

出國報告審核表

出國報告名稱：高放射性廢棄物核種遷移研討會		
出國人姓名 (2人以上，以1人為代表)	職稱	服務單位
黃添煌	主管	台灣電力公司核能後端營運處
出國類別	<input type="checkbox"/> 考察 <input type="checkbox"/> 進修 <input type="checkbox"/> 研究 <input type="checkbox"/> 實習 <input checked="" type="checkbox"/> 其他：開會（例如國際會議、國際比賽、業務接洽等）	
出國期間：106年9月8日至106年9月18日		報告繳交日期：106年10月30日
出國人員 自我審核	計畫主辦 機關審核	審核項目
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	1.依限繳交出國報告
<input checked="" type="checkbox"/>	<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"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	3.無抄襲相關資料
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	4.內容充實完備
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	5.建議具參考價值
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	6.送本機關參考或研辦
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	7.送上級機關參考
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	8.退回補正，原因：
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	(1) 不符原核定出國計畫
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	(2) 以外文撰寫或僅以所蒐集外文資料為內容
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	(3) 內容空洞簡略或未涵蓋規定要項
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	(4) 抄襲相關資料之全部或部分內容
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	(5) 引用相關資料未註明資料來源
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	(6) 電子檔案未依格式辦理
<input type="checkbox"/>	<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"/>	<input type="checkbox"/>	(1) 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"/>	<input type="checkbox"/>	(2) 於本機關業務會報提出報告
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	(3) 其他 _____
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	10.其他處理意見及方式：

報告人：   

單位： _____ 主管處： _____ 總經理： _____
 主管： _____ 主 管：  副總經理： _____

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「公務出國報告資訊網」為原則。

審閱

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：高放射性廢棄物核種遷移研討會

頁數 33 含附件：是否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話

台灣電力公司/陳德隆/02-23667685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話

1. 黃添煌/台灣電力公司/核能後端營運處/副處長/02-23657210 #2202
2. 簡國元/台灣電力公司/核能後端營運處/主管/02-23657210 #2271
3. 李柏叡/台灣電力公司/核能後端營運處/安全評估專員/02-23657210 #2307

出國類別：1 考察2 進修3 研究4 實習5 其他：開會

出國期間：106.9.8~106.9.18

出國地區：西班牙

報告日期：106.10.30

分類號/目

關鍵詞：高放射性廢棄物、最終處置、核種遷移

內容摘要：

Migration 研討會從 1987 年開始舉辦，每兩年舉行一次，Migration 2017 研討會為第 16 次研討會，於 106 年 9 月 10 至 15 日於西班牙巴塞隆納召開。Migration 研討會提供一個國際論壇進行科學資訊的交流，並討論鈾系元素與分裂產物於天然含水層遷移行為的化學控制過程。實驗調查與預測模組的發展過程為 Migration 研討會的主要議題，而從 Migration 研討會產生的資訊，可作

為長半衰期核種於地質圈遷移機制之基礎，此對放射性廢棄物最終處置長期安全評估非常重要。

Migration 2017 研討會於開幕式時，邀請瑞典、西班牙、法國、比利時、日本與美國等各國專家進行專題演講，講述各國放射性廢棄物最終處置計畫發展現況，以及未來研究發展之規劃。於技術議題時，各國專家簡報近期於放射性核種遷移領域之研究成果，報告內容除理論分析模式之發展，更包含實驗室試驗與現地實驗，可提供與會人員最新技術，後續進行相關討論，以聚焦研究方向。而 Migration 2017 研討會分為簡報與海報展示，其中國內研究機構核能研究所亦派員參加海報展示，共進行 4 篇海報展示，並與國際專家進行討論。

參加 Migration 2017 研討會，增加與各國專家交流機會，可瞭解目前國際上核種遷移研究發展現況與未來趨勢，並建立國內相關技術，有助於國內用過核子燃料最終處置計畫之推動。

本文電子檔已傳至出國報告資訊網 (<http://report.nat.gov.tw/reportwork>)

出國報告(出國類別：開會)

高放射性廢棄物核種遷移研討會

服務機關：台灣電力公司

核能後端營運處

姓名職稱：黃添煌 副處長

簡國元 主管

李柏叡 安全評估專員

派赴國家：西班牙

出國期間：106年9月8日至106年9月18日

報告日期：106年10月30日

(本頁為空白頁)

摘要

Migration 研討會從 1987 年開始舉辦，每兩年舉行一次，Migration 2017 研討會為第 16 次研討會，於 106 年 9 月 10 至 15 日於西班牙巴塞隆納召開。Migration 研討會提供一個國際論壇進行科學資訊的交流，並討論銻系元素與分裂產物於天然含水層遷移行為的化學控制過程。實驗調查與預測模組的發展過程為 Migration 研討會的主要議題，而從 Migration 研討會產生的資訊，可作為長半衰期核種於地質圈遷移機制之基礎，此對放射性廢棄物最終處置長期安全評估非常重要。

Migration 2017 研討會於開幕式時，邀請瑞典、西班牙、法國、比利時、日本與美國等各國專家進行專題演講，講述各國放射性廢棄物最終處置計畫發展現況，以及未來研究發展之規劃。於技術議題時，各國專家簡報近期於放射性核種遷移領域之研究成果，報告內容除理論分析模式之發展，更包含實驗室試驗與現地實驗，可提供與會人員最新技術，後續進行相關討論，以聚焦研究方向。而 Migration 2017 研討會分為簡報與海報展示，其中國內研究機構核能研究所亦派員參加海報展示，共進行 4 篇海報展示，並與國際專家進行討論。

參加 Migration 2017 研討會，增加與各國專家交流機會，可瞭解目前國際上核種遷移研究發展現況與未來趨勢，並建立國內相關技術，有助於國內用過核子燃料最終處置計畫之推動。

目錄

摘要.....	i
目錄.....	ii
圖目錄.....	iii
壹、 目的.....	4
貳、 過程.....	5
參、 工作內容	7
Migration 2017 研討會	7
一、 會議大綱	7
二、 開幕式	8
三、 技術議題	17
肆、 心得.....	31
伍、 建議.....	33

圖目錄

圖 1：Migration 2017 研討會會場.....	6
圖 2：Migration 2017 研討會會場入口.....	6
圖 3：Migration 2017 研討會主席西班牙 Jordi Bruno 致詞.....	14
圖 4：Migration 2017 研討會會議現場.....	14
圖 5：Keikuse Ishida 先生簡報說明日本高放射性廢棄物最終處置計畫現況.....	15
圖 6：日本場址篩選之 3 個階段.....	15
圖 7：法國 Cigeo 深層地質處置場示意圖.....	16
圖 8：北京大學劉春立教授介紹中國大陸高放最終處置計畫現況與發展沿革..	26
圖 9：PFLOTRAN 功能介紹.....	26
圖 10：瑞典 Kastriot Spahiu 博士進行用過核子燃料廢棄物型態近期發展之介紹	27
圖 11：台電公司簡國元主管與瑞典 Kastriot Spahiu 博士進行討論.....	27
圖 12：芬蘭 Eveliina Murri 博士介紹於芬蘭 OLKILUOTO 地下實驗室與瑞士 GRIMSEL 地下實驗室之現地試驗.....	28
圖 13：瑞典 SSM Bo Strömberg 先生介紹瑞典用過核子燃料最終處置場建造執 照申請過程.....	28
圖 14：放射性核種遲滯安全功能.....	29
圖 15：核研所與台電公司參加 Migration 2017 研討會人員於海報前合影.....	29
圖 16：核研所研究人員與瑞典 SKB 專家進行海報內容討論.....	30
圖 17：核研所與台電公司參加 Migration 2017 研討會人員合影.....	30

壹、目的

本公司依法執行用過核子燃料最終處置計畫，將於 106 年底提出「我國用過核子燃料最終處置技術可行性評估報告(SFND2017 報告)」，確認國內地質處置工程技術能力是否完備，其中核種傳輸為最終處置場安全評估之核心技术，參與相關研討會瞭解國際發展現況與未來趨勢有其必要性。

Migration 研討會(International Conference on the Chemistry and Migration Behavior of Actinides and Fission Products in the Geosphere)從 1987 年開始舉辦，每兩年舉行一次，主要針對錒系元素與分裂產物於地質圈的化學與傳輸行為進行討論，提供國際專家交流平台，討論議題涵蓋用過核子燃料/高放射性廢棄物最終處置系統的核種傳輸研究，包含理論基礎、傳輸模式發展、實驗室試驗與現地實驗等。Migration 2017 研討會為第 16 次研討會，於 106 年 9 月 10 至 15 日於西班牙巴塞隆納召開。

藉由參加 Migration 2017 會議，與來自世界各國的研究人員進行意見交流，並透過參加會議簡報及海報展示等方式掌握國際上核種傳輸的發展現況與未來趨勢，有助於國內用過核子燃料最終處置計畫之推動。

貳、過程

自 106 年 9 月 8 日出發，迄 9 月 18 日返國(共計 11 天)，參加於西班牙巴塞隆納舉辦之 Migration 2017 研討會，詳細訪問行程如表 1。會議舉辦地點為 Centre Convencions Internacional de Barcelona(如圖 1 及圖 2)。

表 1：公出地點與工作內容

日期	地點	工作內容
9 月 8 日 至 9 月 9 日	Taipei→Paris→Barcelona	去程
9 月 10 日 至 9 月 15 日	Barcelona	Migration 2017 研討會
9 月 16 日	Barcelona→Paris	轉機
9 月 17 日 至 9 月 18 日	Paris→Taipei	回程



圖 1：Migration 2017 研討會會場



圖 2：Migration 2017 研討會會場入口

參、工作內容

Migration 2017 研討會

一、會議大綱

Migration 研討會提供一個國際論壇進行科學資訊的交流，並討論銅系元素與分裂產物於天然含水層遷移行為的化學控制過程。實驗調查與預測模組的發展過程為 Migration 研討會的主要議題，而從 Migration 研討會產生的資訊，可作為長半衰期核種於地質圈遷移機制之基礎，此對放射性廢棄物最終處置長期安全評估非常重要。Migration 2017 研討會涵蓋下列議題：

A、銅系元素與分裂產物的水化學

1. 溶解度與溶解作用
2. 固體溶液與二次相形成
3. 無機與有機物錯合作用
4. 氧化還原反應和輻射效應
5. 固相與水相界面反應
6. 膠體形成
7. 實驗方法
8. 計算化學

B、放射性核種的傳輸行為

1. 動態系統中的吸附與解吸現象
2. 擴散與其他遷移過程
3. 膠體遷移
4. 生物與有機材料之影響
5. 現場與大規模實驗
6. 天然類比

C、地球化學與傳輸模擬

1. 數據選擇及評估
2. 化學與傳輸之耦合
3. 模式的發展與應用
4. 模式驗證
5. 安全評估與處置概念

D、案例分析

E、水泥系統/高鹼性水溶液中的放射性核種行為

二、開幕式

9月10日當天前往 Migration 2017 研討會會場進行註冊，並參加開幕式，由德國 Horst Geckeis 先生與西班牙 Jordi Burno 先生致詞(如圖 3)，最後進行專題討論，議題為「放射性核種遷移科學：最終用戶的需求(Science In Radionuclide Migration: The Needs Of The End Users)」，專題討論的目的為提供應用放射性核種遷移科學/技術之方法，以降低放射性廢棄物最終處置場功能與安全評估之不確定性，並建議研究人員聚焦與調整未來研究方向，以符合實際需求。Migration 2017 研討會邀請瑞典 SKB Bjorn Gylling 先生、比利時 ONDRAF Stéphane Brassinnes 先生、法國 ANDRA Frederic Plas 先生、西班牙 ENRESA Mariano Navarro 先生與日本 NUMO Keikuse Ishida 先生、美國 Sandia 國家實驗室 Paul Mariner 先生進行專題討論，前述各專家首先介紹各國高放最終處置計畫執行現況，以及各國未來的研究發展計畫，最後與聽眾進行討論，Migration 2017 研討會會議現場如圖 4。

瑞典 SKB Bjorn Gylling 先生簡報說明瑞典 SKB 之近況，瑞典 SKB 瑞典新執行長 Eva Hallden 於 2017 年 4 月 1 日上任，並提到瑞典 SKB

申請建造執照的現況。SKB 於 2011 年 3 月申請建造執照，在 2011 年至 2016 年審查期間，已依瑞典管制機關 SSM 要求補充相關文件，瑞典 SSM 於 2015 年 6 月至 2016 年 3 月將瑞典 SKB 之申請文件公開予大眾審視。2016 年 6 月瑞典 SSM 之審查資料已送至土地與環境法院中，2017 年 9 月 5 日土地與環境法院開始舉辦公聽會，公聽會將於瑞典首都 Stockholm 及處置場址預定地 Osthrammar 舉辦，為期一個月。瑞典管制機關和土地與環境法院將於 2018 年初提出聲明，Forsmark 場址所在地 Osthrammar 將於 2018 年 3 月舉辦公投，而 2021 年能否於 Forsmark 場址建造處置場將由公投結果決定，瑞典政府將採用此公投的結果。最後，Bjorn Gylling 先生介紹瑞典從 1986 年開始進行高放處置技術之研究，目前重要研究活動已規劃至 2030 年，且每 3 年會重新檢討一次。瑞典 SKB 之處置場址預計於 2021 年開始建造，但瑞典 SKB 仍然持續進行相關的研究，代表高放處置計畫為長期研究發展計畫，並不會因為開始建造處置場而停止相關研究，若能使用更為進步的技術於處置場，更可提高處置場之安全性。

日本 NUMO Keikuse Ishida 先生簡報說明日本高放射性廢棄物最終處置計畫現況(如圖 5)，NUMO 根據特定放射性廢棄物最終處置法逐步進行場址篩選，以決定最終處置設施之場址，NUMO 於 2002 年公開徵求自願進行文獻調查(Literature Survey)的全國鄉鎮，但並未徵得任何自願供調查之區域，若有自願的鄉鎮並透過文獻調查確認可符合場址篩選準則，將成為候選場址並進入初步調查區域(Preliminary Investigation Area, PIAs)階段，進行地球物理調查、地質鑽探等；利用初步調查之資料確認符合場址篩選準則後，再進入細部調查區域(Detailed Investigation Area, DIAs)階段，執行深層地質調查；再經確認符合場址篩選準則後，候選場址將可進入處置設施場址(Repository Site, RS)階段

(如圖 6)，而日本 NUMO 預計在 2030 年左右選定處置場候選場址，2040 年左右啟用處置場。

現階段 NUMO 與日本經濟產業省(Ministry of Economy, Trade and Industry)共同舉辦多場全國性之研討會及公聽會，進行深層地質處置安全性及重要性的介紹，以利全國民眾瞭解及接受深層地質處置，並期望有自願鄉鎮成為候選場址，提供 NUMO 進行場址篩選。而在技術發展方面，日本 NUMO 目前與瑞典 SKB 進行合作，於日本 H12 報告之基礎上發展安全案例(Safety Case)，將情節發展、安全功能(Safety function)、參考演化(Reference evolution)、場址概念模型(Site descriptive model, SDM)等概念納入，雖然現階段尚未有實際場址，但整合場址調查與安全評估的關鍵經驗可以提供未來應用於實際場址。另外，關於核種傳輸模型方面，日本 NUMO 已發展三維質量傳輸模型 Partridge，可用於分析處置母岩裂隙中的地下水流場，而三維質量傳輸模型 Partridge 是採用粒子追蹤方法(Particle tracking method)進行分析，其具有數百萬個網格須進行計算，但是進行安全案例計算時需考慮計算效率，且需計算多個安全案例，因此放射性核種傳輸分析考慮遲滯(Retardation)效應時係採用一維模型，建立一維多通道模型可取代具有三維粒子追蹤功能的溶質傳輸模型。

西班牙 ENRESA Mariano Navarro 先生介紹西班牙之核燃料循環，其分為封閉循環與開放循環。封閉循環部分，會將用過核子燃料送至再處理廠進行再處理，將鈾與鈾分離並進行回收，產生玻璃固化體的高放射性廢棄物；開放循環部分，先將用過核子燃料貯存於燃料池中，再移至個別暫時貯存設施(Individualized temporary storage facility)。不論是高放射性廢棄物或用過核子燃料，皆會先貯存於集中式中期貯存設施(Centralised Interim Storage Facility, CTS)，最後再送至最終處置場。西

班牙於 2011 年 12 月選定集中式中期貯存設施場址，位於西班牙中部地區 Villar de Canas，預計 2024 年開始運轉，而高放射性廢棄物與用過核子燃料最終處置場址規劃於 2035 年完成選定，處置場規劃於 2068 年完成建造，目前已開始進行相關選址作業，選定花崗岩與泥岩進行前期處置概念設計與參考概念的安全評估。

美國 Sandia 國家實驗室 Paul Mariner 先生說明新墨西哥州廢棄物隔離先導型處置設施(Waste Isolations Pilot Plant, WIPP)與雅卡山(Yucca Mountain)處置計畫之近況。廢棄物隔離先導型處置設施於 2014 年 2 月發生二起獨立事件，即暫時停止運轉，2 月 5 日發生地底礦車之火災事件，而 2 月 14 日因廢棄物罐內用於穩定液體與硝酸鹽類的有機物質發生放熱反應，使得廢棄物罐容器破裂而引發輻射外洩事件。歷經 3 年封閉後，於 2017 年 4 月 10 日重新啟動運轉，接收首批超鈾廢棄物，預計未來 1 年將執行 128 次運送作業。美國總統府預算管理局公佈「預算藍圖(Budget Blueprint)」，其中關於美國能源部(Department of Energy, DOE)預算部分，2018 年將提供 1.2 億美元的預算重新啟動雅卡山處置場的執照審查作業，維持雅卡山處置場的地位，作為處置用過核子燃料和高放射性廢棄物最終處置的首選，並啟動穩健可靠的中期貯存計畫，預算部分目前僅在眾議院能源與商業委員會通過，送入眾議院院會，但尚未通過，未來尚須送參議院審查，最後才是總統簽署。

法國 ANDRA Frederic Plas 先生簡報法國高放處置計畫現況，法國將建造一座放射性廢棄物地質處置場(Cigeo)，興建成本約為 270 億美元，由各生產放射性廢棄物的業主共同負擔，再交由法國放射性廢棄物專責機構 ANDRA 負責管理與規劃。法國政府於 1996 年同意法國 ANDRA 於巴黎盆地的東方，興建泥岩層之地下研究實驗室，法國 ANDRA 於 1999 年 8 月建立 Meuse/Haute-Marne 地下研究實驗室，進

行相關之核種傳輸試驗，驗證泥岩適合進行深層地質處置。而法國高放射性廢棄物最終處置計畫稱為 Cigeo 計畫，Cigeo 深層地質處置場亦位於法國東部之 Meuse/Haute Marne 地區，Cigeo 深層地質處置場位於地下 500 公尺(如圖 7)，將利用其特有的泥岩(Clay)構造形成天然障壁，防止放射性核種外釋，經過法國長達 20 年研究，泥岩具有優秀的核種遲滯能力，目前法國 ANDRA 正在進行相關技術驗證工作。法國 ANDRA 預計 2019 年進行建照執照之申請，規劃於 2025 年開始運轉。

Frederic Plas 先生簡報法國 ANDRA 現階段對核種研發的現況，整理如下：

1. 對於放射性核種研發現況，目前分為三個部分：
 - (1) 在處置區域的放射性核種遷移，包含泥岩介質(處置母岩)、混凝土材料與生物圈。
 - (2) 在複雜化學系統的放射性核種行為，包含泥岩、泥岩表層與混凝土材料。
 - (3) 發展「ThermoChimie」資料庫，包含泥岩介質(處置母岩)、混凝土材料。
2. 關於處置場系統的放射性核種遷移方面，目前進行三個主要工作：
 - (1) 對於氧化還原敏感之核種(如 U、Se、Tc 等)，於泥岩與混凝土中吸附與擴散行為研究。
 - (2) ^{14}C 於泥岩與混凝土的遷移行為研究，包含有機與無機的 ^{14}C ，其中有機的 ^{14}C 為主要部分。
 - (3) 進行生物圈動態系統的相關研究，其中遷移至生物圈的放射性核種包含 ^3H 、 ^{14}C 、 ^{36}Cl 、 ^{79}Se 及 ^{99}Tc ，另外亦針對有機與無機的物種、在不同生物圈系統的停留時間、核種循

環整合至力學模式、土壤演化與氣候變遷的影響等研究。

3. 未來 5 至 10 年的研發目標(至生物圈)

(1) 放射性核種由廢棄物遷移至生物圈相關議題

- a. 增進氧化還原敏感核種(如 Se、U、Tc)的知識。
- b. 發展放射性核種於動力學控制現象之非平衡方法。
- c. 改善放射性廢棄物中核種之物種型態與遷移模式。
- d. 增進放射性核種行為於淺層環境與地質圈介面系統的知識，其目的為量化合併簡易的模式，以作為安全評估之用。

(2) 放射性核種於生物圈的遷移議題

- a. 發展受時間控制的力學模式。
- b. 模擬放射性核種(如 ^3H 、 ^{14}C 、 ^{36}Cl 、 ^{129}I 、 ^{79}Se)遷移行為，以評估未來放射性廢棄物最終處置系統對非人類/生物圈之影響。

最後，Migration 2017 研討會主席 Jordi Bruno 先生提到，儘管各國法規因國而異，安全處置放射性廢棄物與化學毒性廢棄物亦存在類似的安全與研究問題，放射性核種遷移研究的結果與概念如何應用於一般環境污染的主題，是值得思考的議題，請與會者亦能投入心力進行相關研究。



圖 3：Migration 2017 研討會主席西班牙 Jordi Bruno 致詞



圖 4：Migration 2017 研討會會議現場



圖 5：Keikuse Ishida 先生簡報說明日本高放射性廢棄物最終處置計畫現況

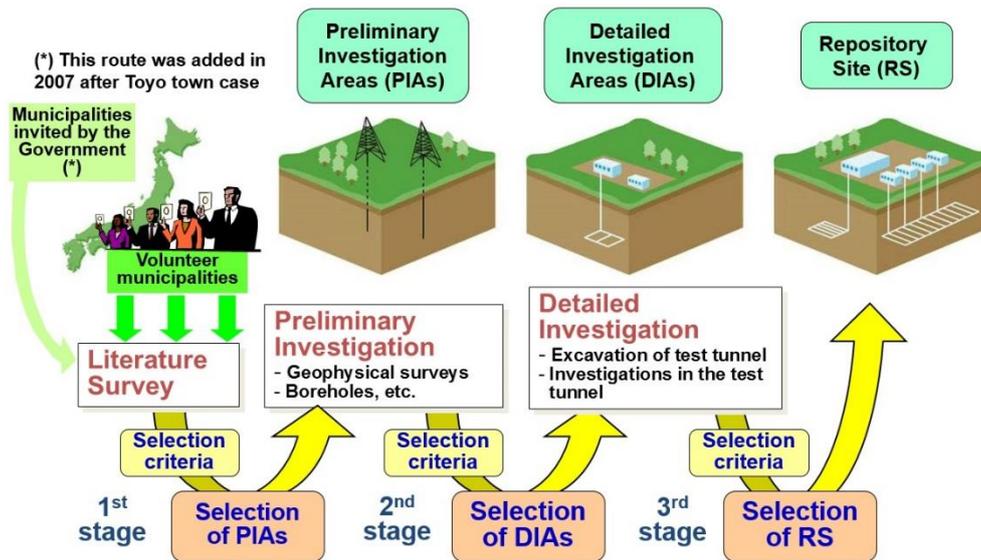


圖 6：日本場址篩選之 3 個階段

Bloc diagramme 3D Cigéo

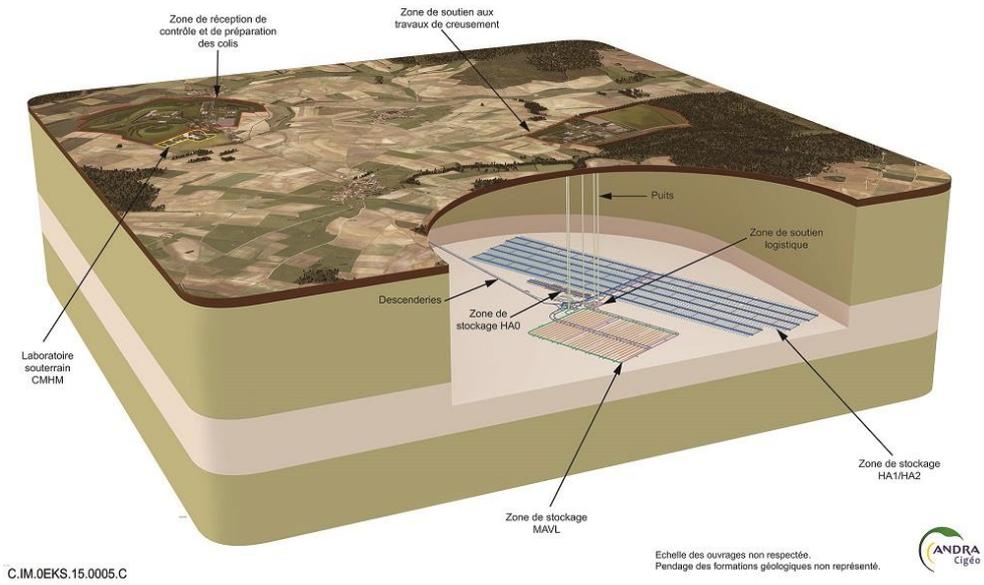


圖 7：法國 Cigéo 深層地質處置場示意圖

三、技術議題

目前世界核能先進國家採用多重障壁概念將放射性核種圍阻與遲滯，並配合緩衝材料具有高吸附力、低滲透性的特性遲滯放射性核種，但放射性核種仍可藉由地下水的傳輸而外釋至生物圈。處置母岩的評估與選擇為最終處置計畫最重要的一環，除了需考慮岩層之地質條件、長期穩定性、地下水特性、地震特性等條件外，其地球化學特性更是決定是否適合進行深層地質處置的關鍵。合適的地球化學環境，係指其具備高的放射性核種遲滯能力與低的核種溶解度等特性，而地下水是放射性核種遷移至生活圈的重要媒介，地下水的流動特性是影響放射性核種遷移速率與分布的主要因子，具有緩慢地下水流的深層地質條件，具有較低的核種遷移速度，為處置場功能優劣與否的關鍵因子。地下水的化學特性除了影響核種的溶解度外，亦會影響地下水的酸鹼度及氧化還原條件，其對工程障壁(如緩衝材料與回填材料)及天然障壁(處置母岩)的障壁功能亦具有重要的影響性，因此須進行核種遷移參數評估研究，包含溶解度、分配係數、擴散係數等。

蒙脫石(montmorillonite)在地下水於低離子濃度時容易形成膠體，因膠體會吸附放射性核種，可作為載體(Carrier)，具有加速核種傳輸的潛能，尤其對於溶解度較低的放射性核種，吸附於膠體表面而隨地下水傳輸，成為另一項傳輸機制。而膠體的釋出會伴隨著蒙脫石的流失，蒙脫石的流失量為維持處置場安全功能的重要指標，因此瞭解膠體對核種吸脫附及遷移行為的影響，為安全評估之重要工作，Migration 2017 研討會中亦有多篇論文發表膠體相關研究，其中瑞典 Äspö 硬岩實驗室已進行膠體形成特性之相關實驗與研究，並分析膠體之背景濃度，顯示膠體形成特性為處置場安全之關鍵議題。

北京大學劉春立教授介紹中國大陸高放最終處置計畫現況與發展

沿革(如圖 8)，中國大陸自 1985 年瞭解高放射性廢棄物最終處置之重要性後，自 1986 年起於北京地質研究院成立專案小組，由北京地質研究院主導，並搭配學校與其他研究機構進行場址篩選及地質調查研究。於 1989 年提出 6 個研究區域(包含西北地區、內蒙古地區、新疆地區、西南地區、東部地區與南部地區)進行高放射性廢棄物處置場址篩選工作，1990 年即針對位於中國大陸甘肅省之北山場址進行調查，採用美國雅卡山模式，一個場址政策(One Site Policy)進行，目前北山場址仍被列為最具有潛力之場址，已經花費幾百萬人民幣於北山場址進行場址調查與評估工作。

核種遷移研究由中國原子能科學研究院(China Institute of Atomic Energy, CIAE)、中國輻射防護研究院(China Institute for Radiation Protection, CIRP)、北京大學及清華大學共同負責，但當時因為經費問題，相關核種遷移研究執行得並不順利。直到 21 世紀初期，中國大陸政府對核能政策的轉變，開始積極發展核能產業，高放射性廢棄物最終處置議題逐漸被重視，在 2005 年由中國國家原子能機構(China Atomic Energy Agency, CAEA)成立高放射性廢棄物最終處置專責團體，由 25 位專家組成，該團體主要負責提供高放最終處置技術諮詢、規劃長期研究方向、審查相關研究項目等。在 2006 年 2 月，高放射性廢棄物最終處置專責團體發佈有關高放射性廢棄物地質處置研究方向及相關政策之文件，列出主要研究架構，並在 2006 年 10 月舉辦專家會議，提出諸多研究計畫項目，包含放射性核種遷移、安全評估、工程設計及場址調查等。關於地下實驗室方面，中國政府預計在北山地區興建地下實驗室，預計 2020 年將會完成建造，目前已有許多大學研究機構正進行相關的研究，如放射性核種的擴散及吸附實驗、核種於現地礦物吸附行為之分子動力模擬研究等項目。處置場址方面，預計 2050 年完成建造。

美國 Sandia 國家實驗室 Jennifer Frederick 女士介紹 PFLOTRAN 程式，並進行基本功能介紹，PFLOTRAN 為開放程式碼，由美國 Sandia 國家實驗室與西班牙顧問公司 AMPHOS 21 共同開發，使用 Fortran 進行編寫，其為最先進的地下水傳輸反應的程式碼，採用平行運算方式。PFLOTRAN 可進行非線性偏微分方程式的運算，包含於多孔介質材料中之流場與傳輸，使用者於使用過程中發現程式缺陷，可於開發者建立的平臺直接修改程式碼，並可與其他使用者進行討論。Jennifer Frederick 女士介紹 PFLOTRAN 之功能，其具備源項評估、工程障壁系統演化模組、流場與傳輸模組及生物圈模組(如圖 9)，最後展示應用 PFLOTRAN 於廢棄物罐演化過程計算所需考慮的部分，須先針對廢棄物罐型態進行評估，包含核種盤存量、廢棄物罐內部間隙體積、放射性核種溶解度等，接著考量外部條件評估廢棄物罐外包裝剩餘厚度，當廢棄物罐外包裝剩餘厚度為 0%時，代表廢棄物罐外包裝已無圍阻功能。

瑞典 SKB Kastriot Spahiu 博士進行用過核子燃料廢棄物型態近期研究發展之介紹(如圖 10)，為了評估燃料基質中大部分核種的釋出速率，須研究用過核子燃料之氧化溶解行為。在用過核子燃料或具有 α 射源的 UO_2 試驗中，觀察到溶解於地下水的氫氣，會對用過核子燃料溶解速率產生較大的影響，近年已進行諸多用過核子燃料基質的研究，當地下水中氫氣量大於一定程度時，燃料基質之溶解速率為零。另外，由模擬核子燃料(SIMFUEL)之實驗結果發現，在燃料表面的過氧化氫分解後(約 99.8%)會產生羥基自由基(hydroxyl radicals)，而羥基自由基會再與過氧化氫反應後產生水與氧氣，或與溶解的氘氣(D_2)反應得到 HDO，只有少部分的過氧化氫會造成 SIMFUEL 氧化溶解，並在溶液中產生氧化鈾(VI)，而這些過氧化氫僅占全部過氧化氫消耗量的 0.02%。

最後，Kastriot Spahiu 博士介紹 MOX 燃料相關研究，在缺氧條件

及含有 1MPa 氬氣的兩種不同研究環境，以無放射性 MOX 燃料(Pu 含量約 24%)為對象，研究 MOX 燃料在碳酸氫鹽溶液中的溶解情形，結果顯示，在缺氧條件下觀察到 U 及 Pu 釋出率很快，而在環境中的氣體為 1MPa 氬氣的條件下，結果現顯示 U 和 Pu 的濃度很低且幾乎維持固定，經過 29 天燃料完全沒有氧化溶解的現象發生，在實驗的 1 個月期間內，U 及 Pu 的濃度都保持比過氧化氫低 100 倍左右的程度。簡報結束後，台電公司簡國元主管與瑞典 Kastriot Spahiu 博士進行簡報內容討論(如圖 11)。

瑞典皇家學院(KTH Royal Institute of Technology) Vladimir Cvetovic 教授簡報於裂隙岩體中的滯留(Retention)作用，處置母岩為最終處置的主要障壁機制，可使溶解於地下水之污染物產生滯留作用。在 1977 年，科學(Science)期刊出版兩份報告，題目分別為「鈾(Pu)和鎂(Am)於岩石的滯留」與「放射性廢棄物隔離：地質學家可以保證隔離？」，前述兩份報告建立高放射廢棄物地質處置的概念和主題，作為後續研究方向。過去 40 年，許多國家致力於研究放射性核種與示蹤劑滯留於結晶岩或其他岩石的情況，例如，瑞典和芬蘭研究放射性核種於花崗岩中的傳輸和滯留現象，瑞典 Äspö 地下實驗室進行示蹤劑滯留實驗結果(Tracer Retention Understanding Experiments, TRUE)與長期擴散測試(Long-Term Diffusion, LTD)。

Vladimir Cvetovic 教授總結目前有關結晶岩的知識，著重於可用的滯留實驗證據，並根據物理和化學作用過程，解釋處置場的安全功能。具體來說，介於裂隙中動態水相與母岩基質中靜態水相間，其溶質質量傳輸受流體力學控制，不僅與滯留作用有關，而且與反應傳輸有關；流體力學和質量傳輸間的連結，是預測理論模式中的不確定因素，需要在實際應用中加以解決。最後，Vladimir Cvetovic 教授提出，滯留是高放

射性廢棄物最終處置場功能和安全的關鍵機制，對於任何放射性核種，在傳輸與轉換作用過程中，於地質構造中滯留存在或擴散傳輸，皆為延遲放射性核種釋出的關鍵機制。

對於未來之挑戰，Vladimir Cvetovic 教授歸納三點結論：

1. 於現地尺寸如何有效地特性化滯留作用的流體力學？
2. 母岩基質與在裂隙中的停滯水如何透過滯留作用相互結合？
3. 熱-水-力-化(THMC)耦合作用的尺寸與特性化影響？

芬蘭 Eveliina Murri 博士採用芬蘭 OLKILUOTO 地下實驗室與瑞士 GRIMSEL 地下實驗室之花崗岩進行 ^{133}Ba 擴散實驗(如圖 12)，所獲得的擴散係數可用於後續安全評估中。瑞士 GRIMSEL 地下實驗室位於地下深度 450 公尺，其地下水成分為中性，採用長期擴散方法進行擴散實驗；芬蘭 OLKILUOTO 地下實驗室位於地下深度 400 公尺，其地下水成分為鹼性，採用穿透擴散方法(through-diffusion techniques)進行擴散實驗。兩個地下實驗室所使用之核種皆為 ^3H 、 $^{131}\text{I}^-$ 、 $^{22}\text{Na}^+$ 、 $^{134}\text{Cs}^+$ 、 $^{133}\text{Ba}^{2+}$ 、 $^{36}\text{Cl}^-$ ，而瑞士 GRIMSEL 地下實驗室則多一個 ^{79}Se ，目前瑞士 GRIMSEL 地下實驗室已停止相關研究，芬蘭 OLKILUOTO 地下實驗室則持續進行中。另外，Eveliina Murri 博士使用商用軟體 Comsol 與 PhreeqC 進行模擬，所獲得的結果與現地實驗資料進行比較，其趨勢一致。最後，Eveliina Murri 博士針對 ^{133}Ba 之結果進行討論， ^{133}Ba 可作為 ^{226}Ra 的類比核種，而 ^{226}Ra 為芬蘭 POSIVA 與瑞典 SKB 於遠場劑量評估的重要核種， ^{133}Ba 於現地擴散實驗所獲得的結果較模擬結果更容易被遲滯， ^{133}Ba 在不同的 pH 值與氧化還原環境下具有相對高的溶解特性。

瑞典 SSM Bo Strömberg 先生介紹瑞典用過核子燃料最終處置場建造執照申請過程中，瑞典 SSM 審查瑞典 SKB 放射性核種的吸附與溶

解度等核種遷移參數之研究(如圖 13)。瑞典 SKB 採用 KBS-3 處置概念進行處置場設計，其主要安全功能為圍阻，可維持放射性核種留存於廢棄物罐中；次要安全功能為遲滯，一旦圍阻之安全功能失效後，可延緩放射性核種從處置設施釋出與傳輸，Bo Strömberg 先生簡報中所提到之遲滯安全功能如圖 14。瑞典 SKB 預估的廢棄物罐失效模式為剪力失效情節與腐蝕失效情節，兩者皆會導致放射性核種向外傳輸，因此緩衝材料與地質圈之遲滯功能需要被證明，以限制放射性核種外釋，故瑞典 SSM 針對瑞典 SKB 之核種傳輸結果與遲滯效應進行審查。

審查結果指出，瑞典 SKB 所使用之處置母岩吸附係數，主要透過蒐集文獻資料(如 Se、Pa、Pu、Pd、Pb、Nb、Sn、Zr、U、Np)，並利用透過化學性質相同的類比物質(Tc (Pu(IV))、Ag(Cs)、Cd(Ni)、Eu(Am)、Ac(Am)、Ho(Am))獲得，而於 Forsmark 特定場址進行吸附實驗之核種為 Cs、Sr、Ra、Ni、Am、Th、Np、U，其他如 Mo、Cl、C、³H 為不被吸附之核種。另外針對不確定之參數進行保守假設是無法避免的，但是過度使用會限制安全評估的準確性，瑞典 SSM 認為瑞典 SKB 所使用的吸附係數有缺陷，但仍然可以接受。近年來瑞典 SKB 在吸附實驗方法上並沒有太大的改變，但是在評估方面，使用校正因子及有系統性地評估不確定性因素，使瑞典 SKB 的評估程序變得更加嚴謹。瑞典 SKB 利用 Forsmark 現地岩石樣品進行實驗，瑞典 SSM 是抱持正向的態度，並認為是值得鼓勵的，但是在實驗條件(如氧化還原條件)的控制方面仍需加強。另外，瑞典 SSM 認為瑞典 SKB 使用的處置母岩吸附參數是較為保守的數據，因為 SKB 利用極度保守的方法來修正破裂母岩與完整母岩表面積之差異，使破裂母岩所獲得的數據能應用於完整母岩當中。

除了吸附作用之外，放射性核種於母岩的基質擴散作用亦是遲滯功能的另一項關鍵作用，基質擴散作用可使無法被處置母岩吸附之核種，

造成一定程度的遲滯作用，基質擴散係數及滲透深度等關鍵參數可透過擴散實驗及量測電阻率而獲得。瑞典 SSM 認為瑞典 SKB 針對基質擴散作用相關研究較為保守，以及認為需要進行電阻率量測以提高數據的可信度，另外建議利用更多的現地資料來精進模擬評估的結果。

關於放射性核種吸附於緩衝材料的評估方面，瑞典 SSM 認為核種於緩衝材料的吸附作用較處置母岩的吸附作用容易評估分析，因為膨潤土是均勻材料，其比表面積較處置母岩容易計算。瑞典 SSM 雖然同意在此議題上不需要再執行進一步之研究工作，但是根據瑞典 SKB 敏感度分析顯示，當廢棄物罐早期失效情節發生時，緩衝材料為遲滯放射性核種外釋的主要安全功能，因此仍須進行相關的評估。

關於放射性核種的溶解度限值評估方面，瑞典 SKB 多年來致力於建立代表性放射性核種的溶解度限值及相關不確定性評估，但溶解度限值對安全評估的作用有限，主要原因是當廢棄物罐失效時，地下水以高流速通過處置母岩的情況下，實際上母岩附近的核種溶解度不可能達到溶解度限值。因此，瑞典 SSM 認為溶解度限值評估與緩衝材料吸附作用評估相同，皆為廢棄物罐發生不預期之失效後才會顯示其重要性。

Migration 2017 研討會分為簡報與海報展示，其中國內研究機構核能研究所(簡稱核研所)亦派員參加海報展示，共進行 4 篇海報展示，題目與摘要敘述如下：

1. Comparison of diffusion coefficients measured in different compacted bentonite for TcO_4^- and HTO

因膨潤土具有限制地下水流之功能，故被考慮作為最終處置場之緩衝/回填材料，而膨潤土接觸地下水後之膨脹特性，可降低放射性核種的傳輸，因此須針對膨潤土之相關特性進行研究。此篇論文進行 TcO_4^- 及 HTO 於不同壓實膨潤土之擴散

行為比較，並獲得有效擴散係數(effective diffusion coefficients, D_e)，使用穿透擴散方法進行實驗，而膨潤土為 MX-80、SPV200、高廟子(GMZ)等材料。在前述緩衝材料中，HTO 及 ^{99}Tc 可視為不可吸附之核種，所獲得的有效擴散係數可提供未來用過核子燃料最終處置場安全評估之用。

2. Determination of Cs diffusion into Granite Matrix Using Rutherford backscattering spectrometry

放射性核種於花崗岩的擴散行為特徵，對於地質障壁的功能評估是必要的，本研究使用拉塞福背向散射分析儀(Rutherford backscattering spectrometry, RBS)進行量測，其適合分析於基質中的重元素(heavy element)濃度梯度，並可量測微米等級的擴散係數。本研究透過軟體分析 Cs 能譜，以獲得 Cs 於花崗岩之擴散係數。

3. Characterization study of U and Cs adsorption onto MX-80 bentonite by XPS and XANES Technique

此篇論文研究吸附於材料上的核種價態，以進一步研究核種傳輸過程的反應機理。XPS(X-ray photoelectron spectroscopy)及 XANES(X-ray absorption near edge structure)皆可以分析、區分吸附於地質材料的 Cs 與 U 價態，利用 XPS 完成的 Cs 吸附結果顯示， Cs^+ 為 MX-80 上的主要離子吸附型態，MX-80 表面附近還有凡德瓦力(van der Waals' force)的相互作用。利用 XANES 完成的 U 吸附結果顯示，MX-80 上的 U 吸附價態幾乎相同，但略大於 U^{6+} ，代表 U 離子與 MX-80 表面間的 U-O 鍵較短。前述結果顯示，核種/礦物反應具有非常重要的基本特徵，對於放射性核種遷移參數用於評估最終處置安全

性是非常有參考價值。

4. A numerical analysis for through-diffusion of HTO and Cs in compacted bentonite with different column lengths

此篇論文進行 Cs 藉由穿透擴散方法於不同厚度 MX-80 膨潤土的擴散行為研究。Cs 的遲滯因子(Retardation factor)將在一維擴散假設中估算，而較高的長度和直徑比中出現較小的遲滯因子，此差異可透過土壤/液體比率的不同進行解釋，並可作為影響 K_d 值的參數。考慮到土壤/液體比率對 K_d 值的依賴性，實驗中應用高的土壤/液體比率可提供比真實地質環境中更為實際的 K_d 值。

最後，核研所與台電公司與會人員於海報前合影如圖 15，而於海報展示過程中，諸多國外專家與核研所與會人員討論相關技術，核研所研究人員與瑞典 SKB 專家進行討論如圖 16。



圖 8：北京大學劉春立教授介紹中國大陸高放最終處置計畫現況與發展沿革

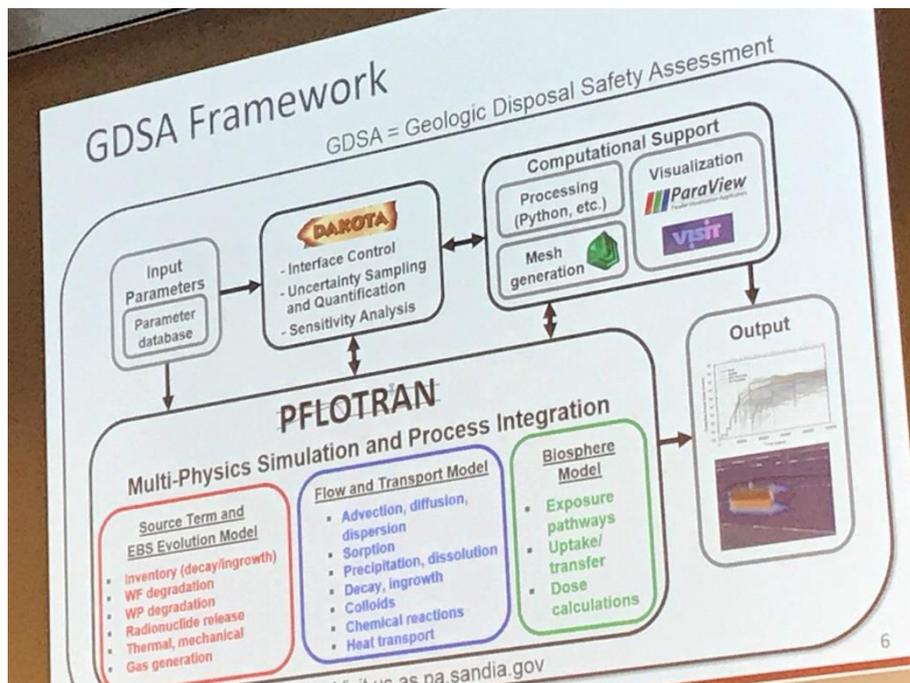


圖 9：PFLOTRAN 功能介紹

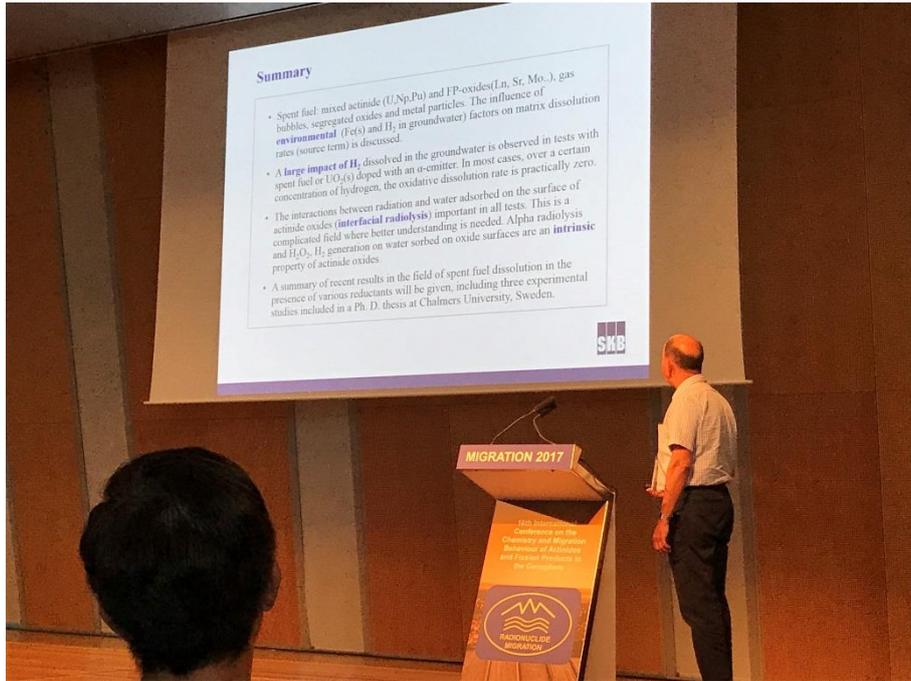


圖 10：瑞典 Kastriot Spahiu 博士進行用過核子燃料廢棄物型態近期發展之介紹



圖 11：台電公司簡國元主管與瑞典 Kastriot Spahiu 博士進行討論

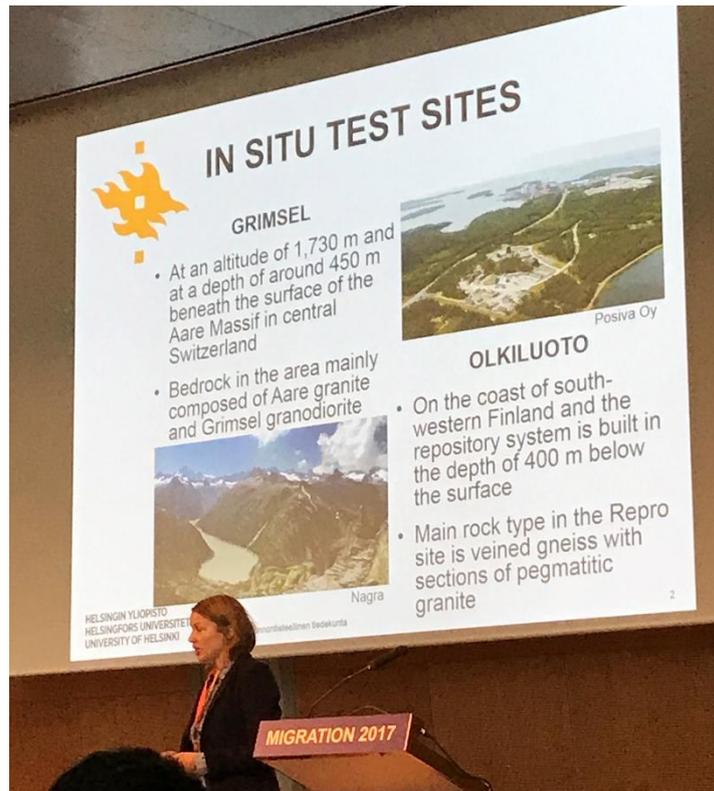


圖 12：芬蘭 Eveliina Murri 博士介紹於芬蘭 OLKILUOTO 地下實驗室與瑞士 GRIMSEL 地下實驗室之現地試驗



圖 13：瑞典 SSM Bo Strömberg 先生介紹瑞典用過核子燃料最終處置場建造執照申請過程

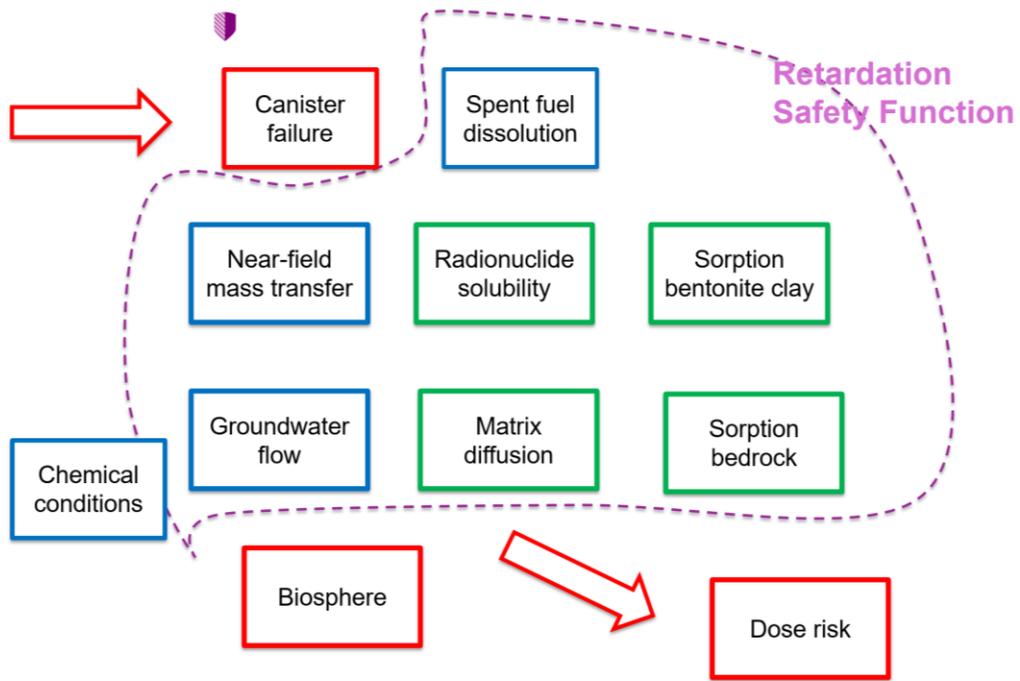


圖 14：放射性核種遲滯安全功能



圖 15：核研所與台電公司參加 Migration 2017 研討會人員於海報前合影



圖 16：核研所研究人員與瑞典 SKB 專家進行海報內容討論



圖 17：核研所與台電公司參加 Migration 2017 研討會人員合影

肆、心得

- 一、Migration 研討會每兩年舉辦一次，第一次於 1987 年召開，而 Migration 2017 研討會為第 16 次，Migration 研討會已召開 30 週年。經過長期的科學交流與跨國的合作計畫，大量的資源被用於放射性核種遷移相關研究，並已產出大量的研究論文。瑞典專家 Kastriot Spahiu 博士表示，第一屆即參加 Migration 研討會，非常清楚核種傳輸研究之發展歷程與方向，諸多研究皆為長期發展，需要長期進行研究並多與各國專家交流，而 Migration 研討會是一個非常棒的平台，可以聚焦研究方向並進行意見交流。台電公司派員參加 Migration 2017 研討會，聽取各國核種傳輸最新研究成果，並與各國核種傳輸專家進行交流討論，可增進對於國際上核種遷移關鍵議題研究趨勢與技術發展之瞭解，作為精進高放處置計畫相關研發工作資源分配與運用效率的參考依據。
- 二、Migration 2017 研討會所討論之主題共有 21 個，專業領域相當廣泛，如地球化學、水文地質、放射性核種、放射化學、安全評估等，於 Migration 2017 研討會進行簡報之內容非常專業，皆投入長時間研究，累積豐富經驗，諸多核種傳輸研究項目可提供國內研究團隊參考，建立國內相關技術。Migration 2017 研討會中，諸多擴散與吸附實驗使用非常簡單的設計概念進行，但所獲得的參數相當關鍵，此種設計概念與經驗可回饋於國內研究團隊，所建立的實驗設備不需複雜，但須掌握其關鍵的因子。
- 三、世界各核能先進國家皆會透過參加國際高放處置合作計畫，共同出資執行特殊研究項目，取得具有代表性之研究成果，並與社群成員互惠分享成果。各國專家進行放射性核種傳輸研究亦會利用現地實驗數據，與模擬結果進行比對，確認模擬程式的可靠度，而在模擬程式發展過程中所進行的驗證與確認(Verification & Validation, V & V)非常嚴謹，若與現地實驗數據不同，將透過修訂所使用的模式或參數，盡可能獲得與現地數

據接近的模擬結果，以獲得公信力。

四、Migration 2017 研討會觀察到許多國家均有學校單位參加並發表研究成果，台灣亦應鼓勵放射性廢棄物貯存或處置相關研究之單位，踴躍參加國際研討會並發表研究成果，不僅可建立國際專業社群網絡，促進技術交流，更可培養專業人才，以及可累積研究成果，作為未來執行處置作業之實際應用。

伍、建議

- 一、Migration 研討會每兩年舉行一次，提供國際專家交流平台，討論議題涵蓋用過核子燃料/高放射性廢棄物最終處置系統的核種遷移研究，有助於取得最新國際資訊，並可瞭解目前國際上核種遷移發展現況與未來趨勢，Migration 2019 研討會將於日本京都舉辦，建議持續派員出席 Migration 研討會，有助於國內用過核子燃料最終處置計畫之推動。
- 二、核種遷移研究領域廣泛，不僅針對放射性核種進行研究，更需進行地球化學與水文地質等研究，而臺灣研究團隊於 Migration 2017 研討會僅展示核種相關研究，建議臺灣研究團隊可擴大投稿範圍，如參考案例、水文地質概念模型與安全評估等研究成果，展現臺灣研究團隊現有技術並與國際專家進行交流。
- 三、參加 Migration 研討會的成員非常多，來自 19 個國家、約 250 人，包含各國放射性廢棄物處置專責機構與管制機關、世界知名大學等，而世界知名大學部分，接受專責機構的支持，進行諸多特殊性的研究，不僅可進行研究發展，更可培養專業人才，與會進行簡報的演講者亦包含為數眾多的博士生，建議國內持續投入經費予學校進行研究發展，並鼓勵研究成果與國外專家進行交流。
- 四、目前世界各國學術單位或專責機構執行核種遷移研究，皆會至現地進行相關試驗，如瑞典 Äspö 地下實驗室或日本 Mizunami 地下實驗室，所獲得之數據可作為安全評估之參數。建議未來國內可積極參加相關計畫，派員至各國進行核種遷移現地試驗，建立國內核種遷移實驗技術，並將國外先進技術引入國內。