

新生物經濟時代的原創思維— 仿生 (Biomimicry) 設計 思考與研發方法學介紹

撰文/江佳純

2017年財富雜誌 (Fortune) 將「仿效自然」列為應用起飛的五大科技趨勢之一；世界經濟論壇 2018 年所發佈之「運用第四次工業革命 - 陸域生態」報告中，提出朝向「包容性生物經濟」的世界，其經濟價值的來源以及未來的營收之一預期可從「生物仿生的資產 (biomimetic asset)」而來。生物歷經地球各式極端條件的考驗至今已 38 億年，這些適存機制成為仿生科技以及發展原創式創新重要的靈感來源與科學基礎，如何進行仿生設計也逐步發展出系統方法學。

1997 年，美國生物學家、自然科學作家珍妮·班亞斯 (Janine Benyus) 出版了 *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature* (中文譯名：人類的出路—探尋生物模擬的奧妙)，當時受到設計師、工程師、企業主等的積極詢問。珍妮·班亞斯從自然資源管理的學術背景思考，藉由彙整受自然啟發的相關科研、科技或社會創新案例進行歸納，將此領域命名為「Biomimicry」(源自希臘文中 bios 指生命、mimesis 指模仿)，中文翻譯為「仿生」，隨後創辦仿生協會與仿生 3.8 顧問公司，並於全球倡議具系統性、永續發展性的仿生設計與創新應用，將單點式提升效率或減少毒害與資源浪費的科技再推進一步。「師法自然」並非新鮮事，直自今日人類仍取經於自然，只是目的與方法各有千秋。西方文藝復興

時代，達文西藉由觀察與解剖，嘗試理解生物與其結構，進而創作飛行器；20 世紀 1950 年代美國生物物理暨工程學家 Otto Schmitt 提出 Biomimetics 概念，以學習生物的結構或自然系統解決工程問題；1960 年代至 1970 年代初，美國設計師與教育家維克多·巴巴納克 (Victor Papanek) 所著《為真實世界設計：人類生態與社會變遷 (Design For The Real World: Human Ecology And Social Change)》，提到設計師應肩負起對生態環境與社會真正需求的責任，一本尚未過時、而且可以預見永遠不會過時的手冊，是大自然的手冊；1970 年代興起的綠色設計 (Green Design) 以 3R(Reduce, Reuse, Recycle) 為主軸，希望從產品設計的方式開始改變，直至「為環境而設計 (Design for Environment)」、「從搖籃到搖籃 (Cradle to Cradle)」、「藍色經濟 (The Blue Economy)」、近年的「循環經濟 (Circular Economy)」等，國際間不乏蘊含向自然學習、追求永續目標的概念，「如何向自然學習」各家則有不同層次的發展。本文將以珍妮·班亞斯所創辦的組織所發展之仿生設計思考進行介紹。

珍妮·班亞斯在書中以三個定義解釋仿生學，分別是：

1. Nature as model (以自然為學習模範)

這門科學以研究自然的設計與過程，接續進行

仿效或從中汲取靈感來解決人類的問題，例如受樹葉行光合作用而啟發的太陽能電池。

2. Nature as measure (以自然為衡量標準)

仿生設計使用生態標準來評斷創新的適當性。歷經 38 億年的演化，大自然已習得哪些設計行得通、合宜也能長久。

3. Nature as mentor (以自然為導師)

仿生是人類重新看待與衡量自然價值的新途，引導一個立基於學習自然、而非榨取自然的新世代。

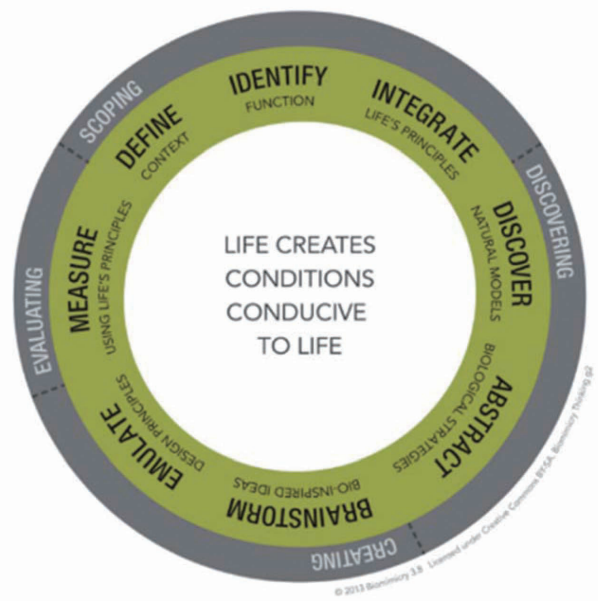
此三個定義涵蓋科研與科技應用、因應環境責任而發展之衡量標準、以及討論人與大自然的關係，後續也成為仿生學三要素，仿效 (emulate)、價值理念 (ethos)、重新連結自然 (re-connect) 的論述源頭。仿生學在美國陸續受到各界詢問如何運用進行科技或社會的創新，系統性的仿生設計思考 (Biomimicry Thinking) 架構逐步發展而成。以往師法自然的成果可能是「意外發現」或剛好工程學家、材料學家、社會學家等對自然生物產生興趣進一步結合運用，尚未有系統性的方法可依循。珍妮與組織共同創辦人黛娜·鮑麥斯特 (Dayna Baumeister) 透過顧問經驗與跨界合作，20 年來這套仿生設計思考架構不但成為亞歷桑納州立大學仿生碩士學程的重點課程，也已協助美國財富 500 大企業、新創公司、學研機構、非營利組織進行於產品開發、製程改良、甚至解決組織運作或社會問題的跨域創新方法學。

仿生設計思考 (Biomimicry Thinking)

仿生設計思考由美國仿生協會與仿生 3.8 公司結合跨域團隊 (生物學家、物理學家、化學家、工程師、設計師、企業代表等) 用模型輔以實際經驗施作後，進行多版調整而成 (Baumeister 2014)。演繹仿生的層次包含從生物的形態 (Form)、形成作用的過程 (Process) 以及生態系統 (System)，強調功能 (Function) 以及系統性思考 (System Thinking) 的結合，如此的結合需以科學為基礎 (science-based)、忠於轉譯生物的策略進行創造並以「生命運行的準

則 (Life's Principles)」衡量、堅守永續的價值。設計思考整體架構以「生命創造有利於生命存續的環境 (Life Creates Conditions Conducive to Life)」為中心思想，強調非單純追求效率與效能，設計與研發應由宏觀角度思考長期的影響。由於真實世界設計的過程並非線性式流程，因此仿生設計思考以圓形架構呈現開放性 (如圖一)，灰色外圈顯示一般設計階段、綠色內圈則為仿生設計思考，由此內外對照方便運用。主要分為四大面向：「界定標的範圍 (Scoping)」、「發掘生物策略 (Discovering)」、「創作仿生設計 (Creating)」、「評估永續創新 (Evaluation)」，每一面向又細分仿生思維執行重點，系統性地落實各執行重點，有助於將生物策略成功整合進人類的設計中 (如表一)。由於其開放性，團隊可依不同的需求與研發階段，選擇由哪一項目切入。

仿生設計思考四大面向的每個步驟中，還有細分引導方式進行，而應從哪一項目進入，則靈活搭配團隊的研發進程。此外，針對設計與研發路



資料來源：Biomimicry 3.8。

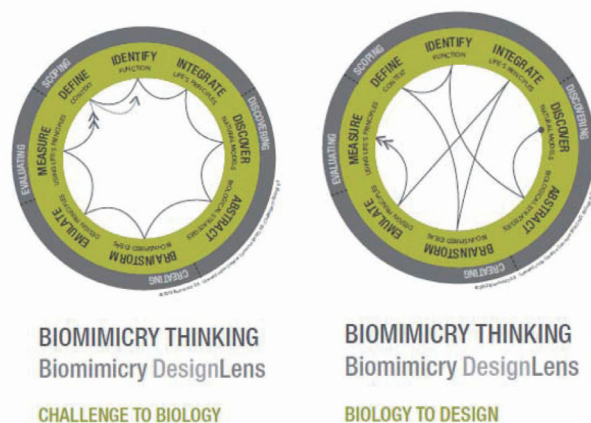
圖一 仿生設計思考架構 Biomimicry Thinking

表一 仿生設計思考觀點與執行步驟

面向	思考與步驟	融入生物學觀點	執行重點
界定標的範圍(Scoping)	<ul style="list-style-type: none"> · 確認真正目的 · 釐清事件來龍去脈 · 定義欲解決問題的範圍 · 找出所需功能與侷限 · 以符合「生命運行的準則」為理想目標 	<ul style="list-style-type: none"> · 生物的適存策略，建立於該生物的功能在其生活環境中，能成就與維持生存。 	<ul style="list-style-type: none"> · 改變傳統觀念模式，從適存觀點定義問題範圍 · 強化願景的描繪 · 深化對事件背景的理解、協助辨識關鍵問題 · 擴大潛在解決方案的產出 · 以生命永續的方式達到功能目的
發掘生物策略(Discovering)	<ul style="list-style-type: none"> · 將人類挑戰轉成生物問題 · 以不同的觀察角度與條件設定挖掘生物策略 · 發掘自然的模式（形態、形成作用的過程、生態系統） · 摘要並精粹設計原則 	<ul style="list-style-type: none"> · 生物個體、作用過程與生態系統所呈現的策略與機制，若非從冠軍物種而來，便是幾乎放諸四海皆準的普遍模式或定律。 	<ul style="list-style-type: none"> · 藉由發掘生物策略，探索出具效益、對生命友善、嶄新的靈感來源 · 策略通過38億年地球環境測試的考驗
創作仿生設計(Creating)	<ul style="list-style-type: none"> · 腦力激盪受生物啟發的創意 · 仿效並運用從生物策略所精粹的設計原則 · 將「生命運行的準則」也做為靈感來源、設計原則 	<ul style="list-style-type: none"> · 「生命運行的準則」是從地球生物精粹出的設計原則。 	<ul style="list-style-type: none"> · 以優雅、對生命友善的設計靈感，啟發嶄新與永續的設計 · 化繁為簡、以創新解決複雜問題
評估永續創新(Evaluation)	<ul style="list-style-type: none"> · 心懷自然與生命價值進行設計 · 進行永續性的測試 · 檢視是否遺漏了條件限制與可能的機會 	<ul style="list-style-type: none"> · 「生命運行的準則」 · 演化策略以利生存 · 面對變化隨時調適 · 通達在地且能適地回應 · 發展結合成長 · 運用資源(材料、能源)有效率 · 使用對生命友善的化學 	<ul style="list-style-type: none"> · 找出忽略的條件限制與可能的機會 · 提早測試成功機率 · 以更宏觀且全面的成功定義檢視方案

資料來源：Baumeister D. (2014), Biomimicry Resource Handbook: A Seed Bank of Best Practice；台灣仿生科技發展協會整理製表（2018）。

徑，仿生設計思考也可分為「任務導向 (Challenge to Biology)」型與「創意導向 (Biology to Design)」型。當團隊已有任務或待解決的挑戰，「任務導向 (Challenge to Biology)」型的路徑將協助團隊有系統性地創造或優化設計，適合目標明確、已固定使用設計流程，或持續性的改良、進行迭代設計 (Iterative Design) 的專案項目。「創意導向 (Biology to Design)」型是仿生設計思考獨特的研發路徑，特別是專案起始點源自某項特殊或引發創作團隊感興趣的生物策略 (圖二)。會採用此路徑的團隊，以發明家、新創家、沒有固定使用設計流程的團隊，甚至學生居多，這個獨特的思考類型雖然沒有固定路



資料來源：Biomimicry 3.8。

圖二 仿生設計思考路徑 Biomimicry Thinking Path

徑，但能在團隊尚無特定生物策略進行設計前，有系統的「發掘」特別的生物策略；或者如果團隊已有生物策略，則能協助收斂創意發想、進而產出作品原型。

生命運行的準則 (Life's Principles)

仿生設計思考著重「生命創造有利於生命存續的環境 (Life Creates Conditions Conducive to Life)」的中心思想，如何衡量創新是否符合永續性也有一套方法。珍妮·班亞斯與組織共同創辦人黛娜·鮑麥斯特邀集生物與生態學家群，參考多部探討地球運行與生物居住其中共通的生存模式，例如 Hoagland, Dodson and Judith, Exploring the Way Life Works: The Science of Biology (2001) 發展出「生命運行的準則 (Life's Principles)」。

由於人類對地球上的生物所知仍有極限，因此這套準則在現今的科學發現基礎下，盡量涵蓋生物在地球環境與條件中歷經 38 億年演化的適存特性、歸納出共通的運行原則，協助

團隊以質化分析的方式，檢驗創作概念或者產品原型與系統是否符合「永續生命」的標準。

生命運行的準則的中心思想維持「生命創造有利於生命存續的環境」。灰色外圈代表著所歸納的生命運行準則，僅適用於地球環境的條件下，目前無法超出這些元素與限制(圖三)。準則分為六大項：「演化策略以利生存 Evolve To Survive」、「面對變化隨時調適 Adapt To Changing Conditions」、「通達在地且能適地回應 Be Locally Attuned And Responsive」、「發展結合成長 Integrate Development With Growth」、「運用資源(材料、能源)有效率 Be Resource Efficient (Material and Energy)」、「使用對生命友善的化學 Use Life-Friendly Chemistry」。每一大項中還細分更深入的闡釋，提供使用者更全面、更精確的定義進行方案的檢視(表二)。

「生命運行的準則」除了作為產品與科技解決方案的設計原則、衡量標準之外，近年來也應用於社



資料來源：Biomimicry 3.8。

圖三 生命運行的準則Life's Principles

表二 生命運行的準則 (Life's Principles)

主項目	演化策略以利生存 Evolve To Survive	面對變化隨時調適 Adapt To Changing Conditions	通達在地且能適地回應 Be Locally Attuned And Responsive
定義說明	藉由持續的收錄與整併資訊，確保效能的持久	適切地回應處於動態的環境背景與情境	融入並結合周圍環境運作
生物案例	微生物的世代交替與演化速度非常快。盤尼西林剛發明時，可以殺死革蘭氏陽性菌這類的細菌，然而隨著不同抗生素的廣泛使用，細菌也不斷的突變，將有利於生存的基因傳至下一代，演化出各式抗藥性的變種。	北極兔的毛色在春、夏、秋季(尤其是沒有下雪的夏季)，毛色大部分呈現灰或褐色。隨著白雪開始覆蓋大地，冬季的北極兔毛色轉為白色，甚至在雪分布較為散落時，毛色也會有些褐色點與環境相容，達到保護效果。	納米比沙漠並無積水。當地甲蟲適應了唯一的水份來源，晨霧。甲蟲會在清晨爬上沙丘等待晨霧濕度最高的時刻，抬高身體讓翅膀暴露於霧中，累積濕氣收集成水滴，再運用背上親疏水交錯的表層結構移動水滴到口中飲入。
人類設計案例	遺傳演算法是一種計算模式，用於解決組合最佳化問題。以字串或數字串類比染色體、個體等，透過選擇、繁殖、突變等條件進行一代一代的運算，得到最佳化的排序、預測、分析。	方塊地毯因為模組化的設計，能隨著空間大小、顏色與形式的需求變化，來達到最佳資源運用與設計條件。在地毯有損壞時，可藉由部份更替完成修復，無需全數換掉。	因應作物微環境的變化(包含濕度、溫度、土壤PH值等，甚至是作物的生理反應)，現代農業智慧灌溉科技，藉由感測、收集隨時變化的數據，進行水分、養液或光照的動態調整，以利環境與作物生長。
子項目	<ul style="list-style-type: none"> 複製成功的策略 整合"意外"事件 交換並重置資訊 	<ul style="list-style-type: none"> 納入多樣性 透過自我更新來維持完整性 藉由變動、冗餘以及去中心化來體現回復力 	<ul style="list-style-type: none"> 善用具周期性的程序 運用隨手可得的材料與能源 使用回饋機制 培養合作關係
主項目	發展結合成長 Integrate Development With Growth	運用資源(材料、能源)有效率 Be Resource Efficient (Material and Energy)	使用對生命友善的化學 Use Life-Friendly Chemistry」
定義說明	最佳化投注於能同時促進發展與成長的策略	巧妙地與謹慎地善用資源與機會	使用能協助進行生命過程的化學
生物案例	嬰兒在母體內的生長與發育是透過細胞分化至器官、左右對稱、骨骼、組織等等進行架構，伴隨尺寸擴大，再分化、特化細胞功能，尺寸再擴大，由兩個機制交替而成。	飛行的鳥類擁有中空的骨骼，藉由去除不必要的組織，僅於需強化之處增生骨骼，獲得高效的結構並維持飛行的功能。相形之下，陸地生活、無法飛行的鳥類(例如鸕鳥)，其骨骼較為紮實。	貽貝生長在潮間帶，會分泌被稱為足絲的絲狀蛋白質，內含的化學分子與其生活環境的化學分子作用，能產生附著的功能，穩固的附著於岩石上，對環境也無害。
人類設計案例	Bootstrapping的創業模式，是指財務上自力更生、不仰賴外部資源運作的模式。因為資源十分有限、沒有餘裕，一有盈餘需快速地最佳化利用，公司的發展架構與成長規模便息息相關。	資源的循環利用，讓A工廠的廢棄物，成為B工廠可再利用的資源。或是汗水回收系統，將使用過的水進行分類處理再利用。	市面上的環保洗滌劑、綠色建材、環保膠等，皆是範例。
子項目	<ul style="list-style-type: none"> 自我組織 由下而上建構 整併模組化與巢狀元件 	<ul style="list-style-type: none"> 使用低能耗的程序 運用多功能的設計 回收所有材料 形狀設計符合功能需求 	<ul style="list-style-type: none"> 產品分解為良性成分 慎選、僅用小部份化學元素來組合 以水為溶劑

資料來源：Baumeister D. (2014), Biomimicry Resource Handbook: A Seed Bank of Best Practice；美國亞歷桑納州立大學仿生碩士課程教材，台灣仿生科技發展協會整理製表(2018)。

會創新、組織改造、變革管理領域，協助個人、創業家、企業管理階層進行領導力提升，進化營運策略的擬定。

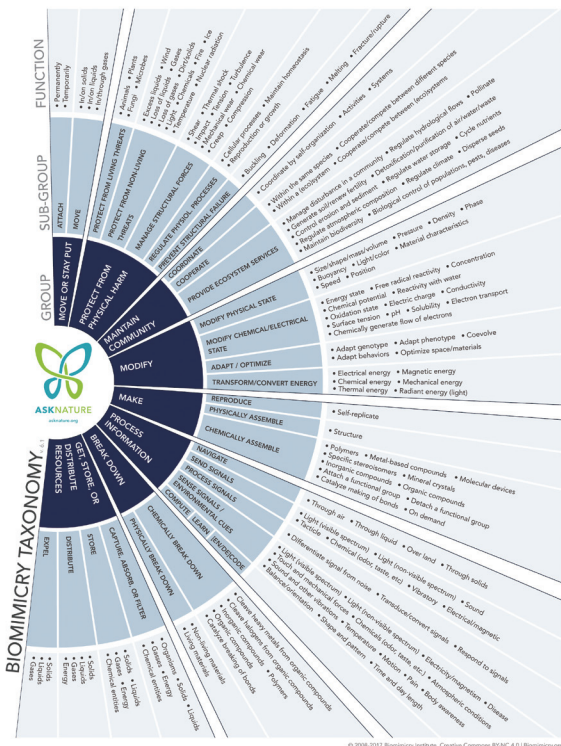
除了思考架構、用以衡量永續創新的「生命運行的準則」，生物策略的搜尋為仿生設計中至為關鍵的環節，為減少跨領域溝通的障礙，美國仿生協會與仿生 3.8 公司合作，將生物策略轉譯成人類設計語言，發展出生物策略功能分類表 (Biomimicry Taxonomy) (圖四)，並建置以「功能」分類、收錄超過 1,500 個生物策略的 AskNature 線上知識庫，可作為仿生設計者獲取靈感的資源平臺之一。目前生物策略功能分類表則包含約 160 個生物功能，分屬八大類群，及 30 個子類群。

英國仿生學研究學者朱里安·文生 (Julian Vincent) 博士曾經在 2009 年發表的文章中提到，生物界面對問題的對應之道與人類科技的方法，僅有 12% 的相似度 (Vincent *et al.* 2006)，生物界運用與人類不同的策略在解決問題，這項研究也反映出運用生物策略的仿生設計，擁有突破人類既有的思考框架，開發出嶄新技術的潛力。美國費爾馬尼安商業與經濟研究所 (Fermanian Business & Economic Institute, FB EI) 預估，2030 年仿生相關產業將為全球創下 1.6 兆美元的國內生產毛額 (GDP)；2017 年財富雜誌將「仿效自然」列為應用起飛的五大科技趨勢之一；世界經濟論壇 2018 年所發佈之「運用第四次工業革命 - 陸域生態」報告中，提出朝向「包容性生物經濟」的世界，其經濟價值的來源以及未來的營收之一預期可從「生物仿生的資產」而來。為了因應產業需求，歐美先進國家也於大學設立專業學門，諸如哈佛大學、喬治亞理工學院皆設有仿生中心。此外，有別於附屬於既有學科下的課程，美國阿克朗大學 (University of Akron) 設立仿生學博士課程、建立與鄰近企業的產學合作研究；美國亞歷桑納州立大學 (Arizona State University) 與仿生 3.8 仿生顧問公司合作開設全球第一個仿生學碩士課程；荷蘭的烏特勒支大學 (Utrecht University) 也開設「受自然啟發的科技」碩士班課程。

仿生設計思考歷經 20 年已發展為系統方法學，在新生物經濟的時代，各式演算法、製造方法、AI 技術的突破，有助於將生命科學與人類工程作有效且友善的結合，為人類解決如氣候變遷的挑戰。仿生科技正要起飛，全球相關產業發展尚未完全成熟，但以科技呈指數型突破的速度，臺灣或應趁此時加速導入仿生設計思考，搭配國家實力，與世界同步進入新的生物經濟時代。

AgBio

江佳純 台灣仿生科技發展協會 秘書長



資料來源：Biomimicry Institute。

圖四 生物策略功能分類 Biomimicry Taxonomy

參考文獻

1. Benyus J.M. 1997, *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature*, USA: William Morrow
2. Baumeister D. 2014, *Biomimicry Resource Handbook: A Seed Bank of Best Practices*, USA: Biomimicry 3.8
3. Papanek V. 1972, *Design for the real world*, USA: Bantam Books, Retrieved Nov. 20, 2018, From: https://monoskop.org/images/f/f8/Papanek_Victor_Design_for_the_Real_World.pdf
4. Vincent J. F.V, Bogatyreva O. A, Bogatyrev N. R, Bowyer,A., Pahl A.K., 2006, *Biomimetics: its practice and theory*, J R Soc Interface. 3(9): 471–482.
5. Fermanian Business & Economic Institute (Nov. 2013), *BIOINSPIRATION: An Economic Progress Report*, Retrieved June, 2014, From http://www.magnefico.com/fileadmin/user_upload/Dokumente/PLNU_Bioinspiration_Da_Vinci_Index_A_Progress_Report_November_2013_Final.pdf .
6. Harnish V. (March 17, 2017) *5 Trends to Ride in 2017*, Fortune.com, Retrieved Sep. 1, 2018, From <http://fortune.com/2017/03/17/trends-business-career-benefits/>.
7. WEF(2018), *Harnessing 4IR Life on Land*, Retrieved Mar. 11, 2018, From http://www3.weforum.org/docs/WEF_Harnessing_4IR_Life_on_Land.pdf, .