

# 核二廠 1 號機第 25 週期 燃料破損專案報告

(可對外公布版本)

台灣電力股份有限公司

106 年 4 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 號機週期 25 末大修期間檢查作業及結果.....	8
一、 爐內啜吸檢查.....	8
二、 護套洩漏燃料束池邊檢查及修復作業.....	13
參、 肇因分析.....	15
肆、 後續處理改善措施.....	21
一、 「燃料丸表面製造缺陷」具體強化對策.....	22
二、 「爐屑磨損」具體強化對策.....	23
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).....	25
伍、 對廠區內外環境之影響說明.....	33
陸、 參考文件.....	38

## 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。

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 1000  $\mu\text{Ci}/\text{sec}$ ，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

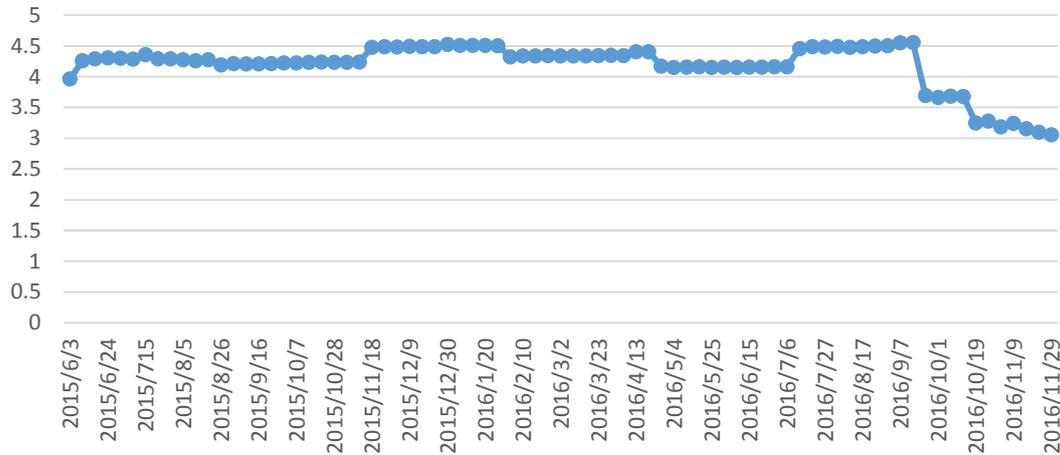
此外本廠觀察到 105 年 7 月 9 日控制棒佈局更換後，六種廢氣總活度升高，推測可能是控制棒佈局更換(A2 佈局更換成 B1 佈局)後，洩漏燃料由受到控制棒壓抑轉變為未受到控制棒壓抑所致，故本廠再利用中秋節長假期間，於 9 月 15 日降載至 500 MWe，執行約每 80 天一次的控制棒佈局更換，將控制棒佈局由 B1 更換為 A2，綜合本廠更換控制棒佈局、六種廢氣總活度變化及廠家所提供之疑似洩漏燃料束所屬 5 個控制單元座標：20-13、20-45、28-29、36-13、36-45 進行功率壓抑，將前述 5 支控制棒由全出位置，插至全入；控制棒佈局更換期間，廠內核工人員依事先設計好的佈局序列更換步驟，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。

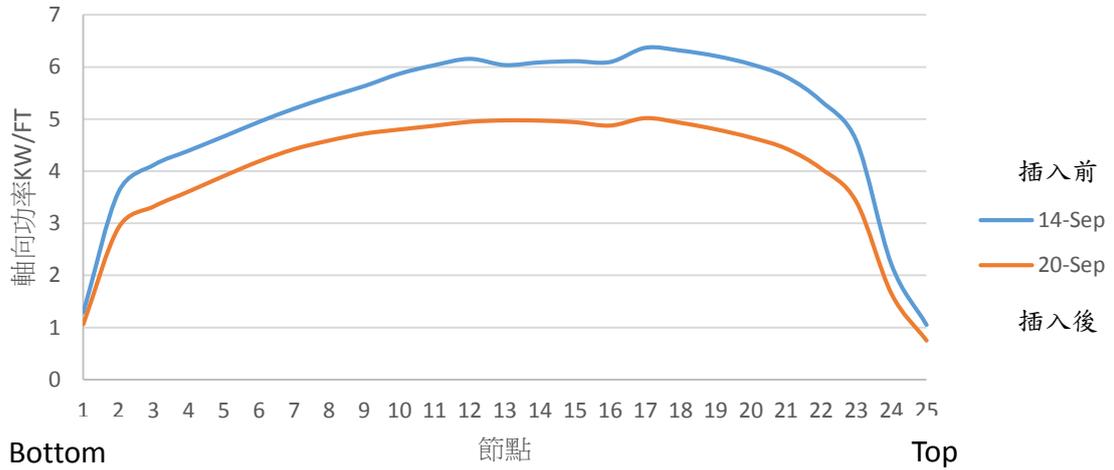


經計算，本廠將控制棒 20-13 插至全入，後續在同年 10 月 15 日再將 16-13 控制棒插至全入，雖未直接壓抑護套洩漏燃料束 (K1H582)，但使該燃料束整體功率平均下降約 20% 及 10%，確實達到功率壓抑的效果，其全週期之燃料束功率歷程及插棒前後功率變化如下圖。

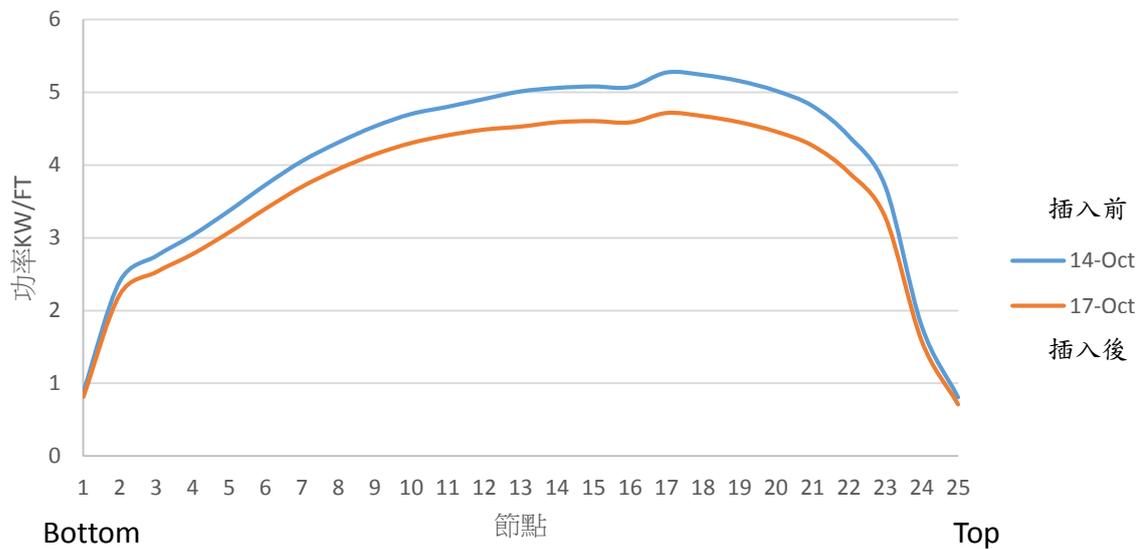
21-10(K1H582) 燃料束功率歷程圖(kW/ft)



9月中插入20-13控制棒前後，K1H582之軸向功率變化



10月15日插入16-13控制棒前後，K1H582之軸向功率變化



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 1000 至 1500  $\mu\text{Ci}/\text{sec}$ 。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 9/15 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<sup>1</sup>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閘動作試驗進行降載，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 值及六種廢氣總活

---

<sup>1</sup>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。

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 號機週期 25 末大修期間檢查作業及結果

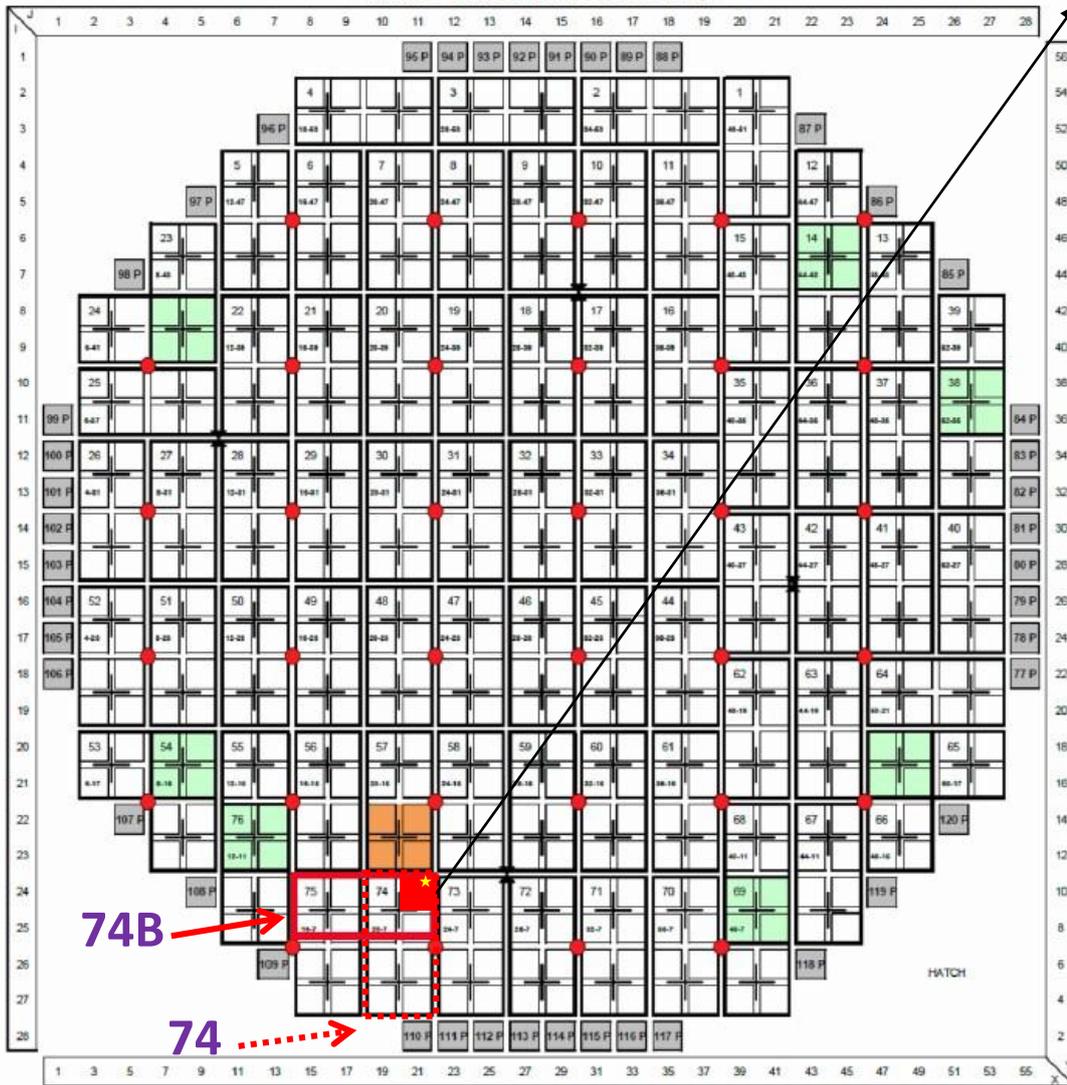
### 一、爐內啜吸檢查

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。

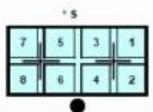
本廠於 105 年 12 月 6 日 18:30，發現護套洩漏燃料束(編號 K1H582)，其爐心位置為 21-10，燃耗 47,063 MWD/MTU，為使用 3 個週期之 ATRIUM-10 型燃料。

KUOSHENG  
Unit 1  
EOC 25  
Phase 1 Hood Placement Map



座標：21-10  
燃料編號：K1H582  
燃耗：47,063 MWD/MTU  
註：★為護套洩漏燃料束位置

涉及廠家所有權



\* = Red dot on hood for orientation  
● = Slipping Hood Umbilical Cable



涉及廠家所有權



Step 74B 18-9

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)

KUOSHENG  
Unit 1  
EOC 25  
Phase 2 Hood Placement Map

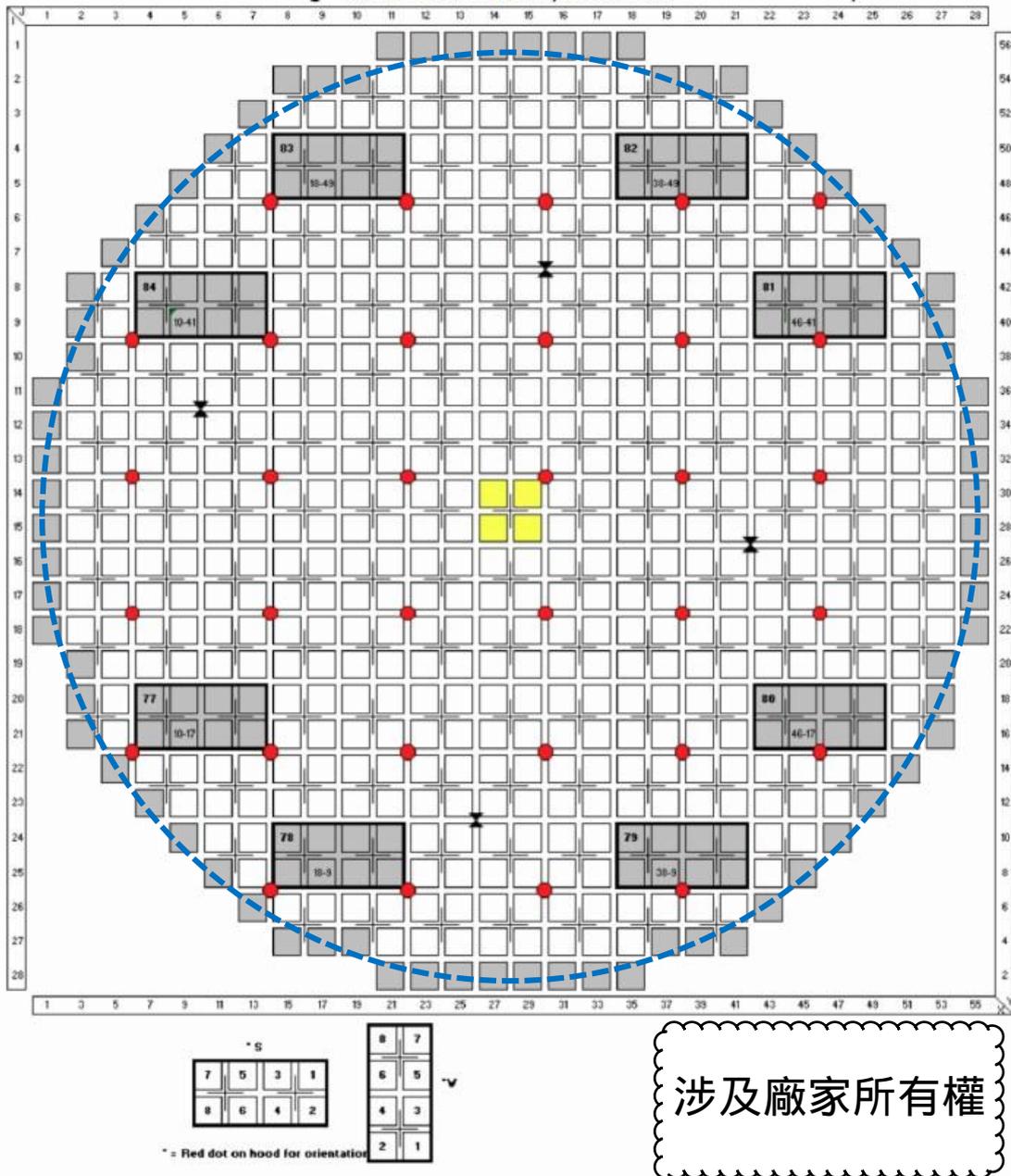


圖 2、第二階段受檢之 44 束邊緣燃料爐內位置圖  
(將外圍 44 束燃料移至中心區，檢查編號 77~84)

(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。

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、一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"><li>將 K1H582 移至燃料準備機，並完成燃料匣脫接。</li><li>目視檢查發現 L07 位置之燃料棒護套有洩漏現象，詳參圖 4。</li></ul>
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"> <li>以 Inert Rod(銦棒)插入 L07 位置後完成 K1H582 燃料檢修</li> <li>修復後 K1H582 燃料束經真空啜吸檢測，結果顯示正常。</li> <li>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。</li> </ul>

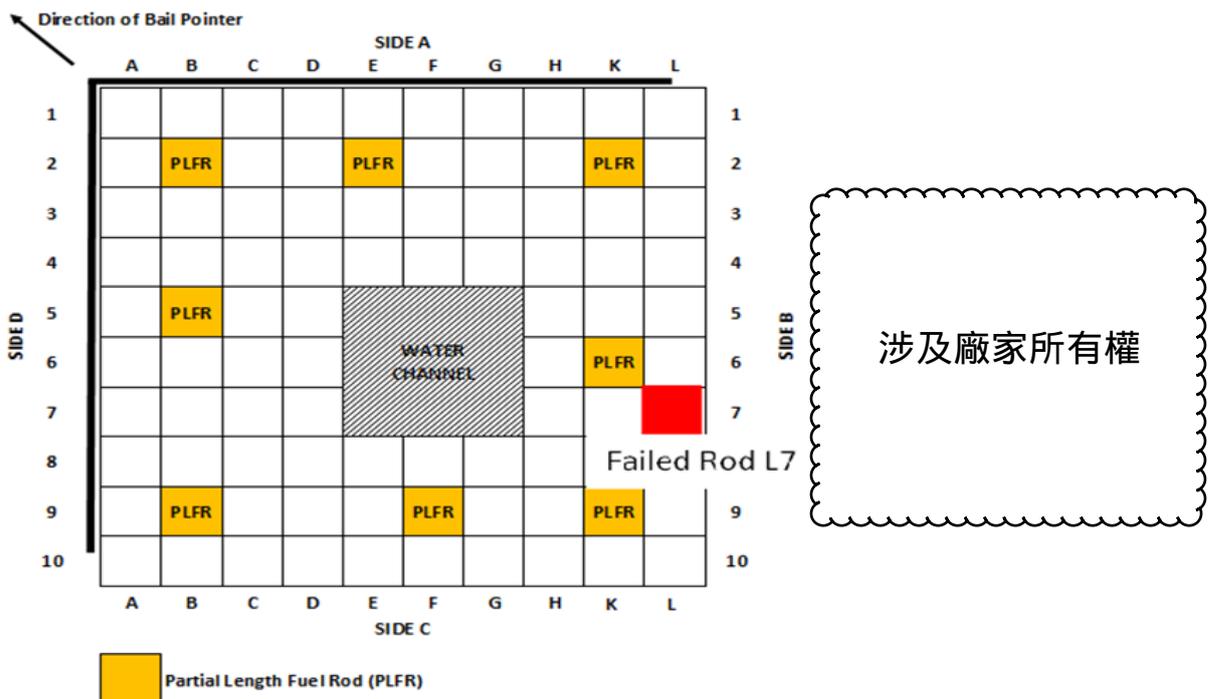


圖 4、ATRIUM-10 燃料棒座標位置圖

## 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，控制棒插至全入位置，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

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 涉及廠家所有權，無

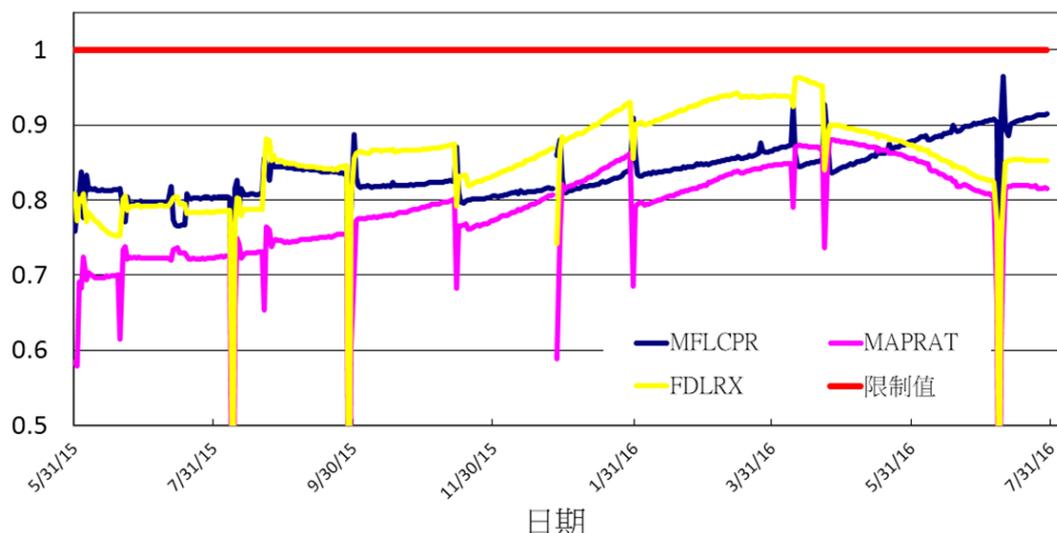
不符規定而可能導致燃料護套洩漏之狀況發生。

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 涉及廠家  
所有權 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。

1 號機週期 25 爐心熱限制值趨勢圖



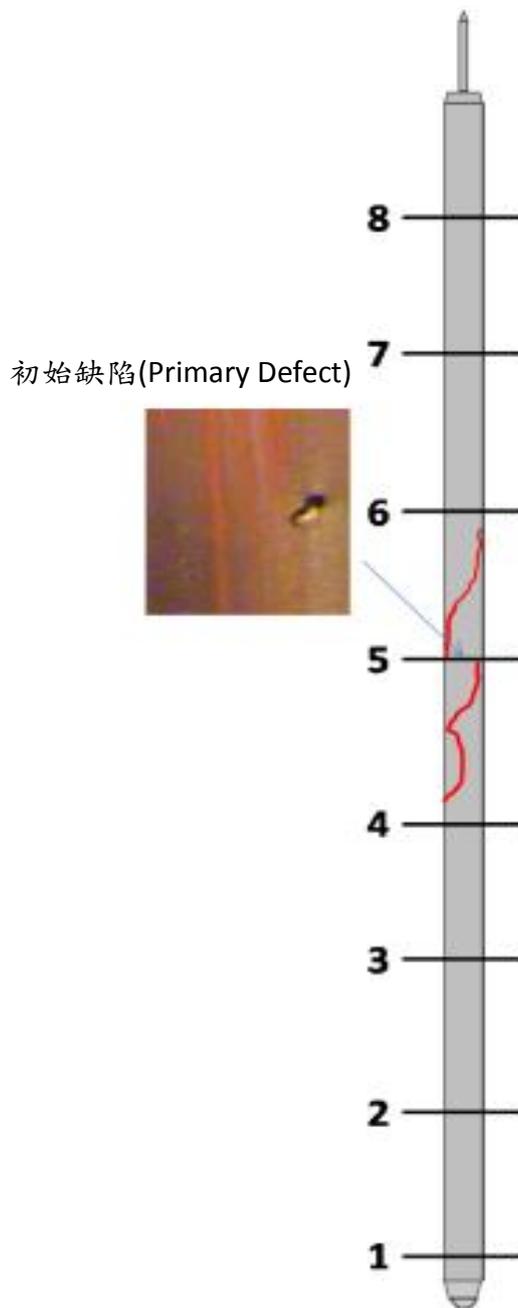
註：MFLCPR：最小臨界熱功率比值  
FDLRX：單位長度發熱率  
MAPRAT：平面單位長度平均發熱率

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

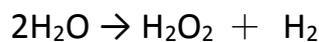
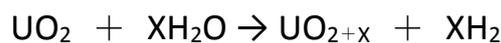
Current Testing, ECT)結果，護套洩漏情形彙整如下圖。



依據 AREVA 公司提出之本案肇因分析總結報告依破損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 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(UO<sub>2</sub>)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 U<sub>4</sub>O<sub>9</sub>(O/U=2.25)、U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>(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，鈳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，再被鈳合金護套吸收(一般而言，氫吸收率介於 10~20%之間，視純鈳或鈳合金化學組成而定)。當總氫含量超過溶解限值時，純鈳或鈳合金中沉澱的氫會形成氫化物( $Zr + H_2 \rightarrow ZrH_2$ )，且隨氫含量提升而增加，因鈳合金氫化物的韌性很低，並有留駐微空泡之特性，導致鈳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「長條形軸向劈裂」或「圓周形破裂」的二次劣化現象，且「圓周形破裂」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

涉及廠家智慧財產權

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」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 部機組開始採用涉及廠家智慧財產權新型設計之燃料丸，因其涉及廠家智慧財產權設計，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)、本次大修立即採取強化措施

1. 持續依本廠 708.1.1 防範異物入侵程序書進行管制並強化。
2. 爐心相關之設備，其開口於作業前、後均需執行錄影，俾檢查及管控有無零件遺失致異物入侵反應爐重要系統。
3. 本次大修亦針對爐底爐屑狀況進行清查及錄影，惟檢查結果顯示良好。
4. 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. 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 涉及廠家智慧財產權 其濾除效率為 90%，已較舊式 涉及廠家智慧財產權 底部繫板之濾除效率(約 50%)大幅提高。目前(104 年)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。

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)

燃料可靠度指標(FRI)是估算由洩漏燃料棒內釋放出之六種放射性廢氣總活度的方法，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放射性廢氣總活度為標準，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 $\mu$ Ci/sec
一階行動階段 (Level 1)	FRI 介於 1,000~5,000 $\mu$ Ci/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 $\mu$ Ci/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 $\mu$ Ci/sec
四階行動階段 (Level 4)	六種放射性廢氣總活度 > 145,000 $\mu$ Ci/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 指標可以執行反應爐局部功率抑低方式緩解，但因燃料棒內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 (DEI)指標立刻會大於  $0.001 \mu\text{Ci/g}$ ，已達需進入 Level 2 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 Level 1(1000  $\mu\text{Ci/sec}$ )判斷標準之狀況發生，或是在 Level 1 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，如有發生護套洩漏事件，則下一週期之六種放射性廢氣核種總活度，將採扣除其起動滿載後一個月之平均值(背景值)方式計算<sup>2</sup>，以顯現該週期爐心之真實狀況；

---

<sup>2</sup>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

碘-131 等價劑量計算方式亦同，惟碘-131 等價劑量之 Level 3/4 判定時，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，另增訂準則如下：

1. 相關監測參數需連續一週被觀測到超出相關行動階段之標準，以提高該參數可信度。
2. 爐水碘指標：
  - (1) 機組起動達滿載後，蒐集一個月每天運轉監測到之碘-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，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 Level 1 行動階段標準，則依第 1 條準則增加取樣頻率，連續一週每日取樣監測該參數，確認其可信度。
  - (2) 如碘-131 活度未進入 Level 1 行動階段，碘-131 等價劑量因污染爐心之故進入之 Level 2 行動階段，應視為無效。碘活度提高之因係燃料護套穿孔惡化，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。

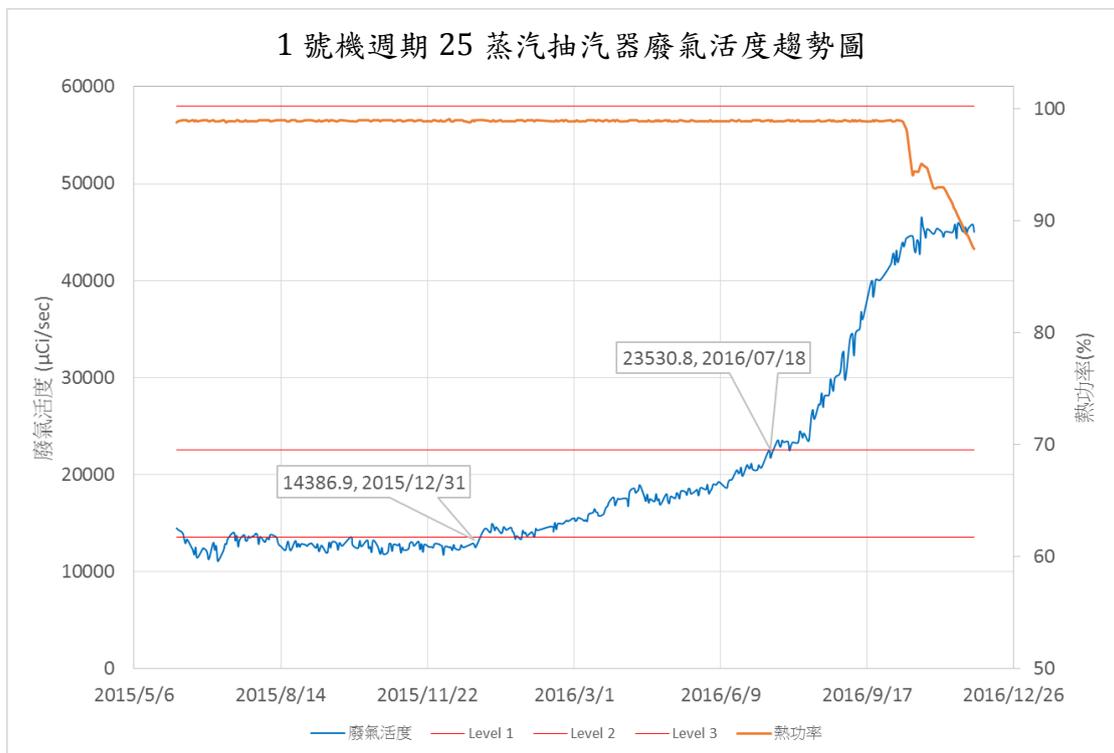
3. 六種廢氣總活度指標(sum-6)：依本次 1 號機燃料護套洩漏之經驗，六種廢氣總活度達進入 Level 1(1000  $\mu\text{Ci}/\text{sec}$ )之行動標準，應同時考量 Xe-133 活度增加狀況；如 Xe-133 活度較穩定運轉時增加 50%以上，本項指標應視為正確。
4. 一階行動階段之各項標準，如僅一項監測參數達到護套洩漏判斷標準，而其它監測參數顯示正常時，本廠將先增加爐水及廢氣取樣頻率，俾蒐集與監視爐心實際狀況，並先召開廠內會議討論、研判，適時通報核發處及燃料廠家。

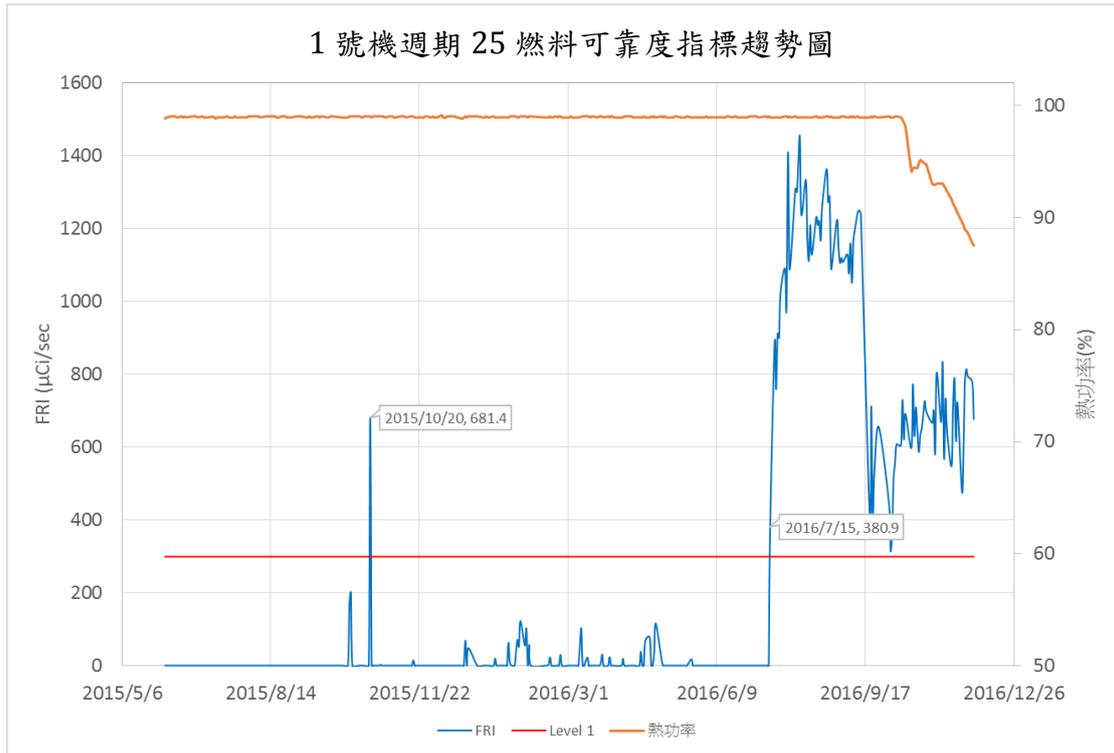
修訂後之各階段行動標準如下表：

類別 行動階段	潔淨的爐心	上一週期曾發生護套洩漏之爐心
Level 1 疑似護套洩漏	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\text{FRI} \geq \text{[redacted]} \mu\text{Ci}/\text{sec}</math>。</li> <li>• 其它證據顯示燃料護套有洩漏發生。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 碘-131、Xe-133 活度上升 <small>本表遮蔽部份涉及EPRI智慧財產權</small></li> <li>• Xe-138/Xe-133 活度比值小於 [redacted]</li> <li>• 六種放射性廢氣核種總活度超過 [redacted] <math>\mu\text{Ci}/\text{sec}^3</math>。</li> <li>• <math>\text{FRI} \geq \text{[redacted]} \mu\text{Ci}/\text{sec}</math>。</li> </ul>
Level 2 爐水活度偏高	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\text{FRI} \geq \text{[redacted]} \mu\text{Ci}/\text{sec}</math>。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 六種放射性廢氣核種總活度超過 [redacted] <math>\mu\text{Ci}/\text{sec}^3</math>。</li> <li>• 碘-131 等價劑量超過 [redacted] <math>\mu\text{Ci}/\text{gm}^3</math>。</li> </ul>
Level 3 評估是否降載運轉	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 六種放射性廢氣核種總活度超過 [redacted] <math>\mu\text{Ci}/\text{sec}</math>。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 六種放射性廢氣核種總活度超過 [redacted] <math>\mu\text{Ci}/\text{sec}^3</math>。</li> <li>• 碘-131 等價劑量超過運轉規範限</li> </ul>

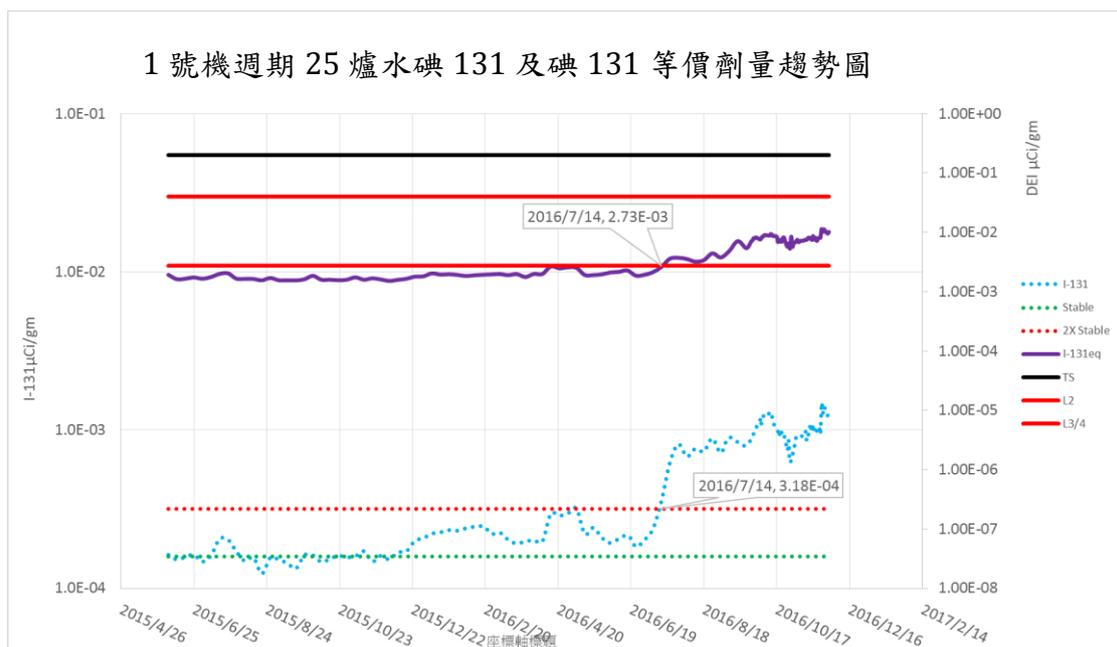
Level 4 評估是否提前大修	<ul style="list-style-type: none"> <li>六種放射性廢氣核種總活度超過 [redacted] <math>\mu\text{Ci}/\text{sec}</math>。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>值的 [redacted] %。 [redacted] <math>\mu\text{Ci}/\text{gm}</math>)</li> <li>惰性氣體總排釋率超過運轉規範限值的 [redacted] %。 ([redacted] <math>\mu\text{Ci}/\text{sec}</math>)</li> </ul>
Level 5 評估是否立即停機	<ul style="list-style-type: none"> <li>六種放射性廢氣核種總活度超過 [redacted] <math>\mu\text{Ci}/\text{sec}</math>。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>六種放射性廢氣核種總活度超過 [redacted] <math>\mu\text{Ci}/\text{sec}</math>。</li> </ul>

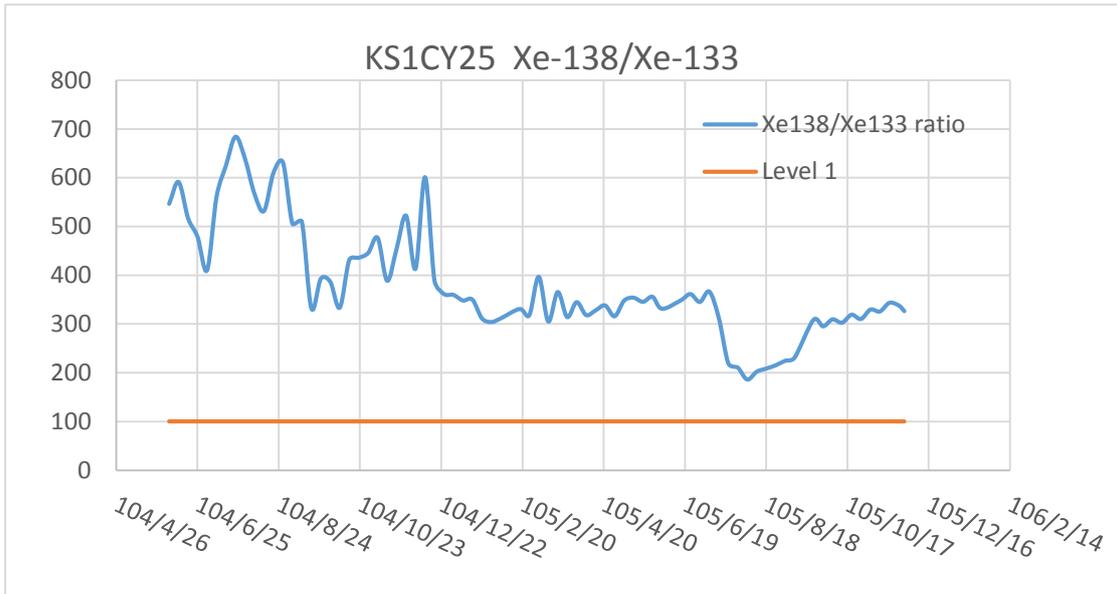
本週期六種廢氣總活度及 FRI 指標如改採新標準重新檢視，則已達進入二階行動階段標準，與修訂前標準相比將更為保守，未來本廠機組週期運轉時，將監視上表所列之燃料完整性相關參數，俾及早發現護套異狀，依燃料護套洩漏各行動階段準則，採相關行動措施因應。





另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，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。





## 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 10 月 3 日至 12 月 31 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 10/03~12/31 期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。105 年 1 月至 9 月本廠之放射性廢氣排放實績評估之廠外民眾最大個人有效劑量為 0.00434 毫

西弗，最大個人器官等價劑量為 0.00207 毫西弗，均低於設計限值<sup>3</sup>與法規限值<sup>4</sup>；另本廠採保守評估策略，假設自 10 月 1 日起，1 號機以 Alarm 設定值運轉至 11 月 30 日，合計本年度對民眾之最大個人有效劑量約為 0.01671 毫西弗，該機組對民眾之影響仍低於設計限值(0.05 毫西弗/機組年)與法規限值。

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

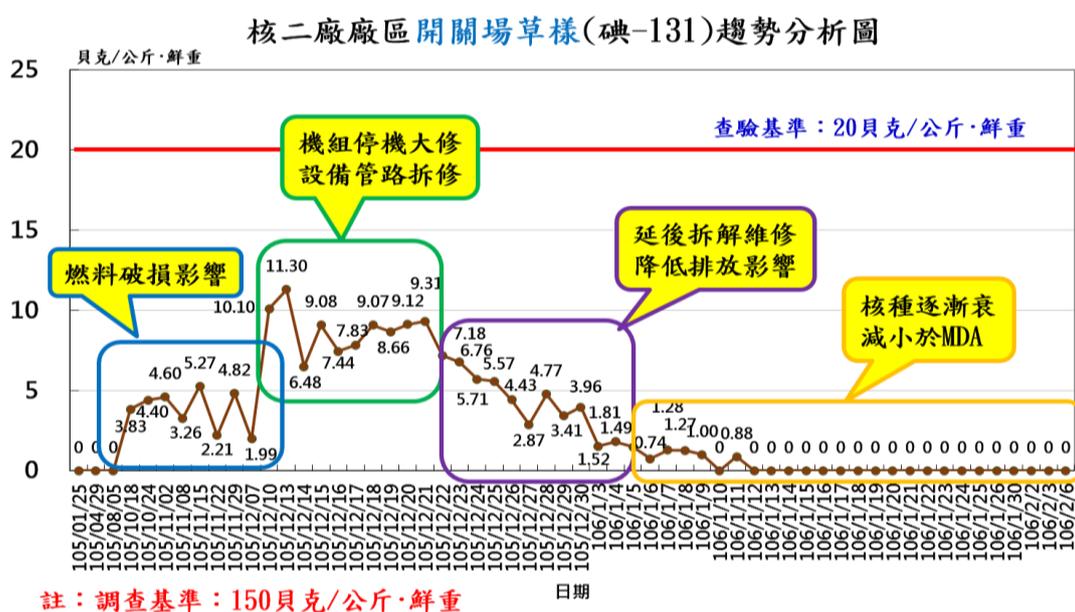
---

<sup>3</sup> 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。

<sup>4</sup> 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。

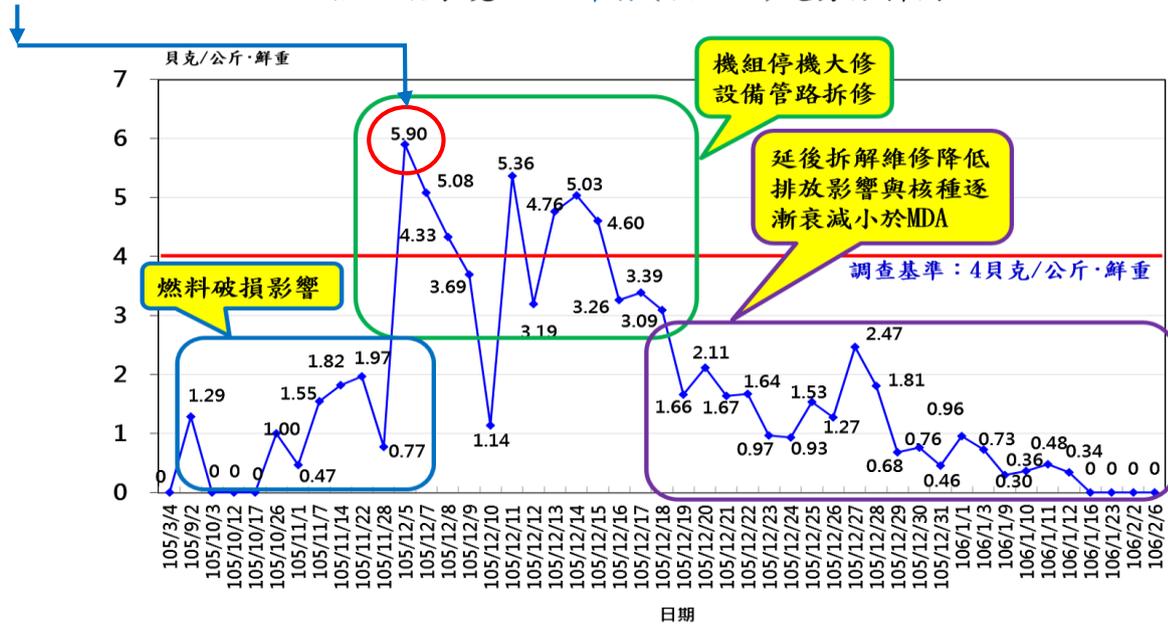
近草樣表面，因此僅於草樣測得極微量碘-131 核種，且於 105.12.13 在開關場監測點測得最高值為 11.3 貝克/公斤·濕樣，但監測區之量測值均未超過『核能電廠監測區試樣放射性分析行動基準與因應行動』之調查基準(150 貝克/公斤·濕樣)，甚至亦均未超過查驗基準(20 貝克/公斤·濕樣)，詳如下圖所示量測值與其意義說明：



廠界環境則於 105.12.5 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 MDA)，詳如下圖所示量測值與其意義說明：

監測點測得最高值

核二廠環境GR202草樣(碘-131)趨勢分析圖



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與法規限值，且在背景環境輻射之變動範圍內。

#### 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