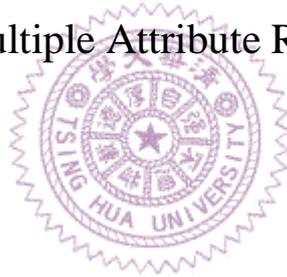


國立清華大學

碩士論文

台灣二氧化碳封存場址評估-利用簡易多屬性評估技術

Sites Assessment of Carbon Dioxide Sequestration in Taiwan -  
Using Simple Multiple Attribute Rating Technology



所別：科技管理學院

組別：經營管理碩士在職專班 (MBA)

姓名：李科豎 (Li, Ke-Shu)

學號：100076527

指導教授：林哲群博士 (Dr. Lin, Che-Chun)

中華民國 一 百 零 二 年 六 月

## 摘要

二氧化碳地質封存是目前降低其排放量的最有效方式，降幅可達19%，但文獻多著重到場址評估因子之描述，對於其評估方式並不明確。

本研究利用簡易多屬性評估技術(SMART)搭配排序次序重心權重法(ROC)來建立台灣地區二氧化碳地質封存之評估指標與評估衡量系統，欲利用系統化分析與權重自動分配，給予客觀的分析，以利地質普查後之實驗地區評選。

**關鍵詞：**二氧化碳地質封存、場址評選、簡易多屬性評估技術

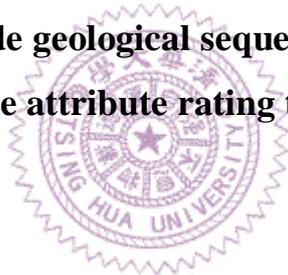


## **Abstract**

For decreasing carbon dioxide emission in Taiwan, geological sequestration becomes the most efficient way. It decreases 19% of total carbon dioxide emissions of Taiwan. But method of evaluation for sites ranking is not clear.

In this study, we use simple multiple attribute rating technology (SMART) with ROC weighting method (ROC) which affords the weights for evaluation indicators of sites screening and establishes sites ranking system to facilitate the further geological survey.

**Key words: Carbon dioxide geological sequestration, site selection, simple multiple attribute rating technology (SMART)**



## 致謝

謹向我們的指導教授林哲群博士致上最高的謝意，感謝他以開放的態度與專業的學養來指導學生的論文，使得學生能將興趣與所學到的專精知識加以結合、運用，並使得本論文得以順利完成。

感謝第十三屆經營管理碩士在職專班全體同學，你們的活力與工作上的專注深深的令我佩服，讓我在你們身上學到很多課堂沒教的事，而彼此間的和樂氣氛更讓我在工作與學業壓力之間得到舒緩。

在二氧化碳封存技術方面，感謝林殿順教授與助理楊健男提供寶貴的建議，才使得本論文更加完整。

最後，由衷感謝父母親這些年來細心的照顧與栽培，讓我在職場與家庭間無後顧之憂，在我求學的路上不斷給予鼓勵與支持。而我最愛的妻子與兩個寶貝的小公主則是我心中的支柱，雖然生活中多少會有些波折，但能與你們一起分享，真好。

民國一百零二年六月于清華大學

## 目錄

摘要 .....	i
英文摘要 .....	ii
致謝 .....	iii
目錄 .....	iv
圖目 .....	vi
表目 .....	vii
第一章 緒論.....	1
1.1 研究動機與目的 .....	1
第二章 文獻探討與回顧 .....	2
2.1 二氧化碳封存概念簡介.....	2
2.1.1 地質封存.....	2
2.1.2 礦化封存.....	4
2.1.3 海洋封存.....	4
2.2 二氧化碳之超臨界態特性 .....	5
2.3 台灣二氧化碳封存研究現況 .....	7
2.4 二氧化碳封存地區評選.....	10
第三章 研究方法與步驟 .....	12
3.1 研究方法 .....	12
3.1.1 SMART-ROC.....	12
第四章 個案分析與探討 .....	16

4.1 研究限制.....	16
4.2 分析流程.....	16
4.2.1 定義問題.....	16
4.2.2 目標與層級架構.....	17
4.2.3 定義評估屬性.....	18
4.2.4 產生方案.....	21
4.2.5 屬性排序與權重給予.....	24
4.2.6 評估方案結果.....	25
4.2.7 價值衡量.....	28
4.2.8 計算各方案總分與決策.....	28
第五章 結論與後續研究建議.....	30
5.1 結論.....	30
5.2 後續研究建議.....	32
參考文獻.....	33

## 圖目

圖2.1 二氧化碳地質封存可選擇之封存場址 .....	2
圖2.2 二氧化碳之溫度壓力相位圖 .....	5
圖2.3 超臨界態二氧化碳在不同地溫梯度下之密度-壓力變化圖 .....	6
圖2.4 台灣二氧化碳排放趨勢與各減碳方案效益 .....	7
圖2.5 二氧化碳於鹽水層封存之發展流程 .....	8
圖2.6 各階段二氧化碳封存之預估量 .....	9
圖2.7 國外場址評選項目與權重分配 .....	11
圖3.1 SMART-ROC之決策分析架構與流程 .....	15
圖4.1 最適二氧化碳封存場址之目標、架構層級與評選指標 .....	17
圖4.2 台灣之地震規模與深度分布圖 .....	22
圖4.3 台灣西部地溫梯度與二氧化碳排放源分布 .....	23

## 表目

表一	各評選指標之定義 .....	20
表二	台灣之二氧化碳封存候選場址一覽表 .....	21
表三	評選指標排序與相關權重一覽表 .....	25
表四	本研究與國外之封存場址評選指標與權重比較 .....	26
表五	候選地區於各屬性中之相對排名 .....	27
表六	候選地區於各屬性中之標準化後價值評分 .....	28
表七	候選場址之加權總價值 .....	29



# 第一章 緒論

## 1.1 研究動機與目的

核四議題持續延燒，也引爆了台灣的用電問題，民國 102 年核能發電占全台灣發電裝置容量的 12.7%，主要仍是以火力發電為主，而其中的台中火力發電廠之二氧化碳排放量更是全球第一(CARMA)。雖然台灣不是京都議定書的締約國之一，但身為地球村的一分子，我們仍有義務在不影響經濟發展的情況下降低二氧化碳的排放量。依據行政院於 2010 年 5 月所公布之「國家節能減碳總計畫」，台灣二氧化碳減量目標預定於 2020 年回到 2005 年的排放量，於 2025 年回到 2000 年排放量。根據工業技術研究院的模式預測結果顯示，我國 2020 年二氧化碳基線排放量介於 418~465 百萬噸之間，因此若要回到 2005 年之排放水準(257 百萬噸)，則需減量 161~208 百萬噸，仍有很大的減碳缺口，在替代能源(如核能、太陽能等)比例仍無法有效拉高的情況下，二氧化碳封存則成為目前降低其排放量的最有效方式，降幅可達 19%。

二氧化碳封存可分為捕獲、運輸與封存三大部分，其中的各部分中的影響因素皆將會影響封存場址的選定，本研究主要針對二氧化碳『封存』場址之初步評選，回顧國際相關文獻及指標，依據簡易多屬性評等技術分析，選擇適合的評估因子，並結合 SMART-ROC 發展系統化的評估模式，以利後續人員進行不同場址合適性之比較。

## 第二章 文獻探討與回顧

### 2.1 二氧化碳封存概念簡介

二氧化碳捕集與封存(Carbon dioxide capture and storage, 簡稱CCS), 指的是利用技術將發電廠或工業排放的二氧化碳收集並將其封存的技術, 避免二氧化碳進入大氣層造成溫室效應, 而IPCC(2005)提出三種可行的封存技術, 分別為地質封存、礦化封存、海洋封存。

#### 2.1.1 地質封存

地質封存(圖2.1)目前已應用於油氣增產技術, 其技術成熟, 且可選擇封存層標的頗多, 且封存潛能高, 封存成本最低(0.5~8美金/公噸), 是目前可行性最高的技術。

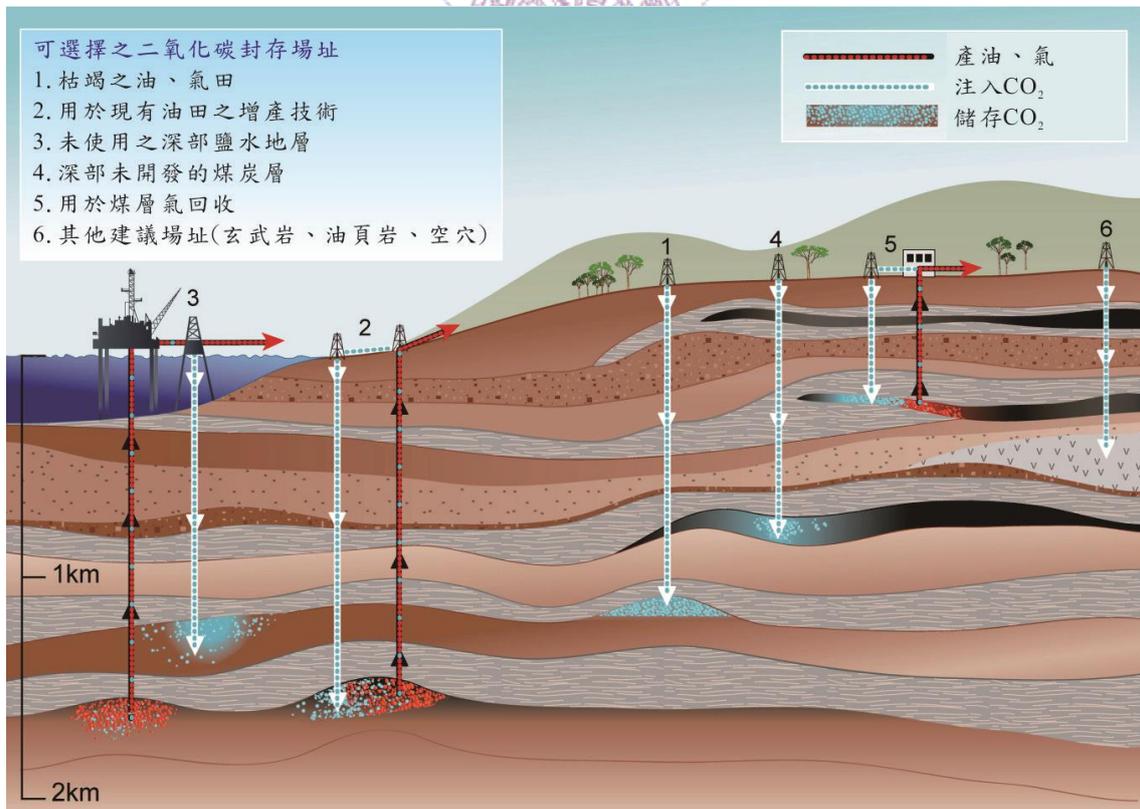


圖2.1 二氧化碳地質封存可選擇之封存場址(修改自IPCC, 2005)

地質封存之類型約可分成三大類：

1. 枯竭之油、氣田：其為具有孔隙的儲集層及緻密的蓋岩層所組成，在生產枯竭後，可以成為有效的封存環境，優點有探勘費用最少、封存場址詳細的地質條件已知、油氣存在儲集層已歷經百萬年以上，確實證實蓋層之封阻效果、更換部分現有油氣生產設備即可注入二氧化碳等。由於台灣自產天然氣不足，須仰賴進口液化天然氣，中油公司遂於1988年，利用枯竭之氣田注入購入的天然氣，一來可調節市場尖離峰之用氣量與建立安全庫存，二來可利用大量的天然氣購氣合約壓低採購價格。因此，利用地下構造封存二氧化碳的技術與監測方法在實行上並無困難，僅需調整部分設備，但該類封存機制受限於油氣田原先的儲存體積，因此初估台灣利用此封存機制之二氧化碳封存量僅28億噸(呂明達，2008)。
2. 未開發之煤層：將二氧化碳注入於含有甲烷氣之深部煤層中，取代甲烷，不僅可以封存二氧化碳，同時可由煤層中將甲烷氣產出，在725 psi壓力下，每公噸煤可儲存0.06公噸的二氧化碳。截至2005年，國際間利用此封存機制在執行的計畫有Yubari(日本)、Fenn Big Valley(加拿大)、Recopol(波蘭)、Qinshui Basin(中國)。而該類型的場址評選條件包括：煤層需具有較高的滲透性、足夠的厚度、場址無複雜的地質構造、均質性、足夠的封存深度等。
3. 地下鹽水層：較深地下水層多屬鹽水層，並不適宜人類飲用，部分用於工業降溫與地熱汲取。若具備良好蓋層及封閉構造，亦可為二氧化碳地下封存的評選目標。著名的案例為挪威的Sleipner 二氧化碳注入計畫，始於1996年且為第一個成功商轉的計畫，其將生產天然氣中所伴隨之二氧化碳注入位於海底1,020公尺深的鹽水層，以減少

碳稅的課征。台灣若利用此機制封存二氧化碳，估計桃園台地及其相鄰海域的封存量可達49億噸(楊健男，2010)；與其他封存機制相較，該類機制若封存地區擴及全台相鄰海域，則封存量相當可觀。本研究在挑選台灣二氧化碳封存場址時，亦以該類封存機制為挑選候選場址之類別。

### 2.1.2 礦化封存

該封存機制的穩定性最高，但封存成本最高(50~100美金/公噸)，屬於研發中技術，其利用金屬氧化物與二氧化碳產生化學反應，形成固態碳酸鹽及其他副產品，平均封存1公噸的二氧化碳需1.6~3.7公噸的岩石。在礦物方面，鹼金屬、鹼土金屬氧化皆適合進行碳酸礦化反應；其中鈣、鎂金屬因大量存於地殼中，最常被選擇用來封存二氧化碳之元素，故目前以含鈣及鎂之矽酸鹽類礦物為較具潛力之反應物，在台灣則可選用東部之蛇紋石 ( $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$ ) 為其反應礦物，反應式如下：



### 2.1.3 海洋封存

該封存機制將二氧化碳直接注入並溶於深層海洋中或灌注於海床上，形成二氧化碳團塊，其需將二氧化碳灌注於海洋之斜溫層以下，因斜溫層具有阻隔上下水體垂直混合之效應，可降低所封存二氧化碳透過循環、重回大氣層的速率，而且最好深度大於3000公尺、壓力達300大氣壓以上，才可確保封存之二氧化碳密度比海水高，避免浮力效應的產生。但至目前為止尚缺乏大規模二氧化碳海洋封存實例，且對

於是否會受海流影響移動及對海洋生態影響皆尚未能正確評估，故其對環境影響性、民眾接受度、法令規範、安全性、操作實務性、相關技術等皆是後續需注重的問題。該機制雖然封存潛能高、封存成本適中(5~30美金/公噸)，但環境爭議最高。

## 2.2 二氧化碳之超臨界態特性

二氧化碳有一特殊之物理特性，在 $31^{\circ}\text{C}$ 、 $1070.4\text{ PSI}$ 的溫壓條件下會形成超臨界流體，其同時具備了氣、液兩態之物質特性，一方面具備低表面張力、低黏度，以及高擴散性的氣體狀態性質，另一方面，同時又擁有高溶解力、高密度的液態特性(圖2.2)。

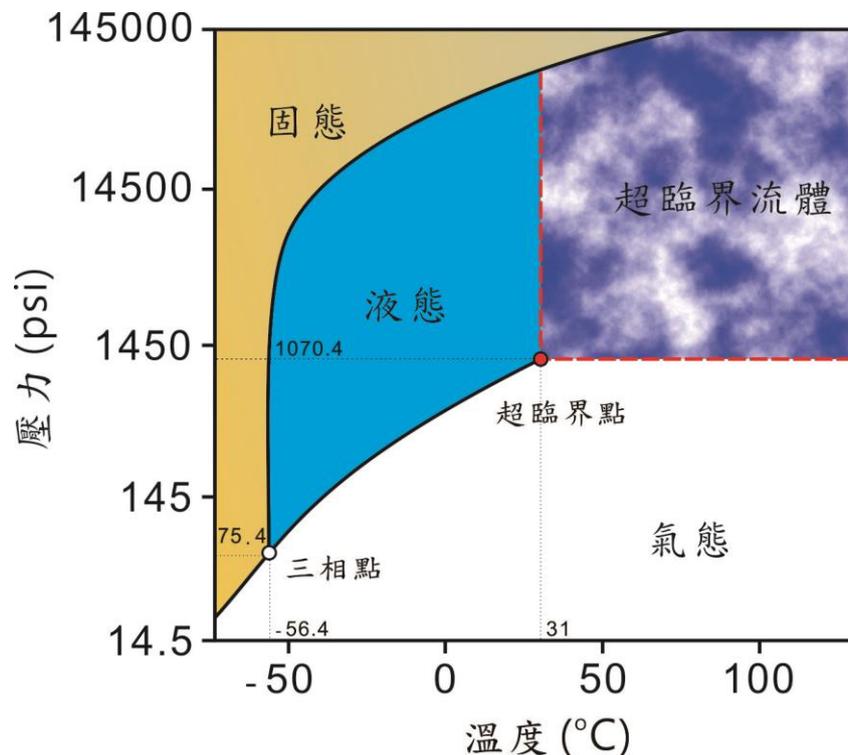


圖2.2 二氧化碳之溫度壓力相位圖

隨著灌注深度的加深，二氧化碳所承受的壓力也越趨增大，一般而言，在灌注深度達800公尺時，二氧化碳會由氣態轉成超臨界狀態，體積也會因為相態的轉換而所小，相較於地表的氣體狀態，可縮小達300多倍。在封存深度在800~1800公尺之間，其密度會急速增加，隨後趨於穩定、緩慢增加。圖2.3為台灣不同地溫梯度下，超臨界態二氧化碳密度隨深度之變化，其中藍色曲線之地溫梯度低於紅色曲線，代表相同深度下，藍色曲線之地下溫度低於紅色曲線，而二氧化碳也會因為地下溫度較低而有較高的密度。因此可知，若要提高二氧化碳的封存量，較低的地溫梯度與大於800公尺的封存深度是需要被考慮的。

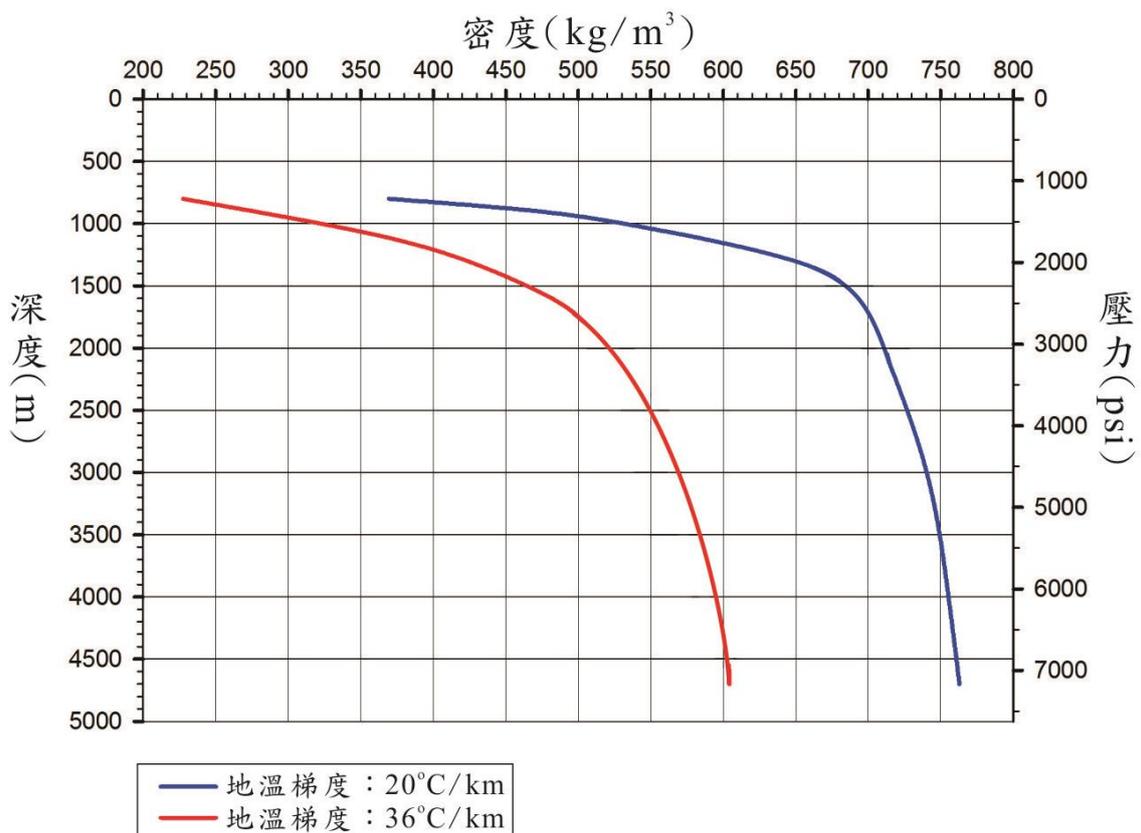


圖2.3 超臨界態二氧化碳在不同地溫梯度下之密度-壓力變化圖

## 2.3 台灣二氧化碳封存研究現況

二氧化碳捕集與封存技術(Carbon Capture and Storage)即所謂CCS技術，是指將工業與能源相關等設備所產生的二氧化碳收集起來並加以儲存，一般可儲存於地層、礦化或生物吸收再利用，以避免排放到大氣中；該技術可區分為捕集、運輸及封存等3大技術構面。IEA能源技術展望(IEA, 2010)指出，直至2050年，各減碳方案中，二氧化碳捕獲與封存(CCS)可達19%的減碳貢獻(圖2.4)，因此世界許多國家皆極力開發CCS技術，以期作為能源結構改變間的過度橋樑。

根據國際組織(CARMA)2009年的調查發現，台灣二氧化碳年排放量大於一百萬公噸的發電廠有19座，其中台中火力發電廠與雲林六輕麥寮發電廠更為世界發電廠排碳量的首位與第五位，且其利用發電量與排碳量計算出單位發電量之碳排放強度，台灣共有23個發電廠是落在高碳排放區塊(Dirty)，顯示台灣目前對於節能減碳工作的重要性與迫切性。

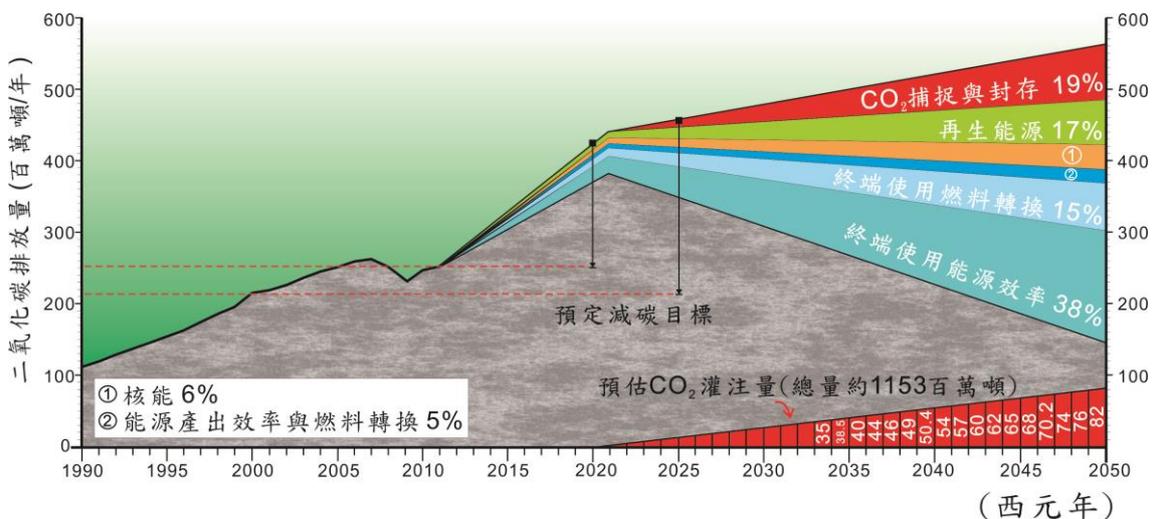


圖2.4 台灣二氧化碳排放趨勢與各減碳方案效益

ICF(2010)將二氧化碳封存區分為九個階段(圖2.5)，台灣目前的研究進度約在第二階段，著重在區域地質普查與封存潛能預估(呂明達，2008；林殿順，2010) (已有企業進行至第七階段之先導試驗)，可分為鹽水層封存與構造封存之地質調查；鹽水層封存之潛在封存地區有北部的桃竹海域沉積盆地、中部的台西盆地與西南部的雲嘉海域地層，總計有效封存量達127億噸；構造封存主要以原先生產油氣之構造為主，共計有14處，總計有效封存量約28億噸。因各階段所獲取的資料精細程度的不同，所預估出來的封存量也會不同，Bachu(2007)將其分成四種層級(圖2.6)：

- (a) 理論封存量(Theoretical Capacity)：又稱全資源量，其假設為目標地層全部的孔隙皆可以儲存二氧化碳，或是溶解二氧化碳的飽和度可達理論最大值所得到的封存量；
- (b) 有效封存量(Effective Capacity)：比理論封存量多考慮地質(最大



圖2.5 二氧化碳於鹽水層封存之發展流程(修改自ICF, 2010)

蓋岩壓力、浮力、二氧化碳移動性)及注儲技術(最大注入壓力)方面的限制後所得之封存量。在初期普查時，可將理論封存量乘以有效儲存係數，根據封存構造與機制的不同，其係數約在1~4%；

(c) 實際封存量(Practical Capacity)：比有效封存量多考慮法規、經濟等其他各種相關條件後所得之封存量，相當於石油工程的蘊藏量(Reserves)；

(d) 匹配封存量(Matched Capacity)：比實際封存量多考慮二氧化碳來源(提供的注入量)後所得之封存量，相當於石油工程的產量(Production)

因此在探討各模型間的封存量時，須加以註明所計算的階段層級與詳細的地層參數，以利各研究間之資料比對。

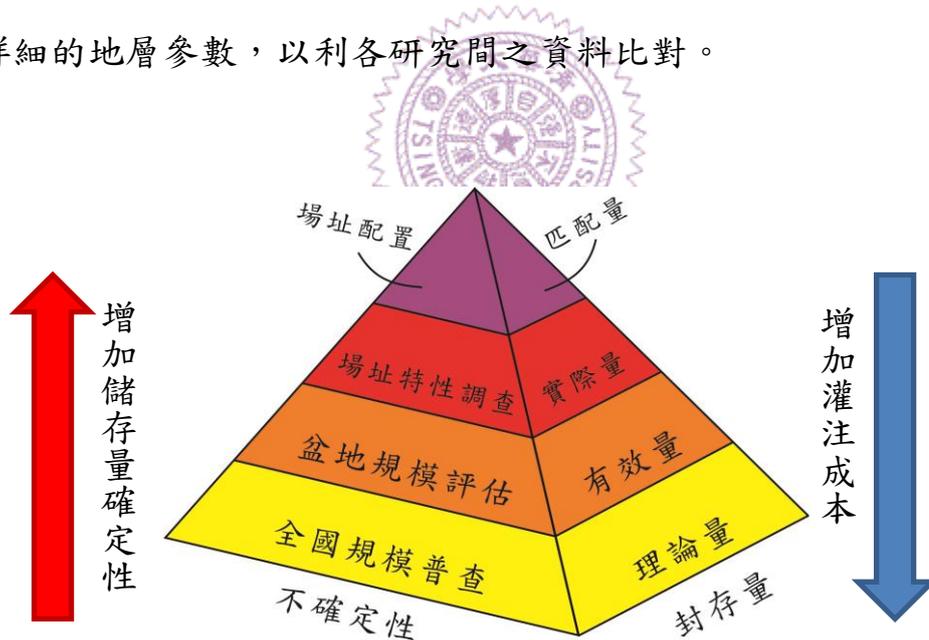


圖2.6 各階段二氧化碳封存之預估量(修改自Bachu, 2007；CO2CRC, 2008)

## 2.4 二氧化碳封存地區評選

若欲前進到ICF所規劃的第三階段，則需要從地質普查地點中評選出最適合的地區做進一步的詳細調查。雖說石油工業早有利用二氧化碳灌注將地底殘餘的油氣逼出的方式，稱EOR (Enhanced Oil Recovery)，因此有該方式的場址適性評估文獻(Rivas et al., 1994; Diaz et al., 1996; Bachu, 2003a)，但因其目的主要是增加油氣產出，並非長期的二氧化碳封存，因此無法將石油工業的適性評估方法直接套用。

二氧化碳地質封存是近幾年來受國際重視地執行項目，但僅有提出評估項目(IPCC, 2005; CO2CRC, 2008; NETL, 2010)，尚未有正式的場址評選的評分方式。CO2CRC(2008)將多位學者對於具封存潛力場址的評選方式加以整合，將繁瑣的細項整合成五大類，分別為封存量(storage capacity)、灌注潛能(injectivity potential)、場址條件(site logistics)、封存密閉性(containment)、存在天然資源(existing natural resources)，但並無詳細的權重與計分方式。

目前封存場址的評分模型僅有Bachu(2003b)，其將二氧化碳封存之沉積盆地評選項目分為15項(包含構造條件、範圍大小、儲存深度.....等)，各項項目給予3~5個分數層級，將各項項目之評估分數正規化後乘以各項權重，最後再將15項分數總加後即為該沉積盆地的評估分數(圖2.7)，分數越高者越適合後續的調查與開發，但其中各層級分數為固定且權重是人為給予，易受人為因素影響與權重給予不易。

	Criterion	Scores					Weight
		<i>j</i> =1	<i>j</i> =2	<i>j</i> =3	<i>j</i> =4	<i>j</i> =5	
<i>i</i> =1	Tectonic setting	1	3	7	15	15	0.07
<i>i</i> =2	Size	1	3	5	9		0.06
<i>i</i> =3	Depth	1	3	5			0.07
<i>i</i> =4	Geology	1	3	7			0.08
<i>i</i> =5	Hydrogeology	1	3	7			0.08
<i>i</i> =6	Geothermal	1	3	7			0.10
<i>i</i> =7	Hydrocarbon potential	1	3	7	13	21	0.06
<i>i</i> =8	Maturity	1	2	4	8	10	0.08
<i>i</i> =9	Coals and CBM	1	2	5			0.04
<i>i</i> =10	Salts	1	2	3			0.01
<i>i</i> =11	On/offshore	1	4	10			0.10
<i>i</i> =12	Climate	1	2	4	7	11	0.08
<i>i</i> =13	Accessibility	1	3	6	10		0.03
<i>i</i> =14	Infrastructure	1	3	7	10		0.05
<i>i</i> =15	CO <sub>2</sub> Sources	1	3	7	15		0.09

圖2.7 國外場址評選項目與權重分配(Bachu, 2003b)



## 第三章 研究方法與步驟

### 3.1 研究方法

本研究主要利用簡易多屬性評等技術(Simple Multiple Attribute Rating Technology, SMART)與排序次序重心權重法(rank order centroid weights, ROC),合稱SMART-ROC法,來分析台灣二氧化碳封存地區應考慮之項目,並將所挑選出來的評選項目按照重要性排列之順序,給與系統化的權重,避免人為干擾的問題產生。

#### 3.1.1 SMART-ROC

多屬性決策方法處理多屬性的評估問題時,往往會利用一些工具與方法來協助決策者達到系統化決策的目的。該方法的前提為各評估屬性間互相獨立、不相依,則每個屬性可獨自進行衡量並以簡易的加法來加總方案的總體價值。不少學者陸續建立數種簡單易用的多屬性決策分析模式,其中以 Edward(1977)所提的簡易多屬性評等技術(SMART)最被廣泛應用於多屬性的決策問題。雖然 SMART 技術簡單好用,但卻一直受到不少的質疑,因此 Edwards 及 Barron (1994)為了改良 SMART,提出一套新的給定權重的方法稱為排序次序重心權重法(ROC),利用 ROC 權重法的 SMART 稱為 SMART-ROC,改善原先 SMART 法中給定權重與標準化的步驟。其決定權重的關鍵在於權重的順序及屬性的個數,流程如下(圖 3.1):

1. 定義問題:不同的決策者以及受決策影響的對象皆會對所要考慮的問題產生影響,進而變動屬性的排列順序(順序會影響權重)。因此須先找出決策者,以考慮其所重視的問題為何。
2. 目標與層級架構:問題確定後,接著便要決定目標。Keeney(1992)



示其價值，公式如下：

$$v_{ij} = \frac{g-R_{ij}}{g-1} * 100 \quad (1 < R_{ij} < g) \dots\dots\dots(\text{公式 2})$$

其中

$v_{ij}$ ：方案(j)於屬性(i)中之標準化後價值；

$g$ ：方案總數；

$R_{ij}$ ：方案(j)於屬性(i)中的排名；

類別法中，各排序間的價值評分差距是相等的，其適用於不易量化的屬性上，但相對的，方案間的區別與鑑別力會降低。

8. 計算各方案總分：將屬性權重乘方案排名即為方案於該屬性的加權得分，總加方案之各屬性得分即為該方案之加權總價值，公式如下：

$$V_j = \sum_{i=1}^n w_i v_{ij} \dots\dots\dots(\text{公式 3})$$

其中

$V_j$ ：方案(j)之加權總價值；

9. 決定最佳方案：上述之結果為各方案主觀之加權總價值，可做為決策的參考，一般而言，總價值最高者為該決策問題的最佳解。

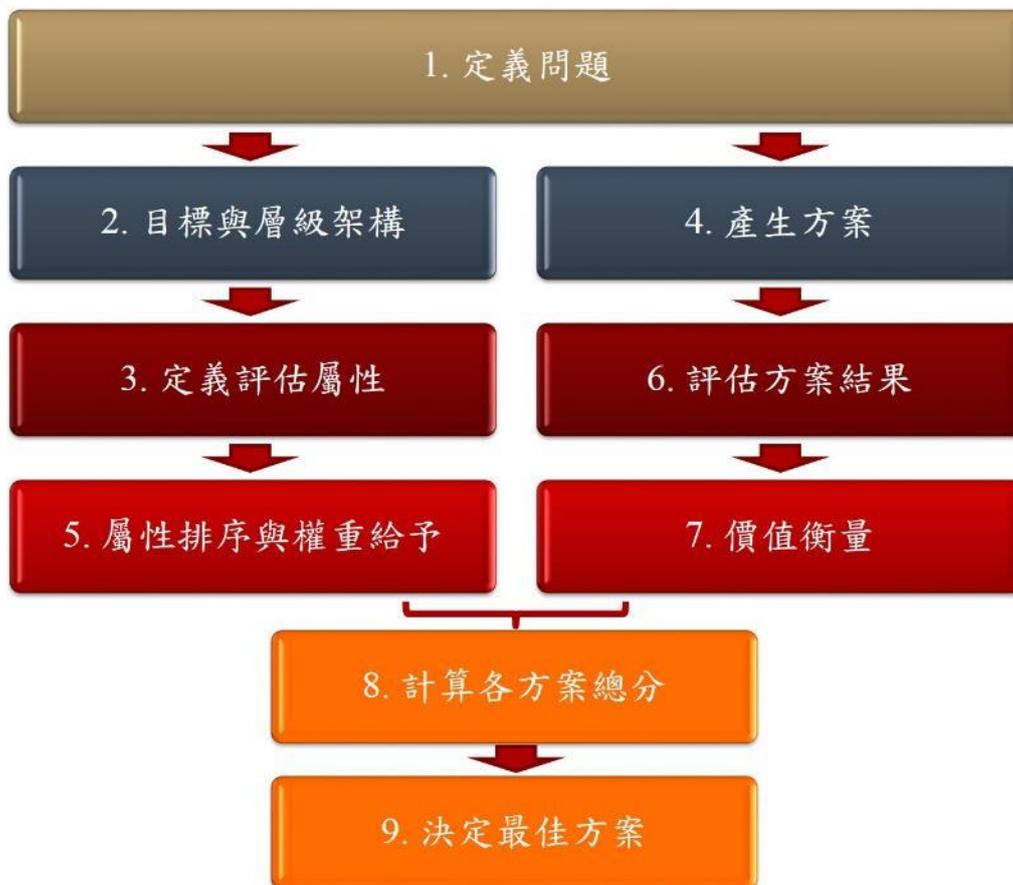


圖3.1 SMART-ROC之決策分析架構與流程

## 第四章 個案分析與探討

### 4.1 研究限制

本研究僅就二氧化碳於鹽水層封存的最適封存地區作為探討目標，其餘地質封存機制不在研究範圍內。在候選地區中，相同限制條件為均在台灣濱海地區、儲集層為中新世的砂岩，因上述地層由陸地往台灣海峽分布甚廣，故將儲存量評估區域範圍限定在25\*25公里。

與國外案例相較，台灣可供封存的地點有限，因此在評比上不採絕對分數，而是比較候選地區的相對優劣，並從中選取最優者。此方式的好處是可快速的篩選；壞處則是若往後有增加候選地區，則須重新計算，且其計算分數無法直接與國外案例做優劣比較。

### 4.2 分析流程

#### 4.2.1 定義問題

因應京都議定書規範，聯合國及相關國家須建置溫室氣體排放額度的登錄平台，包含「清潔發展機制登錄平台」(CDM, Clean Development Mechanism Registry)，以針對溫室氣體排放量進行額度管理，而未簽署京都議定書國家(包含台灣)須依照永續發展的原則下，提出國家適當減量行動(NAMAs)，期能達成2020年時，相較於一切照常(BAU/business as usual)情境下之排放量。屆時台灣的二氧化碳排放量將可能遭受國際非直接的限制規範，故應及早因應國際減量之要求。聯合國氣候變遷綱要公約(UNFCCC)之2011年第17次締約國大會(COP 17)中已將CCS(Carbon dioxide Capture & Storage)列入CDM的減量選項，唯實施CCS須有數年至十數年的先導研究，故本研究中將政



府設定為決策者，所要決策的問題為『二氧化碳封存於鹽水層之最適場址評選』，以期利用系統化分析獲得最佳的決策解，提供政府作為參考。

#### 4.2.2 目標與層級架構

本研究根據Keeney(1992)之分類，將本次研究分為策略目標、根本目標與工具目標三種層級，並建立相對應的評估指標(圖4.1)。

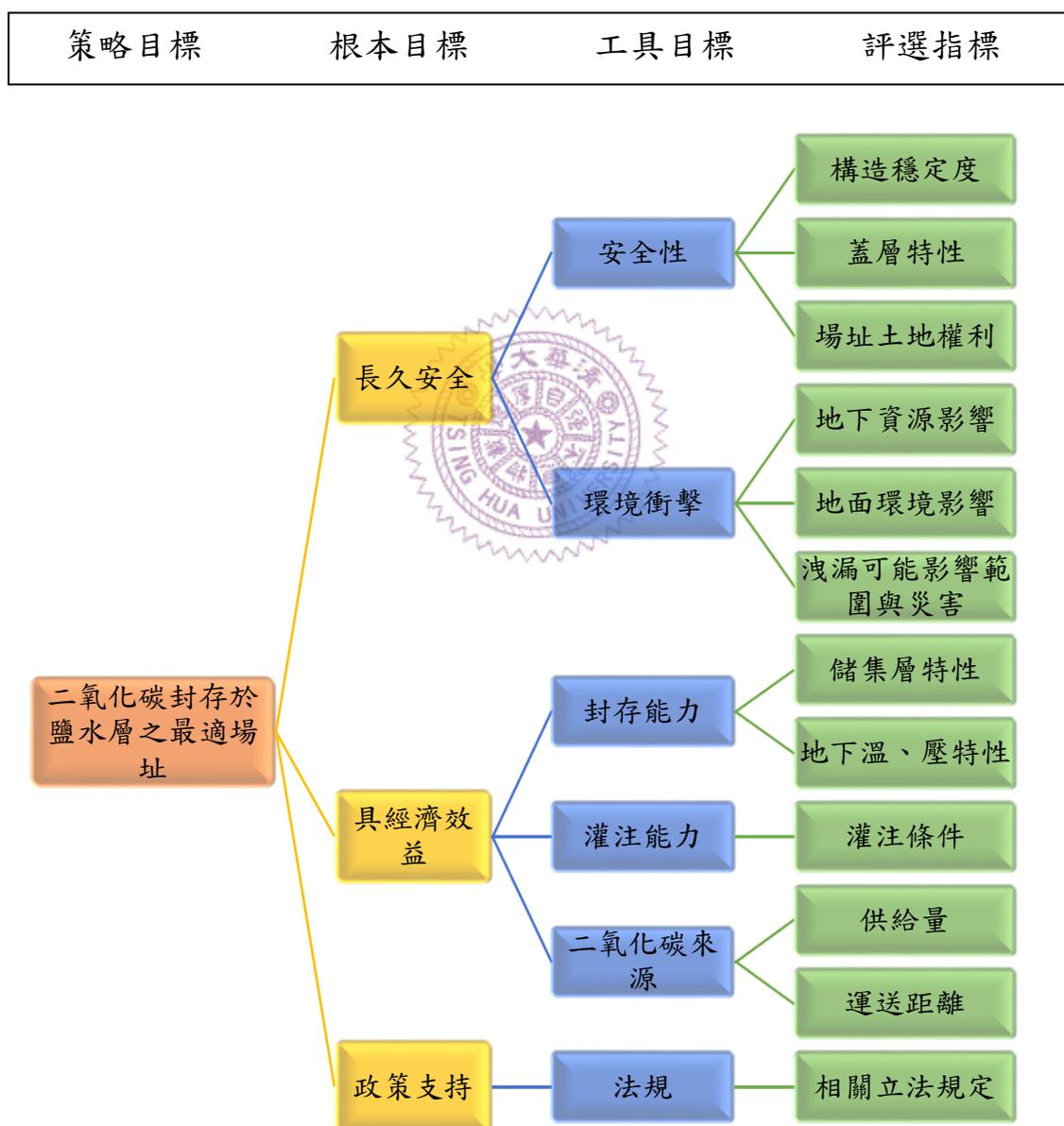


圖4.1 最適二氧化碳封存場址之目標、架構層級與評選指標

本研究採層級解構法 (top-down hierarchical decomposition of objectives)，將高層的抽象目標由上而下的解構，將其轉換成底層具體的作為。在目標解構的過程要確保高層目標可完全被子目標所代表，且子目標間均須獨立、不重複。

封存場址的選擇首重長久安全與其經濟效益，而政府若能在政策上支持，將會使相關行政流程與企業的配合度大大提升，因此上述三者為根本目標。工具目標則是達成根本目標的手段與評估方向，暨上述根本目標可向下解構為安全性、環境衝擊、封存能力、灌注能力、二氧化碳來源與法規共七項工具目標。

### 4.2.3 定義評估屬性

為了評估各方案與所定訂之工具目標的符合程度，則須建立評選指標，其須力求符合3.1.1中所述之五項原則。總計十二項評選指標之定義如表一，而選擇這些評選指標的原因如下：

構造穩定度：封存場周遭的地震或斷層活動度若高，則有可能造成封存的二氧化碳逸漏，雖然可能的逸漏點多位在台灣海峽，在環境安全上影響不大，但仍須以永續封存的角度考量；因此，場址與二氧化碳移棲路徑範圍附近的地震或斷層較少者較優。

蓋層特性：其在封存上扮演重要關鍵，封存後的二氧化碳比水輕，初期會沿著蓋層下界移棲，若其相關特性不佳則會造成逸漏；因此蓋層的完整性佳、覆蓋範圍廣、滲透率低者較優。

場址土地權力：二氧化碳封存於地底需要數十年至數百年才會趨於穩定，在此期間需要不斷監測，甚至需要應付緊急逸漏狀況，因此，最好具有永久使用該場址土地的權力，以利封存後的監測與維護。

地下資源影響：在台灣，二氧化碳封存所影響的地下資源以地下水為主，須了解是否有民眾或是單位使用在該封存深度或地層的地下水，以及其使用狀態是否會受封存二氧化碳而影響；因此，封存影響範圍內以不影響地下資源使用者較佳。

地面環境影響：目前候選場址皆在沿海地區，須考慮場址區域於現在或未來是否位在生態保護區內，以免工程施工破壞環境。

洩漏可能影響範圍與災害：評估二氧化碳在地層移棲的過程中，可能的洩漏點、洩漏量、影響範圍與可能造成的最嚴重災情；上述狀況較少者較佳。

儲集層特性：此特性會影響二氧化碳的評估封存量，若能獲得越多詳細的資料，將會提升對後續評估的精準度，其孔隙率大、厚度厚、深度淺者為佳。

地下溫、壓特性：所封存的二氧化碳為超臨界狀態，其密度易受地下溫、壓特性而劇烈改變，進而影響評估封存量；地溫增加幅度較小與封存深度較淺(壓力較小)者較優。

灌注條件：灌注速率與儲集層的滲透率與灌注壓力有關，若上述灌注條件不佳，則灌注時需耗費較多的能量，反而會增加二氧化碳的排放；因此地層滲透率高與灌注壓力小(灌注深度淺)者為佳。

供給量：若二氧化碳每日供給量小於灌注量，導致啟動灌注的次數過多也會消耗較多的能量，因此若有穩定的供應來源者較佳。

運送距離：二氧化碳單一場址的每日灌注量預估約150公噸，若運送距離太長，則槽車的二氧化碳排放量則會相對增加，能採現地捕捉後直接灌注是最好的方案。若現地的二氧化碳供應量不足，則須計算由周邊地區運送二氧化碳至封存場址的總距離。

相關立法規定：目前實施CCS的企業很少，大部分為國營或是電力生產相關企業，且CCS計畫的執行年限相當長(見圖2.5之階段7~9)，若政府或地方機關能有相關法規會獎勵措施鼓勵民間企業跟進，則在CCS供應鏈的完整性與民眾的接納度均會大大提升。

工具目標	評選指標	定義
安全性	構造穩定度	包含地震活動度、地震規模、斷層數量、斷層活動度
	蓋層特性	包含主要與次級蓋層之有無、厚度、側向連續性、滲透率
	場址土地權力	擁有永久土地使用權
環境衝擊	地下資源影響	是否影響到現有的地下資源，如地下水、甲烷水化合物等
	地面環境影響	場址在現在或未來是否位於保育區內
	洩漏可能影響範圍與災害	可能洩漏點的數量、預估洩漏量與是否會危害民眾
封存能力	儲集層特性	包含孔隙率、分布範圍、厚度
	地下溫、壓特性	預估儲集層所在深度的溫度與壓力
灌注能力	灌注條件	灌注深度、灌注壓力、灌注技術
二氧化碳來源	供給量	每日可供應二氧化碳的數量
	運送距離	非現地灌注、須利用槽車或管線運輸的距離
法規	相關立法規定	當地政府之相關法規或獎勵

表一 各評選指標之定義

#### 4.2.4 產生方案

評選場址的產生須先參考文獻、了解區域的地質特性並從決策者的角度思考，從評選範圍中挑選數個地區，並利用評估屬性加以排序。

台灣地區雖處地震密集的環太平洋地震帶(圖4.2)，地震與斷層廣佈(張徽正，1998)，但在陸域上仍有不少產氣構造，如苗栗出磺坑氣田，顯示地震與斷層的活動對於油氣的逸洩影響不大。因此二氧化碳封存地區附近的斷層經過評估後，部分斷層的存在可視為一種封存機制。在I、II、III可觀察到有明顯的地震空白帶，是因為在I區有觀音高區、II、III區有北港高區，這些地下攏起的基盤高區，其質地甚為堅硬，甚而影響台灣造山運動的分布，所以範圍內的地震活動也較少。

本研究假定決策者首重封存的經濟效益，因此根據二氧化碳排放源分布圖(圖4.3)，本研究設定四個候選二氧化碳封存地區，由北到南依序為I：桃園觀音地區，II：龍井-彰濱地區，III：雲林麥寮地區，IV：高雄地區；因二氧化碳注入深度若大於800公尺深，則地溫、地壓條件將會使其由氣態轉成超臨界態，不僅體積縮小且密度增加，更符合經濟效益，所以深度大於800公尺的砂岩層為各候選地區儲集層挑選的初始條件。

編號	地區	蓋層	儲集層	儲集層頂部深度
I	桃園觀音	錦水頁岩	桂竹林層、南莊層	1020m
II	龍井-彰濱	錦水頁岩	北寮層	2950m
III	雲林麥寮	打鹿頁岩	北寮層	1400m
IV	高雄	崎頂層	古亭坑層	1200m

表二 台灣之二氧化碳封存候選場址一覽表



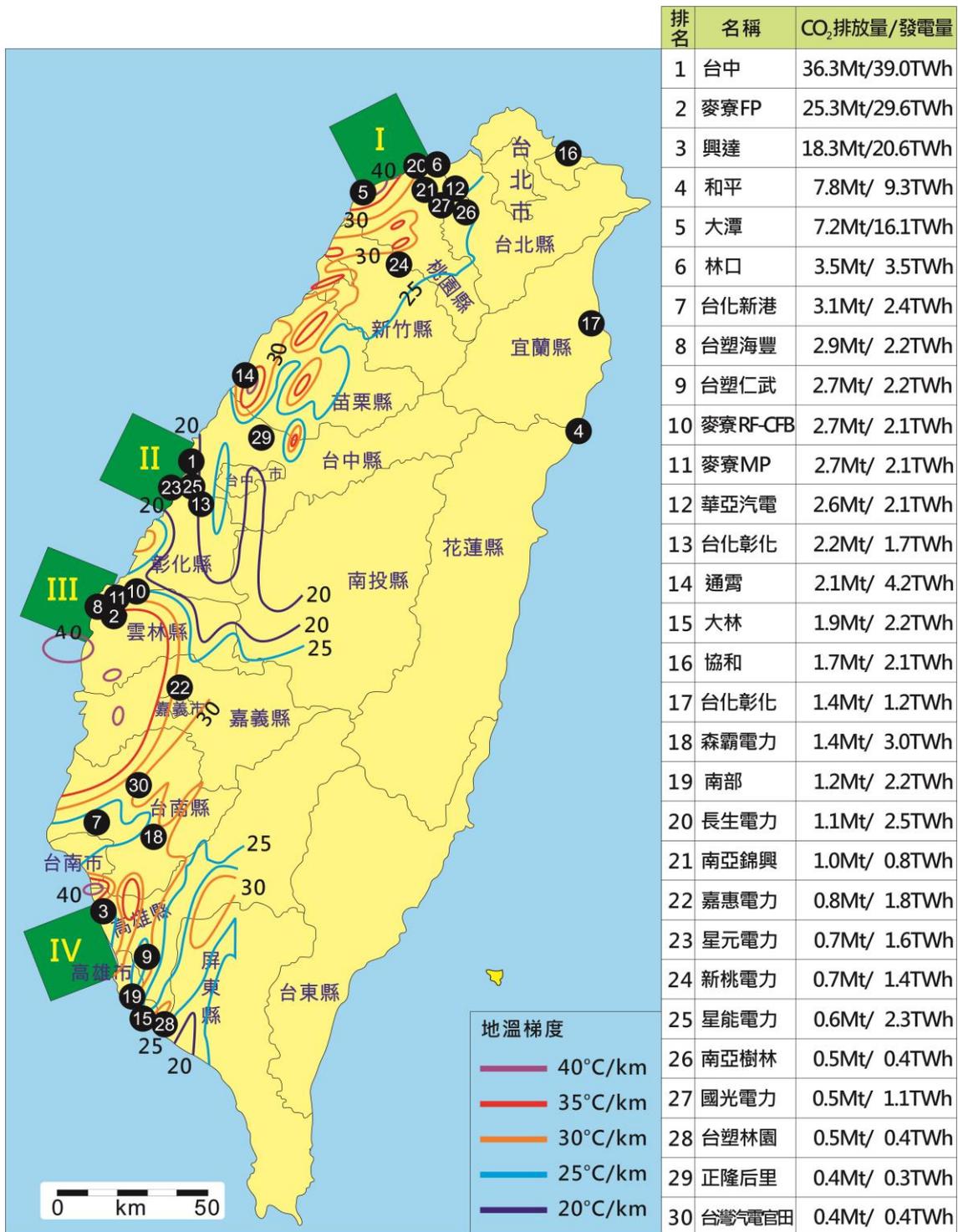


圖4.3 台灣西部地溫梯度(修改自黃立勝，1990)與二氧化碳排放源分布(資料來源：CARMA)

#### 4.2.5 屬性排序與權重給予

評選屬性的排序會依國情、決策者的不同而有所差異。本研究根據台灣現況、決策者角度與專家意見，將評選指標的排序訂定如表三。

本研究首重的工具目標為儲集層的封存能力與安全性，將相關評選指標根據排序給予權重(公式1)，如排序第一位的指標為『儲集層特性』，其權重 $=1/12*(1/1+1/2+.....+1/11+1/12)=0.1336$ ，排序2的權重 $=1/12*(1/2+.....+1/11+1/12)$ ，以此類推，而十二項權重加總之合為1。

將評選指標的權重依照排序順序表示(圖4.4)呈指數分布，最大與最小權重相差達37倍，如此確使各方案排序越先的指標可獲得較多權重，避免優秀方案在多項落後指標表現不佳時，評選分數產生大幅度變化。

將本研究與國外相關文獻之評選指標相比(表四)，可發現國外較重視二氧化碳封存後對地下資源的影響，該類(地下資源影響)權重總加達0.19，將近占了評選權重的1/5，但對於災害的事先評估較少；台灣因地狹人稠，且地質生成年代短，較無油、氣等資源產生，故著重於封存的經濟效益與安全性，這便是因為決策者所處角度不同所造成的影響。故在決定評選指標、相關排序時，須跨部會討論、整合相關意見而做決定，以免各部門間的資料在比較時造成障礙。

工具目標	評選指標	排序	權重( $w_i$ )
安全性	構造穩定度	3	0.1336
	蓋層特性	2	0.1753
	場址土地權力	11	0.0145
環境衝擊	地下資源影響	8	0.0425
	地面環境影響	9	0.0321
	洩漏可能影響範圍與災害	10	0.0229
封存能力	儲集層特性	1	0.2586
	地下溫、壓特性	7	0.0544
灌注能力	灌注條件	4	0.1058
二氧化碳 來源	供給量	5	0.0850
	運送距離	6	0.0683
法規	相關立法規定	12	0.0070
總和			1

表三 評選指標排序與相關權重一覽表

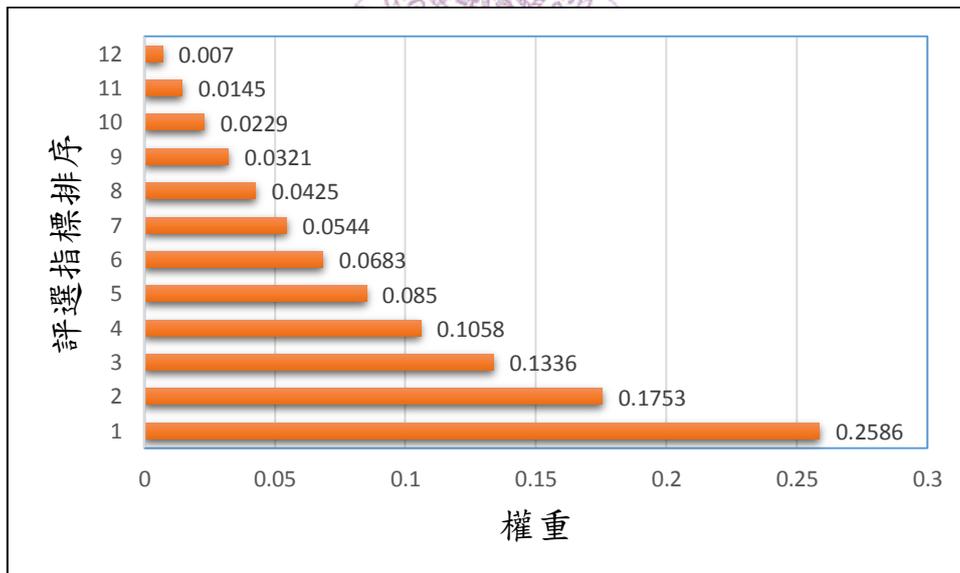


圖4.4 評選指標之權重分布圖

本研究			Bachu, 2003b		
評選指標	排序	權重( $w_i$ )	評選指標	權重	
儲集層特性	1	0.2586	Size	0.06	
蓋層特性	2	0.1753	Geology	0.08	
構造穩定度	3	0.1336	Tectonic Setting	0.07	
灌注條件	4	0.1058	Depth	0.07	0.15
			Accessibility	0.03	
			Infrastructure	0.05	
供給量	5	0.0850	CO <sub>2</sub> Source	0.09	
運送距離	6	0.0683			
地下溫、壓特性	7	0.0544	Geothermal	0.10	
地下資源影響	8	0.0425	Hydrocarbon Potential	0.06	0.19
			Coal & CBM	0.04	
			Salt	0.01	
			Maturity	0.08	
地面環境影響	9	0.0321	Hydrogeology	0.08	0.16
			Climate	0.08	
洩漏可能影響範圍與災害	10	0.0229			
場址土地權力	11	0.0145	On/Offshore	0.10	
相關立法規定	12	0.0070			

表四 本研究與國外之封存場址評選指標與權重比較

#### 4.2.6 評估方案結果

結合前人文獻、研究現況與專家建議，本研究將候選場址於各屬性中之優劣做出相對排名(表五)，最佳者以1表示，最劣者以4表示，但其中『相關立法規定』之屬性屬於需考慮但目前國內尚付之闕如，因此各候選場址之該項目皆以4表示。

相對排序的好處是可快速排序、不須精確的數值，但有些指標須設立評選臨界值(如儲集層的深度須大於800公尺)，此方面需要人工事先篩選；壞處則是無法與國外案例直接比較，且有新增之候選地區或是評選指標有新增或異動皆須重新計算。

評選指標	桃園觀音	龍井-彰濱	雲林麥寮	高雄
構造穩定度	1	3	2	4
蓋層特性	1	2	3	4
場址土地權力	1	3	2	4
地下資源影響	3	2	1	4
地面環境影響	1	4	2	3
洩漏可能影響範圍與災害	2	3	1	4
儲集層特性	1	2	3	4
地下溫、壓特性	4	1	3	2
灌注條件	1	3	2	4
供給量	3	1	2	4
運送距離	3	1	2	4
相關立法規定	4	4	4	4

表五 候選地區於各屬性中之相對排名

#### 4.2.7 價值衡量

將表五中，候選地區於各屬性中的相對排名依照公式2將其標準化(表六)，用0~100之間的價值評分表示，100表示該方案為屬性中最佳者，決策者對其評價最好；反之，0表示該方案為屬性中最差者。

評選指標	桃園觀音	龍井-彰濱	雲林麥寮	高雄
構造穩定度	67	33	100	0
蓋層特性	100	67	33	0
場址土地權力	100	33	67	0
地下資源影響	33	67	100	0
地面環境影響	100	0	67	33
洩漏可能影響範圍與災害	67	33	100	0
儲集層特性	100	67	33	0
地下溫、壓特性	0	100	33	67
灌注條件	100	33	67	0
供給量	33	100	67	0
運送距離	33	100	67	0
相關立法規定	0	0	0	0

表六 候選地區於各屬性中之標準化後價值評分

#### 4.2.8 計算各方案總分與決策

將表六中，候選地區於各屬性中之標準化後價值依照公式3，將其乘以各屬性之權重，並將候選地區之各屬性權重分數加總，即為該候選地區的加權總價值(表七)。

由表七可知，台灣二氧化碳封存地區之決策利用SMART-ROC法分析後，桃園觀音地區為本研究所建議之最佳二氧化碳封存地區，其次為龍井-彰濱地區。

評選指標	權重	桃園觀音	龍井-彰濱	雲林麥寮	高雄
構造穩定度	0.1336	9	4	13	0
蓋層特性	0.1753	18	12	6	0
場址土地權力	0.0145	1	0	1	0
地下資源影響	0.0425	1	3	4	0
地面環境影響	0.0321	3	0	2	1
洩漏可能影響範圍與災害	0.0229	2	1	2	0
儲集層特性	0.2586	26	17	9	0
地下溫、壓特性	0.0544	0	5	2	4
灌注條件	0.1058	11	4	7	0
供給量	0.0850	3	9	6	0
運送距離	0.0683	2	7	5	0
相關立法規定	0.0070	0	0	0	0
總分	1	76	62	57	5

表七 候選場址之加權總價值

## 第五章 結論與後續研究建議

### 5.1 結論

二氧化碳地質封存評估(封存量或適合場址等)常遇到不同單位所使用的評估方式不同或彼此所處在不同的評估階段，卻探討同一筆數據精確度的問題，導致外界對二氧化碳封存產生疑慮。

本研究展示國外二氧化碳封存之各階段評估精確度，並建立台灣之評估模型供各界討論，以期能統一與完善之，目前的研究結論如下：

1. 評估各替代方案時，常遇到無法系統量化或無法表達各部門著重點的不同，本研究利用 SMART-ROC 決策分析法不僅藉由架構問題的流程，可以對問題有更清楚的了解，且藉由屬性排序給予權重，可將模糊的偏好反映在其上並給予系統量化，更可讓不同的決策者了解與溝通。
2. 根據『二氧化碳封存於鹽水層之最適場址』之策略目標，本研究將其往下解析成 3 項根本目標(長久安全、具經濟效益與政策支持)，且為了方便量化評估，建立了 6 項工具目標(安全性、環境衝擊、封存能力、灌注能力、二氧化碳來源與法規)與相關 12 項評選指標；評選指標的建立已使其盡量符合完整性、可衡量性、可解構性、不重複性、最小化之原則
3. 利用類別法，本研究可快速將候選地區的排名轉化為價值評分，並透過 SMART-ROC 法給予系統化的權重，獲得最後的加權總分；決策者可參考決策總分最高者為決策最佳解。

4. 依據上述方式，本研究由四個候選封存地區中，評選出桃園觀音地區為『二氧化碳封存於鹽水層之最適地區』，若要由該地區中再挑選適合鑽井位置仍可利用此方法分析，唯評估指標會因當時策略目標的修正而須做適性分析與調整。



## 5.2 後續研究建議

在評選指標給分方面，本研究採類別法，導致其各方案排序間的價值評分差距為等距，此原因是因為多數評估指標難以量化，但在一些可量化的評選指標(如二氧化碳供給量)，可適時的利用直接給方法給予更具區別性的價值評分。

各評選指標仍未解構至最細，其中仍包含多項評選內容，如『構造穩定度』包含地震活動度、地震規模等細項；未解構的好處是可提供快速評估，且評選指標若太多會降低各指標的權重，導致評選分數有失焦之虞。若要更進一步的評選鑽探位置，則應將評選指標完全解構，研究適當的權重給予方式。

在台灣，民意的表現會直接影響到政策的實施，因此在評估後選地區時須將其考慮，但該項作業須舉辦公聽會後做問卷調查，在初步地區評選時難以實施，有待下一階段決定確切場址時納入評估。

## 參考文獻

- [1] Bachu, S., 2003a. “Sequestration of CO<sub>2</sub> in geological media in response to climate change: roadmap for site selection using the transform of the geological space into the CO<sub>2</sub>-phasespace”, *Energy Conversion and Management*, 44, 3151–3175.
- [2] Bachu, S., 2003b. “Screening and ranking of sedimentary basins for sequestration of CO<sub>2</sub> in geological media”, *Environmental Geology*, 3, 277–289.
- [3] Bachu, S., Bonijoly, D., Bradshaw, J., Burruss, R., Christensen, N. P., Holloway, S. and Mathiassen, O. M., 2007. “Estimation of CO<sub>2</sub> Storage Capacity in Geological Media - Phase II”. Available from: <http://www.cslforum.org/publications/documents/PhaseIIReportStorageCapacityMeasurementTaskForce.pdf>
- [4] Diaz, D., Bassiouni, Z., Kimbrell, W., and Wolcott, J., 1996. “Screening criteria for application of carbon dioxide miscible displacement in water flood reservoirs containing light oil”, *SPE Paper 35431, SPE/DOE Improved Oil Recovery Symposium*.
- [5] Edwards, W., 1977. “How to use multiattribute utility measurement for social decision marking” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, SMC-7, 326-340.
- [6] Edwards, W., Barron, F.H., 1994. “SMARTS and SMARTER: Improved simple methods for multiattribute utility measurement”, *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 60, 306–325.
- [7] ICF International, 2010. “Defining CCS Ready: An Approach to An International Definition”, Report prepared for The Global Carbon Capture and Storage Institute.
- [8] IPCC, 2005. *Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage*, Cambridge University Press.

- [9] CO2CRC, 2008. "Storage Capacity Estimation, Site Selection and Characterization for CO2 Storage Projects", *CO2CRC Report RPT08-1001*.
- [10] Keeney, R. L., 1992, "Value Focused Thinking: A Path to Creative Decision Making", Cambridge, MA: Harvard University Press.
- [11] Keeney, R. L., Raiffa, H., 1993, "Decisions with multiple objectives—preferences and value tradeoffs", Cambridge University Press.
- [12] Rivas, O., Embid, S., and Bolivar, F. (1994), "Ranking reservoirs for carbon dioxide flooding processes", *SPE Paper 23641, SPE Advanced Technology Series*, 2, 95-103.
- [13] NETL (U.S. Department of Energy National Energy Technology Laboratory) (2010), "Site Screening, Site Selection and Initial Characterization for Storage of CO2 in Deep Geologic Formations", *U.S. Department of Energy Report 2010*.
- [14] 呂明達、宣大衡、黃雲津、范振暉，2008。「台灣陸上二氧化碳地質封存潛能推估」，*鑛冶*，第五十二卷，第三期，154-161頁。
- [15] 林振國，2007。「二氧化碳的儲存」，*科學發展*，第413期，28~33頁。
- [16] 黃立勝，1990。「臺灣西部晚新生代沉積盆地之地下溫度及地溫梯度之研究」，*經濟部地質調查所彙刊*，第六號，117-144頁。
- [17] 劉政典、謝秉志、曾繼忠、林再興，2011。「鹽水地層二氧化碳封存量估算之研究」，*鑛冶*，第55卷，第3期，41-52頁。
- [18] 林殿順，2010。「台灣二氧化碳地質封存潛能及安全性」，*經濟前瞻雜誌*，第132卷，93-97頁。
- [19] 張徽正、林啟文、陳勉銘，盧詩丁，1998。「台灣活動斷層概論-五十萬分之一台灣活動斷層分布圖說明書」，*經濟部中央地質調查所特刊*，第十號，1-103頁。

[20]楊健男，2010。「二氧化碳地質封存潛能評估與封存場址選擇：以桃園台地為例，中央大學地球物理研究所碩士論文，84頁。

[21]CARMA：<http://carma.org/>

