

出國報告（出國類別：其他）

赴日本進行二氧化碳封存與 放射性廢棄物處置技術交流與參訪

服務機關：行政院原子能委員會核能研究所

姓名職稱：馬殷邦 研究員

施清芳 副研究員

張福麟 副研究員

派赴國家：日本

出國期間：96年8月23日至96年9月1日

報告日期：96年10月15日

摘 要

本次赴日本參訪 RITE、CRIEPI、AIST、JAEA 與 JNFL 等五個機構，主要目的在瞭解日本二氧化碳海洋封存與放射性廢棄物最終處置二大領域之現況與發展，同時進行協商相關技術交流之可行性。二氧化碳封存方面參訪了 RITE、CRIEPI、AIST 等三個機構，分別進行二氧化碳海洋環境的評估與模擬及深海封存方法、天然類比與海中探測儀器、深海化學特性(如 pH)等議題的研討。放射性廢棄物最終處置方面則參訪了 JAEA 東濃地球科學研究中心，針對場址斷層分析能力在分析核種外釋的概念模型所扮演重要的角色等主題討論，及赴 JNFL 六個所村低放射性廢棄物處置場參訪與研討營運管理與監管作業之議題，最後與 CRIEPI 討論簽訂高、低放射性廢棄物處置及中期貯存等基礎研發之技術合作可行性研商。本報告主要闡述上述議題的參訪心得，並建議將來可進行技術合作的項目。

關鍵字：二氧化碳封存、放射性廢棄物、最終處置

目 次

摘 要.....	i
一、目 的.....	1
二、過 程.....	3
三、心 得.....	13
四、建 議 事 項.....	34
五、附 錄(參訪照片).....	36
六、附 件(相關簡報資料).....	45

一、目的

由於全球暖化的衝擊，二氧化碳減量與排放已成為當今全人類所極需面對的問題。我國因應此趨勢，除持續提高能源使用效率與啓動使用低碳與再生能源外，推動先進二氧化碳捕捉與封存技術是已不可或缺的選項之一。台灣四面環海，具有適量面積之淺、中、深度海域，除西部大陸棚地層下的鹽水層可供作為二氧化碳地質封存之潛在場址外，東部近岸高陡降的廣大深海盆地亦是可供考慮的選擇。從國際趨勢來看，依據「京都議定書」全球溫室氣體的減量機制已正式展開；我國二氧化碳排放的年成長率已超越經濟成長率；基於國內目前能源政策及天然氣價格不穩的緣故，未來我國基載電力勢必仍以燃煤為主，因此必須更積極面對二氧化碳排放減量的議題，而海洋封存(ocean sequestration)是較具長期優勢的選項，對我國未來經濟產業發展極為關鍵，值得投入研發。

國內放射性廢棄物最終處置即將面臨到關鍵里程碑時期，在用過核料最終處置方面，台電公司將於民國 98 年提出第一本國家級之報告(我國用過核子燃料最終處置初步技術可行性報告)，說明國內是否有進行用過核子燃料最終處置的可行性，以及說明技術上是否可行，原子能委員會及其所屬機構(包含核能研究所)將會對此一報告進行審查。在低放射性廢棄物最終處置方面，依國內低放射性處置設施設置條例時程推估，國內將於民國 100 年選定場址，民國 105 年完成建場與試運轉。核能研究所(以下簡稱核研所)亦將協助主管機關，進行低放射性廢棄物最終處置場的安全分析報告進行審查。

上述二氧化碳海洋封存與放射性廢棄物最終處置二項主題研究均與地球科學有密切的關聯，日本與我國在海洋與地質環境上較為類似，而

且日本是國際上積極推動二氧化碳進行地質與海洋封存的國家之一，亦是國際政府間氣候變遷專門委員會(IPCC)推動二氧化碳封存研發的主要國家；同時在放射性廢棄物最終處置研究方面，已有低放射性廢棄物最終處置場在營運中，而且高放射性廢棄物最終處置亦先後完成二套可行性評估報告(H3 與 H12)，這二方面之成果應有國內可參考之處。爰此，核研所遂派員前往日本之二氧化碳封存與放射性廢棄物最終處置相關研究機構進行參訪與技術交流研討，以建立國際間的技術合作機會，並進行研發成果之討論與交流，提高核研所研究方向規劃之可行性與成果的可信度。

二、過 程

本次公差自 96 年 8 月 23 日至 96 年 9 月 1 日止，共計十日赴日本相關機構參訪與研討。公差行程概要列表 1 之簡表，詳細過程詳述於後頁。

表 1 公差行程簡表

日期	說明
96.8.23	起程赴日本京都。
96.8.24	赴財團法人地球環境產業技術研究(RITE)之二氧化碳封存研究小組，進行二氧化碳海洋封存方法與二氧化碳深海特性之技術交流。
96.8.25	同行人員進行二氧化碳海洋封存相關議題之內部討論會議。
96.8.26	行程轉往瑞浪東濃研究中心。
96.8.27	參觀獨立行政法人日本原子力研究開發機構(JAEA)之東濃地球科學研究中心所屬瑞浪超深地層研究所地下研究坑道觀摩，並進行水文地質特性試驗結果之討論。
96.8.28	行程赴青森縣六個所村。
96.8.29	參觀日本原燃株式會社(JNFL)所經營之六個所村低放射性廢棄物最終處置場，及進行營運過程討論。
96.8.30	前往獨立行政法人產業技術綜合研究所(AIST)之環境管理技術研究部，進行二氧化碳海洋封存的深海化學特性技術交流。
96.8.31	前往電力中央研究所(CRIEPI)之核燃料循環後端研究中心、環境科學研究所，分別進行核廢棄物最終處置相關問題與技術合作洽商，及二氧化碳的天然類比與海中探測儀器等研討。
96.9.1	結束任務返程

8 月 23 日

本日為起程，由桃園機場搭機前往日本關西國際機場，再搭車前往京都。同行人員就如何與 RITE 交流進行討論，並指派施清芳代表參訪人員報告核研所推動二氧化碳研究計畫之現況。

8 月 24 日

由馬殷邦主任率領施清芳博士與張福麟先生赴財團法人地球環境產業技術研究(Research Institute of Innovative Technology for the Earth, RITE)之二氧化碳封存研究小組，進行二氧化碳海洋封存方法與二氧化碳深海特性之技術交流。RITE 位於日本京都府木津川市，為日本經濟產業省所屬之非營利組織，創立於 1990 年。其目的在於發展全球經濟的同時，達成保護地球環境之責任。而其重大的使命在成為減緩全球暖化之頂尖研究中心，也因此正積極的和世界各國研究組織合作，一同發展創新的技術。整個研究組織的人數約在 180 人左右，基本資產為 13 億日幣。在提升為全球性研究機構之目標下，RITE 的組織共分為 5 個減緩全球暖化研究團隊，包括：系統分析、化學研究、二氧化碳封存研究、植物研究與微生物學研究團隊。

本次參訪 RITE 的單位為二氧化碳封存研究小組，該小組由研究主席 Dr. Shigeo MURAI (村井重夫)率領 Dr. Takashi OHSUMI (大隅多加志)與 Dr. Michimasa MAGI(間木道政)二位研究員，針對二氧化碳封存之議題與參訪人員進行技術研討，並討論核研所與 RITE 二機構合作的可行性。會議中村井重夫博士介紹 RITE 之現況與所屬小組的研究概況(提供書面簡報資料如附件一)；大隅多加志博士介紹了日本在二氧化碳封存

的研究發展情形(提供書面簡報資料如附件二)。核研所施清芳博士亦在會中簡介核研所在二氧化碳海洋封存的研究規劃情況。

討論結束後，由村井重夫博士帶領參觀該小組之實驗室陳列了地質與海洋封存的室外實驗設備，以及海洋環境模式模擬計算實驗室，由於該實驗室禁止攝影拍照而未能提供較多圖照於本報告。

8 月 25 日

本日為日本之假日，未安排實際之參訪行程，馬主任與同行人員則進行參訪 RITE 後之二氧化碳海洋封存相關議題之內部討論會議。

8 月 26 日

本日搭日本國鐵(JR)轉赴第二目的地岐阜縣，馬主任與同行人員進行內部會議，規劃討論隔日參觀瑞浪超深地層研究坑道時應注意之事項。

8 月 27 日

本日三名參訪人員赴日本獨立行政法人日本原子力研究開發機構(JAEA)之東濃地球科學研究中心參訪。

JAEA 是 Japan Atomic Energy Agency 的縮寫，由原來的 JNC 與 JAERI 於 2005 年 10 月間合併而成，進行原子能領域中的研究發展工作，包含：(1)具環境保護能力的長期能源安全；(2)發展未來具競爭性的前瞻性科學與技術；(3)主導原子能的安全與防護；(4)核能設施的除役發展等主要方向。JAEA 是日本高放射性廢棄物(HLW)處置主要的研究機構，為解決 HLW 處置的實務問題，JAEA 在名古屋附近的東濃設立

東濃地球科學中心，進行結晶岩層的地下試驗的地球科學研究；也在北海道的幌延設立軟岩的地球學研究中心，進行沈積岩層的地下試驗的地球科學研究；亦在茨城縣的東海設立核子燃料循環的研發中心，進行核能設施工程的研究發展。

本次公差是前往 JAEA 東濃地球科學中心，進行高放射性廢棄物處置的現地試驗資料在功能/安全評估應用的技術研討，瞭解結晶岩層的地下研究情形，做為審閱前述國內 2009 年將完成「用過核子燃料最終處置初步技術可行性報告」之參考。該中心由地下坑道開發主管 Masahiro UCHIDA (內田雅大)接待，內田雅大先生首先介紹該中心所屬瑞浪超深地層研究實驗室之開挖與試驗現況(提供書面簡報資料如附件三)，東濃地球科學中心的地下實驗室名稱為瑞浪超深地層研究實驗室，因行政區域屬於瑞浪市之故而稱瑞浪。由於本場址為當地政府提供，並非提供放射性最終處置之實驗室，為有限目的之研究發展用場址。

當結束瑞浪超深地層研究實驗室開挖與試驗現況之簡報與討論後，三名參訪人員換裝後由內田雅大先生陪同至該地下實驗室觀摩，經一些必須之安全檢查程序後，在人員進出豎井直接搭昇降機至地下 100 公尺之橫坑試驗區參觀水文地質試驗，內田雅大先生介紹了試驗設備，並展現部分之試驗成果，參訪人員對該實驗室人員細心與實事求是的精神留下深刻印象。

結束地下 100 公尺橫坑試驗區參觀後，再回到該中心進行結晶岩區水文地質試驗之技術討論，參加人員包括 Dr. Hitomitsu SAEGUSA (三枝博光)、[○]C 與 Takuya OHYAMA (大山卓也)，討論中引起廣泛討論的議題為斷層位置的研判與其間水流的分析計算，三枝博光博士說明了經由長期之抽水試驗，該中心發現斷層位置與早期經由地表之地質與地球物

理方法之研判有所差異，觀測獲知試驗區之結晶岩層中夾有一層泥岩之成果(會中僅為簡報說明，未提供任何書面資料)。尾上博則亦說明如何進行試驗過程並進行技術討論。最後則由核研所成員報告國內放射性廢棄物最終處置之現況，並針對國內所發展之功能/安全評估技術，與東濃地科研究中心之資料互換交流進行討論。

8 月 28 日

本日為行程，由日本西部搭日本國鑄鐵遠赴本島北邊之青森縣六個所村。抵達投宿旅館後，在旅館內與日本財團法人日本原子力產業協會(JAEA)之 Tetsushi MAESHIMA (前島徹士)先生會面，感謝他在此次公差在行程的安排與參訪機構聯繫上之協助，並就台日雙方在非官方機構的核能領域技術交流，交換意見。

8 月 29 日

本日前往參觀日本原燃株式會社(JNFL)所經營之六個所村低放射性廢棄物最終處置場，及進行營運過程討論。

日本低放射性廢棄物最終處置場及核燃料循環過程相關設施位於本州島青森縣東北方之六個所村(Rokkasho-Mura)，由日本經濟產業省委託日本原燃株式會社(Japan Nuclear Fuel Limited, JNFL)負責經營。JNFL成立宗旨為研發完整之核燃料循環過程，確保長期而穩定之能源供給，整體設施依性質共分為六處：鈾濃縮工廠、再處理工廠、及鈾混合氧化物(Mixed Oxide, 簡稱 MOX)燃料加工廠、玻璃固化廢棄物貯存場、用過核燃料接收及貯存場、低放射性廢棄物最終處置場，其設施關聯為由核能電廠產生之用過核燃料，運送至再處理廠進行再處理，若可以再利用

之核燃料則運送至鈾濃縮廠，而產生之低放射性廢棄物則運往最終處置場進行貯存及處置。經由鈾濃縮廠提煉之鈾燃料，則可運往核能電廠繼續發電。上述六個設施除再處理工廠與 MOX 燃料加工廠預計將在本年底開始營運外，其餘四項設施均已在營運中。

此次主要參觀核燃料循環展示中心與低放射性廢棄物最終處置場。核燃料循環展示中心展示上述六個所村區域之核設施發展，包括再處理工廠、高放射性玻璃固化廢棄物貯存、用過核燃料接收及貯存場、鈾濃縮工廠、MOX 燃料加工廠與低放射性廢棄物最終處置之模型及展示運作之程序。參觀過程由該中心之專業解說人員帶領，並針對每一項設施說明營運流程，直至參觀所有設施展示模型後結束。

完成展示中心的解說與參觀後，再至六個所村低放射性廢棄物最終處置場現場參觀並由現場人員介紹處置流程。現場由埋設課 Hiroharu NOZAKI (野崎廣治)課長負責介紹該處置場之埋設現況與流程，由於該日並無實際之埋設作業，野崎廣治課長利用現場觀覽室之圖表說明現場之作業流程。最後並回至營運埋設中心辦公室進行營運技術研討。

技術研討由六個所村低放射性廢棄物最終處置場營運埋設課長 Teruyuki HIRAI (平井輝幸)主持，陪同人員有上述之野崎廣治課長以及其他展示中心之解說員。會中雙方針對營運作業、該場之接收標準、工程障壁設計、安全評估之依據、及未來擴展計畫之問題進行意見交流，日方並未提供任何技術性之書面資料。

8 月 30 日

本日前往獨立行政法人產業技術綜合研究所(National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, AIST)之環境管理技術研究部，進行二氧化碳海洋封存的深海化學特性技術交流。AIST 位於茨城縣筑波市之研究學園區，該研究所研究範圍包含：生命科學與技術、資訊

技術與電子科學、奈米技術與材料科學、環境與能源、地質調查應用地球科學、度量衡與量測技術等六大領域。

本次參訪為環境管理技術研究部，即負責環境與能源領域之研究，該部門負有研究環境診斷技術、環境清潔技術之建立、解決暖化對策之評估方法研究與建立、全球暖化及其對策之評估與研究等之研發工作。其中全球暖化及其對策之評估與研究之研發項目，包含建立對二氧化碳量測系統與區域觀測、二氧化碳的海洋封存、及建立數值模式模擬全球碳循環系統等三大主軸。本次參訪由研究部門長 Koh HARADA (原田晃) 與 Dr. Masahiro NISHIO (西尾匡弘) 負責接待，並進行二氧化碳的海洋封存、及建立數值模式模擬全球碳循環系統等二項議題之討論。

原田晃部門長首先就 AIST 對二氧化碳水合物的研究概況，包括液態二氧化碳之液滴(droplet)在海水中無水合物的變形行為，以及有無水合物的溶解速率研究。西尾匡弘博士亦介紹利用低壓容器與雷射感應螢光(laser induced fluorescence, LIF)法分析液態二氧化碳液滴的溶解行為與 pH 變化之研究。此二研究人員皆利用電子資料進行簡報外，由於簡報之內容仍在發展中，因此並未提供任技術性之資料給參訪人員，唯原田晃部門長允諾將在日後提供研究成果供參訪人員參考。核研所人員亦在會議中報告國內二氧化碳封存研究之規劃案，並針對可能之技術合作提出建議。最後參訪人員與原田晃部門長及西尾匡弘博士在 AIST 門口合影後結束參訪之活動。

8 月 31 日

本日前往電力中央研究所(CRIEPI)之核燃料循環後端研究中心、環境科學研究所，分別進行核廢棄物最終處置相關問題與技術合作洽商，及二氧化碳的天然類比與海中探測儀器等研討。

電力中央研究所 (Central Research Institute of Electric Power

Industry, CRIEPI)成立於 1951 年，是由日本各電力公司出資的非營利研究機構，總部設於日本東京市，另在其他地區設有 5 個研究區。CRIEPI 的研究領域包含：(1)核能技術：發展再處理試驗場，用過核燃料中期貯存混凝土容器受震反應試驗技術建立，SCC(Stress corrosion cracking)高溫進階試驗工廠建立；(2)進階保修技術：發展高性能、多功能超音波設備檢測技術，電力設備置換成本分析技術，渦輪葉片溫度及應力分析；(3)環境創新技術：利用全球暖化預測模擬技術進行海洋表面溫度分析，發展亞洲生態潛能分析資料庫，發展生態/廢棄物試驗場，發展環境風洞系統；(4)理想能源利用技術：實用的熱室設計技術，發展流體噴出與熱傳數值模擬程式，利用離子溶液發展原型二次鋰電池，SiC 吸附/滋生反應器；(5)社會經濟風險管理：電廠客戶滿意度分析，複合震動試驗設施，發展人員教學文件，發展雷擊模擬試驗，發展氣象應用與研究系統 MARS 等五大領域。

本次公差主要是參訪在千葉縣我孫子的研究區，此區域設有土木工程研究實驗室與環境科學研究實驗室，前者是負責包括高、低放射性廢棄物處置之核能技術中工程設施的特性實驗；後者則是研究包含二氧化碳封存的环境創新技術。CRIEPI 對高放廢棄物管理計畫之目標在建立高放廢棄物管理的量測與評估方法，其技術則支援 NUMO。目前主要成果在下列各領域：

(1)地質與水文狀態之量測及預估

- a) 與 JAEA 共同研究：成岩、蝕變、風化與滲透作用之量測與推估；
- b) 瑞士 NAGRA 進行之 Mont. Terri 計畫中，處置坑道接觸壁劣化量測與地下水記錄方法之驗證；
- c) 發展鑽井控制技術；
- d) 地下水監測技術之發展。

(2)地質狀態長期穩定性之量測及預估：提昇下列之量測與推估之技術

- a) 地形抬昇與沉降；
- b) 斷層活動性；
- c) 火山活動性。

(3)功能評估

- a) 修訂溶質遷移分析程式碼，使之能因應岩石中隨機出現之裂隙；
- b) 確認澳洲大盆地資料之可應用性；
- c) 地下水流分析與水化學作用之間之校正。

(4)設施設計與安全評估

- a) 固化材料溶解程序；
- b) 人工障壁的熱-水-力耦合分析；
- c) 以地工離心機試驗估算容器外包裝溶解後在膨潤土之沉澱量。
- d) 高邊緣壓力與高溫下軟質沉積岩的力學特性。
- e) 瑞士 NAGRA 進行之 Mont. Terri 計畫：非等向性沉積岩之應力及變形量測。

參訪人員於該日上午與核燃料循環後端研究中心土木工程研究實驗室進行放射性廢棄物最終處置之合作協商，接待人員包括研究參事 Dr. Motoi KAWANISHI (河西基)、Dr. Kenzo KIHO (木方建造)與 Chihiro ITOH (伊藤先生)。當日下午則與環境科學研究實驗室進行二氧化碳封存之技術研討，交流人員包括：Dr. Norikazu NAKASHIKI (仲敷憲和)、Dr. Kiminori SHITASHIMA (下島公紀)二位研究員及客席研究員 Dr. Takashi OHSUMI (大隅多加志)。

在放射性廢棄物最終處置合作協商之會議中，河西基首先簡報 CRIEPI 在核燃料循環後端研究的現況(書面資料如附件四)，木方建造博士則簡報 CRIEPI 在高放射性廢棄物管理研究發展現況(書面資料如附件五)，核研所人員亦簡報國內放射性廢棄物處置研究之現況，完成簡報後，雙方針對放射性廢棄物處置研究之技術合作內容，及簽署合作備忘

錄內容進行細部討論。

在下午的二氧化碳海洋封存討論之會議中，仲敷憲和博士首先介紹空間與時間尺度下二氧化碳封存模擬所需考慮的機制(無書面資料)與東亞洋流之二年期間水溫變化模擬情形，下島公紀博士則簡報如何在海洋中觀測二氧化碳的擴散行為與水溫的變化，並說明觀測儀器的發展的研發技術(未提供簡報書面資料)。核研所亦在會議中簡報國內二氧化碳封存的研究規劃案，雙面並進行技術交流與人才互訪等議題討論。最後，由大隅多加志博士簡報二氧化碳釋放點附近的衝擊評估研究情形(書面資料如附件六)，並建議將來核研所可透過與 CRIEPI 合作方式，參與日本的二氧化碳海洋封存技術的交流。

結束二氧化碳海洋封存的討論後，由土木工程研究實驗室之伊藤先生帶領參訪人員參觀 CRIEPI 之工程障壁實驗設施，包括處置之人工障壁實驗、混合動力全尺寸震動平台可進行全尺寸高放射性廢棄物貯存筒的強度試驗，長達 20 年研究密封鋼桶 O-Ring 效能實驗設施，以及放射性廢棄物容器長期性能測試之地工離心機設置等設備，讓參訪人員對 CRIEPI 實驗技術留下深刻的印象。本次公差之參訪與技術交流即以此參觀活動結束後畫下句點。

9 月 1 日

公差結束，自日本成田機場搭機返回國內桃園機場，結束行程。

三、心得

本次公差赴日本五個機構進行技術交流與參訪，議題區分為二氧化碳封存與放射性廢棄物最終處置二大領域，參訪心得將分述於以下二節，在每節中將會依參訪機構不同而分小節，將闡述參訪機構的介紹與交流研討的心得，並在各節的最後提出該領域的綜合評述。

3.1 二氧化碳封存領域

日本是國際上積極推動二氧化碳進行地質與海洋封存研究的國家之一，且該國之研究團隊在國際間享富盛名，該團隊之架構如圖 1 所示，即由經濟產業省(METI)提供研究經費補助主導之研究機構 RITE，並成立顧問委員會進行計畫推動之審議，RITE 再與其他機構合作共同進行計畫之執行，其中 RITE、AIST 與 CRIEPI 是主要進行海洋封存的機構，亦是本次公差進行二氧化碳海洋封存的主要機構。(上述各機構簡稱將會在以下各節說明)

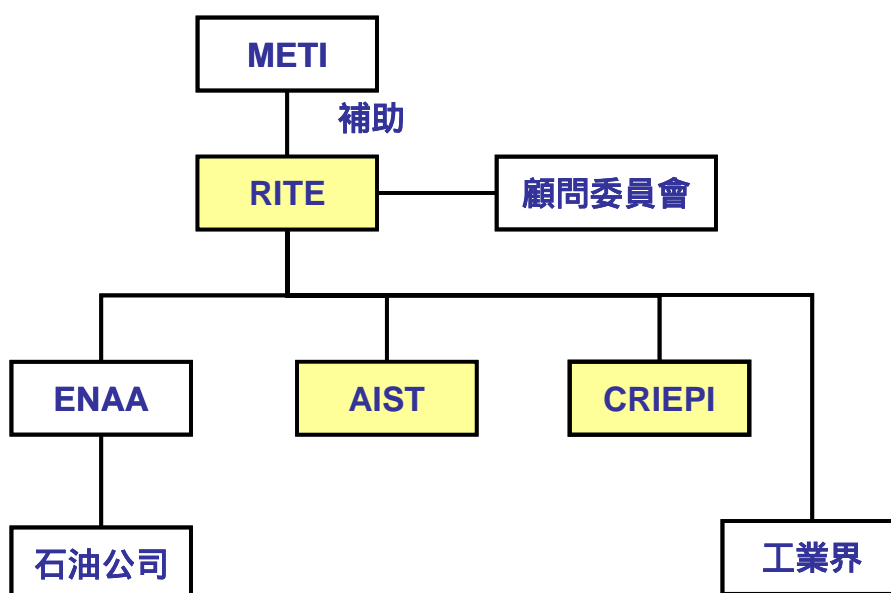


圖 1 日本二氧化碳研究計畫之參與機構

3.1.1 財團法人地球環境產業技術研究(RITE)

二氧化碳封存研究項目，是目前全球最爲關心的議題之一。RITE 對於二氧化碳封存的研究可以分爲二個方向，一爲地質封存，另一爲海洋封存。

A. 地質封存方面，在經濟產業省的支持下，由 RITE 負責並與石油公司及 AIST 等機構於 2000 年時正式進行 Nagaoka 地質封存研究計畫。此一研究計畫，從 2000 至 2007 年共 7 年期間在東京西北方之新瀉縣長岡市附近(Nagaoka Site)進行地下含水層的封存可行性研究，計畫項目與時程如圖 2 之時程表所示，包含了注射井的鑽鑿、地表設施的建造，二氧化碳封存的注射與監測、模擬分析及研究結果的解析報告。該計畫自 2003 年七月至 2005 年的一月於 Nagaoka 場址之地下含水層中，連續 500 天共注入 10,400 噸的二氧化碳，並進行模擬與監測的工作。此計畫原規劃執行至 2004 年的五年執行時程，雖到今年年初才結束，期間亦遇到規模 6.8 級的地震，由所監測的二氧化碳之擴散情形，以及模式模擬預測二氧化碳於注入含水層 1000 年後留存之分析結果，顯示此計畫已成功的完成陸地的二氧化碳地層封存的初步研究，研發方法與成果值得國內中油公司、台灣電力公司、工研院能環所等機構投入地層處置研究之參考。

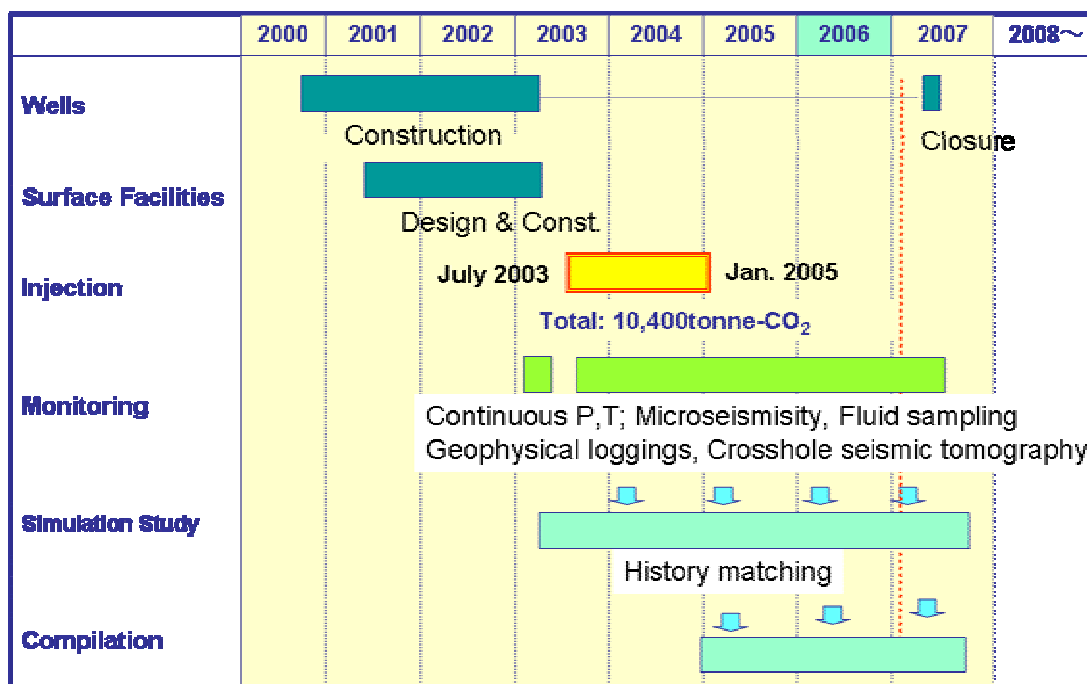


圖 2 日本 Nagaoka 地質封存第一期研究計畫項目與時程

B. RITE 的二氧化碳海洋封存研究原分為兩種型式進行，如圖 3 所示的示意圖，一為在深度約為 1,500~2,500 公尺的大範圍海域溶解擴散方式(Dissolution type)，這方式是目前 RITE 研究的重心；另一為將液態二氧化碳注入至深度超過 3,000 公尺以上的海域範圍而形成類似湖泊狀之湖泊封存方式(Lake type)。前者之方式可以透過管線排放，或是移動船隻於近海區域範圍排放，由於二氧化碳在此層的物理特性，使得其密度比海水小或相當，因此液態之二氧化碳將會隨著船隻與洋流速度而擴散於海域中；後者之方式同樣是依據移動船隻的方式，不過是要將液態二氧化碳注入至深層超過 3,000 公尺的海域中，此時液態二氧化碳之密度比海水大而沉澱至海床上形成一類似湖泊狀之區域。依據 RITE 之 Dr. OHSUMI 向參訪者說明，這二種封存方式之差異如表 1 所示。

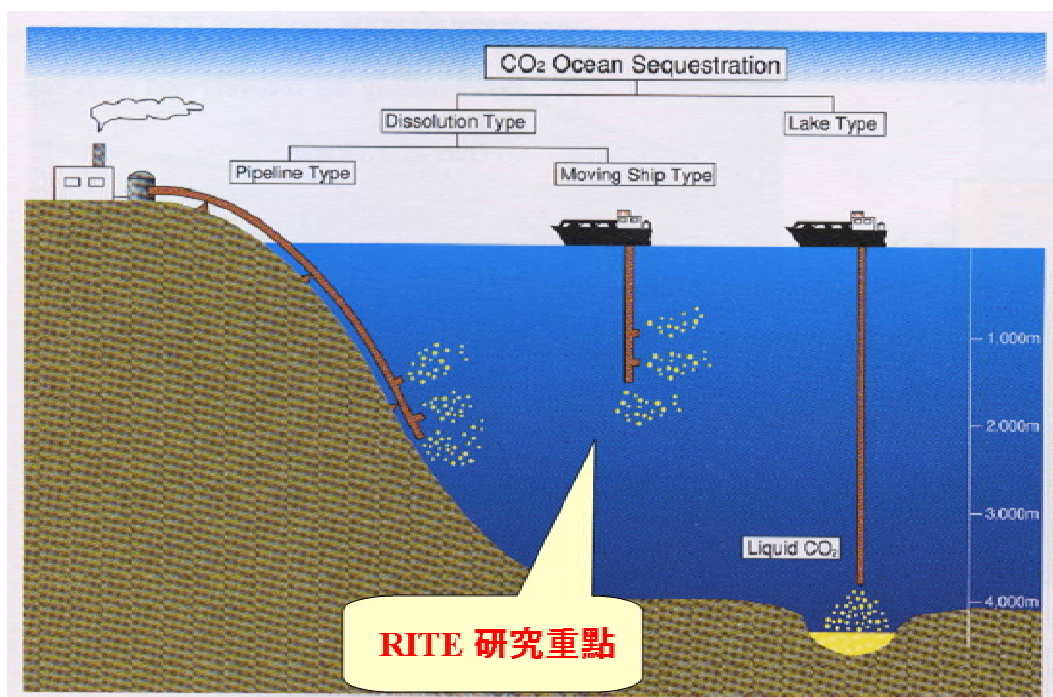


圖 3 溶解型與湖泊型之二氧化碳海洋封存示意圖

表 1 溶解型與湖泊型之二氧化碳海洋封概念與影響差異說明

	溶解型	湖泊型
概念	將溶解的二氧化碳稀釋至廣大的海水中	將二氧化碳存在深層的凹陷的海床中
假設	二氧化碳將充分的溶解於海水中是被允許的	僅局限於注射的小區域受到衝擊
影響	影響較小但較為廣域	影響較大但僅於局部區域

日本政府則在經過討論後，認為湖泊型在短期內無法說服避免對環境永久傷害，已暫停此方面之研究。因此，RITE 過去在海洋封存方面的研究，主要集中在中層海域深度的溶解擴散型態方式，重點包括二氧化碳注入海水之行爲、開發二氧化碳中層海水輸送與稀釋技術、實驗室進行二氧化碳注入對海洋物種衝擊研究、及發展二氧化碳注入點區域專用環境評估模型。RITE 原預定於 2002 年進行實場實驗，但受到日本環

境大臣以(1)國際海洋公約明文限制海拋的規定，以及(2)海洋封存對氣候與環境的影響需先獲得國際共識，必須確認 IPCC 的立場等二理由而取消了實驗許可，此後該計畫即告暫停。雖然如此，RITE 仍繼續在實驗室研究與模擬分析之研究，以下即以二則實例說明在模擬與實驗的豐碩成果。圖 4 為 Dr. MURAI 帶領參觀的實驗液滴與有機體試驗設備(左)，以及提供所觀測之結果(右)，清楚看出在壓力為 50 Mpa 下二氧化碳液滴的擴散行爲。而 Dr. OHSUMI 亦說明在封存場所的模擬分析研究內容，即分別在數個太平洋公海區域進行可能封存場所的評估，得到如圖 5 的結果。結果顯示在琉球外海與夏威夷群島附近有較好的封存場所，另外在太平洋中央、赤道偏北處應亦有較適合的場所，此分析結果顯示台灣之東側公海上是個理想的封存場所。核研所在分析國內封存場所之評估時，可考慮此一結果，並尋求與 RITE 人員藉由互訪或訓練方式引進此一評估技術。

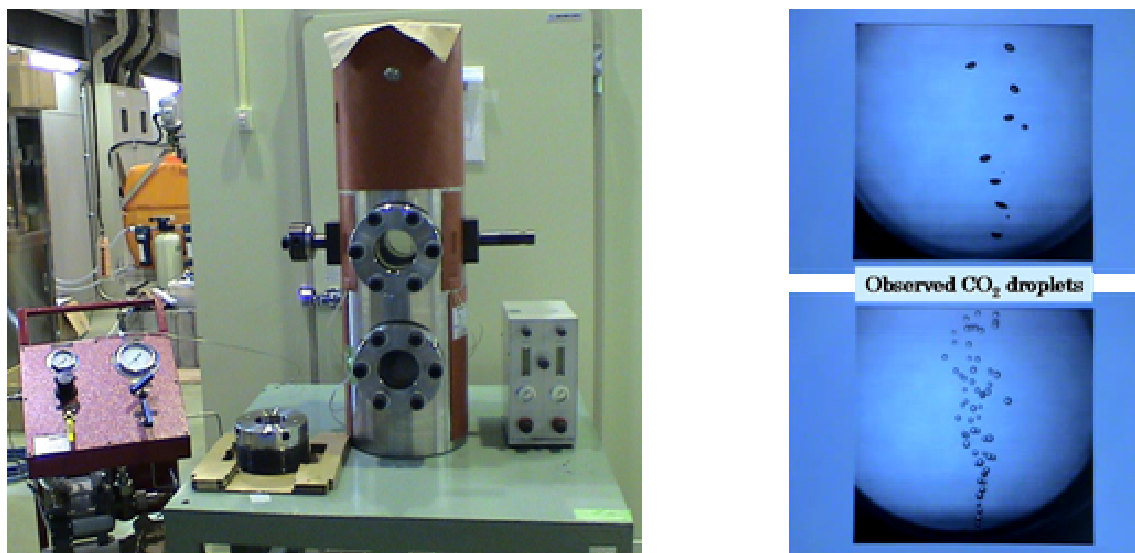


圖 4 二氧化碳液滴在高壓之行爲模擬設備與觀測結果

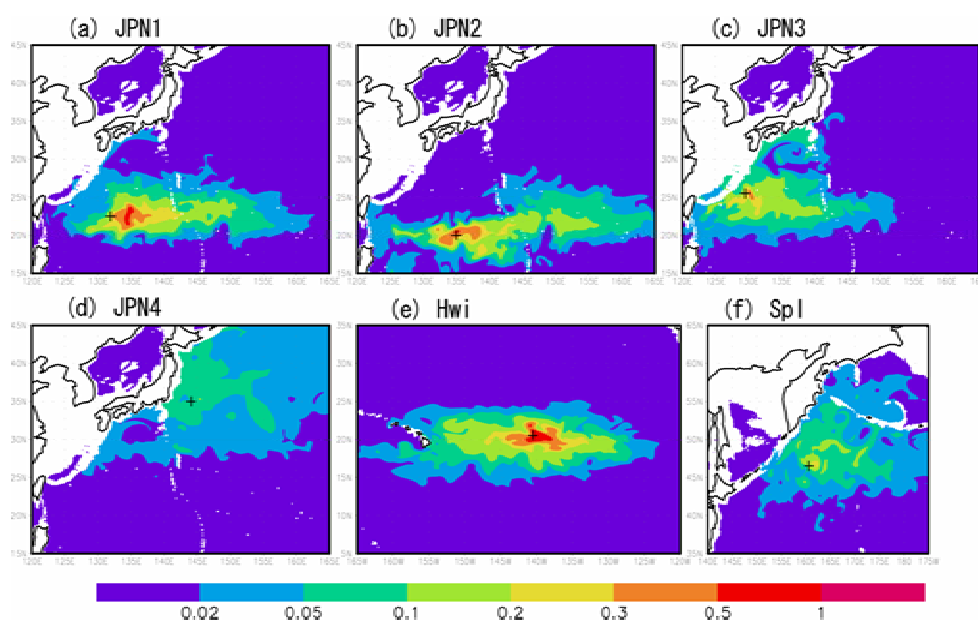


圖 5 太平洋區域封存場所分析結果(指標右側為較佳場所)

3.1.2 獨立行政法人產業技術綜合研究所(AIST)

如圖 1 所示，AIST 是日本研究二氧封存的主要研究機構之一，而且較著重在液態二氧化碳液滴的 pH 變化實驗，與液態二氧化碳的溶解行為研究。在液態二氧化碳之液滴(droplet)於中層海海水的行為研究上，AIST 分別進行了二氧化碳之液滴中有無含水合物的變形行為模擬，並進行二氧化碳液滴在有無含水合物的溶解速率研究。這些研究成果是利用深海高壓模擬容器(圖 6 下側)模擬實驗所獲得，該模擬實驗可觀測液態二氧化碳在不同深度會呈現不同的行為。圖 6 左上側即顯示在 800 公尺深度，絕對溫度為 276 度的行為，可看出液態二氧化碳有較快溶解及往上升的行為；圖 6 右上側則顯示 4,500 公尺深度，絕對溫度為 281 度的行為，液態二氧化碳有呈現不易溶解且往下沉降的行為。

AIST 在分析液態二氧化碳液滴的溶解行為與 pH 的變化研究方面，

西尾匡弘博士特別介紹利用低壓容器與雷射感應螢光(laser induced fluorescence, LIF)法來進行這二項研究，這方法之實驗設備與成果可利用圖 7 來說明，圖 7 左側即顯示為壓力小於 15 PMa 之實驗觀測容器；圖 7 右側為實驗之照片，液態二氧化碳液滴自上方之噴嘴注入後，周圍 pH 變化的情形，深藍色為 pH 值約在 5 至 6 的範圍，淺藍色區為低 pH 區域，pH 值約為 4。

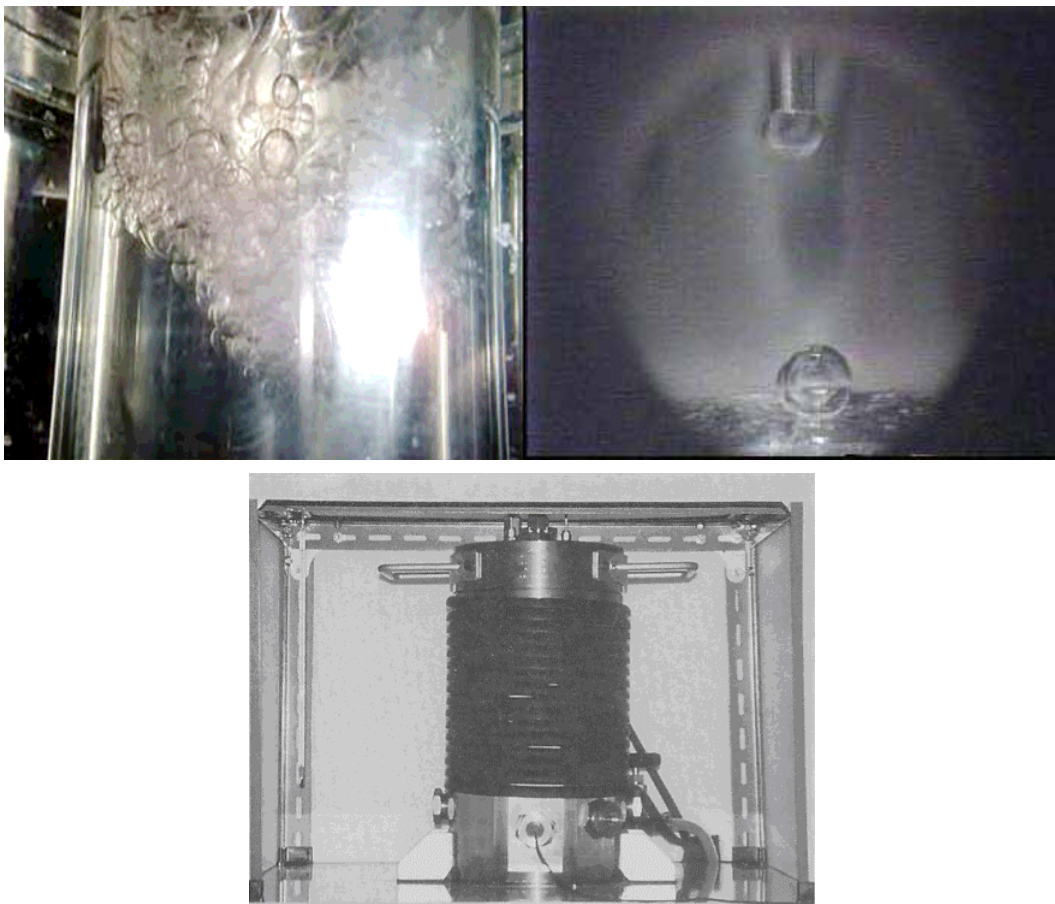


圖 6 深海模擬液態二氧化碳的行為（左上深度 800 m，276°K，右上為 4,500 m，291 °K，下側為高壓模擬容器）

在研討過程中，原田晃部門長提出一個值得思考的問題，即二氧化碳的海洋封存可能使一些有機物種分解或腐爛，但若是在高效率的封存

過程中，亦可能引發新生的物種出現。這對海洋封存存疑者是另一種啓發性的思考方向。

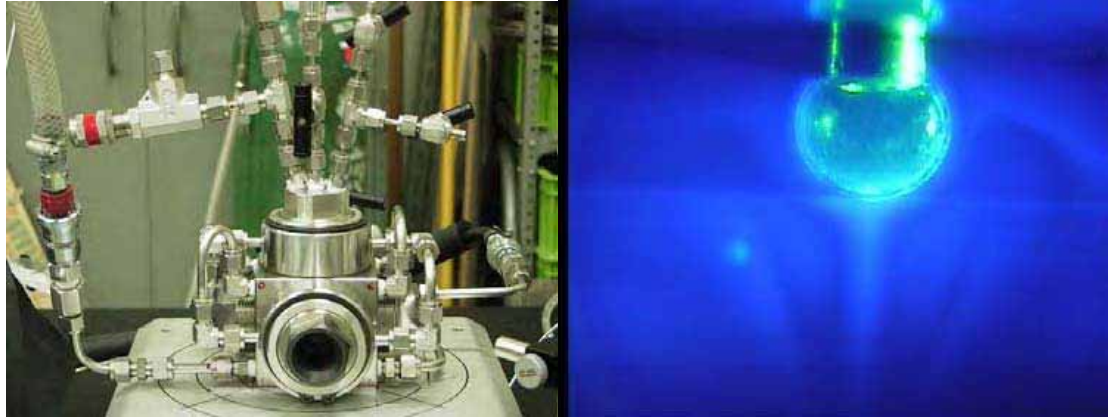


圖 7 液態二氧化碳液滴的 pH 變化實驗（左：低壓實驗容器；右：雷射感應螢光照片）

3.1.3 電力中央研究所(CRIEPI)

CRIEPI 亦日本在二氧化碳海洋封存研究的主要機構之一，而且比較著重在海封封存的天然類比、海中探測儀器及全球海域水面溫度模擬方面。由參訪獲悉進行二氧化碳海洋封存的環境衝擊模擬研究時，應考慮空間與時間尺度下二氣化碳封存模擬所需考慮的機制，這些機制如圖 8 所示。在初注入階段，所考慮的的空間為局部性，時間的考量則以日或月為單位，評估機制為初期的擴散；若考慮區域性的生物衝擊，則需要區域性的空間與以年數量級之時間為考量，評估則需以二相流(液態二氧化碳與海水)及二氧化碳的溶解為主，同時需加入魚類活動的分析。這項主題可做核研所在海洋封存的環境影響評估時的參考。除此之外，CRIEPI 亦在發展模擬全球海洋表面溫度的季節變化的技術，此技術可由特定點之海水溫度量測值，以及分析洋流之流況來進行模擬，模

擬結果如圖 9 所示，紅色區域為高溫區而藍色區域為低溫區，此結果亦可利用影片播放出連續的海域表面水溫變化情形。這方面的研究成果，可供本所在進行海洋環境與二氧化碳對海水溫度變化的合作主題。

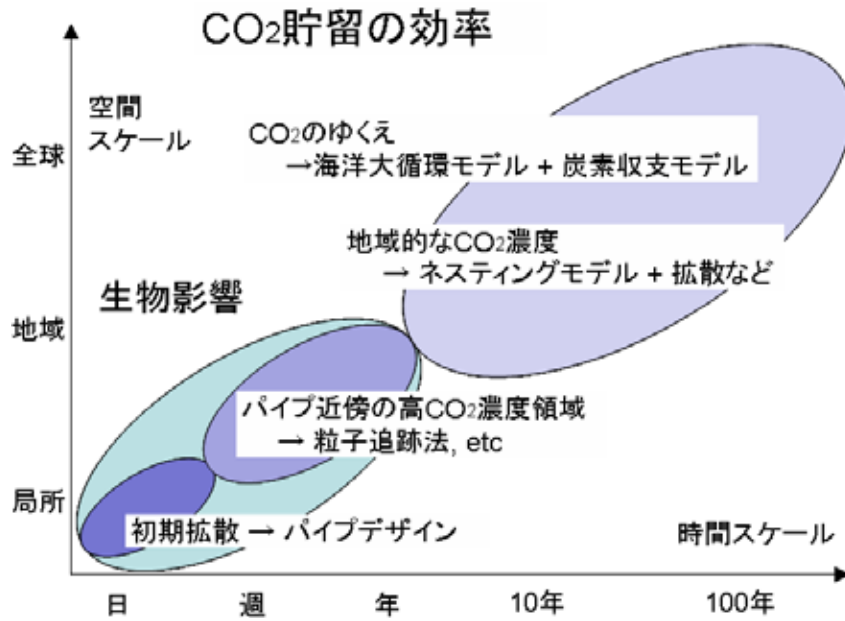


圖 8 二氧化碳注入海洋後在空間與時間上之行爲

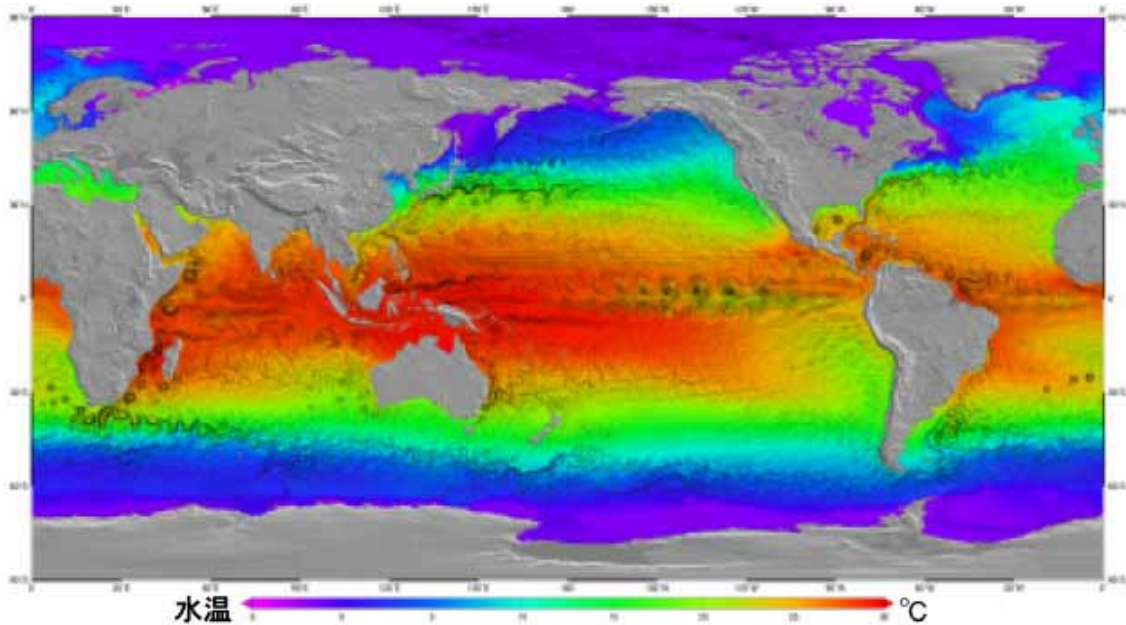


圖 9 高解析度全球海域水面溫度模擬分析

CRIEPI 亦發展觀測二氧化碳在中層海域擴散行爲的觀測儀器。圖 10 顯示 CRIEPI 所發展觀測儀器的設計示意圖，包括最上方的接發訊號的拖曳機組與擴散觀測船；左上方的二氧化碳注入船；左方的自動昇降機；右上方的感應器；右方的尋跡浮筒與下方的 pH/二氧化碳密度感應器等。這些組合可用來進行二氧化碳注入於海水後，水溫變化的天然類比(natural analogue)研究，其結果可進一步提做爲海洋封存環境評估之應用。該部門曾在台灣東部臨近的公海上進行海洋的此項研究，而在進行實驗之前，CRIEPI 研究人員下島公紀博士曾前來台灣與高雄的中山大學進行台灣海域的瞭解。這一方面，除了可能提供核研所如何規劃海洋封存的監測儀器外，亦點出可邀請國內中山大學的海洋研究所共同參與二氧化碳海洋封存研究的可行性。

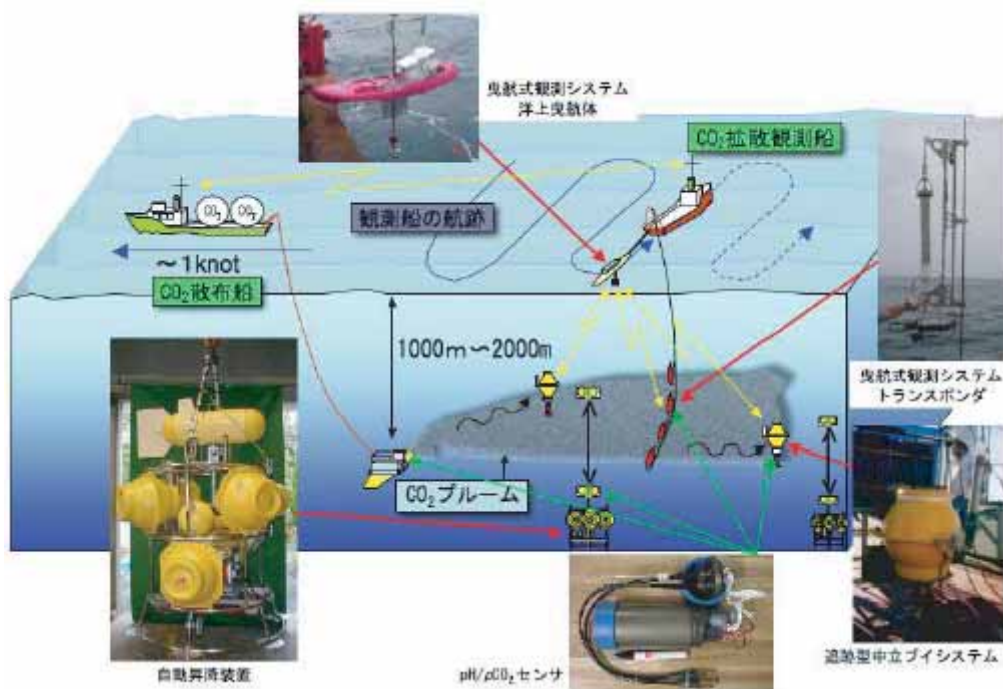


圖 10 二氧化碳海洋封存環境評估觀測儀器

3.1.4 二氧化碳參訪綜合評述

RITE、AIST、CRIEPI 等三單位在實質上是一個研究團隊，關鍵人員如 Dr. Ohusmi 也同時參與 RITE 與 CRIEPI 的研究，日本早在 1992 年即已發表海洋封存二氧化碳之研究與技術成果，從 lake type 到現在的 dilution type 可見端倪。經由參訪後發現各單位專長，如 CRIEPI 的天然類比、海中探測儀器及全球海域水面溫度模擬；RITE 之深海封存方法、二氧化碳液滴在高壓之行爲模擬、及二氧化碳海洋環境的評估與封存場所的分析；AIST 的液態二氧化碳液滴的 pH 變化實驗，與液態二氧化碳的溶解行爲研究等，皆可做爲核研所進行海洋封存研究的借鏡。

因此，建議核研所可以以日本爲例，先分析現有的成果，針對二氧化碳深海特性、封存方式、與現場技術(如注入與海上工程等)，考量台灣特有的海洋環境與天然類比(venting of carbon dioxide-rich fluid 等)進行遷移模擬與特性研究。由於日本海洋探測船較我國先進，如何整合國內研究團隊，並與日本研究單位合作或參與上述議題的研究工作等，都是我們下一步需要進行的。

3.2 放射性廢棄物最終處置領域

日本的放射性廢棄物最終處置研究機構如圖 11，即由經濟產業省(METI)督導與監管經費，高放射性廢棄物方面由 NUMO 負責推動，中/低放射廢棄物方面則由 JNFL 進行營運作業與相關技術發展。本次公差參訪與技術交流的研究機構，分別有 JAEA 的東濃地球科學研究中心、JNFL 六個所村低放射性廢棄物處置場，及 CRIEPI 在我孫子研究區的核燃料循環後端研究中心。

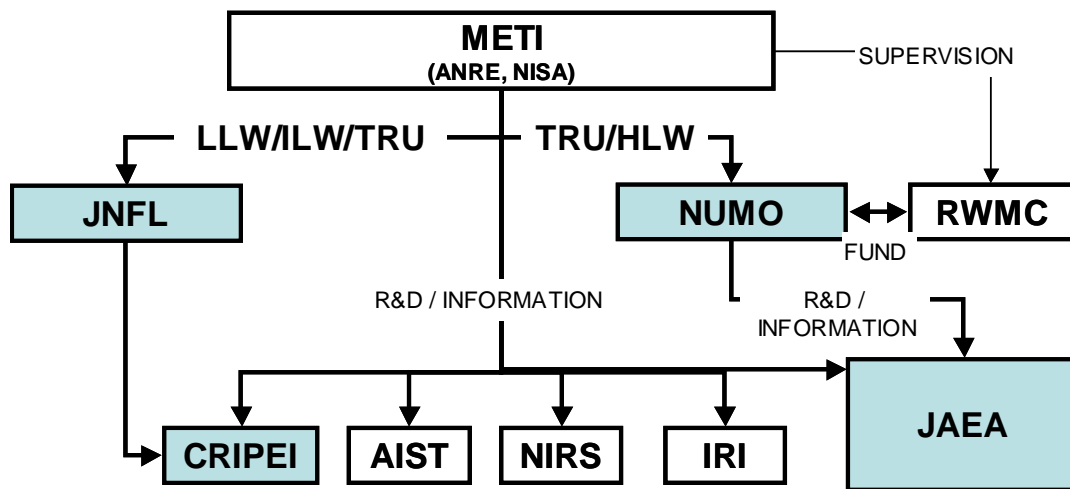


圖 11 日本放射性廢棄物最終處相關之研究機構

3.2.1 獨立行政法人日本原子力研究開發機構(JAEA)

東濃地球科學中心所屬之瑞浪超深地層研究實驗室 (Mizunami Underground Research Laboratory, MIU)，為進行地層研究發展之有限目的之場址，並非提供放射性實驗之實驗室。此場址以花崗岩為基盤，上覆沉積層，預計分別於地下 500 公尺及 1,000 公尺處建立實驗設施，其地下設施的規劃如圖 12 所示。分別有二條豎井(一為人員進出的主豎井，另一為通風井)及位於 500 公尺與 1,000 公尺深之二處實驗室及數個橫道所組成，二豎井相隔 40 公尺。目前正進行深井的探測工作與豎井開挖。豎井直徑 6.5 公尺，通氣井直徑 4.5 公尺，至參訪前之開挖深度超過 200 公尺深的位置，平均進深約每 0.5 公尺/日。

參觀的地下 100 公尺之橫坑試驗區為水文地質試驗區之孔隙水壓量測試驗，經由量測結果進行該區流場的分布分析，此分析可提供裂隙水

流與質量傳輸之間的關聯模型之建立，並進行天然類比研究以提供長期預測行為研究之用。參觀時由內田雅大先生處獲知 MIU 預計 9 月初(參訪日為 8 月底)會完成位於 200 公尺深之橫坑實驗區的開挖。預計之研究內容則包含：(1)解決地表調查時待確認的議題；(2)確認先期預測的地質模型，並在開挖過程將相關資料進行回饋分析等。

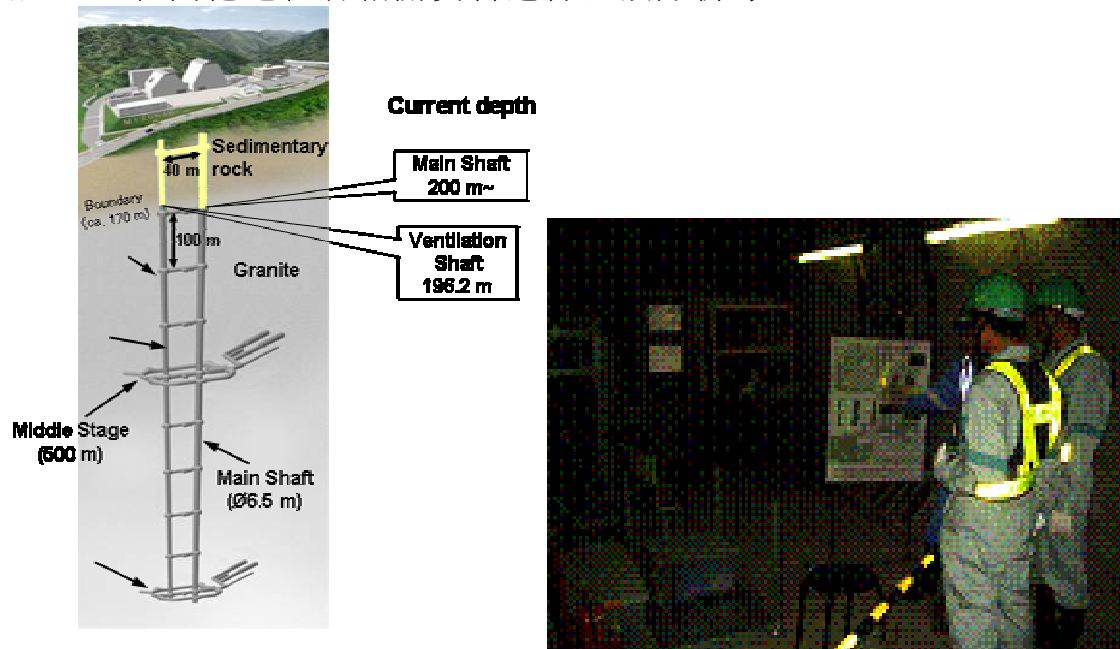


圖 12 瑞浪超深地層研究實驗室與入 100 深橫坑參觀

由目前該地下試驗室所進行的水文地質試驗，主要在斷層位置的研判與其間水流的分析計算。經由在 MIU 之長期抽水試驗，該中心發現斷層位置與早期經由地表之地質與地球物理方法之研判有所差異，觀測獲知試驗區之結晶岩層中夾有一層泥岩，如圖 13 所示。由水頭壓力得知此泥層成為上下兩層結晶岩層之界面，造成上下兩個不同流場，而下層水流明顯往更深處流動，對處置是個有利的發展。唯本項發現尚未對外發表，因此圖 13 之詳情內容需待日後更進一步獲得資訊來驗證。除此之外，該中心亦利用試驗所得資料配合進行水文地質模型之驗證。這是本

所在進行模式發展過程中，尚待突破學習之處，建議可派員至此中心進行實坑試驗之研習，唯若需簽署正式的合作協議，則需經日本政府之許可。

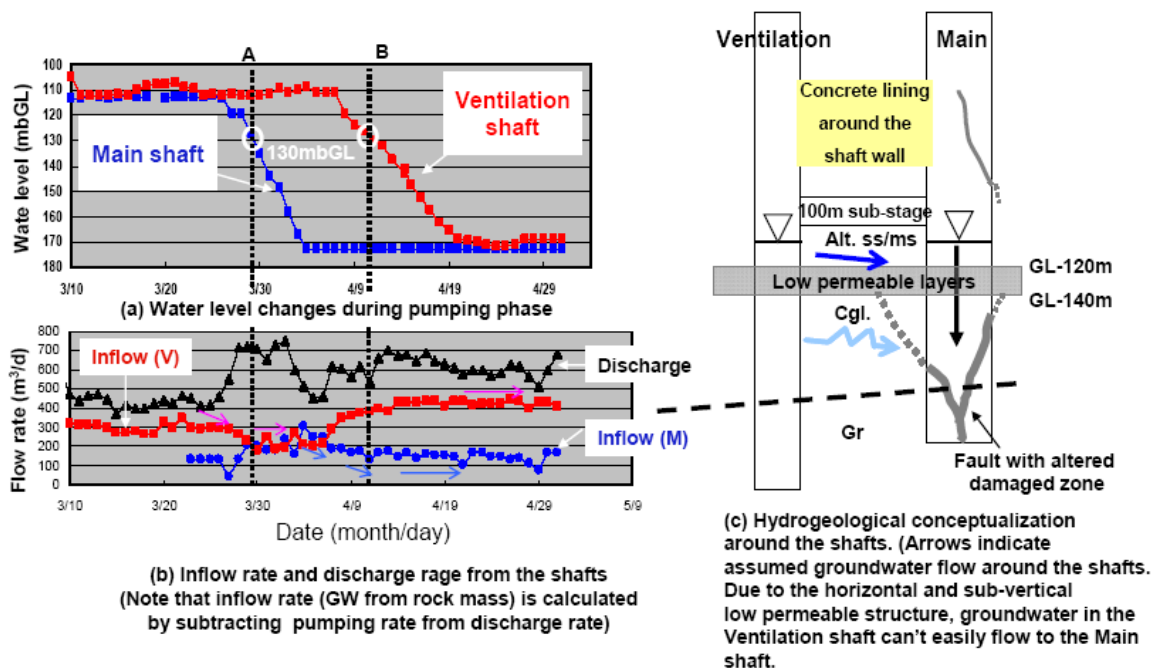


圖 13 瑞浪超深地層研究實驗室層未在初階段發現之低透水層(右圖)

2.3.2 日本原燃株式會社六個所村之核燃料循環處理中心 JNFL

六個所村低放射性廢棄物最終處置場是日本現行運轉中的唯一低放射性廢棄物最終處置場，亦是東亞地區的唯一。該處置場目前有二個不同設計之設施同時進行運轉，運轉至參觀日前一日(8月27日)止，以處置液體廢棄物為主之第一處置設施已存放 136,683 桶廢棄物，26 個區域完成覆蓋；第二處設施以處置固體廢棄物為主，目前已存放 58,744 桶之固體廢棄物，4 個區域完成覆蓋。整個處置場之外觀顯示於圖 14。

六個所村低放射性廢棄物最終處置場的運轉流程大致如下：由核能電廠產生之液體及固體廢棄物，經由一連串處理程序，方可送至最終處

置場。液體廢棄物及樹脂經由混合水泥、瀝青、及塑膠等材料進行固化處理，產生固化液體廢棄物，裝進容量 200 公升之鋼質桶容器內，運往第一處置區進行處置；而固體廢棄物如金屬、塑膠等，則必須經由減容、玻璃固化後，裝進 200 公升之桶容器內，運往第二處置區。因此廢棄物由核能電廠至最終處置場，須經由運輸、接收檢整、處置坑內堆置廢棄物桶、水泥漿封填處置坑、覆蓋混凝土、及覆蓋土壤等步驟。參訪當日現場並未進行任何之運作，未能觀摩到廢棄物桶檢整、廢棄物在處置窖內之堆置、或封填處置窖等，實有所遺憾。唯這方面之運作流程，仍可在展示中心觀摩到模擬的運作。



圖 14 六個所村低放射性廢棄物處置場外觀
(左為第一設施，右為第二設施)

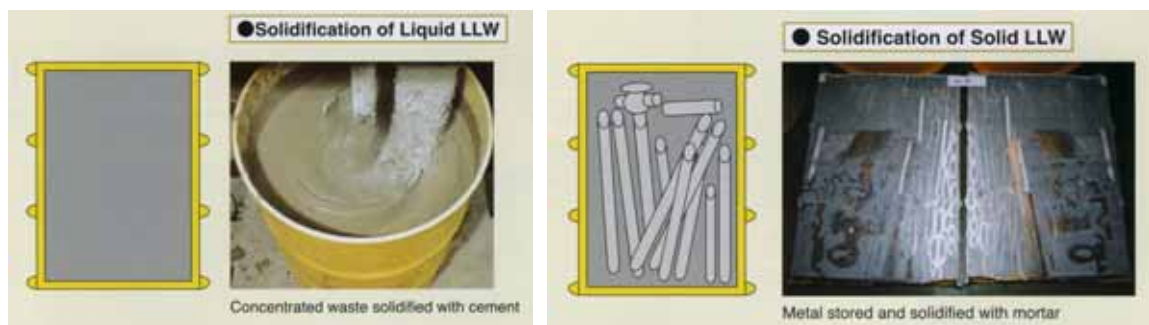


圖 15 處置場接收之液體與固體廢棄物
(左：液體廢棄物運送至第一設施，右：固體廢棄物運送至第二設施)

在參觀之前，核研所人員行前所蒐集的資訊獲知，六個所村之最終處置場目前有第三設施之坑道處置方式在開挖，但在技術研討過程中，平井輝幸與野崎廣治二位課長並未傳達任何進一步訊息，唯核研所人員於後來在 CRIEPI 討論放射性問題得到該項問題的概要。即電廠中的高 α 與 β 廢棄物(稱為 L1 waste)將另開挖坑道予以處置，而不與較低之上述二種廢棄物併行處置。這種坑道之設計概念如圖 16 左側所示，而圖 16 右側則為已開挖完成調查坑道之照片(由 CRIEPI 提供)。

另外該處置場所之工程設計方面，是以混凝土之保護期為 30 年做為設計基準，30 年後視為一般透水材質，核種即開始釋出並以天然障壁阻絕核種外釋。而核研所在進行評估時之假設，為核種在開始處置後即自鍍鋅鋼桶與混凝土釋出(即視為透水材質)，這項假設與 JNFL 之概念相比，顯示出核研所的評估假設較為保守。未來，本所在工程障壁之保護年限設計上，應根據國內之處置設計概念與合理的事實，提出更合理且安全的設計。

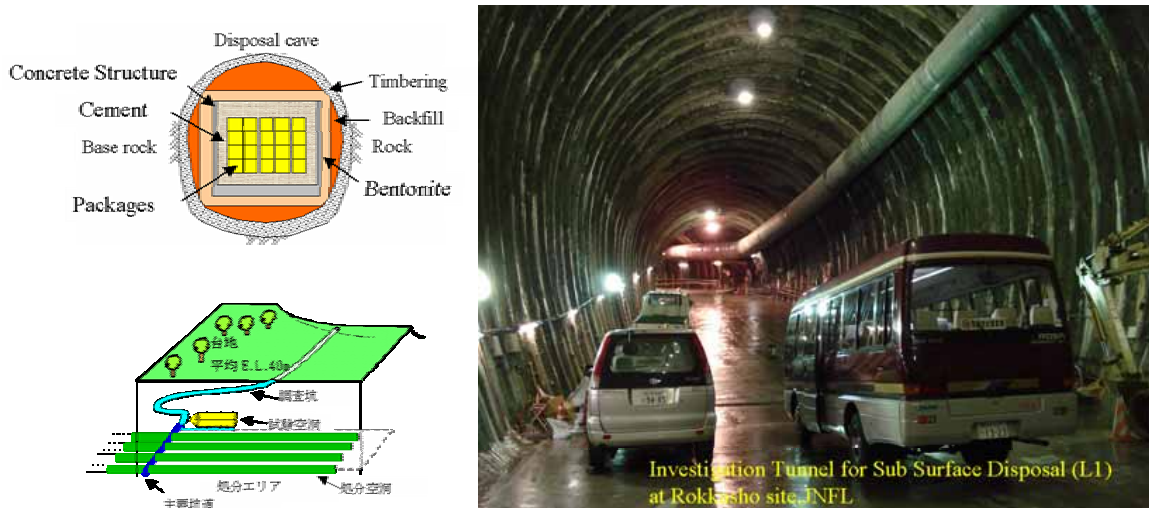


圖 16 JNFL 之 L1 廢棄物設計概念設計與坑道實景

3.2.3 電力中央研究所(CRIEPI)

在 CRIEPI 的行程主要是核研所與此研究實驗室進行簽署高放射性廢棄物技術合作備忘錄之協商。日方對合作備忘錄的意見包含下列兩部份：(1)需要包含更多智慧財產權的具體規定；(2)希望能定義對廢棄物管理合作範圍。初擬之合作條文內容以核廢棄物管理為主，另二氧化碳捕獲與封存及再生能源等方面之研究則需再議。返國後已針對備忘錄內容修訂進行進度追縱，期能適時完成此項工作。

CRIEPI 目前發展之核能相關技術，首推再處理試驗場、用過核燃料中期貯存混凝土容器受震反應試驗技術、長期低劑量 Gamma 射線工廠與高溫進階試驗 (Stress corrosion cracking, SCC)，其高放射性廢棄物管理計畫之目標在建立高放廢棄物管理的量測與評估方法。在 CRIEPI 參訪同時獲知日本對核廢棄物管理歷史，大致如下：

A. 低放(由 JNFL 進行)

1992 年 第一階段(R1)處置設施開始運轉(針對濃縮液體廢棄物)

2000 年 第二階段(R2)處置設施開始運轉(針對乾式廢棄物)

2013 年(預定) 第三階段(R3)處置設施開始運轉(針對高 β, γ 放射線廢棄物)

B. 高放射性廢棄物(由 NUMO 進行)

2000 年 放射性廢棄物最終處置相關法規條列

2000 年 NUMO 建立

現今~2027 年(預定)處置場場址選定

2033~2037 年 建造

2040 年 開始運轉

雖然 CRIEPI 仍依據日本高放射性廢棄物之研發期程，設定 2040 年開始運轉，但按 Toyo town 場址選擇調查之失敗經驗，2040 年是否能如期則是未知數。

在參觀 CRIEPI 之工程障壁實驗設施時，值得一提的是 CRIEPI 所發展之「混合動力測試系統」，其目標係針對地下結構之試體進行測試。此系統流程如圖 17 所示，即先進行靜態之實際尺寸試驗，由控制系統同時控制測試應力之調節，並經由數值分析系統分析模組之結構應力，最後獲得分析結果並由系統自動展示所得之成果。系統本身特點：(1)以實際尺寸結構進行破壞歷程驗證；(2)可提供多組低價且短週期之測試容器；(3)此系統可接受新型之地震測試。圖 18 左即由現場人員介紹其系統流程，並提供為高放射性廢棄物乾式貯存筒進行震動的照片如圖 18 右側，增進參訪人員的印象。

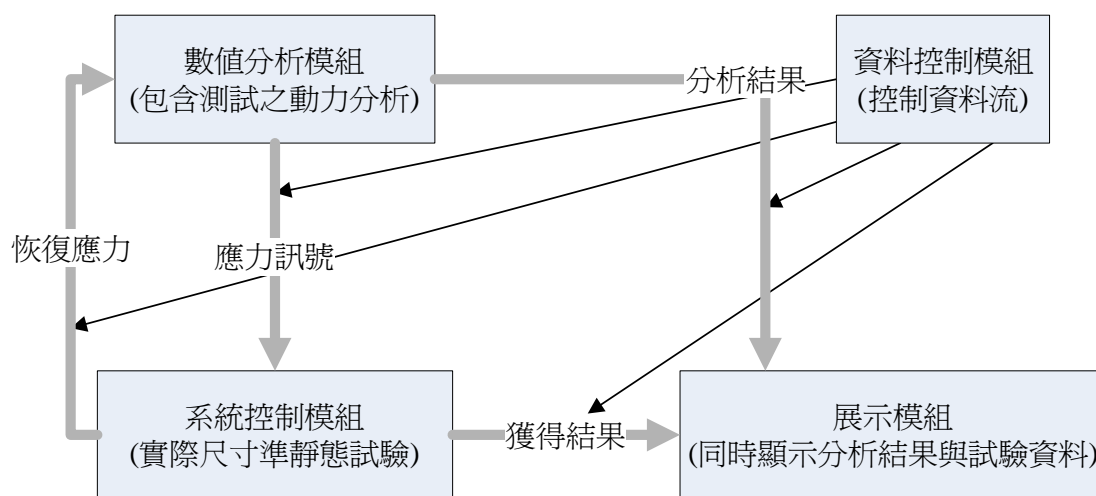


圖 17 混合動力測試系統流程

另外針對高放射性廢棄物容器長期性能應用之地工離心機設置，如圖 19 所示。此機具之目的主要在進行超過 1,000 年之長期性能的模擬評估，是一種將時間尺度縮短下進行廢棄物容器實驗，以評估長期性能之有效方法。運用地工離心機裝置，以及原型性能與離心機模組相似之關

係，可減少滲流之時間尺度，加強分析其他與時間相關之因子。此機具之主要規格為：(1)有效半徑為 1,360 mm；(2)最大離心加速度為 200 g (靜態)；(3)最大適用載重為 100 kg；(4)具可在實驗過程中更換之集電環，使得該機組可以長期連續性的運轉，延長測試之時間。

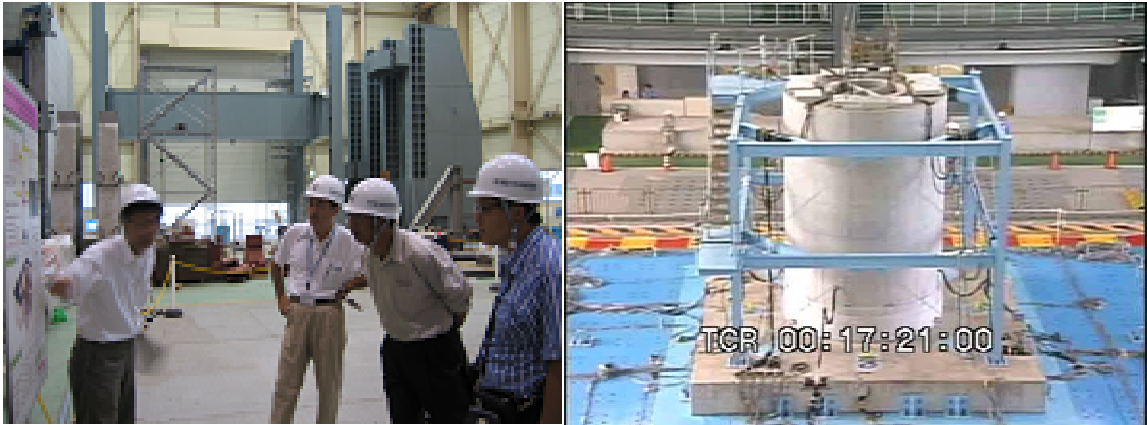


圖 18 參觀混合動力測試系統與乾貯筒的動力測試。



圖 19 長期性能測試之地工離心機

此次參訪瞭解到 CRIEPI 之組織架構及放射性處置之研究現況及研究項目，包括場址特性調查、處置技術與功能/安全評估。而其目前重要研究項目，則包括地震對處置場危害分析、地下水分析與模擬、以 20

倍重力加速之離心機進行緩衝材料長期沈陷評估實驗等；後者歷經多次試驗及測試而趨於成熟，日後將可對緩衝材料中之水流行為進行離心加速分析。

3.2.4 放射性廢棄物最終處置綜合評述

依據本次參訪過程中獲知，高知縣安芸郡之東洋町(Toyo town)原為日本可能做為高放射棄物最終處置的場址，東洋町的地理位置如圖 20 所示。東洋町前地方政府首長原本支持處置方案，日本的申照機構 NUMO 曾於 2006 年 8 月開始申請，經過約一年的時間，仍未獲地方議會通過與民眾的支持。前任地方首長於今年四月競選連任失敗，而新任的地方首長的態度則傾向於反對的立場， NUMO 也在今年 8 月 23 日已撤銷該建造之申請案。因此 NUMO 正繼續透過電視、雜誌、報紙等宣傳方式，尋求更多的支持力量。

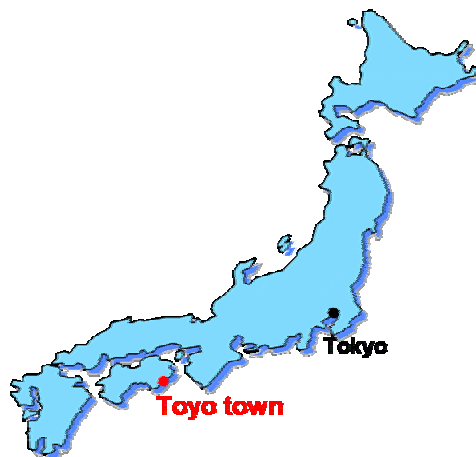


圖 20 日本可能的高放射性廢棄物最終處置場地理位置圖

日本的高放射性廢棄物最終處置概念中，因分沈積岩及結晶岩類兩種不同地質特性，而規劃出不同的處置概念。由於目前尚未決定處置母

岩的種類，因此兩種岩性的相關研究均積極進行中。此外，也分別探討處置容器採用水平置放與垂直置放的二種可能性概念，由於目前對於水平置放的研究仍處於概念階段，因此尚未進行功能評估等相關分析。

JAEA 之東濃地科中心之研究試驗區雖然是政府指定提供的區域，未來實際場址母岩未必是該區域之母岩，但對高放射性廢棄物處置場址分析技術之發展與執行，整體之精神為務實而前進，各項研究不因尚未有確認場址或人員變動而停滯或變動，按步就班，循序漸進。其中有關場址之水文地質模型之逐步建立程序與方法值得本計畫學習或作為未來技術合作之內容。

CRIEPI 之處置技術研究設備與實驗精神，如緩衝材料之縮小比例尺與以離心機研究評估較長時間的特性；長達 20 年研究密封鋼桶 O-Ring 效能等，值得讓我們對長期實驗型基礎研發在國內推動之必要性作一嚴肅的思考。而其研究設備設計之精細，且實驗規格比照最終處置目標，值得國內研究學習。

JNFL 六個所村在低放射性廢棄物最終處置場之工程障壁設施中，混凝土設計壽命為 30 年。該場之設計理念，所考慮的核種與台灣的情況有何差異，我們的處置策略是否亦應有同樣考量，得在未來計畫執行中應該予以釐清並反應在合理的設計上。而該處置場之營運中心以 80 人的規模即可運轉該場址，可見當時之設計、需求、與廢棄物特性顯然有精確的規劃，值得我們學習。

四、建 議 事 項

1. 國內目前才開始投入二氧化碳的海洋封存研究，因此建議以海洋環境與國內相近的日本為例，參考日本過去 15 年來的研究成果，包括二氧化碳的深海特性、封存方式與現場技術(如注入與海上工程等)、封存行為模擬等內容，規劃出國內研究之技術發展藍圖(roadmap)，且尋求與日本可共同研究之主題，是國內目前發展此項技術最需要進行的項目。
2. 日本的二氧化碳封存是由 RITE 為主導機構，核研所若欲與此單位直接建立合作管道，恐因可能受到日本官方的管制而受限。因此建議核研所可經由與 CRIEPI 的合作，間接參與 RITE 的國際研究案，或者由經核研所委託整合的國內學術機構與 RITE 合作，或利用邀請專家來台演講方式，進行實質技術轉移，獲取更大的研發效益。
3. 日本原子力研究開發機構(JAEA)之東濃地球科學研究中心的場址斷層分析能力，為分析核種外釋的概念模型中扮演重要角色，且該中心整體之實驗精神為務實而前進，各項研究不因尚未有確認場址或人員變動而停滯或變動，按步就班，循序漸進。因此建議核研所可派員前往該中心進行實習，學習配合現場資料，而以逐步方式(stepwise)來建立之本土化之水文地質模型之程序與方法，並可做為驗證國內已發展評估程式之能力。
4. 我國最終處置研究經費遠較日本為低，因此相關研究規模與目標應審慎檢討評估以符需要，俾在有限之資源條件下能發揮最大的效

益。而 CRIEPI 之處置技術研究設備，如緩衝材料之縮小比例尺與以離心機研究評估較長時間的特性，設計精細，且實驗規格比照最終處置目標，值得學習。由於核研所正與 CRIEPI 討論簽訂技術合作備忘錄，人員技術交流架構已成型，建議可派員前往該中心，藉由該中心的實驗結果資料，驗證本土性的評估技術，未來亦可將合作範圍擴充到乾貯設施設計、再生能源開發(含二氧化碳補獲與封存)等其他議題。