

「核能復興」工作坊紀要

主題：核能復興工作坊

時間：2013年3月13日

地點：陽明大學

講題：The 'Nuclear Renaissance' in Historical Perspective: A Critical Analysis

主持人：傅大為 陽明大學科技與社會研究所教授

主講人：侯榭流思 (Per Högselius) 瑞典皇家工學院科學與技術史系教授、經濟合作與發展組織研究員 (Division of History of Science, Technology and Environment, Royal Institute of Technology, Sweden)

與談人：蔡岳勳 雲林科技大學科技法律研究所副教授

傅大為 陽明大學科技與社會研究所教授

紀要記錄整理：詹穆彥

一、工作坊內容：

侯榭流思：

核能目前在世界上許多國家都是頗受爭議的議題。講者希望以歷史的觀點理解核能的發展。在此意義下，核能應該被視為老

舊、失敗的科技，目前存在的核能也非原先所被期望的科技形式。以下是主要理由：

核能基本上是一項源自二次世界大戰之前頗為老舊的技術。核能作為都市能源的發展主要始於 1950 年代中期，此後迅速擴張。世界上的核反應爐總數在 1965~1985 這二十年間幾乎呈現指數成長。此一發展終止於車諾比（1986）核能事故的發生。從數據上來看，此後世界上的核反應爐總數鮮有成長，反而呈現穩定地減少，被關閉的反應爐較新增的更多。然而，若單看亞洲的部份，反應爐仍然呈現緩慢成長趨勢。

世界上目前約有四百座在運轉中的反應爐，大約佔總能源生產的 5~6%，對於能源供給的貢獻在比例上並不算多。若單看正式的電力生產，則約佔 13~14%。然而，核能所產生的能源，大約三分之二都在生產過程中散失掉，無法被使用。

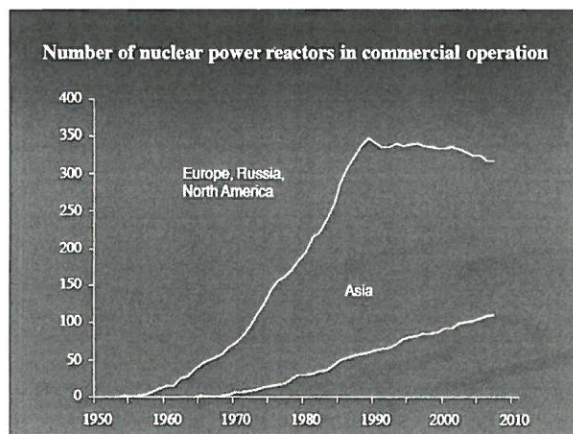


圖 1：核反應爐總數

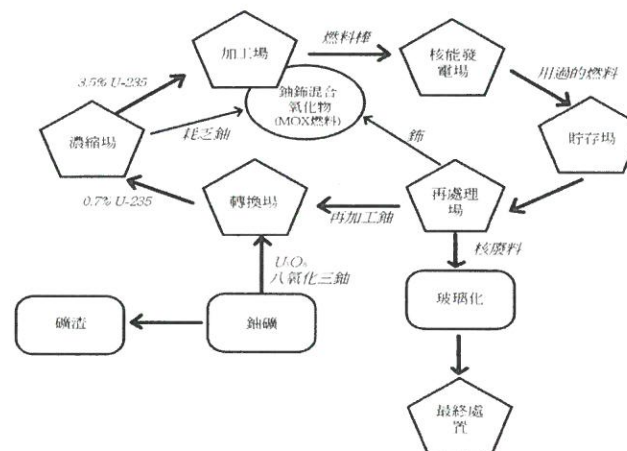


圖 2：核燃料循環 (nuclear fuel cycle)¹

核電廠、反應爐本身只不過龐大核能系統的一個組成要素。例如鈾礦在開採出來之後，必須經過不同階段的精煉以提高濃度，才能被使用於反應爐。理論上，被使用過的核燃料可經由「再處理」(reprocessing)過程重新被使用，成為一個不斷循環的結構。這個構想看來相當符合當代的環保意識，亦即資源可以不斷被有效再利用。然而實際上此一系統在操作十分困難，核能工程領域雖然已經耗費數十年的時間及龐大的資源及努力，至今仍無法實現此一系統。這個循環的困難尤其發生於「再處理」過程的諸多問題無法妥善解決。

目前最普遍被使用的熱式反應爐 (thermal reactor)，若放回五〇到七〇年代科學社群對核能科技的期待，只不過是最初級、

¹ 參考 World Nuclear Association 的圖製成。http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Introduction/Nuclear-Fuel-Cycle-Overview/。黃于倫重製。

原始的形式。然而原先預計可用來取代熱式反應爐的更有效率、更先進的反應爐，如滋生反應爐（breeder reactor）、融合式反應爐（fusion reactor）等，目前幾乎不實際存在，而停留在研發的層次。此外，核能至今已造成諸多事故，除了知名的日本、車諾比、三哩島核災之外，另外還有一些較不為人知的事務發生於核能燃料循環系統中的其他設施之上。

從歷史來看，過去人們對核能用途的設想也非常寬廣，包含運用在運輸、農業、移山、基礎建設……等層面。然而由於技術過於困難，許多未來導向的計畫被擱置廢除，僅有電力生產一項被保留下來。

上述例子可說明為什麼核能可以被視為一項「老舊的」而且是「失敗的」技術。但從現在的爭論可以看出許多人並不同意這種觀點。他們反而看到核能在越來越多的國家被接受，認為核能是對抗全球暖化的重要貢獻。對許多國家而言，核能加強了能源安全，得以擺脫對進口石油天然氣的依賴。這也是許多亞洲國家不斷投資核能的理由。科學技術的討論中也經常可以發現這些論述與詞彙：「新的」反應爐形式正在發展、「新的」燃料科技、「創新的」核廢解決方式。在這樣的論述中，核能被視為「新的」科技、「成功的」科技。因此，社會也需要大量的科技人才。

為什麼在這樣的脈絡下，核能仍普遍地被研究者及一般民眾視為一種成功的、新的科技？從數據上來看，核能發展的動能的確在車諾比事故（1986）之後便結束了。然而，該事件也因此可被視為一個新的起點，它是世界上第一個嚴重的核安事故，引發研究者可深入探討究竟發生了什麼事情。在這樣的分析脈絡下，研究者得以用車諾比事故作為區分核能技術新舊的分水嶺。車諾

比被視為一種「老舊的」、「蘇聯式的」、「東歐式的」、「共產主義的」的核能技術，進一步對比出歐美國家的核能是新的技術。藉由指出老舊的、不同類型的反應爐，才可能強調其他的反應爐是新的、更成功的核能技術。這自然也與當時中歐與東歐政治情勢的轉變（如兩德統一、東歐革命）相關。

在過去十年間，「核能復興」一詞出現得十分頻繁。核能支持者表達出某種新的樂觀主義，相信我們已經到了開發新的核能技術的時候。核能復興經常談到一些在車諾比事故之前不太可能存在的有趣的新概念。諸如，「先天本質上安全」的反應爐（“inherently safe” reactors）指的是在技術層次上不會崩毀或輻射外洩的反應爐。「零災害」的反應爐科技（“disaster-free” reactor technology）則是一種在車諾比之前不可能存在的概念。「無鈾」的再處理（“plutonium-free” reprocessing）強調理想上不會產生鈾的再處理過程，技術上更加安全。

在技術領域中，核能的推廣者經常以階段區分不同的核能世代，強調技術的不斷演進。然而，早期區分核能反應爐世代的觀念，與今日大為不同。早期對於反應爐世代的區分主要為：

第一代：熱式反應爐。（今天大多數的反應爐）

第二代：快中子增殖反應爐（Breed reactors）及高溫反應爐（high-temperature reactors），設計理念上更為先進，然而目前現在極少存在。

第三代：核融合。

然而，從今日的論述來看，卻可以發現完全不同的概念：

第一代：原型、最初實現的世代。（~1950-1970）（這是先前不

存在的概念，被插置於原先的第一代之前。)

第二代：當前運作的核電廠。(1970~2030)(為避免我們還在「第一代」的印象，因此將之命名為「第二代」。)

第三代：對當代反應爐的改進。(一種新的概念，被插入於現在正在運作的熱式反應爐以及未來的反應爐世代之間。這是目前可行，但很少被實際建造的。)

第四代：先進與新的反應爐系統。(2030年之後)

然而從歷史觀點來看，第一代和第二代之間的技術差距，並不足夠構成新的世代，然而這卻是倡議者目前描繪核能歷史，以及核能未來的方式。快滋生反應爐(fast breeder reactor)過去經常被提及，優點是可更有效地使用鈾所蘊含的能量，避免舊式反應爐運作過程中能源的大量浪費。這樣的技術，雖然未來仍很有可能實現，但在今日只是以不同的形式被論述，用新的名稱稱呼。

藉由分析上述新的核能論述，可以用三個要素解釋為什麼核能被視為新的科技。

第一個因素是新說法(Newspeak)。如果我們去看論述場域的發展，核能領域中明顯的有些新的說法取代原先具有危險意涵的詞彙，轉而以一種聽起來很先進、較不危險的方式陳述。例如：說「鈉冷卻快速反應爐」(sodium-cooled fast reactor)，而不說聽起來很危險的「滋生反應爐」(breeder reactor)。又例如以「轉變」(transmutation)替換「再處理」(reprocessing)的說法，前者意味以更「先進」的技術將危險的放射線轉變成較不危險。不過科學家沒提到的是，「轉變」其實還是離不開原有的「再處理」過程。

第二個因素是遺忘(Oblivion)。人們明顯遺忘許多事件，

尤其在福島核災之前許多人從未聽過核能事故。許多年輕人亦無法連結到二十五年前車諾比的脈絡。許多事故被壓抑，很少被討論；此外，人們原先對核能的願景完全被現代的人遺忘。

第三個因素是當前能源政策的挑戰(Current energy policy challenges)。支持核能的人們總是喜好提出環境及能源安全議題的議題，認為核能是對氣候友善的科技，有助於緩和氣候暖化的問題。核能也能確保能源安全。

若以歷史的觀點，核能很合理地可被視為老舊的、失敗的科技，但現在卻被視為新的、成功的科技。這樣的趨勢可由以上三個要素來進行分析解釋：對概念與論述的操作，伴隨著大眾的遺忘，以及當前能源政策挑戰。經常被提及的「核能復興」，主要更具有論述及社會建構的本質。它是被蓬勃的核能研究發展(R&D)活動所賦予的，而不是仰賴於實質上興建新的核電廠。福島核災事件對於亞洲及全球的核能發展上應有相當的啟示。

蔡岳勳：

「核能復興」一詞近年不斷在各種場合被提及，在業界談得比十年前更多。核能被範疇化成乾淨的能源，變成一個新的、不同的產業。然而，我想藉由呈現事實，實際觀察什麼因素支持「核能復興」這件事。

藉由世界觀察研究所(Worldwatch Institute)取得的國際原子能總署(International Atomic Energy Agency, IAEA)的相關數據，可以知道世界上核能反應爐啟動的高峰在1980年代。車諾比事故(1986)之後，啟動數量急遽減少，被關閉的反應爐大為增加。

在 1990 年代到 21 世紀，核能工業變得非常安靜。在日本核災過後（2011），甚至可以看到更多反應爐被關閉。從數據上看，絲毫看不出核能復興的趨勢。

有些人們會說核能復興是情勢的轉變（Change of circumstances）。然而，逐一檢視事實，並看不到實際上情勢的轉變。例如，目前仍無高階核廢料的永久解決方式；地理上的嚴苛要求，使得很難覓得核廢料的永久處置場址。美國曾有耗費鉅資，最終卻放棄的亞卡山（Yucca Mountain）計畫。目前核能的建造、運作及除役成本不減反增。此外在核能技術上，新一代的反應爐目前也僅處於理論階段。

若考量到市場需求的現實狀況，或許可以理解人們為什麼討論核能復興。我們經常忘記的是，反應爐有其使用週期與年限（平均是四十年，有些國家會展延至五十到六十年）。在高峰期（1980 年代）被啟動的諸多反應爐，目前正逐漸面臨退役的情境，並且將在 2025 年左右達到核電廠關閉的高峰。即使部分國家考慮展延使用這些在 1980 年代啟動的反應爐，仍然很有可能產生電力生產上的缺口。由市場現場考量，核能業界意識到此一現象，以及需要新的電力需求。因而大膽地說，核能復興與其說是情勢的轉變，其實更是一種銷售言詞。

日本福島的核災改變了許多事情，像核能復興這樣的銷售言詞大概不會達到核能業界所期望的成效。從財務上來考量，核能是高度資本密集的投資，不僅花錢，更有許多風險。在 2008 年的金融危機之後，銀行大多不願意再涉入這樣的投資。從實際數據上看，銀行界反而更願意投資相對的低廉並且具有彈性的再生能源科技。福島核災成為一種覺醒，讓人們重新思考核能的風險/

責任評估，日本政府與東京電力公司至今仍難以對這樣的苦難所需承擔的成本進行估算。政府部門（如美國國家核能管理委員會）對核能安全的要求變得更嚴苛，額外裝置的安全措施大大增加了核能的成本。相對於蘇聯，高度現代化的日本也發生了如此重大的核災，使得人們對核能有了不同的思考；此外，許多能源設備的製造商（如：美國通用電力公司，GE）也產生轉向，核能部門佔據的總銷售比例逐漸衰退。

傅大為：

首先肯定蔡教授以市場需求解釋核能復興的觀點。但想進一步追問：核能的研發（R&D）社群的樂觀主義從何而來？若如主講者所言，核能科技以技術史而論是一種失敗的科技，新一代的核能物理、核能工程人員如何能得到這種新的樂觀主義？這種樂觀主義是否有可能不是來自老一輩的核能傳統，而是來自不同的技術傳統？

侯榭流思提出車諾比事故被核能研究者視為一個新的起點、新的機會，讓人聯想到韓國將車諾比事件視為購買核電廠良機的例子。彼時世界上幾乎所有國家都停止興建或購買新的核電廠，當時韓國卻逆向操作，成為車諾比事故後唯一願意購買核電廠的國家，並憑藉了這樣的「購買權力」同時向通用電力公司取得了核電場的技術，使得韓國在二十世紀末擁有出口核電廠的能力。

福島核災是一個高度連結地震與海嘯的災難，因此對於東亞的國家（如台灣）而言，這是一個嚴重的課題，畢竟大多數核電廠都興建於海濱，均可能面臨如福島後果的災難。但這樣的後果不一定會發生於將核電廠興建於內陸的歐美國家。因此福島核災

的後果對於東亞國家及歐美國家，可能有不同的影響。

侯榭流思：

傅教授的提問很有意義，此樂觀主義的來源的確值得深入研究，但我必須重申演講中主要想傳達的焦點。我關注的問題是：車諾比事故之後，研究社群到底發生了什麼事情？車諾比之後，新的世代勢必須與這個事實共存，他們不只防禦性的回應車諾比事故，並將其視為一個新的機會來行動，認為正由於事故的發生，我們更需要更多研究來確保核能安全。若沒有車諾比事故的發生，就不會有助於「新的、先進核能反應爐」的概念產生。第三代及第四代的反應爐，經常是連結到車諾比事件產生對新的安全反應爐的標準及需求。

普遍來說，對社會科學家而言，一個危機不僅是壞的事情，同時也是研究的契機。車諾比事故發生的同時，世界上亦有其他的重要事件。例如，關於永續發展（sustainable development）的爭論開端，剛好與車諾比事故同時發生，但兩者沒有實際上的關聯。約莫此時，更市場導向的政策逐漸形成，走向新自由主義，影響著未來世界經濟的討論。車諾比事故某個程度上也是此時東歐共產主義崩解的決定因素之一，在這個時期對這個地區有重要影響。對於福島核災，歐洲國家的反應普遍較亞洲國家更劇烈。例如，德國已決定廢除核能，這在亞洲國家尚未發生。

蔡岳勳：

核能科技對科學家而言像是一個「聖杯」，像是對某種如此

完美、如此美麗事物的永恆探求，事故對核能專家而言反而證明我們更接近那個目標。那種哲學式的感知方式目前仍然主宰了工程師的思維。從實際上的數據來看，所有國家資助（補貼）核能技術或相關工業，十倍多於可再生或其他的技術。我們依然花越來越多的錢，在追求那個美麗的聖杯。

二、問題與討論

活動最後的討論時間，李尚仁提及台灣的核能支持者經常將瑞典視為一個核能的天堂，希望能進一步了解瑞典的狀況。侯榭流思回應：瑞典大概是世界上最依賴核能的國家，大約 40% 至 50% 的電力供應來自核能。瑞典在 1980 年代有一個全國公投決定在 2010 年廢除使用核能。然而實際上目前僅有兩座反應爐被關閉，其他十座反應爐仍在服役中，甚至被昇級，生產較以往更多的核能電力。目前瑞典禁止建新的核能電廠，只能保持已經存在的核能，替換原有的反應爐。

而針對林宜平詢問瑞典核能科技的源頭，侯榭流思回應道，瑞典的核能科技，主要由瑞典政府所發展，來自西屋公司（WestingHouse）的銷售。原先設計版本，是能夠完成瑞典國內的核能燃料循環（fuel cycle）。例如，國內的再處理設施、核彈，但是這些想法最近被放棄了。由於經濟原因，這個願景並沒有被完全實現。有些推動核能的人非常驕傲瑞典大致決定了永久廢棄場址，鄰近居民看到經濟機會、工作機會，從遠方的首都吸引投資。但這些都不是目前正在發生的事情，而是未來的願景。

范玫芳希望進一步瞭解詢問瑞典公眾對核能的態度與反應，以及反核能運動在瑞典的發展。侯榭流思表示，過去他曾就德國

和瑞典對福島核災的反應進行比較。雖然兩國在文化上非常相似，但卻可能有完全不同的反應與解決方式。在德國，非常多的民眾上街要求政府廢除核能，促成德國決定完全廢止核能計畫。然而在瑞典僅有少數的民眾上街抗議核能，福島核災並沒有引起太多爭議，總體的氣氛可能比較中立。但核能的議題依然很敏感，總會引起諸多情緒與反應，連結到其他政治概念。此外，瑞典的核能倡議者實際上將福島核災視為一個機會，強調核能只能在像瑞典（沒有地震或海嘯）這樣的國家運作。

陳嘉新則提到，核能復興論述以及產業轉型的想法之間，是否有所關連。愈來愈多能源密集的工業，使我們需要越來越多的能源，是否也構成了核能復興論述理念的基礎？侯榭流思回應道，許多國家的能源消耗（如西歐），在 1980 年代之後沒有顯著成長很多，因為沒有真的工業成長，相反地有更有能源效率的技術。但另一方面的確存在老派的工業說法，因為需要許多能源，所以很希望建更多的核電廠。舉例來說，林木工業、金屬工業，這種能源密集的工業，他們很希望有新的核電廠。陳嘉新進一步強調：能源政策不能被單獨考量，而需要與經濟政策、工業政策……所有事情，視為「內在連結的系統」來處理。

李尚仁提到了第二個問題，之前曾讀到台電公司因應台灣不具有處理核廢料能力的現實，提出派出團隊到其他國家（如：法國）學習核廢處理技術的方式。侯榭流思回應：許多國家希望擺脫核廢料問題，靠出口的方式將核廢料運到其他國家進行處理。這在法國是可以被接受的，政治上允許法國持有他國使用過的核廢料，英國、俄國實際上也曾經是核燃料的接受國。國際原子能總署經常論及，如果要求每個國家都有自己的核廢料廢棄場址，這是十分荒謬的。如果能夠遠距離在全球運輸核燃料到主要的安

置場址，是比較合理的作法。然而，這樣的運輸本身是非常敏感，也極度困難的。德國目前已經完全禁止任何核廢料的運輸，使用過的核廢料目前僅能堆積於發電站當中。

對於德國為什麼會全部廢棄核能，歐洲的用電狀況、用電量，和亞洲的差異等等問題，侯榭流思表示，德國對於環境議題的爭議有很長的歷史，有一些區域的行政首長甚至是綠黨出身。德國長期投資諸如風力、太陽能之類的新能源，亦進口了很多天然氣，能源來源十分多元。相對於瑞典，德國原先對核能的依賴度便不高，因此也較容易退出核能。然而，投資新能源的議題在德國也有爭論，再生能源太貴了，仰賴政府提供了大量的補貼。但問題是補貼是否可以持續？這也是許多歐洲國家面臨的問題，因此德國未來的發展備受關注。

三、結論

本次工作坊的尾聲，蔡岳勳對 STS 的領域提出了一個問題，希望討論關於核電廠的爭論，究竟是不是一個真實的科學問題？它實際上關係到人民或者政府對法律的制定。蔡岳勳談到自身進行法律研究的經驗，當必須合併到其他學科專業來思考時，經常會遭遇專業知識的對抗，比如「你沒有核能博士之名，因此沒有資格去討論」這樣的說法。這樣的問題在爭議的過程中經常遭遇，亦值得認真去思索及辯論。