

環境管理

生命週期評估方法探討—以石化原料 業為例

林素貞*、胡秋蘭**

摘要

本研究之目的在於簡介生命週期評估架構與比較不同評估方法的差異及其限制，並應用石化原料產品—乙烯所造成之環境衝擊作為個案研究，進行環境衝擊評估分析，並以 EcoPro 分析軟體做為生命週期分析工具，求得乙烯生產所造成之環境衝擊。

由個案分析結果顯示，無論用那一種評估方法，能源因素仍是主宰環境衝擊潛勢大小的主要因素，此外，製程亦扮演相當重要的角色，因此加強製程中的節能措施與提升能源效率將有助抑減乙烯製造過程對環境的衝擊影響，且製程的更新與改善及加強能源管理亦將有利於環境衝擊的減少。在各類環境議題方面，則是以在非生物性資源耗損、對生態毒性及全球暖化方面所造成之影響較為嚴重。

【關鍵字】

1. 生命週期評估(life cycle assessment, LCA)
2. 乙烯(ethylene)

*國立成功大學環境工程研究所教授

**中國技術服務社工業污染防治中心工程師

一、前　　言

生命週期評估(Life Cycle Assessment , LCA)是 ISO-14000 環境管理系統中用來針對產品評估的方法之一，發展自 1960 年代末期及 1970 年代初期，最初應用於能源利用及資源分析，近年來則廣泛應用於工業減廢及環境管理策略評估⁽¹⁾。ISO-14040 標準對生命週期評估的定義為：評估一產品之生命過程中，從原料取得、製造、使用和棄置等階段之環境衝擊。美國環境毒理與化學協會(SETAC)認為生命週期評估是一個衡量產品生產或人類活動所產生之環境負荷的工具。因此作生命週期評估時不僅要知道產品整個生產過程的能量、原料需求及污染物的排放，更需要進一步將這些能量、原料及排放量所造成的影響予以評估，以謀求改善的方法。

國內自 83 年起即致力於生命週期評估觀念及技術之引介，並有案例探討，如顧洋等人(1995)⁽²⁾以生命週期評估方法探討保麗龍從製造、使用到廢棄處置間對環境之影響。工業技術研究院(1995) 以工業廢紙作生命週期評估個案，探討工業廢紙對環境的負荷，及如何利用回收廢紙減少紙類廢棄物之產生⁽³⁾。吳先琪⁽⁴⁾等人進行「機動車輛生命週期研究」，該個案盤查在廢車拆解、分選活動中之資源耗損、生態健康—化學性迫害源/非化學性迫害源等各因子的衝擊。又李康文教授⁽⁵⁾等人著手研究「環境化設計之研究：生命週期分析應用與推動策略」，而李育明、丁執宇⁽⁶⁾等人以永豐餘公司之瓦楞紙生產為例，探討不同強度之瓦楞紙品的環境衝擊負荷，並模擬分析產品與原料成本間之最佳組合。本研究之目的在於簡介生命週期評估架構與比較不同評估方法的差異及其限制，並應用石化原料產品—乙烯所造成之環境衝擊作為個案研究，進行環境衝擊評估分析，並以 EcoPro 分析軟體做為生命週期分析工具，求得乙烯生產所造成之環境衝擊。

二、生命週期評估架構及軟體應用

2.1 生命週期評估架構

生命週期評估的方法步驟如圖 1⁽⁷⁾所示，其中實線框部分為必須進行的項目；虛線框部分，則可以視需要選擇進行。以下簡介生命週期評估架構之四大部分：1.

目的和範圍界定(Goal and scope definition)；2. 生命週期盤查清單分析 (Life cycle inventory)；3. 生命週期衝擊分析(Life cycle impact assessment)及 4. 釋義(Interpretation)。

1. 目的和範圍界定(Goal and scope definition)

目的與範圍界定是從事 LCA 的首要工作，除了要有清楚的界定範疇外，還要注意所界定的範疇應與所預期的應用目的一致。以下為範圍界定中需要考量的主要重點：

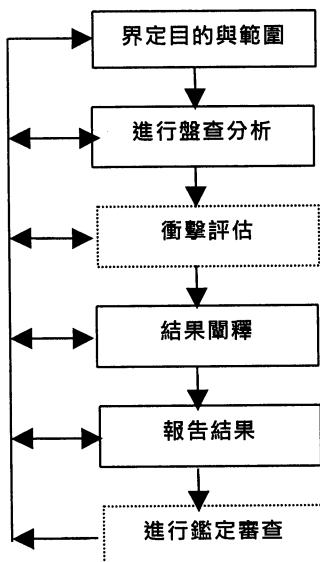


圖 1 生命週期評估之步驟(資料來源：楊致行，1997)

- (1) 單一系統之功能或多系統比較時，各子系統之功能
- (2) 功能單位
- (3) 研究之系統及系統之界線

- (4)系統各部分之分配程序
- (5)所選擇之衝擊種類、衝擊評估方法及闡釋之方式
- (6)原始資料的品質要求
- (7)假設及限制
- (8)鑑定審查的格式
- (9)研究要求之報告形式與格式

2.生命週期盤查清單分析(Life cycle inventory)

盤查分析包括資料輸入與輸出量化的過程，以用來量化一個產品系統，或活動的相關投入與產出。這些資料檔包括共通性資料、公用資料及製程資料等，將資料輸入電腦，透過模式分析即可運算出運輸、製造、使用及棄置等各階段的環境負荷。然而並非所有生命週期評估都能完整的包括以上的各階段，呂穎彬(1996)⁽⁸⁾曾提出盤查分析的六個階段，包括原物料開採、製造與裝配、產銷與運輸、使用/再利用/維護、回收及廢棄物管理。盤查的範圍可定義為此六個階段的任何階段或其組合，主要視使用者之目的與應用範圍而定。

3.生命週期衝擊分析(Life cycle impact assessment)

生命週期衝擊評估是指以生命週期盤查分析之結果，評估潛在衝擊之程度與範圍的階段。此一階段包含將盤查資料與特定環境衝擊加以連結，然後將衝擊項目特徵化，再進一步量化其環境負荷或污染排放對環境的潛在衝擊值。SETAC 將衝擊評估之步驟分為三個部分，包括清單分類(classification)、特徵化(characterization)和評價(valuation)，簡述如下⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾：

(1)清單分類(classification)

在此階段首先建立清單項目與潛在衝擊之關連性，並以衝擊評估網路的方式來說明。在整體的衝擊類別中，SETAC 將其分為四大類，分別是生態健康、人類健康、資源耗竭及社會福利活動。除此之外，Guinee et. al (1993)⁽¹¹⁾等人則將環境問題分為三種型態，其一為耗竭問題，包含非生物性資源及生物性資源之耗竭；其二為污染問題，包含臭氧層破壞、全球暖化、光化學氧化形成物、酸雨、人類毒性、生態毒性、優養化、放射性問題、熱散、噪音、臭味及職業

安全等問題；以及擾動性問題，包含沙漠化、物理性生態系統退化、景觀退化及直接人類災害等。

(2)特徵化(characterization)

所謂特徵化是指將衝擊項目內之盤查資料模式化，特徵化的結果會隨衝擊評估所達到之層次而有所不同，SETAC 將化學性衝擊評估分為五個層次，如表 1 所示⁽⁹⁾。進行衝擊評估時，隨著選擇層次的提高，數據資料的需求亦隨之增加。

(3)評價(Valuation)

衝擊評估之評價係根據特徵化階段導衍出之相關衝擊指標，再賦予其衝擊或衝擊類別的相對權重，以得到綜合性的衝擊指標。常用來作為衝擊評價的方法有多準則效用法(multi-attribute utility theory, MAUT)，此法應用效用理論處理多屬性的決策問題，以得到整合性之環境衝擊指標。另一為分析層級層序法(analysis hierarchy process, AHP)，此法以系統方法架構研究對象的內在結構與關連因素，並將其分成若干層級，比較同級因素間的相對權重，並進而預測環境衝擊之大小，以上兩種方法皆可以德爾非(delphi)技巧，邀請相關領域學者專家參與，以達集思廣益與謀求結果之共識⁽⁹⁾⁽¹²⁾。

4. 釋義(Interpretation)

釋義是將盤查分析與衝擊評估的分析結果合併加以詮釋，使盤查分析的結果與定義的目標與範疇達到一致的階段，此外釋義階段亦包括了審查或修改 LCA 之範疇。

表 1 生命週期評估模式層次

層級	名稱	說明	衝擊模式種類
一	負荷評估 (Loading assessment)	根據清單數據之數量或體積評估，並依「越少越好」之假設進行	檢核表法 相對大小法
二	等價評估 (Equivalency assessment)	依某一化學物質危害程度為轉換基準來加總的方式，評估清單項目中之環境衝擊	臨界體積法 環境標準關係法 衝擊潛勢法 環境優先策略法 人類健康危害性排序法
三	毒性、持久性及生物性累積 (Toxicity,Persistence, and Bioaccumulation Assessment)	以化學物質與生物之間及化學物質與生態系統間之交互作用來評估清單項目	毒性、持久性及生物累積性解析法
四	一般曝露/效應評估 (Generic Exposure/Effect Assessment)	以一般環境或人類之健康資訊為基準來評估清單項目中之潛在衝擊	Mackay unit world 模式 典型環境模擬模式
五	特定廠址暴露/效應評估 (Site-Specific Exposure/Effect Assessment)	以特定廠址的環境或人類的健康資訊為基準來估計清單項目內之潛在衝擊	生態健康風險評估法 人類健康風險評估法

資料來源：(1) SETAC, 1993。
 (2) 魏漣邦，1996。
 (3) 本研究整理。

2.2 評估模式與軟體應用

目前用來進行 LCA 的軟體不下數十種，每種軟體的特性及功能亦不同，尤其在衝擊評估方面，特徵化及評價的方法與表現方式差異頗多。常視研究個案的目的與使用者需求而擇其所需。本研究用於 LCA 個案之生命週期分析軟體為瑞士 EMPA 公司(Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research)所發展之 Ecopro1.5 版分析軟體。EcoPro 是一種針對 LCA 所發展的分析軟體，可以在 Window 視窗下操作，是一套可完整進行生命週期評估(包括盤查及衝擊評估)的分析軟體。其內容除包括一套環境資料庫外，並有三種衝擊評估模式可以選擇，而模式中尚有不同的方法可供比較。

EcoPro 在系統建構方面，將其分為五大部分進行系統的架構：一般系統、原料系統、廢棄物系統、熱能源系統及電力系統，使用者可以針對不同形式的研究

範圍進行系統的建構，可以一般系統為單獨建構，亦可以主系統中包含若干次系統建構出層層關連的架構。在進行每個系統的架構時，必需先輸入此系統中每一操作單元的投入-產出(input-output)物質，再加入該單元中所耗用的其他物質，包括能源、化學品、使用電力模式及其他相關物質等，而此一單元的污染排放資料，包括氣體排放、水體排放及固體廢棄物等資料。由於每個單元的輸入與輸出資料層層相關，亦即前一單元之主要輸出產品，為下一單元的輸入物質，如此就可以架構起一個系統；而主系統與子系統也可以此種方式連結。

經過各單元盤查資料的輸入後，可得到一整體全面的盤查結果。此時再選擇不同的衝擊評估模式，作衝擊評估分析。EcoPro 的衝擊評估模式分為三種，分別是臨界體積模式(Critical volume models)、效應導向模式(Effect-oriented models)及生態乏值模式(Ecological scarcity models)等三種，簡介如下：

1. 臨界體積模式(critical volume model)

所謂臨界體積，即是指將清單項目中的每一因子稀釋到符合相對的恕限值(如法規標準)時，所需耗用的介質體積(如水、空氣及土壤等)，然後再將各種因子中相同的介質耗用體積加總，得到每單位產出之臨界值。

EcoPro 之臨界體積模式結果是依空氣(m^3)、水(l)、能源耗用(mj)、土地掩埋空間(dm^3)及土壤(m^3)等五大類的體積來加總。其中，空氣和水體兩大類並可針對不同地區而輸入其恕限值；其他三類則以系統之直接耗用量計算，並無經過標準轉換。

2. 效應導向模式

效應導向模式是一套以問題導向為中心的評估模式，EcoPro 中有三種方法可以表示效應導向模式的結果。第一種是 CML，由荷蘭 Leiden 大學之環境科學中心(Center for Environment Science)所發展出的方法；第二種則是生態指標-因子法(Ecoindicator 95 Charact. Method)，第三種是生態指標-評價法(Eco-indicator 95 valued Method)。使用者可針對所評估物質可能造成的環境衝擊來選擇不同的方法，以下分別就此三種方法進行介紹：

(1)CML

CML 將清單項目中的各因子，依其可能的環境衝擊分為全球暖化、優養化、酸沈降、臭氧層破壞、光化學氧化形成物、對生態毒性、人類毒性及非生物性資源耗損等八大類。由於導致以上八大類環境衝擊議題的壓力因子可能有很多種，因此 CML 以選擇其中一項作為參考因子，其他因子以相對量表示的方式來統合各壓力因子。例如，造成全球暖化衝擊之壓力因子有 CO_2 、 CH_4 及 N_2O 等，CML 選擇 CO_2 作為參考因子，而 CH_4 對全球暖化的潛在衝擊是為等量 CO_2 的 11 倍， N_2O 為等量 CO_2 的 270 倍，則定 CO_2 之 GWP 等於 1， CH_4 之 GWP 等於 11， N_2O 之 GWP 等於 270。

(2)生態指標因子法

生態指標-因子法(Eco-indicator 95 Charact. method) 將清單項目中的各因子，依其可能的環境衝擊分為全球暖化、優養化、酸沈降、臭氧層破壞、重金屬污染、致癌性、冬季煙霧及夏季煙霧等八大類。此法選擇其中一項作為參考因子，其他因子亦以相對量來統合各環境負荷因子。

(3)生態指標評價法

生態指標-評價法(Eco-indicator 95 valuated Method) 將清單項目中的各因子，依其可能的環境衝擊分為全球暖化、優養化、酸沈降、臭氧層破壞、重金屬污染、致癌性、冬季煙霧及夏季煙霧等八大類。此法有別於以上兩法，以選擇其中一項作為參考因子，而其他因子以相對量表示，是以每單位環境負荷因子造成各類環境衝擊的效應值直接表示。

3.生態乏值模式

生態乏值模式是一種可以將所有衝擊值加總的一種模式，依此模式所得結果，可得到能量、空氣和水等生態乏值，由於單位一致，此三類乏值可加總起來，因此受到廣泛的應用。Ecopro 中也有兩種方法可用來求生態乏值，第一種方法可得到空氣及水等兩大類乏值；第二種方法則可得到廢棄物管理、最終能源介質(end-energy carrier)、空氣及水等四大類乏值。

三、個案研究(中油第五輕油裂解工場乙烯生產之應用)

3.1 背景介紹

第五輕油裂解工場係中油公司興建的第五座輕油裂解工場，採取美國凱洛格工程公司之專利製程，細部設計由中鼎工程公司負責，於民國 82 年建造完成。年產乙烯 40 萬公噸，丙烯 22 萬 8 千公噸，丁二烯 6 萬 7 千 5 百公噸等石化基本原料，供應中下游廠家製造石化產品，以下針對五輕生產製程作介紹。

第五輕油裂解工場製程方塊流程圖如圖 2 所示⁽¹³⁾。五輕工場在設計上以石油腦、製氣油及循環乙烷為進料。進料後，石油腦和製氣油首先通過微秒裂解爐，在爐管出口 850 °C 高溫下，油料裂解成最輕的氫氣、甲烷、乙炔、乙烯、丙烯、丙烷、四碳烴、裂解汽油、輕燃料油及重燃料油等，其中進料與產品分布之情形如表 2 所示。

以上之裂解氣體在初餾塔中冷卻，重燃料油自塔底中取出，輕燃料油自塔中段側提而出，塔頂蒸汽進入驟冷塔，裂解汽油冷凝於塔底，頂部之輕質氣體送至裂解氣體壓縮機，將甲烷及氫氣分離。壓縮機中第四級出口之裂解氣體需經鹼洗及胺洗以去除硫化氫及二氧化碳，避免反應器之觸媒中毒及冷箱堵塞。在第五級出口裂解氣體進入甲烷塔進料系統進行低溫分離，將甲烷和氫氣分離出來，並送至燃料氣系統，提供微秒裂解爐所需的燃料氣。去甲烷塔底部之液體送往去乙烷塔，分離出乙炔、乙烯及乙烷，並於乙炔回收裝置中將乙炔分離出，於乙烯精餾塔中分離乙烯及乙烷，聚合級乙烯由塔頂取出，塔底乙烷循環回乙烷裂解爐裂解以增產乙烯。去乙烷塔底部液體送往去丙烷塔，分離三碳烴及更重成分，再將三碳烴送至丙烯精餾塔，分離聚合級丙烯、化學級丙烯及丙烷。去丙烷塔底部氣體送至去丁烷塔，分離出混合四碳烴及裂解汽油成分。

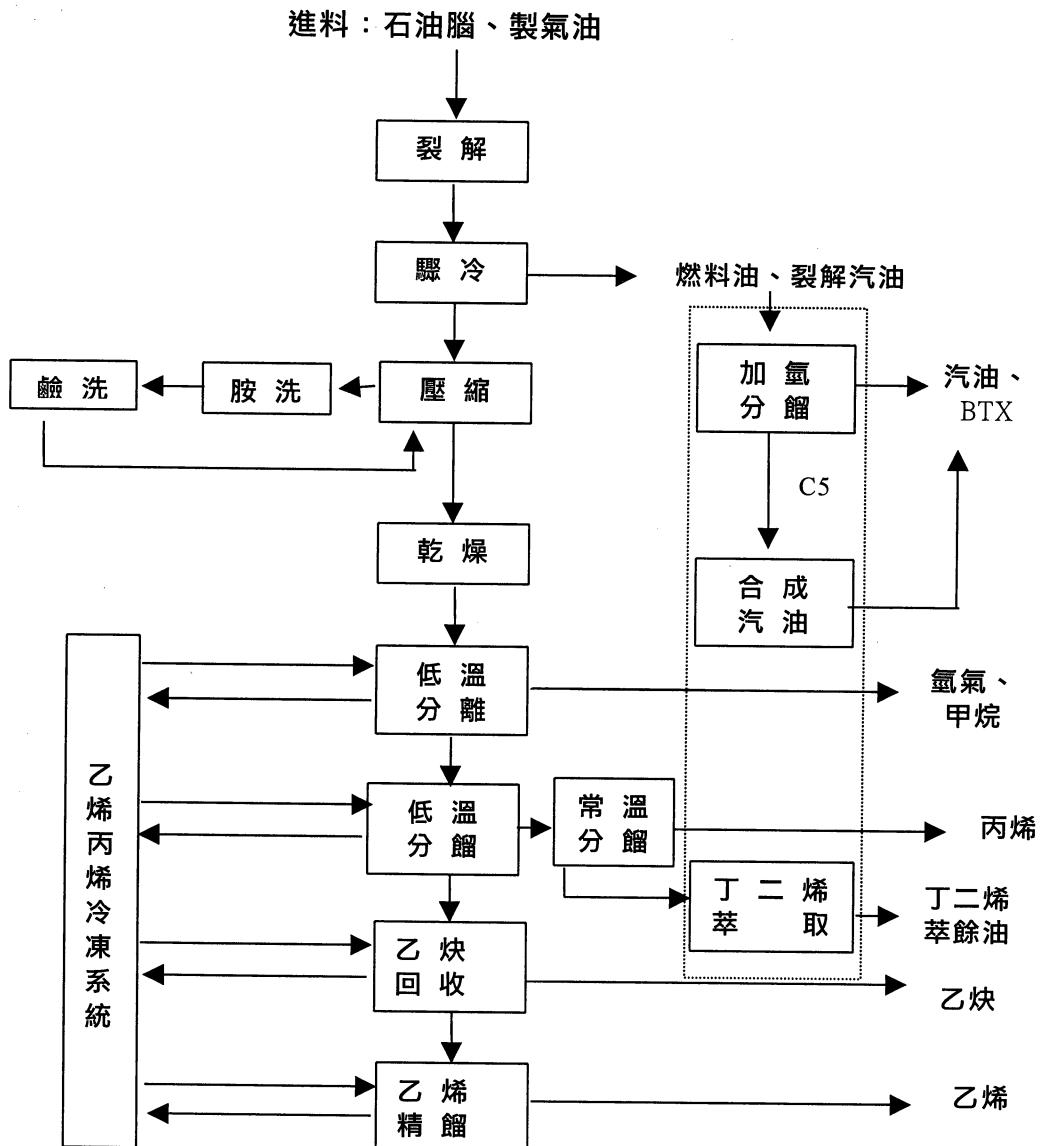


圖 2 第五輕油裂解工場流程圖(資料來源：楊敬熙，1997)

表 2 五輕工場進料與產品分布

成分 (WT%)	石油腦	製氣油
氯氣	0.30	0.17
甲烷	13.90	10.35
乙炔	0.08	0.06
乙烯	28.20	24.90
丙烯	15.10	14.20
丙烷	1.18	0.52
丁二烯	4.00	3.63
丁二烯萃餘油	7.20	6.20
五碳烴以上	30.04	39.79

資料來源：中油公司。

去丁烷塔頂部的混合四碳烴送往丁二烯萃取裝置，第一段萃取分餾出四碳烴中之丁烯及丁烷萃餘油，在第二段中將萃餘油中之粗丁二烯、乙烯乙炔、乙基乙炔分離出來，粗丁二烯送往精餾塔精餾，於塔頂取得純度 99.3% 以上之丁二烯。去丁烷塔底部之裂解汽油和自驟冷塔底部來的裂解汽油合併後送至裂解汽油加氫裝置，經第一段加氫反應器氫化後，進入分餾塔分離出五碳烴、芳香烴、C₉--C₁₀重汽油。五碳烴送至汽油合成裝置，產製無鉛汽油；芳香烴則引入第二級加氫反應器，進行加氫脫硫後，進入芳香烴汽提塔，於塔底可取得芳香烴。

3.2 系統範圍功能

本研究之系統範圍示如圖 3。整個系統由以下四個子系統組成：(1) 原料取得子系統；(2)運輸子系統；(3)蒸汽製造子系統；(4) 生產製程子系統。在各個系統中之原料的先期負荷部份，本研究採取使用分析軟體中內建之先期負荷資料。由於部份資料欠缺，本研究系統設定以下之限制條件：

- 1.輕油裂解之原料主要為本土所有，運輸距離從永安加氣站至中油高雄煉油總廠距離約 1 公里；運輸方式為管線運輸。由於五輕工場輕油裂解之各類原料皆來自永安加氣站及高廠內，運輸距離約為 1 公里，因此估計方式以 1 公里計之。
- 2.高雄煉油總廠備有汽電共生設備供應全廠之蒸汽使用，五輕工場所使用之蒸汽

主要來自 B18 及 B20 兩條管線，汽電共生設備使用燃料為天然氣、燃料油及電力，燃料來源為廠內其他工場所產生及永安加氣站。而五輕工場所使用之電力則全部來自台電公司，針對電力系統部份，本研究並未深入盤查台電之發電資料，因此在研究中，設定發電模組型式為燃煤火力發電機組。

- 3.五輕工廠之廢水經集中至第二污水處理場後與廠內其他廢水合併，經二級及部份三級處理後排放。整廠中各工場產生之廢水實際量無法得知，因此本研究在建構廢水處理部份的資料，是依據五輕工場實際操作人員經驗推估廢水排放量，並以處理後之 COD(化學需氧量)、SS(懸浮微粒)、油脂、Phenol 等指標來代表廢水水質。此外，本研究並未將廢棄及廢水處理時之耗能及各種化學藥劑之使用納入本研究之範圍。
- 4.五輕工廠之廢棄物主要為油泥及廢觸媒，產生量極少，故以焚化後再掩埋處理。

3.3 功能單位

本研究是以生產 1 公噸之石化上游原料產品--乙烯為基本功能單位，所有進入系統之原物料或系統排出污染物及廢棄物質，均是以此一功能單位之負荷量來加總及計算。

3.4 系統盤查

本個案之系統盤查項目可分為原料取得、運輸、蒸汽產生及生產製造四個子系統。各子系統盤查項目如下所列。

- 1.原料取得子系統
 - (1)使用原料種類及來源。
 - (2)製造 1000 公斤乙烯所使用之各原料用量。
- 2.運輸子系統
 - (1)運輸方式。
 - (2)使用之交通工具種類。
 - (3)平均運輸距離
- 3.蒸汽產生子系統
 - (1)蒸汽種類及產生方式。
 - (2)蒸汽產生量。

(3)使用之燃料、化學藥品種類及用量。

(4)用水量：為超純水，提供產生蒸汽所需。

(5)廢氣排放量：以產生每噸蒸汽所排之二氧化碳、硫氧化物、氮氧化物、THC(總碳氫化合物)及 TSP(總懸浮微粒)之排放量表示廢氣成分。

4. 生產製造子系統

(1)用水量。

(2)用電量。

(3)蒸汽使用量。

(4)化學品使用量。

(5)廢水處理：生產 1 噸乙烯所排放之廢水，以 COD、SS、油脂及 Phenol 代表廢水水質。

(6)固態廢棄物處理：五輕工廠之固態廢棄物主要為廢觸媒、油泥等，排放量極少。

(7)廢氣排放量：生產 1 噸乙烯所排放之廢氣，以二氧化碳、硫氧化物、氮氧化物、THC(總碳氫化合物)及 TSP(總懸浮微粒)之排放量代表廢氣成分。

3.4 衝擊評估結果

本研究採用 Ecopro 作為環境衝擊之評估模式，評估模式中以單位產品生產量作為評估對象，在研究系統中，是以 1 噸乙烯作為評估對象，評估 1 噸乙烯於生產過程中可能產生的環境衝擊。在 Ecopro 的評估系統中，主要分成總體評估、製程系統評估、熱能系統評估、電力系統評估、廢棄物衝擊及運輸系統評估等六大部分，探討生產單位乙烯的製造過程中（包含原料運輸、製造、產品包裝等過程）可能造成之環境衝擊。以下便針對乙烯製程中可能產生的環境衝擊加以說明比較。其中，廢棄物衝擊部分，由於乙烯於製造過程中產生之廢棄物量極少，在本研究中並未納入考量。

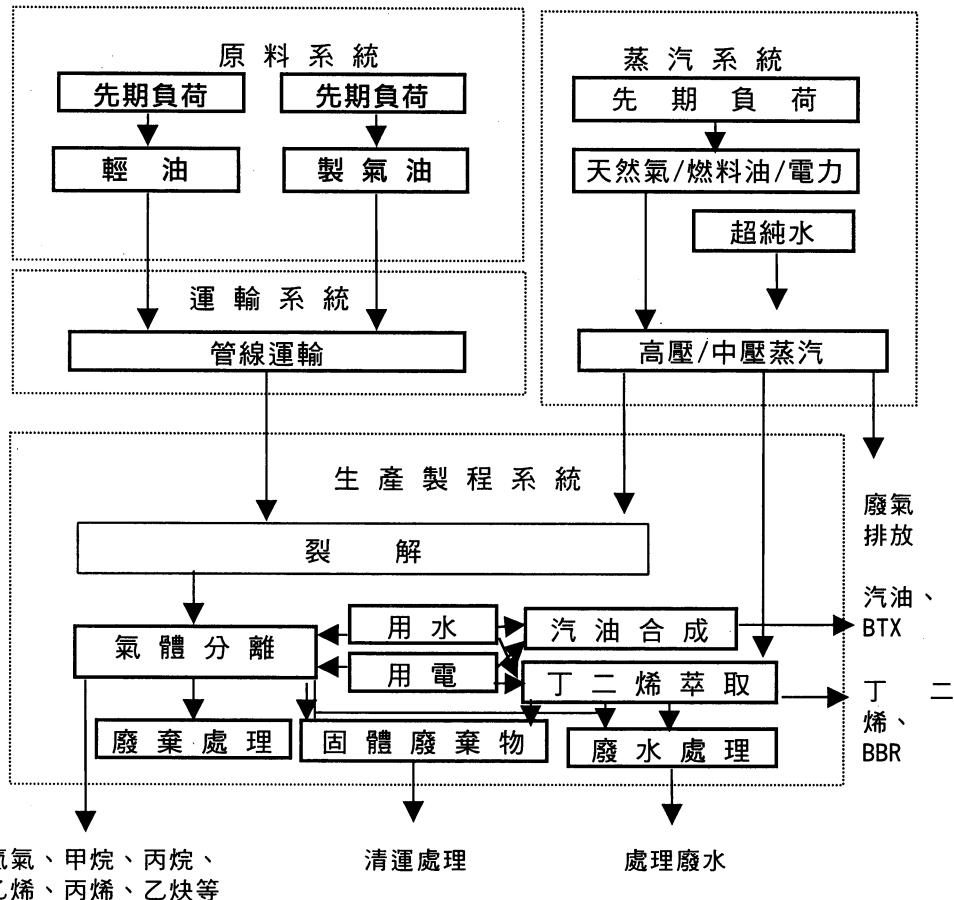


圖 3 本研究之系統範圍

1. 臨界體積模式結果

臨界體積模式之結果列於表 3，由此表中可看出，生產乙稀時所造成的環境衝擊主要來自於生產製造及熱、能源部份。對空氣、水及能源三種介質而言，熱、能源的使用所造成之衝擊都是最大的。其中，在空氣介質中熱、能源是主要的衝擊來源，其次分別為運輸、電力與製造過程，而其所產生的衝擊量則遠小於熱與能源使用過程中所可能產生的衝擊量，而熱與能源使用所產生的衝擊

量直接與使用的能源類型相關，由於本研究所採用的能源型態為火力發電，因此對於環境的衝擊可能有偏高的趨勢。在水介質的衝擊影響方面，熱、能源所產生的衝擊仍為最大，其次是電力、運輸與製程，且電力、運輸與製程對水介質的衝擊有明顯的數量級區隔。由以上的觀察亦不難發現，能量型態的選擇將直接影響其環境衝擊大小。在能源需求的衝擊評估方面，製程耗能與熱、能源為最主要的能源需求，而電力與運輸對環境的衝擊，相對上並不明顯，因此在減低衝擊的策略上，應由製程耗能與熱、能源著手。由以上的結果可以看出，未來乙烯的生產需要加強節能系統與相關措施的規劃，以降低其環境衝擊。

值得注意的是，在土地掩埋衝擊部分，各項指標的衝擊影響程度皆為零，其原因在於製造與運輸過程中所使用的原料、能源型態皆以液態或氣態為主，鮮少為固態物質，且產生的大部分固態廢棄物均具有回收再利用的特性，而對於無法再利用的固體廢棄物，在經焚化處理後的掩埋體積相當有限，因此在衝擊評估分析的過程中，廢棄物對於土地掩埋的衝擊影響並不顯著。

表 3 臨界體積模式結果

項目	空氣(m ³)	水(L)	能源(MJ)	土地掩埋(dm ³)
總值	6.00E+09	6.38E+07	8.90E+05	0.00E+00
製程	1.26E+07	1.93E+03	7.56E+05	0.00E+00
熱能源	5.76E+09	6.34E+07	1.32E+05	0.00E+00
電力	2.29E+07	1.06E+05	7.54E+02	0.00E+00
運輸	3.14E+07	1.48E+04	7.80E+02	0.00E+00

2.效應導向模式結果

Ecopro 提供 CML、生態指標因子法(Ecoindicator 95 Charact. Method)及生態指標總值法(Ecoindicator 95 Val. Method)等三種的效應導向分析模式，其中由 CML 方法所求得之效應導向模式結果，可看出乙烯生產對於生態毒性與非生物性資源所造成的環境衝擊效應潛值最大，其次是全球暖化效益，其餘影響並不明顯；此三個重大環境衝擊效應潛值，非生物性資源耗損來自於製造過程，其餘均來自熱與能源需求，顯示能源需求形態為環境衝擊潛勢的主要來源。這種由能源需求主宰污染衝擊潛勢的情況，在生態指標因子方法中更是明顯。由表 4 與表 5 可看出全球暖化效應成為最主要的環境衝擊因素，酸沈降成為僅次於全球暖化效應的環境衝擊因素，而其他評比項目則影響不大。同樣的趨勢亦發生在生態指標總值方法結果中，由表 6 結果顯示能源因素仍是決定污染衝擊潛勢的主要因素，而在各項衝擊潛勢的評比上，以溫室效應、酸沈降及致癌性的環境效應潛值較高，然各項環境衝擊指標間的的差異不大，顯示利用此方法進行環境效應評估時，較無法區分主要的環境衝擊項目的潛勢。

3.生態乏值模式結果

對於空氣、水與最終能源介質之衝擊影響。Ecopro 中提供了兩種評估模式 - Mole Meth, Schaltegger-Sturm 模式與 UBP 93 模式。其中表 7 為以 Mole Meth, Schaltegger –Sturm 方法求得之結果，由表 7 可以了解熱與能源為造成環境衝擊潛勢的主要因素，而 UBP 93 法的評估結果由表 8 可發現製程對於 end-energy carriers UBP 具有決定性的影響；除此之外，熱、能源對於 air UBP、water UBP 仍是最主要的主導因素。值得注意的是，在兩種方法的結果中皆顯示，在水體污染排放方面，熱能源系統相對於其他部分都有偏高的趨勢，由於在蒸汽製造單元中所排放之水體污染物極微小，因此推測其原因，可能是在其所使用之燃料的先期負荷上，水體污染量較大所致。

表 4 效應導向模式—CML 法結果

項目	全球暖化 GWP ₁₀₀	優養化 NP	酸沈降 AP	臭氧層破壞 ODP	光化學氧化形成物 POCP	對生態毒性 ECA	對人類毒性 HC	非生物性資源耗損 E-15 AD
總值	5.91E+04	1.46E+01	1.51E+02	6.78E-02	6.30E+01	8.59E+05	1.90E+02	1.90E+05
製程	3.17E+02	3.87E-02	2.89E-01	0.00E+00	1.08E-01	7.17E+00	3.29E-01	1.90E+05
熱能源	5.84E+04	1.42E+01	1.45E+02	6.76E-02	6.19E+01	8.55E+05	1.83E+02	0.00E+00
電力	5.67E+01	1.88E-02	6.28E-01	5.81E-05	5.11E-02	1.03E+03	8.70E-01	0.00E+00
運輸	5.87E+01	6.78E-02	7.51E-01	1.26E-05	7.74E-02	1.88E+02	9.12E-01	4.32E+01

表 5 效應導向模式--生態指標因子法(Ecoindicator 95 Charact. Method) 結果

項目	全球暖化 CO ₂ -eq	臭氧層破壞 CFC11eq	酸沈降 SO ₂ -eq	優養化 Phos-eq	重金屬污染 Pb-eq	致癌性 PAH-eq	冬季煙霧 SO ₂ -eq	夏季煙霧 PCOP-eq
總值	5.91E+04	6.78E-02	1.51E+02	1.46E+01	6.32E-02	1.22E-02	9.56E+01	6.30E+01
製程	3.17E+02	0.00E+00	2.89E-01	3.87E-02	0.00E+00	0.00E+00	8.19E-02	1.08E-01
熱能源	5.84E+04	6.76E-02	1.45E+02	1.42E+01	6.24E-02	1.20E-02	9.14E+01	6.19E+01
電力	5.67E+01	5.81E-05	6.28E-01	1.88E-02	2.96E-04	1.12E-04	5.70E-01	5.11E-02
運輸	5.87E+01	1.26E-05	7.51E-01	6.78E-02	2.12E-04	3.55E-05	4.43E-01	7.74E-02

表 6 效應導向模式—生態指標總值法(Ecoindicator 95 Val. Method)結果

項目	全球暖化 GWP EP	臭氧層破壞 ODP EP	酸沈降 AP EP	優養化 NP EP	重金屬污染 Heavy Met. EP	致癌性 Carcinogenics EP	冬季煙霧 Wintersmog EP	夏季煙霧 Sommersmog EP
總值	1.13E+01	7.33E+00	1.34E+01	1.91E+00	5.81E+00	1.12E+01	5.06E+00	8.79E+00
製程	6.05E-02	0.00E+00	2.57E-02	5.06E-03	0.00E+00	0.00E+00	4.33E-03	1.51E-02
熱能源	1.12E+01	7.31E+00	1.29E+01	1.86E+00	5.74E+00	1.11E+01	4.83E+00	8.64E+00
電力	1.08E-02	6.28E-03	5.57E-02	2.46E-03	2.73E-02	1.03E-01	3.01E-02	7.14E-03
運輸	1.12E-02	1.36E-03	6.67E-02	8.87E-03	1.95E-02	3.27E-02	2.34E-02	1.08E-02

表 7 生態泛值模式-- Mole Meth.,Schaltegger-Sturm 法結果

項目	空氣排放	水體排放	總值
總值	3.99E+06	8.98E+06	1.30E+07
製程	7.62E+03	1.33E+00	7.63E+03
熱能源	3.85E+06	8.95E+06	1.28E+07
電力	1.46E+04	7.04E+03	2.16E+04
運輸	1.85E+04	1.53E+03	2.01E+04

表 8 生態乏值模式-- UBP 93 法結果

項目	end-energy carriers UBP	air UBP	water UBP	Total UBP
總值	7.56E+05	1.00E+07	4.06E+05	1.12E+07
製程	7.56E+05	2.94E+04	3.60E+01	7.85E+05
熱能源	0.00E+00	9.76E+06	4.04E+05	1.02E+07
電力	0.00E+00	2.15E+04	3.97E+02	2.19E+04
運輸	1.48E+02	3.54E+04	9.32E+01	3.56E+04

四、結論與建議

本研究主要探討生命週期評估架構與比較評估方法之差異其及限制，並應用石化原料產品—乙烯生產所造成之環境衝擊作個案研究，由評估結果可以發現，無論是用那一種評估模式，能源因素仍是主宰環境衝擊潛勢大小的主要因素；此外，製程亦扮演著相當重要的角色，因此加強製程中的節能措施與提升能源效率將有助抑減乙烯製造過程對環境的衝擊影響，而製程的更新與改善亦有利於環境衝擊的減少。本研究結果可提供決策者與業界參考的地方有二：一為綜合性之環境衝擊指標，藉由這些量化指標，決策者可以得到該產品之環境衝擊輪廓，並可以進一步辨識環境衝擊項目之輕重，應用於環境管理與污染防治的執行計畫與相關法規；其二為衝擊評估的結果與因果探討可助益廠商更加瞭解產品生產行為對環境的衝擊，並進而規劃設計生產步驟中最有效益之改善方案及預防措施。

對生命週期評估個案的應用而言，除了分析軟體的選擇外，關鍵還是在於資料是否完整，若因資料的缺乏或差誤，則評估結果會造成誤導。因此，建立本土性的完整且正確的資料庫，可說是進行 LCA 之當務之急，而資料庫建立之後，需要有良好的流通管道，才能有利於相關研究之進行與增加應用參考的價值。本研究使用的 EcoPro 分析軟體可以在主系統下操作，亦可再建構子系統與之結合，頗能符合多元化應用之需求，且含有數種衝擊評估模式，可針對不同環境議題進行評估，量化分析之結果簡單明瞭，軟體之使用亦極為方便，然而，資料庫內容與

項目尚有待擴充。目前國外之 LCA 分析軟體相當多，功能都不盡相同，未來宜加強進行多種軟體之比較與個案研究分析，以利推廣 LCA 之進行。

目前 LCA 雖尚未完全成為國際標準，但 LCA 的應用已逐漸廣泛。事實上，LCA 在方法技術上還有許多爭議，特別是在衝擊評價方面，主觀因素的判斷易導致不一致的結果，而這也是衝擊評估部分尚未成為國際標準的重要原因之一。目前國內 LCA 之研究尚在起步階段，然而「氣候變化綱要公約」已成為國際矚目的環境議題，雖然我國並未加入此組織，然面對國際壓力，政府已開始規劃進行各部門溫室氣體之減量策略與管制措施。此時，若能針對主要耗能產業進行產品之 LCA 評估，找出其能源與環境衝擊之相關性，進而確認其能源效率提升之關鍵處，加強推動節能及 CO₂ 減量措施，則可有助於溫室氣體之減量，並可提升產業在國際的競爭力。

參考文獻

1. 賴明伸（1996），「生命週期評估之內容架構」，ISO-14000 之第二波—生命週期評估研討會，經濟部。
2. 顧洋、許淑麗、李崑池、申永順（1995），「國內保麗龍使用及廢棄處置之相關管制對策之討論」，行政院環保署。
3. 賴明伸、于寧、陳宏仁、何錦堂、盧明俊、周幼寧、高惠玲、楊致行、王先登（1995）「生命週期評析個案研究—工業用紙中最適國內廢紙比例之研究」，1995 國際工業減廢技術與策略研討會論文集，台北。
4. 吳先琪、丁健原、王美雪(1996)，「機動車輛生命週期研究(含資源回收利用)」，一般廢棄物回收發展基金會。
5. 李康文（1997），「環境劃設計之研究：生命週期分析運用與推動策略」，國科會成果報告。
6. 丁執宇（1997），「ISO-14040 生命週期評估架構之探討與應用」，碩士論文，國立中興大學資源管理研究所，台北。

- 7.楊致行（1997），「生命週期標準及推廣介紹」，生命週期評估研討會，經濟部。
- 8.呂穎彬（1996），「生命週期評估簡介」，環境工程會刊，第7卷，第1期。
- 9.Society of Environment Toxicology and Chemistry and SETAC Foundation for Environmental Education (1993),A Conceptual for Life Cycle Impact Assessment.
- 10.魏漣邦（1996），「環境劃設計之研究—產品生命週期之環境衝擊分析（一）」，國科會成果報告。
- 11.Guinee, J.B., R.Heijungs, H.A.Udo de Haes, and G.Huppes(1993), “Quantitative life cycle assessment of products2. Classification, valuation and improvement analysis”, *Journal of Cleaner Production*, 1(2),pp.81-91.
- 12.Eberhard Bohm and Rainer Walz (1996), “Life-cycle-analysis:: a methodology to analyse ecological consequences within a Technology Assessment Study ?”. *IJTM, Special Publication on Technology Assessment*.
- 13.楊敬熙（1997），「中油五輕工場介紹及角色」，化工技術，第五卷，第七期。