

行政院及所屬各機關出國報告
出國類別：實習

核能電廠營運檢測超音波檢測人員能力驗證訓練及資格證照考試

服務機關：臺灣電力公司核能發電處
出國人職稱：核能工程監/核能工程師
姓名：蔡錫聯、許炳森 / 童振昌

出國地區：美國北卡電力研究院
出國日期：民國 91 年 7 月 6 日
報告日期：民國 91 年 9 月 4 日

43/
009103248

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：核能電廠營運檢測超音波檢測人員能力驗證訓練
及資格證照考試

頁數 14 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)23667685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話
蔡錫聯、許炳森、童振昌/台灣電力公司/核能發電處/核能工程監、核能工程師/(02)23667066

出國類別：1 考察2 進修3 研究4 實習5 其他

出國期間：自91年7月6日至8月19日

出國地區：美國北卡電力研究院

報告日期：91年9月4日

分類號/目

關鍵詞：超音波檢測訓練，能力驗證考試

內容摘要：(二百至三百字)

核能電廠營運法規，規定執行超音波非破壞檢測人員需經過檢測能力驗證(Performance Demonstration)資格考試，取得合格後方能擔任各種組件檢測工作，本項檢測能力驗證資格考試在美國電力研究院非破壞檢測評估中心(EPRI NDE Center)辦理，本公司核能電廠超音波非破壞檢測人員針對此項規定派員研習訓練並參加能力驗證資格考試。此次驗證資格考試，分別為裂縫檢測(Detection)能力驗證考試、裂縫深度評估(Depth Sizing)能力驗證考試、裂縫覆層檢測(Overlay)能力驗證考試。本次研習除了順利通過資格驗證考試外，並進一步了解美國核能電廠目前正在執行及將要執行各項能力驗證的狀況。

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

目 錄

<u>內容</u>	<u>頁次</u>
一、前言	2
二、裂縫檢測(Detection)能力驗證及再授證考試	2
三、裂縫深度評估(Depth Sizing)能力驗證再授證考試	6
四、裂縫覆層檢測(Overlay)能力驗證考試	8
五、反應器壓力槽本體及不同材質管路焊道能力驗證之現況	11
六、討論與建議	14

一、前言

核能電廠營運法規，規定執行超音波非破壞檢測人員需經過檢測能力驗證(Performance Demonstration)資格考試，取得合格後方能擔任各種組件檢測工作，本項檢測能力驗證資格考試在美國電力研究院非破壞檢測評估中心(EPRI NDE Center)辦理，本公司核能電廠超音波非破壞檢測人員針對此項規定派員研習訓練並參加能力驗證資格考試。

此次在美國電力研究院非破壞檢測中心(EPRI NDE Center)，共參加三種超音波檢測能力驗證資格考試，分別為裂縫檢測(Detection)能力驗證考試、裂縫深度評估(Depth Sizing)能力驗證考試、裂縫覆層檢測(Overlay)能力驗證考試，在考試前並接受練習指導(Guide Practice)。本次研習除了順利通過資格驗證考試外，並進一步了解美國核能電廠目前正在執行及將要執行各項能力驗證的狀況，整體而言，收穫良多，對未來核能電廠設備執行檢測工作頗有助益

二、裂縫檢測(Detection)能力驗證及再授證考試

裂縫檢測包括碳鋼(再授證考試免考碳鋼)及不銹鋼管(含 IGSCC)的 Detection, Length Sizing，檢測掃描方式包含單邊及雙邊。

1. 碳鋼檢測：

1) 考試內容：

碳鋼檢測試塊共 4 塊，尺寸由 4"~50"，厚度由 0.337"~3.85"。

2) 使用之儀器、探頭及檢測校準(Calibration)：

(1) 使用之儀器，及儀器之數據設定，均作嚴格之規定，不得隨意使用，例如下表所示：

儀器設定	探頭頻率	阻尼	濾波	波長	頻率	脈波重覆率
Sonic 136 1.0 MHz	1.0	500	1,2,or3	500 n/s	1.0 MHz	4 KHz
Sonic 136 1.5 MHz	1.5	500	1,2,or3	334 n/s	2.25 MHz	4 KHz
Sonic 136 2.0 MHz	2.0	500	1,2,or3	250 n/s	2.25 MHz	4 KHz
Sonic 136 2.25MHz	2.25	500	1,2,or3	222 n/s	2.25 MHz	4 KHz
Sonic 136 3.0 MHz	3.0	500	1,2,or3	168 n/s	2.25 MHz	4 KHz

Sonic 136 3.5 MHz	3.5	500	1,2,or3	144 n/s	2.25 MHz	4 KHz
Sonic 136 4.0 MHz	4.0	500	1,2,or3	126 n/s	5.0 MHz	4 KHz
Sonic 136 5.0 MHz	5.0	500	1,2,or3	100 n/s	5.0 MHz	4 KHz

(2) 探頭頻率之選擇需依照下表規定：

試件厚度	橫波頻率	縱波頻率
0.5" or less	5.0 MHz	4.0 or 5.0 MHz
Great than 0.50"	2.25 MHz	2.0 or 2.25 MHz

(3) 檢測不同管徑時要用規定之不同大小探頭來檢測，以達到被測物與探頭間最佳之耦合效果，探頭尺寸之選擇須依照下列之規定：

公稱管徑	最大橫波尺寸	最大橫波尺寸	最大縱波尺寸	最大縱波尺寸
	<u>inches</u>	<u>mm</u>	<u>inches</u>	<u>mm</u>
2"~4"inclusive	0.25	7	0.20 x 0.30	5 x 10
Greater than 4" to 12"inclusive	0.50	13	0.30 x 0.60	10 x 14
Greater than 12" to 24"inclusive	0.50 x 1.0	16 x 10	0.60 x 1.0	16 x 26
Greater than 24"	1.0	16 x 10	1.0 x 2.0	26 x 51

(4) 檢測校準時需先設定螢幕距離 Screen Distance，使螢幕距離能夠含蓋檢測區域，焊道底部 1/3T，及焊道兩旁 1/4"，見下圖，再建立校準規塊凹槽之信號達到全螢幕之 80%即可。

Required Examination Volume

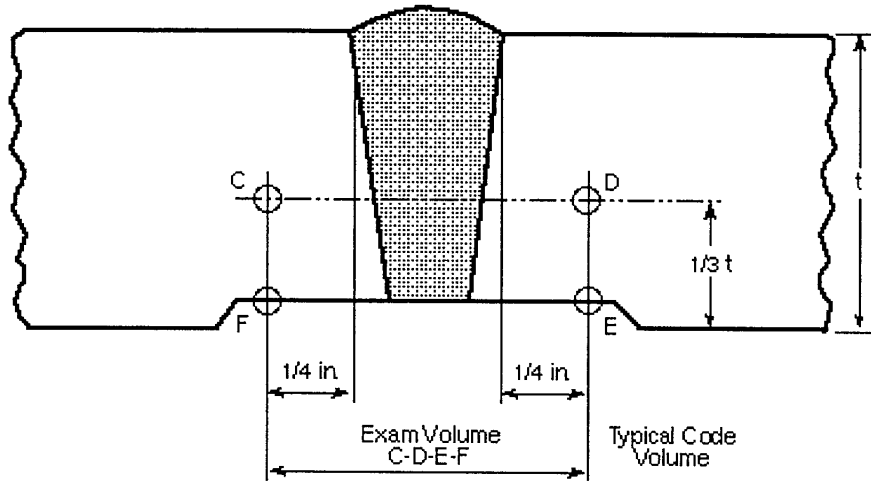


Figure 1

3) 檢測與信號評估：

檢測時由於焊冠太寬，或管壁太薄，致使 45°探頭無法含蓋檢測區域時，則可使用 60°或 70°之探頭，當三者均無法含蓋檢測區域時，可考慮使用 1&1/2V 之方法。探頭掃描時需作至少 20°之搖擺，以及至少 10%超音波換能器之重疊，掃描速度不能大於每秒 3 吋。探頭需作垂直以及平行焊道之掃描，以檢測出平行及垂直焊道之缺陷，掃描之靈敏度可定雜訊在 5%~20%之全螢幕高。

信號評估正確與否，決定考試之成敗；分辨幾何形狀信號或是缺陷信號，可由探頭位置、探頭角度、信號特性，或由焊道兩邊相互掃描驗證來決定，可歸納成如下數點：

- (1) 同一探頭，焊道整圈掃描均得相同信號，信號未有任何改變，可能是幾何形狀信號。
- (2) 信號位置研判來自 counter bore，而從焊道對邊掃描無任何信號產生，可能是幾何形狀信號。
- (3) 信號位置研判來自 counter bore 或焊道根部，改用其他探頭時，信號減弱或消失，可能是幾何形狀信號。
- (4) 探頭水平移動，信號高度均未改變，可能是幾何形狀信號。

- (5) 探頭水平移動，信號由單一轉變為多重時，可能是缺陷的信號。
- (6) 信號位置研判來自 counter bore，而從焊道對邊掃描亦可得到相同位置之信號，可能是缺陷的信號。
- (7) 不同角度之探頭，均可得到同一位置之信號，可能是缺陷的信號。
- (8) 任何與幾何形狀信號不太相同之信號，可能是缺陷的信號。

4) 注意事項：

- (1) 對於 2"~4"薄管檢測，儘量使用 70/60S 來含蓋檢測區域，少用 1&1/2V 法，對單邊檢測之焊道，可增加 0.25"，5MHz 橫波或折射縱波 RL 探頭，及由焊冠上掃描驗證。
- (2) 檢測中大管徑用 45/60S 探頭相互比較信號，注意區分由焊道對邊產生之信號，不要造成混淆。
- (3) 檢測靈敏度不要太高，否則容易造成誤判 False Call。因為試件規塊缺陷之音波反射信號約略與校正塊人工凹槽之反射信號相當。
- (4) 檢測軸向龜裂 Axial Crack 時可不必由焊冠上掃描，試件規塊軸向龜裂之製作，均延伸至母材。
- (5) 作長度評估 Length Sizing 時，可使用 5MHz 探頭，來區分幾何形狀及缺陷之信號，高頻探頭可得到更佳之解析度。

2. 不銹鋼檢測(含 IGSCC)：

1) 考試內容：

不銹鋼檢測試塊共 9 塊，其中包含 2~3 塊 IGSCC 試塊，尺寸由 2"~36"，厚度由 0.237"~2.90"。

2) 使用儀器、探頭及校準(Calibration)：

使用之儀器，及儀器之數據設定，均與碳鋼相同。

探頭頻率之選擇需依照下表規定：

公稱管徑	橫波頻率(Mhz)				縱波頻率(Mhz)			
	IGSCC 檢測		非 IGSCC 檢測		IGSCC 檢測		非 IGSCC 檢測	
	雙邊 檢測	單邊 檢測	雙邊 檢測	單邊 檢測	雙邊 檢測	單邊 檢測	雙邊檢 測	單邊 檢測
≤ 0.50"	2.25	2.25	2.0~ 5.0	2.0 or 2.25	4.0 or 5.0	4.0 or 5.0	4.0 or 5.0	4.0 or 5.0
> 0.50" ~ 2.00"	1.5	1.5	1.5~ 2.25	1.5~ 2.25	1.0~ 2.25	1.0~ 2.25	to 5.0	to 5.0
> 2.00"	1.5	1.5	1.5~ 2.25	1.5~ 2.25	1.0~ 2.25	1.0~ 2.25	1.0~ 2.25	1.0~ 2.25

由上表可知對 IGSCC 的檢測多使用低頻率高穿透能力的音波，來增進檢測靈敏度，而薄管雙邊檢測時多利用高頻 5MHz 的探頭來增進檢測的解析度。

在決定選用探頭的大小以及檢測校準(Calibration)時，依照碳鋼焊道檢測的作法即可。

3) 檢測與信號評估：

檢測與信號評估作法上大至與碳鋼檢測相同，但對單邊檢測大於 0.5 吋厚之不銹鋼管至少要使用折射縱波探頭來檢測；對於薄管單邊檢測之不銹鋼管焊道至少要使用 70 度之橫波來檢測。

4) 注意事項：

對於 IGSCC 之檢測，雖然試塊只有 2-3 塊，但失敗率也最高，應特別注意掃描時速度應儘量緩慢，因為有些 IGSCC 訊號極微弱，雜訊與 IGSCC 訊號幾乎同高，只認定高的 IGSCC 訊號，很可能會有 False Call。對 IGSCC 之檢測，無特別技巧，只有仔細觀察其波的特性，依照程序書規定，使用 45/60S 探頭相互驗證。

三、裂縫深度評估(Depth Sizing)能力驗證再授證考試

1. 考試內容：

每人各考五塊 IGSCC 試件，每塊各有一個缺陷，考試時間無硬性規定。

2. 程序書規定

程序書對於最初評估所使用之探頭頻率規定如下：

試件厚度	橫波探頭	縱波探頭
> 0.50" ≤ 2.0"	1.5 ~ 5.0 MHz	2.0 ~ 5.0 MHz

最初評估完成之後，則可另外使用更高頻率之探頭作進一步之評估。程序書對於所使用之探頭尺寸規定如下：

公稱管徑 t	橫波探頭	橫波探頭	縱波探頭	縱波探頭
	最大尺寸 inches	最大尺寸 mm	最大尺寸 inches	最大尺寸 mm
greater than 12" to 24" inclusive	0.50 x 1.0	16 x 10	0.60 x 1.0	16 x 26

3. 評估方法

對不同深度之缺陷，可使用程序書規定之各種不同角度探頭，並

配合使用各種不同的量測方法—絕對時間法或相對時間法或複波觀察法來量測(AATT or RATT or Bi-model)，詳細搭配方式列於下表：

材質厚度> 0.50"~≤ 1.00"		
缺陷剩餘高度	探頭角度	量測方法
≤ 0.20"	70° and ODCR	絕對時間法
> 0.20" ≤ 0.70"	60° ~ 70°	絕對時間法或複波觀察法
> 0.70"	45° ~ 60°	絕對法或相對法或複波觀察法

4. 評分方式

五塊試件共五個缺陷，其及格標準為所叫缺陷深度與實際缺陷深度誤差之 RMS 值不可大於 0.125"，而 RMS 值的計算公式如下：

$$RMS = \left[\frac{\sum_{i=1}^5 (m_i - t_i)^2}{5} \right]^{1/2}$$

其中 t_i 為實際缺陷深度
 m_i 為所叫缺陷深度

5. 注意事項

- 1) IGSCC 之五塊試件，其缺陷深度通常是淺、中、深都有，先由 30-70-70 方法之 CE1 與 CE2 即可得知其深度範圍，再用 45s 與 60RL 或 ODCR 作正確評估。
- 2) 在作考試件之前應先作練習件，並將所叫之答案與標準答案比對，以了解所使用之評估方法的正確性與校準的準確性，並作適度之修正。
- 3) 報表上所要填寫的缺陷深度與 Remaining Ligament 答案，應特別注意不可弄錯。

四、裂縫覆層檢測(Overlay)能力驗證考試

1. 考試試件共 5 件，列如下表：

試件分類	4" PSI+ ISI	6" PSI+ ISI	12" PSI	12" ISI	28" PSI+ ISI
Overlay 外徑	4.93"	7.23"	12.73"	12.73"	29.41"
周長	15.5"	22.7"	40"	40"	92.4"
管壁厚度	0.365"	0.405"	0.66"	0.66"	1.11"
Overlay 厚度	0.244"	0.417"	0.42"	0.42"	1.16"
全厚	0.609"	0.822"	1.08"	1.08"	2.27"
檢測厚度	0.335"	0.518"	0.42"	0.585"	1.438"
檢測長度	全管	全管	8.0"	21.0"	16.0"

2. 缺陷類別

- (1) ISI -a、周向裂縫（裂縫延伸進入檢測厚度才算）
-b、軸向裂縫（裂縫延伸進入檢測厚度才算）
- (2) PSI-a、Lack of bond（LOB）
-b、Interbeat lack of bond（IBLOB）
-c、Contaminated Crack

3. 4"/6"/28"試件，每件均包含 ISI 與 PSI 缺陷。12"試件分成 2 件，分別包含 ISI 與 PSI 缺陷。

4. 報告要註明缺陷為：

- (1) ISI 或 PSI
- (2) 周向或軸向
- (3) Crack 或 LOB
- (4) X 起點、終點
- (5) Y 起點、終點
- (6) 長度
- (7) RL（Remaining Ligament）

5. 合格標準：

- (1) 缺陷檢出率 80% 以上
- (2) False Call 10% 以下

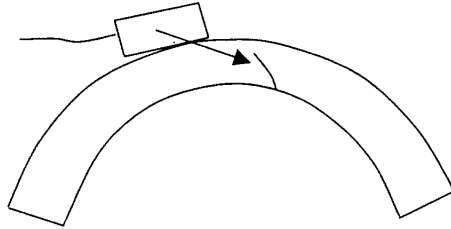
(3) 長度的 $RMS \leq 0.75"$ (不含 Axial 的長度)

(4) 深度的 $RMS \leq 0.125"$ (不含 LOB & IBLOB 的深度)

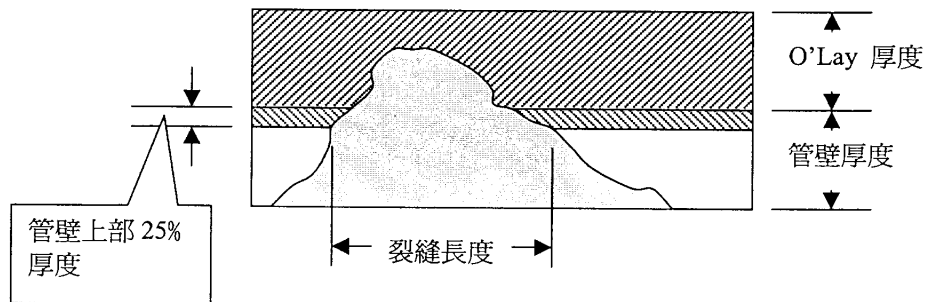
以上 4 項全部通過才算通過考試。

重考時視情況可只考 ISI 或 PSI 或全部重考。

6. 考試時需先以角波檢測完畢，經監考官簽認後，再以直波檢測（理由是：直波可見所有考試件的缺陷，與現場自然缺陷不同，故 PDI 計劃特別做此規定）。角波檢測與直波檢測所叫缺陷即使重複也不扣分。
7. 每一缺陷深度以最深深度報告。
8. Axial 缺陷深度量測需矯正弧度造成的誤差。



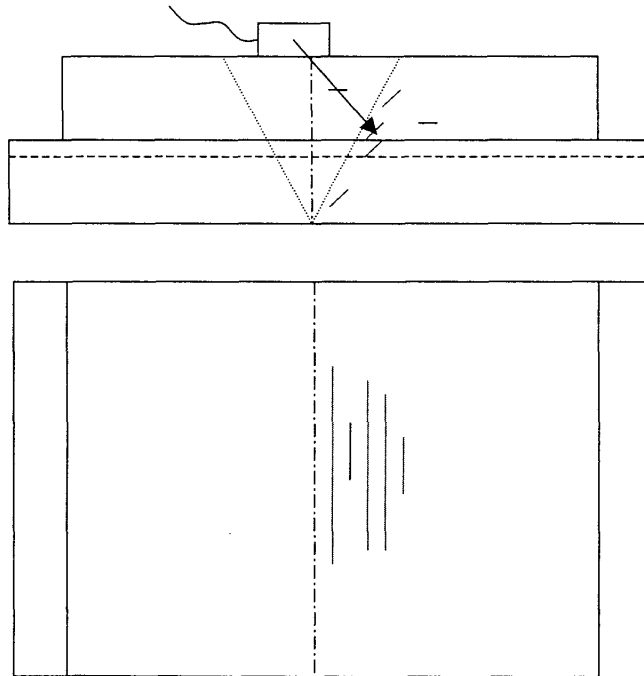
9. 長度量測 (ISI) 只量已延伸進入檢測厚度部份之裂縫長度，如下圖所示。



10. 檢測對策：

- (1) ISI 部份以 45° RL 或 60° RL 檢測、 70° RL 或 Trcr 輔助，PSI 部份以 70° RL 檢測，Trcr 輔助。角波檢測完畢才以直波檢測 (PDI 規定)。
- (2) 頻率以 2 MHz 較佳。

- (3) ISI 缺陷先檢測，然後才檢測 PSI 缺陷。
- (4) 28"管件檢測時，厚度大於 1.0"部份，若以 60° RL 檢測，會有偏折現象，只能以 45° RL 為之。探頭焦距為 55 mm。
- (5) 12"管件檢測時，探頭焦距為 35 mm。
- (6) 6"管件檢測時，探頭焦距為 17 mm。
- (7) 4"管件檢測時，探頭焦距為 17 mm。
- (8) 周向 ISI Crack 檢測時，可將探頭入射點置於銲道中心線上，分別向上、下游掃描，打 Crack 的 Face，有助於分辨上、下游同時存在的 Crack。若將每一個別波峰抓住，將其位置及深度標示銲道橫剖面上，再將探頭沿周向橫移，量測每一個別波峰的周向長度，可有效的量測裂縫長度並分辨裂縫與 LOB。



五、反應器壓力槽本體及不同材質管路焊道能力驗證之現況

ASME Code 96 年增訂版 Appendix VIII 補充說明(supplement) 中，詳細規定各項檢測能力驗證(Performance Demonstration)之標準與要求，有關 RPV 之要求規定在 supplement 4, 5, 6, 7，不同材質焊道 Dissimilar Metal weld(EPRI 稱為 DM Specimen)，規定在 supplement 10。此次在 EPRI NDE center 所了解情形分述如下：

(一) RPV

1. RPV 試件瑕疵包括 Thermal Fatigue、Mechanical Fatigue、Slag 與一些 Notch。
2. supplement 4 — 具有保護層 ID Clad 之反應爐槽體焊道檢測，不含法蘭對槽體 (Flange to Vessel) 及頂蓋對法蘭 (Head to Flange) 焊道，其龜裂均由保護層與母材之界面生出，龜裂深度評估 (Sizing) 之 R.M.S 只允許 0.150"。Supplement 6 — 不具有保護層之反應爐槽體焊道檢測，與 supplement 4 不同處在於其龜裂均位於槽壁中，非由保護層與母材之界面生出，龜裂深度評估之 R.M.S 允許較寬，為 0.250"。supplement 4,6 EPRI 已接受驗證。
3. Supplement 5 — 槽體管嘴內緣 (Nozzle Inside Corner Region) 檢測，簡稱 NICR。NICR 尚無程序書、設備、人員通過 PDI。Code Case N-552 要求 Modeling 決定 Misorientation angle and metal path。無 Generic Procedure，可預見的問題為瑕疵定位、sizing、及 overcall。
4. supplement 7 — 管嘴對槽體 (Nozzle to Vessel) 焊道檢測，此項考試必須先通過 supplement 4 & supplement 6 兩項考試，才能考 Nozzle to Vessel 之周向龜裂檢測，通過了 supplement 5 NICR 考試者，才能考 Nozzle to Vessel 之軸向龜裂檢測，所以要考 Nozzle to Vessel 各種方向龜裂者，必須先通過 supplement 4&5&6 之 PDI。
管嘴對槽體焊道檢測尚無程序書、設備、人員通過 PDI。厚度 t 之 85% 外表面屬於 Supplement 6，Code Case N-552 要求從 OD 檢查時厚度 t 之 15% 內表面 (Inner) 需要 Modeling 決定 Misorientation angle and metal path。無 Generic Procedure。
5. EPRI 目前對 Supplement 4,6 之試件 BWR 有練習塊一塊，考試件 4 塊，厚度 6.88"；PWR 無練習塊，考試件 3 塊，厚度

11"。 Supplement 5,7 之試件 BWR 有練習塊一塊，上面之 Nozzle 分別為 5", 12", 28"，考試件 3~4 塊；PWR 無練習塊，考試件 2 塊，從 ID 檢測。

6. 考試時間 Supplement 4,6 一起考至少 3 至 4 星期，基本費 \$ 4000 元，每天 \$ 1000 元，所以至少 \$ 19,000 至 \$ 24,000。 Supplement 5,7 考試時間至少 3 至 4 星期，費用不詳。以上不包括年費。
7. 適用之探頭 Supplement 4,6 detection 為 RTD 60RL 或 SIGMA 60RL，Sizing 為 45 及 60 KBA composite shear。 Supplement 5,7 則視 modeling 用 specific 探頭及 wedge。

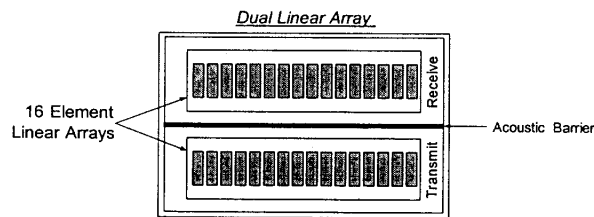
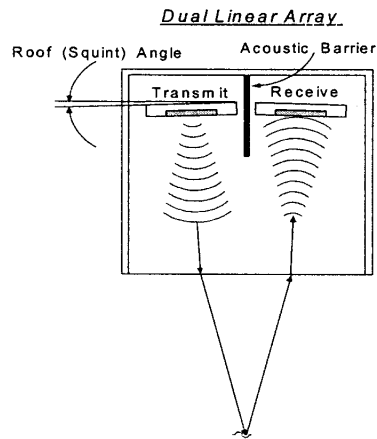
(二) DM

1. DM 試件皆為單邊檢測，缺陷包括縱向及橫向，缺陷不像一般管路只在熱影響區，焊道本身及 buttering、cladding 都有可能，只能用縱波檢測，較難的地方為從不鏽鋼側檢測較遠的碳鋼缺陷，及周向檢測 Axial 橫向缺陷，尤其是在是在不同厚度之管路，焊道是傾斜的。
2. DM 的檢測分為從內部檢測(ID)及外部檢測(OD)，ID 只用在 PWR 廠之 RPV INLET 及 OUTLET 焊道，其他大部分屬於 OD。OD 試件目前 EPRI NDE center 只有到貨 60%，其他大約 9 月才會到，比預定計畫晚 6 星期。對 DM 部分之 Manual PDI 最快從今年 9 月中旬開始接受報名考試。
3. 檢測人員必需對使用折射縱波探頭非長嫻熟，檢測常需使用多種不同頻率及角度探頭，才能作正確研判。DM 試件經常有幾何與金屬介面回波，瑕疵信號大部分被這些回波所覆蓋，大部分瑕疵位於或接近焊道修補區(repair areas)，更增加複雜及困難。在 EPRI NDE Center 測試時，有些 MOCK-UP 小於 20%之瑕疵，無法有效檢測。由經驗顯示由以前收集之 AUT data 作研判比較顯示瑕疵存在及成長是比較容易的方法。

(三) Phased Array 探頭

1. Phased Array 探頭，尚未有統一中文名稱，在 RPV 及 DM 應用不錯，但尚未商業化。
2. Phased Array 探頭優點：

- 能同時發出多種角度
- 音波的發射由電子控制
- 檢測資料容易研判
- 減低時間
- 由檢測資料可回溯給傳統檢測技術(最佳角度、skewing 技巧)Phased Array 探頭構造如下圖：



六、討論與建議

- 1) EPRI 所發行供考生研讀之“Guide Practice”，內容不錯，按照其方法考試通過的機會比較大。
- 2) 裂縫覆層檢測(Overlay)能力驗證考試是新的考試，比舊的考試難上許多，同時牽涉到檢測(Detection)、長度評估(Length Sizing)、深度評估(Depth Sizing)，尤其軸向(axial)瑕疵深度評估佔相當數量。EPRI 說法為裂縫覆層檢測(Overlay)考試相當“busy”，考試人員需有耐心，建立步驟，按部就班，才不會出錯。
- 3) 新的裂縫覆層檢測(Overlay)能力驗證考試及不同材質驗證考試所用之縱波探頭包括 45°,60°,70°三種角度，2(7×10), 2(10×18), 2(15×25)，三種大小探頭，目前本公司還不全，可考慮購買。
- 4) RPV 能力驗證考試頗為複雜及困難，需密切觀察其後續發展，注意 NRC 對此項考試的立場。
- 5) Phased Array 探頭包含數十個發射音波之晶體，有別於傳統超音波單晶或雙晶探頭，由電子控制每一晶體之發射時間可控制其角度或聚焦距離，目前由 EPRI 與製造廠家合作研發中，最快今年年底可商業化上市，可考慮引進。
- 6) 對不同材質焊道(Dissimilar Metal weld, DM)部分之 Manual PDI 最快從 91 年 9 月中旬開始接受報名考試，此項考試應派人參加，並及早準備。
- 7) 從今年 2 月起國外實習之旅費，逾 15 日至二個月以內者，按國外出差人員生活費打五折支給，此項改變，派往美國一般地區只有 54 美元，EPRI NDE center 位於北卡州 Charlotte 市郊區，附近並無公車及便宜旅館，往返旅館及 EPRI NDE center 交通只有依賴計程車或租車，打五折支給顯然不足住宿、交通及生活所需，是否派赴 EPRI 考試人員與去國外學校讀書有不同的考慮，可以再斟酌。