

出國報告(出國類別：開會)

高放射性廢棄物處置技術交流 研討會及設施參訪

服務機關：台灣電力公司

姓名職稱：張武侯處長

李宗倫組長

邱琮翔專員

陳臆涵專員

派赴國家：芬蘭、法國

出國期間：105年9月25日~105年10月7日

報告日期：105年11月22日

摘要

本次出國目的為參加於法國召開之「第 22 屆台法經濟合作會議」，由臺灣產官學研各領域專業技術人才籌組民間代表團參與，並由台電公司鍾總經理炳利擔任代表團領隊，本年度會議中，臺法雙方針對再生能源及智慧經濟合作議題分別發表簡報及討論。

本次出國另一目的為參觀芬蘭與法國的地下實驗室，2 座地下實驗室皆建造於地下深度約 500 公尺，並於地下實驗室內進行各種全尺度實驗，其中，芬蘭的處置母岩為花崗岩，法國的處置母岩為泥岩，我國目前以花崗岩為主要調查母岩，為了處置工作的推動，地下實驗室的建置應列為處置工作的重要目標。

本次出國並參加台電公司與法國放射性廢棄物專責機構 ANDRA 公司共同舉辦之「高放射性廢棄物處置技術研討會」，於會議中，台電公司與 ANDRA 公司針對高放廢棄物處置，進行技術討論，討論議題包括：高放射性廢棄物最終處置營運策略與推動現況、熱-水-力-化耦合模式發展現況、空中磁測技術發展、地下水流模擬、地質特性、廢棄物罐因腐蝕與剪力情節失效評估、處置坑道封塞分析以及安全評估等議題，進行簡報與討論，最後 ANDRA 公司並針對建造地下實驗室以來，所得到的經驗回饋進行分享。

目錄

摘要	i
目錄	ii
圖目錄	1
目的	3
壹、 過程	4
貳、 工作內容	6
一、 參訪芬蘭 ONKALO 地下實驗室	6
二、 參加第 22 屆台法經濟合作會議	16
三、 高放處置技術交流研討會	18
四、 參訪 Buré 地下實驗室	27
五、 國際同儕審查規劃討論會議	35
參、 心得	36
肆、 建議	37
附錄 1	0

圖目錄

圖 1 訪問行程及工作內容.....	5
圖 2 芬蘭運轉中、建造中及擬建核能機組.....	6
圖 3 ONKALO 地下實驗室佈置圖.....	8
圖 4 ONKALO 坑道鑽炸法施工示意圖.....	8
圖 5 進入 ONKALO 地下實驗室前著裝.....	9
圖 6 ONKALO 地下實驗室坑道.....	10
圖 7 技術人員進行解說.....	10
圖 8 試驗處置坑道.....	11
圖 9 試驗處置孔底部積水.....	12
圖 10 膨潤土顆粒.....	12
圖 11 隧道壁上之監測樁.....	13
圖 12 ONKALO 坑道內展示版.....	13
圖 13 全尺度封塞及坑道封閉試驗.....	14
圖 14 ONKALO 地下實驗室合影.....	14
圖 15 ONKALO 展示館.....	15
圖 16 第 22 屆台法經濟合作會議議程.....	17
圖 17 第 22 屆台法經濟合作會議現場.....	18
圖 18 高放射性廢棄物處置技術研討會議程.....	19
圖 19 台電公司說明用過核子燃料最終處置計畫之管理政策.....	21
圖 20 法國放射性廢棄物分類.....	21
圖 21 法國高放射性廢棄物最終處置未來規劃.....	22
圖 22 雙方對於關切議題進行討論.....	22
圖 23 法國最終處置場之地質構造.....	24
圖 24 法國安全評估結果回饋至研究與設計.....	25
圖 25 Buré 地下實驗室取得岩心供檢驗及分析.....	26
圖 26 雙方參與研討會成員於 ANDRA 標誌前合影.....	27
圖 27 預約參訪 Buré 地下實驗室之團體.....	28
圖 28 實體廢棄物罐展示.....	30
圖 29 全尺寸處置坑道及廢棄物封填示意圖.....	30
圖 30 廢棄物罐送入處置坑之傳輸設施.....	31
圖 31 隧道開挖機具操作台展示.....	31
圖 32 護箱墜落測試影片.....	32
圖 33 HLW 外包裝.....	32
圖 34 外包裝外壁上之陶瓷墊片.....	33

圖 35 法國 HLW 地質處置工程障壁設計.....	33
圖 36 連結地表及地下設施豎井示意圖.....	34
圖 37 Buré 地下實驗室參訪團體照.....	35
圖 38 國際同儕審查規劃會議之討論.....	36

目的

用過核子燃料最終處置是核能發電後端營運中最關鍵之課題，世界上的放射性廢棄物處置先進國家，如瑞典、芬蘭、瑞士、法國、日本等，均設立負責放射性廢棄物處理的專責機構，進行地質鑽探、開挖工法、工程設計、安全評估等處置相關技術研究，而在處置技術的研究過程中，地下實驗室的建置是相當實際的手段與方式。國際間地下實驗室的發展策略，為在合適的岩體，開挖適當的深度，讓研究人員可以進行各項與處置工作相關的實驗，與室內實驗不同的是，地下實驗室占地比室內實驗室廣大，可進行全尺度實驗，所得到的試驗值，遠比室內實驗室更貼近真實環境的樣貌。

本次參訪之芬蘭、法國 2 國，在國際放射性廢棄物最終處置技術領域內處於領先之地位，芬蘭為全世界首位取得高放射性廢棄物最終處置設施建造執照之國家，法國也已經選定高放最終處置設施之場址並準備提出建造執照之申請，前述 2 國除有相當豐富的處置相關技術之研究經驗，並都已興建場址特定型地下實驗室以進行相關技術驗證工作。

本次安排與法國放射性廢棄物專責機構(Agence Nationale pour la Gestion des Dechets Radioactifs, ANDRA)技術人員進行高放處置技術研討會，針對雙方目前地質特性、處置工程設計、安全評估研究成果及後續可能合作事項進行交流討論，並藉由實際參訪芬蘭 ONKALO 地下實驗室及法國 Buré 地下實驗室，瞭解地下實驗室之規劃設計、處置技術之驗證與研發及營運管理經驗，可供我國借鏡參考學習，有助於用過核子燃料最終處置計畫之執行及推動。

壹、過程

自 105 年 9 月 25 日出發，迄 10 月 7 日返國(計 13 天)共前往芬蘭及法國 2 個國家，本行程原訂 9 月 26 日 7:35 抵達巴黎後，轉搭乘 10:50 芬蘭航空的班機前往赫爾辛基，但因原訂班機因技術因素取消及候補機位有限，參訪團員分 2 批次改搭當日 15:25 及 19:25 的班機前往赫爾辛基，以致抵達赫爾辛基時已經是 23:00，而必須壓縮次日之行程，9 月 27 日一早便前往芬蘭放射性廢棄物專責機構 Posiva 公司位於 Olkiluoto 的 ONKALO 地下實驗室進行設施參訪，於 9 月 28 日返回巴黎並參加 9 月 29 日舉行的「第 22 屆台法經濟合作會議」，9 月 30 日、10 月 3 日及 10 月 4 日與 ANDRA 進行 2 天的高放處置技術交流研討會及 1 天的地下實驗室設施參訪，並於 10 月 5 日拜會「我國用過核子燃料最終處置技術可行性評估報告」(以下簡稱 SNFD2017 報告)國際同儕審查召集人 Dr. Hans Riotte，共同討論國際同儕審查規劃相關工作之辦理時程與相關事項，詳細訪問行程詳如圖 1。

日期	地點與行程	工作內容
9月25日(日)	臺北到巴黎	往程
9月26日(一)	巴黎到赫爾辛基	
9月27日(二)	赫爾辛基到 Olkiluoto Olkiluoto 到赫爾辛基	參訪 ONKALO 地下實驗室
9月28日(三)	赫爾辛基到巴黎	路程
9月29日(四)	巴黎	參訪第22屆台法經濟合作會議
9月30日(五)	巴黎	參加高放技術交流研討會
10月1日(六)	巴黎	彙整資料
10月2日(日)	巴黎到 Bure	路程
10月3日(一)	Bure 到巴黎	參訪 Bure 地下實驗室
10月4日(二)	巴黎	參加高放技術交流研討會
10月5日(三)	巴黎	參加國際同儕討論會議
10月6日(四)	巴黎到臺北	返程
10月7日(五)		

圖 1 訪問行程及工作內容

貳、工作內容

本次行程由台電公司(以下簡稱為本公司)核能技術處張處長武侯帶隊並邀請核能研究所、工業技術研究院及國立中央大學共同前往，工作內容說明如下：

一、參訪芬蘭 ONKALO 地下實驗室

芬蘭目前運轉中的核能電廠共有兩座，每座電廠各有 2 部機，另有 1 部機建造中及 2 部機規劃中(如圖 2)，2 座核電廠分別位在 Loviisa 及 Olkiluoto 地區，並分別由 Fortum 和 TVO 電力公司所擁有，根據芬蘭官方統計報告(Production of electricity and heat 2015)，核能發電提供之電力約佔芬蘭全國所需電力之 27%。

機組名稱	狀態	反應器類型	容量(MWe)	商轉日期	關閉日期
Loviisa 1	運轉中	VVER-440/ V-213e	488	1977	2027
Loviisa 2	運轉中	VVER-440/ V-213e	488	1980	2030
Olkiluoto 1	運轉中	BWR	885	1978	2039
Olkiluoto 2	運轉中	BWR	880	1980	2042
Olkiluoto 3	建造中	EPR	1,600	2016	2075
Olkiluoto 4	擬建	PWR 或 BWR	1,000 ~ 1,800	2020	2080
Hanhikivi 1	擬建	VVER-1200/ V-491	1,250 ~ 1,700	2020	2080

圖 2 芬蘭運轉中、建造中及擬建核能機組

芬蘭政府了解核能發電對國家能源的重要性，也知道採用核能發電須積極面對核廢料處理及處置問題。為此，芬蘭於 1983 年制定其放射性廢棄物管理政策，並依據 1987 年核能法(Nuclear Energy Act)將深層地質處置作為用過核子燃料之營運方針，復於 1988 年成立芬蘭核子廢棄物管理基金，由 Fortum 及 TVO 電力公司提撥金額給政府，並由政府的

勞動經濟部負責監督管理，其運用包含高放射性廢棄物、中間貯存及輸送、最終處置場的選址和建造、電廠及設施除役、研究開發及放射性廢棄物設施相關項目之支出，1994 年芬蘭核能法的修正案規定，放射性廢棄物應在國內處理與處置。

為確保核廢料處置工作之公正性及獨立性，芬蘭於 1995 年成立了放射性廢棄物最終處置的專責機構 Posiva 公司，並依照使用者付費之原則，由國內 2 家採用核能發電之電力公司 Fortum 和 TVO 合資成立，依照 2 家電力公司所產生用過核子燃料之數量比分配持股比例，其中 TVO 佔 60%股份，Fortum 佔 40%股份。此外，Posiva 僅負責進行放射性廢棄物之最終處置工作，核電廠除役工作仍由電力公司自行負責。

芬蘭的用過核子燃料最終處置場址，自 1978 年開始進行處置場址的調查，經過初步、細部場址調查，到 1999 至 2001 年正式進入法定程序，提出以 Olkiluoto 作為最終處置場址，並獲得地方及中央政府與議會同意。接著，興建 ONKALO 地下實驗室做為展示及各項實驗之用，目前已深入地下 430 公尺，用過核子燃料的最終處置深度約為地下 500 公尺左右。

在芬蘭，目前正準備建造世界上第一個用於高放射性廢棄物的最終處置設施(2015 年取得建造執照)。全世界有 40 餘個使用核能的國家中，芬蘭可能是第一個將商轉高放射性廢棄物進行處置的國家。芬蘭 ONKALO 屬於場址特定型地下實驗室，係做為處置場開挖前的現地研究平台。芬蘭的 ONKALO 地下實驗室於 2004 年開挖，整個地下實驗室的配置如圖 3 所示，通行隧道的部份採用鑽炸法開挖(圖 4)。ONKALO 提供了工程人員重要的現地開挖技術與調查數據，並讓研究人員能有一個與實際場址類似的工作平台，進行技術的精進與驗證；另外一個重要目的，則是為了驗證 Olkiluoto 場址，是否合適於未來處置之用，此外，亦可作

為公眾宣導與溝通之良好平台。

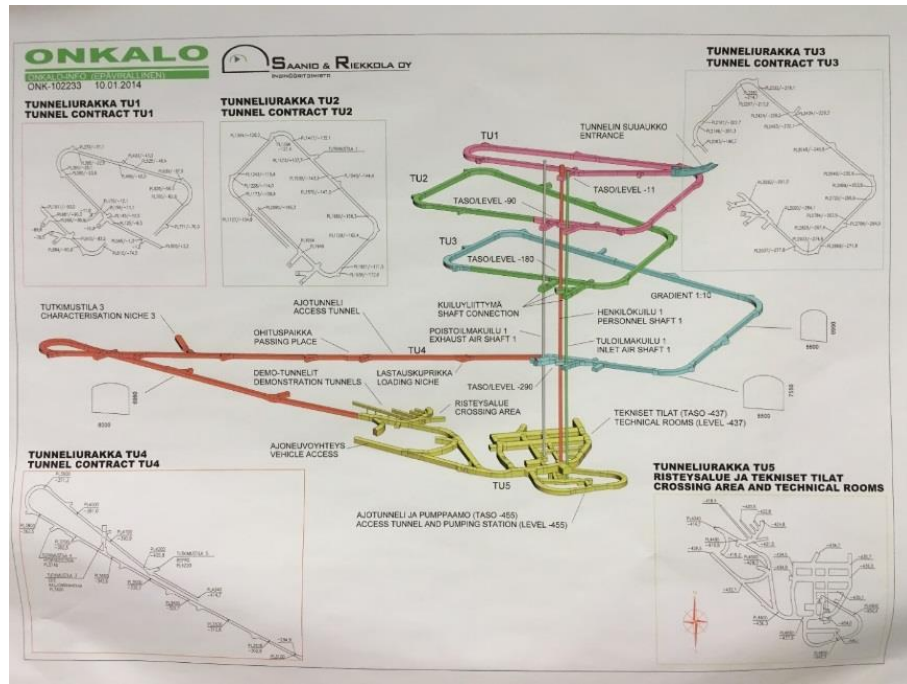


圖 3 ONKALO 地下實驗室佈置圖

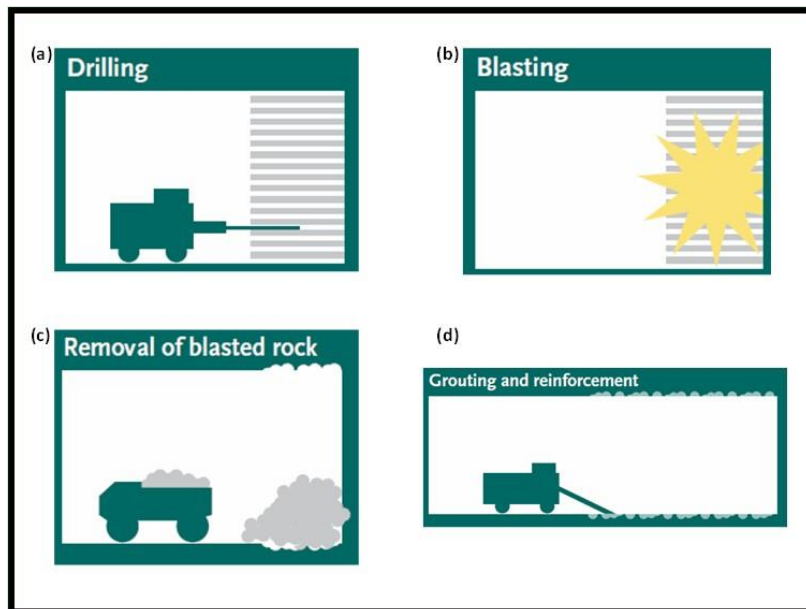


圖 4 ONKALO 坑道鑽炸法施工示意圖

在進入地下實驗室前，先由 Posiva 公司的技術人員 Mr. Ismo

Aaltonen 針對地下實驗室的歷程及背景進行簡單的介紹，之後觀看工安教育影片並引導至工作區內進行換裝(圖 5)，共配備有安全帽、反光背心、手電筒及在緊急時使用之小型空氣呼吸器，然後搭車沿著螺旋型的通行隧道駛入地下實驗室內，隧道的下降坡度為 10° ，意即每行駛 1,000 公尺的距離相當於下降 100 公尺，目前已開挖之通行隧道長度為 4,500 公尺，車行約 10 分鐘後到達地下約 450 公尺處(圖 6)，由技術人員進行解說(圖 7)，主要說明內容如下：



圖 5 進入 ONKALO 地下實驗室前著裝



圖 6 ONKALO 地下實驗室坑道

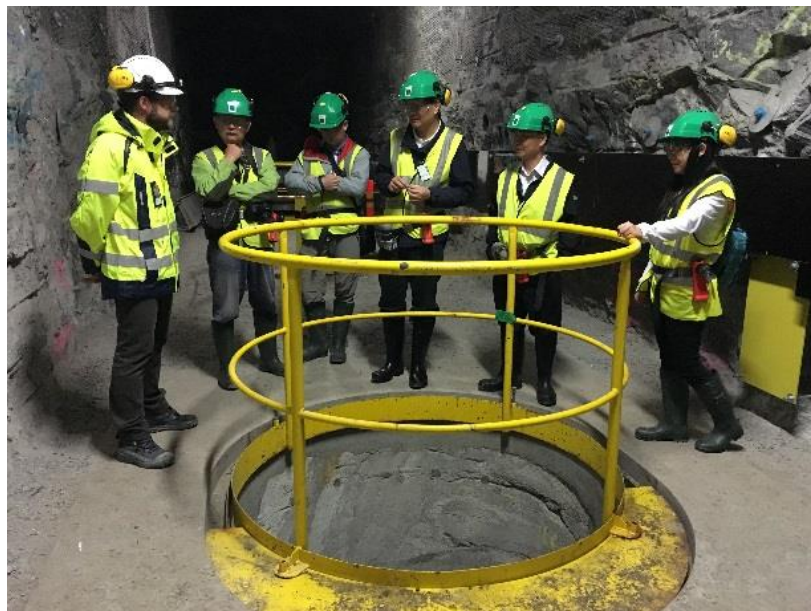


圖 7 技術人員進行解說

(一) 在地質上，芬蘭跟瑞典同屬芬諾斯堪那維亞地盾(Fennoscandia Shield)的一部分，是歐洲最古老的地塊之一，主要由前寒武紀之岩石所組成，芬蘭境內最常見之岩石為花崗岩質結晶岩。本次參訪 ONKALO 地下實驗室，實際觀察現地出露的岩體種類包含有：花崗

岩、石英雲母片麻岩、雲英岩及花崗閃長岩等結晶岩。

(二) ONKALO 地下實驗室內規劃約 3 條示範用坑道，主要目的在於展示及試驗處置孔及處置坑道，圖 8 為其中一個處置坑道，坑道內共設置 3 個處置孔，每孔深約 5 公尺，目前沒有進行試驗，其中 1 個處置孔底部有積水(圖 9)，據現場技術人員解釋，孔內的水可能來自坑道內的裂隙，目前尚在監測當中，在處置孔周圍本應填充膨潤土，但因該坑道處置孔目前進行試驗不多，實驗用的廢棄物罐及膨潤土皆已移除，不過，從處置孔旁仍可撿拾到利用膨潤土所製造成的顆粒(圖 10)，據 Mr. Ismo Aaltonen 表示，這些小型顆粒，主要用來填補膨潤土塊的縫隙，膨潤土顆粒有特殊配方，可以充分達到填實效果。



圖 8 試驗處置坑道



圖 9 試驗處置孔底部積水



圖 10 膨潤土顆粒

(三) 在 ONKALO 地下坑道內隨處可見安裝在隧道壁上的監測樁(圖 11)，據 Mr. Ismo Aaltonen 表示該監測樁用以定期使用光纖量測坑道的變形狀況，作為評估開挖擾動帶(Excavation Damaged Zone, EDZ)的參考數據。



圖 11 隧道壁上之監測樁

(四) 在坑道內常可看到如圖 12 所示的看板，展示及說明地下實驗室的配置與實驗項目及目的等，讓參訪人員更能藉由看板瞭解隱蔽部分之實驗內容。

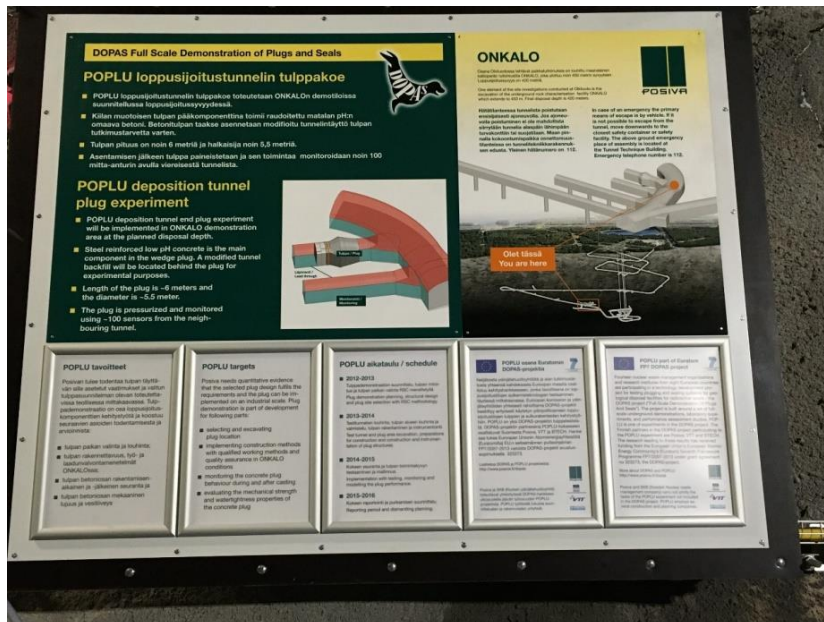


圖 12 ONKALO 坑道內展示版

(五) 目前現場正進行全尺度封塞及坑道封閉試驗(圖 13)，封塞主要材料

為水泥，壁上安裝各式各樣的儀器，以監測封塞的變形。



圖 13 全尺度封塞及坑道封閉試驗

整個參觀行程，讓人有讀萬卷書，不如行萬里路之感，實際參觀地下實驗室，與閱讀技術報告感覺完全不同，令人感覺收穫豐碩，圖 14 為參訪結束後在坑道內合影。



圖 14 ONKALO 地下實驗室合影

(六) 地下實驗室參訪結束後，在 ONKALO 展示館停留參觀館內展示品 (圖 15)，包括全尺寸的銅質廢料罐、鑄鐵內襯、核燃料棒模型及地層處置模型等，讓人感受到 Posiva 公司展現積極與民眾溝通的誠心。

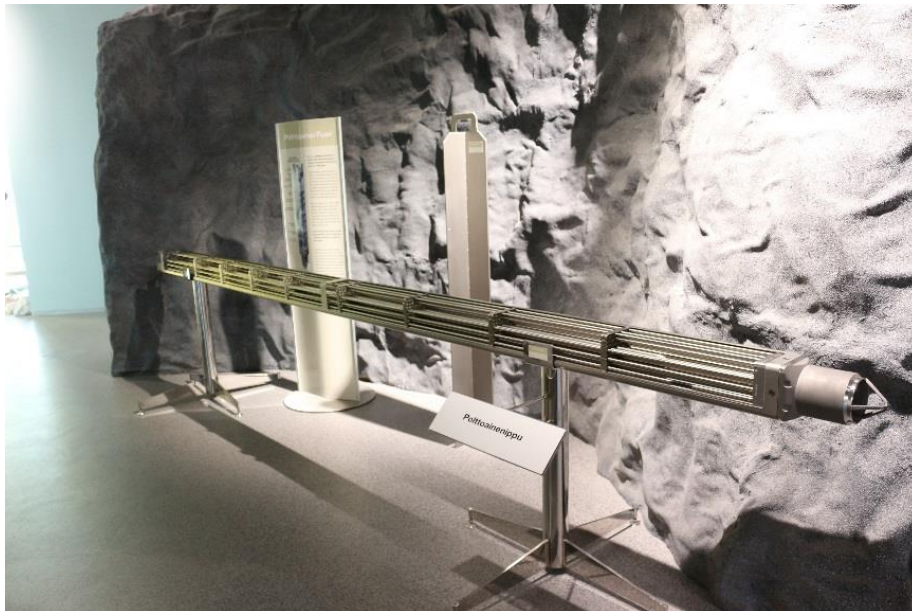
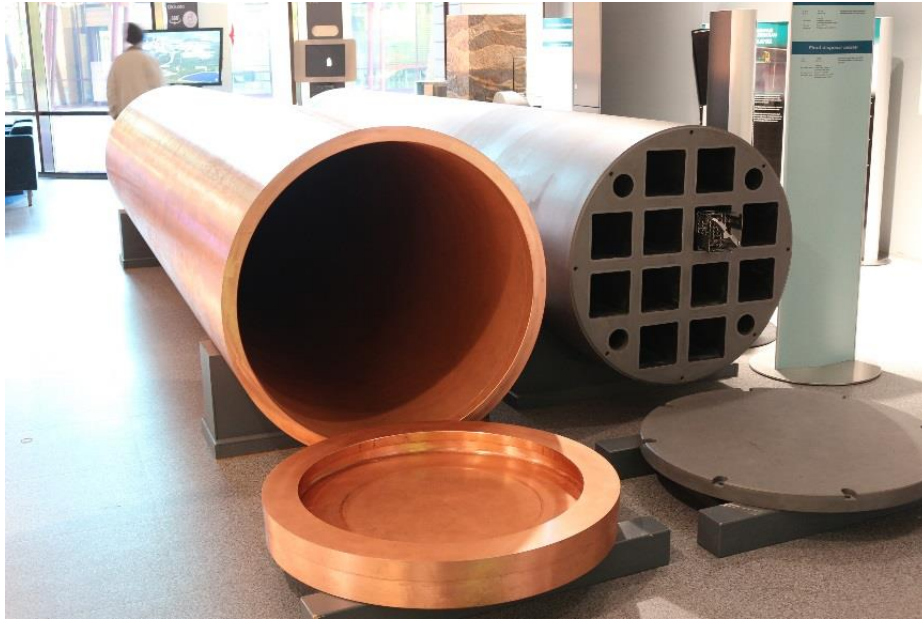


圖 15 ONKALO 展示館

二、參加第 22 屆台法經濟合作會議

105 年 9 月 29 日參加由法國企業行動聯盟(MEDEF International)及中華民國國際經濟合作協會於法國巴黎召開之「第 22 屆台法經濟合作會議」(The 22nd Taiwan-France Economic Cooperation Conference)，臺灣方面由本公司鍾總經理炳利擔任團長，代表團成員包含產官學研各領域專業技術人才共 30 餘人，法國方面則由 MEDEF 的 Ms. Lemblé 領軍，成員亦包含產官學研各領域共 30 餘人，詳細與會人員資訊如[附錄 1](#)。

本次會議主題為「再生能源」及「智慧經濟」2 項議題，議程如圖 16 所示，首先由法方進行歡迎致詞及會議說明後，接續由本公司鍾總經理簡介本公司經營現況及未來電力供應情況，在主題報告上，由台法雙方分別針對再生能源及智慧經濟等項目進行詳細說明。

在再生能源議題方面，著重於風力發電之需求、設計及未來研究方向包括應用光達(Light Detection And Ranging, LiDAR)技術以高頻率發射雷射光束進行風場掃描，便得知風力發電效應最高之位置；針對風力發電機的設計進行改良，並附加寓教於樂、觀光休憩環境美化等各項功能。在智慧經濟議題方面，鑑於經濟與能源是互利共生的型態，但對於尚未開發或開發中國家的偏遠島嶼而言，由於電力機組分配不均，能夠有持續的電力已是島民的最低期望。因此，我方針對此種情境提出建議及實際執行之成果，包括於各孤島建構其自給足的發電機組、利用單元池串聯供應等模式，期望以更有智慧的方式提供穩定的電力，藉以維持其最低的生活所需並作為未來經濟發展之重要基礎，會議現場如圖 17。

The 22nd Taiwan-France Economic Cooperation Conference

THURSDAY 29TH SEPTEMBER 2016 – 8:30 TO 11:30 AM
Working language : English
MEDEF Headquarters - 55 avenue Bosquet - Paris 7^{ème}

A G E N D A

8:00 – 8:25	Registration of the attendees and welcoming breakfast of Korean and French companies - Welcoming breakfast
8:25-8:30	Welcome to the Taiwanese delegation and photo session
8:30 – 8:35	WELCOMING WORDS by Mr. Gérard WOLF, Chairman of MEDEF International's Task Force on Sustainable Cities
8:35 – 8:45	SPEECH by Mr. HWANG Jung-Chiou, Chairman of Taiwan Power Company : - Economic situation and future reforms - Priority sectors in Taiwan
8:45 – 9:45	SESSION 1: RENEWABLE ENERGY <u>Presentations by Taiwanese and French speakers:</u> - Taiwan Power Company - French side - Taiwanese side - French side <u>Q/A session</u>
9:45 – 10:45	SESSION 2: SMART ECONOMY <u>Presentations by Taiwanese and French speakers:</u> - Industrial Technology Research Institute - French side - Institute for Information Industry - French side <u>Q/A session</u>
10:45 – 10:50	CLOSING REMARKS by Mr. Gérard WOLF, Chairman of MEDEF International's Task Force on Sustainable Cities
10:50 – 11:30	Coffee Break & Informal B2B Meeting

圖 16 第 22 屆台法經濟合作會議議程



圖 17 第 22 屆台法經濟合作會議現場

三、高放處置技術交流研討會

法國用過核子燃料營運政策採取再處理的方式，用過核子燃料經由再處理，萃取出可再使用之材料重新製成核燃料，而殘餘廢棄物，則經玻璃固化後，裝入廢棄物罐以待進行最終處置，這些經固化後的廢棄物，即為法國之高放廢棄物。玻璃固化後的高放廢棄物，其活度降低也比較穩定。

依照法國高放射性廢棄物最終處置之規劃，ANDRA 公司預定於 2017 年申請最終處置場的建造執照，為了解法國的處置工作進展情形，藉由這次來訪法國參加會議的機會，本公司與 ANDRA 公尺合作籌劃舉辦為期 2 天的「高放射性廢棄物處置技術交流研討會」及 1 天的設施參訪，於 9 月 30 日、10 月 4 日由雙方針對放射性廢棄物營運管理、熱水力化耦合模擬、空中磁測技術發展、地下水流模擬、地質特性、廢棄物罐因腐蝕與剪力情節失效狀況、處置坑道封塞分析以及安全評估等關鍵議題進行簡報交流，研討會議程詳圖 18。

第 1 日上午由本公司邱琮翔專員及 ANDRA 公司國際事務處處長 Dr. Gerald Ouzounian 分別就雙方的放射性廢棄物營運政策、處置與研究經驗及未來方向進行介紹(圖 19)。法國境內目前有 58 座運轉中的核能機組持續提供安全且低價的電力，在採用核能發電的同時，也將核廢料的處理與處置列入考量，目前法國的放射性廢棄物主要來自於：(1)工業及事業廢棄物；(2)核燃料再處理後之殘餘廢棄物；及(3)核電廠除役之廢棄物。其中這些廢棄物又依其特性可分為：(1)極低放射性廢棄物(Very-low-level waste, VLLW)；(2)長半衰期低放射性廢棄物(Low-level long-lived waste, LLW-LL)；(3)長半衰期中放射性廢棄物(Intermediate-level long-lived waste, ILW-LL)；以及(4)高放射性廢棄物(High-level waste, HLW)(圖 20)。目前正在進行深層地質最終處置安全評估及工程技術的研究，預計於 2017 年提出建造執照的申請，如 2020 年獲核准開始建造，2025 年開始營運(圖 21)。Dr. Gerald Ouzounian 在會中也提到法國目前的能源政策，以發展再生能源為主要之課題，以符合 2015 年巴黎氣候協定中世界各國達成溫室氣體減排的共識。新增加的再生能源將用來逐步取代化石能源，利用核能及再生能源 2 大組合來降低法國的排碳量，但前提是維持目前核能發電的總發電量不變的條件下，逐步提高再生能源發電的比例。雙方於簡報後對於關切之議題進行熱烈討論(圖 22)。



圖 19 台電公司說明用過核子燃料最終處置計畫之管理政策

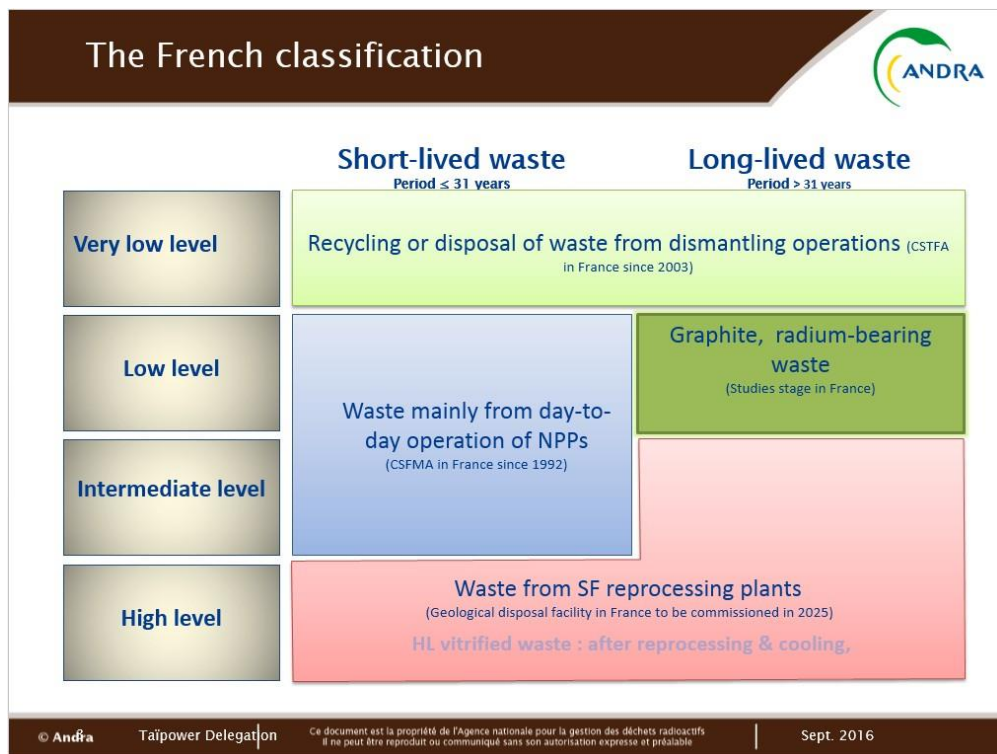


圖 20 法國放射性廢棄物分類

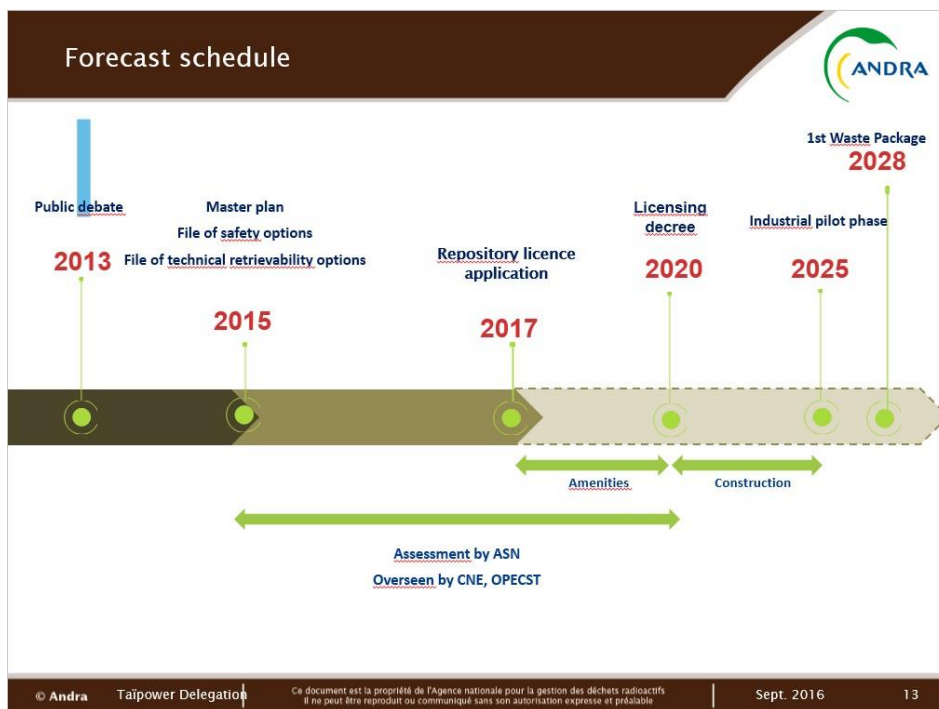


圖 21 法國高放射性廢棄物最終處置未來規劃



圖 22 雙方對於關切議題進行討論

第 2 個議題是熱傳(Thermal)、水力(Hydro)、力學(Mechanic)、化學(Chemical)(THMC)耦合應用，由於 THMC 現象在高放處置的近場而言非常重要，國外知名大型計畫 DECOVALEX，已針對此議題，

研究多年，並與現場試驗進行比對，會議中，中央大學葉高次教授闡述其自行研發之 THMC 數值模擬軟體 HYDROGEOCHEM 模式發展現況及未來發展方針，並展示模擬國際案例之結果。ANDRA 的 Mr. Darius Seyedi 說明其 THM 耦合模擬成果，根據地質調查與地下實驗室開挖後的現地觀察，確認場址中地下水的含量甚低且工程障壁之設計沒有膨潤土，對處置設施之近場影響性低，故僅需考慮 THM 的耦合影響性。另外，透過現地的調查及實驗觀測數據，進行 THM 模擬的比對，以確認數值模擬的合理性及可靠性。

下午由工研院田能全博士介紹 SNFD2017 報告參考案例的區域尺度模擬成果，於簡報中，首先說明如何利用 FracMan 程式，透過裂隙調查與分析結果，發展區域離散裂隙網路(Discrete Fracture Network, DFN)模型，並將其轉換至連續等效介質(Equivalent Continuous Porous Medium, ECPM)，最後再將相關參數套入 TOUGH2 程式，進行大區域模型地下水流場模擬。ANDRA 的 Mr. Hakim Benabderrahmane 介紹如何由區域大型模擬，逐漸將模擬範圍縮小到場址大小，以應用在處置場安全評估上。

本日最後一場簡報，由工研院董倫道博士發表臺灣地區空中磁測技術的發展現況，除了說明空中磁測的原理、裝備之外，亦重點強調我國所發展空中磁測技術的特點。並藉由過去的研究成果，強化解析技術，以取得更高的精確度及解析能力。簡報中亦說明目前的調查成果與發現，特別針對火山地區，透過空中磁測的解析結果，可了解地下火成岩體與構造的分布，並進一步分析火山的活動性。

10 月 4 日為研討會的第 2 日，首先由工研院田能全博士，針對台灣地質特性進行簡報，簡報中闡明我國目前有三大母岩，分別為花崗岩、泥岩以及中生代基盤岩可以選擇，並闡述我國目前以花

崗岩為主要研究對象，但不排除其他岩體做為未來處置的母岩選擇。ANDRA 的 Mr. Philippe Dubreuilh 系統性的將法國地質特性詳細的說明(圖 23)，法國處置母岩為泥岩，其性質均勻可視為孔隙介質，裂隙並沒有對母岩造成太多安全上的隱憂，加上黏土材料有自我癒合之特性，可有效圍阻放射性核種之遷移。

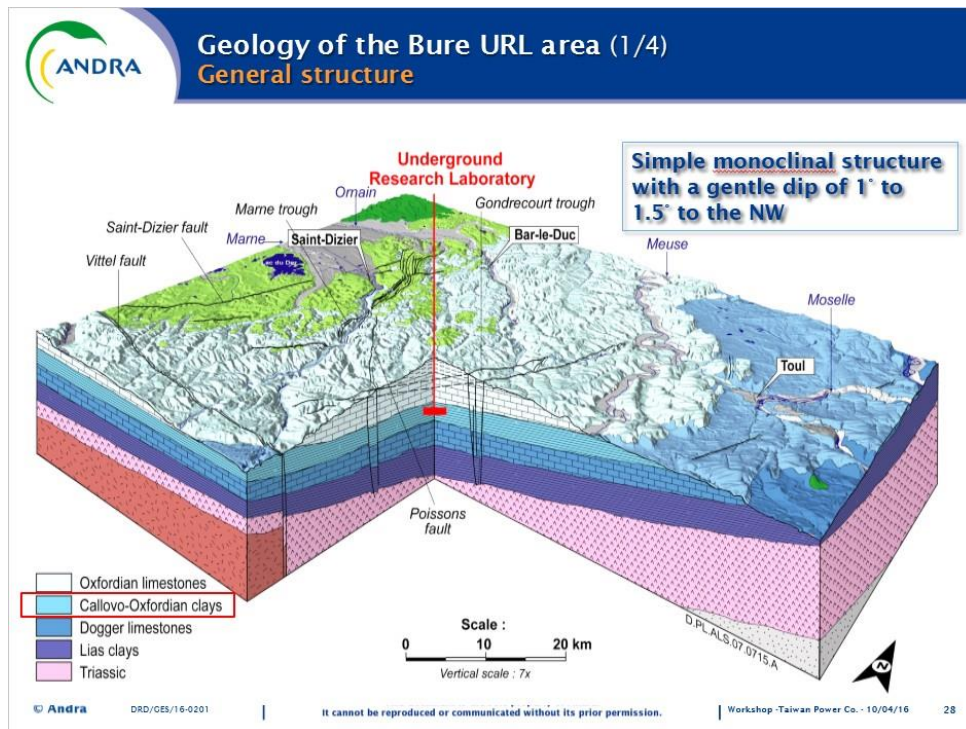


圖 23 法國最終處置場之地質構造

接下來由核研所余允辰助理研究員以及 ANDRA 的 Ms. Lise Griffault 分別就安全評估方法論(Safety Assessment Methodology)提出說明。ANDRA 安全評估可分為運轉安全與封閉後安全 2 部分，運轉期間的安全評估將採用傳統的分析方法；而封閉後的安全評估將以正常情節與變異情節作為定性安全分析方法的案例，並以其地下實驗室的實務經驗及最新的安全規範進行整合(圖 24)。我方 SNFD 2017 報告中參考案例之安全評估是參考瑞典 SKB 的方法論，此方法以邏輯性概念蒐集並彙整與處置場相關的所有特徵、因素及

作用後，建立所有處置元件於圍阻與遲滯的功能，再利用其相對應的指標及準則建構腐蝕作用及剪力效應等廢棄物罐破壞情節，藉以計算放射性核種傳輸至人類環境後造成的影響，並同樣的反覆精進並回饋未來地質調查及工程設計及處置場建造。

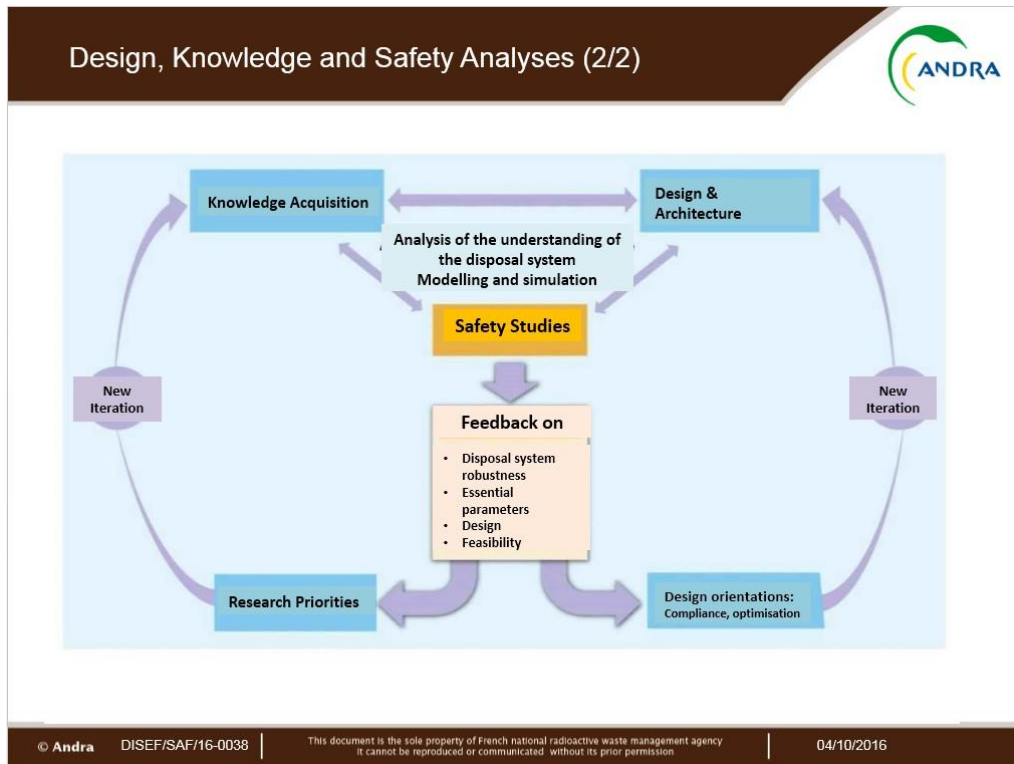


圖 24 法國安全評估結果回饋至研究與設計

核研所余允辰助理研究員接下來報告參考案例安全評估中的 2 個主要基本情節，主要內容為在剪力情節及腐蝕情節的狀況下，廢棄物罐對於核種圍阻能力的影響，經由參考案例之計算，驗證我方已具備安全評估之能力。法國泥岩屬於軟岩，因此重視的是處置隧道開挖後造成的應力破壞，以及外包裝受應力及化學腐蝕的影響，ANDRA 的 Mr. Didier Crusset 也針對廢棄物罐腐蝕狀況進行報告，廢棄物罐以鋼材為主，報告中提及多項試驗，反覆測試鋼材的耐用性，雖然法國與我國處置概念不同，但是其試驗的詳細程度，令人大開眼界，相當值得借鏡。

核研所徐文杰博士報告處置隧道封塞(plug)的研究現況，主要為利用 3DEC 力學分析軟體，探討不同形狀的封塞，受膨潤土回脹壓力的變形狀況。ANDRA 的 Ms. Sarah Dewonck 是 ANDRA 的技術部門主管，在簡報中說明 Buré 地下實驗室所進行的各項試驗，地質調查、工程設計及開挖技術等的相互配合與連結(圖 25)，以及十多年來由地下實驗室所學得的經驗與獲得的成果，整體而言，地下實驗室對於處置計畫有非常重要且實質的幫助，其經驗及課題對於未來在實際執行處置作業時必定有精進的作用。



圖 25 Buré 地下實驗室取得岩心供檢驗及分析

在這 2 天的研討會中，雙方與會人員對於簡報之各項議題都有高度興趣並討論熱烈，於研討會的最後，我方團隊與法方會議人員於 ANDRA 公司前合影留念，並期盼未來仍有技術交流甚至共同合作之機會(圖 26)。



圖 26 雙方參與研討會成員於 ANDRA 標誌前合影

四、參訪 Buré 地下實驗室

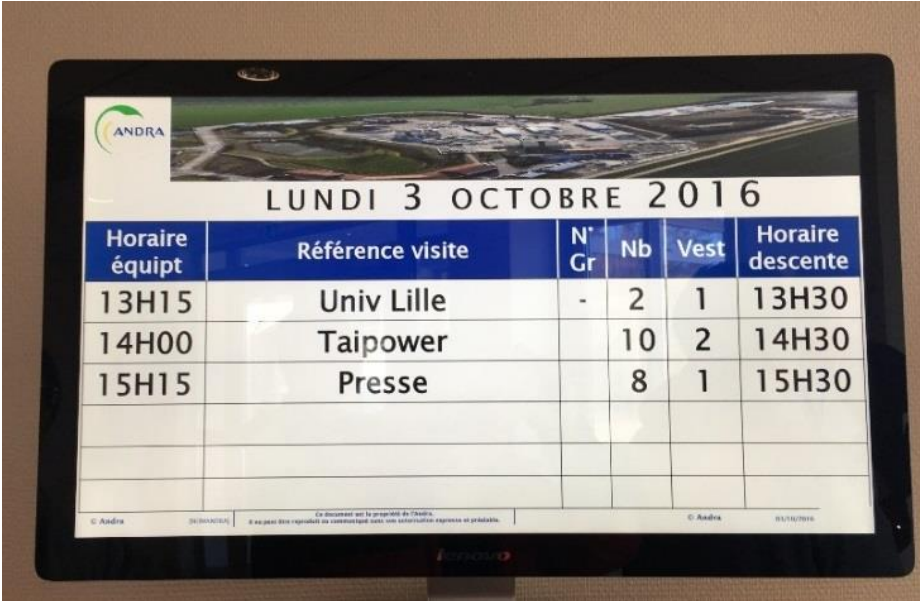
根據法國 1991 年公布之放射性廢棄物法(Radioactive Waste Act)，ANDRA 公司必須建造地下實驗室進行深層地質處置之相關研究。有關地下實驗室之選址工作從 1993 年開始，從一開始 30 個預選地區，透過帶有民意基礎之地方徵選，選出 4 個地區進行進一步調查，這 4 個地區分別為：(1)Meuse；(2)Haut Marne；(3)Gard 及 (4)Vienne。其中除了 Gard 為花崗岩以外，其於地區之處置母岩皆屬泥岩。最後在 1999 年，由政府選定位在 Meuse 及 Haute Marne 之間的 Buré 作為地下實驗室所在地。

Buré 地下實驗室位於巴黎東方約 300 公里處，在地質上屬於侏羅系之沉積盆地(巴黎盆地)，該沉積盆地以中生代的沉積物為主。其中，作為處置母岩的泥岩層稱為 Callovo-Oxfordian Formation，沉積年代約在 1.6 億年前，厚度大約在 130 公尺至 160 公尺之間，

深度約在地下 410 公尺至 550 公尺之間。

地下實驗室之調查規劃，係透過地球物理調查、現地地表地質調查及地質鑽探調查等，從大範圍調查(500 平方公里)，累積足量之資料後，慢慢聚焦並選出最適當之場址(30 平方公里)，以興建地下實驗室。

Buré 地下實驗室的興建主要有 2 個功能，其一為取得現地試驗及地質參數，並進行相關評估結果之驗證；另一目的係作為公眾溝通之平台，讓民眾可以實際參觀設施，了解設施的運作及安全性。一般民眾可透過申請參觀設施，參訪當日有 3 個團體預約參訪，本公司為當日下午第 2 組參訪團體(圖 27)。



LUNDI 3 OCTOBRE 2016						
Horaire équipt	Référence visite	N° Gr	Nb	Vest	Horaire descente	
13H15	Univ Lille	-	2	1	13H30	
14H00	Taipower		10	2	14H30	
15H15	Presse		8	1	15H30	

圖 27 預約參訪 Buré 地下實驗室之團體

設施分為地上及地下 2 部分，地上設施為展示中心，為讓參訪民眾了解設施的功能、目的及安全性，現場展示多樣全尺寸儀器設備，讓民眾了解設施及設備的運作方式，包括有：實體廢棄物罐(圖 28)、全尺寸處置坑道及廢棄物封填示意圖(圖 29)、將廢棄物罐送入處置坑之傳輸設施(圖 30)、隧道開挖機具操作台展示(圖 31)等；並

藉由實際的實驗成果展示，例如：護箱長期重壓測試、護箱墜落測試(圖 32)等，讓民眾了解工程障壁及設施的安全性。本日上午依 ANDRA 之安排，前往參觀展示中心並由地下實驗室技術人員詳細介紹說明，展示中心主要以 ILW-LL 及 HLW 之設備為主，法國 HLW 的最終處置概念是將裝有 HLW 的廢棄物罐(Stainless steel canister)置於碳鋼材質之外包裝(Overpack)中(圖 33)，外包裝直徑 50.5 公分、厚度 6.5 公分、長度約 1.6 公尺，並於外壁上黏貼陶瓷墊片，以利未來移入作業(圖 34)，將外包裝置於長 100 公尺、直徑約 76 公分的處置孔，其內含一直徑 68 公分、厚度 1 公分之中空鋼管作為襯砌(liner)，目的包括可減緩外包裝之腐蝕速率及避免因開挖後應力重新分布與長期潛變所造成的力學破壞，最後並在鋼管及處置孔間填塞約 5~10 公分的水泥及膨潤土混合物(水泥 80%、膨潤土 20%)(圖 35)。法國 HLW 最終處置工程障壁之設計，與芬蘭、瑞典不同，不需要於廢棄物罐外和處置孔間填充厚實的膨潤土，其主要原因為法國處置母岩為泥岩，此區的泥岩均勻，導水特性低、地質活動溫和且沒有太多裂隙產生，且黏土材料有自我癒合之特性，地下水不易進入，因此設計上不須填充大量膨潤土。



圖 28 實體廢棄物罐展示



圖 29 全尺寸處置坑道及廢棄物封填示意圖



圖 30 廢棄物罐送入處置坑之傳輸設施



圖 31 隧道開挖機具操作台展示



圖 32 護箱墜落測試影片



圖 33 HLW 外包裝



圖 34 外包裝外壁上之陶瓷墊片

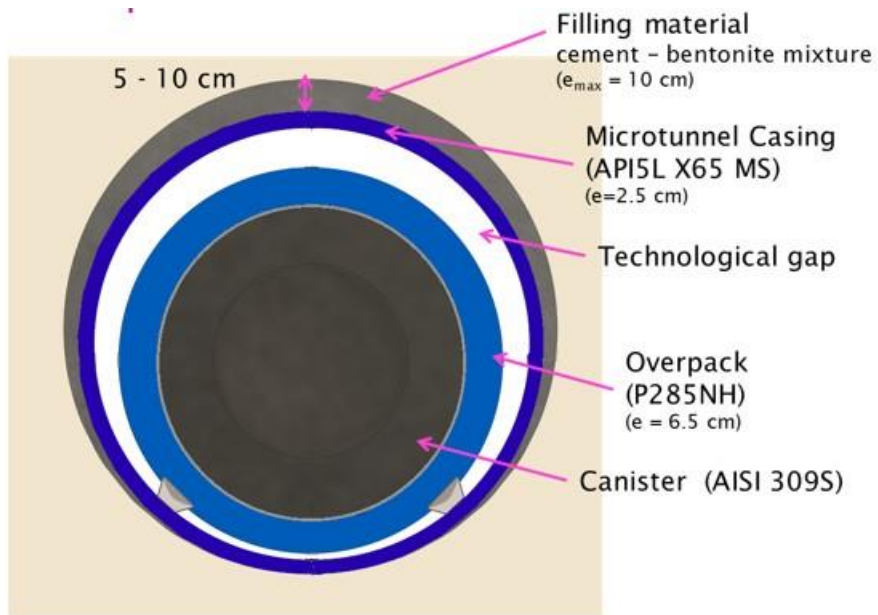


圖 35 法國 HLW 地質處置工程障壁設計

要進入地下實驗室前，先由實驗室技術人員，簡報實驗室的基本介紹，接著進行安全教育訓練，提醒參訪人員有關地下實驗室的逃生及避難方式。接下來領取個人防護及安全設備，並完成換裝後，



圖 37 Buré 地下實驗室參訪團體照

五、國際同儕審查規劃討論會議

SNFD2017 報告是我國用過核子燃料最終處置計畫於「潛在處置母岩特性調查與評估階段」(2005 年~2017 年)之重要的成果報告，為了檢視本報告是否達到國際水平，主管機關原能會要求 SNFD2017 報告須經過國際同儕審查的程序，藉由國際專家的經驗及建議，以期報告品質能與國際接軌，經多方連繫，目前已取得經濟合作暨發展組織/核能署(OECD/NEA)之同意，將協助本公司進行國際同儕審查。

10 月 5 日為本次行程最後 1 日，由本公司假經濟部駐法國代表處位於巴黎之辦公室，邀請國際同儕審查之召集人 Dr. Hans Riotte 針對 SNFD2017 報告之未來審查期程、內容、審查人員以及各章節內容進行討論，以確保國際同儕審查工作得順利執行，Dr. Hans Riotte 對於目前 SNFD2017 報告完成初稿之進度感到滿意，並提醒

審查時所應注意事項，供我方參考，會議討論過程如圖 38 所示。



圖 38 國際同儕審查規劃會議之討論

參、心得

芬蘭跟法國在核能發電的使用及核廢料處置的研究上已有相當歷史，本次行程分別參訪該國為高放射性廢棄物最終處置所設置之地下實驗室，而這 2 國目前在高放廢棄物的最終處置進程上，亦處於領先之地位。其最終處置計畫推展相關經驗值得我國參考。

芬蘭及法國 2 國政府，深深了解核能發電的優劣，在享用核能發電所帶來的生活便利時，也不忘積極且正向的面對處理核廢料議題。2 國的做法有許多相似處，包括有：(1)獨立且專業的專責機構，執行核廢料的處理及處置研究並進行處置相關作業；(2)使用者付費的精神，由廢料的產生者提撥經費，供獨立的專責機構執行最終處置計畫；(3)超然的管制機關，依其獨立及專業性針對核能安全技術議題提出監管意見，以確保核能及輻射安全；(4)公開的態度，將核廢料的處置的必要性及其技術與安全性等，公開的讓人民了解，

以取得民眾的參與及支持；(5)明確的法源依據，由國家訂定明確的法律，供執行單位進行相關必要之調查及研究工作，而不至於無所適從，其中專責機構為推動核廢料處置計畫的基礎。

在本次參訪地下實驗設施中，見到不少年輕的研究人員，芬蘭及法國都意識到最終處置計畫是一個長遠的工作，需積極培養新生代的研究人員投入，確保技術得以承傳，並可長久的執行下去。

目前世界上高放處置依循 OECD 跟國際原子能總署(IAEA)的建議採用技術較純熟的「深層地質處置」進行，本次參訪的 2 國分別係採用同樣的概念，但選用不同母岩進行處置技術之發展，這告訴我們處置技術的規劃與設計應該依各國國情、地質條件、法規依據及可行之技術全盤考量，才得以發展出最適合各國也最可行之方法。

本次參訪 2 國之地下實驗設施，對於各國技術報告內陳述的技術與現地實驗的描述有更進一步的體會，古人說：「行萬里路，勝讀萬卷書」，一點也沒錯，但若無足夠的知識及專業背景，看的再多也只是徒然。透過對現場的認識，可以體認到目前的技術有強化的必要，及須強化的方向，對未來的工作規劃有相當大的助益。

肆、建議

- 一、綜觀國際上放射性廢棄物處置先進國家，多數已興建地下實驗室以發展地質處置技術能力、驗證數值模擬結果及培育本土人才，由本次參訪更可以了解興建地下實驗室確有其必要性，除了可強化現地資料的可信度外，亦可作為民眾溝通之平台，讓民眾知道核廢料處置的安全性及必要性，進而支持處置計畫。
- 二、芬蘭與法國興建之地下實驗室屬於特定型，其地下實驗室與最終處置場址在同一區域，與本公司「用過核子燃料最終處置計畫書」之規劃相同；

然也有國家興建一般型之地下實驗室(如日本)，僅在單純進行研究計畫與民眾溝通，與最終處置場址無關，在國內尚無場址選定法規之情形下，俟可考慮興建一般型地下實驗室，以持續精進地質調查與評估技術。

三、目前國內雖尚未選出高放最終處置場址，但相關研究仍須持續進行，並盡量取得有助於安全評估之關鍵調查資料，以利計畫之推動。

四、除了技術與安全性之外，高放處置工作涉及社會、經濟及能源問題，相關工作整合須借重國家的力量推動，並且在國家充分授權下，進行相關工作。尤其我國仍無相關選址法規，目前僅能就相關調查技術及評估技術持續精進，再取得相關授權後，方可進行後續工作。

五、由芬蘭及法國之經驗可以了解，應積極的透過與民眾溝通，提供更淺顯易懂的技術與概念的分享，使更多人知道處置工作之安全性及重要性，降低受到反對的機率，計畫方可順利推動。

附錄 1



中華民國國際經濟合作協會

Chinese International Economic Cooperation Association

TAIWAN

Business Delegation from CIECA

Led by

Mr CHUNG Bin-Li, President, Taiwan Power Company

On the occasion of the

22nd TAIWAN-FRANCE ECONOMIC COOPERATION CONFERENCE

moderated by

Ms. Géraldine Lemblé, Director of MEDEF International

THURSDAY 29TH SEPTEMBER – 8:30 TO 11:00 AM

Working language: English

MEDEF Headquarters - 55 avenue Bosquet - Paris 7^{ème}

LIST OF PARTICIPANTS

TAIWANESE PARTICIPANTS

❖ Government representatives:

BUREAU DE REPRÉSENTATION DE TAIPEI EN FRANCE

Taipei Office in France

Mr. ZHANG, Ming-zhong

Representative

Mr. Christophe LAI

Director, Economic and commercial department

MINISTRY OF ECONOMIC AFFAIRS

Exploring opportunities for bilateral cooperation between Taiwan and other countries in areas such as IoT, Smart City, 4G/5G development...etc.

Mr. SHY, Huann-Shiuh

Deputy Executive Secretary, Committee of Communications Industry Development (CoCID)

TAOYUAN CITY GOVERNMENT

- Public Utilities
- Industrial Development
- Investment Services

Ms. CHEN, Jyue-ning

Section Head, Bureau of Economic Development

Ms. KAO, Ling-chun

Specialist, Bureau of Economic Development

Conseil de chefs d'entreprise
France-Taiwan

❖ **Taiwanese companies and organizations:**

ACBEL POLYTECH

Established in 1981 with its global headquarters in Taiwan, AcBel specializes in the following: Smart meter, Concentrator, BPLC/PLC Communication module, EV in Car charger, Backup Power, PV inverter, LED street lighting etc.

CONTROLNET INTERNATIONAL

*EMS Energy Management System
Power Grid HV Substation SCADA system
Smart Grid Feeder Automation system
IP Base HA/BA/FA Automation system
IP Base Remote Video Surveillance
Software, Hardware develop & integration*

CHINA STEEL CORPORATION

CSC produces a range of products that includes plates, bars, wire rods, hot and cold rolled coils, electrogalvanized coils, electrical steel coils, hot-dip galvanized coils, and Ti/Ni-base alloy. In 2012, CSC established Wind Power Business Development Committee to implement Renewable energy of wind power, and will be expected to become one of the main sources of domestic alternative energy.

INDUSTRIAL TECHNOLOGY RESEARCH INSTITUTE

Technology and industrial research and incubator of Taiwan

INSTITUTE OF NUCLEAR RESEARCH

INSTITUTE FOR INFORMATION INDUSTRY

Internet of things (IOT), Energy information and communication technology, Hybrid sensor network, Multimedia gateway, High density modem, Voice based telecom service automation, Video on demand service platform, Speech recognition, Digital signal processing.

METROLOGIES ENTERPRISE

Metrologies Ent. Co, Ltd. is established and devoted to the business of Electrical Engineering industry and related 30 years and we are distributors and representative of many worldwide famous manufacturers.

NATIONAL CENTRAL UNIVERSITY

Mr. WAN, Chien-kuo

Business Unit General Manager & COO

Mr. CHIEN, Chun-lung

Principal Engineer

Mr. LEE, Kun-chung (Johnson)

CEO

Ms. CHUNG, Wen-lin (Winnie)

CFO

Mr. WEI, Li-I

Vice Commissioner, Wind Power Business Development Committee

Mr. TUNG, Lun-tao

Principal Researcher

Mr. TIEN, Neng-chuan

Researcher

Mr. YU, Yun-chen

Assistant Researcher

Mr. SHIU, Wen-jie

Associate Researcher

Ms. FENG, Ming-whei

Vice President and Director General, Smart Network System Institute (SNSI)

Ms. TSAI, Mei-ching

Section Manager, International Division

Mr. LAI, Mu-sheng (Nelson)

President

Mr. LAI, Kuang-yi (Edward)

Marketing Manager

Mr. YEH, Gour-Tsyh

Professor

Ms. JAN, Shu-ling

Researcher

SINOTECH ENGINEERING CONSULTANTS

Sinotech Engineering Consultants provide full spectrum engineering consultant services in the fields of Water Resources Development and Management, Electric Power Engineering, Geotechnical Engineering, Industrial Development, Transportation, Industrial Estate and Hi-Tech Parks, Coastal and Port Engineering, Architectural and Urban Development, Environment Engineering, Mechanical Engineering, Electrical Engineering, System Engineering.

Mr. CHEN, Chi-ming (Rick)

Project Manager

TAIWAN INSTITUTE OF ECONOMIC RESEARCH

Taiwan Institute of Economic Research (TIER) was established on September 1, 1976 by Dr. Chen-Fu Koo as the first private independent think tank in Taiwan. The main purpose of the institute is to actively engage in research on domestic and foreign macroeconomics and industrial economics in order to provide consultations to the government and enterprises and to promote Taiwan's economic development.

Mr. LEE, Hsun-tsong

Associate Research Fellow, Division V

TAIWAN POWER COMPANY

Taiwan Power Company is a public utility and the sole integrated power company in Taiwan.

Mr. CHUNG, Bin-li

President

Mr. HSU, Tsao-hua

Director, Department of Corporate Planning

Mr. CHEN, I-Cheng

Director, Department of Renewable Energy

Mr. SHIH, Chih-liang

Director, HSINTAO Power Supply Branch

Mr. CHANG, Wu-hou

Director, Nuclear Engineering Department

Mr. WU, Chin-chung

Deputy Director, Department of System Operations

Mr. LEE, Tsung-lun

Section Chief, Nuclear Backend Management Department

Ms. CHEN, Wan-jane

Head, Int'l Affairs Strategy, Utility Dev't Section, Dept of Corp. Planning

Ms. CHEN, Yi-han

Engineer, Nuclear Backend Management Department

Mr. CHIU, Tsung-hsiang

Engineer, Nuclear Backend Management Department

TATUNG COMPANY

Smart Grid, Micro Grid, Smart Meter, Solar Energy etc.

Mr. YEH, Szu-hsiung

Consultant

TAITRA – (Taiwan Trade Center Paris)

CHEN Lin-yen

Directrice

CHINESE INTERNATIONAL ECONOMIC COOPERATION ASSOCIATION

Established on August 9, 2000, CIECA's mission is to enhance Taiwan (Republic of China)'s bilateral relations with other countries through concerted economic collaborations through Taiwan's businessmen and private business organizations with our counterparts in various countries. We look forward to establishing mutually beneficial relationships between Taiwan and the world!

Ms. CHIEN, Kuo-chen (Christiana)
Specialist, European Team

FRENCH PARTICIPANTS

AIR LIQUIDE
Gases for industry, health and environment

Thierry SUEUR
Vice-President European and International Affairs

BUREAU FRANÇAIS DE TAIPEI
French Office in Taipei

Mr. Frédéric GLANOIS
Head, Economic Department

BIOPOST COFUNA
Engineering, fertilizer manufacturing, industrial ferments manufacturing

Manuel MOREAU
Chairman

BUREAU VERITAS
Government services and international trade

Joaquin TAM
Vice President - Marketing & Ventes

BUSINESS FRANCE
French trade commission for promoting French companies on external markets

Judith ORSINI-RECLY
International network coordinator - North East Asia

Sophie DIEBOLD
Project manager

Inès CHEN
Trade Advisor (Taiwan Office)

EDF - ELECTRICITE DE FRANCE
world leading energy company, operating in all branches of the industry (generation, transmission, distribution, trading and sale of energy)

Jacques SACRESTE
*Executive Vice President International & Partnership
EDF R&D*

Didier CORDERO
Deputy to the Chief Representative in China

EDF – ENERGIES NOUVELLES

Philippe VEYAN
*Project Manager
Marine Renewable Energy Directorate*

ENERTOPIA
Technical consulting and distribution of equipment and spare parts for high technology industries

Franck CONAN
Regional Director Vietnam / Taiwan

ENGIE
Renewable energy, smart city

Catherine MANTEL
Project Director

Angelica COCA
APAC - Sustainable Cities

EOLFI <i>Renewable energies</i>	Joël CICERON <i>CEO Greater China</i>
GREENSOLVER <i>Solar, onshore and offshore wind sectors</i>	Marcia PEREIRA <i>Finance Director</i>
KALLISTA ENERGY INVESTMENT <i>Wind farm development and operation</i>	Pierre-Louis CHOPIN <i>Project Manager wind energy development</i>
LAGARDERE SPORTS & ENTERTAINMENT <i>Sports marketing & entertainment</i>	Idriss AKKI <i>Managing Director Africa, President Football Africa</i>
LEOSPHERE <i>Ground-based and nacelle-mounted LIDAR (Light Detection And Ranging) for atmospheric observation</i>	Erwan LE MEUR <i>Asia Sales Manager</i>
	Vincent GINOUX <i>Industrial Director</i>
	Wenjing HUANG <i>Head of China Project</i>
MINISTERE DE L'ECONOMIE, DE L'INDUSTRIE ET DU NUMERIQUE <i>French Ministry of Economy, Industry and Digital Sector</i>	Brigitte SCHARS <i>International cooperation, Country Manager (China, India, Asean)</i>
MINISTERE DES AFFAIRES ETRANGERES ET DU DEVELOPPEMENT INTERNATIONAL <i>French Ministry of Foreign Affairs and International Development</i>	Paul MARIA <i>Special Advisor to the Director - Asia-Pacific Department, Economic Issues</i>
	Margaux MACIAG <i>Business Support Asia, South Pacific</i>
MONTSALVY <i>Risk management</i>	Laurent MALVEZIN <i>Chairman & CEO</i>
SAIPEM SA <i>Engineering & Construction sector and integrated turn-key solutions to oil companies</i>	Jean-Charles ODON <i>Proposal Manager - Offshore Tendering & Renewable Energy</i>
	Thierry DELAHAYE <i>R&D - marine renewable energy</i>
SENOBLE <i>Agribusiness industry</i>	Stéphane MÉRIDA <i>Commercial & Marketing Director</i>
SERGI TRANSFORMER PROTECTOR <i>Transformer explosion and fire prevention</i>	Matthieu MENECHIER <i>Business Development Manager for Taiwan</i>
TERRAWATT INITIATIVE <i>Global non-profit organization, launched at COP21, which aims at promoting competitive solar power</i>	Jean-Pascal PHAM-BA <i>Secretary General</i>
THALES <i>Electronic systems for defense & security, aerospace, space and ground transportation</i>	Fanny MOUNIER <i>International Relations Officer</i>

MEDEF INTERNATIONAL
French Business Confederation

Géraldine LEMBLÉ
Director

Chloé MOULINS
Project Manager Asia-Pacific

Michael MARDYKS
Project Manager special projects

Conseil de chefs d'entreprise
France-Taiwan