

NRD-SER-109-02

「核二廠 1 號機燃料週期 28 功率遞減運
轉評估報告」安全審查報告

行政院原子能委員會 核能管制處
中華民國 109 年 3 月

摘要

台電公司於 108 年 12 月 6 日依據行政院原子能委員會(以下簡稱本會)「核子反應器設施管制法」第 14 條及「核子反應器設施管制法施行細則」第 10 條第 1 項第 9 款規定提出「核二廠 1 號機燃料週期 28 功率遞減運轉評估報告」。其係因核二廠 1 號機受限於用過燃料池貯存容量不足，致 1 號機 EOC-27 大修期間僅能再填換約 120 束的新燃料，依台電公司規劃可維持滿載運轉至 110 年 3 月，無法運轉至 110 年 12 月 27 日運轉執照屆期，故台電公司係在不改變已核准之燃料總燃耗，以及最長週期運轉天數等兩項限值下，規劃該機組將於燃料週期 28 進行功率遞減運轉，由滿載功率(即 2971MWt)逐步降至 80%額定功率為止，約歷時 60 天，隨後機組即進行降載停機，並維持在停機大修階段。國外亦有類似案例，如美國 Vermont Yankee 電廠於 2014 年機組永久停機前，亦採用週期末功率遞減運轉。

本會為使本案之管制更為周延完備，同時為增加審查廣度及深度，聘請 4 位專家學者及本會同仁組成專案審查小組，從專業角度與安全的立場，針對台電公司提送「[核二廠 1 號機燃料週期 28 功率遞減運轉評估報告](#)」進行審查，並召開 2 次審查會，共提出 30 項審查意見，經台電公司所提答覆說明與報告修訂內容進行審查後，所有審查提問均已釐清並全部同意結案，確認機組可符合功率遞減運轉要求。另本會亦將涉及本案審查要求與台電公司承諾事項，列為後續管制事項，要求台電公司確實執行，以確保核二廠 1 號機週期 28 燃料末期功率遞減運轉安全。

目 錄

	頁次
摘要	i
一、前言	1
二、概述	2
三、審查情形	7
三、結論	17

一、前言

台電公司核二廠 1 號機因受限於用過燃料池貯存容量不足，致執照到期前第 28 燃料週期之爐心燃料設計，僅能於 1 號機 EOC-27 大修期間再填換約 120 束的新燃料，大修後約可維持 1 年滿載運轉能力，依台電公司規劃該機組可維持滿載運轉至 110 年 3 月，惟因該機組運轉執照期限至 110 年 12 月 27 日屆期，故台電公司規劃該機組將於燃料週期 28 進行功率遞減運轉，並於 108 年 12 月 6 日依據行政院原子能委員會(以下簡稱本會)「核子反應器設施管制法」第 14 條及「核子反應器設施管制法施行細則」第 10 條第 1 項第 9 款規定提出「核二廠 1 號機燃料週期 28 功率遞減運轉評估報告」。

台電公司核二廠 1 號機係在不改變已核准之燃料總燃耗及最長週期運轉天數等兩項限值下，規劃該機組於燃料週期 28 滿載運轉至週期末控制棒全出且爐心流量達到 100%時，爐心功率開始以每日遞減約 0.32%功率的方式，將機組由滿載功率(即 2971MWt)逐步降至 80%額定功率為止，為期約 60 天，隨後機組即進行降載停機，並維持在停機大修階段。

本會為使本案之管制更為周延完備，同時為增加審查廣度及深度，聘請 4 位專家學者及本會同仁組成專案審查小組，從專業角度與安全的立場，針對台電公司提送「[核二廠 1 號機燃料週期 28 功率遞減運轉評估報告](#)」進行審查。審查小組分別於 109 年 1 月 3 日及 109 年 2 月 13 日召開兩次審查會，共提出 30 項審查意見，並經台電公司澄清與修訂相關報告後，所有審查提問均已釐清並全部同意結案，確認機組可符合

功率遞減運轉之要求。

二、概述

核能電廠爐心週期末之功率遞減運轉(即所謂 Coastdown 運轉)係指爐心燃料不足以維持滿載運轉，而採逐漸遞減功率方式繼續運轉。當所有控制棒抽至全出，且爐心流量達額定值，此時即為燃料週期末，機組需停機開始大修俾更換爐心燃料及進行設備測試與維護，惟在符合安全分析及相關法規範疇下，核能電廠常藉由功率遞減運轉模式，調整機組停機時程，國外亦有相關案例，如美國 Vermont Yankee 電廠於 2014 年機組永久停機前，亦採用週期末功率遞減運轉。

台電公司提送「核二廠 1 號機燃料週期 28 功率遞減運轉評估報告」，依法規要求應包含該機組功率遞減運轉時程與重要運轉參數變動、功率輸出控制、系統組件衝擊、發電設備考量、運轉考量及運轉操作程序等，分別簡述如下：

(一)功率遞減運轉時程與重要運轉參數變動評估

台電公司規劃核二廠 1 號機燃料週期 28 滿載運轉至週期末控制棒全出且爐心流量達到 100% 時，機組爐心功率開始以每日遞減約 0.32% 功率運轉，逐步降至 80% 額定功率為止，為期約 60 天，隨後機組即進行降載停機大修。

台電公司比較核二廠 1 號機滿載功率運轉與功率遞減降載至額定功率 80% 之運轉重要參數，其於機組功率遞減階段，包括反應爐壓力、水位及流量等運轉參數可穩定控制，另輻射監測值、飼水泵及飼水泵汽機振動等運轉參數變動差異甚小。

另外，在環境監測部分，當功率遞減時對廢氣或廢水排放口之流程輻射監測器(PRM)及廠區環境輻射監測站(ERM)之監測結果，於飼水加氫使用期間影響極微，僅有部分廢氣排放口之 PRM 濃度會略微下降，廢水排放濃度因屬批次排放而與機組功率無關。整體而言，功率遞減運轉對廠區及廠外環境不會造成不良改變或影響，亦不會增加放射性廢棄物之產量。

(二)功率輸出控制評估

台電公司依據燃料廠家計算之臨界功率比運轉限制值(OLMCPR)，訂定功率遞減運轉期間之功率限制，機組於功率遞減運轉期間，除必須如滿載運轉時監測各項熱限值外，同時須注意平時運轉及降載進行測試或設備維修後升載過程，均不可超過燃料廠家設計之功率限制。

核二廠 1 號機燃料週期 28 執行功率遞減運轉期間，爐心流量均維持 100% 額定流量，除須降載進行測試或設備維修時，需降低爐心流量以降低爐心功率外，爐心功率隨著燃料消耗而自然逐漸降低，不需由運轉員介入控制功率，除非必要，亦不需調整爐心流量。惟由於爐心之差壓略為降低，即使再循環泵之流量控制閥(FCV)開度不變，預期使得功率遞減運轉期間之爐心流量將由 100% 略增加至 100.5%，仍低於核二廠最終安全分析報告 FSAR 所容許之最高爐心流量 102%。

(三)系統組件衝擊評估

台電公司針對核二廠 1 號機功率遞減運轉期間與穩定滿載運轉的情境略有差異，分別就反應器系統、燃料與控制棒、水化學考量、

汽機蒸汽流量與壓力儀控系統等進行評估，確認功率遞減運轉不會對系統組件造成不良影響。

台電公司就反應器易受暫態影響較明顯的組件，如飼水噴嘴、爐心噴灑管嘴及 RPV support skirt 等，於每次燃料週期結束統計各種暫態，計算出累計疲勞使用因子。其中飼水噴嘴累計疲勞使用因子最高約 0.29201，仍與疲勞使用因子達 0.7 時須採取措施之門檻，尚有餘裕。對於反應器及重要組件於機組功率遞減運轉期間，其熱循環週期及疲勞使用因子皆可符合原設計之使用範圍，且不致有明顯改變。另外，對於蒸汽流量改變導致主蒸汽管內可能有聲波震盪出現，台電公司依循美國電力研究所 BWRVIP-182A 報告之篩選分析方法，評估滿載功率及額定 80% 功率運轉條件下，Strouhal Number 值計算結果並沒有介於潛在聲波激盪區間內，研判功率遞減運轉不致影響蒸汽乾燥器結構完整性。

反應爐水水化學系統之主要參數分別為 pH 值、導電率、氯離子及硫酸根離子等，其功率遞減運轉時，飼水流量亦隨之遞減，代表雜質伴隨飼水進入反應爐之含量亦遞減，然而爐水淨化系統 (RWCU) 淨化速率維持不變，因此爐水水化學系統不受功率遞減運轉之影響。

核二廠於 87 年完成數位電子液壓 (DEH) 控制系統數位化改善後，依機組降載至爐心功率 75% 運轉時的經驗，其主汽機調速閥 GV 1~4 之開度穩定，主蒸汽旁通閥 (Bypass Valve) 關閉，並未產生閥位追逐 (valve hunting) 或反覆開關 (cycle) 之現象，且蒸汽流量亦呈現穩定，不會造成組件額外之磨耗。

(四)發電設備考量

台電公司針對核二廠發電相關設備之主汽機與發電機系統、飼水泵汽機、飼水加熱器、汽水分離再熱器、主冷凝器及重要儀控系統等重要組件，評估機組進行功率遞減運轉期間之影響，確認上述各設備組件可在該期間運作正常。

機組功率遞減運轉期間，汽機轉速仍維持於 1800 RPM，與滿載功率運轉時相同，汽機潤滑油壓力維持不變。台電公司依汽機原廠家提供之蒸汽節流閥(TV)及調速閥(GV)特性曲線圖，滿載功率期間由調速閥 GV 1 及 GV 4 控制蒸汽流量，爐心功率遞減至 80%運轉時，仍維持由調速閥 GV 1 及 GV 4 控制蒸汽流量，僅閥位開度較滿載運轉時略低，且節流閥(TV)、中間閥(IV)及再熱關斷閥(RSV)均維持全開閥位，與滿載時相同，故蒸汽控制閥可維持正常運轉。

機組於爐心功率遞減至額定功率 80%運轉期間，飼水流量於自動控制下，飼水泵與飼水泵汽機轉速將略降至約 3800~4000 RPM 運轉，而臨界轉速約為 2300 RPM。基於上述，台電公司評估於機組爐心功率自 100%遞減至 80%運轉期間，汽機轉速仍遠離臨界轉速區域，飼水泵與飼水泵汽機可維持正常運轉。

台電公司針對核二廠主發電機部分，依據 EPRI-3002002612 指引分別對發電機之轉子、定子、定子線圈溫度波動、熱傳特性變化等進行評估，其結果可於機組功率遞減運轉期間可維持正常運轉。另外，主發電機原製造廠(Siemens)針對機組功率遞減運轉之評估，在機組功率遞減運轉期間，在符合原廠正常操作之規定與限制，並持續監控相關運轉參數(如 Discharge / Embedded/ Hot Gas/ Cold Gas

Temp.、Exciter Hot/ Cold Gas Temp.、Field Current/ Voltage、FOVM 等)，確保數值都維持在標準內，對設備即無任何影響。

(五)運轉考量

台電公司針對功率遞減與穩定滿載運轉之差異，分別就機組運轉及環境影響等兩方面進行評估。若功率遞減運轉期間發生暫態，皆可採取滿載時發生暫態的相同處理方式，核二廠運轉員在模擬器操作訓練時，亦經常演練降載過程的暫態操作，確保運轉員可順利將機組遞減至額定功率 80% 運轉。爐心功率遞減至 80% 運轉期間，對機組設備可靠度亦無不良影響，所有系統的控制均仍維持在自動模式，運轉員所需監視的重要參數項目與滿載功率運轉時相同，故亦不會增加運轉員負擔。

此外，機組開始功率遞減運轉後，由於系統管路的汽、水流量逐漸降低，其內含放射性物質所造成的直接及間接輻射的影響亦會開始減少，將使管路及相關設備之輻射劑量率出現減少之趨勢，並反映在部分廢氣排放口之 PRM 讀數上，且當爐心功率降低至飼水停止注氫後，蒸汽管路的輻射強度會進一步顯著降低，所以不會增加現場維護及巡視人員之接受劑量。當機組功率遞減運轉將會降低直接輻射對廠區的影響，至於廠外環境部分，則因距離汽機廠房較遠的關係，其輻射率變動量已落於背景正常變動範圍內，故亦無影響。

(六)運轉操作程序

當核二廠 1 號機進入燃料週期 28 之週期末爐心功率逐漸遞減時，爐壓亦伴隨逐漸下降，由於爐心之差壓略為降低，預期爐心流

量會略為增加，運轉員將監視爐心流量，在確保爐心流量不超過額定流量的 102%，以及再循環泵運轉電流不超過 264 安培等兩項原則下，若有必要再調整再循環泵之流量控制閥(FCV)開度。

台電公司全面檢視核二廠異常及緊急操作程序書，程序書 507.6「氫氣控制故障」、574.1「主控制室 1C85(2C85)盤 A 窗警報程序」，以及 574.8「主控制室 1C86(2C86)盤 C 窗警報程序」共 3 份程序書，需於進行功率遞減運轉前，針對功率遞減運轉之功率區間補充相關數值，其餘異常及緊急操作程序書均不受本次功率遞減運轉之影響。

三、審查情形

台電公司依法規要求提出「核二廠 1 號機燃料週期 28 功率遞減運轉評估報告」，其報告包含該機組功率遞減運轉時程與重要運轉參數變動、功率輸出控制、一次側系統組件衝擊、發電設備考量、運轉考量及運轉操作程序等。另外，台電公司亦參考美國電力研究所 EPRI-3002002612「Program on Technology Innovation: Approach to Transition Nuclear Power Plants to Flexible Power Operations」進行評估與比對。審查小組針對前述報告進行審查，共召開 2 次審查會議，並提出 30 項審查意見，分別就審查情形說明如下。

- (一) 審查小組針對功率遞減的預定運轉方式，分別提出 RAI-1-01、RAI-4-01、RAI-4-02 及 RAI-4-11 等審查意見，請台電公司就運轉點、燃耗、時程、經濟效益等進一步說明。台電公司答覆說明，根據 Framatome 公司針對核二廠 1 號機週期 28 再填換執照分析 (Reload Licensing Analysis (ANP-3787P)) 中，其所附 POWER-FLOW

MAP 將核二廠 1 號機功率遞減運轉預定運轉範圍以紅線標示，功率由滿載功率逐漸降至額定功率 80%，預估爐心流量由 100%略增至大約 100.5%，並說明 1 號機週期 28 申照週期末(LEOC，含遞降運轉)爐心平均燃耗為 38090.7MWd/MTU，申照全功率末期(LEOFP)爐心平均燃耗為 35210.7MWd/MTU，而經評估 1 號機週期 28 自全功率末期遞減運轉 60 天，將使爐心平均燃耗比 LEOFP 之爐心平均燃耗將增加 1462 MWd/MTU，即遞減運轉 60 天後爐心平均燃耗將成為 35210.7MWd/MTU+1462MWd/MTU= 36672.7MWd/MTU，仍小於上述申照週期末(LEOC)爐心平均燃耗 38090.7MWd/MT；另外，核二廠 1 號機燃料週期 28 規劃於 110 年 3 月中旬至 110 年 5 月中旬期間進行功率遞減運轉，有助於增加上述期間之備轉容量率(約 2.6%~3%)，提升系統供電穩定。台電公司已就各項疑問提出答覆說明，答覆內容經審查可以接受。

(二)對於功率遞減運轉時之爐心流量需澄清說明部分，審查小組提出 RAI-1-02、RAI-4-07 及 RAI-5-01 等意見。台電公司答覆說明，運轉員於功率遞減運轉期間不介入控制功率，除非必要不需調整爐心流量之原則，功率由滿載功率逐漸降至額定功率 80%，預估爐心流量由 100%略增至大約 100.5%；針對送審報告附件 1「100%功率」欄位所列 33KT/HR，與「80%功率」欄位所列 38513T/HR 差異部分，台電公司說明其前者係為控制棒尚未全出即可維持滿載之相應爐心流量，而「80%功率」欄位，則為功率遞減運轉時，控制棒已抽至全出且爐心流量達到 100%額定流量(38322T/HR)後，功率遞降

至 80%之爐心流量相應爐心流量約為 38513T/HR；另外，機組功率遞減運轉期間，運轉員將監視爐心流量，並以下列兩項原則監控相關參數並適時調整再循環泵 FCV 的開度：(1)確保爐心流量不超過額定流量的 102%；(2)再循環泵運轉電流不超過 264 安培。台電公司已就各項審查意見提出答覆說明，答覆內容經審查可以接受。

(三)對於功率遞減運轉時之與平常運轉相異之處，包括加氫系統停止注氫之影響、氙(Xenon)濃度變化、對 Off Gas 系統之影響等，審查小組提出 RAI-1-03、RAI-4-04 及 RAI-5-03 等意見，請台電公司進一步說明。台電公司答覆說明核二廠 1 號機功率遞減運轉期間預估約 60 天，爐心功率降至 85%以下停止注氫至停機之時間很短，此時加氫水化學將恢復為原有的正常水化學控制，核二廠仍將持續淨化、控制水質以符合程序書及 EPRI 水質指引之要求，因此裂縫成長增加甚微，預計不會有明顯負面影響；對於爐心內 Xenon 之平衡濃度，將隨爐心功率遞減而降低，但因爐心功率是連續不斷的遞減，而 Xenon 之平衡時間約 40-50 小時，將造成即時的 Xenon 濃度維持在比平衡濃度稍多的情形，若期間有偵測試驗或設備維修，可能會做短暫降載及事後回升，當反應爐功率下降初期，爐心 Xenon 之即時濃度會隨之上升，經過 6~9 小時後，爐心 Xenon 之濃度會因衰變而下降，而平衡於相應功率位階之濃度，反之當反應爐功率回升時，爐心 Xenon 之濃度之變化，則與前述相反，在核二廠 1 號機燃料週期 28 功率遞減運轉期間，雖然 Xenon 濃度一直處於未平衡狀態，不過功率及 Xenon 濃度的遞減皆是連續不斷且

非常微幅，Xenon 濃度不會過於偏離平衡狀態；另外，當停止飼水加氫後，因廢氣(off-gas)流量減少，導致 1C45 盤濕氣分離器出口高溫警報出現，依據以往經驗可調增備用串 OG RECOMBINER 之 PURGE FLOW 或調降 GLYCOL 冷凍機之設定溫度，使警報消失，且由於後續之乾燥器仍可有效降低廢氣濕度，研判不會對活性碳床效能造成可見之影響。另將修訂程序書 574.48「警報程序 1C45 盤和 2C45 盤」，納入 1C45 盤濕氣分離器出口高溫警報出現時運轉員應採取之對應措施，此部分亦列入後續管制事項。台電公司已就各項審查意見提出答覆說明，答覆內容經審查可以接受。

(四)審查小組針對機組遞減降載至額定功率 80%之運轉參數，提出審查意見 RAI-1-04、RAI-5-02、RAI-5-04 及 RAI-5-05 等意見，請台電公司補充說明。台電公司答覆於送審報告附件中增列飼水流量、飼水溫度、爐心進口熱焓(Enthalpy)與於滿載運轉與遞減至額定功率 80%之數值，而汽機進口蒸氣 Moisture Fraction 參數因無實際量測儀器，列出 1 號機起動測試之數據作為參考；有關滿載運轉功率部分，台電公司說明核二廠 1 號機終期安全分析報告(FSAR)敘明每部機之額定熱功率(Rated Thermal Power, RTP)為 2894MWt，96 年本會核准其進行核二廠小幅度功率提昇，每部機之額定熱功率提升至 2943MWt，103 年本會再核准該公司進行核二廠中幅度功率提昇，每部機額定熱功率獲准提昇為 3001MWt，惟核二廠於實際執行機組功率提升測試(Power Ascension Test, PAT)時，為確使發電機滿載運轉時保有足夠彈性餘裕，乃決定以行政管制明定反應器爐心

熱功率最高不超過 2971MWt(即額定熱功率 99%)，故以 2971MWt 為核二廠 1 號機滿載運轉熱功率；台電公司經重新檢討汽機 EHC 系統 loading 與 unloading 時間參考範圍，依以往運轉經驗 loading 與 unloading 在 15~30 秒時間範圍內，EHC 系統壓力均可維持正常穩定，其他 EHC 系統參數包含高壓油位及汽機控制閥位等亦維持正常，故訂定 loading 與 unloading 時間參考範圍為 15~30 秒應更為妥適；台電公司於送審報告附件增列 80%功率 EHC 高壓油壓力參數值供比對，並說明雖於 1 號機運轉期間發現低壓力跳脫油壓指示存有晃動且超出參考範圍，但均未引動警報及相關跳脫，而同步確認相關油壓指示包含系統壓力、油泵出口壓力、高壓蓄壓器壓力指示、Loading/Unloading 時間，及高壓油槽油位等均維持正常穩定，目前觀察控制室及油槽壓力錶皆穩定在 2100~1700psi 間運轉，低壓力跳脫油壓雖有晃動情形，仍不影響汽機控制閥正常功能，因此以 1700 psi 作為下限值應仍屬合理保守，且核二廠針對 EHC 系統低壓力跳脫油壓晃動現象，已依程序書訂定系統監測及應變措施，並長期加強監視系統壓力等參數，若系統壓力有下降變化趨勢，或其餘參數(包含 Loading/Unloading 時間、高壓油槽油位指示及汽機控制閥運轉狀態等) 有異常變化，可依監測及應變措施採取必要之行動。本項有關汽機 EHC 系統 loading 與 unloading 時間範圍，須依實際運轉參數進行調整，此部分列入後管制事項追蹤。台電公司已就各項審查意見提出答覆說明，答覆內容經審查可以接受。

(五)有關台電公司針對核二廠 1 號機功率遞減運轉與 IAEA、EPRI 等國

際核能組織所提供運轉參考文件進行評估與比對，審查小組提出 RAI-1-05、RAI-2-01、RAI-4-10 及 RAI-6-03 等意見，請台電公司澄清說明。台電公司答覆核二廠已參考 IAEA Nuclear Energy Series No. NP-T-3.23 2018 年版內容，與送審報告進行評估比對，針對送審報告已有相關評估之項目，逐項標註對應之報告章節編號，針對送審報告無相關評估之項目，亦逐項提出評估說明，就 In-core Detectors 部分為確保功率遞減運轉期間中子偵測儀器 LPRM 及 APRM 之精確度，核二廠將於爐心流量達到 100% 後，在功率穩定運轉的 1 週內依核二廠程序書 1007.1 執行功率遞減運轉期間第 1 次 LPRM 校正，確認 LPRM 之 Gain Adjustment Factor (GAF) 符合程序書要求，並在功率遞減至約 90% 功率時，再執行 1 次 LPRM 校正，確認 LPRM 及 APRM 之精準度；EPRI 報告所述之 Flexible Power Operation 需配合電力需求而經常調整功率，功率遞減 (Coastdown) 運轉期間除須因降載進行測試或設備維修時而主動降低爐心功率外，爐心功率隨著燃料消耗而自然逐漸降低，不需由運轉員介入控制功率，功率遞減運轉期間水位、壓力等控制系統與滿載穩定運轉時相同，均維持在自動模式，由控制系統依各項參數變化，將水位、壓力等控制於穩定狀態，正常運轉下運轉員僅監視，除非必要，不需介入操作，亦不需干預爐心流量，另週期末功率遞減運轉期間控制棒已全出且爐心流量達到 100%，爐心功率由滿載功率穩定逐步降至 80% 功率為止，機組不會隨系統調度需求而改變功率，故不致有頻繁的反應度上下變化的情形，核二廠會因應功率變化的輻度，適時調整爐心分析計算頻率由 2 小時改為 1 小時；台

電公司將核二廠 1 號機週期 28 功率遞減運轉與 EPRI 報告 3002002612 各章節評估比對結果納入報告之附件，並提供發電機原製造廠 Siemens 對主發電機功率降至 80%或 70%下運轉之評估，說明符合原廠手冊中的正常運轉參數規定與限制，僅需持續監視振動、溫度、光纖振動儀器等運轉參數，此狀態下對於發電機運轉亦不會有任何問題。本項有關中子偵測系統 LPRM 及 APRM 之校正，以及爐心分析計算頻率之調整，列入後續管制事項。本項答覆內容經審查可以接受。

(六)對於功率遞減運轉與滿載運轉之差異，審查小組提出 RAI-2-02、RAI-4-05、RAI-4-06、RAI-5-06 及 RAI-6-02 等意見，請台電公司澄清對程序書、訓練、異常應變之影響與適用性。台電公司經全面檢視核二廠異常及緊急操作程序書，確認 507.6「氫氣控制故障」、574.1「主控制室 1C85(2C85)盤 A 窗警報程序」、574.8「主控制室 1C86(2C86)盤 C 窗警報程序」等 3 份程序書，需針對功率遞減運轉之功率區間再補充相關數值，其餘異常及緊急操作程序書不受本次功率遞減運轉之影響；另機組於功率遞減運轉開始前，電廠將對運轉員進行包括模擬器訓練及書面傳閱相關內容之訓練，使運轉員了解功率遞減運轉的策略，以及警報出現時之相關因應；至於機組於功率遞減運轉期間之意外事件影響，經 Framatome 公司評估，確認核二廠 1 號機週期 28 通用性暫態分析仍可適用，並確認該週期之爐心設計配合既有安全系統設計，無論於滿載及功率遞減運轉狀態發生事故時，燃料熱限值與系統壓力等參數，均不會違反安全限值

(Safety Limits)，並具有一定程度的安全餘裕；核二廠 EOP/SAG 以徵候做為應變策略的基礎(Symptom-Based response strategies)，而非以事件做為應變策略的基礎，功率遞減運轉反應爐功率將逐漸由滿載逐漸降至 80%，此功率區間進入 EOP/SAG 的執行策略與滿載時之策略均相同，因此核二廠 EOP/SAG 仍可適用於功率遞減運轉至 80%期間；功率遞減運轉期間若發生再循環泵故障，電廠將依核二廠程序書 528「反應爐再循環水系統故障」處理，並執行再循環泵檢修，待檢修完成後，在確認運轉安全無虞以及合乎經濟效益之原則下，經電廠開會討論同意，再依程序書 614.1.3[「反應器再循環水迴路停用後之起動」，重新將再循環泵置入使用，並將機組回復至再循環泵故障前之負載。本項涉及程序書需補充相關數值及人員訓練(含模擬器訓練)部分，列入後續管制事項。本項答覆內容經審查可以接受。

(七)對於功率遞減運轉可能造成設備、組件狀態差異之影響，審查小組提出 RAI-3-01 及 RAI-3-02 等意見，請台電公司進一步說明。台電公司答覆說明核二廠依據程序書 1036「反應器重要組件疲勞使用因子計算程序書」執行反應器重要組件疲勞使用因子計算，目前監視的組件為經評估較關鍵的組件如飼水噴嘴、爐心噴灑管嘴及 RPV support skirt 三項，於每次燃料週期結束統計各種暫態次數，計算出累計疲勞使用因子，至 107 年 10 月(1EOC-26 大修)止，飼水噴嘴、爐心噴灑管嘴、RPV support skirt 之累計疲勞使用因子分別為 0.29、0.05、0.08，確認尚有一段餘裕，遞減降載運轉期間，對於

反應器重要組件不致有明顯影響；另外，再循環泵高速運轉的額定流量(Capacity)設計為 32500GPM(5562T/HR)，運轉能力為額定流量 20% 至 115% 間，再循環泵正常最大流量可達 37375GPM(6396T/HR)，機組遞減降載至 80% 功率時，每串再循環可提供爐心流量為 19100T/HR，參考核二廠程序書 614.1.2 內容 1 號機第 27 運轉週期建立之爐心流量與再循環泵流量(Recirc Driving Flow)關係進行推算，保守計算出再循環泵流量約 33285GPM，與前述再循環泵正常最大流量可達 37375GPM 還有一段餘裕；在機組遞減降載運轉期間，雖再循環泵流量增加，但泵浦轉速仍維持高頻運轉，轉速不變，研判運轉狀況不致對泵浦組件增加磨損，另機組大修執行 RPV 系統洩漏測試時會針對再循環泵執行試運轉振動監視，由以往 RPV 系統洩漏測試時之再循環泵運轉測試之振動實測值顯示，再循環泵高速運轉時，流量控制閥由最小開度逐漸到允許最大開度值，位移振動值(DX、DY)呈現下降趨勢，可研判再循環泵振動趨勢會隨著再循環泵之流量控制閥(FCV)開度變大而有微降現象，而機組功率遞減運轉期間，再循環泵之流量控制閥(FCV)開度較系統洩漏測試時之開度更大，故研判不致會有運轉高振動現象。本項答覆內容經審查可以接受。

(八)有關核二廠 1 號機功率遞減運轉與核一廠 2 號機降載運轉和國外功率遞減運轉等前例之差異比對與經驗回饋部分，審查小組提出 RAI-4-03 及 RAI-4-09 等意見，請台電公司補充說明。台電公司答覆說明核一廠 2 號機於 106 年 6 月開始進行降載運轉期間，除必須

如滿載運轉時監測各項熱限值外，同時須注意平時運轉及降載進行測試或設備維修後升載過程，均不可超過燃料廠家設計之功率限制，上述經驗已回饋於本次評估報告中，另核一廠 2 號機於 106 年 6 月進行降載運轉，係以人為控制方式，將機組由 100% 功率降載至 75% 功率後，維持於 75% 功率穩定運轉，以延長機組運轉時間，而核二廠 1 號機功率遞減運轉為控制棒已全出且爐心流量達到 100%，爐心功率隨著燃料消耗而自然逐漸降低，由滿載功率穩定逐步降至 80% 功率，過程約 60 天，除須降載進行測試或設備維修時需降低爐心功率外，不需由運轉員介入控制功率，兩者運作方式及現象不同，但機組均可維持安全；核二廠 1 號機燃料週期 28 功率遞減運轉，係週期末控制棒全出且爐心流量達 100% 後，爐心反應度已無法繼續維持滿載，反應爐功率將逐漸遞減，其現象和機組運作方式與國內外電廠以往功率遞減運轉案例相同，於運轉執照屆期前採用週期末(End of Cycle)功率遞減運轉策略，並非國際業界首次施行，美國 Vermont Yankee 電廠於 2014 年 12 月 29 日永久停機前即採用週期末功率遞減運轉至 74% 爐心功率，以往國內外電廠採用週期末功率遞減運轉策略時，大多並非為運轉執照屆期前之最後週期，由於核二廠 1 號機燃料週期 28 為運轉執照屆期前之最後週期，後續並無規劃新的燃料週期，因此無需考慮週期 28 之預估停機燃耗值(EOC exposure)及 Exposure window(± 500 MWd/MTU)，惟週期 28 爐心平均燃耗(Core average exposure)仍不能違反本週期再填換執照分析(Reload Licensing Analysis)之最大 EOC 爐心平均燃耗值(Maximum analyzed EOC core exposure)。本項答覆內

容經審查可以接受。

(九)對於核二廠 1 號機功率遞減運轉期間和滿載運轉之流程輻射偵測與廠區環境輻射偵測(ERM)比對，提出 RAI-4-08 審查意見，請台電公司說明前述之比對結果。台電公司答覆說明廢料廠房與輔助廠房之排氣比活度，主要是與廠房內設備妥善度以及其輻射作業內容相關，與機組運轉功率並無直接關連，故額定功率 80%或滿載功率時之排放口 PRM 讀數差異係正常變動所致，非功率變化造成，且由於廢氣排放口之流程輻射監測器讀值為持續變動，其高低值相間出現，難以比較，觀察長時段的數據趨勢，在機組升降載過程中，排放廢氣比活度之趨勢維持穩定，與運轉功率無關。本項答覆內容經審查可以接受。

(十)對於核二廠 1 號機功率遞減運轉對蒸汽乾燥器影響之評估，提出 RAI-6-01 審查意見，請台電公司說明篩選分析採用之司特勞克數 (Strouhal Number,S)計算公式參數。台電公司答覆說明本報告水蒸汽音速值，是使用” ASME International Steam Tables For Industrial Use” 相同標準公式(IAPWS-IF97)之網路軟體進行精算，輸入額定蒸汽壓力及溫度所得之數據，比對計算得出之滿載功率(額定功率 99%)及 80%音速值，其數值大小及變化趨勢與 ASME Steam Tables 提供之曲線圖相符，故本報告採用計算得出之音速代入司特勞克數計算公式。本項答覆內容經審查可以接受。

(十一) 針對核二廠 1 號機功率遞減運轉申請案，提出審查意見 RAI-6-04，請台電公司完整說明功率遞減運轉(coastdown)原理、現

象與機制，以確認本次功率遞降運轉申請之適用狀況。台電公司答覆說明沸水式核能機組之爐心設計，係藉由每次大修退出一部分照射過燃料並填入相應之新燃料，使爐心燃料之反應度明顯高於滿載時正好達到平衡之反應度，讓機組可維持滿載運轉一段時期。隨著機組運轉時日增加，爐心燃料逐漸消耗，為持續維持滿載運轉，須將爐心內控制棒漸次抽出及增加爐心流量，以補償燃料耗乏所減少之反應度，直到所有控制棒被抽至全出且爐心流量達額定值，此時稱之為滿載末期(End of Full Power, EOFP)，而功率遞減運轉係以所有控制棒維持全出且維持再循環泵之流量控制閥(FCV)於最大開度(或維持爐心流量於其額定值)，讓反應器爐心功率自然地隨著爐心燃料逐漸耗乏以緩慢的速率下降，如此可繼續運轉到核電廠預定要開始停機大修的目標時程或目標功率位階。本項答覆內容經審查可以接受。

四、結論

綜合上述，經審查小組針對台電公司提送評估報告，分別從核二廠 1 號機燃料週期 28 功率遞減運轉時程與參數變動、功率輸出控制、一次側系統組件(設備)衝擊、發電設備考量、運轉考量及運轉操作程序等面向進行審查，經台電公司釐清全部審查意見與修訂報告內容，確認機組可符合功率遞減運轉要求。另本會亦將涉及本案審查要求與台電公司承諾事項，列為後續管制事項，要求台電公司確實執行，以確保核二廠 1 號機週期 28 燃料末期功率遞減運轉安全。