

# 碳捕捉與封存技術(CCS)發展現況與未來趨勢

台綜院研一所

## 【摘要】

自 1990 年代以來，推動 CCS(Carbon Capture and Storage, CCS) 大型專案(Large-Scale Integrated Projects, LSIP)已成為各國政府進行低碳能源系統轉型的主要策略之一，依據 IEA(2016)能源科技展望報告指出 CCS 為未來減碳關鍵技術第三位，占減量效果 12%。另依據全球捕捉與封存研究所(GCCSI)於 2015 年報告，全球至 2015 年共有 15 個大型 CCS 專案已經營運，至 2017 年將增加為 22 個，總捕捉量可達 4,000 萬噸/年。

然而，受限於缺乏立法與政策的支持、投資成本過高、募集資金困難等諸多因素，全球大型 CCS 計畫發展趨緩，計畫數目由 2014 年 55 項削減至 2016 年 40 項，且面臨高度技術風險及金融風險等潛在風險，如無法商轉及無法獲利等，現有多個處於評估規劃階段 CCS 專案，仍需政府持續協助推動，否則將面臨中止。惟依據能源技術研究院(Energy Technologies Institute, ETI)及全球 CCS 研究院(2015)評估均指出，如能連續部署 CCS 技術，透過複製、大規模生產、“做中學(Learning by doing)”和基礎設施共用可降低風險與成本，最高可減少 45%成本。

基此，各國應該更明確宣示 CCS 為值得投資的低排放技術，在政治層面持續協助推動 CCS 技術發展，加速 CCS 專案部署，以降低成本與風險，並推動「碳定價」(Carbon Pricing)，以提高 CCS 技術減碳成本的競爭力，才能確保 CCS 技術至 2050 年能如期進場應用，否則將產生嚴重的減量缺口。

**關鍵字：**碳捕捉與封存(Carbon Capture and Storage, CCS)；大型綜合專案(Large-Scale Integrated Projects, LSIP)；「碳定價」(Carbon Pricing)

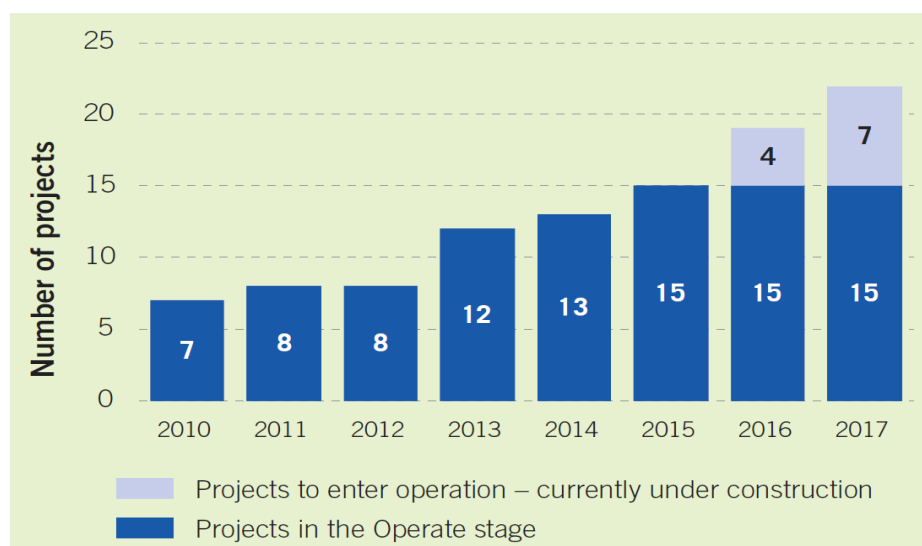
## 壹、前言

依據 IEA(2016)能源科技展望報告指出，全球 2050 年由 6°C 情境(6DS)溫室氣體排放水準減量至 2°C 情境(2DS)目標，未來自供給端新增減碳關鍵技術包括再生能源、碳捕捉與封存(Carbon Capture and Storage, CCS)、核能發電(含第四代)及發電機組效率提升等技術。其中，碳捕捉與封存(CCS)技術主要是在能源使用過程中，利用捕捉技術將二氧化碳從排放源分離出來，經處理後輸送至特定地點封存，以減少二氧化碳的排放，在主要國家已被視為火力電廠及石化、鋼鐵業重要的減碳策略。

有鑑於此，本文將研析碳捕捉與封存技術(CCS)發展現況，並分析案例，作為能源部門溫室氣體減量策略及作法之參酌基礎。

## 貳、CCS 發展現況

為因應氣候變遷，世界各國政府鼓勵發展碳捕捉與封存技術(CCS)大型綜合專案(Large-Scale Integrated Projects, LSIP)的建設和營運。依據全球捕捉與封存研究所(GCCSI)於 2015 年最新發布之全球碳捕捉與封存發展現況報告(The Global Status Of CCS)，至 2015 年目前全球共有 15 個大型 CCS 專案已經營運，二氧化碳捕捉量達到 2,800 萬噸/年，如圖 1 所示。另在 2016-2017 年間將有 7 個 CCS 專案完工營運，包括美國 3 項、加拿大 2 項、澳洲 1 項及阿拉伯聯合大公國 1 項，全數營運後二氧化碳捕捉量提高到 4,000 萬噸/年，如表 1 所示。進一步分析 22 個已營運及預定營運專案，在所有三個類別共有 22 個專案，其中有 3 項是應用於發電業；另碳封存方式共有 16 個採行增強石油產能技術(Enhanced oil recovery, EOR)，有 6 個專案封存於陸地或海洋深層鹽水層，顯示現階段應用仍以 EOR 技術較為成熟，詳見表 2。



資料來源：Global CCS Institute (2015), 2015 The Global Status Of CCS.

圖1、營運階段規模CCS專案

表1、2016-2017年預定營運的建設階段大規模CCS專案

國別	名稱	摘要
美國	伊利諾州工業 CCS 專案	1. 排放源：玉米製造乙醇工廠，世界第一個大規模 bio-CCS 專案。 2. 捕捉能力：每年 100 萬噸二氧化碳。 3. 封存方式：深鹽水層，美國第一個深鹽水層專案。
美國	Kemper County 能源設施	1. 排放源：燃煤電廠(採 IGCC 技術)。 2. 捕捉能力：前捕捉，每年 300 萬噸二氧化碳。 3. 封存方式：EOR。
美國	Petra Nova 碳捕捉項目	1. 排放源：燃煤電廠。 2. 捕捉能力：後捕捉，每年 140 萬噸二氧化碳。 3. 封存方式：EOR。
加拿大	Alberta Carbon 管線 (ACTL) I	1. 排放源：化肥廠。 2. 捕捉能力：每年 60 萬噸二氧化碳。 3. 封存方式：EOR。
加拿大	Alberta Carbon 管線 (ACTL) II	1. 排放源：瀝青煉廠(新建)。 2. 捕捉能力：每年 140 萬噸二氧化碳。 3. 封存方式：EOR。
阿拉伯聯合大公國	阿布達比 CCS 專案	1. 排放源：鋼鐵業，世界上第一個大規模鋼鐵業 CCS 專案。 2. 捕捉能力：每年 80 萬噸二氧化碳。 3. 封存方式：EOR。
澳大利亞	Gorgon 二氧化碳注入項目	1. 排放源：天然氣處理。 2. 捕捉能力：每年 340-400 萬噸二氧化碳。 3. 封存方式：陸上深層鹹水層，全球最大深鹽水層 CCS 專案。

資料來源：本研究整理自 1. Global CCS Institute(2015), 2015 The Global Status Of CCS; 2. Global CCS Institute(2016), Large Scale CCS Projects Database.

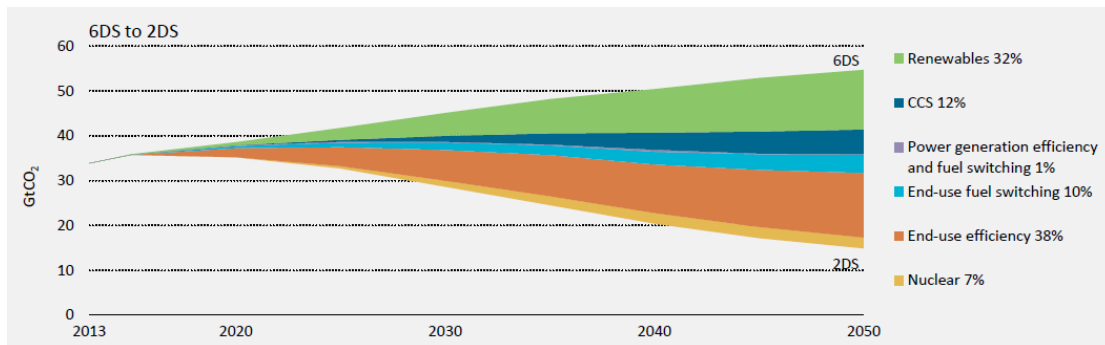
表2、至2017年營運階段及建設階段的大規模CCS專案

發展階段	營運階段	建設階段	總計
專案總數	15	7	22
排放源類別			
-發電	1	2	3
-天然氣處理	10	1	11
-工業分離	4	4	8
封存地點			
-增強石油產能(EOR)	11	5	16
-陸上深層鹽水層	2	1	3
-海上深層鹽水層	2	1	3

資料來源：本研究整理自 Global CCS Institute(2016), Large Scale CCS Projects Database.

### 參、CCS 發展前景

為達全球 2°C 目標並朝向巴黎協定 1.5°C 目標邁進，全球能源系統需要大量部署低碳技術，以實現低碳能源結構轉型。依據 IEA(2016) 能源科技展望報告指出，全球 2050 年由 6°C 情境(6DS)溫室氣體排放水準減量至 2°C 情境(2DS)目標，未來減碳關鍵技術包括終端用戶的能源效率提升(38%)、再生能源(32%)及第三位之 CCS(12%)等技術，故必須確保 CCS 技術能如期進場應用，否則將產生嚴重的減量缺口。

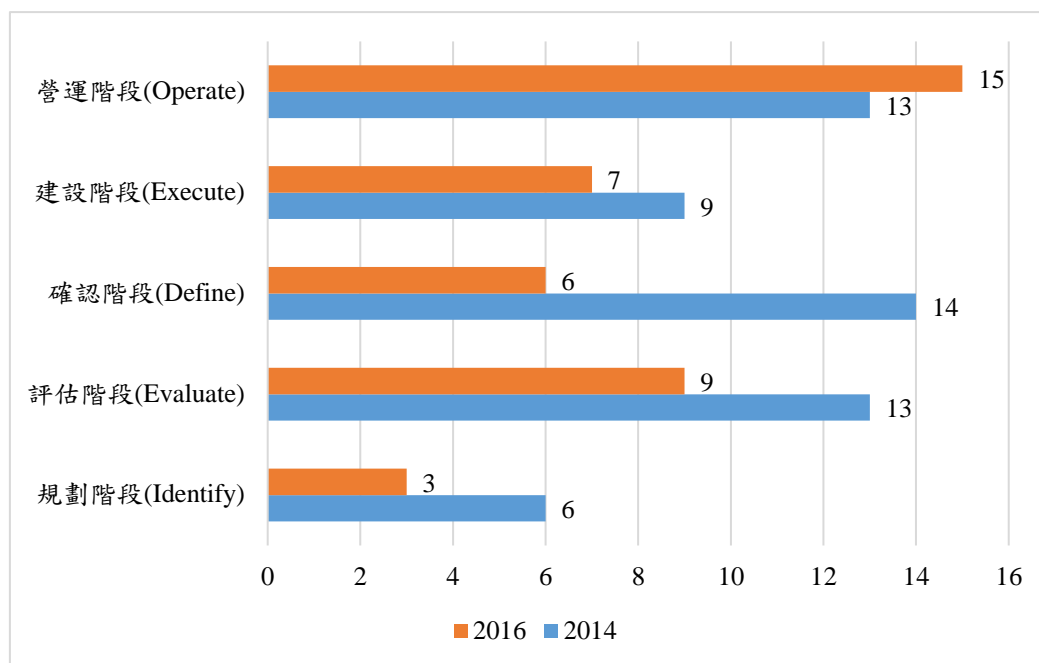


資料來源：IEA (2016), Energy Technology Perspectives 2016。

圖2、至2050年全球CO<sub>2</sub>減量技術潛能推估

然依據全球 CCS 研究所大型 CCS 計畫資料庫 2016 年數據顯示，全球大型 CCS 計畫發展近來呈現趨緩趨勢，數目更由 2014 年 55 項削減至 2016 年 40 項，如英國 White Rose CCS Project 因資金問題已於 2016 年中止、美國未來電廠(FutureGen)旗艦項目亦被取消，如圖

3 所示，彙整各專案終止或是暫時擱置的主要原因包括：投資成本過高、資金不足、缺乏立法及政策的支持、投資誘因低、低碳政策不明確、低碳投資項目改變、發電成本巨幅增加等(GCCSI, 2014)。



資料來源：本研究整理自 1. Global CCS Institute(2014), 2014 The Global Status Of CCS ;  
2.Global CCS Institute(2016), Large Scale CCS Projects Database.

圖3、2014-2016年大型CCS計畫數量變化

## 肆、CCS 技術發展趨勢

由於大型 CCS 專案均面臨成本昂貴且會降低效率的問題，目前國際正致力研究降低 CCS 資金和運營成本，並改善發電效率。

### 一、面臨課題

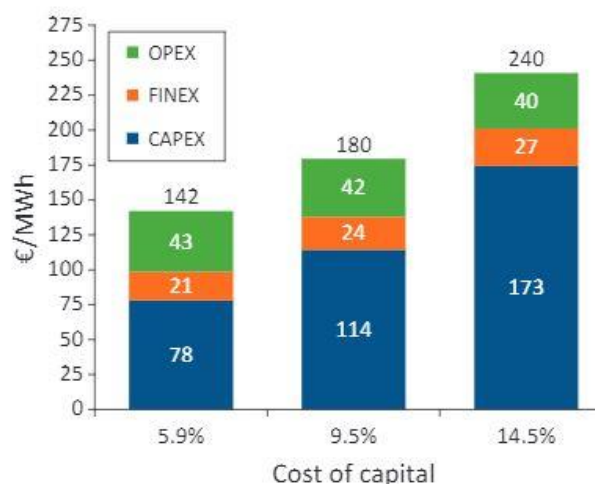
依據能源技術研究所(2016)報告，燃煤電廠搭配 CCS 技術將使發電效率由 42.4%(LHV)下降至 32.8%，發電效率整體損失 23%，每千度均化發電成本由 56 歐元上升至 87 歐元，增加 55%，如表 3 所示。

表3、燃煤、燃氣機組(搭配CCS)之各項成本

項目成本	燃氣機組	燃氣機組 搭配 CCS	燃煤機組	燃煤機組 搭配 CCS
建設成本(歐元/kW)	550	1,240	1,480	2,560
效率(LHV,%)	58.8	49.9	42.4	32.8
均化發電成本(歐元/MWh)	48	69	56	87
均化燃料成本(歐元/MWh)	34	40	21	26

資料來源：Energy Technologies Institute(2016), Reducing the cost of CCS - Developments in capture plant technology.

另外，大型 CCS 專案因規模較大，具有高度技術風險及金融風險(如無法商轉及無法獲利等)等潛在風險，削弱項目籌資能力，而需要較高的資金成本(通常超過 10 億美元)，若無強化石油採收的利用需求，會有巨大的財務風險，造成非石油生產國如日本、南韓、印度等耗能大國卻步原因。依據 Oxera(2011)估計大型 CCS 專案至 2020 年折現率(Discount Rate)，反映資金來源對於投資風險存有疑慮。Samuela Bassi(2015)以加拿大 SaskPower CCS 專案公佈資訊，進行均化發電成本(LCOE)簡單財務模型分析，當折現率由 9.5% 增加至 14.5% 時，均化發電成本隨之由每千度 180 歐元增加至 240 歐元，大幅增加 CCS 專案募集資金難度，如圖 4 所示。基此，現有多個處於評估規劃階段 CCS 專案，仍需政府持續協助推動，否則恐將面臨中止。



資料來源：Samuela Bassi(2015)，What Will It Take for CCS to Have a Future in the European Union?

圖4、折現率對大型CCS計畫均化發電成本之影響

## 二、技術發展方向

依據 2015 年全球碳捕捉與封存發展現況報告，碳捕捉封存技術未來朝 2 個技術方向發展，其一為依據現有 CCS 專案運轉經驗持續發展，以降低設計、建設及運行成本。其次，研究發展現行技術以外的 CCS 技術，期能更進一步降低成本。

依據能源技術研究院(Energy Technologies Institute, ETI)評估英國推動 CCS 成本之結果指出，隨著技術的不斷革新、規模經濟效應以及更高效的 CO<sub>2</sub> 運輸和封存基礎設施的應用，CCS 技術相關成本將日益減少。現有 CCS 技術如能連續設置，可透過增加規模、基礎設施共用和融資成本減少等因素降低風險與成本，最高可減少 45% 成本。另外，全球 CCS 研究院(2015)亦預估透過複製、大規模生產和“做中學(Learning by doing)”的方法來降低成本，加快投產速度，預估第二代 CCS 技術可能在 2025 年進行示範性試驗，發電成本將比現行技術降低 20%。另透過改善 CO<sub>2</sub> 運輸條件和降低融資成本，估計到 2030 年理論上可減少 15%~40% 的 CCS 電廠建造成本。

另外，國際上加快現行技術以外的 CCS 技術積極研發，其中包括：新開發的固體和液體材料，因為這類材料在分子層面對二氧化碳的去除效果最佳；不同於傳統氣體分離的新技術，像超音速膨脹和電化學工藝；可能的碳封存及應用技術，以及將多種技術集合在一起的混合技術，混合技術的搭配使用有望進一步降低成本和提高性能。鑑此，本研究彙整 2016 年上半年，各界新技術研發訊息如表 4，以提供未來 CCS 發展方向之參考。



表4、CCS技術研究發展方向

類別	技術項目	研究團隊	技術概要	效益
碳捕捉	小蘇打碳捕捉技術	加州大學	以小蘇打為主成分的海綿進行碳捕捉	環境影響小、減少 40% 成本，並能更高純度二氧化碳，提高後續工業應用價值。
	Starbons 生物材料	約克大學綠色化學卓越中心	自廢棄生質能包括食品皮和海藻，具有大量細微孔隙可以高效率捕捉到二氧化碳	高 CO <sub>2</sub> 吸附、高選擇性、快速反應和抗水性，結合生物質廢料的低成本和大規模生產的方便，潛力巨大
碳封存	玄武岩封存	冰島	將二氧化碳注入玄武岩(basalt，火山岩的一種)	快速溫室氣體捕獲反應，形成鹽類固化封存。
生產碳產品(封存)	高性能電池材料	喬治華盛頓大學	生產高性能電池之原料	價值 6 倍於生產液體燃料(如甲醇)
生產碳產品(封存)	製作 CO <sub>2</sub> 混凝土	加州大學洛杉磯分校	二氧化碳製作 CO <sub>2</sub> 混凝土，使用 3D 列印技術輸出	嘗試使用來取代水泥。已可以在實驗室規模生產新建建築材料。

資料來源：本研究彙整。

## 伍、結語

自 1990 年代以來，推動大型 CCS 專案已成為各國政府進行低碳能源系統轉型的主要策略之一，然而，受限於缺乏政府立法及政策的支持、投資成本過高、募集資金困難等諸多因素，全球大型 CCS 計畫發展趨緩，計畫數目由 2014 年 55 項削減至 2016 年 40 項，因此，各國應該更明確宣示 CCS 為值得投資的低排放技術，在政治層面持續協助推動 CCS 技術發展，加速 CCS 專案部署，以降低成本與風險，並推動「碳定價」(Carbon Pricing)，以提高 CCS 技術減碳成本的競爭力，才能確保 CCS 技術至 2050 年能如期進場應用，否則將產生嚴重的減量缺口。

為推動 CCS 技術發展，我國環保署亦於 2011 年成立「碳捕集及封存技術策略聯盟」從小規模試行計畫開始，逐步擴大示範計畫，最終期望於 2020 年達成商業運轉目標。然我國 CCS 現況仍面對開發和發電成本高昂問題，可能產生財務風險，建議政府在政策面上宣示積極推動 CCS 發展方向，並積極推動「碳定價」(Carbon Pricing)，落實市場機制，以作為我國發展 CCS 技術的基礎。



## 陸、參考資料

1. Energy Technologies Institute (2016), Reducing the cost of CCS - Developments in capture plant technology.
2. Global CCS Institute (2014), 2014 The Global Status Of CCS .
3. Global CCS Institute (2015), 2015 The Global Status Of CCS .
4. Global CCS Institute (2016), Large Scale CCS Projects Database.
5. IEA (2016), Energy Technology Perspectives 2016.
6. IEAGHG(2015), Integrated Carbon Capture and Storage Project at SaskPower's Boundary Dam Power Station.
7. Oxera (2011), Discount rates for low-carbon and renewable generation technologies, Prepared for the Committee on Climate Change.
8. Samuela Bassi(2015), What Will It Take for CCS to Have a Future in the European Union?, Corner Stone Volume3 Issue4.