

減碳技術環境影響因子分析—以碳捕存為例

陳俊佑^{1*} 呂慶慧² 曾湘捷¹

摘 要

目前國際上較積極的CO₂減量方式包括：(1)節約能源、(2)發展清潔替代能源及再生能源、(3)碳捕存(Carbon capture and storage, CCS)技術的應用、以及(4)課徵碳稅。各種低碳技術如再生能源(地熱能、風能、太陽能等)和碳捕存技術(CCS)，成了國際上降低CO₂之關鍵技術。我國有98%能源來自於進口煤炭及天然氣，且擁有多座火力發電廠，尤其臺中火力發電廠目前為世界第四大的燃煤火力發電廠，而二氧化碳排放量高居世界之冠。目前我國再生能源尚未能大幅度取代化石能源，因此CCS技術勢必成為重要減碳技術。為了確保碳捕存技術能夠安全順利地開展，國際間多個國家均已修訂及改善現行法規管理體系，以因應及符合該技術推動機制，藉此建立大眾對於CCS的認知與安全、快速發展有利的減碳環境。本研究主要蒐集美國、英國及日本提出之CCS環境監測機制，環境衝擊項目包括大氣資源、地質資源、地表(下)水資源、文化資源、景觀資源、土地利用、廢棄物管理、人類健康和安全、社會經濟等項目進行評估。另也剖析美國FutureGen 2.0計畫之環評案例所進行廣泛的環境調查資訊。最後，就上述國際資訊依國內環境影響評估法範疇界定規定之環境衝擊評估項目作一綜整分析，包括地形、地質及土壤、水文及水質、氣象及空氣品質、噪音及振動、廢棄物、能源與溫室氣體排放、生態系統、土地使用、交通與運輸、公用事業、景觀、社會環境、地震危害及風險評估等項目，期許本研究提出之成果可讓主管機關及業者參考，以及因臺灣位於地震帶，也希望本文的相關地震危害及風險評估分析標準，能發展出有效的對策，以解答民眾的擔憂與疑惑，共同進一步發展國內之碳捕存技術，往2050年淨零碳排的目標邁進。

關鍵詞：碳捕存技術，環境影響因子，環境影響評估法

1. 前 言

由於人為溫室氣體排放導致全球氣候變遷，造成自然環境與人體健康和安全受到衝擊，附屬於聯合國的跨政府組織“政府間氣候變遷專門委員會”(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)，在2021年所發表的第六

次「氣候變遷評估報告」中提及，如未能即時採取行動，減少溫室氣體的排放，則我們所遭受的環境衝擊與經濟損失將十分巨大，並指出(IPCC, 2021)人類對大氣、海洋及陸地暖化的影響是無庸置疑的。大氣、海洋、冰雪圈與生物圈已經發生廣泛且快速的變遷。無論哪種排放情境，全球地表將持續增溫至少到本世紀中。

¹財團法人工業技術研究院綠能與環境研究所 副研究員

²工研院綠能所 正工程師

*通訊作者，電話：03-5915122，E-mail: chunyu@itri.org.tw

收到日期: 2021年09月02日

修正日期: 2022年01月28日

接受日期: 2022年03月29日

除非在幾十年內大幅減少二氧化碳及其他溫室氣體排放，否則全球暖化幅度將在21世紀超過1.5°C及2.0°C。從物理科學角度而言，若要控制人為全球暖化在一定程度內，則需要抑制持續累積的二氧化碳排放量，至少達到淨零碳排，同時大幅減少其他溫室氣體排放。

國際能源署(International Energy Agency, IEA)發表的2019年世界能源展望(World Energy Outlook 2019)報告指出，若要使2050年全球溫室氣體排放量控制在2°C情境(2DS)目標，需藉由能源效率提升、再生能源發展及碳捕存等溫室氣體減量技術，其中碳捕存技術所貢獻之減量潛力效果占9%，而我國2019年能源使用之CO₂排放總量為256.0百萬公噸，若依IEA百分比的年減量約為77萬公噸CO₂e。在2019年至2050年之間，每年捕集和永久封存的二氧化碳平均量為每年15億噸；到2050年，每年捕集和永久封存的二氧化碳總量將達到28億噸；捕集的二氧化碳量幾乎平均分配給電力部門和工業部門，包括鋼鐵生產、水泥生產、精煉廠和上游油氣生產。

各種低碳技術如再生能源(地熱能、風能、太陽能等)和碳捕存技術(Carbon capture and storage, CCS)，成為國際上降低CO₂之關鍵技術。我國有98%能源來自於進口煤炭及天然氣，且擁有多座火力發電廠，臺中火力發電廠更為世界第四大的燃煤火力發電廠，二氧化碳排放量高居世界之冠，加上目前我國再生能源發展尚未能大幅度取代化石能源，因此CCS技術勢必為重要減碳技術之一。

全球碳捕存技術仍處於商業化應用的測試階段，要達到商業化應用還存在著科技不確定性、環境風險、資金不足、社會共識及法規認可等諸多的瓶頸。因此迫切需要從國際、國家的法規與準則的角度，對該技術作業的法規需求、技術規範、減量效益評估等多方面進行研

究分析，以加快CCS的發展及其在全球的認同與普及。為了確保CCS能夠安全順利地開展，國際間多個國家均已修訂及改善現行法規管理體系，以因應及符合CCS推動機制，藉此建立大眾對於CCS的認知與安全、快速發展有利的減碳環境。另，因臺灣位於地震帶，希望本文的相關地震危害及風險評估分析標準，能發展出有效的對策，以解答民眾的擔憂與疑惑。

2. 國際碳捕存技術發展經驗及回顧

目前臺灣封存場址潛能的評估著重在地質條件的可行性，但對於健康與安全風險、社經條件、二氧化碳排放源和輸送管線與封存場址的可行性評估尚不足。民眾對於碳捕存的知識，以及其作為減碳目標的技術選項認知有限、共識不足，這使得碳捕存計畫只在選擇科學性研究的示範封存場址，便遭受來自於地方社區、環保團體的疑慮與反對。另外，針對如何規範碳捕存計畫，只能參考國外的相關法令，國外的管理經驗是否能適用於臺灣的地質條件、環境與法條，仍待進一步的研究和釐清。因此，本文就碳捕存(CCS)技術於國際間主要發展之國家，如：美國、英國及日本，其所提出環境監測機制進行彙整及回顧，並加以研析是否可套用至國內，而在環評制度上其實可分為兩類，政策環評(Strategic Environmental Assessment, SEA)與個案環評(Environmental Impact Assessment of Projects)，前者在於評估政策、計畫與方案，目標為決定某一政策是否應該進行，並評估政策影響面；後者則評估開發行為，關切如何降低開發行為對環境的衝擊。經分析後發現英國採政策環評方式進行，針對CCS發展政策影響面進行評估，進而提出淨煤技術發展架構之政策環境影響評估(Strategic

Environmental Assessment for a Framework for the Development of Clean Coal, FDCC)，目標以定性敘述為主，且為原則性的評估。而美國、日本兩國則採個案環評方式進行，重點就放在環境監測項目及標準上。但不管政策環評或個案環評其評估因子及項目均可作為我國CCS環評參考之依據。

(1) 美國

美國評估國家未來10年內主要CCS發展技術以燃燒後捕集、二氧化碳壓縮及輸送、煤層封存、提高石油採收率技術(Enhanced Oil Recovery, EOR)、鹽水層地層封存等項目為主，並將上述項目作為環境衝擊評估之方案範疇進行評估作業。環境衝擊項目包括大氣資源、地質資源、地表水資源、生物資源、文化資源、美學與景觀資源、土地利用、材料與廢棄物管理、人類健康和 safety、社會經濟、公用基礎建設等項目進行評估。

美國FutureGen 2.0 (US EPA archive document, 2013)是第一個近零排放燃煤電廠專案。與美國能源部合作，FutureGen 2.0專案合作夥伴結合富氧燃燒技術升級伊利諾州Meredosia的電廠，其捕集量每年約130萬公噸的二氧化碳(相當於電廠90%的碳排放量)，其他的排放將減少到接近零排放的水平。使用安全和可靠的管線技術，將二氧化碳運輸至附近的一個封存地點並注儲至地底下，其中封存地點附近還包括一個CCS遊客中心、研究和培訓設施。

在開始全面運作之前，封存場址將由美國能源部進行廣泛的環境調查(如表1)，並承諾符合國家環境政策法(National Environmental Policy Act, NEPA)的評估項目。該場址完全由伊利諾州環保局進行審查許可，以確保其安全性，並提供社區就業機會。該設施將在摩根縣

產生巨大的經濟機會。因為這將是第一個且獨一無二的設施，FutureGen 2.0封存場址有望成為全球關注的焦點。來自世界各地的研究人員和參訪遊客將參觀並了解其運作，使參訪人員可以學習到經驗。

(2) 英國

英國已於相關法令明定減碳目標及碳捕存發展方向，因此淨煤技術發展架構(FDCC)目標以定性敘述為主(Entec UK Limited, 2009)，並提出一系列措施(如：公告國家示範計畫及商業化計畫項目、創造低碳電力投資環境、技術研發與創新、設立CCS研究中心、法規障礙排除、建立運輸與封存基礎設施、取得專業供應鏈與人力等)，以加速CCS相關佈署，並透過環境影響評估徵詢各界意見。英國CCS環境影響評估根據不同評估項目進行環境衝擊因子評定(如表2)。

(3) 日本

目前日本CCS技術發展以離岸地質封存為主要方向，因此當要進行CO₂地質封存前，須取得《海洋污染與海上災害防治法》相關許可規定。日本環境省為妥善實施特定二氧化碳氣體海底地層封存許可之申請手續，於2007年修正《海洋污染與海上災害防治法》部分法條(日本環境省，2007)，並規範欲申請進行二氧化碳海底封存者須提供相關文件進行審核(包含：海底地層封存事前評估書)，表示須依據海底地層封存行為對海洋環境影響之調查結果所進行之事前評估。其評估項目如下：

A. 水環境和海底環境

- 總碳酸濃度、氫離子濃度等二氧化碳濃度指標
- 硫化氫和其他有害物質的濃度

B. 海洋生物

表1 美國 FutureGen 2.0環境調查項目(本研究整理)

環境評估因子	場址建造及試營運階段	營運階段
空氣品質	➢ 建造設備及土地擾亂活動會導致短期內對當地空氣品質的影響。	➢ 電廠及封存作業將可能會增加環境空氣中污染物的濃度。最大的增加可能是： SO_2 、 NO_2 、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 及CO
氣候及氣象	➢ 無影響	➢ 無影響
地質	➢ 注入目標層：地質組成、預計注入深度及 CO_2 膠羽半徑 ➢ 蓋層：地質組成、厚度、Well penetrations (Region of influence, ROI)	➢ 潛在發生地震可能性 ➢ 斷層分布監控 ➢ 潛在的負面影響
地理和土壤	➢ 對土壤的擾動(包括減少、成分改變和潛在的洩漏污染)	➢ 潛在的洩漏污染
地下水	➢ 是否使用地下水，若否則無影響	➢ 必須排除在地下飲用水源附近
地表水	➢ 潛在的泥沙量增加 ➢ 河道侵蝕 ➢ 水流經過或土地擾動之污染源	➢ 廠區廢汙水排放
濕地	➢ 場址設計及規劃避免影響到當地的溼地 ➢ 建造場址附近濕地調查	➢ 無影響
生態	➢ 潛在受威脅及瀕臨絕種動植物調查	➢ 無影響
文化資產	➢ 調查場址現場是否有文化資產	➢ 影響只會發生在建造過程中
土地利用	➢ 土地用途轉換(農田轉工業用地) ➢ 石油或天然氣井取代 ➢ 土地評價與場址評估 ➢ 周圍土地利用 ➢ 符合區域規劃要求	➢ 無影響
噪音與振動	➢ 交通工具進出、常規操作及機具啟動，在最接近廠區處，其噪音增加量	➢ 現場操作及交通工具進出，其噪音增加量
廢棄物管理	➢ 建造材料及產生之廢棄物	➢ 操作使用材料及產生之廢棄物 ➢ 洩漏產生之污染
人體健康、安全與風險	➢ 職業風險：預測年度事故案件 ➢ 空氣排放風險：無明顯有害氣體排放 ➢ 封存洩漏釋放：封存設施操作前無影響	➢ 職業風險：預測年度事故案件 ➢ 封存洩漏釋放：井破裂造成無預警洩漏，對於個體之影響風險(以 CO_2 及 H_2S 評估) ➢ 災難性事故或破壞：場址災難性釋放造成個人可能受到之影響
社區服務	➢ 提升就業機會與就學率	➢ 提升就業機會與就學率
社會經濟	➢ 潛在的建造工人進駐，短期內對於住房市場是有利益的 ➢ 建造過程對於附近居民住處之景觀有影響	➢ 工人常駐及場址長期營運：整體成長(人口、工作職缺、住房市場)

表2 英國CCS環評環境衝擊因子(本研究整理)

評估項目	整體評估說明
氣候變遷	• 減少英國或國際間CO ₂ 的排放量可能有顯著正面及長期的影響。
生態(動植物)	• 減緩氣候變遷可減少生態影響，但廠址、管線及洩漏之建造會帶來負面影響。
資源及原料	• CCS營運與商業化可能增加英國及國際間資源及原料之使用。
經濟與技術	• CCS的營運與商業化可能為英國的經濟及技術帶來正面影響。 • 使用煤炭，並保持一個多樣性及可靠的混合能源發電類型，可保障能源安全。
洪水災害風險及海岸侵蝕	• CCS的營運與商業化，於洪水風險之策略層面上具有不利的影響。
水質	• CCS的營運與商業化可能對水質造成不利影響，如溶劑使用、CO ₂ 洩漏及開發過程。
交通及運輸	• CCS的營運與商業化於短期施工期間及長期操作營運期間之運輸造成影響，若透過管線運輸可降低影響。
景觀、城鄉風貌	• CCS的營運與商業化可能對於附近景觀造成負面影響。
考古與文化資產	• 減緩氣候變遷對考古遺跡是有益的，但場址及管線將有負面影響。
空氣品質	• 減緩氣候變遷對空氣品質是有益的。 • 逸散高濃度CO ₂ ，對於人體健康將有暫時的負面影響。 • CCS對NO _x 及CO _x 排放減量有正面效益，但取決於捕集技術之選取。
土壤和地質	• 若因蓋岩、斷層、密封性較差導致逸散，將可能誘發地震活動和海床變形之長遠負面影響。 • CCS管線線路及場址將致使土壤流失。
健康	• 相較於傳統燃煤電廠，CCS的操作營運對於英國的總排放量有正面影響。

- 浮游生物的棲息地
- 魚類等遷徙動物的棲息地狀況
- 海藻和藻類的生長狀況和珊瑚的棲息地狀況
- 海底動物棲息地

C. 生態系統

- 海藻林、濕地、珊瑚群落和其他脆弱生態系統的狀況
- 海洋生物的產卵場域或棲息地的海域狀況
- 海底熱泉生態系統和其他特殊生態系統的

狀況

D. 海洋的利用

- 作為海上休閒場所
- 作為以保護海洋公園等自然環境為目的而設置的區域之使用狀況
- 作為漁場
- 作為主要航線的使用
- 海底電纜鋪設、海底資源勘探或挖掘等海底利用

另，日本於2006年由環境省召開之第一次

二氧化碳海底儲存專家委員會(日本環境省, 2006), 針對二氧化碳地層儲留可行技術文件中載明, 監測行為不僅為公共安全的確認, 更為封存操作有效性的實證。環境省海洋環境保護單位亦表示此一監測技術得有效觀測環境影響並應訂定相關許可要求以監管注儲行為。其所提出之監測項目包含:

- A. 注入井周圍二氧化碳流量、壓力、溫度等。
- B. 各種壓力計、流量計、溫度計等。
- C. 大氣、地下水、土壤等洩漏檢測。
- D. 觀測井中採集地下水與空氣進行化學分析檢測示蹤劑。
- E. 二氧化碳移棲狀況監測。
- F. 地震探查、電磁探測, 重力、磁力探測, 微地震監測與記錄。

3. 碳捕存技術的環境效益和衝擊分析

目前碳捕存計畫並未明定需要進行環境影響評估, 惟可於不同條件下, 啟動個案環評程序, 諸如開始新電廠計畫、翻新舊電廠的環境差異分析、開發規模達到個案環評門檻面積等等。因此, 本研究就第二章國際碳捕存技術發展經驗, 進行檢閱及分析, 彙整整體環境效益及衝擊如下所述:

碳捕存環境與健康效益包括降低 CO_2 排放、降低 SO_x 排放、降低懸浮微粒、降低 HCl 和 HF (沿海生物毒物衝擊主因) 排放。但是這些環境與健康效益必須要以 CCS 的生命週期來檢視, 才得以較真實的反應 CCS 對於整體環境的影響。碳捕存的環境與健康衝擊則包括(Metz *et al.*, 2005; U.S. Department of Energy, 2013a):

- (1) 增加資源消耗(例如石化燃料、水資源、石灰石、氨水)。
- (2) 增加廢棄物與附產品(例如爐灰/渣、脫硫化

殘留物、硫化物、碳捕集所需之吸附物)。

- (3) 增加空氣污染物排放(例如 NO_x 、 NH_3)。
- (4) 其他副作用(例如增加空氣懸浮物、形成對流層臭氧、產生致癌物質)

另, 碳捕存環境與健康衝擊風險的來源, 包括(Metz *et al.*, 2005; U.S. Department of Energy, 2013a):

- (1) 二氧化碳洩漏(增加人為排放, 造成全球溫室效應; 高濃度 CO_2 的人體健康風險、生物風險、飲用水和土壤酸化)。
- (2) 二氧化碳注入引發地震。
- (3) 二氧化碳流組成的關鍵風險, 衝擊運輸管線(腐蝕影響、水合物形成風險、二氧化碳流特性的風險、運輸流的伴隨物質), 危害封存的完善度。
- (4) 健康和環境毒物, 例如 H_2S , SO_x and NO_x , 重金屬污染地下水, 二氧化碳的示蹤劑。

4. 結果與討論

碳捕存技術在環境影響評估過程著重於地質、地下水監測及土壤。推動大規模的 CO_2 地質封存計畫, 無可避免地必須面對民眾對安全性議題的疑慮。從背景值監測工作, 基線資料背景值的監測主要是為了提供建構地質模型所需要的基礎數據, 且希望進一步能進行 CCS 的環境影響預測, 同時可以對場址建設運轉階段進行環境影響評估, 針對開發地進行有效的修復策略, 並且讓未來場址運行中能有可比對的參數基礎。注入階段例行性監測, 以確認有無 CO_2 外釋事件的發生, 並且持續監測 CO_2 團塊的移棲行為。

國內無碳捕存技術開發相關經驗, 因此本文綜整第二節所述之國際間 CCS 環境衝擊影響與監測技術之相關資訊, 並對應於國內目前 CCS 的環境衝擊評估因子, 按照我國「環境影

響評估法」規定之環境影響評估項目，歸納監測必備項目，如表3所示。

為了使將來對碳捕存個案計畫的環境影響衝擊評估也有所依循，本研究整理國內外碳捕存開發行為個案，羅列有關的環境影響評估項目和面向，各評估面向有些具有定性和定量說明，有些只有定性的評估。這些評估的項目需要累積更多的個案資料，才能作為商業規模管理時的參考。這些列舉的定性和定量評估，採取較為保守和謹慎的態度，只要有發生的可能，便列表說明。但這並不表示每一種可能的環境衝擊，其發生的機率和帶來的潛在衝擊程度是一樣的。本文將上述探討的碳捕存技術就國內環境影響評估法範疇界定規定之環境衝擊

評估項目作一綜整分析，如表4所示。

5. 結論與建議

CCS作為一種可觀的二氧化碳大規模減排技術，由於國別的實踐差異和不同國家對其的定位不同，各國都採用了不同的監管路徑和方式，但對CCS流程(捕集、運輸、封存)的大致監管原則與重點問題則確立了相同或相似的框架。這其中，不乏我國作為CCS實踐的新興國家在全面建立和完善自身的CCS法律監管框架過程中可以借鑒的方面。例如：蒐研國際間針對碳捕存技術之環境監督管理相關作法及實際環評案例(FutureGen 2.0碳捕存計畫)所關切的環

表3 建議之CCS環境監測必備項目(本研究整理)

環境影響評估項目	環境監測必備項目
地質	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 建議地質調查應調查與監測項目。 ➢ 依據地質資料蒐集管理辦法。 ➢ 依據地質敏感區基地地質調查及地質安全評估作業準則。 ➢ 地震活動監測(誘發地震危害及風險分析調查)。
地下水	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 建議應監測項目： <ul style="list-style-type: none"> ✧ pH值。 ✧ 總鹼度。 ✧ 總硬度。 ✧ 總溶解固體物(Total dissolved solids, TDS)。 ✧ 重金屬及微量元素濃度。 ✧ 硫酸鹽濃度。
地表水	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 飲用水督導單位應監測飲用水標準。 ➢ 建議應監測項目： <ul style="list-style-type: none"> ✧ pH值。 ✧ 總鹼度。 ✧ 總硬度。 ✧ 總溶解固體物(TDS)。 ✧ 重金屬及微量元素濃度。 ✧ 硫酸鹽濃度。
土壤	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 建議應監測項目： <ul style="list-style-type: none"> ✧ pH值。 ✧ TOC (總有機碳，total organic carbon, TOC)。

表4 國內環境管理及衝擊評估綜整分析(本研究整理)

環境影響 評估項目	開發行為環境影響評估面向	國際定性評估彙整	國際定量評估彙整
地質	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 造成或受到地質相關事件破壞(例如,地震、山崩、排水口) ➢ 降低礦藏或石油資源或獨特地質構造的價值,或無法進入地質構造 ➢ 導致可見的地面隆起或地表垂直向上的位移 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ CO₂因蓋岩、斷層、密封性較差的逸散,可能誘發地震活動和海床變形之長遠負面影響(Entec UK Limited, 2009) ➢ 經由斷層、破壞蓋層或其他途徑,如廢棄井或未使用的井,改變獨特地質構造而造成地質封存二氧化碳的移棲(U.S. Department of Energy, 2013b) 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 建議地質監測項目及參數 <ul style="list-style-type: none"> ■ 依據地質資料蒐集管理辦法 ■ 依據地質敏感區基地地質調查及地質安全評估作業準則 ■ 地質監測項目及儀器(如表5) ■ 地質監測參數表(如表6)
地下水	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 大規模消耗地下水供給會影響到現有水權所有權人使用地下水來源的可取得產能,或干擾地下水補給; ➢ 低觸已建立的水權、分配或是保護地下水的法規作為未來的有利用途; ➢ 由於化學洩漏、鑽井或完井失敗而汙染淺層含水層 ➢ 低觸地區或地方之地下水管理計畫或政府水行政主管部門的目標 ➢ 經由含水層酸化而污染地下水 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 因二氧化碳注入或化學品洩露、鑽井、井開發或井故障導致二氧化碳遷移或有毒金屬溶解和流動,自然產生鹼水(鹹水)的位移(Entec UK Limited, 2009) ➢ 可能由CO₂管線逸散及地層(透過冠岩)造成酸化水體 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 建議應監測項目(GCCSI, 2012; Yang, 2014) <ul style="list-style-type: none"> ■ pH值 ■ 總鹼度 ■ 總硬度 ■ 總溶解固體物(TDS) ■ 重金屬及微量元素濃度(鈣、鐵、錳、鋅) ■ 硫酸鹽濃度
地表水	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 改變暴風雨水排放,這可能會對排水方式、洪水、侵蝕和沉積作用造成不利影響; ➢ 改變或破壞現有農田的排水設施; ➢ 改變滲透速率,這可能會影響(基本上增加或減少)流往下游的地表水體積 ➢ 與適用的暴風雨水管理計畫或條例相抵觸; ➢ 違反任何國家或地方政府水質標準或排放限制; ➢ 影響地表水使得水質不再能達到符合國家或地方政府所建立的水質標準 ➢ 改變地表水資源的可取得性,提供目前或未來使用。 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ CCS場址可能也需要增加淡水的抽取 ➢ 由於碳捕集中使用溶劑,任何排放水皆可能受污染 ➢ 碳洩漏將可能導致地表水優養化(Golder Associates, 2011) ➢ 改變地表水品質(例如酸鹼值、金屬和其他污染物的移動)(Yang, 2014) 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 飲用水督導單位應監測飲用水標準 ➢ 建議應監測項目(U.S. Department of Energy, 2013b; GCCSI, 2012) <ul style="list-style-type: none"> ■ pH值 ■ 總鹼度 ■ 總硬度 ■ 總溶解固體物(TDS) ■ 重金屬及微量元素濃度(鈣、鐵、錳、鋅) ■ 硫酸鹽濃度

表4 國內環境管理及衝擊評估綜整分析(本研究整理) (續)

環境影響評估項目	開發行為環境影響評估面向	國際定性評估彙整	國際定量評估彙整
土壤	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 導致永久性或暫時土壤移除 ➢ 經由轉換為非農業用途造成永久流失優良農地或重要性的農地 ➢ 造成顯著的土壤流失 ➢ 由於有害物質的洩漏造成土壤受到污染 ➢ 改變土壤性質與成分。 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ CCS管線線路及場址將致使土壤流失 ➢ 逸散的CO₂可能造成土壤污染及植被枯萎 ➢ 洩漏之CO₂會降低土壤pH值，TOC和微生物種群(Patil, 2011) 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 建議應監測項目(Golder Associates, 2011) <ul style="list-style-type: none"> ■ pH值 ■ TOC
空氣品質	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 造成標準污染物或有害空氣污染物的排放超出相關的空氣質量或健康標準 ➢ 對於國家環境空氣質量標準或各縣市地方標準，造成空氣品質的不利變化。 ➢ 違反任何國家或地方政府之許可範圍 ➢ 影響能見度 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 周圍的NOx和SOx的排放存在不確定性，應視CCS技術及降低NOx和SOx排放的技術而定。這些影響都需進行場址上的基礎評估 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 工廠等級非CO₂排放推估(Metz <i>et al.</i>, 2005) <ul style="list-style-type: none"> ■ SOx 排放率為0.001 kg/MWh ■ NOx 排放率為0.77 kg/MWh ■ NH3 排放率為0.23 kg/MWh ➢ 排放數據由廠方蒐集，但由環境機關監督，建議應監測項目 <ul style="list-style-type: none"> ■ CO₂ ■ NOx ■ SOx ■ PM₁₀
氣候變遷與溫室氣體	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 造成溫室氣體排放每年增加 ➢ 違反國家或地方政府有關溫室氣體排放的法律或規定 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 碳捕存對CO₂之排放量有顯著正面及長期的影響二氧化碳，但操作不良或管理不當導致之洩漏將增加人為排放，造成全球溫室效應 ➢ 管線對於氣候影響最輕 ➢ 捕集地點以離岸儲存為優先選擇，因其可降低資源需求 ➢ 氣候變遷本身對於碳捕存場址可能有不確定之影響，需要從設計層面中考慮基礎設施、儲存環境(洪水、暴風、海平面變化)及過程中潛在的影響(潛在的溫度變化)¹ 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 把生命週期中，碳捕存計畫導致的能量耗損、採運煤炭、碳運送所增加的碳排放，則燃煤電廠加裝碳捕存設備後之排放強度約為6.01×10⁻⁴ Ton CO_{2e} / kWh (Metz <i>et al.</i>, 2005) ➢ 安裝碳捕集和壓縮設備之燃料消耗比較沒有安裝碳捕集和壓縮之電廠(Patil, 2011) <ul style="list-style-type: none"> ■ 新SCPC (超臨界粉煤燃燒，supercritical pulverized coal, SCPC)電廠增加24–40% ■ NGCC (天然氣複循環，Nature Gas Combined Cycle, NGCC)電廠增加11–20% ■ IGCC (整合型煤炭氣化複循環，Integrated gasification combined Cycle, IGCC)系統增加14–25%

表4 國內環境管理及衝擊評估綜整分析(本研究整理)(續)

環境影響評估項目	開發行為環境影響評估面向	國際定性評估彙整	國際定量評估彙整
土地利用	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 造成鄰近房地產的土地使用限制 ➢ 鄰近無法符合二氧化碳管線通道範圍內、二氧化碳封存區域的土地利用以及相關組件和設施 ➢ 與區域或地方土地利用規劃和分區相抵觸 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 長期影響將發生在需要轉換土地的区域，例如土地提供給管道與二氧化碳封存場 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 新設置每500 MW 超超臨界燃煤電廠並配置燃燒後捕集設施，需要17公頃土地面積(UK DECC, 2009)
資源與廢棄物管理	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 影響區域內現有材料供應商或產業的產能； ➢ 產生的垃圾是屬於市場上未具備的處理或處理技術 ➢ 因專案所需而產生危險廢棄物處理、儲存或處置許可之需求 ➢ 影響廢棄物收集服務的產能，以及處理、儲存或處置設施 ➢ 建立合理可預見的條件而提高危險廢棄物釋放的風險 ➢ 建立合理可預見的條件而提高危險材料釋放的風險 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 增加資源消耗(Patil, 2011) <ul style="list-style-type: none"> ■ 石化燃料 ■ 石灰石 ■ 氨水 ➢ 增加廢棄物與附產品(Patil, 2011) <ul style="list-style-type: none"> ■ 爐灰/渣 ■ 脫硫化殘留物 ■ 硫化物 ■ 碳捕存所需之吸附物 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 工廠等級廢棄物排放推估(Patil, 2011) <ul style="list-style-type: none"> ■ 灰/渣 排放率為28.1 kg/MWh ■ 煙氣脫硫殘渣排放率為 49.6 kg/MWh ■ 碳捕集吸附劑排放率為4.05 kg/MWh
交通與運輸	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 大幅度提高重點公路路段每天的汽車流量，因此超出交通流量處理能力而降低服務水平 ➢ 大幅增加每天的駁船交通流量而超出容納能力，並干擾其他用戶 ➢ 與區域或地方交通改善計畫相抵觸 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 碳運輸最有效且影響較小之方法為藉由直接從發電廠加壓管線至儲存設備，並適當利用現有設施 ➢ 電廠以陸運或船運方式運輸CO₂至新的儲存地點或儲槽，會造成運輸車輛的增加而有不利影響 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 工廠等級碳運輸量推估，運送規模以年捕集100萬噸估算： <ul style="list-style-type: none"> ■ 槽車容量20噸，每日運輸量需2,740噸，以槽車運輸每日需137車次 ■ 船舶容量約3萬~31萬噸/船次，以船舶運輸每月需1~3船次
公用事業	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 影響現有公用基礎設施的有效性或導致臨時故障 ➢ 影響地方和區域公用事業供應商的產能與分布情況，以滿足現有或預期的需求 ➢ 要求公用事業系統升級 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 碳捕集設施的運轉會導致飲用水和製程水、廢水生成以及用電量和發電量的需求增加 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 煤炭發電搭配碳捕存將增加50~100%的水足跡(U.S. Department of Energy National Energy Technology Laboratory, 2013) ➢ 捕集一噸二氧化碳需額外消耗1公噸的水量(GRÜNE LIGA Environmental Group Cottbus, 2010)

表4 國內環境管理及衝擊評估綜整分析(本研究整理)(續)

環境影響評估項目	開發行為環境影響評估面向	國際定性評估彙整	國際定量評估彙整
人類健康與安全	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 於施工和正常運轉條件下，因工業意外、受傷或疾病而提高員工健康風險； ➢ 在運輸、活躍的地質儲存活動和後續關閉注水井的過程中，與二氧化碳捕集相關聯的二氧化碳或其他微量氣體意外釋放，因而提高公共健康風險 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 管線穿刺或破裂最容易造成附近工人受到傷害，主要是因涉及高壓和釋放速度的潛在的身體反應，以及從暴露於極端的溫度下降可能會導致凍傷 ➢ 輸送管道破裂或穿孔有可能會因二氧化碳膨脹和散布產生蒸汽羽流，對公眾造成暴露和風險 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 暴露於超過100,000 ppmv的二氧化碳濃度可能會發生與窒息相關立即危及生命的影響(Entec UK Limited, 2009) ➢ 二氧化碳管道發生事故的可能性介於每100年一次至每10,000年一次 ➢ 富氧燃燒設施運轉過程中發生事故的 가능성이介於每10,000年一次至每1,000,000年一次(Entec UK Limited, 2009) ➢ 二氧化碳輸送管線於1×10^{-6} [死亡/每年]風險等值線之距離約204公尺。(介於1公尺內或7.2公里) (Koorneef, 2010)
生物資源	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 導致陸地或水生群落的位移或喪失棲息地 ➢ 削弱野生動物或植物棲息地的價值 ➢ 造成本土野生動物種群的下降 ➢ 干擾當地居民或遷徙性野生動物物種的移動 ➢ 低觸到陸地、禽類、水生物種及其棲息地的適用管理計畫 ➢ 造成有害的或侵略性植物物種的引進 ➢ 削弱魚類棲息地的價值(包括改變排水方式造成魚類的位移或干擾本土居留魚類的移動) ➢ 導致本土魚類族群的衰退 ➢ 對瀕危、受威脅或其他特殊地位的物種造成不利影響 ➢ 對所列物種的指定重要棲息地造成不利改變。 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 當CO₂自管線或碳儲集層洩漏，局部酸化現象將對長期影響水域，致使影響河流及海洋生態環境，包括增加生物生產力，降低植物多樣性，潛在的毒性衝擊 ➢ 發生在海洋之洩漏，相較於淡水有較小的pH變化，但若與水中的氣體平衡交換後，可嚴重影響浮游動物之生態 	
景觀	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 阻止或降低景觀景色或視域 ➢ 改變區域視覺資源 ➢ 建立眩光或照明太突兀或不符合現有土地用途 ➢ 建立視覺反差影響景觀的品質。 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 建造新電力線路至封存場址、碳運輸管道配置管道標記、封存場址建造新的地面設施，會對視域產生輕微影響² 	

表4 國內環境管理及衝擊評估綜整分析(本研究整理)(續)

環境影響 評估項目	開發行為環境影響評估面向	國際定性評估彙整	國際定量評估彙整
噪音	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 與國家或地方政府噪音條例相抵觸 ➢ 造成施工期間於敏感受體對環境噪音水平之察覺提高-無論是從手機或固定來源 ➢ 造成運轉期間於敏感受體對環境噪音水平之長期性察覺提高-無論是從手機或固定來源 ➢ 對人身或財產造成過度的地面傳導振動 		
濕地與平原	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 造成濕地填積，或甚至改變排水方式而影響到濕地 ➢ 由於土地覆蓋屬性的改變，造成濕地類型或分類的轉變 ➢ 改變分洪河道或氾濫平原，或是甚至妨礙或重定向流量，使得人類健康、環境或個人財產可能會受到影響 ➢ 與適用的洪水管理計畫或條例相抵觸 		
社區服務	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 取代、妨礙有效管道，或增加需求超出可使用的容納量，包括緊急應變服務、消防、執法、醫療設施和學校系統 ➢ 低觸到地方和區域對緊急應變服務、消防、執法、醫療設施和學校系統的規劃。 		
社會經濟	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 取代現有人口或拆除現有的住宅 ➢ 改變人口成長的預測率 ➢ 影響住宅市場 ➢ 取代現有的企業 ➢ 影響當地企業和經濟 ➢ 取代現有職業 ➢ 影響當地就業或勞動力 		

表5 地質監測項目及儀器(日本環境省，2006；張志瑋，2016)

監測方向	項目及儀器
注入井二氧化碳流體之流率、壓力、溫度變化	各種流量計、壓力計、溫度計等
蓋層及儲集層之壓力、溫度變化	各種壓力計、溫度計等
大氣、地下水、土壤等洩漏檢測	觀測井中採集地下水與空氣進行化學分析檢測示蹤劑
儲集層二氧化碳流移棲範圍監測	電磁探測、重力、磁力探測
地震活動監測	誘發地震危害及風險分析調查

表6 地質監測參數表(日本環境省，2006；張志瑋，2016)

資料類型	說明
地質學與地球物理學資料	<ol style="list-style-type: none"> 1. 主要封存構造(儲集層)特性物理量(深度、溫度、壓力、厚度、孔隙率、滲透率、相對滲透率和流體特性等)。 2. 主要蓋層特性物理量(深度、溫度、壓力、厚度、孔隙率、滲透率、毛細管壓力、礦物組成、地質力學特性、裂隙資訊和橫向延伸連續性等)。 3. 釐清封存構造的成因與環境狀況，用以推估更大範圍的構造特性。 4. 地質構造特性評估應包含第二或第三次要蓋層(位於主要蓋層上方)。 5. 地震活動監測(誘發地震危害及風險分析調查)。
地球化學資料	溶解速率、礦化速率
地球力學資料	地層壓縮性、楊氏模數(Young's modulus)、柏松比(Poisson's ratio)壓力強度、張力強度、現地垂直壓力、現地主要和次要水平壓力、地層破壞應力、斷層活化壓力(fault valving pressure)、斷層再活化壓力(fault reactivation pressure)等。
水文學與水力學資料	有無地下水流經過、岩石孔隙率與滲透率
封存工程相關資料	孔隙體積評估、封存潛能評估、壓力與溫度條件限制、灌注性隨壓力與體積的變化行為、灌注速率與時間歷程、CO ₂ 流體可能的移棲範圍等
自然背景地震活動與背景微震噪音	評估灌注行為引發地震的潛在風險
自然和人為之二氧化碳潛在洩漏路徑	由儲集層洩漏至生物圈之可能路徑，如斷層、廢棄井等
地表變形的背景值	針對陸域封存場址監測其地表變形情形

境調查項目，研提環境監測必備項目，其著重項目為地質、地下水、地表水及土壤。

總體而言，首先，各國在建立CCS法律監管框架之初都面臨同樣的問題，是將CCS監管納入當前現有的法律監管框架範圍，還是另闢蹊徑制定新的法律框架對CCS活動進行監管；其次，CCS權利衝突無法避免，法律應明確衝突解決的原則與程式；再次，許可證制度是CCS監管的核心，而資訊公開則是監管有效的重要保障；最後，針對CCS封存的特有問題——關閉後責任制度的提出極大地確立了政府、專案運營方的相對責任和程式安排，為潛在風險提供了制度保障。

在我國建立與完善CCS的法律監管框架的過程中，需要根據CCS監管的不同環節選擇不同的立法路徑，這其中包括捕集階段、運輸階段、注入和封存階段，由於不同環節中當前所涉CCS活動的程度和範圍都不盡相同，因此要考慮針對不同的情況區別對待。例如，在捕集階段，就可以通過適度擴展《環境影響評估法》等法律的適用範圍，對二氧化碳的捕集活動進行有效監管。再如，針對海上封存活動，就要考慮是否專門立法進行監管。

對於CCS各階段的生命週期包括注入前、注入中、注入後和關場等4計畫階段，不同計畫階段皆有不同的監測目的與工作，從背景值監測工作，基線資料背景值的監測主要是為了提供建構地質模型所需要的基礎數據，且希望進一步能進行CCS的環境影響預測，同時可以對場址建設、運轉階段進行環境影響評估，針對開發地進行有效的修復策略，並且讓未來場址運行中能有可比對的參數基礎。注入階段例行性監測，以確認有無CO₂外釋事件的發生，並且持續監測CO₂團塊的移棲行為。

為因應國內多項可行發展之減碳技術推廣，負責之主管機關站在維護環境品質、監督

管理環境衝擊的立場，著重在預防環境污染、強化監測調查、監督開發單位，並可透過管制標準及相關規範促使溫室氣體減量技術之實踐。期許透過本文的分析成果，讓主管機關及業者參考，以及因臺灣位於地震帶，也希望本文的相關地震危害及風險評估分析標準，能發展出有效的對策，以解答民眾的擔憂與疑惑，共同進一步發展國內之碳捕存技術，往2050年淨零碳排的目標邁進。

參考文獻

- 日本環境省，2007。日本環境省告示第八十三号，特定二酸化炭素ガスの海底下廃棄の許可の申請に関し必要な事項を定める件，平成十九年九月十九日。
- 日本環境省，2006。二酸化炭素流の地層貯留に適用可能な監視技術，二酸化炭素海底下地層貯留に関する専門委員会(第1回)。
- 張志瑋，2016。簡述國際二氧化碳地質封存監測方法與法規，能源簡析。
- Entec UK Limited, 2009. Strategic Environmental Assessment for a Framework for the Development of Clean Coal -Environmental Report: Main Report, Department of Energy and Climate Change.
- GCCSI, 2012. Valuation of Potential Risks Arising from a Model, Commercial – Scale CCS Project Site.
- Golder Associates, 2011. Literature Review and Assessment of Potential Impacts of Emissions from Carbon Capture and Storage Projects.
- GRÜNE LIGA Environmental Group Cottbus, 2010. Vattenfall's planned CCS demonstration plant is not a sustainable energy solution, 25 October 2010.
- IPCC, 2021. The Sixth Assessment Report, Climate Change 2021: The Physical Science Basis.

- Koornneef, 2010. Shifting Streams: On the Health, Safety and Environmental Impacts of Carbon Dioxide Capture, Transport and Storage.
- Metz, Bert, Ogunlade Davidson, Heleen de Coninck, Manuela Loos and Leo Meyer, 2005. IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage.
- Patil, Raveendra H., 2011. Impacts of Carbon Dioxide Gas Leaks from Geological Storage Sites on Soil Ecology and Above-Ground Vegetation.
- UK DECC, 2009. Carbon Capture Readiness (CCR) – A guidance note for Section 36 Electricity Act 1989 consent applications.
- US EPA archive document, 2013. Underground Injection Control Permit applications for FutureGen 2.0 Morgan County Class VI UIC Wells 1, 2, 3, and 4 SUPPORTING DOCUMENTATION, March 2013.
- U.S. Department of Energy, 2013a. W.A. Parish Post-Combustion CO₂ Capture and Sequestration Project Final Environmental Impact Statement Volume I, February 2013, DOE/EIS-0473.
- U.S. Department of Energy, 2013b. Environmental Impact Statement for the FutureGen 2.0 Project (DOE/EIS-0460).
- U.S. Department of Energy National Energy Technology Laboratory, 2013. Carbon Storage R&D Project Review Meeting Developing the Technologies and Infrastructure for CCS, August 20-22, 2013.
- Yang, Qiang, 2014. Groundwater hydrogeochemistry in injection experiments simulating CO₂ leakage from geological storage reservoir, International Journal of Greenhouse Gas Control Volume 26 Pages 193-203.

Analysis of Environmental Impact Factors of Carbon Reduction Technology : Carbon Capture and Storage

Chun-Yu Chen^{1*} Joey Lu² Hsiang-Jey Tseng¹

ABSTRACT

At present, the more active ways to reduce CO₂ in the world include: (1) energy conservation, (2) development of clean alternative energy and renewable energy, (3) application of carbon capture and storage (CCS) technology, and (4) levy of carbon taxes. Various low-carbon technologies such as renewable energy (geothermal energy, wind energy, solar energy, etc.) and carbon storage technology (CCS) have become key technologies for reducing CO₂ internationally. 98% of our energy comes from imported coal and natural gas, and we have a number of thermal power plants. The Taichung thermal power plant is the world's largest coal-fired power plant, and its carbon dioxide emissions are also the largest in the world. At present, Taiwan's renewable energy has not been able to substantially replace fossil energy, so CCS technology is an important carbon reduction technology. In order to ensure the safe and smooth development of low-carbon technology, many countries in the world have revised and improved the current regulatory system to respond to and comply with the low-carbon technology promotion mechanism, so as to establish the public's awareness of low-carbon technology and the safety and speed. Develop a favorable carbon reduction environment. This research mainly collects suggestions on environmental monitoring mechanisms proposed by the United States, the United Kingdom and Japan. Environmental impact items include atmospheric resources, geological resources, surface water resources, cultural resources, landscape resources, land use, waste management, human health and safety, and society. Economic and other items are evaluated. In addition, it also analyzes the extensive environmental survey information carried out in the EIA case of the FutureGen 2.0 project in the United States. Finally, a comprehensive analysis of the environmental impact assessment items required by the above-mentioned international information in accordance with the scope of the domestic environmental impact assessment law, including topography, geology and soil, hydrology and water quality, weather and air quality, noise and vibration, waste, and energy. Projects related to greenhouse gas emissions, ecosystems, land use, traffic and transportation, public utilities, landscape, social environment, seismic hazard and risk assessment etc.. It is hoped that the results of this research can be used for reference by competent authorities and industries. Since Taiwan is located in an earthquake zone, it is also hoped that the relevant seismic hazard and risk assessment analysis standards in this paper can develop effective countermeasures to answer the public's concerns and doubts. Together to further develop domestic carbon capture technology and move towards the goal of net zero carbon emissions by 2050.

Keywords: carbon capture and storage (CCS), Environmental impact factor, the law of environmental impact assessment.

¹ Associate Researcher, Green Energy and Environment Research Laboratories, Industrial Technology Research Institute.

² Principal Engineer, GEL, ITRI.

* Corresponding Author, Phone: +886-3-5915122, E-mail: chunyu@itri.org.tw

Received Date: September 2, 2021

Revised Date: January 28, 2022

Accepted Date: March 29, 2022