

出國報告（出國類別：其他）

歐洲核能署「水泥物質對放射性廢
棄物地質處置場安全作用研討會」
報告

服務機關：行政院原子能委員會
放射性物料管理局

姓名職稱：徐源鴻技正

派赴國家：比利時

出國期間：98年11月15日至11月22日

報告日期：99年2月6日

摘 要

職於 2006 年出席經濟發展暨合作組織(OECD)歐洲核能署(NEA)安全事例整合小組(Integration Group for the Safety Case, IGSC)舉辦之「處置工程屏障系統安全設計符合與驗證研討會(EBS-4)」，此次續獲 IGSC 秘書組通知出席假比利時布魯塞爾歐洲管理中心舉辦之「水泥物質對放射性廢棄物地質處置場安全作用研討會」。蒙黃局長核可後，期能與上次熟識之專家討論各國廢料管理現況、遭遇之困難、正尋求之解決辦法。並藉由各國與會人員所提出的專題報告及討論中，達到蒐集各先進國家高放處置工程屏障研發最新資訊及延續國際合作之目的。

此次會議聚集 14 國、76 位專家共同研討。三天內就「水泥物質的使用與演進」、「水泥物質與處置場構件的交互作用」、「安全事例整合與應用」三主題，共發表 15 篇論文。每日下午，依出席專家之職業、專長及國別，平均分配至五個工作小組，就程序委員會事先擬定之議題，進行深入討論。

11 月 20 日在比利時放射性廢棄物管理專責機構(ONDRAF/NIRAS)安排下赴位於 Mol 比利時核能研究所(SCK.CEN)，參觀深達 230m 之 HADES 地下實驗室及全尺寸水泥回填試驗地面設施。

目 錄

壹、目的.....	1
貳、過程.....	2
參、心得.....	13
肆、建議事項.....	14
伍、附件.....	15

壹、目的

職於 2006 年出席經濟發展暨合作組織(OECD)歐洲核能署(NEA)安全事例整合小組(Integration Group for the Safety Case, IGSC)舉辦之「處置工程屏障系統安全設計符合與驗證研討會(EBS-4)」，此次續獲 IGSC 秘書組通知出席假比利時布魯塞爾歐洲管理中心舉辦之「水泥物質對放射性廢棄物地質處置場安全作用研討會」。蒙黃局長核可後，期能與上次熟識之專家討論各國廢料管理現況、遭遇之困難、正尋求之解決辦法。並藉由各國與會人員所提出的專題報告及討論中，達到蒐集各先進國家高放處置工程屏障研發最新資訊及延續國際合作之目的。

此次會議聚集 14 國、76 位專家共同研討。三天內就「水泥物質的使用與演進」、「水泥物質與處置場構件的交互作用」、「安全事例整合與應用」三主題，共發表 15 篇論文。每日下午，依出席專家之職業、專長及國別，平均分配至五個工作小組，就程序委員會事先擬定之議題，進行深入討論。

11 月 20 日在比利時放射性廢棄物管理專責機構(ONDRAF/NIRAS)安排下赴位於 Mol 比利時核能研究所(SCK.CEN)，參觀深達 230m 之地下實驗室 URF HADES 及全尺寸水泥回填試驗地面設施。藉由實際觀摩，瞭解該設施之運作情形及歷年來執行之試驗項目，期能對提升我國高放射性廢棄物最終處置設施之管制，有所助益。

貳、過程

一、行程

日期	行程
11月15日(日)	去程
11月16日(一)	阿姆斯特丹、搭火車抵達布魯塞爾
11月17日(二)	水泥物質對放射性廢棄物地質處置場安全作用研討會
11月18日(三)	水泥物質對放射性廢棄物地質處置場安全作用研討會
11月19日(四)	水泥物質對放射性廢棄物地質處置場安全作用研討會
11月20日(五)	參觀 HADES 地下實驗室
11月21日(六)	搭火車至阿姆斯特丹、搭機返台
11月22日(日)	抵台

二、出席水泥物質對放射性廢棄物地質處置場安全作用研討會

1. 會議背景

安全事例整合小組(IGSC)是歐洲核能署放射性廢棄物管理委員會(RWMC)深地層處置之主要技術諮詢提供者。IGSC 現由 17 國、38 個機構(含專責營運機構、管制機關、研發機構)之資深技術專家組成，著重於研究處置場特性及演化之方法及策略，及處置場之安全評估。

水泥物質是工業界常用的物質，但其行為研究僅數十年。然對長半化期放射性廢棄物處置，須了解水泥物質與處置母岩及廢料體間數千年之反應行為。本次研討會的重點為：

- 各種水泥物質應用於不同的處置場設計。
- 水泥物質長時間尺度(1,000 至 10,000 年)的演化。
- 各種水泥物質與處置場內廢料體、容器、緩衝材、回填材及母岩之交互作用。

本次研討會由比利時放射性廢棄物管理專責機構(ONDRAF/NIRAS)全權負責庶務工作。

2.會議紀要：

17日上午首先邀請英國 TerraSalus 顧問公司 David BENNETT 就各國處置計畫中水泥物質扮演的功能、相似性及相異性作一文獻回顧。

比利時高放處置計畫採用波特蘭水泥混凝土緩衝材，取其高鹼性，防止碳鋼外套桶之腐蝕。另水泥之低水力傳導環境，亦有效降低入滲液接觸外套桶。比國之潛在母岩為軟黏土(Boom Clay)，需大量使用水泥物質支撐坑道。

法國則是採用水泥物質作為坑道封塞及密封，以降低入滲液及核種傳輸。德國採用鹽礦、水泥及飛灰混凝土回填所有空間。芬蘭及瑞典則借助水泥物質之低水力傳導及機械強度，作為坑道封塞。鑒於結晶岩之裂隙，亦澆灌於坑道表面，以降低入滲水。加拿大應用於坑道地面及噴凝土。

Programme	Wastes	Host Rocks	Cementitious Materials
Belgium	SF & HLW	Plastic clay	Portland cement buffer. Cementitious materials also used for tunnel support, backfilling and sealing
Canada	Used fuel	Crystalline or sedimentary rocks	Low-alkalinity concrete tunnel, shaft and borehole seals
France	HLW & LL-ILW	Indurated clay	Cementitious conditioning and packaging of ILW and cementitious repository seals
Germany	HLW, L/ILW	Salt	Salt concrete repository seals
Japan	SF, TRU	Crystalline rocks	Low-pH cements suggested for grouts, structural supports and backfilling of TRU wastes
Finland and Sweden	SF	Crystalline rocks	Low-pH cementitious fracture grouts, tunnel plugs, and other repository components
Switzerland	SF, HLW & ILW	Indurated clay	ILW conditioned, packaged and backfilled using cementitious materials. Cementitious materials may also be used to support SF & HLW tunnels
UK	Wide range of wastes, disposal concepts and host rocks under consideration		OPC-based cementitious materials studied for conditioning and packaging of L/ILW, for backfills, and for other repository components
US WIPP	TRU wastes	Salt	Cementitious materials used in shaft linings and seals, in panel closures, and in borehole seals

表一、廢料體、母岩及水泥物質特性在各國處置計畫中扮演的功能

研討會議題一為「水泥物質的使用與演化」(Use and Evolution of Cementitious Materials)，共有 5 篇專題報告，題目如下：

(1) Engineering Feasibility for the Fabrication and Emplacement of

Cementitious Repository Materials: Results from the EC-ESDRED Project

(2) Compositions and Use of Cementitious Materials: Experience from Onkalo

(3) Damage and Fracture of Cement-Based Materials Due to Desiccation

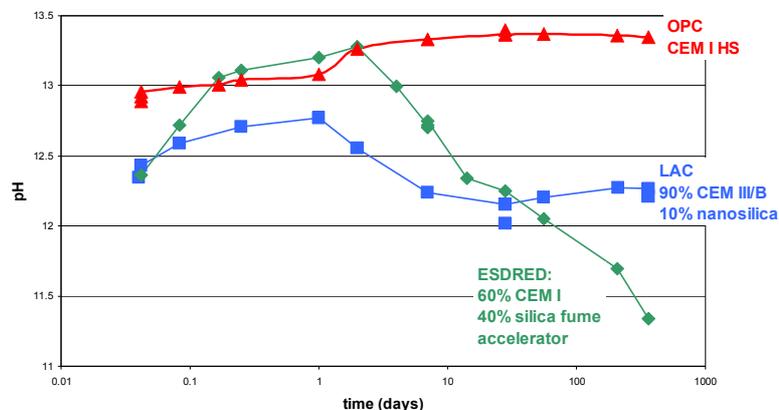
(4) Chemical Evolution of Cementitious Materials

(5) Implications for Solubility and Retention of Radionuclides over Long Timescales

西班牙建造科學院(IETcc) Maria Cruz ALONSO 女士發表歐盟深地層處置技術(ESDRED)研究成果。有鑒於地下水接觸傳統波特蘭水泥時會滲濾出大量 OH^- , K^+ , Na^+ , Ca^{+2} 離子，所形成 $\text{pH} > 13.5$ 之高鹼性羽(alkaline plume)，會嚴重改變膨潤土之物化特性，導致喪失核種拘禁特性。ESDRED 已成功開發出 $\text{pH} \leq 11$ 之低鹼性水泥，應用於噴凝土、坑道封塞及支撐。然因低鹼性導致處置設施內碳鋼及預力鋼筋之腐蝕風險，仍待持續研究。

芬蘭處置專責機構(Posiva Oy) Johanna HANSEN 女士說明 ONKALO 地下試驗室研究顯示，在坑道施工及工程屏障（灌漿、噴凝土、岩釘、錨釘、封塞）約需使用 20,000t 水泥物質。處置場封閉前，若能成功移除噴凝土及地面層，仍殘餘 6,000t 水泥物質。為降低鹼性羽，與 SKB、NUMO、Nagra 合作開發添加矽灰(silica fume)與強塑劑(Superplasticizer)之低鹼性水泥，2008 年後已應用於灌漿。95%噴凝土在回填作業前已被移除，故採用一般耐鹼性水泥即可。

瑞士混凝土及建物化學實驗室(Empa) Barbara LOTHENBACH 女士發展熱力學模式，有效預測低鹼性波特蘭水泥長期特性。低鹼性水泥經一年之水合作用後，幾乎已不含氫氧鈣石(portlandite)，孔隙溶液 pH 值逐漸下降。



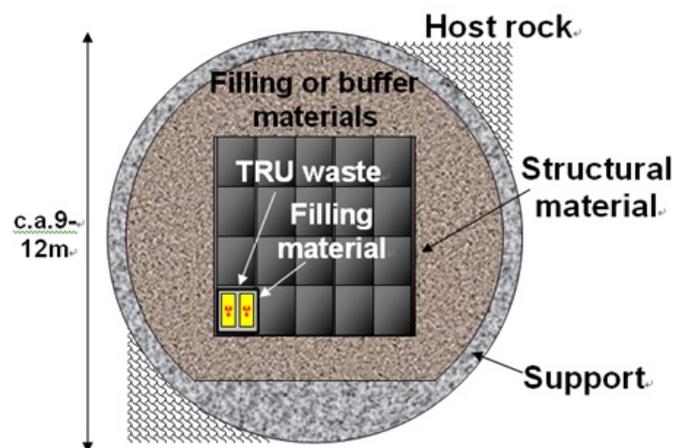
圖一、傳統波特蘭水泥、ESDRED、LAC 孔隙溶液 pH 值

17 日下午研討會秘書組 Betsy FORINASH，基於反映各國不同觀點及職之原能會管制工作屬性，分配職參與第四工作小組討論會議。本小組由日本原子力發電環境整備機構(NUMO) Hiroyoshi UEDA 博士主持，澳大利亞國家核科技機構(ANSTO) Tim PAYNE 博士紀錄，比利時、法、瑞士、英、德、瑞典及西班牙共 15 位專家參與。首先主席 UEDA 博士就程序委員會事先擬定議題，徵詢所有出席者意見後，再詳細討論，取得專家之最大共識後，作成文字決議，以傳承先進國家研發經驗。茲將討論重點即共識紀錄如后。

議題：水泥物質劣化與放射性核種吸附及溶解行為之關係，有機添加物之影響？是否已有足夠的科學數據可納入安全事例？

首先，英國國家核實驗室(NNL) Ed BUTCHER 強調今日的水泥材質已從傳統的波特蘭演進為添加高爐渣、飛灰等添加物，不同材質的實驗結果，不可直接引用。部分國家處置計畫考量塑化劑劣化會增加核種遷移行為，仍不准使用。

UEDA 博士表示高放處置計畫時程綿長，依日本 TRU 處置場概念設計（詳圖一），日本工程屏障將使用低鹼性波索蘭水泥，且不排除數十年後使用改良之強塑劑添加物。

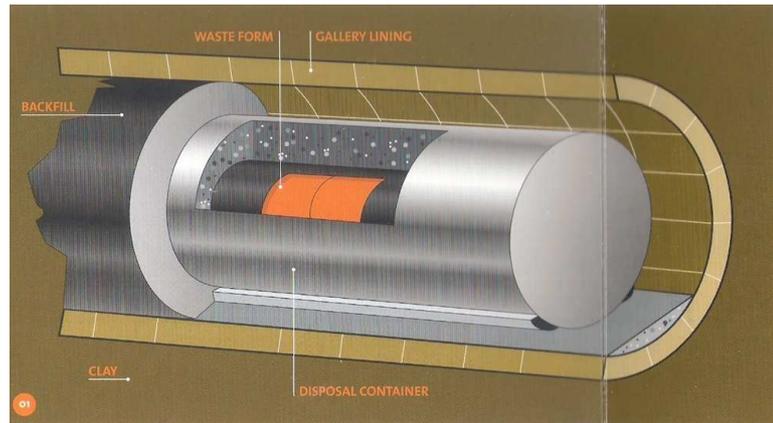


圖二、日本 TRU 處置場概念設計

德國國家核研所(GRS) Peter-Jürgen LARUE 表示鑑於廢料體之非均質及複雜度，該國處置安全分析時不計算吸附之貢獻。瑞士核子安全檢查署

(ENSI) Ann-Kathrin LEUZ 博士表示該國正考量訂定溶解度限值。

比利時 ONDRAF Maarten VAN GEET 表示比國重視低核種流出量，在不同階段訂定核種分配係數 K_d 值要求。比利時高放處置計畫將採超級容器 (Supercontainer) 概念模式，大厚度混凝土緩衝材之使用，只是利用其高鹼性，防止碳鋼外套桶之腐蝕，並不考量混凝土之核種遲滯效應。



圖三、比利時高放處置場超級容器概念設計

專家認為處置場設計時過度保守，會大幅增加費用。典型的保守假設是廢料體之核種瞬間釋出或無溶解度限值（零 K_d 值），並不切實際。另保守假設會導致安全事例之不一致性，如在破裂岩層中膠體效應較高 K_d 值更重要。

討論後，專家達成之共識：

- 全系統之化學演化，應進一步研究。
- 放射性核種交互作用模式是重要的。
- 實驗數據外插至長時間尺度時，應有理論基礎。
- 對放射性核種之移動性，應進一步研究。
- 孔隙水與水泥物質之化學演化，應進一步研究。
- 應加強水泥瀝濾液與膨潤土之反應研究。
- 放射性核種之移動性，與其 speciation 有關。
- 持續研究以化解利害關係人之壓力。

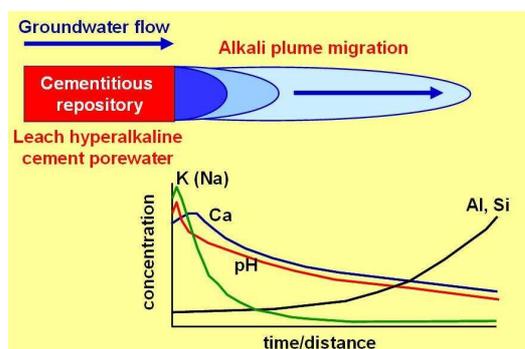
18 日上午議題二為「水泥物質與處置場構件的交互作用」

(Cross-Cutting Issues – Interaction of Cementitious Materials with Repository Components), 共有 6 篇專題報告，題目如下：

- (1) Interaction of Cementitious Materials with High-level Waste (HLW)
- (2) Alkaline Plume on Crystalline Rock
- (3) Alkaline Plume on Clayey Material
- (4) Overview of Recent and Future Work on Material Development and Usage of Cementitious Materials in Salt Repositories
- (5) Corrosion Aspects of Steel Radioactive Waste Containers in Cementitious Materials
- (6) Consequences of Chemical Interactions at the Interface between Cement and Clay Barriers – Potential Effects on Gas Migration

比利時核能研究所(SCK.CEN) Eef WEETJENS 女士表示，初步研究成果顯示改採超級容器(Supercontainer)參考設計後，一旦碳鋼外套桶腐蝕穿孔後，其高鹼性會有可能增加玻璃固化廢棄物之核種溶出。然對用過核子燃料，溶解率與膨潤土設計之差異不大。

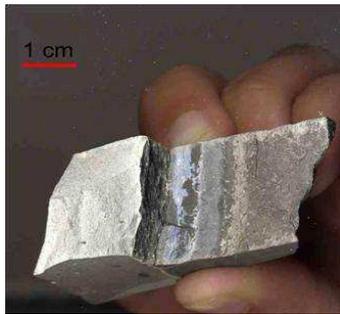
瑞土地質科學家 Russell ALEXANDER 闡述鹼性羽確實有可能加速玻璃固化廢棄物之溶解及膨潤土之崩壞。採用低鹼性水泥是一種解決方向。期待能結合實驗室、田野及天然類比證據有效描述鹼性羽在結晶岩中之特性。



圖四、鹼性羽

法國核安及輻防研究院 François MARSAL 引用該院於 Tournemire argillite 之工程類比研究，顯示與混凝土接觸 15 年之厚層泥岩，發現 1cm

處結構與礦物學卻有肉眼可見之變化。



圖五、厚層泥岩變化

瑞士專責機構(NAGRA) Paul MARSCHALL 說明瑞士中、低放地質處置設施(Opalinus Clay)概念採用 engineered gas transport system (EGTS), 在不影響核種拘禁能力下, 有效釋放氣體。採用高孔隙度水泥漿回填坑道及 20-30%膨潤土/砂混和材密封。

18 日下午第四工作小組討論會議, 仍由日本 UEDA 博士主持, 紀錄替換為德國 GRS Ulrich NOSECK 博士。討論議題: 水泥物質之天然類比是否適用於安全事例或功能評估分析? 其可行性、優點及缺點?

專家首先界定各種類比:

工程類比	人類學類比	天然類比
時間尺度 < 150 年	時間尺度 < 5,000 年	時間尺度: 地質
較受初始及邊界條件限制	→	較不受初始及邊界條件限制
材質與今日較相似	材質與今日較不相似	天然與相似的化學材質

討論後, 專家達成之共識:

- 應區分天然類比及人類學(Anthropogenic)類比。
- 在合理的空間尺度下, 類比可作為長期作用的證據。
- 天然類比之邊界條件(演進過程), 經常不明確, 且充斥著負面類比。
- 類比可提供安全事例更多的定性論證, 但非提供安全基石。
- 必須謹慎使用類比, 注意其概括性、展現其相似性及相異性。
- 不同的利害關係人團體, 對類比有不同的看法。

- 水泥物質之類比應可支持鹼性羽與構件的交互作用概念模式。
- 應區分近地表及深地層處置場之差異。
- 然專家對低鹼性水泥類比應用於與膨潤土之反應，未達成共識。

19 日上午議題三為「安全事例整合與應用」(Integration in the Safety Case and Implications for Long-Term Safety)，共有 3 篇專題報告，題目如下：

- (1) Strategic Choices in the Belgian Supercontainer Design and its Treatment in a Safety Case
- (2) Safety Case Approach for KBS Repository in Crystalline Rock
- (3) Environmental Safety Case and Cement-related Issues for Intermediate-level Waste in a Co-located Geological Disposal Facility

比利時 ONDRAF Maarten VAN GEET 說明原 2001 年公佈之安全分析及可行性中期報告(SAFIR 2)，其工程障壁設計過於複雜及不確定性。採用下列評選因子，才選出「超級容器」工程障壁。

Aspect	Criterion	Weight factor	
Engineered robustness	Containment	40	80
	Release from waste matrix	40	
	Delay and attenuation by EBS	0	
Host rock perturbation	Gas generation	20	80
	Chemical compatibility with host rock	20	
	EDZ	20	
	Loss of clay layer thickness	20	
Intrinsic robustness	Materials characterisation	50	100
	Materials interaction modelling	50	
Ease of demonstration	Natural and/or archeological analogues	25	80
	Proven technology	25	
	QA/QC implementation	30	
Technical operation	Handling complexity	10	25
	Deposition rate	5	
	backfilling	10	
Flexibility	Transferability (flexibility to waste type)	35	50
	retrievability	15	
Financial feasibility	Construction costs	25	50
	Operation costs	25	

圖六、比利時工程障壁評選因子

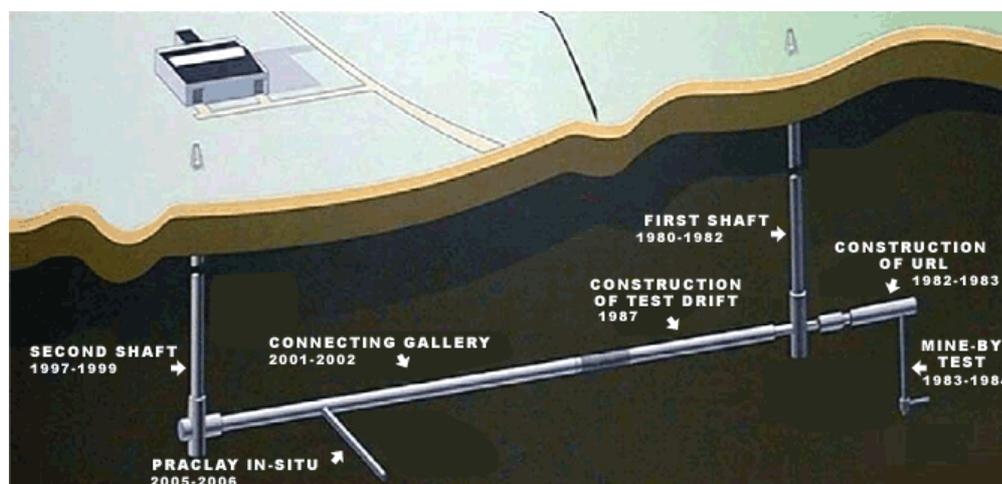
因職未參與其他小組討論，第一、二、三、五工作小組討論決議請參見附件。

另本次研討會論文集，NEA 將於 2010 年底前出刊。

三、參訪行程

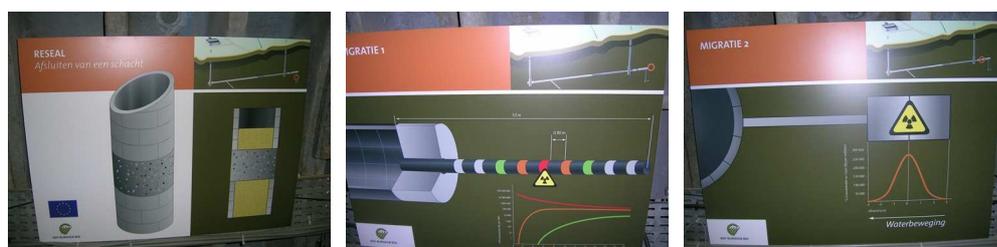
1. HADES 地下實驗室

比利時核能研究所(SCK.CEN)位於布魯塞爾東北方二小時車程之 Mol。經評估該地下-180m 至-280m 深度之 Boom Clay，俱均質、大面積、厚岩層、強塑性有利於開挖擾動後之自我癒合、低透水性及地化特性有利於拘禁核種傳輸等特性，適宜作為高放處置母岩。



圖七、比利時 HADES 地下實驗室設施位置圖

HADES (High-Activity Disposal Experimental Site)地下實驗室之一號豎井於 1980 年開始構築，除用於研究開挖構築操作及封閉之工程可行性，亦進行地質、水文地質、地化、岩石力學等現地試驗，以驗證模式計算及實驗室數據。27 年來與各國合作，已執行封閉、核種遷移、開挖擾動等多種試驗。HADES 是全球少數（或許是唯一）允許使用放射性示蹤劑(^{125}I)之地下實驗室，但不允許處置放射性廢棄物。



圖八、封閉、核種遷移、開挖擾動等多種試驗

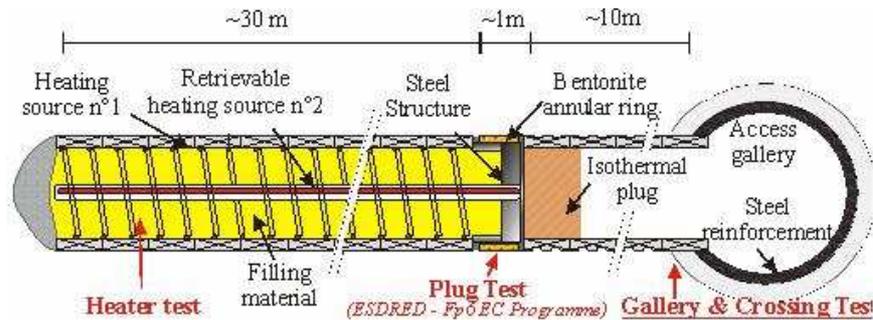
主坑道深達 225m，軟黏土 Boom Clay 之支撐力不足，參觀時可明顯辨

別不同年代襯砌（鋼襯、混凝土小砌塊、大塊水泥環片）之演進。



圖九、襯砌（鋼襯、混凝土小砌塊、大塊水泥環片）之演進

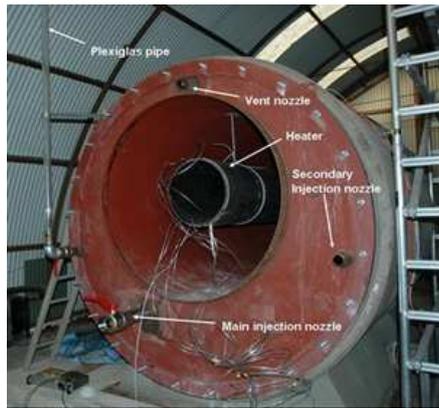
2000 年起由 SCK.CEN 與 ONDRAF 合組之 EIG EURIDICE 公司，負責 HADES 地下實驗室之營運。2007 年開挖 45m 長、2m 內徑之 PRACLAY 加熱試驗廊道，預定於 2010 年加熱 10 年，冷卻後再研究黏土熱-液-機械 (THM) 特性。結合歐盟第六期 TIMODAZ 研究計劃之超音波偵測及波形傳導模式，研究開挖擾動。



圖十、PRACLAY 加熱試驗廊道

2. 水泥回填試驗地面設施

比利時 ONDRAF 參與歐盟第六期 ESDRED 研究計劃之水平環形坑道回填試驗。首先參觀二座分別執行水泥漿（高鹼性）及乾性粒狀材質（砂、水泥、膨潤土）回填試驗之 2/3 比例模型。模組為長 5m、內徑 2m 之預力混凝土管，內含 Supercontainer 直徑 1.3m 之碳鋼桶座落在混凝土基座上，內置加熱器以模擬高放射性廢棄物。另水泥漿回填技術亦試驗於 30m 長之全尺寸模型，效果良好，唯須稍降水灰比(W/C)，以縮短硬化時間。



圖十一、水泥漿回填試驗：施工前（左）、完工剖面（右）



圖十二、乾性粒狀材質回填試驗



圖十三、30m 長全尺寸模型

回填作業之主要考量，就長期安全性而言，回填材不應降低防蝕性能、不應成為隔熱物質、不應添加有機物影響核種傳輸、收縮膨脹性應較小、不要與坑道壁起化學反應。就施工可行性方面，則回填材應易於泵輸送、降低塵土飛揚及限制回填壓縮斷裂強度以方便再取出。

叁、心得

- 一、網際網路的突飛猛進及資訊透明化的策略，造就全球各國的放射性棄物管理資訊極易取得。然關鍵性的問題，還是得於出席國際會議時，面對面的討論與溝通，才能獲的所需的解答。如匈牙利專責機構首席地質師 Zoltan Nagy 當場提供 Bataapáti 低放處置坑道 5 份技術文件，紓解職之困惑。
- 二、高放射性廢棄物最終處置計畫發展長達數十年，管制機關如何有效確保研究成果之持續有效性、內部人員專業能力之維持、及提升外部學者專家之持續投入意願，皆應早日擘畫。
- 三、專業能力及英語表達能力，促使專家能於分組研討會上強勢主導或僅被動應答。討論及共識形成過程，對吾等欠缺國際談判經驗之技術人員，具有極佳之正面教育意義。
- 四、大部份的專家，彼此熟悉，使用相同的（技術）語言，除增加會議之流暢度，亦有助於會後機構間之國際交流合作。
- 五、此次會議有 3 位華裔（瑞典、德國、法國）核廢專家出席，可考慮邀請來華交換放廢管理技術心得。

肆、建議事項：

- 一、為持續參與放射性廢棄物管理之國際合作，吸收並引進最新技術與經驗，建議鼓勵本局高放處置計畫負責人、核能研究所化工組、台電公司及學者專家，積極出席歐洲核能署主辦之類似專家會議。
- 二、考量我國與先進國家高放處置計畫之時間落差，審慎擘畫將先進國家現階段之研發成果，有效的於一、二十年後轉移至我國處置計畫所需。
- 三、請台電公司考量及早籌劃地下實驗設施之構築。

伍、附件

第一、二、三、五工作小組討論決議。