

NRD-SER-111-02

「核一廠除役過渡階段前期停機冷卻  
系統停轉備用 STP-109-01 測試報告」  
安全審查報告

行政院原子能委員會核能管制處

中華民國 111 年 07 月 26 日



# 目 錄

摘 要.....	ii
第一章 測試內容與結果.....	1
第二章 測試結果與安全分析報告符合性.....	5
第三章 安全分析報告審查意見與測試結果比對.....	7
第四章 測試作業規範符合性查證.....	10
第五章 審查總結.....	11

## 摘 要

核一廠兩部機分別於 107 年 12 月 5 日及 108 年 7 月 15 日運轉執照屆期進入除役，2 部機組爐心內之用過核子燃料均未能移出爐心，而維持類似運轉期間之大修狀態，並藉由運轉餘熱移除系統停機冷卻功能（Residual Heat Removal Shutdown Cooling, RHR S/D cooling）移除爐心內用過核子燃料的衰變熱。進入除役期間，用過燃料衰變熱已逐漸降低，因此台電公司於 109 年 5 月提出安全分析報告向本會申請 RHR 系統停轉備用，擬改以用過燃料池冷卻系統（Spent Fuel Pool Cleanup Cooling System, SFPCCS）及爐水淨化系統（Reactor Water Cleanup System, RWCU）作為替代，並規劃特殊程序書 STP-109-01，供運轉人員操作依循。本會針對前述安全分析報告組成專案審查團隊，並於 110 年 2 月 2 日審查同意，台電公司自 110 年 3 月 29 日至 110 年 9 月 30 日期間依特殊程序書執行測試，並於 110 年 12 月向本會提報測試結果報告。

本會於接獲台電公司前述測試結果報告後，即邀請原參與本案安全分析報告審查之專家學者協助審查，審查期間召開二次審查會議，並提出 16 項審查意見，確認台電公司均已澄清各項審查意見，經就台電公司送審報告內容及對審查意見答覆說明，電廠測試結果可符合台電公司所提安全分析報告之假設與計算，審查結果可以接受。

# 第一章 測試內容與結果

## 一、概述

台電公司核一廠 STP-109-01 「餘熱移除冷卻功能停止連續運轉期間爐水溫度與用過燃料池水溫變化之記錄作業」測試期程自 110 年 3 月 29 日至 110 年 9 月 30 日止，測試期間台電公司依據規劃總共驗證用過燃料池冷卻系統 (SFPCU) 三種運轉組態如下，同時電廠運轉人員持續依據除役技術規範要求記錄爐水溫度。

1. 一台 SFPCU cooling pump + 兩組 SFPCU 熱交換器
2. 一台 SFPCU cooling pump + 一組 SFPCU 熱交換器
3. 兩台 SFPCU cooling pump + 兩組 SFPCU 熱交換器

前述規劃測試除提供運轉人員熟悉三種運轉組態之操作外，並驗證三種 SFPCU 系統設備運轉組態下，海水溫度對於爐心及用過燃料池水溫度之影響。測試結果顯示測試期間海水溫度最高為 29.6°C，同時於前述最高海水溫度期間，核一廠僅使用 1 台 SFPCU cooling pump + 1 組 SFPCU 熱交換器，仍能維持爐水溫度低於 40°C，符合程序書溫度限值 51.6°C 之要求，專案審查團隊針對台電公司送審之測試結果報告，審查其測試數據與步驟是否符合原先安全分析報告之分析內容與承諾事項。

## 二、審查發現

審查小組提出審查意見，請台電公司針對測試報告內有關爐心溫度 (Tcore)、爐水溫度、爐穴水溫與用過燃料池水溫等名詞所代表的意義，請台電公司就相關名詞所代表意義提出說明。

台電公司答覆說明已於測試報告補充相關資料與說明。台電公司答覆內容，經審查可以接受。

審查小組提出審查意見，針對報告資料測試期間海水溫度資料最高 29.6°C 左右，與以往海水溫度曾達 33°C 有所落差，且依運轉經驗電廠若使用廢料鍋爐則聯合廠房冷卻水系統（CSCW）水溫會增加約 3-4°C，因此若同時使用多項設備時，請台電公司說明爐水溫度上升是否仍會在預估範圍內。

台電公司答覆說明在採計海水最高溫度下，以最極端的情況讓廢料鍋爐及緊急柴油發電機額定負載同時進行運轉，則 CSCW 水溫可能上升 7°C，加計考量海水溫度增加 3°C 期間，若電廠此時僅使用 1 台 SFPCU 泵+1 組熱交換器移除所有熱量，則爐水溫度經評估計算可能會上升 10°C，以停機時間較短之 2 號機爐心燃料餘熱做為評估標的，爐水溫度約為 48.1°C 則距離 51.6°C 之限值仍有約 3.5°C 餘裕。若爐水溫度接近限值時，運轉員仍可藉由改變運轉組態例如 1 台 SFPCU 泵+2 組熱交換器，或是使用 2 台 SFPCU 泵+2 組熱交換器因應；此外電廠另有兩串熱移除能力更高的新增燃料池冷卻系統（SFPACS）可供應對。若是完全沒有 SFPCCS 及 SFPACS 系統可供使用，最後尚可啟動停轉備用的 RHR 系統進行爐心冷卻，因此在多重防禦機制下並無安全疑慮。台電公司答覆內容，經審查可以接受。

審查小組提出審查意見，有關台電公司於 109 年夏季海水溫度嚴苛條件下進行測試，請說明未來在極端氣候之狀態下，應如何運用 SFPCU 系統之運轉模式與組態執行爐水降溫。

台電公司答覆說明未來待除役技術規範（PDTS）修改核准後，將增訂相關 SFPCCS 運轉準則於程序書 D205 內，供運轉員能清楚依據爐水溫度值來決定 SFPCCS 運轉策略與方式。台電公司答覆內容，經審查可以接受。

審查小組提出審查意見，針對送審之報告說明廢料鍋爐系統濃縮期間 CSCW 水溫會上升 3-4°C，但由附表相關測試數據顯示 CSCW 水溫上升卻僅約 1.5°C，請台電公司提出說明 1、2 號機爐水溫升溫量不相同。

台電公司答覆說明廢料鍋爐於廢液濃縮期間 CSCW 水溫上升 3~4°C 之假設，係以最嚴苛情況下所作之預估，實際 CSCW 系統水溫上升溫度會因運轉狀態與需求有所不同，而 1、2 號機爐水溫升量並不相同，則主要原因是與兩部機之爐心用過燃料餘熱不同所致。台電公司答覆內容，經審查可以接受。

審查小組提出審查意見，請台電公司針對 SFPACS-B 測試時 1 號機與 2 號機之爐水溫度趨勢相反，且與其他測試結果呈現之趨勢有所不同提出澄清與說明。

台電公司答覆說明 SFPACS-B 測試發生爐水溫度趨勢相反，其主要肇因是 1 號機爐心餘熱較低，而新增燃料池冷卻水系統定期測試時間僅約 1 小時，由數據顯示新增燃料池冷卻水系統運轉期間水溫變化僅 0.1~0.3°C，但溫度感測元件誤差值為 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ，考量儀器精確度、測試區間與數據量測時間點之影響，以及用過燃料池水與爐水兩者幾乎無溫差，導致前述短暫時間可能會發生爐水溫度趨勢相反現象。台電公司答覆內容，經審查可以接受。

審查小組提出審查意見，針對報告敘述依靠自然對流冷卻方式即能維持爐水溫度與燃料池水溫，請台電公司明確說明測試階段期間，相關熱量傳遞主要依靠自然對流之敘述是否適切，並澄清爐穴與用過燃料池間隔離閥是否維持開啟或關閉狀態。

台電公司答覆說明爐心衰變熱的移除主要是藉由爐心與爐穴自然對流及少量 RWCU 運轉帶動爐水循環所達成，並以程式模擬顯示 RWCU 運轉與否對爐心流速並無顯著影響，故熱量傳遞仍以自然對流為主。另整個測試期間因爐水溫度與用過燃料池水溫差 $<3^{\circ}\text{C}$ ，不需要將隔離閥開啟增加兩者之間的聯通水流，因此前述隔離閥於測試期間均一直維持在關閉狀態。台電公司答覆內容，經審查可以接受。

審查小組提出審查意見，針對 RHR 系統於測試期間處於停轉備用狀

態，RHR 系統仍需定期進行測試以驗證設備可用性，請台電公司說明前述設備執行定期測試期間對於爐水水質之影響。

台電公司答覆說明由餘熱移除系統測試期間爐水水質數據，顯示 RHR 系統水泵起動前後，爐水水質未有顯著變化，因此並無明顯之影響。台電公司答覆內容，經審查可以接受。

### 三、 審查結論

針對台電公司所提有關安全評估內容，審查小組就 RHR 系統停轉備用後，現有程序書內容是否足夠運轉人員依循、在最多設備運轉及海水溫度最高狀態下之爐水溫度是否仍符合要求、報告數據與假設狀態與呈現結果不一致，以及測試期間起動 RHR 泵對於爐心水質影響等議題，提出多項審查意見，經台電公司答覆說明、補充資料及修訂報告後，審查結果可接受。

## 第二章 測試結果與安全分析報告符合性

### 一、概述

依據台電公司送審之本案安全分析報告，機組目前之熱源主要包括用過燃料池 (SFP) 及爐心用過燃料的衰變熱，以及 SFPCCS 系統和 RHR 系統水泵持續運轉時推動流體所產生的熱能。而熱沉則包括 SFPCCS 系統和 RHR 系統的熱交換器冷卻功能，以及熱體週邊環境的熱逸散、SFP 與爐穴上方開口處自然對流的熱逸散。依據本案安全分析報告計算結果，僅依靠 SFPCCS 系統即能帶走現有用過核燃料之餘熱，審查小組針對台電公司測試結果與數據進行審查，包含爐心熱水流、溫度與反應爐水質等，並進一步比較測試結果與安全分析報告分析計算之符合性。

### 二、審查發現

審查小組提出審查意見，針對測試報告顯示 2 號機之總衰變熱約 800kW，但總衰變熱比熱交換器所移除的熱多出約 300~400kW，但測試數據顯示爐水溫度仍能維持在某一定值，請台電公司提出說明並補充 1 號機相關數據。

台電公司答覆說明原先採用之熱交換器進口水溫，經計算移除熱量平均約 383 kW，經重新審視除爐水與爐穴水面溫度須考慮外，尚有系統中間管路及環境週溫帶走熱量並未納入計算，因此經重新計算後，移除總熱量約 500~600 kW，較原報告內容評估之總衰變熱比熱交換器所移除的熱多出約 187~287kW。另爐壁及池水面散熱所帶走的熱約 90kW，若再考量溫度感測元件誤差值 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ，可能導致移除之熱量偏差值約為 66kW，最後僅剩餘約 31~131 kW 待移除，至於 1 號機估算之結果，比照 2 號機模式重新計算最後剩餘約 7~107kW 待移除，因此差值並未如原先報告所估之 300~400kW。測試結果最後會達到熱平衡，除了前述因素外，其對於衰變熱及燃耗等之估算過程亦過於保守與高估，例如測試期間相關評估數

據採用 2 號機停機 1500~1600 天的爐心燃料衰變熱功率，但測試期間機組停機天數實際已超過前述評估時之停機天數，2 號機總衰變熱功率經重新估算已由 801.7kW 下降至 786.2kW，另爐壁及池水面散熱之估算亦有諸多保守度。台電公司答覆內容，經審查可以接受。

審查小組提出審查意見，依據台電公司陳報資料，核一廠於測試期間增設爐心燃料區溫度儀，請台電公司提出說明增設之爐心燃料區溫度儀是否經過驗證核准及其誤差範圍。

台電公司答覆說明爐心燃料區之新增溫度感測元件，為先前「台電公司與核能研究所共同發展國內自有核反應器安全分析技術」(TITRAM) 報告期間，即已使用之 T-type 熱電偶，其誤差值為 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ，符合電廠程序書要求。台電公司答覆內容，經審查可以接受。

### 三、審查結論

針對台電公司所提有關安全評估內容，審查小組就 RHR 系統停轉備用測試期間，台電公司原先估算現有用過核燃料餘熱與 SFPCCS 系統熱交換器帶走熱量能力，於測試期間驗證所得數據是否正確及測試期間台電公司所使用之溫度偵測儀器品保與校正等議題，提出多項審查意見，經台電公司答覆說明、補充資料及修訂報告後，審查結果可以接受。

### 第三章 安全分析報告審查意見與測試結果比對

#### 一、概述

台電公司之安全分析報告經本會審查小組審查後共計提出 42 項審查提問，針對台電公司所提測試結果報告，審查小組除審查電廠測試數據外，並針對安全分析報告之結果及對本會審查提問之答覆內容與承諾進行檢視。

#### 二、審查發現

審查小組提出審查意見，請台電公司說明有關測試期間機組爐穴加裝之溫度偵測器，日後是否永久保留或於測試結束後拆除。

台電公司答覆說明因應此次測試，電廠於爐穴所加裝之溫度偵測器及記錄器，將於本案審結後拆除，以淨空爐穴區域避免干擾反應器五樓作業。台電公司答覆內容，經審查可以接受。

審查小組提出審查意見，依據台電公司所附之爐水與爐穴水溫測試數據顯示爐水上下半部溫差約僅  $1.1^{\circ}\text{C}$ ，而目前爐心水流僅有 RWCU 系統仍持續維持運轉及帶動水流循環，請台電公司說明爐心水流量是否足以避免靜滯水流的發生及對爐心材料產生影響。

台電公司答覆說明，依模擬程式分析結果，爐心與爐穴溫差僅約  $1^{\circ}\text{C}$  多，此時爐心冷卻水流速模擬推估約為  $0.42\text{cm/sec}$ (約 15 公尺/小時)，藉由分析結果與電廠此次測試數據比較，兩者數據相近且趨勢一致。此外如果用過燃料池冷卻系統之過濾器樹脂進行預敷更新，則爐水導電度亦同時產生相同明顯改善現象(導電度降低)，因此可推論爐心水流循環並無靜滯現象。台電公司答覆內容，經審查可以接受。

審查小組提出審查意見，此次測試報告之目的主要是驗證爐心燃料衰變熱與電廠用過燃料池冷卻系統移除之熱是否能達成平衡，請台電公司說

明爐心燃料所產生的熱與系統移除的熱，若不處於熱平衡，則系統本身之溫度是否會越來越高或越來越低，若處於熱平衡，則平衡的機制為何。

台電公司答覆說明測試結果只需使用 1 台 SFPCU 泵+1 組熱交換器即可充足地移除用過燃料池及爐心燃料所產生的衰變熱，無累積現象，系統之溫度將會與環境溫度平衡，因此應處於熱平衡狀態。測試期間產生的熱與移除的熱，須考量當下海水溫度、周圍環境溫度、SFPCCS 系統運轉組態與通過熱交換器流量的綜效影響。如果某一瞬間，產生的熱量大於帶走的熱量，爐水溫度就會上升，此時爐水溫度與海水溫度差就會變大，而爐水溫度與海水溫度差與熱交換器移除能力成正相關，因此，帶走熱量將隨之增加，直到帶走的熱量等於產生的熱量，達到新的平衡。本次測試全程採 SFPCCS 定流量方式，也未啟用 RHR 系統，因此，係單純利用上述自然調節之力道來達成動態熱平衡。台電公司答覆內容，經審查可以接受。

審查小組提出審查意見，有關本案在測試期間餘熱移除系統處於停轉備用狀態，報告說明用過燃料池水是以自然對流方式運作，因此池水的熱傳導係數採用自然對流模式進行計算，但當 SFPCCS 系統運轉，請台電公司說明是否有會產生強制水流須進一步考量。

台電公司答覆說明 SFPCCS 系統運轉期間，基本上是由燃料池上方溢流至溢流槽，再由溢流槽經泵取水冷卻後由燃料池上方回水進入用過燃料池，因此 SFPCCS 系統運轉並未產生強制水流，而是依靠自然循環的方式將用過燃料池水衰變熱移出。台電公司進一步利用模擬增加強制對流熱傳係數值進行靈敏度分析，發現其對於總體環境熱移除量影響並不大，因此 SFPCCS 系統運轉是否會產生強制水流，並不會影響測試結果。台電公司答覆內容，經審查可以接受。

### 三、審查結論

針對台電公司所提有關安全評估內容，審查小組就 RHR S/D cooling

停轉備用測試期間，針對爐水溫差不大是否會有爐水靜滯水流問題、RHR 系統進行可用性測試期間對於爐心水質之影響、RHR S/D cooling 停轉備用對於爐心如何達成熱平衡及用過燃料池熱傳效應影響等議題，提出多項審查意見，經台電公司答覆說明、補充資料並修訂報告後，審查結果可接受。

## 第四章 測試作業規範符合性查證

### 一、概述

台電公司核一廠進行 RHR 系統停轉備用測試期間，本會除要求台電公司應落實爐心水溫、水質及反應器廠房 5 樓冷卻風扇運轉組態等測試參數之紀錄外，本會亦訂定相關視察計畫，由本會視察員於測試前後及每日駐廠期間執行現場查證，確認電廠測試紀錄落實情形以及機組狀態。

### 二、視察結果

電廠執行測試期間，本會視察員依據視察計畫執行視察，查證電廠是否均依據承諾事項確實記錄機組爐水溫度與水質等，以及相關重要設備起停或執行定期測試時間，此外，本會視察員亦同步查證核安處駐廠安全小組是否依據承諾執行品保稽查。綜合此次測試期間之視察結果並未有發現不符規定或承諾之情事。

## 第五章 審查總結

本會審查小組針對台電公司送審之「核一廠除役過渡階段前期停機冷卻系統停轉備用 STP-109-01 測試報告」測試結果，與安全分析報告審查意見進行比對，同時亦對測試內容進行檢視與審查後，彙整各章審查結論並總結如下：

1. 電廠安全分析報告評估，單使用 1 串 SFPCCS 系統即能移除機組所有用過燃料所產生之餘熱，藉由此次實際測試數據驗證，在各種運轉組態下爐水溫度距離技術規範要求之安全限值仍有相當之安全餘裕。
2. 針對未來極端氣候變化，運轉人員因應部分，審查小組認為台電公司已建立程序書，運轉人員能及時操作恢復 RHR 系統運轉停機冷卻功能。
3. 有關測試期間爐水單依靠自然對流方式即能維持熱平衡部分，台電公司藉由驗證，爐水、爐穴及用過燃料池三者溫差不大且水質數據變化，說明爐水在 RHR 系統停轉備用期間，可依靠自然對流方式維持熱平衡。
4. 有關本案之燃料總衰變熱數據與 SFPCCS 系統移除熱量之計算比較部分，台電公司說明燃料總衰變熱之計算存有相當之保守度，此外經由測試期間之爐水溫度監測結果，說明燃料總衰變熱與 SFPCCS 系統移除熱量，確實能達到平衡與穩定。
5. 有關 RHR 系統停轉備用狀態下，爐心水流是否會產生靜滯水流問題，台電公司依據程式分析結果，以及測試期間爐水及用過燃料池水溫度兩者之間並未有明顯之溫差情形，說明 RHR 系統停轉備用狀態下，爐心冷卻水流仍有一定之流速，因此爐水並未有靜滯之現象。
6. 後續台電公司尚需進行技術規範修改內容送本會審查，待本會審查同意後，台電公司方能正式將 RHR 系統處於停轉備用狀態。