

指向核能復興之羅盤

省思美濱 3 號機事故(3)

從敲打管路的聲音就知道薄化的專家

作者：原子力安全基盤機構(JNES)安全情報部長 水町涉

譯者：行政院原子能委員會(AEC)技正 石門環

*日文原文刊載於 2004 年 12 月 ENERGY 雜誌

在前一期介紹專家的名言：「以管路內流體的心情進行設計」，這一期介紹另一個名言：「從敲打管路的聲音就知道薄化」。

管路彎曲的部份稱為肘管，為了量測流量而裝設限流孔(Orifice)來限制水流，量測其前後的壓力，這些地方容易發生薄化，故必須加以管理，限流孔也會磨耗而必須定期更換。此次發生事故的美濱 3 號機曾在 1993 年更換限流孔，據說在檢查限流孔與肘管時，管路維護保養的專家一定會敲打管路，現在雖然已有所謂超音波的精密度測手段，但專家也會以管路薄化後聲音變鈍來判別。

聲音的不同令人驚訝

此次破損發生在冷凝水管路 A 串，筆者曾要求切取相同條件的 B 串進行調查量測。結果 B 串也如預想中一樣薄化，當初 10 mm 的管壁厚度最嚴重處薄化至只剩 1.8 mm，A 串薄化至 0.6 mm，結果無法承受 10 個大氣壓的管內壓力而破斷。

此次赴美濱 3 號機事故現場調查，想起前述專家的名言，就試著敲打

管路，結果令人相當驚訝，在限流孔上游未薄化的部份，回音為“康”的金屬音，在下游破斷處附近，則是接近重鈍音。

圖 1 為敲打管路的照片，右側為上游，左側破斷處為下游，圖 2 為薄化後翻捲起來的部份。

此次事故的直接原因為 13 年前即已低於所須最小管壁厚度(4.7 mm)，如果進行量測的話，應該就會維修，但因檢查清單上遺漏此部位，以致 28 年間未曾量測。

事故調查委員會之中期報告如此判斷，但真的沒有機會避免此一事故嗎？理應有機會才對，因為在更換限流孔時，如果是專家的話，一定會敲打下游側，聽一聽聲音。

對於美濱 3 號機事故，我的老師東京大學名譽教授植田辰洋曾說：「限流孔是相當好的元件，當然，因為管路會薄化，在常識上應和下游側管路一體製造，以後一起換新，最近為何把限流孔作成一塊板狀實在無法理解」。

這也是「如果不學歷史，歷史就會回來教訓我們」的一個例子。

圖 3 是從破斷管路的下游側所看到的限流孔照片，專家的名言令人感同身受。

鮮花與香的故事現場

在美濱核電廠進行調查時，1、2 號機均停機，顯得相當平靜。進入 3 號機汽機廠房，走到 2 樓時，聞到飄散的燒香味，看到已設置祭壇、佈置

鮮花，很自然就脫下安全帽及手套，合掌上拜，祈求冥福。筆者曾參訪過世界上約 200 部核能機組，TMI 事故後也曾去調查，但是這是第一次看到如此悲傷的場景。

事故現場受管路破損的影響比預想中還小。2001 年 11 月 7 日，濱岡 1 號機發生氫氣爆炸事故時，筆者作為通產大臣之核能發電技術顧問，曾到發生事故的 RHR 室調查，不但是破損的管路，甚至 RHR 室的門都被炸飛，電纜及空調風管(Duct)也破損，格柵平台(Grating)也飛散四處。

與濱岡核電廠相比，美濱核電廠發生事故的管路周邊受害程度較輕，直接遭受蒸汽噴射的天花板也只有 5 cm 長度左右的傷痕，離破斷部位 2~3m 的管路保溫材料則未受到損壞，只看到 800 噸的熱水溢流在 2 樓樓板，並從平台(Grating)流落至 1 樓。通路端與平台夾雜著該管路部位的保溫材料，熱水流至相當廣大的範圍。

流況解析

原子力安全基盤機構與日本原子力研究所為瞭解冷凝水管路內部流況，進行流況解析，作為肇因分析之一環，雖然尚未獲得最終結論，但仍對流況進行大致的解析。

管路的流速為每秒 2.2m，在限流孔下游中心的流速加速到最大約每秒 9m，預測再附著點約為直徑 D 的 2 倍(2D)左右。在此之間，也就是到限流孔下游 2D 距離為止之區間產生剝離域，並預期特別是在限流孔下游 60~

70cm 處發生較大程度的薄化，此次進行 2 次元及 3 次元詳細解析的結果，已證實以上現象。

圖 4 所示為解析模式(Model)，將管路內部切割成 92 萬個格子進行解析。圖 5 為管路內部流速分佈的計算結果，在限流孔下游，中心處之流速加速至最大每秒 9m，再附著點為直徑的 1.7~1.9 倍。

擾流能量分佈解析

其次說明管路內部擾流之能量分佈解析結果，圖 6 為管路中央斷面擾流之能量分佈解析結果，可知限流孔下游受限制之水流外側剪力區域，也就是速度斜率最大區域之能量變大。

圖 7 為管路內壁部份擾流之能量分佈解析結果，可知限流孔下游全部區域較上游直管具有較大能量。

今後預定進行擾流引起薄化之解析。

A 串與 B 串之流況差異

另一方面亦進行 A 串與 B 串之比較，由解析得知 A 串與 B 串流況具有相當差異性，冷凝水從低壓加熱器至集管(Header)分成 A、B 兩串，進入除氧器。A 串從集管起為 80cm 左右的垂直管，再向左彎曲往限流孔方向，B 串則為 180 cm 左右的垂直管，再向右彎曲往限流孔方向。水流變化最大的集管垂直管有 80 cm 及 180 cm 的差異，可想而知對下游有相當大的影響。

突破難關的金崎宮

調查美濱事故時是從敦賀搭車前去，從車窗中可看到敦賀灣的金崎宮，山頂上有金崎城，此地是織田信長與家康、秀吉、利家會合後，滿懷自信攻打朝倉義景，也就是元龜戰亂的場所。當時，信長之妹市方之夫淺井長政倒戈，信長軍遭受夾擊，乃讓秀吉殿後壓陣，好不容易才保住生命脫逃，抵達京都時，信長的隨從只剩十多人，這是信長的最大危機，也就是世人所說的「金崎的逃生口」。

筆者又寫了一些喜好的歷史，這個金崎宮因為以上事件，現在已成為有助於突破難關的宮殿。

看一下現在核電的狀況，僅僅這個半島就有文殊事故和這一次的美濱問題，再加上六所村的再處理問題等，實在是問題堆積如山。期盼能像金崎宮那樣，努力突破核電的難關。

事故調查委員會中期報告

上次的中期報告已明確提出當前對策及此次事故的原因，在此僅就結論部份摘要如下。

(1)當前對策

- ①檢查清單之作成及統一管理
- ②落實外包管理
- ③為防患未然，落實事業者間資訊共享

(2) 事故原因

- ①關西電力、三菱重工、日本 ARM 等 3 家相關公司因二次側系統管路薄化管理上的缺失，必須管理的部位未列入管理清單內，而且一直到事故發生為止都沒有修正。
- ②在品質保證、維護管理方面有重大缺失，在降低人為誤失及管理缺失方面的體制不夠完備，在基本的業務管理上有缺陷。
- ③作為定期安全審查的一環，對運轉超過 30 年的核電廠，要求進行老化的綜合評估，但每 10 年進行的定期安全審查仍具有相當重要的功用。

繼承專家意識及經驗以防止事故

由流況解析得知發生事故的 A 串冷凝水管路與具有相同材料及水質的 B 串管路，其流況及薄化情況具有相當的差異性，這也顯示出美濱 1 號機與 2 號機完全不同的事實。

由此解析看來，上一期所說的「以管路內流體的心情進行設計維護」，真可說是至理名言。A 串集管上垂直管路較短，水流方向的改變也最大，急劇產生三次元的彎曲回旋流，B 串之垂直管較長，回旋流也較少，由此可知管路內流體的心情。

「敲打管路就知道薄化」，這和前一期所說的「以管路內流體的心情進行設計維護」一樣，把管路專家的常識變成格言，代代相傳。這是給設計人員及維護人員的名言，核電廠絕對須要有「我自己的廠」這種意識的專

家，而技術的傳承也相當重要。

現在，安全文化常被提起，筆者在安裝反應爐壓力容器時，也曾參加祭拜儀式，祈求神明保佑全體人員的安全，這是因為筆者認為培養大家同心協力的精神具有相當的助益。此次看到織田信長突破難關的金崎宮，期盼能加以仿效，致力於突破核能界的難關，

當然不是要依賴神明，其目的是要繼承核電技術專家的意識與經驗，並致力於防止事故，在此再加上一句管路的格言作為結語。

「敲打管路就知道薄化」。

「以管路內流體的心情進行設計維護」。

「如果不學歷史，歷史就會回來教訓我們」。

「核能安全從杜絕小缺失做起」。



圖 1 美濱 3 號機管路破斷處（右側為上游，左側為下游）



圖 2 薄化至 0.6mm 破斷的管路

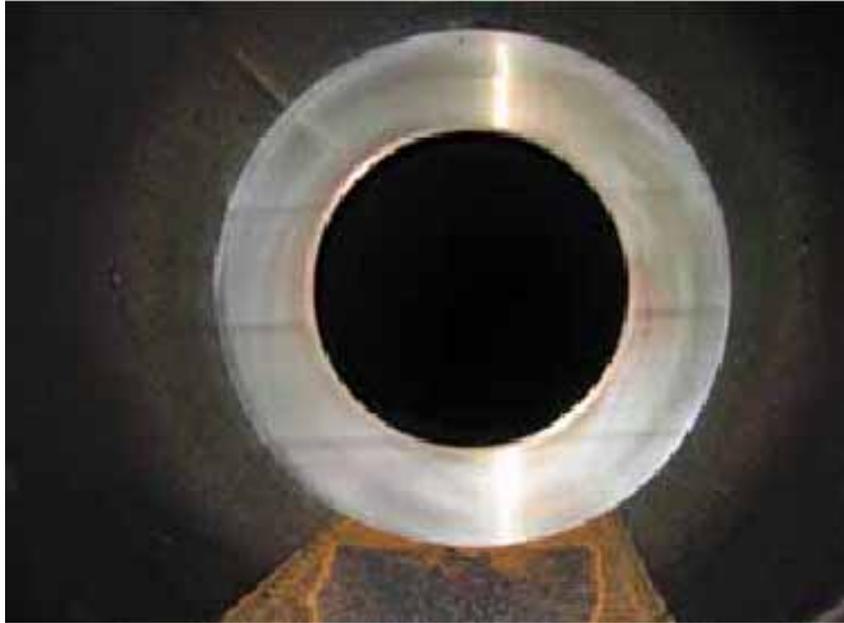


圖 3 破斷處上游之限流孔，前方為破斷處管路內面

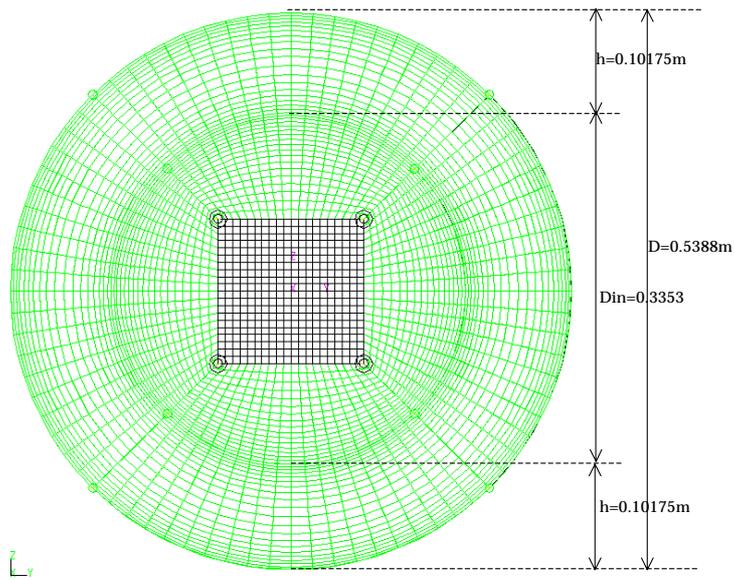


圖 4 管路內部解析模式(92 萬格子)

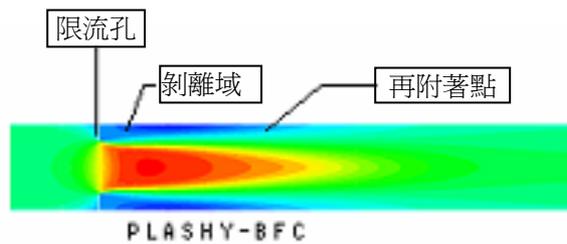


圖 5 管路內部流況解析

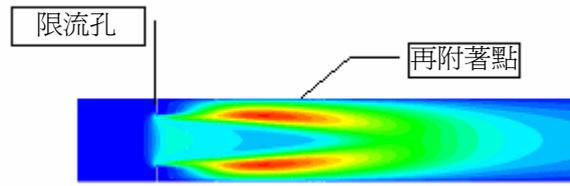


圖 6 管路中央斷面擾流能量分佈解析結果

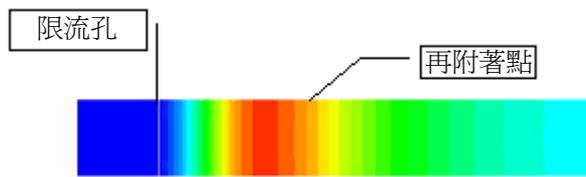


圖 7 管路內壁擾流能量分佈解析結果