

第五章 爐心功率提升對 SGTR 之下的人為誤失機率之影響

5.1 SGTR 事故

5.1.1 SGTR 事故之事故分析

馬鞍山電廠蒸汽產生器為 F 型直立式 U 型管的熱交換器 (Heat exchanger)，重量為 305 噸。一次側的高溫高壓水先由熱端管(Hot Leg)流入蒸汽產生器的進水室 (Inlet Chamber)，再沿著 5624 根 U 型管至出水室 (Outlet Chamber)，最後靠著反應器冷卻水泵打回至反應爐；二次側飼水則由頂部飼水環進入蒸汽產生器，經潛降區 (Down Comer) 流至 U 型管束的底部。在流經 U 型細管時，二次側飼水會吸收一次側的熱量而汽化，成為汽水混合體，再經汽水分離器 (Moisture Separator)、乾燥器 (Dryer) 等將水分排除，最後得約 99.75% 乾度的蒸汽送往汽機作功發電；而被排除的飽和水混合飼水再回到潛降區，繼續循環。正常運轉時，蒸汽產生器是將一次側熱能轉換為推動汽機動能的重要設施 [10]；在事故發生時，蒸汽產生器可藉由釋壓閥釋出蒸汽而有效地將一次側熱量移出爐心。

關於 SGTR 的模擬，MAAP4 的設定如下：

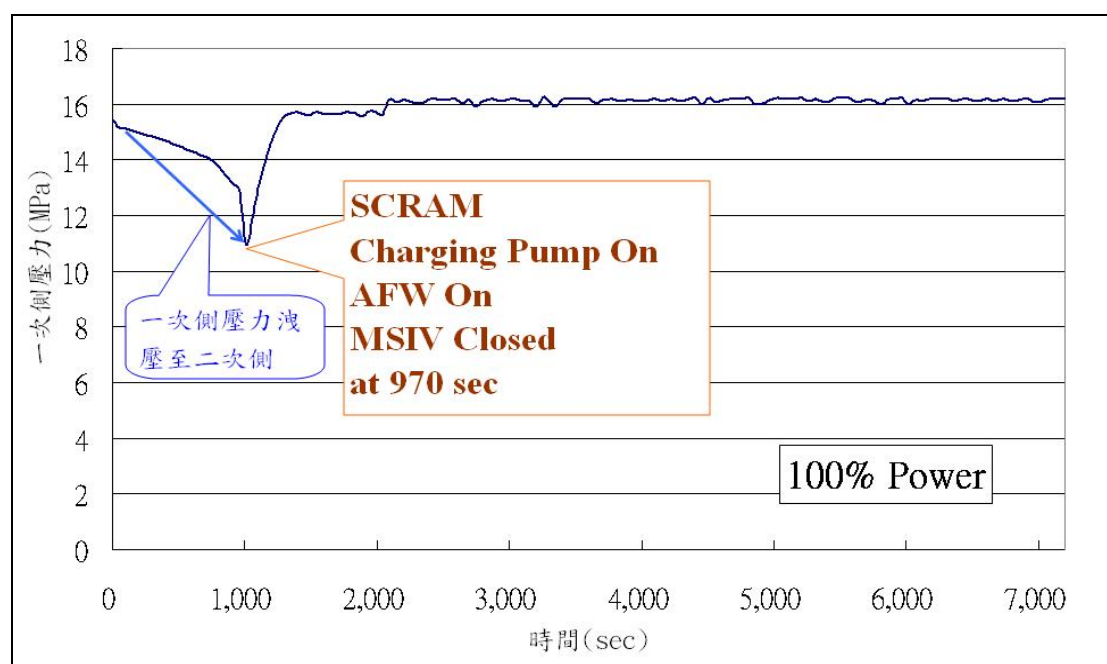
- (1)破口位置：Broken Loop 的 Hot Tube
- (2)破口面積：10.6 平方公分
- (3)破口高度：0.303 公尺

模擬結果的序列中，當蒸汽管束破裂事故 (Steam Generator Tube Rupture, SGTR) 發生時，一次側壓力會失壓而壓力下降 (參照<圖 5.1>)，同時一次側的冷卻水也會因高壓而經由破口流入二次側，使得 Broken Loop 的蒸汽產生器水位會高於 Unbroken Loop 的蒸汽產生器水位 (參照<圖 5.2>)。當一次側壓力低於安全系統的啟動設定點時，便產生安全信號，反應爐 SCRAM 且 MSIV 關閉。此外，高壓注水系統啟動注水進入一次側，在一次側水量流失至二次側之後因高壓注水而慢慢回升；而一次側壓力也漸漸升高 (參照<圖 5.1>)。在 MSIV 關閉時，蒸汽產生器水位因短時間內累積大量蒸汽而瞬間產生高壓 (參照<圖 5.3>)，蒸汽產生器內大量的的高壓蒸汽在短時間內使蒸汽產生器的水位迅速降低 (參照<圖

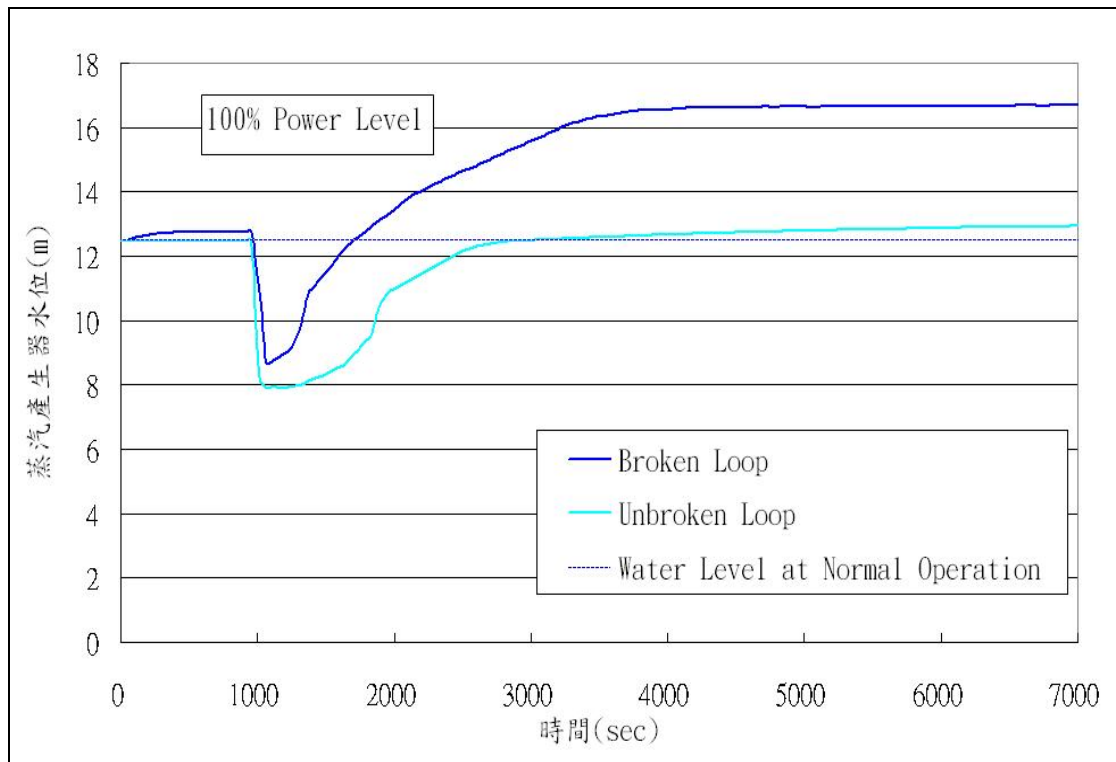
5.2>)。隨後，輔助飼水系統注水，蒸汽產生器水位逐漸回升，而在 Broken Loop 的蒸汽產生器裡，由於一次側冷卻水洩漏至二次側，所以水位會高於 Unbroken Loop 的蒸汽產生器(參照<圖 5.2>)。最後，一次側壓力會因為 RWST 用罄後而高壓注水終止，壓力下降與二次側壓力一致(參照<圖 5.4>)。此外，執行功率提升後，在發生 SGTR 時，重要事件發生時間點如<表 5.1>所示，而一次側壓力的變化示意於<圖 5.5>。

<表 5.1>功率提升後，重要事件發生之時間比較。

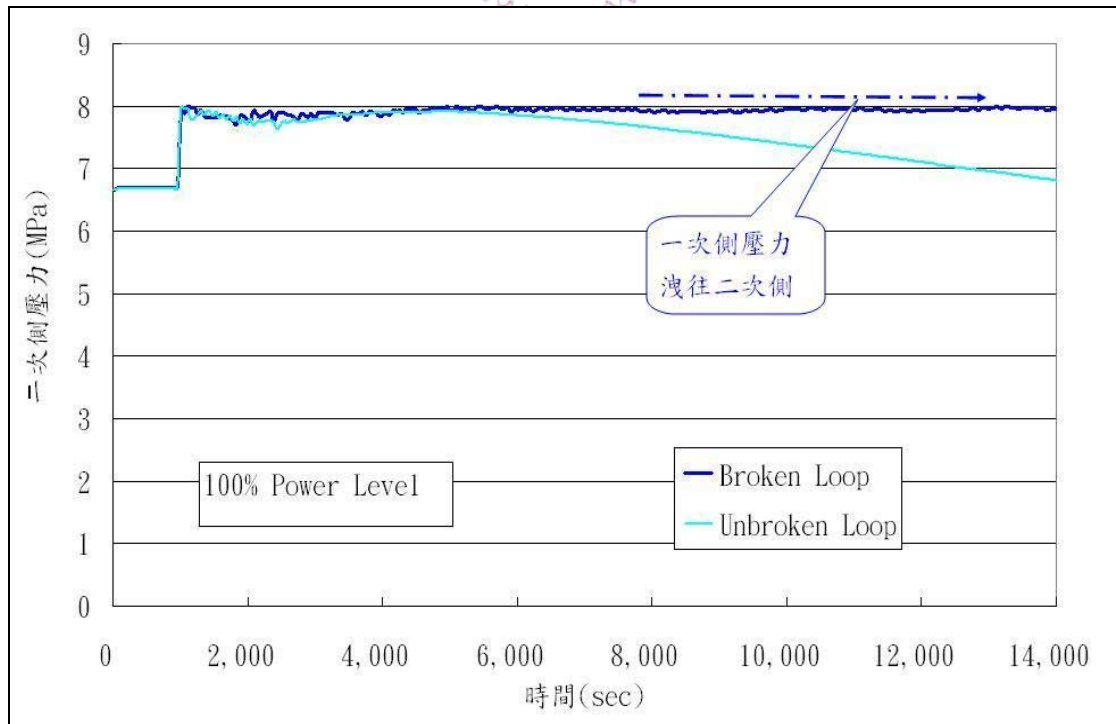
功率(%)	Charging Pump On	SCRAM	AFW On	MSIV Closed	RWST Depleted
100	970	970	970	970	48444
105	971	971	971	971	48295
110	970	970	970	970	48368
115	970	970	970	970	48387
120	970	970	975	970	48432



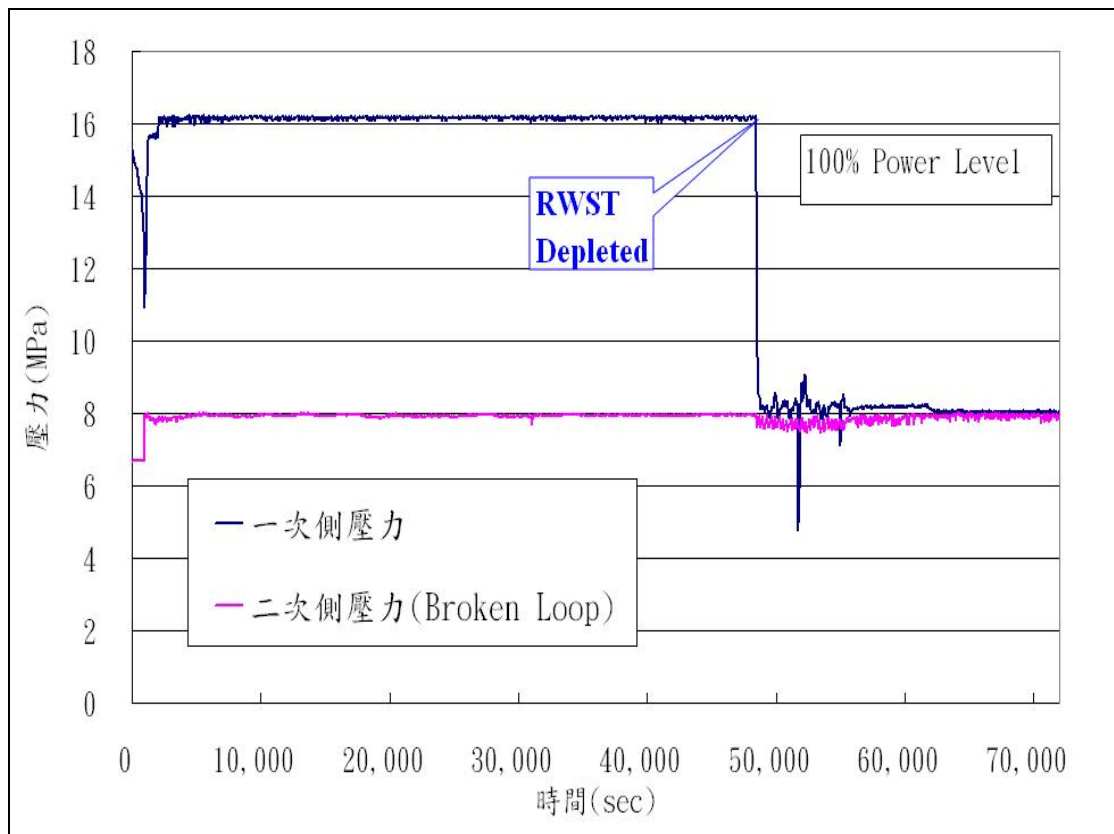
<圖 5.1>功率提升前，SGTR 發生時之一次側壓力變化。



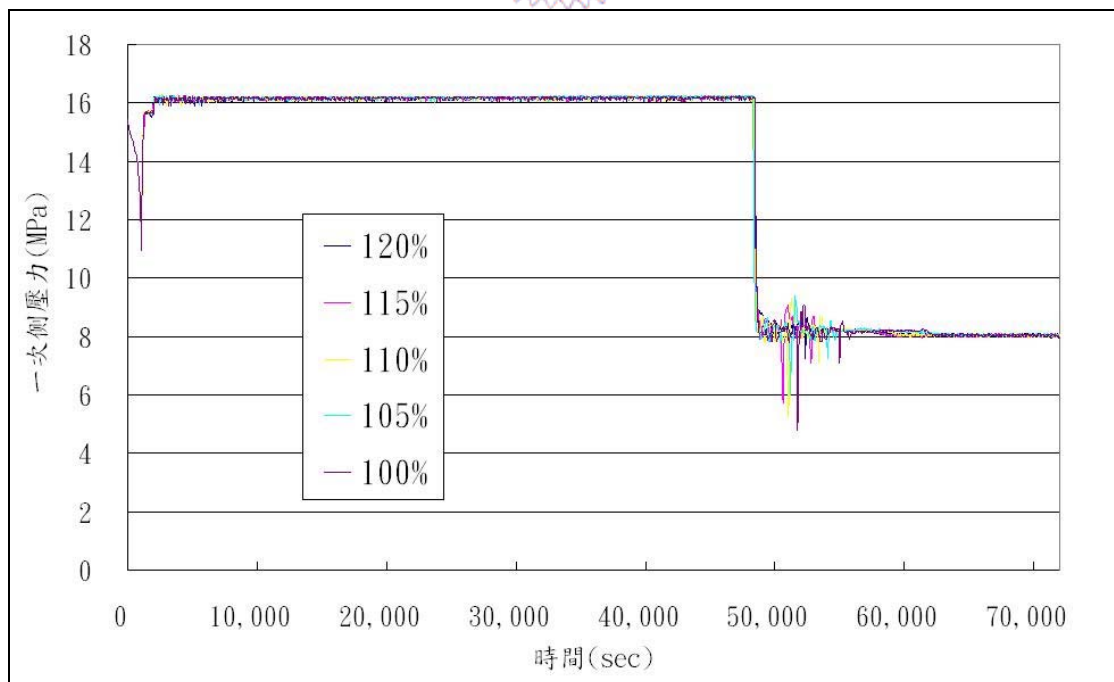
〈圖 5.2〉功率提升前，SGTR 發生時之蒸汽產生器水位。



〈圖 5.3〉功率提升前，SGTR 發生時之蒸汽產生器壓力。



〈圖 5.4〉功率提升前，SGTR 發生時之一次側壓力與二次側壓力。



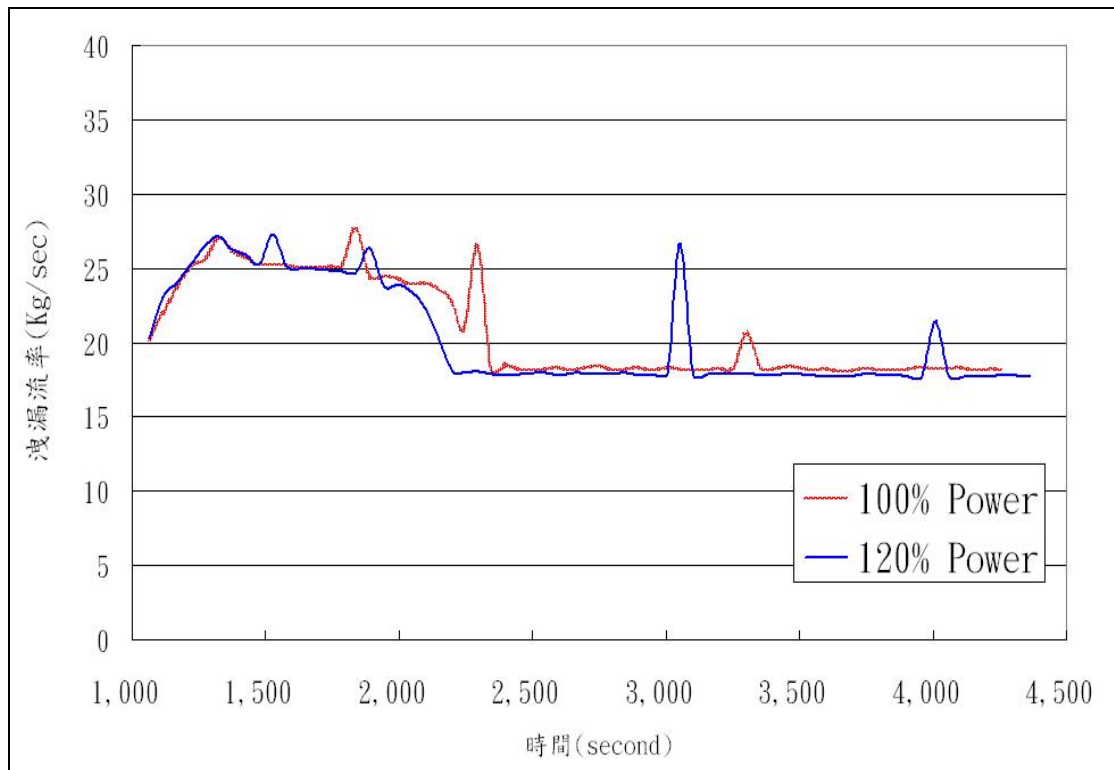
〈圖 5.5〉功率提升後，一次側的壓力變化。

5.1.2 SGTR 的洩漏率

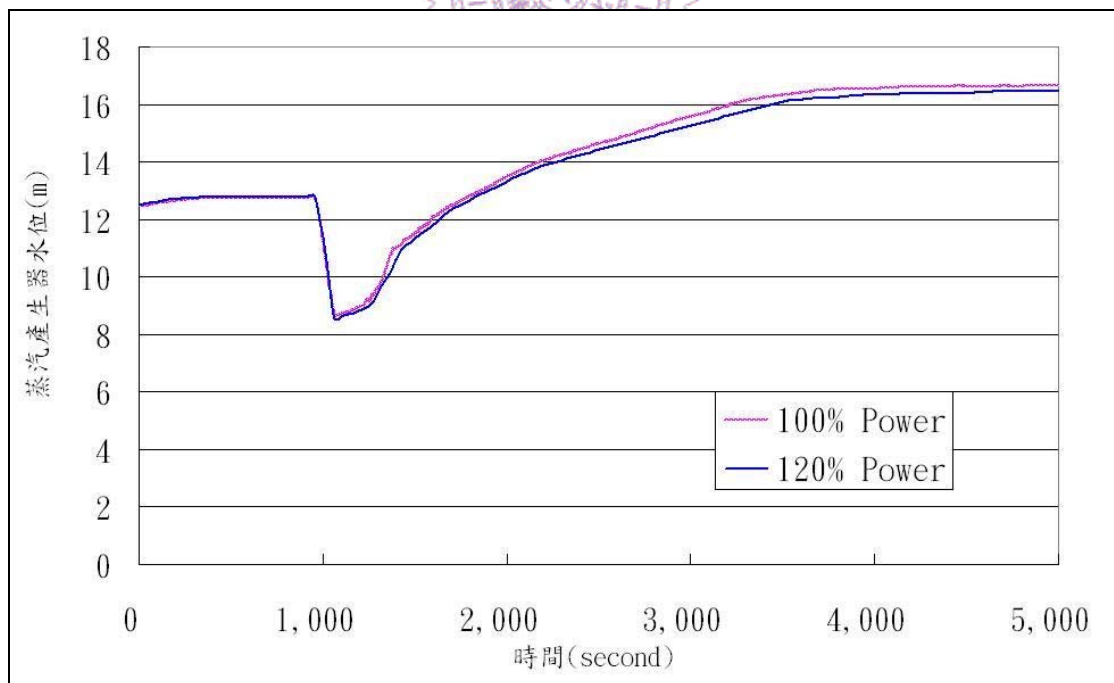
SGTR 之下，一次側流至二次側的洩漏流率會影響到蒸汽產生器達到滿水位的時間。根據核三活態安全度評估，依照 RETRAN 的計算，洩漏流量為 36.71 Kg/s 時，蒸汽產生器會在 22 分鐘達到最高水位；洩漏流量為 19.81 Kg/s 時，則須約 30 分鐘。而以國外電廠經驗為例，SGTR 發生時有 80% 的機率小於 19.81 Kg/s。

以 MAAP4 分析結果而言，在 EPU 前，全功率運轉之下發生 SGTR 後的 17.7 分鐘，蒸汽產生器降到最低水位(參照<圖 5.6>)，在約第 80 分鐘，蒸汽產生器達到滿水位。從最低水位到滿水位的 52.3 分鐘的時間間隔中，平均洩漏流量則為 20.75 Kg/s(參照<圖 5.6>)；爐心功率提升後，SGTR 後至最低水位的時間幾乎與功率未提升前相同(參照<圖 5.7>)，而在約第 72.7 分鐘時達到最高水位，平均洩漏流量則為 20.17 Kg/s。在此設定的 MAAP4 計算之下，EPU 的執行並不會對 SGTR 的洩漏流率造成其太大的影響。

當 SGTR 發生時，影響洩漏流率與蒸汽產生器滿水位時間的主要因素為一次側的壓力與溫度。在 2.1.2 節中討論到，爐心功率提升的執行並沒有對一次側壓力與溫度造成變化。因此，就以上而言，洩漏流率與蒸汽產生器滿水位時間應該不會因執行 EPU 而受到影響，而根據 MAAP4 對於 SGTR 的模擬結果也驗證了此現象。



<圖 5.6>EPU 前後，SGTR 發生時之洩漏流率比較。



<圖 5.7>EPU 後，SGTR 發生時之蒸汽產生器(Broken Loop)水位比較。

5.2 爐心功率提升對 SGTR 之下的人為誤失機率之影響

5.2.1 HR-ECNDSGTR-E10 之誤失事件分析

電廠發生 SGTR 事故時，反應器會因調壓槽壓力過低的信號而自動跳脫，同時高壓注水系統、輔助飼水系統也會在安全注水信號動作下分別自動注水進入一次側與二次側。而一次側冷卻水會因壓差而往二次側洩漏，若運轉人員未隔離此蒸汽產生器並執行緊急降溫降壓以中止洩漏，蒸汽產生器滿水後不僅喪失其移熱能力，更可能導致主蒸汽管斷裂。

HR-ECNDSGTR-E10 的誤失為運轉員未隔離受損迴路之蒸汽產生器並執行緊急降溫降壓，造成蒸汽產生器滿水位。蒸汽產生器滿水位的時間與洩漏流率有關，根據 RETRAN 分析全功率運轉發生 SGTR，關於蒸汽產生器滿水位的時間，洩漏流率為 19.81kg/s(=340gpm)時需 30 分鐘，有 80%的機率洩漏流率為 19.81kg/s；洩漏流率為 36.71kg/s(=630 gpm)時則需 22 分鐘，有 20%的機率洩漏流率為 36.71kg/s。將以上數據代入 HCR 模式計算可得：

$$p_{2,630} = e^{-\left(\frac{6.64/15.36^{-0.148}}{1.14}\right)^{1.27}} = 8.4 \times 10^{-1}$$

$$p_{2,340} = e^{-\left(\frac{14.64/15.36^{-0.148}}{1.14}\right)^{1.27}} = 5.3 \times 10^{-1}$$

$$P_2 = 0.84 \times 0.2 + 0.53 \times 0.8 = 5.9 \times 10^{-1}$$

由 MAAP4 所計算的蒸汽產生器達至高水位時間，洩漏率為 19.24 kg/s 時需 54.9 分鐘；洩漏率為 36.78 kg/s 時需 32.8 分鐘。而在執行 EPU 後，同樣的破口大小之下，洩漏率並沒有太大的改變，分別為 18.93 kg/s 與 37.55 kg/s，蒸汽產生器達至高水位時間則為 58.9 分鐘與 30.4 分鐘。因此，由 MAAP4 的計算結果說明允許時間並不會受到壓縮，所以 HR-ECNDSGTR-E10 的誤失機率並未受到執行 120%爐心功率提升的影響，仍然為 5.86×10^{-1} 。相關數據整理如〈表 5.2〉。

〈表 5.2〉執行 EPU 前後，SGTR 之下，洩漏流率與蒸汽產生器滿水位時間之比較。

	80%機率之下的 SGTR		20%機率之下的 SGTR	
	洩漏流率 (kg/s)	滿水位時間 (min)	洩漏流率 (kg/s)	滿水位時間 (min)
RETRAN(100% Power)	19.81	30	36.71	22
MAAP4(100% Power)	19.24	54.9	36.78	32.8
MAAP4(120% Power)	18.93	58.9	37.55	30.4

5.2.2 HR-BNFSGTR-E45 之誤失事件分析

SGTR 事故之下，反應器跳脫後，假若輔助飼水系統失效而無法對二次側進行補水，運轉員必須在蒸汽產生器(Unbroken Loop)寬幅水位低於 6%後執行 RCS 的洩沖冷卻，並在蒸汽產生器燒乾後五分鐘內完成，以免爐心因二次側熱沉的喪失而裸露、熔損。HR-BNFSGTR-E45 為運轉員在此事故之下，無法於喪失二次側後完成洩沖冷卻， $HR-BNFSGTR-E45 = 2.26 \times 10^{-2}$ 。

根據核三活態安全度評估，HR-BNFSGTR-E45 的允許時間為 10 分鐘，允許時間的分析模式與 3.2.1 節中 HR-BNFSGLLT-E45 的允許時間分析模式相同；而在 3.2.1 節中 HR-BNFSGLLT-E45 的允許時間因 120%的爐心功率提升，由 10 分鐘縮短為 8.3 分鐘。因此，HR-BNFSGTR-E45 的允許時間將會因為 120%的爐心功率提升縮短為 8.3 分鐘，代入 HCR 公式後，HR-BNFSGTR-E45 誤失機率修正為 4.80×10^{-2} 。

5.2.3 HR-RWSTSGTR-E23 之誤失事件分析

SGTR 事故之下，RCS 的低壓訊號會啟動高壓注水泵從 RWST 汲取水源以注水進入 RCS；運轉員必須在 RWST 槽空之前完成 RWST 的補水，以免 RCS 失去補水，導致爐心裸露、熔損。HR-RWSTSGTR-E23 為運轉員未能在 RWST 槽空之前完成 RWST 的補水。

HR-RWSTSGTR-E23 的允許時間主要決定於 RWST 的水量以及高壓注水泵的汲水流率與 RWST 的貯水量。根據核三活態安全度評估，在 SGTR 事故之下，高壓注

水泵的汲水流率為 650 gal/min，RWST 的貯水量保守假設為過低水位存有 108,100gal，估計約 165 分鐘後 RWST 槽空。在以上之系統狀況下，代入 HCR 公式後， $HR-RWSTSGTR-E23=2.2\times 10^{-3}$ 。爐心功率提升對 HR-RWSTSGTR-E23 的影響分析中，不會更動到 RWST 與高壓注水系統的參數設定，因此，在 120%的爐心功率提升之下，HR-RWSTSGTR-E23 依然為 1.1×10^{-3} 。

