

核二廠 1 號機第 25 週期 燃料護套洩漏專案報告

(可對外公布版本)

台灣電力股份有限公司

106 年 5 月



目錄

壹、核二廠 1 號機週期 25 運轉期間監測及處理措施.....	2
貳、核二廠 1 號機第 25 週期末大修期間檢查作業及結果.....	9
一、爐內啜吸檢查.....	9
二、護套洩漏燃料束池邊檢查及修復作業.....	14
參、肇因分析.....	16
肆、後續處理改善措施.....	22
一、「燃料丸表面製造缺陷」具體強化對策.....	23
二、「爐屑磨損」具體強化對策.....	24
三、根據本次燃料護套洩漏及廢氣流量偏高經驗，重新檢討強化 程序書及燃料可靠度指標(FRI)相關因應行動之保守性。(大會 視察備忘錄編號：KS-會核-105-1).....	33
伍、對廠區內外環境之影響說明.....	48
陸、參考文件.....	55



壹、核二廠 1 號機週期 25 運轉期間監測及處理措施

核二廠(以下簡稱本廠)1 號機週期 25 於 104 年 5 月 29 日起動，5 月 30 日併聯發電，運轉到 105 年 11 月 30 日。檢視前述運轉期間，週期燃耗約為 14299 MWD/MTU。

本週期歷經 19 次計畫性降載，計畫性降載係為執行週期性偵測試驗、檢修、控制棒佈局更換，降載幅度皆依程序書要求及燃料廠家建議，採用最保守的「緩慢升載策略(soft operation)」，每週進行爐水及廢氣活度取樣分析，監控爐心燃料護套完整性狀況，並以廠家之爐心線上監測程式進行降載模擬計算，在確保熱限值和封套餘裕足夠下制定出降載策略。該降載策略均經審查核定後交由控制室值班人員，作為控制棒插入及流量降低之步驟指引。

根據 1 號機週期 25 燃料可靠度指標(FRI)歷程圖，首次觀察到 FRI 有跳升現象係在 104 年 10 月 6 日，其數值為 169.8。而 Xe-133 首次有較大幅度的變化現象則發生於 104 年 9 月 16 日，其 Xe-133 活度值由 104 年 9 月 15 日的 20.02 $\mu\text{Ci}/\text{sec}$ 上升至 31.42 $\mu\text{Ci}/\text{sec}$ 。另外，根據 1 號機週期 25 運轉期間碘-131 活度及碘-131 等價劑量變化來看，在 105 年 4 月 14 日前均維持在一個相對穩定值，而自 4 月 14 日之後大約一個月期間，碘-131 等價劑量有略微升高，但同年 5 月 12 日又回到正常值，之後則是在 7 月 14 日後才又觀察到碘-



131 等價劑量有上升跡象，但自此後碘 131 等價劑量未再下降。

由於前述 FRI 值並未超過國際間判定燃料可能發生護套洩漏之門檻值，且依本廠程序書規範，取樣分析有其不準度，不宜貿然將單一的突升現象視作燃料發生護套洩漏，因此核二廠當時實施加強監視 FRI 變化情況以及廢氣取樣結果等作為因應。統計 2015 年 10 月當月份的平均 FRI 值仍為 1，即燃料未發生護套洩漏。

105 年 7 月 15 日，本廠 1 號機燃料可靠度指標(FRI)數值大於 300 $\mu\text{Ci}/\text{sec}$ ，高於 WANO 衡量燃料瑕疵(defect)之標準，並在同月 22 日首次 FRI 大於 1,000 $\mu\text{Ci}/\text{sec}$ ，經持續觀察一週(如下表)，FRI 數值除無下降跡象外，並有緩慢增加趨勢，研判 1 號機爐心核燃料護套有不完整之虞。本廠除依營運程序書 1032 之規定，進入一階行動階段因應外，另亦於 105 年 8 月 3 日成立本案營運決策小組，依爐心燃料護套監測參數變化情形及機組最新狀況，動態召集廠內相關部門開會，以擬定減緩六種廢氣總活度增加及 FRI 指標上升之相關因應措施，大修前 1 號機共計召開 17 次會議。

日期	FRI	日期	FRI	日期	FRI
105/7/14	1	105/7/21	900.2	105/7/28	1091.2
105/7/15	381	105/7/22	1024.6	105/7/29	1122.4
105/7/18	883.5	105/7/25	1090.3	105/8/1	1309.3
105/7/19	758.9	105/7/26	980.1	105/8/2	1299.7
105/7/20	911.5	105/7/27	1408.8	105/8/3	1384.1

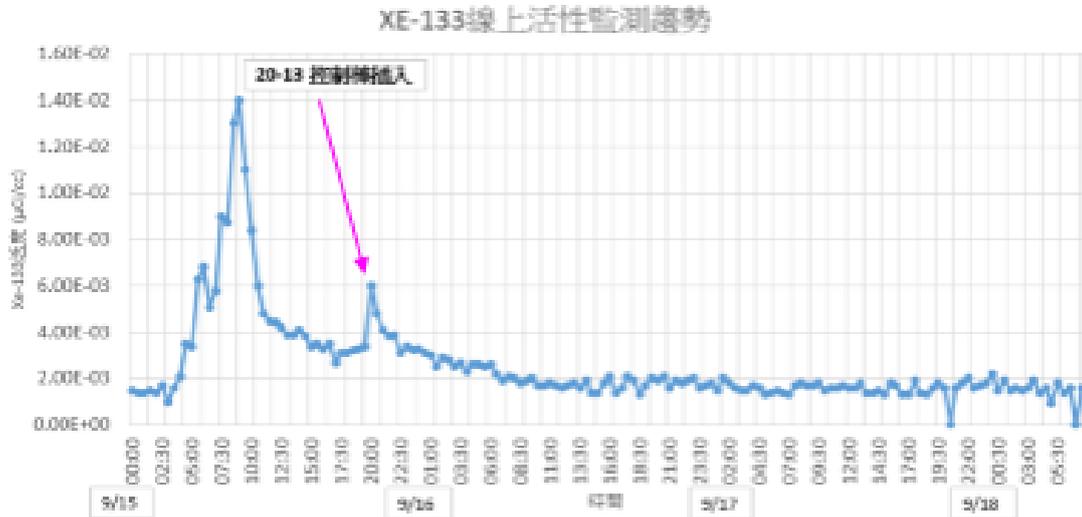
此外本廠觀察到 105 年 7 月 9 日控制棒佈局更換後，六種廢氣



總活度升高，推測可能是控制棒佈局更換(A2 佈局更換成 B1 佈局)後，洩漏燃料由受到控制棒壓抑轉變為未受到控制棒壓抑所致，故本廠再利用中秋節長假期間，於 9 月 15 日降載至 500 MWe，執行約每 80 天一次的控制棒佈局更換，將控制棒佈局由 B1 更換為 A2，綜合本廠更換控制棒佈局、六種廢氣總活度變化及廠家所提供之疑似洩漏燃料束所屬 5 個控制單元座標：20-13、20-45、28-29、36-13、36-45 進行功率壓抑，將前述 5 支控制棒由全出位置，插至全入；控制棒佈局更換期間，廠內核工人員依事先設計好的佈局序列更換步驟，配合線上活性監測記錄表格，以每步驟 1 或 2 支控制棒抽插進行佈局更換；控制室值班人員則依據核工人員所提供之降載指引，以每小時 < 15% 額定功率速率緩慢降載至 CTP 58% 後，啟動爐心監測程式計算，以確保熱限值及燃料封套餘裕足夠才開始執行佈局更換。更換期間於每整點或半點前 10 分鐘將控制棒抽出或插入，於整點或半點時記錄線上活性監測結果，並於每次換完對稱行之控制棒時，啟動監測程式進行爐心參數計算。完成所有序列更換步驟後，發現控制棒 20-13 插入時，線上廢氣核種 Xe-133 活度明顯增加(如下圖)，依本廠過去執行護套洩漏燃料束功率壓抑之經驗，如控制單元內有護套洩漏燃料束存在，當控制棒插入時，線上廢氣活性監測系統之 Xe-133 活度均會有突升現象。由此本廠研判



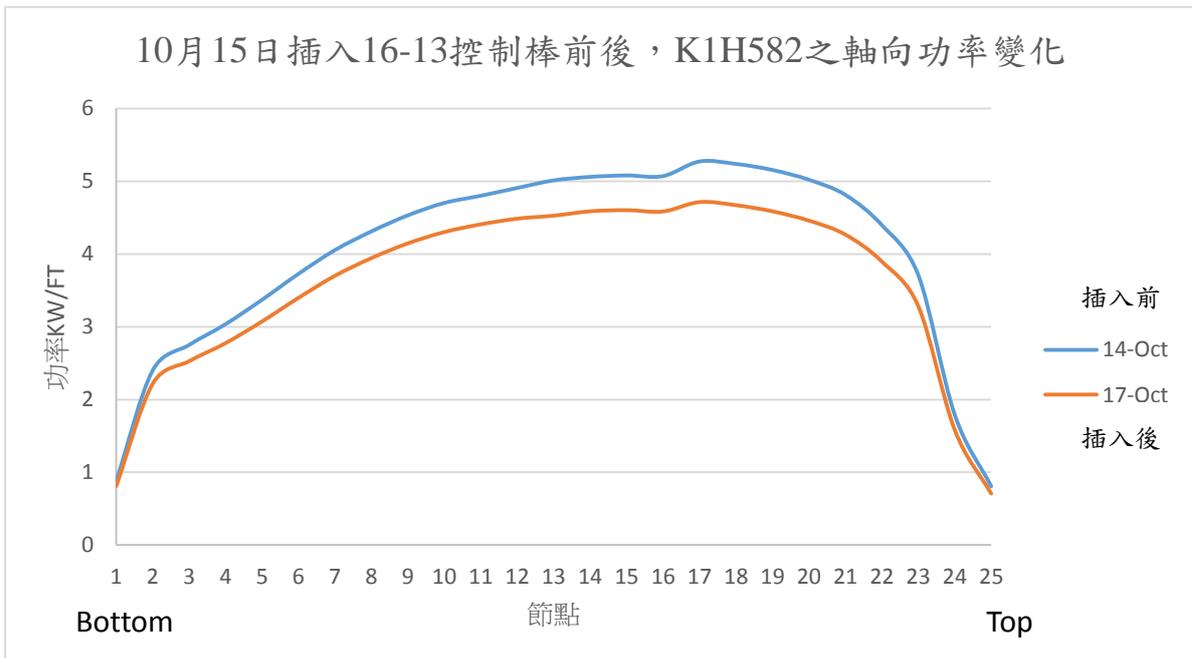
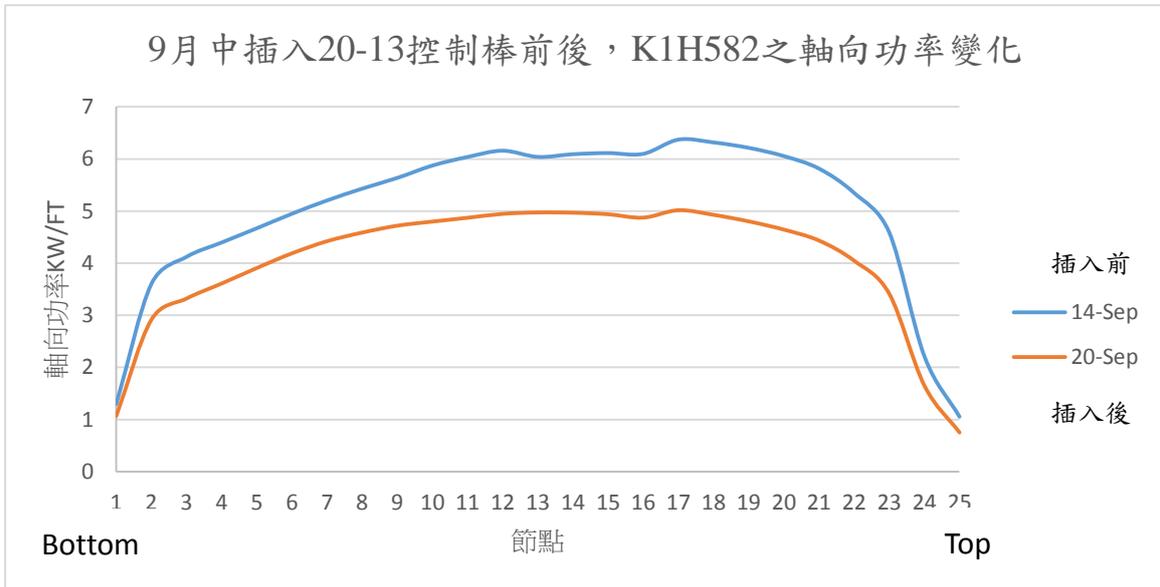
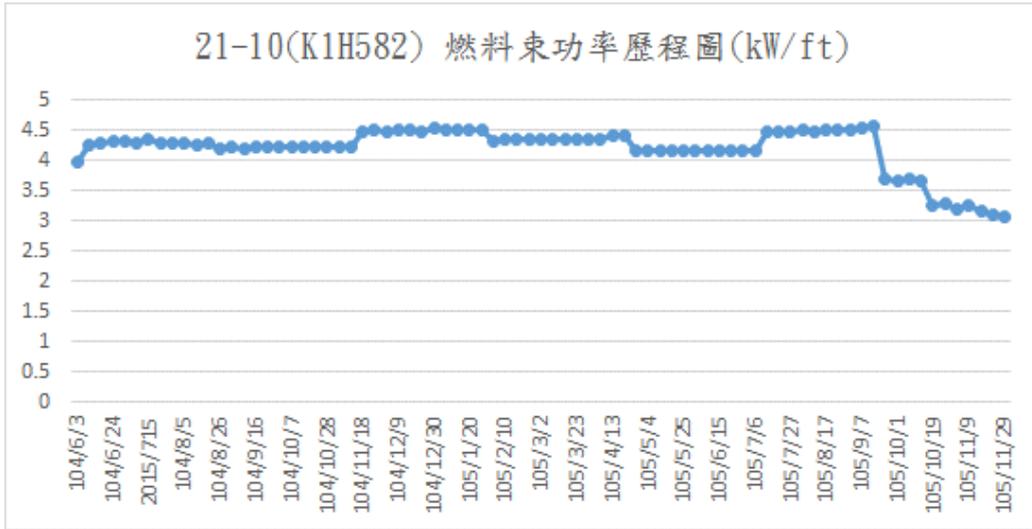
護套洩漏燃料束即位於此控制棒單元或周圍，故將該控制棒 20-13 保持在全入位置，以壓抑該可疑燃料束之功率。



經計算，本廠將控制棒 20-13 插至全入，後續在同年 10 月 15 日再將 16-13 控制棒插至全入，雖未直接壓抑護套洩漏燃料束 (K1H582)，但使該燃料束整體功率平均下降約 20% 及 10%，確實達到功率壓抑的效果，其全週期之燃料束功率歷程及插棒前後功率變化如下圖。



台灣電力公司第二核能發電廠 1 號機第 25 週期
燃料護套洩漏專案報告





105 年 9 月 20 日機組恢復滿載後，廢氣核種 Xe-133 活度下降至一穩定之相對低點，燃料可靠度指標 FRI 維持在 400 至 900 $\mu\text{Ci}/\text{sec}$ 間，明顯低於 9 月 15 日前之 1,000 至 1,500 $\mu\text{Ci}/\text{sec}$ 。更換後之控制棒 A2 佈局確可有效壓抑洩漏燃料束之功率。此外，插棒後之壓抑效果亦可由六種放射性廢氣及爐水碘做為判斷依據。由碘趨勢可看出，護套洩漏情形自 7 月中開始加速惡化，而經 9 月 15 日功率壓抑後洩漏雖仍持續惡化，但趨勢趨於緩和；而六種放射性廢氣趨勢亦顯示經功率壓抑後，惡化趨勢明顯緩和。故功率壓抑雖無法停止護套洩漏持續惡化，但確實可有效降低洩漏惡化速度。之後機組運轉期間本廠仍持續依程序書 1032 一階行動階段¹要求，執行廢氣及爐水取樣分析，並密切追蹤相關參數變化之趨勢，依程序書規定採行相關對應措施。

考量「反應爐有大幅度的功率變化(包括控制棒佈局更換)」為造成燃料可靠度指標(FRI) 增加或燃料洩漏惡化之主因。故後續爐心營運皆以避免不必要的升降載為準則，僅依運轉規範需求，配合每月例行之汽機閥動作試驗進行降載，如有需要一併調整控制棒棒位。亦即 105 年 11 月 30 日大修前，機組營運策略均以穩定 FRI 值及六種廢

¹一階行動階段：除燃料未護套洩漏時所有的處置皆應包括外，首先暫停一切不必要之升降載，另增加相關取樣頻率、對機組功率大幅變化期間(大於 15% CTP)之爐水與廢氣所含核種的活性強度變化加以記錄分析，以及將燃料護套洩漏情況呈報主管處等，詳細行動措施請參考程序書 1032。



氣總活度為首要任務，不再以降載調整棒位，維持機組滿載運轉為目標。大修期間以爐內燃料啜吸檢查，成功定位出護套洩漏之燃料束，燃料編號為 K1H582，位在 20-09 控制單元中，隨後將之移出反應爐，退至用過燃料池中進行溼式貯存，不再使用；其餘 623 束均無護套洩漏跡象。

檢視前述燃料束爐心位置，係位於 105 年 9 月 15 日壓抑可疑燃料束之功率所研判插入之控制棒(座標 20-13)之正下方，證明 7 月 15 日發現燃料洩漏徵兆後，本廠核技人員開始構思藉由監測控制棒佈局更換前後之廢氣變化情況之改良式功率壓抑技術，至 9 月 15 日實施局部功率壓抑，以及嗣後種種核心營運方面之努力相當正確。



貳、核二廠 1 號機第 25 週期末大修期間檢查作業及結果

一、爐內啜吸檢查

本廠 1 號機於 105 年 11 月 30 日開始本週期末(EOC25)大修工作，爐內啜吸燃料檢查作業(In-core Sipping)則安排於 12 月 5 日起，由本廠燃料供應廠家 AREVA 公司(以下稱 AREVA 公司)，依據本廠程序書 1038「爐內啜吸檢查及受損核燃料檢修作業程序書」，分兩階段對全爐心核燃料進行完整性檢查(該設備使用 SIPPING 8 HOOD 啜吸罩，每次可同時檢測 8 束核燃料護套之完整性)。

- (一)、第一階段檢測爐心 145 個控制單元內之 580 束核燃料，總計需執行 76 個步驟；本次並另外增加執行步驟 74B，以不同方位雙重確認護套洩漏燃料之位置無誤。第一階段受檢之 580 束燃料爐內位置詳參圖 1。
- (二)、第二階段檢測反應爐外圈非控制單元之 44 束燃料，惟檢測前需先挪移至啜吸罩可抵達之爐心位置(詳參圖 2)，並先確認停機餘裕符合運轉規範要求後，始進行啜吸檢查，共執行 8 個步驟。

本廠於 105 年 12 月 6 日 18:30，發現護套洩漏燃料束(編號 K1H582)，其爐心位置為 21-10，燃耗 47,063 MWD/MTU，為使用 3 個週期之 ATRIUM-10 型燃料。



台灣電力公司第二核能發電廠 1 號機第 25 週期
燃料護套洩漏專案報告

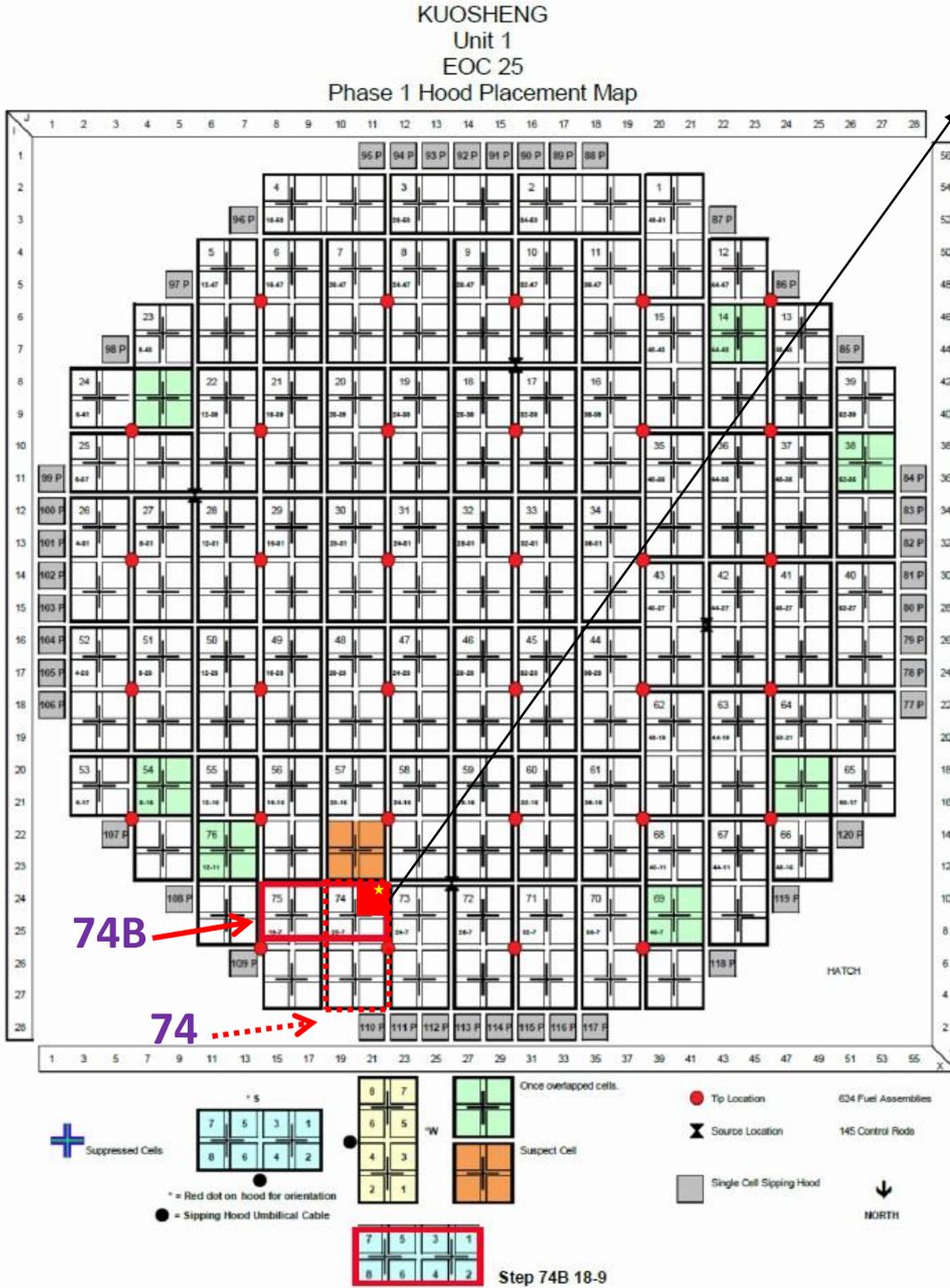


圖 1、第一階段受檢之 580 束燃料爐內位置圖
(檢查編號 1~76，每次檢查 8 束)



台灣電力公司第二核能發電廠 1 號機第 25 週期
燃料護套洩漏專案報告

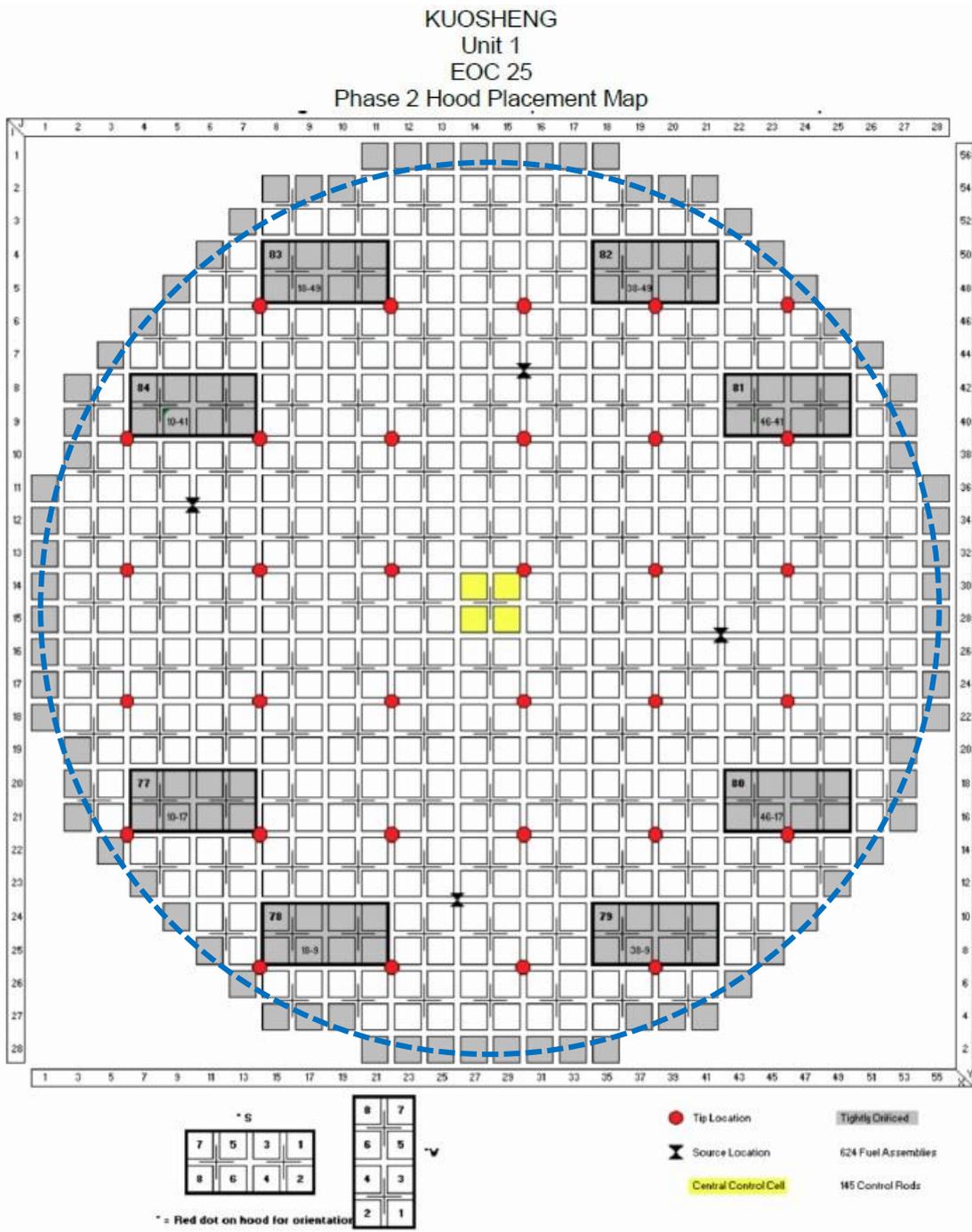


圖 2、第二階段受檢之 44 束邊緣燃料爐內位置圖
(將外圍 44 束燃料移至中心區，檢查編號 77~84)



(三)、 啜吸檢查過程紀要：

時間	作業內容摘要
105.12.05 21:45	開始爐內啜吸第 1 步驟，定位高度確定正常後，開始依序進行啜吸檢查。
105.12.06 18:30	跳步執行第 74 步驟後，發現 1 束燃料有護套洩漏跡象，其氣樣活性 294,236 cps、水樣活性 2,573,156 cps(燃料完整性正常時氣樣活性約為 4,000~5,000 CPS，水樣活性為 80,000~200,000 CPS)。爐心座標為 21-10、燃料編號為 K1H582(詳參圖 3)、燃耗 47,063 MWD/MTU，為使用 3 個週期之 ATRIUM-10 型燃料。
105.12.08 03:21	76 個步驟全數完成，另為重複確認 21-10 是否為發生護套不完整之燃料束，增加步驟 74B，確認 21-10 位置為護套洩漏燃料束。至此第一階段爐內啜吸(SIPPING 8 HOOD)檢查工作完成。
105.12.08 08:48 23:50	將爐內 44 束邊緣燃料，挪移至爐心 SIPPING 8 HOOD 可抵達之位置，燃料挪移前計算所有步驟之停機餘裕符合運轉規範規定。



台灣電力公司第二核能發電廠 1 號機第 25 週期
燃料護套洩漏專案報告

105.12.09
07:45 執行爐內 44 束邊緣燃料(已吊至爐心預先規劃之位置)
之啜吸檢查工作，並於 12/9 11:55 完成 8 個步驟。至
此爐心全數(624 束)燃料束之啜吸檢查工作完成。

	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	
56											K1G554	K1G049	K1G504	K1G001	
54								K1G066	K2G080	K1G050	K1G041	K1H532	K2G060	K1H552	
52							K1G002	K1G577	K2G052	K1H020	K1K510	K1L026	K1K518	K1L550	
50						K1G543	K1H064	K1H568	K1H588	K1K010	K1L105	K1K081	K1L542	K1K034	
48					K1G042	K1H040	K1H024	K2K604	K1K502	K1L090	K1H583	K1L518	K1K066	K1L510	
46				K1G546	K1H052	K1H060	K2K536	K1K026	K2L077	K1K564	K1L010	K1H012	K1L558	K1H508	
44			K1G009	K1H068	K1H028	K2K555	K1H504	K1L042	K2G067	K1L050	K1H008	K1L098	K1K085	K1L034	
42		K1G065	K1G581	K1H548	K2K606	K1K025	K1L041	K1K017	K1L565	K1K019	K1L058	K1K074	K1L018	K1H544	
40		K1G522	K2G053	K1H576	K1K501	K2L110	K1H540	K1L526	K1H556	K1L109	K1H516	K1L117	K1H088	K1L002	
38		K1G033	K1H032	K1K009	K1L089	K2K603	K1L049	K1K058	K1L108	K1H560	K1K050	K1H004	K1K558	K1K551	
36	K1G553	K1H072	K1K509	K1L065	K1H578	K1L009	K1H016	K1L057	K1H528	K1K049	K2L113	K1K002	K1L534	K1H520	
34	K1G010	K1H512	K1L025	K1K089	K1L517	K1H076	K1L097	K1K073	K1L116	K1H048	K1K001	K2H043	K1K042	K1L502	
32	K1G569	K1H056	K1K517	K1L541	K1K065	K1L557	K1K057	K1L017	K1H044	K1K557	K1L533	K1K041	K1L525	K1H083	
30	K1G017	K1H564	K1L549	K1K033	K1L509	K1H536	K1L033	K1H572	K1L001	K1K526	K1H524	K1L501	K1H078	K1H036	
28	K1G024	K1H562	K1L556	K1K040	K1L516	K1H534	K1L040	K1H570	K1L008	K1K555	K1H522	K1L508	K1H080	K1H034	
26	K1G576	K1H054	K1K550	K1L548	K1K072	K1L564	K1K064	K1L024	K1H042	K1K563	K1L540	K1K048	K1L532	K1H081	
24	K1G056	K1H510	K1L032	K1K092	K1L524	K1H074	K1L104	K1K080	K1L088	K1H046	K1K008	K2H044	K1K047	K1L507	
22	K1G560	K1H070	K1K516	K1L107	K1H580	K1L016	K1H006	K1L064	K1H526	K1K056	K2L119	K1K007	K1L539	K1H518	
20		K1G015	K1H030	K1K016	K1L096	K2K616	K1L056	K1K063	K1L115	K1H558	K1K055	K1H002	K1K561	K1K556	
18		K1G027	K2G063	K1H574	K1K508	K2L121	K1H538	K1L531	K1H554	K1L114	K1H514	K1L087	K1H086	K1L007	
16		K1G072	K1H546	K2K609	K1K032	K1L048	K1K024	K1L568	K1K022	K1L063	K1K079	K1L023	K1H542		
14			K1G016	K1H066	K1H026	K2K618	K1H502	K1L047	K2G070	K1L055	K1H014	K1L103	K1K088	K1L039	
12				K1G511	K1H050	K1H058	K2K620	K1K031	K2L126	K1K542	K1L015	K1H010	K1L563	K1H506	
10					K1G047	K1H038	K1H022	K2K611	K1K507	K1L095	K1H582	K1L523	K1K071	K1L515	
8						K1G528	K1H062	K1H566	K1H586	K1K015	K1L071	K1K098	K1L547	K1K039	
6							K1G007	K1G578	K2G064	K1H018	K1K515	K1L031	K1K549	K1L555	
4									K1G071	K2G079	K1G055	K1G048	K1H530	K2G061	K1H550
2												K1G559	K1G014	K1G503	K1G008
	29	31	33	35	37	39	41	43	45	47	49	51	53	55	
56	K1G004	K1G501	K1G052	K1G555											
54	K1H523	K2G068	K1H531	K1G044	K1G051	K2G025	K1G067								
52	K1L551	K1K519	K1L027	K1K511	K1H019	K2G065	K1G580	K1G003							
50	K1K035	K1L543	K1K082	K1L106	K1K011	K1H587	K1H567	K1H063	K1G588						
48	K1L511	K1K067	K1L519	K1H584	K1L091	K1K503	K2K605	K1H023	K1H039	K1G043					
46	K1H507	K1L559	K1H011	K1L011	K1K544	K2L109	K1K027	K2K554	K1H059	K1H051	K1G508				
44	K1L035	K1K086	K1L099	K1H015	K1L051	K2G059	K1L043	K1H503	K2K566	K1H027	K1H067	K1G012			
42	K1H543	K1L019	K1K093	K1L059	K1K018	K1L566	K1K020	K1L044	K1K028	K2K607	K1H547	K1G547	K1G068		
40	K1L003	K1H087	K1L118	K1H515	K1L110	K1H555	K1L527	K1H539	K2L111	K1K504	K1H575	K2G066	K1G540		
38	K1K552	K1K559	K1H003	K1K051	K1H559	K1L111	K1K059	K1L052	K1K543	K1L092	K1K012	K1H031	K1G032		
36	K1H519	K1L535	K1K003	K2L118	K1K052	K1H527	K1L060	K1H007	K1L012	K1H577	K1L068	K1K512	K1H071	K1G036	
34	K1L503	K1K043	K2H045	K1K004	K1H047	K1L119	K1K095	K1L100	K1H075	K1L520	K1K090	K1L028	K1H511	K1G011	
32	K1H084	K1L528	K1K044	K1L536	K1K536	K1H043	K1L020	K1K060	K1L560	K1K068	K1L544	K1K547	K1H055	K1G572	
30	K1H035	K1H077	K1L504	K2H047	K1K527	K1L004	K1H571	K1L036	K1H535	K1L512	K1K036	K1L552	K1H563	K1G020	
28	K1H033	K1H079	K1L505	K1H521	K1K554	K1L005	K1H569	K1L037	K1H533	K1L513	K1K037	K1L553	K1H561	K1G021	
26	K1H082	K1L529	K1K045	K1L537	K1K560	K1H041	K1L021	K1K061	K1L561	K1K069	K1L545	K1K521	K1H053	K1G573	
24	K1L506	K1K046	K2H046	K1K005	K1H045	K1L120	K1K096	K1L101	K1H073	K1L521	K1K091	K1L029	K1H509	K1G053	
22	K1H517	K1L538	K1K006	K2L120	K1K053	K1H525	K1L061	K1H013	K1L013	K1H579	K1L069	K1K513	K1H069	K1G557	
20	K1K553	K1K562	K1H001	K1K054	K1H557	K1L112	K1K062	K1L053	K1K546	K1L093	K1K013	K1H029	K1G031		
18	K1L006	K1H085	K1L086	K1H513	K1L113	K1H553	K1L530	K1H537	K2L123	K1K505	K1H573	K2G071	K1G029		
16	K1H541	K1L022	K1K094	K1L062	K1K023	K1L567	K1K021	K1L045	K1K029	K2K610	K1H545	K1G592	K1G069		
14	K1L038	K1K087	K1L102	K1H005	K1L054	K2G062	K1L046	K1H501	K2K619	K1H025	K1H065	K1G026			
12	K1H505	K1L562	K1H009	K1L014	K1K545	K2L127	K1K030	K2K567	K1H057	K1H049	K1G542				
10	K1L514	K1K070	K1L522	K1H581	K1L094	K1K506	K2K613	K1H021	K1H037	K1G046					
8	K1K038	K1L546	K1K097	K1L070	K1K014	K1H585	K1H565	K1H061	K1G549						
6	K1L554	K1K548	K1L030	K1K514	K1H017	K2G072	K1G579	K1G006							
4	K1H549	K2G069	K1H529	K1G045	K1G054	K2G026	K1G070								
2	K1G005	K1G502	K1G040	K1G558											

圖 3、1 號機燃料編號及位置圖



二、護套洩漏燃料束池邊檢查及修復作業

前述編號 K1H582 之燃料束，於 12 月 9 日 06:52 傳送至 1 號機用過燃料池 BV-22 定位，12 月 12 日開始由 AREVA 公司在用過燃料池邊進行檢查，其步驟如下：(1) 進行燃料匣檢查，檢查後移除燃料匣及燃料上繫板，觀察燃料束四面燃料棒外觀是否完整；(2) 利用水底攝影機等設備，檢查燃料棒形狀與外觀，檢視護套表面的腐蝕與積垢情形等；逐一抽出燃料棒尋找初始缺陷位置；觀察護套洩漏燃料棒開口特徵，以研判初步護套洩漏肇因；(3) 利用渦電流檢測設備進行護套洩漏燃料棒之探傷，以查找針孔開口位置。檢查結果發現：L07 位置之燃料棒護套洩漏，本廠要求 AREVA 公司妥善處理該根燃料棒，俾蒐集證據及後續肇因分析。護套洩漏燃料束池邊檢驗大事紀如下表：

時間	作業內容摘要
105.12.09	完成將 K1H582 傳送至燃料廠房 3F 以備後續進行池邊檢驗。
105.12.12	<ul style="list-style-type: none">將 K1H582 移至燃料準備機，並完成燃料匣脫接。目視檢查發現 L07 位置之燃料棒護套有洩漏現象，詳參圖 4。
105.12.14	抽出護套洩漏燃料棒周圍 5 根燃料棒並使用 IRIS(單根燃料棒檢查站)檢查，檢查結果正常，完整性良好，且未發現爐屑磨



	損痕跡。
105.12.21	檢查該燃料束之其他 85 根燃料棒，全數完成渦電流檢測，檢測結果正常。
105.12.26	<ul style="list-style-type: none"> 以 Inert Rod(鉛棒)插入 L07 位置後完成 K1H582 燃料檢修 修復後 K1H582 燃料束經真空啜吸檢測，結果顯示正常。 未來 1 號機 EOC25 大修後，機組起動至滿載升載過程本廠將續遵守燃料廠家之 soft operation 保守性運轉策略，並由滿載後之燃料可靠度指標(FRI)評估全爐心之燃料護套完整性是否均正常無虞。

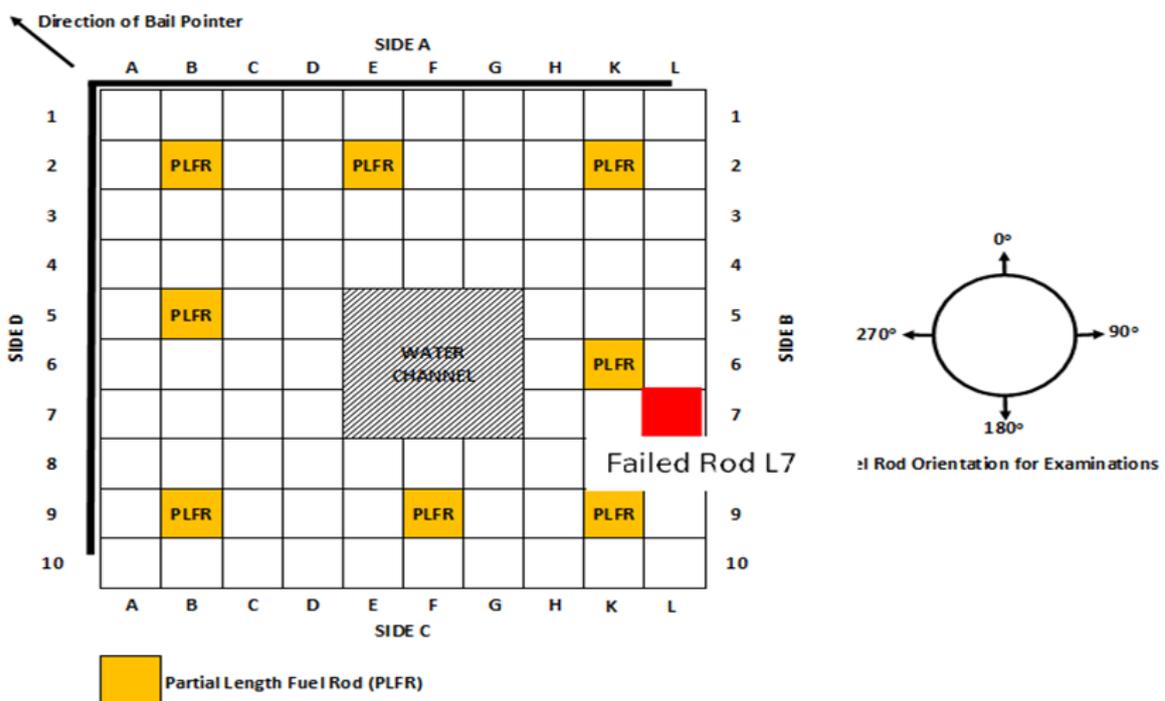


圖 4、ATRIUM-10 燃料棒座標位置圖



參、肇因分析

一般而言，燃料護套洩漏，其肇因可歸類為「燃料相關」及「運轉/維護相關」兩類。燃料相關的原因包括：護套氫化、氫脆增強 PCI、焊道腐蝕、格架/燃料棒磨損、燃料密化或燃料丸漏填之護套塌陷、燃料護套二次劣化、燃料護套高燃耗腐蝕洩漏、增強格架陰影腐蝕(ESSC)、其它未偵測到的製造缺陷。運轉/維護相關的原因則包括：燃料丸與護套交互作用(PCI)、爐屑磨損、變態沸騰或乾涸、過高燃料中心溫度、過高內壓造成之應力與應變、積垢誘發護套局部腐蝕(CILC)等。

本廠曾在發現爐內核燃料護套疑似洩漏跡象初期，立即針對 1 號機反應爐運轉歷程及核燃料完整性相關之監測數據進行分析。相關資料及說明、分析如後：

- 一、機組的運轉歷程：本廠值班部門每日均會針對 1 號機之運轉狀況留下紀錄存參。經檢視本廠每月功率曲線圖，1 號機除相關定期測試(如主蒸汽閘、汽機閘動作等測試)因應颱風來襲降載，及 104 年 12 月 26 日因發電機保護電驛動作，反應爐發生急停，所有控制棒插至全入位置使反應爐安全停機外，無發生其它重大系統暫態事件。
- 二、反應爐功率遞增速率(Ramping)紀錄：以緩慢增載方式遞增反應



台灣電力公司第二核能發電廠 1 號機第 25 週期
燃料護套洩漏專案報告

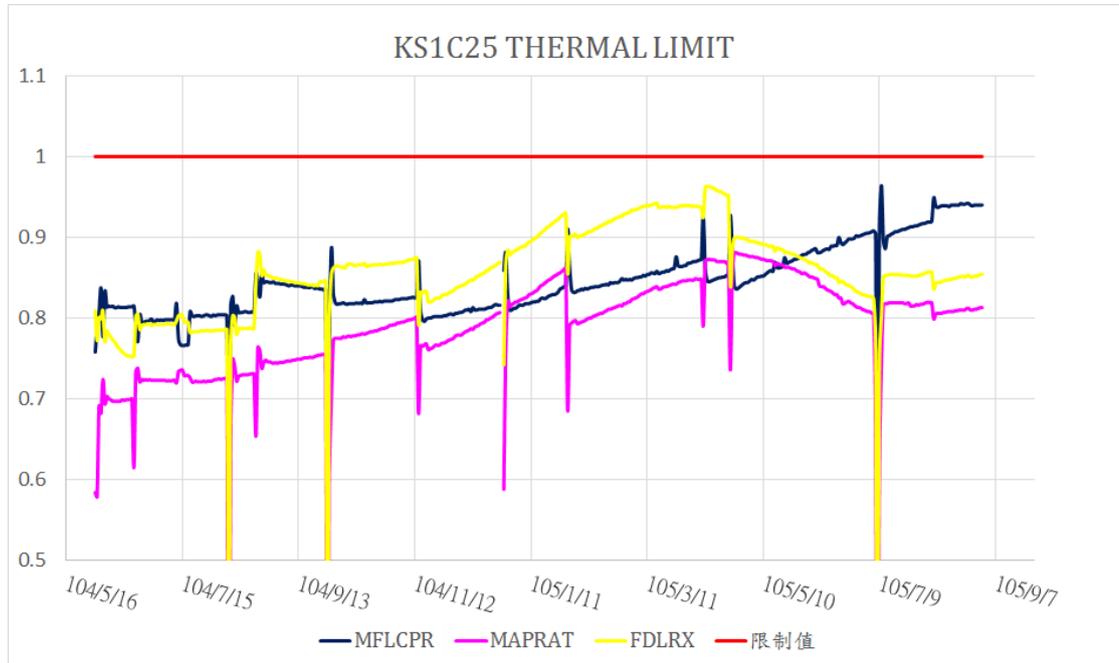
爐功率。經檢查本週期間 13 次之 Ramping 紀錄(如下表)，反應爐功率遞增率均小於 $0.18 \text{ kw/ft} \cdot \text{hr}$ ($\pm 0.05 \text{ kw/ft} \cdot \text{hr}$ tolerance)，無不符規定而可能導致燃料護套洩漏之狀況發生。

第 1 次	104 年 6 月 2 日至 6 月 4 日	符合規定
第 2 次	104 年 6 月 20 日至 6 月 21 日	符合規定
第 3 次	104 年 7 月 13 日	符合規定
第 4 次	104 年 7 月 19 日	符合規定
第 5 次	104 年 8 月 11 日	符合規定
第 6 次	104 年 8 月 22 日至 8 月 23 日	符合規定
第 7 次	104 年 10 月 1 日	符合規定
第 8 次	104 年 11 月 14 日	符合規定
第 9 次	104 年 12 月 30 日	符合規定
第 10 次	105 年 1 月 30 日至 1 月 31 日	符合規定
第 11 次	105 年 4 月 10 日	符合規定
第 12 次	105 年 4 月 23 日至 4 月 25 日	符合規定
第 13 次	105 年 7 月 10 日至 7 月 11 日	符合規定

三、全週期燃料熱限值紀錄：經檢查 425 筆 PPLX-III 之每日最高熱限值，MFLCPR、MAPRAT、FDLRX 均 < 1 (如下圖)，完全符合



本廠運轉規範相關規定，均無不符規定而可能致燃料護套洩漏之狀況發生。

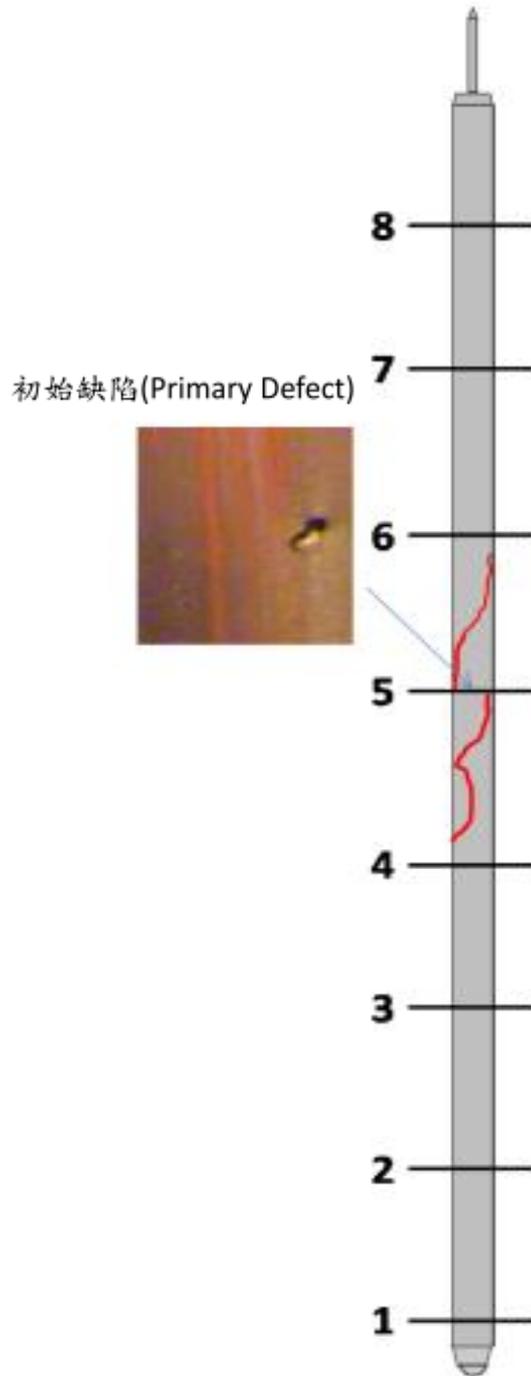


註：MFLCPR：最小臨界熱功率比值
FDLRX：單位長度發熱率
MAPRAT：平面單位長度平均發熱率

四、抽、插棒紀錄：經細查控制棒抽、插紀錄、爐心相關運轉熱限值及燃料節點功率均符合程序書規定，無不符規定之狀況發生。

依據以上資料，本廠研判並無不符規定情事，本次護套洩漏應與運轉無關。

另依 AREVA 公司技術人員，針對 K1H582 燃料束之 L07 護套洩漏燃料棒之池邊目視檢查(Visual Testing, VT)、渦電流檢測(Eddy Current Testing, ECT)結果，護套洩漏情形彙整如下圖。

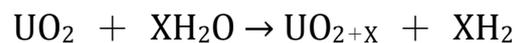


依據 AREVA 公司提出之本案肇因分析總結報告依洩漏的型態及位置判斷指出，L07 燃料棒初始洩漏為 Spacer #5 下緣的小穿孔，其肇因為爐屑磨損(Debris Fretting)，此與 AREVA 公司及工業界之經驗一致，使用現代防爐屑過濾器之 BWR 燃料，爐屑主要係卡在燃



料棒上部，鄰近雙相流區域之間隔板(Spacer)處位置。在總結報告中並將「燃料相關」的各項因素逐一排除。

本次檢查觀察到 L07 燃料棒有二次劣化之長開口型裂縫產生，因核燃料劣化機制為一連串複雜而交互影響的過程，一旦護套初始缺陷(primary defect)形成，冷卻水(爐水)將自「初始洩漏區」的緊密裂縫處滲入護套內，之後受熱蒸發形成水氣，排擠部份氫氣而降低燃料丸與護套間之間隙熱傳導性，使燃料丸溫度增加並膨脹，進而對護套施加應力，造成護套裂縫加大。造成更多的冷卻水再進入護套內，提供更多額外大量水氣，使二氧化鈾(UO₂)有機會與水氣產生局部氧化作用，形成較鬆散之「高氧相氧化鈾」並釋出氫氣，方程式如下：



氧化後的「高氧相氧化鈾」其熱傳能力會降低，燃料丸將熱量向外傳遞能力下降而溫度上升，熱應變(Thermal Strain)增加，故燃料護套洩漏後，若持續運轉，「高氧相氧化鈾」將逐漸形成 U₄O₉(O/U=2.25)、U₃O₈(O/U=2.67)等顆粒狀的低密度燃料，燃料丸會有膨脹現象，使護套局部應力增加。當護套局部應力超過臨界應力或材料



破裂韌性時，初始洩漏區的裂縫便會開始軸向擴散蔓延與擴大。

此外，鋳合金護套穿孔處內壁也會與水氣產生局部氧化作用，形成護套內壁氧化膜，並續釋出氫氣($Zr + H_2O \rightarrow ZrO + H_2$)，與輻射分解水分子所產生之氫氣，再被鋳合金護套吸收(一般而言，氫吸收率介於 10~20%之間，視純鋳或鋳合金化學組成而定)。當總氫含量超過溶解限值時，純鋳或鋳合金中析出的氫形成氫化物($Zr + H_2 \rightarrow ZrH_2$)，且隨氫含量提升而增加，因鋳合金氫化物的韌性很低，並有留駐微空泡之特性，導致鋳合金護套的韌性惡化變差、脆化，助長裂縫進一步軸向擴散蔓延與擴大，形成「長條形軸向裂縫」或「環狀裂痕」的二次劣化現象，且「環狀裂痕」與初始缺陷之距離通常不會太遠，且與燃料棒功率遞增歷程相關程度較小。故 AREVA 公司

鑒於 AREVA 公司提供之可對外公布版肇因報告已將此段敘述文字遮蔽，為不公開內容，顯示 AREVA 公司認為該段文字屬其智慧財產權，故須進行遮蔽。



肆、後續處理改善措施

綜觀本廠 1 號機燃料，近年所發生之護套洩漏事件，探究各案例主要肇因(如下表)，均源自「燃料丸表面製造缺陷」誘發燃料護套洩漏之非典型 PCI 護套洩漏及「爐屑磨損」。

項次	週期	燃料束編號	肇因
1	5	XKS2372	爐屑磨損(Debris Fretting)
2	6	XKS2337	焊道不良(Weld Failure)
3	11	KAA119	爐屑磨損(Debris Fretting)
4	14	KAD090	爐屑磨損(Debris Fretting)
5	17	K1A039	爐屑磨損(Debris Fretting)
6	19	K1B132	非典型燃料丸-護套作用 (non-classical Pellet-Clad Interaction)
7	19	K1C050	爐屑磨損(Debris Fretting)
8	20	K2D109	爐屑磨損(Debris Fretting)
9	22	K1E067	爐屑磨損(Debris Fretting)
10	22	K1E141	爐屑磨損(Debris Fretting)
11	23	K1F002	不確定(Indeterminate) (最可能肇因為爐屑，腐蝕亦有可能)
12	25	K1H582	爐屑磨損(Debris Fretting)



- 一、 針對「燃料丸表面製造缺陷」已採行之具體強化對策如下：
 - (一)、 由燃料廠家改善製程，AREVA 公司自 93 年 6 月起，全面改採用較嚴格之燃料丸表面製造缺陷接受準則及檢驗規範。
 - (二)、 本廠 2 號機自週期 22(100 年 11 月)、1 號機則自週期 23(101 年 6 月)起，2 部機組開始採用 FS-10 新型設計之燃料丸，因其特殊之邊緣削角(chamfer)設計，能有效抑止燃料丸表面缺陷所導致之非典型 PCI。
 - (三)、 本廠自 96 年 2 月起迄今，反應爐升載過程均依燃料公司建議，採用最保守的「緩慢升載策略(soft operation)」，以充分釋放燃料丸與護套間之應力。
 - (四)、 減少非計畫性之維護、檢修作業、並調整控制棒佈局至最佳化，盡量減少不必要的升降載。此外並更新兩部機組的循環水泵設備，提升海水冷卻效率，減少夏天因海水排放高溫降載次數。



二、針對「爐屑磨損」具體強化對策如下：

(一)、本次大修採取之強化措施

1. 過去已採行的措施

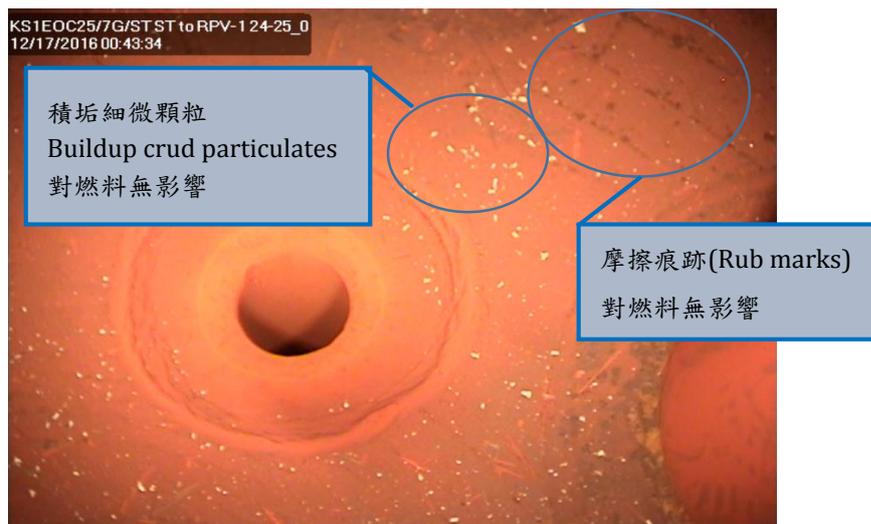
持續依本廠防範異物入侵程序書進行管制並強化管制作為。

2. 本次新增的措施

(1) 針對爐底爐屑狀況進行清查及錄影，過程僅觀察到微小

銹垢顆粒(Crud particulates)與銹垢剝離的痕跡等，經目

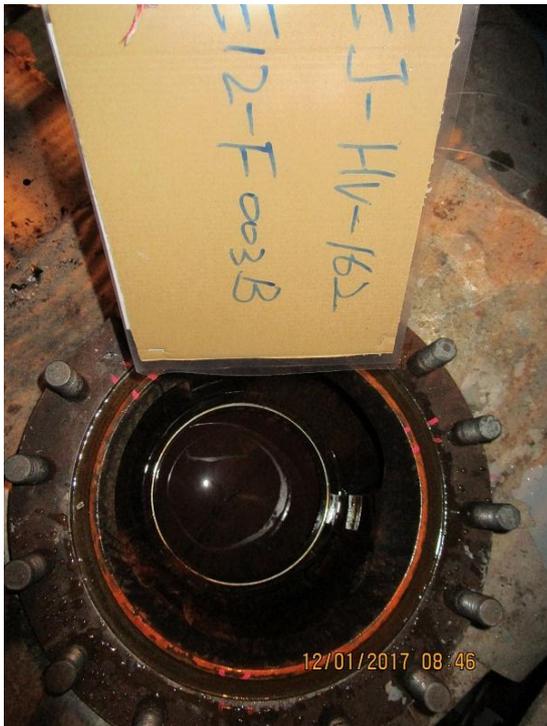
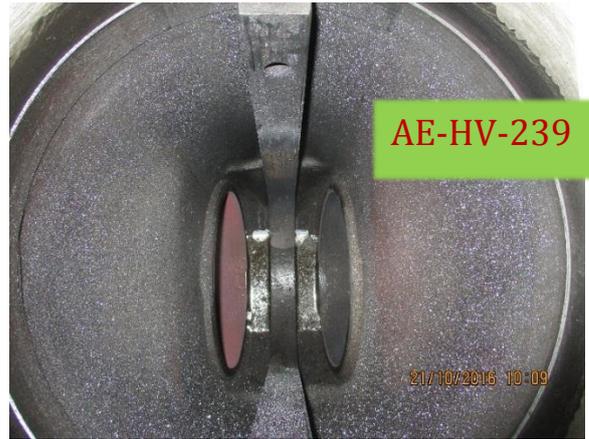
視檢查人員判定沒有足堪紀錄的異常指示。



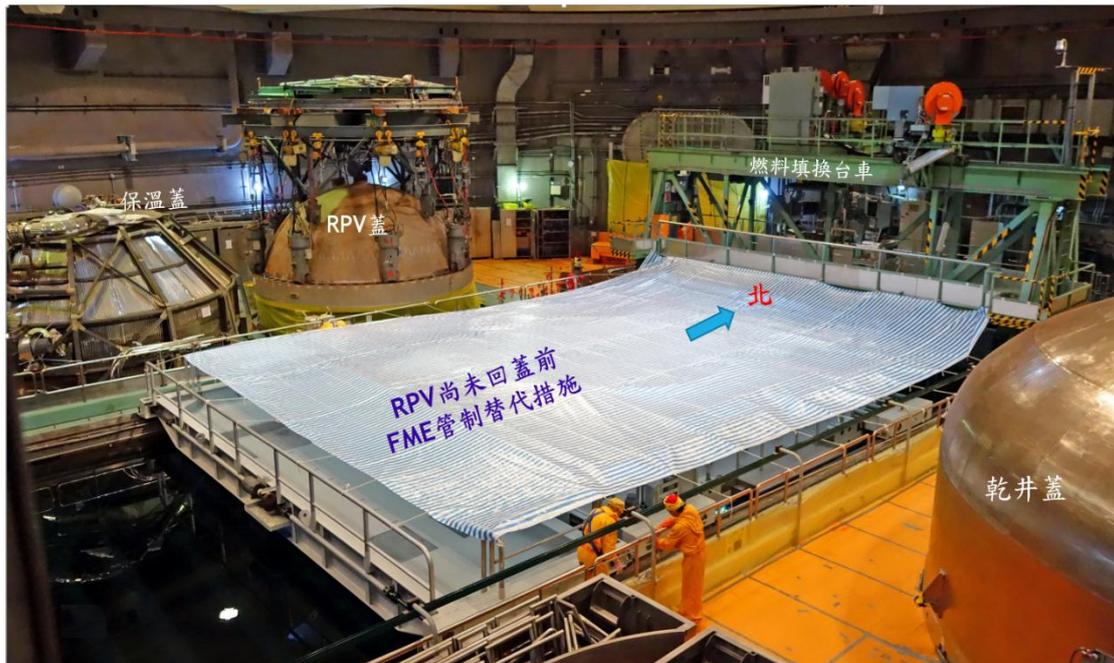
(2) 爐心相關之設備，其開口於作業前、後均需執行攝/錄

影，俾檢查及管控有無零件遺失致異物入侵反應爐重要

系統。以下是本次有關設備檢修後之影像：



(3) 爐心無工作進行時，上方將以帆布覆蓋保護，避免異物
從爐心上方掉入。



(二)、後續改善策略

1. 持續改善項目

- (1) 本廠自 2 號機週期 21(99 年 3 月)起所使用的新燃料，均採用高效能的爐屑過濾底部繫板(FUELGUARD™ Debris Filter)，其濾除效率為 90%，已較舊式小孔式底部繫板之濾除效率(約 50%)大幅提高。目前兩部機已全數使用高效能的爐屑過濾底部繫板燃料設計。
- (2) 加強新燃料接收檢查，以防止有安全疑慮(夾雜爐屑)的燃料置入爐心。參考國內外有關新燃料接收檢查的典範案例及燃料廠家建議，提昇新燃料接收檢查成效。
- (3) 參考國內外有關吊卸作業的典範案例及燃料廠家建議，提升廠外和廠內的核燃料吊卸作業品質。



(4) 另為防止異物入侵系統，降低燃料完整性受損風險，本廠實施下列相關管制措施，包括：建立燃料廠房 3 樓防止異物入侵措施、落實大修中防止異物入侵查核措施，具體內容可詳參本廠 708.1.1 程序書。

2. 新增強化項目：

為降低廢氣(Offgas)流量，提昇廢氣處理系統之效能，本廠就可能造成廢氣流量上升之管路法蘭、汽封、膨脹接頭、管閥等進行查漏，並更換有洩漏跡象的組件或以修整方式補強。當廢氣流量降低後，可延長放射性氣體在廢氣處理系統中的滯留時間，俾抑低出口之六種廢氣總活度。工作內容詳如下表：

項目	設備	情況說明	改善措施	預定完成日期
1	低壓汽機外缸釋壓膜片	停機階段氬氣查漏有反應	比照 2 號機將鎖合螺栓全數逐一拆出塗抹 Loctite 後回裝，外部再以矽利康加強	已完成
2	低壓汽機格蘭汽封	停機階段氬氣查漏有反應	格蘭汽封間隙核測調整，鎖合面作必要整理	已完成
3	低壓汽機外缸下半部插管及根閥	停機階段氬氣查漏有反應	比照 2 號機作必要之封焊	已完成
4	蒸汽旁通閥及管路	停機階段氬氣查漏有反應	法蘭 Gasket/Gland Packing 拆檢有洩漏現象，全數更新	已完成



台灣電力公司第二核能發電廠 1 號機第 25 週期
燃料護套洩漏專案報告

5	RFPT 排汽膨脹接頭	停機階段氬氣 查漏有反應	汽缸排汽端內側插管 沖蝕處焊補，膨脹接頭 拆開護板檢查	已完成
6	水箱 D 南側蒸汽旁通管 路通往主冷凝器壁處上 方	停機階段氬氣 查漏有反應	蒸汽旁通管路穿越主 冷凝器壁處焊道檢查 有裂痕，全面研磨焊補	已完成
7	MSR 啟動逸汽管路法蘭	以往有洩漏經 驗	法蘭拆檢正常，Gasket 更換	已完成
8	低壓汽機進汽膨脹接頭	以往有洩漏經 驗	護板拆開檢查 Bellow 相關接合面正常	已完成
9	MSR 及 HTR 安全閥	以往有洩漏經 驗	安全閥拆檢正常， Gasket 更換	已完成
10	主冷凝器橡膠膨脹接頭 (RUBBER BELT) 完整性 驗證	以往有洩漏經 驗	大修期間依程序書 723.2 執行檢查結果正 常	已完成
11	軸承廢油管及 Hood Spray 管路(冷凝器內)	以往有洩漏經 驗，大修檢查 軸承廢油管有 明顯薄化現象	1.軸承廢油管全面更新 2.Hood Spray 管路檢 查，視需要更換新管	已完成
12	低壓汽機原配重手孔 /PLUG	大修檢查發現 有洩漏現象	封焊	已完成
13	RFPT 外缸釋壓膜片	低壓汽機釋壓 膜片檢修經驗 平行展開	比照第 1 項執行	已完成
14	通往主冷凝器相關管線	蒸汽旁通閥檢 修經驗平行展 開	1.管線與閥執行預防性 Gasket 及格蘭迫緊 更換 2.取樣管線視需要更換 取樣 sensor 套管之 seal 及維護隔離閥管 接頭	已完成



除上述新增強化項目外，本次事件之後，本廠更進一步召開會議討論如何強化防範異物入侵作為，並清查可能造成異物入侵的維護工作，再根據工作內容提出具體防範異物入侵之措施，要求本廠檢驗員及承攬商落實執行，以達到全面性的防範異物入侵效果。具體作法已彙整成『核二廠防範爐屑磨損精進方案』(附件一)，並重點摘述如下：

1. 管制方面之精進：

(1)在反應器廠房 7 樓與燃料廠房 3 樓之防範異物入侵(FME)區

內，維護作業若有裁切電纜線或拆裝螺絲時，應儘量於岸上並遠離池邊施作，殘餘線頭或拆卸之螺絲應立即撿拾並置於盛裝容器；若必須於台車上施作時，須準備盛裝容器或盛裝袋，在拆卸螺絲、零件或裁切電纜線後立即置於盛裝容器內。

(2)涉及反應器廠房 7 樓與燃料廠房 3 樓 FME 區內之池邊、池

上維護作業時，須確認手持工具、個人物品使用繫繩綁於身體、手腕或欄杆牢固處等，避免意外掉落。

(3)反應爐蓋吊架、乾燥器及汽水分離器吊架、爐心操作平台、

360 度工作平台、燃料台車等進入爐心上方之複雜組件，在大修前後皆須進行細部元件之 FME 檢查、標記及錄影。

(4)對於正常運轉時會注水進入爐心之系統(冷凝水除礦器後之



飼水系統、餘熱移除系統、再循環系統、爐水淨化系統)的熱交換器與管閥等組件，在維修後回裝時的 FME 檢查(是否殘留異物)，列為檢驗員的查證點。

(5)反應器廠房 7 樓及燃料廠房 3 樓之 FME 區內除污使用的拭汗布，配合 FME 管制站執行進出數量之管登，並需再仔細核對後，使用紅色棉繩將拭汗布繫於手腕以避免脫落，並禁止使用含有金剛砂之拭汗布。

(6)反應器廠房 7 樓及燃料廠房 3 樓之 FME 區內，當使用 8”拭汗布氣動研磨機除污 T 字堰牆鐵格板（傳送渠道閘門正上方）時，如遇到不平之處，為避免拭汗布破損造成異物入侵，則改以一般拭汗布人工清洗方式除污。

(7)在反應器廠房 7 樓與燃料廠房 3 樓 FME 區內之維護工作，其檢驗員需全程現場督導 FME 執行。

(8)工作人員欲進入 FME 區(特別是燃料填換樓與用過燃料池周邊區域)前須自行檢查鞋底是否沾粘異物，FME 管制員須要求工作人員落實執行。

(9)於 FME 管制區內使用繩索時，將要求作業人員檢查繩索狀況，若有斷股分岔現象須更換新繩索。

(10) 更新反應器廠房 7 樓地面鋪設的防護帆布，帆布上使



用黏貼的防水膠帶長度須 15 公分以上，避免脫落沾粘於鞋底，意外被帶入 FME 區內，另保健物理人員定期巡視補強帆布與膠帶狀況。

- (11) 針對反應器廠房 7 樓 FME 管制區內束帶之管理，將要求設備維護人員於大修前完成檢查，並於大修開蓋期間每週執行束帶狀況確認。

2. 硬體方面之精進：

- (1) 反應器廠房 7 樓 FME 區及抑壓池周邊擋板改善：將 FME 擋板高度由目前約 0.5 公尺增加至約 1 公尺與現有欄杆高度相等，可降低異物由 FME 區外飛入的機率。
- (2) 燃料廠房 3 樓 FME 區擋板改善：下燃料池 FME 區部分區域僅以欄杆隔離無設置圍籬擋板，將增設擋板以確實隔離 FME 區域以強化 FME 區進出管制之落實性。
- (3) 購置雷射除汙設備以替代原本使用之電動銅刷工具進行反應爐螺樁除鏽清理作業，可進一步抑低異物入侵機率。
- (4) 有關反應器廠房 7 樓區域之地板油漆有剝落現象，將增訂預防保養(PM)項目，於每次大修 1 個月前，執行檢查維護。

3. 訓練方面之精進：



台灣電力公司第二核能發電廠 1 號機第 25 週期
燃料護套洩漏專案報告

規劃於今年度開辦一次全廠性之 FME 訓練課程，將 FME 現行規定與上述精進措施，對全廠人員進行完整的教育訓練，爾後則納入每年之檢驗員訓練課程，進行重點複習與宣導，藉由連續的訓練使防範異物入侵觀念成為工作人員行事的圭臬。



三、根據本次燃料護套洩漏及廢氣流量偏高經驗，重新檢討強化程序書及燃料可靠度指標(FRI)相關因應行動之保守性。(大會視察備忘錄編號：KS-會核-105-1)

1. 重新檢討強化程序書及燃料可靠度指標(FRI)相關因應行動之保守性部份

燃料可靠度指標(FRI)是藉由洩漏燃料棒內釋放出之六種放射性廢氣總活度估算爐水受放射性核種污染程度的度量方式。檢視本廠現行之 1032 程序書-核燃料受損對策之各個行動階段，一、二階行動階段係以燃料可靠度指標數值(FRI)進行判定，三、四階行動階段則改採六種廢氣總活度為標準，各階段判定準則如下：

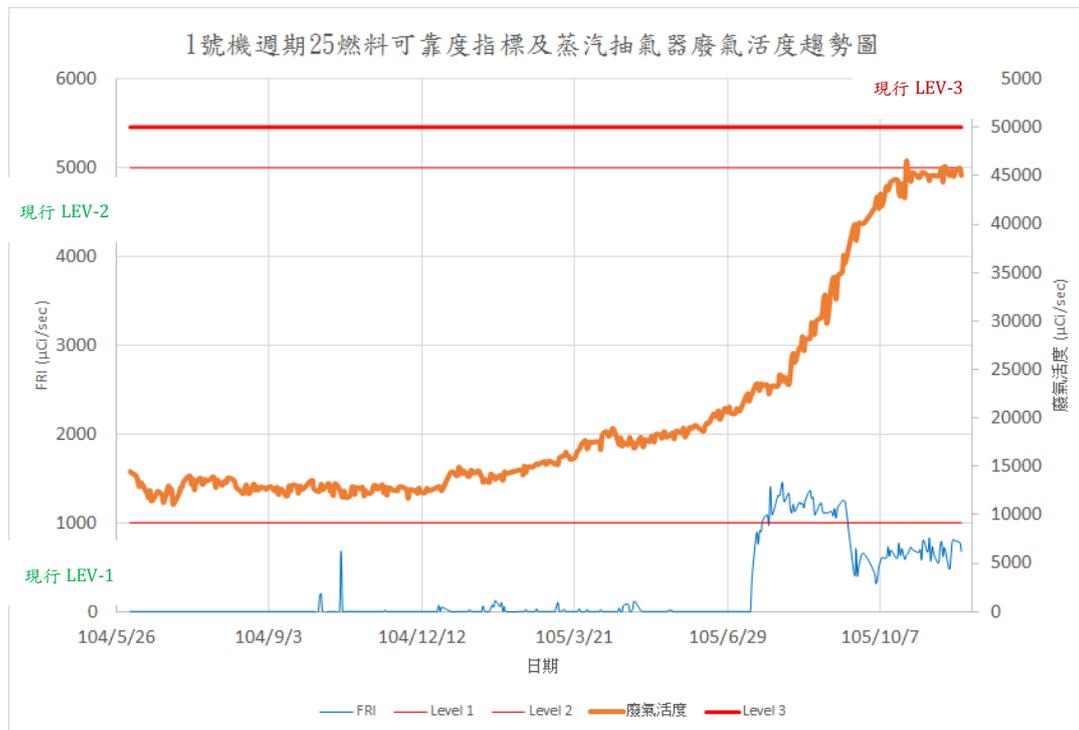
燃料護套洩漏 行動階段	判定標準
正常運轉	FRI < 1,000 $\mu\text{Ci}/\text{sec}$
一階行動階段 (Level 1)	FRI 介於 1,000~5,000 $\mu\text{Ci}/\text{sec}$ 或有其它證據顯示燃料有洩漏跡象
二階行動階段 (Level 2)	FRI 介於 5,000~50,000 $\mu\text{Ci}/\text{sec}$
三階行動階段 (Level 3)	六種放射性廢氣總活度介於 50,000~145,000 $\mu\text{Ci}/\text{sec}$
四階行動階段 (Level 4)	六種放射性廢氣總活度 > 145,000 $\mu\text{Ci}/\text{sec}$

本次燃料護套洩漏依上述準則， FRI 僅達到一階行動階段，且



台灣電力公司第二核能發電廠 1 號機第 25 週期 燃料護套洩漏專案報告

離二階行動階段尚遠，惟一號機本週期末六種廢氣總活度最高已達 46,455 $\mu\text{Ci}/\text{sec}$ ，接近三階行動階段門檻之 50,000 $\mu\text{Ci}/\text{sec}$ ，表示本次燃料護套之瑕疵，FRI 指標可以倚賴執行反應爐局部功率抑低方式緩解，但因燃料棒內持續釋出迷離鈾到爐心中，導致六種廢氣總活度仍會緩慢增加(如下圖)，故本廠已重新檢討及修訂現行核燃料受損對策程序書之各階段行動標準。



本廠首先參考美國電力研究所(EPRI)於 2010 年發佈之 Fuel Reliability Monitoring and Fuel Failure Evaluation Handbook Rev.2 報告內所述之各階段行動標準(如下表)：



涉及EPRI智慧財產權

重新檢視本廠曾發生護套洩漏之爐心情況，發現：如週期中運轉有發生燃料護套洩漏事件，則下一週期機組啟動後，碘-131 等價劑量 (簡寫為 DEI-131) 指標可能會大於 $0.001 \mu\text{Ci}/\text{gm}$ ，已達需進入二階行動階段標準；而且六種廢氣總活度 (Sum-6) 在採取扣除背景值之計算條件後，亦發現六種廢氣總活度 (Sum-6) 之變化，常有高於一階行動 (變化 $1,000 \mu\text{Ci}/\text{sec}$) 判斷標準之狀況發生，或是在一階行動標準值附近上下晃動。故為避免燃料完整性發生誤判，本廠參考 EPRI 之準則，考量一、二號機廢氣排放特性，未來機組週期中，如最近週期²有發生護套洩漏事件，則該週期之 Xe-133、I-131 及六種廢氣核

² 最近週期：由於護套洩漏燃料釋出至反應爐中的迷離鈾對各種廢氣核種活度皆有顯著影響，故在護套洩漏當時存在爐心內之燃料完全退出爐心前，須考量這些迷離鈾對於各種廢氣核種活度之影響，前述燃料完全退出時程約需三至四個週期。



種總活度等，將採扣除其起動滿載後一個月之平均值(背景值)方式計算³，以顯現該週期爐心之真實狀況；二階行動之碘-131 等價劑量計算方式亦同，惟三階/四階行動準則中碘-131 等價劑量之判定，仍採固定值方式計算，不扣除其起動滿載後一個月之平均值。另為避免因人為取樣、測量之誤差致超過相關判定標準，使燃料完整性判讀失真，核二廠除參考 EPRI 各階段行動標準外，再依其實務經驗增訂準則如下：

(1) 如發現監測參數異常時(如 Xe-133 活度突升為穩態平均值兩

倍)，則進入警戒階段，對相關監測參數需每天取樣分析，直到連續一週被觀測到超出相關行動階段之標準，才進入該行動階段以提高該參數可信度。

(2) 爐水碘指標：

- i. 機組起動達滿載碘-131 活度及碘-131 等價劑量穩定後，依前週期取樣頻率蒐集一個月碘-131 活度及碘-131 等價劑量數據，以建立當週期可扣除之背景值。其後機組運轉期間，爐水碘取樣頻率改採每週取樣一次監控，如碘-131 活度取樣顯示超出一階行動階段標準，則依第(1)條準則增加取樣頻率，連續一週每工作日取樣監測該參數，確認其可信度。

³機組滿載後，運轉一個月期間之該參數平均值為當週期之基礎背景值，計算時應予以扣除



- ii. 如碘-131 活度未進入一階行動階段，碘-131 等價劑量因污染爐心之故進入二階行動階段，應視為無效。碘活度提高之因係燃料護套洩漏惡化，爐水與燃料丸發生接觸致碘溶解於爐水中，碘-131 活度及碘-131 等價劑量應同步上升，不應僅有碘-131 等價劑量增加，碘-131 活度卻仍維持在背景值之狀況發生。
- iii. 六種廢氣總活度指標(sum-6)：依本次 1 號機燃料護套洩漏之經驗，六種廢氣總活度達進入一階行動(1,000 $\mu\text{Ci}/\text{sec}$)之行動標準，應同時考量 Xe-133 活度增加狀況；如 Xe-133 活度較穩定運轉時增加 50%以上，本項指標應視為正確。
- iv. 一階行動階段之各項標準，如僅六種廢氣總活度達到護套洩漏判斷標準，而其它監測參數顯示正常時，則進入警戒階段。本廠將先增加爐水及廢氣取樣頻率，俾蒐集與監視爐心實際狀況，並先召開廠內會議討論、研判，適時通報核發處及燃料廠家。依本廠過去經驗，連續發生護套洩漏後的次一週期，六種廢氣總活度變化較大且不穩定，因此建議必須以 Xe-133 的變化作為燃料護套是否發生洩漏的輔助指標。

本廠根據此次事件經驗及 1 號機第 25 週期的爐心條件修訂各階段行動標準如下表：



類別 行動階段	最近週期曾發生護套洩漏之爐心
一階行動 疑似護套洩漏	<ul style="list-style-type: none"> • 碘-131、Xe-133 活度上升為【註1】。或 • Xe-138/Xe-133 活度比值小於【註1】或 • 六種放射性廢氣核種總活度超過【註1】$\mu\text{Ci}/\text{sec}^1$ 且 Xe-133 活度上升>50%。或 • $\text{FRI} \geq$【註1】$\mu\text{Ci}/\text{sec}$。
二階行動 爐水活度偏高	<ul style="list-style-type: none"> • 六種放射性廢氣核種總活度超過【註1】$\mu\text{Ci}/\text{sec}^1$。 或 • 碘-131 等價劑量超過【註1】$\mu\text{Ci}/\text{gm}^1$。
三階/四階行動 期中開蓋/提前大修	<ul style="list-style-type: none"> • 六種放射性廢氣核種總活度超過【註1】$\mu\text{Ci}/\text{sec}^1$。 或 • 碘-131 等價劑量超過運轉規範限值的【註1】%。【註1】$\mu\text{Ci}/\text{gm}$)。或 • 惰性氣體總排釋率超過運轉規範限值的【註1】%。 【註1】$\mu\text{Ci}/\text{sec}$)
五階行動 預防性停機	<ul style="list-style-type: none"> • 六種放射性廢氣核種總活度超過運轉規範限值的【註1】%，【註1】$\mu\text{Ci}/\text{sec}$。

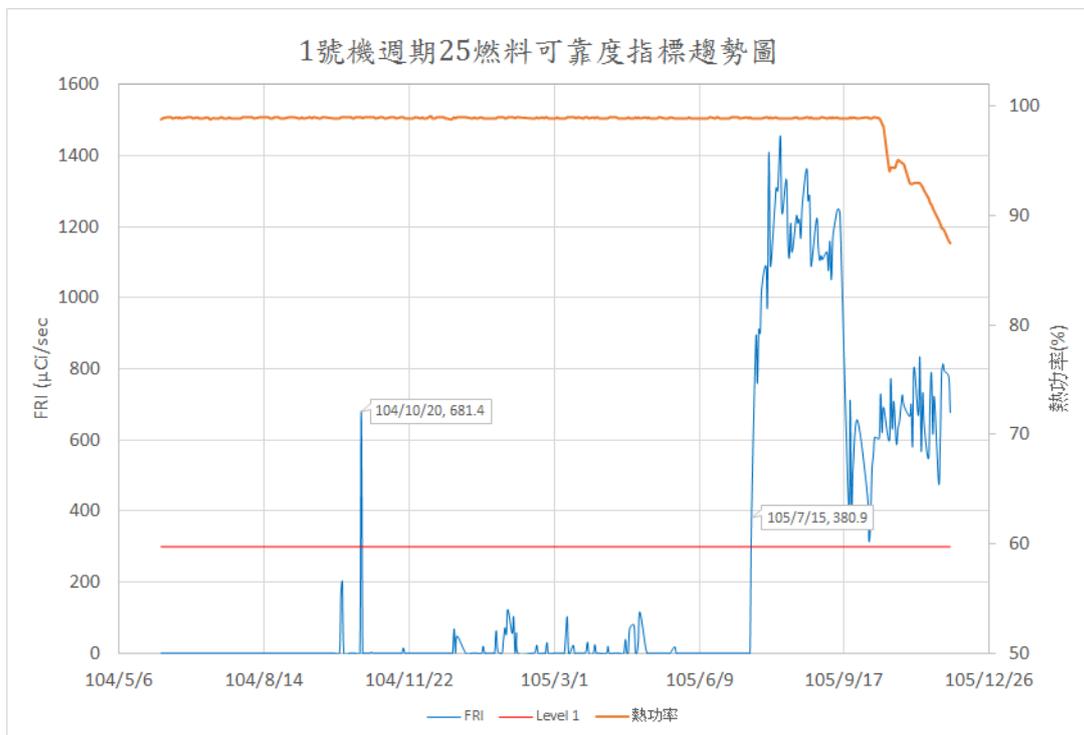
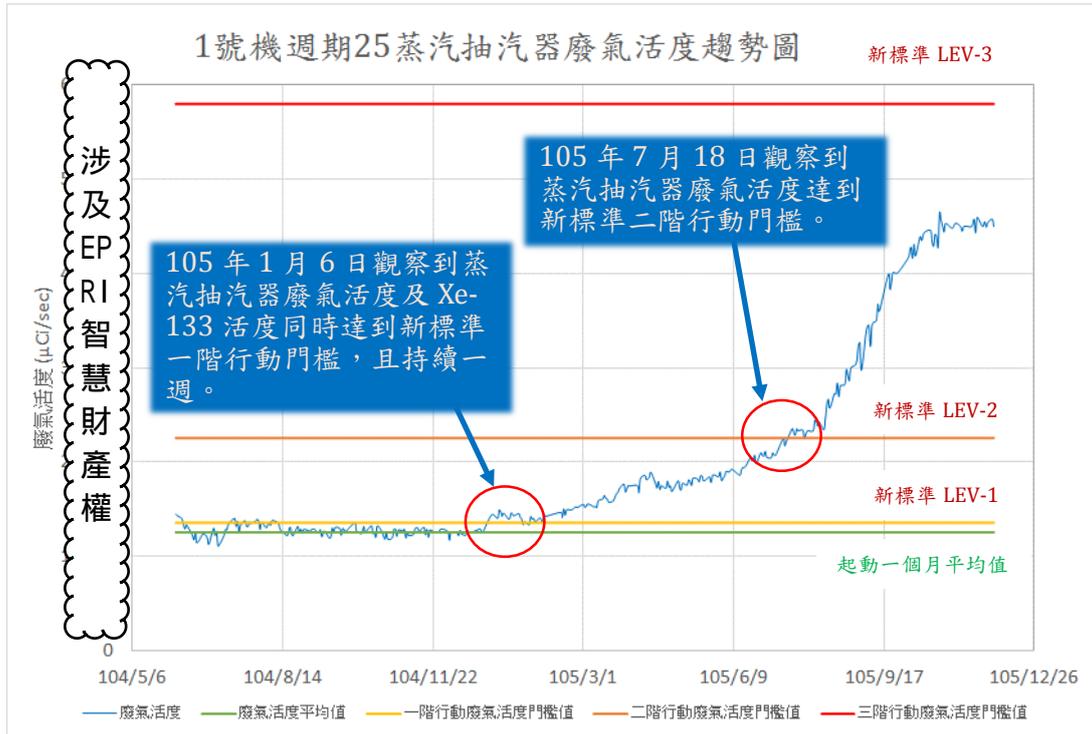
【註1】此處 (P.38、P.40、P.43) 遮蔽部份涉及 EPRI 智慧財產權。

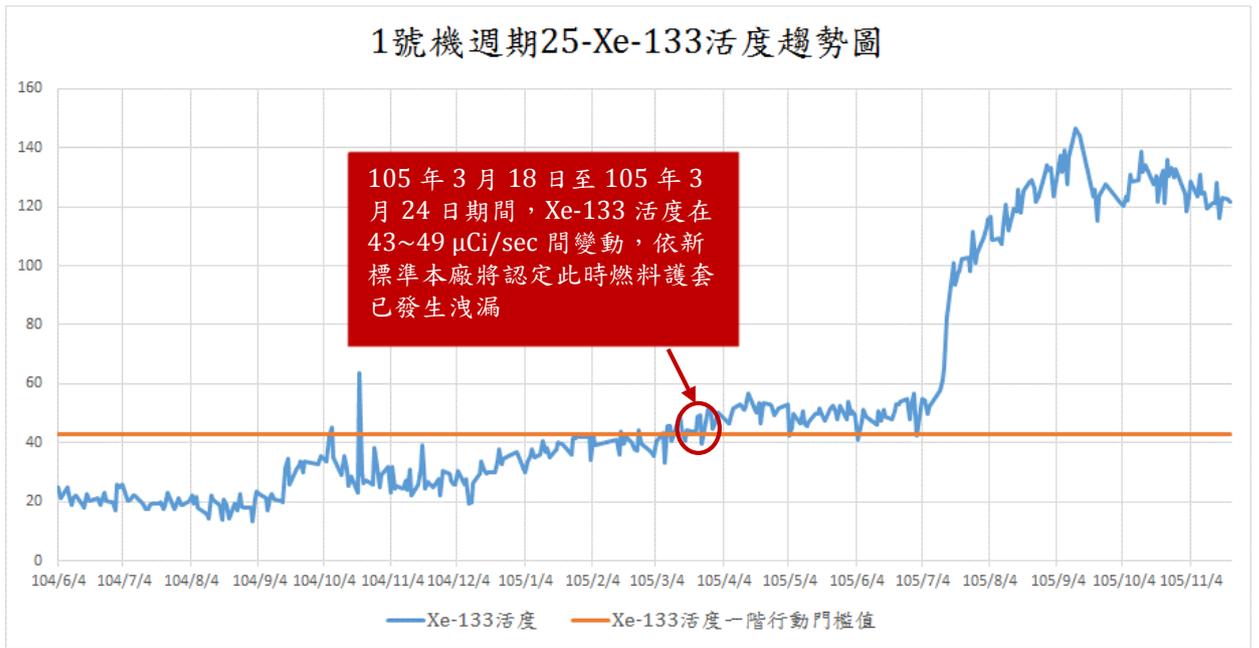
【註】1 此值需先扣除機組起動滿載後一個月之平均背景值。

本週期六種廢氣總活度及 FRI 指標如改採新標準重新檢視，則已達進入二階行動階段標準，與修訂前標準相比將更為保守，未來本廠機組週期運轉時，將監視上表所列之燃料完整性相關參數，俾及早發現護套異狀，依燃料護套洩漏各行動階段準則，採相關行動措施因應。

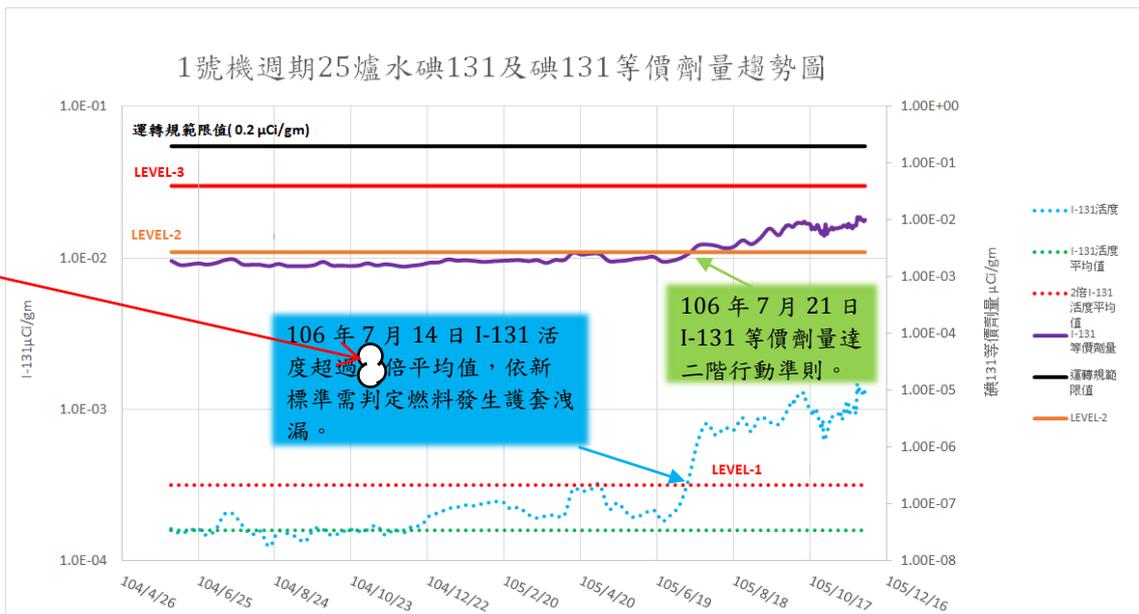


台灣電力公司第二核能發電廠 1 號機第 25 週期
燃料護套洩漏專案報告





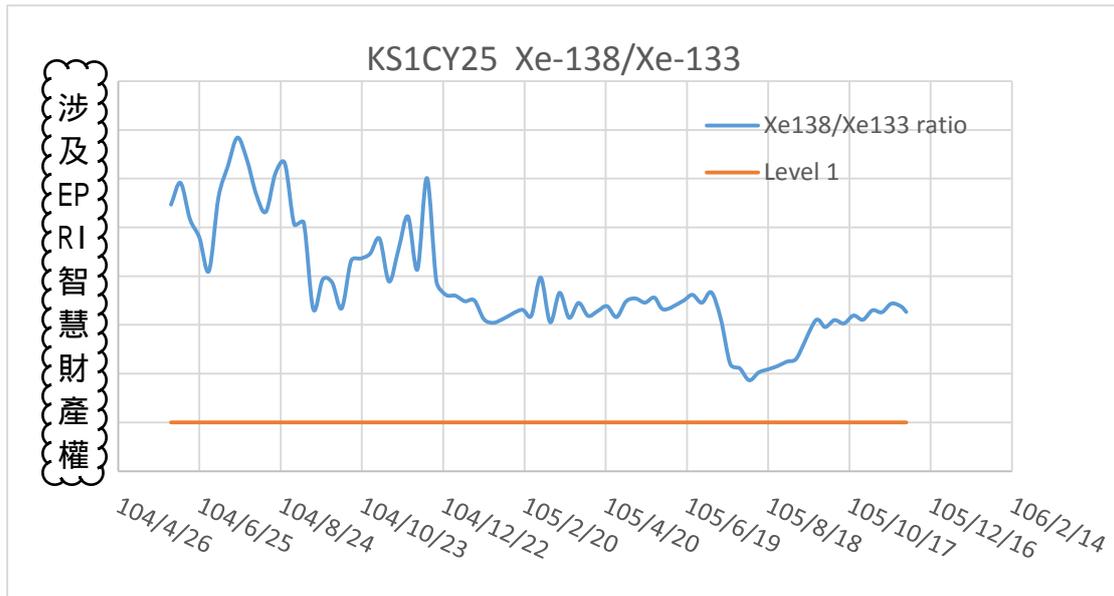
再檢視其它護套完整性監測參數，除 Xe-138/Xe-133 比值因污染爐心之迷離鈾含量較高，以致無法真實反應燃料護套之完整性外，其餘碘-131 活度及碘-131 等價劑量等指標，均能反映爐心燃料完整性狀態，如下圖。



【註1】
此處遮蔽部份涉及EPRI智慧財產權。



台灣電力公司第二核能發電廠 1 號機第 25 週期
燃料護套洩漏專案報告





台灣電力公司第二核能發電廠 1 號機第 25 週期
燃料護套洩漏專案報告

另外，本廠亦同步修訂相關行動階段之行動對策，並略列如下表：

行動對策	一階行動	二階行動	三階行動	四階行動	五階行動
增加化學取樣頻率(每日一次或更多)	◎	◎	◎	◎	◎
減少升降載頻率	◎	◎	◎	◎	◎
採更保守之升載率並適時修正運轉策略	◎	◎	◎	◎	◎
陳報總處，研商、修正爐心設計異動策略	◎	◎	◎	◎	◎
成立 ODMI，對可疑燃料束護套洩漏情況變化進行對應改善策略的實施以及護套洩漏情況的評估	◎	◎	◎	◎	◎
研判可疑燃料束其爐心座標位置及燃耗，於判斷護套洩漏後約 1.5 個月執行功率壓抑測試〔Power Suppression Test, PST，又稱 Flux Tilt〕，以定位護套洩漏燃料。		◎	—	—	—
對於被定位之護套洩漏燃料，進行功率壓抑		◎	◎	◎	◎
於原規劃大修排程期間增加安排爐心燃料啜吸檢查，檢查後將護套洩漏燃料移出爐心。	◎	◎	—	—	—
若功率壓抑效果不如預期，執行非計劃性停機開蓋或提前大修，進行爐心燃料啜吸檢查，檢查後將護套洩漏燃料移出爐心。	—	◎		◎	◎
實施預防性停機行動，依運轉技術規範 3.7.5 之規定執行，並進行爐心燃料啜吸檢查，檢查後將護套洩漏燃料移出爐心。	—	—	—	—	◎

【註 1】有關環境監測方面，由燃料護套洩漏一階行動引動，後依「核二廠燃料護套洩漏專案監測區及環境輻射加強監測計畫」(如附件二)執行。

最後，為避免燃料發生明顯劣化情形，遇有下列情況本廠將召開 SORC 會議討論期中開蓋檢修時程，不再考慮降載運轉乙項，並



聯繫燃料廠家來廠進行啜吸檢查，以機組停機方式防止燃料劣化。

(1) 燃料護套洩漏情況需進入二階行動階段因應，且功率壓抑效果不

如預期，SJAЕ 廢氣活度或碘-131 等價劑量有持續上升趨勢，預期大修前將達到三/四階行動階段之標準。

(2) 燃料護套洩漏情況已進入二階行動階段達 1 個月仍無法定位出

護套洩漏燃料位置，亦即無法進行功率壓抑。

(3) 六種廢氣總活度扣除穩態平均值後達 $25,000 \mu \text{Ci/sec}$ (約 50% 三階行動階段門檻值) 或碘-131 等價劑量扣除穩態平均值後達 $0.005 \mu \text{Ci/gm}$ (約 50% 本次事件碘-131 等價劑量最高值)。

【註1】
此處遮蔽部份涉及EPRI智慧財產權。

核二廠設計具有多重屏障確保放射性分裂產物不會外釋至外界，即使在燃料護套洩漏存在情況下，既有的高效率的廢氣處理系統可有效濾除或滯留放射性分裂產物避免其擴散至外界，然而若因汽機廠房管路洩漏造成部分放射性分裂氣體外釋，並造成本廠監測區環境試樣超過『核能電廠監測區試樣放射性分析行動基準與因應行動』之調查基準或廠界環境試樣超過『環境試樣放射性分析預警基準』之調查基準，則本廠亦將依前述原則召開 SORC 會議討論期中開蓋檢修時程，以機組停機方式防止燃料劣化。



2. 採用新準則重新判定本次 1 號機燃料護套洩漏事件

過去核二廠機組運轉期間判斷燃料是否發生護套洩漏均以 FRI 值之高低作為唯一之判斷依據(並持續達一周以上)，未來除了 FRI 以外，將再加入 Xe-133 活度、碘-131 活度上升涉及EPRI智慧財產權、Xe-138/Xe-133 比值涉及EPRI智慧財產權以及六種放射性核種總活度(Sum-6)大於涉及EPRI智慧財產權此項指標需加上 Xe-133 活度上升涉及EPRI智慧財產權才視為有效)等項(同樣需持續達一周以上)作為輔助判斷燃料完整性之依據。依前述多項準則重新檢視 1 號機第 25 週期燃料護套洩漏事件之結果如下：

a. Xe-133 活度：核二廠 1 號機週期 25 起動滿載後一個月 Xe-133

【註2】
此處可由文字敘述推得準則條件，其涉及EPRI智慧財產權。

活度平均值約為 21.5 $\mu\text{Ci}/\text{sec}$ ，則 105 年 3 月 18 日至 105 年 3 月 24 日期間，Xe-133 活度在 43~49 $\mu\text{Ci}/\text{sec}$ 間變動，已符合變化為註2之條件，故依新標準核二廠將認定此時燃料護套已發生洩漏，較使用原始判斷準則提早了 4 個月即判定燃料已發生輕微瑕疵。

b. 碘-131 活度：核二廠 1 號機週期 25 起動滿載後一個月碘-131

活度平均值約為 1.569E-4 $\mu\text{Ci}/\text{gm}$ ，則 105 年 7 月 14 日及 7 月 21 日兩日，碘-131 活度分別是 3.532 E-4 $\mu\text{Ci}/\text{gm}$ 及 6.198 E-4 $\mu\text{Ci}/\text{gm}$ ，已符合變化為註2之條件，故核二廠將認定此時燃料護套已發生洩漏，較使用原始判斷準則判定燃料發生輕微瑕疵之日期並無顯著差異。

c. Xe-138/Xe-133 比值小於註2：檢視本週期 25 之 Xe-138/Xe-



133 比值皆未低於【註2】以下，未達進入一階行動門檻。推測應是爐心含有較多週期 22 與週期 23 遺下之迷離鈾，使爐心中 Xe-138 活度相對較高的關係。

- d. 六種廢氣總活度(Sum-6)大於【註2】 $\mu\text{Ci}/\text{sec}$ 且 Xe-133 活度上升大於 50%：本週期起動滿載後一個月 SJAE 廢氣活度平均值約為 $12,559 \mu\text{Ci}/\text{sec}$ ，Xe-133 活度平均值約為 $21.5 \mu\text{Ci}/\text{sec}$ ，核二廠於 105 年 1 月 6 日觀察到 SJAE 廢氣活度及 Xe-133 活度同時達到一階行動門檻，且持續一週。依新標準核二廠將認定此時燃料護套已發生洩漏，較使用原始判斷準則提早了 6 個多月。



同時，新增碘-131 等價劑量較正常平均值上升達【註2】 $\mu\text{Ci}/\text{gm}$ 作為輔助判斷燃料是否發生劣化情況之判斷依據，惟其前提是燃料已然發生護套洩漏始得作成此一判斷，因燃料之劣化必先有一初始



洩漏處，之後爐水再經由該洩漏處侵入燃料棒中才會造成燃料的二次劣化，故不會有尚未發生燃料護套洩漏而燃料已然發生二次劣化情況存在。依據上述準則，1 號機週期 25 起動滿載後一個月碘-131 等價劑量平均值約為 $1.717 \text{ E-}03 \text{ } \mu\text{Ci/gm}$ ，則依 105 年 7 月 21 日 ($3.58 \text{ E-}03 \text{ } \mu\text{Ci/gm}$ ，已進入二階行動階段)及 105 年 7 月 28 日 ($3.72 \text{ E-}03 \text{ } \mu\text{Ci/gm}$)取樣結果，碘-131 等價劑量已超過正常平均值達 **【註2】** $\mu\text{Ci/gm}$ ，核二廠依新標準可推測護套洩漏燃料於此時開始有劣化跡象。

綜上所述，核二廠修訂後的燃料護套洩漏判定準則較以往更為嚴格，且更能提早發現燃料出現瑕疵或劣化現象，使電廠能及早採取行動因應燃料護套洩漏事件。同時本廠也精進各行動階段需採行的措施，俾防止護套洩漏燃料發生二次劣化或有效減緩護套洩漏燃料劣化的趨勢。另外，核二廠參考國外同型電廠(Cofrentes、KKL 及 Perry 等電廠)執行功率壓抑測試之時機，大多數電廠皆在發現護套洩漏燃料後的 1.5 至 3 個月內進行第一次的功率壓抑測試，因考量電廠能否成功定位出護套洩漏燃料並進行功率壓抑，須蒐集機組過去功率操作歷程及線上廢氣活度歷史資料等以評估護套洩漏燃料之可能燃耗及位置需相當時日，且依上述運用新準則判定燃料護套瑕疵之結果，核二廠原先係以 3 個月內執行功率壓抑測試作為因應。



台灣電力公司第二核能發電廠 1 號機第 25 週期
燃料護套洩漏專案報告

為保守考量，對於各項因應措施及準備作業理應加速執行，核二廠未來將護套洩漏後執行功率壓抑測試之時程縮短為約 1.5 個月，以遏止燃料發生二次劣化情形應屬適當。若燃料已發生劣化，則核二廠另外訂有明確準則可提請 SORC 會議討論期中開蓋檢修時程，以防範護套洩漏燃料劣化情形持續擴大。

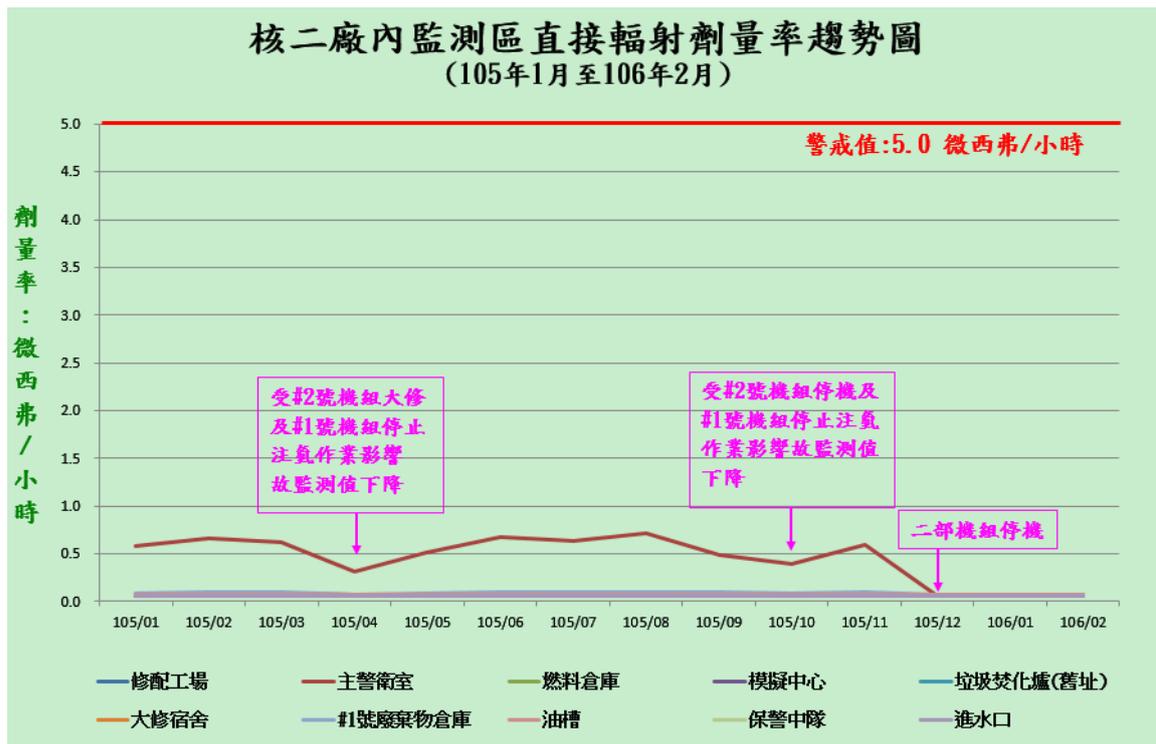


伍、對廠區內外環境之影響說明

本廠廠區監測區設有修配工場、主警衛室、燃料倉庫、垃圾焚化爐(舊址)、模擬中心、大修宿舍、1 號廢棄物貯存庫邊、油槽、保警中隊部及進水口等共計 10 個連續輻射監測站，以電腦連線方式一天 24 小時連續監控各監測站之直接輻射劑量率，經整理 105 年 1 月 4 日至 106 年 2 月 6 日期間之監測資料，顯示各監測站之監測結果均無異常，如下圖。

涉及核二廠保安計劃

核二廠廠區草樣、土樣取樣位置圖



核二廠 105 年 1 月~106 年 2 月間廠內監測區直接輻射劑量率趨勢圖

另為確保本廠排放至環境之放射性廢氣符合原能會游離輻射防護安全標準，本廠以放射性廢氣排放活度實績，利用計算模式進行廠外民眾輻射劑量評估，並定期將放射性物質排放報告（包括季報及年報），依核子反應器設施管制法第十條、核子反應器設施管制法施行細則第七條、放射性物料管理法第十條、第二十條、放射性物料管理法施行細則第十二條、第三十條以及游離輻射防護法施行細則第三條之規定，陳報原子能委員會。

核二廠後續以 105 年 10 月-12 月實際放射性廢氣排放值再次進行廠外民眾實際劑量評估，105 年 10 月-12 月核二廠一、二號機情性氣體排放造成民眾之關鍵群體有效劑量分別為 0.00211 毫西弗與



0.000000953 毫西弗，放射性碘、氫及微粒等廢氣造成民眾之關鍵群體器官等價劑量分別為 0.00743 毫西弗與 0.0000939 毫西弗。

105 年全年核二廠 2 部機惰性氣體排放造成民眾之關鍵群體有效劑量為 0.00647 毫西弗，放射性碘、氫及微粒等廢氣造成民眾之關鍵群體器官等價劑量為 0.0096 毫西弗，遠低於 2 部機之核能電廠環境輻射劑量法規設計限值(有效劑量：0.1 毫西弗/2 部機·年、等價劑量：0.3 毫西弗/2 機·年)。

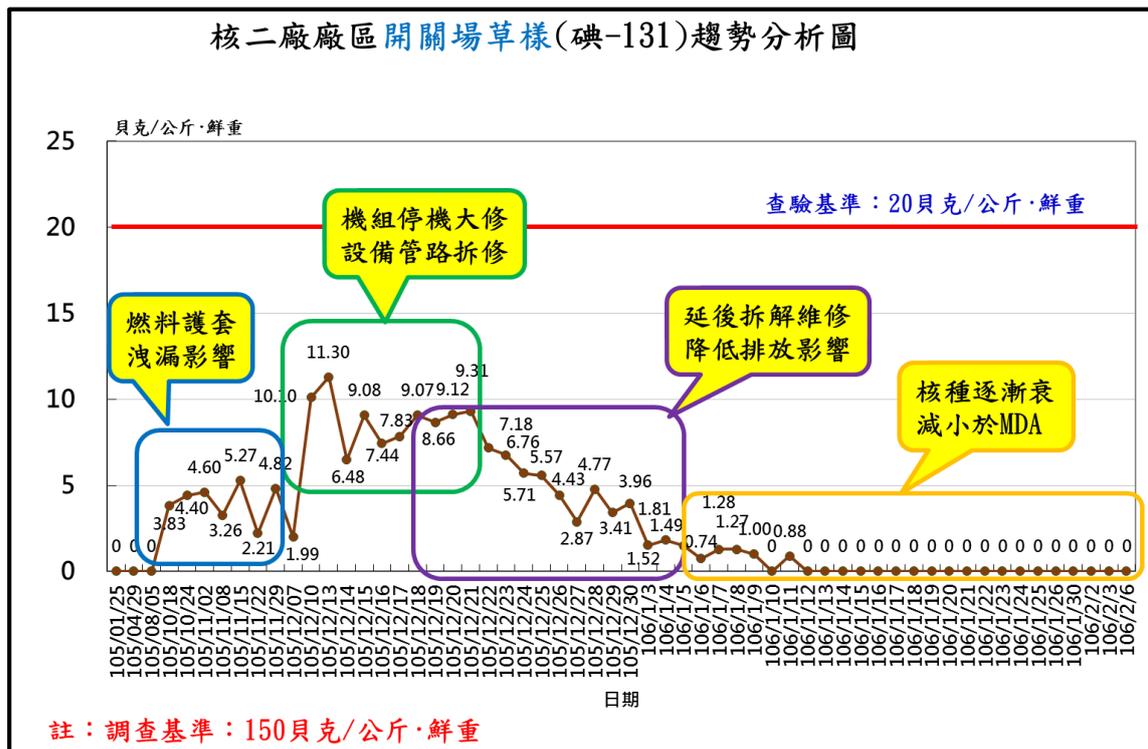
因燃料束護套洩漏之影響，運轉期間所產生分裂碘核種以有機碘及非揮發性碘化物之組態積存於設備或管路。於機組停機大修初期拆修設備或管路時，積存之有機碘以及非揮發性碘化物與空氣接觸後變成揮發性的有機碘，會排至廠房內或經由廠房排氣系統釋出。廠房內，電廠管理階層採取積極之因應管理策略，與輻防人員之嚴密監測與管制下，並未因此而發生污染擴散，或工作人員體表或體內污染之情事。

廠區監測區與環境由於受天氣影響，碘核種自然沉降於廠區附近，因此僅於空氣樣、水樣及草樣測得極微量碘-131 核種；空氣樣部分於 105 年 12 月 12 日在主警衛室站測得最高值為 0.08 貝克/立方公尺，測值均遠低於「核能電廠監測區空氣監測管制及因應行動基準」之查驗基準(56.7 貝克/立方公尺)；水樣部分僅測得 2 次，分



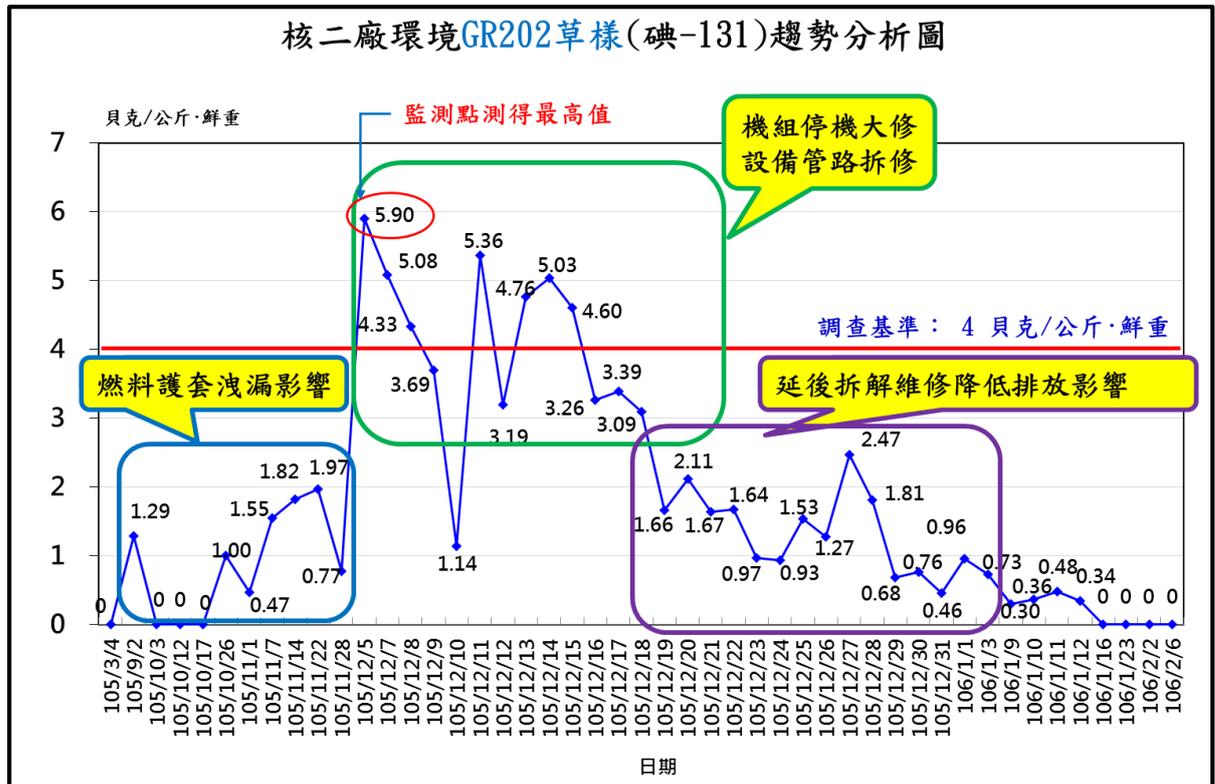
別於 105 年 10 月 11 日及 105 年 11 月 01 在修配工場附近之 1 號
下水道沉澱井測得微量碘-131 核種，測值分別為 0.167 貝克/公升及
0.451 貝克/公升，皆小於「核能電廠監測區試樣放射性分析行動基
準與因應行動」之查驗基準(2 貝克/公升)，更遠低於調查基準(15
貝克/公升)；另草樣部分於 105 年 12 月 13 日在開關場監測點測得
最高值為 11.3 貝克/公斤·濕樣，測值未超過『核能電廠監測區試樣
放射性分析行動基準與因應行動』之調查基準(150 貝克/公斤·濕
樣)，甚至亦均未超過查驗基準(20 貝克/公斤·濕樣)，詳如下圖所示
量測值與其意義說明：

(註:核二廠 105 年 8 月 29 日於模擬中心之南側水溝與臨海橋南側水溝等 2 處取
樣位置測得微量碘-131 核種，量測值分別為 10.9 貝克/公升與 2.1 貝克/公
升，高於「核能電廠監測區試樣放射性分析行動基準與因應行動」中該核
種之查驗基準(2 貝克/公升)，但低於調查基準(15 貝克/公升)；經追查肇
因與本案無關，係承攬商同仁之醫療注射所致。)





廠界環境則於 105 年 12 月 5 日在東北東方向 GR 202 監測點測得最高值為 5.9 貝克/公斤·濕樣，超過『環境試樣放射性分析預警基準』之調查基準(4 貝克/公斤·濕樣)，經電廠採取對應行動與經歷之時間衰變後，該量測值已逐漸降低至 106 年 1 月 16 日之 0 貝克/公斤·濕樣(即小於計測設備的最低可測值 minimum detectable amount，簡稱 MDA)，詳如下圖所示量測值與其意義說明：



因該地區附近並無牧場，該草樣與人類之食物鏈無關，對一般民眾健康安全並無任何不良之影響，如採取保守評估碘-131 和核種



之廢氣排放量對關鍵群體之影響時，評估值均遠低於電廠之設計⁴與法規限值⁵。

另外，考量本次運轉、大修期間在廠界環境東北東方向 GR 202 監測點發現有環境試樣超過『環境試樣放射性分析預警基準』之調查基準(4 貝克/公斤·濕樣)，因此為有效避免放射性產物穿越多重屏障而釋出到廠房或廠外環境，本廠同步進行高/低壓汽機及汽機廠房蒸汽管路各部份重要組件，包含高壓汽機接合面、汽封、管、閥之修整與迫緊裝置之更新工作等，俾防止蒸汽管路發生洩漏而導致廠房內部及廠界環境局部放射性增加。相關工作詳列如下：

項目	設備	檢修前狀況說明	檢修說明	預計完成日期
1	高壓汽機水平接合面	大修拆檢發現有蒸汽沖蝕現象	進行水平接合面整修	已完成

⁴設計限值係行政院原子能委員會民國 79 年 1 月 8 日會輻字第 0183 號函發布之「核能電廠環境輻射劑量設計規範」所定，與放射性氣體排放有關之規定摘要說明如下：

- (1) 惰性氣體造成廠界外任一民眾有效等效劑量(現行輻射防護法規稱為有效劑量)不超過 50 微西弗/年/機組(即 0.05 毫西弗/年/機組)。
- (2) 放射性碘、氙及微粒(半化期超過 8 天者)造成廠界外任一民眾其任一器官的年等效劑量(現行輻射防護法規稱為等價劑量)每年不得超過 15 毫倫目(0.15 毫西弗/年機組)。
- (3) 季劑量限制為年設計限值的一半。

⁵法規限值係指行政院原子能委員會民國 94 年 12 月 30 日會輻字第 0940041080 號令所發布之游離輻射防護安全標準第十二條所定之一般人劑量限度，即輻射作業造成一般人之年有效劑量不得超過 1 毫西弗。



台灣電力公司第二核能發電廠 1 號機第 25 週期
燃料護套洩漏專案報告

2	高壓汽機格蘭汽封鎖合法蘭面	大修拆檢發現有蒸汽沖蝕現象	格蘭汽封鎖合法蘭面焊補磨修	已完成
3	汽機格蘭汽封	大修檢查高壓汽機格蘭汽封片有蒸汽沖蝕現象	高壓汽機格蘭汽封片全面更新	已完成
4	汽機控制閥汽封	大修期間依排程執行拆檢及水壓測試	檢查有洩漏或水壓測試不合格者予以更新	已完成
5	汽封蒸發室內 6"三通管洩漏蒸汽	大修前洩漏以克漏方式處理	更換新管	已完成
6	MSR B 下跨管橢圓形人孔蓋洩漏蒸汽	大修前洩漏以克漏方式處理	人孔蓋鎖合面整理，Gasket 更新，並平行展開相關橢圓形人孔 Gasket 更新共 22 只	已完成
7	MSR B 管側逸氣閥外漏蒸汽	大修前洩漏以克漏方式處理	更換逸氣閥，其它 MSR 逸氣閥依第 9 項平行展開檢修	已完成
8	MSR A 本體下方根閥外漏蒸汽	大修前洩漏以克漏方式處理	更換根閥，其它 MSR 根閥依第 9 項平行展開檢修	已完成
9	汽機廠房 MOV、AOV 及手動閥	例行維護作業	除依維護排程執行閥體拆解檢查外，其餘所有閥門全面執行格蘭迫緊更換	已完成



10	汽機廠房管路及飼水加熱器	大修期間依排程執行測厚及必要檢查	測後發現蒸汽蒸發室有薄化管路，另主汽機下方汽封管路檢查有洩漏，皆已更新相關管段。	已完成
----	--------------	------------------	--	-----

經此改善後，本廠未來機組運轉或大修期間，應能將蒸汽管路洩漏之機率與蒸汽管路洩漏造成之風險降至最低，並且進一步合理抑低廠內工作人員之輻射劑量，同時避免廠外民眾之疑慮。倘若未來機組運轉期間，相關環境試樣再有超過調查基準情事，核二廠將根據已制定之因應行動措施採取行動，茲條列如下：

1. 調查環境試樣超過調查基準原因，包括檢視廠內相關輻射作業與放射性廢氣排放。
2. 如果無法立即確認肇因或阻斷放射源，影響之機組應立即提出因應措施(甚至是實施停機行動)使環境試樣低於調查基準。
3. 如係因廢氣排放或停機設備/組件開口造成，確認排放源頭，並針對排放源提出因應措施，例如：
 - (1) 執行查漏工作，確認洩漏源頭。
 - (2) 針對漏源執行維修止漏或暫時封堵工作。
4. 若研判係與燃料棒護套洩漏有關，將依據本次燃料護套洩漏之檢討改進措施，執行相對之因應措施。



5. 加強廠區與環境試樣取樣之監測頻度(由燃料護套洩漏一階行動引動，後依「核二廠燃料護套洩漏專案監測區及環境輻射加強監測計畫」執行)，確認受影響之程度與範圍。
6. 依據環境試樣取樣分析數據及廢氣排放之放射性核種活度，評估對民眾及環境之影響。

核二廠十分重視此次事件，虛心檢討可改進之處，並研擬更積極的燃料護套洩漏判定準則與因應策略，同時納入廠內對應程序書以防範類似事件再次發生。同時，核二廠亦將防範異物入侵具體做法納入工作程序書以落實執行並推及全廠工作人員，期望能達成『燃料零洩漏』目標。



陸、參考文件

1. In-Core Sipping at Kuosheng Power Station Unit-1 End of Cycle 25, December 2016 Preliminary Report.
2. Failed Fuel Inspection and Reconstitution Preliminary Report
3. FS1-0030208, Kuosheng Unit 1 EOC-25 Cause of Failure Report (Proprietary version).
4. Fuel Reliability Monitoring and Failure Evaluation Handbook (2010) Revision 2, EPRI.
5. 核二廠營運程序書 1032-核燃料受損對策程序書。
6. 核二廠燃料護套洩漏專案監測區及環境輻射加強監測計畫。