第八章

爐心功率提升對一般暫態 SCRAM 之下與 ATWS 的人為誤失機率之影響

8.1 反應器保護系統

為了維持反應爐爐心在安全狀態內運轉，因此，反應器保護系統會設定與安全相關的必要參數來觸發反應爐的跳脫訊號。當有暫態發生使得反應爐運轉偏離安全狀態時，相關儀器會偵測到反應爐運轉狀況超過其安全限值，使得反應爐保護系統啟動反應器跳脫機組。此系統也會預先提供警報，提供運轉員採取必要的行動。

根據核三的訓練教材，會觸發反應器跳脫訊號的設定參數主要如下所示[10]：

(1)手動啟動反應器跳脫。

(2)安全注水訊號。

(3)固態保護系統（Solid State Protection System, SSPS)失效的警告信號。

(4)源階高通量跳脫(Source Range High Flux Trip)，超過 10^5cps。

(5)中程階高通量跳脫(Intermediate Range High Flux Trip)，超過 25%功率之電流。

(6)功率階高通量跳脫(Power Range High Flux Trip)，低設定點為 25%之功率；高設定點為 109%之功率。

(7)功率階高通量正變化率跳脫(Power Range High Positive Flux Rate Trip)，功率變化大於＋5％/2 秒。

(8)功率階高通量負變化率跳脫(Power Range High Negative Flux Rate Trip)，功率變化大於－35％/2 秒。

(9)過溫△T 跳脫(Over Temperature △T Trip, OT△T)，設定值為 138.3%± penalty。

(10) 過載△T 跳脫（Over Power △T Trip, OP△T)，設定值是 107.2％－Penalty。

(11) 調壓槽高壓力跳脫（High Pressurizer Pressure Trip)，調壓槽高壓力高於 167.7Kg/cm^2（2385 psig)。

(12) 調壓槽低壓力跳脫(Low Pressurizer Pressure Trip)，調壓槽高壓力低於 136.8Kg/cm^2;(1945 psig)。

(13) 反應爐冷卻水低流量(Reactor Coolant Low Flow)跳脫，反應爐冷卻水流率低於正常全流量 90%。

(14) 蒸汽產生器低水位跳脫，蒸汽產生器水位小於 17%窄幅水位。

(15) 汽機跳脫訊號。

(16) 冷卻水泵電壓低於正常電壓之 76%。

(17) 冷卻水泵低頻率小於 57.5 Hz。

(18) 調壓槽高水位高於 92%。

(19) 主蒸汽集管低壓力低於 41.1 kg/cm^2(585psig)。

8.2 爐心功率提升對暫態導致 SCRAM 之下的人為誤失機率之影響

8.2.1 HR-BNFRXTRP-E45 之誤失事件分析

暫態發生造成反應器跳脫之下，且二次側熱沉不可用時，依據程序書，運轉員必須打開至少兩個 PORV 以提供爐心冷卻，並手動起動安全注水。根據核三活態安全度評估中指出，若對一次側冷卻水無任何降溫降壓動作，喪失二次側熱沉 50 分鐘後將使蒸汽產生器寬幅水位低於 6%，再 5 分鐘後蒸汽產生器會在蒸乾，而洩充操作必須在蒸汽產生器燒乾後 5 分鐘內執行。運轉員執行洩充的程序為先查證蒸汽產生器的寬幅水位是否小於 6%，確認之後再執行洩充，因此允許時間定義為 10 分鐘。而修正後的執行時間為 2.88 分鐘，代入 HCR 後，HR-BNFRXTRP-E45=2.2×10^{-2}。

根據 MAAP4 模擬計算，上述暫態事件之下，事故序列發展如<表 8.1>所示。Broken Loop 的蒸汽產生器會在二次側熱沉喪失後 3456 秒(57.6 分)蒸乾，而蒸汽產生器蒸乾前的 5 分鐘(暫態發生後第 3156 秒)水位為 13.1cm。依照程序書步驟，操作員須執行洩充的蒸汽產生器警示水位為小於 6%的寬幅水位，而蒸汽產生器將在降至 6%的寬幅水位後五分鐘蒸乾。參照上述之步驟基礎，併入 MAAP4 之計算結果，將執行洩充的警示水位定義為 13.1 cm。

<表 8.1>發生反應器跳脫及喪失二次側熱沉的暫態之下，重要事件發生之時序。(單位：秒)

Power Level	100%	120%
SCRAM and Feed water Pumps Failed	3600	3600
Broken S/G Dry-out	7056	6339
Charging Pump Injection	15324	12218
RWST Depleted	16750	13659
Core Uncover	8920	7842
Reactor Vessel Failed	15323	12214

<表 8.2>發生反應器跳脫及喪失二次側熱沉的暫態之下，蒸氣產生器水位之變化。(單位：秒)

Power Level	100%	120%
SCRAM and Feed water Pumps Failed	3600	3600
Water level in Broken S/G = 13.1 cm	6756	6087
Broken S/G Dry-out	7056	6339

執行EPU後，蒸汽產生器水位降至13.1 cm時為在暫態發生後的第2487秒(第41.45分鐘)，而在第2739秒(第45.65分鐘)蒸乾。由以上可知，執行EPU後，蒸氣汽產生器從須執行洩充的警示水位到完全蒸乾需要4.2分鐘，共壓縮了0.8分鐘，以上時間表格整理於<表 8.2>。因此，由於執行EPU，允許時間重新定義為9.2分鐘，代入HCR公式，重新修正後得HR-BNFRXTRP-E45=3.2×10^{-2}。

<表 8.3>蒸汽產生器過低水位導致反應器跳機的暫態之下，蒸氣產生器水位之變化。(單位：秒)

Power Level	100%	120%
Feed water Pumps Failed	0	0
SCRAM	14	12
Broken S/G Dry-out	2433	1831
Water level in Broken S/G = 59.2 cm	1833	1732

8.2.2 HR-BNFSGLLT-E45 之誤失事件分析

因暫態而蒸汽產生器過低水位導致反應器跳機時，又喪失二次側熱沉的情況之下，根據核三的活態安全度評估指出，在 23 分鐘後蒸汽產生器寬幅水位會低於 6%，再 5 分鐘後蒸氣產生器燒乾，而洩沖操作必須在蒸汽產生器燒乾後 5 分鐘內執行，以避免爐心熔損。

HR-BNFSGLLT-E45 為在以上的肇始事件下，運轉員於喪失二次側熱沉後未能執行洩充冷卻。洩沖操作必須於蒸汽產生器寬幅水位小於 6%後執行，因此有 10 分鐘的允許時間，而執行時間經修正後為 4.32 分鐘。行為類別判定為規則類型，HR-BNFSGLLT-E45=1.11×10^{-1} 。

反應器跳機後，二次側熱沉喪失至蒸汽產生器燒乾的時間，根據 MAAP4 模擬結果約為 40.5 分鐘，蒸汽產生器蒸燒乾前的 5 分鐘水位為 59.2cm。依照程序書步驟，操作員須執行洩充的蒸汽產生器警示水位為小於 6%的寬幅水位，而蒸汽產生器將在降至 6%的寬幅水位後五分鐘蒸乾。因此，將 59.2 公分的水位高度設定為操作員需執行洩沖動作的警示水位。爐心功率提升至 120%後，蒸汽產生器燒乾的時間約縮短了 10 分鐘，也就是約在 30.5 分鐘後蒸汽產生器燒乾，而在 28.8 分鐘時蒸汽產生器水位降到了 59.2cm，從警示水位到蒸汽產生器燒乾的時間將因爐心功率提升至 120%而壓縮了 1.7 分鐘。以上事件發生時間整理如<表 8.3>所示。此外，MAAP4 的模擬結果顯示，無論功率提升與否，即使洩沖操作晚於蒸汽產生器燒乾後的 5 分鐘，依然可以引動安全注水系統而避免爐心熔損，在採以保守態度之下，還是認定洩沖操作必須在蒸汽產生器燒乾後 5 分鐘內執行。

綜和以上之討論，120%的爐心功率提升將會壓縮到允許時間，使得 HR-BNFSGLLT-E45 的允許時間為 8.3 分鐘，在其他參數不變的情況之下，重新修正此人為誤失機率後，HR-BNFSGLLT-E45=1.73×10^{-1} 。

8.2.3 HR-CDPRXTRP-E45 之誤失事件分析

當有暫態發生導致反應器跳脫並且喪失所有飼水時，蒸汽產生器水位會逐漸降低；在蒸汽產生器燒乾之後，二次側熱沉喪失，此時只能藉由執行 RCS 的洩沖操作來移走爐心的衰變熱。根據西屋公司之研究，洩沖操作必須在蒸汽產生器燒

乾後的 5 分鐘內執行完畢，才能防止爐心熔損。而運轉員必須在蒸汽產生器燒乾後的 5 分鐘內，將二次側降壓並啟動冷凝水泵來注水進入二次側系統，恢復二次側熱沉，以阻止事故序列的惡化。HR-CDPRXTRP-E45 則為運轉人員未能在蒸汽產生器燒乾後的 5 分鐘內，完成二次側的降壓並啟動冷凝水泵來恢復二次側熱沉。

關於反應器跳脫後，蒸汽產生器從正常水位(330,309 lb)至完全燒乾所需的熱量，根據核三活態安全度評估的計算模式如下：

$$330{,}309 \times 630 \times 1.05 \times 10^{-3} = 2.185 \times 10^{5}\,\mathrm{MW-s}$$

在爐心功率為 2775MW(爐心功率為 100%)之下，由上可推知蒸汽產生器燒乾所耗費之時間 T：

$$10 \times 60 \times T + 2{,}775 \times 2.951 \times T^{0.784} = 2.185 \times 10^{5}$$

$$T=53.8\ \mathrm{min}$$

而執行洩沖操作的最晚期限為蒸汽產生器燒乾後的 5 分鐘。因此，在 100%的爐心功率之下，從事故發生至執行二次側降壓並啟動冷凝水泵的最後時間限制，估算約為 60 分鐘，HR-CDPRXTRP- E45=$1.9 \times 10^{-1.}$。

根據以上之計算模式，120%的爐心功率之下，蒸汽產生器燒乾所耗費之時間為：

$$330{,}309 \times 630 \times 1.05 \times 10^{-3} = 2.185 \times 10^{5}\,\mathrm{MW-s}$$

$$10 \times 60 \times T + (2{,}775 \times 120\%) \times 2.951 \times T^{0.784} = 2.185 \times 10^{5}$$

$$T=44.3\ \mathrm{min}$$

因此，允許時間將會縮短了 9.5 分鐘(53.8-44.3=9.5)。

然而經由 MAAP4 的計算結果顯示，在此事故之下，爐心功率提升對於蒸氣產生器燒乾所耗費的時間整理如<表 8.4>所示，允許時間則縮短了 12 分鐘(117.6-105.6=12)。在採以較保守的態度估算此動作誤失機率時，允許時間因爐功率提升而受到的壓縮情況將參照 MAAP4 計算之結果，而不採用核三活態安全度評估的計算模式。因此，根據 MAAP4 之計算結果代入 HCR 之下，在執行 120%的爐心功率提升後，HR-CDPRXTRP-E45=4.8×10^{-1}。

<表 8.4>反應器跳脫並且喪失所有飼水的事故之下，爐心功率提升對於蒸氣產生器水位變化的影響。(單位：sec)

爐心功率	SCRAM	Broken S/G Dry-out
100%	3600	7056(after117.6 min)
120%	3600	6339(after105.6 min)

8.2.4 HR-CDPSGLLT-E45 之誤失事件分析

當發生飼水流量不足的情況時，反應器會因蒸汽產生器的水位過低而跳脫。在此事故之下，假若主飼水泵與輔助飼水泵皆無法運轉，運轉員必須執行二次側的降壓並以冷凝水泵注水進入二次側系統，建立二次側熱沉，否則將會造成爐心熔損。HR-CDPSGLLT-E45 為運轉員未能完成二次側降壓，並以冷凝水泵提供二次側熱沉。

在執行此動作之前，運轉員必須先確認冷凝水系統在使用中，以及確定輔助飼水系統失效並且啟動電動輔助飼水泵與主飼水泵失敗後，方可執行二次側的降壓，再以冷凝水泵來恢復二次側熱沉。根據程序書的步驟指示，並考慮行為修正因子之下，以上的確認動作需要 33.1 分鐘；然而，運轉員必須事故發生後的 33 分鐘之內建立二次側熱沉，因此，HR-CDPSGLLT-E45=1.0。爐心功率提升 120%後，對於此動作誤失機率將不做重新模擬計算，依然維持 HR-CDPSGLLT-E45=1.0 的數值。

8.2.5 HR-STPSGLLT-E45 之誤失事件分析

因蒸汽產生器水位過低而導致反應器跳機的肇始事件之下，輔助飼水喪失時，運轉員必須啟動電動飼水泵來恢復二次側熱沉。根據核三活態安全度評估指出，在此肇始事件之下，28 分鐘後蒸汽產生器會燒乾，必須在蒸汽產生器燒乾後 5 分鐘內執行一次側的洩沖操作；因此，二次側熱沉最遲必須在 33 分鐘之內建立完成，否則將會造成爐心熔損。HR-STPSGLLT-E45 為運轉員未能在 33 分鐘內啟動電動飼水泵來提供二次測熱沉，HR-STPSGLLT-E45=5.05×10^{-1}。

根據以上之討論，允許時間主要是受到蒸汽產生器燒乾時間的影響。而 MAAP4

模擬結果顯示，未執行爐心功率提升前，事故發生至蒸汽產生器燒乾的時間為 40.5 分鐘；而執行 120%的爐心功率提升後，事故發生至蒸汽產生器燒乾的時間縮短為 30.5 分鐘，整理如<表 8.5>所示。因此，120%的爐心功率提升將會壓縮了約 10 分鐘的 HR-STPSGLLT-E45 允許時間，經計算後 HR-STPSGLLT-E45=9.3×10^{-1}。

8.2.6 HR-CP/BNF-RX 之誤失事件分析

HR-CP/BNF-RX 為 HR-BNFRXTRP-E45 與 HR-CDPRXTRP-E45 的相依性，兩者為中度相依，HR-CP/BNF-RX= 3.07×10^{-2}。經 120%的爐心功率提升後，會使 HR-BNFRXTRP-E45 從 2.26×10^{-2} 提高至 3.26×10^{-2}，使 HR-CDPRXTRP-E45 從 1.94×10^{-1}提高至 4.84×10^{-1}；因此，重新修正後，HR-CP/BNF-RX=8.27×10^{-2}。

8.2.7 HR-SF/BNF-SG 之誤失事件分析

HR-SF/BNF-SG 為 HR-BNFSGLLT-E45 與 HR-STPSGLLT-E45 的相依性，爐心功率提升前，HR-BNFSGLLT-E45=1.11×10^{-1}，HR-STPSGLLT-E45=5.05×10^{-1}；經判斷兩者為中度相依，因此，HR-SF/BNF-SG=1.21×10^{-1}。

HR-BNFSGLLT-E45 與 HR-STPSGLLT-E45 皆會受到功率提升的影響，在執行 120% 的功率提升後，HR-BNFSGLLT-E45= 1.73×10^{-1}，HR-STPSGLLT-E45= 9.27×10^{-1}。因此，經重新修正後，HR-SF/BNF-SG=2.70×10^{-1}。

<表 8.5>蒸汽產生器過低水位導致反應器跳機的暫態之下，蒸氣產生器水位之變化。(單位：秒)

Power Level	100%	120%
Feed water Pumps Failed	0	0
SCRAM	14	12
Broken S/G Dry-out	2433	1831

8.3 ATWS

預見暫態未急停(Anticipated Transient Without a Scram，ATWS)的意外事故，主要是兩個串聯的跳脫斷路器(Trip Breaker)同時卡住，使其跳脫線圈(Under Voltage Coil)失去電力而無法跳開，導致自動控制系統無法使控制棒落下爐心。ATWS 最嚴重的事故為發生於喪失主飼水且汽機無法跳脫時，控制棒要求必須在 60 秒內緊急插入爐心，否則一次側壓力有可能會出現超過 3200psig 的峰值，威脅到 RCS 的完整性[12]。

HR-RXMNTRIP-E00 為運轉員未能在 ATWS 發生後的 60 秒鐘內，手動跳脫反應器，允許時間為 60 秒鐘。MAAP4.0.4 程式的極限之一為對於暫態發生初期的分析存有極高的不準度，所以本報告不考慮以 MAAP4.0.4 程式來分析 ATWS 之下數分鐘之內的爐心熱水流狀況；此外，PWR 的電廠中因為有二次側系統的設計，所以 ATWS 對 PWR 電廠的風險衝擊遠小於 BWR。因此，根據第二章區分人為誤失事件的 CDF 重要度基礎之下，本報告忽略電廠執行 EPU 對 ATWS 相關人為誤失事件的再評估。

TSING HUA UNIVERSITY