

## 有關日本福島核電廠事故之問與答

### 1. 發生在日本福島核電廠的爆炸是一種核爆嗎？

不是。福島核電廠 1 號機、3 號機及 4 號機爆炸的主因都是氫氣爆炸。福島核電廠使用輕水式反應器，輕水也就是普通水；從維持核分裂連鎖反應的機制來說，輕水式反應器具有自我抑制的特質，即核分裂連鎖反應不會於事故中失控，於瞬間產生大量的能量，造成反應器的解體。使用輕水式反應器電廠的反應器爐心燃料只會熔毀，不會爆炸。福島核電廠的爆炸是氫氣爆炸。

### 2. 什麼原因導致福島核電廠發生氫氣爆炸？

根據美洲核能學會所提供的簡單說明，事故發生的大致情形為：地震發生後，控制棒成功插入爐心，核分裂連鎖反應隨即停止，反應器立即進入停機狀態。停機後的爐心仍有餘熱（燃料組件本身的高溫與燃料衰變熱）持續產生，必須藉由「緊急爐心冷卻系統（ECCS）」的接續運作來移除，「緊急爐心冷卻系統」主要包括了做為第一道防線的「高壓注水系統」、做為第二道防線的「爐心噴灑系統」與「低壓注水系統」、以及做為 ECCS 最後一道防線的「爐心隔離冷卻系統」等四個子系統。不過，海嘯將輸配電系統沖毀，造成廠外電源喪失（Loss of Offsite Power）【註：也許強震時即已喪失】，幸賴緊急柴油發電機成功啟動供電，ECCS 開始運作。但不幸的是海嘯造成柴油發電機的燃料供應系統故障，柴油發電機供電一小時後即停止運轉並導致電廠全黑（Station Blackout），ECCS 因交流電源喪失而無法全面運作（即第一、二道防線的三個子系統均無法運作），此時僅剩利用直流電控制且汽機帶動的「爐心隔離冷卻系統」正常運作，將爐心餘熱導入圍阻體。約 8 小時後，直流電耗盡，「爐心隔離冷卻系統」因而亦無法運作，ECCS 於此時全面喪失了所有餘熱移除功能，導致爐心溫度上升，並使爐水汽化成為水蒸汽，爐心水位因而下降，燃料棒裸露且壓力槽內部壓力上升。裸露的燃料棒在無法冷卻的情況下，表面溫度迅速竄升，鋁合金材質的燃料棒護套隨即與壓力槽內的水蒸汽進行劇烈的氧化還原反應，產生大量氫氣。當壓力槽內的壓力因水蒸汽與氫氣的產生而持續上升至設定值時，具防護功能的自動釋壓系統

（Automatic Depressurization System）立即動作，安全閥被開啟並將水蒸汽、氫氣與伴隨的放射性物質導入一次圍阻體的抑壓池中。在廠外電源與緊急備用電源依舊缺乏的情況下，包圍著壓力槽的一次圍阻體也出現溫度與壓力均快速上升的現象，為了維護圍阻體的完整性，運轉員於是依『嚴重事故處理導則』執行圍阻體排放措施（Containment Venting），進行間歇式的排放釋壓。本項釋壓工作原本應將排放物質（即水蒸汽、氫氣與少量的放射性物質）經過過濾後直接外釋至大氣環境，但現場工作人員很可能因企圖將欲外釋的放射

性物質進一步減量，因此決定將排放物質釋入二次圍阻體（即反應器廠房）內，再透過具有另一道過濾設備的廠房煙囪外釋至大氣環境，未料質量較輕的氫氣蓄積於廠房天花板後，復與大氣中的氧氣進行劇烈化學反應而爆炸，這就是福島 1 號機與 3 號機爆炸的主因。附帶一提的是 2 號機的爆炸，其肇因有可能也是氫氣爆炸，但也可能是水錘效應，確切原因尚待調查。4 號機的爆炸則是用過燃料池中的燃料棒因冷卻水不足而產生高溫，並經前述相同的機制產生氫氣，且蓄積於廠房中，隨後與大氣中的氧氣作用後導致爆炸。

### 3. 已發生的幾次氫氣爆炸導致輻射外洩的原因為何？

依據現有資訊評估，目前福島核電廠 1 號機、2 號機及 3 號機的燃料棒可能均已出現破損現象，其內部之核分裂產物（如揮發性高的碘與惰性氣體以及化學活性高的銫）自破損的燃料棒釋出，經壓力槽進入圍阻體，再經由圍阻體排氣少量地釋入反應器廠房中。氫氣爆炸造成廠房毀損後，這些少量的放射性物質隨即進入大氣環境。值得注意的是，由於圍阻體的功能未喪失，放射性物質並未持續而大量地外釋。

### 4. 這些外洩的放射性物質對人體健康有危害嗎？

基本上，每個核能電廠對於防範放射性物質的外洩，均有三道重要的深度防禦系統，主要包括：燃料棒護套、反應器壓力槽、圍阻體等。這次福島核電廠意外事故，僅造成第一道防禦系統（燃料棒護套）局部受損，第二（反應器壓力槽）及第三道防禦系統（圍阻體）依然保持完整，所以該事故的嚴重程度，無法與前蘇聯車諾比的核子事故相提並論，整體外洩的輻射量也相對有限，應不致於對廠外民眾的健康造成嚴重的傷害。由於福島核電廠意外釋出的放射性物質會隨著空氣的流動在大氣中擴散，但隨著距離加長與風向變化，其濃度會逐漸稀釋至極微量，對台灣的影響將會微不足道。

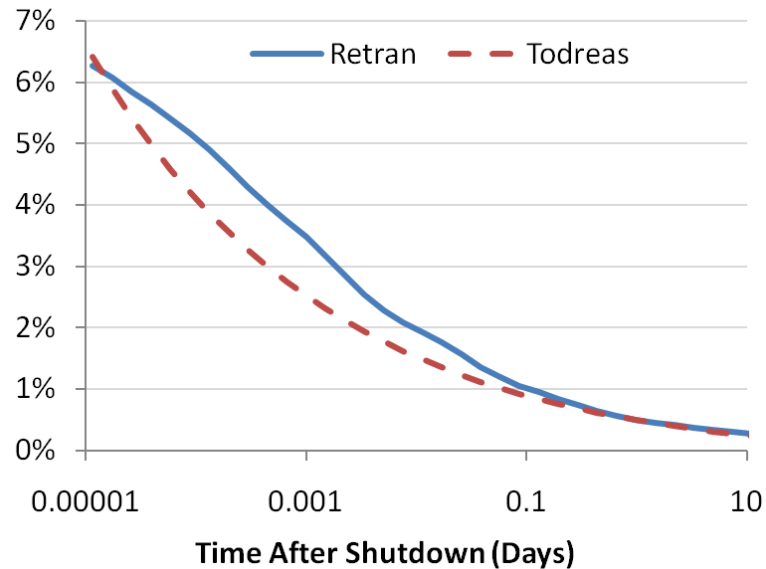
目前福島核電廠外圍地區（20 至 30 公里範圍內）因少量放射性物質外洩造成的輻射劑量率雖然超過事故前的背景值，但仍不致對人體健康產生立即的危害。根據 3 月 23 日上午七時的量測結果，事故現場（福島第一核能發電廠大門）的輻射劑量率為每小時 0.23 毫西弗（mSv）。至於這些輻射劑量率對人體是否可能造成傷害，我們將它與一些天然或醫療活動所接受的輻射劑量相比即可協助了解與判斷，依據美國能源部 2005 年的資料顯示，接受一次胸部 X 光攝影檢查約接受 0.1 毫西弗的劑量；一次牙科全口 X 光攝影檢查約接受 1.6 毫西弗的劑量；一次全身電腦斷層掃描檢查所接收的劑量更高，約在 20~30 毫西弗的範圍，因此我們不必過於憂慮低劑量輻射會對人體健康造成危害。

## 5. 為何反應爐爐心無法在停機後冷卻？為何冷卻系統無法使用？為何所有緊急爐心冷卻系統全都故障了？

地震發生後，反應器立即成功急停，停機後的反應器爐心仍有餘熱（燃料組件本身的高溫與燃料衰變熱）持續產生，必須藉由「緊急爐心冷卻系統（ECCS）」的接續運作來移除。不過，海嘯將輸配電系統沖毀，造成廠外電源喪失，幸賴緊急柴油發電機成功啟動供電，ECCS 開始運作。但不幸的是海嘯造成柴油發電機的燃料供應系統故障，柴油發電機供電一小時後即停止運轉並導致電廠全黑，ECCS 因交流電源喪失而無法全面運作，此時僅剩利用直流電控制且汽機帶動的「爐心隔離冷卻系統」正常運作，將爐心餘熱導入圍阻體。約 8 小時後，直流電耗盡，「爐心隔離冷卻系統」因而亦無法運作，ECCS 於此時全面喪失了所有餘熱移除功能，但新的備用電源卻因海嘯癱瘓了通訊與地面交通而無法及時送抵現場。嚴重天災造成了共因失效，同時影響了數套互相備援之安全系統的運作。

## 6. 核電廠停機後，爐心餘熱的產生會維持多久？是否過了此時段就不用擔心溫度再上昇？

反應器停機後，除了燃料組件本身的高溫必須加以冷卻，爐心燃料棒內的放射性物質會持續釋出輻射，而輻射為能量的一種形式（即衰變熱），亦必須持續不斷地將之移除。爐心內餘熱（燃料組件本身的高溫與放射性物質衰變熱）的強度會隨時間逐漸衰減，如下圖所示，圖中二條曲線係不同評估模式的結果。核分裂反應急停瞬間，爐心餘熱的強度約為原運轉功率的 6.5%，在冷卻系統正常運作的情況下，可於很短的時間內快速衰減，一天之後餘熱的強度約為原運轉功率的 0.5%。因此，停機時間越久，餘熱越少，機組便可容忍較長之喪失冷卻水的時間。當核能電廠進入維修狀態時，壓力槽頂蓋與圍阻體均處於開啟的狀態，注水移除餘熱相對容易，有利工作人員於較短時間內完成維修。用過燃料棒的餘熱只會降低，並透過熱交換機制最終與外界環境達成平衡，但不會消失。



資料來源：[http://en.wikipedia.org/wiki/Decay\\_heat](http://en.wikipedia.org/wiki/Decay_heat) (Theanphibian, 2011)

## 7. 如果冷卻系統一直無法發揮作用，是否會導致爐心熔毀？

會。如前所述，爐心燃料棒在無法冷卻的情況下，表面溫度會迅速竄升，當溫度上升同時超過燃料本身、鋁合金護套與爐心結構組件各自的熔點時，即會出現爐心熔毀現象。

## 8. 爐心熔毀會導致輻射外洩嗎？

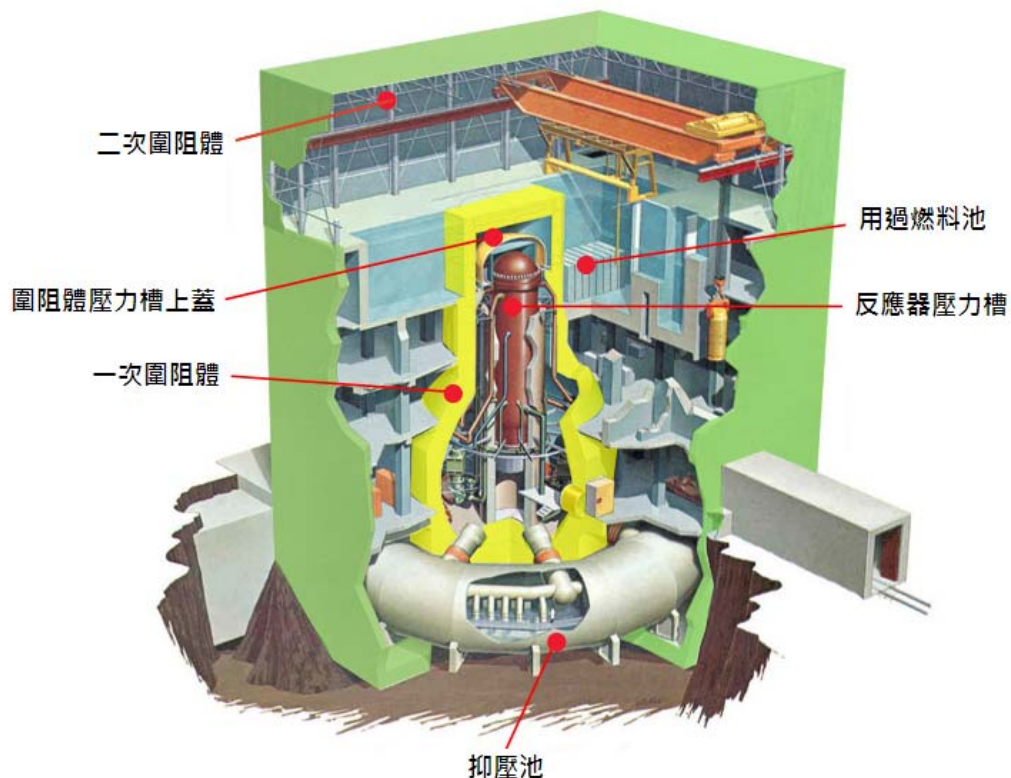
會。核電廠最重要的安全顧慮來自釋出輻射線的放射性物質，因此安全設計上採用多重的屏障將放射性物質層層包覆，這些屏障包括燃料丸、燃料棒護套，封閉的冷卻水系統(壓力槽與管線)，以及圍阻體（一次與二次）。當事故發生時，只要一層屏障能夠發揮功能，放射性物質即不會大量釋放到外界環境，進而造成對民眾與環境的傷害。爐心熔毀後，具有放射性的核分裂產物（如揮發性高的碘與惰性氣體以及化學活性高的鈾）會自破損的燃料棒釋出至壓力槽，但只要反應器壓力槽或圍阻體保持完整，雖仍有可能出現少量放射性物質外釋的狀況（如三哩島事故與此次福島事故），但卻可防止其大量外釋。圍阻體的設計與事故中完整性的確保，是核電營運的重大議題。

## 9. 甚麼叫做用過燃料儲存池？為什麼用過燃料儲存池中的用過燃料會導致廠房爆炸？

如下圖所示，反應器廠房的右上角，設有一用過燃料儲存池，池內存放著用過的核燃料，通常核燃料上方有 20 英尺深的水，水可做為輻射的屏蔽，亦用

於維持燃料的冷卻，為移除用過核燃料產生的衰變熱，用過燃料儲存池有獨立的冷卻系統。冷卻系統喪失功能時，池水的溫度會逐漸升高，進而達到沸騰。此時池水會因蒸發而逐漸減少，如果未及時發現，將導致用過核燃料的裸露，造成燃料棒表面溫度上升，燃料棒的鋁合金護套與水蒸汽發生化學反應，產生大量的熱與氫氣；情況如持續惡化，亦有可能造成燃料的熔毀，但這需要非常長的時間。由於用過燃料儲存池為一開放的空間，喪失冷卻水後，以水管補充池水即可。日本福島第一核能發電廠4號機因地震而喪失電源，用過燃料儲存池的冷卻系統因而無法運作，加上強烈地震有可能導致池體出現緩慢漏水的現象。數日後終於使池中用過燃料棒發生裸露的情形，並透過前述機制產生大量的氫氣，氫氣與廠房內大氣的氧混合後進行劇烈的化學反應而爆炸，導致反應器廠房的毀損。此時，池內的用過燃料所釋出的放射性物質，在缺乏水與建築物做為屏蔽的情況下，直接飄散至外界環境造成環境劑量率上升；這也是4號機反應器廠房毀損後，廠區內輻射劑量率大幅攀升，遠超過安全限值的主要原因。同樣地，要搶救池中的用過核燃料，只要將冷卻水注入用過燃料儲存池即可。媒體報導中的直升機空中灑水與消防隊的水管噴水，都是為了幫用過燃料儲存池加注冷卻水。福島電廠3號機的用過燃料儲存池也是相同的問題。

### Boiling Water Reactor Design At Fukushima Daiichi



資料來源：<http://www.nei.org/howitworks/boiling-water-reactor-design/>

## 10. 這次日本福島核電事故可以算是嚴重事故嗎？

是。此次事故所產生的氫氣量已足以引起爆炸，推測爐心熔毀的程度應屬嚴重。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。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。輕水式反應器電廠爐心熔損事故的發生，並不代表會有毀滅性的災難發生。

福島核能電廠所發生的事故稱為嚴重事故，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。一般大眾或許認為核電廠未如電力公司過去宣稱一般的安全可靠，但綜觀此次嚴重天災造成的影響，受災區所有設施（包括化工廠與煉油廠）無一倖免，一個運轉超過 30 年的電廠，卻能維持主要結構體的完整性，未造成民眾的傷亡，證明了核電廠安全設計考慮的周詳。

## 11. 台灣的核電廠會發生類似日本福島電廠的意外狀況嗎？假設我國核電廠發生類似事故，會採取哪些緊急應變程序？

此次地震造成之影響已超過該電廠的防震設計，電廠的事故是地震與海嘯同時造成。台灣三座核電廠均將海嘯列為設計基準的一部分，可以承受 10 米以上的海嘯。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是無法排除的！

台灣每座核電廠每年都會進行緊急事故應變演習，若確有事故發生，政府的應變措施將完全依照「全國核子事故緊急應變計畫」與電廠及原能會的程序書來進行。除此之外，中央政府每年也都會演練場外緊急應變措施，也就是所謂的核安演習。大家在電視上看到日方所執行的應變工作，我方也都有專門的機構在負責，使用的儀器設備我方也都有配置。相信本次福島核電廠事故落幕後的完整檢討及相關經驗，將會使各國未來核安準備與緊急應變的改進上更為完善。

## 12. 台灣地狹人稠，若遭遇類似情形，是否會出現反應不及的情形？

台灣每座核電廠每年都會進行緊急事故應變演習，若確有事故發生，政府的應變措施將完全依照「全國核子事故緊急應變計畫」來進行。除此之外，中央政府每兩年也都會演練場外緊急應變措施，也就是所謂的核安演習。相信政府將會謹慎研究福島核電廠事故落幕後的完整檢討並相關經驗，並將福島

電廠事故的狀況納入未來演習的項目，在充分考量我國地理環境與核能機組性能的前提下，事先做好更完善的準備與訓練，而不致出現反應不及的情形。

### 13.萬一發生災變如何有效撤離？

核電廠緊急應變民眾防護的重點為如何降低民眾的劑量。自電廠釋出的放射性物質會隨著氣流擴散，大氣中放射性物質的濃度會隨著與電廠的距離而降低，而下風處之濃度會高於上風處；在某一定點之濃度也會隨著時間或者電廠的狀態有所改變。根據核電廠緊急應變計畫，當輻射劑量率達到特定值時，緊急應變組織會通知民眾進行適當的防護措施。措施包括待在屋內（掩蔽）或到特定集結地點，進行疏散。如前所述，人類生活的環境本來就具有輻射，近代工業設施或醫療設備亦會對人體造成劑量；在一定的範圍內，接受超過背景輻射劑量的輻射，對人體的影響應非常輕微。政府在訂定執行民眾防護措施的劑量時，已經考慮疏散時間累積輻射劑量的健康效應。核電廠緊急應變之民眾撤離與水災或火災的疏散不同，水、火災的疏散成效會因時間快慢出現極大的差別，而核電廠事故的撤離，即使時間稍長，會接受較多但仍在安全範圍內的輻射劑量，故核子事故的撤離，可以循序進行。