

NRD-SER-113-06

「核三廠 1 號機週期 28 功率遞減運轉評估報告」安全審查報告

核能安全委員會 核安管制組
中華民國 113 年 6 月

摘要

台電公司於 113 年 1 月 23 日依據核能安全委員會(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「[核三廠 1 號機週期 28 功率遞減運轉評估報告](#)」，其係因核三廠 1 號機依前次大修時爐心燃料布局設計，無法維持該機組滿載運轉至 113 年 7 月 27 日運轉執照屆期日。台電公司係在不改變已核准之燃料總燃耗限值下，規劃該機組於燃料週期 28 末進行功率遞減運轉，由滿載功率(即 2822 MWt)逐步降載，直至機組執照屆期日，歷時約 40 天；功率預估由 100%額定功率遞減至 63%，隨即依運轉操作程序，將機組停機。國外亦有類似案例，如美國 Indian Point 電廠、Salem 電廠等，另國內核二廠 1 號機亦曾採用功率遞減運轉。

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，邀請 5 位會外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「核三廠 1 號機週期 28 功率遞減運轉評估報告」進行審查。審查期間召開 4 次審查會議，共提出 118 項審查意見，經審視台電公司所提答覆說明與報告修訂內容後，所有審查提問均已釐清且經委員複審同意結案，確認機組可符合功率遞減運轉要求。另本會亦將過程中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，以確保核三廠 1 號機週期 28 末期功率遞減之運轉安全。

目 錄

	頁次
摘要	i
一、前言	1
二、概述	2
三、審查情形	9
四、結論	23

一、前言

台電公司核三廠 1 號機依前次大修時爐心燃料布局設計，無法維持該機組滿載運轉至 113 年 7 月 27 日運轉執照屆期日，故台電公司規劃該機組將於週期 28 進行功率遞減運轉，並依據本會「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 款規定於 113 年 1 月 23 日提出「核三廠 1 號機週期 28 功率遞減運轉評估報告」。

本次台電公司核三廠 1 號機係在不改變已核准之燃料總燃耗限值下，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硼濃度達 10 ppm 時，爐心功率藉由調降汽機負載目標值使一次側溫度與二次側溫度平衡，逐漸遞減功率，將機組由滿載功率(即 2822 MWt)依運轉策略降載運轉直到執照屆期日為止，為期約 40 天；功率預估由 100% 額定功率遞減至 63%，隨即依運轉操作程序，將機組停機。

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，邀請 5 位會外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「核三廠 1 號機週期 28 功率遞減運轉評估報告」進行審查。審查小組分別於 113 年 3 月 8 日、4 月 9 日、5 月 3 日及 5 月 24 日召開 4 次審查會議，共提出 118 項審查意見，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且經委員複審同意結案，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，惟在符合安全分析及相關法規範疇下，核電廠常藉由遞減功率方式繼續運轉。核三廠功率遞減運轉方法即在週期長度達到反應爐無法繼續維持全功率運轉的時間點之後，藉由調降汽機負載目標值使一次側平均溫度(T_{avg})與二次側參考溫度(T_{ref})平衡，以此進行遞減功率的運轉方式。國外亦有類似案例，如美國 Indian Point 電廠、Salem 電廠等，另國內核二廠 1 號機亦曾採用功率遞減運轉。

台電公司之「核三廠 1 號機週期 28 功率遞減運轉評估報告」，係依法規要求提出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評估項目，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

台電公司規劃核三廠 1 號機週期 28 滿載運轉至週期末控制棒全出且反應爐冷卻水硼濃度達 10 ppm 時，爐心功率藉由調降汽機負載目標值使一次側溫度與二次側溫度平衡，逐漸遞減功率，將機組由滿載功率(即 2822 MWt)依運轉策略降載運轉直到執照屆期日為止，為期約 40 天；功率預估由 100%額定功率遞減至 63%，機組隨即依運轉操作程序，插入控制棒停機，停止運轉。

台電公司依核三廠過去運轉經驗預估開始功率遞減時間為 113 年 6 月 17 日，開始功率遞減運轉時控制棒維持全出，不再調

整反應爐冷卻水硼濃度，採逐步調降發電量配合反應爐輸出功率，維持反應爐運轉；在遞減至 90%功率時將以加硼及插入控制棒方式，使機組依正常速率降載至 80%功率，再以抽出控制棒或樹脂吸附硼加入正反應度，維持機組 80%功率穩定運轉數日，當反應爐冷卻水硼濃度再次降低達 10 ppm 時，則再次採調降發電量配合反應爐輸出功率之遞減運轉方式，直至機組運轉執照屆期日。

送審報告附件 2 列表比較核三廠 1 號機額定功率與功率遞減時之運轉參數，核三廠終期安全分析報告中，已針對 0~100%功率可能的運轉參數變化進行分析，可確保在假想暫態過程各參數變化均不會超過分析限值。流程輻射偵測與廠區環境輻射偵測比對結果對環境無不利影響。

(二)功率輸出控制評估

此部分敘述核三廠規劃 1 號機週期 28 功率遞減運轉期間，關於爐心功率分布及熱水流參數的控制策略。

有關爐心功率分布的控制策略，功率 100%至 90%及功率 80%至 63%之遞減運轉期間，二次側負載配合一次側逐步調降，爐心功率不會有大幅變化或重新分佈的現象。功率 90%至 80%期間以正常速率(15%/hr 以內)降載，藉由插入控制棒及提升反應爐冷卻水系統(Reactor Coolant System, RCS)硼濃度二者相互配合，以避免軸向功率偏差(Axial Flux Difference, AFD)變動幅度過大導致軸向功率振盪之可能；機組隨後維持功率 80%運轉數天，期間可能因軸向功率分布不均勻，若發生軸向功率振盪時，則須依程序操作控

制，使得軸向功率振盪逐漸收斂。

有關熱水流參數的控制策略，調壓槽壓力、反應爐冷卻水系統平均溫度，以及反應爐冷卻水系統總流量等三項受運轉規範限制之參數，在遞減運轉期間與 100 % 功率運轉時相同。

核三廠依該廠運轉經驗並參考國外業界技術文件，於程序書「非緊急操作之加硼、稀釋與控制棒反應度控制指引」納入週期末遞減運轉操作程序及注意事項。

(三)一次側系統組件衝擊評估

有關核三廠反應爐功率遞減運轉對一次側系統組件之衝擊，台電公司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；評估之設備組件包括控制棒、控制棒驅動機構、爐內組件、調壓槽及進水管路、反應爐冷卻水泵(Reactor Coolant Pump, RCP)、蒸汽產生之相關考量、一次側水化學考量及汽機蒸汽流量與壓力儀器控制等。

對於控制棒中子吸收劑量，台電公司分析於功率遞減運轉期間的控制棒中子吸收劑量在管制限值內對於燃料組件中的鋳合金「控制棒導管」，週期末最大燃耗未超過燃料佈局設計準則，不會有控制棒導管彎曲，使控制棒無法完全插入之疑慮。

對於控制棒驅動機構，台電公司分析於功率遞減運轉期間控制棒置於接近全出位置，抽棒、插棒操作頻率與滿載運轉時相當，評

估控制棒驅動軸及控制棒導管不會因此異常增加磨損。

對於爐內組件，台電公司分析於功率遞減運轉期間，反應爐內冷卻水流量不變，無明顯增加熱力及機械疲勞循環之影響。

對於調壓槽及進水管路，台電公司分析於功率遞減運轉期間，進水流量之溫度、壓力變化朝單一方向緩慢下降，環境因素對組件影響有限。調壓槽壓力不會有明顯變化，噴灑閥及加熱器之保護機制與正常滿載運轉狀況相同。

對於反應爐冷卻水泵，台電公司分析於功率遞減運轉期間與正常運轉期間相當，對該泵的密封件之侵蝕/腐蝕沒有影響。

對於蒸汽產生器，台電公司分析於功率遞減運轉期間蒸汽產生器一次側流量維持不變，二次側的主飼水泵及飼水控制閥隨著功率自動調節轉速及開度，飼水控制系統可穩定監控運轉狀態，維持蒸汽產生器水位穩定，蒸汽產生器交換管的熱力循環(Thermal Cycling)次數不會增加。

對於一次側水化學控制系統，台電公司分析於功率遞減運轉期間 pH、溶氫濃度可以控制，化學容積控制系統中的除礦器保持置入使用狀態，對於 RCS 水質及化學雜質之影響輕微。

對於一次側水處理系統，台電公司評估由 90% 功率降載至 80% 功率期間所需硼酸溶液加入量仍在水處理系統的能力內；維持 80% 功率穩定運轉期間，以樹脂床調降 RCS 硼濃度，不會額外產生廢液。

對於汽機蒸汽流量與壓力儀器控制，台電公司於功率遞減運轉期間依據核三廠程序書有關負載升降注意事項，規劃功率遞減達90%後，以正常速率(15%/hr 以內)降低功率至80%。降載期間，運轉人員將持續監視汽輪發電機相關參數。

(四)發電設備考量

台電公司針對核三廠發電設備之重要組件，如主汽機系統、冷凝水泵、飼水泵與飼水泵汽機、飼水加熱器、汽水分離再熱器(Moisture Separator Reheater, MSR)、冷凝器、蒸汽管路、洩水管路、二次側水化學、發電機系統等，進行功率遞減運轉對系統之影響評估，確認上述各設備組件可在該期間運作正常。

機組由額定功率遞減運轉期間，蒸汽壓力、溫度、冷凝器背壓與轉子乾溼區域不會大幅度變化，汽機轉速維持在1800 rpm，無應力及振動問題。依據核三廠程序書有關負載升降之注意事項，主蒸汽管路在85%功率左右可能會有振動增加問題，因此避免在85%功率附近長時間停留，將以行政管制進行管控。功率遞減期間，仍維持由汽機控制閥控制蒸汽流量，僅閥位開度較滿載運轉時略低，且蒸汽流量隨功率遞減變化緩慢，管閥與控制閥不會因開關頻繁導致磨損。

機組由額定功率遞減運轉期間，冷凝水泵與飼水泵流量仍可維持穩定。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，汽機轉速仍遠離臨界轉速3500 rpm區域，故冷凝水泵、飼水泵與飼水泵汽機可維持正常運轉。

機組由額定功率遞減運轉期間，飼水及其蒸汽流量、主蒸汽及再熱蒸汽流量均置於自動控制且低於滿載運轉，故飼水加熱器與汽水分離再熱器之殼體、管束及安全閥等均可維持正常運轉。

機組由額定功率遞減運轉期間，核三廠保持 4 台循環水泵運轉，蒸汽排放系統各排放閥(汽機旁通閥及大氣排放閥)保持關閉不使用，不會發生管路、主冷凝器鈦管或槽體磨損現象。

機組由額定功率遞減運轉期間，壓力與溫度變化速度緩慢且變動幅度不大。主蒸汽仍維持飽和蒸汽，不會引發劇烈暫態而導致蒸汽管路雙相流。此外，各洩水管路均設計配置流量控制閥，可隨流量變化而調整開度，並補償因熱洩水產生微量汽泡而增加的流阻，可以避免加熱器與洩水槽因洩水不及而水位上升至高水位；各洩水槽與加熱器均設計配置旁通閥，當遭遇劇烈暫態時，開啟旁通閥即可將熱洩水導向冷凝器，避免熱洩水在管路內閃化或發生雙相流。

機組由額定功率遞減運轉期間，二次側系統水中腐蝕產物及雜質數量不會顯著增加，樹脂更換頻率亦無須增加。蒸汽產生器沖放系統仍持續運轉以淨化水質，化學雜質不致有明顯改變。此外，核三廠線上水質監測系統可進行連續監測，與 100% 功率時相同，故功率遞減運轉對二次側水化學並無影響。

有關發電機系統，台電公司依據美國電力研究所 EPRI-3002002612，對發電機轉子、定子、線圈溫度及系統循環負載等進行評估。台電公司評估確認系統無持續性負載循環變化之狀

況，不會發生轉子溫度不平衡，定子線圈不會增加熱疲勞負荷，不會發生線圈軸向膨脹磨損或界面材料疲勞負荷。

(五)運轉考量

台電公司針對核三廠 1 號機功率遞減與滿載運轉之差異，分別就機組運轉及環境影響等兩方面進行評估。在功率遞減運轉期間，核三廠運轉人員除可依循程序書進行操作外，亦於平常訓練加入遞減運轉訓練及模擬器演練，使運轉人員熟悉遞減運轉過程，運轉員監視的參數與滿載功率運轉時相同，不會增加運轉員負擔。

此外，核三廠 1 號機運轉期間控制棒維持全出，主要是以調整反應爐冷卻水硼濃度維持機組功率運轉，當反應爐冷卻水硼濃度達 10 ppm 時不再以調整硼濃度維持機組滿載功率運轉，開始採行遞減功率運轉；依台電公司規劃，採降低反應爐功率方式，在遞減至 90% 功率時將以插入控制棒及加硼方式，以正常速率(15%/hr 以內)降載至 80% 功率後，維持 80% 功率穩定運轉數日；期間以樹脂吸附反應爐冷卻水中硼離子方式降低硼濃度。功率遞減運轉期間，不會增加放射性廢料處理量，亦不會改變廠區環境之輻射劑量，對環境沒有造成明顯額外的影響。

(六)運轉操作程序

當核三廠 1 號機週期 28 進入週期末爐心功率逐漸遞減時，由於反應器冷卻水溫度變化，預期軸向功率偏差會略為往正的方向移動，運轉員將監視一、二次側溫度變化，在控制軸向功率偏差於限值內的目標下，緩速降載。

反應爐上下部(軸向)功率的變化差異，即軸向功率偏差(AFD)，會引起氙毒(Xenon)的振盪，進而引發 AFD 的週期性振盪。若 AFD 出現軸向振盪現象，則須於合適的時機調整控制棒位置，減緩 AFD 的振盪幅度，以避免機組因 AFD 超出運轉技術規範 3.2.3 節之允許運轉區而限制負載。

台電公司依循既有程序書之負載升降、非緊急操作之加硼、稀釋與控制棒反應度控制指引等作為降載操作之依據，維持 AFD 於限值範圍，並加強運轉人員對相關運轉參數之監測。台電公司並已規劃測試程序書「爐內中子通量分佈量測及爐內核儀可用性驗證」之執行時間，其餘維護及測試程序書均不受本次功率遞減運轉之影響。

三、審查情形

台電公司提出之「核三廠 1 號機週期 28 功率遞減運轉評估報告」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評估項目。另外，台電公司亦參考美國電力研究所 EPRI-3002002612 提出評估與比對結果。審查小組針對前述報告進行審查，共召開 4 次審查會議，並提出 118 項審查意見，分別就審查情形說明如下：

- (一)審查小組對於功率遞減運轉國外案例，分別提出 I-K-4、I-H-17、I-L-2 與 I-L-9 等審查意見，請台電公司就同屬西屋公司設計型式核電廠之功率遞減運轉案例詳細研析，提出國外核電廠評估要項及美國核

管會安全審查結果，並與送審報告評估內容比對。台電公司答覆說明在美國核管會所公布美國核電廠每日歷史運轉狀態中，若該機組正經歷遞減運轉，「Reason or Comment」欄位會註明 Coastdown。在 2019-2022 年間有約 10 座機組進行週期末遞減運轉，其中 Indian Point Nuclear Generating Unit 2、Salem Nuclear Generating Station, Unit 1 與 Arkansas Nuclear One, Unit 1 三座機組遞減運轉超過 1 個月。比對業界遞減運轉要求，美國壓水式核電廠同業組織(Pressurized Water Reactor Owner's Group, PWROG)技術文件針對遞減運轉期間 T_{avg} 與 T_{ref} 溫差建議應儘可能維持於 0.1°F 範圍內，而核三廠遞減運轉期間，採行原廠家(西屋公司)之建議說明，依美國業界技術文件做法，維持 T_{avg} 與 T_{ref} 溫差不超過 1°F 。台電公司已就各項審查意見提出答覆說明，答覆內容經審查可接受。

(二)審查小組對於核電機組遞減運轉與過往運轉經驗，提出 I-C-3、I-E-2、I-E-3、I-H-1、I-H-2、I-H-3、與 I-L-1 等審查意見，請台電公司說明何為遞減運轉，歷次與本次遞減運轉之差異。台電公司答覆說明，週期末遞減運轉係機組在週期長度超過「滿載能力終期」後，無法維持全功率但仍繼續運轉，藉此推遲燃料填換大修並最大化發電量的一種運轉策略。核三廠過往於 1 號機週期 23 與 2 號機週期 24 分別有 6.25 天與 9.71 天的遞減運轉經驗。針對功率遞減運轉時程與重要運轉參數變動評估，台電公司進一步說明依過往運轉經驗遞減運轉期間每日約降低 0.9% 功率，週期 28 推算約於 6 月 17 日前後開始遞減運轉(實際以反應爐冷卻水達 10 ppm 時間為準)，在運轉

執照屆期前反應爐功率預估為 63%，台電公司將以安全分析週期 28 燃耗上限，或機組執照屆期日，做為遞減運轉停止條件。針對遞減運轉最終功率、燃耗值，台電公司進一步說明核三廠(壓水式機組)遞減運轉終止點並非功率，而是停機時的爐心燃耗值，故核三廠 1 號機遞減運轉終止之實際燃耗值不超過爐心再填換安全分析報告燃耗上限值。對於暫態之應變處理，台電公司進一步說明如果發生非預期的管路劇烈振動、控制不穩等狀況時，先由該管路上、下游的設備參數研判，找出可能的變動來源，適時以手動介入調整控制以恢復穩定；若管路振動劇烈，其處置方式為降載至振動較小的功率。台電公司已就審查意見提出答覆說明並反應在報告中，答覆內容經審查可接受。

(三)審查小組針對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比對，提出 I-H-11、I-M-13 與 I-N-1 審查意見，請台電公司說明前述之比對結果。台電公司答覆說明在燃料完整性良好且通風過濾系統正常運轉的情形下，流程輻射偵測空氣活度監測值與環境輻射偵測呈穩定且數值皆在正常範圍內變動，並不隨功率變化而有所改變。針對報告所檢附之低功率運轉的輻射偵測資料，台電公司進一步說明資料來源為 1 號機週期 27 機組降載期間之即時監測資料。台電公司已就審查意見提出答覆說明，答覆內容經審查可接受。

(四)針對遞減運轉期間對於緩和劑溫度係數(Moderator Temperature Coefficient, MTC)之影響，審查小組提出 I-B-1、I-H-15 等意見。台

電公司答覆說明，整體而言，隨著爐心燃耗的增加，緩和劑溫度係數的數值愈負，並在分析結果指出功率遞減運轉末期時，MTC 符合運轉技術規範要求。台電公司並使用程序模擬週期末燃耗值 24284 MWD/MTU、功率 60%、控制棒全出的爐心狀態下之 MTC，計算結果仍符合運轉規範對爐心末期 MTC 之要求；依 1 號機週期末 MTC 測試於 113 年 4 月 3 日 RCS 硼濃度 300 ppm 之 MTC 測量結果，加上遞減運轉期間變化量後，RCS 硼濃度 300 ppm 之 MTC 仍符合運轉規範偵測試驗要求。台電公司已就各項審查意見提出答覆說明，答覆內容經審查可接受。

(五)審查小組對於遞減運轉期間機組之安全裕度，提出 I-B-4、I-B-5 與 I-M-12 等審查意見，請台電公司提出說明；台電公司答覆說明，核三廠終期安全分析報告已針對 0~100% 功率運轉條件下，可能由過溫 ΔT (OT ΔT) 跳脫的 condition II 事件(例如爪型控制棒元件 bank withdrawal at power)進行分析，佐證現行 OT ΔT 設定點足以確保發生 condition II 事件時，最熱燃料之最小偏離核沸騰比值大於其安全分析限值。終期安全分析報告也對 0~100% 功率可能因過載 ΔT (OP ΔT) 跳脫的 condition II 事件進行分析，例如 main steam line break at full power，佐證現行 OP ΔT 設定點可確保暫態之線性熱產生率小於限值，因此運轉於較低功率發生 condition II 事件時不會有過功率，亦即不會有燃料中心熔化疑慮。台電公司已就各項審查意見提出答覆說明，答覆內容經審查可接受。

(六)對於功率 90% 降至 80% 期間之操作方式，審查小組提出 I-B-8、

I-C-4、I-C-7、I-C-9、I-F-4、I-H-18、I-M-1 及 I-M-4 等意見，有關功率 90%至 80%之運轉操作係於 1 小時內快速降載達成，請台電澄清評估報告中係以「插入控制棒」或以「提高反應爐冷卻水系統硼濃度」為優先。台電公司答覆說明功率 90%至 80%期間係以正常速率(15%/hr 以內)降載，「插入控制棒」與「提高反應爐冷卻水系統硼濃度」兩者相互配合，操作方式概為：(1)設定汽機欲降低之負載目標，汽機開始降低負載；(2)批次加入硼酸降載，插入控制棒控制軸向功率偏差(AFD)；(3)觀察爐心狀況(如：AFD、溫度、功率、氙毒等)；並重複(1)至(3)直到降載至功率 80%。台電公司已就各項審查意見提出答覆說明，答覆內容經審查可接受。

(七)對於功率遞減運轉期間軸向功率偏差(AFD)部分，審查小組提出 I-B-2 及 I-C-12 等意見，有關 AFD 每天約變化+0.5%，請台電公司說明週期末遞減運轉期間是否有可能超出放寬軸向功率偏離度控制帶(Relaxed Axial Offset Control, RAOC)，並檢討以每天增加 0.5%來預估 AFD 變化的方式是否恰當。台電公司答覆說明 AFD 增加幅度與功率改變幅度較相關，評估報告改以「0.56 % AFD / % power」估算 AFD 增加幅度，經估算整個遞減運轉過程功率 100%至 63%的 AFD 變化，AFD 逐漸接近 RAOC 右限值，遞減運轉最終 AFD 餘裕仍有+1.29%，尚未進入運轉技術規範之限制運轉條件；值班人員可透過「AFD 即時監視畫面」持續監視 AFD。若 AFD 與 RAOC 右限值相距僅剩 0.5%，即將進入運轉技術規範之限制運轉條件前，可插入控制棒以壓制 AFD 之增值。有關功率遞減運轉期間 AFD 逐步增

加之原因，台電公司進一步說明，隨著爐心燃耗增加及硼濃度的減少，MTC 之負值逐漸增大，又功率降低時，爐心上部溫度的下降幅度大於下部的下降幅度，因此爐心上部加入的正反應度比下部多，以致爐心軸向功率分佈會向爐心上部偏移，致使 AFD 增加。

有關讓 AFD 增加或減少的參數，請台電公司進一步澄清說明。台電公司答覆說明，功率遞減運轉期間 AFD 增加的因素有：功率的降低、控制棒抽出；AFD 減少的因素有：控制棒插入。有關功率遞減運轉期間是否需要介入控制 AFD 的增加，台電公司進一步說明，功率遞減運轉期間，AFD 會自然增加，若控制得當，則不預期會出現氙(Xe)振盪；依 Xe 振盪發生與否，採用二種不同的 AFD 建議範圍：(1)無 Xe 振盪，「實際 AFD」與「AFD 目標值」相差的建議範圍 $\pm 3\%$ ，超出範圍時依程序書「軸向功率偏差目標值的決定」更新 AFD 目標值；(2)Xe 振盪，「實際 AFD」與「AFD 目標值」相差的建議範圍 $\pm 5\%$ ，超出範圍時視當時的機組狀況，選用合適的方式(如：汽機負載、控制棒、RCS 硼酸濃度等)，儘量維持 AFD 在建議範圍內，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，答覆內容經審查可接受。

(八)對於功率遞減運轉期間軸向功率偏差(AFD)之震盪控制需澄清說明部分，審查小組提出 I-C-13、I-C-16、I-F-4、I-H-14 及 I-K-7 等意見。有關 AFD 振盪原因及特徵(包含其震幅、週期長度)，以及氙毒(Xenon)濃度變化對爐心功率的影響，台電公司答覆說明穩定運轉時，AFD 會穩定在一個值，Xenon 濃度分布亦處於平衡狀態；當爐心功率由

90%以正常速率降載至 80%，會先有 Xenon 增建及後續 Xenon 消滅的現象；功率下降時，爐心上半部的溫度下降幅度較下半部為大，因為週期末 MTC 為負值，故爐心上半部加入的正反應度較下半部為高，導致 AFD 往正方向移動；而上下半部功率的變化會引起 Xenon 振盪，進而引起 AFD 的變化。控制 AFD 變化的方法如下：(1)AFD 變化趨勢往正方向(爐心上半部)移動時，插入控制棒以消滅振幅；(2)控制棒留置爐心，等待振盪趨勢反轉；(3)AFD 變化趨勢往負方向(爐心下半部)移動時，抽出控制棒以消滅振幅。氙毒濃度變化週期約為 24~28 小時，氙毒濃度隨著時間週期性變動時，爐心局部功率也會隨著週期性變動，運轉員便可觀測到 AFD 週期性振盪的趨勢；核三廠已對各值班人員進行訓練，在程序書的指引下建立共同的 AFD 震盪控制操作方式。

有關需介入的 AFD 震盪幅度，台電公司進一步說明 AFD 在正常滿載運轉期間之介入時機係與目標值相差超過 5%且觀察 AFD 趨勢有振盪跡象時；功率遞減運轉期間介入的參考值依程序書「非緊急操作之加硼、稀釋與控制棒反應度控制指引」縮限至 3%。

有關評估報告之敘述，請電廠說明為何調降發電量的較佳時機可選擇在 AFD 振盪往負時。台電公司答覆說明功率下降時，爐心上半部的溫度下降幅度較下半部大，因為週期末 MTC 為負值，爐心上半部加入的正反應度較下半部為高，故可使 AFD 往正方向移動，因此在 AFD 振盪往負時調降功率，可以使 AFD 往正方向移動，補償 AFD 的變化，減少 AFD 的振盪。台電公司已就各項審查意見

提出答覆說明，答覆內容經審查可接受。

(九)對於功率遞減運轉期間之爐心流量需澄清說明部分，審查小組提出 I-B-7、I-C-15 及 I-C-18 等意見，有關與國際原子能總署報告 NP-T-3.23 第五章各節評估比對結果，核三廠爐心監視程式未使用 Coupling Coefficients，請台電公司說明如何產生 3-D power/flux profiles，以及其是否能反映爐心的即時變化。台電公司答覆說明 BEACON 程式係使用 NEXUS / PARAGON / ANC9 程式集，根據爐心參數(燃耗、硼濃度、燃料溫度、緩和劑溫度等)分別以表格化方式建立截面瞬時或歷史相關分支(Branch)資料，以參數化方式產生截面資料庫(Cell Data File)，並由程式解析粗網格/細網格擴散方程式，建立 3D nodal core model，此 NEXUS / PARAGON / ANC9 程式集已獲得美國核管會核准及我國核能安全委員會核備；核三廠爐心監視程式為原廠家(西屋公司)基本版的 BEACON-INCORE，無線上連續監視功能，僅需每 31 個有效全功率天執行程序書「爐內中子通量分佈量測及爐內核儀可用性驗證」並建立 BEACON 預估模型即可，無需提供反應器爐心的即時變化。

有關 BEACON-INCORE 如何掌握功率遞減運轉期間之 power and burnup profile，請台電公司澄清說明。台電公司答覆說明核三廠平時即會依實際運轉紀錄(功率、爐心燃耗、控制棒位等)持續擴充 BEACON 模型，遞減運轉期間仍會持續進行。有關功率遞減運轉期間需隨時監測軸向功率偏差(AFD)實際值，請台電公司說明功率遞減運轉期間預估之 AFD 目標值。台電公司答覆說明 AFD 目標

值將依據程序書「軸向功率偏差目標值的決定」，在功率遞減運轉期間每 2~4 天更新一次，針對爐心相對較穩定的期間記錄 AFD 與功率數據，將計算所得之 100% 功率時之 AFD 值數設定於核工應用程式中，即可完成 AFD 目標值之更新設定。針對軸向功率偏差目標帶與運轉技術規範限値之差異，台電公司進一步說明針對 AFD 運轉技術規範限値及行政管制限値，在正常運轉期間的範圍為「目標值 $\pm 5\%$ 」，遞減運轉期間縮減為「目標值 $\pm 3\%$ 」，送審報告附表 1 有提及關於監視參數 AFD 目標值的查證方式說明。台電公司已就各項審查意見提出答覆說明，答覆內容經審查可接受。

- (十)對於功率遞減運轉期間之反應爐冷卻水平均溫度(Tavg)與二次側參考溫度(Tref)之控制，審查小組提出 I-C-14、I-K-6 及 II-B-2 等意見。有關 Tavg 與 Tref 之差值範圍，美國業界技術文件的經驗是：維持在 $\pm 1.0^{\circ}\text{F}$ ($\pm 0.55^{\circ}\text{C}$)內，PWROG 技術文件的經驗是：可能的話，維持在 $\pm 0.1^{\circ}\text{F}$ ($\pm 0.06^{\circ}\text{C}$)內，請台電公司澄清此兩者差異；台電公司答覆說明，核三廠 Tavg 之溫度錶數值僅可判讀到小數點後第 1 位，而 0.06°C 已經是小數點後第 2 位，故未採納該 PWROG 技術文件的建議差值；另詢問原廠家(西屋公司)有關國外電廠之作法，原廠回應「維持 Tavg 與 Tref 相差 0.1°F 以內」是理想目標，並非各壓水式核電廠通用的強制要求，由於各核電廠有不同的控制系統及多樣的儀器不準度，所以該 PWROG 技術文件使用了「if feasible」一詞；「Tavg 與 Tref 相差之目標值」可在「電廠可合理達成的目標」與「避免控制棒動作的溫差(核三廠為 1.5°F)」之間選擇。有關功率變動時，爐

心上半部的溫度變動幅度較爐心下半部為大，請台電公司進一步說明；台電公司以圖示澄清說明。台電公司已就各項審查意見提出答覆說明，答覆內容經審查可接受。

(十一) 對於功率遞減運轉期間對一次側系統組件衝擊評估章節，審查小組報告所提相關組件敘述提出相關意見如下。

有關控制棒的中子劑量，審查小組提出 I-E-5、I-C-8、I-L-10 等意見，台電公司答覆說明控制棒的中子劑量使用「週期末最大燃耗」進行評估，週期 28 結束後之預估累計中子劑量符合接受標準。

有關對 RCP 之影響，審查小組提出 I-H-5 等意見，台電公司答覆說明美國電力研究所 EPRI-3002002612 並無針對壓水式反應器的 RCP 有任何顧慮，另依國際原子能總署報告內容評估，功率遞減運轉期間功率穩定地遞減，雜質量與正常運轉期間相當，對 RCP 的密封件之侵蝕/腐蝕沒有影響。

有關對於調壓槽噴灑閥及加熱器運轉在遞減運轉期間開關頻率，審查小組提出 I-M-7 意見，台電公司答覆說明核三廠反應爐在功率遞減期間，功率變化 1 天約僅 0.9%，調壓槽壓力不會有明顯變化，與正常滿載運轉狀況相同。

有關一次側水處理，審查小組提出 I-B-6、I-H-6、I-K-1、I-K-5 等項意見，台電公司答覆說明以樹脂床吸附硼酸的方式調降硼濃度，不會額外產生廢液。

對於蒸汽產生器熱交換管結構完整性，審查小組提出 II-G-1 意見，台電公司答覆說明針對熱交換管重新計算，得出之管束最大磨損位置不變，而磨損值仍小於磨損劣化之結構限值，且有相當餘裕。

台電公司已就關於一次側系統組件之各項審查意見提出答覆說明，答覆內容經審查可接受。

(十二) 有關主蒸汽管路在功率 85%左右可能有共振問題，審查小組提出 I-A-1、I-B-3、I-D-1、II-L-1、III-H-1 等審查意見，請台電公司說明。台電公司答覆說明經洽原廠設計廠家貝泰公司，初步回應與核三廠管路設計類似之國外電廠並未發生過管路因振動造成破裂情形，顯見此類設計強度可因應機組負載變動所導致之振動，而不致損害管路結構完整性。此外，管路本身已經固定，其材料強度與管路支架支撐力並不會有顯著變化，故振動原因主要來自於質量改變與所受外力之變化。對於升降載過程中激發出某些共振現象，台電公司提出振動監測及應變方案，觀察到振動時以正常速度變動功率至「無共振頻率之功率」或「確認振動模態為 deflection mode 且振幅小於最大允許值之功率」，本項振動監測及應變方案作為列入後續管制事項追蹤。台電公司已就各項審查意見提出答覆說明，答覆內容經審查可接受。

(十三) 對於功率遞減運轉期間對於二次側系統及組件之影響，相關審查意見及台電公司回復說明如下。

有關主蒸汽管、MSR 二級加熱管路與低壓汽機進汽管之溫度值，在滿載運轉時與機組降載時之區別，審查小組提出 I-C-10 等審查意見。台電公司答覆說明遞減運轉期間主蒸汽管壓力會稍微上升，蒸汽管路溫度亦會稍微提高，但對流體加速腐蝕效應沒有影響。

有關 MSR 控制部分，審查小組提出 I-E-8、I-E-9、I-H-7、I-H-8、I-K-9 等項意見。台電公司答覆說明 MSR 蒸汽控制之大閥在降載運轉過程不會來回反覆開關；小閥控制則以既定的控制曲線進行調節；系統各項參數變動較機組升降載過程緩慢，控制系統不會有控制不穩定的問題。

有關飼水泵控制部分，審查小組提出 I-A-3、I-E-10、I-F-3 等意見。台電公司答覆說明在功率 63~100%區間，控制曲線無轉折點，故遞減運轉期間飼水控制可正常操作；此外，主飼水泵汽機在轉速於 3700~3500 rpm 間區段將於 48 秒內通過，避免轉子結構與葉片結構產生不良影響或損壞。

有關發電機評估部分，審查小組提出 I-I-1 等意見。台電公司答覆說明對於發電機轉子而言，功率遞減不會產生功率劇烈變化，可避免熱疲勞負荷；磁場電流控制方面，自動電壓調整器有最大及最小激磁限制功能，可確保轉子磁場電流在穩定範圍內，不會發生轉子溫度不平衡之情形；發電機定子方面，功率遞減運轉沒有負載劇烈變動，不會發生線圈磨損或界面材料疲勞負荷之狀況。

台電公司已就關於二次側系統及組件之各項審查意見，提出答覆說明，答覆內容經審查可接受。

(十四) 審查小組針對遞減運轉期間設備組件之監測，提出 I-H-9、I-G-1 與 I-M-6 等意見，要求台電公司說明設備組件狀況。台電公司答覆說明依據核三廠程序書執行組件疲勞使用因子限值監測，預估至核三廠 1 號機週期 28 結束前，皆符合接受標準；另有關反應爐外中子偵檢器皆在使用期限內，且遞減運轉前 100% 功率與遞減運轉至 80% 功率時，亦會執行反應爐內功率分佈掃描，並依功率分佈校正反應爐外中子偵檢器，以確保運轉人員能通過爐外核儀即時掌握正確的爐心功率分佈狀態。針對洩水管路監測方面，台電公司答覆說明巡視頻率、跡象，當發生水位警報時，值班人員將依警報程序書及異常操作程序書進行處置。台電公司已就各項審查意見提出答覆說明，答覆內容經審查可接受。

(十五) 審查小組針對程序書在功率遞減運轉期間的適用性、運轉人員訓練規劃及應變方式、機組定期測試做法等，提出 I-C-17、I-E-11、I-F-1、I-G-4、I-G-5、I-K-3、I-M-9 及 I-M-11 等意見。台電公司答覆說明經檢視電廠異常操作程序書及警報程序書，均適用於遞減運轉期間因應各種異常狀況之處理；台電公司進一步說明規劃課程包括核三廠 1 號機遞減運轉功率規劃、遞減運轉操作方式、經驗回饋、運轉重要參數監視及查證方式、參數偏離參考範圍時之對應措施等。

對於功率遞減運轉期間之參數監測，請台電公司說明監控

低壓汽機進汽壓力之原因、再檢視需納入監測之參數以及檢討參數記錄方式等。台電公司答覆說明是為防止各進汽壓力落差過大造成低壓汽機進汽不平衡而查證進汽壓力是否穩定，需監測之參數經清點後，將現有程序書未涵蓋之項目列入送審報告附表 1 紀錄查證。

針對程序書中獨立監督反應度操作之資深反應器運轉員規定，請台電公司說明功率遞減運轉期間之適用性。台電公司答覆說明此次遞減運轉期間控制室內獨立監督反應度操作之資深反應器運轉員由當值值班經理擔任，在 90 %至 80 %功率降載期間，核三廠會排除其他不必要之排程工作，以利值班經理執行獨立監督之責。

針對遞減運轉期間定期測試規劃與影響，台電公司答覆說明有關定期測試皆依排程進行測試，惟主汽機控制閥測試需要在機組功率 81%以下測試，依目前排程時間屆時核三廠 1 號機功率已達 80%功率，故測試不受影響。針對爐心數據量取時，保持功率穩定之作法，台電公司進一步說明 flux map 執行時機選擇在功率維持 80%期間執行，並在保持功率穩定期間視需要調整控制棒棒位及 RCS 硼酸濃度。

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，分別從核三廠 1 號機週期 28 功率遞減運轉之時程與參數變動、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，以確保核三廠 1 號機週期 28 末期功率遞減運轉安全。