



應如何評估石化業的健康風險

吳焜裕

台灣大學職業醫學與工業衛生研究所副教授

台灣風險分析學會秘書長、看守台灣協會理事長

近來國內為了「台塑六輕過去十年的營運是否對其週遭的居民造成

健康的影響？」與「國光石化的興建營運對國人健康到底會造成什麼樣的影響？」有不同意見，不同單位委託學者專家或是顧問公司進行各種調查研究，研究結果出來後，各界有不同的解讀，讓一般民眾霧裡看花，感到好像專家之間對結果也有不同的看法。其實這樣的結果誤導民眾對健康風險評估的認知，為專業評估者最不喜歡看到的結果。究竟如何執行一科學性的「石化產業營運對其鄰近居民的健康風險評估」？怎麼樣的評估比較能反映出民眾可能面對的健康風險呢？本文嘗試從健康風險評估的本質與其作為決策重要參考工具的特性來闡述一具科學性與客觀性的健康風險評估流程。當然健康風險評估仍在持續發展中，這篇文章所談的內容可能在十年或是一段時間後，因新方法學的發展或是新科學技術的出現而必須做修正，以符合科學性與客觀性的需求。

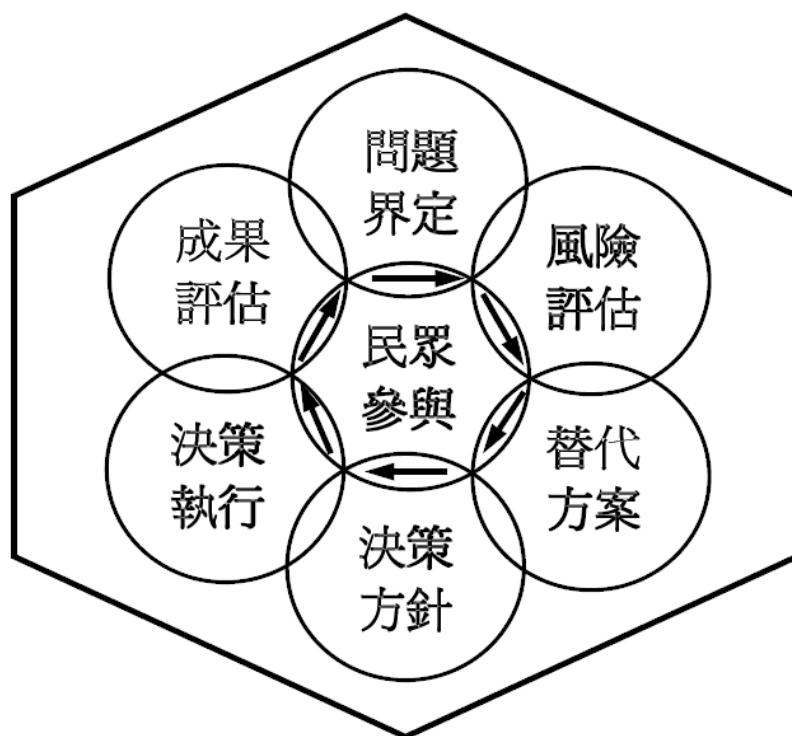
石化工業健康風險評估本身屬於環境健康風險評估範疇，其目的在於整合現有最佳

科學的證據與數據，評估受影響對象因暴露於有害環境污染物而可能對他們健康造成危害的機率。而我國的環境健康風險評估，雖然自1996年左右時即因拜耳案被要求進行健康風險評估而開始出現，而陸陸續續也因像焚化爐的興建所引發的抗爭，而逐漸被引入；然而一直到2005年，中部科學園區第三期的環境影響評估報告書（簡稱中科三期環評）的審查會被環境影響評估委員會委員提出，而在2006年通過環境影響評估時被列為附加條件（要求開發單位應於營運前執行健康風險評估），往後國內重要開發案，都在進行環境影響評估報告書階段主動加入健康風險評估的章節。後來也因健康風險評估未在環境影響評估通過之前執行，被高等法院當作為判決中科三期環評撤銷的重要明顯證據，因此健康風險評估在環境影響評估的重要性也就確立。因此也讓相關單位重視，而在四月九日環保署更公告健康風險評估技術規範，本文也將根據這個規範的科學性與作為決策參考的適當性檢視。

所謂環境健康風險評估，基本內容是

包含健康風險評估的四大支柱：有害物質鑑定（hazard identification）、劑量反應關係評估（Dose-response assessment）、暴露劑量評估（Exposure assessment）、與風險特性化（Risk characterization）。也就是說，執行健康風險評估基本要件在於是否排放有害物質，因此第一件事應該收集現有的科學數據與證據，再嚴格檢視這些資料是否支持某一物質會對人體健康造成什麼樣的危害。而暴露劑量評估是在評估一個有害物質，經由與人接觸而進入人體的量。國人對劑量反應關係評估非常陌生，其中最重要的工作就是進行高低劑量的外插，也就是將動物實驗或流行病學研究對象中，觀察到的高劑量效應風險外插到一般人可能暴露的低劑量。風險特性化，在國內有人翻譯為風險特徵描述，兩者意思雷同。其主要目的是整合前三有害物質鑑定、暴露劑量評估、與劑量反應關係評估，估算出研究對象在某一（某些）暴露情境下的風險，同時呈現出評估結果所含有的不確定性，包含定性與定量的不確定性。

然而配合風險分析（包含風險評估、風險管理、與風險溝通）架構的演進，如果要將目前為國際接受並推薦的風險分析架構（請見圖一）用於石化產業，那就不應只考慮健康風險評估而已。如問題界定（Problem formulation），在評估之前就應進行，其實應該就是對廠址附近民眾辦說明會，針對擬興建工廠運轉情形，與可能排放的有害物質與可能對民眾產生的健康危害作說明，民眾如果有其他疑慮，也應加進未來執行的健康風險評估中。也就是說風險評估者會針對各種有害物質的存在狀態界定評估的範疇，也同時需要針對民眾關切的事向納入評估中，因此在進行評估之前應該舉辦民眾說明會，更歡迎民眾推薦他們信任的專家學者來參加說明會，並虛心接受建議將民眾關切項目納入評估範疇，一併進行高科學性的健康風險評估。



圖一、國際普遍接受的風險評估、管理、與溝通的架構；為一以環繞民眾參與為中心的評估管理架構。

因此健康風險評估的定義就是整合現有最好的科學證據與技術，針對擬興建工廠運轉後影響範圍的民眾所可能暴露的有害物質，進行定量或半定量的評估預測其可能承受健康危害的機率。雖然可以分為點估算與機率分析兩種方法，目前美國政府單位與國際衛生組織都接受機率分析的評估方式。而健康風險評估執行的程序仍遵循有害物質鑑定、劑量反應關係評估、暴露劑量評估、與風險特性化等四個程序來執行。詳細執行方法如下：

有害物質鑑定：根據1983年美國國家科學院出版的健康風險評估紅皮書中的定義，為鑑定一污染物是否可能導致某一種危害，包含鑑定此污染物本身的毒性，同時鑑定此物存在的狀態與媒介物等。根據此定義，首先應該針對石化廠製程中使用的原物料、中間產物、產品與副產物、廢棄物等可能因排放到環境中而使民眾暴露的物質，逐一鑑定其可能對人體的危害，同時需要鑑定此污染物如何排放到環境中，其存在的狀態與民眾可能暴露途徑。當然鑑定污染物對人體健康潛在的危害，需要盡其所能尋找各種文獻資料，如果有毒理資料庫有資料，當然比較省事，但仍然需要再尋找是否有最新資料，如流行病學與毒理機制相關研究報告。另外現存的化學物質種類多，很多缺乏完整毒理資料，甚至能找到的毒理資料非常有限。因此國際上逐漸接受使用以化學物質本身的結構與已知有害物質間的毒性或是化學性作比較等方法，以作為缺乏毒理資料物質的毒性鑑定。否則毒性物質資料不完全的物質便不納入評估，基本上就是假設這些物質對人體健康沒有危害，如此便會低估風險。在

國內對有害物質鑑定不完全了解，將Hazard identification翻譯成危害鑑定，在環保署的技術規範中，寫到最後變成確認物質危害性，基本上這樣的邏輯不通。因為一個物質常常有多種危害，視其暴露劑量而定。而國際衛生組織或美國環保署等機構都根據有害物質的流病與毒理資料加以分類，國際上的評估者都是直接引用，不知國內評估者要如何確認？反而是一些未被國際相關機構歸類的化學物質，需要進一步加以鑑定。以乙烯與丙烯為例，雖然這兩種物質本身不會致癌，也缺乏毒性資料，但是過去研究已證實他們在體內確實可被代謝為環氧乙烷與環氧丙烷，環氧乙烷被國際衛生組織歸類為人的致癌物，環氧丙烷為動物致癌物質，因此乙烯與丙烯基本上應被列為潛在對人體健康危害物質，納入評估。

另外需要鑑定這些物質的存在狀態與媒介，在石化業中，有害物質可能經由幾個途徑排放：經煙道排放的物質常常是來自公用廠在發電、生產蒸氣、製造冷凍水的過程和廢氣燃燒爐等設備。燃燒的產物有一些半揮發性有機物與微量有害重金屬，當然如燃燒不完全也會有大量的揮發性有機物排放。化學物質也會經製程設備元件洩露或逸散，而經由廢水排放的物質可能會比較複雜，會含有多種揮發性與半揮發性有機物；如果製程中使用無機的催化劑，可能也會含有無機的物質。然而石化產業本身想要盡量避免的製程意外，甚至是製程的工安事件，事實上很難完全避免，這種事件可能發生原物料大量外洩，嚴重者可能發生火災或爆炸，後者究竟會燒出那些有害物質不是非常清楚，不過多環芳香烴（Polyaromatic hydrocarbons；

PAHs) 與戴奧辛應該都很難避免。這些物質中有些會經由各種介質傳播與累積，經由食物鏈到人體，這都需要利用科學證據逐一鑑定。鑑定過程中，除經煙道排放與廢水排放的物質很難由製程資料得到，逸散源、異常狀況或工安事件都與製程相關，因此可由製程所使用的原物料與中間產物或副產物的資料逐一配合製程條件了解可能逸散的點。

劑量反應關係評估，不論是使用流行病學的數據或是動物實驗數據，對某一有害物質而言，這些數據往往都是比評估對象可能暴露的劑量高很多，因此為需要得到在不同劑量下可能造成人體健康危害的機率。在這個階段主要的工作是將這些數據外插到低劑量來，最後估算得到致癌係數或參考劑量。在國際上，如美國環保署、加州環保局、或是國際衛生組織已有的資料，應該可以引用不需要再進行估算。但是要很清楚寫出資料庫是根據那一組數據？什麼樣的危害？有什麼優缺點？甚至為什麼選用這組數據？最好都要逐一說明。如果資料庫裡找不到，需要自己估算，當然需要根據美國環保署與國際衛生組織推薦的方法，也要了解這些估算方法的優缺點與使用這方法潛在的不確定性。尤其要非常清楚這些公告資料都是外在劑量（或所謂的潛在劑量；potential dose）為分母的資料，甚至在不同暴露途徑的換算後還是使用外在劑量單位，只有加州環保局在發展多介質模式中在不同介質估算採用內在劑量的觀念。劑量單位的使用很重要，因為關係到下一階段執行暴露劑量評估時，所得到的劑量單位表示。否則徒增不確定性，對評估沒有幫助。因此在這劑量反應關係評估階段，最重要的工作就是針對有害物質鑑定階

段鑑定出來潛在對人體健康造成危害的物質，估算致癌係數或者是參考劑量，供作風險特性化使用。

當然因過去國人對劑量反應關係不熟悉，這個工作比較困難，加上國內執行健康風險者受毒理基礎的限制，因此很難說明劑量反應關係究竟要如何執行。目前國際上也只有美國環保署有系統性的在執行劑量反應關係，執行結果整理在美國環保署的網站。但是遇到未列在這個網站的資料，過去就不執行評估，這樣的作法可能需要檢討。其原因在於美國政府進行評估的順序是根據其國內的需求，我國的需求不見得會與美國完全一致，另外每一國家進行評估的假設並不完全相同，再來族群的易感性也不完全相同，因此必須要說明劑量反應關係要如何執行，這在環保署的技術規範沒有寫清楚，看完規範一定不會執行劑量反應關係。

暴露劑量評估在於有害物質鑑定工作中，鑑定出評估對象經由那些媒介會暴露某些有害物質。因此需要估算這些物質從石化工廠的排放量，一般而言煙道與廢水的排放量比較容易掌握，可經由實測得到相關數據。然而逸散源的排放量比較難掌握，可能會隨著製程條件的變更而改變，甚至隨著元件設備使用時間而改變。過去國內嘗試利用圍封實驗進行測試，這種方法得到的是潛在低估的排放係數。因為這種方法測試時的條件不完全與實際操作時的條件相符，尤其實地操作時還有震動、溫度、甚至元件老化等的影響因子都會使得實際排放係數高於檢測的係數。也有所謂現場檢測，則需要考慮樣本代表性，另外也有使用美國環保署公告

的排放係數的數據（AP-42），基本上都可以接受，最重要的是要討論使用這些數據的合理性與不確定性，與對評估結果的影響。當然使用排放係數，就需要有活動強度，兩者相乘才是排放量。估算活動強度也有不同方法，在環評的階段常用的方法是質量均衡（mass balance），進行質量均衡計算時需要有製程操作條件，可能需要由熟悉製程的化學工程師來執行，並探討其不確定性。當然最好的方法是平時如何藉由實際量測估算排放係數，尤其隨著時間運轉愈久排放係數有可能會提高，如packing物質的老化，螺絲慢慢鬆動等因素，都可能隨著運轉時間而導致排放係數增加。

估算製程意外大量排放最為困難，首先應該進行製程安全評估，估算出各種工安意外事件發生的頻率。並估算各種工安事件發生情境下，各種有害物質可能的排放量。在得到正常運轉與各種工安事件發生的種有害物質的排放量後，再根據空氣擴散模式模擬這些有害物質的隨著時間與空間變化的濃度分布，並配合各種暴露情境，利用多介質模式模擬各種介質中各種有害物質的含量。目前環保署空保處雖對ISC3模式有公告使用規範，但是未說明模擬後的數據要如何配合健康風險評估使用？如何利用模擬結果估算致癌物質暴露劑量？與估算非致癌物質的暴露劑量？同時也未模擬因氣象條件變異而導致濃度分佈的變異情況，另外對敏感族群所在區域的模擬也未說明。多介質模式比較麻煩，因在各國發展的模式是否能適用於台灣還有待驗證。

在計算劑量時，應該注意的是估算外在

劑量或是所謂潛在劑量（potential dose），而非內在劑量，這點很簡單，但在台灣常有人犯錯。原因很簡單，化學物質數十萬種，有估算吸收效率的化學物質非常少，另外最理想用以健康風險評估的劑量單位應該是標的器官的劑量，因需要有使用以生理機制為基礎的藥物動力學模擬，才能估算標的器官劑量，因此一般都使用外在劑量。但是所謂外在劑量是估算與人體接觸時可能進入人體的劑量，因此在術語上稱為潛在劑量。而在暴露時間與平均時間的假設，一般平均時間使用七十年，暴露時間使用工廠營運的期間，這些參數又稱為暴露參數。在機率評估方法，每一個參數都可以用一個統計分佈來表現之，但是唯一缺憾就是濃度的分佈要如何定義？這是目前進行空氣擴散模擬者需要改善的地方。因為目前都是根據過去五年的平均氣候條件，模擬結果應該是過去五年的平均濃度，這樣的數據無法用於機率評估上。

風險特性化仍是整合劑量反應關係評估與暴露劑量評估以估算研究對象可能的致癌機率與危害指數（Hazard index），同時需要說明評估過程所使用的假設、如何選取數據、與選用模式的基本理論與假設，與其可能對評估結果的影響和可能的不確定性。在國內往往將機率評估方法稱為不確定性分析，這樣的說法不正確，因為機率評估中，主要是考慮暴露評估的參數或是所謂暴露因子的不確定與變異性。這個方法未考慮到有害物質鑑定與劑量反應關係評估中的不確定性，也未曾考慮暴露情境與模式的不確定性。考慮情境的不確定性首先應將各種情境都考慮計算風險，最後經由估算結果或是利

用敏感度分析判斷某些情境暴露風險是可忽略，這些情境方可不計，如此將可降低情境不確定性。當然在事先忽略某些情境不納評估中，則應提出科學證據，證明某些情境暴露劑量相對其他途徑暴露可忽略。模式不確定性則相當困難描述，最基本的方法，應該是先探討模式的基本假設與某些實際觀察的現象相吻合，有那些假設與實際有出入，進而可能對模擬結果產生的影響或是不確定性有多少。進而可以比較不同模式間因不同假設，造成模擬結果的差異性與不確定。

還有在非致癌評估，最後的危害指數是否相加？雖然根據加州環保局的資料庫對有害物質的不同效應分類，有些人建議只有相同的效應才相加。這樣的作法尚未有定論。想想看，一群人暴露於多種非致癌物質，這些疾病的發生究竟是一交集或是聯集呢？實際狀況則是最敏感的症狀首先被診斷出來，但不代表其他的症狀不會發生。既然不同的標的器官，在機率上應該是聯集的意義，就代表所有危害指數應該相加。另外一個論點是這些有害物質的效應與標的器官的判斷，如果是根據動物實驗數據，動物的標的器官不代表與人的標的器官要一致，如三聚氰胺在老鼠的標的器官是膀胱，但是對人是腎臟，雖然一樣的結石效應，但是對人與老鼠的標的器官不一樣。因此根據動物實驗數據判斷標的器官，並不能適用於人，因此危害指數還是要相加才不會低估風險。

在風險特性化中，因進行機率評估而同時可以執行敏感性分析，其結果可以提供那些因子對所評估的風險影響程度。風險評估者可以根據敏感性分析結果，向風險管理者

建議未來改善風險評估時降低不確定性的方向。風險評估為一持續改善的過程，基本上在一次的評估中，發現許多資料不齊全，科學研究與知識的進步仍然趕不上人類的需求。因此在一段時間，在新的科學證據與新的資料出現後，需要再執行新的評估。但不是在第一次評估中，故意不求科學的完善，容易忽略現有的科學證據，或故意選用一些老舊的方法，甚至故意低估風險。完全違背健康風險評估的基本定義，這樣的評估將失去民眾的信賴，根據這種評估結果所做的決策，將為全民所唾棄。

總結，石化業對民眾健康影響的環境健康風險評估為一整合現有最佳科學證據、知識、與科技，針對石化工廠進行預測營運後潛在對其附近民眾健康影響的機率。所謂科學證據有時候指的並不完全是很高深的致病機制，而是實際民眾的生活環境資料；如實際氣候條件、有害物質排放量、各種有害物質清單、與經廢水排放的有害物質有那些等等。這些資料相關單位應建立資料庫，不需要等到環評審查的時候，才因應NGOs的要求才要收集。甚至環評書中給的資料毫無根據，徒增困擾，而導致民眾對環境決策失去信心。因此當台灣在學術上已與國際相去不遠，環境決策所要根據的評估規範卻還是根據二十年前的作法而不思改善，導致環境決策遠遠落後學術研究，如此的決策當然無法為多數民眾所接受。

