

國立清華大學

碩士論文

龍門電廠RELAP5-RT控制系統輸入模式
建立與暫態分析

Transient analysis of Lungmen Nuclear Power
Station using RELAP5-RT



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：9611508 李亮瑩 Liang-Ying Li

中華民國九十八年七月

摘要

本論文之目的為使用美國愛德華國家工程實驗室所發展的 RELAP5-RT 分析程式，建立我國第四座核能發電廠—龍門核能發電廠完整獨立的熱水流分析輸入模式。

本研究的主要工作包括，（1）將清華大學核電廠系統動態模擬分析實驗室提供的兩個 RELAP5-RT 熱水流輸入模式合併，成為龍門電廠全廠的 RELAP5-RT 熱水流輸入模式；（2）參照工程模擬器上與電廠設計相同的控制系統，建立龍門電廠的控制系統。本文著重於再循環流量控制系統、棒資訊及控制系統和反應爐保護系統的建立及驗證。其餘兩個重要的控制系統（即飼水控制系統及蒸汽旁通與壓力控制系統）參考 RETRAN 建立，不在本文討論範圍。

在輸入檔建立完成，經過穩態測試，確認控制系統能將模擬的電廠帶至穩態之後，模擬分析<一台爐內泵跳脫>及<三台爐內泵跳脫>兩個龍門電廠啟動測試暫態，並與奇異公司的啟動測試分析報告（STAR）和 ALPS（Advanced Lungmen Plant Simulator）模擬的結果做比較。分析比較顯示本文所建立之龍門電廠控制系統的反應及趨勢均在預期範圍，且模擬結果，如功率變化、爐心流量、蒸氣流量等，與 STAR 和 ALPS 的結果均非常相似。唯飼水控制系統和壓力控制系統控制的相關參數，有比較顯著的差距，未來研究若能建立較接近電廠原始設計的控制系統，應能使此核能電廠的輸入模式更加完善。

Abstract

The purpose of this thesis is using RELAP5-RT, a thermohydraulic system analysis program developed by INEL, to built an independent thermohydraulic analysis model for the simulation of power test transients of Lungmen Nuclear Power Station of Taiwan Power Company. The plant employs the Advanced Boiling Water Reactor (ABWR) designed by General Electric. The focuses of this research are the building of the control logics of the recirculation flow control system (RFCS), reactor protection system (RPS), and rod control & information system (RCIS). The control logics of the other two major control systems, feedwater control system (FWCS), and steam bypass and pressure control system (SBPC) are developed in a separated thesis work and not included in this report.

The two separate RELAP5-RT thermohydraulic systems input decks, which model the reactor coolant system and balance of the plant of Lungmen Nuclear Power Plant, are combined into an integrated input deck. These input decks are parts of the Advanced Lungmen Plant Simulator (ALPS) developed by the Nuclear Power Plant Dynamic Simulation and Analysis Lab. of National Tsing Hua University. Then, the control logics of the Lungmen Nuclear Power Station's control system are incorporated into the integrated deck. The control logics are also adopted from ALPS.

The input deck developed is used to simulate two power test transients of the plant, "trip of one reactor internal pump" and "three reactor internal pumps trip". The results are compared with the results of the GE's STAR and the ALPS's simulation. The comparisons show that the RELAP5-RT input deck of Lungmen Nuclear Power Station built in the present study can mimic.

致謝詞

時光匆匆又來到畢業的季節，能夠順利的完成這本論文，需要感謝的人真是太多太多。首先，要感謝我的指導教授李敏博士。從大學時代一直到現在，老師總是很有耐心的指導與鼓勵，讓我不論是在知識的累積，抑或在做人處事上，均有長足的進步。接著要感謝清華大學核能電廠系統動態模擬分析實驗室提供各種資料與協助，尤其必須感謝梁國興博士、楊宗祐學長及蔡源興學長，總是熱心的為我們解答各種問題，並提供許多寶貴的意見。還要感謝時常撥空指導的白寶實教授，以及系上老師們的教誨，在此獻上由衷的感謝。

再來要謝謝實驗室的同伴、學長姐和學弟們，沒有你們營造出歡樂的實驗室氣氛，這段寫論文的日子想必會相當難熬。另外，特別感謝我的夥伴許耕獻同學，沒有彼此的討論，怎能激盪出這兩本論文出來？這些共同努力的日子，想必會是我們一生的回憶。

此外，教會的同靈，還有許多的好朋友們。雖然你們總是弄不清我到底是學什麼，在做什麼研究，但仍然用你們的行動支持我，在我壓力大的時候給我一個笑臉、一個擁抱，讓我感受到許多溫暖。感謝采儒大姊，總在我卡關的時候關心我，並且傳授各種招式，讓我可以順利破關。感謝郭真不厭其煩的為我這個中文不好的人順稿，相信經過這本論文之後，我的標點符號會用的好些。謝謝大家！

最後，要感謝我的家人。奶奶、爸爸、媽媽、弟弟，謝謝你們全力的支持我完成研究所的學業，謝謝你們總是在我身後，做我的避風港。表哥、表姊，有你們的經驗分享，我的論文才能這麼順利的完成。趁這個機會要說一句：「我愛你們！」

陳之藩說過：「要感謝的人太多了，就感謝天吧！」，所以在最後的最後，我要感謝神，讓我遇見這麼多天使在我身旁幫助我。學生時代就要結束，接著要進入下一個階段的人生了，不管未來如何，相信神仍然會保守我未來的路，直到最後。

李亮瑩 於清華大學

2009.08

目錄

摘要	i
Abstract	ii
致謝詞	iii
目錄	iv
表目錄	vi
圖目錄	vii
第一章 緒論	1
1.1 研究目的與動機	1
1.2 研究範圍	1
1.3 論文架構	1
第二章 龍門電廠介紹	3
2.1 龍門廠簡介	3
2.2 控制系統簡介	3
2.2.1 再循環流量控制系統	3
2.2.2 反應爐保護系統	5
2.2.3 棒控制與資訊系統	6
第三章 RELAP5 簡介	13
3.1 RELAP5 分析程式簡介	13
第四章 龍門電廠 RELAP5-RT 控制系統輸入模式及初始狀態	16
4.1 前言	16
4.2 反應爐壓力槽系統	16
4.3 電廠平衡系統	17
4.3.1 主蒸汽系統	17
4.3.2 飼水系統	18

4.4 控制系統	18
4.4.1 再循環流量控制系統	19
4.4.2 反應爐保護系統	19
4.4.3 棒控制與資訊系統	20
4.5 控制系統獨立測試	20
4.5.1 再循環流量控制系統獨立測試	20
4.5.2 反應爐保護系統獨立測試	21
4.5.3 棒控制與資訊系統獨立測試	21
4.6 全廠系統整合	21
第五章 龍門電廠暫態事故分析	41
5.1 前言	41
5.2 一台爐內泵跳脫暫態	41
5.2.1 一台爐內泵跳脫暫態測試簡述	41
5.2.2 一台爐內泵跳脫暫態結果比較	42
5.2.3 飼水系統設定方法比較	44
5.3 三台爐內泵跳脫暫態	45
5.3.1 三台爐內泵跳脫暫態測試簡述	45
5.3.2 三台爐內泵跳脫暫態結果比較	45
5.4 暫態比較結論	47
第六章 結論與展望	62
參考文獻	63
附錄 A 再循環流量控制系統獨立測試	64
附錄 B 反應器保護系統獨立測試	82
附錄 C 棒控制與資訊系統獨立測試	89

表目錄

表 4-1 十九組控制棒在不同狀態之下應該達到的棒位	39
表 4-2 穩態初始條件設置	40
表 4-3 重置後初始條件列表	40
表 A-1 再循環流量控制系統獨立測試表	64
表 B-1 反應爐保護系統獨立測試表	82
表 C-1 棒控制與資訊系統獨立測試表	89



圖目錄

圖 2.1 進步型沸水式反應器示意圖	9
圖 2.2 進步型沸水式反應器爐內再循環水泵	10
圖 2.3 微調控制棒驅動系統	11
圖 2.4 液壓控制單元	12
圖 3.1 RELAP 系列程式發展歷程	15
圖 4.1 反應爐壓力槽系統模式	23
圖 4.2 電廠平衡系統系統模式示意圖	24
圖 4.3 主蒸汽系統的模擬節點圖	25
圖 4.4 高壓汽機細部模擬圖	26
圖 4.5 低壓汽機細部模擬圖	26
圖 4.6 飼水系統的模擬節點圖	27
圖 4.7 再循環流量控制系統控制圖(1)	28
圖 4.8 再循環流量控制系統控制圖(2)	29
圖 4.9 再循環流量控制系統控制圖(3)	30
圖 4.10 再循環流量控制系統控制圖(4)	31
圖 4.11 再循環流量控制系統控制圖(5)	32
圖 4.12 反應爐保護系統控制圖(1)	33
圖 4.13 反應爐保護系統控制圖(2)	34
圖 4.14 反應爐保護系統控制圖(3)	35
圖 4.15 十九組控制棒的分佈狀況示意圖	36
圖 4.16 棒控制與資訊系統系統控制圖	37
圖 4.17 Scram 插棒示意圖	38
圖 4.18 邊界設定示意圖	38
圖 5.1 一台爐內泵跳脫功率（中子通率）比較圖	48

圖 5.2 一台爐內泵跳脫爐心進口流量比較圖	48
圖 5.3 一台爐內泵跳脫降速曲線比較圖	49
圖 5.4 一台爐內泵跳脫爐心進口過熱度比較圖	49
圖 5.5 一台爐內泵跳脫飼水溫度比較圖	50
圖 5.6 一台爐內泵跳脫水位比較圖	50
圖 5.7 一台爐內泵跳脫壓力變化比較圖	51
圖 5.8 一台爐內泵跳脫調速閥開關比較圖	51
圖 5.9 一台爐內泵跳脫反應爐出口蒸氣流量比較圖	52
圖 5.10 一台爐內泵跳脫汽機入口蒸氣流量比較圖	52
圖 5.11 一台爐內泵跳脫飼水流量比較圖	53
圖 5.12 飼水系統計算出的數值直接作為流量邊界	53
圖 5.13 一台爐內泵跳脫事件不同飼水設定之飼水流量比較	54
圖 5.14 一台爐內泵跳脫事件不同飼水設定與 ALPS 爐心次冷度結果比較	54
圖 5.15 一台爐內泵跳脫事件不同飼水設定與 ALPS 爐心水位比較	55
圖 5.16 一台爐內泵跳脫事件不同飼水設定之壓降比較	55
圖 5.17 三台爐內泵跳脫功率（中子通率）比較圖	56
圖 5.18 三台爐內泵跳脫爐心進口流量比較圖	56
圖 5.19 三台爐內泵跳脫飼水流量比較圖	57
圖 5.20 三台爐內泵跳脫爐心進口過熱度比較圖	57
圖 5.21 三台爐內泵跳脫飼水溫度比較圖	58
圖 5.22 三台爐內泵跳脫水位比較圖	58
圖 5.23 三台爐內泵跳脫壓力變化比較圖	59
圖 5.24 三台爐內泵跳脫高壓汽機調速閥開關比較圖	59
圖 5.25 三台爐內泵跳脫反應爐出口蒸氣流量比較圖	60
圖 5.26 三台爐內泵跳脫汽機入口蒸氣流量比較圖	60
圖 5.27 三台爐內泵跳脫飼水流量比較圖	61

圖 A.1 再循環流量控制系統獨立測試案例(1).....	66
圖 A.2 再循環流量控制系統獨立測試案例(2).....	66
圖 A.3 再循環流量控制系統獨立測試案例(3).....	67
圖 A.4 再循環流量控制系統獨立測試案例(4).....	67
圖 A.5 再循環流量控制系統獨立測試案例(5).....	68
圖 A.6 再循環流量控制系統獨立測試案例(6).....	68
圖 A.7 再循環流量控制系統獨立測試案例(7).....	69
圖 A.8 再循環流量控制系統獨立測試案例(8).....	69
圖 A.9 再循環流量控制系統獨立測試案例(9).....	70
圖 A.10 再循環流量控制系統獨立測試案例(10).....	70
圖 A.11 再循環流量控制系統獨立測試案例(11).....	71
圖 A.12 再循環流量控制系統獨立測試案例(12).....	71
圖 A.13 再循環流量控制系統獨立測試案例(13).....	72
圖 A.14 再循環流量控制系統獨立測試案例(14).....	72
圖 A.15 再循環流量控制系統獨立測試案例(15).....	73
圖 A.16 再循環流量控制系統獨立測試案例(16).....	73
圖 A.17 再循環流量控制系統獨立測試案例(17).....	74
圖 A.18 再循環流量控制系統獨立測試案例(18).....	74
圖 A.19 再循環流量控制系統獨立測試案例(19).....	75
圖 A.20 再循環流量控制系統獨立測試案例(20).....	75
圖 A.21 再循環流量控制系統獨立測試案例(21).....	76
圖 A.22 再循環流量控制系統獨立測試案例(22).....	76
圖 A.23 再循環流量控制系統獨立測試案例(23).....	77
圖 A.24 再循環流量控制系統獨立測試案例(24).....	77
圖 A.25 再循環流量控制系統獨立測試案例(25).....	78
圖 A.26 再循環流量控制系統獨立測試案例(26).....	78

圖 A.27 再循環流量控制系統獨立測試案例(27).....	79
圖 A.28 再循環流量控制系統獨立測試案例(28).....	79
圖 A.29 再循環流量控制系統獨立測試案例(29).....	80
圖 A.30 再循環流量控制系統獨立測試案例(30).....	80
圖 A.31 再循環流量控制系統獨立測試案例(31).....	81
圖 A.32 再循環流量控制系統獨立測試案例(32).....	81
圖 B.1 反應爐保護系統獨立測試案例(1).....	83
圖 B.2 反應爐保護系統獨立測試案例(2).....	83
圖 B.3 反應爐保護系統獨立測試案例(3).....	84
圖 B.4 反應爐保護系統獨立測試案例(4).....	84
圖 B.5 反應爐保護系統獨立測試案例(5).....	85
圖 B.6 反應爐保護系統獨立測試案例(6).....	85
圖 B.7 反應爐保護系統獨立測試案例(7).....	86
圖 B.8 反應爐保護系統獨立測試案例(8).....	86
圖 B.9 反應爐保護系統獨立測試案例(9).....	87
圖 B.10 反應爐保護系統獨立測試案例(10).....	87
圖 B.11 反應爐保護系統獨立測試案例(11).....	88
圖 C.1 停機控制棒插棒行為示意圖.....	90
圖 C.2 棒控制與資訊系統獨立測試案例(1).....	90
圖 C.3 棒控制與資訊系統獨立測試案例(2).....	91
圖 C.4 棒控制與資訊系統獨立測試案例(3).....	91
圖 C.5 棒控制與資訊系統獨立測試案例(4).....	92

第一章 緒論

1.1 研究目的與動機

我國第四座核能發電廠經過二十多年的風風雨雨，終於將在民國 100 年開始功率測試。在進行此工作之前，必須先利用模擬工具，進行功率測試的各項分析，以驗證反應爐的各項設計之能力。為提供台灣電力公司一套完整獨立的分析工具，本研究採用美國愛德華國家工程實驗室（INEL）發展之 RELAP5-RT 程式，以現有龍門電廠熱水流分析輸入模式為基礎，建立龍門電廠 RELAP5-RT 控制系統輸入檔。研究完成後一套完整獨立的暫態分析工具，以支援核電廠的功率測試，甚至進行商業運轉後各項可能暫態之分析。

1.2 研究範圍

本研究主要之工作，為利用 RELAP5-RT 程式，對龍門核電廠的啟動測試項目進行分析，並與龍門核電廠啟動測試報告（Startup Transient Analysis Report, STAR）以及 ALPS (Advanced Lungmen Plant Simulator)之結果比較，以驗證龍門電廠 RELAP5-RT 控制系統的邏輯正確性。本研究的重要工作，大致可歸納為下列幾項：

1. 以 ALPS 的邏輯圖為基礎，建立龍門電廠再循環流量控制系統、反應爐保護系統及棒控制與資訊系統之控制輸入檔；
2. 建立龍門電廠 RELAP5-RT 程式穩態並紀錄期初始狀況數據；
3. 以 RELAP5-RT 分析在 100%爐心功率及 100%爐心流量運轉下，一台爐內泵跳脫以及三台爐內泵跳脫之暫態，並分別與核四啟動測試分析報告及 ALPS 分析結果做比較，以驗證控制系統邏輯之正確性。

1.3 論文架構

本論文共分六章，第一章介紹研究之動機、目的及範圍。第二章簡介龍門電廠整體狀況以及與本研究相關之系統。第三章介紹 RELAP5 程式，包含程式緣起、程式架構以

及使用能力，並且簡述 RELAP5-RT 之特色。第四章詳細敘述所使用之龍門廠 RELAP5-RT 輸入模式以及其控制系統的建立與驗證。第五章使用 RELAP5-RT 分析所選定暫態，並與啟動測試分析報告及 ALPS 之結果做詳細的比較討論。第六章綜合本研究之結果做成結論，並提出日後可能的發展。



第二章 龍門電廠介紹

2.1 龍門廠簡介^[1]

台灣電力公司龍門核能發電廠採用進步型沸水式反應器（Advanced Boiling Water Reactor, ABWR），圖 2.1^[2] 為其示意圖。廠址位於台灣東北角台北縣貢寮鄉，佔地約為 480 公頃。裝置兩部機組，反應爐功率各 3926 百萬瓦，汽機容量各為 1,350 百萬瓦。建造完成後，將成為台灣電力供應系統中，裝置容量最大的發電機組。

龍門核能發電廠廠房設計採雙機組式，除了輔助燃料廠房、廢料處理廠房及部分系統結構為兩部機所共用外，其他部份均為各自獨立的系統。各部機擁有一座進步型沸水式反應爐，是美國奇異（General Electric, GE）公司所設計發展的第七代沸水式反應爐。汽輪發電機組由日本三菱重工所承造，汽輪機為四缸六排汽流串聯複合式，有一部高壓汽輪機及三部低壓汽輪機。發電機為氫冷式，發電量為 1,350 百萬瓦。所發電力經由 34.5 萬伏特超高壓輸電線分二路送至台北及龍潭地區匯入系統。

蒸汽產生系統所在的反應器廠房，外圍使用鋼筋混凝土之圍阻體以防止輻射線外洩，廠房其他部份可能發生輻射物外洩之處，皆有構築屏蔽牆。一切有關安全的設備為確保運轉安全，都有雙套且安置於隔離廠房。縱使有輻射物洩漏的事故，也都會被多重的隔牆屏蔽，不致於擴散至電廠外造成環境污染。

冷卻水排放管路按照建廠時環境影響評估所作之承諾設計，採用潛盾工法，興建地下暗渠，將冷卻水引導至離岸約 800 公尺，水深約 11 公尺處排出，即所謂的潛式排放。可將對環境景觀的衝擊減至最低，且對溫排水的擴散有較佳的效果，與其他電廠在海岸邊的實施的岸邊排放有所不同。

本研究著重於控制系統的建立，以下將各個控制系統做一個簡單的介紹。

2.2 控制系統簡介^[2]

2.2.1 再循環流量控制系統

進步型沸水式反應爐設計的一大特點在其再循環水系統（RCIR）。再循環水系統強制冷卻水（Forced Coolant）流過爐心，以移除燃料產生的熱量，並提高反應爐的功率。有別於其他型號的沸水式反應爐有再循環迴路，進步型反應爐將再循環水泵（Recirculation Pump）直接設置於反應爐底，稱之為爐內再循環水泵（Reactor Internal Pump，RIP，以下簡稱爐內泵），如圖 2.2^[2]。爐內泵一共有 10 組，10 組全速運轉時可達到 111%的額定流量。若有一組爐內泵故障，其餘九組也可以提供 100%的流量，維持全功率運轉。

再循環流量控制系統（RFCS）藉由控制爐內泵的速度，可以改變流過爐心的流量，進而控制反應爐的功率。以下詳列再循環流量控制系統之功能：

1. 提供足夠的爐心水流，以移除燃料產生的熱量。當反應爐功率介於 65%~100 % 範圍內，僅藉本系統即可自動改變反應爐功率，以自動跟隨負載（Automatic Load Following）運轉。
2. 調節反應爐內部再循環水泵（RIPS）的速度。
3. 藉著控制爐水流量以控制反應爐的功率。
4. 為了減緩「預期暫態未急停」（ATWS）之效應，RFCS 會提供訊號給控制邏輯，去開啟控制棒替代插入系統（Alternate Rod Insertion，ARI）的電磁閥。也會提供訊號給棒控制與資訊系統（Rod Control & Information System，RCIS）去插入所有控制棒。
5. 發生如汽機跳脫、負載棄載、急速降載（Fast Load Winddown）、喪失飼水加熱等暫態時，RFCS 會送訊號去跳脫部份運轉中之反應爐內部再循環水泵（RIP）且/或將 RIP 速度回退，快速降低爐心流量，以減緩暫態之效應。
6. 當反應器運轉於流量曲線（Core/Power Map）之低穩定區（Low Thermal Hydraulic Stability），亦即低流量高功率區域時，RFCS 會送訊號給 RCIS 去引動選棒插入（Selected Control Rod Run-In，SCRRI）及阻棒抽出（Control Rod Withdrawal Block）。

7. 當偵測到汽機跳脫、負載棄載、急速降載及喪失飼水加熱的訊號時，RFCS 會觸發選棒插入（SCRRI）。
8. RFCS 藉由非緊要多工傳輸系統（Non-Essential Multiplexing System）將爐心流量訊號送至廠用電腦系統。
9. 當系統有潛在不安全時，RFCS 會將該系統重要的運轉參數與警報顯示於控制室。

2.2.2 反應爐保護系統

反應爐保護系統（Reactor Protection System，RPS）設置之目的，在於各種運轉狀態下，若偵測到足以威脅核燃料完整性的狀況（如高溫度），或會造成冷卻水壓力邊界破裂的狀況（如高壓力），能夠正確準確又可靠的將反應爐急停，以防止或限制放射性物質外洩。以下狀況發生時會導致反應爐保護系統動作：

1. 中子偵測系統偵測到之參數超過限值。
2. 反應爐高壓力。
3. 反應爐低水位。若反應爐水位低於第三階水位（Level 3）則反應爐急停。
4. 乾井高壓力。
5. 主蒸汽隔離閥關閉。當主蒸汽管隔離閥關度大於 90 %，顯示主蒸氣隔離閥將關閉，則反應爐急停。此設定點考慮熱膨脹會改變閥和開關的相對位置。
6. 控制棒驅動液壓控制單元（HCU）充水集管壓力偏低。
7. 汽機斷止閥（Stop Valve）關閉。當汽機斷止閥關度大於 90 %，顯示主蒸氣隔離閥將關閉，則反應爐急停。此設定點考慮熱膨脹會改變閥和開關的相對位置。若反應爐功率（APRM Flow Biased Simulated Thermal Power）低於 40% 時，本項急停信號被旁通。此外，當反應爐功率高於 40% 且汽機跳脫時，如果旁通閥（Bypass Valve）開啟的數目足夠時，亦不會產生急停。
8. 汽機控制閥（Control Valve）快速關閉。當汽機控制閥快速關閉信號啟動則反應爐急停。同汽機斷止閥的狀況，若反應爐功率（APRM Flow Biased Simulated

Thermal Power) 低於 40% 時，本項急停信號被旁通。此外，當反應爐功率高於 40% 且汽機跳脫時，如果旁通閥 (Bypass Valve) 開啟的數目足夠時，亦不會產生急停。

9. 抑壓池高溫度。
10. 地震高強度。
11. 手動。

2.2.3 棒控制與資訊系統

龍門電廠共有 205 組控制棒，控制棒驅動系統採用電動及液壓兩種方式。正常運轉時，可以電動馬達微調控制棒位置，圖 2.3^[2] 即為電動馬達驅動的微調控制棒驅動系統 (Fine Motion Control Rod Drive, FMCRDs)。需要急停時，則用液壓來驅動，圖 2.4^[2] 為液壓控制單元 (Hydraulic Control Unit, HCU)。此時 FMCRDs 則作為備用驅動控制，以提高急停裝置的可靠度。

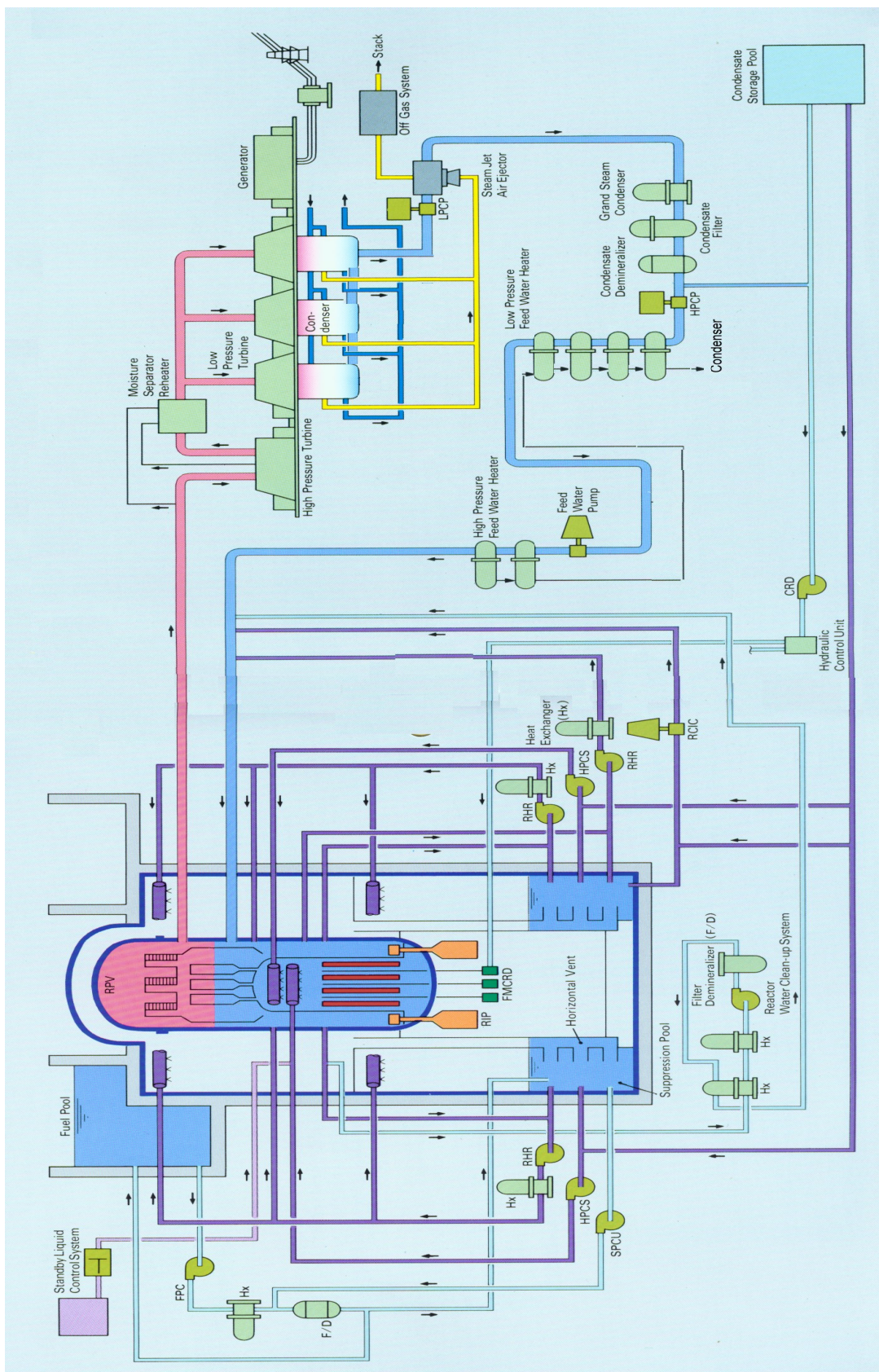
棒控制與資訊系統 (Rod Control & Information System, RCIS) 主要的功能在於提供控制棒於爐心中位置的控制，藉以控制爐心功率的產生與分佈。功能詳列如下：

1. 藉由抽插控制棒，以控制爐心反應度、功率以及功率分佈，使爐心內的中子通量不超過熱限值並控制燃料的燃耗。控制棒的移動可經由運轉員或是自動功率調節系統 (Automatic Power Regulator System, APR) 操作。
2. 提供運轉員控制棒有關的資訊，包括棒位、FMCRD 和 RCIS 系統的狀況等。正常運轉狀況下，每支 FMCRD 有兩組重複棒位量測信號，當其中一組故障時可以旁通，機組可繼續運轉而不需要任何的功率限制。
3. 提供控制棒的位置、FMCRD 及 RCIS 的情況給其他電廠系統，如廠用電腦系統等。和其他系統資料的傳輸，直接藉由非緊要多工系統網路 (Non-Essential Multiplexing System, NEMS)，或是以硬接線 (Hard Wire) 連接。
4. 偵測到反應爐急停時，提供所有可用控制棒的球螺帽 (Ball Nut) 馬達自動旋入 (Run-In) 的信號，稱為 Scram-Follow function。

5. 提供所有控制棒有替代且不同的插入方法，此稱為替代插棒（Alternate Rod Insertion, ARI）功能，信號由再循環流量控制系統（RFC）提供至 RCIS 系統，引動信號有自動及手動兩種。
6. 在發生熱流不穩定時，提供手動或自動的選棒插入功能。此功能又稱為 Selected Control Rod Run-In（SCRRI）的功能，自動引動（SCRRI）信號由再循環流量控制系統（RFC）提供至 RCIS 系統。
7. 自動執行阻棒的動作，以防止爐心燃料的損害。阻棒時，不會妨礙急停插入、Scram-follow、ARI 及 SCRRI 的功能。
8. 藉由棒值限制器（Rod Worth Minimizer, RWM）次系統執行預存的特定棒位型式。
9. 藉由控制棒動作與位置資訊次系統（Rod Action and Position Information, RAPI）的群棒（Gang）選擇與邏輯查證，強迫 RCIS 在自動或半自動模式下，執行預定的群棒移動順序，又稱為參考抽棒順序（Reference Rod Pull Sequence, RRPS）。
10. 提供執行 FMCRD 的計畫性偵測試驗的功能，包括定期的單一 HCU 急停時間測試等，另外可傳送測試數據給廠用電腦系統以供檢閱及存檔。
11. 經由自動熱限值偵測器（Automatic Thermal Limit Monitor, ATLM）提供阻棒功能以及阻止再循環水流量（Flow Block）信號給再循環流量控制系統（RFCS），以防止違反燃料的熱限值。
12. 若有抽出插入阻棒的信號時，會防止任何控制棒進一步地抽出或插入。信號邏輯由 RCIS 內部產生或由 RCIS 外其他的系統信號送入。假如 RCIS 在自動模式下，阻棒信號會強迫 RCIS 跳至手動模式。待阻棒信號完全清除後，方可再置於自動模式。
13. 提供單支控制棒掉落的控制與保護功能。位於 FMCRD 中有兩組重複的位置脫離感測器，只要其中一組偵測到控制葉片脫離（RPS Mode Sw.在 Start-Up 或 Run Mode 時），會立刻經由 EMS 送出阻棒信號給 RCIS 而造成阻棒。

14. 當接收到 All-Rods-In 命令信號時，提供“RIP Runback”信號經由硬接線傳給十個 RIPs 的可調速度驅動器（Adjust Speed Drive，ASD），將所有運轉中的 RIP 降至最低轉速，快速降低爐心平均功率，以防止在此暫態中違反燃料的熱限值。
15. RCIS 電源與儀控的設計，可使任何單一故障不會造成多於一支以上的控制棒的誤插入或抽出。





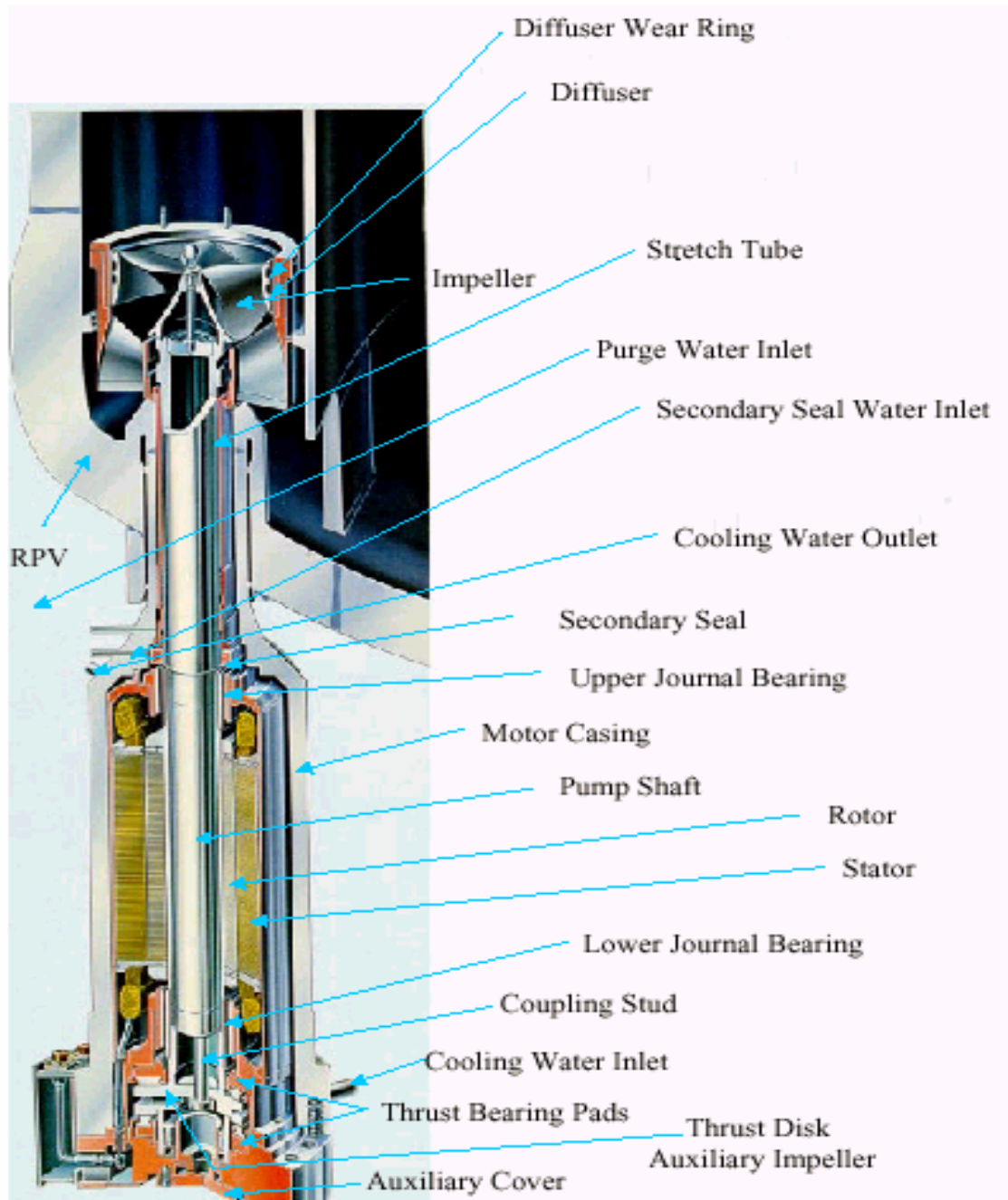


圖 2.2 進步型沸水式反應器爐內再循環水泵

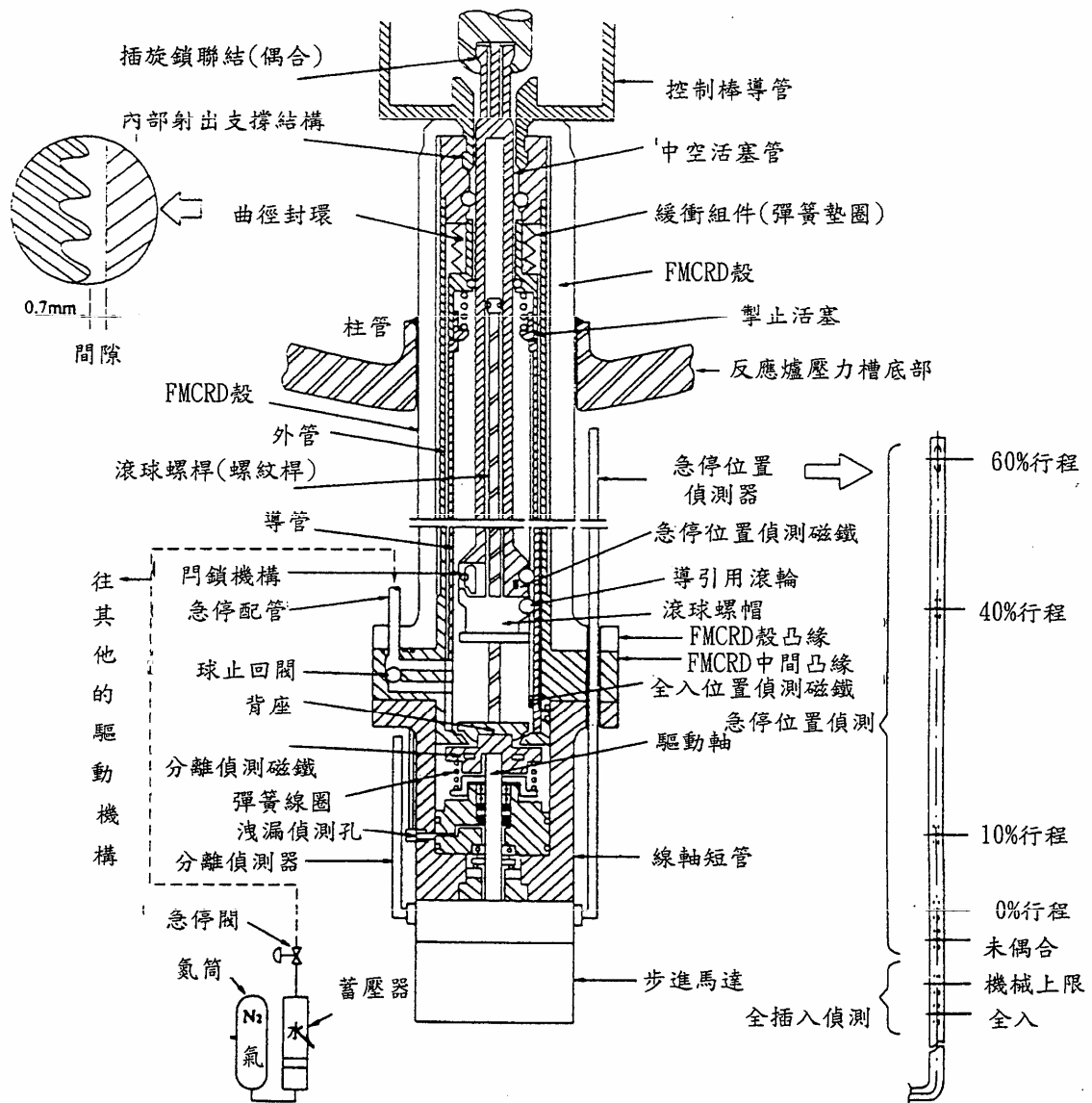


圖 2.3 微調控制棒驅動系統

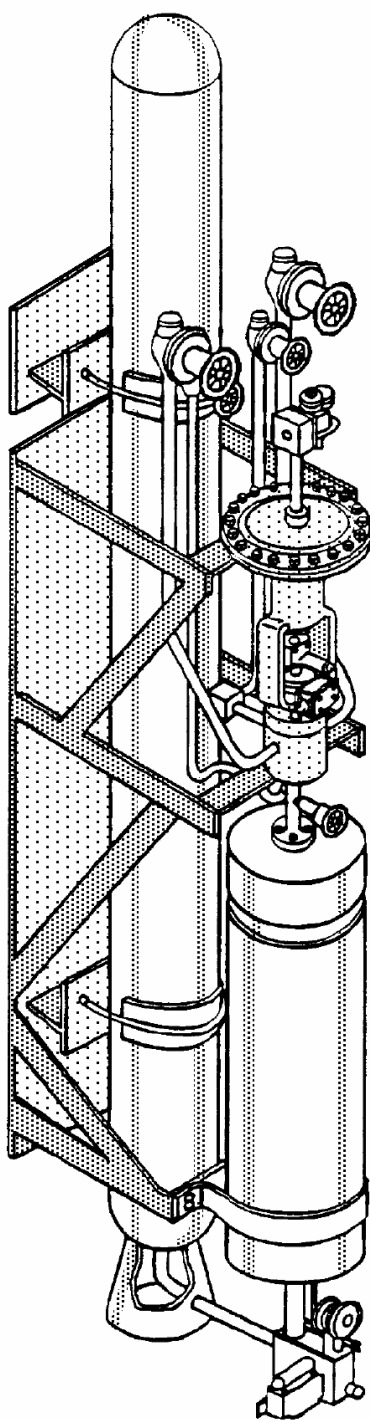


圖 2.4 液壓控制單元

第三章 RELAP5 簡介

3.1 RELAP5 分析程式簡介^[3]

RELAP 為 Reactor Excursion and Leak Analysis Program 的簡稱，是由美國愛德華國家工程實驗室（Idaho National Engineering Labotory, INEL）在美國核管會支助下發展出來之輕水式核能電廠（Light Water Reactor, LWR）暫態與事故分析程式，發展此程式之主要目的為提供一較快且使用方便之最佳估算分析程式，以作為下述主要用途：

1. 作為核能管制法規制訂與核電廠運轉執照申請等之評估作業基礎，以及驗證使用較簡化模式之電廠分析器（Plant Analyzer）的結果，作為分析比對基礎及依據。
2. 提昇核能相關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. 協助熱流實驗計畫擬定，執行實驗進行前預測分析之所需，以及執行實驗完成後之分析工作，以增進實驗結果之實用性。

RELAP 程式是使用 FORTRAN 程式撰寫而成，有相當長遠的發展歷史。圖 3.1 為 RELAP 系列程式之發展歷史。目前使用的 RELAP5-RT 是從 RELAP5/MOD3 改進的版本。其主要特質為雙流體（two fluids），雙相非均勻混合態（non-homogeneous），雙相非平衡態（non-equilibrium），是一個使用最少經驗式，且模組化之最佳估算系統熱水流分析程式。此程式主要由四個主程式組合而成：

1. 環路熱水流程式（Thermal and Hydraulic Loop Code）
2. 核心熱水流程式（Thermal and Hydraulic Core Code）
3. 熱傳導程式（Thermal Conduction Code）
4. 核反應程式（Nuclear Reaction Code）

本程式包含五個系統模組：

1. 流體動力模式（Hydrodynamics）

2. 熱結構模式 (Heat Structure)
3. 控制系統模式 (Control System)
4. 啟動與跳脫邏輯訊號 (Trip)
5. 中子反應動態模式 (Neutron Kinetic)

採用流體模式為雙相流體分離模式 (Separated Model)，共用六個基本雙流體三項守恆方程式來描述：

1. 汽相質量守恆方程式
2. 液相質量守恆方程式
3. 汽相動量守恆方程式
4. 液相動量守恆方程式
5. 汽相能量守恆方程式
6. 液相能量守恆方程式

RELAP5-RT 是 RELAP5/MOD3 的時間同步 (Real Time) 版本，可以啟用時間同步選項，使程式可以使用真實時間運行；另外也更新了中子動態模式，原本在 RELAP5/MOD3 中只能使用點動態模式 (Point Kinetics) 進行爐心中子熱源模擬，RELAP5-RT 中可以使用多維動態模式 (Nodal Kinetics)，能夠更精準的模擬爐心熱分佈，更能掌控沸水式反應器功率分佈變化不固定的狀況。

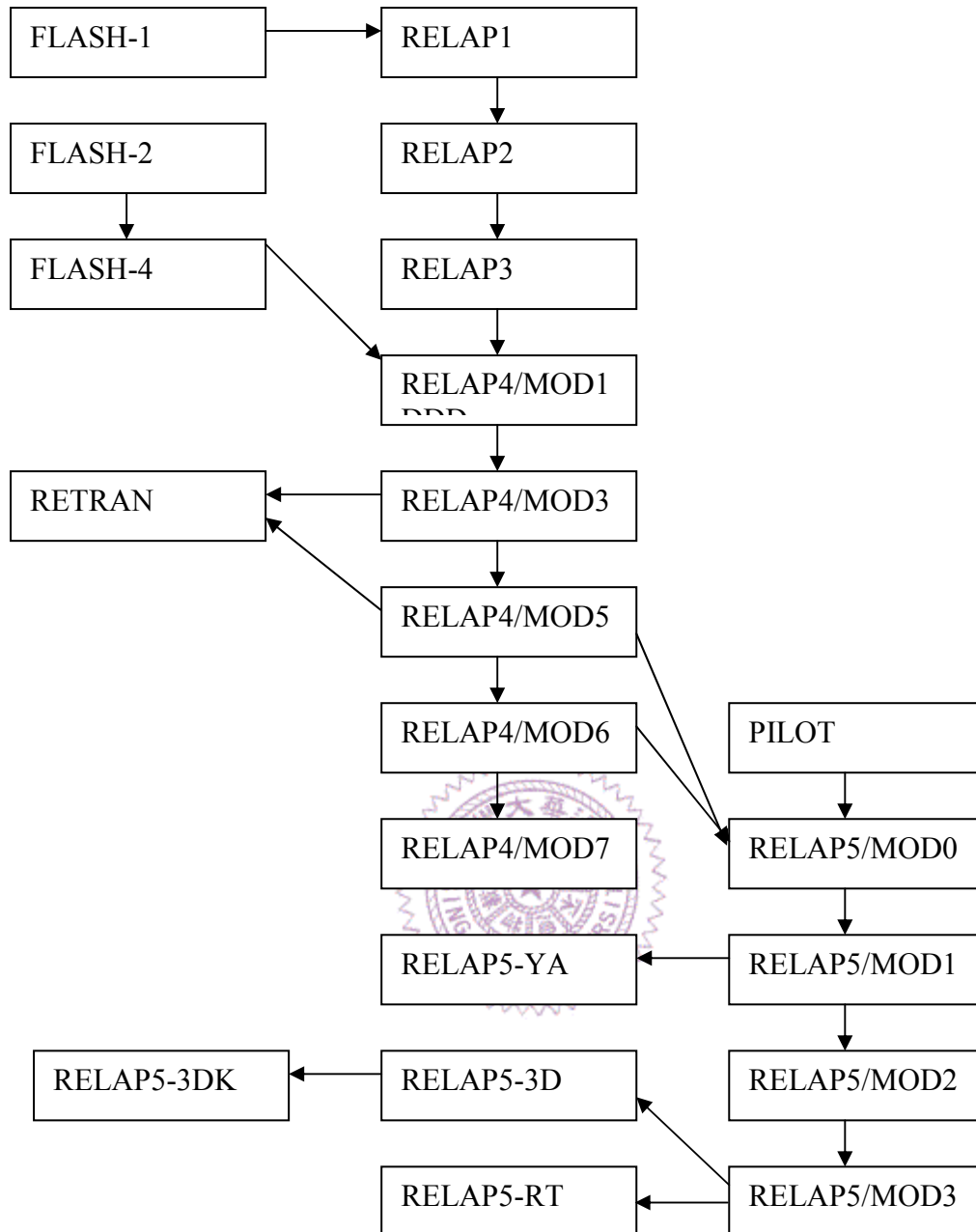


圖 3.1 RELAP 系列程式發展歷程

第四章 龍門電廠 RELAP5-RT 控制系統輸入模式及初始狀態

4.1 前言

本研究所建立的龍門核電廠 RELAP5-RT 輸入模式是由清華大學核電廠系統動態模擬分析實驗室使用的 ALPS 輸入模式^{[4][5]}修改而來。ALPS 包含兩個獨立之 RELAP5-RT 的熱水流輸入模式，分別模擬反應爐壓力槽系統及電廠平衡系統的熱水流反應，再經由介面程式 3KeyMaster 互相傳遞資訊。動態模擬分析實驗室已將龍門核電廠重要控制系統建立於介面程式 3KeyMaster 中。建立獨立完整之龍門核電廠 RELAP5-RT 輸入模式必須先將研發小組發展的兩個輸入模式合併，調整至穩態；再依據 3KeyMaster 上的控制系統^[5]及 RELAP5-RT 的輸入規定建立控制系統。核電廠系統動態模擬分析實驗室在 3KeyMaster 建立的控制系統包括再循環流量控制系統（Recirculation Flow Control System, RFCS）、反應爐保護系統（Reactor Protection System, RPS）、棒控制與資訊系統（Rod Control & Information System, RCIS）、飼水控制系統（Feedwater Control System, FWCS）、蒸氣旁通與壓力控制系統（Steam Bypass and Pressure Control System, SBPC）等主要的控制系統；本章節描述 RFCS、RPS 及 RCIS 三個控制系統的建立與測試過程，以確認系統邏輯反應正確。最後將整合所有控制系統，包含本研究所建立的 RFCS、RPS 及 RCIS 系統，以及參考 RETRAN 輸入模式^[6]所建立之蒸汽旁通與壓力控制系統和飼水控制系統，共四個系統；調整整合完成的輸入模式至穩態。以下將分三節介紹反應爐壓力系統、電廠平衡系統和控制系統的輸入模式，4.5 節為獨立測試的結果，4.6 節說明全廠系統整合。

4.2 反應爐壓力槽系統

反應爐壓力槽系統模式如圖 4.1^[5]所示。系統大致可分為反應爐壓力槽（RPV）、主蒸汽管路系統（MS）、飼水系統（FWS）以及反應爐爐內泵（RIP）。反應器壓力槽系統共有 162 個控制體積（Volume）及 155 個流體接節（Junction）。反應爐壓力槽本

體中，包含反應爐降流區（Downcomer）、壓力槽底部（Lower Plenum）、反應氣爐心；汽水分離器（Seperator）以及反應槽頂部（Upper Plenum）等區域。模擬時均使用適當 RELAP5-RT 程式中的熱水流元件模擬。反應爐爐心分成有效爐心通道（Active Core Channel, Volume 41~49）及旁通通道（Bypass Channel, Volume70），皆使用管路（Pipe）元件模擬，每個管路元件縱向分為 13 個節點。872 個燃料元件依 205 組控制單元（Control Cell），分成 9 組熱結構（Heat Structure），每組熱結構縱向分為 13 個節點，分別連接至有效爐心通道的各節點。熱結構的熱源分佈來自中子反應一維動態模式（1D Kinetics），可以精準的計算 BWR 燃料的功率軸向分佈。龍門核電廠最大特色之一的反應爐爐內泵（RIPs）的模擬，將 10 台 RIPs 分成以一台、三台、三台、三台的方式分成四組（Volume 10、11、12、14），用 RELAP5-RT 的泵（Pump）元件模擬，特性曲線參照龍門核電廠原始設計輸入。

反應爐壓力系統也模擬了緊急爐心冷卻（ECC）注水，包含高壓爐心灌水系統（HPCF）、爐心隔離冷卻系統（RCIC）。高壓爐心灌水系統從抑壓池（Suppression Pool）取水注水至爐心上方（Volume 71），爐心隔離冷卻系統注水從抑壓池取水經由飼水管路（Volume 678）進入反應爐，注水量皆根據電廠原始設計輸入。

反應爐壓力槽系統在蒸汽管路端將進入汽機前的壓力設定為壓力邊界（Volume 411、421、431、441），在飼水管路端將飼水集管的水溫及流量設定為流量邊界（Volume 670、671，Junction 780、784）。

4.3 電廠平衡系統

電廠平衡系統系統模式示意圖如圖 4.2^[4]。此系統非常龐雜，以下分成主蒸汽系統和飼水系統兩個部份詳細說明。

4.3.1 主蒸汽系統

主蒸汽系統的模擬節點圖如圖 4.3^[5]，總共使用了 86 個控制體積和 61 個流體接節，模擬的元件包含高壓汽機（Hight Pressure Turbine, HPT）、汽水分離再加熱器（Moisture Separator and Reheater, MSR）、低壓汽機（Low Pressure Turbine, LPT）、主飼水泵帶

動汽機（Main Feed Water Pump Turbine，MFPT）。主蒸汽系統的以調速閥（Governing Valve，GV，Junction 587、588、589、590）為流量邊界，有四條管路在汽機前匯集再進入高壓汽機。汽機將熱能轉換成機械能，圖 4.4^[5]和 4.5^[5]分別是高壓汽機與低壓汽機的細部模擬圖。利用 RELAP5-RT 中汽機元件分成多級模擬高低壓汽機。另外加熱器的加熱源有部份來自於汽機抽氣，在模式中也詳細模擬了高壓汽機的 3 個及低壓汽機的 5 個蒸汽抽氣（Extraction）。高低壓汽機之間尚有汽水分離再加熱器，詳如圖 4.3，由汽水分離器（Separator）和兩級的再加熱器（Reheater）組成，使用 RELAP5-RT 的分離器（Separator）元件、控制體積元件以及熱平板元件模擬。離開高壓汽機的蒸汽先進入汽水分離器將水汽分離，經過第一級再加熱器，其熱源來自於高壓汽機抽出，再進入熱源來自於主蒸汽及氣管的第二級再加熱器後，離開 MSR 進入低壓汽機以及主飼水泵帶動汽機，最後進入冷凝器（壓力邊界，Volume 897、898、899）。

4.3.2 飼水系統

飼水系統的模擬節點圖如圖 4.6^[5]，一共使用 131 個控制體積和 106 個流體接節，模擬的元件冷凝器（Condenser，CDSR）、冷凝水泵（Condensate Pump，CP）和冷凝水增壓泵（Condensate Booster Pump）、多組飼水加熱器（Feed Water Heaters，FWHTRs）及主飼水泵（Feed Water Pumps，FWPs）。冷凝器使用依時體積（Time Dependent Volume，TDV：Volume 890）設定為壓力邊界，讀取主蒸汽系統汽機到冷凝器的流量，經過冷凝水泵和冷凝水增壓泵結合的等效泵（圖 4.6 的 CP），進入連續四級的低壓飼水加熱器。此四級的飼水加熱器使用控制體積及熱平板元件模擬，熱源來自低壓汽機的抽氣。離開四級低壓飼水加熱進入兩台主飼水泵，是使用泵元件模擬，由於此兩台主飼水泵是由汽機帶動（Turbine Driven Feed Water Pumps，TDFWPs），泵與主蒸汽系統的 MFPT 使用相同的軸元件（Shaft Connection）來模擬。經由 TDFWPs 加壓之後飼水會再經過兩級的高壓飼水加熱器，其熱源來自高壓汽機抽氣。最後流入飼水集管後分成兩條飼水管路，以飼水集管出口處的壓力作為壓力邊界（Volume 593、594）。

4.4 控制系統

4.4.1 再循環流量控制系統

RELAP5-RT 的再循環流量控制系統係根據 ALPS 建立於 3KeyMaster 上的 RFCS 控制圖建立，如圖 4.7~4.11^[5] 所示。系統比較額定功率及實際運轉功率，運算之後得到爐心流量需求。將爐心流量需求和實際爐心流量比較再經過運算，得到反應器爐內泵（Reactor Internal Pump，RIP）轉速需求。若平均能階偵測系統（Average Power Range Monitor，APRM）偵測值過高時，則轉速需求將自動減少 4.99% 以降低反應器爐心功率，避免燃料損壞；轉速需求或爐心水流變化過快時，控制系統會自動減緩轉速改變，以避免反應器因過度劇烈的改變受損；若因反應器暫態造成 Runback 信號產生，RFCS 系統會自動將轉速以每秒 5% 的減速率直到到達額定轉速之 31% 為止；有 RIP 跳脫時，RFCS 傳出之轉速需求為零。

圖 4.10 展示了所有會造成 RIP Runback 的暫態信號。包含飼水熱容量不足、汽機跳脫、負載棄載、急速降載、喪失飼水加熱、爐內泵超過四台跳脫、低穩定區運轉以及冷凝器壓力過高，都會造成 RIP Runback 的信號產生。

圖 4.11 是 RFCS 傳給 RCIS 的信號。包含 SCRRI 和 ARI 兩種信號，都會傳送至 RCIS 並造成控制棒插棒。當反應爐功率大於 38% 時，飼水停止供應（Feedwater No Service）、急速降載、汽機跳脫、喪失飼水加熱或低爐心流量超過一台 RIP 跳脫等暫態發生，RFCS 會傳信號給 RCIS 啟動選棒插入（Selected Control Rod Run-In，SCRRI）；當反應爐壓力大於 7.783MPa 或爐心水位低於 Level 2，則 RFCS 會傳信號給 RCIS 啟動控制棒替代插入系統（Alternate Rod Insertion，ARI）。

4.4.2 反應爐保護系統

反應爐保護系統是根據 ALPS 在 3KeyMaster 平台上的控制邏輯圖建立，如圖 4.12~4.14^[5]。ALPS 在 3KeyMaster 平台上的控制邏輯為反邏輯。為了在 RELAP5-RT 上盡量不產生誤觸動，邏輯建立方式和 ALPS 的邏輯相反，但結果相同。

主要會造成停機的信號包括：手動停機、反應爐水位低於 Level 3、反應爐壓力過高、乾井壓力過高、抑壓池壓力過高、主蒸汽管路隔離、汽機斷止閥（Turbine Stop Valve）

關閉或汽機控制閥（Turbine Control Valve）快速關閉且汽機旁通閥（Turbine Bypass Valve）開度不足，以上狀況都會造成停機訊號，使得控制棒全入。

龍門核電廠因為汽機旁通閥有超過 100% 的旁通能力，可以在 TSV 關閉及 TCV 快速關閉時讓反應爐不停機，圖 4.14 即是判斷 TBV 在這種狀態下，TBV 的開度是否足夠將反應爐的蒸汽順利旁通至冷凝器。若能順利旁通，則反應爐不會自動停機。

4.4.3 棒控制與資訊系統

棒控制與資訊系統是根據 ALPS 平台上的棒控制與資訊系統 C 語言的程式碼建立。龍門進步型反應器的控制棒共有 205 根，在 RELAP5-RT 中雖然可以分別控制 205 根控制棒，但目前採用對稱的方式，將 205 根控制棒分成 19 組來控制。圖 4.15^[5] 即 19 組控制棒的分佈狀況，圖 4.16 為 RELAP5-RT 第一組控制棒的控制圖。

在 RELAP5-RT 中，RCIS 主要的控制信號包含一般運轉（Normal Operation）、選棒插入（SCRRI）、控制棒替代插入（ARI）以及急停（Scram）。表 4-1 列出 19 組控制棒在不同狀態之下應該達到的棒位。200 表示控制棒全出，0 表示控制棒全入。在一般運轉時調整棒位，控制棒會以每秒 0.03m 的速度抽棒或插棒；SCRRI 時以每秒 0.025224827 公尺的速度插棒；ARI 必須以 25 秒內全入(0.146304m/s)的速度插棒；Scram 的插棒速度隨插棒深度不同會改變：棒位介於 190 與 200 之間，控制棒插入速度為每秒 0.762m；棒位介於 190 與 200 之間，控制棒插入速度為每秒 0.762m；棒位介於 160 與 190 之間，控制棒插入速度為每秒 1.3716m；棒位介於 100 與 160 之間，控制棒插入速度為每秒 1.25546911m；棒位介於 20 與 100 之間，控制棒插入速度為每秒 0.75259259m；棒位介於 0 與 20 之間，控制棒插入速度為每秒 0.67483395m。圖 4.17 即 Scram 插棒之示意圖。

4.5 控制系統獨立測試

控制系統建立完成後，先根據控制系統的邏輯，作獨立的系統測試，驗證所建立完成的系統之邏輯正確性。

4.5.1 再循環流量控制系統獨立測試

再循環流量系統的測試可以分成兩大類：運轉模式與暫態模式。在運轉模式下，確認一般運轉時 RFCS 系統能夠正確的控制運轉時會碰到的狀況。例如當爐心功率上升超過額定功率時，爐內泵應降低轉速使爐心流量減少，進而降低爐心功率；當爐心流量低於額定或手動設定值，爐內泵應升速使流量達到額定流量。在暫態模式下，測試所有可能造成 RIP 跳脫、RIP 回退、SCRRI 以及 ARI 的信號，例如當汽機跳脫信號產生，控制系統應當送出 Runback 的信號，同時 SCRRI 的信號也會啟動。再循環流量控制系統的獨立測試共有 32 項，詳細的測試結果列於附錄 A 中。

4.5.2 反應爐保護系統獨立測試

反應爐保護系統測試所有會造成 Scram 的系統。如 Level 3 的信號產生時，RPS 系統會在 1.09 秒後發出 Scram 信號。需要注意的是 TSV 和 TCV 的關閉暫態，必須確認 TBV 旁通成功時不會造成跳機。反應爐保護系統的獨立測試共有 11 項，詳細的測試結果列於附錄 B 中。

4.5.3 棒控制與資訊系統獨立測試

棒控制與資訊系統主要測試會造成 SCRRI、ARI 和 Scram 的信號。若是產生 SCRRI 信號，部份控制棒會以每秒 0.025224827m 的速度插入爐心；若是產生 ARI 信號，全部的控制棒都會以每秒 0.146304m 的速度插入爐心；若是產生 Scram 的信號，控制棒插入行為同 4.4.3 所描述。由於會產生 SCRRI、ARI 以及 Scram 的信號在前兩小節已測試，僅各取一個暫態信號測試本系統。棒控制與資訊系統的獨立測試共有 4 項，詳細的測試結果列於附錄 C 中。

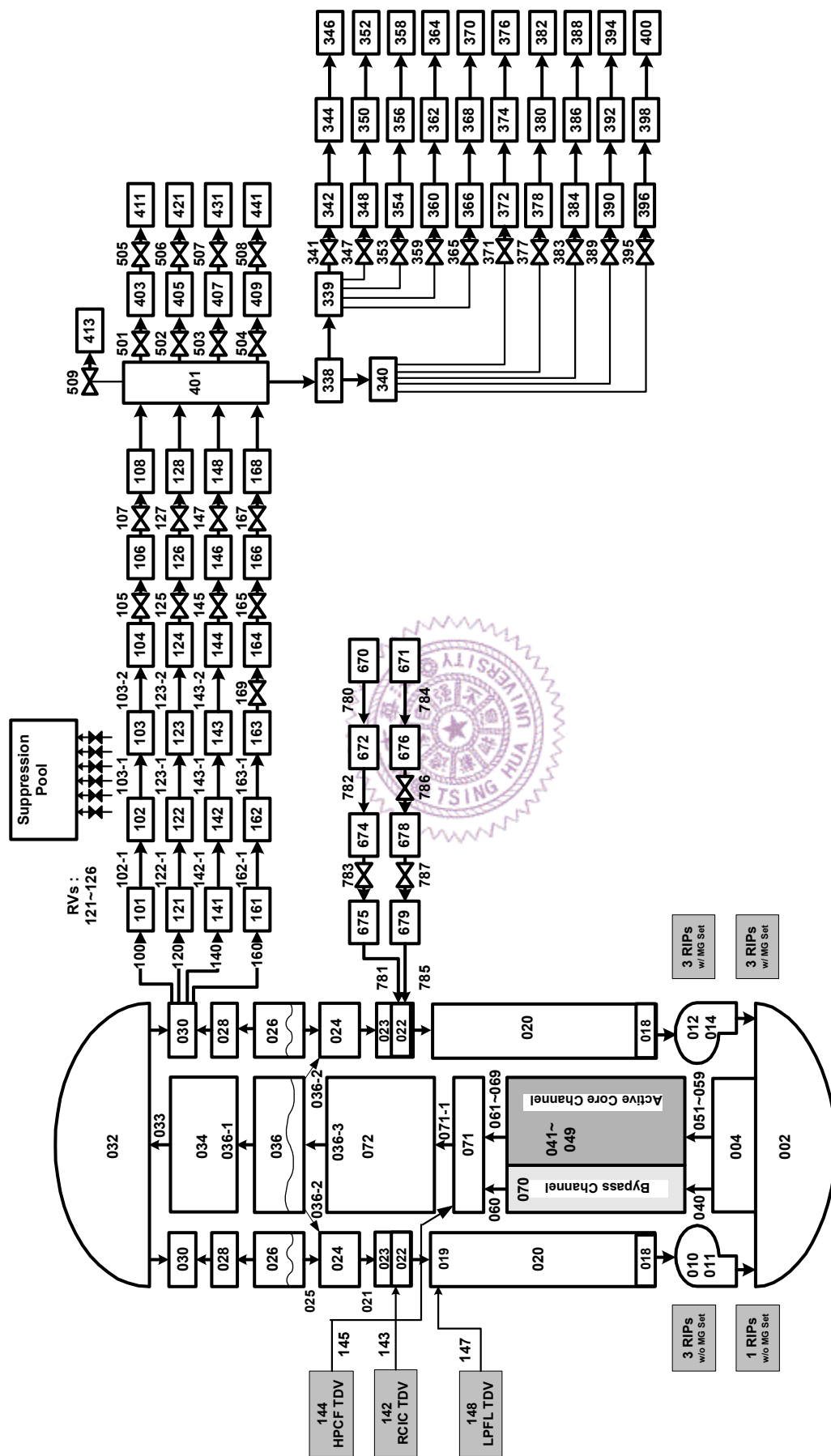
4.6 全廠系統整合

龍門核電廠輸入模式最後必須全部整合在一起。首先，兩個熱水流輸入模式（RPV 和 BOP）必須結合成為一個完整的能量產生和轉換系統。RPV 和 BOP 原本的邊界是利用控制體積（Time Dependent Volume，TDV）和控制接節（Time Dependent Junction，TDJ）讀取 3KeyMaster 平台上相互的邊界資料，將其合併至同一個輸入模式之後，RPV 的蒸汽管路壓力邊界設定為 BOP 進入汽機前（Volume 584）的壓力，飼水管路壓力邊

界設定為 BOP 飼水集管 (Feedwater Header, Volume 592) 的壓力，流量邊界設定為 BOP 飼水集管後方閥 (Junction 595、596) 的流量。相對而言，BOP 部份的蒸汽管路壓力邊界設定為 RPV 調速閥 (Governing Valve, GV) 前 (Volume 403、405、407、409) 之壓力，流量邊界設定為 RPV 調速閥 (Junction 505、506、507、508) 的流量，飼水管路壓力邊界設定為飼水集管下游 (Volume 672、676) 壓力。設定示意圖如圖 4.18。設定完成後相當於 RPV 利用 BOP 汽機前壓力，得四條蒸汽管路的流量，同時因流量確定，BOP 也以此同流量的蒸氣推動汽機並驅動飼水泵，流經冷凝器進入飼水系統。經過飼水系統加壓、加熱之後，BOP 反應 RPV 飼水管路的壓力，計算飼水流量，並使其流入 RPV 飼水管路，成為一個完整的循環。

熱水流輸入模式結合之後，將新建的控制系統加入輸入模式，RFCS 計算的 RIP 速度和 RCIS 設定的棒位將直接反應到系統之中。另外，按照 RETRAN 輸入模式建立的 FWCS 及 SBPC 系統也一併加入，新的輸入檔已包含大部分主要的控制系統。

初始狀態使用 ALPS 提供的初始條件，即可完成初步的穩態設置。初始功率設定為 100% 額定功率，初始爐心流量 100%。蒸汽和飼水流量皆為 100% 額定流量。其餘重要參數皆列於表 4-2。RPV 和 BOP 系統結合時，由於相互讀取資訊的時距 (time step) 較原本讀取 3KeyMaster 平台資訊的時距為小，造成計算的差異，加上控制系統的反應對整個系統造成影響，穩態結果與原先稍有不同，但大致維持額定初始條件。經過重置 (Pygi) 之後的穩態初始條件列於表 4-3。



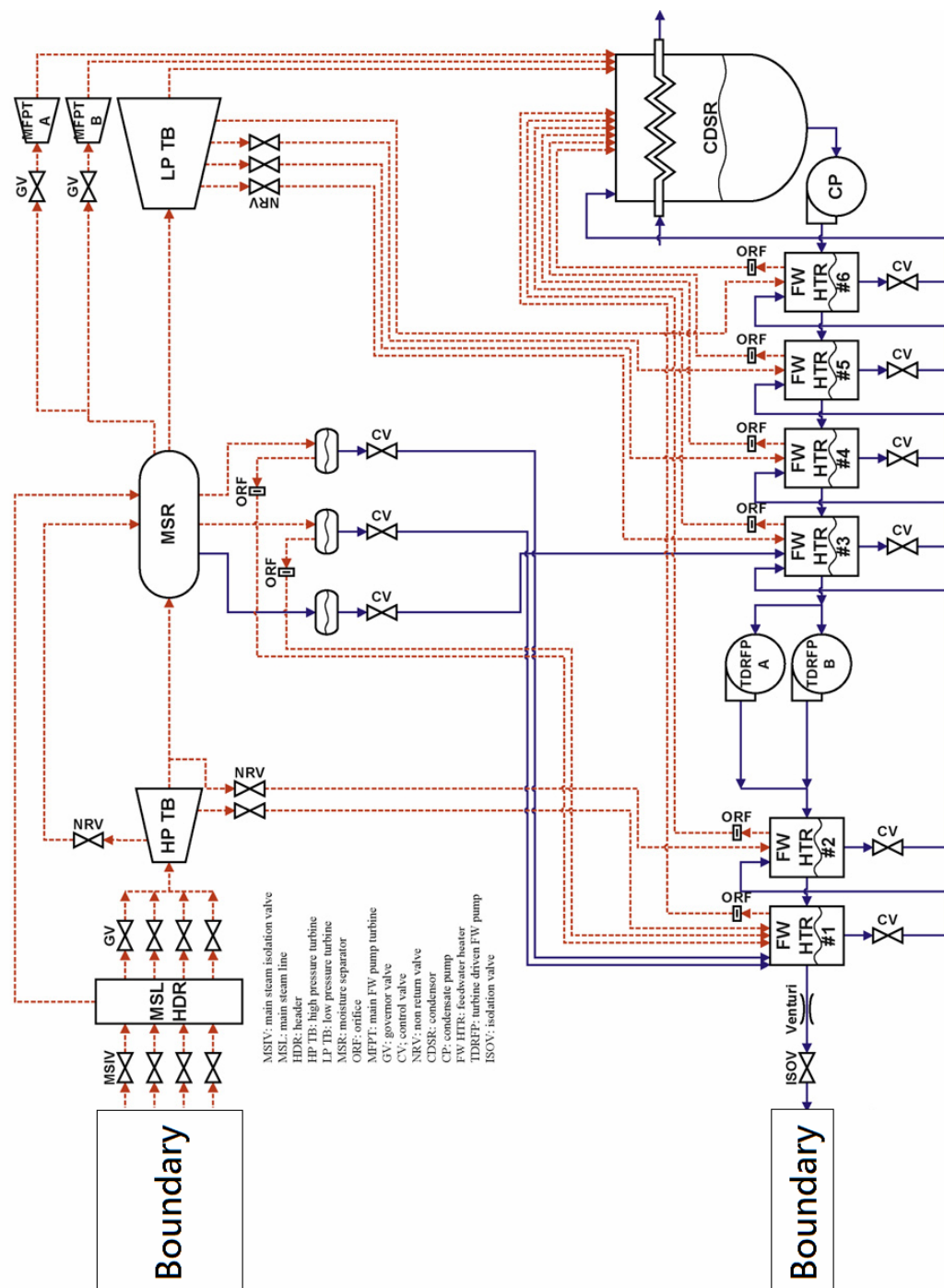


圖 4.2 電廠平衡系統模式示意圖

BOP Steam Side Noding for NPP4 Simulation

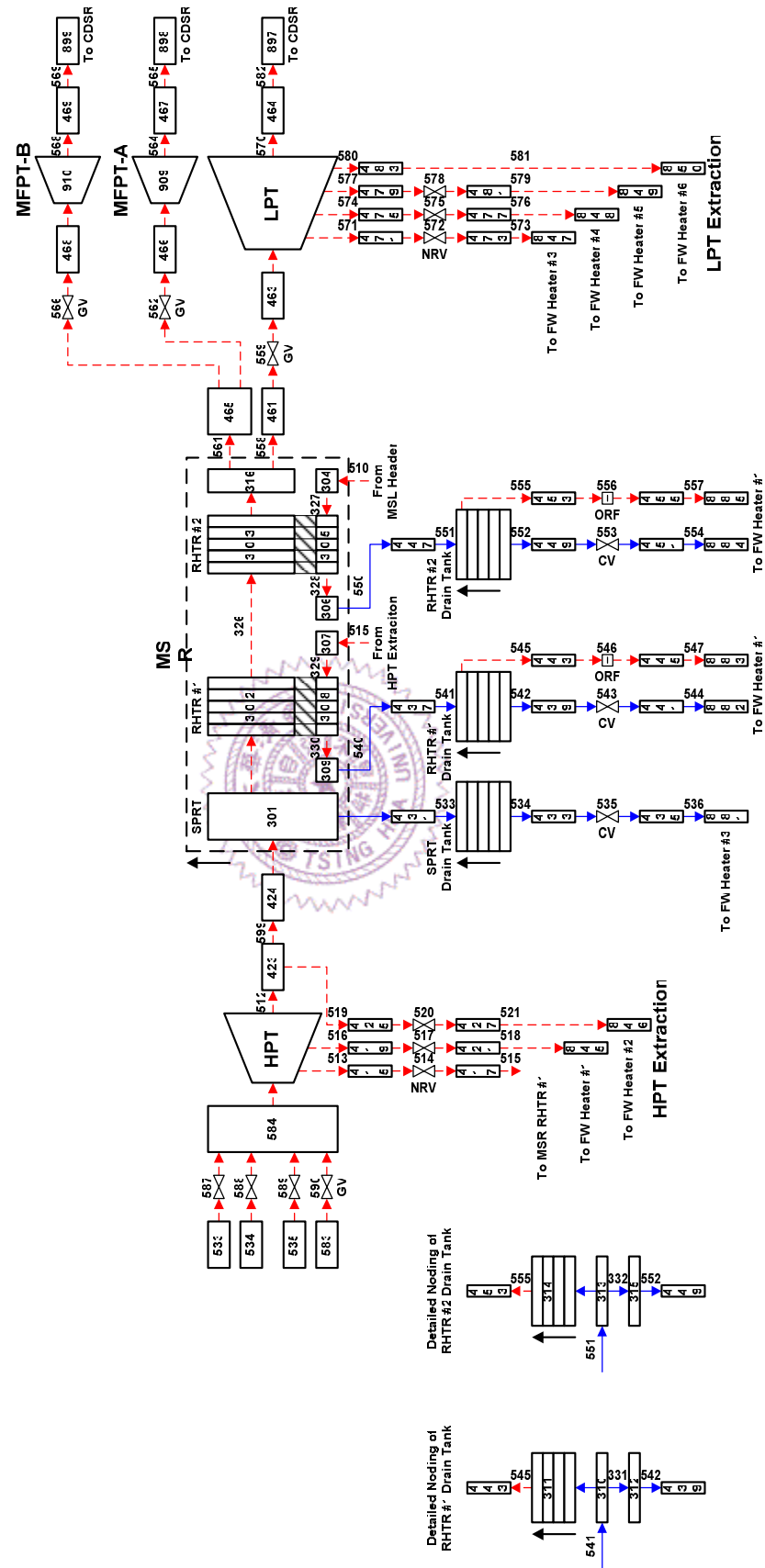
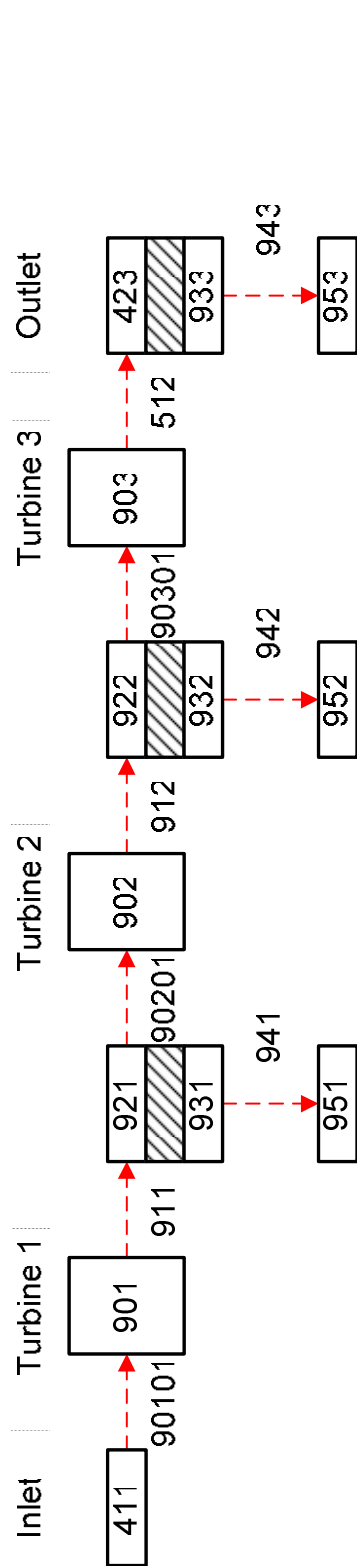
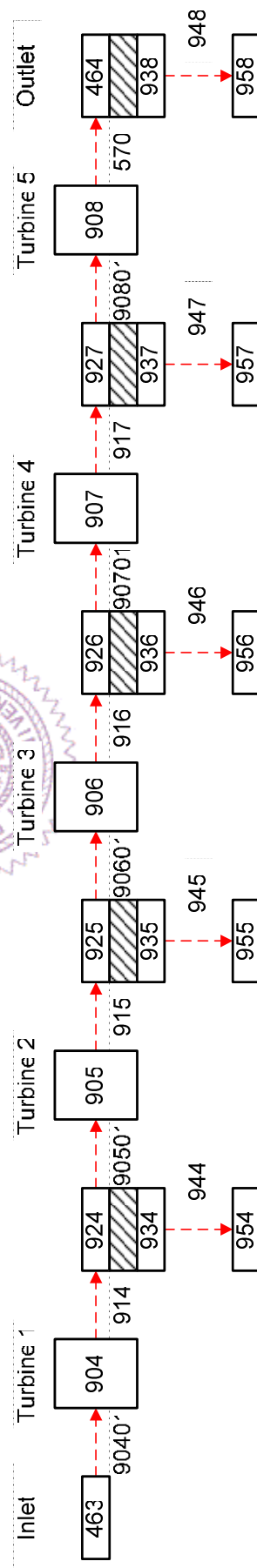


圖 4.3 主蒸汽系統的模擬節點圖



NPP4 HP Turbine Model

圖 4.4 高壓汽機細部模擬圖



NPP4 LP Turbine Model

圖 4.5 低壓汽機細部模擬圖

Feedwater System Noding for NPP4 FWLOCA

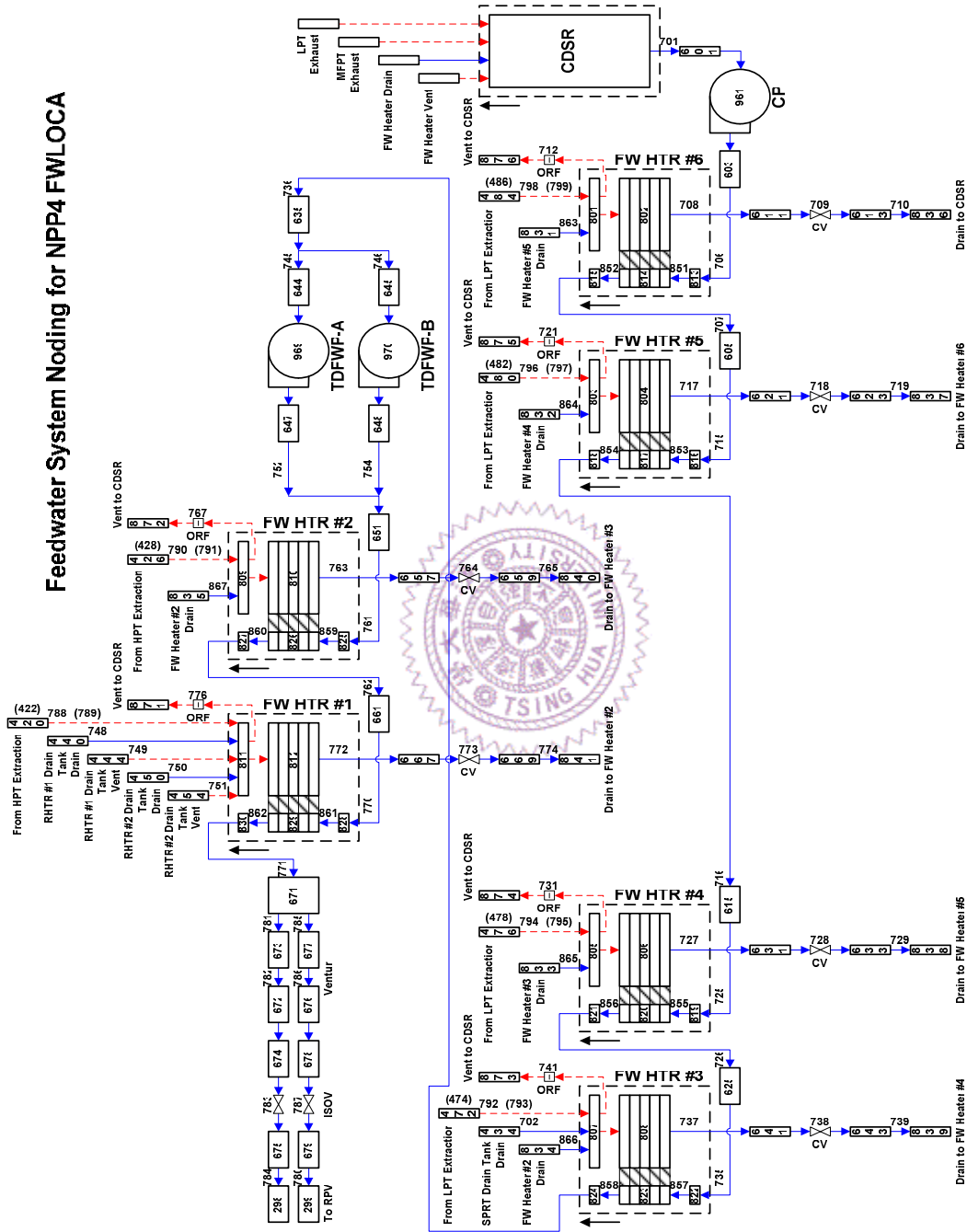


圖 4.6 飼水系統的模擬節點圖

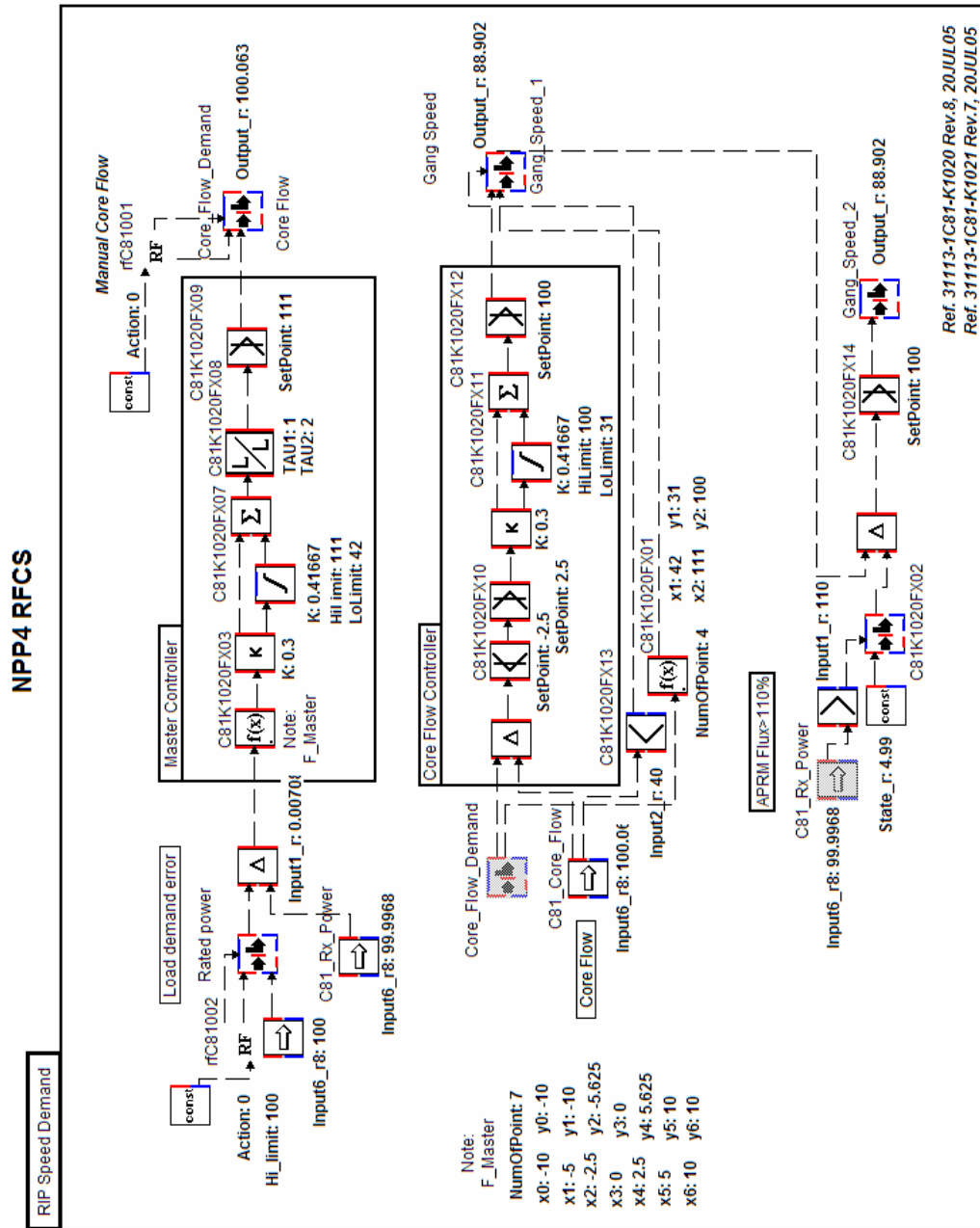


圖 4.7 再循環流量控制系統控制圖(1)

NPP4 RFCS

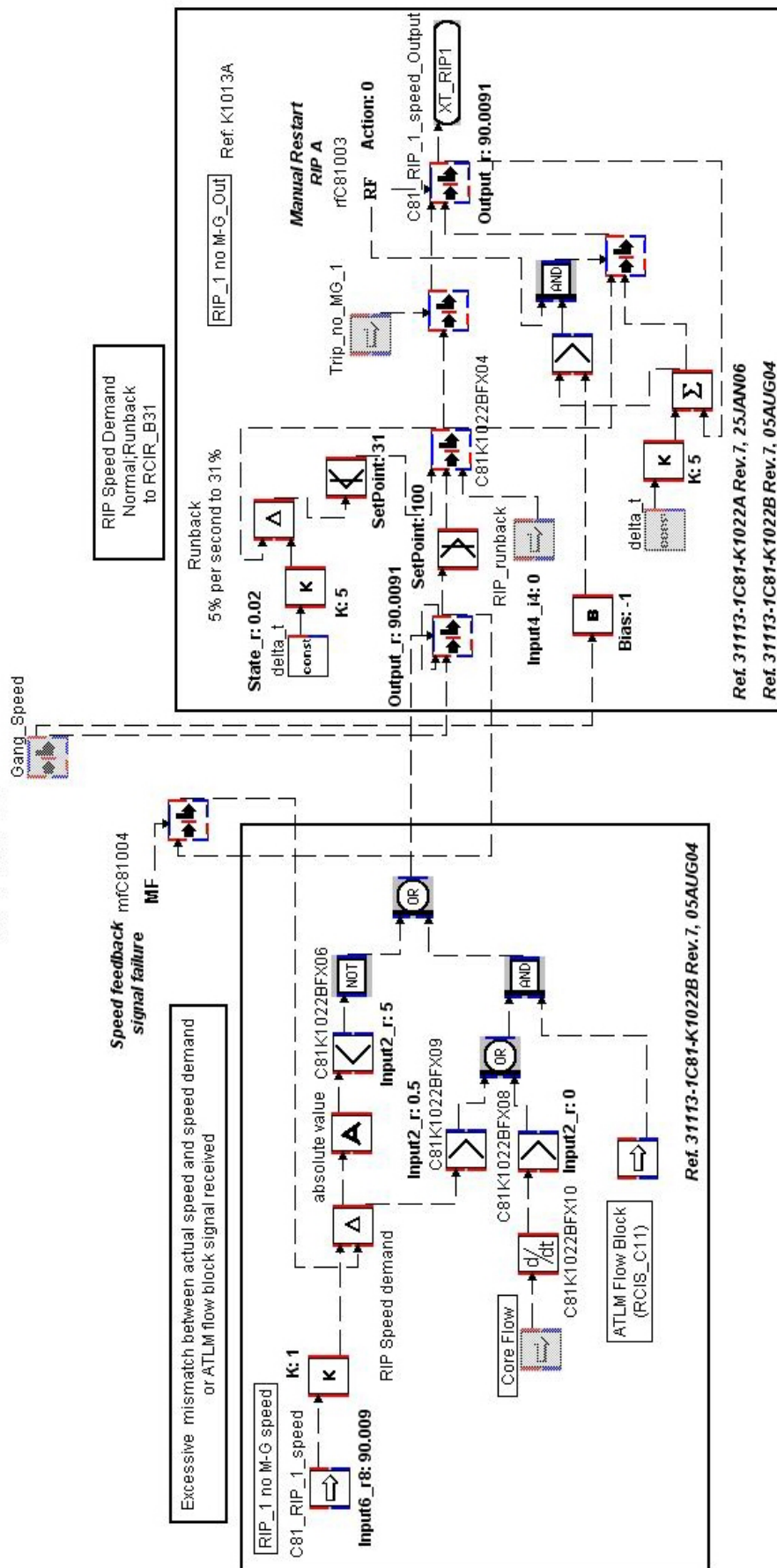


圖 4.8 再循環流量控制系統控制圖(2)

10 RIPS Trip

mfC81003

mfC81005

mfC81006

mfC81001

mfC81002

mfC81000

mfC81004

mfC81007

mfC81008

mfC81009

mfC81010

mfC81011

mfC81012

mfC81013

mfC81014

mfC81015

mfC81016

mfC81017

mfC81018

mfC81019

mfC81020

mfC81021

mfC81022

mfC81023

mfC81024

mfC81025

mfC81026

mfC81027

mfC81028

mfC81029

mfC81030

mfC81031

mfC81032

mfC81033

mfC81034

mfC81035

mfC81036

mfC81037

mfC81038

mfC81039

mfC81040

mfC81041

mfC81042

mfC81043

mfC81044

mfC81045

mfC81046

mfC81047

mfC81048

mfC81049

mfC81050

mfC81051

mfC81052

mfC81053

mfC81054

mfC81055

mfC81056

mfC81057

mfC81058

mfC81059

mfC81060

mfC81061

mfC81062

mfC81063

mfC81064

mfC81065

mfC81066

mfC81067

mfC81068

mfC81069

mfC81070

mfC81071

mfC81072

mfC81073

mfC81074

mfC81075

mfC81076

mfC81077

mfC81078

mfC81079

mfC81080

mfC81081

mfC81082

mfC81083

mfC81084

mfC81085

mfC81086

mfC81087

mfC81088

mfC81089

mfC81090

mfC81091

mfC81092

mfC81093

mfC81094

mfC81095

mfC81096

mfC81097

mfC81098

mfC81099

mfC81100

mfC81101

mfC81102

mfC81103

mfC81104

mfC81105

mfC81106

mfC81107

mfC81108

mfC81109

mfC81110

mfC81111

mfC81112

mfC81113

mfC81114

mfC81115

mfC81116

mfC81117

mfC81118

mfC81119

mfC81120

mfC81121

mfC81122

mfC81123

mfC81124

mfC81125

mfC81126

mfC81127

mfC81128

mfC81129

mfC81130

mfC81131

mfC81132

mfC81133

mfC81134

mfC81135

mfC81136

mfC81137

mfC81138

mfC81139

mfC81140

mfC81141

mfC81142

mfC81143

mfC81144

mfC81145

mfC81146

mfC81147

mfC81148

mfC81149

mfC81150

mfC81151

mfC81152

mfC81153

mfC81154

mfC81155

mfC81156

mfC81157

mfC81158

mfC81159

mfC81160

mfC81161

mfC81162

mfC81163

mfC81164

mfC81165

mfC81166

mfC81167

mfC81168

mfC81169

mfC81170

mfC81171

mfC81172

mfC81173

mfC81174

mfC81175

mfC81176

mfC81177

mfC81178

mfC81179

mfC81180

mfC81181

mfC81182

mfC81183

mfC81184

mfC81185

mfC81186

mfC81187

mfC81188

mfC81189

mfC81190

mfC81191

mfC81192

mfC81193

mfC81194

mfC81195

mfC81196

mfC81197

mfC81198

mfC81199

mfC81200

mfC81201

mfC81202

mfC81203

mfC81204

mfC81205

mfC81206

mfC81207

mfC81208

mfC81209

mfC81210

mfC81211

mfC81212

mfC81213

mfC81214

mfC81215

mfC81216

mfC81217

mfC81218

mfC81219

mfC81220

mfC81221

mfC81222

mfC81223

mfC81224

mfC81225

mfC81226

mfC81227

mfC81228

mfC81229

mfC81230

mfC81231

mfC81232

mfC81233

mfC81234

mfC81235

mfC81236

mfC81237

mfC81238

mfC81239

mfC81240

mfC81241

mfC81242

mfC81243

mfC81244

mfC81245

mfC81246

mfC81247

mfC81248

mfC81249

mfC81250

mfC81251

mfC81252

mfC81253

mfC81254

mfC81255

mfC81256

mfC81257

mfC81258

mfC81259

mfC81260

mfC81261

mfC81262

mfC81263

mfC81264

mfC81265

mfC81266

mfC81267

mfC81268

mfC81269

mfC81270

mfC81271

mfC81272

mfC81273

mfC81274

mfC81275

mfC81276

mfC81277

mfC81278

mfC81279

mfC81280

mfC81281

mfC81282

mfC81283

mfC81284

mfC81285

mfC81286

mfC81287

mfC81288

mfC81289

mfC81290

mfC81291

mfC81292

mfC81293

mfC81294

mfC81295

mfC81296

mfC81297

mfC81298

mfC81299

mfC81300

mfC81301

mfC81302

mfC81303

mfC81304

mfC81305

mfC81306

mfC81307

mfC81308

mfC81309

mfC81310

mfC81311

mfC81312

mfC81313

mfC81314

mfC81315

mfC81316

mfC81317

mfC81318

mfC81319

mfC81320

mfC81321

mfC81322

mfC81323

mfC81324

mfC81325

mfC81326

mfC81327

mfC81328

mfC81329

mfC81330

mfC81331

mfC81332

mfC81333

mfC81334

mfC81335

mfC81336

mfC81337

mfC81338

mfC81339

圖 4.9 再循環流量控制系統控制圖(3)

[illegible]

圖 4.10 再循環流量控制系統控制圖(4)

18	1	18
1	19	1
18	1	18
1	17	1
15	1	15

圖 4.15 十九組控制棒的分佈狀況示意圖

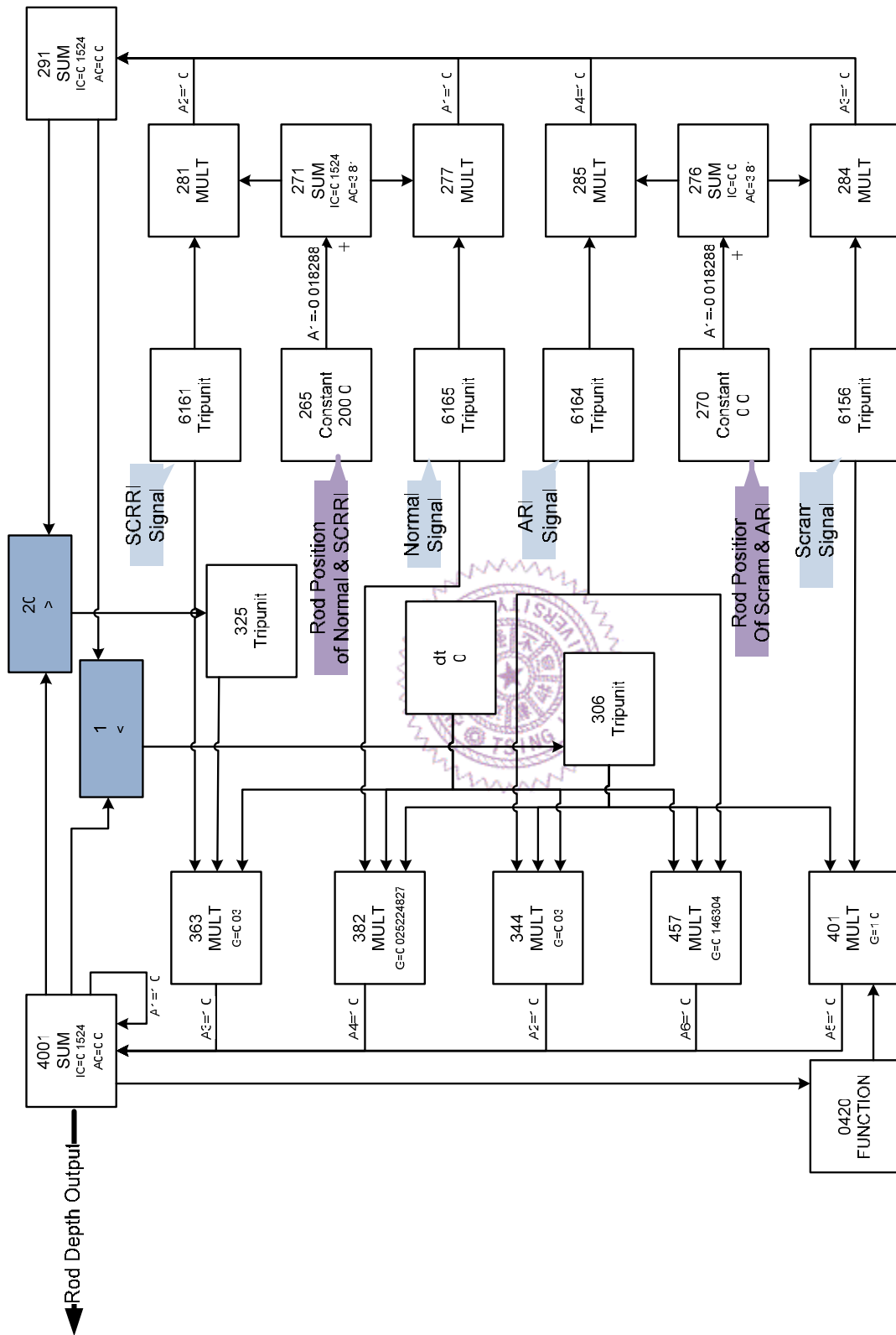


圖 4.16 棒控制與資訊系統控制圖

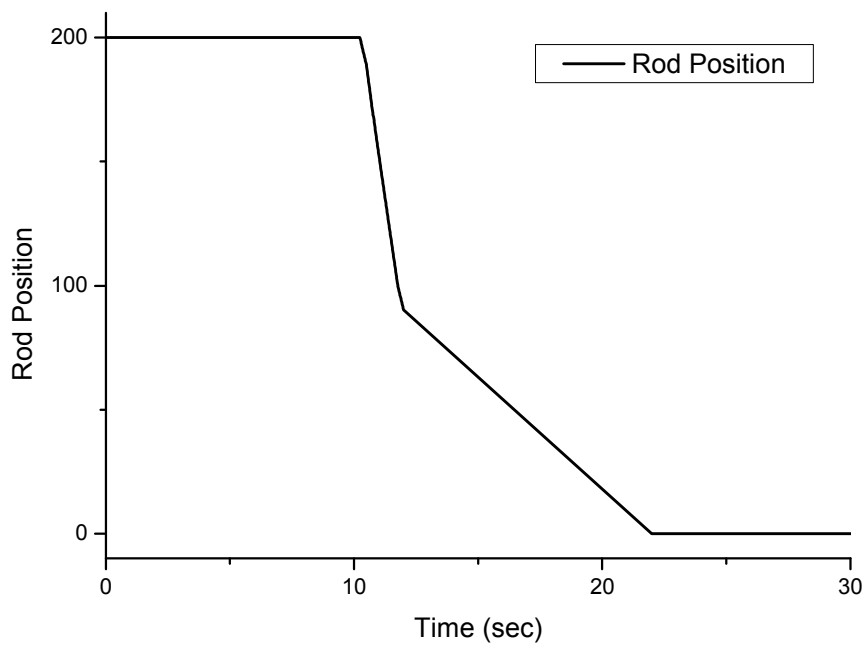


圖 4.17 Scram 插棒示意圖

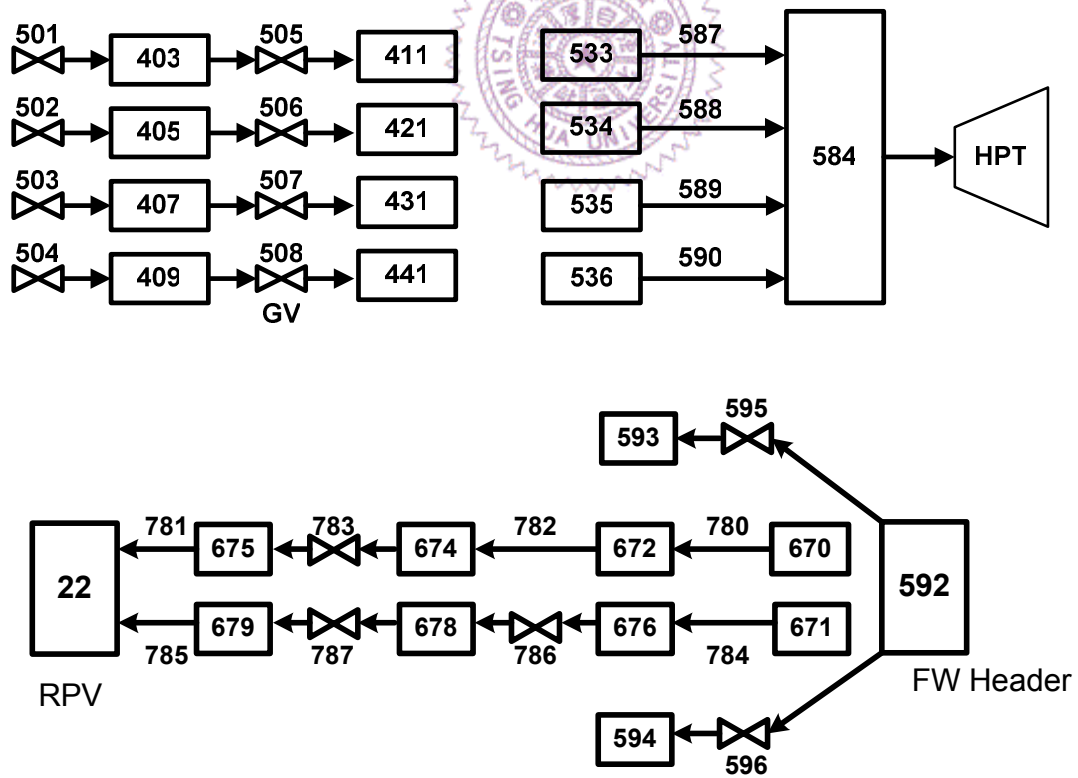


圖 4.18 邊界設定示意圖

表 4-1 十九組控制棒在不同狀態之下應該達到的棒位

組別	棒數	一般運轉	選棒插入	停機插棒
1	104	200	200	0
2	4	200	200	0
3	8	200	200	0
4	8	200	56	0
5	8	200	200	0
6	8	38	0	0
7	4	200	0	0
8	4	200	200	0
9	8	200	56	0
10	8	200	200	0
11	4	40	0	0
12	8	200	0	0
13	4	40	0	0
14	4	200	200	0
15	8	200	56	0
16	4	32	0	0
17	4	200	0	0
18	4	200	200	0
19	1	32	0	0

表 4-2 穩態初始條件設置

參數	初始值
Reactor Thermal Power [MWt]	3926.0
RPV Dome Pressure [MPa]	7.17564
RPV Core Flow [kg/s]	12402.847
RPV Narrow Range Water Level [cm]	423.867
Steam Flow [kg/s]	2128.680
Feedwater Flow[kg/s]	2128.657
Feedwater Temperature[°C]	215.803

表 4-3 重置後初始條件列表

參數	初始值
Reactor Thermal Power [MWt]	3926.0
RPV Dome Pressure [MPa]	7.174232
RPV Core Flow [kg/s]	12408.960
RPV Narrow Range Water Level [cm]	423.585
Steam Flow [kg/s]	2128.447
Feedwater Flow[kg/s]	2133.280
Feedwater Temperature[°C]	215.747

第五章 龍門核電廠暫態事故分析

5.1 前言

龍門核電廠啟動測試報告^[7]（Startup Transient Analysis Report，STAR）為奇異公司針對龍門核電廠商轉前的啟動測試項目所提出的測試模擬報告。報告中列出的啟動測試項目分成下列幾項：

冷卻水加熱喪失（Loss of Feedwater Heater）

冷卻水泵跳脫（Feedwater Pump Trip）

一台爐內泵跳脫（Trip of 1 RIP）

三台爐內泵跳脫（3 RIPs Trip Test）

喪失外電及汽機/發電機跳脫（Loss of Offsite Power and Turbine/Generator Trip）

汽機跳脫（Turbine Trip）

覆載棄載（Load Rejection）

急速降載（Load Winddown）

反應爐完全隔離（Reactor Full Isolation）



本研究利用 RELAP5-RT 分析<一台爐內泵跳脫>和<三台爐內泵跳脫>兩個暫態，並和 STAR 與 ALPS 的結果做比較。STAR 中所使用的分析程式 ODYN^[7]是由美國奇異公司自行發展的暫態分析程式。ODYN 模擬的電廠架構較簡化，主蒸汽管路只模擬一條，以汽機為邊界。沒有電廠平衡系統，故飼水管路端也是以邊界條件直接給定。ALPS 使用 RELAP5-RT 為熱水流分析的程式，將電廠分為 RPV 與 BOP，以平台軟體 3KeyMaster 相互連結。控制系統亦建立於平台上，藉由平台取得的熱水流資訊做相關的控制反應與信號傳遞。

5.2 一台爐內泵跳脫暫態

5.2.1 一台爐內泵跳脫暫態測試簡述

在正常運轉的狀態下，一台反應爐爐內泵跳脫後，電廠可於達到穩定狀況之下重新啟動爐內泵。測試的重點為電廠整體反應需在可接受的範圍內，即在暫態進行中（包含跳脫及重新啟動），反應爐不應停機；暫態發生後，MCPR 應該大於熱限值；在重新啟動暫態中，最高中子通率應當低於停機設定點 7.5%，且最高熱通率必須比停機設定點小 5% 以上。

本研究因控制系統沒有爐內泵重啟模擬的能力，故僅模擬跳脫一台反應爐爐內泵的狀況。起始條件為 100% 爐心功率，100% 爐心流量，爐內泵在 0.01 秒時跳脫。其餘條件都按照輸入模式原始設定進行。

當爐內泵 0.01 秒時跳脫，爐心流量因少了一台爐內泵的水流瞬間下降十分之一，爐心功率跟著下降。RFCS 偵測到爐心水量不足，提昇剩餘九台爐內泵的轉速，將爐心水流補足。此外，爐心流量的變化也造成水位下降、反應爐頂端壓力下降，蒸汽流量下降，除了爐內泵加速，FWCS 增加流量補足水位，SBPC 控制調速閥穩定壓力和蒸汽流量。由於九台爐內泵即可提供 100% 爐心流量，最後系統穩態仍然可以維持 100% 爐心功率，100% 爐心流量。

5.2.2 一台爐內泵跳脫暫態結果比較

本模擬結果如圖 5.1 至 5.11 所示，RELAP5-RT 多數結果和 ALPS 及 STAR 非常近似。圖 5.1 為三者功率（中子通率）的比較，由於 STAR 報告提供的參數中，只有中子通量的變化而不含功率的變化，但中子通率大約與功率變化成正比，因此將 STAR 的中子通率、ALPS 及 RELAP5-RT 所模擬的功率互相比較。暫態初啟幾秒內 RELAP5-RT 與 ALPS 的結果非常接近，STAR 的中子通率下降則較快，也較其他二者低了約 10%。然而，STAR 回到 100% 功率的速度也較其他二者快。圖 5.2 是爐心入口流量，相當於比較爐內泵提供的流量。STAR 的爐內泵加速曲線和其他二者有顯著的不同，雖然三者都於 35~40 秒左右到達最大流量，但 STAR 爐心流量變化前十秒加速較快，造成 STAR 功率變化較劇烈，在十秒左右即回到 100% 功率。10 秒後流量亦較平緩，功率變化較緩和。ALPS 和 RELAP5-RT 的流量則以一定幅度的速率提升到 100%。另，RELAP5-RT 爐心

流量最低點在 1.7 秒的 90.6%爐心流量，然 ALPS 流量最低點是 1.78 秒的 89.85%爐心流量。對照爐內泵降速曲線（即圖 5.3），RELAP5-RT 爐內泵在 1.7 秒左右速度降到 0，模擬器在 1.8 秒左右降至 0，降速較慢也造成其他爐內泵比 RELAP5-RT 稍晚始提昇速率。因此儘管二者的流量提昇速率幾乎相同，最後 ALPS 流量到達 100%的時間仍較晚。圖 5.4 中，三者進口次冷度的走勢很接近，上下不到 5%的差異。差異來源除了與飼水系統供給的流量相關，與飼水溫度以及爐心壓力也有密切的關係。爐心壓力降低使得飽和溫度降低，在爐心壓力變化最劇烈的前 10 秒，次冷度的變化大致與壓力變化成等比例關係。STAR 的飼水的溫度以固定邊界條件的形式給入，此邊界條件的設定沒有詳細資料，單純從飼水變化無法完整解釋和其他兩者差異的原因；ALPS 以及 RELAP5-RT 的飼水溫度是經由 RELAP5-RT 程式運算得到的結果，飼水溫度的變化比較如圖 5.5，溫度相差不到千分之二，對兩者次冷度的差異影響有限；RELAP5-RT 飼水系統的反應較慢，飼水下降和回升的時間都比模擬器的反應慢了兩倍左右，是以 RELAP5-RT 次冷度的震盪較模擬器稍大。圖 5.6 顯示反應爐水位變化，三者皆在 40 秒內藉由飼水控制到初始狀態，其中，只有 STAR 在 20 秒內有些微的上下起伏，而 ALPS 和 RELAP5-RT 的結果很接近。爐心壓力變化於圖 5.7，最開始由於一台爐內泵跳脫功率和壓力都瞬間下降，STAR 的壓力下降較大，但由於功率提昇較快，加上壓力控制系統的控制，很快的回到初始壓力。RELAP5-RT 壓力下降沒有 STAR 大，壓力控制系統最後並未將壓力帶回初始壓力，但差距不遠（20kPa 為不到千分之三的壓降）。ALPS 壓力下降最少，應是壓力控制系統的調速閥反應較快，將壓力控制住，最後也回到初始壓力狀態。反應壓力控制系統控制調速閥開關的狀況有兩處，分別是 RELAP5-RT 在壓力探底後有稍微大的震盪，以及模擬器壓力上升的過程中，略有小幅度震盪，如圖 5.8，也可看出兩者壓力控制系統的差異。圖 5.9 蒸汽流量變化和與圖 5.7 之壓力變化對照，STAR 起始 20 秒左右的流量較 ALPS 和 RELAP5-RT 都大，是以壓力下降幅度比較大。RELAP5-RT 和 ALPS 蒸汽流量行為極相似。另外，關於汽機流量，如圖 5.10，由於 STAR 沒有模擬電廠平衡系統，所以進汽機的蒸汽流量和出壓力槽的蒸汽流量相同，其行為反應與蒸汽流量相當。ALPS 和 RELAP5-RT 則因模擬部份蒸汽抽出至汽水分離再加熱器，因此低了 5%的

流量。其餘的狀況與出壓力槽的蒸氣流量相同。飼水流量如圖 5.11，STAR 的結果在一開始有比較明顯的上升，飼水流量下降的幅度約 3% 左右，僅有 ALPS 和 RELAP5-RT 的結果的一半。ALPS 和 RELAP5-RT 飼水的趨勢比較類似，但 RELAP5-RT 飼水控制系統的反應比較緩慢，飼水流量下降的比較慢。80 秒後三者的流量回到正常的 100% 流量且達到穩態。

從本暫態測試之結果可以發現，RELAP5-RT 的結果與 STAR 及 ALPS 的結果皆相當接近。其中，RELAP5-RT 與 ALPS 由於熱水流模式與部份控制系統幾乎相同，故兩者差異更小。唯飼水變化反應比較緩慢，使得相關參數震幅較大，以及壓力在穩態平衡後較其他兩者略低，是本暫態中兩個比較明顯的差異。

5.2.3 飼水系統設定方法比較

飼水系統的反應較慢是造成許多結果差異的原因。本研究使用的飼水控制系統是參考 RETRAN 的飼水控制建立。在 RETRAN 輸入模式中並不包含電廠平衡 (BOP) 部份，飼水控制直接用邊界條件的形式給入壓力槽。而 RELAP5-RT 的輸入檔卻擁有完整的 BOP 模擬，在飼水系統算出需求的飼水流量之後，輸入蒸汽驅動飼水泵之控制，利用飼水汽機驅動帶動飼水泵打出飼水。由於飼水給入的位置不同，造成 RELAP5-RT 的飼水反應比較遲緩。若參照 RETRAN 的設定方法，如圖 5.12 所示，飼水控制計算出的飼水流量平分後以依時接節 (Time Dependent Junction) 輸入接節 780 和 784，並不會影響穩態的結果，但會改變暫態時飼水系統的反應速度。圖 5.13 是一台爐內泵跳脫事件時，兩種設定方式之飼水流量比較。飼水控制直接作為流量邊界的方式確實反應比較快速。由於飼水反應較快，飼水流量變化的幅度也較小。對於和飼水流量有關的參數，如爐心進口次冷度以及爐心水位，確實有所改善，模擬結果和 ALPS 之結果更為貼近 (圖 5.14 和 5.15)。但此作法同時產生其他問題，圖 5.16 比較兩種作法的壓降，原本的狀況下壓力系統已經無法將壓力帶到正常運轉時的壓力，在飼水控制設為流量邊界後平衡壓力比原本還要更低，推測是將飼水控制計算結果直接作為流量邊界的設定方法，使得整個電廠的迴路不再完整，RPV 和 BOP 在飼水管路端流量資料無法同步，進而影響到整個電

廠的平衡。

飼水系統設定方法的不同，會造成本暫態事件些許的差異。儘管將飼水系統的計算值直接設定為流量邊界能夠將飼水反應變快，但同時由於電廠平衡被破壞，在壓力控制上會產生其他的問題。

5.3 三台爐內泵跳脫暫態

5.3.1 三台爐內泵跳脫暫態測試簡述

跳脫三台反應爐爐內泵測試主要有三個目的：測試電廠整體反應是否在可接受的範圍內、測試飼水控制系統是否能將水位控制住使水位不至於碰到汽機跳脫（L8）或飼水跳脫（L3）的信號、在較低功率狀態（75%功率）下測試選棒插入系統是否成功作用。

本研究三台爐內泵跳脫事件僅測試全功率運轉狀態。起始條件為 100%爐心功率，100%爐心流量，其餘條件設定都按照輸入模式原始設定進行。

當爐內泵於 0.01 秒時跳脫，爐心流量因少了三台爐內泵的水流瞬間下降十分之三，爐心功率同時下降。RFCS 偵測到爐心水量不足，提昇剩餘七台爐內泵的轉速，將爐心水流流量補上。爐心流量的變化同時使水位下降、反應爐頂端壓力下降，蒸汽流量下降，除了爐內泵加速，FWCS 增加流量補足水位，SBPC 控制調速閥穩定壓力和蒸汽流量。由於只剩七台爐內泵，爐內泵可提供的流量最大值為 77%左右的爐心流量，因此最後系統穩態大約維持在 85%爐心功率，77%爐心流量。

5.3.2 三台爐內泵跳脫暫態結果比較

本案例模擬結果如圖 5.17 至 5.27 所示，RELAP5-RT 模擬結果和 ALPS 非常近似，和 STAR 有比較多不同之處。三者功率（中子通率）的比較如圖 5.17，起初幾秒 RELAP5-RT 與 ALPS 的結果非常接近，STAR 的中子通率仍然較另外兩者低了 10%左右。STAR 功率在 20 秒左右很快的達到平衡功率左右，原因仍在於 STAR 的爐內泵加速較快。對照爐心入口流量（圖 5.18），STAR 的爐內泵加速曲線不但上升較快，且爐心流量可以到達 87%左右，較設計值七台爐內泵全速可提供的 77%流量多了 10%（此結果有待和奇異公司進一步商榷）。RELAP5-RT 和模擬器的爐內泵降速曲線稍微有一點

點的差異，如圖 5.19，模擬器和 STAR 的降速較 RELAP5-RT 稍微晚了一點，因此模擬器爐內泵稍晚開始升速，造成兩者爐心流量些許的差異。圖 5.20 為過冷度的變化，前 20 秒的變化主因在於系統壓力的快速改變，飼水溫度差異不大(圖 5.21)可以不予討論。由於系統瞬間暫態比前案例劇烈，20 秒後次冷度和的飼水變化關係更加明顯。圖 5.22 顯示反應爐水位變化，看似差距頗大，但由於 STAR 起始點設定於 Level 4 的水位，而 RELAP5-RT 和模擬器都設定在一般運轉水位，故實際上三者的變化量相當接近。暫態起始時三者都因瞬間爐心流量不足，爐心產生大量氣泡以及蒸氣流量驟減，使得水位在 5 秒內快速上升，然 STAR 的上升幅度比 RELAP5-RT 及模擬器小了大約 10 公分。比較三者的蒸氣流量(圖 5.25)，上述反應肇因於 STAR 蒸氣流量降低的速度慢流量較大，及其爐心功率(圖 5.17)下降較快。STAR 的水位 5 秒後出現忽然下降再上升的狀況，是其他二者沒有的。比較其他參數可發現，這個現象均發生在與爐心壓力相關的參數上。爐心壓力變化於圖 5.23，起初三台爐內泵跳脫功率和壓力都瞬間下降，其中，STAR 的壓力下降幅度極大，但由於功率提昇較快及壓力控制系統的控制，在 20 秒內迅速的到達穩態壓力。因此推斷因爐心壓力變化過大且過快，連帶影響了水位的變化；相較之下，RELAP5-RT 和 ALPS 壓力下降只有 STAR 一半大，探底後回升幅度又比較和緩，對其他參數的影響較小。水位 20 秒後的變化情形正相關於飼水流量。同一台爐內泵跳脫的案例，RELAP5-RT 壓力探底後震盪以及模擬器在壓力上升過程中的小幅震盪，與壓力控制系統控制調速閥開關的差異有關，如圖 5.24。RELAP5-RT 壓力控制系統最後穩態壓力仍比其他二者略低(20kPa，不到千分之三)。圖 5.25 是反應爐出口蒸汽流量，將其變化和壓力變化對照，得 STAR 起始 20 秒左右的流量大於 ALPS 和 RELAP5-RT 的流量，是以壓力下降幅度比較大。RELAP5-RT 和 ALPS 蒸汽流量行為相似，比 STAR 的穩態流量低 2% 左右，此差異和爐心流量的差異有關。汽機流量的部份，如圖 5.26，ALPS 和 RELAP5-RT 因模擬部份蒸氣抽出至汽水分離再加熱器，故流量低了 5%，其餘類似主蒸氣流量。飼水流量如圖 5.27，STAR 的結果在一開始有上升，飼水流量下降的幅度約 13% 左右，且很快的在 150 秒達到平衡。ALPS 和 RELAP5-RT 飼水的趨勢類似，但 RELAP5-RT 飼水控制系統的反應比較緩慢，震幅也因而較大。300 秒後兩者的流量

大致達到穩態，穩態值較 STAR 略低 2%。

從本暫態測試之結果可以發現，RELAP5-RT 的結果與 STAR 及 ALPS 的結果趨勢大致類似。其中，RELAP5-RT 與 ALPS 使用相同的熱水流模式，故這兩者模擬結果更為接近。STAR 起始的壓力變化極大，使其起始趨勢和 RELAP5-RT 及 ALPS 較為不同。RELAP5-RT 的壓力在穩態平衡後仍較其他兩者略低。另外，儘管 RELAP5-RT 與 ALPS 結果相當接近，但 RELAP5-RT 的飼水變化反應仍較緩慢，故相關參數震幅較大。

5.4 暫態比較結論

從以上暫態的結果可以發現，RELAP5-RT 的模擬結果和 STAR 及 ALPS 的結果都相當類似，表示 RELAP5-RT 新建的控制系統功能正常，且其反應合理。唯壓力控制系統與飼水控制系統反應差異較顯著，需要進一步的更新。



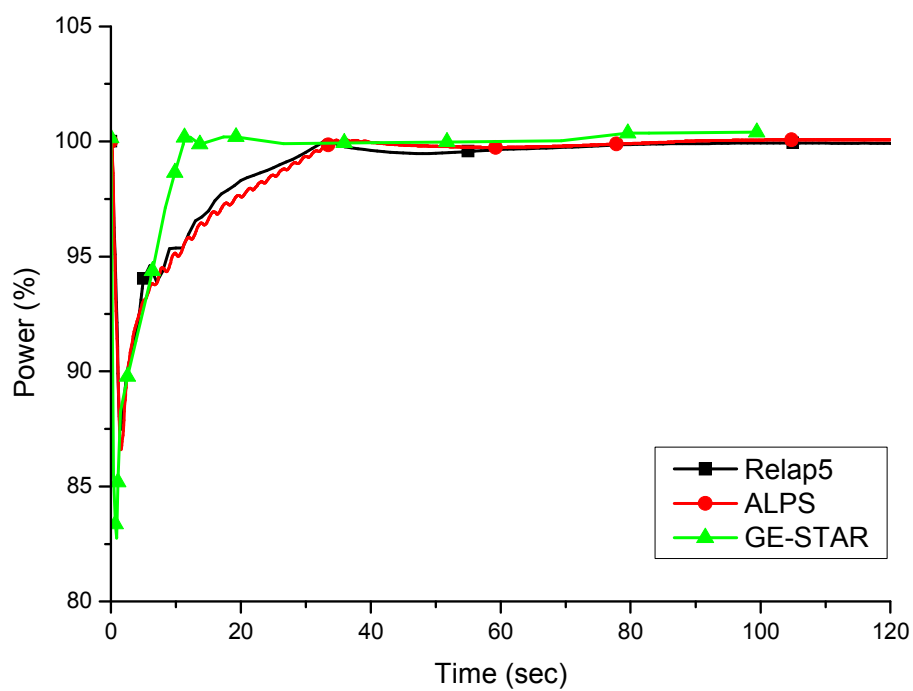


圖 5.1 一台爐內泵跳脫功率（中子通率）比較圖

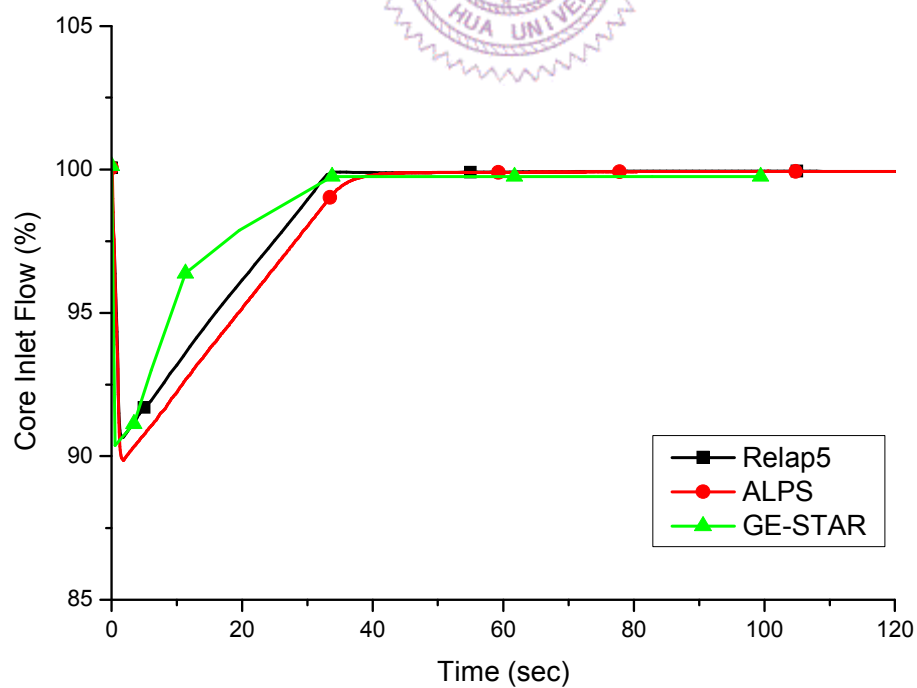


圖 5.2 一台爐內泵跳脫爐心進口流量比較圖

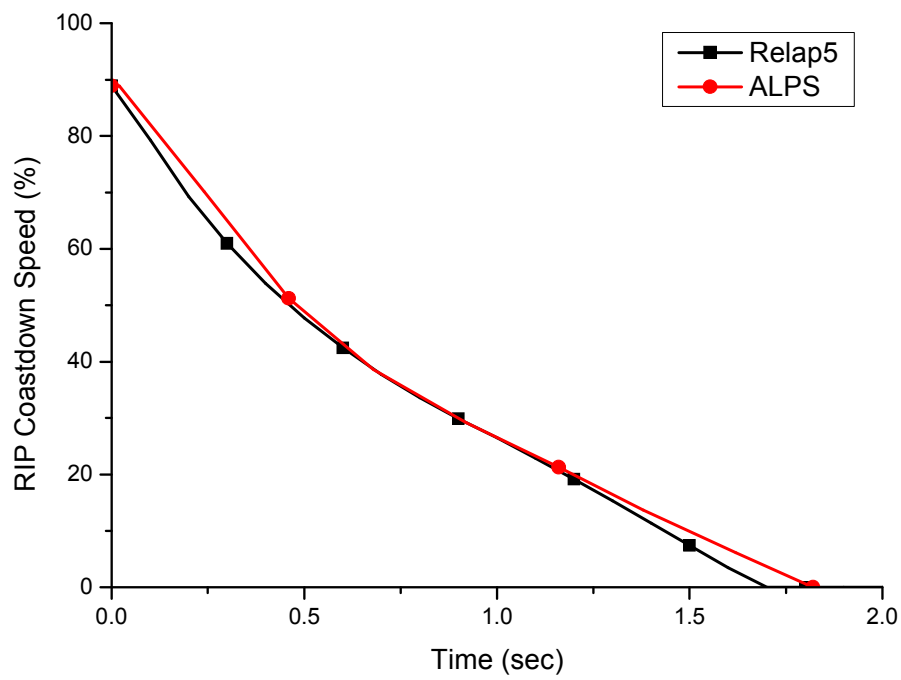


圖 5.3 一台爐內泵跳脫降速曲線比較圖

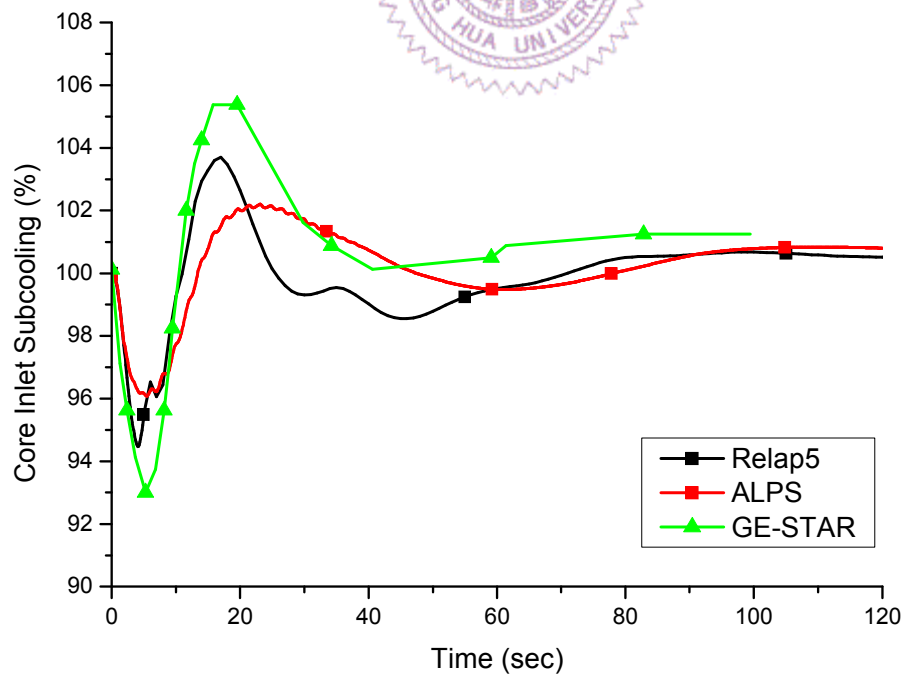


圖 5.4 一台爐內泵跳脫爐心進口過熱度比較圖

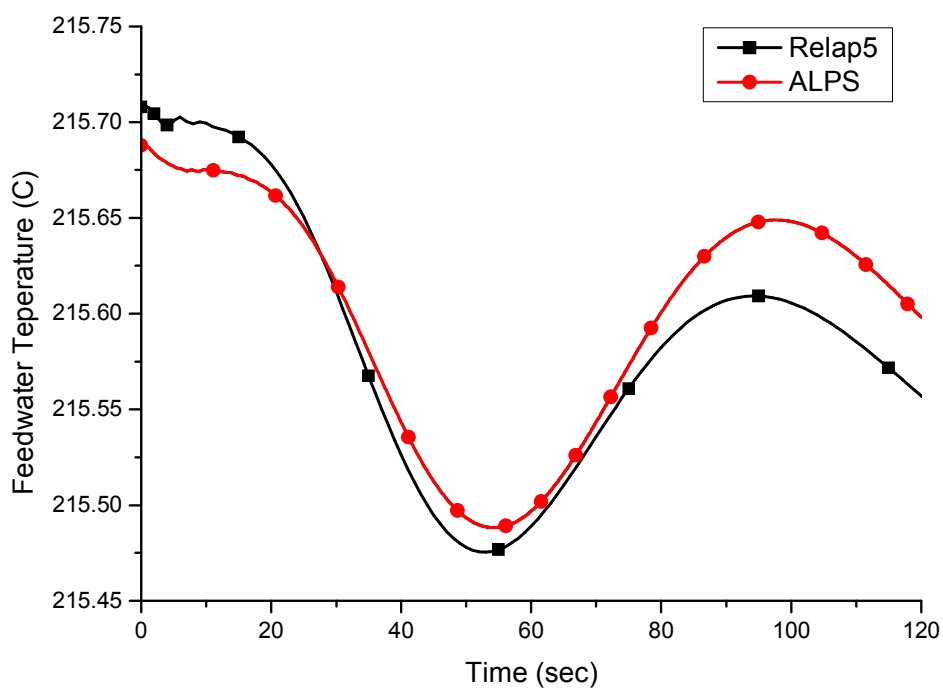


圖 5.5 一台爐內泵跳脫飼水溫度比較圖

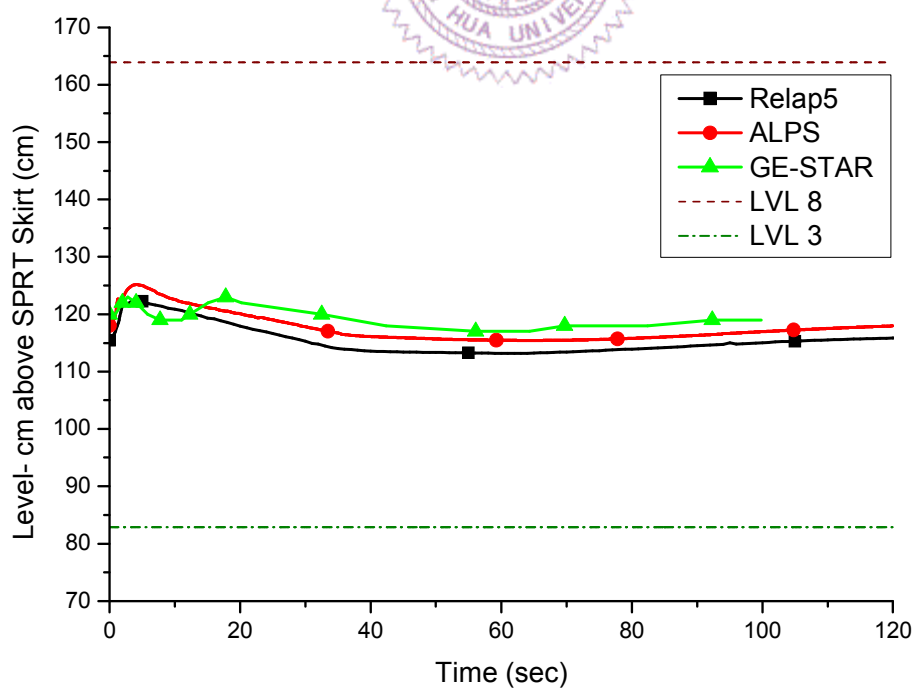


圖 5.6 一台爐內泵跳脫水位比較圖

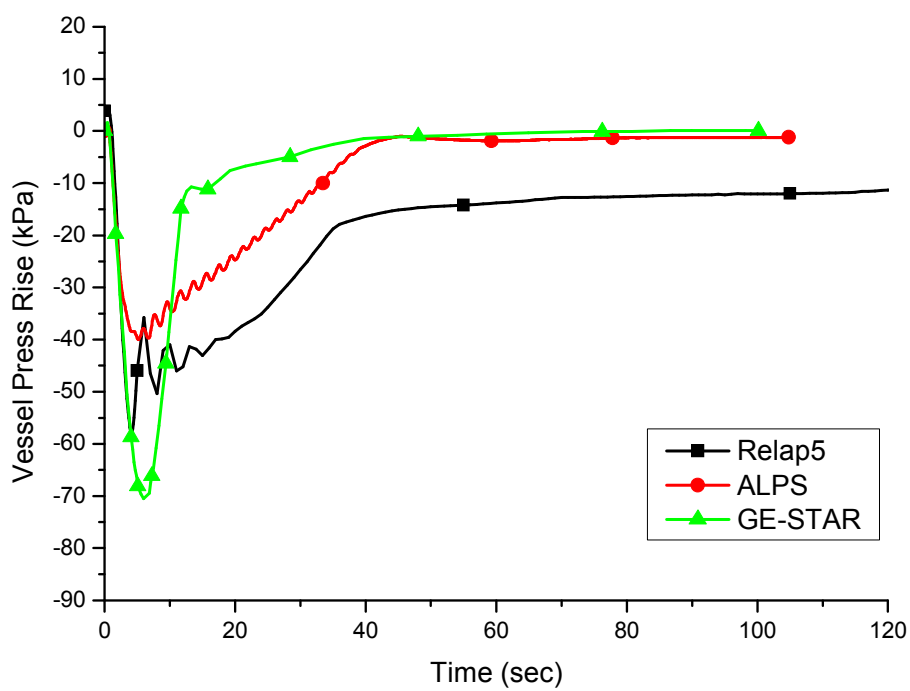


圖 5.7 一台爐內泵跳脫壓力變化比較圖

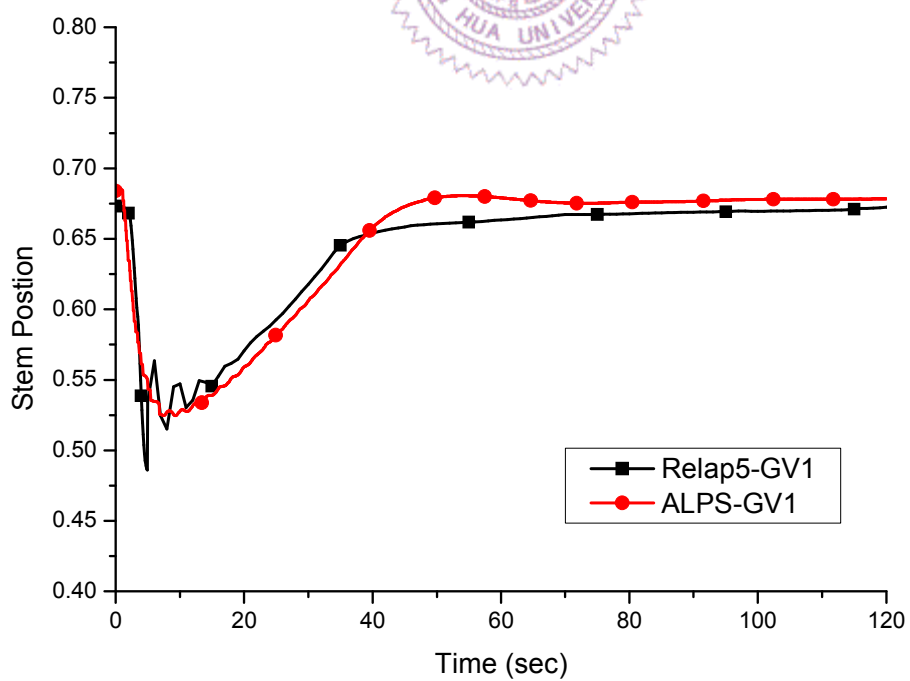


圖 5.8 一台爐內泵跳脫調速閥開關比較圖

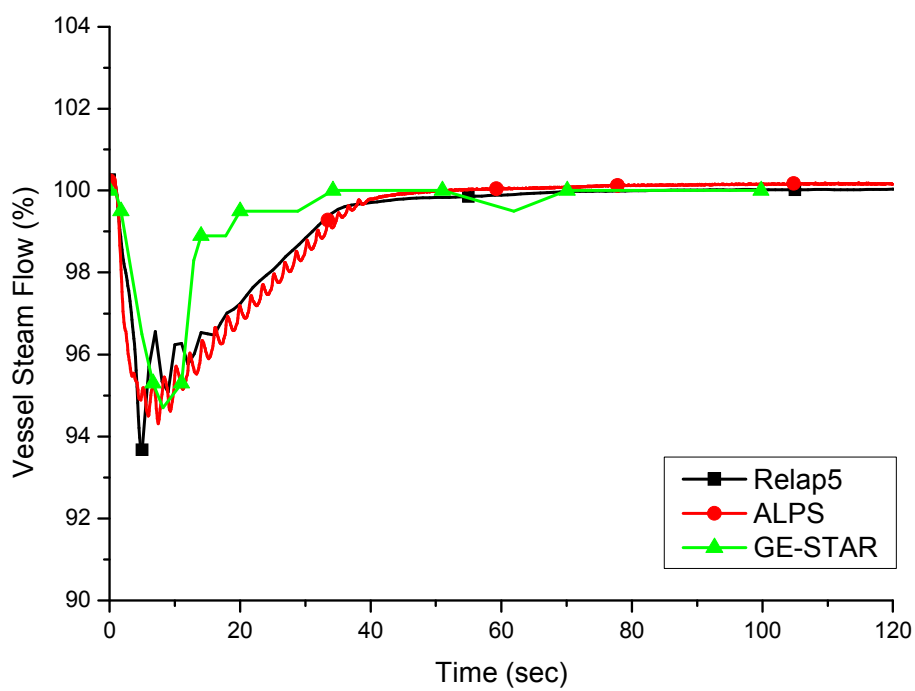


圖 5.9 一台爐內泵跳脫反應爐出口蒸氣流量比較圖

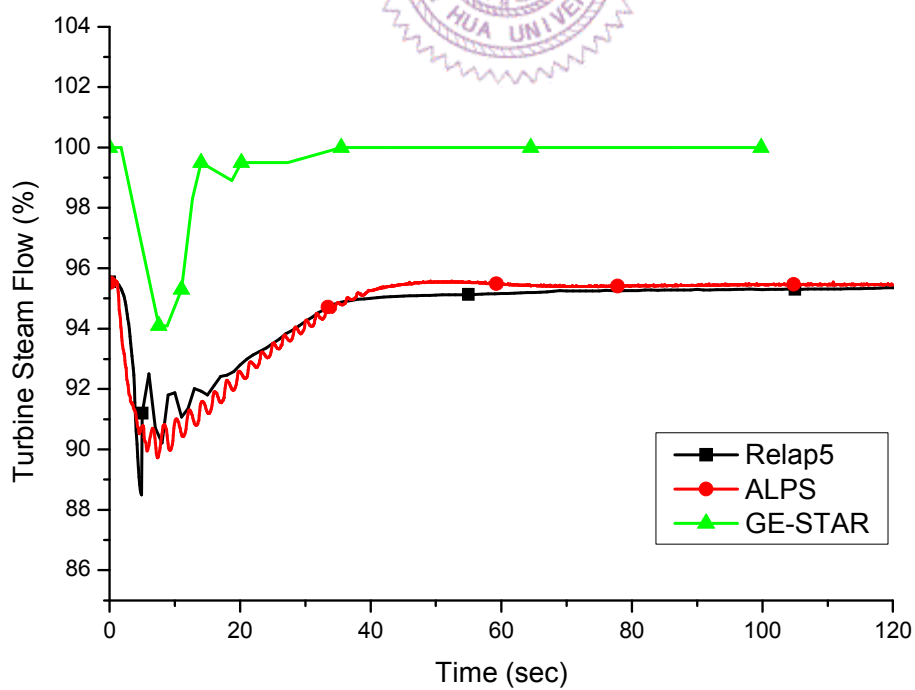


圖 5.10 一台爐內泵跳脫汽機入口蒸氣流量比較圖

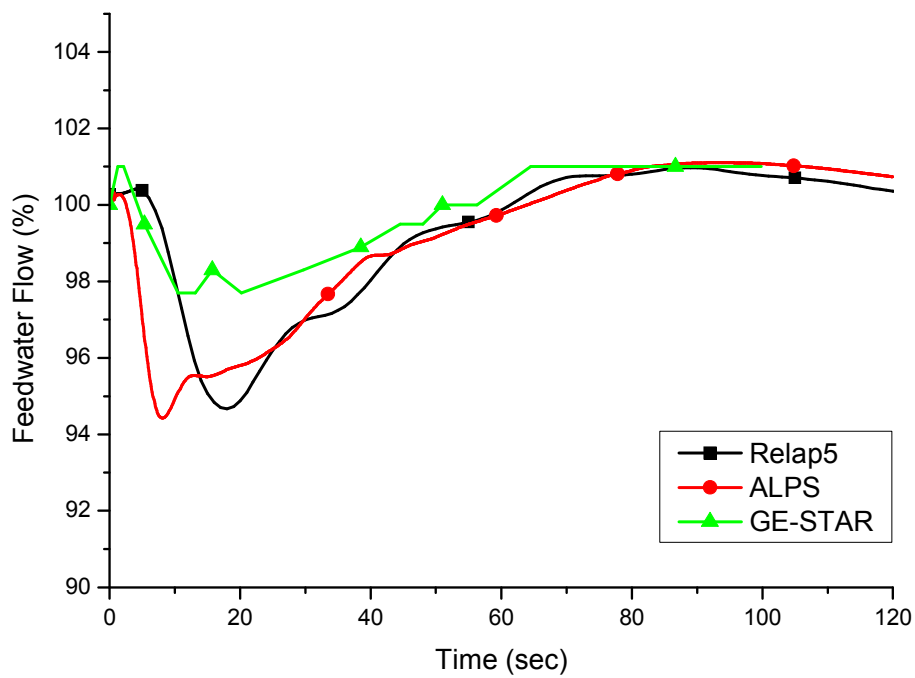


圖 5.11 一台爐內泵跳脫飼水流量比較圖

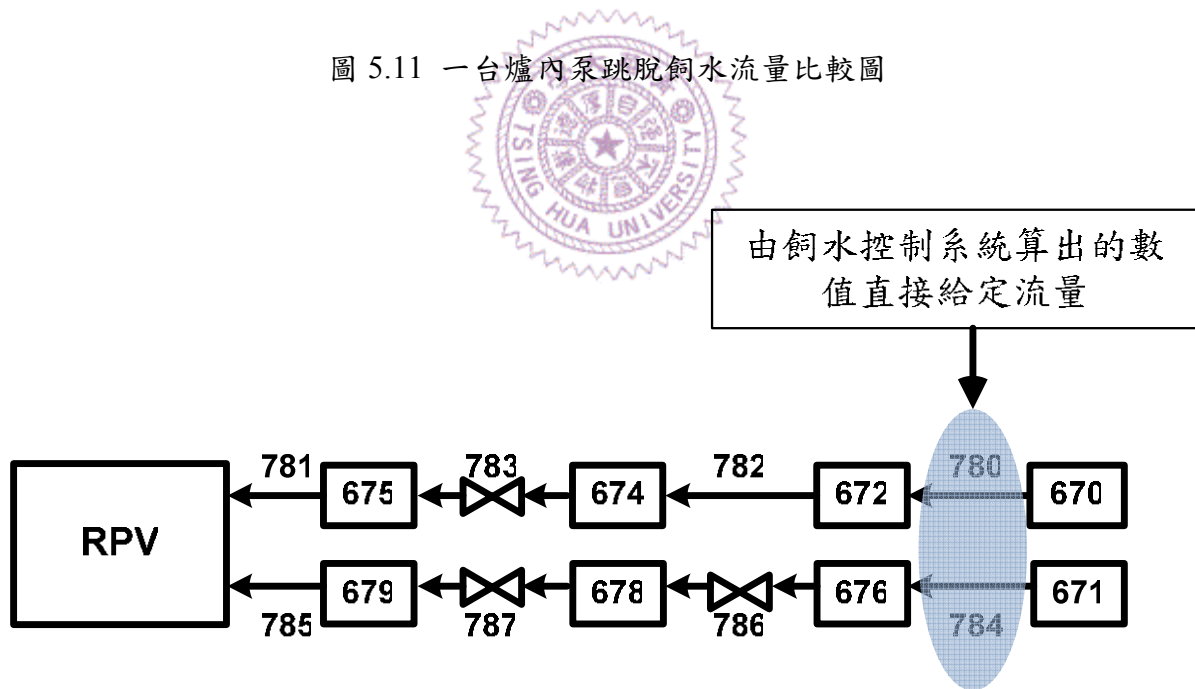


圖 5.12 飼水系統計算出的數值直接作為流量邊界

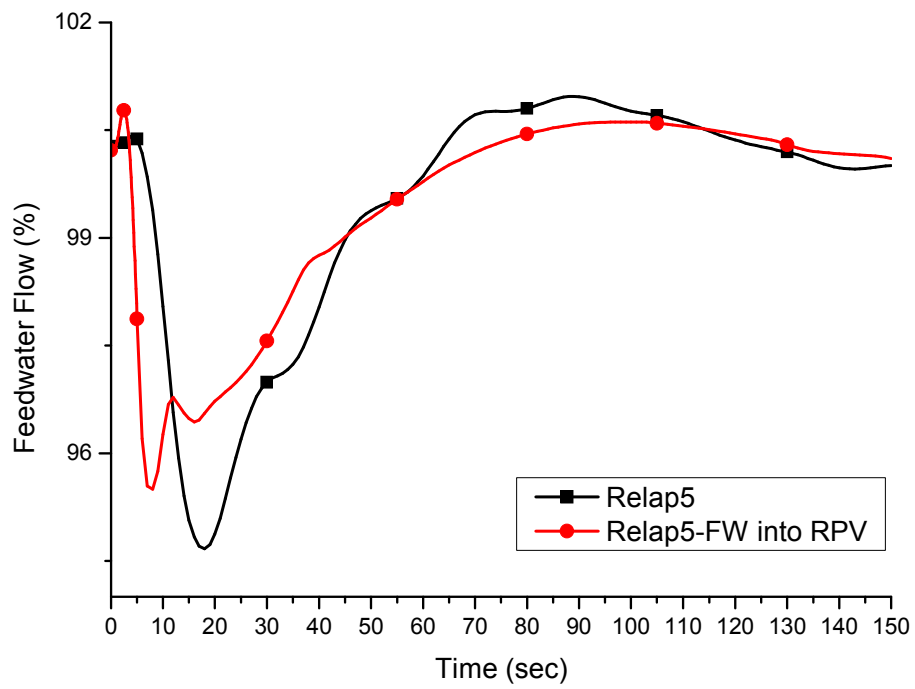


圖 5.13 一台爐內泵跳脫事件不同飼水設定之飼水流量比較

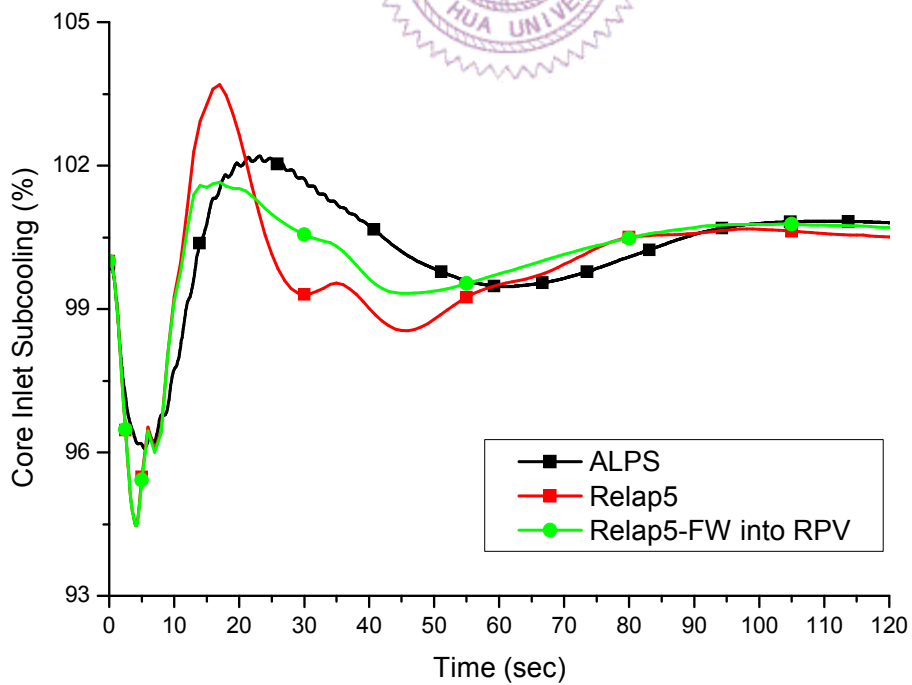


圖 5.14 一台爐內泵跳脫事件不同飼水設定與 ALPS 爐心次冷度結果比較

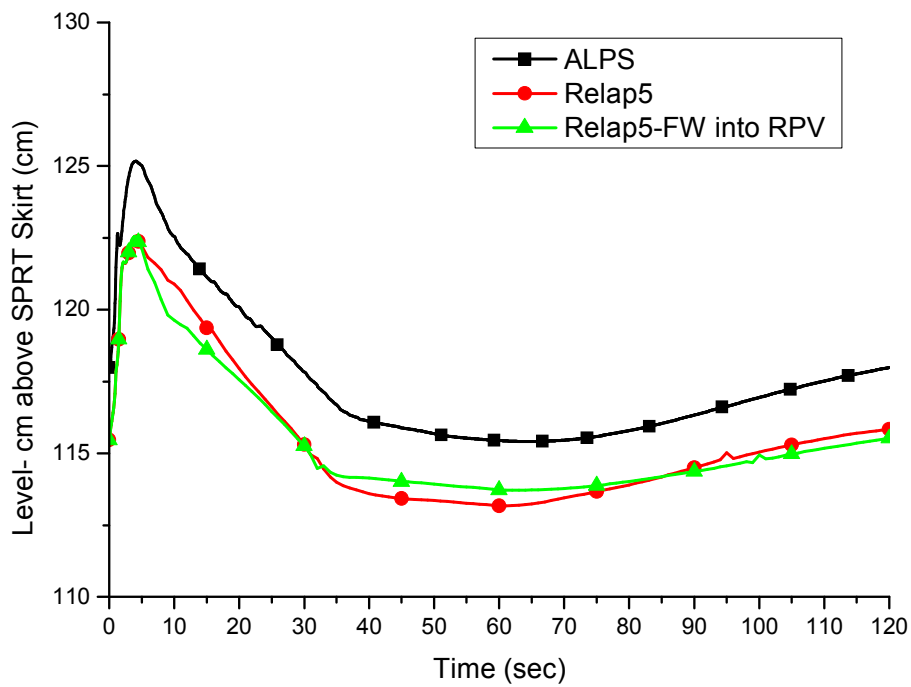


圖 5.15 一台爐內泵跳脫事件不同飼水設定與 ALPS 爐心水位比較

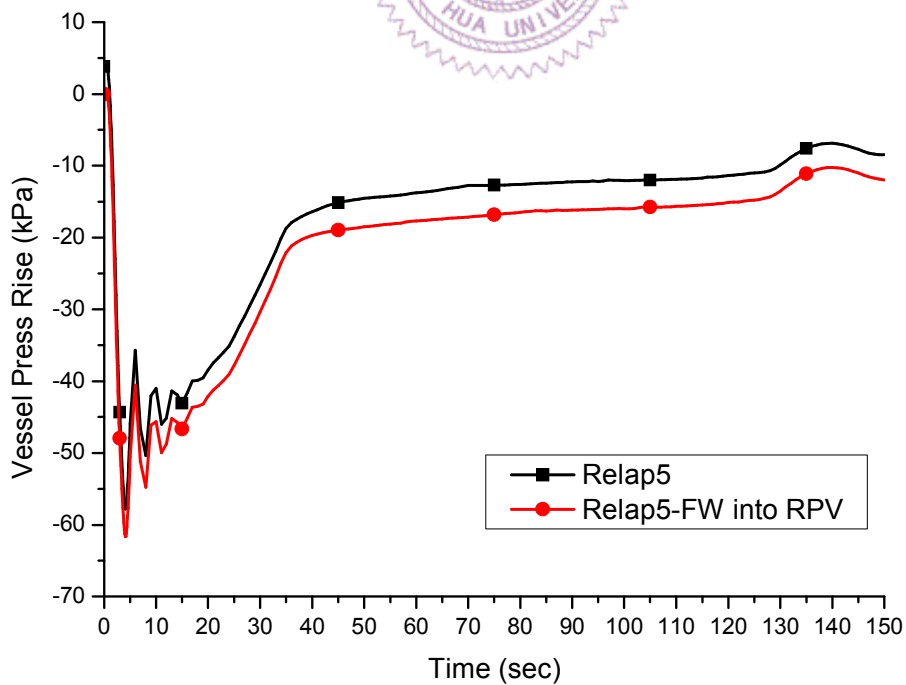


圖 5.16 一台爐內泵跳脫事件不同飼水設定之壓降比較

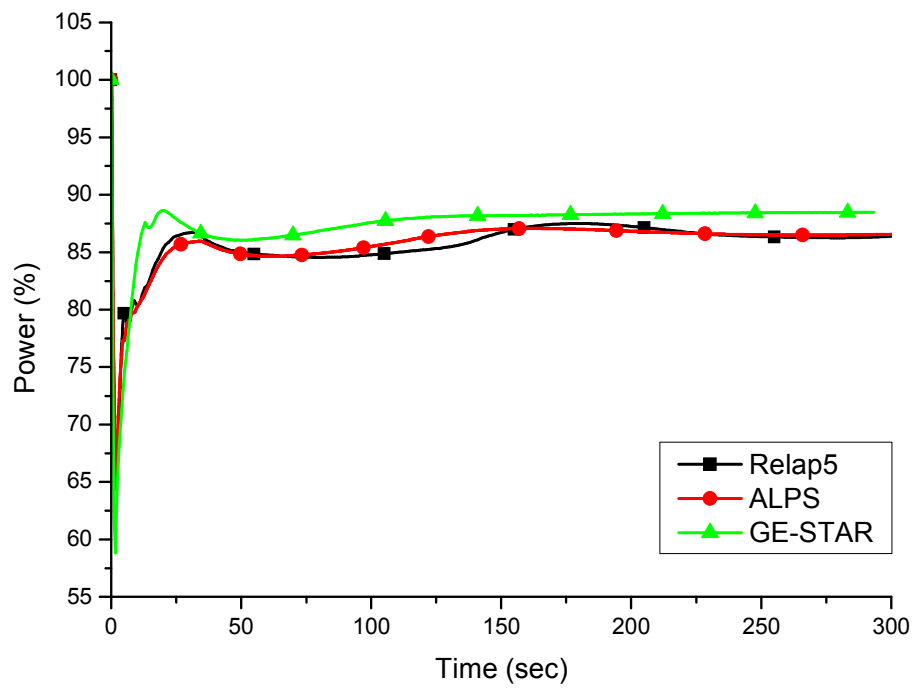


圖 5.17 三台爐內泵跳脫功率（中子通率）比較圖

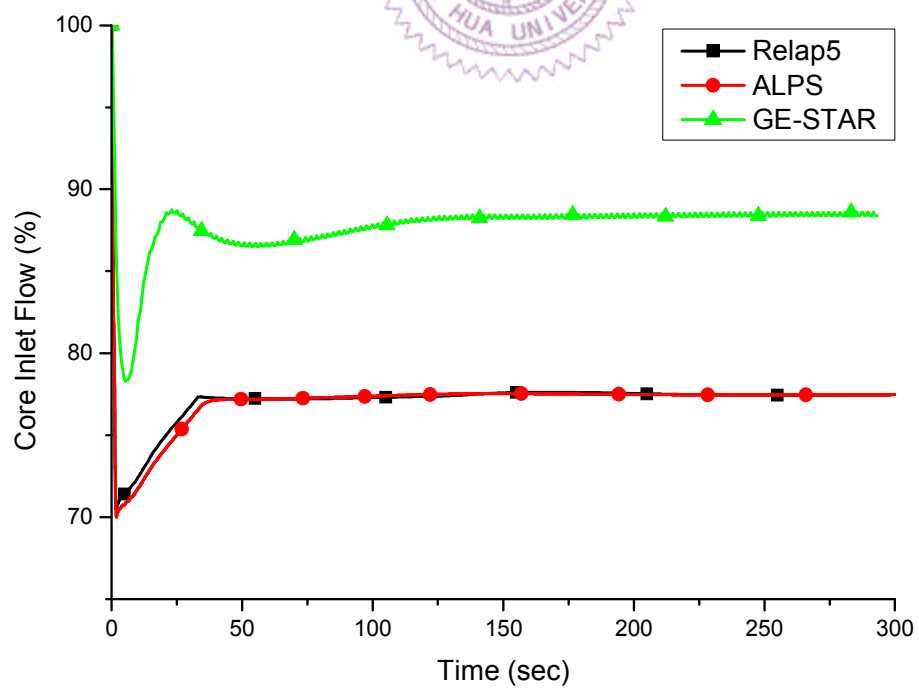


圖 5.18 三台爐內泵跳脫爐心進口流量比較圖

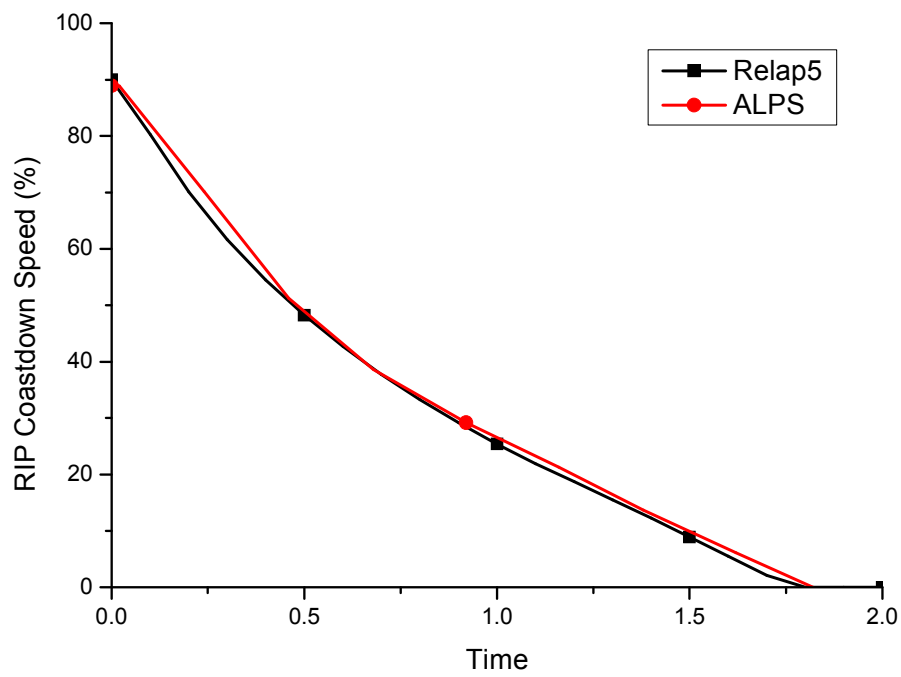


圖 5.19 三台爐內泵跳脫飼水流量比較圖

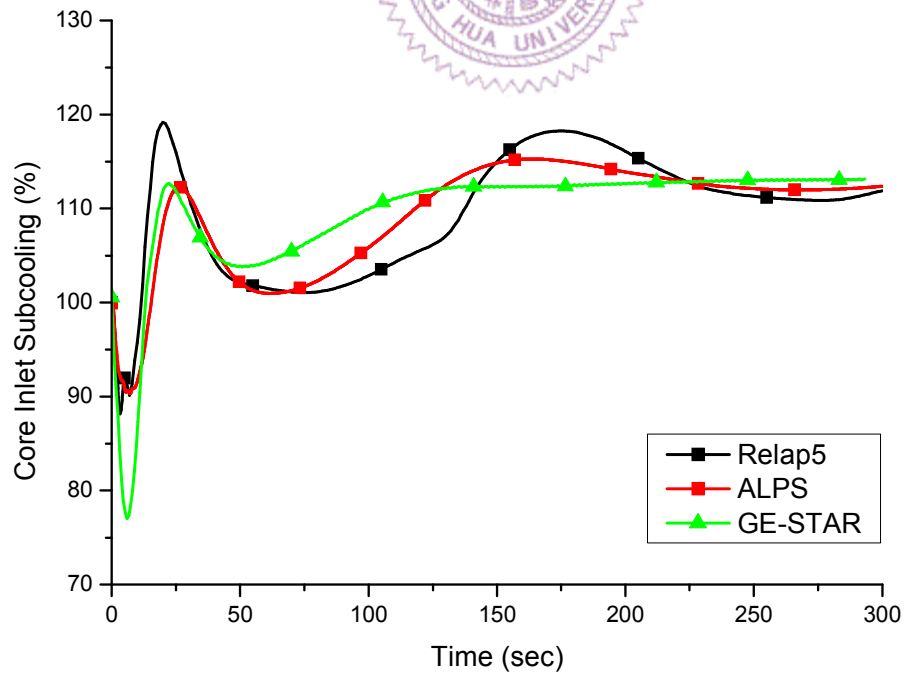


圖 5.20 三台爐內泵跳脫爐心進口過熱度比較圖

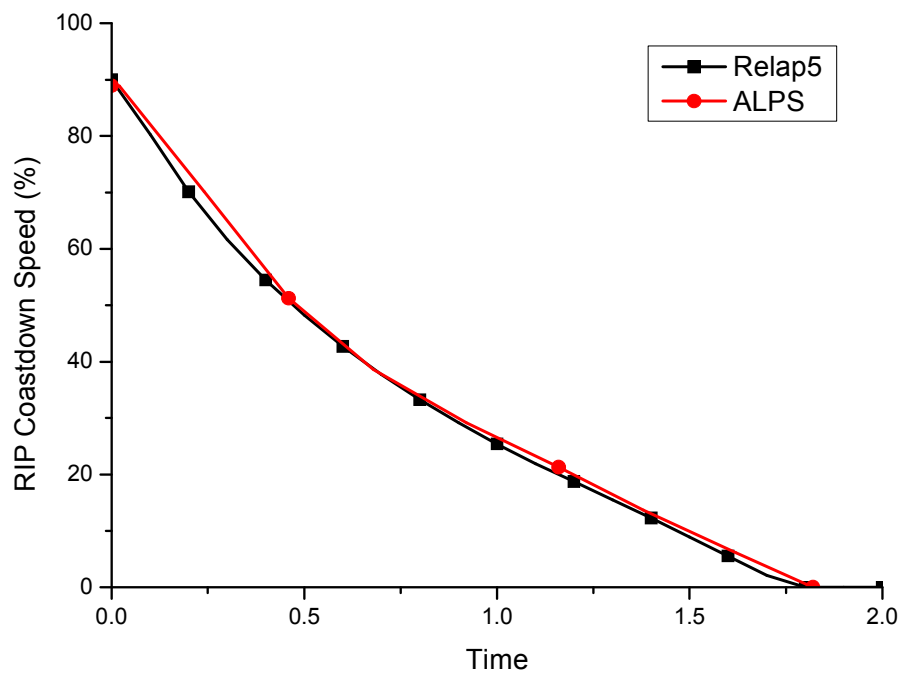


圖 5.21 三台爐內泵跳脫飼水溫度比較圖

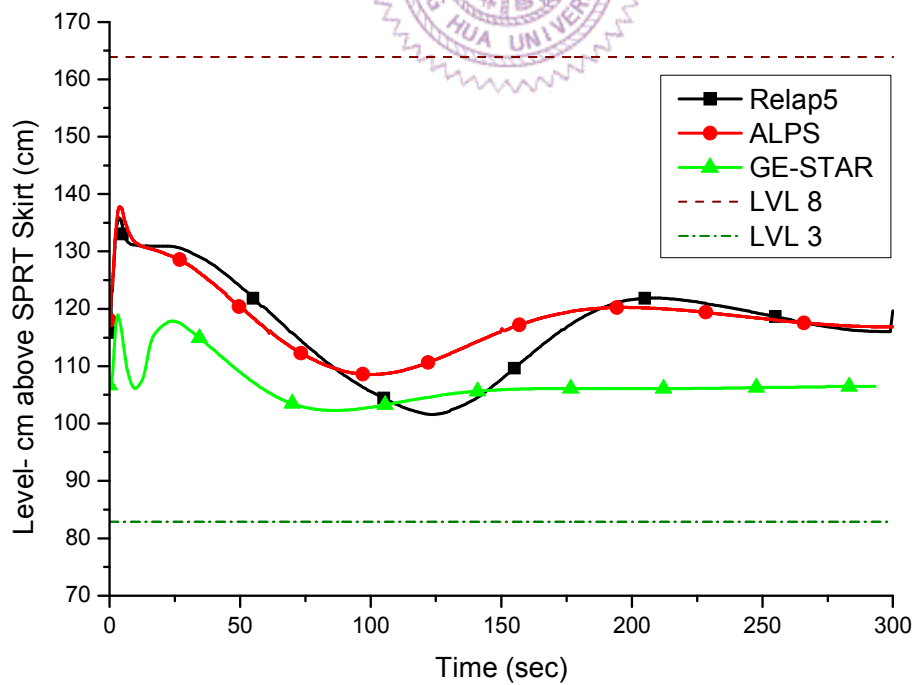


圖 5.22 三台爐內泵跳脫水位比較圖

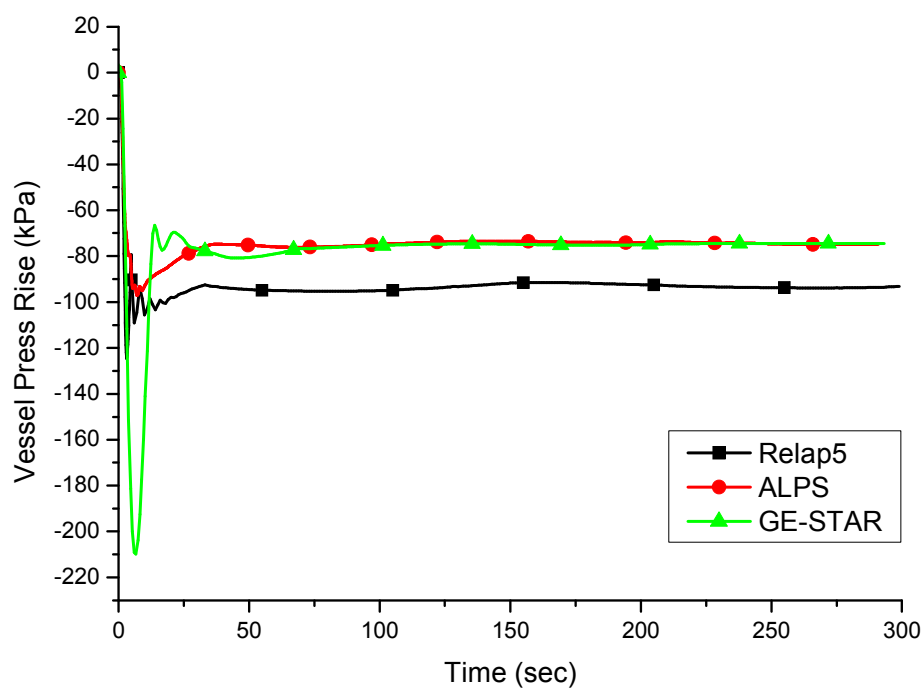


圖 5.23 三台爐內泵跳脫壓力變化比較圖

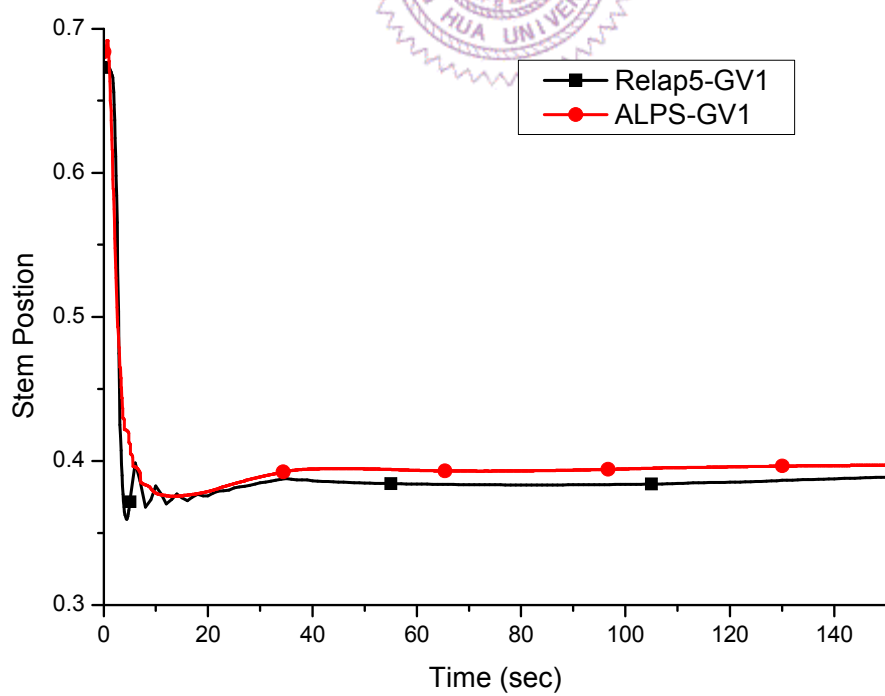


圖 5.24 三台爐內泵跳脫高壓汽機調速閥開關比較圖

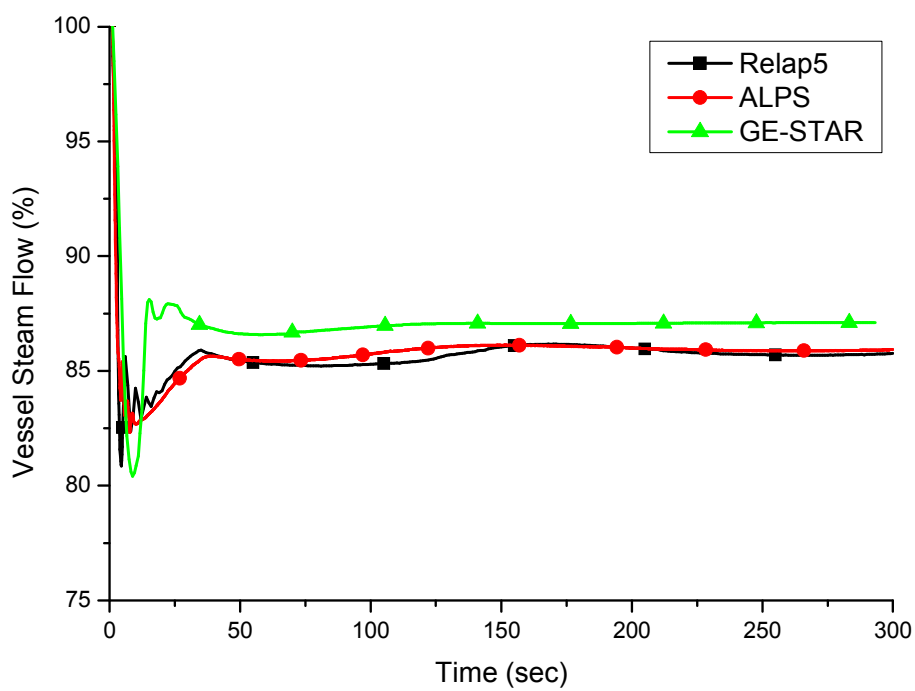


圖 5.25 三台爐內泵跳脫反應爐出口蒸氣流量比較圖

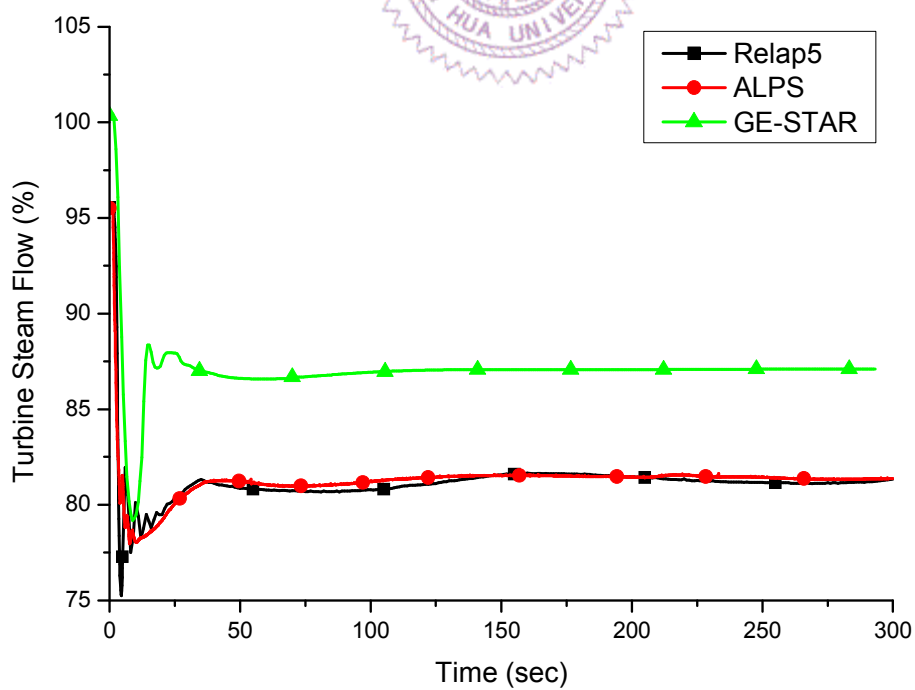


圖 5.26 三台爐內泵跳脫汽機入口蒸氣流量比較圖

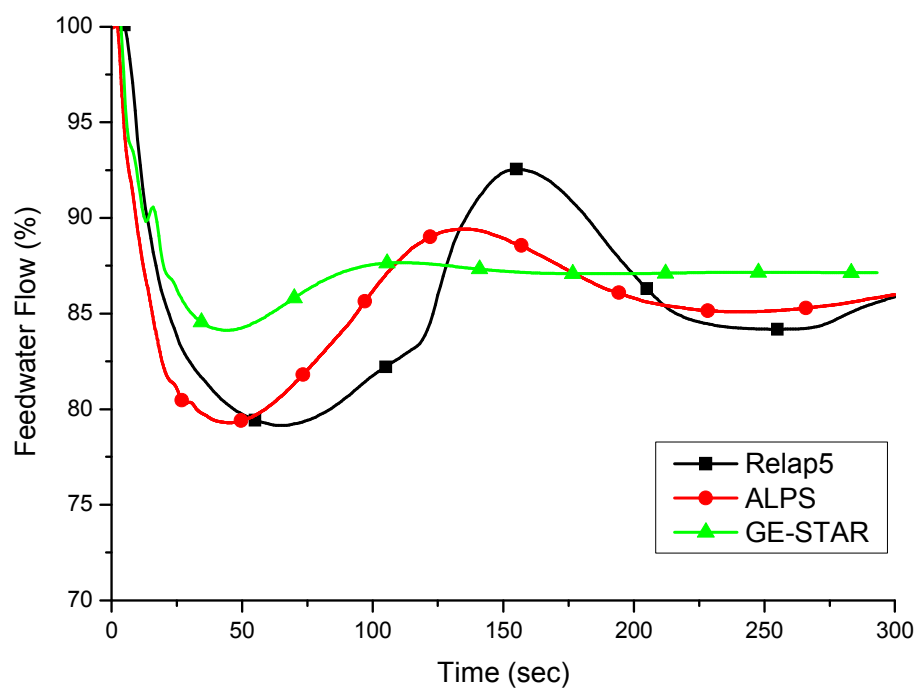


圖 5.27 三台爐內泵跳脫飼水流量比較圖



第六章 結論與展望

龍門電廠 RELAP5-RT 熱水流及主要控制系統輸入模式已建立完成。其中使用了 379 個控制體積，322 個流體接節，75 個熱結構體以及 1862 張控制卡號來模擬龍門電廠。其中包含熱水流結構、三大主要控制系統以及中子反應一維動態模式。

本研究主要目的為合併龍門電廠的熱水流輸入模式，以及建立其控制系統。控制系統著重於再循環流量控制系統、棒資訊及控制系統和反應爐保護系統的建立及驗證。此三個控制系統參考 ALPS 系統邏輯圖建立，接近電廠原始設計，建立完成後另有個別獨立測試。詳細獨立驗證資料列於附錄 A、B、C。其餘兩個重要的控制系統，即飼水控制系統及蒸汽旁通與壓力控制系統參考 RETRAN 建立，不在本文討論範圍。

所有控制系統完成，加入熱水流模式，並達到穩態後，選擇龍門核電廠啟動測試分析報告內的案例，並和分析報告以及 ALPS 的結果做比較。本研究選擇一台爐內泵跳脫及三台爐內泵跳脫暫態兩個案例，發現模擬趨勢與 STAR 及 ALPS 均相當類似。參考 RETRAN 建立的壓力控制及飼水控制結果差異比較明顯，但都在預期的範圍內。整體而言在所選案例中 RELAP5-RT 的控制系統反應均如預期，可以正確的控制反應電廠暫態的狀況。

目前龍門電廠尚有一些相對次要的控制系統尚未建立，另飼水控制系統及蒸汽旁通與壓力控制系統是參考 RETRAN 建立，和電廠原始設計差異較大。若以上系統能夠參考 ALPS 建立，使龍門核電廠 RELAP5-RT 輸入模式更加完備，未來可以提供台灣電力公司一個完整可用的工具，對未來將要進行的起爐測試、商業運轉等工作進行分析和協助。

參考文獻

- 【1】 <http://wapp4.taipower.com.tw/nsis/option0-4.asp> 台灣電力公司龍門廠簡介
- 【2】 台灣電力公司，“核能四廠”，核能發電訓練教材，2003
- 【3】 INEL, RELAP5 Code Development Team, ”RELAP5/MOD3.3 Code Manual”, Vol.1~Vol.8, NUREG/CR-5535, 2006
- 【4】 Yang, C.-Y., et al., “Development and application of a dual RELAP5-3D-based engineering simulator for ABWR”, Nucl. Eng. Des., 2009
- 【5】 楊宗祐等人，”核四廠起動測試暫態模擬與分析完成報告”，台灣電力公司，2009
- 【6】 林金足等，”核四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
- 【7】 General Electric Company, “Startup Test Prediction- Transient Test Prediction,” 31113-0A51-6525., 2005



附錄 A

再循環流量控制系統獨立測試

再循環流量系統的測試可以分成兩大類：運轉模式，確認一般運轉時 RFCS 系統能夠正確的控制運轉時會碰到的狀況，諸如功率變化、爐心流量變化。暫態模式，包含所有可能造成 RIP 跳脫或是 RIP 回退的信號都加以測試。

再循環流量控制系統的獨立測試共有 32 項。表 A-1 為測試結果列表，圖 A.1~A.32 為各項測試的重要參數結果。

表 A-1 再循環流量控制系統獨立測試表

測試編號	測試內容	控制變數
1	反應爐功率在 100%，爐心流量在 100% 的穩態，RIPs 轉速為 88.9 % 的額定轉速，測試時間為 400 秒。	無
2	減少模擬的反應爐功率，RIPs 轉速將增加。	模擬的反應爐功率 (%)
3	增加模擬的反應爐功率，RIPs 轉速將減少。	模擬的反應爐功率 (%)
4	減少額定的反應爐功率，RIPs 轉速將減少。	額定的反應爐功率 (%)
5	增加額定的反應爐功率，RIPs 轉速將增加。	額定的反應爐功率 (%)
6	減少模擬的爐心流量，RIPs 轉速將增加。	模擬的爐心流量 (%)
7	增加模擬的爐心流量，RIPs 轉速將減少。	模擬的爐心流量 (%)
8	減少額定的爐心流量，RIPs 轉速將減少。	額定的爐心流量 (%)
9	增加額定的爐心流量，RIPs 轉速將增加。	額定的爐心流量 (%)
10	APRM Flux 大於 110% 的額定功率，RIPs 速度減少一個定量 (4.99%)。令 APRM Flux 為 111%。	APRM Flux (%)
11	當接收到 RIPs 回退信號，所有的 RIPs 回退 (Runback)	RIPs 回退信號
12	當 FW capacity low，產生 RIPs 回退信號。 令 FW Capacity 為 1948.0 kg/s (IC=2435.0 kg/s)。	FW Capacity (kg/s)
13	當 Reactor power low，產生則 RIPs 回退信號。 令 Reactor Power 為 40.0 % (IC=100.0 %)。	Reactor Power (%)
14	當 Loss of FW heating，產生 RIPs 回退信號。	Loss of FW Heating 信號 (Boolean)

15	當 Turbine trip，產生 RIPs 回退信號。	Turbine Trip 信號
16	當 Power/Flow map 運轉在 Region II，產生 RIPs 回退信號。令 Reactor power = 40.5 %；Core flow = 100.0 %。	Reactor Power (%)
17	當 Four RIPs (無 M-G) trip，產生 RIPs 回退信號。	Four RIPs 跳脫信號
18	當 Six RIPs (有 M-G) trip，產生 RIPs 回退信號。 設定 Level 2 信號成立，兩組 RIPs 回退信號其中一組延遲 6 秒啟動。	Six RIPs 跳脫信號 (Level2 信號啟動)
19	當 Ten RIPs trip，產生 RIPs 回退信號。	Ten RIPs 跳脫信號
20	當 Main condenser pressure high，產生 RIPs 回退信號。	Main Condenser Pressure High 信號
21	先令 RIPs (無 M-G) 回退，然後接收 RIPs 跳脫信號，使 RIPs 跳脫，RIPs 速度為零。	RIPs (無 M-G) 跳脫信號
22	先令 RIPs (有 M-G) 回退，然後接收 RIPs 跳脫信號，使 RIPs 跳脫，RIPs 速度為零，而且此兩組跳脫信號相差 6 秒。	RIPs (有 M-G) 跳脫信號
23	當 Reactor pressure high，產生 RIPs (無 M-G) 跳脫信號。	Reactor Pressure High 信號
24	當 Level 3，產生 RIPs (無 M-G) 跳脫信號。	Level 3 信號
25	當 EOC-RPT，產生 RIPs (無 M-G) 跳脫信號。	EOC-RPT 信號
26	當 Level 2，產生 RIPs (有 M-G) 跳脫信號，且兩組 RIPs 的跳脫時間差 6 秒。	Level 2 信號
27	SCRRI and FMCRD，Reactor power $\geq 28\%$ and Loss of Feedwater heating。	Loss of Feedwater heating 信號
28	SCRRI and FMCRD，Reactor power $\geq 28\%$ ，Core flow $\leq 41.5\%$ and All RIPs Runback。	All RIPs Runback 信號
29	SCRRI and FMCRD，Reactor power $\geq 28\%$ ，Core flow $\leq 41.5\%$ and more than 1 RIP tripped (situation 1)。 令 Core flow = 40.5 %，RIPs (無 M-G) 跳脫。	RIPs 跳脫信號
30	SCRRI and FMCRD，Reactor power $\geq 28\%$ ，Core flow $\leq 41.5\%$ and more than 1 RIP tripped (situation 2)， 令 Core flow = 40.5 %，RIPs (有 M-G) 跳脫。	RIPs 跳脫信號
31	ARI and FMCRD，Reactor High Pressure。P=7.27 MPaA at 100% power；Setpoint: P=7.86 MPa。令 P=7.97MPa。	Reactor Pressure (%)
32	ARI and FMCRD，Reactor Water Level Low (Level 2)。	Level 2 跳脫信號

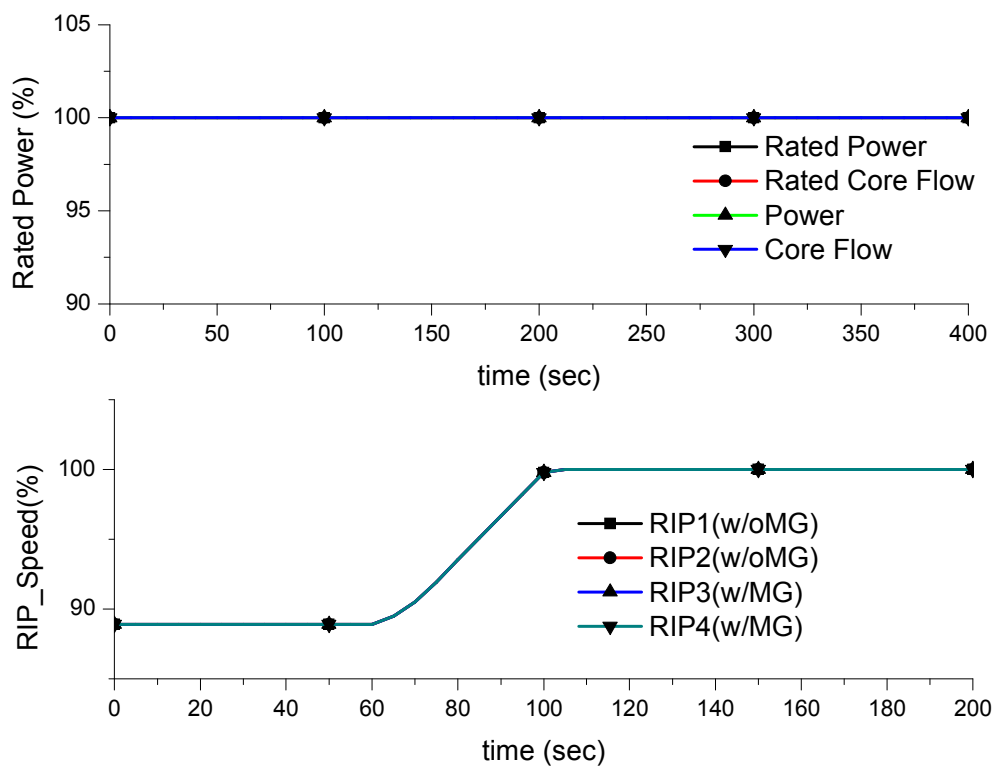


圖 A.1 再循環流量控制系統獨立測試案例(1)

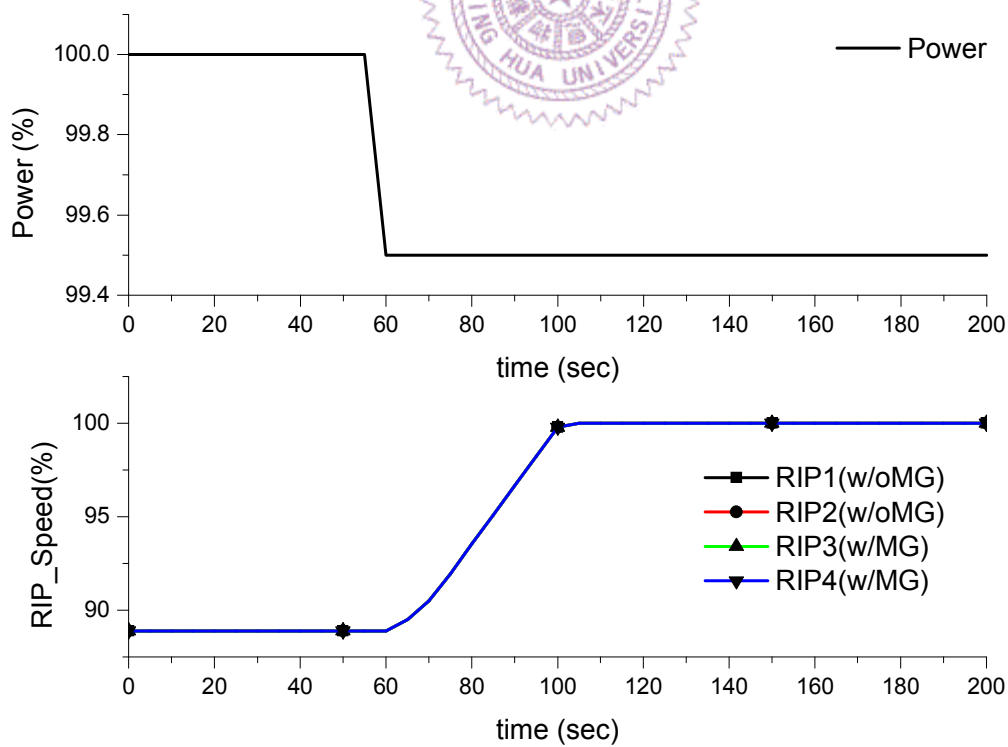


圖 A.2 再循環流量控制系統獨立測試案例(2)

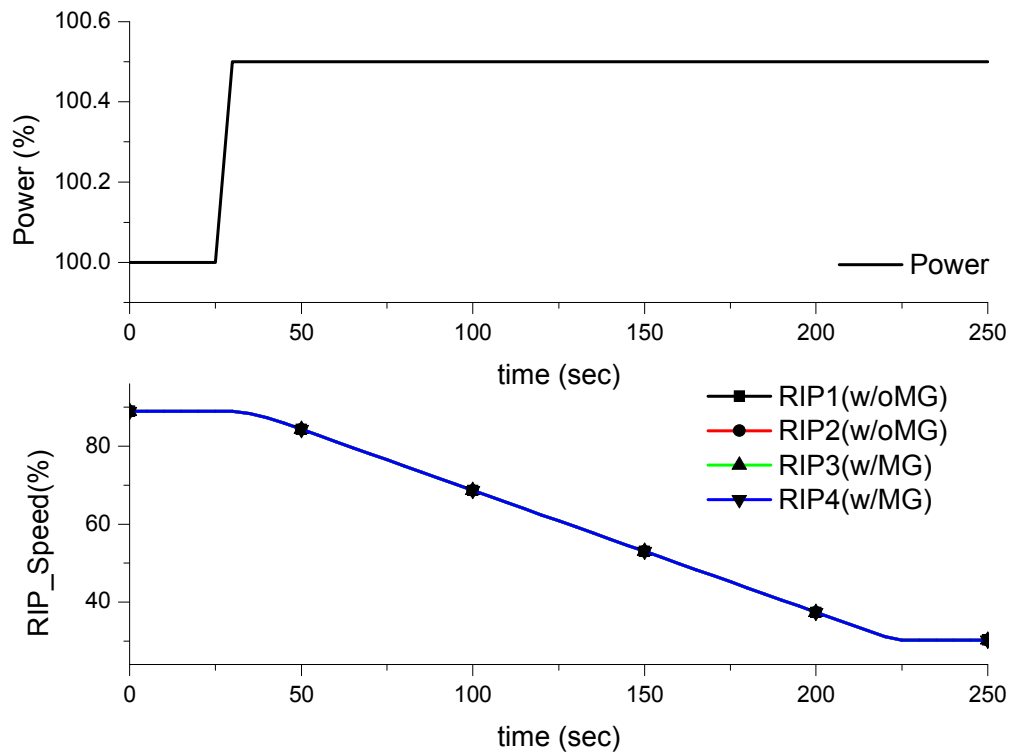


圖 A.3 再循環流量控制系統獨立測試案例(3)

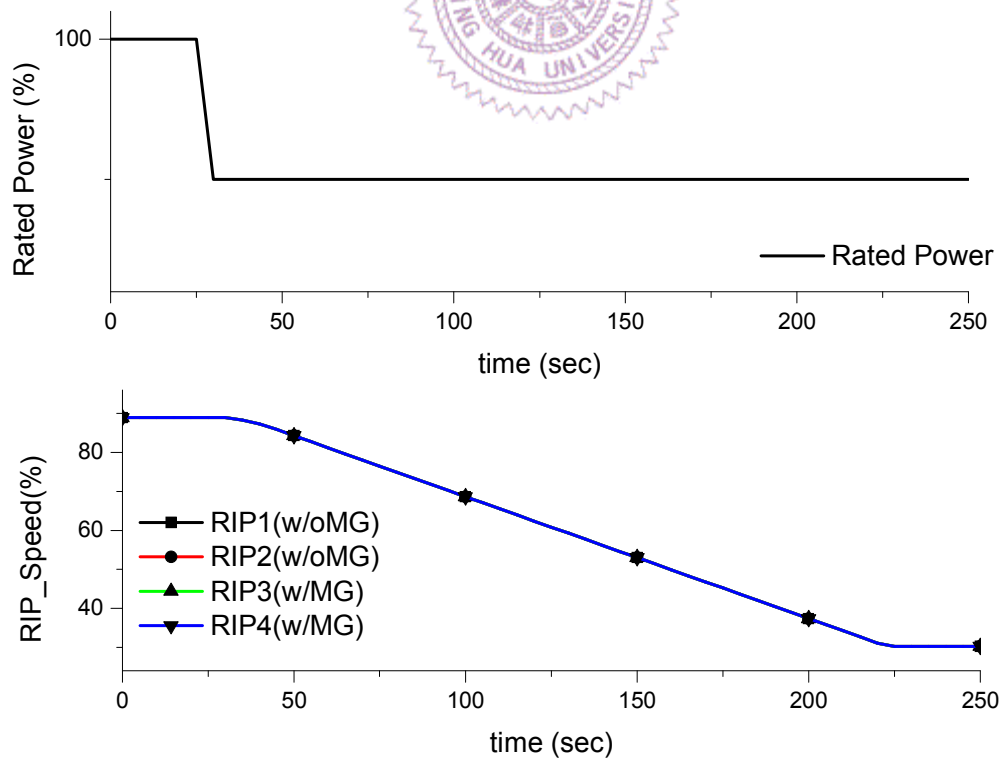


圖 A.4 再循環流量控制系統獨立測試案例(4)

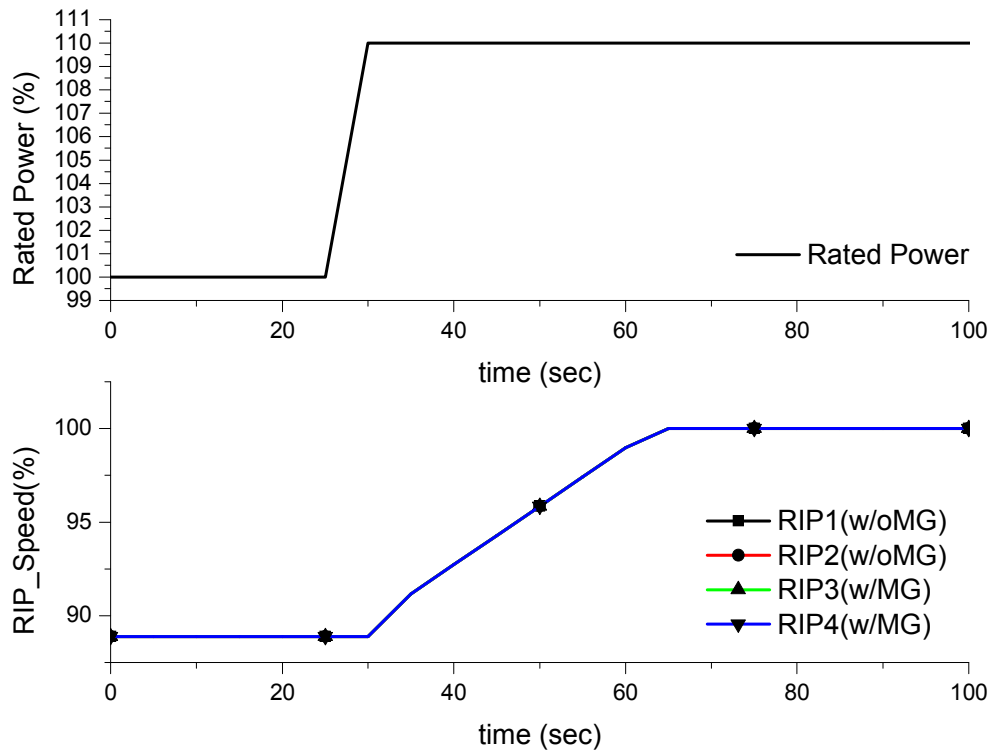


圖 A.5 再循環流量控制系統獨立測試案例(5)

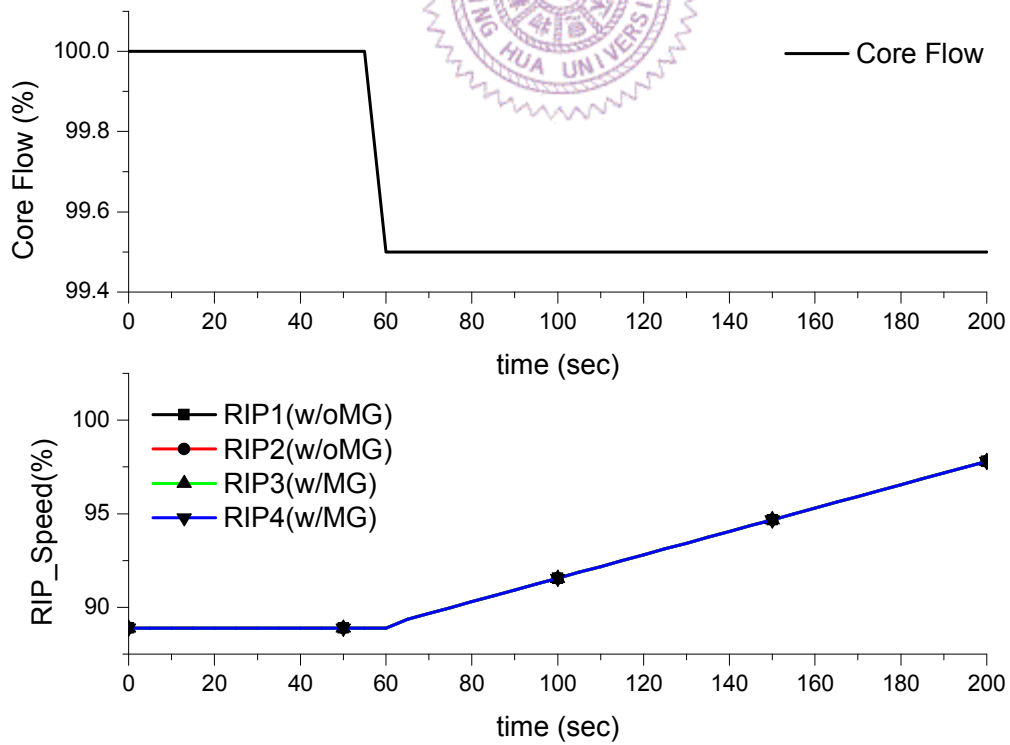


圖 A.6 再循環流量控制系統獨立測試案例(6)

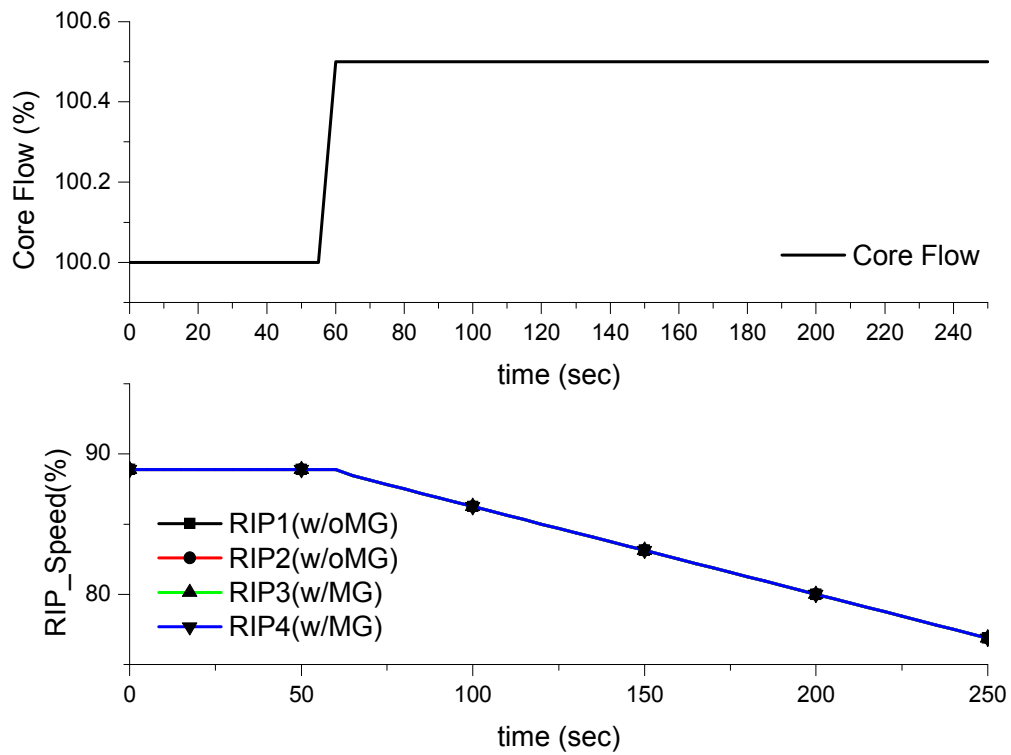


圖 A.7 再循環流量控制系統獨立測試案例(7)

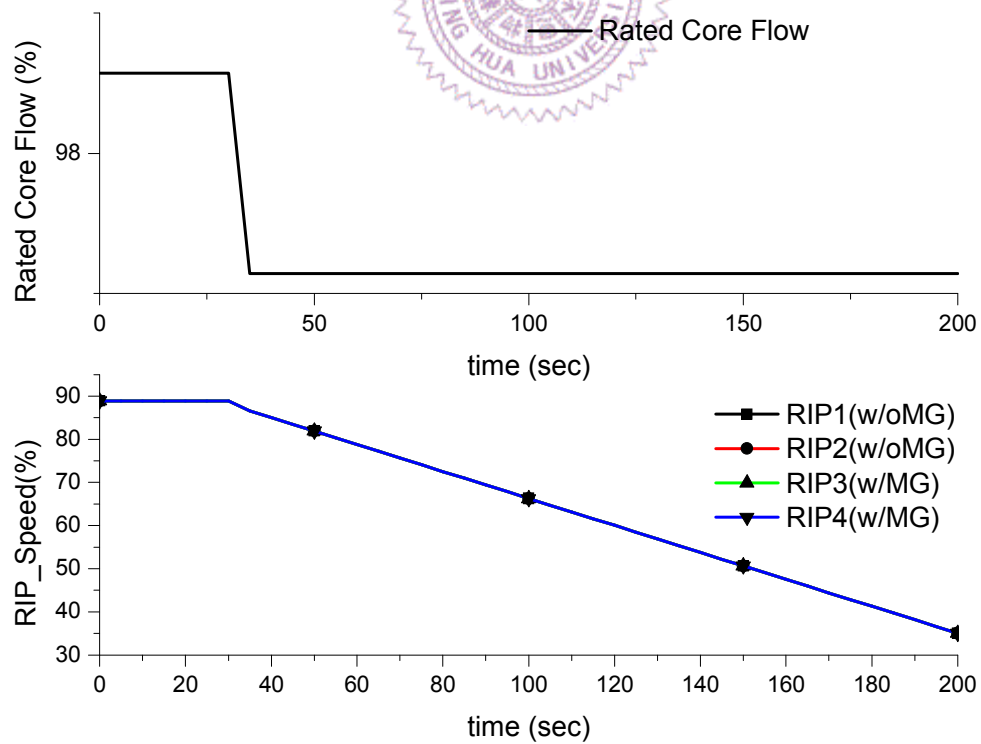


圖 A.8 再循環流量控制系統獨立測試案例(8)

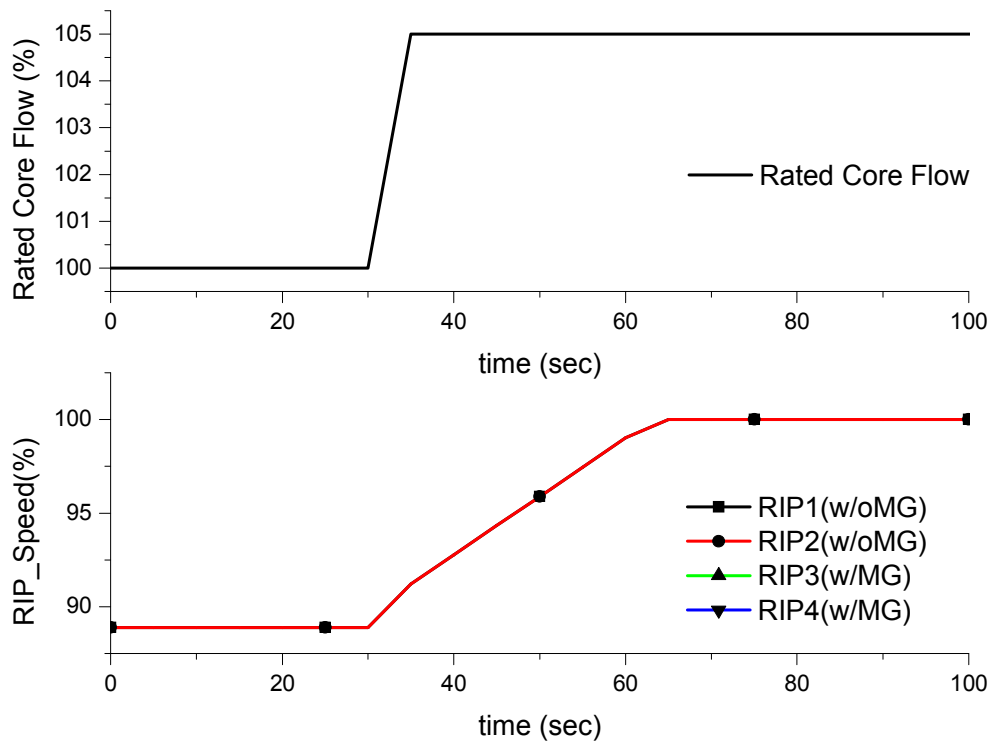


圖 A.9 再循環流量控制系統獨立測試案例(9)

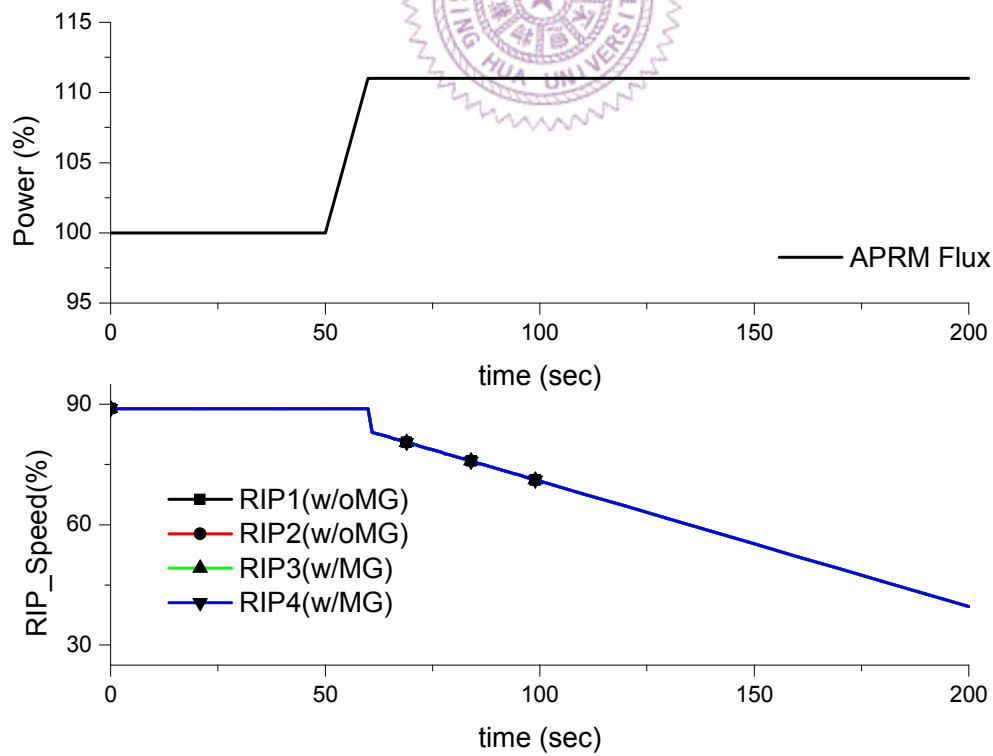


圖 A.10 再循環流量控制系統獨立測試案例(10)

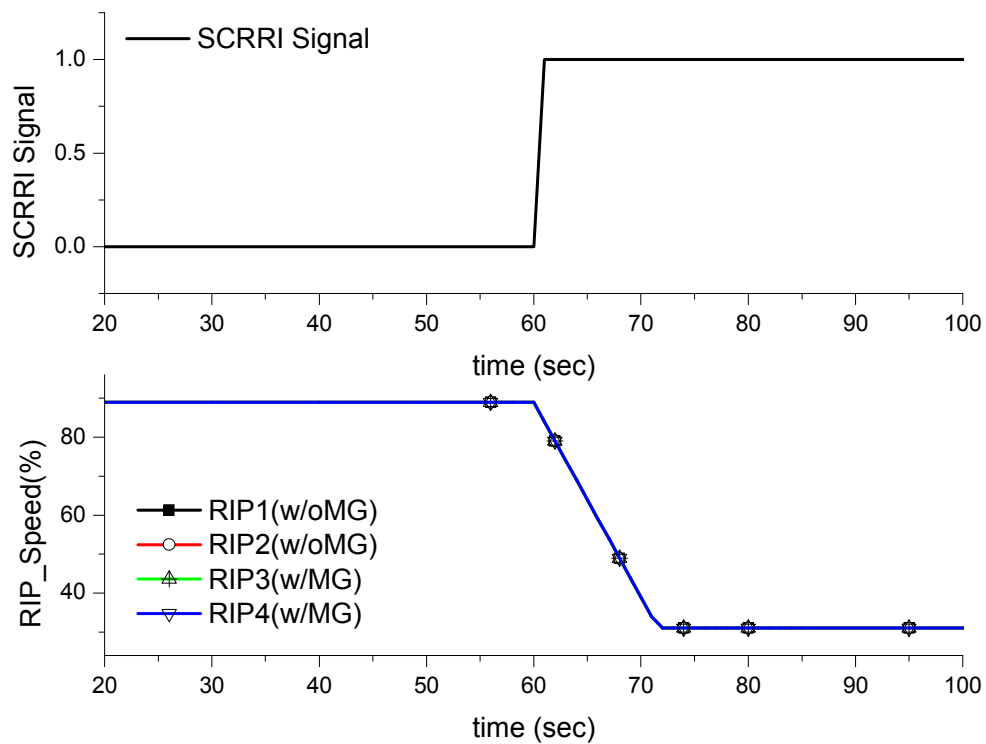


圖 A.11 再循環流量控制系統獨立測試案例(11)

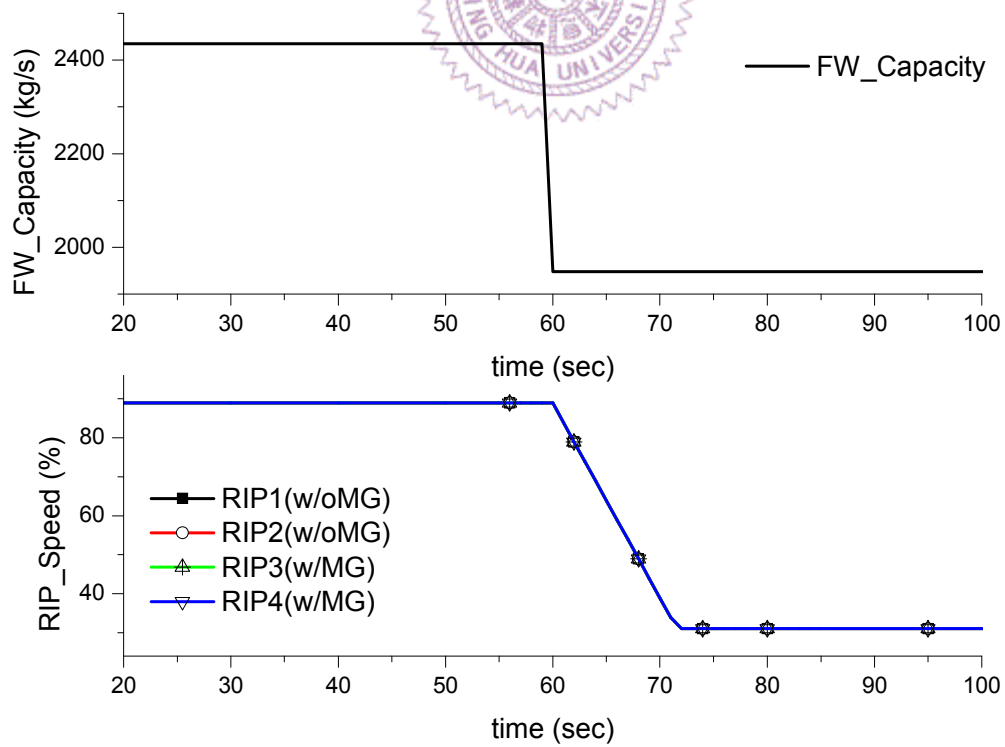


圖 A.12 再循環流量控制系統獨立測試案例(12)

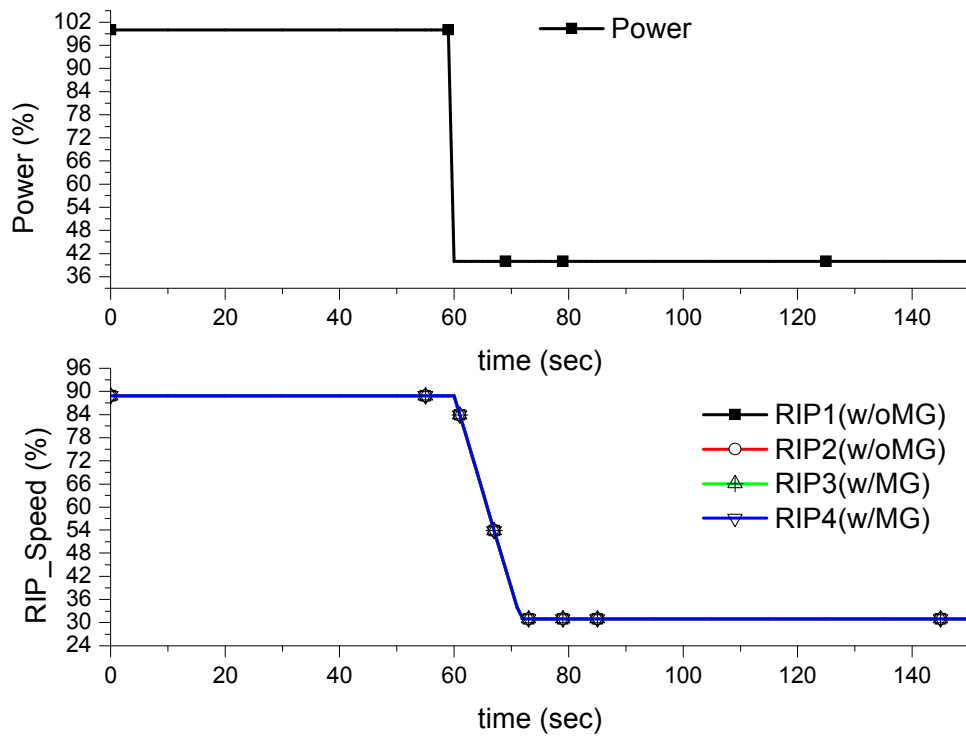


圖 A.13 再循環流量控制系統獨立測試案例(13)

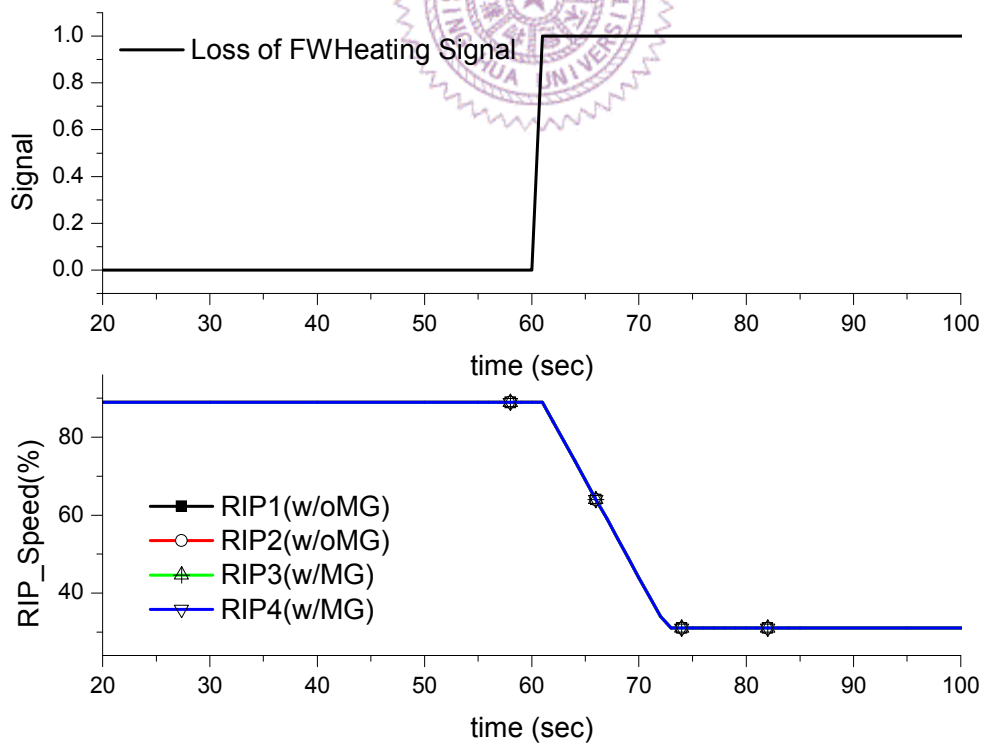


圖 A.14 再循環流量控制系統獨立測試案例(14)

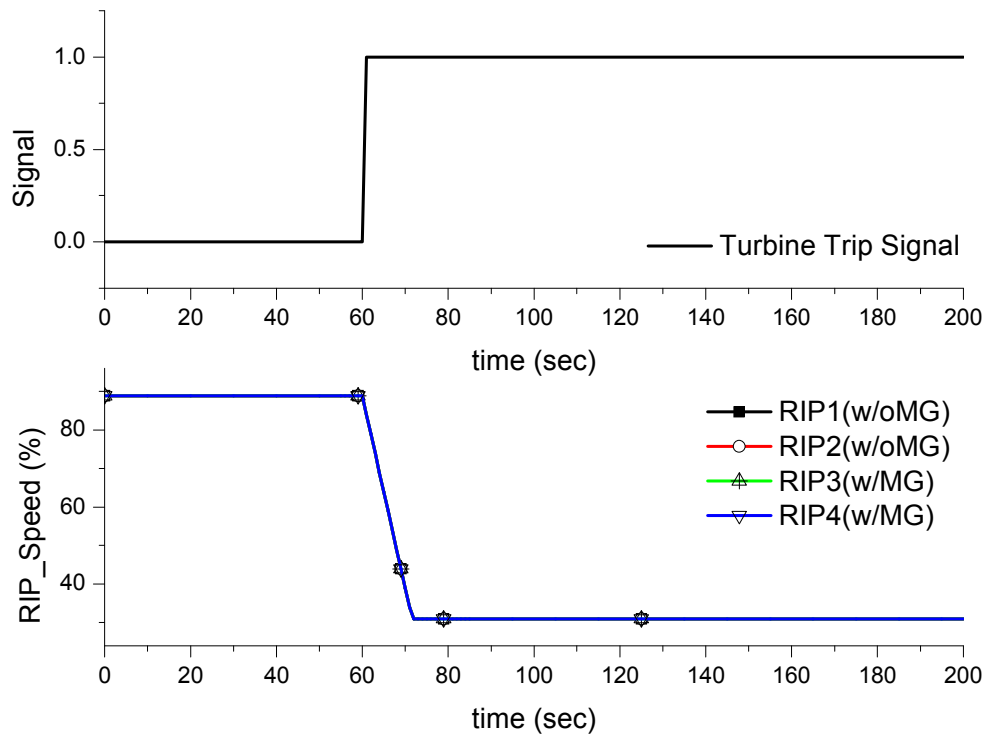


圖 A.15 再循環流量控制系統獨立測試案例(15)

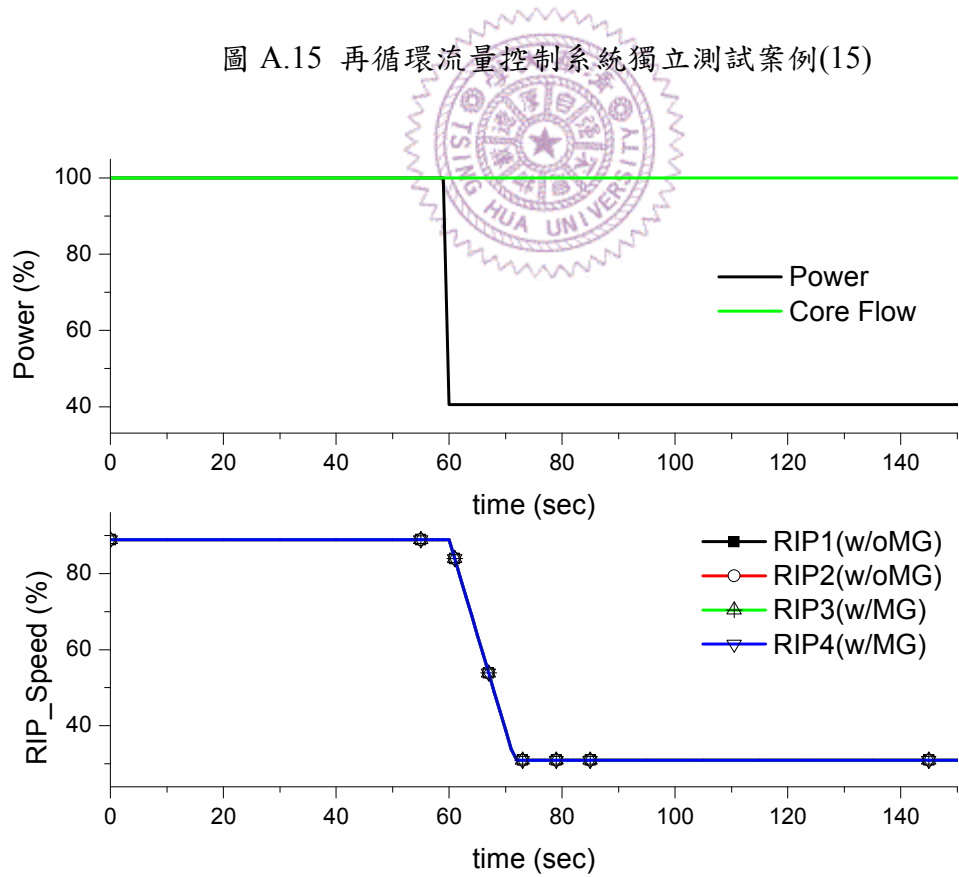


圖 A.16 再循環流量控制系統獨立測試案例(16)

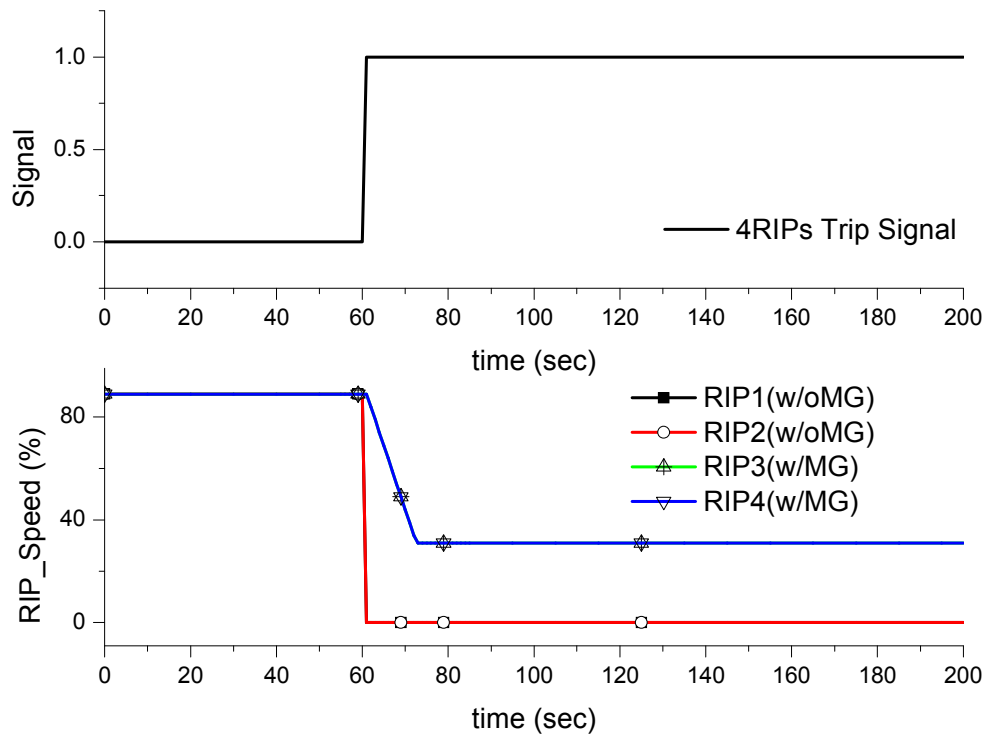


圖 A.17 再循環流量控制系統獨立測試案例(17)

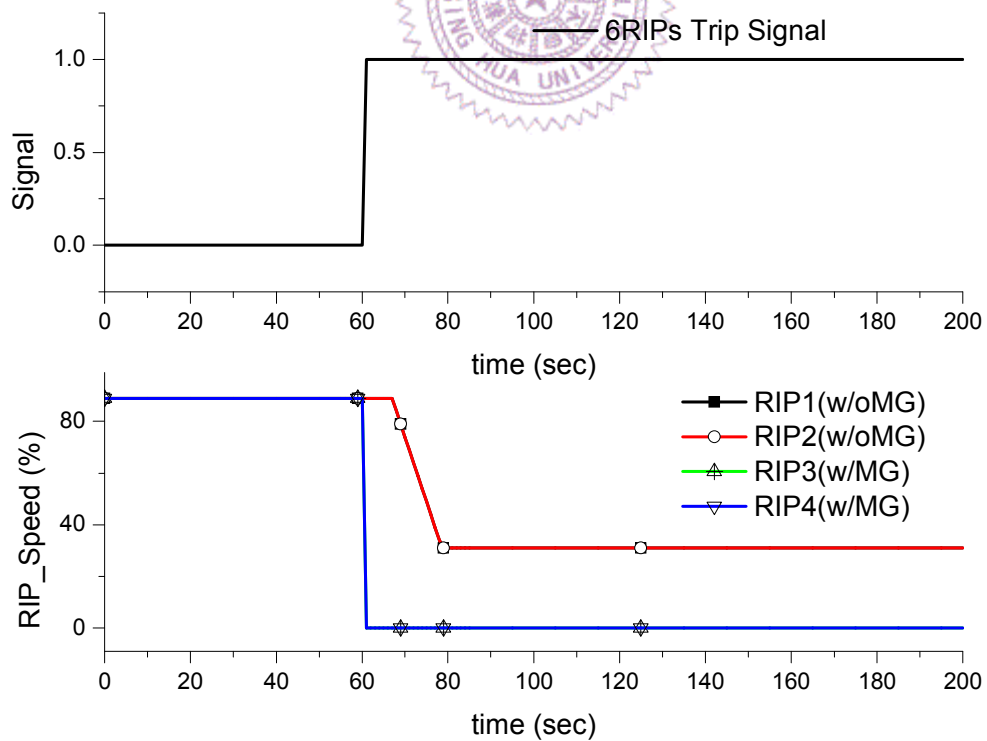


圖 A.18 再循環流量控制系統獨立測試案例(18)

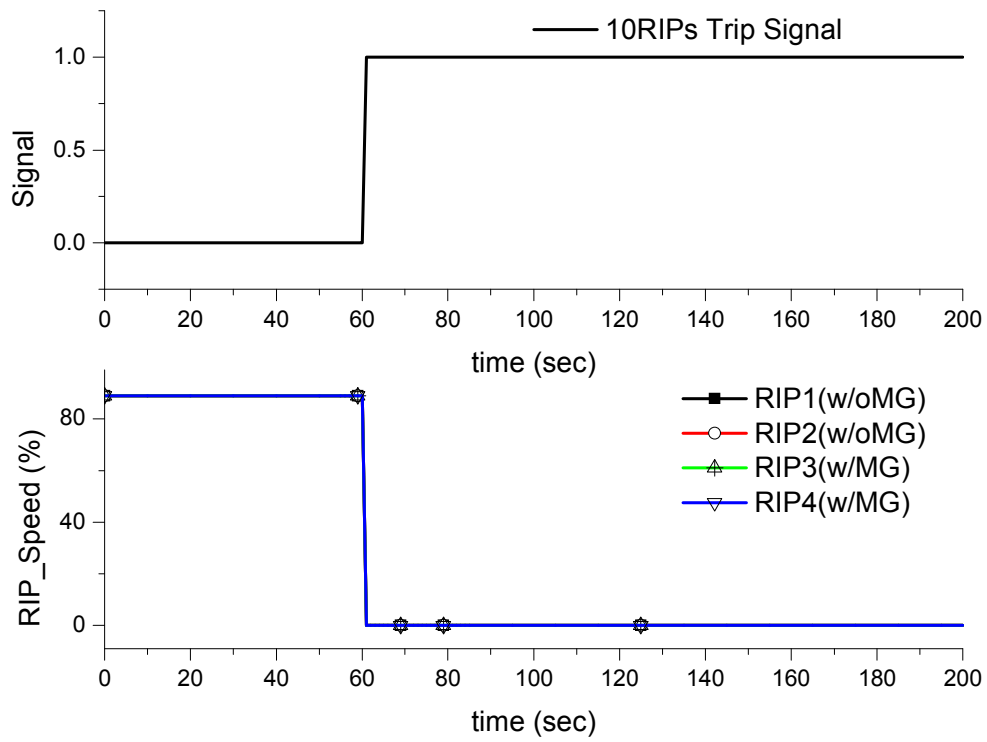


圖 A.19 再循環流量控制系統獨立測試案例(19)

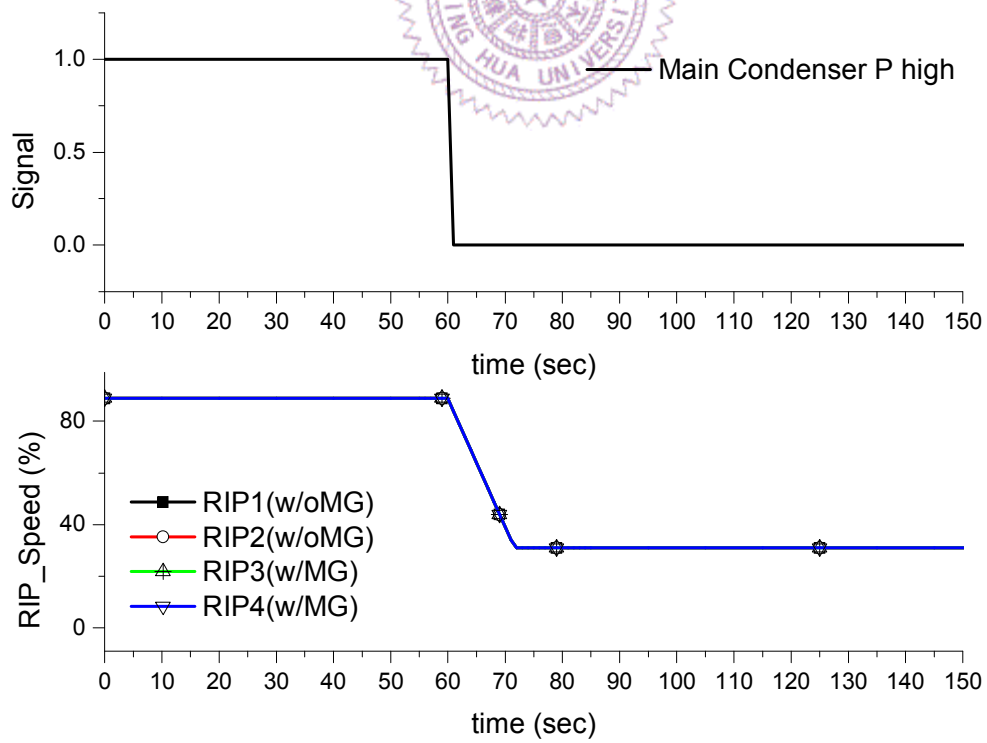


圖 A.20 再循環流量控制系統獨立測試案例(20)

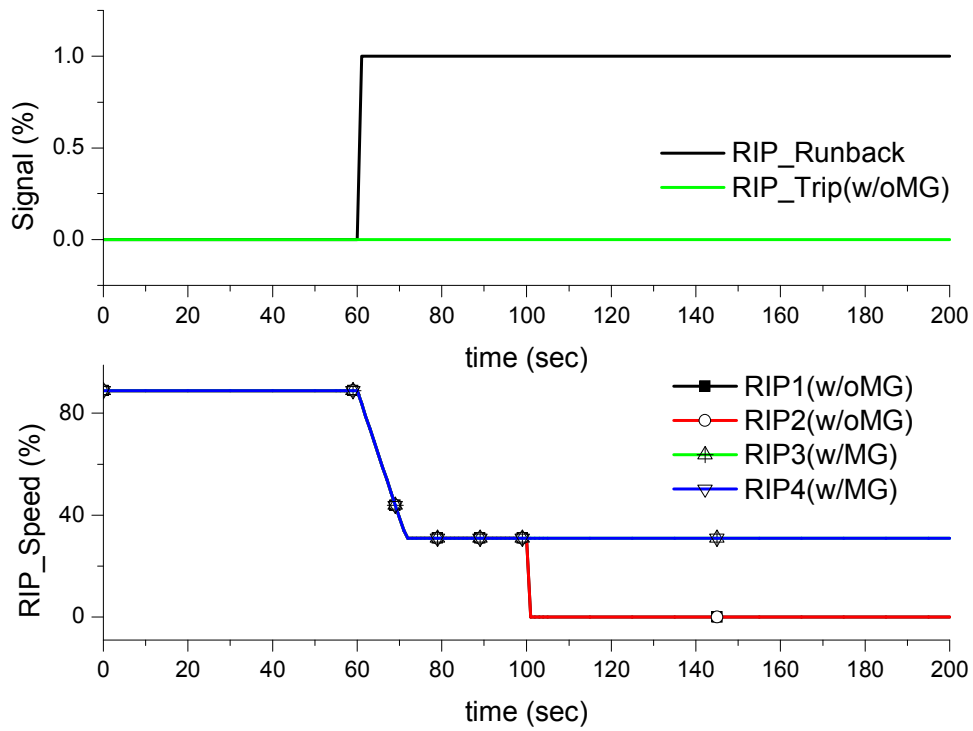


圖 A.21 再循環流量控制系統獨立測試案例(21)

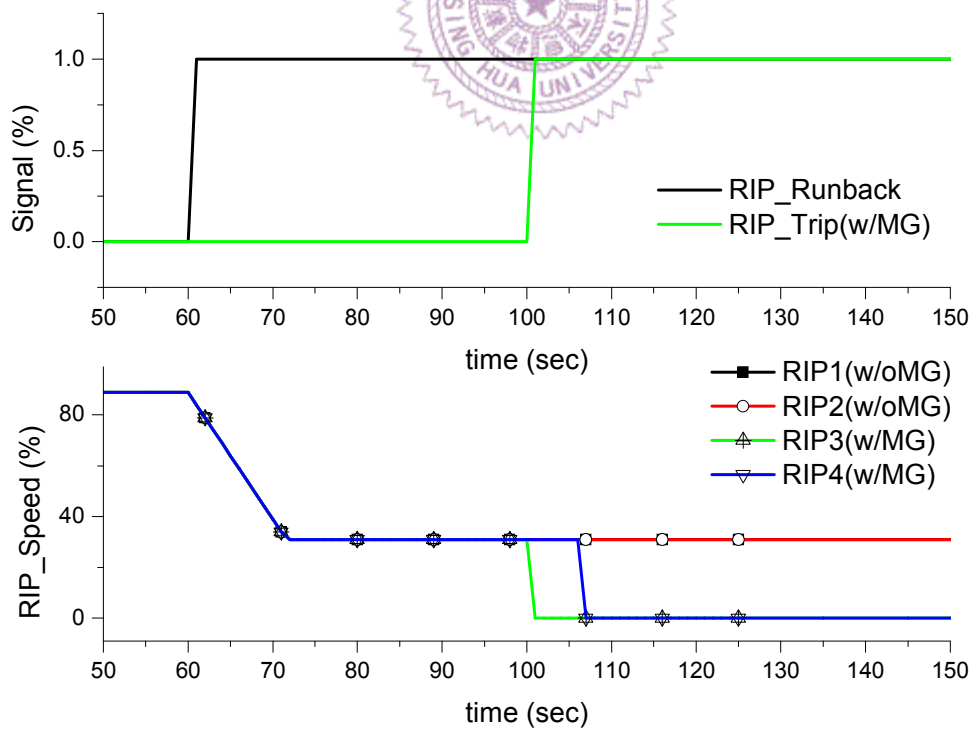


圖 A.22 再循環流量控制系統獨立測試案例(22)

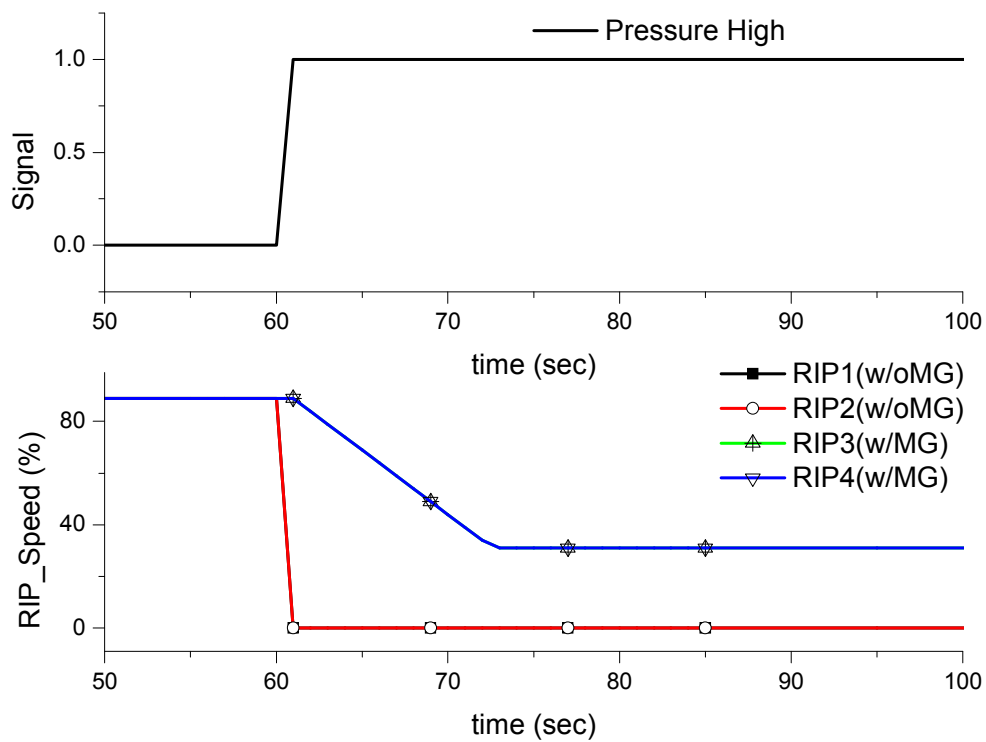


圖 A.23 再循環流量控制系統獨立測試案例(23)

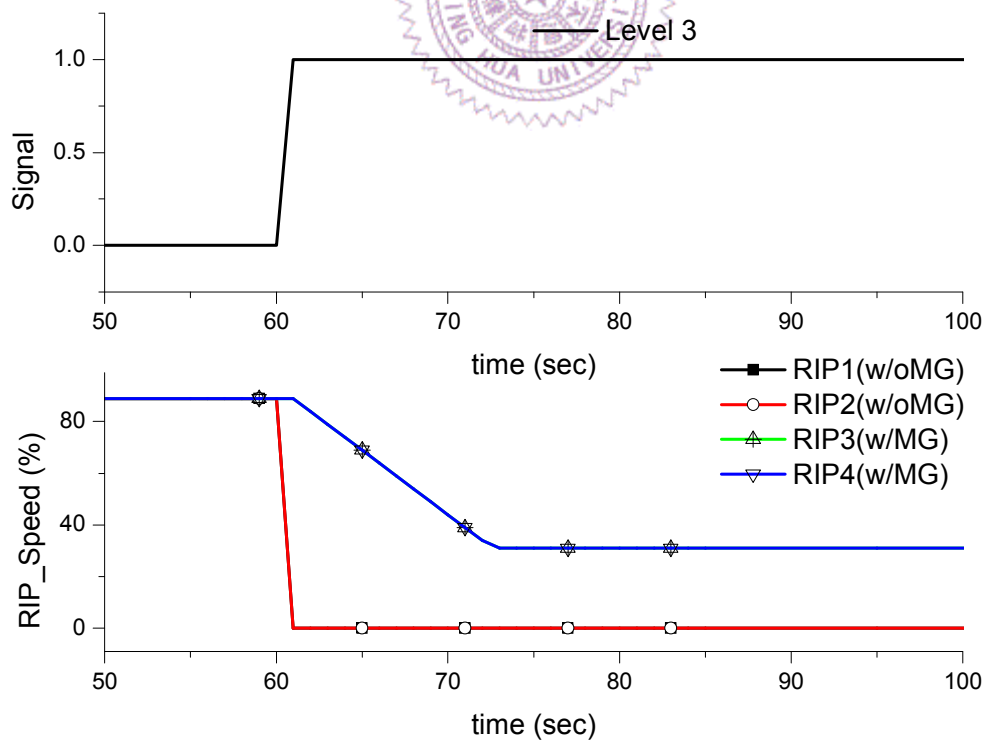


圖 A.24 再循環流量控制系統獨立測試案例(24)

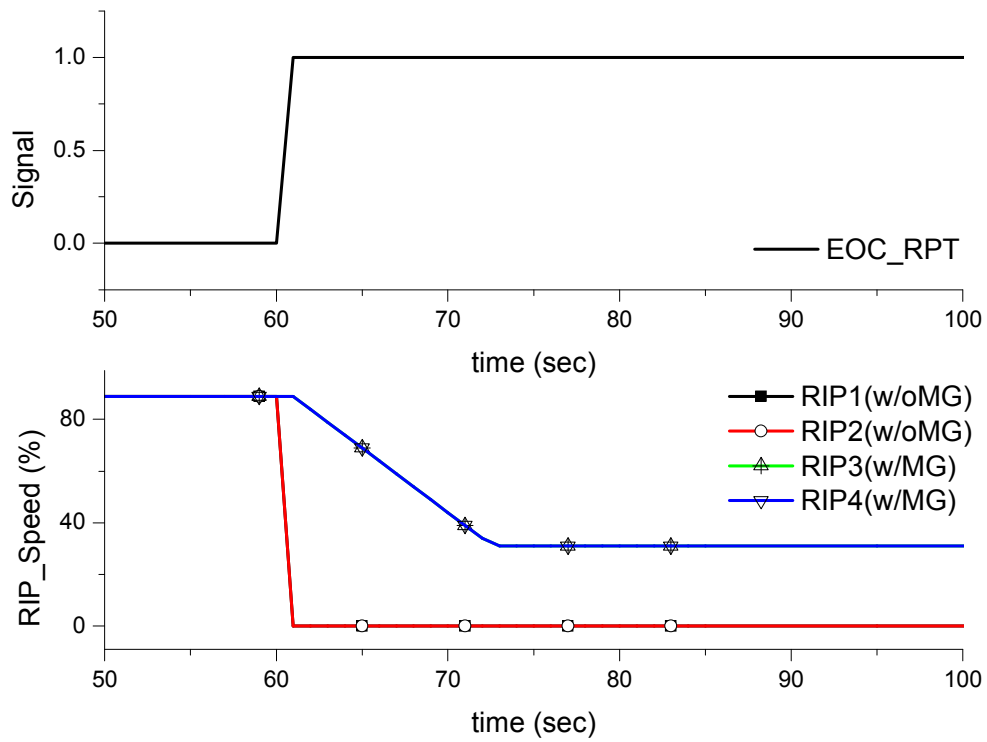


圖 A.25 再循環流量控制系統獨立測試案例(25)

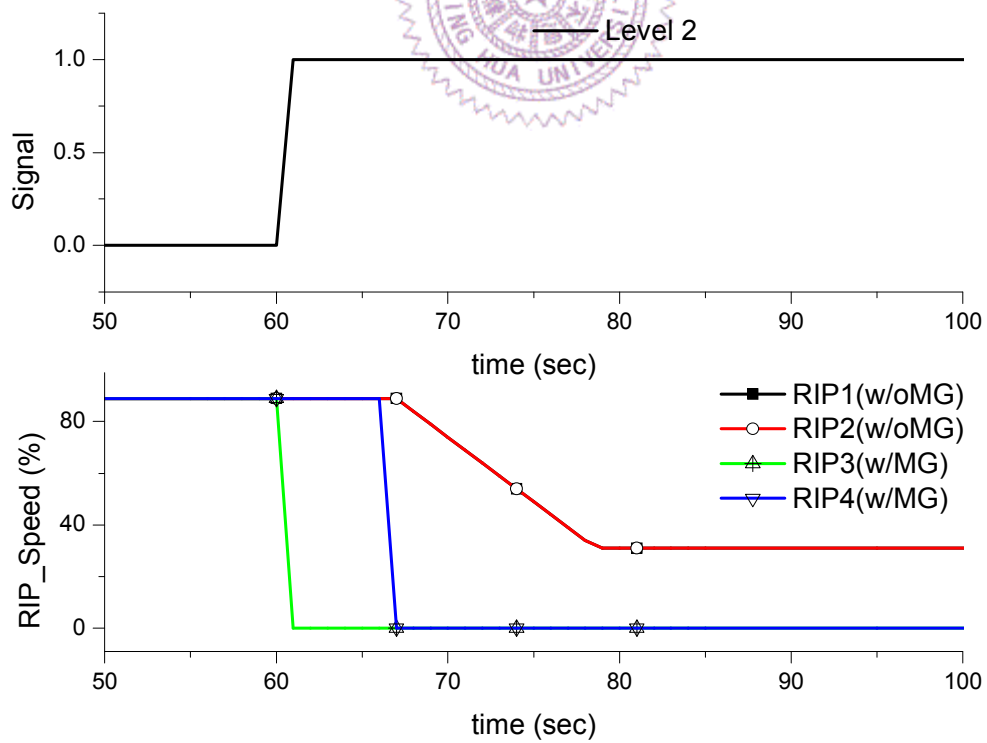


圖 A.26 再循環流量控制系統獨立測試案例(26)

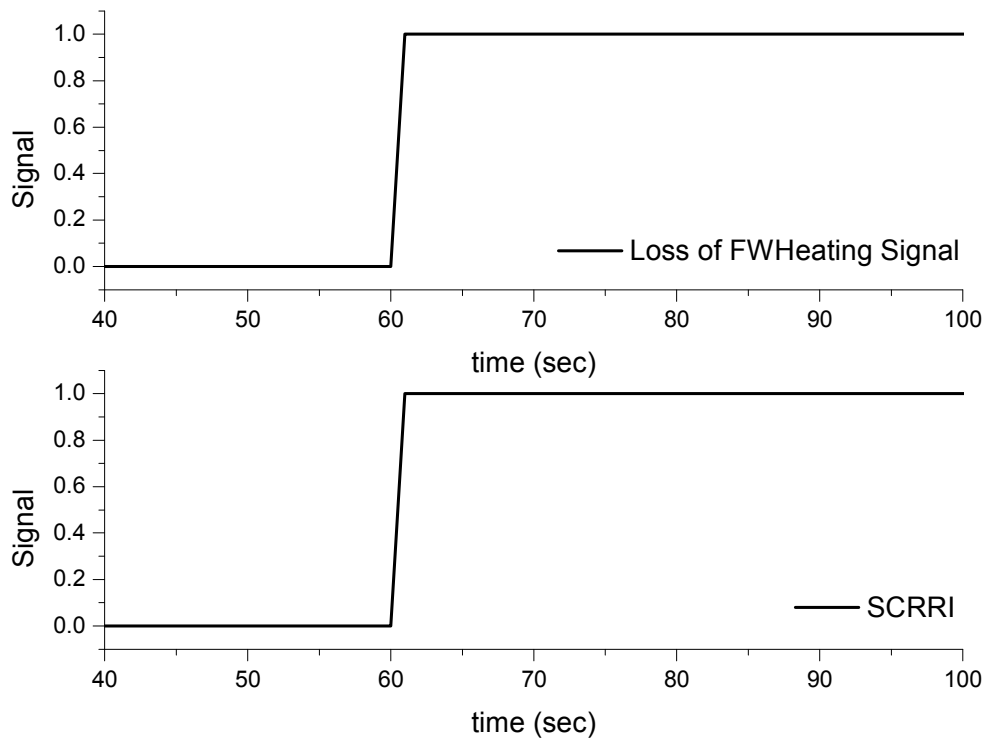


圖 A.27 再循環流量控制系統獨立測試案例(27)

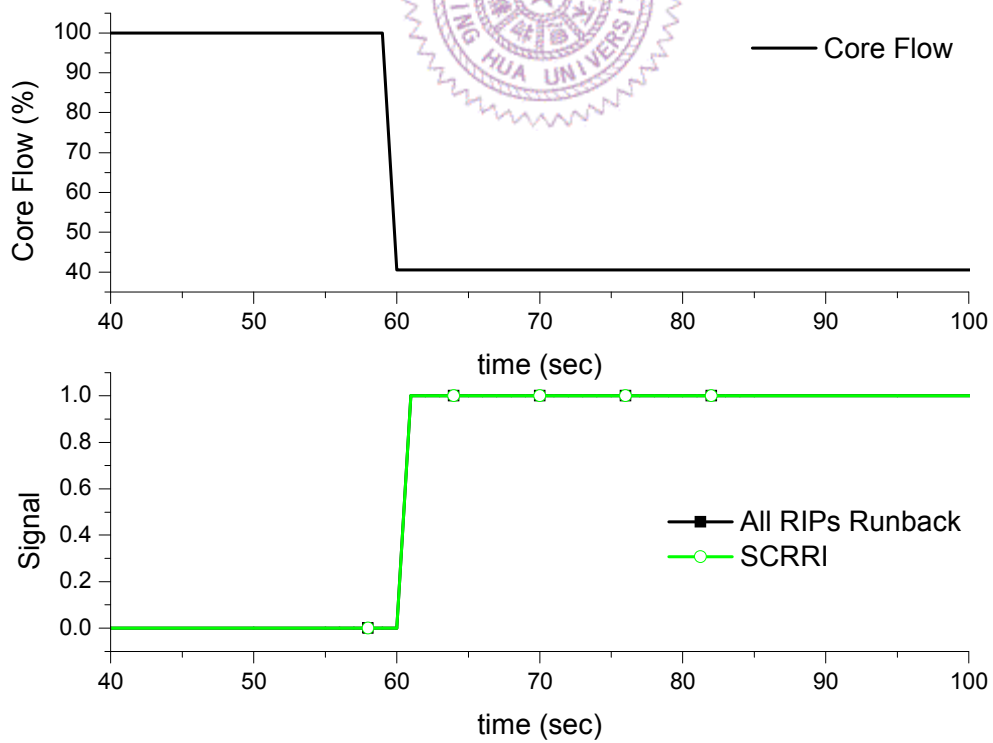


圖 A.28 再循環流量控制系統獨立測試案例(28)

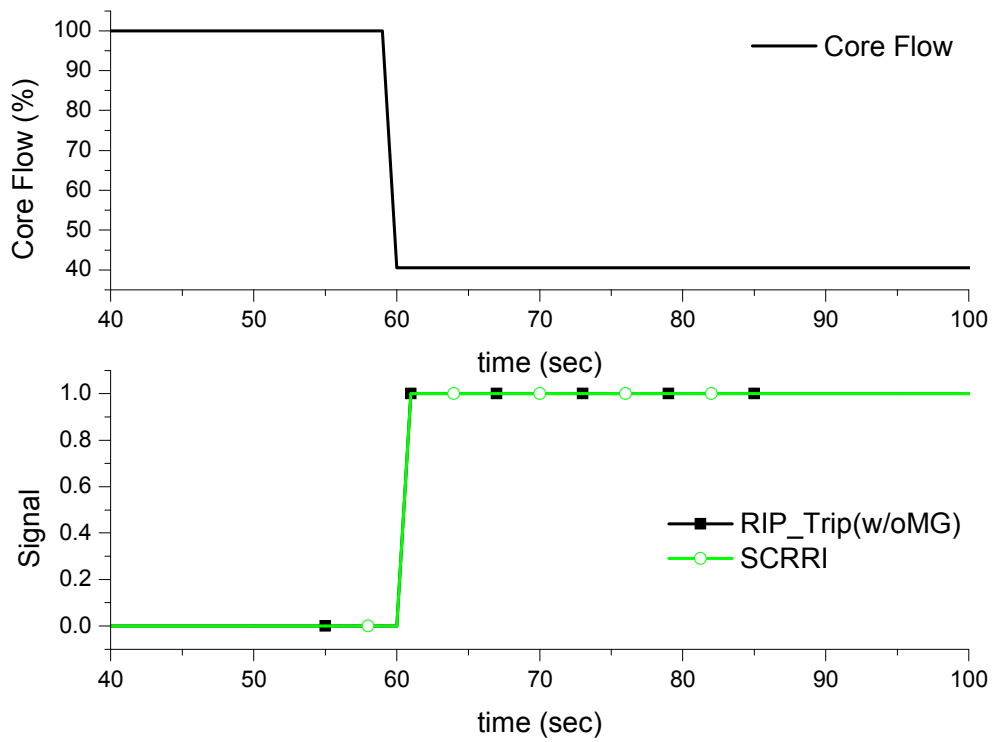


圖 A.29 再循環流量控制系統獨立測試案例(29)

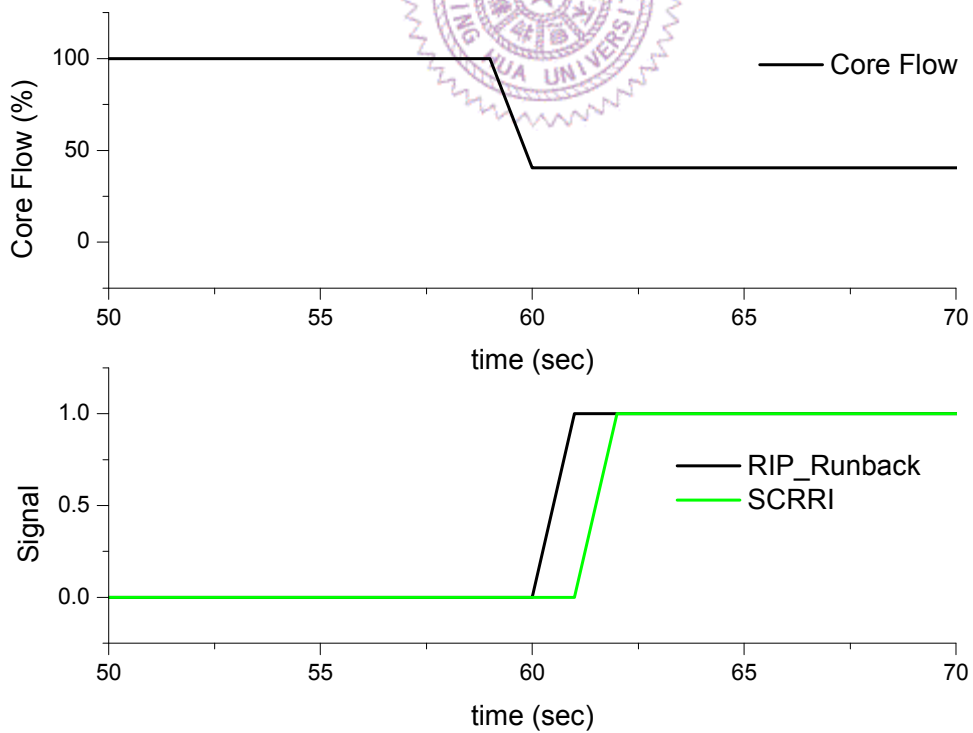


圖 A.30 再循環流量控制系統獨立測試案例(30)

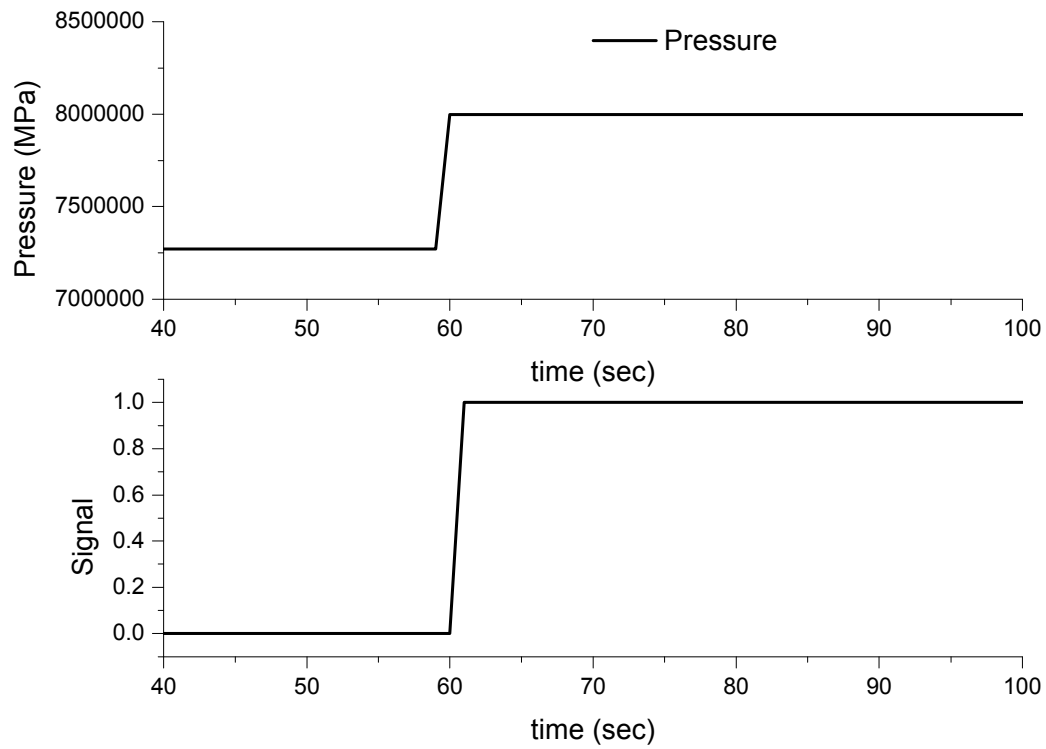


圖 A.31 再循環流量控制系統獨立測試案例(31)

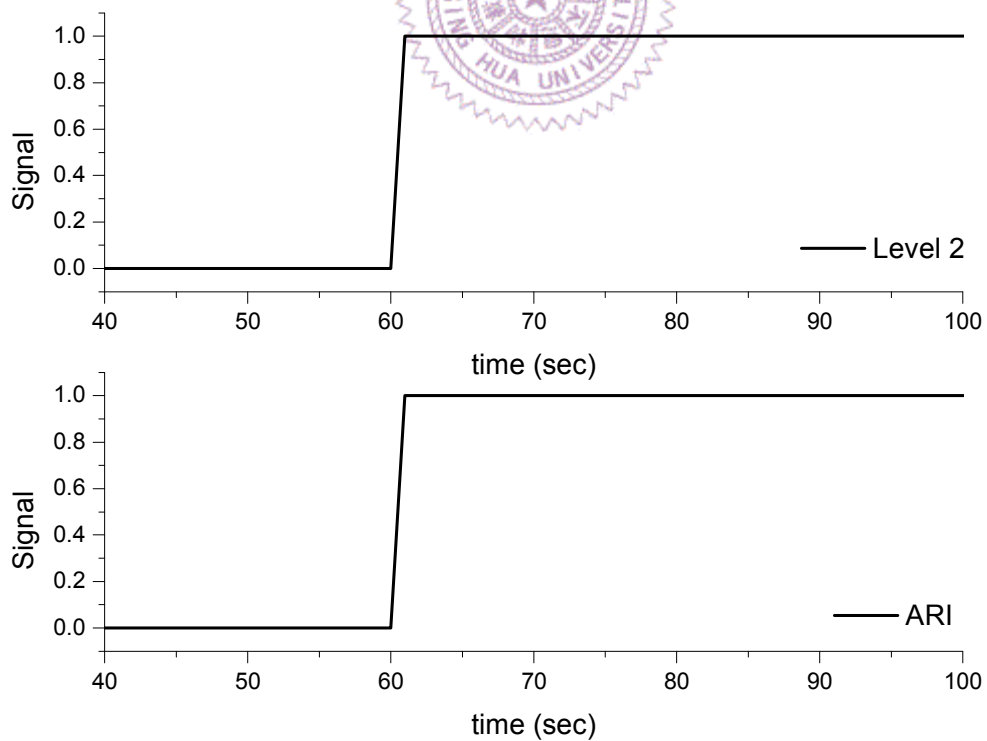


圖 A.32 再循環流量控制系統獨立測試案例(32)

附錄 B

反應器保護系統獨立測試

反應爐保護系統測試所有會造成 Scram 的系統。需要注意的是 TSV 和 TCV 的關閉暫態，必須測試確認 TBV 旁通不會造成跳機。

反應爐保護系統的獨立測試共有 11 項，表 B-1 為測試項目及結果列表，圖 B.1～B.11 為各項測試的重要參數結果。

表 B-1 反應爐保護系統獨立測試表

測試編號	測試內容	控制變數
1	正常運轉，RPS 系統無動作	無
2	當 Level 3，1.09 秒後產生 Scram 信號。設定水位 Narrow Range Water Level ≤ 392 cm	Narrow Range Water Level
3	當反應爐壓力過高，0.94 秒後產生 Scram 信號。設定反應爐壓力為 7.4MPa。	反應爐壓力
4	當乾井壓力過高，0.59 秒後產生 Scram 信號。設定乾井壓力 0.12MPa。	乾井壓力
5	當抑壓池溫度過高，25.29 秒後會產生 Scram 信號。設定抑壓池溫度為 42°C	抑壓池溫度
6	關閉任兩個流道上的 MSIV 至 90%開度以下，將產生 MSIV Closure 信號，在 0.3 秒後產生 Scram 信號。	MSIV Closure
7	任一 TSV 關閉，若在 0.2 秒內 TBV 開啟不足將在 0.2 秒後產生 Scram 的信號。	TSV 關閉 TBV 開度
8	任一 Turbine GV 關閉，若在 0.22 秒內 TBV 開啟不足將在 0.2 秒後產生 Scram 的信號	GV 關閉 TBV 開度
9	任一 TSV 關閉，若在 0.2 秒內 TBV 開啟足夠將不會產生 Scram 的信號。	TSV 關閉 TBV 開度
10	任一 Turbine GV 關閉，若在 0.22 秒內 TBV 開啟足夠將不會產生 Scram 的信號	GV 關閉 TBV 開度
11	手動跳脫信號啟動後 0.2 秒啟動 Scram 信號	Spurious Scram 信號

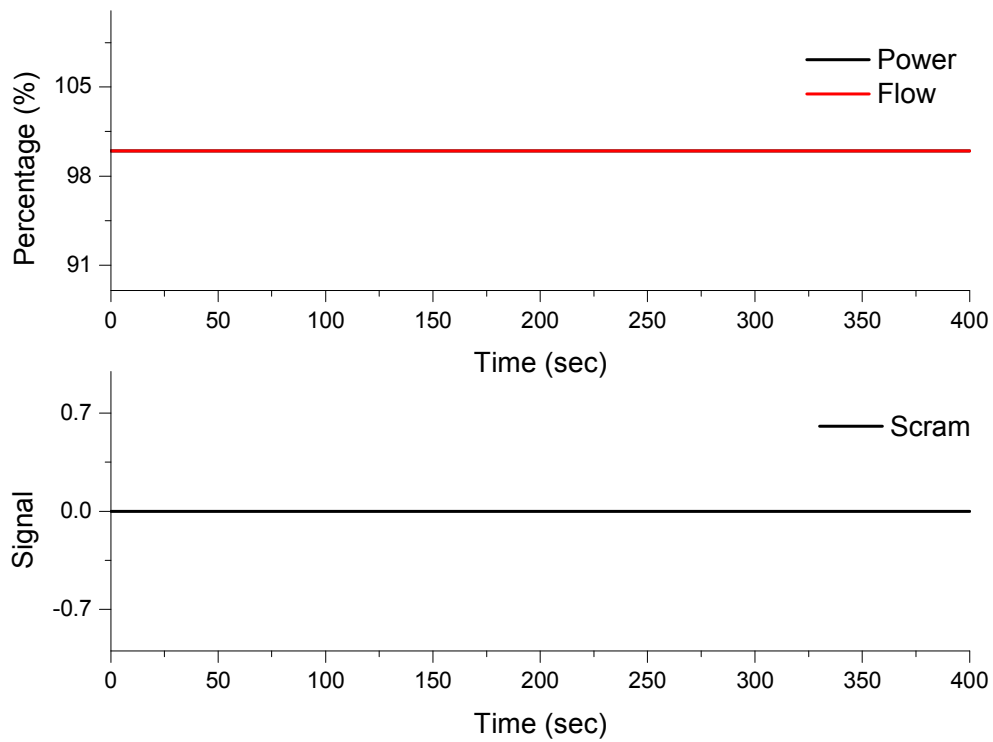


圖 B.1 反應爐保護系統獨立測試案例(1)

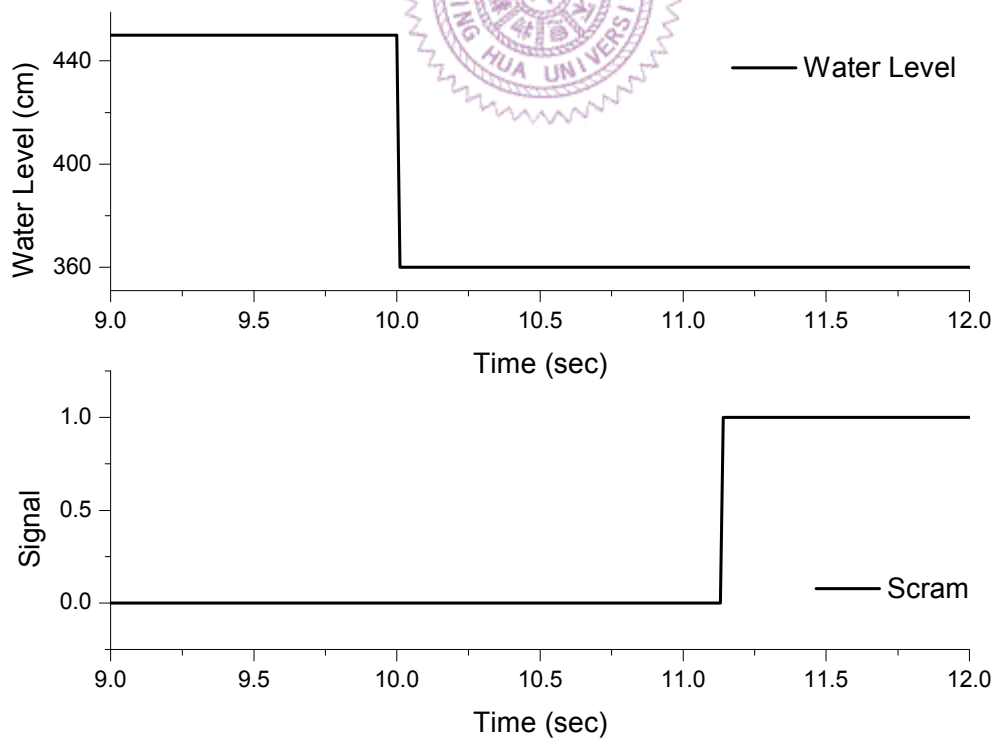


圖 B.2 反應爐保護系統獨立測試案例(2)

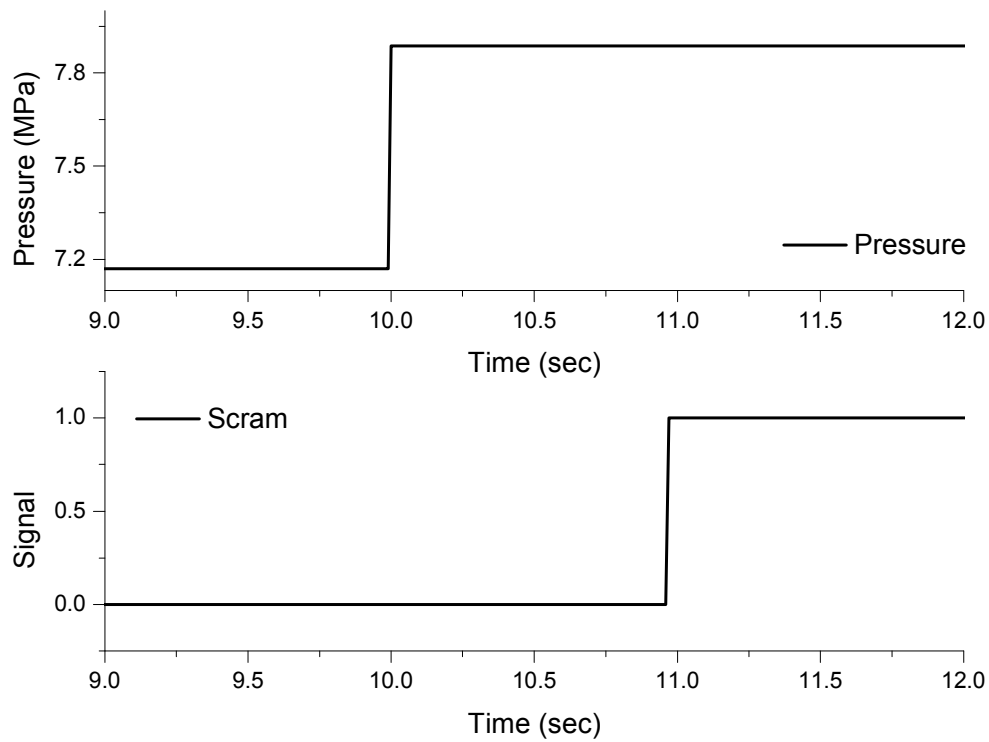


圖 B.3 反應爐保護系統獨立測試案例(3)

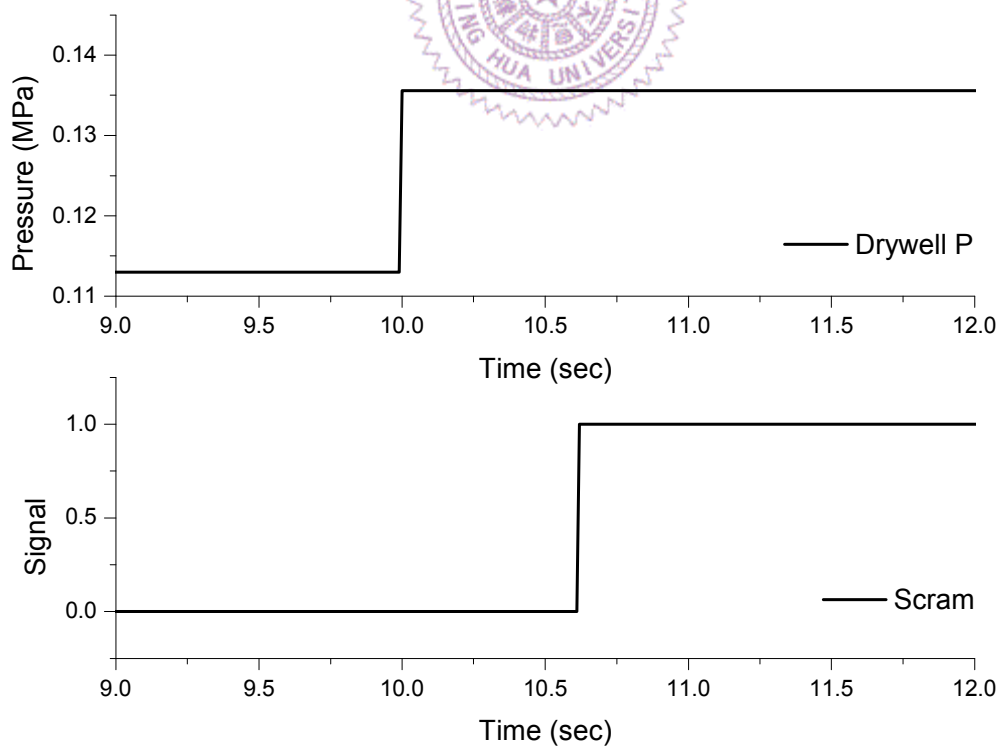


圖 B.4 反應爐保護系統獨立測試案例(4)

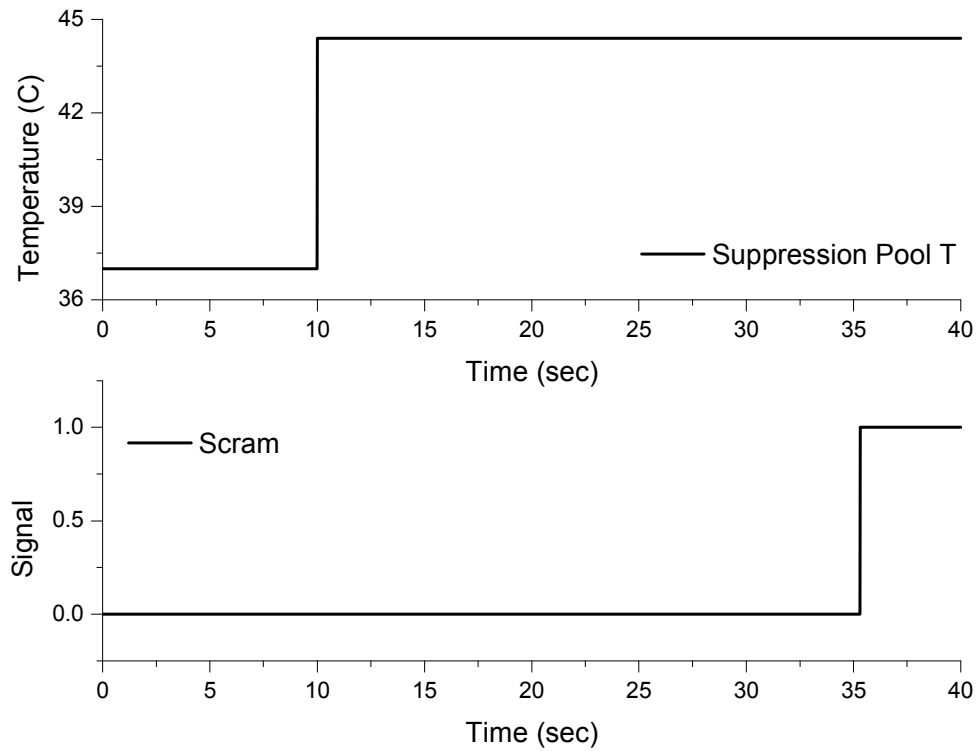


圖 B.5 反應爐保護系統獨立測試案例(5)

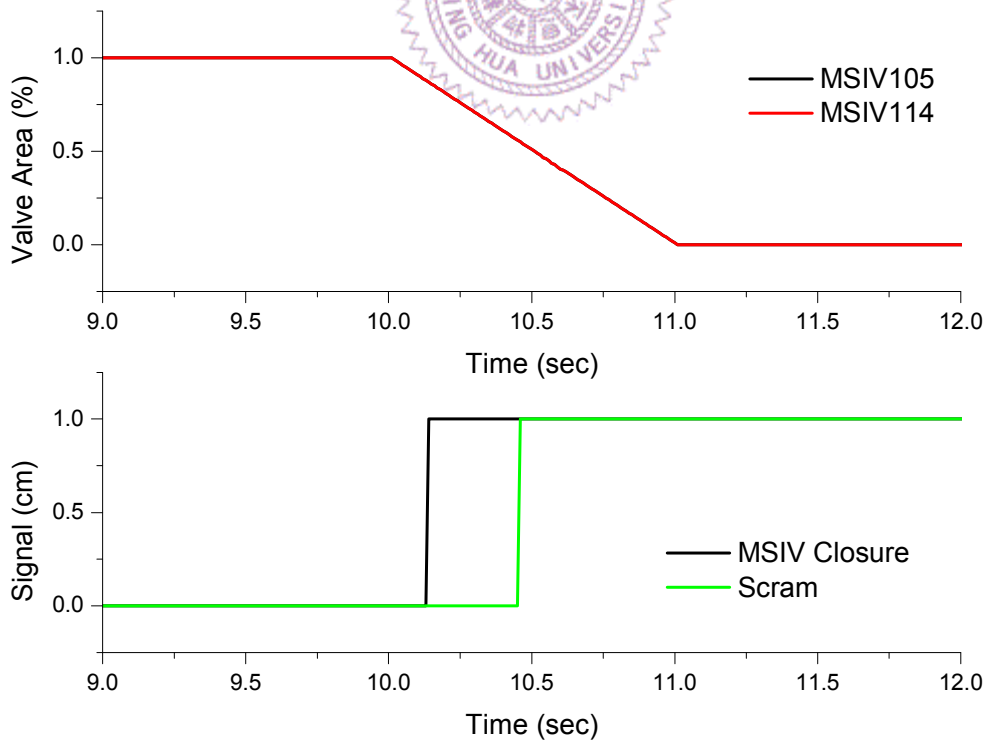


圖 B.6 反應爐保護系統獨立測試案例(6)

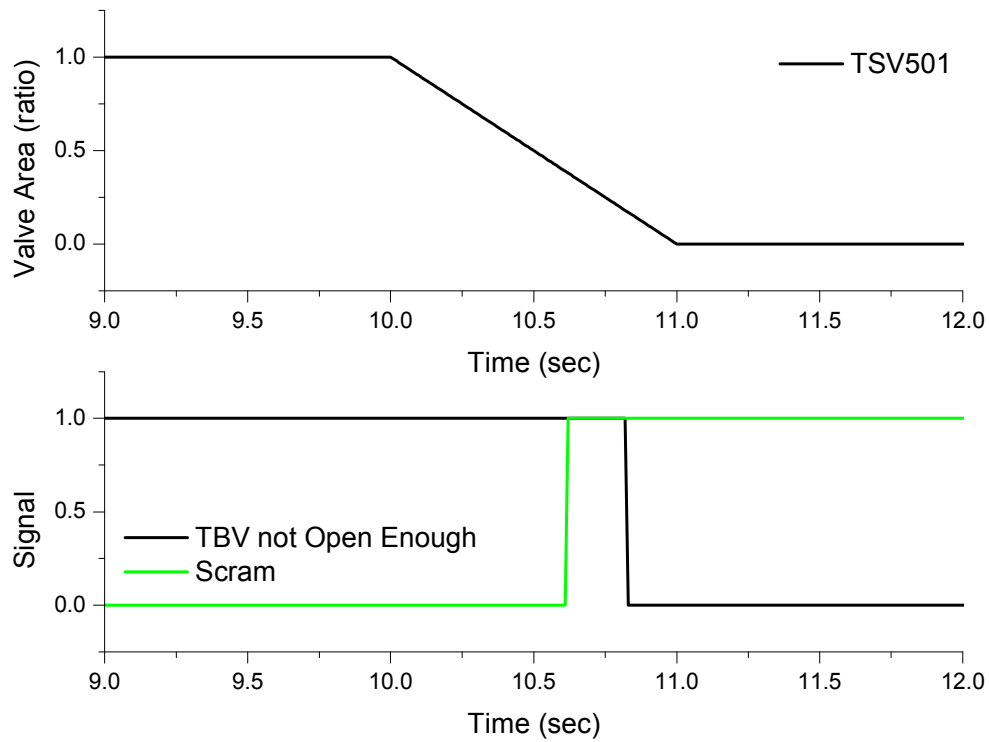


圖 B.7 反應爐保護系統獨立測試案例(7)

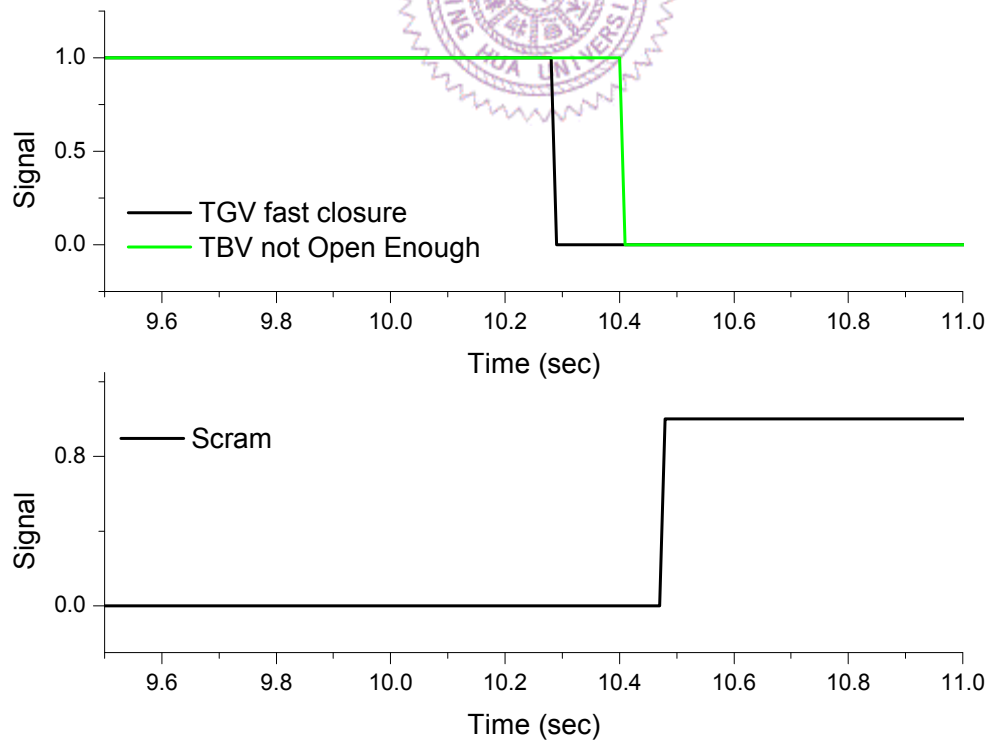


圖 B.8 反應爐保護系統獨立測試案例(8)

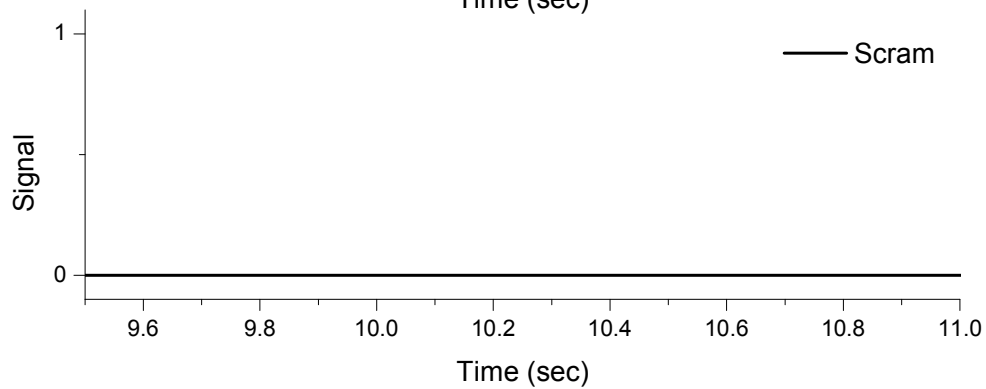
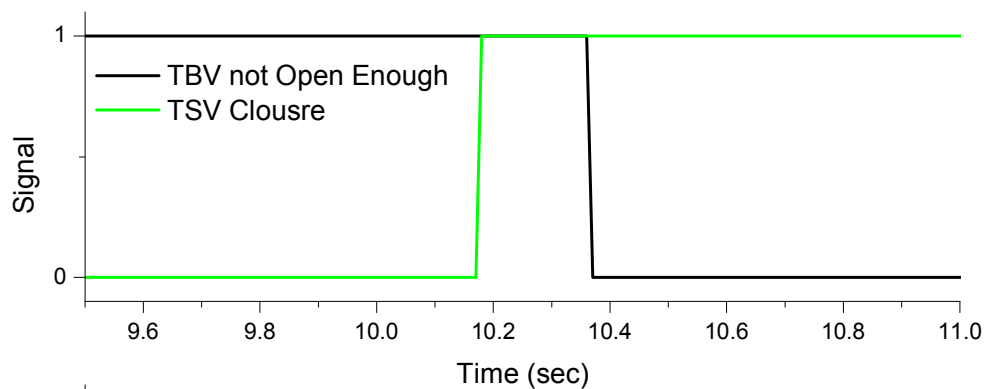


圖 B.9 反應爐保護系統獨立測試案例(9)

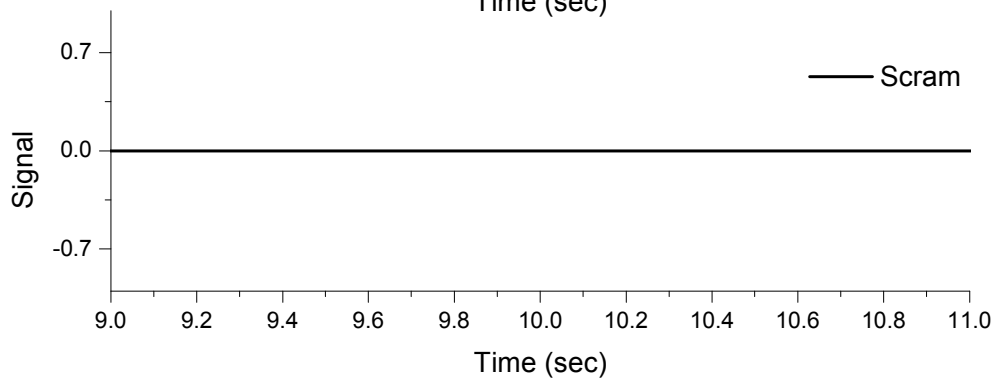
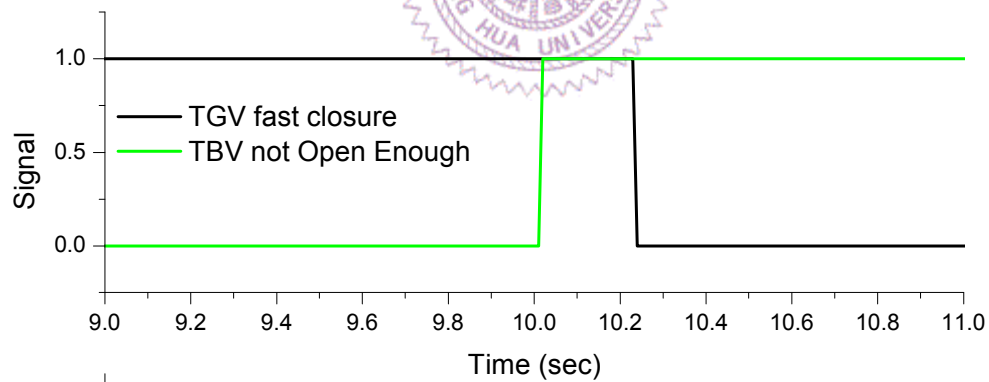


圖 B.10 反應爐保護系統獨立測試案例(10)

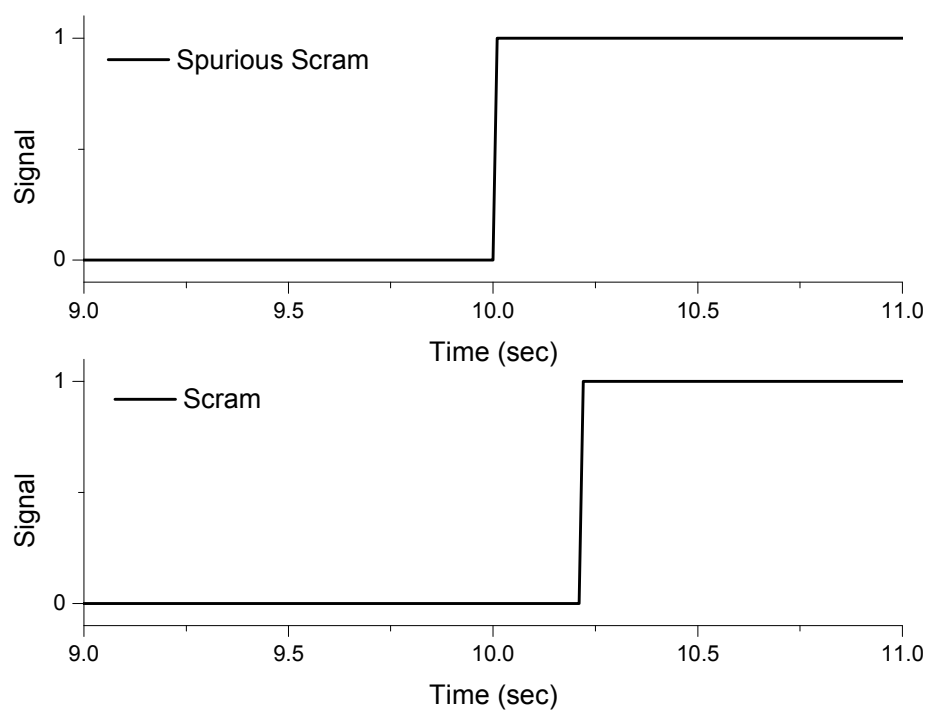


圖 B.11 反應爐保護系統獨立測試案例(11)



附錄 C

棒控制與資訊系統獨立測試

棒控制與資訊系統主要測試會造成 SCRRI、ARI 和 Scram 的信號。若是產生 SCRRI 信號，選定的控制棒會以每秒 0.025224827m 的速度插入爐心；若是產生 ARI 信號，全部的控制棒都會以每秒 0.146304m 的速度插入爐心；若是產生 Scram 的信號，控制棒插入行為同如圖 C.1。由於產生 SCRRI、ARI 以及 Scram 的信號已於附錄 A 與附錄 B 測試，此處僅各取一個暫態信號測試本系統。

棒控制與資訊系統的獨立測試共有 4 項，測試項目及結果列於表 C-1，各項測試的重要參數結果列於圖 C.2~C.6。

表 C-1 棒控制與資訊系統獨立測試表

測試編號	測試內容	控制變數
1	正常運轉，控制棒棒位皆同表 4-1	無
2	選定 RFCS 第 27 項測試的條件，SCRRI 啟動於 10 秒，選定的控制棒以 0.025224827m/s 的速度變化至同表 4-1 的目標值	Loss of Feedwater heating 信號 (Boolean)
3	選定 RFCS 第 21 項測試的條件，ARI 啟動於 10 秒，所有控制棒以 0.146304m/s 的速度變化至同表 4-1 的目標值	Reactor Pressure (%)
4	選定 RPS 第 2 項測試的條件，Scram 啟動於 100 秒，所有控制棒以圖 C.1 的插棒行為全數插入。	Level 3 信號 (Boolean)

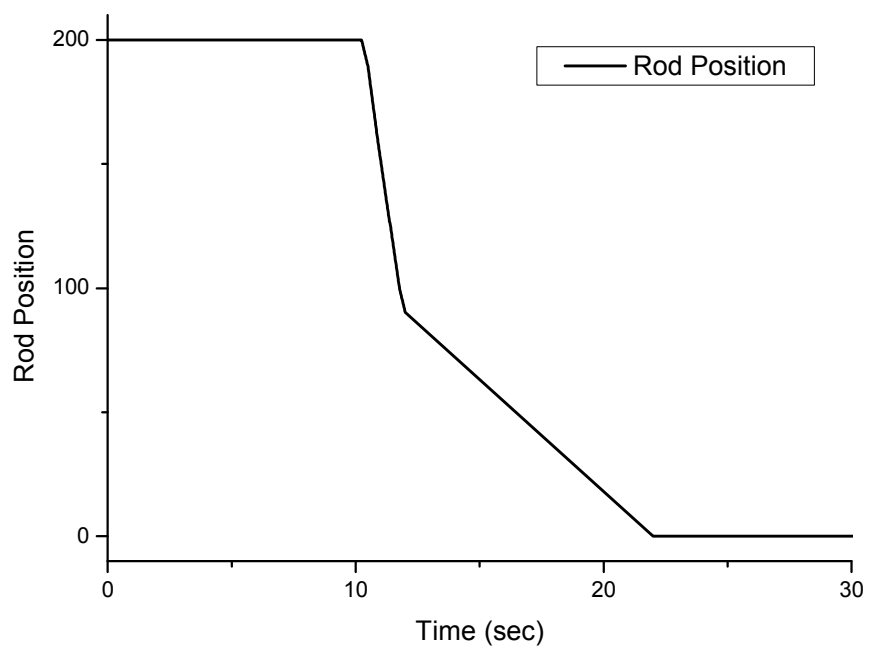


圖 C.1 停機控制棒插棒行為示意圖

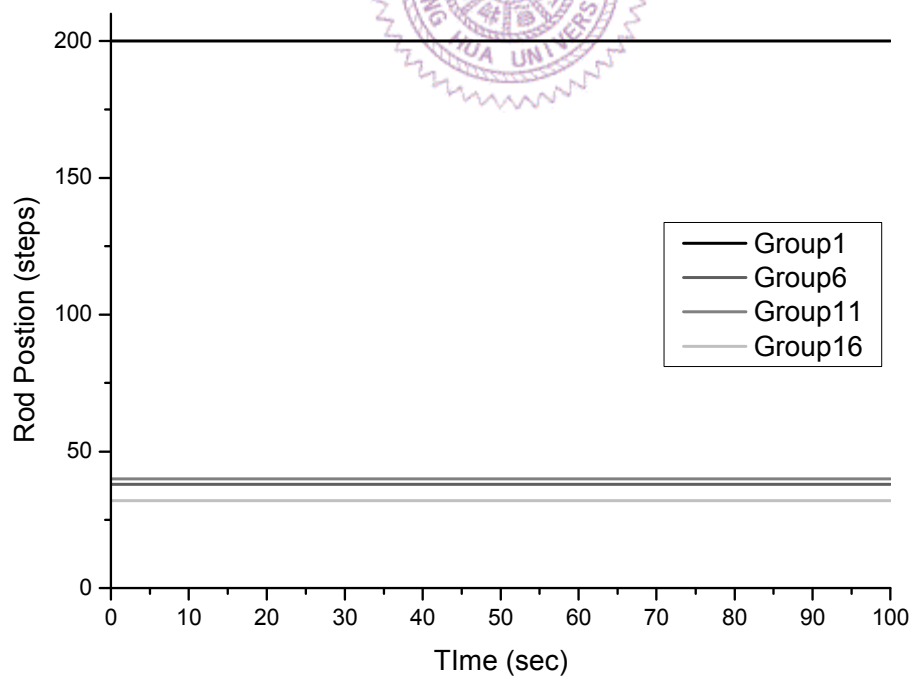


圖 C.2 棒控制與資訊系統獨立測試案例(1)

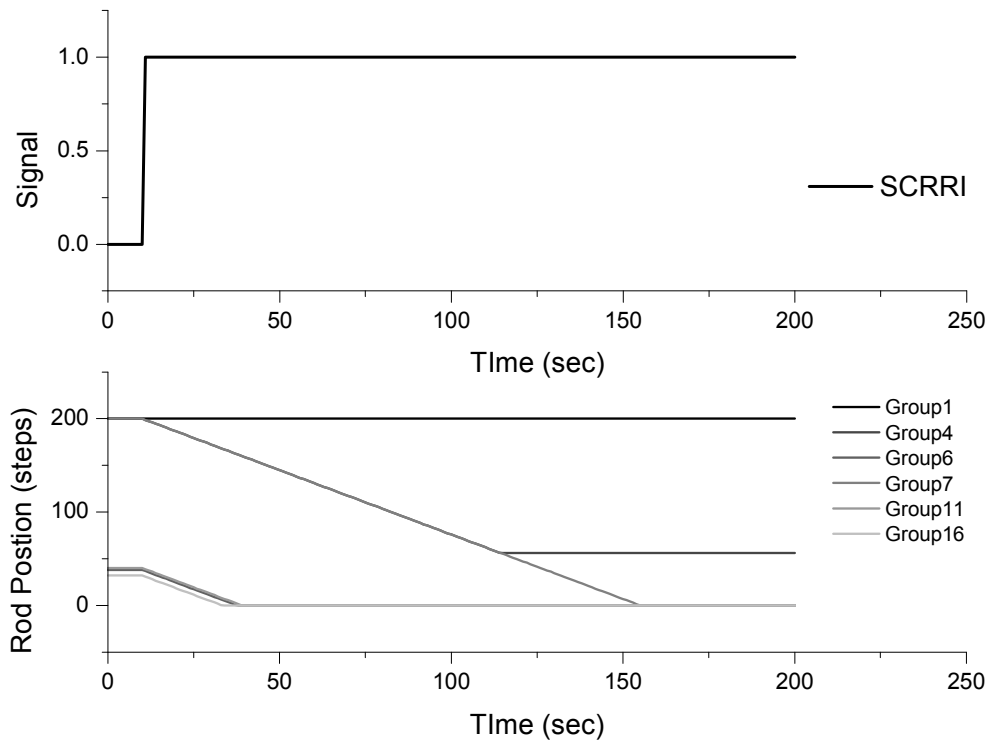


圖 C.3 棒控制與資訊系統獨立測試案例(2)

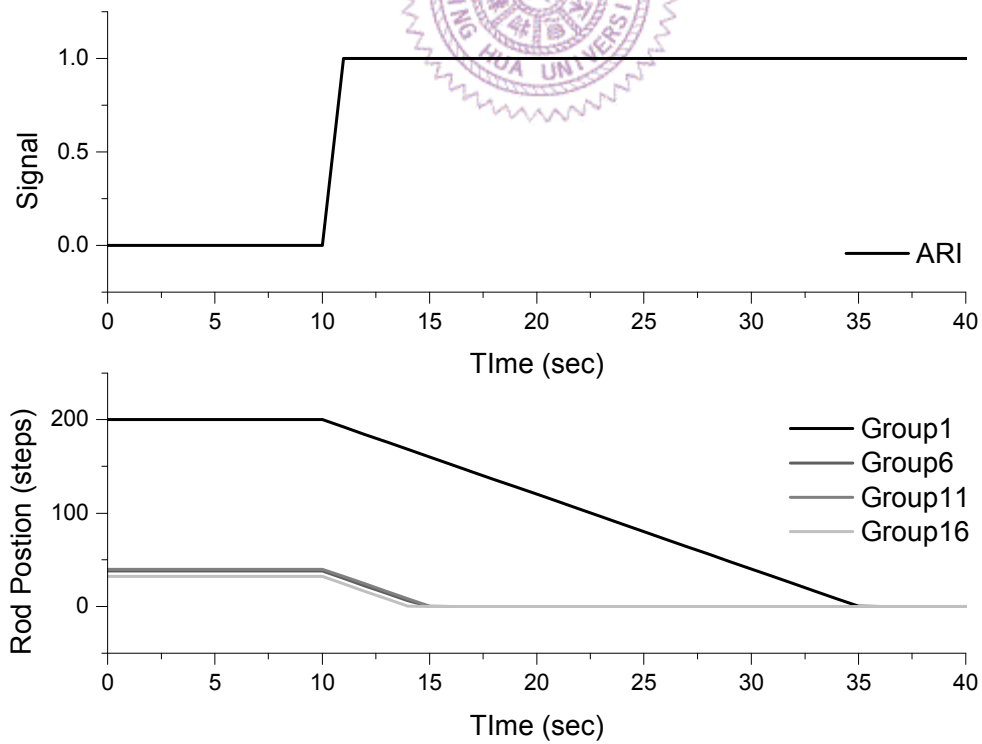


圖 C.4 棒控制與資訊系統獨立測試案例(3)

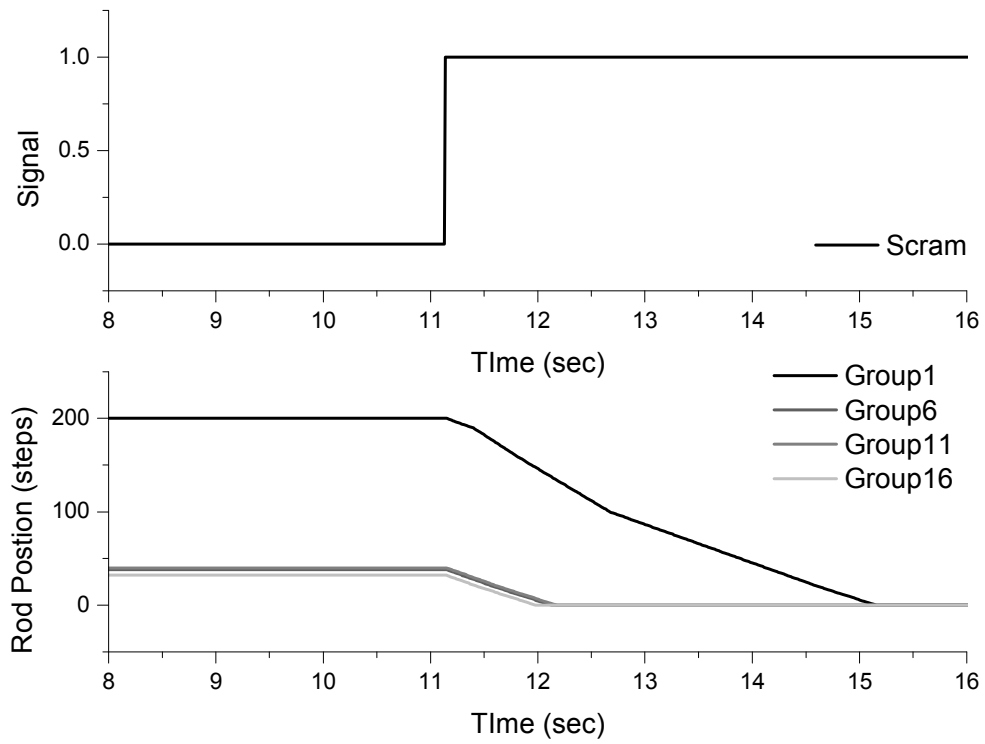


圖 C.5 棒控制與資訊系統獨立測試案例(4)

