

## 從工業生態觀點談環境保護發展趨勢

張添晉\*、陳建宏\*\*

### 摘要

由於全球資源日漸匱乏加上環境保護意識高漲，工業的發展遂衍生出應用多種方法來模擬自然生態系統，將資源利用最大化，並對環境衝擊最小化，來達成產業永續發展及社會、經濟與環境保護三重盈餘之願景，即工業生態化。而工業區為區域經濟發展動脈，但也是最大的固定污染源，因此近年以工業生態為理念所建構的生態工業園區，受各界重視而競相仿效，截至 2004 年 3 月底止，全球至少有 104 個工業區進行生態化，台灣為順應潮流，應用工業生態觀點積極發展環保科技園區，目前已選定 4 個環保科技園區場址，分別為高雄岡山、花蓮鳳林、台南及桃園觀音等四區，其發展計畫考量三種不同層次的工業生態化，第一層次以作業規範來選定特定產業，因此產業內部生態化易於進行；第二層次以發展循環回收體系為原則；第三層次則以生態城鄉為藍圖進行發展。

以往產業的環保思維僅侷限於以不危害生態為原則，然而因工業生態觀念使其思維與作法得以擴展，並朝五大目標發展，包括建立循環體系、提高能源使用效率、保護自然環境、帶動區域發展與改善營運及社會互動等，根據已發展之案例分析，顯示目前多數產業僅以部份項目為目標，待生態化發展成熟後，再逐年階段性擴展生態化模式。

**【關鍵字】**工業生態、生態系統、生態工業園區、環保科技園區

\*台北科技大學環境規劃與管理研究所所長暨循環型環境研究中心主任

\*\*台北科技大學環境規劃與管理研究所碩士

## 一、前　　言

現階段全球資源日漸匱乏，產業為達永續發展，紛以更少資源來產生更多產品與服務，積極進行污染預防及資源再利用工作，以降低環境處理成本、提高生態效益（eco-efficiency），並增加資源價值及使用效率。然而資源再利用雖然為增加資源價值的主要方法，雖具有相當程度優勢，但亦有其限制，因此近年發展出工業生態學（industrial ecology），應用多種方法來模擬類比自然生態系統（eco-system），將資源利用的優勢最大化，來克服資源再生的限制及困難，朝向生產、生活與生態等三生一體之目標永續發展。

### 1.1 資源再利用優勢與影響因子

#### 1.1.1 資源再生優勢

全球資源日趨匱乏致使原物料礦價格暴漲，原物料開採時，通常涉及複雜開採程序，如礦物偵測、礦產含量評估、地質分析及成本估算等，需耗費大量人力、物力、能量及財力，並得進行大量土壤及岩石開挖。通常為獲取一噸銅礦，移除 350 噸覆蓋層及 100 噸礦石；而開採一百萬磅礦石僅可煉製成十萬磅鋼鐵，十萬磅鋼鐵僅可生產一萬磅引擎<sup>[1]</sup>，如圖 1 所示，因此礦石與產品的重量比約為 100 比 1，顯示地球原物礦資源的可貴及延長產品生命週期及進行資源回收之重要性，而再生材料能降低原物礦開採量，提供產業另一個降低物料成本的選擇。

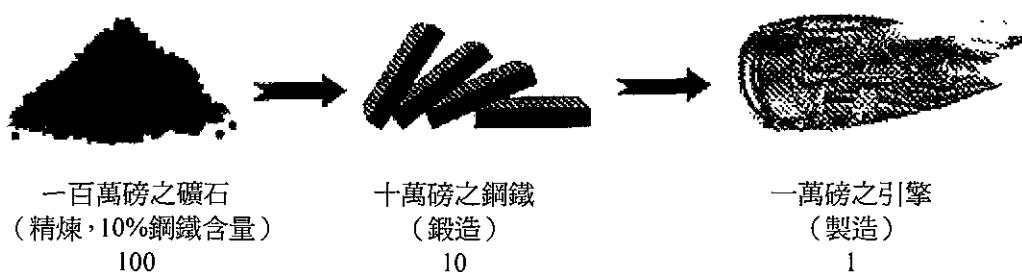


圖 1 磿物製成產品比例<sup>(1)</sup>

產業於計算產品成本時，常忽略礦石開採成本，僅考量製程成本，但現實而言，礦物開採階段所需成本最大（包含設備、時間、環境及運送成本等總合），因此若進行循環再利用，跳過礦物開採階段，將節省大量成本與自然資源。因此，一般島國若能轉型成循環型生產體系，維持人口、經濟、社會之成熟穩定，藉由目前具有的物料資源，如鋼鐵、玻璃、銅礦、紙等物質，即可進行大部分經濟活動，不需額外進口資源或進行資源開採，在環境與經濟上將可取得最佳平衡與狀態。

### 1.1.2 資源再利用影響因子

廢棄物與資源為一體兩面，若將兩者解離還原成原子態，則兩者具相同價值，故廢棄物即是一種錯置資源，資源再利用即是將廢棄物解離還原，使其適得其所，而非成為地球環境負擔，但廢棄物解離還原的資源回收過程絕非易事，通常須面臨下列幾項挑戰：

#### 1. 廢棄物或副產品收集系統

落實現行四合一資源回收體系、延長生產者責任、增加回收點、產業進行副產品收集與再利用等廢棄物收集策略，均為進行資源化再利用之前期階段及首要工作。

#### 2. 分選與分離

產品於分選拆卸時，應以自動化為優先考量，減少人工分選以降低人力成本，因此產品於設計階段即應考量拆卸容易度；而許多材料並未從回收利用角度設計，如電磁合金及鈦合金等複合材料，因分離技術尚不成熟而無法完全分離來進行回收利用，降低了資源之利用價值。

#### 3. 資源價值與性能降低

工業系統中資源回收常使物質質量及品質下降，如再生紙質感較原生紙差、廢車鋼鐵通常不可用於生產新車，而多用於次級建築料上、聚合塑膠回收時須先破碎並經過加熱模壓，降低了再生塑膠物理性能，使再生塑膠用途窄化，而塑膠經過多次循環再利用後，可能僅能作為轉化熱能的燃料，不具有製造產品之利用價值。

#### 4. 再生資源用途

資源回收主要困難處，為再生資源或副產品於產業製程體系的可利用性及利用價值，產業常為了使用再生資源，須先改變原有製程或產品設計，這些改變需花費額外費用，因而降低意願；或產業注重產品優越性能，不願使用再生資源作為原料，故提升再生資源品質與用途廣度，將有助資源化工作推廣。

#### 5. 再生市場通路

在供需平衡原則下，提高社會大眾購買再生品的意願將有助資源化工作進行。台灣近年發生許多不利於再生產品形象的社會事件，如黑心電視及黑心床墊，在消費者被蒙騙情況下，以低廉廢棄物料重新包裝成新產品販售，危害消費者權益及安全，對再生產品形象產生嚴重負面影響，因此，政府應積極對再生產業與社會大眾進行教育，並妥善管理與擴展再生市場。

#### 6. 避免產生更嚴重之環境問題

在進行廢棄物資源化的過程，若需耗費更大且不合理的資源，或衍生二次環境污染問題，則必須重新評估是否持續進行，舉例而言，廢棄物掩埋場雖然可進行甲烷氣回收發電，但因佔地面積廣大、衍生出臭味、環境衛生、滲出水等問題，並損失土地生產力及影響附近區域發展，因此掩埋處理的自然復育方法不符合環保與經濟效益，將逐漸被淘汰。

#### 7. 經濟因子

許多有害廢棄物雖然已有技術可將其資源化或無害化，但基於經濟效益考量，無法廣泛地推廣與普及，舉例而言，焚化爐飛灰雖可應用高溫熔融爐進行處理，但設備成本太高使得應用不普遍，因此，若產業進行資源化工作沒有利潤可圖，則無法永續經營，因為有利潤才能持續性發展下去。

#### 8. 技術創新

資源化技術通常可由下列三方面著手<sup>[2]</sup>。

(1)產品創新：產品創新可分兩種型態，一種為漸進式，係針對產品進行改良，行漸進式改變，例如，改良產品使產品成為省電性、省資源、容易拆解之產品；另一種為激進性，重新進行產品設計，將原有產品原有設計及組織架構重組，如發展零排放之電動汽機車。

- (2) 製程創新：並非針對產品，而是針對特定產品尋求較環保的製程，強調環境意識的製造 (environmental conscious manufacturing)，透過減量、重製、循環使用及再利用等工具，達成製程創新目的。
- (3) 回收創新：產業進行回收系統之建立及再生技術開發，包含重新設計產品及製程，為環境而設計及為拆解而設計為原則，使產品易於收集、分類、分解、回收及再製。

## 1.2 工業生態背景與環保發展趨勢

工業生態化主要目的在於降低原物擴之使用，提高資源價值及生態效益，並突破資源再生利用之限制，因此工業發展乃應用近代發展的許多觀念，將各觀念結合，以產業共生為原則來達成模擬自然生態系統之目的，因此環保發展趨勢與工業生態有著不可分離的關係存在。

### 1.2.1 發展緣起與定義

1989年美國通用汽車公司研究部副總裁 Robert Frosch，與 Nicolas Galloopoulos 在「科學美國人」雜誌上共同發表一篇名為「產業策略」的文章，首先提出工業生態觀念，文中將其定義為：「傳統工業活動之模式，多為獨立製程，透過原料消耗，生產出銷售之產品，相對亦產出須加以處理處置之廢料，這種模式應該轉換成為一種較為整合的模式，將此系統的能源與物料消耗最佳化、廢棄物產生及製程排放最小化，而此系統即是工業生態系統」<sup>[3]</sup>。

Nicholas Gertler 於 1995 年則對工業生態系統下另一個定義：「工業生態系統為同處一個區域的共同體或網絡，並於某種程度上進行副產品及能量的交換或資源再利用，產業間彼此相互影響，創造更高於傳統非連結網絡模式的利益」<sup>[4]</sup>。

### 1.2.2 近代發展之環保概念及趨勢

十八世紀工業革命前，人類活動與自然環境維持一定形式平衡，然而這種平衡自瓦特發明蒸汽機後，取代傳統人力相關機械設備大量產生，並促使經濟蓬勃發展，當時並無考量地球資源有限，使資源消耗率大於地球資源生產力及自淨能力，雖然近代環保發展已著重在環境整治與污染防治，但此種方法為管末處理，並無法恢復原有生態系統，而使地球資源逐漸面臨匱乏與生態系統失衡的窘境。為改善此失衡現象，近代發展出許多與永續發展相關的創新觀念，如表 1 所列。

表 1 近代與永續發展相關之觀念及其演繹

時間	中文名稱	英文名稱	創造人或組織
1973 年	產業共生雛型	Industrial Symbiosis, IS	丹麥 Kalundborg
1986 年	社區知權法案	Community Right-to-know	美國政府立法 – EPCRA
1987 年	永續發展	Sustainable Development, SD	世界環境與發展委員會
1988 年	延長生產者責任	Extended Producer Responsibility, EPR	Thomas Lindhqvist 等人
1989 年	自然的一步	Natural Step	瑞典羅北特醫生
1989 年	工業生態	Industrial Ecology, IE	Robert Frosch, Gallopolous
1989 年	去物質化	Dematerialization	J.H. Ausubel, H.E. Sladovich
1990 年	清潔生產	Cleaner Production, CP	聯合國環境署
1990 年	全品質環境管理	Total Quality Environmental Management, TQEM	全球環境管理倡議組織、聯合國環境部及國際商會
1991 年	綠色競爭力	Green Competitiveness	Michael E. Porter
1992 年	提出生態工業區概念	Eco-Industrial Park, EIP	綻藍開發公司
1992 年	BS7750 環境管理系統	British Standard 7750	英國政府
1992 年	永續生產與消費	Sustainable Production and Consumption, SP&C	世界企業永續發展委員會
1992 年	環境空間	Environmental Space	地球之友荷蘭分會
1992 年	生態足跡	Ecological Footprints	加拿大 Rees & Wackernagel
1992 年	生態材料	Eco-Materials	日本東京大學之山本良一
1992 年	生態效益	Eco-efficiency	世界企業永續發展委員會
1993 年	趨強永續性及趨弱永續性	Strong Sustainability & Weak Sustainability	Pearce and Turner
1993 年	環境管理稽核計畫	Eco-Management and Audit Scheme, EMAS	歐洲共同體
1994 年	綠牆效應	Green Wall Effect	Robert Shelton
1994 年	生態背包	Ecological Rucksack	德國伍佩塔爾氣候、環境和能源研究所
1994 年	十倍數	Factor 10	Fridrich Schmidt-bleek 組成之十倍數小組
1995 年	四倍數	Factor 4	Amory B. Lovins & L. Hunter Lovins 羅馬俱樂部
1996 年	綠色生產力	Green Productivity, GP	亞洲生產力組織
1996 年	生態圖規	Eco-Compass	陶氏化學歐洲公司
1996 年	商業生態系統	Business Ecosystem	James F. Moore
1996 年	公佈 ISO14000 – 環境管理系列標準	ISO14000	國際標準組織-ISO/TC207
1997 年	三重盈餘	Triple Bottom Line, TBL	英國管理顧問公司總裁 John Elkington
1997 年	社會責任標準	SA8000 Social Accountability 8000	Council on Economic Priorities Accreditation Agency, CEPAA
1998 年	生態有效性	Eco-effectiveness	美國維吉尼亞大學建築學院院長 Mc Donoug
1999 年	國際職業安全及衛生管理系統評鑑系列標準	Occupational Health and Safety Assessment Series 18000, OHSAS 18000	英國標準協會、全球七大驗證機構(BSI, DNV, BVQI, Lloyds, SGS, NSAI, NQA)

## 二、工業生態化應用原理及生態化方法

### 2.1 模擬自然生態系統

工業生態學之所以廣被各界接受並成為全球發展趨勢，主要原因為工業發展模擬自然生態系統，使產業進行開發時利潤最大化對環境衝擊最小化，以達到經濟與環境的雙贏狀態。

#### 2.1.1 何謂生態系統

生態系統係由生物型態（有生命的）及非生物型態（無生命的）共同所組成，彼此間相互影響或互補互助。非生物型態乃指地球之物理環境，如水、空氣、土壤及生命所需之各種養分，當然養分係由各種化學物質或元素（碳、鎂、鈣、硫、磷、鐵、鉀、鈉等）所組成之化合物；生物型態則可分成三大類別，為生產者、消費者及分解者，生產者為應用陽光來進行製造所需之養分或食物，主要為綠色植物或細菌；消費者則須仰賴其他生物作為食物，以生產者（植物）為食物之生物稱為一級消費者，若以一級消費者作為食物者則稱為二級消費者，以此類推；分解者則分解具有生命之屍骸，以得到本身所需之養分，並能對於所處環境有所益處，如提供養分給土壤，並可將複雜之生命複合體還原成簡單元素或化合物。

1998 年 Ray Cote 曾述及生態系統具備有多樣性、慣性及彈性之特色，多樣性提供自然生態具備回收再利用之能力，即藉由生態系統中各種不同角色，產生複雜之封閉循環鏈，把物質流與能源流成為一封閉迴圈體系，如同持續進行物質與能源之回收再利用一般；慣性提供抵抗變化之能力，而彈性則提供吸收環境變化能力，這些特色均依靠生態系統中之回饋循環系統而正常運行，此說明生態系統中各個角色均具有互動性（回饋）與關聯性（循環系統），亦論證生態學中的物物相關及物有所歸原則，且不論生物或非生物型態，均具有輸入或輸出之鏈結存在，並藉由回饋循環系統來維持平衡，生態系統整體特色如圖 2 所示<sup>[5]</sup>。

若將生態系統中三個特色套入產業發展趨勢中，發現產業發展亦符合物物相關、物有所歸及多樣性、慣性及彈性之特色，多樣性代表產業具有各種不同產業類別，彼此間進行產業合作，成為一類似食物鏈之網絡系統；慣性代表工業園區

本身具有之營運特色或產業類型特色，不容易隨便受到外界干擾而有所大幅度變化，通常具有一定模式之操作或營運方法；彈性則代表工業園區本身之管理方法，應具有吸收壓力之能力，以應付因外界環境改變而隨之而來的壓力，因此產業發展亦應具有類似於生態系統之特性。

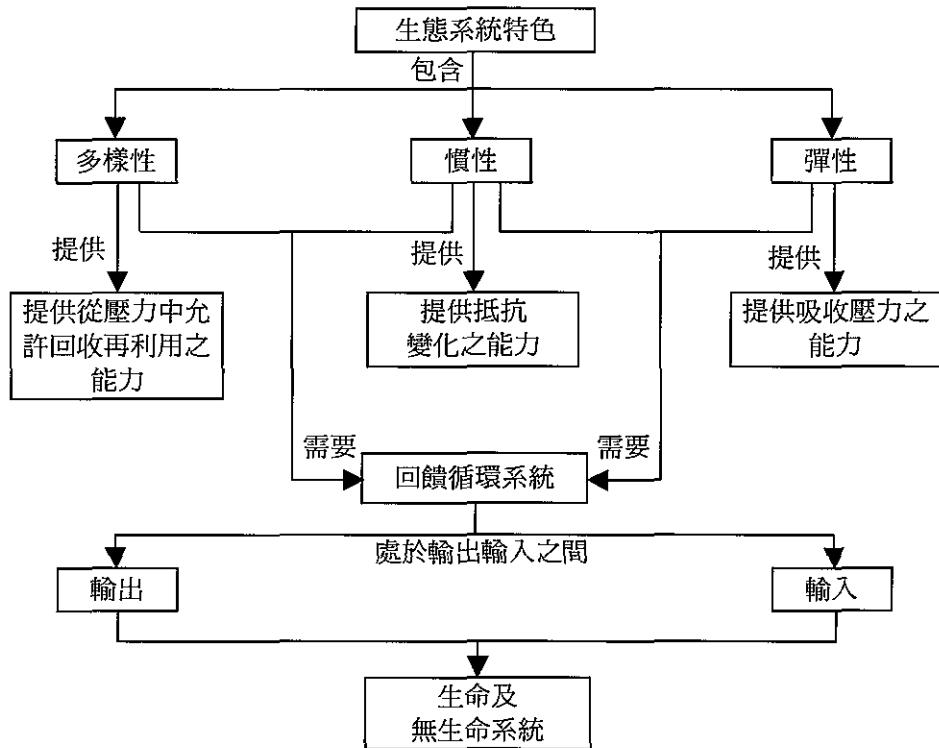


圖 2 生態系統特色<sup>[5]</sup>

### 2.1.2 工業生態系統特徵

工業生態係類似生態系統中物質與能量之循環系統，具生態系統中四個主要特徵性，分別為循環流向性（roundput）、多樣性（diversity）、地區性（locality）及漸進改變性（gradual change）<sup>[6]</sup>。

1. 循環流向性 (roundput)

由生產者、消費者及分解者所構成之食物鏈，可稱其為生態系統之循環流向性，其中包含物質循環與能源串聯。

2. 多樣性 (diversity)

生態系統中無論生命的或無生命的，均具有多樣性特色，包含有生物多樣性、物種、有機體之多樣性等，且彼此之間均相互影響。

3. 地區性 (locality)

生態系統中具有區域性之特性，生命或無生命之型態均受到當地自然環境之影響，而有其發展限制性。

4. 漸進式改變性 (gradual change)

生態系統如同生命一般，會逐漸改變，並受到四周自然環境影響，其改變速率與變化程度亦有所不同，如透過生殖繁育進行演化，可能因基因突變而產生新物種；環境大幅度改變，致使某物種瀕臨絕種，這些變化多以緩慢時間之速率持續進行，並可能具有週期性及季節性。

工業系統可模擬為一個自然生態系統，若將前述生態系統四個特徵性套入於工業系統中，則可發現其間之異同，整理如表 2 所示。其中，工業系統與生態系統均具有循環流向之特性，並強調形成一個封閉循環網絡；於多樣性方面，二者相同之處在於各個參與者均受到彼此相互影響，而不同處在於參與者角色不同，生態系統強調物種、有機體之多樣性，而工業系統則強調產業輸出及輸入之多樣性、參與者及共同合作之多樣性；於地區性方面，兩者均應用當地資源進行發展，並受到當地環境狀況限制，工業系統則更加強調其區域性之通力合作；於漸進改變方面，兩者均具有系統多樣性之逐漸發展特性，差異在於轉變方法與驅動原因有所不同。

整體而言，若以生態系統四大特徵性切入，工業系統與生態系統是可相互比擬的，對於生態系統而言，有陽光才有萬物，太陽能為主要輸入，而主要輸出產物則是熱能；以環境思維思考工業循環系統，發現工業系統屬生態系統之一環，其輸入應考量使用可回復更新之資源，並提高使用再生資源之比例，輸出則考量到再利用性及自然環境容忍力，生態系統與產業循環系統關係如圖 3 所示。

表 2 生態系統與工業系統之異同

		生態系統	工業系統
循環流向 (roundput)	異	—	—
	同	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 物質再利用</li> <li>● 能源串聯</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 物質再利用</li> <li>● 能源串聯</li> </ul>
多樣性 (diversity)	異	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 生物多樣性</li> <li>● 物種、有機體之多樣性</li> <li>● 資訊多樣性</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 產業輸出及輸入之多樣性</li> <li>● 參與者之多樣性</li> <li>● 共同合作之多樣性</li> </ul>
	同	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 互助互補及相互影響之多樣性</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 互助互補及相互影響之多樣性</li> </ul>
地區性 (locality)	異	—	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 透過當地參與者之間進行共同合作</li> </ul>
	同	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 應用當地資源</li> <li>● 尊重當地自然限制因子</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 應用當地資源</li> <li>● 尊重當地自然限制因子</li> </ul>
漸進式改變 (gradual change)	異	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 應用太陽能演化發展</li> <li>● 透過生殖繁育進行發展</li> <li>● 週期性及季節性</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 應用資源、廢棄物質、廢能及可再生資源進行發展</li> </ul>
	同	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 以緩慢時間之速率進行系統多樣性的發展</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 系統多樣性之逐漸發展</li> </ul>

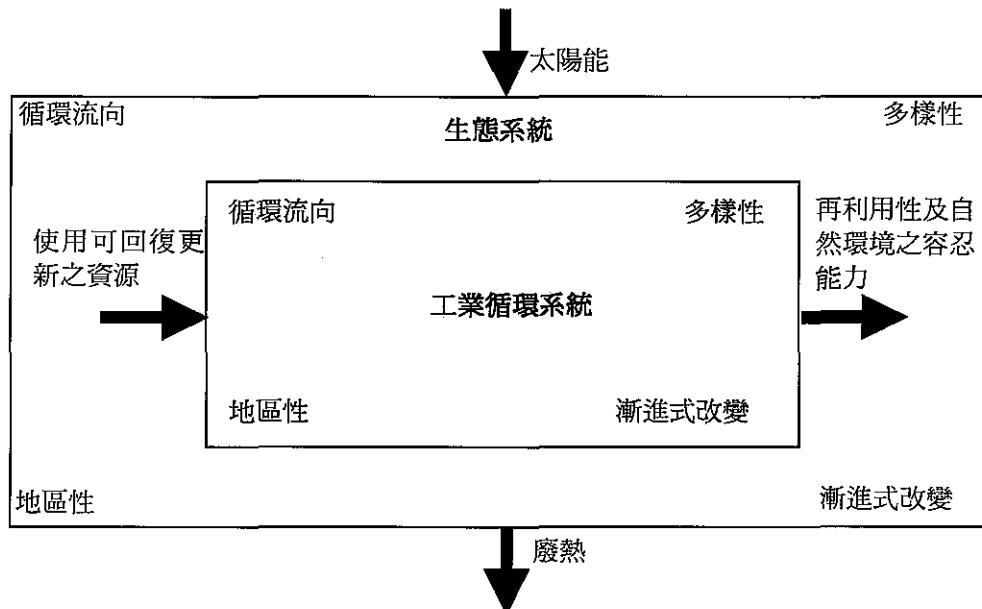


圖 3 生態系統與工業循環系統之關聯示意圖<sup>[6]</sup>

### 2.1.3 工業系統模擬生態系統之探討

由上節得知，生態系統與工業循環系統有許多相同處，且工業系統本來係包含於自然生態系統內，應符合生態系統之運作原則，故工業模擬生態系統必定可行，然而過去未察覺並忽略此原理，導致嚴重生態失調與環境污染之問題。

Ernest Lowe 等人曾發表過一篇名為「工業生態及工業生態系統（Industrial ecology and industrial ecosystems）」之文章，內容述及：「工業生態之內涵係針對環境管理所衍生之新興架構，積極尋求工業系統之轉變，以滿足當地產業，並維持相當涵容能力之輸出與輸入平衡，而工業生態主要目標，在於將人類生產與消耗的範疇內，將傳統線性系統轉變成封閉循環系統，若遵循此項原則，工業系統將轉變成更接近生態之模式」<sup>[7]</sup>。該文並舉例到許多工業園區模擬自然生態系統之案例，如丹麥 Kalundborg 及加拿大 Burnside 工業園區等。

Ray Cote 等人發表一篇名為「工業園區如同生態系統（Industrial parks as ecosystems）」之文章，主旨為分析如何將工業園區模擬成生態系統，並探討操作與設計上可行性。作者於 1992 年針對加拿大 Burnside 工業園區，進行各產業之間卷調查，當時 Burnside 工業園區計有超過 5,100 名全職工作人員及 480 名兼職人員，園區進駐產業種類非常多元，調查結果顯示有 90.4% 的產業十分樂意參與廢棄物減量機制之合作，95.4% 之產業願意瞭解有關產業改善效率及廢棄物最小化之相關訊息，92.3% 產業則願意提供機會，參與使用廢棄物來進行生產及進行相關利於環境之活動，顯示許多產業在環境與經濟間之敏感度提升<sup>[8]</sup>，亦證明工業系統將傳統生產系統模擬成自然生態系統，提高經濟與環境績效之觀念已廣被接受。

## 2.2 工業生態化應用層次

就工業生態應用層面而言，可分成三種層次，第一種層次為某產業內部之工業生態，第二種層次為在一個工業系統內，考慮不同產業間之相互合作，即為產業共生之概念，第三種層次為生態工業園區或生態城鄉之應用<sup>[9]</sup>，工業生態化層次如圖 4 所示。

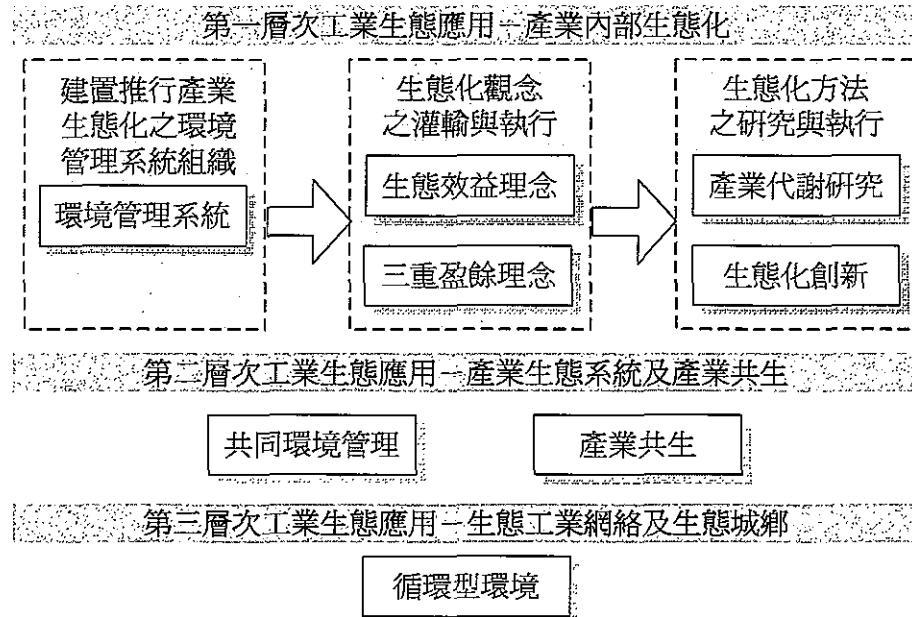


圖 4 工業生態化層次示意圖

### 2.2.1 產業內部生態化

從整體產業各種角度，尋求產業內部能增加經濟及環境績效的方法與手段，包含各種資源使用效率最大化及廢棄物產生最小化等，所使用的策略如生命週期分析、環境管理系統、環境化設計、清潔生產、延長生產者責任及生態效率等。而產業生態化原則為系統化管理、原料減量、製程改善與減量及產品功能提升等，如圖 5 所示。

### 2.2.2 產業共生

透過各產業共同管理環境事宜與經濟事宜，來獲取更大的環境效益、經濟效益與社會效益，這種集體效益比各單獨產業最佳化績效之總和更具效益，產業共生型態有可分成五大項目，如表 3 所示，分別為物質流共生、資訊流共生、人力流共生、商業流共生及資金流共生，其中又以物質流共生應用最為普遍，如副產品交換即為此種類型。

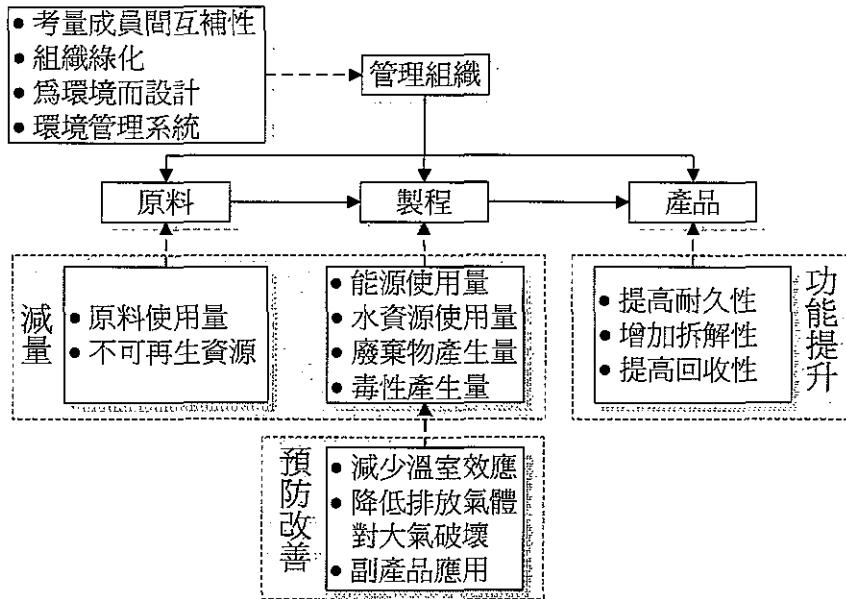


圖 5 產業內部生態化原則

表 3 產業共生類型

產業共生構面	應用內涵
物質流共生 (物質循環)	副產品交換、資源(水、物質或能源)集體收集與回收、氣電共生、廢熱再利用、共同採購、供需分析、綠色共同採購、綠色供應鏈等、設備資源共用、運輸服務共享、整合型資源回收系統(IRRS)、循環型生產。
資訊流共生 (資訊循環)	資訊網路化、訂單共同管理與處理、去物質化、情報與資訊共同處理、外部資訊溝通、園區監測與監控系統、技術交流與應用等。
人力流共生 (人力循環)	人力支援分工、知識交流、改善勞資關係、教育訓練與實習、人事共同管理、跨組織營運機制、人員派遣彈性應用、人際溝通等。
商業流共生 (通路循環)	風險共同承擔、市場共同投資、產業協商、商品共同促銷、共同開發綠色市場、市場調節、延長生產者責任等。
資金流共生 (經濟循環)	帶動區域發展、生態城鄉計畫、活絡社會經濟、產業間付款請款作業單一窗口化及簡易化、協作共生廠商之價格優勢、資金支援及補助等。

### 2.2.3 廣域工業生態化

於一個地區、一個城市、一個國家或更廣範圍內，建立生態工業網絡或生態城鄉，此須考量到不同之工業系統、產業群落之間，如何透過有效的合作來達成最佳化資源使用及經濟發展，並改善整體環境與經濟績效，達到永續發展目的。

## 2.3 工業生態化原則與方法

### 2.3.1 工業生態原則

Ernest Lowe 等人表示工業生態必須具備下列四點原則<sup>[7]</sup>：

1. 所有產業（包含私人或公共之製造業、服務業及公共基礎建設）之運作均屬自然系統，因所有工業活動均受到當地生態系統與生物圈條件而限制；
2. 生態系統之原則與動力，可提供給工業系統之管理與設計，作為有力之導引與依據；
3. 若能於生產、使用、回收及服務中達到較高之能源效率與物質效率，將可增加競爭優勢與經濟利益；
4. 經濟價值主要來源在於產業及其當地生態系統之長期發展能力，若不符合此原則，產業所呈現的成功則將毫無意義。

### 2.3.2 生態化方法

工業生態應用觀念十分廣泛，其發展均以環境考量為優先，污染預防為原則，考量層面包含整體生命週期，主要包括(1)在產品設計階段，強調為環境而設計等觀念；(2)於原料輸入階段，推動去物質化（dematerialization）；(3)於產品製程階段，注重清潔生產（cleaner production）；(4)產品使用階段，加強產品為拆解而設計（design for disassembly）以利於資源回收，並延展產品生命及服務，延長生產者責任（extended producer responsibility）；(5)於廢棄物產生階段，積極推廣廢棄物（副產品）交換（by-product exchange）機制及資源化工作；(6)於管理評估階段，則進行產品或服務之生命週期評估，加強整體績效評估。此等工業生態所注重之觀念，曾經於 1999 年時，由 Ian Christesen 所述及<sup>[10]</sup>，茲彙整如表 4 所示。

此外，Ernest Lowe 等人所認為的工業生態學原理<sup>[9]</sup>，整理如表 5，其認為工

業生態乃由各種產業與整體工業生態系統所聯繫構成，著重產業輸入、輸出與自然生態系統能力之間的平衡，並對產業所消耗之能源及材料進行再設計，將長期發展政策與工業系統結合起來，而工業系統之設計，應考量到當地社區對社會和經濟之需求，透過社區工程之投資，消除工業發展對當地社區之衝擊。

表 4 工業生態注重之觀念及其目的<sup>[10]</sup>

觀念	目的
去物質化	藉著產品綠色設計或替代能源、運輸之考量，進行系統化減廢，以減少因消費所產生之環境污染及降低後續廣大之廢棄物處置問題。
為拆解而設計	產品或製程之設計，考量到後續是否可容易進行拆解而易於進行相關資源回收工作。
清潔生產	進行製程、產品與服務之再設計或改善工作，以增加環境績效與經濟績效。
生命週期評估	藉著定性與定量某一產品、製程或活動之生命週期內，所有使用之能量、物料及相關環境排放物質等資料，來評估某產品、製程或活動之環境負荷。
環境化設計	將環境考量融入於產品設計或製程設計當中。
廢棄物交換	鼓勵廢棄物、不要的物質或能量，進行產業間之經濟交易與物質交換，將產業本身副產品作為其他產業之原料或摻料使用。
延展產品生命及服務	透過整體性生命週期考量，進行耐久性及可升級性之產品設計，以減少能量與物料之需求，並增加產品或服務價值。

表 5 工業生態學之部分原理與內容

原理	內容
將單個產業與整體工業生態系統聯繫起來	透過再使用及再循環回收形成封閉之循環系統，提高材料和能源之使用效率，減少廢棄物產生，將所有廢棄物定義為潛在產品，並積極尋找再利用市場。
實現產業輸入、輸出與自然生態系統能力之間的平衡	減少對自然環境排放能源和材料而造成之環境負荷，以自然生態環境特性及敏感性角度，來對自然界緊密聯繫之工業進行設計，避免或減少產生有毒物質或有害材料。
對工業消耗之能源及材料進行再設計	重新設計工業生產製程，減少能源及材料之使用，改變技術與產品設計，以降低資源使用量，並發揮最大效能，用最少資源做更多之產品或服務。
考量長期發展策略	將政策與工業系統長期發展策略結合起來

符合當地發展需求	工業系統之設計，應考量當地社區對社會和經濟之需求
進行社區回饋與改造	透過社區工程投資，消除工業發展對社區之影響與衝擊

因此，Ernest Lowe 與 Ian Christesen 所提之工業生態應注重觀念之考量角度不同，Ian Christesen 主要切入點在於產業內部，強調產品各生命週期階段之生態化，而 Ernest Lowe 之觀點，即屬於第二層次或第三層次之工業生態，當然第二層次或第三層次之工業生態，應包含考量到第一層次之工業生態，才可進行較高層次發展，並得以有效地進行生態工業園區之營運。

### 三、生態工業園區與環保科技園區

全球各地生態工業園區正積極蓬勃發展當中，目前至少有 104 個工業區著手進行生態化工作，而生態工業園區係以工業生態學為原則所構築，因此在瞭解工業生態原理、方法及應用層次後，本文以生態工業園區與我國現行之環保科技園區進行分析，並探討環境保護之發展趨勢。

#### 3.1 生態工業園區

##### 3.1.1 發展源起

早於 1980 年代左右，丹麥 Kalundborg 市內幾家產業自發性地進行副產品交換，形成一個產業共生系統，那時並無針對此生態化工業進行積極推廣與宣導，並將此方法策略下一定義，直到 1989 年時，由 Frosch 及 Galloopoulos 二位學者提出工業生態化之觀念，生態工業園區之原則概念因之得以衍生。而 1990 年早期加拿大新斯科細亞省的 Dalhousie 大學及美國紐約的康乃爾大學，曾構想出與生態工業園區相關類似的發展架構。

1992 年，美國靛藍開發公司（Indigo Development）首先創造了生態工業園區之觀念，並於 1993 年引入生態工業園區觀念予美國環保署，當時環境技術推廣計畫（environmental technology initiative project），其內容包含進行生態工業園區推廣計畫，進而使得總統永續發展委員會（President's Council on Sustainable Development）於 1995 年開始進行生態工業園區之示範計畫（包含四個生態工業示範園區，分別為馬里蘭州之巴爾的摩港市（Baltimore, Maryland）、維吉尼亞州之 Cape Charles（Cape Charles, Virginia）、德州之 Brownsville（Brownsville, Texas）及田納西州之查特奴加市（Chattanooga, Tennessee）<sup>[11]</sup>）。

1994 年到 1995 年間，在美國環保署計畫資金的支持下，美國靛藍開發公司與三角研究園區（Research Triangle Institute）共同進行生態工業園區之合作研究，產生工業園區與環境管理重大改革<sup>[1][2]</sup>，使生態工業園區變得十分有名，並開始蓬勃發展。生態工業園區整體發展脈絡如圖 6 所示。

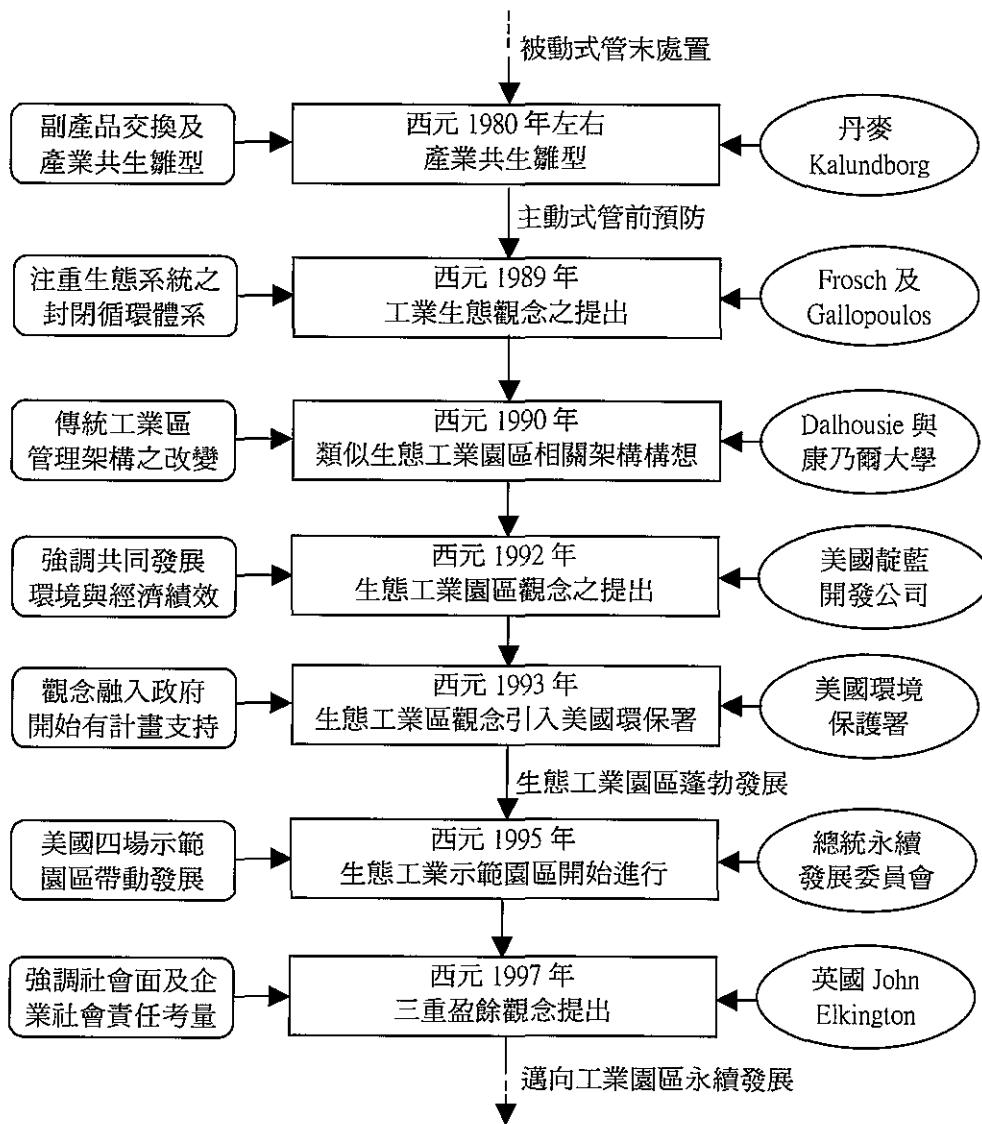


圖 6 國外生態工業園區發展之背景沿革

### 3.1.2 工業生態化目標

生態工業園區崛起後為何受到全球如此重視，並競相仿效，究其原因在於工業園區經工業生態化後，能達成三重盈餘（triple bottom line）之境界，並使工業園區、進駐產業及環境得以永續發展，在不影響後代子孫發展前提下，使用適當或少量資源，獲取產業所需利益，甚或製造出最佳狀況之產品或服務。因此，生態工業園區終極目標為永續發展及三重盈餘。生態工業園區在積極追求此兩個主要目標下，衍生出許多次級目標，當然全球各個生態工業園區及各界觀點，對於園區欲達成之目標及方向均不相同（示如表 6），本文將各家觀點整理分類成生態工業園區營運五大目標類型（示如圖 7），分別為：

1. 帶動區域性發展（A 型）－如表 6 中之提供區域性發展模式，提升商業、人力、經濟及自然資源、創造社會就業機會、經濟收入及建立循環經濟等；
2. 保護自然生態環境（B 型）－如減少廢棄物量、掩埋體積及生態保育等；
3. 增加資源使用效率（C 型）－如創新技術研發、去物質化及共同環境管理等；
4. 建立工業封閉循環（D 型）－如建立產業共生、系統平衡、循環型生產及零排放之體系；
5. 改善營運效率（E 型）－如增加社會互動，創造產業形象及營運架構重組等。

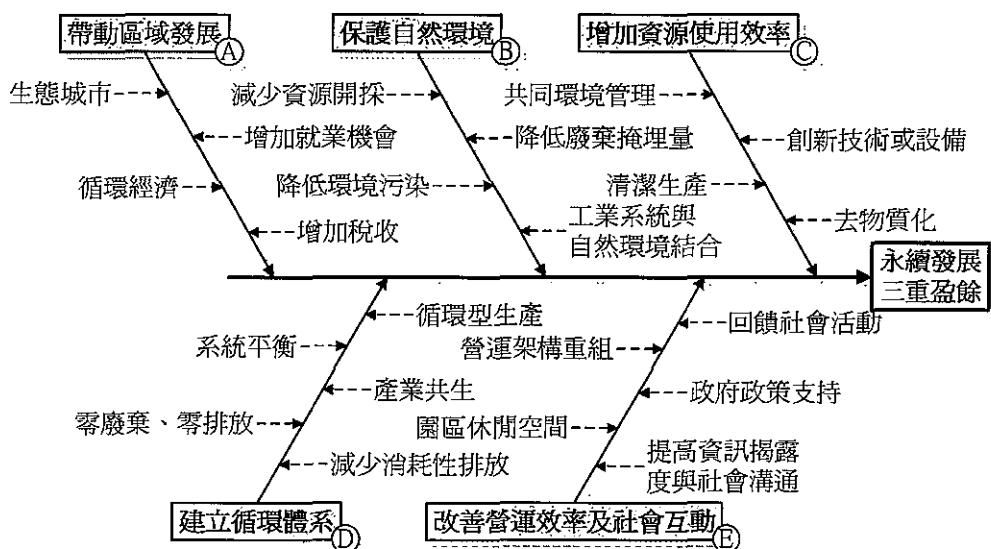


圖 7 工業生態化營運五大目標

表6 生態工業園區擬定營運目標參考表

發表者	目標項目
Tad McGalliard, Ed Cohen-Rosenthal and Michelle Bell, 1997 <sup>[11]</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 提供區域性發展模式，提升商業、人力、經濟及自然資源；(A)</li> <li>● 創造提高家庭薪資及訓練機會；(A)</li> <li>● 應用工業生態原則，保護並提升自然及文化資源，並增加資源使用及保存效率；(B) (C)</li> <li>● 支持私營工商業發展，並使本地經濟復甦；(A)</li> <li>● 透過集體效益結合利潤、資源、效率，並應用工業生態學與污染防治等方法，發展下一代之工業設備；(C)</li> <li>● 增加稅收基礎而無增加稅款。(A)</li> </ul>
Pierre Desrochers, 2000 <sup>[14]</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 降低原生材料之使用；(B)</li> <li>● 減少污染產生；(B)</li> <li>● 增加能源效率；(C)</li> <li>● 減少廢棄物量及所須掩埋之體積；(B)</li> <li>● 增加具市場價值之製程輸出物質的類型及總量。(C)</li> </ul>
Ray Cote and J Hall, 1995 <sup>[8]</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 自然及財政資源之保存；(B)</li> <li>● 降低污染、物質、能源、安全預防措施及處理等成本及責任；</li> <li>● 改善營運效率、品質、公眾健康及大眾形象；(E)</li> <li>● 透過廢棄物質之交易，獲取額外收入。(D)</li> </ul>
Suren Erkman, 2001 <sup>[15]</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 建立循環經濟；(A) (D)</li> <li>● 浪費損失最小化；(C)</li> <li>● 增加資源生產力（去物質化）；(C)</li> <li>● 平衡及協調工業系統（脫碳及脫氯）。(D)</li> </ul>
John R. Ehrenfeld, 1997 <sup>[16]</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 改善工業製程及資源使用之代謝途徑；(D)</li> <li>● 創造封閉循環之工業生態系統；(D)</li> <li>● 將工業輸出物質去物質化；(C)</li> <li>● 能源使用模式系統化；(C)</li> <li>● 平衡產業之輸出與輸入；(D)</li> <li>● 應用政策進行工業系統之長期發展；(E)</li> <li>● 創造新的功能、協調、通訊、鏈結及資訊等架構。(E)</li> </ul>
Ian Christesen, J.A. Scott, K. Krrishnamohan, A. Gabric and S. Heart, 1999 <sup>[10]</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 工業系統與自然生態系統相互依賴與共存；(B)</li> <li>● 物質流透過當地經濟活動形成一封閉循環狀態；(A) (D)</li> <li>● 廣泛採用可再生能源；(B)</li> <li>● 維持可再生資源生產率與消耗率之平衡；(D)</li> <li>● 在對生物圈影響衝擊最小化之前提下，維持及增加工業系統之經濟發展。(B)</li> </ul>

### 3.1.3 全球工業園區生態化發展趨勢

全球許多國家之生態工業園區已有許多案例其營運績效亦十分良好，並依各園區營運目標訂定各具特色之營運方法及策略，本文依前述 3.1.2 節所分之五大目標類型，探討生態工業園區部分實際案例，以驗證全球生態化發展趨勢是否符合此五大目標，由圖 8 至 22 得知，生態工業園區並非全面性地將五大目標類型完全考量，大多鎖定部分生態化目標進行，另一方面，亦可從營運目標及策略不同，看出全球各種生態化特色與發展趨勢。

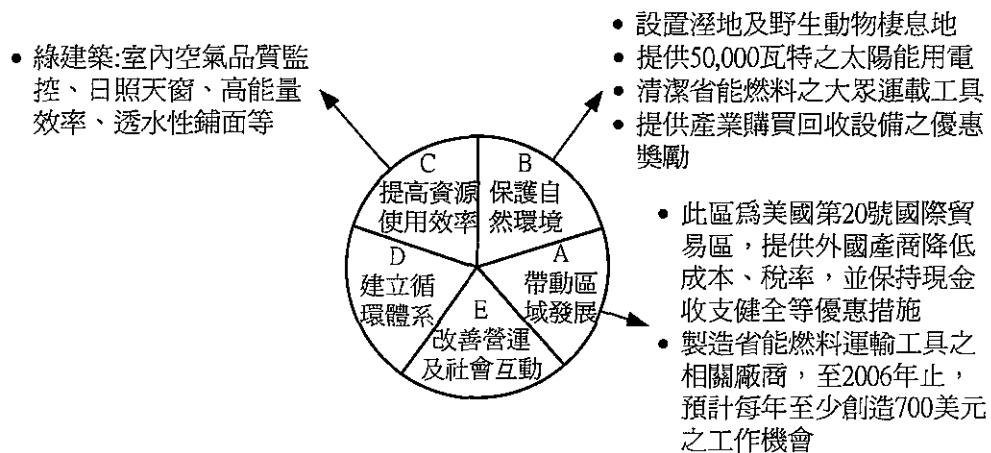


圖 8 美國 Cape Charles 永續科技園區

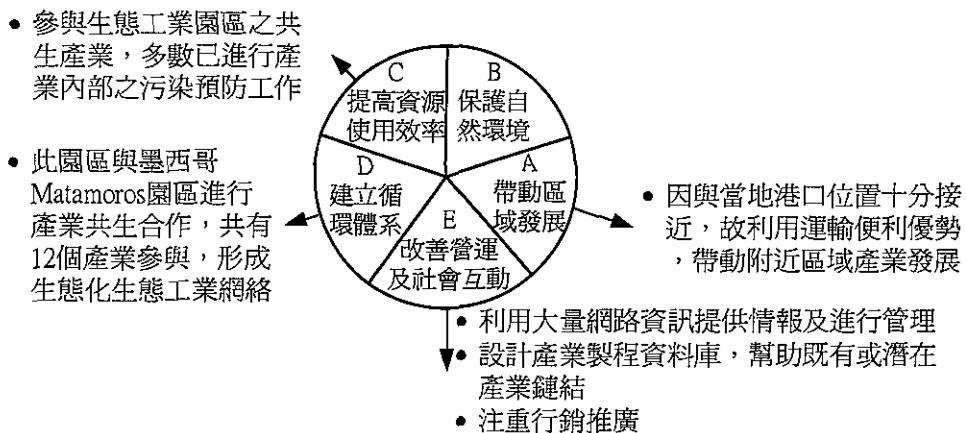


圖 9 美國德州 Brownsville 生態工業園區

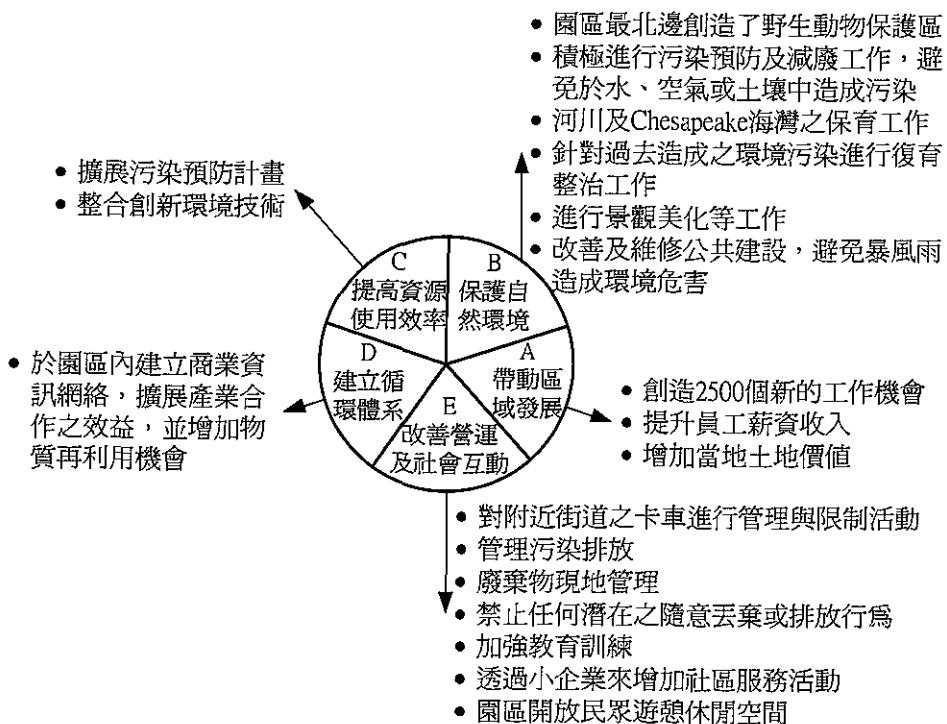


圖 10 美國 Fairfield 生態商業園區

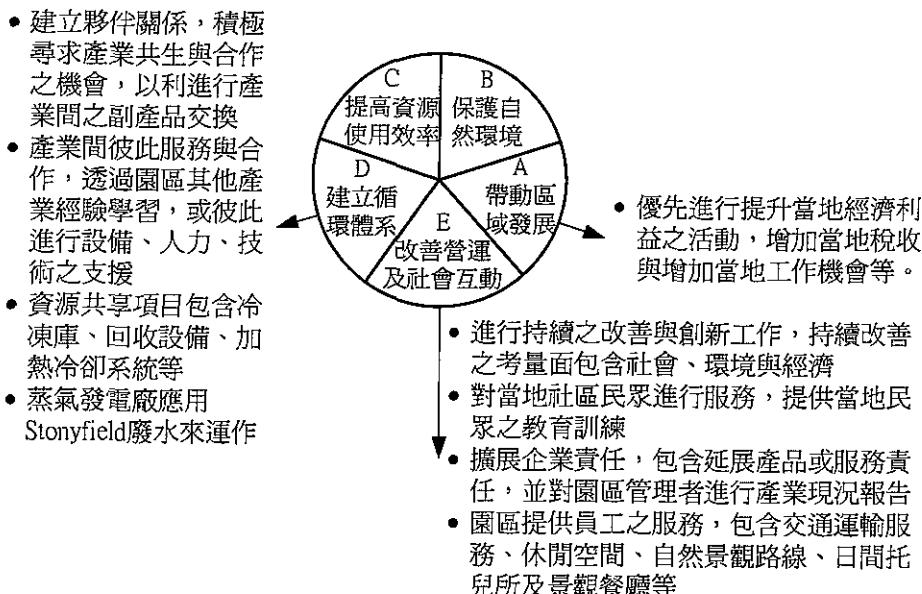


圖 11 美國 Stonyfield 倫敦德里生態工業園區

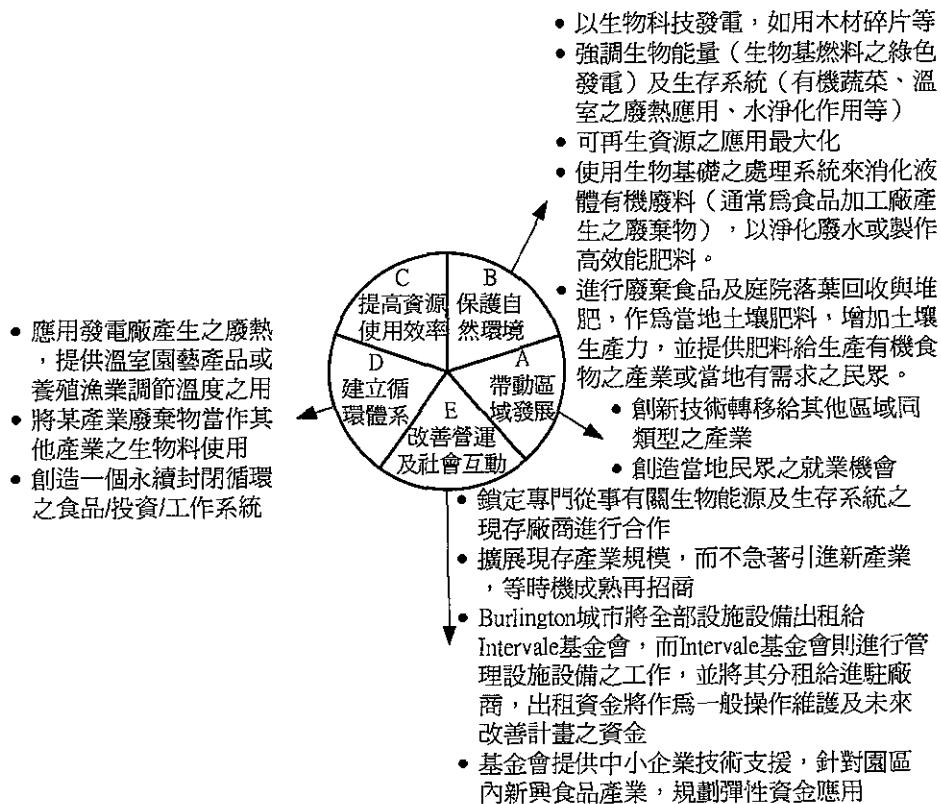


圖 12 美國 Riverside 生態園區

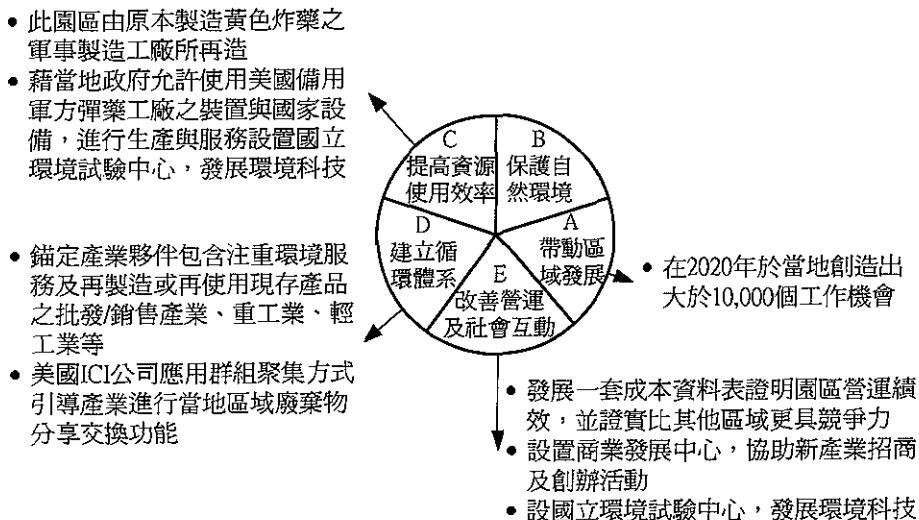


圖 13 美國田納西州南區產業生態工業園區

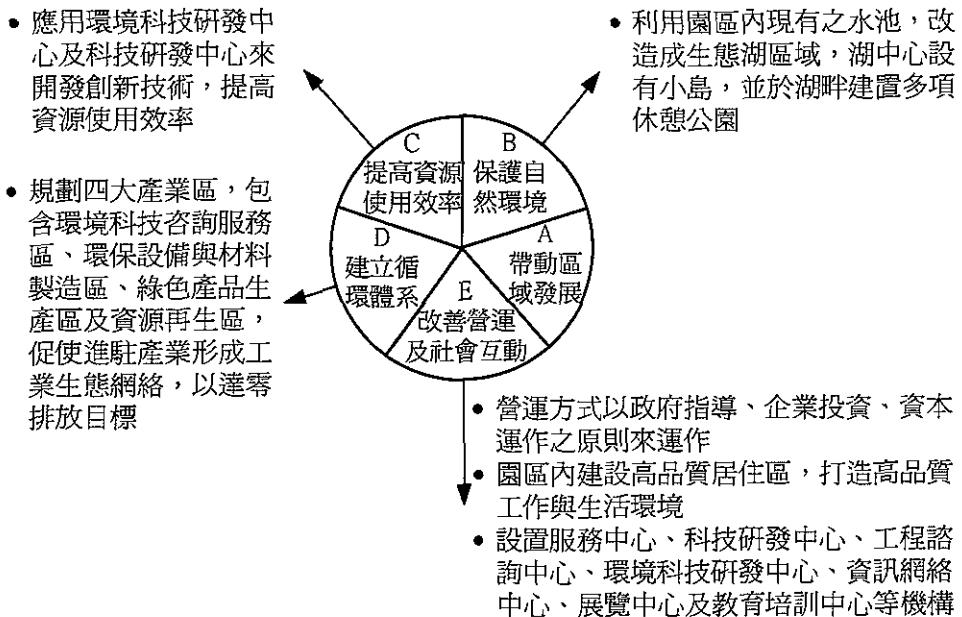


圖 14 中國南海國家生態工業示範園暨華南環保科技產業區



圖 15 中國江蘇省蘇州高新區國家生態工業示範園

- 設置環保科研園，內有開放式工程技術中心、產業孵化器、歸國留學生創業園及博士後流動站等，以研發創新科技，並培養科技人才
- 設置環保產品展銷中心，展銷園區各種產品和技術成果及國內外其他地區同類產品和技術成果

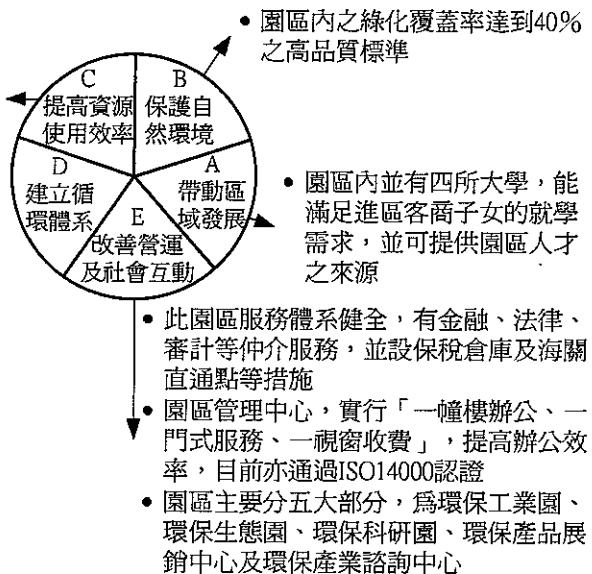


圖 16 中國常州國家環保產業園區

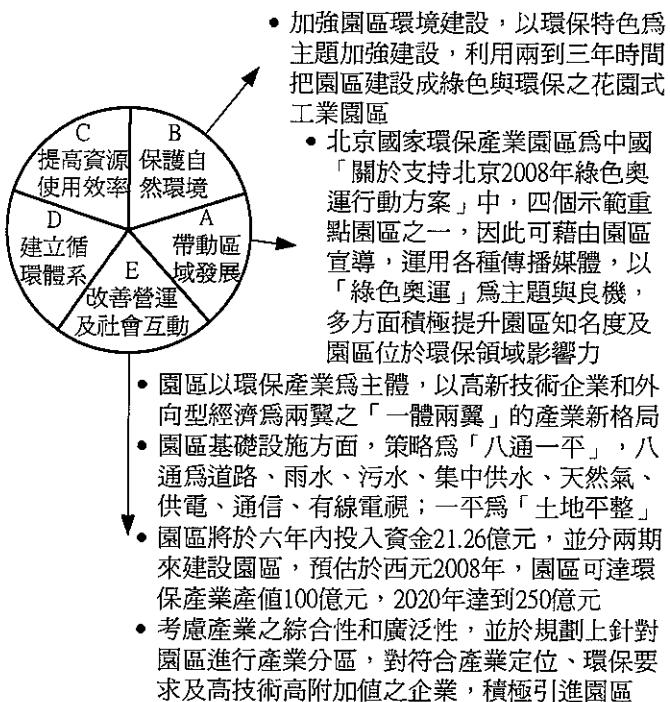
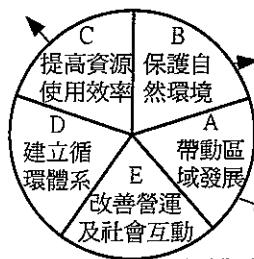


圖 17 中國北京國家環保產業園區

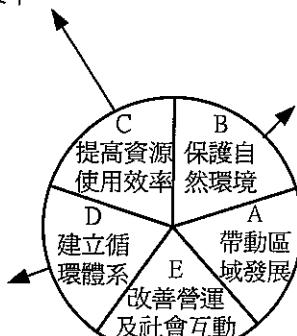
- 於節能產品產業基地上，進行以太陽能、電能、機械能、風能之節能產品研究、開發及生產，以減少資源使用量



- 園區中心設有人工湖泊，並加強綠化設計部份
- 園區總綠化率達到50%以上
- 於環保產品產業基地，以治水、治氣、治汙為主體之產品開發、生產、環保工程及資訊諮詢，以降低產業對環境之衝擊
- 建築面積40萬平方米的現代化東方家園住宅區
- 園區內生活圈分成三部分，分別為商務接待，生活服務和住宅區
- 產業區分成七類產業區塊，為新型材料基地、新型建材基地、節能產品基地、環保產品基地及數位機電基地、新型建材超級市場及物流產業等
- 十年內將投資約60億元建設主輔幹道20餘公里、生態化標準廠房200餘棟（建築面積300萬平方米）、水、電、暖、氣、通訊等基礎設施及住宅區

圖 18 中國濟南環保科技園區

- 廢水、污水及固體廢棄物集中共同處理及管理
- 參與廢棄物交換產業，均為EBARA公司所有之子產業
- 建設流體化床燃燒處理系統，並由電廠供熱，將一般廢棄物、農業廢棄物、污水及塑膠料轉化成具商業價值之氣體，如甲烷、氫氣及氮氣，並可將其轉換成電能
- 應用污水處理廠提供之中水，進行園區澆灌、洗滌及沖洗廁所之用
- 將水處理廠之污泥處理後作為農業用混合肥料



- 於屋頂使用太陽能光電及風力發電系統
- 房屋以高效絕緣建材所建成，每個房屋並安裝真空污水處理系統，以降低水消耗
- 由EBARA公司發起零排放計畫，並提供資金資助，與聯合國大學及ZERI (Zero Emissions Research Initiative)聯合發展，將園區內700戶居民、商業設施及一個工業製造區建構成零排放區域
- 曾於2000年3月時，工廠發生嚴重洩露事故，而影響公司形象及公共關係，使管理者暫時先停止計畫進行，優先進行洩漏事故之分析及評估對公司影響程度

圖 19 日本騰澤生態工業園區

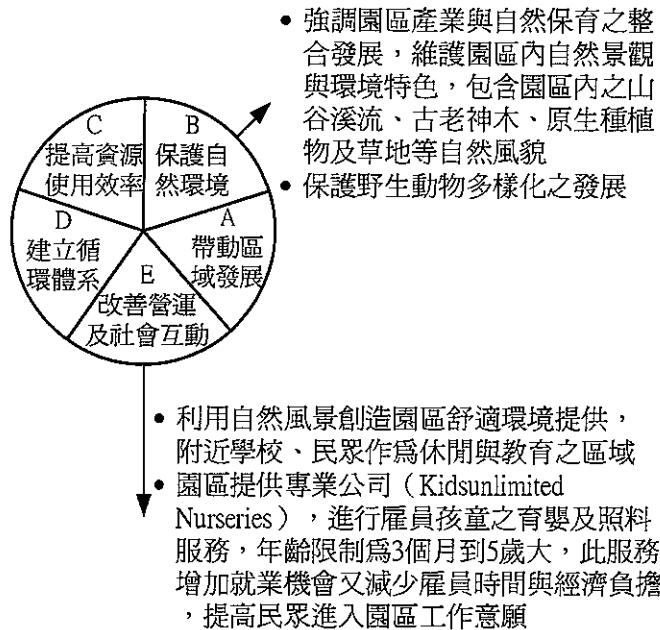


圖 20 英國 Crewe 商業園區 (Crewe Business Park, CBP)

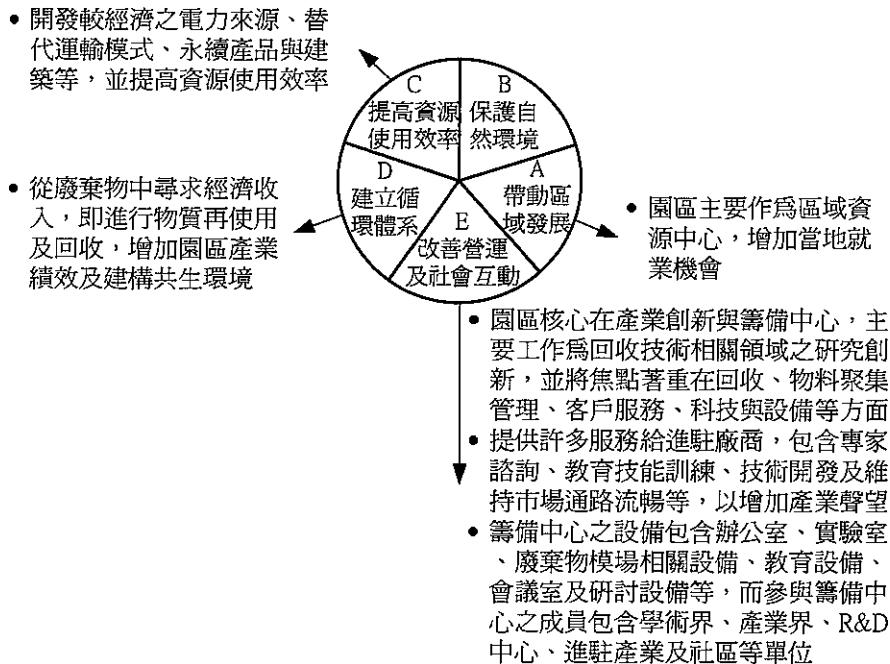


圖 21 英國永續成長園區

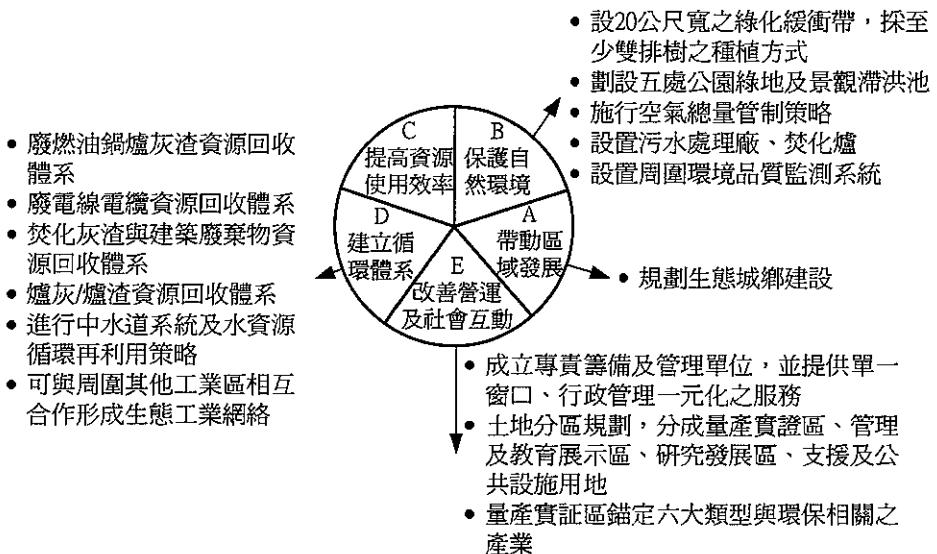


圖 22 我國高雄環保科技園區

### 3.2 台灣環保科技園區

#### 3.2.1 發展現況

為順應世界發展潮流，行政院環境保護署於 2002 年進行環保科技園區 (environmental science and technology park) 推動計畫，通過環保科技園區推動計畫作業與管理要點，目前共選定四區域作為生態化示範園區，分別為高雄岡山、花蓮鳳林、桃園觀音及台南縣等四區域，如圖 23 所示。

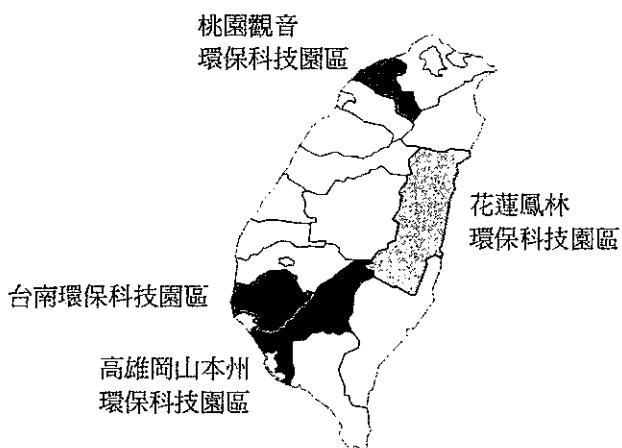


圖 23 台灣環保科技園區選定區域

### 3.2.2 環保科技園區營運特色

1. 園區規劃：以「生態工法」為原則進行建設，其建設內容包括公共設施、道路與綠地等項目，整體規劃分區為<sup>[13]</sup>：
  - (1)量產實證區，約十五公頃以上，以環境友善之生產程序與製品量產為主。
  - (2)研究發展區，約二公頃以上，以新技術、產品研發、基礎實驗與分析為主，並與當地區域之學術及研究單位進行合作。
  - (3)支援設施區，約二公頃以上，以提供各種公用及污染防治設施為主。
  - (4)管理中心及教育展示區，約一公頃以上。
2. 生態化發展策略：我國環保科技園區營運策略係以工業生態為發展原則，並朝工業生態應用之三種層次邁進，說明如下：
  - (1)第一層次－產業生態化：我國環保科技園區以鎖定特定環保關鍵產業進行招商（具清潔生產技術及產業關聯之產業、具循環再利用技術、產品及產業關聯之產業、具資源化技術、產品及產業關聯之產業、符合新興策略性重點環保產業、清潔與再生能源產品與系統製造產業、解決產業界環保問題之設備、關鍵技術及零組件之關聯產業等類型），並由廠商依「環保科技園區推動計畫作業與管理要點」提出營運計畫，由廠商自行建廠，環保署則依規模及生產效能給予獎勵。此項策略使環保科技園區進駐產業能容易進行第一層次的工業生態化。
  - (2)第二層次－產業共生、副產品交換及資源回收網絡：高雄環保科技園區以廢燃油鍋爐灰渣、廢電線電纜、焚化灰渣與建築廢棄物、爐灰/爐渣等四大資源回收體系為主要發展目標，而花蓮環保科技園區則是以生物科技及石材利用為主要資源化對象，各園區均有不同特色之生態化資源回收網絡。
  - (3)第三層次－生態城鄉與生態工業網絡：依據環保科技園區之作業管理規範及推動計畫內容，現行所有環保科技園區推動計畫，均需要納入生態城鄉發展計畫，且環保科技園區與周圍工業區並得保持相當程度之合作，形成生態工業網絡，以帶動區域經濟發展及維護區域環境。

## 四、結論

鑑於資源與環境之永續發展，現階段全球產業及工業區之發展均漸朝生態化之方向努力，達到生產、生活與生態三生一體及經濟、環保與社會三重盈餘之目標，未來全球環境保護發展有朝下列幾項發展之趨勢：

1. 產業發展以模擬自然生態系統為原則（包含產業內部、產業之間、縣市間、國際關係等各種層次），並符合循環流向性、多樣性、地區性及漸進式改變性等特性，如自然生態系統之食物鏈般，各種不同單元組成一個互助互補之多樣性網絡，彼此存在著共生合作及競爭關係，透過廢棄物交換、資源回收體系及資源供需關係，形成封閉循環資源流動網，在不破壞原有生態環境之前提下，合理應用當地資源，持續發展並逐漸改善生產環境，我國近期所推動的零廢棄物政策，亦根據此項原則而衍生發展。
2. 將傳統工業園區轉型成生態化工業園區，透過各界通力合作，以生態化思維來規劃設計及營運工業園區，應用整合性系統化管理，在自然生態系統的條件限制下，形成園區產業共生及封閉循環的工業生態系統，提高園區資源生產力，維持園區系統平衡，並藉由集體效益及社會共同體通盤合作，帶動區域之社會、經濟與環境發展，使得產、官、學、民均能獲得三重盈餘之益處。
3. 以往產業進行環境保護發展時，僅以不危害自然生態為目標，然而在工業生態及三重盈餘觀念積極推廣之下，致使環境保護發展趨勢之涵蓋面更廣，多以五大生態化營運方向為目標，分別為建立循環體系、提高資源使用效率、保護自然環境、帶動區域發展與改善營運及社會互動等，此等目標並非一觸可及，由本文案例分析，顯示多數產業或園區均以特定項目為生態化發展目標，等待生態化發展成熟後，再階段性地擴展生態化模式。
4. 三層次的生態化與環境保護發展趨勢：全球環境保護或資源化的發展，不再僅將焦點侷限於產業當中（第一層次工業生態化），而是將視野與格局擴大，於宏觀方面注重產業共生，將傳統單獨產業效益轉成更具利潤之集體效益（第二層次工業生態化），在巨觀上以發展生態工業網絡及生態城鄉為原則，將

生產、生活與生態合為一體（第三層次工業生態化），達到經濟、環保與社會三重盈餘之最高目標。

## 五、參考文獻

1. T.E. Graedel and B. R. Allenby, *Industrial Ecology*, New Jersey: Pearson Education, Inc., pp.22~50, 2003.
2. 溫肇東，企業的環境管理-與生態共榮的企業綠化研究，台北市：遠流出版社，pp.89-123，1999。
3. Frosch, R. A. and Gallopolous, N. E., "Strategies for Manufacturing," *Scientific American*, vol.261, no.3, pp.144-152, 1989.
4. Nicholas Gertler, *Industrial ecosystems: developing sustainable industrial structures*, Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, chapter 1&7, 1995.
5. Ray Cote, "Whither industrial ecology: transforming industrial park," *Connecting Business and the Environment – a seminar series on industrial ecology*, New York, pp.2-13, 1998.
6. Jouni Korhonen, "Some suggestions for regional industrial ecosystems – extended industrial ecology," *Eco-Management and Auditing*, vol.8, part1, pp.57-69, 2001.
7. Ernest A. Lowe and Laurence K. Evans, "Industrial ecology and industrial ecosystem," *Journal of Cleaner Production*, vol.3, no.1-2, pp.47-53, 1995.
8. Ray Cote and J Hall, "Industrial park as ecosystems," *Journal of Cleaner Production*, vol.3, no.1-2, pp.41-46, 1995.
9. 勞愛樂（Ernest Lowe），*工業生態學與生態工業園*，化學出版社，pp.27-35, 164-219, 2003。
10. Ian Christesen, J.A. Scott, K. Krrishnamohan, A. Gabric and S. Heart, "What is needed to encourage adoption of industrial ecology," 2nd Asia Pacific Cleaner

- Production Roundtable, Brisbane, Australia, pp.374-383, 1999.
11. Tad McGalliard, Ed Cohen-Rosenthal and Michelle Bell, Designing eco-industrial parks — the North American experience, New York, US: Cornell University, Work and Environment Initiative, pp.1-10, 1997.
  12. Ernest A. Lowe, Eco-industrial Park Handbook for Asian Developing Countries, Oakland: Indigo Development, chapter 1&8, 2001.
  13. 行政院環境保護署，環保科技園區推動計畫作業與管理要點(草案)，pp.4-10，2002。
  14. Pierre Desrochers, Eco-industrial parks — the case for private planning, Montana, US: The Property and Environment Research Center, PERC, pp.1-34, 2000.
  15. Suren Erkman, "Industrial ecology: a brief introduction," New Strategies for Industrial Development: An International Conference and Workshop, Manila, Philippines, pp1-5, 2001.
  16. John R. Ehrenfeld, "Industrial ecology: a framework for product and process design," *Journal of Cleaner Production*, vol.5, no.1-2, pp.87-95, 1997.