

第九章 爐心功率提升對 LOCA 之下的人為誤失機率影響

9.1 緊急爐心冷卻系統 (Emergency Core Cooling System, ECCS)

9.1.1 ECCS 功能

ECCS，又稱安全注水系統(Safety Injection System, SIS)，主要功能為以下兩項，能在事故發生時緊急冷卻爐心，以增加停機後的安全餘裕[10]：

(1) ECCS 之主要功能為在發生冷卻水流失事故 (Loss of Coolant Accident, LOCA) 時，從燃料更換水儲存槽 (Refueling Water Storage Tank, RWST) 汲取水源將大量冷卻水注入爐心冷卻水系統(Reactor Coolant System, RCS)，用以移除爐心衰變餘熱，避免爐心熔損；其中 LOCA 範圍包括小管路斷裂或釋壓閥卡在全開位置、以及最大管路瞬間完全斷裂之大型事故，使得正常補充水系統無法補足流失的爐心冷卻水時，調壓槽的低壓訊號便會自動啟動 ECCS。

(2)ECCS 之次要功能為在發生蒸汽管路斷裂時，RCS 冷卻水因驟降會導致瞬間的正反應度，並使圍阻體內壓力升高。因此，必須藉 ECCS 注入高濃度硼液至核心，以增加停機的安全餘裕。

除此之外，ECCS 的設計基準尚包括射棒事故 (Rod Ejection Accident) 以及蒸汽產生器管束破裂事故 (Steam Generator Tube Rupture, SGTR)。在緊急事故之後，ECCS 系統之動作可分為三個階段，即：

- 注水階段 (Injection Phase)

事故發生的起始，ECCS 會將大量含硼水自 RWST 或蓄壓槽 (Accumulator) 經冷端管路注入爐心，防止爐心裸露並阻止爐心反應度上升，以免爐心受到損害。

- 冷端管路再循環 (Cold Leg Recirculation Phase)

LOCA 發生時，RCS 內的冷卻水會從破口以氣態或液態的形式溢出，接著流入圍阻體內之再循環集水池 (Containment Recirculation Sump)。當 RWST 達至過低水位時，ECCS 的水源汲取會自動或手動從 RWST 切換成自集水池取水，再經冷端管路補水進入爐心；而 RCS 內的冷卻水又曾經管路破裂處流至集水池，構成一個循環迴路。此階段之目的在移去爐心的衰變熱。

- 熱端管路再循環 (Hot Leg Recirculation Phase)

事故後 7 小時，ECCS 注水模式必須由 RCS 冷端管路注水切換成 RCS 熱端管路注水，以溶解爐心上部硼酸結晶，避免硼酸結晶阻礙水流或蒸汽通道；之後每 12 小時冷端與熱端再循環轉換一次。

9.1.2 ECCS 概述

ECCS 之設計基準除了能在爐心失水、射棒事故、蒸汽管路斷裂事故、以及蒸汽產生器管束破裂事故時，提供緊急爐心冷卻，保持爐心完整外，還必須在遭逢地震、颱風、洪水、飛射物等廠外事件下仍能達成其功能。而 ECCS 主要為三個前線救援系統，即低壓注水系統 (Low Head Safety Injection)，高壓注水系統 (High Head Safety Injection)、蓄壓槽系統 (Accumulator)，以及水源汲取的 RWST 系統[10]：

- (1)LHSI(Residual Heat Removal, RHR)，包括冷端管路注水關斷閥、熱端管路注水關斷閥、RWST 出口關斷閥、圍阻體再循環集水池出口閥、跨接管關斷閥、兩 CCP 迴路之冷端及熱端注水管路、以及單級直立式離心 RHR 泵。其中 RHR 泵主要參數如下：

數 量	2
設計系統壓力	42.2 kg/cm ² (600psig)
設計系統溫度	204°C (400°F)
設計流量	681.5M ³ /HR (3000GPM)
設計水頭	82M (270ft)
最大流量	1022M ³ /HR (4500GPM)
最大流量時之最低水頭	61M (200ft)
關斷水頭	106.7M (325ft)
馬達容量	300 馬力

(2) HHSI (Charging Coolant Pump, CCP), 包括壓力試驗排量式泵 (Positive Displacement Hydro Test Pump)、注硼槽 (Boron Injection Tank)、注硼調節槽 (BIT Surge Tank)、注硼槽再循環泵 (BIT Recirculation Pump)、RHR 至 CCP 進口閥、BIT 隔離閥、RWST 至 CCP 進口隔離閥、VCT 至 CCP 進口隔離閥、CCP 最小流量閥、正常充水隔離閥、以及 11 級水平式離心 CCP。其中 CCP 泵為由感應馬達帶動，有潤滑及機械式軸封冷卻裝置，潤滑系統熱交換器由 CCW 冷卻，最小流量閥必須經常開啟以防泵過熱受損。CCP 規格如下：

數 量	3
設計壓力	197 kg/cm ² (2800psig)
設計溫度	149°C (300°F)
設計流量	34.1M ³ /HR (150GPM)
設計水頭	1768M (5800ft)
最大流量	147.6M ³ /HR (650GPM)
最大流量時之最低水頭	169M (2400ft)
關斷水頭 (Shut off head)	1890M (6200ft)
馬達容量	900 馬力
齒輪箱變速比	1 : 2.733
馬達轉速	1771 R. P. M.
泵轉速	4841 R. P. M

(3)蓄壓槽系統，包括蓄壓槽出口隔離閥與蓄壓槽。其中三台獨立之蓄壓槽分別連接至 RCS 三個迴路，蓄壓槽規格如下：

設計壓力	49 kg/cm ² (700psig)
設計溫度	149°C (300°F)
操作溫度	38°C ~ 65°C (100~150°F)
正常操作壓力	46.4 kg/cm ² (660psig)
最低操作壓力	42.2 kg/cm ² (600psig)
蓄壓槽容積	41M ³ / (1450ft ³)
正常水容積	28.3M ³ (1000ft ³)

(4)燃料更換水儲存系統，主要規格如下：

總容積	1,900,600 L (502100 gal)
規範貯水量	1,756,566 L (464700 gal , 92.5%)
高水位警報	95%
低水位警報	92.6%
過低水位警報	32.5%
槽空警報	5.7%
硼酸濃度	2,450±50ppm

9.2 各類 LOCA 概述[12]

9.2.1 大破口 LOCA

大破口 LOCA 的肇始事件定義為 RCS 管路發生等效直徑大於 6 英吋(182 cm²) 的破口。根據核三 FSAR 指出，大破口 LOCA 之下必須維持住 RCS 的水量以防止爐心裸露，其成功準則為一串 LHSI 與兩台蓄壓槽成功啟動注水。此外，大破口之下，從 RCS 溢出至圍阻體的冷卻水會使圍阻體壓力上升而觸發圍阻體噴灑系統的啟動；而經台電評估後，圍阻體壓力在此事故之下最大的壓力峰值為 39psig，圍阻體設計壓力則為 60psig，因此，在注水階段不會使圍阻體噴灑系統啟動。由大破口 LOCA 所造成的爐心熔損頻率為 7.91×10^{-7} 。

9.2.2 中破口 LOCA

中破口 LOCA 的肇始事件定義為 RCS 管路發生等效直徑大於 2 英吋(20.3 cm^2)而小於 6 英吋(182 cm^2)的破口。根據核三 FSAR 指出，中破口 LOCA 之下的破口流率足以釋出爐心衰變熱，所以可忽略二次側移熱的失效與否，其成功準則為一串 HHSI 與兩台蓄壓槽成功啟動注水；其中，在冷端管路的等效直徑 3 吋(45.6 cm^2)破口為最嚴重之情況。由中破口 LOCA 所造成的爐心熔損頻率為 9.29×10^{-6} 。

9.2.3 小破口 LOCA

小破口 LOCA 的肇始事件定義為 RCS 管路發生等效直徑大於 0.375 英吋(0.1 cm^2)而小於 2 英吋(20.3 cm^2)的破口。小破口 LOCA 之下的破口流率無法足以釋出爐心衰變熱，因此必須二次側移熱成功運作，並且 HHSI 成功運作以維持 RCS 的水量。由小破口 LOCA 所造成的爐心熔損頻率為 1.63×10^{-7} 。

9.2.4 爐心功率提升對各類 LOCA 之下的人為誤失機率之影響

9.2.4-1 HR-HOTLEGRC-E08 之誤失事件分析

ECCS 系統的設計基準是為防止冷卻水流失事故 LOCA、射棒事故、蒸汽管路斷裂事故、以及蒸汽產生器管束破裂事故的惡化。發生上述之事故時，ECCS 的運轉動作依序可分為三個階段：注水階段 (Injection Phase)、冷端管路再循環 (Cold Leg Recirculation Phase)、和熱端管路再循環 (Hot Leg Recirculation Phase)。當 ECCS 進入再循環模式時，為了防止再循環管路因硼結晶而堵塞，運轉員必須在事故發生後第 10 小時完成管閥配置以及電源配給，準備執行熱端管路再循環；並在第 14 小時將 ECCS 切換成熱端管路再循環。

HR-HOTLEGRC-E08 為運轉員未能成功地執行熱端管路再循環。根據核三活態安全度評估的估算，此誤失機率非常地低，給予底限值 10^{-4} 。因此，在無更精確的系統及狀態參數之下，暫不考慮爐心功率提升對此誤失機率的影響，依然維持 $\text{HR-HOTLEGRC-E08} = 1.01 \times 10^{-4}$ 。

9.2.4-2 HR-RWSTRPNH-E23 之誤失事件分析

LOCA 之下，高壓注水系統會由 RWST 汲水以注入 RCS 補水，當 RWST 水位降至過低水位時，運轉員必需將安全注水系統切換成再循環模式；假若安全注水的再循環模式失效，運轉員則必須在 RWST 槽空之前執行 RWST 的捕水，否則當 RCS 無法維持水位時，將會導致爐心裸露、熔損。HR-RWSTRPNH-E23 為在 LOCA 之下，安全注水的再循環模式切換失效後，運轉員無法在 RWST 槽空之前完成 RWST 的補水，導致爐心熔損。

兩串 CCP 的最大汲水速率為 $1,300\text{gal}/\text{min}$ ($2 \times 650 = 1,300$)，RWST 最低水位時的貯水量為 $108,100\text{gal}$ ，在此狀態參數之下，RWST 從最低水位至槽空需約 80min ；而確認安全注水系統再循環模式失效的耗費時間經修正後為 6.4min ，因此，HR-RWSTRPNH-E23 的允許時間為 73.6min 。而執行時間為 24.58min ，代入 HCR 公式，可得 $=2.74 \times 10^{-2}$ 。

根據以上討論，所需考慮之系統及狀態參數皆不會受到爐心功率提升的影響。因此，在 120% 的爐心功率提昇之下，HR-RWSTRPNH-E23 依然為 2.74×10^{-2}

9.3 爐心功率提升對大破口 LOCA 之下的人為誤失機率之影響

9.3.1 HR-CTMTSPRR-E07 之誤失事件分析

大破口 LOCA 之下，圍阻體的高壓訊號會啟動圍阻體噴灑系統，圍阻體噴灑系統的汲水水源由 RWST 所供給。當 RWST 達至過低水位時，運轉員必須在 RWST 槽空之前將圍阻體噴灑系統切換成再循環模式，以維持圍阻體噴灑系統的移熱功能，避免圍阻體因長期承受 RCS 釋出的冷卻水而過壓失效。HR-CTMTSPRR-E07 為運轉員未能在 RWST 槽空之前將圍阻體噴灑系統切換成再循環模式，導致圍阻體高溫過壓。

RWST 在過低水位時，存有 $108,100\text{gal}$ 的水，而 ECCS 與 CSP 的最大總設計汲水流量為 $7,300\text{gal}/\text{min}$ ($650 \times 2 + 3,000 \times 2 = 7,300$)。因此，RWST 最快會在 14.8 分鐘後槽空 ($108,100/7,300=14.8$)，HR-CTMTSPRR-E07 的允許時間即為 14.8 分

鐘，代入 HCR 公式後，最後得 $HR-CTMTSPRR-E07=1.8 \times 10^{-2}$ 。在不更動其他系統與狀態參數之下，爐心功率的提升並不會對 $HR-CTMTSPRR-E07$ 的允許時間造成衝擊， $HR-CTMTSPRR-E07$ 依然為 1.78×10^{-2} 。

9.4 爐心功率提升對中破口 LOCA 之下的人為誤失機率之影響

9.4.1 HR-ASIMLOCA-E00 之誤失事件分析

發生中破口 LOCA 時，調壓槽的低壓訊號會觸發反應器跳脫機制，並啟動高壓注水系統注水進入 RCS。當高壓注水系統發生注水異常，運轉員就必須在爐心溫度升高至 644°K (700°F) 之前尋找出變通注水路徑並完成管路配置，避免喪失高壓注水。確認高壓注水異常的所需時間經修正後為 10.24 分鐘，而建立後備高壓注水的路徑經修正後則需要 7.2 分鐘的執行時間；根據核三活態安全度評估計算，在 4 吋破口的 LOCA 之下，從事故發生到爐心溫度升高至 644°K 約需要 20 分鐘。因此， $HR-ASISLOCA-E00$ 的允許時間為 $20-10.24=9.76$ 分鐘，執行時間為 7.2 分鐘，代入 HCR 公式後， $HR-ASISLOCA-E00=3.74 \times 10^{-1}$ 。

根據 MAAP4 計算，4 吋中破口 LOCA 之下，發生高壓注水失效時，爐心重要事件發展的時序整理如〈表 9.1〉；由〈圖 9.1〉可看出，燃料溫度會在爐心裸露後逐漸上升，RCS 是否有足夠的冷卻水來覆蓋住爐心會是影響燃料溫度變化的重要因素之一。

依照〈圖 9.2〉所示，大約在事故發生後的第 4300~4800 秒鐘時，爐心功率提升後的爐心衰變熱與二次側移熱功率差值明顯大於功率提升之前；以上的差異會使得在這段時間內，一次側壓力在功率提升後會略大於功率提升前，如〈圖 9.3〉所示；而一次側壓力的大小會影響到冷卻水溢出 RCS 的總流失率（包括從調壓槽釋壓閥與破口流溢出的冷卻水），因此，在一次側壓力的變化受到功率提升的影響之下，由〈圖 9.4〉便可看出，冷卻水的總流失率將會因功率提升而有所增加，導致爐心水位下降的速率加快（如〈圖 9.5〉），進而使得爐心裸露提早發生，並且爐心溫度也較早升高至 644°K (700°F)。

以上的參數變化說明了在此事故之下，爐心功率的提升使得燃料溫度較早升

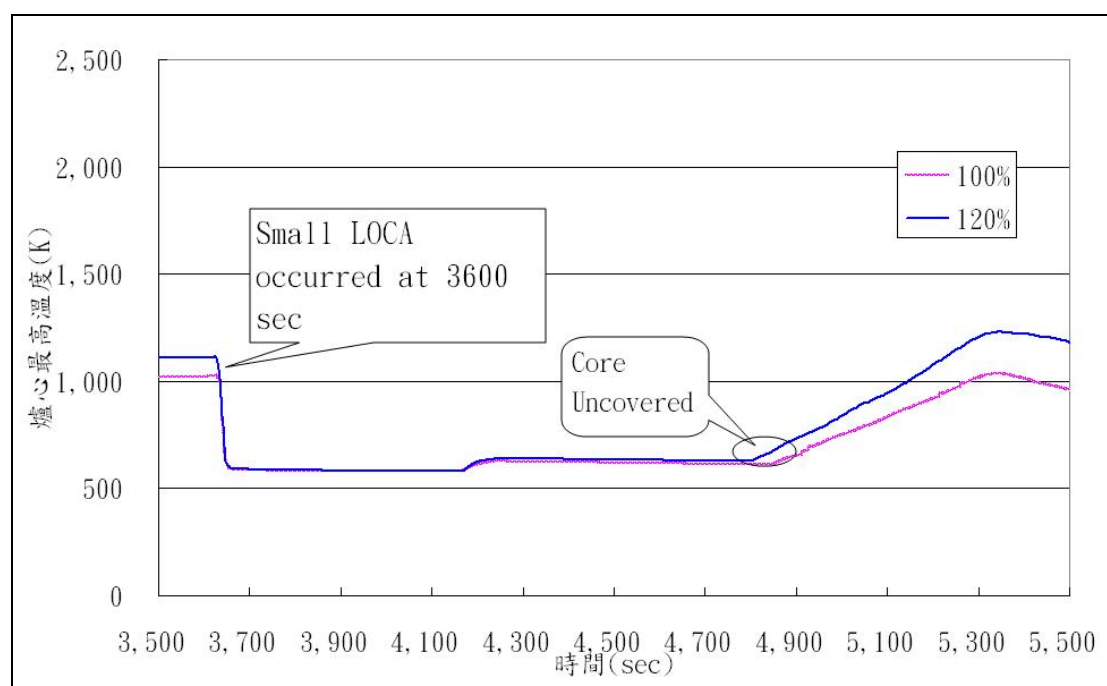
高至 644°K (700°F) 的原因。依照〈表 9.1〉指出，爐心功率提升的影響會壓縮到 HR-ASISLOCA-E00 的允許時間，提早了約一分鐘 ($4880-4818=62\text{ sec}$)，代入 HCR 公式，執行 120% 的爐心功率提升後，HR-ASISLOCA-E00 = 4.14×10^{-1} 。

〈表 9.1〉4 吋中破口 LOCA 之下，發生高壓注水失效時，功率提升對於爐心重要事件發展時序的影響。(單位：秒)

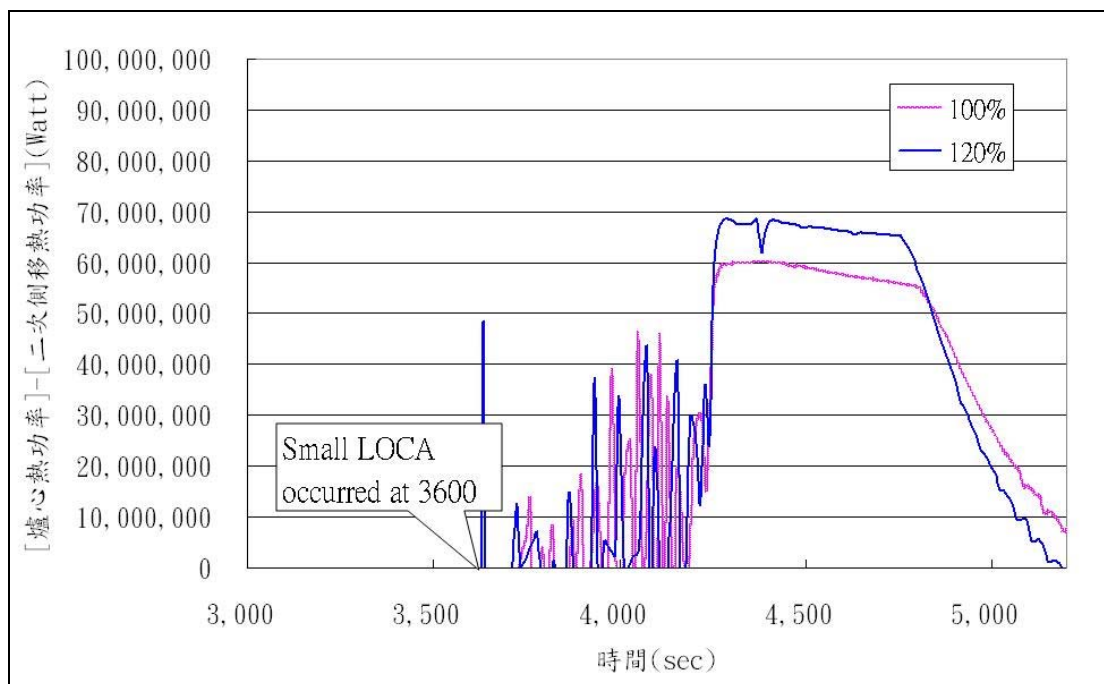
爐心功率	100%	120%
Small LOCA occurred	3600	3600
Core Uncovered	4796	4752
Fuel Temperature at 644°K (700°F)	4880	4818
Accumulator Injection	5259	5239
Reactor Vessel Failed	20504	20525



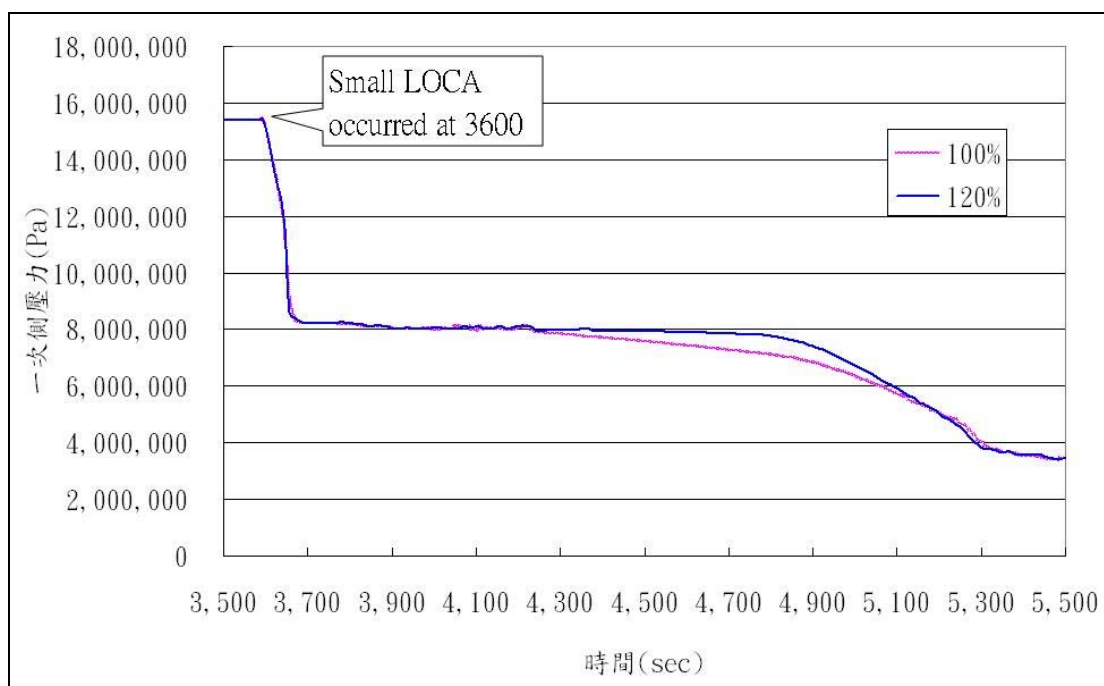
〈圖 9.1〉4 吋中破口 LOCA 之下，發生高壓注水失效時，功率提升對於燃料溫度變化的影響。



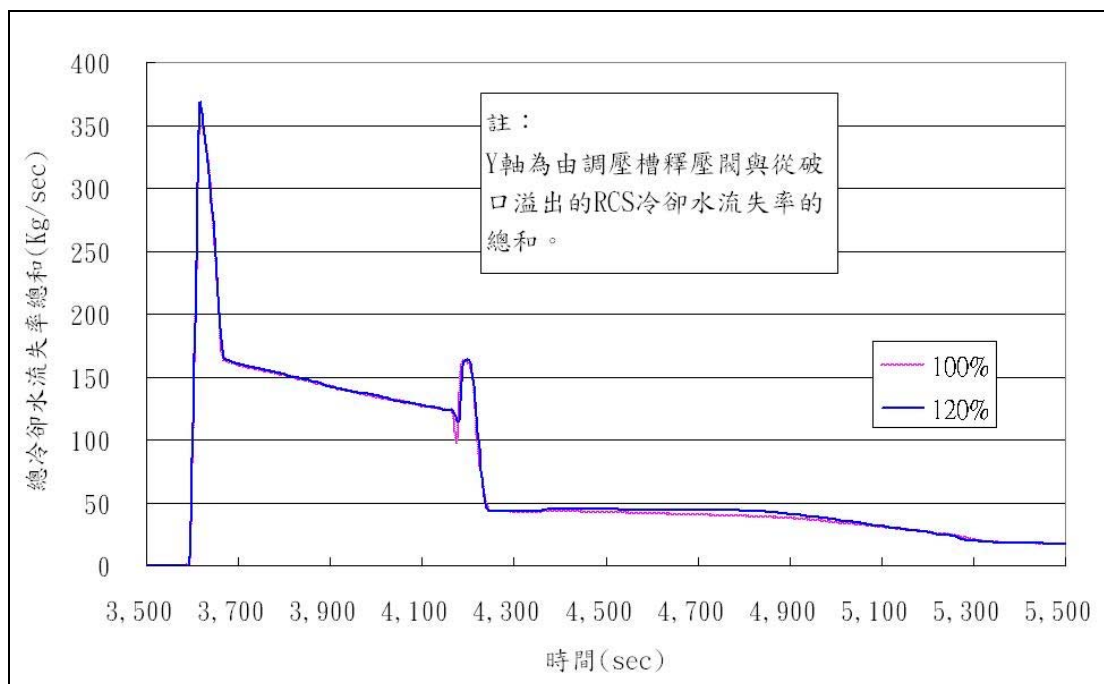
〈圖 9.2〉4 吋中破口 LOCA 之下，發生高壓注水失效時，爐心功率提升對於爐心衰變熱與二次側移熱功率差值的影響。



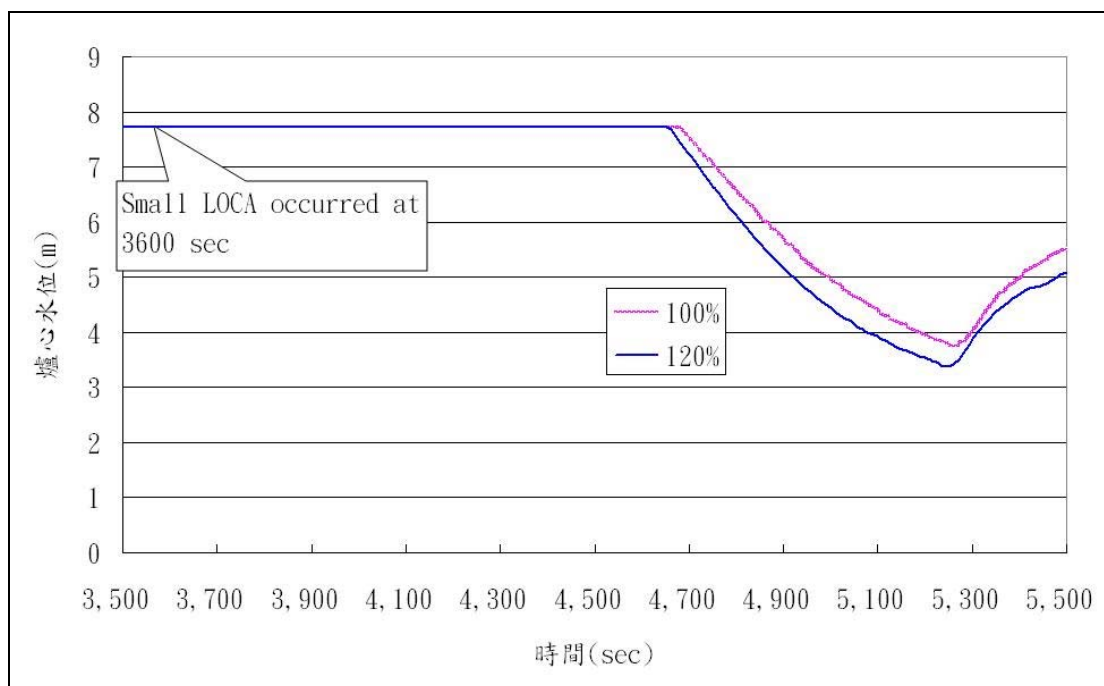
〈圖 9.3〉4 吋中破口 LOCA 之下，發生高壓注水失效時，功率提升對於一次側壓力變化的影響。



<圖 9.4>4 吋中破口 LOCA 之下，發生高壓注水失效時，功率提升對於冷卻水流失率的影響。



<圖 9.5>4 吋小破口 LOCA 之下，爐心功率提升對於爐心水位變化的影響。



9.4.2 HR-CNDMLOCA-E06 之誤失事件分析

中破口 LOCA 之下，運轉員必須於三小時內使用蒸汽排放閥或蒸汽產生器的 PORVs 來進行 RCS 的降溫，以及利用調壓槽的 PORVs 或噴灑系統來降低 RCS 的壓力。為了使低壓注水系統冷端再循環模式能成功運作，RCS 的壓力必須在 RWST 用罄之前降低至 3.032MPa，使 RHR 系統能接手運轉，否則將有爐心熔損的虞慮。HR-CNDMLOCA-E06 為中破口 LOCA 之下，運轉員未能在 RWST 槽空之前完成 RCS 降溫降壓， $HR-CNDSLOCA-E06=4.2 \times 10^{-4}$ 。

HR-CNDSLOCA-E06 的允許時間主要是決定於 RWST 的槽空時間與 RCS 降溫過程所耗費的時間，根據核三活態安全度評估的計算，在中破口 LOCA 之下，RWST 會在 180 分鐘後槽空，而 RCS 降溫過程需要 150 分鐘，則允許時間為 $180-150=30$ 分鐘。

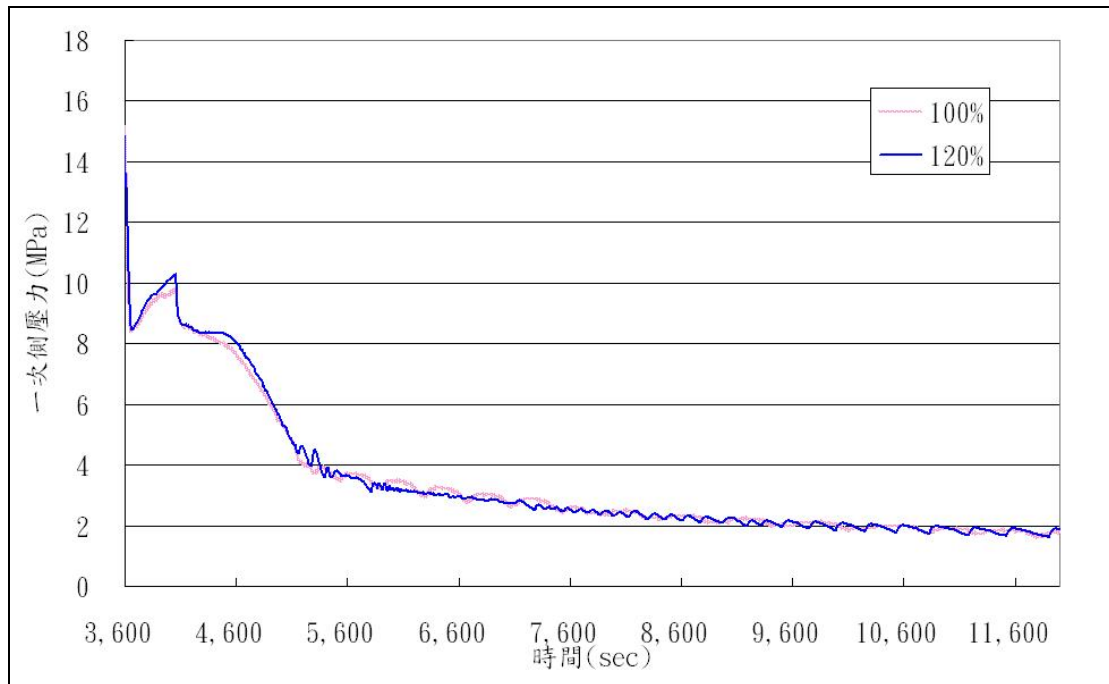
其中，RWST 貯水量為 424,600gal，而 RWST 必須提供兩套高壓注水系統共 1300gal/min 的注水率，以及圍阻體噴灑系統 3000gal/min 的泵送率，在以上安全系統皆全速運轉的情況之下，並考慮 ECCS 在 LOCA 發生後注水的延遲時間，RWST 最快會在 180 分鐘內用罄；而運轉人員對於 RCS 的降溫速率必須符合程序書所規範的小於 $55^{\circ}\text{C}/\text{hour}$ ，且不得使燃料溫度高於 1204°C (2200°F)，在以上的條件之下，保守估計 RCS 降溫過程需 150 分鐘。上述之時間，主要是受到高壓注水系統、圍阻體噴灑系統、調壓槽和蒸汽產生器的 PORVs、以及蒸汽排放閥功能的影響。因此，當中破口 LOCA 發生時，在以上系統皆可負荷的情況之下，HR-CNDSLOCA-E06 的允許時間並不會受到爐心功率提升的影響。

以下將用 MAAP4 模擬在中破口 LOCA 時的事故序列發展，探討未經更動的安全系統是否可負荷爐心功率提升後的 RCS 降壓與降溫。由〈圖 9.6〉顯示，在電廠全黑的設定下，即使爐心功率提升到 120%，開啟調壓槽的三個安全釋壓閥仍可成功地降低 RCS 壓力至讓低壓注水系統運作；此外，一次側系統的蒸汽也能經安全釋壓閥攜出爐心的衰變熱，使爐心溫度低於 1204°C ，如〈圖 9.7〉所示。最後，〈圖 9.8〉表示，在所有飼水泵皆失效的情況之下，高壓注水系統的運作仍可避免爐心熔損。因此，經 MAAP4 驗證，120%的爐心功率提升，仍能在中破口 LOCA 下

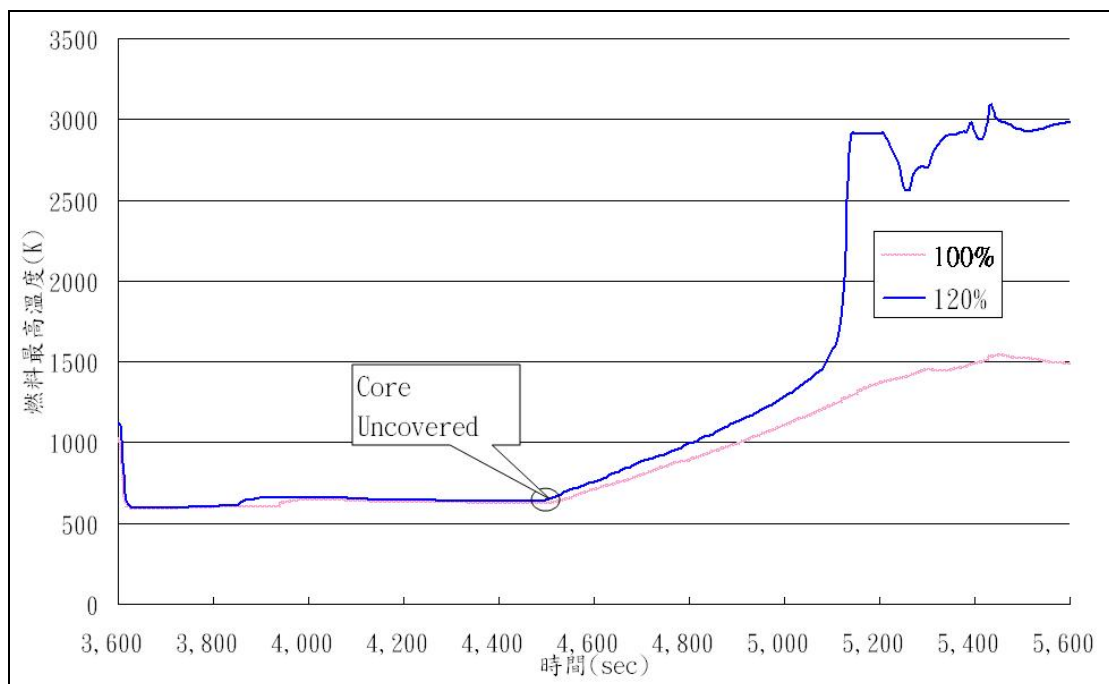
以既有的安全系統符合其成功準則。

綜合上述之討論， $HR-CNDSLOCA-E06=4.12 \times 10^{-4}$ ，此人為誤失機率並不會受到執行 120% 爐心功率提升的影響。

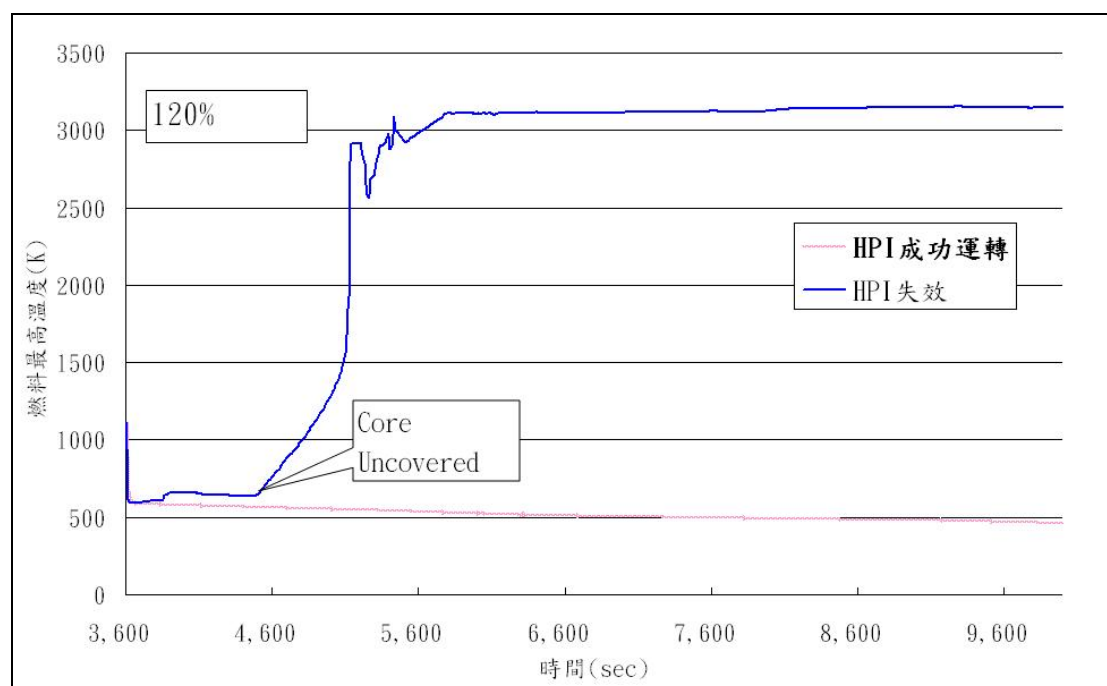
<圖 9.6>中破口 LOCA 之下，功率提升對調壓槽安全釋壓閥降壓功能的影響。



<圖 9.7>中破口 LOCA 之下，功率提升對調壓槽安全釋壓閥降溫功能的影響。



〈圖 9.8〉中破口 LOCA 之下，120% 的功率提升後，HPI 注水與否對燃料溫度的影響。



9.4.3 HR-HHRMLOCA-E06 之誤失事件分析

發生中破口 LOCA 時，調壓槽的低壓訊號會啟動高壓注水系統，並且圍阻體的高壓訊號也會觸發圍阻體噴灑系統的啟動。高壓注水系統與圍阻體噴灑系統的水源皆為 RWST，當 RWST 低於過低水位時，安全注水系統會自動切換成再循環模式；若再循環模式啟動失敗，運轉員就必須手動執行冷端高壓再循環的管閥配置，以及手動開啟 RHR 泵到 CCP 的汲水泵，以維持對 RCS 的補水能力。

HR-HHRMLOCA-E06 為運轉員未能切換成高壓注水系統至再循環模式，喪失 ECCS 對 RCS 的補水能力，導致爐心熔損。高壓注水的再循環模式必須在 RWST 達到過低水位後執行，並在 RWST 槽空之前執行完成，HR-HHRMLOCA-E06 的執行時間經修正後為 3.84 分鐘；而 HR-HHRMLOCA-E06 的允許時間決定於 RWST 過低水位時的貯水量與安全系統的取水速率，依據核三活態安全度評估計算，RWST 在過低水位時的貯水量為 108,100gal，兩串高壓注水泵與兩串圍阻體噴灑泵的取水速率總共為 7,300 gal/min ($2 \times 650 + 2 \times 3,000 = 7,300$)，因此，HR-HHRMLOCA-E06 的允許時間約為 14 分鐘。代入 HCR 公式後， $HR-HHRMLOCA-E06 = 1.78 \times 10^{-2}$ 。

根據以上討論，HR-HHRMLOCA-E06 允許時間的相關計算參數並不會受到爐心

功率提升的影響，所以，在執行 120%的爐心功率提升後，HR-HHRMLOCA-E06 依然為 1.7×10^{-2} 。

9.5 爐心功率提升對小破口 LOCA 之下的人為誤失機率之影響

9.5.1 HR-ASISLOCA-E00 之誤失事件分析

發生小破口 LOCA 時，調壓槽的低壓訊號會啟動反應器保護系統使反應器跳脫，並且啟動高壓注水系統注水進入 RCS。當高壓注水系統發生注水異常，運轉員必須依照程序書查證 CCP(Cooling Charging Pump) 流量是否有達到預期，假若確定 CCP 注水未達至標準，運轉員就必須在爐心溫度升高至 644°K (700°F) 之前尋找出變通注水路徑並完成管路配置，避免喪失高壓注水。以上的查證程序步驟經修正後需要 10.24 分鐘，而建立後備高壓注水的路徑經修正後則需要 7.2 分鐘的執行時間；根據核三活態安全度評估計算，在 2 吋破口的 LOCA 之下，從事故發生到爐心溫度升高至 644°K 約需要 80 分鐘。因此，HR-ASISLOCA-E00 的允許時間為 $80 - 10.24 = 69.76$ 分鐘，執行時間為 7.2 分鐘，代入 HCR 公式後， $\text{HR-ASISLOCA-E00} = 1.3 \times 10^{-2}$ 。

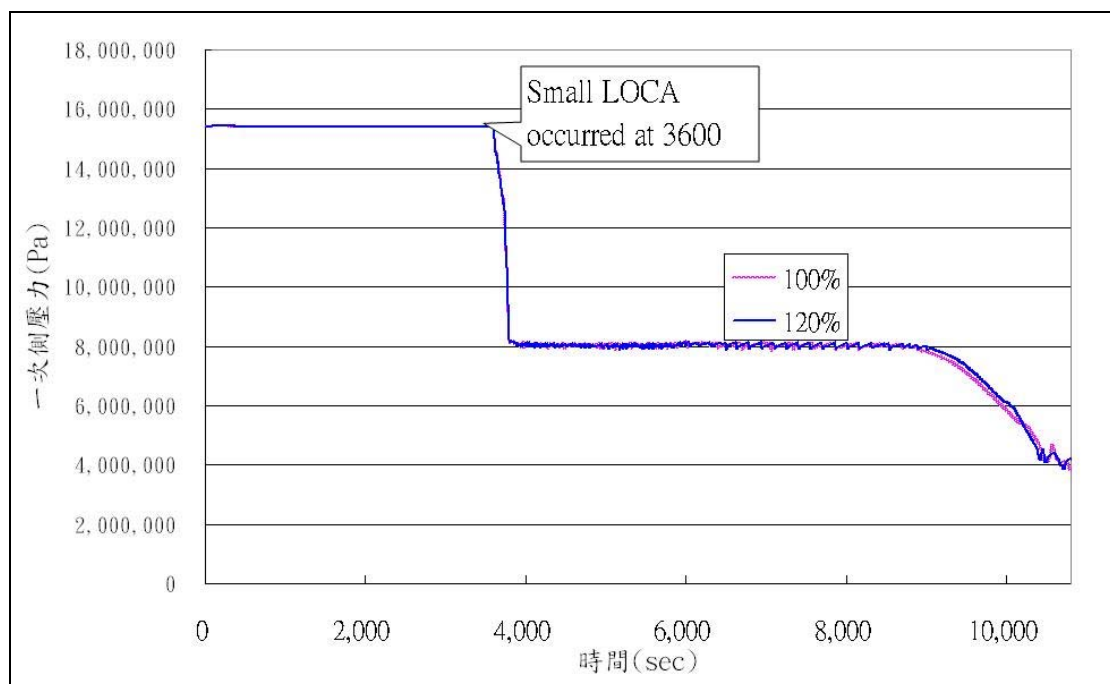
根據 MAAP4 計算，2 吋小破口 LOCA 之下，發生高壓注水失效時，RCS 的壓力變化如〈圖 1〉所示；而爐心重要事件發展的時序整理如〈表 9.2〉，燃料溫度約在事故發生後的 75 分鐘升高至 644°K (700°F)。由〈圖 9.9〉顯示，由於 120%的爐心功率提升並沒有更改一次側壓力的設定，所以在事故發生的初期(兩小時內)，一次側的壓力變化並不會因爐心的功率提升而有顯著的改變；在一次側壓力沒有太大的變化之下，RCS 冷卻水流失率也不會受到爐心功率提升的影響，如〈圖 9.10〉所示。因此，在事故發生後的兩小時內，可以忽略爐心功率提升對於爐心的裸露時間與燃料溫度的變化所造成的衝擊，並且燃料溫度升高至 644°K (700°F) 的需要時間也不會因爐心的功率提升而有所改變，如〈圖 9.11〉所示。所以，在 120%的爐心功率提升後，HR-ASISLOCA-E00 依然為 1.3×10^{-2} 。

〈表 9.2〉2 吋小破口 LOCA 之下，發生高壓注水失效時，功率提升對於爐心重要事件發展時序的影響。(單位：秒)

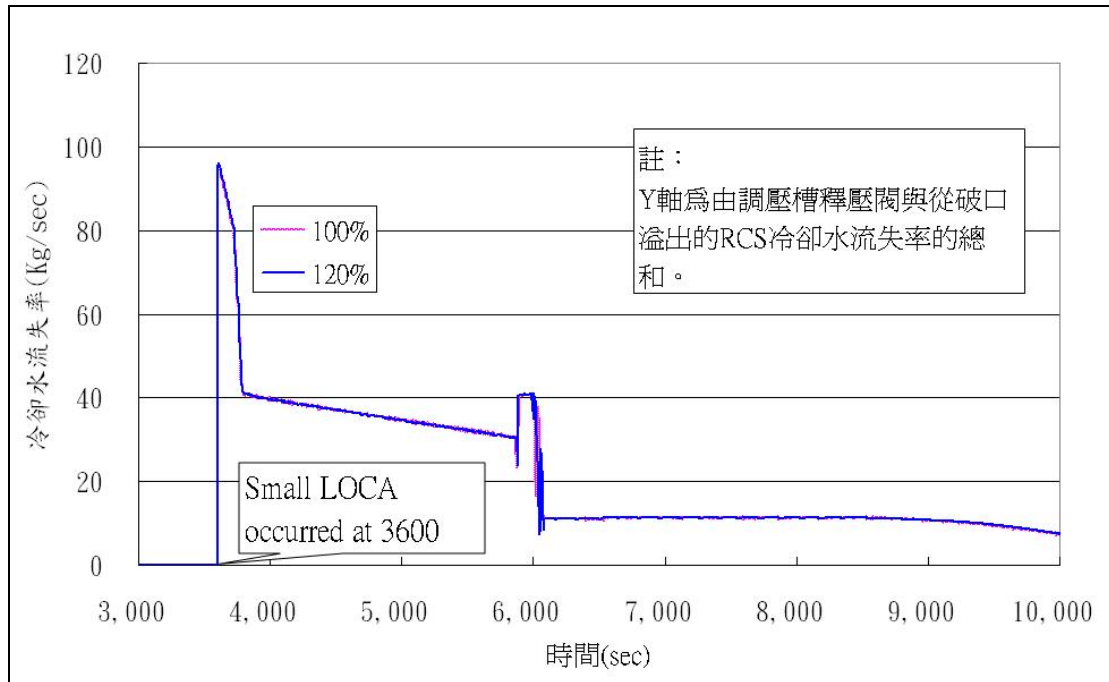
爐心功率	100%	120%
Small LOCA occurred	3600	3600
Core Uncovered	8124	8154
Fuel Temperature at 644°K (700°F)	8330	8336
Accumulator Injection	10414	10365
Reactor Vessel Failed	18665	16224



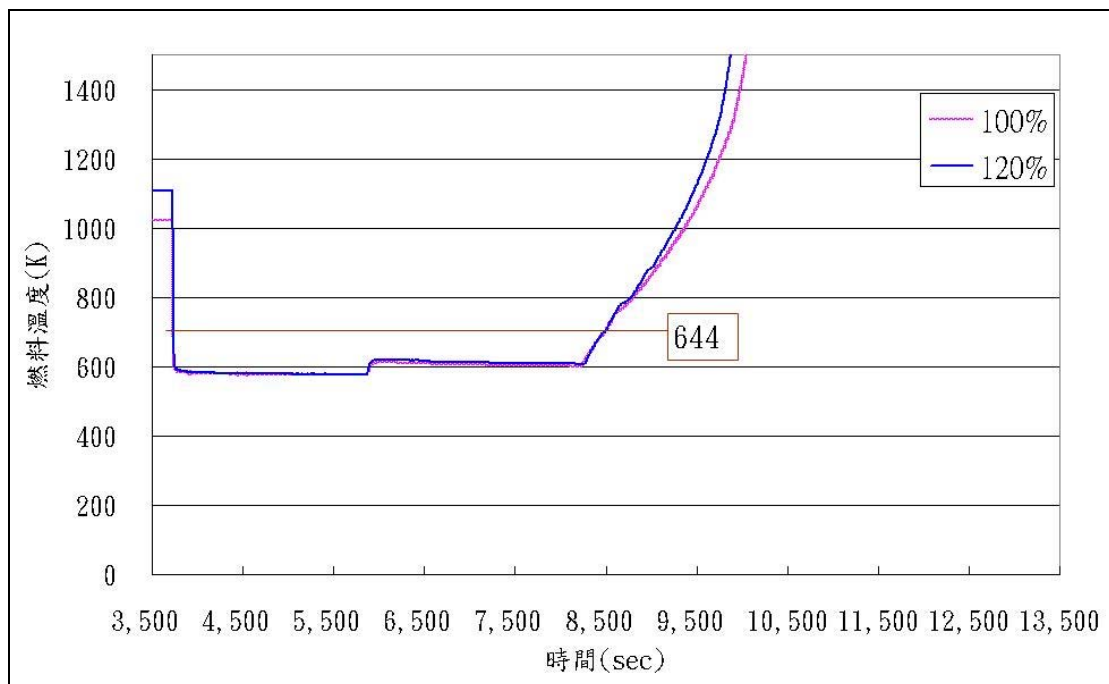
〈圖 9.9〉2 吋小破口 LOCA 之下，發生高壓注水失效時，功率提升對於一次側壓力變化的影響。



〈圖 9.10〉2 吋小破口 LOCA 之下，發生高壓注水失效時，功率提升對於冷卻水流失率的影響。



〈圖 9.11〉2 吋小破口 LOCA 之下，發生高壓注水失效時，功率提升對於燃料溫度變化的影響。



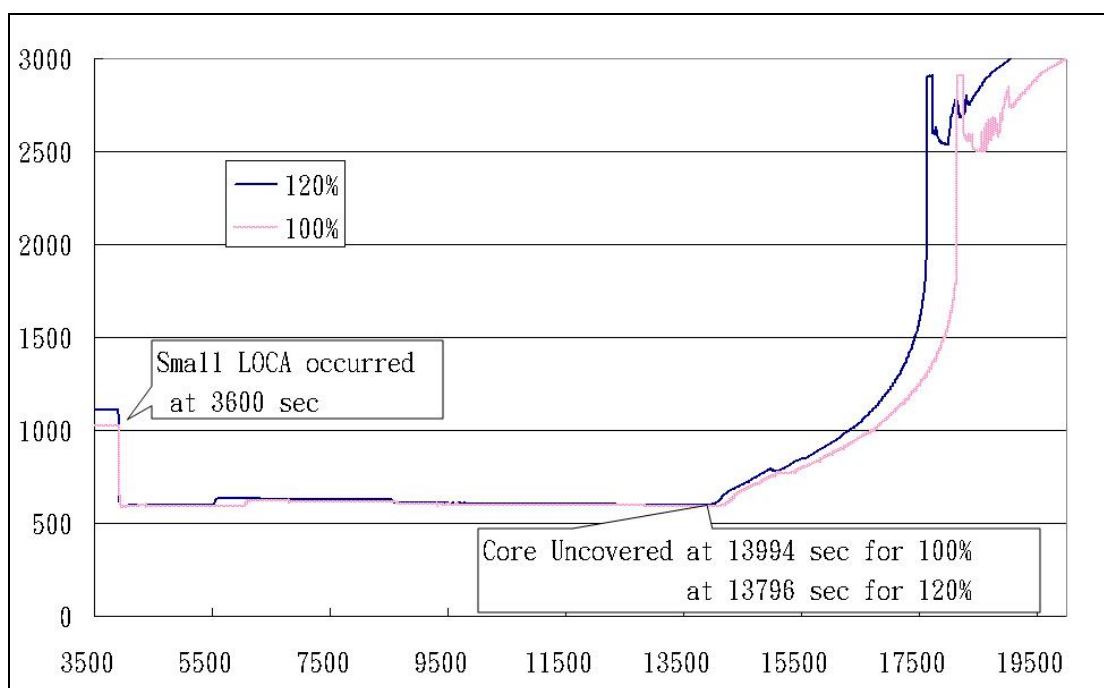
9.5.2 HR-CCRSLOCA-E42 之誤失事件分析

小破口 LOCA 發生時，調壓槽的低壓訊號會啟動高壓注水系統與輔助飼水泵以防止事故序列的惡化。高壓注水系統的功能在於補水進入 RCS 以維持其水量，避免爐心裸露；輔助飼水泵可維持住二次側熱沉，使爐心衰變熱可藉由二次側系統移走。當高壓注水失效時，冷卻水的流失會使壓力槽的水位逐漸降低而導致爐心裸露，在冷卻水無法覆蓋爐心的狀況之下，燃料溫度將急劇上升。假若燃料溫度升高至 371°C (700°F) 時，尚無法啟動高壓注水，運轉員就必須執行爐心冷卻復原(Core Cooling Recovery)來抑制爐心溫度的攀升。爐心冷卻復原為緊急執行蒸汽產生器的洩壓，或者將調壓槽的釋壓閥開啟並啟動 RCP。此動作必須在燃料溫度達到 1204°C (2200°F) 的溫度限值前完成，否則會有爐心熔損之虞。

根據核三活態安全度評估計算，燃料溫度將於事故後的第 170 分鐘溫度升高至 371°C (700°F)；若運轉員無法在 30 分鐘內完成爐心冷卻復原，爐心將在第 200 分鐘達到 1204°C (2200°F) 的溫度限值。HR-CCRSLOCA-E42 即為在此事故之下，運轉員未能完成緊急爐心冷卻復原程序致使爐心溫度超過溫度限值，執行時間經修正後為 5.76 分鐘，允許時間則為 30 分鐘， $\text{HR-CCRSLOCA-E42} = 3.39 \times 10^{-3}$ 。

而 MAAP4 的分析結果顯示，在小破口 LOCA 之下，若高壓注水無法啟動且執行爐心冷卻復原失敗，功率提升對於燃料溫度的變化如〈圖 9.12〉所示；而燃料溫度從 644°K (700°F) 上升到 1477°K (2200°F) 的耗費時間整理如〈表 7.5.2〉。因此，120%的爐心功率提升對於 HR-CCRSLOCA-E42 允許時間的影響為使其減少了 4.9 ($59.1 - 54.2 = 4.9$) 分鐘。將 4.9 分鐘的壓縮時間代入核三活態安全度評估的計算模式，允許時間將會從爐心功率未提升前的 30 分鐘縮短為 25.1 ($30 - 4.9 = 25.1$) 分鐘，在其他參數不變的情況之下，重新修正人為誤失機率後， $\text{HR-CCRSLOCA-E42} = 7.22 \times 10^{-3}$ 。

〈圖 9.12〉在小破口 LOCA 之下，功率提升對於燃料溫度變化的影響。



〈表 9.3〉在小破口 LOCA 之下，功率提升對於燃料溫度攀升的影響。(單位：秒)

爐心功率	燃料溫度=644°K	燃料溫度=1477°K	燃料溫度從 644°K 到 1477°K 所需之時間
100%	14366	17912	3546(=59.1 min)
120%	14169	17421	3252(=51.2 min)

9.5.3 HR-CNDSLOCA-E06 之誤失事件分析

小破口冷卻水流失事故(Loss of Coolant Accident, LOCA)之下，運轉員必須於六小時內使用蒸汽排放閥或蒸汽產生器的動力釋壓閥(Power Operation Relief Valve, PORV)進行爐心冷卻水系統(Reactor Coolant System, RCS)的降溫，以及利用調壓槽的 PORVs 或噴灑系統來降低 RCS 的壓力。假若 RCS 的壓力未能在 RWST 槽空之前降低至使低壓注水系統冷端再循環模式能成功運作，將有爐心熔損的虞慮。HR-CNDSLOCA-E06 為小破口 LOCA 之下，運轉員未能在 RWST 槽空之前完成 RCS 降溫降壓的誤失， $HR-CNDSLOCA-E06=2\times 10^{-4}$ 。

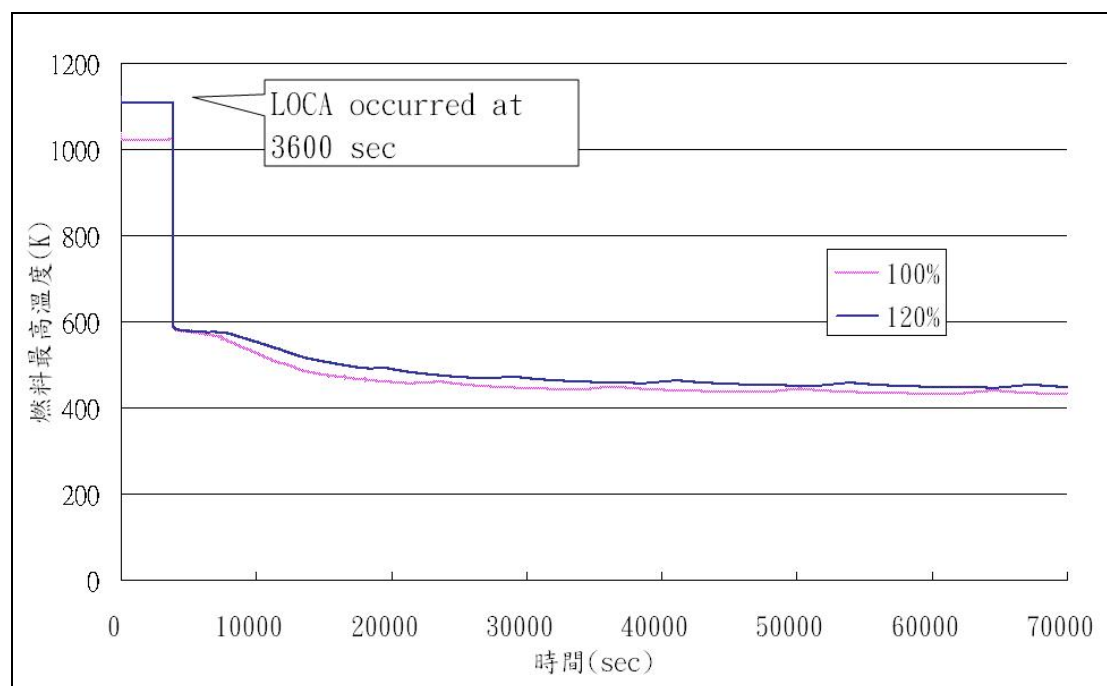
HR-CNDSLOCA-E06 的允許時間為 210 分鐘，是由 $360-150=210$ 得來。其中 360 分鐘為根據核三廠訓練教材以及核三活態安全度評估計算模式得之，RWST 貯水量為 424,600gal，兩套高壓注水系統(High Pressure Injection, HPI)的

最高總注水率為 1,300gal/min，而 ECCS 會在事故發生後的 155 秒啟動高壓注水。因此，RWST 最快會在事故發生後的 357.5 分鐘槽空。由上可知，RWST 槽空的所需時間取決於 RWST 的貯水量以及 HPI 的注水流率，不受爐心功率提升的影響；關於 RCS 降溫方面，運轉人員對於 RCS 的降溫速率必須符合程序書所規範的小於 55°C/hour，且不得使燃料溫度高於 1204°C (2200°F)，在以上的條件之下，保守估計 RCS 降溫過程需 150 分鐘。

在 120% 的爐心功率提升後，MAAP4 的分析結果顯示，調壓槽的釋壓閥設計仍能在 RCS 的降溫過程中符合成功準則，使運轉員可在 150 分鐘內完成 RCS 的降溫；此外，核三訓練教材指出，ECCS 的設計基準為能在小破口 LOCA 之下防止燃料溫度高於 923°K (650°C)。根據 MAAP4 計算結果，現有的 ECCS 仍能在 120% 的爐心功率提升後，在小破口 LOCA 發生時，使爐心溫度低於 923°K (650°C)，如〈圖 9.13〉所示。

綜合上述之討論，爐心的功率提升並不會影響 RWST 的槽空時間與 RCS 的降溫時間，且以現有的相關安全設施仍能符合其成功準則。因此，執行 120% 的爐心功率提升後，HR-CNDSLOCA-E06 的誤失機率不變，仍為 2.00×10^{-4} 。

〈圖 9.13〉功率提升前後，小破口 LOCA 之下的燃料最高溫度變化。



9.5.4 HR-HHRSLOCA-E07 之誤失事件分析

小破口 LOCA 發生時，高壓注水系統會汲取 RWST 的水來注入 RCS 中，以防止爐心裸露；RWST 經高壓注水系統取水後，當其水位低於過低水位時，運轉員必須切換安全注水系統為再循環模式，以維持安全注水系統對 RCS 的補水能力。在兩串高壓注水系統的取水之下，RWST 從過低水位至槽空須耗費 80 分鐘，而此動作必須在 RWST 槽空之前完成。因此，HR-HHRSLOCA-E07 的動作允許時間為 80 分鐘。此外，HR-HHRSLOCA-E07 執行時間為 3.84 分鐘，代入 HCR 後 P_2 趨近於 0，所以，取 $HR-HHRSLOCA-E07=2.0\times 10^{-4}$ 。

HR-HHRSLOCA-E07 允許時間決定於 RWST 過低水位至槽空的耗費時間，只會受到高壓注水泵功率與 RWST 容量的影響。所以，爐心功率的提升並不會影響到 HR-HHRSLOCA-E07 的允許時間。在此事故之下，執行 120%的爐心功率提升後，HR-HHRSLOCA-E07 依然為 2.0×10^{-4} 。

9.5.5 HR-ASI/CCR-S 之誤失事件分析

HR-ASI/CCR-S 為小破口 LOCA 之下，HR-CCRSLOCA-E42 與 HR-ASISLOCA-E00 的相依性，兩者判斷為中度相依， $HR-ASI/CCR-S=1.94\times 10^{-3}$ 。其中，HR-ASISLOCA-E00 不會受到功率提升的影響，為 1.31×10^{-2} ；而 HR-CCRSLOCA-E42 在 120%的爐心功率提昇之下，重新修正為 7.22×10^{-3} 。因此，120%的爐心功率提昇後， $HR-ASI/CCR-S=1.91\times 10^{-3}$ ，而在有效數字只取到小數一位的計算之下，HR-ASI/CCR-S 仍然記為 1.95×10^{-3} 。

9.5.6 HR-ECD/CCR 之誤失事件分析

HR-ECD/CCR 為 HR-CCRSLOCA-E42 與 HR-ECNDSGTR-E10 的相依性，兩者判斷為中度相依。其中，HR-ECNDSGTR-E10 不會受到爐心功率提升的影響；而 HR-CCRSLOCA-E42 在執行 120%的爐心功率提升後，重新修正為 7.22×10^{-3} 。因此，HR-ECD/CCR 在 120%的功率提升下，為 8.79×10^{-2} 。

9.5.7 HR-ASI/ECD/CCR 之誤失事件分析

HR-ASI/ECD/CC 為 HR-CCRSLOCA-E42 與 HR-ASI/ECD 的相依性，其中 $HR-CCRSLOCA-E42=3.3\times 10^{-3}$ ， $HR-ASI/ECD=1.0\times 10^{-2}$ ，兩者為高度相依的計算之下， $HR-ASI/ECD/CC=5.0\times 10^{-3}$ 。

HR-ASI/ECD 為 HR-ECNDSGTR-E10 與 HR-ASISLOCA-E00 的相依性，而 HR-ECNDSGTR-E10 與 HR-ASISLOCA-E00 兩者皆不會受到爐心功率提升的影響，所以 HR-ASI/ECD 經 120% 的功率提升後，其值依然不變；根據討論，HR-CCRSLOCA-E42 經 120% 的爐心功率提升後，從 3.39×10^{-3} 提高至 7.22×10^{-3} 。因此，在 HR-CCRSLOCA-E42 與 HR-ASI/ECD 為高度相依的情況之下，考慮 120% 的爐心功率提升後，HR-ASI/ECD/CC 重新修正為 5.04×10^{-3} 。

