全球碳捕集與封存發展現況

侯萬善 摘譯(2012.01.02 初稿，01.05 修改)

一、背景

將製程或燃燒產生的二氧化碳(CO2)排放，藉由碳捕集與封存(CCS)方式來防止或減少的科技，具備成爲重大溫室氣體減量潛力之選項，因而全球許多國家的業者致力在相關應用技術的研究與發展，而政府也投入巨資補助大規模整合型示範專案。這種大規模整合型示範專案，在不同操作環境下跨越範圍廣泛的科技領域的實證，是碳捕集與封存技術商業化推廣的必要前提。

在碳捕集與封存程序鏈中每個階段的示範項目，包括捕集、輸送、封存或利用，都有不同的科技正在被開發與規劃來尋求實證。爲瞭解這些技術項目的發展進度，特別調查全球實地進行的大規模整合型專案，並予以整理分析。而大規模整合型示範專案要瞭解的實況不僅是科技實用性，還包括可能的資金來源、政府的支持程度、融資，與成立碳捕集與封存業務方案的商業考量，還有公眾接受度，以及有利於大規模與長期投資的政策、法律與管理環境。

依據國際能源總署(IEA)2010 年的一份報告顯示，一旦成本較低的能源效率改善措施與再生能源應用達到開發潛能臨界點之後，碳捕集與封存科技應用的經濟價值就會浮現。

二、專案概況

總體而言，依據至 2011 年 8 月的調查顯示，全球 74 個大規模整合型碳捕集與封存專案(如表 1 所示)中，有 14 個專案是在營運中或興建中，總共具備每年超過 33 百萬公噸 CO2 的封存容量。所謂的大規模整合型專案(LSIP)是指

- 對燃煤電廠而言，每年封存容量不小於 80 萬公噸 CO2；以及
- 對其他排放密集製程設施(包括天然氣電廠)而言，每年封存容量不小於 40 萬公噸 CO2。

表 1. 2011 年全球大規模整合型碳捕集與封存專案的開發進度

	已確認	評估中	已定案	興建中	營運中	小計
美國	1	8	9	3	4	25
歐洲	1	9	9	0	2	21
澳洲紐西蘭	1	5	0	1	0	7
加拿大	0	2	4	2	1	9
中國	4	2	0	0	0	6
中東	0	1	2	0	0	3
亞洲其他	1	1	0	0	0	2
非洲	0	0	0	0	1	1
合計	8	28	24	6	8	74

資料來源：Global CCS Institute, Nov 2, 2011, "THE GLOBAL STATUS OF CCS: 2011"

雖然自從 2008 年全球金融風暴發生以來，各國大規模融資難度增加，且大規模整合型碳捕集與封存專案被波及的傳聞不斷，但總體而言，大部分專案的開發仍按規劃進行，如表 2 所示。

表 2. 2009~2011 年間全球大規模整合型碳捕集與封存專案的開發進度

年度	已確認	評估中	已定案	興建中	營運中	小計
2009	19	20	15	2	8	64
2010	10	28	27	4	8	77
2011	8	28	24	6	8	74

資料來源：Global CCS Institute, Nov 2, 2011, "THE GLOBAL STATUS OF CCS: 2011"

專案推動過程各開發階段最進較顯著的進展包括：

➢美國德州 Century Plant 的第 1 套天然氣處理機組在 2010 年底達到營運階段，具備每年 5 百萬公噸 CO2 捕集能力；興建中的第 2 套天然氣處理機組預期在 2012 年可完工營運，具備每年 3.5 百萬公噸 CO2 捕集能力。捕集的 CO2 要應用在提高石油採收率(EOR)的專案活動。

➢進入興建階段的專案由 2009 年的 2 件、2010 年的 4 件，達到 2011 年的 6 件；其中有 3 件在北美地區。

表 3 列出達到興建與營運階段的 14 個專案，合計具備每年 33 百萬公噸 CO2 以上的捕集能力。而這些專案主要是與用來提高石油採收率的 CO2 回收，或天然氣處理的 CO2 副產品有關，本身即具備經濟價值；只有美國伊利諾州的工業碳捕集與封存專案(ICCS)所捕集的 CO2 要封存在地下深處鹽水層，目前尚不具經濟價值。這說明目前碳捕集與封存專案所要面對的營運收入挑戰，在溫室氣體管制法規尚未成熟的國家，推廣單純的封存應用如何獲得額外營收的相關問題尤其嚴重。

表 3. 達到興建與營運階段的大規模整合型專案

專案名稱	場址	捕集方式	捕集量(百萬公噸 CO2/年)	封存方式	營運啓始日
操作階段					
Shute Creek Gas Processing Facility	美國(懷俄明州 LaBarge)	燃燒前處理(天然氣 CO2 冷凍分離處理)	7	提高石油採收率	1986
Sleipner CO2 Injection	挪威(北海)	燃燒前處理(天然氣 CO2 胺水溶液吸收處理)	1	地下深處鹽水層	1996
Val Verde Natural Gas Plants	美國(德州 Terrell/Pyros)	燃燒前處理(天然氣 CO2 胺水溶液吸收處理)	1.3	提高石油採收率	1972
Great Plains Synfuels Plant and Weyburn - Midale Project	美國/加拿大(薩斯克其萬省)	燃燒前處理(合成氣 CO2 以冷甲醇洗滌處理)	3	提高石油採收率(含監視、量測與驗證)	2000
Enid Fertilizer Plant	美國(奧克拉荷馬)	燃燒前處理(肥料製程副產品)	0.7	提高石油採收率	1982
In Salah CO2 Storage	阿爾及利亞	燃燒前處理(天然	1	地下深處鹽	2004

	(Melkoya 島)	氣 CO2 胺水溶液吸收處理)		水層	
Snøhvit CO2 Injection	挪威(巴倫支海)	燃燒前處理(天然氣 CO2 冷凍分離處理)	0.7	地下深處鹽水層	2008
Century Plant	美國(德州 Pecos)	燃燒前處理(天然氣 CO2 冷凍分離處理)	5 (另外建造中的有 3.5)	提高石油採收率	2010
建造階段					
Lost Cabin Gas Plant	美國(懷俄明州 Lysite)	燃燒前處理(天然氣 CO2 聚乙二醇吸收處理)	1	提高石油採收率	2012
Illinois Industrial Carbon Capture and Sequestration (ICCS) Project	美國(伊利諾州 Decatur)	工業(乙醇製造副產品以加壓脫水分離)	1	地下深處鹽水層	2013
Boundary Dam with CCS Demonstration	加拿大(薩斯克其萬省)	燃燒後處理(燃煤發電廢氣 CO2 胺水溶液吸收處理)	1	提高石油採收率	2014
Agrium CO2 Capture with ACTL	加拿大(亞伯達省)	燃燒前處理(肥料製程副產品)	0.6	提高石油採收率	2014
Kemper County IGCC Project	美國(密西西比州 Kemper)	燃燒前處理(發電用合成氣以聚乙二醇吸收 CO2 處理)	3.5	提高石油採收率	2014
Gorgon Carbon Dioxide Injection Project	澳大利亞(西澳大利亞州 Barrow 島)	燃燒前處理(天然氣 CO2 冷凍分離處理)	3.4~4	地下深處鹽水層	2015

資料來源：Global CCS Institute, Nov 2, 2011, "THE GLOBAL STATUS OF CCS: 2011"

由上表所列的各類實質專案可以發現，各種 CO2 捕集技術都已被證明可以掌控，各種灌注封存方式都已被證明安全可行，這意味著碳捕集與封存所應用的各項關鍵技術障礙是可以被克服的。未來要面臨的挑戰是在商業化推廣過程中，如何解決處理量漸增所浮現的問題，如何充分瞭解各種地質差異的因應方式，以及如何建制適合的可監督、可量測、可驗證(MMV)管制環境。

全球碳捕集與封存研究所(GCCSI)由至 2011 年 8 月所收集全球大規模整合型專案的資料，分別按區域分布(表 4)、按行業分布(表 5)、按捕集科技分布(表 6)、按儲存型式分布(表 7)彙整列表如下：

表 4. 按區域分布的大規模整合型專案

應用地區	2009 年(專案件數)	2010 年(專案件數)	2011 年(專案件數)	規劃容量(百萬公噸 CO2/年)	興建容量(百萬公噸 CO2/年)	營運容量(百萬公噸 CO2/年)
美國	18	31	25	53〈18 件〉	9〈3 件〉	14〈4 件〉
歐洲	26	21	21【註 1】	33	0	2
加拿大	6	8	9	8	2	3
澳紐	7	7	7【註 2】	12	4	0
中國大陸	4	5	6	11	0	0
中東	1	2	3	4	0	0
亞洲其他	1	2	2【註 3】	2	0	0
非洲	1	1	1	0	0	1
小計	64	77	74【註 4】	123	15	20

資料來源：Global CCS Institute, Nov 2, 2011, "THE GLOBAL STATUS OF CCS: 2011"

1. 其中英國 7 個專案、荷蘭 4 個專案、挪威 3 個專案。
2. 澳大利亞 6 個專案
3. 南韓 2 個專案
4. 目前日本、印度、俄羅斯尚無大規模整合型專案。

由上表資料進一步分析發現，以專案平均處理規模比較，美國以 3.01 百萬公噸 CO2/年-專案居首，澳紐以 2.29 百萬公噸 CO2/年-專案居次，其後依序是中國大陸(1.83)、歐洲(1.67)、加拿大(1.44)、中東(1.33)、亞洲其他(1.00)、非洲(1.00)；74 個專案的平均值是 2.14 百萬公噸 CO2/年-專案。若以美國的資料進一步分析比較，則專案的平均處理容量以營運中的 3.5 百萬公噸 CO2/年-專案居首，其次依序是興建中的 3.0 百萬公噸 CO2/年-專案、規劃中的 2.9 百萬公噸 CO2/年-專案；美國未來專案規模出現逐漸縮小趨勢的原因值得探討。在此，規劃中的專案包括已確認、評估中、已定案的專案。

表 5. 按行業分布的大規模整合型專案

應用產業		2009 年(專案件數)	2010 年(專案件數)	2011 年(專案件數)	規劃容量(百萬公噸 CO2/年)	興建容量(百萬公噸 CO2/年)	營運容量(百萬公噸 CO2/年)
發電		40	42	42	78〈19 件〉	5〈23 件〉	0〈0 件〉
天然氣處理		12	11	11	7〈1 件〉	9〈3 件〉	16〈7 件〉
其他產業	合成氣	3	5	6	38	1	4
	肥料製造	2	3	5			
	煤液化	2	3	3			
	氫製造	0	1	3			
	鋼鐵煉製	0	1	2			
	煉油	3	2	1			
	化學品製造	0	1	1			

	水泥製造	0	1	0			
	紙漿造紙	0	1	0			
	其他製造	2	6	0			
小計		64	77	74	123	15	20

資料來源：Global CCS Institute, Nov 2, 2011, "THE GLOBAL STATUS OF CCS: 2011"

由上表資料進一步分析發現，以專案平均處理規模比較，天然氣處理業以 2.91 百萬公噸 CO2/年-專案居首，製造工業以 2.05 百萬公噸 CO2/年-專案居次，其後是發電業的 1.98 百萬公噸 CO2/年-專案；74 個專案的平均值是 2.14 百萬公噸 CO2/年-專案。另一方面，若以天然氣處理業的資料進一步分析比較，則專案的平均處理容量以規劃中的 7 百萬公噸 CO2/年-專案居首，其次依序是興建中的 3.0 百萬公噸 CO2/年-專案、營運中的 2.3 百萬公噸 CO2/年-專案；專案規模有逐漸擴大趨勢。若以發電業的資料進一步分析比較，則專案的平均處理容量以規劃中的 4.1 百萬公噸 CO2/年-專案居首，其次是興建中的 0.22 百萬公噸 CO2/年-專案；目前尚無營運中的發電專案，然而未來專案規模也出現逐漸擴大的趨勢。

表 6. 按捕集科技分布的大規模整合型專案

應用地區	燃燒前捕集(專案件數)	燃燒後捕集(專案件數)	富氧燃燒(專案件數)	工業分離(專案件數)	未註明(專案件數)	小計
美國	22	1	1	1	0	25
歐洲	5	10	4	2	0	21
加拿大	6	3	0	0	0	9
澳紐	5	0	0	0	2	7
中國大陸	5	1	0	0	0	6
中東	1	1	0	1	0	3
亞洲其他	0	1	0	0	1	2
非洲	1	0	0	0	0	1
小計	45	17	5	4	3	74
發展階段	燃燒前捕集(百萬公噸 CO2/年)	燃燒後捕集(百萬公噸 CO2/年)	富氧燃燒(百萬公噸 CO2/年)	工業分離(百萬公噸 CO2/年)	未註明(百萬公噸 CO2/年)	小計(百萬公噸 CO2/年)
已確認	6	2	0	0	3	11
評估中	38	7	2	0	1	48
已定案	37	18	7	2	0	64
建造中	12	1	0	1	0	14
營運中	21	0	0	0	0	21
小計	114	28	9	3	4	158

資料來源：Global CCS Institute, Nov 2, 2011, "THE GLOBAL STATUS OF CCS: 2011"

由上表資料進一步分析發現，以專案平均處理規模比較，燃燒前捕集以 2.53 百萬公噸 CO2/年-專案居首，富氧燃燒以 1.80 百萬公噸 CO2/年-專案居次，其後是燃燒後捕集(1.65)、工業分

離(0.75)，未註明技術的平均處理規模爲 1.33 百萬公噸 CO2/年-專案；74 個專案的平均值是 2.14 百萬公噸 CO2/年-專案。

表 7. 按儲存型式分布的大規模整合型專案

應用地區	提高石油採收率(百萬公噸 CO2/年)	枯竭油氣儲槽(百萬公噸 CO2/年)	地下深處鹽水層(百萬公噸 CO2/年)	未註明(百萬公噸 CO2/年)	小計(百萬公噸 CO2/年)
美國	62	0	13	1	76
歐洲	6	8	20	1	35
加拿大	9	0	4	0	13
澳紐	0	0	11	5	16
中國大陸	2	1	2	6	11
中東	4	0	0	0	4
亞洲其他	0	0	2	0	2
非洲	0	0	1	0	1
小計	83	9	53	13	158
專案規劃發展階段	提高石油採收率(專案件數)	地下深處鹽水層或枯竭油氣儲槽(專案件數)		未註明(專案件數)	小計(專案件數)
已確認	1	3			
評估中	9	9			
已定案	15	18			
小計	25	30		5	60
興建中	4	2		0	6
營運中	5	3		0	8
合計	34	35		5	74

資料來源：Global CCS Institute, Nov 2, 2011, "THE GLOBAL STATUS OF CCS: 2011"

由上表資料進一步分析發現，以專案平均儲存規模比較，提高石油採收率爲 2.44 百萬公噸 CO2/年-專案居首，地下深處鹽水層或枯竭油氣儲槽爲 1.77 百萬公噸 CO2/年-專案，未註明技術的平均處理規模爲 2.60 百萬公噸 CO2/年-專案；74 個專案的平均值是 2.14 百萬公噸 CO2/年-專案。

若以輸送方式分析，約 95%的大規模整合型專案是以管路方式送往封存場址。看起來輸送方式在業者的認知裡並非最具挑戰性的問題，因爲高壓氣體管路輸送的技術已相當成熟，並行之有年。此外，大部分的碳捕集與封存專案會將捕集的 CO2 輸送作業委外，由專業機構來處理，送往營運中的油氣田。當然，對於新開發的封存場址，地質探勘、環境調查、基礎建設、地權協商、許可申請與社區溝通是會須要投入額外的資金與時間。而以桶槽運送處理的專案目前僅有 4 個，但隨著碳捕集與封存專案的推廣，會因較具彈性運用的特性得以擴大採用。若將捕集、輸送、儲存方式與產業別等組合按區域別彙整，發現各個專案會因地制宜，依據營運須要而選擇不同的操作技術，如表 8 所列。

表 8. 按各種組合分布的大規模整合型專案

領域	產業	項目	北美	歐洲	亞洲	澳紐	中東北非	小計
捕集	發電	燃燒前	9	3	3	1	1	17
		燃燒後	4	10	2		1	17
		富氧燃燒	1	4				5
		其他			1	2		3
	其他	天然氣處理	6	2		2	1	11
		煉鋼鐵		1			1	2
		水泥						0
		其他	14	1	2	2		19
輸送		陸上遠距管輸	14	6	5	4	1	30
		離岸遠距管輸	1	8	1			10
		聯網管輸	19	5		2	3	29
		其他管輸				1		1
		船槽運輸		2	2			4
儲存	地質封存	陸地地下深處鹽水層	6	6	1	4	1	18
		離岸地下深處鹽水層	1	6	2	1		10
		陸地枯竭油氣儲槽						0
		離岸枯竭油氣儲槽		5	1			6
	其他	提高石油採收率	26	3	2		3	34
		提高天然氣採收率						0
		其他再利用						0
		其他組合	1	1	2	2		6

資料來源：Global CCS Institute, Nov 2, 2011, "THE GLOBAL STATUS OF CCS: 2011"

三、科技現況

3.1 捕集

捕集 CO2 的成本在碳捕集與封存專案中有最大占比，主要的科技選項包括

➢燃燒後捕集(PCC)：可應用在新設計的火力電廠或既有電廠的改裝。而吸收程序是目前最先進的燃燒後捕集科技。

➢燃燒前捕集：應用在氣化複循環發電(IGCC)廠時，是將燃料在高壓下氣化後以酸性氣體脫除(AGR)程序分離出 CO2，由此產生的含氫合成氣(syngas)供燃氣渦輪機使用。

➢富氧燃燒：直接將氧氣供應燃燒作用，產生含二氧化碳的廢氣；所產生的二氧化碳廢氣會部分回流與氧氣混合，以維持適度的燃燒溫度。

爲了比較清楚的指出各項科技的應用發展程度，在此以科技備用程度(TRL)來表示；科技備用程度的 9 個層級說明如下：

TRL-9：全規模的商業化應用

TRL-8：次規模的商業示範廠(商業應用規模的 25%以上)

TRL-7：示範廠(商業應用規模的 5%以上)

TRL-6：程序開發單元(商業應用規模的 0.1~5%)
TRL-5：個別組件在有關環境的確證
TRL-4：實驗室個別組件檢測
TRL-3：分析的「概念性的驗證」
TRL-2：研擬應用方式
TRL-1：觀察到的基本原則

彙整的資料顯示，燃燒前捕集科技的應用，工業部門在營運中的大規模整合型專案有 8 個，電力業在建造中的大規模整合型專案有 1 個，證明相關科技已達全規模的商業化應用的水準(TRL-9)。但在另一方面，合成氣的工業分離科技應用，工業部門在建造中的只有 1 個大規模整合型專案，沒有營運中的專案，顯示相關科技達到次規模的商業示範廠水準(TRL-8)。至於燃燒後捕集科技應用，電力部門在建造中的大規模整合型專案只有 1 個，但仍在規劃中的專案有 16 個，沒有營運中的專案，顯示相關科技達到小規模的示範廠水準(TRL-7)。而富氧燃燒科技應用只有在規劃中的 5 個專案，沒有建造與營運中的專案，顯示相關科技最多達到小規模的示範廠水準(TRL-7)；如表 9 所示。

表 9. 各類二氧化碳捕集科技的發展現況

行業	工業		發電				小計(專案件數)
發展階段	工業分離(專案件數)	燃燒前捕集(專案件數)	燃燒前捕集(專案件數)	燃燒後捕集(專案件數)	富氧燃燒(專案件數)	未註明(專案件數)	
規劃中	3	17	16	16	5	3	60
建造中	1	3	1	1	0	0	6
營運中	0	8	0	0	0	0	8
小計	4	28	17	17	5	3	74
	合成氣	燃燒前捕集		燃燒後捕集	富氧燃燒		
科技備用程度	8	9		7	7		

資料來源：Global CCS Institute, Nov 2, 2011, "THE GLOBAL STATUS OF CCS: 2011"

3.1.1 燃燒後捕集科技

電力部門的燃燒後捕集科技主要有下列 3 種型式：

➢吸收：主要是以含胺水溶液來吸收 CO2 達到捕集分離的目的，是目前短程與中程開發的主要技術；然而目前該技術的應用規模仍相當小，因此科技備用程度爲 7。

➢吸附：主要是以特定固體物質表面來吸收 CO2 達到捕集分離的目的，由於吸附物質的再生過程耗能較吸收爲低，是較有利之處；然而目前該技術的應用規模仍相當小，約僅千瓦(kW)的範圍，因此科技備用程度爲 6。

➢薄膜：利用薄膜物質特定孔隙容許 CO2 滲透達到捕集分離的目的，由於薄膜滲透過程的耗能較低，是較有利之處；然而目前該技術的實驗規模仍相當小，捕集分離量每天不到 1 公噸，且公布的實驗結果有限，因此科技備用程度爲 6。

但是燃燒後捕集設施會顯著影響燃煤電廠的發電效率，假設 1 座新建操作溫度 595℃ 發電廠的設計效率是 38.5%，搭配全規模的燃燒後捕集設施會讓發電淨效率降至 27.5%，若改用改良的胺水溶液來吸收會讓發電淨效率達到 28.5%，若改用先進的胺水溶液來吸收會讓發電淨效率

達到 30.5%，若改用先進的操作溫度 705℃超超臨界鍋爐會讓發電淨效率達到 34.5%。至於應用在水泥廠的碳捕集與封存研究仍在初期階段，探討的捕集方式包括燃燒後捕集與富氧燃燒科技。而在煉油業的碳捕集與封存研究，有關燃燒後捕集的研究資料很有限。

3.1.2 燃燒前捕集科技

油氣產業與化學產業在製程中的 CO2 分離程序商業化應用已有數十年的經驗，應用在燃燒前捕集方面沒有技術上的問題；因此，應用化學性捕集溶液的科技備用程度爲 9、物理性捕集溶液的科技備用程度爲 9、空氣分離單元/氣化/轉變/脫硫的科技備用程度爲 9、燃氫氣渦輪機的科技備用程度爲 8、CO2 壓縮/乾燥的科技備用程度爲 9。

然而燃燒前捕集設施也會顯著影響燃煤電廠的發電效率，假設 1 座參考的發電廠設計效率是 38.5%，全規模的氣化複循環發電廠搭配捕集設施會讓發電淨效率降至 30.5%，若改用 G 燄級(1,500℃)氣渦輪機會讓發電淨效率達到 33%，若改用薄膜空氣分離單元會讓發電淨效率達到 34%，若改用飼煤 CO2 漿會讓發電淨效率達到 36%，若改用先進的碳捕集與封存系統會讓發電淨效率達到 38.5%。

3.1.3 富氧燃燒搭配 CO2 捕集科技

富氧燃燒是在燃燒前將空氣中約 80%的氮先脫除，剩下的氧氣與化石燃料燃燒後可得含 CO2 達 90%(乾基)的廢氣，基本上無須進行分離。目前的資料顯示，富氧燃燒搭配 CO2 捕集科技的成本略低於燃燒後捕集與燃燒前捕集科技。其中配套設備如空氣分離單元科技備用程度爲 9、富氧燃燒鍋爐科技備用程度爲 7、二氧化碳純化科技備用程度爲 8、二氧化碳壓縮乾燥科技備用程度爲 9、富氧燃燒鍋爐搭配捕集廢氣科技備用程度爲 7。

同樣的，富氧燃燒廠會增添額外的輔助性電力耗用量，因而降低淨輸電量(約 23%)，和以傳統空氣燃燒廠比較得到較低的淨效率。若以 1 座參考的發電廠設計效率是 38.5%，富氧燃燒廠會讓淨效率降至 31.5%，若改用先進超超臨界鍋爐(680℃/700℃/352 bar/5,100psia)會讓淨效率達到 35%，若改用加壓氧化還原式燃燒系統會讓淨效率達到 36.5%，若改用化學循環燃燒系統會讓淨效率達到 41.5%。

3.1.4 其他工業的 CO2 捕集科技

由於煉鋼業與生化業的二氧化碳排放無法適用上述的燃燒前、燃燒後、富氧燃燒捕集科技，須要較複雜的組合方式來處理。煉鋼業或許可利用高爐爐頂煤氣回收(TGR-BF)科技處理，因爲既有的高爐可進行改裝。但是，生化業如發酵製程的 CO2 捕集科技似乎尚未受到重視。

歸納前述各項分析，若以超臨界粉化煤發電廠爲比較基礎，得到應用各種 CO2 捕集科技的新增成本如表 10 所列。

表 10. 各種 CO2 捕集科技應用的新增成本

捕集科技	設備裝置成本 (美元/公噸 CO2)	操作儲存成本 (美元/公噸 CO2)	新增燃料成本 (美元/公噸 CO2)	小計 (美元/公噸 CO2)
富氧燃燒	29	13	15	57
氣化複循環發電	35	21	11	67
燃燒後捕集	39	20	22	81

資料來源：Global CCS Institute, Nov 2, 2011, "THE GLOBAL STATUS OF CCS: 2011"

此外，對於捕集 CO2 的成分規格與所含雜質的影響要特別注意，因爲對於大規模的碳捕集與封存專案會有顯著的衝擊，特別是未來轉運站觀念實際運作時，會對不同來源的 CO2 成分規

格有所規範或差別對待處理。

3.2 輸送

有關 CO2 排放源的捕集場址與最終封存場址之間輸送作業，是碳捕集與封存專案鏈最重要的關聯。雖然目前捕集場址與封存場址相近，但隨著碳捕集與封存專案的推廣與多樣性，捕集場址與封存場址之間的距離可能延伸至數百公里，輸送成本必然隨之增加，且輸送過程的可能狀況與問題也會增加。長距離輸送過程可能要解決通行權問題、公眾接受度，以及再壓縮與監測的技術問題。有關輸送作業的相關議題討論如下

➢輸送管：是目前大量輸送最主要的方式，而相關應用技術也相當成熟。

➢集散地、轉運站與網絡：當未來大規模的碳捕集與封存專案普遍推廣後，會因彈性操作與分散風險而出現二氧化碳的集散地、轉運站與網絡，藉由輸送管或桶槽等不同方式，以因應碳源(CO2排放者)與碳匯(CO2儲存場址)的各種營運策略。在北美歐洲與澳大利亞等地，跨區的輸氣管網絡已開始規劃，且有些輸氣管已初步埋設。

➢桶槽運送：目前桶槽運送 CO2 的規模相當小，在歐洲只有 4 艘船運送食品級 CO2(約 1,000 公噸)。由於 70 年來大量液化石油氣與液化天然氣的船運作業已相當成熟，未來大規模的碳捕集與封存專案普遍推廣後，應用桶槽大量運送 CO2 的能力應無問題；挪威與日本已著手設計大型 CO2 運輸船，預料運量在 10,000~40,000 立方公尺之間，能維持－50℃的冷藏溫度。

兩相比較發現，管路輸送有低成本優勢，桶槽運送有彈性操作優勢，在未來大規模的碳捕集與封存專案普遍推廣後，能發揮互補的功能。若參考目前示範專案廠的運作成本資料，依據不同規模進行分析比較，發現輸送成本隨規模擴大而降低，但隨輸送距離增加而升高；不過，船運成本的距離效應不如管輸成本的距離效應那麼明顯，如表 11 所示。

表 11. CO2 輸送成本估計

距離(公里)	180	500	750	1,500
碳捕集與封存示範專案，規模爲 2.5 百萬公噸 CO2/年				
陸地輸送管(歐元/公噸 CO2)	5.4	無資料	無資料	無資料
離岸輸送管(歐元/公噸 CO2)	9.3	20.4	28.7	51.7
船運(歐元/公噸 CO2)	8.2	9.5	10.6	14.5
液化(以備船運) (歐元/公噸 CO2)	5.3	5.3	5.3	5.3
大型網絡，規模爲 10~20 百萬公噸 CO2/年				
陸地輸送管(歐元/公噸 CO2)	1.5	3.7	5.3	無資料
離岸輸送管(歐元/公噸 CO2)	3.4	6.0	8.2	16.3
船運(含液化) (歐元/公噸 CO2)	11.1	12.2	13.2	16.1

資料來源：Global CCS Institute, Nov 2, 2011, "THE GLOBAL STATUS OF CCS: 2011"

3.3 封存與利用

對於地下深處鹽水層封存容量進行調查的國家與進度包括：

已確認：美國、加拿大、巴西、西歐、日本、澳大利亞

勘察中：墨西哥、南非

推論中：中國、印度、東歐

依據 2011 年專案調查結果，估計新封存場址調查的前置時間長達 5~10 年，這也是碳捕集與

封存專案由定案階段到興建階段時，爲瞭解風險範圍所進行各種評估活動所需的時程。按目前歐洲有關碳捕集與封存活動進行中的案例，離岸的封存容量大於陸地的封存容量，而且地下深處鹽水層封存容量也大於枯竭油氣田的封存容量。一般說來，封存成本在專案的占比相當小，估算值如表 12 所示。

表 12. CO2 封存成本估計

封存場址	陸地 (歐元/公噸 CO2)	離岸 (歐元/公噸 CO2)
枯竭油氣田(舊井)	3	6
枯竭油氣田(無舊井)	4	10
地下深處鹽水層	5	14

資料來源：Global CCS Institute, Nov 2, 2011, "THE GLOBAL STATUS OF CCS: 2011"

雖然尚無精確統計數字，但目前全球的人爲 CO2 地質封存活動，顯然是以提高石油採收率程序作業多於其他程序作業，這主要是基於對石油採收的高度興趣。但石油採收的應用也有限制，通常僅適用於較不黏稠、低含臘、低雜質的原油田，而且地質容許高壓 CO2 能和原油混合形成液態抽出。若操作條件理想，提高石油採收率程序作業所使用的 CO2 能循環回收使用，減少 CO2 的補充量。但若原油田的地質特性能吸收 CO2，那麼灌注的 CO2 會有約 30~40%被封存在地層內。

一般說來，目前提高石油採收率專案作業並未建立精確的 CO2 封存量監測系統，而其 CO2 封存量只是由補充量估算得來。提高石油採收率專案要成爲可靠的碳捕集與封存專案，還須要建立完善的監測系統，並防止原油田的土質與水質受到影響。

適合 CO2 封存的沉積盆地深層地質內可能蘊藏各種資源，例如岩層、煤層、煤氣、石油、天然氣、岩頁氣、地熱、地下水、鹽層與其他有價值的礦藏。將 CO2 灌注至地下，很可能因交互化學作用或改變壓力分布，而直接影響既存資源的開採利用機會。由於目前 CO2 排放缺乏價格機制，因此 CO2 封存的價值最低；爲了避免 CO2 封存作業導致該場址其他地下資源的價值喪失，或影響地上資源的開發，封存場址的地下與地上資源、生態及風險評估必須要全面、遠程且深入的考量與進行。

此外，可靠的碳捕集與封存專案須要一套監督、量測、驗證計畫，其基本目標是要確認與管理操作營運的相關風險，所收集的資料可用來改善預測模型，以便確認 CO2 灌注作業是否偏離規劃。監督與量測的科技與儀器必須因地制宜，才能掌握灌注的 CO2 在地下移動的狀況。

3.4 科技成本與挑戰

依據國際能源總署(IEA，2010 年)、WorleyParsons (2011 年)，與美國能源部國家能源科技研究所(DOE NETL，2010 年)這 3 個機構的研究報告，彙整得重大結論如下：

- 大型示範廠的前期資本成本是最具不確定性的成本之一，這會讓氣化複循環發電廠投資成本因搭配碳捕集與封存設施而增加 30%，讓燃煤與燃氣廠投資成本因搭配碳捕集與封存設施而增加 80~100%。
- 燃煤發電廠因碳捕集與封存設施的投資，將反應爲發電成本的 45~50%。
- 富氧燃燒的成本雖然相對較低，但科技成熟度也最低，有較大不確定性。
- 由於不確定性仍相當高，目前很難確認何種科技有明顯的成本優勢。

這 3 個機構的研究對象主要是美國的碳捕集與封存專案，所彙整的各項環節與作業成本如表

13 所示。

表 13. 由 IEA(2010 年)、WorleyParsons(2011 年)與 DOE NETL(2010 年)彙整碳捕集與封存之設計成本

		燃燒後捕集			氣化複循環發電				富氧燃燒	天然氣複循環發電	
		Worley Parsons	NETL	IEA【1】	Worley Parsons (Shell)	NETL (Shell)	NETL (Conoco Phillips)	NETL (GE)	Worley Parsons	Worley Parsons	DOE NETL
基準年【2】		2010	2007	2008	2010	2007	2007	2007	2010	2010	2007
容量	MW(淨)	546	550	474	517	497	514	543	550	482	474
總基礎成本	美元/千瓦	4,701	3,570	3,838	4,632	3,904	3,466	3,334	4,430	1,964	1,497
操作維護【3】	美元/千度	16	22	14	18				12	6	
燃料成本	美元/千度	34	20	13	33	18	18	17	44	72	52
捕集率	%	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90
效率【4】	%	27.2	26.2	34.8	32.0	31.2	31.0	32.6	29.3	43.7	42.8
容量因數	%	85	85	85	85	80	80	80	85	85	85
交貨前置期	年	4	5	4	4	5	5	5	4	3	3
使用壽期	年	30	30	40	30	30	30	30	30	30	30
貼現率	%	8.8	9.1	10	8.8	9.1	9.1	9.1	8.8	8.8	9.1
運輸【5】	美元/千度	1	-	無資料	1	-	-	-	1	1	-
儲藏【6】	美元/千度	6	5.6		6	5.7	5.6	5.3	6	6	3.2
平均化電力成本	美元/千度	131	135	90	125	151	140	134	121	123	109
排放減量成本【7】	美元/公噸 CO2	81	87	~75	67	77	93	109	57	107	106

資料來源：Global CCS Institute, Nov 2, 2011, "THE GLOBAL STATUS OF CCS: 2011"

1. IEA 估計值僅包括 CO2 捕集與壓縮成本。
2. 基準年爲幣值的參考年。
3. NETL 估計值還包括薪資與產權稅，而其他機構估計值未納入考量。
4. IEA 報告採低熱值(LHV)的淨熱效率，而其他機構報告採高熱值(HHV)的淨熱效率。
5. Worley Parsons 的 CO2 傳輸距離假設爲 100 公里，DOE NETL 的傳輸距離假設爲 80 公里，還包括儲存成本。
6. NETL 報告包括 30 年責任險保險費。
7. 參考設施均爲採用超臨界粉煤科技的燃煤發電廠。

由歐洲零排放化石燃料電廠科技平台(ZEP，2011 年)的研究報告，彙整得針對歐洲碳捕集與封存專案各項環節與作業成本如表 14 所示。

表 14. 由 ZEP 彙整碳捕集與封存之成本估計

		燃煤發電				燃氣發電	
		基準：超超臨界	燃燒後捕集	氣化複循環發電	富氧燃燒	基準：F 級渦輪機	燃燒後捕集
基準年【1】		2009	2009	2009	2009	2009	2009
容量	MW(淨)	736	616	900	568	420	350
總基礎成本	歐元/千瓦	1,711	2,860	3,300	4,060	786	1,829
操作維護	歐元/千度	7	14	15	13	6	13
燃料成本	歐元/千度	18.3	26.6	28.3	28.6	56.4	68.1
捕集率	%	-	90	90	90	-	86
效率【2】	%	46	38	36	35	58	48
容量因數	%	85	85	85	85	85	85
交貨前置期	年	無資料	無資料	無資料	無資料	無資料	無資料
使用壽期	年	40	40	40	40	25	25
貼現率	%	8	8	8	8 的	8	8 本
運輸【3】	歐元/千度	-	2	2	2	-	2
儲藏	歐元/千度	-	4	4	4	-	2
平均化電力成本	歐元/千度	44.5	80	87	94	71.9	104
排放減量成本	歐元/公噸 CO2	-	46	54	65	-	114

助

資料來源：Global CCS Institute, Nov 2, 2011, "THE GLOBAL STATUS OF CCS: 2011"

1. 基準年爲幣值的參考年。
2. 報告採低熱值(LHV)的淨熱效率
3. ZEP 彙集有 29 種輸送網絡的輸送成本，上表選用專案的規模爲 2.5 百萬公噸 CO2/年，陸地上點對點距離 180 公里網絡之案例。

政府的補助是希望碳捕集與封存科技創新與應用得以加速進行，但這種期望充滿挑戰與變數，因爲在示範專案所得之精確成本數據不一定能套用在大規模整合型專案上，因爲可能會

資料來源：Global CCS Institute, Nov 2, 2011, "THE GLOBAL STATUS OF CCS: 2011"

目前政府能爲碳捕集與封存發展提供的政策綱要包括補助示範專案活動、確認可供地質封存的區域、支持公眾宣導教育，與提供各項諮詢服務；這些政策綱要有助於縮短碳捕集與封存科技市場化的時程。畢竟，科學家與專家們相信，碳捕集與封存科技有希望成爲大規模削減二氧化碳排放量的工具選項。

資料來源：
Global CCS Institute, Nov 2, 2011, "THE GLOBAL STATUS OF CCS: 2011"