

## 核電廠主蒸汽管聲波共振評估

翁炯立, 張漢洲, 劉家銓  
臺灣電力公司 核能安全處

### 摘要

美國多座核電廠在執行大幅度功率提升(Extended Power Uprate, EPU)後, 蒸汽乾燥器(Steam Dryer)發生一系列結構破壞問題, 其肇因為主蒸汽管路(Main Steam Lines)在高流量之蒸汽下與連接安全釋壓閥(Safety and Relief Valves)之直立管產生聲波共振現象(Acoustic Resonances), 共振之壓力波經由主蒸汽管路回傳至反應爐內之蒸汽乾燥器上, 並對蒸汽乾燥器施加反覆交變應力(cyclic stress)造成疲勞破壞。本分析針對龍門核電廠一號機主蒸汽管路, 除採用EPRI之BWRVIP-194所提供之數值解法外, 並以ABAQUS有限元素分析求解直立管之激發頻率, 配合實驗得出之斯特勞哈數(Strouhal number), 評估主蒸汽管路系統是否有聲波共振之疑慮。

**關鍵字:** 聲波共振、功率提升、蒸汽乾燥器、斯特勞哈數

### ABSTRACT

Many nuclear power plants in the United States experienced significant degradation in the steam dryers caused by acoustic resonance induced cyclic loads, particularly for those operating at extended power uprate (EPU) conditions associated with increased steam line flow velocities. These acoustic resonance pressure fluctuations were found to propagate acoustically through the main steam lines back to the reactor pressure vessel with the potential to damage the steam dryer. In this study, both the finite element method (ABAQUS) and the refined acoustic modeling proposed by EPRI BWRVIP-194 are used to calculate the excitation frequencies of the main steam line standpipes, then combined with appropriate Strouhal number to characterize the behavior of the standpipe combination considered.

**Keywords:** Acoustic Resonance, Power Uprate, Steam Dryer, Strouhal Number

### 一、前言

美國 Quad Cities 核電廠二號機在執行 17% 的大幅度功率提升(Extended Power Uprate, EPU)之後, 蒸汽乾燥器(Steam Dryer)發生一系列結構破壞問題。Dresden 電廠的蒸汽乾燥器亦於 EPU 後產生裂縫, 美國核管會(USNRC)隨後修訂 RG 1.20 Rev.2, 並於 2007 年 3 月公布 RG 1.20 Rev.3【1】, 除了規定新電廠在商業運轉前須對爐內組件有完整的振動評估計畫外, 亦規定既有電廠在執行 EPU 時亦必須有完整的振動評估計畫。根據 USNRC 調查結果發現, 發生的根源可歸究於主蒸汽管路(Main Steam Lines)

的安全釋壓閥(Safety and Relief Valves, 以下簡稱 SRV)在高流量的蒸汽下產生聲波共振現象(Acoustic Resonances)。當蒸汽於主蒸汽管路內流過一旁通的安全釋壓閥結構時, 在特定的流速下會造成交界處產生卡門渦旋剝離(Karman vortex shedding)的週期性的流動不穩定現象; 此外, SRV 於正常運轉狀態下為一閉合組件, 與其連接之管路形成一直立閉合管, 當承受壓力波之擾動後將激發一系列自然頻率之駐波(standing wave), 當其中某一頻率, 主要為第 1 振模, 或稱基礎振模(fundamental mode)之自然頻率與主蒸汽管路形成的卡門渦旋剝離週期頻率相近時, 將產生共振現象。該

共振壓力波將會經由主蒸汽管路傳遞回反應爐內之蒸汽乾燥器上，並對蒸汽乾燥器施加反覆交變應力(cyclic stress)造成疲勞破壞。

大部分電廠進行 EPU 後蒸汽乾燥器疲勞產生裂縫是由 SRV 直立管 120Hz~200Hz 聲波共振所造成。因此，蒸汽乾燥器聲波共振監測成為功率提昇的一個重要議題。美國電力研究院 (EPRI) 在 2008 年初出版之 BWRVIP-182【2】建議大於 2% 功率提昇的計畫均應考慮進行蒸汽乾燥器聲波共振監測，更於 2008 年 10 月出版 BWRVIP-194【3】，提供評估主蒸汽管產生聲波共振之篩濾方法。本分析針對龍門核電廠一號機主蒸汽管路之設計是否可能有聲波共振之現象進行評估。評估方法除採用 EPRI 之 BWRVIP-194 所提供之數值解法外，並以 ABAQUS 有限元素分析求解直立管之激發頻率，配合實驗得出之斯特勞哈數(Strouhal number)，評估主蒸汽管路系統是否有聲波共振之疑慮，以確實掌握機組之安全營運。

## 二、聲波共振問題說明

### 2.1 文獻回顧

目前核能工業界評估沸水式反應器(BWR)主蒸汽管聲波共振問題所引用的文獻是 S. Ziada and S. Shine, "Strouhal Numbers of Flow-Excited Acoustic Resonance of Closed Side Branches," Journal of Fluids and Structures 13, 127-142 (1999)【5】。該文獻係藉由實驗，歸納出主管與支管在各種配置下，產生之聲波共振與 Strouhal Number 間之關係。Strouhal Number 為一無因次參數，一般可用來描述各式流體的振動特性。Strouhal Number 一般可表示如下式：

$$St = \frac{f \cdot L^*}{V} \text{-----} (2.1)$$

(2.1) 式中， $St$ ：無因次的 Strouhal Number

$f$ ：流體之振動頻率

$L^*$ ：系統之特徵長度

$V$ ：流體之速度

前述之文獻所做之實驗成功地找出主管與支管間之流體產生聲波共振時之 Strouhal Number，稱為發生聲波共振(onset)之 Strouhal Number， $St_{on}$ 。換言之，當 Strouhal Number 接近  $St_{on}$  時，意味著主管在支管處

之渦漩剝離頻率，與支管內流體之聲波自然頻率（主要係指第 1 振模之聲波自然頻率）接近而產生共振現象。由該文獻之實驗結果顯示，影響發生聲波共振之 Strouhal Number  $St_{on}$  的主要因素為支管（或稱直立管）內徑（ $d$ ）與主管（主蒸汽管）內徑（ $D$ ）之比值（ $d/D$ ），以及支管至上游彎頭之距離（ $L$ ）與主管內徑之比值（ $L/D$ ），見圖 2.1。

上述實驗之支管之安排見圖 2.2 所示，有(a)單支管(b)雙支管(c)對向同軸支管三種。支管內共振波之振幅以單支管最小，雙支管次之，對向同軸支管最大。雙支管安排之條件為  $l \ll 4L$  ( $l$  為支管間距離， $L$  為支管長度)，支管內共振振幅才會被放大。實驗結果三種不同支管安排下，雖然產生聲波共振的振幅有所差異，但開始發生聲波共振之 Strouhal Number  $St_{on}$  則均相當一致。

根據 Ziada 的對彎頭研究報告，當主蒸汽管流過一支管且主蒸汽管上游為一彎頭彎曲結構時，主蒸汽管內部流場並非均勻分布而造成  $St_{on}$  的改變。Ziada 的研究結果歸納出支管的位置與上游彎頭之關係有三類，分別為 1. 支管位於彎頭內側、2. 支管位於彎頭外側及 3. 無彎頭之狀況。圖 2.3 顯示支管位於彎管外側流速較平均值大，位於內側則流速較平均值小。從實驗數據顯示支管置於彎管外側  $St_{on}$  較高（假設  $St > St_{on}$ ，則 Margin 較小，易發生聲波共振現象），直立管若置於彎管內側則  $St_{on}$  較低（假設  $St > St_{on}$ ，則 Margin 較大，不易發生聲波共振現象）。 $L/D$  影響  $St_{on}$  的原因：彎管外側流體流速較平均值大，內側流體流速較平均值小。支管置於彎管外側導致  $St_{on}$  上升，實為流體經過彎頭外側後，局部流速增加所致。支管若置於彎管內側導致  $St_{on}$  下降，實為流體經過彎頭內側後，局部流速降低所致。

### 2.2 龍門核電廠一號機主蒸汽管之 SRV 配置及相關參數【9】

龍門核電廠一號機有四條主蒸汽管，共 18 個 SRV (A-Line 與 D-Line 各 4 個 SRV，B-Line 與 C-Line 各 5 個 SRV)，SRV 設計完全相同，SRV 內徑  $d$  均為 173.05mm，主蒸汽管內徑  $D$  均為 637.34mm，因此  $d/D$  比值相同，均為 0.27。

龍門核電廠一號機四條主蒸汽管之 SRV 支管間距離 $l$  (表 2.1) 雖然有些差異, 但只會影響共振振幅 (註: 若發生共振之時。由於龍門核電廠一號機非屬 $l \ll 4L$  設計, 支管內共振振幅不會被放大), 不會引起 $St_{on}$  之差異。

龍門核電廠一號機四條主蒸汽管之第一個 SRV 支管至上游第一個 $90^\circ$  彎頭之距離 $L$  差異不大 (表 2.2), 且四條主蒸汽管的第一個 SRV 相對於其上游第一個 $90^\circ$  彎頭的配置亦不同。

A-Line 與 D-Line 的第一個 SRV 支管位於其上游第一個 $90^\circ$  彎頭之內側, 蒸汽流速較平均值為慢, 相當於 $L/D$  等於無限大<sup>註</sup>, 亦即支管至上游第一個 $90^\circ$  彎頭距離不會引起 $St_{on}$  之差異。假設 $L/D$  等於無限大仍屬保守。以 $d/D=0.27$  及 $L/D=\infty$  可從圖 2.1 查得 A-Line 與 D-Line 之 $St_{on}$  約為 0.47。

B-Line 與 C-Line 的第一個 SRV 支管的上游第一個 $90^\circ$  彎頭屬於水平彎頭 (SRV 支管為直立管), 第一個 SRV 支管不歸類為其上游第一個 $90^\circ$  彎頭的內側或外側, 彎管效應應可忽略。若考慮其上游的第二個彎頭, B-Line 與 C-Line 的第一個 SRV 支管亦位於其上游第二個 $90^\circ$  彎頭之內側。綜上可假設 B-Line 與 C-Line 的第一個 SRV 上游無 $90^\circ$  彎頭, 即 $L/D \rightarrow \infty$ , 此結果與 A-Line 與 D-Line 相同。

又根據 BWRVIP-194【3】, 管路內的 $St_{on}$  數可以透過下經驗式做更精確描述

$$St_{on} = 0.625 + 0.294 \log(d/D) \text{ -----(2.2)}$$

因此根據龍門核電廠一號機的 SRV 立管與主蒸汽管尺寸可計算出管路內的 $St_{on}$

$$St_{on} = 0.625 + 0.294 \log(d/D) = 0.625 + 0.294 \log(173.05/637.34) = 0.46$$

由文獻查圖所得之 $St_{on}$  (0.47) 與經驗公式算出之 $St_{on}$  (0.46) 相當接近。本報告保守假設 $St_{on}=0.47$ 。

註: 文獻中提到若支管位於其上游第一個 $90^\circ$  彎頭之內側,  $St_{on}$  較 $L/D$  等於無限大者為低, 建議取 $L/D$  等於無限大, 因此設計仍屬保守。 $L/D$  等於無限大相當於支管前無彎管。

### 三、聲波共振之篩濾分析

本節依照 BWRVIP-182 及 BWRVIP-194 之篩濾分析, 評估龍門核電廠一號機主蒸汽管是否有發生聲波共振之疑慮。篩濾方法為計算主蒸汽管在支管處之 Strouhal Number ( $St$ ) 值。當 $St$  非常接近開始發生聲波共振之 Strouhal Number ( $St_{on}$ ), 就有可能發生聲波共振。

#### 3.1 Strouhal Number 計算方式

核電廠主蒸汽管流經支管處之 Strouhal Number 可由下式進行計算【2】【3】。

$$St = f_1 \times \frac{(d+r)}{V} \text{ -----(3.1)}$$

當支管為均勻直管時, 則(3.1)式亦可寫為:

$$St = \frac{C}{4L} \times \frac{(d+r)}{V} \text{ -----(3.2)}$$

其中:

C = 流體音速 = 454m/s (以主蒸汽管運轉壓力 1040psi 之飽和水蒸汽為介質計算而得)  
d = 支管 (side branch) 內徑, 以龍門核電廠一號機而言,  $d=173.05\text{mm}$

r = 支管進口處之彎曲半徑。由於 r 值愈大,  $St$  值愈大, 距離管路系統開始發生聲波共振之 Strouhal number  $St_{on}$  愈遠, 亦即避開發生聲波共振之安全餘裕愈高, 因此, 本分析保守假設  $r=0$ 。

L = 支管長度

V = 主蒸汽管流體速度 (Nominal Velocity), 以龍門核電廠一號機而言,  $V=45.38\text{m/s}$

$f_1$ : 主管在支管處之渦旋剝離頻率, 當產生聲波共振時, 此頻率亦為支管系統內流體之聲波自然頻率, 主要係指第 1 振模之聲波自然頻率, 如果管路系統為直管時, 則

$$f_1 = \frac{C}{4L}, \text{ 如(3.2)式所示。}$$

#### 3.2 主蒸汽管蒸汽流速計算

依廠家設計計算書【8】所示, 龍門核電廠一號機主蒸汽管運轉參數如下:

壓力 = 1040psi = 7.17Mpa;

溫度 = 551°F = 228°C;

蒸汽之總質量流率 = 7823.2ton/hr = 2317.11kg/s。

假設主蒸汽管總質量流率平均分配至 4 條

主蒸汽管，故每條主蒸汽管之質量流率為  $\dot{m} = 543.28 \text{ kg/s}$

由 ASME Steam Table 【4】得知在 1040psi 壓力之下，水蒸汽飽和溫度為 549.36°F，僅略小於主蒸汽管運轉溫度，故以飽和水蒸汽比容來近似運轉狀態下之過熱蒸汽比容。

蒸汽比容  $v_g = 0.42681 \text{ ft}^3/\text{lb} = 0.026645 \text{ m}^3/\text{kg}$   
蒸汽密度  $\rho = 1/v_g = 37.53 \text{ kg/m}^3$

主蒸汽管外徑  $OD = 711 \text{ mm}$ ，壁厚  $t_{nom} = 36.83 \text{ mm}$ ，內徑  $ID = 637.34 \text{ mm}$ ，內半徑  $IR = 318.67 \text{ mm}$ ，主蒸汽管內截面積  $= 0.319 \text{ m}^2$   
 $\dot{m} = \rho \cdot V \cdot A$

因此，蒸汽在主蒸汽管內之平均流速

$$V = \frac{\dot{m}}{\rho \cdot A} = 45.38 \text{ m/s}$$

### 3.3 支管聲波振動自然頻率之計算

核電廠主蒸汽管與支管結合之管路系統中，每一支管均銜接一安全釋壓閥(SRV)。正常運轉中，SRV 之閥盤均處於關閉狀態，因此，支管之一端為閉合，另一端則開口於主蒸汽管，當此類管路承受一聲波擾動後，將在管內形成一駐波(standing wave)。駐波有節點(node)及反節點(anti-node)，節點處之波壓為 0，反節點之波壓絕對值最大，且波壓斜率為 0。對於一端為開口，另一端為閉合之管子而言，開口端恆處於節點位置，而閉口端則恆處於反節點位置。圖 3.1 所示為直管內之駐波示意圖。圖中(a)、(b)、(c)、(d)分別為第 1、2、3、4 振模。由於第 1 振模，或稱基礎振模(fundamental mode)引發之共振最為嚴重，因此，亦為主蒸汽管/支管系統發生聲波共振主要考慮之振模。

#### 3.3.1 簡化為均勻直管之解析解

由圖 3.1(a)可知，對於直管之第 1(基礎)振模之振動頻率  $f_1$  為【2、3】：

$$f_1 = \frac{\text{音速}}{\text{波長}} = \frac{C}{4L} \text{-----} (3.3)$$

以龍門核電廠一號機 A 串主蒸汽管 3A SRV 為例，其支管與 SRV 管嘴之尺寸如圖 3.2 所示。圖中顯示，在 SRV 管嘴部位為漸縮管，且最大管徑比支管管徑小。上列(3.3)式為均勻直管之第 1 振模之自然頻率，因此，如果假設上列支管/SRV 管路系統為一內徑均勻尺寸之直管，管長為 703.33 mm，引用前述運轉中之蒸汽音速為 454 m/s，則由(3.3)式，其第 1 振模之振動頻率為：

$$f_1 = \frac{454}{4 \times 0.70333} = 161.375 \text{ Hz}$$

#### 3.3.2 簡化為均勻直管之有限元素分析解

管內流體之聲波自然頻率可藉由有限元素分析求解。本分析以 ABAQUS 6.10 版進行分析。假設前節之支管，包括 SRV 管嘴為一均勻直管，則管內蒸汽空間可模擬為如圖 3.3 所示，分析模式所施加之邊界條件如前所述，在支管開口端指定為節點位置，即波壓  $P=0$ ；閉口端則為自然邊界條件，即波壓梯度  $dP/dx=0$ 。整個有限元素分析模式採用 20390 個 8 節點線性聲波磚塊元素(linear acoustic brick element)，總共產生 22716 個節點，如圖 3.4 所示。求解過程為進行聲波自然頻率之擷取分析。

圖 3.5 為第 1 振模下正規化(normalized)之壓力分佈圖，開口端聲壓為 0，閉口端聲壓為 1.0，且壓力梯度  $dP/dx=0$ 。圖 3.6 為第 1~10 個振模之自然頻率，並表列於表 3.1。表 3.1 顯示，第 1 振模之自然頻率為 161.372 Hz，與 3.3.1 節以(3.3)式計算結果(161.375 Hz)吻合。

#### 3.3.3 支管實際幾何形狀之聲波自然頻率

如圖 3.2 所示，龍門核電廠一號機主蒸汽管各支管所銜接之 SRV 管嘴為一漸縮管，且其管徑比支管管徑小。BWRVIP-194，4.3 節要求在評估支管之聲波自然頻率時，應考慮此一截面積隨距離變化之情形，以免評估結果不夠準確。以 Quad Cities 二號機為例，主蒸汽管銜接 Dresser SRV 之支管系統當簡化為直管時，計算結果之第 1 振模聲波振動頻率為 129.4 Hz，大幅度功率提升(EPU)後之 Strouhal Number  $St$  為 0.36。當考慮前述支管系統截面積隨距離變化之實際情形後，修正其第 1 振模聲波振動頻率為 159.1 Hz，在 EPU 後之 Strouhal Number  $St$  隨之修正為 0.45，而該串主蒸汽管之開始發生聲波共振之 Strouhal Number  $St_{on}$  為 0.48，與修正後之 Strouhal Number(0.45)相近，因而產生聲波共振，造成蒸汽乾燥器疲勞龜裂，但如果未考慮截面積之變化，則 EPU 後之 Strouhal Number  $St=0.36$ ，安全餘裕為 25

%，應不致於發生聲波共振。顯然，評估主蒸汽管之聲波共振問題時，支管系統截面積隨距離變化之狀況不容忽視。

### 3.3.3.1 有限元素分析解法

為期能準確求解實際支管之聲波自然頻率，本分析以 ABAQUS 針對龍門核電廠一號機主蒸汽管支管銜接 SRV 之實際幾何形狀，直接求解其聲波振動自然頻率，可望求得最準確之實際解。圖 3.7 為模擬龍門核電廠一號機 A 串主蒸汽管支管銜接 3A SRV 管路系統之實際管內蒸汽空間之有限元素分析模式，模式中反映了實際的截面積突變以及漸縮的 SRV 管嘴。邊界條件亦如前節所述，開口端為駐波節點，壓力波設定為 0，閉口端為駐波反節點，壓力波斜率為 0。整個有限元素分析模式採用 24818 個 8 節點線性聲波磚塊元素，如圖 3.8 所示。

分析結果，圖 3.9 為第 1 振模下正規化(normalized)之壓力分佈圖，開口端聲壓為 0，閉口端聲壓為 1.0。圖 3.10 為第 1~10 個振模之自然頻率，並表列於表 3.2。表 3.2 顯示，第 1 振模之自然頻率為 186.14 Hz。由有限元素分析結果顯示，龍門核電廠一號機主蒸汽管考慮了支管與 SRV 管嘴內徑之差異以及 SRV 管嘴漸縮之實際情況後，第 1 振模之自然頻率由 161.375 Hz 修正為 186.14 Hz。圖 3.11 分別為假設支管/SRV 管嘴為直管及實際幾何形狀時，第 1 振模至第 3 振模在管內壓力變化之比較，圖 3.11 顯示，假設為直管之情況下，每一振模之壓力變化均呈正弦波(sine wave)，但在實際管內截面積隨距離變化之幾何形狀下，管內之壓力分佈均偏離正弦波，且在管內截面積突變處有一壓力波干擾，但兩者在開口端恆處於聲波之節點處( $P=0$ )，閉口處則恆處於聲波之反節點處( $dp/dx=0$ )。圖 3.12 為分別為假設支管/SRV 管嘴為直管及實際幾何形狀時，第 1 振模至第 10 振模之自然頻率比較。如前所述，龍門核電廠一號機有 4 條主蒸汽管，各有 4~5 個直立支管銜接至 SRV，每一直立支管之尺寸均不盡相同，但 SRV 之各部尺寸均一致。以 A 條主蒸汽管銜接至 3A SRV 之支管為例，如圖 3.2 所示：

直立支管從主蒸汽管中心線至支管 flange 之高度 H 為 726mm，實際直立支管至 SRV 閘盤長度，亦即蒸汽承受聲波之實際長度  $L = H (726 \text{ mm}) - \text{主蒸汽管之內半徑 IR}$

$(318.67 \text{ mm}) + \text{SRV 進口管嘴深度 } D (296.0 \text{ mm}) = 703.33 \text{ mm}$

其餘 17 條支管/SRV 承受聲波之實際長度 L 如表 3.3 中之第 3 欄。

重複上列有限元素分析，針對龍門核電廠一號機其餘 17 組直立支管與 SRV 之實際幾何形狀進行聲波自然頻率擷取分析，分析結果，第 1 振模自然頻率  $f_1$  列於表 3.3 中之第 4 欄。表 3.3 顯示， $f_1$  在 183.58 Hz~188.47 Hz 之間。

### 3.3.3.2 數值分析解法

BWRVIP-194 提供 refined acoustic modeling 之數值分析法，如下列考慮截面積隨距離變化之常微分方程式，進行聲波自然頻率之修正。

$$\frac{d^2 P}{dx^2} + \left(\frac{1}{A} \frac{dA}{dx}\right) \frac{dP}{dx} + S^2 P = 0 \text{-----}(3.4)$$

(3.4)式中，A 為管內截面積，x 為離開口端之距離，P 為壓力， $S=2\pi fL$ ，f 為頻率，L 為支管之長度。針對(3.4)式予以正規化(normalization)後，整個支管之長度為 1.0，因此，當座標由開口端為起點時，邊界條件為在  $x=0$  時，聲波壓力  $P=0$ ；在  $x=1.0$  時，壓力梯度  $dp/dx=0$ 。

求解二階常微分方程式(3.4)式，可將其化為如下之二個一階常微分方程式。

$$\frac{dP}{dx} = y \text{-----}(3.5)$$

$$\frac{dy}{dx} + \left(\frac{1}{A} \frac{dA}{dx}\right) y + S^2 P = 0 \text{-----}(3.6)$$

邊界條件：

$$P(0) = 0 \text{-----}(3.7)$$

$$y(1) = 0 \text{-----}(3.8)$$

針對(3.5)及(3.6)式，本分析採用尤拉預估-修正法(Euler Predictor-Corrector)【10】進行數值分析求解。滿足(3.5)及(3.6)式之 S 則可進而求取系統之自然頻率，求解方法則由  $x=1.0$  開始，引用 (3.8)式及此處閉口端之正規化波壓為 1.0，並先試猜一 S 值，求解(3.5)及(3.6)式，得出在  $x=0$  時之 p 值，若此處之 P 值為 0，則所猜之 S 值恰可滿足(3.5)及(3.6)常微分方程式，亦即滿足(3.4)式，若解出之  $P \neq 0$ ，則必須修正 S 值，直到解出之  $P(0)=0$  為止，本分析在猜取 S 之過程採用內外差法，即根據上一次解出之  $P(0)$  值對  $P(0)=0$  進行對 S 值之修正，依本分析之求

解經驗，約在第 7 次之修正即可得出 P(0) 值達到小於  $10^{-6}$  之收斂標準。

(3.4)式或(3.6)式中，支管之不規則幾何形狀反映在  $(1/A)(dA/dx)$  項中，計算過程中，此一常數項可重寫如下：

$$\frac{1}{A} \frac{dA}{dx} = \frac{1}{\pi^2} \frac{2\pi r dr}{dx} = \frac{2}{r} \frac{dr}{dx} \quad (3.9)$$

(3.9)式中， $\frac{dr}{dx} = -\tan \theta$ ， $\theta$  為漸縮管段之漸縮角，如圖 3.2 所示，因此，(3.9)式可寫為：

$$\frac{1}{A} \frac{dA}{dx} = -\frac{2 \tan \theta}{r} \quad (3.10)$$

支管在截面積突變處， $\theta=90^\circ$ ， $\tan \theta=\infty$ ，如圖 3.2 中之管徑由 173.05mm 突然縮減為 151.0 mm，此處在求解時，可假設  $\theta$  接近  $90^\circ$ ，但不等於  $90^\circ$ ，如假設該截面積突變之管段在軸向之變化量僅為 0.0001 mm，以本分析案例而言，相當於  $\theta=89.9995^\circ$ 。

附件一為針對龍門核電廠一號機 A 串主蒸汽管支管與 3A SRV 管嘴求解第一振模自然頻率之輸出檔。由附件一顯示，在第 7 次迭代後求得其自然頻率為 186.354 Hz，與前一節有限元素分析結果(186.141 Hz)相當一致。

重複上列數值分析，針對龍門核電廠一號機其餘 17 組直立支管與 SRV 之實際幾何形狀進行聲波自然頻率擷取分析，分析結果，第 1 振模自然頻率  $f_1$  與有限元素分析結果比較列於表 3.4。表 3.4 顯示，數值分析法與有限元素分析法分析結果極為吻合。

### 3.4 Strouhal Number 計算

本節計算主蒸汽管路支管系統之 Strouhal Number  $St$ ，由 3.3.3 節之計算結果，顯示數值分析法與有限元素分析法分析結果極為吻合，但有限元素分析法分析結果比數值分析法分析結果之自然頻率稍低，比較接近發生聲波共振之 Strouhal Number  $St_{on}$ ，因此，本分析計算 Strouhal Number  $St$  採用有限元素分析所計算之結果。依 3.3.3.1 節之分析結果，龍門核電廠一號機主蒸汽管 18 條支管系統之第 1 振模聲波振動自然頻率  $f_1 = 183.58 \text{ Hz} \sim 188.47 \text{ Hz}$ 。引用(3.1)式，以及如 3.1 節所述，保守假設支管進口處之彎曲半徑  $r=0$ ，以銜接至 SRV A 為例，在

100% OLTP 之正常運轉下之 Strouhal Number 為：

$$St = f_1 \times \frac{(d+r)}{V} = 186.14 \times \frac{(0.17305+0)}{45.38} = 0.710$$

重複上列計算，針對龍門核電廠一號機其餘 17 組直立支管之 Strouhal Number  $St$  計算結果，詳列於表 3.3 中之第 5 欄。

### 3.5 聲波共振潛在可能性評估

#### 3.5.1 防止發生聲波共振安全餘裕之探討

如前所述，當主蒸汽管在直立支管開口處所產生之渦旋剝離振動頻率與直立支管內流體之聲波振動自然頻率相近時，將有潛在發生聲波共振之可能，文獻【5】、BWREVIP-182【2】及 BWRVIP-194【3】

均以 Strouhal Number  $St$  來顯示是否發生聲波共振。當系統之  $St$  離開發生聲波共振之 Strouhal Number  $St_{on}$  愈遠，則發生聲波共振之可能性愈低。

針對防止發生聲波共振之安全餘裕，BWRVIP-182 建議如要避開發生聲波共振，則  $St$  不可落在 0.25~0.60 之間，換言之，只要  $St$  低於 0.25 或高於 0.60，均可避開發生聲波共振，而有足夠的安全餘裕。另 EPRI 在 Material Reliability Program: Fatigue Management Handbook (MRP-235) Vol. II 第 3 節 Vibration Fatigue Screening【11】中，針對 BWR 核能電廠主蒸汽管的聲波共振建議直立支管之聲波第 1 振模之自然頻率應離開渦旋剝離頻率  $\pm 30\%$  以上，換言之，實際之  $St$  如離開  $St_{on} \pm 30\%$  以上，則可保有相當的安全餘裕，將不致有發生聲波共振之疑慮。以 Quad Cities 核電廠為例，主蒸汽管在支管處發生聲波共振之 Strouhal Number  $St_{on}$  為 0.48，當執行大幅度功率提升(EPU)後，實際的 Strouhal Number  $St$  降為 0.45【3】，安全餘裕只有 6%，因此運轉中主蒸汽管發生聲波共振。

#### 3.5.2 龍門核電廠一號機防止發生聲波共振之安全餘裕

針對龍門核電廠一號機主蒸汽管之尺寸及直立支管的配置，如 2.2 節所述，依文獻【5】查表所獲得之  $St_{on}$  為 0.47，另依 BWRVIP-194【3】經驗公式所計算出之  $St_{on}$



為 0.46。本分析保守假設  $St_{on}=0.47$  為龍門核電廠一號機主蒸汽管發生聲波共振之 Strouhal Number。依據 3.4 節計算出主蒸汽管所銜接 18 個直立支管之  $St$ ，可得知龍門核電廠一號機主蒸汽管防止發生聲波共振之安全餘裕，詳如表 3.3 所示。由表 3.3 顯示，龍門核電廠一號機主蒸汽管距離發生聲波共振有 48.9%~53.0% 之安全餘裕，遠大於 EPRI MRP-235 所要求的 30 %。另外各支管處之  $St$  (0.700 ~ 0.719) 距離 BWRVIP-182 所建議之 0.6 以上(已包含安全餘裕)亦有相當高的額外安全餘裕，因此，龍門核電廠一號機主蒸汽管不致於有發生聲波共振之疑慮，蒸汽乾燥器沒有承受聲波共振所引發交變負荷之問題。

#### 四、結論

本分析計算龍門核電廠一號機主蒸汽管支管之聲波振動自然頻率時考慮管內截面積之變化，以期確保分析之準確性。分析中以數值分析法及以有限元素分析方法，分別針對龍門一號機主蒸汽管銜接各 SRV 支管系統之實際幾何形狀，包括截面積漸縮的 SRV 管嘴以及直立管與管嘴內徑的差異等，進行聲波自然頻率分析。分析結果顯示，數值分析法與有限元素分析法分析結果極為吻合，各支管系統之聲波自然頻率在 183.58 Hz~188.47 Hz 之間，其相對應之 Strouhal Number  $St$  在 0.700~0.719 之間。依文獻【5】及 BWRVIP-194 計算龍門一號機四條主蒸汽管發生聲波共振之 Strouhal Number  $St_{on}$  分別為 0.47 及 0.46，因此，若保守以  $St_{on} = 0.47$  而言，龍門一號機主蒸汽管各支管距離發生聲波共振之安全餘裕( $(St-0.47)/0.47$ ) 為 48.9%~53.0% 之間，如表 3.3 所示。

依據 EPRI MRP-235 【11】之建議，上列 Strouhal Number 之安全餘裕在±30 % 以上時，即可避免 BWR 主蒸汽管發生聲波共振之現象。表 3.3 顯示，龍門核電廠一號機主蒸汽管各支管距離發生聲波共振之安全餘裕 (48.9%~53.0%) 均超過 30 %。另 BWRVIP-182 雖未提出安全餘裕之建議，但強調如果 Strouhal Number  $St$  小於 0.25 或大於 0.60，則同樣不致於發生聲波共振之現象。而龍門核電廠一號機主蒸汽管各支管之

Strouhal Number  $St$  (0.700~0.719) 均遠大於 0.60，詳如表 3.3 所示。

綜合以上分析結果，龍門核電廠一號機主蒸汽管共 18 條支管均不致有發生聲波共振之疑慮，因此，蒸汽乾燥器沒有承受聲波共振負荷之問題。

#### 五、參考資料

1. Regulatory Guide 1.20 Revision 3 "Comprehensive Vibration Assessment Program For Reactor Internals During Preoperational And Initial Startup Testing", United States Nuclear Regulatory Commission, March, 2007.
2. EPRI BWRVIP-182 "Guidance for Demonstration of Steam Dryer Integrity for Power Uprate"
3. EPRI BWRVIP-194 "Methodologies for Demonstrating Steam Dryer Integrity for Power Uprate"
4. ASME Steam Tables Sixth Edition, "Thermodynamic and Transport Properties of Steam"
5. S. Ziada and S. Shine, "Strouhal Numbers of Flow-Excited Acoustic Resonance of Closed Side Branches," Journal of Fluids and Structures 13, 127-142 (1999)
6. 台灣電力公司, "核一廠中幅度功率提昇須執行 Steam Dryer Vibration Monitoring 之評估報告"
7. 台灣電力公司, "核二廠中幅度功率提昇計畫執行蒸汽乾燥器振動監測評估"
8. GE Nuclear Energy, "Taiwan Power Company Lungmen Project Fourth Nuclear Power Plant Units 1 and 2", Contract No. 8748611M001-1, Calculation (Document) No.
  - (1) 31113-0B21-2101 Main Steam System (B21) -Establish system Design Parameters
  - (2) 31113-0B21-2104 Main Steam System (B21) -Sizing of Major Equipments
  - (3) 31113-0B21-2105 Main Steam System (B21) -28" Main Steam Line Pipe Sizing
  - (4) 31113-0B21-2106 Main Steam System (B21) - Establish system

- Design Flow
- (5) GE Nuclear Energy, "Taiwan Power Company Lungmen Project Fourth Nuclear Power Plant Units 1 and 2", Contract No. 8748611M001-1, Project Drawing Number
  - (6) 3113-1B21-M2001 Piping and Instrument Diagram, Main Steam
  - (7) 3113-1B21-M2002 Piping and Instrument Diagram, Main Steam
  - (8) 3113-1B21-M2003 Piping and Instrument Diagram, Main Steam
  - (9) 3113-1B21-M4025 Piping Isometric, Main Steam
  - (10) 3113-1B21-M4030 Piping Isometric, Main Steam
  - (11) 3113-1B21-M4019 Piping Isometric, Main Steam
  - (12) 3113-1B21-M4123 Piping Isometric, Main Steam
9. "Applied Numerical Analysis", Curtis F. Gerald and Patrick O. Wheatley, Addison-Wesley Publishing Company, 3rd Ed., 1984.
  10. "Materials Reliability Program: Fatigue Management Handbook, Revision 1 (MRP-235 w/Correctopns)", EPRI Final Report, December, 2009.

六、附件

附件一、A 串主蒸汽管支管與 3A SRV 管嘴實際幾何形狀之聲波自然頻率數值分析輸出檔

At iteration 1  
 S square: 5.000000 P at open end : -0.31376023  
 The natural frequency : 229.72162 Hz

At iteration 2  
 S square: 1.000000 P at open end : 0.63285047  
 The natural frequency : 102.73463 Hz

At iteration 3  
 S square: 3.674174 P at open end : -0.08111930  
 The natural frequency : 196.92313 Hz

At iteration 4  
 S square: 3.370342 P at open end :

-0.01744312  
 The natural frequency : 188.60529 Hz

At iteration 5  
 S square: 3.287112 P at open end : 0.00071769  
 The natural frequency : 186.26193 Hz

At iteration 6  
 S square: 3.290401 P at open end : -0.00000593  
 The natural frequency : 186.35510 Hz

At iteration 7  
 S square: 3.290374 P at open end : -0.00000002  
 The natural frequency : 186.35434 Hz

七、表格

表 2.1、一號機主蒸汽管 SRV 支管間距離  $l$  (mm)

| 主蒸汽管   | SRV 編號 | $l$  |
|--------|--------|------|
| A line | 3A&4A  | 1515 |
|        | 4A&5A  | 1195 |
|        | 5A&6A  | 1201 |
| B line | 3B&4B  | 1200 |
|        | 4B&5B  | 1200 |
|        | 5B&6B  | 1207 |
|        | 6B&7B  | 1671 |
| C line | 3C&4C  | 1200 |
|        | 4C&5C  | 1200 |
|        | 5C&6C  | 1207 |
|        | 6C&7C  | 1686 |
| D line | 3D&4D  | 1524 |
|        | 4D&5D  | 1184 |
|        | 5D&6D  | 1201 |

表 2.2、一號機 SRV 支管至上游第一個 90° 彎頭之距離  $L$  (mm)

| 主蒸汽管 | SRV 編號 | $L$ | D | $L/D$ |
|------|--------|-----|---|-------|
|      |        |     |   |       |



|           |    |      |        |       |
|-----------|----|------|--------|-------|
| A<br>line | 3A | 1969 | 637.34 | 3.09  |
|           | 4A | 3484 | 637.34 | 5.47  |
|           | 5A | 4679 | 637.34 | 7.34  |
|           | 6A | 5880 | 637.34 | 9.23  |
| B<br>line | 3B | 2200 | 637.34 | 3.45  |
|           | 4B | 3400 | 637.34 | 5.33  |
|           | 5B | 4600 | 637.34 | 7.22  |
|           | 6B | 5807 | 637.34 | 9.11  |
|           | 7B | 7478 | 637.34 | 11.73 |
| C<br>line | 3C | 2200 | 637.34 | 3.45  |
|           | 4C | 3400 | 637.34 | 5.33  |
|           | 5C | 4600 | 637.34 | 7.22  |
|           | 6C | 5807 | 637.34 | 9.11  |
|           | 7C | 7493 | 637.34 | 11.76 |
| D<br>line | 3D | 1972 | 637.34 | 3.09  |
|           | 4D | 3497 | 637.34 | 5.49  |
|           | 5D | 4681 | 637.34 | 7.34  |
|           | 6D | 5882 | 637.34 | 9.23  |

表 3.1 A 串主蒸汽管支管與 3A SRV 管嘴第 1~10 個振模之自然頻率(簡化為直管)

| 振模 | 自然頻率 (Hz)          |
|----|--------------------|
| 1  | <b>161.372</b>     |
| 2  | <b>484.034</b>     |
| 3  | <b>806.453</b>     |
| 4  | <b>846E+03</b>     |
| 5  | <b>1.44991E+03</b> |
| 6  | <b>1.54436E+03</b> |
| 7  | <b>1.54457E+03</b> |
| 8  | <b>1.60948E+03</b> |
| 9  | <b>1.6097E+03</b>  |
| 10 | <b>1.73227E+03</b> |

表 3.2 A 串主蒸汽管支管與 3A SRV 管嘴第 1~10 個振模之自然頻率(考慮實際幾何形狀)

| 振模 | 自然頻率 (Hz)          |
|----|--------------------|
| 1  | <b>186.141</b>     |
| 2  | <b>484.275</b>     |
| 3  | <b>811.873</b>     |
| 4  | <b>1.13211E+03</b> |
| 5  | <b>1.44169E+03</b> |
| 6  | <b>1.5948E+03</b>  |
| 7  | <b>1.59513E+03</b> |
| 8  | <b>1.77042E+03</b> |
| 9  | <b>1.77084E+03</b> |
| 10 | <b>1.78094E+03</b> |

表 2.3 一號機主蒸汽管各支管尺寸(mm)

| 主蒸汽管      | SRV 編號 | 主蒸汽管中心 EL | Flange EL | Flange 高度 | 支管長度 L |
|-----------|--------|-----------|-----------|-----------|--------|
| A<br>line | 3A     | 16430     | 17156     | 726       | 703.33 |
|           | 4A     | 16415     | 17141     | 726       | 703.33 |
|           | 5A     | 16404     | 17130     | 726       | 703.33 |
|           | 6A     | 16392     | 17118     | 726       | 703.33 |
| B<br>line | 3B     | 16471     | 17196     | 725       | 702.33 |
|           | 4B     | 16459     | 17186     | 727       | 704.33 |
|           | 5B     | 16447     | 17175     | 728       | 705.33 |
|           | 6B     | 16434     | 17162     | 728       | 705.33 |
|           | 7B     | 16418     | 17153     | 735       | 712.33 |
| C<br>line | 3C     | 16471     | 17195     | 724       | 701.33 |
|           | 4C     | 16459     | 17183     | 724       | 701.33 |
|           | 5C     | 16447     | 17165     | 718       | 695.33 |
|           | 6C     | 16434     | 17160     | 726       | 703.33 |
|           | 7C     | 16418     | 17150     | 732       | 709.33 |
| D<br>line | 3D     | 16430     | 17157     | 727       | 704.33 |
|           | 4D     | 16415     | 17141     | 726       | 703.33 |
|           | 5D     | 16404     | 17129     | 725       | 702.33 |
|           | 6D     | 16392     | 17116     | 724       | 701.33 |

表 3.3 一號機各直立支管之聲波第 1 振模自然頻率、發生聲波共振之 Strouhal Number  $St_{on}$  及 Strouhal Number  $St$

| 主蒸汽管   | SRV 編號 | 支管長度 L | 第 1 振模<br>自然頻率<br>$f_1$ (Hz) | Strouhal<br>Number<br>$St$ | 發生聲波共振之<br>Strouhal Number<br>$St_{on}$ |                | 安全餘裕 <sup>(註)</sup><br>$\left(\frac{St - 0.47}{0.47}\right)$ | 是否有聲<br>波共振疑<br>慮 |
|--------|--------|--------|------------------------------|----------------------------|---|----------------|--|-------------------|
|        |        |        |                              |                            | 文獻<br>【5】                               | BWRVIP<br>-194 |  |                   |
| A line | 3A     | 703.33 | 186.14                       | 0.710                      | 0.47                                    | 0.46           | 51.1% > 30%  | 無                 |
|        | 4A     | 703.33 | 186.14                       | 0.710                      | 0.47                                    | 0.46           | 51.1% > 30%  | 無                 |
|        | 5A     | 703.33 | 186.14                       | 0.710                      | 0.47                                    | 0.46           | 51.1% > 30%  | 無                 |
|        | 6A     | 703.33 | 186.14                       | 0.710                      | 0.47                                    | 0.46           | 51.1% > 30%  | 無                 |
| B line | 3B     | 702.33 | 186.43                       | 0.711                      | 0.47                                    | 0.46           | 51.3% > 30%  | 無                 |
|        | 4B     | 704.33 | 185.85                       | 0.709                      | 0.47                                    | 0.46           | 50.9% > 30%  | 無                 |
|        | 5B     | 705.33 | 185.57                       | 0.708                      | 0.47                                    | 0.46           | 50.6% > 30%  | 無                 |
|        | 6B     | 705.33 | 185.57                       | 0.708                      | 0.47                                    | 0.46           | 50.6% > 30%  | 無                 |
|        | 7B     | 712.33 | 183.58                       | 0.700                      | 0.47                                    | 0.46           | 48.9% > 30%  | 無                 |
| C line | 3C     | 701.33 | 186.72                       | 0.712                      | 0.47                                    | 0.46           | 51.5% > 30%  | 無                 |
|        | 4C     | 701.33 | 186.72                       | 0.712                      | 0.47                                    | 0.46           | 51.5% > 30%  | 無                 |
|        | 5C     | 695.33 | 188.47                       | 0.719                      | 0.47                                    | 0.46           | 53.0% > 30%  | 無                 |
|        | 6C     | 703.33 | 186.14                       | 0.710                      | 0.47                                    | 0.46           | 51.1% > 30%  | 無                 |
|        | 7C     | 709.33 | 184.43                       | 0.703                      | 0.47                                    | 0.46           | 49.6% > 30%  | 無                 |
| D line | 3D     | 704.33 | 185.85                       | 0.709                      | 0.47                                    | 0.46           | 50.9% > 30%  | 無                 |
|        | 4D     | 703.33 | 186.14                       | 0.710                      | 0.47                                    | 0.46           | 51.1% > 30%  | 無                 |
|        | 5D     | 702.33 | 186.43                       | 0.711                      | 0.47                                    | 0.46           | 51.3% > 30%  | 無                 |
|        | 6D     | 701.33 | 186.72                       | 0.712                      | 0.47                                    | 0.46           | 51.5% > 30%  | 無                 |

註：依 EPRI MRP-235 【10】之建議，避免 BWR 主蒸汽管產生聲波共振，安全餘裕應大於 30%

表 3.4 一號機各直立支管之聲波第 1 振模自然頻率以數值分析法與有限元素分析法分析結果比較

| 主蒸汽管   | SRV 編號 | 支管長度 L (mm) | 數值分析法 (Hz) | 有限元素分析法 (Hz) |
|--------|--------|-------------|------------|--------------|
| A line | 3A     | 703.33      | 186.35     | 186.14       |
|        | 4A     | 703.33      | 186.35     | 186.14       |
|        | 5A     | 703.33      | 186.35     | 186.14       |
|        | 6A     | 703.33      | 186.35     | 186.14       |
| B line | 3B     | 702.33      | 186.63     | 186.43       |
|        | 4B     | 704.33      | 186.09     | 185.85       |
|        | 5B     | 705.33      | 185.82     | 185.57       |
|        | 6B     | 705.33      | 185.82     | 185.57       |
|        | 7B     | 712.33      | 183.76     | 183.58       |
| C line | 3C     | 701.33      | 187.00     | 186.72       |
|        | 4C     | 701.33      | 187.00     | 186.72       |
|        | 5C     | 695.33      | 188.63     | 188.47       |
|        | 6C     | 703.33      | 186.35     | 186.14       |
|        | 7C     | 709.33      | 184.64     | 184.43       |
| D line | 3D     | 704.33      | 186.09     | 185.85       |
|        | 4D     | 703.33      | 186.35     | 186.14       |
|        | 5D     | 702.33      | 186.63     | 186.43       |
|        | 6D     | 701.33      | 187.00     | 186.72       |

### 八、圖片

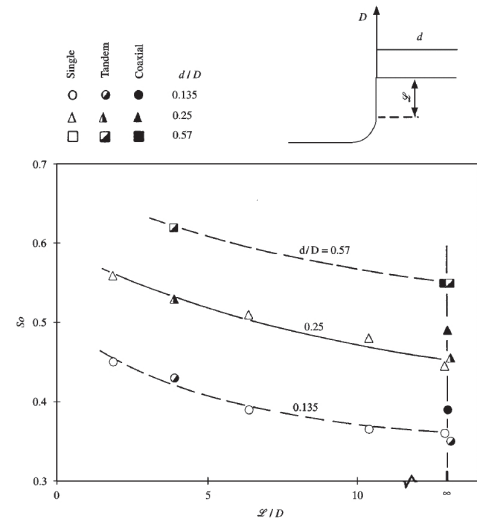


Figure 14. Design chart of critical Strouhal number at the onset of resonance (for proper use see comments in the text).

圖 2.1、影響發生聲波共振之共振 Strouhal number ( $St_{on}$ ) 的兩項變數： $d/D$  及  $L/D$ 。

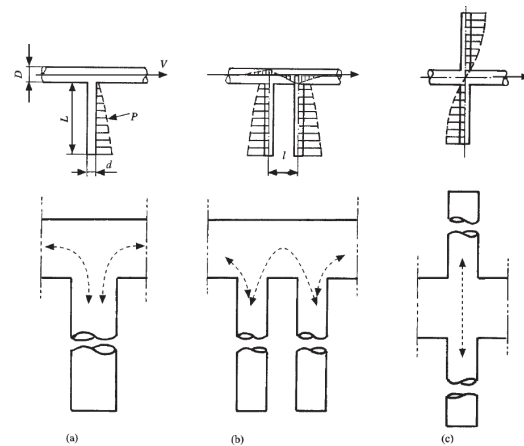


Figure 2. Tested arrangements of side-branches showing the acoustic pressure distribution of the first acoustic mode and the associated acoustic flux: (a) single branch; (b) tandem branches; (c) coaxial branches. The arrows in the bottom figures indicate the acoustic flux of the resonant acoustic modes.

圖 2.2、測試時支管之安排：(a) 單支管 (b) 雙支管 ( $l \ll 4L$ ) (c) 對向同軸支管。下排圖虛線箭頭表示共振聲波通量(flux)

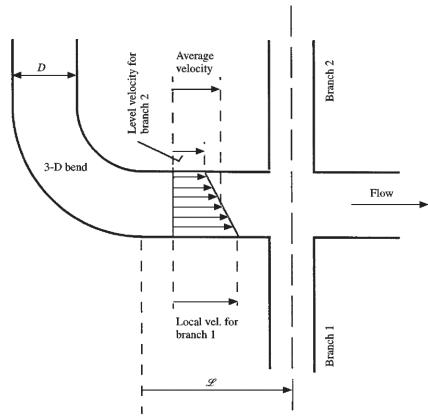


Figure 4. Schematic presentation of a nonuniform velocity profile (due to an upstream elbow) approaching two side-branches. Note that for the purposes of simplicity, a linear profile is shown.

圖 2.3、彎管對聲波共振影響圖示 (彎管外側流速較平均值大，內側流速較平均值小)

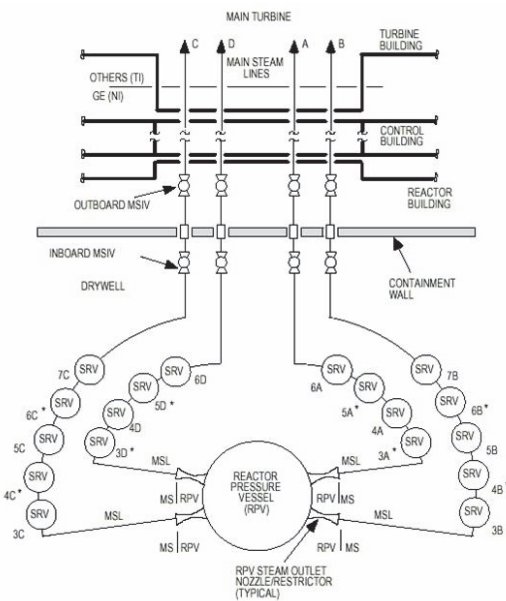


圖 2.4、龍門核電廠一號機主蒸汽管之 SRV 佈置示意圖

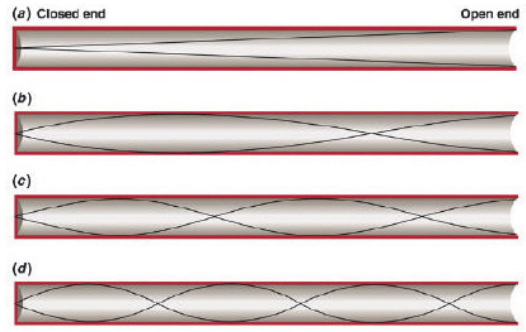


圖 3.1 駐波在一端為開口，另一端為閉合直管內之聲波振模 ((a)、(b)、(c)、(d)分別為第 1、2、3、4 振模)

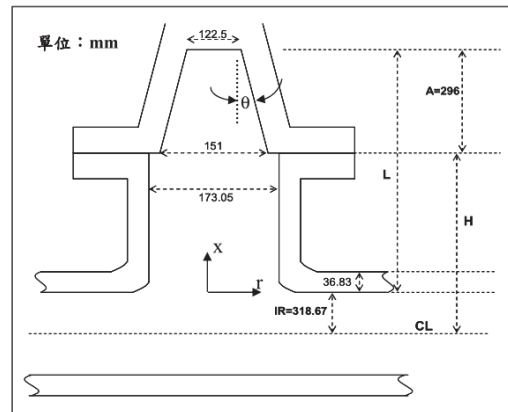


圖 3.2 龍門核電廠一號機 A 串主蒸汽管支管與 3A SRV 管嘴之尺寸圖

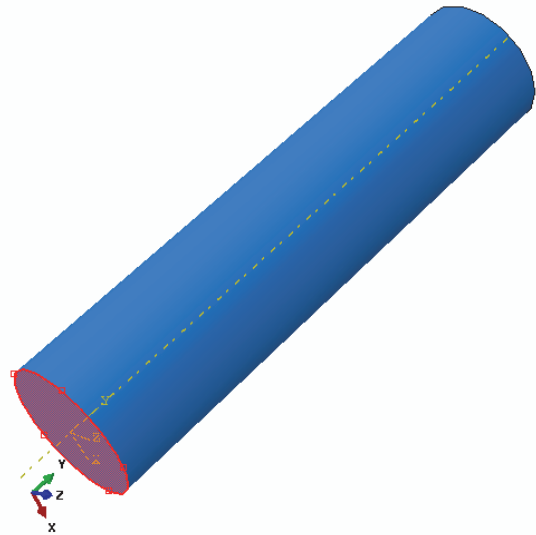


圖 3.3 龍門核電廠一號機 A 串主蒸汽管支管與 3A SRV 管嘴簡化為一均勻直管之有限元素聲波分析模式

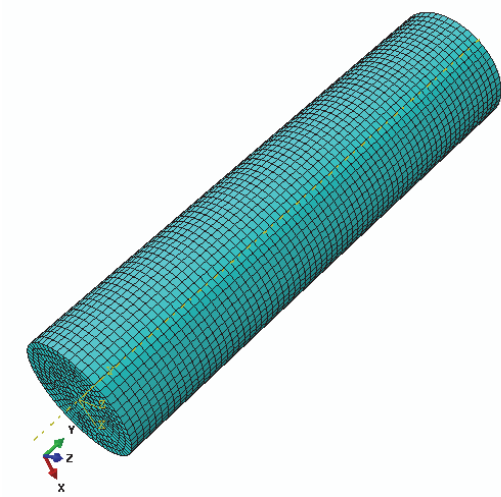
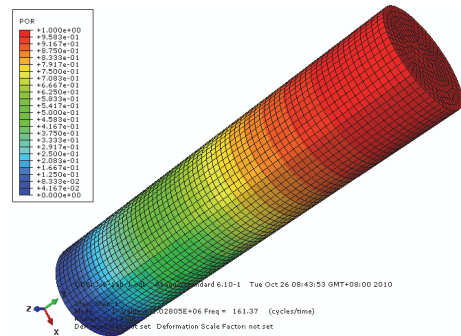
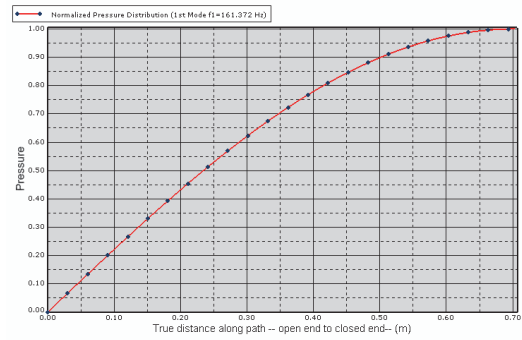


圖 3.4 龍門核電廠一號機 A 串主蒸汽管支管與 3A SRV 管嘴簡化為一均勻直管之有限元素聲波分析網格劃分



(a) 壓力分佈線圖 (第 1 振模  $f_1 = 161.372$  Hz)



(a) 壓力曲線圖 (由開口端至閉口端) (第 1 振模  $f_1 = 161.372$  Hz)

圖 3.5 A 串主蒸汽管支管與 3A SRV 管嘴正規化(normalized)之壓力分佈情形 (簡化為直管)

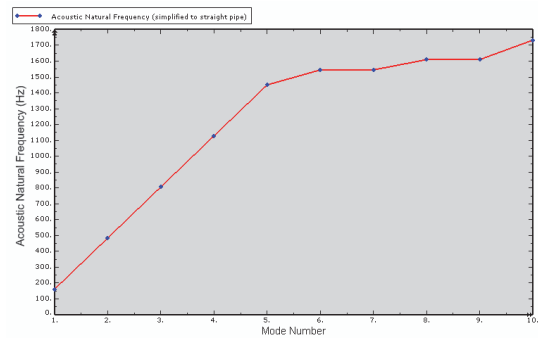


圖 3.6 A 串主蒸汽管支管與 3A SRV 管嘴第 1~10 個振模之聲波自然頻率(簡化為直管)

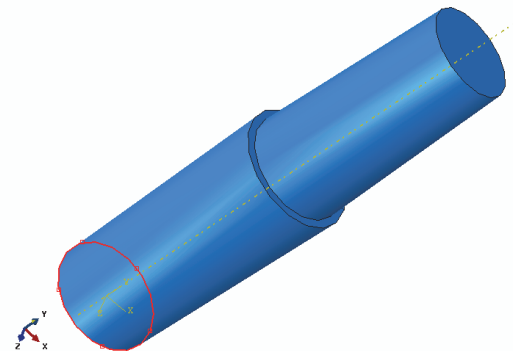


圖 3.7 龍門核電廠一號機 A 串主蒸汽管支管與 3A SRV 管嘴之實際管內蒸汽空間之有限元素聲波分析模式

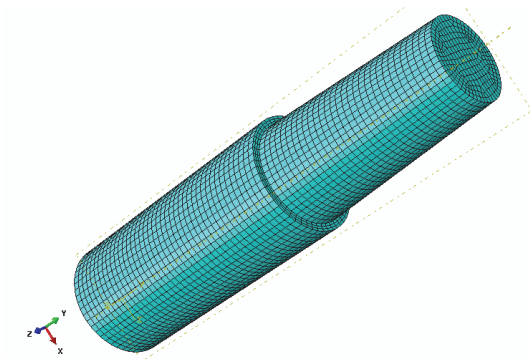
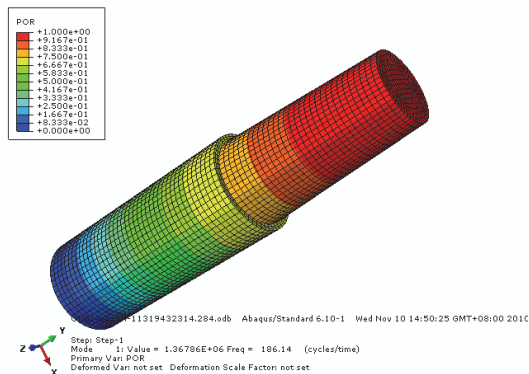
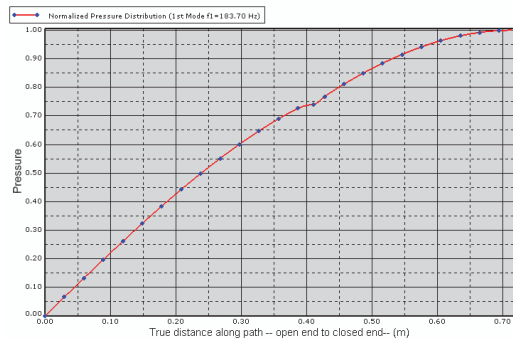


圖 3.8 龍門核電廠一號機 A 串主蒸汽管支管與 3A SRV 管嘴之實際管內蒸汽空間之有限元素聲波分析網格劃分



(a) 壓力分佈線圖 (第 1 振模  $f_1=186.14$  Hz)



(a) 壓力曲線圖 (由開口端至閉口端)(第 1 振模  $f_1=183.70$  Hz)

圖 3.9 A 串主蒸汽管支管與 3A SRV 管嘴正規化(normalized)之壓力分佈情形 (考慮實際幾何形狀)

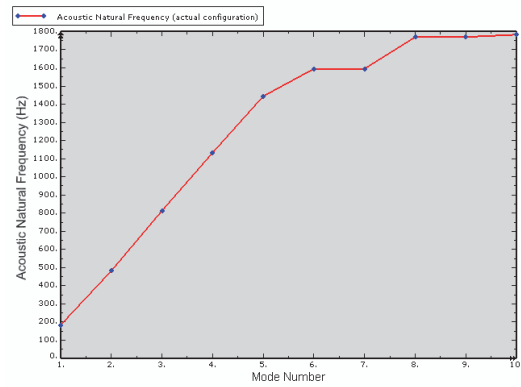


圖 3.10 A 串主蒸汽管支管與 3A SRV 管嘴第 1~10 個振模之聲波自然頻率 (考慮實際幾何形狀)

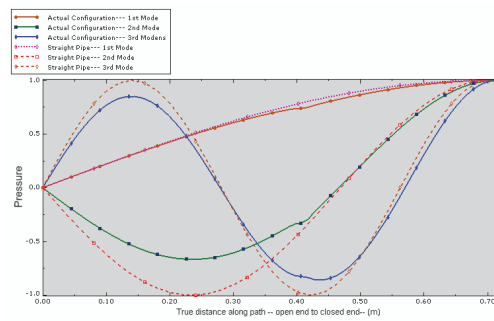


圖 3.11 龍門核電廠一號機 A 串主蒸汽管支管與 3A SRV 管嘴聲波之第 1 振模至第 3 振模下, 管內壓之變化, 並與假設為直管時之比較

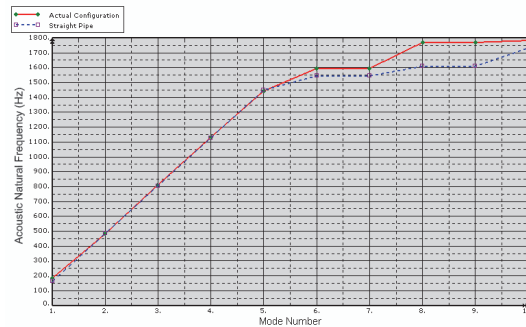


圖 3.12 龍門核電廠一號機 A 串主蒸汽管支管與 3A SRV 管嘴聲波之第 1 振模至第 10 振模之自然頻率並與假設為直管時之比較