

案號：113FB017

「碳封存技術社會溝通平臺建置
先期規劃」
成果報告

計畫主持人：林殿順

協同主持人：顏宏元、俞旗文

受委託單位：中華民國地球物理學會

計畫履約期限：自 113 年 3 月 13 日起至 113 年 12 月 31 日止

國家環境研究院編印(定稿本)

中 華 民 國 113 年 12 月

案號：113FB017

「碳封存技術社會溝通平臺建置 先期規劃」

成果報告

受委託單位：中華民國地球物理學會

計畫履約期限：自 113 年 3 月 13 日起至 113 年 12 月 31 日止

計畫經費：新臺幣 280 萬元

計畫主持人：林殿順

協同主持人：顏宏元、俞旗文

計畫執行人員：林哲銓、徐偉啾、蔡宜伶、李宗勳、林雅君、

譚志豪、吳柏林、陳建新、朱敬平、王美璇、

李珺樺

國家環境研究院編印(定稿本)

中 華 民 國 113 年 12 月

「碳封存技術社會溝通平臺建置先期規劃」

計畫成果報告基本資料表

委辦單位	國家環境研究院		
執行單位	中華民國地球物理學會		
參與計畫人員姓名	林殿順、顏宏元、俞旗文、林哲銓、徐偉啾、蔡宜伶、李宗勳、林雅君、譚志豪、吳柏林、陳建新、朱敬平、王美璇、李珺樺。		
年度	113	計畫案號	113FB017
研究性質	<input type="checkbox"/> 基礎研究 <input checked="" type="checkbox"/> 應用研究 <input type="checkbox"/> 技術發展		
研究領域	二氧化碳地質封存、社會溝通、環境教育		
計畫屬性	<input type="checkbox"/> 科技類 <input checked="" type="checkbox"/> 非科技類		
全程期間	113 年 3 月 ~ 113 年 12 月		
本期期間	113 年 3 月 ~ 113 年 12 月		
本期經費	本期經費 0 億 2,800 千元		
	資本支出		經常支出
	土地建築 0 千元		人事費 400 千元
	儀器設備 0 千元		業務費 2,400 千元
	其他 0 千元		材料費 0 千元
		其他 0 千元	
摘要關鍵詞			
1.碳封存，Carbon Storage			
2.碳捕存法規發展，CCS regulations			
3.民眾教育，public education			
4.國際交流，international exchange			

基本摘要內容

計畫名稱	碳封存技術社會溝通平臺建置先期規劃		案號	113FB017
主管機關	國家環境研究院	執行單位	中華民國地球物理學會	
計畫主持人	林殿順	聯絡人	李琺樺	
聯絡電話	03-4255336	傳真號碼		
期程	113年3月13日至113年12月31日			
經費	(全程)：2,800千元		(年度)：2,800千元	
執行情形	全年報			
	1.執行進度	年度	預定 100(%) 實際 100(%) 比較 0(%)	
		總進度	預定 100(%) 實際 100(%) 比較 0(%)	
	2.經費支用	年度經費	預定 2,800 (千元) 實際 2,800 (千元) 支用比率 100(%)	
		總經費	預定 2,800 (千元) 實際 2,800 (千元) 支用比率 100(%)	
	3.主要執行內容		詳如報告內容	
	4.計畫變更說明		無	
	5.落後原因分析		無	
	6.解決辦法		無	
	7.主管機關管考建議			

計畫成果中英文摘要

- 一、中文計畫名稱：碳封存技術社會溝通平臺建置先期規劃
- 二、英文計畫名稱：Advance planning for the establishment of a social communication platform for carbon storage technology
- 三、案號：113FB017
- 四、執行單位：中華民國地球物理學會
- 五、計畫主持人：林殿順，顏宏元，俞旗文
- 六、執行開始時間：113/03/13
- 七、執行結束時間：113/12/31
- 八、報告完成日期：113/11/15
- 九、報告總頁數：141 頁
- 十、使用語文：中文，英文
- 十一、報告電子檔名稱：113FB017-成果報告 1216.DOC
- 十二、報告電子檔格式：WORD 10
- 十三、中文摘要關鍵詞：碳封存，碳捕存法規發展，民眾教育，國際交流
- 十四、英文摘要關鍵詞：Carbon Storage, CCS regulations, public education, international exchange
- 十五、中文摘要

本報告針對國內碳封存技術發展進行了廣泛的資料收集與分析，重點涵蓋法規與實場案例、科普教育、試驗模場規劃及國際交流等方面。

首先，報告分析了碳捕存的國際法規與文獻，包括碳捕存國際法規發展趨勢、國內法規、美國環保署地下注入管制計畫和民眾接受度。同時，蒐集並分析了日本 Nagaoka (10,400 噸)、德國 Ketzin (67,271 噸) 和澳洲 Otway (65,000 萬噸) 三個國際試驗案例，探討了潛在風險和環境衝擊處理對策。

其次，報告建議擴大碳捕存科普教育，提升民眾對碳封存技術的理解，減少對技術的恐懼。計畫包括設立教育場域，針對不同年齡層和族群進行科普推廣，並盤點關鍵議題以支持政策推動。

在試驗模場前期規劃方面，報告根據反射震測和井下資料分析了 R2 封存系統，顯示其地層結構完整，封存空間厚度超過 500 公尺，具備優秀的封存潛力。

此外，試驗模場的鑽井及地表設施規劃參考國際規範及案例，確保設計和監測的科學性，並依據規劃工項內容進行成本分析評估。

最後，計畫擬與 IL-CCS Project 合作，學習其成功的社會溝通和營運經驗，以改進碳封存技術的推廣和應用。

十六、英文摘要：

This report focuses on advancing domestic carbon storage technology through extensive data collection and analysis, covering regulatory frameworks, practical cases, educational initiatives, and international collaboration.

Firstly, the report examines international regulations and literature on carbon capture and storage, including trends in CCS regulations, domestic regulations, the U.S. Environmental Protection Agency Underground Injection Control program, and public acceptance. It also analyzes international case studies from Japan's Nagaoka (10,400 tons), Germany's Ketzin (67,271 tons), and Australia's Otway (65 million tons), addressing potential risks and environmental impact communication strategies.

Secondly, the report recommends expanding CCS public education to enhance understanding of carbon storage technology and reduce fear of the unknown. The plan includes creating educational venues, developing age-appropriate and demographic-specific content, and identifying key issues to support policy implementation.

For trial site planning, the report analyzes the R2 storage system using seismic reflection and subsurface data, revealing a well-structured cap layer and a storage space thickness exceeding 500 meters, indicating excellent storage potential. Additionally, the design of drilling and surface facilities will follow international guidelines and cases to ensure scientific accuracy in planning and monitoring. A cost analysis was also conducted based on the planned tasks.

Finally, the project aims to collaborate with the IL-CCS Project to gain insights into successful social communication and operational practices, enhancing the promotion and application of carbon storage technology.

目錄

基本摘要內容	I
計畫成果中英文摘要	II
目錄	IV
圖目錄	VI
表目錄	IX
報告大綱	X
計畫成果摘要 (詳細版)	XI
壹、前言	1
一、研究緣起	1
二、目的	1
三、工作進度與查核點	2
貳、研究成果	4
一、法規及實場案例對環境文獻收集	4
1. 碳封存相關文獻與法規蒐集研析	4
2. 國際碳封存案例蒐集與研析	26
二、國家碳捕存教育軟硬體	55
1. 教育設施規劃	55
2. 利害關係人界定	63
3. 社會溝通	63
三、試驗模場前期規劃	65
1. 碳封存試驗模場地下水水文地質模型	67
2. 鑽井暨地表設施規劃	82
3. 成本分析	89
4. 地下水品質基線資料	96
四、國際合作前期規劃	100
1. 國際合作對象	100
2. 國際合作與交流	109
參、結論與建議事項	113
一、結論	113
1. 法規及實場案例對環境文獻收集	113
2. 國家碳捕存軟硬體	113
3. 試驗模場前期規劃	114
4. 國際合作前期規劃	114
二、建議事項	115
1. 社會溝通及科教	115
2. 試驗模場前期規劃	115
3. 國際合作前期規劃	116
肆、參考文獻	117

附件 A、美國交流行程參訪照片	121
附件 B、2024 MRCI 會議議程	123
附件 C、中央大學社會溝通經驗分享	126
附件 D、蒐集澳洲、美國、日本、挪威 CCS 社會溝通案例	128
附件 E、條列台灣 CCS 社會溝通推動策略架構	129
附件 F、審查意見回復意見表.....	130
一、評選會議之委員審查意見回復意見表	130
二、啟動會議和第一次工作進度報告之審查意見回復意見表	134
三、期中報告委員審查意見回復意見表	136
四、期末成果報告之審查意見回復意見表	139

圖目錄

圖 2.1.1	國際法規概況與 IEA 法規架構推動藍圖	6
圖 2.1.2	美國 2018 年 45Q 擴大稅收抵免條款	7
圖 2.1.3	環境部相關單位執掌	17
圖 2.1.4	EPA 第 VI 類鑽井	20
圖 2.1.5	第 VI 類鑽井專案計畫各階段主要工作	22
圖 2.1.6	第 VI 類鑽井專案計畫溝通	23
圖 2.1.7	民眾對於「二氧化碳再利用與封存」的支持程度	25
圖 2.1.8	連續調查民眾對於「二氧化碳再利用與封存」的支持程度	26
圖 2.1.9	日本 Nagaoka 計畫場址及地層結構示意圖	27
圖 2.1.10	日本 Nagaoka 二氧化碳封存先導試驗場址	28
圖 2.1.11	日本 Nagaoka 先導試驗場址灌注歷時曲線圖	29
圖 2.1.12	日本 Nagaoka 先導試驗場址井下監測設施佈設示意圖	31
圖 2.1.13	日本 Nagaoka 先導封存場址跨孔震測監測跨孔剖面上注入碳流位置	32
圖 2.1.14	Nagaoka 封存場址地電阻與二氧化碳團塊歷時曲線圖	32
圖 2.1.15	德國柏林附近凱琴 (Ketzin) 場址位置	34
圖 2.1.16	中歐主要盆地系統位置圖	34
圖 2.1.17	德國 Ketzin 計畫鑽井配置	36
圖 2.1.18	3D 震測時間剖面結果	37
圖 2.1.19	鑽井 DTS 監測成果	38
圖 2.1.20	灌注井光纖式壓力感測器量測成果	38
圖 2.1.21	澳洲 Otway 盆地地質構造剖面	40
圖 2.1.22	Otway 井口設施配置	41
圖 2.1.23	Otway Stage 1 執行成果	42
圖 2.1.24	Otway Stage 2B 殘餘飽和度試驗	43
圖 2.1.25	Otway Stage 2 地表設施配置	43
圖 2.1.26	Otway Stage 3 SOV/DAS 監測影像	44
圖 2.1.27	Otway 計畫各階段完成及預計達成目標	45
圖 2.1.28	苫小牧 CCS 示範計畫位置圖	47
圖 2.1.29	苫小牧地區兩口二氧化碳注入井與地層剖面示意圖	48

圖 2.1.30	場址近域監測設施配置	49
圖 2.1.31	注入井溫度壓力監測結果	51
圖 2.1.32	JCCS 在北海道膽振東部地震後採取的措施	52
圖 2.1.33	Nagaoka 先導計畫「新潟縣中越地震」	53
圖 2.1.34	Nagaoka 先導計畫地震前後注入井壓和溫度變化	54
圖 2.2.1	「淨零減碳親子生活營」活動宣傳海報	56
圖 2.2.2	「淨零減碳親子生活營」活動	57
圖 2.2.3	「碳捕存技術與永續環境」佈展及「淨零綠生活」講座	59
圖 2.2.4	草漯沙丘海灘淨灘活動	60
圖 2.2.5	「113 年淨零碳封存與資源循環再利用工作坊」課程表	61
圖 2.2.6	「113 年淨零碳封存與資源循環再利用工作坊」活動剪影	61
圖 2.2.7	「永續淨零綠生活」環境教育宣導活動課程模組	62
圖 2.2.8	「桃園海岸地下水資源」的研究成果	64
圖 2.3.1	台灣西部沉積物厚度、地震震源及活動構造分布圖	66
圖 2.3.2	我國二氧化碳地質封存之概念模型	66
圖 2.3.3	臺灣北部新生代沉積物厚度圖	68
圖 2.3.4	桃園台地陸海域西北-東南向地質剖面	68
圖 2.3.5	桃園台地 R2 封存系統-錦水頁岩頂部深度圖	69
圖 2.3.6	桃園台地 R2 封存系統-桂竹林層頂部深度圖	69
圖 2.3.7	桃園台地 R2 封存系統-南莊層頂部深度圖	70
圖 2.3.8	桃園台地觀音一號井與平鎮二號井之合成地層與電測圖	70
圖 2.3.9	預定「台灣碳封存平台」之碳封存試驗場及教育館空間配置	71
圖 2.3.10	台灣碳封存平台之灌注井、監測井及監測站規劃	71
圖 2.3.11	台灣碳封存平台周邊之反射震測及井下資料分布衛星圖	73
圖 2.3.12	井測資料對比至反射震測流程圖	74
圖 2.3.13	反射震測剖面 L-01 根據 KY-1 井下資料對比之解釋剖面	75
圖 2.3.14	反射震測剖面 L-17 之解釋剖面	76
圖 2.3.15	卓蘭層頂部等深度圖	77
圖 2.3.16	錦水頁岩頂部等深度圖	78
圖 2.3.17	桂竹林層頂部等深度圖	78

圖 2.3.18	南莊層頂部等深度圖	79
圖 2.3.19	觀音山砂岩頂部等深度圖	79
圖 2.3.20	卓蘭層等厚度圖	80
圖 2.3.21	錦水頁岩等厚度圖	80
圖 2.3.22	桂竹林層等厚度圖	81
圖 2.3.23	南莊層等厚度圖	81
圖 2.3.24	觀音山砂岩等厚度圖	82
圖 2.3.25	碳封存試驗模場井體規劃	83
圖 2.3.26	地表灌注設施之初步規劃架構	84
圖 2.3.27	碳封存試驗模場地表設施配置	85
圖 2.3.28	典型的二氧化碳地質封存監測項目與分類	86
圖 2.3.29	TaiCOAST 臨海工作站的設施及地下水井配置圖	97
圖 2.3.30	TaiCOAST 臨海工作站內地下水井之井名及其分布位置	97
圖 2.3.31	BW07 井及 BW01 井	98
圖 2.3.32	貝勒管及分析儀器	98
圖 2.3.33	使用精密儀器進行水樣初步分析	98
圖 2.4.1	伊利諾盆地地區可封存二氧化碳之深部鹽水層範圍	101
圖 2.4.2	美國 IBDP 示範場址示意圖	101
圖 2.4.3	伊利諾盆地的地層柱狀圖	102
圖 2.4.4	伊利諾盆地二氧化碳封存注入監測模擬	104
圖 2.4.5	IBDP 的 FEPs 風險清單的前四十個風險項目	105
圖 2.4.6	IBDP 由風險清單繪製的風險矩陣	105
圖 2.4.7	IBDP 的管線末端（井口處）的場區洩漏模擬	106
圖 2.4.8	IBDP 的管線前端（捕獲端）的場區洩漏模擬	107
圖 2.4.9	ICCS 計畫與 IBDP 計畫的廠區位置圖	108
圖 2.4.10	IL-CCS Project 之 Decatur 碳封存場之 2008-2020 監測項目	112

表目錄

表 2.1.1	歐盟地質封存指令配套法規	6
表 2.1.2	CCS 技術發展之可能獎勵補助來源	9
表 2.1.3	CCS 技術發展之相關管制法規	10
表 2.1.4	行業別指定削減率	14
表 2.1.5	技術標竿指定削減率	15
表 2.1.6	各行業目標年燃料排放標竿	16
表 2.1.7	自主減量計畫管理辦法與碳封存相關條文	17
表 2.1.8	日本 Nagaoka 先導封存場址監測頻率	31
表 2.1.9	德國 Ketzin 計畫監測儀器與功能	36
表 2.1.10	地震前後苫小牧 CCS 示範計畫之設備狀態	50
表 2.3.1	摘要國外著名碳封存案例之關鍵監測技術	87
表 2.3.2	(A) 項注入井鑽設 (1,500 m) 成本分析	90
表 2.3.3	(B) 項監測井 (1,500 m) 鑽設成本分析	91
表 2.3.4	(C) 項地質模型與封存概念模型建立	92
表 2.3.5	(D) 項地表注入設施	93
表 2.3.6	(E) 項注入前中後 MMV 量測分析	94
表 2.3.7	(F) 項社會溝通平台與教育館建置	95
表 2.3.8	不同工項之成本分析表	95
表 2.3.9	TaiCOAST 兩口地下水井 BW01 及 BW07 的地球化學分析成果	99
表 2.4.1	美國參訪人員名單 (2024/9/23-26)	109

報告大綱

壹、前言

我國政府在 2023 年設立「2050 淨零排放」目標，其中二氧化碳捕捉利用及封存（CCUS）技術為關鍵策略。儘管國際已有成功案例，但台灣面臨社會接受度不足的挑戰。為實現目標，計畫建立國家級「碳封存技術社會溝通平台」，進行碳封存技術試驗並促進民眾教育。此平台將提升技術接受度，並支援未來研究與國際合作，包含試驗場選址、設施規劃及文獻收集等。

貳、研究成果

本章節針對碳封存技術發展進行深入研究，涵蓋了：碳封存文獻與法規、國際案例分析、民眾教育、試驗模場的封存潛能與設施規劃。

一、法規及實場案例對環境文獻收集

研究包括二氧化碳捕獲與封存（CCS）國際法規趨勢、美國環保署地下注入計畫、美國、日本、德國和澳洲的試驗案例，以及相關風險事件處理對策。

二、國家碳捕存教育軟硬體

建議擴大 CCUS 科普教育，提升民眾對技術的理解。

三、試驗模場前期規劃

試驗模場地下及周邊環境之 R2 系統具備優秀的封存潛力。鑽井暨地表設施規劃也參考國際上之相關規範指引及碳封存試驗場國際規畫經驗，並分析執行成本。

四、國際合作前期規劃

本計畫亦與 IL-CCS Project 合作交流，學習成功經驗以改進社會溝通。

參、結論與建議事項

本計畫提出了多項結論與建議：首先，應盤點國內外 CCS 法規與實場案例，包括國際法規趨勢、美國環保署地下注入計畫、碳封存計畫的公眾接受度及風險事件處理，並參考日本、德國及澳洲的試驗案例。其次，推動 CCUS 政策時應加強科普教育，提升民眾對技術的理解，減少恐懼與憂慮。前期規劃方面，依據國際規範進行試驗場設施規劃、成本分析及地下水品質基線資料建設。此外，應與 IL-CCS Project 合作學習其成功經驗，並在地區設立教育展示空間，推動「淨零減碳」活動。

計畫成果摘要（詳細版）

計畫名稱：碳封存技術社會溝通平臺建置先期規劃

計畫案號：113FB017

計畫執行單位：中華民國地球物理學會

計畫主持人：林殿順、顏宏元、俞旗文

計畫期程：113 年 3 月 13 日起至 113 年 12 月 31 日止

計畫經費：新臺幣 280 萬元

摘要：

本報告針對國內碳封存技術發展進行了廣泛的資料收集與分析，重點涵蓋法規與實場案例、科普教育、試驗模場規劃及國際交流等方面。

首先，報告分析了碳捕存的國際法規與文獻，包括國際法規發展趨勢、國內法規、美國環保署地下注入管制計畫和民眾接受度。同時，蒐集並分析了日本 Nagaoka（10,400 噸）、德國 Ketzin（67,271 噸）和澳洲 Otway（65,000 萬噸）三個國際試驗案例，探討了潛在風險和環境衝擊處理對策。

其次，報告建議擴大碳捕存科普教育，提升民眾對碳封存技術的理解，減少對技術的恐懼。計畫包括設立教育場域，針對不同年齡層和族群進行科普推廣，並盤點關鍵議題以支持政策推動。

在試驗模場前期規劃方面，報告根據反射震測和井下資料分析了 R2 封存系統，顯示其地層結構完整，封存空間厚度超過 500 公尺，具備優秀的封存潛力。此外，試驗模場的鑽井及地表設施規劃參考國際規範，確保設計和監測的科學性，並分析執行成本，及地下水品質基線資料建立。

最後，計畫擬與 IL-CCS Project 合作，學習其成功的社會溝通和

營運經驗，以改進碳封存技術的推廣和應用。

This report focuses on advancing domestic carbon storage technology through extensive data collection and analysis, covering regulatory frameworks, practical cases, educational initiatives, and international collaboration.

Firstly, the report examines international regulations and literature on carbon storage, including trends in CCS regulations, domestic regulations, the U.S. Environmental Protection Agency Underground Injection Control program, and public acceptance. It also analyzes international case studies from Japan's Nagaoka (10,400 tons), Germany's Ketzin (67,271 tons), and Australia's Otway (65 million tons), addressing potential risks and environmental impact communication strategies.

Secondly, the report recommends expanding CCS public education to enhance understanding of carbon storage technology and reduce fear of the unknown. The plan includes creating educational venues, developing age-appropriate and demographic-specific content, and identifying key issues to support policy implementation.

For trial site planning, the report analyzes the R2 storage system using seismic reflection and subsurface data, revealing a well-structured cap layer and a storage space thickness exceeding 500 meters, indicating excellent storage potential. Additionally, the design of drilling and surface facilities will follow international guidelines to ensure scientific accuracy in planning and monitoring. The report also includes an analysis of implementation costs and the establishment of baseline data for groundwater quality.

Finally, the project aims to collaborate with the IL-CCS Project to gain insights into successful social communication and operational practices, enhancing the promotion and application of carbon storage technology.

前言

我國政府在 2023 年設立「2050 淨零排放」目標，其中二氧化碳捕捉利用及封存 (CCUS) 技術為關鍵策略。儘管國際已有成功案例，但台灣面臨社會接受度不足的挑戰。為實現目標，計畫建立國家級「碳封存技術社會溝通平台」，進行碳封存技術試驗並促進民眾教育。此平台將提升技術接受度，並支援未來研究與國際合作，包含試驗場選址、設施規劃及文獻收集等。

研究方法

本報告針對國際二氧化碳封存的相關計畫，進行廣泛資料蒐集與研究分析，就二氧化碳捕獲與封存 (CCS) 國際法規發展趨勢、國內法規現況、美國環保署 (EPA) 地下注入管制 (UIC) 計畫、民眾觀感與接受度等主要內容，蒐集相關文獻並歸納探討，並蒐集了國際試驗計畫進行案例研析。

在民眾教育方面，透過科學教育的普及與傳播，消除科學專業與價值觀的衝突，理解科學議題中的不確定性，使公眾間獲得與政策相關之科學知識。CCUS 科學教育推廣，可分兩個面向規畫行動策略，一為教育部門的知識建構，二為公眾科普推廣與溝通。為促進民眾對全球暖化之認知、認識 CCS 對二氧化碳減量之貢獻、了解 CCS 之各項技術及其安全性，應選擇適當場域及地點進行教育設施規劃。

此外，為了解試驗模場地下及周邊環境之碳封存潛能，本計畫收集彙整既存的反射震測及井下資料，經由井下對比及時深轉換，將地層解釋對比到震測剖面上，藉以了解二氧化碳封存地層和蓋層的空間分布概況。試驗模場的鑽井暨地表設施規劃也參考國際上之相關規範指引及碳封存試驗場國際規畫經驗，擬定本先導注儲試驗計畫的地表設施項目、井體規劃、監測設施規劃。

結果

1. 法規及實場案例對環境文獻收集

為推動國內碳封存技術發展，本報告針對國際二氧化碳封存的相關計畫，進行廣泛資料蒐集與研究分析。本期報告研究分析聚焦於兩項主題：(1) 碳封存相關文獻與法規蒐集研析、(2) 國際碳封存案例蒐集與研析。前者已就 CCS 國際法規發展趨勢、國內法規現況、EPA UIC 計畫、民眾觀感與接受度等主要內容，蒐集相關文獻並歸納探討；再者則已蒐集日本 Nagaoka 先導試驗計畫（10,400 噸）、德國 Ketzin 試驗計畫（67,271 噸）及澳洲 Otway 試驗計畫（65,000 萬噸）三個試驗計畫進行案例研析。此外，本期報告另蒐集了相關案例中，碳封存項目潛在風險事件發生的可能情境，並探討事件發生後有關環境衝擊影響議題之溝通處理對策。

2. 國家碳捕存教育軟硬體

CCUS 政策之推動，應擴大 CCUS 科普教育基本知識的累積，使民眾瞭解其技術之基本原理、運作方式等，民眾則能理性評估其潛在風險和益處，降低未知的恐懼及憂慮。本計畫擬推動 CCUS 的教育場域、規劃各年齡層及族群的科普內容，並盤點 CCUS 利害關係人之關鍵議題，以助政策推動。

3. 試驗模場前期規劃

為了解試驗模場地下及周邊環境之碳封存潛能，本計畫根據反射震測及井下資料解釋成果，研究區域 R2 封存系統的各地層空間分布趨勢皆為向東南傾斜、向西北抬升，整體的深度分布範圍都在適合二氧化碳封存的深度條件內。R2 系統之蓋層結構完整、厚度適中、沒有缺失現象，封存安全性高；封存層方面，整體封存空間厚度超過 500 公尺，且沒有地層缺失，具有優秀的封存空間潛力。此外，試驗模場的鑽井暨地表設施規劃也參考國際上之相關規範指引及碳封存試驗場國際規畫經驗，擬定本先導注儲試驗計畫的地表設施項目、井體規劃、監測設施規劃。先導注儲試驗計畫規劃包括六大類工項：(A) 注入井（1,500 m）鑽設；(B) 監測井（1,500 m）鑽設；(C) 地質模型與封存概念模型建立；(D) 地表注入設施；(E) 注入前中後量測、監測及

驗證 (MMV) 量測分析；(F) 社會溝通平台與教育館建置，依據各工項進行細部成本分析，綜合前述細項成本合計為 13 億 1,950 萬元。

為評估二氧化碳封存對地下水的影響，進行了水質監測並建立基線資料。利用 TaiCOAST 工作站的地下水井採樣，分析結果顯示該區地下水為碳酸氫鎂泉，表明桃園臨海區域為自由地下水區。

4. 國際合作前期規劃

此次參訪 MRCI 會議，與碳封存領域的關鍵人物建立合作關係，並了解美國政府透過能源局補助碳封存選址及開發，補助金額可達 80%。建議我國仿效該政策，促進 CCS 技術發展。參訪 IL-CCS Project 的 Decatur 場址，學習監測技術及設置碳封存教育中心，促進社會與當地居民對碳封存技術的認識，並期待未來建立實質合作關係。

結論

1. 法規及實場案例對環境文獻收集

- (1) 盤點 CCS 國際法規發展趨勢及國內法規現況，依管制類法規及誘因類法規分別歸納探討，提供未來可能須依循之規範參考，並瞭解可能的獎勵補助來源。
- (2) 蒐集 EPA UIC 計畫內容，歸納監管單位之責任及專案計畫之溝通內容，提供監管單位後續執行專案參考。
- (3) 蒐集碳封存計畫民眾觀感與接受度文獻資料，可作為後續規劃民眾溝通參考資料。
- (4) 本計畫針對日本 Nagaoka 先導試驗計畫 (10,400 噸)、德國 Ketzin 試驗計畫 (67,271 噸) 及澳洲 Otway 試驗計畫 (65,000 萬噸) 三個試驗計畫進行案例蒐集及研析，相關環境監測內容可提供後續執行規劃參考。
- (5) 蒐集國際碳封存計畫風險事件發生案例，並探討事件發生後有關環境影響議題之處理對策，相關執行經驗可作為未來計畫執行之參考。

2. 國家碳捕存軟硬體

CCUS 政策之推動，應擴大 CCUS 科普教育基本知識的累積，使民眾瞭解其技術之基本原理、運作方式等，民眾則能理性評估其潛在風險和益處，降低未知的恐懼及憂慮。本計畫推動 CCUS 的教育場域、規劃各年齡層及族群的科普演講、增能工作坊、座談會、等各項活動，並盤點 CCUS 利害關係人之關鍵議題，提升整體國人對 CCUS 的認識，益於未來 CCUS 之社會溝通與公眾參與。未來若持續辦理，將辦理「淨零減碳」活動，擬以「行動博物館及攤車」方式擴展，同時也將加入親子科學工作坊，以增加科學教育的強度。

3. 試驗模場前期規劃

- (1) 根據反射震測及井下資料解釋成果，研究區域 R2 封存系統的各地層空間分布趨勢皆為向東南傾斜、向西北抬升，整體的深度分布範圍都在適合二氧化碳封存的深度條件內。R2 系統之蓋層結構完整、厚度適中、沒有缺失現象，封存安全性高；封存層方面，整體封存空間厚度超過 500 公尺，且沒有地層缺失，具有優秀的封存空間潛力。
- (2) 參考國際上之相關規範指引及碳封存試驗場國際規畫經驗，擬定本先導注儲試驗計畫的地表設施項目、井體規劃、監測設施規劃。
- (3) 依據擬定之先導注儲試驗計畫工項，就各主要工項進行細部成本分析，可提供較明確之成本資訊。
- (4) 利用 TaiCOAST 工作站的地下水井採樣，已初步建立本區的地下水基線資料。分析結果表明桃園臨海區域為自由地下水區。

4. 國際合作前期規劃

本計畫團隊此次參訪 MRCI 會議，與碳封存領域的關鍵人物建立合作關係，並了解美國政府透過能源局補助碳封存選址及開發。參訪 IL-CCS Project 的 Decatur 場址，學習監測技術及設置碳封存教育中心，促進社會與當地居民對碳封存技術的認識，並期待未來建立實質合作關係。

建議事項

1. 社會溝通及科教

桃園市政府已經同意租借市府環保局所轄「永續資源館」一隅規劃為實體展示教育及環境教育空間。陸續會辦理觀音及新屋地區民眾及兩區中小學師生的「淨零減碳」活動，設計「永續淨零綠生活」環境教育宣導活動課程，該課程屬環境教育之課程，本課程皆由已取得環境教育教學認證資格之講師進行授課。環境教育內容包認識台灣極端氣候的定義與成因、探討因應台灣極端氣候的策略、「碳捕捉與封存」是對抗氣候變遷的新利器、永續淨零綠生活等觀念。同時也將加入親子科學工作坊，以增加科學教育的強度。

2. 試驗模場前期規劃

(1) 鑽井暨地表設施規劃

本案碳封存試驗模場目前尚無鑽井實證資料，鑽井暨地表設施規劃主要依據既有地質調查資料進行規劃，據此對於碳封存試驗模場建議應規劃先期地質鑽井與地質調查，有助於瞭解目標封存層地質特性，相關之規劃及設計將更為精準。

(2) 成本分析

在資料尚屬有限的情境下，初估執行萬噸級碳封存模場注入試驗成本約為 13 億 1,950 萬元整，此成本分析結果仍為概略性估算。建議若後續有取得情境模場先期地質鑽井與進一步地質調查資料，應可再針對原先規劃內容與因應新增法規要求進行必要調整（例如鑽井數量、MMV 項目），辦理成本分析評估調整，以更為貼近實際狀況。

(3) 地下水品質基線資料

為了解二氧化碳地質封存在洩漏風險下是否會影響到地下水層，建議未來於預計碳封存試驗場址鑽探地下水井，進行持續性的地下水品質量測與監測等工作。

3. 國際合作前期規劃

(1) 在 MRCI 會議中，得知美國政府透過能源局大量補助碳封存計畫之選址與初期開發計畫，補助金額可達總經費之 80%。透過

政府資金補助，使得美國的 CCS 技術可以蓬勃發展。我國 CCS 技術發展正在起步，亟需政府資金挹注。建議仿效美國政府補助政策，以盡早落實我國 CCS 技術。

- (2) IL-CCS Project 的 Decatur 場址之碳封存監測技術與監測項目，可提供本計畫之桃園碳封存試驗場未來規畫監測項目之參考。
- (3) 在參訪過程中除討論許多關鍵技術外，就共同願景、價值鏈、利害關係人之間的合作、技術商業化的關鍵等多項議題上充分交流，透過雙邊交流，期待建立雙邊未來實質合作關係。

壹、前言

章節摘要：

我國政府在 2023 年設立「2050 淨零排放」目標，其中二氧化碳捕捉利用及封存技術為關鍵策略。儘管國際已有成功案例，但台灣面臨社會接受度不足的挑戰。為實現目標，計畫建立國家級「碳封存技術社會溝通平台」，進行碳封存技術試驗並促進民眾教育。此平台將提升技術接受度，並支援未來研究與國際合作，包含試驗場選址、設施規劃及文獻收集等。

一、研究緣起

我國 2023 年將「2050 淨零排放」納入「氣候變遷因應法」中作為政府未來重大施政目標，而二氧化碳捕捉利用及封存(CCUS, Carbon Capture, Utilization and Storage) 技術，為政府所提的「十二項淨零碳排關鍵戰略」中扮演關鍵減碳與負碳角色。政府規劃於 2030 年與 2050 年時，年度碳捕捉利用及封存目標，分別為 1.76-4.60 百萬噸與 40.2 百萬噸，預計在 2050 年時須開發 20 至 40 個年封存百萬噸以上等級的封存場。

雖然國際上有多個商轉、年封存百萬噸等級以上的碳封存場，證明碳封存之有效性與安全性。然而仍有多個國內外碳封存開發案例，遭遇到非技術性阻礙，主要為社會大眾不了解碳封存原理，以及鄰避效應(NIMBY, Not In My Back Yard)，或是過度放大碳封存之風險而產生恐懼進而反對。於 2012~2013 年，台灣中油公司曾於枯竭的苗栗永和山天然氣田，灌注 300 公噸二氧化碳於 3,200 公尺深的打鹿砂層中，進行枯竭氣田天然氣增產(CO₂-EGR, CO₂-Enhanced Gas Recovery)及二氧化碳地質封存試驗計畫，後因媒體負面報導及民眾疑慮，導致試驗計畫終止。此例顯明在進行碳封存之前，取得公眾信任是當務之急。

二、目的

為實現「2050 淨零排放」目標，有鑑於國內碳封存灌注、監測、風險評估等技術仍待實證，碳封存技術之社會及民眾接受度暨封存場址利害關係人溝通仍待提升，實有必要建立國家級的「碳封存技術社會溝通平台」。該平台將利用本土碳封存試驗場之選址、灌注及監測之科學數據，進行社會及民眾溝通及教育。平台

碳封存技術社會溝通平臺建置先期規劃

建置期間將廣邀利害關係人參與，全程自選址期間，即進行社會溝通與民眾教育。透過國際合作，鏈結國際碳封存技術。預期此平台建置，將提升民眾對碳封存之接受度。試驗場所得之科學資訊，可用以草擬或持續修正相關操作及監測準則或規範。此國家級試驗溝通平台，未來可提供各界進行碳封存技術開發與研究場域，且碳封存教育館也可成為「2050 淨零排放」教育及環境教育平台。

本計畫「碳封存技術社會溝通平臺建置先期規劃」預期達到以下效益：

- (1) 完成封存 1 萬噸二氧化碳試驗場之選址、灌注、監測等規劃。內容包含碳封存試驗模場地下水水文地質模型、鑽井暨地表設施規劃、成本分析、地下水品質基線資料等。
- (2) 國家碳捕存教育軟硬體之規劃。內容包含教育設施（封存教育館）規劃、利害關係人界定、社會溝通。
- (3) 國際合作前期規劃：與美國 IL-CCS Project (Illinois-Industrial Carbon Capture and Storage Project) 交流規劃。
- (4) 碳封存文獻法規及實場案例蒐集。

三、工作進度與查核點

工作進度表（期末報告完成的部分以黃色標示）

工作項目	時程	2024 年									
		3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
(1-1) 教育設施規劃				1							
(1-2) 利害關係人界定							2				
(1-3) 社會溝通									3		
(2-1) 碳封存試驗模場地下水水文地質模型						4					
(2-2) 鑽井暨地表設施規劃							5				
(2-3) 成本分析									6		
(2-4) 地下水品質基線資料									7		
(3-1) 美國 IL-CCS Project 交流規劃									8		
(4-1) 碳封存相關文獻與法規蒐集研析							9				
(4-2) 國際碳封存案例蒐集與研析									10		
報告撰寫與修改				11						12	

查核點說明

查核點	工作項目說明	時間	完成度(百分比)
1	教育設施規劃	2024/6/30	100%
2	利害關係人界定	2024/9/30	100%
3	社會溝通	2024/11/30	100%
4	碳封存試驗模場地下水水文地質模型	2024/8/31	100%
5	鑽井暨地表設施規劃	2024/9/30	100%
6	成本分析	2024/11/30	100%
7	地下水品質基線資料	2024/11/30	100%
8	美國 IL-CCS Project 交流規劃	2024/11/30	100%
9	碳封存相關文獻與法規蒐集研析	2024/8/31	100%
10	國際碳封存案例蒐集與研析	2024/11/30	100%
11	完成期中報告	2024/6/30	100%
12	完成期末報告	2024/11/30	100%

貳、研究成果

章節摘要：

本章節針對碳封存技術發展進行深入研究，涵蓋了：碳封存文獻與法規、國際案例分析、民眾教育、試驗模場的封存潛能與設施規劃。研究包括碳捕存國際法規趨勢、美國環保署地下注入計畫、美國、日本、德國和澳洲的試驗案例，以及相關風險事件處理對策。同時建議擴大 CCUS 科普教育，提升民眾對技術的理解。試驗模場前期規劃顯示 R2 系統具備優秀的封存潛力，以 R2 系統為目標層規畫碳封存先導試驗計畫，並分析計畫執行成本。本計畫亦與 IL-CCS Project 交流，學習成功經驗以改進社會溝通。

一、法規及實場案例對環境文獻收集

1. 碳封存相關文獻與法規蒐集研析

二氧化碳捕獲與封存 (CCS) 技術主要是在能源或經濟生產過程，利用燃燒前、燃燒後或富氧燃燒等捕獲技術，將二氧化碳分離出來，再經過純化及壓縮後輸送至特定地點進行封存或再利用的處理過程與技術。國際間針對二氧化碳捕獲、運輸與封存等過程，相關技術於國際間已有其發展規模及成熟度。

目前國際間提出大規模、可行的二氧化碳封存方式可分為：地質封存、礦化封存及海洋封存三大類。其中地質封存是國際間公認技術可行性最高且最能達成大規模二氧化碳減排之技術，2005 年八大工業國高峰會已將發展 CCS 科技之管制架構列為建議方針；2011 年《聯合國氣候變化綱要公約》(UNFCCC, United Nations Framework Convention on Climate Change) 第 17 次締約國大會 (COP17/CMP.7) 正式決議將 CCS 納入清潔發展機制 (CDM, Clean Development Mechanism)，以利推動國際減碳行動，使 CCS 發展向前跨出一大步。

CCS 已被國際公認為重要的減碳技術之一，各國亦已加緊進行產業布局。為達國內 2050 淨零排放之目標，CCS 為不可或缺的減碳選項，且台灣地質條件富有推動 CCS 之潛力，惟國內在進行二氧化碳地質封存計畫之過程，不可避免會遭遇到若干質疑與困難，是亟待政府明確的政策才有辦法解決。CCS 之推動須仰賴政策與法律之緊密妥善結合，方得以完善發展。

(1) CCS 國際法規發展趨勢

對於低碳科技的引進，世界先進國家的立法往往以「管制、誘因」雙管齊下的方法進行。歐盟委員會(EC, European Commission)為加強對 CCS 實施的管理，於 2008 年 1 月公布了二氧化碳封存指令草案，並於 2009 年制訂 CCS 指令。CCS 指令主要根據 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) GHG (Greenhouse Gas) 指導綱要與東北大西洋海洋環境保護公約 (OSPAR, Oslo and Paris Convention) 之內容 (IPCC, 2005)。OSPAR 公約是以「區域性協定」之方式，保護北海及部分的大西洋與北極海域之東北大西洋區域之海洋環境。OSPAR 委員會正式於 2007 年 6 月修正既有 OSPAR 公約之內容，准許「海床下之二氧化碳儲存槽」(geological formations under the seabed) 之發展；為避免潛在的負面影響，同時也採行另一決定，禁止將二氧化碳放置在「水層」(water-column) 及海床上 (on the seabed)。此外，為規範碳儲槽及避免二氧化碳污染海洋環境，OSPAR 委員會亦採取下列配套措施：第一、採行一決定 (decision)，希望確保二氧化碳碳流在海底儲槽之環境安全性 (例如要求碳儲存處理過程中不可混入其他廢棄物，且明確指出二氧化碳需永久保留在海底地質結構中)；第二、針對 CCS 活動，OSPAR 委員會特頒布「風險評估及管理準則」(OSPAR Guidelines for Risk Assessment and Management of that activity)。以上之規劃方向，影響歐盟 CCS 指令之立法 (如禁止水層儲碳)。歐盟之氣候變遷與能源配套法規如表 2.1.1。

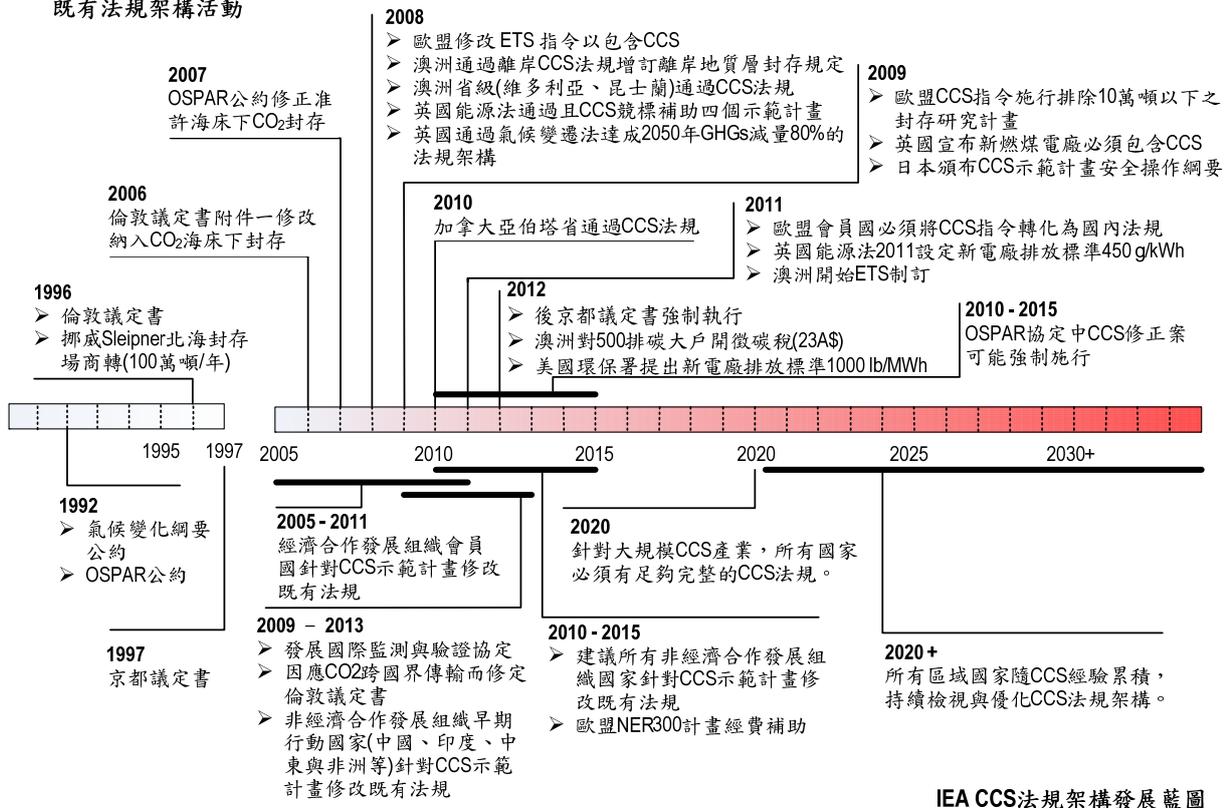
國際能源總署 (IEA, International Energy Agency) 亦針對 CCS 之法規於 2010 年建立「模範管制架構」(Model Regulatory Framework)，供世界各國在制訂 CCS 法規之參考。其並依據 CCS 發展藍圖，在 2009 年規劃了國際 CCS 法規之發展藍圖，另綜整近年國際重要 CCS 法規活動如圖 2.1.1 所示 (財團法人中興工程顧問社，2012)。

在此一發展趨勢下，世界各國與區域組織紛紛研提 CCS 立法草案或推動 CCS 發展相關之立法：草案方面，如美國肯塔基州 2010 年之碳捕獲與封存法案 (HB 213)；已通過之立法部分，如歐盟 2009 年之 CCS 指令、英國 2008 年及 2010 年能源法、加拿大 2009 年碳捕獲與封存贊助法等。

表 2.1.1 歐盟地質封存指令配套法規

Directive 2009/28/EC (再生能源指令)	建立每一會員國具約束力的國家再生能源目標。
Decision No 406/2009/EC (共同努力宣言)	建立共同努力協議，每一會員國同意 2020 年限制排碳目標，其排碳範圍並未規範於碳交易制度 (ETS) 指令中。
Directive 2009/29/EC (修改 ETS 指令)	<ul style="list-style-type: none"> ● 修改並加強 ETS 指令，建立 3 億歐元之儲備基金以支持 CCS 與再生能源示範計畫的建設和營運。 ● 若有洩漏之情事發生需提交相當的排放權。 ● 未來需建立 CCS 相關監測及報告指引。
Directive 2009/31/EC (CCS 指令)	<ul style="list-style-type: none"> ● 目的為建立保障永久封存的法律架構。 ● CCS 探勘與封存需要取得許可證，無顯著洩漏風險者才能發予其許可證，歐盟執委會有權審議許可證核發決定。 ● 建立封存場址選擇標準，強調場址分析、風險評估、監測計畫均需依照指令相關標準。 ● 新建廠需預留可加裝二氧化碳捕獲設施空間 (CCS-Ready)。

既有法規架構活動



IEA CCS法規架構發展藍圖

圖 2.1.1 國際法規概況與 IEA 法規架構推動藍圖

此外，昂貴的執行成本是 CCUS 項目發展的主要障礙之一。CCUS 法規及政策制定亦應考量誘因類之管制措施及補助辦法，需要制定有利的政策和監管環境，以允許 CCUS 技術的全面商業化。以目前擁有最多商轉 CCUS 設備的美國為例，其自 2008 年開始啟動 45Q 稅收抵免條款 (45Q of the Internal Revenue Code)，提供碳捕獲與封存計畫財政誘因，鼓勵企業參與和投資 CCUS 計畫。至 2018 年再通過擴大 CCUS 稅收抵免規定 (如圖 2.1.2)，採逐年緩步提高抵免金額。至 2026 年時 EOR 或其他再利用項目每噸二氧化碳可獲得 35 美元稅收抵免 35 美元，地質封存項目每噸二氧化碳可獲得 50 美元之稅收抵免。

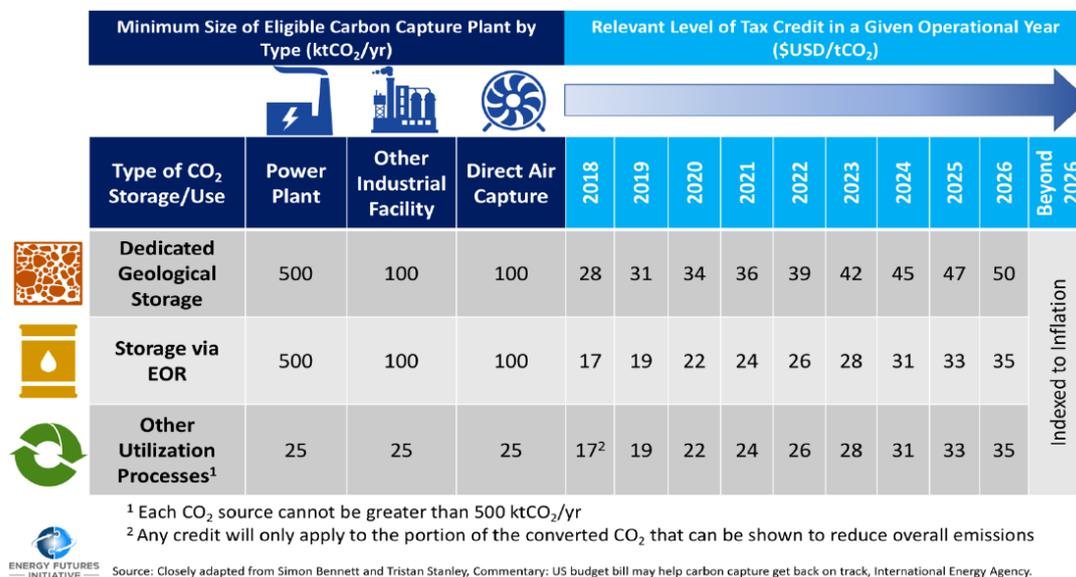


圖 2.1.2 美國 2018 年 45Q 擴大稅收抵免條款

(2) CCS 國內法規現況

CCS 技術已被國際證實為減緩氣候變遷重要的方式之一，且台灣西部濱海深部鹽水層具有龐大的二氧化碳地質封存潛力，具備良好的發展條件。但相較國外對 CCS 技術之研究、試驗及運用部署等，我國皆相對落後。我國近年來對於 CCS 技術應用僅於政策位階加以處理。如：96 年能源科技研究發展白皮書、97 年永續能源政策綱領、98 年全國能源會議、99 年能源產業技術白皮書、111 年正式公布「臺灣 2050 淨零排放路徑及策略總說明」等，然對於 CCS 法規則是少有著墨。

碳封存技術社會溝通平臺建置先期規劃

過去國內對 CCUS 研究，多偏重於二氧化碳捕獲 (Capture) 與再利用 (Utilization) 技術，特別是針對燃燒前捕獲技術與燃燒後捕獲技術已進行一段時間。1998 年起經濟部委託工業技術研究院進行關於煤炭氣化相關研究 (燃燒前捕獲技術)，諸如：「氣化複循環發電技術引進及推廣策略規劃」之研究及「淨煤發電技術應用整合規劃及獎勵措施」之研究等，至於燃燒後捕獲技術亦在 2007 年開始進行二氧化碳捕獲分離技術之評估與發展。經濟部能源局有鑑於 CCS 對於減碳重要性，自 2006 年亦開始投入淨煤與碳捕獲技術的推動，其中鈣迴路 (Calcium looping) 捕獲技術由工研院與臺灣水泥公司合作於 2007 年起投入研究，2013 年 6 月於和平水泥廠將其從 3 kWt 規模之實驗系統放大至 1.9 MWt 先導試驗廠，另接續於 2015 年開發 500 kWt 新世代鈣迴路二氧化碳捕獲技術並預計於 2023 年起推展 10 MWt 示範系統 (周揚震等，2020)。

在二氧化碳封存研究方面，國內除台電公司於 2014 年在過去彰工電廠預定地成功完成之 3,000 m 鑽井調查、中油公司於 2012 年欲在苗栗永和三山試辦 CCS，但後續皆因法規未臻完備、媒體渲染及居民疑慮等問題而延宕，至今仍未實際執行先導試驗灌注研究，故目前於地質封存之經驗仍十分缺乏。

由於 CCS 是重要的氣候變遷減緩方式之一，若能使相關法律規範明確化，應能加速促進 CCS 技術發展，否則在法規不明確狀態下，無法吸引國內大型排碳企業投入 CCS 大型專案，反而喪失提早減少二氧化碳排放而失去轉型低碳經濟的契機。

以下盤點目前國內於 CCS 發展可能涉及之相關法規現況，初步分為：A. 誘因類法規及 B. 管制類法規，分述如下。

A. 誘因類法規

台灣目前對於碳捕集與封存技術的推動，主要參考 IEA 與歐盟所採行的獎勵措施，由於碳捕集與封存技術需要龐大資金的援助，在我國現有的法規中，可先以研發階段提供推廣 CCS 技術的資金來源主要以經濟部相關補助條款為主，彙整如表 2.1.2。

表 2.1.2 CCS 技術發展之可能獎勵補助來源

法源	相關內容
能源管理法	第 5 條： 設有「能源研究發展特種基金」 說明：若能將 CCS 技術視為「能源開發技術的研究發展及替代能源之研究」
氣候變遷因應法	第 32 條 中央主管機關應成立溫室氣體管理基金 第 33 條 前條基金專供執行溫室氣體減量及氣候變遷調適之用，其用途如下： 四、補助及獎勵事業投資溫室氣體減量技術。 五、辦理前三款以外之輔導、補助、獎勵溫室氣體減量工作事項、研究及開發溫室氣體減量技術。
石油管理法	第 36 條： 1.石油基金用途如下： 四、能源政策、石油開發技術及替代能源之研究發展、應用及推廣。 六、再生能源熱利用替代石油能源獎勵之補助。 說明：若能修法擴大適用於 CCS。
政府科研補助	例如 2011 年的「能源國家型科技計畫前瞻科技研究」，由政府編列試驗計畫所需經費，由研究單位進行。

B. 管制類法規

考量管制層面，有部分法規有可能介入 CCS 技術發展。初步檢視以下表列法規與 CCS 發展之關連性。惟這些法規原則上雖屬管制 CCS 發展，但由於 CCS 本身亦有二氧化碳減排之環境益處，故亦有可能最終被視為這些法規之獎勵對象，故仍需與主管機關作溝通釐清。茲將相關法規彙整如表 2.1.3 所示。

值得注意的是，行政院會於 111 年 4 月 21 日通過《溫室氣體減量及管理法》修正草案，並將名稱修正為《氣候變遷因應法》，除將 2050 年淨零排放入法，也將分階段，由大至小徵收碳費。本案已於中華民國 112 年 2 月 15 日總統華總一義字第 11200010681 號令修正公布名稱及全文 63 條，並自公布日施行，並待後續完善相關施行細則後淨零政策即正式於法有據。

表 2.1.3 CCS 技術發展之相關管制法規

法規	相關內容
氣候變遷因應法	<ul style="list-style-type: none"> ● 行政院會於 111 年 4 月 21 日通過「溫室氣體減量及管理法」修正草案，並將名稱修正為「氣候變遷因應法」。 ● 說明：本法增訂事業捕捉二氧化碳後之利用、封存相關規定；配合新增相關管制措施，修正行政檢查之範疇；確保檢驗測定品質，增訂檢驗測定機構及檢驗測定方法相關規定。(修正條文第 39 條至第 41 條)
	<ul style="list-style-type: none"> ● 修正條文第 39 條： 事業捕捉二氧化碳後之利用，應依中央目的事業主管機關之規定辦理。 事業辦理二氧化碳捕捉後之封存，應向中央主管機關申請核准。前項二氧化碳捕捉後封存核准之申請，應提出試驗計畫或執行計畫送中央主管機關審查，計畫內容至少應包含座落區位、封存方法、環境衝擊、可行性評估及環境監測。 經核准二氧化碳捕捉後封存之事業，應依核准內容執行，於二氧化碳封存期間持續執行環境監測，並定期向主管機關申報監測紀錄。 前三項二氧化碳捕捉後封存核准之審查程序、廢止、監測、記錄、申報、管理及其他應遵行事項之辦法，由中央主管機關會商中央目的事業主管機關定之。 ● 依氣候變遷因應法第 39 條，環境部於 113 年初制定「二氧化碳捕捉後封存管理辦法」草案，並分別於 113 年 6 月 14 日、8 月 7 日、10 月 2 日，針對草案內容，召開 3 次專家諮詢會議，並預計於 113 年底前提出 CCS 管理辦法草案。此管理辦法草案架構包含(1) 二氧化碳地質封存類型：陸域、海域；(2) 地質條件：座落區位、灌注區位；(3) 審查程序：試驗計畫、執行計畫；(4) 監測作業：注入井監測、環境監測、二氧化碳移棲監測；(5) 紀錄申報：定期申報監測資料、公開資訊平台；(6) 查核監督：利害關係人溝通、不定期查核、數據連線；(7) 緊急應變：風險評估、緊急應變計畫、封閉廠址；(8) 權責轉移：財務證明、權責委託、營運移轉、強制執行。
	<ul style="list-style-type: none"> ● 修正條文第 40 條： 主管機關或目的事業主管機關得派員攜帶有關執行職務之證明文件或顯示足資辨別之標誌，進入事業、排放源所在或其他相關場所，實施排放源操作、排放相關設施、碳足跡標示、溫室氣體或相關產品製造、輸入、販賣、使用、捕捉後利用、捕捉後封存之檢查，或令其提供有關資料，受檢查者不得規避、妨礙或拒絕。

法規	相關內容
	<ul style="list-style-type: none"> ● 修正條文第 41 條： 檢驗測定機構應取得中央主管機關核給之許可證後，始得辦理本法規定涉及溫室氣體排放量、排放效能及環境之檢驗測定。前項檢驗測定機構應具備之條件、設施、檢驗測定人員資格限制、許可證之申請、審查程序、許可事項、廢止、許可證核(換)發、停業、復業、查核、評鑑程序、管理及其他應遵行事項之辦法，由中央主管機關定之。 本法各項溫室氣體排放量、排放效能及環境之檢驗測定方法，由中央主管機關定之。
都市計畫法	<ul style="list-style-type: none"> ● 第 42 條： 從捕集、輸送、至儲存，均與用地取得相關。納入都市計畫之公共設施用地可適用徵收等規定。
	<ul style="list-style-type: none"> ● 第 46 條： 相關設施係與電力設施有關，界定為『公益性且具民生重要性』。
	<ul style="list-style-type: none"> ● 第 47 條： 將設施界定為 NIMBY (或 NUMBY 設施)
空氣污染防治法	<ul style="list-style-type: none"> ● 第 3 條： 若主管機關將二氧化碳視為空氣污染物，則屬管制；若主管機關將 CCS 視為本法所稱之「最佳可行控制技術」，則有助於相關管制區內應用，則屬誘因。 ● 有關連性者尚有空污法第 16 條、18 條、19 條、23 條、24 條、32 條、77 條，空污法施行細則第 2 條、19 條。 ● 二氧化碳雖非認定為空氣污染物，但於 CCS 設施運作過程中，恐怕會造成額外能源之利用而產生污染，但同時也會捕集既有電廠之「納入本法列管之空氣污染物」，故恐會有相關關連，如空氣污染防治設備、空氣污染收集設備或者固定污染源等。
水污染防治法	<ul style="list-style-type: none"> ● 第 2 條、7 條、13 條、18 條、27 條、32 條、33 條。 ● 說明：需釐清是否產生事業排放廢(污)水。
噪音管制法	<ul style="list-style-type: none"> ● 第 9 條： 1.噪音管制區內之下列場所、工程及設施，所發出之聲音不得超出噪音管制標準：一、工廠(場)。二、娛樂場所。三、營業場所。四、營建工程。五、擴音設施。六、其他經主管機關公告之場所、工程及設施。
毒性及關注化學物質管理法	<ul style="list-style-type: none"> ● 第 3 條 ● 相關法規：毒性及關注化學物質運送管理辦法、毒性化學物質及懸浮微粒物質災害救助種類及標準、毒性及關注化學物質運作投保責任保險辦法、毒性及關注化學物質運作及釋放量紀錄管理辦法、毒性化學物質災害潛勢資料公開辦法。 ● 說明：需釐清二氧化碳是否被認定為毒性及關注化學物質。
海岸管理法	<ul style="list-style-type: none"> ● 若涉及海岸地區利用管理之相關項目。

法規	相關內容
海域管理法（草案）	<ul style="list-style-type: none"> ● 第 23 條： 明定海域使用權人應將相關資料提交中央目的事業主管機關及主管機關，並於一定期限內負保存責任。一、底土及地質鑽探。二、海洋地球物理調查。三、水文及水質環境調查。四、生態調查。五、聲景調查。六、經主管機關指定及公告之事項。 涉及海域底土及地質鑽探所產出之岩心樣本，主管機關得視需要通知海域使用權人無償提供；相關資料涉機敏性者，保密措施依有關規定辦理。 ● 說明：若涉及海域使用管理之相關項目。
中華民國專屬經濟海域及大陸礁層法	<ul style="list-style-type: none"> ● 若採離岸地質封存而涉及中華民國專屬經濟海域及大陸礁層之相關項目。
土壤及地下水污染整治法	<ul style="list-style-type: none"> ● 土壤及地下水污染整治法第 2 條、8 條、9 條、12 條、13 條、15 條、17 條、28 條。 監測監控之義務，有目的事業主管機關檢測土壤及地下水備查作業辦法、土壤污染監測標準、地下水污染監測標準、地下水水質監測井設置規範、土壤污染檢測資料備查作業要點、土壤及地下水污染場址改善審查及監督作業要點、場置性地下水監測井設置及後續處理處置原則、目的事業主管機關檢測土壤及地下水資料格式。
地質法	<ul style="list-style-type: none"> ● 地質調查相關項目
礦業法	<ul style="list-style-type: none"> ● 探礦相關項目 ● 說明：需釐清二氧化碳封存資源調查是否為探礦行為。
廢棄物清理法	<ul style="list-style-type: none"> ● 一般廢棄物、事業廢棄物處理相關項目
行政院環境保護署未管制污染物健康風險評估諮詢作業規範	<ul style="list-style-type: none"> ● 行政院環境保護署為處理於開發案件或公害事件對環保法令未管制污染物排放於環境之健康危害產生爭議時，評估未管制污染物對國民健康之潛在危害，可以視情況，成立未管制污染物健康風險評估諮詢小組。其主要任務為： <ol style="list-style-type: none"> (1) 有關未管制污染物之毒理蒐集、安全評估與系統性篩選建議事項。 (2) 有關未管制污染物之健康風險評估建議事項。 (3) 有關未管制污染物之健康風險溝通建議事項。
職業安全衛生法	<ul style="list-style-type: none"> ● 有關場區之工作者、安全衛生設施、安全衛生管理等項目。 ● 第 5 條： 機械、設備、器具、原料、材料等物件之設計、製造或輸入者及工程之設計或施工者，應於設計、製造、輸入或施工規劃階段實施風險評估，致力防止此等物件於使用或工程施工時，發生職業災害。
營造安全衛生設施標準	<ul style="list-style-type: none"> ● 本標準依職業安全衛生法第六條第三項規定訂定之。 ● 有關營造工程作業、場所、安全衛生設備及措施之相關項目。

法規	相關內容
高壓氣體勞工安全規則	<ul style="list-style-type: none"> ● 本規則依職業安全衛生法第六條第三項及第二十三條第四項規定訂定之。 ● 有關高壓氣體設備、作業、安全管理等相關項目。
輸配電設備裝置規則	<ul style="list-style-type: none"> ● 本規則依電業法第二十五條第三項規定訂定之。 ● 有關裝設、操作，或維護電業之供電線路、通訊線路及相關設備時之實務安全防護。
消防法	<ul style="list-style-type: none"> ● 有關場區內消防之相關項目 ● 相關法規，如：消防安全設備設置標準、公共危險物品及可燃性高壓氣體製造儲存處理場所設置標準暨安全管理辦法...等。
建築法	<ul style="list-style-type: none"> ● 有關場區內建築物、建築物設備建造之相關項目。 ● 建築技術規則總則編、建築技術規則建築構造編、建築技術規則建築設備編、建築技術規則建築設計施工編等相關規範、建築物耐震設計規範及解說、鋼骨鋼筋混凝土構造設計規範及解說、基礎構造設計規範、結構混凝土工程設計規範及解說、結構混凝土工程施工規範及解說...等。

《氣候變遷因應法》自 2023 年 2 月 15 日公布施行，此法為我國氣候風險治理的重大法律，環境部於 8 月 29 日公告碳費徵收相關三項子法：碳費收費辦法、自主減量計畫管理辦法、碳費徵收對象溫室氣體減量指定目標，碳費制度正式上路。碳費徵收對象必須依照三項子法，提出符合減量指定目標的自主減量計畫，才能適用優惠費率。費率審議會於 10 月 7 日完成審議，包括：一般費率及二種優惠費率；經會議審議後，一般費率每公噸 300 元，若企業選擇最高標準的自主減量計畫，優惠費率 A（行業別指定削減率）每公噸為 50 元，優惠費率 B（技術標準指定削減率）則為每公噸 100 元，114 年 1 月 1 日生效。根據環境部規畫，初步徵收對象以年排放量 2.5 萬公噸以上的電力業、燃氣供應業及製造業為主，約 500 家工廠，明年 5 月採試申報，115 年正式開始收費。而為鼓勵企業自行減碳，只要企業提出「自主減量計畫」並經環境部審核通過後，即可申請優惠費率。

(a) 碳費收費辦法

- 收費對象：溫室氣體年排放量達 2.5 萬公噸 CO₂e 以上之電力、燃氣供應業及製造業。
- 繳費時程：自費率公告生效次年起，於每年 5 月底前，將前一年度全年排放量，依公告費率繳費。（倘費率 114 年 1 月 1 日公告生效，115 年 5 月要繳交 114 年全年排放量之碳費）

碳封存技術社會溝通平臺建置先期規劃

- 碳費計算：碳費 = 收費排放量 × 徵收費率
 - 過渡配套機制：收費排放量 = (年排放量 - K 值) × 排放量調整係數值
1. 屬高碳洩漏風險行業（參考國際評估方法，考量貿易密集度及排放密集度，且提出自主減量計畫經審查核定），初期排放量調整係數為 0.2；未來第二期及第三期分別為 0.4 及 0.6。
 2. 非屬高碳洩漏風險行業，年排放量扣除碳費起徵門檻 K 值。（2.5 萬公噸，未來分階段調整）
 3. 使用減量額度：國內減量額度可扣減收費排放量上限 10%；國外減量額度應經環境部認可，且非高碳洩漏行業才可使用，上限 5%。

(b) 碳費徵收對象溫室氣體減量指定目標

依據「事業應盤查登錄及查驗溫室氣體排放量之排放源」之 111 年盤查結果，推估收費對象約 500 廠（281 家公司，其中有 141 家上市櫃公司）。收費對象之溫室氣體排放量約 155 百萬公噸二氧化碳當量，約占全國總排放量 54%。以 2030 年為目標年，二種指定削減率適用不同優惠費率：

- 行業別指定削減率（表 2.1.4）：以 110 年為基準年，此目標參酌國際間科學基礎減量目標（SBT）訂定，適用優惠費率 A。
- 技術標竿指定削減率（表 2.1.5）：以 107~111 年為基準年，考量各排放源排放型式，包括燃料種類、製程、電力使用等訂定減量目標，適用優惠費率 B。

表 2.1.4 行業別指定削減率（碳費徵收對象溫室氣體減量指定目標附表一）

行業別	定義	削減率
鋼鐵業	限於一貫煉鋼鋼胚生產、電弧爐碳鋼鋼胚及不銹鋼鋼胚生產之行業	目標年溫室氣體排放量削減率相對基準年應達百分之二十五點二。
水泥業	從事水泥熟料製造之行業	目標年溫室氣體排放量削減率相對基準年應達百分之二十二點三。
其他行業別	目標年溫室氣體排放量削減率相對基準年應達百分之四十二。	
備 註		
一、目標年為中華民國一百十九年。		
二、基準年為中華民國一百十年。		

表 2.1.5 技術標竿指定削減率（碳費徵收對象溫室氣體減量指定目標附表二）

排放型式		削減率
直接排放：固定燃燒排放源		$[(\text{基準年燃料單位熱值排放量} - \text{各行業目標年燃料排放標竿}) \div \text{基準年燃料單位熱值排放量}] \times 100\%$ 。
直接排放： 製程	含氟氣體 (HFCs、PFCs、SF ₆) 及 NF ₃ 去除效率	中華民國九十四年後設立之排放源，目標年全廠平均去除率 95%。 中華民國九十四年以前設立之排放源，目標年全廠平均去除率 85%。
	氧化亞氮去除效率	目標年全廠平均去除率 50%。
	一貫煉鋼鋼胚生產程序	目標年排放量削減率應達 13%。
	水泥熟料生產程序	目標年排放量削減率應達 7%。
	其他製程	目標年排放量削減率應達 3%。
使用電力間接排放		目標年排放量削減率應達 6%。
備 註		
<p>一、事業應依本附表所列排放型式之削減率加總計算其目標年溫室氣體年排放量，納入自主減量計畫依實際需要選擇採行之減量措施。</p> <p>二、燃料單位熱值排放量、含氟氣體去除率與氧化亞氮去除率因受活動數據變化影響，其基準年之活動數據、排放量及去除率，應採用加權平均計算。</p> <p>三、「含氟氣體」及「氧化亞氮」之削減率計算公式： (一) 削減率(%)=[(目標年全廠平均去除率－基準年全廠平均去除率)÷(1－基準年全廠平均去除率)]×100%。 (二) 基準年全廠平均去除率(%)=[(∑基準年全廠使用量 i×GWPI－∑基準年製程使用及設備處理後溫室氣體排放量)÷(∑基準年全廠使用量 i×GWPI)]×100%。</p> <p>四、固定燃燒排放源基準年燃料單位熱值排放量優於各行業目標年燃料排放標竿，與含氟氣體、氧化亞氮基準年全廠平均去除率優於目標年全廠平均去除率者，其削減率以零計算。</p> <p>五、使用電力間接排放量計算，其自主減量計畫執行年度及目標年使用非再生能源之電力，應以基準年使用非再生能源電力之排放係數加權平均方式計算。</p> <p>六、以減少外購蒸汽之能源間接排放作為減量措施者，其基準年及目標年之溫室氣體排放量計算，應納入外購蒸汽之能源間接排放。</p>		

表 2.1.6 各行業目標年燃料排放標竿(碳費徵收對象溫室氣體減量指定目標附表三)

行業別	定義	燃料單位熱值排放量 (gCO ₂ e/Kcal)
鋼鐵業	從事鋼鐵冶鍊、軋延及擠型之行業。	0.235
水泥業	從事水泥熟料製造之行業。	0.395
煉油及石化業	以裂解、蒸餾等技術將原油分離出燃料氣、汽油、輕油(石油腦)、煤油、柴油等石油精煉產品或從事化學原材料、塑膠及合成橡膠原料、人造纖維製造之行業。	0.360
紡織業	從事紡織之行業，如紡紗、織布、染整及紡織品製造等。	0.336
造紙業	從事紙漿、紙張、紙板及其製品製造之行業。	0.349
其他行業別		0.235

(c) 自主減量計畫管理辦法

碳費徵收對象因轉換低碳燃料、採行負排放技術、提升能源效率、使用再生能源或製程改善等措施，能有效減少溫室氣體排放量並達指定目標者，得提出自主減量計畫申請核定優惠費率。每年4月30日前提交前一年度執行進度報告送環境部審核，並規定限期改善，廢止之情形。經查核且未達指定目標之年度改為一般費率。「溫室氣體減量及管理法」修正為「氣候變遷因應法」於一百十二年二月十五日公布施行，為鼓勵碳費徵收對象加速並大幅採行溫室氣體減量措施，依本法第二十九條第一項規定碳費徵收對象因轉換低碳燃料、採行負排放技術、提升能源效率、使用再生能源或製程改善等溫室氣體減量措施，能有效減少溫室氣體排放量並達中央主管機關指定目標者，得提出自主減量計畫向中央主管機關申請核定優惠費率。「自主減量計畫管理辦法」，其與碳封存相關條文如表 2.5 所示之第四條第四款與第五款。

表 2.1.7 自主減量計畫管理辦法與碳封存相關條文

條文	說明
<p>第四條 前條第三款第七目之減量措施方式如下：</p> <p>一、……</p> <p>二、……</p> <p>三、……</p> <p>四、製程改善：採行原物料替代、設備汰舊換新或拆除、回收或減少蒸汽使用、二氧化碳捕捉與封存（Carbon Capture and Storage, CCS）、二氧化碳捕捉與再利用（Carbon Capture and Utilization, CCU）、含氟氣體、氧化亞氮等溫室氣體之去除或其他可有效減少溫室氣體排放之措施。</p> <p>五、負排放技術：採行直接將大氣中二氧化碳捕捉與封存（Direct Air Capture with Carbon Storage, DACCS）、生質能與碳捕捉及封存（Bioenergy with Carbon Capture and Storage, BECCS）或其他可自大氣中移除溫室氣體之技術。</p>	<p>本條之減量措施為本法第二十九條第一項所指可採行能有效減少溫室氣體排放量之減量措施種類與項目。</p>

環境部中相關權責管制單位為氣候變遷署，茲負責相關子法擬定、碳封存許可審查等業務，此外國家環境研究院為環境部轄下之幕僚單位，協助審查與監管指引方針之擬訂，相關組織架構可參考圖 2.1.3。

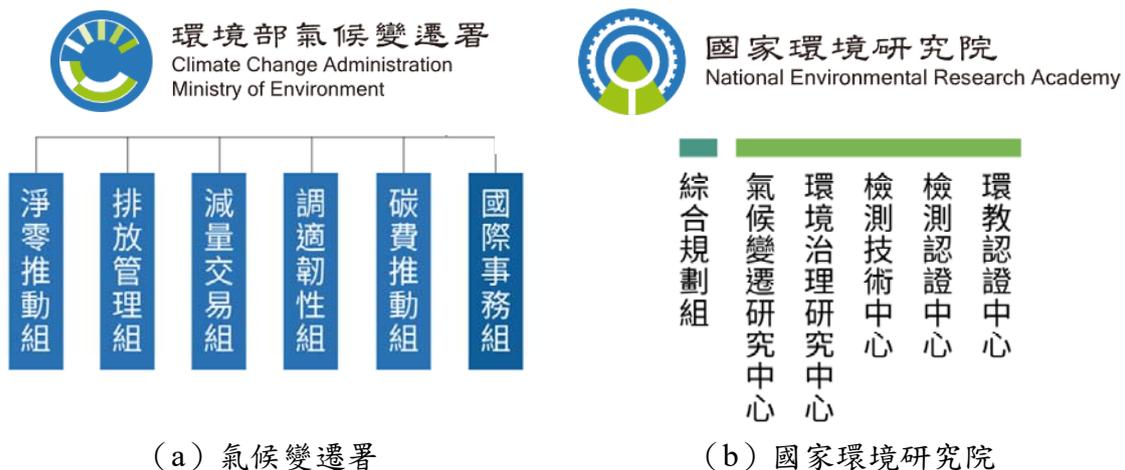


圖 2.1.3 環境部相關單位執掌

(3) IEA CCUS 手冊

由於國內相關法規訂定可能參考國際相關法規與框架，因此蒐集國際相關制度動態。IEA CCUS 手冊(IEA, 2022)確立了 CCUS 的 25 個優先法律和監管問題，大致分為八個類別：

- A. 定義監管範圍：為二氧化碳的分類和所有權設定法律參數的問題。
- 二氧化碳的分類與純度：二氧化碳的相關分類和特徵，例如作為廢棄物、危險廢棄物、污染物、危險物品或商品。還有二氧化碳流的定性或定量要求或標準。
 - 二氧化碳的所有權與產權：定義 CCUS 價值鏈和 CCUS 專案生命週期內的二氧化碳所有權。
- B. 環境審查和許可：要求營運商透過詳細的評估以及數據收集和報告來盡量減少對環境和公共健康的影響。
- 環境影響評估 (EIA, Environmental Impact Assessment)：適用的環境保護和 EIA 要求，包括二氧化碳封存的具體考慮因素。
 - 許可和授權：二氧化碳注入和封存許可證的申請和頒發流程、允許和開始注入的任何先決條件，以及任何審查、修改/取消和放棄機制。
 - 公眾參與和諮詢：公眾參與 CCUS 活動的權利、義務和機制，包括公佈提案和許可登記冊、審查和回應流程、考慮意見的義務以及法律或行政質疑的途徑。
- C. 支持先行項目：減少監管障礙並為先行項目和先行項目提供確定性的方法。
- 一次立法：在缺乏現有綜合框架的情況下，針對特定 CCUS 計畫制定專門立法。
 - 優惠方式和項目：優先開發權，包括二氧化碳封存勘探和開發，以及被確定具有戰略利益的項目的特別行政和許可安排。
- D. 確保安全可靠的封存：涵蓋從資源評估到場址關閉過程的整個儲存開發過程的問題。這包括對營運商的嚴格監控和報告要求以及財務安全義務，包括維護二氧化碳封存場地的任何要求。
- 封存資源評估：監管確定適合開發的二氧化碳封存資源的流程，包括區域篩選、場址篩選、選址、初步表徵和詳細表徵。
 - 孔隙空間的所有權：地下地質合法所有權的影響，包括二氧化碳封存的孔隙

空間，在不同地區有所不同。

- 量測、監測及驗證（MMV, Measurement, Monitoring and Verification）計畫：監測和報告有關建立基準和識別違規行為的義務，以及對資料進行獨立驗證的任何要求。
 - 封存場址檢查：檢查規定，包括授權檢查員的機制、檢查員的存取權限以及運營商允許存取和共享資訊的義務。
 - 營運負債和財務安全：對於任何關閉後許可放棄或責任轉移之前發生的損害或損失，以及任何監管機構介入和成本回收機制，責任分配和財務擔保義務。
 - 場址關閉流程：場地退役和關閉的流程，包括關閉前需要滿足的條件、堵井義務、拆除地面基礎設施和監測封存的二氧化碳、釋放任何財務安全的機制和合規認證機制。
- E. 解決長期封存責任：封存場址關閉後運營商和相關當局的要求和責任的問題。
- 場址關閉後的長期責任：將關閉的二氧化碳封存場和/或注入的二氧化碳的責任轉移到國家或相關當局的安排（如果有），包括任何先決條件、轉移之前必須經過的任何關閉後期限以及任何責任由運營商保留。
 - 長期場址管理的財務保證：要求業者在任何場地關閉後為二氧化碳封存場地的長期場地管理費用提供資金的機制。
- F. 國際和跨境問題：二氧化碳跨境運輸和封存可能產生的監管問題。
- 規範跨境二氧化碳運輸：捕獲的二氧化碳可以跨越一個或多個司法管轄區，這可能會觸發某些國家或國際監管要求。
 - 遵守倫敦議定書：《倫敦議定書》和《2019 年臨時適用 2009 年 CCS 出口修正案》規定的二氧化碳跨境運輸的義務和要求。
 - 跨國界壓力前沿的相互作用：地下地質的相互作用，特別是大型二氧化碳封存地層中壓力鋒面的相互作用，發生在管轄範圍內。
 - 多個框架之間的重疊：多個監管框架之間可能存在重疊，例如美國境外的專案根據具有特定監管要求的加州低碳燃料標準獲得認可。
- G. 推動 CCUS 樞紐(Hubs): 啟用共享二氧化碳運輸和封存基礎設施的注意事項。
- 使用共享運輸基礎設施：允許第三方進入二氧化碳運輸基礎設施的義務或安排，包括拒絕進入的任何權利，以及相關的補償和爭議解決機制。
 - 推動共享儲存基礎設施：允許第三方存取封存場址的義務或安排，包括拒絕

存取的任何權利，以及相關的補償和爭議解決機制。

(4) 美國環保署地下注入管制計畫

美國環保署 (EPA) 根據二氧化碳地質封存井制定地下注入管制 (UIC) 計畫，並設置相關法規稱為第 VI 類鑽井規則。該法規建立了新的鑽井類別 (第 VI 類，如圖 2.1.4)，並為第 VI 類鑽井設定了相關技術標準，以保護地下飲用水源 (USDW, Underground Sources of Drinking Water)。

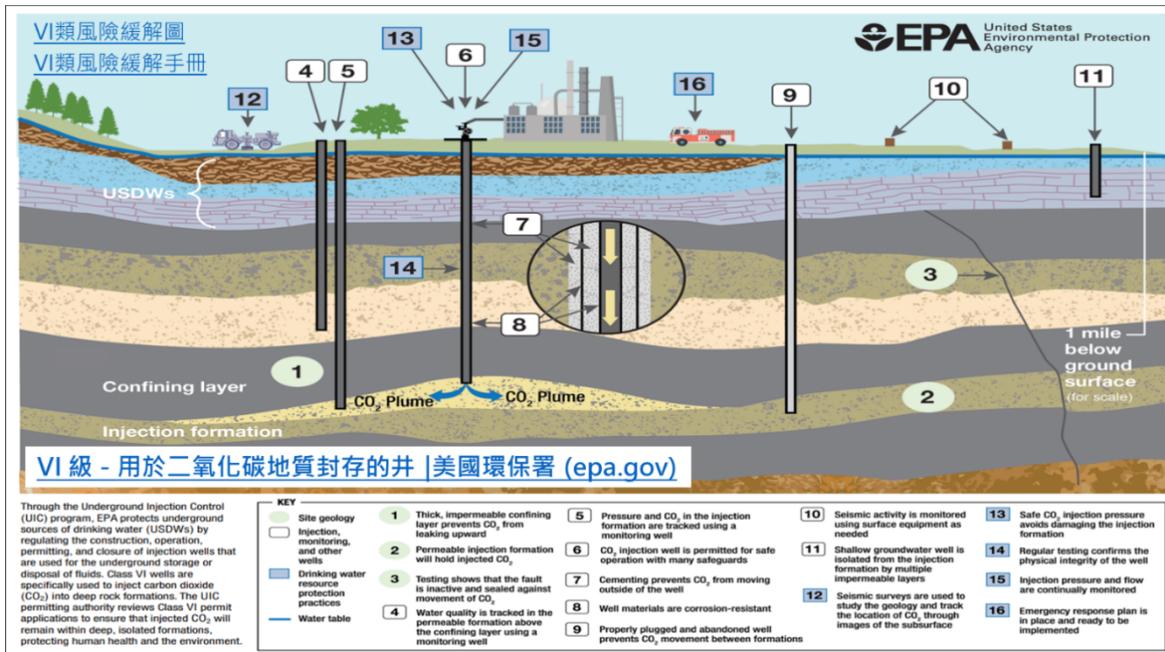


圖 2.1.4 EPA 第 VI 類鑽井

A. 監管責任及內容

第 VI 類鑽井規則涵蓋了第 VI 類鑽井專案的許可、選址、施工、操作、監控和關場的要求，UIC 監管計畫須負責確保第 VI 類鑽井的安全性，以保護 USDW 免受危害。在第 VI 類鑽井專案的執行期間，許可核准機關有責任確保以下內容：

- 應蒐集並評估許可取得前階段 (pre-permitting phase)、施工前階段 (pre-construction phase) 和營運前階段 (pre-operation phase) 各階段有關場址和執行項目之相關資訊，以確保 USDW 不受第 VI 類鑽井的選址和建造影響。

- b. 於注入階段 (injection phase)，確保第 VI 類鑽井專案按計畫承諾執行，並透過試驗和監測驗證計畫安全性符合規定，確保 USDW 不受影響。
- c. 應持續進行注入後監測工作，直到提供 USDW 無危害佐證資料並獲得 UIC 監管單位批准、注入井和所有監測井完成封井並關閉場址等工作。

為了達成上述目標工作，UIC 計畫監管之項目包括以下內容：

- a. 審查第 VI 類鑽井許可申請
(reviewing Class VI permit applications)
- b. 核發許可證
(writing and issuing permits)
- c. 注入計畫執行授權
(authorizing injection)
- d. 記錄決策內容
(documenting decision-making)
- e. 審查試驗和監測數據、審查 AoR 重新評估的結果、以及其他報告
(reviewing testing and monitoring data, the results of Area of Review (AoR) reevaluations, and other reports)
- f. 應對緊急情況或違規行為
(responding to emergency situations or violations)
- g. 處理遵守法規問題
(addressing compliance issues)
- h. 授權和批准關閉場所
(authorizing and approving site closure)
- i. 提供 EPA 有關其監督責任的資訊
(providing information about their oversight responsibilities to the EPA)

UIC 監管計畫提供第 VI 類鑽井專案執行時各階段主要工作如圖 2.1.5 所示，從許可申請、施工前、營運前、注入到注入後階段。有關第 VI 類鑽井專案計畫各階段執行內容說明如下：

- 許可取得前階段 (pre-permitting phase)

申請人準備第 VI 類鑽井專案計畫執行許可證申請，UIC 監管計畫建議應與潛在申請人進行溝通，以確保能執行所有必需的項目，並且讓申請人了解必須取得之相關批准或許可證。

- 施工前階段（pre-construction phase）

提供審查有關許可證申請中第 VI 類鑽井專案計畫執行項目之建議，包含地質、建模、水文地質、工程和財務資訊等，以確認場址適宜性並降低執行項目之不確定性，核發許可可以保護 USDW 不受影響，並允許計畫井之建井作業。

- 營運前階段（pre-operation phase）

第 VI 類鑽井專案計畫營運商提交營運前之試運轉測試結果，並更新場址地質資料、AoR 評估結果、專案計畫內容以及有關計畫井施工和測試之相關資料。UIC 監管計畫提供了審查各式資料之建議，以確保在許可證申請審查過程中發現的任何不確定性問題均已被解決、驗證場地適用性、確認計畫井建造符合申請內容，以決定是否核准注入計畫執行。

- 注入階段（injection phase）

第 VI 類鑽井專案計畫營運商進行注入活動、執行試驗和監測，並按照第 VI 類鑽井許可證和專案計畫內容重新評估 AoR。UIC 監管計畫提供了審查各式資料之建議，以確認計畫井和專案執行符合許可規定，二氧化碳碳流移棲和壓力前緣符合預期，並且 USDW 不會受到威脅。

- 注入後階段（post-injection phase）

第 VI 類鑽井專案計畫營運商將注入井封井，監測碳流和壓力前沿，並在證明 USDW 不存在危險後關閉場址。UIC 監管計畫提供審查營運商所提交資料之建議，以驗證該項目繼續保護 USDW，並且在場地關閉後，注入井和監測井不會影響 USDW。

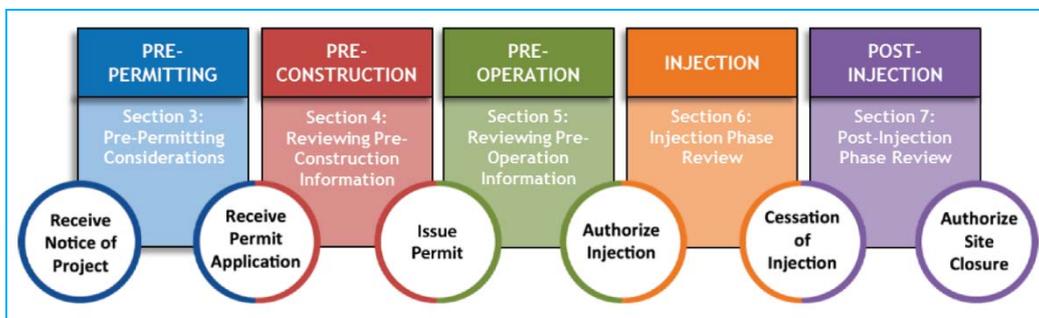


圖 2.1.5 第 VI 類鑽井專案計畫各階段主要工作

B. 第 VI 類鑽井專案計畫之溝通

大型開發計畫執行時與各利益相關者的主動溝通非常重要，二氧化碳地質封存計畫具有潛在的高度公眾興趣，以及複雜執行界面之整合協調工作。UIC 監管單位在與第 VI 類鑽井許可證申請人（營運商）、公眾和感興趣的利害關係人以及共同監管機構的溝通中扮演核心角色（如圖 2.1.6）。



圖 2.1.6 第 VI 類鑽井專案計畫溝通

二氧化碳地質封存計畫之獨特性和複雜性凸顯了與公眾和利害關係人就專案進行溝通的重要性，在第 VI 類鑽井專案計畫的整個過程中，民眾溝通和對外宣導顯得格外重要。各階段可能需要進行公眾溝通之情況說明如下：

- 在提交許可證申請之前，EPA 建議 UIC 監管單位和許可申請人應儘早向公眾提供有關專案計畫之內容和許可申請的資訊。對外宣導活動的目標應包括公眾、鄰近居民和土地所有者。
- 在第 VI 類鑽井許可申請之公眾評議期間，許可申請程序依規定需要公告。除了提供許可申請草案副本、概況介紹及基礎資料外，UIC 監管計畫還可能進行公眾宣導或需要回答有關該項目的問題。例如，公眾可能對場地地質、注入技術以及第 VI 類鑽井要求或特定許可條件如何保護 USDW 免受危害感興趣。如果申請人尋求注入深度豁免或擴大含水層豁免的面積範圍，則需要另外針對這

類申請額外辦理公告。

- 於計畫井建井階段時，營運商於取得許可證後至開始注入之間的時間可能會有所不同，具體取決於鑽設計畫井和執行運營前試運轉，以及監管單位評估更新資料所需的時間。提供計畫井施工即時更新資訊，以及營運商與許可機構之間的互動，可以讓公眾了解情況並解決專案現場開發過程中可能出現的問題。此外，如果在審查更新資料後需要修改許可申請內容或任何專案計畫內容，則須依規定公告修訂後的許可申請草案。在此期間，公眾可能會對修改原因或許可申請修改內容產生疑問。

- 於注入階段時，EPA 建議在注入作業期間定期更新專案執行情形，增加公眾參與程度。在許可申請內容修改期間、違規情形發生或緊急情況下，可能需要與公眾再次進行溝通。相關具體作法可能採取以下形式：

➤ **定期更新專案執行情形**

定期更新專案執行情形可以向公眾和利益相關者保證專案正按照計畫內容執行，監控和監督程序持續進行，並且 USDW 不會受到威脅。定期更新內容可以提供有關碳流位置、水質監測、計畫井試驗的最新結果、或各式審查和檢查的最新結果資訊。

➤ **許可申請修改通知**

如果需要修改許可申請內容(例如因為 AoR 重新評估後修改專案計畫內容)，公眾可能會對修改的原因產生疑問。UIC 監管計畫應提供有關 AoR 重新評估過程及結果等相關資料、或是促使專案計畫或許可進行修訂之因素，並應公告修訂內容。

➤ **違規或緊急事件回應之溝通**

計畫執行過程中發生任何事件導致違規或需要緊急回應，EPA 建議 UIC 監管單位與營運商協調，盡快向公眾提供有關緊急事件處理相關資訊。

- 於注入結束後階段，EPA 建議 UIC 監管計畫在計畫井封井或場址關閉後通知公眾，以提醒相關各方。另外，UIC 監管計畫應提供有關注入井封井程序、證明不存在相關危險風險，或授權營運商根據規定執行場址關閉所必須滿足的條件等資訊。

上述提到各階段可能需要進行公眾溝通之情況，其可選擇的民眾溝通和對外宣導工具包含直接溝通、報紙和社交媒體，例如部落格、社交網路、網路廣播、APP 等。

(5) 民眾觀感與接受度

國內制定減碳政策時，應增加民眾參與程度，於政策形成的過程中，同時讓民眾瞭解議題之背景脈絡與政策之利弊得失，以降低未來實行時可能受到民眾抗爭之阻力。台灣經濟研究院與財團法人中興工程顧問社合作之「二氧化碳地質封存關鍵技術建立與應用研究」一案（財團法人中興工程顧問社，2013），民國 101 年曾針對民眾對於「二氧化碳再利用與封存」此項能源技術的支持程度，表示支持的民眾占 75.5%，有 14.8% 的民眾對於該項能源技術表示不支持，而有 9.8% 的受訪者表示沒意見。顯示七成六的民眾對於「二氧化碳再利用與封存」此項能源技術態度偏向支持，僅有一成五的民眾表示不支持，整體而言，民眾對「二氧化碳再利用與封存技術」此項能源技術的支持度偏高（參考圖 2.1.7）。

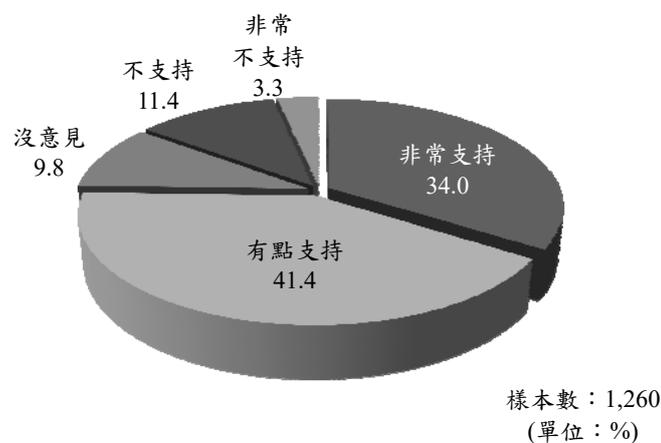


圖 2.1.7 民眾對於「二氧化碳再利用與封存」的支持程度

圖 2.1.8 顯示連續調查資料，民眾對「二氧化碳再利用與封存技術」的支持程度無顯著差異。從歷年支持程度分布情形來看，歷年皆有七成五以上的民眾支持，顯示多數民眾認同「二氧化碳再利用與封存技術」此項減碳技術。

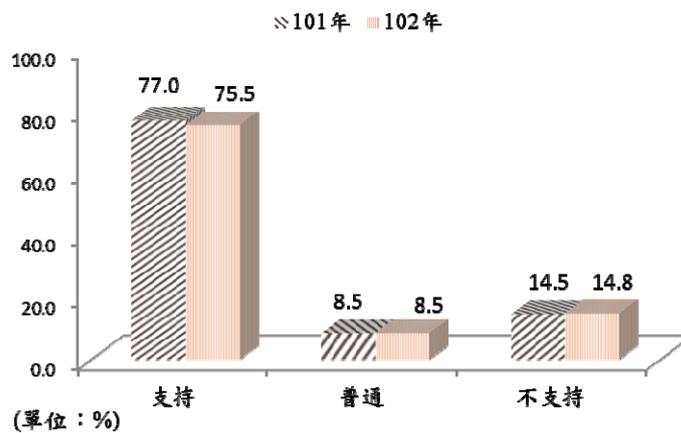


圖 2.1.8 連續調查民眾對於「二氧化碳再利用與封存」的支持程度

2. 國際碳封存案例蒐集與研析

針對國際二氧化碳封存計畫 10 萬噸以下等級灌注規模之實場案例蒐集部分，本計畫針對日本 Nagaoka 先導試驗計畫（10,400 噸）、德國 Ketzin 試驗計畫（67,271 噸）及澳洲 Otway 試驗計畫（65,000 萬噸）三個試驗計畫進行案例蒐集及研析。另蒐集國際碳封存計畫風險事件發生案例，並探討事件發生後有關環境影響議題之處理對策。

（1）日本 Nagaoka 先導試驗計畫

日本政府為配合國際推動「地球再生計畫」，設立了「財團法人地球環境產業技術研究機構（RITE, Research Institute of Innovative Technology for the Earth）」，進行相關議題的研究與推動。此後 RITE 長期接受日本經濟產業省的委託與經費補助，主導進行了一系列與「碳捕存」相關技術的研發，以期早日將此技術於日本境內進行商業化運轉，協助政府達成減緩暖化的政策目標。「二氧化碳地質封存」，係為 RITE 所贊助推動的主題（1）所屬的子項目計畫，相關的研究計畫內容主要包括了：（1）先導場址（Nagaoka）實證試驗與監測、（2）場址基礎的研究、（3）封存二氧化碳地中擴散行為的預測方法的高精度化發展、（4）候選場址地點調查、（5）日本境內貯留層潛能調查、（6）封存效果評估、（7）相關法規調查研制、以及（8）安全性評估方法調查研制等。

Nagaoka 先導試驗實證計畫場址位於日本新潟縣境內長岡市南方的岩野原，大約處於信濃川支流、涉海川的左岸，如圖 2.1.9。該場址係租用了一處日本帝國

石油公司所屬的舊天然氣田所在地點。在地下 4,000 公尺以下，有一綠色凝灰岩類地層，為一產天然氣層。以往地質資料顯示 Nagaoka 場址具封閉的背斜構造，非常適合作為二氧化碳封存場址。試驗地點位於背斜構造的南翼，預定作為地質封存點的目標層（貯留層）的岩層，屬沉積於更新世早期「灰爪層」內的厚層砂岩，其層厚約達 60 公尺，深度約 1,100 公尺，估計垂直地壓約 18.6 MPa。該處地層位態傾向為西北西，傾角約為 15 度。貯留層上方的不透水蓋層岩石 (Cap Rock) 厚度約為 140 公尺，地質上屬「灰爪層」上方「魚沼層群」下部的頁岩。作為二氧化碳注入貯留層 (Aquifer Rock) 的含水厚層砂岩內可再依岩相的不同，細分為五個區段，由上而下分別簡稱為「Zone-1」到「Zone-5」，其中層厚約 12 公尺的「Zone-2」區段的水平向滲透性 (Horizontal Permeability) 經評估為最佳，因此選擇作為先導試驗二氧化碳目標的貯留層 (RITE 長岡 CO₂ 壓入實証試驗官方網站)。

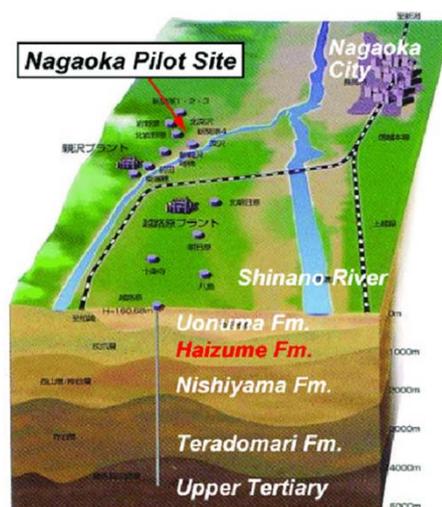


圖 2.1.9 日本 Nagaoka 計畫場址及地層結構示意圖

Nagaoka 先導封存場址共佈置四口深鑽井，包括一口深度大約 1,110 m 的注入井 (CO₂-1)，與三口深度大約介於 1,270~1,322 公尺不等的監測井 (CO₂-2、CO₂-3、CO₂-4)，如圖 2.1.10。本計畫之注儲設施組成包括：貯槽、增壓泵、主加壓泵、主加熱器、加壓蒸發器、水電供應設施、監控與觀測作業室等。主要監測項目包括 (1) 封存相關溫度與壓力測定、(2) 物理特性井測 (Well Logging)、(3) 跨孔震波斷層掃描 (Geo-tomography) 等。透過 Nagaoka 封存先導計畫二氧化碳

碳封存技術社會溝通平臺建置先期規劃

注入封存試驗所得到的成果，對於二氧化碳注入於地下岩層的操作方式、操作安全性；以及二氧化碳注入於地底後移棲的方式、時空的分布，均可得到比較清晰的輪廓。先導計畫試驗的成功，其更大的意義在於，試驗同時也實際驗證了在日本境內施行「碳捕存」概念的技術可行性。Nagaoka 二氧化碳注入封存實證試驗，成功建立了日本國內自主二氧化碳注入的操作經驗與移動擴散與監測能力，雖然實際注入量僅有 10,400 噸二氧化碳左右，但成果應已足以說服大眾接受「二氧化碳地質封存」的技術安全性。

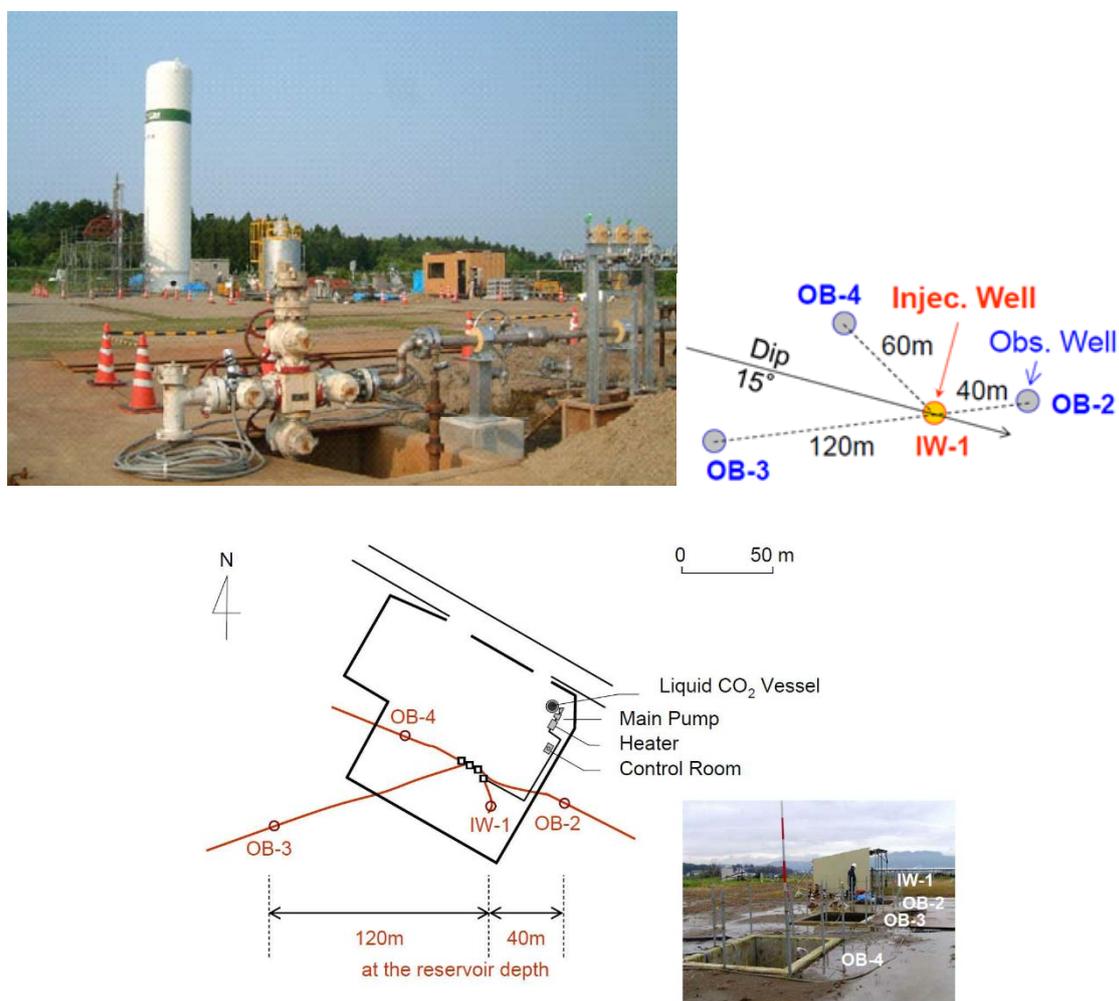


圖 2.1.10 日本 Nagaoka 二氧化碳封存先導試驗場址

該場址於 2003 年 7 月至 2005 年 1 月間經由氣罐車裝載由氨合成法生產純度 99.9% 的二氧化碳以進行灌注作業，共灌注約 10,400 噸二氧化碳，其灌注歷程圖詳見圖 2.1.11 所示，在灌注最初的 9 個月中注射率為 20 ton/day，隨後逐漸增加至 40 ton/day，井底壓力由灌注時期呈現不穩定狀態，最後在終止灌注後又回到初始狀態條件下。在二氧化碳貯留層深度區段，每個觀測井套管使用玻璃纖維增強塑料 (FRP, Fiber-reinforced plastic) 代替鋼材，使之能夠進行井測試驗，並在注入二氧化碳流體的過程中隨時監測井中溫度、壓力及實施井測、跨孔震測成像及區段地層水樣抽取等。在井內壓力監測部分，主井最深安置壓力監測計於 1,072 公尺深處，並往上每間格 20~30 公尺進行布置，並於 4 號監測井深度為 1,091 公尺的外側設置一處壓力計，藉以量測在二氧化碳灌注後地層壓力的改變。在二氧化碳注入前，主井所量測到井底壓力為 10.7 MPa，同一個時間於 4 號監測井所量測到的壓力為 10.8 MPa，由圖 2.1.10 所示，在二氧化碳灌注期間由監測得知其壓力同步反應的情形，在二氧化碳灌注的過程中，灌注井的壓力一直高於觀測井的壓力，其中在灌注終止前，主井所觀測的壓力為 12.4 MPa，而觀測井觀測到的壓力值為 11.9 MPa。隨後在停止灌注後 5 天，主井的壓力降為 11.8 MPa，而 4 號觀測井的壓力此時約與主井相同。在停止灌注的第一年，主井的壓力在下降 1 MPa 後趨於穩定(主井 10.8 MPa 及觀測井 10.9 MPa)。而在過去的 2 年監測結果中發現，井內壓力洩降的幅度逐漸降低，其壓力遞減率每年小於 0.04 MPa。在後灌注階段，地層壓力的回復過程約是呈現兩個階段進行。

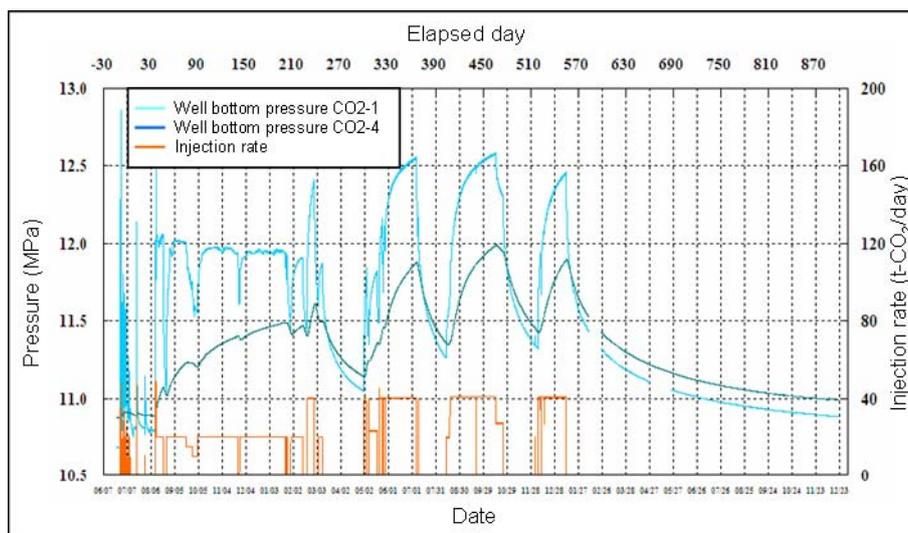


圖 2.1.11 日本 Nagaoka 先導試驗場址灌注歷時曲線圖

在井測結果部分，使用多種井測工具以進行灌注場址的測試，如圖 2.1.12。例如利用中子測定儀來檢測岩體的孔隙率，其原理是利用檢測地層孔隙中水的氫同位素含量，當含飽和地下水地層中孔隙率增加時，相同的孔隙中水所佔的比例也相對增加，因此也反映出氫同位素含量的增加。當二氧化碳逐漸取代地層水後，其中子所檢測出來的孔隙度將逐漸減少。在 Nagaoka 先導試驗場址中，假設為地層水完全飽和於地層中每一個孔隙，所以經由中子儀檢測出來的資料，其數據比例上的變化基本上是相對應其二氧化碳的飽和度。此外利用聲波的傳遞的特性，也就是 P 波及 S 波在岩體中傳播速度變化的情形，其中 P 波於水中及二氧化碳中波速的敏感度變化差異甚大。從試驗結果顯示，P 波速急遽的減低主要起因於地層孔隙中少量二氧化碳取代地層水所產生的結果。另使用雙感應電阻率檢測儀探測灌注入地層二氧化碳團塊的變化情形，當地層中孔隙水逐漸被二氧化碳團塊取代時，所量測到的電阻值也逐步地增加。

在二氧化碳灌注階段，注入過剩的壓力將驅使二氧化碳團塊的擴散，少量濕潤液態的二氧化碳將取代在岩層孔隙中的孔隙水，稱之為排退作用 (drainage-like process)。此作用在終止二氧化碳灌注後，二氧化碳團塊在上浮力的導引下，地層水逐步取代團塊末端部分岩體孔隙中之二氧化碳，這稱之為汲取作用 (imbibition-like process)。而在汲取階段，少量的二氧化碳因而殘留於岩層孔隙中無法排出，此時殘存二氧化碳的溶解度將維持一定的濃度，將無法恢復至灌注前地層水的飽和度。持續性的監測計畫 (如表 2.1.8) 將有助於提供二氧化碳團塊於地層中位置、移棲或殘餘封閉特性的確認 (如圖 2.1.13)。利用電井測技術所測得地層中高電阻帶的部分，也就是二氧化碳團塊貯留地層，如圖 2.1.14 所示，相對於地電阻背景值，其地電阻正值與負值分布凸顯出一二氧化碳團塊分布的區域。隨著時間的增加，地電阻正向訊號的厚度變得愈來愈薄，負向訊號愈來愈厚。這顯示在貯留層內二氧化碳團塊溶解度有提高的跡象。

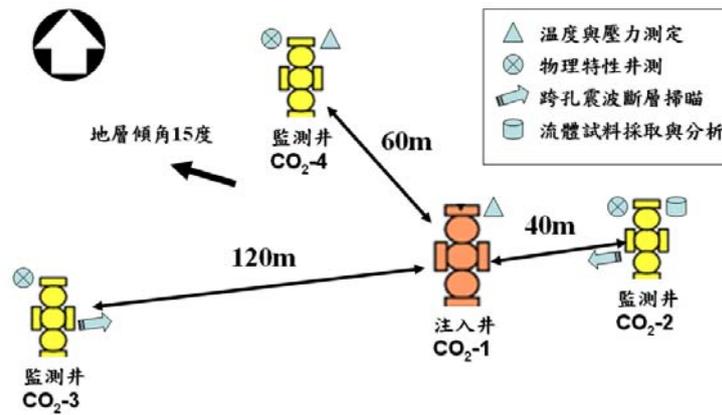


圖 2.1.12 日本 Nagaoka 先導試驗場址井下監測設施佈設示意圖

表 2.1.8 日本 Nagaoka 先導封存場址監測頻率

監測類型	監測技術	準備期			灌注期(2003.7 ~ 2005.1)			灌注後監測					
		2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
操作	(IW-1井頭&井底、OB-4井底)溫度及壓力				連續								
	IW-1 CO2灌注速率				連續								
井測	中子(Neutron logging)、音波(Sonic logging)、電感(Induction logging)				11次	12次	5次	4次	5次		1次		1次
地球物理	(OB-2與OB-3間)跨井震測				基線1次	3次	2次		1次				
地球化學	(OB-2)地層流體取樣分析			1次				1次	1次				1次

碳封存技術社會溝通平臺建置先期規劃

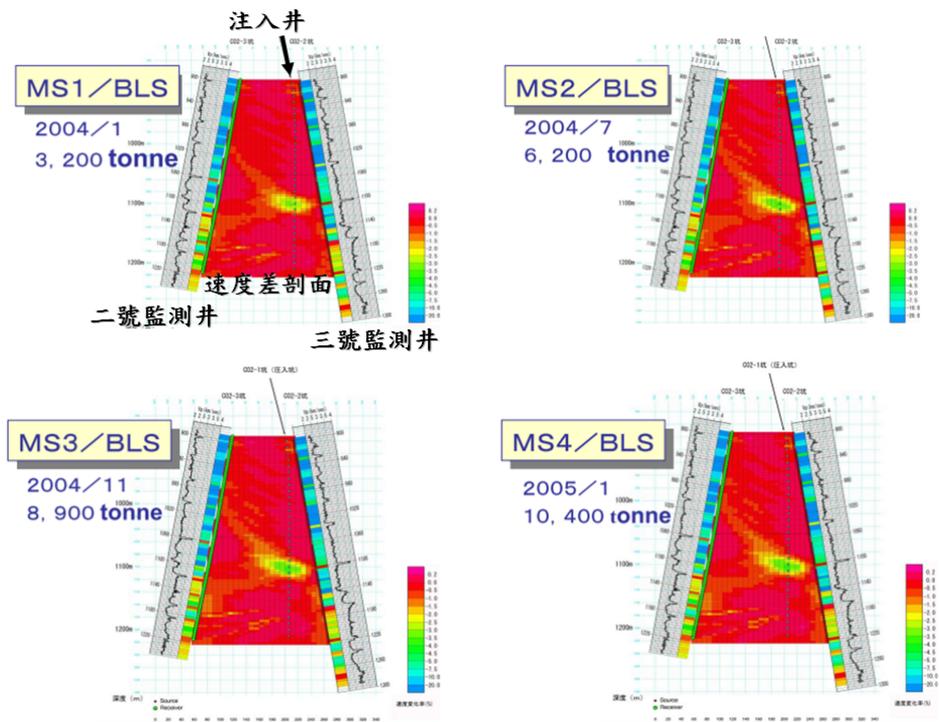


圖 2.1.13 日本 Nagaoka 先導封存場址跨孔震測監測跨孔剖面上注入碳流位置

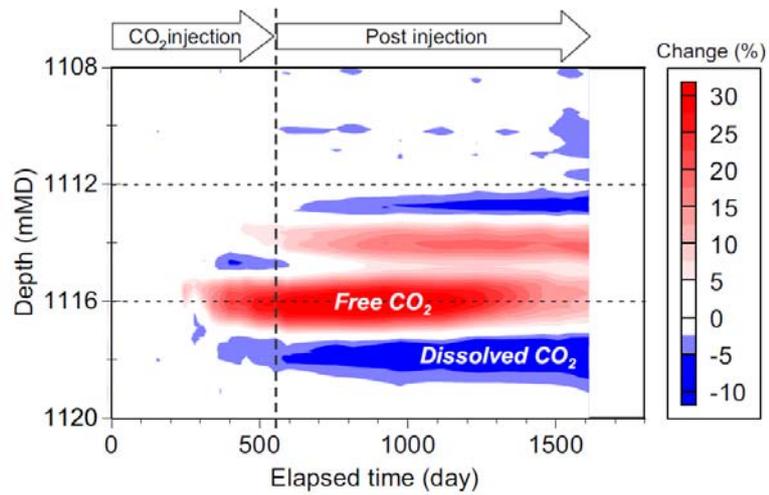


圖 2.1.14 Nagaoka 封存場址地電阻與二氧化碳圍塊歷時曲線圖

(2) 德國 Ketzin 試驗計畫

CO2SINK 計畫為 CO₂ Storage by Injection into a Natural saline aquifer at Ketzin 的簡稱，或稱 Ketzin 計畫，係在此背景下所成立的一個專責驗證地質封存技術的先期研究計畫。此計畫主要是建構於歐盟委員會的第六期主軸發展計畫（FP6, Sixth Framework Program）中的一個階段性整合型計畫，在歐盟經費的支持下，主要由德國位於波茨坦（Potsdam）的地球科學研究中心（GFZ, Geo-Forschungs Zentrum）負責計畫統籌執行，參與計畫的協力單位包括公司業者與研究機構，共有 14 個。

在 CO2SINK 計畫中，先導計畫階段主要工作為探查灌注場址範圍內地質概況、舊有地質資料檢視與蒐集、相關地物及地化試驗執行以收集場址相關背景值資料、近地表水力試驗監測等，由於預定場址之既有地質資料相當完整。因此透過資料檢視與蒐整合，對於場址區地質模型得以獲得全面性明確的概念。

從地理位置上來說，灌注場址凱琴（Ketzin）位於柏林市的西方、波茨坦附近哈維爾蘭（Havelland）東南方的小鎮，該鎮是一個具有眾多美麗風景和野生動物，以及河流和運河充斥交會其中，自古是一個以捕撈魚貨為生的小漁村，如圖 2.1.15。

凱琴場址在地質上位屬於德國東北部沉積盆地(N-German Basin 或北德盆地)的一部分，此區盆地的等深線概況詳如圖 2.1.16 所示，屬於中歐整個盆地系統中的一個次盆地（Mazur and Scheck-Wenderoth, 2005）。CO2SINK 計畫中，二氧化碳目標灌注層係選擇於緩傾的三疊紀的「斯塔加層」(Stuttgart Formation)之內。此計畫場址與目標地層處於一約略東西走向的羅斯科-凱琴背斜（Roskow-Ketzin Anticline）南側翼，附近過去鑽鑿的深井最深可達或穿透「斯塔加層」，其中 4 口深井分布於西側（羅斯科背斜區），以及位於東側（凱琴背斜區）的 1 口深井。

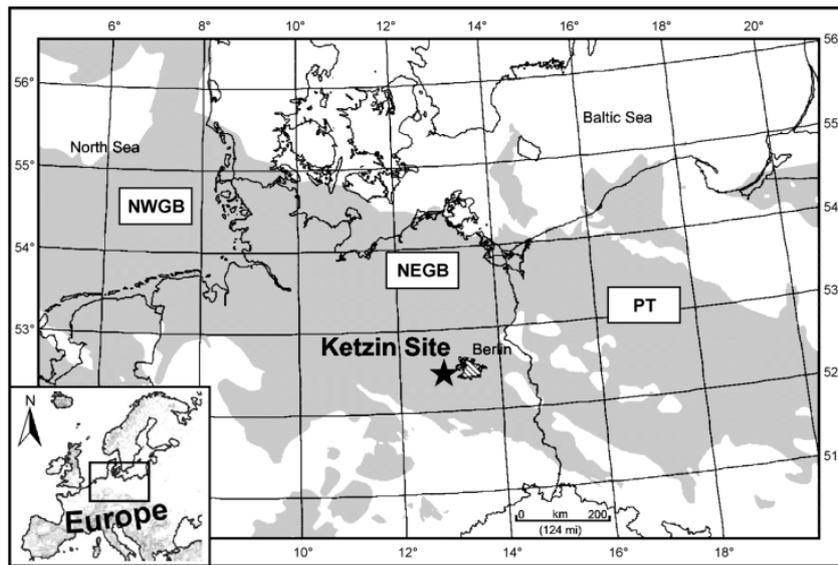
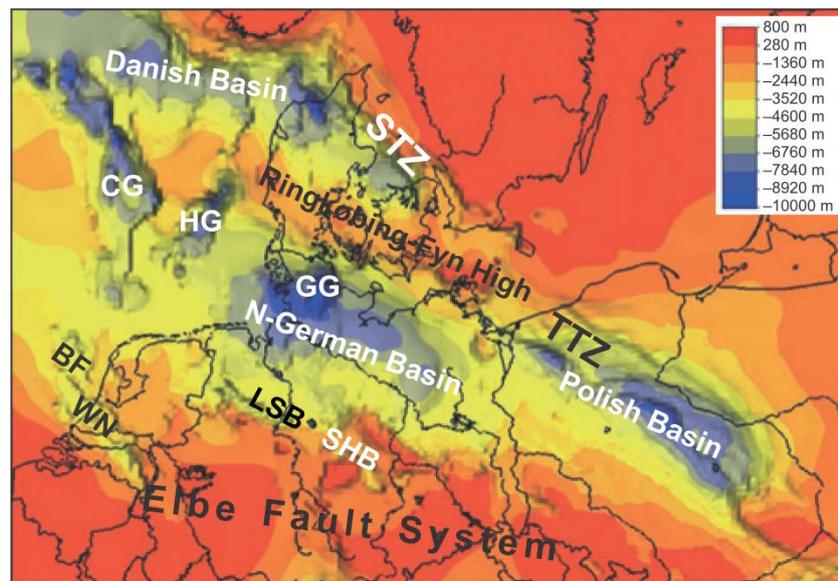


圖 2.1.15 德國柏林附近凱琴 (Ketzin) 場址位置



CG: Central Graben STZ: Sorgenfrei-Tornquist Zone LSB: Lower Saxony Basin
 HG: Horn Graben TTZ: Teisseyre-Tornquist Zone SHB: Subhercynian Basin
 GG: Glückstadt Graben WN: West Netherlands Basin BF: Broad Fourteens Basin

圖 2.1.16 中歐主要盆地系統位置圖

「斯塔加層」在凱琴場址附近的分布深度為 630~710 公尺，地層溫度約為 38°C，其地層主要由兩種沉積特性所組成，由屬於河道沖積相 (Channel facies)，有較佳的淘選度，其岩性以砂岩及粉砂岩為主，此岩相地層具有較佳二氧化碳儲集性能；另一類岩性大部分以泥岩為主，屬於泛濫平原相 (Flooding-plain facies)，具較差的淘選度，並不適合作為二氧化碳儲集層，「斯塔加層」中此兩相地層基本上係以交替沉積的型態存在。

在「斯塔加層」上方由所謂的「威瑟層」(Weser Formation) 形成絕佳的封閉蓋層 (Caprock)，威瑟地層的沉積環境同樣也為大陸型的間歇湖型式，主要由黏土質或砂質的粉砂岩，與碳酸鹽及蒸發岩類所交替沉積所構成。這些岩石經由岩相的分析得知具有高含量黏土礦物成分，並經由微視觀察其孔隙幾何分布情形，確認其蓋層封閉性能適合利用。

位於「威瑟層」上方尚有一「恩施塔特層」(Arnstadt Formation)，其沉積型態為泥、黏土與碳酸鹽類組成的間歇湖環境，並同樣具備蓋層封閉特性。前述兩具蓋岩 (Cap-rock) 封閉性的地層，在「斯塔加層」上方形成約 210 公尺厚的完美蓋層，其高度安全性確保了 CO₂SINK 計畫的推動，並因此取得了當地居民的民意支持。

德國 Ketzin 計畫場址最初規劃設置三口垂直深鑽井，包括一口灌注井與兩口觀測井 (Prevedel et al., 2008)。三口深鑽井彼此相距約為 50~100 公尺，呈 L 型佈置，灌注井編號 Ktzi-201，深度 755 公尺；第一觀測井編號為 Ktzi-200，第二觀測井編號為 Ktzi-202，二口觀測井深度皆為 810 公尺。後續計畫又再增加二口監測井，編號為 Ktzi-203 及 P300，計畫鑽井分布如圖 2.1.17。注入計畫於 2008 年 6 月開始進行至 2013 年 8 月，累積總注入量為 67,271 噸二氧化碳。

德國 Ketzin 計畫配合於三口深鑽井的巧思佈置，規劃許多新穎監測項目與監測方法。表 2.1.9 彙整了其中主要幾個具有特色的監測儀器與功能。其中的 ERT 搭配 VERA 技術，結合分散式溫度感測器 (DTS, Distributed Temperature Sensing)，以及井下應力量測 (Downhole Pressure Measurements)，構成此計畫所謂「智慧型套管系統」(Smart-casing Technology) 的一環。

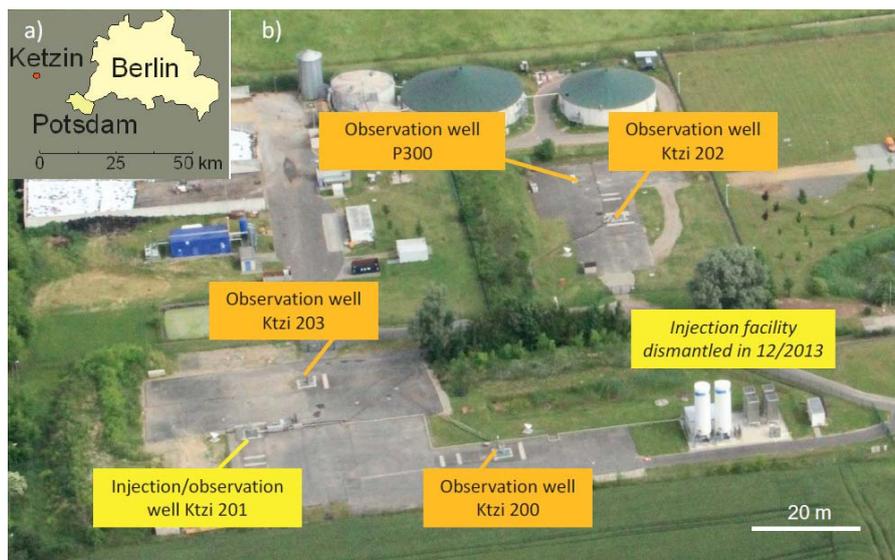


圖 2.1.17 德國 Ketzin 計畫鑽井配置

表 2.1.9 德國 Ketzin 計畫監測儀器與功能

監測項目	監測目標	監測位置
震測剖面技術	背景值與二氧化碳團塊擴散的情形	地表/注入井/監測井
地電阻成像解析 (ERT)	背景值與二氧化碳團塊擴散的情形	地表/注入井/監測井
垂直電極陣列系統 (VERA)	獲得井間地層的視電阻值分布狀況、推估二氧化碳團塊擴散的情形	注入井與監測井
分散式溫度感測器 (DTS)	推得井間地層中溫度的變化、推估二氧化碳團塊擴散的情形	注入井與監測井
光纖壓力感測器 (FBG)	分析井間地層感測器附近套管周遭所承受應力	僅裝設於注入井
氣體薄膜感測器	灌注前後，地層中氣體分子含量變化情形	僅裝設於監測井
地層微生物分析	微生物與灌注地層礦物間的互制行為	注入井與監測井

德國 Ketzin 計畫場址所使用的震測剖面技術，包括了 (a) 3D 震測 (3D surface seismic baseline measurements)、(b) 垂直震測剖面 (VSP, Vertical Seismic Profiling)、(c) 走動震源震測剖面 (MSP, Moving Source Profiling)、與 (d) 跨孔量測 (Cross hole seismic tomography)。上述技術分別於灌注前用於背景值量測，以及灌注後接續用於不同時空條件下的間歇式量測。圖 2.1.18 為全面鑽井工作展

開之前，2005 秋天於地表所進行的 3D 震測時間剖面結果（剖面編號為 Xline 1105）。此南南東-北北西向的剖面結果顯示出地表至 1,000 公尺深的影像非常清晰，並可判別有一東西走向的地塹（CGFZ）出現於頂部，靠近預定鑽井區域則無斷層跡象。在深度 250 至 400 公尺處仍依稀可看出廢棄天然氣層中殘存氣體的反射訊號（Giese et al., 2008）。

DTS 其原理主要為利用光纖，將光源所產生的光波導引至待測區，待測區中溫度的產生變化時，將進一步造成光波特性的變化，分析光波特性的改變，即可推得待測區中物理量的變化。圖 2.1.19 分別為監測井（Ktzi-200 與 Ktzi-202）內 DTS 系統所設上、下濾窗（Filter screen）部份，於 2008 年 6 月至 8 月間所測得的溫度依時變化結果，以及灌注井（Ktzi-201）於同一時期，於井口（Wellhead）、上濾窗、井底所監測得的溫度變化成果，並包含了當時對應的注入率變化（Giese et al., 2008）。

光纖壓力感測器（FBG）係安裝於灌注井（Ktzi 201）的灌注管串（Injection tubing string）末端，FBG 感測器為單點（Single-point）運作方式，提供灌注井特定深處下的即時（Real-time）溫壓紀錄。灌注井於 2008 年 7 月 13 至 16 日連續四天間所測得的壓力、溫度依時變化結果，如圖 2.1.20 所示。此結果可對比於同時於第一監測井（Ktzi-200）內所測得二氧化碳氣體濃度變化（中間圖），以及氬（Krypton）氣體（下圖）濃度變化，判斷二氧化碳氣體是否出現（Giese et al., 2008）。

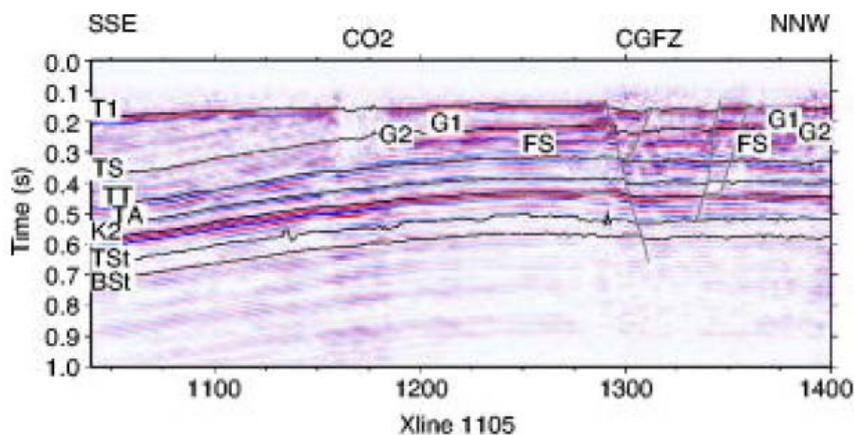


圖 2.1.18 3D 震測時間剖面結果

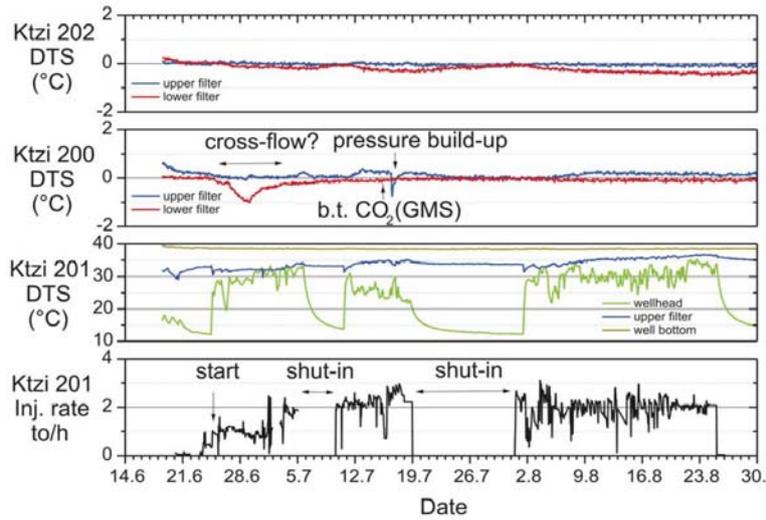


圖 2.1.19 鑽井 DTS 監測成果 (b.t.表穿透時間點)

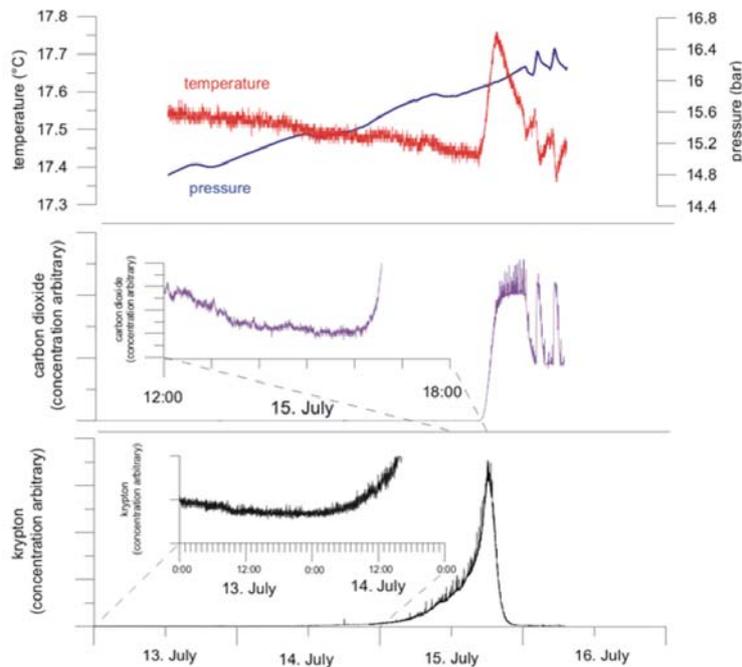


圖 2.1.20 灌注井光纖式壓力感測器量測成果

德國 Ketzin 計畫的焦點主要是運用各種地球物理、地球化學及微生物監測技術驗證二氧化碳儲留於深部鹽水層的環境的安全性，並對成果提供一個廣泛且全面的觀點，以供相關研究人員據以決定進一步研究策略與研究方向。

所有的監測活動最終的目標是建立一個隨著時間發展的三維空間監測技術，

加入時間的維度，也就是所謂的四維的地下電腦斷層掃描技術（Four dimensional tomography of the underground），期盼在全面推行 CCS 商轉之前，透過各種研究深入地瞭解二氧化碳團塊流於深部含飽和鹽水地層中的移棲行為模式，以便對灌注入地層的二氧化碳團塊分布情形，有更深切之了解與掌握，降低將來操作的風險性。

（3）澳洲 Otway 試驗計畫

Otway 計畫係由澳洲溫室氣體技術聯合研究中心（CO2CRC, The Cooperative Research Centre for Greenhouse Gas Technologies）所主導，該中心成立於 2003 年，係為澳洲政府創新、工業、科學與研究部（Department of Innovation, Industry, Science and Research）內的聯合研究中心（CRC, Cooperative Research Center）直接資助而成立的研究計畫，主要目的為證明二氧化碳捕獲與地質封存，用於減緩二氧化碳的可行性。計畫成立之初，CO2CRC 即首先著力於完成澳洲維多利亞省（Victoria）境內的多處具潛能地質封存場的候選場址評選工作，其評比項目的評選因子包含構造安定性（Tectonic stability）、盆地尺度（Basin size）、封存深度（Sequestration depth）、封存層與蓋層組合（Reservoir-seal pairs）、斷層強度（Faulting intensity）、地熱梯度（Geothermal Gradient）、海陸域位置、氣候條件、便利性等十五項，每一項目評比級別（Class）則分為五級。根據上述評選規則，CO2CRC 針對該省內十二個場址進行客觀評比，其中位處海域（Offshore）的知名油氣產區 Gippsland Basin 場址綜合評選排名第一，而陸域（Onshore）的 Otway Basin 則排名第二。最終 Otway Basin 場址因其具體可行性較高，而獲選成為澳洲第一個二氧化碳地質封存示範計畫的預定場址。

Otway 計畫場址位於澳洲南部維多利亞省（Victoria）坎貝爾港（Campbell port）附近，距墨爾本（Melbourne）約 200 公里，地質分區屬 Otway 盆地。Otway 盆地寬約 400 公里，長約 200 公里，其中鄰近澳洲大陸的盆地北側，主要構造為自西北至東南一系列的地槽（Sedimentary trough）與斷層，地層為先白堊紀（Early Cretaceous）沉積物所構成。先導試驗場址約位於克洛（Korot）沉積地槽東方，根據震測資料顯示，此區域並無明顯斷層構造（圖 2.1.21）。Otway 盆地係為一系列西北-東南走向的張裂大陸邊緣盆地之一，自澳洲東南部延伸至塔斯馬尼亞，約形成於岡瓦納古陸（Gondwana）分裂、南極大陸板塊與澳洲古大陸板塊分離時期，盆地內多為近侏羅紀與白堊紀之近海沉積物。

Otway 盆地西側的 Gippsland 盆地，為知名石油與天然氣產區，同樣位處於墨爾本南方約 200 公里處。在 1970 年至 1994 年間，盆地區域內石油產量約為澳洲石油產量的一半以上，目前盆地產油狀況已大不如前，惟仍持續進行大規模探勘，其中新近發現的圖魯姆油田 (Turrum field)，估計約有 1 萬億立方英尺的天然氣儲量和 1 億桶石油儲量。因 Otway 盆地構造類似 Gippsland 盆地，故歐美諸多石油公司投入大量資金進行地質探勘，以評估石油與天然氣可能產區與儲量，惟此區域目前仍僅有天然氣產出。1999 年以後，因天然氣使用量大增與三維反射震測技術的應用，Otway 盆地陸域與海域的探勘活動逐漸擴大，並陸續探得多處蘊藏量龐大的天然氣田。

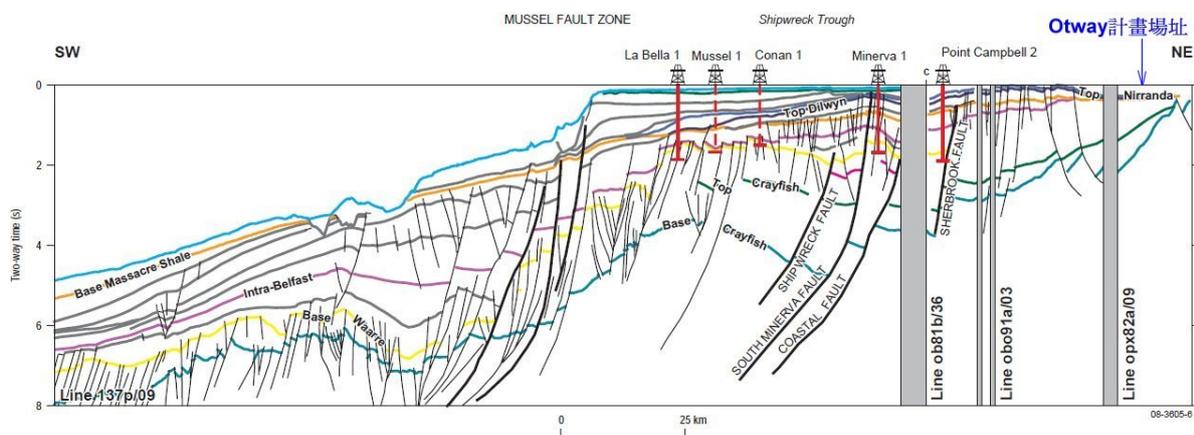


圖 2.1.21 澳洲 Otway 盆地地質構造剖面 (CO2CRC Website)

位於 Otway 的 CO2CRC 為澳大利亞唯一的二氧化碳封存設施，目前仍於不同階段全面且不斷擴展基礎設施，Otway 研究設施的總體原則為確保人類健康和 safety 始終受到保護、在設施的整個生命週期內保護生態系統、確保不對地下水源和其他資源造成影響，此外並能實現注入影響之科學層面目標。目前該場址已執行完三階段工作，其井口規畫可參考圖 2.1.22。

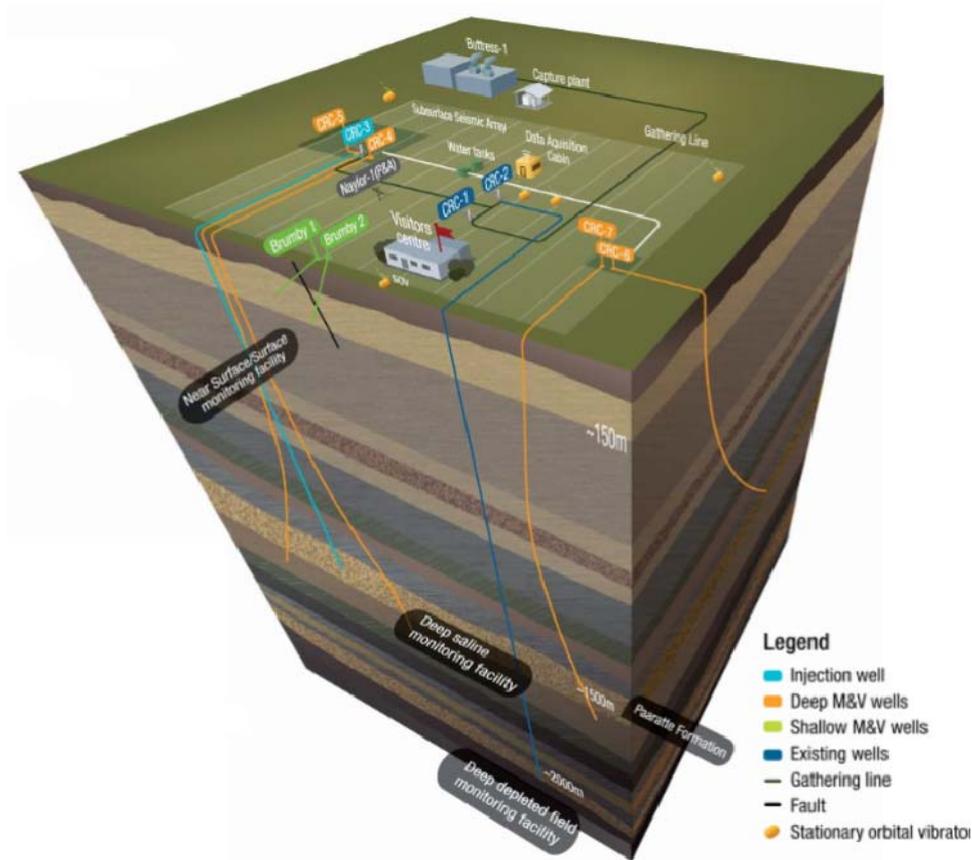


圖 2.1.22 Otway 井口設施配置

A. Otway Stage 1 (2004 – 2009)

第一期完成 CRC-1 井的施作，透過 CRC-1 井(井深 2,250 米)，共注入約 65,000 噸二氧化碳於 Waarre C 砂岩層(深度約在 2,025-2,055 米；圖 2.1.23)，本階段為驗證二氧化碳安全注入和儲存到枯竭的儲氣層(depleted gas reservoir)中之可行性。採用之監測技術：(a) 井下：壓力、地震、氣體和地層水採樣(包括示踪劑)；(b) 地表：地下水、土壤、大氣、微震。

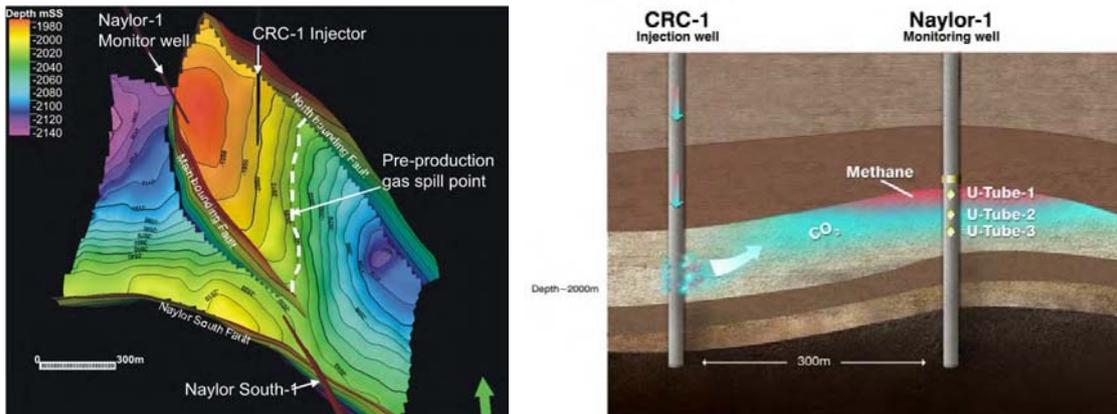


圖 2.1.23 Otway Stage 1 執行成果

B. Otway Stage 2 (2009 – 2019)

第二期分為 A、B、C 三階段，Otway Stage 2A 的工作目標為完成 CRC-2 井的施工；Otway Stage 2B 的工作目標為完成 CRC-2 井下（井深 1,565 米，目標 Paaratte 含水砂層）的殘餘飽和度試驗；Otway Stage 2C 的工作目標完成確認最低監測門檻、發展 4D 監測技術、驗證注入碳流穩定性（Watson, 2015）。

第二期各階段工作證明可以在鹽水層中安全地大規模儲存二氧化碳，工作包括：

- 2A：新增 CRC-2 鑽井
- 2B：測定影響鹽水層中殘留和溶解捕獲的參數
- 2C：在鹽水層中追蹤注入的二氧化碳，包括：(a) 最低監測下限；(b) 碳流遷移行為；(c) 岩層穩定性

其中，尤可注意的為 Stage 2B 僅利用 CRC-2 單井達成試驗目的殘餘封存特性試驗（Residual Gas Trapping Characterisation, 2009 – 2011），說明如下（圖 2.1.24、圖 2.1.25）：

階段 1：(a) 從帕拉特地層提取水並儲存在地面水箱中；(b) 井下儀器採集有關地層的信息；(c) 注入少量示踪氣體，以追蹤二氧化碳如何穿過岩石。

階段 2：(a) 將相對少量的純二氧化碳（150 噸）注入地層中；(b) 其中一些會溶解，有些將保留為自由相二氧化碳，有些會被殘餘困住。

階段 3：(a) 幾天後，地層水重新注入井中；(b) 在下降過程中，這些水與二氧化碳混合，二氧化碳在注入地層之前溶解在水中；(c) 注入飽和二氧化碳的地層水會分解岩石孔隙內的二氧化碳碳流，從而增加殘留二氧化碳的量。

階段 4：(a) 從帕拉特地層中提取水（這應該可以去除任何剩餘的移動二氧化碳）；(b) 井下儀器收集有關殘餘二氧化碳量的訊息；(c) 確定殘留二氧化碳量的其他測試包括示踪劑濃度和通過<U形管>對地層流體進行取樣。

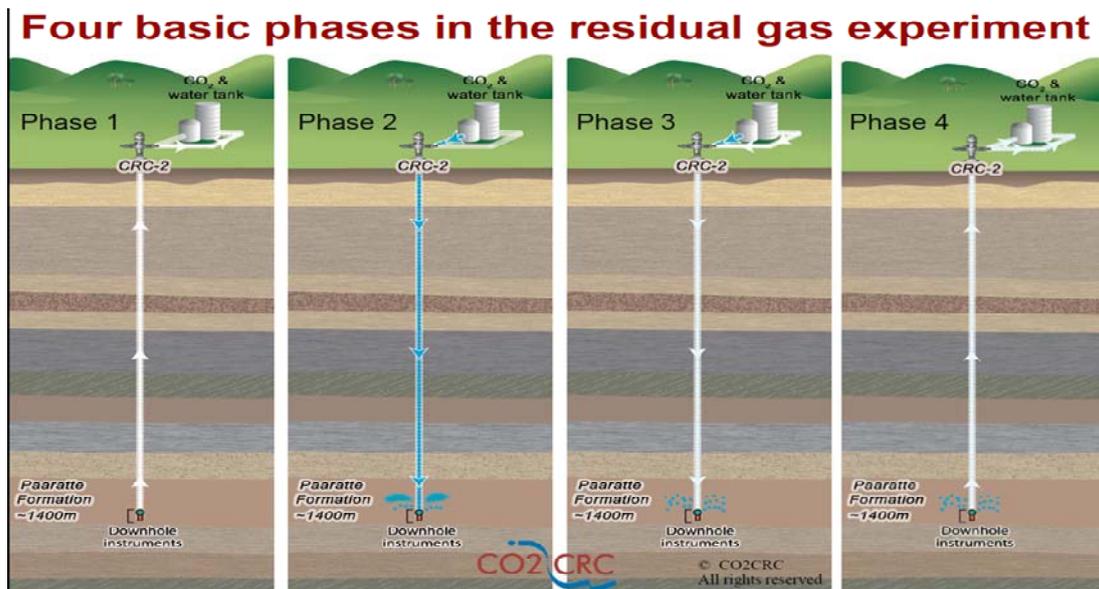


圖 2.1.24 Otway Stage 2B 殘餘飽和度試驗

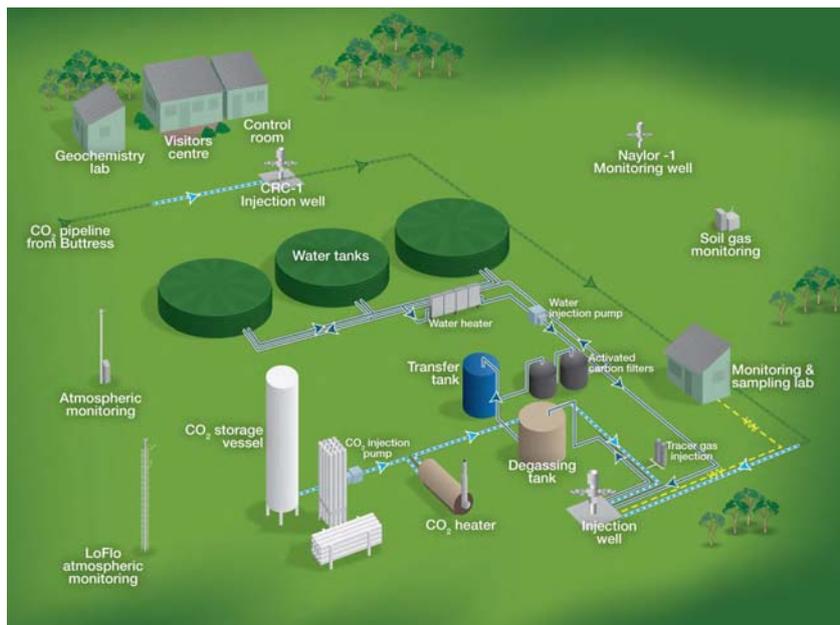


圖 2.1.25 Otway Stage 2 地表設施配置

C. Otway Stage 3 (2015 – 2022)

第三期目標主要透過井下震測和壓力層析成像監測的應用，完成開發具有成本效益、高解析度、依需求和非侵入性的監測和驗證能力。井下地震技術是使用永久震源和井內光纖 (SOV/DAS, Surface Orbital Vibrator / Distributed Acoustic Sensing) 的時移 VSP 方法，用於每天追蹤二氧化碳碳流 (圖 2.1.26)。井下地震技術於注入兩天後就檢測到注入氣體，注入的氣體量不到 300 噸。該系統靈敏度，甚至可以檢測到舊的 Stage 2C 碳流的變化 (當新注入的第三期碳流與其相交並合併時)。

另外，過往奧特魏國際測試中心 (OITC, Otway International Test Centre) 產生的地震資料是在硬碟上以原始格式 (通常為數百 TB) 手動取得的，並送到場外處理，此處理需要數月的時間才能產生影像資料。相較之下，SOV/DAS 系統會自動進行現場資料處理，每天僅將 1 GB 資料傳送到異地進行最終處理和品質檢查，並每兩天產生一次影像。

奧特威第三期計畫於 2012 年構思測試和驗證創新監測技術的手段，為營運商提供具有成本效益且可靠的資訊，這些資訊將為監管機構和進行 CCS 運營的社區所接受。經過多年的規劃、建模和設計、場地升級以及 Paaratte 鹽水層注入 15,000 噸二氧化碳，2021 年 4 月已完成該階段所設定目標。

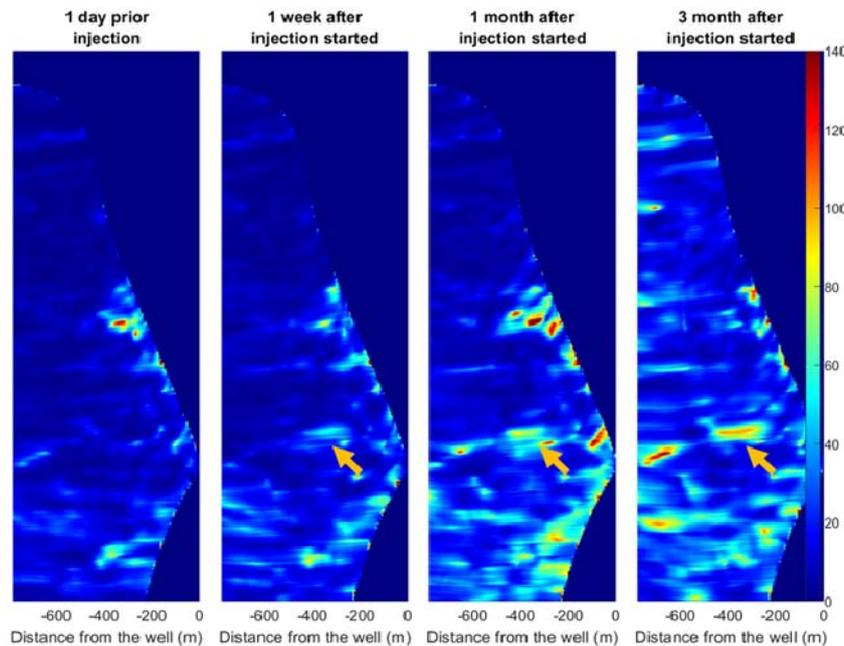


圖 2.1.26 Otway Stage 3 SOV/DAS 監測影像

D. Otway Stage 4 (2019 – 2026)

第四期計畫目前正在執行中，目標主要展示以商轉為重點的儲存層管理技術，以提高注入、儲存和監測效率，從而大幅降低專案成本（圖 2.1.27）。

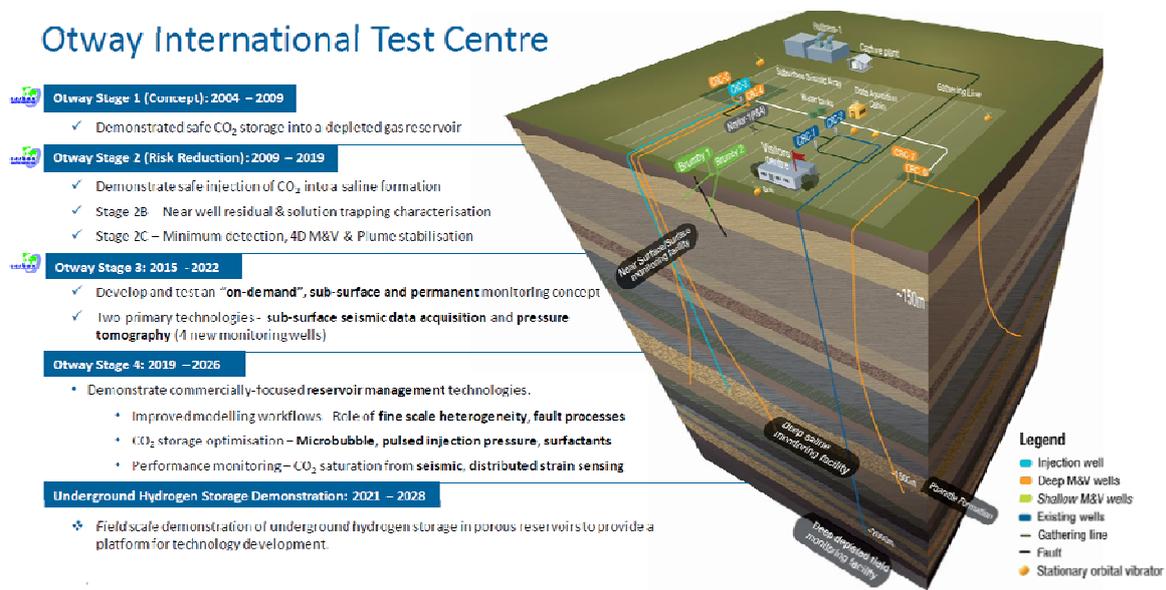


圖 2.1.27 Otway 計畫各階段完成及預計達成目標

(4) 潛在風險案例與應對策略

為減緩二氧化碳排放衍生溫室效應等問題，國際間已積極投入發展二氧化碳的捕獲與封存計畫。然而執行這類相關計畫除需仰賴成熟的技術外，更需進行詳細完整的安全評估。並依據可能的風險情境擬定預防措施及緊急應變處理計畫，當實際發生緊急事件時，應能迅速啟動相關應變作為，並以公開透明方式面對公眾溝通議題，以獲得決策者及廣大民眾的認可。

A. 日本苫小牧示範計畫

以日本北海道苫小牧 CCS 示範計畫為例，2018 年 9 月 6 日，北海道膽振東部發生規模 6.7 的地震。此事件提供了檢驗二氧化碳地質封存地震安全性難得的實例經驗。日本 CCS 調查株式會社 (JCCS, Japan CCS Co., Ltd.) 根據其風險管理手冊，採取了緊急事件應變措施，並隨後進行與地震事件衝擊相關的安全評估作業，以昭公信 (JCCS, 2018；日本 CCS 調查株式會社，2018)。

(a) 地震風險事件及後續監管要求

2018年9月6日凌晨03:07北海道發生了重大地震。震央位於北緯42.7度、東經142.0度，靠近北海道膽振（Iburi）綜合振興局所轄的勇拂郡厚真町附近，距札幌市約70公里，距東京都約790公里。本次地震規模為Mw 6.7，震源深度約37公里。日本氣象廳命名為平成30年北海道東部膽振地震（Hokkaido Eastern Iburi Earthquake）。

地震震央也位在日本北海道苫小牧市（Tomakomai City）東邊約30公里（圖2.1.28），為苫小牧CCS示範計畫（Tomakomai CCS Demonstration Project）自2016年4月灌注二氧化碳開始以來，所遭逢的最大地震侵襲。震央距離二氧化碳注入區域水平距離約30公里，區域範圍內量測到最大震度為7級；在苫小牧CCS示範場址附近所量測到的震度則小於5級（158 gal）。隨後，於2019年2月21日，同地又發生了一次地震規模為Mw 5.8。

據示範計畫執行者JCCS在震後科學性自評證明：這兩次地震事件均未對場址造成嚴重影響，但事業主管機關要求JCCS必須對當地居民安排進行地質封存安全性公聽會，並邀集專家對JCCS提出的科學性安全評估報告進行專家審查確認。

(b) 苫小牧CCS示範計畫概況

日本北海道苫小牧CCS示範計畫由日本政府推動，進行二氧化碳分離、回收、利用、運輸，地下封存技術調查與研發，商業化調查與驗證測試，由JCCS負責執行（日本CCS調查株式會社，2020）。

示範計畫總時程共九年，三階段時程規劃如下：

1. 2012~2015年（準備階段）：在選址完成後，進行二氧化碳注入設備的設計與建造、鑽鑿注入井以及法規與安全準則之研究。
2. 2016~2019年（灌注階段）：進行二氧化碳灌注作業，目標灌注量為30萬噸。
3. 2015~2020年（監測階段）：2015年起進行基線監測；2016年灌注作業開始進行後，同步執行監測作業到2020年。之後，仍會另案延續灌注後長期監測。

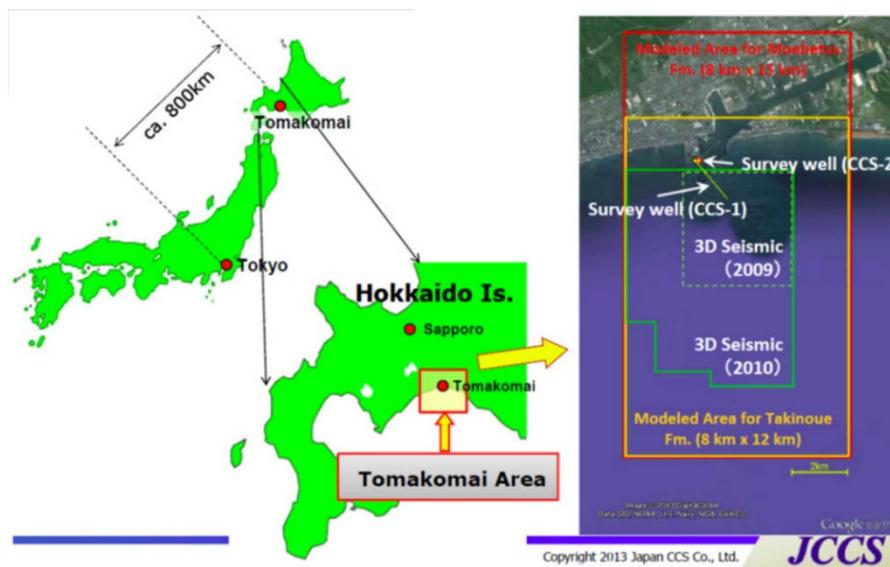


圖 2.1.28 苫小牧 CCS 示範計畫位置圖

(c) 灌注作業及監測計畫

以 Takinoue 層為儲集層的注入井 IW-1 最大傾斜角度為 72 度，總計鑽進 5,800 公尺，鑽進垂直深度為 2,754 公尺，鑽進水平長度為 4,347 公尺。以 Moebetsu 層為儲集層的注入井 IW-2 最大傾斜角度為 83 度，總計鑽進 3,500 公尺，鑽進垂直深度為 1,161 公尺，鑽進水平長度為 2,900 公尺（如圖 2.1.29）。淺的 Moebetsu 層灌注作業從 2016 年 4 月開始進行；深的 Takinoue 層灌注作業，則從 2018 年 2 月才開始進行。絕大部分二氧化碳灌注於 Moebetsu 層。因該地層壓力於灌注後仍保持穩定，升壓量很小，成為主要儲集層。Takinoue 層的火山碎屑岩，孔隙連通條件不佳，灌注過程發現升壓太快，因而於短期內便停止灌注。

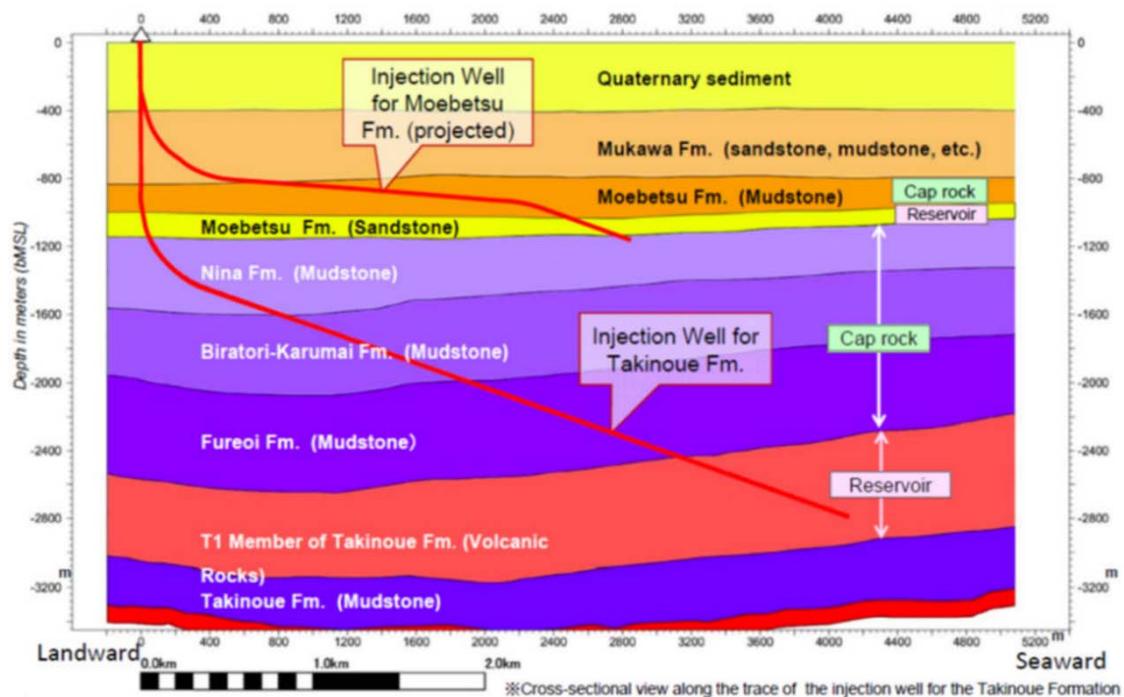


圖 2.1.29 苫小牧地區兩口二氧化碳注入井與地層剖面示意圖

為確保二氧化碳注儲的安全性與穩定性，因此計畫主要監測設施除設置兩口注入井 (IW-1, IW-2) 外，尚有三口監測井 (OB-1, OB-2, OB-3)、一條海底電纜 (OBC, Ocean bottom cable)、四組海底地震儀 (OBS, Ocean bottom seismometer)、一組陸上地震儀，各監測設施的空間配置情形 (如圖 2.1.30)。為了解二氧化碳在地層中移棲行為，於 2017 年累積注入二氧化碳至 Moebetsu 層達到 65,000 噸後，進行三維震測與資料比對分析。由上述監測系統獲取的資料，可持續反饋以強化數值模擬模型，精進二氧化碳移棲分析，並進一步以持續性反饋預測後續增加注入的二氧化碳分布的範圍。



圖 2.1.30 場址近域監測設施配置

(d) 緊急災害風險管理規則

2016 年 4 月二氧化碳灌注前，JCCS 針對發生緊急災害需採取的應變措施制訂內部規則。其框架根據基本風險管理手冊，為各計畫項目（包括：陸上捕獲設備、陸上注入設備、離岸儲集層、公共關係等）制訂一套風險管理手冊。地震發生時，便使用此手冊，採取相對應的措施。JCCS 亦針對陸上捕獲與注入設備建立一套獨立的緊急停機系統（ESS, Emergency shutdown system）。當發生嚴重災害因子（例如：爆炸、火災、環境破壞、人為破壞、重要設備損壞）或設施異常，該設施於運行時可以安全地停止、關閉和隔離。

2018 年 9 月 6 日地震前後（2018 年 9 月 1 日~10 日）示範計畫之設備狀態，整理如表 2.1.10。地震發生當下，二氧化碳捕獲設備正處於關閉模式，但是如果設施處於正常運行模式，則緊急停機系統會被啟動，因為設施檢測到的加速度為 158 gal，此值已超過 150 gal 關閉的安全標準。然而地震事件發生時，JCCS 尚未有針對長時間停電與網路斷線處置方案。注入井、監測井與海底電纜的資料數據收集中斷，亦無法進行資料驗證。因此 JCCS 為避免相關操作設備、辦公設備、

通訊設備、資料監測設備因停電而失效，提出改善方法，包括：(1) 新增示範計畫中心緊急電源供應 (80 kva)；(2) 新增電池供應給注入井資料記錄計使用。

表 2.1.10 地震前後苫小牧 CCS 示範計畫之設備狀態

日期	設備狀態
2018/9/1	9/1 前二氧化碳捕獲與注入設備均運作正常。而後二氧化碳供應來源發生問題，乃暫時停止供應二氧化碳，以致二氧化碳注入作業也隨之暫停。因此二氧化碳捕獲與注入設備保持待機狀態，以便二氧化碳恢復供應後可以隨時重新注入。
2018/9/5	二氧化碳來源廠商延後恢復二氧化碳供應的時程，相關設施從待機模式切換至停止模式。
2018/9/6	03:07 發生地震，捕獲裝置附近的地震儀量測到 158 gal 的震動，若在正常運作模式下，該震度會觸發緊急停俾，但實際上設備處於停止模式，所以並未執行緊急停俾。停電導致監測設備停止。
2018/9/8	電力恢復供應。恢復捕獲與注入設備至地震前的停止模式。
2018/9/10	監測設備恢復運作。

(e) 二氧化碳注入與地震關聯性

北海道膽振東部規模 6.7 大地震，震央距離二氧化碳注入區域水平僅約 30 公里，在苫小牧 CCS 示範場址附近所量測到的震度小於 5 (158 gal)。大地震勢必引發公眾對當地二氧化碳封存安全性疑慮。JCCS 計畫團隊藉由監測量測資料分析與模式模擬分析，以科學性角度分別評析探討二氧化碳注入與地震關聯性。JCCS 綜合監測科學證據與模擬結果指出：(1) 地震震源與灌注點位置比對，顯示在地質上兩者並無連續性關係，可排除北海道東部膽振地震是因二氧化碳注入兩個儲集層所誘發；(2) 灌注區域連續進行微震監測關聯事件分析，顯示地震前後並未有微震事件發生，因此排除二氧化碳封存作業與北海道東部膽振地震有直接關聯；(3) 從數值模擬結果與實測結果相互驗證得知，地震發生後監測的壓力升高，可解釋為與震央位置附近之斷層位移，使得地殼變形所致；(4) 根據實測儲集層壓力和溫度數據，北海道東部膽振地震並未造成地層內二氧化碳洩漏 (圖 2.1.31)。因此，根據上述分析結果，2018 年 10 月 19 日由包含地震學專家組成的「苫小牧 CCS 示範計畫評審會議」達成以下共識：(1) 地震沒有造成二氧化碳洩

漏；(2) 尚無數據顯示二氧化碳封存與地震之間存在直接關係。

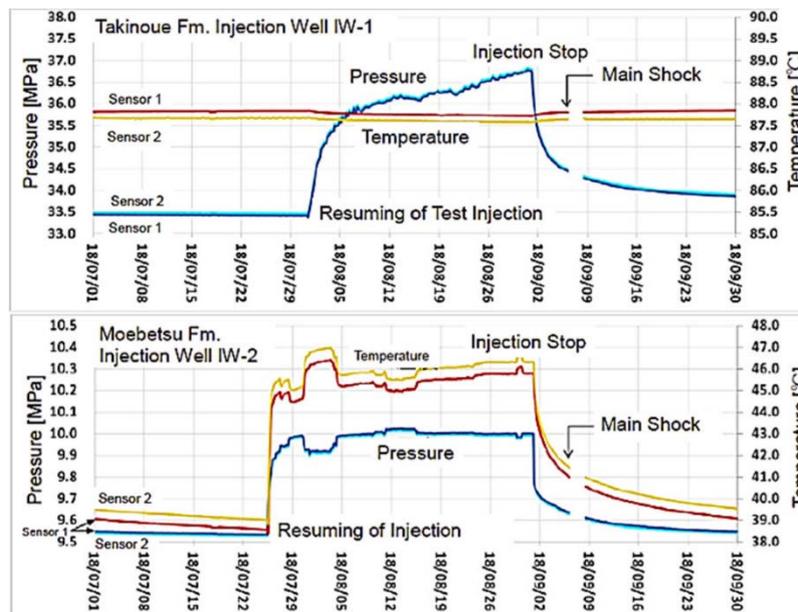


圖 2.1.31 注入井溫度壓力監測結果

(f) 風險事件發生後之處理原則

緊急風險事件發生後，迅速啟動相關應變作為，並以公開透明方式面對公眾溝通議題，避免民眾疑慮擴大。以本案為例，JCCS 計畫團隊於北海道膽振東部規模 6.7 地震事件發生後，立即就研究計畫資料分析評估排除碳封存計畫專案與地震之關聯性，並召開專家評審會議，提高其評估結果之公信力（圖 2.1.32）。藉由這難得的風險事件處理經驗可知，處理風險事件的關鍵原則要能迅速地以技術性佐證詮釋資料進行公眾溝通，以盡量減少當地民眾和公眾之疑慮。

Measures taken by JCCS after the Hokkaido Eastern Iburi Earthquake

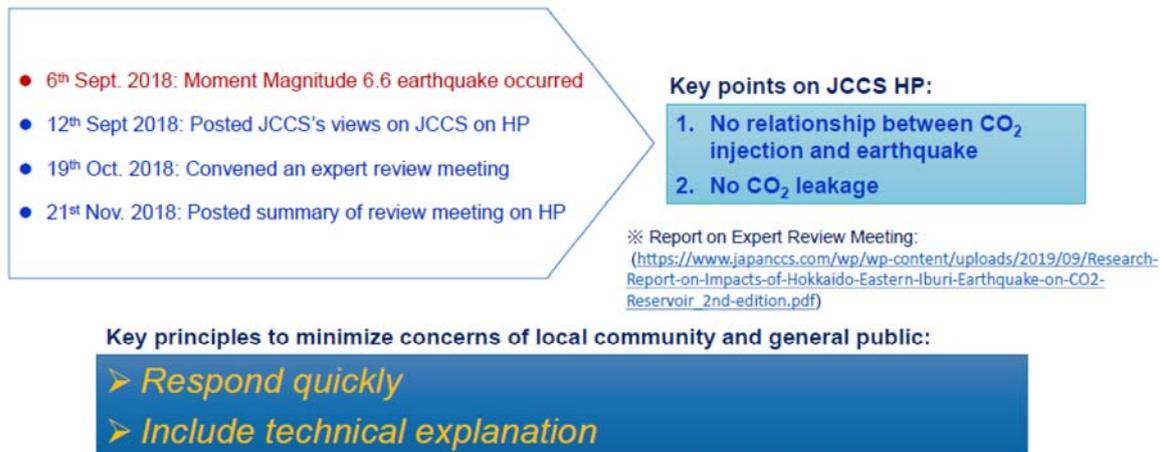


圖 2.1.32 JCCS 在北海道膽振東部地震後採取的措施

B. 日本 Nagaoka 先導計畫

Nagaoka 先導試驗實證計畫場址位於日本新潟縣境內長岡市南方的岩野原，大約處於信濃川支流、涉海川的左岸。該場址係租用了一處日本帝國石油公司所屬的舊天然氣田所在地點。在地下 4,000 公尺以下，有一綠色凝灰岩類地層，為一產天然氣層。以往地質資料顯示 Nagaoka 場址具封閉的背斜構造，非常適合作為二氧化碳封存場址。試驗地點位於背斜構造的南翼，預定作為地質封存點的目標層（貯留層）的岩層，屬沉積於更新世早期「灰爪層」內的厚層砂岩，其層厚約達 60 公尺，深度約 1,100 公尺，估計垂直地壓約 18.6 MPa。Nagaoka 先導封存場址共佈置四口深鑽井，包括一口深度大約 1,110 m 的注入井（CO₂-1），與三口深度大約介於 1,270~1,322 公尺不等的監測井。

在 2004 年 10 月 23 日發生的「新潟縣中越地震」，本震震源位置離 Nagaoka 試驗場址僅 20 公里，因此場址感受最大震度達到 6 級（圖 2.1.33）。地震當時，引起場址內商用電源喪失，因此注入作業自動停止，累計已注入量達 8,950 噸二氧化碳。地震事件是否造成封存試驗影響或引發安全疑慮，安全評估作業隨即展開，作業內容包括：

- 檢視地震前後貯留層中物理特性井測資料（含比抵抗、音波、珈瑪射線、中子），確定注入二氧化碳無異常變化

- 利用震波斷層掃描影像資料，詳細的比對確認二氧化碳無異常移動
- 利用地震時井底壓力測定結果的評估，確認封存壓力無異常變化(圖 2.1.34)
- 透過孔內聲波式影像攝影檢視，查驗孔壁水泥護層完整性，無洩露之虞
- 詳細檢查注入設備完整性，以及進行設備的氣密性、耐壓性試驗等
- 確認後續三菱瓦斯化學工廠所供應二氧化碳的供給無虞

所幸經審慎的災後評估，並提供各項安全佐證後，主辦單位終於成功說服當地居民與官方督導單位，取得復工的認可，同年 12 月 6 日恢復了每日 40 噸二氧化碳注入量，此時距離地震發生時間僅不到 45 天(日本財團法人地球環境產業技術研究機構，2006)。

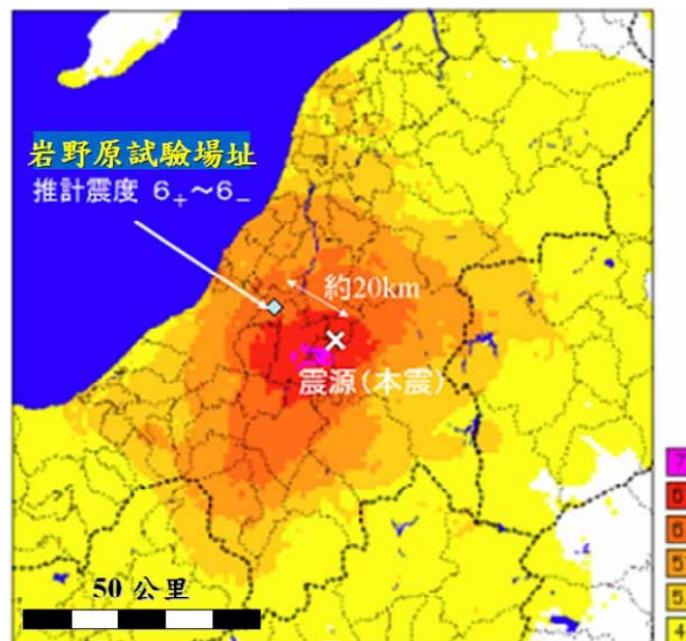


圖 2.1.33 Nagaoka 先導計畫「新潟縣中越地震」

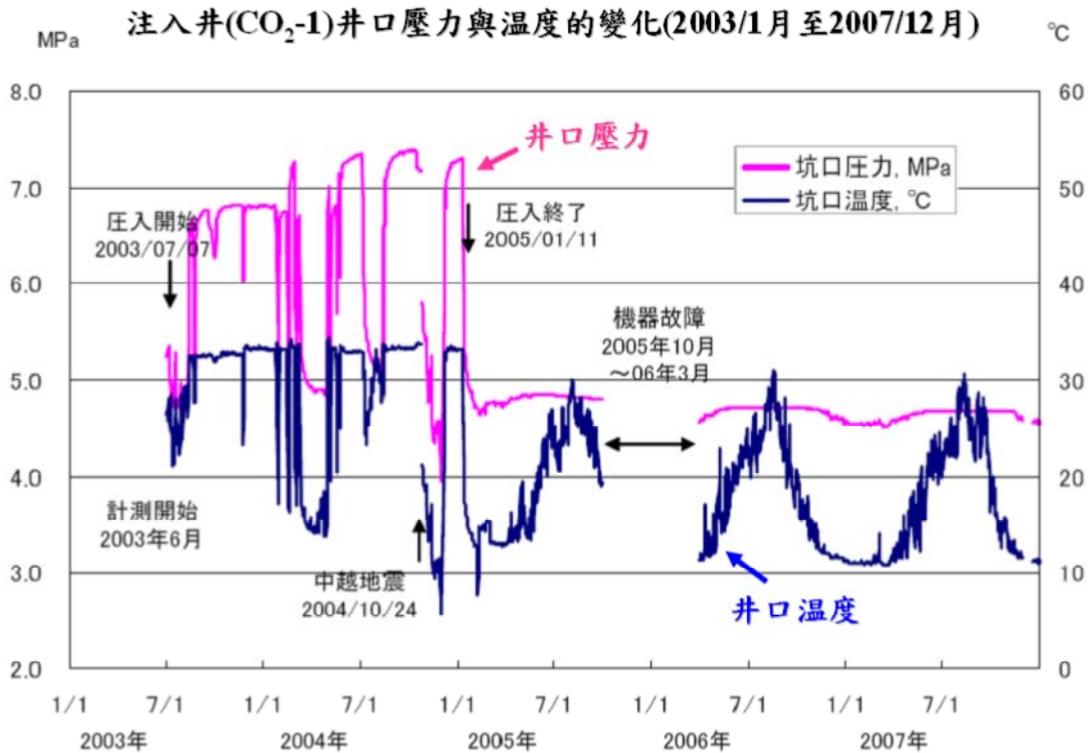


圖 2.1.34 Nagaoka 先導計畫「新潟縣中越地震」地震前後注入井壓和溫度變化

(5) 其他關鍵和新出現的議題

大多數 CCUS 框架都專注於二氧化碳減排，而不一定是清除。然而，到 2050 年實現淨零排放幾乎肯定需要一定程度的基於技術的二氧化碳去除(CDR, Carbon Dioxide Removal)。CDR 是指直接或間接從大氣中捕獲二氧化碳並將其封存。CDR 可以為遺留排放提供解決方案，並支援整個能源系統的長期淨負排放。CDR 有多種方法：

- 基於自然的解決方案包括植樹造林和重新造林，透過在以前沒有森林的地方種植森林或在過去存在森林的地方重建森林來重新利用土地。其他例子包括泥炭地和海岸恢復。
- 增強的自然過程包括透過現代農業方法和海洋施肥增加土壤碳含量的土地管理方法。其中許多方法正處於研究和開發階段，需要進一步研究以了解其成本、風險和權衡。其他例子包括增強耐候性和使用生物炭。
- 基於技術的解決方案包括從生物能源和直接從空氣中捕獲二氧化碳 (DAC) 並將其永久封存 (BECCS, Bioenergy with Carbon Capture and Storage 和

DACCS, Direct Air Carbon Capture and Storage)。

IEA CCUS 手冊 (IEA, 2022) 概述的許多法律和監管問題，以及傳統環境評估和許可程序中涵蓋的問題，都可以適用於 DACCS 和 BECCS 技術。也就是說，隨著越來越多的國家和公司考慮採用 CDR 方案來實現淨零目標，政策制定者必須考慮框架如何支援或阻礙部署。

例如，BECCS 和 DACCS 是在「地球工程」的背景下討論的，即對影響地球氣候的環境過程進行故意和大規模的操縱，試圖抵消全球暖化的影響。生物多樣性公約於 2012 年通過了一項不具約束力的決定，邀請締約方和其他各方確保（有一些例外情況且在滿足某些條件之前）不進行任何地球工程活動。因此，國家立法或國際協議必須明確區分地球工程方法，例如太陽輻射調節和透過 BECCS 和 DACCS 進行的基於技術的碳去除。

基於技術的 CDR 也應在氣候變遷措施或立法的背景下予以考慮。例如，歐盟最近推出的 Fit for 55 子計畫旨在修訂歐盟的氣候、能源和交通相關立法，使現行法律與其 2030 年和 2050 年氣候目標保持一致。該子計畫包括一項修訂關於納入土地利用、土地利用變化和林業溫室氣體排放和清除的法規的提案。雖然子計畫中明確提到了陸基 CDR，但尚未包括 BECCS 和 DACCS 等基於技術的選項。

二、國家碳捕存教育軟硬體

1. 教育設施規劃

著名的帕金森定律：「因為未能溝通而造成的真空，將很快充滿謠言、誤解、廢話與毒藥。」，所以「溝通」應主動、提早、透明、開誠佈公，降低爭議議題的發生，積極對話，透過科學教育的普及與傳播，消除科學專業與價值觀的衝突，理解科學議題中的不確定性，使公眾間獲得與政策相關之科學知識。CCUS 科學教育推廣，可分兩個面向規畫行動策略，一為教育部門的知識建構，二為公眾科普推廣與溝通。為促進民眾對全球暖化之認知、認識 CCS 對二氧化碳減量之貢獻、了解 CCS 之各項技術及其安全性，選擇適當場域及地點進行教育設施規劃，有其必要性及迫切性。

本計畫在 7 月 27 日和 28 日兩天舉辦「淨零減碳親子生活營」活動，活動海

碳封存技術社會溝通平臺建置先期規劃

報如圖 2.2.1。27 日邀請專家學者說明全球暖化情況、講解 2050 淨零碳排相關之減碳技術及桃園海岸的永續經營。28 日參訪本計畫所設計有關「碳捕存技術與永續環境」佈展及安排「淨零綠生活講座」。最後舉行草漯沙丘淨灘活動，讓學員實際關心並保護環境，在生活中實行減碳綠生活。

淨零減碳 親子生活營
7/27(六)-28(日)

減碳研習
沙丘淨灘
守護地球

報名連結
QR Code

活動主旨：透過室內課程認識全球暖化、傳達我國2050淨零碳排目標及淨零減碳技術；藉由參訪桃園市環保科技園區永續資源館及草漯沙丘淨灘活動，讓學員實際關心並保護環境，在生活中實行減碳綠生活。

參加對象：以家庭親子為主軸，父母帶小孩一起參與★7/27(國中以上)限80人★7/28(國小以上)限160人

活動日期：2024/7/27(六全天)~7/28(日)下午

活動地點：國立中央大學、桃園永續資源館、草漯沙丘觀音展示館

指導單位：環境部國家環境研究院
主辦單位：國立中央大學碳封存及地熱研究中心
協辦單位：桃園市政府環境保護局、國立中央大學地球科學系、桃園生命樹領袖協會

參加費用：免費
報名截止日期：7/19(五) 17:00

活動聯絡人：
國立中央大學碳封存及地熱研究中心 李小姐
03-4227151 ext 65642
ncu05642@ncu.edu.tw

活動介紹說明	7/27 AM	7/27 PM	7/28 PM
地點：國立中央大學第一館(地球科學系)	國立中央大學	國立中央大學	桃園永續資源館及草漯沙丘觀音展示館
8:30-9:00 報到	12:00-13:30 中餐	12:30-13:00 報到 (國立中央大學科一館環境講堂)	12:30-13:00 報到 (國立中央大學科一館環境講堂)
9:00-10:00 課程1-氣候變遷時代來了，當警覺警鐘 (汪中和研究員)	13:30-14:30 大地遊戲	13:00-14:00 前往桃園市環保科技園	13:00-14:00 前往桃園市環保科技園
10:00-10:30 午餐	14:30-15:30 課程3-碳捕存技術與氣候危機解決方案 (林殿順教授)	14:00-15:00 課程2-碳捕存技術與永續環境 (李小姐)	14:00-15:00 課程2-碳捕存技術與永續環境 (李小姐)
10:30-11:20 課程2-2050淨零 (李明旭教授)	15:30-16:30 課程4-桃園海岸環境與永續發展 (李明旭教授)	15:00-15:30 前往草漯沙丘觀音展示館	15:00-15:30 前往草漯沙丘觀音展示館
11:20-12:00 交流-全球暖化與減碳Q&A (李明旭教授)	16:30-17:00 頒發參加活動證明書	15:30-17:00 沙丘淨灘	15:30-17:00 沙丘淨灘
主辦人：陳淑芬教授 協理人：沈中毅研究員、李明旭教授、林殿順主任		17:00-18:00 活動結束(頒發證書及發放餐券) 總策劃：陳淑芬教授、李明旭教授、沈中毅教授、林殿順主任	17:00-18:00 活動結束(頒發證書及發放餐券) 總策劃：陳淑芬教授、李明旭教授、沈中毅教授、林殿順主任

圖 2.2.1 「淨零減碳親子生活營」活動宣傳海報

活動第一天在中央大學地球科學學院舉行，第一個課程邀請國內環境變遷議題最權威研究學者汪中和博士，講述「氣候沸騰時代來了，要警醒預備」(圖 2.2.2(a))。汪博士提醒大家地球已經進入沸騰時代，暖化衝擊將持續到世紀末，減碳是急迫且必要的工作，提醒大家要警醒和預備，更要知災、防災、避災和救災。接著邀請中央大學水文與海洋科學研究所，同時也是國科會永續學門副召集人李明旭教授，以「2050 淨零」為題(圖 2.2.2(b))，講述未來 30 年台灣將面臨的挑戰以及淨零的轉型過程一起反思氣候變遷，綠電等議題。課程講述結束後進行交流問答，討論十分的熱絡。下午則由計畫主持人林殿順主任和大家探討「碳捕捉技術是氣候危機解方嗎？」(圖 2.2.2(c))，提及二氧化碳捕獲與地質封存是成

熟的技術，並在國際上的成功案例。而我國具有巨量二氧化碳地質封存潛能（數百億噸），足以應付 2050 年每年封存 4,000 萬噸二氧化碳之需求。最後，共同主持人顏宏元教授以「桃園海岸環境與永續發展」為題（圖 2.2.2(d)），從桃園海岸永續治理、桃海三生計畫和海好友你永續國際三個面向進行探討，讓淨零成為永續的發展。全程皆以淺顯易懂方式進行論述及詢答，達到優質的環教科普及與落實公眾對話的目標。講演結束後，由中央大學碳封存及地熱研究中心林殿順主任，頒發「參加活動證明書」（圖 2.2.2(e)）。



(a) 汪中和博士



(b) 李明旭教授



(c) 林殿順主任



(d) 顏宏元教授



(e) 頒發參加活動證書合影

圖 2.2.2 「淨零減碳親子生活營」活動

碳封存技術社會溝通平臺建置先期規劃

本計畫租借桃園市政府環境保護局所轄「永續資源館」一隅，規劃為實體展示教育及環境教育空間。展示內容包括以模型佈展說明二氧化碳捕捉利用與封存技術（圖 2.2.3(a)），以及利用壁報、掛軸說明有關全球暖化的嚴重性、傳達我國 2050 淨零碳排目標及淨零減碳技術（圖 2.2.3(b), (c)）。28 日下午「淨零減碳親子生活營」活動安排前往「永續資源館」，參訪本計畫所設計有關「碳捕存技術與永續環境」佈展及安排「淨零綠生活」講座（圖 2.2.3(d)）。在佈展區除了有實體模型說明二氧化碳捕捉利用與封存技術，還有專業環教講師林雅君老師藉由壁報及掛軸，讓學員增加全球暖化之認知、認識 CCS 對二氧化碳減量之貢獻、了解 CCS 之各項技術及其安全性（圖 2.2.3(e)），消除民眾對於碳封存之疑慮，為社會溝通重要的要件之一。同時也邀請淨零綠生活推廣種子老師李宗勳先生進行「淨零綠生活」講座（圖 2.2.3(f)），以互動的講述方式讓學員在生活中實行減碳綠生活，了解環境保護的重要性。

講座及佈展導覽結束後，全員轉抵草漯沙丘觀音展示館旁的沙灘進行淨灘活動。淨灘成員由 28 個家庭組成，其中包含 34 位學齡孩童及 15 位觀音區的居民，共 106 人一起淨灘（圖 2.2.4(a)）。適逢強烈颱風凱米颱風（警報期間 7 月 22 日至 7 月 26 日）過後，垃圾滿布沙灘（圖 2.2.4(b)）。淨灘活動結束後統計撿拾的垃圾量，一般垃圾 128.02 公斤、寶特瓶 9.22 公斤及玻璃瓶 10.01 公斤，總共撿拾 147.25 公斤的垃圾（圖 2.2.4(c)），淨灘成果豐碩，讓參與者更深感垃圾減量和淨零減碳的重要性。



(a) 二氧化碳封存技術解說海報

(b) 實體模型及壁報



(c) 科教互動區



(d) 參訪永續資源館合影



(e) 永續環境海報解說



(f) 淨零綠生活講座

圖 2.2.3 「碳捕存技術與永續環境」佈展及「淨零綠生活」講座



(a) 淨灘成員合影



(b) 颱風過後垃圾滿布沙灘

(c) 淨灘結束後統計垃圾量

圖 2.2.4 草漯沙丘海灘淨灘活動

辦理多元領域師資工作坊探索教材教案，從培力種子教師出發，協助理解議題、進而發展相關教學內容，將 CCUS 基礎知識帶入校園及社區，讓正確觀念及知識向下紮根。本計畫於 113 年 10 月 17 日在桃園環保科技園區永續資源館，辦理「113 年淨零碳封存與資源循環再利用工作坊」，工作坊安排了五節課程（圖 2.2.5）並申請環境教育人員認證展延時數 6 小時，共有 35 位具有環教老師參加。站在第一線的環教老師都非常關注二氧化碳封存及淨零綠生活，午餐請觀音區樹林社區媽媽協助準備「淨零低碳蔬食午餐」，社區民眾的實際參與，更有助於當地居民對 CCUS 基礎知識帶入社區，擴散民眾對「淨零碳排」議題的認知（圖 2.2.6）。

113年淨零碳封存與資源循環再利用增能工作坊課程表

時間	課程主題	服務人員與授課老師	課程概述
08:30-09:00	人員報到	李冬梅	桃園市觀音區環保科技園區-永續資源館 (桃園市觀音區環科路335號)
09:00-10:00	氣候變遷影響與淨零減碳綠生活	李宗勳老師	探討全球氣候變遷所造成的影響。如何從生活中的食，衣，住，行，育，樂購著手，落實淨零減碳綠生活
10:00-11:00	桃園碳捕捉封存(CCS)之未來趨勢與效益	顏宏元老師	二氧化碳偵測小實驗，什麼是CCS負碳技術，桃園CCS示範場實施必要性，CCS效益，安全性及全球案例，Q&A
11:00-12:00	淨零綠生活與SDGs	林雅君老師	2050台灣淨零轉型十二項關鍵戰略，二氧化碳的生活應用，一破究竟Q&A，什麼是SDGs及台灣永續目標發展核心目標，學員分享。
12:00-13:00	淨零低碳蔬食午餐	樹林社區媽媽協助準備	
13:30-14:30	資源循環再利用與循環經濟	永續資源館導覽老師	永續資源館簡報，參觀3樓資源循環再利用的展場，了解各產業的循環經濟
14:30-16:00	資源循環再利用與DIY實作	林雅君老師	介紹紡織工廠邊角料的回收利用 DIY實作:甜甜圈隔熱墊

圖 2.2.5 「113年淨零碳封存與資源循環再利用工作坊」課程表



圖 2.2.6 「113年淨零碳封存與資源循環再利用工作坊」活動剪影

本計畫同仁編輯設計「永續淨零綠生活」環境教育宣導活動課程，課程模組如圖 2.2.7 所示，該課程屬環境教育之課程，本課程皆由已取得環境教育教學認證資格之講師進行授課。環境教育內容包認識台灣極端氣候的定義與成因、探討因應台灣極端氣候的策略、「碳捕捉與封存」是對抗氣候變遷的新利器、永續淨零綠

生活等觀念。同時為辦理中小學生推動行動學習坊並規劃環境教育巡禮方式，以此優質的環教科普活動，從小就了解「減碳」的重要，並藉由環境教育活動瞭解個人及自然、環境的相互依存關係，增進對環境認知、環境倫理與責任，讓正確觀念及知識向下紮根。「永續淨零綠生活」環境教育宣導活動課程模組，預計再針對觀音區社區民眾及中小學再辦理參訪及增能工作坊。

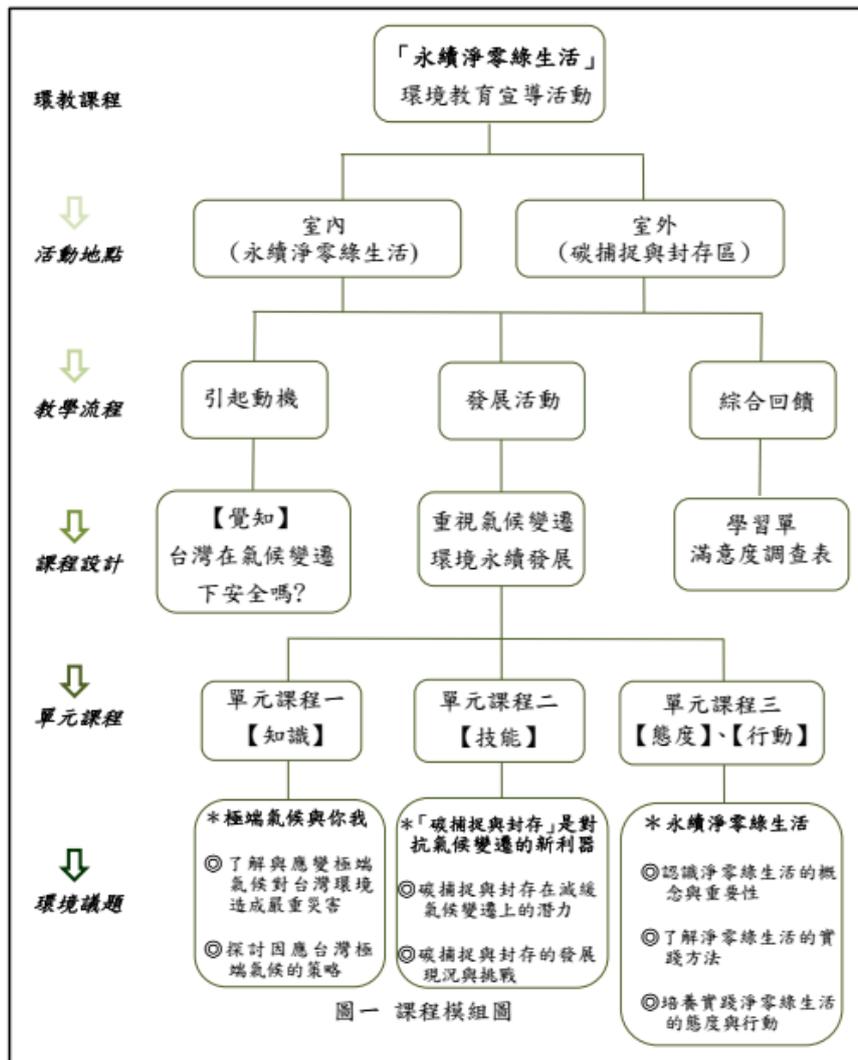


圖 2.2.7 「永續淨零綠生活」環境教育宣導活動課程模組

針對 CCUS 科學推廣教育專案計畫已經完成初步的規劃，針對國小三年級學生設計了解氣候變遷、溫室效應、碳捕捉與封存技術，並從日常生活實踐淨零綠生活的觀念與行動。目前初步發展兩套教案內容，透過四個子單元，進一步讓學生將氣候變遷認識出發，了解碳捕捉技術，參與綠生活 DIY 活動，最後了解台灣

淨零排放行動，藉此激發學生在生活中實踐環保行動的動力。本團隊將會繼續租借桃園市政府環境保護局所轄「永續資源館」一隅，為實體展示教育及環境教育空間，繼續規劃親子科學工作坊，以增加科學教育的強度及延續 CCUS 的教育推廣。

2. 利害關係人界定

盤點「碳捕存」所涉利害關係人，含括行政執行公務員、監管機構、地主和居民、意見領袖、公民團體、環保團體和商業利益團體等，進行溝通與強化生態參與式治理，減少社會衝突。同時透過溝通資訊整合平台建立，以永續發展為基礎，開誠佈公、提供資訊；舉辦利害關係人工作坊，持續透過工作坊體察利害關係人關切之安全問題以及其他利害關係人看法，與利害關係人溝通且建立互信、化解安全疑慮。

3. 社會溝通

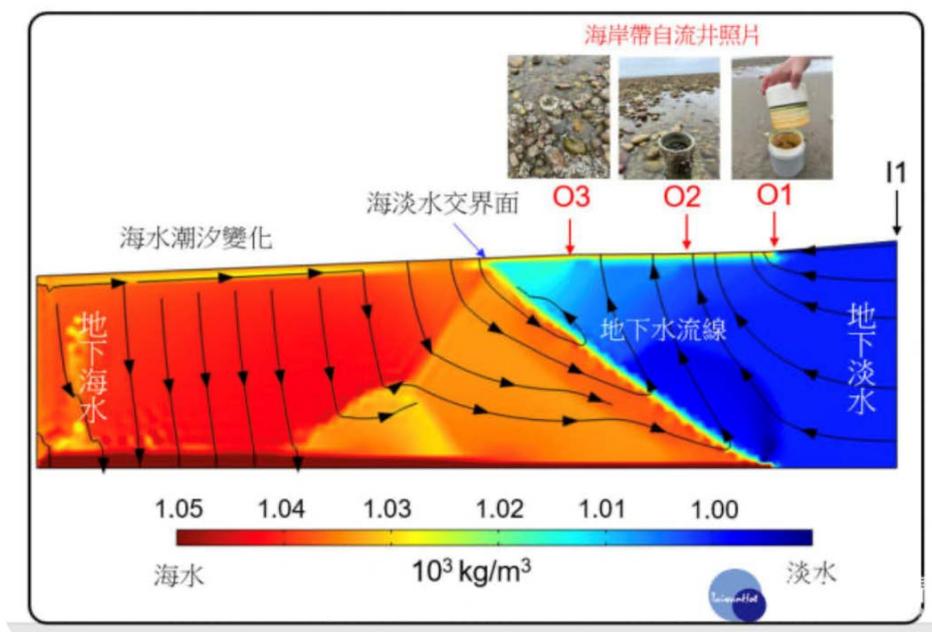
面對跨領域的複雜性議題，溝通是不可或缺的重要元素。溝通的方式大致可以分為正式溝通和非正式溝通。正式溝通為依明文規定的原則、程序來進行，如中央與地方政府之間、政府各部門之間的公函往來，各單位及各種社會組織間召開各種會議等。非正式溝通主要存在於民間，在民主社會勢必存在且不可能消除，除了希望將非正式溝通的負面影響或作用降到最低限度，但可將非正式溝通視為正式溝通的一種參考。從社會治理層面看，官方的溝通仍然主要是正式溝通，但並不排斥非正式溝通，而是盡其所能的控制和減少非正式溝通的負面影響，避免讓「公眾疑慮」轉變成為「公眾反對」。例如：讓當地居民知道什麼是 CCS，為何要做；以正確資訊化解當地居民疑慮；當地居民參與並建立信任，提升對建置「二氧化碳封存示範場」的接受度。

4月11日透過觀音區吳議員的安排，由校長帶領有關「碳捕存」老師前往市府拜會市長及相關局處首長，說明在桃科環保園區建置「二氧化碳封存示範場」的構想，經說明討論後市長原則上同意，並指示有關市府同仁繼續與中大保持聯繫。拜訪桃園市政府後，多次前往觀音地區與社區民眾、意見領袖說明市府的決策。期間又有 SRF 事件及台灣中油擬在大堀溪北岸進行「二氧化碳封存場」鑽探研究，這些事件都要透明公開事實的真相，讓當地關係人充分了解，避免以訛傳訛造成誤解，節外生枝。同時也與中油公司協調，同意原計畫鑽井移至「永續資

碳封存技術社會溝通平臺建置先期規劃

源館」旁的空地，與「二氧化碳封存示範場」共同辦理。6月26日張善政市長帶領副市長及環保局正副局長蒞校，商討雙方合作事宜。前述整併獲得市長的認同，並指示環保局及經發局給予協助。雙方預計再次檢視雙方合作事宜進度及滾動式調整。

利用媒體專業，透過文字和資料視覺化來轉譯學術知識，產出較為平易近人的科學訊息，使重要的知識透過大眾媒體發揮影響力而實現的間接溝通。本校長期在桃園海岸進行各項研究，在3月發布一則有關「桃園海岸地下水資源」的研究成果，該研究成果對桃園沿海的重要性如下：(1) 將過去入侵海岸的海水，目前已經往外海推到距海岸超過100公尺遠；(2) 不須抽取就能自行湧出(圖2.2.8)，絕對沒有地層下陷的疑慮；(3) 若收集自流湧出的淡水供應大潭電廠及觀音工業區用水，省下的用水轉供民生及灌溉，減少管線末端用水的滲漏。這些成果以科學/學術資訊轉譯，讓當地民眾了解地下水環境，同時更明瞭研究的用心，增加對校方的認同及信任感，有助於推動在桃科環保園區建置「二氧化碳封存示範場」的規劃。



中央大學TaiCOAST潮間帶自流井(O1-O3)照片與位置；
地下海水（左側）與地下淡水（右側）交互作用模擬結果。
照片王士榮副教授提供

圖 2.2.8 「桃園海岸地下水資源」的研究成果

三、試驗模場前期規劃

台灣海域及陸域具有厚達約 10 公里的新生代沉積岩層 (Lin et al., 2003; 林殿順等, 2014; 2023; 圖 2.3.1)。如此厚的沉積層序經常以厚層砂岩與頁岩交替出現, 其中, 具高孔隙率的砂岩層可成為二氧化碳的潛在儲集層; 而其上覆的頁岩層可成為蓋岩層, 具有將二氧化碳封存於地下並防止溢散至地表的功能。根據潛在二氧化碳儲集層與蓋層組合, 可將台灣西部陸海域二氧化碳儲集系統, 由淺至深分為 4 個系統 (圖 2.3.1 右圖): (1) R1 系統: 下部卓蘭層; (2) R2 系統: 錦水頁岩 (蓋層) - 桂竹林層、南莊層、觀音山砂岩 (儲集層); (3) R3 系統: 打鹿頁岩 (蓋層) - 北寮層、石底層 (儲集層); (4) R4 系統: 碧靈頁岩 (蓋層) - 木山層、五指山層 (儲集層)。

根據前人研究指出, 我國至少有四種二氧化碳地質封存模式 (圖 2.3.2), 分別為 (A) 陸上封閉構造、(B) 濱海開放鹽水層、(C) 海域開放鹽水層、(D) 海域封閉構造等 (林殿順, 2010)。其中, 濱海開放鹽水層因封存量、靠近主要二氧化碳排放源、地震風險較低、預期灌注之二氧化碳主要往海峽方向移棲 (往西移棲, 因地層往東傾斜)。因此濱海開放鹽水層之二氧化碳封存潛能成為台灣實施二氧化碳地質封存之首選場址。

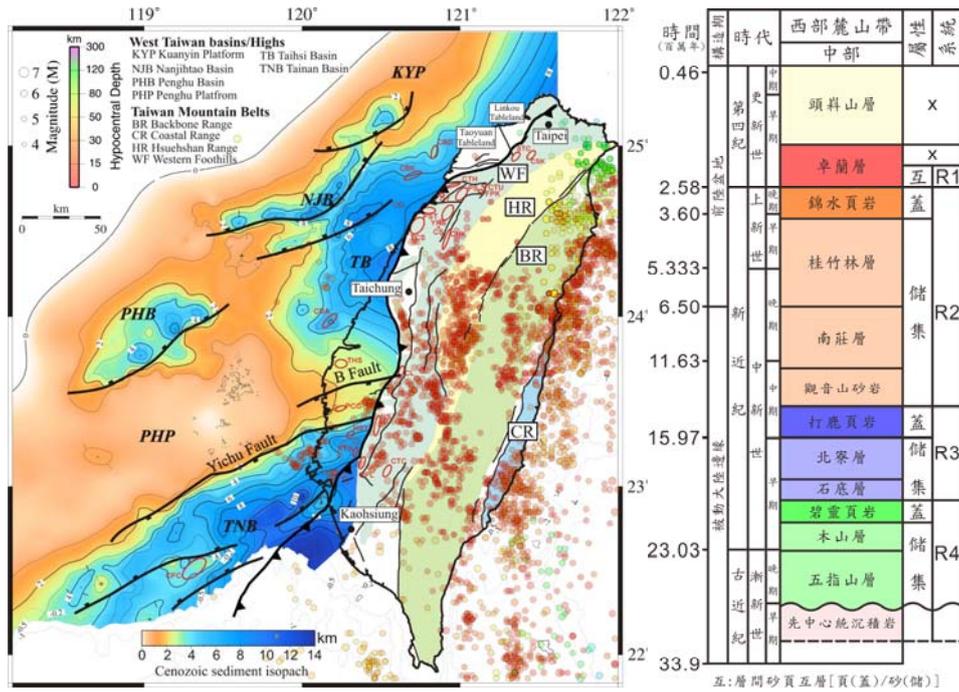


圖 2.3.1 (左圖) 台灣西部平原及台灣海峽新生代沉積物厚度、規模大於 4 的地震震源分布及活動構造與封閉構造 (紅色圈) 之分布圖; (右圖) 台灣西部陸海域新生代地層以及二氧化碳儲集系統, 由淺至深分別為 R1、R2、R3、R4 等系統。



圖 2.3.2 我國二氧化碳地質封存之概念模型

1. 碳封存試驗模場地下水水文地質模型

(1) 研究區域碳封存地質條件

在桃園地區的地質條件方面，前人研究指出二氧化碳地質封存之二氧化碳儲集層深度至少要深於 800 公尺（假設靜水應力且地溫梯度為 25°C/km；Holloway and Savage, 1993；Bachu, 2003）。因此，各潛在儲集層與蓋層的深度便成為重要的選址依據。這些地下構造圖包括新生代沉積物厚度圖（圖 2.3.3；Lin et al., 2003）、桃園台地陸海域西北-東南向地質剖面（圖 2.3.4；邱維毅，2009）錦水頁岩頂部深度圖（圖 2.3.5；邱維毅，2009）、桂竹林層頂部深度圖（圖 2.3.6；邱維毅，2009）、南莊層頂部深度圖（圖 2.3.7；邱維毅，2009）。圖 2.3.8 為觀音一號井與平鎮二號井的合成地層與電測圖，顯示研究區域濱海區大略之地下岩性與地層之深度分布。

本計畫之研究區域位於桃園台地的沿海平原區域。本區甚少斷層與地震發育，地下構造單純，使得地層面由東南往西北方向變淺（圖 2.3.3、圖 2.3.4）。本研究區域主要利用 R2 系統作為封存系統，R2 系統的區域性蓋岩為錦水頁岩，上覆於桂竹林層之上，頂部深度約為 950~1,050 公尺深，厚度則約有 150~200 公尺厚（圖 2.3.5、圖 2.3.6），為優良的蓋層。其下的桂竹林層厚度亦達 250~300 公尺厚（圖 2.3.6、圖 2.3.7），桂竹林層下方的南莊層厚度也與桂竹林層相似（圖 2.3.4）。該兩地層作為 R2 的封存層，在本研究區約可提供 500~600 公尺厚之儲集層，有優異的封存潛能。

根據上述的地質條件，本計畫將針對桃園沿海區域進行篩選，利用既存資料尋找適合的場址，建置「台灣碳封存平台」，該資料包含桃園陸域及海域可用的反射震測資料以及鑽井資料，在選定場址之後製作更為精細的地下水水文地質模型，以了解封存系統在場址地下之空間分布，並用於後續的設施與規劃，包含灌注井與監測井位置，槽車作業區、二氧化碳儲存槽、加壓設施區、監控室、岩心儲藏室、臨時工務所，地表連續監測儀器站（空氣、微震）等（圖 2.3.9、圖 2.3.10）。

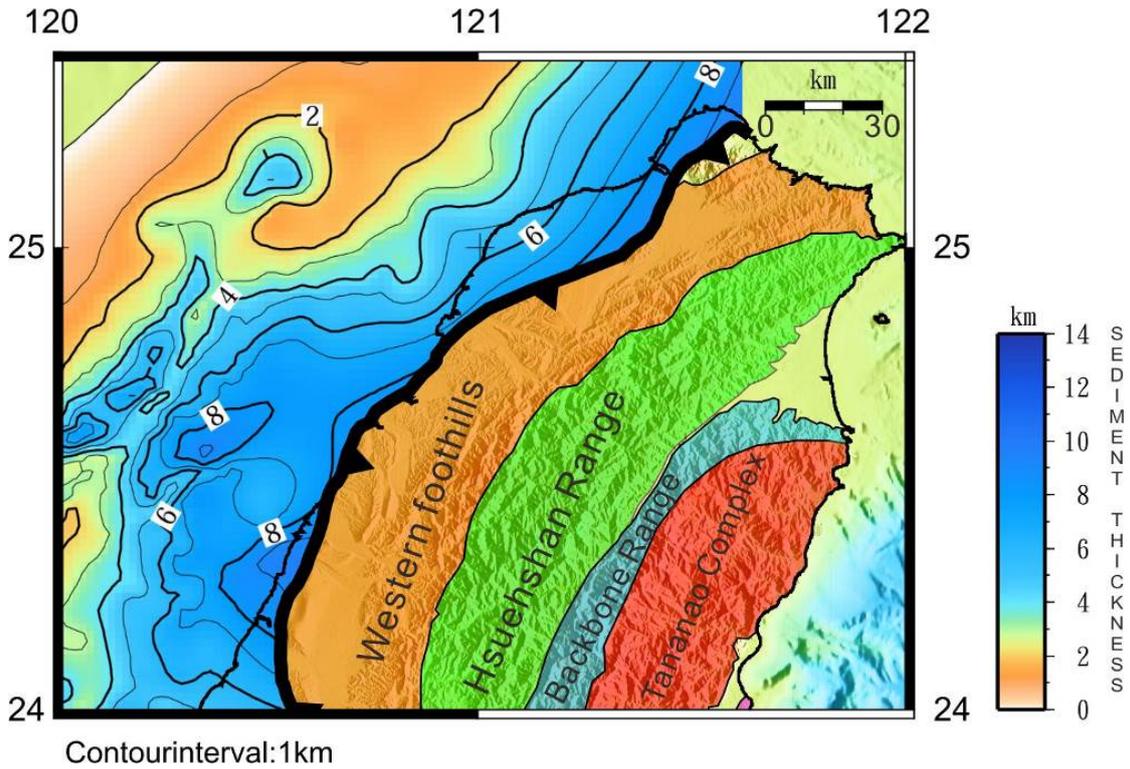


圖 2.3.3 臺灣北部新生代沉積物厚度圖 (Lin et al., 2003)

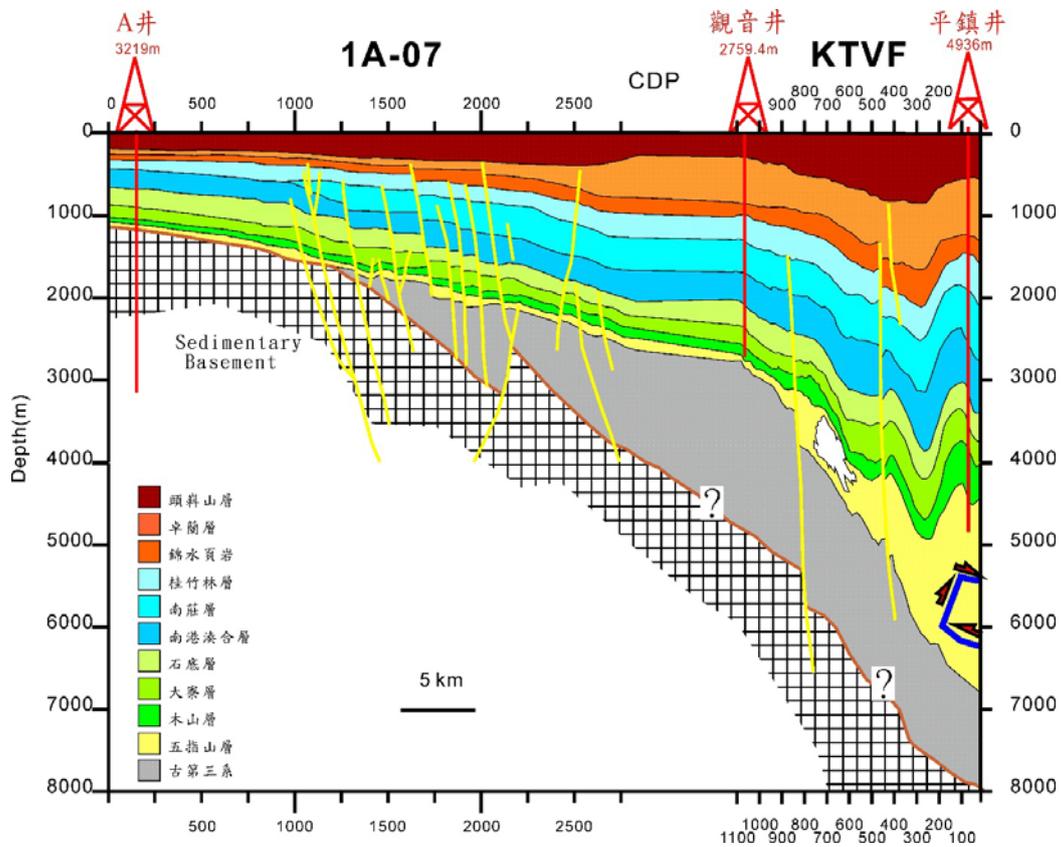


圖 2.3.4 桃園台地陸海域西北-東南向地質剖面 (邱維毅, 2009)

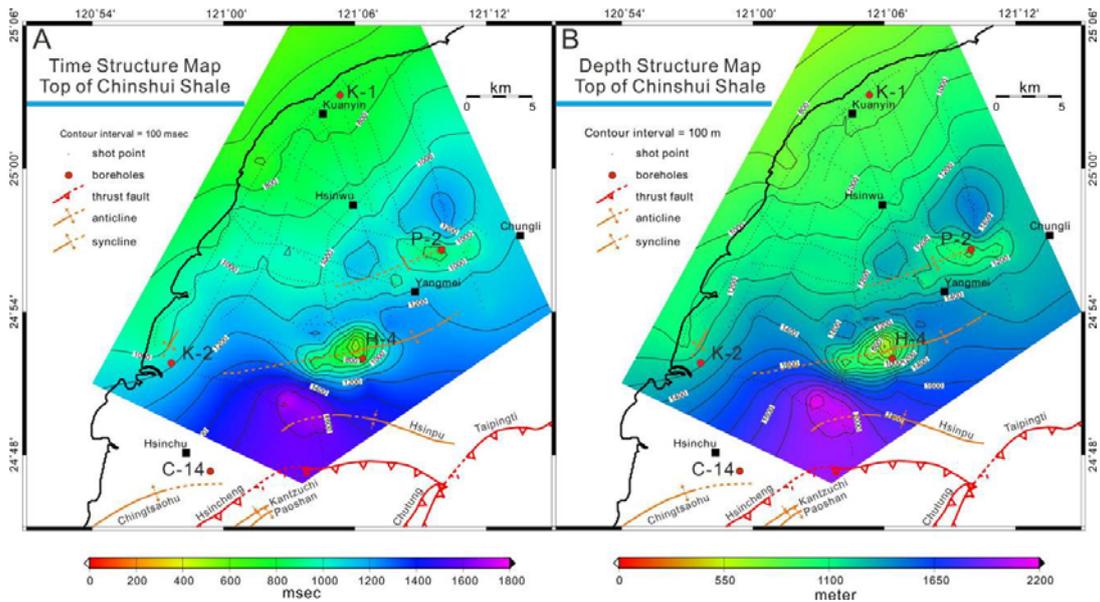


圖 2.3.5 桃園台地 R2 封存系統-錦水頁岩 (蓋層) 頂部深度圖 (邱維毅, 2009)。
左圖為錦水頁岩頂部之雙程走時 (單位為毫秒)；右圖為錦水頁岩頂部
深度 (單位為公尺)。

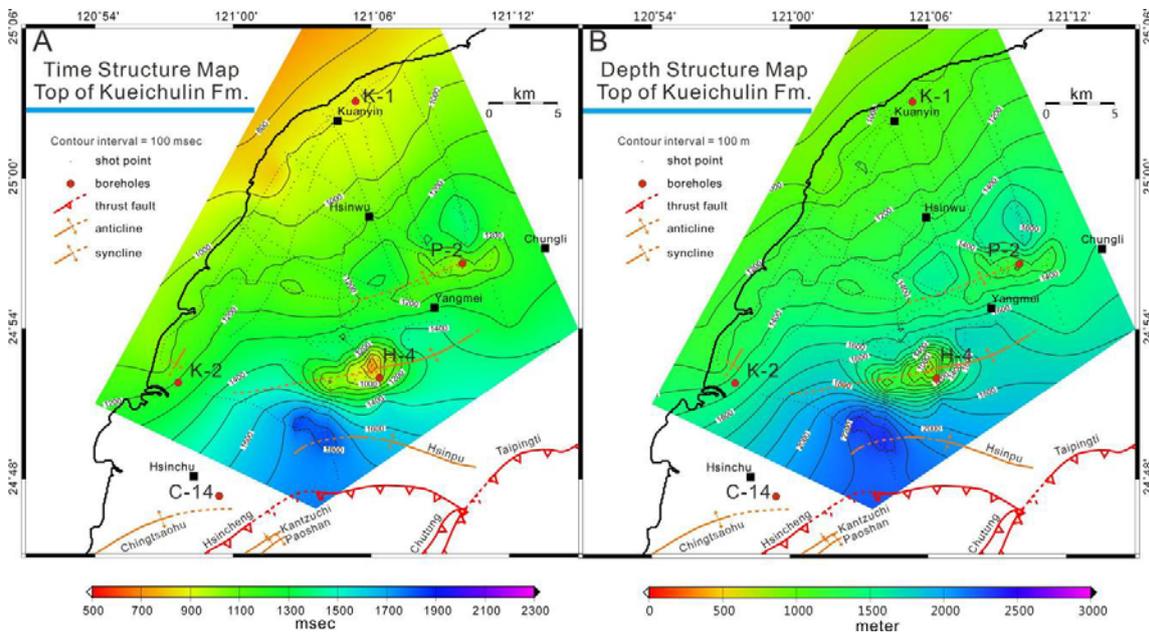


圖 2.3.6 桃園台地 R2 封存系統-桂竹林層 (封存層) 頂部深度圖 (邱維毅, 2009)。
左圖為桂竹林層頂部之雙程走時 (單位為毫秒)；右圖為桂竹林層頂部
深度 (單位為公尺)。

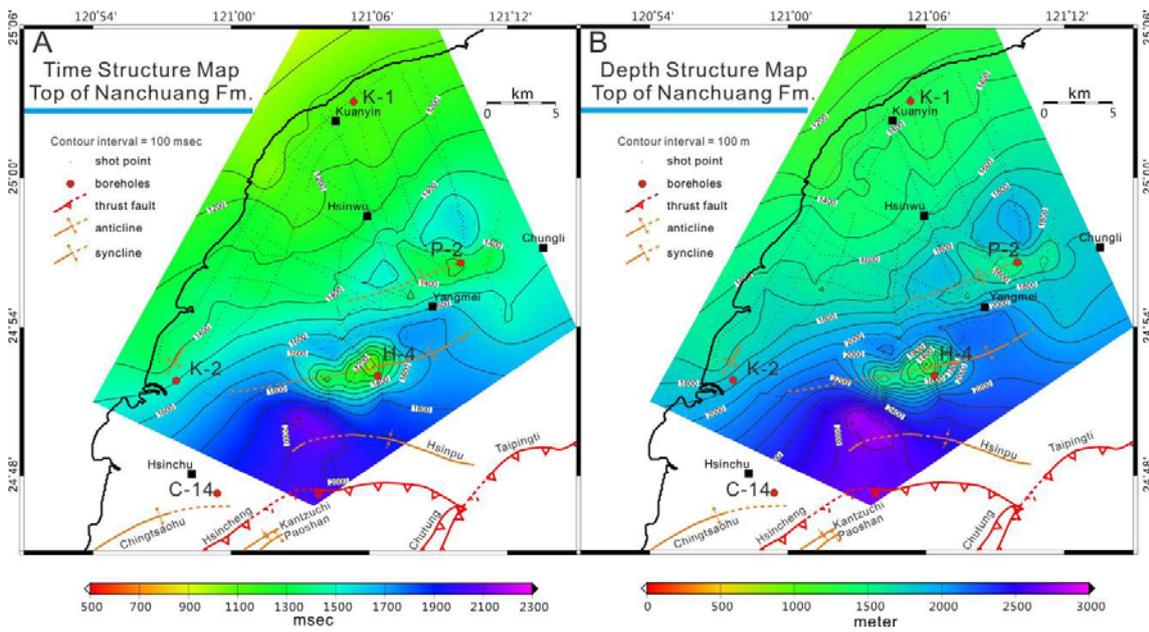


圖 2.3.7 桃園台地 R2 封存系統-南莊層（封存層）頂部深度圖（邱維毅，2009）。左圖為南莊層頂部之雙程走時（單位為毫秒）；右圖為南莊層頂部深度（單位為公尺）。

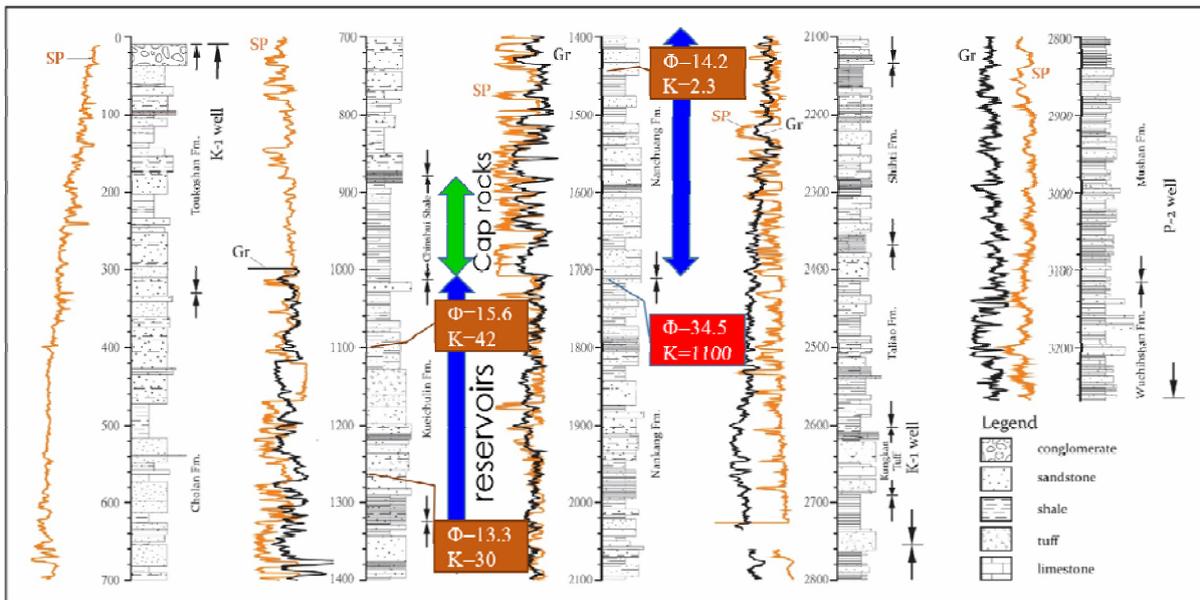


圖 2.3.8 桃園台地觀音一號井（KY-1）與平鎮二號井（PCN-2）之合成地層與電測圖（重繪自邱維毅，2009）。R2 儲集系統之蓋岩層錦水頁岩，厚約 100 多公尺、頂部位於深度約 900 公尺，下方的桂竹林層與南莊層有巨厚、高孔隙的砂岩層，可當良好的二氧化碳封存層。同樣的 R3 與 R4 系統，深度適中，也可成為潛在二氧化碳封存層。



圖 2.3.9 預定「台灣碳封存平台」之碳封存試驗場及教育館空間配置。通過灌注井與監測井之 AA'假想地質剖面見圖 2.3.10。

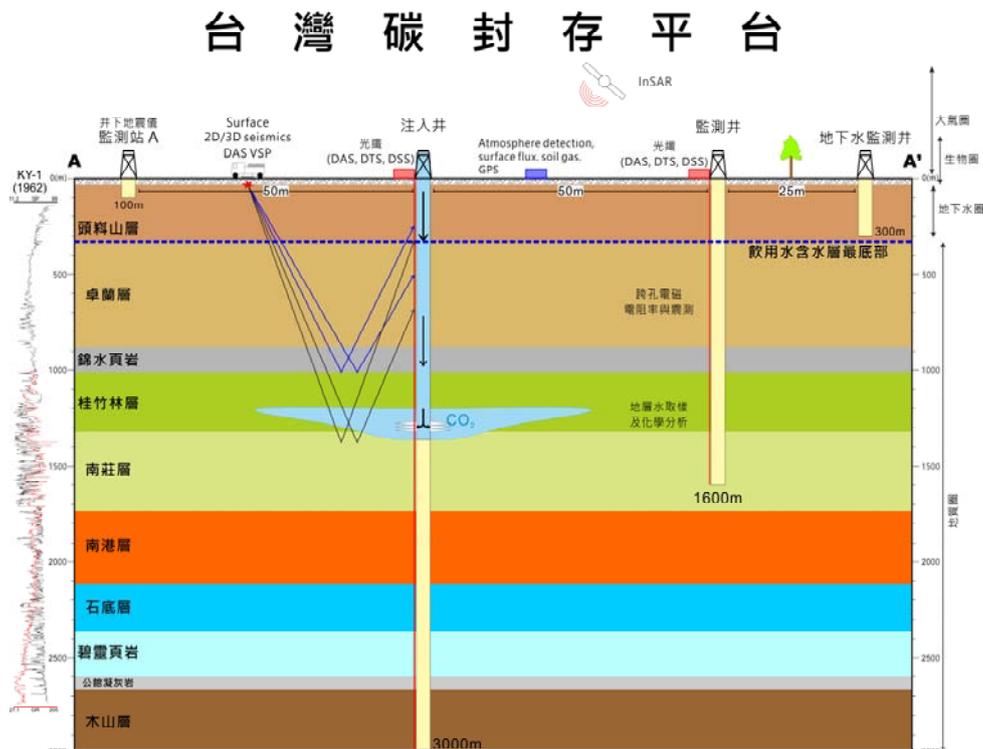


圖 2.3.10 台灣碳封存平台之碳封存試驗場之灌注井、監測井及淺層鑽井監測站之布置規劃。AA'剖面位置見圖 2.3.9。圖中顯示二氧化碳儲集層為桂竹林層與南莊層、錦水頁岩為區域性蓋岩層。預計於深度約 1,300-1,400 公尺區間，注入 1 萬噸二氧化碳，進行碳封存試驗。

(2) 震測及井下資料收集

臺灣西北部陸域及海域已有既存地下地質與地球物理資料，臺灣中油公司自 1976 至 1988 期間，於北臺灣陸海域附近收集反射震測資料，探勘地下油氣構造。中油及工研院過去的委託計畫也於桃竹陸海區域也鑽探了 7 口工業鑽井，除了兩口為海上的 CAC-1B 井、CBD-1 井，剩餘陸域的鑽井分別為：觀音 (KY-1 井)、平鎮 (PCN-2 井)、湖口 (HK-4 井)、青草湖 (CTH-14 井) 與坑子口 (KT-2 井)。國科會臺灣二氧化碳地質封存前期計畫—桃科園區 (林殿順等, 2013)，也在觀音的桃科園區內收集了三維震測資料，並利用了鑽井資料了解桃科區域的地下岩層物理特性 (圖 2.3.8)。

本計畫彙整了研究區域之既存反射震測剖面及井下資料，在「台灣碳封存平台」周邊的資料分布如圖 2.3.11，反射震測資料包含：(1) 文獻記載之中油反射震測剖面 (邱維毅, 2009; Lin et al., 2021; 圖 2.3.11 粉色線); (2) 科技部前期計畫於桃科園區所蒐集的三維高解析反射震測剖面 TK3D (王乾盈教授團隊提供; 圖 2.3.11 橘色方框)。(3) 井下資料包含：文獻記載之鑽井的井測資料、地層柱狀圖與岩性描述 (Huang and Lee, 1962; Tang, 1964; Schreiber, 1965; Chiu, 1967; Chou, 1970; Shaw, 1996; 邱維毅, 2009; 位置如圖 2.3.11 平台區東北方的 KY-1 井); (4) TaiCOAST 地下水監測站，目的為調查地下水和海水的交換機制。可用以建立地下水基線資料。(Dang et al., 2024)。期能由此資料可勾勒出桃園區域的地下地質狀況。



圖 2.3.11 台灣碳封存平台周邊之反射震測及井下資料分布衛星圖，粉紅色線為文獻記載之中油反射震測剖面（L-01 及 L-17）的位置；橘色方框則為科技部前期計畫於桃科園區所蒐集的三維高解析反射震測剖面 TK3D（王乾盈教授團隊提供）；平台區西北方為中油鑽井 KY-1，西南方為最鄰近平台的 TaiCOAST 地下水監測站，可用以建立地下水基線資料。

(3) 反射震測資料解釋

根據上述彙整之既存反射震測資料及鑽井資料，本計畫將進行震測資料解釋與井下地層對比，繪製二氧化碳 R2 封存系統之蓋岩層與儲集層之深度與各層厚度空間分布，以了解研究區域的二氧化碳封存潛能。

井下對比利用上述鑽井之井測資料及鑽井報告，將各地層介面深度定義出來，將井測資料上完成對比之各地層深度，利用時深轉換公式：(公式逆推參考陳美伶，2006)，由 V0-k 方法 (Marsden, 1992; Etris et al., 2001; Smallwood, 2002) 之公式推導求得 (中油公司的鑽井報告 Checkshot 也是用此公式)，將各地層的頂部深度(公尺)轉為時間域(毫秒)，再對比到震測剖面上，流程圖如下(圖 2.3.12)，就可以先定義出各地層頂部在反射震測剖面上的正確時間，再沿著延續的強反射訊號側向延伸，進行水平方向的地層對比；不同反射震測線間之對比，則利用相連的反射震測資料相交的位置，將地層解釋持續向外延伸。

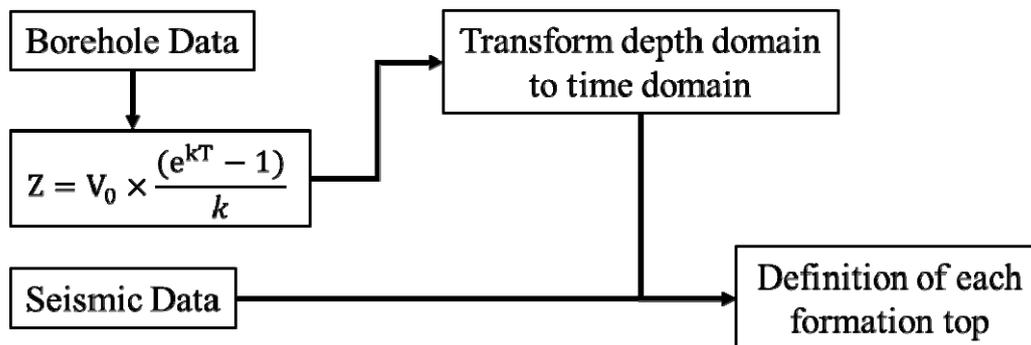


圖 2.3.12 井測資料對比至反射震測流程圖

基於上述的井下及反射震測剖面的地層對比，以下將展示並描述其中兩條鄰近台灣碳封存平台、具代表性的反射震測剖面根據井下資料對比後之解釋成果(位置如圖 2.3.11 粉紅色線)。

首先，通過觀音一號井、沿著海岸線的東北-西南向陸域剖面 L-01 (圖 2.3.13)，顯示地下地層趨勢在此走向大致平整，向南開始受構造影響有局部抬升現象。R2 系統的地層分布完整，沒有缺失現象，具有完整的蓋層及厚層的封存層，封存層厚度也一致，錦水頁岩向南受構造影響逐漸減薄，向北則厚度不受影響。

R3 系統地層亦完整但相對較薄。除了南方的主要斷層之外，往北雖局部地區有斷層，但錯距小、穿深不深、規模不大；極少有斷層穿過卓蘭層頂部，應不致影響地下水層。此處卓蘭層頂部（亦即頭嵛山層底部）及上部卓蘭層的區域，推測可能指示著地下水層的下界位置，由 KY-1 井測資料的電阻率(LN)及自然電位(SP)皆可見有顯著的變化。此外，剖面鄰近台灣碳封存平台的位置，顯示下方各地層大致平整，且正好為構造空白的區域，為構造較穩定的環境。

另一條東南-西北向的 L-17 剖面（圖 2.3.14）橫跨了從近海的平台區至較靠內陸的區域，可觀察到整體地層的趨勢轉變為向東南逐漸加深，向西北變淺。就平台內的地層與構造特徵類似於 L-01 剖面的觀察，地層平整、在此剖面的小構造不影響儲蓋系統，僅少數構造有穿過卓蘭層頂部，對地下水層影響較小。至於 L-17 東側靠內陸的地層與構造特徵有明顯的變化，發育較大規模的正斷層，且下方有背斜的特徵，構造較為複雜。

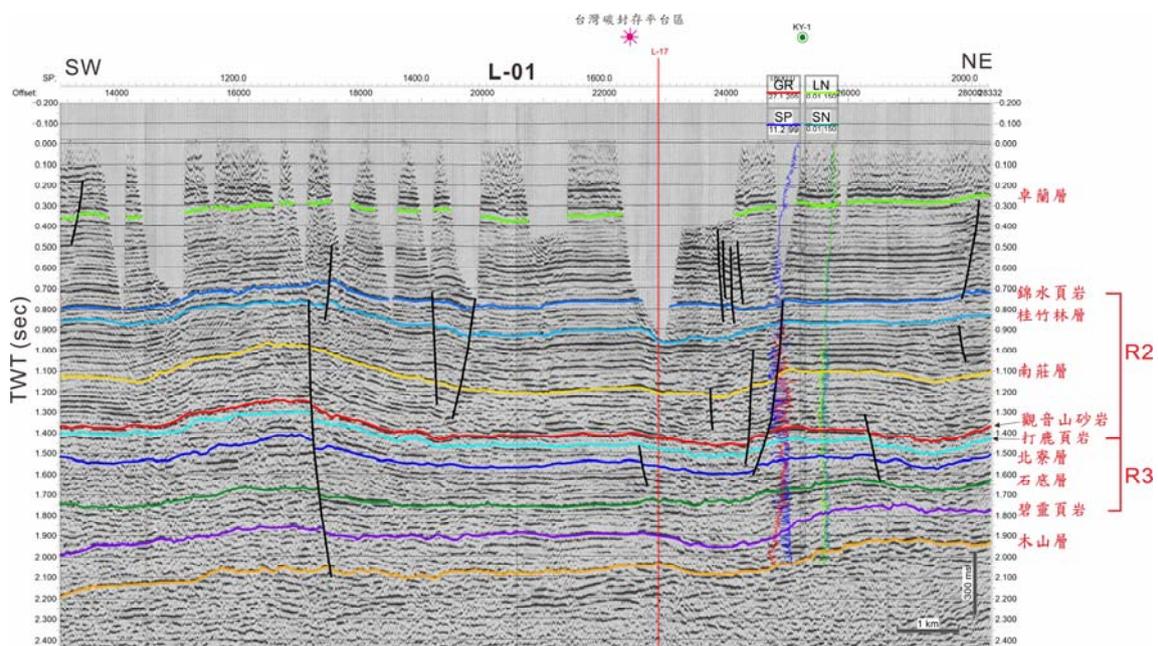


圖 2.3.13 反射震測剖面 L-01 根據 KY-1 井下資料對比之解釋剖面。各地層介面顯示地層頂部位置。剖面位置如圖 2.3.11 粉紅色線。

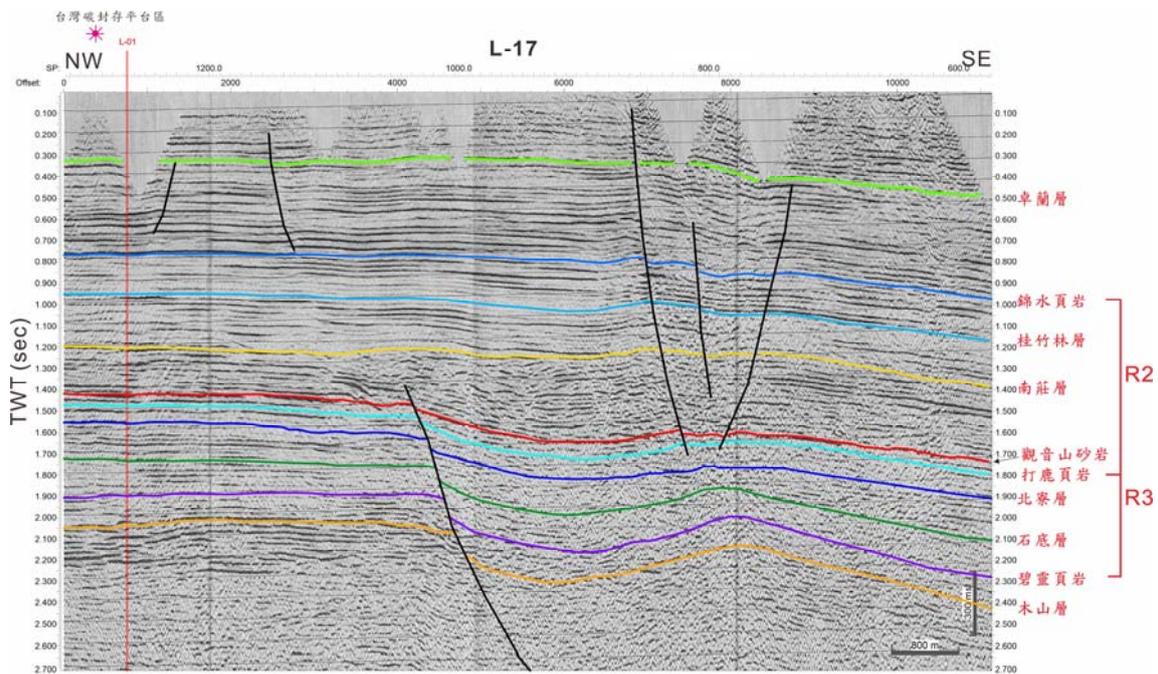


圖 2.3.14 反射震測剖面 L-17 之解釋剖面 (各地層介面顯示地層頂部位置)

(4) 研究區域潛在地下水層及 R2 封存系統之深度與厚度分布

為了解台灣碳封存平台區附近及其周邊潛在區域各地層的空間分布概況，本計畫以平台區為中心，設計 20 x 20 km 的區域範圍，作為繪製各地層之深度與厚度分布圖的範圍，並根據所蒐集的反射震測及井下資料解釋成果，繪製由卓蘭層頂部至 R2 封存系統各地層頂部的等深度圖 (圖 2.3.15~圖 2.3.19) 以及各地層的等厚度圖 (圖 2.3.20~圖 2.3.24)。由等深度圖可見，各地層的主要趨勢皆為向東南加深、向西北變淺，與震測剖面上觀察到的一致，因此二氧化碳在地層中封存將可能向西北、朝海域方向移棲。而關於封存深度條件，R2 系統的各封存層頂部皆已深於 800 公尺 (圖 2.3.17~圖 2.3.19)，位於適合二氧化碳封存之條件內。關於地層完整性，由錦水頁岩等厚度圖可知，R2 系統蓋層的結構完整沒有缺失現象 (圖 2.3.21)，厚度分布約在 75~225 公尺之間，在研究區域北部較薄，向南逐漸增厚，在中心點的平台區下方蓋層的厚度也可達 125 公尺以上，蓋層安全性高。R2 系統封存層的部分，圖 2.3.22 顯示桂竹林層整體厚度約介於 245~455 公尺之間，與南莊層厚度相似 (圖 2.3.23)，和預期的結果接近。觀音山砂岩雖然相對較薄，也有 30~210 公尺厚 (圖 2.3.24)，整體封存地層的空間厚度，可達 515~1,385

公尺的封存厚度區間，具有相當優秀的封存空間潛力。此外，潛在地下水層的底部大約在卓蘭層頂部附近（如前節所推測），由圖 2.3.15 顯示其底部深度約為 300~700 公尺，與封存地層的深度有一段距離，並其間有緻密的錦水頁岩作為蓋層阻隔、以及下部卓蘭層（R1 系統）的層間頁岩有一定的封阻能力，且研究區域的斷層較少切穿至卓蘭層頂部，封存的二氧化碳應不易影響至上方的地下水層。

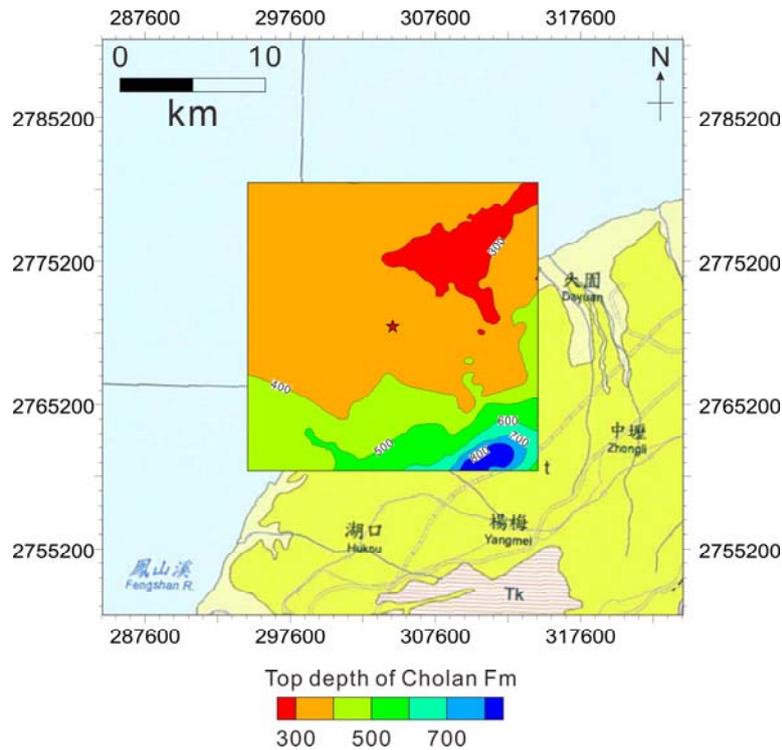


圖 2.3.15 卓蘭層頂部等深度圖（單位為公尺，紅色星號為平台位置）

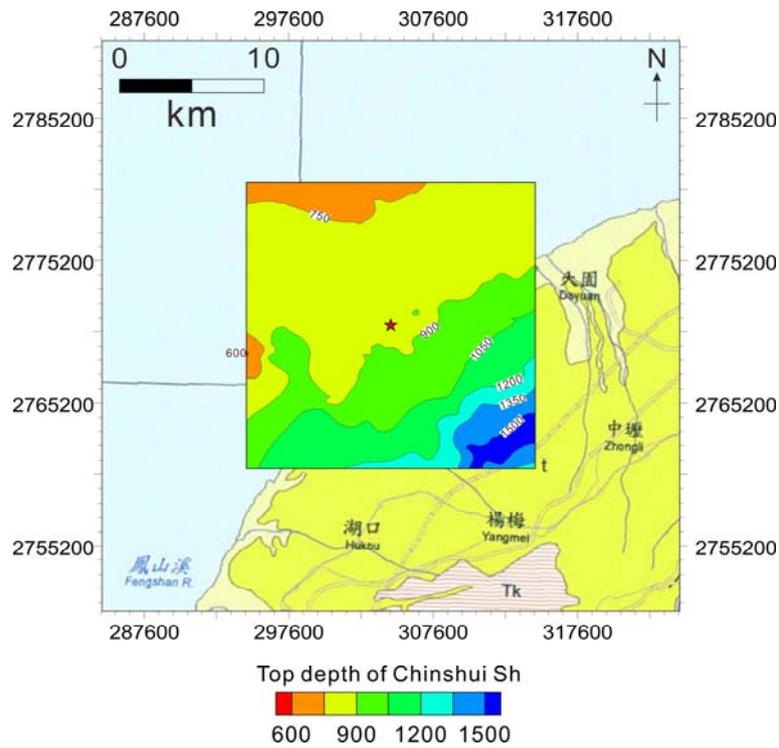


圖 2.3.16 錦水頁岩頂部等深度圖（單位為公尺，紅色星號為平台位置）

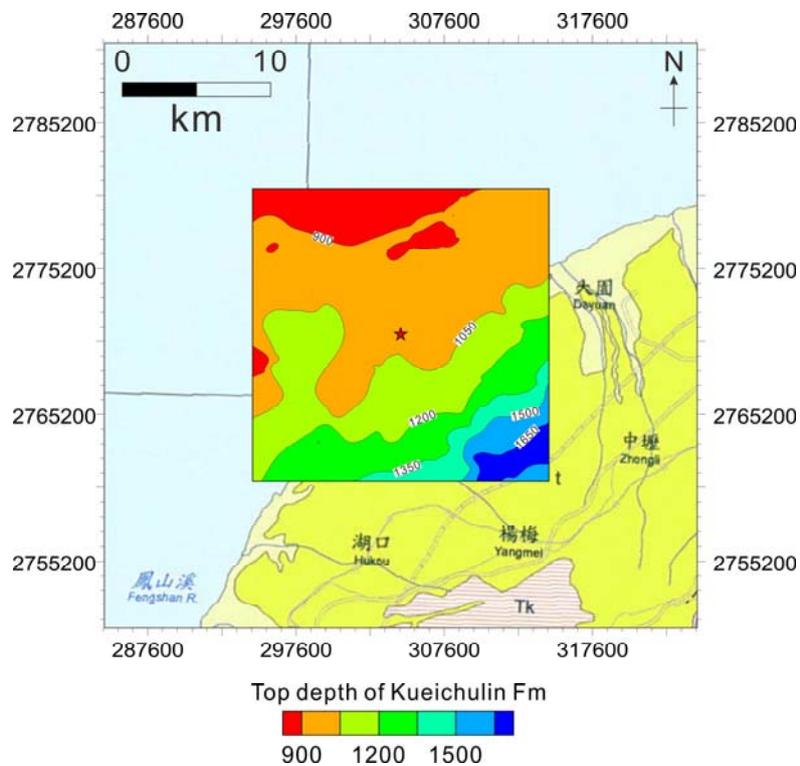


圖 2.3.17 桂竹林層頂部等深度圖（單位為公尺，紅色星號為平台位置）

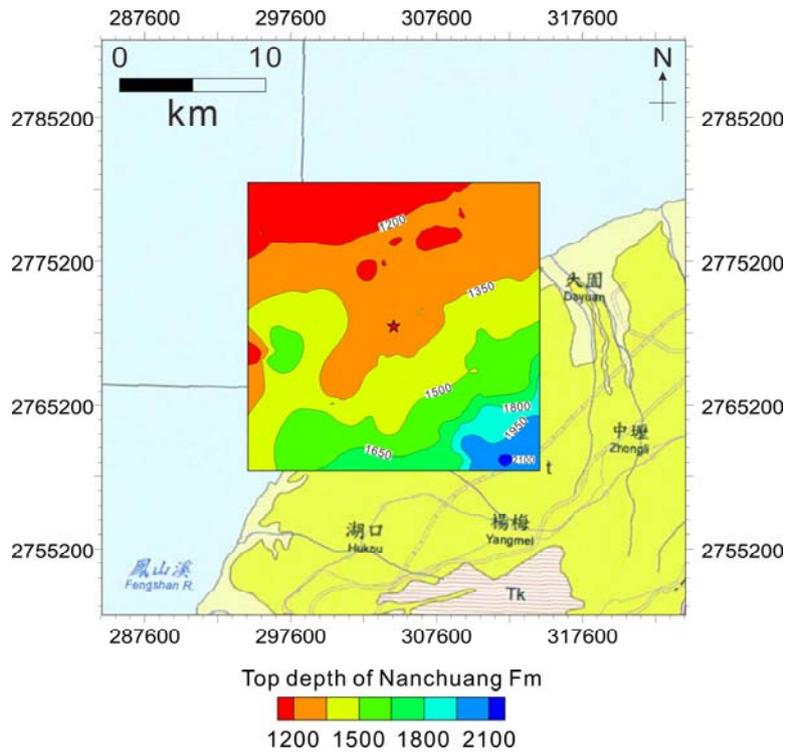


圖 2.3.18 南莊層頂部等深度圖（單位為公尺，紅色星號為平台位置）

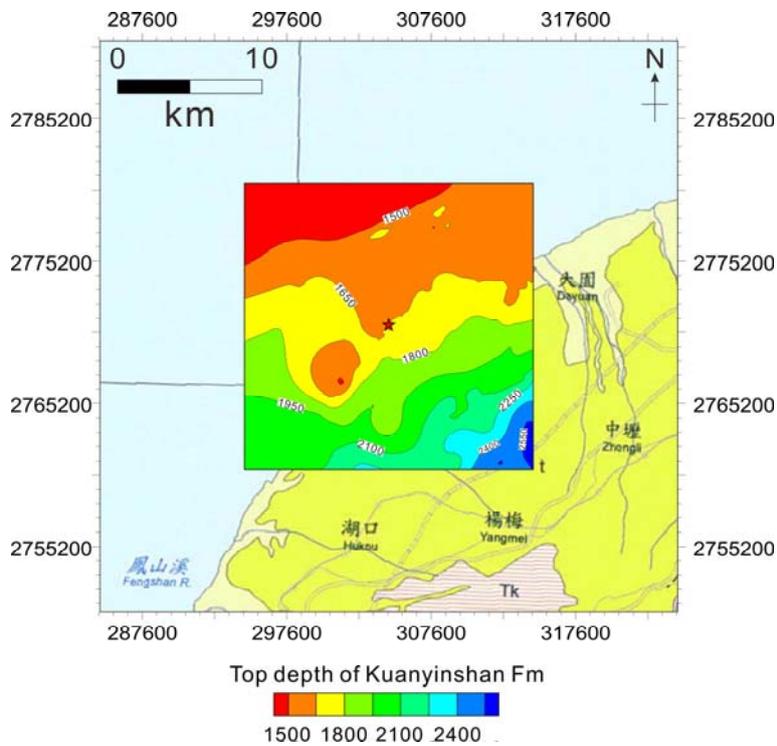


圖 2.3.19 觀音山砂岩頂部等深度圖（單位為公尺，紅色星號為平台位置）

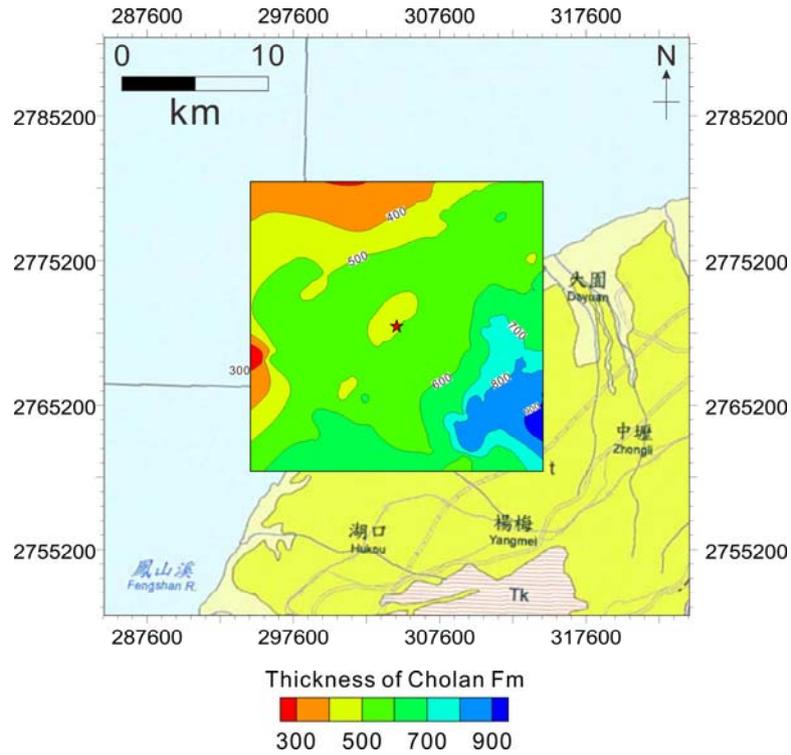


圖 2.3.20 卓蘭層等厚度圖（單位為公尺，紅色星號為平台位置）

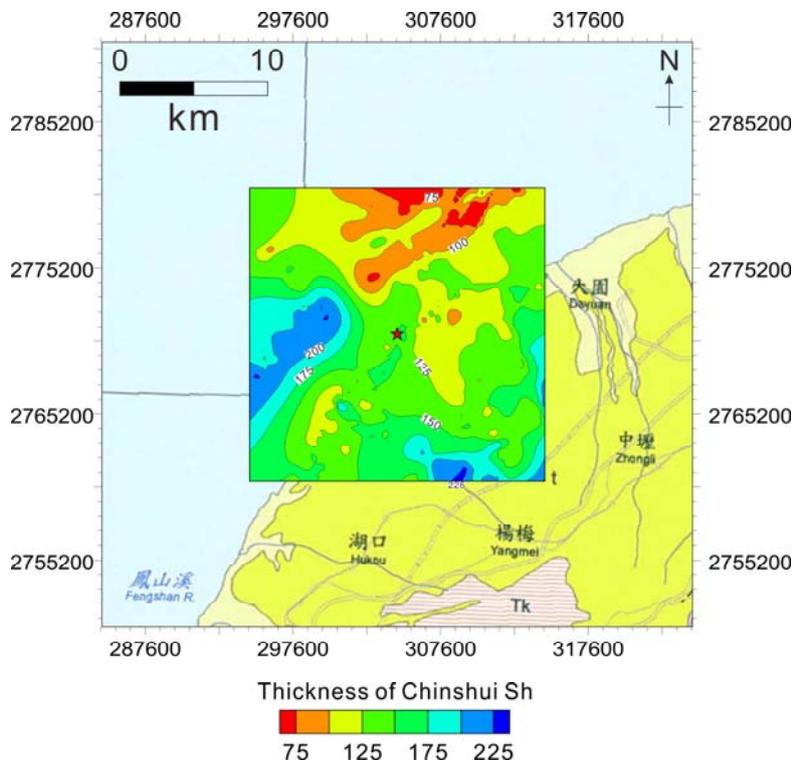


圖 2.3.21 錦水頁岩等厚度圖（單位為公尺，紅色星號為平台位置）

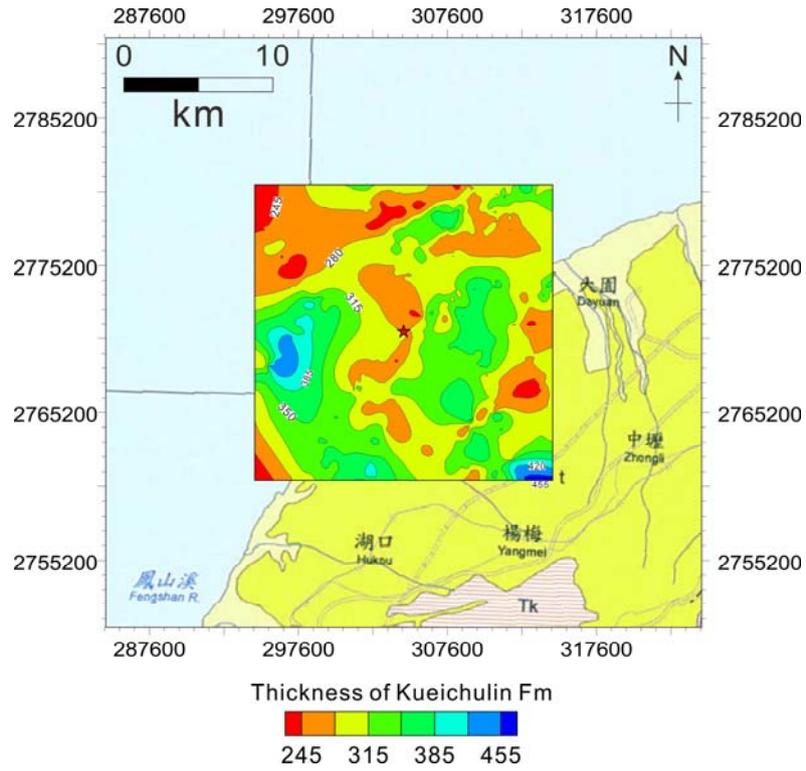


圖 2.3.22 桂竹林層等厚度圖（單位為公尺，紅色星號為平台位置）

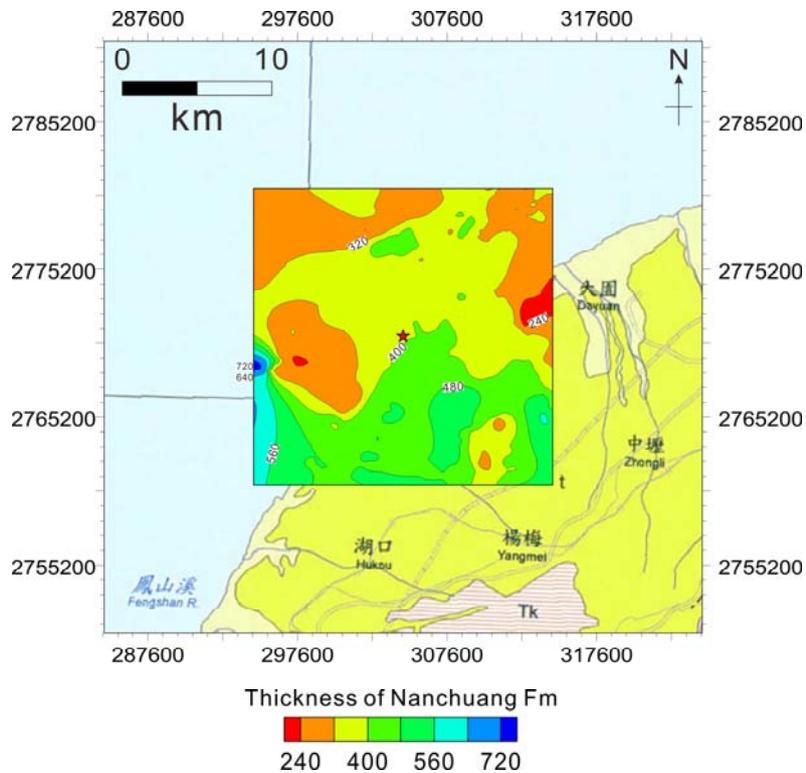


圖 2.3.23 南莊層等厚度圖（單位為公尺，紅色星號為平台位置）

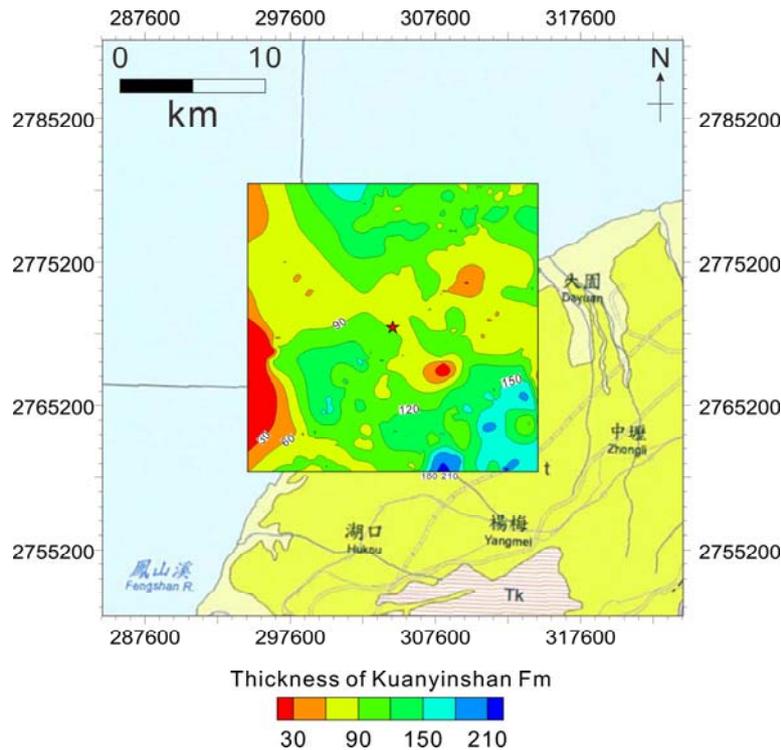


圖 2.3.24 觀音山砂岩等厚度圖 (單位為公尺，紅色星號為平台位置)

2. 鑽井暨地表設施規劃

由試驗模場之水文地質概念模型可知，主要的二氧化碳儲集層為桂竹林層與南莊層，而錦水頁岩則為良好的區域性蓋岩層。預計於深度約 1,300-1,400 公尺區間，將規劃注入 1 萬噸二氧化碳以進行碳封存試驗。

考量計畫目標、灌注規模、地層位態及移棲範圍等因素，綜合規劃以 1 口注入井、1 口監測井，搭配地表儲槽、管線、溫度和壓力控制設備、監測設備等設施以進行碳封存試驗，茲將上述設施之重要元件說明如後。

(1) 井體規劃

碳封存鑽井之規劃設計與施工的基本要旨在確保井體建造方式能夠確保安全的注入和封存二氧化碳，並防止 USDW 受到影響。本試驗模場井口建議綜合規劃採一口注入井搭配一口監測井(一注一監)之形式，以充分掌握碳流之移棲現象，初步井體規劃配置如圖 2.3.25。本配置優先以 R2 封存系統作為配置考量，由試驗模場之水文地質概念模型可知，R2 封存系統主要的儲集層為桂竹林層與南莊層，因此井口底端規畫通過桂竹林層進入至南莊層，將井深初步設定為 1,500 公尺，

並規劃於深度約 1,300-1,400 公尺區間執行試驗模場灌注計畫。鑽井井深 0-1,200 公尺規劃保護套管並背填灌漿，於井深 1,200-1,500 公尺桂竹林層與南莊層區域，應採用特殊鉻合金套管並搭配抗酸水泥，以抵抗注入過程中產生之套管酸蝕。

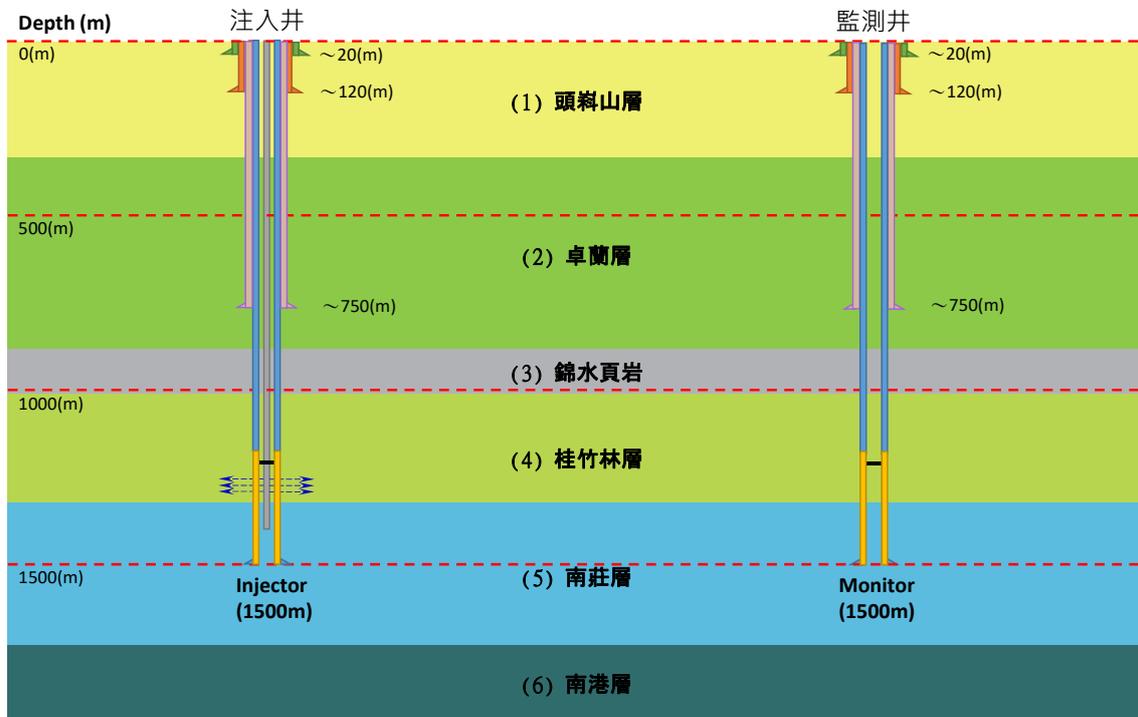


圖 2.3.25 碳封存試驗模場井體規劃

(2) 地表灌注設施規劃

本試驗規劃之二氧化碳灌注量為 1 萬噸，因此本計畫借鏡國際經驗，參考國際同等規模之碳封存試驗計畫案例進行相關地表灌注設施規劃。參考與台灣條件相近之日本長岡市 (Nagaoka) 場址的 1 萬噸碳封存先導試驗案例，所草擬之系統架構流程圖 (PFD, Process Flow Diagram) 如圖 2.3.26 所示。試驗所需之地表設施規劃包括：A. 液化二氧化碳儲槽設備、B. 液化二氧化碳增壓設備、C. 液化二氧化碳加熱設備，其中：

A. 液化二氧化碳儲槽設備

液化二氧化碳由槽車運送至儲槽區，經泵送至儲槽接收及儲存。該主要設備包括液化二氧化碳氣體槽車、液化二氧化碳儲槽、液化二氧化碳儲槽增壓蒸發器、

槽車加注軟管、壓力平衡軟管與壓力調節閥組成。

B. 液化二氧化碳增壓設備

本設備是將液化二氧化碳儲槽中的液化二氧化碳加壓至規定壓力的設備，以確保在灌注後能達到超臨界二氧化碳狀態所需壓力。主要由增壓/傳送泵和液化二氧化碳加壓泵以及其他儀錶和控制閥組成。

C. 液化二氧化碳加熱設備

本設備用於將來自於液化二氧化碳加壓泵的液化二氧化碳加熱至預定溫度，以確保在灌注後能達到超臨界二氧化碳狀態所需溫度。主要由液化二氧化碳氣體加熱器和其他溫控裝置組成。

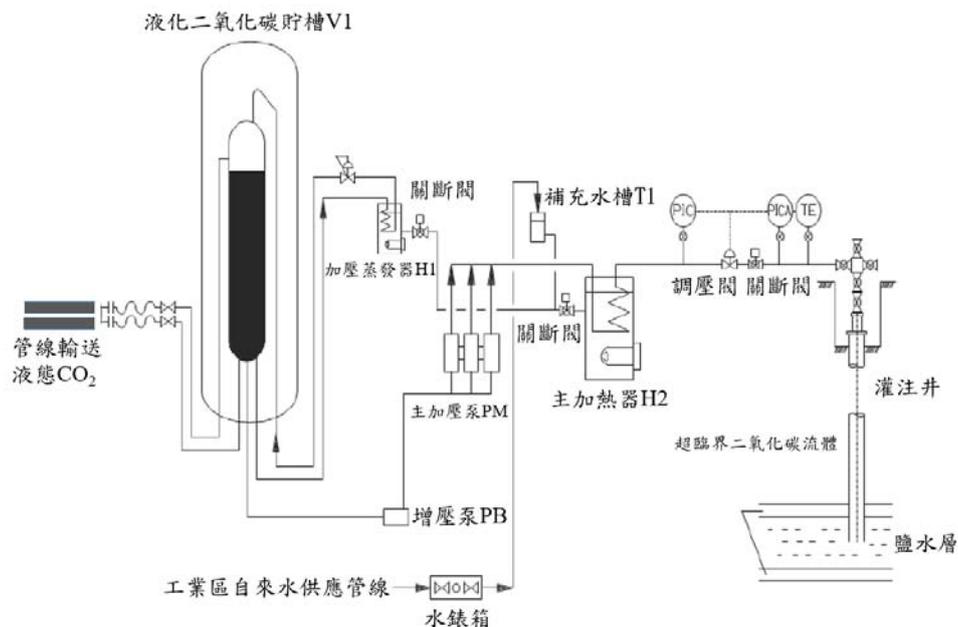


圖 2.3.26 地表灌注設施之初步規劃架構（參考日本 Nagaoka 先導試驗場址設施配置）

此外，初步針對試驗模場範圍與動線做合理佈設如圖 2.3.27，地表設施項目包括：(1) 增壓加熱設備區；(2) 監控室；(3) 儲槽區；(4) 槽車作業區；(5) 地表監測站。



圖 2.3.27 碳封存試驗模場地表設施配置

(3) 監測設施規劃

基於本計畫之目標與願景、模場地質特性、灌注量、潛在風險等初步研判結果，草擬相關監測設施規劃。本計畫參考美國能源部國家能源技術實驗室 (US DOE NETL, United States Department of Energy National Energy Technology Laboratory) 曾建立之二氧化碳封存各階段之監測目標及其所對應之技術選項 (US DOE NETL, 2009)，研擬適當且必要的監測項目。試驗模場監測所得之成果將可提供環境部針對後續二氧化碳地質封存計畫自灌注前、中、後乃至關場之完整地質封存計畫生命週期提供豐富的科學資訊，據以草擬或持續修正相關操作及監測準則或規範。

現階段國際常見的二氧化碳地質封存監測項目，依監測涵蓋範圍大致可分為三個主要類別，分別為：(1) 大氣監測、(2) 近地表監測及 (3) 地下監測，如圖 2.3.28 所示。其中，大氣及近地表監測主要針對二氧化碳是否產生逸失風險透過監測進行確認，並建立基線資料 (Baseline Data)，以便於後續進行二氧化碳封存試驗時，作為灌注前 (Pre-Injection)、灌注期間 (Injection)、後灌注期 (Post-Injection) 等階段之監測資料比對分析 (History Matching)。同時也作為評估灌注後安全評

碳封存技術社會溝通平臺建置先期規劃

估分析的依據，以確保試驗計畫之整體安全性。

由於目前國內針對二氧化碳地質封存有氣候變遷因應法作為母法，但監測項目尚無相關施行細則可供依循。故本計畫參考國際案例常用監測項目(詳表 2.3.1)及參考 EPA UIC 之二氧化碳地質封存(第六類試驗井)監測指引(Class VI Well Testing and Monitoring Guidance)，規劃下列基線監測項目，以完備碳封存試驗模場進行適法性研析所需之足夠監測資料，包括：(1) 氣象資料、(2) 大氣二氧化碳濃度、土壤二氧化碳通量、(3) 淺井地下水質、(4) 微震監測及(5) 衛星導航系統(GNSS, Global Navigation Satellite System)定位等。

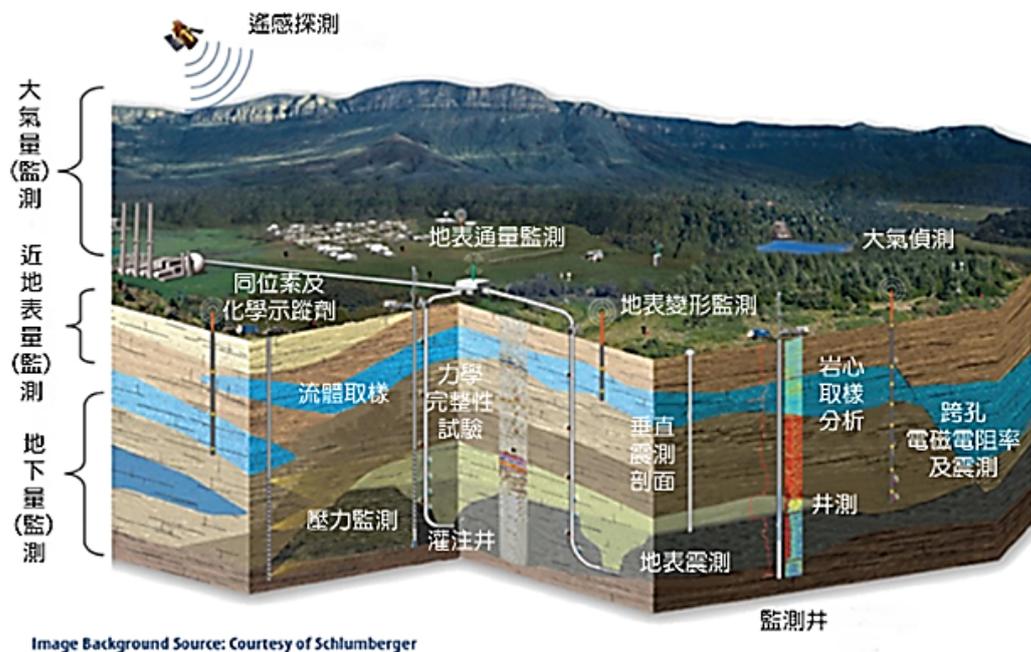


圖 2.3.28 典型的二氧化碳地質封存監測項目與分類(改繪自 US DOE NETL, 2017)

表 2.3.1 摘要國外著名碳封存案例之關鍵監測技術

國外案例	封存類別	關鍵監測技術
Cranfield (Mississippi, US)	EOR/GS	Seismic and electric geophysical methods, geochemical analysis, pressure monitoring, surface air/soil gas monitoring, tracers
Paradox/Aneth (Utah, US)	EOR/GS	Seismic and micro-seismic methods, soil gas monitoring, pressure monitoring, tracers
Ketzin (Germany)	Saline aquifer	Seismic and electric geophysical methods, pressure monitoring, geochemical analysis, soil gas monitoring, tracers
Weyburn (Canada)	EOR/GS	Seismic and micro-seismic methods, pressure monitoring, geochemical analysis, process-based soil gas monitoring
In Salah (Algeria)	Gas production	Remote satellite imaging, seismic and micro-seismic methods, surface air/soil gas monitoring

至於地下監測則需要透過深井進行，監測項目與目的較為複雜。一般可依照碳封存之生命週期區分為以下幾個監測階段，各階段之主要監測規劃如下：

A. 灌注前監測

本階段監測作業主要於灌注前根據所識別之潛在風險情境研擬灌注前之 MMV 計畫，以確立背景條件並支持後續碳封存試驗之成效評估。監測項目參考國際案例，諸如：震測、地層掃描、井下光纖等。環境監測方面，於場址建置時同步開始進行近地表環境背景值量測，包含大氣、土壤、地下水水質、微震等項目。本階段監測重點在於建立環境背景值以建立二氧化碳封存相關影響評估之基線資料，另針對井體完整性進行測試，並確認決定井口及地層之允許灌注壓力、建立大氣、土壤氣體及地下水中的二氧化碳環境背景值及驗證注入率。

B. 灌注期間監測

此階段之監測作業主要可概分為操作量測、驗證監測及環境監測等三種類型。其中，操作量測主要的目的在於掌控灌注過程中一切程序，並確保其安全性；驗證監測的目的則是瞭解場址灌注二氧化碳後複雜的過程、追蹤及量化灌注之二

碳封存技術社會溝通平臺建置先期規劃

氧化碳量體；環境監測則是為了降低二氧化碳洩漏導致健康、安全及環境（HSE, Health, Safety and Environment）的風險。

此階段的監測規劃策略主要著重於流體灌注及移棲行為，監測策略規劃考量之重點為：井口壓力、井底壓力；近地表之大氣、土壤氣體、地下水之二氧化碳濃度；灌注速率及累積灌注量、二氧化碳流之追蹤。相關監測項目之選擇需依實際試驗模場之地層特性、灌注量、灌注時間及移棲空間、是否引致特殊事件（如二氧化碳流移棲方向改變、突發洩漏情況、目標儲集層完整性變化等因素）而調整，監測方法則基於地球物理和地球化學之學理及大氣、土壤和地下水質等相關監測技術。

C. 後灌注期監測

此階段由於已停止灌注二氧化碳，因此隨著時間增長所監測的儲集層壓力應該會明顯下降，且相關封存機制將減低二氧化碳的移動性。因此，將有效減低因灌注二氧化碳而引致地震的風險。

此階段的監測規劃策略主要著重於二氧化碳流之監測及近地表二氧化碳環境濃度之監測，以掌握二氧化碳流的移棲行為，評估是否符合預期，以確保地質封存系統能有效達到永久封存之目標。至於近地表二氧化碳環境濃度監測則在於確保人體健康與環境安全條件的完整性，並作為是否需啟動緊急應變措施或是作為監管作業終止之依據。

參考 EPA UIC 二氧化碳地質封存 VI 類試驗井監測指引(Class VI Well Testing and Monitoring Guidance) 以及歷年國際上碳封存計畫之經驗，初步針對碳封存試驗模場擬定三階段之 MMV 計畫，包括：(1) 注入前 MMV 背景值量測分析；(2) 注入期間 MMV 作業 (2 年)；(3) 後注入期間 MMV 作業 (3 年)。

1. 注入前 MMV 背景值量測計畫項目，包括：(a) 地化採樣分析；(b) 垂直剖面震測 (VSP) 施測；(c) 井下光纖系統分析；(d) 地表環安背景值量測分析。
2. 注入期間 MMV 作業規劃項目，包括：(a) 地化法追蹤分析；(b) 垂直剖面震測 (VSP) 追蹤分析；(c) 井下光纖系統追蹤分析；(d) 地表環安追蹤監測分析；(e) 井間壓力、溫度監控。
3. 後注入期間 MMV 作業規劃項目，包括：(a) 地化法追蹤分析；(b) 垂直剖面震測 (VSP) 追蹤分析；(c) 井下光纖追蹤分析；(d) 地表環安追蹤監測分析；(e) 套管井測追蹤分析。

3. 成本分析

碳封存試驗模場規劃工項包括井體鑽掘、背景值試驗與完井配置、注入設施建構、MMV 作業、社會溝通平台建置等，基於不同階段可區分為六大類工項，包括：(A) 注入井 (1,500 m) 鑽設；(B) 監測井 (1,500 m) 鑽設；(C) 地質模型與封存概念模型建立；(D) 地表注入設施；(E) 注入前中後 MMV 量測分析；(F) 社會溝通平台與教育館建置。各工項之主要工作細分及成本評估說明如下：

(A) 注入井 (1,500 m) 鑽設

1. 鑽井 1,500 m
2. 岩心連續取樣 (深度 800~1,500 m 間)
3. 施作 20" (20 英吋) 表層鋼質導引套管
4. 施作 13-3/8" (13 又 3/8 英吋) 表層鋼質套管 (第一階段)
5. 施作 9-5/8" (9 又 5/8 英吋) 鋼質套管 (第二階段)
6. 施作 7" (7 英吋) 鋼質套管 (第三階段)
7. 施作 7" (7 英吋) 鉻合金 (13Cr80) 套管
8. 施作背填水泥 1,200 m
9. 施作抗酸水泥 300 m
10. 井場規設、整備、施工、維護

依據上述項目拆解後，依據現階段國內鑽井成本做合理估算，計算如表 2.3.2 所示。

表 2.3.2 (A) 項注入井鑽設 (1,500 m) 成本分析

編號	工 作 項 目	單位	數量	單價	合計
1	注入井 (1,500 m) 鑽設				
1.1	鑽井 1,500 m	公尺	1500	50,000	75,000,000
1.2	岩心連續取樣 (深度 800~1,500 m 間)	公尺	700	70,000	49,000,000
1.3	施作 20" 表層鋼質導引套管	公尺	20	5,000	100,000
1.4	施作 13'3/8" 表層鋼質套管 (第一階段)	公尺	120	5,000	600,000
1.5	施作 9'5/8" 鋼質套管 (第二階段)	公尺	750	6,000	4,500,000
1.6	施作 7" 鋼質套管 (第三階段)	公尺	1200	5,000	6,000,000
1.7	施作 7" 鉻合金 (13Cr80) 套管	公尺	300	7,000	2,100,000
1.8	施作背填水泥 1,200 m	公尺	1200	2,500	3,000,000
1.9	施作抗酸水泥 300 m	公尺	300	20,000	6,000,000
1.10	井場規劃、整備、施工、維護	式	1	8,000,000	8,000,000
	合計				154,300,000

(B) 監測井 (1,500m) 鑽設

1. 鑽井 1,500 m
2. 施作 20" (20 英吋) 表層鋼質導引套管
3. 施作 13-3/8" (13 又 3/8 英吋) 表層鋼質套管 (第一階段)
4. 施作 9-5/8" (9 又 5/8 英吋) 鋼質套管 (第二階段)
5. 施作 7" (7 英吋) 鋼質套管 (第三階段)
6. 施作 7" (7 英吋) 鉻合金 (13Cr80) 套管
7. 施作背填水泥 1,200 m
8. 施作抗酸水泥 300 m

依據上述項目拆解後，依據現階段國內鑽井成本做合理估算，計算如表 2.3.3 所示。

表 2.3.3 (B) 項監測井 (1,500 m) 鑽設成本分析

編號	工作項目	單位	數量	單價	合計
2	監測井 (1,500 m) 鑽設				
2.1	鑽井 1,500 m	公尺	1500	50,000	75,000,000
2.2	施作 20" 表層鋼質導引套管	公尺	20	5,000	100,000
2.3	施作 13'3/8" 表層鋼質套管 (第一階段)	公尺	120	5,000	600,000
2.4	施作 9'5/8" 鋼質套管 (第二階段)	公尺	750	6,000	4,500,000
2.5	施作 7" 鋼質套管 (第三階段)	公尺	1200	5,000	6,000,000
2.6	施作 7" 鉻合金 (13Cr80) 注入井管	公尺	300	7,000	2,100,000
2.7	施作背填水泥 1,200 m	公尺	1200	2,500	3,000,000
2.8	施作抗酸水泥 300 m	公尺	300	20,000	6,000,000
	合計				97,300,000

(C) 地質模型與封存概念模型建立

1. 場址周圍中尺度反射震測
2. 裸井階段井測與分析 (兩井)
3. 套管階段井測與分析 (兩井)
4. 鑽井穿孔 (兩井)
5. 鑽井酸洗 (兩井)
6. 穿孔段抽注水試驗 (兩井)
7. 注入井設備規劃與安裝配合 (注入井完井)
8. 監測井設備規劃與安裝配合 (監測井完井)
9. 現地岩心處理 (照相、掃描、記錄)
10. 岩心保存
11. 全岩分析與評估
12. 室內岩心試驗分析與評估

依據上述項目拆解後，依據現階段國內外相關震測、井測、完井、岩心處理與分析成本做合理估算，計算如表 2.3.4 所示。

表 2.3.4 (C) 項地質模型與封存概念模型建立

編號	工 作 項 目	單位	數量	單價	合計
3	地質模型與封存概念模型建立				
3.1	場址周圍中尺度反射震測	式	1	8,000,000	8,000,000
3.2	裸井階段井測與分析(兩井)	井	2	40,000,000	80,000,000
3.3	套管階段井測與分析(兩井)	井	2	25,000,000	50,000,000
3.4	鑽井穿孔(兩井)	井	2	25,000,000	50,000,000
3.5	鑽井酸洗(兩井)	井	2	5,000,000	10,000,000
3.6	穿孔段抽注水試驗(兩井)	井	2	5,000,000	10,000,000
3.7	注入井設備規劃與安裝配合(注入井完井)	式	1	38,000,000	38,000,000
3.8	監測井設備規劃與安裝配合(監測井完井)	式	1	31,600,000	31,600,000
3.9	現地岩心處理(照相、掃描、記錄)	式	1	5,000,000	5,000,000
3.10	岩心保存	式	1	3,500,000	3,500,000
3.11	全岩分析與評估	式	1	9,000,000	9,000,000
3.12	室內岩心試驗分析與評估	式	1	35,000,000	35,000,000
	合計				330,100,000

(D) 地表注入設施

1. 場地整備、注儲系統規設施工
2. 地面注儲系統設置
3. 注儲系統試運轉
4. 注儲系統操作運轉
5. 地面注儲場安全監控、儀控設施與維護
6. 井間壓力、溫度監控設施（注入井、監測井）
7. 監測井地化分析系統設置
8. 注入井與監測井之 DTS/DAS 井下光纖與分析系統設置
9. 基礎工事設計、施工、維護

依據上述項目拆解後，依據現階段國內外相關地表注入設施項目成本做合理估算，計算如表 2.3.5 所示：

表 2.3.5 (D) 項地表注入設施

編號	工作項目	單位	數量	單價	合計
4	地表注入設施				
4.1	場地整備、注儲系統規設施工	式	1	50,000,000	50,000,000
4.2	地面注儲系統設置	式	1	126,000,000	126,000,000
4.3	注儲系統試運轉	式	1	2,500,000	2,500,000
4.4	注儲系統操作運轉	式	1	17,500,000	17,500,000
4.5	地面注儲場安全監控及儀控設施	式	1	28,000,000	28,000,000
4.6	井間壓力及溫度監控設施	式	1	9,000,000	9,000,000
4.7	監測井地化分析系統	式	1	10,000,000	10,000,000
4.8	井下 DTS/DAS 光纖分析系統	式	1	70,000,000	70,000,000
4.9	基礎工事設計、施工、維護	式	1	12,000,000	12,000,000
	合計				325,000,000

(E) 注入前中後 MMV 量測分析

1. 監測井鹽水層地化採樣分析
2. 監測井垂直剖面震測 (VSP) 施測及分析
3. DTS/DAS 井下光纖系統分析
4. 地表環安監測分析
5. 套管井測追蹤分析
6. 注入碳流移棲情境數值模擬
7. 注儲結果比對分析
8. 洩露風險評估與分析
9. 注入井封井或後續方案研擬

依據上述項目拆解後，依據現階段國內外相關 MMV 項目成本做合理估算，計算如表 2.3.6 所示：

表 2.3.6 (E) 項注入前中後 MMV 量測分析

編號	工作項目	單位	數量	單價	合計
5	注入前中後 MMV 量測分析				
5.1	監測井地化鹽水層採樣分析	次	25	2,000,000	50,000,000
5.2	監測井垂直剖面震測(VSP)施測及分析	次	6	9,000,000	54,000,000
5.3	DTS/DAS 井下光纖系統分析	次	21	6,000,000	126,000,000
5.4	地表環安量測分析	式	1	70,000,000	70,000,000
5.5	套管井測追蹤分析	次	1	25,000,000	25,000,000
5.6	注入碳流移棲情境數值模擬	式	1	2,500,000	2,500,000
5.7	注儲結果比對分析	次	7	900,000	6,300,000
5.8	洩露風險評估與分析	次	20	2,000,000	40,000,000
5.9	注入井封井或後續方案研擬	式	1	9,000,000	9,000,000
	合計				382,800,000

(F) 社會溝通平台與教育館建置

1. 教育館室內設計與布置
2. 大眾傳播與利害關係人溝通方法建立
3. 民眾教育與社會溝通

依據上述項目拆解後，依據現階段國內相關工項成本做合理估算，計算如表 2.3.7 所示：

表 2.3.7 (F) 項社會溝通平台與教育館建置

編號	工 作 項 目	單位	數量	單價	合計
6	社會溝通平台與教育館建置				
6.1	教育館室內設計與布置	式	1	20,000,000	20,000,000
6.2	大眾傳播與利害關係人溝通方法建立	式	1	5,000,000	5,000,000
6.3	民眾教育與社會溝通	式	1	5,000,000	5,000,000
	合計				30,000,000

綜合上述細項成本合計為 13 億 1,950 萬元整，依據主要工項總結本計畫之初步預算分析結果如表 2.3.8 所示。

表 2.3.8 不同工項之成本分析表

主要工項	預算額 (萬元)
(A) 注入井鑽設 (1,500 m)	15,430
(B) 監測井鑽設 (1,500 m)	9,730
(C) 地質模型與封存概念模型建立	33,010
(D) 地表注入設施	32,500
(E) 注入前中後 MMV 量測分析	38,280
(F) 社會溝通平台與教育館建置	3,000
總計	131,950

4. 地下水品質基線資料

為了解二氧化碳地質封存在洩漏風險下是否會影響到地下水層，在灌注後的監測也必須對地下水做持續的水質測量，這些監測也須仰賴灌注前的測量基線資料，基線資料來源將會取用選定場址周圍的地下水井、地下水井報告或前人的研究等，如環境部之「全國環境水質監測資訊網」資料。未來也規劃於預計碳封存試驗場址進行地下水井鑽探，進行地下水品質量測與監測等工作。

現有最接近試驗場址的地下水監測站為 TaiCOAST 臨海工作站（位置如圖 2.3.11），為國立中央大學所建置，目的為調查地下水和海水的交換機制（Dang et al., 2024），可藉由採取此監測站的地下水井之水樣進行水質分析，成為本區地下水水質基線資料。

非常感謝環境中心林淇平研究員的協助聯繫與幫忙，並提供採水的儀器，使本團隊得以於 2024 年 10 月 30 日前往 TaiCOAST 工作站進行採水樣作業，同時也非常感謝盧乙嘉教授帶領整個實驗室團隊一同前往採樣，並進行詳細的地球化學分析，建立了珍貴的本區第一筆地下水基線資料。

本次採樣的地下水井為 TaiCOAST 工作站內的兩口井，分別為 BW01 與 BW07，水井位置如圖 2.3.29 和圖 2.3.30，兩井位置相近，井深分別為 100 公尺及 25 公尺。水井已被沉積物及植被覆蓋，經過一陣清理後方可將井口打開（圖 2.3.31），採水使用貝勒管採取近表面水（圖 2.3.32），並進行一系列前處理與初步分析（圖 2.3.33），將完成前處理的水樣收集於採樣瓶後帶回實驗室分析。水化學分析成果如表 2.3.9，結果顯示兩口井非常相似，可見兩井之間除了距離近之外，地下水的聯通性佳。同時也將分析成果繪製成 Piper 圖（圖 2.3.34），由圖可見，兩口井的成分皆為碳酸氫鎂泉（代表自由地下水，Piper 圖的說明根據網址：<https://hatarilabs.com/ih-en/what-is-a-piper-diagram-and-how-to-create-one>）。由此可知，桃園的臨海淺層仍為自由地下水（淡水）所充填。



圖 2.3.29 TaiCOAST 臨海工作站的設施及地下水井配置圖 (林淇平博士提供)

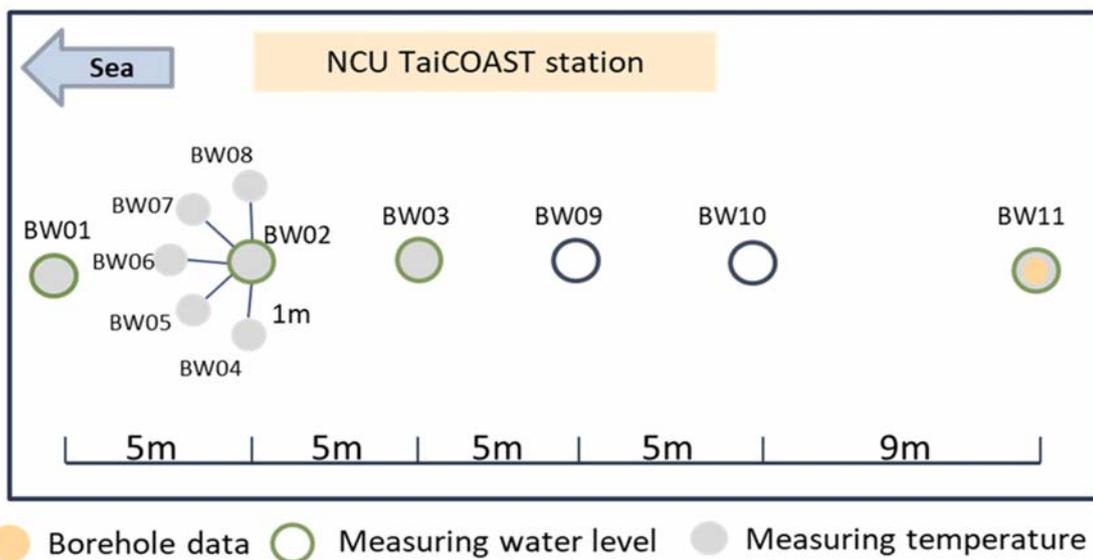


圖 2.3.30 TaiCOAST 臨海工作站內地下水井之井名及其分布位置 (林淇平博士提供)。



圖 2.3.31 左圖為 BW07 井、右圖為 BW01 井



圖 2.3.32 左圖為採水所使用的貝勒管及分析儀器，中圖為使用貝勒管採水的過程，右圖將採到的水樣放入水瓢預備進行處理與分析。



圖 2.3.33 使用精密儀器進行水樣初步分析

表 2.3.9 TaiCOAST 兩口地下水井 BW01 及 BW07 的地球化學分析成果（盧乙嘉教授提供）。

Well Name	Date	Time	Well depth	T (°C)	pH (Field)	TDS (mg/L)	EC (us/cm)	Salinity (%)
BW01	2024.10.30	14:55	100m	23.7	7.56	201	296	0.016
BW07	2024.10.30	16:04	25m	23.9	7.44	201	297	0.016
Res (Ω.cm)	F ⁻ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	Br ⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	PO ₄ ³⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	CO ₃ ²⁻ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)
3370	<0.5	47.41	<0.5	<0.5	<0.1	5.622	0	220
3370	<0.5	48.33	<0.5	<0.5	<0.1	5.56	0	195
Li ⁺ (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	NH ₄ ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	Mn ²⁺ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)		
<0.5	31.1	<0.1	2.63	<0.5	30.5	6.38		
<0.5	30.9	<0.1	2.93	<0.5	29.7	6.26		

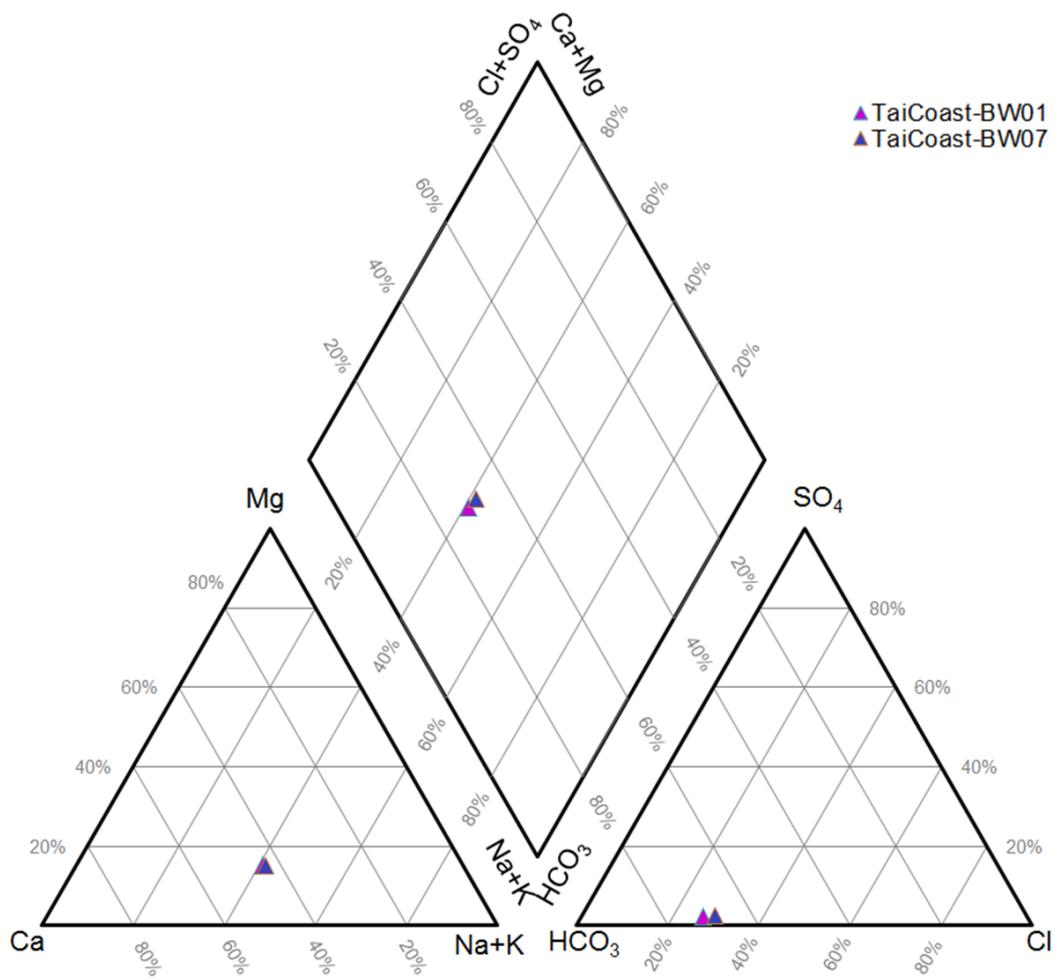


圖 2.3.34 TaiCOAST 兩井 BW01 及 BW07 的 Piper 圖分析成果(盧乙嘉教授提供)

四、國際合作前期規劃

1. 國際合作對象

二氧化碳地質封存是成熟的技術，全世界已有很多碳封存案場。我國碳封存案場還在初期選址及開發階段，亟需借鏡國際，汲取碳封存案場開發之各項經驗。本計畫選擇美國伊利諾州的 IL-CCS Project 為國際合作對象，期盼建立長期的技術交流與合作，學習其碳封存案場成功之社會溝通及營運之經驗，作為本計畫社會溝通技術示範的參考與依據。選擇 IL-CCS Project 為國際合作之對象，原因如下：

- (1) IL-CCS Project 的 Decatur 場址已灌注約 4 百萬噸二氧化碳，是美國最成功的碳封存工業規模示範場址。
- (2) Decatur 場址設有國家封存教育中心 (NSEC, National Sequestration Education Center)，進行社會與民眾溝通，成效非常良好。
- (3) Decatur 場址的二氧化碳儲集層及蓋層之地質條件（如岩性、物理性質及深度）與本計畫所規劃的桃園場址極為類似，其施行之灌注及監測技術極具參考價值。

美國伊利諾盆地 (Illinois Basin) 為一巨大橢圓形窪地，覆蓋伊利諾州約 70% 的面積，綿延約 60,000 平方英里。圖 2.4.1 顯示伊利諾盆地可封存二氧化碳的深部鹽水層範圍 (Greenberg et al., 2022)，包含西蒙山砂岩 (Mt. Simon Sandstone)、聖彼得砂岩 (St. Peter Sandstone) 和柏樹砂岩 (Cypress Sandstone)，深度多超過 2,500 英尺之適合二氧化碳封存的環境，其中西蒙山砂岩是最早用於儲存二氧化碳的地層之一，也是美國第一個商業規模碳封存計畫：伊利諾盆地-迪凱特計畫 (IBDP, Illinois Basin-Decatur Project) 的重點，IBDP 計畫為 IL-CCS 計畫的第一期計畫名稱。

伊利諾盆地-迪凱特計畫 (IBDP, 2007~2021) 是由美國能源部資助中西部聯盟 (MGSC, Midwest Geological Sequestration Consortium) 的業界整合型商轉示範計畫，位置與廠區配置如圖 2.4.2 所示 (Greenberg et al., 2017; Greenberg et al., 2022)。IBDP 計畫由美國伊利諾州地質調查所 (ISGS, Illinois State Geological Survey) 領導，並由中西部地質封存聯盟執行，該聯盟是美國能源部國家能源技術實驗室 (US DOE NETL) 資助的七個區域碳封存合作夥伴關係之一。ISGS 也與印第安納州地質調查所 (現為印第安納州地質和水調查所) 和肯塔基州地質調

查所作為主要合作夥伴。其他合作夥伴包括阿徹丹尼爾斯米德蘭（ADM, Archer Daniels Midland）、Trimeric Corporation、斯倫貝謝（SLB）、楊百翰大學（Brigham Young University）和南伊利諾大學（Southern Illinois University）。

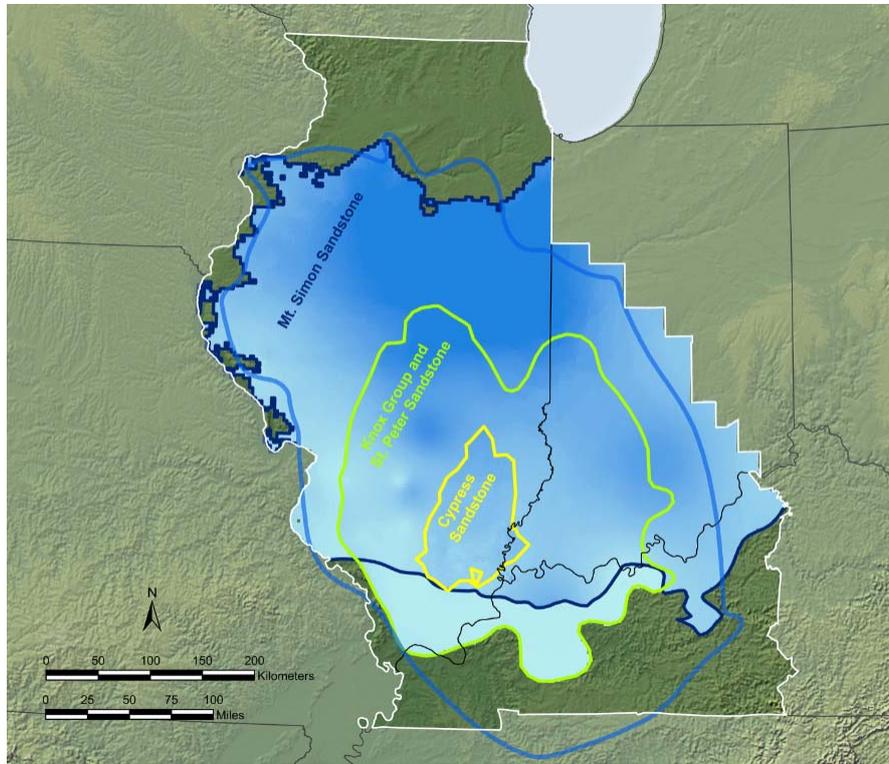


圖 2.4.1 伊利諾盆地地區可封存二氧化碳之深部鹽水層範圍

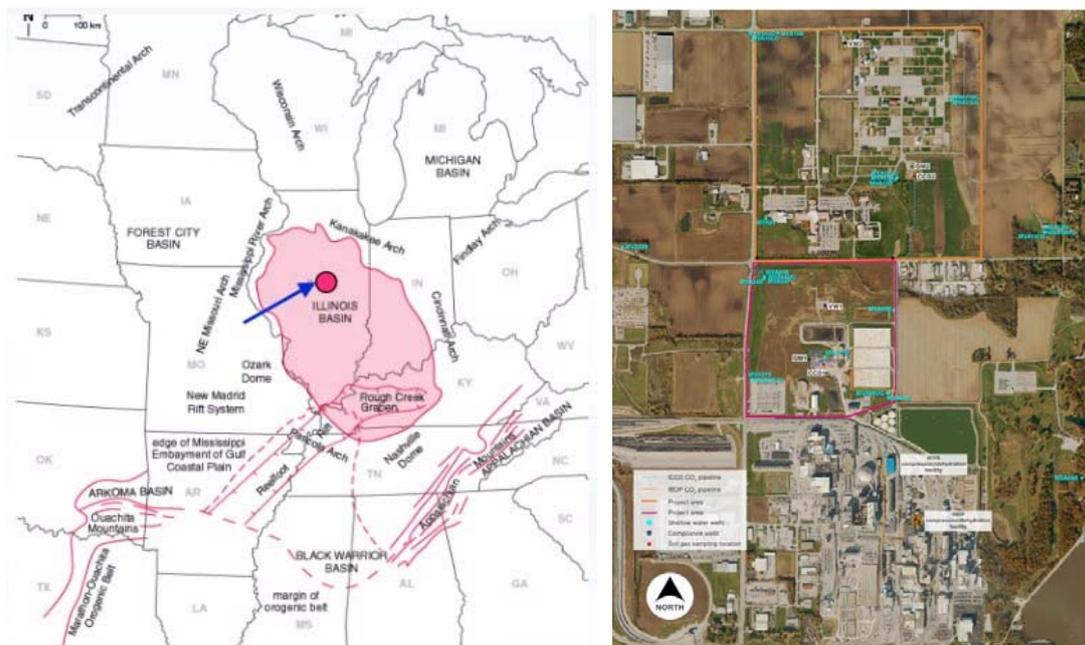


圖 2.4.2 美國 IBDP 示範場址示意圖

碳封存技術社會溝通平臺建置先期規劃

該計畫將位於伊利諾州迪凱特的 ADM 公司之玉米轉製乙醇發酵之生質油製程所產出的二氧化碳進行捕捉，以約 1 英里的管線將超臨界二氧化碳運輸並注入至約 2,000 公尺深、460 公尺厚的西蒙山砂岩鹽水層中（圖 2.4.3）。西蒙山砂岩因其深度、廣度以及優異的孔隙率（<20%）和滲透率（約為 26 mD）特性，成為良好的封存地層（Bioeconomy, 2017；Greenberg et al., 2022）。Eau Claire 地層覆蓋在西蒙山砂岩之上（圖 2.4.3），為厚層滲透率低的頁岩，形成了極佳的蓋層。除了此蓋層之外，至地表之間數千英尺的地層中，仍有多層厚且範圍廣的不滲透頁岩地層，可做為蓋層。

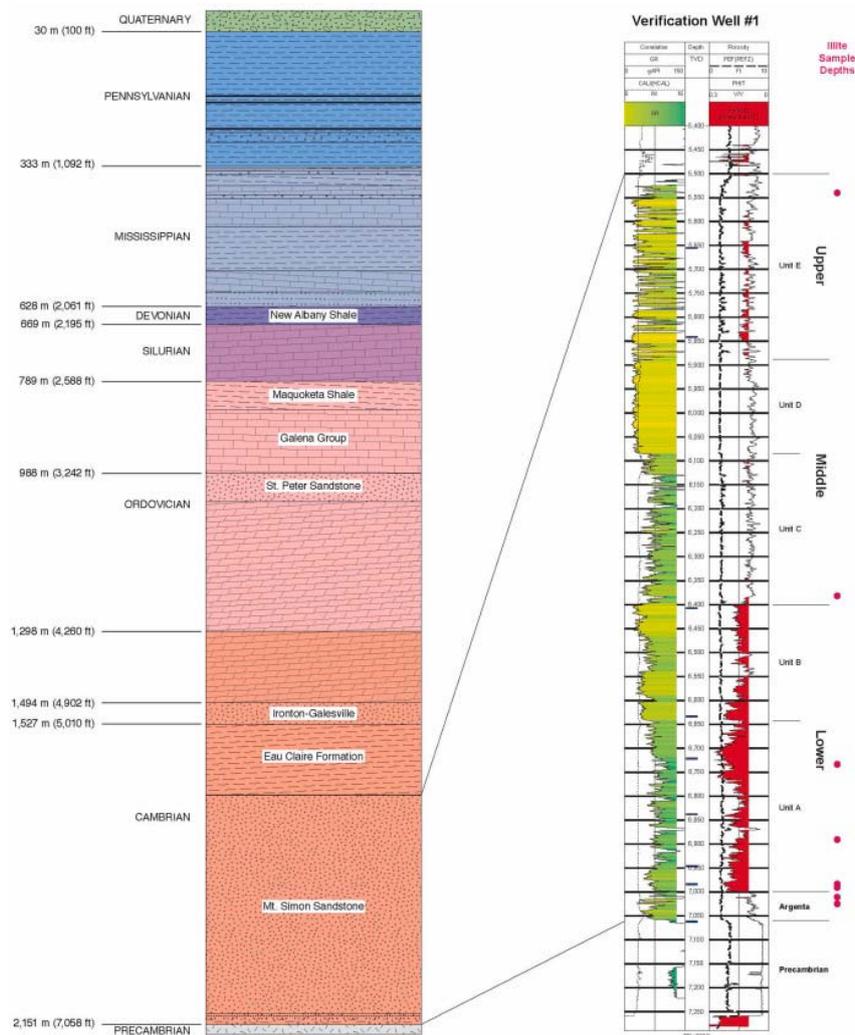


圖 2.4.3 伊利諾盆地的地層柱狀圖（Freiburg et al., 2022）。IBDP 計畫的目標封存層以西蒙山砂岩（Mt. Simon）鹽水層為主。

IBDP (2007~2021) 計畫分為：4 年的注入前監測 (2007-2011)、灌注與監測 (2011-2014) 和 7 年注入後監測 (2014-2021)。注儲設施包括壓縮/脫水設施、輸送管道、一口注入井、一口深監測/驗證井、一口地球物理測試井、淺層地下水井監測與一套綜合環境監測系統，都於 ADM 公司場地內開發建置。自 2011 年 11 月開始二氧化碳灌注作業，注入量為每天 1,000 噸。在 3 年 (2011-2014) 內，已於 2014 年 11 月達成捕捉和儲存 1 百萬噸的二氧化碳目標。在整個計畫運作期間 (2007-2021)，Decatur 場址的地表和地下皆進行持續監測 (圖 2.4.4；Bioeconomy, 2017)。該計畫顯示二氧化碳已被有效且安全的封存與地底下。

除了監測研究之外，IBDP 計畫也使用特徵、事件及作用分析 (FEPs, Features, Events and Processes) 資料庫進行了兼顧風險清單建立與風險溝通的研究示範 (Greenberg et al., 2011；Hnottavange-Telleen, 2014)。IBDP 風險管理方法遵循滾動式風險管理的概念，即不斷更新發展的風險識別 (identification)、評鑑 (assessment)、評估 (evaluation) 和處理 (treatment) 循環步驟。將計畫工作專家會議與風險評估工作坊同時召開，並定期更新風險清單，以凝聚專家群間的共識與知識共享。定性分析使用的方法與工具以 FEPs 發展與建立案場的計畫風險清單，使用風險矩陣進行風險分析與制定風險管理策略 (Hnottavange-Telleen, 2014)，如圖 2.4.5 與圖 2.4.6 所示。風險管理主要目標：為確保盡可能多的風險得到識別，以及確保所有已識別的風險被降低或保持在可接受的水準。IBDP 示範計畫中風險清單中最大的風險其實是外部經濟風險 (唯一在風險矩陣紅色區域的點，圖 2.4.6)，接下來的風險項目則是與管線流動與洩漏有關。

碳封存技術社會溝通平臺建置先期規劃

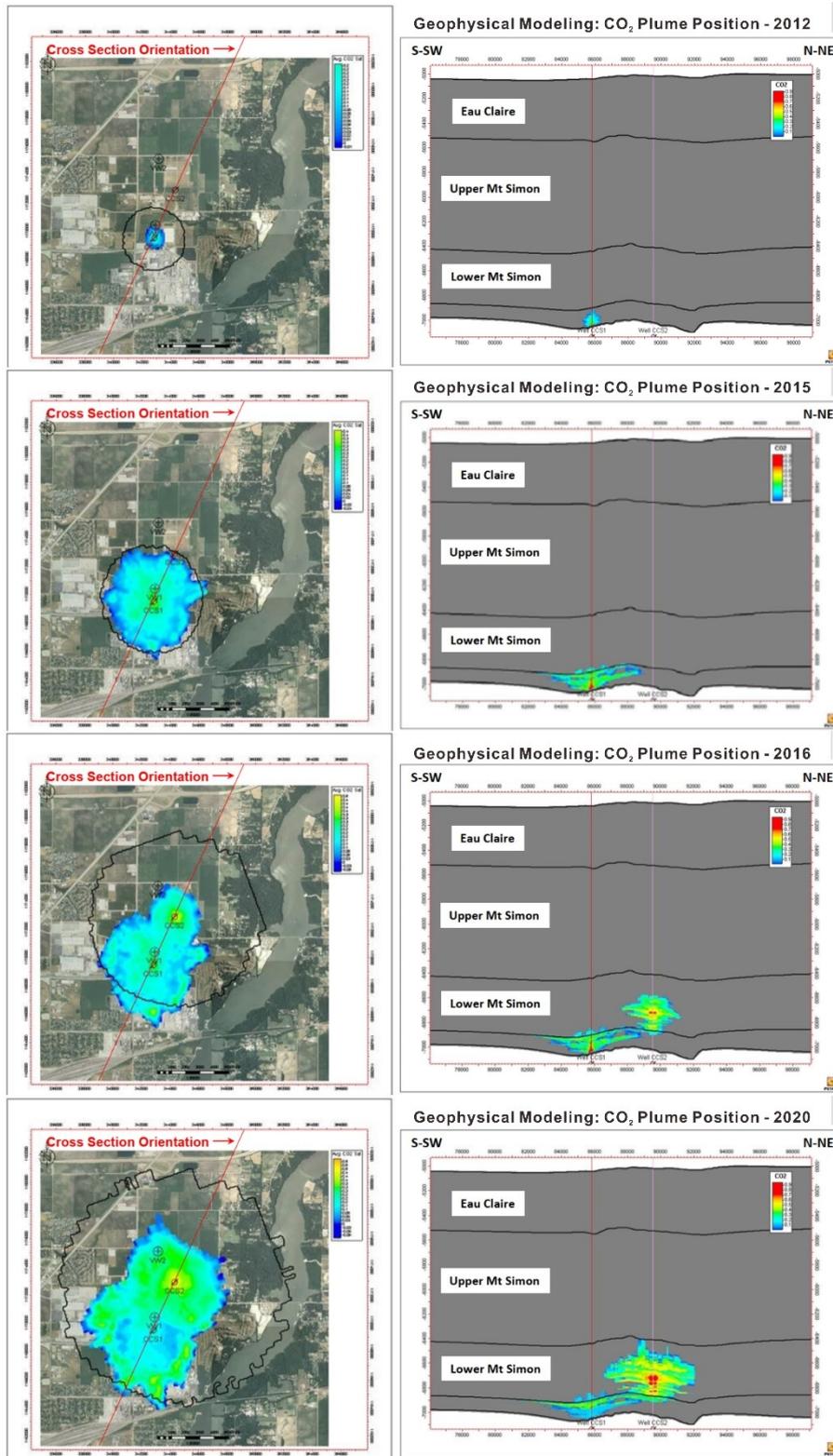


圖 2.4.4 伊利諾盆地二氧化碳封存注入監測模擬

Table 6. Risk-ranked FEPs. The top 64 of 119 evaluated FEPs are shown, ranked by Risk = Average Severity x Average Likelihood.			Table 6. Continued.		
RANK	FEP	RISK	RANK	FEP	RISK
1	Exogenous economics, supply prices	10.3	21	Reservoir geometry	5.8
2	CO ₂ solubility and aqueous speciation	8.9	22	Accidents and unplanned events: Project	5.7
3	Toxic geologic components (metals)	8.1	23	Mineral dissolution – reservoir	5.7
4	Fractures and faults	7.8	24	Community characteristics	5.7
5	Compressor procurement	7.8	25	Heterogeneity in reservoir	5.6
6	Legal/regulatory: Underground Injection Control permit	7.7	26	Seal: Geologic, primary (caprock)	5.6
7	Schedule and planning	7.4	27	Heterogeneity of overlying aquifers	5.5
8	Compression facility construction	7.2	28	Mineral dissolution – borehole	5.5
9	Undetected features	7.2	29	Pressure effects on caprock	5.5
10	Human activities in the surface environment: on site	7	30	Formation damage	5.4
11	Mechanical processes and conditions	7	31	Well lining and completion	5.4
12	Mineral precipitation	7	32	Lithology	5.3
13	Seal failure (in wells)	6.9	33	Displacement of formation fluid (capillarity)	5.3
14	Legal/regulatory: Property rights and trespass	6.8	34	Accidents and unplanned events: External	5.3
15	Seismicity (Induced earthquakes)	6.5	35	Legal/regulatory: construction, discharge, and other operations permits	5.2
16	Undefined specification	6.3	36	Drilling and completion activities: Project	5.2
17	Contamination of groundwater by CO ₂	6.2	37	Thermal effects on the injection point in the formation	5.2
18	Actions and reactions – local community	6	38	CO ₂ release to the atmosphere	5.1
19	Near-surface aquifers and surface water bodies	6	39	Actions and reactions – SIGs and NGOs, national/international	5
20	Reservoir pore architecture	5.9	40	Overpressuring	5

Source: Hnottavange-Telleen, K., 2014.

圖 2.4.5 IBDP 的 FEPs 風險清單的前四十個風險項目

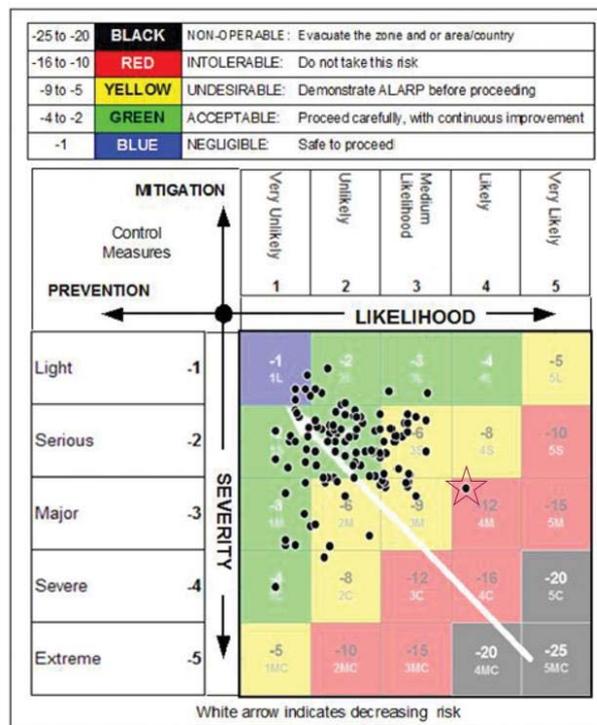


Figure 1. Each of the 119 symbols represents a FEP whose Severity and Likelihood was quantified. The product Severity times Likelihood is defined as Risk. The highest-risk FEP plots in the red square where S = -3 and L = 4.

圖 2.4.6 IBDP 由風險清單繪製的風險矩陣

IBDP 也有對於場址的管線前端（捕獲端）與末端（連接注入井處）之洩漏情境進行量化風險評估，模擬使用是實場工廠建物配置，模擬的重點在於管線洩漏後對於地表面廠區的影響範圍，管線洩漏風險情境模擬的流程與 Shell 類似，極端大規模洩漏事件後的地表二氧化碳擴散模擬結果範例如圖 2.4.7 與圖 2.4.8 所示（Mazzoldi et al., 2013）。量化模擬的目的除了為了制訂工廠安全衛生實務所需之緊急應變計畫（ERPs, emergency response plans）之外，也藉試驗計畫研究結果來協助政府釐清管理方法或架構（Oldenburg and Budnitz, 2016）。



圖 2.4.7 IBDP 的管線末端（井口處）的場區洩漏模擬

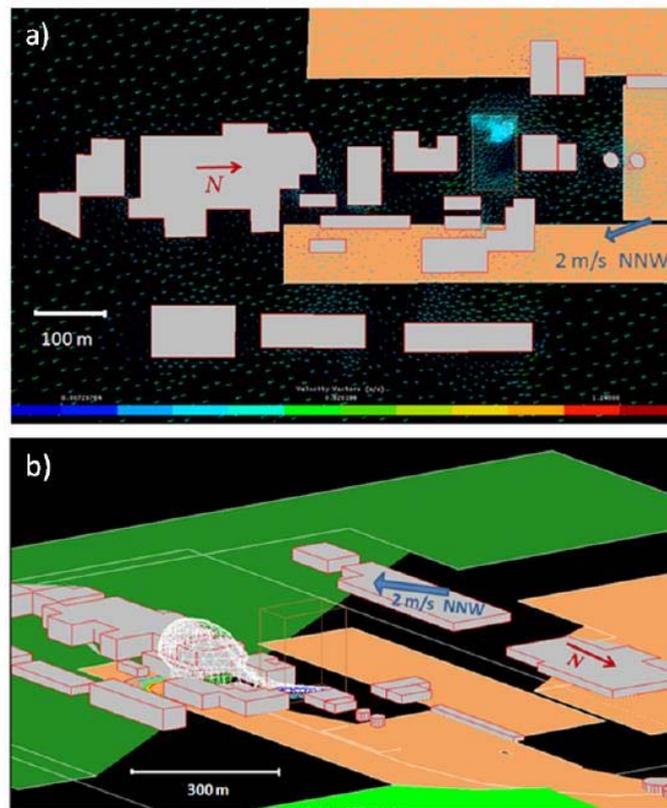


圖 2.4.8 IBDP 的管線前端（捕獲端）的場區洩漏模擬

此外，在社會溝通上，合作夥伴 Richland Community College (RCC) 負責該計畫的公眾接受、教育、溝通工作。RCC 在校園中（接近 CCS 場址）建立全球知名的國家封存教育中心（NSEC, National Sequestration Education Center）。設立全球第一個 CCS 教育學程/學位。2011-2015 年間，對超過 340 萬人，透過現場、廣播、電視等方式，提供教育溝通訊息。

IBDP 計畫獲得國際矚目，已至少有 29 個國家、700 多名參觀者訪問 Decatur 場址，原因如下：

- (1) 展示了接近商業規模的碳捕捉和封存。有效、安全地實現了封存 100 萬噸二氧化碳的目標，這說明可以擴大捕捉和封存的規模，以應付處理每年工業級的排放量。
- (2) 取得首批 EPA UIC 第六類井許可證之一（為專門針對用於二氧化碳地質封存之鑽井許可證類別）。
- (3) 開發了第一個監測、驗證和核算（MVA）計畫，要求在注入期間和注入後

碳封存技術社會溝通平臺建置先期規劃

進行監測，以驗證儲存的二氧化碳是否留在原處且不會造成環境破壞。監測技術包括使用地球物理技術來確認地下二氧化碳的位置，以及使用井來監測淺層地下水和土壤。

(4) 證明伊利諾州具有永久封存溫室氣體的最佳地質條件。

接續 IBDP 計畫之後，第二期計畫「伊利諾州工業碳捕獲和封存計畫」(ICCS, Industrial Carbon Capture Storage Project) 也得到了美國能源部的部分資助。該計畫也在伊利諾州迪凱特的 ADM 工廠進行，並以 IBDP 的成功和研究結果為基礎，ICCS 目的是實現商業規模的捕捉和封存作業。雖然 IBDP 的設計目的是每天脫水和壓縮多達 1,000 噸二氧化碳，但 ICCS 每天脫水和壓縮的二氧化碳量是該數量的三倍，並且每天可以在西蒙山砂岩中儲存多達 3,000 噸二氧化碳，用於永久封存。ICCS 注入井和監測井位於 IBDP 場地以北約 1 英里處(圖 2.4.9; Greenberg et al., 2017)，ICCS 自 2017 年灌注至今。根據 EPA 的溫室氣體當量計算器：截至 2022 年底，ICCS 已注入超過 400 萬噸二氧化碳。

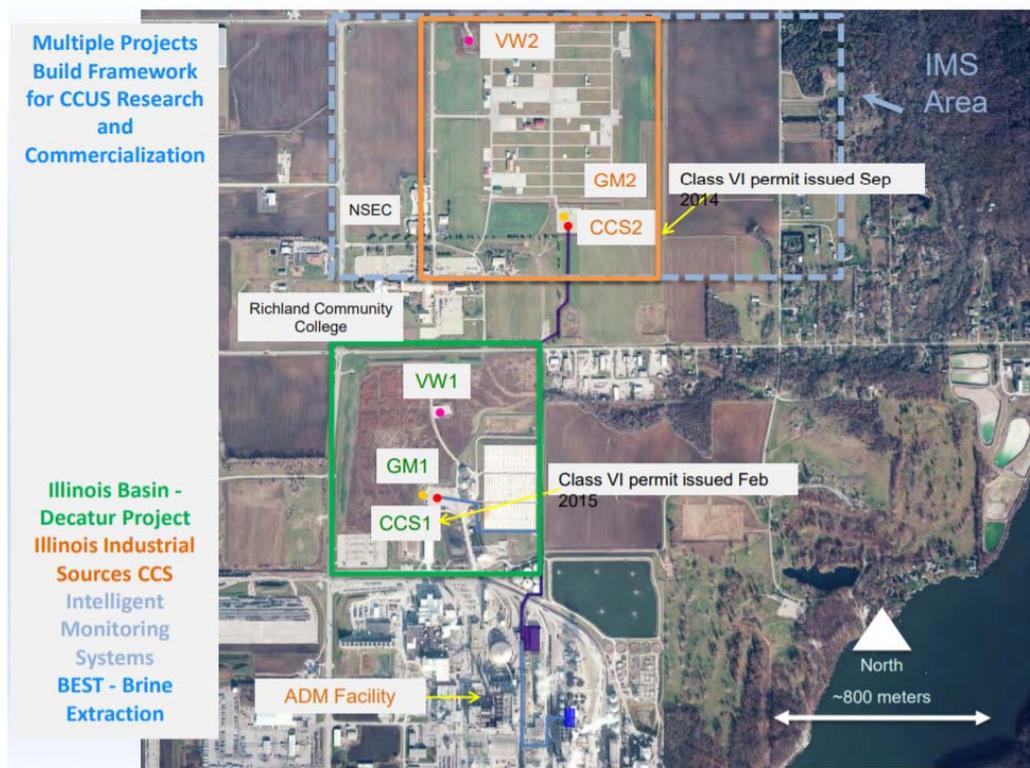


圖 2.4.9 ICCS 計畫 (圖中 CCS2) 與 IBDP 計畫 (圖中 CCS1) 的廠區位置圖

2. 國際合作與交流

IL-CCS Project 是美國碳封存中西部聯盟 (MRCI, Midwest Regional Carbon Initiative) 所管轄的碳封存計畫案場。今年九月適逢 MRCI 的內部年度會議 (不對外開放)，經由管道與 MRCI 主持人聯繫，取得參加 MRCI 年度會議機會。因此，計畫主持人及團隊 (參加人員列於表 2.4.1)，於 2024 年 9 月 23-26 日，先參加於美國俄亥俄州哥倫布 (Columbus) 所舉行的 MRCI 年會，會後拜訪 Battelle Memorial Institute (巴特利研究院)、伊利諾大學及 Decatur 碳封存場，也就是 IL-CCS Project 的封存場址。本計畫補助林殿順、俞旗文、林哲銓等計畫人員出國考察經費，其餘出國人員之經費自理。訪問之照片見附件 A。

表 2.4.1 美國參訪人員名單 (2024/9/23-26)

No.	Participants	Employer and Position
1	Andrew Tien-Shun LIN (林殿順)	Professor, Department of Earth Sciences, NCU Director, Carbon Storage and Geothermal Research Center, NCU
2	Chung-Pai CHANG (張中白)	Professor, Center for Space and Remote Sensing Research, National Central University (NCU) Convener, Earth Sciences Discipline, Department of Natural Sciences and Sustainable Development, National Science and Technology Council
3	Chuen-Fa NI (倪春發)	Professor, Graduate Institute of Applied Geology, NCU
4	Che-Chuan LIN (林哲銓)	Post-doctoral Researcher, Carbon Storage and Geothermal Research Center, NCU
5	Chi-Ping LIN (林淇平)	Assistant Researcher, Center for Environmental Studies, NCU
6	Yu-Huan CHANG (張侑瑛)	Research Assistant, Graduate Institute of Applied Geology, NCU
7	Chi-Wen YU (俞旗文)	Deputy Director, Geotechnical Engineering Research Center, Sinotech Engineering Consultants, Inc.
8	Jason Hsin-Kuei WANG (王興桂)	Senior Engineer, Formosa Petrochemical Corporation
9	Han-Hsiang TSENG (曾漢湘)	Associate Researcher, National Atomic Research Institute
10	Yifu CHIOU (邱一夫)	Assistant Researcher, National Atomic Research Institute

MRCI 是美國中西部地區碳倡議，致力於加速 CCS 技術在美國中西部和東北部的部署。美國中西部（MRCI）每年之二氧化碳排放量達 9.45 億公噸。在過去二十年中，MRCI 地區已進行了十多個二氧化碳捕捉與封存試驗與商轉計畫，是世界領先的 CCS 技術佈署地點之一。MRCI 由 Battelle 研究院和隸屬於伊利諾大學的伊利諾州地質調查局（Illinois State Geological Survey）進行計劃管理。目前 MRCI 由 Battelle 研究院的 Neeraj Gupta 博士，以及伊利諾大學的 Chris Korose 博士共同主持，而 IL-CCS Project 由伊利諾大學的伊利諾州地質調查局主導。

A. 參訪及考察過程

1. 2024/09/22 搭機至美國舊金山轉機至俄亥俄州哥倫布。
2. 2024/09/23~24（兩天）參加美國 MRCI 利害關係人與夥伴會議：

本次會議，邀請 MRCI 各州計畫（約有 10 幾個大型計畫）進行年度成果報告，能源局、環境部、海洋能源局也派員說明國家 CCS 進程與規劃。台灣團隊也受邀，由計畫主持人林殿順教授報告台灣碳封存進程與發展狀況，並進行廣泛的雙邊交流。詳細會議議程請見附件 B。

3. 2024/09/25 參訪巴特利研究院

Battelle 研究院是全球最大的非營利研究機構，也代管美國幾個國家實驗室。大約 20 年前，該機構開始做 CCS，目前約有 70 幾位研究員進行 CCS 研究，Battelle 研究院也主導 MRCI 計畫。台灣碳封存團隊拜訪 Battelle 總部，與 Dr. Gupta 及其碳封存團隊交流，雙方談及未來 CCS 的合作議題，如二氧化碳封存之監測項目；與可能合作場址，如本計畫所規劃之桃園碳封存試驗場以及台中火力發電廠碳封存試驗場。

4. 2024/09/26 上午參訪 ISGS

ISGS 為伊利諾州立大學 Prairie Research Institute 轄下五個研究單位之一。ISGS 也是 MRCI 計畫管理單位之一，尤其該單位對於伊利諾盆地的碳封存場址有最深入的研究。

台灣碳封存團隊拜訪 ISGS，由該所主任地質師 Dr. Randy Locke、林裕豐（Yu-Feng Lin）教授、Dr. Mohammad Alkhadrawi 等人接待。期間針對伊利諾盆地的碳封存研究以及 Decatur 碳封存場址的開發與監測進行深入的交流。林裕豐教授也帶領團隊參觀伊利諾大學的「淺層溫能系統」，利用淺層地熱，

調節建築物室內溫度。

5. 2024/09/26 下午參訪伊利諾州 Decatur 碳封存場址

當天下午，由伊利諾州立地質調查所 Drs. Randy Locke 及 Mohammad Alkhadhrawi 兩人，帶領台灣碳封存團隊來到 Decatur 碳封存場址，參觀已成功灌注約 4 百萬噸二氧化碳封存場。封存場旁邊還設置碳封存教育館，進行民眾與社會溝通。該教育館也與當地社區大學合作，設置 CCS 學程，推廣環境保護及增進社會對 CCS 技術之認知。

6. 2024/09/27~29 由 Decatur 搭機至芝加哥轉機回台。

B. 心得

此次參訪認識 MRCI 計畫主持人及多位 MRCI 碳封存重要關鍵人物，也與 IL-CCS Project 主要負責人建立合作關係。在 MRCI 會議中，得知美國政府透過能源局大量補助碳封存計畫之選址與初期開發計畫，補助金額可達總經費之 80%。透過政府資金補助，使得美國的 CCS 技術可以蓬勃發展。我國 CCS 技術發展正在起步，亟需政府資金挹注。建議仿效美國政府補助政策，以盡早落實我國 CCS 技術。另外，參訪 IL-CCS Project 的 Decatur 場址，學習到該場址之碳封存監測技術與監測項目（圖 2.4.10），提供本計畫之桃園碳封存試驗場之監測項目參考。Decatur 碳封存教育中心，除了設置碳封存展覽，並與社區大學合作，設置學分學程。教育中心與當地居民及美國社會大眾有很好的溝通與交流。該中心也接待超過 30 個國家、1,000 位以上的國際友人來訪。教育中心的設置，讓社會及當地民眾，正確認識碳封存技術，有效協助碳封存場址的建置。在參訪過程中除討論許多關鍵技術外，就共同願景、價值鏈、利害關係人之間的合作、技術商業化的關鍵等多項議題上充分交流，透過雙邊交流，期待建立雙邊未來實質合作關係。

IBDP/ICCS MONITORING SUMMARY

ICCS Injection →

	Monitoring Activity	Freq.	IBDP Pre-injection			IBDP Injection				IBDP Post-Injection →					
			2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Surface	Aerial imagery	SA		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Eddy covariance*	C				x	x	x							
	Soil flux – network*	W-Q		x	x	x	x	x	x	x					
	Soil flux – multiplexer*	C			x	x	x	x	x	x					
	Tunable diode laser- single path*	C					x	x							
	Tunable diode laser- multi path*	C								x					
	InSAR*	BW				x	x								
	Continuous GPS*	C				x	x	x	x						
Near-Surface	Soil gas sampling*	Q-A				x	x	x	x	x	x				
	Shallow groundwater sampling	M-Q-SA		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x→
	Shallow electrical earth resistivity*	A	x	x	x										
Subsurface	Pressure/temp. - VW1 and CCS1	C				x	x	x	x	x	x	x	x	x	x→
	Pulsed neutron (CCS1, VW1, GM1)	Q-A		x		x	x	x	x	x			x	x	x→
	Deep fluid sampling (VW1)	SA				x	x	x	x	x		x	x	x	
	Passive seismic monitoring (GM1)	C			x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x→
	Seismic/3D VSP imaging	SA-A			x	x	x	x	x	x					x→
	Mechanical integrity (CCS1, VW1)	A			x	x	x	x	x	x					x

Abbreviations: C = Continuous, W = Weekly, BW = Biweekly, M = Monthly, Q = Quarterly, SA = Semi-Annually, A = Annually,
 * = experimental technique or deployment; x = permit required; x→ = permit activity required beyond 2020

圖 2.4.10 IL-CCS Project 之 Decatur 碳封存場之 2008-2020 監測項目

參、結論與建議事項

章節摘要：

本計畫提出了多項結論與建議：首先，應盤點國內外 CCS 法規與實場案例，包括國際法規趨勢、EPA 地下注入計畫、碳封存計畫的公眾接受度及風險事件處理，並參考日本、德國及澳洲的試驗案例。其次，推動 CCUS 政策時應加強科普教育，提升民眾對技術的理解，減少恐懼與憂慮。前期規劃方面，依據國際規範進行試驗場設施規劃、成本分析及地下水品質基線資料建設。此外，應與 IL-CCS Project 合作學習其成功經驗，並在地區設立教育展示空間，推動「淨零減碳」活動。

一、結論

綜合前述之成果，本計畫得到如下的結論：

1. 法規及實場案例對環境文獻收集

- (1) 盤點 CCS 國際法規發展趨勢及國內法規現況，依管制類法規及誘因類法規分別歸納探討，提供未來可能須依循之規範參考，並瞭解可能的獎勵補助來源。
- (2) 蒐集 EPA UIC 計畫內容，歸納監管單位之責任及專案計畫之溝通內容，提供監管單位後續執行專案參考。
- (3) 蒐集碳封存計畫民眾觀感與接受度文獻資料，可作為後續規劃民眾溝通參考資料。
- (4) 本計畫針對日本 Nagaoka 先導試驗計畫（10,400 噸）、德國 Ketzin 試驗計畫（67,271 噸）及澳洲 Otway 試驗計畫（65,000 萬噸）三個試驗計畫進行案例蒐集及研析，相關環境監測內容可提供後續執行規劃參考。
- (5) 蒐集國際碳封存計畫風險事件發生案例，並探討事件發生後有關環境影響議題之處理對策，相關執行經驗可作為未來計畫執行之參考。

2. 國家碳捕存軟硬體

CCUS 政策之推動，應擴大 CCUS 科普教育基本知識的累積，使民眾瞭解其技術之基本原理、運作方式等，民眾則能理性評估其潛在風險和益處，降低未知

的恐懼及憂慮。本計畫推動 CCUS 的教育場域、規劃各年齡層及族群的科普演講、增能工作坊、座談會、等各項活動，並盤點 CCUS 利害關係人之關鍵議題，提升整體國人對 CCUS 的認識，益於未來 CCUS 之社會溝通與公眾參與。未來若持續辦理，將辦理「淨零減碳」活動，擬以「行動博物館及攤車」方式擴展，同時也將加入親子科學工作坊，以增加科學教育的強度。

3. 試驗模場前期規劃

- (1) 根據反射震測及井下資料解釋成果，研究區域 R2 封存系統的各地層空間分布趨勢皆為向東南傾斜、向西北抬升，整體的深度分布範圍都在適合二氧化碳封存的深度條件內。R2 系統之蓋層結構完整、厚度適中、沒有缺失現象，封存安全性高；封存層方面，整體封存空間厚度超過 500 公尺，且沒有地層缺失，具有優秀的封存空間潛力。
- (2) 參考國際上之相關規範指引及碳封存試驗場國際規畫經驗，包含參考 EPA UIC 二氧化碳地質封存 VI 類試驗井監測指引 (Class VI Well Testing and Monitoring Guidance) 以及與台灣條件相近之日本 Nagaoka 場址的 10,000 噸注儲試驗的成功經驗案例等，擬定本先導注儲試驗計畫的地表設施項目、井體規劃、監測設施規劃，可提供作為未來執行相關 CCS 發展計畫之參考。
- (3) 依據擬定之先導注儲試驗計畫工項，就各主要工項進行細部成本分析，可提供較明確之成本資訊，可作為未來執行相同規模之 CCS 發展計畫之經費參考。
- (4) 國際上 CCS 先導試驗計畫主要聚焦相關技術發展，初期投入成本較高且無法回收是可預期的。計畫執行成本分析成果，可提供研究人員決策評估是否投入資金發展相關技術。
- (5) 已至現有最接近試驗場址的地下水監測站 TaiCOAST 的地下水井進行採樣，已初步建立本區的地下水基線資料。分析結果表明桃園臨海區域為自由地下水區。

4. 國際合作前期規劃

- (1) 本計畫團隊此次參訪認識 MRCI 計畫主持人及多位 MRCI 碳封存重要關鍵人物，也與 IL-CCS Project 主要負責人建立合作關係。
- (2) Decatur 碳封存教育中心，除了設置碳封存展覽，並與社區大學合作，設置

學分學程。教育中心的設置，讓社會及當地民眾，正確認識碳封存技術，有效協助碳封存場址的建置。

二、建議事項

1. 社會溝通及科教

桃園市政府已經同意租借市府環保局所轄「永續資源館」一隅規劃為實體展示教育及環境教育空間。陸續會辦理觀音及新屋地區民眾及兩區中小學師生的「淨零減碳」活動，設計「永續淨零綠生活」環境教育宣導活動課程，該課程屬環境教育之課程，本課程皆由已取得環境教育教學認證資格之講師進行授課。環境教育內容包認識台灣極端氣候的定義與成因、探討因應台灣極端氣候的策略、「碳捕捉與封存」是對抗氣候變遷的新利器、永續淨零綠生活等觀念。同時也將加入親子科學工作坊，以增加科學教育的強度。

2. 試驗模場前期規劃

(1) 鑽井暨地表設施規劃

本案碳封存試驗模場目前尚無鑽井實證資料，鑽井暨地表設施規劃主要依據既有地質調查資料進行規劃，據此對於碳封存試驗模場建議應規劃先期地質鑽井與地質調查，有助於瞭解目標封存層地質特性，相關之規劃及設計將更為精準。

(2) 成本分析

表 2.3.8 所示在資料尚屬有限的情境下，初估執行萬噸級碳封存模場注入試驗成本約為 13 億 1,950 萬元整，此成本分析結果仍為概略性估算。建議若後續有取得情境模場先期地質鑽井與進一步地質調查資料，應可再針對原先規劃內容與因應新增法規要求進行必要調整（例如鑽井數量、MMV 項目），辦理成本分析評估調整，以更為貼近實際狀況。

(3) 地下水品質基線資料

為了解二氧化碳地質封存在洩漏風險下是否會影響到地下水層，建議未來於預計碳封存試驗場址鑽探地下水井，進行持續性的地下水品質量測與監測等工作。

3. 國際合作前期規劃

- (1) 在 MRCI 會議中，得知美國政府透過能源局大量補助碳封存計畫之選址與初期開發計畫，補助金額可達總經費之 80%。透過政府資金補助，使得美國的 CCS 技術可以蓬勃發展。我國 CCS 技術發展正在起步，亟需政府資金挹注。建議仿效美國政府補助政策，以盡早落實我國 CCS 技術。
- (2) IL-CCS Project 的 Decatur 場址之碳封存監測技術與監測項目，可提供本計畫之桃園碳封存試驗場未來規畫監測項目之參考。
- (3) 在參訪過程中除討論許多關鍵技術外，就共同願景、價值鏈、利害關係人之間的合作、技術商業化的關鍵等多項議題上充分交流，透過雙邊交流，期待建立雙邊未來實質合作關係。

肆、參考文獻

- Bachu, S. 2003 Screening and ranking of sedimentary basins for sequestration of CO₂ in geological media in response to climate change. *Environmental Geology* 44(3), 277-289.
- Bioeconomy, 2017. Illinois Industrial Carbon Capture & Storage Project – Eliminating CO₂ Emissions from the Production of Bio Fuels – A ‘Green’ Carbon Process. 37pp.
- Chiu, H.-T. 1967 Stratigraphic correlation of the subsurface formations in northwestern Taiwan. *Petroleum Geology of Taiwan* 6, 33-44.
- Chou, J.-T. 1970 A stratigraphic and sedimentary analysis of the Miocene in northern Taiwan. *Petroleum Geology of Taiwan* 7, 145-186.
- Dang, M.-Q., Wang, S.-J., Fu, C.-C., Truong, H.-D. 2024 Coastal flowing artesian wells and submarine groundwater discharge driven by tidal variation at TaiCOAST site in Taoyuan, Taiwan. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 52, 101708.
- Etris, E. L., Crabtree, N. J. Dewar, J. 2001 True depth conversion: more than a pretty picture. *CSEG Recorder*, 26, 11-22.
- Freiburg, J. T., Amer, M., Henkel, K., Wemmer, K., Grathoff, G. H. 2022. Illitization in the Mt. Simon Sandstone, Illinois Basin, USA: Implications for carbon dioxide storage. *Marine and Petroleum Geology* 146, 105963.
- Giese, R., Hennings, J., Lüth, S., Morozova, D., Schmidt-Hattenberger, C., Würdemanna, H., Zimmera, M., Cosma, C., Juhlin, C., and CO₂SINK Group 2008. Monitoring at the CO₂SINK Site: A Concept Integrating Geophysics, Geochemistry and Microbiology, GHGT-9.
- Greenberg, S. E., Baur, R., Will, R., Locke II, R., Carney, M., Leetaru, H., Medler, J. 2017. Geologic carbon storage at a one million tonne demonstration project: Lessons learned from the Illinois Basin – Decatur Project. *Energy Procedia* 114, 5529-5539.
- Greenberg, S., Gauvreau, L., Hnottavange-Tellen, K., Finley, R., Marsteller, S. 2011.

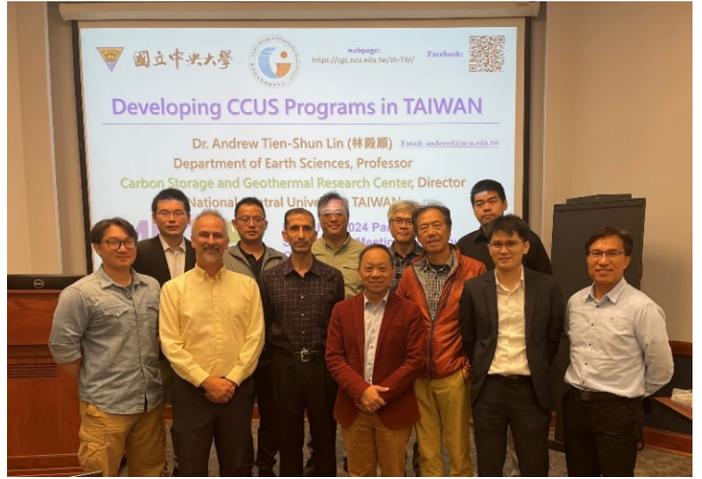
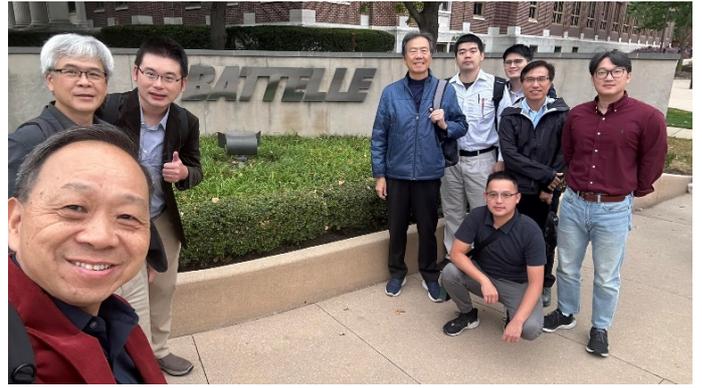
- Meeting CCS communication challenges head-on: Integrating communications, planning, risk assessment, and project management. *Energy Procedia* 4, 6188-6193.
- Greenberg, S., Whittaker, S., and OBrien, K. 2022. Carbon Capture, Utilization, and Storage in Illinois. Champaign, IL : Prairie Research Institute. <https://hdl.handle.net/2142/116416>
- Hnottavange-Telleen, K. 2014. Risk management at the Illinois Basin – Decatur Project: A FEPs-based approach. *Greenhouse gases: science and technology* 4(5), 604-616.
- Holloway, S., Savage, D. 1993 The potential for aquifer disposal of carbon dioxide in the UK. *Energy Conversion and Management* 34, 925-932.
- Huang, T.-Y., Lee, P.-J. 1962 Stratigraphy of the Kuanyin well, Taoyuan, and its relation to that of the Peikang well, Yunlin, Taiwan. *Petroleum Geology of Taiwan* 1, 67-74.
- International Energy Agency 2022 Legal and Regulatory Frameworks for CCUS - An IEA CCUS Handbook.
- IPCC Carbon Dioxide Capture and Storage 2005 IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, Intergovernmental Panel on Climate Change, UNEP, Cambridge University Press, New York, U.S.A.
- JCCS 2018 Research report on impacts of Hokkaido Eastern Iburi Earthquake on CO₂ reservoir (Second edition) Japan CCS 公司北海道膽振東部地震對 CO₂ 儲集層衝擊研究報告。
- Lin, A.T., Watts, A.B., Hesselbo, S.P. 2003 Cenozoic stratigraphy and subsidence history of the South China Sea margin in the Taiwan region. *Basin Research* 15(4), 453-478.
- Lin, A.T., Yang, C.-C., Wang, M.-H., Wu, J.-C. 2021 Oligocene-Miocene sequence stratigraphy in the northern margin of the South China Sea: An example from Taiwan. *Journal of Asian Earth Sciences* 213, 104765.
- Marsden, D. 1992 V0-k method of depth conversion. *The Leading Edge*, 11, 53-54.
- Mazur, S., and Scheck-Wenderoth, M. 2005 Constraints on the tectonic evolution of the

- Central European Basin System revealed by seismic reflection profiles from Northern Germany. *Netherlands Journal of Geosciences*, 84 – 4, pp. 389 – 401.
- Mazzoldi, A., Picard, D., Sriram, P. G., Oldenburg, C. M. 2013 Simulation-based estimates of safety distances for pipeline transportation of carbon dioxide. *Greenhouse gases: science and technology* 3(1), 66-83.
- Oldenburg, C. M., Budnitz, R. J. 2016 Low-Probability High-Consequence (LPHC) Failure Events in Geologic Carbon Sequestration Pipelines and Wells: Framework for LPHC Risk Assessment Incorporating Spatial Variability of Risk. Lawrence Berkeley National Laboratory. LBNL Report #: LBNL-1006123. Retrieved from <https://escholarship.org/uc/item/07z5f6v4>
- Prevedel, B., Wohlgemuth, L., Henniges, j., Krüger, K., Norden, B., Förster, A., and the CO2SINK Drilling Group 2008 The CO2SINK Boreholes for Geological Storage Testing, *Scientific Drilling*, No. 6
- Schreiber, A. 1965 On the geology of the Cenozoic geosyncline in middle and northern Taiwan (China) and its petroleum potentialities. *Petroleum Geology of Taiwan*, 4, 25-87.
- Shaw, C.-L. 1996 Stratigraphic correlation and isopach maps of the western Taiwan basin. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.* 7, 3, 333-360.
- Smallwood, J. R. 2002 Use of V0-k depth conversion from shelf to deep-water: how deep is that brightspot? *First Break*, 20.2, 99-107.
- Tang, C. -H. 1964 Subsurface geology and oil possibilities of the Taoyuan district. *Petrol. Geol. of Taiwan* 3, 53-73.
- USDOE NETL 2009 Factsheet for Partnership Field Validation Test: Southwest Regional Partnership on Carbon Sequestration, Aneth Field.
- USDOE NETL 2017 BEST PRACTICES: Monitoring, Verification, and Accounting (MVA) for Geologic Storage Projects.
- 周揚震、黃欽銘、陳威丞、吳鉉智、萬皓鵬、徐恆文 2020 鈣迴路二氧化碳捕獲技術之發展與產業化規劃。燃燒季刊，第 73-85 頁。
- 日本 CCS 調査株式会社 2018 北海道胆振東部地震の CO₂ 貯留層への影響等に関する検討報告書。

碳封存技術社會溝通平臺建置先期規劃

- 日本 CCS 調查株式会社 2020 苫小牧における C C S 大規模実証試験 3 0 万ト
ン圧入時点報告書（「総括報告書」）。
- 日本財団法人地球環境産業技術研究機構 2006 二酸化炭素地中貯留技術研究開
発。平成 17 年度成果報告書。
- 林殿順 2010 台灣二氧化碳地質封存潛能及安全性。經濟前瞻，第 132 期，第 93-97
頁。
- 林殿順、徐偉啾、林哲銓、蔡宜伶、楊雅梅、陳新翰 2023 二氧化碳地質封存：
我國減碳機會與挑戰。土木水利，第 50 卷，第 6 期，79-86 頁。
- 林殿順、楊健男、李科豎、譚志豪、劉浙仁、邵國士、王順民、李易叡、俞旗文、
冀樹勇、左峻德、陳彥豪、鄭貞怡、馬雲亭、林立夫、陳慶馨、丁桓展、劉
文惠 2014 台灣二氧化碳地質封存地圖集。能源國家型科技計畫淨煤捕碳與
儲碳主軸專案計畫，行政院國家科學委員會，共 36 頁。
- 林殿順、田永銘、王乾盈、林慶偉、楊耿明、簡錦樹、洪日豪、劉台生、謝秉志、
林靜怡、黃蕙珠、林再興、倪春發 2013 臺灣二氧化碳地質封存研究暨先導
試驗場建置及整合技術開發(I)。科技部專題研究計畫期末報告，共 183 頁。
- 財團法人中興工程顧問社 2012 國科會淨煤主軸 B 分項計畫：二氧化碳地質封
存。計畫成果報告。
- 財團法人中興工程顧問社 2013 二氧化碳地質封存關鍵技術建立與應用研究。台
灣經濟研究院委託計畫期末報告。
- 邱維毅 2009 台灣西北部漸新世至更新世盆地演化及層序地層。國立中央大學地
球物理研究所碩士論文，共 103 頁。
- 陳美伶 2006 臺灣海峽及臺灣西部平原之沈積層速度構造。國立中央大學地球物
理研究所碩士論文，共 110 頁。
- Class VI Solutions, inc. 官方網站，<https://www.classvisolutions.com/>。(2024/8/14 查
詢)
- RITE 長岡 CO₂ 圧入実証試験官方網站，[https://www.rite.or.jp/co2storage/safety/naga
oka/](https://www.rite.or.jp/co2storage/safety/nagaoka/)。(2024/8/14 查詢)
- Hatari Labs 網站，[https://hatarilabs.com/ih-en/what-is-a-piper-diagram-and-how-to-cre
ate-one](https://hatarilabs.com/ih-en/what-is-a-piper-diagram-and-how-to-cre
ate-one)。(2024/11/12 查詢)
- CO2CRC 網站，<http://www.co2crc.com.au/>。(2024/8/14 查詢)

碳封存技術社會溝通平臺建置先期規劃



附件 B、2024 MRCI 會議議程

計畫主持人林殿順，受大會邀請報告我國碳封存現況（講題以黃色標示）。



MRCI Fall 2024 Partner and Stakeholder Meeting

The Grand Event Center, 820 Goodale Blvd., Grandview Yard,
Columbus, Ohio

Wi-Fi: Marriott Bonvoy Conference; Password: -

Agenda

Monday, September 23, 2024

noon-12:45 PM	Lunch, Registration, and Networking
12:45-1:45 PM	Introduction: State of CCS Initial Remarks and Welcome <i>Neeraj Gupta, Technical Director – Carbon Management, Battelle</i> <i>Chris Korose, Associate Geologist, Illinois State Geological Survey</i> <i>Matt Young, Program Manager, Battelle</i> Status of CCS in MRCI Region and National/Global Summary <i>Neeraj Gupta, Technical Director – Carbon Management, Battelle</i> Washington DC Update – BIL, IRA, 45Q – Invited
1:45 – 3:15 PM	Developing Full Value Chain CCUS Programs in MRCI Region <i>Chair - Neeraj Gupta, Technical Director – Carbon Management, Battelle</i> Kicking-off the Appalachian Region Clean Hydrogen Hub (ARCH2) <i>Shawn Bennett or Kurtis Hoffman, Battelle</i> Cement Industry Perspective - Mitchell Indiana Cement Plant CCUS Program <i>Greg Ronczka, VP, Environment & Sustainability, Heidelberg Materials North America</i> Clean Power with Coal Waste and Biomass FEED Study in the Appalachian Basin <i>Steve Winter, Project Manager, Consol</i> Developing CO₂ Storage at an Ethanol Plant <i>Adam Dunlop, Chief Development Officer, Harvestone Low Carbon Partners</i> From Permitting to Execution - An update from Wabash Valley Program <i>Nalin Gupta, Board Member, Wabash Valley Resources</i> Discussion
3:15-3:45 PM	Networking Break
3:45-5:00 PM	CCUS National and Global Updates <i>Chair – Jared Hawkins, Subsurface Scientist, Battelle</i> DOE FECM Carbon Capture, Transport, and Storage Program <i>Darin Damiani, U.S. Department of Energy, Fossil Energy and Carbon Management</i>

Innovations for Decarbonizing Shale Industry in the Appalachian Basin
John Litynski, Carbon Storage and Sequestration Program Manager, EQT
Direct Air Capture for CCUS – Project Cypress and beyond
Matt Young, Program Manager, Battelle
Developing CCUS Programs in Taiwan
Dr. Andrew Tien-Shun Lin, National Central University, Taiwan
Update on North Dakota – Progress and Challenges
John Harju, Vice President, EERC-Univ. of North Dakota
Discussion

6:30-9:15 PM **Reception and Dinner – The Boat House, 300 W. Broad Street, Columbus, Ohio**
Bus leaves Grand Event Center/Hotel at 6:00 PM and returns at about 9:00 PM

Dinner Keynote Guest – Lou von Thær
President and CEO, Battelle Memorial Institute

Tuesday, September 24, 2024

8:30-8:40 AM *Opening Remarks - Neeraj Gupta, Battelle*

8:40-10:30 Update on MRCI Regional and Basin-Scale Efforts
Chair – Dawn Deel, Project Manager, Large-Scale Storage Team, DOE-NETL
Introduction to DOE Regional Programs
Dawn Deel, Project Manager, Large-Scale Storage Team, NETL
MRCI Addressing Regional Geologic Storage Update
Mark Kelley, Research Leader, and others, Battelle
Illinois Basin Geologic Storage and Regulatory Status
Carl Carman, Asst. Research Scientist, Illinois State Geological Survey
Michigan Basin Geologic Storage Status
Autumn Haagsma, Asst. Dir., Michigan Geological Survey & Director, Michigan Repository for Research & Education
Updates from Indiana and Iowa Geological Surveys
Ashley Douds, Research Geologist, Indiana Geological and Water Survey
Ryan Clark, Geologist, Iowa Geological Survey
Appalachian Basin and Eastern MRCI
West Virginia Class VI Primacy
Todd Cooper, WV Dept. of Env. Protection
Appalachian Carbon Education Program (RITAP) and Regional Initiatives
Joel Sminchak, Battelle, and others
Developing Mid-Atlantic Offshore Storage Options for Eastern USA
Joel Sminchak, Sr. Subsurface Scientist, Battelle
Discussion

10:30-11:50 AM **Networking Break**

10:50-12:00 PM **Activities for Enabling CCUS**
Chair – Joel Sminchak, Senior Subsurface Scientist, Battelle
U.S. EPA Class 6 Wells Update
Khurram Rafi, Supervisory Scientist, U.S. EPA Region 4



- Developing the Enabling Framework for Offshore CO₂ Storage
Melissa Batum, Sen. Geol. for Carbon Sequestration, Bureau of Ocean Energy Management
- CO₂ Pipeline Safety: Communicating the Good News and Forecasting Regulatory Developments
David Elam, Vice President, TRC Companies
- Decarbonization Policy Crossroads: an NGO Perspective
Sam Bailey, Industrial Decarbonization Manager, Clean Air Task Force
- 12:00-1:00 PM **Lunch**
Attendees are encouraged to review the MRCI posters in the area
- 1:00-2:40 PM **Enabling Geologic Storage Development via CarbonSAFE**
Moderator – William Aljoe, Project Manager, DOE-National Energy Tech. Laboratory
Introduction and updates on DOE CarbonSAFE Program
William Aljoe, Project Manager, DOE-National Energy Tech. Laboratory
Illinois Basin CarbonSAFE - Illinois Storage Corridor and other projects
Carl Carman, Asst. Research Scientist, Illinois State Geological Survey
Project Crossroads Introduction
Chris Walker, Manager CCS Center of Expertise, bp
Project Paradise CarbonSAFE, Kentucky
Jared Hawkins, --- Subsurface Scientist, Battelle
Southeastern Michigan CarbonSAFE update
Joel Sminchak, Sen. Subsurface Scientist, Battelle
Tri-State Project in the Appalachian Basin
Bryan Crabb, Manager Project Development, Tenaska
- 2:40-3:00 PM **Networking Break**
- 3:00-4:10 PM **MRCI and Regional Infrastructure and Outreach Updates**
Data Gathering, Analysis, and Sharing in MRCI Region
Joel Sminchak, Battelle and Chris Korose, Illinois State Geological Survey
Developing Infrastructure for CCS
Jared Hawkins, Battelle and Carl Carmen, Illinois State Geological Survey
Community Benefits, Stakeholder Outreach, and Environmental Justice Strategies
Joy Frank-Collins and others, Outreach and Community Benefits Lead, Battelle
- 4:15-4:45 PM Closing/Feedback and facilitated discussion –
Matt Young and Neeraj Gupta, Battelle

Closing Reception

Thank you to our sponsors!



附件 C、中央大學社會溝通經驗分享

國際上 CCS 技術雖然漸漸成熟，但是大多數的民眾因為缺乏地質學的背景概念，對於 CCS 相關知識的認識非常陌生，此次中央大學在與觀音區的民眾進行溝通時發現，民眾認知的落差是推動 CCS 發展的主要障礙之一，而且無法透過一二次的溝通就能達成，參考澳洲、美國、日本、挪威等國家的 CCS 計畫成果，各國案例顯示，社會溝通是 CCS 計畫不可缺的重要一環，而且是需要長期推動，逐步凝聚共識，才能獲得社會支持，以加速能源轉型。

2022 年中央大學成立碳封存及地熱中心，並於官網設立碳封存專區，致力於再生能源開發及二氧化碳地質封存研究，分享國內外碳封存現況及相關資訊，辦理科普獎座，使大眾了解永續能源開發與減碳排的各種挑戰級展望，以及以家庭為主要受眾對象辦理「淨零減碳親子生活營」，透過課程與參訪，分享全球暖化、2050 淨零碳排目標及淨零減碳的負碳技術。

由於學校長期以學術研究與環境教育推廣方式與在地經營連結，解決空污偵測及提升居民對環境教育與經濟共存的知識，並透過與桃園永續資源館的合作，舉辦淨零工作坊增能課程活動與宣傳，在館內設置碳封存模型、封存地質介紹、碳封存風險監控與安全性及氣候變遷下引發全球嚴重災害的省思，讓當地社區居民知道，臺灣 2050 淨零排放路徑及策略推展，不能只是口號，而是人人有責，進而推展 CCS 科普教育，讓居民了解桃園觀音海邊地質為何適合做碳封存試驗場，期望透過長期推動與當地居民達成共識。除此之外，釐清利害關係人，產官學三方也要能達成共識，因此學校也與在地民意代表及在地政府首長保持暢通的溝通管道，希望能得到地方政府及中央的支持，推展 CCS 科普教育與建構完善社會溝通平台。讓台灣居民都能認識 CCS，了解 CCS 推展的重要性。

- 避免常民 vs. 專家出現不同歧異觀點
- 協調過程絕對不能落入「科學霸權」或「理盲濫情的民粹」對立
- 阻斷 NGO 介入的任何關鍵點
- 讓證據說話且進行科學轉譯
- 避免「公眾疑慮」變成「公眾反對」
- 避免位溝通錢而充滿謠言及誤解

- 「社會溝通」必須誠信、互信、主動、提早、透明、開誠佈公
- 事前的溝通遠較事後疏通有效且省力
- 事前必須評估且了解是否有強烈的地區性

附件 D、蒐集澳洲、美國、日本、挪威 CCS 社會溝通案例

表列如下：

序	項目	澳洲 Otway 計畫	美國 伊利諾計畫	日本 苫小牧計畫	挪威 北極光計畫
1	溝通策略	六大面向 1. 釐清利害關係人 2. 資訊揭露內容 3. 資訊揭露方式 4. 資訊揭露頻率 5. 利害關係人之反應與想法 6. 利害關係人關切之議題與面向	五大步驟 1. 建立國家封存教育中心 2. 釐清利害關係人 3. 制定宣傳冊率與溝通計畫 4. 效益評估 5. 滾動式調整	兩大階段 1. 計畫執行前期：取得利害關係人支持與資訊揭露 2. 計畫執行期間：強化資訊揭露內容，並辦理活動與宣傳	三大要素 1. 取得在地民眾支持 2. 保持開放與透明 3. 與利害關係人共識需求並持續對話
2	資訊網站	設立網站公開 CCS 技術相關資訊與活動			
3	宣導文宣	1. 電子報 2. 簡報 3. 傳單 4. 海報 5. 文宣手冊	1. 電子報 2. 文宣影片	1. 大型立牌 2. 文宣手冊 3. 科普漫畫 4. 電子看板 5. CCS 地層模型	1. 電子報 2. 海報 3. 大型立牌 4. 文宣影片 5. 岩心樣本
4	溝通活動	1. 利害關係人溝通 2. 公開座談會 3. 場域開放日	1. 利害關係人溝通 2. 副學士學位課程 3. 研討會 4. 場域開放日	1. 利害關係人溝通 2. 科普課程 3. 座談會 4. 研討會 5. 教育體驗營	1. 利害關係人溝通 2. 研討會 3. 高峰會 4. 廠區開放日期
5	中心建置	Otway 中心建置	國家教育封存中心	導覽中心	訪客中心

附件 E、條列台灣 CCS 社會溝通推動策略架構

策略一：知識轉譯與透明資訊

- (1) 科技知識轉譯-----深淺度，廣度，正式，非正式等方式
- (2) 科技策略推廣-----國際與國內 CCS 重點政策及案例

策略二：在地文化與歷史考究

- (1) 在地背景脈絡-----人文歷史，在地產業，文化與觀光，環境與生態
- (2) 釐清利害關係人-----CCS 相關資源，社會網絡與影響力

策略三：降低風險與創造機會

- (1) 風險面向-----技術，環境，政策，經濟等風險
- (2) 機會面向-----社會就業，產業轉型，經濟發展，環境淨零

策略四：參與式溝通與交流互動

平等參與、共同討論或決策溝通方式：

- *科普講座與環境教育----學生、教職人員
- *教育體驗營或宣講說明會----在地居民
- *深度對話訪談----民意代表、意見領袖
- *專家諮詢會議、研討會、論壇----產官學研專家學者

策略五：效益評估與策略調整

- (1) 蒐集資料：
問卷調查，事後訪談，焦點座談，媒體報導數量及正負面影響
- (2) 評估項目：
知識提升度，科技接收度，社會共識度，行為改變率，活動滿意度

附件 F、審查意見回復意見表

一、評選會議之委員審查意見回復意見表

委員意見	回復意見
<p>1.本案工作內容 1「利害關係人界定與社會溝通方式規劃」為主要內容，建議對於工作項目 1 進行更詳細的總體規劃。</p>	<p>界定與盤點「碳捕存」所涉利害關係人，含括行政執行公務員、監管機構、地主和居民、意見領袖、公民團體、環保團體和商業利益團體等，鑑別與釐清對 CCS 實現產生直接或間接受正面與負面影響者。</p>
<p>2.服務建議書前言提及：「許多國內外碳封存開發案例遭遇到非技術性阻礙，主要為社會大眾不了解碳封存原理，以及鄰避效應，或是過度放大碳封存之風險而產生恐懼進而反對。」本計畫將進行二氧化碳封存試驗，有無規劃若遇上述阻礙情形時，如何因應的措施以避免重蹈覆轍。</p>	<p>以觀音地區溝通過程重點條列方式說明：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1.二氧化碳不是垃圾，捕捉技術成熟，不會造成二度汙染。 2.有效降低當地空氣汙染程度。 3.民眾知道桃園是台灣最安全的地方，沒有溢出的機會，更不會影響地下水資源。 4.非常高科技監控方法可以掌握封存後二氧化碳移棲的情況。
<p>3.本計畫規劃 CO₂ 灌注 1 萬噸試驗，係參考日本長岡市場址碳封存案例，將採用液化 CO₂ 槽車送至儲槽儲存再經加壓加熱程序後灌注。請問此操作程序團隊中有無施作經驗案例？請補充說明。</p>	<p>日本長岡碳封存試驗的灌注設施設計、施工及運轉資訊，均詳載於日本 RITE (2022, 2023) 的公開報告。目前國內尚未有任何相關施作經驗，因此，本團隊參酌其工藝流程圖 (PFD) 作為規劃設計指引，主要考量其注入規模與本案相當，且日方實踐結果相當成功。未來本案試驗模場進入工程階段，需通過設施整合、試運轉成功，方能進行灌注試驗。</p>
<p>4.計畫書第 2 頁 2.3 節第三行寫到”承接經濟部中央地質地調所委託”...該機構現在已成為「地質調查與礦業管理中心」也是第 4 頁第 12 行寫到的「地礦中心」這些應加以說明，否則讀者或許不知「地礦中心」就是新的地調所+礦務局。</p>	<p>謝謝委員的建議，後續若有提及相關機構，將會加註說明，以協助讀者釐清。</p>

<p>5.「利害關係人界定」是要「盤點」利害關係人，溝通方式亦可經由研討會、論壇等活動來進行。</p>	<p>也可以透過教育場域與溝通資訊整合平台建立，以永續發展為基礎，開誠佈公、提供資訊。</p>
<p>6.本計畫預計規劃國家級的「碳封存技術社會溝通平臺」，請問未來之規劃是否包含固定辦公場域及「網路」平臺？</p>	<p>如委員所建議，希望能有固定辦公場域及「網路」平臺。</p>
<p>7.台灣最早在2006年5月即傳出規劃二氧化碳地下封存，經報紙披露後，當地民眾表示「誓死反對」，報社亦訪問環工教授、醫院毒物科主任及環保團體等，都表示堅決反對。請問本平臺的溝通對象，是否包含上述的個人或團體？</p>	<p>所有利害關係人都是溝通的對象，彼此之間會採用公平且等距的方式溝通。</p>
<p>8.請更新圖 3.2.1 右圖中之絕對地質年代。</p>	<p>謝謝委員的建議，已將此圖的地質年代更正，可參閱本報告書的圖 2.3.1。</p>
<p>9.本案主軸為溝通平臺建置，不宜以教育設施規劃。</p>	<p>感謝委員的意見！計畫是以溝通平台建置為主軸。不過就地緣關係，仍希望藉由科普與環境教育的公眾溝通與場域建立，成為公眾溝通的管道之一。因此租借永續館布展可以讓場域民眾，提升民眾對 CCUS 的認知與理解，進而促成公民對政策的參與討論。</p>
<p>10.宜對 CCUS 技術，盤點利害關係人各項疑慮，提出對應之議題或設施規劃。</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1.成立 CCUS 諮詢委員會 2.CCUS 科學教育素養及知識建 3.CCUS 科學教育場域與對話平台的建立

<p>11.現階段二氧化碳捕捉成本過高，施作誘因不大，CCU 技術現況宜有盤點，對封存需求及成本宜有不同歷程（短、中、長）分析。</p>	<p>碳捕捉技術已有一定成熟度，工程成本也有市場價格可參考，目前對企業而言，成本確實偏高。誘因部分，政府應強化碳費折抵、碳稅減免、碳權交易等手段，讓捕碳成本有所回報。至於碳捕捉後的回收再利用，目前技術成熟度低，成本太高，國內仍在進行研發階段，希望逐步擴大可去化的規模。據日前（2024/8/10）中油在亞太永續論壇表示：經中油內部盤點與預測分析，CCU 到 2050 恐怕只能達到 5%的減碳佔比，與 IEA 估計相去不遠。CCS 的碳封存應該還是最關鍵的減碳技術選擇。</p>
<p>12.試驗模場前期規劃工項及細項成果，對後續推廣應用宜有說明。</p>	<p>本試驗場址未來若執行 1 萬噸二氧化碳灌注及監測，若試驗成功，可驗證本土二氧化碳地質封存之可行性。所採用的灌注與監測方法，可提供未來我國大量進行碳封存的參考。試驗場址由選址至灌注期間，公開透明，皆有民眾參與。未來場址灌注與監測期間，將邀請國際碳封存團隊參與，讓本土封存場之技術與國際接軌，提升民眾及社會對碳封存安全性之信心。</p>
<p>13.除地面監測樣點外，碳封存基地之環境監測，宜有二氧化碳逸失熱區自動偵測規劃。</p>	<p>對試驗模場的監測規劃，係屬全方位的考量。包括預估影響範圍（Area of Review）內，涵蓋空中、地表、地下，水與土壤、岩層等介質空間，所有的物理、化學改變，都是 MMV 監測的對象。模場的逸失熱區應為注入井口所在位置，此區的主要監測會包括井口壓力計、井口溫度計、流量計、濃度計，以及緊急應變通報系統等，以策安全。</p>
<p>14.國家碳捕存教育軟硬體前期規劃中，有關教育設施規劃，建議規劃對象不僅限於中小學師生，而能擴大年齡層，並納入分眾教育的概念，設計相關內容。</p>	<p>初期規劃先以中學生為主要對象，後續結合大學通識課程，推動 CCUS 及淨零轉型相關課程開設，並辦理學生競賽，徵案探索負碳科技在永續環境的創新應用方向，以及規劃大學端之教案競賽、教學實踐獎勵促進不同領域師生對相關議題的興趣與投入。</p>

<p>15.社會溝通請納入國內近幾年碳封存開發案細之經驗研析，擬出碳封存場址開發社會溝通相關參考文件或指引。</p>	<p>在與民眾溝通過程也了解中油永和山不被民眾接受的原因，就是落入「霸權」或「民粹」的對立。會依委員的意見來研擬社會溝通的參考文件。</p>
<p>16.請補充說明，有關國際合作前期規劃的相關產出為何？</p>	<p>本計畫規劃於 2024 年 9 月 23-26 日參加美國 MRCI 的年會會議，會後拜訪 MRCI 於伊利諾州的 Decatur 碳封存場。該封存場已灌注約 4 百萬噸二氧化碳，並設有碳封存教育館。本次參訪，團隊將學習 MRCI 成功的碳封存技術及民眾溝通經驗，並擬邀請美國團隊，參加未來本試驗計畫。</p>

二、啟動會議和第一次工作進度報告之審查意見回復意見表

委員意見	回復意見
<p>1.針對碳封存技術的規劃相當豐富，但在社會溝通部分似著墨較少，例如後續在社會溝通上的實際做法為何？除了透過環境教育偏單向傳達資訊之外，宜換位思考瞭解對方想知道甚麼樣的資訊，譬如或許有民眾擔心是否有可能影響到房價？若能提供相關數據進行公開說明，讓民眾能安心與放心，後續技術推動才會順利。</p>	<p>後續如中油、台電、台塑化等高碳排企業，將會一同納入社會溝通的對象與範圍。為避免社會疑慮轉為社會反對，後續會與 NGO 團體合作倡議，進行科學轉譯和科普理解等工作。</p>
<p>2.建議可將日本案例資料以具體方式呈現，以解除當地民眾的疑慮。台電、中油的碳封存場域，是否也可以一同納入比較。TaiCOAST 100 米的地下水井是否適合？距離會不會太遠？</p>	<p>監測法規案例研析，會再特別標示以區別出國際標準和台灣標準。 中油目前案場為鐵砧山，台電則尚未公開招標，後續會再收集相關資料，一同列表比較。關於國際實場案例，會在教育館以海報方式展示，以日本為案例，2024 年已有 CO₂ 封存 1,400 萬噸的商轉。 TaiCOAST 地下水井已是目前現有最接近試驗場址的地下水井，未來若有爭取到經費，會在試驗場旁的監測站 A、D 分別設立 100 米的地下水化學監測井供監測之用。 觀音區和新屋區的民情又不太一樣，未來會實際觀察民情，展現適切誠意與民眾溝通，含正式和非正式等各方面的溝通方式。</p>

<p>3. 社會溝通的部分，需將經驗文件化，呈現出具體的成果，產出類似教戰守則、指引或操作手冊等。並瞭解民眾最在意的問題為何？反對的理由又為何？</p> <p>依照契約規定，法規及實場案例對環境影響文獻資料收集、國家碳捕存教育軟硬體及國際合作前期規畫，在期中報告中需要有初步的書面報告呈現。</p> <p>既已有 TaiCOAST 地下水井，關於地下水化學的監測，建議可以開始做先期水質分析。</p> <p>對於國內外各碳封存實場案例，若民眾抗爭時，不能接受的原因有哪些？應在報告裡明確指出，例如日本的碳封存案例中，在經歷過地震後，是如何說明當地民眾，房價是否會受影響等議題。</p> <p>關於 7 月份的親子生活營，可以與環教館人員聯繫，確認雙方共識後，再由本院發函請桃園市府相關單位協助辦理。</p> <p>有關與美國伊利諾 CCUS 的國際合作案，國環院要以什麼樣的角色來加入，需再請示上級意見後再議。</p>	<p>政府部會應藉由廣泛的科學教育推廣，讓社會上不同族群、公眾能容易取得 CCUS 知識觀念以及國內、外已執行 CCUS 案例的正反面相關資訊，減少公眾與政府兩造間的資訊不對稱，政府部會應秉持開誠布公、勇於面對的態度與公眾溝通，避免讓「公眾疑慮」轉變成為「公眾反對」。</p> <p>目前社會大眾對二氧化碳地質封存有極大的歧異觀點，並對灌注之二氧化碳是否會污染人類使用之地下水、誘發地震、封存有效性等存有疑慮。這些都可以用科學轉譯來說明其安全性。</p> <p>在溝通前就建立彼此間的互信，事前的溝通絕對比事後的疏通重要。</p>
---	---

三、期中報告委員審查意見回復意見表

委員意見	回復意見
<p>(一) 宋聖榮委員：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1.法規及實場案例文獻收集應該不僅包括鹽水層灌注之相關文獻之收集，也應包括玄武岩灌入場址，CDR(Carbon Dioxide Removal) 相關資料等。 2.教育園區應不僅只包括桃園地區之規劃，也應以一般通例適用全國設置的規劃。 3.前期規劃平臺，本計畫與國科會相關計畫之關係為何？也應有所陳述。 4.國際合作應找一處與台灣地質、社會環境與人口密度等條件相似的國家。 5.國外例子之收集，除了執行過程和成果之描述外，也應收集如何決策、申請手續之狀況和相關法令之施用等情形。 	<ol style="list-style-type: none"> 1.感謝委員意見，已納入 CDR (Carbon Dioxide Removal) 相關資料，此外本案先著重鹽水層注儲進行規劃，故現階段法規及實場案例文獻收集以鹽水層灌注之相關文獻為主，將建議後續可就玄武岩灌入場址相關議題另案規劃研究探討。 2.有規劃模組化策展，可以擴展至學校、社區及公共場所。 3.謝謝委員的意見，本計畫以民眾溝通與環境教育為主要的訴求，國科會計畫則主要深入探討碳封存的可行性而進行數個重點區域的場址調查。 4.謝謝委員的意見，因本計畫重點在民眾溝通、監測技術等等，美國的伊利諾案場有許多相近值得學習之處。 5.感謝委員建議，已納入 IEA CCUS 手冊的建議的申請、法律及監管相關議題。
<p>(二) 劉家瑄委員：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1.本計畫到期中為止，已經完成許多工作，其中試驗模場的建置整合了許多國科會、中油及其他機構的資訊。但是試驗模場的建置經費龐大，如果無法建置，對本計畫的影響如何？ 2.本計畫收集了許多法規資料，以及世界各地在教育展示上的內容，而如何能把這些資訊有效利用，除了在示範場址建展示館之外，建議亦可透過網頁、巡迴展示等方式，把成果擴散到全國。 3.本計畫名稱為「碳封存技術社會溝通平台建置先期規劃」，因此計畫重點應仍在「溝通平台建置」。報告工作項目繁多，但主題「溝通平台建置」仍應為報告重點。 	<ol style="list-style-type: none"> 1.本案提出試驗模場及教育訓練場館所需成本費用，提供後續若整合相關機構時，規畫預算之參考。 2.感謝委員的建議！有規劃模組化策展，可以擴展至學校、社區及公共場所。另利用網路宣傳會更有效果，將收集資料進行轉譯後建置網頁。 3.溝通對象多，會依委員建議滾動式的調整。

<p>(三) 林昭遠委員：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. CCS 涉及各部門權責，宜盤點分析本院未來之執行重點。 2. 文獻蒐集宜依法規、技術以及管理等構面加以論述，俾供院參考，並擬定未來推動重點。 3. 工作項目偏技術面之工項，宜轉為科普方式加以說明，供本計畫平台建置之用。 4. 宜先確立利害關係人，採 SWOT 分析，提出具體之議題與對策。 5. 推廣教育之教材、教案、教具以及模型製作，宜有科普化的展示說明。 6. 教育宣導內容及問卷，意見之回饋與回覆宜有說明。 7. 有關 CS, CCS 及 CCUS 之說明，在本計畫中宜有區別及聚焦之描述。 8. 報告之圖、表宜註明來源出處。 9. 工作項目宜說明達成百分比，以及需協助事項之說明。 10. 國際案例蒐集研析，宜有推動窒礙、失敗以及面臨災害潛勢等之回顧說明。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 國家環境研究院為環境部轄下之幕僚單位，協助審查與監管指引方針之擬訂，已補充說明於文中。 2. 感謝委員建議，已納入 IEA CCUS 手冊的建議的申請、法律及監管相關議題。 3. 謝謝委員的建議，後續將嘗試以科普方式來展現科研成果，以利民眾溝通與平台建置之用。 4. 會依委員建議嘗試採用 SWOT 進行利害關係人分析，以利提出具體之議題與對策。 5. 已經陸續進行科學轉譯以利科普化的推廣教育，首先針對國小同學編輯教材及動手做實驗。 6. 科教活動均有填寫回饋單，以作為下次活動活動的參考。 7. 謝謝委員的意見，不論是 CS、CCS 或 CCUS 都是本計畫所重視且希望能推廣的，期使民眾對於碳封存的不同技術面相有更多的認識。 8. 謝謝委員的意見，已註明來源出處。 9. 謝謝委員的建議，已將工作項目之完成度改以百分比顯示。 10. 感謝委員建議，已納入潛在風險案例與應對策略。
<p>(四) 顏振華委員：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 碳封存計畫的安全評估是大眾極關切的議題，參考日本苫小牧示範計畫就地震事件的關聯性釋疑，建議可以針對計畫生命週期中所可能面臨關切的議題來建立社會溝通的擬答題，也可以做為教育設施的教案。 2. 建議在國內法規蒐集方面，可以把主管機關研擬中的碳封存管理辦法（草案）的進展做些敘述，尤其是關於碳封存監測規範的研擬方向。 3. 簡報中之整理監測設施規劃頗為簡潔明瞭，建議可再納入期末（成果）報告。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 會依委員的建議盤點民眾關切之議題，除了釋疑外，還會作為爾後的教案。 2. 感謝委員建議，已補充國內碳封存碳費相關法規與碳封存相關之說明。 3. 遵照辦理，已納入期末報告中。

<p>(五) 許元正主任：</p> <ol style="list-style-type: none">1. 相關教育模型成果很不錯，相關成果未來可以多展示出來。2. 本計畫相關教育資料可納入本院「環境教育探索館」資訊平台內容。3. 碳封存法規的整理很棒，期末綜整建議納入本土的特異性和需求，未來可將相關成果以科研角度提供給氣候變遷署參考。4. 期末(成果)報告請再納入計畫各期報告之回覆意見表。	<ol style="list-style-type: none">1. 感謝委員的肯定及鼓勵！擬就相關成果做進一步的展出。2. 會儘快與相關同仁商討如何將科教資料納入貴院「環境教育探索館」資訊平台。3. 感謝委員建議，本土最具潛能主要為鹽水層封存，因此本案著重於綜整鹽水層封存相關法規與國際經驗，尤以與台灣自然條件近似之日本相關案例經驗更能符合本土特異性及需求。4. 感謝委員的意見，已將計畫各期報告的回覆意見表納入於期末報告中。
---	---

四、期末成果報告之審查意見回復意見表

委員意見	回復意見
<p>(一) 劉家瑄委員：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1.本報告完成內容豐富，報告具有高度參考價值，值得肯定。 2.為協助讀者了解碳封存相關技術，報告中有許多英文縮寫字應該在首次出現時加上英文原文及中文名稱，才容易了解報告內容。 3.國際碳封存案例列出三案，是否可以說明為何挑這三個案例？每個案例台灣可以關注、學習的重點為何？日本 Nagaoka 先導試驗計畫在潛在風險案例那部分中又稱為日本岩野原先導計畫，請統一名稱。 4.試驗場址經費高達 13~14 億元，國環院是否能爭取到足夠經費？最佳做法應該是各部會能整合（如中油也規劃為 CCS 調查鑽井），請往此方面努力。 5.報告第 113 頁「叁、建議事項」，其內容包括結論及建議，請分別說明及描述，目前章、節之標題容易引起誤會。 	<ol style="list-style-type: none"> 1.感謝委員的肯定。 2.遵照辦理，成果報告已修正。 3.國際碳封存案例係列舉國際上較具代表性或地質條件與台灣較為相近之先導試驗場址。各案例之鑽井規劃配置、井體設計、地質條件、灌注設備、注儲計畫、監測規劃及設備等相關資訊皆為台灣先導試驗場址規劃階段應關注及學習的重要資料。選擇該三案之原因為注儲規模為萬噸以及地質條件之近似性，此外日本兩案皆有地震之影響，相當值得我們借鏡。另將統一日本案例名稱為日本 Nagaoka 先導試驗計畫。 4.謝謝委員的建議，本案已經過跨部會討論後，將由能源署承接後續的碳封存示範場相關研究，同時中油也規劃於此平台處鑽探地質井 3 千米深，以了解桃園地區的地質條件。 5.遵照辦理，成果報告已修正。
<p>(二) 宋聖榮委員：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1.規劃所需經費 13.775 億元，灌注量是多少呢？ 2.回覆期中審查意見 CDR 之部分，請明確指出補充在報告何處？ 3.報告第 50 頁，誘發地震可能大小規模？在灌注過程中有無設定閾值？ 4.在教育館的規劃時，應列出各種可能之減碳法及其優缺點？ 5.報告第 83 頁，監測井無 DAS 與 DTS 之規劃，原因為何？ 6.如何建立監測的基線資料（或背景值）？需多少時間的背景值數據，才能達到此一標準？ 7.報告第 90 頁之經費規劃部分，鑽井及取芯的經費是否重複呢？又是否需要全程取芯呢？ 	<ol style="list-style-type: none"> 1.本案碳封存試驗模場先導試驗規劃之二氧化碳灌注量為 1 萬噸。 2.相關內容彙整於成果報告「貳、一、2.(5) 其他關鍵和新出現的議題」章節內。 3.根據日本 JCCS 計畫團隊藉由監測量測資料分析與模式模擬分析，以科學性角度評析北海道膽振東部規模 6.7 大地震與二氧化碳封存並無直接關係。目前國際上亦尚無二氧化碳封存誘發地震之相關案例，無法直接探討誘發地震可能大小規模。基於日本不同規模灌注經驗，灌注壓力上限於一般蓋層/儲集層條件下約控制為靜水壓力之 120%-150%。其變因依據苦小牧實証試驗評價報告中指出，安全注入壓力之決定主要考量預定注入深

	<p>度、管道損失以及蓋層強度等因子，實際管理值應依據鑽井階段後之岩層試驗資料進行綜合評估。</p> <p>4.後續會增加各種可能之減碳法及其優缺點，以利民眾的認識及比較，感謝委員的建議！</p> <p>5.圖 2.3.25 為井體規劃不顯示監測設施。光纖監測規劃內容彙整於成果報告「貳、三、2.(3) 監測設施規劃」章節內，於注入前中後 MMV 不同階段皆規劃有井下光纖監測分析工作。</p> <p>6.碳封存試驗模場先導試驗規劃於灌注前根據試驗模場研擬 MMV 計畫，並建置相關監測設備接收資料至少一年以上，以確立背景條件並支持後續碳封存試驗之成效評估。監測項目參考國際案例，諸如：震測、地層掃描、井下光纖等。環境監測方面，於場址建置時同步開始進行近地表環境背景值量測，包含大氣、土壤、地下水水質、微震等項目。</p> <p>7.鑽井及取芯經費估算目前為分開評估，取芯費用另計，無重複估算。另有關鑽井取芯長度，考量國際上二氧化碳地質封存要求封存系統應超過地表下 800 公尺，調整取芯深度為地表下 800 公尺至 1,500 公尺，取芯長度共計 700 公尺。</p>
<p>(三) 顏振華委員 (書面審查意見):</p> <p>1.計畫成果摘要 (詳細版) P.XV, 建議事項之社會溝通, 敘及“市府”、“環保局”等, 建議明確說明係“桃園市政府”、“桃園市政府環保局”等。</p> <p>2.續上, 本項建議事項的寫法, 建議以「未來若持續辦理, 將辦理...「淨零減碳」活動。並以『行動博物館及攤車』...」。的方式書寫。</p> <p>3.計畫成果摘要 (詳細版) P.XVII~P.XXIV, 各次會議之委員審查意見回復意見表, 建議置於報告末之附錄附件。另請於成果報告 (修正版) 時併附成果報告審查 (驗收) 會議之</p>	<p>1.依委員意見修改內文。</p> <p>2.依委員意見修改內文。</p> <p>3.謝謝委員的意見, 以按建議將各次會議審查意見回復表置於附錄, 同時亦已附上成果報告審查會議之意見回復表。</p> <p>4.遵照辦理, 已於成果報告補充說明, 詳見表 2.1.3。</p>

<p>審查意見回復意見表。</p> <p>4.報告第 7 頁，CCS 國內法規現況中，似仍未見主管機關研擬中的碳封存管理辦法（草案）研訂進展，尤其是針對碳封存監測規範的研擬方向，建議報告中能予補充。</p>	
<p>(四)許元正主任：</p> <p>1.報告第 113 頁，請修正為結論與建議，並將內文分節敘述。</p> <p>2.本計畫執行中所辦理之活動資料、教材請納入成果報告之附錄。</p> <p>3.請將計畫執行過程中社會溝通推動程序及國外實例整理出一份社會溝通參用指引，納入成果報告之附錄。</p> <p>4.本計畫所發展碳封存相關科普教案，請納入環境教育探索館更新資料。</p>	<p>1.遵照辦理，已於成果報告修正結論與建議。</p> <p>2.彙整於附錄中，請參考。</p> <p>3.彙整於附錄中，請參考。</p> <p>4.彙整於附錄中，請參考。</p>