

NRD-NPP-92-04

# 核二廠二號機第十五次大修管制報告

(再循環管路鋸道完整性)

行政院原子能委員會

核能管制處

中華民國九十二年一月

# 目錄

壹、 背景說明.....	1
貳、 檢測作業說明.....	2
參、 原能會現場作業查證.....	4
肆、 檢測結果整理.....	5
伍、 檢測發現與修復.....	7
陸、 綜合結論.....	8

# 核二廠二號機第十五次大修管制報告

## (再循環管路鋸道完整性)

### 壹、背景說明

沸水式核能電廠機組的設計特徵之一，是在反應爐下方有二串再循環水系統(請參見圖一)，機組運轉時可以藉由控制循環水的流量，達到調整功率大小的目的。該系統由於直接與反應爐相連，因此屬於一次壓力邊界之重要安全設備。

由於再循環水系統為構成反應爐壓力邊界的一部分，如果發生管路破口，甚至斷管事件，將導致爐水喪失，也就是所謂冷卻水流失事故。對沸水式反應爐而言，冷卻水流失事故為設計基準事故，其主要事故接受準則為事故期間燃料護套尖峰溫度須低於法規限值 2200 °C。由最近的核二廠冷卻水流失事故分析結果顯示，再循環水泵出水側發生管路裂開對燃料護套尖峰溫度的影響，嚴重性並不亞於管路斷管，都有可能成為核二廠嚴重的冷卻水流失事故。

因此為能確保再循環水系統的機械結構完整性，核二廠依據美國機械工程師學會 ( ASME ) 規範第十一部 ( Code Sec. ) 美國核管會文件 GL88-01 和 NUREG 0313，制定電廠營運期間再循環水系統管路檢測計畫，檢測範圍原則上是二次大修必須完成所有管路鋸道的

檢查，但是對於部分較敏感的鋸道，則必須每次大修檢查。此項檢查的目的在於及早發現有劣化跡象的鋸道，即時採取修復的安全措施，藉以避免機組在運轉過程中發生冷卻水流失的可能性。

任何鋸道如果檢測結果確認有裂紋顯示，必須依 ASME 規範第十一部 (Code Sec. ) 的要求進行瑕疵評估，若裂紋形式在允許範圍內則該鋸道可暫不處理，但每次大修仍應持續追蹤裂紋是否有成長的趨勢，假若評估結果不符合規範要求，則必須以覆焊之方式進行修理，並經管制單位確認符合安全要求後，機組方能繼續運轉。

## 貳、檢測作業說明

核二廠每部機組再循環水系統有 A 和 B 二串（請參見附件一），基本上每次大修以至少檢查一串為原則，並依過去紀錄或經驗，適時增加檢測數量。此次大修按原訂計畫，全面檢查 A 串 81 口鋸道和 B 串持續監測的 11 口鋸道，原能會在檢視該機組此次大修規劃時，參考核一廠一號機於九十一年九月大修時的發現，以備忘錄函送台電公司（請參見附件二），要求自該機組前次大修已全面檢查的 B 串鋸道中，篩選出 20 口鋸道於此次大修再執行檢測，故核二廠二號機此次大修工作前規劃檢測數為 112 口。

再循環管路鋸道檢查工作，係由台電公司檢測隊人員執行，檢測

工作依各部鋸道位置、檢測方法和要求，執行液滲檢測（PT）超音波檢測（UT）或自動超音波檢測（AUT）等（請參見圖二）。

核二廠再循環水系統管路材質採用 304 不鏽鋼（屬於沃斯田鐵系不鏽鋼），此種材質管件於焊接後，會在鋸道熱影響區產生顯著的殘留應力，此外又處於反應爐水作用的環境下，加上材料本身具有敏化的特性，依國內外對此種管件的檢測經驗，在管路內表面鋸道鄰近區域容易檢測出沿晶應力腐蝕龜裂（IGSCC），檢查此種裂紋大都採用如超音波檢測之體積檢測，其優點可儘早在管件內表面檢測出裂紋，做好因應措施，因此檢測人員須具有高度專業性和實作經驗，才能做出正確研判，所以電廠檢測程序書規定檢測人員之資格，須取得美國電力研究所 EPRI IGSCC detection 檢定合格之 UT 能力驗證資格人員，才能執行超音波檢測（UT）或自動超音波檢測（AUT）。

再循環水系統管路因位於反應爐下方，現場檢測空間相當狹窄，檢測困難度高，加上部分管路處於乾井生物屏蔽牆內，空間輻射強度高達約每小時 6~7 毫西弗，距再循環管路表面一尺為每小時 7~10 毫西弗，接觸則為每小時 20~25 毫西弗，且因本次檢測數量較多，對檢測人員輻射劑量的管理為一大挑戰。

## 參、原能會現場作業查證

有鑑於近年來國外發生核能機組檢測數據不實的問題，原能會針對此次核二廠二號機大修的檢測工作，特別邀請核研所專家共同組成現場管制團隊，針對檢測之程序書、儀器設備校驗、以及作業品質等，執行加強視察與見證工作，本項現場查證共投入十人天。

現場查證反應爐生物屏蔽內 A 串 N2A-F1 及 N2A-F2 錄道 PT 檢測、N2E-J7S 和 N2E-J8 錄道 UT 檢測，及 B 串 J16S 錄道 PT 檢測，查核檢測人員資格、檢測區域、檢測方法及檢測過程等，查證過程中發現檢測人員均能依程序書規定執行檢測工作，並無異常情形，另於十一月二十七日夜間再次抽查 A 串 N1B-J1 和 B 串 N2H-J4 錄道 AUT 檢測執行狀況，經查核檢測資料收集人員具有 EPRI PDI 執照，符合程序書之人員資格要求，另查核儀器系統校準驗證紀錄，均依程序書每隔 12 小時校準驗證要求執行驗證，且驗證結果正常。

台電公司檢測隊人員於十二月二日檢查到 A 串之 N2E-J4 錄道時，發現一長度 25.32"×深度 0.233"（請參見圖三；管徑為 10"，管厚為 1.153"）之周向延晶應力腐蝕龜裂（IGSCC）顯示，即開立品質不符報告（NCD）處理，並即書面通知原能會管制人員（請參見附件三），原能會針對此事件之重要性，深入瞭解此口錄道前次 AUT 檢測紀錄資料和本次檢測紀錄，根據以往歷次檢查結果顯示，N2E-J4 錄道上

次檢查時間為 EOC-13(八十八年)，當時並無裂紋顯示，但本次檢測紀錄可清楚研判此口鋸道存有裂紋顯示，因此為確保未來一個週期運轉的安全性，以及再確認過去檢測結果裂紋的分佈情況，即發備忘錄要求台電公司應增加對 B 串上升管部分 (Riser) 之鋸道詳細檢查(請參見附件四)。

## 肆、檢測結果整理

此次核二廠二號機大修之再循環管路鋸道檢測，排定於十一月十六日到十二月五日間執行，相關之檢測結果可整理如下：

### 一、再循環管路鋸道缺陷統計

核二廠從二號機 EOC-4 起陸續發現再循環管路有裂紋顯示，至目前為止，一、二號機都有同樣的裂紋發生，對於裂紋的問題，台電公司以評估、換管或覆焊修理的方式處理。

依以往檢測紀錄約略可歸納出，上升管 (Riser) 鋸道發生裂紋的次數相較於其他位置來得高 (請參見附件一，鋸道編號標註為 OL)，核二廠再循環系統管路相關檢測與修理記錄統計資料，請參見表一、二。

### 二、本次檢測結果及原能會之要求

台電公司檢測隊人員於十二月二日檢查到 A 串 N2E-J4 鋸道時發

現裂紋顯示，即開立品質不符報告(NCD)處理，並書面通知原能會管制人員，而原能會考量此項發現之重要性，以及過去檢測結果裂紋的分佈情況，即發備忘錄要求台電公司應增加對 B 串上升管部分( Riser )之鋸道詳細檢查，以確保未來一個週期運轉的安全性。此部分鋸道有 30 口，其中 10 口鋸道於大修前已排定執行檢查，另外有 7 口已執行過覆焊之鋸道，經查以往檢查並無異常情形，以及根據國外相關經驗，已覆焊之鋸道並沒有劣化的紀錄，因此該 7 口鋸道可不檢查，故共計再增加 13 口鋸道，累計此次大修共檢測 125 口鋸道。此次核二廠二號機再循環管路全部之檢測工作因此延後到十二月十日完成，經再次查證確認此次大修除了 N2E-J4 鋸道有新的裂紋顯示外，其他鋸道並無裂紋顯示。

另外，原能會於獲得此鋸道檢測結果後，隨即於十二月五日邀請核研所專家會同本會核管處人員組成專案小組，就鋸道裂化肇因、核二廠處理措施、安全影響等事項進行深入評估（請參見附件五）。除此之外，於十二月十日召開討論會議，請台電公司針對此次發現，提出裂紋發生機制及以往檢測紀錄、再循環水系統管路完整性之短程與長程處理改善措施等說明（請參見附件六），並於核二廠二號機大修後再起動會議中，要求台電公司針對核二廠再循環系統管路之完整性，提出因應之老化管理策略，此項將納入核二廠二號機第二次十年

換照考量（請參見附件七）。

## 伍、檢測發現與修復

根據二號機以往歷次檢查結果顯示，N2J-J3 錸道於 EOC-5 大修發現裂紋顯示，並於 EOC-6 執行應力改善，之後每次大修均做追蹤檢查，至本次檢測結果，在歷經九個週期運轉後裂紋沒有成長，按規定將再列入下次大修持續追蹤檢測外，其餘先前發現有裂紋的錐道，都已經執行過覆焊修理，且覆焊修理後之追蹤檢測均無劣化趨勢。

至於本次大修發現 N2E-J4 錢道裂紋，根據歷次檢查紀錄，此口錐道上次檢查時間為 EOC-13（八十八年），當時並無裂紋顯示，歷經兩個運轉週期出現此種裂紋，依台電公司之答覆說明（請參見附件八），N2E-J4 錢道裂紋並非為單一之裂紋顯示，而是由許多裂紋連貫而成，研判發生機制為沿晶應力腐蝕龜裂（IGSCC），經應力分析，若假設裂紋於 EOC-13 期間引發，於本次 EOC-15 期間成長至 0.233 吋，是有此可能，再分析至下次大修（EOC-16）止，裂紋深度成長到管壁厚度 34%，符合法規限制值要求，但台電公司仍採行錐道覆焊修理（請參見圖四），經本案之專案小組評估後，認為台電公司採取覆焊之方式修理，應可接受。

一般再循環管路如果發生沿晶應力腐蝕龜裂（IGSCC），國內外

核電廠大都採用覆焊修理，亦即在龜裂的鋸道上增加覆鋸層，於管內壁形成壓縮殘留應力，以避免裂紋的成長，但由於焊接會在鋸道熱影響區產生殘留應力，加上材質敏化，以及覆焊收縮效應對系統的影響，必須在覆焊設計過程中一併加以考量，因此覆焊修理所要求的技術層次較高。

近年來，台電公司積極完成覆焊修理技術本土化，並遵循 ASME 規範第十一部（Code Sec. ）和規章個案 Code Case N-504-1、美國核管會 NUREG 0313 Rev.2 之相關規定，執行覆焊過程中應有的工作程序。此次覆焊修理，同樣由台電公司負責執行，但有鑑於今年核一廠覆焊修理時，發生夾層瑕疵問題，此次覆焊過程中增加第二覆鋸層之手動超音波檢測（MUT），以確保覆焊與管件之結合，覆焊完成後經手動超音波檢測（MUT）檢測，並無發現其他瑕疵問題。另外，此口鋸道原本裂紋並未貫穿管壁，依 Code Case N-504-1 之規定，覆焊完成後須執行洩漏測試，此次核二廠將此部分測試納入較嚴格的水壓測試範圍（1130~1145PSIG）內執行，經查證測試結果，並無洩漏情形發生。

## 陸、綜合結論

再循環水系統為構成反應爐壓力邊界的一部分，於機組大修期

間，台電公司均按營運期間檢測計畫進行檢測工作，冀以避免機組在運轉過程中發生冷卻水流失的可能性，管制單位在機組大修時，也會就相關作業深入查證。綜合而言，此次核二廠二號機 EOC-15 大修之再循環管路鋸道檢查，由現場查證可以獲致如下之結論：

## 一、檢測結果綜合敘述

此次核二廠二號機 EOC-15 大修之再循環管路鋸道檢查，按原訂計畫，全面檢查 A 串 81 口鋸道和 B 串 11 口鋸道持續監測，原能會參考核一廠一號機於九十一年九月大修時的發現，要求自該機組前次大修已全面檢查的 B 串鋸道中篩選出 20 口鋸道，以及為因應 N2E-J4 鋸道發現之裂紋顯示，原能會考量此項發現之重要性，以及過去檢測結果裂紋的分佈情況，即要求核二廠應增加對 B 串上升管部分( Riser )之鋸道詳細檢查，經評估後此部分再增加 13 口鋸道，累計此次大修共檢測 125 口鋸道。

根據此次檢查結果，N2J-J3 鋸道於 EOC-5 大修發現裂紋顯示，並於 EOC-6 執行應力改善，之後每次大修均做追蹤檢查，至本次檢測結果，裂紋沒有成長，將再列入下次大修持續追蹤檢測外，其餘先前已經執行過覆焊修理之裂紋追蹤檢測，均無劣化趨勢。

至於本次大修發現 N2E-J4 鋸道裂紋，依台電公司的說明，此裂紋並非為單一之裂紋顯示，而是由許多裂紋連貫而成，經應力分析，

若假設裂紋於 EOC-13 期間引發，於本次 EOC-15 期間成長至 0.233 吋，是有此可能，再分析至下次大修（EOC-16）止，裂紋深度成長到管壁厚度 34%，仍符合法規限制值要求，但台電公司仍採行鋸道覆焊修理，經本案之專案小組評估後，認為台電公司採取覆焊之方式修理，應可接受。

## 二、後續管制措施

(一) 對於下次一號機大修再循環水系統管路鋸道之檢查，仍建議參考本次二號機檢測情形，除按原計畫執行外，應增列上升管所有鋸道之檢查，未來一、二號機大修則比照此次二號機處理模式執行。

(二) 對無法使用自動超音波檢測（AUT），而須使用手動超音波檢測（MUT）之鋸道部分，無論軸向或周向裂紋檢測，更應確保檢測品質，因此檢測人員除應取得美國電力研究所 EPRI UT 能力驗證外，更應積極加強檢測再訓練和新進人員之培養，並應繼續蒐集國外之檢測資訊和技術，以提昇檢測品質。

(三) 在鋸道瑕疵方面，目前台電公司已完成覆焊修理技術本土化，但覆焊修理過程中可能發生之夾層瑕疵問題，建議台電公司蒐集國外相關技術和研發，以避免類似問題發生。

(四) 基於核能安全長程規劃的考量，多次覆焊所產生之收縮效應，

對管路系統整體鋸道應力分析和系統撓性變化之影響，台電公司應積極進行相關研究和因應。

(五)為確保再循環水系統的機械結構完整性，對於鋸道發生裂紋問題，台電公司應提出短程與長程改善計畫，並納入老化管理，以期使系統在營運期間仍能保有原先的設計功能。

針對上述之後續管制措施，原能會已發備忘錄（請參見附件九）要求台電公司辦理，並且原能會仍持續加強視察再循環管路的檢測作業，和台電公司對前述要求事項之辦理情形，以確保核能機組運轉之安全與品質。

註：1. 本報告之附件，因篇幅過多故於本上網報告中從略。

2. 本案若有疑問請洽本會張欣科長，電話：(02) 2232-2130

表一 核二廠一號機再循環管路鋸道龜裂和修復紀錄

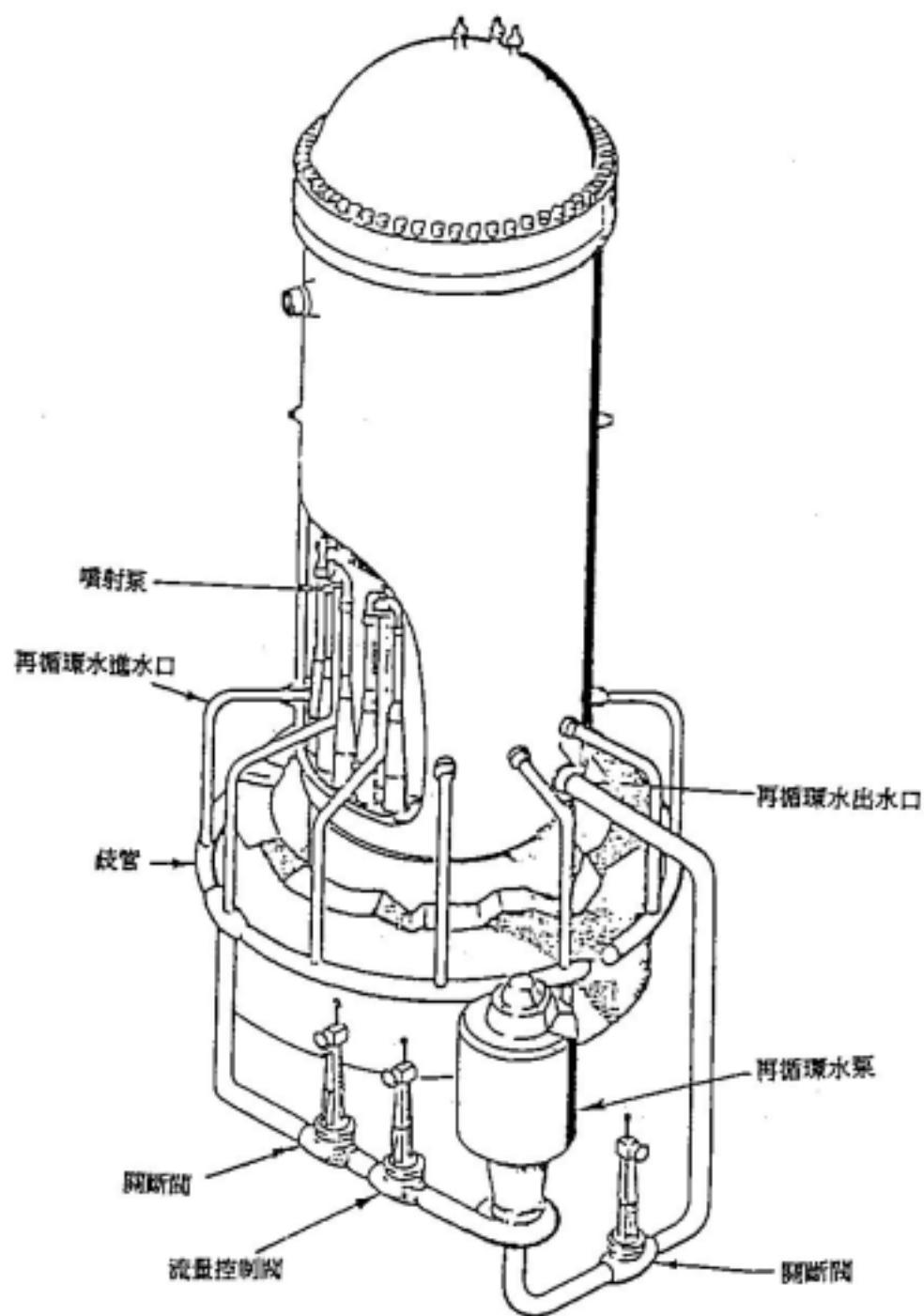
項目	鋸道編號	發現裂紋	裂紋尺寸(吋)		處理情形
			長度	深度	
1	AS-J2	EOC-6	0.7	0.18	EOC-6 覆焊
2	AS-J4	EOC-6	1.5	0.32	EOC-6 覆焊
3	AS-J7	EOC-12	spot	穿透	EOC-12 覆焊
4	AD-J17	EOC-7	63	<0.1	EOC-7 覆焊
5	AD-J21	EOC-12	0.9	0.22	EOC-12 覆焊
6	N2A-J1	EOC-12	3 0.1	均穿透	EOC-12 覆焊
7	N2C-J1	EOC-12	1.8 0.9 3.15	0.16 0.096 0.096	EOC-12 覆焊
8	N2C-F2	EOC-7	0.25	N/A	外表面微裂，經磨除後 AUT 檢測合格
9	N2D-J2	EOC-6	2	0.14	EOC-6 覆焊
10	N2A-TSOL	EOC-7	3.2	0.24	
			0.4	0.08	
			0.8	0.1	
			1.5	0.1	EOC-7 覆焊
			0.4	0.16	
			1.5	0.3	
11	N2B-TSOL	N/A	N/A	N/A	EOC-9 覆焊
12	N2C-TSOL	N/A	N/A	N/A	EOC-9 覆焊
13	N2D-TSOL	EOC-7	0.5	0.42	
			2	0.3	
			0.9	0.35	
			1	0.26	EOC-7 覆焊
			1.4	0.31	
			3.4	0.17	
			1.2	0.25	
14	N2E-TSOL	EOC-8	0.08	0.10	
			0.14	0.14	
			0.14	0.14	
			0.06	<0.10	EOC-9 覆焊
			0.10	0.10	
			0.12	0.12	
			0.07	<0.10	
15	BS-J2	EOC-6	1.9	0.22	EOC-6 覆焊

項目	鋸道編號	發現裂紋	裂紋尺寸(吋)		處理情形
			長度	深度	
16	BS-J4	EOC-6	2.17	0.08	追蹤至 EOC-10 改判為幾何形狀非裂紋
17	RHR-J1	EOC-10	2.25	0.15	追蹤至 EOC-15, 仍可接受, 未覆焊
18	BD-J23	EOC-6	4.4 11.8 0.5	0.2 0.15 0.29	EOC-6 覆焊
19	N2F-J1	EOC-6	0.3	0.1	EOC-6 覆焊
20	N2G-J3	EOC-6	1.5	0.19	EOC-6 覆焊
21	N2J-J1	EOC-6	2.6 0.35	0.09 0.09	EOC-6 覆焊
22	N2J-J3	EOC-6	0.25	0.06	EOC-6 覆焊
23	N2F-TSOL	N/A	N/A	N/A	EOC-9 覆焊
24	N2G-TSOL	EOC-7	1.3 0.6 0.9 2 1 0.5	0.15 < 0.10 0.15 0.29 0.15 0.15	EOC-7 覆焊
25	N2H-TSOL	EOC-7	1.1 0.5 0.6 1 1 3 2.4 0.7 1	0.29 0.15 0.16 0.3 0.12 0.26 < 0.10 0.12 < 0.10	EOC-7 覆焊
26	N2J-TSOL	N/A	N/A	N/A	EOC-9 覆焊
27	N2K-TSOL	N/A	N/A	N/A	EOC-9 覆焊
28	N2J-J2	EOC-15	0.44 0.71	0.2 0.2	EOC-15 覆焊

表二 核二廠二號機再循環管路鋸道龜裂和修復紀錄

項目	鋸道編號	發現裂紋	裂紋尺寸(吋)		處理情形
			長度	深度	
1	AS-J4	EOC-4	1	0.14	EOC-5 覆焊
			1	0.10	
			1.25	0.12	
			0.5	0.16	
2	N2A-J1	EOC-4	2	0.12	EOC-5 覆焊
			2	0.09	
3	N2B-J2	EOC-5	1.3	0.11	EOC-6 覆焊
4	N2B-J3	EOC-5	2.8	0.05	EOC-5 覆焊
			0.8	0.1	
			2.8	0.05	
			3.4	0.05	
			1.0	0.1	
			0.6	表面	
			1.2	0.15	
			6.2	0.25	
			1.4	0.22	
5	N2C-J1	EOC-5	2	0.16	EOC-5 覆焊
6	BS-J4	EOC-4	3	0.16	EOC-5 覆焊
			2	0.12	
			2	0.15	
			0.5	0.16	
			4	0.15	
			1.5	0.11	
7	BD-J22	EOC-4	2.2	0.15	追蹤至 EOC-12 判為幾何形狀
8	N2F-J2	EOC-5	6	0.18	EOC-5 覆焊
9	N2F-J3	EOC-5	0.6	0.15	EOC-5 覆焊
			0.6	0.1	
10	N2H-J1	EOC-5	0.8	0.13	EOC-5 覆焊
			1.8	0.13	
			0.6	0.2	
11	N2H-J2	EOC-12	2.1	0.1	EOC-13 覆焊
12	N2H-J3	EOC-5	3	0.21	EOC-5 覆焊
13	N2K-J2	EOC-12	2.5	0.12	EOC-13 覆焊
			5.5	0.10	
14	N2K-J3	EOC-12	2.5	0.13	EOC-13 覆焊

項目	鋸道編號	發現裂紋	裂紋尺寸(吋)		處理情形
			長度	深度	
15	N2J-J2	EOC-5	5.5	0.1	追蹤至 EOC-12 判為焊道根部幾何形狀非裂紋
16	N2J-J3	EOC-5	0.5	0.09	追蹤至 EOC-15 , 仍可接受 , 未覆焊
17	N2C-J3	EOC-14	4.1	0.12	EOC-14 覆焊
18	N2E-J4	EOC-15	25.32	0.233	EOC-15 覆焊



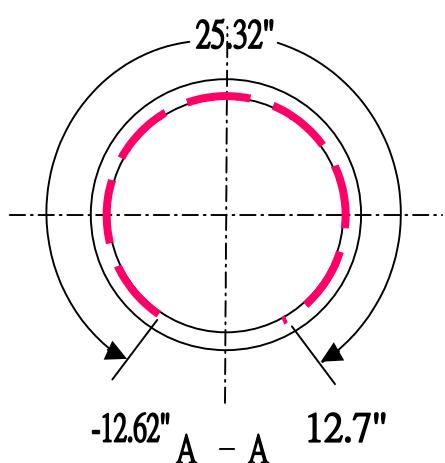
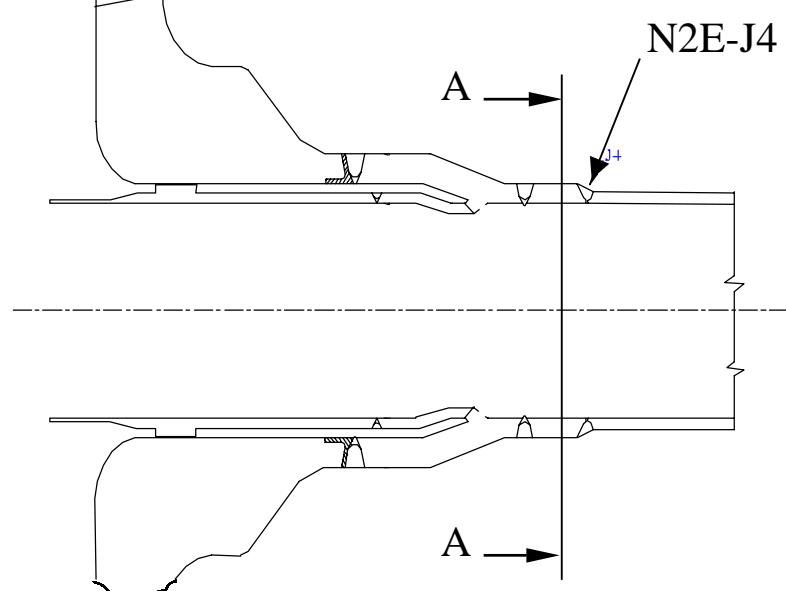
圖一 再循環水系統示意圖



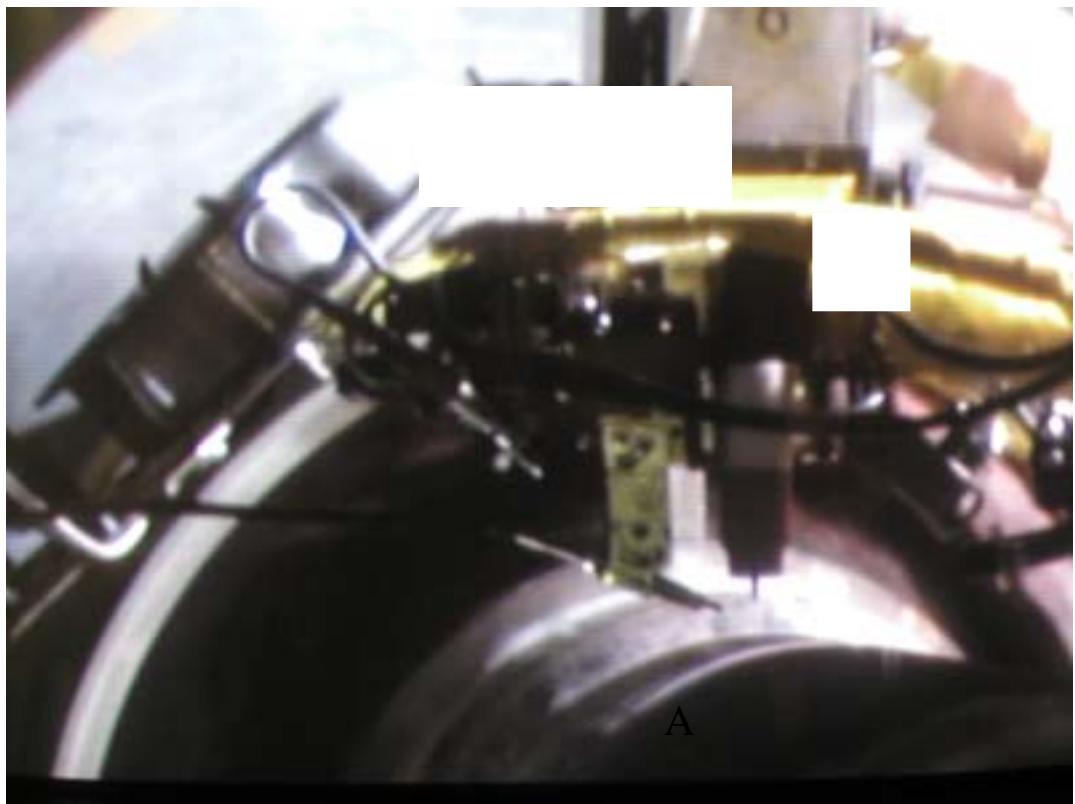
圖二 AUT 現場檢測資料擷取情形



反應爐 ← → 再循環管路



圖三 N2E-J4 錛道裂紋示意圖



圖四 N2E-J4 錄道現場覆焊情形