

經濟部暨所屬機關因公出國人員報告書
(出國類別：其他(開會))

第九屆 CO2GeoNet 二氧化碳地質封存
論壇
出國人員報告書

服務機關：台灣中油股份有限公司

姓名職稱：黃乙倫 研究員

派赴國家：義大利

出國期間：103年5月18日至5月28日

報告日期：103年8月11日

摘要

有鑑於國內油氣資源日漸耗竭，以及溫室氣體減量趨勢，本公司自 2002 年起即開始關注二氧化碳地質封存與注氣增產技術，並積極從事相關研究工作，歷經十餘年的努力，已初步建立執行二氧化碳地質封存所需各項關鍵技術，包括封存潛能評估、場址篩選評估、地質模型建立、監測技術、注氣流程規劃、注儲模擬及二氧化碳移棲路徑模擬等。除自行研究外，亦與國內學術與研究單位共組聯盟，執行各項合作研究，並藉由參與國際組織(如美國 Gulf Coast Carbon Center)，共同研討並分享研究成果，以精進技術層級。然而，目前大多數的合作都集中在國內或美洲地區，對於鹽水層封存技術領先且已有許多大規模示範場址的歐洲地區，反而較少著墨。藉由本次奉派出國參與「CO2GeoNet 二氧化碳地質封存論壇」，有機會與歐洲地區二氧化碳地質封存領域之專家學者交流，藉此瞭解其技術發展現況與未來展望，並針對發展過程中所遭遇的各項問題與技術瓶頸(如增進封存效益與提升民眾接受度等)進行研討，以尋求可能的解決之道。此外，亦積極爭取合作機會或技術引進，以加速國內二氧化碳地質封存技術之發展。

目次

摘要	1
目次	2
壹、 目的	3
貳、 過程	3
參、 心得及建議	34

壹、目的

本次奉派出國參與歐洲二氧化碳地質封存研究領域之重要年度盛會「CO2GeoNet 二氧化碳地質封存論壇」，期望透過此次機會與此領域之頂尖學者與研究人員面對面交流，研討二氧化碳地質封存技術研究發展現況與技術應用成果，以對此技術之研發方向與應用情形有更深入的了解與認識。此外，希望藉由參加此論壇之機會，蒐集資料快速累積經驗與技術，並積極爭取未來可能的合作機會或技術引進，以應用於本公司後續相關研究中，進而加速國內二氧化碳地質封存技術之發展。。

貳、過程

本次出國為期 11 天，詳細出國行程如下表一所示，主要行程為參與第九屆 CO2GeoNet 二氧化碳地質封存論壇，會議為期三天(5/20-5/22)，內容涵蓋 CO2GeoNet 成員研究成果發表與二氧化碳地質封存未來發展方向與策略研討。

表一、出國行程

日期	地點	工作內容
103.05.18-19	台灣-杜拜-威尼斯	啟程
103.05.20-22	威尼斯	參加第九屆 CO ₂ GeoNet 二氧化碳地質封存論壇
103.05.23-26	威尼斯	私人行程
103.05.27-28	威尼斯-杜拜-台灣	返程

一、CO2GeoNet簡介

CO2GeoNet 係一個致力於處理二氧化碳地質封存相關議題之歐洲科學權威機構，在歐盟第六框架計畫(the European Commission's 6th Framework Programme)的資助下，成立的目的是在於整合所屬成員之技術資源與研究成果，以安全與有效地執行二氧化碳地質封存，進而減緩氣候變遷與海洋酸化。目前計有來自 16 個歐洲國家之 24 個機構成員，主要為各國地質調查局、研究機構與大學等，如圖一所示，包括 British Geological Survey(BGS)、Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe(BGR)、Bureau de Recherches Geologiques et Minieres (BRGM)、Geological Survey of Denmark and Greenland (GEUS)、Heriot-Watt University (HWU)、Energies Nouvelles (IFPEN)、Department of Earth Science and Engineering, Imperial College London(IMPERIAL)、Norwegian Institute for Water Research(NIVA)、National Institute of Oceanography and Experimental Geophysics(OGS)、International Research Institute of Stavanger(IRIS)、SINTEF Petroleum Research(SPR)、Netherlands Organisation for Applied Scientific Research(TNO)、Universita di Roma “La Sapienza” (UniRoma1) 等。此外，為提升一般社會大眾對於二氧化碳地質封存之認識，該組織亦於 2008 年出版了” What does CO₂ geological storage really mean” 手冊(圖二)，內容除了以簡單明瞭的文字說明碳捕獲與封存技術之目的與運作情形外，並針對最常被提及的 6 大疑問，提供了具體的答覆，包括：

- (一) 二氧化碳可以封存於哪裡？可以封存多少？(Where and how much CO₂ can we store underground?)
- (二) 如何運輸與擠注大量二氧化碳(How can we transport and inject large quantities of CO₂)
- (三) 二氧化碳一旦存入於封存層後會發生什麼事？(What happens to the CO₂ once in the storage reservoir?)
- (四) 二氧化碳會自封存層洩漏嗎？如果真的發生了，會造成什麼後果(Could CO₂ leak from the reservoir and if so, what might be the

consequences ?)

(五) 如何在地底與地表監測封存場址 ? (How can we monitor the storage site at depth and at the surface ?)

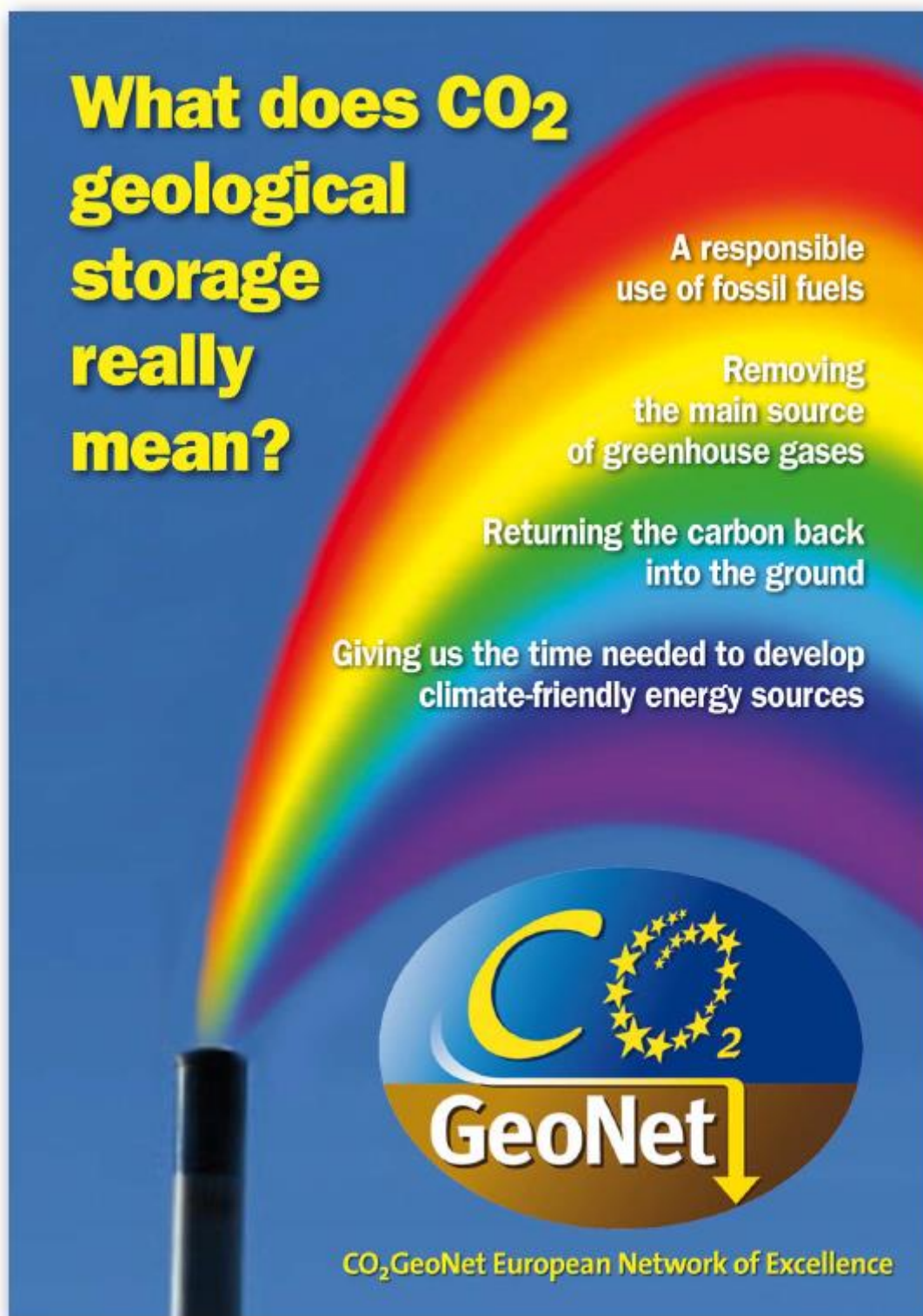
(六) 需要實施與重視那些安全標準 ? (What safety criteria need to be imposed and respected ?)

此手冊最初僅發行了英文版，然而，因其內容簡單明確，十分有利於各國政府或研究單位向一般民眾介紹與推廣二氧化碳地質封存技術，故受到極佳的迴響，迄今已出版了 27 種語言之譯本，該組織並將所有版本均上載至網站中 (<http://www.co2geonet.com/NewsData.aspx?IdNews=44&ViewType=Old&IdType=18>)，提供社會大眾免費下載與瀏覽。



圖一、CO2GeoNet 主要成員

資料來源：CO2GeoNet 網站



圖二、” What does CO₂ geological storage really mean” 手冊
資料來源：CO₂GeoNet 網站

二、 第九屆CO2GeoNet二氧化碳地質封存論壇

CO2GeoNet 二氧化碳地質封存論壇為歐洲二氧化碳地質封存研究領域之重要年度盛會，2014 年年會於威尼斯大學所在地 San Servolo 島舉辦(圖三)，研討範疇涵蓋歐盟政策與法規、技術應用、基礎研究、公眾參與二氧化碳再利用等，參與人員包括來自 22 個國家之專家學者、研究人員、工程師、地質師與歐盟官員等(圖四)，會議內容豐富，總計約有近 25 篇研究成果與技術資訊發表，議程如表一與表二所示，主要議題包括：

- (一) 碳捕獲與封存於歐盟氣候與能源政策現況(Status of CCS in EU Climate and Energy Policy)
- (二) 二氧化碳封存技術執行進展(Progress toward the implementation of CO₂ storage technology)
- (三) 為安全與環境的封存提供科學與技術的基礎(Scientific and technical basis for safe and environmental sound CO₂ storage)
- (四) 實踐公眾參與活動(Implementation of public participation activities)
- (五) 二氧化碳再利用(Use of CO₂)



圖三、第九屆 CO₂GeoNet 二氧化碳地質封存論壇(會場)

The participants

- 69 registered participants
 - 43 researchers from CO₂GeoNet
 - 26 stakeholders
- from 22 countries
 - Abu Dhabi
 - Austria
 - Belgium
 - Croatia
 - Czech Republic
 - Denmark
 - Finland
 - France
 - Germany
 - India
 - Italy
 - Norway
 - Poland
 - Romania
 - Scotland
 - Slovenia
 - Spain
 - Sweden
 - Switzerland
 - The Netherlands
 - Taiwan
 - United Kingdom



9th CO₂GeoNet Open Forum, May 20-22 2014 – Venice, San Servolo Island



圖四、第九屆 CO₂GeoNet 二氧化碳地質封存論壇(參與人員)

表一、研究成果簡報

<p>Session 1: Status of CCS in EU Climate and Energy Policy</p>
<ul style="list-style-type: none"> • <u>EU CCS policy and implementation of the CO₂ Storage Directive</u> - Alexandr Jevsejenko, European Commission DG CLIMA • <u>CCS policy, regulatory and commercialisation landscape in the UK</u> - Ward Goldthorpe, The Crown Estate • <u>CCS in France and beyond - lessons learned & perspectives</u> - Christian Oeser, French Directorate General Energy and Climate
<p>Session 2: Progress toward the implementation of CO₂ storage technology</p>
<ul style="list-style-type: none"> • <u>Global status of CCS</u> - Andrew Purvis, Global CCS Institute • <u>Licensing CO₂ storage in the ROAD project (storage in an offshore depleted gas field, NL)</u> - Chris Gittins, Taqa • <u>Building a full CCS value chain towards an Italian demonstration project in the Sulcis area</u> - Giuseppe Girardi, ENEA • <u>Site characterisation and field experiments prior to CO₂ injection at the Hontomin CO₂ storage pilot site (onshore saline aquifer, Spain)</u> - Juan Carlos de Dios, CO₂GeoNet-CIUDEN
<p>Session 3: Scientific and technical basis for safe and environmental sound CO₂ storage</p>
<ul style="list-style-type: none"> • <u>Modelling and Simulation of CO₂ Storage in Channel Sand Formations</u> - Gillian Pickup et al., CO₂GeoNet-HWU • <u>An approach to obtain better understanding of a potential storage site through utilization of available well data</u> - Roman Berenblyum, CO₂GeoNet-IRIS • <u>The long-term fate of CO₂ in the subsurface - Latest results from FP7 UltimateCO₂ project</u> - Pascal Audigane, CO₂GeoNet-BRGM • <u>A guide to potential impacts of leakage from CO₂ storage</u> - Results from the FP7 RISCs project- Jonathan Pearce, CO₂GeoNet-BGS • <u>Identifying CO₂ leakage and quantifying emissions in the marine environment</u> - Astri Kvassnes et al., CO₂GeoNet-URS, OGS, IRIS, IGB • <u>Potential impact of CO₂ storage on groundwater</u> - Salvatore Lombardi, Julie Lions et al., CO₂GeoNet-URS & BRGM
<p>Session 4: Breakout “The road ahead for CO₂ storage”</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Information about breakout session and group formation • Breakout groups - Discussion on state of knowledge, commercialisation of CCS, related policy and regulatory aspects of CO₂ storage in Europe

表二、研究成果簡報(續)

Session 5: Implementation of public participation activities
<ul style="list-style-type: none"> • <u>Practice in public participation at Hontomin</u> - Daniel Fernández Poulussen & Gema Ortiz, CO2GeoNet-CIUDEN • <u>From public participation project to public participation process</u> - Samuela Vercelli, CO2GeoNet-URS • <u>A view from civil society on CO2 storage</u> - Manfred Treber, Germanwatch
Session 6: Use of CO2
<ul style="list-style-type: none"> • <u>The CO₂-DISSOLVED project toward an actual synergy between geological storage of CO₂ and geothermal energy recovery</u> - Christophe Kervévan, CO2GeoNet-BRGM • <u>Feasibility of Enhanced Gas Recovery with CO₂ injection</u> - Filip Neele & Ton Wildenborg, CO2GeoNet-TNO • <u>Enhanced Oil Recovery with CO₂ injection in the North Sea</u> - Lars Hende, Maersk Oil
Keynote lecture: The latest science on ocean acidification - Richard Sanders, UK National Oceanography Centre
<ul style="list-style-type: none"> • <u>CCS in Horizon2020</u> - Vassilios Kougionas, DG Research • <u>Research trends in EERA CO₂ storage</u> - Sven van der Gijp, CO2GeoNet-TNO • <u>Development of ECCSEL research infrastructure for CO₂ storage</u> - Sverre Quale, NTNU • <u>ECCSEL NatLab-Italy: A new infrastructure for CO₂ storage researches in the Panarea natural laboratory, Tyrrhenian Sea</u> - Michela Vellico & Cinzia De Vittor, CO2GeoNet-OGS • <u>ERA-NET Cofund on CCS</u> - Niels Peter Christensen & Aage Stangeland, Gassnova

除了研究成果簡報及研究發展策略研討外，亦有近 15 篇海報展示，詳細題目與發表單位如表三所示。會場外亦提供了 CO2GeoNet 部分成員之單位簡介與歷年研究成果，供與會人員索取。此外，會場同時亦展出了 " What does CO₂ geological storage really mean "手冊之所有語言版本(圖五)，十分壯觀，獨缺中文版，實感遺憾。

表三、海報展示

- Joint Nordic CCS research in NORDICCS - the Nordic CCS Competence Centre - K.L. Anthonsen* (GEUS), P. Aagaard, P. E. S. Bergmo, S. R. Gislason, A. Lothe, G. M. Mortensen & S. Ó. Snæbjörnsdóttir
- The long-term Time-Trapping-Security - A meta-study of published simulations - P. Frykman* (GEUS)
- The utilization of fly ash in CO₂ capture from flue gas - J. Jaschik, K. Warmuzinski* (Polish Academy of Sciences) & M. Jaschik
- Laboratory experiments on CO₂-rock-fluid interactions under reservoir conditions - V. Havlova, V. Hladik* (CGS), V. Kolečka & V. Vrbova
- Centre of Excellence on Clean Energy: Characterization of Sulcis coal basin for CO₂ geological storage - A. Plaisant* (Sotacarbo SpA / ENEA), P. Deiana, G. Girardi, E. Maggio & A. Pettinau
- Viral shunt in CO₂-dominated hydrothermal vent of Panarea (Italy) - A. Karuza* (OGS), M. Celussi, C. Comici, M. Giani & C. De Vittor
- ULTimateCO₂: Understanding the Long-Term fate of geologically stored CO₂ - P. Audigane, J.-C. Manceau, R. Stead* (BRGM), F. May, J. Pearce, A. Dimier, Y. Le Gallo, P. Frykman, F. Gherardi, N. Maurand, T. Yalamas, C. Nussbaum, H. Cremer, P. Fokker & C. Spiers
- Bubble dynamic experiments at the natural CO₂ leaking site at Panarea, Italy (ECO2 project) - S. E. Beaubien et al.
- Near surface geochemistry baseline surveys during the CCS site characterization process: the influence of land use and seasonal variability - S. E. Beaubien et al.
- Continuous monitoring of terrestrial and marine sites (RISCS) - A. Annunziatellis et al.
- On the Sensitivity of CO₂ Injectivity to Reservoir Facies Architecture - M. Jin, E. J. Mackay, S. A. Mathias, J. G. Gluyas, W. Goldthorpe & G. E. Pickup* (Heriot-Watt University)
- A showcase for chler, P. Oehler, J. Winkler & M. Mazzotti



圖五、” What does CO₂ geological storage really mean” 手冊(所有譯本)

三、重要研究成果摘錄

第九屆 CO2GeoNet 二氧化碳地質封存論壇之研究成果豐碩，難以一一贅述，茲針對各項議題篩選出與本人負責之年度研究計畫「永和山構造二氧化碳注儲及井下監測(II)」及我國技術發展瓶頸相關簡報與研討內容摘錄並說明如下。

1. Licensing CO₂ storage in the ROAD project

Rotterdam Opslag en Afvang Demonstratieproject (ROAD)係一項位於荷蘭 Rotterdam 港近海的碳捕獲與封存示範計畫，主要執行單位為 E.ON Benelux 與 Electrabel Nederland，並由 GDF SUEZ E&P Nederland 與 TAQA Energy 分別負責二氧化碳運輸與封存工作。此示範計畫開始於 2008 年，預計將於一座新設燃煤與生質能電廠中安裝燃燒後捕獲與壓縮單元(post-combustion capture and compression unit)，捕獲量為 110 萬公噸/年，預計 2017 開始注氣，相關資料與位置圖如表四所與圖六所示。此案分別於 2009 年與 2010 年取得歐盟(1.8 億歐元)與荷蘭政府(1.5 億歐元)之補助，並已初步取得二氧化碳封存核准(storage permit)，但須於注氣前計畫更新資訊與二氧化碳移棲研究成果，藉以判斷二氧化碳可能的移棲路徑。

此案在申請的過程中，提出了「財務健全(Financial Security)」的構想，係取得封存核准的關鍵之一。「財務健全」係指針對此案規畫進行的監測工作與後續的場址復舊，須提交明確的財務保障(表五所示)，以確保計畫的執行過程中，若經營人突然倒閉，政府仍有足夠的經費完成後續工作。此想法十分值得台灣借鏡，建議依納入相關法規中。

表四、Rotterdam Opslag en Afvang Demonstratieproject

經營人	E.ON Benelux 與 Electrabel Nederland
地點	Zuid-Holland, the Netherlands
CO2 捕獲(來源)	<ul style="list-style-type: none"> • 捕獲自一座新設的燃煤與生質能發電廠 Maasvlakte Power Plant 3 (MPP3) • 採用 Absorption chemical solvent-based-process (Amine)捕獲法 • 預計捕獲量為每年 110 萬公噸
CO2 運輸規劃	<ul style="list-style-type: none"> • 由 GDF SUEZ E&P Nederland 負責 • 採用 16” 管線運輸(陸上 5 公里，離岸 20 公里) • 離岸管線將埋設於海床下 1 公尺
CO2 封存	<ul style="list-style-type: none"> • 由 TAQA Energy 負責 • 離岸 20 公里之耗竭天然氣田(P18-4)
封存層資訊	<ul style="list-style-type: none"> • P18-4 天然氣層 • 深度：3,500 公尺 • 原始氣層壓力為 350 bar，目前僅剩 20 bar • 目前仍生產中，預計 2015 年停產 • 初步估計封存量約為 800 萬公噸
注氣規劃	<ul style="list-style-type: none"> • 以一口現有生產井作為注氣井 • 2017 年開始注氣 • 每年注氣 110 萬公噸，持續 5 年，預估氣層壓力將回升至 240 bar

資料來源：1. Licensing CO₂ storage in the ROAD project (storage in an offshore depleted gas field, NL)簡報

2. <http://www.globalccsinstitute.com/project/rotterdam-opslag-en-afvang-demonstratieproject-road>



圖六、ROAD 位置圖

資料來源：1. Licensing CO₂ storage in the ROAD project (storage in an offshore depleted gas field, NL)簡報

2. <http://www.globalccsinstitute.com/project/rotterdam-opslag-en-afvang-demonstratieproject-road>

表五、ROAD Financial Security

- monitoring costs, € 10 million which covers 9 years (injection years plus time till closure)
- monitoring costs, € 0.1 million/yr for 20 years post closure , pre-transfer
- possible extra monitoring costs, €10 million
- corrective measures if things go other than planned, €7.5 million
- closure of the P18-4 injection well, €5.5 million
- removal of the P18A platform, € 7.0 million
- measures to ensure P15-9 wells are closed CO₂ proof, € 10 million
- costs incurred by Ministry of Economic Affairs for 30 years post transfer, €2.0 million
- cost of ETS-EUAs in the event that CO₂ is released to the atmosphere, worst case assuming release lasting 3 months, but recognising pressure starts low and builds year by year
- 20% contingency covering all of the above.

資料來源：Licensing CO₂ storage in the ROAD project (storage in an offshore depleted gas field, NL)簡報

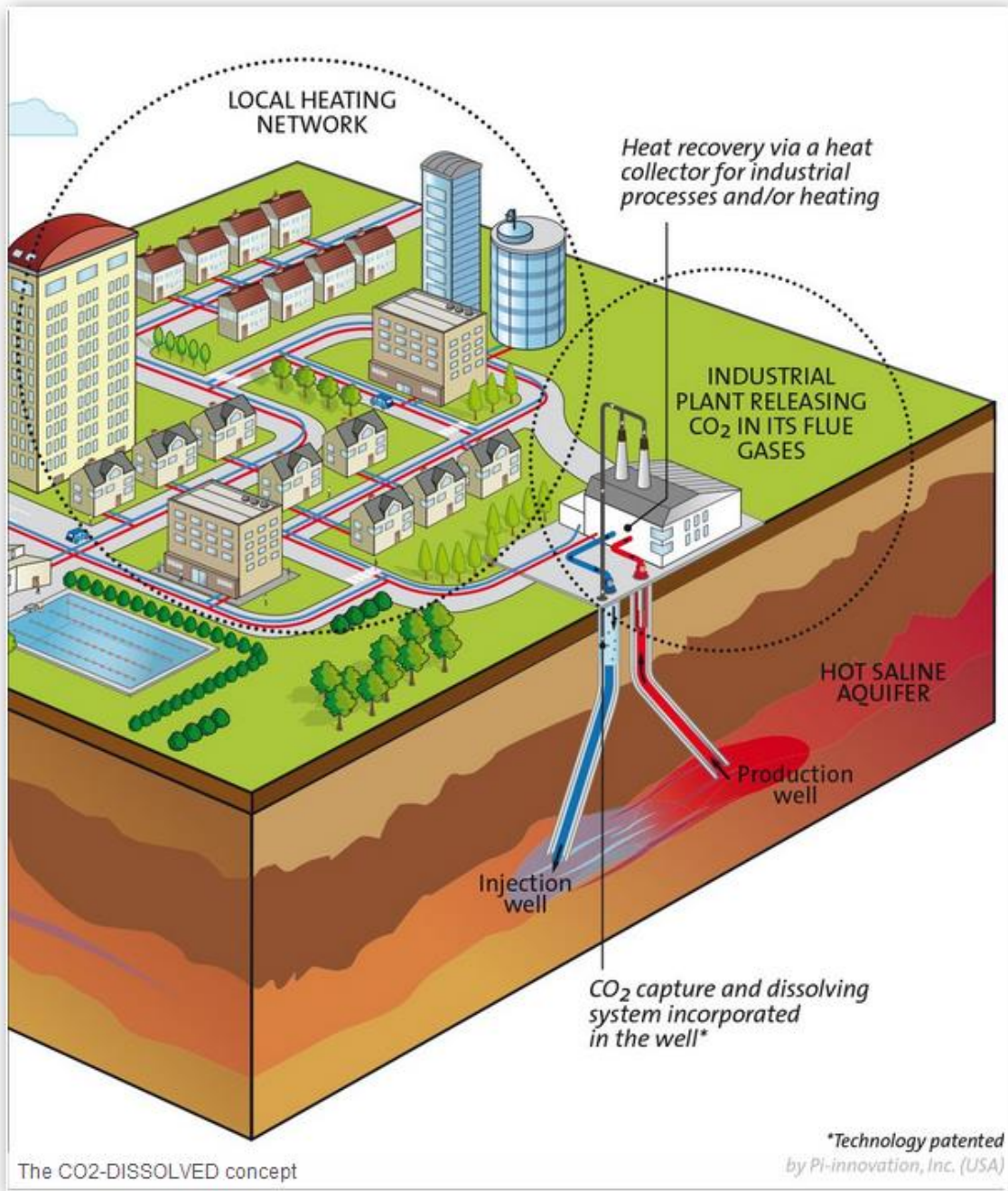
2. The CO₂-DISSOLVED project toward an actual synergy between geological storage of CO₂ and geothermal energy recovery

此研究係由法國地質調查局(BRGM)主導，法國國家科學局(French National Research Agency)贊助之創新研究計畫，主要成員涵蓋法國(CFG Services、GEO、GeoResources、LEO)、德國(BGR)與美國(Partnering in Innovation inc.)等機構。CO₂-DISSOLVED 的全文為 CO₂ Dependable Injection and Storage System Optimized for Local Valorization of the geothermal Energy Delivered，顧名思義是利用二氧化碳擠注與封存將地下的地熱能導引至地表，以供應工廠或一般民生使用之技術(圖七)。而為了讓一般民眾能迅速瞭解 CO₂-DISSOLVED 之目的，此計畫亦設計了一個簡單明瞭的標誌(圖八)，此說明了其主要作業流程-「自工業廢氣中捕獲了二氧化碳，透過擠注井(藍色)將溶解於水中的二氧化碳注入鹽水層中，再由生產井(紅色)將地熱能生產出來」。此計畫之工作內容主要包含二氧化碳捕獲與溶解技術、碳封存與地熱能對比、監測與風險分析等三大部分(圖九)，此技術之實踐需同時分析二氧化碳排放源位置與當地地熱潛能，而考量鹽水對於二氧化碳之溶解度，排放源限定為二氧化碳年排放量小於 15 萬公噸中小型排放源，此研究目前已初步完成了法國(圖十)、德國(圖十一)與美國等地之二氧化碳排放源與地熱潛能資料蒐集與比對，並篩選出具潛能的試驗場址。

CO₂-DISSOLVED 技術之優勢包括：

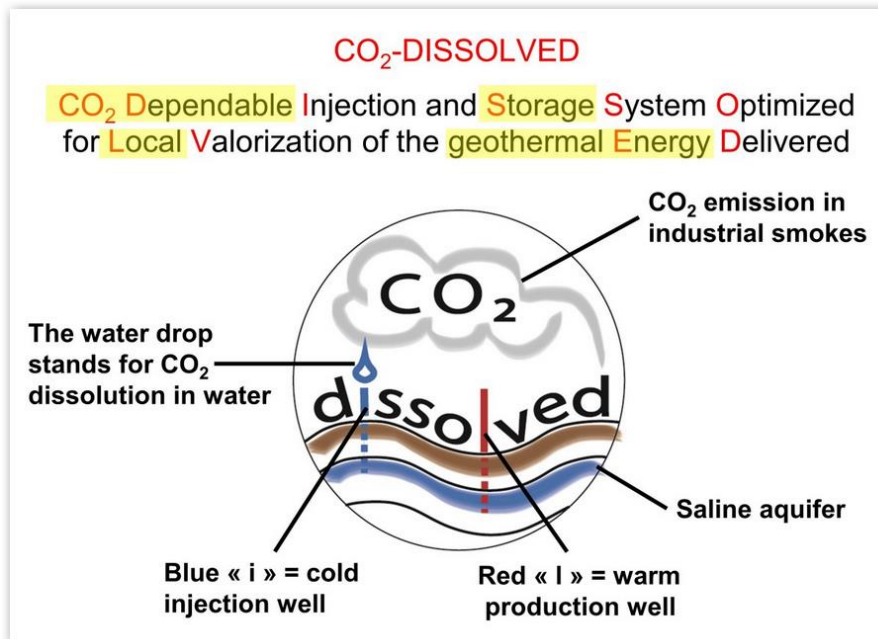
- (1) 安全的溶解二氧化碳封存：以富含二氧化碳之鹽水進行擠注，故鹽水層中不會有氣相二氧化碳，亦不會造成鹽水層壓力上升(build-up)。
- (2) 回收地熱能供工廠或一般民生使用：為發展成熟的技術，並可創造收入。
- (3) 降低二氧化碳捕獲成本：此技術以水作為溶劑，故無其他有害化學物質，且此專利捕獲技術相較於其他燃燒後捕獲技術，降低了 50%的成本。

對於具有豐富地熱資源的台灣而言，整合二氧化碳地質封存與地熱能回收之技術，不啻是同時推廣此二項節能減碳技術之良好方式。



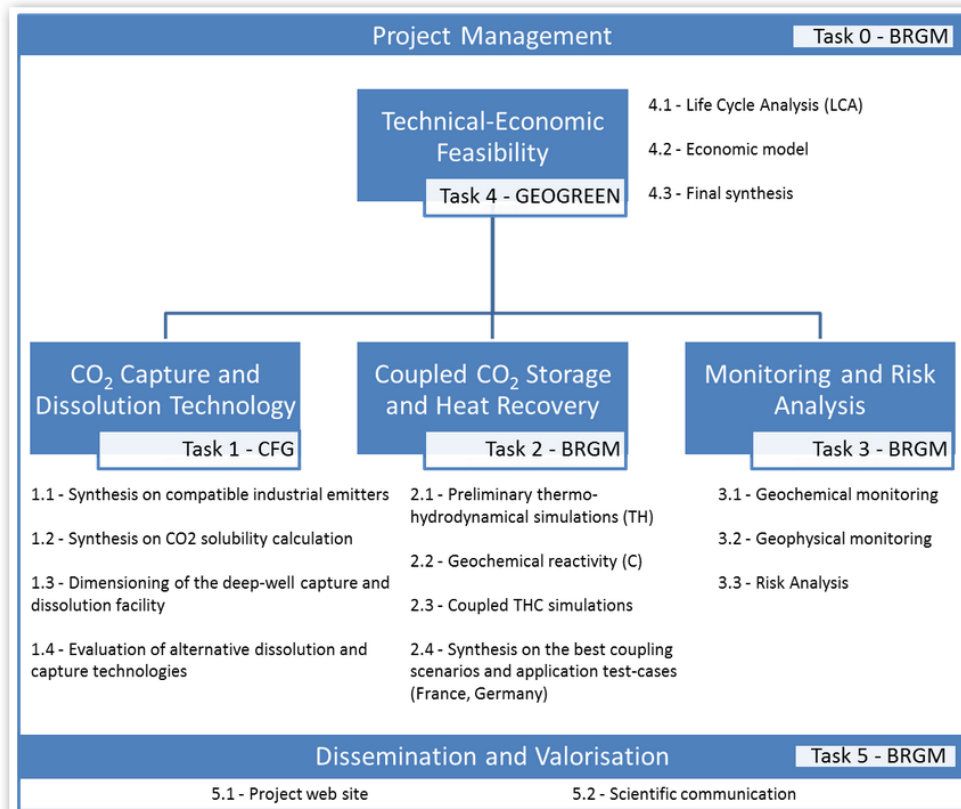
圖七、CO₂-DISSOLVED 原理

資料來源：The CO₂-DISSOLVED project toward an actual synergy between geological storage of CO₂ and geothermal energy recovery 簡報



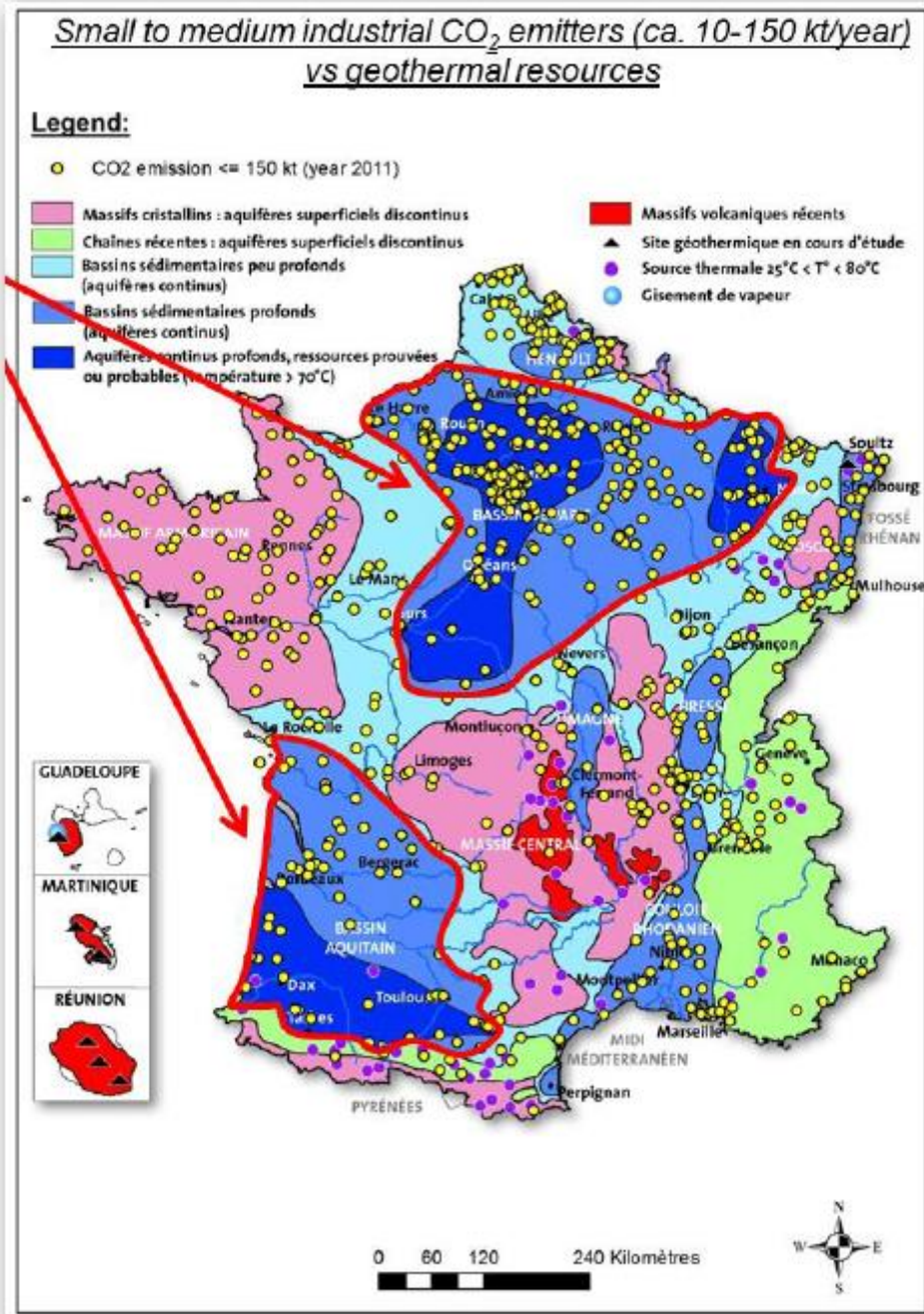
圖八、CO₂-DISSOLVED logo

資料來源：CO₂-DISSOLVED 網站



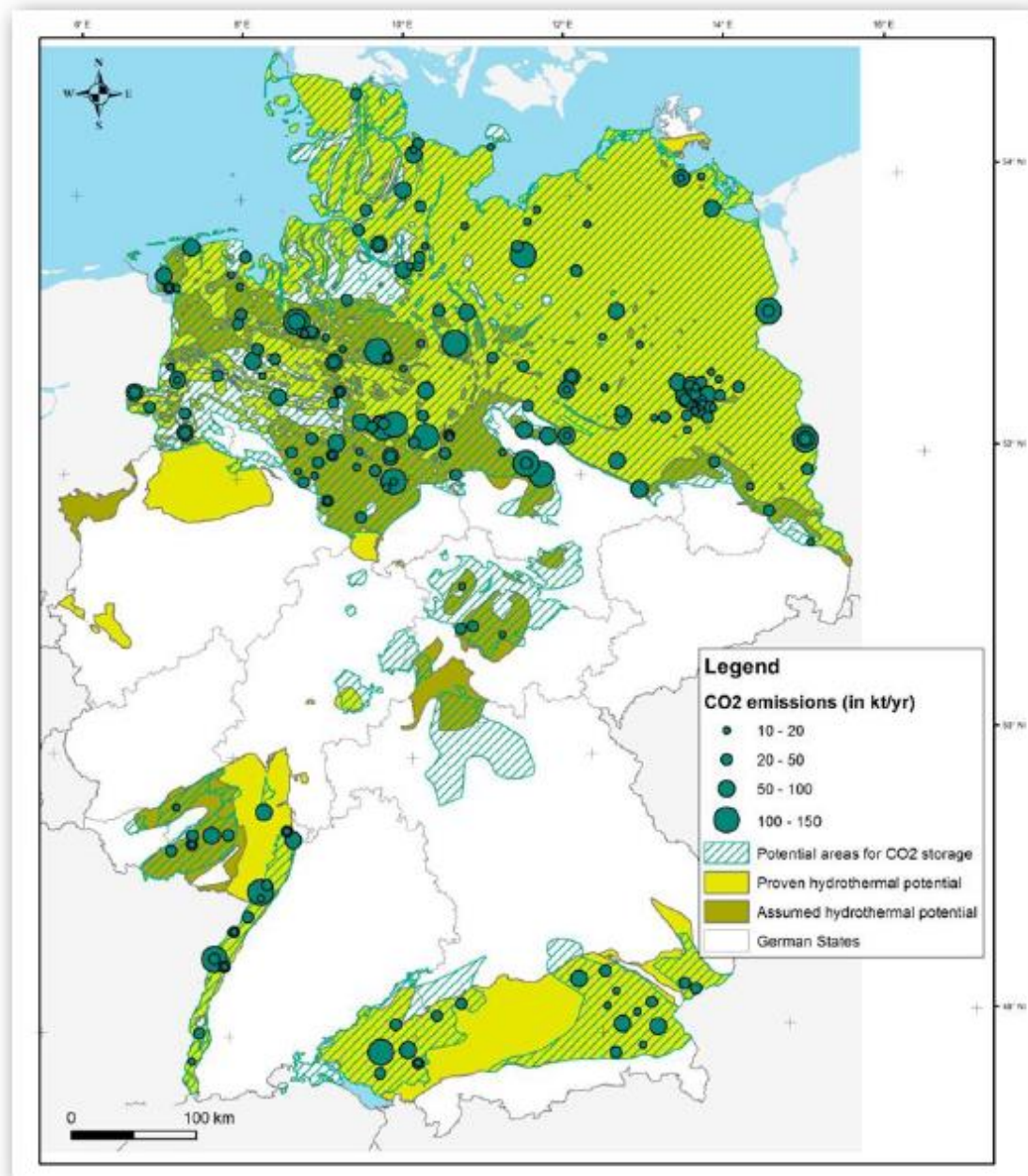
圖九、CO₂-DISSOLVED 計畫內容

資料來源：CO₂-DISSOLVED 網站



圖十、中小型二氧化碳排放源與地熱潛能比對(法國)

資料來源：The CO₂-DISSOLVED project toward an actual synergy between geological storage of CO₂ and geothermal energy recovery 簡報



圖十一、中小型二氧化碳排放源與地熱潛能比對(德國)

資料來源：The CO2-DISSOLVED project toward an actual synergy between geological storage of CO2 and geothermal energy recovery 簡報

3. Development of ECCSEL research infrastructure for CO₂ storage

歐洲二氧化碳捕獲與封存實驗室設施聯盟(European Carbon dioxide and Storage Laboratory Infrastructure)係由 NTNU(The Norwegian University of Science and Technology) 與 SINTEF(The Foundation for Scientific and Industrial Research at the Norwegian Institute of Technology)代表挪威政府成立之跨國聯盟，期望透過整合成員國之研究設施與資源(圖十二)，以達成下列目標：

- (1) 在歐洲建立與營運世界級的碳捕獲與封存研究設施。
- (2) 整合與升級現有的研究設施，以及增設新設備。
- (3) 強化歐洲碳捕獲與封存領域之科學、技術發展、創新與教育。

此聯盟迄今仍處於準備階段(preparatory phase)，主要從事正式營運所需的管理、法規、財務與策略等工作，並積極招募新成員中(目前僅限歐洲，未來會開放其他區域)，預計 2015 開始營運。此外，此聯盟現有研究設施涵蓋實驗設備與天然試驗場址，詳細清單如表六所示。

透過單一聯盟整合各成員之研究設施，以便進行資源與資訊分享，除可提高研究設備使用率與彼此研發能量外，並可避免成員間研究內容重複所造成的資源浪費，此做法十分值得台灣 CCS 聯盟學習與參考。



圖十二、ECCSEL 成員

資料來源：Development of ECCSEL research infrastructure for CO₂ storage 簡報

表六、ECSSEL 現有設施

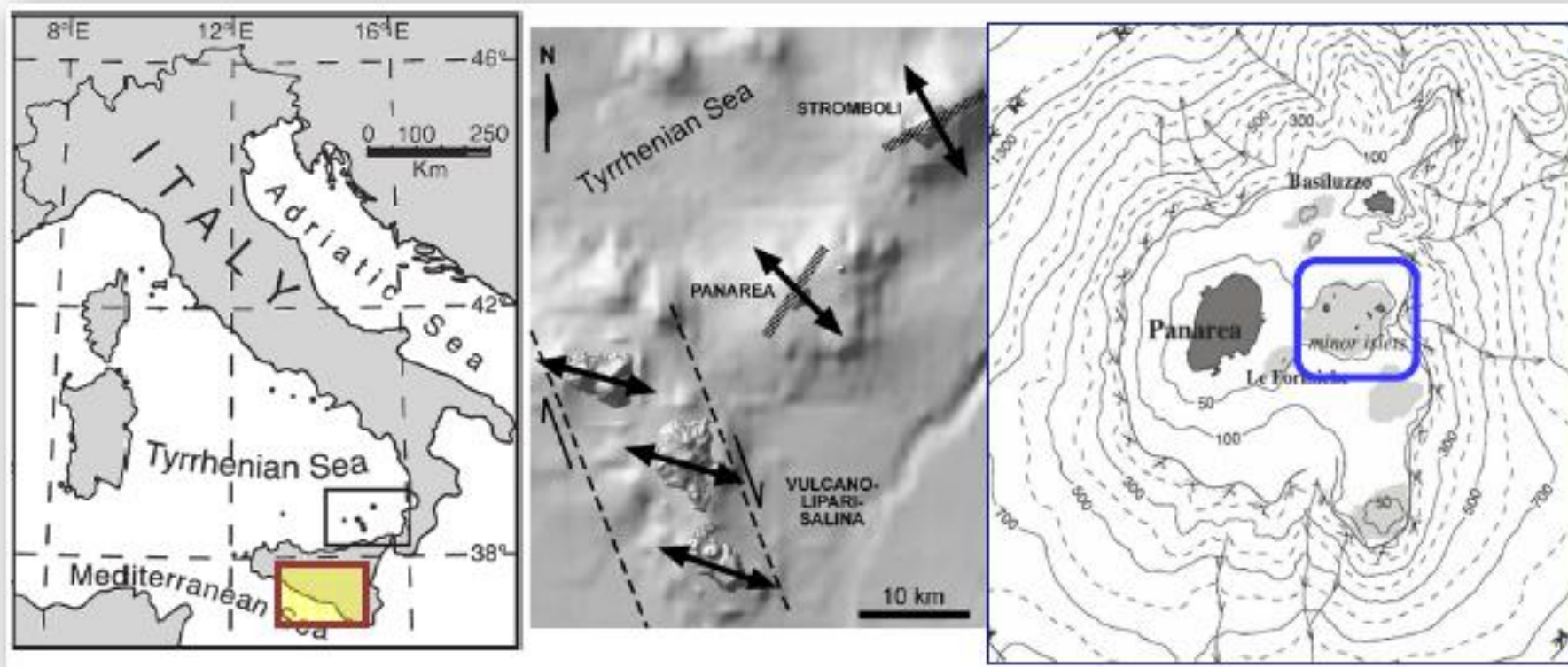
- CO₂ capture test facility at Tiller (SINTEF/NTNU, Norway)
- New packed column for solvent characterization (IFP, France)
- Post-combustion coal based pilot plant at Brindisi, (ENEL, Italy)
- Oxy-fuel test facility at El Bierzo (CIUDEN, Spain)
- High pressure oxy-fuel combustion test rig (DLR, Germany)
- Pulverized coal test facility at Amyntaion-Filotas (CERTH, Greece)
- Rock Mechanical & Geophysical Property (S&P-wave) Testing System (BGS, UK)
- Tri-axial flow cell for gas injection/displacement in ECBM applications (ETH Zurich, Switzerland)
- MONTMIRAL natural CO₂ field for CO₂ storage (BRGM, France)
- PANAREA (off-shore) and LATERA (on-shore) CO₂ leaking natural laboratories (OGS, Italy)
- Laboratory facilities for fundamental R&D

4. ECCSEL NatLab-Italy A new infrastructure for CO₂ storage researches in the Panarea natural laboratory, Tyrrhenian Sea

Panarea 位於西西里島(the island of Sicily)北方，屬於 Aeolian islands 火山群島之一(圖十三)，鄰近此區域之海床，有許多處均存在著氣體洩漏(gas leakage)，大量的二氧化碳持續洩漏至海水中，適合研究二氧化碳外洩之化學與生物影響，並可用於測試不同的監測技術。Panarea 天然試驗場址目前已累積了超過十年的試驗資料。由於目前正處於 ECCSEL 的準備階段，義大利國家研究機構 OGS(Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale) 作為 ECCSEL 的成員，計畫未來將提供義大利境內的兩座天然試驗場址(Panarea 與 Latera)供成員進行監測與評估二氧化碳洩漏對生態系統潛在衝擊相關研究之用，預計第一年將先從 Panarea 天然試驗場址開始。” ECCSEL Natlab Italy” 係由義大利大學與研究部(The Italian Ministry of University and Research, MIUR) 贊助，主要計畫目標為：

- (1) 發展為 ECCSEL Research Infrastructure(RI)之重要研究樞紐。
- (2) 增進此兩天然試驗場址之研究潛力，安裝最先進的實驗設備，以發展成永久試驗場址。
- (3) 促進研究機構間的合作。
- (4) 吸引國際頂尖學者
- (5) 鼓勵公部門與私人機構投資實驗室發展

ECCSEL 成員透過 ECCSEL Natlab Italy，可取得 Panarea 過去累積的試驗資料，並可於該場址進行其他研究工作；於此同時，並可與新資料進行對比，以驗證此區域之科學模型正確性。



圖十三、Panaera 天然試驗場址位置圖

資料來源：ECCSEL NatLab-Italy A new infrastructure for CO₂ storage researches in the Panarea natural laboratory, Tyrrhenian Sea 簡報

5. A showcase for geological CO₂ storage: Replacing misconceptions by visual explanations

二氧化碳地質封存相關研究工作中，移棲模擬係最容易遭受質疑的研究項目之一，因為封存層模型與流體動態模擬係基於許多假設條件所建立的，而且多以電腦模式呈現，民眾可能會提出「如何確定參數假設是否正確？」、「如何確定二氧化碳注入地底後會如同模擬結果般移動？」與「移棲動畫是否造假？」等疑慮。為解決此困境，蘇黎世大學的研究團隊構思出了以實體模型呈現超臨界二氧化碳封存於地層中的移棲情形之想法。此研究分為兩方面進行，茲說明如下：

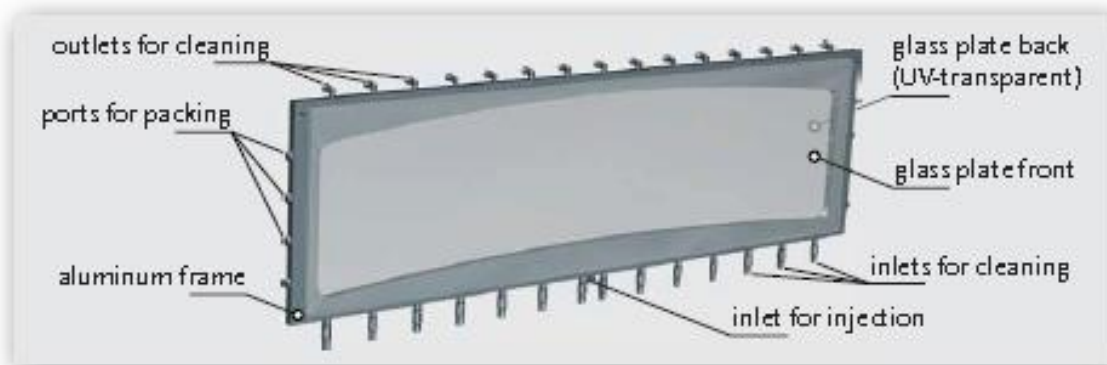
- (1) 建立可視的鹽水層砂體模型，以便觀察流體注入後的移棲情形：模型簡圖如圖十四所示，為強化可視性，此模型係於兩塊玻璃隔板作為框架，並於隔板間放入透明玻璃珠(transparent glass beads)，及放入鹽水，已呈現飽和鹽水之砂體情形。
- (2) 篩選性質近似超臨界二氧化碳之流體：經過多次試驗，考量不同注入率之流體移棲情形與分部形狀，最後選擇以庚烷(heptane)作為試驗流體，並以螢光劑染色，以提升視覺效果。

除上述設計外，為提升模型使用效率與便利性，該研究團隊亦於模型中設計了整合自動清潔之控制系統(圖十五)，透過簡單的操作程序，即可迅速完成流體與玻璃珠之清潔，以方便再次使用。模型之完成品如圖十六所示，於模型左側加入了地下環境、蓋層與封存層之說明，並以艾菲爾鐵塔作為比例尺，使參觀者對此試驗之規模能有更深刻的感受。實際注入結果如圖十七所示，流體自井底流出後，會逐步向上移棲，並集中於蓋層底部。

該研究團隊的 Daniel Sutter 博士指出依據模型展示的經驗，民眾對此模型所呈現的結果反應良好，顯示此研究確實能夠排解民眾對於二氧化碳於地底移棲情形之疑慮。

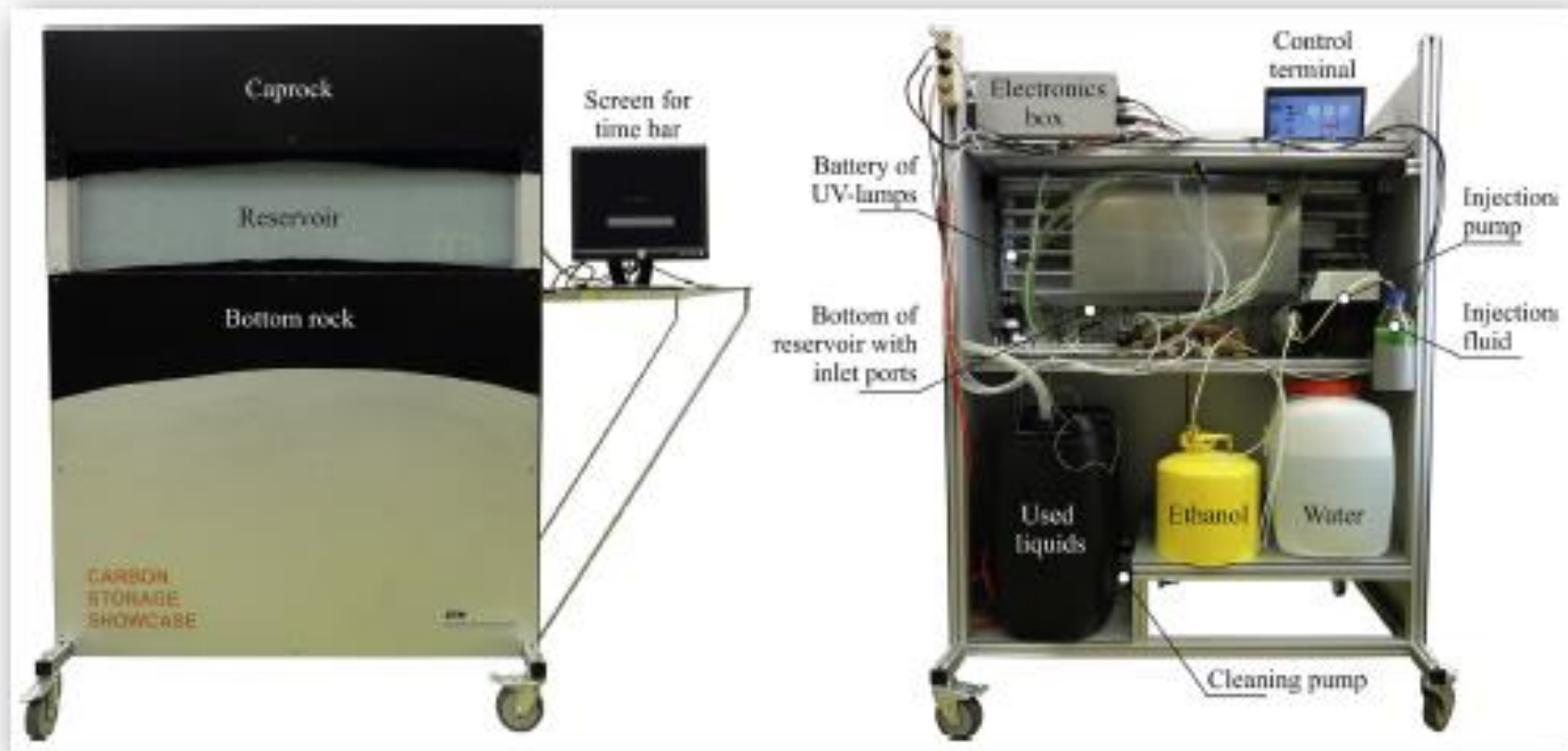
社會大眾對於電腦模式的不信任亦是台灣發展二氧化碳地質封存技術的瓶頸之一，若能於台灣重製此模型，勢必能夠提升社會大眾對此技術之認識與接受度。經與 Daniel Sutter 博士討論，該團隊十分鼓勵其他單位重製他們所開發出的模型，並樂意提供必要的技術支援。於論壇結束後，Daniel Sutter 博士亦熱

心地提供其團隊今年初於 International Journal of Greenhouse Gas Control 發表之論文與試驗相關影片資訊。最後，除與 Daniel Sutter 博士合影外(圖十八)，亦交換了聯絡方式，期望後續能有更進一步的研究交流。



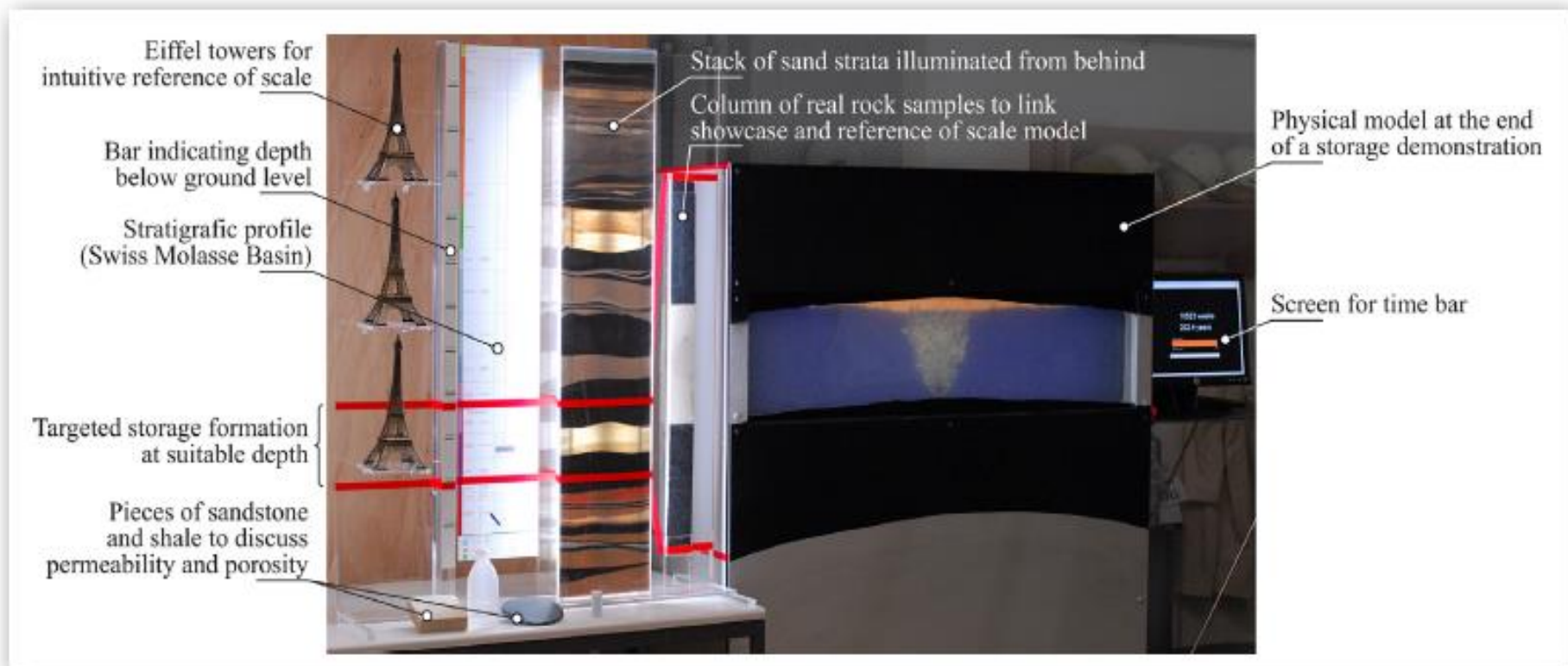
圖十四、鹽水層砂體模型

資料來源：Werner, M., et al., 2014, “A physical model for geological CO₂ storage - Replacing misconceptions by visual explanation”, International Journal of Greenhouse Gas Control, Vol.25, p.48.



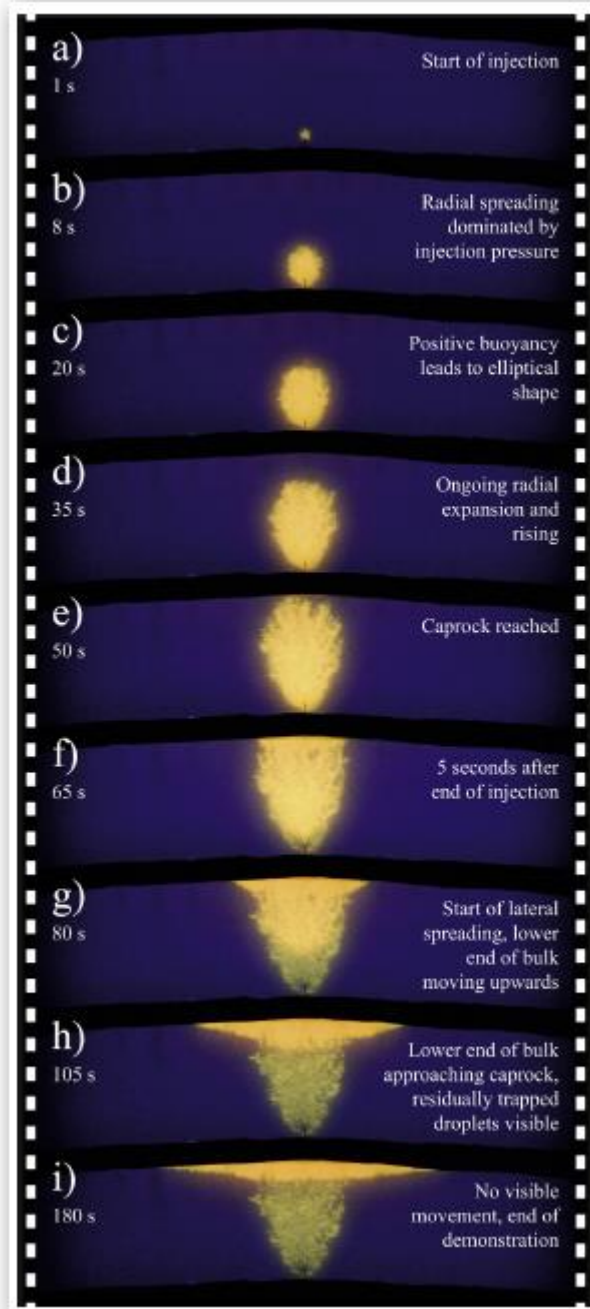
圖十五、整合自動清潔之控制系統

資料來源：Werner, M., et al., 2014, “A physical model for geological CO₂ storage - Replacing misconceptions by visual explanation”, International Journal of Greenhouse Gas Control, Vol.25, p.48.



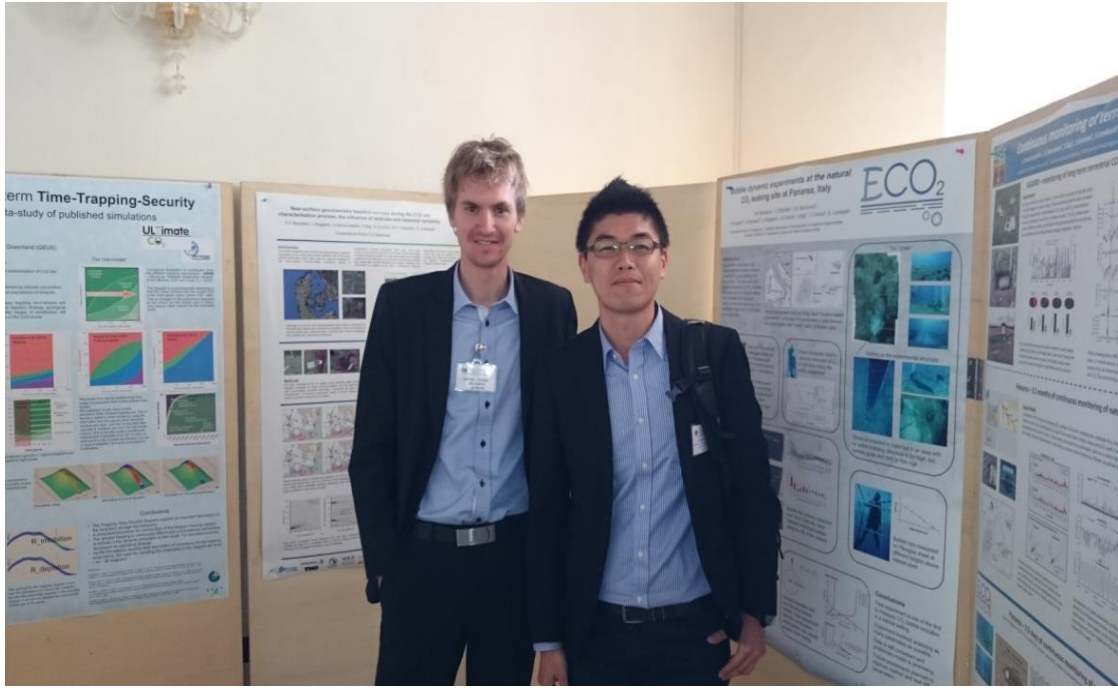
圖十六、二氧化碳地質封存實體模型

資料來源：Werner, M., et al., 2014, “A physical model for geological CO₂ storage - Replacing misconceptions by visual explanation”, International Journal of Greenhouse Gas Control, Vol.25, p.48.



圖十七、注入流體實際移棲情形

資料來源：Werner, M., et al., 2014, “A physical model for geological CO2 storage - Replacing misconceptions by visual explanation”, International Journal of Greenhouse Gas Control, Vol.25, p.47.



圖十八、與蘇黎世大學研究團隊 Daniel Shutter 博士合影

參、心得及建議

本次奉派出國參與「第九屆 CO2GeoNet 二氧化碳地質封存論壇」，與歐洲地區二氧化碳地質封存領域之專家學者交流，使我對於歐洲各國的二氧化碳地質封存發展現況以及研究想法有了更深入的瞭解，著實獲益良多，茲提出以下幾點心得與建議：

- 一、荷蘭 ROAD 示範計畫所提出之「財務健全」的構想，針對監測工作與場址復舊等預防性工作之費用，提交明確的財務保障，以確保當經營人無預警倒閉時，此類工作仍可順利進行。此構想有助於降低封存計畫之風險，並提升民眾之信任，十分值得我國效法，建議未來應納入相關法規中。
- 二、ECCSEL 透過單一聯盟整合各成員之設施與資訊，以進行研究資源分享，除可提高研究設備使用率與增進彼此研發能量，以最佳化研發支出外，亦可避免成員間研究內容重複所造成的資源浪費，此做法值得台灣 CCS 相關聯盟學習與參考。
- 三、依據蘇黎世大學研究團隊經驗，二氧化碳地質封存實體模型對於化解社會大眾對於電腦模式之疑慮，具有顯著的正面影響。對於近期因民眾抗爭問題，而面臨碳封存技術發展困境的台灣而言，建議與該團隊合作，於國內重製此模型，藉此提升社會大眾對此技術之認識與接受度。
- 四、終年持續自然釋放二氧化碳之天然場址係研究監測技術與探討二氧化碳對區域環境與生態影響之絕佳場所，而國內亦有許多適合執行各項研究之天然場址，包括活火山、溫泉、冷泉與泥火山等，建議執行相關研究時應妥善利用。
- 五、二氧化碳地質封存結合地熱能回收之技術極具發展前景，對於具有豐富地熱資源的台灣而言，不啻是同時推廣此二項節能減碳技術之良好方式。
- 六、民眾接受度依然是影響碳捕獲與封存技術發展之關鍵，而歐洲地區目前已從過去的「公眾教育宣導」(public outreach)提升至「公眾參與」(public

participation)，透過邀請民眾參與研習活動，公開討論二氧化碳地質封存技術之效益與可能風險，同時並傾聽民眾切身的感受，瞭解其潛在的困惑與恐懼，並盡可能加以說明與處理，此將可有效提升民眾對此技術之接受度，並樂於協助此技術之推廣。