

## 第四章 爐心功率提升對喪失 NSCW 或 CCW 之下 的人為誤失機率之影響

### 4.1 廠用海水系統失效與核機冷卻水系統之失效簡介[10]

#### 4.1.1 廠用海水系統失效與核機冷卻水系統

核機冷卻水系統(Component Cooling Water System, CCW) 主要功能在於提供以下設施之冷卻：

- (1)餘熱移除系統的熱交換器。
- (2)緊急爐心冷卻水系統的各水泵，包括圍阻體噴灑系統與風扇冷卻系統、高壓注水系統、以及低壓注水系統。
- (3)反應爐的各輔助設施，包括熱屏蔽交換器、RCP 的軸封冷卻器與馬達空氣冷卻器。
- (4)取樣系統、偵檢系統、以及廢料處理系統等與安全無關之設備。

此外，CCW 也作為可能帶有輻射污染之設施與廠用海水系統之界面，減低輻射污染外釋機會。而當 CCW 喪失時，只要汽機驅動的輔助飼水泵有順利啟動，二次側系統就可以順利移走反應器跳脫後的爐心衰變熱，使得電廠將近有十多小時的應變時間。但若汽機驅動的輔助飼水泵啟動失敗，運轉人員又無法及時建立後備冷卻系統，各項重要安全設施將會因無法冷卻而失效，最後將導致爐心熔損。核機冷卻水系統與汽機驅動飼水泵同時失效之雙重事故對電廠系統來說，事故序列的發展則和喪失廠用海水事故相同，為較需注意的肇始事件之一。由喪失 CCW 事故中所造成爐心熔損頻率為 $1.07 \times 10^{-6}$ 。

廠用海水系統(Nuclear Service Cooling Water System, NSCW)的主要功能為冷卻下列之設施以及提供其熱負載：

- (1)核機冷卻水系統。
- (2)汽機廠房循環冷卻水系統。
- (3)緊急柴油發電機。
- (4)緊要寒水系統。
- (5)中央寒水系統。

(6) 冷凝器真空泵與水箱驅氣泵的軸封冷卻。

(7) 主汽機冷凝器機械真空泵封水冷卻器。

當喪失 NSCW 時，如前段所述之需要 CCW 冷卻的設施也會一併失效；另外，汽機廠房循環冷卻水系統(Turbine Building Closed Cooling Water System, TBCW) 主要執行飼水泵與汽機系統的冷卻，因此，NSCW 的喪失也會導致輔助飼水系統失效。根據前線救援系統與支援系統的關係，喪失 NSCW 的事故序列發展就相當於 CCW 與飼水系統同時失效，而由喪失 NSCW 所造成爐心熔損頻率為  $6.24 \times 10^{-7}$ 。

#### 4.1.2 廠用海水系統失效之分析

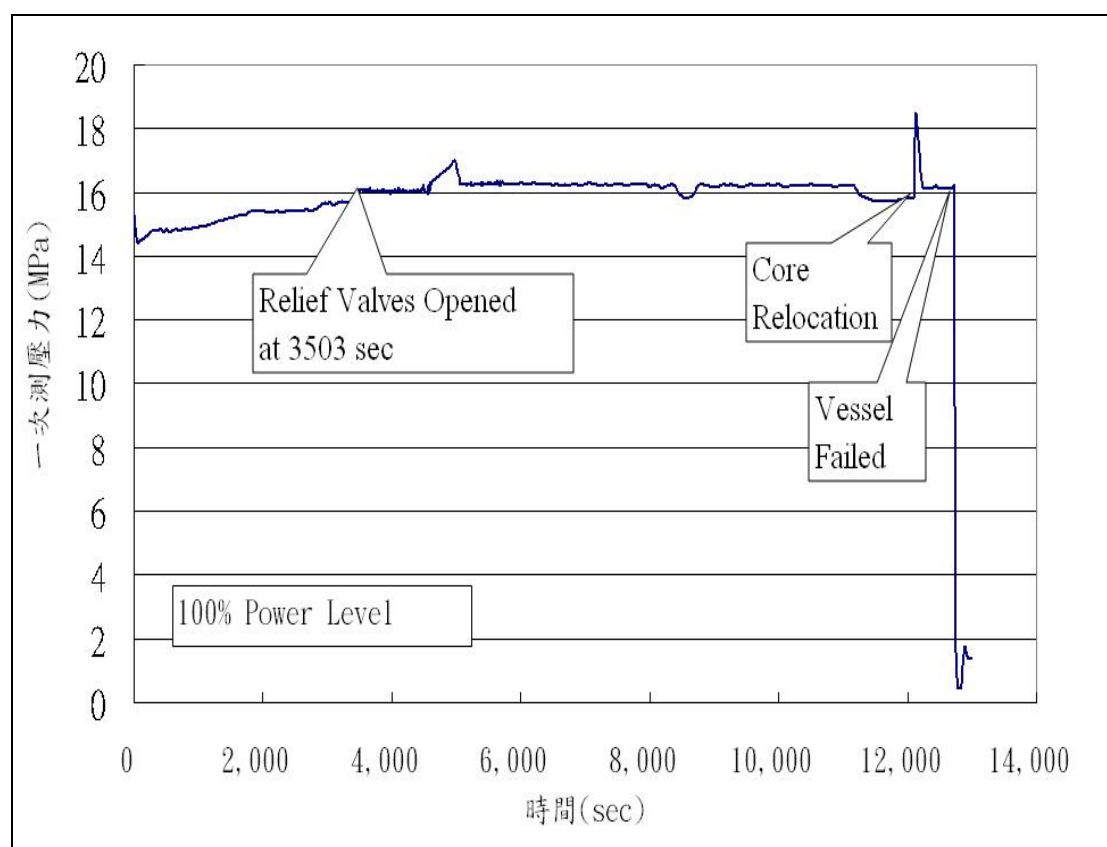
依據 4.1 節之討論，在事故序列的分析中，喪失 NSCW 與喪失 CCW 的差異僅在於輔助飼水系統的失效與否。因此，喪失 NSCW 與 CCW 之下的人為誤失機率分析，本章將一並討論；而在此兩種肇始事件中，又以喪失 NSCW 較為嚴重，因此，分析重點將會著重於 CCW 失效之下的分析比較。

100% 功率運轉時，喪失 NSCW 之下，其事故發生序列根據 MAAP4 計算結果如〈圖 4.1〉所示。主飼水泵及輔助飼水泵失效後，二次側飼水壓力會隨著溫度升高而增加，當二次側系統壓力達至蒸汽產生器釋壓閥的開啟點時，二次側釋壓閥開啟，飼水會大量汽化並從釋壓閥流溢出二次側迴路。藉由以上暫態，冷卻水熱量可持續從蒸汽產生器移走。

在第 3436 秒蒸汽產生器蒸乾之後，冷卻水失去熱沉，一次側壓力會攀升至安全釋壓閥的開啟點，調壓槽安全釋壓閥的開啟將導致 RCS 的冷卻水大量的從安全釋壓閥蒸發而溢出 RCS；而 NSCW 喪失所造成的 CCW 失效會使得安全注水系統完全停擺，RCS 因而無法獲得補水。最後，一次側冷卻水將會漸漸喪失使得爐心裸露、熔損。

而功率提升後，在喪失 CCW 及飼水泵失效後的重要事件發生時間點，MAAP4 計算結果如〈表 4.1〉所示。在事故發生初期，爐心衰變熱的移除主要仰賴二次側系統；飼水完全被蒸乾後，一次側失去熱沉，冷卻水便開始從調壓槽的釋壓閥汽化而逸出一次測系統。根據能量守衡的基本定理之下，由於功率提升的設定並沒

有更動一次側冷卻水的總量。因此，事故發生後的蒸汽產生器蒸乾時間與爐心熱功率有高度相依的線性關係。



〈圖 4.1〉功率提升前，喪失 CCW 之下冷卻水系統的壓力變化。

〈表 4.1〉爐心功率提升前後，喪失 CCW 之下，重要事件時間發生點之比較。

(時間單位：秒)

功率(%)	S/G Dry-out	RCP Off	Uncover	Relocation	RV Failed
100	3436	4962	5296	12117	12725
105	3228	4682	4987	11103	11693
110	3051	4413	4689	10002	10601
115	2867	4187	4442	9258	9864
120	2713	3982	4206	8707	9290

## 4.2 爐心功率提升對喪失 NSCW 或 CCW 之下的人為誤失機率之影響

### 4.2.1 HR-ALTCCPCL-E29 之誤失事件分析

喪失 CCW 或 NSCW 時，為了維持 RCP 的軸封注水，需建立 CCP 之後備冷卻。HR-ALTCCPCL-E29 為運轉員未能執行 CCP 後備冷卻水源的管閥配置，而造成 CCP 喪失冷卻水源，無法提供 RCP 之軸封注水，在 RCP 喪失軸封注水 30 分鐘後，就有可能發生軸封洩漏。因此，根據核三活態安全度評估的計算，在 HCR 的模式中允許時間為 30 分鐘，行為類別判定為規則類型，代入 HCR 公式後， $HR-ALTCCPCL-E29 = 4.6 \times 10^{-1}$ 。

根據 MAAP4 的模擬，喪失 NSCW 時，執行 EPU 會提早爐心裸露的時間，並且會加速一次側管路的溫度上升速率。儘管功率的提升會影響爐心狀態的演變，但是根據[4]顯示，軸封洩漏的主要原因為軸封注水系統的失效。RCP 發生軸封洩漏的議題被定義為系統運作的問題，與爐心的熱水流狀態無關。因此，執行 EPU 後對爐心狀態演變的影響，並不會壓縮到運轉人員的操作允許時間，而對人為誤失機率造成衝擊。所以在執行功率提升後，HR-ALTCCPCL-E29 的誤失機率依然不變， $HR-ALTCCPCL-E29 = 4.6 \times 10^{-1}$ 。

### 4.2.2 HR-ECDLOCCW-E29 之誤失事件分析

喪失 CCW 或 NSCW 時，依程序書敘述，提供 RCP 軸封注水的 CCP 達到溫度限值後，運轉員必須在 30 分鐘之內執行緊急降溫降壓以避免 RCP 軸封受損。30 分鐘的動作允許時間是根據事件樹分析所得，RCP 喪失軸封注水 30 分鐘後就有可能發生軸封洩漏，因此，運轉員必須在 30 分鐘之內執行緊急降溫降壓。

HR-ECDLOCCW-E29 為運轉員未執行緊急降溫降壓以避免 RCP 軸封受損。以 HCR 模式量化此誤失機率中，行為類別判定為規則類型，允許時間為上述之 30 分鐘。功率提升後對允許時間衝擊之探討，則同 HR-ALTCCPCL-E29 的允許時間之討論。因此，HR-ECDLOCCW-E29 的誤失機率不受功率提升之影響，為  $1.8 \times 10^{-2}$ 。

#### 4.2.3 HR-CCP/ACCI 之誤失事件分析

HR-CCP/ACCI 為 HR-ACCISO-E29 與 ALTCCPCL-E29 的相依性，兩者判斷為低度相依， $HR-CCP/ACCI=2.28\times 10^{-2}$ 。其中 HR-ACCISO-E29 為在喪失 CCW 或 NSCW 之下，運轉員未能在執行蒸汽產生器降溫至冷停機的過程中將蓄壓槽隔離，導致氮氣進入 RCS 影響 RCS 的自然對流， $HR-ACCISO-E29=2.00\times 10^{-4}$ 。此動作對運轉員來說沒有時間的急迫性，所以不做允許時間的討論，故不受爐心功率提升後對爐心狀態改變的影響。在 120% 的爐心功率提昇之下，其值不變。

而根據 4.3.1 節之討論，ALTCCPCL-E29 亦不受爐心功率提升之影響。因此，在兩者皆不受爐心功率提升影響之下，執行 120% 的爐心功率提升後，HR-CCP/ACCI 依然為  $2.28\times 10^{-2}$ 。

#### 4.2.4 HR-CCP/ECD 之誤失事件分析

HR-CCP/ECD 為 HR-ECDLOCCW-E29 與 HR-ALTCCPCL-E29 的相依性，兩個動作皆為同一程序書之連續動作，目的為維持 RCP 軸封之完整，判斷為中度相依， $HR-CCP/RHR$  之值為  $7.3\times 10^{-2}$ 。

根據 4.3.1 節與 4.3.2 節對功率提升之討論，因為以上兩個動作的誤失機率皆不因功率提升而有所改變，因此，HR-CCP/ECD 在功率提升後依然為  $7.3\times 10^{-2}$ 。

#### 4.2.5 HR-CCP/RHR 之誤失事件分析

HR-CCP/RHR 為 HR-ALTRHRCL-E29 與 HR-ALTCCPCL-E29 的相依性，兩個動作相隔一段時間但為操作方式相似之運轉員動作，判斷為中度相依。 $HR-CCP/RHR$  之值為  $1.0\times 10^{-1}$ 。

喪失 CCW 或 NSCW 時，為了彌補軸封洩漏發生時的冷卻水流失，在緊急降溫降壓成功後，RHR 會啟動來執行爐心注水，而運轉員必需建立 RHR 系統的後備冷卻以防 RHR 注水失效。HR-ALTRHRCL-E29 為運轉人員未能執行 RHR 後備冷卻水源的管閥配置致使 RHR 的爐心注水失效。根據程序書，在 RHR 熱交換器無 CCW 冷卻水之情況下，RHR 泵的運轉不能超過一個小時，因此，在 HCR 的模式中允許時間為



60 分鐘，而行為類別則判定為規則類型。60 分鐘的允許時間為程序書所規定的失去 CCW 後 RHR 泵可運作的時間，此動作的允許時間不受事故發生後的爐心熱水流狀態演變的影響。所以，即使執行爐心功率的提升而加速爐心熱水流狀態的演變，此動作也不會因為爐心熱水流狀態演變的加速而壓縮到允許時間。無論功率與否， $HR-ALTRHRCL-E29=8.9\times 10^{-2}$ 。

根據  $HR-ALTRHRCL-E29$  與 4.3.1 節之討論，此兩項人為誤失事件的發生機率並不會受到爐心功率提升的衝擊。因此，功率提升後， $HR-CCP/RHR$  之值並不會改變，依然為  $1.0\times 10^{-1}$ 。

#### 4.2.6 $HR-CCP/SGBNF$ 之誤失事件分析

$HR-CCP/SGBNF$  為  $HR-ALTCCPCL-E29$  與  $HR-BNFSGLLT-E45$  的相依性。判斷為低度相依， $HR-CCP/SGBNF=7.07\times 10^{-2}$ 。

當 CCW 系統失效時，由於 RHR 熱交換器喪失冷卻而無法達到長期移熱的成功準則，因此必須改成藉由蒸汽產生器來移除爐心所產生的熱量。根據程序書，當蒸汽產生器壓力降至一大氣壓時，運轉員就必須執行蒸汽產生器的補水及洩沖 (Feed and Bleed) 來降低爐心冷卻水系統溫度。 $HR-BNFSGLLT-E45$  為運轉員未執行蒸汽產生器之補水及洩沖以降低爐心冷卻水系統溫度的動作誤失， $HR-BNFSGLLT-E45=2\times 10^{-4}$ 。由於此時系統已趨於穩定，運轉人員心理壓力不大，此動作沒有時間的急迫性，因此無允許時間之討論。

而依據 4.3.1 節之討論後， $HR-ALTCCPCL-E29$  亦不受到爐心功率提升的影響，因此， $HR-CCP/SGBNF$  在執行 120% 的爐心功率提升後依然為  $7.07\times 10^{-2}$ 。

#### 4.2.7 $HR-LHSI-TC2$ 、 $HR-LHSI-TC1$ 、 $HR-CCW-RHRHX-INI$ 與 $HR-NSCW-TC1$ 之誤失事件分析

在喪失核機冷卻水或廠用海水的肇始事件之下，相關的人為誤失事件上尚有  $HR-LHSI-TC2$ 、 $HR-LHSI-TC1$ 、 $HR-CCW-RHRHX-INI$  與  $HR-NSCW-TC1$ 。但以上之人為誤失事件在核三活態安全度評估中並沒有以 HCR 模式討論到允許時間與人為誤

失機率的關係。因此，本報告不討論電廠執行 EPU 對 HR-LHSI-TC2、HR-LHSI-TC1、HR-CCW-RHRHX-INI 與 HR-NSCW-TC1 的影響。

