

核能發電的省思

蕭國鑫

工業技術研究院 綠能與環境研究所

摘要

核能事故的發生均與人為因素有關，在核災當時倘能即時處理、資訊公開與適當的人為避災措施，將可減少災情擴大。對於核能電廠的安全防禦，除需考量減緩地震或海嘯的衝擊外，亦需注意複合式天然災害威脅與具備抵禦人為攻擊的能力，而營運中的核電廠更需具有自動停轉功能，且配備“被動”安全系統，以提供緊急冷卻和其他安全功能。而對於用過核燃料的最終處置，世界各國均傾向於由地方或社區主動提出廠址供評選。我國的環境較特殊，目前台電公司亦正進行用過核燃料最終處置場的地質調查、評估與相關技術發展，另也並持續探討運往國外再處理或最終處置的可行性。

未來核能電廠興建以安全為第一考量，所以建廠成本將會增加，而亞洲地區的新興國家將規劃興建許多核電廠，如中國大陸在沿海地區就有大量核電廠的興建，我國除需要密切關注中國大陸的核能電廠發展外，亦可考量結合大陸沿海的氣象條件及自然環境等，模擬若有核能事故發生時之災害演習，以減少民眾的心理恐慌。而基於未來第四代核能電廠的特色，強調建廠簡單、體積小、價格較便宜、可以很快建成、具多用途且更安全等之特色，雖然我國的核能政策以非核家園為目標，但是我國的自主能源相當缺乏，故此種核能電廠新技術的開發，仍然可以多加注意。

關鍵字: 核能發電、用過核燃料、海嘯

一、前言

2011 年 3 月 11 日日本福島核災發生後，再度激起人民對於核能發電安全的省思。由於歷史上已發生多次重大核能事故，造成環境的重大災害與累計數萬人的喪生。在講求核能經濟效益的同時，藉由歷史核災的回顧，我們可以深入思考，核能真的安全嗎？應如何確定核能發電的高度安全。

核能發電成本結構中，燃料費所占比例較低，且核能發電的成本較不易受到國際經濟情勢影響，其成本變動亦較其他發電方法穩定。但是基於安全考量，如核能電廠設施易受地震與海嘯等天災及人為破壞影響，發生核災時倘因人為疏忽，將導致災情擴大或輻射外洩等困擾；加上用過核燃料的永久儲存問題，一致使未來核能電廠建造成本逐漸增加等，對於是否要建造核能電廠，均為值得探討的課題。

配合經濟成長需求，中國、越南與其他新興市場對電力需求大幅成長，南韓也因工商業及生活水準急速提升，電力需求持續快速增加。依國際能源總署預測，未來二十年的電力需求將以每年 2.4% 的速度成長，至 2035 年累計成長將超過

80%；而中國與印度電力需求也將以每年 4%與 5.4%的速度成長，顯示全球電力高成長區域將往亞洲移動；同時也導致未來核能發電將在亞洲地區發展的契機態勢 [1]。

核能發電具有減少碳排放優勢，惟在其效益之外亦須審慎評估安全因素；而現在之三代及未來第四代核能電廠，均以安全為第一考量，並強調用過核燃料可回收再利用，以減少用過核燃料之處置問題。另外第四代核能電廠亦考慮較小型、低成本的中小型反應爐，除了可提供發電外，亦可利用於海水淡化、集中供熱，甚至運輸等用途；此種核能發電新技術的發展，目前正在進一步研發中。

二、重大核能事故回顧

依據行政院原子能委員會資料，國際核能事件分級制度基本架構，針對核能災害規模可分為七級(表 1)，其中 4~7 級屬於較嚴重之核能事故，1~3 級則屬於核能事件，雖然後者還沒有對民眾的輻射安全構成影響，但仍需視情況緊急處理。

依據 Discovery 對全球核能事故的追蹤資料[2]，福島核災前已發生 5 件較重大的核能事故(如表 2)，其中以車諾比核災最為嚴重，估計有數萬人受到輻射影響而死亡，並導致 61,780 平方哩的面積受到嚴重的輻射污染，且有數十萬人被迫離開家園，目前仍無法回到自己的家園居住。近年來影響較大之三哩島核災、車諾比核災及福島核災事故，其詳細說明如附件一。

表 1、國際核能事件分級制度基本架構

等 級	準則 1	準則 2	準則 3
	廠外衝擊程度	廠內衝擊程度	安全防禦衰減程度
7 級 (最嚴重意外事故)	極大量放射性物質外洩: 造成廣泛性環境之影響		
6 級 (嚴重意外事故)	極顯著放射性物質外洩: 造成廣泛性環境之影響		
5 級 (廠外意外事故)	有限度放射性物質外洩: 造成須部份施行區域性 緊急計畫。	嚴重之核心或放射性 屏蔽毀損狀態	
4 級 (廠區意外事故)	輕微放射性物質外洩: 造 成民眾輻射曝露達規定 限值程度。	局部性核心或放射性 屏蔽毀損狀態，工作人 員有致命性曝露發生。	
3 級 (嚴重事件)	極小量之放射性物質外 洩:造成民眾輻射曝露尚 未達規定限值之程度。	發生大量污染擴散及 工作人員有輻射急性 效應發生。	接 近 發 生 事 故 狀 態，喪失安全防禦功 能程度。
2 級 (偶發事件)	無 安 全 顧 慮	重要污染擴散及人員 超曝露狀況	發生潛在安全影響 之事件
1 級 (異常警示)	無 安 全 顧 慮		發生功能上之偏差
0 級 (未達級數)	無 安 全 顧 慮		

格式化表格

資料來源：國際原子能總署(IAEA)和經濟合作開發組織核能署(OECD/NEA)合併訂定。

格式化: 字型: 12 點

格式化: 左右對齊, 縮排: 凸出: 12.75 字元, 左 -0.54 字元, 間距 套用前: 0 點

表 2、福島核災前五次重大的核能事故[2]

事故名稱	發生日期	地 點	國際核事件分級	事 故 影 響
車 諾 比 (Chernobyl) 核災	1986/04/26	前蘇聯(現 屬烏克蘭)	7 級	1.受污染區域面積 61,780 平方哩, 估計 20 萬人永遠離開家園 2.估計死亡人數 5000 人~75000 人 3.受輻射後後遺症逐漸出現 4.緊急處理與經濟損失近 200 億美元
克 什 特 姆 (Маяк)核災	1957/09/29	前蘇聯(現 屬俄羅斯)	6 級	1.估計 1 萬人撤離影響區域 2.估計輻射直接造成 200 人因癌症死亡 3.嚴重放射性物質洩漏(向東北擴散數百英里)
溫思喬火災	1957/10/10	英國	5 級	1.估計 200 人因溫思喬火災得了癌症 2.輻射波及北歐數百英里, 所以確切死亡人數難以統計。
三 哩 島 (Three Mile Island)核災	1979/03/28	美國賓夕 法尼亞州	5 級	1.核電廠周圍居民的癌症發生率沒有顯著性影響(專家評估應再評估肺癌及血癌的發生率)。 2.造成二號爐嚴重損毀(一號爐停機六年), 直接經濟損失 10 億美元。
東海村核災	1999/09/30	日本東京 東北部東 海村	4 級	1.電廠 1000 英呎內 161 位居民被撤離。 2.近 100 名工人和附近居民因輻射住院 3.3 名事故當事人受到強烈輻射, 其中 2 人在事故後不到一年死亡。

資料來源：福島地震專輯。歷史上發生的 5 大核能事故，discovery 報導，果殼網，2011-03-17，<http://www.guokr.com/article/13377/>。

格式化: 縮排: 凸出: 12.75 字元, 左 -0.54 字元, 間距 套用前: 0 點

三、縱深防禦-核能安全嗎？

核能電廠的安全防護為核能發電最重要的課題⁺。福島核災後，世界各國對於興建中的核電廠，均重新評估或提升改進核能發電的安全性，以避免核能事故的發生，包括核電廠的選址、設計、建造、測試、運轉與除役等，都設有嚴格的要求與規範⁺。而對於運轉中的核電廠，則提高避震安全係數、加強對海嘯或其他天然災害的防護能力(包含複合型的災害)。福島災後日本及我國均針對核電廠進行安全總體檢，如防地震、防海嘯、冷卻設施、不需人為干預的安全裝置、可自動冷卻反應爐及所有的壓力測試等，務必將核能發電可能導致的災害降至最低，以消弭因日本強震引發海嘯導致之核災^所，以及引起社會大眾對核安之疑慮。

鑑於 2001 年的 911 恐怖攻擊事件，核能電廠的硬體防護課題更受到關注⁺，因此，營運中的核電廠需加強防禦措施，以抵禦飛機攻擊⁺。未來新設計建造的核能電廠，除了要求上述的防禦能力外，更需具備在電力被切斷時自動停轉的功能，且配備“被動”安全系統，以提供緊急冷卻和其他安全功能[3]。甚者，核電廠

運營者須具有管理大型火災或爆炸的能力，並依據標準操作程序(SOP)進行營運管理，以避免人為的疏失而釀成災害。

雖然藉由工程改善與有效的管理，可儘量避免核能災害的發生，但大自然的力量是難以估計的，因此，未來仍無法百分之百確定核能發電是絕對安全的。倘若安全措施做的完善，則我們可以相信「它是相對安全的」。

四、用過核燃料的最終處置

用過核燃料的最終處置是目前核能發電最棘手的問題之一，因為最終處置場的設置與選址不易，特別是高放射性物質長時間集中儲存後，具有相當高的不確定性。而被動式被選定為最終處置場的地區，更會遭遇到居民的強烈抗爭。

通常核能發電用過的核燃料，會暫存在核電廠核廢料池的臨時儲存系統水池中，待其冷卻及放射性下降後，再進行用過核燃料處理，如此可將用過核燃料中的鈾 235 和鈾取出，並提供再利用，而剩餘物質再當作高放射性廢棄物處置[4]。若沒有進行核燃料再處理，用過核燃料在水池中放置數年後，會移至乾式貯存設施做中期貯存(用過核燃料放在水泥護箱內的焊接金屬密封鋼筒中)，目前美國就有 55 處運作中乾式貯存設施。而台電公司亦參照國際間的作法，將用過核燃料儲存於水池中，經過一段時間後再移到乾式儲存設施做儲存，同時亦進行用過核燃料最終處置場的地質調查、評估與相關技術發展。由於我國的地質環境較為特殊，所以台電也同時探討運往國外再處理或最終處置的可行性。

歐盟各國亦積極尋找與評估最終處置場所。英國核能除役署(Nuclear Decommissioning Authority, NDA)規劃之放射性廢棄物處置，是以地質處置場作為中高放射性廢棄物儲存場所，進行過程包括 4 年地質研究、10 年地表分析和 15 年地下研究、設施興建和啟動；並設定 2040 年為用過核燃料深層處置場的運轉年。另如瑞士、法國、德國與芬蘭等歐盟國家，對於選址評估與興建的整個流程，亦均花費了 30~40 年的時間。

深地層處置為代表高強度放射性廢棄物或用過核燃料最終處理最安全、永續的選項，所以歐盟執行委員會於 2011 年公布放射性廢棄物深地層處置計畫，其「用過核燃料與放射性廢棄物處理指示」將提供歐盟各會員國規劃安全貯存放射性廢棄物與用過核燃料時的參考依據。目前歐盟尚未強制各會員國採用深地層處置，係因各地區地質狀況有所差異，故各會員國應根據場址的特殊狀況確定處置深度，且每處場址都必須依其特殊情況加以評估。另該指示也允許多國共用一個處置場，但不得將放射性廢棄物出口至歐盟以外的其他地區進行最終處置。同時各國亦應立法，以堅持政府在制定相關計畫時，必須告知並徵詢民眾的意見[5]。

另依據美聯社 2011 年 3 月的調查報導，多年來美國各州的核能電廠已經產生 71,862 噸的用過核燃料，其中超過四分之三的用過核燃料長期存放在類似日本福島第一核電廠核廢料池的臨時儲存系統中(包含美國 15 個已經永久關閉的核電廠)；這些地點頗接近大型人口密集區，如華盛頓、波士頓、紐約市、費城與芝加哥均位在 50 哩輻射落塵區內；因此，輻射核廢料專家 Kevin Kamps 表示：此可能是美國最嚴重的單一安全弱點[6]。而在尚未設想出永久的處理方式之前，核廢料

儲存於廢料池的方式應只是暫時；依 Kamps 建議，應將核廢料儲存在經認證的不鏽鋼混凝土箱內，並遠離反應爐，而後再將這些箱子置放在強化建築內，或地下儲藏所中⁴。然而這種核廢料儲存方式亦只是暫時，直到可存放於內華達州猶卡(Yucca)山內深處[6]。惟目前基於地質與其他因素，近來猶卡山地址已被認定為不適合儲存核廢料(猶卡山計畫說明如附件二)。

五、未來核能建造成本將更高昂與亞洲國家興起

依據 2010 年國際能源總署(IEA)資料，如果以核電廠運轉壽命 60 年估算，建廠的固定投資成本(Overnight Cost¹)約在美金 1,338~5,863 元/瓩之間(中位數 4,102 元/瓩，平均數 4,055 元/瓩)，而台電公司推估我國於 2015 年完工的核四廠固定投資成本約為美金 5,000 元/瓩[7]，建廠成本稍高於 IEA 計算的平均價格⁴，主要原因為福島核災後，需加強核電廠的安全措施，以及須加上 2000 年的停工損失。另英國在 2004 年、2006 年和 2008 年，估算新的壓水式反應爐成本約為美金 2,233 元/瓩、2,644 元/瓩與 3,000 元/瓩；美國麻省理工學院(MIT)推估大致相同時間核電廠的建廠成本，約從美金 2,208 元/瓩上升至 4,000 元/瓩[8]。此外，10 年前開始推廣之第三代 AP1000s 核反應爐，曾強調會有更標準化設計和改進施工技術，且設計上更安全，價格亦更便宜⁴。實際上，以美國 2012 年通過新建造的兩個 AP1000s 系統核能反應爐，推估的建設成本約為 200 億美元(成本約美金 9,000 元/瓩)，由於強調以安全為第一考量的第三代核電廠造價不降反升，導致反對者認為該反應爐過於昂貴，因此⁴強烈建議不要建造。

~~國際能源總署預測，未來二十年電力需求將以每年約 2.4% 的速度成長，累計至 2035 年成長將超過 80%；其中如中國大陸、印度、越南與其他新興國家，由於經濟發展需要大量電力，而南韓也因工商業及生活水準急速提升，所以電力需求大量增加。推估中國大陸與印度的電力需求每年將以 4% 與 5.4% 的速度成長(歐盟與美國為 0.9% 與 1%)，顯示全球電力高成長區域將往亞洲移動。~~

依世界核能協會 2012 年資料，全世界正在興建及規劃中的核子反應爐，分別有 60 座及 163 座(與福島核災前相差不大)；而到 2012 年 3 月止，中國大陸就有 25 ~~個座~~正在興建和即將興建的核反應爐(分布如圖 1)，且大部分分布在沿海地區(中國大陸目前運轉中的核反應爐有 14 ~~個座~~，核能發電裝置容量 10.3 GWe)；~~而~~興建中的反應爐型式包含第三代的 AP1000s 型和 EPR 型，且規劃到 2020 年的裝置容量為 60 GWe，2030 年為 200 GWe，2050 年時核電廠的分布將擴及到內陸地區(如圖 2 所示)，且規劃的核能裝置容量為 400 GWe [9]。另日本國會也通過該國的核電公司將核電設備出口至約旦、越南等國的協議⁴，而中國大陸亦允諾未來協助巴基斯坦建造兩座核反應爐計畫⁴，顯示未來亞洲地區~~的~~核能發電重要性將日漸增加。

~~目前許多國家仍將繼續興建核電廠，惟在經濟利益與工商業發展需求的誘因下，許多國家仍將繼續興建核電廠，惟~~若沒有慎重考慮是否有足夠的基礎建設讓

¹所謂 Overnight cost 是在不考慮利息的情況下，假設整個電廠計畫現在就完工所需支付的建造成本。

反應爐正常運作，並具備萬一發生核能事故的處理能力，只是一昧一昧的興建新核電廠，則對於未來核能的營運安全將會是一大隱憂。

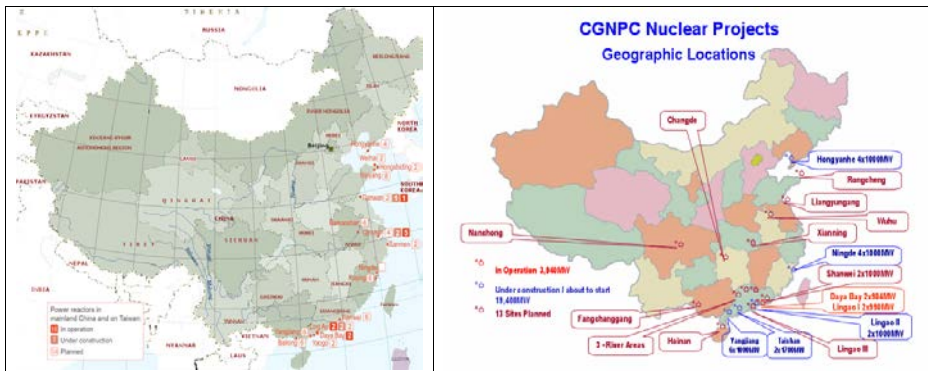


圖 1、中國大陸運轉中、興建中及規劃興建之核能廠分布圖 [8]

圖 2、中國廣東核能公司對未來中國大陸的核電廠規劃 [8]

資料來源：[The dream that failed, Nuclear Energy Special Report, The Economist, 2012/03/10.](#)

格式化: 字型: 12 點

六、核能減少碳排放

與傳統化石能源相比，核能發電所使用的燃料成本與體積相對少很多，運輸與儲存均很方便，加上核能發電不像化石燃料發電會排放巨量的 CO_2 到大氣中，不會造成空氣污染，也不會導致地球溫室效應問題之惡化，故核能發電為目前較為經濟、穩定且潔淨的電力來源之一（不計核廢料處理問題）。

依麻省理工學院歐內斯特·莫尼斯表示，推估到 2020 年，21 世紀初的碳排放量將超過整個 20 世紀。而核能發電對環境貢獻的最大優點是不會直接產生大量的 CO_2 排放。另依據普林斯頓大學羅伯特·索科洛工作群推估，最近 50 年，如果核能發電裝置容量增加三倍，取代可產生 700GW 電力的燃煤發電，則每年將可以減少約 37 億噸 CO_2 的碳排放[8]。但最值得深思的是 2010 年工業排放 CO_2 量約為 300 億噸，且每年約以 3% 的速率增長，4 年的工業排放 CO_2 增加量，即可抵消核能發電一年碳減排的貢獻。由於使用核能發電達到減少碳排的比例較工業排放的 CO_2 量少很多，故欲在 2050 年前達到 80% 減碳目標，採取各種節能減碳措施與具體行動，均為須持續努力的方向。

雖然核能發電具有減碳排效益，但是一般民眾對於核能營運的安全仍然存疑。而未來配合再生能源技術的進步與大量開發應用，其發電成本預期將會降低，藉由逐漸增加再生能源發電比例(如我國推行之陽光屋頂百萬座、千架海陸風力機等再生能源發電)與降低電力密集度，將可在未來逐漸減核或達到非核家園目標時，仍能滿足用電需求及維持合理的電價有助於達成減少我國對核能依賴。另如圖 3 所示，相對於 2000~2010 年世界上再生能源與核能的發電情形，顯示再生能源發電比例雖然逐年增加，但 2010 年發電量占比仍不足核能發電量的 1/4；倘未來擬以再生能源發電輔助核能發電，仍有很大的努力空間。

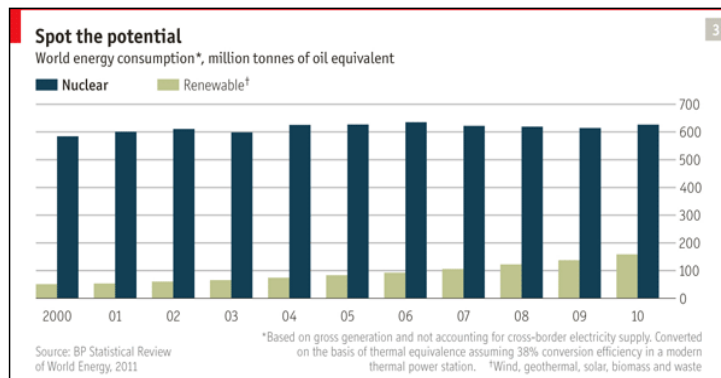


圖 3、對比2000~2010 年世界上可再生資源與核能的相對發電情形 [8]

資料來源：The dream that failed, Nuclear Energy Special Report, The Economist, 2012/03/10.

格式化: 縮排: 凸出: 12.25 字元, 左 4.45 字元, 右 4.76 字元

七、未來可能發展的的中小型核能電廠

現行第三代與未來第四代的核電廠的規劃設計，將以安全為第一考量。目前正興建中的核電廠，已經有多座使用第三代 AP1000s 或 EPR 等型式的核能設施(如中國大陸多座規劃中的反應爐及美國 2012 年 2 月新核准興建的兩座 AP1000s 反應爐)，，+這些新建設施除須具備第三節所述之安全防禦功能外，最重要的是當發生突發事件導致電力被切斷時，系統須具有自動停轉功能，且須配備被動安全系統，以提供緊急冷卻反應爐與和其他安全的功能[3]。另外未來並將考慮用過核燃料回收再利用的問題，推估約可減少 60%用過核燃料體積。

刻正研究規劃中的未來第四代核能電廠，可能考慮發展較小型—、較低成本的小型反應爐(100MW~ 300MW)，除了提供發電，亦可利用於海水淡化、集中供熱，甚至運輸等用途+。此種中小型反應爐也可以建造在地下，減少土建費用，，(並可建立類似建立工廠模式，工程也較不會延誤)。未來藉由發展這種中小型反應爐，將可音量因量化生產而顯著降低建造成本[8]。

八、結論與建議

1.核能事故發生對環境、社會與經濟的影響非常大，綜觀核能事故的原因，除了核能電廠自身的安全防禦措施外，人為因素是最重要的關鍵+。美國三哩島事故發生後，因為核能廠反應爐外殼發揮了安全保護作用，使得輻射沒有外洩，而核災當時的即時處理、資訊公開與人為的避災措施得宜，所以輻射災情沒有持續擴大+。反觀蘇聯的車諾比核災，人為操作錯誤為主要導火線，而受輻射污染的地區亦遠遠超過電廠周圍 30 公里的範圍，且因發生災害時相關資訊沒有公開，所以受輻射影響的人民達數百萬人之多。而日本福島發生地震後，大多數核能廠已

因例行停止運轉進行安檢後，未再啟動²全部自動關閉，電力也中斷，但受到地震引發的海嘯波及，使得抽水冷卻裝置全部泡水故障，反應爐溫度也不斷上昇，導致爐心熔毀，並引發輻射外洩情形；其中在反應爐溫度持續上升時，即因人為判斷過於樂觀，沒有接受即時的外援冷卻設施，導致災情擴大。

- 核能的安全除須考量避免地震或海嘯等單一天然災害的攻擊外，複合式的天然災害更值得注意(我國在太平洋板塊邊緣的地震帶¹與日本近似)¹。福島核災後，日本及我國均針對核電廠採取安全總體檢做法，如防地震、防海嘯、冷卻設施、不需人為干預的安全裝置、可自動冷卻反應爐及所有的進行超過設計基準之壓力測試³等，彼此之間或有可互為參考與借鏡處。
- 用過核燃料的處置一直是我國核能發展需要思考的課題⁴。對於用過核燃料的處理，目前台電公司正參照國際間的作法，將儲存於水池中一段時間的用過核燃料移到乾式儲存設施做儲存，同時亦進行用過核燃料最終處置場的地質調查、評估與相關技術發展⁵。另台電也持續探討運往國外再處理或最終處置的可行性。
- 未來核能廠基於安全考量，建造成本將更高昂⁶，核四廠在福島核災後，亦因為加強安全措施需要再增加經費，因此針對增加核四成本引起之爭論，可強調因安全問題所提高之相關成本，應可以藉此擴大說服民眾，並減緩大眾的疑慮。
- 未來中國大陸將在沿海地區大量興建核電廠，倘若發生核能事故時，對我國影響將會很大⁷。因此，我國除需要密切關注中國大陸的核能電廠發展外，亦可考量結合大陸沿海的氣象條件及自然環境等，模擬若有核能事故發生時之災害演習，以減少民眾的心理恐慌。
- 核能最大效益之一是可以減少碳排放，安全則為一大隱憂。未來隨著再生能源的技術進步與大量開發應用，其成本預期會降低，所以藉由增加再生能源的發電比例與降低電力密集度⁸；以逐步降低對核能之依賴應可在未來逐漸減核，並達到非核家園目標時，仍能充分滿足用電需求及維持合理電價的目標。
- 未來第四代核能電廠的特色，將強調以簡單、體積小、價格較便宜、可快速興建、多用途使用彈性，更安全等特色⁹。雖然我國未來將以實現非核家園為目標，但惟在我國自主能源相當缺乏的限制下，仍可多加注意此種核能電廠新技術的開發情形。

參考文獻

- [1] 福島核災嚇不怕_新興市場核電需求不減反增，自由時報，2012-3-25，<http://www.libertytimes.com.tw/2012/new/mar/25/today-int5.htm>
- [2] 福島地震專輯_歷史上發生的 5 大核能事故，discovery 報導，果殼網，2011-03-17，<http://www.guokr.com/article/13377/>。
- [3] 新核廠設計美國准了，中央社華盛頓綜合外電報導，2011/12/23。

格式化: 字型: (英文)標楷體, (中文) 標楷體

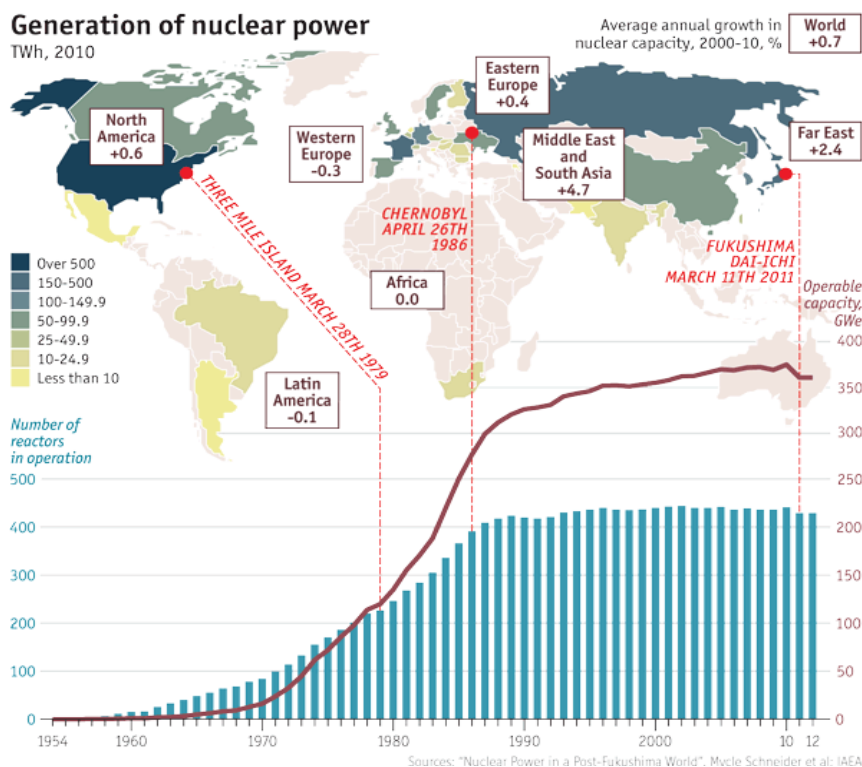
²日本共 17 座核能電廠 54 座核能機組，截至今(101)年 4 月 20 日僅餘 1 座機組運轉中，為北海道電力公司泊核能電廠 3 號機組，且預計將於今年 5 月 5 日停止運轉。

³壓力測試 (stress test): 以不同極端天然災害為引發事件，逐步推演惡化狀態，並驗證電廠之安全設計餘裕，以及採行因應措施的有效性，由點至面整體判斷是否足以因應超出預期之事故。

- [4] WNN News 2011/07/25, 2011/07/05, 2011/06/30.
- [5] 放射性廢棄物深地層處置計畫，WNN News, 2010/11/03。
- [6] 核廢料_美國安全最嚴重的威脅，鉅亨網，編譯郭照青，2011/04/02。
- [7] 國內外各類燃料發電成本比較，台電Q &A。
- [8] The dream that failed, *Nuclear Energy Special Report*, The Economist, 2012/03/10.
- [9] 中國核電，2012年3月，<http://www.world-nuclear.org/info/inf63.html>.

(本文僅代表 工研院 綠能與環境研究所 意見)

附件一、三哩島核災、車諾比核災及福島核災(地點如附件圖1)事故說明



附件圖 1、1954~2012 年核能反應爐數目及發電容量統計圖

(a)三哩島核能事故

1979 年 3 月 28 日凌晨四時，美國賓夕法尼亞州的三哩島(Three Mile Island)核電站，因為管理者的錯誤導致核心輻射洩漏⁴。當日早上 7 時偵測到二號反應爐圍阻體內的放射性強度已較正常時讀數高出數倍，於是負責運轉的大都會愛迪生電力公司馬上宣布電廠進入「廠址緊急狀態」，開始管制電廠區域的交通和進出人員，並通知美國聯邦政府的核能管制委員會(NRC，簡稱核管會)、賓州州政府所屬警察局、環境資源部及民防組織。由於狀況持續惡化，電廠於 7 時 30 分宣布進入「全面緊急狀態」，8 時 15 分 NRC 派遣數架直昇機到電廠做環境偵測⁴，結果顯示三哩島電廠上空的輻射劑量強度為每小時 0.20~0.30 毫西弗，離電廠 2~3 英哩處的空中輻射劑量強度為每小時 0.05~0.07 毫西弗，顯示三哩島核能電廠發生了非常嚴重的意外。3 月 29 日 NRC 宣布，三哩島發生核反應爐運轉以來最嚴重事故，電力公司也透露部份燃料棒可能受損的訊息，如果事故持續惡化，對附近居民安全將造成威脅。

3月30日，電廠周圍3英哩半徑範圍內的輻射劑量，強度達每小時0.25毫西弗，賓州州長一度擬疏散電廠附近四個鎮的部份居民，但在與核管會及電力公司磋商²⁶後決定暫緩實施，僅勸導居民減少外出並緊閉門窗。稍後不久，賓州州長下令撤離電廠周圍5英哩範圍內的學齡前兒童及孕婦，並通知電廠附近四個鎮的90萬居民準備疏散。白宮也於30日成立特別行動小組，統籌規劃三哩島事故應變事宜，之後因為處理得宜，將反應器逐漸冷卻，使得電廠的混亂情況獲得改善。4月1日，卡特總統親赴三哩島電廠巡視，以具體行動向民眾宣示三哩島事故的威脅已告解除。

三哩島事故發生後，因為核能廠外殼發揮了安全保護作用²⁷，而核災當時的即時處理、資訊公開與人為的避災措施得宜，事後在周邊50英哩範圍內的220萬居民經過輻射檢查，沒有發現急性輻射反應現象²⁸，只是一號機因為事故而停機六年，經濟損失約為10億美元。而核災已經過33年，目前三哩島的核反應爐1號機仍照常運轉，並持續提供約80萬戶的用電。

(b) 車諾比核能事故

1986年4月26日前蘇聯境內的車諾比(Chernobyl)核災事故的發生，主要是四號機組將定期保養停機(兩座為一組，共用一棟建築物及設施)，電廠當局擬趁停機時，利用該機組兩部汽輪發電機的第八號汽輪機，測試其驅動的蒸汽被切斷之後，汽輪發電機的轉動慣性能量在備用柴油發電機啟動前，能提供多久的廠內緊急電源實驗。此實驗在商轉前曾試驗過，但因發電輸出電壓下降太快而未能成功。此次則是在勵磁機上採用特殊之發電機磁場調整器設計，欲藉此克服電壓急劇下降問題²⁹。由於該機組設計上有缺陷，加上試驗時不當措施與人為運轉錯誤，導致嚴重³⁰的核能電廠事故發生。當事故發生後，消防人員在很短幾分鐘內抵達現場加入救火行列，外圍的主要火勢在4月26日凌晨5時即予以撲滅。

為了抑制反應爐石墨之燃燒及防止爐心放射性核種外洩，4月28日以直昇機投置總數5,000噸材料在反應器頂部，包括40噸碳化硼以防止反應器再達臨界、800噸石灰石以產生二氧化碳達成隔絕空氣作用、2400噸鉛以達輻射屏蔽之作用、以及1800噸的砂及泥土以作為放射性氣體懸浮物之過濾介質及達到滅火的效果。另為了避免反應爐內高溫的燃料燒穿爐底，5月21日在四號機底下興建一條隧道，以放置冷卻用的熱交換器，這是一項在飛快的速度和危險的環境下進行的龐大工程。動用了400名礦工，3小時一班，在6月24日，完成了168公尺長的鋼筋水泥隧道。事故之後，為了長期安置四號機，於是用了超過7千噸的鋼鐵和41萬立方公尺的水泥建造「石棺」(sarcophagus)的巨大圍阻體；並於當年6月動工，11月底完成。

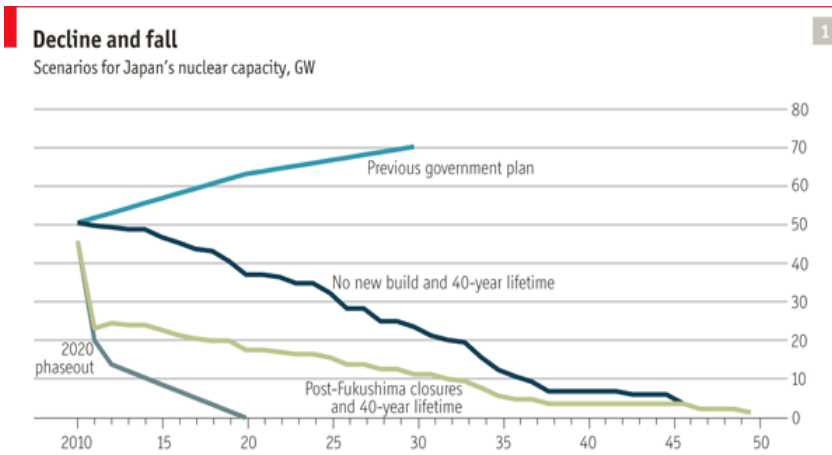
事故發生後，經過檢查，受輻射污染的地區遠遠超過電廠周圍30公里的範圍，最嚴重污染地區可達到300公里，甚至到達莫斯科，而被污染的土地散佈在現在的白俄羅斯、烏克蘭和俄羅斯等三個國家，且至少有九百萬人受到輻射³¹影響；由1995年聯合國的資料指出，被污染的土地面積超過16萬平方公里，被疏散的居民超過40萬人；從1986至1989年，統計工農業損失和保險金支付累計約36億美元，而蘇聯政府在這段期間花在緊急處理工作的經費約140億美元。

(c) 福島核能事故

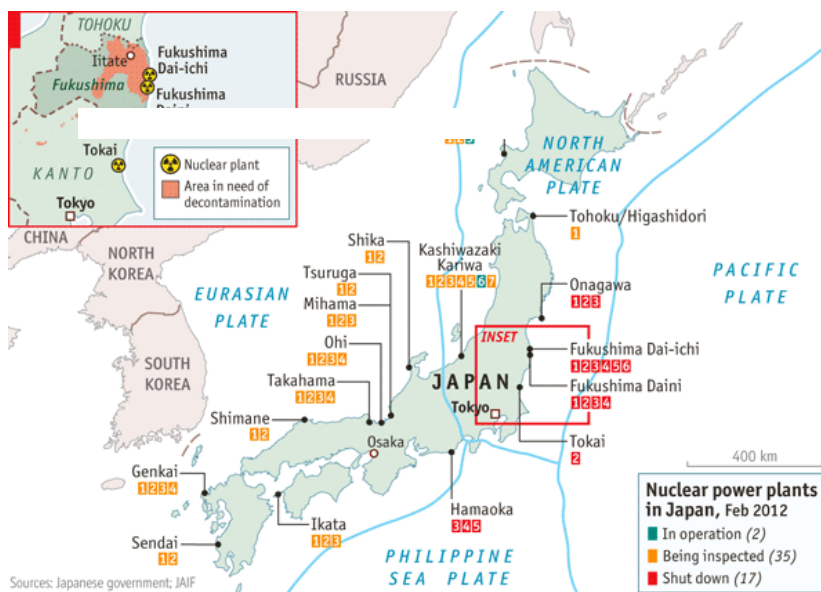
2011年3月11日日本東北部發生9級地震，位於震央附近的福島第一、第二、女川和東海等四座核電廠(合計11個反應爐，約提供日本8%的電力)，於地震後全部自動關閉，電力也中斷。隨後福島核一廠備用電力系統遭到巨大海嘯衝擊而毀損，冷卻系統停止運轉，燃料棒持續衰變發熱，以致反應爐溫度飆高，燃料棒絕緣體鍍金屬在高溫下(1,000°C以上)與水發生化學反應，產生大量的氫氣與高熱；於是洩壓閥將反應爐壓力鍋內的氫氣釋放到金屬保護殼外，而最薄弱的外層圍阻體在高熱下終於陸續引爆，並導致部分金屬保護殼破裂，致使高強度輻射物質外洩。由於爐心冷卻不順利，最後導致爐心熔毀、巨大熱量熔穿反應爐容器底部，再貫穿鋼筋水泥後，陷落到地層，同時將大量輻射物質散布在大氣中。

發生福島核災後，由於日本東電公司研判錯誤，亦即對災情過於樂觀與行動緩慢，導致輻射外洩情形逐漸加劇⁴。此外，亦沒有及時公布預測輻射物質擴散數據及緊急疏散民眾等，當發現嚴重輻射外洩時，才將福島沿海的核電廠半徑20公里內列為禁區，且禁止進入居住⁵。因此，事故當時約有7萬8200名居民被迫遷離家園(目前事故5公里範圍內仍禁止居住)。目前當地民眾仍有輻射恐懼，對於土壤、河川、湖泊和海洋殘留的輻射物質感到不安，且目前對於食物安全問題仍有疑慮(CNN 2012年1月報導)。整體經濟損失仍在計算中，但推估損失已接近700億美元。

福島事件後，日本的用電與核能發展政策改變，除了採取大規模分區限電外，東電並將於今(2012)年4月調漲企業用戶電價17%。日本核能發電比率亦從2010年的27.5%降到2011年的6.6%(如附件圖2)，使用化石能源(煤、天然氣)之火力發電則從49.1%增加到72.2%^[A1]，日本環境大臣於2012年1月亦發布核子反應爐等管制相關法案修正案概要，提出核電廠運轉40年限制，此為首次以法律規範反應爐壽命⁶。目前日本54個核子反應爐中，只剩北海道泊電廠還在運轉(預計5月5日停機檢查，如附件圖3)，屆時如果沒有其他核電廠被允許營運，今年夏天日本將沒有核能電力提供使用。



附件圖 2、推估 2012~2050 日本可能的核能發電情形



附件圖 3、2012 年日本的核能廠分布圖

附件二、美國猶卡山儲放核廢料計畫

猶卡山計畫的目的，係作為美國用過核燃料(包含核能動力潛水艇、航空母艦與軍用及民用實驗室等產生的核廢料)最終處置儲存場所。猶卡山位於拉斯維加(Las Vegas)西北方約 90 哩的地方(洛杉磯東北方約 210 哩位置)，處於內華達州沙漠區，地理位置良好，具有天然屏障，設計上也結合了現在和將來維護民眾健康和安全的必要條件；因此，~~初~~初步評選猶卡山底下作為美國用過核燃料的永久儲存場所。經過四十年的研究，評估此區可作為全美 7 萬 7 千噸核廢料之永久儲存處，並預估在 2012 年之前，可以正式將全美 113 處暫存之核廢料運抵猶卡山底下永久儲存 10,000 年。2002 年 2 月 14 日當時的能源部長向布希總統提出此計畫，並建議未來可投入資金建設地下貯存廠；同年 2 月 15 日布希~~即~~接受了建議。惟整個計畫的通過，仍需克服政治和技術方面雙重障礙，後於同年 7 月在眾院多數支持票決下，表決通過猶卡山為核廢料貯存場的計畫[A2]。

要執行猶卡山計畫的技術障礙仍然很多，包括如何將分散於全美 39 州 113 處核廢料暫存地點的核廢料安全無虞地運到猶卡山下永久貯存、貯存核廢料的桶子是否安全、恐怖分子是否會伺機恐擊及反核人士是否會沿途抗議等。另外在自然環境方面，雖然內華達州沙漠地區之猶卡山外觀乾燥，但週遭環境仍然有水，地下岩石之下有地下水，且岩石襯著裂縫，其地下地質較原先想像複雜，可能導致水滴滲透或讓放射物質外洩情形。另猶卡山周邊之核爆試驗區於 1962 年最後一次地上試爆核子彈後，於猶卡山底下發現核子試爆才能產生的氯 36 (chlorine 36) 物質，因此，推估在短短的 40 年內，雨水已使此放射性物質滲入地下岩石。雖然美國政府改變計畫，擬使用鎳及不銹鋼合金(稱為合金 22 (Alloy 22))，並採雙層方式製造貯存核廢料桶子，以確保核廢料乾燥隔離，並加強乾燥等措施，但經過長時間儲存後，其不確定因素仍然很多。

鑒於猶卡山計畫地質深層掩埋場計畫仍有許多不確定性，因此，歐巴馬政府已在 2011 年暫時停止「猶卡山計畫」~~一~~。美國目前仍積極找尋一個新的長期性儲存處所，以備未來之需；但是要找到合適地點並完成興建，可能得花數十年。另外在衡量英、法兩國用過核燃料再處理經驗，並參考日本與中國積極建立用過燃料的再處理能力後；歐巴馬政府於 2010 年 1 月 29 日，確定要評估將「先進核燃料循環技術」使用於高階核廢料長期處置的新策略，以求再利用用過核燃料內的資源，並減少約 60% 的高階核廢料體積。目前美國政府已遴選 15 名專家成立「藍勳帶委員會」(Blue Ribbon Commission)，以發展高階核廢料長期處理的新策略，「藍勳帶委員會」設立宗旨為確立未來美國高階核廢料(用過核燃料)的處理策略，但不會決定高階核廢料儲存地點[A3]。

參考文獻

[A1] 日本原子力產業新聞 2012 年 2 月中旬報導

[A2] 猶卡山計畫，看守台灣協會，2010/10/08。

[A3] 國際核能最新發展情勢，中華民國核能學會，2010 年 2 月。