

從三哩島、車諾比到福島核電廠事故

李 敏

1979年3月29日美國賓州三哩島核能電廠，發生爐心熔毀的嚴重事故。三哩島事故的發生，徹底的改變了核能業界對核電廠安全的看法。過去認為「設計基準事故」已經是電廠可能發生之最嚴重的事故，電廠的安全設備能夠應付設計基準事故，即可以「絕對」的確保電廠不會有放射性物質外釋環境的可能。事實上，美國核能管制委員會於1975年發表的「反應器安全研究」中，即指出輕水式反應器有可能發生此類型的事故，但只要圍阻體保持完整性，對環境與附近居民健康的影響會是可以接受的，也就是說核電廠的運轉對附近民眾的風險，不會因核電廠的運轉有顯著的改變。「反應器安全研究」採用統計方法與機率理論，利用可靠度評估方法中的事件樹與故障樹分析法，找出會造成爐心熔損的事故序列及該事故發生的頻率；接著分析圍阻體在事故中的反應，以及量化放射性物質外釋的程度；再根據電廠附近的氣候狀態，計算放射性物質在大氣中的擴散，評估電廠附近民眾的劑量，決定電廠運轉對民眾帶來的風險。

三哩島事故的肇因為機件故障、人機介面設計不佳、運轉人員訓練不夠。三哩島事故讓核工業界以更謙卑的心看待核能安全，對電廠的硬體設施與軟體措施做了大幅度的檢討與改善；前述風險評估的方法可用來量化各項措施的成效。為了解爐心熔毀後的物理與化學現象，核工業界投

入了大量的資源。核電廠嚴重事故研究成果也用於「嚴重事故處理導則」的發展，作為運轉人員採取非常規的方法搶救機組，防止事故惡化的指導原則。雖然三哩島事故僅有微量的放射性物質外釋，但當時賓州州政府為保護民眾，仍然下令進行疏散。三哩島事故讓大家意識到核電廠的緊急應變計畫不能聊備一格。三哩島事故至今已有32年，全世界300餘座輕水式反應器並未因相同的肇因，發生爐心熔毀事故；代表核工業界有反省與改善的能力，不讓相同的事故再次發生。

2011年3月11日芮氏地震儀規模9.0級的強震襲擊日本，造成震央附近四座核電廠11部運轉中的機組跳機，控制棒成功插入爐心，終止核分裂連鎖反應；雖然地震造成外來電源的喪失，但緊急柴油發電機依設計功能啟動，但隨之而來的海嘯，摧毀了東京電力株式會社的福島核能一廠緊急柴油發電機的供油設備，造成電廠喪失所有交流電源，經一段時間後，電廠發生輻射外釋的嚴重事故，引起全世界的關注。受地震波及的電廠包括福島核一廠（3部運轉，3部停機維修）、福島核二廠（3部機）、女川核電廠（4部機）、與東海核電廠（1部機）。但僅有福島核一廠的4部機組發生嚴重事故。這裡就有很多值得學習與討論的地方，可以作為日後電廠改善防震與防海嘯設計的依據。雖然此事故已可斷定是自然災害造成的，但幾乎所有使用核能發電的國家，均要

求相關單位鎖緊發條，對核能電廠執行總體檢或所謂的員工與設備的壓力測試。

英國《衛報》的專欄作家 George Monbiot 在其3月21日的專欄中提到，原來對核能持中立看法的他，因福島事件，轉為支持核能。因為在如此超出想像的龐大天然災難中，一個老舊電廠承受著超過其設計基準的衝擊，發生嚴重事故，但卻沒有造成任何人因輻射而受到傷害。核能業界並沒有以此為藉口，逃脫檢討與改善電廠安全的責任，但或多或少的也反映了不少一直在為核能安全而付出心力的人的無奈。

日本於4月12日將福島核能一廠事故等級由國際原子能總署事故分類（INES）的第六級提升至第七級。國際原子能總署事故分類是對事故影響程度的評估。國際原子能總署事故分類中，1~3級歸類為「事件」（incident），4~7稱為「事故」（accident）。各級事故的名稱為：「異常」、「事件」、「嚴重事件」、「事故影響局限於當地」、「事故影響範圍較大」、「嚴重的事故」、與「大型的事故」。每個類型事故的嚴重程度差異為一個數量級。三哩島事故為第六級，而車諾比事故為第七級。

決定事故等級時，同時考量三個因數，包括「對人與環境的影響」、「對放射性物質屏障的影響與對設施的掌控」、與「對深度防禦的影響」。第五級至第七級均包括「較嚴重」的放射性物質外釋，計算基準是以釋放出的放射性物質活度為基準，活度單位是貝克（Bq），即每秒釋出之輻射粒子數。第五級至第七級的放射性物質的外釋量的低限值相當於500、5000與50000（ $\times 10^{12}$ 貝克）的碘-131；各個重要核種與碘-131間的當量值都有所規定，例如銻-239的當量值為10000，銻-137的當量值為40，惰性氣體的當量值為0。日本政府在善後時，發現在事故過程中，放射性物質的外釋量已超過前述建議數值，

故提升層級。並不代表事故在4月12日才惡化至第七級。日本政府表示雖然已達到第七級，但所預估之碘-131與銻-137為車諾比災變的十分之一。日本做此宣布後，世界許多核能組織都立刻表示，福島事故的嚴重性絕對不能與車諾比災變類比。

車諾比核能電廠的石墨水冷反應器，利用石墨做為緩和劑。石墨水冷反應器有嚴重設計缺陷，在低功率運轉時，反應器功率有能會因小的干擾而失去控制，造成反應器的解體。車諾比災變發生的過程為運轉員想要完成一個實驗，將反應器運轉於低功率；在執行實驗時，低功率運轉的反應器受到干擾，連鎖反應失去控制，功率於瞬間迅速攀升；運轉員雖然按下即停的按鈕，但功率持續上升，反應器於48秒傳出爆炸聲。數秒後，發生第二次爆炸。第一次爆炸的原因為水蒸汽爆炸，燃料因功率驟升所累積的熱而部分氣化，造生燃料棒護套破裂，氣化的燃料與所水接觸，產生大量水蒸汽。第二次爆炸的原因為氫氣爆炸，氫氣來源為銦合金護套與水蒸汽的快速反應。二次爆炸造成反應器的解體。反應器的解體引燃石墨。爆炸與石墨長時間的燃燒導致放射性物質大量的外釋，其中尚包括高汽化點的放射性物質。如果將釋出之低揮發性放射性物質計算在內，車諾比事故的外釋量會遠遠超過福島的核能事故。雖然目前兩個事故都已被歸類為第七級，但可以預期兩者的嚴重程度會有非常大的差別。

「前事不忘，後事之師」，劍及履及與持續不斷的改善，是核能工業界在三哩島事故後，能夠維持32年良好的安全記錄。日本福島核能一廠事故的經驗，將成為全世界檢討核電廠防震與防海嘯設計，以及如何提升核電廠安全的主要依據，核電勢必會更加的安全。

李敏：清大工程與系統科學系