

第十一章 結論與建議

11.1 結論

核三廠 EPU 的執行，爐心功率的提升會提高反應器急停後的衰變熱，使得在事故發生時壓縮到運轉員的反應時間，增加人為誤失機率，導致 CDF 與 LERF 的升高。以 LERF 與 CDF 重要度大小以及誤失動作允許時間的條件之下，所摘選出的 39 個人為誤失動作中，經過重新討論或計算後，會受到電廠執行功率提升的影響而提高人為誤失機率的人為誤失事件共有 12 個，不受到電廠執行功率影響的人為誤失事件共有 27 個。前述 12 個人為誤失事件的機率增加，會使得 CDF 由原來的 $7.33 \times 10^{-6}/\text{year}$ 升高至 $8.24 \times 10^{-6}/\text{year}$ ，升高約 13 %；而 LERF 則由原來的 $1.69 \times 10^{-7}/\text{year}$ 升高至 $2.43 \times 10^{-7}/\text{year}$ ，升高約 44%。

在 HCR 模式的討論之下，39 個人為誤失動作中，有超過 2/3 的人為誤失事件的誤失機率不會受到執行 EPU 的影響，原因為在使用 HCR 模式來評估人為誤失機率時，決定人為誤失機率的重要參數為誤失事件的允許時間(available time)，若爐心功率提升不影響到允許時間的情況之下，EPU 的執行便不會提高該人為誤失的機率。而允許時間不因爐心功率提升而受到壓縮的原因可歸納為下列幾項：

- (1) RWST 槽空的所需時間不受爐心功率提升之影響。在 LOCA 發生時，緊急爐心冷卻系統的注水能力為決定允許時間的重要因素，根據 MAAP4.0.4 分析核三廠的結果顯示，核三廠的緊急爐心冷卻系統在設計基準上保留了充足的安全餘裕，即使在 120% 的爐心功率之下發生 LOCA 時，緊急安全注水系統仍能提供足夠的水壓與流量來冷卻爐心。在緊急安全注水系統並不需要因爐心功率提升而提高對 RWST 的汲水速率之下，RWST 的水位降低速率並不會因爐心功率提升而加快。因此，由 RWST 槽空速度所決定的允許時間便不受到爐心功率提升的衝擊，與此相關的人為誤失機率即不受影響。以上包括 HR-CNDMLOCA-E06、HR-HHRMLOCA-E07、HR-HOTLEGRC-E08、HR-CNDSLOCA-E06、HR-RWSTRPNH-E23、HR-ECD/CCR、HR-ASI/CCR-S、HR-IFBI/RWST、HR-CCHW-RECOV、HR-RWSTSGTR-E23。

- (2) 電廠組件可靠度不受爐心功率提升之影響。爐心冷卻水泵的失效模式到目前為止依然還無法確定是否與 RCS 的熱流狀態有關，工業界中與學術界較能接受的冷卻水泵失效的機制為軸封注水的喪失，估計冷卻水泵會於失去軸封注水的 30 分鐘後失效。因此，關於冷卻水泵的人為誤失事件中，允許時間均不考慮爐心功率帶來的影響。以上包括 HR-CCP/RHR、HR-CCP/ECD、HR-CCP/SGBNF、HR-CCP/ACCI、HR-ALTCCPCL-E29、HR-FSGI/EDEP、HR-FSGIMSLB-E09、HR-ECNDLOOP-E20；此外，HR-DG5/1H 的允許時間只與 RCS 的釋壓閥失效與否有關，而與爐心功率提升無關。
- (3) 一次側系統壓力與溫度不受爐心功率提升之影響。在 MAAP4.0.4 對於電廠執行 EPU 的初始設定上，由於調整一次側壓力會涉及到許多安全設定的更動以及系統參數的調整。在此系統狀態之下，受到一次側壓力影響的允許時間便不會因爐心功率的提升而受到壓縮，所以電廠 EPU 的執行並不會對與一次側壓力相關的人為誤失事件造成衝擊。以上包括 HR-ECD/CCR、HR-ASI/ECD/CCR、HR-BNFSGTR-E45、HR-ECNSGTR-E10。
- (4) 誤失機率為 100% 的人為誤失事件。採取保守評估的討論之下，只考慮人為誤失機率因爐心功率的提升而升高的部份。因此，誤失機率為 100% 的人為誤失事件在電廠執行 EPU 後，其誤失機率並不需重新評估，仍採用 100 的機率數值。誤失機率為 100% 的人為誤失事件為 HR-CDPSGLLT-E45。

其次，在 12 個受到爐心功率提升影響而提高誤失機率的人為誤失事件中，並非所有人為誤失事件的 CDF F-V 重要度皆會隨著其人為誤失機率升高而增加。〈表 11.1〉顯示，在電廠執行 EPU 後，誤失機率升高而 CDF F-V 重要度卻下降的人為誤失事件為 HR-ASI/ECD/CCR 與 HR-ASI/CCR-S。HR-ASI/ECD/CCR 的誤失機率從 5.00×10^{-3} 升高至 5.04×10^{-3} ，而 CDF F-V 重要度卻從 5.94×10^{-4} 降低至 5.32×10^{-4} ；HR-ASI/CCR-S 的誤失機率從 1.94×10^{-3} 升高至 1.95×10^{-3} ，而 CDF F-V 重要度卻從 1.295×10^{-3} 降低至 1.158×10^{-3} 。此外，HR-ASI/ECD/CCR 與 HR-ASI/CCR-S 的誤失機率皆與 HR-CCRSLOCA-E42 相關，HR-C0CRSLOCA-E42 為小破口

LOCA 之下的緊急爐心冷卻復原動作，是唯一在小破口 LOCA 肇始事件之下的誤失機率會受到電廠執行 EPU 而提升的人為誤失事件。

在 CDF 的最小失效組合之探討方面，CDF 大於 1.0×10^{-10} 的最小失效組合共有 1335 個，其中 CDF 值最大的前 100 個最小失效組合共佔了 86.5% 的 CDF ($6.334 \times 10^{-6}/\text{year}$)。最值得注意的為 EPU 執行前排名為第 10 的最小失效組合，其事故序列為在主飼水可用的暫態之下，反應器跳脫後，輔助飼水泵失效，並且運轉員無法成功啟動冷凝水泵緊急注水進入二次側飼水系統與執行 RCS 的洩沖冷卻失敗，最後導致爐心熔損 ($[\text{PMZ-AL-P017X}] \times [\text{PTAS-AL-P019}] \times [\text{AAA-T1A}] \times [\text{HR-CP/BNF-RX}]$)。以上之最小失效組合在電廠執行 EPU 後，CDF 從 1.65×10^{-7} 提高至 4.44×10^{-7} ，升高了將近 2.7 倍，所佔 CDF 的排名升至第一，成為電廠在執行 EPU 後所佔 CDF 值最大的最小失效組合。造成此結果的原因為 HR-CP/BNF-RX (HR-CDPRXTRP-E45 與 HR-BNFRXTRP-E45 的相依性) 的誤失機率由 3.07×10^{-2} 升高至 8.27×10^{-2} ，F-V 重要度則由 5.187×10^{-2} 提高至 1.242×10^{-1} 。此外，所佔 CDF 值最大的最小失效組合排序中與 HR-CP/BNF-RX 相關的，還有三組最小失效組合值得注意。主要為在一般暫態反應器跳脫而主蒸汽隔離閥關閉的肇始事件之下，導致二次熱沉喪失並且執行冷卻洩沖失敗的事故序列。這三個最小失效組合的 CDF 受到電廠執行 EPU 的衝擊後分別由 1.27×10^{-7} 提高至 3.11×10^{-7} 、 2.85×10^{-8} 提高至 7.69×10^{-8} 以及 8.32×10^{-9} 提高至 2.24×10^{-8} 。

除了 HR-CP/BNF-RX 以外，人為誤失機率受到電廠執行 EPU 影響而升高且明顯導致 CDF 上升的人為誤失事件還有 HR-BNFSGLLT-E45，誤失機率從 1.11×10^{-1} 升高至 1.73×10^{-1} 。在所佔 CDF 值最大的最小失效組合排序 100 名內，與 HR-BNFSGLLT-E45 相關的最小失效組合共有 4 個，這些失效組合主要是代表著在蒸汽產生器水位過低導致反應器跳脫的暫態之下，運轉員無法建立二次側熱沉且執行 RCS 的洩沖冷卻失敗，最後導致爐心熔損的事故序列。同樣在蒸汽產生器水位過低導致反應器跳脫的暫態之下的人為誤失事件 HR-STPSGLLT-E45，受到電廠執行 EPU 的衝擊後，誤失機率由 5.05×10^{-1} 升高至 9.27×10^{-1} ，但此人為誤失機率的升高對 LERF 的 F-V 重要度遠大於 CDF 的重要度，因此不考慮 HR-STPSGLLT-E45

升高對 CDF 的衝擊。

LERF 的評估方面，在執行 EPU 之下，LERF 的 F-V 重要度排序 50 之內而必須特別注意的人為誤失事件主要有三項，分別是 HR-CP/BNF-RX、HR-BNFSGLLT-E45 與 HR-SF/BNF-SG，此三項皆與 CDF 之 F-V 重要度最大的三個人為誤失事件一致。以上人為誤失事件與 LERF 的關係整理如<表 11.2>所示。

在最小失效組合的事故序列方面，所佔 LERF 值最大的失效組合為喪失 CCW 的一般暫態之下，RCS 的 ECCS 注水失敗，且輔助飼水系統與圍阻體移熱系統皆失效，運轉員無法完成二次側降壓，以冷凝水泵提供二次側熱沉，最後導致爐心熔損而造成大量早期輻射外釋($[P1] \times [HR-CDPRXTRP-E45] \times [PMAZ-AL-P017X] \times [PTAS-AL-P019] \times [AAA-T1A] \times [HR-CCW-RHRHX-INI] \times [HR-CTMTFC-BKUP]$)。以上失效組合所佔的 LERF 值在執行 EPU 後從 1.04×10^{-8} 提升至 2.60×10^{-8} ，無論功率提升的與否，皆為所佔 LERF 值最大的失效組合；此最小失效組合在電廠執行 EPU 後所佔 LERF 值升高的原因為 HR-CDPRXTRP-E45 的誤失機率由 1.94×10^{-1} 升高至 4.84×10^{-1} ，LERF 的 F-V 重要度則由 8.39×10^{-3} 提高至 1.72×10^{-2} 。

HR-CP/BNF-RX、HR-BNFSGLLT-E45 與 HR-STPSGLLT-E45 誤失機率的提高代表著在主飼水可用與蒸汽產生器水位過低的反應器跳脫暫態之下，爐心功率提升對於蒸氣產生器蒸乾的速率有關鍵性的影響。因此，針對人為誤失機率而言，二次側輔助飼水泵的失效事故為電廠執行 EPU 所要面對的重要課題。若要解決執行 EPU 所帶給電廠風險的衝擊，根據以上之討論，在軟體改善方面，電廠首先必須加強運轉員處理二次側飼水泵失效的反應訓練，或者優化相關盤面的人機介面以降低執行時間。

最後，以上尚未討論的 3 個人為誤失事件，分別是 HR-ASIMLOCA-E00、HR-CCRSLOCA-E42 與 HR-BNFSGTR-E45，以上人為誤失事件的 CDF 重要度以及 LERF 重要度皆非常小，在電廠執行 EPU 之下，可忽略這 3 個人為誤失機率的提升帶給 CDF 與 LERF 的衝擊，但其反應時間皆小於 30 分鐘。因此，對電廠的人為可靠度分析而言，仍需注意 HR-ASIMLOCA-E00、HR-CCRSLOCA-E42 與 HR-BNFSGTR-E45 在功率提升後帶給運轉員的壓力。

<表 11.1>執行 EPU 前後，人為誤失機率與 CDF 的關係。

人為誤失事件	誤失機率		CDF 的 F-V 重要度(排序)	
	EPU 前	EPU 後	EPU 前	EPU 後
HR-BNFSGLLT-E45	1.11×10^{-1}	1.73×10^{-1}	2.181×10^{-2} (42)	3.021×10^{-2} (35)
HR-CDPRXTRP-E45	1.94×10^{-1}	4.84×10^{-1}	7.897×10^{-3} (73)	1.775×10^{-2} (51)
HR-STPSGLLT-E45	5.05×10^{-1}	9.27×10^{-1}	7.770×10^{-4} (134)	1.268×10^{-3} (118)
HR-BNFRXTRP-E45	2.26×10^{-2}	3.26×10^{-2}	1.069×10^{-4} (220)	1.678×10^{-4} (203)
HR-ASIMLOCA-E00	3.74×10^{-1}	4.14×10^{-1}	*	*
HR-CCRSLOCA-E42	3.39×10^{-3}	7.22×10^{-3}	2.473×10^{-4} (186)	5.117×10^{-4} (150)
HR-BNFSGTR-E45	2.26×10^{-2}	4.80×10^{-2}	*	*
HR-CP/BNF-RX	3.07×10^{-2}	8.27×10^{-2}	5.187×10^{-2} (24)	1.242×10^{-1} (8)
HR-SF/BNF-SG	1.21×10^{-1}	2.70×10^{-1}	9.717×10^{-3} (70)	1.927×10^{-2} (44)
HR-ECD/CCR	8.62×10^{-2}	8.79×10^{-2}	6.835×10^{-4} (145)	6.169×10^{-4} (141)
HR-ASI/ECD/CCR	5.00×10^{-3}	5.04×10^{-3}	5.940×10^{-4} (146)	5.323×10^{-4} (147)
HR-ASI/CCR-S	1.94×10^{-3}	1.95×10^{-3}	1.295×10^{-3} (116)	1.158×10^{-3} (121)

*為允許時間小於 30 分鐘而重要度極小可忽略之人為誤失事件。

<表 11.2>執行 EPU 前後，人為誤失機率與 LERF 的關係。

人為誤失事件	誤失機率		LERF 的 F-V 重要度(排序)	
	EPU 前	EPU 後	EPU 前	EPU 後
HR-CP/BNF-RX	3.07×10^{-2}	8.27×10^{-2}	5.84×10^{-2} (16)	1.30×10^{-1} (7)
HR-BNFSGLLT-E45	1.11×10^{-1}	1.73×10^{-1}	2.46×10^{-2} (32)	3.16×10^{-2} (28)
HR-CP/BNF-RX	3.07×10^{-2}	8.27×10^{-2}	1.05×10^{-2} (57)	1.29×10^{-2} (53)

11.2 建議

在 LOCA 之下，RWST 水位的降低速率為影響人為誤失機率的重要因素。在核三活態安全度評估中，採用的是最保守的計算方法，所有的緊急爐心冷卻設施，包括餘熱移除系統、高壓注水系統與圍阻體灑水系統，皆假設以流量最大的汲水速率來從 RWST 取水。雖然此為最保守的估算，但在實際 LOCA 事故之下，RCS 的壓力為決定安全注水系統注水能力的重要參數之一；安全注水系統的注水流率理應會隨著 RCS 壓力的不同而變化，此為比較合乎常態的狀況，並非任何時刻注水泵皆以最大注水流率在運轉。因此，在 LOCA 肇始事件之下，根據核三活態安全度評估計算人為誤失動作的允許時間之模式，除了會高估 CDF 值外，依照其計算模式也無法分析出爐心功率提升對人為誤失機率的影響。因此，建議建立另一套較合於實際狀況的計算模式來分析電廠執行 EPU 前後對於 RWST 水位降低速率的影響，進而計算出較為精確的人為誤失機率。

如上所述，由於安全度評估方法採用較保守的時間估算來分析人為誤失機率，所以便無法確實量化功率提升對電廠風險的影響。如果採用較合乎現實狀況的運轉人員反應時間來計算人為誤失機率，功率提升對電廠安全度的影響將會大於目前所評估的結果差異，但其 CDF 值或是 LERF 值均會小於目前評估之數值。

11.3 未來工作

MAAP4.0.4 的程式特性在於計算快速且參數設定簡易，並且對於長時間的事故序列發展有一定的可靠度[5]；但在暫態之下的短時間計算上，其準確度便不盡理想，並且關於 LOCA 之下的壓降計算也有其極限存在。因此，對於 MAAP4.0.4 程式無法準確模擬的事故序列(如:LOCA)，有必要利用更精準的程式(如:RELAP5)來重新分析電廠執行 EPU 之影響，以獲得更可靠之數值。