

## 從可靠度看核能發電

郭位

2011年3月11日，在日本東北海域發生日本有史以最強烈的里氏九級大地震，地震引發大規模海嘯，以致福島第一核電站三個反應堆機組及一個廢燃料槽先後氣爆，並有放射性物質外洩大氣，觸發世界各地的核恐懼症。有的救援隊甚至因為擔心核輻射而離開日本放棄救援，鄰近國家與地區的民眾擔心放射性物質隨風飄至，引發搶購碘片和碘鹽的熱潮。香港居民雖然知道放射性物質到達本港的可能性很小，但是擔心日本食物及食品受到污染，有些人也到超市搶購日本奶粉和醬油。

任何大的變故都有可能引發恐慌，特別是與核能相關的危機。兩年多前，我剛到香港城市大學時做的第一個學術報告就提到核能安全問題，但當時沒有多少人關注。這次日本發生核電事故，大家都緊張起來，讓我想起1979年美國發生的三哩島核洩漏事件。當時美國人的恐慌現象與現在人們的反應不相上下。這次事故與三哩島事件程度相似，加上一般人對核能認識不多，恐慌是可以了解的。

### 歷史上發生的核電事故

世界上目前有47個國家使用核能發電，共有443個核反應堆，日本有54個，是核能發電量較高的國家，約佔全國總發電量的30%（最高的是立陶宛和法國，均佔75%以上，雖然立陶宛本身並沒有核反應堆）。

歷史上核電廠出過幾次重大事故，除了1979年美國三哩島核電廠事故外，最嚴重的是1986年的前蘇聯切爾諾貝爾核電廠事故，這是唯一曾經造成大

量人命傷亡的惡性核事故。切爾諾貝爾核電廠完全沒有按照國際標準設計和建造，嚴格來講並不是一個正規的核電廠。

日本從 1966 年開始使用核能發電，在這次地震、海嘯引發的福島核電廠事故之前，四十多年來曾發生過三次核電廠事故，即：1981 年的鶴龜核能電廠的放射性廢水外洩事件、1995 年的文殊核子反應堆事故，以及 1999 年的東海村核能事故；但都不是重大事故，也沒有嚴重人員傷亡。

### 核電廠不是原子彈

人們對核電事故的恐慌，最大的原因可能是來自對原子彈的恐懼。二次世界大戰結束前，美國在日本投下兩顆原子彈，造成的巨大破壞在人們心中留下永遠的恐懼。但是核電廠跟原子彈不是一回事，就跟在家裡燒爐子與在野外放火燒荒不同是同一個道理。核電廠的鈾濃度很低，並且是在堅實封閉的爐內控制反應的，典型的核電站反應爐外的水泥牆就有二至三米厚；而原子彈的鈾濃度很高，而且是較不受控制的。

日本這次發生的事故，最令人擔心的是燃料棒高溫不減最後被熔解，熔解的放射性物質經過破裂的爐心及外牆滲透到地下，污染水源。這種情況目前並無發生。即使萬一出現這樣的情況，由於附近居民已經疏散，也不必恐慌，其影響不能與原子彈相比擬。

### 核能發電可靠嗎？

核能發電歷年來有頗多爭議，發生福島核電站事故後，大家又開始質疑核能發電的安全性。大家最擔心的應該有兩大因素：第一是意外事故的發生；第二則是可能造成的影響。

核工業界及核能電廠，早已建立嚴格的安全標準，並清楚列舉核能發電可能面對的風險。1975 年美國發表「WASH1400」，我當時很仔細地閱讀過，內容記述所有可能發生的核能事故，還計算出事故發生的機率，並詳盡分析事故原因。2007 年美國核管制委員會（Nuclear Regulatory Commission, NRC）出版了「當代最先進核反應堆事故後果分析報告」（State-of-the-Art Reactor Consequence Analysis, SOARCA），以電腦模擬核電站可能發生的事故。此報告公開發表後，被視為核能發電的安全指引。

可靠度是一種評估方式。在製造業，可靠度與產品的品質保證期密切相關，它包括對產品生命週期的分析、風險評估等。在核能發電方面，則是通過對各個故障發生環節的分析進行評估，類似 SOARCA 的內容。

核能發電至今已經是成熟的工業，不論是二代或三代核電廠，已經有完備的科學理論與技術，安全性能極高。若是從發生「意外事故」的機率來看，核電廠的故障率極為微小。除了機率的角度的角度，還可從人類期望壽命的研究數據來了解核能發電的影響。著名物理學家柯恩（B. L. Cohen）曾經在其研究中計算人類的「期望壽命」，以及因生活中各種因素的影響會減短多少。按照研究結果，人類的平均壽命會受各種因素之影響，即使是一輩子生活在核電廠附近，平均壽命減少的天數遠遠低於「其他意外事件」所造成的壽命減少天數。

### 「二次污染」沒科學根據

核輻射的累積量達到一定程度，才會對人體產生影響。當有大量核輻射洩漏時，不要在半徑 16 公里範圍以內長時間停留。如果是在半徑 16 公里內停留了幾個小時以上，那就需要檢查人體是否已經受到核輻射。依核輻射感染的

程度，可以導致不孕症、甲狀腺癌或其他癌症，受到輻射者需要治療。所謂「二次污染」的說法，沒有科學根據；若有輕微放射性物質粘在鞋子或外衣上，也很容易清洗掉，不會對人體造成任何危險。

美國核管制委員會（NRC）對 1979 年 3 月 28 日美國三哩島核洩漏事件（根據國際原子能總署歸類，屬第 5 級核事故事件）所做的追蹤研究及多項獨立研究報告顯示：平地背景輻射的最高值是 100-125 毫雷姆，核電站周圍約 200 萬居民接觸的累積核輻射量與每人每年接觸的自然輻射量不相上下（每次照 X 光的輻射量為 6 毫雷姆）。從三哩島核事件發生至今的數據判斷，鄰近國家的民眾尚不須擔心。

### 核電廠是最安全的工作場所

從經濟角度看，核能與燃煤幾乎並列為最划算的能源，其平均發電成本約為 2.2 美分/千瓦小時。與石油或天然氣的平均發電成本比較，核能發電只有其一半都不到。然而據世界核能協會資料顯示，中國要用 GDP 的 6% 去處理每年燒煤燒油發電所造成的環境污染。

核能電廠也是工作場所中最安全的地點之一。在每二百萬工作小時中，核能電廠發生事故的比例低於一件，一般製造業每二百萬工作小時平均發生事故的比例是四十五件。

另外從能源價值看，核能發電產生的二氧化碳等有害物含量也較其他能源低，而且除經濟優勢外，核能對環境的附加值也遠遠高於其他能源。下表可以說明。

最高的能源環境價值

	NOx	Sox	Ng	CO <sub>2</sub>	總價值	現價值
	(美元/千瓦/年)				(美元/千瓦)	
核能	11.6	5.3	12.0	61.2	90.0	750.1
風能	2.2	0.7	1.6	17.1	21.6	180.1
太陽能	1.5	0.3	0.8	13.7	16.2	135.3
生物能	-4.3	3.7	8.5	51.5	59.4	495.1

資料來源：Electric Power Research Institute, 2003

經濟高速發展引發的能源危機日益加重，現在各個國家和地區都在尋求新的替代能源，核能是許多國家的首選。但在目前條件下，核能發電仍具有無可比擬的優點，是最經濟、最清潔的電力來源。

### 輸港日本食物有安全檢測方法

有香港居民擔心未來輸港的日本食物及食品會受到污染，其實這個擔心是很容易解決的，所有輸港食物只要經過檢測儀器照射，即可測出是否含有放射物，就像在機場通過 X 光門檢查一樣簡單。如果沒有發生燃料棒溶解的情況，甚至沒有必要做這種檢測。

放射性物質須經過一個介質產生影響，不會像疾病那樣傳染他人。此外，經過低劑量放射處理的食物也不致於會影響人體健康。在一些國家和地區，廣泛使用放射處理食物，以達到消毒、防腐、殺蟲的效果。我們平時喝的牛奶和青菜，很多都經過放射處理。

## 要提升人員可靠度

雖然核電廠已具備科學和工程的嚴實基礎，但是工作人員的可靠性更是影響電廠管理營運最大的不確定因素。在以往前蘇聯及美國核電廠發生的事故，都是深夜時人為操作失誤引起的。世界上沒有歷久不衰的系統。在可靠度的相關研究中已經有充分的證據顯示，在各式各樣系統中，人員與系統的交互影響至關重要。在極為龐大的系統中，我們更要找出系統的瓶頸，做徹底的改革。人員的專業訓練和管理必須持續進行，只要有效提升人員的可靠度，整體效益可能比單靠高科技投資顯著千萬倍。

當危機來臨時，保持理性和科學的態度甚為重要，我們更應該了解核電廠的相關知識，才能作出理性的判斷和決策。然而核能發電的知識與技術門檻甚高，一般民眾無法掌握核電安全措施及相關資訊，也因此產生恐懼。

因此核工業及核電廠，除了要加強核電的設備、營運和管理的安全措施，尚須推廣與核電相關的科普教育，讓社會大眾更加了解核電是什麼，其運作與管理的安全性。

## 要重視備用設備

為了消除民眾的疑慮和心理壓力，核電設施運作和管理透明度也須提高。這次日本發生的核電事故之所以造成民眾恐慌，與核電廠發佈消息的透明度不高很有關係，大家不知道究竟發生了什麼事，也不知道公佈出來的信息可信度有多高，致使各種聳人聽聞的謠言四處傳播，民眾無法判斷，寧可信其有不敢信其無。

此次事故涉及的福島核電廠已達設計規劃的 40 年使用年限，在電廠的維修策略上是否有所忽略，尚值得探討。經過這次事故，我們更認識到核電廠備

用設備以及備用設備的維護及維修都值得重視。就像每輛汽車都有備胎一樣，這個備胎應該隨時都可以用來替代損害的輪胎。如果一個國家和地區同時有幾十座核電設施在運行，最少要有幾個作為臨時取代和補救的備用設施和供電中心，更應不停檢討管理、操作與應變措施，確保完備執行。

### 核電科技對香港未來的影響

香港目前的核電供電比例是 23%，到 2020 年計劃增加至 50%。因此短期內不可能有其他替代供電能源；停止核能發電將導致限電、停電問題，對於民生與經濟勢必會造成巨大影響。無庸置疑，我們也必須考慮研究發展其他可持續發展的再生能源，同時提倡改變生活方式，節約能源。但在可預見的將來，如果計入各種因素，例如替代能源發電技術與成本所產生的負面影響、非核發電對周圍環境造成的污染、核工業多年來不斷從各種意外事故中累積的經驗、科學研究的突破發展、更精進工業技術的成果等，核能仍將是主要的能源來源。

受到福島核電廠事故影響，我相信本地社會開始了解到，香港雖然是經貿、金融重鎮，在全球一體化環境下，周邊國家與地區的變動，會牽連並震動本地經濟、政治和社會安定的脈搏。生活在現代社會中，我們更需要深入了解科技，促進科技發展，才能解決人類面對的問題，而不應因噎廢食，因為不了解科技而加以排斥或產生恐懼，導致無法享受科技帶來的文明與生活品質的提升。

郭位教授現任香港城市大學校長，是中國工程院外籍院士，台灣中央研究院院士及美國國家工程院院士。

Professor **Way Kuo** is President of City University of Hong Kong. He is a Foreign Member of the Chinese Academy of Engineering, a Member of Academia Sinica, Taiwan and the US National Academy of Engineering.