

三哩島核能電廠事故

清華大學工程與系統科學系李敏
1997 年 10 月

三哩島事故記要[^]

1979 年 3 月 28 日凌晨四時，位於美國賓夕凡尼亞州哈里斯堡的三哩島核能電廠二號機發生跳機，值班的運轉人員按照運轉程序書處理此一突發狀況，起初運轉人員並未發現有任何特殊狀況，預期可以順利的將反應器冷卻，進入冷停機狀態。28 日凌晨值班人員發現，圍阻體地面有少量積水，且積水中含有放射性物質。這種情形在一般電廠的跳機事件中並不常見。不料到了早晨 7 時，圍阻體內的放射性強度已較正常時的讀數高出數倍，負責運轉三哩島核能電廠的大都會愛迪生電力公司於是宣佈電廠進入所謂的「廠址緊急狀態」，開始管制電廠區域的交通和進出人員，並通知美國聯邦政府的核能管制委員會（簡稱核管會）、以及賓州州政府所屬警察局、環境資源部、和民防組織。由於狀況的持續惡化，電廠於 7 時 30 分宣佈進入「全面緊急狀態」。8 時 15 分美國核管會自附近城市派遣數架直昇機到電廠做環境偵測。偵測結果顯示三哩島電廠上空的輻射劑量強度為每小時 0.20 ~ 0.30 毫西弗。在離電廠 2 ~ 3 英哩處的空中輻射劑量強度則為每小時 0.05 ~ 0.07 毫西弗，這一訊息透露出三哩島核能電廠發生了非常嚴重的意外。

3 月 29 日美國核管會宣佈，三哩島事故為美國商用反應器運轉以來所發生的最嚴重事故，電力公司也透露部份燃料棒有可能已經受損的訊息。根據他們的估計，受損燃料棒的比例約為 1%。3 月 30 日美國核管會估計，受損燃料棒比例已達 60%。此時，電力公司也首次承認反應器爐心尚無法適當的冷卻，如果事故繼續惡化下去，將對附近居民的安全造成威脅。值此關鍵時刻，從美國各地趕赴而來的工程師和專家們群集出事電廠，苦思對策，希望找出方法使事故不再繼續惡化。

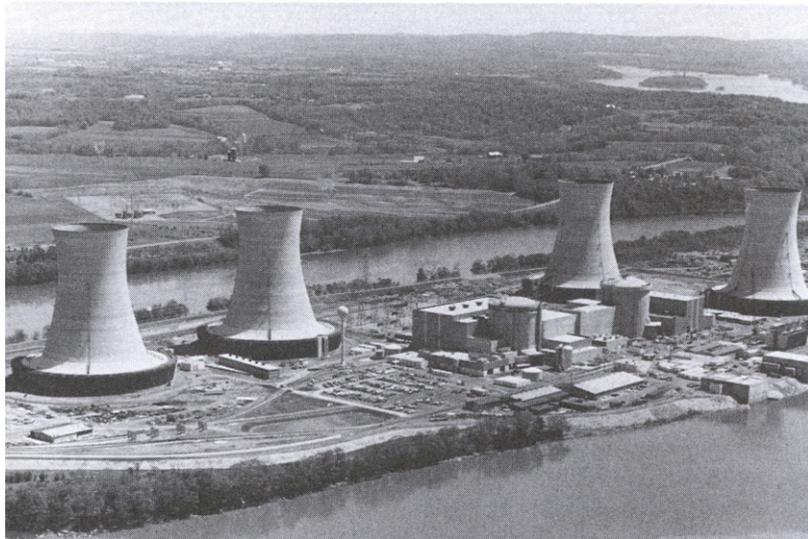
3 月 30 日，電廠周圍 3 英哩半徑範圍內的輻射劑量強度為每小時 0.25 毫西弗，賓州州長一度要疏散電廠附近四個鎮的部份居民，但在與核管會及電力公司磋商之後決定暫緩實施，僅僅勸導居民減少外出並緊閉門窗。美國總統卡特知悉情況之後，打電話給賓州州長表達關切之意，並詢問需要聯邦政府配合的事項。稍後不久，賓州州長下令將電廠周圍 5 英哩

[^] 節譯自美國時代雜誌 (time) 與新聞雜誌 (News Week) 於災變發生後之相關報導。

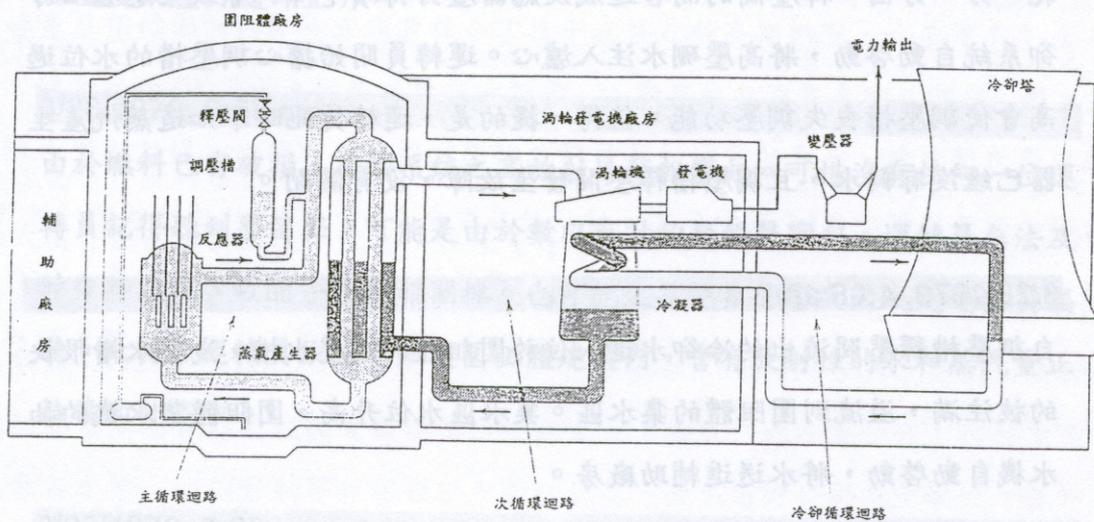
範圍內的學齡前兒童及孕婦撤離，並通知電廠附近四個鎮的 90 萬居民準備疏散。白宮也於 30 日成立特別行動小組，統籌規劃三哩島事故應變事宜。特別行動小組派遣核管會的哈諾德·鄧肯赴三哩島電廠，全權處理事故。鄧肯的抵達，使得電廠的混亂情況獲得改善。工程師和專家們逐漸將反應器冷卻，成功的遏止了事故的惡化。4 月 1 日，卡特總統親赴三哩島電廠巡視，以具體行動向民眾宣示三哩島事故的威脅已告解除。

三哩島電廠介紹

1979 年 3 月 28 日發生嚴重事故的三哩島核能電廠，位於美國賓夕凡尼亞州的一個典型的中產階級社區，稱為三哩島的小島上(見圖附 2.1)。三哩島核能電廠採用美國 B & W 公司設計製造的壓水式反應器(圖附 2.2)，此類型反應器的基本構造如§第 3 章 3.3 節所述。如圖附 2.2 所示，壓水式反應器的高壓冷卻水進入壓力槽，流經爐心吸收熱量後，流出壓力槽，進入蒸汽產生器，加熱低壓低溫的二次側飼水，使飼水沸騰，產生蒸汽，推動渦輪發電機，以產生電力。由於壓水式反應器冷卻水系統的一次側不會產生沸騰，而液態水為不可壓縮，因此為了調節反應器的壓力，反應器的出水管路上裝有調壓槽，以調節系統壓力。調壓槽內，一半為水，一半為蒸汽。當冷卻水系統內的水溫因功率增加，或熱量無法移除而上升時，冷卻水體積膨脹，驅使冷卻水流入調壓槽，調壓槽水位因而上升，擠壓調壓槽上方的水蒸汽空間，造成調壓槽壓力升高，此時調壓槽上方的噴灑系統自動打開，灑入低溫的水將部份水蒸汽凝結，降低系統壓力。如果壓力上升幅度太大，噴灑系統不足以有效降低壓力，調壓槽上方的釋壓閥會自動開啟，將調壓槽內的水蒸汽洩放至圍阻體內的洩壓水槽 (pressurizer relief tank)，快速將系統壓力降低。系統壓力降低後，釋壓閥會自動關閉。三哩島電廠備有多樣的安全系統，其中較重要的有緊急爐心冷卻系統，及輔助飼水系統。壓水式反應器中，蒸汽產生器二次側飼水是移除爐心熱量的主要途徑，為了防止飼水喪失，爐心的熱量無法排除，因此設計有輔助飼水系統，於主飼水系統故障時，自動啟動，打水進入蒸汽產生器二次側，將衰變熱移除。



圖附 2.1：三哩島核能電廠之鳥瞰圖，圖裏右中部份的圓柱形建築物是一、二號機組的圍阻體結構，事故發生於照片上右邊的二號機組。



圖附 2.2：三哩島核能電廠剖示圖。

三哩島事故時序

三哩島事件發生於 1979 年 3 月 28 日凌晨，其主要經過如下：

3/28/1979, 4:00:37 am

由於化學除污系統的樹脂發生阻塞現象，使得凝結水幫浦跳脫，進而也使飼水幫浦和汽機跳脫，停止運轉。於是輔助幫浦自動啟動，但由於輔助飼水管路上的一閥門，在維修後沒有依照規定打開，故無法將水注入蒸汽產生器二次側，反應器內產生的熱無法移除，造成反應器壓力快速上升，調壓槽灑水系統自動啟動灑水降壓，釋壓閥亦開啟洩壓，但系統壓力仍就繼續上升，觸及反應器急停設定值。控制棒插入爐心，核分裂反應停止。

3/28/1979, 4:00:50 am

反應器急停後，功率降低，反應器壓力亦隨之降低。當反應器壓力降至釋壓閥門自動關閉點時，閥門卻沒有關閉，於是冷卻水由閥門持續流出。由於輔助飼水無法進入蒸汽產生器，故蒸汽產生器內二次側的水已逐漸被燒乾。另一方面，釋壓閥的開啟造成反應器壓力持續下降，導致緊急爐心冷卻系統自動啟動，將高壓礮水注入爐心。運轉員開始擔心調壓槽的水位過高會使調壓槽喪失調壓功能。值得一提的是，運轉員此時不知道蒸汽產生器已經沒有飼水，且調壓槽釋壓閥發生故障，沒有關閉。

3/28/1979, 4:06 am

自調壓槽釋壓閥流出的冷卻水進入位於圍阻體的洩壓水槽，洩壓水槽很快的被注滿，溢流到圍阻體的集水區。集水區水位升高，圍阻體集水機的抽水機自動啟動，將水送進輔助廠房。

3/28/1979, 4:08 am

運轉人員發現蒸汽產生器二次側輔助飼水閥門是處於關閉的狀態，於是手動打開閥門。飼水進入蒸汽產生器的二次側，但為時已晚，此時一次側已有大量的水蒸汽，使得熱無法有效的自蒸汽產生器移除。

3/28/3/28/1979, 4:10:24 am

運轉員降低高壓緊急注水系統的流量，避免調壓槽水位過高。

3/28/3/28/1979, 4:15 am

冷卻水持續自釋壓閥流出，進入圍阻體的集水池，轉而進入輔助廠房。

3/28/1979, 5:14 am

因系統壓力過低，且系統內已產生蒸汽，冷卻水幫浦發生嚴重振動，為了防止冷卻水幫浦的損壞，運轉人員將B迴路之冷卻水幫浦停止運轉。

3/28/1979, 5:40 am

A迴路之冷卻水幫浦也以同樣的理由關閉，在缺乏動力下，反應器內汽水開始分離，爐心上方的水蒸汽阻止了水流動。預期中的自然對流現象並未發生。此時水位大概只在爐心上方三十公分。

3/28/1979, 6:18am

運轉人員此時終於注意到釋壓閥沒有關閉，於是手動關閉了釋壓閥，反應器溫度及壓力隨即上升。

3/28/1979, 6:55 am

由於燃料已有破損，冷卻系統之高放射性警報響起。可惜沒有任何一位運轉員記得聽到警笛聲。可能是由於數以百計的警報聲響起，運轉員無法及時分辨處理，故隨手把警報關掉。也可能主要警報聲響失效或是運轉員漏聽。此時，運轉員依然不知道圍阻體建築內，含有放射性的水和蒸汽量正持續的升高中。

3/28/1979, 7:30 am

圍阻體、反應器廠房和輔助廠房輻射強度繼續上升。

3/28/1979, 8:30 am

運轉員嘗試利用蒸汽產生器的建立移熱路徑，但由於反應器內的汽水分離現象而失敗。

3/28/1979, 11:38 am

運轉員設法降壓，想利用低壓移熱系統移熱，但是反應器的洩壓能力不夠，無法降壓。

3/28/1979, 1:50 pm

在降壓操作中，圍阻體內發生氫氣燃燒現象，圍阻體瞬間壓力高達19個大氣壓力。

3/28/1979, 5:30 pm

重新以高壓注水系統加壓，使反應器內的水蒸汽凝結，以便再啟動冷卻水幫浦。

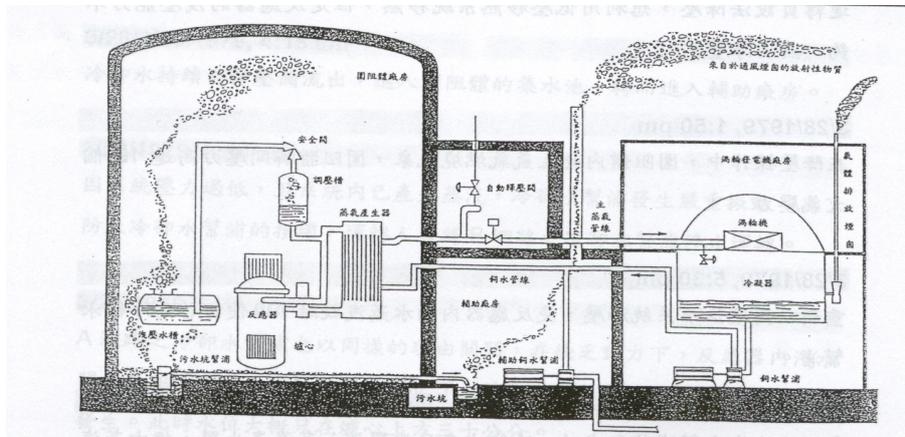
3/28/1979, 7:51 pm

A 迴路冷卻水幫浦啟動成功，冷卻水自反應器流入蒸汽產生器，經由蒸汽產生器二次側，將衰變熱移除，危機終告解除。

搶救工作進行到這裏時，爐心內的熱可以移出，機組的安全已無問題。但由於當時對爐心熔損事故的物理現象並不了解，且對圍阻體內所累積的氫氣是否會發生爆炸，存有相當大的疑慮。為了民眾安全，賓州州長於三月三十日下令將電廠五英里內的學齡前兒童和孕婦撤離。事故之後，檢驗三哩島電廠反應器爐心，發現它嚴重的毀損，約有 20 噸的熔融二氧化鈾流到反應器壓力槽底部，大量的放射性物質釋放到圍阻體內。少部份放射性物質由輔助廠房的集水池釋放到外界環境中(見圖附 2.3)，據估計其中含 1.6 ~ 8.4% 的惰性氣體，及 17 居里活度的碘-131。這些外釋的放射性物質所造成的最高輻射劑量約 0.37 毫西弗，比自然輻射背景值的 1 ~ 2 毫西弗還來的低。核電廠深度防禦中的最後一道防線—圍阻體在緊要關頭，確實發揮了功能，防止了放射性物質的大量外釋。

三哩島事件的衝擊

三哩島事件震驚了世界！核能界一直不願意面對的反應器爐心熔毀事件終於發生了。讓核能界感到慶幸的是，深度防禦概念中，作為最後一道防線的圍阻體的確可以發揮功能，將爐心熔毀後所釋出的放射性物質包封住，不讓它排到外界環境中，造成環境的衝擊和民眾的輻射傷害。反核人士口中之爐心熔毀事故真的發生了，但後果並沒有像反核人士所說的造成毀滅性災難。有人將三哩島事件的發生，怪罪於運轉人員的失誤。要是運轉人員沒



圖附 2.3：三哩島事故放射性物質釋放路徑圖。

有錯誤的將高壓注水系統關閉的話，整個事件也不會惡化。但從較廣泛的角度來檢討整個事件，該檢討的是，運轉人員有沒有受到適當的訓練、控制室的設計是否考慮到運轉人員操作上的便利、以及運轉員是否能充分掌握電廠重要系統的運轉狀況；還有在緊急狀況下，運轉人員能否獲得必要的協助等問題。

三哩島事件使得核能界了解到：運轉人員的臨場應變對核能電廠安全的重要性，電廠控制室的人機介面也需要適當的改善，以及電力公司間運轉經驗相互交流的必要性。後一項的認知促成了美州核能運轉協會 (Institute of Nuclear Power Operation, 簡稱 INPO) 及國際核能運轉組織 (World Organization of Nuclear Operation, 簡稱 WANO) 等國際組織的成立，這些組織的主要功能即為核能電廠運轉經驗的交流，希望透過相互合作，提昇電廠的安全。三哩島事件之後，法規管制單位提出不少新的規定，要求電力公司改正缺失，其中不少牽涉到硬體設施的改善，這些要求使得核電的成本大幅攀升。法規管制單位也意識到，核能界對爐心熔毀的物理及化學現象瞭解不夠，因此大幅度提高相關研究的經費。

從安全的角度來看，三哩島事件對核能電廠安全所帶來的衝擊是正面的，它促成了核能界全面檢討核能電廠的安全運作模式，發覺許多隱藏性盲點，進而提出相當多的改善方案，這些改善措施直接提昇了電廠的安全。

三哩島事件再發生的可能性探討

基本上，三哩島事件是多重安全系統同時喪失功能所造成。核能電廠由於有潛在性的危險，因此運用龐大且複雜的多重安全系統來維持爐心的持續冷卻。每個安全系統中分別使用著各式各樣的組件。理論上來說，這些組件絕非百分之百的可靠，亦即每個組件仍有壞的可能性；換句話說，雖說是微乎其微，但多個重要組件還是有可能同時發生故障或損壞。基於這一體認，沒有人保證類似三哩島的事故不會再發生。

與車諾比爾核能災變比較，三哩島事件從開始發展到惡化至放射性物質大量洩入圍阻體內，整個事件經過了一段相當長的時間。電力公司可以利用這段時間尋求外援，搶救機組，也使得政府可以執行擬定好的緊急應變計劃，保護電廠附近的民眾安全。

