



INDUSTRIAL ECOLOGY

Second Edition

工業生態學

E. Graedel & B. R. Allenby 合著

文元 郭乃文 合譯

工業生態學

蕭 登 元

景文技術學院觀光事業系
助理教授兼系主任

郭 乃 文

國立台北護理學院
旅遊健康研究所助理教授

合 譯

五南圖書出版公司 印行

國家圖書館出版品預行編目資料

工業生態學／T. E. Graedel, B. R. Allenby 作：
蕭登元、郭乃文合譯。—— 一版。——
臺北市：五南，2004 [民 93]
面；公分
參考書目：面
含索引
譯自：Industrial Ecology, 2nd ed.
ISBN 957-11-3659-X（平裝）
1. 工業生態學

555.016

93011776

5115

工業生態學

譯 者 蕭登元 郭乃文 （245.3）
編 輯 蔣和平

出 版 者 五南圖書出版股份有限公司
發 行 人 楊榮川

地 址：台北市大安區 106
和平東路二段 339 號 4 樓
電 話：02-27055066（代表號）
傳 真：02-27066100
劃 撥：0106895-3
網 址：<http://www.wunan.com.tw>
電子郵件：wunan@wunan.com.tw

顧 問 財團法人資訊工業策進會科技法律中心

版 刷 2004 年 9 月一版一刷

定 價 580 元

版權所有・請予尊重

於序

生態學是一門探究某「地球生物物種」與它周圍生存環境間共在與互動關係的學問。人類在地球生物裡，相對而言，屬較遲來慢到的物種，而近代工業社會時期的人類更只興起僅不滿三百年，這群人的經濟發展重心在於生產與消費大量與各色的工業製品；他們的社會生活重心則發生在人口密集且對外呈寄生狀態的大型都市或超都會區。然而，因近代人所取向的生存與繁衍習性對整個地球環境所造成的衝擊已無所不在、無遠弗屆，甚至於無堅不摧。以致，工業生態以及都市生態雙雙成為人類近代最被熱衷研究的兩個學域。

很高興看到問世才未幾年的工業生態學初版已再版了，而且原作者 Graedel 與 Allenby 能在新版本中增添了「人文與環境」、「社會與文化」等原即絕對必要先行於工業生態硬體內涵的章節。雖然，我認為人類文化如何成就了工業型的現今社會，其癢處並未完全被作者扣準搔著，但相信未來繼起的三、四等等新版本，仍可期待。

格外高興的則是：近數年來相繼畢業於台大環工所博士班 302 研究室的郭乃文、蕭登元先生，他們能在教學／行政忙碌之餘，不辭辛勞，聯袂成為本書的第二與第一譯者，可見他們必也認同到以生態學觀點來探討近代工業發展功過的迫切，以及攸關其前程永續與否的關鍵學科所在了。

是的，此書有此中譯本，除可為台灣本地讀者多提供些對近代工業系統認知的新觀點外，我覺得海峽對岸正朝工業化與都會化兩皆日夜擴張中的社會，說不定應更能因此譯本的問世而受益。

於幼華 教授

序於台灣大學環境工程學研究所

2004 年 6 月 6 日

張 序

早期的產業發展偏重人類的需求，較忽略資能源開採、製造、消費及廢棄過程中對其他生態體系及環境的影響。近年來由於資能源的日趨短缺及環境負荷的加重，產業界已逐漸重視資能節約與善用，製程改善、工業減廢及資能源回收再利用，以追求環境、經濟及社會等各方面的永續發展。工業生態學即為反應及因應永續發展需要所發展出來的新學科，將產業及其活動視為生態體系的一份子及生態變遷的一部分。有鑑於此學科對環境科技及規劃管理的重要，台灣大學環境工程學研究所（台大環工所）已將其規劃於課程中，並於 2002 年開始正式授課。而有關工業生態的研究則更早於 1999 年即開始進行。截至 2004 年 6 月止，台大環工所完成工業生態相關研究之畢業生已有十多位碩士及蕭登元博士。

蕭博士與郭博士目前分別任教於景文技術學院與台北護理學院，繼續環境規劃與管理及工業生態相關之教學與研究。欣知兩位博士接受五南圖書出版公司之邀請，將 Graedel and Allenby (2003) 所著 *Industrial Ecology* 一書翻譯成中文以供大專學生與工業生態領域相關學者研讀與參考之用，本人很高興為其譯作寫序介紹。期望本書所撰述之環境化設計與工業生態理念能逐漸推廣應用於各相關領域。

張慶源 博士

台灣大學環境工程學研究所教授兼所長

2004 年 6 月 20 日

沈序

這是一本非常好、非常重要，凡是商品設計、製造、銷售事業及支援商品設計、製造、銷售事業的從業人員，必須詳細閱讀的書。我非常敬佩，也為讀者感謝蕭登元及郭乃文兩位年輕老師，在修讀博士學位及教書公餘之暇，將原著翻譯成中文，使國內更多的人可以分享書中的觀念與方法。

地球發燒生病了，傷痛纏身，存續危機四伏。我們都知道地球生病，是因為科技進步工業革命以來的人類大量生產，包括嬰兒、糧食及各種商品的生產，造成地球人口的大量增加、大量消耗化石燃料及自然再生資源所引起的。地球的氣圈、水圈、土圈、及生物圈與陽光形成一個各種生命相互依存的有機運作體系。生態學的發現告訴我們，能源的作用及物質在生命間、生命與自然間循環，造就地球生生不息的複雜生物網絡。

為地球療傷止病，要從改變人類的價值觀與每天的行為作息開始，特別是工業化生產方式的改變。我們期望人類生產工業的每一個業別，每一個生產單元，個別地、相互間地、與大自然間地形成一個符合地球生態體系運作原則的工業生態系，自然地融入地球生態體系的循環型運作中。

這是一本非常好的書。將工業的，不論是製造業的或服務業的，產品生命週期中各個階段符合生態體系運作的生產與服務的理念與方法的最新知識，網羅成冊。讀好書，救地球！不是口號，是您讀完本書後的具體行動。

台北市政府顧問 沈世宏
景文技術學院環境管理系副教授兼總務長

2004年6月14日

譯者序

近年來從工業代謝 (Industrial Metabolism)、生態再設計 (EcoReDesign)、工業共生 (Industrial Symbiosis)、生態工業園區 (Eco-industrial Parks)、零排放 (Zero-emissions)、虛擬生態工業園區 (Virtual Eco-industrial Park) 和生態發展 (Eco-development) 等名詞的相繼問世推斷，「生態學」應用於「工業界」抑或是「產業界」已是世界環境保護趨勢之所需。其實這些名詞的最上位就是「工業生態」 (Industrial Ecology)。綜觀工業生態的研究領域已擴及：物質與能量流動的研究 (Material and Energy Flows Studies)、物質減量化和脫碳 (Dematerialization and Decarbonization)、技術變革和環境 (Technological Change and the Environment)、生命週期規劃設計與評估 (Life Cycle Planning, Design and Assessment)、為環境設計 (Design for the Environment, DEF) 與生態工業園區 (Eco-industrial Parks) 等六大領域。

提及翻譯本書的動機，譯者在西元 2000 年 4 月親赴巴西里約發表論文後轉往美國耶魯大學參訪昔日同窗，並順道參觀本書原著 T. E. Graedel 教授的院所與研究室，深感「生態學」的奧妙、其應用範圍之寬廣與國內對其觀念應用之缺乏。回台後，即積極進行國內外相關資料之收集，並以工業生態學為譯者博士論文之主題，期能為解決台灣環境破壞與資源匱乏問題盡一份心力；西元 2001 年 11 月譯者前往荷蘭萊登大學發表以工業生態學為題之研究論文，恰巧與 T. E. Graedel 教授被安排在同一 Session，發表完後亦與其交換一些意見，其實，他已將此觀念應用在解決其他國家的環境與資源問題。由此可知，工業活動所產生的環境、資源問題與其造成環境影響之解決方法是不分地域與不分你我他的。在譯者完成博士論文後，由於投入的時間長與深感「工業生態學」有用之處，便樂於將此書推

廣至國內之產、官、學、研界。

因此，特將譯者研究心得與 *Industrial Ecology* 原文書第二版中譯後供有志趣者參考。本書倉促付梓，免有疏漏處，請不吝賜教指正。

本書的完成應感謝台大環工所學弟偉榮、景文技術學院學生詔壠與純美的幫忙，在此一併致謝。

譯者

景文技術學院觀光事業系助理教授兼系主任 蕭登元

台北護理學院旅遊健康研究所助理教授 郭乃文

共序於台北

2004年6月中旬

作者序

多年來一直存在一個箴言，那就是環境保護與工業發展的目標無法並存。過去此句話是否為真並不是很清楚，但是毫無疑問的是，此箴言在今日已不是個事實。愈來愈多的前瞻企業與國家瞭解到以下的事實：要維持地球子民的舒適生活品質並非是大量減少工業活動、或是降低對新科技的依賴、或是減少科技與社會之互動；反而深深感受到若要促進永續社會則需讓產業與環境之互動更為密切。這些企業、公民、以及政府的覺知與承諾讓企業體採取負責任的作為後，不僅可以避免環境問題之產生，更可因他們的遠見帶來許多利益。

事實上，一個世界若要追求永續發展，產業活動之參與程度是個關鍵。科羅拉多大學的 Robert Sievers 指出政府部門常需煩心許多短程的議題，例如：達成經濟穩定、餵養日益成長的人口、建立穩定的政治環境、以及將中央集權改革為自由市場經濟等等。從可預知的未來角度來看，許多國家的措施過於狹隘。然而，卻有愈來愈多的企業體變成多國籍企業，他們具有宏遠的眼光，在相對穩定的全球經濟環境，與隨時反應不同地區文化與族群之特需需求下，力求企業之生存與興隆。私人公司不像公部門的政府，他們瞭解、選擇、發展、執行科技。因此，負責任的企業體，他們或許可以拋開不同國家領導者在永續與不永續發展的轉變，但是他們仍舊需要政府和非政府的幫忙，以建立宏觀、卓見的藍圖，因應企業所處之複雜環境。

我們可以從三種時間尺度來檢視產業與環境之互動關係。首先是「過去」，多數焦點集中於補救未妥善處理事業廢棄物所衍生之問題。而第二個時間尺度是「現在」，焦點集中於規範各項管制法

規，以避免重蹈覆轍，同時推演出更為負責任的生產行為。因此，此階段強調「工業減廢」、避免使用毒性化學物質、以及各類污染（空氣、水、土壤）之管末處理。工廠內的環保和工安人員，開始和生產線之製程人員攜手合作，在既有的程序下小幅改善與調整。然而，現在工業生產製程的設計人員與工程師在此階段卻未扮演重要角色。

第三個時間尺度是「未來」，工業產品、製程、與服務將被重新思考與設計，這將是後續幾十年所持續關心的焦點，那就是產業與環境之互動。所以，可以預期的是這群工業製程與產品設計工程師將主導未來產業與環境互動之新關係，然而縱使他們有著關懷環境的想法，但對這項具前瞻性的工作卻常感到力不從心。

這些設計者的問題在於當他們從事這項任務時，所需的知識與觀點卻是他們先前在學校課堂或研究課程中所未獲得的，而且目前他們亦不易取得這部分的智能。因此，本書撰寫之主要目的就在於改變目前或是未來學生以及專業從業人員所面臨的窘境。此外，當我們在雕琢本書內容時，特別注意到相關領域的學生，如政策、商業、環境科學、法律等，希望對他們的學習亦所有助益。因為，促使更多不同專業領域的學生、教授，共同體認產業科技在減少或加重環境問題的重要角色是同等重要的事。

工業生態學，一如我們在第二章所下之定義，是一種重新思考經濟與環境關係的現代思維。當此概念被應用實際產業製程時，它需要同時熟悉產業活動、環境流程、以及社會互動的專業人士，但是具有這些整合能力的人力卻是少之又少。因此，我們將本書主要設定在提供那些以工業、環境、社會為主要背景的人士，或是其他領域但對這方面有興趣的讀者。許多章節不僅陳述產業活動所衍生之環境問題，同時討論現今產業一般的處理對策。後半部則將重點落於長時間尺度以及大空間環境衝擊問題的整合探討與分析，以便於產業自發地由內或藉助外界力量加以改善。關於這個部分的討論，或許將因不同個案而有不同的策略，但是工業生態學的目標則是一致的，那就是落實環境目標。

本書區分成五個部分。第一部分係關於本書重要議題的定義與範疇界定。第二個則是討論物理環境、生態環境、以及社會環境，這些都是工業生態學所運作的場域，我們必須瞭解每個環境系統所提供的機會與先天限制。第三部分則是「為環境設計」，中心議題在於討論產品、製程、以及服務的環境設計，包含能源、物料、產品遞送與使用、最終處理等。而核心的生命週期評估技術亦在此部分詳細陳述。第四部分則是企業之工業生態學，陳述如何在企業環境下實施工業生態學。最後一個部分則是系統層級的工業生態學，討論的範疇將從設計、工廠、企業等層級擴大延伸，進而討論工業生態體系，資源分析、模式、預測，以及整個地球系統科學與技術。

撰寫之初，我們即放入許多實務面的例子，考量的是怕許多事情講來輕鬆、容易，但是付諸實行則困難重重。因為工業生態學的本質即在於整合科技與社會，而這種整合包含許多面向與意涵。工業生態學家必須樂於合作以及與社會互動，同時試圖去探索產業活動與環境互動關係的蛛絲馬跡；唯有如此，才能在理性的思考架構下，擺入目標與技術。

本書第一版出版獲得好評，我們感到非常高興。當該書在1995年出版時，工業生態學還處於萌芽階段，正在尋找定義、方法和工具。我們的嘗試可以說是因應需求的必然結果。截止目前數以千計的學生、教授採用這本書，亦有不同語言版本之翻譯問世，如：日本國家環境研究所的Sukehiro Gotoh先生翻譯日文版。此外，更有為數不少的學生、教授使用我們所撰寫的相關出版品，如：《為環境設計》（1995）、《工業生態學與汽車產業》（1998）、《物流生命週期評估》（1998）（T.E.G. only）、《工業生態學：政策藍圖與想像》（1999）（B.R.A. only），這些書都是Prentice Hall公司所出版。多年以後，已有許多工業生態學相關論著出版，且已發行專業學術期刊：《工業生態期刊》（*Journal of Industrial Ecology*），由國際工業生態學學會所籌畫。今日，工業生態學的演進與蓬勃發展將是顯而易見的。

隨著工業生態學的發展，十年前隱藏的概念終於成形，一種探

討科技與環境關係的新方法已浮現。因此，在第二版的修正中我們利用相當多的篇幅來陳述工業生態與生物學生態、指標與矩陣、服務部門、工業代謝、系統分析、和網絡技術發展等，這些都是第一版所未呈現的部分。作為一本成熟領域的教科書，上述內容的呈現可以說是集合多年來相關研究與論著的結果。但是不可諱言的，相較其他學科，工業生態學仍是個新興的學問，其內涵與分支仍舊存在發展的空間。如同本書部分内容所嘗試定義和介紹的某些新的研究領域與方向，仍有許多待討論切磋的空間。這些新的領域似乎將把工業生態學原先所關注的主要範疇—產品設計，帶向更為宏觀的思考視野，而以邁向永續發展的參數與途徑進行思量，此時工業生態學將成為更為跨學科整合的科學。

我們要感謝在第二版出版過程中給予協助的每個人。加州柏克萊大學的 Arpad Horvath、賓州州立大學的 Timothy Considine、以及 M. Bertram, R. Gordon, R. Lifset, H. Recherger, S. Spatari 等人的建議，使得本書更為完美。同時感謝 I. Horkeby (Volvo 汽車公司)、R. Tierney (Pratt & Whitney) 同意使用實際案例與相關圖表。我們也相對感激 Prentice Hall 公司工作夥伴和我們的密切互動，特別是 Marcia Horton, Laura Fischer 讓我們感覺到他們將出版一本具吸引力的書。最後，我們要感謝 AT&T 公司、the AT&T and Lucent 基金會、美國國家科學基金會、美國國家工程學會等對工業生態學相關研究之支持，他們的協助是促使工業生態學發展不可或缺的力量。

T. E. GRAEDEL
B.R.ALLENBY

作者序

多年來一直存在一個箴言，那就是環境保護與工業發展的目標無法並存。過去此句話是否為真並不是很清楚，但是毫無疑問的是，此箴言在今日已不是個事實。愈來愈多的前瞻企業與國家瞭解到以下的事實：要維持地球子民的舒適生活品質並非是大量減少工業活動、或是降低對新科技的依賴、或是減少科技與社會之互動；反而深深感受到若要促進永續社會則需讓產業與環境之互動更為密切。這些企業、公民、以及政府的覺知與承諾讓企業體採取負責任的作為後，不僅可以避免環境問題之產生，更可因他們的遠見帶來許多利益。

事實上，一個世界若要追求永續發展，產業活動之參與程度是個關鍵。科羅拉多大學的 Robert Sievers 指出政府部門常需煩心許多短程的議題，例如：達成經濟穩定、餵養日益成長的人口、建立穩定的政治環境、以及將中央集權改革為自由市場經濟等等。從可預知的未來角度來看，許多國家的措施過於狹隘。然而，卻有愈來愈多的企業體變成多國籍企業，他們具有宏遠的眼光，在相對穩定的全球經濟環境，與隨時反應不同地區文化與族群之特需需求下，力求企業之生存與興隆。私人公司不像公部門的政府，他們瞭解、選擇、發展、執行科技。因此，負責任的企業體，他們或許可以拋開不同國家領導者在永續與不永續發展的轉變，但是他們仍舊需要政府和非政府的幫忙，以建立宏觀、卓見的藍圖，因應企業所處之複雜環境。

我們可以從三種時間尺度來檢視產業與環境之互動關係。首先是「過去」，多數焦點集中於補救未妥善處理事業廢棄物所衍生之問題。而第二個時間尺度是「現在」，焦點集中於規範各項管制法

規，以避免重蹈覆轍，同時推演出更為負責任的生產行為。因此，此階段強調「工業減廢」、避免使用毒性化學物質、以及各類污染（空氣、水、土壤）之管末處理。工廠內的環保和工安人員，開始和生產線之製程人員攜手合作，在既有的程序下小幅改善與調整。然而，現在工業生產製程的設計人員與工程師在此階段卻未扮演重要角色。

第三個時間尺度是「未來」，工業產品、製程、與服務將被重新思考與設計，這將是後續幾十年所持續關心的焦點，那就是產業與環境之互動。所以，可以預期的是這群工業製程與產品設計工程師將主導未來產業與環境互動之新關係，然而縱使他們有著關懷環境的想法，但對這項具前瞻性的工作卻常感到力不從心。

這些設計者的問題在於當他們從事這項任務時，所需的知識與觀點卻是他們先前在學校課堂或研究課程中所未獲得的，而且目前他們亦不易取得這部分的智能。因此，本書撰寫之主要目的就在於改變目前或是未來學生以及專業從業人員所面臨的窘境。此外，當我們在雕琢本書內容時，特別注意到相關領域的學生，如政策、商業、環境科學、法律等，希望對他們的學習亦所有助益。因為，促使更多不同專業領域的學生、教授，共同體認產業科技在減少或加重環境問題的重要角色是同等重要的事。

工業生態學，一如我們在第二章所下之定義，是一種重新思考經濟與環境關係的現代思維。當此概念被應用實際產業製程時，它需要同時熟悉產業活動、環境流程、以及社會互動的專業人士，但是具有這些整合能力的人力卻是少之又少。因此，我們將本書主要設定在提供那些以工業、環境、社會為主要背景的人士，或是其他領域但對這方面有興趣的讀者。許多章節不僅陳述產業活動所衍生之環境問題，同時討論現今產業一般的處理對策。後半部則將重點落於長時間尺度以及大空間環境衝擊問題的整合探討與分析，以便於產業自發地由內或藉助外界力量加以改善。關於這個部分的討論，或許將因不同個案而有不同的策略，但是工業生態學的目標則是一致的，那就是落實環境目標。

本書區分成五個部分。第一部分係關於本書重要議題的定義與範疇界定。第二個則是討論物理環境、生態環境、以及社會環境，這些都是工業生態學所運作的場域，我們必須瞭解每個環境系統所提供的機會與先天限制。第三部分則是「為環境設計」，中心議題在於討論產品、製程、以及服務的環境設計，包含能源、物料、產品遞送與使用、最終處理等。而核心的生命週期評估技術亦在此部分詳細陳述。第四部分則是企業之工業生態學，陳述如何在企業環境下實施工業生態學。最後一個部分則是系統層級的工業生態學，討論的範疇將從設計、工廠、企業等層級擴大延伸，進而討論工業生態體系，資源分析、模式、預測，以及整個地球系統科學與技術。

撰寫之初，我們即放入許多實務面的例子，考量的是怕許多事情講來輕鬆、容易，但是付諸實行則困難重重。因為工業生態學的本質即在於整合科技與社會，而這種整合包含許多面向與意涵。工業生態學家必須樂於合作以及與社會互動，同時試圖去探索產業活動與環境互動關係的蛛絲馬跡；唯有如此，才能在理性的思考架構下，擺入目標與技術。

本書第一版出版獲得好評，我們感到非常高興。當該書在 1995 年出版時，工業生態學還處於萌芽階段，正在尋找定義、方法和工具。我們的嘗試可以說是因應需求的必然結果。截止目前數以千計的學生、教授採用這本書，亦有不同語言版本之翻譯問世，如：日本國家環境研究所的 Sukehiro Gotoh 先生翻譯日文版。此外，更有為數不少的學生、教授使用我們所撰寫的相關出版品，如：《為環境設計》（1995）、《工業生態學與汽車產業》（1998）、《物流生命週期評估》（1998）（T.E.G. only）、《工業生態學：政策藍圖與想像》（1999）（B.R.A. only），這些書都是 Prentice Hall 公司所出版。多年以後，已有許多工業生態學相關論著出版，且已發行專業學術期刊：《工業生態期刊》（*Journal of Industrial Ecology*），由國際工業生態學學會所籌畫。今日，工業生態學的演進與蓬勃發展將是顯而易見的。

隨著工業生態學的發展，十年前隱藏的概念終於成形，一種探

討科技與環境關係的新方法已浮現。因此，在第二版的修正中我們利用相當多的篇幅來陳述工業生態與生物學生態、指標與矩陣、服務部門、工業代謝、系統分析、和網絡技術發展等，這些都是第一版所未呈現的部分。作為一本成熟領域的教科書，上述內容的呈現可以說是集合多年來相關研究與論著的結果。但是不可諱言的，相較其他學科，工業生態學仍是個新興的學問，其內涵與分支仍舊存在發展的空間。如同本書部分內容所嘗試定義和介紹的某些新的研究領域與方向，仍有許多待討論切磋的空間。這些新的領域似乎將把工業生態學原先所關注的主要範疇—產品設計，帶向更為宏觀的思考視野，而以邁向永續發展的參數與途徑進行思量，此時工業生態學將成為更為跨學科整合的科學。

我們要感謝在第二版出版過程中給予協助的每個人。加州柏克萊大學的 Arpad Horvath、賓州州立大學的 Timothy Considine、以及 M. Bertram, R. Gordon, R. Lifset, H. Recherger, S. Spatari 等人的建議，使得本書更為完美。同時感謝 I. Horkeby (Volvo 汽車公司)、R. Tierney (Pratt & Whitney) 同意使用實際案例與相關圖表。我們也相對感激 Prentice Hall 公司工作夥伴和我們的密切互動，特別是 Marcia Horton, Laura Fischer 讓我們感覺到他們將出版一本具吸引力的書。最後，我們要感謝 AT&T 公司、the AT&T and Lucent 基金會、美國國家科學基金會、美國國家工程學會等對工業生態學相關研究之支持，他們的協助是促使工業生態學發展不可或缺的力量。

T. E. GRAEDEL
B.R.ALLENBY



於序
張序
沈序
譯者序
作者序

PART 1 領域介紹

Chapter 1	人文與環境	3
	1.1 共同體的悲劇	3
	1.2 主要方程式	7
	1.3 主要目標	10
	1.4 闡明挑戰	18
	後續建議閱讀之相關文獻	19
	習題	20
Chapter 2	工業生態概念	23
	2.1 從當代思維到前衛思想	23
	2.2 連結工業活動、環境與社會科學	26
	2.3 工業生態學的關鍵問題	28
	2.4 本書內容介紹	28
	後續建議閱讀之相關文獻	31
	習題	31
Chapter 3	科技的變化與風險發展	33
	3.1 科技進化的歷史型態	33