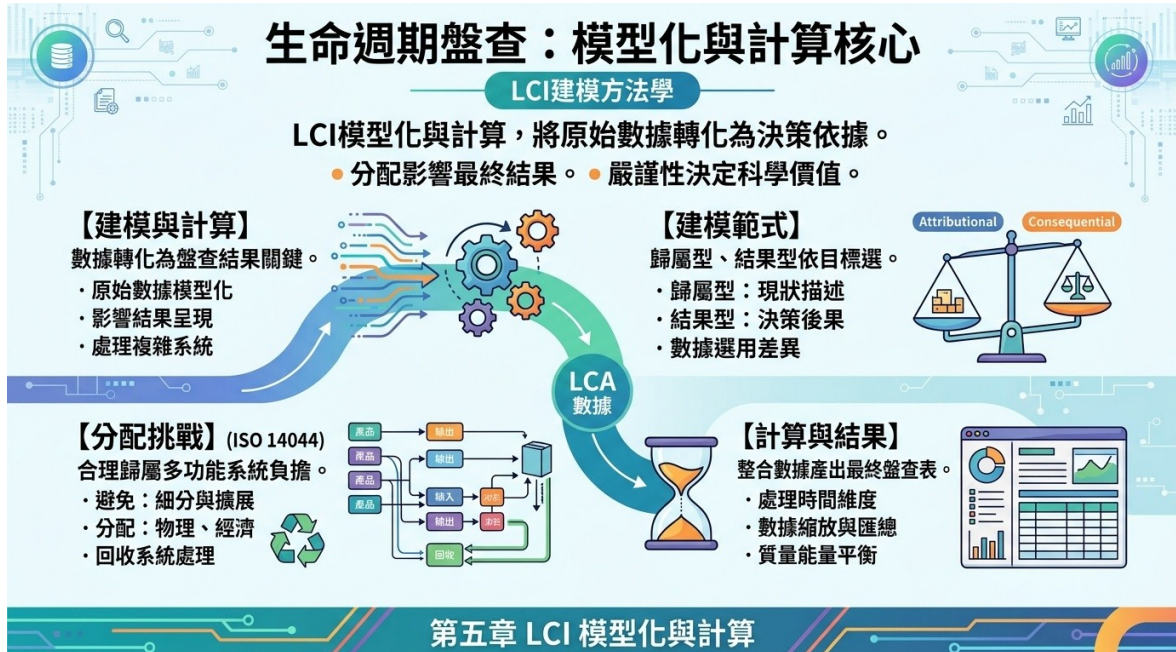


第五章 生命週期盤查 (LCI) - 模型化與計算



完成生命週期盤查分析階段的數據蒐集與品質控制後，研究便進入至為關鍵的模型化與計算階段。此階段旨在將所蒐集到的原始流程數據，透過系統性的建模方法，轉化為與功能單位相對應的完整盤查結果。這不僅涉及數學上的計算，更包含一系列重要的方法學選擇，這些選擇將深刻影響最終盤查結果的呈現方式與解釋方向。模型化過程需要處理現實世界中複雜的工業系統，例如同一生產過程可能產出多種產品，或產品生命結束後的材料進入回收循環，這些情況都使得環境負荷的歸屬變得複雜。因此，建立一個清晰、一致且符合研究目標的計算模型，是確保盤查結果可靠性與可比性的基石。

在生命週期盤查的建模中，最核心的方法學分野在於歸屬型建模與結果型建模的選擇。歸屬型建模採靜態的、描述性的視角，旨在將某一段特定時間內，與產品系統相關聯的環境流平均地分配給該產品。它本質上是對現有系統狀態的一種快照，回答的是「與此產品相關的环境負擔是多少？」這類問題。此方法通常採用平均數據，並依循既定的分配程序來處理多功能過程，其結果常用於環境產品宣告或碳足跡標籤。相對地，結果型建模則採動態的、因果關係的視角，旨在評估因特定決策（如增加某產品產量、引進一項新技術）所引發的邊際變化對環境造成的後果。它聚焦於市場機制下的因果鏈，試圖回答「如果做出這個選擇，將會導致什麼額外的環境影響？」這類問題。結果型建模通常涉及市場分析，以識別受影響的技術與過程，並使用邊際數據而非平均數據。這兩種建模範式源於不同的決策情境，選擇何者取決於研究目標是描述現狀還是預測改變帶來的後果。

除了建模範式的選擇，盤查計算還需處理時間維度上的複雜性，特別是未來流與長期排放的議題。某些環境排放，尤其是溫室氣體，其在大氣中的存留時間可長達數百年甚至更久，其產生的輻射強迫效應將持續影響未來氣候。傳統的靜態盤查可能將這類長期影響與短期排放等同視之，未能充分反映其時間特性。為此，先進的盤查模型會引入時間考量，例如透過折現率或特定的特徵化模型來權衡不同時間點排放的影響力。在處理生物碳或土地利用變化產生的碳排放時，時間動態尤為關鍵，因為碳的吸收與釋放並非瞬間發生。這要求研究者在計算中明確界定時間範圍，並謹慎選擇處理時間分布的方法，以確保盤查結果能更真實地反映產品系統在整個時間軸上對環境造成的負荷。

最終，所有模型化與方法學的選擇都將匯聚於盤查結果的計算。此過程涉及將每一個單元過程的輸入與輸出數據，根據其與功能單位的關聯進行縮放，然後沿著產品系統的流程鏈進行逐級匯總。計算必須確保系統邊界內所有過程的質量與能量平衡，這是一個反覆驗證的過程。透過計算，分散於原料開採、製造、運輸、使用及廢棄處理等各階段的資源消耗與排放數據，被整合成一份以功能單位為基準的完整盤查表。這份表格列出了所有來自環境的資源索取（如礦物、水、原油）以及所有向環境的排放（如二氧化碳、重金屬、廢水），為後續的生命週期衝擊評估提供了量化的數據基礎。因此，模型化與計算階段的嚴謹性直接決定了整個生命週期評估的科學價值與實用性。

5.1 多功能系統的分配 (Allocation)：如何處理副產品或回收系統的負擔。

在生命週期盤查分析中，當一個單一過程同時產出多種產品或服務，或是當一個產品系統涉及回收、再利用與廢棄物處理時，便會面臨如何將該過程的環境負擔（包括資源消耗與排放）合理地分配給其各個輸出流的問題。這個問題的核心在於，許多工業過程並非僅生產單一產品，例如煉油廠同時產出汽油、柴油、瀝青等多種產品；而一個產品的生命週期結束後，其材料可能進入另一個產品的生命週期，形成複雜的交互關係。若無法妥善處理這些多功能系統的分配問題，盤查結果將失去其客觀性與可比性，進而誤導後續的衝擊評估與決策。因此，分配是生命週期盤查模型化過程中一個至關重要且充滿方法論挑戰的環節。

根據國際標準 ISO 14044 的指引，處理分配問題應遵循一個階層式的決策順序。首要原則是盡可能避免分配，其方法是透過程序細分或系統擴展來達成。程序細分是指將原本的多功能單元過程，進一步分解為多個子過程，每個子過程僅對應一種主要產品或功能，並分別蒐集其獨立的輸入與輸出數據。例如，在一個結合熱電聯產的工廠中，若能分別釐清發電與產熱所需的燃料消耗與排放，則無需進行分配。然而，實務上往往因數據不可得或過程過於緊密整合而難以細分。此時，系統擴展便成為另一種避免分配的途徑。系統擴展的概念是將產品系統的邊界擴大，將

原本由副產品或回收材料所替代的其他產品生產過程納入考量，從而將環境負擔歸屬於系統內的主要功能流。這種方法在處理回收系統時尤為常見。

當避免分配不可行時，則必須進入分配階段，依據產品系統中不同輸出流之間的物理關係或經濟關係，將單元過程的輸入與輸出進行分攤。物理關係分配通常基於質量、能量或物質含量等可量測的物理屬性。例如，在一個同時產出主產品與副產品的化學過程中，若兩者皆為固體，則可能依據其質量比例來分配該過程的資源消耗與排放。這種方法看似客觀，但其適用性取決於副產品是否確實承載了與主產品成比例的環境負擔。在某些情況下，副產品可能是生產主產品時必然產生的低價值殘餘物，其物理屬性（如質量）可能無法真實反映其產生的驅動原因。因此，物理分配並非放諸四海皆準的通用解方。

另一種常見的分配基礎是經濟關係，亦即依據各輸出產品在市場上的經濟價值（例如銷售價格）來分攤環境負擔。其背後的邏輯是，市場價格反映了社會對該產品功能的相對需求與價值認可，因此環境負擔也應按此價值比例分配。例如，在一個生產小麥與麥稈的農業系統中，雖然麥稈的質量可能很大，但其經濟價值遠低於小麥穀粒，因此按經濟價值分配時，大部分環境負擔會歸屬於小麥。這種方法的優點是與市場機制連結，易於理解與應用；但其缺點在於價格會隨市場波動，導致同一過程在不同時間或地區進行評估時，可能產生不一致的分配結果，影響研究的可重複性與穩定性。

在處理涉及回收、再利用與生命終結階段的系統時，分配問題變得更加複雜。這涉及到如何將前一個產品生命週期（稱為「前任系統」）的環境負擔，以及回收處理過程的負擔，分配給當前使用回收料的產品（稱為「後繼系統」）。ISO 標準提供了幾種方法，其中最常見的是「閉環分配」與「開環分配」。閉環分配適用於材料在相同產品系統中無限次循環回收的情況，例如玻璃瓶回收再製成新玻璃瓶。在此情境下，通常採用「回收內容法」或「避免負擔法」。回收內容法將回收材料視為「零負擔」的原料輸入，而將所有回收處理的負擔分配給使用回收料的後繼產品。相反地，避免負擔法則將回收處理視為一項廢棄物管理服務，其環境效益體現於避免了原生材料的開採與生產，因此前任系統需承擔部分回收處理負擔，而後繼系統則因使用回收料而獲得環境信用。

開環分配則適用於材料被回收後降級使用於不同類型產品的情況，例如塑膠瓶回收後製成紡織纖維。此時，由於材料的功能發生變化，必須在前任系統與後繼系統之間分配回收過程的負擔以及材料本身的「原始生產」負擔。常見的方法是依據材料的物理特性（如質量）或經濟價值在回收前後的變化比例來進行分配。例如，可根據回收後材料相對於原生材料的品質保持率來決定分配比例。這些方法各有利弊，選擇哪一種取決於研究的目的、範疇定義以及所秉持的環境哲學——是強調生產者的延伸責任，還是鼓勵使用再生材料的市場。

分配方法的選擇對生命週期評估的最終結果具有決定性的影響，不同的分配假設可能導致對同一產品或技術的環境績效得出截然不同的結論。因此，在進行分配

時，必須嚴格遵循 ISO 標準所強調的透明度與一致性原則。研究報告中必須清晰闡明所選擇的分配方法、其背後的合理性、以及任何相關的價值判斷。此外，在後續的生命週期解釋階段，通常需要對關鍵的分配選擇進行敏感性分析，以探討不同分配方法對整體結論的影響程度，從而確保研究結果的穩健性與可信度。總而言之，分配並非單純的數學計算，而是一項融合了科學判斷、技術考量與政策意涵的關鍵方法論步驟，需要評估者審慎為之。

5.2 歸屬型與結果型 (Attributional vs. Consequential) 建模：不同的盤查建模方法。

在生命週期盤查分析中，建模方法的選擇是決定研究結果與解釋方向的關鍵。歸屬型建模與結果型建模代表了兩種截然不同的哲學與應用情境，其差異不僅在於計算技術，更在於研究問題的本質與決策情境的設定。歸屬型建模旨在描述產品系統在特定時間與技術背景下，其生命週期各階段的环境負擔歸屬。這種方法採用靜態的、平均的數據，試圖回答「產品系統目前的環境影響是什麼？」或「影響是如何沿著供應鏈分配的？」這類問題。它通常假設系統處於穩態，市場供需關係不因所研究的產品系統而改變，因此其核心在於「歸因」或「分配」現有系統的環境負擔。在實踐上，歸屬型建模大量依賴於行業平均數據，例如電力網的平均排放係數，或特定製程的平均資源消耗。這種方法與產品環境宣告或碳足跡標籤高度相關，因為它提供了一個相對穩定、可比較的基準，用於評估產品在現有經濟與技術結構下的表現。

相比之下，結果型建模則聚焦於決策所引發的邊際變化及其帶來的環境後果。它試圖回答「如果做出某項決策（例如增加產量、改用新材料、實施回收政策），將會導致什麼樣的環境影響變化？」這類問題。因此，結果型建模是動態的、前瞻性的，其核心在於評估決策的「因果」關係。它明確考慮市場機制，例如當對某種產品的需求增加時，邊際生產者（通常是成本最高、效率最低的生產者）將被啟動以滿足需求，而盤查分析就應納入這些邊際生產過程的數據。同樣地，若決策導致某種副產品產量增加，結果型建模會追蹤該副產品在市場上替代了哪些其他產品，從而可能減少被替代產品系統的環境負擔，產生系統擴展與替代效應。這種建模方式對於政策評估、戰略規劃或比較根本不同的技術方案至關重要，因為它捕捉了決策在真實經濟系統中可能引發的連鎖反應。

從方法論的具體操作來看，兩者的區別體現在多個層面。在處理多功能過程或回收系統時，歸屬型建模通常依賴於物理分配（如質量、能量）或經濟分配，將環境負擔按比例分配給不同產品。而結果型建模則傾向採用系統擴展法，將系統邊界擴大到包含所有受影響的產品，並透過分析市場替代來確定淨影響。在數據選擇上，歸屬型建模使用代表現有生產組合的平均數據，例如區域電網的混合發電排放係數。結果型建模則需識別邊際數據，例如在評估夜間充電電動車的影響時，需考

慮夜間邊際電力通常來自基載燃煤或核能電廠，而非日間平均的電力組合。此外，在處理土地利用變化或長期碳封存等問題時，結果型建模需納入更複雜的動態模型來預測決策導致的實際變化。

這兩種建模方法的選擇，根本取決於在目標與範疇定義階段所確定的研究目的和決策情境。若研究目的是為了提供產品環境資訊、進行基準比較或支持環境標籤，歸屬型建模是標準方法。若研究目的是評估一項新政策、一項重大投資或一個可能改變市場結構的技術創新所帶來的環境效益或風險，則結果型建模更為合適。然而，結果型建模在實踐上面臨更大挑戰，包括邊際數據的可得性與不確定性、市場分析的高度複雜性，以及對未來情景的依賴性。這些都使得結果型研究的假設更為關鍵，透明度要求更高，解釋時需要更為謹慎。

儘管兩者存在明顯差異，但在某些情況下，它們的界線可能變得模糊。例如，一個旨在改進現有生產流程的內部決策，可能既需要了解現狀（歸屬型視角），也需要評估改進措施的邊際效益（結果型視角）。此外，隨著動態生命週期評估的發展，傳統歸屬型模型的靜態局限性正在被探討，而結果型模型也試圖納入更精細的技術擴散與經濟反饋機制。理解這兩種核心建模範式的差異、優勢與限制，是確保生命週期評估研究能夠提出正確問題、選擇適當方法，並最終產出對決策者具有實際意義的洞察的基礎。這也為後續的盤查結果計算與衝擊評估階段，奠定了明確的系統邊界與數據處理邏輯。

5.3 盤查結果計算：縮放數據至功能單位並進行匯總。

在完成歸屬型或結果型建模的選擇，並建立相應的產品系統模型後，生命週期盤查分析便進入核心的計算階段。此階段的主要任務是將蒐集到的所有單元過程數據，系統性地轉換為與研究目標相符的總體盤查結果。計算過程並非簡單的加總，而是一個嚴謹的數據縮放與匯總程序，其核心在於確保所有輸入與輸出數據都與先前定義的功能單位建立明確的關聯性。功能單位作為比較的基準，是整個計算過程的錨點，所有上游與下游過程的環境交換數據都必須按比例調整，以精確反映該功能單位所承擔的環境負荷。若缺乏此標準化步驟，不同系統或不同研究的數據將無法進行有意義的比較，因為其服務的規模、壽命或性能可能截然不同。

計算的起點是對產品系統中每一個單元過程的數據進行處理。每個單元過程都包含一系列來自環境的資源輸入與向環境排放的輸出，這些數據通常源自於實地測量、文獻資料或背景資料庫，並以其原始的運作規模呈現。例如，一個製造塑膠顆粒的過程，其原始數據可能代表生產一公噸顆粒的能耗與排放。然而，若研究的功能單位是「提供一千次飲料盛裝服務的包裝系統」，而該包裝系統使用了特定重量的塑膠，則必須計算出該重量塑膠所佔一公噸產量的比例，並將所有與該單元過程相關的資源消耗和排放數據，按此比例進行線性縮放。這種縮放是基於假設單元過

程的環境效率在其運作範圍內是線性的，雖然這是一種簡化，但在多數情況下是合理且必要的。

當所有單元過程的數據都依據其對功能單位的貢獻比例縮放完畢後，下一步便是進行匯總。匯總意指將產品系統內所有單元過程的同類環境交換數據進行加總。具體而言，所有單元過程消耗的某種資源，例如原油、鐵礦石或淡水，其縮放後的數量會被加總，得到整個產品系統為滿足功能單位而消耗的該資源總量。同樣地，所有單元過程產生的某種排放物，例如二氧化碳、氮氧化物或重金屬，其縮放後的數量也會被加總，得到系統排放的總量。這個過程產生的是一份完整的盤查表，其中列舉了成百上千種與環境交換的基本流及其總量，這些數據構成了後續生命週期衝擊評估的原始材料。

在匯總過程中，必須特別注意系統邊界內可能存在的封閉循環或內部流。所謂內部流，是指從一個單元過程輸出，並立即成為系統內另一個單元過程輸入的物質或能量流。例如，在一個整合的工業園區內，A工廠產生的廢熱被B工廠回收利用。在盤查計算中，這類內部流必須被排除在最終的環境交換總表之外，因為它們並未從環境中額外索取，也未最終排放到環境中。計算的焦點應始終放在跨越系統邊界的「基本流」，即直接從環境獲取的資源，以及最終排入環境的排放物與廢棄物。正確識別與處理內部流，是避免重複計算、確保盤查結果準確性的關鍵。

此外，計算過程需緊密結合前一節討論的分配問題。若系統中存在多個產品或涉及開環回收，則在數據縮放前，必須先根據選定的分配程序，將共生產程或回收過程的環境負擔合理地分配給所研究的產品系統。例如，在一個煉油廠的共生產程中，生產汽油、柴油與其他石化產品的環境負荷，需按質量、能量或經濟價值等基準進行分配。只有完成分配後，屬於研究對象的那部分環境負荷才能被納入後續的縮放與匯總計算。這一步驟確保了計算結果能公正地反映研究產品所應承擔的責任。

數據的品質與一致性在整個計算階段至關重要。由於盤查數據可能來自不同年代、不同地理區域與不同技術代表性，計算時需評估這些差異對最終結果的潛在影響。有時需要對數據進行調整或使用平均數據來代表某一類技術。計算過程本身也應具備透明度與可追溯性，意味著每一步縮放因子、分配係數與匯總計算都應被清晰記錄，以便在後續的生命週期解釋階段進行敏感性分析與不確定性評估。最終產生的盤查結果，不僅是一系列數字，更是承載了所有前期方法選擇與數據假設的綜合體現，為量化評估產品系統的環境績效奠定了堅實的數據基礎。

5.4 未來流與長期排放處理：處理超過 100 年的長期環境影響。

在生命週期盤查分析中，未來流與長期排放的處理是一項極具挑戰性的方法學議題。當產品系統涉及的材料或排放物具有長達數十年甚至數百年的環境影響時，傳統的靜態盤查模型可能無法充分反映其真實的環境負荷。例如，建築物中使用的

水泥在其使用階段雖無顯著排放，但水泥生產過程所釋放的二氧化碳會在大氣中存留數百年，持續對氣候系統產生影響。同樣地，核能發電產生的高放射性廢料，其潛在危害期可長達數萬年。這些超越傳統生命週期時間框架的影響，迫使評估者必須思考如何將時間維度納入盤查模型，以確保評估結果的完整性與科學嚴謹性。

處理長期排放的核心難題在於時間範圍的界定與影響的折現。國際標準如 ISO 14040 系列並未強制規定一個統一的時間邊界，這導致不同研究可能採用 20 年、100 年或 500 年等不同的評估時間範圍，從而使得研究結果難以直接比較。在氣候變遷影響評估中，全球暖化潛勢便是一個典型例子，其計算通常會提供 20 年、100 年和 500 年等不同時間範圍的數值。選擇較短的時間範圍（如 20 年）會凸顯甲烷等短期強效溫室氣體的影響，而選擇較長的時間範圍（如 100 年或 500 年）則會相對提高二氧化碳這種長存留期氣體的權重。這種選擇並非純粹的科學計算，往往隱含了決策者對於近期與遠期風險的價值判斷。

在盤查建模層面，處理未來流涉及對產品系統終結階段及之後的長期行為進行預測與建模。以建築物的拆除與廢棄物處理為例，混凝土被粉碎後作為路基材料，這是一個長達數十年的次級應用階段。在此期間，混凝土的碳化過程會持續吸收大氣中的二氧化碳，形成一種負排放。然而，這種吸收過程緩慢且受環境條件影響，要準確量化其對生命週期淨排放的貢獻，需要建立動態的碳化模型。同樣地，垃圾掩埋場中有機廢棄物分解產生的甲烷，其排放可能持續數十年，排放速率隨時間變化。這就要求盤查數據不能僅是一個靜態的總量，而應是一個隨時間變化的排放函數或序列，以便在後續的衝擊評估中進行更精確的時間整合。

另一項關鍵議題是與長期排放相關的不確定性與情景分析。對於持續超過 100 年的影響，未來技術發展、社會經濟條件、環境政策以及自然系統的反饋機制都存在極大的不確定性。例如，評估一個今日建造、使用壽命為 50 年的建築物，其廢棄建材在 50 年後將如何被處理或回收？未來的能源結構、回收技術效率和廢棄物管理政策都將截然不同。因此，負責任的 LCA 實踐通常要求進行情景分析，例如設定「保守情景」、「樂觀情景」和「技術突破情景」等，以探討不同未來發展路徑下長期排放的範圍。這種分析有助於決策者理解評估結果的穩健性，並識別出無論在何種未來情景下都顯著存在的環境熱點。

在方法學上，動態生命週期評估正逐漸成為處理時間相關問題的重要工具。與傳統的靜態 LCA 將所有排放視為在「時間零點」瞬間發生不同，動態 LCA 明確考慮了排放發生的時間點以及環境影響隨時間的演變。它將盤查數據表示為時間序列，並在衝擊評估階段使用時間依賴的特徵化因子。例如，對於全球暖化影響，動態 LCA 會計算每一噸二氧化碳在排放後每一年所產生的輻射強迫，並將其積分到所選的時間範圍內。這種方法能更真實地反映如生質能源（燃燒時釋放近期吸收的碳）與化石能源（釋放遠古地質封存的碳）之間的差異，儘管其最終的二氧化碳分子相同，但對大氣碳庫的時間動態影響卻不同。

最後，長期排放的處理也觸及了 LCA 的哲學與倫理層面，即我們應如何權衡當代與後代的環境負擔。將遠期影響折現到當前價值，是經濟學中常見的做法，但在環境評估中引入折現率存在巨大爭議。較高的折現率會大幅降低未來損害的現值，可能導致對長期風險的低估。許多學者主張，對於可能造成不可逆或災難性後果的長期影響（如物種滅絕或長期輻射污染），應採用零折現率或極低的折現率，以體現對未來世代的公平性。因此，在報告中清晰說明處理長期排放所採用的時間範圍、折現假設（如果有的話）以及其背後的倫理考量，是確保研究透明度與可信度的關鍵。這也為從盤查分析過渡到衝擊評估階段奠定了基礎，因為後者將具體量化這些長期排放對各類環境端點的潛在影響。