

廢棄物類

核能電廠除役之循環經濟可行性探討

簡淑美*

摘 要

歐盟執委會 (European Commission, EC) 已於 2022 年 7 月公布，將核能和天然氣能源活動列入歐盟分類法涵蓋的經濟活動清單，這意謂著在因應氣候變遷的相關議題，核能發電具有調適與減緩的效應，就其效應除營運階段對於環境衝擊能媲美再生能源之外，對於氣候變遷有減緩的幫助；許多關於核能電廠的研究中，重點都是聚焦在使用階段，對於核能電廠除役的研究甚少進行評估，主要是因為除役過程需要數十年的時間，且一旦核能電廠停止營運後已無任何經濟價值，因此除役對環境、經濟和社會的衝擊影響至今仍不明確。

EC 旗下之聯合研究中心 (Joint Research Center, JRC)，2021 年發布之《核能發電技術評估報告》，除環境保護之永續性指標外，更是提倡循環經濟轉型，使其在經濟發展的同時也將環境永續概念導入經濟活動之投資，本研究參考該評估報告循環經濟的觀點，並以核一廠為例計算核能電廠除役後建材、設備等潛在回收率，由定量結果來探討核能電廠除役對於循環經濟之影響，其類別項目包含鋼筋混凝土、金屬廢棄物 (含組件及設備)、混凝土廢棄物 (含活化及受污染) 和其他廢棄物 (保溫材)，研究結果指出除役後廢棄物總潛在回收率為 57.9%，仍有 42.1% 的廢棄物需貯存於低放射性廢棄物貯存庫，依促進永續投資框架規則之朝向循環經濟轉型，本研究認為核能一廠除役階段可更精進除污技術的研究以利提升除污效果，使其達到外釋標準以利回收再

62 核能電廠除役之循環經濟可行性探討

利用，加速朝核能發電技術循環經濟轉型的目標邁進；此外，研究結果亦能做為《核能發電技術評估報告》除役階段的補充說明，評估核能發電列入永續性經濟活動之適宜性。

【關鍵字】核能電廠、除役、循環經濟、核能廢棄物

* 泰興工程顧問股份有限公司 核能工程部

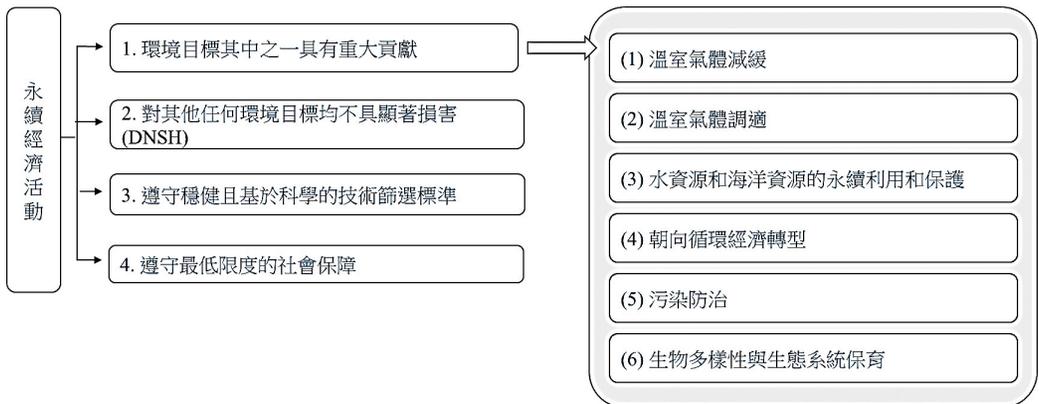
資深工程師

一、前言

歐盟執委會 (European Commission, EC) 將核能和天然氣能源活動列入歐盟分類法的經濟活動清單，顯示了歐盟對於多元化能源來源和應對氣候變遷的策略。核能在減少碳排放方面具有顯著的優勢，相較於燃煤和天然氣等能源，核能在發電過程中減少大量的溫室氣體排放，對於降低溫室氣體排放和應對氣候變遷具有積極的影響。

2019 年 6 月歐盟技術專家小組 (Technical Expert Group, TEG) 針對永續金融 (Sustainable Finance)，提出歐盟永續性經濟活動的通用分類系統 (EU-Wide Common Classification System for Sustainable Economic Activities)，為公司、投資者和決策者，提供適當的綠色投資定義，建立永續性投資的清單，幫助歐盟擴大永續性投資和推動歐盟綠色協議，旨為希望能調動大量民間投資加快綠色轉型，緩解市場分裂並將投資轉移到最需要的發電技術。

除溫室氣體減緩與調適作為重要指標，還包括五項環境目標，分別為水資源和海洋資源的永續利用和保護、朝向循環經濟轉型、污染防治、保護和恢復生物多樣性和生態系統，綜合考量發電技術的相關廢棄物及排放，是否會對環境造成長期顯著性傷害。



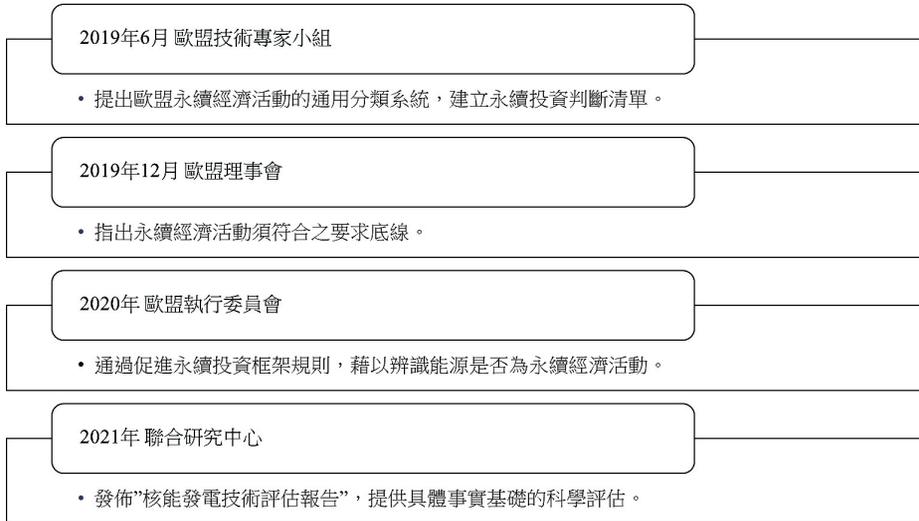
資料來源：本研究繪製

圖 1 歐盟永續性經濟活動的通用分類系統及環境目標

歐盟理事會 (The Council of the EU, EU) 在 2019 年 12 月歐洲議會指出，永續性經濟活動投資必須符合的四個要求，包括六項環境目標其中之一具有重大貢獻 (Substantial Contribution)、對其他任何環境目標均不具顯著損害 (Do No Significant Harm, DNSH)、遵守穩健且基於科學的技術篩選標準 (Technical Screening Criteria)、遵守最低限度的社會保障 (Minimum Social Safeguards)，並在 2020 年 4 月 15 日通過建立『促進永續投資框架規則』 (Establishment of a Framework to Facilitate Sustainable Investment)。此規則可提供歐盟內所有企業和投資者一套『永續經濟活動分類』 (Taxonomy for Sustainable Economy Activities)，以識別哪些能源是被認為具有環境永續性的投資 (如圖 1)。

為釐清核能發電是否屬於符合 DNSH 準則之技術，EC 旗下之聯合研究中心 (Joint Research Center, JRC) 於 2021 年發布 Technical Assessment of Nuclear Energy with Respect to the ‘Do No Significant Harm’ Criteria of Regulation(EU)2020/852(Taxonomy Regulation)，以下簡稱《核能發電技術評估報告》，提供具事實基礎的科學評估，供 EC 相關決策者參考。

根據《核能發電技術評估報告》，已明確表示核能在營運階段，溫室氣體排放量接近於零，可以媲美再生能源發電，因此核能發電在減緩氣候變遷是具有貢獻的能源之一，永續經濟活動之發展歷程摘述於圖 2；然而，專案小組提出之報告僅聚焦在營運階段，對於任何發電技術在環境之實質影響及衝擊，應全面性考量包含燃料製造、建廠和除役後廢棄物之處置及管理等各階段，較為客觀。



資料來源：本研究繪製

圖 2 永續經濟活動之發展

本研究以核一廠為例，從除役計畫及環評報告書進行資料收集，盤查分析核電廠除役之相關資料，其評估範疇與系統邊界至整廠除役完畢，並參考《核能發電技術評估報告》朝向循環經濟之觀點，計算核能電廠除役後建材、設備等潛在回收率，本研究結果能做為核一廠除役期間廢棄物處理及除污技術選擇之參考依據，加速朝核能發電技術循環經濟轉型的目標邁進；此外，亦能做為該報告除役階段的補充說明，評估核能發電列入永續性經濟活動之適宜性。

二、文獻回顧

(一) 核能電廠除役

1. 國際核能電廠除役概況說明

(1) 美國：

截至 2024 年，在美國已有 32 座核能電廠永久停止運轉，其中 14 座已完成除役、13 座已完成屏蔽隔離狀態或安全貯存、5 座目前進行除役中，其餘的電廠則處於廠址對外開放準備或安全貯存準備階段。根據美國的除役相關

法規，僅要求經營者需在 60 年內完成核能電廠除役，可依據各廠的需求選擇適宜的除役策略。

依據美國核能管理委員會 (United States Nuclear Regulatory Commission, USNRC) 出版之 NUREG-0586 “Final Generic Environmental Impact Statement on Decommissioning of Nuclear Facilities”，核能電廠的除役方法有三種選擇模式，可分為『立即拆除 (DECON)』、『安全貯存 (SAFSTOR)』及『長期封存 (ENTOMB)』等 3 種。其中又以立即拆除方式 (需要 5~10 年) 或安全貯存方式 (需要 30~50 年) 為主流選擇。

從經濟角度來看，立即拆除方式通常更具成本效益。然而，由於部分核能電廠考量到用過核燃料和放射性廢棄物的貯存地點和處置場尚未完備，因此選擇了安全貯存方式。美國的核電廠經營者也可以選擇結合前兩種策略，即對核子設施的某些部分進行延後拆除，先採取安全貯存，而其他部分則立即拆除，目前台灣核能電廠也是以兩種策略作為核能電廠除役之方式。

(2) 德國：

截至 2024 年，德國已有 33 座核能電廠及原型反應器永久停止運轉，有 6 座正在進行拆除，其中 2 座已完成反應器拆除，並將廠址以『綠地 (Greenfield)』方式對外開放；另有 2 座處於安全貯存階段。

德國的除役策略是由經營者決定其執行策略，各州政府等管制單位則負責審查業者所提出的除役計畫內容，當業者提送的除役計畫符合審查標準時，即發給除役許可。

德國從危害風險角度決定進行核能電廠除役，但除役措施則是以經濟角度進行評估，並從中選擇立即拆除方式或安全貯存後拆除方式。目前 2 座處於安全貯存階段分別為林根 (Lingen) 核能電廠與 Thorium Hoch Temperature Reactor (THTR) 反應器，是採用安全貯存後拆除方式；而其餘的核能電廠則考量到社會經濟層面之影響，並為有效利用電廠專業人員的情況下，選擇了立即拆除方式。

(3) 日本

截至 2024 年日本已有 27 座核能電廠永久停止運轉，1 座已除役完成、24 座停止發電、1 座除役中。日本核能電廠的除役，基本原則就是拆解並移除反應器及其附屬設備與建物，並將土地恢復至未建廠的狀態。除役期間，輻射劑量較高的部分侷限在反應器區域；因此，必須事先進行約 10 年的安全貯存期，讓反應器區域的輻射衰減，藉此可讓執行除役作業的作業人員所接受到的輻射劑量，暴露於跟運轉期間之作業人員一樣的程度。

在安全貯存期間的先進行拆除方面，第 1 階段是進行附屬設備等的拆除，第 2 階段則是進行熱交換器等物的拆除，並確保第 3 階段反應器區域的解體廢棄物搬出路徑、放射性廢棄物貯存庫，以及作業量的均衡化。

2. 核能電廠除役過程主要階段

核能除役 (Decommissioning) 是指當核能設施（如反應爐）達到使用壽命、運轉執照到期無法繼續營運或政府政策決定停用時，對這些設施進行安全的關閉、拆除、除污、貯存和處理的過程。這是一個複雜且長期的工程，確保設施在除役期間核能安全風險和環境衝擊影響降至最低，核能電廠除役過程通常包括幾個主要階段，本研究彙整如表 1。

表 1 核能電廠除役過程主要階段

階段	工作說明
停止反應爐運作並確保安全	<ol style="list-style-type: none"> 1. 反應爐關閉，中止核子分裂反應，待冷卻並減壓後，移除所有燃料棒。 2. 封閉反應爐的所有開口部份，如閘門、活栓等，確保無流體洩漏。
封存反應爐並進行除污及切割	<ol style="list-style-type: none"> 1. 拆除連接於反應爐壓力槽的所有管線、機件，減少槽體的尺寸，再將其緊密包封。 2. 進行除污 (decontamination) 工作，根據評估結果重新規劃圍阻體廠房或通風系統等設施。
完全拆除並確保無放射性污染	<ol style="list-style-type: none"> 1. 完全拆除具有高放射性的材料、機器配件等。 2. 未移除之建物或設備必須無放射性污染，使該區域可以無限制地再使用。

整個除役過程中，安全性是最重要的考慮因素。過程中需要遵守台灣和國際的法規和標準，確保從事除役工作之相關人員和周圍環境的安全。

(二) 核能電廠除役經濟循環

循環經濟致力於透過重新使用廢棄物和利用環境友善的資源，提高社會效益和減少自然資源使用，從而促進經濟永續發展，也是應對當前資源限制和環境問題的重要途徑，此思維建立在減少、再利用和回收材料三個概念的基礎上，以及使用創新技術來提高工業製程中的資源利用率。

從經濟角度來看，核能除役運用循環經濟的理念，回收及再利用除役產生廢棄物的某些部分（例如廢金屬或混凝土碎石）是非常值得推動的策略，在理想狀態下可節省處置能力和減少消耗環境資源。本研究彙整目前國際上對於除役循環經濟的方法和原則其說明如下：

1. 廢棄物最小量：根據美國能源部於 2021 年發佈由國家實驗室執行之專案研究報告，提出在核能設施拆除過程中，通過精確的除污技術，使除役期間產生之廢棄物達到外釋標準，將其生成量最少化，並從輻射防護的角度進行分析，確保其輻射劑量，對人類健康不良影響落在可忽略的水平。
2. 回收和再利用：回收是評估任何核能除役是否有確實減少廢棄物體積之真實指標。Lim et al., (2022) 研究指出韓國核能電廠除役過程中產生的廢棄物，包括金屬或混凝土等材料，應規劃採取最大化地回收和再利用，以日本而言已將流體鋼結構之材料運用於核能反應器建物，相較於鋼筋混凝土能減少對環境資源之利用和需求，除役後達到外釋標準的廢棄物，以韓國為例優先考慮再利用於其他工業領域。
3. 放射性廢棄物處理：Hrncir et al., (2019) 研究指出斯洛伐克 (Slovakia) 核能電廠除役期間中產生的放射性廢棄物，應進行詳細的安全評估以及成本 / 效益估算和可行性研究，以證明規劃之處理及貯存方案的安全性、實用性和成本效益，確保它們不對環境和人類健康造成威脅；同時，也應該研究放射性廢棄物的再處理和再利用技術。

4. 技術創新：中國近年來則是投入研究和開發，尋找更高效、更環保的除污技術、拆除工法和放射性廢棄物處理技術等，以確保除役過程盡可能地低污染和高效率。

(三) 核能發電技術評估報告之循環經濟

根據《核能發電技術評估報告》循環經濟在核能領域的定義主要關注使用的設備、機械、材料和建材的耐用性、可修復性、可升級性、可重複使用性和可回收性。這些特性是循環經濟的基本原則，旨在最大限度地延長設備、機械、材料和建材的使用壽命，減少浪費，提高資源的再利用率，具體來說：

1. 耐用性 (Durability)：設備、機械、材料和建材應該設計成具有較長的壽命，減少提早報廢和資源浪費的情況，並且能夠承受長期使用且不失效能。
2. 可修復性 (Repairability)：設備、機械、材料和建材出現故障或瑕疵應該易於修復，能迅速且符合成本地修復，而非報廢。
3. 可升級性 (Upgradeability)：設備、機械、材料和建材應該具有可升級的特性。這意味著在技術進步或使用需求改變的情況下，產品應該能夠方便地進行升級，而不是必須完全替換。
4. 可重複使用性 (Reusability)：設備、機械、材料和建材的選擇應使用再生材料，減少對有限資源的需求，或選擇符合綠色設計標準的建材，減少對環境的影響。
5. 可回收性 (Recyclability)：設備、機械、材料和建材應該易於回收。在核能電廠的壽命結束後，設備、機械、材料和建材應該能夠被有效地分離和回收，以供再次使用。

這些特性的結合可以幫助確保核能設施的建造、運轉和除役是符合循環經濟原則的，以實現更可持續的能源生產和使用。在《核能發電技術評估報告》循環經濟著重在將來核能電廠除役期間建材、鋼筋、混凝土或運轉期間時廢水等回收再利用之評估；以台灣核能電廠除役為例，若採用循環經濟之理念，在理想狀態下可節省處置能力和減少消耗環境資源；但是其中外釋標準則是一項非常具有挑戰性的任務。

(四) 台灣核能電廠金屬廢棄物減量與再利用之法規及經驗

國際原子能總署 (International Atomic Energy Agency, IAEA) 於 2004 年下半年公布 RS-G-1.7 報告，提出有關放射性固體廢棄物的解除管制 (Clearance) 建議限值。於同年行政院原子能委員會 (現稱為核能安全委員會) 放射性物料管理局參考 RS-G-1.7 報告，隨後同年也跟進公布“一定活度或比活度以下放射性廢棄物管理辦法”，作為放射性廢棄物外釋法源依據。該辦法中明確規定了兩種固體廢棄物的外釋方式：

- (1) 符合管理辦法中附表的放射性廢棄物的活度或比活度限值；
- (2) 依據輻射劑量評估，1 年內所造成個人之有效劑量不超過 0.01(mSv)，且集體劑量不超過 1 人 (Sv) 者。

符合上述規定者得提出外釋計畫，經主管機關核准後方可進行放射性廢棄物的解除管制外釋作業。

根據台電核能月刊 (2011) 刊登之金屬廢棄物解除管制外釋作業執行實務，其經濟效益分析討論外釋及不外釋作業之差異，依廢金屬來源外釋分為 4 個批次，外釋經濟效益則是由廢金屬標售費用及作業執行人力成本計算得知；反之，不外釋作業則採用最終處置之費用作為經濟效益計算。其研究指出，金屬廢棄物如不外釋，而是進行處理並送往最終處置之費用為新台幣 81,069,566 元。然而，若執行外釋作業之支出費用約為 80,139,889 元，相關計算彙整如表 2 所示。從此得知，外釋或最終處置兩者之間的實質差異不具有顯著差異 ($P < 0.05$)，由於這是 2011 年的研究，經過數十年無論是技術普及化或是溫室氣體減緩及調適之急迫性而言，其潛在或是附加價值應會有所提升。

表 2 金屬廢棄物解除管制外釋作業經濟效益分析

批次	第一批	第二批	第三批	第四批
標售總價 (元)	196,000	616,668	271,855	108,800
合計 (元)	1,193,323			
清運重量 (公斤)	20,506	37,406	43,539	8,998
合計 (公斤)	110,449			

批次	第一批	第二批	第三批	第四批
人力估算 (新台幣元)	2,123,000			
規費 (元/公斤)	734 核研所收費標準之非燃性廢金屬處理貯存及最終處置規費			
計算說明	外釋作業： $\text{標售總價(元)} + \text{規費(元/公斤)} \times \text{清運重量(公斤)} - \text{人力成本(元)}$ $1,193,323(\text{元}) + 734(\text{元/公斤}) \times 110,449(\text{公斤}) - 2,123,000(\text{元}) = 80139889(\text{元})$ 不外釋採處理並送最終處置： $\text{規費(元/公斤)} \times \text{清運重量(公斤)}$ $734(\text{元/公斤}) \times 110,449(\text{公斤}) = 81,069,566(\text{元})$			

資料來源：台電核能月刊(2011)；本研究彙整說明

三、研究方法

(一) 目標與範疇界定

本研究說明核一廠除役各階段之作業目標及工作時程，依據除役 4 個階段所對應之工作分解架構 (Work Breakdown Structure, WBS)，核一廠除役為期 25 年內各階段所需達成之工作目標，藉此規劃本研究之範疇及系統邊界界定 (如圖 3)，其主要目標及作業時程，說明如下：

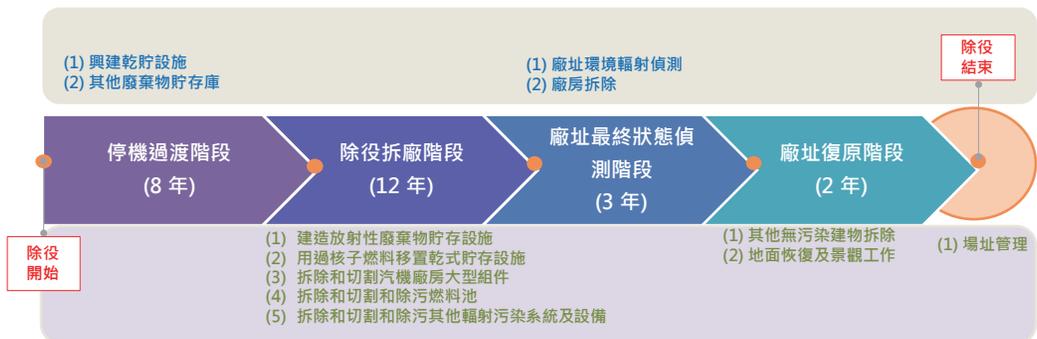
1. 停機過渡階段：

- (1) 除役規劃：主要工作為除役所需之工程顧問、工程規劃及承包商招標。
- (2) 廠房與場地：除役工作地點準備、核能相關設施停止作業、用過核燃料移出至冷卻池、廠址輻射特性量測、拆除前受污染設備及區域進行除污及反應器壓力槽與其內部組件拆解流程規劃準備。
- (3) 放射性廢棄物管理 (第 1 期)：放射性廢棄物設施前置作業準備與建造規劃。

2. 除役拆廠階段：

- (1) 除役規劃：通用設備與材料之招標。

- (2) 廠房與場地：執行現場規劃及準備作業，包括既有廠房改建待外釋廢金屬之臨時倉庫及鋼筋混凝土塊分離場。
 - (3) 放射性廢棄物管理 (第 2 期)：放射性廢棄物貯存庫建造與規劃運轉操作。
 - (4) 用過核燃料移置室內乾式貯存庫：進行燃料池之清空，包含用過核燃料移至乾式貯存設施，燃料池及其他低放射性廢棄物包裝、運送，並存放於所需之互相與貯存庫。
 - (5) 拆解與拆除：除役需求公用設施系統調整 (含電力和用水供應)、聯合結構廠房與汽機廠房內所需拆解及切割作業區域準備、聯合結構廠房內、汽機廠房內及其他輻射作業廠房內所有設備組件之拆除及混凝土結構物表面污染之剷除；其他非輻射作業廠房內設備拆解。
3. 廠址最終狀態偵測階段：
- (1) 建築物拆除：主要是拆除其他污染建物。
 - (2) 廠址最終輻射偵測：執行最終輻射偵測以驗證除役後廠址是否符合除役目標。
4. 廠址復原階段：
- (1) 建築物拆除：將在第三階段內未拆除完之其他無污染建築物拆除完畢，其需拆除的建物有重機械廠房及其他須拆除的建築物等。
 - (2) 土地復原：進行除役範圍內土地之覆土、整地等景觀工程。
 - (3) 除役終止：除役範圍內土地復原之相關作業。



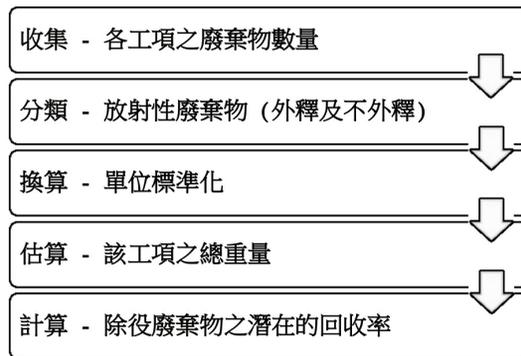
資料來源：本研究繪製

圖 3 核能電廠除役循環經濟探討範疇及系統邊界界定

(二) 盤查分析步驟

核一廠除役環評報告書已於 108 年通過，同時原能會也核發除役許可，因此本研究生命週期評估的範疇，是依照核一廠環評報告書及除役計畫工作分解工項，分別包括拆除和切割汽機廠房大型組件、燃料池、輻射污染系統及設備和其他建物等工程，盤點整個核能一廠在 25 年內待拆除的建物與設施及計算其潛在回收率，故並不受限於期程及環評之影響。

核能發電的健康和環境外部成本，已被廣泛地探討，並且在合理的不確定性的範圍內完全評估。但是就除役階段的健康和環境外部成本相關研究甚少，主要關鍵仍是因為無法決定除污後的外釋標準，在各種永續經濟活動的過程中，污染物排放常被認為是一種不可或缺的元素，因此要根絕污染（零輻射）不但在技術上相當困難，在經濟上也極不可及。



資料來源：本研究繪製

圖 4 除役廢棄物數據收集及整理

根據《核能發電技術評估報告》，經濟面的永續評估，是以循環經濟的思維來進行討論，廢棄物去向也是很重要的環境永續目標，應分別考量化學性廢棄物和放射性廢棄物兩種指標。對應臺灣相關法規要求即是區分為放射性廢棄物和事業廢棄物（含非放射性廢棄物）兩類，事業廢棄物將會依據環境保護署之「廢棄物清理法」將電廠產生之事業廢棄物，再細分為一般事業廢棄物及有害事業廢棄物；一般事業廢棄物可經主管機關認可之清理單位處理，而有害事業廢棄物則須依「有害事業廢棄物認定標

準」、「事業廢棄物貯存清除處理方法及設施標準」和「經濟部事業廢棄物再利用管理辦法」辦理，本研究不將其列入除役循環經濟探討範疇及系統邊界；對於放射性廢棄物，評估中考慮了部分材料具有輻射污染須除污後才能再利用的事實，若無法達到外釋標準則是依據輻射劑量高低，分別貯存至低或高放射性廢棄物貯存場。除役放射性廢棄物數據收集及整理，包含五大步驟分別為收集、分類、換算、估算及計算（如圖 4）。參考《核能發電技術評估報告》朝向循環經濟之觀點，計算核能電廠除役後建材、設備等潛在回收率，計算公式如下列所示。

$$\text{整體建材或設備的回收率} = \frac{\text{可回收的建材或設備重量(公噸)的總和}}{\text{除役後建材或設備總量(公噸)}} \times 100 (\%)$$

四、結果與討論

本研究根據核一廠除役環評報告書及除役計畫等資料進行潛在回收率估算，做為核一廠除役循環經濟之討論。首先是鋼筋混凝土的潛在回收率，目前國際上針對核能電廠除役研究發表僅只有 Wallbridge et al. (2013) 和 Seier and Zimmermann (2014) 是根據核電廠實質除役階段進行之研究分析，就英國 Mangnox 電廠（安全封存），對於混凝土回收量為不確定之變數，在衝擊評估則是採用完全不回收之假設；反觀，德國 Lubmin 電廠（立即拆除），則是假設混凝土為 100% 回收，就核一廠除役環評報告書及除役計畫，對於鋼筋混凝土的量體均未有明確的數值，主要是因為不容易估算，但在環評報告書則是提及鋼筋混凝土將會回填至聯合結構廠房及汽機廠房，以不外運為原則，故本研究假設為 100% 回收。

金屬廢棄物分類為活化金屬、污染金屬及初判無污染之金屬，活化金屬主要來源為反應器壓力槽與其內部組件經中子活化所產生之金屬廢棄物，反應器壓力槽不可外釋及可外釋重量分為 878 MT 及 0 MT，反應器內部組件不可外釋及可外釋重量分為 345 MT 及 0 MT，活化金屬不可外釋及可外釋重量小計分為 1,233 MT 及 0 MT，其活度約佔除役金屬廢棄物的 95.6%，但重量僅佔 4.3%，由於活化程度較高，因此不會外釋回收再使用。

污染金屬則是受放射性污染之閥件、製程管線、管路連接件等相關設備，經除污後不可外釋及可外釋重量小計分為 8,842 MT 及 6,699 MT 可外釋；核一廠管制區內初步研判確認無污染者，例如電纜與電纜槽、電力組件、電櫃、搬運設備、加熱與衛生水處理組件與管線、聯合結構廠房與汽機廠房之橋式吊車、鋼材等，總重量約有 11,524 MT，不列計在受污染之金屬內，均能回收再使用。

混凝土廢棄物又包含活化混凝土(生物屏蔽)及污染混凝土，就活化混凝土(生物屏蔽)不可外釋及可外釋重量分為 1,140 MT 及 0 MT，就污染混凝土不可外釋及可外釋重量分為 1,545 MT 及 0 MT，混凝土廢棄物不可外釋及可外釋重量小計分為 2,685 MT 及 0 MT。

其他廢棄物又包括乾性廢棄物(減容後)、濕性廢棄物(固化後)和保溫材，就乾性廢棄物(減容後)不可外釋及可外釋重量分為 242 MT 及 0 MT，就濕性廢棄物(固化後)不可外釋及可外釋重量分為 362 MT 及 0 MT，就保溫材不可外釋及可外釋重量分為 30 MT 及 212 MT，其他廢棄物不可外釋及可外釋重量小計分為 634 MT 及 212 MT。

綜整上述內容，評估結果整理至表 3。以回收再利用及潛在回收率的比例討論，就鋼筋混凝土部分，其潛在回收率為 100%，就金屬廢棄物部分：由於主要來源為反應器，其潛在回收率為 0.0%；就污染金屬部分：汽機組、製程管線及通風元件部分廢棄物可外釋，故提升潛在回收率之比例(43.1%)；就電纜與電纜槽等無污染之金屬則 100% 外釋回收；就活化混凝土部分：與金屬廢棄物一樣，主要為反應器周圍之生物屏蔽，其潛在回收率為 0.0%；就其他廢棄物部分：為固化及減容後之廢棄物，故潛在回收率一樣為 0.0%。

整體而言，金屬廢棄物(包括活化金屬、污染金屬和初判無污染之金屬)、混凝土廢棄物和其他廢棄物潛在回收率僅只有為 57.9%，換言之將會有 42.1% 的廢棄物在短時間內活化程度無法達到外釋標準，需要貯存於低放射性廢棄物貯存庫，就永續分類標準之朝向循環經濟轉型，就本研究認為仍有需要進行更多除污技術的研究以利提升除污效果，加速讓核能發電技術循環經濟轉型的目標。

活化金屬主要是反應器壓力槽及其內部組件，若要進行除污達到外釋標準在技術上相當具有挑戰性，其費用勢必相當可觀；污染金屬主要是連結組件，雖受輻射污染，但相較於活化金屬輻射劑量較低，若採取適宜之除污技術，定能提高潛在回收率；其他廢棄物，相對於直接或是間接受中子輻射影響之機率更顯低，源頭的管制配合適當除污，潛在回收率亦能提高。

污染金屬除污技術選擇取決於多個因素，包括污染的性質、分佈情形、劑量高低等，就表面除污而言可以考量研磨消除法、加壓水柱或是研磨料噴射法；對於處理金屬內部深處則是須由化學溶液或是電化學方式；然，污染金屬除污技術選擇並非單一方法，關鍵策略是針對上述之因素進行分類，採用複合式技術以化學方法來處理深層污染，然後再使用機械方法來清潔表面，結合多種技術以確保可達到外釋標準以便回收再利用，且可避免產生大量的二次廢棄物的疑慮。

表 3 核一廠除役廢棄物潛在回收率估算

類別	不可外釋 (MT)					可外釋 (MT)	潛在回收率 *
	放射性廢棄物之分類 (MT)				合計 (MT)		
	超 C 類	C 類	B 類	A 類			
1. 金屬廢棄物							
1.1 活化金屬							
1.1.1 反應器壓力槽	0	0	0	878	878	0	0.0%
1.1.2 反應器內部組件	72	37	0	236	345	0	
小計	72	37	0	1,114	1,223	0	
1.2 污染金屬							
1.2.1 閥件	0	0	32	510	542	527	43.1%
1.2.2 熱交換器	0	53	78	3,395	3,526	70	
1.2.3 泵	0	0	1	475	476	294	
1.2.4 桶槽	0	0	163	344	507	668	
1.2.5 其他汽機廠房組件	0	0	0	34	34	39	
1.2.6 汽機組	0	0	0	0	0	2,564	
1.2.7 製程管線	0	55	346	1,858	2,259	1,012	
1.2.8 管路連接件	0	8	53	151	212	237	

類別	不可外釋 (MT)					可外釋 (MT)	潛在回收率 *
	放射性廢棄物之分類 (MT)				合計 (MT)		
	超 C 類	C 類	B 類	A 類			
1.2.9 儀器管線	0	3	0	0	3	0	(接續前頁)
1.2.10 雜項製程組件	0	1	123	97	221	339	
1.2.11 內襯鋼板與燃料格架	0	232	0	788	1,020	81	
1.2.12 通風元件	0	1	32	9	42	868	
小計	0	353	828	7,661	8,842	6,699	
1.3 初步研判無污染之金屬							
1.3.1 電纜與電纜槽	0	0	0	0	0	2,435	100.0%
1.3.2 電力組件	0	0	0	0	0	445	
1.3.3 電櫃	0	0	0	0	0	974	
1.3.4 搬運設備	0	0	0	0	0	102	
1.3.5 加熱與衛生用水組件	0	0	0	0	0	65	
1.3.6 加熱與衛生用水管線	0	0	0	0	0	45	
1.3.7 橋式吊車 (天車)	0	0	0	0	0	500	
1.3.8 鋼材 (含鋼構)	0	0	0	0	0	6,958	
小計	0	0	0	0	0	11,524	
2. 混凝土廢棄物							
2.1 活化混凝土 (生物屏蔽)	0	0	0	1,140	1,140	0	0.0%
2.2 污染混凝土	0	0	0	1,545	1,545	0	
小計	0	0	0	2,685	2,685	0	
3. 其他廢棄物							
3.1 乾性廢棄物 (減容後)	0	0	0	242	242	0	25.1%
3.2 濕性廢棄物 (固化後)	0	0	131	231	362	0	
3.3 保溫材	0	0	0	30	30	212	
小計	0	0	131	503	634	212	
合計	72	390	959	11,963	13,384	18,435	57.9%

註：* 本研究計算；

計算說明：{可外釋 / (不可外釋 + 可外釋) × 100%}

以活化金屬為例：{0 / (1,223 + 0) × 100%} = 0%

資料來源：除設計畫第九章；低放射性廢棄物分類之判別，依據「低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」所列之長短半化期核種參考濃度，以分率和方式計算，作為低放射性廢棄物 A、B、C 及超 C 類分類依據。

五、結論

目前核一廠已進入除役階段，接下來核二及核三廠將會陸續除役，由此可知，核能電廠除役將是臺灣未來重大工程之一，且核能電廠除了面對非核家園的減核政策，如期如質除役或甚至提前除役等迫在眉睫的重責大任；同時，用過核燃料的安全存放、放射性廢棄物最終處置和除役完成後廠址復原的使用，都是社會大眾重視之議題。

因此，本研究核能電廠除役之循環經濟，參考歐盟理事會提出『建立促進永續投資框架規則』，核能電廠除役經濟評估是導入循環經濟之思維，透過除役後產生廢棄物之潛在回收率進行定量分析，從結果得知除役後仍有 42.1% 是短時間無法外釋回收，需要貯存於低放射性廢棄物貯存庫，由於本研究數據是參考除役計畫和環評報告書，當時尚未決定除污方式和執程序，故以嚴謹思維一分為二，確定無涉及任何輻射污染之建材、管線、機械等，才進行回收；就永續分類標準之朝向循環經濟轉型，就本研究認為仍有需要進行更多除污技術的研究以利提升除污效果，加速讓核能除役朝循環經濟轉型的目標。

污染金屬除污技術選擇取決於多個因素，包括污染的性質、分佈情形、劑量高低等，就表面除污而言可以考量研磨消除法、加壓水柱或是研磨料噴射法；對於處理金屬內部深處則是須由化學溶液或是電化學方式；某些情況下，可以使用化學方法來處理深層污染，然後再使用機械方法來清潔表面，結合多種技術以確保可達到外釋標準以便回收再利用。其他廢棄物，避免一次性的耗材使用。若提升污染金屬及其他廢棄物之潛在回收率，必能加速朝核能發電技術循環經濟轉型的目標邁進。

參考文獻

- Joint Research Center(2021). “Technical assessment of nuclear energy with respect to the “do no significant harm” criteria of Regulation (EU) 2020/852 (Taxonomy Regulation)” . Available online: https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/business_economy_euro/banking_and_finance/documents.pdf
- Caldas Neto, A.B. and Silva, A.T.(2023). “Strategies for Decommissioning Small Nuclear Reactors in Brazil” . *Nuclear Engineering and Design*, 414, 112608.
- Hyun, D., Kim, I., Lee, J., Kim, G.H., Jeong, K.S., Choi, B.S., and Moon, J.(2017). “A methodology to simulate the cutting process for a nuclear dismantling simulation based on a digital manufacturing platform” . *Annals of Nuclear Energy*, 103, 369-383.
- Vico, A.M., Noguerales, M.C., Rodríguez, L., and Álvarez, A.(2021). “Clearance of building of a former uranium concentrates plant” . *Annals of Nuclear Energy*, 159, 108313.
- Liu, H., Khan I., Zakari, A. and Alharthi M.(2022). “Roles of trilemma in the world energy sector and transition towards sustainable energy: A study of economic growth and the environment” . *Energy Policy*, 170, 113238.
- Ramirez-Corredores, M.M., Diaz, L.A., Gaffney, A.M. and Zarzana, C.A.(2021). “Identification of opportunities for integrating chemical processes for carbon (dioxide) utilization to nuclear power plants” , 150, 111450.
- Lim, Y.J., Lee, B.S., Park S.O. and Lee, S.G.(2022). “A study on the clearance waste recycling scenario in the decommissioning of Korea’ s nuclear power plants” . *Annals of Nuclear Energy*, 178, 109366.
- Konno, T.(1999). “Construction materials for reactor buildings for decommissioning and recycling” . *Nuclear Engineering and Design*, 192(2-3), 365-380.

- Chang, I.G. and Cheong J.H.(2023). “A new proposal for controlled recycling of decommissioning concrete waste as part of engineered barriers of a radioactive waste repository and related comprehensive safety assessment” . Nuclear Engineering and Technology, 55(2), 530-545.
- Hrncir, T., Strazovec, R. and Zachar M.(2019). “Potential for recycling of slightly radioactive metals arising from decommissioning within nuclear sector in Slovakia” . Journal of Environmental Radioactivity, 196, 212-224.
- Xie, Y.P., Wang, J., Hu, Y.C., Sun, Q., Li, X.B, Wang, S. and Liu G.M.(2023). “Numerical simulation and experiments study on laser ablation decontamination for strontium and cesium from contaminated 316L stainless steels in spent nuclear fuel reprocessing” . Progress in Nuclear Energy, 161. 104760.
- Kurniawan, T.A., Othman, M.H.D., Singh, D., Avtar R., Hwang, G.H., Setiadi, T. and Lo, W.H. (2022). “Technological solutions for long-term storage of partially used nuclear waste: A critical review” . Annals of Nuclear Energy, 166, 108736.
- International Atomic Energy Agency(2004). “Application of the Concepts of Exclusion, Exemption and Clearance, IAEA Safety Standards Series No. RS-G-1.7” . Available online: <https://www.iaea.org/publications/7118/application-of-the-concepts-of-exclusion-exemption-and-clearance>
- 台灣電力股份有限公司 (2021) , 核一廠除役計畫。取自於：<https://www.taipower.com.tw/tc/page.aspx?mid=1471>
- Wallbridge, S., Banford, A., and Adisa, A.(2013). “Life Cycle Environmental Impacts of Decommissioning Magnox Nuclear Power Plants in the UK” . The International Journal of Life Cycle Assessment, 18(5), 990-1008.
- Seier, M., and Zimmermann, T.(2014). “Environmental Impacts of Decommissioning Nuclear Power Plants: Methodical Challenges, Case Study, and Implications” . The

International Journal of Life Cycle Assessment, 19, 1919-1932.

World Nuclear Industry Status Report.(2020). 取自於：<https://www.worldnuclearreport.org/-World-Nuclear-Industry-Status-Report-2020-.html>

United States Nuclear Regulatory Commission.(2021). “Final Generic Environmental Impact Statement on Decommissioning of Nuclear Facilities (NUREG-0586)” . 取自於：<https://www.nrc.gov/docs/ML1805.pdf>

林志宏、徐仲彥 (2015)，核能電廠除役作業安全分析之審查技術研究，行政院原子能委員會放射性物料管理局委託研究計畫期末報告。取自於：<https://www.aec.gov.tw/share/file/information>

白寶實、許文勝、李宜娟、楊雋之 (2012)，核能電廠除役計畫審查技術之研究，行政院原子能委員會放射性物料管理局委託研究計畫研究報告。取自於：<https://www.aec.gov.tw/share/file/information/.pdf>

王正忠、張峰榮 (2011)，金屬廢棄物解除管制外釋作業執行實務，台電核能月刊。取自於：<http://archived.chns.org/s.php?page=4&id=34&id2=1804.html>

