

第七章 爐心功率提升在 MSLB 之下的人為誤失機率之影響

7.1 主蒸汽系統概述[10]

7.1.1 主蒸汽管

主蒸汽系統包括主蒸汽管、流量限制器、主蒸汽隔離閥 (Main Steam Isolation Valve, MSIV)、動力釋壓閥(Power Operated Relief Valve, PORV)、以及安全閥(Safety Valve, SV)。主蒸汽系統的功能主要如下：

- (1)將蒸汽產生器產生的飽和蒸氣傳輸至高壓汽機來做功發電，以及其他輔助系統，包括第二級的再熱加熱器、主飼水泵汽機、汽封、汽機旁通、輔助蒸汽和程序取樣所需。
- (2)構成放射性流體與非放射流體的部分邊界。在 SGTR 事故之下，可阻止輻射污染的擴散。
- (3)作為 RCS 的主要熱沉。在機組異常時可移除 RCS 的熱量，防止燃料過熱；且其設計基準可在汽機或反應器未跳脫之下，可將蒸汽旁通至冷凝器或大氣，使機組由滿載降至廠內負載。

核三電廠的主蒸汽系統設有三支主蒸汽管將高壓蒸汽帶出蒸汽產生器，主要參數如<表 7.1>所示。三支主蒸汽管會在隔離閥下游匯接成一條 42 吋的連通集管，然後再經 4 支 26 吋的進汽管並連接 4 個汽機斷止閥和控制閥，最後進入汽機作功。其中，每一串蒸汽管路上均包含兩個通往大氣的 PORV、五個彈簧式安全閥、一只 MSIV、一只主蒸汽隔離旁通閥以及一個連接到冷凝器的洩水閥。

此外，當汽機要從暖機升載到額定功率負載時，部份蒸汽可經由主蒸汽管進入支管傳輸至輔助蒸汽系統 (Auxiliary Steam System)、汽封系統 (Steam Seal System)、汽水分離再熱器、蒸汽排放系統、以及主飼水泵汽輪機來控制及穩定蒸汽壓力與流量的變化；而在功率降載時，蒸汽可旁通 32%的額定蒸汽量至蒸汽大氣排放裝置 (Steam Dump To Atmosphere) 和 53%的額定蒸汽量至蒸汽主冷凝器排放裝置 (Steam Dump To Condenser)。

〈表 7.1〉核三主蒸管之重要系統參數。

管徑	32 inch
設計壓力	83.3 kg/cm ² (1185psig)
設計溫度	315.5°C (600°F)
額定蒸汽壓力	66.7 kg/cm ² (964psig)
額定蒸汽乾度	99.75%
額定飽和蒸汽流量	5.577×10 ⁶ kg/hr (12.295×10 ⁶ lb/hr)
由蒸氣產生器至高壓汽機之總壓降	2.1 kg/cm ² (30psig)

7.1.2 流量限制器 (Flow Restrictor)

流量限制器位於在蒸汽產生器出口噴嘴，為文氏管型。在 MSIV 上游發生 MSLB 事故時，流量限制器可限制蒸汽沖放率；而在正常運轉中，可監測蒸汽流量。流量限制器的設計功能主要以下列條件為準則：

1. 正常狀況下，主蒸汽為設計額定蒸汽流量時，流量限制器可減少蒸汽的壓降。
2. 當蒸汽管路破裂時，減少蒸汽流量以降低潛在之蒸汽推力並提高 RCS 保護的安全餘裕。
3. 監控及校正蒸汽流量，提供系統控制參數和保護訊號。

7.1.3 PORV 與 SV

PORV 位於圍阻體外側的蒸汽管路上，在 SV 的上游，為空氣氣壓驅動操作，但可至現場經手動開啟。在停機而冷凝器不能使用的情況下，運轉員可開啟將爐心殘留的衰變熱經消音器排至大氣。PORV 的功能在於減少暫態時安全閥的使用，並且可在安全閥開啟後調整蒸汽壓力；此外，在 MSIV 關閉或是蒸汽旁通系統失效的狀況之下，可藉由 PORV 的開啟來調整主蒸汽壓力與溫度。每一個 PORV 在設計壓力 83.5 kg/cm² (1185psig) 之下，釋放容量為 310,260 kg/hr (684,000 lb/hr)，3 個 PORV 的釋放容量可達至額定蒸汽流量的 10%；PORV 的開啟設定點可由運轉員在控制室操作，正常情況之下，高壓開啟設定點為 83.5 kg/cm² (1,185psig)，低壓關閉設定點為 79.2 kg/cm² (1,125psig)，從全關至全開需

約 20 秒鐘。

SV 位於圍阻體外側的蒸汽管路上，主蒸汽隔離閥上游，動力釋壓閥之後。每一主蒸汽管路上備有五個安全閥，提供二次側系統的過壓保護，各閥容量相同，但隨開啟設定壓力的增加其排放量亦增加，五個安全閥的總容量為 $2,088 \times 10^6$ kg/hr (4,603,570 lb/hr)。當主蒸汽流量對於爐心熱功率失去熱平衡而蒸汽壓力升高至威脅到系統安全時，可開啟 SV 藉由將蒸汽排至大氣來緊急釋放蒸汽產生器的能量。

SV 與 PORV 主要用於限制主蒸汽系統的壓力以滿足電廠系統安全設計準則，以及緊急移熱。

7.1.4 MSIV

主蒸汽管的 MSIV 位於在安全閥之後，為一氣動液壓活塞隔離閥，由電磁導引閥控制活塞操作，當電磁閥門失去控制電源或控制氣壓時，MSIV 將會閉鎖在關閉位置；一旦隔離信號被引發後，MSIV 會保持關閉直到手動復歸後才能開啟。在正常功率運轉中，此閥的引動器亦可轉至 90% 開啟位置以確認此閥的操作性。此閥設計在最大差壓下可開啟，目前備有旁通閥作為主蒸汽管預熱及差壓平衡用。

MSIV 的主要功能為當發生二次側管路破裂時，可迅速隔離受損之迴路，避免壓力槽潛降區的低溫過壓威脅到 RCS 的結構完整性，以及阻止高溫蒸汽洩溢至圍阻體而造成圍阻體高壓。

7.2 主蒸汽管路斷裂

在主蒸汽管路破裂(Main Steam Line Break, MSLB)的肇始事件之下，破管的二次側迴路壓力會迅速下降，飼水系統突然的失壓會使得飼水大量汽化並迅速從破口溢出，由破口流出的高流量蒸汽會對 RCS 有異常的大量移熱；在冷卻水的中子緩衝作用對溫度的負回饋效應之下，冷卻水的降溫會使反應度提高。假若高壓注水系統失效而無法將硼液注入爐心且有兩組控制棒無法插入爐心時，可能會造成爐心功率分布的不平均而引起偏離核沸騰，導致燃料護套破孔、受損。

[3][12]

除此之外，假若主蒸汽隔離閥(Main Steam Isolation Valve, MSIV)無法關閉以隔離破管之二次側迴路，飼水大量汽化所造成的沖放現象會使 RCS 急速過度冷卻，導致反應器潛降區可能發生過壓熱震，將會嚴重衝擊到爐心組件的結構完整性。[3][12]

7.3 爐心功率提升對 MSLB 之下的人為誤失機率之影響

7.3.1 HR-FSGIMSLB-E09 之誤失事件分析

發生 MSLB 時，二次側蒸汽管路的低壓信號會觸發 MSIV 關閉；運轉員必須確定 MSIV 的關閉並隔離受損之蒸汽產生器迴路，避免壓力槽潛降區發生過壓熱震。HR-FSGIMSLB-E09 為運轉員未關閉 MSIV 並阻止飼水進入受損之蒸汽產生器，導致反應器低溫過壓， $HR-FSGIMSLB-E09=8.2\times 10^{-2}$ 。

經核三活態安全度評估的事件樹分析顯示，運轉員必須在事件發生後的 30 分鐘之內完成受損之迴路的隔離；而運轉員根據程序書來確定為主蒸汽管斷裂事件，所耗費時間經修正後約為 14.08 分鐘。因此，HR-FSGIMSLB-E09 的允許時間約為 15.92 分鐘($30-14.08=15.92$)。在 120%爐心功率提昇之下，儘管可由〈圖 7.2-1〉看出 MSLB 之下對壓力槽溫度及壓力的變化，但在尚未有較詳細的資料來釐清過鋼材的壓熱震機制之前，暫時不考慮爐心功率提升對 HR-FSGIMSLB-E09 允許時間的影響。因此，在執行 EPU 後，HR-FSGIMSLB-E09 依然為 8.2×10^{-2} 。

7.3.2 HR-EDEPMSLB-E50 之誤失事件分析

MSLB 事故之下，假若破裂的二次側迴路隔離失效時，因為壓力槽的潛降區可能會發生過壓熱震，RCS 完整性的緊要安全功能便進入了紅色狀況；運轉員必須在進入紅色狀況後的 30 分鐘內，開始執行 RCS 的緊急降壓，以免反應爐結構受損。HR-EDEPMSLB-E50 為運轉員未能在 RCS 完整性的緊要安全功能進入紅色狀況後的 30 分鐘內完成 RCS 的降溫降壓， $HR-EDEPMSLB-E50=7.3\times 10^{-2}$ 。

HR-EDEPMSLB-E50 的允許時間為 30 分鐘，此允許時間是否會受爐心功率提升影響的議題，在對於壓力槽鋼材的過壓熱振機制尚未有更詳盡的資料佐證之

下，不討論爐心功率提升對 HR-EDEPMSLB-E50 允許時間造成的改變。因此，在 120%的爐心功率提昇之下，仍然定義 $HR-EDEPMSLB-E50=7.3\times 10^{-2}$ 。

7.1.3 HR-FSGI/EDEP 之誤失事件分析

HR-FSGI/EDEP 為 HR-EDEPMSLB-E50 和 HR-FSGIMSLB-E09 的相依性，判斷為低度相依， $HR-FSGI/EDEP=1.0\times 10^{-2}$ ；爐心功率提升至 120%後，在 HR-EDEPMSLB-E50 和 HR-FSGIMSLB-E09 皆不受爐心功率提升的影響之下，HR-FSGI/EDEP 保持不變，依然為 1.0×10^{-2} 。

