

## 第二章：LCA 原則與方法論框架 (ISO 14040)



生命週期評估作為一套系統性的環境管理工具，其有效性與可信度高度依賴於一套嚴謹且一致的方法論框架。國際標準化組織所制定的 ISO 14040 系列標準，正是為此目的而建立，為全球的 LCA 實踐者提供了共同遵循的原則與程序。此框架不僅確保了不同研究之間具備一定程度的可比性，更重要的是，它透過標準化的步驟與指導原則，引導研究人員進行科學、透明且完整的評估，避免因方法歧異而導致結論偏頗或誤導。從永續發展的宏觀視角轉入具體的評估方法，本章將深入剖析 ISO 14040 所確立的 LCA 核心原則與方法論骨架，為後續各階段的詳細操作奠定堅實的理論基礎。

ISO 14040 標準首先確立了生命週期評估的幾個核心指導原則，這些原則是貫穿整個 LCA 過程的基石。首要原則是「環境焦點」，強調 LCA 專注於評估與產品系統相關的環境議題和潛在環境影響，而非經濟或社會面向。其次是「迭代方法」，意指 LCA 的四個階段並非線性進行，而是一個反覆優化的過程；研究人員可能在後續階段發現前期定義的不足，從而返回修正目標、範疇或數據，使研究逐步趨於完善。「透明度」原則要求所有假設、數據來源、計算方法與價值選擇都必須被充分揭露，以利於審查與重現。最後，「科學優先」原則強調在方法選擇與數據處理上，應優先基於自然科學與工程學的依據，確保評估的客觀性與科學嚴謹性。這些原則共同構成了 LCA 研究的品質保證，確保其結果能作為可靠的決策支援資訊。

在方法論的具體構建上，ISO 標準引入了「產品系統」與「功能單位」這兩個關鍵概念。產品系統是一組在物質與能量上相互關聯的單元過程集合，其目的是實

現一個或多個特定的功能。為了公平地比較不同系統，必須定義一個共同的基準，即「功能單位」。功能單位量化了產品系統所提供的服務性能，例如「提供 1000 小時照明」或「包裝與運輸 1 公升飲料」。所有後續的數據蒐集、計算與分析都將以此功能單位為基準進行縮放與彙總，從而確保比較是在同等服務水平的基礎上進行。建立清晰的產品系統模型，並明確定義其功能單位，是後續設定系統邊界、蒐集盤查數據的先決條件，也是整個 LCA 研究邏輯一致性的起點。

儘管 ISO 標準提供了統一的框架，但 LCA 並非一套僵化不變的固定程序，其方法論具有相當的「靈活性」。這種靈活性體現在研究人員可以根據具體的研究目標、受眾、資源與時間限制，在標準允許的範圍內做出合理的選擇。例如，在設定系統邊界時，可以選擇從搖籃到大門、搖籃到墳墓或搖籃到搖籃等不同範疇；在處理副產品時，可依據物理關係、經濟價值或其他基礎進行負擔分配；在衝擊評估階段，亦可選用不同的影響類別與評估方法。這種靈活性使得 LCA 能夠應用於從產品生態設計、策略規劃到政策制定等各種不同情境。然而，靈活性必須與透明度相結合，任何偏離標準常規方法的選擇都必須在研究報告中明確說明其理由，以維持研究的可信度與可解釋性。

## 2.1 LCA 的四個階段：目標與範疇定義、盤查分析 (LCI)、衝擊評估 (LCIA) 及解釋。

生命週期評估作為一套系統性的分析工具，其嚴謹性與可信度奠基於一套結構化的執行框架。國際標準化組織所頒布的 ISO 14040 系列標準，即為此框架提供了國際公認的規範。該標準將生命週期評估的執行過程明確劃分為四個相互關聯且具備迭代特性的階段，分別是目標與範疇定義、生命週期盤查分析、生命週期衝擊評估，以及生命週期解釋。這四個階段構成了 LCA 研究的骨幹，確保評估過程從起始的規劃到最終的結論闡釋，皆能遵循一致且透明的邏輯路徑，從而產出可供決策參考的可靠結果。

第一階段「目標與範疇定義」是整個 LCA 研究的基石，它決定了後續所有分析的方向與邊界。在此階段，研究人員必須清晰闡明研究的目的、預期的應用方式、目標受眾以及研究結果可能溝通的對象。同時，需定義研究的核心——「功能單位」，這是一個量化並標準化系統性能的基準，確保不同產品或系統之間的比較具備公平性。此外，系統邊界的劃定至關重要，它明確指出哪些單元過程應被納入研究範圍，哪些可以合理排除，並訂定數據截斷的準則。此階段亦需說明數據品質要求、假設與限制條件，以及後續將採用的影響評估方法學選擇。一個定義完善的目標與範疇，能夠有效引導數據蒐集與分析工作，避免研究範圍無限制地擴張或遺漏關鍵環境負荷，是後續階段得以順利進行的前提。

緊接而來的第二階段是「生命週期盤查分析」。此階段的核心任務在於根據已定義的範疇，進行全面性的數據蒐集與量化計算，最終產出一份詳盡的輸入與輸出

清單。盤查分析如同為產品系統建立一份環境收支帳本，需針對系統邊界內的每一個單元過程，蒐集其從自然環境中攝取的資源（如原材料、能源、水）以及向環境排放的物質（如大氣污染物、水污染物、廢棄物）。數據來源可能包括實地量測、工廠生產記錄、文獻資料或商業生命週期盤查資料庫。在數據蒐集完成後，需依據功能單位將所有單元過程的數據進行縮放與匯總，計算出整個產品系統在其生命週期內，總共消耗了多少資源，排放了多少污染物。此階段的工作成果是一系列未經加權的物理量清單，例如多少公斤的二氧化碳、多少立方公尺的水消耗，其本身並未直接詮釋這些數據的環境意義，而是為下一階段的衝擊評估提供堅實的數據基礎。

第三階段「生命週期衝擊評估」旨在將盤查階段所得到的龐雜清單數據，轉化為易於理解且與環境問題直接相關的資訊。此階段透過科學模型，將不同的盤查項目歸類到特定的環境影響類別中，並量化其對該類別的潛在貢獻。首先，在分類步驟中，各項盤查排放物或資源消耗會被指派到一個或多個影響類別，例如二氧化碳、甲烷等溫室氣體會被歸類於「氣候變遷」類別。接著，在特徵化步驟中，會利用特徵化因子將同一類別中的不同物質轉換為共同的等效單位，例如將各種溫室氣體轉換為二氧化碳當量，從而計算出該系統對全球暖化的潛在貢獻總值。除了此類「中點」水平的評估（直接針對環境機制），部分方法學還進一步將中點指標匯總至「終點」水平，以評估對人類健康、生態系統品質及資源稀缺性等保護領域的潛在損害。LCIA 階段使得決策者能夠超越繁雜的數據列表，直觀地辨識出產品系統最主要的環境熱點所在。

最後的第四階段「生命週期解釋」是對前述所有分析結果進行綜合性檢視、評估與闡述的過程。此階段並非簡單地重述結果，而是需要根據最初設定的目標與範疇，對盤查與衝擊評估的結果進行批判性分析。解釋階段主要包括三個關鍵活動：首先，基於敏感性分析或貢獻度分析等方法，識別出對整體結果影響最顯著的議題、過程或假設；其次，進行完整性、敏感性及一致性檢查，評估研究的數據品質、方法選擇是否與研究目的一致，以及關鍵假設的變動會如何影響結論的穩健性；最終，得出結論、說明研究的限制，並提出基於研究發現的合理建議。解釋階段是連接科學分析與管理決策的橋樑，它確保研究結論是建立在對不確定性與限制有充分認知的基礎上，從而為生態設計、策略規劃或市場溝通等後續行動提供清晰、可靠且具備實用價值的洞察。這四個階段構成了一個迭代循環，在解釋階段若發現新的見解或不足，可能需要回過頭去調整範疇或補充數據，使研究臻於完善。

## 2.2 指導原則：包含環境焦點、迭代方法、透明度與科學優先。

生命週期評估作為一套系統性的分析工具，其有效性與可信度高度依賴於執行過程中所遵循的核心指導原則。這些原則不僅確保評估結果的科學嚴謹性，也保障了不同研究之間的可比較性，並為後續的決策提供堅實的基礎。國際標準化組織在 ISO 14040 系列標準中明確規範了這些指導原則，其中環境焦點、迭代方法、透明

度以及科學優先性構成了方法論的基石。這些原則並非孤立存在，而是相互關聯、共同作用，貫穿於 LCA 的四個階段，從目標與範疇定義開始，直至最終的解釋與報告。

環境焦點是生命週期評估最根本的指導原則，它明確界定了 LCA 的研究範疇與核心關切。此原則要求評估必須專注於產品系統與環境之間的相互作用，即系統從環境中擷取的資源投入，以及系統向環境排放的各種物質與能量。這意味著 LCA 主要考量的是生態環境的壓力與衝擊，例如資源消耗、氣候變遷、水體優養化、酸化等環境議題，而非社會經濟或成本效益等面向。儘管在永續發展的完整圖景中，社會與經濟維度同樣重要，但標準化的 LCA 方法論將其核心鎖定在環境維度，以提供一個清晰且可量化的環境績效剖面。這種聚焦確保了研究不會因納入過多複雜因素而失焦，同時也為後續可能進行的社會生命週期評估或生命週期成本分析提供了明確的環境基礎數據。在實踐中，環境焦點原則直接影響了目標與範疇的定義，決定了哪些輸入與輸出流需要被納入盤查，以及後續衝擊評估所選擇的環境影響類別。

迭代方法是生命週期評估過程中不可或缺的動態原則，它承認 LCA 研究並非線性、一步到位的過程，而是一個需要反覆檢視與修正的循環。在研究的初始階段，許多假設、數據可得性與方法選擇都存在不確定性。隨著研究的推進，在盤查分析或衝擊評估階段可能會發現新的資訊，這些資訊可能迫使研究者回頭重新審視並調整最初設定的目標、系統邊界或數據質量要求。例如，在進行敏感性分析時，若發現某個先前被認為不重要的單元過程實際上對整體結果影響顯著，則可能需要迭代回去，蒐集該過程更精確的數據。這種迭代特性確保了最終的結論是建立在逐步完善的基礎之上，提高了研究的穩健性與可靠性。迭代方法也體現在 LCA 的四階段框架本身，從範疇定義到盤查，再到衝擊評估與解釋，解釋階段的發現常常會導向對前續階段的重新審視，形成一個持續改進的循環，直至結果滿足最初設定的目標與質量要求。

透明度原則是確保生命週期評估研究可信、可重現且可被關鍵審查的關鍵。它要求研究過程中的所有假設、方法選擇、數據來源、計算過程以及價值判斷都必須被清晰、完整且無歧義地記錄與揭露。由於 LCA 涉及大量數據處理與模型化選擇，不同的假設可能導致截然不同的結論，因此透明度是避免「選擇性呈現」或「綠色漂洗」的防火牆。具體而言，透明度涵蓋了多個層面：在目標與範疇定義階段，必須明確說明研究目的、目標讀者、功能單位、系統邊界及其截斷準則；在盤查階段，需詳細記錄數據來源（包括前景數據的測量方法與背景數據庫的版本）、數據代表性、以及對缺失數據的處理方式；在衝擊評估階段，必須揭露所選用的影響類別、特徵化模型、歸一化基準與權重方法及其理由；在解釋階段，則需完整呈現敏感性分析與不確定性分析的過程與結果。一份透明的 LCA 報告應使獨立的審查者能夠理解研究的每一步推導，並在必要時能夠重現其主要結果。缺乏透明度的研究，其結論無論看似多麼有利，都將缺乏科學說服力與決策參考價值。

科學優先原則強調生命週期評估應以自然科學和工程學的知識與方法為基礎，確保所使用的方法和數據在技術上合理，並與國際公認的科學共識保持一致。這意味著在方法選擇與數據處理上，應優先採用經過科學驗證、在學術與專業領域內獲得廣泛接受的方法。例如，在盤查分析中，對於多功能過程的分配問題，應優先考慮基於物理因果關係的分配方式（如質量、能量或化學計量關係），若不可行，才考慮其他經濟性或社會性的分配依據。在衝擊評估中，所採用的特徵化模型（如計算全球暖化潛勢的模型）應反映當前氣候科學的最新認知。科學優先原則也要求研究人員對數據的質量有清晰的認識，並在報告中誠實地討論研究的不確定性與局限性。它並非排斥價值判斷，而是將價值判斷（如權重階段對不同環境議題的重要性排序）與科學事實（如特徵化因子）明確區分開來，並要求價值判斷的應用也必須透明化。此原則確保了 LCA 作為一個環境管理工具，其核心是客觀的科學分析，而非主觀的臆測或行銷話術，從而維護了其作為決策支持工具的公正性與權威性。

綜上所述，環境焦點、迭代方法、透明度與科學優先這四項指導原則共同構成了生命週期評估方法論的靈魂。它們相互支撐，環境焦點確定了研究的邊界，迭代方法提供了動態優化的路徑，透明度建立了信任的機制，而科學優先則保障了分析的根基。在實際操作中，這些原則需要被內化於研究者的思維中，並外化於每一個研究步驟的執行與文件記錄中。唯有嚴格遵循這些原則，所完成的 LCA 研究才能夠產出具有意義、可靠且可比較的結果，從而真正服務於產品生態設計、政策制定或企業環境策略等多元目的，為推動系統性的環境改善與永續發展提供實質的貢獻。這些原則也為接下來探討如何具體建立產品系統模型及其功能單位的概念，奠定了必要的理論與規範基礎。

## 2.3 產品系統與功能概念：如何建立產品系統模型及其功能。

在生命週期評估的框架中，產品系統與功能概念是構建模擬現實世界物料與能量流動的基石。產品系統是一個由單元過程相互連結而成的網絡，旨在描述產品、過程或服務從資源開採到最終處置的完整生命週期。這個系統的邊界是人為定義的，它將與環境交換的基本流納入考量，同時也界定了哪些相關過程應被包含在評估範圍內。建立產品系統模型的首要步驟，是將複雜的實體生產或服務提供活動，分解為一系列可量化的單元過程。每個單元過程代表一個基本的轉換步驟，例如原物料的開採、零部件的製造、組裝、運輸、使用階段的能源消耗，以及最終的廢棄處理或回收。這些過程透過中間產品流或廢物流相互連接，形成一個有向的流程圖，清晰地描繪出物質與能量在系統內部的傳遞路徑。

功能單位是生命週期評估中至關重要的比較基準，它為整個產品系統提供了量化的性能描述。功能單位的定義必須精確、可衡量，並且與研究目標緊密相關。它不僅僅是描述產品的物理數量，例如「一公升油漆」或「一公斤鋼材」，更重要的是闡明該產品所提供的服務或功能。例如，評估牆面塗料時，功能單位可能定義為「覆蓋一平方公尺牆面並提供十年保護期限的塗層系統」。這樣的定義確保了不同

產品或技術方案之間能夠在公平的基礎上進行環境績效比較，因為比較的基礎是它們所提供的同等服務，而非單純的物料質量。功能單位的確立直接影響後續數據蒐集的範圍與深度，是確保評估結果相關性與可靠性的關鍵。

在建立產品系統模型時，必須明確區分前景系統與背景系統。前景系統通常包含研究人員能夠直接控制或獲取詳細過程數據的單元過程，例如自家工廠的製造流程、特定的運輸路線或使用模式。背景系統則是指為前景系統提供原材料、能源或處理其排放的上游或下游過程，這些過程的數據往往來自於通用的生命週期盤查資料庫，例如電力生產、基礎化學品製造或廢棄物處理的平均數據。建模的挑戰在於如何將這兩類系統無縫整合，形成一個連貫的模型。這需要透過參考流來實現，參考流是為滿足功能單位所需而必須通過產品系統的物料或能量流。建模者需從功能單位出發，逆向追蹤或正向推演所有必要的單元過程及其間的流動，從而構建出完整的產品系統模型圖。

產品系統的建模過程本質上是一種簡化現實的抽象化工作，因此必須處理系統的複雜性與不確定性。一個關鍵的建模決策是確定系統邊界，即決定哪些單元過程應被納入模型，哪些可以合理地排除。這通常依賴於截斷準則，例如依據質量、能量或環境顯著性設定百分比閾值，低於該閾值的流動可被忽略。此外，當一個單元過程同時產出多種產品或提供多種功能時，就會面臨分配的難題。例如，在煉油廠中，原油精煉過程同時產出汽油、柴油、瀝青等多種產品，其環境負荷應如何分配給這些共生產品？標準的處理方法遵循階層原則：優先考慮透過系統擴展來避免分配，例如將副產品的替代生產系統納入考量；若不可行，則根據物理關係（如質量、能量）進行分配；最後才考慮經濟價值等其他關係。這些建模選擇必須在目標與範疇定義階段明確記錄，以確保透明度。

功能概念的延伸體現了生命週期思維，它要求評估者超越產品實體，思考其提供的終極服務。這種思維促使我們比較根本不同的解決方案。例如，評估「提供室內照明」這一功能時，產品系統可能不僅包括不同類型的燈泡（如LED燈與螢光燈管），還需涵蓋其使用階段的電力消耗、更換頻率，乃至於照明系統的設計與控制方式。這就將單一產品的評估，擴展到一個更廣泛的「產品-服務系統」評估。建立此類模型時，功能單位的定義變得更為抽象但也更貼近實際需求，例如「在標準辦公室環境下，提供每平方公尺500勒克斯照度、每年2500小時的照明服務」。這種以功能為導向的建模方法，能夠更真實地揭示不同技術路徑在滿足人類需求過程中所產生的環境影響，為生態設計與永續消費決策提供更深刻的洞察。

## 2.4 關鍵特徵與靈活性：根據組織需求實施 LCA 的方法。

生命週期評估作為一種系統性的環境管理工具，其核心價值不僅在於提供科學的量化分析，更在於其方法論本身具備的關鍵特徵與實施上的高度靈活性。這種靈活性使得LCA能夠適應不同組織的特定需求、資源限制與決策情境，從大型跨國企

業的產品生態設計到中小型公司的內部流程優化，皆能找到合適的實施路徑。LCA 並非一套僵化不變的標準作業程序，而是一個在 ISO 14040 系列標準所建立的堅實原則框架下，允許使用者根據研究目標、可用數據與預期應用，進行適當調整與聚焦的彈性方法。這種特性確保了 LCA 的廣泛適用性，同時也要求執行者必須具備清晰的判斷能力，以在方法學的嚴謹性與實踐的可行性之間取得平衡。

LCA 的關鍵特徵首先體現在其「迭代性」的本質上。這意味著 LCA 研究並非線性的一次性過程，而是一個循環往復、逐步精煉的活動。在初步定義目標與範疇後，進行盤查分析時可能會發現數據獲取上的重大限制，此時可能需要返回前一階段，重新調整系統邊界或功能單位的定義。同樣地，在衝擊評估階段，若發現某些影響類別對最終結果的貢獻微乎其微，也可能簡化盤查階段的數據蒐集範圍。這種迭代過程允許組織從一個相對簡化的初步評估開始，隨著對系統理解的加深、數據質量的提升或決策需求的變化，再逐步擴展研究的深度與廣度。對於資源有限或初次導入 LCA 的組織而言，可以先進行一個「篩選性 LCA」，快速識別環境熱點，後續再針對關鍵議題進行更詳盡的「完整 LCA」，這便是靈活運用迭代特徵的典型策略。

另一個核心特徵是「功能導向」的比較基礎，這賦予 LCA 在比較不同產品或系統時的根本靈活性。如前一節所述，功能單位是評估的基準，而如何定義這個功能單位，極大程度取決於組織的具體目標。例如，一個包裝製造商可能以「承載一公升飲料並提供六個月保質期」作為功能單位，來比較塑料瓶與玻璃瓶；而一個城市規劃部門則可能以「為一萬居民提供年度供暖服務」為功能單位，來評估區域供熱系統與分散式天然氣鍋爐的優劣。組織可以根據其市場定位、政策要求或內部改善重點，量身訂製最貼切的功能單位，從而確保評估結果能直接回應其核心關切。這種以功能而非單純以質量或體積為比較基礎的做法，使得 LCA 能夠進行公平且有意義的比較，避免了因產品壽命、效率或服務水平不同而導致的誤判。

LCA 的靈活性也顯著體現在「系統邊界」的設定與「數據選擇」的策略上。ISO 標準並未規定一個放諸四海皆準的系統邊界，而是要求研究者根據目標，明確說明哪些單元過程被納入，哪些被排除，並採用一致的截斷準則。一個旨在滿足市場上環境產品宣告要求的 LCA，可能需要遵循如 EN 15804 等特定產品類別規則，採用較為嚴格和標準化的邊界。相反，一個用於內部研發、探索不同材料選擇的初步評估，則可以採用更聚焦的邊界，例如僅包含對碳排放影響最大的原材料生產和製造階段，暫時忽略使用和終結階段。在數據方面，組織可以混合使用實測的「前景系統」數據與來自商業或公共資料庫的「背景系統」數據。對於關鍵過程，投資於高品質的初級數據蒐集是必要的；對於眾多但影響微小的上游過程，使用具有地理和技術代表性的次級數據庫則是兼顧成本與科學性的務實選擇。

此外，建模方法的選擇是 LCA 靈活性的關鍵維度，直接關聯到研究欲回答的問題類型。主要的區分在於「歸屬型」建模與「結果型」建模。歸屬型 LCA 旨在描述一個產品系統在特定時間範圍內的環境負擔流量，它採用平均數據，靜態地將環境影響「歸屬」於該產品，常用於環境產品宣告、碳足跡標籤或對現有系統的基準評

估。結果型 LCA 則旨在評估因某項決策（如增加產量、引入新產品、改變政策）而導致的環境影響變化，它採用邊際數據，動態地分析市場機制下的因果鏈，常用於策略規劃、政策分析或評估技術創新的長期後果。組織必須根據其決策情境——是描述現狀、進行標示，還是預測改變的後果——來選擇最合適的建模範式，這項選擇將從根本上影響盤查數據的蒐集來源與計算方式。

最後，LCA 的報告與溝通形式也充分展現了其適應不同受眾需求的靈活性。根據 ISO 14044 的要求，完整的 LCA 研究必須形成報告，但報告的詳略程度、呈現方式與技術深度可以大幅調整。對於內部的工程師與研發團隊，報告可能需要包含詳細的過程圖、原始數據表、分配係數和敏感性分析結果，以便進行深度技術檢討。對於管理層或市場行銷部門，報告則需要提煉出關鍵結論、顯著議題和直觀的圖表，聚焦於環境熱點和改善機會。若是用於對外公開宣告或符合特定認證要求，則必須遵循相應的標準格式，並可能需經過外部關鍵審查。這種從高度技術性到高度概括性的光譜，使得 LCA 既能作為深入的科學分析工具，也能成為有效的戰略溝通媒介，滿足組織內外不同利害關係人的資訊需求。總而言之，理解並善用 LCA 的這些關鍵特徵與內建靈活性，是任何組織成功實施並從中獲益的關鍵，它使環境評估不再是昂貴且僵化的合規負擔，而能真正轉化為驅動創新、創造價值與支持永續決策的核心能力。

# 第三章 第一階段：目標與範疇定義 (Goal and Scope)



生命週期評估的執行始於一個至關重要的規畫階段，即目標與範疇定義。此階段為整個研究奠定基石，其品質直接決定了後續盤查分析、衝擊評估與解釋的可靠性與相關性。若此階段定義不清或過於草率，將導致研究結果偏離實際需求，甚至產生誤導性結論，使得投入大量資源所進行的評估失去其決策支持價值。因此，這是一個需要審慎思考與明確記錄的過程，旨在確保研究的方向、深度與廣度均能精準對應到最初設定的應用目的。

目標與範疇定義的核心任務在於清晰地回答幾個根本問題：為何進行此研究、研究結果提供給誰使用、研究的對象是什麼、以及研究的系統邊界在哪裡。首先，必須明確界定研究的目的，這包括說明研究的應用類型，例如是用於產品生態設計、市場行銷聲明、策略規畫或是政策制定。同時，需指明研究的目標讀者，是內部研發團隊、管理階層、行銷部門，還是外部客戶、監管機構或一般公眾。不同的目的與讀者，將顯著影響後續數據蒐集的精細度、衝擊類別的選擇以及報告呈現的方式。

緊接著，需要為研究的系統建立一個可量化的比較基礎，即功能單位。功能單位是生命週期評估中最重要計量基準，它精確定義了被評估系統所提供的服務或功能量。例如，評估包裝容器時，功能單位不應僅是「一個玻璃瓶」，而應是「盛裝一公升飲料並提供特定保鮮期限的包裝系統」。功能單位的明確定義，確保了不同產品或方案之間能夠進行公平的比較，避免因性能差異而導致評估失真。與功能