

# 日本福島核電廠事故 說明與評析

311東日本大地震，震碎許多人的故鄉，也震醒全世界對核能發電安全的高度關注。面對輻射外釋的威脅，各國人心惶惶，媒體也密切追蹤日本核災的發展；到底事件的來龍去脈為何？台灣遭受輻射汙染的可能性有多高呢？

李 敏

2011年3月11日，日本時間下午2點46分芮氏地震儀規模9.0級的強震襲擊日本，進而引發東京電力株式會社的福島第一核能電廠發生輻射外釋的嚴重事故，引起全世界的關注。截至目前為止，事故還在持續演變中，以下簡單介紹福島電廠、說明核電廠的安全設計、嘗試交代事情發生的始末、並介紹核電廠嚴重事故的特質。

## 東北地震及其影響

地震震央位於日本東北區域牡鹿半島東岸130公里的海上，震源深度為32公里。地震發生數分鐘後浪高達10公尺的海嘯衝擊日本海岸，有些地區海嘯影響的範圍深達內陸10公里。此地震為日本史上最大的地震，為自1900年有記錄以來，世界排名第五的地震。日本首相菅直人認為這是日本二次大戰後所面對的最大危機。

根據日本警察廳3月21日的資料，地震與海嘯造成8649人死亡、2644人受傷、與1萬3262人失蹤、12萬5000棟建築受損或全毀，多處地方失火，許多道路與鐵路遭震毀，並造成位於須賀川市的藤沼灌溉水壩崩塌。在許多災難中，最引起世界關注的還

是福島一廠核電廠放射線物質外釋的事故。

如圖一所示，受地震影響的核電發電廠共有女川電廠（3部機組，1部運轉中）、福島一廠（6部機組，3部運轉中）、福島二廠（4部機組）、東海電廠（1部機組）。地震發生後，9部運轉中機組全部安全停機，但地震及隨之而來的海嘯對各電廠造成不同的損害，只有福島一廠的事故繼續惡化成輻射外釋的嚴重事故。

## 福島電廠

日本東京電力株式會社是全日本最大，全球第四大的電力公司，擁有福島一廠、福島二廠、與柏崎刈羽電廠3座核能電廠。福島一、二廠分別擁有6部與4部沸水式反應器，總裝置容量為469.6與440萬瓩。福島一廠一號機為沸水式反應器第三型（BWR 3）、二五號機為沸水式反應器第四型（BWR 4）、六號機為沸水式反應器第五型（BWR 5）；福島二廠4部機組全為沸水式反應器第五型。基本上，這三型沸水式反應器的設計非常類似，而第四型與第五型可以視為標準化的機組。台灣核能一廠所採用的機型亦為沸水式反應器第四型，商轉時間亦與

# 東日本大地震後 災區核電廠狀況



圖一：為了防止輻射物質外洩，日本已經採取各種手段來搶救福島第一核電廠；其他受到地震影響的核能電廠已安全停機，未受影響者則繼續運轉。

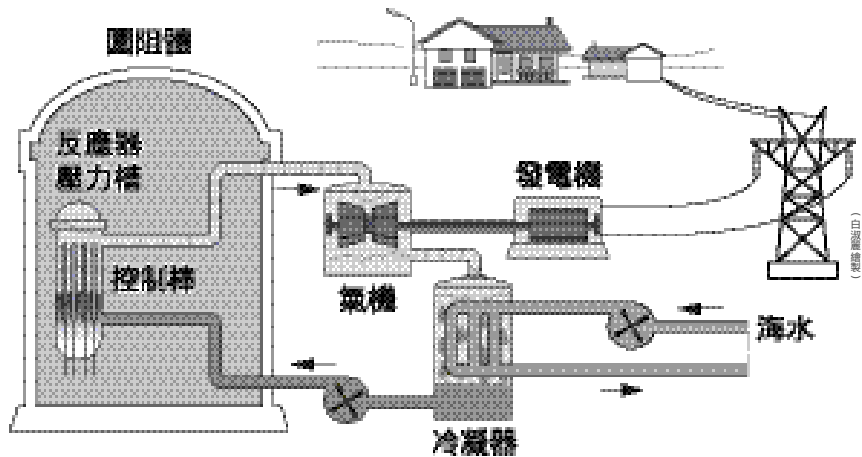
福島一廠的三、五號機非常接近（圖二）。

## 電廠安全設計

核電廠的安全顧慮來自會釋出輻射線的放射性物質。安全設計上採用多重的屏障將放射性物質層層包覆，這些屏障包括燃料丸、燃料棒護套、封閉的冷卻水系統（壓力槽與管線）、與圍阻體。事故中，只要一層屏障能夠發揮功能，放射性物質就不會大量釋放到外界環境，造成對民眾與環境的傷害。美國三哩島事故中，反應器爐心已經熔毀，也就是前三項屏障均已喪失功能，但圍阻體保持完整，成功地防止了放射性物質的外釋。圍阻體的設計與事故中完整性的確保，是核電營運的重大議題。福島一廠一、五號機的圍阻體為所謂的馬克一型（Mark I）設計，六號機採用馬克二型（Mark II）。台電的核一廠的圍阻體亦為馬克一型；美

國也有 23 個機組採用此類型之圍阻體。

圖三所示為典型之馬克一型圍阻體，包括形狀像一個倒置之傳統電燈泡的乾井，以及類似甜甜圈狀的溼井，溼井內灌水形成水池，稱為抑壓池（suppression pool, torus）；乾井與溼井間有管道相通。溼井與乾井材質為鋼板，鋼殼圍阻體（steel containment vessel）置於混凝土結構內，整個結構再置於所謂的反應器廠房內，反應器廠房維持負壓，又稱為二次圍阻體（secondary containment）。為防止氫氣爆炸



圖二：沸水式反應器系統。冷卻水進入反應器壓力槽，加熱成為水蒸汽，水蒸汽進入汽機，帶動轉動軸的轉動，轉動的另一端接有線圈，線圈切割發電機內之電磁場，產生電力。

的發生，正常運轉時，馬克一型圍阻體會充氮，故圍阻體內無氫爆的可能。

放射性物質會持續釋出輻射，而輻射為能量的一種形式，核電廠安全最大的挑戰為，必須持續不斷地將燃料丸中放射性物質釋出之衰變熱移除。事故發生後，正常系統無法使用時，須使用多重與多樣之備用安全系統將冷卻水注入壓力槽，把熱自系統移除。由於目前的核反應器的備用安全系統大都需要交流電為動力，故交流電源的可靠度為重要的考量。一般核電廠交流電的來源包括廠外電源、每機組2台緊急柴油發電機，台灣核電廠尚有2機組共用之第五台柴油發電機與氣渦輪發電機（Gas Turbine）。

沸水式反應器第四型的備用安全系統包括統稱為「緊急爐心冷卻系統」以及「爐心隔離冷卻系統」。「緊急爐心冷卻系統」又分為「高壓注水系統」、「爐心噴灑系統」與「低壓注水系統」3個子系統；「低壓注

水系統」亦可用於移除衰變熱，故又稱為「餘熱移除系統」。基本上這些系統的功能不外乎自一個稱為「凝結水儲存槽」大型的儲水槽，取水注入爐心，視事故的類別，注入壓力槽的水會經由不同的管道進入溼井之抑壓池。燃料丸內的衰變熱會隨著水進入抑壓池，最後再透過「餘熱移除系統」的抑壓池冷卻運轉模式，將能量透過熱交換器，交給廠用海水系統，自系統移除。

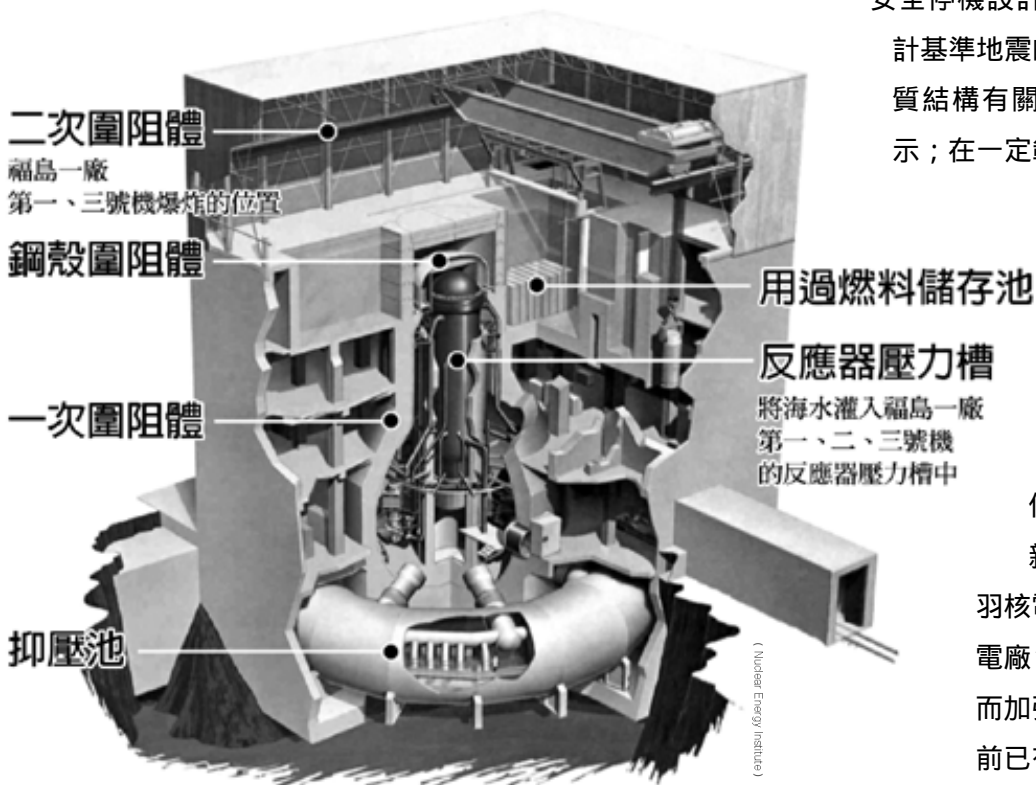
「高壓注水系統」與「爐心隔離冷卻系統」最大的不同在於前者為電力帶動，後者動力來自壓力槽的蒸汽，驅動汽機，帶動水泵，系統雖不需要交流電，但須要直流電才能運轉。推動「爐心隔離冷卻系統」水泵的蒸汽經汽機後，進入位於圍阻體溼井的抑壓池，若抑壓池的移熱能力喪失，熱無法自圍阻體移除，圍阻體壓力會持續上升。

反應器正常運轉所使用的系統、備用的安全系統與電力系統的耐震能力需要超過

「安全停機設計基準地震」，核電廠設計基準地震的大小和電廠的位置與地質結構有關，是以重力加速度來表示；在一定範圍內若是有活動斷層，

是不准建核電廠的；此外仍需調查在較大範圍內活動斷層的活動記錄，再依理論計算該廠址的設計基準地震

值的大小。2007年日本新潟地震超過東電柏崎刈羽核電廠的設計基準地震，故電廠7部機組全部停止商轉，而加強設備的耐震能力後，目前已有4部機組回復運轉。



圖三：沸水式反應器馬克一型圍阻體。(3/17 資料)



圖四：3月16日從衛星所拍攝的日本福島第一核電廠，從右到左分別為一、二、三號機。

為確保運轉人員在事故發生時，能夠採取正確的措施，核電廠有運轉員必須嚴格遵循的《緊急操作程序書》，逐步將機組帶回穩定狀態；若事故的演變超過設計基準，運轉員要在應變組織的協助下，依《嚴重事故處理導則》，採取非傳統的措施，確保燃料被冷卻水覆蓋、維持圍阻體的功能；以上非傳統措施包括引進海水進行冷卻，而如何引進海水與引進的時機在《嚴重事故處理導則》均有描述。《緊急操作程序書》與《嚴重事故處理導則》的遵循與了解，為電廠運轉人員及應變組織成員的訓練重點。

若電廠的應變組織依程序書判定事故會持續惡化，圍阻體有喪失功能的可能，或者電廠已有放射性物質外釋，就會通知地方與中央政府，依規定與規劃進行廠外的緊急應變。以上所述為所有使用核能的國家的標準做法，為核電廠安全規劃的一部分。

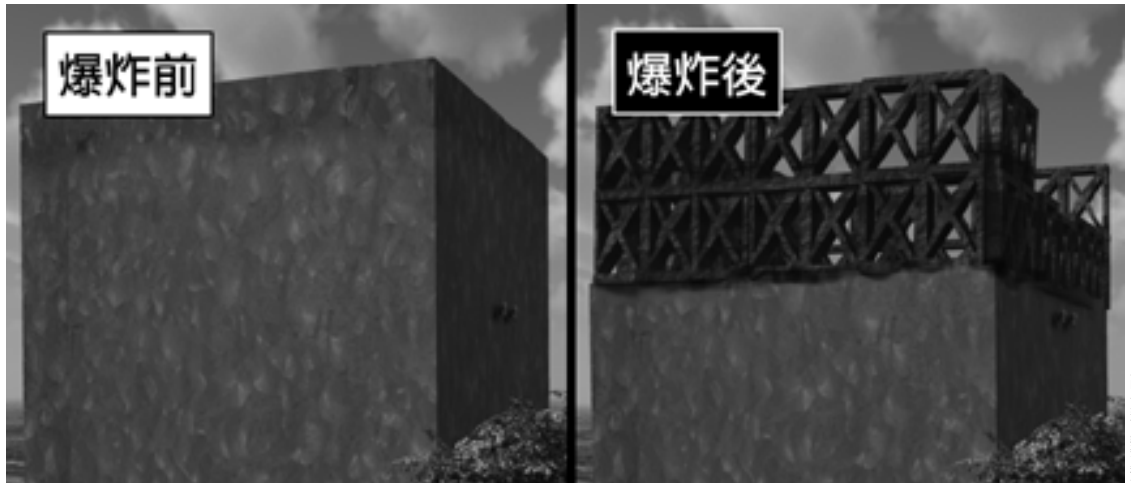
## 日本福島電廠事故

福島電廠共有6部機，地震發生時有3部在運轉（一、三號機，圖四），其他3部

處於停機維修狀態。以下將分別說明兩種不同狀況下機組的事故演變。

### 運轉機組

根據美洲核能學會所提供的簡單說明，運轉機組事故演變的大概情形為：地震發生後，控制棒成功插入爐心，核分裂連鎖反應停止；海嘯將輸配電系統沖毀，造成廠外電源喪失（也許強震時即已喪失）；緊急柴油發電機成功啟動供電，緊急安全系統開始運作；柴油發電機供電1小時後停止運轉，原因為海嘯造成柴油發電機燃料供應系統的故障，緊急安全系統因沒有交流電而無法運作；反應器可能發生小破口冷卻水流失事故，造成冷卻水自壓力槽的流失；此時仍可利用汽機帶動（不需交流電力即可運轉）的「爐心隔離冷卻系統」，維持爐心水位，並將熱導入圍阻體；約8小時後，直流電耗盡，控制閥無法動作，「爐心隔離冷卻系統」喪失功能；在無法補水的狀況下，爐心水位降低，造成燃料棒頂端開始不再被水覆蓋，此時稱為爐心裸露。



圖五：日本福島一廠一號機發生氫爆之後，上半部鋼筋裸露示意圖。

爐心裸露後，燃料棒護套溫度大幅上升，鋯合金材質的護套迅速被水蒸汽氧化，產生大量氫氣，燃料棒內揮發性較高之分裂產物（碘、銫與惰性氣體）自破裂的燃料棒釋出，進入圍阻體；但圍阻體持續接受衰變熱，溫度與壓力持續上升，達到設定值時，運轉員依《嚴重事故處理導則》進行圍阻體排放措施，透過間歇式的排放洩壓，避免圍阻體因過壓而完全喪失功能，圍阻體排放造成氫氣與放射性質進入反應器廠房，氫氣與氧氣接觸，產生氫爆；反應器廠房設計時，故意將上層結構減弱，若發生廠房內部爆炸，會造成廠房的上部解體，但不會傷到圍阻體，這是為什麼網路照片顯示，建築物上半部於爆炸後消失，只剩下鋼筋，但下半部仍然完好（圖五）；反應器廠房上部解體，經由圍阻體排氣，釋入反應器廠房的少量輻射物質已進入外界環境。新聞影片中顯示反應器廠房在爆炸後有大量的白煙，應該是釋出水蒸汽凝結後的水滴。

機組搶救最主要的措施是尋找水源，注入壓力槽，使爐心的燃料為水所覆蓋，降低燃料的溫度，設法將進入圍阻體的熱帶出。日本最後採取的措施為將海水灌入

壓力槽（或圍阻體），衰變熱造成海水的蒸發，達到移熱目的，只要燃料維持在低溫，放射性物質也不會再自燃料釋出。

由於每個機組設備損壞的狀況不一樣，以及運轉人員採取措施的時間不一樣，故每個機組事故演變的過程與時序也不一樣，根據媒體的報導或網路的資料，福島一廠一號機的圍阻體功能正常，二號機與三號機圍阻體有可能損壞，但即使有損壞，應該也是洩漏，而非大型破口。一號機與三號機的反應器廠房嚴重損壞，二號機反應器廠房完好。

### 維修機組

核能電廠處於維修狀態時，燃料雖仍會產生衰變熱，但熱量會隨著停機時間而降低；維修時壓力槽頂蓋與圍阻體均處於開啟的狀態，故注水與移熱均相對容易。如圖二所示，反應器廠房的右上角，設有一用過燃料儲存池（spent fuel pool），池內存放著大量用過的核燃料，通常核燃料上方有6公尺深的水，水可作為輻射的屏蔽，亦用於維持燃料的冷卻，為移除用過核燃料產生的衰變熱，用過燃料儲存持有獨自的熱移除系統。熱移除系統喪失功能時，池水的溫度會

逐漸升高，進而達到沸騰，池水會因蒸發而逐漸減少。如果未及時發現，造成用過核燃料的裸露，同樣會導致燃料棒溫度上升、燃料棒護套銦合金與水蒸汽發生反應，產生大量的熱與水蒸汽；如果持續惡化，亦會造成燃料的熔毀，但這需要非常長的時間。由於燃料池為一開放的空間，燃料池喪失冷卻後可用水管補水即可。

福島一廠四號機因喪失電源而喪失冷卻，也許儲存池因地震而有漏水的現象，最後爐心裸露，護套溫度上升氧化產生大量氫氣，氫氣爆炸或者燃燒造成反應器廠房的毀損。此時用過燃料池內的用過燃料所釋出的輻射線少了水與建築的屏蔽，直接造成環境劑量，使得四號機反應器廠房毀損後，廠區內劑量大幅攀升，遠超過安全限值。這種現象雖然提高了廠區的劑量，卻不會對離廠較遠的地方造成影響。同樣的，要搶救用過燃料池中的核燃料，只要將水注入儲存池即可。新聞報導中的直升機空投水與消防隊員的水管噴水，都是為了替儲存池注水。據新聞報導，三號機的用過燃料儲存池也有相同的問題。

## 事故評估與分析

此次事故所產生的氫氣量已足以引起爆炸，可以推測爐心熔毀的程度應該蠻大的，但爐心是否已經完全的熔毀，壓力槽是否已經失效，造成熔融爐渣進入圍阻體，目前還沒有足夠的訊息可以判定。此事故與 1979 年的三哩島事故類似，三哩島事故中，圍阻體維持功能，故未造成大量放射線物質的外釋；此次日本的事故，推測有兩個機組的圍阻體喪失完整性，其影響程度應大於三哩島事故。由於日本的電廠是輕水式反應器，與

車諾比的石墨水冷反應器的物理性質完全不同，故此次事故影響的程度，絕對不能與車諾比災變的影響程度與範圍來類比。

車諾比電廠採用石墨水冷反應器，此類型核反應器有可能發生核分裂連鎖反應失控的情形，反應器在瞬間解體，將爐心各類放射性物質拋向大氣，釋出的能量又引燃石墨，石墨燃燒的溫度高達 5000 度，眾多的放射性物質亦於石墨燃燒時釋出。輕水式反應器在核分裂連鎖反應上具有自我抑制的特質，故反應器不可能於事故中瞬間解體。

輕水式反應器擔心的是熱移除的事故，熱無法移除時，溫度緩慢上升，最終熔毀。在這過程中，燃料棒護套破裂後，惰性氣體會首先釋出，如果燃料溫度持續上升，碘與銻等揮發性較高的分裂產物會開始釋出。其他以氧化態存在的放射性物質會停留在燃料丸或熔融爐心內。如果事故持續惡化，熔融爐心造成反應器壓力槽的失效，熔融爐心自壓力槽到圍阻體的爐穴區，與混凝土產生作用，混凝土分解產生之氫氣與一氧化碳，改變放射性物質的化學型態，低揮發性的放射性物質才有可能釋出。對輕水式反應器電廠而言，爐心熔損事故的發生，並不代表會有毀滅性的災難發生。

用核能工業界的術語，福島核能電廠所發生的事故稱為嚴重事故，它確實已超出電廠「設計基準事故」的範疇，但絕不是超出想像的事故；在規劃電廠安全措施時、在計算核電廠風險時、在執行電廠人員訓練時，這類型事故都被討論過。

根據網站上的資料，地震發生前，福島一廠一三號機正常運轉，四六號機停機大修中。媒體報導一三號機陸續發生狀況，可能是地震或海嘯造成了所謂的共因失

效，影響了安全系統的正常運轉。

大家或許認為核電廠也太脆弱了，但這麼嚴重的天災，週邊設施無一倖免。一個運轉 30 年的電廠，能屹立不搖，未造成民眾的傷亡，證明了核電廠安全設計考慮的周詳。媒體沒有大幅報導的是化工廠與煉油廠的大火(圖六)，那些火災所造成汙染化學物質的排放，對環境的影響，絕對超過福島核電廠所釋出的放射性物質。

## 事故釋出的放射性物質 對台灣的影響

媒體報導與網路資訊顯示，福島電廠廠址的劑量非常高，一度達到背景值的 4000 倍。這些輻射劑量有兩個來源，一是廠內之輻射物料喪失屏蔽後，直接造成的劑量(例如前述之低水位之用過燃料儲存池)；另一個來源是自爐心釋出之高揮發性放射性物質，漂浮在大氣，形成所謂之輻射塵。前者



圖六：大地震之後，位於千葉縣的煉油廠也因煤氣外洩傳出大火，火勢一直到 3 月 21 日才完全撲滅。

的影響只限於廠址或廠址的上空；後者的輻射塵則有機會，隨著大氣擴散漂浮到遠方。

事故釋出的放射性物質會隨著空氣的流動，在大氣中擴散；隨著距離的拉遠，濃度會逐漸稀釋。若目前的風向為自日本吹向台灣，以目前核種偵測能力，我們一定可以找到事故釋出的核種，但從劑量的角度來看，其影響將會微不足道。地球本來就具有背景輻射，背景輻射的強弱受到許多因素的影響，隨時會改變。日本福島電廠事故釋出的輻射所造成的劑量，應在背景輻射強度的變動範圍內。目前的風向並非東北風，故台灣受到影響的程度可能微乎其微。

## 結語

目前不了解此次地震對電廠的衝擊，是否超過該電廠的「安全停機設計基準地震」，也不了解電廠設備的損害是地震還是海嘯造成的，故無法判定台灣是否會發生類似的事。台灣 3 座核電廠均將海嘯列為設計基準的一部分，可以承受 10 公尺以上的海嘯。但是如果台灣核電廠附近發生超過電廠防震設計基準的地震時，類似事件發生的可能性應無法排除！

福島一廠事故有很多細節尚未明朗，可以預期的是全世界的核能業者，包括電力公司、反應器製造商、法規管制單位、與學術單位都會確實檢討此次經驗，並記取教訓，積極改善核電廠的不當設計，建造與運轉更安全的電廠。「前事不忘，後事之師」一直是核能業者最基本的工作態度，也是面對挫折與挑戰的不二法門。(本文資訊與數據為截稿時間 2011 年 3 月 21 日止)

李敏：任教清大工程與系統科學系