

國立清華大學

碩士論文

題目 核二廠 RELAP5-3D 輸入檔建立與驗證

系別 工程與系統科學系

學號姓名 9511525 陳宇民

指導教授 李 敏 博士

中華民國九十七年七月

摘要

本論文研究目的為，使用自愛達華國家工程實驗室（INEL）發展之 RELAP 系列程式 RELAP5-3D，建立核二國聖電廠 RELAP5-3D 之輸入檔。並在建立完成輸入檔及穩態計算後，以相關暫態測試結果驗證控制系統的正確性。

完成核二廠 RELAP5-3D 之輸入檔建立，使用點動態中子模式來計算中子通率之時變情況。在控制系統的建立方面，參考 RETRAN 及 RELAP5/MOD3 之核二廠輸入檔，轉換為 RELAP5-3D 格式，並用電廠測試之暫態來驗證所建立控制系統之正確性。

三個暫態模擬結果顯示，各個控制系統雖然能夠達到基本的功能，使得暫態模擬數據趨勢大致上接近電廠測試結果，但數據上的差異仍有改善的空間。藉由修正並調整在暫態測試模擬時所發現的問題，進一步改善控制系統，減少誤差，使其模擬電廠實際狀況能力達到要求標準。

Abstract

In this study, the input deck of the thermalhydraulic system analysis code, RELAP5-3D, for Kuosheng Nuclear Power Plant is developed. The plant employs a General Electric Designed Boiling Water Reactor (BWR IV) with rated power of 2,894 MWt. The input deck includes modeling of reactor vessel, recirculation loop, and major components of balance of plant (BOP) . The input deck is initialized successfully to a steady state conditions. The input deck is then used to simulate three power test transients e.g. 100% power load rejection, 96% power MSIV closure, 68% power recirculation pump trip. The simulated results are compared with the results of power tests. The results of comparison show that the simulated results can be improved by fine tuning of parameters, and the control system of RELAP5-3D input deck.

致謝辭

本論文研究的完成，得之於人者太多，在此獻上謝意。

感謝論文指導老師，李敏教授，給予論文上多方面的指導及觀念上的啟發與建立。感謝核研所，梁國興博士、楊宗佑學長、馬紹仕學長及徐玉芬學姐對於程式上及作法上的指導。感謝一起努力的實驗室同學，紹楷、亞霖，三人互相激勵讓碩士兩年過得輕鬆許多。感謝實驗室的學長及學弟妹，謝謝你們的支持與鼓勵。謝謝一路陪伴的家人與朋友，給了我持續奮戰的動力與精神上的支持。非常感謝。



目錄

摘要·····	1
英文摘要·····	2
致謝辭·····	3
目錄·····	4
圖目錄·····	6
第一章 緒論·····	8
1.1 前言·····	8
1.2 研究範圍·····	8
1.3 資料來源·····	9
1.4 論文架構·····	9
第二章 RELAP5-3D 程式介紹·····	10
2.1 RELAP 程式發展·····	10
2.2 RELAP5-3D 模式介紹·····	10
第三章 核二廠 RELAP5-3D 輸入數據的建立·····	13
3.1 前言·····	13
3.2 輸入檔穩態的建立·····	13
第四章 核二廠控制系統介紹與控制系統建立·····	27
4.1 核二廠控制系統簡介·····	27
4.2 飼水控制系統·····	28
4.3 壓力調節系統·····	30
4.4 再循環水控制系統·····	30
4.5 核二廠控制系統的建立·····	31
第五章 暫態分析結果與驗證·····	32

5.1 核二廠控制系統建立與驗證.....	32
5.2 100%功率負載棄載測試.....	32
5.3 96%功率主蒸汽隔離閥（MSIV）關閉測試.....	34
5.4 68%功率再循環水泵跳脫測試.....	36
第六章 結論.....	47
參考資料.....	48
附錄 A RELAP5-3D 閥門(Valve)模式討論.....	49
A.1 前言.....	49
A.2 RELAP5-3D 閥門模式驗證.....	49



圖目錄

圖 2.2.1 RELAP 系列程式發展圖.....	12
圖 3.2.1 反應器壓力槽的模擬系統格點圖.....	17
圖 3.2.2 高壓汽機系統模擬格點圖.....	18
圖 3.2.3 低壓汽機系統模擬格點圖.....	18
圖 3.2.4 飼水控制系統邏輯圖.....	19
圖 3.2.5 壓力調節系統邏輯圖.....	20
圖 3.2.6 反應爐壓力槽輸入檔初始震盪.....	21
圖 3.2.7 反應度回饋值調整後之功率.....	21
圖 3.2.8 質量流率模式與流體速率模式下的功率比較.....	22
圖 3.2.9 再循環管路簡化前的質量流率.....	22
圖 3.2.10 再循環管路簡化後的質量流率.....	23
圖 3.2.11 主蒸汽管路簡化前的質量流率.....	23
圖 3.2.12 主蒸汽管路簡化後的質量流率.....	24
圖 3.2.13 核二廠輸入檔之功率.....	24
圖 3.2.14 核二廠輸入檔之蒸汽頂槽壓力.....	25
圖 3.2.15 核二廠輸入檔之主蒸汽管路質量流率.....	25
圖 3.2.16 核二廠輸入檔之飼水管路質量流率.....	26
圖 5.2.1 100%功率負載棄載測試，反應爐功率比較.....	38
圖 5.2.2 100%功率負載棄載測試，蒸汽頂槽壓力比較.....	38
圖 5.2.3 100%功率負載棄載測試，汽機控制閥開度比較.....	39
圖 5.2.4 100%功率負載棄載測試，蒸汽流量比較.....	39
圖 5.2.5 100%功率負載棄載測試，爐心水位比較.....	40
圖 5.2.6 100%功率負載棄載測試，爐心流量比較.....	40

圖 5.3.1 96%功率主蒸汽隔離閥關閉測試，主蒸汽隔離閥開度比較	41
圖 5.3.2 96%功率主蒸汽隔離閥關閉測試，爐心功率比較·····	41
圖 5.3.3 96%功率主蒸汽隔離閥關閉測試，蒸汽頂槽壓力比較·····	42
圖 5.3.4 96%功率主蒸汽隔離閥關閉測試，爐心流量比較·····	42
圖 5.3.5 96%功率主蒸汽隔離閥關閉測試，蒸汽隔離閥流量比較··	43
圖 5.3.6 96%功率主蒸汽隔離閥關閉測試，爐心水位比較·····	43
圖 5.4.1 68%功率再循環水泵跳脫測試，爐心功率比較·····	44
圖 5.4.2 68%功率再循環水泵跳脫測試，蒸汽頂槽壓力比較·····	44
圖 5.4.3 68%功率再循環水泵跳脫測試，蒸汽流量比較·····	45
圖 5.4.4 68%功率再循環水泵跳脫測試，再循環水流量比較·····	45
圖 5.4.5 68%功率再循環水泵跳脫測試，爐心流量比較·····	46
圖 5.4.6 68%功率再循環水泵跳脫測試，爐心水位比較·····	46
圖 A.2.1.1 RELAP5-3D 閥門模式驗證，模擬系統格點圖·····	51
圖 A.2.2.1 RELAP5-3D 閥門模式驗證，閥門流量比較·····	51
圖 A.2.2.2 RELAP5-3D 閥門模式驗證，閥門開度·····	52
圖 A.2.2.3 RELAP5-3D 閥門模式驗證，壓力比較·····	52

第一章 緒 論

1.1 前言

核電廠系統於重要暫態及事故中的熱水流變化是核電廠安全分析的重點。美國愛德荷國家工程研究室 (INEL)，在美國核能管制委員會 (U.S Nuclear Regulatory Commission, NRC) 支助下發展 RELAP (Reactor Excursion and Leak Analysis Program) 程式，主要用於輕水式反應器 (Light Water Reactor, LWR) 暫態事故模擬分析。目的在協助電力公司及法規管制單位設定運轉限值，避免暫態及事故發生時，造成防止放射性物質外釋的屏障喪失完整性，確保電廠的安全運轉。

我國的核二廠位於台北縣萬里鄉，共有兩座同型機組。使用美國奇異公司 (General Electric, GE) 設計與製造之第六代沸水式反應器 (Boiling Water Reactor, BWR/6)，發電機組西屋公司 TCF-44 型，圍阻體則為馬克三型 (Mark III)。核二廠單機裝置容量為 985 MWe，核反應器的熱功率為 2894 MWt。

本研究目的為利用 RELAP 系列程式最新之 RELAP5-3D 版本，建立核二廠輸入檔，並以電廠功率測試及實際暫態數據驗證 RELAP5-3D 程式及輸入檔。RELAP5-3D 是美目前採用經驗公式最少之最佳計算 (Best Estimated, BE) 核電廠系統熱水流分析程式。

1.2 研究範圍

本研究工作重點為，利用 RELAP5-3D 程式，建立核二國聖電廠之輸入檔，並以功率測試及實際暫態數據驗證其正確性。研究成果可以提供電廠做為日常運轉相關分析的參考。本研究的重要工作，可歸納

為下列幾項：

- 1、以 RELAP5-3D 程式為基礎分析工具，建立核二廠輸入資料。
- 2、建立核二廠 RELAP5-3D 程式穩態之初始狀況。
- 3、建立核二廠之控制系統，並以相關暫態測試其正確性。

1.3 資料來源

本研究依據的資料，由核研所提供部份包括：RELAP5-3D【參考資料 6】及 RETRAN 程式【參考資料 7】核二廠輸入檔，此用以建立穩態輸入檔。另外，張世勳學長於民國 85 年 6 月碩士論文【參考資料 4】中所建立的暫態輸入檔，參考以建立暫態輸入檔。

1.4 論文架構

本論文共分為五章，第一章介紹研究緣起及研究範圍。第二章簡介 RELAP5-3D 程式，整體架構及其使用能力。第三章介紹核二廠 RELAP5-3D 輸入檔建立及穩態初始狀況的方法。第四章介紹核二廠重要控制系統：飼水控制系統，壓力調節系統及再循環泵控制系統，以及控制系統建立方法。第五章介紹暫態分析結果與驗證，討論各暫態分析結果與輸入檔可改進之處。第六章為結論，介紹論文完成度及後續改善工作。

第二章 RELAP5-3D 程式介紹

2.1 RELAP 程式發展

RELAP 系列電廠系統熱水流分析程式是由美國愛德荷國家工程實驗室 (INEL)，在美國核管會支助下發展出來之輕水式反應器 (Light Water Reactor, LWR) 暫態與事故模擬分析之程式。此程式主要目的為提供電力公司及法規管制單位一運算快，計算結果準確且使用方便之最佳估算 (Best Estimated, BE) 核電廠系統熱水流分析程式。其主要作為下列各類用途：

- 1、作為核能管制法規製訂與核電廠運轉執照申請之評估作業基礎。以及驗證其它使用較簡化模式之電廠分析程式的結果，做為分析比對基礎及依據。
- 2、提昇核能相關基構之核能電廠系統暫態及事故分析能力，做為設計分析、安全分析及運轉執照申請之作業所需。
- 3、協助熱流實驗計劃擬定，執行實驗進行前預測分析，以及執行實驗完成後分析工作，以增進實驗結果之實用性。

2.2 RELAP5-3D 模式介紹

RELAP 的發展有長遠的歷史，圖 2.2.1 所示為 RELAP 系列程式發展的歷程。RELAP-3D 分析程式主要應用於輕水式反應器 (Light Water Reactor, LWR) 的暫態與冷卻水流失事故的分析評估，但其通用性的分析能力，使 RELAP5-3D 程式亦可廣泛應用於包含蒸汽、液態水、非凝結性氣體等核能或非核能系統的熱水流暫態模擬。程式中係以非均質、非平衡模式對雙相流系統模擬，以部份隱性數值法求得聯立方程式之解。RELAP5-3D 中包含一般系統之組件模式，如泵、閥門、管路、

汽水分離器以及控制系統元件，簡化了分析複雜系統時各組件的模式化。

在爐心功率計算方面，RELAP5-3D 提供了兩個模式可選擇。第一是點動態中子模式 (Point Reactor Kinetics Model)，由 IREKIN 計劃主持發展的，此模式在目前 RELAP5 系列中皆已發展完成。另一模式為，多維中子模式 (Multi-dimension Neutron Kinetics Model)，由北卡大學 (North Carolina State University) 所發展。此模式在計算中子分裂能量，可依據笛卡兒模式 (Cartesian) 或者六角形模式這兩種幾何模式來進行計算。節點擴張法 (Nodal Expansion Method, NEM) 用來解中子擴張方程式並計算出在不同中子能群 (energy groups) 下的中子通量 (neutron flux)。中子截面模式 (neutron cross section model) 及控制棒模式 (control rod model) 經過發展後，已經有能力模擬較完整的反應爐狀況。而原本為點動態中子模式中的衰變熱模式 (decay heat model) 經過修改，亦能夠在多維中子模式中使用。【參考資料 3】

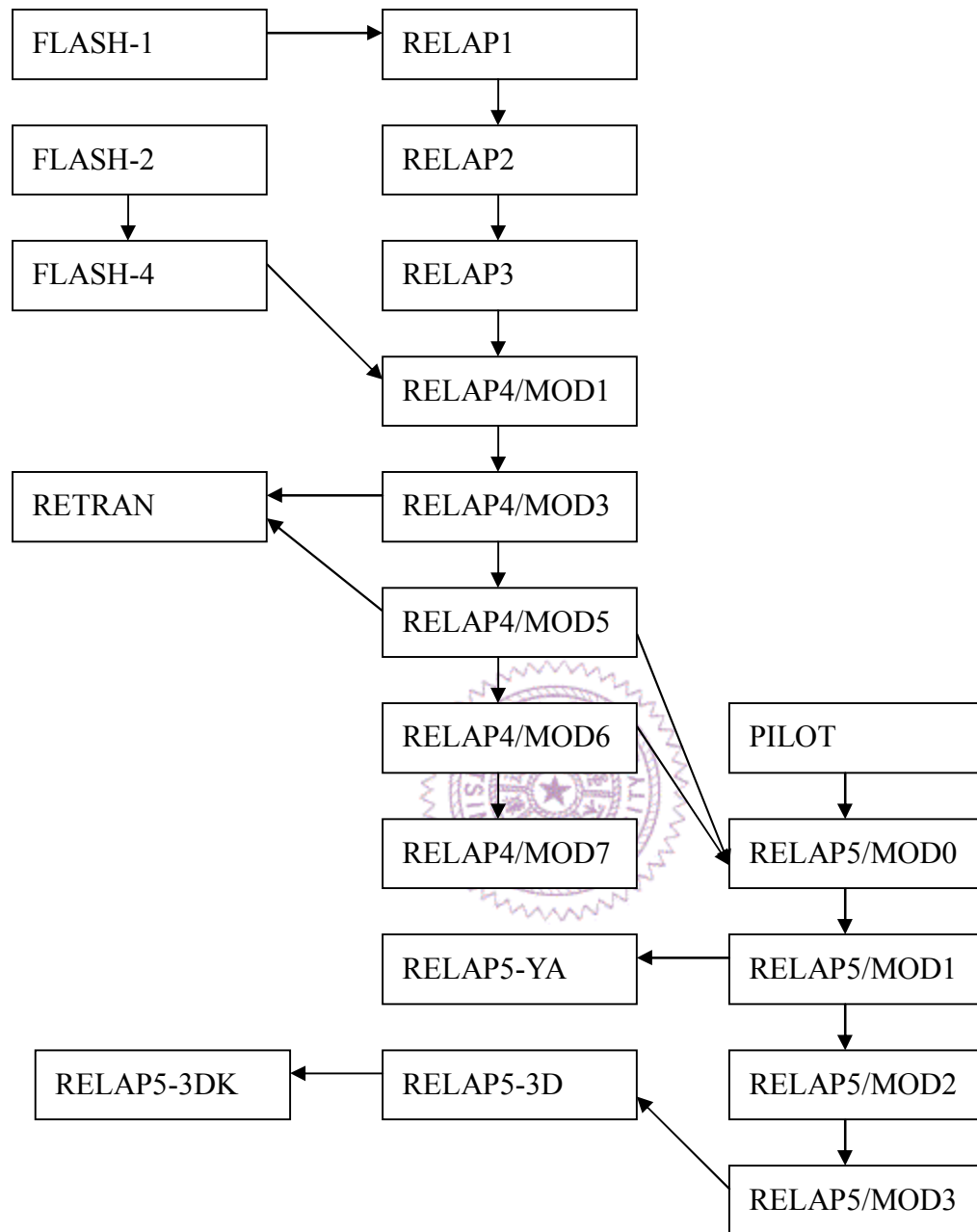


圖 2.2.1 RELAP 系列程式發展圖

第三章 核二廠 RELAP5-3D 輸入數據的建立

3.1 前言

自核能研究所取得之核二廠 RELAP5-3D 輸入數據檔，是核研所發展之核電廠模擬器的一部份；該數據檔輸入資料分為反應爐壓力槽部份 (Reactor Pressure Vessel, RPV) 與電廠平衡系統 (Balance of Plant, BOP) 兩個獨立輸入檔；電廠的控制系統移至另一平台上來計算。因此將前述核二廠輸入檔合併，並適當的加入控制系統，完成輸入模式的穩態分析，使台電公司具有可單獨使用之核二廠 RELAP5-3D 程式輸入檔數據，即為本論文之目的。核二廠輸入檔建立可分為兩個階段：(1) 合併反應爐壓力槽與電廠平衡系統並且達到穩態建立之輸入檔，(2) 參考 RETRAN 程式核二廠輸入檔之控制系統，建立 RELAP5-3D 輸入檔之控制系統。



3.2 輸入檔穩態的建立

3.2.1 輸入檔介紹

核二廠輸入檔建立可分為兩個階段：(1) 合併反應爐壓力槽與電廠平衡系統並且達到穩態建立之輸入檔，(2) 參考 RETRAN 程式核二廠輸入檔建之控制系統，建立 RELAP5-3D 輸入檔之控制系統。

在 RELAP5-3D 部份，核研所提供之兩個核二廠輸入檔：一是反應器壓力槽 (RPV)，另一為電廠平衡系統 (BOP)。圖 3.2.1 為反應器壓力槽的模擬系統格點圖。反應器壓力槽輸入檔包含了 421 控制體積，486 流體接點。模擬部份包括為：反應爐壓力槽 (RPV) 內部組件、再循環水環路 (Recirculation Loop)、主蒸汽管線 (Main Steam Line)，釋壓閥 (Relief Valve) 與安全閥 (Safe valve)、及飼水管線

(Feedwater Line)。輸入數據包含利用點動態中子模式(Point Kinetic Model)來計算中子通率時變所須之輸入數據。電廠平衡系統主要又分為高壓汽機系統及低壓汽機系統。圖 3.2.2 為高壓汽機系統模擬格點圖，圖 3.2.3 為低壓汽機系統模擬格點圖。輸入檔包含了 213 控制體積，231 流體接點，模擬部份為：高壓汽機(High Pressure Turbine)，汽水分離機(Moisture Separator)，低壓汽機(Low Pressure Turbine)，再加熱器(Reheater)，冷凝器(Condenser)，飼水加熱器(Feedwater Heater)，飼水泵(Feedwater Pump)。

RETRAN 程式核二廠輸入檔控制系統模擬了飼水控制系統，壓力調節系統，再循環水控制系統，緊急爐心冷卻系統以及主蒸汽隔離閥控制。圖 3.2.4 為飼水控制系統的邏輯圖，圖 3.2.5 為壓力調節系統邏輯圖。

3.2.2 輸入檔穩態建立過程

在初始嘗試整合反應爐壓力槽與電廠平衡系統輸入檔時，將兩輸入檔重要邊界條件，如邊界控制體積壓力及流體接點(junctions)質量流率等，設定為相同數值後，分別進行穩態計算；在達到穩態後，將穩態時之系統狀況重新設為輸入檔之初始值，直接將兩輸入檔由邊界組件(控制體積及流體接點)相互連結，成為單一之輸入檔。此作法雖然合乎邏輯，但結合在一起的輸入檔卻始終無法達到穩態的建立。其原因為反應爐壓力槽輸入檔部份初始時會有一極大震盪，此震盪早已存在(如圖 3.2.6 所示)，唯因計算時之資料儲存之時間間隔(Time Step Size)設定過大，故繪圖時顯示不出。反應爐壓力槽部分的初始震盪，導致電廠汽機系統部份的震盪，故輸入檔無法達到穩態。

為連結兩輸入檔建立穩態必須找出造成反應爐壓力槽部分初始震盪的原因，由於沒有足夠的資訊，故只能以猜測的方式，逐一測試。

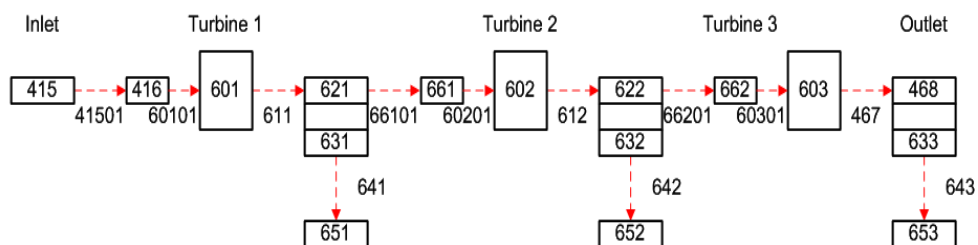
曾經嘗試的部份包括了解反應度回饋是否為造成震盪的原因。在反應度回饋的計算，RELAP5-3D 是以密度效應與都卜勒效應視為反應度回饋的機制。嘗試改變密度及都卜勒回饋表 (Table)，以反覆疊代 (Iteration) 方式，使回饋值逼近零。將回饋值趨近零之時間點設為起始條件，判斷反應度回饋是否為初始震盪的原因。圖 3.2.7 為反應度回饋值調整後之功率。從圖上可以發現，即使在反應度回饋初始值趨近零的狀態下，在 1 秒內發生的極大震盪仍無法藉由此調整而消除，因此反應度並不是初始震盪發生的原因。

第二項嘗試為探討流體接點中輸入質量流率 (Mass flowrate) 與流體速率 (Velocity) 的差異，造成系統計算轉換後無法一致是否是震盪產生的原因。RELAP5-3D 流體接點狀態的輸入模式有兩種，一為直接輸入該流體接點初始質量流率；另一為輸入液態流體速率，汽態流體速率，及兩者之介面速率，再將這三個參數經由程式內部計算轉換成質量流率。第一種輸入方式較為直接，但如果是經程式進行穩態計算獲得之初始值為第二種型式。本研究將相同輸入檔分別以質量流率模式及流體速率模式分別輸入流體接點狀態，測試是否會有不同的結果。圖 3.2.8 為質量流率模式與流體速率模式下的功率比較。可看出兩者的功率幾乎重疊，初始震盪依然存在，因此流體接點的不同輸入模式，也非初始震盪造成的原因。

經過其他的嘗試，終於發現造成反應器壓力槽震盪主因為再循環管路及主蒸汽環路上閥 (servo valve and motor valve) 的開關導致此一震盪。雖然輸入檔中閥的設定為全開，但程式執行時不會在零秒就達到全開時的質量流率，故會造成一短暫的暫態。此為程式內部執行邏輯問題，無法透過輸入數據修改。故在此先將閥(代碼：115、117、125、127、135、137、145、147；205、207、213、215、219、257、

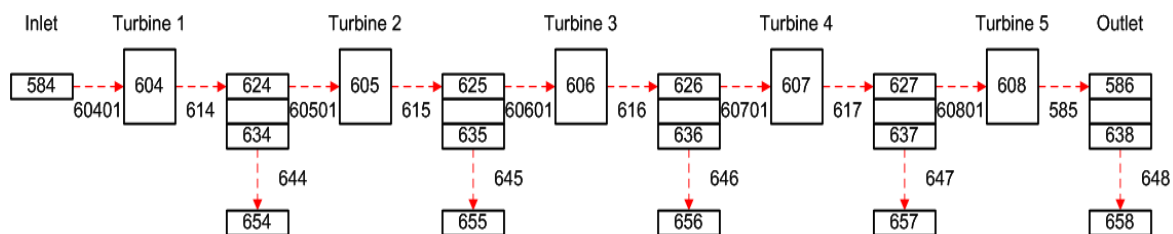
263、265；411，412，413，414)以單流體連接點 (Single Junction) 代替，簡化以避免閥開關時造成的暫態干擾。圖 3.2.9 為更改前的再循環管路質量流率，圖 3.2.10 為更改後之再循環管路的質量流率。對照兩圖可發現更改後可避免初始震盪發生，進而達到穩態。圖 3.2.11 為主蒸汽管路更改前的質量流率，圖 3.2.12 為主蒸汽管路更改後的質量流率。相同的，在簡化後主蒸汽管路也可以消除初始震盪，達到穩態。

在了解初始震盪發生原因進而完成反應器壓力槽輸入檔的穩態建立後，將電廠平衡系統與反應器壓力槽部份連接。經過長時間計算使反應器壓力槽與電廠平衡系統達到穩態，並做初始狀態更新後，可建立起一核二廠 RELAP5-3D 穩態輸入檔。圖 3.2.13 為核二廠輸入檔之功率，圖 3.2.14 為核二廠輸入檔之蒸汽頂槽壓力，圖 3.2.15 為核二廠輸入檔之主蒸汽管路質量流率，圖 3.2.16 為核二廠輸入檔之飼水管路質量流率。由圖中可看出參數值的改變或震盪幅度已經小於萬分之一，輸入檔符合穩態的要求。



NPP2 HP Turbine Model

圖 3.2.2 高壓汽機系統模擬格點圖



NPP2 LP Turbine Model

圖 3.2.3 低壓汽機系統模擬格點圖

Kuosheng Feedwater Control

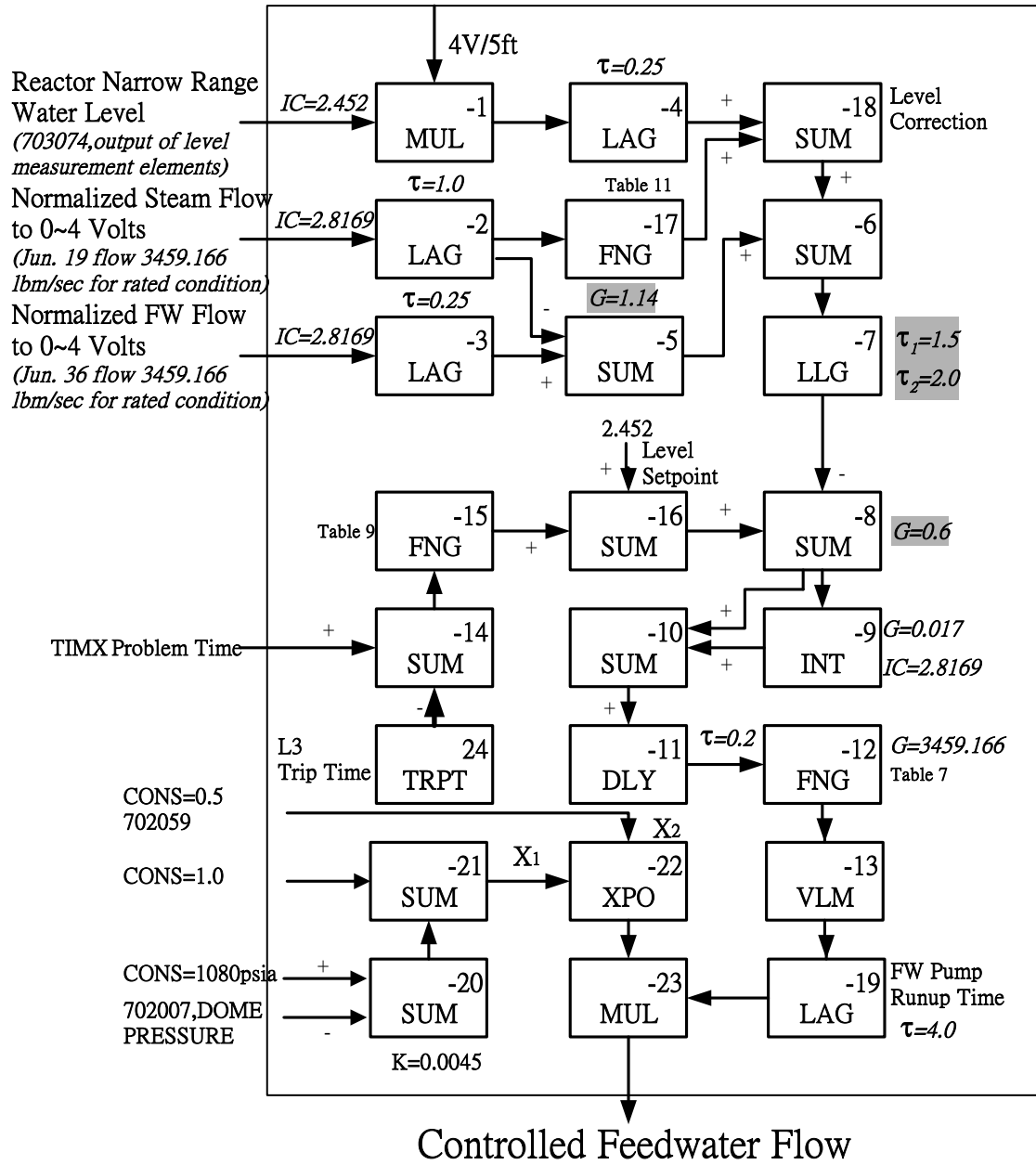


圖 3.2.4 飼水控制系統邏輯圖

圖 3.2.5 壓力調節系統邏輯圖



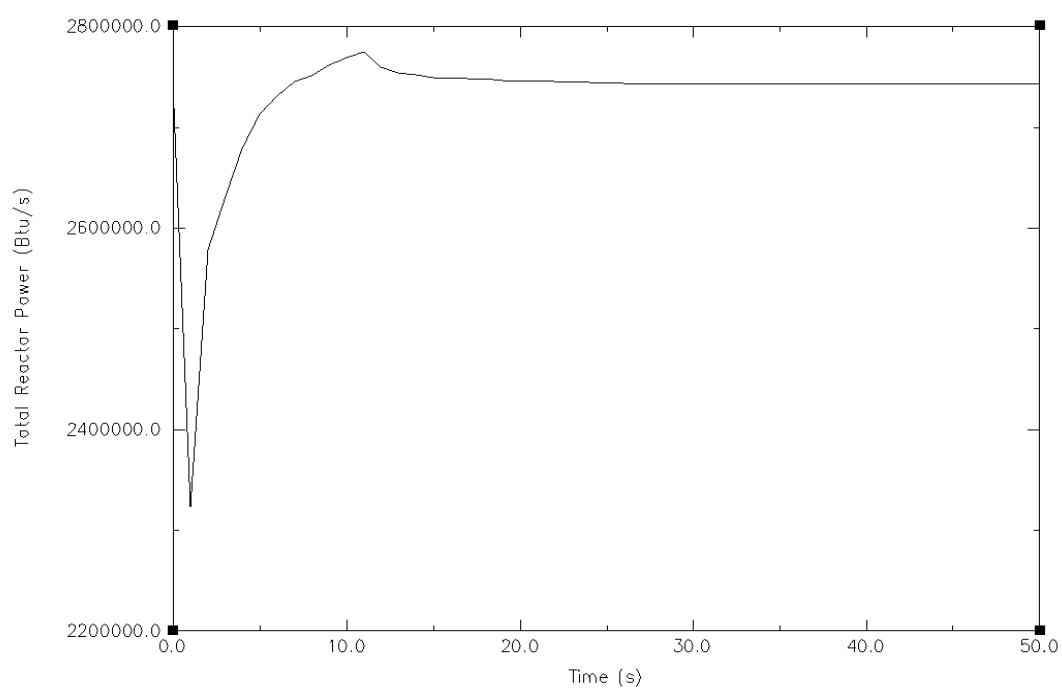


圖 3.2.6 反應爐壓力槽輸入檔初始震盪

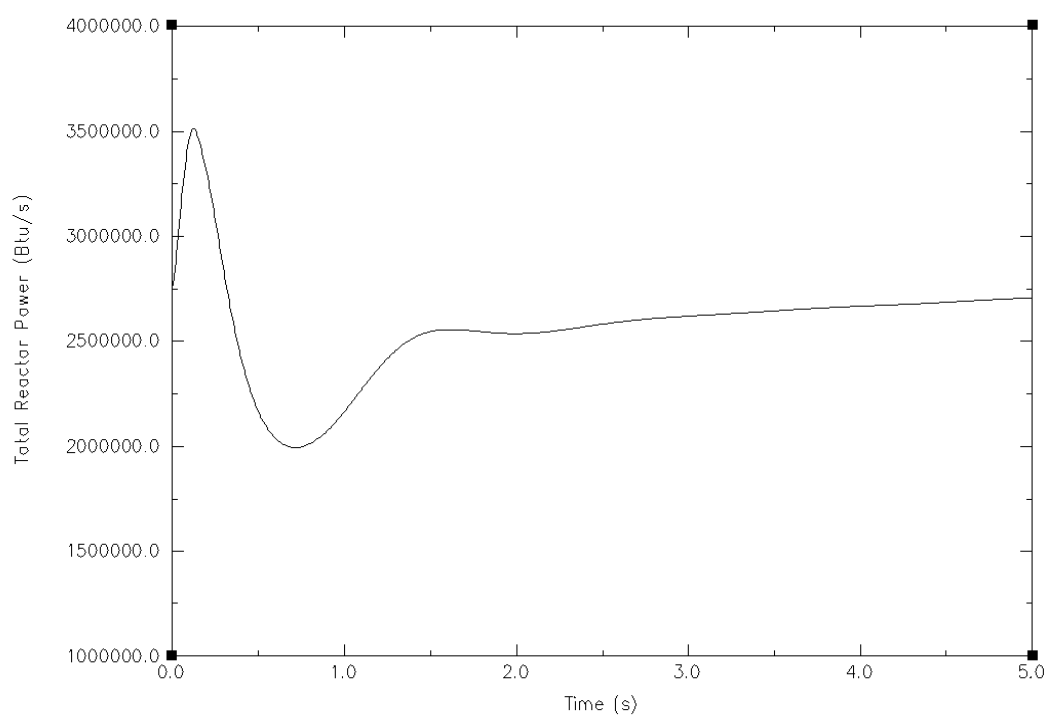


圖 3.2.7 反應度回饋值調整後之功率

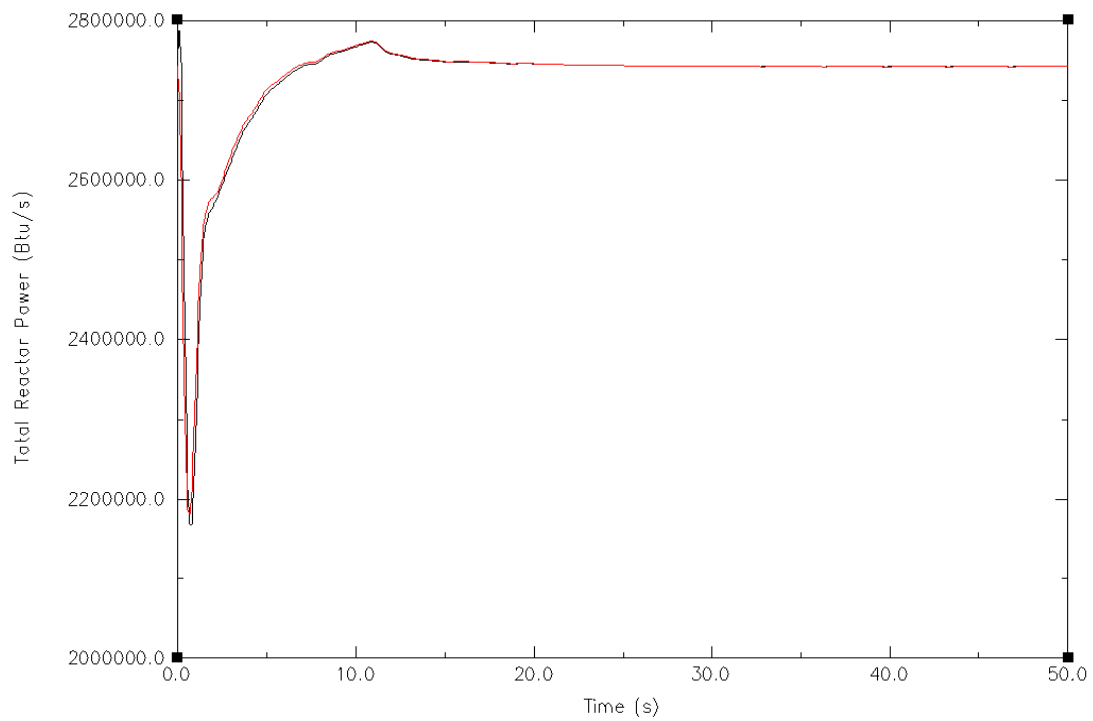


圖 3.2.8 質量流率模式與流體速率模式下的功率比較

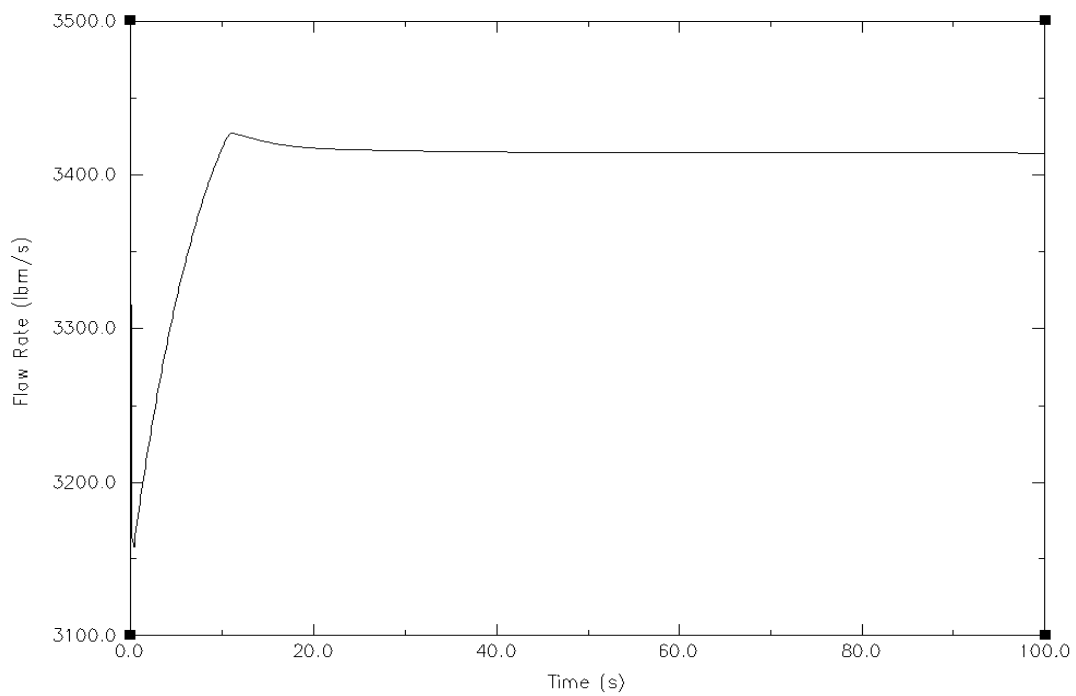


圖 3.2.9 再循環管路簡化前的質量流率

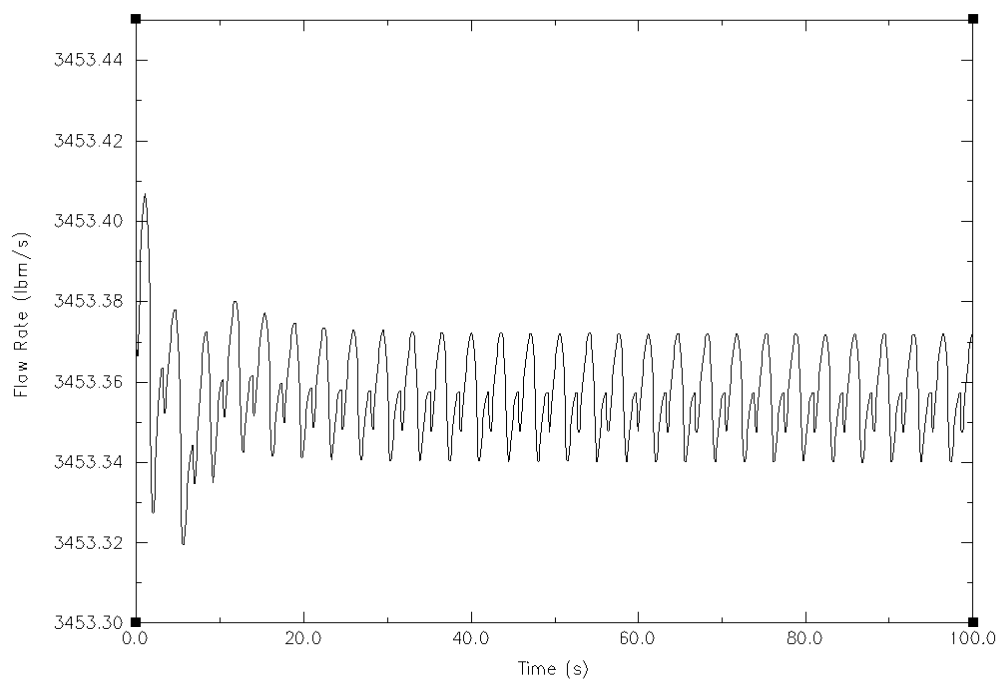


圖 3.2.10 再循環管路簡化後的質量流率

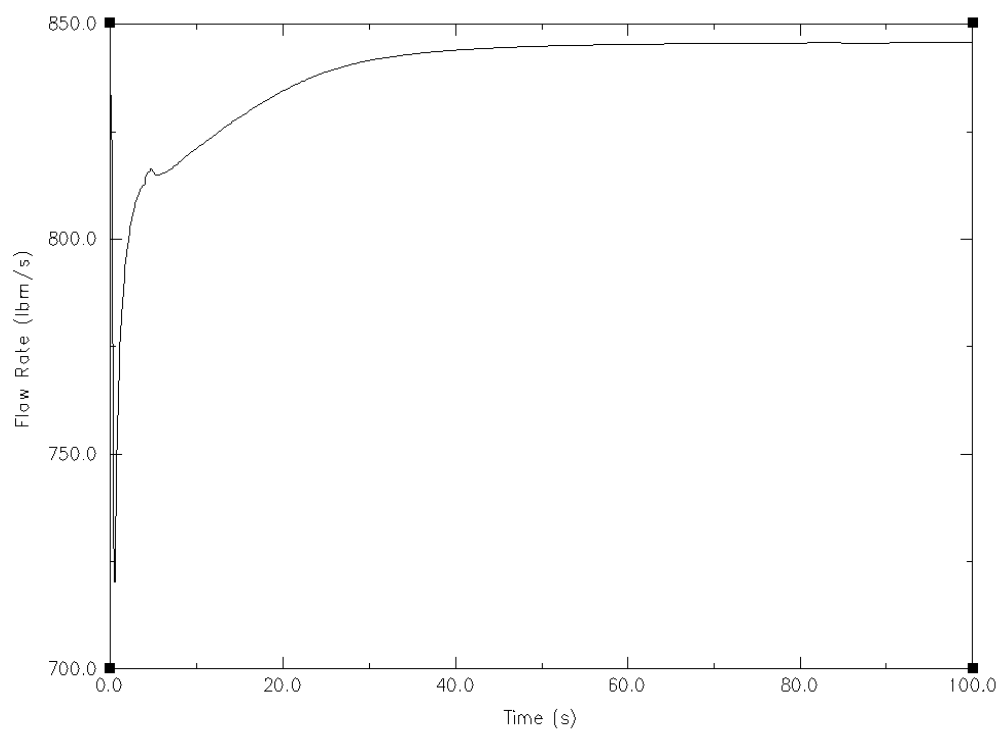


圖 3.2.11 主蒸汽管路簡化前的質量流率

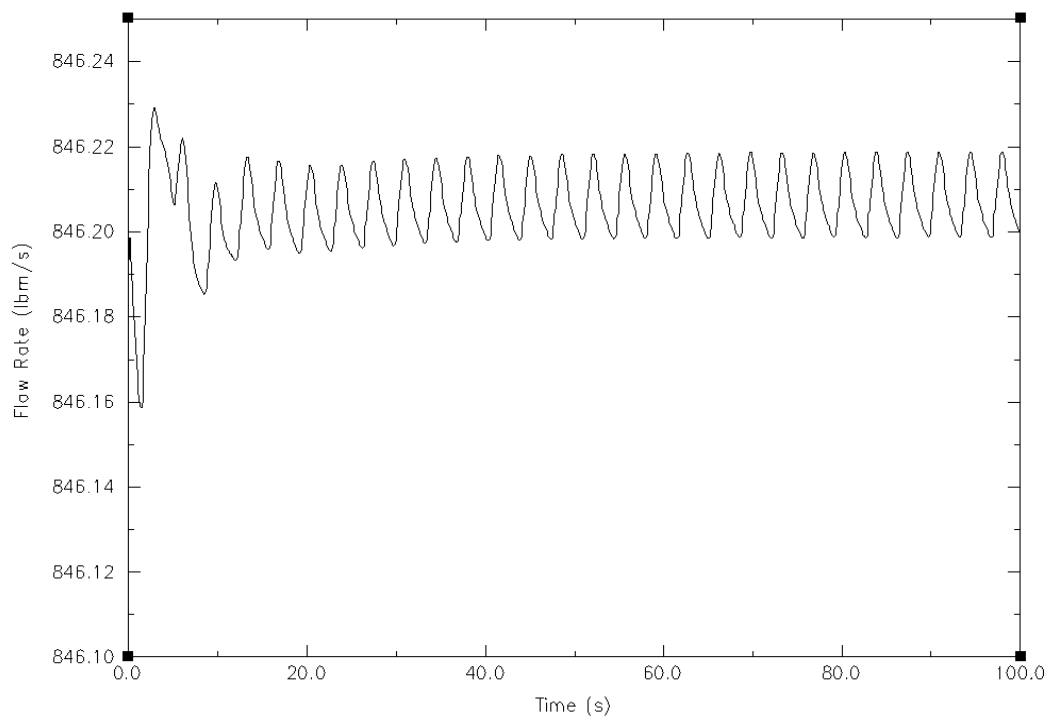


圖 3.2.12 主蒸汽管路簡化後的質量流率

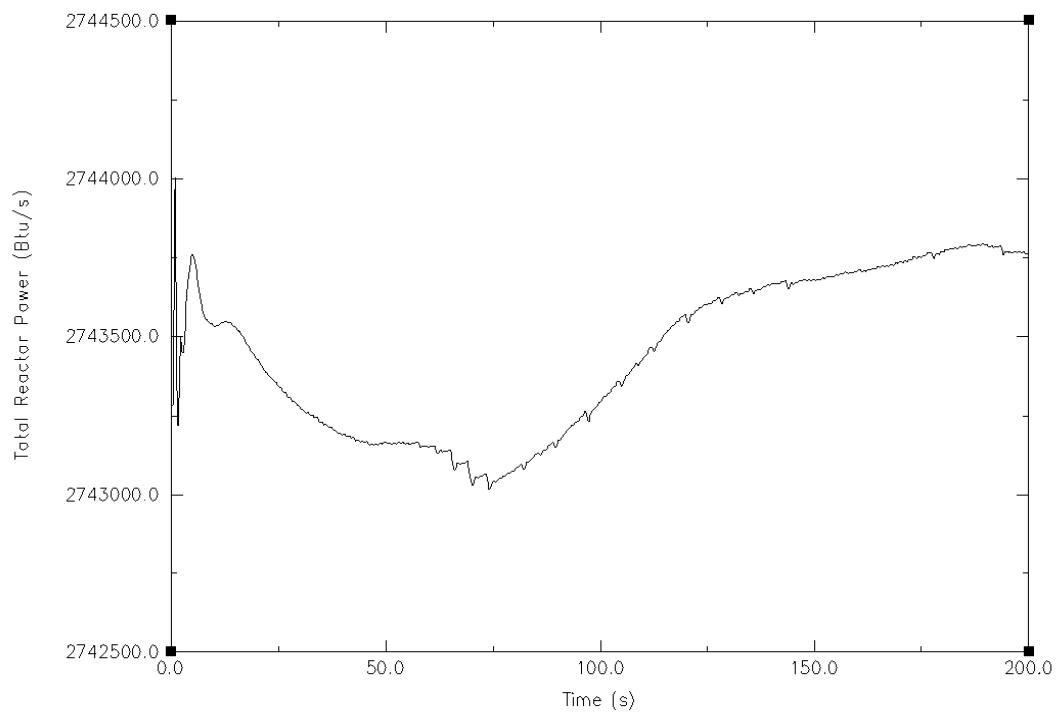


圖 3.2.13 核二廠輸入檔之功率

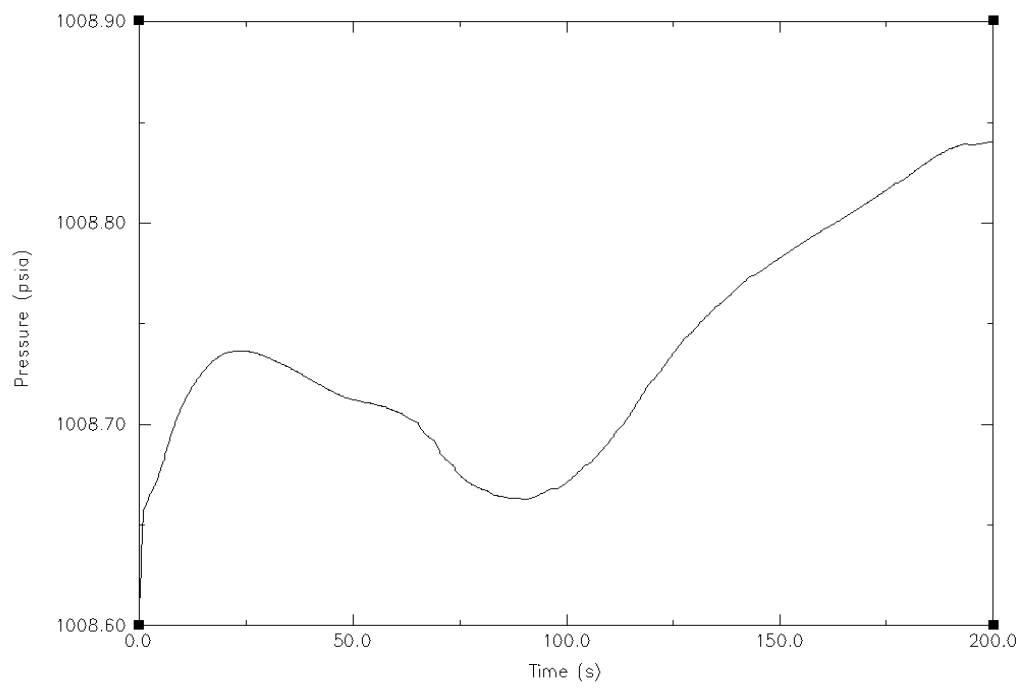


圖 3.2.14 核二廠輸入檔之蒸汽頂槽壓力

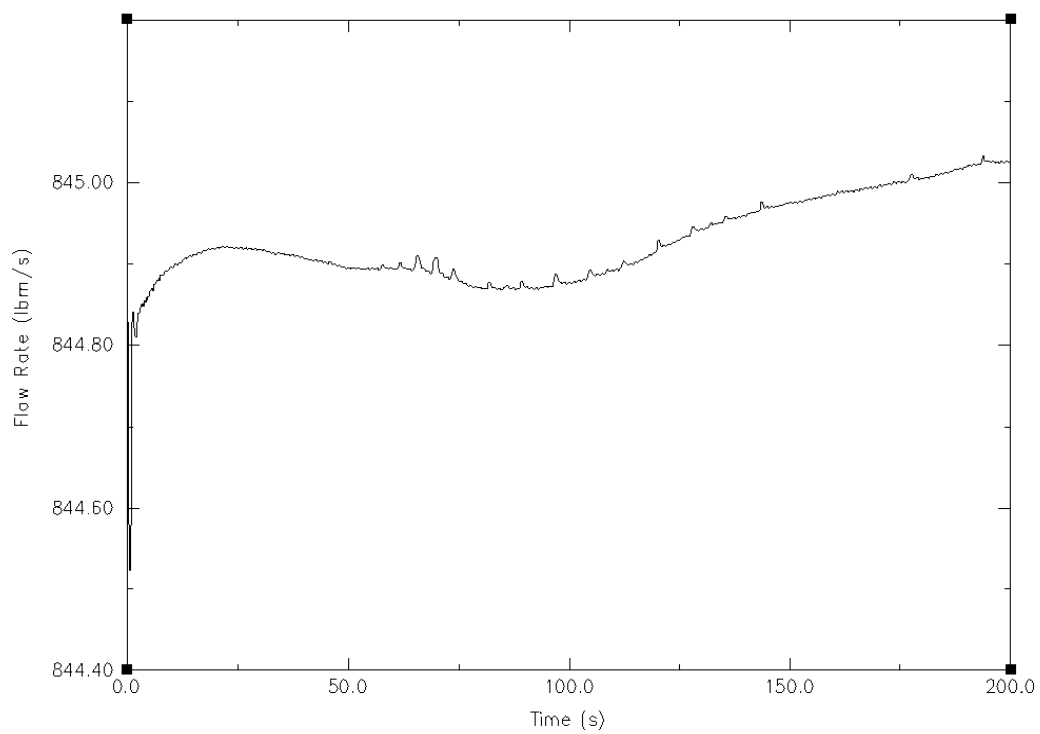


圖 3.2.15 核二廠輸入檔之主蒸汽管路質量流率

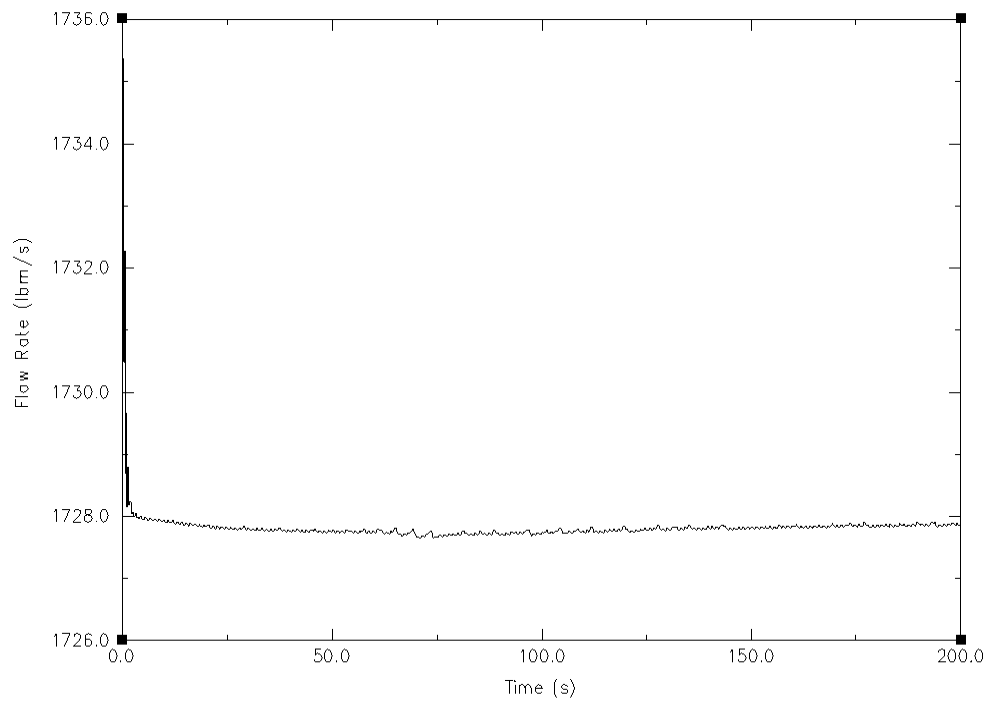


圖 3.2.16 核二廠輸入檔之飼水管路質量流率



第四章 核二廠控制系統介紹與控制系統建立

4.1 核二廠控制系統簡介

核二廠系統中與系統熱水流分析關係密切者，可分為六大部份，包括（1）反應爐壓力槽（RPV），（2）正常運轉系統，（3）反應爐保護及反應度控制系統，（4）備用水補充系統，（5）餘熱排除系統，（6）隔離系統。

反應爐內部分為爐心及燃料區，上頂部（Upper Plenum）、下底部（Lower Plenum）、降流區（Downcomer）和蒸汽頂槽（Steam Dome）。正常運轉系統與電廠安全分析工作關係密切，包含了可作為調節爐心流量，進而調節反應爐功率的再循環水控制系統與壓力控制系統相關之壓力調節器（Pressure Regulator），以及和反應爐水位控制有關的飼水控制系統和爐水淨化系統。反應爐保護及反應度控制系統則包含了反應爐保護系統和控制棒驅動系統，以及在控制棒不能使反應爐正常停機情況下，將備用硼液注入爐心，使得反應爐能安全停機的備用硼液控制系統。

備用水補充系統是在反應爐異常狀態下啟動，用於保護爐心的系統。低壓爐心注水系統（Low Pressure Core Injection System, LPCI）、低壓爐心噴灑系統（Low Pressure Core Spray System, LPCS）、高壓爐心噴灑系統（High Pressure Core Spray System, HPCS）、以及自動釋壓（ADS）系統等四項，合稱緊急爐心冷卻系統（Emergency Core Cooling System, ECCS）。此保護系統在反應爐發生冷卻水流失事故（Loss of Coolant Accident, LOCA）時啟動，可迅速將水補入反應爐，維持爐心被水所淹覆，以避免爐心燃料產生損壞。配合乾井（Drywell）及圍阻體（Containment）有關設備來維持爐心安全。而

爐心隔離冷卻 (Reactor Core Isolation Cooling, RCIC) 則是當反應爐與主冷凝器間因故隔離，飼水系統無法供水至反應爐時，利用反應爐之餘熱所產生之蒸汽為動力，推動爐心隔離冷卻系統汽輪機，補水至反應爐。並且配合餘熱移除系統 (Residual Heat Removal, RHR)，可冷卻反應爐溫度及降低爐內壓力，期始反應爐能安全停機。

餘熱移除系統的功用，除了在反應爐發生冷卻水流失事件時能提供爐心緊急冷卻水外，本系統包含的停爐冷卻系統、圍阻體冷卻系統及抑壓槽 (Suppression Pool) 冷卻系統，能夠移除停爐時的爐心衰變熱 (Decay Heat)，防止反應爐溫差過大，而能冷卻燃料池。所以餘熱移除系統也提供使用過燃料儲存池之冷卻。

隔離系統指反應爐壓力隔離系統和圍阻體隔離系統，其目的是在系統發生異常狀況時能將放射性物質封在圍阻體內，確保廠界外輻射劑量不超過法規規定。



4.2 飼水控制系統

核二廠飼水控制系統，可分為自動和手動控制。在反應爐低飼水流量或特殊運轉情況之需要下，可採用手動控制。自動控制分為兩種：(1)一元控制 (One-element Control)，(2)三元控制 (Three-element Control) 兩種方式。兩者的目的都是在將反應爐水位維持於正常的設定範圍 (Level 4~Level 7)，由此來限制水位騰帶 (Carry over) 和蒸汽潛挾 (Carry under) 回至爐心，避免因此造成汽機葉片損壞或降低爐心冷卻作用。飼水控制系統同時提供控制、指示和警報信號至其他相關系統。

一元控制是僅以反應爐水位作為唯一的控制信號，藉由此信號和設定水位比較的差值來調整飼水流量。而三元控制其自動控制輸入信

號有三，包括反應爐水位，蒸汽流量和飼水流量。其控制方法乃依據飼水流量和蒸汽流量相減所得之差值，以及水位設定值與反應爐水位間的差值來決定輸入信號。而水位設定值則依蒸汽流量變化程度而變化，如此所得之信號，轉換成飼水流量來控制爐心水位。當反應爐功率上升時，騰帶增加，因此蒸汽中挾帶水份增加，此現象可能會造成汽機葉片的損壞。所以控制系統須調低水位之設定值，避免騰帶現象發生。當反應爐功率下降時，可能產生蒸汽潛挾，使蒸汽進入降流區 (Downcomer Region)，致使爐心冷卻作用降低，而引起噴射泵 (Jet Pump) 或再循環泵 (Recirculation Pump) 發生孔蝕現象。為了避免此現象發生，升高水位設定值，以增加飼水泵轉速來減少潛挾，可降低此不良效應的發生。

飼水控制系統的主要功能在於調節飼水流量以穩定水位。飼水控制系統之組成元件，有 (1) 流量控制器，(2) 函數發生器，(3) 反應爐壓力槽水位量測系統，(4) 蒸汽流量量測系統，(5) 飼水流量量測系統。系統簡介如下：

- (1) 流量控制系統：轉換手動或自動控制方式。
- (2) 函數發生器：提供一非線性話之需求信號，以匹配汽機飼水泵的非線性特性。
- (3) 反應爐壓力槽水位量測系統：計有三個水位偵測器，其中 A 與 B 運用於水位控制，另外一個 C 則使用於高水位時跳脫汽機。
- (4) 蒸汽流量量測系統：量測四個蒸汽流量，並加以合計後輸入蒸汽水位控制程式，藉以修正水位。
- (5) 飼水流量量測系統：量測並加總兩個飼水流量信號後，經由蒸汽流量與飼水流量的誤差網路，調節飼水泵轉速，以維持

適當爐心水位。

4.3 壓力調節系統

壓力調節系統的主要功能在於控制蒸汽爐頂壓力於某一穩定值。壓力調節系統將偵測器所測到之壓力數據，經過運算後調節汽機控制閥（TCVs）及汽機旁通閥（BPVs）的開度，使通過蒸汽管路的流量與反應爐蒸汽產生率相配合，來控制蒸汽爐頂壓力。但若發生汽機跳脫（Turbine Trip），負載棄載（Load Rejection）和主蒸汽隔離閥關閉（MSIV closure）時，信號直接控制 TCVs 及 BPVs，並不經過壓力調整控制系統，使蒸汽爐頂壓力可迅速調整至安全範圍內。

4.4 再循環水控制系統

核二廠再循環水控制系統主要功用為控制爐心流量，進而影響反應爐之功率和水位。

核二廠的再循環水控制系統可分為四種模式。第一種為控制閥開度模式，此模式是以操作員所給的控制閥開度來改變再循環水的流量（一般沸水式核能電廠多半操作在此種模式）。第二種模式為流量模式，此模式是以輸入再循環水之流量需求來改變閥的開度，進而達到控制再循環水流量之目的。第三種模式為中子通量模式，此種模式是以輸入之功率需求改變再循環水流量之需求，並使用控制閥開度來控制再循環水流量，以達到控制功率輸出之目的。第四種模式則為負載追隨（Load Following）模式，此種模式是以負載需求信號，來修正中子通量需求信號、再循環水流量需求及控制閥開度，來改變再循環水流量使得輸出功率達到負載之需求。

4.5 核二廠控制系統的建立

在完成核二廠 RELAP5-3D 輸入檔建立並達到穩態計算後，參考 RETRAN 程式與 RELAP5/MOD3 程式之核二廠輸入檔來建立起核二廠的控制系統。控制系統建立的方式為，先建立起控制系統，並用相關暫態來測試其正確性，做模式的修正。控制系統建立參考 RETRAN 程式，並將其轉換為 RELAP5-3D。因兩程式輸入檔建立方法並不相同，無法直接使用。故建立步驟為：(1) 繪製 RETRAN 控制系統邏輯圖，(2) 將該控制系統邏輯逐一轉換成 RELAP5-3D 格式。轉換的過程中，注意該控制系統所需要的輸入檔參數，例如蒸汽頂槽之壓力，原本在 RETRAN 中蒸汽頂槽的體積代號 (240) 須改為在 RELAP5-3D 中的體積代號 (078)。此外，在逐一轉換每個控制邏輯，給予控制邏輯編號時，須避免和輸入檔內的編號重覆而造成編號被覆蓋的情況。由 RELAP5/MOD3 程式來建立控制系統因與 RELAP5-3D 輸入格式相同，不用經過格式轉換，但要注意避免輸入檔內的編號重覆。

以 RETRAN 程式建立的控制系統包括：壓力調節系統、安全閥及釋壓閥之控制。以 RELAP5/MOD3 建立的控制系統包括：再循環水控制系統、主蒸汽管路隔離閥門控制以及緊急爐心冷卻系統。其中飼水控制系統因無法順利轉換成 RELAP5-3D 格式，且 RELAP5/MOD3 輸入檔內飼水控制系統也無法有效作用，三個暫態內的飼水流量皆以電廠數據為邊界條件輸入。

在建立控制系統過程中，先前 3.2.2 所簡化之閥門為了達到控制系統的功能，必須將單流體連接點轉換回控制系統要求之閥門模式。因此由閥門開啟所造成的震盪對於初始值仍會造成影響，相關討論可見附錄 A 之說明。

第五章 暫態分析結果與驗證

5.1 前言

完成核二廠穩態輸入檔建立後，以核二廠之功率測試數據來驗證輸入數據檔的正確性。共選用三組功率測試數據：一、100%功率負載棄載測試（100% Power Generator Load Rejection），二、96%功率主蒸汽隔離閥完全關閉測試（96% Power MSIV Full Isolation），三、68%功率再循環泵跳脫測試（68% Power Recirculation Pump Trip）。

5.2 100%功率負載棄載測試

5.2.1 測試說明

反應爐在滿載功率下穩定運轉，壓力調節系統設定在控制蒸汽頂槽壓力（Steam Dome Pressure）的方式下，測試人員手動將主發電機輸出斷路器跳脫。此測試目的在於確定反應爐系統汽機控制閥

（Turbine Control Valves）能否快速關閉，並於測試過程中，評估汽機旁通閥（Turbine Bypass Valves）、安全釋壓閥（Safety Relief Valves）以及反應爐保護系統的反應。主要用來測試壓力控制系統的正確性。此暫態測試在初始值的小幅震盪原因可參考附錄 A 之說明。

5.2.2 模擬與驗證結果

（1）反應器功率：圖 5.2.1 為功率比較，暫態開始於 0.2 秒因汽機控制閥快速關閉至 90%開度，導致反應爐急停（Scram），功率因而驟降，只剩下衰變熱（Decay Heat）。圖中模擬值與電廠測試值趨勢相同，功率皆在汽機控制閥關閉時快速下降，在時間 2 秒只剩下衰變熱所提供的功率。

（2）蒸汽頂槽壓力：圖 5.2.2 為蒸汽頂槽壓力比較，因為汽機控

制閥的快速關閉，使得蒸汽頂槽壓力升高，隨後因反應爐急停和蒸汽旁通閥開啟將蒸汽排至冷凝器，功率下降且開啟另一蒸汽流道的影響，使得壓力下降。圖中系統壓力初始值和電廠數據有差距，因當初建立穩態輸入檔時是以電廠平衡系統壓力為邊界值。重新建立輸入檔工作需耗費大量時間因此暫時從趨勢上做定性分析，做為控制系統模式正確性的驗證，往後可試著調整使初始值相同。圖中顯示蒸汽頂槽壓力快速上升，且隨即往下降，蒸汽控制閥的關閉與蒸汽旁通閥的開啟造成此一效果，可驗證壓力調節系統能有效作用。但由蒸汽頂槽壓力的形狀來看，模擬值上升與下降的時間都較快，推測可能是旁通閥門的模擬流量大於電廠測試值，造成壓力下降較快。

(3) 汽機控制閥開度：圖 5.2.3 為汽機控制閥開度比較，雖然電廠測試之初始開度為 68%，但從蒸汽流量比較可發現，以 100% 初始開度來模擬之蒸汽流量初始值和電廠測試數據較為接近，因此以 100% 初始開度為此暫態測試之初始條件。在 0.2 秒時，啟動一汽機控制閥關閉之信號使閥門開始關閉，並於 0.5 秒達到全關。由圖可看出汽機控制閥之關閉曲線模擬結果和電廠測試數據相近。

(4) 蒸汽流量：圖 5.2.4 為蒸汽流量比較，由於汽機控制閥和蒸汽旁通閥的快速動作，造成蒸汽流量震盪的現象。可看出模擬的蒸汽流量震盪幅度較大，且在時間 4 秒之後有極大的差異。原因是壓力調節系統無法正確的模擬汽機旁通閥門的作用造成了此差異。當汽機控制閥關閉後，爐心產生的蒸汽改由汽機旁通閥排放至冷凝器。壓力調節系統從 RETRAN 程式轉換的過程，僅能達到控制旁通閥門之開啟與關閉，無法對於小幅壓力變化做更精確的閥門開關來調節壓力。因此改善壓力調節系統的旁通閥控制，可對於蒸汽流量做更準確的模擬。

(5) 爐心水位：圖 5.2.5 為爐心降流區水位，採用窄幅水位來比

較。暫態開始，降流區水位因爐心功率驟降，造成汽泡陷 (Collaspe) 而使水位急速下降，在 6~8 秒間因水位低於窄幅水位範圍，故為負值。暫態末期因爐心壓力降低導致飼水流量增加而使水位回升。如前所述，因壓力調節系統尚需調整，蒸汽流量模擬值在 4 秒後較電廠值小，從爐心出去的蒸汽量較少，故爐心水位維持較電廠測試值為高。隨後因飼水的注入，造成爐心水位上升。

(6) 爐心流量：圖 5.2.6 為爐心流量比較。由於棄載信號造成再循環泵於 0.6 秒由高速回退到低速，使得爐心流量下降。從圖中可看出爐心流量的模擬值高於電廠測試值，再循環泵控制的模擬尚需改進。

由此暫態可知：壓力調節系統有作用能力，但旁通閥控制仍需進一步調整。再循環泵的控制能力仍需改善。

5.3 96%功率主蒸汽隔離閥 (MSIV) 關閉測試

5.3.1 測試說明

當反應爐在 96%額定功率穩定運轉下，以人為方式觸發控制室中 F6A 和 F6B 的保險線路，造成所有主蒸汽隔離閥 (MSIV) 關閉。此測試目的在於：(1) 測試主蒸汽隔離閥在該功率下是否能正常動作，(2) 獲得 MSIV 完全關閉後，反應爐暫態變化資料，(3) 確定 MSIV 完全關閉所需時間。此測試可用來檢驗主蒸汽隔離閥的控制系統。此暫態測試在初始值的小幅震盪原因可參考附錄 A 之說明。

5.3.2 模擬與驗證結果

(1) 主蒸汽隔離閥開度：圖 5.3.1 為 MSIV 開度結果比較，由圖中可看出模擬值與電廠測試值相當接近，因此主蒸汽隔離閥門開關的控制系統已經可以正常運作。

(2) 爐心功率：圖 5.3.2 為爐心功率比較，兩者的 MSIV 開度隨

時間變化相近，皆可在 4.6 秒時達到全關。因 MSIV 關閉引發的反應器急停造成爐心功率下降。隨後兩者功率皆僅剩下衰變熱所提供的熱功率。由圖可看出爐心功率模擬值與測試值相當接近。

(3) 蒸汽頂槽壓力：圖 5.3.3 為蒸汽頂槽壓力比較，在 2.5 秒至 4 秒之間，因為 Scram 對於壓力影響效果大於 MSIV 關閉，壓力因而下降。隨後因 MSIV 完全關閉，燃料衰變熱產生之蒸汽造成壓力的上升，蒸汽頂槽壓力達到釋壓閥設定點後，因釋壓閥的開啟使壓力下降。由圖顯示，模擬值的急停效應較強，使隨後因衰變熱造成的蒸汽而讓壓力上升的效果較晚出現。

(4) 爐心流量：圖 5.3.4 為爐心流量比較，在暫態開始時因爐心功率驟降，使空泡減少，流阻變小，造成爐心流量的上升。隨後因水位達 Level3 低水位使得再循環泵由高速轉為低速，爐心流量因而降低。由圖顯示，再循環系統控制能有效作用，爐心流量模擬與電廠測試值趨勢相同。

(5) 蒸汽隔離閥流量：圖 5.3.5 為蒸汽隔離閥流量比較，由於 MSIV 的關閉，使得蒸汽流量下降。在 4.8 秒 MSIV 全關時蒸汽隔離閥，流量也下降至零，沒有流體通過。從圖上可看出，蒸汽隔離閥流量模擬值和電廠測試值相當接近，這呼應了隔離閥開度的比較結果。

(6) 爐心水位：圖 5.3.6 為爐心窄幅水位的比較。暫態開始因爐心功率驟降造成的汽泡陷 (Collapse) 而使水位急速下降。暫態末期因飼水的加入，水位上升。和 100% 功率負載棄載暫態相同，因為壓力調節系統旁通閥控制的關係，導致蒸汽通過旁通閥的流量小於電廠測試值，造成在爐心水位下降較緩慢。隨後因飼水注入使水位上升。

由此暫態比較可知：MSIV 的控制系統以可正常作用，旁通閥的作用能力尚需調整。

5.4 68%功率再循環水泵跳脫測試

5.4.1 測試說明

此測試是經由手動跳脫兩台再循環水泵，使再循環水泵轉速由高速轉至低速，造成爐心流量減少，而使爐心空泡增加、中子緩速效果變差，進而造成負反應度的增加，爐心功率降低等一連串的變化。

此測試目的在於：觀測再循環水泵跳脫時，飼水流量和蒸汽流量之變化、泵減速特性、泵再啟動及流量引發震動等系統參數變化情形。

5.4.2 模擬與驗證結果

(1) 反應爐功率：圖 5.4.1 為反應爐功率比較，由於再循環水泵跳脫使爐心流量降低，造成空泡增加、負反應度增加，最終導致爐心功率下降。嘗試將 100% 功率調整為 68% 功率來建立 68% 功率之穩態輸入檔，但仍無法避免初始回溯造成的尖峰值。在此以 100% 功率來模擬，避免初始尖峰值對暫態的影響。由圖所示，模擬爐心功率在 0.6 秒後迅速下降，趨勢和電廠測試值相同。

(2) 蒸汽頂槽壓力：圖 5.4.2 為蒸汽頂槽壓力比較，由於反應爐功率下降，蒸汽頂槽壓力也隨之下降而逐漸達到穩態。如圖所示，模擬之蒸汽頂槽壓力初始值和電廠測試值不同，需藉由重新調整穩態輸入檔初始功率改善。在暫態發生 6 秒後，模擬值也可逐漸達到穩態。

(3) 蒸汽流量：圖 5.4.3 為蒸汽流量比較，由於反應爐功率下降，使蒸汽產生量減少，蒸汽流量因而下降，隨著功率達到穩態而逐漸穩定下來。在暫態時間 6 秒到 12 秒之間，可看出模擬值在逐漸穩定的過程中振盪較大。隨後模擬之蒸汽流量因爐心功率達到穩態而逐漸穩定。

(4) 再循環水流量：圖 5.4.4 為再循環水流量比較圖，由於再循環水泵由高速降至低速，再循環水流量因此減少。由趨勢上比較，兩

者可以得到相似的結果，可驗證再循環水泵在此暫態中可正常作用。兩者流量的差異應為初始功率同造成的差異。

(5) 爐心流量：圖 5.4.5 為爐心流量的比較，再循環水泵手動跳脫後，由高速轉至低速，再循環水流量降低，因此造成爐心流量隨之下降。由圖中可看出兩者結果近似。

(6) 爐心水位：圖 5.4.6 為爐心窄幅水位比較。因蒸汽流量隨爐心功率下降而減少，使得水位上升，隨後達到穩態。從圖中可發現，模擬之爐心水位差異很大。在參考資料【4】中爐心水位模擬結果也有所差異，其作者認為是測量誤差導致。

由此暫態可知，再循環水泵的控制在此一暫態內可有效作用。爐心功率對其它參數有相當程度的影響，若能將其調整為 68% 之穩態輸入檔，再來模擬此暫態，或許可得到更接近的結果。



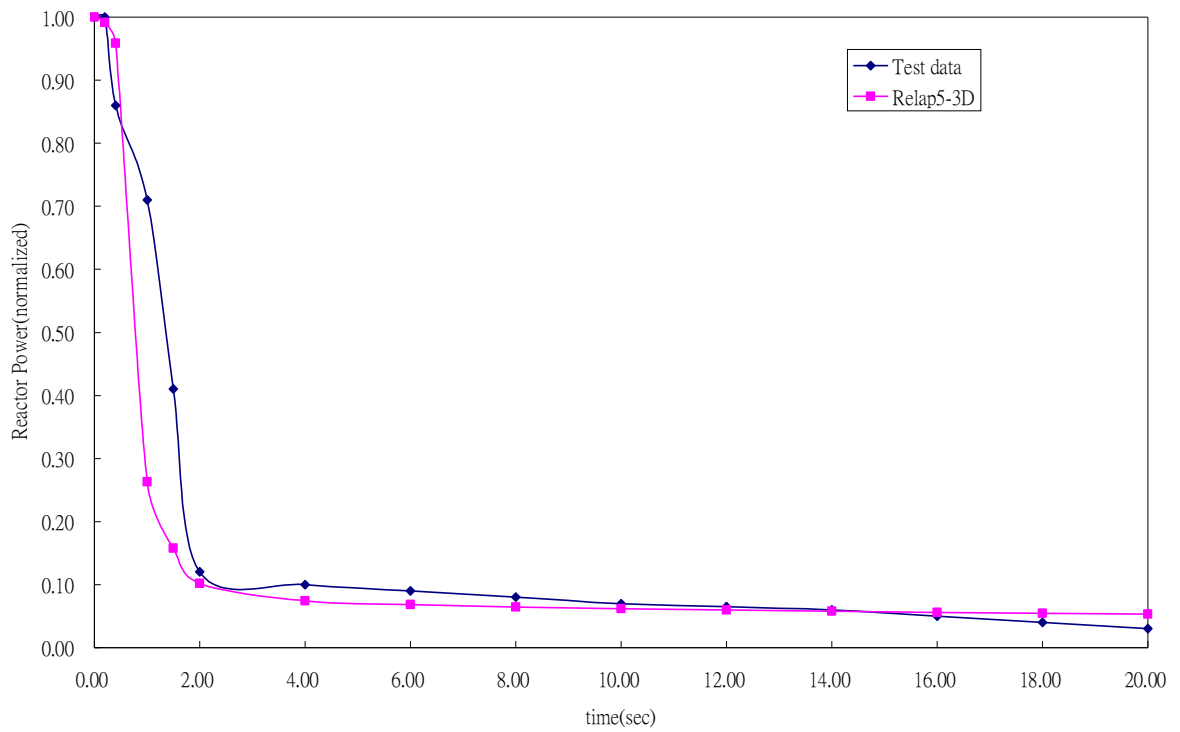


圖 5.2.1 100%功率負載棄載測試，反應爐功率比較

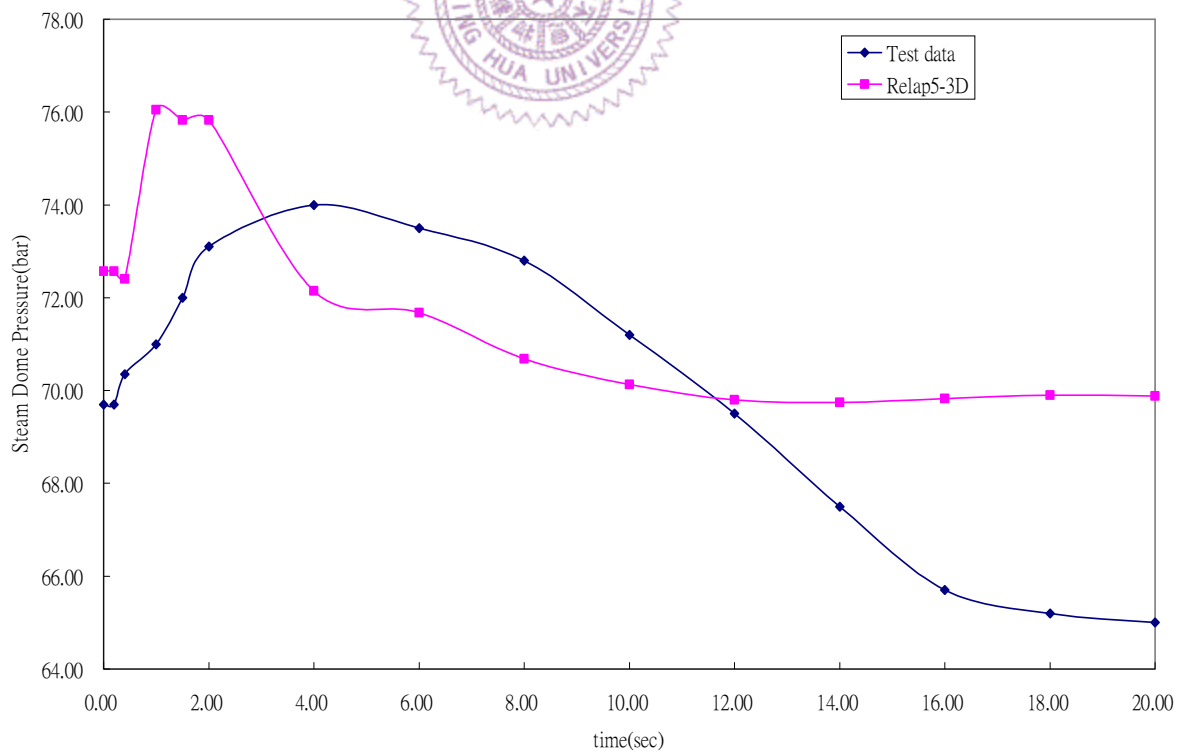


圖 5.2.2 100%功率負載棄載測試，蒸汽頂槽壓力比較

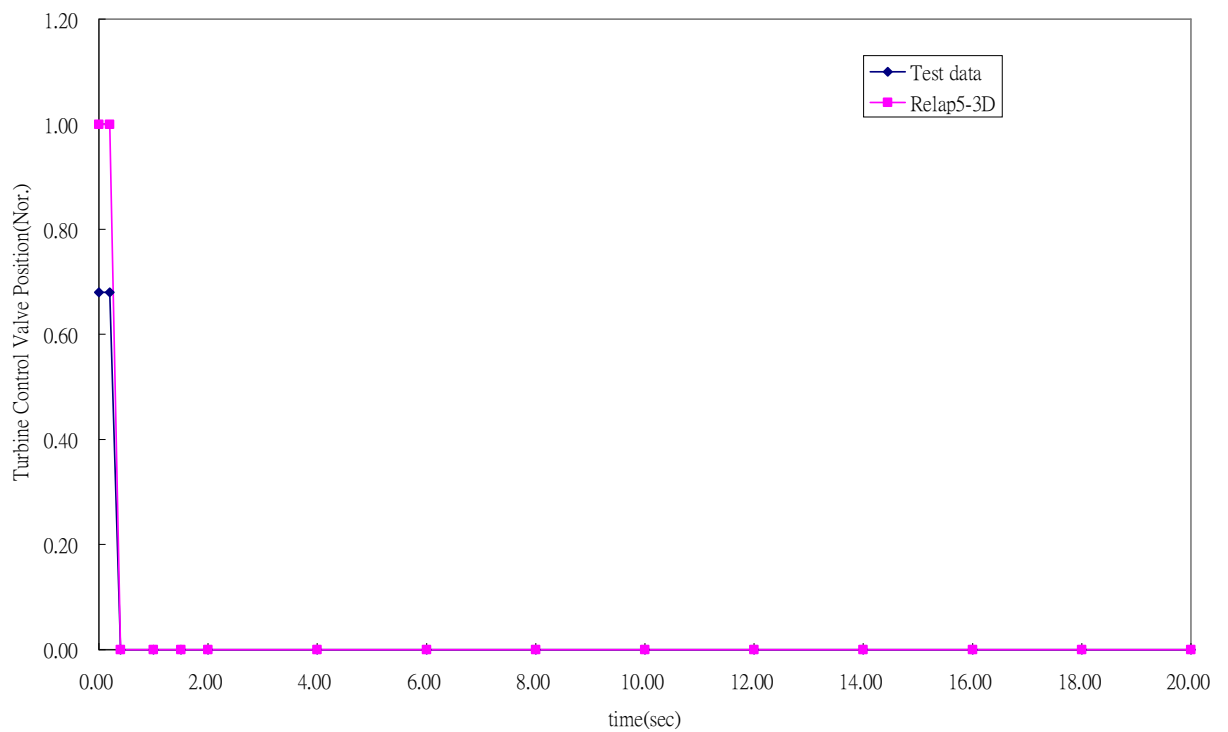


圖 5.2.3 100%功率負載棄載測試，汽機控制閥開度比較

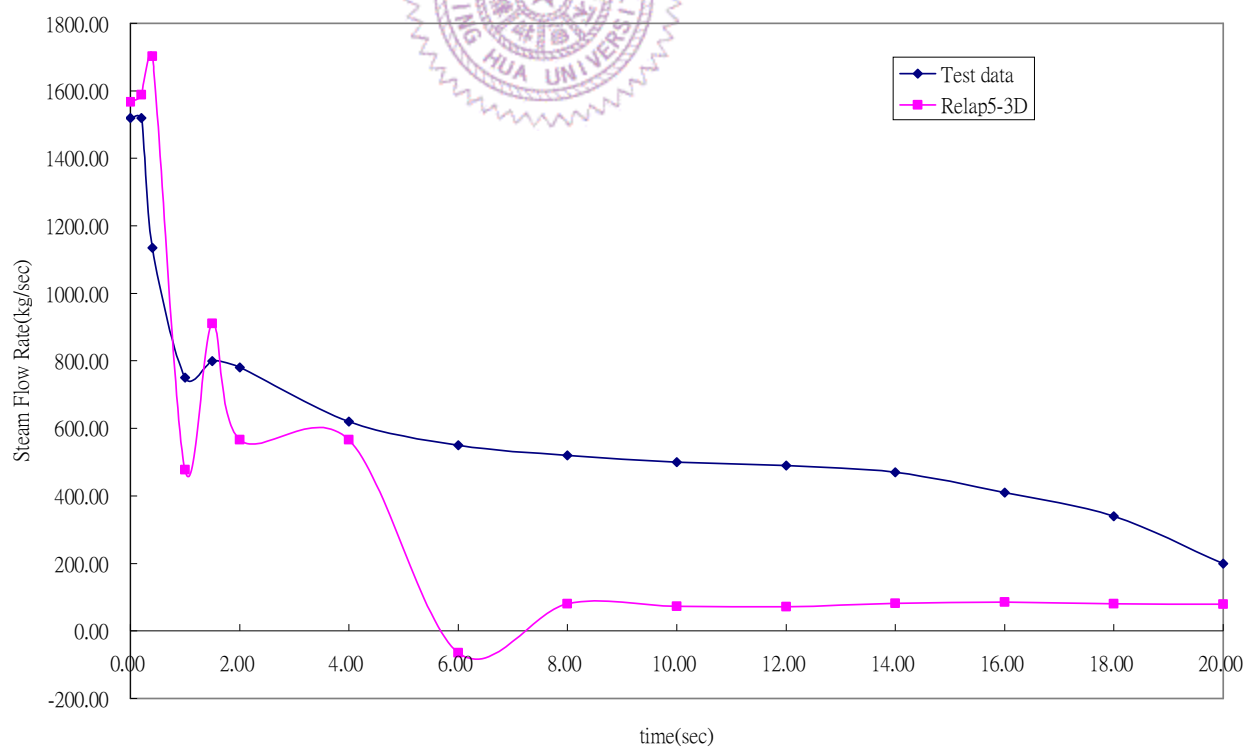


圖 5.2.4 100%功率負載棄載測試，蒸汽流量比較

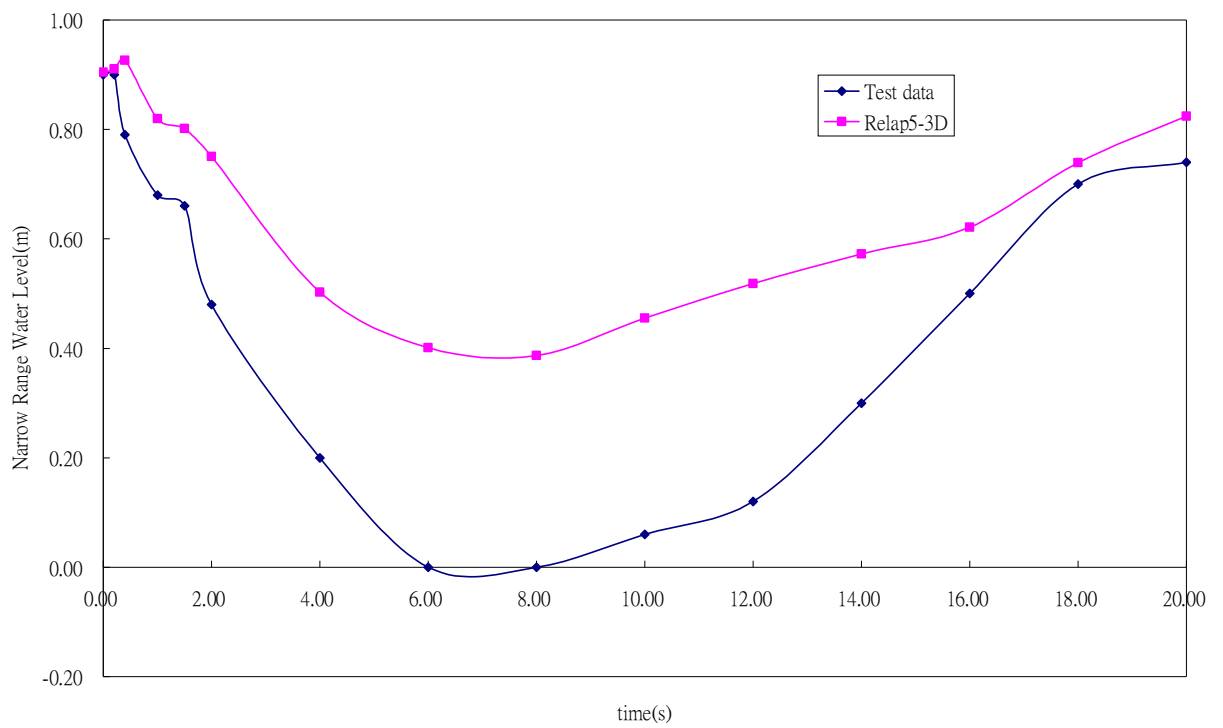


圖 5.2.5 100%功率負載棄載測試，爐心水位比較

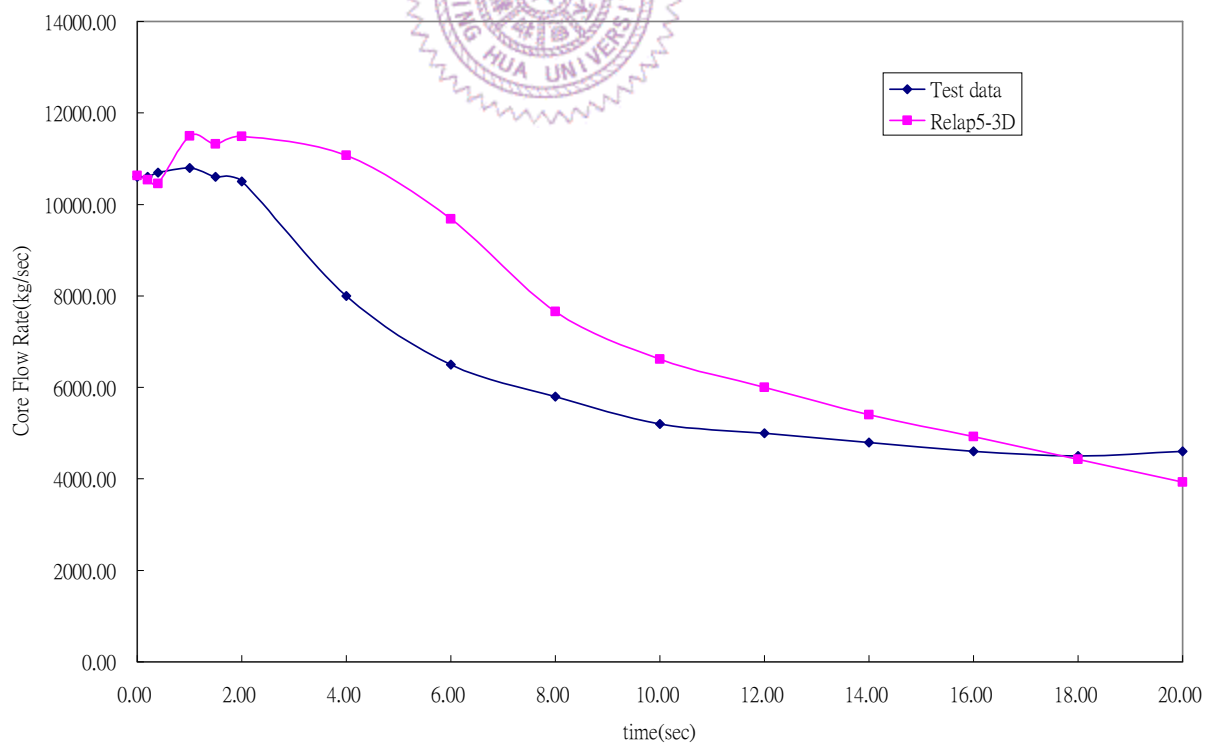


圖 5.2.6 100%功率負載棄載測試，爐心流量比較

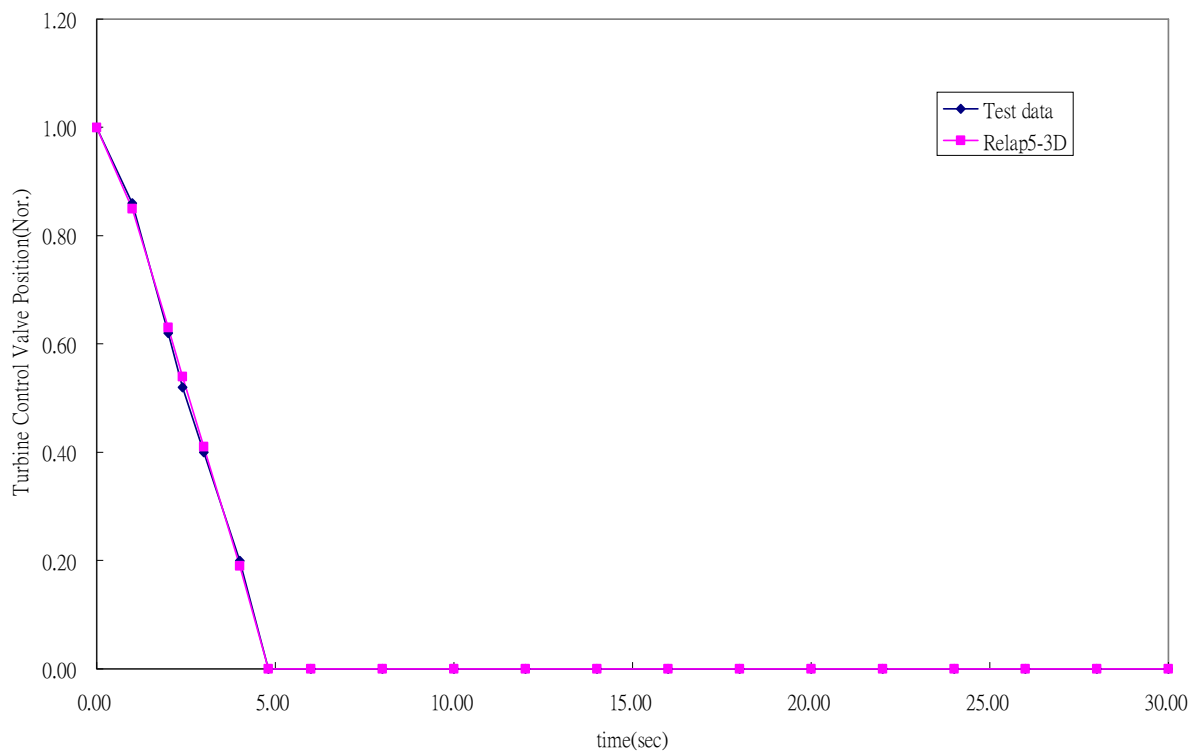


圖 5.3.1 96%功率主蒸汽隔離閥關閉測試，主蒸汽隔離閥開度比較

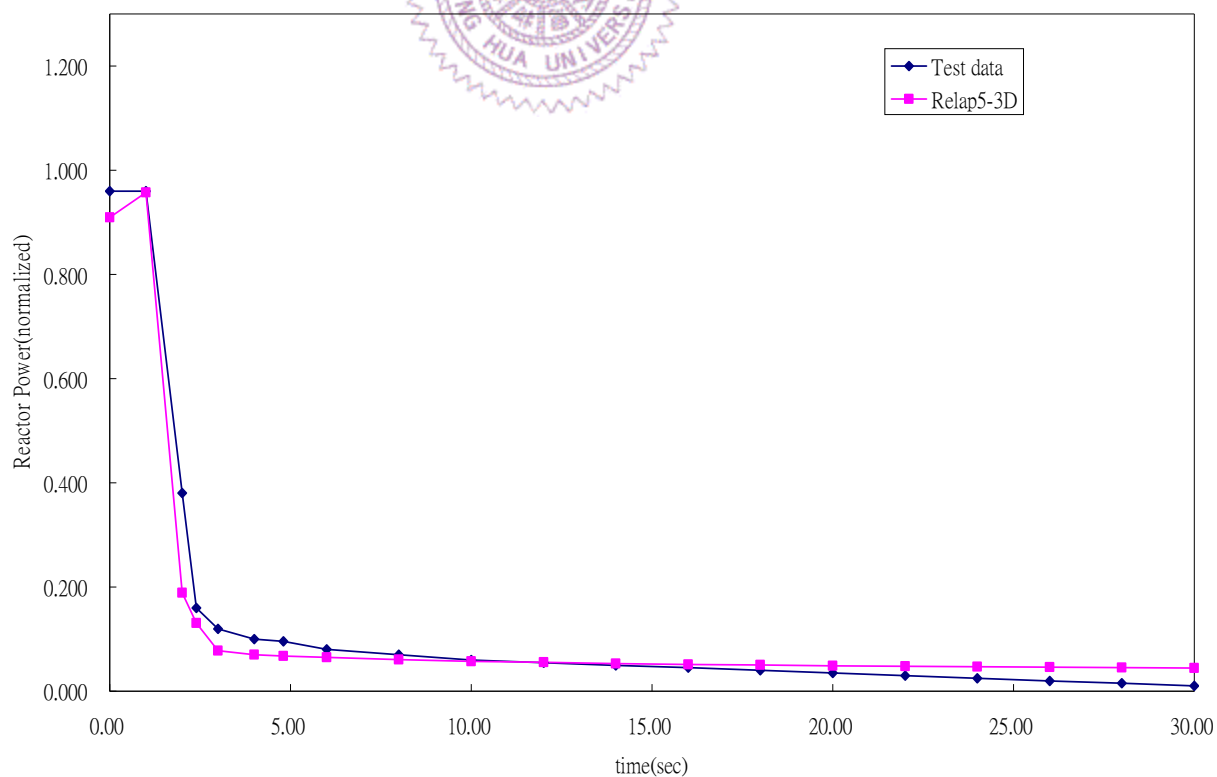


圖 5.3.2 96%功率主蒸汽隔離閥關閉測試，爐心功率比較

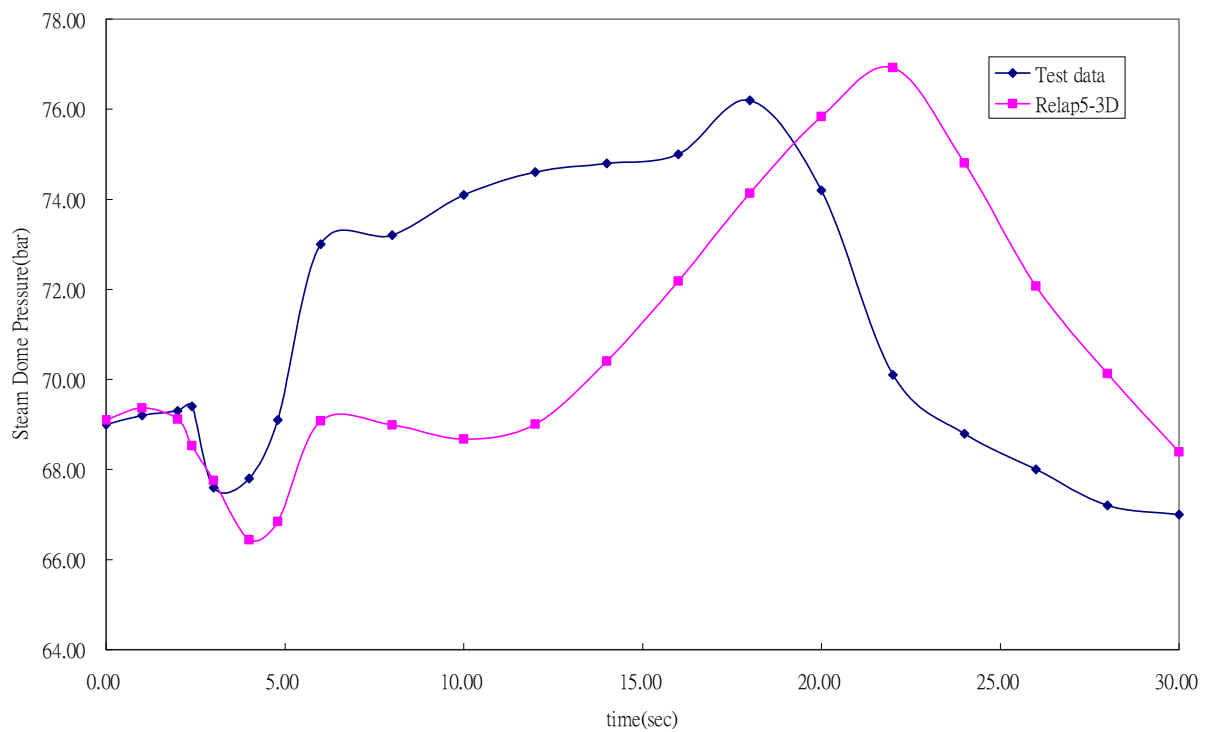


圖 5.3.3 96%功率主蒸汽隔離閥關閉測試，蒸汽頂槽壓力比較

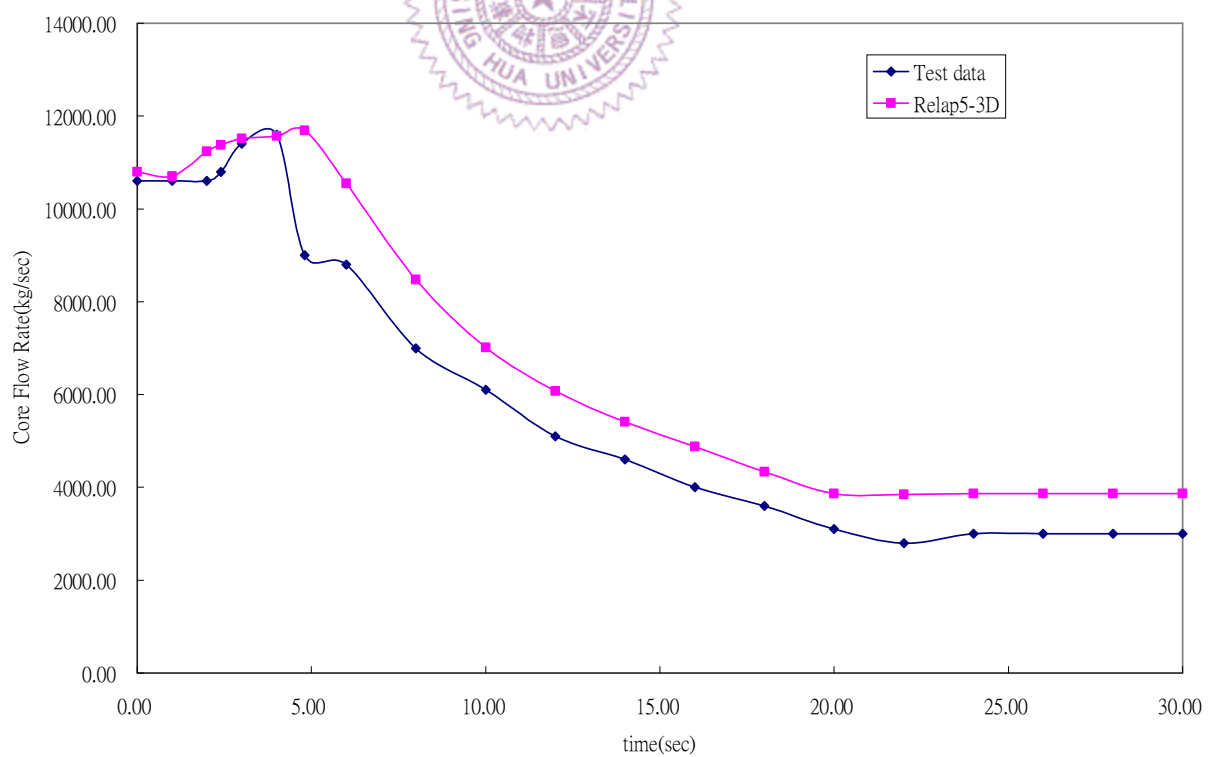


圖 5.3.4 96%功率主蒸汽隔離閥關閉測試，爐心流量比較

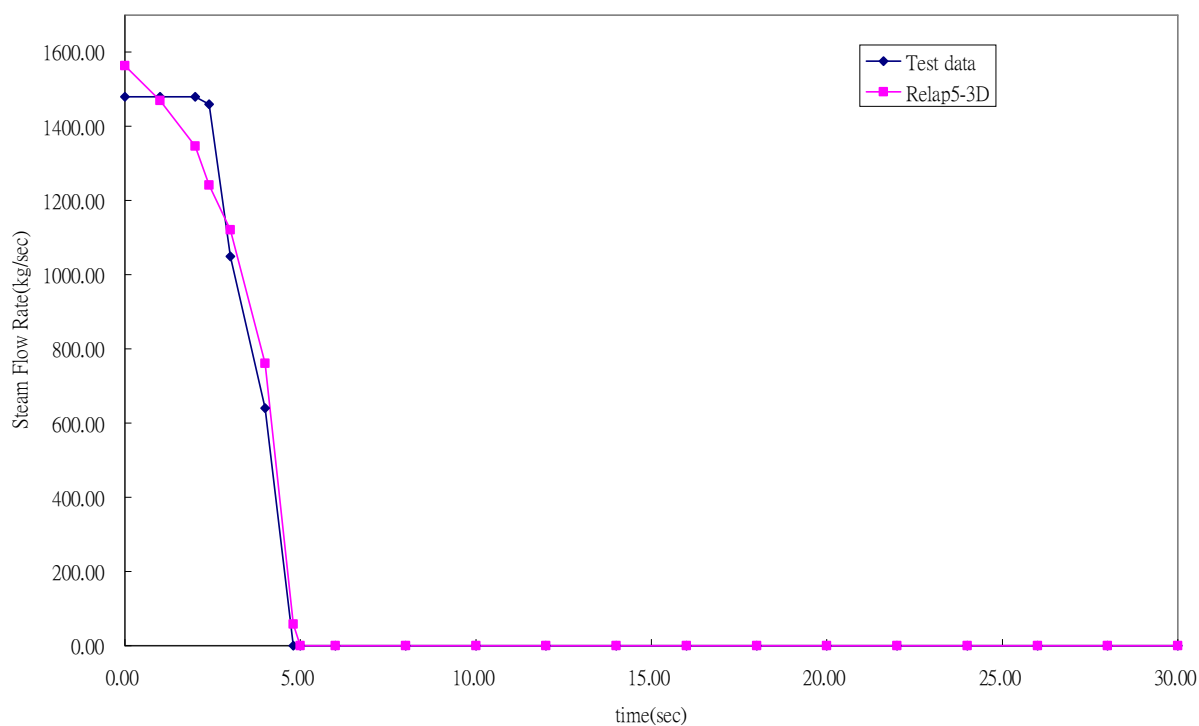


圖 5.3.5 96%功率主蒸汽隔離閥關閉測試，蒸汽隔離閥流量比較

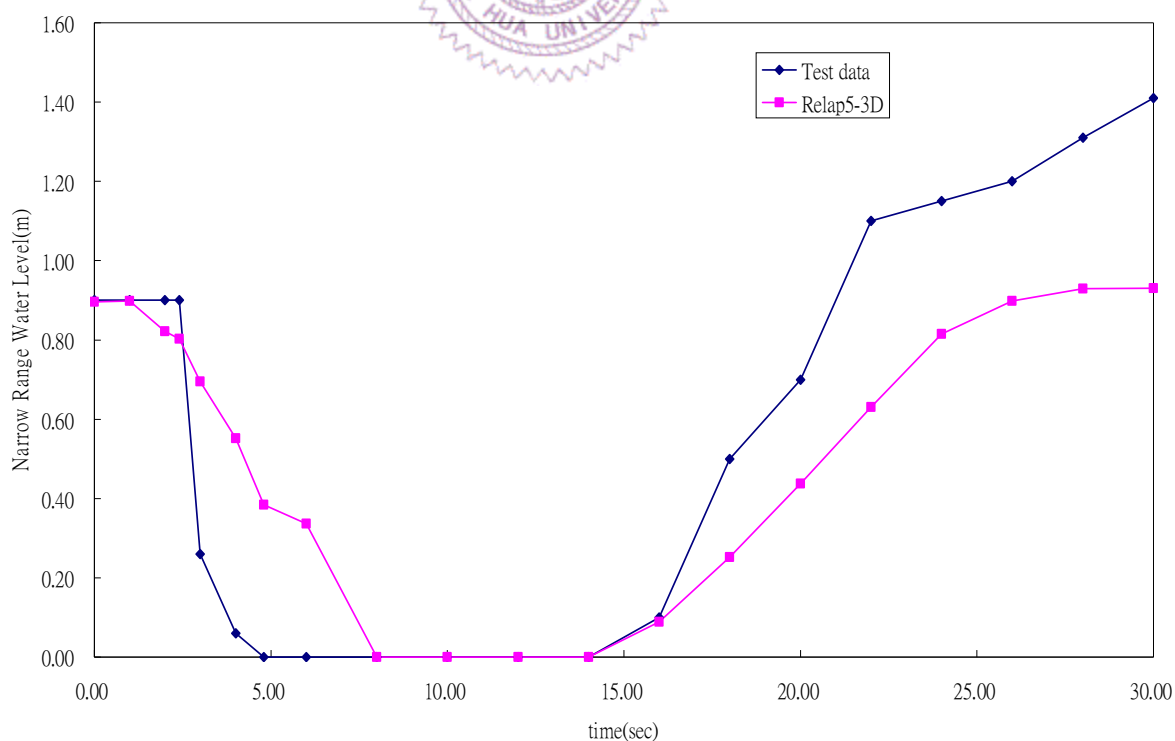


圖 5.3.6 96%功率主蒸汽隔離閥關閉測試，爐心水位比較

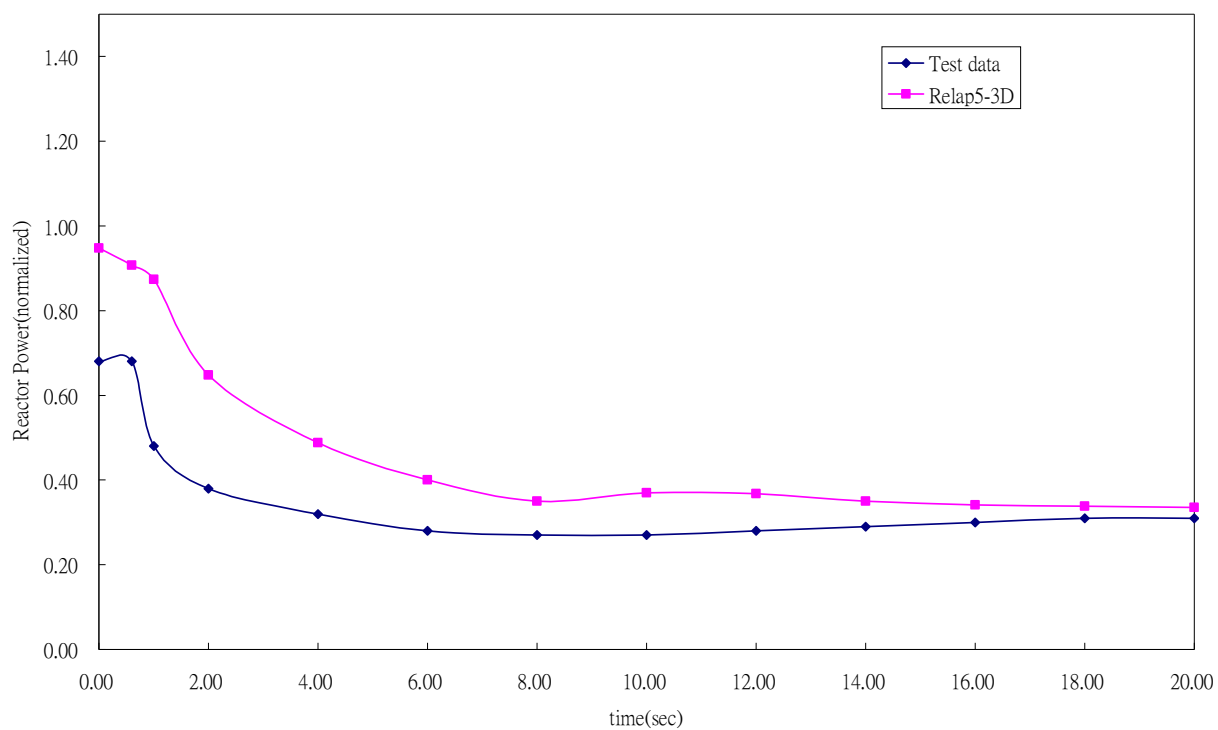


圖 5.4.1 68%功率再循環水泵跳脫測試，爐心功率比較

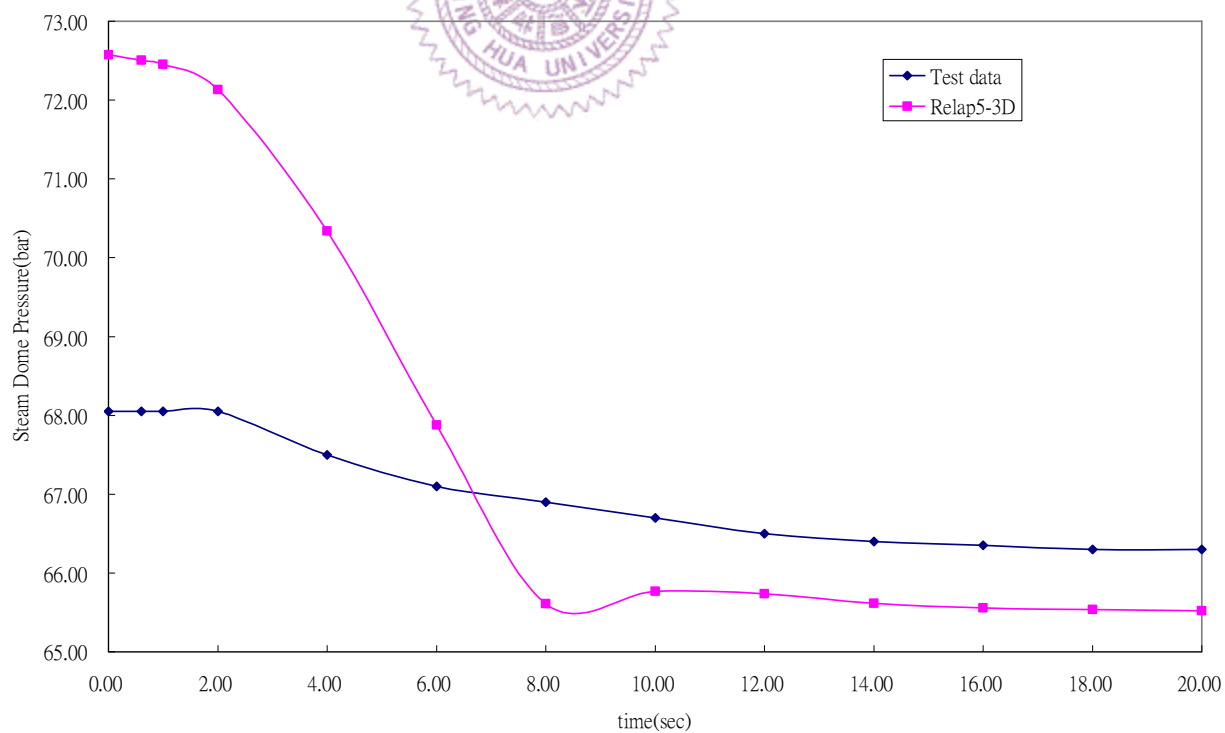


圖 5.4.2 68%功率再循環水泵跳脫測試，蒸汽頂槽壓力比較

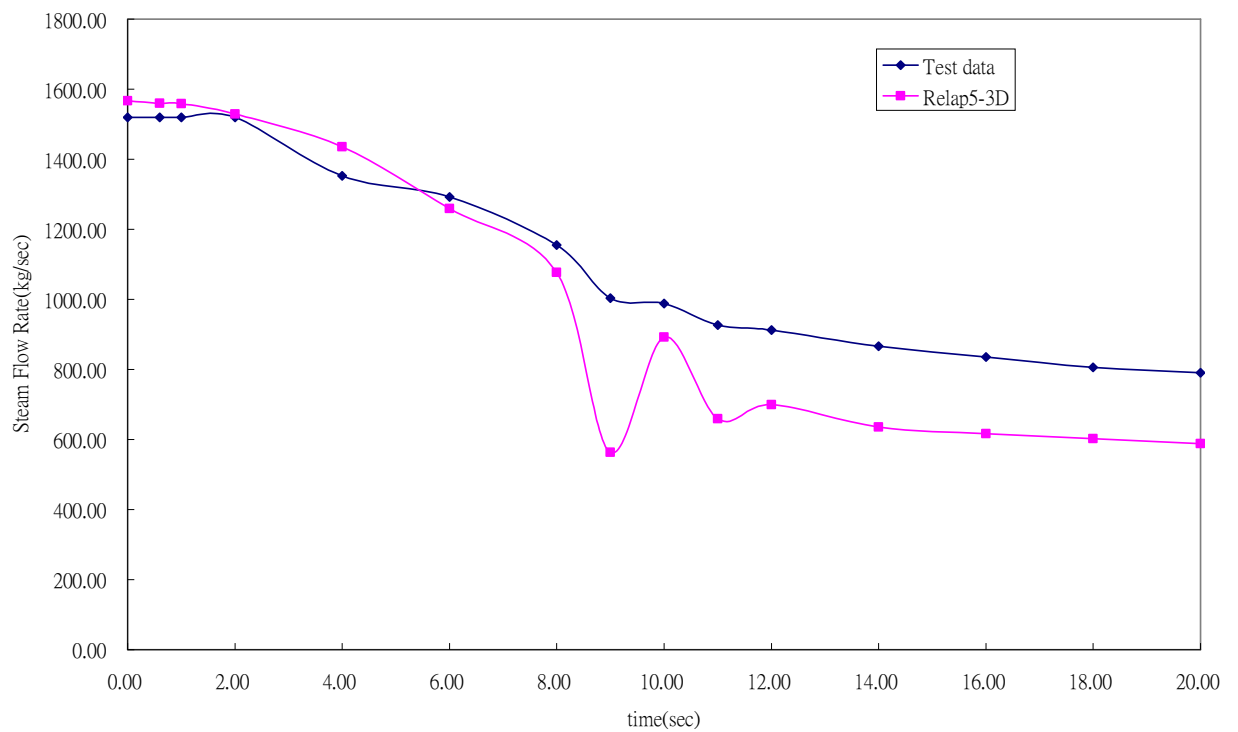


圖 5.4.3 68%功率再循環水泵跳脫測試，蒸汽流量比較

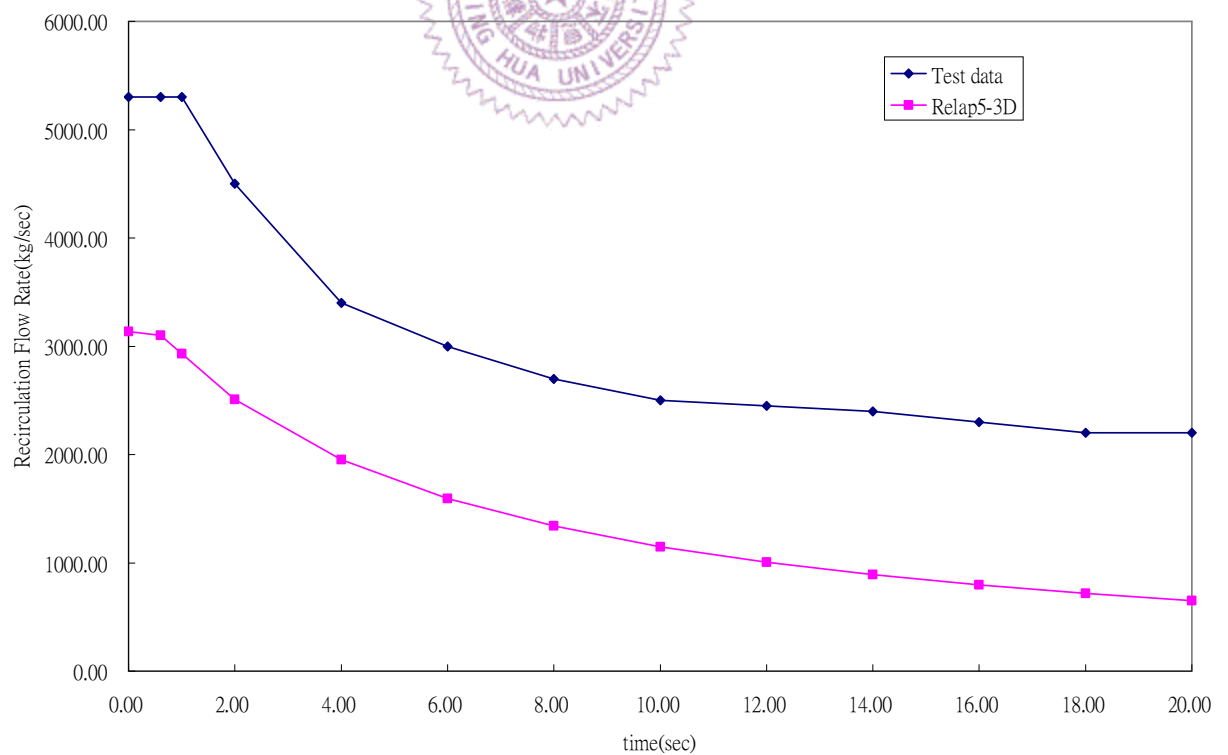


圖 5.4.4 68%功率再循環水泵跳脫測試，再循環水流量比較

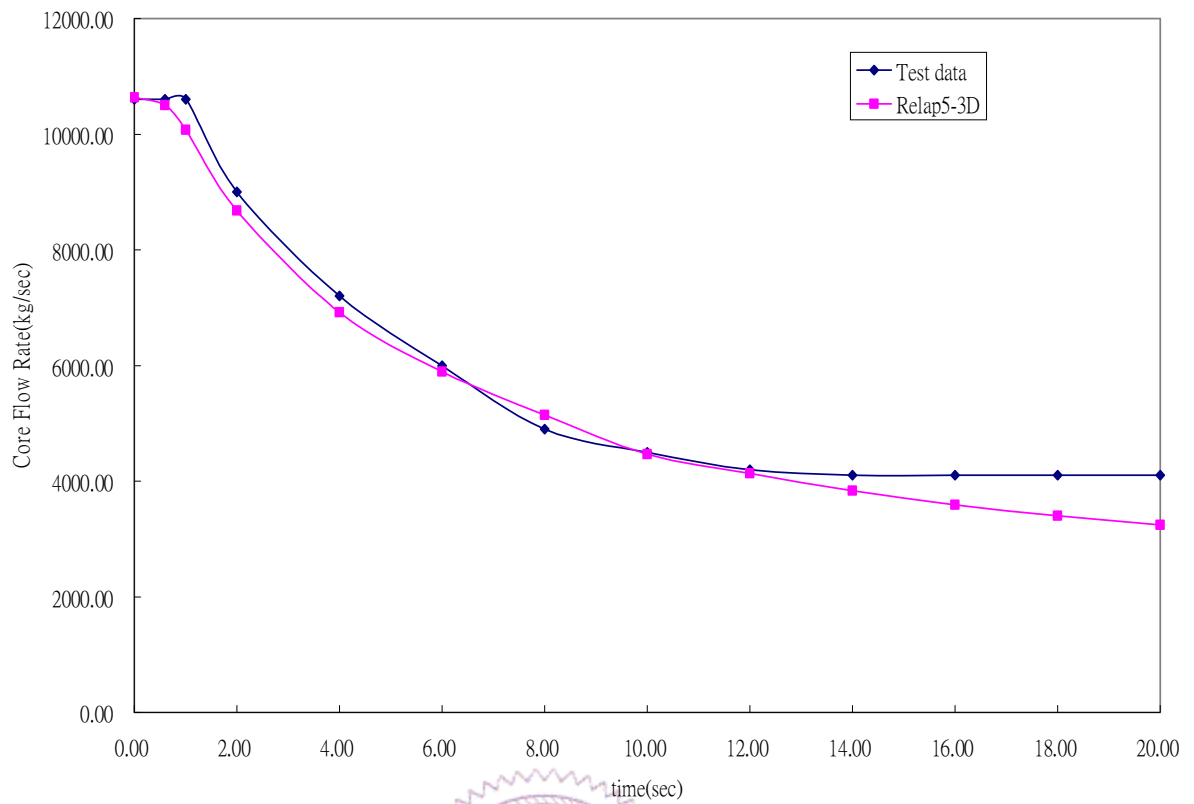


圖 5.4.5 68%功率再循環水泵跳脫測試，爐心流量比較

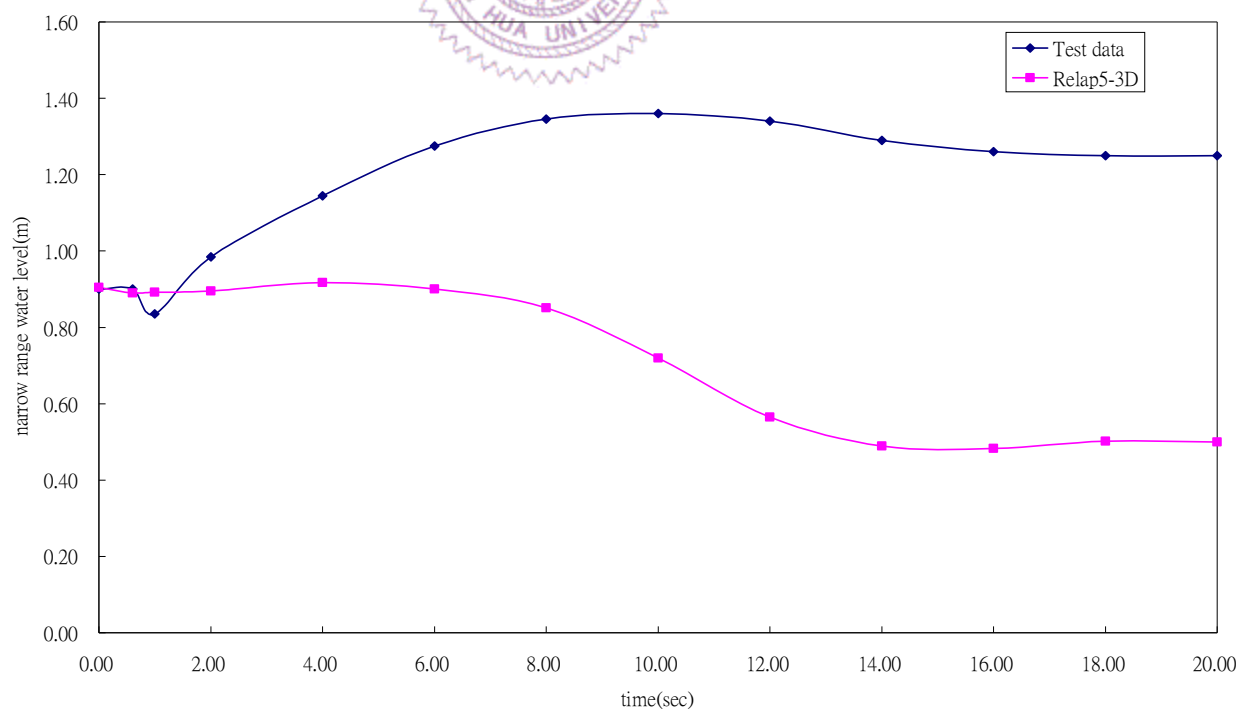


圖 5.4.6 68%功率再循環水泵跳脫測試，爐心水位比較

第六章結論

本研究完成核二廠穩態輸入檔建立，並以暫態分析驗證後，可發現在控制系統的模擬上仍有許多能改進的空間。後續工作將會著重在各個功率的穩態檔建立，避免在不同的初始狀態下所造成的模擬誤差。並且針對在各暫態中，控制系統所造成的問題加以改進。一是改變飼水控制系統模組，設法將 RETRAN 核二廠輸入檔之飼水控制系統轉換成 RELAP5-3D 可使用之格式；二是對於其它已建立之控制系統，針對細部進行調整，以達到具有模擬電廠測試結果的能力。



參考資料

- 【1】核能發電工程學，楊昭義、歐陽敏盛，2005
- 【2】核二廠雷傳模式建立與起爐測試校驗分析報告，湯簡如、馬紹仕、王政德、劉千田，1998
- 【3】RELAP5-3D Code Manual，2001
- 【4】核二廠 RLAP5/MOD3 輸入資料建立與模式驗證，張世勳，1996
- 【5】Introduction to Nuclear Engineering/Third Edition，John R. Lamarsh、Anthony J. Baratta，2001
- 【6】RELAP5-3D 核二廠輸入檔，核能研究所，2008
- 【7】RETRAN 核二廠輸入檔，核能研究所，2008



附錄 A

RELAP5-3D 閥門(Valve)模式討論

A.1 前言

本研究中，合併反應爐壓力槽與電廠平衡系統並且達到穩態建立之過程中發現閥門會造成初始值的震盪，造成核二廠輸入檔建立的困擾。此外在暫態分析時，閥門造成的初始震盪也會對暫態分析造成影響。在此用一簡單的系統來探討閥門所造成的初始震盪。

A.2 RELAP5-3D 閥門模式驗證

A.2.1 RELAP5-3D 驗證系統介紹

選擇再循環系統上的環路簡化來設計此閥門驗證系統。以控制體積 212 及 216 穩態下的溫度及壓力為邊界條件，213 為依時流體結點 (Time-Dependent Junction)，提供一固定流量作為測試流量，控制體積 214 以穩態條件輸入。測試閥門為 215，以觸動閥 (trip valve) 來模擬。圖 A.2.1.1 為模擬系統格點圖。

A.2.2 RELAP5-3D 閥門驗證結果

在本研究中採用 100% 功率穩態建立之輸入檔為基礎，來作為驗證閥門模式的依據。

圖 A.2.2.1 為依時結點 213 與測試閥門 215 的流量比較。可以發現，結點 213 流量以固定值經由控制體積 214 通過測試閥門 215，但是在最初的 0.1 秒內觸動閥門 215 會有一震盪產生。雖然觸動閥 215 設定為 0 秒開啟，但卻會從全關閉開始啟動，在短暫的時間內達到要求開度，可參考圖 A.2.2.1 觸動閥門開度。隨後觸動閥門的流量才回

到穩態達到初始流量值，此一震盪即是造成困擾的原因。圖 A.2.3 為壓力比較，可看出控制體積 214 因觸動閥門 215 開啟較慢造成壓力的震盪。

A.2.3 結論

由上述驗證結果顯示，RELAP5-3D 觸動閥門模式無法在初始狀態達到要求開度，必須從全關閉啟動，造成質量流率在達到要求開度下的值之前有一極大震盪。此模式尚未改善之前，暫態模擬時，須避免觸動閥門造成的震盪影響分析結果。



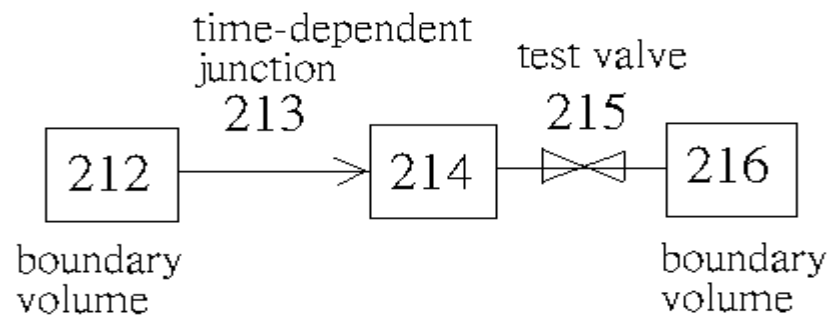


圖 A. 2. 1. 1 模擬系統格點圖

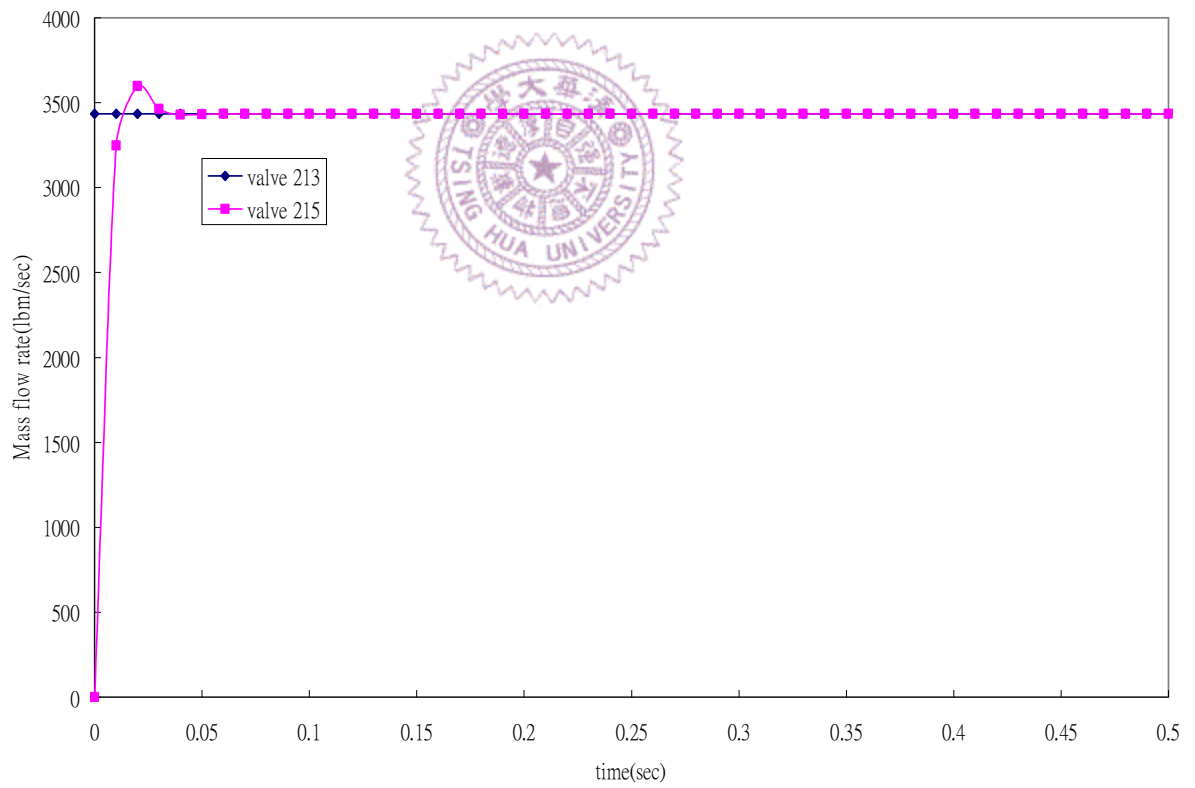


圖 A. 2. 2. 1 閥門流量比較

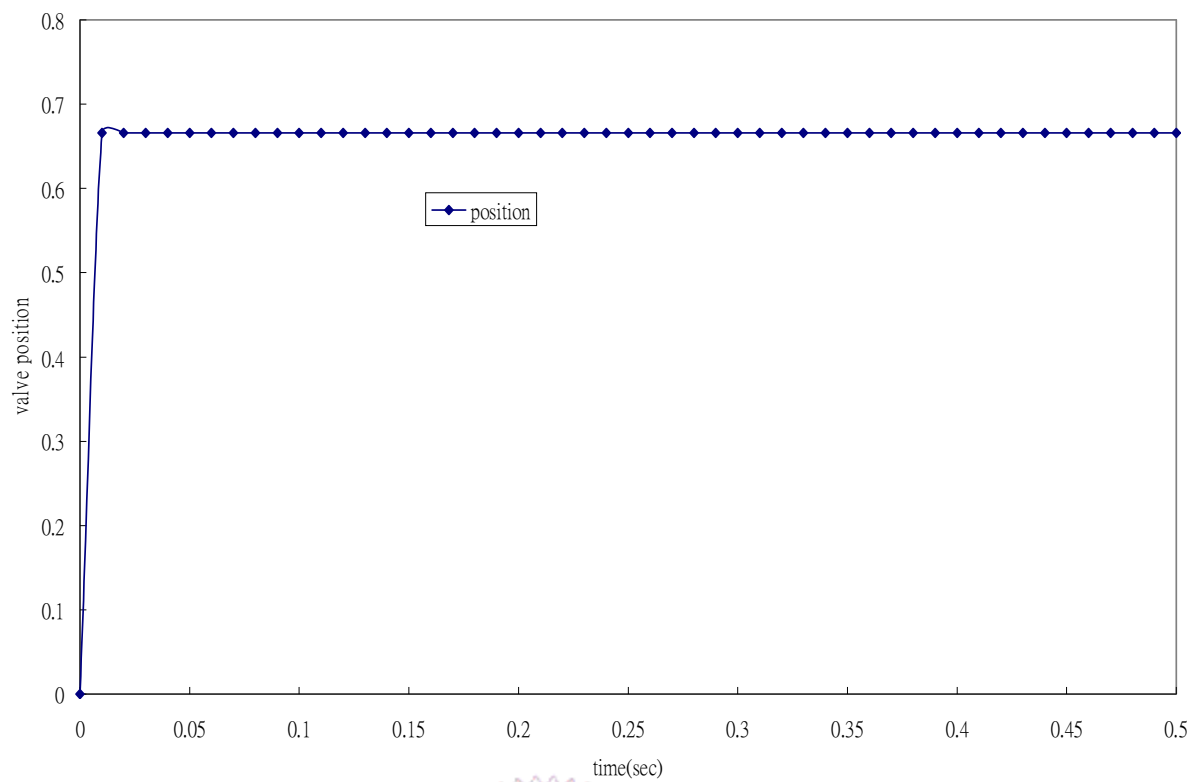


圖 A. 2. 2. 2 閥門開度

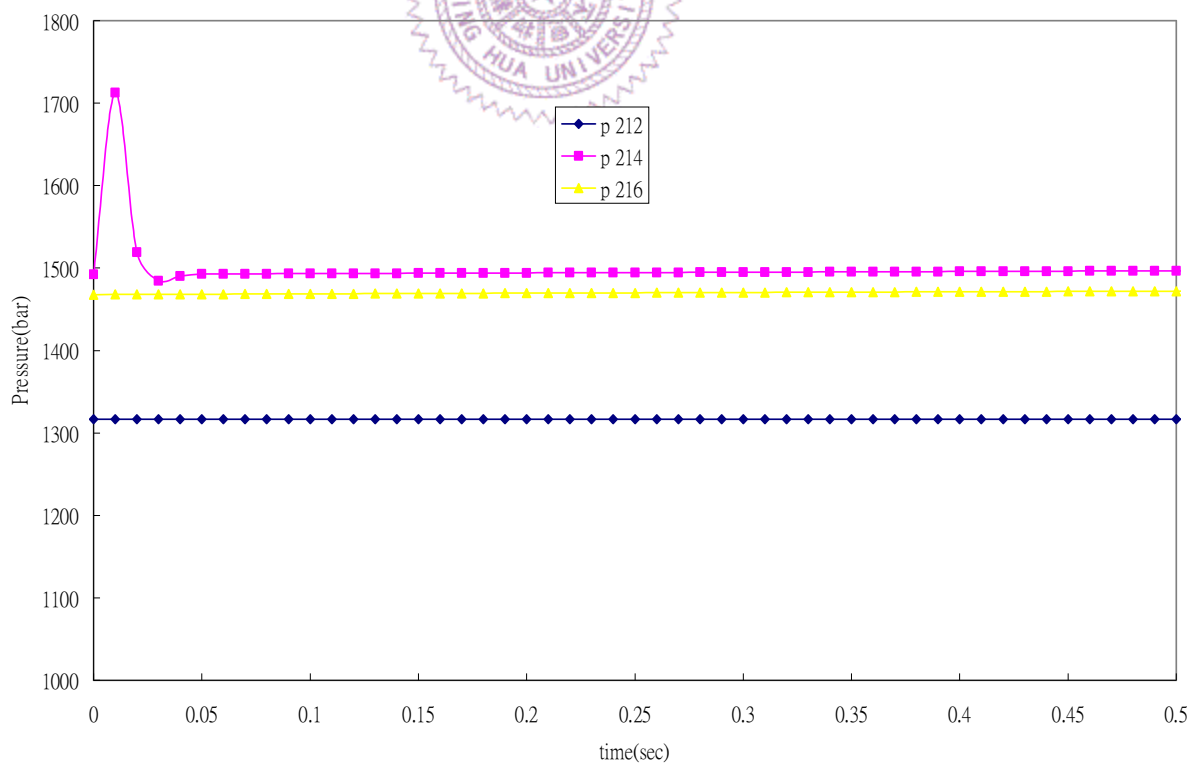


圖 A. 2. 2. 3 壓力比較