

行政院原子能委員會
委託研究計畫研究報告

核四廠 RELAP5 分析模式建立與
事故校驗數據提供

Model Development with RELAP5 for the
LungMen Power Plant and Simulator Event
Assessments Supporting

計畫編號: 942001INER023

執行單位: 國立清華大學 工程與系統科學系

計畫主持人: 白寶實

聯絡電話: (03)5715131 ext. 2673

E-mail address: bspei@faculty.nthu.edu.tw

報告日期: 中華民國九十四年十二月

Development of RELAP5-3D Model for Lungmen Plant Systems and Assessments with Feedwater Line Break Events

by

Bau-Shei Pei

Abstract

The name of the project is “Model Development with RELAP5-3D for the Lungmen Power Plant and Simulator Event Assessments Supporting”. The main purpose of the project is to develop a RELAP5-3D model of Lungmen power plant systems, which provides the assessment data to the upstream project. The development of Lungmen power plant systems divides the plant systems into two independent parts. The reactor pressure vessel system(RPV) is one of them, and the other one is balance of plant system(BOP). They are both modeled by RELAP5-3D input and tested individually. Then both of them are integrated as a Lungmen power plant RELAP5-3D model.

The integrated Lungmen power plant is assessed by a 100% power steady state test. The results show that the intergration is successful. The feedwater line break events are chosen to assess this integration model. The results of feedwater line break events are compared with SAR. The capability of Lungmen plant RELAP5-3D model for event simulation is demonstrated in the assessment.

Keywords: Reactor Pressure Vessel, RPV, Balance of Plant, BOP, Feedwater Line Break, PSAR.

National Tsing Hua University

Engineering and System Science Department

核四廠之 RELAP5-3D 整廠系統分析模式建立與 飼水管路斷管事故之校驗

白寶實

摘 要

本計劃為核四廠 RELAP5-3D 分析模式建立與事故校驗數據提供，目的在建立核四廠系統的 RELAP5-3D 分析模式，提供校驗數據為上位計畫所使用。而核四廠系統的 RELAP5-3D 分析模式分成反應爐壓力槽系統(RPV)與電廠平衡系統(BOP)兩大部分來分別建立，各部分均完成模式建立及獨立測試過程後，再加以整合成整廠系統的 RELAP5-3D 分析模式。

整合後的整廠系統分析模式經過 100% 功率穩態測試，驗證整合後的各系統組件之反應及功能均如預期般正常。事故驗證案例則挑選飼水管路斷管事件來驗證核四廠 RELAP5-3D 系統模式，飼水管路斷管事件之校驗結果在與 PSAR 中預測的數據比較之後，確認了以 RELAP5-3D 輸入模式建立的核四廠系統模式具備了事故模擬的能力。

關鍵字：反應爐壓力槽、電廠平衡系統、飼水管路斷管、PSAR。

國立清華大學
工程與系統科學系

目 錄

| | |
|-----------------------|----|
| 壹. 計畫目的..... | 1 |
| 貳. 計畫緣起..... | 2 |
| 參. 執行方法與進度說明..... | 3 |
| 肆. 反應爐壓力槽系統建立和測試..... | 5 |
| 伍. 電廠平衡系統建立和測試..... | 6 |
| 一、 飼水系統模擬..... | 6 |
| 二、 主蒸汽系統模擬..... | 8 |
| 陸. 整廠系統整合測試..... | 10 |
| 柒. 整廠驗證事件模擬和一般假設..... | 12 |
| 一、 特殊安全設施(ESF)模擬..... | 12 |
| 二、 飼水管破管模擬..... | 12 |
| 三、 初始條件..... | 12 |
| 四、 電廠操作..... | 13 |
| 1. BOP 側..... | 13 |
| 2. RPV 側..... | 13 |
| 五、 模擬假設..... | 14 |
| 捌. 整廠驗證事件結果..... | 16 |
| 一、 飼水管路圍阻體內側破管..... | 16 |
| 1. RPV 側..... | 16 |
| 2. BOP 側..... | 17 |
| 二、 飼水管路圍阻體外側破管..... | 18 |
| 玖. 結論..... | 19 |

參考文獻 63

附 圖 目 錄

| | |
|------------------------------------|----|
| 圖 4-1 RPV 節點圖..... | 28 |
| 圖 4-2 反應器壓力槽壓力時變圖 | 29 |
| 圖 4-3 反應器窄幅水位時變圖 | 29 |
| 圖 4-4 反應器爐心流量時變圖 | 30 |
| 圖 4-5 反應器蒸汽流量時變圖 | 30 |
| 圖 5-1 飼水系統節點圖 | 31 |
| 圖 5-2 飼水泵-飼水泵汽機模式節點圖 | 32 |
| 圖 5-4 飼水泵汽機模式性能驗證-功率 vs.流量 | 33 |
| 圖 5-5 高壓飼水加熱器的節點圖 | 34 |
| 圖 5-6 冷凝泵和冷凝增壓泵性能驗證-水頭 vs.流量 | 35 |
| 圖 5-7 冷凝泵和冷凝增壓泵性能驗證-功率 vs.流量 | 35 |
| 圖 5-8 飼水系統壓力誤差分析 | 36 |
| 圖 5-9 飼水系統溫度誤差分析 | 36 |
| 圖 5-10 飼水系統流量誤差分析 | 37 |
| 圖 5-11 主蒸汽系統節點圖..... | 38 |
| 圖 5-12 主蒸汽系統壓力誤差分析 | 39 |
| 圖 5-13 主蒸汽系統流量誤差分析 | 39 |
| 圖 5-14 蒸汽抽汽壓力誤差分析 | 40 |
| 圖 5-15 蒸汽抽汽流量誤差分析 | 40 |
| 圖 5-16 飼水加熱器殼側壓力誤差分析 | 41 |
| 圖 6-1 整廠系統(RPV+BOP)模擬範疇示意圖..... | 42 |
| 圖 6-2 反應器壓力槽壓力時變圖 | 43 |

| | |
|------------------------------------|----|
| 圖 6-3 反應器窄幅水位時變圖..... | 43 |
| 圖 6-4 反應器側(RPV)主蒸汽流量時變圖..... | 44 |
| 圖 6-5 電廠平衡系統側(BOP)主蒸汽集管壓力時變圖..... | 44 |
| 圖 6-6 電廠平衡系統側(BOP)飼水流量時變圖..... | 45 |
| 圖 6-7 電廠平衡系統側(BOP)飼水溫度時變圖..... | 45 |
| 圖 6-8 電廠平衡系統側(BOP)飼水泵 1 轉速時變圖..... | 46 |
| 圖 6-9 電廠平衡系統側(BOP)飼水泵 2 轉速時變圖..... | 46 |
| 圖 7-1 圍阻體內側及外側破管模擬節點圖..... | 47 |
| 圖 8-1 RPV 側斷管流..... | 48 |
| 圖 8-2 RPV 側斷管焓..... | 48 |
| 圖 8-3 爐心水位..... | 49 |
| 圖 8-4 ECC 注水流量..... | 49 |
| 圖 8-5 MSIV 前後壓力..... | 50 |
| 圖 8-6 完整和破管飼水管路流量..... | 50 |
| 圖 8-7 RPV 側累積沖放儲水..... | 51 |
| 圖 8-8 RPV 側累積沖放能量..... | 51 |
| 圖 8-10 FWPT 入口蒸氣流量..... | 52 |
| 圖 8-11 高壓汽機蒸汽抽汽..... | 53 |
| 圖 8-12 低壓汽機蒸汽抽汽..... | 53 |
| 圖 8-13 經由完整和破管飼水管路流量..... | 54 |
| 圖 8-14 BOP 沖放流量..... | 54 |
| 圖 8-15 BOP 沖放焓..... | 55 |
| 圖 8-16 BOP 沖放焓和 PSAR 結果比較..... | 55 |
| 圖 8-17 飼水加熱器殼側壓力比較..... | 56 |

| | |
|---------------------------------|----|
| 圖 8-18 飼水加熱器管側出口溫度比較 | 56 |
| 圖 8-19 飼水高壓加熱器進出口溫度比較 | 57 |
| 圖 8-20 飼水低壓加熱器進出口溫度比較 | 57 |
| 圖 8-21 累積 BOP 沖放質量..... | 58 |
| 圖 8-22 累積 BOP 沖放能量..... | 58 |
| 圖 8-23 外側破管中經完整和破管管路的飼水流量 | 59 |
| 圖 8-24 外側破管中飼水沖放流量 | 59 |
| 圖 8-25 外側破管中飼水沖放焓 | 60 |
| 圖 8-26 外側破管中累積 BOP 沖放質量..... | 60 |
| 圖 8-27 外側破管中累積 BOP 沖放能量..... | 61 |
| 圖 9-1 沖放流量和 PSAR 結果比較 | 61 |
| 圖 9-2 累積沖放儲水和 PSAR 結果比較 | 62 |
| 圖 9-3 累積沖放能量和 PSAR 結果比較 | 62 |

附表目錄

| | |
|---------------------------------------|----|
| 表 4-1 100%功率穩態爐心條件比較表..... | 20 |
| 表 5-1 飼水系統初始條件誤差分析(100 %反應器功率) | 21 |
| 表 5-2 主蒸汽系統初始條件誤差分析(100 %反應器功率) | 23 |
| 表 5-3 蒸汽抽汽初始條件誤差分析(100 %反應器功率) | 24 |
| 表 6-1 核四廠整廠系統穩態參數值與奇異(GE)設計值的比較 | 25 |
| 表 7-1 飼水斷管模擬之初始狀態..... | 26 |
| 表 8-1 飼水斷管內側破管的事件順序..... | 27 |
| 表 8-2 飼水斷管外側破管的事件順序..... | 27 |

壹. 計畫目的

上位計畫中需建立核四廠工程用系統動態模擬與分析工作平台，以支援相關工作項目審查與評估之執行，如核四廠功率測試模擬及訓練用模擬器功能評估等。本委託計畫將平行建立核四廠 RELAP5-3D 分析模式，而核四廠的系統分為反應爐壓力槽系統(RPV)與電廠平衡系統(BOP)兩大部分，各部分均完成模式建立及獨立測試過程後，再加以整合成整廠系統的 RELAP5-3D 分析模式，整廠系統分析模式的校驗則以飼水管路斷管事件來驗證整廠模式的功能。以達到提供上位計畫所建立之核四廠系統模擬與分析工作平台事故模擬校驗數據的目的，至於該工作平台運轉暫態模擬之校驗，則將直接與電廠功率測試相比對。期使最後建立完成之核四廠系統動態模擬與分析工作平台除於計畫執行中協助相關工作項目之審查與評估，日後亦可提供相關單位使用，以充分掌握核四廠重要系統之設計特性與動態分析。

貳. 計畫緣起

本委託計畫係為了支援核四廠工程用系統動態模擬與分析工作平台建立計畫，用以提供上位計畫所建立之核四廠系統模擬與分析工作平台事故模擬校驗數據。支援上位計畫相關工作項目審查與評估之執行，如核四廠功率測試模擬及訓練用模擬器功能評估等。本委託計畫將平行建立核四廠 RELAP5-3D 分析模式，以提供上位計畫所建立之核四廠系統模擬與分析工作平台計畫的事故模擬校驗數據。

參. 執行方法與進度說明

在本計畫中，將核四廠系統分析模式區分為反應爐壓力槽系統與電廠平衡系統兩大部分來建立模式，在反應爐壓力槽系統模式中，到主蒸汽集管為止的主蒸汽系統及反應器爐內泵亦包含在模式內。電廠平衡系統則分成主蒸汽系統與飼水系統等兩大次系統。反應爐壓力槽系統模式(RPV)與電廠功率轉換系統模式(BOP)均以 RELAP5-3D 輸入模式建立，模式建立過程中各系統均進行其各自的獨立測試，以確認系統模式成功建立。

最後反應爐壓力槽模式(RPV)及電廠功率轉換系統模式(BOP)兩部分再整合成核四廠整廠系統 RELAP5-3D 分析模式，整合後的整廠系統分析模式進行了整廠 100% 穩態功率獨立測試，驗證各系統間的整合成功。事故校驗的案例則選擇飼水斷管事件，飼水斷管事故校驗的結果與 PSAR 中的數據比對，驗證核四廠整廠系統模式使用 RELAP5-3D/K 程式於事故模擬時的能力。

RELAP5-3D 程式是由美國愛達荷國家工程與環境實驗室 (Idaho National Engineering and Environmental Laboratory, INEEL) 所發展的。RELAP5-3D/K^[1,2,3]即 RELAP5-3D^[4] Appendix K 版，其根據 10 CFR 50 Appendix K 的要求，為分析冷卻水流失事故(LOCA)所修改完成的程式。

執行進度如計畫書所規劃，本年度的第一、二季已順利完成核四廠個別系統 RELAP5-3D 模式建立，RPV 及 BOP 兩大系統於本年度上半年完成模式建立工作，第三季也按照預定時程整合 RPV 及 BOP 系統成為核四廠整廠系統模式，並且如期於第四季執行完成核四廠系統分析模式校驗及

結案報告撰寫工作。

肆. 反應爐壓力槽系統建立和測試

此處系統細分成反應爐壓力槽系統(RPV)、主蒸汽系統(MS)及反應器爐內泵(RIP)三個部分。所有的反應爐壓力槽本體和反應爐壓力槽出口至主蒸汽集管範圍內的模擬總共包含 123 個節點和 137 個接合。此外，為了適當模擬在反應爐壓力槽結構組件的儲熱，用了 123 個熱平板來模擬反應爐壓力槽壁、燃料棒和其他反應爐組件。在反應爐的模擬中，降流區(Downcomer)、爐內泵(RIPs)、爐心進水區 (Lower Plenum)、反應爐爐心、蒸汽分離器和乾燥器、和蒸汽圓頂(Steam Dome)等皆以適當的 RELAP5-3D/K 元件來分別模擬。龍門 ABWR 反應爐系統用 RELAP5-3D/K 來模擬的模式圖如圖 4-1 所示。

反應爐壓力槽系統的獨立測試案例為 100% 功率穩態測試。主蒸汽集管為壓力邊界，飼水則以依時體積(TDV)與依時接節(TDJ)控制在 100% 功率穩態條件來注入反應爐壓力槽系統，為固定流量邊界。反應器爐內泵(RIP)定在 93.1% 爐心流量的轉速以配合上位計畫的中子功率模式的起始條件。固定功率在 100%，觀察水位、壓力等重要參數的變化。

獨立測試結果的系統穩態參數值與奇異(GE)設計值^[5]的比較列於表 4-1。壓力、水位、爐心流量與主蒸汽流量等參數時變圖見圖 4-2 至圖 4-5。測試結果顯示反應爐壓力槽系統的模式建立與穩態起始成功。

伍. 電廠平衡系統建立和測試

電廠平衡系統的模擬主要包含飼水系統和主蒸汽系統。所有電廠平衡系統模擬模式包含 299 個流力節點(Nodes)、個 277 接合(Junctions)和 133 個熱傳平板(Heat slabs)。

一、飼水系統模擬

飼水系統總共包含 158 流力體積、151 個接合和 133 個熱平板。模擬的飼水系統元件包含(1)飼水泵(FWPs)和驅動汽機，(2)飼水加熱器，(3)冷凝水泵和冷凝水增壓泵，(4)主冷凝器，和(5)系統管路。飼水系統模擬模式節點圖如圖 5-1 所示。

飼水泵模式採用脫羈轉速 5350 rpm 的性能曲線來模擬泵特性。設計的泵曲線包含泵水頭(Pumping Hhead)對應流量及功率對應流量。因為 FWP 由 FWP 汽機所驅動，所以 FWP 汽機及傳動軸皆被模擬。RELAP5-3D 程式的泵模式、汽機模式和軸模式分別用以於模擬 FWP，FWP 汽機和傳動軸。飼水泵-飼水汽機模式如 5-2 所示。飼水泵及飼水泵汽機的轉速將依角動量守恆求出。

角動量守恆等式:

$$\sum_i I_i \frac{d\omega}{dt} = \tau_T - \tau_P - f * \omega \quad (5-1)$$

其中 I = 元件慣量(Inertia)

ω = 轉速

τ = 力矩(Torque)

f = 元件的磨擦係數

T, P = 汽機, 泵

飼水泵模式性能和原性能曲線的比較顯示在圖 5-3 和圖 5-4 中。由圖上可知，

飼水泵-飼水泵汽機模式能準確模擬飼水泵的特性。

在飼水系統分析模式中，詳盡模擬兩級高壓飼水加熱器和四級低壓飼水加熱器。每個加熱器的管側和殼側皆包含五個流力節點，而管側和殼側的熱傳應用 RELAP5-3D 的熱平板元件進行模擬。此外，每個加熱器的汽機抽取和洩水路徑亦被模擬。高壓飼水加熱器的節點圖如圖 5-5 所示。

冷凝水泵和冷凝水增壓泵被結合成為一個等效泵來模擬。此結合的等效泵是基於每一個泵的個別設計資料來模擬。結合泵的性能曲線為冷凝水泵和冷凝水增壓泵原性能曲線的疊加。模擬等效泵的泵水頭對應流量及功率對應流量曲線與疊加的原性能曲線之比較在圖 5-6 及圖 5-7。

主冷凝器包含三個主要區域，即混合區、熱傳區和熱井區(Hot Well)。主冷凝器總共包含十三個節點。由一個體積模擬混合區;熱傳區的殼側及管側皆有五個節點，殼側和管側之間有熱平板元件;而熱井由二個體積來模擬，詳見圖 5-1。

飼水系統的所有管路，其資料是來自於相關的管路和設備圖(P&ID)，以體積元件或管元件來模擬，並用接合來連接相鄰的節點。此外，管壁以熱平板來模擬金屬的儲存能量。

在飼水系統中的所有獨立元件，以管路來整合成完整的系統。所有飼水系統的模擬圖在圖 5-1 呈現。而模擬的額定系統狀態為參照龍門電廠的 Thermal Kit^[6]和/或 Process Flow Diagram (PFD)所提供的參數數值。壓力、流量和溫度分佈的誤差分析分別列於表 5-1 和圖 5-8、圖 5-9 及圖 5-10 中。除了壓力分佈的最大誤差大約 2%外，其他的參數誤差皆小於 1%。

二、主蒸汽系統模擬

主蒸汽系統總共包含 141 個節點和 126 個接合。模擬的主蒸汽系統元件包含(1)蒸汽集管，(2)高壓和低壓汽機，(3)汽水分離再熱器(MSR)和洩水槽，和(4)蒸汽抽汽。所有元件由設計管路連接。主蒸汽系統模擬模式節點圖如圖 5-11 所示。

蒸汽集管是以 RELAP5-3D branch 元件模擬。有四條蒸汽管路進入集管而另四條蒸汽管路離開集管到高壓汽機。汽機係將高壓、高溫蒸汽的熱能量轉換為機械能的裝置。主蒸汽系統運用 RELAP5-3D 汽機元件來模擬多級高壓和低壓汽機。為了精確模擬加熱器的加熱源，高壓汽機的三個蒸汽抽汽和低壓汽機來的四個蒸汽抽汽模式被完整建立，如圖 5-11 所示。這七個蒸汽抽汽模式與相關飼水加熱器殼側或 MSR 管側相連接。除了低壓汽機的最後一級蒸汽抽汽管路上沒有逆止閥外，其餘蒸汽抽汽管路皆有模擬用來保護汽機的逆止閥。

MSR 的汽水分離器和兩級再熱器是以 RELAP5-3D 分離器元件、節點元件和熱平板元件來模擬，如圖 5-11 所示。高壓汽機出口的蒸汽流入 MSR 分離器，而離開分離器的蒸汽將透過接下來的兩級再熱器加熱。第一級再熱器的加熱源為高壓汽機來的第一級蒸汽抽氣，而第二級再熱器的加熱源為蒸汽集管的蒸汽抽氣。此外，也模擬了分離器和兩級再熱器的洩水槽。洩水路徑是以管路元件(Pipe Component)來模擬，並洩水至相關的飼水加熱器殼側。

此段落為描述飼水系統和主蒸汽系統的整合。主蒸汽系統中相關元件以管路來進行整合，進而形成完整動力轉換系統。元件包含主蒸汽集管、高壓汽機、MSR、低壓汽機、FWP 汽機、相關的洩水槽和蒸汽抽汽管路。完整主蒸汽系統的結點圖如圖 5-11 所示。模式的初始狀態是根據 Thermal Kit 和/或 PFD。飼水系統和主蒸汽系統分析模式壓力分佈和流量分佈與額定值的誤差分析，分別

列於表 5-2、圖 5-12 和圖 5-13。關於由主蒸汽系統抽汽至飼水系統，每條抽汽管路的壓力和流量和飼水加熱器殼側壓力之誤差分析，列於表 5-3、圖 5-14、圖 5-15 和圖 5-16。由表及圖中可見每個分析參數的誤差皆不超過 2%。

陸. 整廠系統整合測試

在本章中，結合反應爐壓力槽(RPV)和電廠平衡系統(BOP)的模式，並以 RELAP5-3D Appendix K 版程式來模擬，完整模擬範疇在圖 6-1 顯示。所有的 BOP 和 RPV 元件藉著系統管路連接而成為一個完整的能量產生和能量轉換系統。而模擬的初始系統狀態為參照龍門電廠的 Thermal Kit 和/或 Process Flow Diagram (PFD)所提供的參數數值。經由分佈參數數值的比較，特別是壓力和流量，可確定系統模式中的阻力係數分佈。所有 BOP 模擬模式包含 299 個流力節點(Nodes)、277 個接合(Junctions)和 133 個熱傳平板(Heat Slabs)，而在 RPV 模式包含了 123 個流力節點、137 個接合和 123 個熱平板。

反應爐壓力槽系統(RPV)和電廠平衡系統(BOP)的模式整合後，原先兩個系統發展時使用的固定邊界條件將取消，RPV 系統將以 BOP 系統的主蒸汽集管壓力計算出主蒸汽流量，RPV 系統產生的主蒸汽將流入 BOP 系統，用以推動汽機、汽機驅動飼水泵等元件，而主蒸汽經冷凝器冷凝後進入飼水系統，經過加熱增壓後，BOP 系統則以反應爐壓力槽中的飼水注入區的壓力計算出飼水流量，配合由主蒸汽抽氣加熱後的飼水溫度注入反應爐壓力槽而成一個完整的循環。

核四廠整廠系統的獨立測試案例為 100% 功率穩態測試，目的在於測試反應爐壓力槽系統(RPV)和電廠平衡系統(BOP)的模式整合後的狀況，檢測各系統的狀態是否仍會達到與當初單獨建立時設定的穩態起始條件，系統穩態參數值與奇異(GE)設計值^[5]的比較列於表 6-1，比較的系統參數值是以兩個系統間原先是固定的邊界條件為主，例如 BOP 側的主蒸汽集管壓力、RPV 側的主蒸汽流量、BOP 側的飼水流量、飼水溫度以及汽機驅動飼水泵的轉速等參數，

另外加上反應爐壓力槽系統的壓力及窄幅水位的變化以檢測整合系統的 100% 功率穩態狀況，以上各參數的時變圖見圖 6-2 至圖 6-9。測試結果顯示反應爐壓力槽系統(RPV)和電廠平衡系統(BOP)整合後的整廠模式穩態起始成功。

柒. 整廠驗證事件模擬和一般假設

在整廠驗證事件中，選擇飼水管瞬時破管事件作為分析，RPV 和 BOP 沖放皆列入考慮。除了 RPV 和 BOP 的結合外，還需要額外模擬特殊安全設施和飼水管破管。在此分析中，使用適當的假設來確保合理的分析保守性。三種假設將應用於飼水沖放分析，其包括(1)初始條件、(2)電廠操作和(3)模擬假設。

一、特殊安全設施(ESF)模擬

在飼水斷管事件中，所有的緊急爐心冷卻(ECC)注水將被高壓和低水位訊號所啟動。ECC 注水包含了爐心隔離冷卻系統(RCIC)、高壓爐心灌水系統(HPCF)、和低壓爐心灌水系統(LPCF)。每個注水系統以一組時間獨立體積(TDV)和時間獨立接合(TDJ)來模擬，注水流量是根據相關的流量&水頭表^[9]。

二、飼水管破管模擬

在本研究中，模擬兩支飼水管進入反應器，各管路上以接合元件來模擬文氏管來降低飼水截面積。關於破管的模擬方面，飼水管路破管模擬使用兩個隔離閥，如圖 7-1 所示。當破管發生時，對應的隔離閥立即打開以模擬圍阻體內側或外側破管。Moody critical flow model 應用在破管接合和文氏管接合，以模擬飼水管內部阻塞(Choking)。

三、初始條件

根據 10 CFR 50 Appendix K，反應器初始功率假設為 102%。所以初始蒸汽和飼水流量亦為額定值的 102%。此外，初始爐心流量假設為 111%，來給予 RPV 最大的初始儲水。至於進入反應器的飼水溫度假設為 422.4 °F，此值是額

定飼水溫度加上 2.4 度。詳細的初始狀態歸納在表 7-1。

四、電廠操作

1. BOP 側

應用於飼水破管事件 BOP 沖放分析，在 BOP 操作的保守假設如下所列：

- (1) 在事件開始時，飼水泵立即到達飼水泵脫羈轉速(即最大轉速)。
- (2) 當飼水泵帶動汽機開始作慣性減速，飼水泵亦隨之減速。
- (3) 抽汽持續流入飼水加熱器殼側和飼水泵汽機，直至貯汽耗盡或被止回閥阻擋，止回閥是設計來保護主汽機。
- (4) 非安全系統和元件的運轉及操作以能產生最大沖放水量和能量為準則。
- (5) 冷凝水泵及冷凝水增壓泵持續運轉以提供冷凝水給飼水系統，對長期沖放為運轉三十分鐘。
- (6) 冷凝水儲存槽提供對主冷凝器的冷凝水補充，冷凝水系統的入口溫度為 $36.0^{\circ}\text{C}^{[6]}$ 。
- (7) 事件發生後，完整飼水管路根據飼水集管和反應器的壓力提供飼水至反應器。

2. RPV 側

應用於飼水破管事件 RPV 沖放分析，在 RPV 操作的保守假設如下所列：

- (1) 當內側飼水破管，於破管後五秒^[7, 8]，乾井高壓力將啟動反應器急停。當外側飼水破管，爐心水位 L-3 或 MSIV 關閉將啟動反應器急停。
- (2) 蒸汽管低壓、爐心水位 L-1.5 將關閉 MSIVs。
- (3) MSIVs 在 3.0 至 4.5 秒完全關閉^[5]。當內側飼水破管，有 RPV 和 BOP 沖放，MSIVs 在 3.0 秒關閉是較保守假設。當外側飼水破管，只有 BOP 沖放，MSIVs 在 4.5 秒關閉是較保守假設。

- (4) 爐心水位 L-3 將跳脫沒有 MG 驅動的四台 RIPs。
- (5) 爐心水位 L-2 將跳脫有 MG 驅動的三台 RIPs，另外有 MG 驅動的三台 RIPs 將在六秒後跳脫。
- (6) 當乾井高壓力或爐心水位 L-2，二十九秒後將啟動爐心隔離冷卻系統 (RCIC)。
- (7) 當乾井高壓力或爐心水位 L-1.5，二十六秒後將啟動高壓爐心灌水系統 (HPCF)。
- (8) 當乾井高壓力或爐心水位 L-1，三十六秒後將啟動低壓爐心灌水系統 (LPCF)。
- (9) 考慮爐心水位訊號的反應時間。對 L-3 和 L-8，訊號的反應時間為 0.85 秒；對 L-2、L-1.5 和 L-1，訊號的反應時間為 1.0 秒。
- (10) 在長期沖放的計算中，當運轉三十分鐘後，高壓爐心灌水系統和爐心隔離冷卻系統的注水終止，而低壓爐心灌水系統將維持 L-2 至 L-8 的水位。

五、模擬假設

為確保分析結果的保守性，本研究選用重要的模式和假設。這些模式和假設如下所列：

- (1) 使用 Homogeneous Moody model 來計算沖放流量。
- (2) 考慮在飼水系統文氏管和 RPV 內噴灑器的內部阻塞影響。
- (3) 在短期沖放的計算中，考慮使用由 ANSI/ANS-5.1 方法加上金屬水反應 (Metal Water Reaction) 所推導的反應器衰變熱 (Decay Heat)。相關的功率表由 GE 提供，其被用在 GE 圍阻體反應的計算。
- (4) 在計算最大沖放流量時，考慮系統流損 (管路磨擦、局部損失及水位高度影響)。
- (5) FWP 的模擬採用脫羈轉速下的性能曲線。

- (6) 考慮當壓力低於飽和點時水的閃化效應，和蒸汽提供的閃化相關影響。
- (7) 考慮管路金屬及飼水加熱器殼側飽和水儲熱的釋放。
- (8) 當飼水管路破管事件發生時，程式所算的飼水系統加熱蒸汽量與洩水量將放大 1.05 倍，以補償計算誤差量。
- (9) 當飼水管路破管事件發生時，程式所算的飼水泵帶動汽機的入口流量將放大 1.05 倍，以補償計算誤差量
- (10) FW 泵的慣量假設和 FWPT 的慣量相同。
- (11) 排放係數(Discharge Coefficient)保守地假設為 1.0。

捌. 整廠驗證事件結果

在進行飼水管路破管分析時，同時考慮 RPV 和 BOP 系統的沖放。注意在破管後，反應器和飼水系統仍藉著完整的飼水管路相連。飼水管路破管分析包含二種情況，即為(1)飼水管路的內側破管，和(2)飼水管路的外側破管。對於飼水管路的內側破管，同時發生 RPV 和 BOP 系統的沖放。至於飼水管路的外側破管，因為 RPV 沖放被逆止閥所阻擋，而只有發生 BOP 系統的沖放。在飼水管路的內側破管的情況，反應器將因乾井高壓力訊號而急停，且 MSIV 將因蒸汽管路低壓力訊號而隔離。而在飼水管路的外側破管的情況，因為蒸汽通道高溫訊號的安全等級不高而不採用，MSIV 亦因蒸汽管路低壓力訊號而隔離。此外，在外側破管反應器因水位 L-3 而發生急停。

一、飼水管路圍阻體內側破管

於飼水管路破管的內側破管中，其相關的事件順序如表 8-1 所列。注意反應器因在 5.0 秒時的乾井高壓力訊號而發生急停，且 MSIV 關閉因在 19.2 秒時的蒸汽管路低壓力訊號而啟動。而在破管約 30 秒後，ECC 注水依序被啟動。

1. RPV 側

在破管後，RPV 開始沖放且大量發生閃化。RPV 沖放流量和焓分別如圖 8-1 和圖 8-2 所示。由圖上明顯可見，在沖放後 30 秒，為由早期的劇烈閃化所造成的二相混合沖放。在其後的 150 秒為蒸汽沖放，直到 RPV 內部水位因 ECC 注水而恢復至大於飼水噴灑器高度。爐心水位和 ECC 注水分別在圖 8-3 和圖 8-4 呈現。注意在圖 8-1，在破管後立刻有個很大的沖放峰值。此峰值為位於破管端點和飼水噴灑器間的空間之初始次冷水所造成。

於 MSIV 關閉後，蒸汽管路壓力和 RPV 壓力反應無關，如圖 8-5 所示。經由完整管路和破管管路的飼水流量在圖 8-6 呈現。當破管發生，FW 泵由脫羈和慣性減速操作，在完整飼水管路上喪失輸送飼水至 RPV 的水頭，直至 RPV 壓力降得夠低才能再次輸送飼水。而隨著 RPV 壓力持續降低，冷凝泵和冷凝增壓泵將在完整飼水管路上持續輸送飼水至 RPV。在 RPV 短期沖放所造成的累積沖放儲水和能量分別如圖 8-7 和圖 8-8 所示。

2. BOP 側

在破管瞬間，飼水泵轉速因流量脫羈而增加。此時，更多蒸汽流入飼水泵帶動汽機直至 MSIV 關閉。泵轉速和抽蒸汽至 FWPT 的流量分別如圖 8-9 和圖 8-10 所示。由於破管時飼水流量突然增加，飼水自飼水加熱器殼側抽取較多能量。因此，高低壓汽機抽取蒸汽突然增加。然而，因 MSIV 關閉高低壓汽機將無法提供蒸汽，隨後飼水加熱器殼側內的飽和儲水開始閃化。高低壓汽機的抽取蒸汽量分別在 8-11 和圖 8-12 呈現。注意在 MSIV 關閉後，蒸汽壓力將無法維持，如圖 8-5 所示。由於飼水加熱器殼側內的飽和水閃化，閃化蒸汽回流至汽機，但為抽汽管路中的止回閥所阻擋(最後一級的抽汽管路除外)，見圖 8-12。

破管發生時，斷管管路的飼水流量大量增加，此時反應器壓力大於飼水管壓力，飼水管路上的止回閥發生作用，而使完整管路的水流驟降為零，如圖 8-13 所示。由圖上可見在破管後 170 秒，完整管路的正向飼水流因反應爐的持續降壓而恢復。斷管管路的飼水減少量和流向反應爐的完整管路飼水量相等。

BOP 沖放流量和焓如分別在圖 8-14 和圖 8-15 呈現。因為文氏管截面積比飼水管面積小多，文氏管產生的內部堵塞(Choking)將限制破管的流量。而其最大沖放量仍能達到 7000 lbm/s。

關於沖放焓，由於系統管路金屬及飼水加熱器殼側飽和水能量釋放被準確

模擬，沖放焓的衰減速率相較於 PSAR 所計算結果是較緩和的，如圖 8-16 所示。加熱器不斷釋放能量給飼水，而每個加熱器的能量釋放衰退趨勢可由加熱器殼側壓力看出，如圖 8-17 呈現。因為高壓加熱器比低壓加熱器儲存更多的能量，因此能夠提供給飼水較長時間的加熱，如圖 8-18 所示。在一段時間後，當低壓加熱器完全失去加熱飼水能力，高壓加熱器仍有能力加熱飼水。在 BOP 長期沖放計算中，可見每一飼水加熱器的加熱能力最後完全喪失。飼水高壓和低壓加熱器進出口溫度的比較分別在圖 8-19 和圖 8-20 呈現。在 BOP 沖放所造成的累積沖放質量和能量分別如圖 8-21 和圖 8-22 所示。

二、飼水管路圍阻體外側破管

一般而言，外側破管的沖放現象是很相似的。然而，爐心壓力因 MSIVs 和飼水隔離閥而維持。由假設條件，在外側破管中 MSIVs 關閉訊號為蒸汽管低壓力，而不再是蒸汽通道高溫度。MSIVs 關閉時間在外側破管比在內側破管大約晚 10 秒。外側破管的相關事件順序如表 8-2 所列。因為爐心壓力被維持住，所以沒有正的飼水流經完整管路由泵輸入爐心，如圖 8-23 所示。計算結果的累積沖放流量和焓分別在圖 8-24 和圖 8-25 呈現。在 BOP 沖放所造成的累積沖放質量和能量分別如圖 8-26 和圖 8-27 所示。

玖. 結論

反應爐壓力槽系統及電廠平衡系統均已成功地建立，並完成適當的測試。在結合反應爐壓力槽和電廠平衡系統的整廠模式中，選擇了飼水管路斷管水流沖放事件來驗證模式。經由和 PSAR 曲線的比較，可見在事件發生後的前 120 秒破管流量小於 PSAR 所示值，如圖 9-1 所示。而 120 秒後，由於採較保守的假設，冷凝水泵和冷凝水增壓泵持續運作自主冷凝器供水至破管處。累積的沖放儲水只在前 180 秒在 PSAR 曲線的範圍內，如圖 9-2 呈現。對沖放焓來說，因為考慮系統管路金屬和飼水加熱器殼側熱水的能量釋放，沖放焓變化較與 PSAR 所提供曲線更緩和，如圖 8-16 所示。全部的累積沖放能量比較在圖 9-3 中。由圖上可見，累積沖放能量在早期 120 秒處於 PSAR 曲線下的範圍內。以上的飼水管路斷管事件之校驗結果確認了以 RELAP5-3D 輸入模式建立的核四廠整廠系統模式具備了事故模擬的能力。

表 4-1 100%功率穩態爐心條件比較表

| | Rated Condition | RELAP5-3D(Average) |
|---------------|-----------------------------|------------------------|
| 功率(MWt) | 3926 MWt (100%) | 3926 MWt (100%) |
| 反應器壓力槽壓力(Mpa) | 7.17 Mpa | 7.17 Mpa |
| 反應器窄幅水位(cm) | 426.0 cm | 426.02 cm |
| 爐心流量(kg/sec) | 14500 kg/sec (100% Flow) | 13505.3 kg/sec(93.14%) |
| 蒸汽流量(kg/sec) | 2122.3 kg/sec | 2126.8 kg/sec(100.2%) |

表 5-1 飼水系統初始條件誤差分析(100 %反應器功率)

| Pressure [MPa] | Rated Value | Initial Value | Error [%] |
|------------------------|-------------|---------------|-----------|
| 89001 (Main Condenser) | 0.0059260 | 0.0059265 | 0.008 |
| 603 (CP Discharge) | 3.7913000 | 3.8152000 | 0.630 |
| 815 (HTR6 Outlet) | 3.5913000 | 3.5983200 | 0.195 |
| 818 (HTR5 Outlet) | 3.4263000 | 3.4256300 | -0.020 |
| 821 (HTR4 Outlet) | 3.2603000 | 3.2518800 | -0.258 |
| 824 (FWP Suction) | 3.0953000 | 3.0774300 | -0.577 |
| 651 (FWP Discharge) | 8.1633000 | 8.1523100 | -0.135 |
| 827 (HTR2 Outlet) | 7.9663000 | 7.9681500 | 0.023 |
| 671 (HTR1 Outlet) | 7.8143000 | 7.6884300 | -1.611 |
| Temperature [K] | Rated Value | Initial Value | Error [%] |
| 813 (HTR6 Inlet) | 309.95 | 309.20 | -0.242 |
| 816 (HTR5 Inlet) | 351.37 | 348.19 | -0.905 |
| 819 (HTR4 Inlet) | 375.15 | 372.39 | -0.736 |
| 822 (HTR3 Inlet) | 406.05 | 402.85 | -0.788 |
| 824 (HTR3 Outlet) | 423.85 | 421.81 | -0.481 |
| 825 (HTR2 Inlet) | 424.75 | 422.37 | -0.560 |
| 828 (HTR1 Inlet) | 460.45 | 457.73 | -0.591 |
| 830 (HTR1 Outlet) | 488.75 | 487.36 | -0.284 |
| Mass Flow Rate [kg/s] | Rated Value | Initial Value | Error [%] |
| 706 (HTR6 Inlet) | 2122.306 | 2121.700 | -0.029 |
| 707 (HTR5 Inlet) | 2122.306 | 2121.700 | -0.029 |
| 716 (HTR4 Inlet) | 2122.306 | 2121.700 | -0.029 |
| 726 (HTR3 Inlet) | 2122.306 | 2121.700 | -0.029 |
| 736 (HTR3 Outlet) | 2122.306 | 2121.700 | -0.029 |
| 761 (HTR2 Inlet) | 2122.306 | 2121.700 | -0.029 |
| 771 (HTR1 Inlet) | 2122.306 | 2121.700 | -0.029 |
| Pump Speed [rad/s] | Rated Value | Initial Value | Error [%] |
| 969 (TDFWP-A) | 515.22 | 516.10 | 0.171 |

| | | | |
|---------------|--------|--------|-------|
| 970 (TDFWP-B) | 515.22 | 517.00 | 0.345 |
|---------------|--------|--------|-------|

表 5-2 主蒸汽系統初始條件誤差分析(100 %反應器功率)

| Pressure [MPa] | Rated Value | Initial Value | Error [%] |
|------------------------|-------------|---------------|-----------|
| 401 (MSL Header) | 6.7900000 | 6.8694200 | 1.170 |
| 411 (HPT Inlet) | 6.5200000 | 6.5190700 | -0.014 |
| 423 (HPT Outlet) | 1.3100000 | 1.3097000 | -0.023 |
| 463 (LPT Inlet) | 1.2300000 | 1.2020900 | -2.269 |
| 464 (LPT Outlet) | 0.0076000 | 0.0076133 | 0.175 |
| Mass Flow Rate [kg/s] | Rated Value | Initial Value | Error [%] |
| 590 (MSL Header Inlet) | 530.577 | 530.560 | -0.003 |
| 501 (HPT Inlet) | 506.070 | 505.730 | -0.067 |
| 30103 (SPRT Inlet) | 1677.145 | 1672.600 | -0.271 |
| 30101 (SPRT Outlet) | 1462.336 | 1447.800 | -0.994 |
| 558 (LPT Inlet) | 1426.776 | 1412.300 | -1.015 |
| 570 (LPT Outlet) | 1157.997 | 1142.600 | -1.330 |
| 90901 (MFPT-A Inlet) | 17.780 | 17.781 | 0.006 |
| 91001 (MFPT-B Inlet) | 17.780 | 17.781 | 0.006 |

表 5-3 蒸汽抽汽初始條件誤差分析(100 %反應器功率)

| Pressure [MPa] (Turbine Side) | Rated Value | Initial Value | Error [%] |
|-------------------------------|-------------|---------------|-----------|
| 922 (HP Turbine 5th Stage) | 2.370000 | 2.330480 | -1.668 |
| 423 (HP Turbine Outlet) | 1.320000 | 1.309700 | -0.780 |
| 924 (LP Turbine 2nd Stage) | 0.548900 | 0.549262 | 0.066 |
| 925 (LP Turbine 3rd Stage) | 0.335700 | 0.335753 | 0.016 |
| 926 (LP Turbine 5th Stage) | 0.126200 | 0.126830 | 0.499 |
| 927 (LP Turbine 6th Stage) | 0.051920 | 0.052942 | 1.968 |
| Pressure [MPa] (Heater Side) | Rated Value | Initial Value | Error [%] |
| 801 (HTR6) | 0.049330 | 0.049584 | 0.515 |
| 803 (HTR5) | 0.119800 | 0.118039 | -1.470 |
| 805 (HTR4) | 0.318900 | 0.312848 | -1.898 |
| 807 (HTR3) | 0.521500 | 0.516583 | -0.943 |
| 809 (HTR2) | 1.260000 | 1.265900 | 0.468 |
| 811 (HTR1) | 2.250000 | 2.198650 | -2.282 |
| Mass Flow Rate [kg/s] | Rated Value | Initial Value | Error [%] |
| 509 (MSL Header to RHTR2) | 98.027 | 99.289 | 1.287 |
| 513 (HPT to RHTR1) | 77.735 | 78.120 | 0.495 |
| 516 (HPT to HTR1) | 119.329 | 121.290 | 1.643 |
| 519 (HPT to HTR2) | 150.070 | 150.960 | 0.593 |
| 571 (LPT to HTR3) | 33.977 | 34.024 | 0.138 |
| 574 (LPT to HTR4) | 81.389 | 81.679 | 0.356 |
| 577 (LPT to HTR5) | 59.962 | 59.886 | -0.127 |
| 580 (LPT to HTR6) | 93.451 | 94.128 | 0.724 |

表 6-1 核四廠整廠系統穩態參數值與奇異(GE)設計值的比較

| Rated Condition | Model Value | GE Design Value |
|------------------------------|-------------|-----------------|
| RPV Dome Pressure [MPa] | 7.15 | 7.17 |
| RPV N.R. Water Level [cm] | 426 | 426 |
| MSL Header Pressure [MPa] | 6.88 | 6.89 |
| MS Flow [kg/s] | 2125.5 | 2122.31 |
| FW Flow [kg/s] | 2125.9 | 2122.31 |
| FW Temperature [C] | 215.6 | 215.6 |
| FW Pump Speed [rpm] | 4927 | 4920 |

表 7-1 飼水斷管模擬之初始狀態

| Parameter | Initial Value |
|---|----------------------------|
| Reactor Thermal Power [MWt] | 4005.0 (102 %) |
| RPV Dome Pressure [MPa] | 7.31(1060psi) (102 %) |
| RPV Core Flow [kg/s] | 16107.0 (111.1 %) |
| RPV Narrow Range Water Level [cm] | 426.0 (normal W/L) |
| Steam and Feedwater Flow [kg/s] | 2178.0 (102 %) |
| Feedwater Temperature [° C] | 216.9(422.4° F) (102 %) |
| Turbine Driven Feedwater Pump Speed [rpm](Pump Rated Speed: 4920 rpm) | 5096.6 |

表 8-1 飼水斷管內側破管的事件順序

| Time [s] | Events |
|----------|---|
| 0.000 | Feedwater line break. |
| 0.310 | L-4 and 10 RIPs Runback (L-4 + 0.0s, not apply). |
| 5.000 | Reactor scram by drywell high pressure (Assumption). |
| 5.389 | L-3, Trip of 4 RIPs without MG set (L-3 + 0.0s). |
| 12.765 | L-8, Turbine trip (L-8 + 0.0s, not apply), and Feedwater pump turbine trip (L-8 + 0.0s, not apply). |
| 19.184 | MSIVs closure by main steam line low pressure. |
| 26.702 | L-2, Trip of 3 RIPs with MG set (L-2 + 0.0s). |
| 31.000 | HPCF startup complete (Drywell high pressure + 26.0s). |
| 32.702 | Trip of other RIPs with MG set (L-2 + 6.0s). |
| 34.000 | RCIC startup complete (Drywell high pressure + 29.0s). |
| 41.000 | LPFL startup complete (Drywell high pressure + 36.0s). |

表 8-2 飼水斷管外側破管的事件順序

| Time [s] | Events |
|----------|---|
| 0.000 | Feedwater line break. |
| 1.582 | L-4 and 10 RIPs Runback (L-4 + 0.0s, not apply). |
| 11.987 | L-3, Trip of 4 RIPs without MG set (L-3 + 0.0s), and RX Scram (L-3 + 0.0s). |
| 20.667 | L-8, Turbine trip (L-8 + 0.0s, not apply), and Feedwater pump turbine trip (L-8 + 0.0s, not apply). |
| 31.542 | MSIVs closure by main steam line low pressure. |
| 43.035 | L-2, Trip of 3 RIPs with MG set (L-2 + 0.0s). |
| 49.035 | Trip of other RIPs with MG set (L-2 + 6.0s). |
| 72.035 | RCIC startup complete (L-2 + 29.0s). |
| 88.644 | HPCF startup complete (L-1.5 + 26.0s). |
| 102.652 | LPFL startup complete (L-1 + 36.0s). |

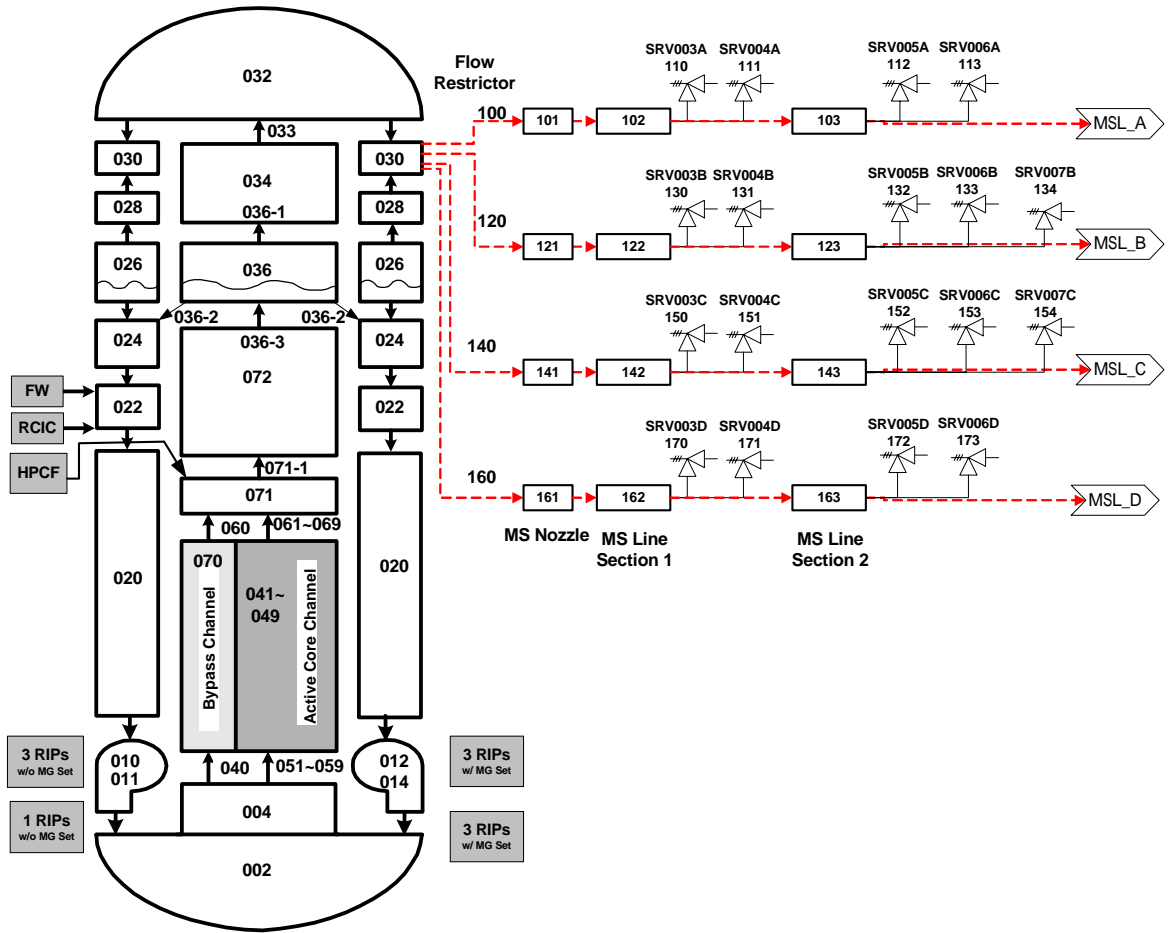


圖 4-1 RPV 節點圖

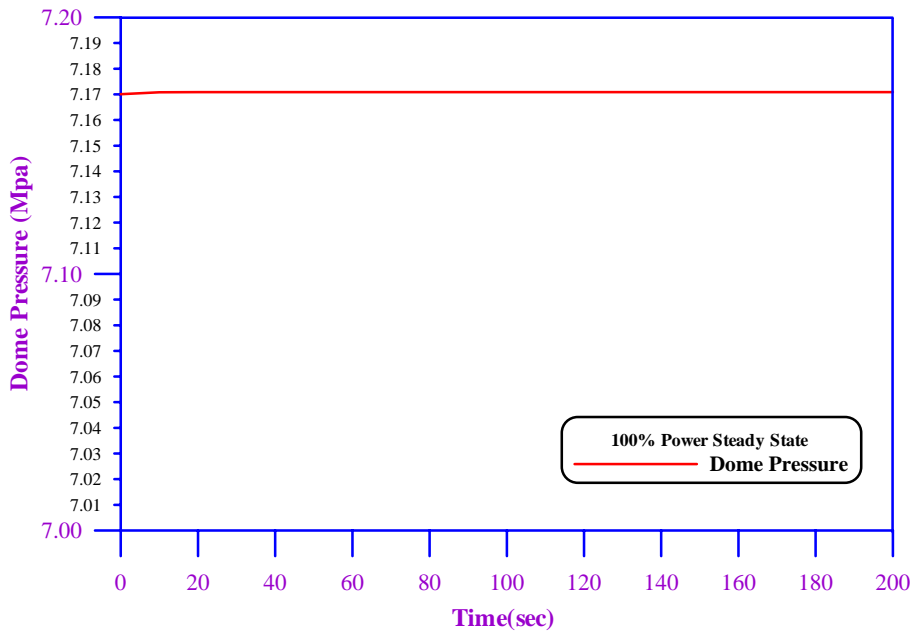


圖 4-2 反應器壓力槽壓力時變圖

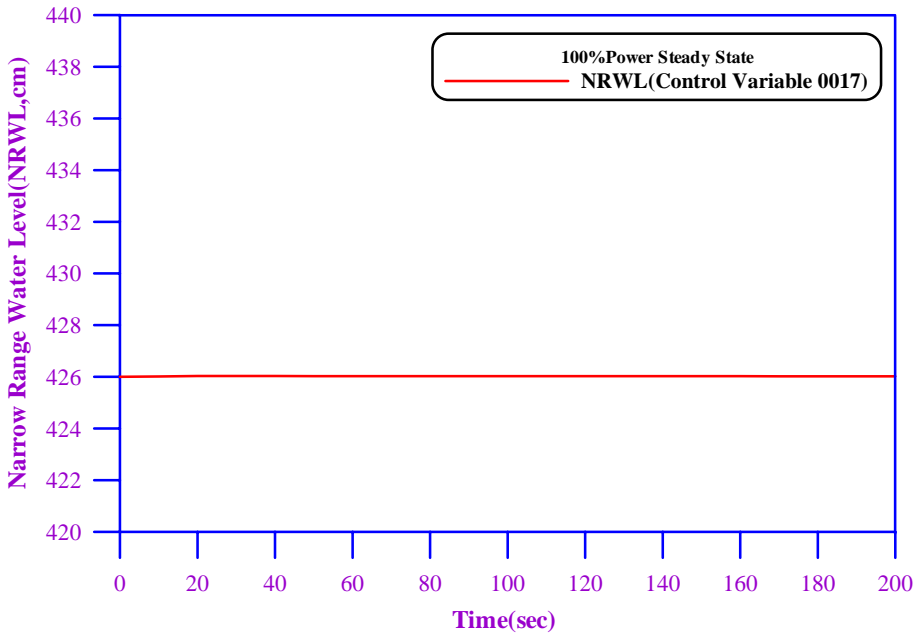


圖 4-3 反應器窄幅水位時變圖

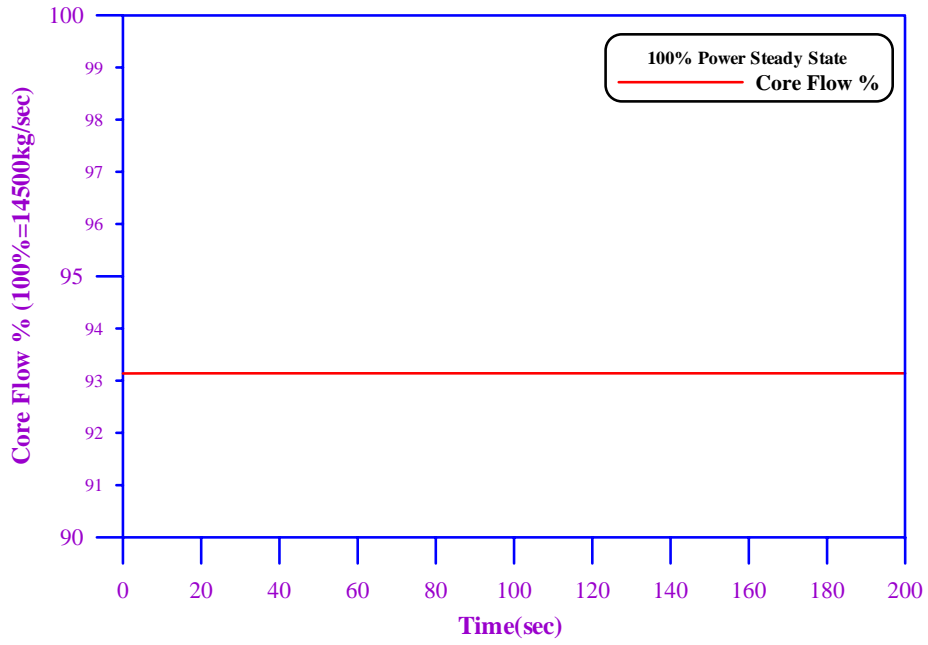


圖 4-4 反應器爐心流量時變圖

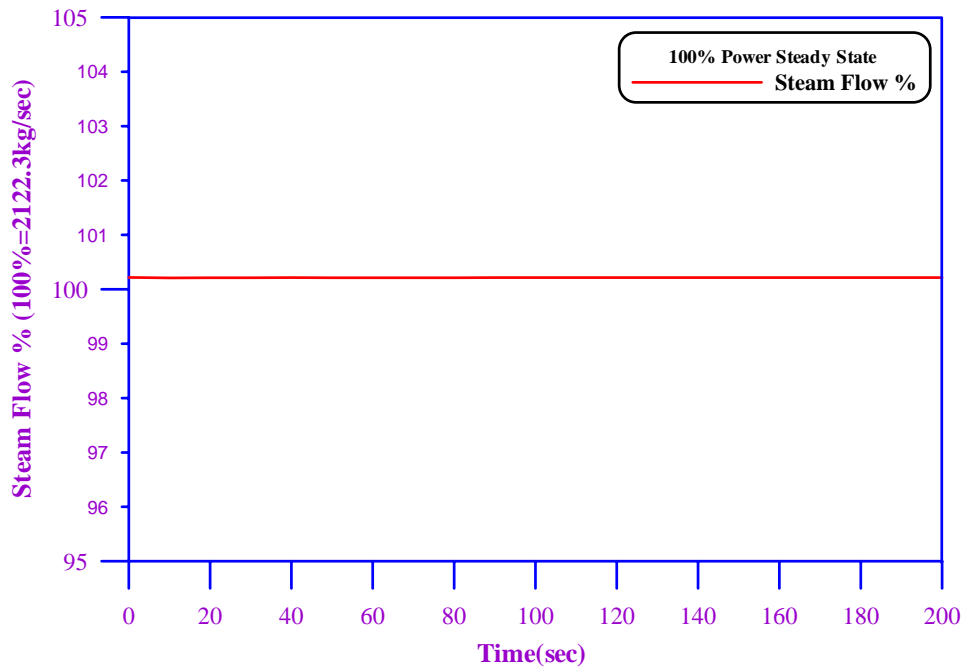


圖 4-5 反應器蒸汽流量時變圖

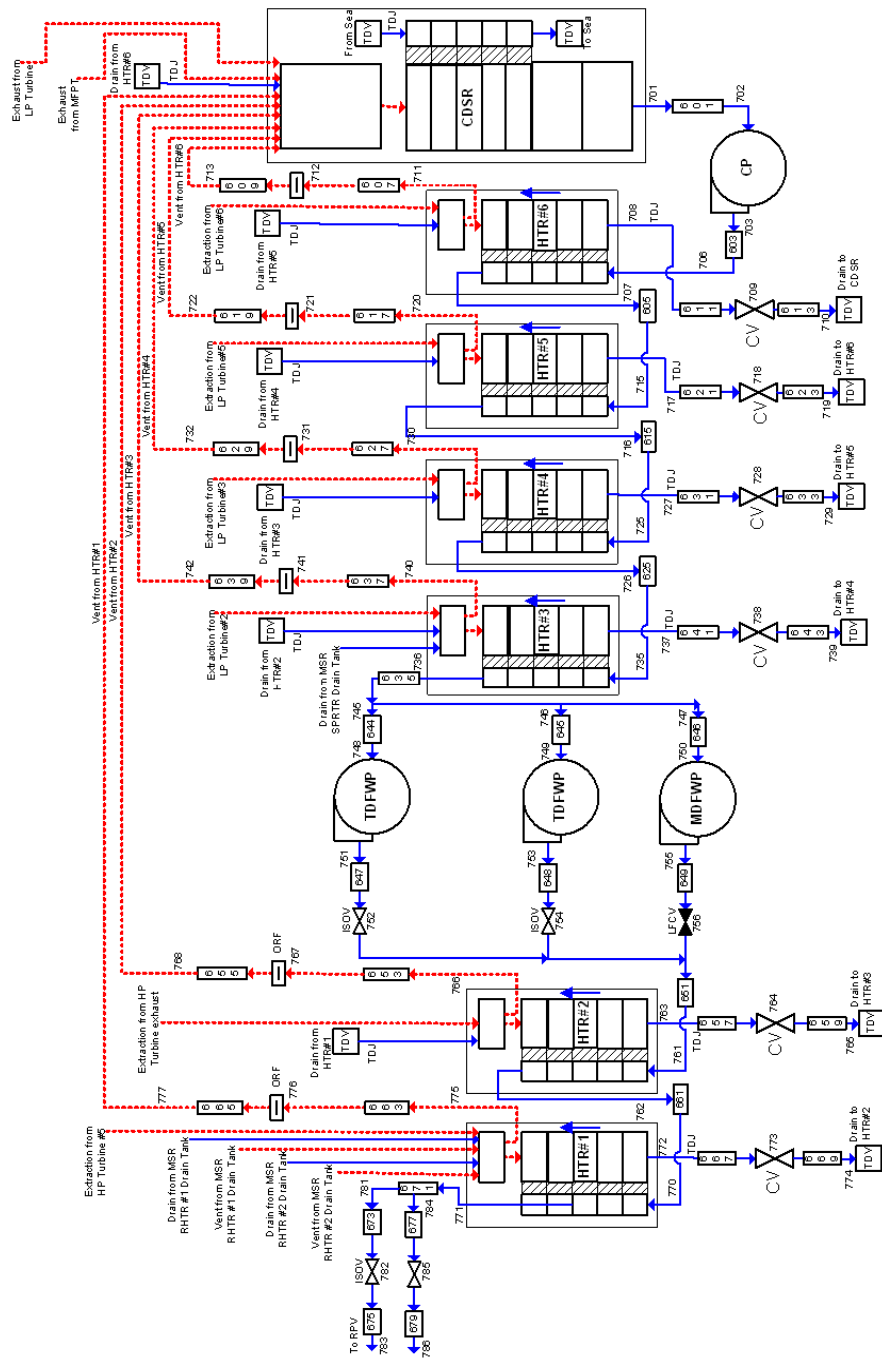


圖 5-1 飼水系統節點圖

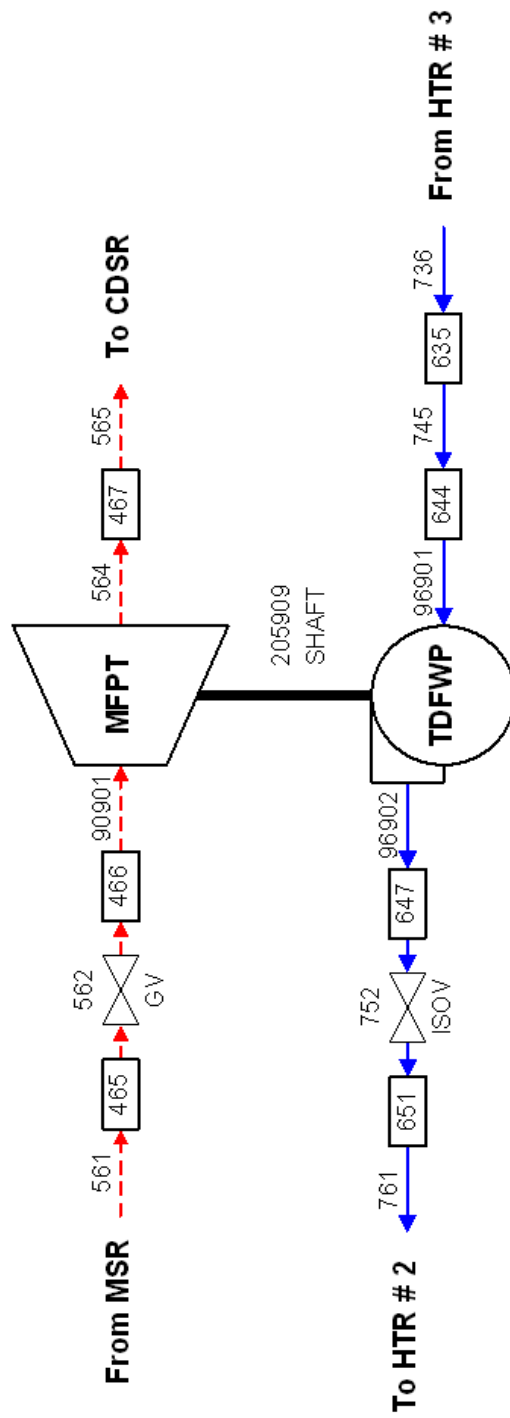


圖 5-2 飼水泵-飼水泵汽機模式節點圖

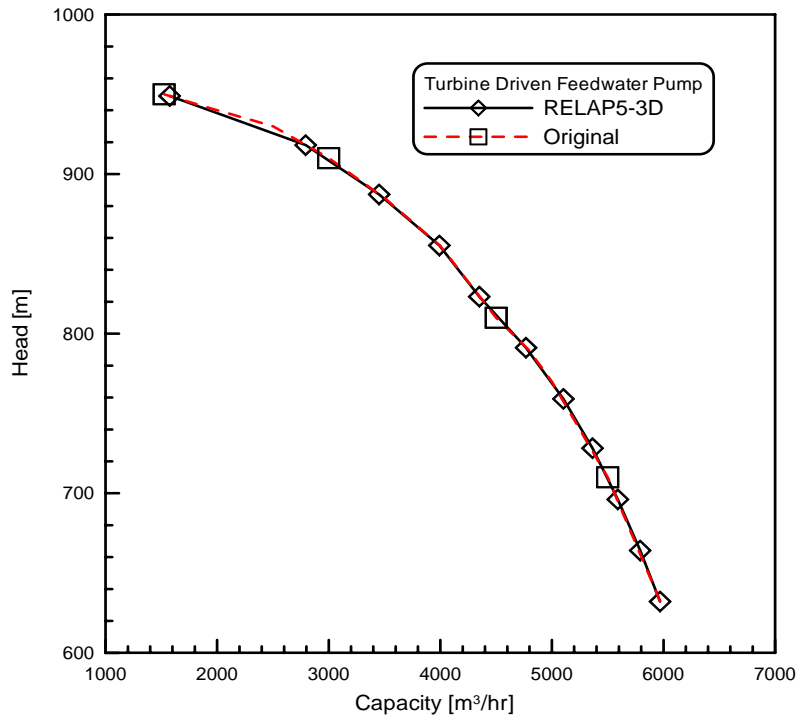


圖 5-3 飼水泵汽機模式性能驗證-水頭 vs.流量

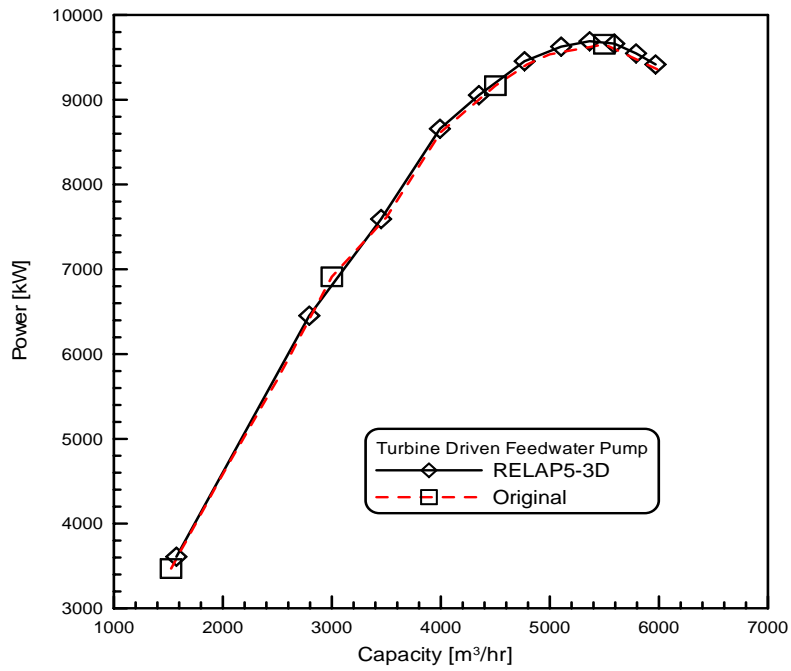


圖 5-4 飼水泵汽機模式性能驗證-功率 vs.流量

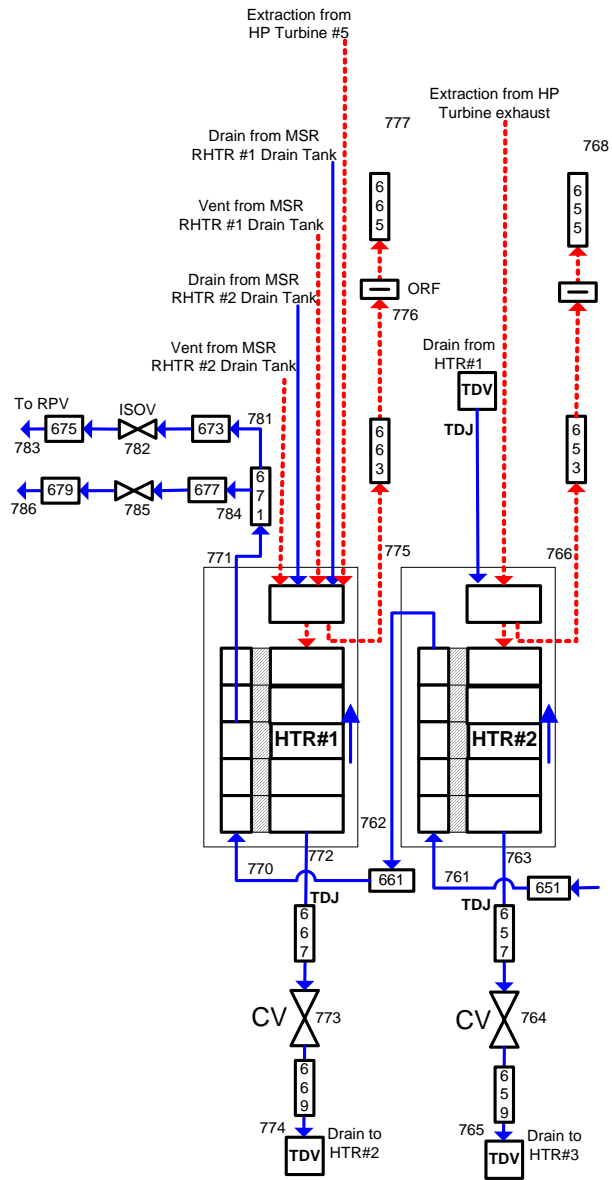


圖 5-5 高壓飼水加熱器的節點圖

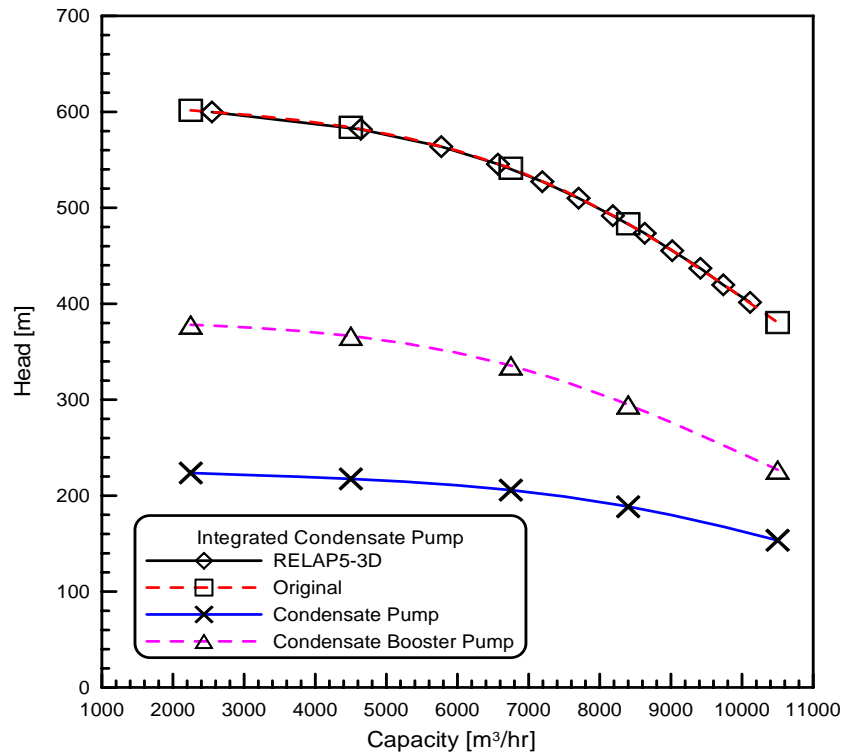


圖 5-6 冷凝泵和冷凝增壓泵性能驗證-水頭 vs. 流量

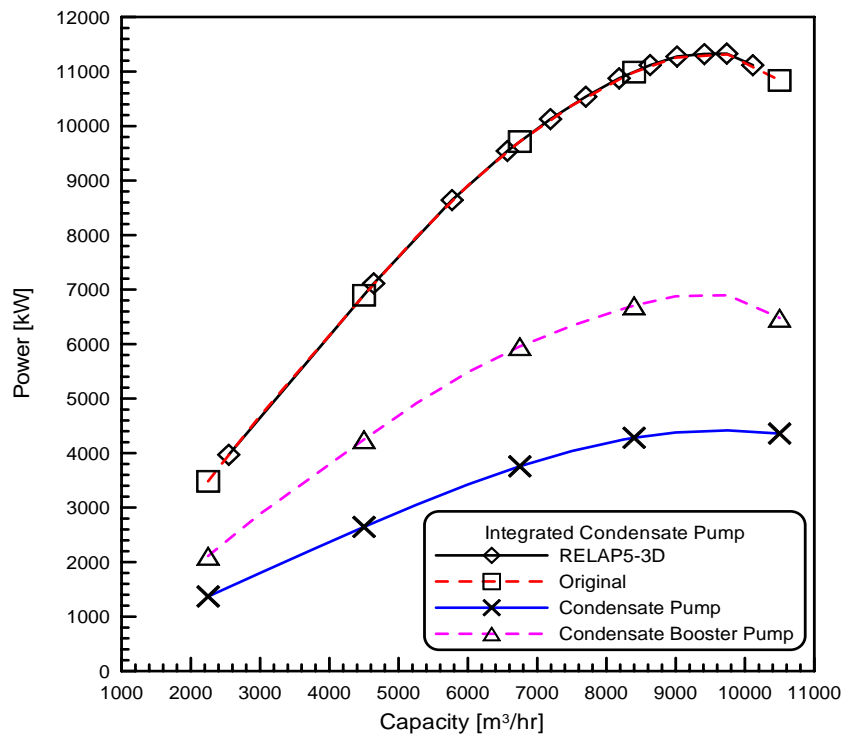


圖 5-7 冷凝泵和冷凝增壓泵性能驗證-功率 vs. 流量

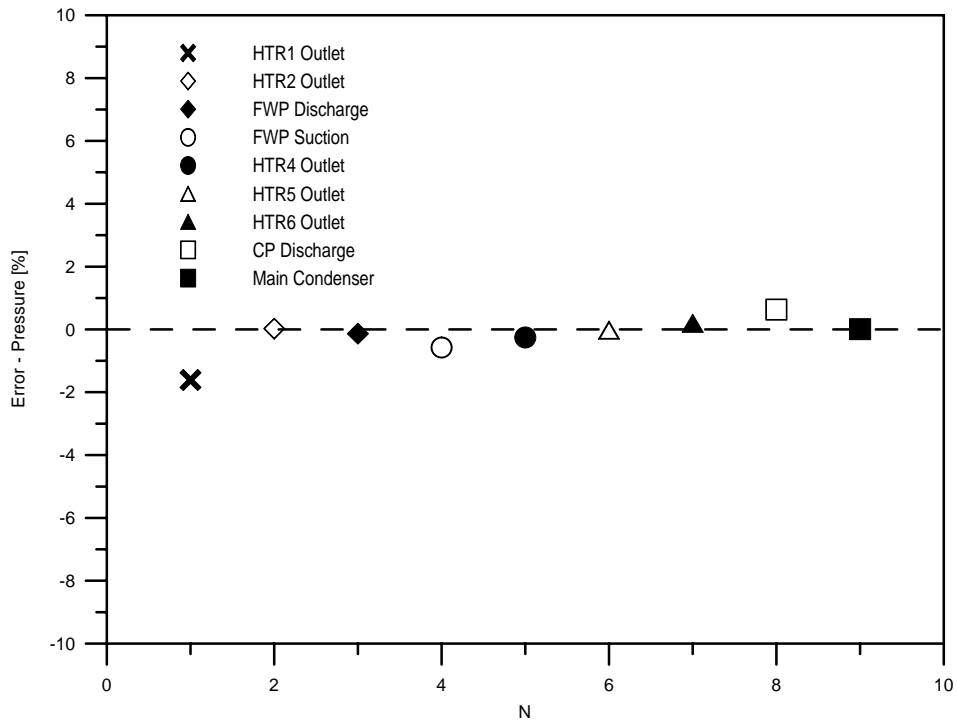


圖 5-8 飼水系統壓力誤差分析

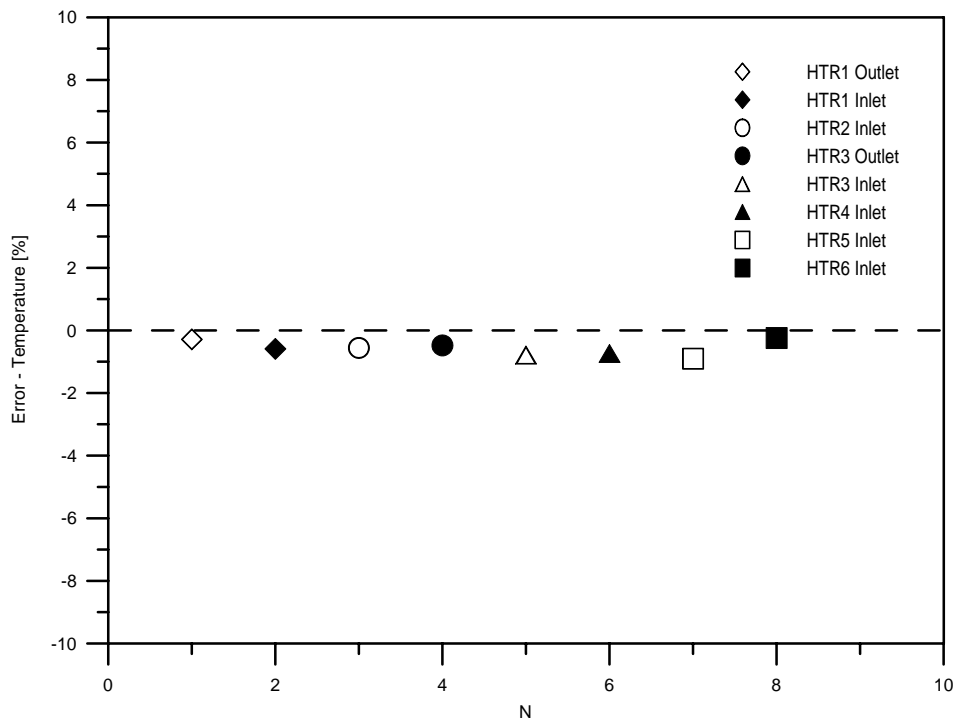


圖 5-9 飼水系統溫度誤差分析

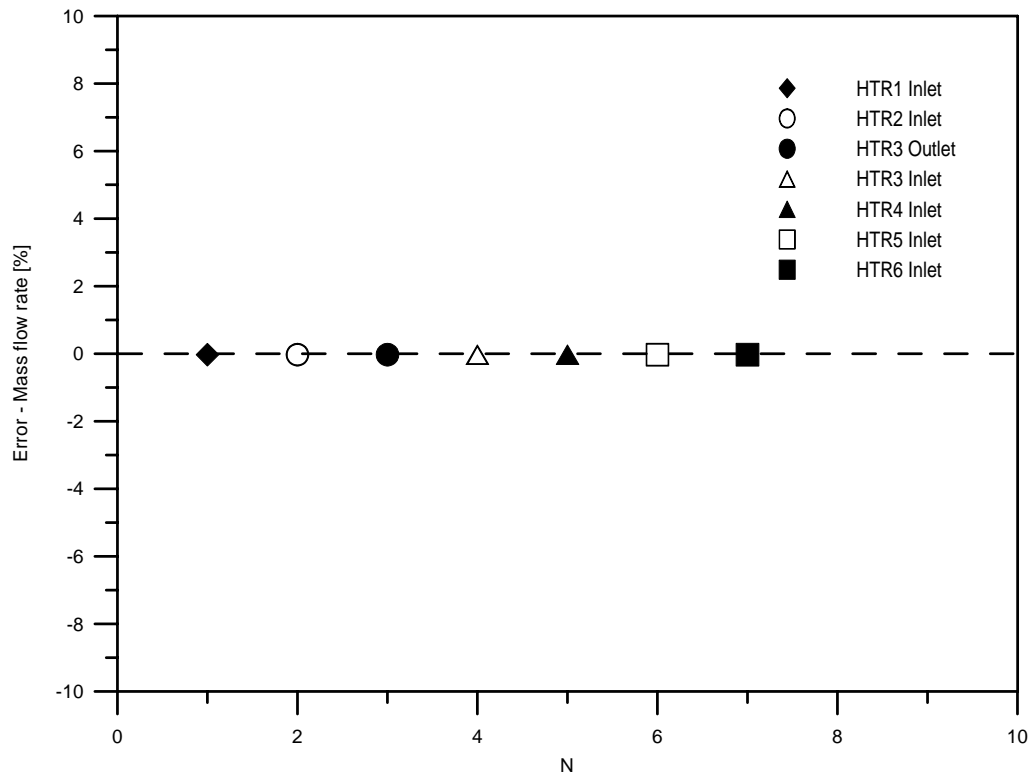


圖 5-10 飼水系統流量誤差分析

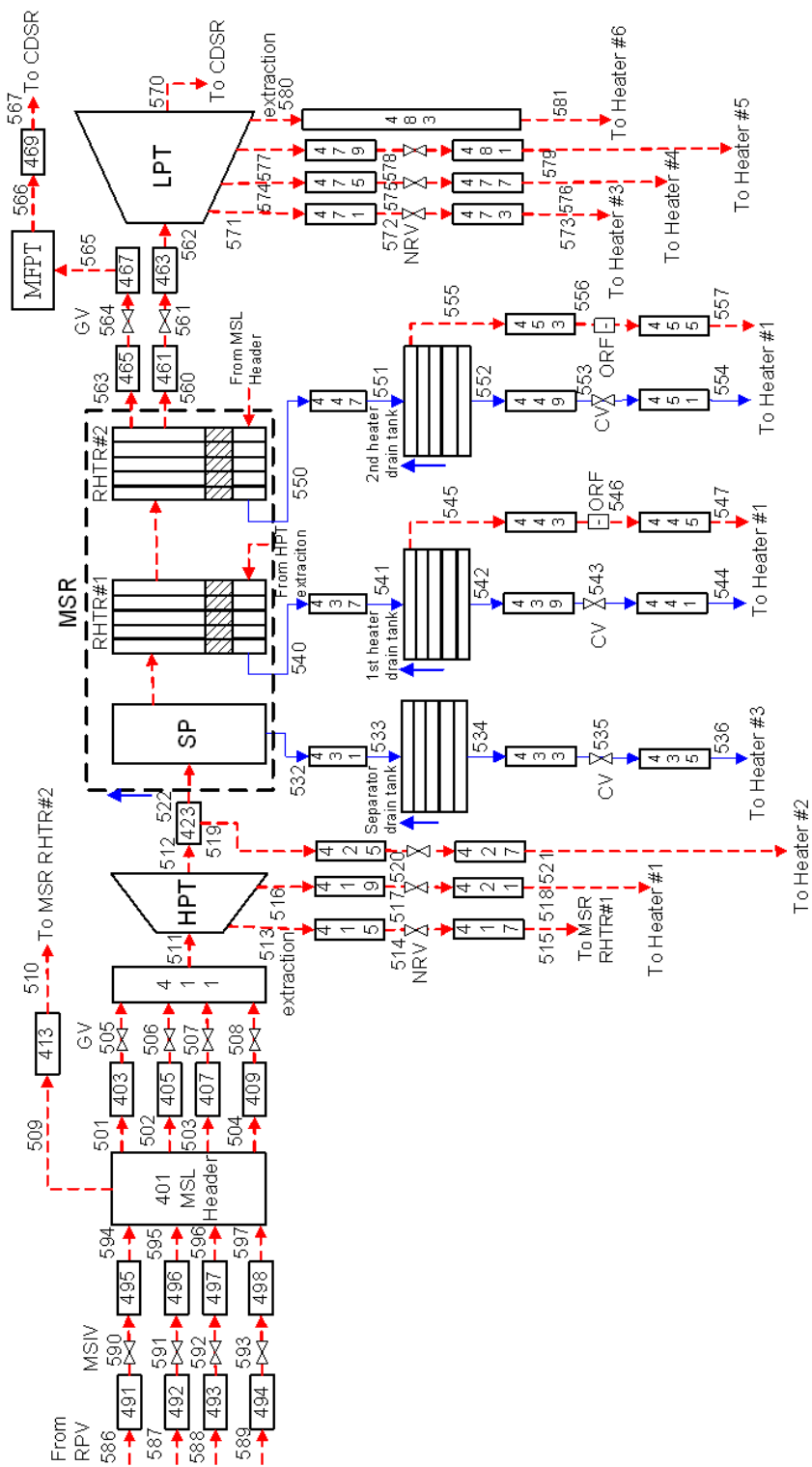


圖 5-11 主蒸汽系統節點圖

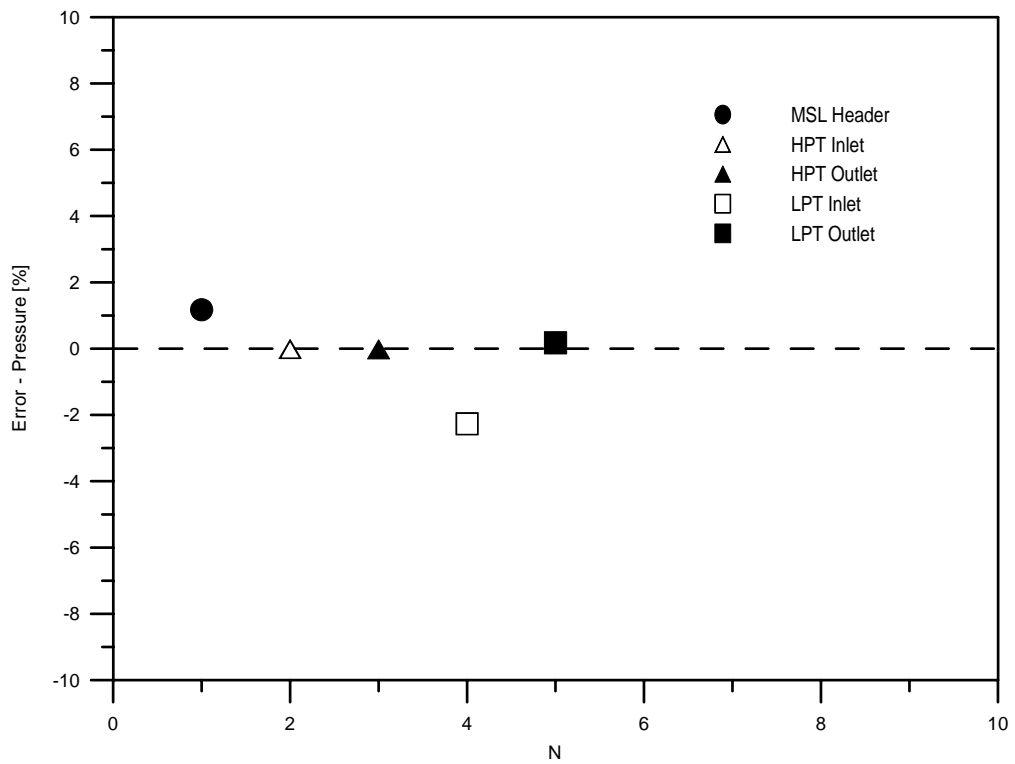


圖 5-12 主蒸汽系統壓力誤差分析

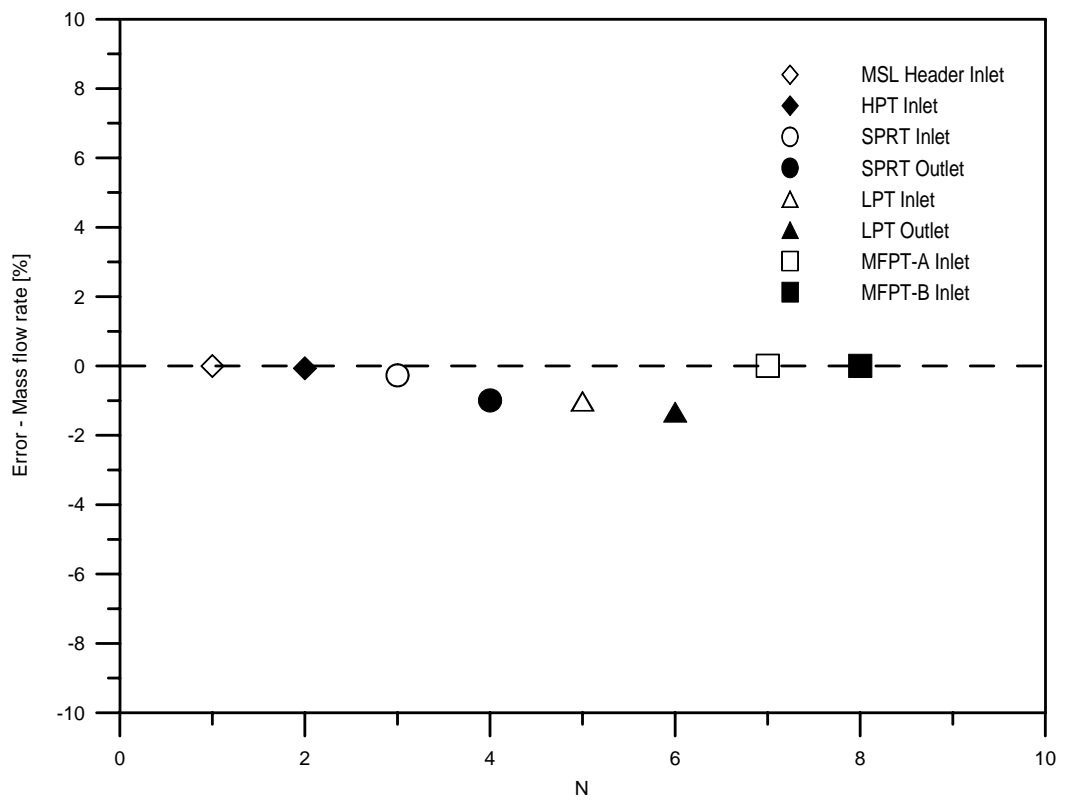


圖 5-13 主蒸汽系統流量誤差分析

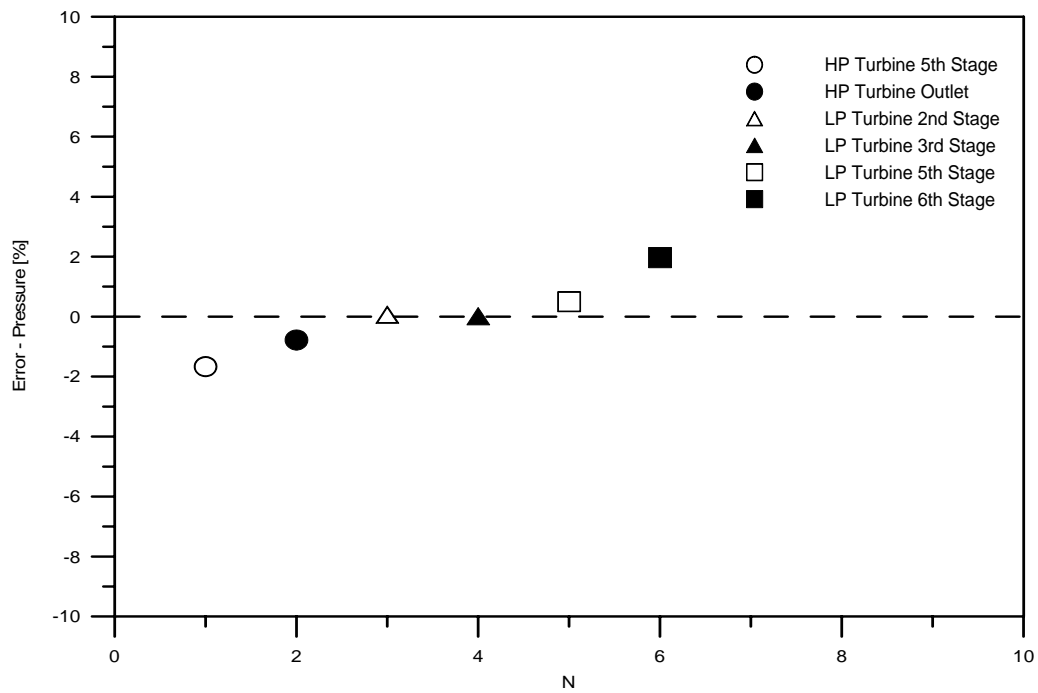


圖 5-14 蒸汽抽汽壓力誤差分析

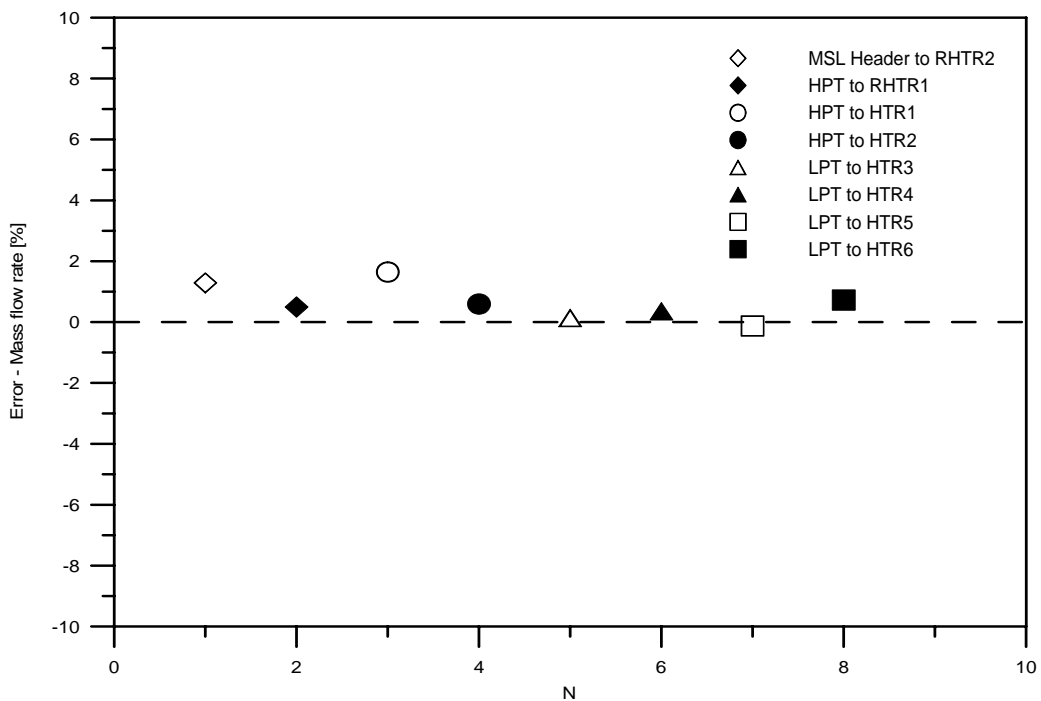


圖 5-15 蒸汽抽汽流量誤差分析

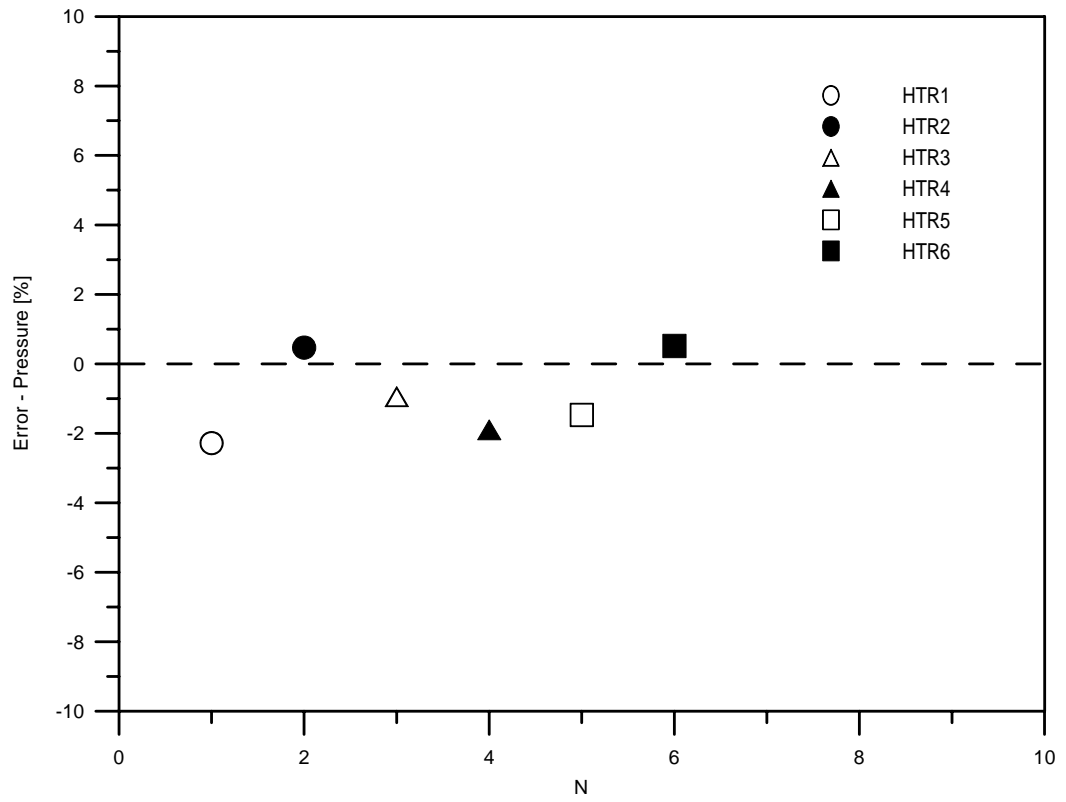
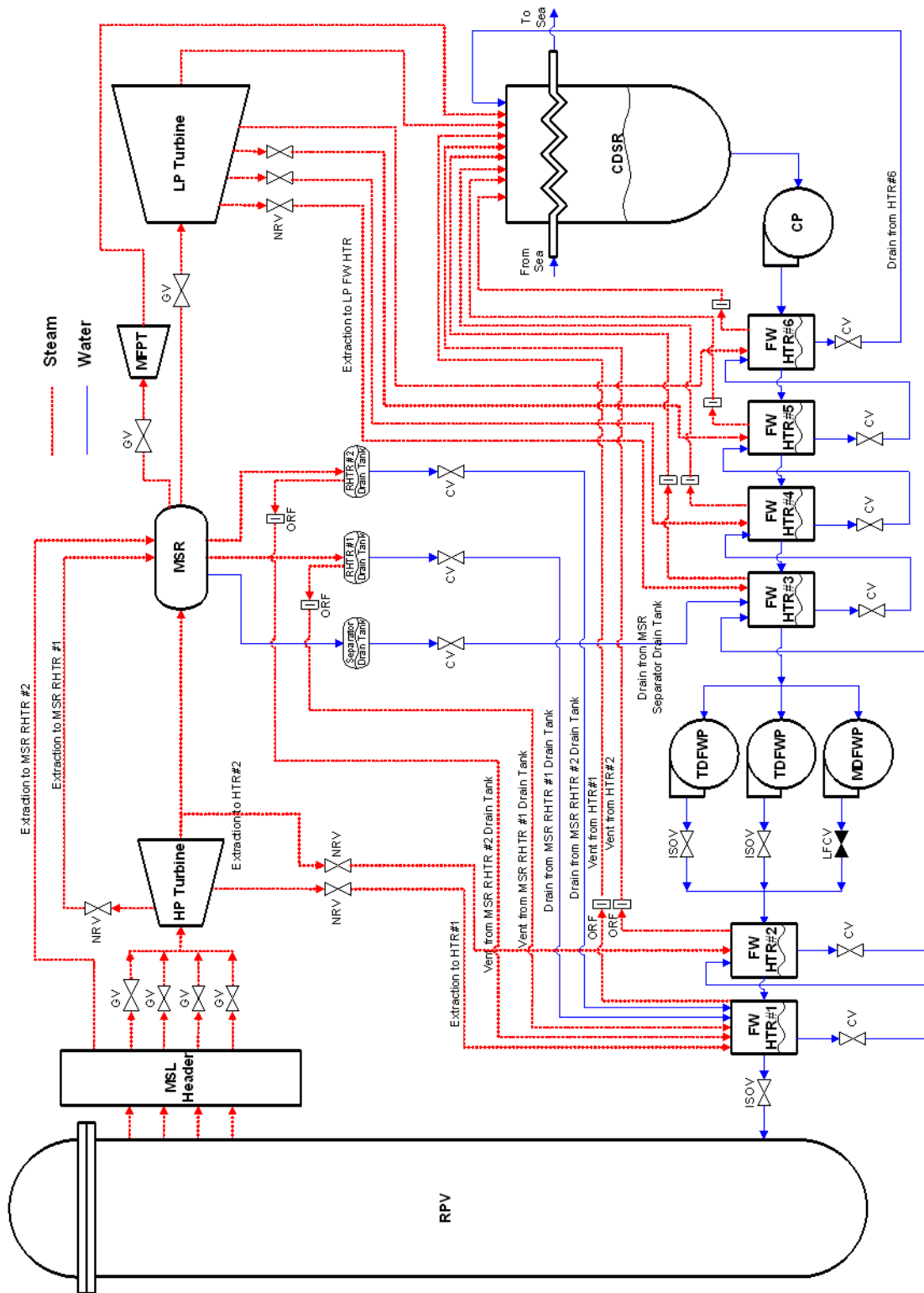


圖 5-16 飼水加熱器殼側壓力誤差分析



NPP4 System Simulation Diagram

圖 6-1 整廠系統(RPV+BOP)模擬範疇示意圖

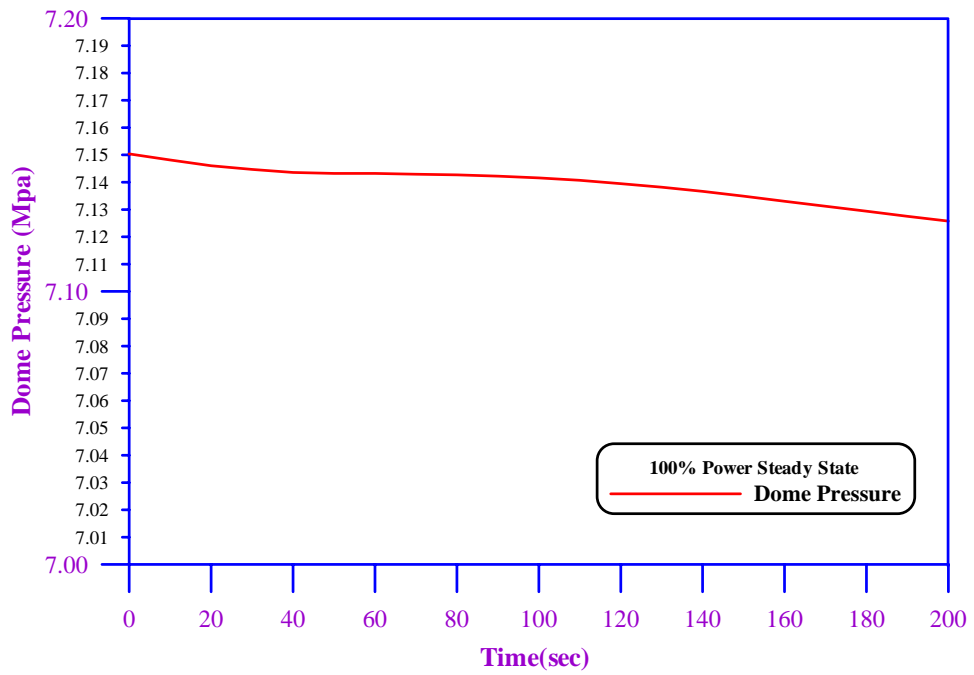


圖 6-2 反應器壓力槽壓力時變圖

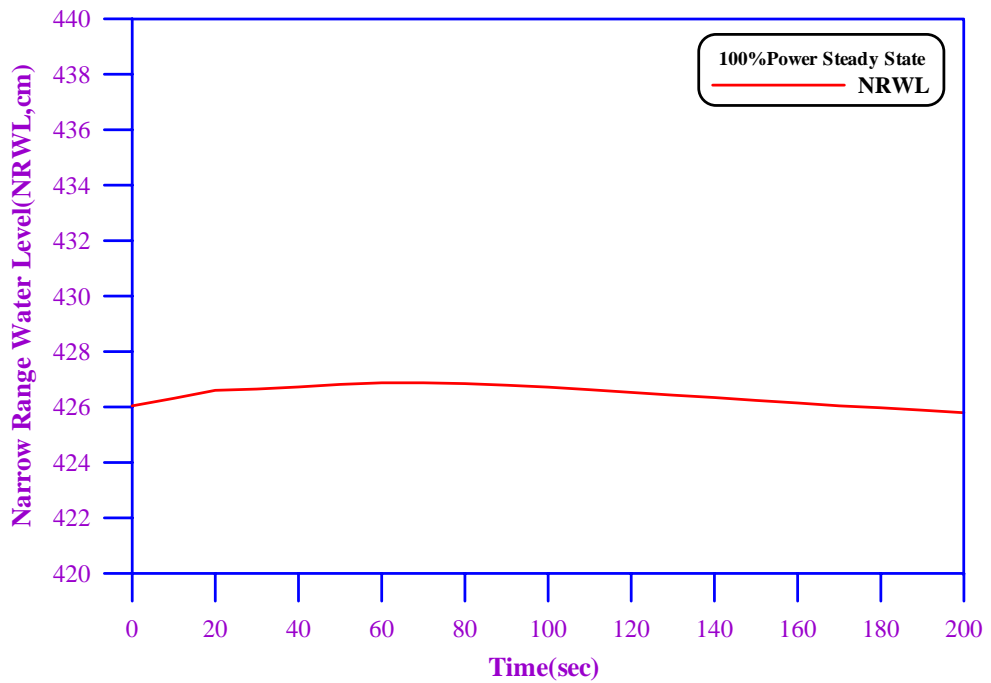


圖 6-3 反應器窄幅水位時變圖

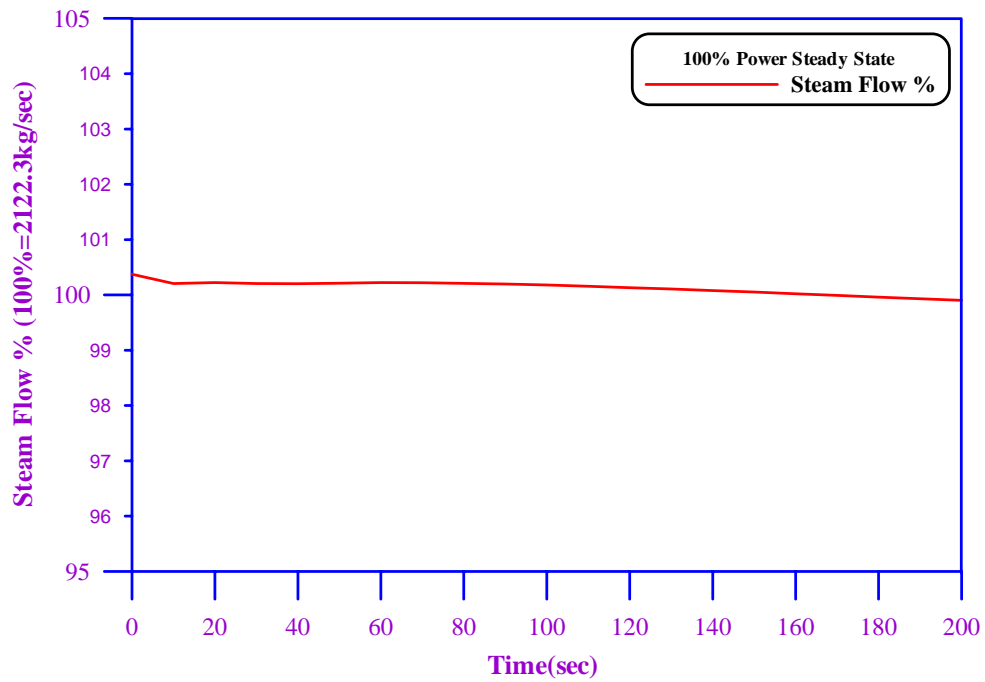


圖 6-4 反應器側(RPV)主蒸汽流量時變圖

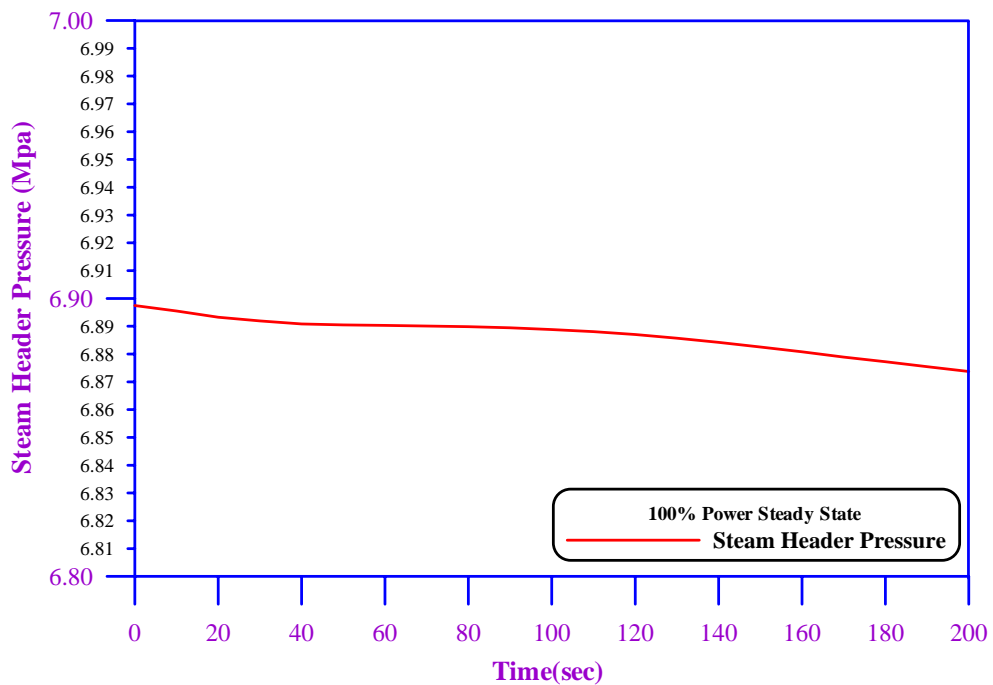


圖 6-5 電廠平衡系統側(BOP)主蒸汽集管壓力時變圖

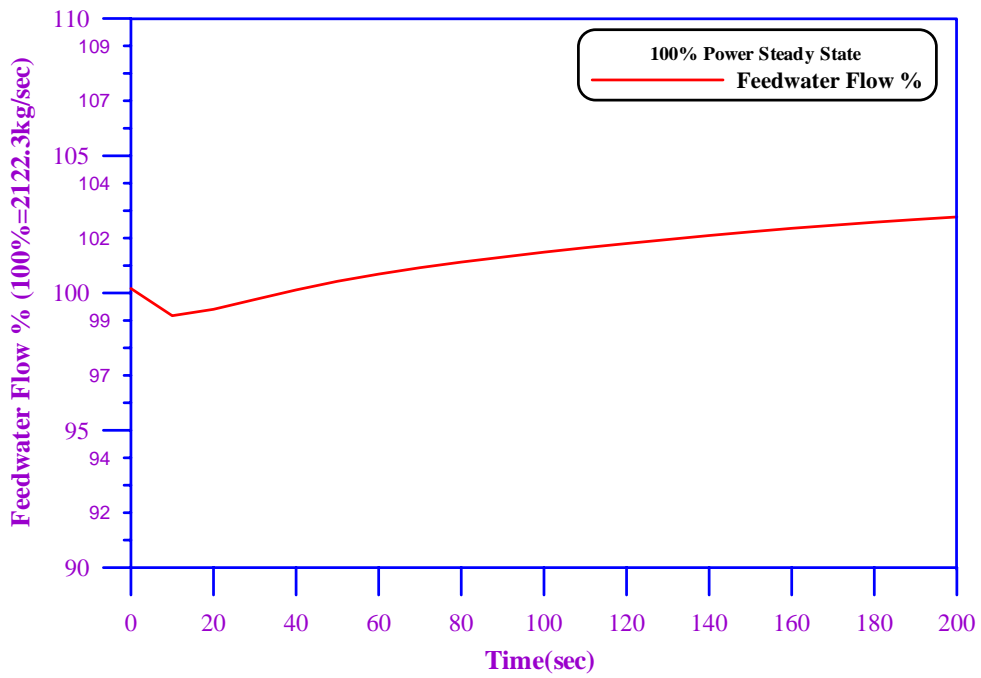


圖 6-6 電廠平衡系統側(BOP)飼水流量時變圖

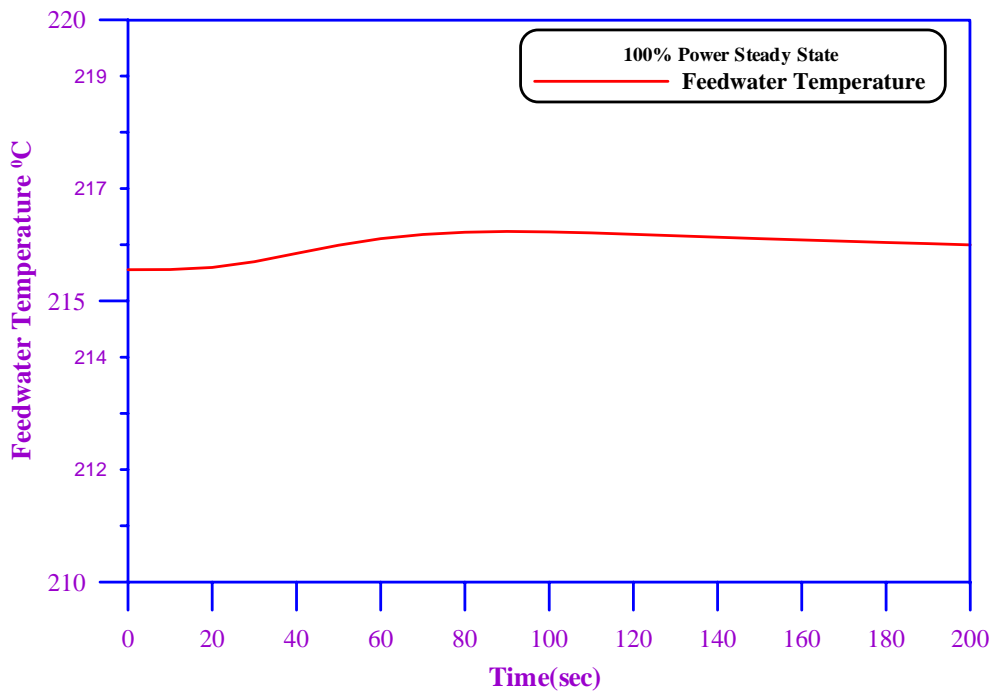


圖 6-7 電廠平衡系統側(BOP)飼水溫度時變圖

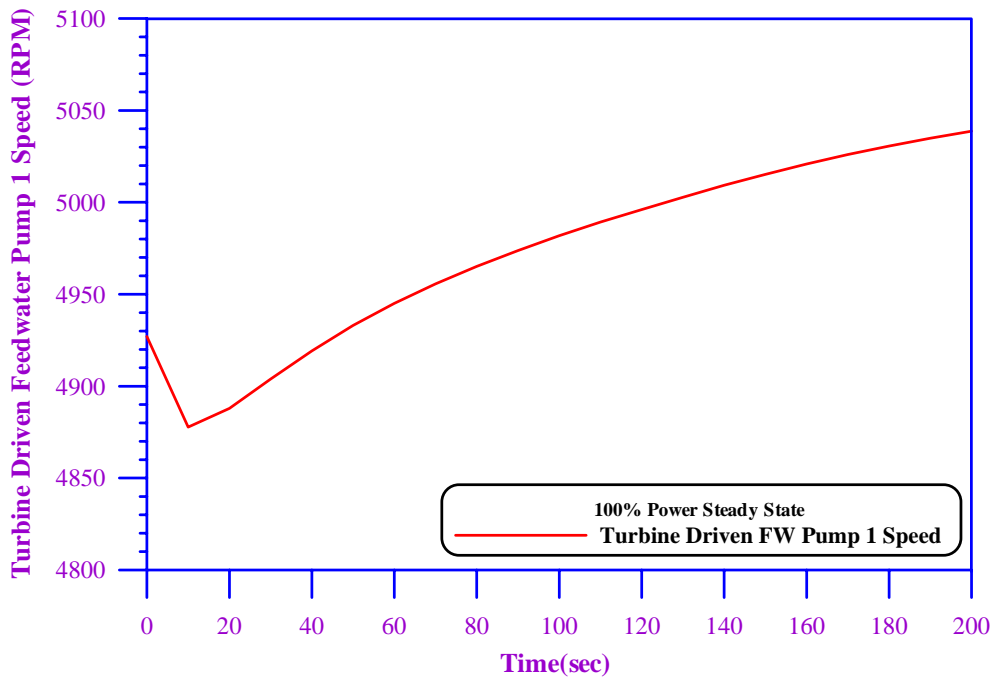


圖 6-8 電廠平衡系統側(BOP)飼水泵 1 轉速時變圖

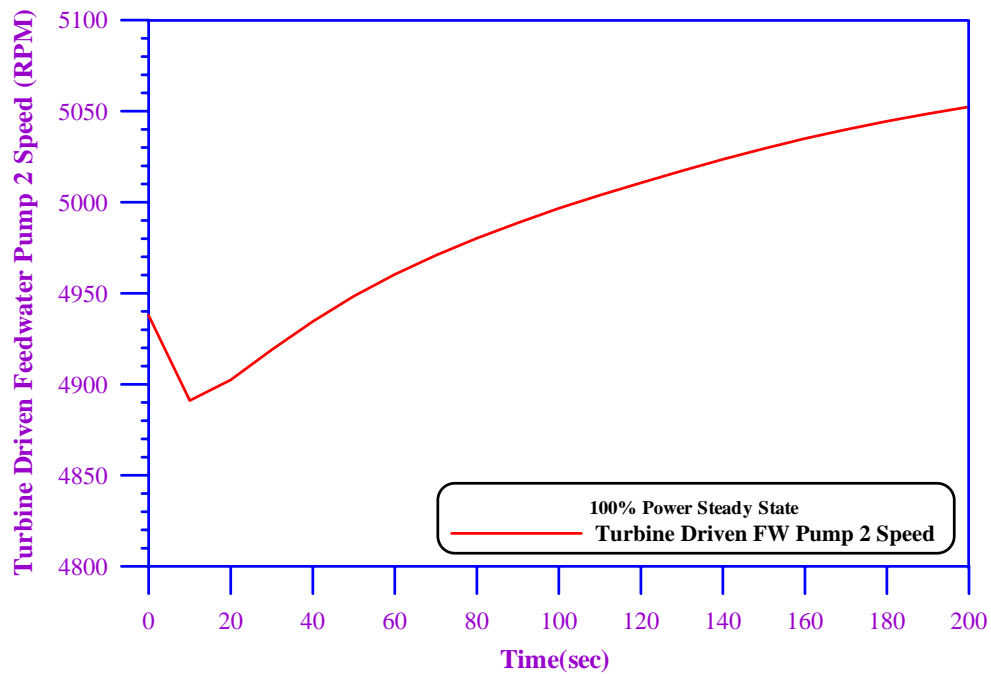


圖 6-9 電廠平衡系統側(BOP)飼水泵 2 轉速時變圖

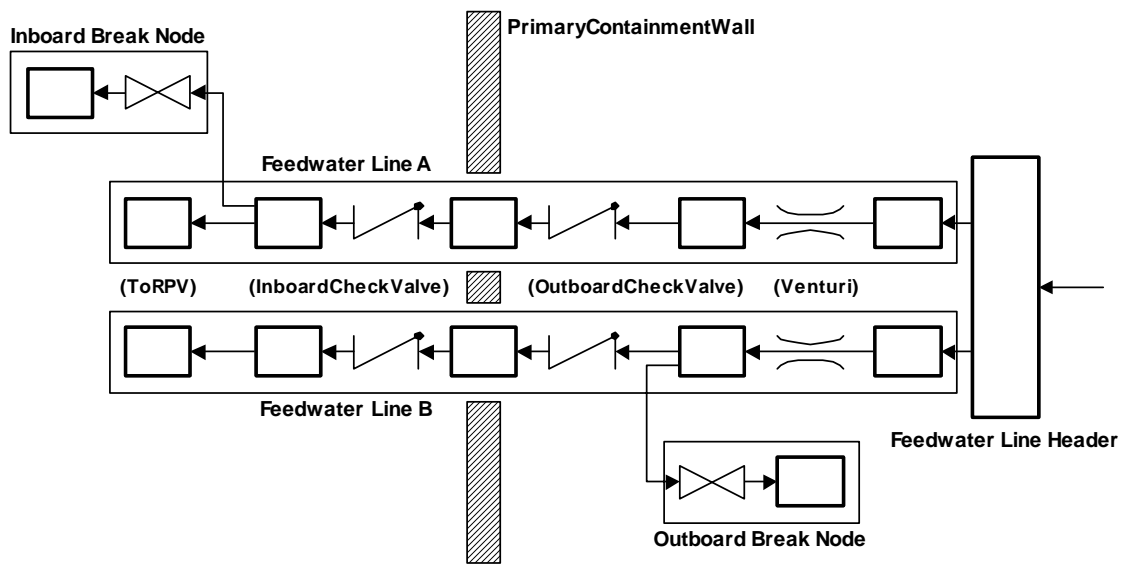


圖 7-1 圍阻體內側及外側破管模擬節點圖

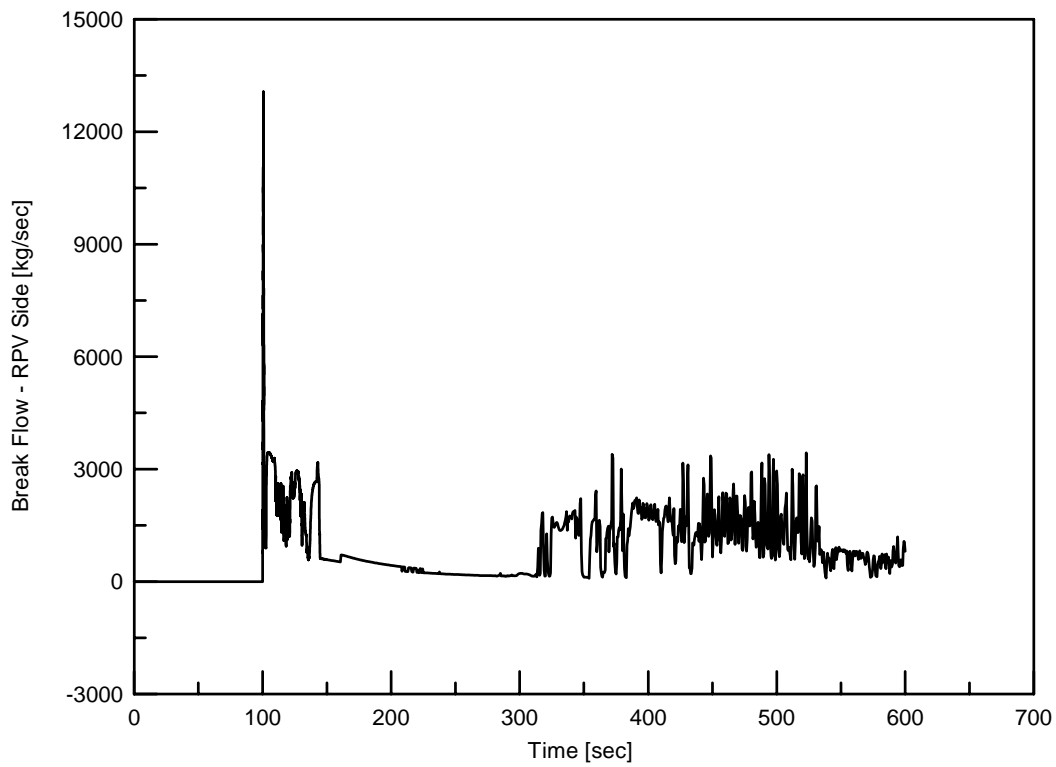


圖 8-1 RPV 側斷管流

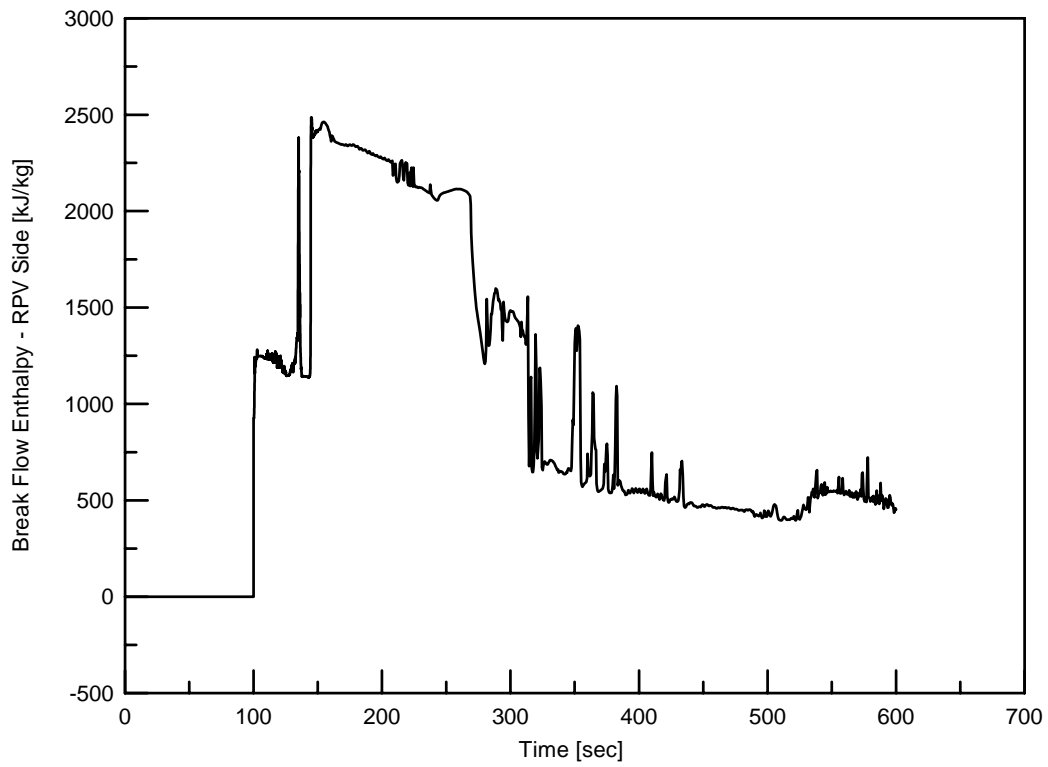


圖 8-2 RPV 側斷管焓

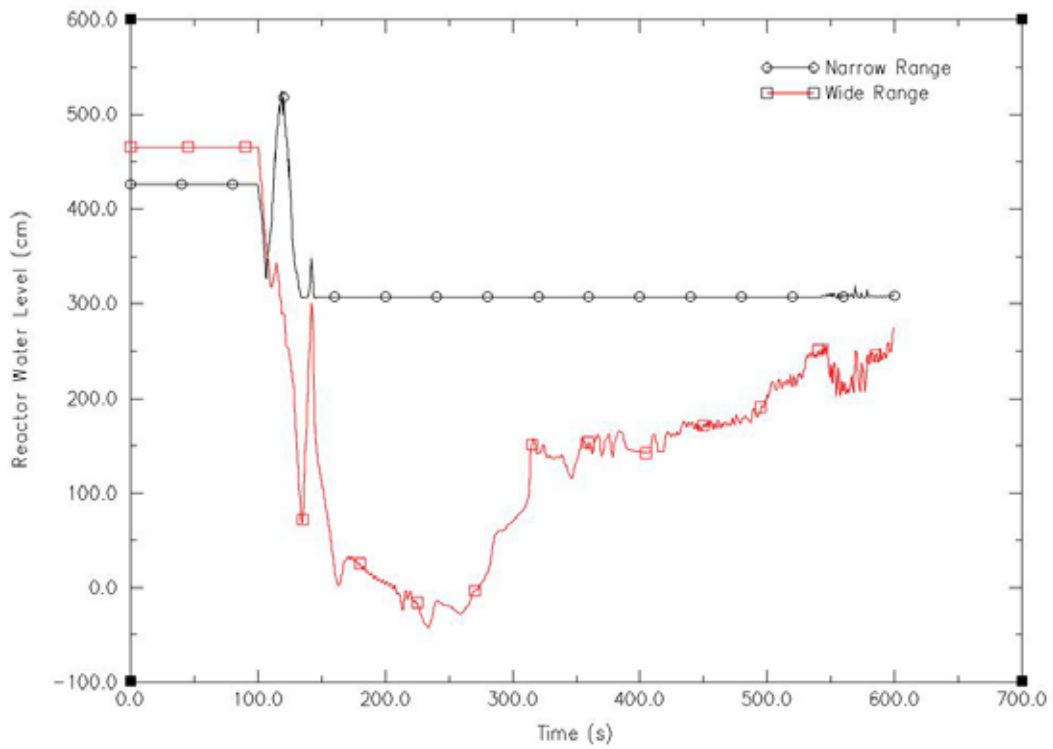


圖 8-3 爐心水位

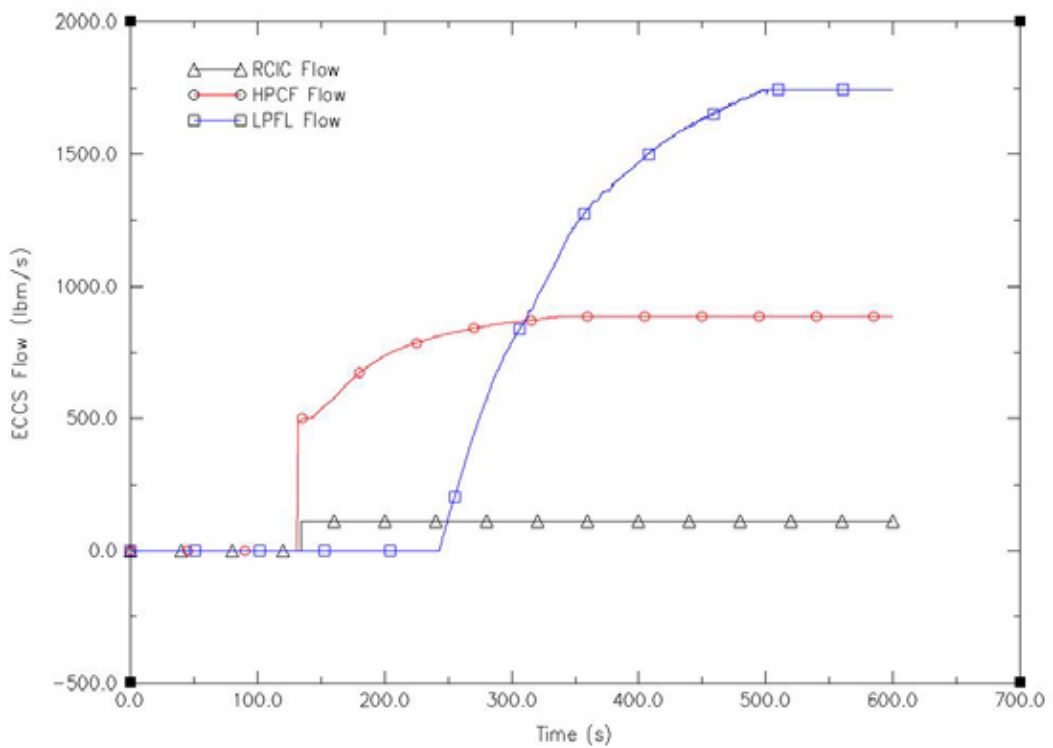


圖 8-4 ECC 注水流量

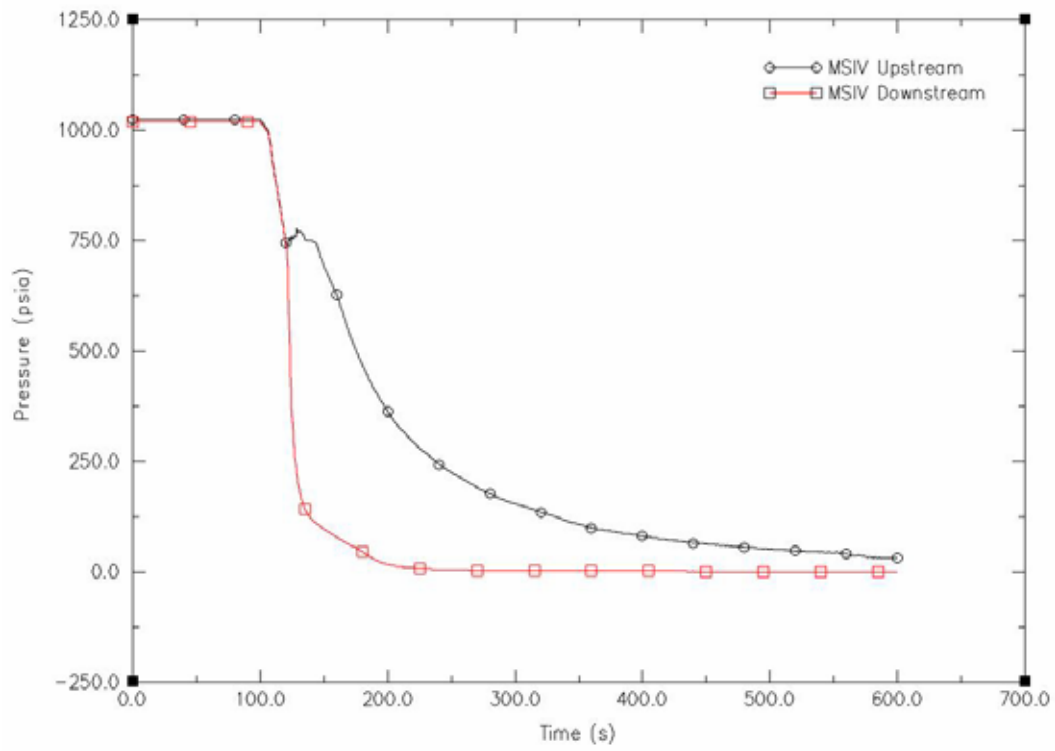


圖 8-5 MSIV 前後壓力

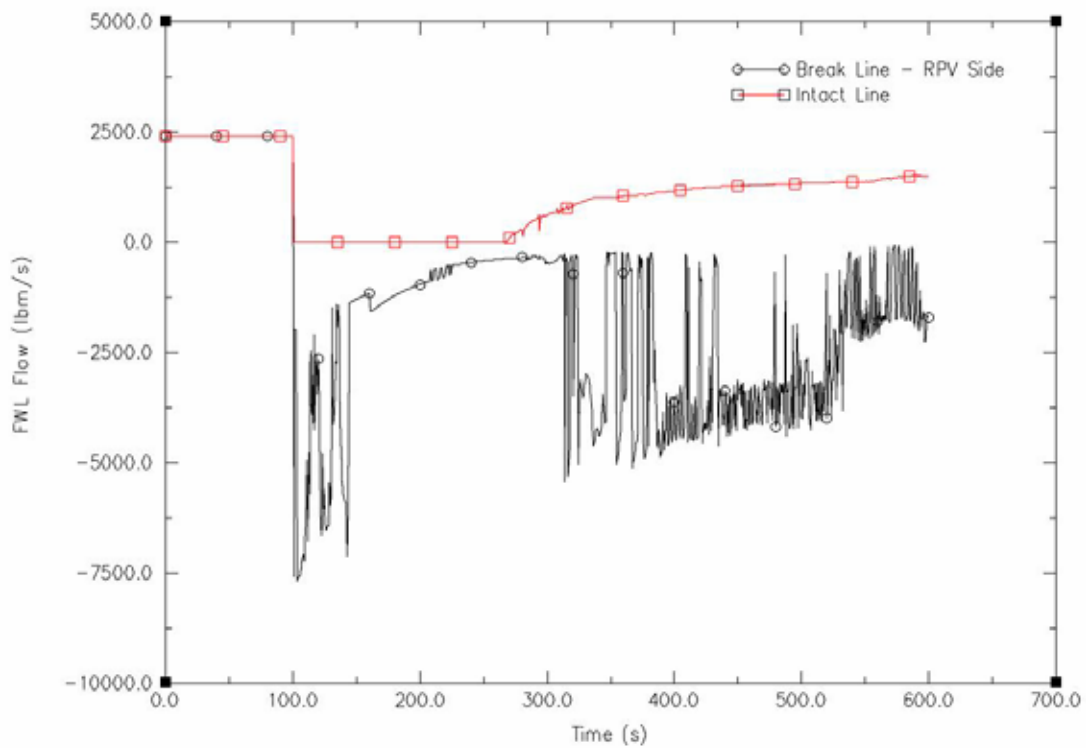


圖 8-6 完整和破管飼水管路流量

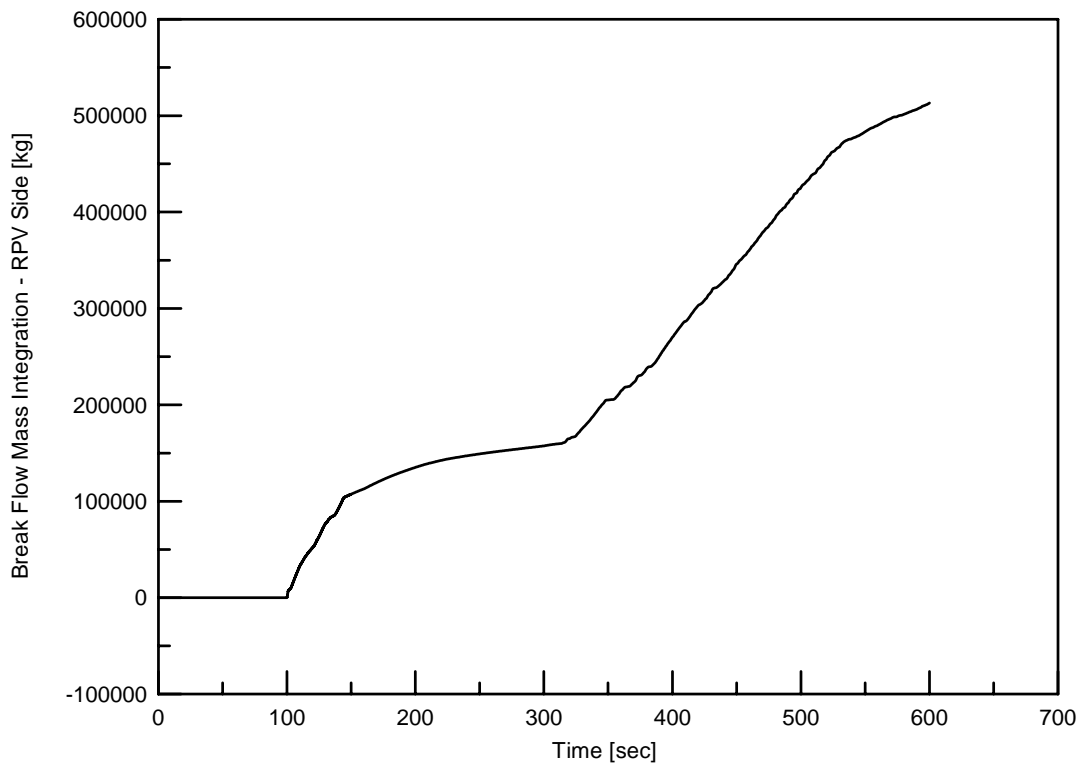


圖 8-7 RPV 側累積沖放儲水

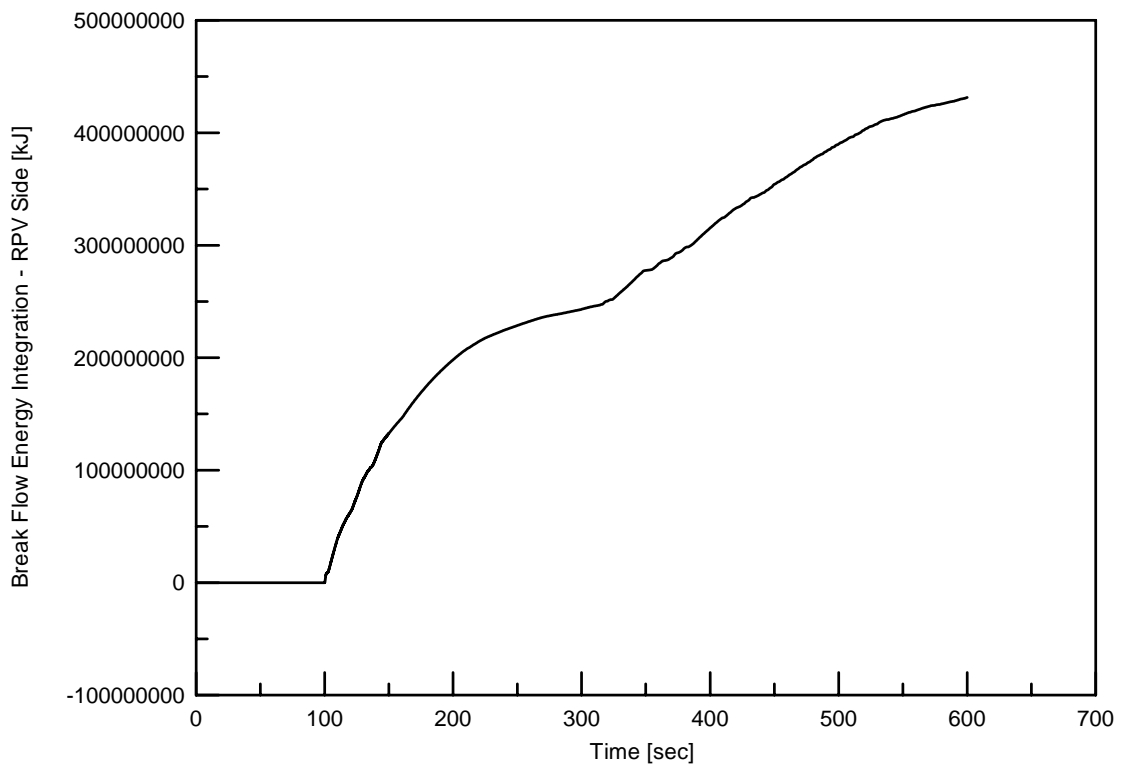


圖 8-8 RPV 側累積沖放能量

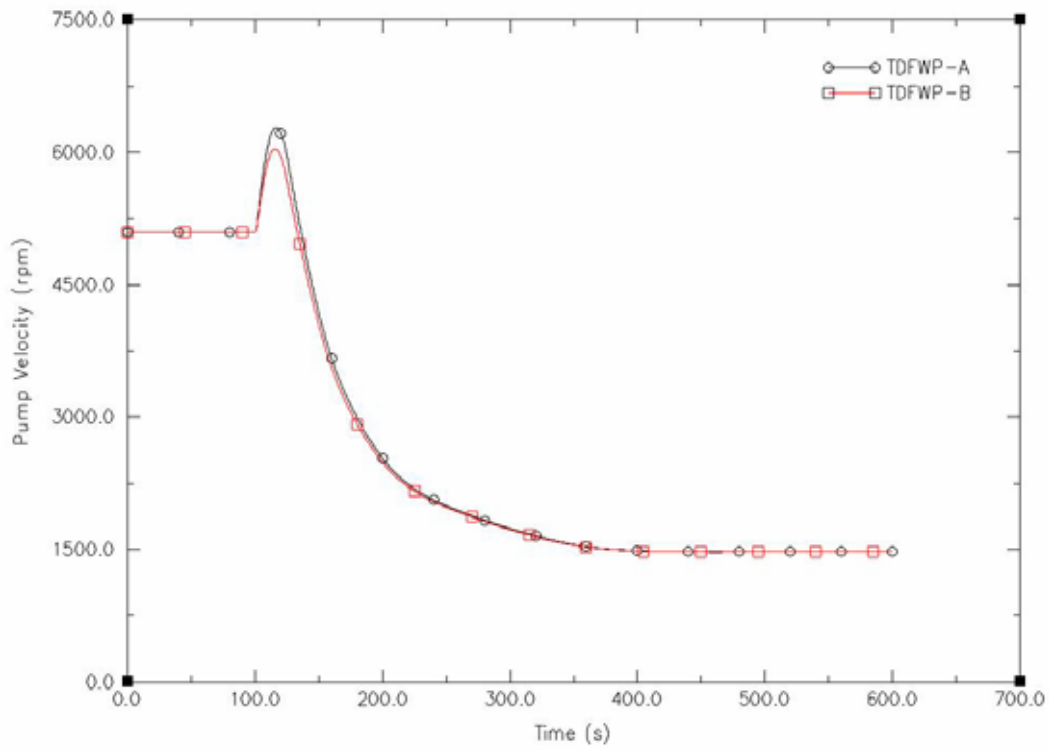


圖 8-9 飼水泵脫羈速度

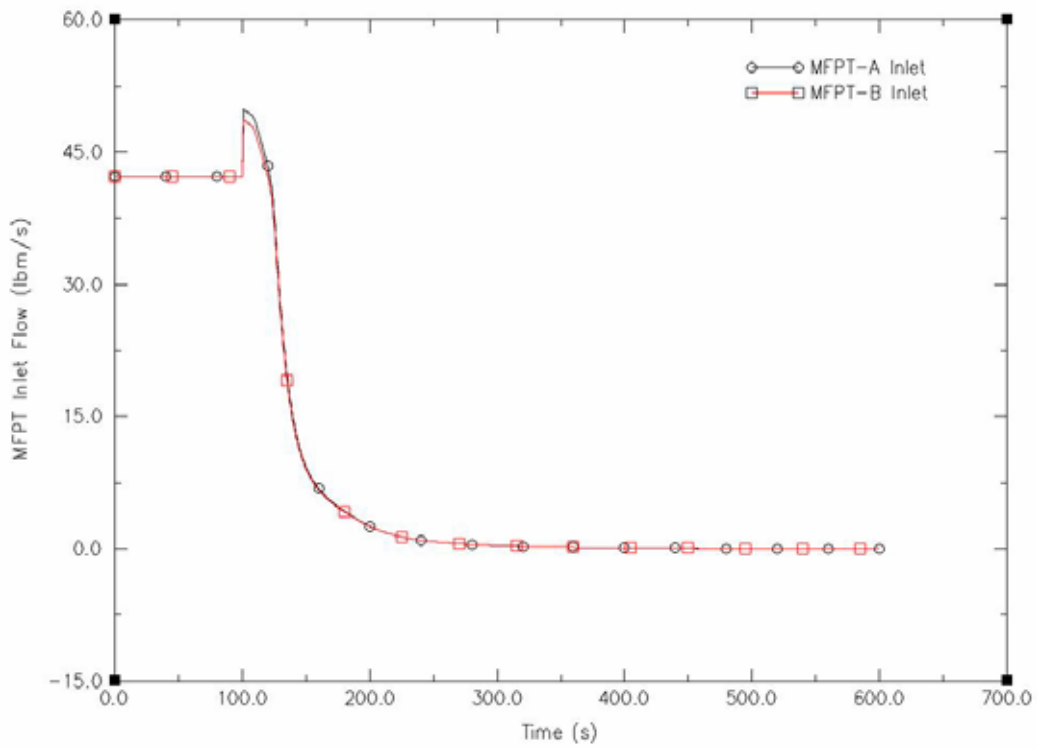


圖 8-10 FWPT 入口蒸氣流量

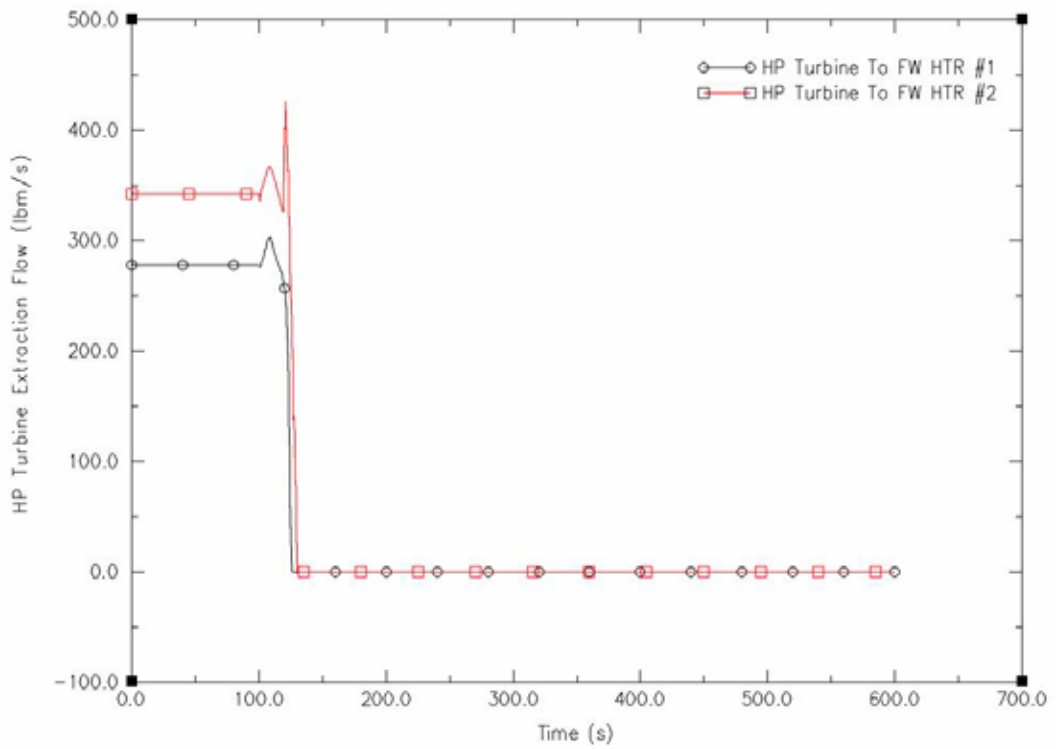


圖 8-11 高壓汽機蒸汽抽汽

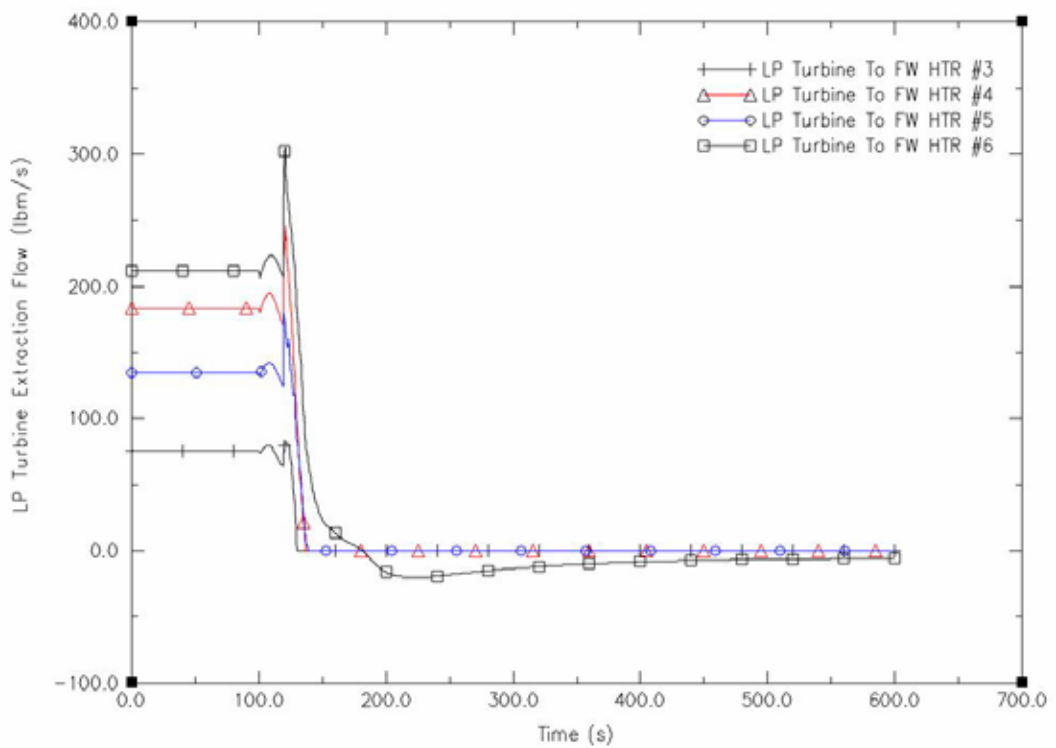


圖 8-12 低壓汽機蒸汽抽汽

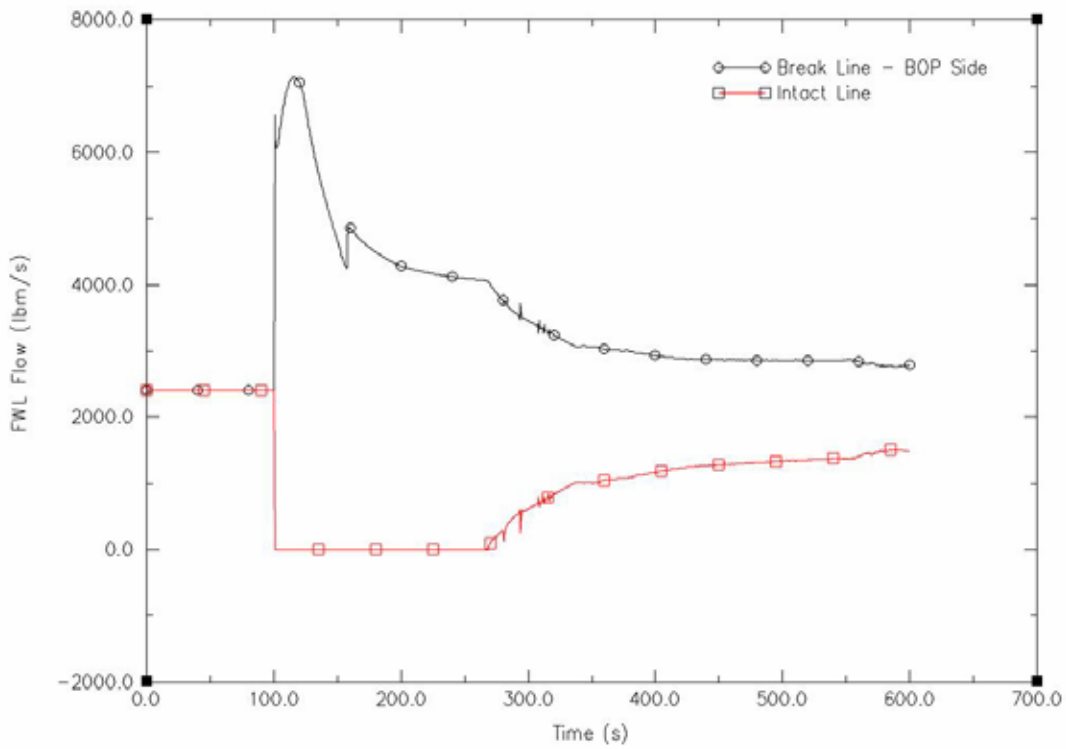


圖 8-13 經由完整和破管飼水管路流量

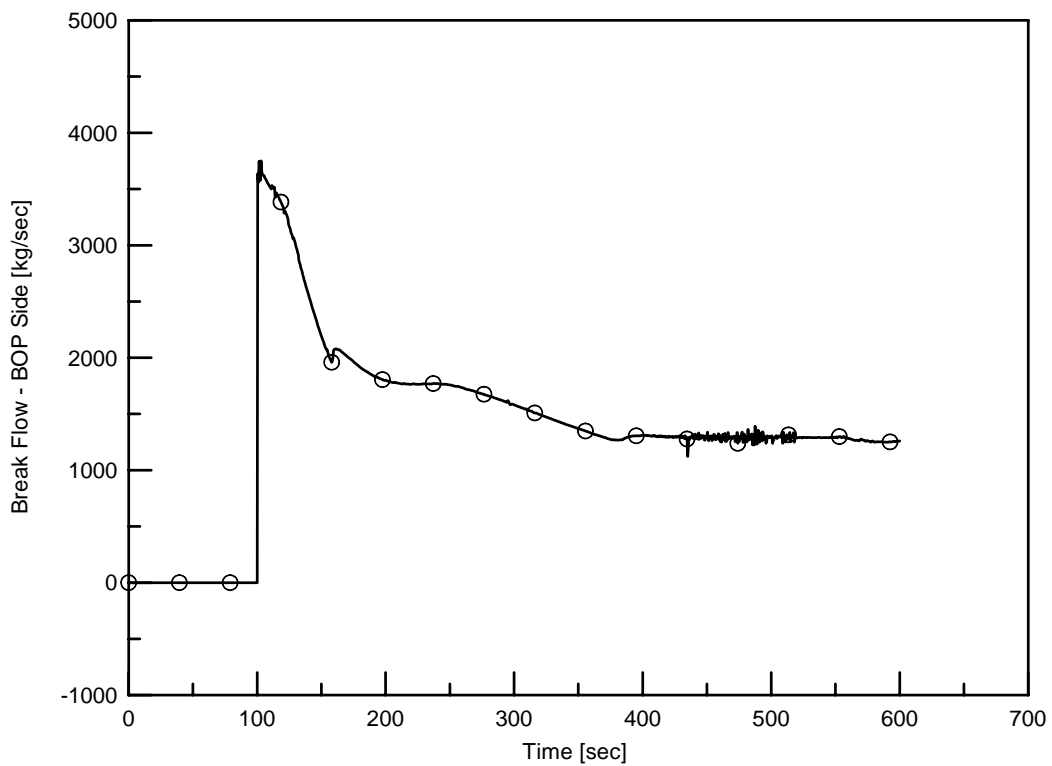


圖 8-14 BOP 沖放流量

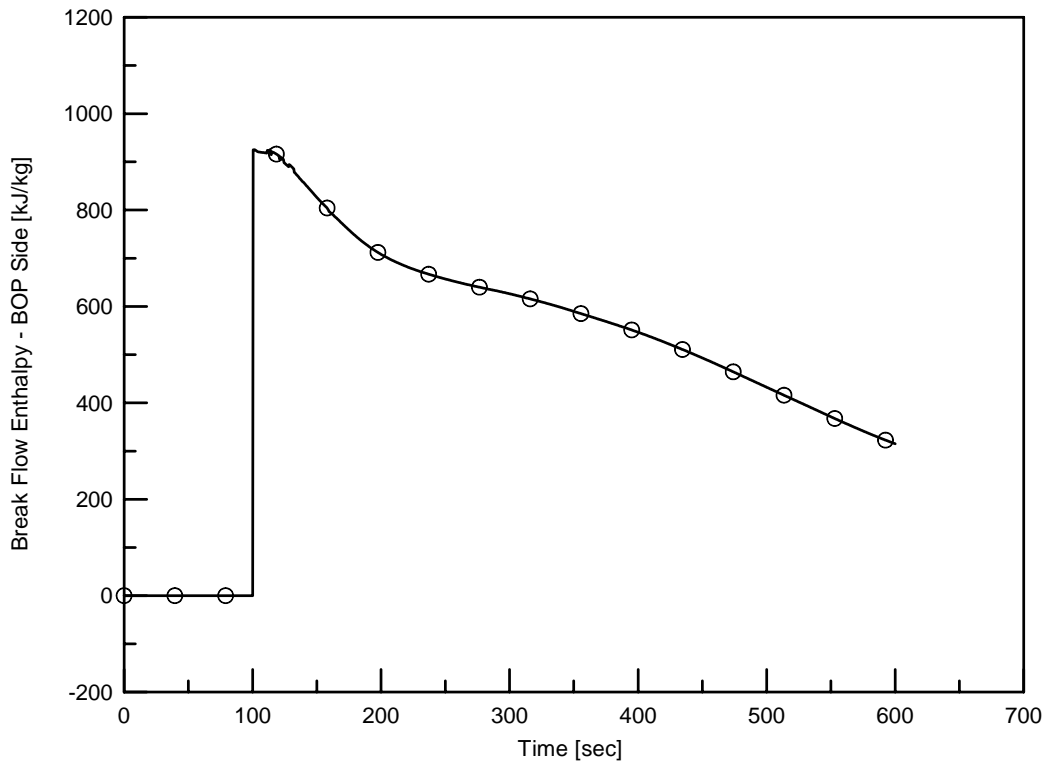


圖 8-15 BOP 沖放焓

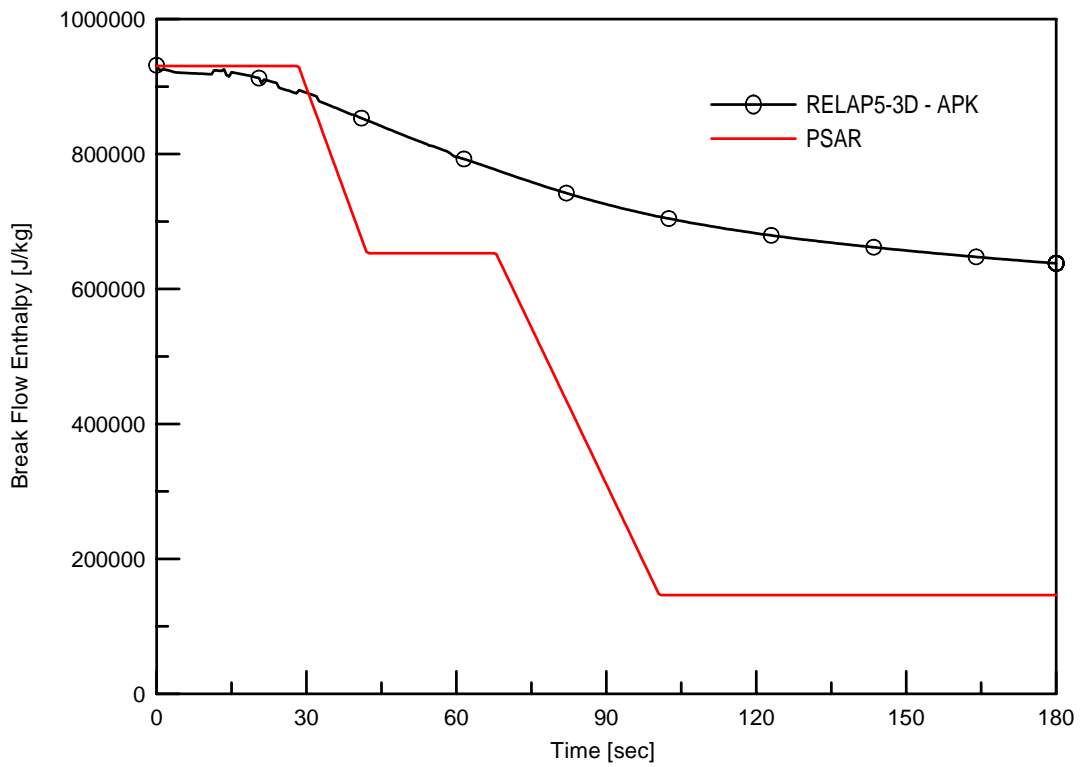


圖 8-16 BOP 沖放焓和 PSAR 結果比較

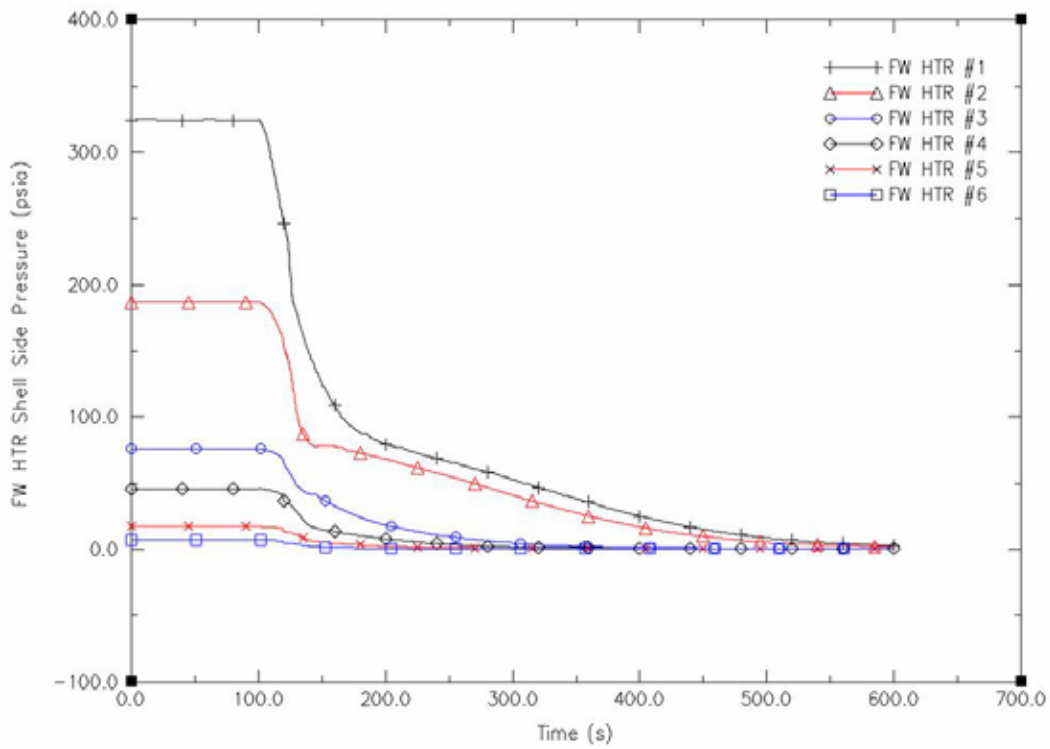


圖 8-17 飼水加熱器殼側壓力比較

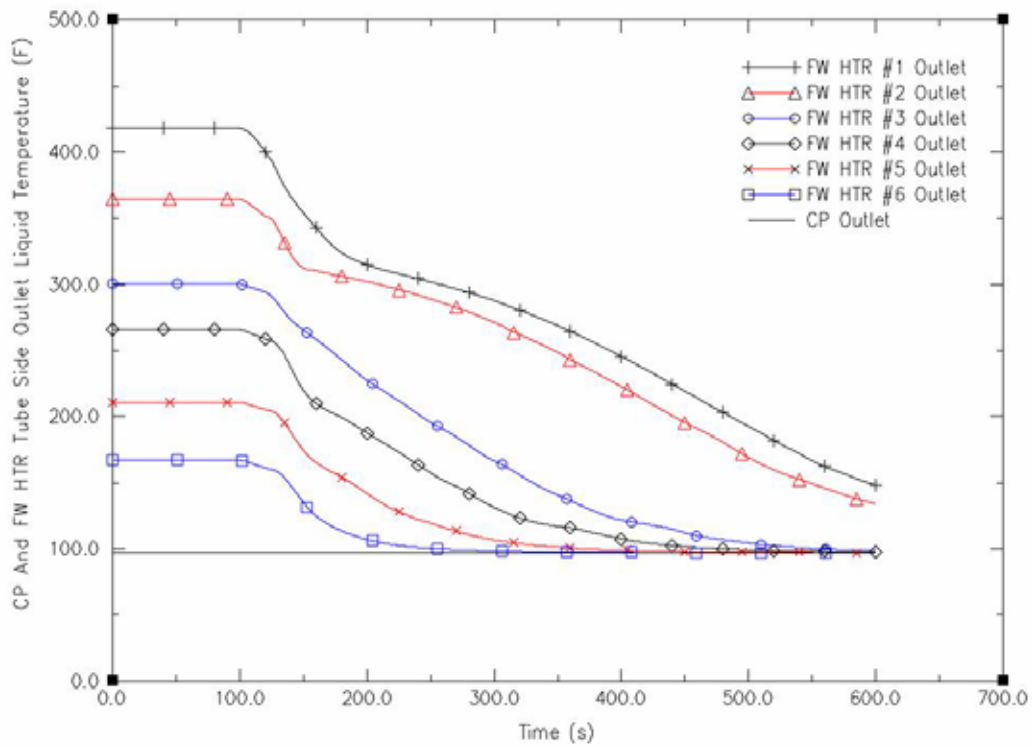


圖 8-18 飼水加熱器管側出口溫度比較

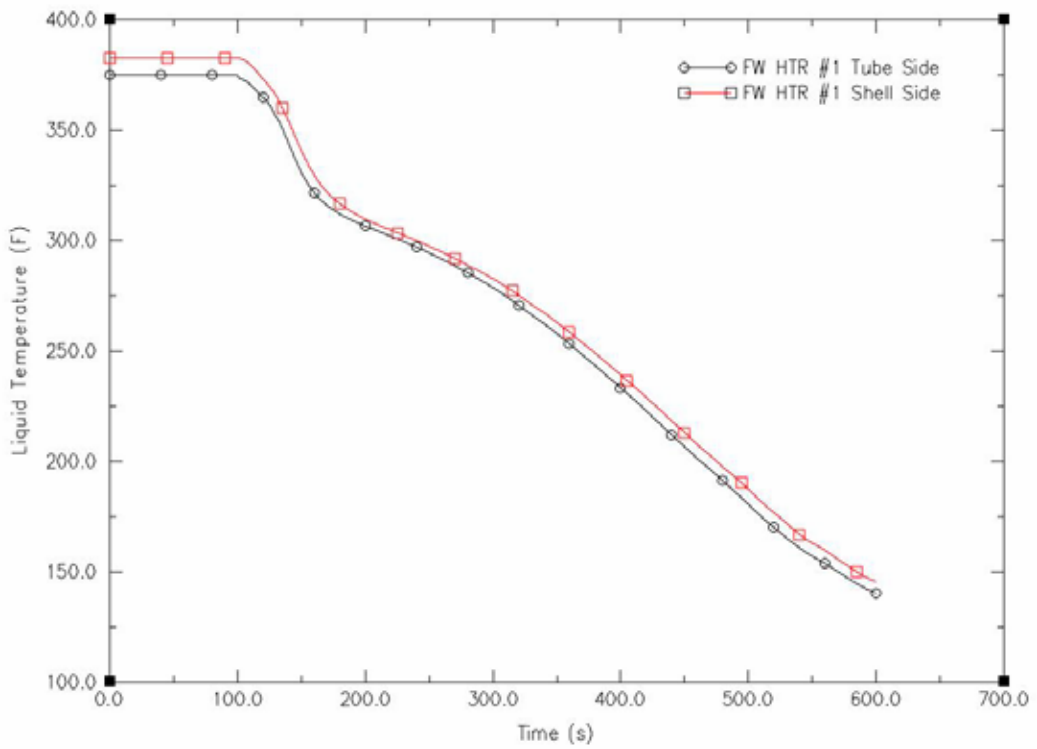


圖 8-19 飼水高壓加熱器進出口溫度比較

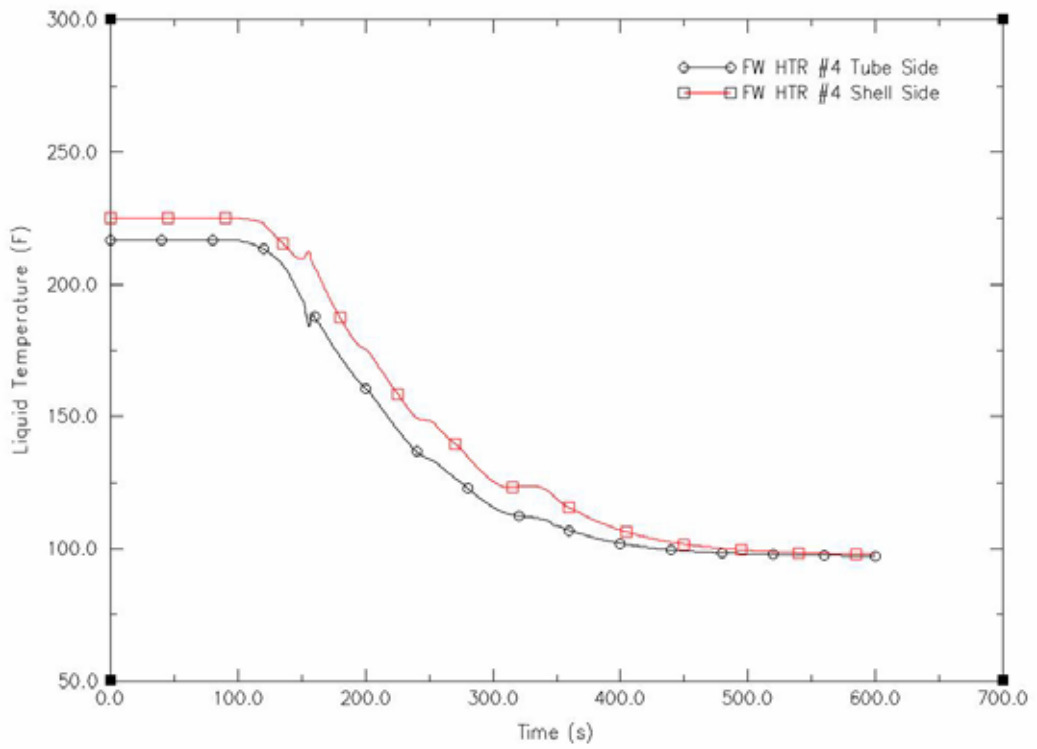


圖 8-20 飼水低壓加熱器進出口溫度比較

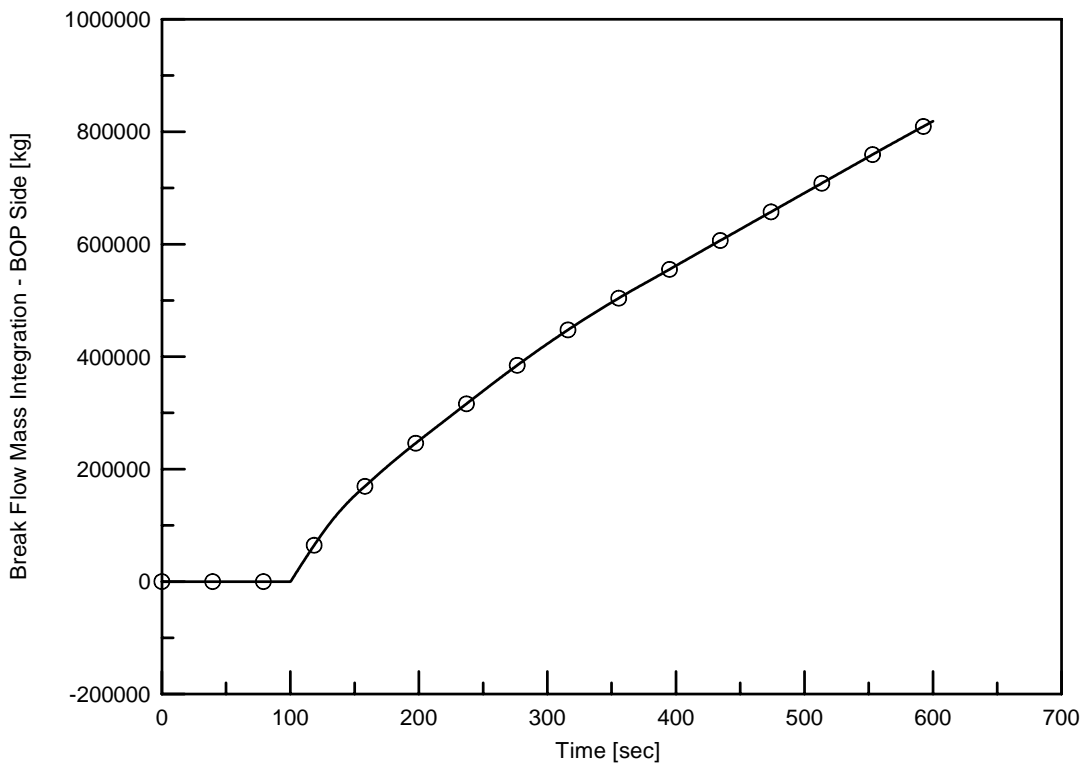


圖 8-21 累積 BOP 沖放質量

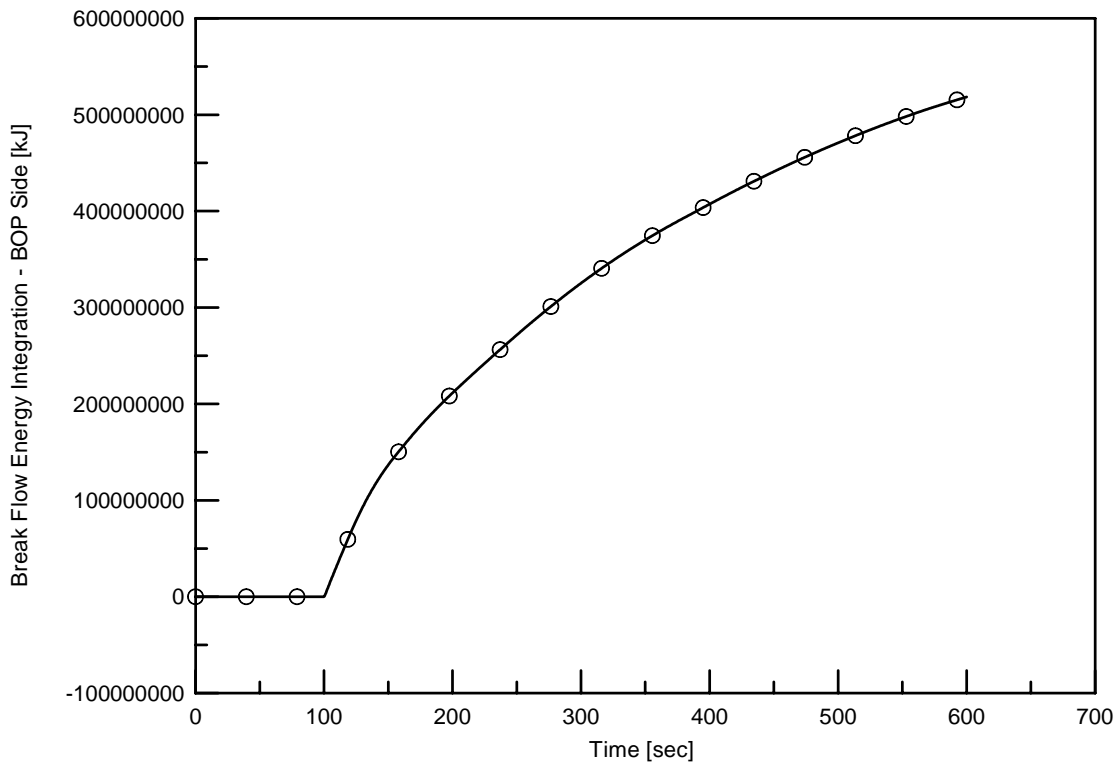


圖 8-22 累積 BOP 沖放能量

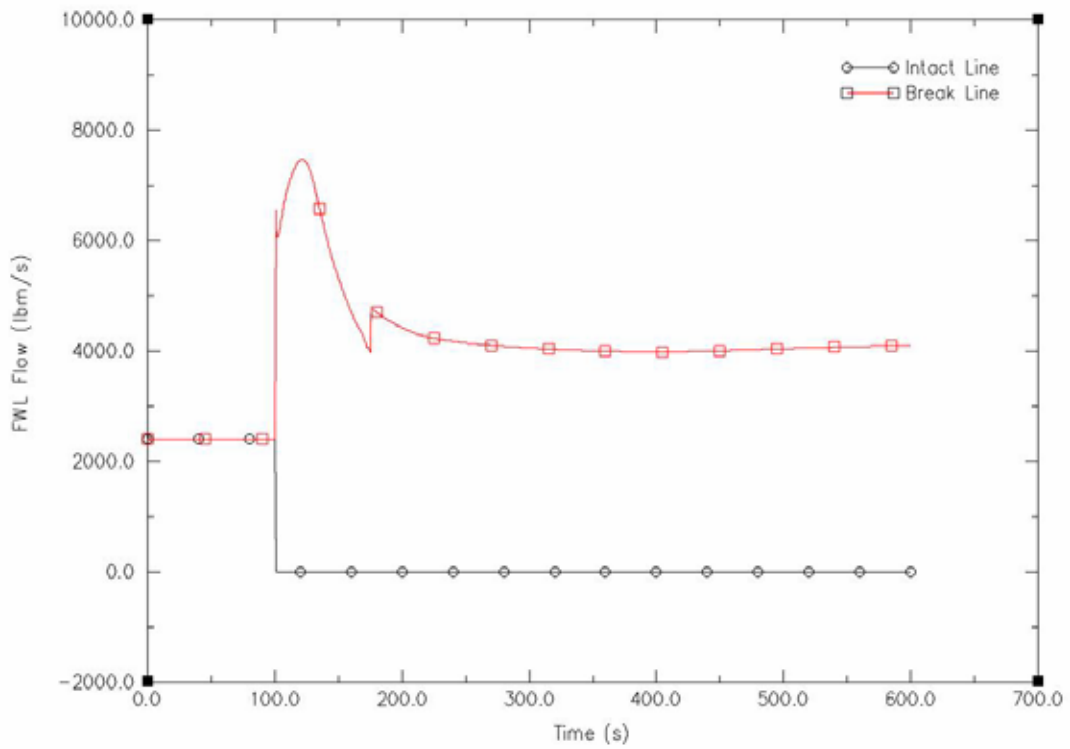


圖 8-23 外側破管中經完整和破管管路的飼水流量

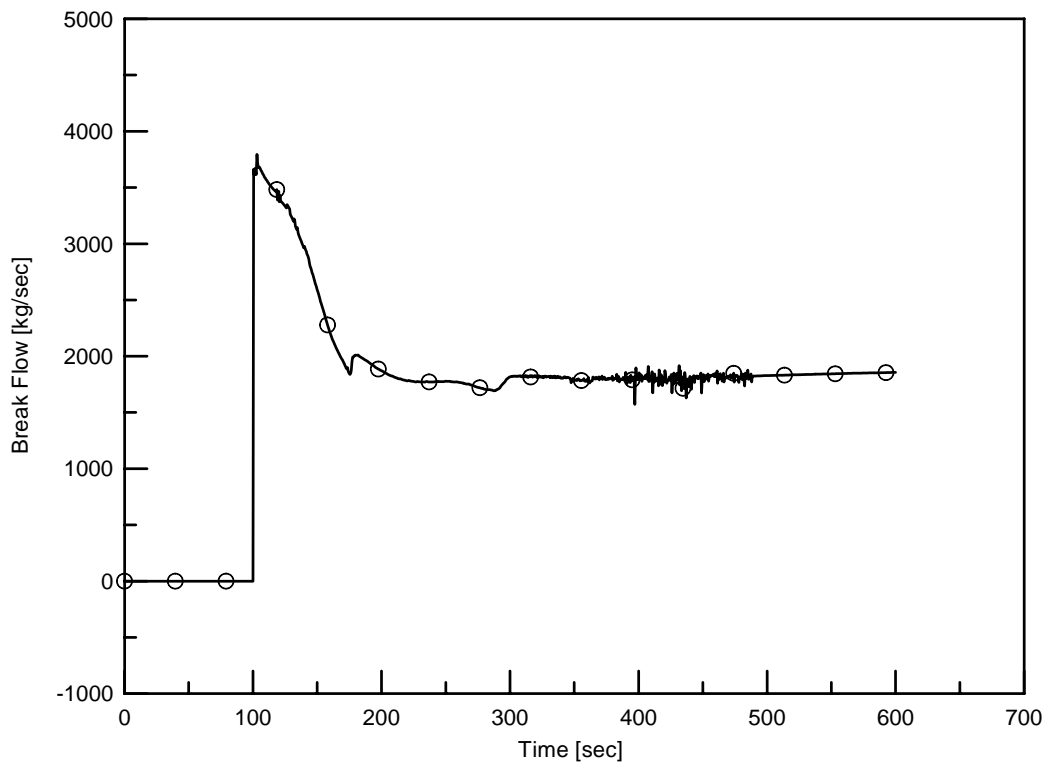


圖 8-24 外側破管中飼水沖放流量

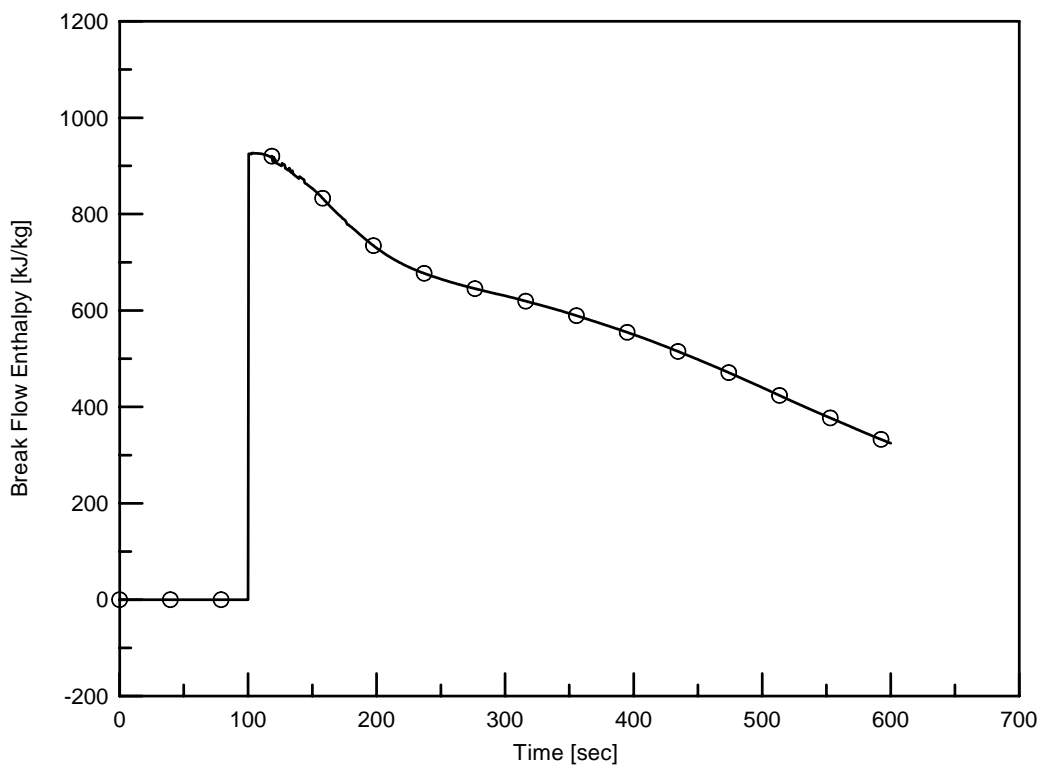


圖 8-25 外側破管中飼水沖放焓

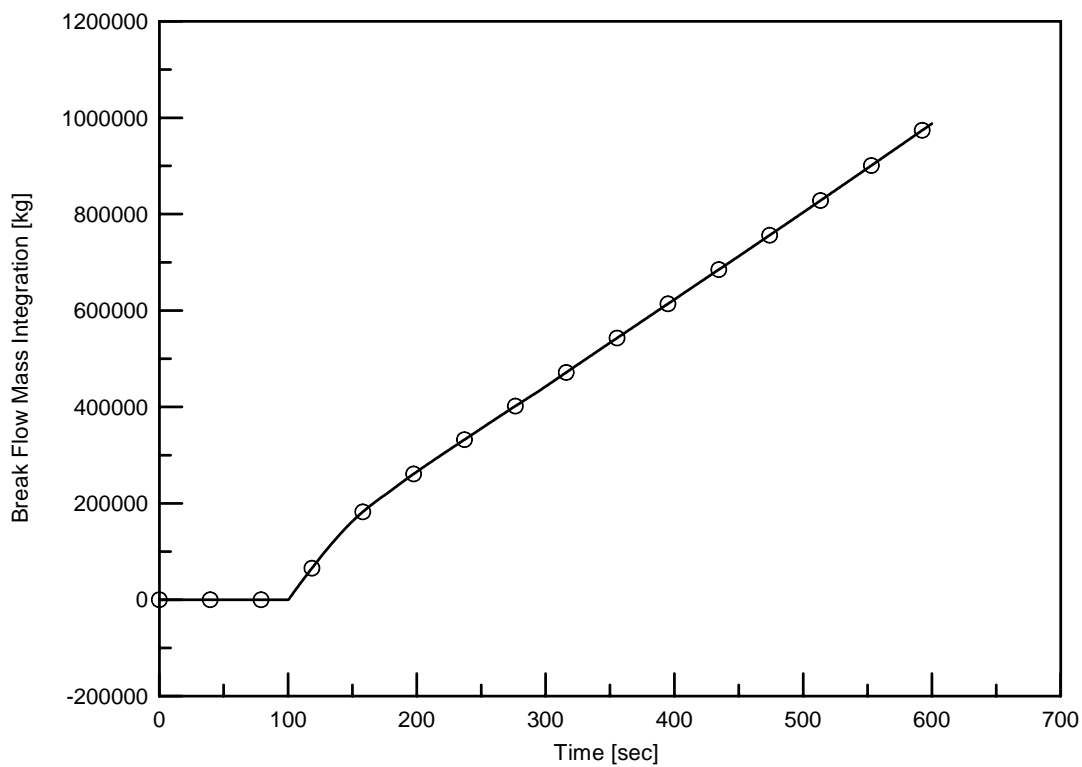


圖 8-26 外側破管中累積 BOP 沖放質量

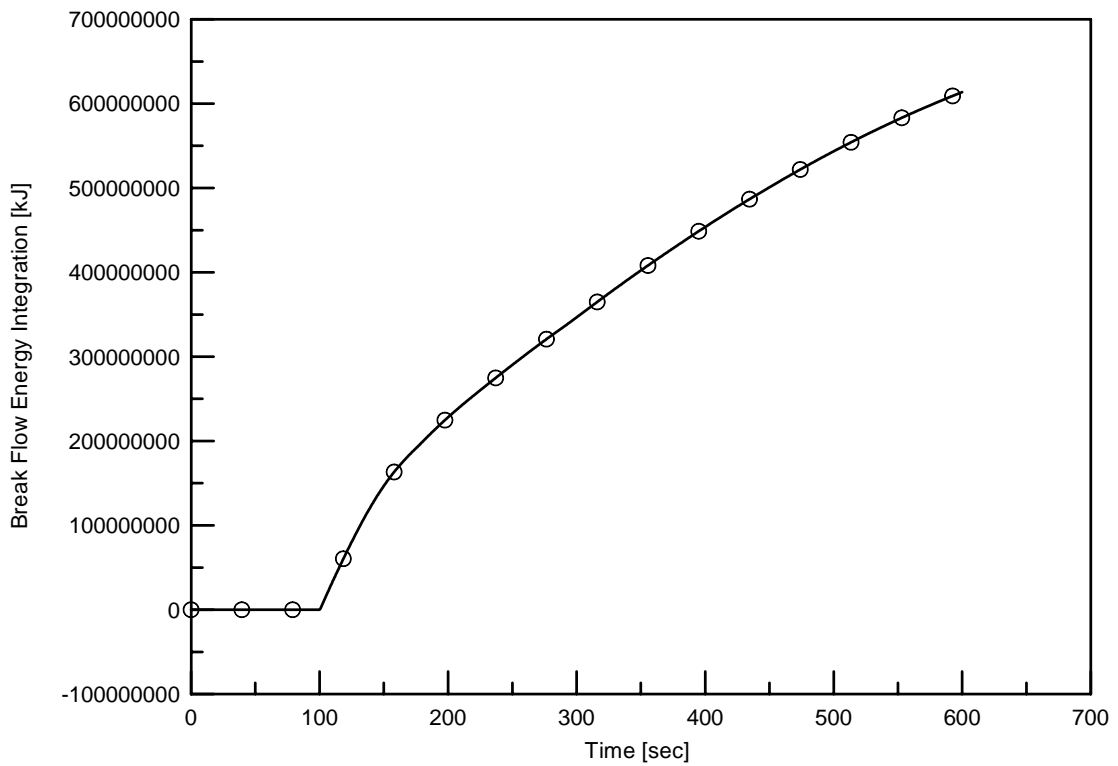


圖 8-27 外側破管中累積 BOP 沖放能量

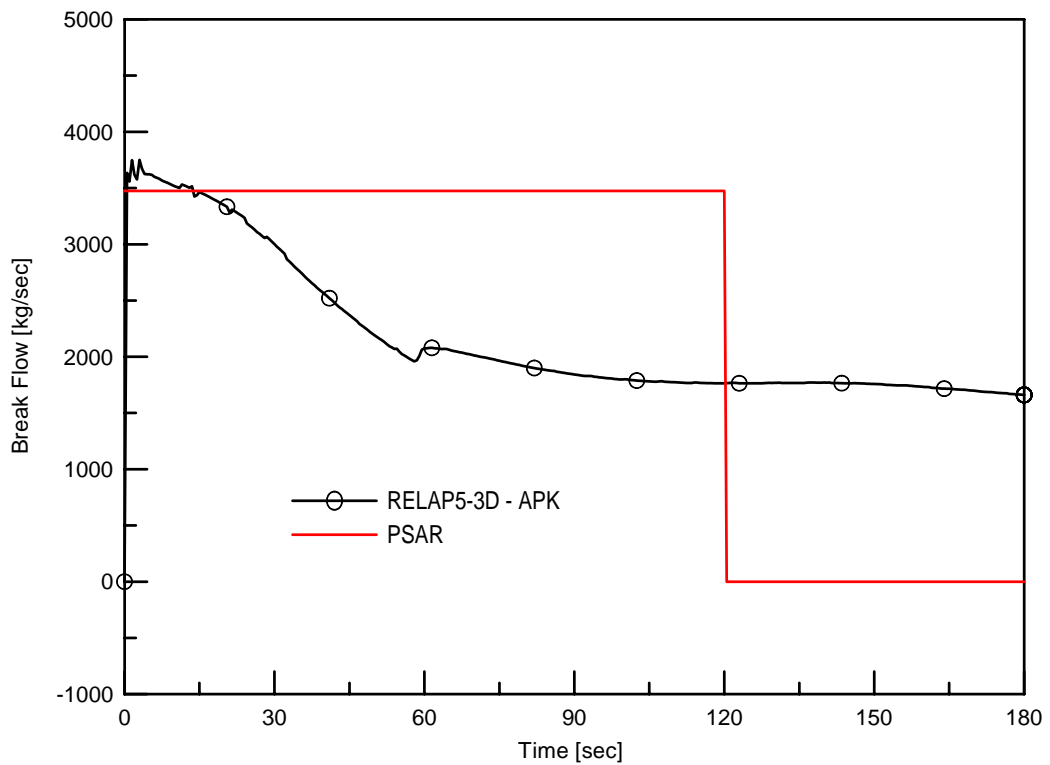


圖 9-1 沖放流量和 PSAR 結果比較

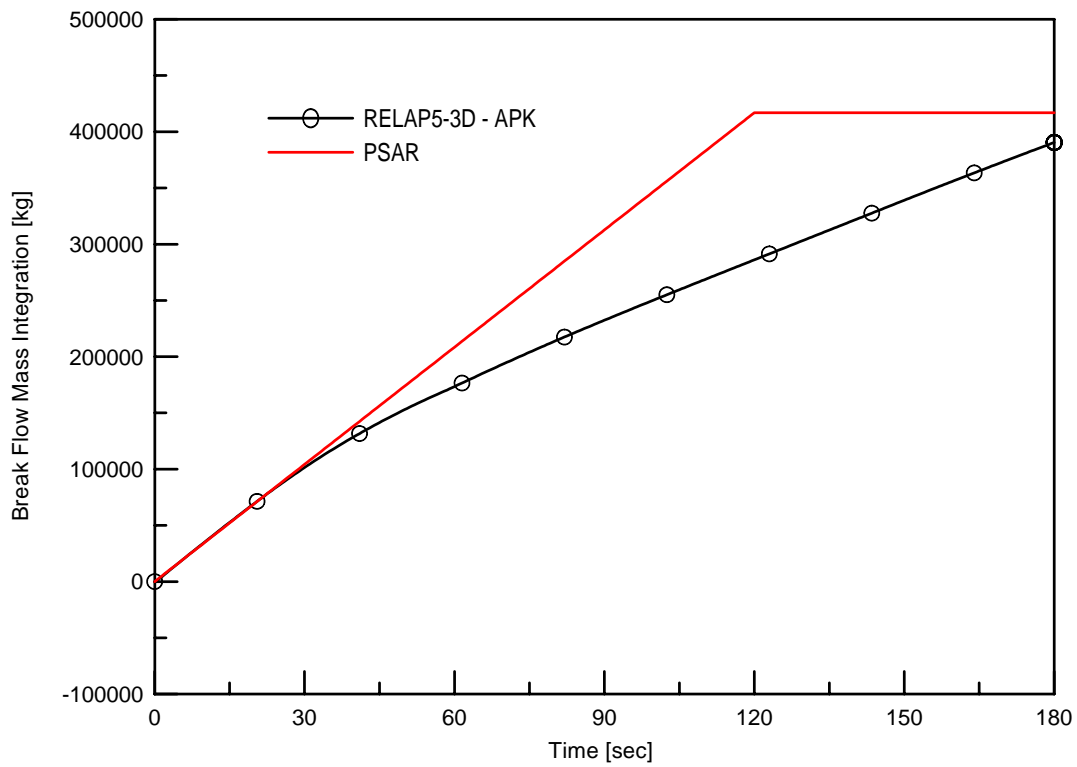


圖 9-2 累積沖放儲水和 PSAR 結果比較

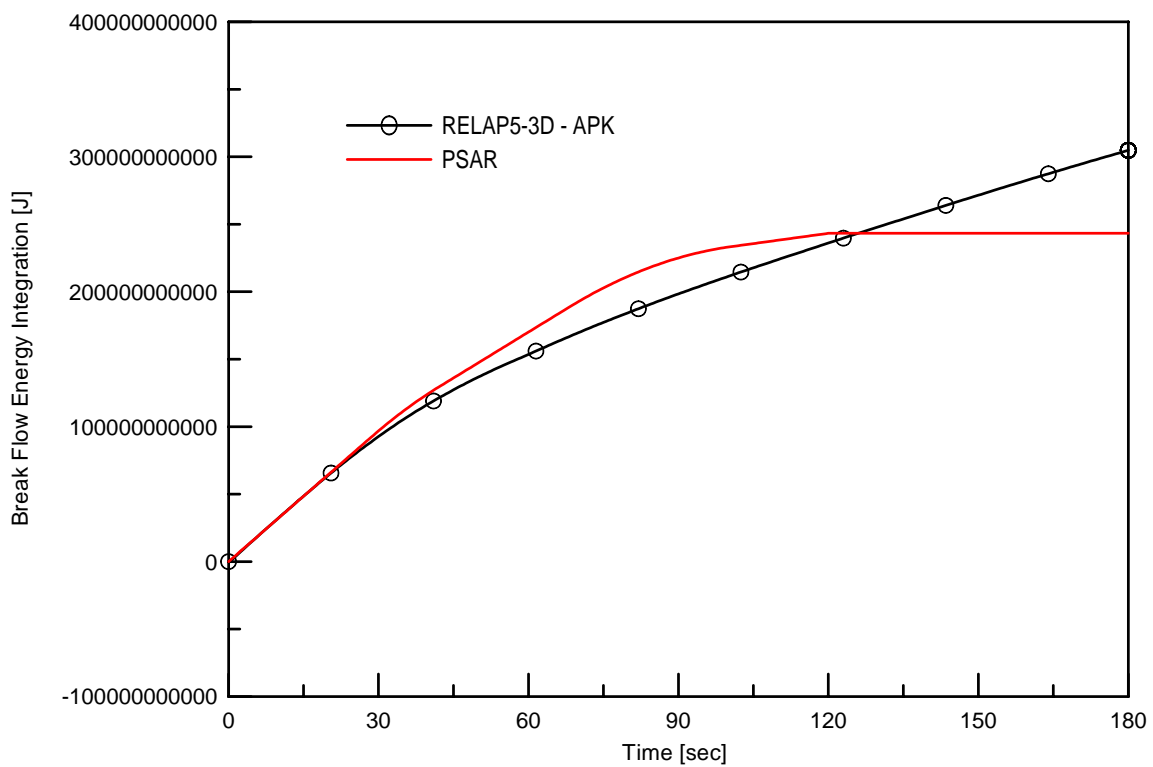


圖 9-3 累積沖放能量和 PSAR 結果比較

參考文獻

- [1] Thomas K.S Liang, et al., “Development and Assessment of the Appendix K Version of RELAP5-3D for LOCA Licensing Analysis,” Nuclear Technology, vol. 139, page 233-252, Sep. 2002.
- [2] Thomas K.S. Liang, et al., “Development of LOCA Licensing Calculation Capability with RELAP5-3D in Accordance with Appendix K of 10 CFR 50,” Nuclear Engineering and Design 211(2002) 69-84.
- [3] Thomas K.S. Liang, et al., “Development Program of LOCA Licensing Calculation Capability with RELAP5-3D in Accordance with Appendix K of 10 CFR 50,” Nuclear Technology, vol. 133, March 2001.
- [4] RELAP5-3D Code Development Team, “RELAP5-3D Code Manual,” INEEL-EXT-98-00834, Idaho National Engineering and Environmental Laboratory (Sep. 1998).
- [5] General Electric Company, “Project Design Manual,” 31113-0A23-1000, rev. 20.
- [6] T4-A5851 R3, “Thermal Kit,” August 29, 2003.
- [7] GE-NE-0000-0027-5584-R0, “Lungmen FWLB SOE,” March 31, 2004.
- [8] Attachment 1 of GETP-2004-3747, Sep. 16, 2004.