

國立清華大學

碩士論文

龍門核電廠 RELAP5-RT 輸入檔建立與暫態分析

Transient Analysis of Advanced Boiling Water Reactor
of Lungmen Nuclear Power Station using RELAP5-RT

系別：工程與系統科學系 組別：核子工程組

指導教授：李敏 Min Lee

學號姓名：9611522 許耕獻 Keng-Hsien Hsu

中華民國九十八年七月

摘 要

本論文的目的為建立台電龍門核電廠的熱水流分析程式 RELAP5-RT 輸入檔，該程式係由美國愛達華國家工程實驗室所發展。龍門核電廠 RELAP5-RT 輸入檔由清華大學核能電廠系統動態模擬與分析實驗室提供，分為蒸汽供應系統和電廠平衡系統(Balance of Plant, BOP)兩部份，本研究首先將其合併為一整合之套龍門核電廠 RELAP5-RT 輸入檔，並參考雷傳輸入檔的控制系統建立飼水控制系統 (Feed Water Control System) 和蒸汽旁通與壓力控制 (Steam Bypass and Pressure Control system)，而再循環流量控制 (Recirculation Flow Control System) 和棒控制資訊系統 (Rod Control Information System) 以及反應器保護系統 (Reactor Protect System) 則是由李亮瑩同學建立。

由於龍門核電廠尚未商轉，沒有實際運轉數據，本論文建立之 RELAP5-RT 輸入數據檔暫態測試的結果將與奇異公司 (General Electric) 運轉測試報告中的 ODYN 分析結果，以及清華大學核能電廠系統動態模擬與分析實驗室發展的 ALPS(Advanced Lungmen Plant Simulator) 之結果進行比較。模擬的暫態包含：全功率下汽機跳脫、反應器完全隔離、一台飼水泵跳脫。比較結果顯示，反應器完全隔離與一台飼水泵跳脫兩個暫態，三套分析軟體的結果很接近。由於建立之輸入檔在模擬蒸汽旁通閥的控制尚不完整，導致汽機跳脫暫態之初始壓力下降過多，且飼水控制系統所參考的雷傳輸入模式欠缺電廠平衡系統的模式，造成暫態分析時，飼水反應較慢。

ABSTRACT

In this study , RELAP5-RT input deck of Lungmen Nuclear Power Station of Taiwan Power Company is developed. The Lungmen power station employs Advanced Boiling Water Reactor designed by General Electric. The rated thermal power of the Nuclear Steam Supply System is 3926 MWt .

Separate RELAP5-RT input decks of nuclear steam supply system (NSSS) and systems of balance of plant of the plant (BOP) models are adopted from the Advanced Lungmen Plant Simulator (ALPS) developed by the Nuclear Power Plant Dynamic Simulation and Analysis Lab. of National Tsing Hua University. These two input decks are combined into an integrated RELAP5-RT input deck.

The control logics of feed water control system and steam bypass and pressure control system of plant are built into RELAP5-RT input deck. The control logics are based on the RETRAN input deck of the plant. It has been demonstrated that the integrated thermal hydraulic deck together with the control systems can bring the system to steady state.

Three power test transients are simulated using the deck developed. These are turbine trip at 100% power, reactor full isolation, and one feedwater pump trip. The results of simulations are compared with the results in GE Startup Transient Analysis Report and the results of the ALPS simulations. The comparison shows that the results of these simulations are very similar. Nevertheless, there are some differences in the results of the simulation of turbine trip transient due to that the systems of BOP are not modeled in the RETRAN input deck of the plant and the control logics of the feed water control system and steam bypass control system are not completed.

致謝詞

這篇論文可以完成，有很大功勞和苦勞歸功於指導教授李敏博士以及李亮瑩同學。在大學時期的專題課程跟李老師以及亮瑩同學一起參與核三廠大破口事件對於不同分析軟體結果比較，這個題目使我接觸電廠安全模擬軟體，並對於所學的核工相關基礎進一步的應用在安全分析，這些經驗的累積對於本論文不少助益。由於我的個性比較躁進，對於研究分析容易出現小錯誤，老師明白我的缺點，時常叮嚀我凡事慢慢來，要觀察全盤結果，而非只關注於小部份。

特別感謝核能電廠系統動態模擬與分析實驗室的同仁，尤其是楊宗祐學長和梁國興博士，提供了很多想法與他們的實驗分析數據，才能完成暫態測試。謝謝一路陪伴的實驗室同伴與學長學弟們，那些吃便當閒聊的日子，我不會忘記的。最後，謝謝家人的支持，回到家吃飯的日子是最輕鬆舒服的。身邊的每個人，謝謝你們。



目 錄

摘要	i
ABSTRACT.....	ii
致謝詞	iii
目 錄	iv
圖目錄	vi
表目錄	ix
第一章 序論	1
1.1 前言	1
1.2 研究內容	1
1.3 資料來源	2
第二章 程式介紹	3
2.1 RELAP 程式介紹.....	3
2.2 RELAP5-RT 介紹.....	3
第三章 龍門核電廠進步型沸水式反應器介紹	6
3.1 龍門核電廠設施簡介	6
3.1.1 前言	6
3.1.2 廠內系統簡介	6
3.2 龍門核電廠控制系統簡介	7
3.2.1 前言	7
3.2.2 飼水控制系統	8
3.2.3 蒸氣旁通與壓力控制系統	8
第四章 龍門核電廠 RELAP5-RT 輸入檔建立.....	16
4.1 前言	16
4.2 輸入檔介紹	16

4.2.1	蒸汽供應系統	16
4.2.2	電廠平衡系統	17
4.3	輸入檔穩態建立	18
4.4	龍門核電廠 RELAP5-RT 輸入檔控制系統建立.....	19
4.4.1	前言	19
4.4.2	飼水控制系統	19
4.4.3	蒸汽旁通與壓力控制系統	20
4.4.4	龍門核電廠 RELAP5-RT 穩態輸入檔建立.....	21
第五章	暫態分析結果	43
5.1	前言	43
5.2	全功率下汽機跳脫	44
5.2.1	測試說明	44
5.2.2	模擬結果分析比對	44
5.2.3	汽機跳脫之 RELAP5-RT 飼水進口選擇比較.....	46
5.2.4	汽機跳脫之結論	47
5.3	反應器完全隔離	47
5.3.1	測試說明	47
5.3.2	模擬結果分析比對	48
5.3.3	反應器完全隔離之飼水進口選擇比較	50
5.3.4	反應器完全隔離之結論	51
5.4	一台飼水泵跳脫	51
5.4.1	測試說明	51
5.4.2	模擬結果分析比對	51
5.4.3	一台飼水泵跳脫之結論	53
第六章	結論與展望	77
參考文獻	78

圖目錄

圖 2.1	RELAP 程式發展樹狀圖	5
圖 3.1.1	進步型沸水式反應器電廠架構	10
圖 3.1.2	進步型沸水式反應器之壓力槽內部組件	11
圖 3.1.3	龍門電廠飼水泵管路圖	12
圖 3.2.1	電廠主控制廠房	13
圖 3.2.2	飼水控制區塊圖	14
圖 3.2.3	蒸汽供應系統	15
圖 4.2.1	龍門核電廠蒸汽供應系統 RELAP5-RT 輸入檔	23
圖 4.2.2	龍門核電廠電廠平衡系統 (BOP) 蒸汽段 RELAP5-RT 輸入檔	24
圖 4.2.3	龍門核電廠 BOP 蒸汽端之主飼水泵汽機 RELAP5-RT 輸入檔	25
圖 4.2.4	龍門核電廠電廠平衡系統 (BOP) 飼水段 RELAP5-RT 輸入檔	26
圖 4.3.1	龍門核電廠 RELAP5-RT 輸入檔之飼水端連接設定	27
圖 4.3.2	龍門核電廠 RELAP5-RT 輸入檔之蒸汽端連接設定	27
圖 4.3.3	RELAP5-RT 穩態功率變化 (無控制系統)	28
圖 4.3.4	RELAP5-RT 穩態壓力槽頂端壓力變化 (無控制系統)	28
圖 4.3.5	RELAP5-RT 穩態爐心水位變化 (無控制系統)	29
圖 4.3.6	RELAP5-RT 穩態壓力槽出口蒸汽流量變化 (無控制系統)	29
圖 4.4.1	雷傳飼水控制邏輯圖 ^[2]	30
圖 4.4.2	RELAP5-RT 飼水控制邏輯圖	31
圖 4.4.3	RELAP5-RT 改變爐心水位觀察飼水變化 (飼水控制)	32
圖 4.4.4	RELAP5-RT 改變蒸汽流量觀察飼水變化 (飼水控制)	33
圖 4.4.5	RELAP5-RT 改變壓力槽壓力觀察飼水變化 (飼水控制)	34
圖 4.4.6	雷傳壓力控制邏輯圖 ^[2]	35
圖 4.4.7	RELAP5-RT 壓力控制邏輯圖 (1)	36

圖 4.4.8	RELAP5-RT 壓力控制邏輯圖 (2)	37
圖 4.4.9	RELAP5-RT 壓力控制之旁通閥邏輯圖	37
圖 4.4.10	控制閥球的高度	38
圖 4.4.11	控制閥位與相對流量	39
圖 4.4.12	RELAP5-RT 改變壓力槽壓力觀察汽機控制閥開度變化 (壓力控制)	40
圖 4.4.13	穩態下反應器功率	41
圖 4.4.15	穩態下爐心水位	42
圖 4.4.16	穩態下飼水流量	42
圖 5.2.1	爐心進口流量變化 (100%功率下汽機跳脫)	56
圖 5.2.2	反應器功率變化 (100%功率下汽機跳脫)	56
圖 5.2.3	5 秒內壓力槽頂端壓力變化 (100%功率下汽機跳脫)	57
圖 5.2.4	400 秒內壓力槽頂端壓力變化 (100%功率下汽機跳脫)	57
圖 5.2.5	飼水流量 (100%功率下汽機跳脫)	58
圖 5.2.6	壓力槽出口蒸汽量變化 (100%功率下汽機跳脫)	58
圖 5.2.7	飼水和蒸汽流量差值 (100%功率下汽機跳脫)	59
圖 5.2.8	爐心水位變化 (100%功率下汽機跳脫)	59
圖 5.2.9	爐心進口次冷態溫度變化 (100%功率下汽機跳脫)	60
圖 5.2.10	高壓汽機進口蒸汽量變化 (100%功率下汽機跳脫)	60
圖 5.2.11	汽機旁通閥蒸汽量變化 (100%功率下汽機跳脫)	61
圖 5.2.12	RELAP5-RT 汽機跳脫後飼水控制之飼水和流進壓力槽飼水差距(飼水輸入蒸汽驅動飼水泵控制)	61
圖 5.2.13	RELAP5-RT 汽機跳脫後爐心水位對於不同飼水輸入之比較	62
圖 5.2.14	RELAP5-RT 汽機跳脫後反應器功率對於不同飼水輸入之比較	62
圖 5.2.15	RELAP5-RT 汽機跳脫後流進壓力槽之飼水量對於不同飼水輸入之比較	63
圖 5.3.2	爐心功率 (%) 變化 (反應器完全隔離)	64
圖 5.3.3	壓力槽頂端壓力變化 (反應器完全隔離)	64

圖 5.3.4	飼水流量變化（反應器完全隔離）	65
圖 5.3.5	爐心水位變化（反應器完全隔離）	65
圖 5.3.6	壓力槽出口蒸汽變化（反應器完全隔離）	66
圖 5.3.7	釋壓閥流量變化（反應器完全隔離）	66
圖 5.3.8	高壓汽機流量變化（反應器完全隔離）	67
圖 5.3.9	爐心流量變化（反應器完全隔離）	67
圖 5.3.10	power/flow operating map (10 RIPs).....	68
圖 5.3.11	爐心進口次冷態溫度變化（反應器完全隔離）	69
圖 5.3.12	進口飼水溫度變化（反應器完全隔離）	69
圖 5.3.13	爐心進口次冷態溫度變化對於飼水輸入值討論（反應器完全隔離）	70
圖 5.3.14	RELAP5-RT 反應器完全隔離後飼水控制之飼水和流進壓力槽飼水之差距（飼水輸入蒸汽驅動飼水泵控制）	70
圖 5.3.15	RELAP5-RT 反應器完全隔離後流進壓力槽飼水對於不同飼水輸入之比較..	71
圖 5.3.16	RELAP5-RT 反應器完全隔離後爐心水位對於不同飼水輸入之比較.....	71
圖 5.3.17	RELAP5-RT 反應器完全隔離後壓力槽頂端壓力對於不同飼水輸入之比較..	72
圖 5.4.1	飼水流量變化（一台飼水泵跳脫）	72
圖 5.4.2	反應器功率變化（一台飼水泵跳脫）	73
圖 5.4.3	爐心流量變化（一台飼水泵跳脫）	73
圖 5.4.4	壓力槽頂端壓力變化（一台飼水泵跳脫）	74
圖 5.4.5	爐心水位變化（一台飼水泵跳脫）	74
圖 5.4.6	壓力槽出口蒸汽流量（一台飼水泵跳脫）	75
圖 5.4.7	高壓汽機蒸汽進口流量（一台飼水泵跳脫）	75
圖 5.4.8	爐心進口溫度和飽和態溫度比較（一台飼水泵跳脫）	76
圖 5.4.9	爐心進口次冷態溫度變化（一台飼水泵跳脫）	76

表目錄

表 5.1	RELAP5-RT 穩態數據比較.....	54
表 5.2	汽機跳脫重要事件時序表	54
表 5.3	反應器完全隔離重要事件時序表	55
表 5.4	一台飼水泵跳脫重要事件時序表	55



第一章 序論

1.1 前言

台灣電力公司在台北縣貢寮鄉蓋了台灣第四座核能發電廠，因其所在地為龍門，俗稱龍門發電廠，兩部機組皆屬於奇異公司（GE）製造的進步型沸水式反應器（Advanced Boiling Water Reactor，ABWR），預計於民國一百年商轉，共可提供兩百七十萬千瓦的電力。

對於全球暖化效應越來越嚴重的趨勢，各國對核能的重視度也提昇，台灣對於能源的發展型態仍屬於化石燃料為主，核能發電佔不到總裝置容量的百分之二十。隨著核能逐漸受到重視，相關的安全議題以及核廢料處置議題也重新浮出檯面，本研究所關心的就是分析電廠暫態發生時，對於核能電廠造成的影響，是否符合管制單位所訂立的限定值，確保核能電廠的安全運轉。

1.2 研究內容

本研究主要目的為建立龍門核電廠 RELAP5-RT 輸入檔，RELAP5-RT 輸入檔主要包括熱水流分析所需之系統模式以及維持電廠安全穩定之相關控制系統。本研究由核能電廠系統動態模擬與分析實驗室提供的 RELAP5-RT 熱水流分析輸入檔^[1]為基礎，發展相關之控制系統，完成獨立之龍門核電廠 RELAP5-RT 輸入檔，進行暫態分析並與奇異公司報告比較驗證。主要執行的工作為：

- ◎ 合併核能電廠系統動態模擬與分析實驗室提供的龍門核電廠 RELAP5-RT 輸入檔之蒸汽供應系統與電廠平衡系統（BOP），建立一套龍門核電廠 RELAP5-RT 穩態輸入檔。
- ◎ 參考核能研究所提供之龍門核電廠雷傳輸入檔^[2]之飼水控制系統（FWCS）和蒸汽旁通與壓力控制系統（SBPC）以及核能電廠系統動態模擬與分析實驗室提供的釋壓閥設定^[3]，建立出包含控制系統的龍門核電廠 RELAP5-RT 輸入

檔，並進行穩態測試。

- ◎ 參考奇異公司龍門核電廠起爐測試報告^[4] (Startup Transient Analysis Report, STAR) 進行汽機跳脫、反應器完全隔離以及一台飼水泵跳脫暫態測試，將 RELAP5-RT 結果與核能電廠系統動態模擬與分析實驗室發展之 Advanced Lungmen Plant Simulator (ALPS)的結果以及 STAR 報告所用的 ODYN^[4] 分析結果進行比較。

1.3 資料來源

龍門核電廠蒸汽供應系統與定廠平衡系統之 RELAP5-RT 輸入檔以及奇異公司龍門核電廠起爐測試報告由核能電廠系統動態模擬與分析實驗室提供，再循環流量控制系統^[5] (RFCS)、反應器保護系統^[5] (RPS)、棒控制資訊系統^[5] (RCIS) 和釋壓閥控制等相關資訊亦來自核能電廠系統動態模擬與分析實驗室發展之 ALPS，龍門核電廠雷傳 (RETRAN) 輸入檔以及龍門核電廠雷傳輸入模式設計檔案由核能研究所提供，依據這些資訊，本研究建立包含控制系統之龍門核電廠 RELAP5-RT 輸入檔。

本報告分為六個章節，第一章為前言，簡述研究內容和資料來源。第二篇章式介紹說明本研究使用之 RELAP5-RT 特色。第三章為龍門核電廠電廠介紹，描述龍門核電廠相關設備以及介紹本研究所建立的兩大控制系統，分別為飼水控制和蒸汽旁通與壓力控制。第四章為建立包含控制系統之龍門核電廠 RELAP5-RT 穩態輸入檔，分別為合併 RELAP5-RT 之蒸汽供應系統與電廠平衡系統和建立飼水控制、蒸汽旁通與壓力控制。第五章比較 RELAP5-RT、ALPS 以及奇異公司報告中的 ODYN 分析軟體對於不同暫態所得到的結果。第六章為本研究報告的總結，並針對不足處提出未來改進方向。

第二章 程式介紹

2.1 RELAP 程式介紹

本論文所使用的分析軟體為 RELAP (Reactor Excursion and Leak Analysis Program) 熱水流分析軟體，由美國核管會 (Nuclear Regulatory Commission) 為了法規制定以及電廠執照認證等需求，資助愛荷達國家工程研究室 (Idaho National Engineering Laboratory, INEL) 所研發出的雙相熱水流計算軟體，可用於輕水式電廠作暫態分析。隨著電腦硬體日新月異，RELAP 從一開始的 RELAP1 到現在的 RELAP5，其發展史如圖 2.1 所示。本研究所用之 RELAP 程式與 TRACE^[6]、RETRAN^[7]、MAAP^[8] 以及 PCTRAN^[9] 都是有名的核電廠熱水流分析軟體。

2.2 RELAP5-RT 介紹

本論文所使用的分析軟體為 RELAP5-RT 是屬於 RELAP5/MOD3^[10] 系統，程式增加了多維中子計算 (Nodal Kinetics) 能力和擁有時間同步 (Real Time) 的選擇，本研究的輸入檔使用一維中子計算，但沒有使用 Real Time 的選項。

RELAP5/MOD3 軟體特色：

- (1) 使用最佳化測量 (Best Estimate) 分析，對於暫態事件的分析可以得到較為保守的數據。
- (2) 在電廠熱水流的架構分析中，如可以選擇管路 (pipe)、分支 (branch) 或者體積 (volume) 等等對架構起組件，使用閥 (valve)、接節 (junction) 連接各組件。對於特定的硬體，也有他各自的分析，如泵 (pump)、汽機 (turbine)、汽水分離器 (separator)、調壓槽 (pressurizer) 等等組件。
- (3) 對於控制部份，擁有詳盡的分析邏輯可以使用，如：積分 (integral)、表列 (table)、延遲 (time delay) 和基本的四則運算等功能，對於建立控制系統不可缺少。

(4) 中子計算部份，對 RELAP5/MOD3 來說有兩種：點中子計算 (point kinetics) 以及功率表列 (power table)，對於沸水式電廠，點中子計算不容易提供正確的熱能分析給雙相流體，而表列形式更是缺乏往後調整輸入檔變數的能力。本研究所用的版本可以提供多維中子計算，對於所分析的進步型沸水式電廠來說，可以得到較為正確的暫態分析結果。



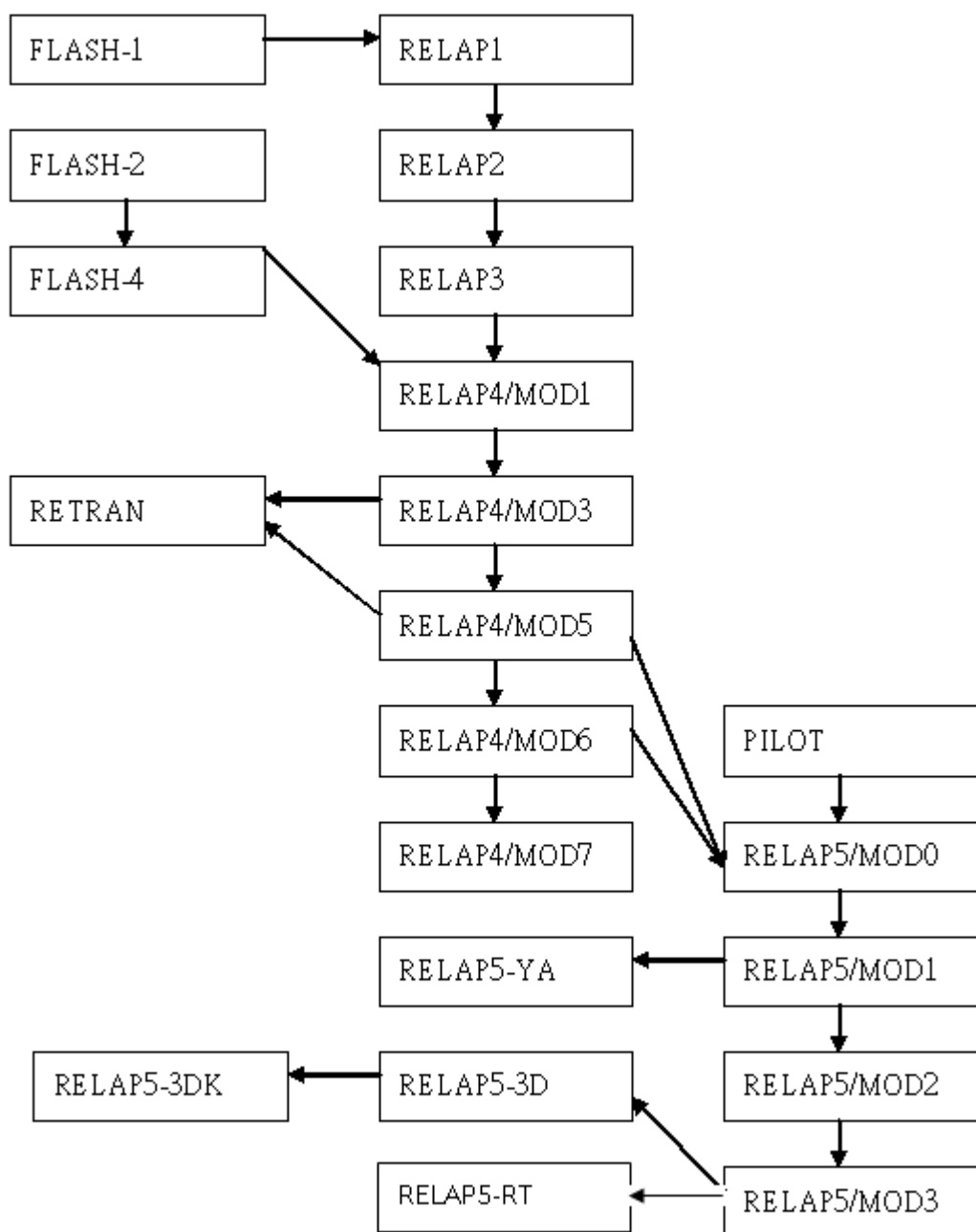


圖 2.1 RELAP 程式發展樹狀圖

第三章 龍門核電廠進步型沸水式反應器介紹

3.1 龍門核電廠設施簡介

3.1.1 前言

龍門核電廠所使用的進步型沸水式核能電廠 (Advanced Boiling Water Reactor, ABWR)，核反應爐直接產生蒸汽，驅動汽輪發電機組，產生電力。反應爐為奇異公司設計，熱功率輸出為 3926 MWt，汽輪發電機由日本三菱公司設計，每部可提供 1369.5 MWe 電力。

3.1.2 廠內系統簡介

圖 3.1.1 為龍門核電廠進步型沸水式反應器電廠架構圖^[11]。冷卻水經飼水泵打入壓力槽，壓力槽組件如圖 3.1.2 所示，冷卻水藉由重力流至反應爐環狀降流區，再透過 10 台爐內再循環水泵 (Reactor Internal Pump, RIP)，把冷卻水送進爐心，吸收燃料核分裂反應產生的熱能而沸騰，接著飽和蒸汽經汽水分離器 (Steam Separator, 圖 3.1.2 組件 4) 及蒸汽乾燥器 (Steam Dryer, 圖 3.1.2 組件 2) 除去水份 (水份少於 0.1%)，蒸汽從 4 條主蒸汽管線流出壓力槽，且其額定蒸汽壓力為 7,170 kPa。

高壓汽機 (High Pressure Turbine, HP) 利用流出壓力槽的高壓蒸汽作功，爾後將蒸汽送入汽水分離再熱器 (Moisture Separator Reheater 簡稱 MSR)，再熱後送入低壓汽機 (Low Pressure Turbine, LP)。蒸汽經低壓段作功後，排入主冷凝器 (Main Condenser)，被凝結成水，匯集於熱井 (Hotwell) 內，透過凝結水泵 (Condensate Pump, CP) 打出，經凝結水過濾器與除礦器 (除去雜質)、再經凝結水加壓泵 (Condensate Booster Pump, CBP) 後流經低壓加熱器至反應爐飼水泵。

如圖 3.1.3，有三台反應爐飼水泵 (Reactor Feed Water Pump)，包含兩台蒸汽驅動飼水泵 (Turbine Driven Feed Water Pump) 及另外一台由馬達驅動的飼水泵 (Motor Driven Feed Water Pump)，在一般穩態全功率運轉時由蒸汽驅動飼水泵將冷凝水再加壓成為飼

水，飼水經高壓加熱器（High Pressure Feed Water Heater）加熱後，送回壓力槽，如此循環。

龍門核電廠為進步型沸水式反應器，和其他輕水式核電廠一樣，擁有圍阻體設計來包護整個蒸汽供給系統，防止萬一發生核能事故後，分裂產物或放射性物質的外洩，兼有屏蔽和壓力界限（Pressure Boundary）作用。圍阻體內主要設備：抑壓池（Suppression pool）、乾井(Drywell)、反應爐壓力槽(Reactor Pressure Vessel)、燃料池(Fuel Pool)、燃料添換台（Refuel Platform）。

抑壓池位於圍阻體底部，在反應爐管路斷裂洩漏大量熱能甚至爐心熔毀時，抑壓池池水流進圍阻體底端吸收熱能，以防止圍阻體損毀導致輻射物質外洩。抑壓池也是緊急爐心冷卻系統的水源之一。圍阻體頂部為燃料添換工作區域，包括重吊車，有關燃料更換設備和儲存區域等，而大修時先將壓力槽注滿水至燃料池高度，再將用過燃料取出放置於燃料池冷卻。另外，當核能系統發生事故時，為了防止放射性產物自一次側外洩，透過洩漏偵測與隔離系統（Leak Detection 及 Isolation System 簡稱 LDI）動作，將一次與二次圍阻體系統隔離。

3.2 龍門核電廠控制系統簡介

3.2.1 前言

龍門電廠的控制系統分別為：飼水控制系統（Feed Water Control System，FWCS）、蒸汽旁通與壓力控制（Steam Bypass and Pressure Control System，SBPC）、再循環流量控制（Recirculation Flow Control System，RFCS）、棒控制資訊系統（Rod Control and Information System，RCIS）和反應器保護系統（Reactor Protect System，RPS）以及許多監測系統。運轉人員透過主控制台（圖 3.2.1）接收不同控制系統的訊號，由電腦做出相關反應傳出控制訊號，藉著數位/類比轉換訊號給電廠設備，以進行運轉或者做出安全方面的判定。本報告的重點為描述龍門核電廠 RELAP5-RT 飼水控制系統和蒸汽旁通與壓力控制系統的建立，故以下僅說明前述之控制系統。

3.2.2 飼水控制系統

龍門核電廠飼水控制系統設備由奇異公司提供。如圖 3.2.2 所示^[11]，控制方式主要有三元控制（Three Element）與一元控制(Single Element)兩種。三元控制的條件為：主蒸汽流量大於 25%且主蒸汽流量和飼水流量相差不超過 5%；此時的控制訊號參數為反應爐水位、主蒸汽流量、飼水流量，以控制蒸汽驅動飼水泵（Turbine Driven Feed Water Pump, TDRFP）速度控制器。一元控制條件為主蒸汽流量小於 25%，此時控制參數只剩反應爐水位，用來控制爐水淨化系統（Reactor Water Clean Up System, RWCU）沖放閥、飼水低流量控制閥（Low Flow Control Valve, LFCV）或蒸汽驅動飼水泵速度控制器。

飼水控制和爐心水位息息相關，電廠的爐心水位分為八個設定點（L1~L8，水位由低到高），正常運轉時水位落在 L5~L6 之間，若不在此範圍，飼水控制系統會產生警報訊號提供給運轉員。對於水位到達 L8 時，則壓力控制系統會產生訊號將所有運轉的飼水泵跳脫，且主蒸汽機也會跳脫，以防止產生騰帶現象（此時反應爐不會急停，但依安全分析，水位達 L8，4 秒後，因飼水泵跳脫無法補水，水位將降至 L3 低水位，導致反應爐急停）。但為了防止共同模式故障（Common Mode Failure），此訊號不由飼水控制系統生。

當飼水泵無法提供足夠流量時，會傳遞訊號給再循環水泵將轉速回退到最低轉速，並降低反應爐功率，減少主蒸汽流量，以避免水位過低造成反應爐急停。

3.2.3 蒸氣旁通與壓力控制系統

電廠的四條主蒸汽管線流到蒸氣旁通與壓力控制系統的控制訊號由量測爐頂壓力為回饋信號的三重容錯數位控制器所產生，控制主蒸氣閥（Turbine Control Valve, TCV）和旁通閥（Turbine Bypass Valve, TBV）的開度，如圖 3.2.3 所示。在正常運轉時，TBV 會全關而此時爐壓則由 TCV 調節控制。若 SBPC 的壓力控制器輸出之總蒸汽流量（Pressure regulation demand 愈大，產生的總蒸汽流量愈大）超過 TCV 蒸汽流量需求時，SBPC 會控制汽機旁通閥(TBV)，將額外蒸汽流量直接排放到主冷凝器。

SBPC 的重要設備有：

一、主蒸汽平衡管(Main steamline equalizer)

1. 降低主蒸汽管間的壓力差
2. 降低單支蒸汽管的最大蒸汽流量
3. 在執行汽機關斷閥和調速閥的測試時，可使反應爐的壓力變化最小

二、蒸汽旁通系統 (Turbine Bypass System)

1. 當反應爐壓力槽升溫至額定壓力
2. 當汽機升速和同步
3. 當功率運轉反應爐蒸汽產生量超過汽機蒸汽流量的需求
4. 當機組棄載或汽輪發電機跳脫
5. 龍門電廠擁有十個汽機旁通閥 (Turbine Bypass Valve)，分配在位於汽機廠房，靠近 TSV 的兩個蒸汽櫃，每一只蒸汽櫃上各有五個 TBV。當反應爐冷機時，旁通閥會開啟將主蒸汽排到冷凝器，旁通的總流量為 110% 反應爐額定蒸汽量。

三、TBV 的閥位開關：

每一個 TBV 有一組與安全有關的位置開關，包括四個接點，提供 10% 位置信號給予 RPS，做為當汽機跳脫時反應爐是否急停之依據。

四、蓄壓器(Accumulator)

每一個 TBV 的液壓迴路各配置一只蓄壓器(Accumulator)。當喪失電源或液壓時，TBV 仍能維持至少開啟 6 秒鐘再關閉。

五、減壓汽 (Pressure Reducer)

減壓器是裝置在每一只旁通閥下游管路上，減壓器的進口是位於 TBV 的出口管路，其出口是穿越主冷凝器和噴灑器連接。減壓器之設計是為降低進入噴灑器之蒸汽壓力，並維持 TBV 的背壓。

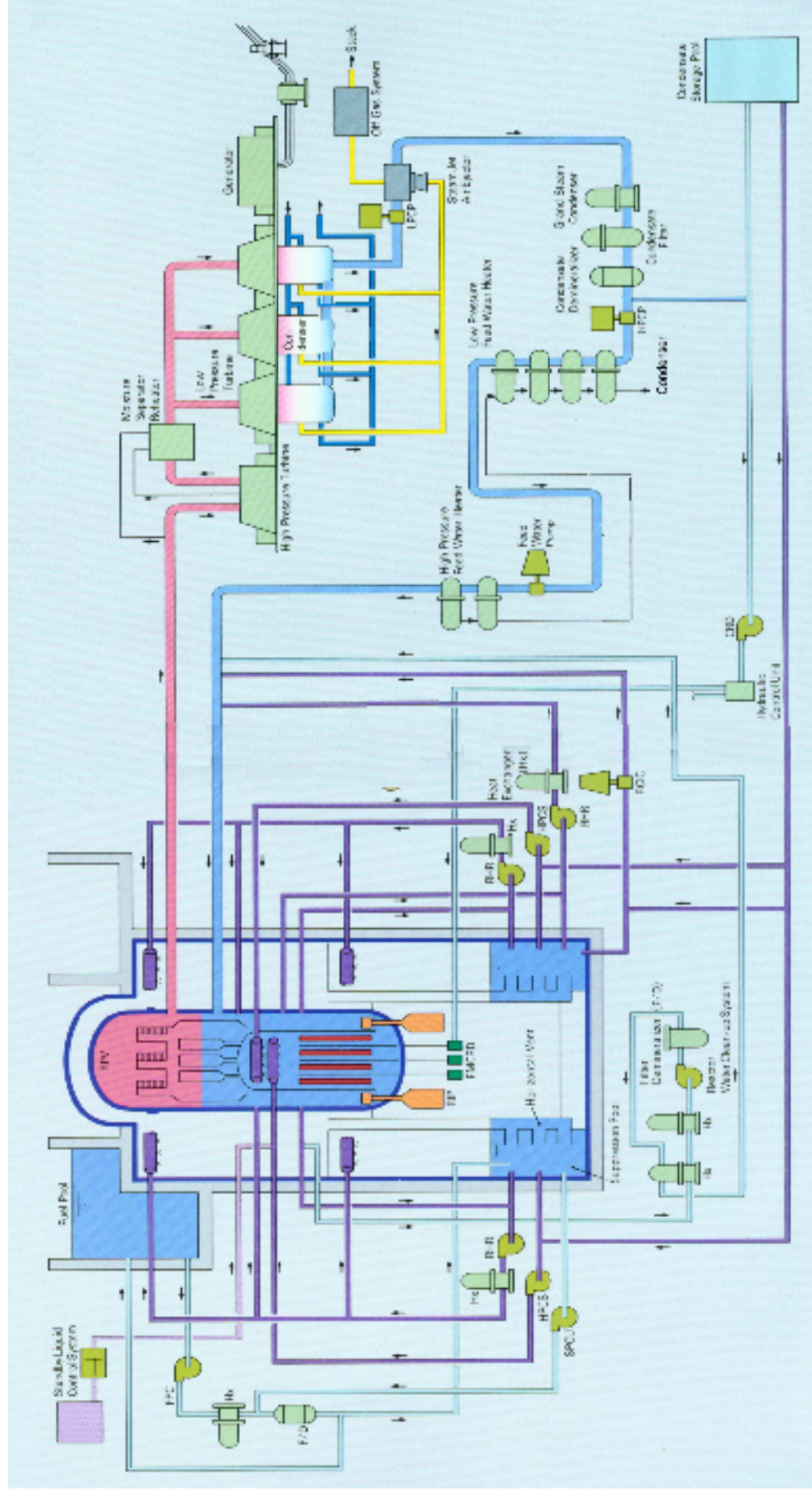
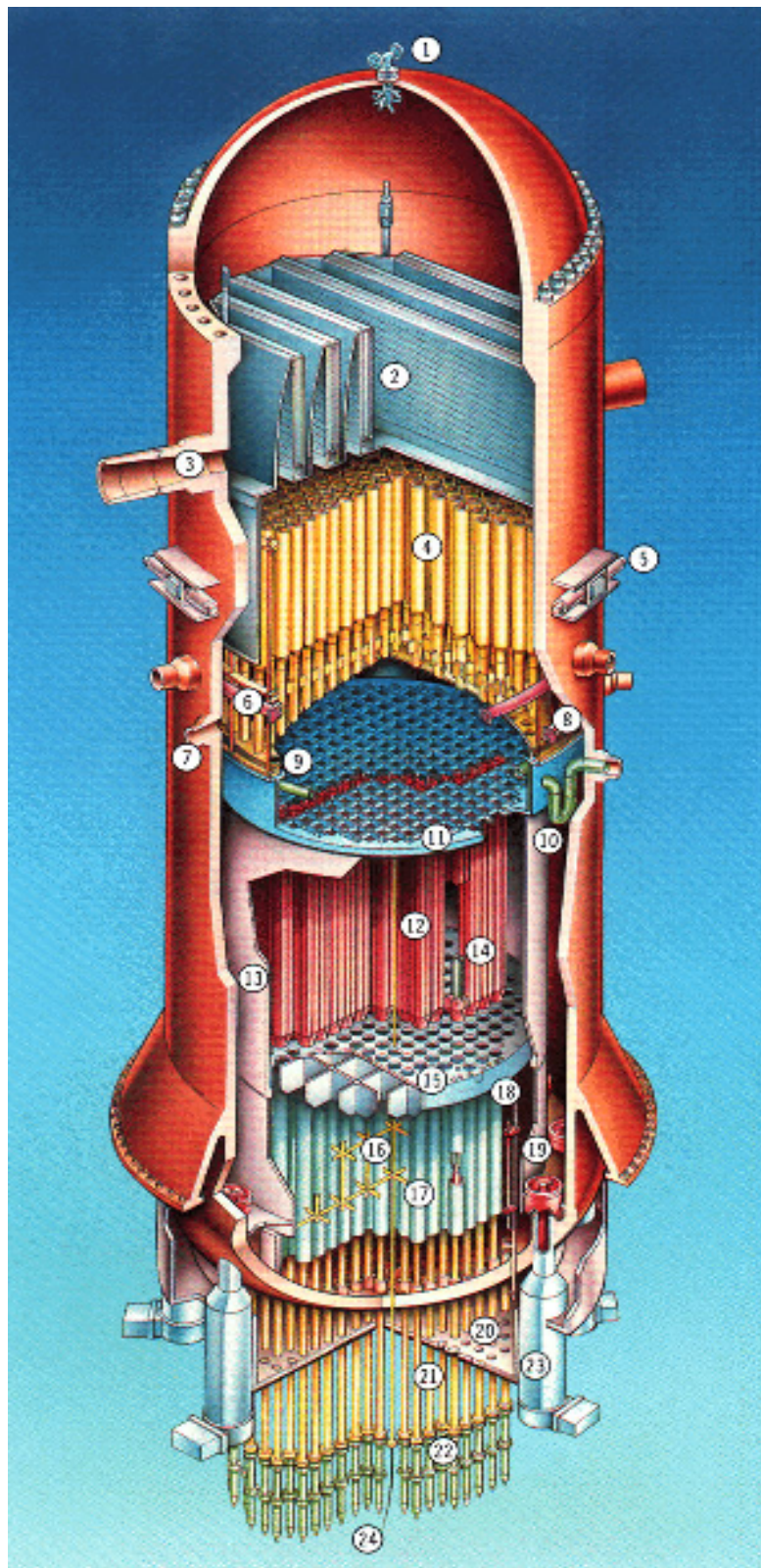


圖 3.1.1 進步型沸水式反應器電廠架構



Advanced Boiling Water Reactor Assembly

- 1 Vent and Head Spray
- 2 Steam Dryer
- 3 Steam Outlet Flow Restrictor
- 4 Steam Separators
- 5 RPV Stabilizer
- 6 Feedwater Sparger
- 7 Shutdown Cooling Outlet
- 8 Low Pressure Flooder (LPFL) and Shutdown Cooling Sparger
- 9 High Pressure Core Flooder (HPCF) Sparger
- 10 HPCF Coupling
- 11 Top Guide
- 12 Fuel Assemblies
- 13 Core Shroud
- 14 Control Rod
- 15 Core Plate
- 16 In-Core Instrument Guide Tubes
- 17 Control Rod Guide Tubes
- 18 Core Differential Pressure Line
- 19 Reactor Internal Pumps (RIP)
- 20 Thermal Insulation
- 21 Control Rod Drive Housings
- 22 Fine Motion Control Rod Drives
- 23 RIP Motor Casing
- 24 Local Power Range Monitor



GE Nuclear Energy

圖 3.1.2 進步型沸水式反應器之壓力槽內部組件

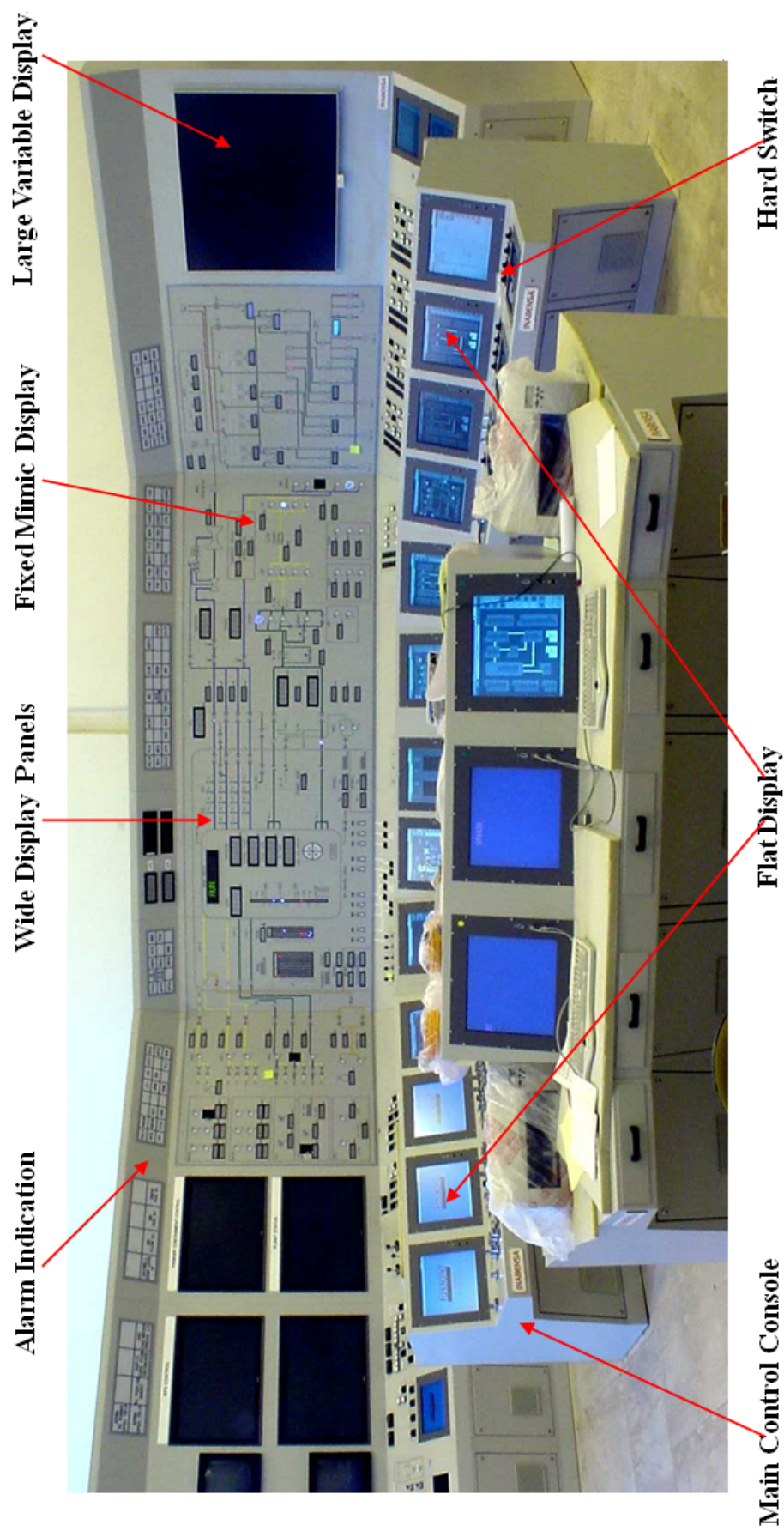


圖 3.2.1 電廠主控制廠房

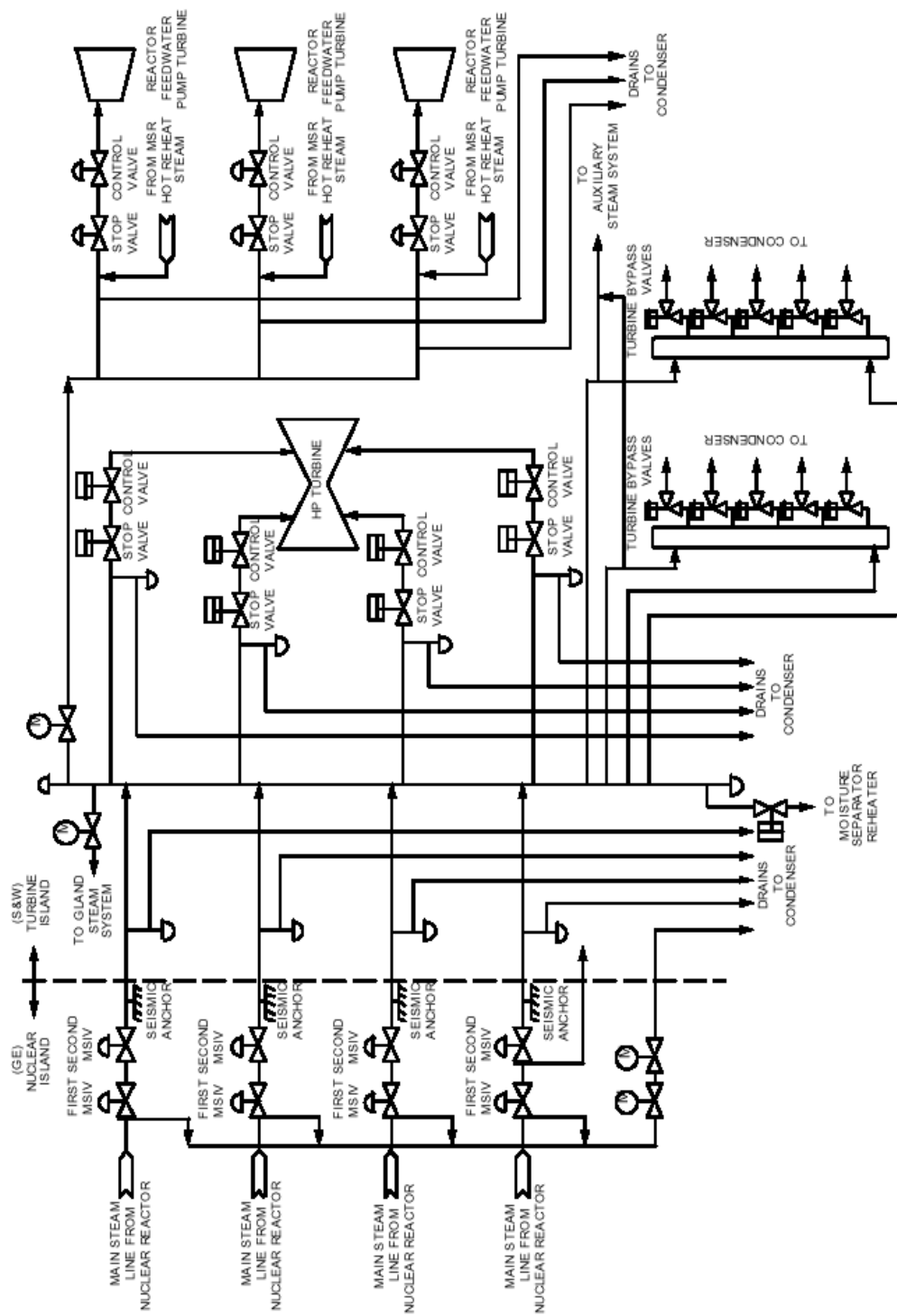


圖 3.2.3 蒸汽供應系統

第四章 龍門核電廠 RELAP5-RT 輸入檔建立

4.1 前言

由核能電廠系統動態模擬與分析實驗室提供的 RELAP5-RT 熱水流分析輸入檔分為反應器壓力槽和電廠平衡系統兩部份，本研究首先將兩個輸入檔合併為一個，使整個電廠系統的熱水流反應可由一個 RELAP5-RT 輸入檔模擬，接著進行穩態測試確認電廠輸入檔可以滿足穩態的需求，再參考核能研究所提供的龍門核電廠雷傳輸入模式，引用飼水控制系統 (FWCS) 和蒸氣旁通與壓力控制 (SBPC)，建立 RELAP5-RT 的龍門核電廠輸入檔。李亮瑩同學參照核能電廠系統動態模擬與分析實驗室提供 SIMPORT 平台的控制系統^[5]，將再循環流量控制 (RFCS) 和棒控制資訊系統 (RCIS) 以及反應器保護系統 (RPS) 建立在 RELAP5-RT 輸入檔。最後將建立好控制系統的 RELAP5-RT 龍門核電廠輸入檔進行穩態測試。

4.2 輸入檔介紹

4.2.1 蒸汽供應系統



圖 4.2.1 為龍門核電廠蒸汽供應系統 RELAP5-RT 輸入模式節點圖，共有 162 個控制體積以及 155 個接節，包含壓力槽本身、主蒸汽管路以及蒸汽旁通閥。冷卻水從兩條飼水管路以固定流量流進壓力槽 (branch 22)，經壓力槽降流區藉著十台循環水泵 (pump 10~14) 的帶動，一部分的冷卻水 (約總爐心流量的 15%) 流過爐心旁通區 (pipe 70)，其他大部分經過爐心加熱變成水蒸汽，而爐心中子動能模擬使用一維的中子計算，爐心部份共有 872 根燃料束，分成九塊平行之通道，以程式中之 pipe 組件模擬，每個通道在軸向分為十三節。接著水蒸汽往上通過汽水分離器 (separatr 36)，流向壓力槽頂部區間 (branch 32) 後，分成四條主蒸汽管自壓力槽 (branch 30) 流出。

每條主蒸汽管路各有兩組釋壓閥和兩組主蒸汽管路隔離閥 (MSIV: 如管路 A 的 valve 105 和 107)，當壓力槽的壓力過高時會打開釋壓閥將蒸汽釋出至抑壓池 (suppression

pool:190~194)，最後四條主蒸汽管路匯流到主蒸汽集管（Main Steam line Header，401）。閥 501 至 504 為汽機斷止閥（Turbine Stop Valve），當暫態發生時用來阻止蒸汽從主蒸汽集管流出，另外汽機控制閥（閥 505~508）的目的為調整閥位控制流進高壓汽機的蒸汽量，少部份的蒸汽將不透過高壓汽機直接從主蒸汽集管流往汽水分離再熱器（Moisture Separator Reheater 簡稱 MSR）當作熱源。此外，汽機旁通區塊共有 10 組旁通閥（valve 341、347 等），當暫態發生時將多餘的蒸汽透過旁通閥釋放到冷凝機組。

4.2.2 電廠平衡系統

電廠平衡系統(BOP)輸入檔所模擬的組件包含高壓和低壓蒸汽機，兩部蒸汽驅動飼水泵（TDRFP, Turbine Driven Reactor Feedwater Pump），一部電力驅動飼水泵（MDRFP, Motor Driven Reactor Feedwater Pump），六台飼水加熱器和汽水分離再熱器以熱交換的形式改變流體的相變化和溫度。

圖 4.2.2 為電廠平衡系統之蒸汽端節點圖，共有 86 個控制體積和 61 條接節。蒸汽從主蒸汽集管開始，流往三台高壓蒸汽機（turbine 901~903）作功後流入汽水分離再熱器，部份蒸汽作為飼水加熱器的熱源，而大部分蒸汽通往五台低壓蒸汽機（turbine 904~908），部份蒸汽流向 MFPT(Main Feedwater Pump Turbine)作功給蒸汽驅動飼水泵，如圖 4.2.3。同樣的，少部份蒸汽從低壓汽機管路流出作為飼水加熱器的熱源。

圖 4.2.4 為電廠平衡系統之飼水端節點圖，共有 131 個控制體積和 106 條接節。冷凝器的功用是將低壓汽機流出的蒸汽以熱交換的方式凝結為水，透過圖中編號 961 的凝結水泵（Condensate Pump）將水打出，分別透過六組飼水加熱器，將蒸汽端提供的熱源加熱飼水，以提高熱效率。最後透過編號分別為 969 以及 970 的兩部蒸汽驅動飼水泵（TDRFP, Turbine Driven Reactor Feedwater Pump）將飼水送回壓力槽，此外，當發生暫態導致蒸汽驅動飼水泵喪失作用時，編號為 972 的電動飼水泵將啟動，提供輔助飼水。

4.3 輸入檔穩態建立

由核能電廠系統動態模擬與分析實驗室提供的輸入檔分為反應器壓力槽和電廠平衡系統，先將重複的卡號（如：體積、接節、訊號、控制）重新編碼，原先的邏輯訊號由 3 碼改為 4 碼。完成這些前置作業後，將兩套輸入檔合併為一個輸入檔後，設定邊界條件，對於蒸汽供應系統之飼水端（圖 4.3.1），依時接節（Time Dependent Junction）780 和 784 的流量為 BOP 飼水端之閥 595 以及 596，依時體積 670 和 671 則使用 BOP 飼水端 592 的溫度，而 BOP 飼水端的依時體積 593 和 594 則使用蒸汽供應系統飼水端之單一接節 672 以及 676 的壓力，使整個飼水端的資訊連結在一起。

圖 4.3.2 為 RELAP5-RT 輸入檔之蒸汽端連接設定，BOP 蒸汽端的依時接連管 587～590 使用蒸汽供應系統之控制閥 505～508 的流量，依時體積 533～583 使用控制閥前的單一接節之壓力，而蒸汽供應系統之依時體積 411～441 使用 BOP 蒸汽端體積 584 的壓力。此外，流進 MSR 的依時接連管 591 為蒸汽供應系統之閥 509 的流量，依時體積 532 為主蒸汽集管 401 的壓力，而蒸汽供應系統之依時體積 413 則使用 BOP 蒸汽端 585 的壓力，使整個蒸汽端的資訊互相交換。

完成邊界條件設定後，整個電廠的熱水流是一個循環的流路，接著進行穩態測試。圖 4.3.3 為電廠功率變化，一開始有個小震盪，振幅不到 0.1%，穩態時的功率為 3925.67 MWt，和實際設定值 3926MWt 很接近。圖 4.3.4 顯示壓力槽頂端壓力變化，一直都有震幅極小（約 0.03%）的週期性震盪，在其他參數也都有類似情況，穩定時壓力為 7,174 kPa。圖 4.3.5 為爐心水位變化，由於欠缺飼水控制系統，導致爐心水位無法穩定，有緩慢下降的趨勢。圖 4.3.6 為壓力槽蒸汽出口流量，和壓力一樣都有一個幅度極小的週期性震盪，穩定蒸汽流量為 2127 kg/sec，和額定蒸汽流量 2122.38 kg/sec 僅有 0.2% 差距。整體看來，除了爐心水位需要完整的飼水控制外，蒸汽供應系統與電廠平衡系統的合併，達到了預期的穩態。

4.4 龍門核電廠 RELAP5-RT 輸入檔控制系統建立

4.4.1 前言

本輸入檔的控制系統除了三大控制：飼水控制 (Feed Water Control System)、蒸汽旁通與壓力控制(Steam Bypass and Pressure Control System)、再循環水控制(Recirculation Flow Control System)，還包括反應器保護系統 (Reactor Protect System) 以及棒控制資訊系統 (Rod Control and Information System)。本報告說明飼水控制系統和蒸汽旁通與壓力控制系統的建立，另外再循環水控制和棒控制資訊以及反應器保護系統將詳述於李亮瑩同學的論文，以上所述之控制系統在建立完成後，進行獨立測試，最後把所有的控制系統合併，進行穩態測試。

4.4.2 飼水控制系統

4.4.2.1 飼水控制系統建立

龍門核電廠的雷傳熱水流輸入檔之飼水控制如圖 4.4.1 所示，主要透過四個參數：水位、蒸汽流量、飼水流量、壓力槽頂端壓力，來決定流進壓力槽的飼水流量。本研究建立之龍門核電廠 RELAP5-RT 輸入檔參照雷傳飼水控制建立，其架構如圖 4.4.2 所示。飼水控制系統首先比較窄幅水位和設定點的差距，經過積分算出水位的誤差百分比；蒸汽流量扣掉飼水流量決定出流量誤差百分比，將這兩個誤差百分比相加且積分計算後，乘上壓力變化決定出一個增值，即為飼水流量。

由於雷傳的輸入檔缺少了電廠平衡系統部份，也就是少了蒸汽驅動飼水泵，其飼水控制系統所算出的飼水就是流進壓力槽的流量，不同的是，RELAP5-RT 輸入檔把飼水控制算出的流量給進兩台蒸汽驅動飼水泵的控制計算裡，透過內建在 RELAP5-RT 裡的飼水泵控制計算，決定出兩台編號為 909 和 910 的 MFPT(Main Feedwater Pump Turbine) 之控制閥 562 和 566 的開度，再利用汽機作功帶動蒸汽驅動飼水泵 969 以及 970 的運轉。這兩種輸入檔在高功率和高流量運轉下差異有限，然而在流量變化較大的情況下會發現 RELAP5-RT 的飼水變化反應會比較緩慢，推測和 RELAP5-RT 輸入檔包涵電廠平衡系統

裡的蒸汽驅動水泵控制有關。

4.4.2.2 飼水控制系統獨立測試

建立完飼水控制系統後仍需透過獨立測試來驗證飼水反應是否符合預期變化：

- (1) 改變水位：圖 4.4.3 所示為水位變化以表列(table)輸入時，飼水流量的反應。當飼水系統偵測到水位上升訊號時，會減少飼水的流量以降低爐心水位；相反地，水位下降時，飼水就會增加流量以維持爐心水位，防止燃料和空氣接觸。
- (2) 改變蒸汽量：圖 4.4.4 所示為蒸汽變化以表列輸入時，飼水流量的反應。飼水控制系統發現蒸汽量不斷增加時（即蒸汽量扣掉飼水量差距越大），會調高飼水流量來防止爐心水位下降（或者可解釋為爐心流出蒸汽量過多時，會導致爐心壓力下降，在功率及其他情況不變下，代表飼水量不夠。）飼水反應如圖所示。
- (3) 改變反應槽壓力：圖 4.4.5 所示為壓力變化以表列輸入時，飼水流量的反應。當飼水系統接收到爐心壓力過低訊號時，會增加飼水的流量。

4.4.3 蒸汽旁通與壓力控制系統

4.4.3.1 蒸汽旁通與壓力控制系統建立

龍門核電廠雷傳的熱水流輸入檔之蒸汽旁通與壓力控制系統如圖 4.4.6 所示，主要讀取壓力槽頂端的壓力變化來控制汽機控制閥以及汽機旁通閥的開度，RELAP5-RT 輸入檔的壓力控制系統係參照雷傳建立，圖 4.4.7 至圖 4.4.9 所示為建構之蒸汽旁通與壓力控制系統。原先雷傳控制卡號 205 和 206 在 RELAP5-RT 裡拿掉了，因為使用 Lead-Lag 組件時，當 $(\text{Lead time A1}) = (\text{Lead time A2})$ 時，輸出的結果和輸入的值會一樣；RELAP5-RT 控制卡號 8707 是把流進高壓汽機的流量歸一化，而非雷傳的汽機控制閥開度。

雷傳的輸入檔只有模擬一條主蒸汽管路，一個蒸汽控制閥，一個旁通閥，且蒸汽旁

通與壓力控制系統為決定出汽機控制閥的流量；RELAP5-RT 輸入檔依照電廠規格模擬了四條主蒸汽管線、四個蒸汽控制閥、十個蒸汽旁通閥。

建立在 RELAP5-RT 輸入檔的蒸汽旁通與壓力控制系統是透過偵測壓力槽頂端壓力（控制卡號 8700）以及流進高壓汽機的蒸汽量（控制卡號 8780）經過運算比較，算出高壓汽機的流量面積需求（area demand），再把相關跳脫訊號引進，如 MSIV 關閉訊號以及汽機跳脫訊號，決定出流進高壓汽機的蒸汽量（控制卡號 8756）和汽機旁通閥流量（控制卡號 8762），把算出的流量透過圖 4.4.10 以及圖 4.4.11 分別轉換成四個蒸汽控制閥的開度（控制卡號 8850~8853）。

由於雷傳蒸汽旁通與壓力控制系統沒有包含旁通閥的控制，而汽機跳脫（Turbine Trip）的暫態分析（Turbine Trip）和旁通閥的開度有很大關係。本研究參考核能電廠系統動態模擬與分析實驗室所提供電廠功率和壓力變化的模擬數據，如圖 4.4.9 所示，建立簡化的 RELAP5-RT 旁通閥控制系統。當系統偵測到汽機跳脫的訊號時，會把蒸汽旁通閥打開，接著由電廠功率對應出應有的壓力大小，將此額定壓力和實際壓力槽頂端壓力作比較，若實際壓力過低，則會傳出訊號把旁通閥的開度縮小，反之實際壓力過高則旁通閥開度會增大。

4.4.3.2 蒸汽旁通與壓力控制系統獨立測試

同樣的，壓力控制系統也需要透過獨立測試來驗證反應和預期結果是否符合。圖 4.4.12 所示為壓力變化以表列形式輸入時，四個蒸汽控制閥的開度變化，當爐心壓力下降時，可能是因為爐心產生的蒸汽量減少，而收到訊號的壓力控制系統會要求控制閥關小，以減緩流進高壓汽機的蒸汽。

4.4.4 龍門核電廠 RELAP5-RT 穩態輸入檔建立

透過 4.3 節建立好的 RELAP5-RT 穩態輸入檔，和通過獨立測試的控制系統，完成具有控制系統的 RELAP5-RT 輸入檔，其中包含飼水控制、蒸汽旁通與壓力控制、再循環水控制、棒控制資訊系統以及反應器保護控制。經過穩態測試後，由相關資訊可以看出輸入模式可以成功的達到穩態。圖 4.4.13 為穩態之反應器功率變化，一開始 20 秒內

有個 0.2% 的震幅，隨後功率穩定在 4267.5 btu/sec，即 3926.1 MWt，約為龍門核電廠之 FSAR(Final Safety Analysis Report^[12]) 額定數值。圖 4.4.14 為壓力槽頂端壓力變化，發現完成控制系統建立後，除了開始 10 秒內有個不到 0.17% 的震幅，穩定後的壓力值為 7,180.9 kPa，比起 FSAR 額定值 7,170.5 kPa 高了些。圖 4.4.15 為穩態的爐心水位，一開始也是有一個 0.5% 左右的震盪，隨即穩定在 115.6 cm，對照圖 4.3.5，得知水位的穩定和飼水控制系統的建立有很大的關係。圖 4.4.16 為穩態下飼水流量，在一開始 100 秒內會有明顯的上下震盪，震幅約 1.4%，隨後流量穩定在約 2127 kg/sec，和 FSAR 額定的 2117.8 kg/sec 比起來，高了約 0.4%，可能也導致了整體壓力偏高的現象，這些情況和應和飼水控制系統以及壓力控制系統是由雷傳輸入檔轉換有關，不過整體看來，完成 RELAP5-RT 輸入檔之控制系統建立後，整體電廠穩態模擬狀況趨於穩定。



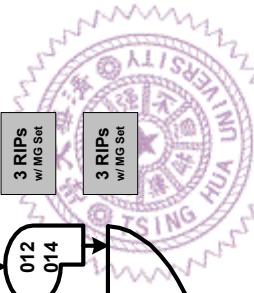


圖 4.2.1 龍門核電廠蒸汽供應系統 RELAP5-RT 輸入檔

BOP Steam Side Nodding for NPP4 Simulation

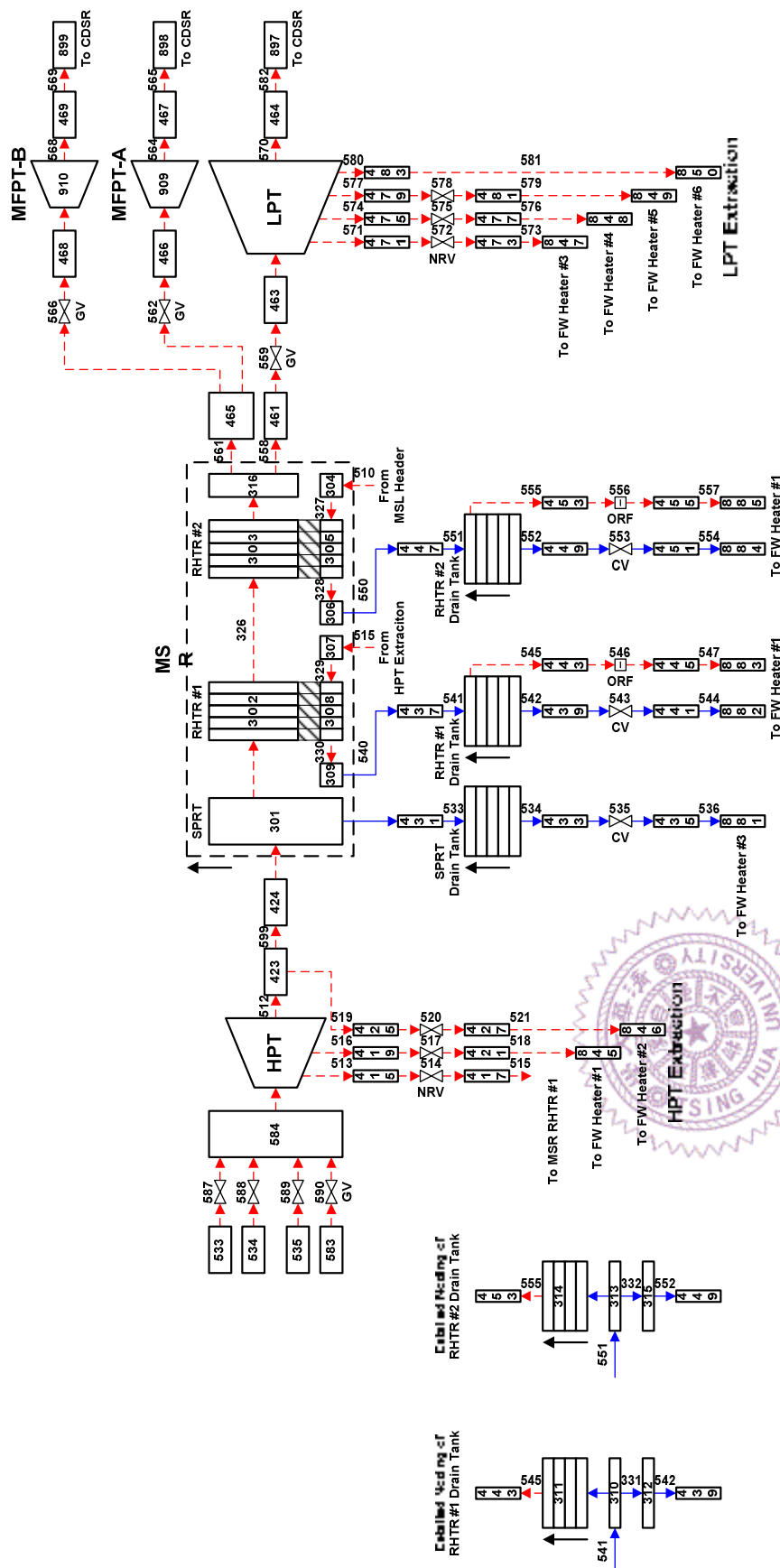


圖 4.2.2 龍門核電廠電廠平衡系統 (BOP) 蒸汽段 RELAP5-RT 輸入檔



NPP4 MFPT-A Model

NPP4 MFPT-B Model

圖 4.2.3 龍門核電廠 BOP 蒸汽端之主飼水泵汽機 RELAP5-RT 輸入檔



BOP Water Side Noding for NPP4 Simulation

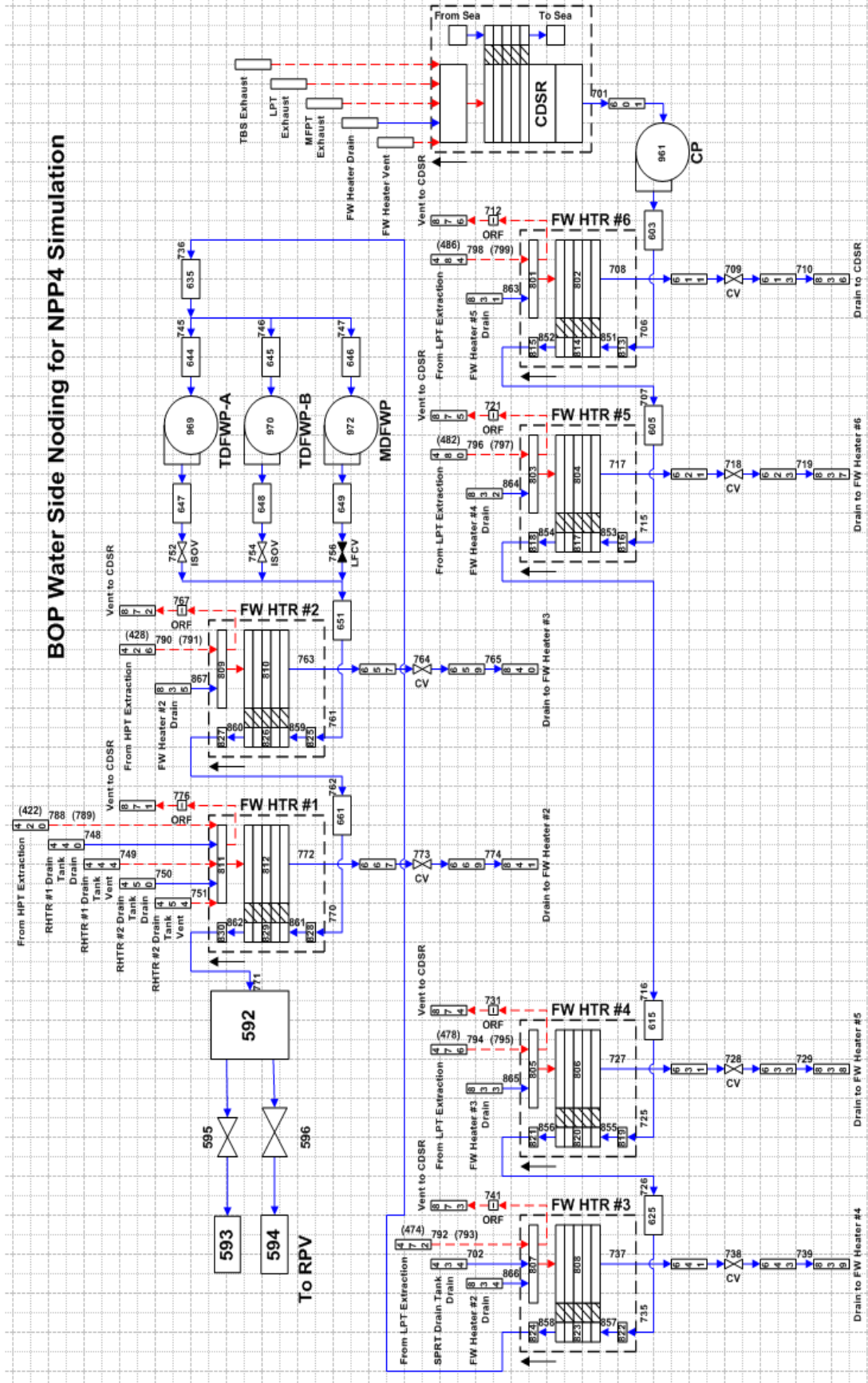


圖 4.2.4 龍門核電廠電廠平衡系統 (BOP) 飼水段 RELAP5-RT 輸入檔

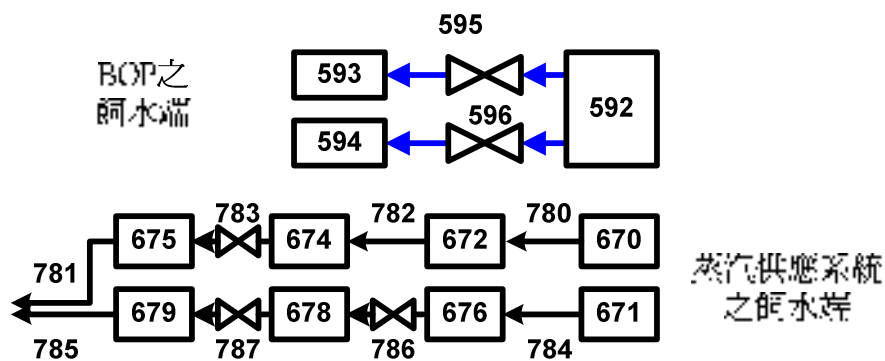


圖 4.3.1 龍門核電廠 RELAP5-RT 輸入檔之飼水端連接設定

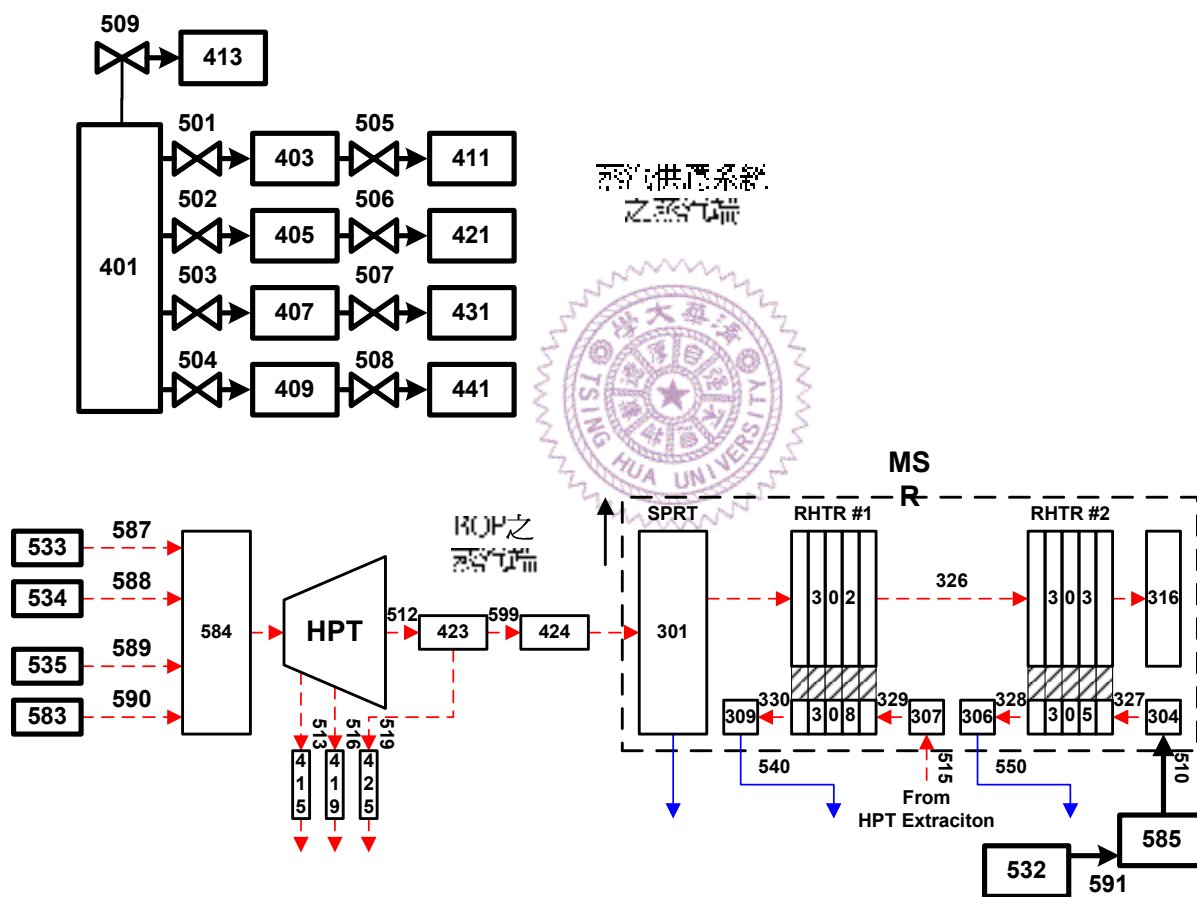


圖 4.3.2 龍門核電廠 RELAP5-RT 輸入檔之蒸汽端連接設定

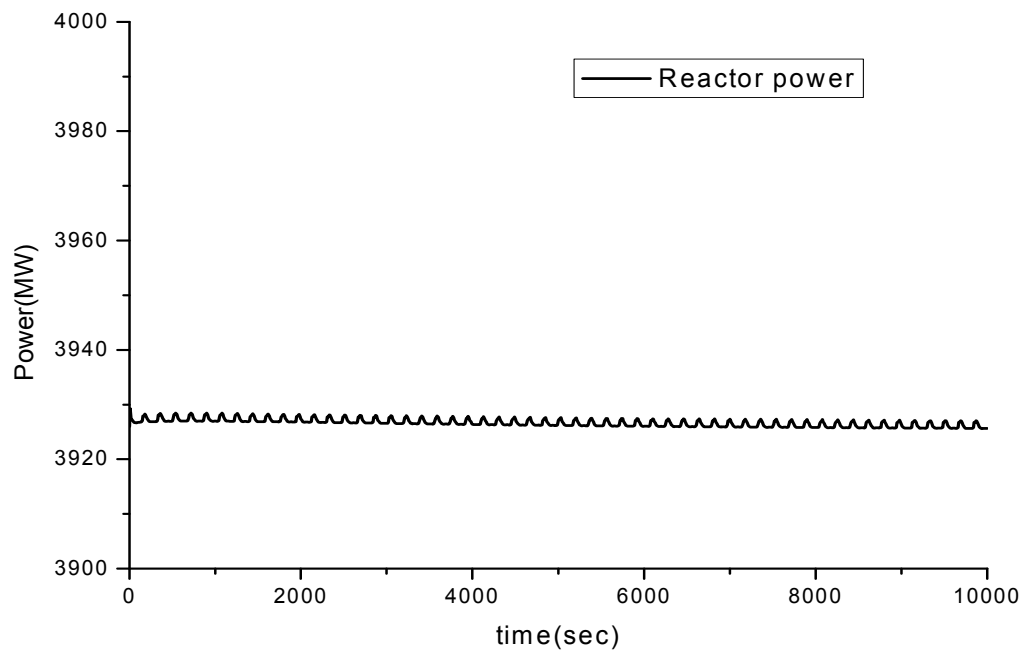


圖 4.3.3 RELAP5-RT 穩態功率變化（無控制系統）

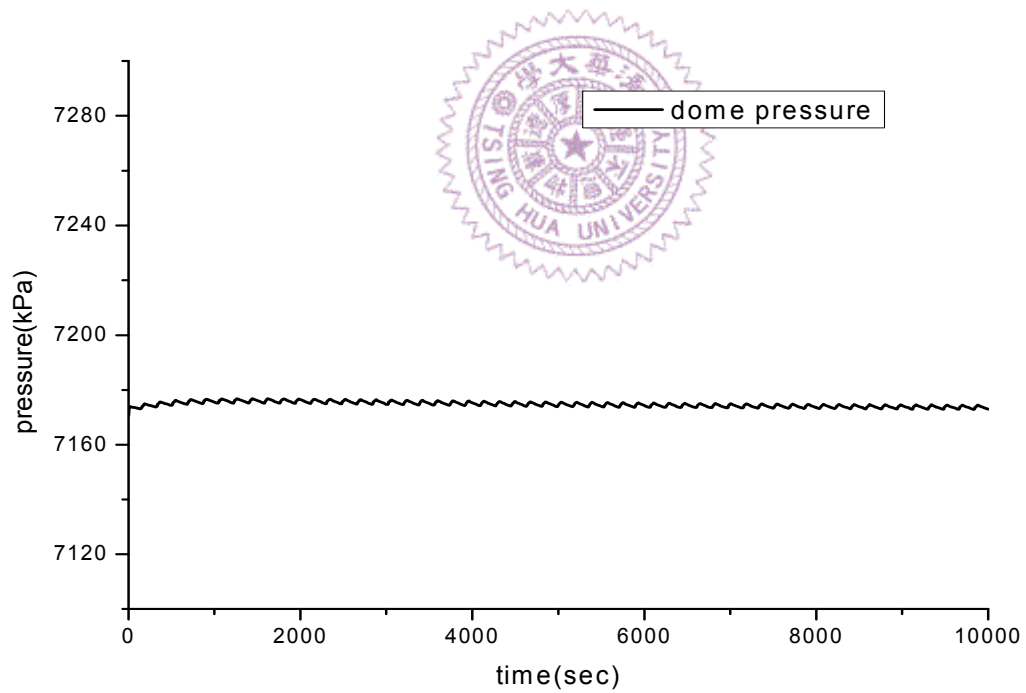


圖 4.3.4 RELAP5-RT 穩態壓力槽頂端壓力變化（無控制系統）

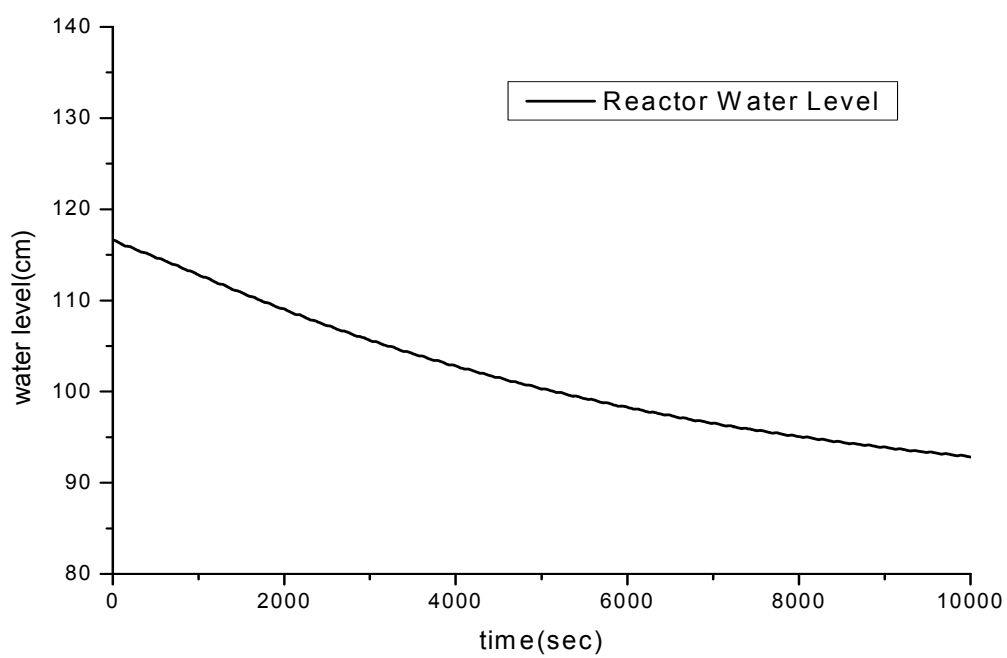


圖 4.3.5 RELAP5-RT 穩態爐心水位變化（無控制系統）

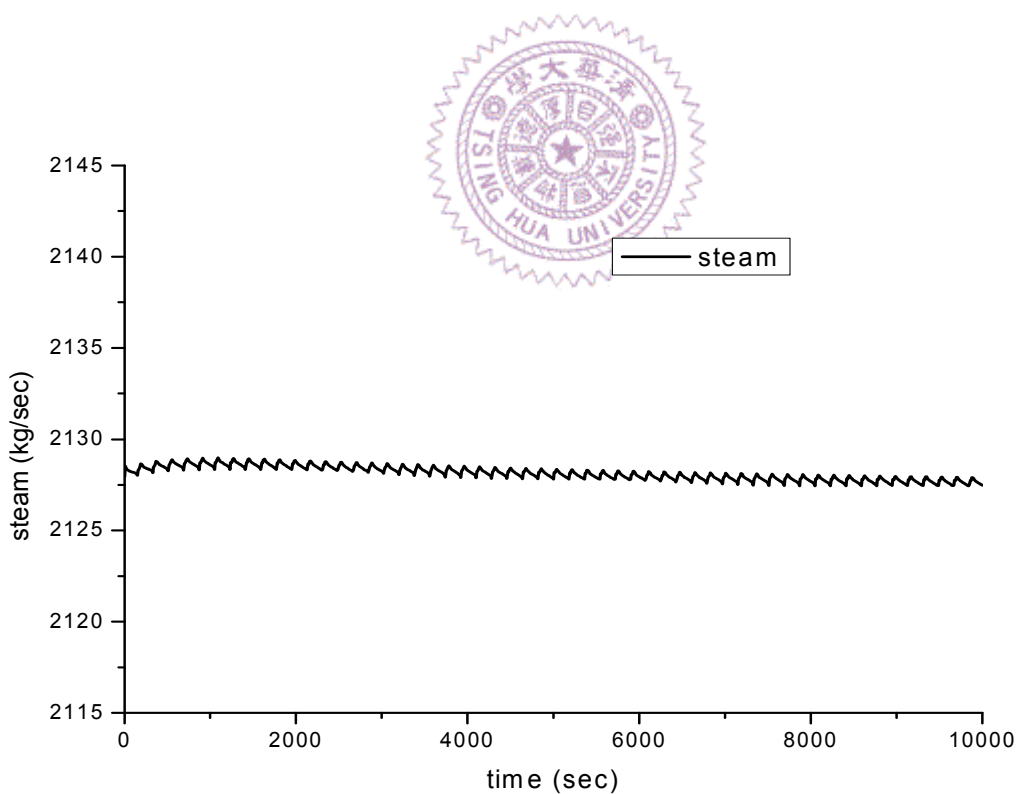


圖 4.3.6 RELAP5-RT 穩態壓力槽出口蒸汽流量變化（無控制系統）

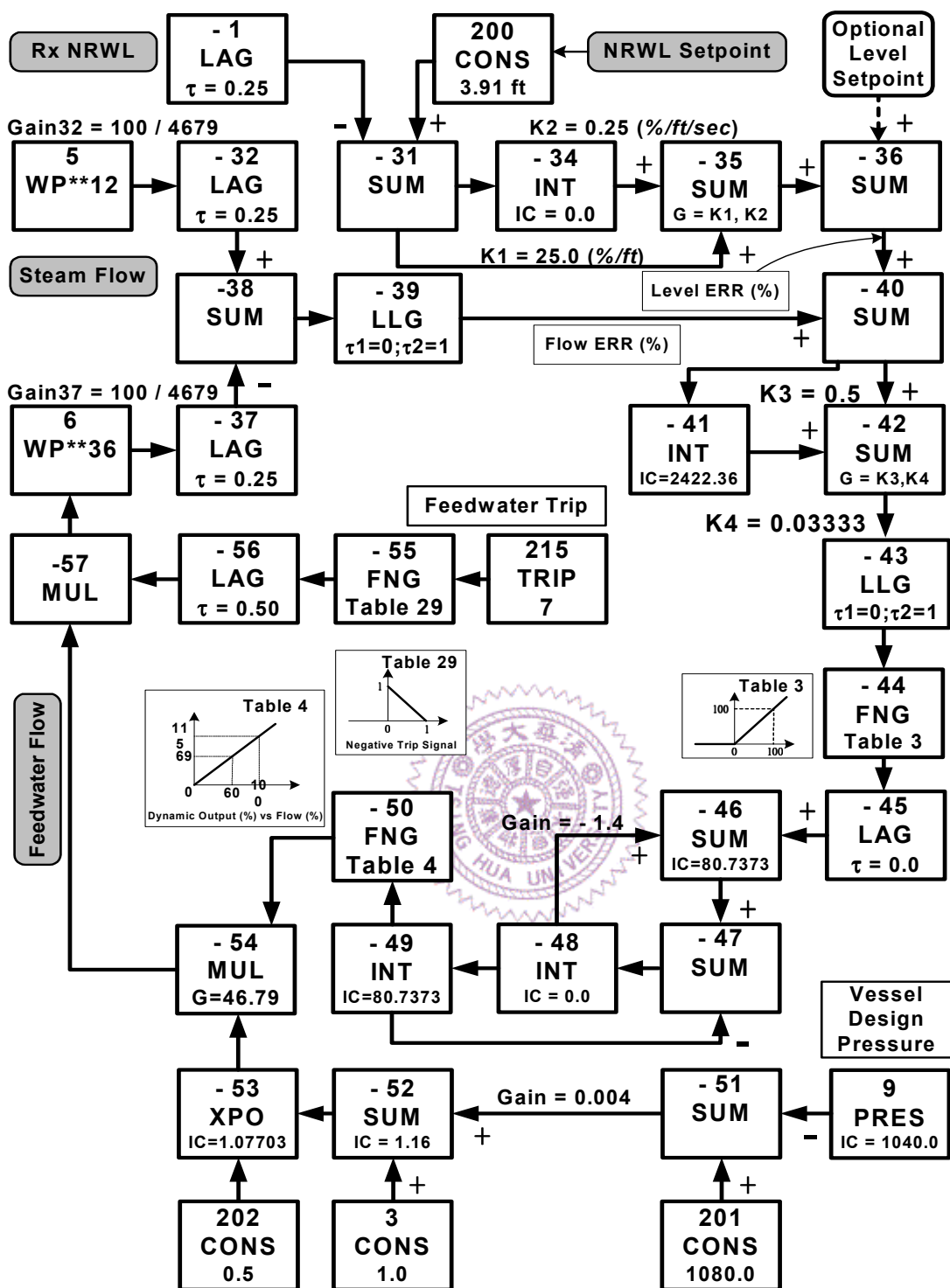


圖 4.4.1 雷傳飼水控制邏輯圖^[2]

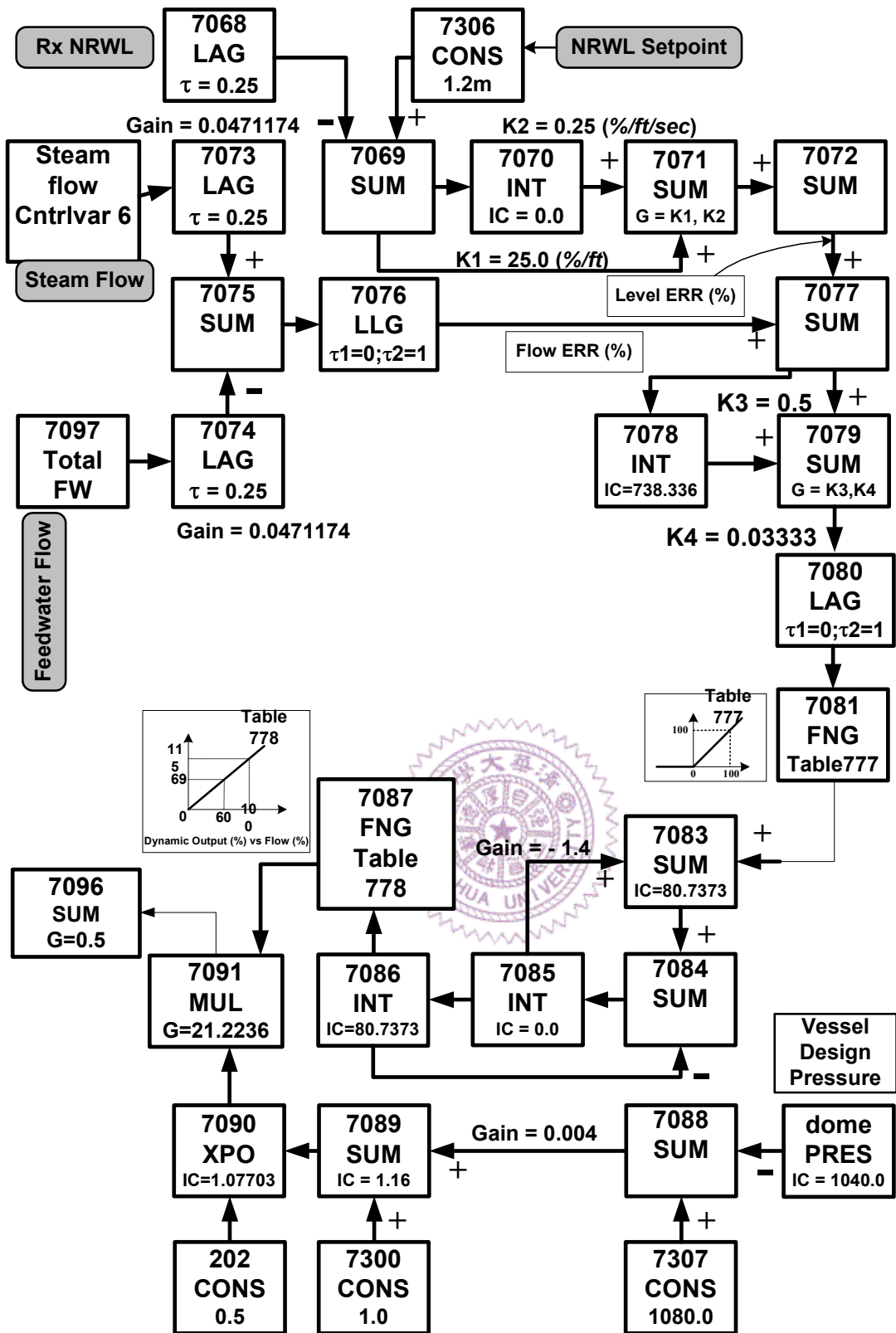


圖 4.4.2 RELAP5-RT 飼水控制邏輯圖

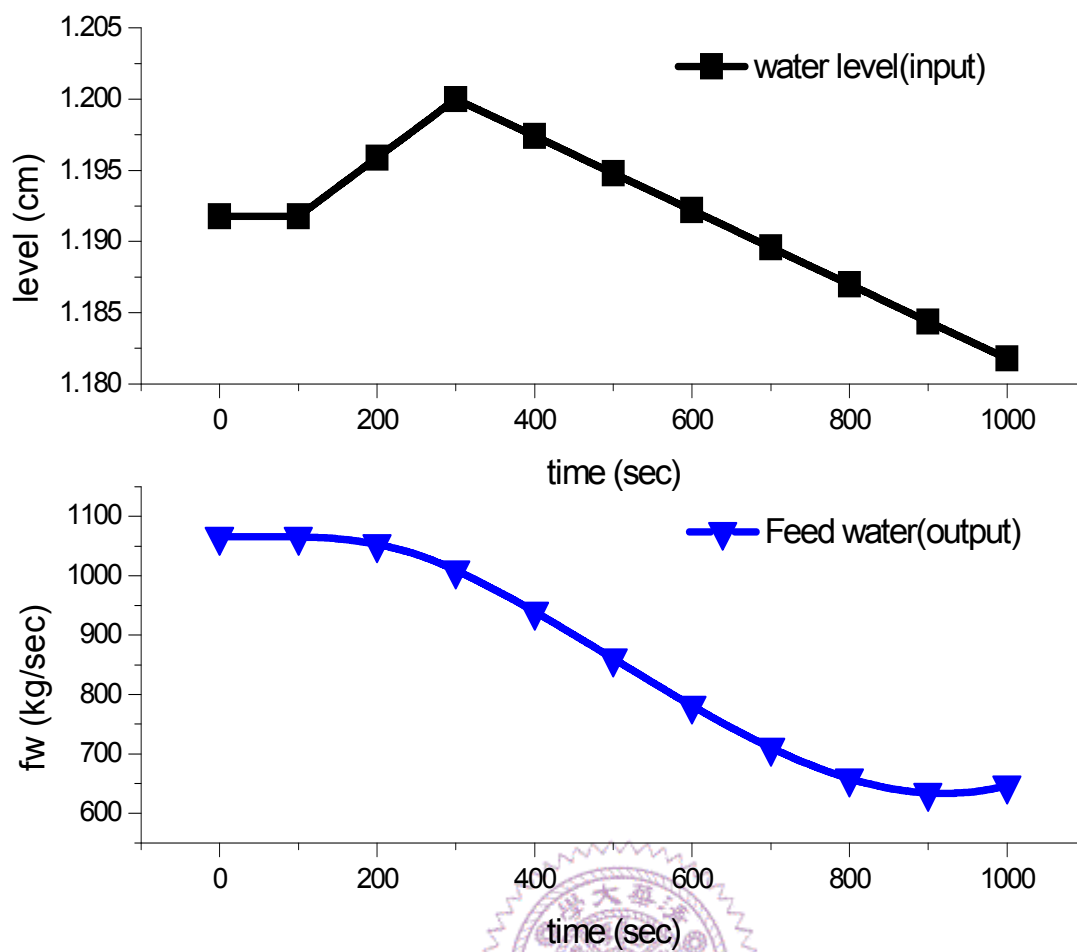


圖 4.4.3 RELAP5-RT 改變爐心水位觀察飼水變化（飼水控制）

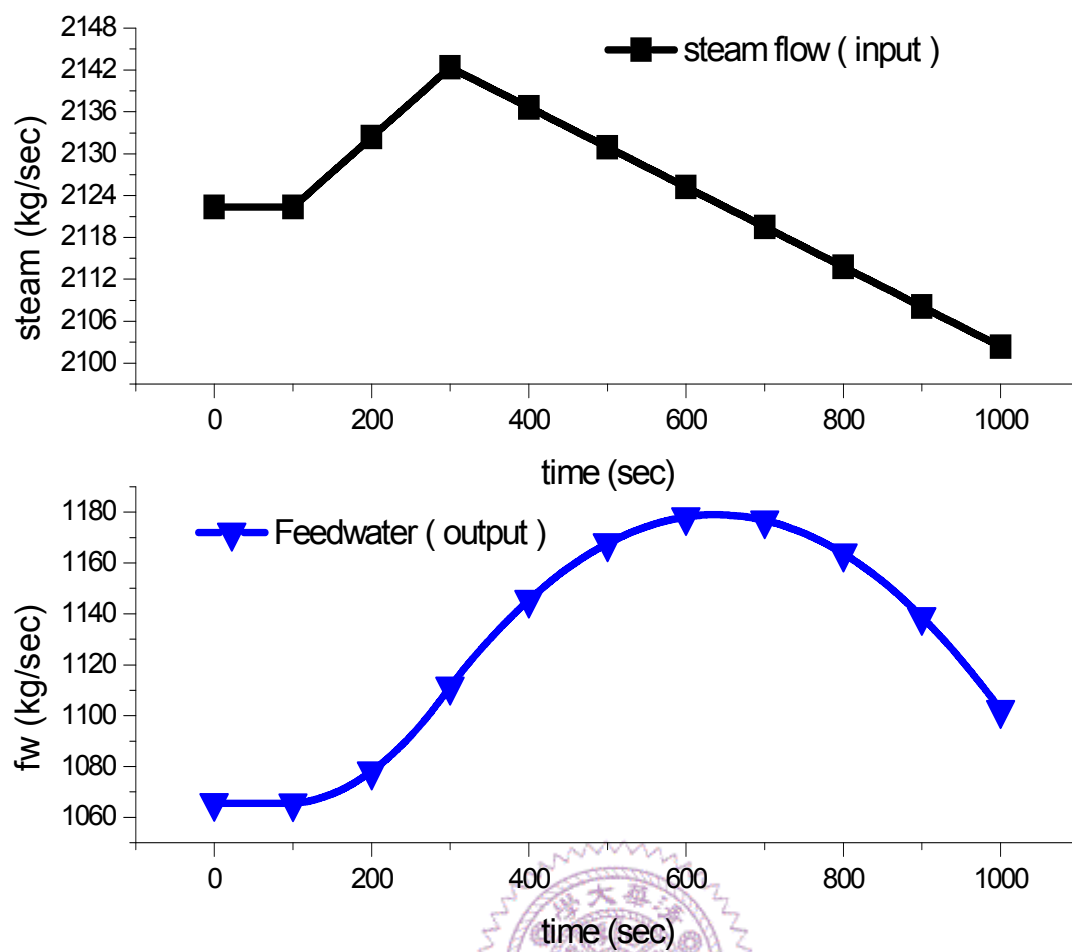


圖 4.4.4 RELAP5-RT 改變蒸汽流量觀察飼水變化（飼水控制）

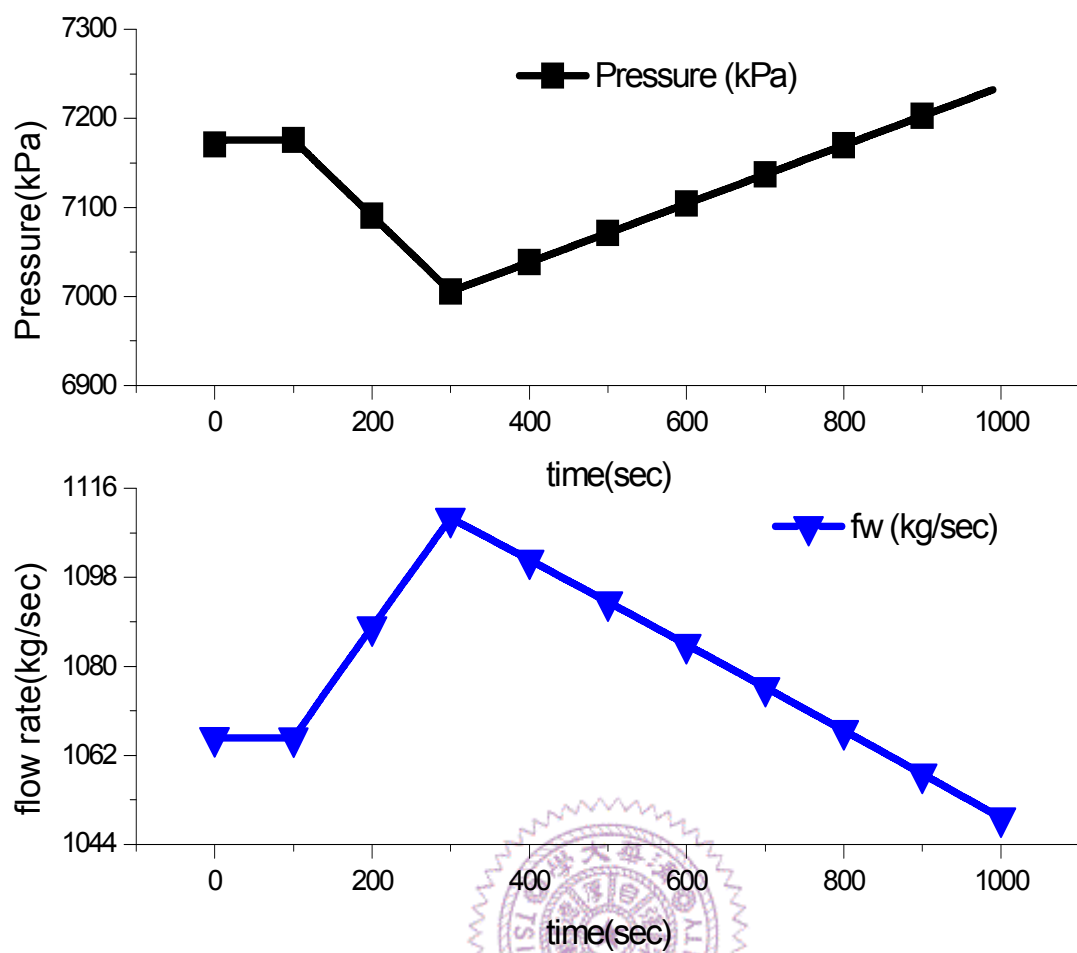


圖 4.4.5 RELAP5-RT 改變壓力槽壓力觀察飼水變化（飼水控制）

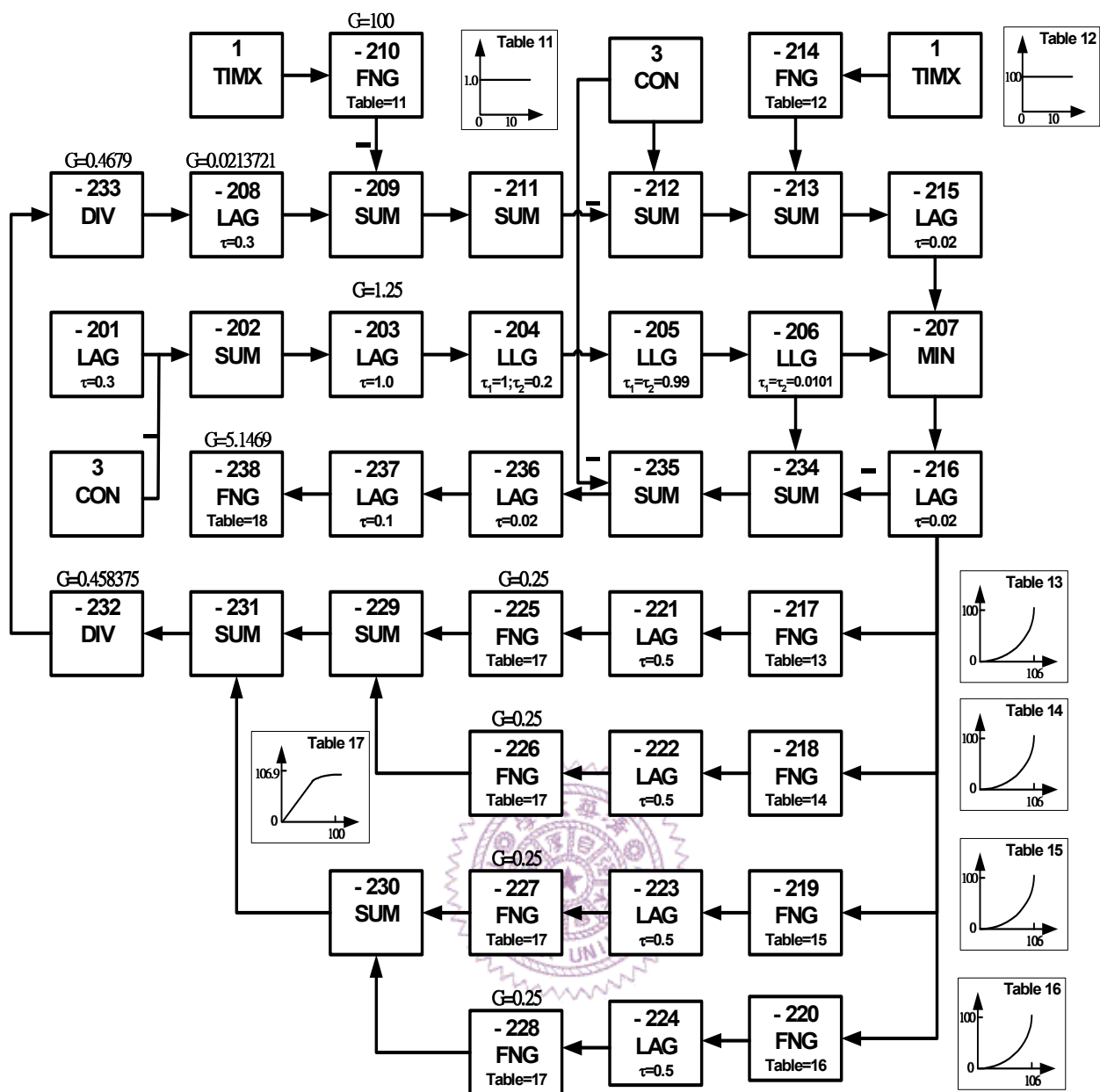


圖 4.4.6 雷傳壓力控制邏輯圖^[2]

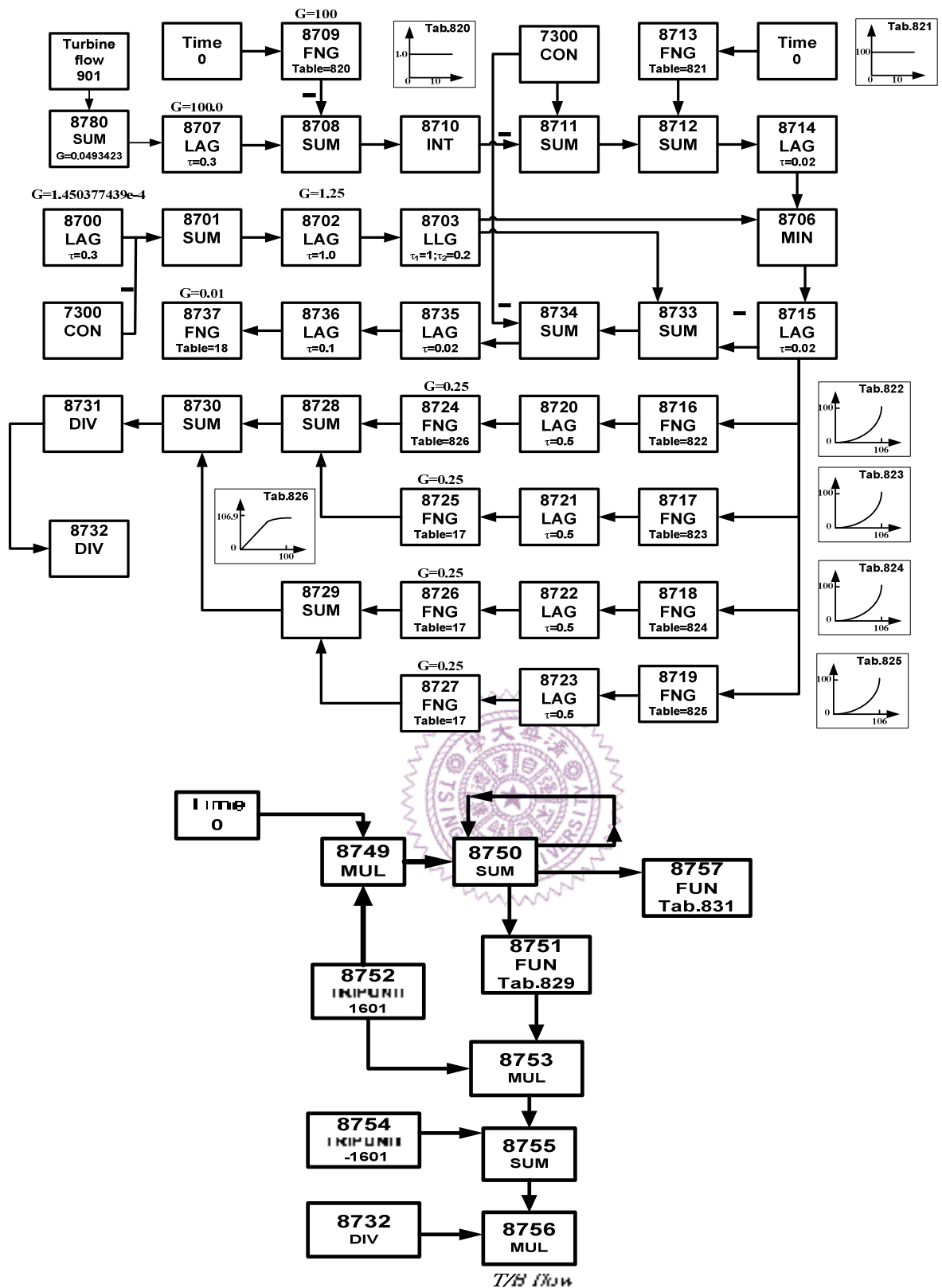


圖 4.4.7 RELAP5-RT 壓力控制邏輯圖 (1)

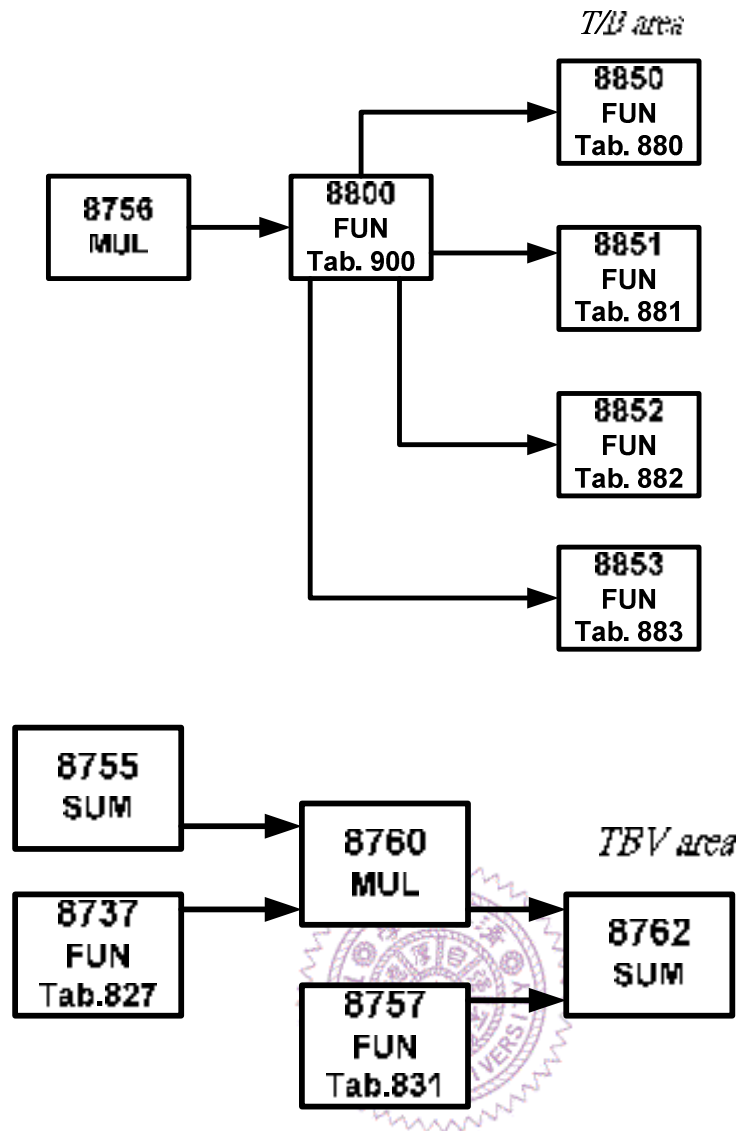


圖 4.4.8 RELAP5-RT 壓力控制邏輯圖 (2)

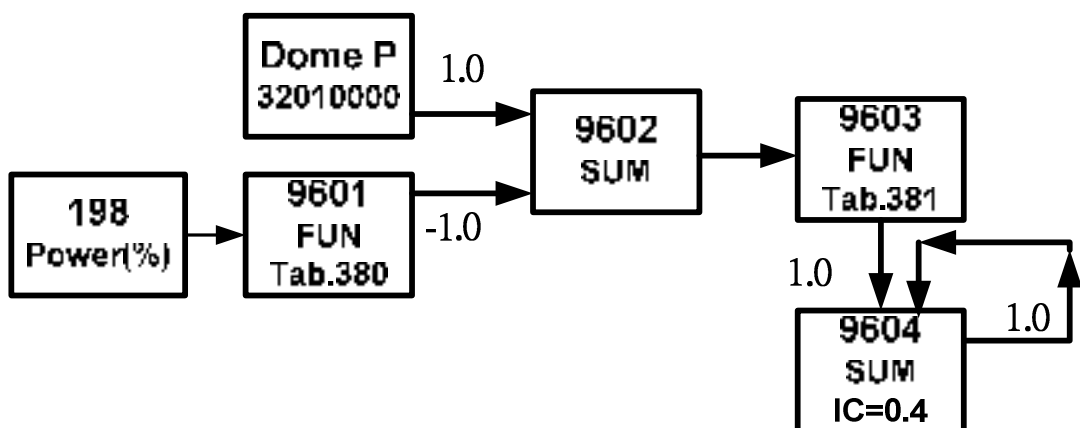
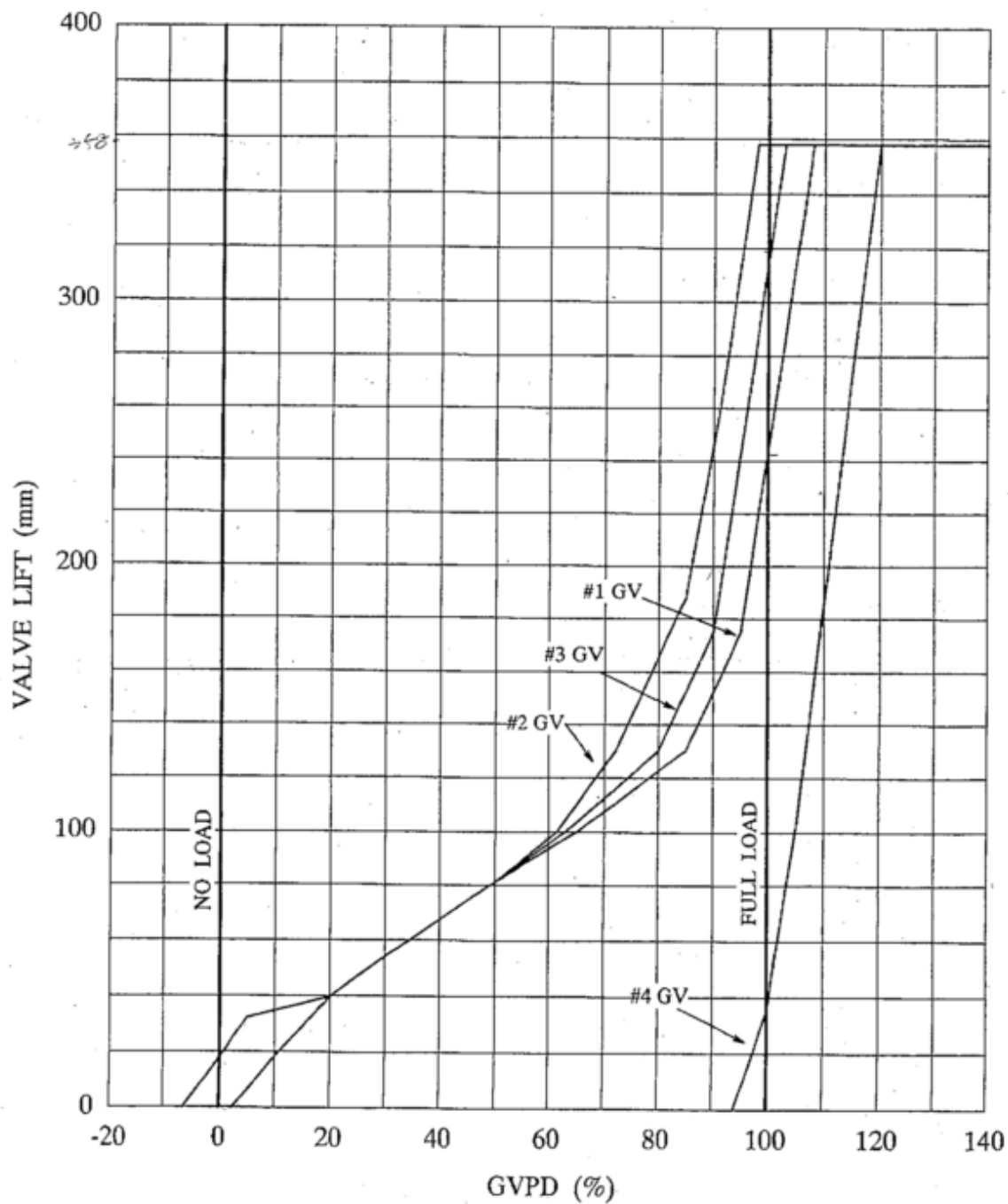


圖 4.4.9 RELAP5-RT 壓力控制之旁通閥邏輯圖



GVPD vs GV VALVE LIFT

圖 4.4.10 控制閥球的高度

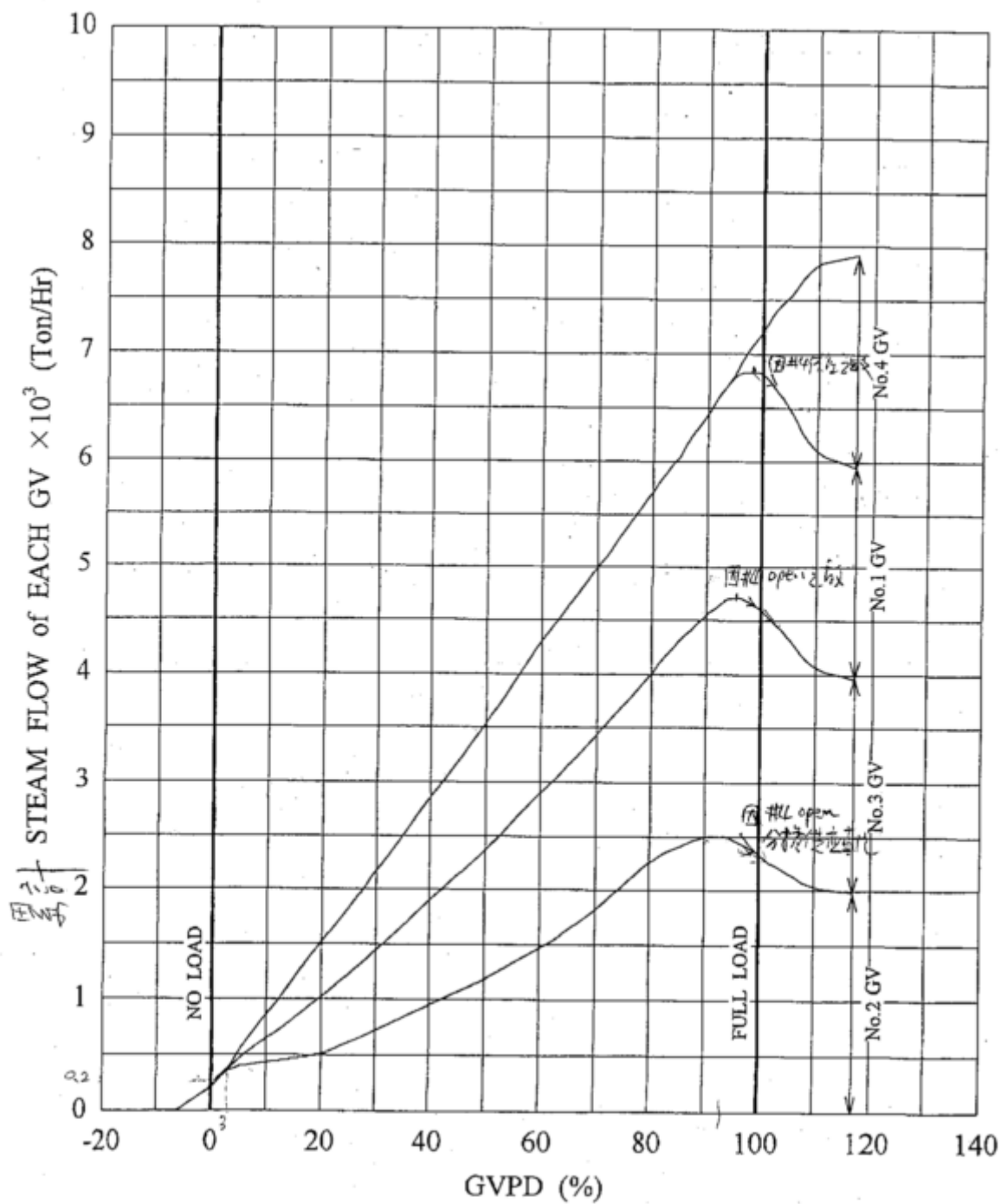


Fig-4 GVPD vs. STEAM FLOW of EACH GV

圖 4.4.11 控制閥位與相對流量

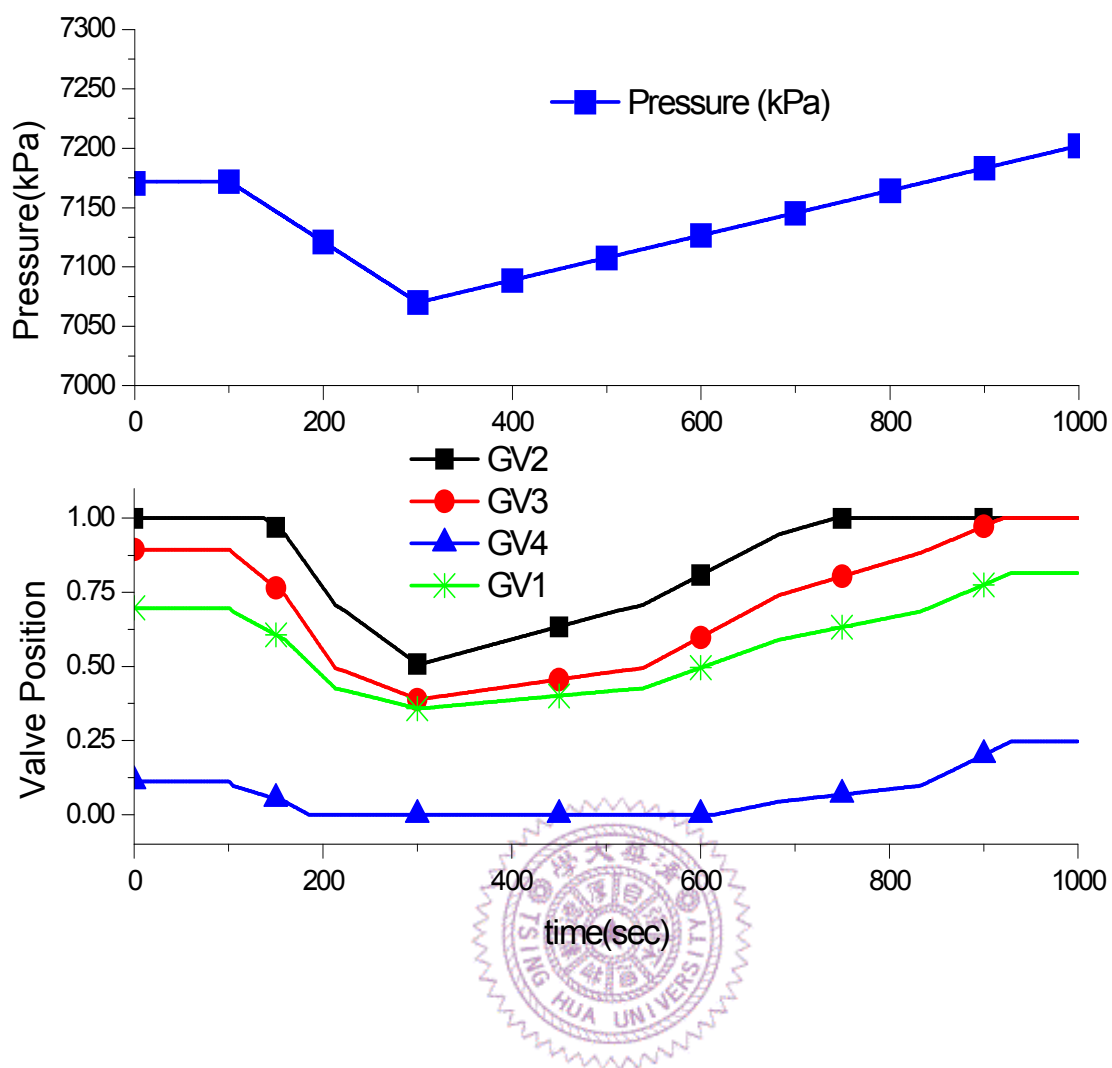


圖 4.4.12 RELAP5-RT 改變壓力槽壓力觀察汽機控制閥開度變化（壓力控制）

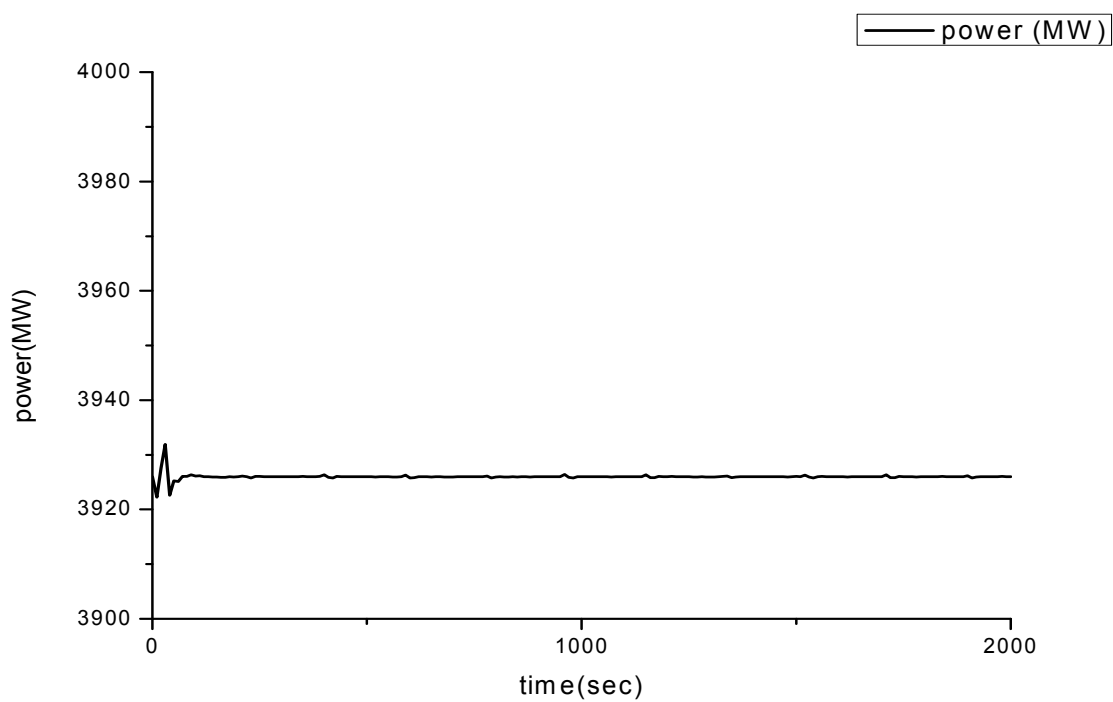


圖 4.4.13 穩態下反應器功率

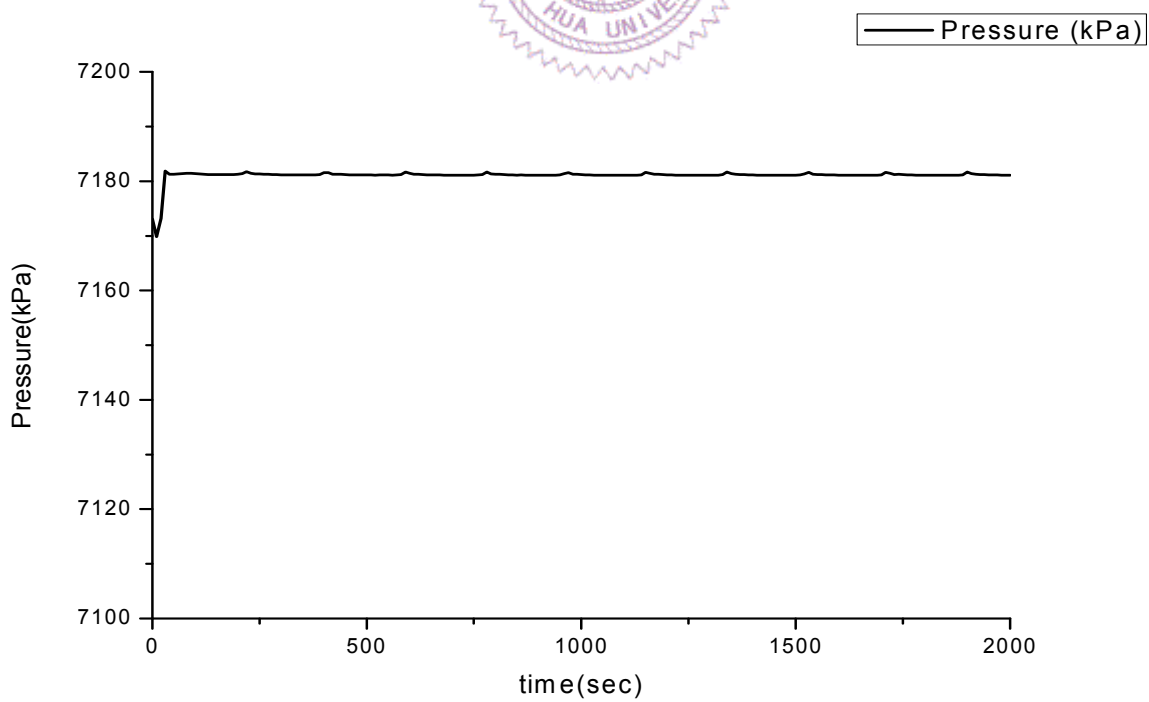


圖 4.4.14 穩態下壓力槽頂端壓力

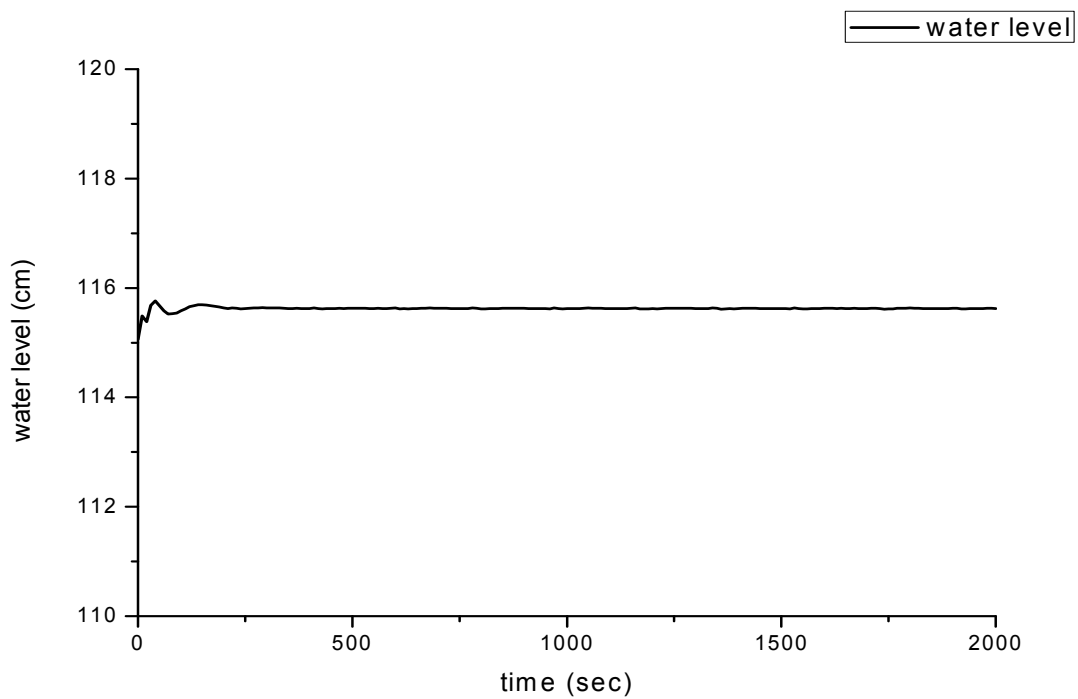


圖 4.4.15 穩態下爐心水位

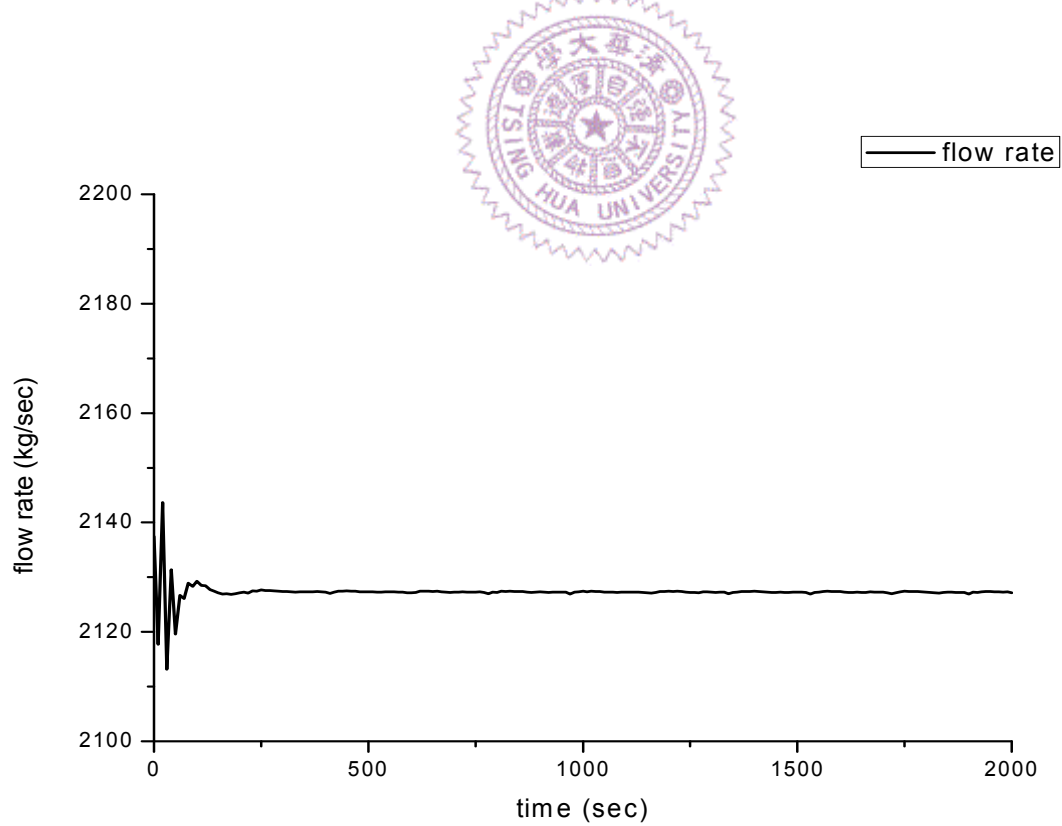


圖 4.4.16 穩態下飼水流量

第五章 暫態分析結果

5.1 前言

表 5.1 所示為本研究建立之 RELAP5-RT 輸入檔所預測之重要參數穩態值與龍門電廠 FSAR 提供的額定值的比較，兩者有些微之差距，但整體看來和額定數值相差不大，如飼水流量和蒸汽流量比額定值高了約千分之二，壓力也高出 11 kPa（約千分之一）。本研究對奇異公司所提供的龍門電廠運轉測試報告所做的暫態分析，挑選三項暫態進行分析比較。三項暫態分別為全功率下汽機跳脫（Turbine Trip）、反應器完全隔離（Reactor Full Isolation）以及一台飼水泵跳脫（One Feedwater Pump Trip）。

本輸入檔的模擬結果與奇異公司的啟動測試報告（GE STAR test 所用的分析軟體為 ODYN，故以下遇到皆以 ODYN 稱之）以及核能電廠系統動態模擬與分析實驗室發展之 ALPS 的分析結果比較。ODYN 模擬的電廠架構較為簡單，只有一條主蒸汽管路，且無模擬電廠平衡系統，模式中沒有蒸汽飼水泵以及飼水加熱器等組件，欠缺飼水溫度分析，可能會導致爐心進口水溫在暫態發生時失準。ALPS 包括兩個 RELAP5-RT 輸入檔，分別模擬蒸汽供應系統，以及電廠平衡系統，再以 SIMPORT 平台本身建立好的控制系統連結，透過 SIMPORT 讀取 RELAP5-RT 的熱水流資訊以給予相關的控制訊號傳遞。暫態分析的結果，ALPS 和 RELAP5-RT 的數據較為接近，然而 RELAP5-RT 輸入檔裡的飼水和蒸汽旁通與壓力控制系統主要參照雷傳輸入檔建立，故相關反應和 ALPS 結果有些許差距。

以下章節之功率變化比較圖，ALPS 和 RELAP5-RT 的數據為功率百分比，而 ODYN 未提供功率數據，乃依其中子通量百分比當作功率變化和其他兩套熱水流分析軟體比較。因此在功率變化比較裡，主要看其整體趨勢是否一致。而高壓汽機進口蒸汽量變化圖，礙於 ODYN 沒有模擬電廠平衡系統（BOP）部份，所以全部的蒸汽都流進高壓汽機，RELAP5-RT 和 ALPS 的蒸汽約有 5% 流往 BOP 之汽水分離再熱氣（Moisture Separator Reheater, MSR），導致往後高壓汽機進口蒸汽量的圖中 RELAP5-RT 和 ALPS 的初始值

約 95%。

5.2 全功率下汽機跳脫

5.2.1 測試說明

汽機跳脫的暫態測試在 100% 功率以及 100% 流量下，手動開啟汽機跳脫的訊號，訊號出現後，會啟動一連串反應。沸水式反應器核電廠，如核一、核二廠，在發生汽機跳脫時，會導致反應器急停，控制棒全入；龍門核電廠的蒸汽旁通閥設計，可以在汽機跳脫後，提供 110% 的額定蒸汽流量，透過十組蒸汽旁通閥將蒸汽排入冷凝器，使得反應器可以不用緊急停機，只需插入部份控制棒以降載，就可以將電廠帶到安全的狀態。電廠是否需要緊急停機由電廠保護系統（RPS）決定，當暫態發生後十組旁通閥若未能成功啟動，閥的開度總和若無法達到要求時，會有急停訊號出現。

按照龍門核電廠 RELAP5-RT 穩態輸入檔，飼水控制系統所算出的飼水流量將成為 BOP 之兩台蒸汽驅動飼水泵控制系統的輸入值，經轉換為飼水泵轉速及飼水流量。在汽機跳脫暫態裡，此作法會因為飼水反應較慢導致震幅較大而引起爐心水位低於 L3，使得反應器急停與 4 台 RIP 跳脫，導致爐心流量下降更低，電廠無法穩定。所以在汽機跳脫暫態，對於飼水控制系統算出來之飼水流量設定為直接流進壓力槽的流量，沒有透過 BOP 之蒸汽驅動飼水泵控制系統，如此飼水的反應較快，不會使爐心水位低於 L3。在 5.2.3 節將比較此兩種作法對分析結果造成的差異。

5.2.2 模擬結果分析比對

本研究建立之龍門核電廠 RELAP5-RT 輸入數據模擬結果顯示，汽機跳脫後，藉由前述之設計，反應器不會急停，選棒插入系統（Select Control Rod Run-In, SCRRI）以及再循環水泵轉速下降（RIP Runback）馬上啟動，汽機控制閥（TCV）和汽機斷止閥（TSV）於汽機跳脫後 0.1 秒內關閉，而蒸汽旁通閥於暫態發生後 0.02 秒開啟，0.17 秒旁通閥全開，表 5.2 所示為 RELAP5-RT 模擬結果與 ALPS 及 ODYN 結果的比對。

爐心流量受到 RIP 轉速下降影響，使四組（10 台 RIP）以每秒下降 5% 的速率減速，

如圖 5.2.1 所示，過了 12 秒後使爐心流量下降到約 41%，圖中顯示 ALPS 爐心流量反應較慢，暫態發生 2 秒後才有明顯的下降斜率出現，使得 20 秒後爐心流量才穩定於 41%，而 ODYN 的爐心流量下降 50% 以後，下降的幅度趨緩，於 50 秒後穩定在 41%。爐心流量大幅下降也導致反應器功率降低，圖 5.2.2 所示為反應器功率變化，三套分析軟體的趨勢很接近，不過 RELAP5-RT 的下降幅度略大於其他，可能和旁通閥的控制不完整有關。RELAP5-RT 在 12 秒內功率下降至 50% 左右是因為 RIP runback，而 SCRRI 的作用並不會短時間內把控制棒插入完畢，而是依照棒控制資訊系統設定，以每秒 0.025224827 公尺的速度選棒插入，最晚於 145 秒後完成選棒插入工作，使整體功率降至 33% 左右，將電廠成功的帶到另一種穩態。ALPS 和 ODYN 穩定後的功率為 35%，略高於 RELAP5-RT，而 ALPS 功率會有小鋸齒狀變化的原因為旁通閥的開度不斷變化導致。

RELAP5-RT 輸入檔針對汽機跳脫測試，將旁通閥控制系統分為兩段，在暫態發生前 30 秒，由於功率變化較大，10 個旁通閥開度變化由表列 (table) 給定，此表列利用 ALPS 提供的旁通閥流量轉換為開度變化；30 秒後，旁通閥控制為 4.4.3.1 節提到的控制方法（利用旁通閥開度變化去維持現狀下功率對應出的壓力值）。圖 5.2.3 和圖 5.2.4 為暫態發生後壓力變化，暫態發生後 1 秒內，RELAP5-RT 旁通閥控制為了防止反應器急停，所以把旁通閥的開度開得比較大，也使較多的蒸汽流量在短時間內排到冷凝器，導致一開始壓力槽的壓力比較低一些，長時間來看壓力變化，隨著反應器功率下降，蒸汽量下降以及蒸汽旁通閥的打開，壓力也跟著下降，透過控制微調旁通閥的開度，維持著壓力槽的壓力，最後穩定時壓力為 980kPa 左右。ALPS 和 ODYN 擁有完整的蒸汽旁通閥控制系統，使得前 50 秒內壓力震盪比起 RELAP5-RT 小，整體趨勢三套分析軟體的結果一致。

5.2.1 節提到，RELAP5-RT 輸入檔對於汽機跳脫測試，飼水給進方式不同，圖 5.2.5 可看出，RELAP5-RT 的飼水反應沒有上下震盪，而是緩慢下降而後穩定，ALPS 飼水有一震幅漸小的週期性震盪而 ODYN 的飼水反應介於 RELAP-RT 和 ALPS，週期性不明

顯且震盪漸小，最後三套分析軟體的飼水變化皆穩定於額定值的 30~40% 之間。圖 5.2.6 為壓力槽出口蒸汽流量變化，RELAP5-RT 和 ALPS 的分析結果都有一個突增的流量（約穩態時的 130%），和蒸汽控制閥關閉的時間（0.1 秒）以及旁通閥無法在這麼短時間排出額定蒸汽量，導致流出壓力槽的蒸汽會有一個突增，隨後蒸汽的流量受到旁通閥的控制系統影響，趨勢和旁通閥流量一致。圖 5.2.7 為 RELAP5-RT 之飼水流量扣掉壓力槽蒸汽流量的差值，在暫態發生 100 秒後，蒸汽流量和飼水流量漸趨相同，達到平衡。圖 5.2.8 為爐心水位變化，基本上水位變化類似飼水流量扣掉壓力槽蒸汽流量的差值，RELAP5-RT 的水位變化看不到週期性震盪，ALPS 和 ODYN 受到飼水震盪影響，同樣有個週期性的水位變化，隨著時間增長，震盪趨緩。圖 5.2.9 為爐心進口次冷態溫度變化，次冷態溫度的計算為流體溫度扣掉流體飽和態溫度，然而飽和態溫度變化受到壓力影響，RELAP5-RT 和 ALPS 的分析結果裡看出壓力變化差距不大，所以爐心進口次冷態溫度受到進口流體溫度較大的影響，然而 ODYN 的分析結果次冷態溫度整個偏高，和他分析時固定飼水溫度有關（沒有模擬 BOP 以及飼水溫度的控制計算）

圖 5.2.10 為高壓汽機進口蒸汽，受到汽機跳脫訊號影響，汽機控制閥(Turbine Control Valve)以及汽機斷止閥（Turbine Stop Valve）皆在 0.1 秒內快速關閉，導致汽機進口流量驟降，ODYN 在不到 1 秒內就沒有蒸汽流量了，RELAP5-RT 和 ALPS 仍有些許蒸汽則為管路微殘留蒸汽影響。圖 5.2.11 為汽機旁通閥流量，旁通閥於暫態發生後 0.02 秒內快速開啟以達到足夠的開度免於反應器急停。由於整個壓力槽和蒸汽旁通區的壓差很大，在 1 秒內 RELAP5-RT 和 ALPS 的旁通流量都高達 150% 的額定蒸汽流量，長時間來看，ODYN 的旁通閥流量略高於 RELAP5-RT 和 ALPS，此反應和 ODYN 在汽機跳脫暫態對於飼水和壓力槽出口蒸汽量皆略高有關。隨後旁通閥的流量隨著反應器功率下降，而旁通閥的開度變化將壓力槽的壓力維持在約 6791.34 kPa。

5.2.3 汽機跳脫之 RELAP5-RT 飼水進口選擇比較

在汽機跳脫暫態裡，若飼水控制系統計算出的飼水流量成為 BOP 之兩台蒸汽驅動飼水泵控制系統的輸入值，再經轉換為飼水泵轉速及飼水，流進壓力槽的飼水和飼水控

制所計算出的飼水流量會有如圖 5.2.12 的差距。暫態發生後 50 秒內，由於蒸汽流出壓力槽少於飼水流量，爐心水位上升，如圖 5.2.13 所示，把飼水流量成為蒸汽驅動飼水泵輸入值的結果，水位在 50 秒後低於初始設定點（115.6 cm），此時飼水控制系統如圖 5.2.12，增大飼水流量，但實際流進壓力槽的飼水繼續減少，100 秒後爐心水位低於 L3 造成反應器急停，其功率變化如圖 5.2.14 所示。圖 5.2.15 為不同飼水選擇對於流進壓力槽的影響，把飼水流量成為蒸汽驅動飼水泵輸入值的結果，使流進壓力槽之流量較低。

5.2.4 汽機跳脫之結論

當汽機跳脫後，龍門核電廠蒸汽旁通閥擁有 110% 額定蒸汽的特殊設計，電廠不會急停，透過選棒插入以及 RIP Runback 將功率漸漸降低，防止燃料因為溫度梯度過大而損毀。對於 RELAP5-RT 輸入檔，欠缺完整的蒸汽旁通閥控制系統，針對此暫態而架構的旁通閥控制沒有任何依據，類似嘗試錯誤作法（Try and Error），不能算是完整的蒸汽旁通控制系統；且將飼水控制系統算出之飼水值設為流進壓力槽的流量（此作法，類似沒有電廠平衡系統的 ODYN 分析）分析，對於電廠整體分析仍嫌不足。

5.3 反應器完全隔離

5.3.1 測試說明

反應器完全隔離事件，是將四條主蒸汽管路的蒸汽閥（Main Steamline Isolation Valve）關閉，導致蒸汽無法進入電廠平衡系統部份（包涵高低壓汽機、冷凝機、凝結水泵等），暫態重要事件時序如表 5.3 所述。

反應器完全隔離暫態分析中，若按照龍門核電廠 RELAP5-RT 穩態輸入檔，飼水控制系統所算出的飼水流量將成為 BOP 之兩台蒸汽驅動飼水泵控制系統的輸入值，轉換為飼水泵轉速及飼水流量，導致飼水反應較慢，而多餘的飼水導致爐心水位偏高，時間一久特別明顯。在 RELAP5-RT 模擬裡，改將控制系統算出的飼水流進壓力槽，以避免此暫態會產生爐心水位過高的現象，在 5.3.3 節裡，將對兩種作法作比較討論。

5.3.2 模擬結果分析比對

暫態發生後，如圖 5.3.1 所示，MSIV 在 3 秒內完全關閉，壓力槽的壓力上升造成釋壓閥打開，而釋壓閥（Safety Relief Valve，SRV）的開度設定依照核能電廠系統動態模擬與分析實驗室提供的設定點，分為六組，依控制系統的設定操作 18 個控制閥的開關，當壓力到達設定點時，釋壓閥在 0.1 秒後全開把蒸汽排放到液壓池，當壓力低於關閉設定點時，釋壓閥在 1 秒後完全關閉，以維持壓力槽壓力穩定。此外，暫態發生後，當 MSIV 關閉 10% 後，RPS 系統會送出急停訊號造成反應器急停（Reactor Scram）。原先設定對於急停訊號並無延遲時間，而造成暫態一發生後有個突降的壓力，應該是急停導致的控制棒全插造成功率急降所帶動的壓力變化，所以在此參考 ALPS 的設定方法，在 MSIV 關閉 10% 後，延遲 0.5 秒傳出反應器急停訊號。接著 MSIV 關閉 90% 時，經過 0.5 秒的延遲時間後系統會送出汽機跳脫訊號（Turbine Trip）造成 TSV（Turbine Stop Valve）關閉，相關結果如以下說明：

圖 5.3.2 為反應器功率變化，RELAP5-RT 和 ODYN 在暫態發生後約 1 秒，由於 MSIV 關閉 10%，急停訊號傳出使得控制棒全入，在 4 秒後反應器功率降至 10%，ALPS 約 1.4 秒時功率急速下降，可能和 SIMPORT 平台傳遞訊號有些為時間差導致。圖 5.3.3 為壓力槽頂端壓力變化，在反應器完全隔離事件裡，RELAP5-RT 和 ALPS 的壓力變化幾乎一致（前 35 秒），原因為兩者的釋壓閥的開關設定點相同，且開關的閥位變化相同，ODYN 的第一個和第二個壓力高峰較 RELAP5-RT 早且高，猜測和其僅模擬一條主蒸汽管，釋壓閥需結合在一條蒸汽管上，可能會造成模擬上的誤差；在 35 秒以後，第三個壓力峰波由於不會達到釋壓閥的壓力設定點而沒打開，圖中 RELAP5-RT 的壓力較高的原因可能和飼水還沒停止注入導致壓力槽水位和壓力都偏高。

圖 5.3.4 為飼水流量變化，由於 MSIV 關閉後會造成反應器急停，飼水流量幾乎乘線性下降，一開始 15 秒內有些為震盪可能和爐心水位下降過多有關。由圖中可發現 ALPS 飼水流量在暫態發生後 46 秒降為 0，RELAP5-RT 的飼水流量也約在 60 秒左右會降為 0；ODYN 的飼水反應下降最慢，猜測應與所預測之爐心水位會降到 L2 以下有關，

因為當水位降到 L2 會引發 HPCF(高壓緊急爐心注水)和 RCIC (反應氣冷卻注水系統)，造成壓力槽流出較多蒸汽，經過飼水控制計算後的飼水流量降幅較小。圖 5.3.5 為爐心水位變化，由於暫態發生後反應器急停，功率驟降導致壓力槽內汽泡崩陷 (Collapse) 而使爐心水位急降，RELAP5-RT 和 ALPS 在 5 秒後下降到一低峰 (介於 L2 和 L3)，接著緩慢上升不到 L3 前又下降，在 15 秒達到另一低峰，接著水位持續上升直到無飼水注入。ODYN 的爐心水位趨勢大致一樣，不過兩個低峰下降幅度過大，水位會低於 L2 (19.9cm)，造成緊急注水系統啟動 (HPCF 和 RCIC) 以維持爐心水位高度，防止冷卻水低於燃料棒頂端造成損毀。

圖 5.3.6 為壓力槽出口蒸汽流量，隨著 MSIV 關閉，壓力槽流出的蒸汽量快速下降，RELAP5-RT 和 ALPS 在暫態發生 5 秒後，因為釋壓閥的開啟造成反應器和抑壓池有很大的壓差，帶動大量蒸汽流出，而 OLYN 釋壓閥開啟的時間較早且流出的蒸汽量較大，可能和蒸汽管路以及釋壓閥模擬不完整有關；在 16 秒後 RELAP5-RT 和 ALPS 的蒸汽流量同樣為釋壓閥二度開啟導致，釋壓閥關閉後，壓力槽與外界隔絕，無壓差，相對蒸汽無法流出壓力槽。圖 5.3.7 說明釋壓閥流量，和蒸汽流量趨勢一樣，兩者互相影響，RELAP5-RT 和 ALPS 在暫態發生 4 秒後，RELAP5-RT 和 ALPS 的壓力達到 4 組設定點，共開啟了 10 個釋壓閥，才宣洩了足夠的蒸汽使壓力槽的壓力不再上升。過了 9 秒後釋壓閥全數關閉，隨著衰變熱繼續產生蒸汽而升高壓力槽壓力，在第 16 秒開啟了一個釋壓閥，即可把適量蒸汽移除，壓力不再上升，隨後第 34 秒關閉釋壓閥，此時衰變熱產生已無法產生大量蒸汽，所以壓力上升趨勢漸緩，不會再有釋壓閥開啟，另外對於 OLYN 的數據，僅知初期蒸汽流出較多，且第二次釋壓閥開啟流出的量也略多，可能和其壓力較高而導致較多的蒸汽流出釋壓閥。

圖 5.3.8 為高壓汽機進口蒸汽變化，隨著 MSIV 關閉，流進高壓汽機的蒸汽快速減少，在 RELAP5-RT 和 ALPS 都可看到一驟降流量 (3.2 秒和 4 秒)，這和系統偵測到 MSIV 關閉到達 90%而傳出汽機跳脫訊號有關，因為汽機跳脫訊號會將汽機斷止閥(TSV)快速關閉，造成流進汽機的流量驟減，而 OLYN 的汽機進口蒸汽量則隨著 MSIV 的關

閉線性下降，在 2 秒後蒸汽量快速減少，4.3 秒後就無蒸汽進入汽機，中間沒有看到抖降的現象。圖 5.3.9 為爐心流量，RELAP5-RT 和 ALPS 在暫態發生 1.5 秒後，爐心流量和功率來到了不穩定區，即圖 5.3.10 之 region II，使得爐內再循環水泵回退（RIP Runback），爐心流量隨之下降，過了 3 秒後，爐心水位降至 L3 使得 4 台再循環水泵跳機（RIP trip），另外 6 台則持續轉速回退（runback），13.5 秒後轉速降至 31%，RELAP5-RT 和 ALPS 的爐心流量都降至約 24%，另外，ODYN 的模擬測試未提到有 RIP Runback 訊號，在 3.5 秒後會因為壓力過高而跳脫 4 台爐內再循環泵且 3.7 秒後因為爐心水位下降至 L2 而造成剩下的 6 台爐內泵跳機，最後爐心流量下降至約 10% 左右。

圖 5.3.11 為爐心進口次冷態溫度變化，已知流體的飽和態溫度受到壓力影響，整體趨勢看起來與各分析軟體之壓力趨勢一致，RELAP5-RT 在 30 秒之後的次冷態溫度上升較多（約高到 200%），對於此現象，猜測原因為 RELAP5-RT 的飼水流量來自飼水控制系統而飼水溫度來自 BOP 飼水端，兩者不同步導致（圖 5.3.12 為 RELAP5-RT 和 ALPS 之飼水溫度比較）。圖 5.3.13 為飼水流量及飼水溫度為 ALPS 數據輸入值，在反應器完全隔離對於 RELAP5-RT 爐心進口次冷態溫度變化，看出 30 秒後 RELAP5-RT 仍有次冷態溫度過高現象，與猜測原因不合，其次冷態溫度過高和 30 秒後的壓力較高導致飽和態溫度偏高有較大關聯。此外，電廠穩態時次冷態溫度約為 12°C，暫態發生後上升 20°C 多對整體電廠的安全性影響不大。

5.3.3 反應器完全隔離之飼水進口選擇比較

若把飼水控制計算出飼水為蒸汽驅動飼水泵之輸入值，在反應器完全隔離暫態，由於反應器急停導致飼水流量下降，由圖 5.3.14 看出飼水控制計算出的流量和流進壓力槽的飼水有 30% 以上之額定飼水差距。從圖 5.3.15 可看出，和飼水控制計算出的飼水設為流進壓力槽的流量比較起來，將飼水設為蒸汽驅動飼水泵輸入值之暫態所流進壓力槽流量較高，導致暫態發生 42 秒以後，爐心水位達到 L8，如圖 5.3.16 所示。此外，壓力槽頂端壓力較不受飼水流量影響，如圖 5.3.17，不論飼水進口選擇，壓力變化主要受到釋壓閥開關影響。

5.3.4 反應器完全隔離之結論

對於電廠發生反應器完全隔離，導致反應器急停以及汽機跳脫，此時主蒸汽管上的釋壓閥開關設定最為重要，RELAP5-RT 和 ALPS 參照龍門核電廠設計報告^[3] (Project Design Manual) 之壓力設定，對於釋壓閥開啟和關閉所花的時間不同，ODYN 礙於僅模擬 1 條主蒸汽管線，對於釋壓閥的模擬較不完備。整體看來，RELAP5-RT 和 ALPS 結果較穩定，而 ODDYN 因水位過低引發緊急爐心注水系統，需藉由冷卻水注入燃料才不會受損。針對此暫態，需將 RELAP5-RT 飼水控制系統算出之飼水設為流進壓力槽流量，以免爐心水位過高，此作法造成電廠平衡系統端之模擬數據有失準確。

5.4 一台飼水泵跳脫

5.4.1 測試說明

龍門發電廠擁有兩台蒸汽驅動飼水泵和一台備用的馬達驅動飼水泵，此暫態分析當電廠在全功率運轉（100%功率以及 100%爐心流量）下發生一台蒸汽驅動飼水泵跳脫所造成的影響。事件發生後馬達驅動飼水泵將啟用提供輔助飼水以維持爐心水位；另外爐內的再循環水泵會接收到回退（RIP Runback）訊號，降低水泵轉速來達到降載的作用。暫態重要事件時序如表 5.4 列述。

5.4.2 模擬結果分析比對

在 RELAP5-RT 的模擬測試裡，由於從雷傳修改而來的飼水控制系統欠缺電廠平衡系統的飼水部份，所以在此暫態中飼水參考 ALPS 的數據，如圖 5.4.1 所示，當作邊界條件設定（據了解奇異公司的分析結果也是把飼水當作類似邊界條件的形式輸入），ODYN 的飼水流量假設只有一台蒸汽驅動飼水泵可以提供 55%的額定流量，在暫態發生 5 秒內，馬達驅動飼水泵的轉速僅可提供一半（額定流量的 10%）的飼水，即第 5 秒時飼水總流量可達到 65%的額定飼水，在 10 秒後馬達驅動飼水泵的轉速可提供到額定流量的 20%，即 10 秒後飼水可達到 75%的額定飼水。對於這部份，ALPS 之飼水泵設計乃根據現有的龍門電廠所提供的設計值，所反應出來的飼水變化，由圖可看出前 20 秒

內的飼水變化沒有 ODYN 劇烈，飼水流量僅降為 80% 額定流量，而 ODYN 下降為 65% 額定流量。

跳脫一台飼水泵後，系統偵測到立即啟動爐內再循環水泵回退 (RIP Runback)，減少爐心流量，而馬達驅動飼水泵在 10 秒後達到最大流量運轉，在此 RELAP5-RT 的飼水以依時邊界 (time dependent junction) 輸入，12 秒後爐內再循環水泵完成回退，轉速降至 31%。以下為三套分析軟體模擬結果比對：

圖 5.4.2 為反應器功率變化，由於系統偵測到一台飼水泵喪失，馬上啟動爐內再循環水泵回退 (RIP Runback) 把爐心流量降低，12 秒後 RIP 轉速退到 31%，RELAP5-RT 和 ALPS 爐心功率降至 60%，而 ODYN 功率下降較多，和飼水流量較低有關。隨著馬達驅動飼水泵的啟動，三套分析軟體的功率也隨著飼水的補回緩慢上升到正常運轉的 65% 左右。圖 5.4.3 為爐心流量，RIP Runback 造成 10 台再循環水泵轉速降至 31%，使得 RELAP5-RT 和 ALPS 之爐心流量在 12 秒後降至正常運轉的 41% 左右，而 ODYN 約為 43% 左右。圖 5.4.4 為壓力槽壓力變化，隨著反應器功率下降以及爐心流量減少，產生的蒸汽量變少，使得 RELAP5-RT 和 ALPS 壓力槽的壓力下降約 180 kPa；20 秒後不再有其他因素影響電廠 (RIP runback 於 12 秒結束且馬達驅動飼水泵於 10 秒後啟動完畢)，使壓力維持在一穩定值，約 6991.3 kPa，而 ODYN 在 20 秒內壓力下降較多，和其模擬飼水流量偏低，導致蒸汽較少有關。

圖 5.4.5 為爐心水位變化，三套分析軟體在穩態時爐心水位有些差距。RELAP5-RT 和 ALPS 的水位在飼水泵跳脫後 10 秒內皆會升至 L7，隨著 RIP Runback 結束 (12 秒) 以及 10 秒後飼水因為爐心水位過高而開始降低流量，造成爐心水位慢慢下降，維持在 L4~L7，保持反應器正常運轉。至於 ODYN 的爐心水位會先降後升，且振幅頗大，因為飼水流量下降過多使得水位最低降至 L4 以下 (20 秒)，水位最高則超過 L7。

圖 5.4.6 以及 5.4.7 分別為壓力槽出口蒸汽流量和高壓汽機進口蒸汽量，由於主蒸汽管路上的釋壓閥以及蒸汽旁通閥在此事件裡並不會開啟，所以兩者趨勢一致。因為爐心流量的下降 (RIP Runback)，使得功率下降，產生的蒸汽量也隨之減少，在回退訊號結

束以及電廠功率不再下降後，RELAP5-RT 和 ALPS 蒸汽量即維持在原先的 65%左右，而 ODYN 蒸汽量一開始會因為飼水較低導致蒸汽下降較多，隨著飼水的補足，蒸汽量也維持在 65%左右，值得注意的是，ODYN 沒有模擬 BOP 部份，導致不會有蒸汽流至 MSR，所以進蒸汽機的蒸汽和壓力槽出口蒸汽量一致，而 RELAP5-RT 和 ALPS 的汽機進口蒸汽量穩定時維持在 60%左右，有 5%的蒸汽流到 MSR 當作熱源。

次冷態溫度為流體溫度和流體飽和態溫度相差，圖 5.4.8 為 RELAP5-RT 爐心進口流體溫度和飽和態溫度變化，爐心進口飽和態溫度受到壓力槽的壓力變化影響，而流體溫度則和飼水流量息息相關，然而喪失一台飼水泵會使得飼水流量有 40%左右的變化，相比之下，壓力的變化在此暫態沒有受到大幅度影響（不到 3%）。圖 5.4.9，為爐心進口次冷態溫度變化，整體看來三套分析軟體趨勢一致，一開始 RIP Runback 導致功率下降，ODYN 的次冷態溫度下降最多和其飼水模擬過低有關，隨著飼水補回以及功率達到穩態，提高了次冷態溫度，最後三套分析軟體皆穩定在約 140%，約略上升了 15°C。

5.4.3 一台飼水泵跳脫之結論

由於 RELAP5-RT 飼水控制系統參照的雷傳輸入檔欠缺電廠平衡系統模擬，RELAP5-RT 之飼水控制亦無法針對電廠平衡系統之飼水端有完整模擬，所以在此暫態飼水流量需以 ALPS 之飼水當邊界條件輸入。龍門核電廠在跳脫一台飼水泵後，藉由 RIP Runback 降低爐心流量以減少功率，整體看來，三套分析軟體皆可成功將電廠帶到功率約 65%之穩態且趨勢一致，對於爐心水位的分析，ODYN 的趨勢和 RELAP5-RT 以及 ALPS 不同，會先往下降再攀升，所幸不會低於 L3 而造成反應器急停。藉由三套分析軟體的結果，看出一台飼水泵跳脫對龍門核電廠不會有重大影響，仍可穩定運轉。

表 5.1 RELAP5-RT 穩態數據比較

	RELAP5-RT	FSAR 額定數值
反應器功率(MWt)	3926	3926
爐心頂端壓力(kPa)	7180.89	7170.0
爐心水位(cm)	115.6	無
爐心進口溫度 (°C)	277.45	278.3
爐心流量 (kg/sec)	14500	14500
壓力槽蒸汽流量 (kg/sec)	2127	2122.38
飼水溫度 (°C)	215.68	215.7
飼水流量 (kg/sec)	2127	2117.8
爐心進口次冷態溫度 (°C)	11.1	無

表 5.2 汽機跳脫重要事件時序表

Event	RELAP5-RT	ALPS	ODYN
Turbine Trip Initiated	0.0 sec	0.0 sec	0.0 sec
TSV start to close	0.0 sec	0.0 sec	0.001 sec
RIP runback start	0.0 sec	0.0 sec	0.275 sec
SCRRRI initiated	0.03 sec	0.0 sec	0.001 sec
Bypass valve start to open	0.02 sec	0.02 sec	0.02 sec
TCV start to close	0.0 sec	0.0 sec	無說明
TCV fully closed	0.1 sec	0.1 sec	0.1 sec
TSV fully closed	0.1 sec	0.1 sec	無說明
RIP runback complete	12.0 sec	12.0 sec	11.5 sec

表 5.3 反應器完全隔離重要事件時序表

Event	RELAP5-RT	ALPS	ODYN
Reactor Isolation Initiated	0.0 sec	0.0 sec	0.0 sec
Scram Initiated since MSIV 10% closed	1.0 sec	1.0 sec	0.8 sec
ALL RIP Runback initiated	1.5 sec	1.5 sec	無
Turbine Trip since MSIV 90% closed(delay 0.5sec)	3.2 sec	3.2 sec	無說明
4 RIP tripped	3.4 sec	3.4 sec	3.5 sec
ALL RIP tripped (L2)	無	無	3.7 sec
6 RIP Runback completely	13.5 sec	13.5 sec	無

表 5.4 一台飼水泵跳脫重要事件時序表

Event	RELAP5-RT	ALPS	ODYN
Trip of 1 TDFP	0.0 sec	0.0 sec	0.0 sec
All RIP Runback Initiated	0.0 sec	0.0 sec	0.0 sec
Motor Driven Feedwater Pump Reached Full Flow	10.0 sec	10.0 sec	10.0 sec
RIP Runback Complete	12.0 sec	12.0 sec	11.26 sec

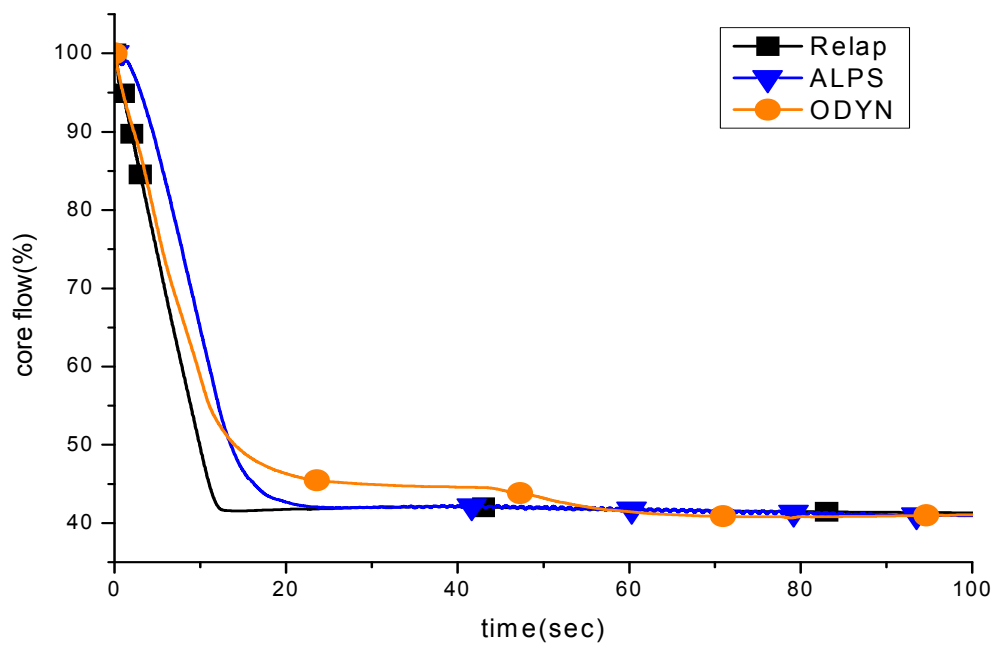


圖 5.2.1 爐心進口流量變化 (100%功率下汽機跳脫)

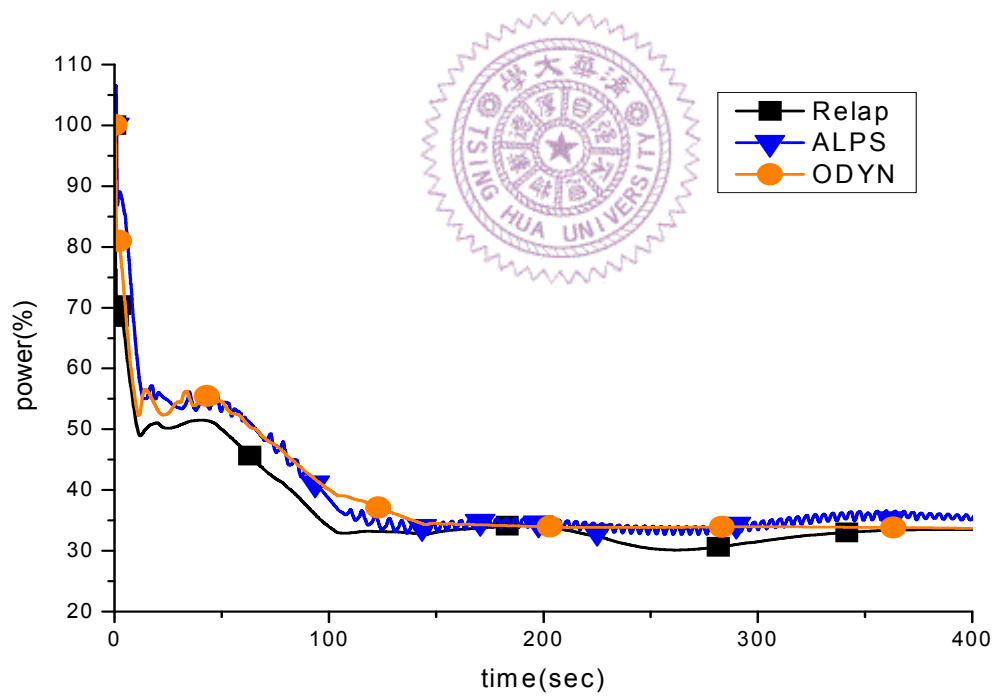


圖 5.2.2 反應器功率變化 (100%功率下汽機跳脫)

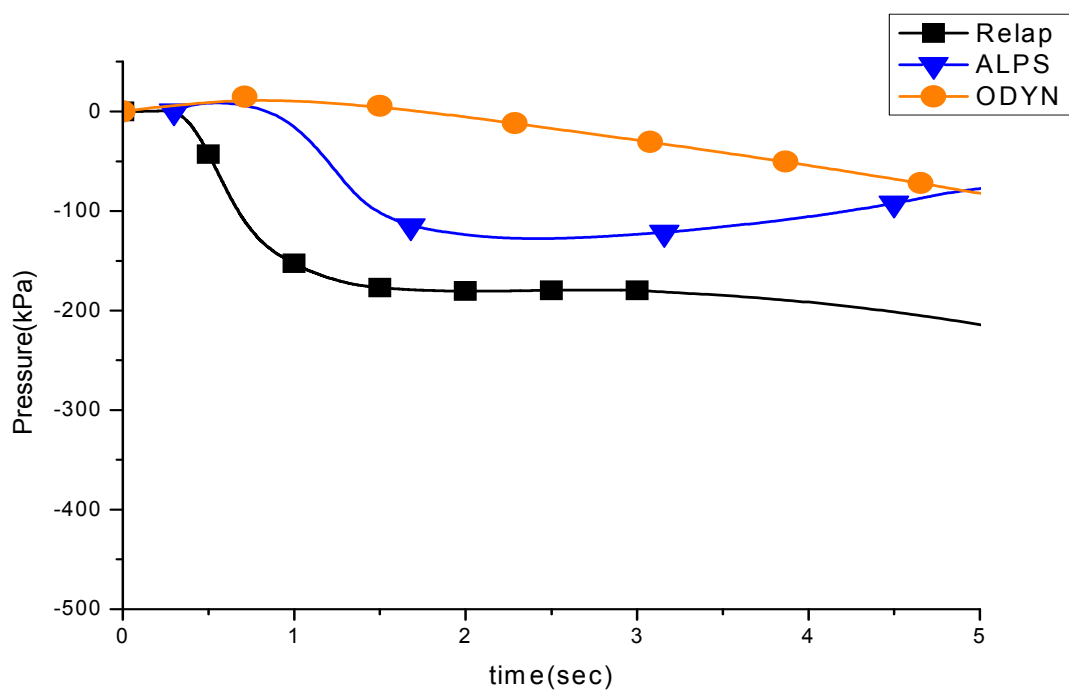


圖 5.2.3 5 秒內壓力槽頂端壓力變化（100%功率下汽機跳脫）

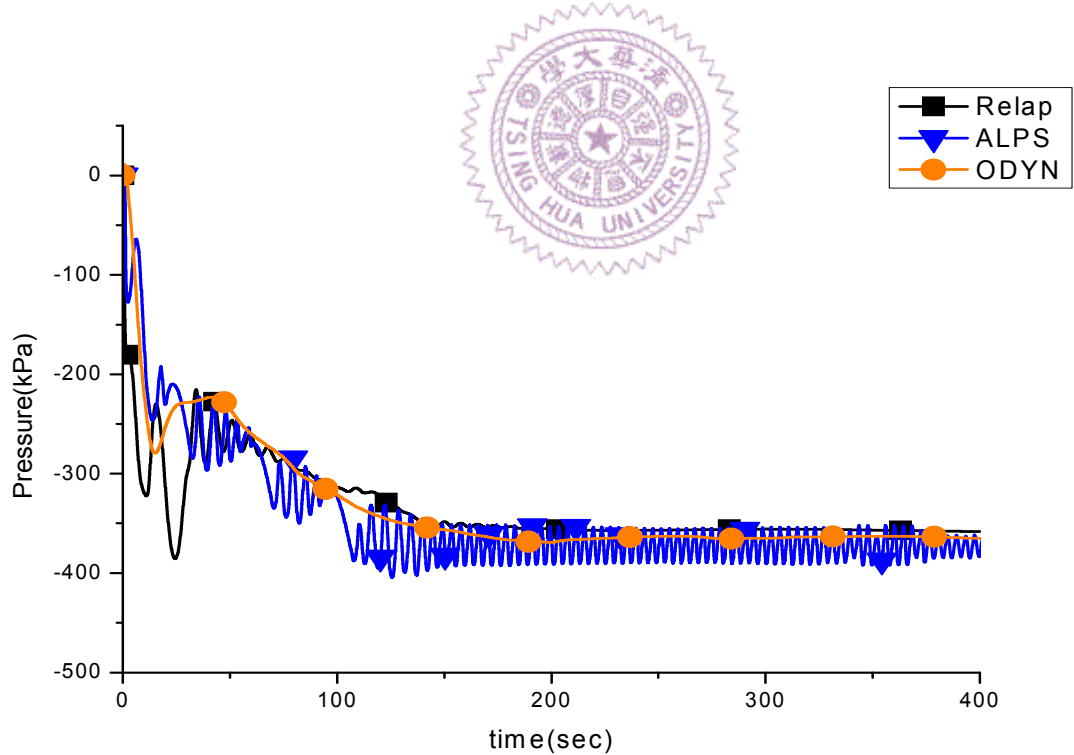


圖 5.2.4 400 秒內壓力槽頂端壓力變化（100%功率下汽機跳脫）

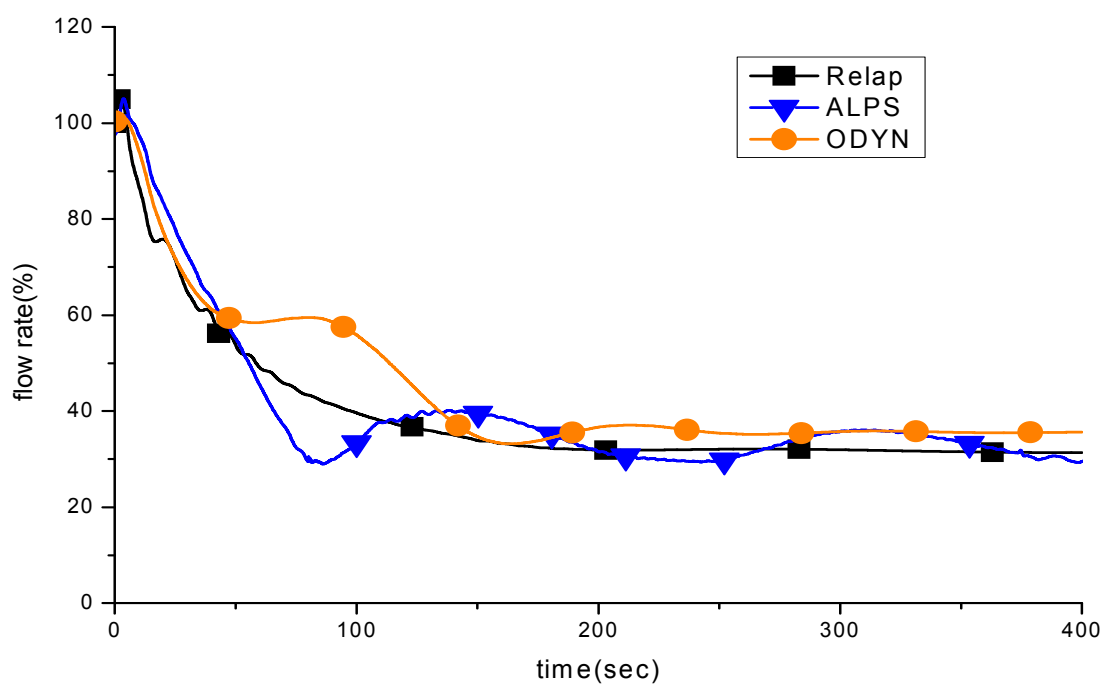


圖 5.2.5 飼水流量 (100%功率下汽機跳脫)

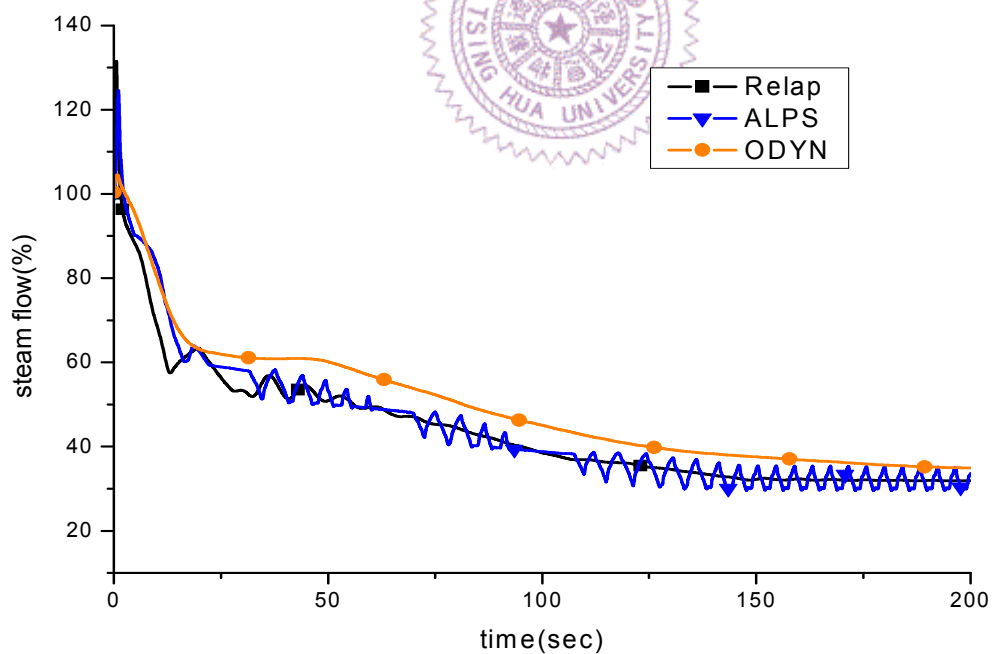


圖 5.2.6 壓力槽出口蒸汽量變化 (100%功率下汽機跳脫)

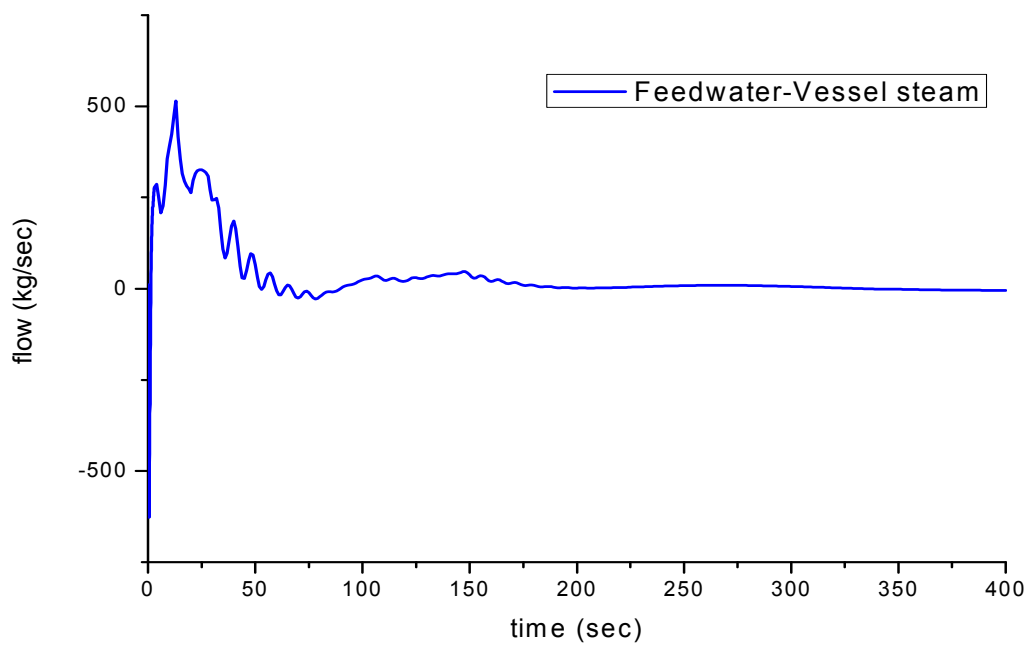


圖 5.2.7 飼水和蒸汽流量差值（100%功率下汽機跳脫）

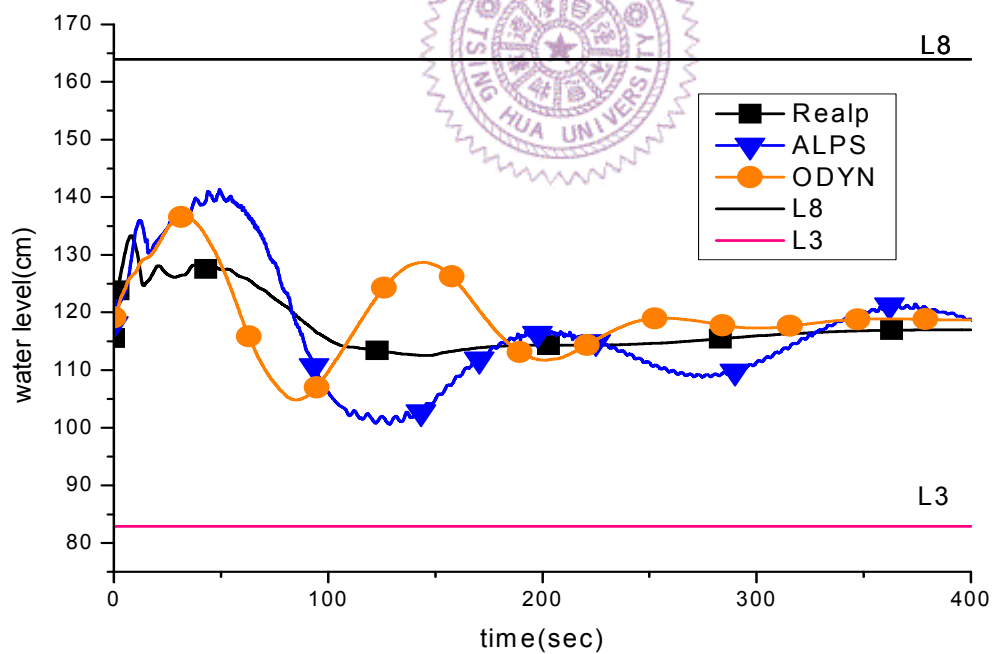


圖 5.2.8 爐心水位變化（100%功率下汽機跳脫）

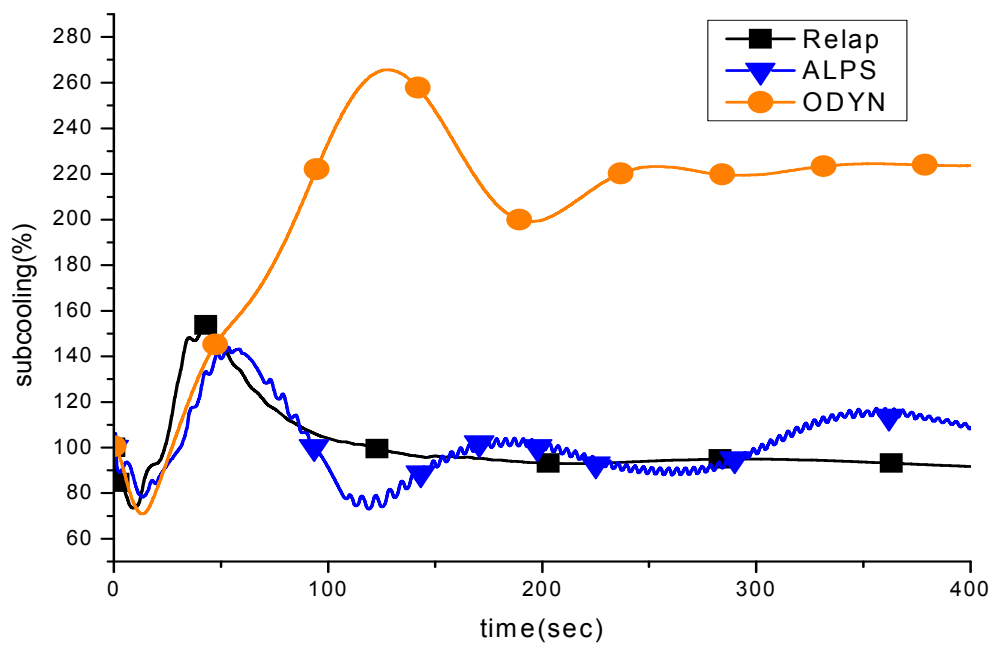


圖 5.2.9 爐心進口次冷態溫度變化 (100%功率下汽機跳脫)

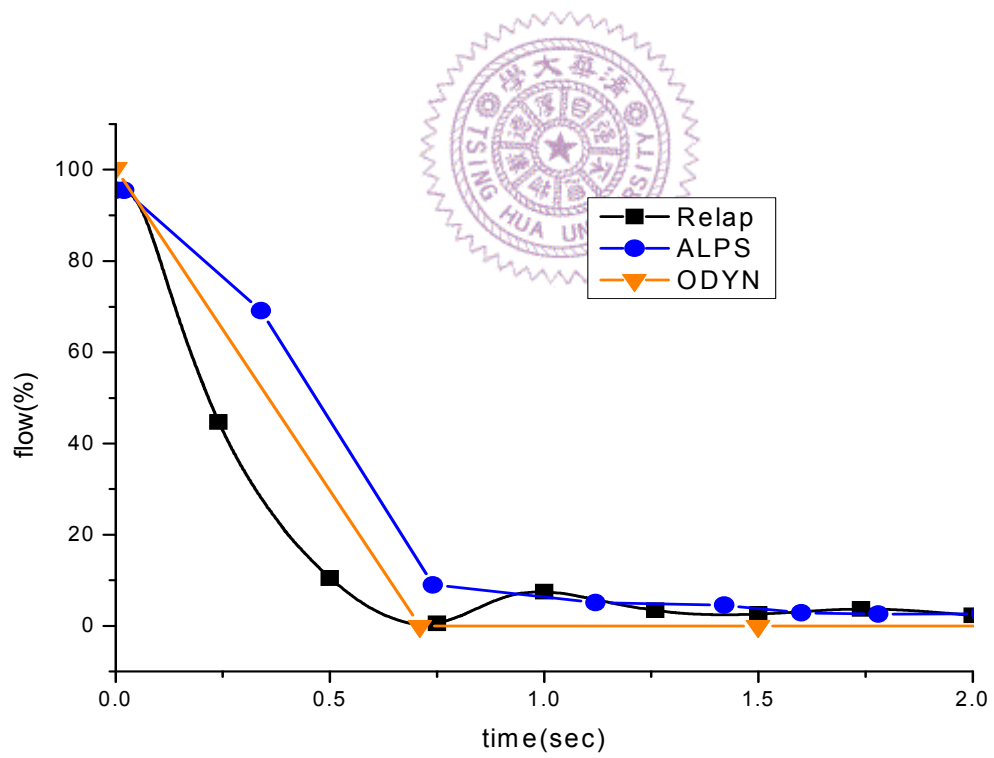


圖 5.2.10 高壓汽機進口蒸汽量變化 (100%功率下汽機跳脫)

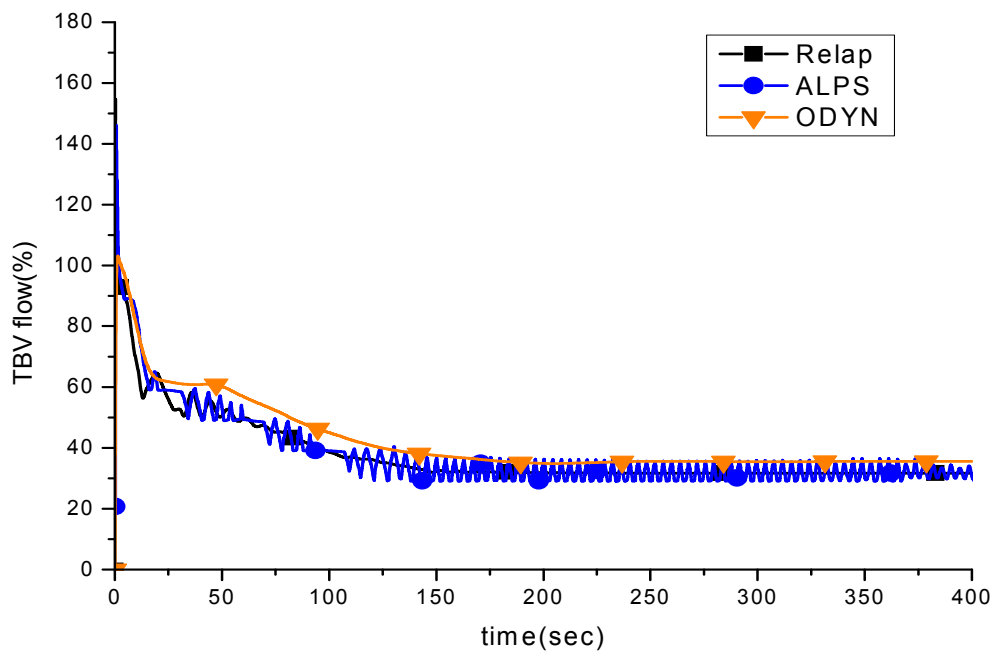


圖 5.2.11 汽機旁通閥蒸汽量變化（100%功率下汽機跳脫）

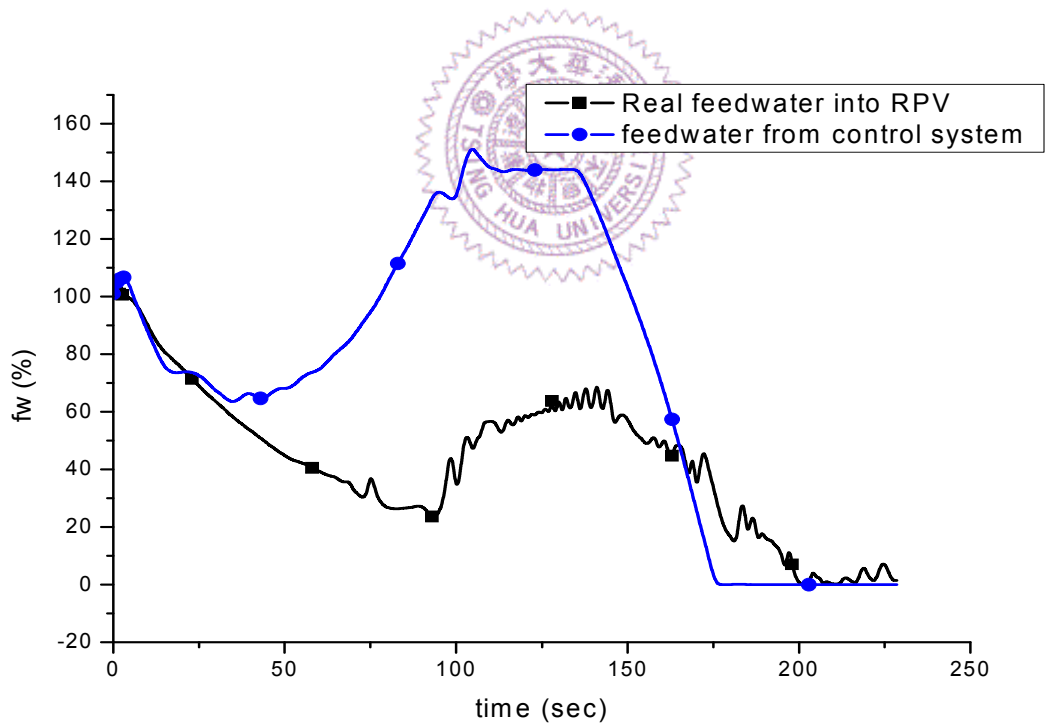


圖 5.2.12 RELAP5-RT 汽機跳脫後飼水控制之飼水和流進壓力槽飼水差距
（飼水輸入蒸汽驅動飼水泵控制）

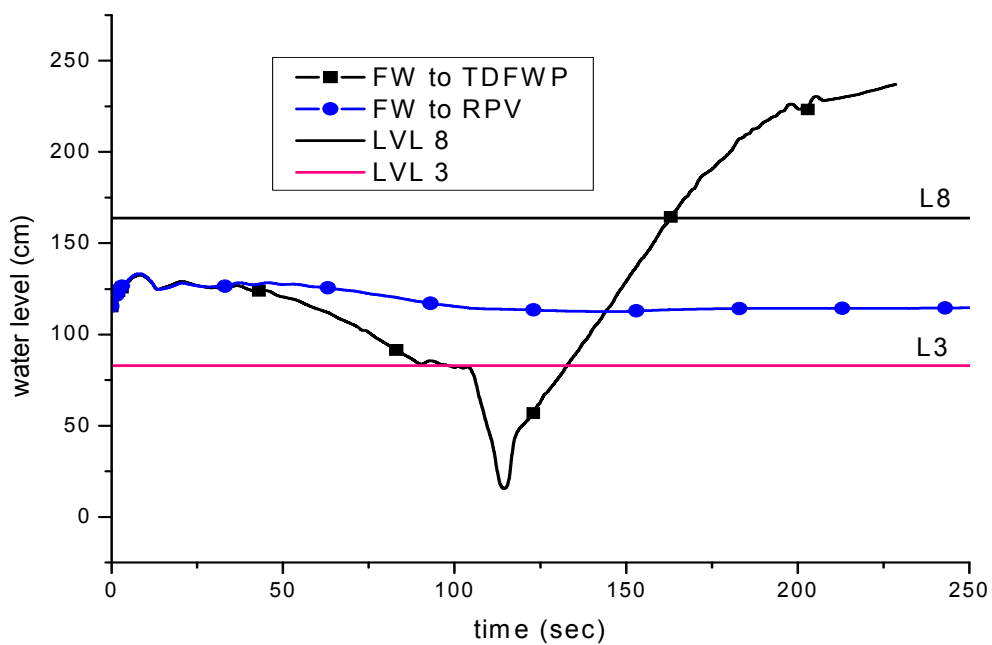


圖 5.2.13 RELAP5-RT 汽機跳脫後爐心水位對於不同飼水輸入之比較

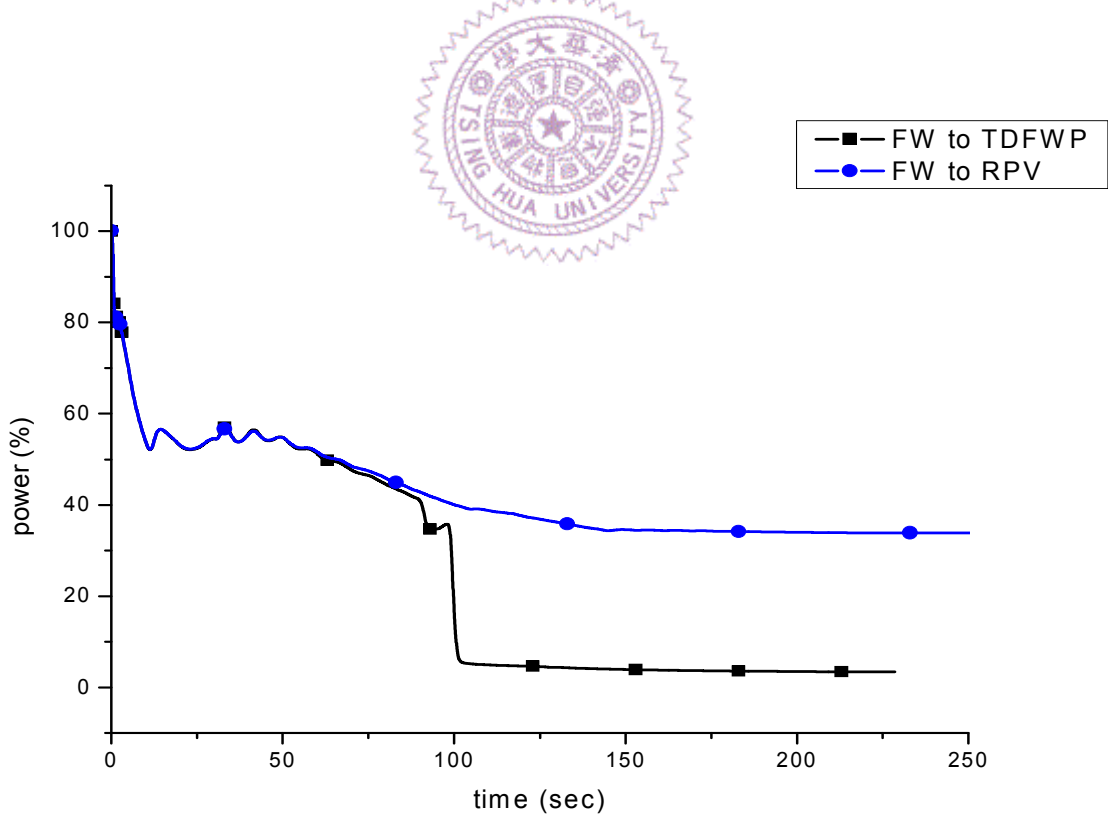


圖 5.2.14 RELAP5-RT 汽機跳脫後反應器功率對於不同飼水輸入之比較

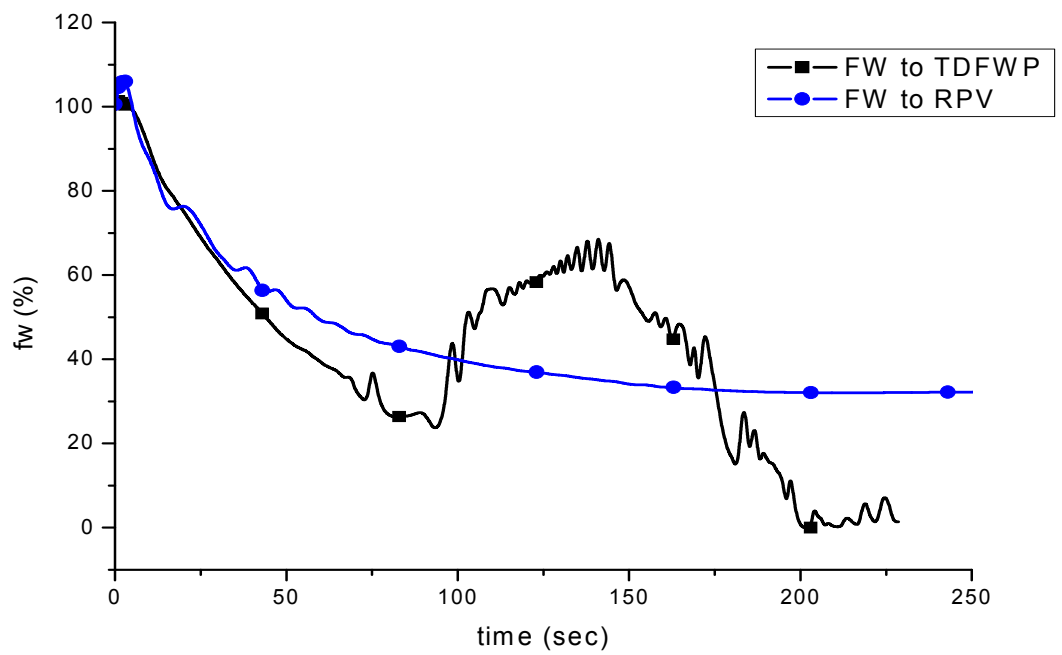


圖 5.2.15 RELAP5-RT 汽機跳脫後流進壓力槽之飼水量對於不同飼水輸入之比較

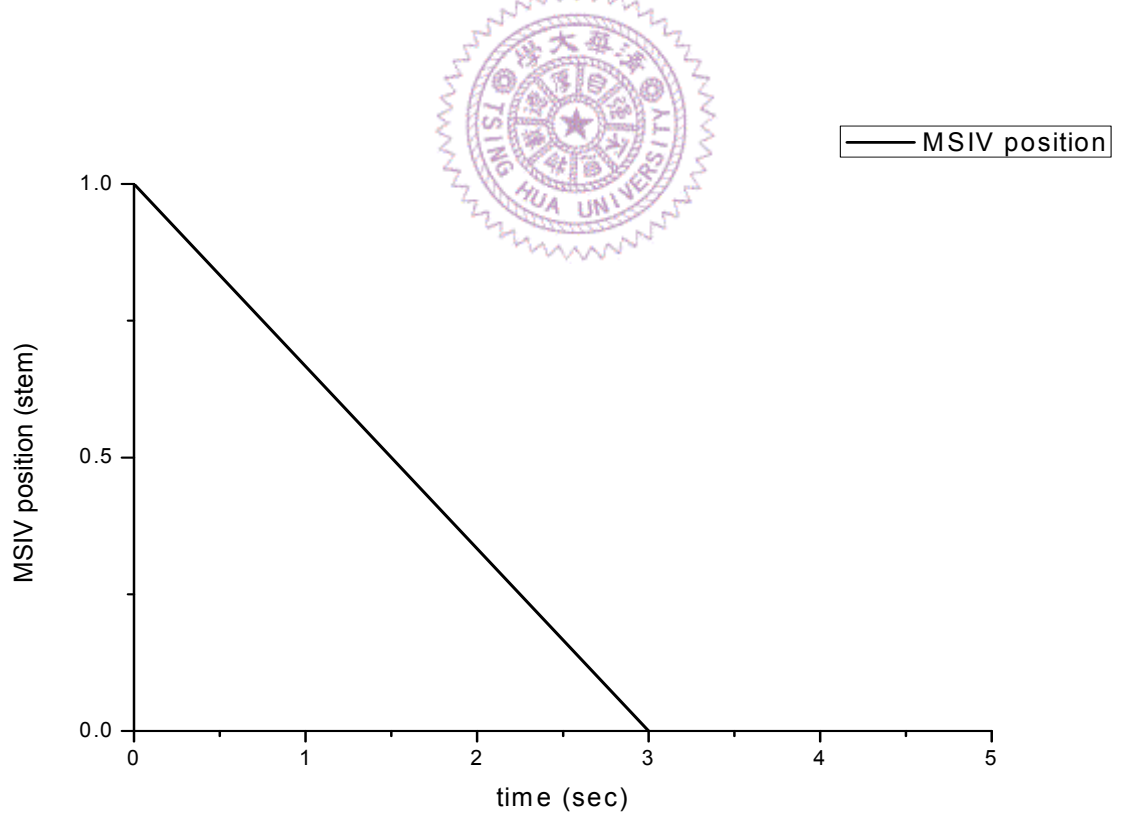


圖 5.3.1 MSIV 開度與時間曲線（反應器完全隔離）

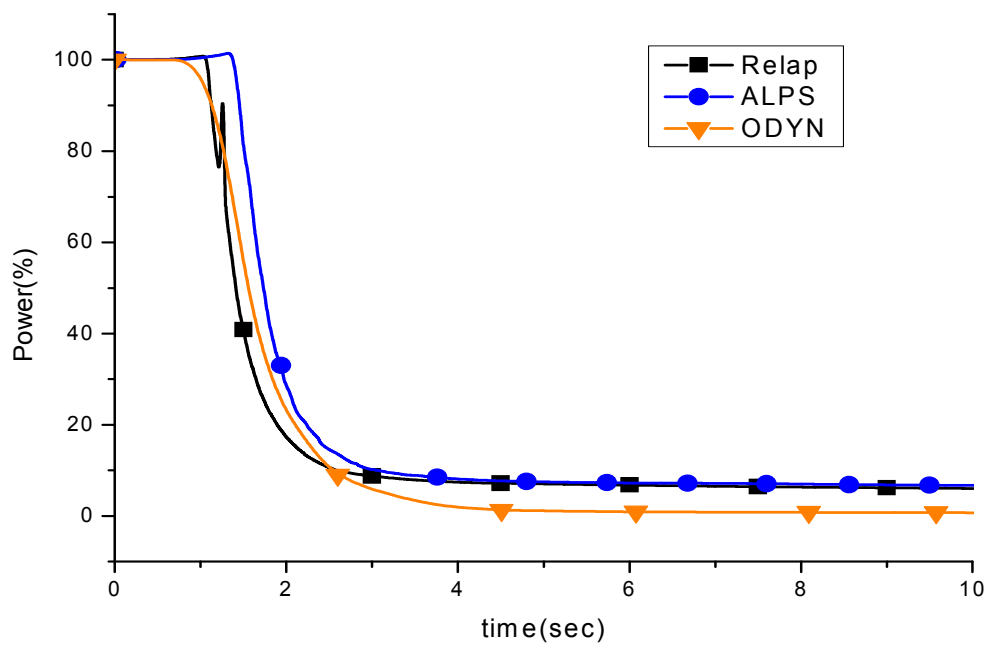


圖 5.3.2 爐心功率 (%) 變化 (反應器完全隔離)

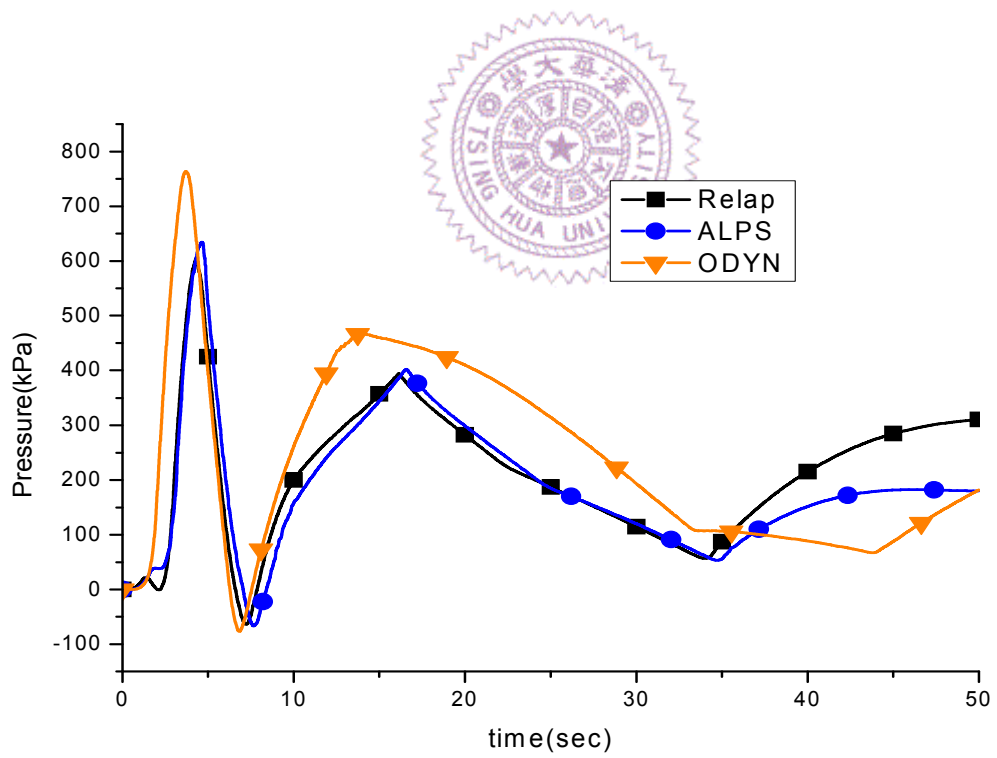


圖 5.3.3 壓力槽頂端壓力變化 (反應器完全隔離)

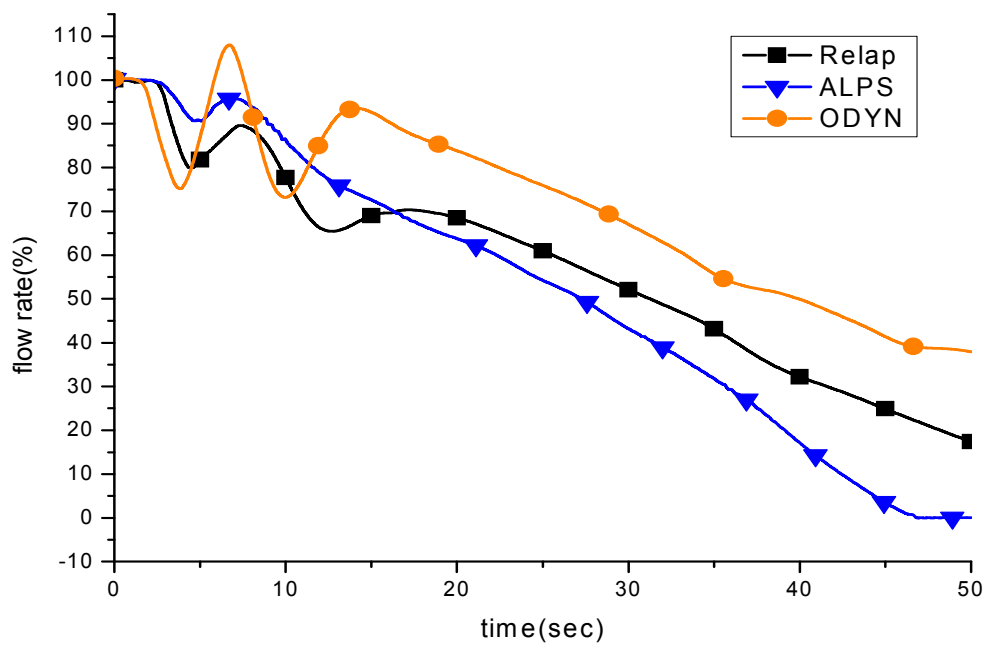


圖 5.3.4 飼水流量變化（反應器完全隔離）

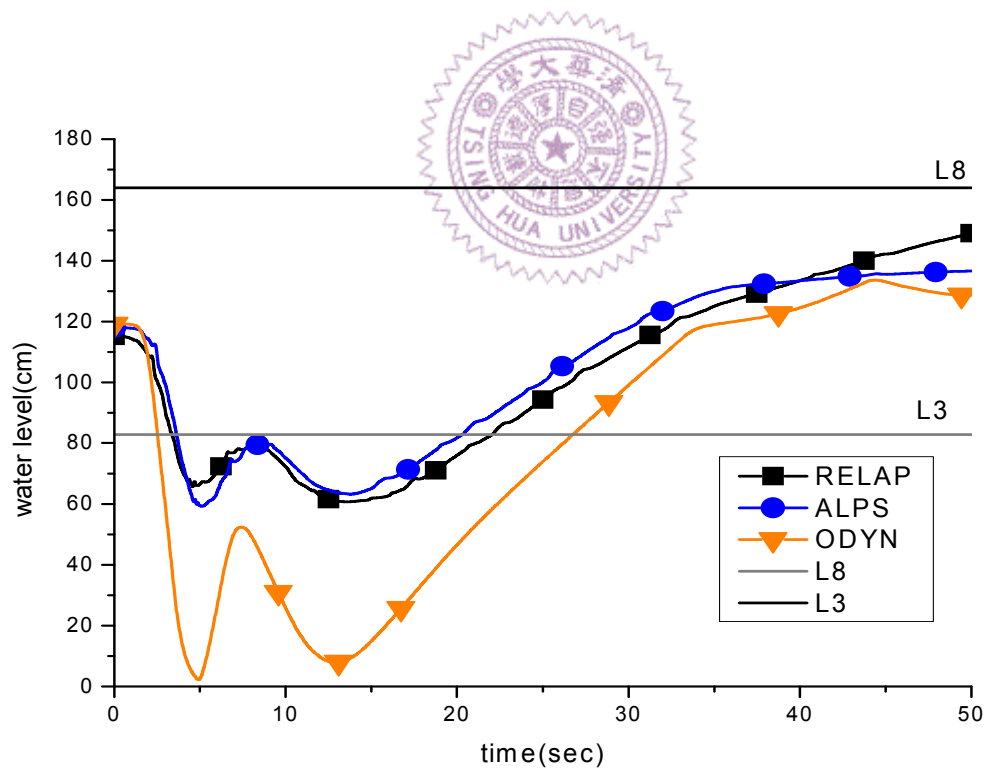


圖 5.3.5 爐心水位變化（反應器完全隔離）

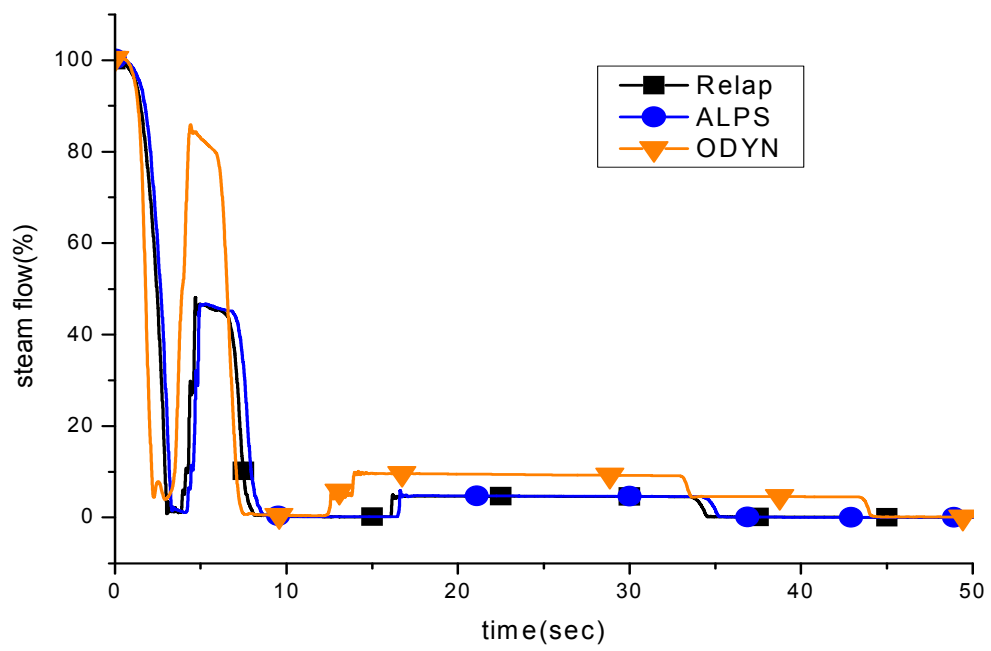


圖 5.3.6 壓力槽出口蒸汽變化（反應器完全隔離）

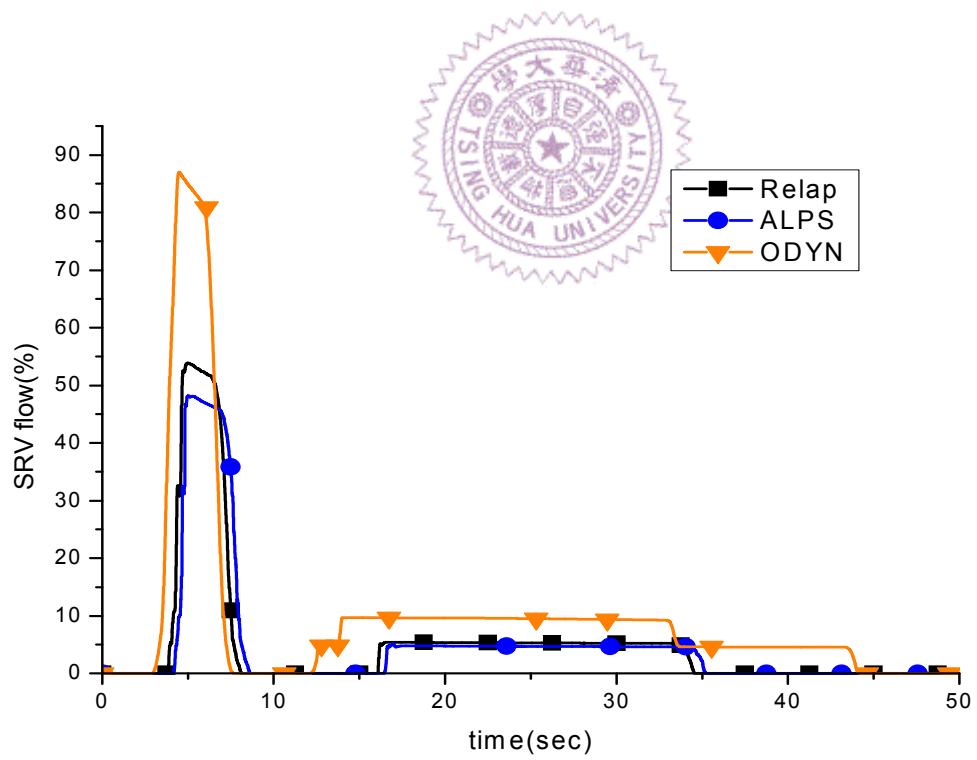


圖 5.3.7 釋壓閥流量變化（反應器完全隔離）

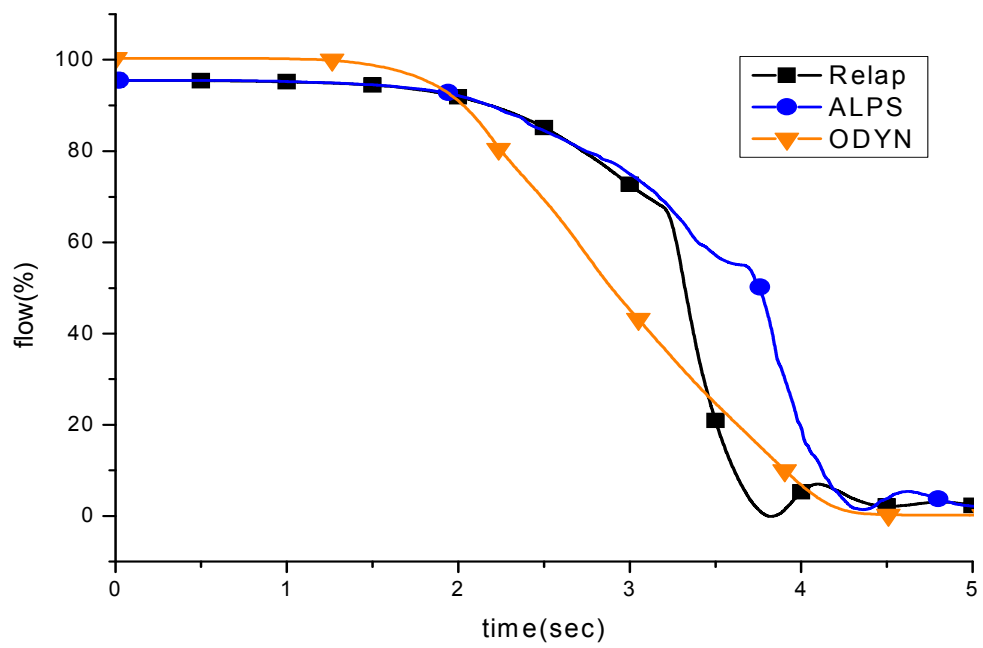


圖 5.3.8 高壓汽機流量變化 (反應器完全隔離)

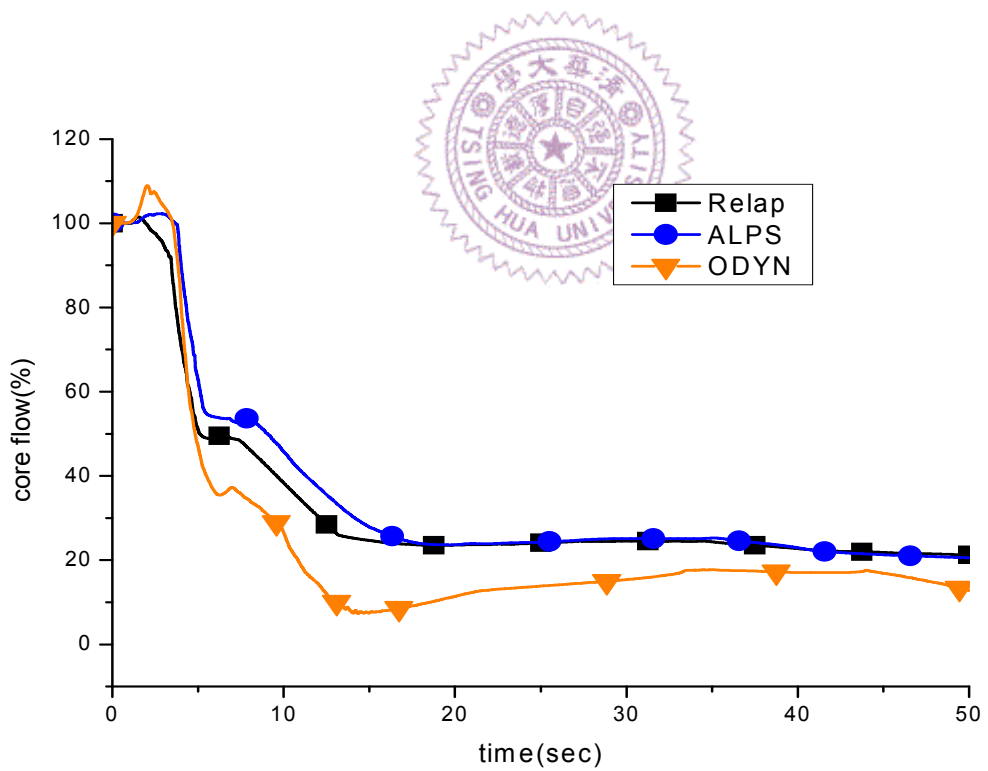


圖 5.3.9 爐心流量變化 (反應器完全隔離)

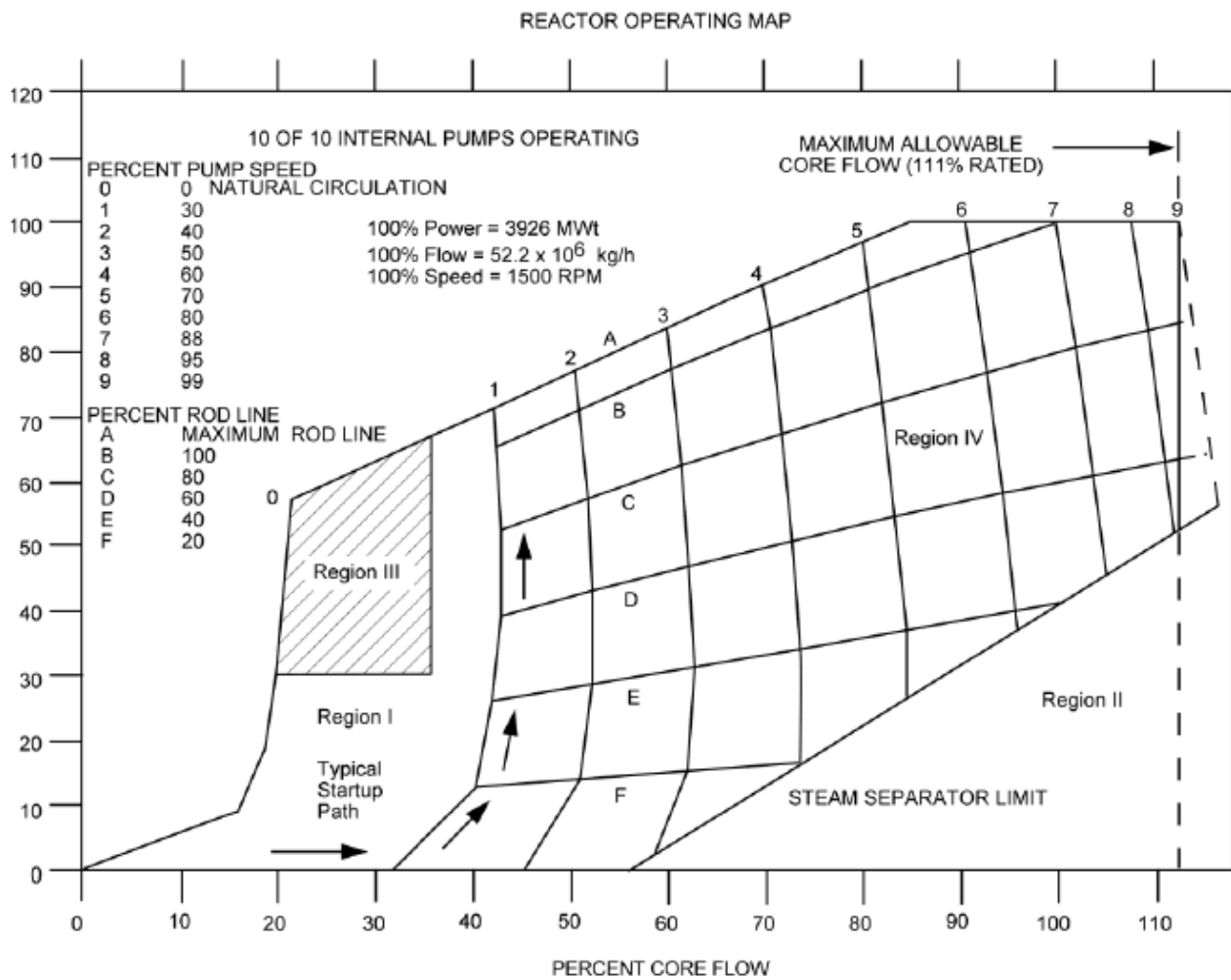


圖 5.3.10 power/flow operating map (10 RIPs)

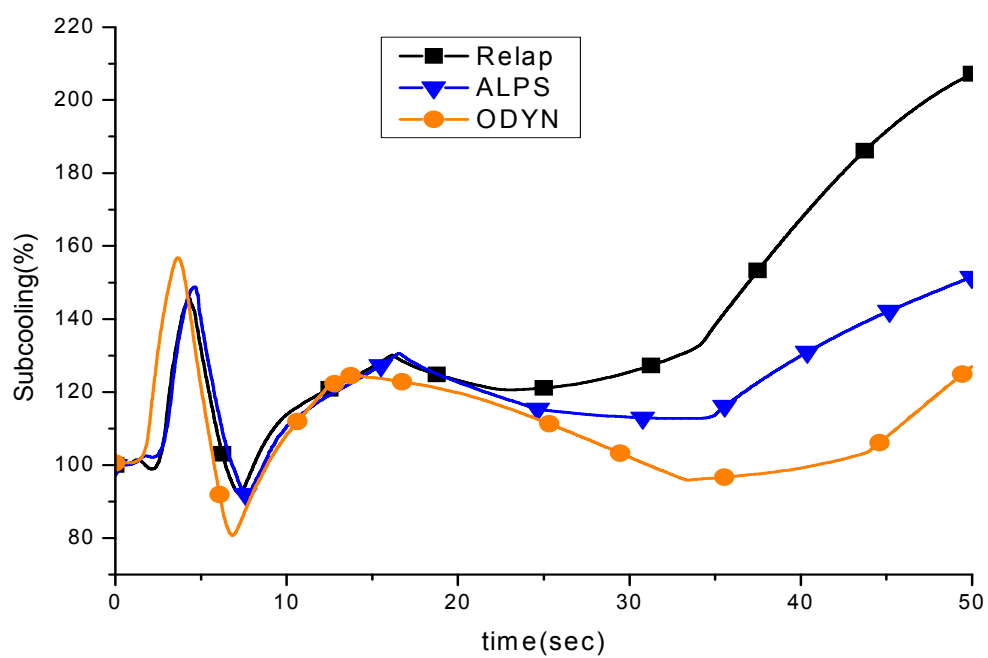


圖 5.3.11 爐心進口次冷態溫度變化（反應器完全隔離）

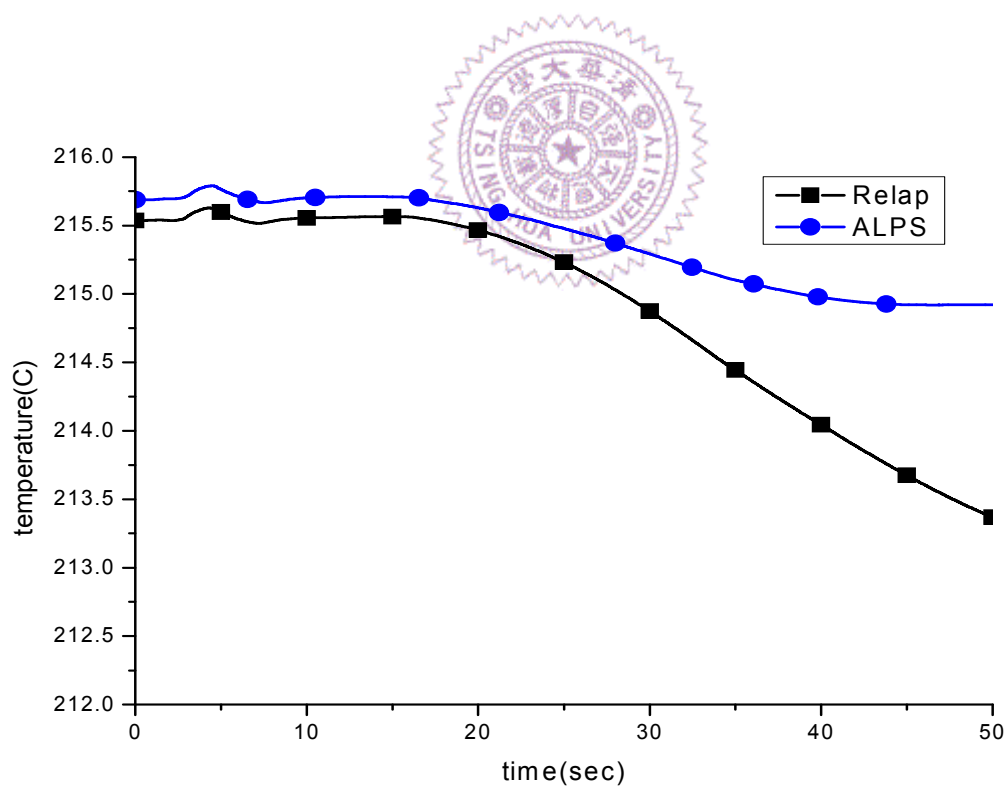


圖 5.3.12 進口飼水溫度變化（反應器完全隔離）

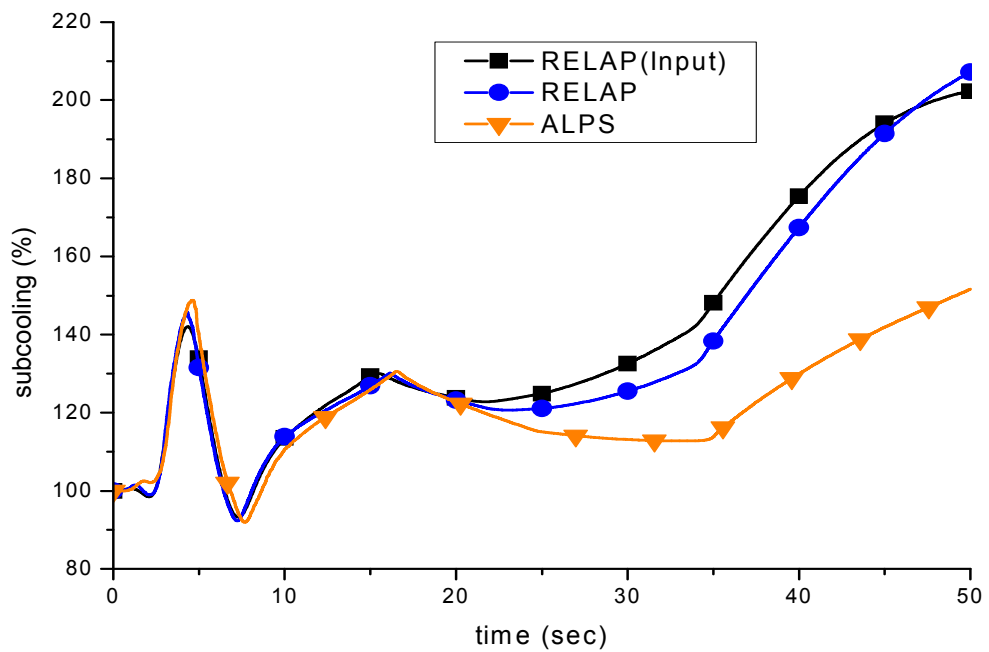


圖 5.3.13 爐心進口次冷態溫度變化對於飼水輸入值討論（反應器完全隔離）

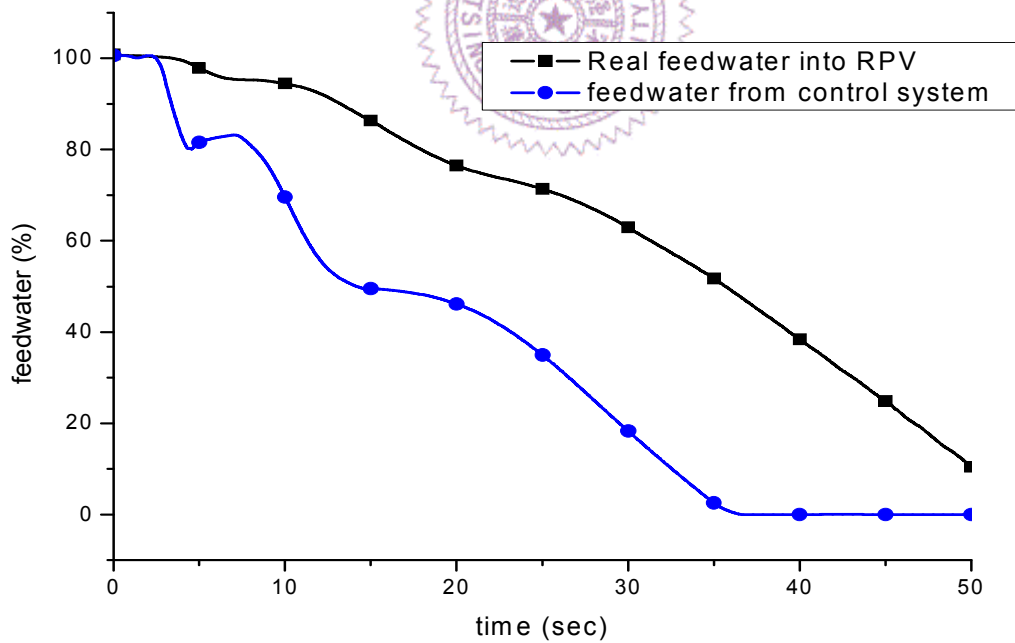


圖 5.3.14 RELAP5-RT 反應器完全隔離後飼水控制之飼水和流進壓力槽飼水之差距(飼水輸入蒸汽驅動飼水泵控制)

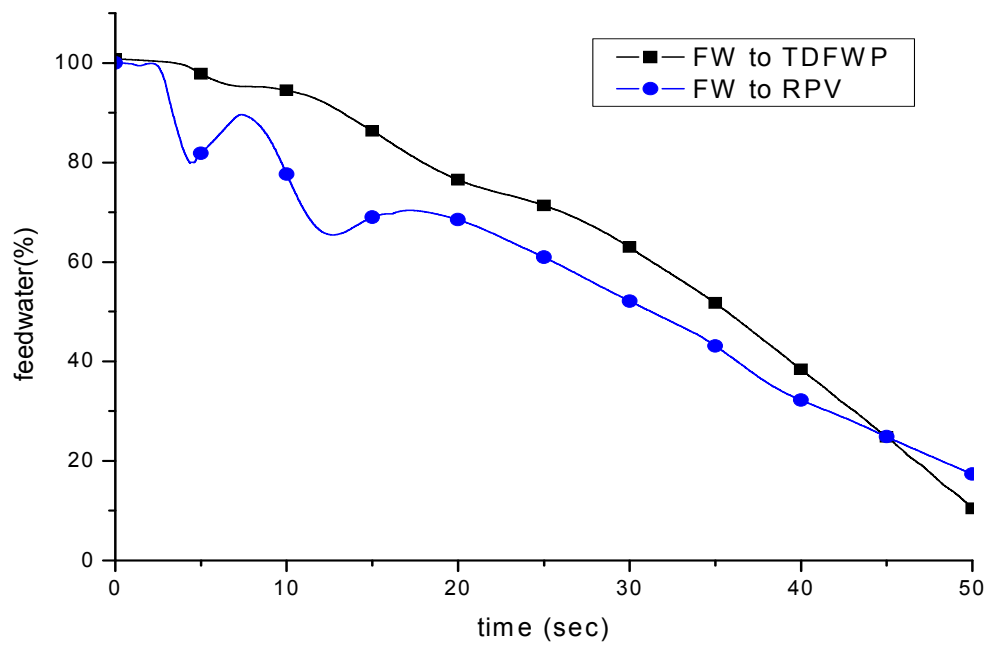


圖 5.3.15 RELAP5-RT 反應器完全隔離後流進壓力槽飼水對於不同飼水輸入之比較

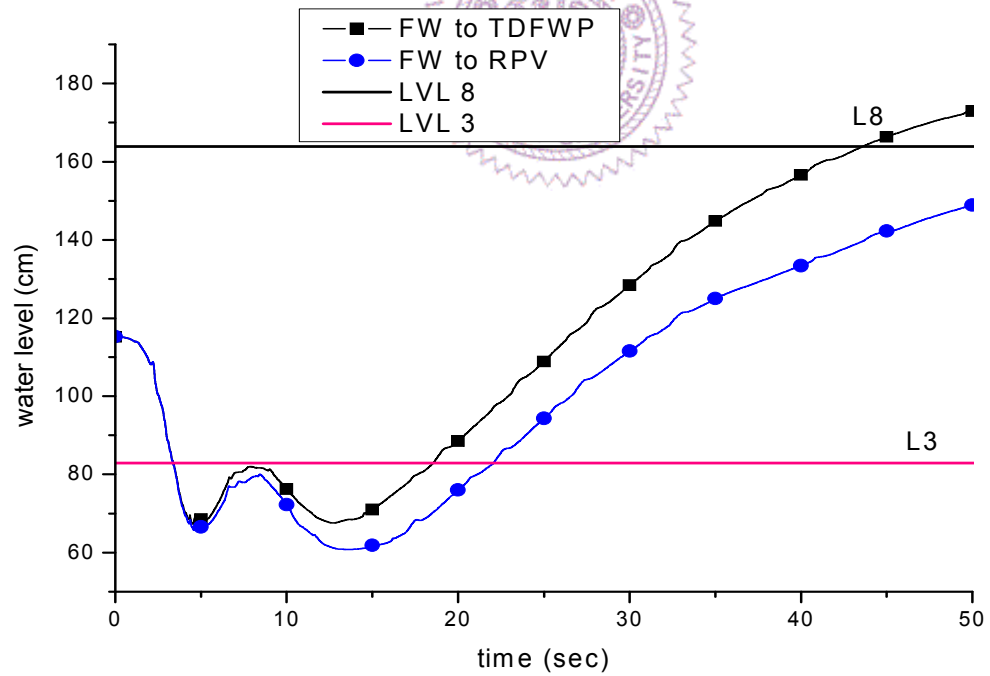


圖 5.3.16 RELAP5-RT 反應器完全隔離後爐心水位對於不同飼水輸入之比較

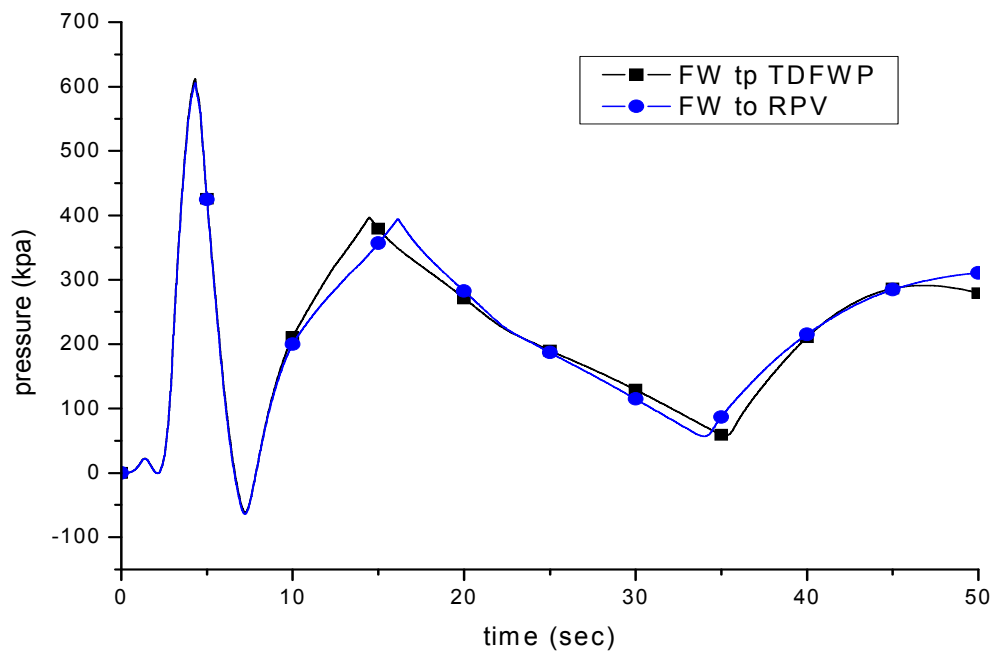


圖 5.3.17 RELAP5-RT 反應器完全隔離後壓力槽頂端壓力對於不同飼水輸入之比較

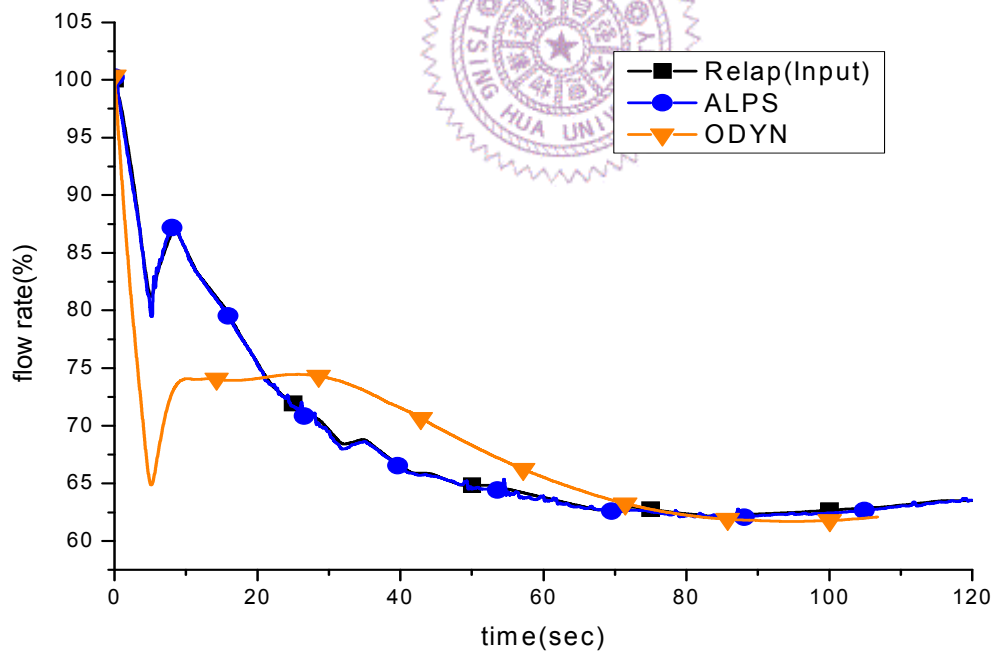


圖 5.4.1 飼水流量變化（一台飼水泵跳脫）

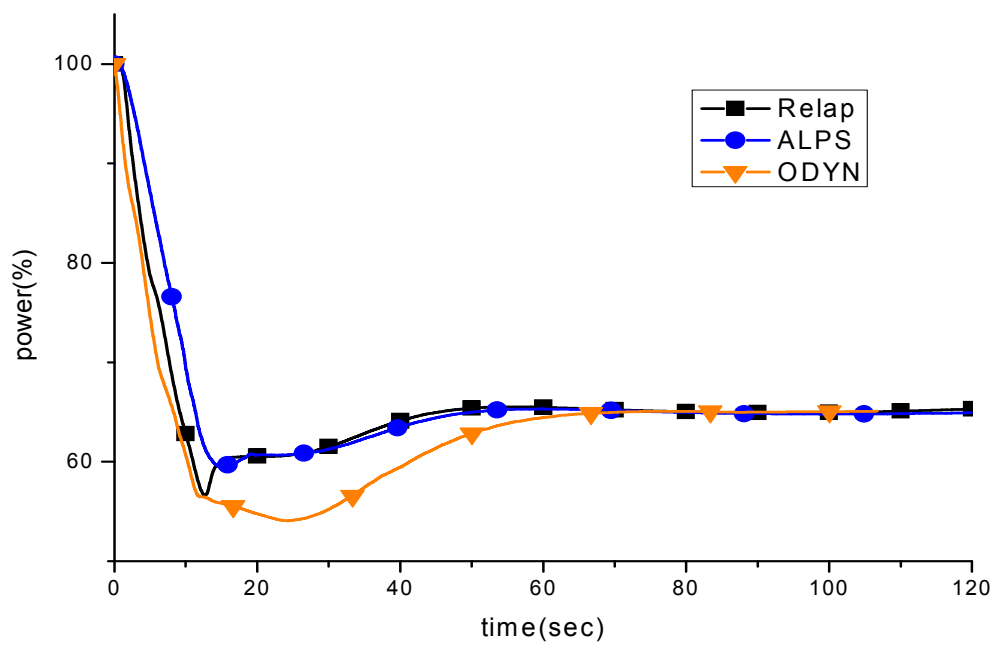


圖 5.4.2 反應器功率變化 (一台飼水泵跳脫)

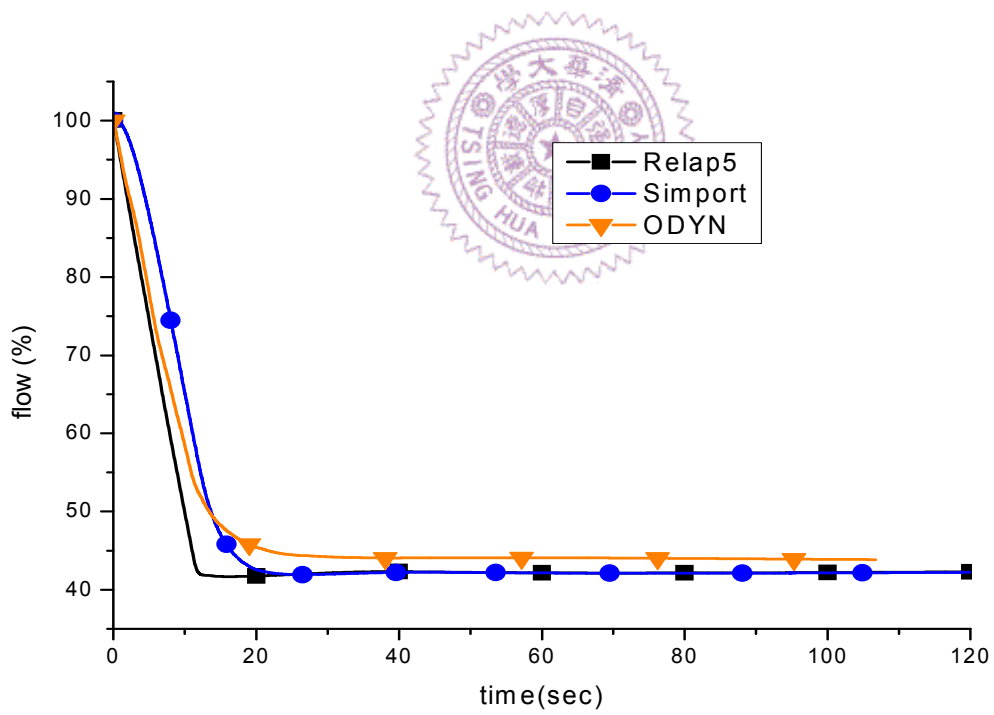


圖 5.4.3 爐心流量變化 (一台飼水泵跳脫)

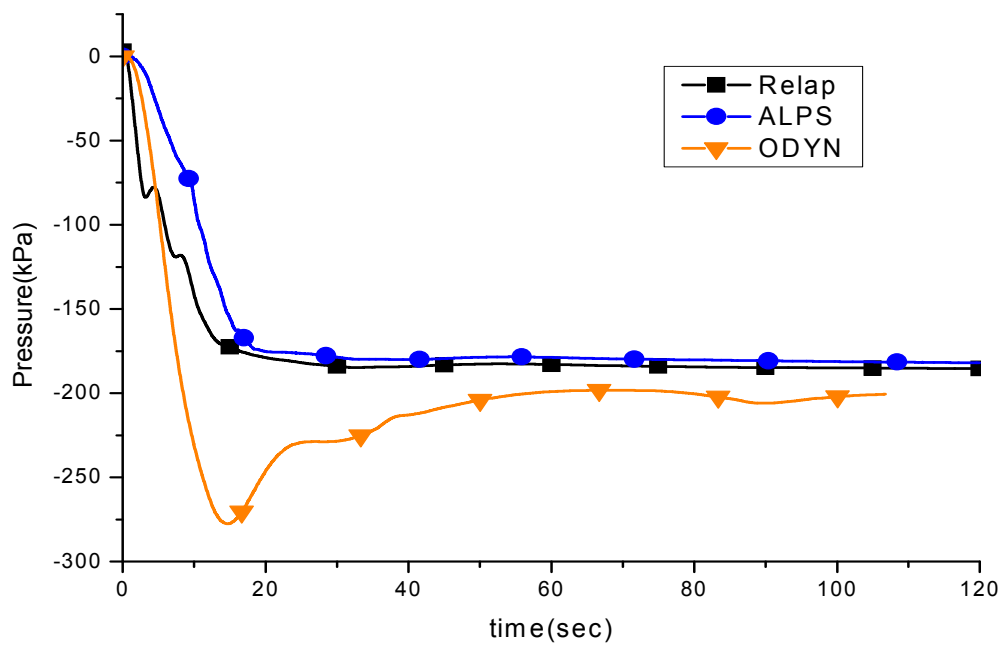


圖 5.4.4 壓力槽頂端壓力變化（一台飼水泵跳脫）

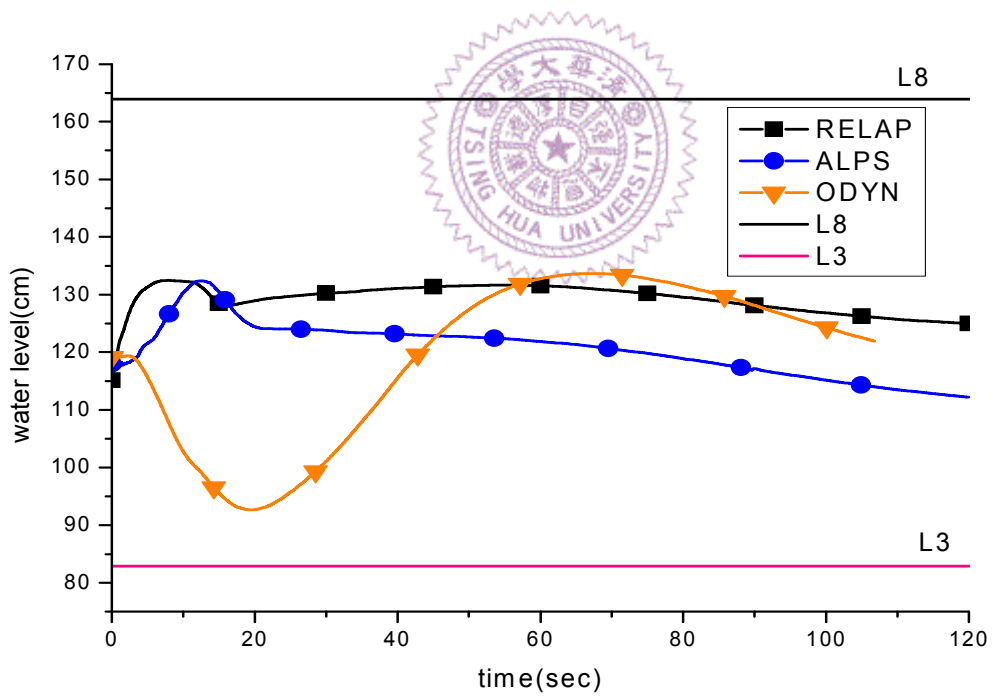


圖 5.4.5 爐心水位變化（一台飼水泵跳脫）

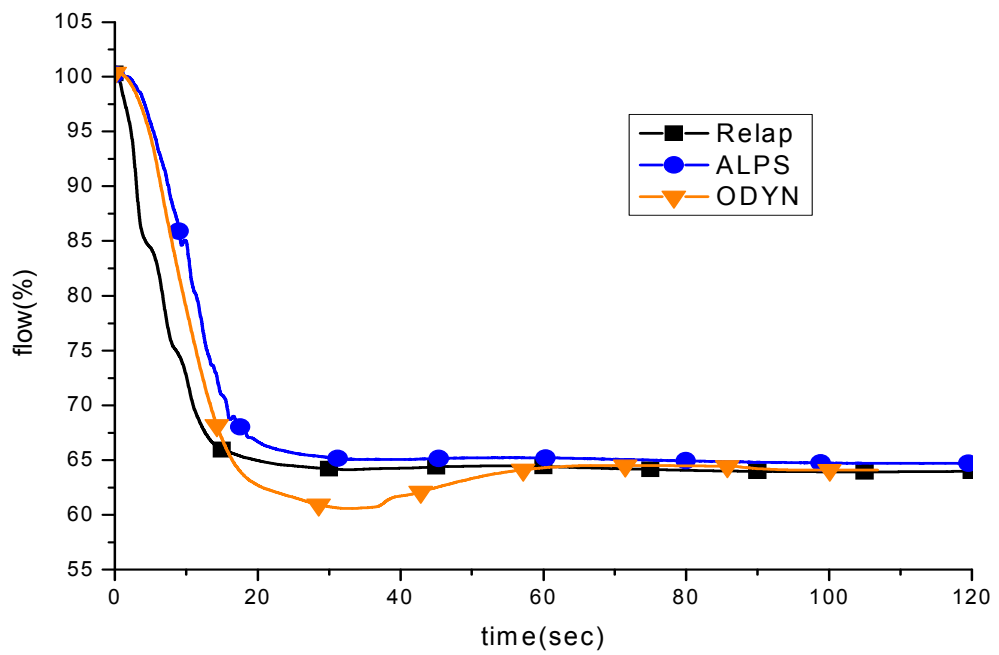


圖 5.4.6 壓力槽出口蒸汽流量（一台飼水泵跳脫）

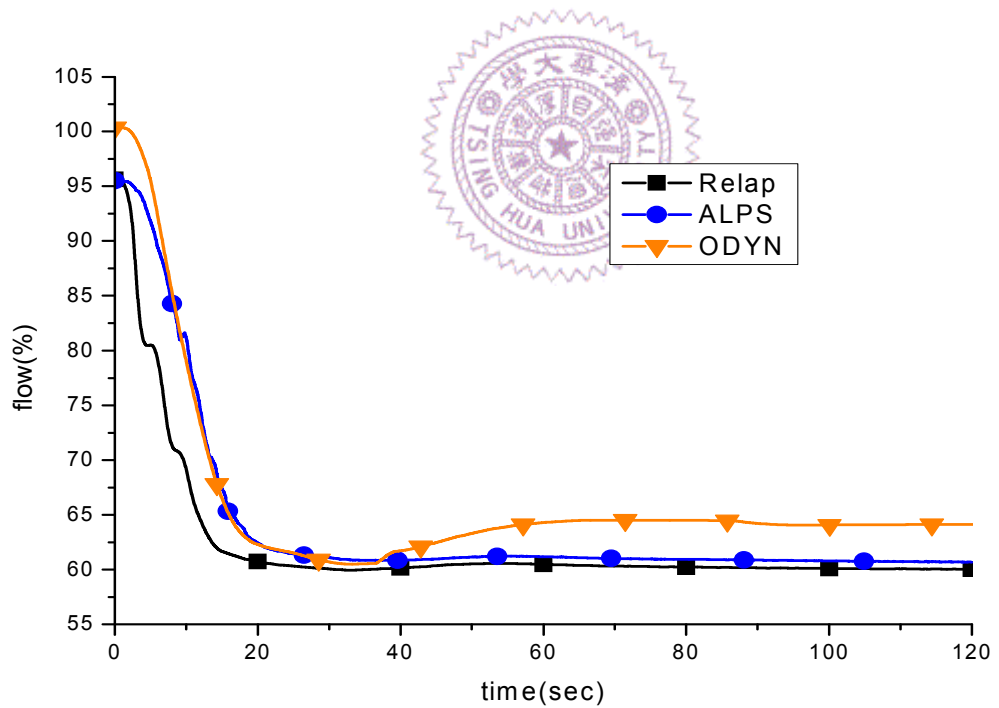


圖 5.4.7 高壓汽機蒸汽進口流量（一台飼水泵跳脫）

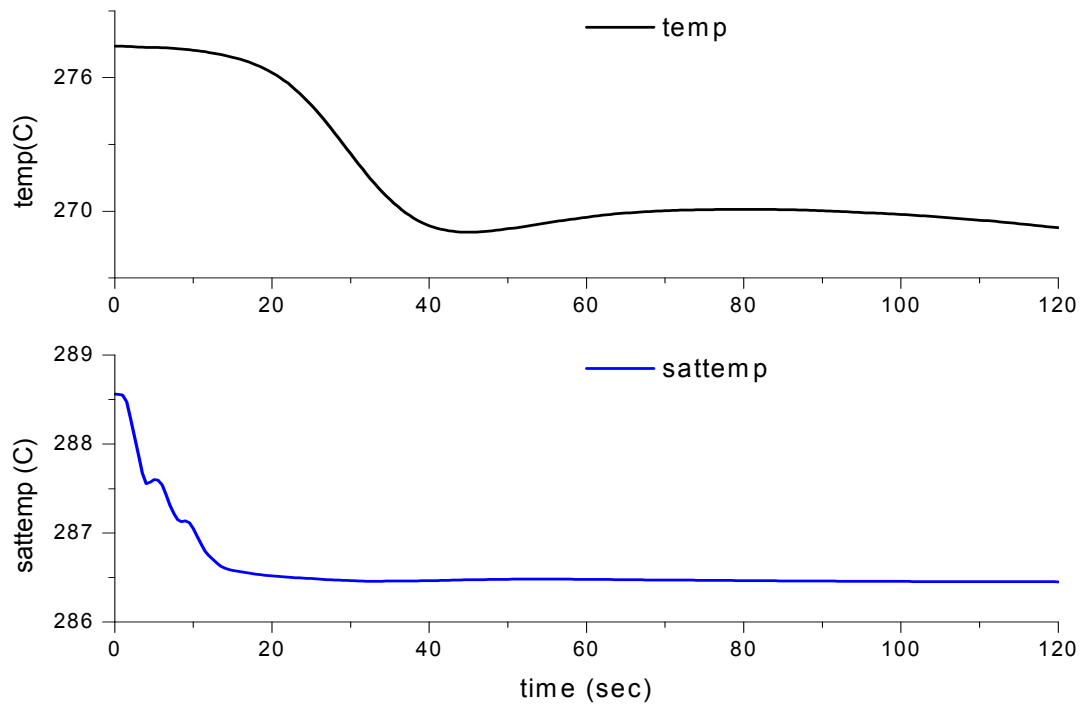


圖 5.4.8 爐心進口溫度和飽和態溫度比較（一台飼水泵跳脫）

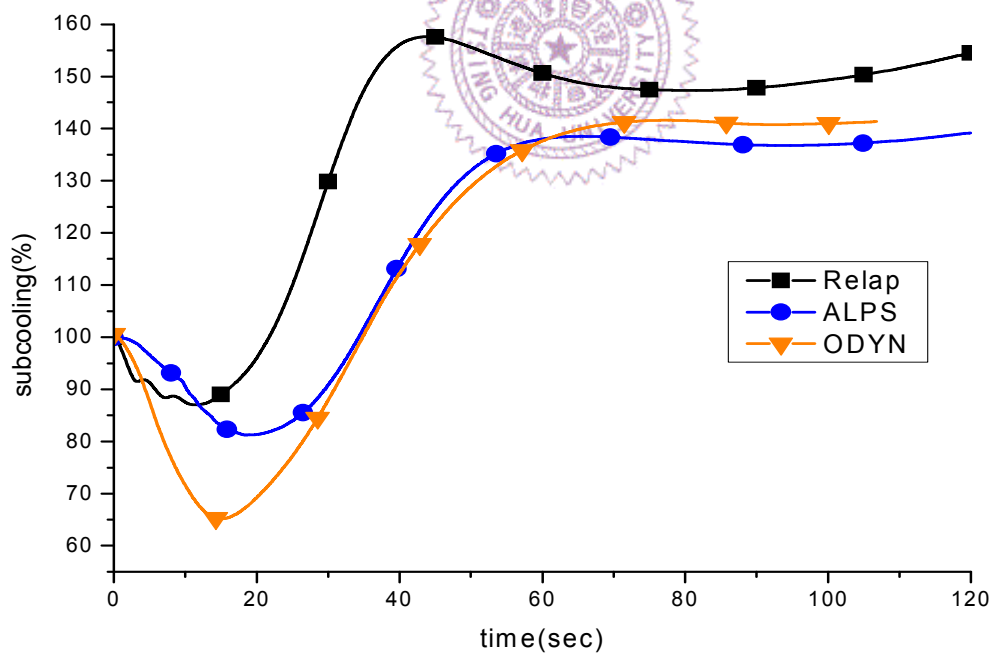


圖 5.4.9 爐心進口次冷態溫度變化（一台飼水泵跳脫）

第六章 結論與展望

本研究目的為建立龍門核電廠 RELAP5-RT 輸入檔，對於奇異公司龍門核電廠起爐測試報告書，選擇汽機跳脫、反應器完全隔離、一台飼水泵跳脫，三項暫態測試，和 RELAP5-RT 以及核能電廠系統動態模擬與分析實驗室的 ALPS 暫態測試進行比較分析。RELAP5-RT 輸入檔模式包括蒸汽供應系統和電廠平衡系統熱水流組件，使用一維爐心中子動能，並參考 ALPS 以及龍門核電廠雷傳輸入模式，建立起包含控制系統的龍門核電廠 RELAP5-RT 輸入檔。

本研究可以成功達成龍門核電廠 FSAR 報告的穩態需求，但飼水控制系統以及蒸汽旁通與壓力控制系統是參考龍門核電廠雷傳輸入檔建立，雷傳輸入檔僅模擬一條主蒸汽管路和不完整的蒸汽旁通閥控制，旁通閥在汽機跳脫訊號傳出後保持全開，無法穩定電廠，且雷傳輸入檔欠缺電廠平衡系統模擬，其飼水控制所決定的飼水流量透過接節直接流進壓力槽，此部份在第五章各小節已分開討論。為了在暫態中得到更真實的模擬數據，仍需透過核能電廠系統動態模擬與分析實驗室提供 ALPS 之飼水控制和蒸汽旁通與壓力控制，將其建立在龍門核電廠 RELAP5-RT 輸入檔，取代原先參考龍門核電廠雷傳輸入檔而建立的控制系統，再次進行各項暫態測試，重新和奇異公司龍門核電廠起爐測試報告書以及 ALPS 之暫態結果進行比較分析。

參考文獻

- 【1】 Yang, C.-Y., et al., “Development and application of a dual RELAP5-3D-based engineering simulator for ABWR”, Nucl. Eng. Des.,2009
- 【2】 林金足等，”龍門核電廠雷傳輸入模式設計檔案修訂一版”，行政院原子能委員會核能研究所，2003
- 【3】 Project Design Manual of’ Lungmen Project Fourth Nuclear Power Plant Units 1 and 2”， GE Nuclear Energy
- 【4】 Kellie Norton ，”TAIWAN POWER COMPANY LUNG MEN PROJECT FOURTH NUCLEAR POWER PLANT UNITS 1 AND 2, Startup Test Prediction and Transient Test Prediction ” ， GE Nuclear Energy
- 【5】 楊宗祐等，龍門核電廠起動測試暫態模擬與分析完成報告，台灣電力公司，2009
- 【6】 TRACE, The TRAC/RELAP Advanced Computational Engine
- 【7】 F.Rahn” RETRAN-3D Computer Code Manual Vol.3 ”，EPRI
- 【8】 ”MAAP 4.0 Modular Accident Analysis Program User’s Manual ” Fauske & Associates Inc.，1994
- 【9】 ” <http://www.microsimtech.com/pctran/> ”，Micro Simulation Technology
- 【10】 ” RELAP5/MOD3.3 Code Manual Vol. 1~ Vol.7 ”，NUREG/CR-5535/Rev1
- 【11】 台灣電力公司，” 龍門核電廠核能發電訓練教材”
- 【12】 ” Lungmen Power Plant Units 1 and 2 Final Safety Analysis Report”，GE Nuclear Energy