

二氧化碳地質封存之設施風險評估

陳憶璇* 譚志豪** 冀樹勇***

摘要

本文根據二氧化碳封存場址之灌注管線流程，設計不同的灌注管線洩漏風險情境，討論二氧化碳灌注管線斷裂之肇始事件，並以事件樹說明灌注管線可能發生之事故情境，再利用故障樹及蒐集數據計算每一事故序列之發生頻率。配合 4 種不同氣象條件設計出 12 種不同洩漏情境狀態，應用 SAFETI 計算出二氧化碳應灌注管線斷裂引發洩漏所造成的氣量影響範圍、個人風險及社會風險，藉以探得各情境事件的風險狀況。

風險情境分析結果顯示，即使在以年灌注量一百萬噸之速率灌注時管線破而造成大量二氧化碳洩漏，其影響範圍仍有限，高濃度 40,000ppm 涵蓋範圍大多集中在灌注場區內，超過此範圍則濃度大量降低。此外，雖一開始洩出二氧化碳濃度較大，但在短時間內（數分鐘）即被大氣所稀釋，並不會長時間造成空氣中二氧化碳濃度增加。量化風險分析結果顯示在最嚴重氣象條件下個人風險為 1.50×10^{-5} 、夏季氣象條件下個人風險為 1.42×10^{-5} 、冬季氣象條件下個人風險為 1.04×10^{-5} 、全氣象條件下個人風險為 1.27×10^{-5} ，均小於 UK HSE 之標準。

至於風險門檻值方面，目前國際上以荷蘭新建設施標準最為嚴格，其建議之最大容許風險機率為每年 1×10^{-6} ，可忽視風險機率為每年 1×10^{-8} 。依此標準檢視本案例分析結果，在 1×10^{-6} 機率下 4 種氣象條件之影響距離範圍介於 233m~365m，而在 1×10^{-8} 機率下，影響範圍介於 436m~485m，影響範圍均侷限在灌注場區內。

關鍵字：二氧化碳地質封存、二氧化碳大氣擴散、定量設施風險分析、設施風險評估

一、前言

為因應全球氣候異常所帶來不利影響與災害，世界各國紛紛研擬溫室氣體減量目標，我國於 2015 年通過的「溫室氣體減量與管理法」中已規定必須在 2050 年減排至 2005 年的 50% 以下，並向國際社會承諾，我國的國家自訂預期貢獻（Intended Nationally Determined Contributions, INDC）減量目標為 2030 年溫室氣體排放量為現狀發展趨勢（Business As Usual, BAU）減量 50%。

為達此目標，應適當地應用二氧化碳捕獲與封存技術（Carbon Dioxide Capture and Storage, CCS）技術，方能有效協助我國達成減量目標。

CCS 技術具有改善溫室效應、滿足巨額減碳缺口、降低空氣污染、降低能源支出帳單及創造產業與提升就業人口等優點與效益，但民眾因資訊不足，對於將大量的二氧化碳封存於地層仍有疑慮須待釐清，特別是針對是否發生洩漏出地表的問題。鑑此，如何量化評估二氧化碳地質封存可能產生的風險以降低民眾疑慮為推動 CCS 之重

* 中興工程顧問社大地工程研究中心正研究員

** 中興工程顧問社大地工程研究中心水文地質模擬組組長

*** 中興工程顧問社大地工程研究中心、防災科技研究中心主任

要課題。

一般在進行風險評估之前，必須先訂定欲保全之風險標的。以二氧化碳地質封存而言，封存過程或封存場關閉後均可能因天然或人為不當操作因素造成二氧化碳洩漏，進而引起人體健康、設施安全與環境生態（Health, Safety and Environment, HSE）風險。本文主要針對二氧化碳地質封存灌注期間之設施風險部分進行量化風險分析，以了解場址因設施洩漏所可能造成的大氣擴散影響程度、個人風險以及社會風險。

目前國際上有關二氧化碳地質封存之風險分析工作正在起步階段，並無一套標準且完整的分析程序，可用於處理所有風險問題，故各國研究團隊仍就此議題進行各方面的嘗試與努力。

Bowden and Rigg (2004) 基於專家判斷方式提出 RISQUE 方法，藉以針對關鍵風險項目進行量化分析；Savage 等人 (2004)、Wildenborg 等人 (2004) 及 Maul 等人 (2004) 則透過了 FEP (Feature, Event and Process) 資料庫，逐條表列各項風險情境之可能危害及其矯正措施；Stauffer 等人 (2006) 提出系統化的 CO₂-PENS 風險評估工具，針對二氧化碳逸失機制進行評估；Gerard 等人 (2006) 則特別針對灌注井相關之逸失風險情境進行量化評估。

Oldenburg 等人 (2007) 將複雜的系統拆解成各項程序單元，並以簡化的定量模式估計各項逸失風險之可能性；Stenhouse 等人 (2006) 則應用情境分析 (Scenario Analysis)、事件樹分析 (Event Tree Analysis)、缺陷樹分析 (Fault Tree Analysis)、專家判斷 (Expert Judgement) 及篩選級別分析 (Screening-Level Analysis) 等方法，指出於參數評估、概念模式建立、模式分析及情境事件模擬等部分均具有不確定性；Tanaka 等人 (2008) 則將各項二氧化碳地質封存所可能遭遇之危害建立成事件樹 (Hazard Event Tree)，將各項問題拆解成獨立單元逐一考量；Meyer (2009) 應用 P&RTM 程式進行注入井完整性的風險分析；Lahaie 等人 (2009) 檢討了目前為止應用於

地質封存的各種風險分析工具，指出尚無一般系統性的風險分析可供全面風險事件的評估，多半係針對某些特定風險所發展的特定技術或軟體，進行較為系統性的風險分析 (Risk Analysis or Risk Estimation) 與風險評估 (Risk Assessment or Risk Evaluation)。進一步再配合風險監測工作獲知一旦有風險過高的現象時，則設法降低該風險項目之發生機率 (Probability) 或衍生後果 (Severity or Consequence)，進行風險管理以降低風險至可接受程度。

二、灌注設施安全風險評估架構

二氧化碳地質封存灌注設施由多個系統組成，每個系統由多樣組件 (設備) 建構而成，這些組件及設備由相關人員進行操作，因此二氧化碳地質封存的設施安全風險評估涵蓋了系統、組件、設備及人員。人員操作設備帶來的風險則著眼於人因工程的核心概念，考量「人的能力」與「作業負荷」等因素；系統、組件及設備等硬體設施以系統可靠度及系統安全概念進行評估，在於探討系統或維護加強系統、設備來提升其可靠度。

二氧化碳在地質封存的過程中，最可能造成大量二氧化碳外洩的風險情境是在灌注初期，若接收端或灌注端管線破裂，將造成管儲氣體大量洩出，導致空氣中二氧化碳濃度增加。

考量量化風險評估採用量化數據進行分析，較適用於設施安全風險評估，故本文參考行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所 (2007) 所擬量化風險評估要項之關連圖，如圖 1 所示，將設施安全量化風險評估分為識別肇始事件、事故發生頻率分析及後果評估、事件及整體風險分析等要項，摘述如下：

(一) 識別肇始事件

肇始事件分析方法過程中，失效模式與效應分析 (Failure Mode and Effects Analysis, FMEA) 為量化風險與可靠度分析的第一步。

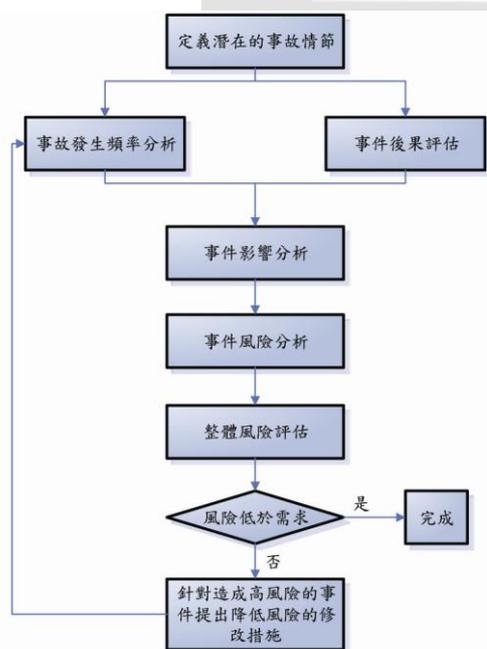
(二) 事故發生頻率分析及後果評估

根據 FMEA 表格得到「可能性」或「關鍵性」的排序，事件樹分析 (Event Tree Analysis, ETA) 則是一種圖解式的邏輯分析方法，可以分析肇事事件與整體系統的反應模式組合下，所有可能的事件序列並量化其發生率。事件樹能對事件發展過程的時間序列提供系統性的涵蓋，包括正常的操作、一連串的保护/防災系統操作及人員操作等。

故障樹 (Fault Tree Analysis, FTA) 是一種演繹性邏輯的樹狀圖分析法，可用於判定事件的發生原因與探討各因子間之關係外，並可評量故障事件的發生機率與各因子的重要度。故障樹能評估在事件樹的時間過程序列事項發生的機率，如灌注泵無法關閉或管線無法阻隔之發生機率。

(三) 事件及整體風險分析

經由 FMEA、ETA 及 FTA 進行風險分析及計算得到的發生頻率及事件後果，加以組合得到可能事故情境風險，係危害發生頻率與其後果所形成的一種度量，基於不同的觀點會有不同的風險表述方式，如風險指標、個人風險及社會風險等。



(行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所，2007)

圖 1 量化風險評估要項流程圖

三、灌注設施洩漏風險分析

(一) CCS 設施洩漏發生機率分析

設施的肇始事件大致可分為兩類，即因為整體環境事件或狀況所引起的「場外事件」，如地震、颱風、落雷等自然災害造成的設備破裂或洩漏；另一為肇始於設備本身失效或運轉過程誤失引起的「場內事件」，通常包含喪失阻遏 (Loss of Containment) 和製程意外 (Process Upset) 兩類。

根據二氧化碳封存場址的特性，主要的風險情境著重在灌注設施可能失效或洩漏，造成場區及鄰近地區人員因二氧化碳濃度過高而危及健康。因此首先須確認肇始事件，定義可能發生之事故情境的開端，例如二氧化碳場址可能發生破管導致洩漏。從破管開始，可能引發監測設備動作，關斷相關的閥 (Valve) 及泵 (Pump)，或其他減少洩漏措施，這些在肇始事件後之各種情境即以事件樹進行釐清，討論各交互關係及其發生頻率。每一個可能發生的事故序列可再以故障樹評估相關設備可能故障或人為誤失的機率，如破管後監測器沒有作用 (失效)，導致閥及泵沒有立即關斷而大量洩漏之機率。分析流程如圖 2。

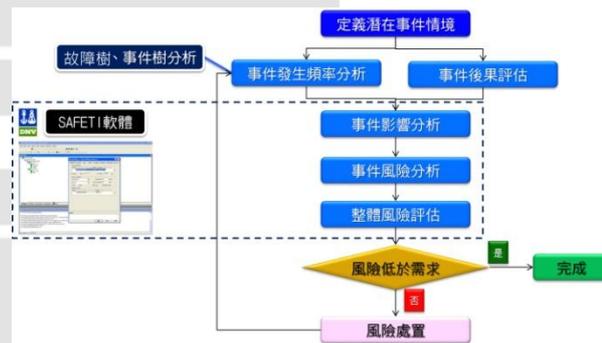


圖 2 灌注設施安全風險評估架構圖

本文所設計之灌注設施風險評估情境仍根據二氧化碳封存場址之灌注管線流路圖 (Pipe Flow Diagram, PFD) (詳圖 3)，假想灌注管線洩漏情境，討論二氧化碳灌注管線斷裂之肇始事件，將灌注管線分為兩段，泵前段為接收端，泵後段為

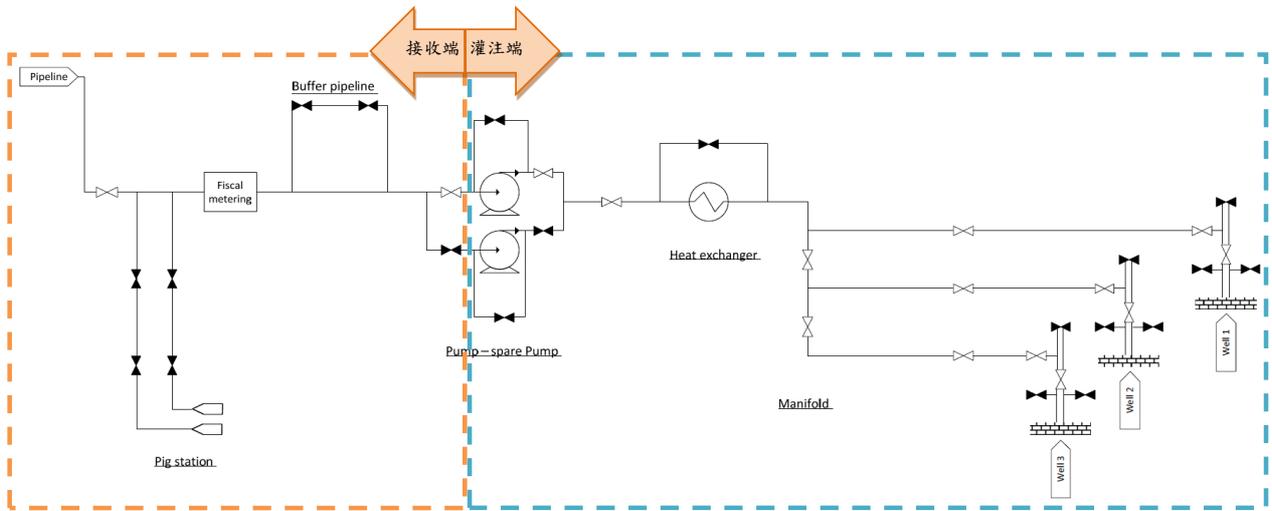


圖 3 二氧化碳地質封存之灌注設施 PFD 圖

灌注端。接收端包括緩衝管線（含 Buffer Pipeline）、閥體（閥體正常為關閉狀態）及計量器，設備較單純，其中 Buffer Pipeline 管段較長；至於灌注端則包含管線、泵、熱交換器、閥體及灌注井。

灌注管線出現斷裂之事件樹描述了灌注管線可能發生之事故情境，如圖 4 之灌注端管線斷裂事件樹及圖 5 之緩衝管線斷裂事件樹所示。

以事件樹決定事故如何發展後，再蒐集數據計算每一事故序列之發生頻率，其中灌注泵無法關閉及灌注管線無法緊急隔離的機率需透過故障樹建立（如圖 6 及圖 7 所示），透過故障樹頻率資料庫得知數據的項目有：1. 灌注管線斷裂、2. 現場人員未發現、3. 灌注泵無法關閉、4. 灌注管閥無法關閉等。由於國際間二氧化碳地質封存系統並無既有數據資料庫可供使用，因此所需的故障頻率仍透過目前國際上常用的工業標準數據手冊及相關資料取得，如表 1 所示。

灌注端管線發生斷裂	偵測器成功動作	灌注作業停止	管線緊急隔離	事件序列	序列代碼	後果代碼	發生頻率 (1/yr)
PIP	DET	PUM	VAL				
4.83E-05	立即控制 5.56E-03	減壓 8.90E-01	部分洩漏 8.91E-01	1	PIP	DIF1	2.13E-07
			全管段洩漏 1.09E-01	2	PIPVAL	DIF2	2.61E-08
		加壓 1.10E-01	部分洩漏 8.91E-01	3	PIPPUM	DIF1	2.63E-08
			全管段洩漏 1.09E-01	4	PIPPUMVAL	DIF3	3.22E-09
			全管段洩漏	5	PIPDETPUMVAL	DIF3	4.81E-05
延遲控制 9.94E-01	加壓	全管段洩漏					

圖 4 灌注端管線斷裂事件樹

緩衝管線發生斷裂	偵測器成功動作	管線緊急隔離	事件序列	序列代碼	後果代碼	發生頻率 (1/yr)
BUP	DET	VAL				
1.95E-05	立即控制 5.56E-03	部分洩漏 8.91E-01	1	BUP	DIF1	9.65E-08
		全管段洩漏 1.09E-01	2	BUPVAL	DIF2	1.18E-08
		全管段洩漏	3	BUPDETVAL	DIF2	1.94E-05
	延遲控制 9.94E-01	全管段洩漏				

圖 5 緩衝管線斷裂事件樹

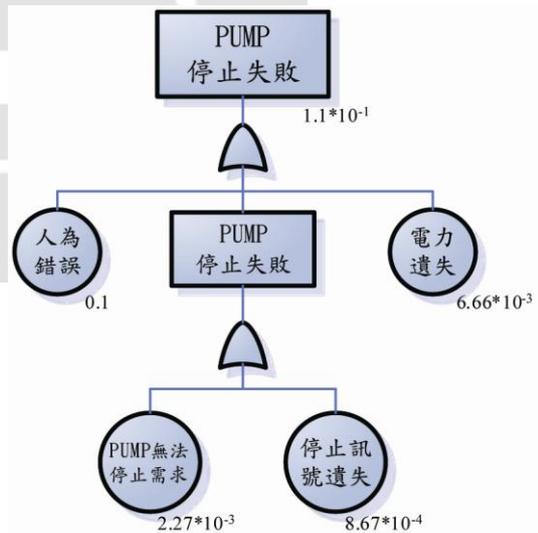


圖 6 灌注泵無法關閉的故障樹

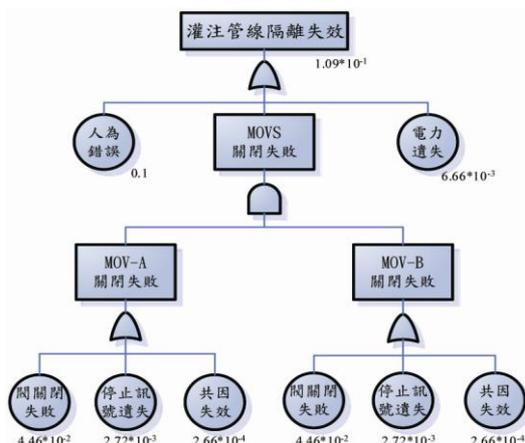


圖 7 灌注管關斷閥無法關閉的故障樹

表 1 事件樹及故障樹各項失效機率及出處

故障樹 (描述)	平均值 (次/小時)	設備失效 機率	來源/出處
灌注端管線斷裂事件樹			
管線 (1km)	3.1×10^{-5} /km-year	3.1×10^{-5}	An Assessment of Measures in Use for Gas Pipelines to Mitigate Against Damage Caused by Third Party Activity, Table 1 Third Party Activity - Failure Frequency per Diameter Class, HSE, 2001.
法蘭 (3pcs)	5.78×10^{-6} /year	1.73×10^{-5}	Failure Frequency Guidance, Table of Process Equipment Leak Frequencies (10" Pipeline with >150mm Leak) , DNV GL.
總頻率		4.83×10^{-5}	
緩衝管線斷裂事件樹			
管線 (0.63km)	3.1×10^{-5} /km-year	1.95×10^{-5}	An Assessment of Measures in Use for Gas Pipelines to Mitigate Against Damage Caused by Third Party Activity, Table 1 Third Party Activity - Failure Frequency per Diameter Class, HSE, 2001.
總頻率		1.16×10^{-4}	
泵的故障樹			
電力遺失	7.6×10^{-7}	6.66×10^{-3}	European Industry Reliability Data Bank: EIREDA 1998, Crete University Press Publication, Board, Power Supply and Protection, AC 220/380V
泵無法即時關閉	2.6×10^{-7}	2.27×10^{-3}	OREDA-2002 ,Machinery Pump, Critical, Fail to Stop on Demand
停止訊號遺失	9.9×10^{-8}	8.67×10^{-4}	OREDA-2002 ,Machinery Pump, Degraded, Abnormal Instrument Reading
閥的故障樹			
閥關閉失效	5.09×10^{-6}	4.46×10^{-2}	OREDA-2002 ,Control and Start Equipment Valve, critical, Fail to Close on Demand
停止訊號遺失	3.1×10^{-7}	2.72×10^{-3}	OREDA-2002 ,Control and Start Equipment Valve, Degraded, Abnormal Instrument Reading
共因失效		閥的失效率 $\times 5.96 \times 10^{-3} = 2.66 \times 10^{-4}$ (限本案例)	CCF Parameter Estimations 2007, USNRC
電力遺失	7.6×10^{-7}	6.66×10^{-3}	European Industry Reliability Data Bank: EIREDA 1998, Crete University Press Publication, Board, Power Supply and Protection, AC 220/380V

1. 灌注端管線斷裂事件

灌注系統洩漏風險之灌注端管線斷裂事件樹標題設定為：現場人員巡視成功、灌注作業停止、

管線緊急隔離等，可分為 5 個事故序列，如下：

- 事故序列 S01：灌注端管線斷裂 (4.83×10^{-5})，CO₂ 洩出後被現場巡視人員發現 (5.56×10^{-3})，管線隔離成功 (8.91×10^{-1})，灌注作業泵即時停止 (8.9×10^{-1})，僅有隔離管線段內 CO₂ 逸失，後果代碼為 DIF1，洩漏時間短，洩漏量少(約為 5 分鐘, 9,510kg 量)，CO₂ 逸失後被空氣稀釋，其影響可能不明顯，計算得事故序列 S01 發生頻率為 2.13×10^{-7} /年。
- 事故序列 S02：灌注端管線斷裂 (4.83×10^{-5})，CO₂ 洩出後被現場巡視人員發現 (5.56×10^{-3})，管線隔離失敗 (1.09×10^{-1})，但灌注作業停止，泵停止運轉 (8.9×10^{-1})，CO₂ 逸散速度緩慢但逸散量大包括全部管段 (約為 60 分鐘, 114,120kg 量)。後果代碼為 DIF2，其連通體積大，洩漏壓力較小(速度慢)，CO₂ 逸失速度慢，被空氣稀釋效果可能較佳，計算得事故序列 S02 發生頻率為 2.61×10^{-8} /年。
- 事故序列 S03：灌注端管線斷裂 (4.83×10^{-5})，CO₂ 洩出後被現場巡視人員發現 (5.56×10^{-3})，管線隔離成功 (8.91×10^{-1})，灌注作業無法停止，泵持續運轉 (1.1×10^{-1})，CO₂ 逸散速度可能較慢且僅有隔離管段內 CO₂ 逸散。後果代碼為 DIF1，洩漏時間短，洩漏量少(約 5 分鐘, 9,510kg 量)，CO₂ 逸散後被空氣稀釋，其影響可能不明顯，但須注意除斷裂管線外，泵到隔離管線間壓力持續累積，是否可能造成二次破管，計算得事故序列 S03 發生頻率為 2.63×10^{-8} /年。
- 事故序列 S04：灌注端管線斷裂 (4.83×10^{-5})，CO₂ 洩出後被現場巡視人員發現 (5.56×10^{-3})，管線隔離失敗 (1.09×10^{-1})，灌注作業無法停止，泵持續運轉 (1.1×10^{-1})，CO₂ 逸散速度可能較快且散量大包括全部管段。後果代碼 DIF3，洩漏時間長，洩漏量大

(約為 60 分鐘，114,120kg 量)，洩漏壓力大（速度快），於洩漏點附近累積高濃度 CO₂，計算得事故序列 S04 發生頻率為 3.22×10⁻⁹/年。

(5) 事故序列 S05：灌注端管線斷裂 (4.83×10⁻⁵)，CO₂ 洩出後沒有被現場巡視人員發現 (9.94×10⁻¹)，管線無法隔離，持續洩漏達 1 小時，灌注作業無法停止，泵持續運轉，CO₂ 逸散量大包括全部管段 (約為 60 分鐘，114,120kg 量)。後果代碼為 DIF3，洩漏時間長，洩漏量大、洩漏壓力大 (速度快)，於洩漏點附近累積高濃度 CO₂，計算得事故序列 S05 發生頻率為 4.81×10⁻⁵/年。

2. 緩衝管線斷裂事件

緩衝管線斷裂事件樹與灌注管線端相似，惟緩衝管線中間無加壓泵，依洩漏量體不同分為 3 個事故序列如下：

- (1) 事故序列 S01：所有緩衝功能成功運行，緩衝管線斷裂後 (1.95×10⁻⁵)，CO₂ 洩出後被現場巡視人員發現 (5.56×10⁻³)，管線隔離成功 (8.91×10⁻¹)，僅有少量 CO₂ 逸失，後果代碼為 DIF1，CO₂ 逸失後被空氣稀釋，其影響可能不明顯，計算得事故序列 S01 發生頻率為 9.65×10⁻⁸/年。
- (2) 事故序列 S02：緩衝管線斷裂後 (1.95×10⁻⁵)，CO₂ 洩出後被現場巡視人員發現 (5.56×10⁻³)，但管線隔離並未成功 (1.09×10⁻¹)，因此在緩衝管線內的二氧化碳完全逸失，洩漏量大，於洩漏點附近累積高濃度 CO₂，計算得事故序列 S02 發生頻率為 1.18×10⁻⁸/年。
- (3) 事故序列 S03：緩衝管線斷裂後 (1.95×10⁻⁵)，CO₂ 洩出後未被現場巡視人員發現 (9.41×10⁻¹)，因此在緩衝管線內的二氧化碳完全逸失，洩漏量大，於洩漏點附近累積高濃度 CO₂，計算得事故序列 S03 發生頻率為 1.94×10⁻⁵/年。

(二) CCS 設施洩漏發生後果分析

設施洩漏之後果分析，主要針對洩漏物質之物理與化學特性、設施場址特性及氣象條件等因子，討論其洩漏可能的擴散情形及影響範圍，進而評估擴散後對人員造成的影響。二氧化碳封存設施之大氣擴散模擬，因二氧化碳無燃燒或爆炸之虞，與一般工廠常見的化學氣體危害分析不同，遂以氣體擴散模式來分析二氧化碳灌注時因洩漏解壓回到氣體狀態之擴散情形，排除燃燒或爆炸的可能性，進行設施洩漏之後果分析。

1. 分析軟體簡介

本文採用之風險分析軟體為挪威 DNV GL 所發展之 SAFETI 軟體進行量化風險分析研究(Phast Risk Release Notes)。其中 PHAST 模組針對事故發生 (洩漏) 進行後果分析，依照事故發生洩漏物質之物理、化學特性及廠區環境特性、氣象資料、地形特點，透過各種意外模擬模式計算出所造成氣體擴散及物質具有之威脅，可分析災害對於人員或設備所造成的影響，再配合地理資訊 (地圖、人口密度與點火源分布情形) 進行各種危害影響範圍繪製。另以 SAFETI 程式進行後續之風險分析 (如圖 8)，結果各種情境分析結果及設施失效機率，可進而計算出每年個人死亡風險機率及社會 (F/N) 風險值。

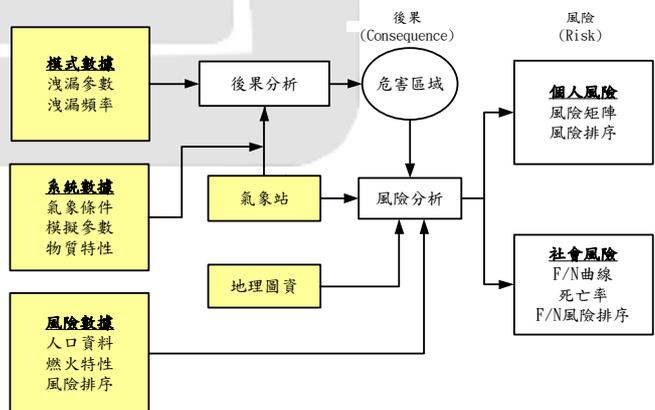


圖 8 應用 SAFETI 於設施安全風險評估之流程

2. 擴散分析之模擬案例情境參數設定

本文以麥寮工業區為假設之模擬基地，輸入之參數如下：

(1) 情境設定

後果模擬之情境可分為最嚴重情境 (Worst Case Scenario, WCS) 及其他情境 (Alternative Release-Case Scenario, ACS) 兩種。最嚴重情境為假設洩漏源位於地面，儲存物於短時期內完全洩漏，最嚴重情境氣象條件為大氣穩定度 F，風速為 1.5m/s，溫度為該區域三年氣象統計最高溫度，濕度為平均濕度；其他情境則為其他可能造成災害後果之條件，定義為發生頻率比最嚴重事件更高，在本文中採取夏季、冬季及全年三種不同氣象條件作為其他情境分析，同時配合 3 種洩漏情境：

- A. 常時部分洩漏 (DIF1)：壓力為接收端管壓 (73.9bar)，洩漏量假設為洩漏 5 分鐘 (9,150kg)。
- B. 常時全管段洩漏 (DIF2)：壓力為接收端管壓 (73.9bar)，洩漏量為全管段二氧化碳總量，假定為管線總量 114,120kg。
- C. 加壓灌注全管段洩漏 (DIF3)：壓力為灌注端管壓 (140bar)，洩漏量為全管段二氧化碳總量，同 DIF2。

故在情境分析上共有 3 種洩漏情境 (A、B、C) 配合 4 種氣象條件 (最嚴重、夏季、冬季、全年)，於分析時總共考量 12 種不同的模擬情境組合。

(2) 共同參數條件

- A. 數據限值：主要包括事故情境持續時間、化學物質的溫度、壓力、洩漏速度、角度、物質洩漏時液滴的直徑等數值。本文設定之操作管壓：接收端為 73.9bar、灌注端 (泵加壓後) 為 140bar、液態二氧化碳溫度 25℃，洩漏時間依情境分為 5 分鐘及 60 分鐘。

- B. 洩漏參數：本文使用「Line Rupture」洩漏模型，使用參數主要包括：管長、管徑、管道粗糙度、泵輸出的水頭、儲槽的水頭高度、閥體數量、洩漏高度及角度等；還有從偵測到洩漏最長時間以及設備參數如最大事故頻率、最小事故頻率等。洩漏總重為 114,120kg，洩漏速度以灌注速度假設為 31.7kg/s。

(3) 氣象參數

模式分析所需之氣象條件包括溫度、濕度、風速、風向及大氣穩定度，本文收集潛在封存場址鄰近之海氣象資訊網 2010 年至 2012 年共三年之氣溫、濕度、風速及風向每小時資料，整理如表 2 之統計表，將其他情境之分析氣象條件設為夏季、冬季及全年共 3 種，以分析不同氣象條件可能造成的擴散程度差異。圖 9 為平均風向玫瑰圖，同時參照 Pasquill (1961) 所提出半定量分類法 (如表 3 所示) 選定研究區域之大氣穩定度。

表 2 本案例分析之氣象參數

項目	溫度	濕度	風速	風向	大氣穩定度
最嚴重	28.4°C	86.2%	1.5m/s	NNE、S	F
夏季	26.0°C	86.2%	5.4m/s	NNE、S	D
冬季	18.7°C	84.0%	9.3m/s	NNE	D
全年	22.4°C	85.0%	7.4m/s	NNE	D

表 3 大氣穩定度分類表 (Pasquill, 1961)

地表 10公尺 高度風速 (m/s)	日間日照程度			夜間雲覆蓋率		任何 時間 陰天 多雲
	強	中	弱	雲覆蓋率 ≥4/8	雲覆蓋率 >3/8	
<2	A	A-B	B	F	F	D
2-3	A-B	B	C	E	F	D
3-5	B	B-C	C	D	E	D
5-6	C	C-D	D	D	D	D
>6	C	D	C	D	D	D

- 註：A：非常不穩定狀態 (Extremely Unstable Conditions)
- B：中等不穩定狀態 (Moderately Unstable Conditions)
- C：略微不穩定狀態 (Slightly Unstable Conditions)
- D：中性狀態 (Neutral Conditions)
- E：略微穩定狀態 (Slightly Stable Conditions)
- F：中等穩定狀態 (Moderately Stable Conditions)
- G：非常穩定狀態 (Extremely Stable Conditions)

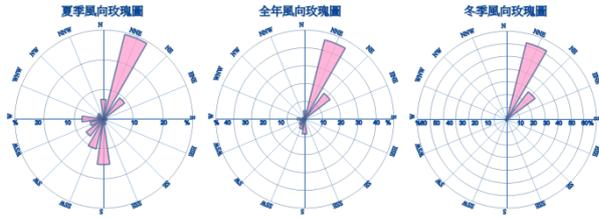


圖 9 各氣象條件之平均風向玫瑰圖

(4) 管制濃度設定

本文參考國內外各項化學物質洩漏時對人體健康危害的毒性化學物質暴露指標共 6 項來訂定管制濃度基準 (如表 4 所示)。

表 4 各單位公布的二氧化碳濃度指標

單位	名稱	濃度標準
美國國家職業安全衛生研究所 (NIOSH)	IDLH	40,000 ppm
美國聯邦緊急管理署 (FEMA)	1/10 IDLH	4,000 ppm
美國政府工業衛生師協會 (ACGIH)	TLV-STEL	30,000 ppm
	TLV-TWA	5,000 ppm
行政院環境保護署	1/2 IDLH	20,000 ppm
	室內空氣品質標準	1,000 ppm

- 註：1. IDLH：指人員暴露於毒性氣體環境30分鐘，尚有能逃脫，且不致產生不良症狀或不可恢復性之健康影響的最大容許濃度。
 2. TLV-STEL：一次暴露不得超過15分鐘，在8小時工作日中不得超過4次暴露，前後兩次暴露之間隔至少60分鐘的作業環境空氣中有害物質濃度。
 3. TLV-TWA：8小時工作日或40小時工作週中，以暴露時間為權數計算所得的作業環境空氣中有害物質平均濃度不得超過此值。
 4. 空氣品質標準：連續8小時各測值之算術平均值或8小時累計採樣之測值，二氧化碳之室內空氣品質標準。

3. 分析結果

根據設定預分析 3 種 (DIF1、DIF2、DIF3) 不同事件情境，配合 4 種氣象條件，以洩漏源為中心，評估不同風向及條件下，管制濃度的影響範圍如表 5 所示，在 12 種情境組合下，不論風向為 NNE 向或 S 向，其影響範圍在高濃度 (400,000~20,000ppm) 的狀況下，大多侷限在灌注場內；而到了較低濃度 (4,000~1,000ppm) 的情

況則略有不同，最嚴重氣象條件影響範圍較大，不論是風向 NNE 或 S 在 4,000ppm 的濃度下，即有部分影響到工業區內；至於在 1,000ppm 條件下則最遠可到達 2,397m (DIF3)。

此外，在夏季氣象條件下若以考量風向 NNE 則即使在 1,000ppm 下亦無影響到工業區，惟在風向 S 時，則有部分影響工業區範圍；另在冬季及全年氣象條件下，考量其風向及擴散範圍可發現即使在低濃度標準下，亦不影響工業區範圍。

表 5 不同情境與氣象條件之擴散範圍評估結果

後果代碼	DIF1	DIF2	DIF3
情境說明	常壓 部分洩漏	常壓 全管段洩漏	加壓灌注時 全管段洩漏
壓力 (bar)	73.9	73.9	140
溫度 (°C)	25	25	25
洩漏量 (kg)	9,510	114,120	114,120
最嚴重	1,000ppm	962m	2,355m
	4,000ppm	696m	1,654m
	5,000ppm	660m	1,540m
	20,000ppm	404m	731m
	30,000ppm	334m	565m
	400,00ppm	295m	369m
夏季	1,000ppm	1,125 m	2,280 m
	4,000ppm	800 m	1,590 m
	5,000ppm	754 m	1,495 m
	20,000ppm	502 m	764 m
	30,000ppm	434 m	593 m
冬季	1,000ppm	1,177 m	1,830 m
	4,000ppm	825 m	1,152 m
	5,000ppm	776 m	1,070 m
	20,000ppm	494 m	608 m
	30,000ppm	427 m	500 m
全年	1,000ppm	1,150 m	1,955 m
	4,000ppm	808 m	1,280 m
	5,000ppm	762 m	1,195 m
	20,000ppm	494 m	676 m
	30,000ppm	429 m	547 m
	400,00ppm	382 m	458 m

(三) 風險評估結果

利用 SAFETI 結合由事件樹及故障樹求得每一項事故序列之發生頻率 (包含灌注管線破裂及緩衝管線斷裂) 及其 PHAST 模組所求得每一項預估情境發生的後果 (DIF1、DIF2、DIF3)，搭配 4 種氣象條件風向資料 (風向資料如表 6 所示)，並配合地理人口資訊，得以計算出設施洩漏造成之社會風險及個人風險。

表 6 封存場址風向條件表

風向	最嚴重	夏季	冬季	全年
N	4.68%	6.55%	2.81%	4.68%
NNE	45.91%	29.37%	62.45%	45.91%
NE	18.13%	8.91%	27.35%	18.13%
ENE	0.64%	0.78%	0.49%	0.64%
E	0.82%	1.15%	0.49%	0.82%
ESE	0.81%	1.10%	0.51%	0.81%
SE	0.42%	0.64%	0.20%	0.42%
SSE	1.11%	1.93%	0.28%	1.11%
S	8.45%	15.36%	1.53%	8.45%
SSW	5.68%	10.36%	1.00%	5.68%
SW	4.07%	7.34%	0.80%	4.07%
WSW	2.57%	4.63%	0.52%	2.57%
W	4.08%	7.30%	0.87%	4.08%
WNW	1.27%	2.22%	0.32%	1.27%
NW	1.36%	2.35%	0.37%	1.36%
NNW	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%

分析時假設 CCS 場址範圍內有 5 名常駐作業人員；另查得場區外圍工業區員工 11,984 人，假設平均分布於工業區；鄰近地區居民 9,419 人；考慮影響濃度為 40,000ppm。

依上述條件分析其社會風險及個人風險。其中，社會風險分析結果 (F/N Curve) 區分為：(1) 可接受的區域 (Acceptable Region)、(2) 在合理可行的情況下儘可能抑低區域 (ALARP Region) 及 (3) 不可接受區域 (Unacceptable Region) 等三種區域，標準是依據 UK HSE 標準 (居民最大承受風險須低於 1×10^{-3} /人·年)，其他各國的社會風險標準如表 7 所示。

分析結果在最嚴重氣象條件下個人風險為 1.50×10^{-5} 、夏季氣象條件下個人風險為 1.42×10^{-5} 、冬季氣象條件下個人風險為 1.04×10^{-5} 、全氣象條件下個人風險為 1.27×10^{-5} ，均小於 UK HSE 之標準。而在個人風險方面，整理出 $10^{-5} \sim 10^{-9}$ 風險值影響範圍如表 8 所示，依照目前國外分界區域內個人風險標準為例 (如表 9 所示)。

另以荷蘭新建設施標準最為嚴格，最大容許風險為每年 1×10^{-6} ，可忽視風險為每年 1×10^{-8} ，依其標準檢視此案例分析結果，在風險為 1×10^{-6} 之 4 種氣象條件影響範圍為 233m~365m 之間，而在 1×10^{-8} 條件下，影響範圍為 436m~485m 之間，將

其結果繪於場區地區可看出，其影響範圍均在灌注場區內，均未涵蓋到麥寮工業區，且與鄰近居民距離甚遠 (如圖 10 至圖 11 所示)。

表 7 各國社會風險標準值

機構	最大容許斜距 N=1	F/N 曲線斜距	可忽視斜距 N=1	界限點 N
英國 (R2P2)	10^{-2}	-1	10^{-5}	9763
英國 (Old LUP)	10^{-3}	-2	10^{-5}	163
英國 (New LUP)	10^{-3}	-1.5	10^{-6}	847
荷蘭 (Old)	10^{-3}	-2	10^{-5}	163
荷蘭 (New)	10^{-3}	-2	10^{-6}	1644
捷克 (New)	10^{-4}	-2	10^{-6}	163
荷蘭	10^{-3}	-1	10^{-5}	1000
丹麥	10^{-2}	-2	—	—

表 8 個人風險於各氣象條件之影響範圍

機率範圍	最嚴重影響範圍	夏季影響範圍	冬季影響範圍	全年影響範圍
1×10^{-5}	165m	46 m	160 m	163 m
1×10^{-6}	346 m	348 m	233 m	365 m
1×10^{-7}	408 m	416 m	430 m	440 m
1×10^{-8}	436 m	460 m	485 m	480 m
1×10^{-9}	454 m	470 m	500 m	500 m

表 9 各國分界區域內個人風險標準

機構及應用	最大容許風險 (每年)	可忽視風險 (每年)
英國安全衛生部 (現有危險性設施)	1×10^{-3}	1×10^{-6}
殼牌石油公司 (陸上和海上設施)	1×10^{-3}	1×10^{-6}
英國石油公司 (陸上和海上設施)	1×10^{-3}	1×10^{-5}
Norsk Hydro 公司 (陸上設施)	1×10^{-3}	—
ICI 公司 (陸上設施)	—	3.3×10^{-5}
挪威石油公司 (陸上設施)	—	8.8×10^{-5}
Rohm & Haas (陸上設施)	—	2.5×10^{-5}
荷蘭 (新建設施)	1×10^{-6}	1×10^{-8}
荷蘭 (已建設施或結合新建設施)	1×10^{-5}	1×10^{-8}
英國 (已建危險工業)	1×10^{-4}	1×10^{-6}
英國 (新建核能發電廠)	1×10^{-5}	1×10^{-6}
英國 (新建危險性物品運輸)	1×10^{-4}	1×10^{-6}
英國 (靠近已建設施的新民宅)	3×10^{-6}	3×10^{-7}
中國香港 (新建和已建設施)	1×10^{-5}	—
新加坡 (新建和已建設施)	5×10^{-5}	1×10^{-6}
馬來西亞 (新建和已建設施)	1×10^{-5}	1×10^{-6}
汶萊 (已建設施)	1×10^{-4}	1×10^{-6}
汶萊 (新建設施)	1×10^{-5}	1×10^{-7}
澳大利亞西部 (新建設施)	1×10^{-6}	—
美國加利福尼亞 (新建設施)	1×10^{-5}	1×10^{-7}

即便在灌注系統管線破裂下造成二氧化碳濃度增加，會造成此數量二氧化碳增加事件發生機率極微，在灌注廠區內發生的機率為 $1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-9}$ ，而進到工業區、民眾居住地則幾無任何影響，發生機率低於 1×10^{-9} 。

四、結 論

1. 本文針對 CCS 廠區管線斷裂造成之風險情境進行量化風險分析。包括 3 種擴散後果，配合 4 種氣象條件進行分析評估，獲得個人風險及社會風險結果。結果顯示即使在灌注時管線破裂造成大量二氧化碳洩漏，其影響範圍仍有限。高濃度 40,000ppm 大多集中在封存場區內，超過此範圍則濃度大量降低；至於工業區外民眾居住的地方則完全無影響。此外，開始洩出之二氧化碳濃度雖高，但在短時間內（數分鐘）即被大氣所稀釋，並不會長時間造成空氣中二氧化碳濃度增加，且上述情境發生機率極低。建議加強現場監測設備及請操作人員配戴安全防護設備即可確保所有人員安全。
2. 依 CCS 設施風險分析之需求，已研析國際上重要之工業標準數據手冊，其中包括 EIReDA 1998、OREDA-2002、CCF Parameter Estimations 2010 等資料庫，並全力蒐集封存場址中必要設施組件之可靠度參數及失效機率，其成果應可作為 CCS 風險評估的參考依據。
3. 計算出風險大小後需有衡量標準，用以判斷風險等級是否須進行處置，本文蒐集國際間先進國家對風險評估所採用之門檻值，雖風險評估概念相同，但各國訂定的門檻值仍因國情而有所差異。綜合目前國際間對於個人風險所訂立的標準，其上限值大多介於 10^{-3} 至 10^{-8} 之間，若進一步考量個人風險與人口密度的分布，則可獲得社會風險，各國社會風險可忍受上限值大約介於 10^{-2} 至 10^{-4} 之間，此風險門檻範圍可作為未來管制單位風險管理訂定參考之依據。

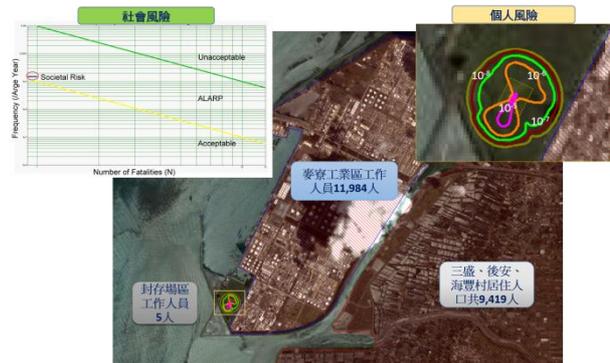


圖 10 最嚴重氣象條件下，管線斷裂造成的社會風險 F/N 曲線及個人風險輪廓線圖

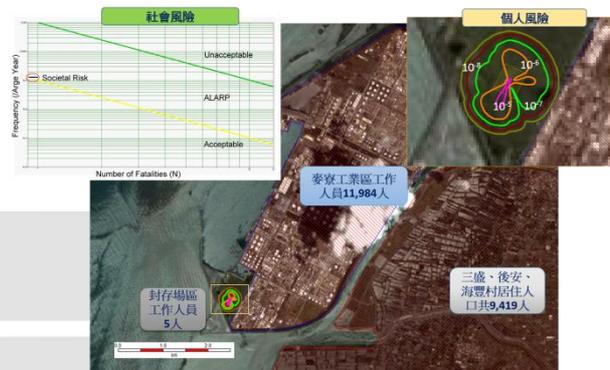


圖 11 全年氣象條件下，管線斷裂造成的社會風險 F/N 曲線及個人風險輪廓線圖

謝 誌

感謝國科會能源國家型科技計畫與財團法人台灣經濟研究院提供計畫經費及各項協助。另對 DNV-GL 與核能所提供的風險評估技術協助致上最誠摯謝忱。

參考文獻

- AIChE/CCPS (2000) Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis, New York, Center for Chemical Process Safety, American Institute for Chemical Engineers
- Celia, M. A., Bachu, S., Nordbotten, J. M., Kavetski, D., Gasda, S. E. (2005) Modeling Critical Leakage Pathways in a Risk Assessment Framework: Representation of Abandoned Wells, Fourth Annual Conference on Carbon Capture and Sequestration DOE/NETL
- British Standards Institution (2007) Occupational Health and Safety Assessment Series-Requirements, OHSAS 18801:2007

USEPA (1998) Guidelines for Ecological Risk Assessment, EPA-630-R-95-002F, April, U.S. Environmental Protection Agency

Roberts J. J., Wood R. A., and Haszeldine R. S. (2011) Assessing The Health Risks of Natural CO₂ Seeps in Italy, PNAS Early Edition

DNV Guideline for Selection (2009) Characterization and Qualification of Sites and Projects for Geological Storage of CO₂, CO₂QUALSTORE Report

Pasquill F. (1961) The Estimation of the Dispersion of Windborne Material, The Meteorological Magazine, Vol. 90, No. 1063, pp. 33-49

Bowden A. and Rigg A. (2004) Assessing Risk in CO₂ Storage Projects, The APPEA Journal, 44, pp. 677-702

Stauffer P. H., Viswanathan H. S., Pawar R. J., Klasky M. L., Guthrie G. D. (2006) CO₂-PENS: A CO₂ Sequestration Systems Model Supporting Risk-Based Decisions, Proceedings of the 16th International Conference on Computational Methods in Water Resources, pp. 19-22

European Industry Reliability Data Bank (EIReDA) (1998) Crete University Press Publication

HSE (2001) An Assessment of Measures in Use for Gas Pipelines to Mitigate Against Damage Caused by Third Party Activity

OREDA (2002) Offshore and Onshore Reliability Data

USNRC (2007) CCF Parameter Estimations 2007, Available: https://issuu.com/dnv.com/docs/failure_frequency_guidance_process_

Gérard B., Frenette R., Augé L., Barlet-Gouédard V., Desroches J, Jammes L. (2006) Well Integrity in CO₂ Environments: Performance and Risk, Technologies, Proceedings of the International Symposium on Site Characterization for CO₂ Geological Storage, Berkley, CA, USA

Lahaie F., Farret R., Bumb P. (2009) Towards a Framework for CCS Risk Assessment, Carbon Capture Journal, Nov./Dec., pp. 22-24

Maul, P. R., Savage, D., Benbow, S. J., Walke, R.C., Bruin, R. (2005) Development of a FEP Database for the Geological Storage of Carbon Dioxide, Wilson, M., Morris, T., Gale, J., Thambimuthu, K. (Eds.), Proceedings of the Seventh International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, Vol. 1, pp. 701-710

Meyer V. (2009) Performance and Risks Analysis for Well Integrity in CO₂ Geological Storage, Carbon Capture Journal, March/April, pp. 24-27

Oldenburg C., Bryant S. (2007) Certification Framework for Geologic CO₂ Storage, Sixth Annual Conference on Carbon Capture and Sequestration, Pittsburgh, PA, USA, pp. 7-10

Savage D., Maul P. R., Benbow S., Walke R. C. (2004) A Generic FEP Database for the Assessment of Long-Term Performance and Safety of the Geological Storage of CO₂, Quintessa Report IEA, Document Number: QRS-1060A-1

Tanaka A., Komai T., Okuyama Y. Tosha T. (2008) Development of Conceptual Hazard Event Tree of CO₂ Geological Storage R&D, International Disaster and Risk Conference, Switzerland

Wildenborg T., Leijnse T., Kreft E., Nepveu M., Obdam A. (2004) Long Term Safety Assessment of CO₂ Storage, The Scenario Approach, Proceedings of GHGT-7

中興工程顧問社(2014)國科會能源國家型科技計畫淨煤、捕碳與儲碳主軸專案計畫—二氧化碳地質封存(3/3), 計畫成果報告

中興工程顧問社(2012)二氧化碳地質封存試驗場址調查規劃與研究, 台灣電力公司委託專業服務期末報告



財團法人中興工程顧問社歷年之研發成果，已開發下列電腦程式，對相關工程問題之掌握與分析精度之提升，有很大助益。若有需要，歡迎洽購。

聯絡電話：(02) 8791-9198 轉 473 馬小姐

E-MAIL：pony@sinotech.org.tw

網址：<http://www.sinotech.org.tw>

專利名稱	核准地區	獲准年月日	目前商品化情形
混凝土結構品質檢測方法及裝置	臺灣 美國 日本	90年6月26日 91年9月30日 93年3月5日	研發成果已完成，持續推廣中。
混凝土結構品質檢測用之鋼珠敲擊組件	臺灣	90年5月8日	
鋼結構耐震梁柱接頭	臺灣 美國	90年1月3日 91年6月7日	
耐震橋柱預鑄節塊接頭	臺灣	91年11月21日	尚未開始
耐震橋柱塑鉸區預鑄節塊接頭	臺灣	91年11月22日	