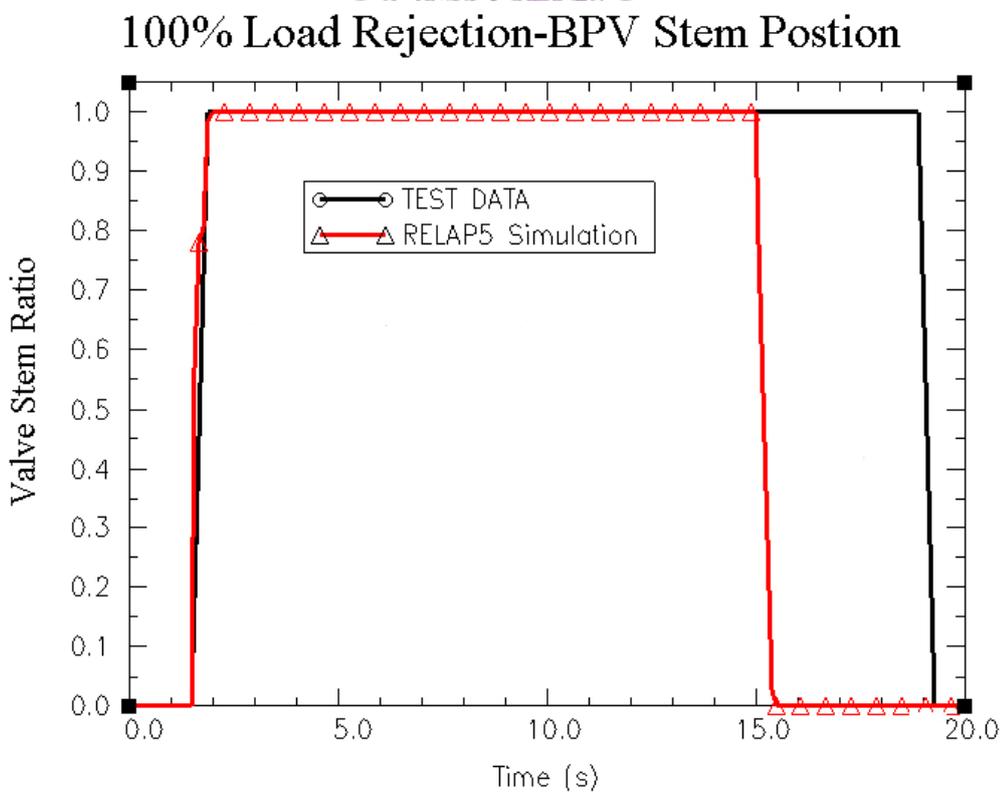


圖 4.36 100%Load Rejection 汽機旁通閥閥門開度時變圖

100% Load Rejection-Flow Comparison(lbm/sec)

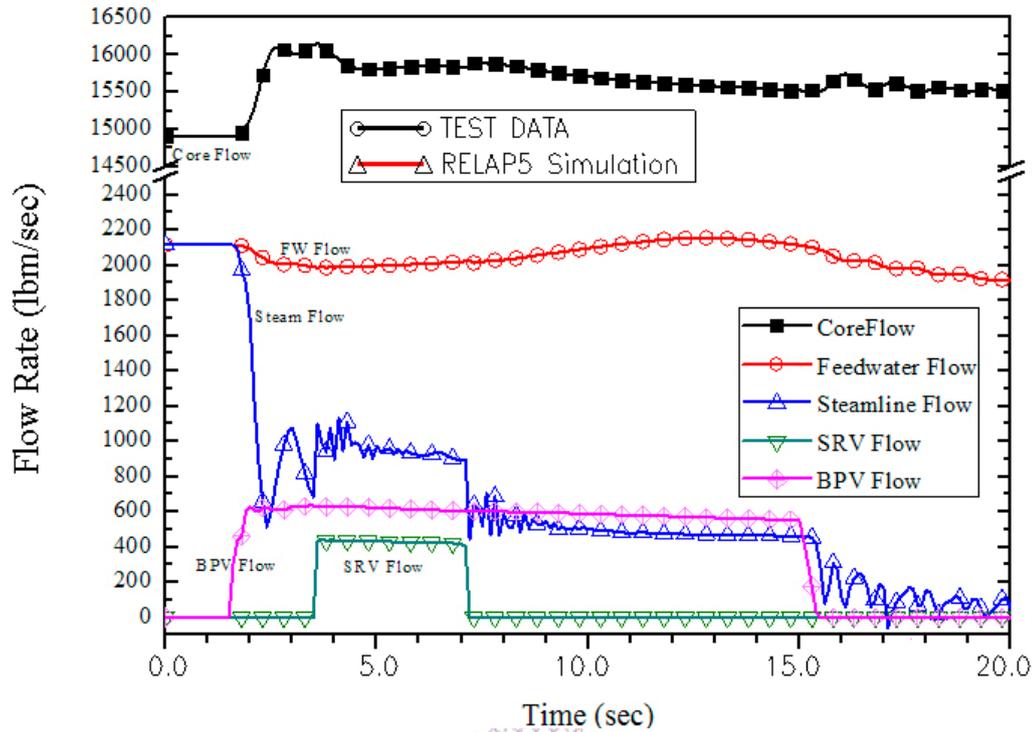


圖 4.37 100%Load Rejection 暫態流量比較時變圖

100% Load Rejection-Core Flow(lbm/sec)

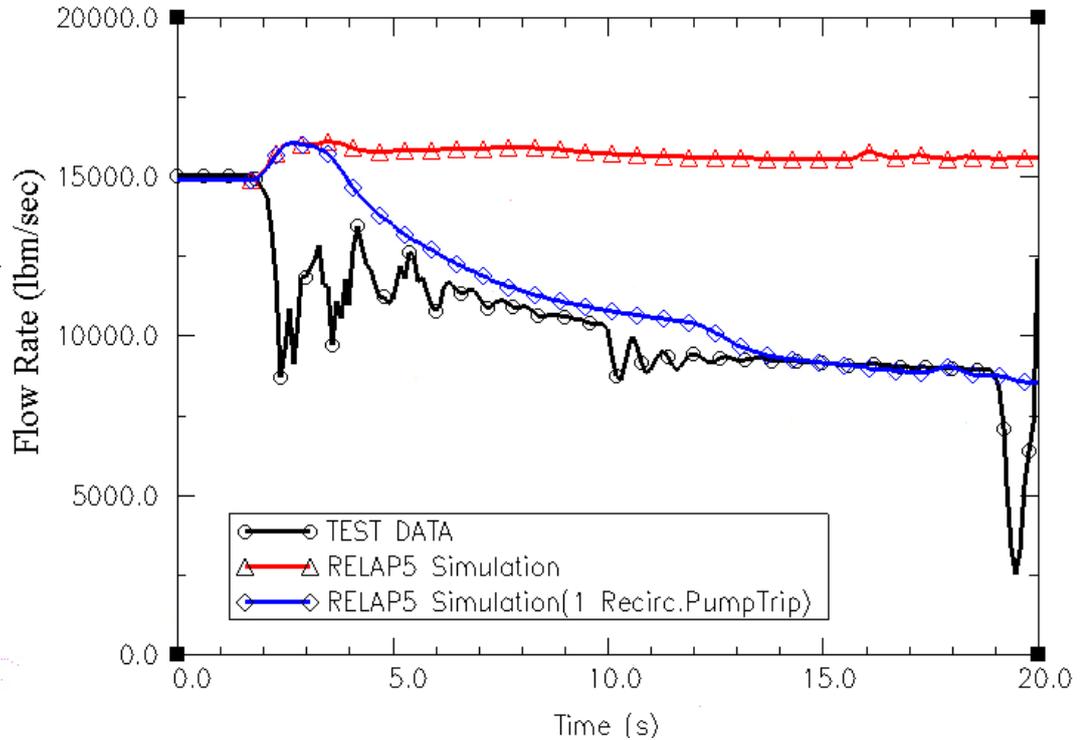


圖 4.38 100%Load Rejection 爐心流量比較時變圖(假設 A 串再循環泵跳脫)

100% Load Rejection-Steam Dome Pressure(psia)

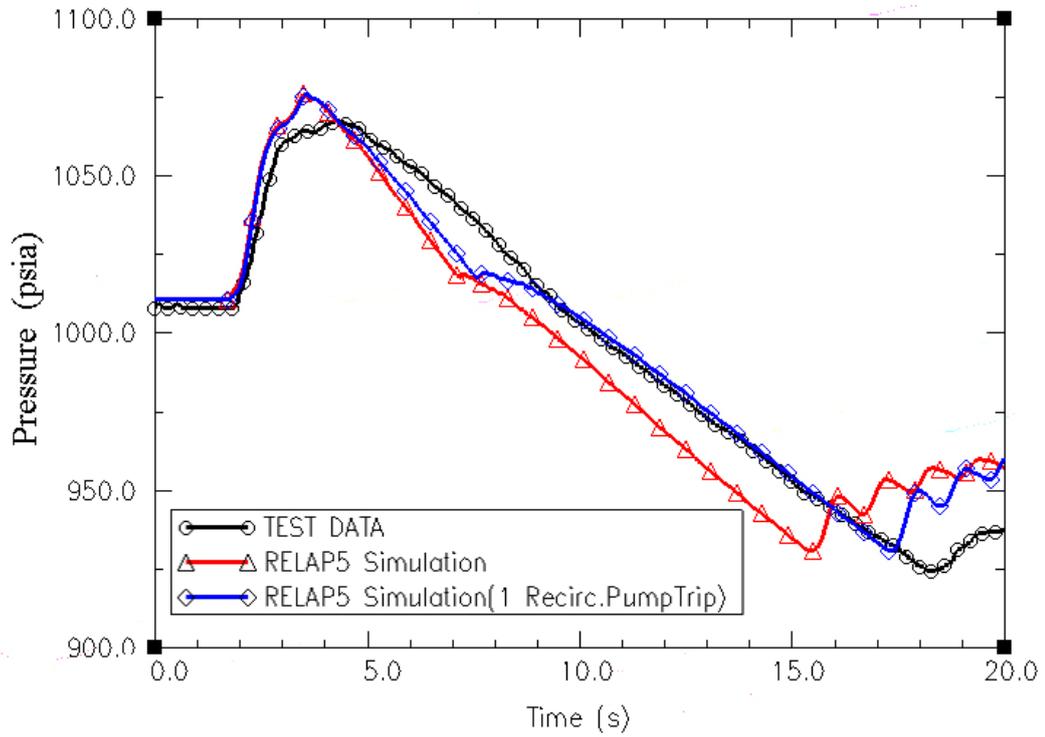


圖 4.39 100%Load Rejection 蒸汽頂槽壓力比較時變圖(假設 A 串再循環泵跳脫)

100% Load Rejection-Steamline Flow(lbm/sec)

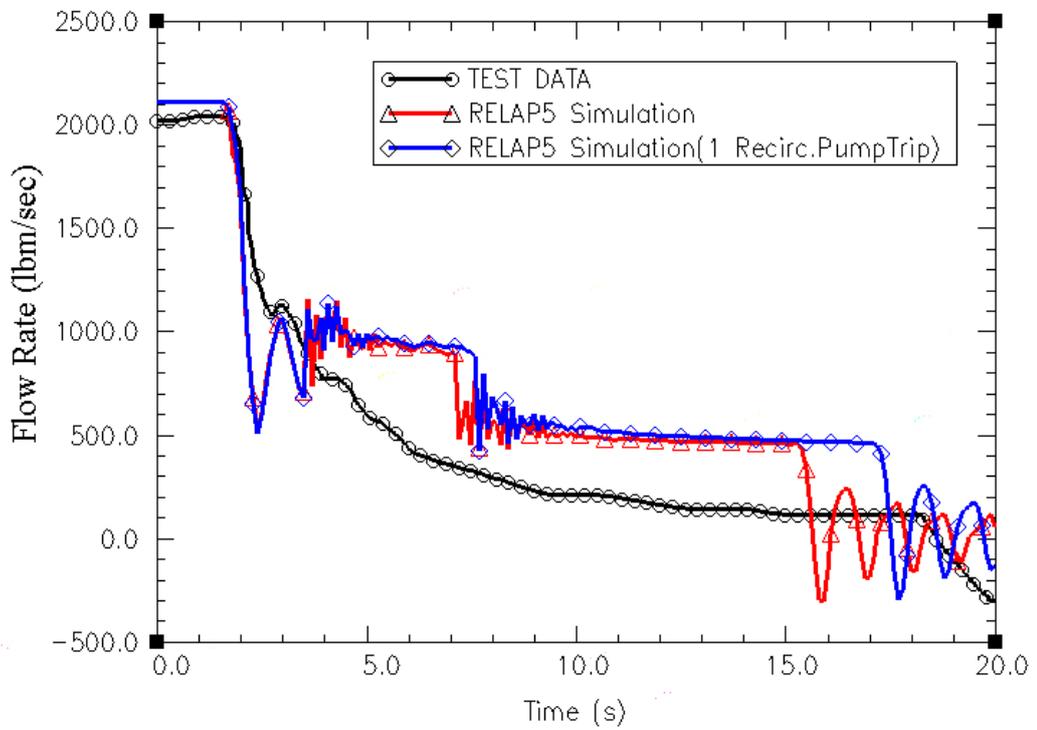


圖 4.40 100%Load Rejection 蒸汽流量比較時變圖(假設 A 串再循環泵跳脫)

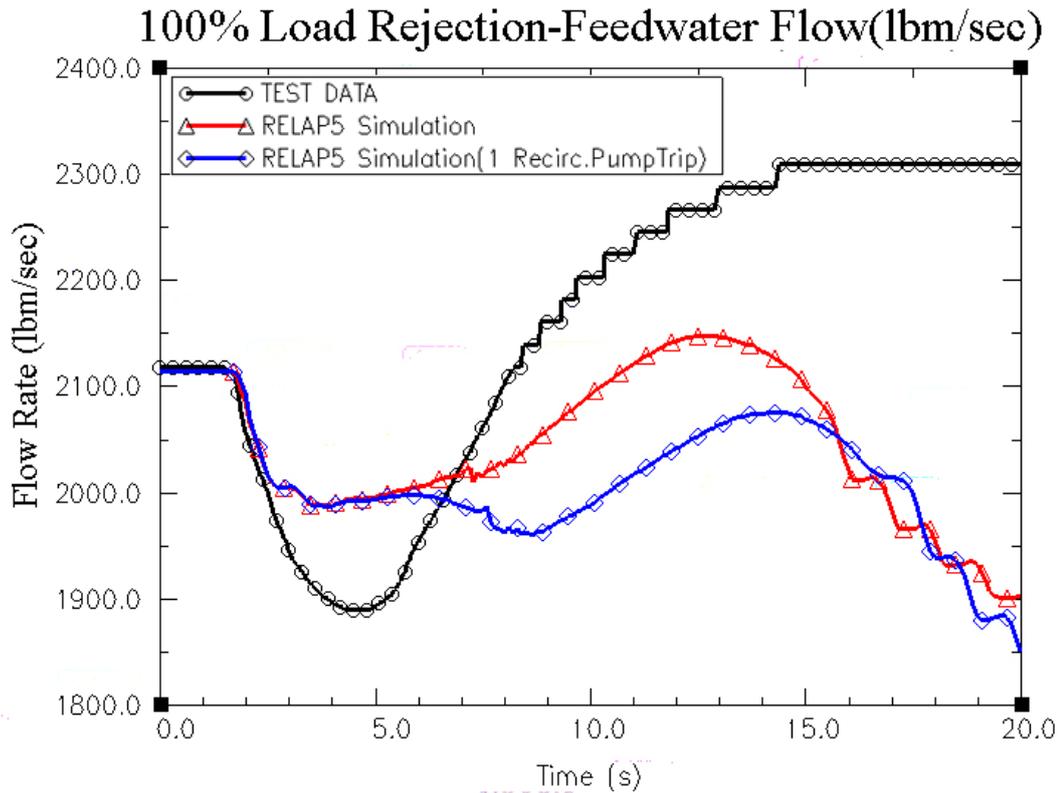


圖 4.41 100%Load Rejection 飼水流量比較時變圖(假設 A 串再循環泵跳脫)

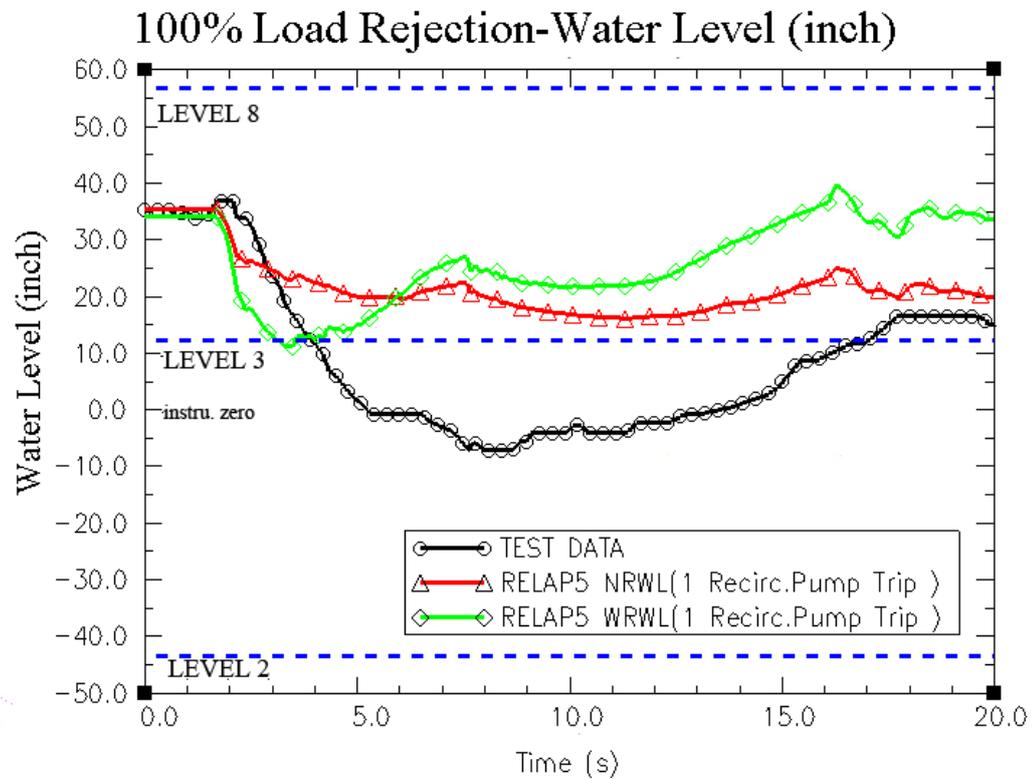


圖 4.42 100%Load Rejection 降流區水位比較時變圖(假設 A 串再循環泵跳脫)

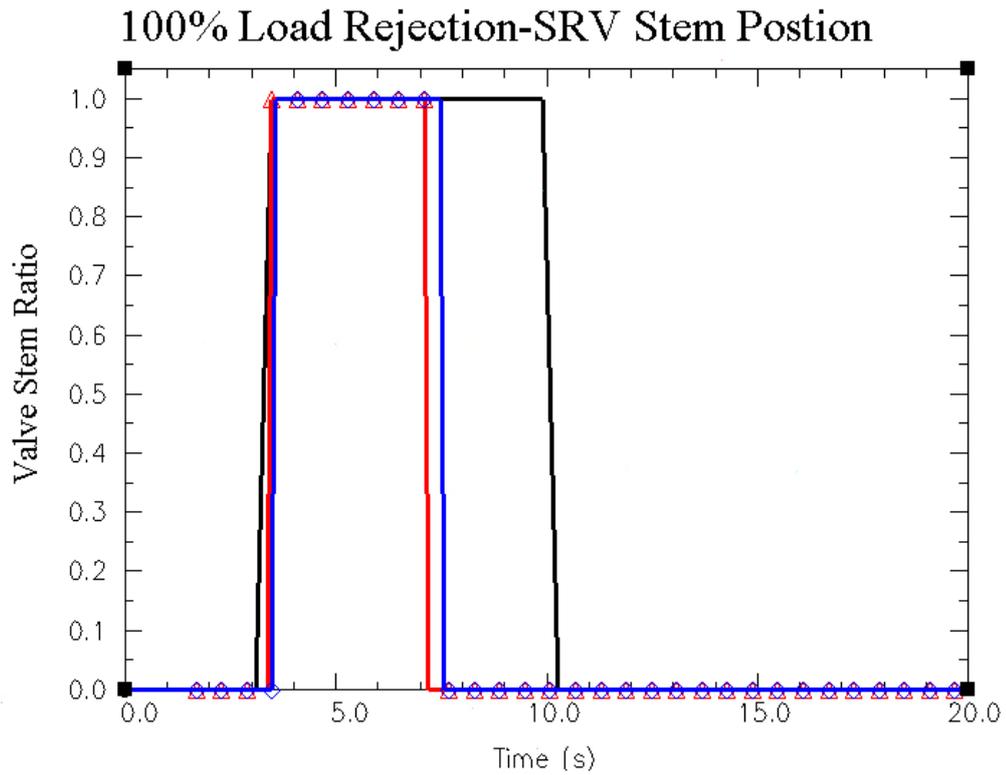


圖 4.43 100%Load Rejection 安全釋壓閥閥門開度比較時變圖(假設 A 串再循環泵跳脫)

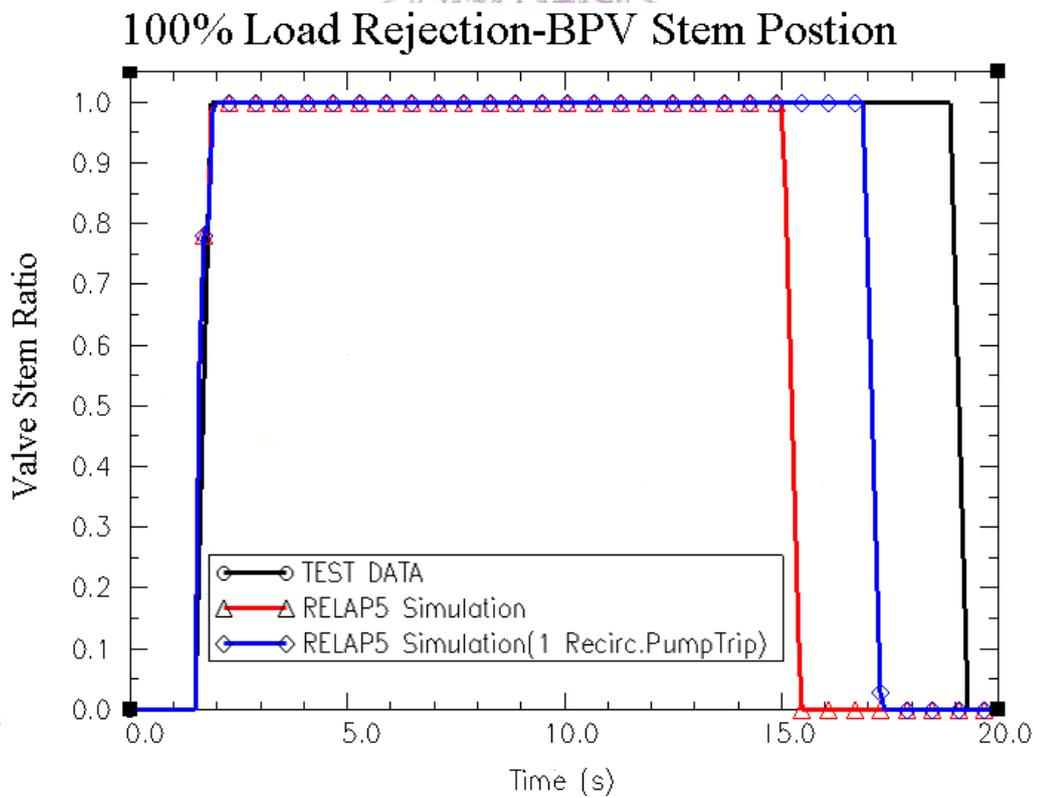


圖 4.44 100%Load Rejection 汽機旁通閥閥門開度比較時變圖(假設 A 串再循環泵跳脫)

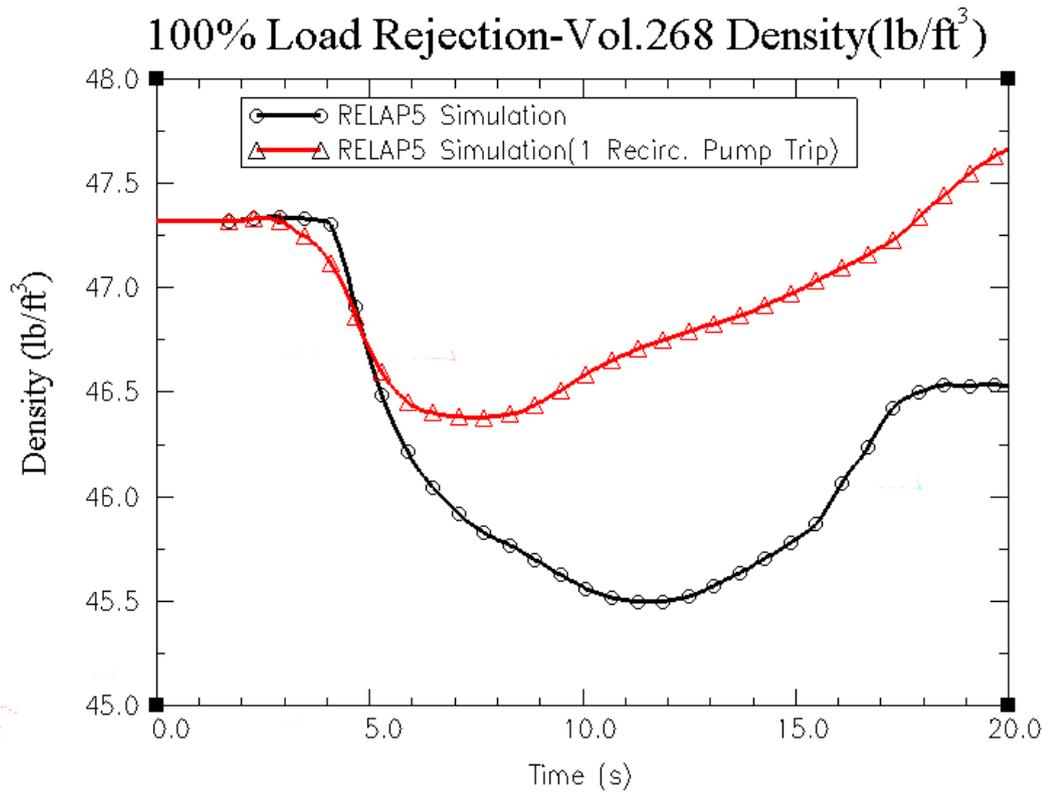


圖 4.45 100%Load Rejection 降流區(Volume268)密度比較時變圖(假設 A 串再循環泵跳脫)

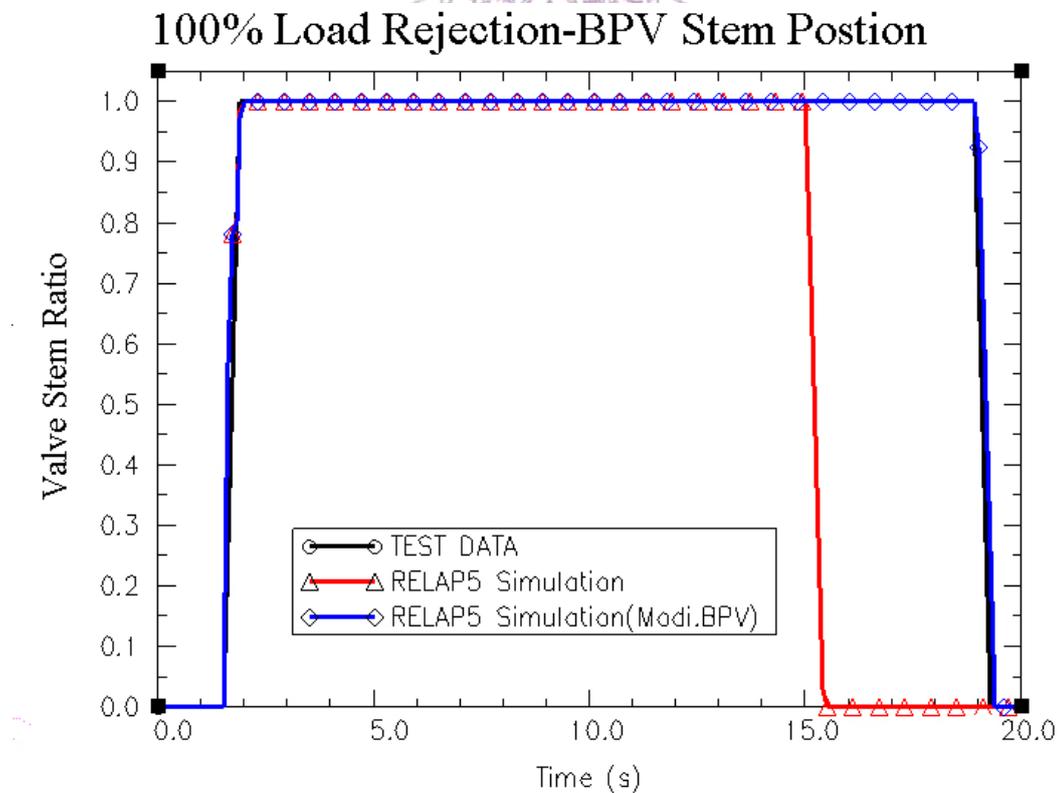


圖 4.46 100%Load Rejection 汽機旁通閥開度比較時變圖(調整汽機旁通閥開度)

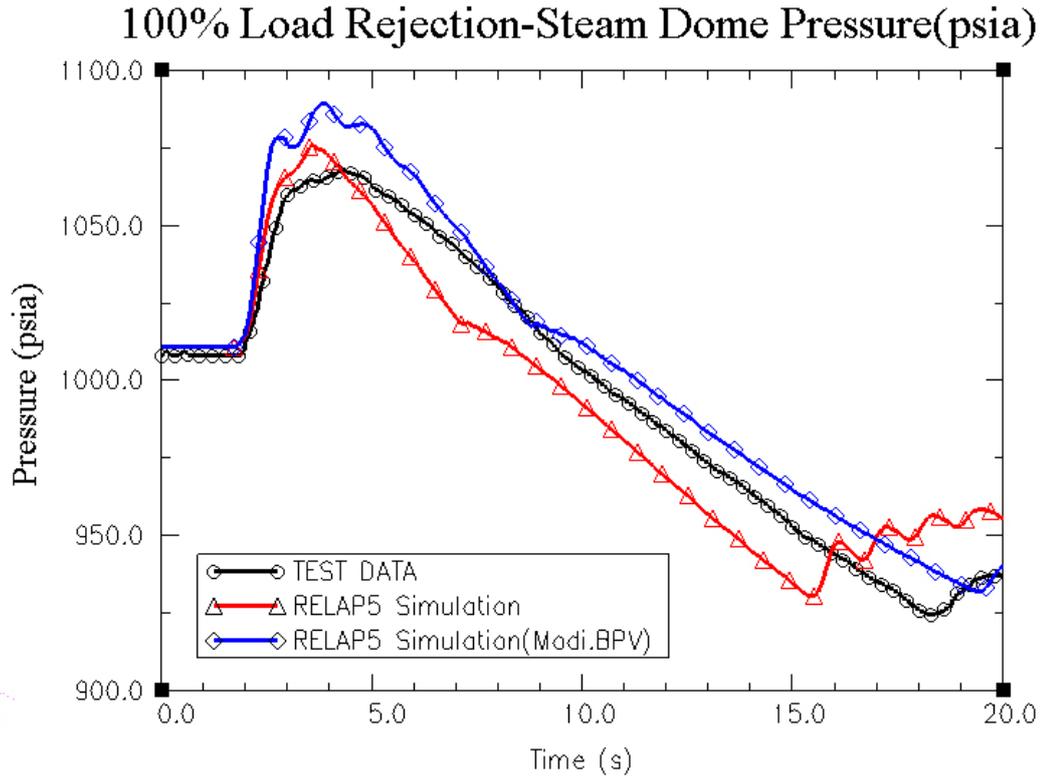


圖 4.47 100%Load Rejection 蒸汽頂槽壓力比較時變圖(調整汽機旁通閥開度)

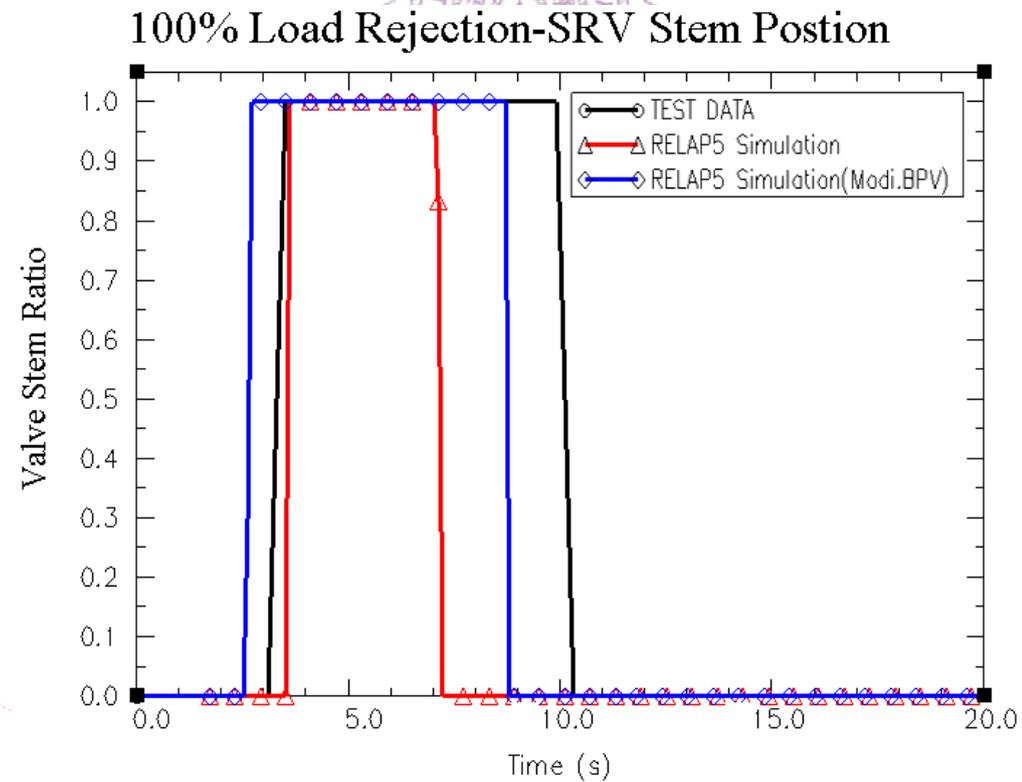


圖 4.48 100%Load Rejection 安全釋壓閥開度比較時變圖(調整汽機旁通閥開度)

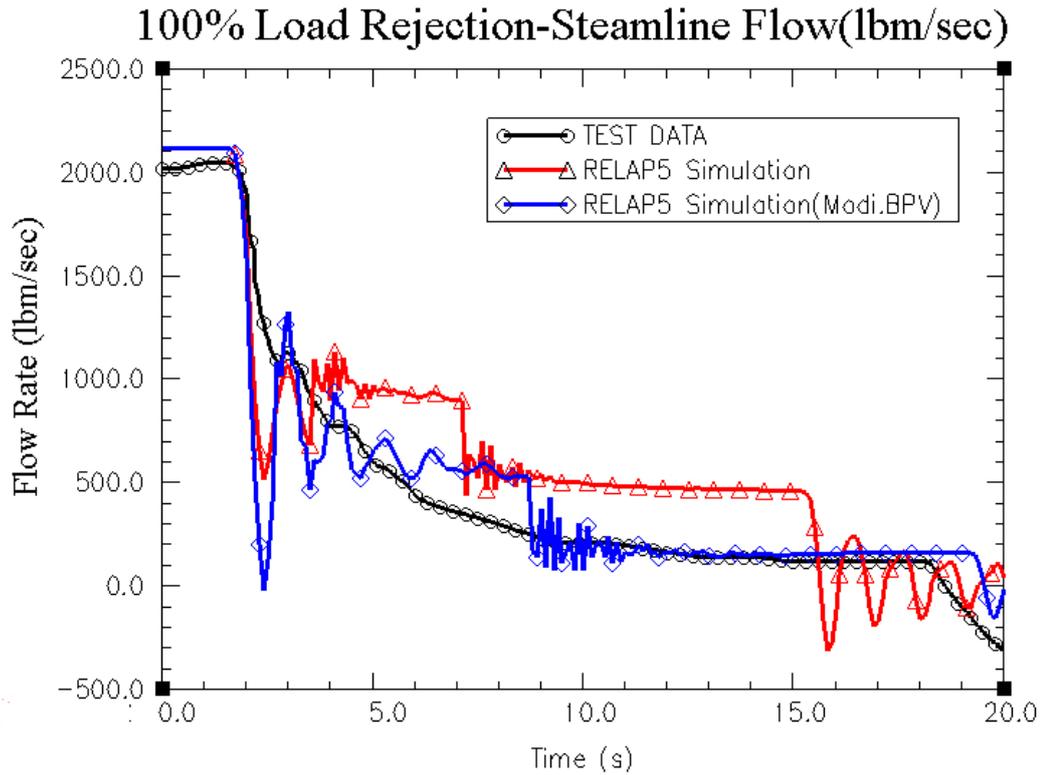


圖 4.49 100%Load Rejection 蒸氣流量比較時變圖(調整汽機旁通閥開度)

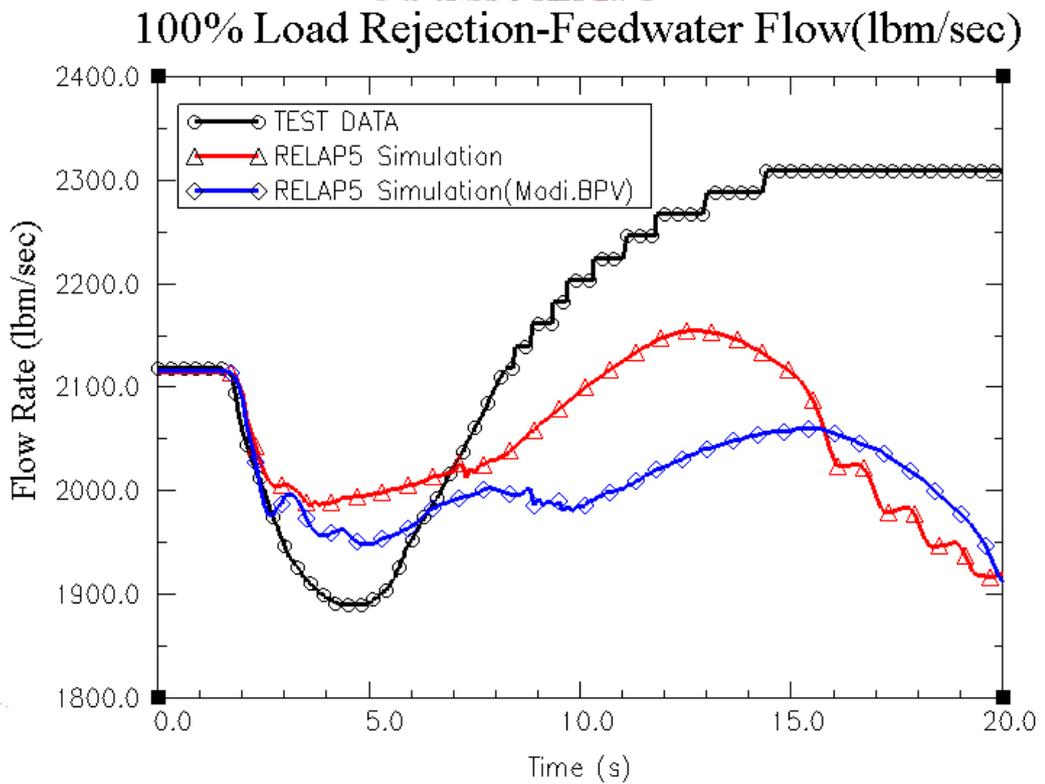


圖 4.50 100%Load Rejection 飼水流量比較時變圖(調整汽機旁通閥開度)

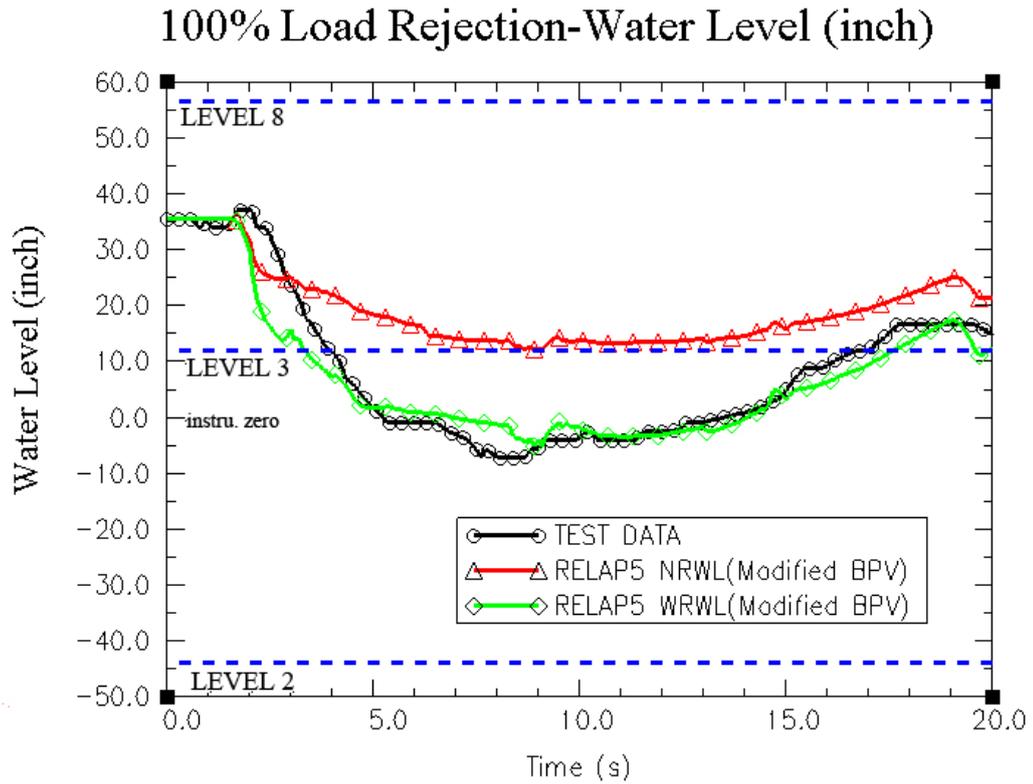


圖 4.51 100%Load Rejection 降流區水位比較時變圖(調整汽機旁通閥開度)

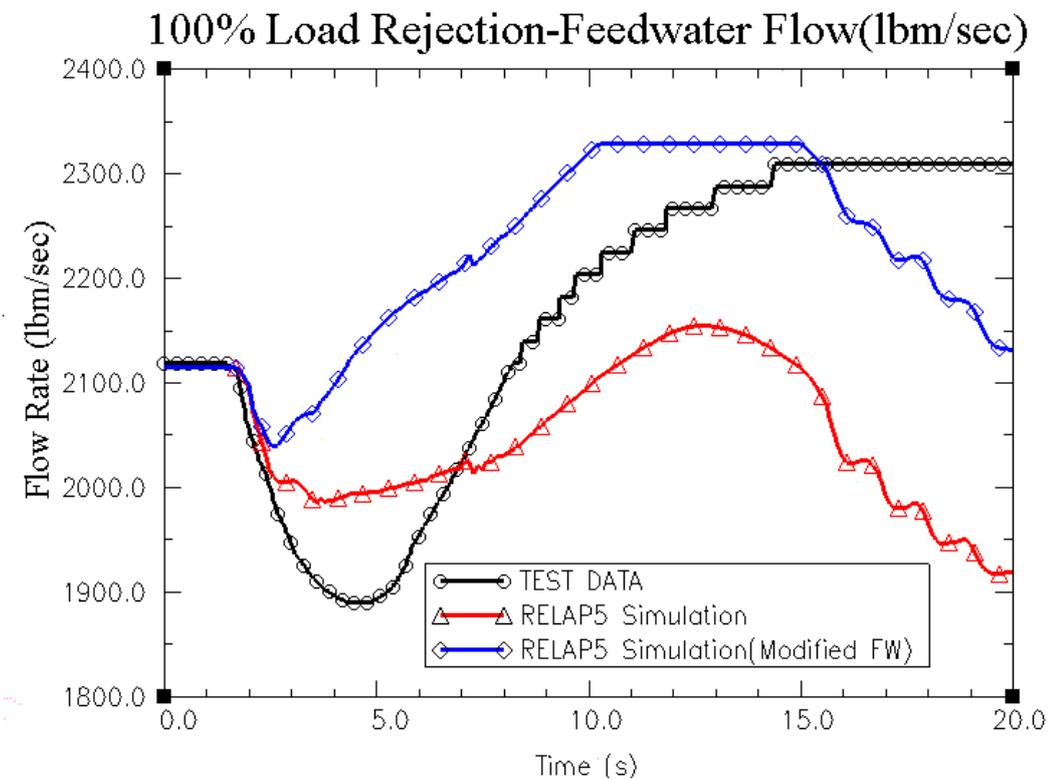


圖 4.52 100%Load Rejection 飼水流量比較時變圖(調整飼水控制系統水位信號)

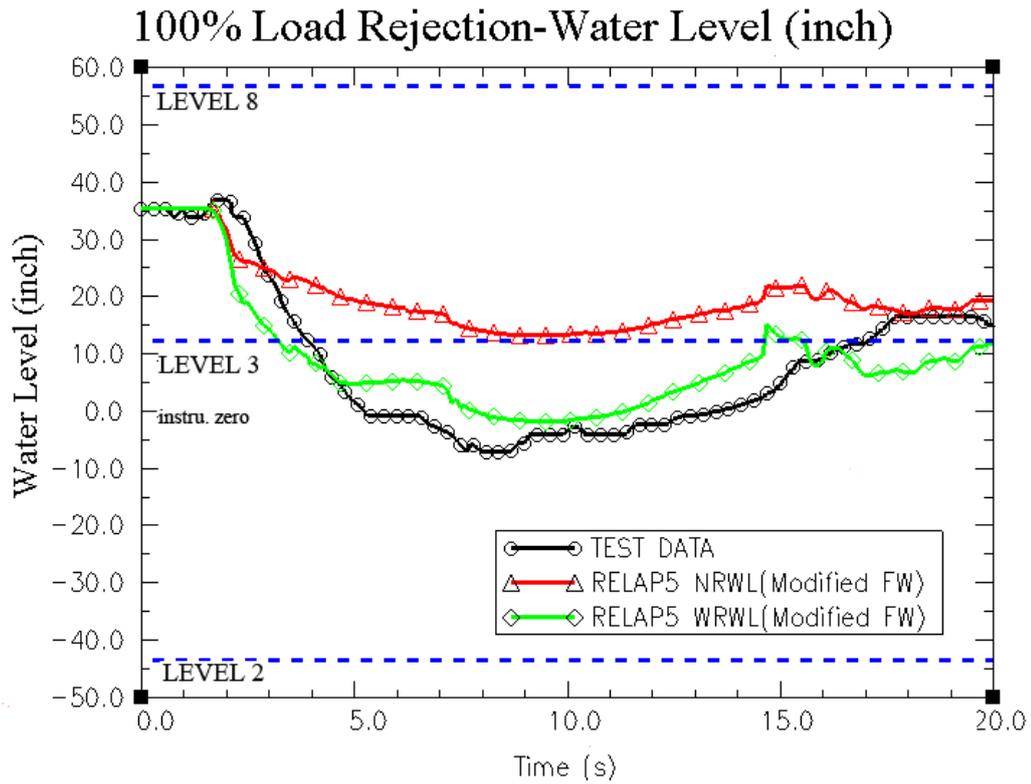


圖 4.53 100%Load Rejection 降流區水位比較時變圖(調整飼水控制系統水位信號)

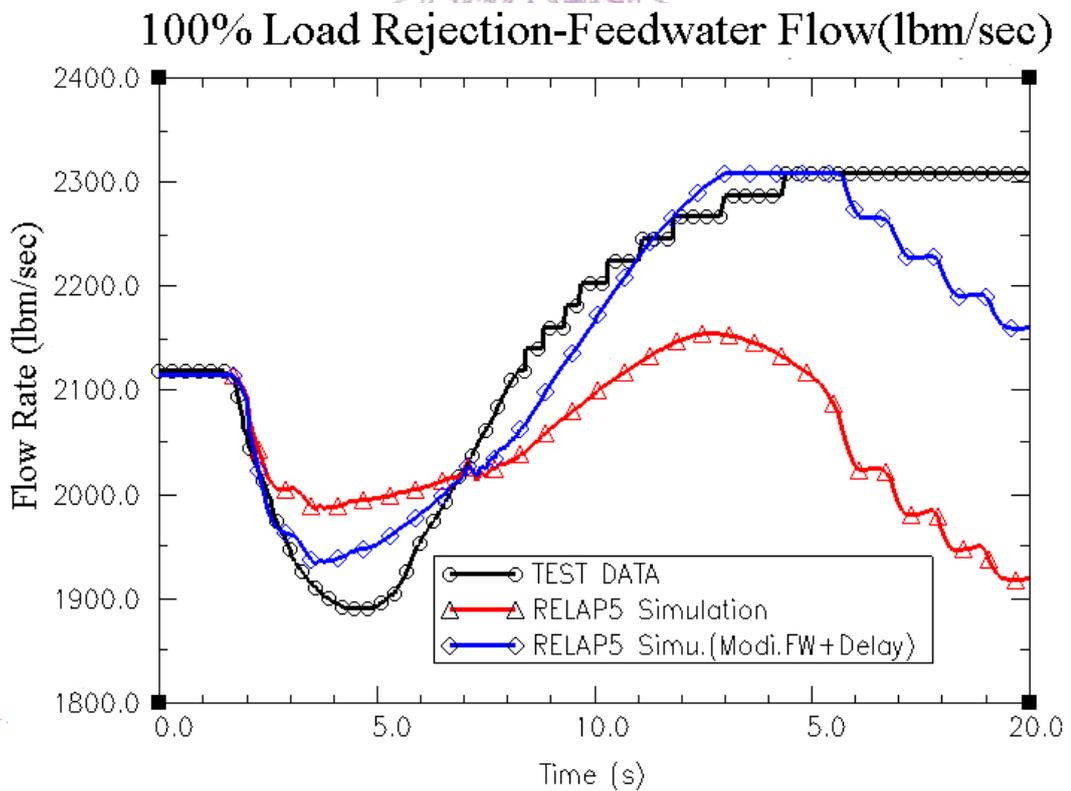


圖 4.54 100%Load Rejection 飼水流量比較時變圖(調整飼水控制系統水位信號及延遲時間)

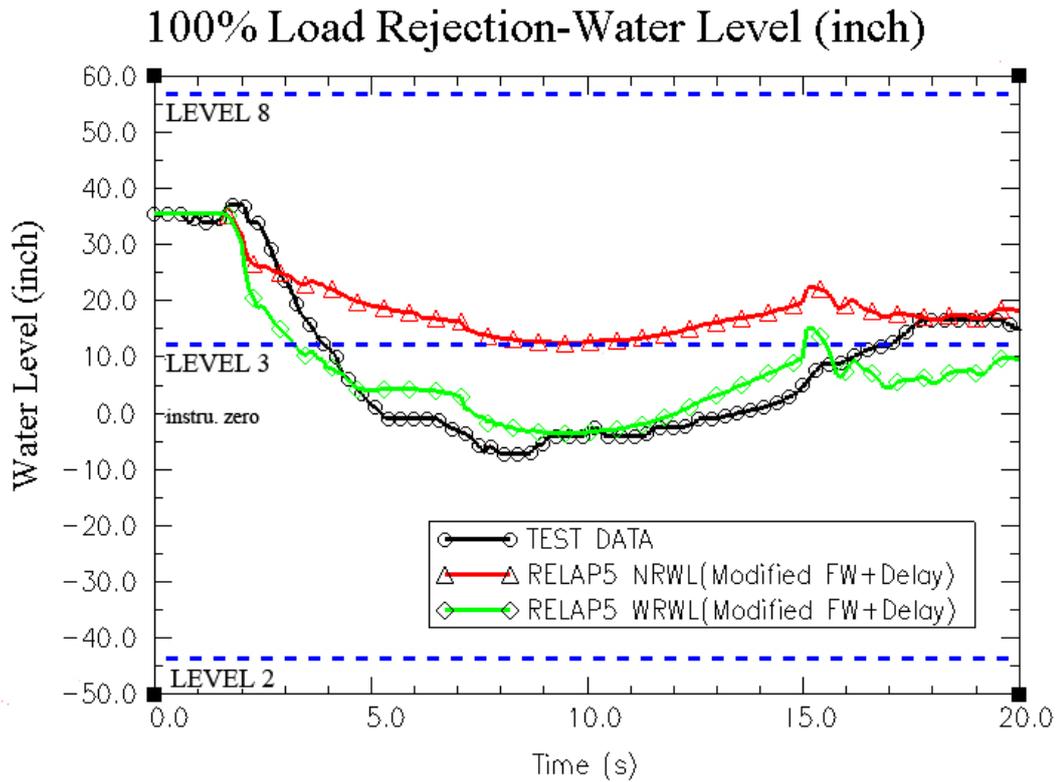


圖 4.55 100%Load Rejection 降流區水位比較時變圖(調整飼水控制系統水位信號及延遲時間)

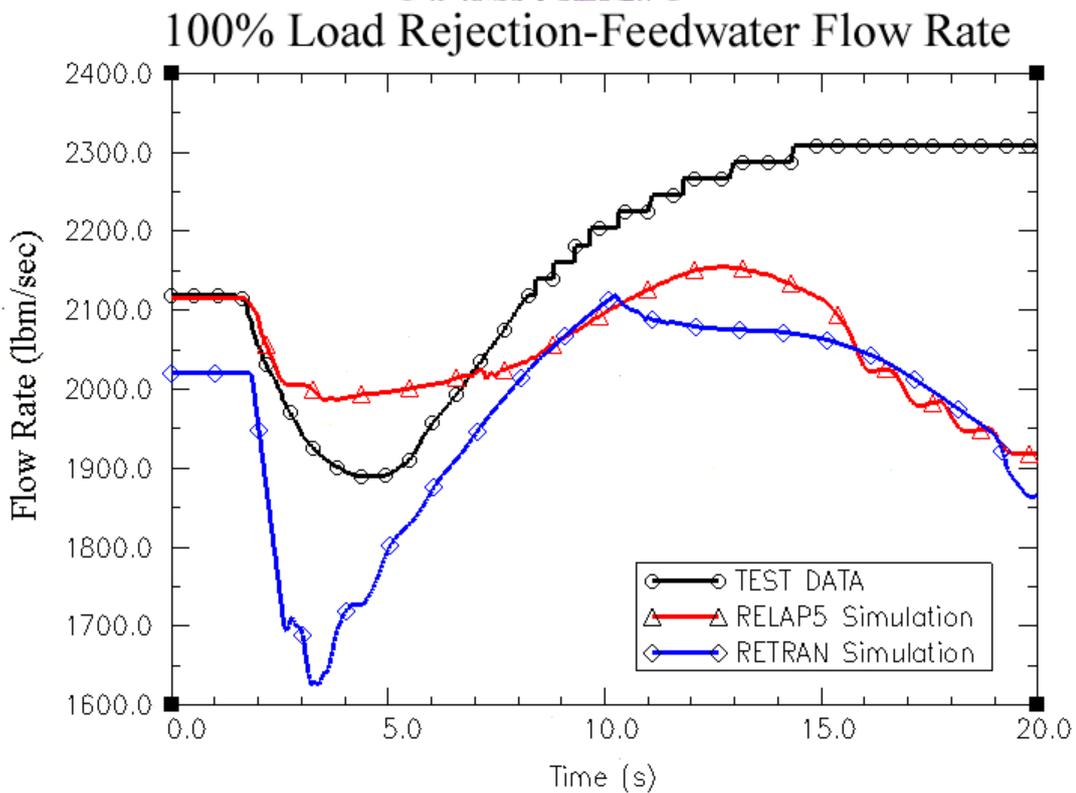


圖 4.56 100%Load Rejection 飼水流量比較時變圖(與核一廠雷傳程式比較)

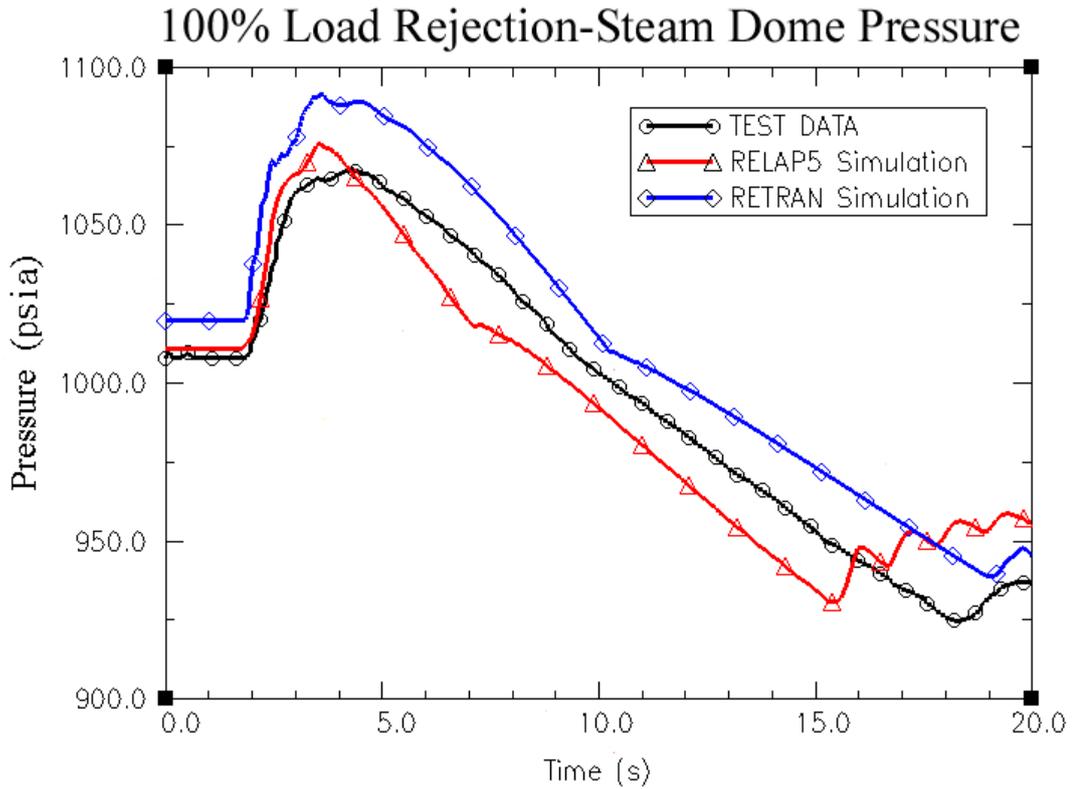


圖 4.57 100%Load Rejection 蒸汽頂槽壓力比較時變圖(與核一廠雷傳程式比較)

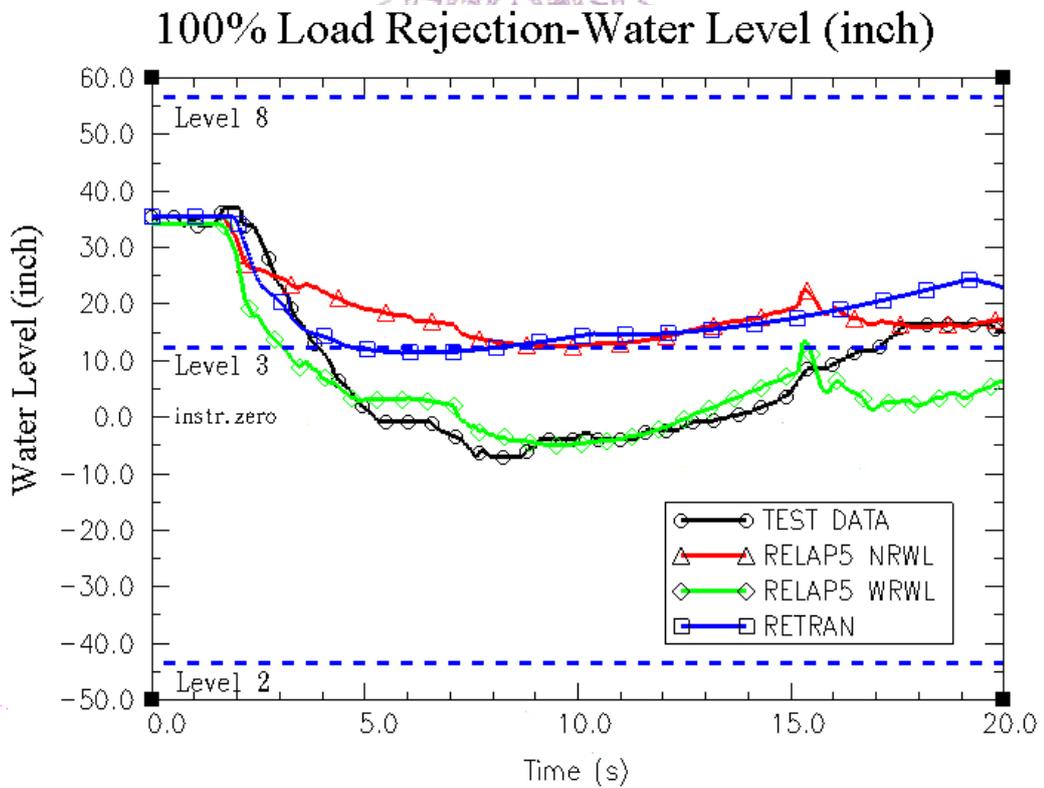


圖 4.58 100%Load Rejection 水位比較時變圖(與核一廠雷傳程式比較)

第五章 結論與建議

5.1 結論

核一廠 RELAP5/MOD3.3 輸入模式已進一步更新修改完成。本論文除了將四條蒸汽管線建立並將壓力調節系統及飼水控制系統採用雷傳程式控制系統更新完成外，並重新驗證內建汽水分離器模式(Separator Model)的適用性，並分別針對 97% 功率單串再循環泵跳脫及 100% 全功率發電機負載棄載兩個暫態做出比對測試。暫態模擬驗證結果顯示，多項參數皆能夠準確預測，整體趨勢皆與測試數據接近，但同時仍有許多地方需要修改更新。

在 97% 功率單串再循環泵跳脫暫態中，可看出爐心流量預測及反應度回饋有重新調整之必要，且再循環泵跳脫轉速曲線是採用表列輸入而非程式計算的方式模擬。在 100% 全功率發電機負載棄載暫態及調整案例之中，也可看出反應爐槽內壓力降有重新調整之必要，且飼水控制系統的反應時間及對於各信號的靈敏度也需要商榷。

與舊有的輸入模式比較，整體的測試表現良好，模擬結果也更能符合測試數據的趨勢；另外與核一廠雷傳程式比較的結果也顯示，兩者具有的模擬暫態能力相似，唯雷傳程式採用一維中子動態模擬，因此對於爐心功率的模擬則較為準確。

後繼研究者可繼續針對以上問題更新修正，並可將電廠平衡系統(Balance of Plant, BOP)建立，如此除了可更完整且忠實的模擬核一廠，更可加強在暫態模擬分析的能力。

參考文獻

1. 台灣電力公司，「沸水式核能電廠」，第一核能發電廠訓練教材上下冊，中華民國七十一年。
2. 楊昭義、歐陽敏盛，「核能發電工程學」，中華民國九十四年。
3. "RELAP5/MOD3.3 Code Manual", Vol.1 ~ Vol.8, NUREG/CR-5535, March 2006
4. "ChinShan Nuclear Power Station RELAP5/MOD3 Design Record File Calculation Note"
5. 張世勳，"核一廠 RELAP5/MOD3 輸入資料建立與模式驗證"，台灣電力公司/國立清華大學建教合作研究計畫-RELAP5/MOD3 系統分析程式的模式與應用驗證計畫報告，中華民國九十年九月。
6. 許文勝、湯簡如，"核一廠雷傳模式起爐測試計算書"，核能研究所核子工程組，中華民國八十六年七月。
7. 馬紹仕，"核二廠四條蒸汽管路雷傳輸入模式設計檔案"，06-4-DRF-010-001-1.0，中華民國九十年九月。
8. 王政德，"核一廠雷傳輸入模式設計檔案"，核能研究所，中華民國九十二年二月。



附錄 A：核一廠 RELAP5/MOD3.3 水位計算方法

A.1 前言

在電廠實際運轉之下，爐心水位無法直接測量，因此乃利用兩壓力偵測器所測得之壓差估算，如窄幅水位(Narrow Range Water Level)即為偵測儀器 N13 與 N14 之間(圖 3.7)的壓差所推算而得之水位高度；寬幅水位(Wide Range Water Level)則為偵測儀器 N12 與 N14 之間的壓差所推算之水位高度。在 RELAP5 舊有輸入模式中是將控制體積的空泡分率與其體積相乘，推算液態水的高度後再累加成為偵測水位，詳細計算可參考「核一廠 RELAP5 計算書」【4】。然而實際上偵測水位是以壓力差(Pressure difference)推算而得，因此經過修改後改用壓力差(Pressure difference)推算方式計算水位高度。

A.2 RELAP5/MOD3.3 壓力差計算水位方法

A.2.1 RELAP5/MOD3.3 窄幅水位計算過程

以下括弧中為以反應爐槽底為 0 計算的高度，計算過程請參考圖 A.1。

窄幅水位範圍：0 cm ~ +150 cm (505.12 inch ~ 599.21 inch)

儀器偵測接頭 N14：(599.21 inch)

儀器偵測接頭 N13：(505.12 inch)

爐心頂部(TAF)：(350.00 inch)

$$\begin{aligned} P_2 - P_1 &= \rho_{g,1}gh_{\text{steam}} + \rho_{f,1}gh_{\text{water}} \\ \therefore h_{\text{steam}} &= h - h_{\text{water}} \\ \therefore P_2 - P_1 &= \rho_{g,1}g(h - h_{\text{water}}) + \rho_{f,1}gh_{\text{water}} \\ \Rightarrow h_{\text{water}} &= \frac{1}{(\rho_{f,1} - \rho_{g,1})} \left\{ \frac{(P_2 - P_1)}{g} - \rho_{g,1}h \right\} \end{aligned}$$

$$\Rightarrow h_{\text{water}} = \frac{1}{(\rho_{f,252} - \rho_{g,252})} \left\{ \frac{(P_2 - P_1)}{g} - \rho_{g,252} h \right\}$$

$$h = 599.21 \text{ in.} - 505.12 \text{ in.} = 94.09 \text{ in.} = 2.39 \text{ m}$$

$$h_{\text{Shift,NRWL}} = 516.93 \text{ in.} - 505.12 \text{ in.} = 11.81 \text{ in.} = 0.299974 \text{ m}$$

$$P_1 = P_{252} + \rho_{\text{mix},252} g \Delta h_{\text{upper tap}}$$

$$P_2 = P_{262} + \rho_{\text{mix},262} g \Delta h_{\text{lower tap}}$$

$$\Delta h_{\text{upper tap}} = \text{Elevation}_{\text{center},252} - \text{Elevation}_{\text{upper tap}}$$

$$= 605.00 \text{ in.} - 599.21 \text{ in.} = 5.79 \text{ in.} = 0.1471 \text{ m}$$

$$\Delta h_{\text{lower tap}} = \text{Elevation}_{\text{center},262} - \text{Elevation}_{\text{lower tap}}$$

$$= 508.00 \text{ in.} - 505.12 \text{ in.} = 2.88 \text{ in.} = 0.07315 \text{ m}$$

$$\therefore h_{\text{water}}$$

$$= \frac{1}{(\rho_{f,252} - \rho_{g,252})} \left\{ \frac{(P_{262} - P_{252})}{g} + 0.07315 \times \rho_{\text{mix},262} - 0.1471 \times \rho_{\text{mix},252} - 2.39 \rho_{g,252} \right\}$$

$$h_{\text{indicated NRWL}} = h_{\text{water}} - h_{\text{Shift,NRWL}}$$

$$h_{\text{indicated NRWL}} = h_{\text{water}} - 0.299974 \text{ (m)}$$

飼水三元控制系統即以 $h_{\text{indicated NRWL}}$ 作為水位輸入訊號，控制飼水流量。經過修改估算方法後，以 100% 功率負載跳脫(100% Load Rejection)做為比較基準，圖 A.2 即為窄幅水位計算方法比較圖，由圖可知所計算出的水位會較原先方法略高，在暫態發生後差異亦趨明顯。理論上，壓力估算水位方法是以電廠偵測水位方法來計算，因此更貼近電廠實際情況，由其在壓力有較大變化的暫態事件下，應可忠實呈現電廠反應。

A. 2. 2 RELAP5/MOD3. 3 寬幅水位計算過程

以下括弧中為以反應爐槽底為 0 計算的高度，計算過程請參考圖 A.3。

寬幅水位範圍：-280 cm ~ +150 cm(356.69 inch ~ 599.21 inch)

儀器偵測接頭 N14：(599.21 inch)

儀器偵測接頭 N12：(356.69 inch)

$$P_2 - P_1 = \rho_{g,1}gh_{\text{steam}} + \rho_{f,1}gh_{\text{water}}$$

$$\therefore h_{\text{steam}} = h - h_{\text{water}}$$

$$\therefore P_2 - P_1 = \rho_{g,1}g(h - h_{\text{water}}) + \rho_{f,1}gh_{\text{water}}$$

$$\Rightarrow h_{\text{water}} = \frac{1}{(\rho_{f,1} - \rho_{g,1})} \left\{ \frac{(P_2 - P_1)}{g} - \rho_{g,1}h \right\}$$

$$\Rightarrow h_{\text{water}} = \frac{1}{(\rho_{f,252} - \rho_{g,252})} \left\{ \frac{(P_2 - P_1)}{g} - \rho_{g,252}h \right\}$$

$$h = 599.21 \text{ in.} - 356.69 \text{ in.} = 242.52 \text{ in.} = 6.16 \text{ m}$$

$$h_{\text{Shift,WRWL}} = 516.93 \text{ in.} - 356.69 \text{ in.} = 160.24 \text{ in.} = 4.07 \text{ m}$$

$$P_1 = P_{252} + \rho_{\text{mix},252}g \Delta h_{\text{upper tap}}$$

$$P_2 = P_{268} + \rho_{\text{mix},268}g \Delta h_{\text{lower tap}}$$

$$\Delta h_{\text{upper tap}} = \text{Elevation}_{\text{center},252} - \text{Elevation}_{\text{upper tap}}$$

$$= 605.00 \text{ in.} - 599.21 \text{ in.} = 5.79 \text{ in.} = 0.1471 \text{ m}$$

$$\Delta h_{\text{lower tap}} = \text{Elevation}_{\text{center},268} - \text{Elevation}_{\text{lower tap}}$$

$$= 350.85 \text{ in.} - 356.69 \text{ in.} = -5.84 \text{ in.} = -0.1483 \text{ m}$$

$$\therefore h_{\text{water}}$$

$$= \frac{1}{(\rho_{f,252} - \rho_{g,252})} \left\{ \frac{(P_{268} - P_{252})}{g} - 0.1483 \times \rho_{\text{mix},268} - 0.1471 \times \rho_{\text{mix},252} - 6.16 \times \rho_{g,252} \right\}$$

$$h_{\text{indicated WRWL}} = h_{\text{water}} + h_{\text{Shift,WRWL}}$$

$$h_{\text{indicated WRWL}} = h_{\text{water}} - 4.07 \text{ (m)}$$

經過修改估算方法後，以 100% 功率負載跳脫(100% Load Rejection)做為比較基準，圖 A.4 即為寬幅水位計算方法比較圖，因原由空泡分率計算水位的方法，是將控制體積 268、266、264、262、254 的水位高度累加上去，因此只能捕捉到水位多寡，並無法看到暫態時水位因壓力等原因而變化的情形。由壓力差(Pressure difference)估算水位的方法則可在壓力有較大變化的暫態事件下，呈現出水位因壓力變化而造成冷卻水凝結或是汽化的反應。

A. 2. 3 結論

經過上述計算過程修改，RELAP5/MOD3.3 在新的水位計算方法下，除了更忠實的以電廠偵測儀器實際計算水位的方法估算之外，更能夠反映出暫態水位變化的情形。



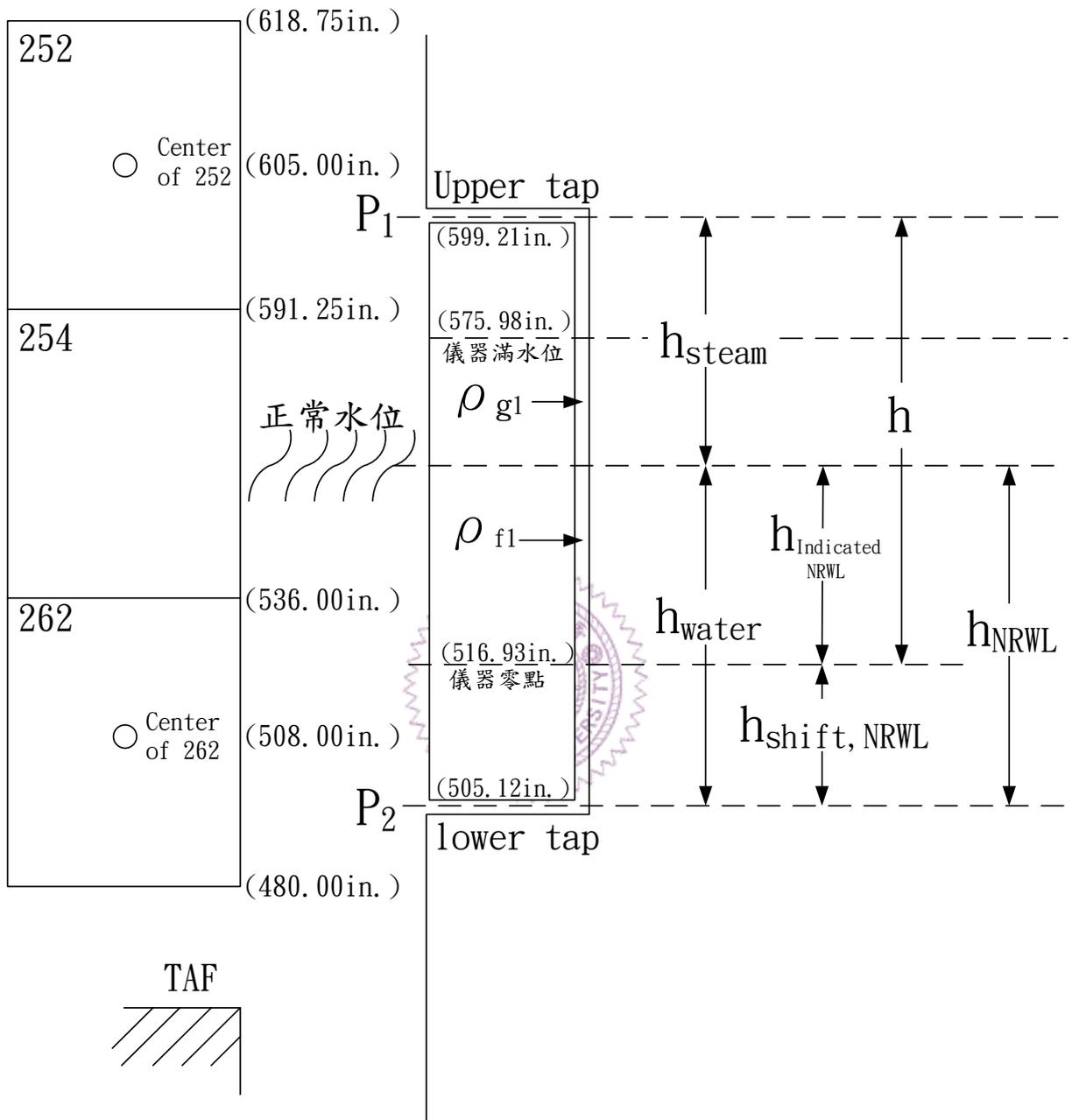


圖 A.1 窄幅水位計算示意圖

100% Load Rejection-窄幅水位計算方法比較圖

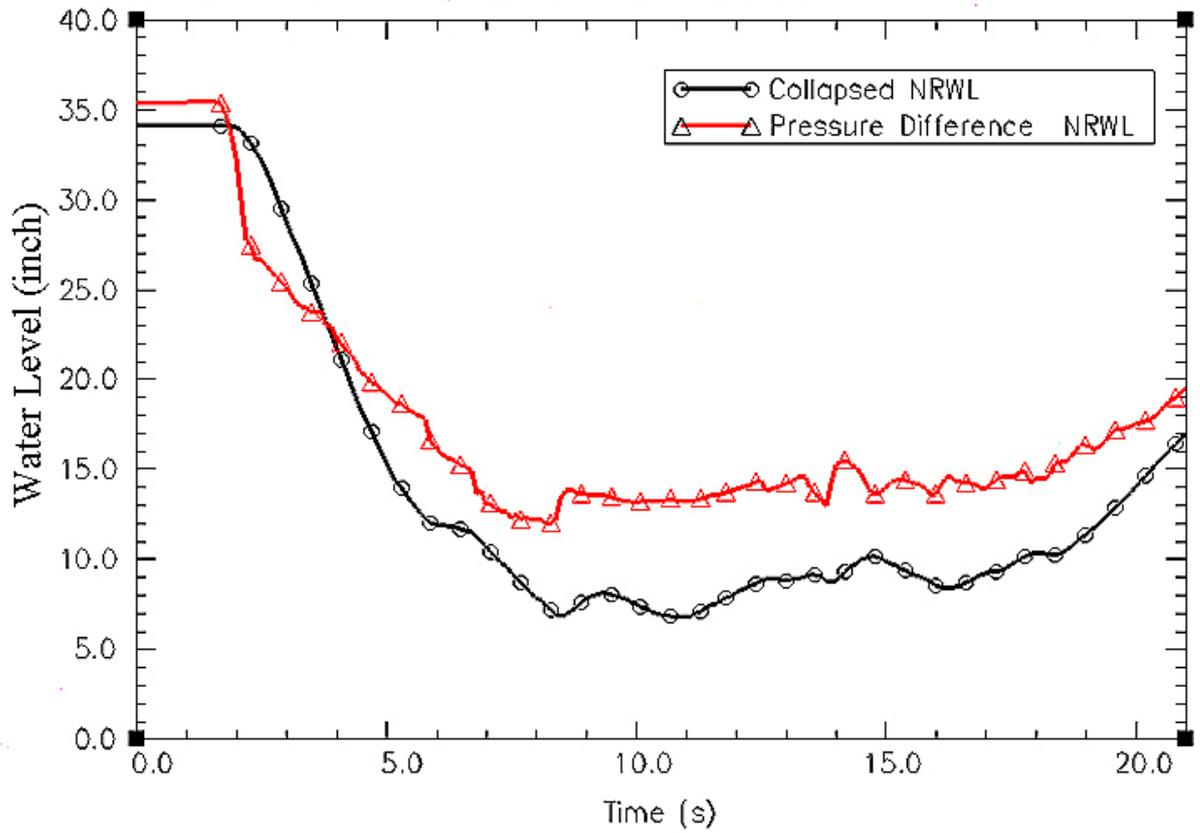


圖 A.2 窄幅水位計算方法比較示意圖

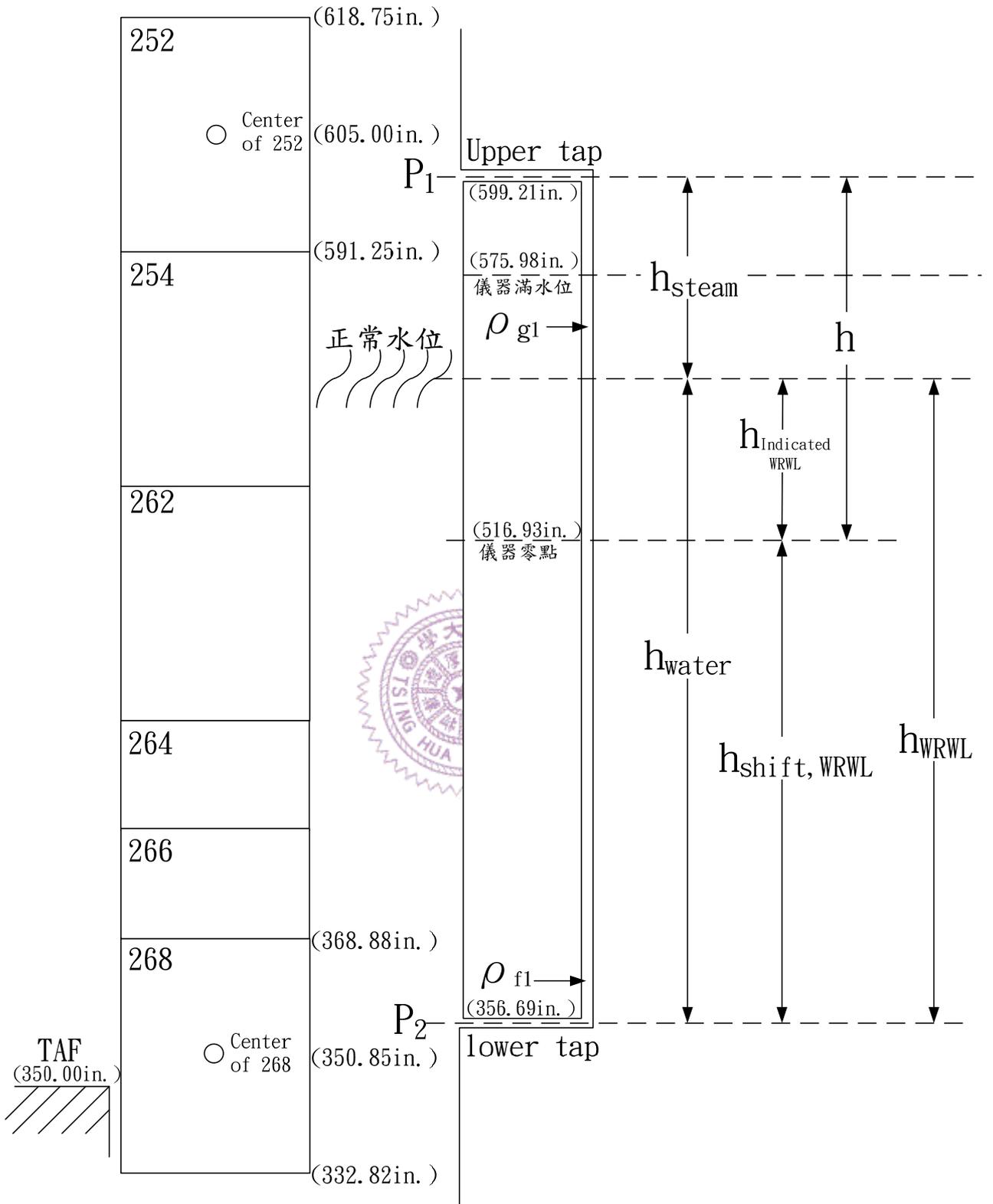


圖 A.3 寬幅水位計算示意圖

100% Load Rejection-寬幅水位計算方法比較圖

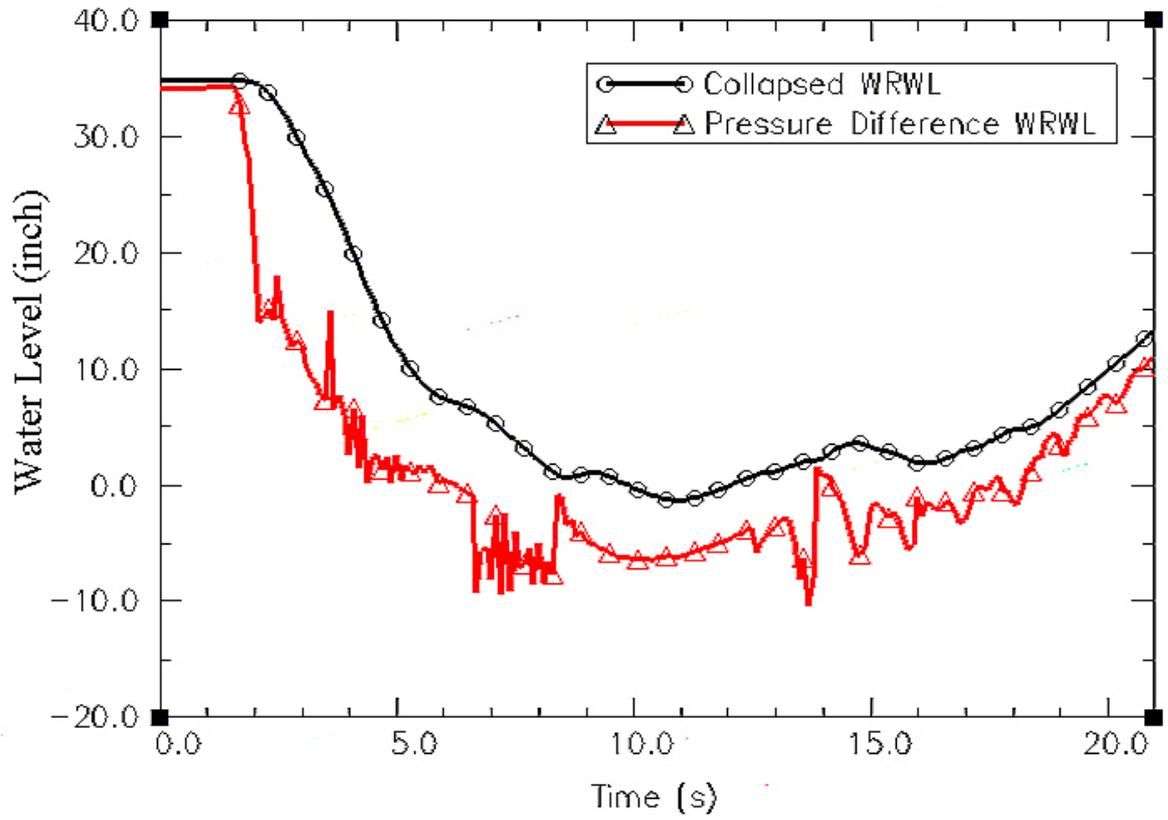


圖 A.2 寬幅水位計算方法比較示意圖

附錄B：核一廠RELAP5/MOD3.3 分離器(Separator)

模式分析討論

B.1 前言

在舊有核一廠 RELAP5/MOD3 輸入模式之中，使用程式內建的分離器模式(Separator Model)，但在調整穩態時發現能量並不能守恆，故仍沿用 RELAP5/YA 所建之汽液完全分離的方法。然而實際情況要做到汽液完全分離是有困難的，且暫態發生瞬間冷卻水的流動及汽水變化情形也無法忠實呈現，因此在較新的 RELAP5/MOD3.3 程式嘗試在輸入模式之中使用程式內建的分離器模式。

B.2 RELAP5/MOD3.3 分離器模式驗證

B.2.1 RELAP5/MOD3.3 分離器模式

汽水分離器之功用主要為將自反應爐流出之高溫汽液混合體分離，將蒸汽送至蒸汽頂槽後，再送至蒸汽管路推動汽機；被分離的冷卻水則回流至反應爐槽降流區(Downcomer)。圖 B.1 為分離器體積(Volume)與接點(Junction)簡圖，當使用程式內建分離器模式(Separator)時，對於流體接點(Junction)會有汽水空泡率之限制值，即分離器體積(228)中之蒸汽空泡值(α_{gk})大於分離器蒸汽出口(208-01)設定值(VOVER 值，預設為 0.5)時，即將蒸汽出口流體接點(208-01)之蒸汽空泡值轉為 1.0；同理，當分離器體積(228)中之液體空泡值(α_{fk})大於分離器液體出口(208-02)設定值(VUNDER 值，預設為 0.15)時，即將液體回流接點(228-02)中之液體空泡值設為 1.0，借由上述方式以達到分離汽液混合物的目的，且同時具有蒸汽乾燥器(Dryer)的功能，詳細之模式理論可參考 RELAP5/MOD3.3 使用手冊【3】。

B. 2. 2 RELAP5/MOD3. 3 分離器驗證結果

本驗證過程中採用 100% 功率穩態建立之結果作為驗證分離器是否能達到能量及質量守恆的基本要求，並以輸入模式計算穩態達 200 秒的結果為分析依據。

本次驗證功率為設定為 1775.0MWt，藉由程式內建之參數設定，直接比較由汽水分離器進入及流出之焓變化。圖 B.1 為汽水分離器控制體積(Volume)與流體接點(Junction)之相對位置圖，228 為分離器本體，228-01 為向上離開分離器的蒸汽流體接點，228-02 為向下回流(fall back)的液體接點，而 228-03 為自反應爐爐心進入汽水分離器之流體接點。分析研究結果顯示，從汽水分離器體積來探討能量及質量均能達到平衡，如表 B.1 所示；由整個反應爐系統來看，爐心產生能量減去蒸汽與飼水的淨流出焓，再考慮再循環泵所產生的能量，如表 B.2 所示，最後計算出的差異百分比皆在 0.3% 左右，如再考慮被動熱結構(Passive Heat Structure)的熱散失，則系統的能量平衡差異百分比應該會更小，即系統更趨近於能量平衡。

由分析計算結果顯示，使用內建的汽水分離器模式在能量及質量平衡上皆可達到基本的守恆要求。

B. 2. 3 結論

由上述驗證結果顯示，RELAP5/MOD3.3 之內建汽水分離器模式在程式更新後有修正了能量及質量守恆的問題，因此為了忠實反應輸入模式真實模擬的需求，因此在更新後的核一廠 RELAP5/MOD3.3 輸入模式案之中採用了程式內建的汽水分離器模式，作為穩態及暫態分析下的輸入模式設定。

表 B.1 汽水分離器質量及能量平衡比較表

Mass Flowrate	228-01	228-02	228-03	Difference	Difference
Time(sec)	(lbm/s)	(lbm/s)	(lbm/s)	(lbm/s)	(%)
198.0	2115.63	12786.2	14902.4	0.57	0.004
199.0	2115.51	12788.9	14903.7	-0.71	-0.005
200.0	2115.83	12782	14902.4	4.57	0.031
201.0	2114.85	12803.1	14902.8	-15.15	-0.102
201.5	2115.45	12790.3	14903.9	-1.85	-0.012
Enthalpy	228-01	228-02	228-03	Difference	Difference
Time(sec)	(Btu/sec)	(Btu/sec)	(Btu/sec)	(Btu/sec)	(%)
198.0	2522160	6960340	9482800	300	0.003
199.0	2522020	6961820	9483500	-340	-0.004
200.0	2522410	6958050	9482810	2350	0.025
201.0	2521230	6969550	9483070	-7710	-0.081
201.5	2521940	6962610	9483610	-940	-0.010

(註：Difference 百分比為差值除以 22803 之百分比值)

表 B.2 系統能量平衡比較表

Sys Bal.	Core Gen	Steam Enthalpy	FW Enthalpy	Recirc.Pump	Difference	Difference
Time(sec)	(BTU/s)	(BTU/s)	(BTU/s)	(BTU/s)	(BTU/s)	(%)
199.00	1685560.00	2521941	840780	1800	6199.00	0.3678
200.00	1685500.00	2521937	840862	1780	6205.00	0.3681
201.00	1685510.00	2521973	840878	1800	6215.00	0.3687
201.51	1685570.00	2521963	840772	1780	6159.00	0.3654

(註：Difference 百分比為差值除以 Core Gen 之百分比值)

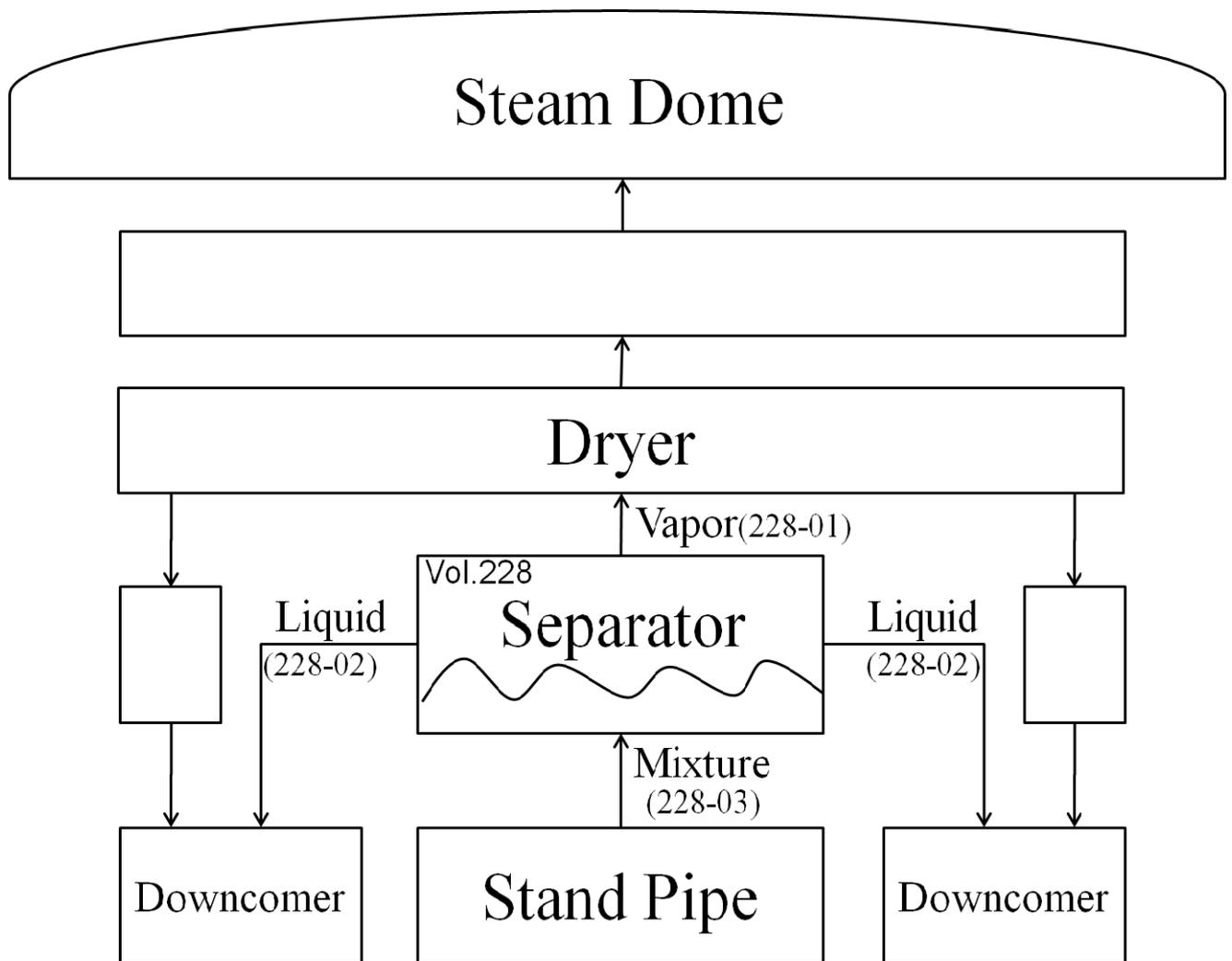


圖 B.1 反應爐汽水分離器(Separator)模擬示意圖