

行政院所屬各機關因公出國人員報告書  
(出國類別：實習)

赴美國研習熱交換器檢查之技術與維修運轉之經驗

出國人 服務機關：台灣電力公司  
職 稱：核一廠氣渦輪機股長  
姓 名：李榮進  
出國地區：美 國  
出國日期：92年8月6日  
報告日期：92年9月3日

43/09203627

## 行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：

研習熱交換器檢查之技術與維修運轉之經驗

頁數 19 含附件：是 否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話

台灣電力公司/陳德隆/(02)2366-7685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話

李榮進/台灣電力公司/第一核能發電廠/氣渦輪機股長/  
(02)2638-3501 ext.3387

出國類別：1 考察 2 進修 3 研究 4 實習 5 其他

出國期間：92.8.6 ~92.8.18 出國地區：美國

報告日期：92.9.3

分類號/目

關鍵詞：飼水加熱器、YUBA

內容摘要：（二百至三百字）

核一廠飼水加熱器過去曾發生數次內部破管事件，為期對廠內之飼水加熱器能夠做最有效的檢測及維修，乃派員前往設備廠家 YUBA 公司研習熱交換器檢查之技術與維修運轉之經驗，研習內容包括：

- (一) 飼水加熱器在電廠內的功能
- (二) 飼水加熱器之分類與構造。
- (三) 飼水加熱器可能發生的損壞狀況包括：外部殼側及噴嘴發生薄化、洩漏、破裂。內部緩衝擋板發生沖蝕、缺損、脫落。管束部分發生腐蝕、磨耗、凹陷、破孔、薄化、斷裂而引起內部洩漏。
- (四) 飼水加熱器的檢測範圍，包括如何篩選出可能發生損壞的高危險群。
- (五) 飼水加熱器的檢測方法：包括抽汽進口噴嘴及飼水加熱器殼側應檢測的區域及密度、脈衝渦電流檢測技術在殼側檢測的應用、飼水加熱器管側檢測的方法。
- (六) 飼水加熱器在運轉中發生故障之狀況。
- (七) 飼水加熱器的維修：包括殼側及管側的維修方式。

本文電子檔已傳至出國報告資訊網 (<http://report.nat.gov.tw>)

## 目 錄

內 容	頁次
一、出國目的	3
二、出國行程	4
三、研習內容	5
(一) 熱交換器在電廠之功能	5
(二) 飼水加熱器之分類與構造	6
(三) 飼水加熱器可能發生的損壞狀況	10
(四) 飼水加熱器的檢測範圍	11
(五) 飼水加熱器的檢測方法	13
(六) 飼水加熱器在運轉中發生故障之狀況	16
(七) 飼水加熱器的維修	16
四、研習心得	18
五、建議事項	18
六、參考資料	19

## 一、出國目的

本公司核一廠商業運轉至今已二十餘年，其飼水加熱系統之熱交換器，由於長年運轉之正常沖蝕磨耗，以及機組運轉暫態所造成之應力變化，使得內部組件結構逐漸受到損傷。民國八十九年至九十一年間，本廠曾發生三次飼水加熱器內部破管事件，均造成程度不一的降載或停機損失。有鑑於此，本廠乃派員至熱交換器設備供應廠家 YUBA 公司研習熱交換器的檢查技術以及運轉維修之經驗，以期對廠內之熱交換器在年度歲修時，能夠做最有效的檢測及維修，並提供運轉上應注意的事項，使得內部破管之機率降至最低，並確保熱交換器殼側之完整性，以減少停機損失並增進機組運轉之安全。

## 二、出國行程

本次出國，係前往位於美國奧克拉荷馬州淘沙市(TULSA)的 YUBA 公司之設計部門與生產及維修工廠，研習熱交換器之檢測與維修經驗。並與 YUBA 公司的現場服務工程師討論，若於運轉中遇到熱交換器故障情況之因應對策。

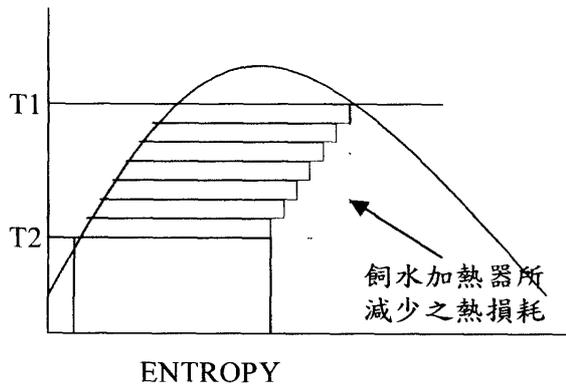
本次出國期間共十三天，其行程詳如下表：

日期	地點	工作內容
92年8月6日	台北→洛杉磯→淘沙	往程
92年8月7日~8月15日	淘沙	研習熱交換器檢查之技術 與維修運轉之經驗
92年8月16日~8月18日	淘沙→洛杉磯→台北	返程

### 三、研習內容：

#### (一) 熱交換器在電廠之功能：

在核能電廠中有為數眾多、設置目的各不相同的各種熱交換器，而在整個發電流程中最重要的熱交換器之一，即為飼水加熱器。在電廠中裝設有多台的飼水加熱器串並聯使用，利用來自汽機中間段的部分蒸汽的熱源，將來自主冷凝器的冷凝水溫度逐步增高再送往反應爐，如此安排最主要的目的是為了使整個熱循環接近理想之 CARNOT CYCLE (如圖一)，以減少熱消耗，增加整廠的熱效率。其次由於飼水在進入反應爐之前已逐步加溫，可避免溫度過低的水直接進入高溫的反應爐，減少對反應爐之熱震 (THERMAL SHOCK) 及熱應力疲勞。此外在利用汽機抽汽加熱飼水的同時，可將汽機中作功後產生的水滴予以移除，降低蒸汽中的水分，以減少對汽機葉片的沖腐蝕。飼水加熱器在運轉過程中還可將各級抽汽管中以及洩水中之不凝結氣體 (包括氧氣等) 予以排除，以避免有效熱交換的面積減少而降低熱交換的效率，同時由於飼水中的溶氧量減少，可以降低組件的生鏽機會。因此飼水加熱器功能是否正常，對電廠的效率及汽機葉片壽命以及設備腐蝕的抑制有決定性的影響，故對於飼水加熱器的維護值得投入相當的心力。



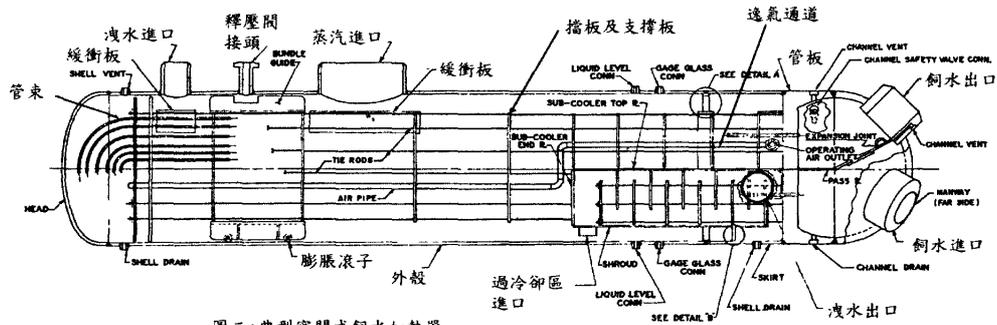
圖一：飼水加熱器可減少電廠之熱損耗

(二) 飼水加熱器之分類與構造：

- 1、飼水加熱器之分類以工作壓力來分可分為高壓飼水加熱器及低壓飼水加熱器兩種，在核一廠是以主飼水泵（FEED WATER PUMP）為分界點，在主飼水泵上游的加熱器即 2 號到 6 號飼水加熱器均屬於低壓飼水加熱器，其管側壓力是由冷凝水泵（CONDENSATE PUMP）所提供。在主飼水泵下游的加熱器即 1 號飼水加熱器則屬於高壓飼水加熱器，其管側壓力是由主飼水泵所提供，通常壓力都在 1000psi 以上。
- 2、飼水加熱器若以形狀來分可分為直立式與水平式兩類，直立式所佔的空間較小，且可提供較大的壓力水頭，但在維護上較為不利。核一廠的所有飼水加熱器均屬於水平式的，其優點是在查漏、擴管時較方便，且由於每單位高度所含的水量容積較直立式為大，故在控制水位方面較為有利。
- 3、飼水加熱器以熱交換方式來分則可分為直接接觸開放式（DIRECT CONTACT OPEN TYPE）及表面接觸密閉式（SURFACE CONTACT CLOSED TYPE）兩種，前者是將汽機的抽汽及上一級加熱器的洩水與飼水直接混和加熱，後者則是將飼水與抽汽及上一級的洩水以金屬管（METAL TUBE）隔開來，分別走

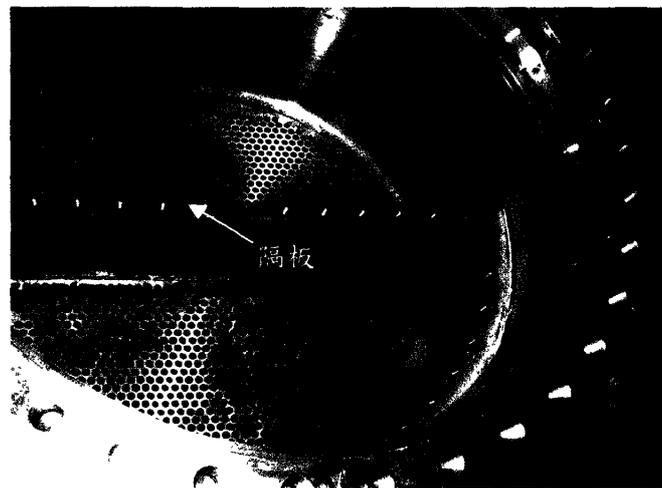
管側與殼側，即所謂的管殼式加熱器，核一廠所有飼水加熱器均屬於此類。

4、典型的密閉式飼水加熱器構造如圖二所示，其主要元件如下：



圖二：典型密閉式飼水加熱器

4.1、飼水進出口端 (CHANNEL HEAD)：係作為飼水進出口之引導用，其內部用分隔板 (PARTITION PLATE) 將進出口分開，在進出口端上並裝有人孔蓋 (MAN-HOLE) 以方便維護保養檢查。進出口端的型式又可分為橢圓型、半球型、螺栓結合式可移除型、以及全開式可移除型。



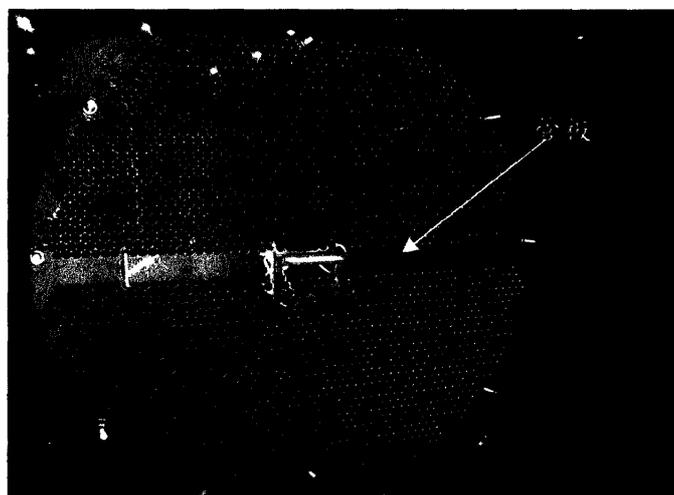
進出口端 (CHANNEL HEAD)



4.2、緩衝板 (IMPINGEMENT PLATE): 裝置於抽汽進口噴嘴或洩水進口噴嘴下方,其作用在於防止抽汽或洩水的高速衝擊力直接作用於管束上造成損傷。



4.3、管板 (TUBE SHEET): 管板是用來支撐並安排管子的排列形式,同時亦為管側與殼側的壓力邊界。

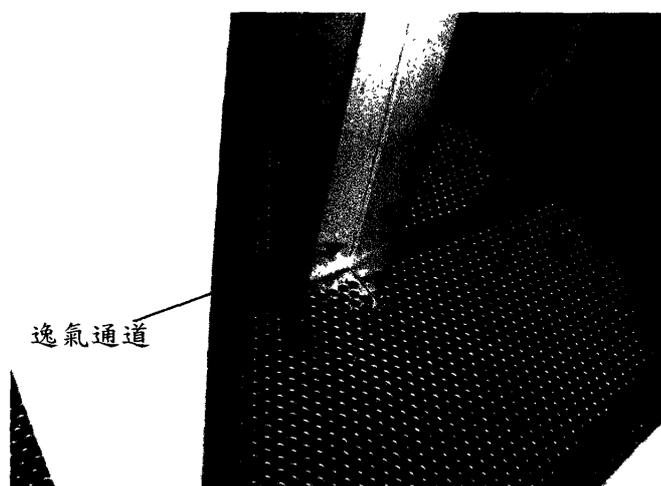


- 4.4、擋板與支撐片 (BAFFLE AND SUPPORT PLATE)：係用來支撐管束，並作為改變熱流體方向之用，以增加熱傳導效果。



- 4.5、洩水冷卻區 (DRAIN COOLING ZONE)：當進入飼水加熱器的抽汽與飼水完成熱交換之後，本身即被冷卻為飽和液態，並成為洩水進入下一級的熱交換器，為了防止其行經管路時，因為壓降而產生閃化 (FLASH) 及孔蝕 (CAVITATION) 造成管路震動或水錘現象，故在加熱器中特別設計一個區域，將洩水引導至該區使其溫度下降到過冷狀態 (SUB-COOLING)。
- 4.6、管殼間膨脹裝置 (EXPANSION PROVISION)：飼水加熱器如係採用直管且兩端管板均為焊死的，則在殼側均加裝有膨脹接頭，以吸收管側和殼側不同的膨脹差。若為 U 型管，則會在管側自由端加裝管束膨脹滾子滑輪，以適應熱脹冷縮產生的位移。
- 4.7、逸氣通道 (VENTING CHANNEL)：在飼水加熱器的冷凝區，裝有逸氣通道，其用途是將冷凝區中的不凝結氣體予以收集並導引至排氣管排除，以避免不凝結氣體佔據部分管束空間，減少有效熱交換面積，降

低熱交換效率，同時將不凝結氣體中的有害氣體如氧氣等排除可減少設備的腐蝕率。



### (三) 飼水加熱器可能發生的損壞狀況：

由於飼水加熱器在運轉中受到蒸汽經年累月的衝擊，以及電廠啟動停機、負載升降、或不預期的跳機等暫態所產生的熱應力影響，這些都會對飼水加熱器內部造成損傷，一般常見的損壞狀況有：外部殼側及噴嘴發生薄化、洩漏、破裂（通常發生於抽汽管進口處附近），內部緩衝擋板發生沖蝕、缺損、脫落。在管束部分則可能因蒸汽流體的衝擊、震動、摩擦而發生腐蝕、磨耗、凹陷、破孔、薄化甚至斷裂而引起內部洩漏，這種洩漏會使得飼水流失到冷凝器。上述這些症狀的早期現象必須利用例行歲修檢查時予以發現並加以檢修，否則在運轉週期中隨時可能發生異常事故，其後果輕則造成電廠運轉效率之降低，重則可能由於殼側破裂而造成人員或設備的損傷。

(四) 飼水加熱器的檢測範圍：

飼水加熱器殼側的損壞情況通常為流體加速腐蝕 (FLOW ACCELERATED CORROSION, 簡稱 FAC) 所造成的。根據 EPRI 提出的一份 CHUG POSITION PAPER NO.4 文件指出, 在 BWR 電廠最容易受到 FAC 影響之飼水加熱器可用下列幾項危險因子來判斷：

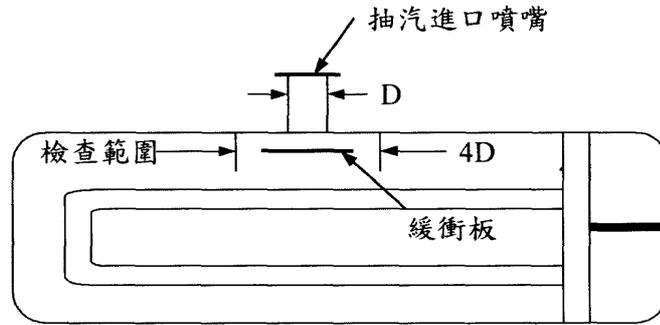
- 1、運轉年齡
- 2、運轉溫度接近 300°F
- 3、抽汽之蒸汽純度小於 95%
- 4、低氧含量 (尤其是在液態相部分小於 7ppb)
- 5、高的蒸汽抽汽速度
- 6、殼側為碳鋼之材質 (如 SA-285C, SA-515-70, SA-516-70 等)

核一廠之飼水加熱器根據上列危險因子判斷之結果, 以 2 號及 3 號飼水加熱器為最可能受影響者。

對於這些飼水加熱器檢測是否受到 FAC 影響之範圍應包括：

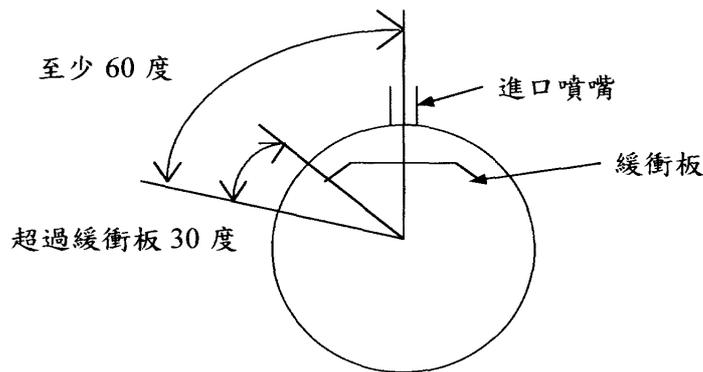
- 1、抽汽入口噴嘴：如果噴嘴未包含在二次側管路檢測的計畫中, 則整個噴嘴都必須檢測。在噴嘴與飼水加熱器的殼相接的焊道兩側都必須檢測, 雖然通常不容易估計這些焊道及噴嘴的磨耗量, 但這些部位都很重要。
- 2、飼水加熱器殼側：殼側須檢查的範圍係依照抽汽進口緩衝板的尺寸以及殼側不銹鋼內襯 (如果有安裝的話) 尺寸的大小而定。在加熱器縱向檢查範圍必須涵蓋緩衝板兩側至少一倍的抽汽進口噴嘴直徑, 通常緩衝板的寬度

為一至兩倍的噴嘴直徑，在此情況下，檢查範圍則須涵蓋以抽汽進口噴嘴為中心的四倍直徑區域（如圖三）。如果沒有緩衝板，則檢查範圍為三倍直徑區域。



圖三：飼水加熱器殼側縱向檢查範圍

在圓週方向則必須包括以抽汽進口噴嘴為中心，向兩側延伸到緩衝板外側至少 30 度的範圍。對於小的緩衝板而言每邊至少要有 60 度的範圍（如圖四），但不必大於 90 度。綜合以上兩項可歸納出典型的檢查範圍，大約是在縱向為四倍的抽汽進口噴嘴直徑長度乘上以噴嘴為中心週向 120 度至 180 度的弧度區域。



圖四：飼水加熱器殼側週向檢查範圍

- 3、如果殼側有不銹鋼內襯，則週向的檢查範圍必須視內襯的尺寸而擴大，至少需由噴嘴中心線向外延伸到內襯以外 30 度的區域，在縱向則至少必須從內襯末端向外延伸一個噴嘴直徑的長度。
- 4、如果檢查發現有 FAC 造成損壞的現象，則檢查範圍應視需要擴大以描繪出磨損的全貌。

(五) 飼水加熱器的檢測方法：

1、抽汽進口噴嘴：

抽汽進口噴嘴應依照 NSAC-202L-R2 之指引，以超音波(UT)方式檢查。

其網格尺寸應為 6 吋或是  $\pi D/12$ ，取其較小值，其中 D 為噴嘴直徑。

2、飼水加熱器殼側：

在飼水加熱器殼側方面，UT 和 ECT (脈衝渦電流技術) 都有人使用。

許多美國加拿大電廠都以 2 吋至 4 吋的網格尺寸對殼側做 UT 檢測，這種尺寸很適合用來檢測是否有磨損狀況存在，可繼續引用。但是對於靠近小尺寸 (6 至 8 吋) 的噴嘴附近，4 吋的網格就顯得太粗了。在此情況可採用下表的替代方案，此方案在大部分的情況下與 NSAC-202L-R2 所建議的管路和噴嘴網格尺寸相符：

噴嘴尺寸 (D)	最大噴嘴網格尺寸	加熱器殼側網格尺寸
6"	1.73"	2"
8"	2.25"	2"
10"	2.81"	2"
12"	3.33"	3"
14"	3.67"	3"
16"	4.19"	4"

18"	4.71"	4"
20"	5.23"	4"
>=24"	6.00"	4"

如果遇到兩個噴嘴周圍的網格相重疊的情況，則建議兩者都使用較小的網格尺寸來檢測。上述網格尺寸應足以檢測出磨耗的情況是否存在，但是還不夠小到足以決定磨耗的程度以及最大深度。因此當檢測發現有殼壁薄化的情形存在，則網格的尺寸應進一步縮小到足以描繪出薄化區域的深度以及程度。

### 3、脈衝渦電流檢測技術在殼側檢測的應用：

脈衝渦電流檢測技術是屬於非破壞性檢測方式的一種，它將電流導入被檢測的材料之中，再監測這些電流與材料之間的相互作用，此處的電流即渦電流，是以渦電流探頭內的感應線圈來產生的。被測材料的狀況及材質不連續係經由監測線圈阻抗的變化來達成。渦電流檢測的成功與否，非常依賴操作者以及判讀者所受的訓練及技巧的影響。通常渦電流檢測是從管子的內部進行，因此必須能夠設法進入管子內部，在此情況下通常必須洩除系統中的積水。渦電流檢測通常係在非磁性材料中執行，若要在像碳鋼管一類的導磁性金屬中執行此種檢測，則必須用很強的磁化線圈將其磁化到飽和狀況。部分飽和渦電流檢測法也曾應用在高壓飼水加熱器的碳鋼管檢測上面。

在檢測加熱器殼側方面，脈衝渦電流檢測法有著透過保溫即可偵測材料的體積損耗的優點，因此可以對加熱器進行線上檢查，同時相對於必須拆除保溫才能進行檢查的方式來說也比較省錢。

渦電流檢測法並不像 UT 檢測那麼精確，除此之外它也無法對特定位置確認出壁厚的損耗量，而只能對探頭大小的區域確認其平均壁厚損耗量。使用渦電流檢測法時，其設備的精確度必須達到以 3 吋為最大極限的探頭，還能偵測出平均 10% 的公稱壁厚損失。如果偵測到相當大的薄化情形，則建議使用 UT 來定量損壞的程度和總量。此外對於噴嘴的檢查則不建議使用脈衝式渦電流檢測法。

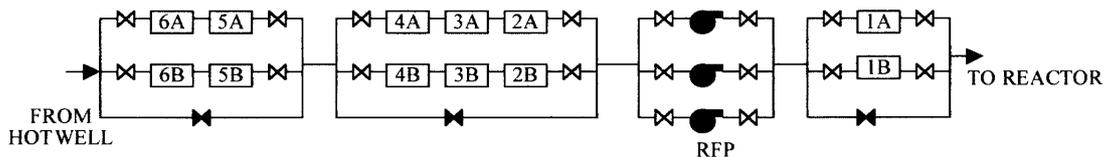
#### 4、飼水加熱器管側：

飼水加熱器管側的檢測，目前最常用的辦法仍然是渦電流檢測法，此法係將渦電流探頭從飼水進出口端放入管子內，以定速向前移動，再配合自動記錄器將每支管子的編號和移動距離以及偵測到的反應信號記錄在電腦的硬碟或磁片上，再攜回辦公室判讀，對於有不正常的顯示的管子如針孔、薄化、凹陷等，則可於評估及確認之後將其塞管。對於正常的管子，則可將其信號作為下次檢測比對的基準，從兩次檢測的信號差異也可以估計其磨耗的成長率，進而可評估其剩餘壽命以作為是否提前塞管或換管之依據。



(六) 飼水加熱器在運轉中發生故障之狀況：

本廠飼水加熱器有 A, B 兩串，其中 2, 3, 4 號飼水加熱器之間及 5, 6 號飼水加熱器之間沒有隔離閥，各加熱器也沒有個別的旁通閥（如圖五）。



圖五: 飼水加熱器流程圖

當其中一串的某一台飼水加熱器管側洩漏，則必須隔離整串（兩台或三台）飼水加熱器的飼水側及抽汽側，並改走旁通管路，雖然對於機組的出力沒有影響，但是由於熱耗增加，整廠效率會降低，同時另一串運轉中的飼水加熱器流量會增大許多，造成該串飼水加熱器前後壓差增大（以平方倍增加），由於流速增加會造成所有元件遭受更大的應力衝擊。如果是短時間運轉尚無妨，但若是持續一段相當長的時間，則可能造成另一串加速磨耗損壞，因此最好還是停機將其修復再運轉。

(七) 飼水加熱器的維修：

飼水加熱器殼側在檢測到薄化超過安全限度時，則必須將薄化的區域切除，再重新以電焊的方式更換同樣材質的外殼鐵板，由於飼水加熱器屬於 ASME 法規所管轄的壓力容器，故其修理方式、焊接程序、焊工檢定及焊道測試方式等，都必須符合 ASME 的法規，維修工作並須請持照的檢查員查證。焊接後須做焊道目視檢

測 (VT)、滲透液探傷檢測 (PT)、及超音波檢測 (UT)。在水壓試驗方面，因飼水加熱器無法有效隔離，依據廠家 YUBA 公司建議，若測得最小厚度超過法規要求，則不須執行水壓試驗。

飼水加熱器內部的管束若是偵測到有磨耗、薄化超過一定程度 (厚度減少 70%) 或是測漏已經發現有斷管、破孔時則須予以塞管，塞管時須先依照廠家建議之材質及尺寸車製帶有斜度的管塞，再將要塞的管口內部及管塞外部用高品質且不會殘留的溶劑加以清潔，將管板加以預熱以除去水氣，再以全周焊方式將管塞與管板焊接。飼水加熱器的塞管率如果太高會影響效率，一般而言若塞管率超過 10% 則必須更換管束，實際更換時機仍須依據飼水加熱器運轉中承受壓力的大小、熱交換效率損失等因素精確評估，飼水加熱器若是屬於直管型式則可逐支抽換，若是 U 型管型式則須將整個管束予以更換。

#### 四、研習心得：

- (一) 飼水加熱器在發電廠中扮演重要的角色，它的功能正常與否關係著整廠熱效率的高低，由於飼水加熱器在運轉中外在表現是靜態的，因此平常較易被人忽視其重要性，但隨著電廠運轉年限的增加，經年累月的沖蝕，蒸汽以及電廠啟動停機、負載升降、或不預期的跳機等暫態所產生的熱應力，都會對飼水加熱器內部造成損傷，因此必須利用例行歲修檢查時予以發現並加以檢修，否則在運轉週期中隨時可能發生異常事故，其後果輕則造成電廠運轉效率之降低，重則可能由於殼側破裂而造成人員或設備的損傷。
- (二) 對於飼水加熱器殼側之檢測，目前最有效的方法是依照 EPRI 所建議的方法篩選出高危險群，並依其建議的範圍執行 UT 檢測，若是在某一台飼水加熱器發現有異常沖蝕薄化現象，則須將檢測範圍擴大到平行串的加熱器、上、下游相鄰的加熱器，以及其他機組相同位置的加熱器。

#### 五、建議事項：

- (一) 核一廠的飼水加熱器在最近幾年曾發生數次管側洩漏事件，造成機組降載運轉，建議儘早完成管束內部渦電流檢測，建立基本資料以作為爾後檢測比對之基準，以及磨耗成長率估算之依據。
- (二) 儘早依據 EPRI 之 CHUG POSITION PAPER NO.4 所建議之方法，篩選出易受到流體加速沖蝕損害之飼水加熱器，並對篩選出來的飼水加熱器殼側可能薄化之區域完成測厚檢查，以及早發現問題加以整修，避免運轉中發生破損洩漏等情況。
- (三) 針對塞管率較高之飼水加熱器，分析是否有流體引發之震動 (FLOW INDUCED VIBRATION) 造成管束與支撐板之磨損。

- (四) 以內視鏡由洩水管及抽汽管噴嘴伸入飼水加熱器內部，檢視內部結構如緩衝板等有無異常情形。

#### 六、參考資料

- (一) EPRI CHUG POSITION PAPER NO.4  
(二) YUBA INSTRUCTION MANUAL FOR HEATERS  
(三) 核技處 NED-M-R001 飼水加熱器改善研究