

出國報告（出國類別：考察）

天然氣在儲集層與蓋層中的 擴散與分異作用之研究

服務機關：台灣中油股份有限公司探探研究所

姓名：孫智賢


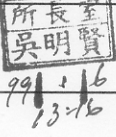
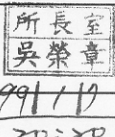
職稱：地球化學探勘師

派赴國家：德國

出國期間：98年10月25日至98年11月08日

報告日期：99年01月04日

出國報告審核表

出國報告名稱：天然氣在儲集層與蓋層中的擴散與分異作用之研究		
出國人姓名	職稱	服務單位
孫智賢	地球化學探勘師	台灣中油股份有限公司探探研究所
出國類別	<input checked="" type="checkbox"/> 考察 <input type="checkbox"/> 進修 <input type="checkbox"/> 研究 <input type="checkbox"/> 實習 <input type="checkbox"/> 其他 _____ (例如國際會議、國際比賽、業務接洽等)	
出國期間：98年 10 月 25日至 98年11月 08日		報告繳交日期：99年 01 月 04日
計畫 畫 主 辦 機 關 審 核 意 見	<input checked="" type="checkbox"/> 1.依限繳交出國報告 <input checked="" type="checkbox"/> 2.格式完整(本文必須具備「目的」、「過程」、「心得及建議事項」) <input checked="" type="checkbox"/> 3.無抄襲相關出國報告 <input checked="" type="checkbox"/> 4.內容充實完備 <input checked="" type="checkbox"/> 5.建議具參考價值 <input checked="" type="checkbox"/> 6.送本機關參考或研辦 <input type="checkbox"/> 7.送上級機關參考 <input type="checkbox"/> 8.退回補正,原因: <input type="checkbox"/> 不符原核定出國計畫 <input type="checkbox"/> 以外文撰寫或僅以所蒐集外文資料為內容 <input type="checkbox"/> 內容空洞簡略或未涵蓋規定要項 <input type="checkbox"/> 抄襲相關出國報告之全部或部分內容 <input type="checkbox"/> 電子檔案未依格式辦理 <input type="checkbox"/> 未於資訊網登錄提要資料及傳送出國報告電子檔 <input type="checkbox"/> 9.本報告除上傳至出國報告資訊網外,將採行之公開發表: <input type="checkbox"/> 辦理本機關出國報告座談會(說明會),與同仁進行知識分享。 <input type="checkbox"/> 於本機關業務會報提出報告 <input type="checkbox"/> 其他 _____ <input type="checkbox"/> 10.其他處理意見及方式:	
審 核 人	單位主管	機關首長或其授權人員
	  99/1/16 13:16	 99/1/19 20:20

說明：

- 一、各機關可依需要自行增列審核項目內容，出國報告審核完畢本表請自行保存。
- 二、審核作業應儘速完成，以不影響出國人員上傳出國報告至「政府出版資料回應網公務出國報告專區」為原則。

提要表

系統識別號：	C09803491					
計畫名稱：	經濟部98年度台德技術合作人員訓練計畫					
報告名稱：	天然氣在儲集層與蓋層中的擴散與分異作用之研究					
計畫主辦機關：	台灣中油股份有限公司					
出國人員：	姓名	服務機關	服務單位	職稱	官職等	E-MAIL 信箱
	孫智賢 台灣中油股份有限公司		探採研究所 地球化學探勘師			聯絡人155373@cpc.com.tw
前往地區：	德國					
參訪機關：	RWTH Aachen大學石油與煤地球化學研究所					
出國類別：	其他					
出國期間：	民國98年10月25日 至 民國98年11月08日					
報告日期：	民國98年12月17日					
關鍵詞：	天然氣，二氧化碳，蓋層，擴散，地質封存					
報告書頁數：	21頁					
報告內容摘要：	<p>本出國研習受經濟部「98年臺德、臺法、臺奧及臺俄技術合作人員訓練計畫」之補助，至德國研習「天然氣在儲集層與蓋層中的擴散與分異作用之研究」，為期15天，研習地點為位於德國西北部之RWTH Aachen大學的石油與煤地球化學研究所。參訪期間總共研討了氣體高壓吸附特性、開放系統熱裂分析、氣體突出、二氧化碳於地層中的擴散特性、二氧化碳地質封存之地層完整性探討等項目。前三項主要針對目前逐漸受到各國重視的煤層氣與頁岩氣等新興非傳統能源的投資與開發，對於現在正進行資源評估及研究的相關議題將有直接的幫助；後兩項以及氣體突出項目則與目前最熱門的全球環保議題”溫室氣體減量”相關，藉由本次的研習，得以了解未來在進行二氧化碳地質封存時，二氧化碳對於封存環境與儲層和蓋層可能產生的反應、潛在的洩漏方式與途徑、以及對蓋層完整性之影響與評估方式等。</p>					
電子全文檔：	C09803491_01.doc					
出國報告審核表：	C09803491_A.pdf					
限閱與否：	否					
專責人員姓名：	周芝英					
專責人員電話：	02-87258416					

摘 要

本出國研習受經濟部「98年臺德、臺法、臺奧及臺俄技術合作人員訓練計畫」之補助，至德國研習「天然氣在儲集層與蓋層中的擴散與分異作用之研究」，為期15天，研習地點為位於德國西北部之RWTH Aachen大學的石油與煤地球化學研究所。參訪期間總共研討了氣體高壓吸附特性、開放系統熱裂分析、氣體突出、二氧化碳於地層中的擴散特性、二氧化碳地質封存之地層完整性探討等項目。前三項主要針對目前逐漸受到各國重視的煤層氣與頁岩氣等新興非傳統能源的投資與開發，對於現在正進行資源評估及研究的相關議題將有直接的幫助；後兩項以及氣體突出項目則與目前最熱門的全球環保議題「溫室氣體減量」相關，藉由本次的研習，得以了解未來在進行二氧化碳地質封存時，二氧化碳對於封存環境與儲層和蓋層可能產生的反應、潛在的洩漏方式與途徑、以及對蓋層完整性之影響與評估方式等。

關鍵字：天然氣、二氧化碳、蓋層、擴散、地質封存

目 錄

壹、考察目的.....	1
貳、參訪單位與行程.....	1
一、參訪機構簡介.....	1
二、參訪行程安排.....	3
參、考察過程.....	5
一、氣體高壓吸附實驗.....	5
二、開放系統熱裂實驗.....	9
三、氣體突出實驗.....	13
四、氣體擴散實驗.....	17
五、二氧化碳地質封存之地層完整性探討.....	20
肆、研習心得與建議.....	21

圖目錄

圖 1.1 氣體高壓吸附實驗設備。.....	6
圖 1.2 氣體高壓吸附實驗的示意圖。.....	7
圖 1.3 氣體高壓吸附實驗過程所需量測的各種體積示意圖。.....	7
圖 1.4 煤樣本在乾燥與濕度平衡條件下，對甲烷的高壓吸附等溫圖。.....	8
圖 1.5 煤樣本在乾燥與濕度平衡條件下，對二氧化碳的高壓吸附等溫圖。.....	8
圖 2.1 開放系統熱裂分析儀器及分析流程。.....	10
圖 2.2 開放系統熱裂分析之分析結果、序列、氣相層析(GC-FID 圖譜)。.....	11
圖 2.3 台灣西北部碳質頁岩之開放系統熱裂分析結果。.....	12
圖 3.1 (a)進行中的氣體突出實驗;(b)實驗設備之電磁閥組與管線。.....	14
圖 3.2 以氬氣進行氣體突出實驗過程之時間 vs. 壓力、流量之變化關析圖。.....	14
圖 3.3 岩石水飽和測試之儀器設備。.....	15
圖 3.4 氣體突出實驗所使用岩心樣本。.....	15
圖 3.5 氣體突出實驗示意圖。.....	16
圖 3.6 P_1 、 P_2 、與 P_c 的含意與計算關係式。.....	16
圖 4.1 氣體擴散實驗所使用的壓力試驗儀、高壓氣體、控制電腦、與 HPLC。.....	17
圖 4.2 (a)氣體擴散實驗所使用的不銹鋼三軸室;(b)三軸室內孔，孔內凹槽為圍壓水之流通管道;(c) 包覆雙層襯套之岩心與活塞總成。.....	18
圖 4.3 氣體擴散實驗所使用的三軸室、以及壓力和流體流程圖。.....	18
圖 4.4 氣體擴散實驗流程簡圖。.....	19

表目錄

表 1.1”天然氣在儲集層與蓋層中的擴散與分異作用之研究”研習行程。.....	3
表 2.1 開放系統熱裂分析之台灣碳質頁岩生油岩評估資料。.....	12

壹、考察目的

本出國計畫主要可分為兩個主題，一是研習不同地質介質在加壓氣體通過時，對於該氣體的吸附作用，以及氣體在介質中的擴散與滲透等特性的實驗方法。吸附作用的探討，特別是對於中油公司目前進行中的煤層氣(coalbed methane)探勘研究，將有直接的助益。煤層氣的儲集層孔隙極小，主要發育為微孔隙及裂縫(或割理)，被圈閉的氣體在煤層微孔隙中，大多數在壓力作用下呈吸附狀態被保存。經由模擬實驗，將可了解煤層在不同壓力下，對於天然氣的吸附能力及脫附比率，以作為可能蘊藏量以及可開發蘊藏量評估之參考。另一個主題是藉由 CO₂ 在不同壓力之下通過岩心的模擬實驗，推測 CO₂ 在岩層中的擴散行為以及碳同位素成分的變化，作為未來進行 CO₂ 地下封存時，擴散作用在蓋層內所可能產生的微洩漏程度。擴散作用雖非主要的儲氣層洩漏途徑，但是對於蓋層封閉效率仍是重要考量因素，在節能減碳的大前提下，公共安全仍是考量的重點，本研習同時並可藉此發展利用地表 CO₂ 的碳同位素檢驗技術，作為 CO₂ 洩漏之監測。

貳、參訪單位與行程

一、參訪機構簡介

本次參訪的行程承蒙 Dr. Krooss 的大力協助，在初次以電子郵件表明參訪要求後，時人在外訪問的 Dr. Krooss 即刻與其單位主管 Prof.,Dr. Littke 聯繫並安排參訪的行程，並且與每一行程的負責人調度好時間與參訪實驗的安排，令人見識到德國人的辦事態度與效率。在聯繫後的兩天，即收到正面的答覆，使得此一參訪行程可以成行。

此次參訪單位為位於德國西北部 RWTH Aachen 大學的石油與煤地球化學研究所，該研究所專長包括岩石物理學(Petrophysics)、有機岩石學與地球化學、以及沈積盆地的數值模擬三個領域。岩石物理學探討的是沈積盆地中地層的物理和化學特

質以及流體在地層中的移棲作用，利用實驗的方法探討流體在低滲透率岩層和煤中的傳輸特性。有機岩石學是經由有機物的成熟度測量來推測沈積岩，甚至是石油和天然氣生油岩的溫度史。此外，有機物類型的辨別亦有助於沈積相和古環境的研究。該研究所的有機地球化學除了與能源有關的石油和煤的有機化學外，環境地球化學則是另一個重點，從有機物的化學特徵來判斷其事件、分佈、轉化、分解，進而推測其於沈積史、沈積環境、以及污染物最後的命運。沈積盆地的數值模擬除了對於石油及天然氣系統的探討之外，並可協助盆地的熱歷史與油氣形成時機等判斷，目前該所擁有 1D、2D、和 3D 等 PetroMod 軟體，並與許多石油探勘與開發公司有密切的合作關係。

二、參訪行程安排

表 1.1 ”天然氣在儲集層與蓋層中的擴散與分異作用之研究”研習行程

訓練進修日期及時間 (Visiting Time)	訓練進修地點 (Location)	訪談機構及訪談對象 (Institutions & Persons visited)	訓練進修目的及討論主題 (Topics for discussion)
10/25, 2009	台北-法蘭克福-科隆-亞琛 (Taipei-Frankfurt-Cologne-Aachen)	往程	
10/26-11/05, 2009	亞琛(Aachen)	Institute of Geology and Geochemistry of Petroleum and Coal, RWTH Aachen University RWTH Aachen 大學石油與煤地球化學研究所 1. Dr. B.M. Krooss Mr. P. Weniger 2. Dr. S. Heim Mr. R. Fink 3. Dr. B.M. Krooss Dr. A. Amann Ms.F. Han 4. Mr. G. Matush 5. Miss. D. Joyce	1.High-pressure sorption experiments for methane and CO ₂ and their application to CBM study 甲烷與二氧化碳之高壓吸附實驗及其在煤層氣研究上之應用 2.Pyrolysis experiment of carbonaceous rocks, gas generation curves and kinetics of hydrocarbon and non-hydrocarbon gases 碳質頁岩熱裂實驗、油氣與非碳氫化合物氣體生成曲線與動力學 3.Gas breakthrough and fluid transport experiments in coals and shales 煤層與頁岩之天然氣突出與流體傳輸實驗概述 4.Introduction to CO ₂ diffusion experiments 蓋層二氧化碳擴散實驗概論 5.Introduction to experiments and concepts for tight gas studies 緻密地層天然氣實驗與概念
11/06, 2009	亞琛-科隆 (Aachen-Cologne)	Institute of Geology and Geochemistry of Petroleum and Coal, RWTH Aachen University RWTH Aachen 大學石油與煤地球化學研究所	Discussion of sealing integrity with the “CO ₂ SEALS” team. 參與 CO ₂ SEALS 研究團隊之二氧化碳地質封存之地層完整性探討

		所 Dr. M. Waschbuesch Dr. A. Amann Dr. D. Prinz Dr. B. Andreas (Shell International Exploration and Production B.V.)	
11/07-11/08, 2009	科隆-法蘭克福-台北 (Cologne-Frankfurt - Taipei)		

參、考察過程

一、氣體高壓吸附實驗 (High-pressure sorption experiments)

受到非傳統天然氣探勘與二氧化碳地質封存的受到重視，天然氣與二氧化碳等氣體在煤與頁岩中的物理吸附過程逐漸引起人們的興趣，RWTH Aachen 大學石油與煤地球化學研究所最近幾年也投入甲烷與二氧化碳在各種形態與煤階的煤，以及不同成分頁岩中的吸附熱力學、動力學、以及分異過程的實驗研究。

煤的高壓吸附實驗是在不同的壓力下進行，利用體積法由壓力與體積之間的關係來量測，最高實驗壓力可達 25MPa。一般而言，煤對於二氧化碳的吸附與脫附能力比對於甲烷更為快速，但是在低壓的條件下，有些煤對於甲烷的吸附能力則優於二氧化碳，這種選擇性的吸附率差異突顯出此一實驗對於非傳統天然氣探勘的重要性。

a. 實驗設備配置

圖 1.1 為石油與煤地球化學研究所之高壓吸附實驗設備，圖 1.2 為其分析示意圖，整個實驗裝置包括一不銹鋼高壓釜、一組電磁閥、以及一精密壓力計。將經粉碎後的煤樣本(<0.2mm)置於樣本室(sample cell)中，樣本室之前再以一 2 μ m 線上過濾器阻隔粉塵進入管線中。樣本室放置於氣相層析儀中保持於穩定設定的溫度下，壓力計與電磁閥組則另外放置於一經調節溫度(45 $^{\circ}$ C)的小隔間內，兩者之間的溫度差亦納入測量的考量之內；受測氣體則是在 45 $^{\circ}$ C 下，以超臨界狀態儲存於 150ml 的壓力容器。實驗以 V2-V3 管線體積與此段管線至壓力計之間的死點體積(dead volume)為參考體積，此一體積可由注入氦氣後之校正過程所測得。

b. 高壓吸附實驗方法

吸附作用是將被吸附氣體分子自氣相移出，Gibbs 法大概是用以量化氣體吸附作用最基本的方式，總吸附氣體量(n_{adsorbed})代表的是系統中總氣體量(n_{total})與充填於空隙之間的氣體量(V_{void})。本計算方式假設氣體的濃度均勻的，公式中 c_{gas} 為氣體在特定溫度與壓力下的分子濃度。

$$\begin{aligned}
 n_{\text{sorbed}} &= n_{\text{total}} - c_{\text{gas}} V_{\text{void}} \\
 &= n_{\text{total}} - c_{\text{gas}} (V_{\text{sample cell}} - V_{\text{sample}}).
 \end{aligned}$$

實驗過程所需量測的各種體積與彼此之間的關係示於圖 1.3，導入系統的氣體總量是經由計算流經參考體積 V_{ref} 進入樣本室的氣體而來。

n_{sorbed} 的值有賴於 V_{sample} 的精密估計，其估計方式是在吸附實驗前，利用氮氣的膨脹測量(expansion measurements)而得。以 Gibbs 法計算吸附氣體的方法的先決假設為除了實驗氣體之外，其餘的固態相與空隙之間的比例在實驗的進行過程中需為常數不可有任何的變化或耗損。吸附作用會導致於固體表面附近與被吸附相非均勻的濃度分佈，在低壓下氣體相會有比被吸附相更低的比重，因此被吸附相的體積與樣本室中的空隙體積相較之下，可被忽略不計。而在高壓吸附實驗下，當被吸附相的量增加時，游離氣體與被吸附氣體之間的密度差則隨之減少。為了正確的估計出物質的絕對吸附能力，實驗時被吸附相的體積必須非常的明確，因此樣本室(sample cell)的體積又被進一步劃分為固體(吸附物)體積、吸附相體積、與空隙體積：

$$V_{\text{sample cell}} = V_{\text{sample}} + V_{\text{sorbed phase}} + V_{\text{void}}$$

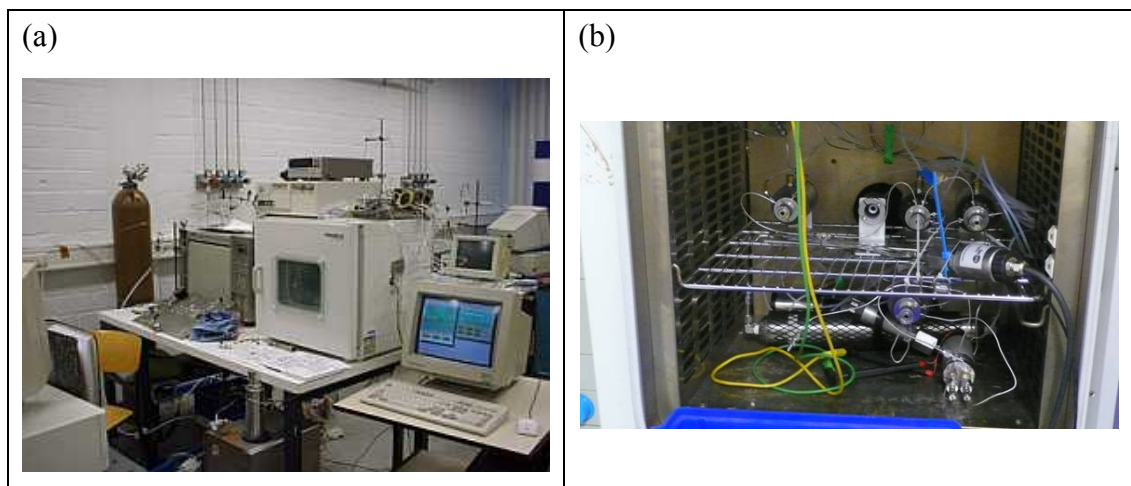


圖 1.1 (a) RWTH Aachen大學石油與煤地球化學研究所氣體高壓吸附實驗設備；(b)高溫爐內之閥件配置。

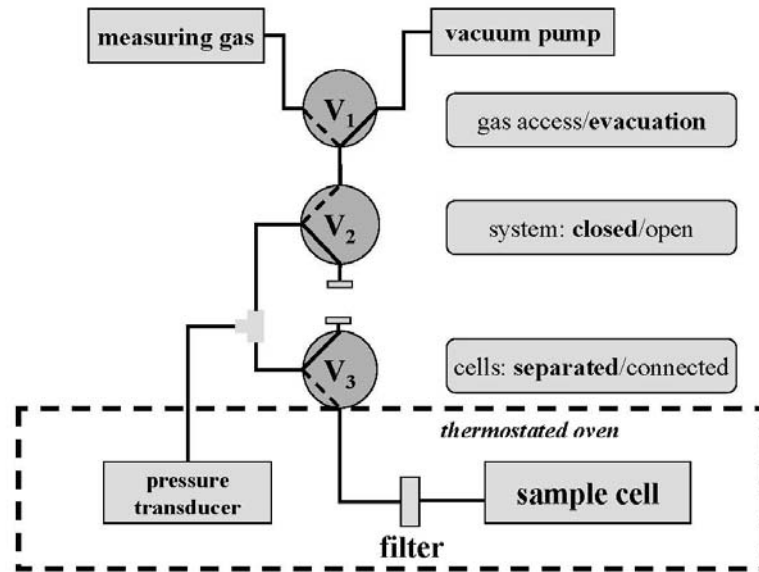


圖 1.2 氣體高壓吸附實驗的示意圖。

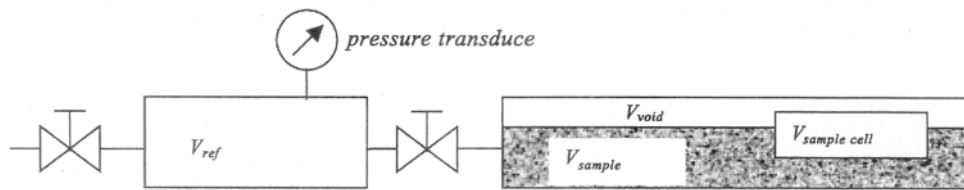


圖 1.3 氣體高壓吸附實驗過程所需量測的各種體積示意圖。

圖 1.4 為在乾燥與濕度平衡條件下，同一煤樣本在對甲烷的高壓吸附等溫圖 (isotherms)，同一條件共以三種不同溫度模擬，由類似的實驗可以用以推測在不同深度、溫度、以及含水分的條件下，煤層可能吸附的甲烷量；輔以煤層厚度和分佈範圍後，即可用以推測可能煤層氣蘊藏量。類似的實驗亦可應用於推測煤層對於二氧化碳的吸附等溫圖 1.5，在煤層氣的增產或以煤層為二氧化碳地質封存目標層的研究上極為有用。

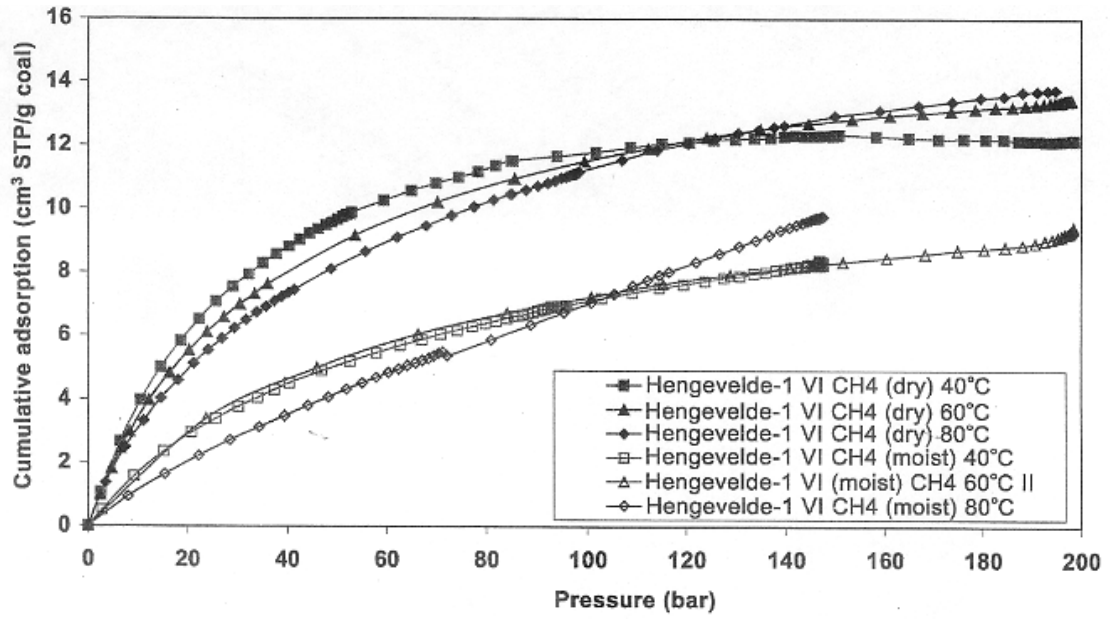


圖 1.4 煤樣本在乾燥與濕度平衡條件下，對甲烷的高壓吸附等溫圖(isotherms)。

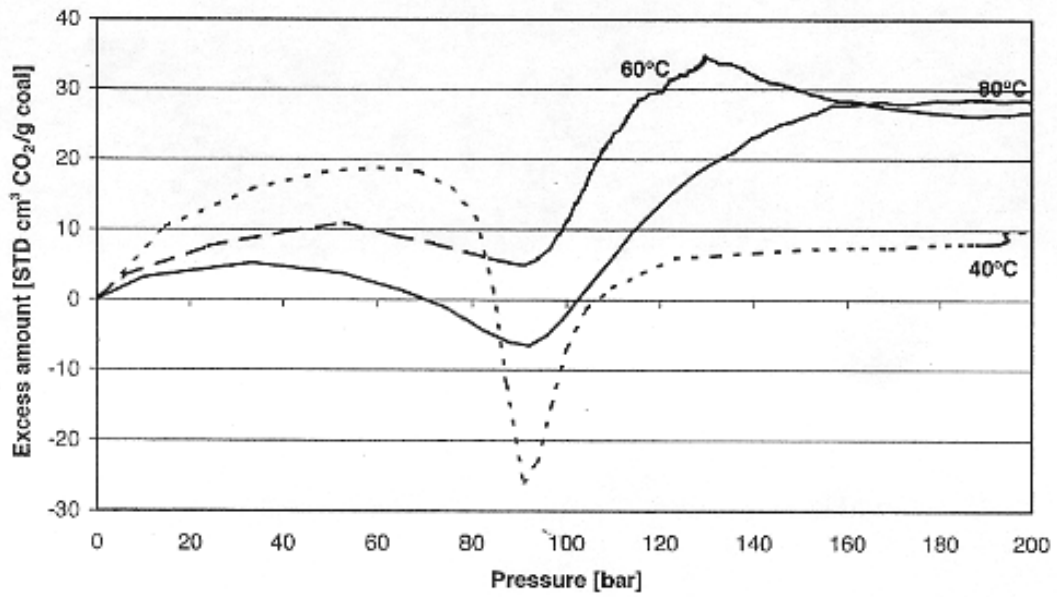


圖 1.5 煤樣本在乾燥與濕度平衡條件下，對二氧化碳的高壓吸附等溫圖(isotherms)。

二、開放系統熱裂實驗 (Open-system Pyrolysis)

此行除了參訪以外，爲了進一步了解其先進的分析技術，也以攜帶來的一個碳質頁岩進行了開放系統的熱裂分析，期望藉此技術提供額外的油氣生成資訊，以了解碳質頁岩對於台灣地區的油氣生成的角色與貢獻。

a. 原理

開放系統熱裂分析的分析原理是將適量的樣本盛於船型石英坩堝中，再經由氧化鋁質支架置入特別設計的高溫爐中(圖 2.1)，在未加圍壓但以氮氣吹拂的條件下，以每分鐘 0.5°C 的升溫速率逐漸將樣本自室溫加熱至 1200°C，在升溫過程中，樣本所含有機物發生裂解並產生各種氣體，再以管線及電動閥門每隔 300 秒的時間，持續將產生氣體導入串聯的氣相層析儀，分析其生成氣體中的氮氣、甲烷、與一氧化碳濃度，以求得樣本生成氣體的特徵。

由於熱裂分析結果將用於不同生油岩所產生氣體的指紋對比應用，所以分析前後都地需進行仔細的儀器與背景校正，此校正包括 20 samples，每一個 sample 有 10 個循環(cycles)，在每一個循環之前，還包括一個 5 分鐘的分析前校正，旨在測定實驗腔是否有氣密不佳導致空氣中的氧及氮氣滲漏進來；正式升溫前則另需進行一個預校正(pre-calibration)，包括 6 個 samples，每一個 sample 有 5 個循環(cycles) (圖 2.2)，其氮氣、甲烷、與一氧化碳的平均值則當作正式分析的背景值。正式分析的流程則包括 50 個 samples，每一個 sample 有 10 個循環。

該實驗室的開放系統熱裂分析由 Dr. B.M. Krooss 與 Dr. S. Heim 管理，在氮氣生成及來源研究領域上享有盛名。過量的氮氣在台灣的天然氣中雖不常見，但是在某些地區卻因其不具經濟價值，而成爲天然氣開發的障礙。因此，了解其來源特性(有機 vs.無機)以及其與盆地之沈積特性，對於天然氣的探勘具有很重要的意義。

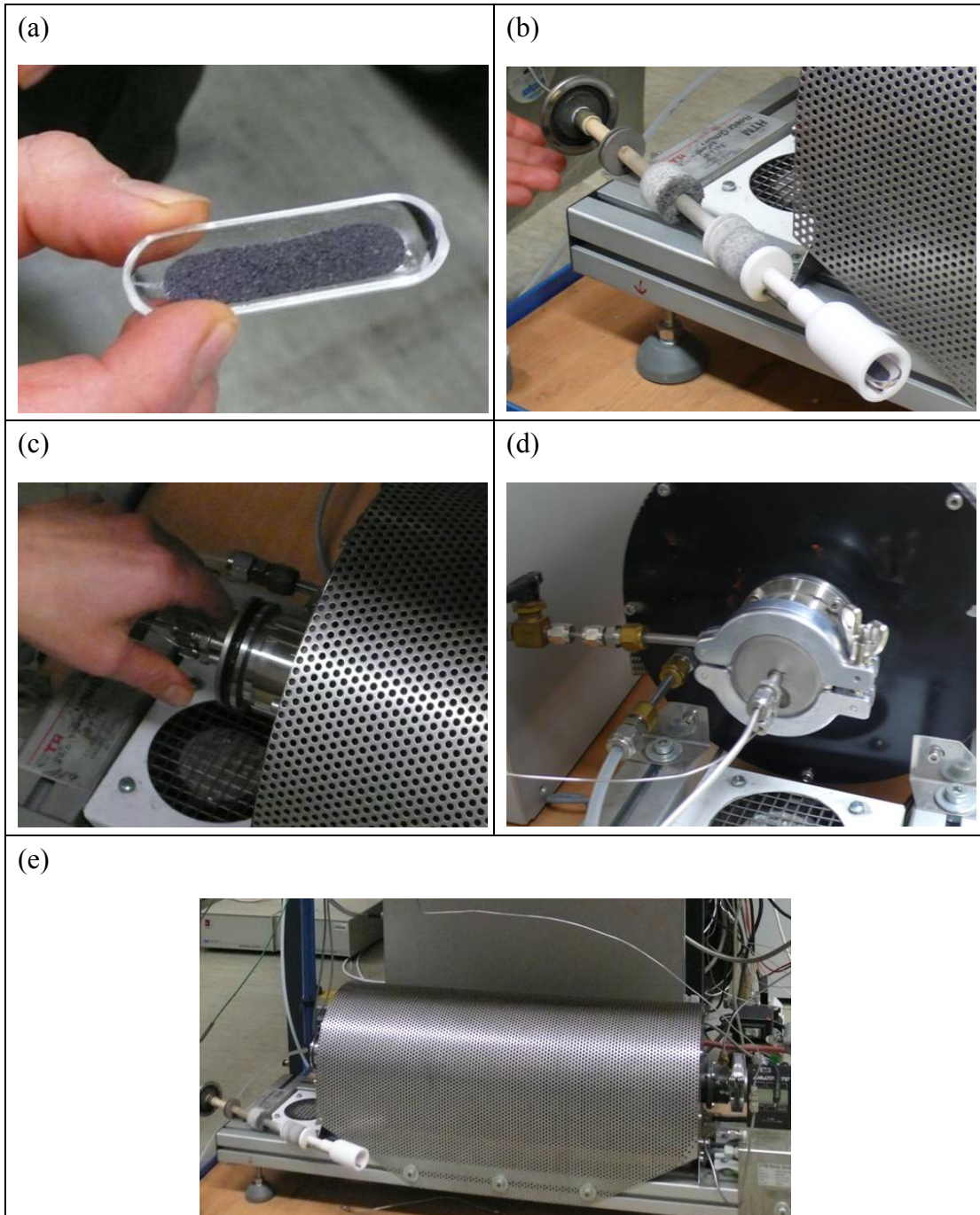


圖 2.1 開放系統熱裂分析儀器及分析流程。(a)樣本盛於船型石英坩堝；(b) 氧化鋁質支架與樣本位置；(c)樣本置入端閉鎖；(d) 樣本置入端側視；(e)高溫反應爐全貌。

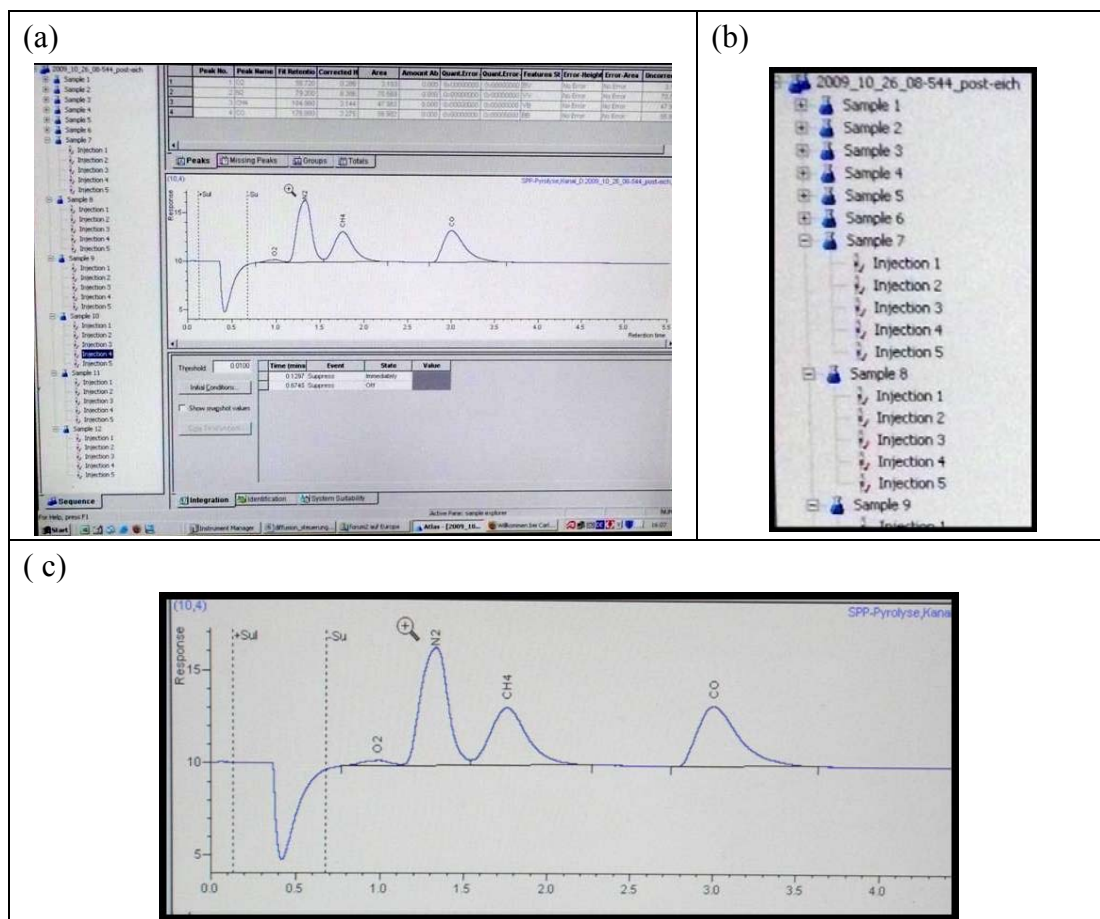


圖 2.2 開放系統熱裂分析之(a)分析結果；(b)分析序列；(c)分析之氣相層析(GC-FID)圖譜。

b. 台灣西北部碳質頁岩分析結果

為探索開放系統熱裂分析對於台灣油氣生成可能提供的訊息，此次參訪亦進行了一個碳質頁岩的測試分析，其生油岩評估資料如表 2.1。由分析結果(圖 2.3)得知，甲烷在約 250°C 起逐漸產生，在 478°C 度時達到最大生成量；一氧化碳的生成時機與甲烷近似，其生成量隨著溫度的增加一路攀升，1171°C 以後才逐漸下降；氮氣的生成時間稍晚，約在 600°C 之後，並在 720°C 時達到最高產生率。由表 2.1 與圖 2.3 之對照發現，甲烷的最大生成溫度與生油岩評估中的 Tmax 有 47°C 的差異。探討其原因後推測，S2 代表的是總生成碳氫化合物，其中包括甲烷、乙烷以及其他重成分，在 Tmax 時，總碳氫化合物之生成量達到最高，隨後某些成分的生成量開始減少，但是甲烷的生成階段則可以延長到更高溫。這也是為何在過成熟的生油岩層中，只看到

甲烷而很少看到乙烷以上的成分的原因。

表 2.1 開放系統熱裂分析之台灣碳質頁岩生油岩評估資料。

Sample ID	TOC %	S1 mgHC/gRock	S2 mgHC/gRock	Tmax °C	%Ro	HI mgHC/gTOC
911222	8.73	0.79	0.93	431	0.48	240

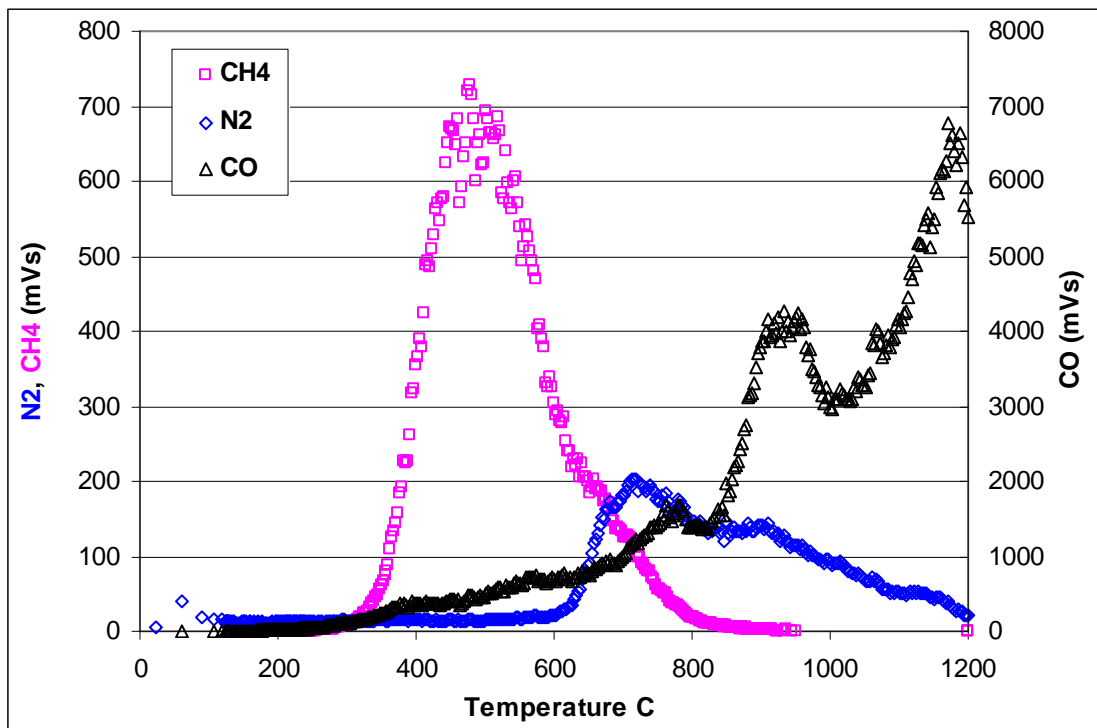


圖 2.3 台灣西北部碳質頁岩之開放系統熱裂分析結果。

c. 開放系統熱裂分析技術之展望

開放系統的熱裂分析可以提供有機物在不同階段熱成熟過程中，特定氣體的生成時機與生成量的變化，用以協助探討天然氣組成中過量或特定組成氣體的生油源岩特徵，其最終目的則是達到天然氣-生油岩的對比工作。在目前以化學指紋”chemical fingerprint”為對比技術的前提下，GC-FID 分析資料的指紋特性仍嫌薄弱，若能串聯同位素比值質譜儀(Isotope Ratio Mass Spectrometer, IRMS) 進行線上(on-line)同位素

量測，將能進一步探討如：氮同位素的演化與富氮天然氣氮來源的對比關係、各階段甲烷碳同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 值的演化及範圍、”累計”(cumulative)或”瞬時”(instantaneous)模式天然氣成礦模式、結果是否可與金管熱裂實驗的結果對比？生成甲烷的碳同素演化是否有轉折等問題。

此一技術另一可進步空間為加熱階段與有機成熟度的對比關係，由於該熱裂實驗為一持續升溫過程，反應的碳質頁岩樣本無法在過程取出，以進行鏡煤素反射率的測量，因此無法以各階段熱裂溫度下生成氣體的組成特性，來與真實天然氣樣本組成進行對比或推測其來源成熟度。

三、氣體突出實驗(Gas breakthrough)

油氣在岩層的移棲或自蓋層中流失的主要機制是以 Darcy flow 的型態流經基質孔隙或破裂網絡，當兩種或以上不相容的流體同時存在於一多孔隙岩石中時，將因毛細效應而產生兩相或多相的流體流動。流體的傳輸因此受到流體表面張力、固體相對於接觸流體的濕度、以及孔隙系統的結構所控制。氣體突出實驗的目的即在於了解蓋層岩石在氣體壓力下的封閉性與氣體通量(圖 3.1)，對於油氣的儲集與二氧化碳的地質封存效率極為重要。

RWTH Aachen 大學石油與煤地球化學研究所的氣體突出實驗是施以受試岩石樣本一高氣體壓力梯度(亦即超過其預測氣體突出的壓力)，並藉由壓力變化來量測氣體通量(圖 3.2)。實驗的受試系統(包括岩樣)的起始狀態必須是完全水飽和，因此所有的系統必須經過單相流通測試，在經過一段時間的流通測試後，方能假設所有的連通孔隙系統已達到水飽和。圖 3.3 為岩石樣本在進行水飽和的測試，圓柱狀岩石緊密包覆於一橡皮套中，下方通以 1bar 的水壓，外部施以 1.5bar 的圍壓(水壓)，以迫使水通過岩石樣本的孔隙系統。

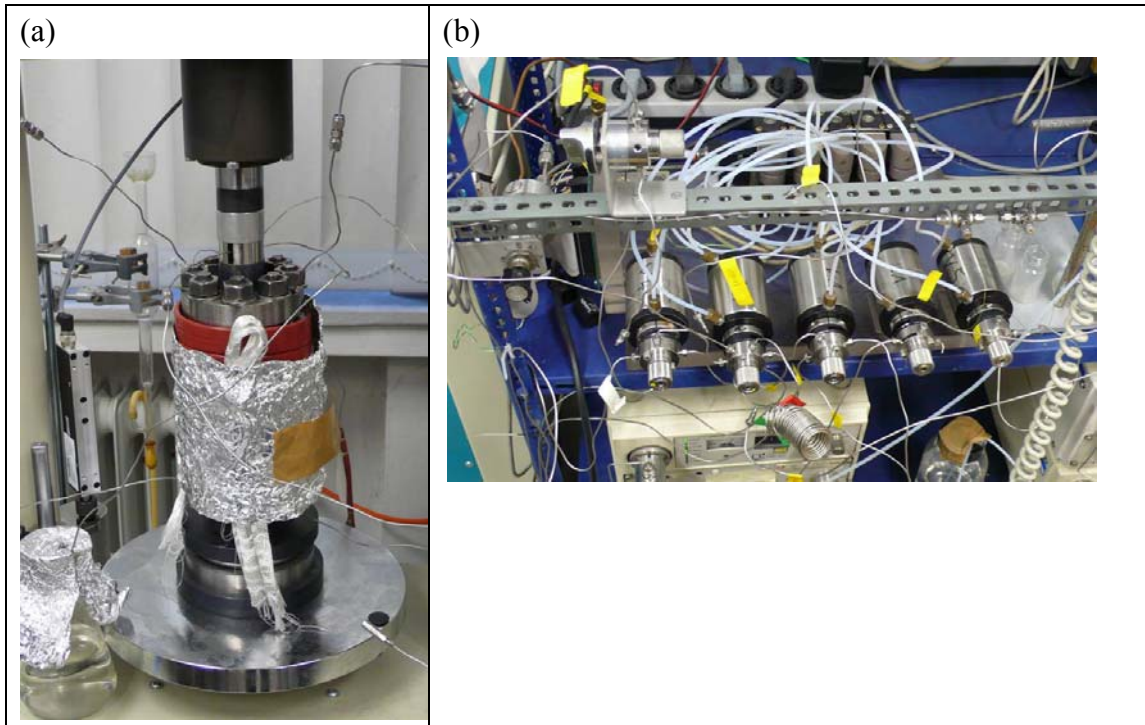


圖 3.1 (a) 進行中的氣體突出實驗；(b)實驗設備之電磁閥組與管線。

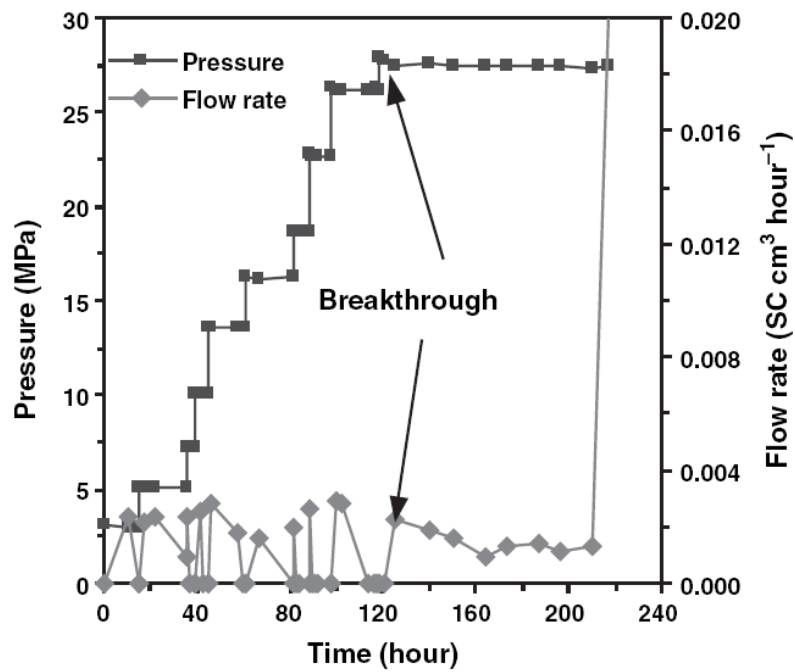


圖 3.2 以氮氣進行氣體突出實驗過程之時間 vs. 壓力、流量之變化關析圖 (Li, et al., 2005)。



圖3.3 岩石水飽和測試之儀器設備。



圖3.4 氣體突出實驗所使用岩心樣本，自左至右孔隙率漸增。

典型的氣體突出實驗中(圖 3.5)，下游氣室的壓力(P_2)在一段延遲時間後，將會增加並且趨近於上游氣室的壓力(P_1)，但是兩氣室之間並不會達成完全的壓力平衡，並存在一殘餘壓力差 P_c ，所得此一殘餘壓力差即為此一受測樣本的特徵參數。 P_1 、 P_2 、與 P_c 之間的關係可以如圖 3.6 中的 Washburn equation 來表示：

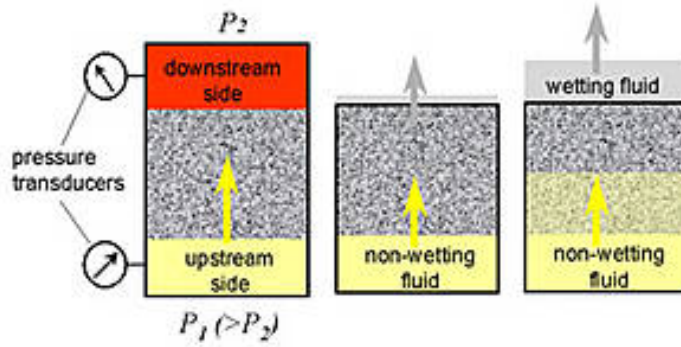
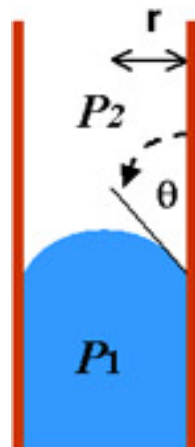


圖3.5 氣體突出實驗示意圖。黃色為氣體，灰色為水(鹽水)，當實驗開始進行後，氣體逐漸取代孔隙中的水，並將水從另一方驅趕出來。



Washburn equation:

$$p_c = P_1 - P_2 = -\frac{2\gamma \cdot \cos \theta}{r}$$

gas migration as a function of

- capillary pressure (p_c)
- interfacial tension (γ)
- wetting angle (θ)
- pore radius (r)

圖3.6 P_1 、 P_2 、與 P_c 的含意與計算關係式。

當將受測岩石的氣體突出實驗結果引伸為封閉的品質時，有效滲透率 k_{eff} 則成為其指標。岩石的有效滲透率會隨著所施加氣體壓力的改變與氣相飽和度而改變，其計算可以 Darcy's law 求得：

$$k_{eff} = -\frac{V_2 \cdot \eta \cdot 2\Delta x}{A(P_2^2 - P_1^2)} \frac{dP_2}{dt}$$

四、氣體擴散實驗 (CO₂ diffusion experiments)

擴散實驗是在設定的壓力梯度下，應用化學潛能梯度通過水飽和的樣本，以求得有效擴散係數以及岩層中擴散氣體的濃度。二氧化碳的擴散實驗使用一壓力試驗儀(圖 4.1)及圍壓與軸向壓力可達 50 MPa 的三軸室(圖 4.2a)，三軸室最高操作溫度可達 350 °C，試驗圓柱狀岩心直徑為 28.5mm，長度視擴散實驗的時間需求而定，可介於 5 至 20mm 之間。

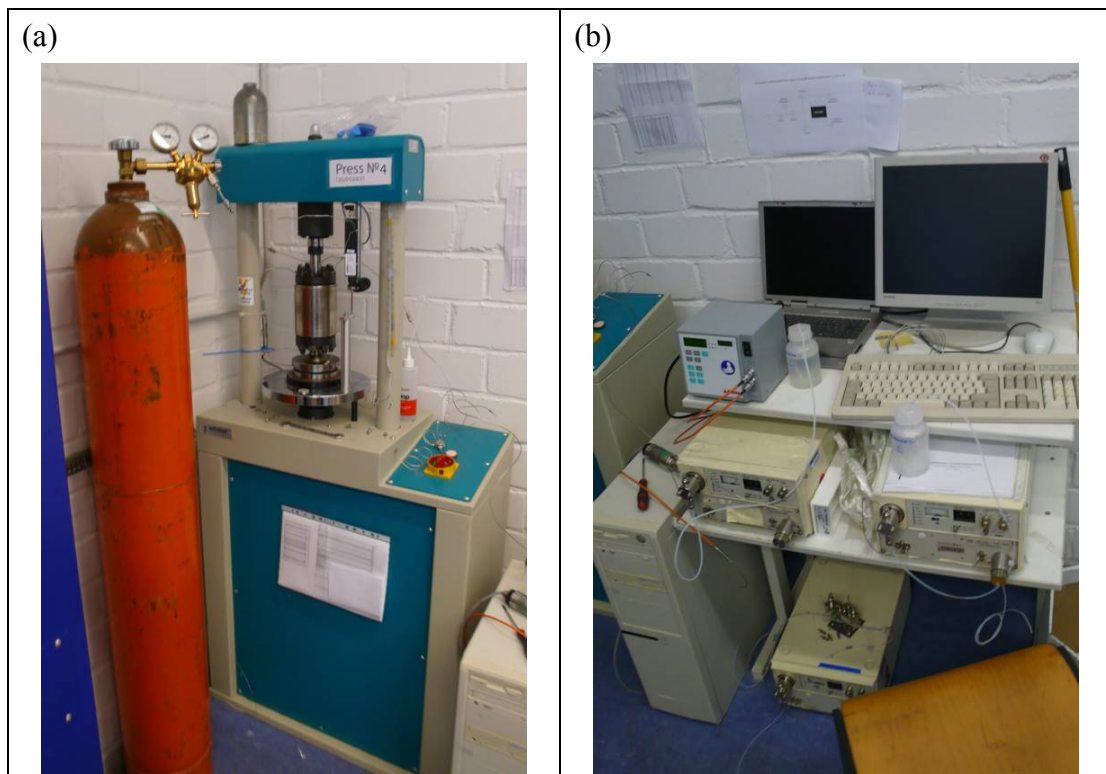


圖4.1 (a) 氣體擴散實驗所使用的壓力試驗儀與高壓氣體；(b)控制電腦與HPLC。

試驗岩心兩端各放置一個圓形多孔不銹鋼片，之後在兩端裝上活塞，活塞上的鑽孔允許流體的引入與釋放。為了確保加壓流體可以流穿岩心，而不至於經由岩心與三軸室孔壁間的縫隙流失，岩心與活塞組合外圍另包覆內層為鉛箔、外層為薄銅管的雙層襯套(圖 4.2c)。

擴散實驗進行前，樣本先於一側以 HPLC 施以 8 MPa 的水壓，令其水飽和。之後，在另一端測量其流量，以計算其滲透係數。擴散實驗開始時，先將兩端加水壓至預定壓力，在三軸室下方通以二氧化碳，以排開岩心孔隙的水，流程見圖 4.3。

將擴散後的氣體蒐集並去除水份後，以分子篩吸附當中的二氧化碳，最後再以熱脫附($\approx 300^{\circ}\text{C}$)的方式釋出吸附的二氧化碳，並以 GC-TCD 進行定量分析(圖 4.4)。擴散實驗是一種非穩定態的測量分析，氣體的擴散式突出在實驗過程受到監測和計算，以求得有效的擴散係數。

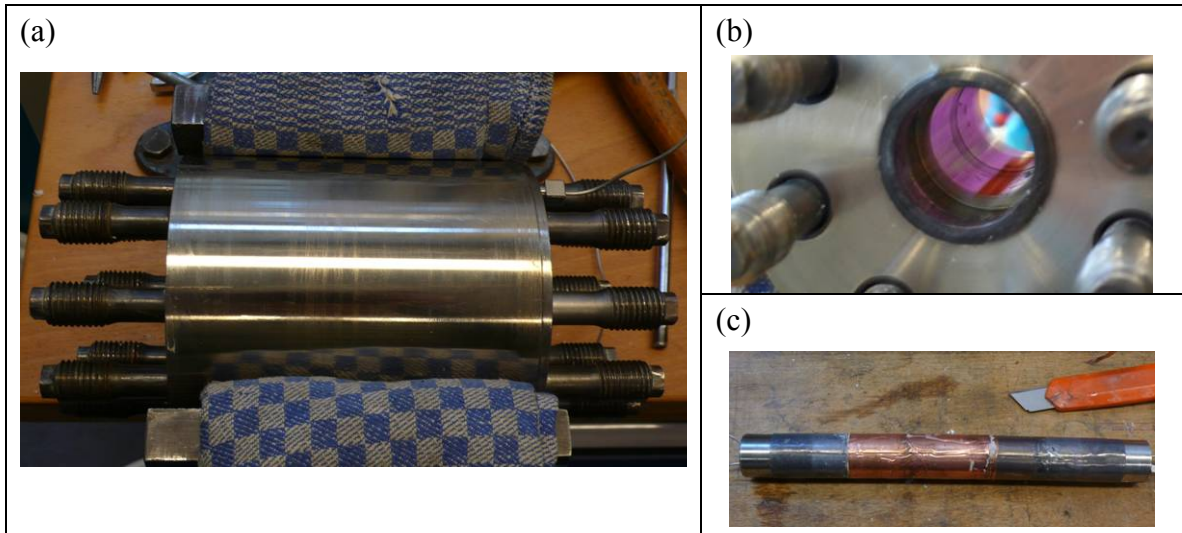


圖4.2 (a)氣體擴散實驗所使用的不銹鋼三軸室；(b)三軸室內孔，孔內凹槽為圍壓水之流通管道；(c) 包覆雙層襯套之岩心與活塞總成。

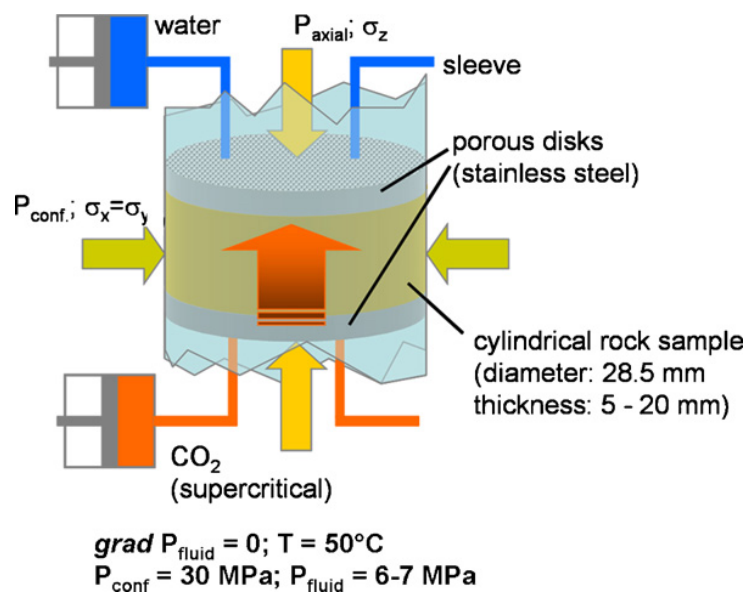


圖4.3 氣體擴散實驗所使用的三軸室、以及壓力和流體流程圖。

Experimental set-up for gas diffusion measurements on water-saturated sedimentary rocks

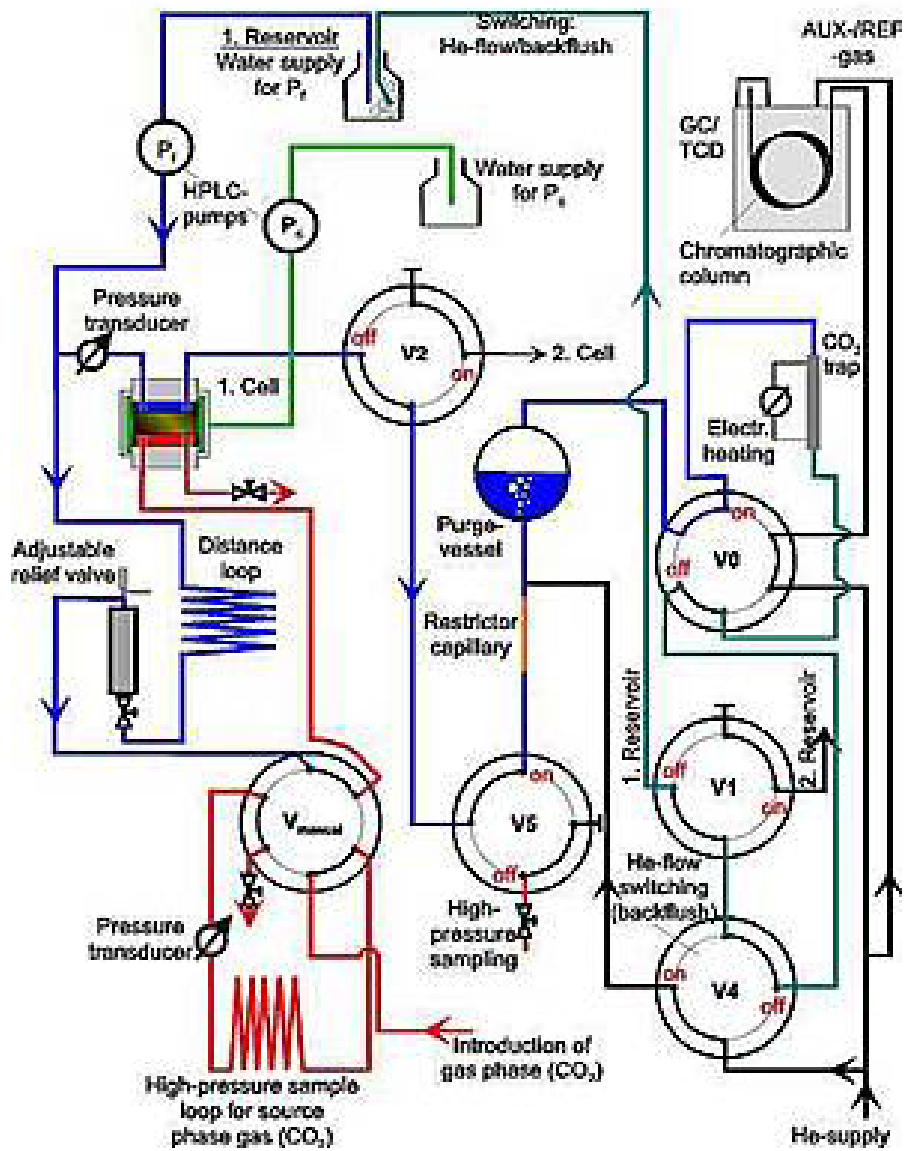


圖4.4 氣體擴散實驗流程簡圖。

五、二氧化碳地質封存之地層完整性探討

二氧化碳被認為是主要導致地球暖化的溫室氣體之一，除了環境本身的自然排放之外，破壞平衡的原兇即是人類，特別是化石燃料大量使用所產生的超量二氧化碳，已超出大自然自身碳循環的負載。因此，減少大氣中二氧化碳的濃度以避免暖化造成環境的衝突，成為世界各國政府的當務之急。

二氧化碳減量的途徑有二：一為節能；另一為固碳。固碳即是將大氣中的二氧化碳捕捉並封存起來，其方式包括：礦化、深海封存、以及地質封存。其中，將二氧化碳注入不具生產價值的油氣田或者是深層地下水層的地質封存方式，被認為是最有效的固碳方式。但二氧化碳地質封存所涵蓋的技術層面甚廣且複雜，除需具備一般油氣儲藏的地質條件外，更需顧及對於環境的衝擊以及生命安全的威脅。

RWTH Aachen大學的石油與煤地球化學研究所目前進行中的CO₂Seals計畫，為德國GEOTECHNOLOGIES R&D Program和Shell International Exploration and Production共同資助的計畫，主要針對泥質蓋岩在二氧化碳地質封存環境的封閉效率，特別是注入的二氧化碳與岩層之間的反應對於岩石物理與地質力學(geomechanical) 特性的影響，目的在於探討與建立二氧化碳地質封存場址的選定與長期的安全評估標準。研究方法則是藉由實驗、觀察二氧化碳、或二氧化碳飽和鹽水與蓋層岩石接觸後所發生的基本物理和化學過程對於蓋層特性的變化，最後輔以電腦數值模擬，放大尺度到儲氣層規模，以推測在真實環境下的封閉效率。該計畫目前正針對以下問題，以深入了解二氧化碳於地層中的行為：

- 二氧化碳(氣態或溶解於鹽水中)在蓋層中最大移棲距離為何？
- 蓋層可以留置多少二氧化碳？該留置之機制為何？
- 二氧化碳或二氧化碳飽和鹽水如何影響不同岩性的滲透率？
- 在蓋層的破裂帶與斷層帶會有什麼反應或過程發生？
- 二氧化碳或二氧化碳飽和鹽水是否會影響岩石的穩定性或剪力等力學特性？

肆、研習心得與建議

1. 嚴謹與務實的態度：德國人行事向以嚴謹與務實著名，實驗室器材水電設施的使用，皆需要工程部門的許可方得以操作，即使是一滲透試驗的漏水測試，亦不馬虎。由觀察其進行中的測試，3 組壓克力加壓設施已連續進行實驗達數星期，周遭皆無任何滲水痕跡可見，因此實驗可以順利持續的進行，可見堅持是有代價的。在以實驗為主體的研究中，確實需要在環境與儀器狀態良好確定之後，實驗資料方有討論的價值。
2. 基礎研究的重視：本次研習的項目皆是非常耗時的實驗，流體在地質材料中的移動時間以萬年為單位，在實驗室的模擬下，仍需要極長的時間，交談中得知當中一研究生在二年研究期間，只完成 2 個樣本的模擬實驗。然而如果沒有這樣的堅持，就不會有氣體在介質中的滲透率、擴散速率、突破壓力等資料的存在，也無從預測流體在地層中的移棲行爲。
3. 參訪期間曾數次參與該所與其他合作單位（例如：殼牌(Shell)石油荷蘭分公司、德國聯邦地質與自然資源研究所)的技術討論會並進行技術交流，獲得目前二氧化碳地質封存實務的最新進展與參考資訊，受益良多。德國教育普及且科技發達，但由討論中得知，即使在周全的考量下所進行的先導試驗，仍有不少民眾對其安全性存疑，顯示仍有很大的改善空間。國內在此一方面的研究才剛起步，值得向其學習經驗。