

# 核能電廠的風險分析

文・圖／吳焜裕

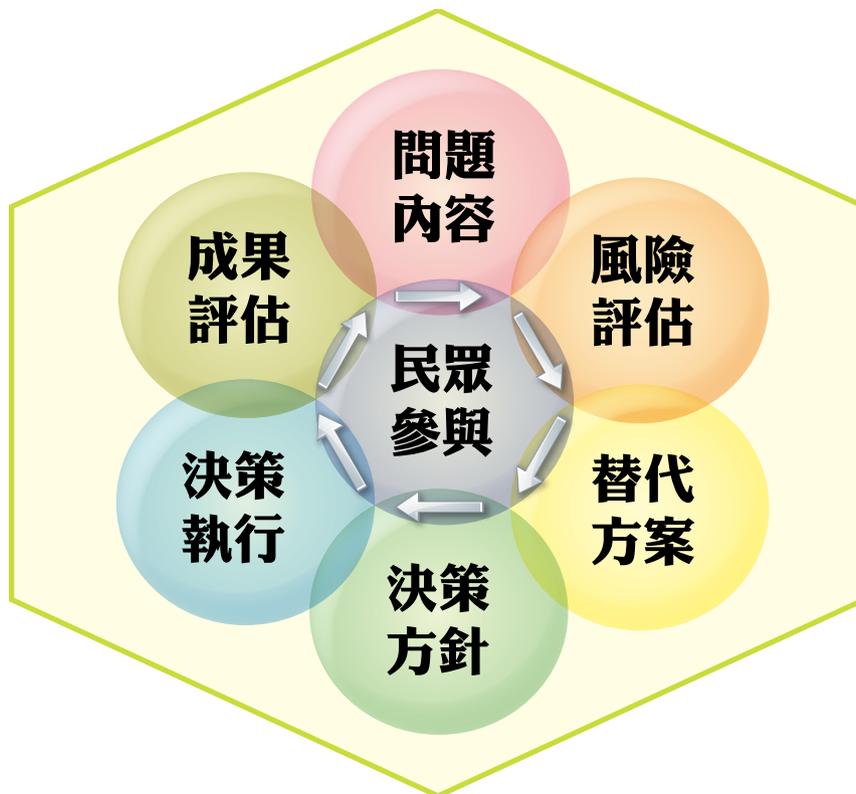


圖1：1997年美國總統／國會風險評估與風險管理委員會建議的風險管理架構，此架構於2003年為國際衛生組織（WHO）正式接受並建議國際根據此建構作為風險分析的參考。

在投資興建工廠前，為預防該工廠未來運轉影響其鄰近居民健康，根據一般健康風險評估（Risk Assessment）步驟，整合當時最佳科學資訊，估算在正常運轉與發生各種意外事故的情境下，因排放有害物質，可能造成健康危害的機率，提供風險管理者決策參考。當然決策的過程中，除考慮風險高低外，還要考慮到經濟、政治、社會現況與文化等因素，同時進行風險溝通（Risk communication）。自1997年美國總統／國會風險評估與風險管理（Risk management）委員會即建議民眾參與風險溝通的時間越早越好，最好是在規劃投資興建之初時，就參與和進行風險溝通（圖1）<sup>[1]</sup>。這個根據風險評估、風險管理、與風險溝通的決策過程稱為風險分析（Risk analysis）。

## 健康風險～放射性物質

核能電廠的健康風險評估，首要考慮就是在正常運轉、意外停止運轉、與重大意外事件發生時，可能排放的有害物質。民眾最關切的是這些放射性物質及其排放量。如經空氣排放，可利用空氣擴散模式模擬這些物質在當地氣候條件影響下，飄散距離和各地點的沉降濃度，及其沉降後進入地表水、表土、裡土、與各種農作物和畜牧產品、甚至地下水的濃度。如果是經由廢水排放，最終會流進大海，也可以利用各種數學與統計方法估算在各種環境介質（如水、底泥、與各種海鮮水產）的濃度。接下來就要根據國人的生活飲食習慣，估計居民經由呼吸空氣、飲水、與食用各種食物（海產與農畜牧產品）所攝取的

量，再以半衰期來估算人體接受的終身累積輻射劑量。當然還需要將體外直接接受的輻射劑量納入考慮。得出劑量後，再對照國際組織所公告之單位劑量對人體造成各種危害係數，便可以計算出可能造成危害的機率。

這樣的一個評估結果，不僅有助於了解核能電廠運轉後，對其鄰近民眾健康影響的風險，更重要的是提供政府在規劃核能電廠發生意外事故的緊急應變的方案，包括緊急應變措施，緊急醫療與疏散，農漁牧產品食用等。

## 安全評估～反應爐融燬

在這個評估過程中，很重要的一點是：如何評估核電廠發生各種意外事故發生的機率。這個評估過程就像一般化學工廠的製程安全評估，針對製程中每一個製造單元可能發生的各種意外事故，分析建構導致此種意外的故障樹（Fault tree）與事件樹（Event tree）<sup>[2]</sup>，只要有每個組成事件發生故障的機率，就可以估算其意外事故發生的機率。一般核能電廠最嚴重的意外事故是反應爐融燬（Nuclear reactor meltdown），因此在談核電廠安全評估，主要就在評估其反應爐融燬的機率。

評估核電廠反應爐融燬機率的方法，在1980年前已建立，而臺灣在1980年代規劃興建核能電廠，按常理應執行過該項評估。隨著科學資訊的進步，國際上對於核電廠反應爐安全評估方法已有改變，例如從側重硬體設備的安全性到增加人為疏失（Human errors）因素，並建立動態（Dynamic model）評估系統<sup>[3]</sup>，將材料設備隨使用時間而發生故障率納入考量等，較能反映實際狀況並降低評估結果的不確定性。

## 科學資訊～完整與運用

執行風險評估與安全評估都需要整合當時最

佳的科學資訊，所謂科學資訊至少包含科學知識與科學數據兩個層面。執行評估的過程中常常遇到科學知識不足，與科學數據不充分的問題，導致評估結果必然含有不確定性（Uncertainty）。在一般風險評估的教科書中，常將不確定性分為模式不確定性（Model uncertainty）、情境不確定性（Scenario uncertainty）、與數據不確定性（Data uncertainty），前兩項常與科學知識不足相關，也有人稱為知識論的限制<sup>[4]</sup>。就像歐洲人原本認為天鵝都是白色的，直到17世紀，荷蘭的水手到澳洲發現黑天鵝才改變看法<sup>[5]</sup>。這也解釋為什麼核工界的學者專家要感謝上帝在福島核電廠作實驗，讓他們了解到複合性天然災害會引發核能電廠嚴重意外事故的情境，有助於改善核能電廠的安全評估。另外，數據不夠完整例如評估反應爐意外事故風險時，國內缺乏故障率相關數據，只好引用國際現有數據，但其中某些設備可能是國內自行製造，或是工程由國內廠商施工，卻使用國際的數據進行評估，會增加評估結果的不確定性。東京電力也曾在福島核電廠災變前針對地震與海嘯進行評估，根據文獻資料顯示，日本東北地區曾經在869年發生8.6級的Sanriku地震與引發海嘯，侵襲陸地至少4公里，在1611年也發生8.1級的Sanriku地震，引發高達20公尺的海嘯，但因只有兩筆，當時東京電力模擬評估結果是海嘯高度最高只達5.7公尺<sup>[6]</sup>。

## 高估風險以降低風險

執行風險評估與安全評估，目標都在預測未來的風險，既使根據當時最佳科學資訊進行評估，難免遇到科學知識不足與數據不充分的情況。這也是風險評估的最後一項工作；風險特性化（Risk characterization）特別強調執行評估者需要完整的描述在執行過程中遇到那些科學知識不足與數據不充分的情況，並說明為了使得評估

順利進行必須作的假設，與這些假設對評估結果的影響。也就是說即使根據目前最佳科學資訊執行的風險評估，所估算的風險與實際風險到底誤差多少，實在沒有人知道。因此一位專業的風險評估工作者，會在現有科學資訊的限制下，作合理和具科學性的假設以高估風險，儘可能讓所評估的風險包含實際風險。如果決策者能參考以進行決策，並據以進行管制，可能讓實際風險趨近所評估的風險，這樣的政策應該可以維護民眾健康安全。萬一決策者不滿意評估報告的品質，想要改善評估與決策品質，可以根據敏感性分析結果，針對影響風險較大的因素或事件重新評估，降低評估的不確定性進而改善其品質<sup>[6]</sup>。

## 核四應重啟風險評估

當前臺灣面臨核四廠續建與否的問題，在作決策之前，政府應先檢討當年核四廠的風險評估報告究竟含有那些不確定性。當一個電廠歷經10多年仍未完工，當年很多規劃的工程項目已變更，很多材料設備還未運轉使用，說不定早已超過它們的使用年限。建議重新執行健康風險與安全評估。福島核災提供了重新執行評估的契機，重新執行評估時應該考慮更多的情境，如人為疏失、設備老化、核電廠維修、公司的組織與管理文化、各種災害（地震、海嘯、颱風、複合災害、甚至戰爭）、管理監督效能、與電腦安全（恐怖份子可能利用電腦攻擊）等情境。當然考慮的情境愈多，使用數學統計模式會愈複雜，數據愈難取得，評估的不確定性會愈高。而且天然災害的風險評估，本身就有相當高的不確定性。面對這種高度不確定性的風險，在風險特性化中，執行評估者更應該將評估過程所使用的假設與如何選用數據詳細描述，幫助風險管理者了解其限制。不論機率多小，風險管理者須要了解這個風險需要在某些假設下，與符合所評估的情境

下才有意義。因此要談安全性，應該在滿足評估的條件下，才有安全性可言。面對核電廠反應爐安全評估的高不確定性，應該針對幾種意外事故，包含最嚴重的反應爐融燬進行模擬，擬訂緊急應變策略，並進行演練，尤其在大臺北地區，人口稠密，一時要疏散為數龐大的民眾不易。

風險管理者在制定決策過程中，成本效益分析是重要參考工具，風險本身無法反映成本。需要考慮意外事故發生後導致的各種損失換算成金錢後的總額（後果嚴重程度），意外事件發生機率乘以該事件的後果嚴重程度才能反映成本，各種可能的意外事件發生的機率乘以其相對的後果嚴重程度之平均值會等於意外事故發生時需要付出的成本期望值（或函數）。這個期望值與執行政策可能獲得的利益期望值作比較，才是風險管理者作決策要參考的重要資料。當然還要有其他替代方案，並針對替代方案進行比較風險分析以得出最具有成本效益者。有人可能誤以為是比較各種事件的風險機率大小，所以才會說出核電有風險，搭飛機也有風險之類的話，又如罹患禽流感的風險機率遠小於車禍等，但是政府對預防禽流感所投入的資源不會低於預防車禍，因為決策不是完全根據風險的高低。

## 風險管理～不只是成本

政策要為多數民眾所接受，就需要主動積極的進行風險溝通。風險溝通為科技溝通的一種，指的是風險管理者在政策未定案前的雙向共識溝通（Consensus communication）<sup>[7]</sup>，內容包含評估結果、評估結果的意義、與執行評估過程所受的限制。如果政府已決定核四廠續建，再來與民眾溝通，那等於只是單方面的告知，不是雙向的溝通，民眾沒有建言的機會，與風險溝通的定義相去甚遠。或者溝通過程只告訴民眾核四廠很安全，也就是風險很低，民眾為什麼要相信呢？一

般民眾其實都是理性的，會想了解何以評估出核四廠很安全。因此所有與核四廠安全評估的資訊要完全公開，接受民眾檢視，也讓人民了解，在現有科學資訊下，已盡最大可能的高估風險，期待民眾能接受因此而造成的評估誤差。但是核能電廠反應爐融燬的意外發生機率很低，但因無法預測什麼時候會發生<sup>[4]</sup>，加上後果很嚴重，民眾不僅接受意願低，甚至擔心害怕。最近瑞士在福島核災發生前後對核電廠接受度的研究結果顯示，在福島核災後顯著降低，對核電廠可能帶來的利益主張也顯著減少<sup>[8]</sup>。

總之，核能電廠的健康風險評估與安全評估

確實受到科學資訊限制，評估結果有相當高的不確定性。在福島核災後，民眾擔心類似福島核災的意外事故在臺灣重演，雖然機率很低，但臺灣地狹人稠，民眾承擔這樣後果的意願更低。加上外界普遍認為核電監督效能不彰，對其安全性信賴度低，所以核四廠興建以來面臨諸多抗爭、紛擾不斷。臺灣社會已民主化，公共政策的決策需要根據當時最佳的科學資訊為基礎，方能為民眾所接受。風險分析包含風險評估、風險管理、與風險溝通，已是國際上公認足以整合最佳科學資料的決策過程，值得參考。（本期專欄策畫／健康政策與管理研究所鄭雅文教授）

## 參考文獻：

- [1] Presidential/Congressional Commission on Risk Assessment and Risk Management. 1997. Framework for Environmental Health Risk Management. Washington, DC.
- [2] Robert M. Bernero. 1984. Probabilistic Risk Analyses: NRC Programs and Perspectives. Risk Analysis, 4:287-297.
- [3] Kae-Sheng Hsueh and Ali Mosleh. 1996. The development and application of the accident dynamic simulator for dynamic probabilistic risk assessment of nuclear power plants. Reliability Engineering and Safety System, 52:297-314.
- [4] Jonas Hagmann. 2012. Fukushima: probing the analytical and epistemological limits of risk analysis. Journal of Risk Research. 15:801-815.
- [5] Elisabeth Pat e-Cornell. 2012. On “Black Swans” and “Perfect Storms” : Risk Analysis and Management When Statistics Are Not Enough. Risk Analysis, 32:
- [6] National Science Council, Sciences and Judgment in Risk Assessment, 1994, Washington, DC.
- [7] Regina E. Lundgren and Andrea H, McMakin. 2009. Risk Communication: A Handbook for Communicating Environmental, Safety, and Health Risks. 4th edition, A John Wiley & Sons, Inc., Publication, Hoboken, New Jersey.
- [8] Vivianne H. M. Visschers and Michael Siegrist. 2013. How a Nuclear Power Plant Accident Influences Acceptance of Nuclear Power: Results of a Longitudinal Study Before and After the Fukushima Disaster. Risk Analysis, 33:333-346.



### 吳焜裕小檔案

97學年度到臺大公共衛生學院職業醫學與工業衛生研究所任教，目前兼任臺灣風險分析學會秘書長。主要講授課目有風險評估、風險評估實務、和風險溝通與管理等。長年從事健康風險評估與利用質譜儀分析生物指標之研究，曾執行過帶骨牛肉與其相關產品、三聚氰胺、與油炸油含砷的健康風評估等，這些成果不僅發表在國際學術期刊，並提供國內政府與國際相關組織作為制訂決策之參考。所執行的加拿大帶骨牛肉風險評估報告，據聞為加拿大政府翻譯成英文，送到國際貿易組織作為和針對韓國帶骨牛肉進口仲裁的科學證據。另外其三聚氰胺評估報告，對於國際食品法典（Codex）在2012年中修訂三聚氰胺標準也可能產生效益。