

出國報告（出國類別：考察）

## 二氧化碳深地層封存與 場址安全性觀測技術訪查

服務機關：台灣電力公司

姓名職稱：焦中輝 電源開發處工程地質組長

楊明偉 綜合研究所化學研究專員

派赴國家：美國

出國期間：100年4月6日至100年4月16日

報告日期：100年6月10日

## 行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：二氧化碳深地層封存與場址安全性觀測技術訪查

頁數 41 含附件：是 否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話：台電人資處/陳德隆/23667685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話

焦中輝 /台電公司/電源開發處/工程地質組長

楊明偉/台電公司/綜合研究所/研究專員

出國類別：1 考察 2 進修 3 研究 4 實習 5 其他

出國期間：100 年 4 月 6 日至 100 年 4 月 16 日

出國地區：美國

報告日期：100 年 6 月 10 日

分類號/目

關鍵詞：二氧化碳、深地層封存、溫室氣體、電廠

內容摘要：

二氧化碳深地層封存已成為電力業者因應二氧化碳減量排放的重要對策之一。目前國內二氧化碳深地層封存計畫仍屬起步階段，相關經驗與可用資源相當缺乏；為此，本公司已逐步建立二氧化碳封存潛能評估能力的核心技術，並正規劃辦理二氧化碳深地層封存場址特性研析與深鑽井工作。為順利推行二氧化碳深地層封存試行工作，本次行程參訪美國在二氧化碳深地層封存有多年經

驗之相關機構包含：美國電力研究院（EPRI）、Lawrence Berkeley National Laboratory（LBNL）與 American Electric Power（AEP）等單位，針對深地層二氧化碳封存場之運作實務與封存場後續之安全性觀測工作等進行交流。參訪機構均正式派出高級人員接待，並以雙方事先排定的議程進行深入討論，藉此得以了解美國二氧化碳深地層封存計畫執行現況與新技術發展。此外，在急切的減碳要求下二氧化碳深地層封存可能很快的進展到大規模實施階段，相關的教育與法規推動工作須從現在就開始進行。為使二氧化碳深地層封存工作順利進行除研發相關技術外，宜現在就開始進行民眾溝通之工作。

本文電子檔已傳至出國報告資訊網（<http://open.nat.gov.tw/reportwork>）

# 目 錄

圖目錄.....	iv
摘要.....	ix
1. 任務目的.....	1
2. 過程.....	2
3. 討論議題內容.....	4
3.1 勞倫斯柏克萊國家實驗室(LNBL).....	4
3.2 美國電力研究所(EPRI).....	20
3.3 史丹福大學全球氣候及能源計畫二相流實驗室 (BENSON LAB).....	26
3.4 美國電力公司 Mountaineer 燃煤電廠.....	27
3.5 貝特爾紀念研究所(BMI).....	33
4. 心得及建議.....	40

## 圖 目 錄

圖 1 勞倫斯柏克萊國家實驗室#90 號館地球科學部門 .....	4
圖 2 LBNL ESD 在澳洲 Otway 計畫使用的 BHA .....	5
圖 3 台電公司與中興社參訪團向 LBNL 研究團隊作簡報 .....	5
圖 4 LBNL 研究團隊向台電公司與中興社參訪團作簡報 .....	6
圖 5 LBNL ESD BHA 為整合設計之井下多功能性監測 裝置探查儀器 .....	7
圖 6 Dr. Barry Freifeld 設計的 U-tube 深地層水採樣 器系統 .....	8
圖 7 LBNL ESD Dr. Barry Freifeld 設計的 U-tube 深地層 水採樣器系統 .....	8
圖 8 Frio U-tube 深地層水採樣分析 .....	9
圖 9 Dr. Barry Freifeld 設計的 DTSP 系統 .....	10
圖 10 二氧化碳注入地層中置換鹽水的飽和度變化 .....	10
圖 11 二氧化碳注入地層中井下不同深度的熱傳導度變化 .....	10
圖 12 全尺度研究之地球物理監測工具 .....	11
圖 13 衛星監測天然氣田二氧化碳注入地層 之地表變形情況 .....	11

圖 14 挪威 Sleipner 天然油氣田海上 4D 反射震測剖面影像.....	11
圖 15 VSP 及 Crosswell 井孔震測剖面示意圖.....	12
圖 16 美國 Frio-1 跨孔震測斷層掃描二氧化碳團塊流及電井測對照圖 .....	13
圖 17 LBNL ESD Paul Cook & Dr. Barry Freifeld 分別講解新式井內震源裝置及光纖電纜 .....	13
圖 18 LBNL ESD 新式井內震源設備現場操作實況.....	14
圖 19 LBNL ESD Dr. Seiji Nakagawa 講解新式 SHRB 試驗設備 .....	14
圖 20 LBNL ESD 研發出新式 SHRB 及二相流 CT scans 試驗設備.....	15
圖 21 二相流試驗過程中，相對於二氧化碳特定飽和度下的岩心試體波速.....	15
圖 22 二氧化碳大量注入地下深鹽水層之影響示意圖.....	16
圖 23 二氧化碳大量注入深鹽水層及向上滲漏反應傳輸模型.....	17
圖 24 二氧化碳封存滲漏檢測三種模式示意圖.....	18

圖 25 滲漏檢測工作流程 .....	19
圖 26 早期滲漏檢測之效益示意圖 .....	19
圖 27 EPRI 總部辦公室 .....	20
圖 28 參訪團與 EPRI 互作簡報與討論 .....	20
圖 29 Anthropogenic 計畫團隊組織圖.....	23
圖 30 Anthropogenic 計畫 CO2 封存場址特性鑽井.....	23
圖 31 Anthropogenic 計畫及環評之許可要項.....	23
圖 32 Anthropogenic 計畫二氧化碳管線輸送及儲存 費用分配表 .....	24
圖 33 Mountaineer 示範電廠地質封存計畫井位圖.....	25
圖 34 Mountaineer 示範電廠實施廣泛的注入 CO2 監測.....	25
圖 35 BENSON LAB 二相流實驗室設備 .....	27
圖 36 岩石試體雙層包覆套管展示 .....	27
圖 37 岩石樣本 .....	27
圖 38 岩心置入之鋁製試體室 .....	27
圖 39 鋁製試體室移入 X 光電腦斷層掃描儀 .....	27
圖 40 Mountaineer 電廠大門外觀.....	27
圖 41 Mountaineer 廠長為參訪團作簡報 .....	28

圖 42 注入二氧化碳圍塊面積模擬計算.....	29
圖 43 Mountaineer 電廠之超臨界(SC)燃煤廠房、煙囪及 冷卻塔外觀.....	29
圖 44 Mountaineer 電廠之 1300 百萬瓦(MW)超臨界(SC) 燃煤機組渦輪蒸氣發電機 .....	30
圖 45 Mountaineer CCS 計畫係由煙道引流煙氣至 FGD 再進一步作二氧化碳捕獲 .....	31
圖 46 採用 ALSTOM 公司專利冷氨法(Chilled Ammonia)辦理 煙道二氧化碳捕獲再加壓輸送至注入井灌注.....	31
圖 47 二氧化碳注入泵及流量控制設備.....	32
圖 48 Mountaineer 計畫經理查看注入泵品牌.....	32
圖 49 發現注入泵品牌為台灣製東元(TECO)馬達.....	32
圖 50 兩口注入井 AEP-1 及 AEP-2 地表設施.....	32
圖 51 參訪團成員觀察注入井管線設備.....	33
圖 52 注入井附近之監測井(MW3) .....	33
圖 53 參訪哥倫布市 OSU 旁的 BMI 總部.....	34
圖 54 全美地區七個 RCSP 組織分布圖 .....	35
圖 55 BMI 參與全美近期 CCS 計畫之現地試驗工作.....	35



圖 56 BMI 完成 MRCSP Michigan 二氧化碳注入許可證之

申請流程..... 37

圖 57 二氧化碳封存計畫推展之民眾宣傳與教育..... 39

## 摘 要

二氧化碳深地層封存已成為電力業者因應二氧化碳減量排放的重要對策之一。目前國內二氧化碳深地層封存計畫仍屬起步階段，相關經驗與可用資源相當缺乏；為此，本公司已逐步建立二氧化碳封存潛能評估能力的核心技術，並正規劃辦理二氧化碳深地層封存場址特性研析與深鑽井工作。為順利推行二氧化碳深地層封存試行工作，本次行程參訪美國在二氧化碳深地層封存有多年經驗之相關機構包含：美國電力研究院（EPRI）、Lawrence Berkeley National Laboratory（LBNL）與 American Electric Power（AEP）等單位，針對深地層二氧化碳封存場之運作實務與封存場後續之安全性觀測工作等進行交流。參訪機構均正式派出高級人員接待，並以雙方事先排定的議程進行深入討論，藉此得以了解美國二氧化碳深地層封存計畫執行現況與新技術發展。此外，在急切的減碳要求下二氧化碳深地層封存可能很快的進展到大規模實施階段，相關的教育與法規推動工作須從現在就開始進行。為使二氧化碳深地層封存工作順利進行除研發相關技術外，宜現在就開始進行民眾溝通之工作。

## 1. 任務目的

電業的二氧化碳減量排放相關工作不僅是技術上的挑戰，也牽涉到國家與國際經濟情勢的巨大改變。二氧化碳的捕集與儲存的實施，預期會對能源與電力業者的經營環境產生巨大改變。業者在二氧化碳的捕集與儲存上將會有相當大規模的投資，因此未來電力事業的獲利能力將取決於其實施二氧化碳的捕集與儲存技術之成本。為此，台電公司推行二氧化碳的捕集與儲存將持續發展自有技術以期降低未來二氧化碳的捕集與儲存技術之操作成本。另一方面，發展二氧化碳的捕集與儲存技術亦有助於確保本公司電廠將來可持續提供低碳排放的電力給國內產業，以免未來國際上要求產業經營者使用低碳電力時我國產業失去競爭力。

目前二氧化碳深地層封存已成為電力業者因應二氧化碳減量排放的重要對策之一。為此，本公司已逐步建立二氧化碳封存潛能評估能力的核心技術，並成立相關研究計畫推行先導試驗場址之評估與試行等工作。為順利推行二氧化碳深地層封存試行工作，本次行程參訪美國電力研究院（EPRI）、Lawrence Berkeley National Laboratory（LBNL）與 American Electric Power（AEP）等單位，針對深地層二氧化碳封存場之運作實務與封存場後續之安全性觀測工作等進行交流，作為本公司深地層二氧化碳封存試行計畫的參考，並期引進或自行開發相關技術之目標。EPRI、LBNL 與 AEP 等單位於二氧化碳深地層封存有多年經驗，AEP 亦有二氧化碳深地層封存試行場。藉此參訪機會可與國外相關之專家學者進行資訊及技術交流，並可實地觀摩研習相關技術。

本次考察有關二氧化碳深地層封存與場址安全性觀測技術，可有利於作為本公司深地層二氧化碳封存試行計畫與相關單位業務上的參考。

## 2. 過程

本次行程參訪 Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL)、美國電力研究院 (EPRI)、American Electric Power (AEP) 與 Battelle Memorial Institute (Battelle) 等單位，針對深地層二氧化碳封存場之運作實務與封存場後續之安全性觀測工作等進行交流，作為本公司深地層二氧化碳封存試行計畫的參考，並期引進或自行開發相關技術之目標。EPRI、LBNL、AEP 與 Battelle 等單位於二氧化碳深地層封存有多多年經驗，AEP 亦有二氧化碳深地層封存試行場，以下為本次參訪與前述機構討論之議題概要。

### **LBNL 參訪課題：**

- 二氧化碳儲存場的地球物理與化學監測技術。
- 整合性的地球化學監測井採樣技術。
- 二氧化碳灌注對地下水的可能衝擊。
- 岩心斷層掃描設施。
- 二氧化碳封存洩漏途徑與地層力學。

### **EPRI 參訪課題：**

- Advanced Coal Technology (IGCC、Oxy-combustion 等)。
- Geologic Storage。
- Mountaineer Plant Project Overview。

### **AEP Mountaineer Plant 參訪課題：**

- Mountaineer 發電廠運轉簡介。
- Mountaineer 二氧化碳捕捉與封存計畫。
- Carbon Capture Technology (冷氫法，CAP)。
- Geologic Storage。
- 儲存場址參觀。

**Battelle 參訪課題：**

MRCSP (Midwest Regional Carbon Sequestration Partnership)。

地質封存試驗場址選定。

監測與風險分析。

民眾接受度。

法規架構。

未來合作之可能性討論。

參訪行程共 11 天，台電公司由電源開發處與綜合研究所派員前往。

### 3. 討論議題內容

#### 3.1 勞倫斯柏克萊國家實驗室(LBNL)

本次參訪對象是勞倫斯柏克萊國家實驗室(以下簡稱 LBNL)地球科學部門(Earth Sciences Division, 簡稱 ESD)(參閱圖 1)為隸屬美國能源部(DOE)的研究單位,經費補助來源包括能源部、環保署及民間機構,為國際上相關二氧化碳地下封存技術的領先研究組織。該部門的任務是認識和瞭解二氧化碳注入、儲存、棲移過程、影響和監測等,以提供資訊和安全的指導,俾有效實施地質碳封存(GCS)。

本次拜訪是由二氧化碳封存計畫(Carbon sequestration program)負責人 Curt Oldenburg 博士親自接待,並介紹該團隊任務及人員組成。該團隊除參與美國境內碳封存計畫之外,並積極參與包括德國、澳洲、冰島等地的國際碳封存研究計畫,並以 Barry Freifeld 博士設計的二氧化碳注入監測井深層水採樣器(U-tube)、Tom Daley 專利的新型井內震源設備等最為著名,LBNL 稱此等整合性的地球化學、地球物理監測工具為 BHA(Bottom Hole Assembly)(參閱圖 2),成功應用在多個知名的調查計畫中。台電公司及中興社參訪團與 LBNL 研究團隊互作簡報(參閱圖 3,4),此外 LBNL 研究團隊尚派員導覽該部門實驗室的新式 SHRB(Split Hopkinson Resonant Bar)及二相流 CT scans 試驗設備。以上皆為本次參訪觀摩的重點。



圖 1 勞倫斯柏克萊國家實驗室 #90 號館地球科學部門



(LBNL ESD Barry Freifeld)

圖 2 LBNL ESD 在澳洲 Otway 計畫使用的 BHA



圖 3 台電公司與中興社參訪團向 LBNL 研究團隊作簡報

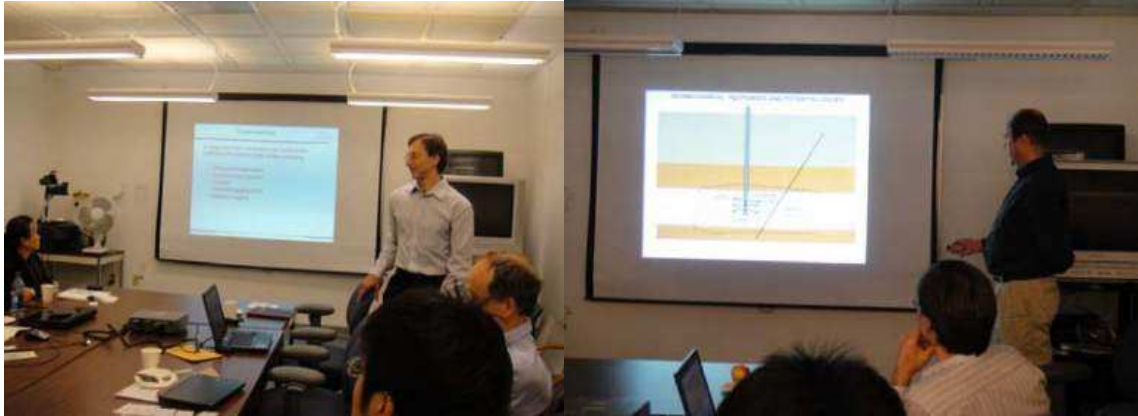


圖 4 LBNL 研究團隊向台電公司與中興社參訪團作簡報

**LBNL ESD 主要計畫的活動分為四部分：**

1. ZERT(Zero Emissions Research and Technology)：進行地質儲存之基礎研究。
2. GEO-SEQ(Geologic Sequestration)：進行地質儲存之各種科學的野外與室內試驗(如多相流試驗)、監測、分析及 TOUGH codes 模擬。
3. RCSP(Regional Carbon Sequestration Partnerships)Support：參與美國境內 WESTCARB, SECARB, MGSC, Big Sky 及國際(如澳洲、阿爾及利亞及德國等)之先導型試驗，以驗證二氧化碳儲存在深部地層潛能，俾部署 CCS 技術。
4. EPA/NETL：模擬盆地(大)尺度二氧化碳注入，對地下水及地壓增大之影響。

### **3.1.1 整合性的地球化學採樣及地球物理探測之監測井技術**

由於深地層鑽井及地面設施運轉之費用龐大，井管設計及多功能性監測裝置，應儘可能將所有地球化學採樣、溫度及壓力量測、震測、井孔紀錄等必要的探查儀器整合設計(參閱圖 5)，LBNL 稱此整合工具為 BHA(Bottom Hole Assembly)，使監測井的投資報酬能達到最高價值。



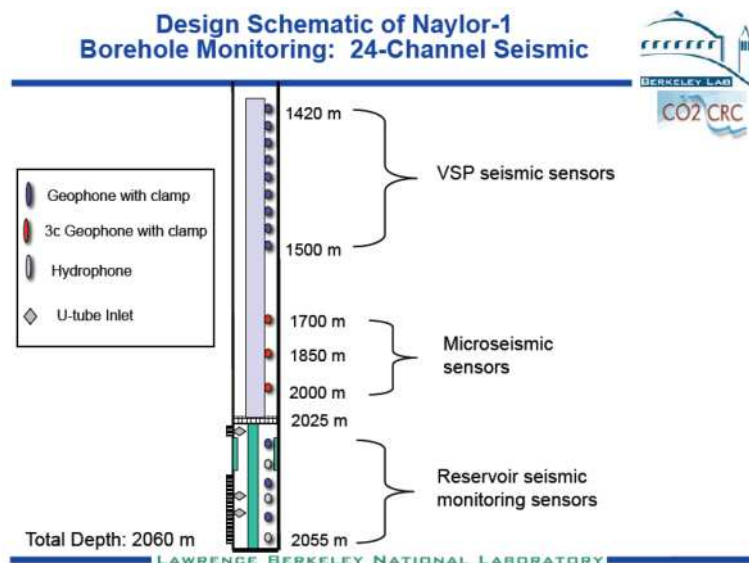


圖 5 LBNL ESD BHA 為整合設計之井下多功能性監測裝置探查儀器

### 3.1.2 U-tube 深地層水採樣器

一般二氧化碳封存在地表下約 800~3000m 深的地層中，為評估二氧化碳在封存地層的物理作用(相變化、溶解、吸收、吸附、擴散等)、化學特性(pH、沉澱、酸萃、共溶)，及棲移過程中可能發生的地球化學反應，需對深地層水進行採樣分析。由於深層水及水中的溶解氣體，採集到地表後，因環境壓力改變，會造成水中溶解氣體氣化蒸發。因此，為採取到地表下數千公尺具代表性的水樣品，於 2005 年 Barry Freifeld 博士設計出 U-tube 採樣器，可以克服既有採樣器的缺點，其設計原理是利用高壓氣體擠壓 U-tube 管內地下流體(包含液體及氣體)進入採樣管路(參閱圖 6)，該系統為密閉設計，可以避免水樣中氣體與大氣接觸產生的壓力變化，可以取得更具代表性的樣品。

採樣原理是利用球閥控制，先以壓縮氮氣吹除清潔 U 型管內的流體，將管內氮氣洩出，並讓管內與大氣壓力達到平衡，俟管內水位回復至地下水位後，再由氮氣管加壓(至 3200 psi，相當約 218 atm)，將管內液體擠出採樣管。反覆吹氣、抽氣、加壓等動作(參閱圖 7)，可以快速取得大量的地下水樣品(~10-100 Liters)，採樣過程中，水中溶解氣體不會因為壓力改變而釋出，並可隔絕大氣中的氧及其他污染物，增加樣品的代表性，井中設置的 U-tube 可以用來採集一般化學試驗用的液相樣品，同步也可以將氣相樣品直接連接到四極質譜儀，進行氣體

組成分析。

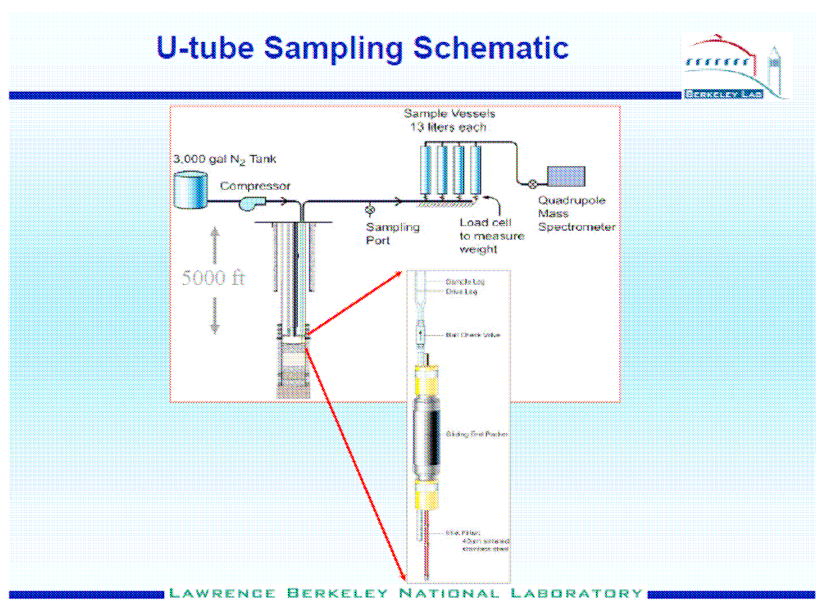


圖 6 Dr. Barry Freifeld 設計的 U-tube 深地層水採樣器系統

### How the U-tube Operates

- Step 1 – Vent drive and sample leg to atmosphere
- Step 2 – Sample and drive leg will fill to hydrostatic
- Step 3 – Apply N<sub>2</sub> to drive leg and force fluid up. Check valve closes
- Step 4 – Collect fluid from sample leg
- Step 5 – Continue to purge U-tube loop until it is free of fluid and ready to refill –

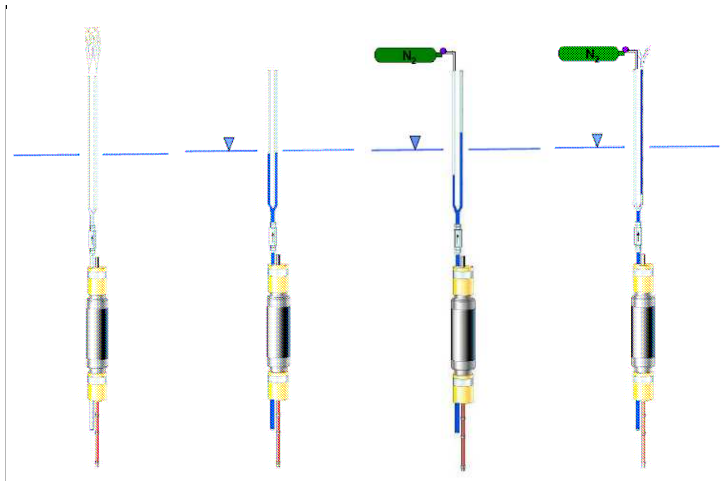


圖 7 LBNL ESD Dr. Barry Freifeld 設計的 U-tube 深地層水採樣器系統

該 U-tube 採樣系統第一個應用在美國德州 Frio Brine Pilot Site(參閱圖 8)，後續也應用在澳洲的 Otway 先導試驗計畫、SECARB Cranfield Experiment，並同步針對個別場址的情況進行小幅度的調整改善。

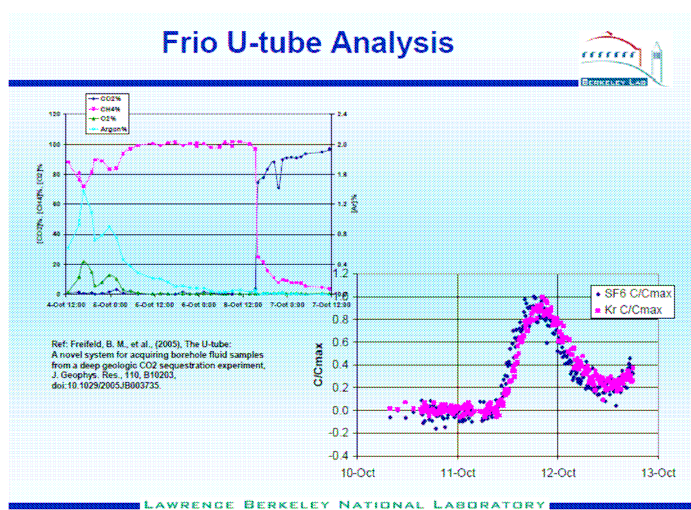


圖 8 Frio U-tube 深地層水採樣分析

依據 LBNL 提供的資料，U-tube 的硬體成本包括井下組件約 US\$ 15/m，埋設地下 2000m 的井管，則約需美金 3 萬元。地面採樣設備則依調查目的及操作考量不同，基本的設置費用約美金 3 萬元，較複雜的裝置如包含即時溫度、壓力、pH 及空氣地化分析者，則需 20 萬美元。

### 3.1.3 分散式熱擾動感應器(DTPS)

DTPS(Distributed Thermal Perturbation Sensor) 亦是 Barry Freifeld 博士的專利設計。該裝置是利用井管內裝設的電加熱器，再由平行裝設的熱感應偵測紀錄熱傳導的結果(參閱圖 9)，其中熱傳導效率受介質影響，如井管內有二氧化碳氣體滲流出，則受該滲流氣體影響，環境介質的熱傳導效應不同，由量測到的溫度變化，可計算出二氧化碳注入地層中置換鹽水的飽和度(參閱圖 10)及井下不同深度熱傳導度之變化情形(參閱圖 11)。

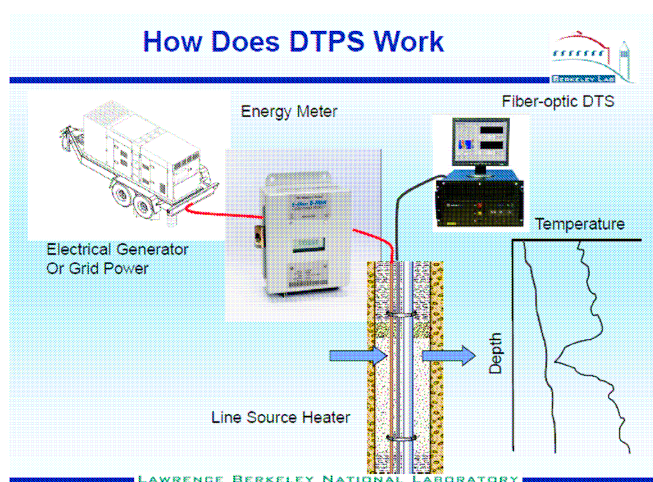


圖 9 Dr. Barry Freifeld 設計的 DTPS 系統

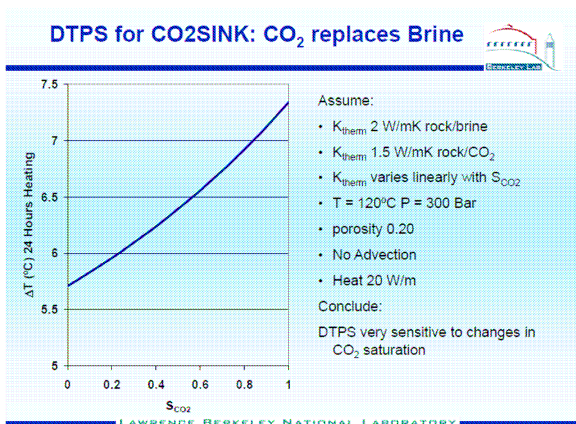


圖 10 二氧化碳注入地層中置換鹽水的飽和度變化

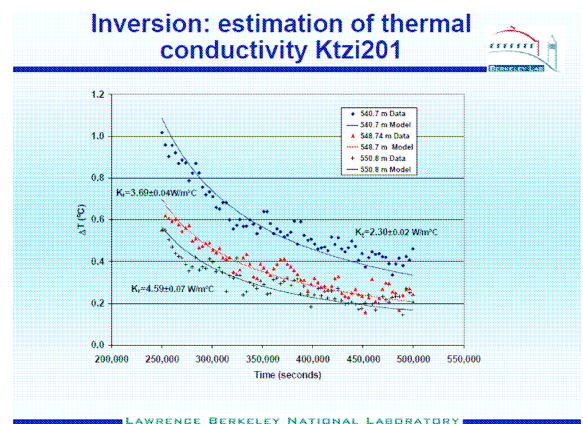


圖 11 二氧化碳注入地層中井下不同深度的熱傳導度變化

### 3.1.4 全尺度地球物理監測工具

二氧化碳注入地層後，團塊流的移棲分布及二氧化碳在儲集層中的飽和度一直是監測追蹤的重要議題。新式全尺度地球物理監測工具(參閱圖 12)可以蒐集到所需要的資料，作出定量判釋，並與儲集層模式整合。

#### Satellite(InSAR)監測注入井地表變形之成功案例

在非洲阿爾及利亞 Krechba In Salah 天然氣田 CCS 計畫，將二氧化碳注入到地表下約 1800 公尺深地層中，計有 3 口注入井，每年注入一百萬噸，經過 6 年

後 Satellite(InSAR) 監測到地表有發生隆起變形的現象(參閱圖 13)。此地表隆起變形量僅約數公厘，但仍可被偵測到，並將此數據與該處地質力學模型耦合結果發現，二氧化碳注入到儲集層內並未發現有滲漏出的情況。

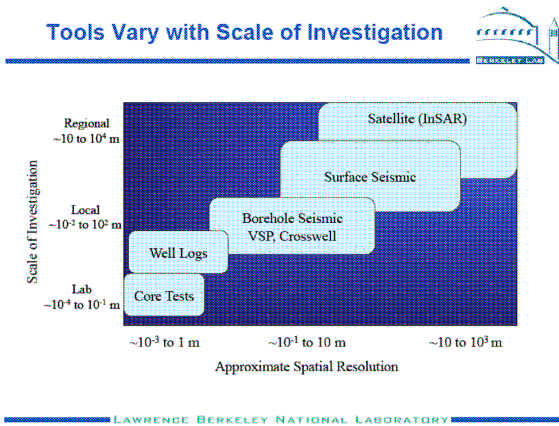


圖 12 全尺度研究之地球物理監測工具

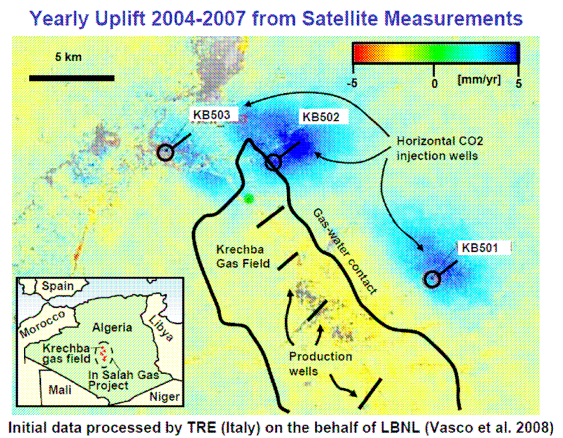


圖 13 衛星監測天然氣田二氧化碳注入地層之地表變形情況

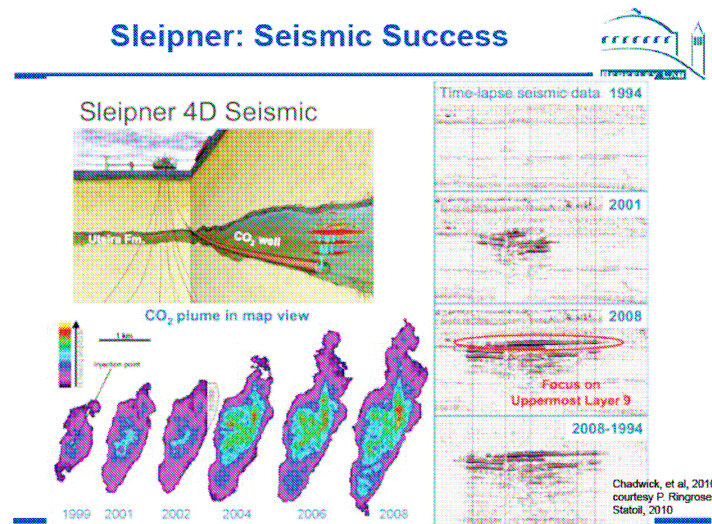


圖 14 挪威 Sleipner 天然油氣田海上 4D 反射震測剖面影像

### 地面 4D 反射震測之成功案例

近年來 4D 震測逐漸受到重視，並成為一項關鍵技術。在挪威 Sleipner 天然油氣田 CCS 計畫，於 1996 年開始將二氧化碳注入到地表下約 1000 公尺深地層中，

並自 1999 年以來經常作重覆的海上 4D 反射震測，由反射震測剖面影像可清晰顯示，二氧化碳從注入中心向垂直及水平方向移棲及擴散(參閱圖 14)。

### 井孔震測監測

井孔震測依探查的範圍可分為兩種：VSP 及 Crosswell(參閱圖 15)。

VSP 探查涵蓋一組監測井以外二氧化碳圍塊流移棲的分布範圍，並可探查監測井附近的斷層構造等；Crosswell 探查一組監測井之間二氧化碳圍塊流移棲的分布，利用持續的探測獲得地層波速是否發生改變，以推估二氧化碳圍塊流的移棲行為，解析度高，並計算出二氧化碳注入地層中置換鹽水的飽和度，可用於驗證數值模擬結果。

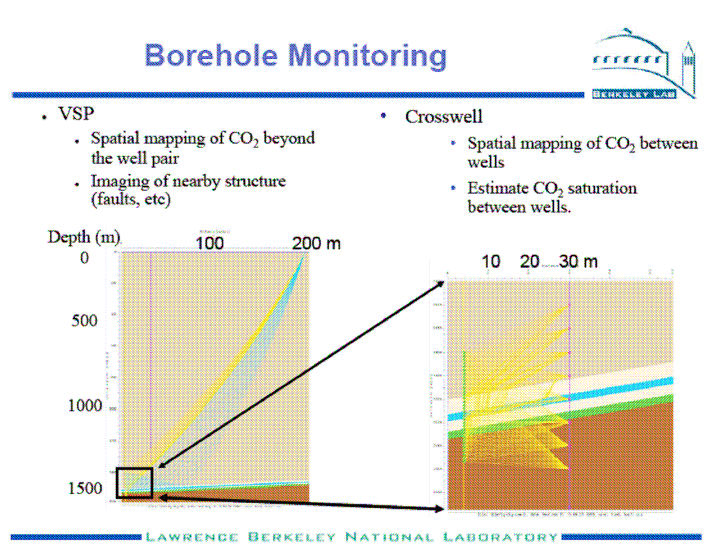


圖 15 VSP 及 Crosswell 井孔震測剖面示意圖

有關 VSP 及 Crosswell 井孔震測使用之震源，大多為新式井內震源設備，例如日本 Nagaoka 計畫採用跨孔的震測斷層掃描法(Seismic Tomography)，採用日本 OYO 公司的深井專用震源 OWS；美國的 Frio 計畫則採用 LBNL 專利研發震源，辦理 VSP 與震測斷層掃描探查(參閱圖 16)，為一種應用於高溫高壓下非破壞、可重覆式機械震源系統。LBNL ESD Tom Daley 地球物理學家原為電子機械專長，採用 18 片環式壓電片組成新形式震源(參閱圖 17)，該設備長約 1 公尺，直徑約 3 吋。實際測試結果，在良好岩盤條件下，經由高壓電激發壓電片產生瞬時變形，並壓

迫井內水體造成震波，最大傳遞距離約可達 100 公尺(數百英尺)以上，震波頻率最高可達 1kHz 。訊號接收器採用商業化的水耳(Hydrophone)或地(Geophone)。該設備應用於 Frio 計畫的震波斷層掃描與 VSP 探勘(參閱圖 18)，均取得相當良好品質的探查資料，用於推估注入二氧化碳團塊流的移棲範圍。此設備亦曾應用於美國能源部轄下的 WESTCARB 與 SECARB 等二氧化碳地質封存試驗計畫。

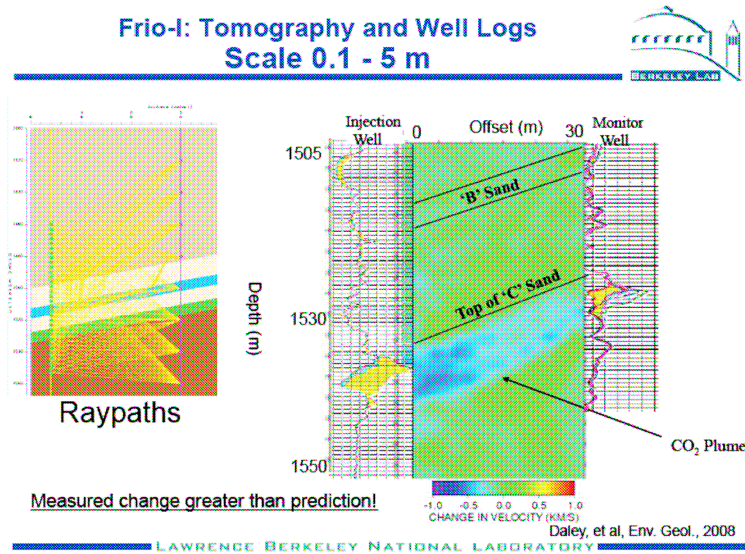


圖 16 美國 Frio-1 跨孔震測斷層掃描二氧化碳團塊流及電井測對照圖



圖 17 LBNL ESD Paul Cook & Dr. Barry Freifeld 分別講解新式井內震源裝置及光纖電纜



圖 18 LBNL ESD 新式井內震源設備現場操作實況

### 3.1.5 新式 SHRB 及二相流 CT scans 試驗設備

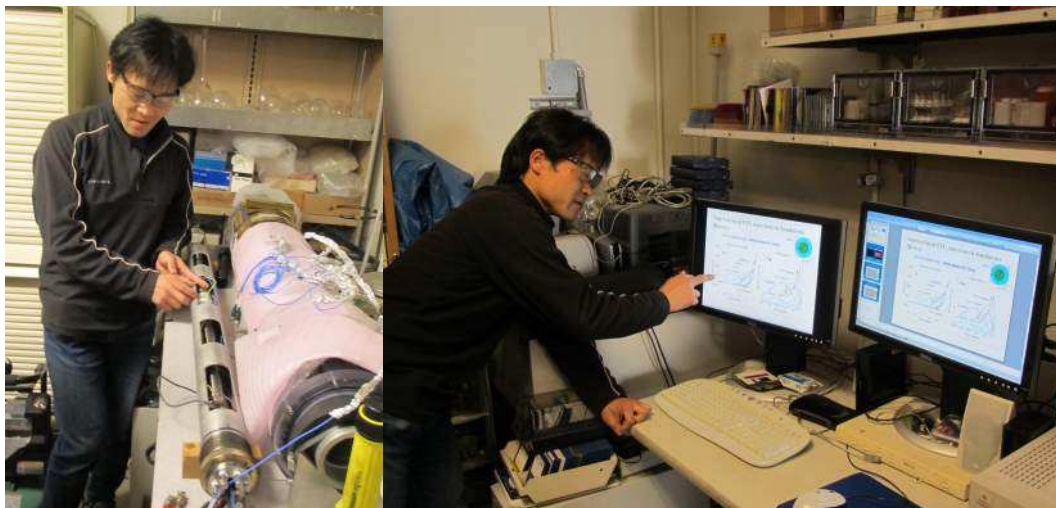


圖 19 LBNL ESD Dr. Seiji Nakagawa 講解新式 SHRB 試驗設備

新式 SHRB(Split Hopkinson Resonant Bar)是由 LBNL Dr. Seiji Nakagawa 與 Dr. Timothy J. Kneafsey 將既有設備改良，共同研發製造(參閱圖 19、20)。此試驗係將岩心兩端以金屬柱狀體加長，形成較長的柱狀體，約 40.6 公分，方能使用較低頻段進行共振試驗，獲得低頻波共振頻率，最終再進行數值分析，解離出試體本身的動態特性與波速參數。但上述共振試驗過程需搭配二相流 CT scans



試驗，方能獲得所需的波速與飽和度關係資料。於試驗時將岩心組裝於 SHRB 中，再將 SHRB 置入二相流灌注室內，進行注入二氧化碳之排水試驗，並在排水過程即時進行共振試驗，如此可獲得二相流試驗過程中，相對於特定飽和度下的材料波速(參閱圖 21)，並建立成為基本資料庫。於進行二相流試驗，採用較高孔隙率的砂岩試體，整體有效試驗過程僅為時數分鐘，在如此短暫時間內若需進行多次共振試驗，有實際上的困難。因此，共振試驗設備與資料處理的自動化相當重要。

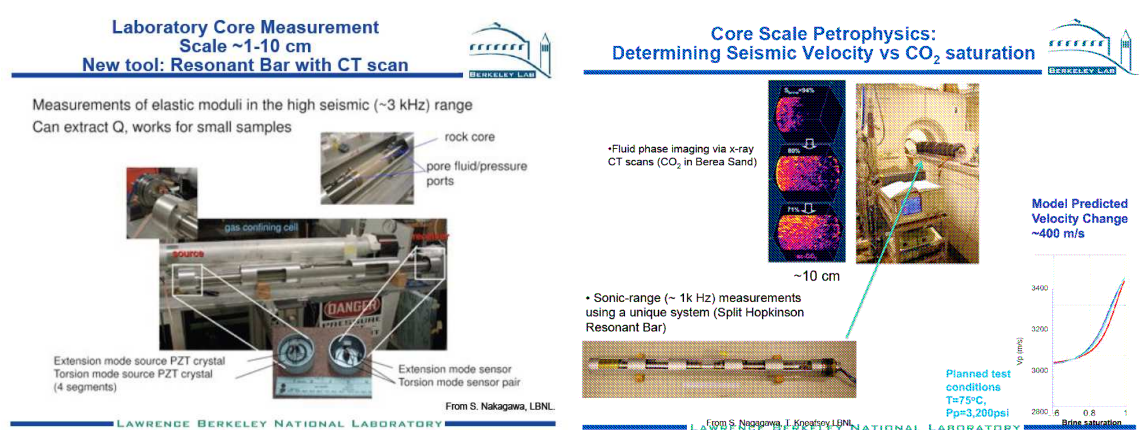


圖 20 LBNL ESD 研發出新式 SHRB 及二相流 CT scans 試驗設備

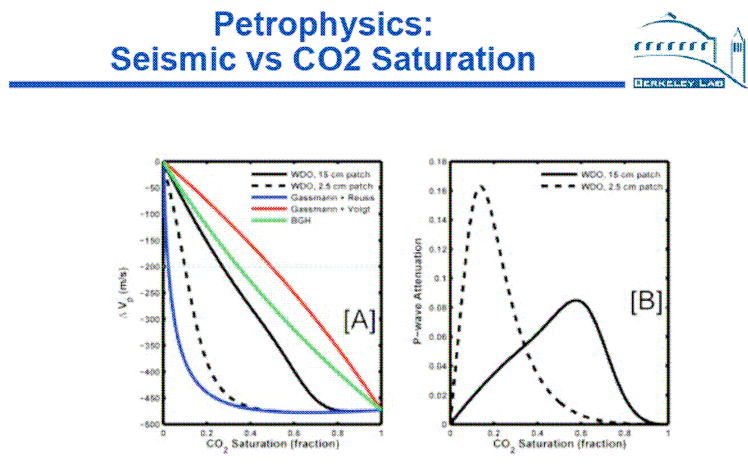


圖 21 二相流試驗過程中，相對於二氧化碳特定飽和度下的岩心試體波速

### 3.1.6 環境保護相關的地球化學及法規議題

## 二氧化碳大量灌注操作及對地下水潛在的影響

LBNL 於 1999 年發展出一套地下水文地質模擬程式 TOUGH2(目前已更新為 2.0 版)，用以模擬地下水中的流體特性，目前為因應二氧化碳地質封存需要，開發 ECO2N 程式，用來模擬二氧化碳封存在鹽層水中的流體特性；TOUGHREACT 則是搭配 TOUGH2，用來模擬多成分、多相間的化學反應。

有關二氧化碳大量注入地下深鹽水層，美國 EPA 的法規草案定義出 AoR(Area of Review)，將所有二氧化碳滲入之儲集層與封閉層必須先作模擬認定，同樣對區域地下水壓力增加亦須作計算，此有可能使深部鹽水經由附近廢棄井進入地表淺部 USDW(Underground Source of Drinking Water)，造成影響(參閱圖 22)。

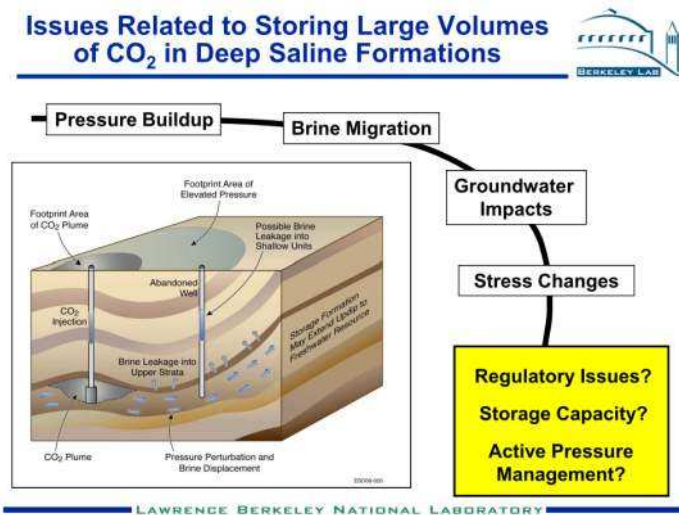


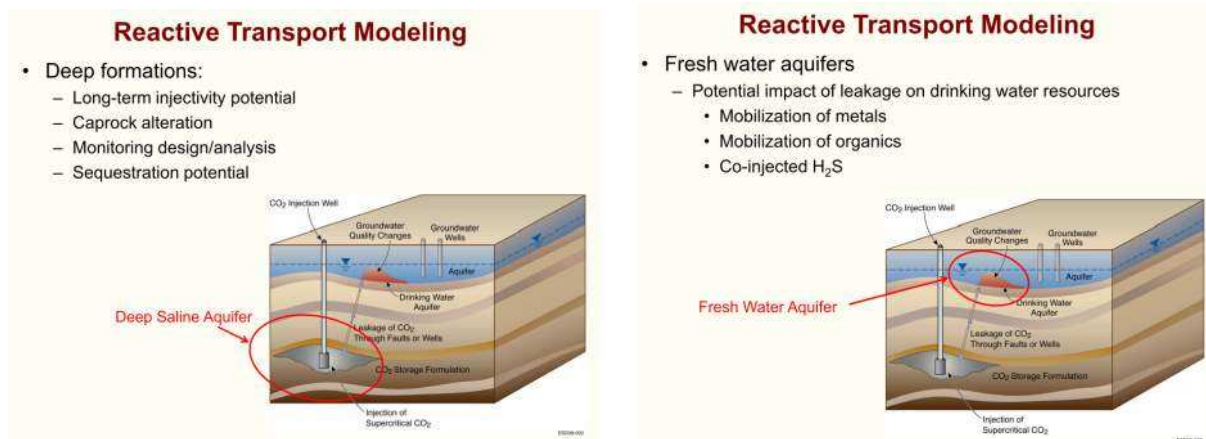
圖 22 二氧化碳大量注入地下深鹽水層之影響示意圖

## 二氧化碳注入深鹽水層及向上滲漏至地下水層之地化作用模型

此反應傳輸模型依地層深淺可分為兩大部分(參閱圖 23)：

深鹽水層研究項目-長期注入潛能、蓋層置換作用、監測設計與分析及封存潛能。淺淡水層研究項目-滲漏至飲用水源，如金屬的流動性、有機物的流動性及 H<sub>2</sub>S 的影響。

另外，Spycher 博士說明 CCS 風險評估主要由美國能源部之國家能源技術實驗室(National Energy Technology Laboratory, NETL)負責。



(LBNLESD Nicholas Spycher)

圖 23 二氧化碳大量注入深鹽水層及向上滲漏反應傳輸模型

美國能源部的相關新聞資訊顯示，美國國家能源技術實驗室(NETL)目前正與其他能源部所屬國家實驗室合作，確立風險評估發展所需的科學基礎(包含策略監測)，以支持大規模的地下二氧化碳封存計畫。該國家風險評估計畫(National Risk Assessment Program, NRAP)由 NETL 負責執行，但研究人員包含了洛斯阿拉莫斯(Los Alamos National Laboratory, LANL)、勞倫斯伯克萊(Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL)、勞倫斯利弗莫爾(Lawrence Livermore National Laboratory, LLNL )和西北太平洋(Pacific Northwest National Laboratory, PNNL)等國家實驗室的專家群。

欲確保大型二氧化碳封存之效益，乃需要對二氧化碳移動行為及在含水層中反應活動做出精準預測，同時有策略地監測每個場址點位，驗證場址性能之預測。NRAP 科學家們已評估現有科學知識之差距，並針對標的區域進行合作研究。目前 NRAP 工作小組確定了五個基礎重點研究領域：井管完整性，天然封閉層完整性，地下水系統，風險評估之策略監測與以科學為基礎的風險評估系統模擬，並針對以上五個不同領域主題，由不同的獨立實驗室負責督導：NETL 負責研究井管完整性之風險評估相關工作，LLNL 負責天然封閉層完整性之研究，PNNL 為研究地下水系統風險，LBNL 為研究風險評估相關監測，LANL 則負責風險評估系統模擬研究。

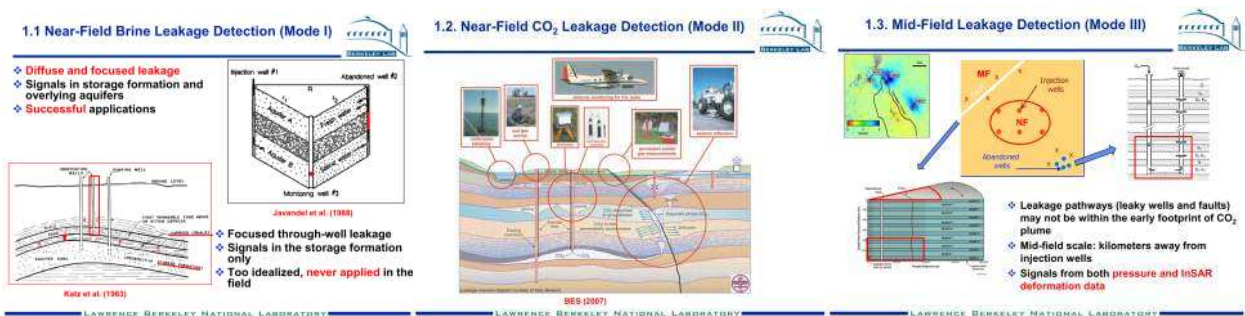
## 檢測二氧化碳封存滲漏途徑及地下不均質性之新構想

二氧化碳封存滲漏檢測依建構模式的概念可分為下列三種(參閱圖 24)：

模式一：場址近距離特性檢測。

模式二：場址近距離二氧化碳滲漏檢測。

模式三：場址中距離即時檢測。



(LBNL ESD Quanlin Zhou)

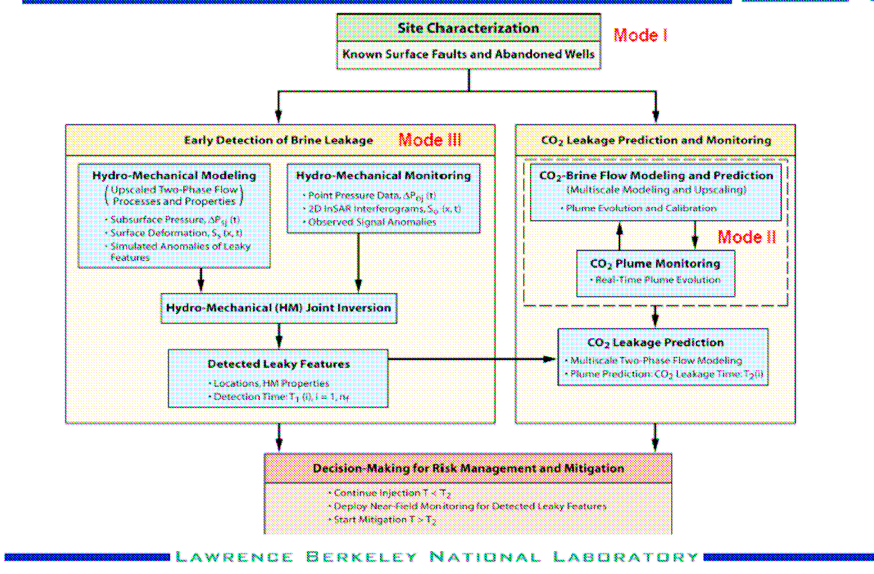
圖 24 二氧化碳封存滲漏檢測三種模式示意圖

早期二氧化碳封存滲漏檢測之主題可分為下列三種：

1. 壓力及壓力衍生式之行為：洞悉及敏感度分析，異質性時間效應。
2. 藉由 InSAR 影像檢測地表變形：斷層效應，檢測之可行性。
3. 地下異質性：藉由電井測檢測。

二氧化碳封存滲漏檢測及風險度管理(參閱圖 25)。

# Workflow for Leakage Detection

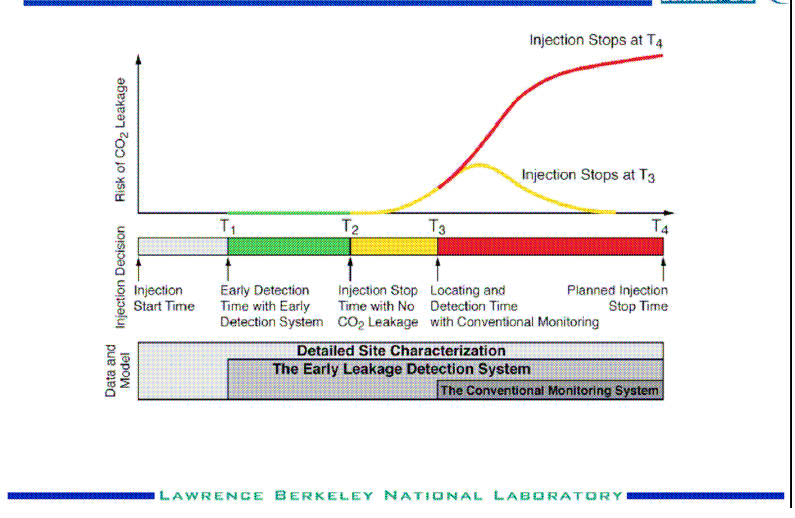


(LBNL ESD Quanlin Zhou)

圖 25 滲漏檢測工作流程

二氧化碳封存滲漏檢測之效益(參閱圖 26)。

# Benefits of Early Leakage Detection



(LBNL ESD Quanlin Zhou)

圖 26 早期滲漏檢測之效益示意圖

## 3.2 美國電力研究所(EPRI)

EPRI 參訪照片如圖 27 與 28。



圖 27 EPRI 總部辦公室



圖 28 參訪團與 EPRI 互作簡報與討論

### 3.2.1 EPRI Advanced Coal 簡介

二氧化碳減量的國際協議依然是相當困難的，相關法規與技術也需要一段時間才可普及。因為石油等化石燃料的蘊藏量逐漸降低，大眾日常使用的液體與氣體燃料將越來越不易取得，這部分的能源需求預估將轉嫁至電力需求上。

雖然燃煤發電成本相對較低，但是燃煤電廠所排放的大量二氧化碳可能會引起全球暖化效應，在抑低二氧化碳排放的要求下，預期再生能源會被大量的安裝以供應大量的電力，在 2015 年由再生能源所供應的電力將會成為第二大的電力來源。

由於電力需求一直隨著人口與經濟成長而增加，可靠的電力來源是維繫經濟近一步發展的重要課題。目前，全球對核能的進一步發展還存在很大的疑慮，先進燃煤電廠的技術發展也需要一段很長的時間。傳統燃煤電廠的高可靠度與低成本，至 2030 年依然是最大的電力來源；但對近程而言，天然氣發電是大部分地區的重要選項。

但是，傳統燃煤電廠與天然氣發電廠依舊會排釋二氧化碳。在抑低二氧化碳排釋的要求下，結合二氧化碳的捕集與儲存技術 (CCS) 的傳統電廠是近程與中程的重要減碳選項。考量抑低溫室氣體排放的迫切需求，預期到 2020 年前時這些結

合 CCS 技術的燃煤電廠將會是電業二氧化碳減排較可能的選項。但是，在大規模實施 CCS 前，電力業者須先瞭解碳捕集技術對電廠操作之影響、儲存技術之可行性和儲存場址之安全性等重要議題。

這些技術的發展能逐步降低大眾的疑慮，最後須要能被大眾能接受，所以每個技術環節不僅是技術上的挑戰，也牽涉到國家與國際經濟情勢的巨大改變。二氧化碳的捕集與儲存的實施，預期會對能源與電力業者的經營環境產生巨大改變。業者在 CCS 上將會有相當大規模的投資，因此未來電力事業的獲利能力將取決於其實施 CCS 技術的成本。因此，台電公司推行 CCS 將持續發展自有技術以期降低未來 CCS 技術之操作成本。另一方面，發展 CCS 技術亦有助於確保本公司電廠將來可持續提供低碳排放的電力給國內產業，以免未來國際上要求產業經營者使用低碳電力時台電公司無法提供低碳排放的電力。

但是 CCS 技術的發展與試行需要很大金額的投資與廣泛的資源，諸如發電設備更新與地理資訊調查也須廣泛的資源投入，已非單一電力公司可執行的計畫，國際上也只有少數試行計畫實施，CCS 的發展還是取決於該國政府推動 CCS 的決心與投資，我國針對 CCS 法規的推動與研發投資亦為我國推行 CCS 之關鍵。

參訪 EPRI 針對先進燃煤發電技術進行廣泛的討論，主要議題是討論電業實施 IGCC 與 oxy-combustion 的最新進展。

IGCC 雖已發展多年，但是目前尚有一些技術障礙無法突破，以致於目前 IGCC 電廠仍未達商轉規模。其中，低耗能的供氧技術與高溫除硫技術等可能是本技術發展之關鍵。

高溫除硫技術是於汽化爐出口處直接除去高溫合成氣中的硫份，如此合成氣不須降溫來去除硫份，降溫的熱損失也可去除。全部的熱含量可以做為發電之用，因此，電廠的熱效率也可大幅提升。

另一方面，濕式汽化技術利用水與煤粉混合漿液為進料；但是，水分加入汽化爐會蒸發成水蒸汽同時會吸收掉一大部分的熱能；也就是說，這些原先將用於發電的熱能已先一步耗損在這些水分的蒸發上。為了減少水分蒸發所需的熱能，新式的氣化技術是利用乾式汽化技術，以二氧化碳與煤粉為進料。因為，進料中沒有水分所以不會吸收合成氣的顯熱；這部分的顯熱也就可以用於發電。

乾式汽化技術另一個優點是氧氣需要量也可進一步降低，因為製氧程序是一個耗能的程序，降低氧需求量可以進一步減少廠用電的消耗。另外，離子傳導薄膜製氧 (ITM) 等先進製氧技術的發展，也有助於進一步降低廠用電消耗。然而 ITM 製氧技術尚在實驗室規模，距離可被電廠引用的規模還需進一步研發。

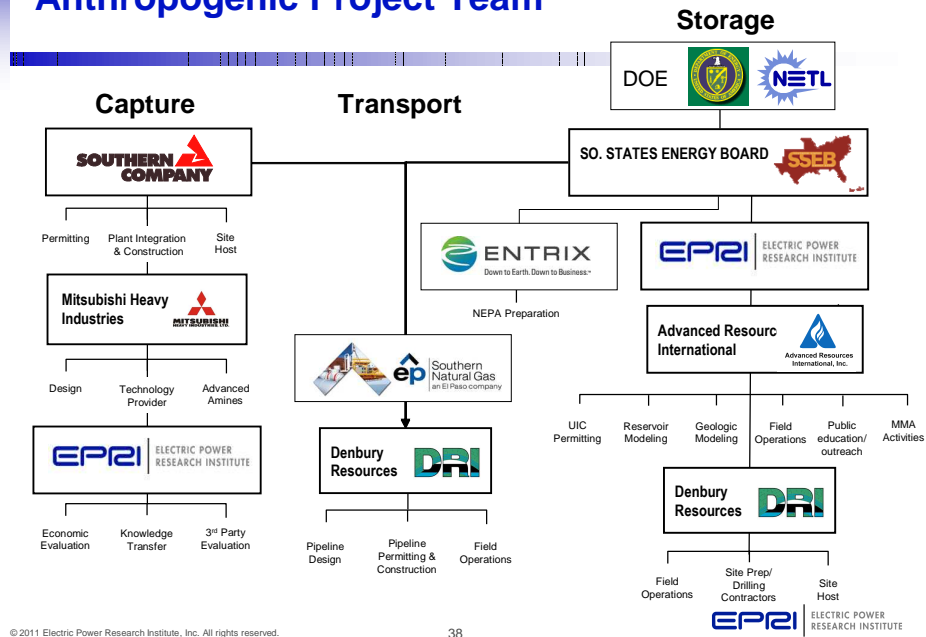
### 3.2.2 EPRI 參與美國 SECARB 地質封存工作簡介

SECARB(Southeast Regional Carbon Sequestration Partnership)，為美國能源部的下屬單位，負責美國東南分區的二氧化碳地質封存相關工作。目前 EPRI 協助該組織成員-南方公司(Southern Company)，辦理 James M. Barry 燃煤與天然氣電廠的 CCS 計畫。Barry 電廠位於阿拉巴馬州 Mobile 河畔，包含 7 個發電機組，總發電容量為 2,657MW。該 CCS 計畫為整合性之捕獲、運輸與封存計畫，稱為 Anthropogenic 計畫，並分別由不同單位協助辦理(參閱圖 29)。

該計畫的二氧化碳捕獲係採用日本三菱重工的 Amine 製程，預計建造一組相當於 25MW 容量的捕獲設備，並將捕捉的二氧化碳利用管線輸送至位於電廠西北方，距離 10 英里遠的 Citronelle Dome 油田封存場址，進行灌注及 CO<sub>2</sub>-EOR 工作。該封存場址在地質上屬巨大背斜構造的一部分，目標地層(Paluxy Formation)深度約 9,400 英尺(約 2,856 公尺)。二氧化碳捕獲運作期間預估為 2~3 年，注入總量約 10~30 萬噸，並在灌注結束後再進行 3 年的安全監測工作。該計畫二氧化碳捕獲設備預計在 2011 年第二季建造完成，場址特性鑽井已於 2011 年 1 月完成(參閱圖 30)，兩口注入井預計在 2011 年第四季開始鑽掘，注入工作將在運輸管路完成後展開。本計畫須進行注入井 UIC (Q4 FY11)申請及環評許可(參閱圖 31)始得進行。另本計畫二氧化碳管線輸送及儲存費用有接受 DOE 補助(參閱圖 32)。



# Anthropogenic Project Team



© 2011 Electric Power Research Institute, Inc. All rights reserved.

38

圖 29 Anthropogenic 計畫團隊組織圖

## Geologic Storage Update

- Characterization Well D9-8#2 started 31-Dec-2010
  - 32 days to drill and install well
  - Total depth 11,817 ft (3,602 m)
  - 98 feet (30 m) of whole core
  - 45 percussion sidewall cores
  - Well logs (Triple Combo, MRI, Mineralogy, Dipole Sonic, CBL)
- Two injection wells to be installed upon receiving UIC permit (Q4 FY11)



Rig on location at well D9-8#2

Characterization well successfully completed January 31, 2011

© 2011 Electric Power Research Institute, Inc. All rights reserved.

43

EPRRI | ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE

## NEPA/Permitting Update

- UIC permit application
  - Submitted to Alabama Dept. of Env. Quality
  - Updated with new data
- Environmental Assessment (EA)
  - Mitigation
    - 3 mi of wetlands (wetland mitigation planned)
    - 23 gopher tortoise burrows
  - Permitting/consultation
    - Fish & wildlife service for the tortoise
    - Corp of Eng. for wetlands
    - SHPO (State cultural/archeological assets)
    - Storm-water construction (BMPs)



Gopher tortoise: Photo courtesy of Southern Company

Finding of No Significant Impact (FONSI) anticipated within days

© 2011 Electric Power Research Institute, Inc. All rights reserved.

44

EPRRI | ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE

圖 30 Anthropogenic 計畫 CO<sub>2</sub> 封存場址特性鑽井 圖 31 Anthropogenic 計畫及環評之許可要項

## Transport and Storage Project Costs

Phase III Anthropogenic Test		
	Dollars	Percent
<b>Storage</b>		
DOE Share	\$28,691,330	76.14%
Non-DOE Share	\$8,990,057	23.86%
Total Value	\$37,681,387*	
Expenditures (12/31/2010)	\$2,274,513	
<b>Transport</b>	\$8,000,000	

**Project expenditures to date are within Budget  
BP4 funding pending DOE approval**

© 2011 Electric Power Research Institute, Inc. All rights reserved.

45

**EPRI** | ELECTRIC POWER  
RESEARCH INSTITUTE

圖 32 Anthropogenic 計畫二氧化碳管線輸送及儲存費用分配表

### 3.2.3 EPRI 參與 AEP Mountaineer 示範電廠地質封存工作簡介

Mountaineer 燃煤電廠位於俄亥俄河旁，位屬西維吉尼亞州紐海芬市(New Haven, WV)。美國能源部在 2003 年即出資委託 BMI 及相關探勘單位共同進行 Mountaineer 電廠之地質探勘，以了解當地地質條件，並評估應用於二氧化碳地質封存的適用性。根據地表反射震測與地質鑽探結果，確認了兩處適當深部含鹽水的儲集層，一為深度在 7,800 英尺的 Rose Run 砂岩，另一層則為深度在 8,200 英尺的 Copper Ridge B 帶，其上則覆蓋上千公尺厚的緻密蓋層。

Mountaineer 示範電廠地質封存計畫規劃兩口注入井，均位於電廠的西南側，其中 AEP-1 井深度較大，係用於注入 Copper Ridge B 帶，AEP-2 井係用於注入 Rose Run 砂岩，另鑽取三口監測井，分別編號為 MW1、MW2 與 MW3(參閱圖 33)。監測工作項目(參閱圖 34)包含注入井監測、地表滲漏監測與注入追蹤等，其中兩口注入井均裝設自動流量計、溫度計與壓力計計讀系統，採人為方式定期至現地計讀設備下載資料。地表滲漏監測主要藉由淺層地下水監測結果，了解注入二氧化碳是否發生滲漏。注入二氧化碳追蹤則藉由監測井的流體取樣分析、井測、井內壓力監測與跨孔震測探勘，了解注入二氧化碳團塊流的移棲。目前累積所得監測資料顯示灌注狀況良好，無滲漏情事發生，而注入 Copper Ridge B 帶(AEP-1 井)灌注性較預期佳，注入 Rose Run 砂(AEP-2 井)灌注性則不如預期，惟近來有明

顯改善。進一步的監測工作將用於了解長期性的封存行為與評估封存量。

## Site Layout

Injection wells:

AEP1 & AEP2

Monitoring wells:

MW1: between injection & town

MW2: between injection & river

MW3: close to injection & monitor plume location



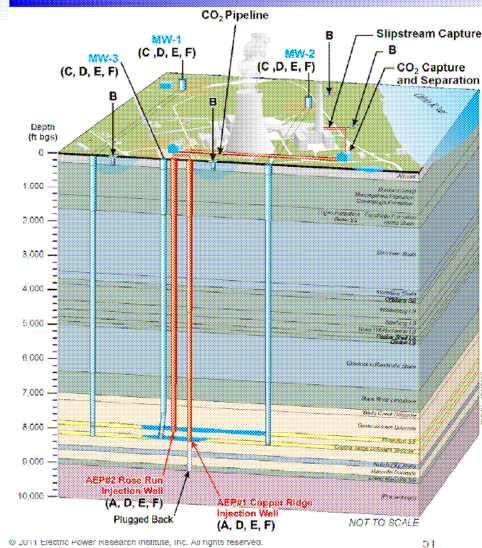
© 2011 Electric Power Research Institute, Inc. All rights reserved.

48

EPRI | ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE

圖 33 Mountaineer 示範電廠地質封存計畫井位圖

## Implemented Extensive Injected CO<sub>2</sub> Monitoring



Injection Well Monitoring (A)

- Flow rate, pressure, temp.
- Annulus pressure
- Corrosion
- CO<sub>2</sub> product purity

Surface Leak Detection (B)

Shallow groundwater monitoring

CO<sub>2</sub> Tracking and Caprock/Confining Layer Monitoring

- C - Fluid sampling
- D - Wireline logging
- E - Pressure monitoring
- F - Cross-well seismic survey

© 2011 Electric Power Research Institute, Inc. All rights reserved.

51

EPRI | ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE

圖 34 Mountaineer 示範電廠實施廣泛的注入 CO<sub>2</sub> 監測

### 3.3 史丹福大學全球氣候及能源計畫二相流實驗室(BENSON LAB)

本次參訪的二相流實驗室屬地球科學研究所 Sally Benson 教授主持的研發實驗室(參閱圖 35~39)，係由來自台灣清大物理畢業後，目前在史丹佛大學攻讀博士的郭佳瑋小姐引介。郭小姐現為 Sally Benson 教授的 CCS 工作團隊成員之一。該團隊主要研究工作較偏向於基礎研究，目前多著重於數值模擬與實驗室(BENSON LAB)二相流試驗等研究工作。其中數值模擬採用 TOUGH 系列軟體，進行小尺寸模型的數值分析，並藉由岩石試體的試驗結果進行驗證，最終得以瞭解岩石材料中鹽水與二氧化碳的二相流行為。

該實驗室使用的二相流試驗方法為穩態法(一般稱 Core Flooding Test)，與日本 RITE 相同，此試驗方法常見於石油相關服務公司與研究單位。其試驗設備設有二氧化碳氣瓶、壓縮機、幫浦、流量計、醫用 X 光電腦斷層掃描儀與操作電腦等。

此試驗每模擬一批次試驗可分成三個階段，第一階段為由壓縮機壓縮氣瓶內二氧化碳氣體，讓其穿透岩石試體，先行排退試體內的孔隙水，使其成乾狀。第二階段再通入水，填滿岩石孔隙，藉由流量計之計量，可獲得岩石孔隙體積，進而求得孔隙率。第三階段方開始進行鹽水二氧化碳混合物注入岩石的穩態法試驗，將二氧化碳壓縮至與水混合，形成超臨界流體，此時利用流量計測定氣體與水之總體積，體積之減少表示二氧化碳已被加壓至密度增大，當總體積減少且逐漸穩定時，即表示二氧化碳密度幾乎與水相近，完全溶於水，形成臨界流體。此時，即可啟動抽取超臨界流體注入岩石，模擬二氧化碳注入岩石試體之行為模式。

穩態法於試驗時係將固定比例的鹽水與二氧化碳混合物，穩定地注入岩石試體中，並持續改變比例進行其他各階段的注入試驗；此與排退法不相同係，後者將二氧化碳注入飽和岩石試體，以逐步排退孔隙水。穩態法試驗設備需求規格較高，價格較為昂貴，惟可在特定注入條件下，維持相當長的時間，故該實驗室即採用醫事 X 光電腦斷層掃描儀，掃描試體內孔隙飽和狀況，以監測試體狀況。



圖 35 BENSON LAB 二相流實驗室設備



圖 36 岩石試體雙層包覆套管展示



圖 37 岩石樣本

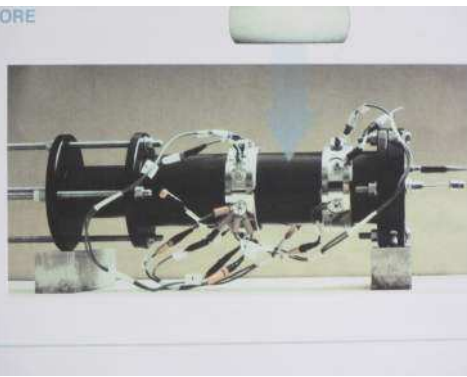


圖 38 岩心置入之鋁製試體室



圖 39 鋁製試體室移入 X 光電腦斷層掃描儀

### 3.4 美國電力公司 Mountaineer 燃煤電廠

美國電力公司 Mountaineer 燃煤電廠參訪照片如圖 40 與 41。



圖40 Mountaineer 電廠大門外觀



圖41 Mountaineer 廠長為參訪團作簡報

### Mountaineer 二氧化碳深鹽水層封存簡介

Mountaineer CCS 計畫自 2007 年起開始規劃設計與申請建築與鑽井相關許可執照，2008 年場址施工開始，2009 年 9 月開始捕獲煙道二氧化碳，當年 10 月開始辦理注入。在注入前須先獲得西維吉尼亞環保部門之 UIC(Underground Injection Control)許可。因此，需先針對二氧化碳注入的體積及儲集層特性，進行 AOR(Area of Review)進行模擬計算，以預期二氧化碳團塊移棲的面積(參閱圖 42)，作為監測井監測範圍的依據。

目前經過一年多來的操作，迄今已注入超過 25,000 噸，大致上狀況相當良好，並無任何異常二氧化碳洩漏發生，實際捕獲與封存約可達設計容量的 50%~75%。下一步工作將提高注入效率，期望可達到設計容量的 75%以上，並持續辦理注入監測，以期完整地確認系統的操作性能，並驗證 AOR 模擬計算，作為未來擴大二氧化碳注入計畫設計之基礎。本階段計畫預計在今年底結束；下一階段計畫定位在商業性運轉，預計在明年至 2015 年間建立 235MW 的製程工廠，每年捕獲二氧化碳 150 萬噸。

## AEP CCS Project Underground Injection Control Permit

- “The Area of Review (AOR) is to be, at a minimum, the anticipated size of the CO<sub>2</sub> plume as modeled or calculated from the injection volume and the characteristics of the injection zone.”
- **Conservative basis-** Injection of 165,000 metric tons/yr of CO<sub>2</sub> into a single formation for 4 years → AOR at 3,490 ft from injection well

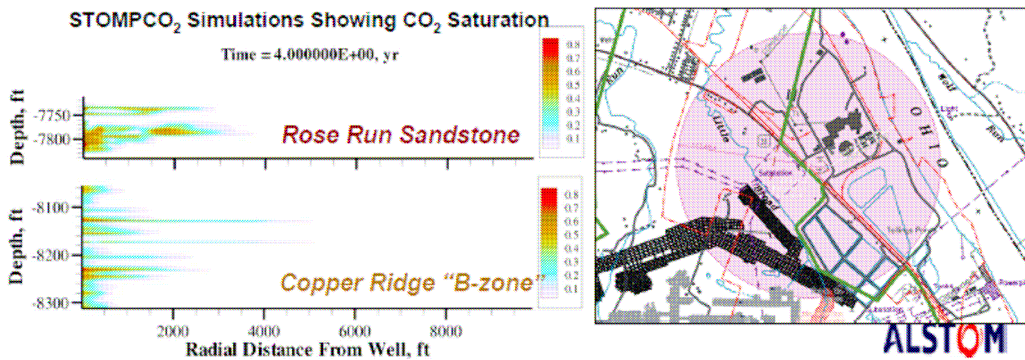


圖 42 注入二氧化碳團塊面積模擬計算



圖 43 Mountaineer 電廠之超臨界(SC)燃煤廠房、煙囪及冷卻塔外觀



圖 44 Mountaineer 電廠之 1300 百萬瓦(MW)超臨界(SC)燃煤機組渦輪蒸汽發電機

Mountaineer CCS 示範場為單一場址結合二氧化碳捕集技術與地質封存之試行計畫。Mountaineer 為 1300 MW 之燃煤電廠，該廠使用單一超臨界鍋爐並配置有 SCR 與 FGD 等環保設備。煙氣在經過 FGD 後分流一部份煙氣至冷氨法 (Chilled Ammonia Process, CAP) 之吸收塔除去煙氣中的二氧化碳 (參閱圖 45)，CAP 可去除煙氣中 80 至 90% 的二氧化碳，處理後尾氣再回流至煙囪排放。

CAP 目前以氨為吸收劑，煙氣經 FGD 去除  $SO_x$  後分流至水洗塔與壓縮機以降低溫度與提升壓力，移除煙氣中水分後進入吸收塔以氨吸收二氧化碳。然而，二氧化碳於氨液中之溶解度會依據吸收塔的操作溫度與壓力不同而改變，CAP 的耗能大小因此會有所改變。該示範廠操作條件目前 ALSTOM 公司不對外揭露，但推測其吸收塔不在平衡條件下操作，其操作條件取決於反應速率。也就是說，吸收塔大小與滯留時間取決於反應速率，使用 CAP 程序之設備設置成本與操作成本與其操作條件相關。

目前 Mountaineer 的 CAP 程序以碳酸銨為吸收劑原料，補充之碳酸銨直接投入二氧化碳回收塔進行熱解，產生之液態氨回流至吸收塔與煙氣接觸以吸收其中的二氧化碳，吸收劑於吸收二氧化碳後再輸送至回收塔加熱脫除二氧化碳，CAP 所得之二氧化碳濃度達 99.9%，可直接用於深地層儲存。





圖45 Mountaineer CCS計畫係由煙道引流煙氣至FGD再進一步作二氧化碳捕獲

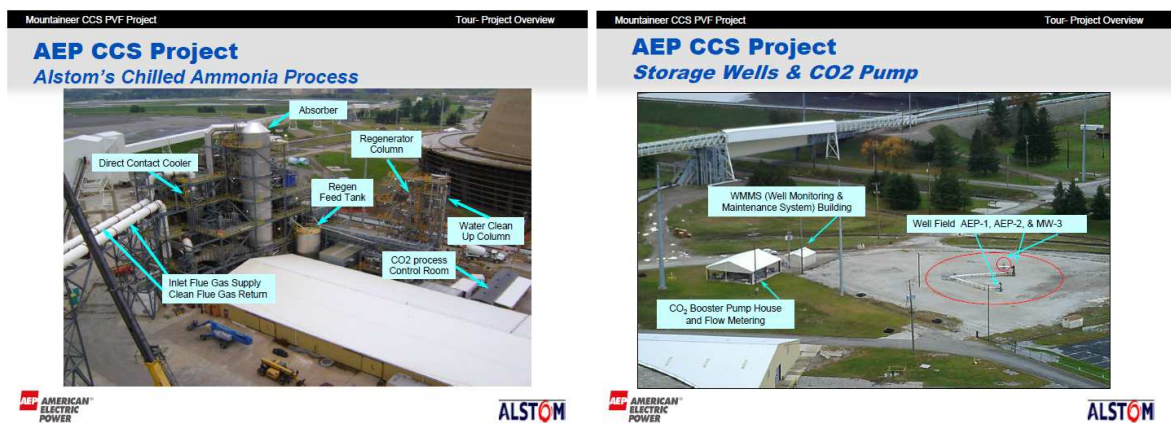


圖46採用ALSTOM公司專利冷氨法(Chilled Ammonia)辦理煙道二氧化碳捕獲再加壓輸送至注入井灌注

Mountaineer CCS 示範場自 2009 年起運轉至今已捕捉近 4 萬噸，其中 2,500 噸已灌注至地下深地層儲存。本階段計畫用以評估儲存場址之有效性與驗證 CAP 程序，並對這些程序做一些修正。目前 CAP 程序所需之外加熱源加熱其吸收劑，並未使用鍋爐之蒸汽，預計在今年底結束。下一階段計畫定位在商業性運轉，預計在明年至 2015 年間建立 235MW 的製程工廠，每年捕獲二氧化碳 150 萬噸。屆時，所需之熱源需以鍋爐蒸汽為主，故在下一階段工作中也將測試自汽機引出大量蒸汽對電廠發電之影響，並進一步測試汽機修改與整合 CAP 與電廠蒸汽循環之可行性。

Mountaineer CCS 示範場址參觀概況，如圖 43~52。Mountaineer CCS 示範場址兩口灌注井露出地表之設施包含壓力計、地下監測計之訊號線與閥門等佔地很小，對於地上景觀影響很小。

Mountaineer CCS 示範場經 CAP 程序吸收之二氧化碳直接經加壓後灌注，吸收程序至灌注程序間沒有儲存設施，這對示範場操作沒有影響。但是，將來進行大規模捕集時應考量 CAP 與灌注程序之可靠度如何調整；以免其中一個程序故障時影響電廠正常操作。

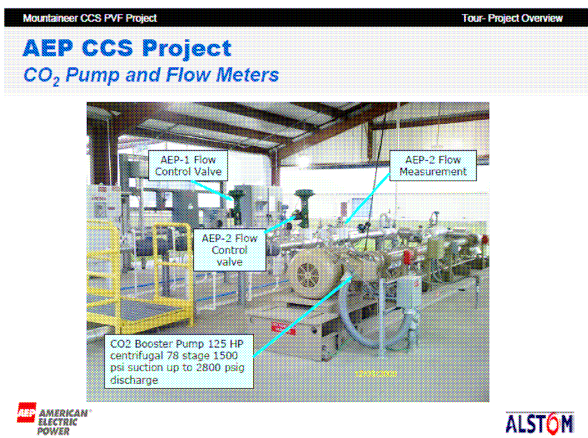


圖 47 二氧化碳注入泵及流量控制設備



圖 48 Mountaineer 計畫經理查看注入泵品牌



圖 49 發現注入泵品牌為台灣製東元(TECO)馬達

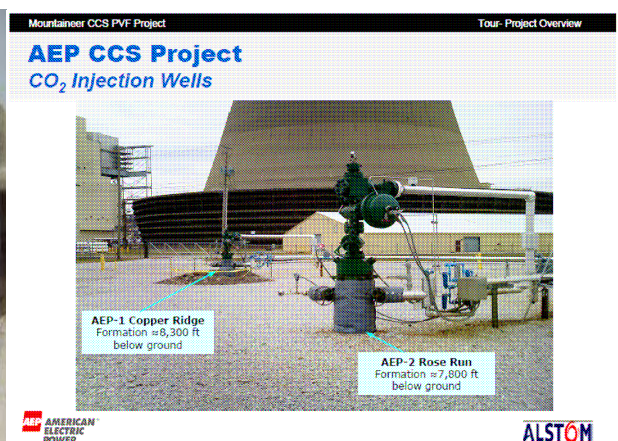


圖 50 兩口注入井 AEP-1 及 AEP-2 地表設施



圖 51 參訪團成員觀察注入井管線設備



圖 52 注入井附近之監測井(MW3)

### 3.5 貝特爾紀念研究所(BMI)

貝特爾紀念研究所(Battelle Memorial Institute, 簡稱 BMI)是美國俄亥俄州實業家戈登貝特爾在 1929 成立的非營利應用科學和技術研發機構，總部設在美國俄亥俄州的哥倫布(參閱圖 53)。BMI 主要的核心目標是將科學的發現轉變成創新的商業應用，公司資產約 51 億美元，僱員人數約 22,000 人，除辦理政府機構與私人公司計畫，執行業務所得外，每年編列約 9 億美元進行研發工作。伯特爾研究所包含三個主要部門，分別為國家安全部(National Security)、能源/環境/材料科學(Energy, Environment and Material Sciences)與健康及生活科學部(Health and Life Sciences)，此次參訪洽談的專家 Neeraj Gupta 博士等均來自於能源部門。BMI 另協助美國能源部管理 7 個國家實驗室，其中包含著名的 BROOKHAVEN NATIONAL LABORATORY 與 LAWRENCE LIVERMORE NATIONAL LABORATORY 等。



圖 53 參訪哥倫布市 OSU 旁的 BMI 總部

### **BMI 參與美國近期 CCS 計畫現地試驗工作案例**

美國境內的 CCS 計畫相當繁多，全國性之 CCS 規劃與執行係由美國能源部主導辦理，目前全美依地區劃分為七個區域性碳封存夥伴組織(Regional Carbon Sequestration Partnerships 簡稱 RCSP)分別稱為 BIG SKY、WESTCARB、PCOR、SWP、MGSC、MRCSP、SECARB 等(參閱圖 54)。美國能源部規劃的發展道路圖主要分為三階段，其中 2003 年至 2005 年為封存場址篩選階段，2005 年至 2010 年辦理 20 個封存試驗計畫，2008 年至 2017 年則進一步辦理 9 個大尺度的灌注試驗計畫，並探討商業化計畫及法規等議題。BMI 目前執行中的減碳相關計畫(參閱圖 55)可分為五大項，分別為(1)Mountaineer 計畫、(2)FutureGen 計畫、(3)美國能源部 MRCSP、(4)Global Energy Technology Strategy(GTSP)與(5)工業界直接資助計畫。

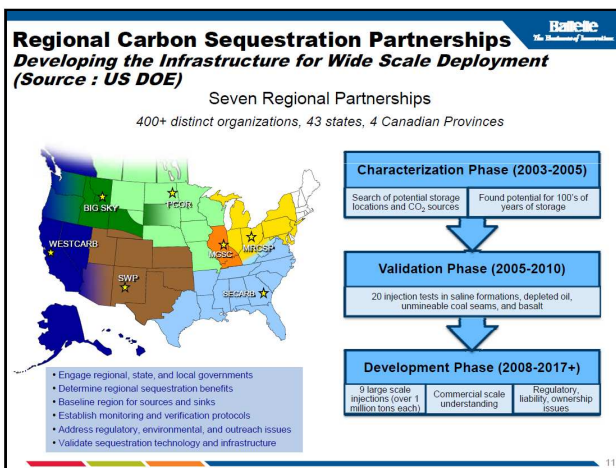


圖 54 全美地區七個 RCSP 組織分布圖

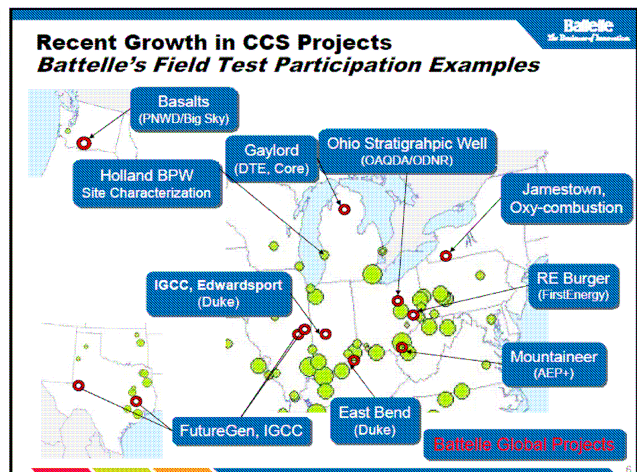


圖 55 BMI 參與全美近期 CCS 計畫之現地試驗工作

MRCSP(Midwest Regional Carbon Sequestration Partnership)涵蓋範圍包含印第安那州、肯德基州、馬里蘭州、密西根州、俄亥俄州、賓州與西維吉尼亞州與紐約及紐澤西等九個地方政府單位，另包含大學、民間公司、政府單位、研究機構共 41 個單位，MRCSP 的領導單位為 BMI。

MRCSP 第一階段(Phase I)計畫大致上分析了區域內的二氧化碳排放源與可用地質封存方法與場址。第二階段(Phase II)計畫則進一步針對三個適當地質封存構造進行探勘與評估，包含密西根州內的密西根盆地(Michigan Basin)、俄亥俄州內的阿帕拉契盆(Appalachian Basin)與辛辛那提地拱(Cincinnati Arch)，並進行少量灌注(約一千至一萬噸二氧化碳)與監測工作。第三階段(Phase III)計畫將進行大尺度的灌注計畫。

區域第三階段計畫之預定工址可能是位於俄亥俄州哥倫布市西方的格倫威爾市(GreenVille)TAME 乙醇化工廠，該工廠每年生產約 1.1 億加侖的乙醇與 28 萬噸的高濃度二氧化碳，預定四年間灌注一百萬噸二氧化碳。該工址地質屬辛辛那提地拱，在深度約 3300 英尺左右有一層厚 300 英尺的 Mt. Simon 砂岩層，平均孔隙率約 12%，滲透率約 50~400md。灌注計畫預定鑽掘一口注入井與兩口監測井，並規劃採跨孔三維震測探勘、井測、地下水取樣分析及地表二氧化碳通量監測等方法，進行注入二氧化碳的安全與滲漏監測。

## BMI 參與美國 CCS 注入許可申請

BMI 在 Mountaineer 進行二氧化碳注入前，向美國環保署第五行政區 (region 5) 之 Alabama 環境品質部 (Alabama department of Environmental Quality) 提出地下注入控制 (Underground Injection Control, UIC) 許可 (Q4FY11) 之申請，依據 UIC 準則規範，提交相關二氧化碳封存之風險分析結果證明文件，獲得許可後，始可進行二氧化碳注入計畫。

Dr. Gupta 舉例說明二氧化碳注入許可證的申請流程 (參閱圖 56)：當二氧化碳封存計畫開始成立後，在鑽探工作結束至注入工作開始前，計畫執行者必須向美國環保署提出 UIC Class V 的許可申請，再由美國環保署會同其他部會，依據相關法規規範，審閱申請資料。同時，在草案決定期間，需開放民眾提供意見至少 30 天，若無異議，則由環保署發放許可，並需將計畫作內部展示。當注入工作被授權後，即可進行二氧化碳注入工作，完成注入後，若不需進行下口井之注入工作，計畫執行者需向美國環保署申請封閉注入井，並獲得美國環保署頒發之終止許可，使得結束注入工作。倘若需進行下口井之注入工作，則需向美國環保署申請 UIC Class II 轉換許可，以將注入工作換至下口井進行注入工作。Dr. Gupta 並指出當二氧化碳在注入過程中，由壓力監測結果發現二氧化碳出現洩漏時，注入工作則需立即終止，將洩漏造成之風險危害降至最低。

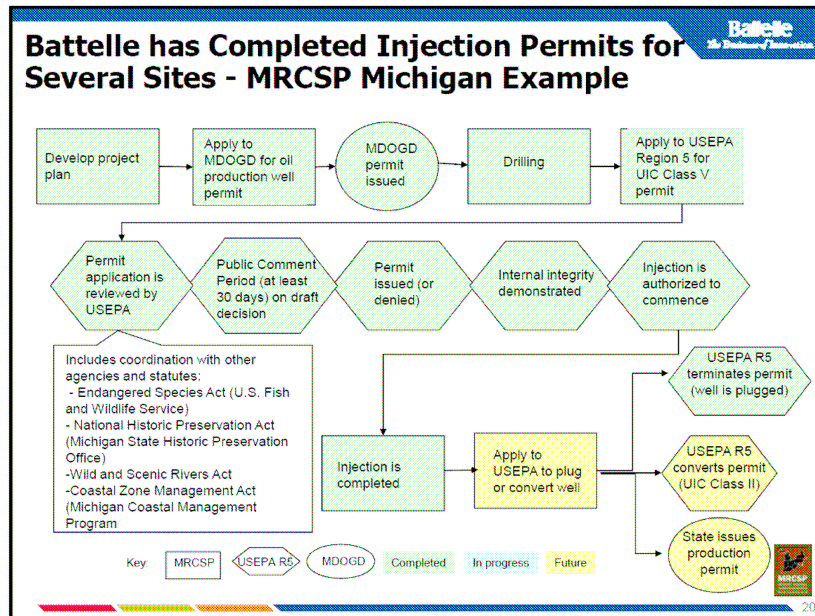


圖 56 BMI 完成 MRCSP Michigan 二氧化碳注入許可證之申請流程

### 美國源部國家能源技術實驗室對 CO2 封存之民眾宣傳與教育計畫

美國能源部之國家能源技術實驗室(NETL)針對 CCS 之民眾溝通，建立了「二氧化碳封存之民眾宣傳與教育計畫 (Public Outreach and Education for Carbon Storage Projects)」(參閱圖 57)，並出版了第一版教育手冊。此手冊主要功能為輔助 CCS 計畫執行者掌握與民眾溝通之準則，以利於執行者與民眾之間順利交換意見，並有效地宣傳與教育民眾有關 CCS 的知識與重要性。本手冊強調與民眾溝通需具備之能力與條件如下：

1. 建立一個強大且有能力的宣傳團隊。
2. 建立一個有效率的計畫技術與法規團隊之工作關係。
3. 做好充份準備工作，清楚說明計畫內容，並解決當地的關切議題。
4. 欣然接收信息，包括聆聽社區民眾意見。
5. 經常進行計畫監控，並向外界民眾宣傳團隊表現。
6. 在條件允許下，保持計畫之彈性變化。

本手冊建議在 CCS 計畫概念研擬階段，即應開始進行民眾溝通之工作。其並提供以下最佳 10 項民眾溝通之步驟，供 CCS 計畫之民眾溝通執行團隊參考：

- 步驟一：計畫管理與民眾宣傳進行整合(Integrate Public Outreach with Project Management)。
- 步驟二：建立強大的宣傳團隊 (Establish a Strong Outreach Team)。
- 步驟三：確定關鍵利益相關者(Identify Key Stakeholders)。
- 步驟四：管理與應用社會特性 (Conduct and Apply Social Characterization)。
- 步驟五：發展宣傳策略與溝通計畫 (Develop an Outreach Strategy and Communication Plan)。
- 步驟六：發展關鍵訊息 (Develop Key Messages)。
- 步驟七：制訂對民眾量身訂做之宣傳材料 (Develop Outreach Materials Tailored to the Audiences)。
- 步驟八：在整個二氧化碳封存計畫年限，積極監督與管理宣傳計畫 (Actively Oversee and Manage the Outreach Program throughout the Life of the CO2 Storage Project)。
- 步驟九：監控宣傳計畫之表現與民眾認知及關注之變化(Monitor the Performance of the Outreach Program and Changes in Public Perceptions and Concerns)。
- 步驟十：保持彈性 - 視需要改善民眾宣傳計畫 (Be Flexible - Refine the Public Outreach Program as Warranted)。

其中，第一項至第四項為建立必備之基礎，目的在於了解與確定關鍵利益相關者之需求。第五項至第七項涉及宣傳計畫與材料之建立，將以獲得社會反映，從中學習民眾關注議題。第八項至第十項則與宣傳計畫之實施步驟有關，包含執行、評估與視需要之改善等。



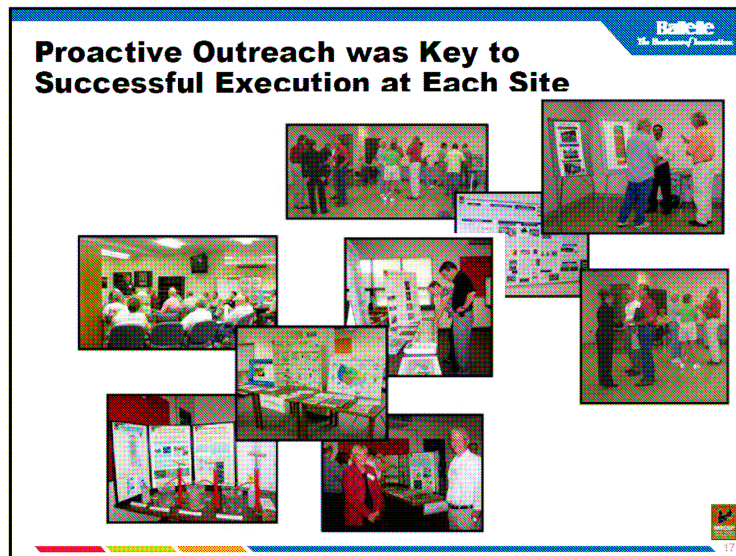


圖 57 二氧化碳封存計畫推展之民眾宣傳與教育

CCS 工作因牽涉大規模的深地層灌注工作，社會接受度是最大的問題，妥善法規與清楚的對外溝通工作才可使工作順利進行，這部分的工作可能比技術性工作更難推動，也會需要許多時間來推動；唯有在完善的規範下進行這些灌注工作才可降低大眾的疑慮。

周詳的地質調查工作有助於擬定合適之灌注計畫，以減少封存後洩漏的風險。然而，目前我國相關的法規和灌注規範都尚未釐清，相關政策也未清楚的對外揭露，在急切的減碳要求下 CCS 可能很快的進展到大規模實施階段。考量推動社會接受度提升所需之時間，相關的教育與法規推動工作須從現在就開始進行。為使 CCS 工作順利進行除研發相關技術外，宜現在就開始進行民眾溝通之工作。

#### 4. 心得及建議

- 1、本次協同中興社人員赴美國考察，由於兩個單位行前就各自與美方商業往來的機構分別進行連繫，參訪的單位較多且均為美國頂尖的研發機構，如美國電力研究所(EPRI)、勞倫斯柏克萊國家實驗室(LBNL)、史丹佛大學 BENSON LAB、美國電力公司(AEP) Mountaineer 超臨界燃煤電廠 CCS 計畫設施與巴特爾紀念研究所(BMI)。參訪機構均正式派出高級人員接待，並以雙方事先排定的議程進行且互相深入討論，因此得以了解美國 CCS 計畫執行之現況與其透過國際合作發展之新技術。此應為國內第一次針對了解美國 CCS 發展而辦理的實務參訪，對目前台電公司正規劃辦理 CCS 計畫之場址特性深鑽井工作甚有助益。此外，國內 CCS 計畫仍屬起步階段，目前相關經驗與可用資源相當缺乏，擬建議經常辦理此類國外 CCS 計畫之技術參訪、出席國際研討會及參加國外特定研發機構辦理之課程，以期快速及有效地累積專業知識、了解相關可用資源及建立國際合作交流。
- 2、LBNL 為國際間 CCS 技術發展先驅，針對二氧化碳注入後監測工作，現已發展完成一組特殊的 BHA 監測工具，包括 U tube 取樣設備、DTPS 與跨孔震測及孔內新震源等，並經過澳洲 Otway、德國 Ketzin 與美國 Frio 等知名先導試驗計畫實地應用，成功地驗證其硬體設備的效能。目前台電公司規劃下一階段的深鑽與相關試驗工作，可考量透過 LBNL 之國際合作，採用該 BHA 作為二氧化碳注入井下之監測工具。近期 LBNL ESD Barry Freifeld 博士，為該硬體研發的重要角色，將應中興社邀約來台參訪，瞭解該相關試驗設備在台應用的可行性。
- 3、史丹福大學地球科學研究所 BENSON LAB 試驗室使用的二相流試驗方法為穩態法，係注入特定比例的二氧化碳與鹽水混合物。此與台電公司二相流試驗設備採用「排退法」，係注入二氧化碳以排退孔隙水不相同，但兩者試驗可作為效度的經驗比對。台電公司下一階段深鑽與相關試驗工作，將

規劃相當大數量的二相流相關試驗，未來擬建議與採用「穩態法」的美國 BENSON LAB 進行合作，以驗證試驗過程的正確性，並可提升國內二相流試驗之國際水準。

- 4、BMI 除辦理 Mountaineer CCS 計畫地質封存工作，並主導美國東南分區 MRCSP 之 CCS 計畫，具有完備的地質封存工作規劃能力及執行能力。該機構具有地質、地球物理與鑽探技術的專業人員，且具有強大的規劃、設計、管理與資源整合能力，目前與相關探勘及技術服務公司形成密切合作關係，共同完成地質封存計畫，對 Pilot Test 及 Demonstrations 等地質封存工作，已累積許多實際經驗。Dr. Neeraj Gupta 為 BMI-CCS 團隊的核心人物，近期中興社將邀約他來台參訪，藉其專業能力協助規劃評估台電 CCS 道路圖及規劃工作的適當性，期能建立雙方合作關係，拓展在 CCS 領域的相關資源。
- 5、在急切的減碳要求下 CCS 可能很快的進展到大規模實施階段。考量推動社會接受度提升所需之時間，相關的教育與法規推動工作須從現在就開始進行。為使 CCS 工作順利進行除研發相關技術外，宜現在就開始進行民眾溝通之工作。
- 6、Mountaineer CCS 示範場下一階段計畫將放大至 235MW 規模；屆時，汽機引出大量蒸汽做為其熱源。進一步測試碳捕集程序對電廠發電之影響，並進行汽機修改與 CAP 與電廠蒸汽循環整合工作值得本公司繼續關注最新發展。