

英國碳捕獲與封存發展策略

朱証達

工業技術研究院 綠能與環境研究所

摘要

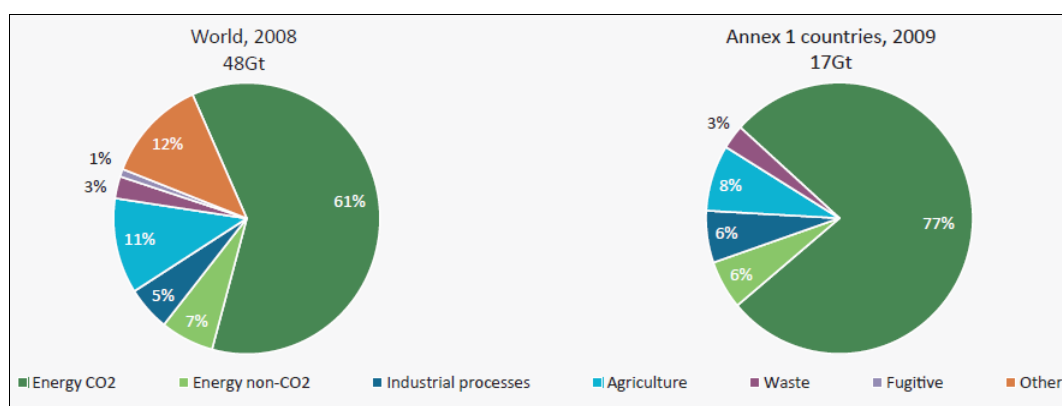
目前各國仍大量仰賴化石燃料以供應能源，造成大量溫室氣體排放。國際間對於降低二氧化碳主要有幾個策略：擴大再生能源、增加核電占比、提升能源效率以及碳捕獲與封存(Carbon Capture and Storage, CCS)等。碳捕獲與封存目前相對其他再生能源與節能技術仍是非常前瞻且尚未商業化，然而卻具有相當的減碳潛力。英國目前有四成左右的二氧化碳排放來自能源供應，這是大量仰賴化石燃料電廠的結果。為了達到國家未來目標減碳量，CCS 是英國減碳路徑上重要的策略，因此在近五年內的投入相當積極。因此本文將整理英國 CCS 發展的現況以及推動上的策略，最後則整理我國 CCS 發展現況，並提出相關建言。

一、國際碳捕獲與封存發展現況

目前世界大部分的溫室氣體排放來自於能源供應，主要為燃燒化石燃料以產生電力或熱能的過程中產生。依據 IEA 2012 年能源技術報告[1]指出，全球 2008 年有 68%溫室氣體來自能源供應，對於京都議定書裡附錄一的國家，此比例更高達 77%，這些能源供應所產生的溫室氣體又以發電廠佔最大宗(如圖一所示)。世界各國對化石燃料的仰賴在短中期內仍持續增加，特別是快速發展中的經濟體如中國與印度，增加幅度更為可觀。另該報告表示 CCS 技術可以減少高達 90%化石燃料電廠的二氧化碳排放，無論是工業或電力部門，CCS 將成為減少二氧化碳排放量的關鍵技術。

聯合國氣候變化綱要公約第 15 次締約國大會暨京都議定書第 5 次締約國會議(一般簡稱哥本哈根會議)於 2009 年 12 月 7 日至 18 日

召開，依據該會議之哥本哈根協議(Copenhagen Accord)，各國承諾保持全球平均溫度較前工業化時代的升幅不超過 2 攝氏度(2 Degree Scenario, 2DS)。另根據 IEA 2012 年報告[1]的推估，若是要將全球溫度上升控制在 2 度內，則 CCS 技術的導入可貢獻整體減碳量的 22%，而若不導入 CCS 技術，減量將困難許多、整體成本也將提高 70%。若要在 2020 年達成 2DS 目標，則 CCS 技術必須減少約 269 百萬噸二氧化碳排放量，相當於約 120 個 CCS 的設施。



圖一、全球二氧化碳排放來源[1]

CCS 計畫一般分為電廠 CCS 整合與工業 CCS 整合計畫。到 2011 年底全球有 65 個大型 CCS 整合計畫進行中[2]，其中只有 4 個工業 CCS 整合計畫達到可運轉的階段，其餘都在規劃或執行階段。目前電廠 CCS 整合技術尚未成熟，但是其減碳潛力相對較大，各國的投入逐漸增加，也因此大部分進行中的計畫都是電廠 CCS 整合計畫。主要發展 CCS 國家有美國、加拿大、英國及澳洲等，這些國家共同點都是本身有一定的化石燃料產量，發展 CCS 技術將有利其化石燃料的使用與出口。根據 IEA 的推估[3]，一直到 2020 年以前 OECD 國家扮演發展 CCS 的關鍵角色，之後隨著成本降低，中國及其他非 OECD 國家將大量設置 CCS 設施，帶來大量的減碳效益。

目前 CCS 整合由於成本高，CCS 的發展需要政府的大力支持，透過限制性或獎勵性的措施以刺激產業投入，例如碳稅或是專案示範資金。而目前 CCS 的研究進展需要透過大規模的技術發展與示範計畫，這也取決於足夠的資金和政策規範是否完善，以支持技術的示範和未

來設置。截至 2011 年底，全球已投入約美金 214 億元支持大規模的 CCS 示範計畫，前幾名的國家分別為，美國 75 億美元、澳洲 41 億美元、加拿大 31 億美元及英國 17 億美元[2]，其中英國推動 CCS 發展已有數年時間，2007 年啟動第一期示範計畫後，2010 年又公布投入 10 億英鎊，確立 CCS 為邁向低碳經濟發展主軸，爰本文將介紹該國 CCS 發展現況及推動策略。

二、英國碳捕獲與封存發展背景

英國的二氧化碳排放來源如表一所示[4]。以 2011 年來說，能源供應占了整體的 40%，約 184 百萬噸。其中發電廠排放約 146 百萬噸，約占整體的三分之一左右[5]。其次為運輸部門，其二氧化碳排放來自於車輛燃燒汽柴油。接著為住宅與服務部門，此兩部門的二氧化碳排放主要來自燃燒化石能源以提供暖氣或是烹調。而英國二氧化碳排放自 1990 年來不斷下降，2010 年的二氧化碳排放量已經降低到 1990 同年水準的 83%，此減量成效跟能源效率提升與能源結構調整有直接關係。就二氧化碳排放占比最大的電力部門而言，自 1990 年以來發電量是不斷成長的，但是二氧化碳排放卻不斷降低，藉由觀察表二的歷年發電結構便可推測其原因。1990 年至 2010 年期間，燃煤發電減少超過一半，取而代之的是大量的天然氣，而其他發電方式則無太大變化，導致即使總電力供應量增加的情況下，總二氧化碳排放卻降低的現象。

表一、英國歷年二氧化碳排放來源[4]

	1990	1995	2000	2005	2007	2008	2009	2010	2011 (p)
Energy Supply	242	211	203	218	219	213	190	196	184
Transport	119	120	125	129	131	126	121	121	119
Business	111	104	104	94	89	87	76	76	70
Residential	79	81	87	84	78	80	75	87	67
Other	39	36	31	27	24	22	16	17	16
Total	590	552	550	551	542	529	478	496	456

(p) 2011 estimates are provisional.

All figures are for the UK and Crown Dependencies only, and exclude Overseas Territories.

表二、英國歷年發電量與發電方式[5]

	1980	1990	2000	2008	2009	TWh 2010
Coal	220.8	213.4	114.7	118.1	97.8	102.3
Oil	8.1	20.0	5.9	5.9	5.4	4.4
Gas	-	0.4	144.9	173.0	163.5	171.8
Nuclear	32.3	58.7	78.3	47.7	62.8	56.5
Hydro ¹	3.9	5.2	4.2	3.8	4.1	2.5
Wind	-	-	0.9	7.1	9.3	10.2
Other fuels	-	-	8.3	11.4	12.6	13.5
Net Imports	-	11.9	14.2	11.0	2.9	2.7
Total electricity available for supply	264.9	309.4	371.4	378.1	358.3	363.8

英國於 2008 年頒布了極具指標性的 2008 氣候變遷法案(Climatic Change Act of 2008)，其最重要的意義在於規範了具約束力的法定減量目標，在 2050 年前將溫室氣體排放降低到 1990 同年水準的 20%。若要達到此 2050 目標，電廠的碳排放必須要大幅的減少。考量目前的技術選項，再生能源、核能及 CCS 是目前能替代或降低化石燃料電廠碳排放的主要方式。為顧及能源價格、穩定供應及能源安全，英國氣候變遷委員會明確宣示，走向未來低碳能源的過程中，核能、再生能源與 CCS 的角色同等重要，需均衡發展。化石燃料發電仍是穩定且可靠的電力基載，未來隨著英國再生能源占比提高，這些穩定的基載角色將更為重要。而長期來說，CCS 搭配生質能源所產生的減排效益，將是未來最可期待且最有效益的選項。

根據英國提出的 Carbon Plan 推估[6]，若要達到 2050 減碳目標，則 2030 年時需要有 40~70GW 的低碳發電裝置，其中 CCS 裝置須達 10GW。並且 CCS 裝置到 2050 年時須達 40GW。英國 CCS 協會則有更具野心的目標，規劃在 2030 年達到 20~30GW。因為發電廠排碳量相對工業多許多，因此電廠 CCS 技術的發展比工業 CCS 技術更為優先，是英國政府優先發展的重點。CCS 也同時代表了綠能商機。至 2010 年時，全球政府已經投入 400 億美元於開發 CCS。若是英國政府對 CCS 的投入符合預期，則在 2030 以前，該產業的出口值將可達到每年 30

到 65 億美元[7]。而英國發展 CCS 具有四個主要優勢[7]，包含了：

1. 在外海有廣大的封存場域，儲存潛能高達 700 億噸，遠高於未來一百年所需的總容量 150 億噸。其中約有 90 億噸的容量是耗竭的油氣田，600 億噸是深海鹽水層[8]。
2. 電廠以及工業的聚落有助於共享 CCS 基礎設施，並且這些主要二氧化碳排放來源接近外海可封存的區域，有利 CCS 的運輸與封存。而接近北海的二氧化碳來源，也可以藉由將二氧化碳打入油氣田以增加產量，充分發揮其效益(Enhanced Hydrocarbon Recovery)。
3. 英國過去幾十年在離岸油氣田開採已累積充足專業知識與經驗，並且相關產業已經健全，對於發展二氧化碳的運輸封存有絕對優勢。
4. 英國長期投入 CCS 的基礎科技研究，已經累積了不少開發能量。

三、英國碳捕獲與封存之推動措施

英國推動 CCS 發展已經有數年時間，2007 年啟動第一期示範計畫，2010 年公布投入 10 億英鎊。英國的政策與推動一向以謹慎穩健聞名，在確立 CCS 為邁向低碳經濟發展主軸後，英國政府近年推動一連串的措施以推動 CCS 的發展。

1. 第一期示範計畫(the first UK demonstration competition)

英國政府於 2007 年公告第一期的 CCS 示範計畫，目標是和業界共同打造世界第一座商業級 CCS 示範電廠。該年共有 9 家業者投標，最後只有 4 家業者符合資格，這些業者都是當時主要的民營電廠業者。然而隨後 2008 年到 2010 年有 3 家業者陸續放棄競逐，2011 年英國政府和最後一家業者協商失敗，隨後便撤銷此計畫。檢討其主要失敗原因[9]，首先，政府在招標及採購上給予太多限制，欠缺彈性，因此有意願業者不多。其次，政府在整體採購及開發上的經驗不足，並且全球無往例可循，導致風險過高。最後，政府在先期的投入過於

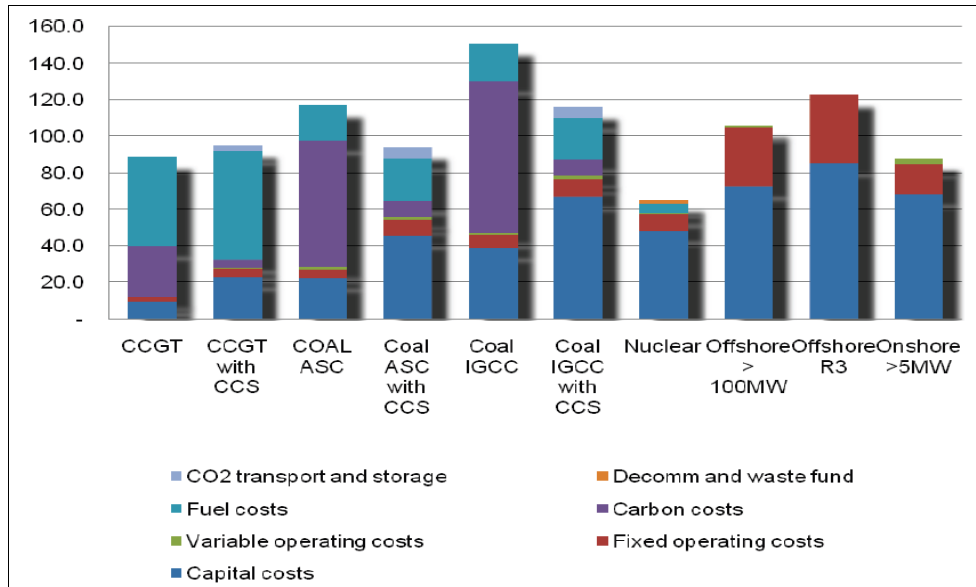
保守(包含可行性評估、工程和設計的研究)，業者對計畫發展感到充滿不確定感。雖然英國政府在 2010 年公布投入 10 億英鎊，但仍無法與最後一家業者協商成功。然而計畫雖然失敗，政府在技術、政策及商業上都取得不少寶貴經驗。

2. 創造低碳電力投資環境

目前 CCS 成本仍高，政府必須創造穩定且合宜的投資環境才有辦法吸引業者投入資金。目前英國政府正大力的推動電力市場改革 (Electricity Market Reform)，為過去 20 年來自電力市場自由化後最大幅度的能源改革，其目的之一在於創造穩定且可預期獲利的低碳電力投資環境。CCS 的整體發展也整合入電力市場改革，包含了：

- (1) 制訂長期的 CCS 收購電價合約(Feed-in Tariff, FIT)
- (2) 對先期的 CCS 計畫給予直接的計畫補助，以克服開發障礙
- (3) 新電廠若有整合 CCS 技術，將不受最低碳價(Carbon Price Floor)的限制
- (4) 新電廠若有整合 CCS 技術，將不受碳排放標準(Emission Performance Standard)的限制
- (5) 未來新火力電廠都需要規劃將來能夠整合 CCS

推動這些措施後，因為各種發電項目的成本將大幅變動，預計能刺激業者對 CCS 的大量投入。由圖二可以看出，推動這些改革措施後，2017 年整合 CCS 技術的燃煤電廠成本將比未整合之電廠減少許多，並且與風力發電的成本相當。主要原因是未整合 CCS 技術的燃氣或燃煤電廠，成本受碳稅或碳交易相關機制影響而提高許多，創造了有利業者投資 CCS 的環境。並且日後隨著碳稅或碳交易的規定更加嚴苛，為整合 CCS 技術的火電廠成本將不斷的上升。



圖二、預計英國 2017 年各發電項目的成本結構[7]

3. CCS 商業化計畫(CCS Commercialization Program)

CCS 商業化計畫於 2012 年 4 月啟動[7]，預計在 2020 年以前完成，被視為推動 CCS 發展最關鍵的措施。主要預期效益為有效降低 CCS 的開發成本，藉由此計畫去檢討法規、技術與商業上的障礙，刺激民間對 CCS 電廠投資，並使 2020 年以後的新 CCS 計畫可以在政府無任何補助下(除了 FIT)順利佈署。政府已經提撥 10 億英鎊預算(不包含 FIT 補助以及歐盟的補助)，是目前全球對 CCS 發展中最完整且明確的計畫之一。廠商的提案可以只是整體 CCS 一部分，不用涵蓋完整的三階段(捕獲、輸送及封存)，但整體計畫仍是會建立一個完整的 CCS 系統。在建立完整的 CCS 基礎設施方面，其包括在英國本土建立基礎管線設施，並在北海完成儲存場域開發，以供當地產業聚落共享使用。而英國政府也將協助早期開發程序的設計與評估(如 FEED 研究, Front-end Engineering Design)，並要求業者共享計畫的開發經驗，以幫助本土產業學習並降低成本。

4. 技術研發與創新

英國過去已經累積了不少 CCS 技術研發的能量，2011 年更透過

計畫實際規劃出未來 CCS 發展路徑上所必要的研發投入[10]。2011 年投入 1 千 3 百萬英鎊設立英國 CCS 研究中心(UK CCS Research Centre)，集結國內 100 位頂尖 CCS 專家，提供一個整合國內各 CCS 計畫的交流平台，並建立一個共用的研發測試區。另一方面，英國政府也預計在 2011 至 2015 投入 1.25 億英鎊於研發相關計畫，其包含了 4 千萬英鎊基礎研究、3 千萬英鎊零組件開發與創新及 5.5 千萬英鎊先導測試計畫。目前已經有一個小型燃燒後捕獲的計畫於 2011 年開始運轉，另有一燃煤與一個燃氣的小型計畫預計 2014 年開始運轉。

5. 法規障礙排除

歐盟在 2009 年公布了完整的 CCS 行動指令(Directive 2009/31/EC)，對二氧化碳捕獲、運輸和封存各環節涉及的規劃、許可、實施、評估和長期責任等關鍵問題提供了基本的法律依據，為各成員國開展 CCS 計畫奠定了法律基礎。除了過去幾年歐盟對於儲存場域的規範外，英國已經建立了完整的基礎法規框架。目前推動的 CCS 商業化計畫便提供一個最佳的時機去檢視目前的政策框架，持續地評估並修訂相關規範，例如檢視將石油與天然氣設施轉換成二氧化碳封存設施的法規，或是遵從歐盟二氧化碳地質儲存指令(Directive 2009/31/EC)去制定二氧化碳封存相關法規。

6. 建立輸送與封存基礎設施

若在 2030 年要達成 10GW 容量目標，則每年要儲存 5 千萬噸的二氧化碳。而在北海的石油開採，最高一年達 1.3 億噸(1999 年)[8]。CCS 的開發可直接重複使用油氣平台以及輸送設施，以大幅減低整體成本。英國政府已經委託地質研究單位完成外海 600 個場址的評估調查，發現在外海有廣大的封存場域，儲存潛能高達 700 億噸，其中約有 90 億噸的容量是耗竭的油氣田，可以較低的成本進行封存開發。而目前英國政府仍在進行評估建立公用輸送管線及封存場址的經濟效益，協助業者找出成本最佳的方案。

7. 供應鏈與人力

英國政府已經委託專業研究單位完成 CCS 整體供應鏈與人力的報告[7]，其顯示目前的供應鏈已經有必要的專業能力支援重點開發項目，然而所需要的人力與零組件供應仍不足。對於健全整體供應鏈，CCS 商業化計畫扮演最關鍵的角色，藉此找出實際的瓶頸項目，再協助本土業者投入。而對人力資源來說，大部分的專業人力可以由現有產業中取得，例如電力生產、離岸開發、地質探勘、化學與製程工程等等。政府也將投入 5 千萬英鎊用於人員訓練與技術培養。英國政府粗估，英國 CCS 產業到 2030 年以前每年可以創造 20 到 40 億英鎊附加價值，並且創造 7 到 10 萬個工作機會[7]。

四、我國碳捕獲與封存的發展

我國二氧化碳總排放量正逐年上升，雖然近十年的排放成長已經趨緩，但每年平均仍成長約 1.7%，2010 年達 254 百萬噸，人均排放為全球平均的 2.86 倍。在國際減碳的聲浪下，我國也必須設定目標並執行實際減碳措施，以盡國際責任。2010 年我國環保署致函 UNFCC，對外承諾於 2020 年將溫室氣體排放總量比 BAU 減少至少 30%，對內則仍以 2020 年回到 2005 年排放水準(相對 BAU 減 45%)為目標。

以 2008 年我國溫室氣體排放資料分析，全國溫室氣體排放有 77% 來自於能源供應。電力生產(主要為電廠)的溫室氣體排放占了全國的 56%，相較之下英國只有 33% 左右。另一方面我國較為仰賴化石燃料電力生產，電力碳排放係數也高出英國許多，因此我國的發電廠應比英國更具有減量潛能。而熱能生產與其他燃料燃燒占了全國溫室氣體排放的 21%，其中近三分之二是用在工業，相較之下英國工業的溫室氣體排放占比小非常多，其顯示了我國的工業減碳也較英國更具潛能。因此不論是發展電廠 CCS 或工業 CCS 的二氧化碳捕獲，我國應都比英國更具潛能。而就封存的潛能來說，根據工研院初步推估，我國西部陸域油氣封存地層有 28 億噸的封存潛能，而西部濱海或離岸深部鹽水層有高達 90 億噸到 680 億噸的封存潛能，已經具備足夠封存場址。並且我國主要電廠與工業區也是集中在西部濱海地區，有利降

低輸送與封存的成本。

我國近年也開始推動 CCS 開發。目前已經有多個產學合作的碳捕獲計畫進行中，例如中鋼與清大團隊已於 2010 年建立國內第一座二氧化碳捕獲示範工廠，每天可捕獲 0.1 噸二氧化碳。我國並於 2011 年成立 CCS 研發聯盟，期望結合經濟部內相關單位之技術能量及資源，主要工作是協助推動國內 CCS 資訊與技術交流，研擬 CCS 技術實施策略與對應做法，同時協助推動經濟部 CCS 整體示範試驗計畫，累積 CCS 操作經驗。目前 CCS 研發聯盟的示範計畫在捕獲技術方面，工研院在經濟部能源局委辦計畫支持下與台泥合作，已經開發先進鈣迴路捕獲二氧化碳技術，預計於 2012 年建立 1.9MWt 先導型捕獲試驗廠。在封存方面，國內產業龍頭中油與台電公司也在研發聯盟的框架下，積極推動地質封存前導試驗，目標將 2015 年開始執行 1 萬噸碳排放封存示範點的小規模試行計畫。

根據工研院的減碳成本效益分析，到 2025 年時，CCS 整合技術以目前的規劃保守推估可以降低約 37 百萬噸的二氧化碳，占我國減量目標的 11% 左右。並且其平均減量成本在 2025 年時可接近再生能源。實際預估的 CCS 設置規劃與減量潛力如表三所示，電廠 CCS 將具有較多的減量潛力，而整體 CCS 到 2030 年時減量潛力可高達 73 百萬噸。

表三、我國 CCS 發展規劃及二氧化碳減量潛力

項目	進程	2025 減量潛力	2030 減量潛力
電廠 CCS	2016~2030 年台電規劃改建與新增 18 座燃煤機組，至少一半機組應設置 CO₂ 捕獲系統 2020 年設置乙座 800MW 示範廠	23.3 MtCO _{2e}	53.0 MtCO _{2e}
工業 CCS	2012 年、2017 年進行既有水泥試驗廠 2025 年台泥和平廠及亞泥花蓮廠、台塑麥寮廠、中龍鋼鐵廠加裝 CCS	13.4 MtCO _{2e}	20.0 MtCO _{2e}

我國 2010 年電力排放係數達每度 0.61 公斤，高於 OECD 國家之

平均值許多。我國是以出口為導向發展的經濟體，未來出口商品存在高「碳關稅」的潛在風險下，電力低碳化實刻不容緩。在走向電力低碳的過程中，以目前的情勢，核能已是選項之外，而以目前的設置規劃，再生能源也無法提供大量且穩定的電力，因此 CCS 已變成主要選項。我國 CCS 的發展規劃與英國有些相似之處，都規劃在 2020 以前藉由政府支援的力量完成大型的示範廠，然而我國推動 CCS 的配套措施上還不如英國的完整且積極。

在整體投資環境的創造上，英國配合電力市場改革，提供業者一個穩定且低風險的投資環境，並且新的碳價機制迫使業者必須投入 CCS 的整合。而我國缺乏完整的碳稅或碳交易制度，尚無法反映溫室氣體排放的外部成本，也無法有效刺激對低碳技術的推廣，因此我國應加速相關制度的規畫。英國發電業是非常自由化的，所以可藉由市場的機制去刺激產業投入，而我國若要積極發展電廠 CCS，台電公司將需要去承擔大部分的責任，因此現階段值得去探討如何賦予台電更多的權責。對工業 CCS 發展，政府可提供更強烈之經濟誘因，如提供設備補貼或稅率上之優惠等措施刺激產業的投入。

英國將 CCS 商業化計畫視為推動 CCS 的主要關鍵，可藉此釐清法規與市場障礙、建全國內產業鏈以及建立必要的基礎設施。我國 CCS 研發聯盟規劃了多項 CCS 示範試驗計畫，也可藉此機會去釐清整體開發障礙，並研擬未來降低成本的策略。例如國內電廠因受限於環評，無法在新建立電廠之際進行 CCS 整合，政府可就此部分進行鬆綁或另訂法規。而有效降低成本也是刺激業者對 CCS 投入的關鍵之一，我國可先針對捕獲的項目去投入，其目前成本占比最大，也最具成本降低空間，值得投入更多研發能量。另外，CCS 示範試驗計畫也提供了機會去檢視如何建立起本土產業鏈，未來可針對瓶頸的項目去加強。最後，我國也應即早規劃必須的基礎建設，利用產業聚落共享輸送和封存等基礎設施以降低整體成本，並提高經濟效益。

参考文献

- [1] IEA, 2012. Energy Technology Perspectives 2012.
- [2] GCCSI, 2011. The Global Status of CCS: 2011.
- [3] IEA, 2012. Tracking Clean Energy Progress 2012.
- [4] DECC, 2011. UK emissions statistics: 2011 Provisional UK Figures.
- [5] DECC, 2011. UK Energy in Brief 2011.
- [6] DECC, 2012. Carbon Plan.
- [7] DECC, 2012. CCS Roadmap.
- [8] ZEP, 2011. Storage Costs Report.
- [9] National Audit Office, 2012. Carbon capture and storage: lessons from the competition for the first UK demonstration.
- [10] Advanced Power Generation Technology Forum, 2011. Cleaner Fossil Power Generation in the 21 Century.