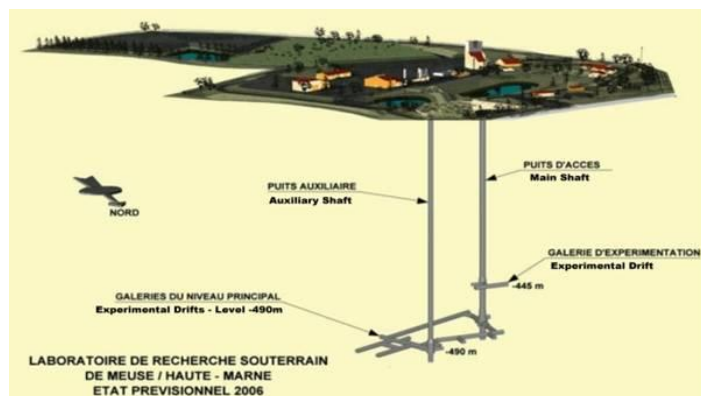


法國進行深層挖掘來處置核廢物

編譯自：“SPECIAL REPORT: **France digs deep for nuclear waste**”, by Declan Butler, NATURE|Vol 466|12 August 2010.

在歐洲，運用地質處置的方式將長壽期放射性物質封存即將實現。

當我們關上了小升降梯重重的大門，慢慢地向下往地球深處下降時，帶領的官員大聲的說：「到達位於地底 490 公尺深的實驗室樓層，將要花費約 8 分鐘的時間。」但是由於機器的轟鳴聲，我們幾乎聽不到他的說明。



法國東北部一個名為Bure的小鎮外，在綿延的麥田地下約半公里 (500公尺) 的地底，該國正為著處置其放射性廢物作準備。在一個耗資10億歐元 (約 13億美元) 的地下實驗室，法國國家放射性廢物管理機構 (ANDRA)正在測試合宜的岩石層和技術，以便於貯存放射性廢物。ANDRA的科學家相信，岩層的結構可以安全地安置高放射性廢物，並規劃建造一座具產業規模的處置設施，俾於在接近2025年前在地底深層開發一座30平方公里的貯存庫場址。這將是世界首先開發的 - 也是最大的 - 高階及中階長壽期核廢棄物深層地質貯存庫之一。

在 Bure 地底下像兔窩的坑道，是橫跨歐洲國家數個平行研究努力的先鋒，其目標是：為目前累積在臨時儲存場所的長壽期放射性廢物找出一個永久的家。這些幾十年前就開始的研究計畫，終於即將開花結果。芬蘭和瑞典計劃在大約 2020-2025年間開始營運其深層地質貯存庫(請參閱附錄)，而德國則希望於 2035年開始營運該國自己的長期地質貯存庫。幾個較小的歐洲國家也已經聯合起來，組成一個歐洲貯存庫發展組織，為建構共用的地質貯存庫概念而努力。

相較之下，美國唯一建議設置的長期貯存庫，亦即在內華達州的 Yucca Mountain場址，其開發工作再次停滯不前，看來是已經要放棄了二十年的工作努力和超過 100億美元的投資 (請參閱 Nature 458, 1086–1087; 2009)。Obama 政府要廢棄 Yucca Mountain場址，並已成立了一個委員會來探尋替代方案。本案其中一個主要問題是，在1987年由美國國會選擇 Yucca Mountain場址的決定，從一開始就是個政治的決策而不是一個基於科學上的選擇。一位地質學家亦是任職於法國放射性廢棄物管理機構(ANDRA)科學處的處長 Mr. Patrick LANDAIS 說：「在美國有許多地質條件比 Yucca Mountain 好得多的場址，」當我們戴著硬工作帽和螢光工作服參觀實驗室的同時，他就像許多專家一樣地質疑 Yucca Mountain 場址其地質條件的適宜性，他說：「當我爬上Yucca Mountain 的山頂時，我看到火山就在下面，這讓我擔心。」然不單是如此，美國聯邦政府尋找新場址的努力又已遭受到其他各州反對的阻礙，州民對在自己家的後院有一座核廢棄物堆存處感到不安。

歐洲國家已經採取了更科學的與逐步漸進的方法來選定場址，這樣能產生更大的民眾信心 – 也就是依循典型的斯堪地納維亞(Scandinavian)傳統，瑞典和芬蘭政府從一開始就讓候選場址的當地社區一起參與決策，這增加了民眾的接受度。

法國約有 80%的電力是來自於其 58 個核電廠所產生，其核能技術更是世界之領導者。核能在該國擁有堅強的跨黨派支持，又由於爲了建設地質貯存設施而對 Bure 地區提供的優厚經濟獎勵措施，受到當地官員的歡迎。再者，反核團體也沒有什麼影響力。因此，在 Bure 建造地質貯存庫沒有遭受到什麼反對，也許一點也不奇怪。「動員公眾輿論來反對地質貯存庫是困難的，因爲大部分的法國人對核電問題根本是“無動於衷”。」法國的綠色和平組織核能活動的領導人 Mme Sophia MAJNO 表示，該組織並不反對深層地質貯存庫的研究，但他們所關注的是，計劃在地質貯存庫使用一個世紀後封庫，將幾乎不可能再處理隨後在設施中發生的問題。

Bure 實驗室創建於1999年，其研究大抵在確立該地區地質條件的適宜性，其研究結果亦通過國際專家的確認。現在，它更是加快速度發展，將花費每年1億歐元的研究經費，針對如何能夠將放射性廢物確實安全地貯存在規劃中的地質貯存庫之中。ANDRA 必須於 2014年向法國政府出示一份深層地質貯存庫的規劃藍圖，如果該計畫在 2016年獲得法國國會批准了，該深層地質貯存庫將於下一年開始施工建造。然後，法國國會將會進行考量發給該地質貯存庫營運執照，俾允許它在 2025年開放營運。

一旦建造完成，該地質貯存庫將可儲存所有法國現有的 2300 立方公尺體積的高階及 42,000 立方公尺的中階長壽期放射性廢物 – 包括其中大部分是目前法國的核電廠已產生的放射性廢物 - 以及涵蓋至少在未來 20 年裡將會產生的新放射性廢物。目前法國現有的放射性廢物都是存放在臨時的儲存設施，場址在：La Hague、Marcoule 和 Cadarache。



Bure 實驗室的坑道仍正在 1億5000萬年的岩層中進行雕鑿。

測試實驗室

該實驗室本身並不存放任何放射性廢物，而且也永遠不會。相反地，研究人員在 **Bure** 實驗室的研究重點是在測試岩石和放射性廢物包封原型等策略。幾乎所有的研究結果都是以遠距分析方式進行的。一旦科學家已經將實驗裝置安裝妥當，鑲襯在坑道的儀器其測試數據將透過網路傳送到 **ANDRA** 自家的研究人員，和在法國其他研究機構及大學裡的 80個合作實驗室，以及參與該計畫的其他歐洲國家研究機構。**Mr. Jacques DELAY**，一位在實驗室中負責聯繫協調和實驗策略的地質學家，讓我在電腦螢幕上看到遠距數據擷取系統：一個三維的展示畫廊，在其中我們可以放大任何一個坑道，俾找到某一個實驗儀器，擷取它的輸出數據，並即時繪出分析圖形。

但每天幾十個科學家和工程師仍必須搭乘升降梯下降到這麼深的地底工作場所，在這樣的深度工作並非沒有風險。在我們搭上升降梯前，我上了一課使用自救設備的速成班，將笨重的“自足自救”設備穿綁在我的腰間。它是一個使用於採礦業的獨立電子迴路呼吸器，在發生隧道內的通風系統停電時，它可供應 20分鐘由化學反應產生的氧氣。當升降梯下降到 445米深度時，下降的速度緩慢了下來，然後輕輕的碰觸底部地面。幾分鐘後，我們推開門進入擠滿了科學儀器的長廊。連續不斷的擴音器廣播聲、喧囂的鑽岩機和鑽土機聲音充斥在實驗場所的各個角落。有部分坑道的牆壁是用混凝土、鋼筋和螺栓來進行強化，但到處都是光禿禿的且已經有 150億年歷史的灰色 **Callovo-Oxfordian** 泥質岩，它最終將會把貯存庫密封起來。



坑道壁中的感測儀器晝夜不停地監測岩層狀態。

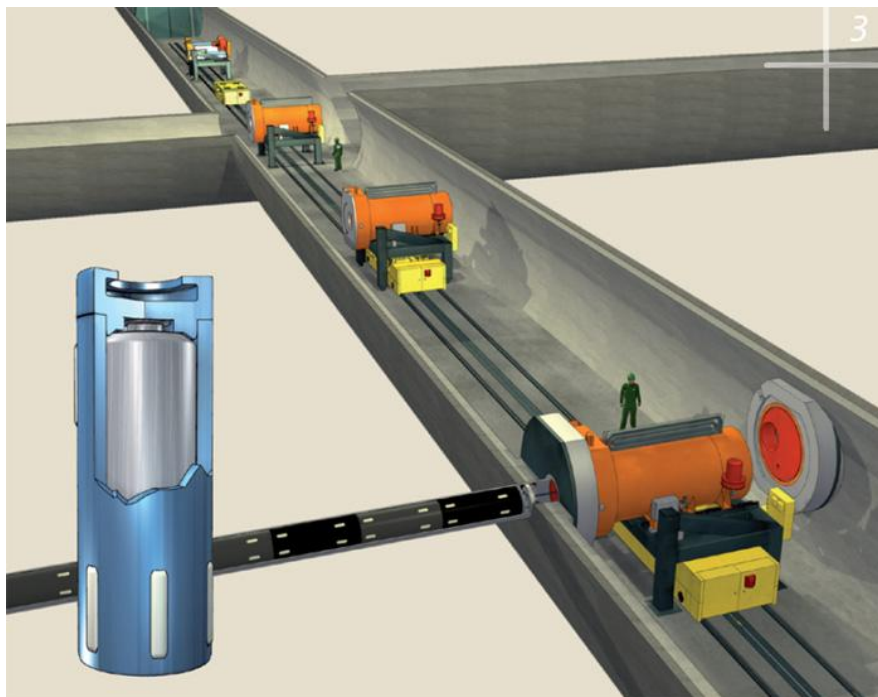
脈動

在岩牆上精緻的實驗鑽孔裡架設了約 3,500個感測儀器，蒐集並採取幾乎每一個機械性的、化學性的和水文地質方面的岩層脈衝訊息。這些數據都會被輸入到模擬岩層特徵的電腦程式裡，並用來預測岩層未來的行為，預測期程從幾十年到超過 100萬年。ANDRA的LANDAIS 處長說：「在世界上沒有其他岩石實驗室像 Bure實驗室一樣，設備這麼完備的了。」

所有實驗的最終目的就是要回答一個關鍵問題：法國最危險的放射性廢物是否能被安全地包封在這 150公尺厚的岩層裡呢？高階放射性廢物包括有放射性裂變產物：銻-134、銻-137和 鋇-90 和稀有放射性銻系元素，例如銻-244 和銻-241。在法國大多數的用過核燃料(Spent Fuel)均經過再處理以提取其中有用的鈾和鈾後，再予以減縮放射性廢物之體積。雖然，這些高階放射性物質僅佔法國核廢物體積總量的 0.2%，但它們卻佔了總放射性活動的 95%。

高階放射性廢物將被混融於玻璃中並予以固定，這種複雜的玻璃化(Vitrification)製程是法國首創的。熔融狀的玻璃混融物將被倒入不銹鋼製容器內，然後放置在鋼桶中。在 Bure 貯存庫的自動化機具會把這些鋼桶推進到直徑 70公分被稱為肺泡(alveoli)的鑽孔裡貯存，這些肺泡是以水平方向來鑽孔其深度達 40公尺，並分佈在坑道主要通道的牆上。

同時，來自於核反應器使用過的相關設備與試劑之中階放射性廢物，將被壓縮成圓餅狀並堆擠進鋼製容器，然後被混凝土包封在鋼桶中，最後亦將被貯存於坑道內。



自動化機具將高階放射性廢物儲放至鑽孔(肺泡_alveoli)裡。

在 **Bure** 的科學家已經在測試那些將使用於固定高階放射性廢物之玻璃的穩定性，不銹鋼桶的腐蝕率，以及氫氣 - 這種退化釋出氣體的生命歷程。他們也正在肺泡原型中評估玻璃、以及在各岩層中的鋼鐵和岩石之間所有的相互作用。

這些鋼製容器，是以容器內部放射性衰變所產生的熱將不會把容器表面的溫度加熱到 90°C 來設計完成的。在使用該模擬容器所作的各種測試結果顯示，即使長期暴露在此等溫度下也不會導致岩層裂隙。雖然，高階放射性廢物的體積遠遠小於中階放射性廢物，但它們將需要兩倍數量的貯存空間，因為其具有較熱溫度的鋼桶必須隔以一層空的隔間來儲存放置之，以避免過熱。現在，科學家們還繼續在研究如何減少被發送到該貯存設施之放射性廢物體積的方法。**LANDAIS** 處長說：「地質貯存是一種稀有而珍貴的資源。」例如：從大且重的石墨燃料元件中汲取放射性元素，然後再予以濃縮以減少體積，將可以讓出更多的貯存庫空間給中階放射性廢物來打包存放。

該地質貯存庫可能終究會營運至少一個世紀，然後它將會被永久封存。數千年後，不銹鋼將會被腐蝕，直到它在岩石的壓力下的破裂，留下玻璃化的放射性廢物和岩層本身來提供屏障。

岩層不是一個絕對的屏障，**LANDAIS** 處長說：「一個絕對安全的地質屏障，這個想法是不存在的。」放射性核分子會慢慢地擴散並穿透它。在 **Bure** 實驗室研究人員最關注的是放射性碘離子和氯離子，它們是在這類型的岩石中最能夠滲透移動的。但是 **LANDAIS** 處長表示即便如此，它們也要經過數十萬年才會擴散到地殼表面上來。到那時，它們的低濃度和較低階的放射性強度，將在任何環境污染的限制規定中被予以忽略。

還有一個更令人擔憂的問題是岩層斷裂的可能性，這可能會導致放射性物質的洩漏。但在 **Bure** 的研究已基本上確認，安置貯存庫的岩石層是均勻的，對水的移動具有高度的不透水性，沒有斷層也沒有地震的風險。

在地面上，研究人員正廣泛地在場址周圍 250 平方公里區域的環境中進行採樣與分析，包括空氣，水和土壤中的樣本，以便取得一個全面的環境數據基準。在今年的 4 月 **Bure** 實驗室與法國的農業研究機構 (**INRA**) 共同設立了一個環境觀測站，並將對這個生態系統進行至少一個世紀之監測。

在 **Bure** 的地質學家相信這裡將會是一個安全貯存放射性核廢物的地方。他們說，岩層具有 1 億 5000 萬年的歷史，在過去的 2000 萬年裡沒有變動過，在未來的 2000 萬年也不會。站在實驗室裡新穎完善的感測儀器、電腦模擬程式和測量設備旁邊，「我們可能會有百分之幾的誤差，但不會有大問題，」**LANDAIS** 處長深具信心的表示：「地質是可以被預測的。」

參考網頁 **ANDRA**:

<http://www.andra.fr/international/index.html>

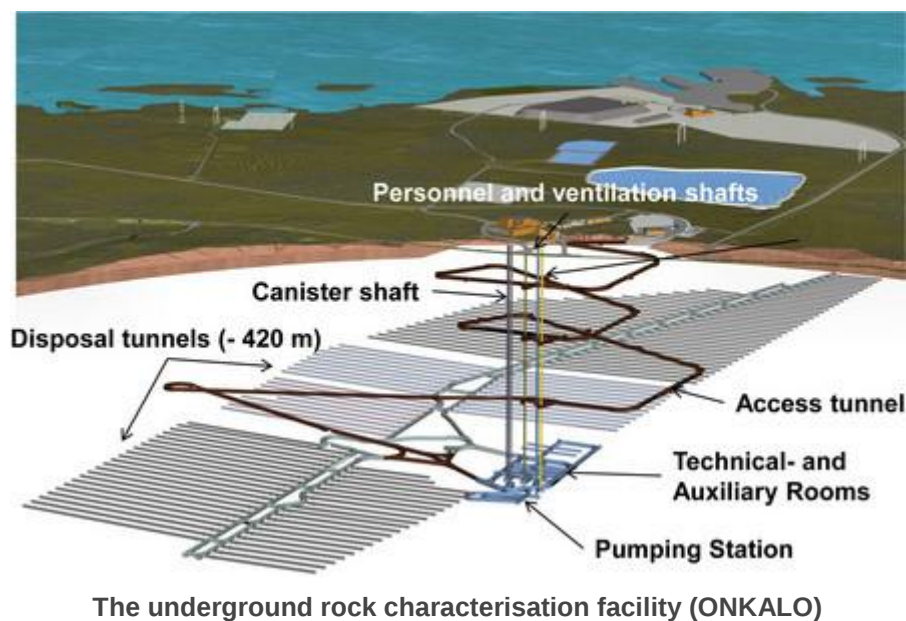


[附錄]

芬蘭 ONKALO 深層地質核廢物貯存庫

參考網頁: http://www.posiva.fi/en/research_development/onkalo/

據 2010.05.11《紐約時報》國際線上專稿報道，芬蘭正在修建地下核廢物貯存庫，這座巨型掩埋場將被用來密封芬蘭全國的核廢物，至少 10 萬年不被碰觸。在距離芬蘭首都赫爾辛基幾百英里遠 Eurojoki 地區的一座綠樹成蔭的小島上，芬蘭工程師們正在挖掘地底隧道。10 年後工程結束時，這條隧道將有 3 英里長，1600 英尺深，貫穿芬蘭地底有 18 億年歷史的結晶片麻岩層。而在黑暗的隧道盡頭，來自芬蘭各個核反應爐的充滿放射性元素的用過燃料棒將被密封於此至少 10 萬年。這座核廢料貯存庫被命名為“Onkalo”，意為“掩藏之所”。有興趣者請觀看影片: [Watch animation about ONKALO](#)



瑞典 Äspö Hard Rock Laboratory

參考網頁: http://www.skf.se/Templates/Standard_25506.aspx

