

出國報告（出國類別：開會）

## 參加二氧化碳激勵增產與地下封存 技術會議

服務機關：台灣中油股份有限公司探採研究所

姓名職稱：陳大麟 副所長

派赴國家：澳洲

出國期間：98年12月6日 - 98年12月12日

報告日期：99年3月1日

出國報告（出國類別：開會）

## 參加二氧化碳激勵增產與地下封存 技術會議

服務機關：台灣中油股份有限公司探採研究所

姓名職稱：陳大麟 副所長

派赴國家：澳洲

出國期間：98年12月6日 - 98年12月12日

報告日期：99年3月1日

## 摘要

二氧化碳沖排法為油氣激勵增產常用的方法之一，隨著全球暖化溫室效應日趨嚴重，如何降低二氧化碳排放成為各界關注的焦點，其中二氧化碳之捕捉與封存（CCS）已成為目前最為可行的末端處理方法之一。澳洲的 CO2CRC 為此一領域的佼佼者，而 Otway 二氧化碳地下封存計畫亦為當今著名之 CCS 示範場址，因此前往參加會議研討與實地參訪。除瞭解以二氧化碳沖排法激勵油氣增產之技術進展外；同時獲得二氧化碳捕捉、封存與監測技術之最新資訊。利用 CO<sub>2</sub> 激勵增產油氣的方法有 EOR、EGR 與 ECBM 等，所注入的 CO<sub>2</sub> 來源大多另外購置，因此若能結合 CCS，除可激勵增產油氣外，尚可增加 CCS 之經濟效益。

本行程主要與澳洲 CO2CRC 研究人員舉行會議研討，同時赴 Otway 二氧化碳地下封存注入場址與位於 Latrobe Valley 的 Hazelwood 與 Loy Yang 電廠二氧化碳捕捉場址，以及 Melbourne 和 Monash 兩所大學實驗室等現場研討。本報告除出國行程之所見所聞外，並提出數點心得與建議。

## 目次

一、目的.....	1
二、過程.....	2
三、心得.....	4
(一)注入 CO <sub>2</sub> 以增產油氣.....	4
(二)CCS ( Carbon Capture and Storage ) .....	10
(三)CO <sub>2</sub> 捕捉技術.....	11
(四)CO <sub>2</sub> 地下封存.....	16
(五)心得小結.....	30
四、建議.....	32
參考資料.....	34

## 一、 目的

二氧化碳（CO<sub>2</sub>）沖排法為油氣激勵增產常用的方法之一，通常係以注入 CO<sub>2</sub> 到油層的方式增加油氣產量。而隨著全球暖化溫室效應日趨嚴重，如何降低 CO<sub>2</sub> 排放亦成為各界關注的焦點，其中 CO<sub>2</sub> 之捕捉與封存（CCS, Carbon Capture and Sequestration）已成為目前最為可行的末端處理方法，而澳洲 Otway 之 CO<sub>2</sub> 地下封存計畫，為當今著名之 CCS 示範場址。有鑑於此，在 COP15 會議召開期間前往澳洲開會、參訪並研討有關 CO<sub>2</sub> 捕捉、封存與監測之實際操作技術別具意義。尤其澳洲的 CO<sub>2</sub>CRC 又是此一領域的佼佼者，因此與工研院能環所共同組團透過我國駐澳洲辦事處的協助，得以有機會前往，希望由石油開採工程師的觀點來吸收具體且實際之方法。除瞭解以 CO<sub>2</sub> 沖排法激勵油氣增產之技術進展，應用於本公司國內外油氣田外；同時可獲得 CO<sub>2</sub> 捕捉、封存與監測技術之最新資訊，希望能對本公司即將進行之 CO<sub>2</sub> 地下封存先導型計畫有幫助。

## 二、 過程

澳洲溫室氣體技術聯合研究中心 CO2CRC (Cooperative Research Center for Greenhouse Gas Technologies) 為目前世界上對於溫室氣體技術領先的研究機構，致力於發展 CO<sub>2</sub> 的捕捉與地質封存、示範 CO<sub>2</sub> 捕捉與封存科技之實際應用、評估 CCS 在不同地理、技術和商業條件下之應用、與全球合作並參與國際計畫、以 CO2CRC 的智慧財產為基礎開發新商機、提供優良的溫室氣體技術之教育與訓練、以及在政府、業界與社區間扮演 CCS 的溝通橋樑。CO2CRC 之成員包括澳洲與全球工業界、大學與紐澳研究機構與澳洲政府單位，其資源主要來自澳洲聯邦政府的聯合研究計畫 (Cooperative Research Centers Program) 與其他聯邦或省政府的計畫以及工業界所贊助。

CO2CRC 目前在澳洲有 3 處示範計畫 (圖 1)，分別為：

1. CO2CRC Otway 計畫：為澳洲第一個深層 CO<sub>2</sub> 注入示範計畫，重點在於監測與確認 (Monitoring and Verification)，為國際所關注。
2. 位於 Latrobe Valley 的燃燒後捕捉 (Post-Combustion Capture (PCC)) 先導試驗計畫：由 CO2CRC、Loy Yang 電力、International 電力與 CSIRO (澳大利亞聯邦科學與工業研究組織) 共同出資 5.6 百萬澳幣 (約合台幣 1.7 億)，結合 7 個相關計畫以研究如何降低褐煤 (Brown Coal) 電廠的排放量。
3. 褐煤發電廠燃燒前 (Pre-combustion) CO<sub>2</sub> 捕捉技術先導工廠示範計畫：由 Victorian 省政府、CO2CRC 與 HRL 電力共同出資 4.11 百萬澳幣 (約合台幣 1.2 億)，Melbourne 和 Monash 大學的研究人員針對位於 Mulgrave 的 HRL IDGCC 電廠的氣化設施，試驗各種不同捕捉技術。

本行程主要與澳洲 CO2CRC 研究人員舉行會議研討，同時赴 Otway CO<sub>2</sub> 地下封存注入場址與位於 Latrobe Valley 的 Hazelwood 與 Loy Yang 電廠 CO<sub>2</sub> 捕捉場址，以及 Melbourne 和 Monash 兩所大學實驗室等現場研討。其主要行程如表 1。

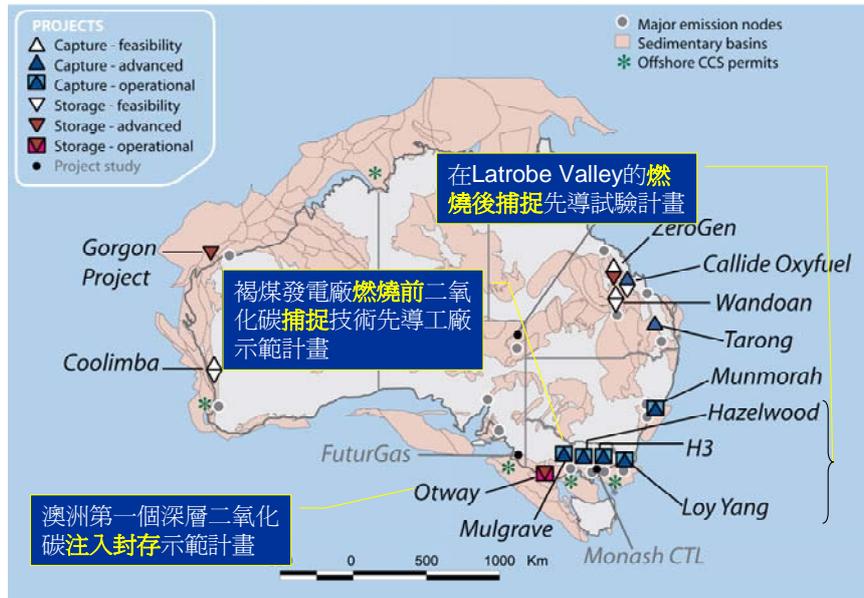


圖 1 CO2CRC 示範計畫位置

表 1 出國行程

日期	到達地點	行程
98.12.6-7	台北－墨爾本	啓程
98.12.8	墨爾本	赴 Otway CO <sub>2</sub> 地下封存場址研討
98.12.9	墨爾本	赴 Melbourne 和 Monash 大學會議研討 CO <sub>2</sub> 捕捉技術
98.12.10	墨爾本	赴 CO2CRC 在 Hazelwood 電廠的捕捉計畫研討、至 CSIRO 在 Loy Yang 的電廠捕捉計畫研討
98.12.11	墨爾本	與 CO2CRC 研究人員會議研討注入 CO <sub>2</sub> 增產與地下封存技術
98.12.12	墨爾本－台北	返程

### 三、心得

#### (一) 注入 CO<sub>2</sub> 以增產油氣

以注入 CO<sub>2</sub> 增產原油 (CO<sub>2</sub> Enhanced Oil Recovery (EOR)) 的技術由來已久，主要係以 CO<sub>2</sub> 降低原油的黏度，使原油體積膨脹並降低界面張力，因而易於流動產出而增加採收率。石油開採工業在輸送與注入 CO<sub>2</sub> 進行 CO<sub>2</sub> EOR 已有 37 年以上之經驗，經由不斷的改進，相關技術與規範已日趨成熟。僅在美國就有 13,000 口 CO<sub>2</sub> EOR 井，3,500 英哩的 CO<sub>2</sub> 高壓管線，已注入 6 億噸以上的 CO<sub>2</sub> (約 3000 億立方公尺，或約 10.8 兆立方英尺)，目前每天注入約 2.14 BCF (21.4 億立方英尺，或約 6000 萬立方公尺) 的 CO<sub>2</sub>，而每天由 CO<sub>2</sub> EOR 產出 24.5 萬桶原油，約佔美國國內產量的 5%。

以下將針對世界第一個 CO<sub>2</sub> EOR 計畫—SACROC 油田、Weyburn CO<sub>2</sub> 注入計畫、K12-B CO<sub>2</sub>-EGR (注入 CO<sub>2</sub> 以增產天然氣) 計畫以及 Allison Unit ECBM (注入 CO<sub>2</sub> 以增產煤層氣) 先導試驗等，分別說明以 CO<sub>2</sub> 增產油氣之效益。

#### 1. SACROC 油田 CO<sub>2</sub> EOR 計畫

SACROC EOR 計畫為全世界第一個商業化 CO<sub>2</sub> EOR 計畫，於 1972 年 1 月在美國西德州的 SACROC (Scurry Area Canyon Reef Operators Committee) Unit 展開 (圖 2)，該油田目前已成為全世界最大的 CO<sub>2</sub> 混溶沖排計畫。SACROC 最初所使用的 CO<sub>2</sub> 來自氨氣工廠，但隨著使用量增加，目前 CO<sub>2</sub> 來源則來自地下開採。每天注入 6 億立方英尺 (約 1,700 萬立方公尺)，生產 29,300 桶原油，注 CO<sub>2</sub> 約已增加 10% HCPV 的產量。

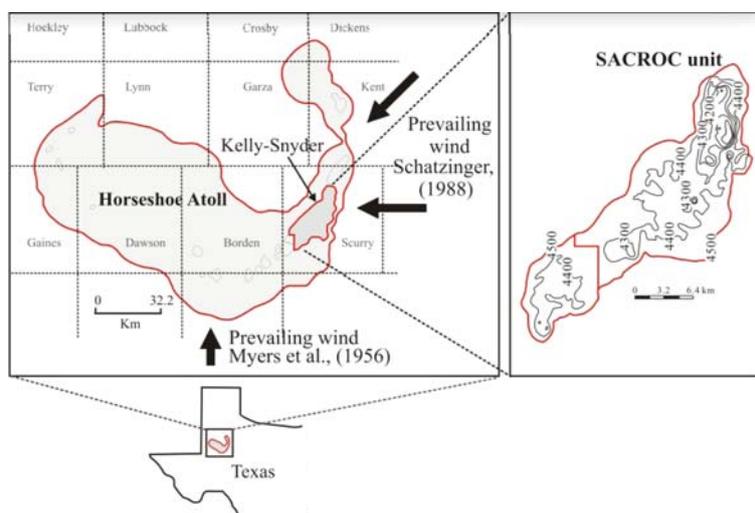


圖 2 SACROC 位置圖

CO<sub>2</sub> EOR 的經驗代表石油工業界具備處理、輸送、注入 CO<sub>2</sub> 的技術，這些在未來執行 CCS 計畫時是一大利基，也證實 CO<sub>2</sub> 地下封存係一持久、可靠且安全的技術。

## 2. Weyburn CO<sub>2</sub> 注入計畫

Weyburn 計畫係自 1999 年起，由加拿大 EnCana 公司、Saskatchewan 省資源局、國際能源署及石油工業界共同合作執行之注入 CO<sub>2</sub> 以增產石油的計畫，將美國北達科塔州 Beulah 之煤炭氣化廠所排放之 CO<sub>2</sub>，經由 330 公里的管線輸送至加拿大 Saskatchewan 省南部的 Weyburn 油田(圖 3)，注入深度約 1,400 公尺、厚度 300 公尺的碳酸岩儲油層。

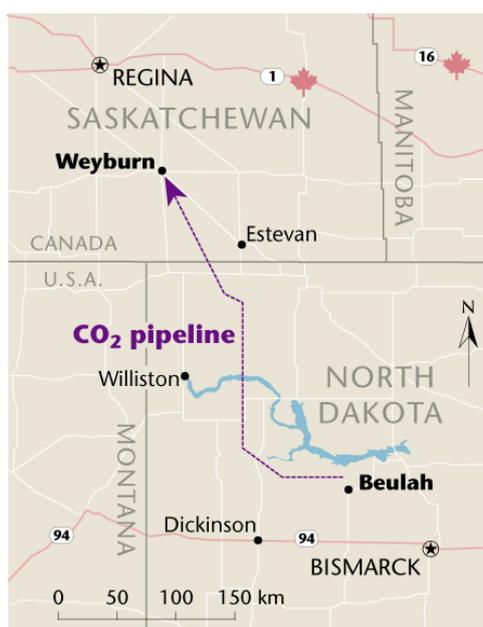


圖 3 Weyburn 計畫位置圖

Weyburn 油田於 1954 年發現，估計原始原油資源量為 14 億桶 (1.4 Bbbl)，此 CO<sub>2</sub> 注入計畫為目前世界上最大的 CCS 計畫，自 2000 年 9 月開始注氣，將原先每天排放到大氣 5,000 噸 (約相當 9,500 萬立方英尺，或 270 萬立方公尺) 的 CO<sub>2</sub> 注入，每年約注入 1.5 百萬噸的 CO<sub>2</sub>，相當於自馬路上移除 200 萬輛車的排放量，預計可永久封存約 20 百萬噸的 CO<sub>2</sub>。在未注氣前，原油的產率為每天 1 萬桶，估計注氣後產率可望提升到 3 萬桶 (圖 4)。

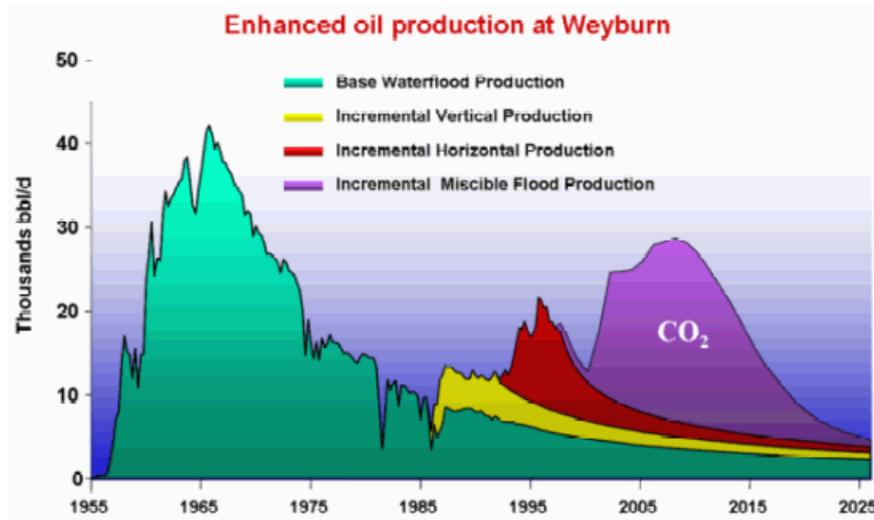


圖 4 Weyburn 產油量（紫色為注入 CO<sub>2</sub> 所增產之部分）

Weyburn 油田 CO<sub>2</sub> 注入計畫因可增產原油而順利實施，此計畫除示範有效的 CO<sub>2</sub> 減量技術外，尚可提升油氣採收率，提高 CO<sub>2</sub> 封存的經濟性。Weyburn 計畫有 50% 的 CO<sub>2</sub> 被永久封存於油層中，其餘的隨著油氣生產回到地表，但在進行 CO<sub>2</sub> 分離、壓縮後，再重新注回地層中。此封存計畫每年為煤炭氣化廠增加約 3,000 萬美元的收入。預計至少將增產 122 百萬桶原油，提高原油採收率到 34%，且可延長油田壽命約 25 年。

Weyburn 計畫第一階段從 2000 年 10 月展開，主要進行：(1) 地質圈及生物圈的地質特徵研究；(2) 監測、預測、查核 CO<sub>2</sub> 封存量；(3) CO<sub>2</sub> 儲存容量、移棲預測、經濟評估；(4) 儲存場址長期封存風險評估。而 2004 年 7 月到 2008 年 7 月的第二階段，主要進行監測及驗證研究，在技術方面持續進行場址特徵、監測查核、井眼完整性、經濟及風險評估等工作；在政策方面則著重於監管問題、公共傳播與推廣。其中監測工作主要有：(1) 樣品收集；(2) 建立地質架構；(3) 地球化學分析；(4) 地球物理分析；(5) 長期風險確認與儲集層完整性研究。所採用的監測技術包括：4D 地表震測、3D 垂直震測剖面 (VSP)、井間震測、地球化學採樣與分析、示蹤劑注入監測、傳統生產數據分析、地表監測技術。由於 Weyburn 為一舊油氣田，許多的地質調查於油田開發時已完成，在封存階段儲集層的地質條件已確知，因此工作重點集中於監測研究，以及開發模擬預測工具，建立地質模型，以提高對 CO<sub>2</sub> 在地下移棲行為的瞭解。

### 3. K12-B CO<sub>2</sub>-EGR (增產天然氣) 計畫

K12-B 氣田位於北海的荷蘭部分，約在 Amsterdam 西北方約 150 公里處(圖 5)，K12-B 注入 CO<sub>2</sub> 以增產天然氣 (Enhanced Gas Recovery, EGR) 計畫，為荷蘭已進行多年的 CRUST (CO<sub>2</sub> Re-use through Underground Storage) 計畫的一部

份。K12-B 氣田自 1987 年開始生產，原先將天然氣中分離出來的 CO<sub>2</sub> 運至陸上，自 2004 年開始注入 4000 公尺地層深處，目前已注入約 6 萬噸的 CO<sub>2</sub>。K12-B 是世界上第一個將 CO<sub>2</sub> 注入同一生產層，以瞭解 CO<sub>2</sub> 注入、儲存於涸竭型氣田之可行性，並執行後續的監測與確認。



圖 5 K12-B 氣田位置圖

本計畫的目的除了封存 CO<sub>2</sub> 外，也進行涸竭氣田的 CO<sub>2</sub> 強化採氣之可行性研究。計畫分為兩個階段。第一階段的目的在於建立一個示範計畫，並進行可行性研究；第二階段的主要目的則為研究將 CO<sub>2</sub> 再注入於北海的耗竭型氣層中。此計畫主要資金來源為荷蘭政府（90%）及法國天然氣公司（Gaz de France B.V.）資助 10%，其中荷蘭政府投資約 12 百萬歐元（約合新台幣 5.7 億元）。計畫主要執行機構為荷蘭經濟部、TNO-NITG（荷蘭地質調查局暨荷蘭應用地學研究所）以及 GDF（法國天然氣公司）。

K12-B 構造於 1981 年發現，1987 年開始生產。目前 K12-B 雖已接近耗竭但仍有 4 口生產井，原始天然氣埋藏量為 144 億立方公尺，目前可採蘊藏量僅剩約 4 億立方公尺。所產天然氣中約含 13% 之 CO<sub>2</sub>。K12-B 主要利用位於不同地塊的 K12-B6 及 K12-B8 兩口生產井，做為 CO<sub>2</sub> 注入井，而以 K12-B1 與 K12-B5 為生產井，所有的井都由海上平台採定向鑽井的方式完成（圖 6）。

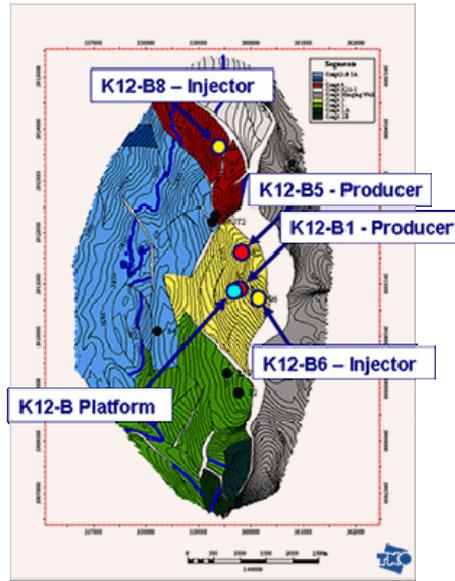


圖6 K12-B氣田井位圖

第一階段計畫自 2002 年開始，主要項目包括：(1) 可行性研究：選定特定場址進行示範計畫。(2) 技術及經濟可行性研究：研究技術上是否可行，及是否具有成本效益。(3) 示範計畫的法規許可、審查機構、以及場址管理研究。(4) 安全性研究。(5) 投資者的利益評估，並完成封存的相關技術準備及經費預算編列。2004 年起，開始第二階段之注儲工作，隨天然氣產出的 CO<sub>2</sub> 經分離、壓縮後，注入相同的氣層中，主要利用 K12-B8 井將 CO<sub>2</sub> 注入到北方地塊的已耗竭氣層中，其目的在測試注入設施，證明注入的可行性與安全性，同時觀察 CO<sub>2</sub> 的移棲行為以及儲氣層的反應。

2005 年 2 月開始利用 K12-B6 將 CO<sub>2</sub> 注入於將近耗竭的氣層中，目的則是研究 CO<sub>2</sub> 之強化採氣效果。計畫主要分為三個部份：(1) 可行性研究：利用現有設備和技術來進行 CO<sub>2</sub> 地下注入 K12-B 氣層的可行性。(2) 示範階段：在海域的地層中注入 CO<sub>2</sub>，並分成兩個試驗。試驗一是在 2004 年 5 月至 12 月，由 K12-B8 開始注儲 CO<sub>2</sub> 於氣層中，平均每日注入約 3 萬立方公尺 CO<sub>2</sub>，累積注入 9,000 噸。同時利用井下設備連續監測地層壓力，並與儲藏層模擬之預測結果進行擬合研究；試驗二是在 2005 年 1 月，將 CO<sub>2</sub> 注入井由 K12-B8 轉移至另一地塊的 K12-B6 井。此地塊中包含有 K12-B1 及 K12-B5 生產井，這二口井在 2006 年 1 月以前每天仍可生產 25 萬立方公尺的天然氣。K12-B6 原先為生產井，從 1991 年 11 月產氣至 1999 年 8 月，在 CO<sub>2</sub> 封存計畫中，則轉為注入井。在 2005 年的一年期注入試驗中，年注入 20,000 噸 CO<sub>2</sub>。本計畫同時監測儲氣層的反應，包括：每日注氣和生產率、壓力和溫度、氣體成分分析、以及示蹤試驗等。(3) 全面實施階段：預計擴大 CO<sub>2</sub> 注入規模，目標為每年注入 31- 47.5 萬噸 CO<sub>2</sub>。

#### 4. Allison Unit ECBM (注入 CO<sub>2</sub> 以增產煤層氣) 先導試驗

Allison Unit 煤層甲烷氣增產(ECBM, Enhanced Coalbed Methane) 先導試驗位於美國 New Mexico 州北端靠近 Colorado 州邊界附近的 San Juan County (圖 7)，主要利用煤層有吸附  $\text{CO}_2$  而排出  $\text{CH}_4$  的特性，藉由注入  $\text{CO}_2$  而增產  $\text{CH}_4$ ，不僅將  $\text{CO}_2$  封存於煤層中，兼收增產  $\text{CH}_4$  之效。先導計畫利用其中 16 口煤層氣生產井、4 口  $\text{CO}_2$  注入井，以及 1 口壓力觀測井。研究區域井位配置如圖七所示，中央位置為五點式 (Five-Spot) 的煤層氣生產井，井距為 320 英畝 (130、114、132 和 120 等井在四個角落，113 在中間)，4 口  $\text{CO}_2$  注入井分布於四個邊，使注入井與生產井之井距成爲 160 英畝，觀測井 POW #2 則位在東邊界 (圖 8)。

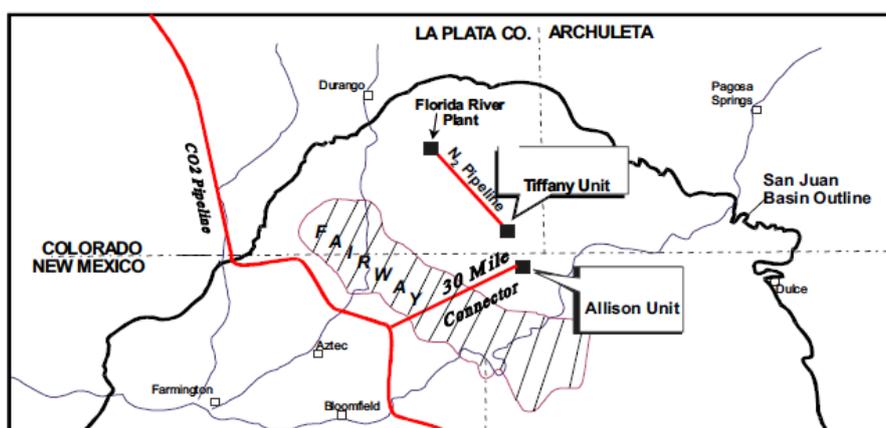


圖 7 Allison Unit 位置圖

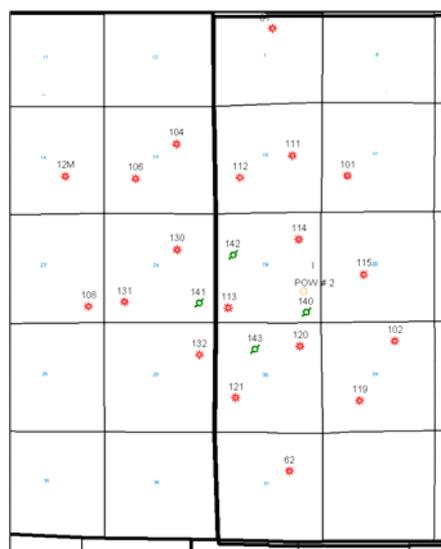


圖 8 Allison ECBM 計畫井位配置圖

圖 9 爲研究區域之生產歷史，生產自 1989 開始， $\text{CO}_2$  在 1995 年 4 月到 2001 年 8 月間注入。研究結果顯示，注入  $\text{CO}_2$  確可增加甲烷氣的產量，其比例約爲注入 3 份體積的  $\text{CO}_2$  可增加 1 份體積的甲烷回收，在五點式的研究範圍內約增產了 17 - 18% 的原始埋藏量。但隨著  $\text{CO}_2$  注入，煤層的滲透率會因吸附而逐漸降低。

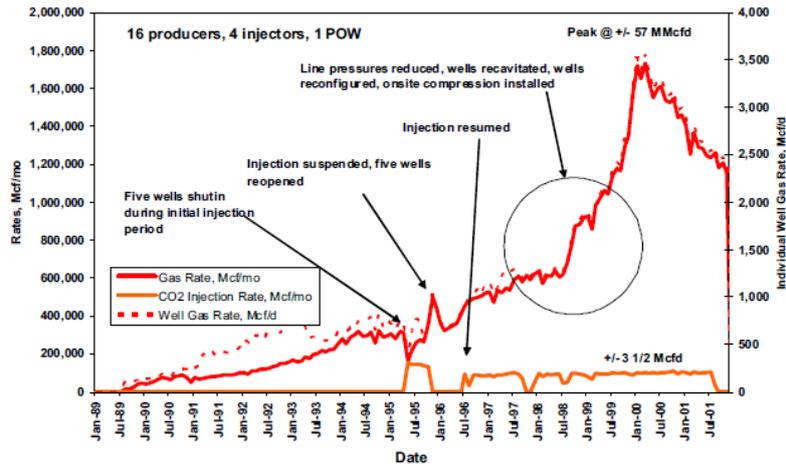


圖 9 Allison Unit 研究區域生產史

## (二) CCS (Carbon Capture and Storage)

現階段溫室氣體末端減量方法多處於研究階段，其量或微不足道；或是成本過高，而地下封存為現階段最具發展前景者。事實上 CO<sub>2</sub> 絕大部分來自化石能源，將之封存於地下最能符合自然生態循環，為未來溫室氣體減量主要選項之一。CO<sub>2</sub> 地下封存之主要工作包括自排放源捕捉、分離、壓縮、運輸、注入、封存及後續之監測等（圖 10）。在 CO<sub>2</sub> 排放未受限制前，所有減量措施似乎皆無經濟效益。但如未積極開始進行地質封存構造之調查與探勘，當 CO<sub>2</sub> 排放需妥善處理時，地下封存就無法及時解決大量的 CO<sub>2</sub> 排放。

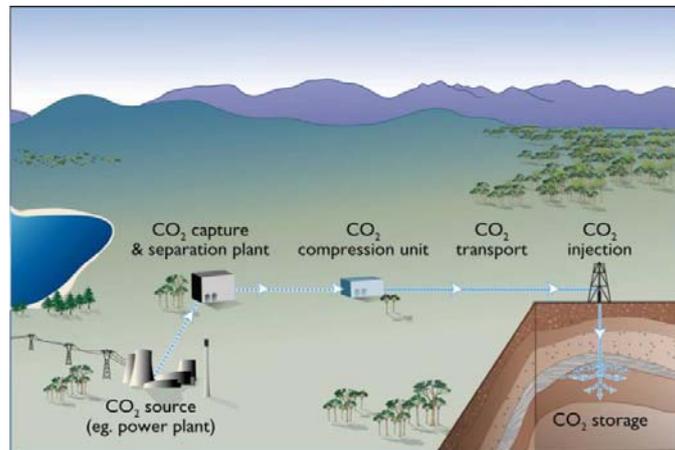


圖 10 CCS 流程示意圖

石油工業數十年來有關長途管線運輸、注入 CO<sub>2</sub> 以增產石油、地下儲氣窖及持續發展之監測技術等，均顯示將 CO<sub>2</sub> 注入地層中封存並無技術與安全顧慮，CO<sub>2</sub> 地下封存之主要考量為所需費用與可封存之潛能，而佔成本比例最大之 CO<sub>2</sub> 分離捕獲費用可能因技術發展而降低，使其在經濟上具可行性，但封存構造之潛

能卻是大自然經千百萬年孕育而成，因此調查評估是否具備封存潛能之自然條件將為日後能否選擇地下封存之關鍵。

### (三) CO<sub>2</sub> 捕捉技術

澳洲研發 CCS 有其特殊目的，澳洲褐煤蘊藏量為世界的 24.1%，褐煤的含水量高達 60%，因其發電效率較低且產出更多 CO<sub>2</sub>，因此為求開拓褐煤未來的銷路，必須開發 CO<sub>2</sub> 的捕獲技術。

#### 1. CO<sub>2</sub> 捕捉方式

目前發電廠捕捉 CO<sub>2</sub> 之方式主要分為 3 類：燃燒後 (Post-Combustion)、燃燒前 (Pre-Combustion) 與含氧燃燒 (Oxy-Firing) (圖 11)，而在 CO<sub>2</sub>CRC 的先導示範計畫中三種捕獲方式皆有之，包括位於 Latrobe Valley 褐煤電廠的燃燒後捕捉 (Post-Combustion Capture (PCC)) 先導試驗計畫，試驗三種不同捕捉技術，此外位於 Mulgrave 的褐煤發電廠則為燃燒前 CO<sub>2</sub> 捕捉技術先導工廠示範計畫。其中含氧燃燒係使燃料在純氧環境中燃燒，可減少 75% 的煙道氣產出，而產出氣中 80%-90% 為 CO<sub>2</sub>，使得分離更加容易，但需要先設置純氧供應工廠。

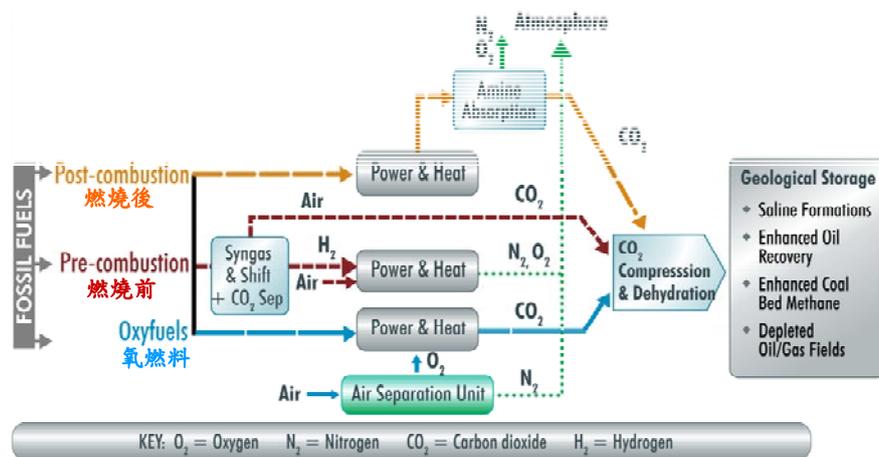


圖 11 主要碳捕捉方式

#### 2. CO<sub>2</sub> 捕捉技術

燃燒後碳捕捉技術主要有利用溶劑吸收(Solvent Absorption)、壓力變化吸附(Pressure Swing Adsorption)、低溫分離(Cryogenic Separation)與薄膜分離(Gas Separation Membranes)等。吸附的材料有 Silica-aluminates、Zeolites Mesoporous、Carbon Metalorganic frameworks (MOFs)、Mixed metal oxides (MMO) 等。而 CO<sub>2</sub> 可被選擇性吸附，再藉由降壓或升溫方式來脫附 (Desorption)，藉以獲得濃度較高的 CO<sub>2</sub> 氣體。

### 3. Hazelwood 電廠捕捉先導試驗

Hazelwood 電廠（圖 12）為 International Power 所經營，設有 8 組 200 MW 的發電設備，與 CO2CRC 合作以溶劑吸收法捕捉 CO<sub>2</sub>（圖 13），溶劑吸收煙道氣所含之 CO<sub>2</sub> 後形成富含 CO<sub>2</sub> 的溶劑（Rich Solvent），再加熱去除 CO<sub>2</sub>，所回收的 CO<sub>2</sub> 用於酸鹼中和用。因為是先導工廠，雖然捕捉量為目前澳洲最大，一年可捕捉 15,000 噸 CO<sub>2</sub>，但所回收的 CO<sub>2</sub> 尚不及電廠排放量的 1%，另外此電廠尚設有以薄膜（圖 14）或吸附法（圖 15）之捕捉裝置，但因都在試驗階段，所捕捉的量更微不足道。



圖 12 在 Hazelwood 電廠進行中的燃燒後捕捉試驗計畫



圖 13 每年吸收 15000 噸 CO<sub>2</sub> 的工場



圖 14 CO2CRC H3 捕捉計畫的薄膜設施 (Membrane Skid)



圖 15 CO2CRC H3 捕捉計畫的吸附設施 (Adsorbent Skid)

同為 International Power 所經營的 Loy Yang B 電廠，發電量為 1,000MW (2 套各為 500 MW 的發電機組)，亦設有由 CSIRO 所設置的 CO<sub>2</sub> 捕捉先導試驗設施，目前一年捕捉量約只有 1000 噸，採用溶劑吸收法。此電廠的燃料來自南半球最大的露天煤礦開採礦場 (圖 16)



David 與 Herzog (2000) 曾分析 6 家 IGCC (Integrated Gasification Combined Cycle (整合式氣化複循環)) 電廠、4 家 PC (Pulverized Coal (粉煤)) 電廠與 4 家 NGCC (Natural Gas Combined Cycle (天然氣複循環)) 電廠之實際操作資料，在假設各類電廠之 90% 如表 2。

表 2 CO<sub>2</sub> 捕捉成本模式分析結果

捕捉方式	IGCC	PC	NGCC
<b>Input (輸入資料)</b>			
Capital Cost, \$/kW	1401	1150	542
O&M, mills/kWh	7.9	7.4	2.5
Heat Rate, Btu/kWh	8081	8277	6201
Incremental Capital Cost, US\$/ (kg/h)	305	529	921
Incremental O&M, mills/kg	2.65	5.56	5.2
Energy Requirement, kWh/kg	0.194	0.317	0.354
<b>Basis (共同假設)</b>			
Yearly Operating Hours, hrs/yr	6570	6570	6570
Capital Charge Rate, %/yr	15	15	15
Fuel Cost (LHV), US\$/MMBtu	1.24	1.24	2.93
Capture Efficiency, %	90	90	90
<b>Reference Plant (未設捕捉設施)</b>			
CO <sub>2</sub> Emitted, kg/kWh	0.752	0.789	0.368
coe: CAPTIAL, mills/kWh	32.0	26.3	12.4
coe: FUEL, mills/kWh	10.0	10.3	18.2
coe: O&M, mills/kWh	7.9	7.4	2.5
Cost of Electricity, c/kWh	4.99	4.40	3.31
Thermal Efficiency (LHV), %	42.2	41.22	55.02
<b>Capture Plant (增設捕捉設施)</b>			
Relative Power Output, %	85.4	75.0	86.96
Heat Rate, Btu/kWh	9462	11037	7131
Capital Cost, US\$/kW	1,909	2,090	1,013
CO <sub>2</sub> Emitted, kg/kWh	0.088	0.105	0.042
coe: CAPTIAL, mills/kWh	43.6	47.7	23.1
coe: FUEL, mills/kWh	11.7	13.7	20.9
coe: O&M, mills/kWh	11.6	15.7	5.1
Cost of Electricity, c/kWh	6.69	7.71	4.91
Thermal Efficiency (LHV), %	36.06	30.91	47.85
<b>Comparison (比較)</b>			
Incremental coe, ¢/kWh (增加發電成本)	1.7	3.31	1.6
Energy Penalty, % (能源懲罰)	14.6	25.0	13.0
Mitigation Cost, US\$/ton CO <sub>2</sub> avoided	26	48	49

註：IGCC= Integrated Gasification Combined Cycle (整合式氣化複循環)

PC= Pulverized Coal (粉煤)

NGCC= Natural Gas Combined Cycle (天然氣複循環)

由表 2 可發現因 CO<sub>2</sub> 捕捉所增加的發電成本約在 1.6-3.3 ¢/kWh 之間（2000 年之技術與幣值），以粉煤發電所增加之成本最高。而要避免 CO<sub>2</sub> 排放所需投入的成本約在 26-49 美元之間，而對粉煤發電廠與天然氣複循環發電廠而言，竟不相上下。至於代表因 CO<sub>2</sub> 捕捉所需消耗的能源表分比之能源懲罰（Energy Penalty），則以粉煤發電最高（25%），整合式氣化複循環發電次之（14.6%），天然氣複循環發電最低（13%）。

#### (四) CO<sub>2</sub> 地下封存

Otway 計畫位於澳洲東南方維多利亞省的 Port Campbell 附近（圖 18），為澳洲第一個 CO<sub>2</sub> 地下封存計畫，共有 3 口井，由 Buttress-1 所生產之天然氣中 80% 為 CO<sub>2</sub>，經過 2 公里的管線運輸後，注入 CRC-1 井，再由 Naylor-1 監測，3 口井之相對位置圖如圖 19。

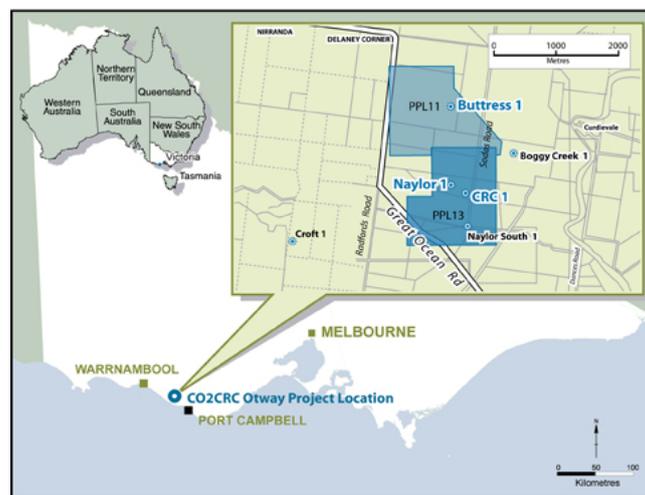


圖 18 Otway 計畫場址位置

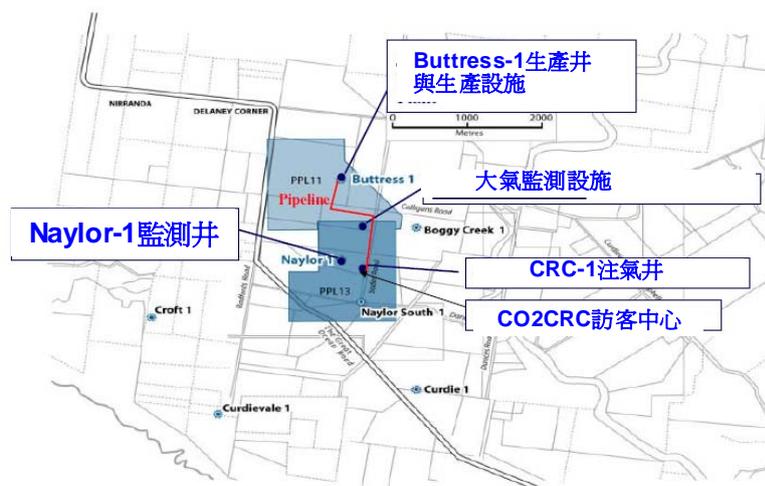


圖 19 Otway 計畫 3 口井位置圖（第一階段）

選擇 Otway 主要基於下列原因：

1. 具備 CO<sub>2</sub> 的來源：其生產井所產天然氣中含 80% CO<sub>2</sub>。
2. 油氣處理成本可接受。
3. 已有大量探勘與生產資料。
4. 現地已有一些設施。
5. 原為已涸竭氣田，其儲存空間之安全性已經證實。
6. 附近社區熟悉石油工業（是加分也可能是減分）。
7. 地理位置容易到達。
8. 地質條件適合所需封存量。
9. 靠近當地的天然氣田，擠注的設備與技術可就近提供支援。

Otway 場址地質條件包括了一系列的多孔隙厚層砂岩，儲藏層上方有厚的蓋層，防止 CO<sub>2</sub> 向上洩漏（圖 20）。計畫分為兩個階段，第一階段的注儲地層為 Waarre Formation，其為一已耗竭氣層，上方有 Belfast 泥岩當作蓋層；第二階段的注儲地層則為已耗竭氣層上方的砂岩含水層 Paaratte Formation。

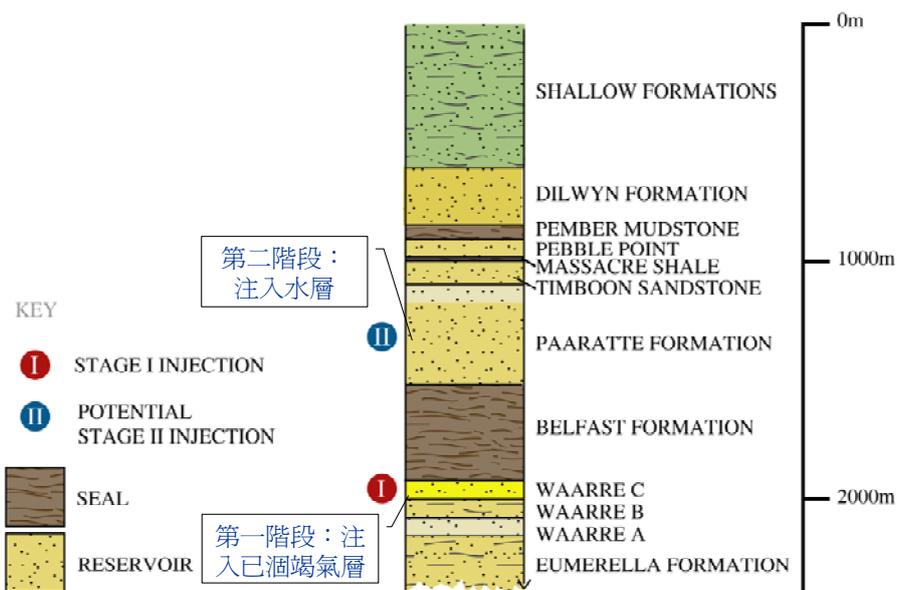


圖 20 地層柱狀圖

第一階段以單純的生產井、輸送管線與注氣井為主。使用 Buttress-1 所產天然氣，注入於 CRC-1 井（新井）中，並以舊有的 Naylor-1 為監測井；第二階段則將增加 CO<sub>2</sub> 與甲烷氣分離之設施，並另鑽新井 CRC-2。

Otway 計畫第一階段的時程規劃（圖 21）為：（1）2004 年：開始計劃的準備、設定與撰寫計劃書。（2）2005 年至 2007 年：取得證照與許可證並正式開始。（3）2005 年至 2007 年：進行基本的基線調查。（4）2007 年：鑽鑿注入井（CRC-1）、

佈置地表設施與管線。(5) 2008 年至 2009 年：利用 CRC-1 注氣；(6) 2005 年至 2010 年：持續監測。基線調查主要進行：地質資料調查（包括進行區域及儲氣層的地質調查）、基線資料調查、儲藏層地球化學探勘、地球物理探勘、地下水監測（水文、地球化學）、土壤氣監測、數值模擬、儲藏層容量、及風險評估。

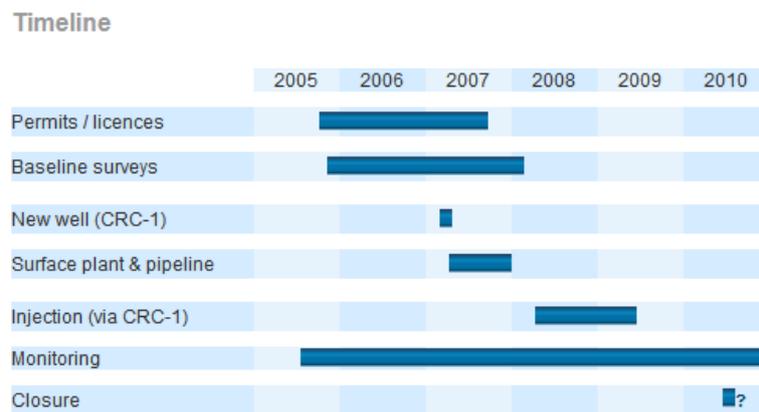


圖 21 第一階段計畫時程規劃

Buttress-1 生產井（圖 22）所生產天然氣中 80% 為 CO<sub>2</sub>、20% 為 CH<sub>4</sub>，因此成為 Otway 計畫中 CO<sub>2</sub> 的來源，井場設備（圖 23）有生產井、處理設備（Process Skid）、壓縮機、後端冷卻器（After Cooler）、管線等（圖 24-27）。



圖 22 位於牧場中的 Buttress-1 生產井

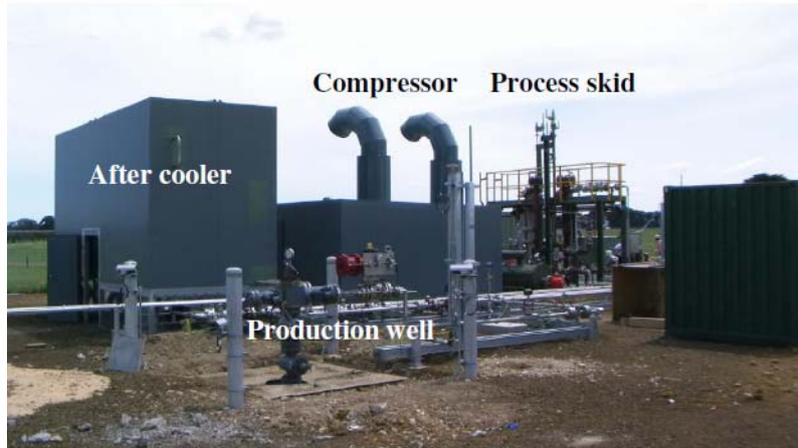


圖 23 Buttriss-1 之井場設施



圖 24 天然氣處理設備



圖 25 加熱器



圖 26 壓縮機房



圖 27 壓縮機（型號為 ARIEL JGQ/1）

CRC-1 注入井靠近訪客中心，鑽深為 2200 公尺（圖 28）



圖 28 CRC-1 注入井

Naylor-1 監測井（圖 29）原為已生產 3.965 BCF（112 MMSCM）天然氣的廢棄生產井，經更改為監測井（圖 30），其井下安裝有美國 Lawrence Berkeley 國家實驗室所設計的 U-tube 取樣設備（圖 31），由 Naylor-1 所取得的 CO<sub>2</sub> 樣品資料，顯示由 CRC-1 井注入的 CO<sub>2</sub> 在 150 天後即到達監測井，其結果與模式預估相符。其他尚安裝有連續式壓力/溫度量測、連續式微震量測、在氣水界面安裝分散式高解析度傳達時間（HRTT, High Resolution Travel Time）量測以及垂直震測剖面（VSP, Vertical Seismic Profiling）影像等設備（圖 32）。



圖 29 Naylor-1 監測井



圖 30 監測井之井口裝置

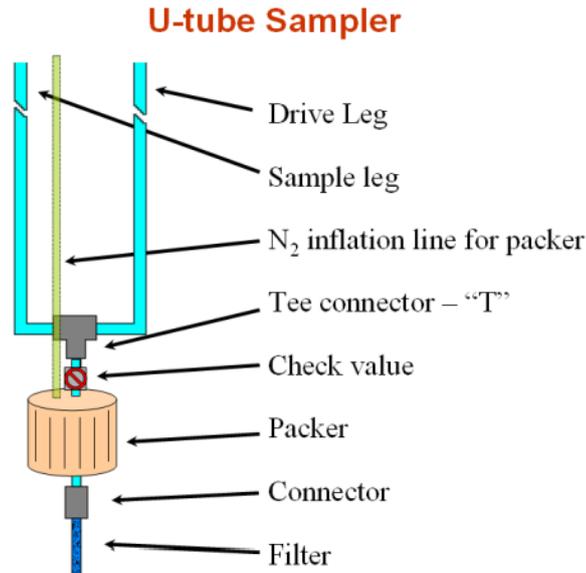


圖 31 地下取樣裝置 (U tube) 之設計

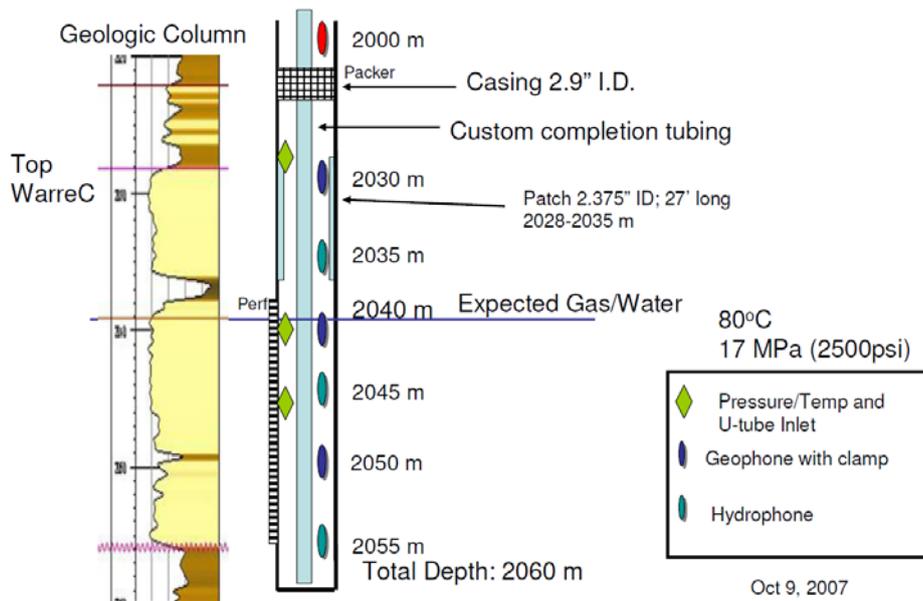


圖 32 監測井設施

完整的監測系統為 Otway 計畫的特色(圖 33),其監測項目主要有大氣監測、地球化學監測(包括:水文和地表水監測、示蹤劑監測)、地球物理監測(包括:地表震測、井孔震測、高解析度歷時(HRTT)、垂直震測剖面(VSP)、微震等)。

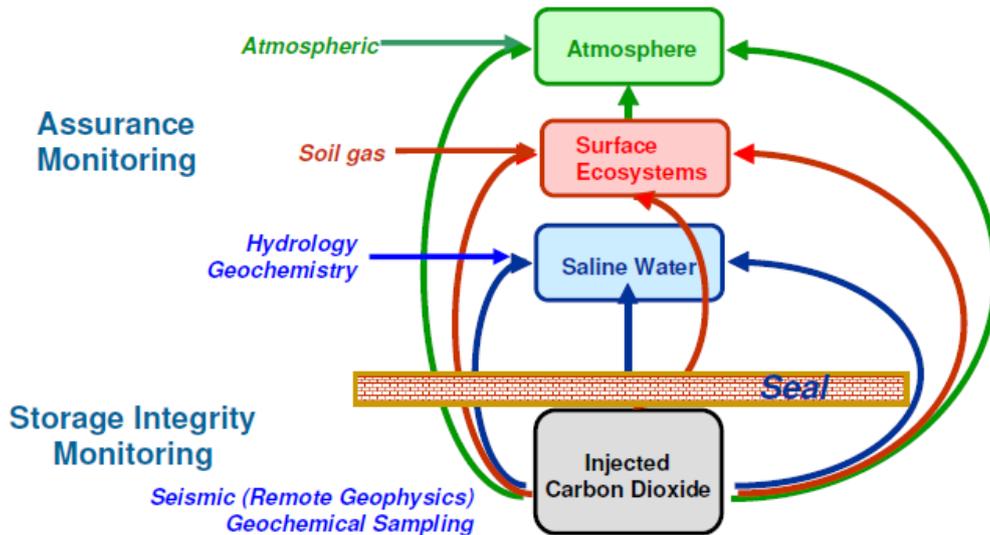


圖 33 Otway 計畫之監測項目

1. 大氣監測：主要驗證地質封存的能力，並建立可檢測地表洩漏的量化方法，及建立注儲前的濃度背景值。自 2006 年開始監測大氣中 CO<sub>2</sub> 含量，以確認所注入的 CO<sub>2</sub> 是否洩漏至地表。由於監測大氣中 CO<sub>2</sub> 含量必須有利條件配合，因此尚添加一些容易監測的示蹤劑以增加偵測的敏感度。但由每日與季節性的變動只有發現約 3 ppm 的 CO<sub>2</sub> 增加，並未觀察到有 CO<sub>2</sub> 洩漏的證據。
2. 地表地球化學監測：抽取土壤氣分析 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 與同位素，觀察 CO<sub>2</sub> 含量是否有異常、建立 CO<sub>2</sub> 變化，研判漏源並分辨 CO<sub>2</sub> 來源係天然的或注入的。
3. 儲存層上方含水層監測：監測淺層（Port Campbell 石灰岩非拘限含水層）與深層（Dilwyn 拘限含水層）之地下水面的季節性變化、流率與方向，以研判任何因為 CO<sub>2</sub> 洩漏所產生的化學變化，並瞭解所注入 CO<sub>2</sub> 是否漏入上方地層。
4. 儲存層：監測儲存層之強度，包括地球物理（震測）與地球化學方法（取樣分析），利用美國 Lawrence Berkeley 國家實驗室所設計之地下取樣裝置（U tube），將地層樣品送至地表分析（圖 34）。



圖 34 多層次 U-tube 地球化學取樣系統可提供 CO<sub>2</sub> 分佈與示蹤劑抵達的資訊

地球化學監測分為兩部分：(1) 水文和地表水監測：監測淺層（非拘限含水層 Port Campbell Limestone）和深層（拘限含水層 Dilwyn Aquifer）的水位和化學成分，以確保早期偵測 CO<sub>2</sub> 是否洩漏到這些含水層中。在多口淺井或深井中使用紀錄器紀錄水流變化、流速和方向，並進行地下水取樣。(2) 示蹤劑：利用化學示蹤劑確認 CO<sub>2</sub> 的行為。經由追蹤示蹤劑濃度，研究 CO<sub>2</sub> 的移棲，並確認有無洩漏到淺水層、土壤和大氣中。

在地球物理的監測項目有：(1) 地表震測：監測 CO<sub>2</sub> 團從注入井至生產井的移動情形。在注入前取得注儲區的震測資料，隨時間取得不同時期的震測資料可得知地下變化結果，通常稱為四維或延時震測，以時間來表現注入前中後 CO<sub>2</sub> 的分布。(2) 井孔震測：隨時間監測儲存層的變化，在觀測井監測附近 CO<sub>2</sub> 的垂直移棲情形。(3) 高解析度傳達時間監測 (HRTT)：將 geophones 設置於 Naylor-1 監測井的氣水界面上下，藉以觀測液面的細微變化並且確定 CO<sub>2</sub> 的注入體積，預期注入的 CO<sub>2</sub> 會上升並集中形成氣頂 (Gas Cap)，持續注入將迫使氣水界面 (GWC) 向下推移。(4) 垂直震測剖面 (VSP)：提供在井孔附近的即時高解析度影像地質分析。(5) 微震調查：檢查儲存層的現地狀況，確認儲氣層不會因為注氣而產生裂縫或引發斷層重新作動。微震偵測器與 VSP 偵測器在井內之安裝位置如圖 35 所示。

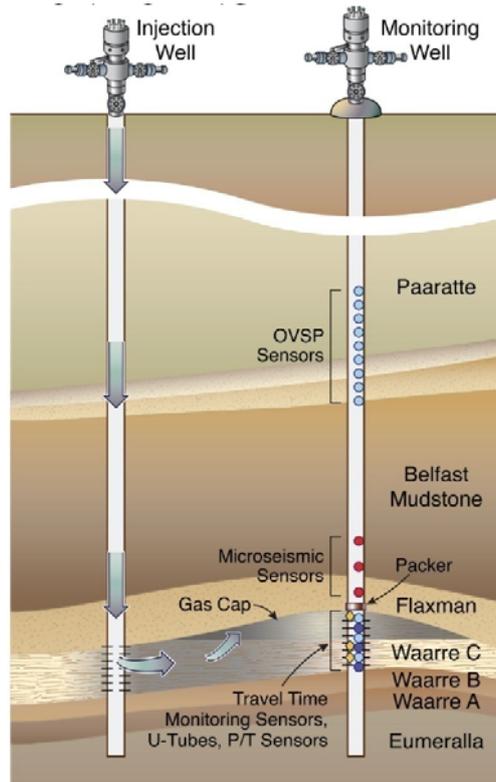


圖 35 微震與 VSP 偵測器位置示意圖

與世界上其他先導試驗場址比較，Otway 計畫之監測項目咸認是最為齊全的。

	Geological Data Availability		Baseline data	Reservoir Geochem	Geo-physics	Ground water monitoring		Soil Gas	Atmos	Containment Risk Ass. prior to project start
	Regional	Reservoir				Hydrology	Geochem			
West Texas	✓	Largely confidential		very limited	limited					
Alberta Basin	✓	limited		very limited						
Sleipner	✓	limited	limited		✓					
Weyburn	✓	Largely confidential	✓	✓	✓	✓	✓	limited		
Frio	✓	✓	✓	✓	✓	limited	limited	limited		
Japanese	✓	✓	✓		✓					
CO2CRC Otway	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

圖 36 完整的監測項目

Otway 計畫第一階段自 2008 年 4 月開始，將 CO<sub>2</sub> 注入涸竭的油氣層 Waarre 層，目前規劃中的第二階段，準備鑽鑿新的注入井，將 CO<sub>2</sub> 注入 1500 m 深的 Paaratte 鹽水層，並進行 huff-n-puff 實驗。其目的在建立模式並模擬 CO<sub>2</sub> 在非均

質鹽水地層中移棲之特性，同時建立有效、可靠的監測與確認方法，將可更加瞭解 CO<sub>2</sub> 在鹽水層中形成殘餘氣的情形。

除了技術層面以外，Otway 計畫對於安全的重視也是值得學習的，譬如井場外的標示：進入井場（或現場）必須穿著安全鞋、螢光背心、安全衣褲、配戴安全帽、安全眼鏡等告示（圖 37、38）。於生產井與注氣井四周安裝氣體偵測器，第一時間掌握漏氣現象（圖 39）。為避免壓縮機房密閉，壓縮機房的安全告示，必須在 2 分鐘內將門關上，或者將兩邊的們都打開，否則壓縮機會停機（圖 40）。於現場要求配戴安全帽、安全眼鏡、螢光背心等（圖 41）。



圖 37 井場外警告標示



圖 38 現場之警告標示



圖 39 井口四周之氣體偵測器



圖 40 壓縮機房的安全告示



圖 41 現場必須穿戴安全帽與螢光背心

而在公眾溝通與宣傳方面也是 Otway 計畫所重視，無論在茶杯、環保袋（圖 42），或與各合作大學的實驗室外，在每一個標示牌上都寫上 CO2CRC 的願景—零排放的未來（An emission-free vision for the future）。而發電廠與煤礦開採並合資建立展示中心（Power Works），宣傳其從煤炭到產生電力的過程，以及對環保的投入與用心（圖 43）。



圖 42 將願景印在環保袋上做為宣傳



圖 43 發電廠共同展示中心



圖 44 在煤樣上之宣傳(這包 30 公克的褐煤煤樣可供 100 瓦燈泡點亮 15 分鐘)

目前參加 Otway 計畫的單位包括：政府機構、大學、研究機構、業界（主要為石油、電力、煤礦公司）（圖 45），其中值得注意的是有 10 家公司為了推動 Otway 計畫，特別組成一 CO2CRC Pilot Project Ltd. (CPPL 公司)，這些公司分別為石油業者的 Woodside、BP、Shell、Chevron，煤礦業者 RioTinto、Bhpbilliton、Anglo Coal、Solid Energy、Xstrata Coal 與技術公司 Schlumberger，莫非這些公司已嗅到新商機，或準備做為未來折抵碳稅之額度？Otway 計畫具有全球性指標意義，因為它是世界級的地下封存示範計畫，已有六萬五千噸以上的 CO<sub>2</sub> 被注入到地下深部已耗竭天然氣層。國際上認為這個封存和監測計畫是世界上最全面的地下封存計畫。Otway 計畫的經驗，尤其是全面性的監測計畫，未來將為世界上其他地下封存計畫所採用。



圖 45 目前參加 CO2CRC Otway 計畫的單位

Otway 計畫是澳洲的第一個示範性的 CO<sub>2</sub> 深部地質儲存的計畫。提供地下封存的技術資料，內容包括封存技術、監測和查核制度，這個計畫的結果將有助於

提供公共政策和企業決策者許多相關資訊，同時提供一般社會大眾安全上的保證。Otway 計畫已證明碳封存技術是一種技術上可行且環境上安全的方法，目前已獲致下列成就：

1. 安全且有效地示範將 65,000 噸 CO<sub>2</sub> 注入舊氣田中
2. 若有滲漏至上方地層可以有效偵測
3. 若有顯著滲漏至大氣或土壤可以有效偵測
4. 所建立的地層模式成功預測穿透 (Breakthrough) 現象
5. 成功由 2 km 深處取得樣品
6. 震測結果顯示與地質模式相符
7. 獲得社區支持
8. 執法者滿意
9. 即將進行下一階段

#### (五) 心得小結：

1. 由石油工業數十年來有關長途管線運輸、注入 CO<sub>2</sub> 以增產石油、地下儲氣窖及持續發展之監測技術等，均顯示將 CO<sub>2</sub> 注入地層中封存並無技術與安全顧慮，但仍須實際以先導試驗來證實並取信於公眾，因此先導試驗最主要的目的應是監測與確認 (M&V, Monitoring & Verification)。
2. Otway 計畫的重點就在於監測與確認：完整的監測系統為 Otway 計畫的特色，監測項目包括大氣、地表土壤氣、地下水、井下取樣，在儲存層尚進行垂直剖面影像、微震等監測。
3. Otway 計畫的主要目的是示範 CO<sub>2</sub> 捕獲和封存 (CCS) 對環境是安全的，證明依澳洲的地質條件，可以安全地捕獲、輸送和封存 CO<sub>2</sub>，並評估 CO<sub>2</sub> 地質封存的經濟效益與可行性，台灣也應該要證明。
4. 對安全的重視與落實值得學習。
5. 重視公眾溝通與公共關係：Otway 計畫與地方建立良好關係，包括定期舉行會議：與地主、環保單位、地方政府、社區團體、地方代表們雙向溝通，報告計畫現況、交換意見並立即回應。此項溝通工作在計劃開始 2 年半前就已開始，同時僱用當地人士負責公共關係業務，負責與地方溝通與接待來自各地的訪客。定期出版最新消息。
6. 宣傳：無論簡報、海報、環保袋、標示、實驗設備，到處都可看到 CO<sub>2</sub>CRC 宣示願景：「零排放的未來」 (An emission-free vision for the future)。
7. 澳洲之所以熱衷於 CCS，因其為重要產煤國 (同時也有牲畜排放之問題)，必須為煤的市場尋找出路，但因煤是排碳量高的能源，因此必須有搭配的減碳措施。

8. 目前商業化 EOR 或 ECBM 計畫的 CO<sub>2</sub> 都由購買而得，在德州，CO<sub>2</sub> 購買費用約為 EOR 總成本的 55–75%（平均為 68%），佔整個操作費成本的一大部分，而且是一個主要投資變數，因此若能改為地下封存將可增加其效益。
9. CO<sub>2</sub> EOR 會使得將 CO<sub>2</sub> 封存的成本比鹽水層還低，而利用 CO<sub>2</sub> EGR 不若 EOR 那麼成熟，主要是擔心 CO<sub>2</sub> 會與天然氣混合，同時氣田的採收率本來就比較高。
10. CCS 未來必須面對的課題主要在：如何降低捕捉成本、成立先導與示範工廠、如何促進公眾認知與接受、法規與規範的設立、以及長期政策之走向。

## 四、建議

依據 IPCC 研究結果顯示，CCS 確實能對溫室氣體減量提供顯著的貢獻，估計在 2100 年時，CCS 將可提供 2 兆噸 (2000 Gt) CO<sub>2</sub> 的儲存量，減少量大約為屆時排放量之 15%- 55% (依當時經濟情況而定)，因此值得長期關注。

而石油工業界因過去有類似經驗，相關技術已建立或尚待建立，但都與石油探勘類似，因此在此一領域本公司具有利基。但因 CCS 工作所需投入經費、時間與資源不菲，職提出下列建議供未來決策參考。

### (一) 及早投入調查國內地質封存潛能

CCS 為現階段溫室氣體減量方法之主要選項之一，目前大部分成本雖集中於排放源之捕捉，但未來此成本可能因技術進步而降低，但封存構造之潛能卻是必須經調查方能評估，因此調查評估是否具備地下封存潛能之自然條件，將為日後能否選擇地下封存之關鍵。但因此項工作所需時間甚長，因此建議及早投入。

### (二) 可先由注氣增產著手

注入 CO<sub>2</sub> 若能同時收增產油氣之效，既減少碳排放又增加收益，一舉兩得，若有適當油氣田為現階段 (碳稅還未開徵前) 可以採行之方式。可先擇本公司國內適當油氣田灌注 CO<sub>2</sub> (EOR 或 EGR)，如永和山氣田或可嘗試，不僅可測試 CO<sub>2</sub> 地下封存，同時可回收油氣。

### (三) 建議以合作聯盟為單位加入 CO<sub>2</sub>CRC 或其他國際合作計畫

加入 CO<sub>2</sub>CRC 或其他國際合作計畫，除了突顯我國對 CCS 的重視外，並可獲取相關經驗與資訊，但因入會費澳幣 15 萬，年費澳幣 20-25 萬，第一年合計約澳幣 40 萬 (約合台幣 1200 萬元)，所費不貲。由於 CCS 牽涉甚廣，不是單一公司或單位可以獨力完成之事，應由國家 (如能源局或地調所) 出面建立國內合作聯盟，以集中資源與力量，並以聯盟為單位加入，將較為省錢。

### (四) 先導試驗可分階段並選擇小型的場址進行

依世界趨勢，CCS 的先導試驗大多分階段進行，可先將 CO<sub>2</sub> 封存於較有把握的舊油氣田，再進行鹽水層之封存。如 Otway 計畫第一階段先注入涸竭氣層；第二階段才注入水層。並應選擇小型的試驗場址，比較容易在短時間內看到注入之影響。

### (五) 公眾接受度與宣導將為未來推動之重點

公眾接受度為最應重視之重點，如社區溝通、定期座談，聘請當地人士負責溝通與宣傳、公眾教育、立法等將是國內未來推動之重點。

#### **(六) 爭取先導試驗免經環評或核准**

先導試驗若需經環評或核准可能曠日費時，應爭取不需經環評（而採限量管制）。因先導試驗是幫政府評估、收集資料，試驗所得資訊，將來可提供主管機關做為規劃、施政與立法之參考。Otway 計畫也是先導試驗在法規之前先行。

#### **(七) 確認發展 CCS 的目的**

發展 CCS 的目的為宣示技術、示範教育、證明安全、重視環保、創造商機、提昇形象或未來折抵碳稅，或者以上皆有之，必須先行確認，因在碳稅尚未開徵之前，方能確定資源投入之主要目的。

## 參考資料

1. CO2CRC, 2009, CO2 Cooperative Research Center for Greenhouse Gas Technologies, <http://www.co2crc.com.au/>.
2. IEA Greenhouse Gas R&D Programme, 2009, <http://www.co2captureandstorage.info/co2db.php>.
3. Orr, F. M. Jr.: "Storage of Carbon Dioxide in Geologic Formations," SPE 88842, Journal of Petroleum Technology, September 2004.
4. David Hilditch: "Demonstration and Deployment of Carbon Dioxide Capture and Storage in Australia – The CO2CRC Otway Project.
5. David, J. and H. Herzog, "The Cost of Carbon Capture," presented at the Fifth International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, Cairns, Australia, August 13-16 (2000).