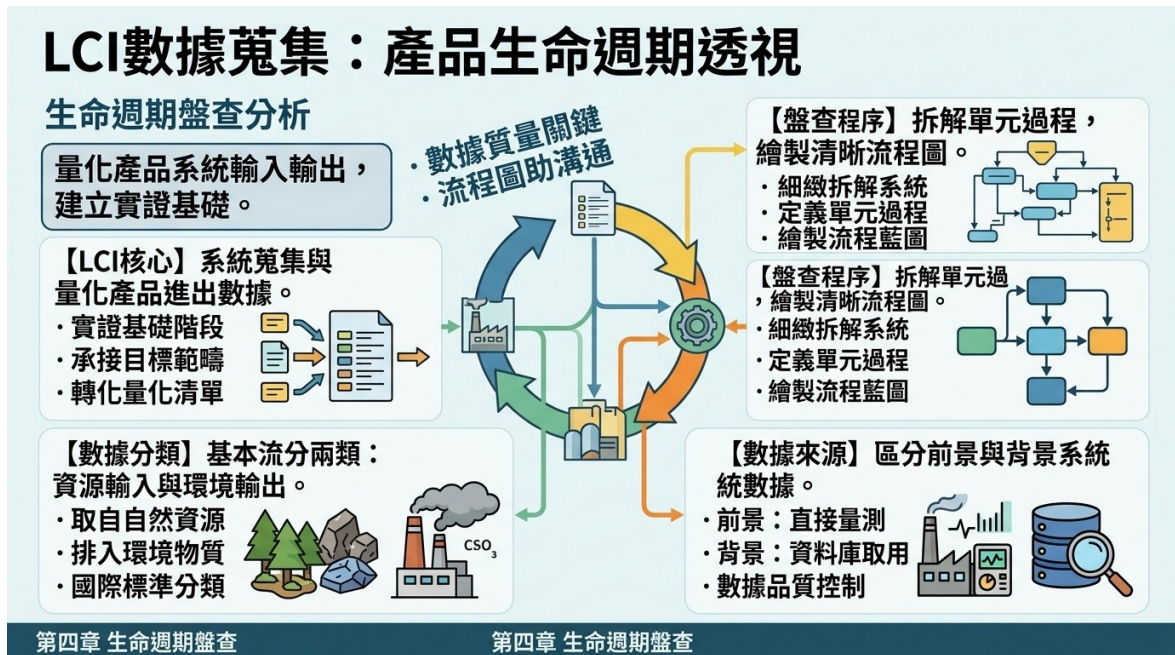


第四章 第二階段：生命週期盤查分析 (LCI) - 數據

蒐集



生命週期盤查分析是生命週期評估中至關重要的實證基礎階段，其核心任務在於系統性地蒐集與量化產品系統內所有單元過程的輸入與輸出數據。此階段承接目標與範疇定義所確立的系統邊界、功能單位及數據質量要求，將抽象的產品系統模型轉化為具體的量化清單。盤查分析的成果是一份詳盡的盤查表，其中羅列了從自然環境中提取的所有資源（如礦物、水、原油）以及向環境排放的所有物質（如二氧化碳、廢水、固體廢棄物）。這些數據的質量與完整性，直接決定了後續衝擊評估階段的可信度與解釋階段的結論有效性，因此數據蒐集過程必須嚴格遵循科學方法與透明度原則。

在實際操作中，數據蒐集始於對產品系統的細緻拆解，將其劃分為一系列相互關聯的單元過程。每個單元過程代表一項基本的物理或化學操作，例如原物料的開採、零部件的製造、組裝過程、產品使用階段的能源消耗，乃至最終廢棄處理的步驟。對於每個單元過程，分析人員必須識別並量化其輸入流與輸出流。輸入流包括來自上游過程的中間產品，以及直接從環境獲取的基本流；輸出流則包括交付至下游過程的中間產品，以及排放至環境的基本流。此過程需要建立清晰的流程圖，以可視化方式呈現物料與能量的流向，確保系統內所有過程的連結關係都被正確界定，避免遺漏或重複計算。

數據的來源主要分為兩大類：前景系統數據與背景系統數據。前景系統數據，亦稱特定地點數據，是指與被研究產品系統直接相關的過程數據，通常需要透過實

地測量、工廠記錄、供應商提供的技術規格或詳細的工程計算來獲得。這類數據具有較高的技術、時間和地理代表性，能精確反映所研究系統的實際狀況。背景系統數據則涉及更上游或更通用的過程，例如電網的電力生產、基礎化學品的製造、或標準化的運輸服務。這類數據通常取自商業或公開的生命週期盤查資料庫，其優點在於節省大量數據蒐集成本，並提供一致的計算基礎，但須注意其與研究系統在技術、地域和時間上的匹配性。

為了確保盤查數據的可靠性，必須實施嚴格的品質控制措施。這包括數據驗證，例如透過質量平衡或能量平衡檢查輸入與輸出總量是否合理，以及利用文獻數據或類似過程數據進行交叉比對。對於不可避免的缺失數據，需制定明確的處理策略，例如採用保守估計、使用具有相似技術的代表性數據，或明確說明該缺失可能造成的限制。此外，數據的不確定性也應被記錄與評估，這有助於在後續的生命週期解釋階段，理解結果的穩健性。整個數據蒐集過程是一個迭代的過程，可能隨著對系統理解的深入，需要回頭調整範疇定義或補充蒐集更精確的數據，以確保最終盤查結果能滿足研究目標的要求。

4.1 盤查程序與數據準備：建立 unit process 模型與流程圖。

生命週期盤查分析是將目標與範疇定義階段所確定的系統邊界，轉化為具體數據模型的關鍵步驟。此階段的核心任務在於系統性地蒐集、整理與量化所有與產品系統相關的輸入與輸出流，這些數據將構成後續衝擊評估的基礎。盤查程序始於對產品系統的細緻拆解，將其劃分為一系列相互關聯的單元過程。每個單元過程代表一個具有明確輸入與輸出的基本活動，例如原物料的開採、零部件的製造、組裝過程、運輸、產品使用階段的能源消耗，以及最終廢棄處理或回收等。建立清晰的單元過程模型，有助於釐清系統內物質與能量的流動路徑，並確保數據蒐集工作能夠有條不紊地進行，避免遺漏重要環節或重複計算。

在建立單元過程模型後，下一步便是繪製詳細的生命週期流程圖。這張流程圖是整個產品系統的視覺化藍圖，它以圖形方式展示從原材料獲取到最終處置的所有過程，以及連接這些過程的物料流、能量流和廢物流。流程圖的繪製應嚴格遵循前一階段定義的系統邊界與截斷準則，明確標示出哪些過程屬於研究範圍之內，哪些被排除在外。通常，流程圖會以方框代表單元過程，以箭頭代表流動的物質或能量，並在關鍵節點標註數據蒐集點。一個結構良好的流程圖不僅能指導數據蒐集工作，還能促進研究團隊內部以及與外部審查者之間的溝通，確保所有人對系統結構有共同的理解，這對於維持研究的透明度和一致性至關重要。

數據準備工作與流程圖的繪製同步進行，且兩者相互依賴。數據蒐集需針對流程圖中的每一個單元過程展開，目標是量化其所有相關的輸入與輸出。輸入通常包括來自自然界的資源（如礦石、原油、水）以及來自其他單元過程的中間產品或能源；輸出則包括產品系統所欲交付的主要產品或服務、產出的副產品，以及排放至

空氣、水體和土壤中的各種污染物與廢棄物。數據來源可分為兩大類：前景系統數據與背景系統數據。前景系統數據是指與研究對象直接相關的特定過程數據，例如工廠生產線的實際能耗、原料消耗和排放數據，這類數據通常需要透過實地測量、問卷調查或從企業內部記錄中獲取，其質量對研究結果的準確性有直接且重大的影響。

背景系統數據則涉及那些與研究對象間接相關的上游或下游過程，例如電網的電力生產、基礎化學品的製造、或平均運輸過程的數據。由於研究者難以也無需對所有背景過程進行一手數據蒐集，因此這部分數據主要依賴於商業或公開的生命週期盤查資料庫，例如 Ecoinvent、GaBi 資料庫等。這些資料庫提供了大量經過標準化處理的單元過程數據集，極大地提高了 LCA 研究的可行性與效率。在數據準備過程中，必須仔細記錄每個數據點的來源、獲取年份、地理代表性與技術代表性，以滿足數據質量要求。對於缺失的數據，需要透過合理的估計、文獻調研或使用具有相似技術和地理條件的代理數據來填補，但所有這些處理方式及其潛在的不確定性都必須在報告中明確說明。

建立單元過程模型與流程圖的最終目的，是為了構建一個完整的、可計算的盤查模型。這意味著需要將所有蒐集到的單元過程數據，根據其與功能單位的關聯進行數學連結。例如，製造一個零件需要一定數量的鋼材，而生產這些鋼材又需要鐵礦石、煤炭和電力。盤查模型透過一系列線性方程式，將這些層層嵌套的過程聯繫起來，最終計算出為了提供一個功能單位（如生產一公斤產品或提供一項服務）所直接及間接消耗的所有資源，以及所產生的所有排放。這個計算過程要求高度的嚴謹性，特別是在處理具有多種輸出（副產品）的單元過程時，需要應用適當的分配程序來分攤環境負擔。因此，在數據準備階段就預先識別出這些需要進行分配的複雜單元過程，並規劃好處理方法，對於後續盤查計算的順利進行至關重要。

總而言之，盤查程序與數據準備是生命週期評估中承上啟下的實作核心。它將抽象的系統邊界轉化為具體的單元過程集合與數據需求清單，並透過流程圖將系統結構可視化。此階段的工作質量直接決定了盤查分析結果的可靠性與代表性。嚴謹的模型建立與詳實的數據蒐集，為後續的盤查計算、衝擊評估乃至最終的解釋與決策提供了堅實的數據基礎。研究者在這一階段投入的精力與對細節的關注，將顯著影響整個 LCA 研究的科學嚴謹度與實用價值。

4.2 基本流的分類：來自自然資源的輸入與排入環境的輸出。

在生命週期盤查分析中，基本流的分類是建立完整且可量化環境負荷清單的基礎。基本流指的是從環境進入產品系統，或從產品系統排放到環境中的物質或能量流。這些流動構成了系統與環境之間的介面，是後續進行衝擊評估時，將盤查數據轉化為環境影響指標的原始材料。精確地分類與記錄基本流，有助於確保盤查結果的科學性與可比性。此分類工作必須在建立單元過程模型與流程圖之後進行，因為

它依賴於對系統內所有單元過程的輸入與輸出有清晰的界定。唯有將每個過程的具體物質與能量交換，歸類到統一的基本流類別中，才能進行後續的匯總與計算，避免重複計算或遺漏。

基本流的分類主要區分為兩大類：來自自然資源的輸入，以及排入環境的輸出。來自自然資源的輸入，亦稱為「取自自然界的資源」，指的是從地球環境中開採或獲取的原材料與能源。這包括了從地殼中開採的礦物資源，例如鐵礦石、鋁土礦、銅礦；從生物圈獲取的再生資源，例如木材、農作物、漁獲；以及各種形式的能源載體，例如原油、天然氣、煤炭、鈾礦。此外，水資源的取用，無論是地表水或地下水，也屬於此類基本流。值得注意的是，空氣本身通常不被視為一種資源輸入，因為它被認為是取之不盡的背景介質，但空氣中的特定成分，如工業上使用的氮氣或氧氣，若經過分離與純化過程，則可能被視為資源。這類輸入流的量化，是評估資源消耗與生態足跡的關鍵。

排入環境的輸出，則是指產品系統在生命週期各階段中，向空氣、水體或土壤排放的物質，以及釋放到環境中的能量。向空氣的排放包括各種氣體與微粒物質，例如二氧化碳、甲烷、氧化亞氮等溫室氣體；硫氧化物、氮氧化物等導致酸化的氣體；以及揮發性有機化合物、懸浮微粒等。向水體的排放涵蓋了排入河流、湖泊或海洋的各種物質，例如重金屬離子、營養鹽、有機鹵化物、懸浮固體等，這些排放可能導致水體優養化、毒性效應或生態破壞。向土壤的排放則包括固體廢棄物的最終處置、污泥的施用，或是有害物質的滲漏。此外，廢熱的排放，例如電廠冷卻水造成的熱污染，也是一種重要的能量輸出。這些輸出流直接關聯到後續衝擊評估中的各類環境影響類別，如氣候變遷、酸化、優養化、生態毒性等。

在實際盤查作業中，對基本流進行系統性分類需要遵循一定的原則與指引。國際標準組織的生命週期評估標準，以及許多廣泛使用的LCA資料庫與軟體工具，都提供了標準化的基本流分類清單與命名系統。例如，將資源輸入細分為「可再生資源」與「不可再生資源」；將排放輸出按環境介質（空氣、水、土壤）和具體物質類型進行歸類。採用標準化的分類有助於確保不同研究之間的數據可以進行整合與比較。當研究人員從不同的資料庫或文獻中蒐集單元過程數據時，必須仔細核對其基本流的分類與命名是否與自身研究採用系統一致，必要時需進行轉換或重新歸類，以避免在匯總計算時出現錯誤。

基本流的分類不僅是簡單的歸檔工作，更涉及對系統邊界與截斷準則的深刻理解。例如，來自技術系統的副產品或回收物料，若被另一產品系統所使用，則不應被視為來自自然環境的「資源輸入」，而應透過分配程序來處理其環境負擔。同樣地，廢棄物在處理廠中被轉化為能源或二次材料，其最終排放到環境的流動，應歸屬於產生該廢棄物的產品系統，還是處理系統，也需要透過明確的系統邊界與建模選擇來決定。因此，在進行基本流分類時，必須回顧目標與範疇定義階段的決策，確保分類方式與研究設定的系統邊界和分配規則保持一致。

數據的質量與詳細程度也直接影響基本流分類的精度。高質量的盤查數據應能明確指出具體的物質種類與化學形態，例如區分「氮氧化物」為一氧化氮還是二氧化氮，或區分排放到水體中的「磷」是磷酸鹽還是其他形態。較粗略的數據可能僅提供匯總類別，如「重金屬」或「揮發性有機物」，這會限制後續衝擊評估的準確性，因為不同的物質形態其特徵化因子可能差異巨大。因此，在數據蒐集階段，應盡可能追求高解析度的基本流數據，並在數據質量要求中明確規定所需的分類細節。這項工作為後續區分前景與背景系統數據奠定了基礎，因為前景系統（直接過程）的數據通常可以獲得較詳細的基本流資訊，而背景系統（如電力生產、基礎材料製造）則可能依賴資料庫中已分類好的匯總數據。

4.3 前景與背景系統數據：區分直接過程數據與背景資料庫數據。

在生命週期盤查分析中，數據的來源與性質是決定評估結果可靠性的關鍵因素。為了有效組織與蒐集數據，國際標準將產品系統的數據區分為「前景系統」數據與「背景系統」數據。這種區分不僅有助於數據管理，更能明確界定研究者的責任範圍與數據品質要求。前景系統數據，亦稱為特定過程數據或一級數據，指的是與被研究產品系統直接相關、且由研究者或其委託方直接量測、蒐集或從特定營運記錄中獲取的數據。這類數據通常涵蓋產品製造、組裝、使用階段中可被直接觀察與控制的過程，例如工廠生產線的能源消耗、原料投入量、廢棄物產生量，或是產品在使用階段的耗電量、燃料消耗等。由於前景系統數據直接來自於研究對象，其時空代表性與技術代表性通常較高，能夠較精確地反映該特定產品系統的實際環境負荷。

相對地，背景系統數據則是指那些與研究產品系統間接相關、且通常無法或不適合由研究者直接量測的過程數據。這類數據大多涉及上游的原材料開採、初級加工、能源生產（如電力網的混合發電）、基礎化學品製造，以及下游的廢棄物處理（如垃圾掩埋場、焚化廠的營運）等。由於背景系統往往牽涉到複雜的供應鏈與公共基礎設施，單一研究通常難以負擔其全面調查的成本，因此高度依賴於既有的生命週期盤查資料庫。這些資料庫，例如 Ecoinvent、GaBi Database、USLCI 等，彙整了經過標準化建模與數據蒐集的背景過程單元，提供了諸如「一度電的生產」、「一公斤鋼板的製造」或「一噸廢棄物掩埋」的平均環境盤查數據。使用背景數據庫能大幅提升 LCA 研究的效率與可行性。

區分前景與背景數據的核心目的，在於實踐生命週期評估的務實性與經濟性原則。一個完整的產品生命週期可能涉及數百甚至數千個過程，要求每個過程都進行原始數據蒐集是不切實際的。因此，標準方法論建議將研究資源集中於對結果影響最大、或最具有不確定性的「前景系統」過程，進行高品質的特定數據蒐集。而對於那些位於供應鏈上游、對最終結果影響相對較小、或具有高度共通性的過程，則可採用來自可靠資料庫的「背景系統」數據作為代表。這種區分也反映了數據的

「可影響性」：前景系統過程通常是企業或決策者能夠直接控制或改進的環節，而背景系統過程則多受制於更廣泛的市場與技術條件。

在實際操作上，界定前景與背景系統的邊界並非絕對，而取決於研究目標與範疇定義。例如，對於一家汽車製造商而言，車體的沖壓、焊接、塗裝等在其工廠內完成的工序屬於前景系統；而鋼鐵、鋁材、塑料顆粒等原材料的生產，則屬於背景系統，可採用資料庫數據。然而，若該製造商的研究目標是深入分析其高強度鋼材供應鏈的環境影響，並與供應商合作進行減排，那麼該鋼材的生產過程就可能被納入前景系統的範疇，需要蒐集特定數據。這種彈性使得 LCA 能夠適應不同層級的決策需求，從具體的產品設計改進到宏觀的政策分析。

數據的區分也直接關聯到數據品質的管理。前景系統數據由於需要專門蒐集，研究者必須制定嚴格的數據品質要求，包括明確的時空範圍（如數據代表的年份、地理區域）、技術代表性（如生產技術的具體描述），並透過測量、監測記錄或經過驗證的工程計算來獲取。數據的完整性、一致性與準確性需受到嚴格檢核。相反地，背景系統數據的品質則取決於所選用資料庫的建構方法、數據來源與更新頻率。研究者在選用背景資料庫時，必須評估其與自身研究在時間、地理及技術層面上的匹配度，並在報告中透明揭露所使用資料庫的名稱與版本。

這種前景與背景的二分法，在面對現代複雜的全球供應鏈與循環經濟模式時，也帶來了一些方法學上的挑戰。例如，當產品系統中包含回收材料時，回收過程的環境負擔應如何在前景與背景系統間劃分？常見的做法是，若回收過程是研究系統中特定規劃的一部分（如企業自建的回收線），則可視為前景系統；若回收材料是從開放市場購得，其回收過程通常被視為背景系統，並採用資料庫中具有市場平均代表性的回收材料數據。此外，在多企業合作或產業生態系統的評估中，數據的共享與邊界劃分更需要清晰的協議，以避免重複計算或遺漏。

總而言之，前景與背景系統數據的區分是生命週期盤查分析中一項至關重要的實務策略。它使評估工作能在科學嚴謹性與執行可行性之間取得平衡。透過將有限的資源聚焦於蒐集關鍵過程的高品質特定數據，並善用標準化的背景資料庫來涵蓋廣泛的支撐過程，研究者能夠建構出既可靠又有效率的生命週期模型。此一區分也強調了透明度的重要性，在最終的 LCA 報告中，必須清晰說明哪些過程使用了特定數據，哪些過程引用了背景資料庫，從而讓報告讀者能夠理解評估結果的基礎與可能的不確定性來源。

4.4 盤查過程中的品質控制：數據驗證與缺失值的處理。

生命週期盤查分析過程中的品質控制，是確保最終評估結果可靠性與可信度的基石。在完成前景與背景系統數據的蒐集後，這些原始資料必須經過系統性的驗證與處理，方能進入後續的模型化與計算階段。品質控制的核心目標在於識別並最小化數據中的不確定性、錯誤與偏差，從而提升整個生命週期評估的科學嚴謹性。此

過程不僅涉及技術性的數據檢查，更包含一套管理性的程序，用以確保數據從蒐集、處理到最終彙整的每一步都符合研究最初設定的目標與範疇定義中所要求的數據質量準則。缺乏有效的品質控制，即使數據量再龐大，其分析結果也可能誤導決策，甚至導致所謂的「垃圾進、垃圾出」現象，使得耗費資源進行的 LCA 研究失去其應有的價值。

數據驗證是品質控制的首要環節，其重點在於確認所蒐集數據的準確性、一致性與完整性。驗證工作通常從檢查數據的內部一致性開始，例如確同一流程中的質量與能量是否平衡，輸入與輸出流的總和是否合理。對於來自工業製程的前景數據，可能需要與工廠的生產記錄、物料清單或能源帳單進行交叉比對。而對於來自商業資料庫的背景數據，則需審視其文檔說明，了解其地理、時間與技術代表性是否與研究系統匹配。此外，異常值的偵測也至關重要，例如某項原料的消耗量遠高於行業平均水平，或某項排放係數出現不合理的高值，這些都需追溯原始來源或尋求專業判斷以確認其合理性。數據驗證往往是一個迭代過程，可能需要回過頭與數據提供者溝通，或尋找替代數據源來修正發現的問題。

在實際的盤查工作中，數據缺失是極為常見的挑戰，尤其當系統邊界涵蓋複雜的供應鏈或多種背景過程時。缺失值的處理需要謹慎的方法論選擇，以避免引入系統性偏差。最直接的方法是尋求替代數據，例如使用相同技術但在不同地理區域的數據，或採用相似材料的數據進行代理。然而，使用替代數據時必須明確記錄其與原過程的差異，並在後續的敏感性分析中評估此替代對最終結果的潛在影響。另一種常見方法是基於工程計算或化學計量原理進行估算，例如根據化學反應式推算副產品的產量，或根據設備的額定功率與運轉時數估算電力消耗。當缺失的數據對整體結果影響極微時，研究者也可能依據事先設定的截斷準則予以排除，但必須證明該數據的忽略不會顯著改變結論。

建立一套系統化的數據質量指標體系，是量化與管理數據不確定性的有效工具。這些指標通常針對數據的幾個關鍵維度進行評分，例如時間代表性、地理代表性、技術代表性、完整性以及可靠性。透過對每個單元過程的數據賦予質量評級，研究者可以更清晰地識別出整個產品系統中的數據薄弱環節，並將後續的改善資源優先投入於對結果影響最大的關鍵過程上。這種基於質量的分層方法，也使得在盤查結果解釋階段，能夠更客觀地討論研究結論的穩健性。此外，詳細記錄數據的來源、處理方法與質量評級，是達成 ISO 標準所要求透明度的必要條件，這不僅有助於內部的品質管控，也為未來可能進行的關鍵審查提供了清晰的審計軌跡。

品質控制的最後一環，在於確保整個盤查模型在計算前的整體一致性與邏輯正確性。這包括檢查所有單元過程之間的連結是否正確，例如上游過程的輸出是否恰為下游過程的輸入，且流量單位是否一致。同時，需確認所有數據均已按照功能單位進行了正確的縮放，避免因單位換算錯誤而導致數量級上的謬誤。對於涉及回收或能源共生產的多功能系統，需預先審視分配方法的選擇是否合理並一致地應用於所有相關過程。完成這些檢查後，盤查數據集便從一個鬆散的數據集合，轉化為一

個內部一致、可供計算的系統模型，為下一階段的模型化與計算奠定了堅實的基礎。唯有透過嚴謹的品質控制，生命週期盤查的結果才能成為後續衝擊評估與解釋階段可信賴的輸入，從而支持具備環境效益的決策制定。