

指向核能復興之羅盤

省思美濱 3 號機事故(1)

如果不學歷史，歷史就會回來教訓我們

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 10 月 ENERGY 雜誌

無論是日本史或世界史，筆者對歷史都相當喜好，聽說最近的年輕人已不流行歷史了。我認識的一位高中老師曾說：「以往日本國民都知道信長、秀吉、家康等家族的興衰遞嬗；現代的日本青年還知道的已如鳳毛麟角了」。也有更離譜的學生居然說：「美國和日本打過戰爭？騙人！日本和美國這麼好」。我曾經向高中生談到「如果不學歷史，歷史就會回來教訓我們」的諺語，結果被反問：「曾有過歷史回來教訓我們的事？」這種經驗令我驚訝不已。了解歷史、學習歷史是相當重要的，改革歷史教育可說是緊急的課題。在此謹闡述美濱事故有關的核能歷史。

難忘的一天 8 月 9 日

2004 年 8 月 9 日星期一這一天令人難以忘懷。2003 年夏天，為了成立新組織：原子力安全基盤機構(JNES)而放棄暑期休假。2004 年的這一天暑假，週末離開酷暑的東京後神清氣爽，8 月 9 日下午 4 時左右接獲「美濱二次側系統發生事故」第 1 個通報，5 時 30 分電視報導有 4 人死亡，急忙經關越高速公路直赴辦公室，隨後就是徹夜的作業。在調查過去事故例的同

時，也向國際原子能總署(IAEA)和美國核能管制委員會(NRC)等海外有關機關送出第 1 個通報。本案配合原子力安全保安院迅速的網路公告，美國的 Nucleonics Week 也很難得地刊載讚賞的報導：「日本過去所未曾有的異例的快速反應」。

世界上類似事故例

首先調查與此事故類似的事例，篩選出美國 23 例及芬蘭 1 例加以檢討，其中最類似的例子為美國維吉尼亞電力公司所屬的 Surry 核電廠 2 號機事故。1986 年 12 月 9 日，飼水管路斷頭式(Guillotine)破壞，噴出之高溫水、蒸汽造成 8 人受害，其中 4 人死亡。

筆者曾調查過這個 Surry 核電廠，從華盛頓前往，這是位於 Surry 郡 James 河旁、純樸的田園風景中一個小而美的電廠。此電廠以剛開始中期貯存而有名，也就是首次將用過核燃料在廠內以貯存箱(Cask)保管。

查看當時日本的新聞報導，大標題是「此缺失在日本不會發生」、「鬆散的水質管理」等，並敘述：「我國的核電廠對相同的二次側飼水、冷凝水管路由電力公司自主進行管壁厚度量測，水質管理也相當徹底，不須要再採取特別對策。但為求萬全，對代表性的電廠執行詳細檢查」。

當時的日本是 Japan as No.1 的時代，報導內容相當自傲，但是這次終究災難降臨，這也是因「電力公司自主量測管壁厚度，不須要再採取特別對策」，而漏失了此次應檢查的部位，導致日本發生了過去難以想像的事態。

我最喜歡的諺語：「如果不學歷史，歷史就會回來教訓我們」，實在是至理名言。

保安院和我們(JNES)彙整世界各國二次側系統管壁薄化現象的類似事故例，其發生部位、電廠名稱、發生年度等如圖 1 所示。

Surry 事故詳情

Surry 2 號機為 77.5 萬瓩的 PWR 電廠，於 1973 年 5 月開始運轉，至 1986 年發生事故時已運轉 76,600 小時，事故發生在汽機廠房內飼水管，直徑 45.7cm、管壁厚度 1.27cm 的肘管(Elbow)。

美濱 3 號機則發生在汽機廠房內之冷凝水管路（直徑 56cm，管壁厚度 1cm）限流孔(Orifice)下游，與 Surry 2 號機事故相當類似。Surry 事故時，正進行儀控系統改善工程的 6 位作業員和進行管路保溫作業的 2 人受害，其中 4 人在一星期內死亡。

美濱與 Surry 的直接原因都是管壁薄化引起管路破斷。Surry 除了在肘管部位薄化最嚴重以外，T 型管和鉸道也發生薄化現象，肘管的壁厚薄化至 3~10mm，局部部位有凹陷，其最小壁厚為 1.2mm。

關西電力公司初步調查結果，美濱薄化到最小壁厚為 1.4mm，後來原子力安全保安院與 JNES 量測結果為 0.6mm，這和 Surry 也相當類似。調查 Surry 肘管內表面結晶粒的結果，證實並非孔蝕(Cavitation)(圖 2)。

所謂沖腐蝕是指在高溫高速水流中，因電化學腐蝕與急速水流導致氧

化膜剝離與去除相互作用而產生的薄化現象。此薄化現象是因噴流所引起的亂流狀態而發生，化學作用稱為腐蝕，物理作用稱為沖腐。

沖腐蝕所產生的薄化現象與流速、亂流、渦流、溶氧、pH值、溫度等有相當複雜的關係，特別是磁鐵礦(Magnetite, Fe_3O_4)安定膜層之形成相當重要。在低溶氧條件下，會阻礙此磁鐵礦層之形成而促進沖腐蝕。此外，pH值在 9.2 以上可抑制沖腐蝕，溫度在 $90^\circ\text{C} \sim 220^\circ\text{C}$ 左右時，磁鐵礦層不易形成，亦會促進沖腐蝕，特別是在 $140^\circ\text{C} \sim 150^\circ\text{C}$ 的狀況下最差，美濱則幾乎都在 140°C ，這也是歷史教導我們的。

Surry 電廠當時在 100% 功率運轉，蒸汽產生器低水位造成反應爐跳機，飼水管路內因而產生壓力波，在管路薄化部位產生局部高應力而導致破壞。在現場之作業員作證，在破壞前 5 秒曾聽到蒸汽洩漏聲音，蒸汽先洩漏後導致斷頭式破壞。破壞是從大幅薄化部位沿著軸向龜裂，蒸汽由此洩漏後，沿著周向 360 度瞬間發生斷頭式破壞。

NRC 之行動與 Surry 再起動

NRC 對此事故之結論為(1)肘管、T 型管之形狀引起局部性高速亂流、(2)pH 值、(3)水質管理、(4)溫度、(5)管路材質等之複雜組合。這真是一針見血的結論，我們當然有必要謙虛地「學習歷史」。

事故後，NRC 派遣大批人員組成視察團隊赴現場，決定進行短期與長期探討，隔年 3 年 20 日再起動，1 號機也進行檢查，同年 2 月 23 日再起動。

NRC 認為 Surry 事故與輻射、反應爐安全性無關，如果管路薄化能確實管理即可，而允許機組再起動。因此，破損之管以建廠時相同形狀、相同材質的新管更換，就長期性措施而言，NRC 以上述沖腐蝕之對策為主，作出結論，提請所有電力公司注意，並要求各電力公司提出檢查報告。這確實是科學、合理的判斷，我國也應效法。

美濱 3 號機與 Surry 2 號機之比較

為易於了解，將美濱 3 號機與 Surry 2 號機作成比較表如下：

美濱 3 號機與 Surry 2 號機比較表

	美濱 3 號機	Surry2 號機
事故發生時已運轉時間	約 19 萬小時	7.66 萬小時
破損部位	二次側管路 冷凝水流量計 限流孔(Orifice)下游	二次側管路 飼水管 肘管
破損狀況	部份開口	完全破斷
破損部位之溫度	142°C	192°C
壓力	10 kg/cm ²	25.7kg/cm ²
流速	2.2 m/s	5.2 m/s
管路之直徑	56 cm	45.7 cm
管壁厚度	1 cm	1.27 cm
管路材質	碳鋼 ASTM A234	碳鋼 SB42

芬蘭之類似事故例

1990 年 5 月 28 日，芬蘭之 Loviisa 核電廠 1 號機主飼水系統限流孔法

蘭(Flange)破斷，約 50 噸的水流到汽機間。此破斷事件發生於 5 台主飼水泵中 1 台跳脫之後，管路之止回閥急速關閉，因而產生壓力波(Spike)。檢查後發現法蘭下游長 50cm 的管路從原來壁厚 1.8cm 沿圓周方向薄化至 0.5~1.0cm。檢查 1、2 號機其他限流孔法蘭的結果，發現 10 個法蘭中有 9 個已薄化至所需最小管壁厚度以下，檢查結果亦確認此薄化現象係因沖腐蝕所引起（圖 3）。

國內類似事故例

美濱事故當日，徹夜調查國內類似事例，原子力安全保安院也將此調查結果作為事故調查委員會資料，共報告以下 9 例。

敦賀 1 號機	1971 年 6 月	反應爐飼水泵 B 暖溫(Warming)管路之肘管
敦賀 1 號機	1971 年 8 月	反應爐飼水泵 B 暖溫管路之肘管
濱岡 1 號機	1980 年 9 月	高壓第一飼水加熱器(A)通氣管
敦賀 1 號機	1982 年 5 月	汽水分離器洩水槽(B)水位控制閥下游異徑管連結管
高濱 2 號機	1983 年 2 月	汽水分離再熱器與汽水分離器洩水槽平衡管之歧管
敦賀 1 號機	1983 年 12 月	汽機格蘭蒸汽系統洩水管路之肘管
濱岡 2 號機	1988 年 5 月	HPCI 系統蒸汽洩水管
濱岡 2 號機	1998 年 11 月	汽機驅動飼水泵(B)殼洩水管管嘴(Nozzle)
大飯 1 號機	2004 年 7 月	主飼水管路之肘管

國內火力電廠類似事故例

美濱事故後，8月15日白天，新地火力電廠（相馬共同火力發電：煤炭火力式、100萬瓩）亦發生同樣事故。連結鍋爐飼水管路加熱器之輔助管路上破孔，縱長9cm，寬18cm，近200°C之高溫壓蒸汽噴出（圖4），運轉員發現有異音而停機，沒有人員受傷。

此事故與美濱3號機一樣，在限流孔下游部份發生破損，破損部位亦同為碳鋼管（直徑約30cm），原來10.3mm的管壁厚度薄化至政府的技術基準4.15mm以下，最薄部位為1mm。

此管路從1995年運轉以來未曾檢查，電力公司說明：「原預定在運轉10年以後檢查」。依據電氣事業法，檢查結果不必向管制單位報告，屬事業者自主檢查項目。

原子力安全保安院進行全國性調查，1998年以來，在和歌山縣內工廠的火力電廠曾發生3次與美濱事故同樣的管路破損、蒸汽噴出事故。

美濱蒸汽噴出事故之後，原子力安全保安院針對全國1,000瓩以上火力電廠共1,466部機組的發電設備，調查管壁厚度檢查的狀況，結果發現有一半以上未進行檢查。具體而言，802個火力電廠的1,466部機組之中，以超音波等執行管壁厚度檢查的只有704部機組，半數以上的762部機組運轉後未曾檢查。依據電氣事業法，事業者雖負有義務對鍋爐等重要設備進行定期檢查，但對其他管路等則為事業者自主檢查。

美濱 3 號機事故詳情

美濱 3 號機(PWR、82.6 萬瓩，1976 年 12 月商業運轉)於額定功率穩定運轉中，2004 年 8 月 9 日 15 時 22 分發生火災警報，15 時 28 分發生「3A 蒸汽產生器飼水流量蒸汽流量不一致跳脫」警報，反應爐自動停機。

赴現場巡查結果，發現汽機間 2 樓頂部附近冷凝水管路破斷（第 4 低壓飼水加熱器與除氧器間之冷凝水管路、碳鋼製、管徑 56cm、管壁厚 1cm）。破口形狀在上半部最大翻捲 57cm，破斷部位上游約 50cm 處裝置量測熱水流量的限流孔，其直徑約 34cm，為不銹鋼製之環形(Ring)(圖 5、6、7)。

關西電力公司調查結果，該破斷處管壁厚度最薄部位只有 1.4mm，原子力安全保安院後來在 8 月 13 日會同檢查，結果發現壁厚最薄部位為 0.6mm，管路破裂時曾受到拉伸而大幅薄化，依據關西電力公司內規，10mm 的管壁厚度薄化至 4.7mm 時須採取預防措施，但該部位未列入檢查清單內。

事故發生時，承包商作業員受管路破斷、蒸汽噴出的影響，有 11 人燒燙傷，其中 4 人死亡，7 人受傷。因負傷而入院治療的 7 人之中有 1 人於 8 月 25 日死亡，該事故之死者增加為 5 人。

該破斷部位從商業運轉以來，從未進行超音波量測管壁厚度，而預定在 8 月 14 日開始之第 21 次大修定期檢查時才初次進行檢查。

關西電力公司從 1987 年至 1996 年，將管路檢查等工作委託三菱重工進行，1996 年起則委託日本 ARM 公司檢查。關西電力公司雖在 1990 年以

內規規定檢查部位，但三菱重工並未將該部位列入檢查對象清單內，後來改由日本 ARM 公司執行時亦遺漏此部位，一直到 2003 年 4 月修訂大修定期檢查之未檢查部位時，才注意到此一疏漏，日本 ARM 公司宣稱在 11 月大修定期檢查結束後已提出報告，關西電力公司則預定在 2004 年 8 月 14 日開始的大修定期檢查時，對破斷部位附近的管壁厚度與耐久性進行初次調查。

關西電力公司承認該管路依內規本應於 13 年前進行檢查，結果卻因遺漏此檢查部位之疏失，從開始運轉以來 28 年間未曾檢查。

關西電力公司對包括美濱 1、2 號機在內 8 部機組（美濱 3 號機、大飯 3、4 號機除外）的反應爐設施二次側管路，在 1990～2003 年間進行詳細檢查，對於美濱 3 號機延後檢查的理由，則說明「在調查比 3 號機老舊的美濱 1、2 號機管路時，管壁厚度仍有餘裕」。

另一方面，與美濱 3 號機相同位置設置限流孔的大飯 1 號機，在 2003 年發現管壁摩耗後，已更換新管。

核能安全從杜絕小缺失作起

國會在休會期間的 8 月 31 日對美濱事故案召開經濟產業委員會，議員們對關西電力公司提出許多意見，其中有議員質詢：「1995 年度關西電力公司的核電維護保養費用約 1170 億圓，2003 年度為 700 億圓強，已減少至 60% 以下，比其他電力公司刪減較多的維護保養費，是否未致力於安

全？」，關西電力公司的藤總經理對此回答：「這是因大型的蒸汽產生器等更新工程結束，最近的工程量減少，但仍然以安全為最優先」。大型工程確實已經結束，但像此次因遺漏檢查而使 5 人喪失生命的事故，實在令人心痛，悔恨至極。

筆者在此羅盤系列之 2004 年 6 月份文章中曾提及紐約變成安全的城市，殺人事件也大幅減少，其解決方法就是破窗(Broken Windows)理論，將地下鐵塗鴉與竊盜書籍商品的小事件澈底去除，文章標題也強調「核能安全從杜絕小事件作起」。4,200 個部位的檢項目漏失了 3 個項目，這種小失誤導致發生人命事故，實在遺憾至極。

此次在最後重複兩句話：

「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作起」。

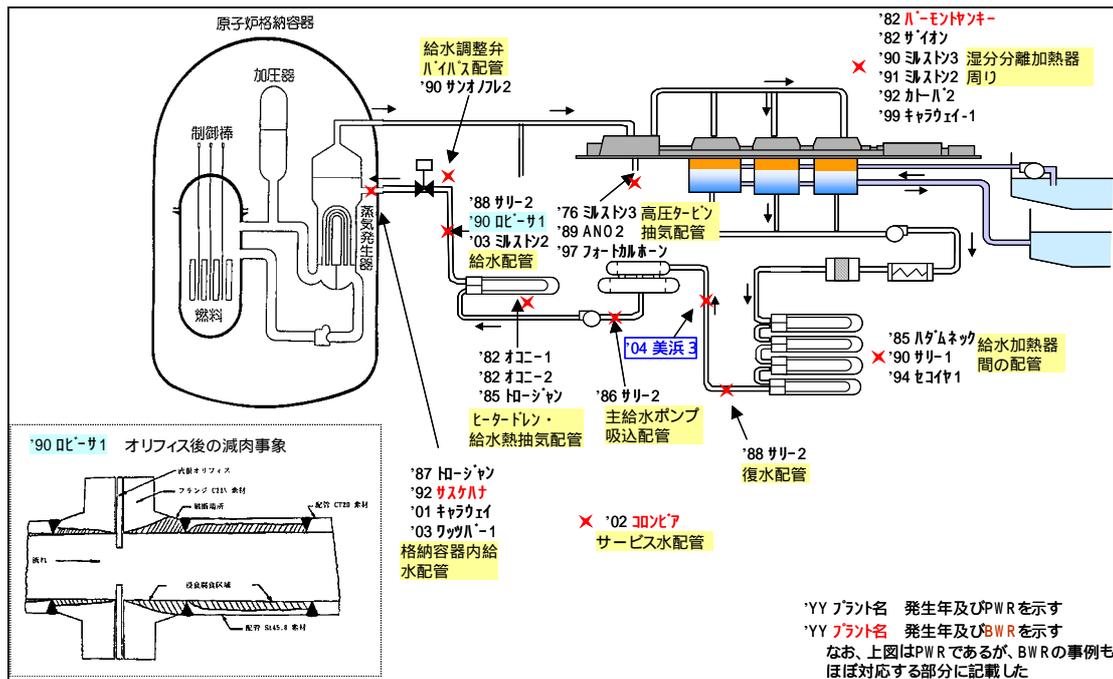


図1 世界上類似事故



図2 Surry 2 号機管路破断照片

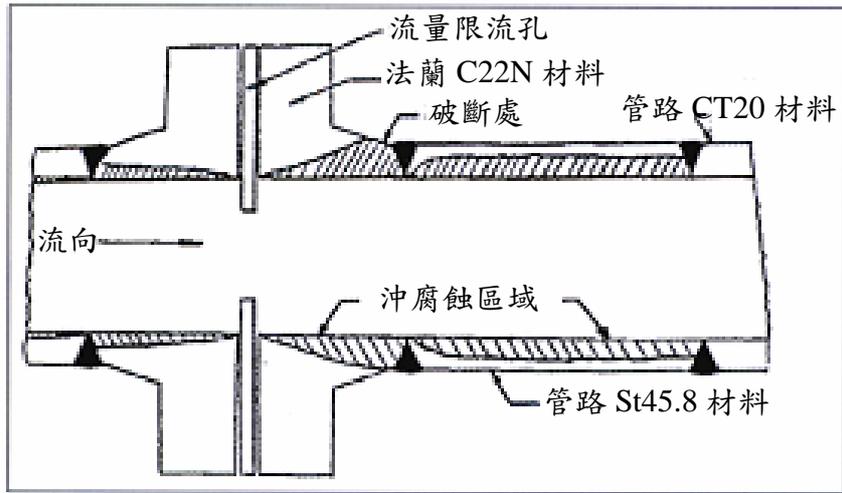


圖 3 Loviisa 核電廠限流孔法蘭洩漏



圖 4 相馬共同火力新地電廠 2 號機管路破洞



圖 5 美濱之管路破斷處



圖 6 美濱之管路破斷處放大照片

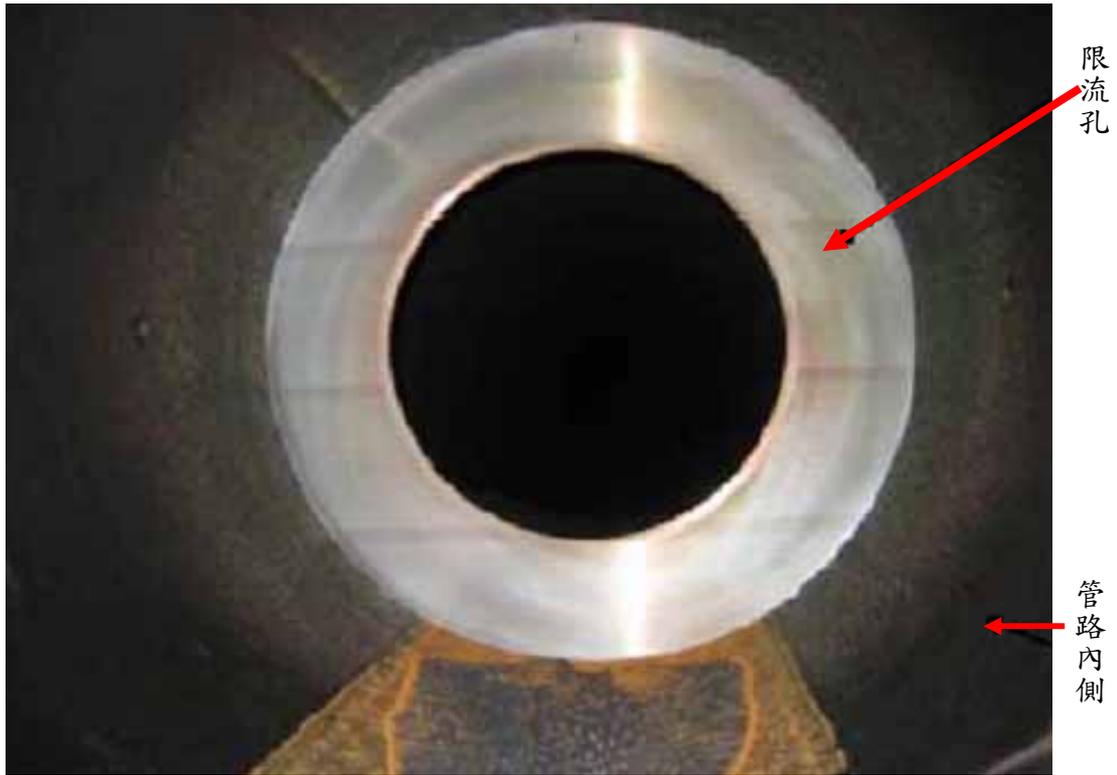


圖 7 從美濱之破斷處所見該限流孔照片