

GLOBAL CRISIS OF NUCLEAR WASTE

全球核廢料危機

綠色和平法國辦公室製作

GREENPEACE 綠色和平

目錄

目錄	02	摘要	41
作者簡介	04	計畫結構	41
執行摘要	06	計畫成本	41
執行摘要	06	觀點	41
無解的放射性危害之時間尺度	07		
攀升的成本與巨大的不確定性	08		
核廢料處置方案：焦點國家審視	09	法國	42
比利時	10	法國的高階核廢料貯存	43
法國	10	用過燃料棒的處理	43
日本	12	法國的放射性廢棄物	44
瑞典與芬蘭	13	—核廢料管理	44
英國	14	—輻射廢棄物的性質	44
美國	14	—輻射廢棄物，以輻射內容區分	45
		Cigéo 深地質處理計畫	46
核廢料：現今狀況	16	深地質處置	46
核廢料：現今狀況	17	待貯存之放射性廢棄物	46
鈾	26	Cigéo 計畫	46
用過燃料棒貯存	27	—地址	47
未來核廢料存量情境預測	30	—計畫結構	47
結論	32	—Cigéo 計畫成本	47
		風險	48
比利時	33	爆炸相關風險	48
核廢料深地質處置計畫——比利時	34	火災相關風險	49
簡介	34	潛藏的營運關閉	49
關於莫爾區深地質處置計畫	35	岩層中的水流風險	50
待處理之核廢料	35	安全與外部攻擊	50
—數量	35	貯存與可逆性原則	51
—屬性	35	將放射性廢棄物以深地質掩埋於地殼之中	52
母岩 (軟黏土層)	36	是可被接受的嗎？	52
—位置	36	建議	53
—特性	36	結論	54
貯存場基本構造	37		
—設計	37	日本	55
—觀察	38	日本高階放射性廢棄物現況	56
各種因素與相關風險間的互動關係	39	從深海處置到深地質處置	56
—溫度與可滲透性的提升	39	「玻璃固化高階廢棄物」與「長生命週	
—通風 (去飽和作用) 以及崩塌之風險	39	期低熱度放射性廢棄物」	56
—廢氣 (氫氣) 與岩石裂解	39	規劃中的永久處置場的空間與容量	57
—設計 (井道與封閉廊道) 與爆炸風險	39	深地質處置技術可行性報告 (1999 年) 與	
—挖掘區 (壓裂) 與放射性物質轉移	40	永久處置法案 (2000 年)	58
—營運期間與火災風險	40	環境衝擊評估	58
		選址程序	59

目錄

日本原子力發電環境整備機構 (NUMO)		輻射安全	74
與邀請申請制	59	整體風險	74
地質科學特性地圖的公布	59	— 貯存、輻射安全以及地質條件的整	
高階放射性廢棄物的期程計畫	61	體不確定性	74
處置成本估算	61	— 非意圖性與意圖性侵入	74
處置資金之籌款	61	— 低階與中階核廢料	75
結論	62	芬蘭：現況簡介	75
瑞典與芬蘭	63	英國	77
瑞典與芬蘭之用過核反應爐燃料棒管理	64	英國的放射性廢棄物處置政策	78
簡介	64	賽拉菲爾德 – 無法迴避的負面資產	79
瑞典之核廢料管理	64	40 年的選址以失敗告終	79
用過燃料棒之管理	65	新的反應爐計畫	80
用過燃料棒目前的數量與預計數量	65	新製造的核廢料	80
資金與三年期研究發展計畫	66	深地質處置設施安全論證 (safety case)	81
當前正在進行中的法院與管制機關審查	66	成本	81
KBS-3 技術、用過燃料棒管理系統、提案地點與主要不確定性	66	結論	82
KBS-3 技術與用過燃料棒管理系統包括：	67	附錄 – 前五次選址嘗試	82
銅腐蝕	69	美國	83
核能家族	70	美國高階核廢料	84
決策過程以及里程碑日期	70	貯存於冷卻池中的用過燃料棒的危險性	85
公眾諮詢	70	高燃耗型用過核燃料棒	86
正式提出申請	70	缺乏貯存與處置規劃	87
申請完整性評估	70	毫無把握的深地質處置選址	88
將申請公開予公眾檢視	70	還需要做些什麼	89
土地與環境法案所主持之正式、法定、公眾與口頭聽證會	71		
瑞典輻射安全管理局、環境與土地法院提交給政府的最後意見陳述	71		
第一次政府審核	71		
政府要求相關地方政府針對許可與否做出決定	71		
最終政府審核與決策	71		
假如政府批准後的相關施行規範	72		
不確定性之下的決策	72		
瑞典輻射安全管理局之審核結果	72		
瑞典輻射安全管理局所建議之先決條件	72		
環境與土地法院審查：世界唯一一件由法院做出的審查	73		
法院審查結果：除非特定條件達成，否則不予許可	73		
長期責任歸屬	74		
銅腐蝕之風險	74		

此報告由綠色和平法國辦公室於 2019 年 1 月發布

作者群：Pete Roche, Bertrand Thuillier, Bernard Laponche, Miles Goldstick, Hideyuki Ban, Robert Alvarez

協調整合：Shaun Burnie, 綠色和平德國辦公室

圖像設計：Alexandra Bauch, bureau-abcd.com

翻譯：Jean-Luc Thierry, Emma Morton Saliou

作者簡介

ROBERT ALVAREZ

Robert Alvarez 在位於華盛頓特區的政策研究所 (Institute for Policy Studies) 擔任副研究員。在 1993 年至 1999 年期間，Alvarez 曾經擔任美國能源部部長以及副助理部長的資深政策顧問，負責國家安全與環境事務。在任期內，他帶領團隊控制北韓掌握核能武器材料。此外，他也協助主持能源部的核子材料戰略計畫，並協助能源部確立該部門的第一個資產管理計畫。在進入能源部之前，Alvarez 在美國參議院政府事務委員會 (Committee on Governmental Affairs) 擔任 6 年的資深調查員，同時也是參議院在美國核子武器計畫上的主要專家之一。1975 年，Alvarez 協助建立並指導環境政策研究所 (Environmental Policy Institute)，一個廣受推崇的全國性公眾利益組織。

MILES GOLDSTICK

自從 2008 年以來，Miles Goldstick 一直在瑞典環境運動之核廢料秘書處 (The Swedish Environmental Movement's Nuclear Waste Secretariat, Milkas) 工作，Milkas 是由瑞典地球之友 (Friends of the Earth Sweden) 以及瑞典反核運動 (Swedish Anti-nuclear Movement) 所組成的聯盟。自 1970 年代中期以來，Goldstick 便開始針對核燃料循環此一主題進行研究和書寫。他在位於瑞典烏普薩拉 (Uppsala) 的瑞典農業科學大學 (Swedish University of Agricultural Studies) 中獲得了生態與環境保護博士學位。他撰有許多分析著作，同時也是《渥拉斯頓》(Wollaston) 一書的作者，探討鈾礦開採對加拿大薩斯喀徹溫省 (Saskatchewan) 原住民所帶來的衝擊。

伴英幸 (HIDEYUKI BAN)

伴英幸是位於東京的原子力資料情報室 (Citizen's Nuclear Information Center, CNIC) 的共同執行長。自從 2013 年以來，他便是隸屬於日本經濟產業省的自然資源及能源諮詢委員會下原子能次級委員會的放射性廢棄物聯合工作小組成員之一。他同時也撰有許多分析著作以及書籍，包括《通往零核電社會之路：市民擬定的非核政策大綱》(共同作者) 和《日本核能政策框架之批判》。

BERNARD LAPONCHE

Bernard Laponche 是巴黎綜合理工學院 (Paris Polytechnic School) 的工程師，核子反應爐物理學國家博士 (State Doctor)，並擁有能源經濟學的博士學位。1960 年代和 1970 年代時，Bernard Laponche 曾於法國原子能委員會 (Atomic Energy Commission, CEA) 工作，並於 1970 年代時在法國勞工民主聯盟 (Confédération française démocratique du travail, CFDT) 擔任工會代表，1982 年至 1987 年先後擔任法國能源管理署 (French Agency for Energy Management, AFME，現為法國環境與能源管理署) 的處長與局長。從 1988 年至 2012 年期間，他從事能源效率領域國際顧問工作，範圍涵蓋東歐、地中海以及中國大陸等地區，共同創辦國際能源委員會 (International Council on Energy, ICE)，並且在 1998 年到 1999 年間擔任法國前環境部長 Dominique Voynet 的能源和核子安全技術顧問。他同時也是全球機會 (Global Chance) 和共享能源 (Shared Energy) 等組織的共同創辦人和成員，並且是《達成永續世界的能源效率》(Energy Efficiency for a Sustainable World) 和《終結核能：理由與方法》(Ending Nuclear Energy; why and how) 等書的共同作者。

PETE ROCHE

Pete Roche 是名於愛丁堡工作的能源顧問，並且是蘇格蘭和英國的非核地方政府（Nuclear Free Local Authorities）的政策顧問。直到 2004 年 4 月，Pete Roche 在英國綠色和平擔任反核運動者已有 13 年。他獲頒愛丁堡大學的生態科學榮譽學位。他在 1976 年時共同創辦「蘇格蘭抵原子威脅運動」（SCRAM），於 1970 年代和 1980 年代在愛丁堡近郊的托爾尼斯核電廠（Torness）外發起英國史上最大的反核電示威抗議之一。30 年來，他始終作為環境議題、能源效率議題的倡議者、發起者以及諮詢者。他曾經多次代表綠色和平參加國際層級和國家層級的論壇，包括奧斯陸巴黎公約（OSPAR），國際海事組織（International Maritime Organization's, IMO）和聯合國會議，以及英國核燃料公司（British Nuclear Fuels Ltd., BNFL）舉辦的國家利益相關者對話（National Stakeholder Dialogue）。他同時也是英國政府體內輻射受曝風險檢驗專門委員會（Committee Examining Radiation Risks of Internal Emitters）成員，以及放射性核廢料管理委員會（Committee on Radioactive Waste Management, CoRWM）顧問。最近，他擔任蘇格蘭議會能源效率和微型發電相關議題顧問。Pete Roche 在閒暇之餘也參加當地的勞動者日記（logs for labour）計畫，協助管理當地林地，並藉此發展生質能供熱系統。

BERTRAND THUILLIER

Bertrand Thuillier 是一位農藝學家，同時也是法國里爾第一大學（Lille I University）里爾綜合理工學院（Polytech Lille）的副教授。他畢業於巴黎格里尼昂國立農學院（Institut National Agronomique Paris-Grignon, INA-PG），曾在位於菲律賓馬尼拉的亞洲管理學院就讀，並擁有翰斯大學（University of Reims）的生物學科學博士學位。Bertrand Thuillier 過去曾在軍事部門工作，而後在一間食品產業的研究中心工作了三年，如今他成為同一個小組的產業協調人員，負責品質控管、生產以及物流作業。他同時也在歐洲各國如義大利、荷蘭、德國、瑞士以及西班牙等國負責建立品質保證計畫。如今，他則在新產品開發與產品評估的領域，經營自己的科技公司以及替食品產業與化妝品產業提供諮詢服務的顧問公司。他也在多所大學開課教授感官分析（Sensory Evaluation）的課程，尤其是方法論以及相對應的統計學。他是最早在 2012 年透過詳盡且深入的分析點出法國 Cigéo 計畫缺陷的獨立專家之一，他特別指出法國在布爾（Bure）的深地質貯存計畫之火災風險以及設計缺點。上述所有他提到的部分，都在 2017 年 IRSN（Institute for Radiological Protection and Nuclear Safety, IRSN）的安全選項文件（Safety Options File）中被再次提及。

「整體來說，它們的毒性——不論是放射性或化學性——都遠比我們至今在美國或其他任何國家所處理過的任何工業原料來得致命」

1959年1月，約翰霍普金斯大學教授 Abel Wolman 在首次針對核廢料議題舉行的美國國會調查之發言

國際的核燃料循環包括許多階段，每個階段都會製造數量不等的核廢料。此循環起始於鈾礦之探尋、開採、研磨、轉化為鈾濃縮工廠的原料、燃料棒製造，接著是商用核反應爐的運轉，最終生成需被貯存或再處理的「用過燃料棒」(spent fuel)。商用核能發電運轉至今已有超過 60 年的歷史，並製造出許多放射性物質，這些放射性物質將存在遠遠超越人類文明存續的時間，持續不斷地對人類與環境造成危害。

綠色和平委託核廢料相關領域的專家，產出這份關於全球核廢料現況的綜合報告。核能工業仍持續掙扎著在快速演變的世界能源市場中維持競爭力，然而長達數十年的核反應爐運轉的遺毒，以及維持自身運作仍持續製造的核廢料，將依然會在任何關乎核能發電未來——包括淘汰核電——的辯論中占據核心位置。只要核反應爐持續運轉，大量的核廢料就會持續在全球各地產生。面對如此大量的核廢料，人們至今尚未找到任何長期解決方案。這包括了每個核反應爐都會製造的高放射性廢燃料棒，至今所有嘗試尋找安全可靠的高階核廢永久處置方案的努力，最後都以失敗告終。

從礦區到反應爐

開採鈾礦會製造大量的廢棄物，其含有的放射性同位素 (radioisotopes) 濃度往往比一般石頭還來得高。其他的廢棄物堆則包含因為等級太低而無法處理的礦石。由於這些廢棄物堆會釋出含有放射性與有毒物質的氫氣與滲流水，因此對於當地的人們來說是一種威脅。在過去數十年來，鈾磨礦尾渣 (Uranium mill tailing) 都被當作污泥直接傾倒於環境之中，或是棄置於特定的廢水池或土堆裡。

鈾礦的開採與研磨過程，會導致危險化學物質離開相對安全的地底環境，並轉化為細沙型態，最後形成污泥，進而使有害化學物質容易在環境中逸散。要直到一百萬年後，這些礦尾渣的放射性以及其釋放的氫氣，才會降低到僅受殘留其中的鈾含量影響的程度，而這些殘存的鈾也會持續產生鈾-230。截至 2011 年¹為止，全球鈾磨礦尾渣的存量高達 23 億噸。目前世界上最主要的核反應爐類型——輕水式反應爐 (light water reactor)，主要依賴的鈾礦燃料就是濃縮鈾。在自然界的鈾礦中，可分裂性同位素鈾-235 的濃度僅為約 0.71%，要製造大多核反應爐所需的核燃料棒，便必須藉由鈾濃縮工廠將此濃度提高到 3% 到 5% 之間。這個鈾濃縮工程所產生的最主要的廢棄物便是「耗乏鈾」(depleted uranium)，目前全世界估計約有 170 萬噸的耗乏鈾。

用過燃料棒 (Spent fuel)

在鈾濃縮以及燃料製造之後，核燃料棒生產鏈的下一個階段，是將高濃縮核燃料棒插入核反應爐並進行發電，每隔 12 到 18 個月，此核燃料棒會從反應爐中退出，並成為用過燃料棒 (spent nuclear fuel)。國際原子能總署 (The International Atomic Energy Agency, IAEA) 估計，自從民生用核能電廠的出現以來，一共產生約 37 萬公噸重金屬的用過燃料棒，其中約有 12 萬公噸重金屬的用過燃料棒被再處理 (reprocess)²。目前全世界約有 25 萬噸的大量高放射性用過燃料棒，分散在全球 14 個國家之中。大多數的用過燃料棒就地放置在反應爐廠區內的冷卻池，缺乏足夠的深度防禦如二次圍阻體 (secondary containment)，因此面對冷卻失靈等狀況時十分脆弱，且大多缺乏獨立的備用電力系統。2011 年 3 月的福島事件即是一例，向各界清楚揭露用過燃料棒冷卻池的高溫風險並非不存在³。日本原子力委員會當時便曾警告日本首相菅直人，指出萬一對福島第一核電廠冷卻池失去控制，將會導致極為嚴重的放射性污染，時任首相菅直人表示⁴「我們可能必須要疏散 5 千萬人，等同於打輸了一場大戰... 我擔憂數十年的動盪將緊隨而來，那將意味著日本這個國家的終結」。每一年，全球商用核電反應爐的運轉製造約 1 萬 2 千噸的額外用過燃料棒。這些全世界終究必須去面對、管理的大量高階核廢料，便是為什麼反應爐壽命以及核電退場的決定是如此關鍵的原因之一。

鈾的再處理

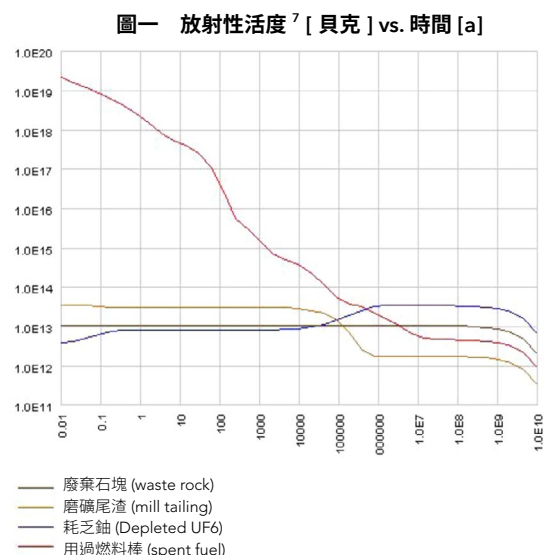
商用再處理之技術發展於美國與俄羅斯的核武計畫早期，截至今日已被許多國家採用，目的在於將鈾從用過燃料棒中以化學方式分離出來。鈾是鈾元素在核反應爐中進行分裂後

的產物。再處理技術最原先的目的，是為了生產鈾以用於核子武器的製造，日後則演變生產鈾以提供快中子增殖反應爐 (Fast breeder reactor) 燃料，而這又將生產更多的鈾。雖然商用快中子增殖反應爐計畫遭逢失敗，但法國與俄羅斯仍持續從事再處理、鈾分離，英國則預計在 2020 年停止用過燃料棒再處理，日本的再處理計畫則仍處於長年延宕之中。

除了核廢料透過管線 (pipeline) 的直接排放以及放射性物質在空氣中的逸散，再處理也會產生多種廢棄物液體，其中危害最高的便是高階核廢液⁵。

無解的放射性危害之時間尺度

過去 60 年來核能發電，已導致一個目前尚無解決方案、但卻需數萬年安全貯存、管理與最終處置的核廢料危機。為了描繪我們所需要考慮的時間尺度，下圖⁶以一個 1,000MW 的核電廠為例，比較其所生產的不同型態核廢料的放射性之逐年變化。用過燃料棒的放射性程度在最一開始是最強的，但隨著時間持續遞減。另一方面，耗乏鈾的放射性長期而言則是遞增，更在 50 萬年後超越用過燃料棒的放射性程度。(註：尺度皆為對數尺度)



攀升的管理成本與巨大的不確定性

一如新建核反應爐的籌資，包括用過燃料棒在內的核廢料管理乃至於最終處置之成本負擔，不斷地在攀升。顯而易見地，沒有任何國家可以準確地估算要管理這些核廢料，長達數十年甚至數百年的時間，需要負擔的成本總額到底是多少？即使是近期的成本估算值，在許多國家中都是缺乏的。幾乎毫無例外地，以下列出的成本並未考量在核燃料循環過程中被製造出來的其他大量核廢料。這些巨大的財政負擔最終將無可避免地由納稅人們來承擔。

在**法國**，要評估核廢料管理的總成本是極端複雜的任務，尤其考量到管理成本不斷地隨著時間增加。根據審計院（Court of Auditors）的估算，2013年時，長期核廢料管理的毛成本高達320億歐元，其中有81%，約260億歐元由法國電力公司（Électricité de France，EDF）所資助。此數字並未包括用過燃料棒之管理成本，法國電力公司評估截至2013年12月31日為止約為160億歐元。最後，根據法國國家放射性管理局（Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs，ANDRA）在2015年時的統計，用來深地質處置高階與中階廢棄物的「Cigéo計畫」（Centre Industriel de Stockage Géologique，Cigéo）的成本約為350億歐元，但到了2016年，一項政府命令決定此項計畫之成本應降為250億歐元。

在**比利時**，包括意外情境（unplanned

events）的額度在內，整體成本在2011年⁸時預估約為30億歐元，如今則達到80億甚至100億歐元⁹。

在**瑞典**，2017年瑞典核燃料和廢棄物管理公司（Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company，SKB）估計，從現在一直到未來瑞典所有核能設施關閉的這段期間內，管理所有由反應爐所生產的核廢料總成本約為96億歐元，其中30億歐元是用來管理用過燃料棒¹⁰。

在**日本**，產業經濟省（Ministry of Economy Trade and Industry，METI）於2011年時估計核廢棄物處置的成本為290億歐元¹¹。然而這個數字基於完全不切實際的時程估算，可預見進度將延宕數十年，這將導致更高的成本。

在**美國**，2008年時能源部（Department of Energy，DOE）發布了一份修訂版的生命週期成本（life-cycle cost）估算，預估於猶加山廠區（Yucca Mountain）處置達7萬公噸的商用反應爐用過燃料棒將花費1,000億歐元。但由於核反應爐仍持續運作，未來預測仍將製造超過11萬2千噸的用過燃料棒，上述的成本也將會顯著地提升。

在**英國**，目前規劃中的地質處置設施（Geological Disposal Facility，GDF）之成本在2008年時預估為126億歐元，然而這並未將新的反應爐所生產的用過燃料棒包含在內¹²。然而就如同其他世界各國一般，依然存在著高度的不確定性。

核廢料處置方案：焦點國家審視

綠色和平委託專家學者，針對過去、現在與未來的核廢料政策進行詳細檢視，尤其聚焦於用過燃料棒的管理。目前全世界還有相當多的國家承受使用核電的負面遺產（legacies），甚至包括本身從未運轉過核反應爐，卻身為鈾礦主要供給者的國家，此處我們所選擇檢視的國家都呈現出一個共同點：沒有任何一個國家可以解決「如何安全處置核廢料」的問題。以下是從各國家報告中摘要出來的重點，包括所有國家共同面對的核廢管理困境之案例。在各政府程度不一的支持下，全球的核能工業目前仍致力於用過燃料棒——危害最大的核廢料——的地質處置。然而，目前全世界尚未完成興建任何一個安全可靠且能維持長期穩定的地下貯存場。即使是在核能工業計畫最為先進的瑞典與芬蘭，不論是在核廢料處置的科學依據，或是在這些處置方案所遭遇的政治、法律與公眾接受度之困境，都依然存有巨大的不確定性。在瑞典與芬蘭遭遇到的關鍵問題依然未解，且全球皆然，包括：

- 若要在安全前提下阻止核廢料擴散，以避免對未來人類社會造成可能的放射性衝擊，所需要花費的時間將長達數個世紀，甚至是數萬年。
- 當國家的穩定程度是用「未來數年」或者「未來數十年」衡量時，在管理核廢料所需的長達數千年的時間區間中，國家的可存續性（viability）又有多高？

- 是否可能確保包括處置井（disposal shaft）以及廠區的不透水性（water-tightness）在內的地質完整性？
- 在可能崩塌的地底核廢料貯存設施中，如何保證並落實未來的維護工作？
- 在成本依然只是預估值的情況下，以及當其所涉及的時間規模遠遠超過當前核廢料生產者以及電力公司所擁有高度脆弱的商業存續力時，如何能確保足夠的資金來源？
- 在數個世紀甚至更久之後，核廢料以及其圍阻系統本身將會有什麼樣的變化？

從各個國家的審視報告之中所能夠得到的共同結論是：不僅上述這些問題未能得到解答之外，尚有更多問題有待解決。考慮到核廢料——尤其是高階核廢料——極為特殊的危險性質，對於政府、管制機構以及核能工業而言，不論在此時此刻或在未來，以最高的安全規格處理核廢料並減低其危害，都必須是責無旁貸且最優先的任務。

對於包括用過燃料棒在內的高階核廢料而言，唯一確實的結論是：首先必須將這個問題最小化。換句話說，必須在淘汰核反應爐的過程中，盡早停止高階核廢料的生產。至於既存的用過燃料棒，乾式貯存依然是往後數十年內危險性最低的選項。對於核能工業宣稱「在管理高階核廢料上已經取得顯著進展」，則缺乏可信的證據支持。

比利時

即便已投資相關的研發長達數十年，位於比利時莫爾區（Mol region）的規劃中高階核廢料處置場依然存在許多顯著的內在風險，包括：

- 選擇黏土基質（clay matrix）之地質進行深地質處置：該處之岩層飽含水分且缺乏自承性（not self-supporting）。
- 該場址的深度：太接近地表，且離重要的飲用水源僅有數十米的距離。
- 地層厚度不足，進而小幅度傾斜，約等同於長達 2 公里的地層傾角 2%、40 公尺位移。這種地質結構將需要嚴格的水平式設計，以應對運輸以及支道之需求。

同樣值得一提的是，許多營運上的風險涉及共時作業（co-activity）的困難，以及來自緊鄰住宅區的強力氣流干擾。預期成本多有波動，包括意外情境的額度在內，整體成本在 2011 年¹³時預估約為 30 億歐元，如今則達到 80 億甚至 100 億歐元¹⁴。

法國

法國擁有全球第二多、58 座運轉中的核反應爐，導致法國面臨巨大的核廢料危機，且橫跨各種層級的核廢料。距離法國啟動核能計畫至今已經超過 60 年，法國離「解決」核廢料危機——或甚至意識到此項任務的困難程度——都依舊非常遙遠。核廢料再處理（reprocessing）所產生的廢棄物如鈾、玻璃固化（vitrified）之高階核廢料，以及使用過之混合氧化物核燃料棒（spent Mixed Oxide plutonium fuel, MOX）等，使得法國的核廢

料危機更為複雜。在高階核廢料的處置上，國會已通過相關法案，探尋在擁有黏土層的潛力場址建立深地質貯存場的可能性。目前法國預計將用來處置高階與中階核廢料的設施位於布爾郡（Bure），但該項計畫的各種弱點、缺點以及障礙，都已陸續被三大官方意見所指認，這些官方意見包括法國核能安全局（French Nuclear Safety Authority, ASN）、法國輻射防護暨核能安全研究所（Institute for Radiological Protection and Nuclear Safety, IRSN）以及獨立的同儕審查。這也導致由法國國家放射性廢棄物管理局（The French National Radioactive Waste Management Agency, ANDRA）所提出的「Cigéo 計畫」遭到嚴厲的質疑。

本報告中法國專章的關鍵議題摘要

- 位於布爾的核廢料處置計畫，目的是深地質處理約 1 萬立方公尺未經固化包裝（non-conditioned）的「高階、長生命週期」（HLLL）核廢料以及約 3 萬立方公尺經固化包裝的（conditioned）核廢料、約 6 萬包；「中階、長生命週期」（MLLL）廢料的部分，則有約 7 萬立方公尺的未經固化包裝核廢料，以及約 35 萬立方公尺的經固化包裝核廢料共約 18 萬包，其中包括 7 萬 5 千包瀝青包。
- 上述數字尚未包含那些被歸類為「核原料」（nuclear material），但實際上應被歸類為核廢料的廢棄物，且這類「中高階、長生命週期」的廢棄物也需要透過類似 Cigéo 計畫的方式進行處理。其中一個例子是尚未預定進行處理的用過燃料棒（包括使用過的 MOX 燃料棒）。同樣地，目前存放在拉阿格（La Hague）鈾的數據也未被提供。

-
- 風險：ANDRA 坦承「爆炸可能導致 Cigéo 廠區的圍阻體 (confinement) 遭破壞」，進而可能造成放射性同位素滲透入貯存設施中。
 - 火災是最嚴重的風險，尤其考量到「中階，長生命週期」(ILLL) 廢料儲存間中氫氣與可燃性廢料包件的同時存在。IRSN 表明此種貯存方式的確有弱點，且有在儲存間發生大爆炸的風險，這將導致放射性氣體逸洩。IRSN 的模擬測試顯示，由一個廢料包件的火苗所釋放出來的熱浪，在短短幾個小時之內就可能擴散到另一個廢料包件。在發生了這種意外之後，幾乎不可能回歸正常運作的。
 - 長期而言，水分滲移 (water migration) 所導致的風險也存在於 Cigéo 計畫中。ASN 要求 ANDRA 在其模擬測試中呈現 Cigéo 岩層中的水流機制，以加強證明貯存系統的整體穩健性。地層中的水流滲透 (water infiltration)，或許是最巨大且難以預防的技術性長期風險。
 - 如同其他國家，法國立法者於 2006 年 6 月 28 日立法的第五項條文中加入了「可逆性」(reversibility) 的概念。
 - 然而在現實中，計畫中的可逆性缺乏可信度，它僅被侷限於廠區營運階段，等同於未來數個世代的長度，且現在我們知道的是：可逆性的具體實踐，即一個或多個核廢料包的「可回收性」(recoverability)，僅僅是在產業試營運階段 (pilot industrial stage) 為義務性，即廠區營運的早期，而非在廠區密封之後。
 - 將核廢料以如此完全不可逆的方式埋藏在地底深處，且完全沒有任何調整管理策略的時程，將會導致未來世代蒙受地底污染的問題，並且缺乏任何可以解決的務實辦法。
 - 法國目前尚沒有任何可靠的解決方案來安全地長期處置核廢料，當務之急是降低既存核廢料的危險性，包括用過燃料棒在內。法國政府必須致力於提升當前核廢料貯存與處置設施的安全性。
 - 法國政府與國會應即刻重新檢視 Cigéo 計畫，它不僅最終將不可避免地走向失敗的結局，其必須花費的鉅額成本最終將會由法國人民所蒙受。法國政府也應發展中期乾式貯存設施以及高階研究計畫，以降低核廢料的放射性與半衰期。
 - 當前的放射性廢棄物管理策略需要大幅度調整，這些策略是在對此議題的長時間漠視之後才發展出來的，並且是建立在狹隘選項之上：「再處理」、「鈾生產」以及仍有爭議的「高潛力資材」與「廢棄物」的區別。

日本

如同大多數使用核能發電達半個世紀或以上的國家，為了遵守 1972 年簽訂的《防止傾倒廢棄物及其他物質污染海洋公約》（Convention on the Prevention of Marine Pollution by Dumping of Wastes and Other Matter），又稱《倫敦海拋公約》（London Dumping Convention），日本被迫放棄將高階核廢料棄置於海洋的計畫。

- 基於高地震風險，相較於自然屏障，日本目前更聚焦於如何利用技術屏障確保地質處置的安全性。然而，儘管已有長達數十年的投資，日本仍未能成功證實地質處置的可行性。
- 日本的核燃料循環政策依然聚焦於用過燃料棒的再處理，而用過燃料棒目前並未被歸類為高階核廢料。考慮到日本的鈾再處理計畫落後進度長達數十年，且超過預算達數十億歐元，且完全無法實現，因此調整上述的政策勢必是未來唯一可行選項。
- 目前日本的地底研究計畫位於北海道北邊的幌延町（Horonobe），當地地質相對年輕，是約於 10 萬年前形成的泥岩層（mudstones），包含大量的裂縫以及地下水。該處的水源包括來自地表的水流以及「古地下水」（fossiliferous seawater）。
- 目前沒有任何適合的地點符合標準，即使只是提議在當地興建處置設施，都會面臨當地高度的公眾反對。全日本 46 個一級地方政府首長中，有 21 個早已表示拒絕接受在他們的轄區進行核廢料地質處理的後續研究。
- 目前估算的成本依然完全缺乏可信度，約為 3.8 兆日圓（294 億歐元）。
- 事實是：用過燃料棒是高階核廢料，沒有理由對其進行再處理或是鈾分離。用過燃料棒將繼續放置在反應爐所在之廠區，未來可能存放位於六所村（Rokkasho-mura）的核燃料基地。如同日本學術會議（Science Council of Japan）在他們 2012 年的內閣報告中所警告的，目前唯一的選項，便是致力發展可以存放高階核廢料達 300 年的中期貯存設施。

瑞典與芬蘭

從 1970 年代以來，核能工業以及政府都投注極為大量的資金來處理各種核廢料——尤其是用過燃料棒——的長期管理。瑞典目前有一個位於奧斯卡港市（Oskarshamn）的用過燃料棒地底中期貯存設施（Centralt mellanlager för använt kärnbränsle，Clab）可以存放用過燃料棒達 30 年之久。針對瑞典核燃料和廢棄物管理公司（Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company，瑞典文 Svensk Kärnbränslehantering，SKB）所提出的申請，即預計建造一個使用 KBS-3 技術來處理高階核廢的地底用過燃料棒管理系統，目前也正在進行正式審查。瑞典在 KBS-3 技術上所面臨的技術性問題與挑戰，同樣也適用於芬蘭目前部分完工的安克羅（Onkalo）設施上，該處的地質條件整體而言與瑞典相當相似。全世界的核能工業都盛讚瑞典與芬蘭的進展，並將其視為未來的願景，然而實際上，現實卻與此落差甚大：

- KBS-3 技術的安全性是建立在許多未經證實的原則性假設之上，其中一個假設是：廢料貯藏罐所使用的材料——銅以及鐵製內襯——的腐蝕速度將非常緩慢，因而可以確保在核廢料仍對生命體存有危害的期間中，放射性同位素都不會有外洩的情況。

- 由於可能導致貯存罐腐蝕的因素相當複雜，因此並無法確定銅與鐵是否果真是合適的材料。獨立於核能工業的研究調查發現，肇因於銅料腐蝕而產生的外洩，最晚可能在 100 年後便發生，而且大多數的貯存罐可能在 1000 年後都會發生外洩的狀況¹⁵。除此之外，也尚未針對此貯存系統「以廢料罐貯存用過燃料棒」的情境進行模擬測試。
- 2018 年時，瑞典輻射安全管理局（Swedish Radiation Safety Authority，SSM）針對 KBS-3 計畫做出了條件式的同意，條件之一便是要解決銅鏽蝕的問題。
- 2018 年時，土地與環境法院（Land and Environment Court）做出關鍵性判決，質疑整個 KBS-3 計畫未能證明其安全性，此外法院也認為關於該項作業的可能影響仍缺乏足夠肯定的預測，故而無法對其制定出任何最終許可條件（to permit the formulation of any final conditions）。

與此同時，土地與環境法院也認為該計畫的長期財務責任歸屬仍有待釐清。

英國

英國面臨著全世界最大且最複雜的核廢料問題之一。2018年1月公布的兩份新的諮詢文件¹⁶，標誌著英國政府在過去42年內，第16次開始試著尋找願意在當地設置放射性廢棄物處置場的社區。在英格蘭北部塞拉菲爾德（Sellafield）進行了長達數十年的鈾再處理計畫，致使英國所面臨的核廢料困境變得極端的危險與昂貴。在徒勞無功地花了四十年尋找核廢料處置場的場址之後，英國政府決定嘗試一個透過「志願主義與夥伴關係」（voluntarism and partnership）的新路徑。然而，並沒有任何徵兆顯示過去數十年的失敗經驗，能透過地質處置設施（Geological Disposal Facility，GDF）克服。

- 眾多官方機構都曾經警告，塞拉菲爾德核燃料工廠「對人民與環境帶來巨大的風險」，同時它也積累「極為大量的有害廢棄物，且大多貯藏於過期老舊的核能設施中」。
- 塞拉菲爾德核燃料廠所在地的地方議會，在過去數十年中在尋找地質處置場場址一事上累積了豐厚的經驗，他們認為政府於2018年所提出的方案在根本上是有缺陷的。他們尤其感到遺憾的是：儘管用過燃料棒因為過度灼熱而難以在地底安置超過一世紀，政府仍未能正視核廢料中期貯藏的需求。
- 令人懷疑的是，是否真的有可能做出具有科學信度的證明來確保核廢料貯存設施附近的人們所接受的輻射劑量，直至未來都將處於可被接受的低程度。

- 在缺乏解決方案的情況下，英國又開始新的核反應爐興建計畫，此舉將惡化既有的核廢料問題，且大幅度增加由用過燃料棒與其他高階核廢料所生產的放射性，且這些核廢料將無期限地被存放於四散英國沿岸的眾多脆弱設施之中。

美國

自從1957年美國第一座商用反應爐運轉已經60年，今日美國核反應爐所生產的用過燃料棒大約占全球總量的30%，高居各國之首。然而與此同時，長達數十年的努力以及數十億美元的投資，都依舊無法找到任何一個地點可以興建地質處置場以處置商用用過燃料棒。因為政治因素而被選中且耗時數十年興建的猶加山（Yucca Mountain）地下設施，最終基於科學與公眾反對的因素，於2010年時被歐巴馬政府取消。

- 在長達30年的時間裡，美國核能管制委員會（Nuclear Regulatory Commission，NRC）針對核廢棄物貯存的規範，都是取決於永久核廢料處置場所的啟用時間，如此一來允許了核反應爐合法地在廠區的冷卻池內，用比初始設計來得更久的時間、約4倍的密度貯存用過燃料棒——目前美國約有70%的用過燃料棒是就地存放於脆弱的冷卻池中。
- 美國核電廠冷卻池所積累的大量用過燃料棒，構成巨大的潛在危害。因為這些冷卻池裝載許多輻射照射核燃料（irradiated cores），或裝載比初始設計裝載量高出3到4倍的用過燃料棒。且這些冷卻池缺乏如二次圍阻體（secondary containment）這類的深度防禦系統，也缺乏自身的後備電力。

-
- 2008 年時美國能源部 (Department of Energy, DOE) 發布一份修訂版的「生命週期成本」 (life-cycle cost) 估算，若要於內華達州猶加山廠區處置達 7 萬公噸的商用反應爐用過燃料棒，以及處置截至 2018 年為止超出既有存量的核廢料，所需花費的總成本將高達 1130 億美元，以 2018 年匯率換算約為 970 億歐元。根據目前的法規，超過既有存量數量的用過燃料棒必須被放置在第二個處置場。
 - 猶加山設施並不符合由國際核子能總署所訂出的長期核廢料貯存的基本地質要求，包括「深層處具有穩定的地質化學 (geochemical) 或水化學 (hydro chemical) 條件，主要表現為：還原化環境 (reducing environment) 的存在，以及地下水跟造岩礦物 (rock-forming minerals) 達成均衡的成分組合；此外，考慮到重大地層移動、地層型變、斷層、地震或是地熱等，該地需有以百萬年計的長期地質穩定性。」
 - 在目前唯一可行的選項「用過燃料棒與其他高階核廢料的長期地表貯存」上，美國缺乏一致性的政策。在意識到此議題的巨大不確定性之後，美國能源部表示「目前正在考慮於美國範圍內採用可達 300 年的長期貯存」。

1

核廢料： 現今狀況

NUCLEAR WASTE: THE SITUATION TODAY

從鈾礦開採、鈾濃縮、反應爐運轉、再處理乃至於反應爐除役，核燃料循環的整個過程都會製造具有危害的核廢料。

鈾礦的開採會產生放射性尾礦 (tailing)，這些尾礦會由尾礦堰 (tailings dam) 進行收集，並以黏土與岩石覆蓋，以避免氫氣外洩。

核能工業會製造大量的低階核廢料 (Low-level Wastes, LLW)，包括紙張、廢布料、工具、服裝、過濾器等等。這些低階核廢料通常是在掩埋場進行簡單的淺層掩埋。

中階核廢料 (Intermediate-level Wastes, ILW) 則包含合成樹脂、化學污泥、從廢燃料棒上剝落的金屬護套，以及除役過後的受污反應爐部件。在某些國家中，即使是這些比低階核廢料帶有更高劑量放射性活度的中階核廢料，也依然僅僅是在掩埋場中淺層掩埋。雖然

這並不是放射性程度最高的核廢料，但中階核廢料通常仍要求一定形式的屏蔽，並需要妥善小心的管理，以保護工人之健康與周遭環境。

危險性最高的核廢料即是從核反應爐中移出的高階核廢料 (High Level Waste, HLW) 或用過燃料棒 (spent fuel)，其放射性可維持達數萬年之久。在某些國家中，針對用過燃料棒的再處理導致上述情況更加惡化。再處理便是將用過燃料棒溶解於硝酸 (nitric acid) 之中，以分解出可使用於核武器製造的鈾元素。這個過程將會產生具有高度放射性的液態核廢料。

根據世界原子能總署的估計，自從民生用核能電廠出現以來，一共約有 37 萬公噸重金屬¹⁷ 的用過燃料棒被製造出來，其中約有 12 萬公噸重金屬經過再處理¹⁸。

表一 核廢料貯存量 (國際原子能總署 2018 年估算值)

	貯存中之固態放射性廢棄物 (立方公尺)	已處置之固態放射性廢棄物 (立方公尺)	該類型廢棄物之處置比例
極低階廢棄物	2,356,000	7,909,000	77%
低階廢棄物	3,479,000	20,451,000	85%
中階廢棄物	460,000	107,000	19%
高階廢棄物	22,000	0	0%

註：所有的體積數字皆根據營運中、提議階段之各類廢棄物最終處置方案之估算值

鈾礦開採

大多數的鈾礦是在露天礦坑或地下礦場進行開採。礦石中的鈾含量通常僅介於 0.1% 到 0.2% 之間。因此為了獲取鈾，需要開採大量的礦石。直到 1960 年代前，絕大多數的鈾都是在靠近地表的礦床露天開採，在那之後鈾礦開採則持續在地底礦場進行，但這些礦區大多都在 1980 年代隨著鈾價下跌而關閉。美國在冷戰時期擁有數百個的地底礦場。在礦床被開採殆盡後，許多礦場隨即被棄置不理，且往往未妥善確認礦區開口的安全，時至今日仍造成威脅¹⁹。

不論是露天礦坑或地下礦場，鈾礦的開採都會製造大量的廢棄石塊。這些廢棄石塊所含有的放射性同位素之濃度通常比一般的石頭還要來得高。其他的廢棄物堆則包含因級別太低而無法處理的礦石。由於這些廢棄物堆會釋出含有放射性與有毒物質的氫氣與滲流水，因此它們對於當地的人們來說是一種威脅。

根據 Hoppin、Rydberg 以及 Liljenzin 1995 年出版針對核能工業的開創性研究：

「鐳與氫是既存最具放射性毒性的物質，即使是相對低的濃度也可導致骨癌與肺癌，因此，對於它們在自然環境中的出現務必得特別給予注意」²⁰

鈾礦研磨

在露天礦坑或地下礦場開採的礦石會在鈾礦研磨廠中進行粉碎與過濾，鈾礦研磨廠基本上是設計將鈾元素自礦石中提煉出來的化學工廠，一般而言位於礦場附近，以利運輸。在大多數的情況下，過濾溶液會使用硫酸及鹼性過

濾溶液。由於過濾溶液不僅會從礦石中萃取出鈾，同時也會連帶地萃取出許多其他元素如鉬、鈾、錒、鐵、鉛以及砷等，因此必須將鈾自這些濾液中分離出來。鈾礦研磨廠的最終產物一般被稱為黃鈾餅（yellow cake），即有雜質的八氧化三鈾，它將被裝在護箱中進行運送。

鈾礦處理過程中的廢棄物之一，即是鈾磨礦尾渣（uranium mill tailings），往往被當作污泥棄置於特殊的廢水池與廢石堆中。在美國與加拿大，像這樣的廢石堆包含高達 3000 萬公噸的固態廢料。在德國的薩克森，鄰近茨維考（Zwickau）的赫姆斯多夫（Helmsdorf）廢石堆則收納 5000 萬公噸，位於圖林根（Thuringia）鄰近塞林格斯特（Seelingstädt）的 Culmitzsch 廢石堆則有 8600 萬公噸此類廢料²¹。

鈾礦研磨的程序並不會將移除長生命週期的衰變物質如鈾-230 與鐳-226，也不會移除所有的鈾，約會有 5% 到 10% 的鈾殘留。因此鈾礦研磨所產生的廢污泥依然含有原初放射性活度的約 85%，此外也含有重金屬與其他有毒污染物如砷，還有研磨過程中所使用的化學試劑等。鈾礦的開採與研磨過程會導致有害化學物質離開相對安全的地底環境，並使其轉化為細沙型態，最後形成廢污泥，進而導致這些有害化學物質容易在環境中逸散。

氣體狀態的氫-222 會自尾礦堆中散逸，且有 3.8 天的半衰期，這看起來或許相當短暫，但由於鐳-226 的衰變會持續產生氫氣，而鐳-226 的半衰期長達 1600 年，致使氫氣成為一種長期的危害。此外，由於鐳-226 的母產品鈾-230 也同時存在（半衰期 8 萬年），因此鈾-230 的衰變也將持續製造鐳-226。

要直到一百萬年後，這些礦尾渣的放射性活度以及其釋放的氫氣才會降低，到僅受其鈾殘餘內容物影響的程度，而這些殘餘鈾礦渣也會持續產生鈾-230。

即使在鈾礦場關閉之後，氫氣的外洩也依然持續造成巨大的危害。根據美國環境保護署針對居住於 80 公頃露天尾礦堆附近的居民之終身肺癌風險評估，結論是約每一百個居民中會有兩人罹患肺癌。由於氫會乘著風快速地擴散，因此許多人會受曝於小量的額外輻射劑量。雖然對於每個人來說，額外致癌風險並不大，但考慮到受其影響的人數眾多，其後果依然不容忽視。美國環境保護署估計，倘若沒有相關應對措施，則 1983 年存在於美國的鈾尾礦堆將會導致每世紀有 500 人因肺癌死亡²²。

由於鈾尾礦所含有的放射性物質具有相當長的半衰期，因此這些鈾尾礦堆的安全性需要獲得長期保證。下過雨之後，可能會產生侵蝕溝（erosion gullie）；洪水可能會摧毀整個尾礦堆；植物與掘穴生物可能會鑿穿尾礦壩並導致有害物質溢散，加劇氫氣外洩，並致使尾礦壩更容易受到氣候因素所侵蝕。當尾礦堆乾燥之後，細沙會被風吹至鄰近區域。來自尾礦堆的滲流水則是另一個可能污染地下水與地表水源的危害。附近居民也蒙受飲用水與食用水產遭鐳-226 及其他有害物質如砷所污染的風險。在酸性尾礦堆中，滲流水的問題將特別重要，因為放射性同位素在酸性環境下的可流動性更高。

在世界各地，尾礦壩意外都造成了鈾礦區的污染問題。世界能源資訊服務（World Information Service on Energy, WISE International）記載 21 起尾礦壩意外²³。

關閉鈾礦場會製造大量遭輻射污染的垃圾，而它們都需要被安全地處置。以德國威斯麥的克羅森礦場（Wismut's Crossen）為例，為了降低成本，有些廢棄物預計將被棄置在哈姆斯多夫尾礦壩，然而這些廢棄物可能會在那裡製造出廢氣，進而危害到這些廢污泥的最終安全處置²⁴。

世界能源資訊服務的「鈾計畫」詳列全球於 2011 年時已知的鈾磨礦尾渣數量。南非的礦尾渣是金礦開採過程中所回收的鈾副產品；部

分澳洲的礦尾渣，則是銅礦開採過程中所回收的鈾聯產品²⁵（奧林匹克大壩）。全球的鈾磨礦尾渣數量約為 23 億 5255 萬噸²⁶。

表二 全球鈾磨礦尾渣分布及數量

國家／地區	鈾磨礦尾渣（百萬噸）
澳洲	79
保加利亞	16
加拿大	202.13
捷克	89
法國	29.318
德國	174.45
匈牙利	29.4
哈薩克	165
吉爾吉斯	32.3
納米比亞	350
俄羅斯	56.85
南非	700
烏克蘭	89.5
美國	235
烏茲別克	60

綠色和平於 2010 年時，記錄了法國核能工業在尼日的鈾礦開採工程所造成的廢棄物問題與環境破壞²⁷。大量塵土從露天礦坑的人工爆破工程揚起，並夾帶放射性氣體飄向周遭的小鎮如阿爾利特（Arlit）與阿科坎（Akokan）。堆積如山的工業放射性廢棄物暴露在空氣中長達數十年。除此之外，高達數百萬噸石塊與泥土的搬移，污染了曾經乾淨的地下水源，而這些地下水源同時也因為工業的過度使用而正迅速地消失。2009 年 11 月，綠色和平以及其夥伴們針對該地區與周遭礦業城鎮的輻射指數進行科學調查。在某些案例中，輻射指數高於國際建議劑量的 100 倍。在十年之內，阿爾利特與阿科坎附近的地方經濟將會隨著鈾礦的枯竭而一同衰敗，然而不論是當地的人民還是遺留下來的環境污染，都將在往後的數個世紀中被遺忘²⁸。

尼日的廢棄物包括來自兩個礦場約 4000 萬噸的放射性殘餘物、1600 噸受污染的固體廢棄物，以及許多廢液²⁹。

類似的故事在全世界各地都在上演。在印度東部賈坎德邦 (Jharkhand State) 東新奔縣 (East Singhbhum)，有數百起的先天性疾病與其他先天性缺陷案例以及極高比例的不孕、流產、早產等現象，發生在鄰近賈杜戈拉 (Jadugora) 礦場的區域，賈杜戈拉礦場擁有全世界品質最高的鈾礦礦床以及重鈾酸鎂 (magnesium diuranate)。透過影像將人們因危險採礦而受苦的畫面記錄下來的攝影師 Ankush Vengurlekar 說到，「**在礦區工作的礦工會吸入粉塵與氫氣。此外，鈾礦由缺乏車頂屏蔽的卡車所運送，行經顛簸的道路，導致鈾礦碎屑掉落路面。在缺乏遮蔽的水池中傾倒礦尾渣也導致了輻射逸散**」。

當地居民表示，鄰近礦尾渣池的村落是受害最深的地方。在乾季，礦尾渣所產生的粉塵會被風吹遍整個村落。在盛行季風雨的季節，放射性廢棄物則會流入周遭的溪流與河川，由於村民不僅會將這些受污水源用於洗滌或飲用，也會在附近的池塘捕魚，因此進一步造成體內的輻射污染³⁰。

約十年前，當核能發電廠的興建看似回溫時，中國大陸、加拿大與法國的公司紛紛湧至新的非洲國家去開採鈾礦。2010 年時，一位評論員指出，「**你若要在德州採礦，你需要滿滿兩書架的授權文件；但在尼日，你只需要用一天兩塊美元的代價聘用一個人，並給他一把鏟子，你就可以開採鈾礦了**」³¹。即使如此，2016 年時全世界近 75% 的鈾礦生產依然集中在三個主要生產國：哈薩克共和國、加拿大與澳大利亞³²。

開採鈾礦只不過是核燃料循環的開始，但上述這些故事仍清楚地向我們描繪核能工業如何在獲利之後，將應該由自己負擔的成本轉嫁到當地居民、納稅人以及電力消費者身上。在

核能生產鏈的每一個環節裡，當地居民總是被迫面臨遽增的健康風險，然而幾乎毫無例外地，他們也從未被詢問過是否願意承受這些逐漸增加的風險。

鈾濃縮

透過鈾礦開採而獲得的原物料一般稱為「黃鈾餅」 (yellow cake)。黃鈾餅的主要成分是八氧化三鈾 (U_3O_8) 以及雜質。若要將黃鈾餅用於核電廠來生產電力，則必須將其轉製為核燃料棒。首先，其中的鈾必須被轉化為六氟化鈾 (uranium hexafluoride, UF_6 ，或簡稱 hex)，一種極易揮發為氣體的化合物，而此種特性對於後續的濃化程序而言是必須的。

黃鈾餅依然帶有某些雜質，因此必須在轉化為六氟化鈾之前或之後進行進一步精鍊，接著才進行濃化程序。在美國、加拿大、法國、俄羅斯與中國大陸都有商業轉化工廠在營運。此種轉化程序會製造更多的廢棄物，這些廢棄物通常會被棄置在轉化工廠附近的大型圍場 (compounds) 中。

舉例而言，法國的馬爾維西鈾轉化廠 (Comurhex Malvési conversion plant) 負責將八氧化三鈾轉化為四氟化鈾 (UF_4)。而針對六氟化鈾的進一步精鍊，則是在皮耶爾雷拉特 (Pierrelatte) 的鈾轉化廠進行。2004 年 3 月 20 日，位於馬爾維西鈾轉化廠中的傾析池 (decantation pond) 與蒸發池 (evaporation pond) 發生潰堤事故，釋放出總體積高達 3 萬立方公尺的液體與廢泥漿。此一潰堤事故，一般相信是肇因於 2003 年夏天豪雨導致的異常的水份存在 (abnormal presence of water)。2006 年 1 月底時，由於劇烈的豪雨，馬爾維西鈾轉化廠的生產再次被迫中斷兩個月，以維持圍場內池水所需的安全限度 (safty margin)。然而，該次降雨的雨水與 2004 年潰堤事故後遺

留在堤防外的廢泥漿相接觸，導致溶解於廢泥漿中的污染物逸散到周遭環境之中。2006年5月，許多傾析池由於池水高度的安全限度過低，因此在強風過後發生了池水外溢的意外，再次導致硝酸鹽污水外洩。

2006年6月20日，再次發生一起受污廢泥漿的外洩，覆蓋350平方公尺的土地，外洩漿液的體積並未見於報導，且事故直到一個月之後才被發現³³。

在自然界的鈾礦中，可分裂性同位素鈾-235的濃度僅為約0.71%。要製造大多核反應爐所需的核燃料棒，這個濃度便必須提高到3%到5%之間。這便是所謂的濃化程序(enrichment process)。在可商業運轉的鈾濃縮工廠中，此濃化程序透過氣體擴散法(gas diffusion)或是利用離心機(centrifuge)這兩種物理製程來達成。每生產一公噸的濃縮鈾，就會製造出七公噸的耗乏鈾。這些耗乏鈾最終將何去何從，仍是個有待解答的問題，不過目前它們大多數以六氟化鈾的形式被貯存在鋼製容器中，並被放置在鄰近鈾濃縮廠的空地上。美國目前已著手落實一個計畫，試圖將耗乏六氟化鈾轉化為更適合長期貯存的化學形式。

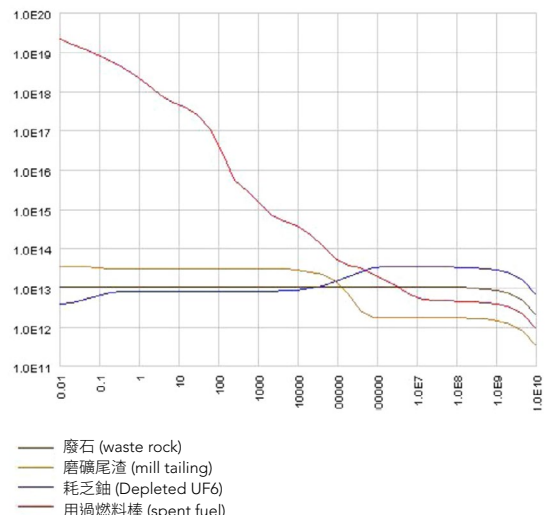
經濟合作暨發展組織核能署(OECD's Nuclear Energy Agency)於1999年的報告³⁴提供最近一次的全球耗乏鈾數據，報告指出：由鈾濃縮程序所製造出的耗乏鈾數量，預計將在不遠的未來以每年5%的增幅，即每年5萬7千噸鈾(tU)³⁵的幅度成長。核燃料生產的下一個步驟，便是將濃縮過後的六氟化鈾轉化為二氧化鈾(uranium dioxide)以便利用於核燃料棒上。此階段的製程會製造少量的廢棄物。

表三 全球耗乏鈾分布與存量

國家／地區	貯存形式	存量 (噸鈾)
美國	UF ₆	480,000
俄羅斯	UF ₆	450,000
	金屬與氧化物	10,000
法國	U ₃ O ₈	140,000
	UF ₆	50,000
英國 (英國核燃料公司)	UF ₆	30,000
荷蘭、德國、英國 (Urenco 集團)	UF ₆	16,000
日本	UF ₆	10,000
中國大陸	UF ₆	2,000
南韓	UF ₆	200
總計		1,188,200

為了描繪我們所需要考慮的時間尺度，下圖³⁶以一個1,000MW的核電廠為例，針對其所生產的不同型態核廢料的放射性之逐年變化進行比較。用過燃料棒的放射性程度在最一開始是最強的，但這隨著時間而持續遞減。另一方面，耗乏鈾的放射性長期而言則是增加的，更在50萬年後超越用過燃料棒的放射性程度。(註：尺度皆為對數尺度)

圖二 放射性活度 [貝克] vs. 時間 [a]



核電生產

核燃料循環的下一個階段，是將核燃料棒放進反應爐中生產電力。最終，此核燃料棒會從反應爐中退出，並成為用過核燃料棒（spent nuclear fuel）。

2011年，核裂變物質國際小組（International Panel on Fissile Materials，IPFM）發布一份報告，分析過去五十年來國際社會嘗試長期貯存與處置用過燃料棒上所遭遇的政治與技術挑戰。截至今日，肇因於這些政治與技術挑戰，世界各地都難以順利取得用來處置用過燃料棒與高放射性再處理廢料的地質處置場的申請許可³⁷。該份報告尤其聚焦於加拿大、法國、德國、日本、南韓、俄羅斯、瑞典、芬蘭、英國與美國等十個國家。上述這份名單包括許多全球歷史最悠久、規模最大的核能計畫，且涵蓋了超過全世界80%的核電裝置容量。

下表陳列上述十個國家截至2007年為止的用過燃料棒存量。此表使用了最系統性回報的用過燃料棒存量資訊，包含存放於冷卻池或是乾式貯存護箱中的用過燃料棒數量。這些資訊來自各國政府根據《用過核子燃料及放射性廢棄物安全管理聯合公約》（Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and the Safety of Radioactive Waste Management）要求所製作的國家報告書。核裂變物質國際小組的報告引用資料為各國於2009年提交給第三次審查會議的國家報告書。第六次審查會議於2019年5月21日至6月1日間舉行，因此我們將檢視提交此次會議的國家報告書³⁸：

英國的國家報告書在IAEA的網站上已無法存取，但可從別處取得³⁹，瑞典的報告亦可於網路⁴⁰取得。法國與日本之數據請參考相關章節。

表四 全球10國截至2007年用過燃料棒存量

國家／地區	至2007年為止用過燃料棒存量（噸重金屬）	用過燃料棒相關政策
加拿大	38,400	直接處置
芬蘭	1,600	直接處置
法國	13,500	再處理、處置、貯存
德國	5,850	直接處置（目前）
日本	19,000	計畫採用再處理，目前採用處置
俄羅斯	13,000	部分再處理
南韓	10,900	貯存，尚未決定是否處置
瑞典	5,400	直接處置
英國	5,850	再處理，但未來方向不明
美國	61,000	直接處置

從2018年各國提交《用過核子燃料及放射性廢棄物安全管理聯合公約》第六次審查會的國家報告書中，或者從2015年的第五次審查會議的國家報告書中，我們可以一窺世界主要核能國家中的高階放射性廢棄物、中階放射性廢棄物以及用過燃料棒之存量，並將其呈現於下表。值得注意的是，並非所有國家都使用相同的度量單位或是相同的放射性廢棄物級別分類。無論如何，我們可以看到目前全世界已經有約25萬噸鈾的高放射性用過燃料棒存量，散佈於14個國家中，另外還有約37萬立方公尺的液態或玻璃固化高階放射性廢棄物。

表五 全球主要核能使用國高階、中階放射性廢棄物及用過燃料棒存量

	高階廢棄物	用過燃料棒 (噸重金屬 tHM)	中階廢棄物	政策
阿根廷 (至 2013 年底)		4,243tHM		用過燃料棒目前採用濕式貯存。
比利時 (至 2016 年 12 月 31 日)	600 到 4500 立方公尺 (端視商用用過燃料棒未來的管理狀態而定)	4,080tHM (包括 66tHM 的混合氧化物核燃料) *	11,100 到 10,430 立方公尺 (端視商用用過燃料棒未來的管理狀態而定)	反應爐預計將於 2025 年前逐步關閉。到 2016 年 12 月 31 日為止，針對商用核電廠用過燃料棒之管理政策是用過燃料棒的安全貯存。
巴西 (至 2014 年 3 月)		1,398 個燃料束		貯存用過燃料棒
加拿大 (至 2016 年 12 月 31 日)		52,655tHM	32,891 立方公尺 (加上除役作業所產生的 263 立方公尺)	直接處置
中國大陸 (至 2013 年 12 月 31 日)		3,973.5tHM		預計將用過燃料棒再處理，但目前作法是將其貯存
芬蘭 (第五次審查，至 2013 年底)		16,382tHM	包括尚未處置的低階廢棄物 2,056 立方公尺以及已處置的 7,567 立方公尺	直接處置 (從洛維薩把用過燃料棒運往俄羅斯瑪雅克 Mayak 的作法在 1996 年時被終止)
法國 (至 2015 年 12 月 31 日)	14,555 桶玻璃固化廢料。2013 年底時約有 3,200 立方公尺當量的處理過廢棄物。*	拉阿格：9,681tHM (包括來自外國的 32tHM) 法國電力公司之核電廠：4,221tHM 法國原子能和替代能源委員會：88tHM	14,284 桶壓縮金屬廢棄物，以及 46,300 立方公尺來自再處理的未壓縮廢棄物 135,000 立方公尺的長生命週期中階廢棄物以及長生命週期低階廢棄物 **	再處理處置以及直接貯存
德國	約有 700 立方公尺的玻璃固化廢棄物貯存在廢料罐中	20,400 立方公尺來自輕水式反應爐、直接處置的用過燃料包件。約 1,340 立方公尺來自 Hamm-Uentrop 鈾燃料高溫反應爐的用過燃料包件。	約有 740 立方公尺貯存於廢料罐中的結構部分與套管 (標準壓縮廢料罐)，來自在法國再處理工廠進行的用過燃料棒再處理。 約有 3,400 立方公尺含有用過燃料棒結構部分的廢料包件，用於直接處置。	用過燃料棒在過去是送往法國與英國再處理，但現在則是直接貯存。

*2025 年，當最後一個比利時商用核反應爐永久關閉時，貯存於杜爾 (Doel) 和堤漢耶 (Tihange) 兩個廠區的用過燃料棒總量將達到 4,880tHM 的高峰⁴¹。

表五 全球主要核能使用國高階、中階放射性廢棄物及用過燃料棒存量

	高階廢棄物	用過燃料棒 (噸重金屬 tHM)	中階廢棄物	政策
日本 (第五次審查， 至 2014 年 3 月底)	415 立方公尺的高階廢液 247 個 120 公升的貯存槽 346 個 160 公升的貯存槽 1442 個 170 公升的貯存槽	16,889 tHM	在核電廠內有 696,896 個 200 公升的廢料桶，其他 地方則有 110,296 個。	過去將用過燃料棒送往國 外再處理。計畫交由國內 再處理設施負責，但至今 為止仍未成功。
俄羅斯 (至 2017 年 1 月 1 日)	18,640 立方公尺的液態高 階廢棄物，加上 480 公噸 的固態高階廢棄物	22,449 tHM	94,800 立方公尺的液態中 階廢棄物，以及 1,680 公 噸的固態廢棄物。	不完全的再處理，處置與 貯存。
南韓 (第四次審查，至 2010 年底)		11,370 tHM	在核電廠內有 87,176 個 200 公升的廢料桶，其他 地方則有 18,228 個。	直接處置
西班牙 (至 2014 年 10 月)		4,592 tHM	7,494 立方公尺的低階與 中階廢棄物。加上位於 El Cabril 貯存場的 30,188 立方公尺廢棄物。	西班牙的政策是用過燃料 棒應該被視為是廢棄物
瑞典 (至 2016 年 12 月 31 日)		6,758 tHM	40,232 立方公尺的低階與 中階廢棄物	直接處置
瑞士 (至 2016 年 12 月 31 日)	約有 1,139 噸用過燃料棒 已由瑞士核電廠運往英、 法之再處理設施	1,377 tHM	經固化包裝之低階／中 階廢棄物有 7,271 立方 公尺。未固化包裝的有 1,224 立方公尺。	暫緩進行於 2003 年引進 的再處理。 直接貯存。
英國 (至 2016 年 4 月 1 日)	1,960 立方公尺 (1,100 立 方公尺廢液，867 立方公 尺玻璃固化) 3,700 公噸 (1,400 公噸尚 未包裝; 2,300 公噸已包裝)	反應爐廠區內約有 2,800tHM 貯存場內約有 4,800 tHM 預計現有的反應爐在未來 將會新產出約 2,900 tHM 共 10,500 tHM	99,000 立方公尺 (120,000 公噸)	鎂諾克斯燃料再處理將在 2020 年完成。 氧化物燃料再處理將在 2018 年終止。
美國 (至 2017 年 6 月)	348,298 立方公尺	80,296 tHM	91,003 立方公尺的國防用 超鈾廢棄物，安置於廢棄 物隔離先導廠 (WIPP)	直接處置

再處理

在核能技術發展的早期，核能領域的人們熱衷於尋找如何有效利用第一代鈾燃料核反應爐所產生的副產品「鈾」。在核分裂過程中，鈾元素中某些無法進行核分裂的部分如鈾-238，會在吸收一個中子之後轉化為鈾-239，而這可以被應用於一種新式核反應爐—快中子增殖反應爐（fast breeder reactor）。假如反應爐爐心被一層鈾-238的圍包（blanket）所包圍，則理論上快中子增殖反應爐將可以產出更多自身所需的燃料。這些快中子增殖反應爐可以製造出比它們所消耗的還要多的鈾，繼而大幅延長鈾儲備的生命週期。決策者對於這樣的概念感到十分驚艷，並提供了十分優渥的研發經費。

要達到上述目標，必須將鈾從用過燃料棒中分離出來，方法是將其溶解於沸騰的濃縮硝酸液之中，並藉此分離出鈾與鈾，此程序稱為「再處理」（reprocessing）。這個物理與化學製程會產出許多不同的廢液，包括高放射性液體廢棄物。高劑量輻射也會被釋入空氣以及海洋環境之中。英國與法國的核子計畫所造成的放射性物質釋放與鈾元素釋放，大部分皆是來自於他們的再處理工程。據估計，僅僅是再處理工程就佔法國整個核能工業所製造的公眾輻射劑量（集體劑量）的80%。在英國，根據統計核子計畫所釋放、排放的核種有90%來自於其再處理工程⁴²。

「再處理」已然成為一個環境與財政的災難。舉例而言，位於英國蘇格蘭北部杜恩雷（Dounreay）的快中子增殖反應爐研究中心，目前正經歷除役階段。該廠預計將在2030年到2033年之間進入中期終止階段（Interim End State），但僅僅是2018年到2019年的財政年度，就將耗資1億9200萬英鎊。杜恩雷廠除役的折扣後成本預計將高達27億英鎊⁴³。

英格蘭西北部塞拉菲爾德廠的再處理計畫現已終結。塞拉菲爾德廠的熱氧化再處理廠（Thermal Oxide Reprocessing Plant，THORP）過去的任務，是將由英國先進氣冷式反應爐（Advanced Gas-cooled Reactor）與歐洲、日本的輕水式反應爐所製造出來的氧化燃料進行再處理；目前該廠預計將在今年關閉。

無論在商業上與工業上，塞拉菲爾德THORP再處理廠都是個失敗的案例。當它在1994年開始營運時，英國核能燃料公司（British Nuclear Fuels Ltd，BNFL）聲稱造價28億英鎊（約47億美元）的THORP再處理廠已經獲得了總量達5,334公噸的輕水式反應爐用過燃料棒的合約，來自日本、德國、瑞士、義大利、西班牙、瑞典、荷蘭與加拿大等國。在THORP再處理廠於1994年開始營運前，其經濟合理性說法便遭到反對者激烈的質疑，當時它被估算將可替英國核能燃料公司賺進90億英鎊（約150億美元）並且「**在營運的第一個十年間創造至少五億英鎊（約8.4億美元）的利潤**」。然而實際情況是，THORP再處理廠無法如期在2003年前完成海外再處理的訂單，最終在2009年完成訂單，期間還有20%的訂單遭到取消以及發生數起廠區事故。

此外，相關的塞拉菲爾德MOX核燃料製造廠（Sellafield MOX Plant）也由於設計失敗而無法按照原定計畫營運，並且於2011年永久關閉。

至於較為老舊、負責英國已關閉之第一代反應爐的用過燃料棒進行再處理的鎂諾克斯（Magnox）再處理廠，也將於2020年關閉。塞拉菲爾德在2018、2019年將花費20億英鎊營運費用。塞拉菲爾德除役過程總花費則預計將高達1200億元英鎊⁴⁴。

英國國家審計局最近一次針對塞拉菲爾德的報告指出：

「…該廠區最危險的設施包括 4 個裝載著大量核物質的貯存池與儲倉，以及存放著英國主要的鈾存量的倉庫。管理該廠區每日營運作業的塞拉菲爾德有限公司為了處理這些有害物質，制定 5 個長期計畫。為了回收與處理核廢料，這些長期計畫需要興建新的工廠以及開發專門的技術，故將耗費數十年才能完成。舉例而言，鎂諾克斯再處理廠自從 1964 年開始營運的切屑儲倉 (swarf storage silo)，含有來自核能運轉所產生的放射性與腐蝕性廢污泥。直到 2050 年為止，該設施預計將持續地造成巨大的危害。⁴⁵」

其中，鎂諾克斯再處理廠的用過燃料棒貯存池在 2015 年時被稱為「歐洲最危險的工業建築」。這個 150 公尺長的室外貯存池常有鳥類造訪，且裂縫已導致放射性物質外洩至土壤之中。沒有任何人確實知道裡面的內容物，但它很有可能存放高達一公噸的鈾⁴⁶。

鈾

目前全世界的已分離鈾元素存量約有 520 公噸，其中有 290 公噸由民間機構進行管理⁴⁷。製造一顆核子彈約需要 8 公斤反應爐等級的鈾⁴⁸。

表六 全世界民間機構管理鈾元素存量

國家／地區	民間鈾元素 (噸)
俄羅斯	57.2
美國	7
英國	110.3
法國	65.4
中國大陸	0.04
印度	0.4
日本與其他	49.3
總計	290

來源：<http://fissilematerials.org>

英國擁有全世界最大量的民間鈾元素存量，過去曾被視為極具價值的資產，如今則是所費不貲的負擔，甚至可能淪為恐怖主義者的目標。據估計，英國納稅人目前每年需要花費約 8000 萬英鎊確保這些分離鈾的安全保存，以防它落入心懷不軌的人手中⁴⁹。英國核退役管理局 (Nuclear Decommissioning Authority, NDA) 在 2014 年時表示，在處理這些有毒資產上，他們比較屬意的作法是將其重新使用於反應爐上，但他們也說：

「…我們相信，對於此選項我們仍然缺乏足夠的瞭解，因此無法充滿信心地執行這項方案」。

此後，無論是核退役管理局或是英國政府，皆未曾有進一步的相關公告。根據核退役管理局所述，假如有 5 座輕水式反應爐，利用鈾佔比 30% 的鈾鉍混合氧化物核燃料進行運轉，則約需花費 40 年才可以將所有的可再利用鈾元素給消耗掉，而此一時間長度將根據反應爐數量、反應爐類型以及不同的混合氧化物比重而有所變化⁵⁰。

與一般的用過燃料棒相比，使用過的 MOX 燃料棒貯存方式更為複雜，且需要花上更長的時間來進行冷卻，甚至可能長達一百年⁵¹。

日本的鈾存量有 47 公噸，同時國際上也要求日本在「美日民用核能合作協議」到期前減少鈾存量的壓力。這種不確定性迫使日本政府重新思考他們數十年來試圖透過核反應爐運轉以及再處理核燃料達成能源自主的策略⁵²。日本表示將會採取積極措施來抑制多餘的鈾元素。日本目前在國內存有約 10 噸的鈾，另外透過再處理合約放置於英、法兩國的用過燃料棒中則存有共 37 噸的鈾。

日本所有的鈾存量約略等同於 6000 個曾在 1945 年摧毀長崎的原子彈。然而，日本大幅減少國內鈾存量的前景，現在變得越來越黯淡，日本已放棄「文殊快中子增殖反應爐」計畫。此外，9 座在 2011 年福島核災後遵循更為嚴格的安全標準指示而恢復營運的反應爐當中，僅有 4 座可使用 MOX 燃料⁵³。

除此之外，日本政府不放棄嘗試啟用建造於 1993 年、位於青森縣六所村的再處理工廠，目前預計在 2021 年上半年啟用。假如六所村再處理工廠開始營運，將會每年製造 8 噸額外的鈾⁵⁴。

用過燃料棒貯存

根據國際原子能總署 (IAEA) 統計，全世界製造出的用過燃料棒中，只有不到三分之一經過再處理。其餘的都被貯存起來，等待最終安置場所的決定，有些存放在濕式儲存池中，有些則是乾式貯存。

當核燃料棒從反應爐中退出後，其中的放射性可分裂物質將持續衰變並且產生高熱。美國所有的核能電廠，都將用過燃料棒就地存放於廠區內、特別設計過的冷卻池底部達至少 4 年以上，以讓其緩慢冷卻，範圍遍布全美⁵⁵。

然而，假如這些存放在美國核電廠中的用過燃料棒不幸發生火災，將會導致災難性的後果，憂思科學家聯盟 (Union of Concerned Scientists) 的物理學家愛德溫·萊曼 (Edwin Lyman) 指出，那甚至將可能「使福島核災的後果相比之下輕微許多」。與普林斯頓大學的麥克爾·史普納 (Michael Schoeppner) 合作模擬測試的普林斯頓大學核能安全專家法蘭克·馮·希佩爾 (Frank von Hippel) 也指出，「**災難的後果將以兆元計**」。

在大多數的美國核電廠裡，用過燃料棒被密集地堆積在池中，提高發生火災的風險。美國核能管制委員會估計，如果位於賓州的桃底核電廠 (Peach Bottom nuclear power plant) 內的用過燃料棒發生大火，將會導致 3 萬 1 千平方公里的土地遭污染，這比紐澤西的面積還要大，且居住其中的 346 萬人將因此流離失所。馮·希佩爾與史普納認為核能管制委員會嚴重低估這類火災的規模與社會成本。根據他們的模擬測試指出，高達 1800 萬人將需要因此被安置⁵⁶。

核能管制委員會曾經考慮過強制要求核能工業將大部分目前密集存放於冷卻池中的已冷卻用過燃料棒，轉移到被稱為「乾式貯存護箱」(dry cask) 的水泥容器中。如此一來，將可降低用過燃料棒貯存池失火的可能性與影響。2013 年時，核能管制委員會做出結論指出：全面轉移用過燃料棒所帶來的預期利益並未能符合高達 40 億美元的成本。然而核能管制委員會著實低估了用過燃料棒火災的風險性。

即使在法國，用過燃料棒最終被運往拉阿格 (La Hague) 進行再處理之前，一開始也需要先在池中進行冷卻。根據綠色和平的調查報告指出，面對潛在的攻擊，這些存放用過燃料棒的冷卻池其實高度脆弱。這些冷卻貯存池並未被設計作為抵禦來自外部攻擊，這類攻擊若造成冷卻池源流失，將會讓用過燃料棒發生火災，進而造成遠至 250 公里之外的區域輻射污染⁵⁷。

為了顯示這些貯存池有多麼脆弱，綠色和平操控一架超人形狀的無人機，撞向法國電力公司位於里昂附近的布基核電廠 (Bugey nuclear plant)。無人機飛入核電廠周遭的禁飛區，並撞毀在核電廠貯存池的建築物外牆上⁵⁸。

除役

美國最老的核電廠位於紐澤西州，於 1969 年開始營運的奧伊斯特河核電廠 (Oyster Creek) 在 2018 年 9 月 17 日關閉，然而在接下來的 60 年內，奧伊斯特河核電廠將持續矗立於原地。據核能管制委員會表示，奧伊斯特河核電廠的業主艾索倫電力公司 (Exelon Generation) 預計會在電廠關閉的 5 年半之內，將剩餘的用過燃料棒自燃料池移出，並放到乾式貯存場中。關閉這座核電廠共計將花費 14 億美元，然而艾索倫電力公司目前僅撥款 9 億 8210 萬美元到除役帳戶中。雖然這座核電廠在 2019 年夏天結束就將停止繼續生產電力，但直到 2070 年代晚期或甚至更晚，放射性物質都將持續滯留廠區。直到 2075 年為止，奧伊斯特河核電廠反應爐都將處於所謂的「安全貯藏」(safe store) 狀態，拆除工程則預計在 2075 年到 2078 年之間進行。這將給廠區放射性活度足夠的衰變時間⁵⁹。

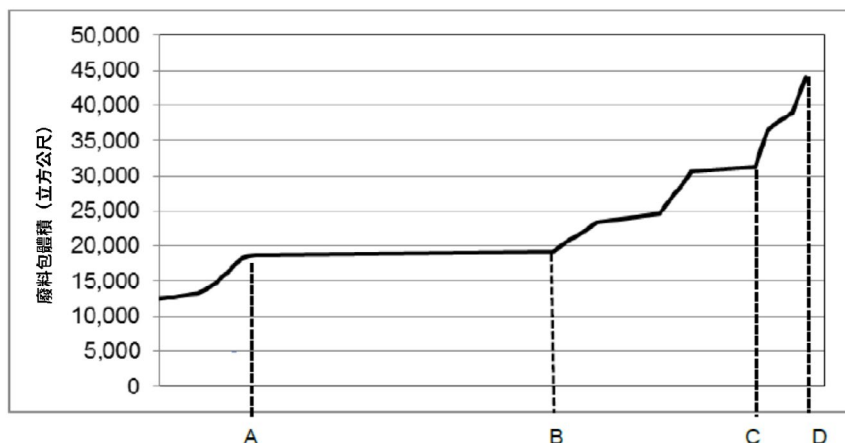
英國也有類似的狀況，位於蘇格蘭格拉斯哥 (Glasgow) 南方 30 哩處海岸的亨特斯頓 A 核電廠 (Hunterston A)，與奧伊斯特河核電廠一樣，廠內 2 個鎂諾克斯反應爐 (Magnox) 也是在 1969 年開始運轉，但僅僅運轉 20 年，便於 1989 年時停止運轉。該處的用過燃料棒已被取出並移往塞拉菲爾德進行再處理。亨特斯頓 A 核電廠目前正處於維護保養的階段，且需

要發展複雜的技術回收與包裝固態中階核廢棄物，這些廢棄物主要是用過燃料棒在送往塞拉菲爾德前剝落下來的金屬護套，共貯存在 5 個大倉庫之中。

上述過程將花費約 6 年的時間。5 個倉庫所收納的固體廢棄物之體積約有 2,200 立方公尺。亨特斯頓 A 核電廠的另一個計畫——濕式低階廢棄物取回與封裝廠 (Wet ILW Retrievals and Encapsulation Plant, WILWREP) 則處理 180 立方公尺的廢污泥、11 立方公尺的廢樹脂，以及 141 立方公尺的廢酸液。WILWREP 目前正在發展新的機械手臂作業技術。兩個反應爐都將會以鋁包覆，且在 2024 年之前，所有的中階廢棄物都將存放在一個地上貯存場。在接下來的 60 年內，該廠會進入維護保養階段，最終的除役階段預計將到 2070 年之後才開始⁶⁰。

目前大多數的國家都會在最終除役階段開始之前，替老舊反應爐安排維護保養，以讓放射性物質有時間衰變，並降低工作人員所接觸到的輻射劑量。然而，考慮到機械手臂技術的進展以及 50 年後可供使用之技術，上述過程或許也將有所改變。

下圖是蘇格蘭在未來預計產生的中階廢棄物數量，此圖描繪這段過程所涉及的長時間尺度。約有三分之二的廢棄物將在 2070 年後的最終場址清理及復原階段才會產生。蘇格蘭政府目前的政策是拒絕任何新核電廠的興建。



圖三 蘇格蘭預估至 2115 年廢料包數量成長趨勢

- A：2030 年前後。營運與除役廢棄物直到 2030 年前後都將持續被生產出來。
- B：2070 年到 2085 年。蘇格蘭兩座最老舊的核電廠開始進行除役，它們分別在 1989 年與 2004 年停止發電。
- C：2115 年。蘇格蘭最新的兩座今日仍在運轉中的核電廠開始進行除役，它們分別預計將在 2023 年與 2030 年關閉。
- D：2120 年。此時所有的除役工程預計都將結束。未來將不會再有新的中階廢棄物。

來源：
<https://www2.gov.scot/Resource/0051/00511782.pdf>

在 1956 年到 1971 年之間，英國在 11 個核電廠中（包括蘇格蘭的 2 座）興建 26 個鎂諾克斯反應爐。這些反應爐如今已全數關閉，而除役的工作目前落在核能除役局（Nuclear Decommissioning Authority, NDA）這個非政府機構身上。2014 年時，核能除役局發包一份長達 14 年的合約給跨國財團卡文迪什·福陸合夥公司（Cavendish Fluor Partnership），委託他們進行這 26 座反應爐（外加 1 座設有 2 個特殊實驗性反應爐的核電廠）的除役工程。然而，另外兩間未能如願取得這份價值 62 億英鎊合約的美國公司，針對該合約的招標作業程序提出了法律訴訟，並在 2017 年以 9,730 萬英鎊達成庭外和解。除此之外，核能除役局亦在法律專家與外部顧問上花費 1,380 萬英鎊、內部員工工作時間成本花費約 1,080 萬英鎊，因此這個糟糕透頂的招標程序總共花費英國納稅人約 1 億 2200 萬英鎊。英國政府提早終止與卡文迪什·福陸合夥公司之間的合約，使得除役的工作重新回到非政府機構的手上。

緊鄰倫敦、位於英國埃薩克斯（Essex）的布拉德偉爾核電廠（Bradwell）擁有其中 2 個鎂諾克斯反應爐，它正準備進入長達 80 年的維護保養階段。該核電廠在營運了 40 年之後，於 2002 年 3 月停止繼續生產電力。因此，假設今天有個嬰兒在科赤斯特醫院（Colchester Hospital）婦產科出生，他的曾孫或玄孫將可能會在布拉德偉爾核電廠的最終除役工程中工作，且負責收納核電廠拆除過程中所生產的廢棄物。

根據歐洲議會的評估，歐洲此刻所面臨的核廢料管理以及核電廠除役工程將耗資 2,530 億歐元，這將導致高達 1,200 億歐元的資金缺口。這些花費中，有 1,230 億歐元是用於老舊反應爐的除役工程，1,300 億歐元用於用過燃料棒、放射性廢棄的管理以及深地質處置程序⁶¹。擁有全歐洲最大的運轉中核電廠隊伍的法國，目前

也面臨資金嚴重缺乏的問題。其專項基金總共僅價值 230 億歐元，尚不及預計需花費的 740 億歐元的三分之一。至於德國，除了目前 380 億歐元花費之外，尚需要額外的 77 億歐元⁶²。

未來的核廢料存量

2003 年時，英國政府設立一個新的獨立委員會「放射性核廢料管理委員會」（Committee on Radioactive Waste Management, CoRWM），檢視放射性廢棄物管理的各種選項並做出建議。3 年後，該委員會提出一系列建議，然而大多遭到政府的忽視；內容包含處理既有的（existing）與表定待產（committed）的廢棄物，深地質處置是最適合的可行選項，然而他們也表示「『製造更多的廢棄物』與『因為表定待產而難以避免的廢棄物』，兩者所引發的政治與倫理問題是截然不同的」。

該委員會也進一步指出：「若要從倫理的角度將製造新的用過燃料棒舉動正當化，必須要有一個在倫理上周延完善（sound），而非僅是最不差（least bad）的管理方案…簡而言之，一個在倫理上可被接受的既存用過燃料棒解決方案，在處理新製造的或是轉化過的物質上，卻不一定會是在倫理上可被接受的」

2018 年時，英國政府啟動另一個地底核廢料處置場的研究計畫。在英格蘭西北部的西坎布里亞（West Cumbria），為了檢視當地在參與高階廢棄物貯存場的選址過程中可能涉及的各種問題，三個地方政府成立了「西坎布里亞放射性廢棄物管理合夥計畫」（West Cumbria Managing Radioactive Waste Safely Partnership），並在 2012 年時發布最終報告。坎布里亞地方議會雖然否決政府於 2013 年在當地進行地底放射性廢棄物處置場前期作業的計畫，然而該最終報告也條列出關於核廢料存量清單的幾點原則，強調當地社區必須對他們預

計接收的廢棄物存量清單有所瞭解；任何廢棄物存量清單的變化，都應遵守經同意的存量清單變更程序。

英國的核能計畫清楚地指出，考慮接受核廢料的社區必須享有獲知核廢料存量清單相關訊息的管道。

舉例而言，英國核能工業協會（UK Nuclear Industry Association）聲稱「新的核電廠隊伍只會在其 60 年的服役年限中增加現有核廢料體積的 10%」。這意味著新增加的核廢料數量，並不足顯著地影響替英國核能工業已經生產出來的核廢料尋找合適的地底核廢處置場地點。然而用體積（volume）來衡量放射性廢棄物的衝擊，是相當具有誤導性的方式。從核廢料管理與處置的角度來說，當衡量來自新建反應爐的用過燃料棒與核廢料的潛在衝擊時，體積並不是最好的衡量單位。英國目前提議新建的反應爐，如欣克利角 C 的歐洲壓水式反應爐，所使用的高燃耗型燃料（high burn-up fuel），其產生的用過燃料棒將比現存反應爐（如欣克利角 B）產生的用過燃料棒具有更高的放射性。比起用體積作為衡量尺度，廢棄物的放射性活度總量（amount of radioactivity）將更為適合；這將牽涉到深地質處置場所需空間有多大。

根據放射性核廢料管理委員會的估計，若不將新建的反應爐納入計算，2200 年時既存核廢料的放射性活度總量將為約 477 萬太貝克（Terabecquerels, TBq）。尚若不計算其他型態的核廢料，則一個總裝置容量 16GW 的新建反應爐計畫產生的用過燃料棒，其放射性活度預計將高達 1900 萬太貝克。光是欣克利角 C 核電廠產生的用過燃料棒，其放射性活度在 2200 年時便會達到 380 萬太貝克，即約為現有核廢料放射性活度總量的 80%。

未來核廢料存量情境預測

西班牙遞交給《用過核子燃料及放射性廢棄物安全管理聯合公約》第五次審查會的國家報告書中，運用情境模擬預測現有的核能設施之營運在未來將產生的核廢料體積。在此情境中，共有 6 座核能電廠（共建有 8 個反應爐，總裝置容量 7.7GW）完整運轉其 40 年的生命週期。

其他許多國家在自行遞交給國際原子能總署報告或其他報告進行過類似的情境模擬。下表列出了目前可獲得的資訊。

表七 各國自行預估核廢料數量

國家／地區	假設情境	短生命週期 低階與中階廢棄物	長生命週期 低階與中階廢棄物	高階廢棄物， 包括用過燃料棒
比利時	7 座反應爐都在 2022 年 10 月到 2025 年 12 月間關閉。（來自 2017 年 10 月之國家報告書）	70,500 立方公尺	11,100 立方公尺到 10,430 立方公尺	600 到 4,500 立方公尺 （視商用用過燃料棒未來的管理狀態而定）
加拿大 (2015 年 11 月 27 日預估值)	2050 年放射性廢棄物估計存量，屆時最後一座興建的核電反應爐停止營運。假設沒有任何新建的核電廠。	2,570,000 立方公尺低階廢棄物	79,000 立方公尺中階廢棄物	21,300 立方公尺 (2016 年 12 月時預測為 104,000tHM)

表七 各國自行預估核廢料數量

國家／地區	假設情境	短生命週期 低階與中階廢棄物	長生命週期 低階與中階廢棄物	高階廢棄物， 包括用過燃料棒
芬蘭	放射性廢棄物存量之估計包括奧爾基洛托三號機以及 Fennovoima 核電廠營運 60 年。			8.300tHM
法國	所有在 2013 年年底前許可營運的核電設施，在停止營運之前所生產的廢棄物，包括來自拆除工程廢棄物在內，包含兩個情境：(1) 反應爐壽命 50 年，所有的鈾都回收。(2) 反應爐壽命 40 年，再處理於 2019 年結束。	情境 1： 1,900,000 立方公尺 情境 2： 1,800,000 立方公尺	情境 1： 252,000 立方公尺 情境 2： 245,000 立方公尺	玻璃固化廢棄物 情境 1：10,000 立方公尺 情境 2：3,900 立方公尺 (在情境 2 之下，也將會有約 89,000 立方公尺的用過燃料包件與 MOX 燃料包件)
西班牙	8 座共 7.7GW 的反應爐運轉 40 年。(2013 年 12 月估算)	181,091 立方公尺 (包括極低階廢棄物)	855 立方公尺	6,704 立方公尺的用過燃料棒以及 12 立方公尺的高階廢棄物。
瑞典	假設剩下的核能電廠在 2040 年到 2045 年之間營運滿 60 年。	153,200 立方公尺	16,400 立方公尺	11,404tHM
瑞士	5 座反應爐 米勒貝格核電廠 (Mühleberg) 運轉 47 年，其它運轉 60 年。 產出約 4,100 噸用過燃料棒，其中 1,140 噸經過再處理。包裝過後的用過燃料棒束以及高階廢棄物之數量約為 9,400 立方公尺。	低階與中階廢棄物包件有 81,760 立方公尺 (包括來自工業及醫療部門)	Alpha 毒物 1,072 立方公尺	9,400 立方公尺
英國	新建反應爐計畫預計將有 16GW。	11,800 立方公尺低階廢棄物	中階廢棄物遺緒 415,000 立方公尺 新產生之中階廢棄物 41,000 立方公尺	9,290m 立方公尺高階廢棄物，以及 14,800 立方公尺用過燃料棒遺緒。 39,400 立方公尺的新產生之用過燃料棒。
美國				國防相關活動所製造的 140,000tHM 高階廢棄物。 9000 萬加侖的高階廢液、廢泥漿以及固態廢棄物。

結論

據估計，全世界的核廢料存量約有：

- 24 億公噸的鈾磨礦尾渣。
- 118 萬 8200 公噸鈾 (tU) 的耗乏鈾，於 1999 年時以每年 6 萬噸鈾的速度增加，在 2020 年時預計將增至 200 萬噸。
- 14 個國家中存有的 24 萬 6686 萬噸重金屬用過燃料棒；國際原子能總署估計，自從民生用核能電廠出現以來，一共約有 37 萬公噸重金屬的用過燃料棒被製造出來，其中約有 12 萬公噸重金屬被再處理。37 萬 3313 立方公尺的高階廢棄物與全球 520 公噸的鈾存量。

2

比利時

BELGIUM

簡介

核廢料的深地質處置是個迫在眉睫的複雜議題，因為它不僅涉及科學、技術、倫理、政治與社會等眾多因素，考慮到該廠的營運將長達上百年，密封時間更長達數萬年，且此段時間內核廢料將依然危險無比，故深地質處置也涉及時間問題。

本章將介紹目前比利時在東北部莫爾區（Mol）利用軟黏土岩層（Boom clay）進行深地質處置計畫的現況，並介紹該計畫之三個主要組成成份：（a）預計處理之核廢料，（b）母岩，以及（c）規劃中的地底構造。

本章將進一步利用這些資訊，探討上述因素如何交互作用並影響包含安全性風險、可能後果以及放射性物質穿透至含水層上層等問題。最後，本章針對該計畫之風險與不確定因素進行摘要，作為針對此複雜議題之建設性觀點。

關於莫爾區深地質處置計畫

待處理之核廢料

一 數量

此計畫處理兩種類型的核廢料：B 類—中階廢棄物，以及 C 類—高階廢棄物。由於比利時已於 2003 年 1 月 31 日時立法禁止新反應爐的興建與使用，且現有的 7 座反應爐在達 40 年運轉期限⁶³之後都將關閉，因此與法國的案例不同，此處我們可以初步確立一個相對清晰的待處理核廢料之數量：

- 10,430 立方公尺到 11,100 立方公尺的 B 類廢棄物，約佔廢棄物放射性活動總量 2%——然而，必須強調的是，一部分貯存於奧倫（Olen）的 8 萬 5000 立方公尺未經固化包裝之鑄廢棄物，將可能大幅度地增加 B 類廢棄物數量⁶⁴。
- 4,500 立方公尺的 C 類廢棄物，約佔廢棄物放射性活動總量 98%，然而此數字中包括用過燃料棒，依照現在的標準必須被歸類為核廢料，由於比利時政府中止其核能計畫，並且在 1993 年時就決定⁶⁵停止核廢料再處理（此決策在 1998 年得到確認）⁶⁶。此外，根據 2011 年 7 月 19 號的歐洲聯盟指令（European Directive），用過燃料棒應被歸類為「核廢料」。

一 屬性

根據廢棄物類型（B 類或 C 類）與範疇的不同，有 4 種不同的屬性將可能影響該廠區未來發展，尤其是在地底的環境之下。

瀝青的存在

只有 B 類廢棄物擁有這類屬性⁶⁷。47% 的 B 類廢棄物是以瀝青基質（bitumen matrix）裝於不銹鋼桶中，在總計 35,000 桶的廢棄物內，約有 16,600 桶這類廢棄物。此一塗膜法（coating method）含有 60% 的純瀝青⁶⁸，現

已不再被採用，因為瀝青高度易燃，3,200 公噸的純瀝青將帶來巨大的火災風險。此外，由於環境存有鹽分與輻射（劑量率約在每小時 400 戈雷⁶⁹ Gy 到 5000 戈雷 Gy 之間），此一基質的體積將會膨脹為原本體積的 1.7 倍⁷⁰。此一體積膨脹與基質中有機質因為發生輻射分解（radiolysis）而產生的氫氣氣泡有關。

氫氣的產生

法國國家放射性管理局（ANDRA）的報告⁷¹指出，B 類廢棄物也會產生相當大量的氫氣，並釋出放射性氣體如氫、氫 -85、碳 -14 以及氯 -36。ANDRA 在針對歐洲瀝青協會（Eurobitumen）所發表的「標準瀝青桶檢視報告」指出，平均一個廢料包（package）每年可釋放出 10 公升的氫氣，總計每年將產生 150 到 200 立方公尺的氫氣。然而，在有機質發生輻射分解的情況下，特定廢料包件所釋出的氫氣將可能高達每桶每年 500 公升⁷²。

衰變熱

此一特性與 C 類廢棄物有關，C 類廢棄物主要由 ZAGALS⁷³ 與氧化鈾用過燃料棒所組成，在總數 11,000 桶 C 類廢棄物之中，約有 10,250 桶這類廢棄物⁷⁴。這些高放熱的廢料包是名符其實的小型暖氣機。它們的熱功率隨著時間下降，在 20 年後會降至每包 1,000 瓦到 1,400 瓦，60 年後則會降到每包 400 瓦到 600 瓦。這些核廢料中的鈾與鎂也需特別注意，因為它們的熱功率下降得更為緩慢⁷⁵。此外，ANDRA 報告所列出的 114 個 MOX 用過燃料包退出反應爐後，即使經過 90 年的貯存期，其熱功率也高達 1100 瓦⁷⁶。

可分裂性物質

同樣根據 ANDRA 之報告，剛離開反應爐的可分裂性物質殘渣質量約有 10 公斤，包括

每桶氧化鈾用過燃料棒中含有的 4 到 5 公斤的鈾 -235，以及少於 4 公斤的鈾 -239⁷⁷。這個數字也可能為每桶 20 公斤用過燃料棒，包括高達 12 公斤的鈾 -239。值得一提的是，鈾 -239 的臨界質量 (critical mass) 是 510 公克。因此，在封裝核廢料包件時勢必得將燃耗率的因素考慮進去，以確保可以避免發生臨界反應 (criticality) 以及核子連鎖反應。

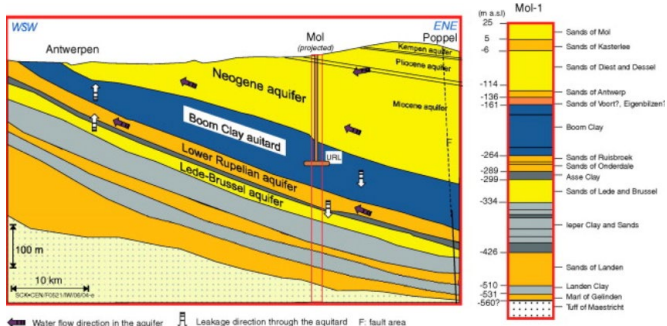
母岩 (軟黏土層)

一位置

軟黏土層 (Boom clay) 是在約 3000 萬年前沉積形成的沉積地層，位於莫爾與德賽爾區域 (Mol-Dessel) 地表以下 190 到 290 公尺處，有 100 公尺厚，並往東北方向下傾約 1% 到 2%。越靠近荷蘭邊界處，其厚度與深度也隨之增加⁷⁸。

此一不透水層位於一層新近紀沙層 (Neogen sand) 之下，此一新近紀沙層為比利時第二大的用來抽取飲用水的含水層，是比利時東北區域的重要地下水來源 (如圖四)⁷⁹。

圖四 比利時莫爾區地質圖



一特性

可塑性

此黏土岩是相當具有可塑性的岩石，它不像花崗岩 (granite) 可以自我支撐。為了避免在挖掘工程中發生坍塌等意外，需要施以充足的支撐輔助，包括相當大量的水泥與金屬結構，例如在法國 Cigéo 計畫中便使用上萬公噸，等於待掩埋核廢料本身體積的五倍。

水分之存在

該岩層 19% 到 24% 的重量是由水份所組成⁸⁰。這對於下列兩點是相當關鍵的，首先，根據與通風相關的去飽和作用之程度，這種水份飽和度將可能導致水份流失 (withdrawals) 與裂縫。第二，強力輻射的存在會導致輻射解離，在此情況下，水分子會分裂為兩個自由基——帶正電的氫離子 (H⁺)，帶負電的氫氧離子 OH⁻——，而它們會隨機地重新結合成其他分子例如氫氣 (H₂) 與過氧化氫 (H₂O₂)，成為高度氧化與還原性化合物。這些化合物會對金屬產生劇烈侵蝕，而氫氣也會在劇烈的金屬結構鏽蝕過程中持續產生。

溫度

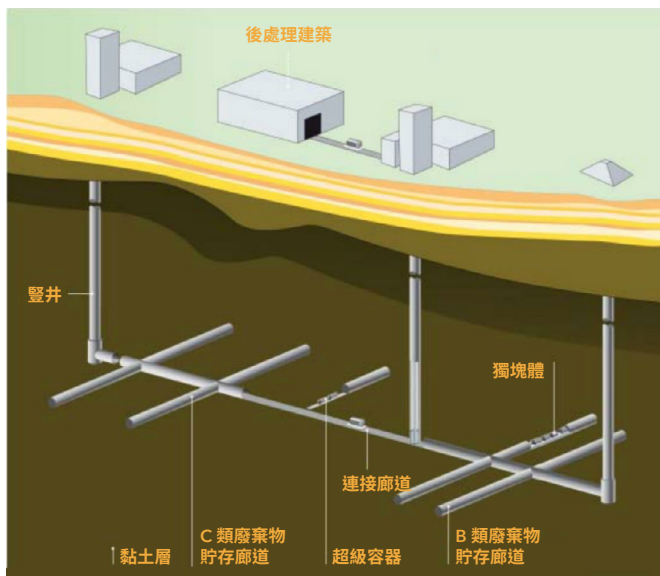
有二個須被遵守的溫度相關限制，第一，岩石溫度不得超過攝氏 90 度到 100 度之區間，以避免結構形變風險與滲透性的問題 (水蒸氣與水沸騰)。第二，砂與黏土層的溫度限制目前是攝氏 14 到 15 度，僅僅是 10 度的增溫就將嚴重地傷害到飲用水的品質。相關法規規範將溫度限定在攝氏 25 度以內，以避免退伍軍人症桿菌 (legionella bacteria) 的孳生⁸¹。

貯存場基本構造

一 設計

該設施將位於地底約 240 公尺處，並有 3 個直徑 6 公尺的出入通道與通風井道，包括特別用來垂降廢料桶的中央豎井。這些井道貫穿前述之含水層，在廠區填裝與封存的整段時間內都必須保持防水狀態。在地底，這些井道由一條中央連接隧道（central access tunnel）連結至貯存廊道⁸²。

圖五 B 類與 C 類廢棄物所規劃之深地質處置場，以及用來製造超級容器、B 類廢棄物單石體的地表設施。廢料井道位於中心位置。



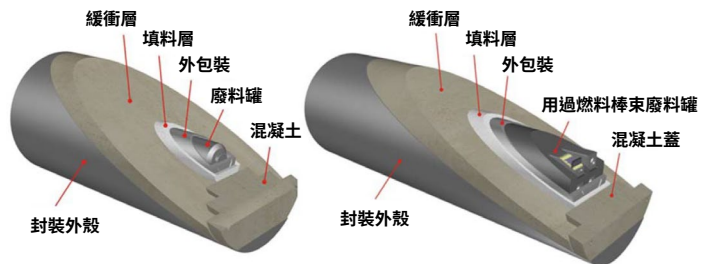
中央連接隧道是一個直徑約 6 公尺、長約 1 公里的直線單管（single-pipe）系統。貯存廊道（storage galleries）則是直徑 3 公尺，長度最高 1 公里，與中央進出隧道垂直相交，彼此間隔 20 到 50 公尺。為了運送裝載在超級容器⁸³（super-containers）中的核廢料，也規劃混凝土地板與軌道；貯存廊道一側與中央廊道連接、另一側則封閉。這些廊道累計總長約有 30 公里長，並涵蓋 3.1 平方公里的範圍。一旦完工，它們將用來存放於地表製造的超級容器。圖 14

以圖解方式呈現此貯存場的配置⁸⁴。

組裝完成後的超級容器內含寬 2.1 公尺、長 4 到 6.2 公尺的廢料包（package）。最大重量可達 70 公噸。

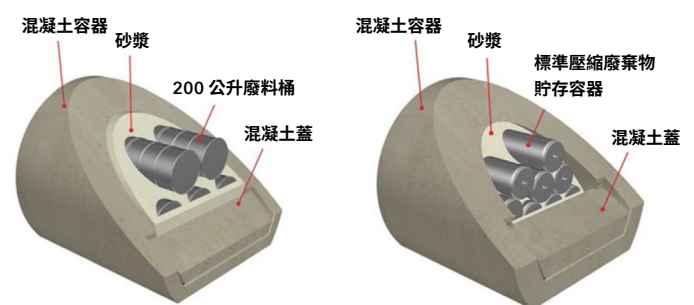
- B 類超級容器由鑲嵌於混凝土中的主要廢料包（1 到 12 個廢料包件或廢料桶）所組成，見圖 13⁸⁵。

圖六 存放玻璃固化高階廢器物（左）以及氧化鈾廢料桶包（右）的超級容器



- C 類超級容器則包含 1 到 4 個主要廢料包（1 個 MOX 廢料包、4 個玻璃固化廢料包，或 4 個氧化鈾廢料包），這些廢料包鑲嵌入 30 毫米厚的不鏽鋼鋼罩之中，首先以膨潤土（bentonite clay）塗層包覆，再以一層混凝土與第二層鋼罩覆蓋。參見圖 11⁸⁶。

圖七 貯存 B 類廢棄物的混凝土石塊 B（200 公升之廢料桶）（左）以及 CSD-C（右）



這些超級容器是不可回收的，一旦貯存廊道填滿，它們就將被封存。

—觀察

此作法將會把 4 個外來因素導入地底環境中，分別是混凝土、鋼材、流通空氣，以及（萬一井道失去水密度）水份，後者需要在營運階段予以移除。

水密性 (Water-tightness)

這個複雜問題與砂質含水層有關，並因此需要在 HADES 實驗室（位於地底 225 公尺處，於 1980 年代建立，用以進行在此類黏土層建立深地質處置場研究）的第二層井道中建立一個雙層混凝土結構，中間夾著一層以瀝青與鋼材強化後的聚乙烯 (polyethylene) 氣密層 (hermetic layer)。在第二井道中，已經發現瀝青洩漏的狀況，為了持續維持水密度⁸⁷，需要頻繁地重新灌入不可滲透的聚乙烯。在缺乏補抽水系統 (recovery pumping system) 的情況下，倘若黏土層的滲透率導致地下廠區內的水因此無法排乾，將可能導致廠區遭水淹沒。

處理

除非有任何設計上的更動，否則規劃中的廢料桶進出井道之直徑，顯然與超級容器的直徑及長度不相符，這將使得井下輸送機無法水平式直接裝載。因此，勢必需要有足夠大的井下接受室 (down-hole receiving chamber) 處理高達 70 公噸而難以進行的轉向 (directional changes)。同時尚未釐清的是，在道路交叉口處缺乏平台以及額外的大型艙房之情況下⁸⁸，要如何在軌道式輸送帶上以近乎直角的方式連接貯存廊道。

安全性

雖然缺乏最新的廠區規劃示意圖，但令人意外的是，該計畫在貯存廊道上使用了單管系統，而非雙管系統，若是遭遇火災或是坍塌，將缺乏逃生路線。地底高速公路隧道、英倫海

峽海底隧道，以及 Cigéo 計畫的設計變更皆屬於雙管系統。

臨界反應

同樣令人驚訝的是，C 類高階廢棄物包與用過燃料棒是透過井道垂降。假如有廢料包從井道墜落，完成組裝的廢料包發生的結構變形將可能會導致臨界反應。值得一提的是，透過井道將廢料包垂降的方式，因同樣的顧慮已遭 Cigéo 計畫捨棄，改使用「綜合斜井系統 (way shaft)」或「斜暗井系統 (winze)」⁸⁹。

共同作業 (co-activity)

由於未曾被特別提及，因此很難想像如何在一個並未在物理上進行區隔的空間中，同時管理興建工程與貯存活動。必須設法處理下列同時共存的問題，除塵、鑽挖機具與殘渣輸送（估計約 100 萬到 200 萬立方公尺）、機具所排放的廢氣、機油存放區域、電池充電站、氫氣與放射性氣體（數量有限但可確認數量）等。

通風

強而有力的通風系統絕對是必須的，尤其是前述的共同作業階段。舉例而言，根據 Cigéo 計畫之規劃，在直徑 11 公尺的通風井裡需要有每秒 500 到 650 立方公尺的通風⁹⁰。同時，如何妥善地建置兼顧排氣與抽氣之通風系統，讓 3 個規劃中的井道避免出現落差，且在廊道層能夠有統一的通風管線，這都有待釐清；假如發生火災，是否存在如止回閥 (non-return valves) 或煙霧管理方案等，也未曾被提及。同樣存在疑慮地是，若發生核能意外，要如何在密封的貯存廊道內確保如空氣替換這種必要任務，以避免達到最低爆炸濃度；或者，高效率空氣微粒子濾網 (high-efficiency particulate air, HEPA) 在這種環境中是否可行？如何有效地運作？

各種因素與相關風險間的互動關係

—溫度與可滲透性的提升

假如要在 60 年之後開始貯存 C 類核廢料，則超級容器的熱功率將遠遠超過 1000W（4 個 500W 的廢料封包，或甚至是 1110W）；PRACLAY 實驗⁹¹也證明，350 瓦到 450 瓦的熱功率便足以使岩石溫度上升到攝氏 80 度。超過了這個閾值，礦物學轉換（mineralogical transformation）將不可避免地導致滲透率的結構變化。相同的實驗也證明，這些溫度對滲透率的影響在整整 42 個月的實驗期間內都持續地穩定增加，且其影響距離可達離熱源 15 公尺遠的區域⁹²。

—通風（去飽和作用）以及崩塌之風險

2011 年關於氣體轉換（gas transfers）對於黏土材質之滲流力學（pro-mechanical）影響的一份研究⁹³，不僅證實黏土的氣體滲透率取決於其飽和程度⁹⁴，更證實強力通風再加上大量的熱能，將導致顯著的壁面蒸發效應，甚至可能導致岩石裂解或嚴重的毀損。此一發現與某些觀察中黏土因水分蒸發而產生裂縫的現象有關。蒸發也會創造優勢水流路徑（preferential flow path）⁹⁵，進而導致潛在性的放射性物質轉移；甚至可能在地塊（massif）上造成嚴重的隙縫或裂縫⁹⁶（如圖八），並造成密度改變 8% 到 11%⁹⁷，進而造成基礎設施不穩的風險。

—廢氣（氫氣）與岩石裂解

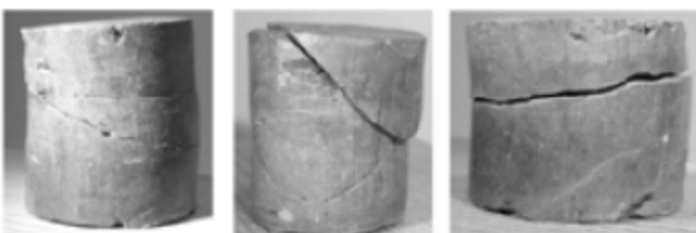
至於以瀝青基質密封（bitumen matrix-sealed）的 B 類廢棄物，這些廢棄物包被嵌入混凝土中，且僅留下 20% 未填滿的空間⁹⁸因應前述高達 70% 的膨脹幅度，最終將會導致超級容器發生爆裂（在緊繃狀態下，壓力可達 43 兆帕 MPa）以及混凝土逸散，結果將可能發生由壓力所引起的岩石變形。需要注意的是，造成 Boom 黏土質開始裂解的壓力閾值很低，僅約 0.9 到 2.9 兆帕⁹⁹，而這將無庸置疑地導致優勢水流路徑的發生，參見前段所述。

—設計（井道與封閉廊道）與爆炸風險

爆炸的主要風險存在於將含有用過燃料棒的廢料包透過井道向下垂降的過程中；2005 年 ANDRA 在與「綜合斜井道計畫」相關的報告中清楚地指出：「**因為墜落而對用過燃料棒包件所造成的重大意外損害，以及水份的乍現，此兩者的結合將成為可能引發臨界反應風險的意外事件¹⁰⁰**」。

第二個風險則在於，事實上任何一個可能存有氫氣的空間，都勢必得要進行通風以避免爆炸的發生；當氫氣濃度達到 4%，就可能發生爆炸，且 1 立方公尺的氫氣約等同於 2 公斤三硝基甲苯炸藥（TNT）的爆炸威力。有鑑於此，在此廠區於營運階段便缺乏通風的情況下，很難想像這種長達 1 公里長的廊道在其中一端被封閉之後，如何能夠通風。

圖八 Boom 黏土岩樣本在去飽和作用下，肉眼可見裂縫。



—挖掘區（壓裂）與放射性物質轉移

在黏土層這種具有可塑性的岩層進行挖掘的相關力學限制，將製造出所謂的開挖損傷區（excavation damaged zone, EDZ），且根據所使用的挖掘技術不同，開挖損傷區覆蓋面積可能達到挖掘區半徑 2.1 倍的範圍¹⁰¹。考慮到貯存廊道的可用面積區域寬度有 6 公尺，並需要向下挖掘至少 8 公尺以安插支撐構造，此一開挖損傷區是特別敏感的區域。這導致了一個離含水層僅 40 公尺遠的空白地層（blank layer），在這個約 16 立方公尺大小空間中，滲透率提高 4 到 5 倍¹⁰²。

—營運期間與火災風險

如前所述，黏土層對於溫度升高十分敏感。因此假如在地底發生火災，將會產生「烤箱效應（oven effect）並傳導熱能，導致迅速地溫度飆高。其中一個可能性是傳送機由於維護故障（如油、內燃機或電池）而起火燃燒，像是發生在美國核廢棄物隔離先導廠（Waste Isolation Pilot Plant, WIPP）貯存設施的事故一樣。另一個狀況是由零組件之間的化學反應所導致，例如美國 WIPP 的爆炸與 Stocamine 的火災）。這些例子顯示，過薄的黏土層將無法承受這類意外所導致的位移或坍塌。

計畫結構

顯而易見地，此計畫之結構依然存在著固有的多重重大風險。其中最為關鍵的包括以下幾點：

- 選擇黏土基質 (clay matrix) 地質進行深地質處置，該處岩層飽含水分且缺乏自我支撐的能力 (not self-supporting)。
- 該場址太接近地表，且離重要的飲用水源僅有數十米的距離。
- 地層厚度不足，且小幅度地向下傾斜，約長達 2 公里、傾角 2% 的 40 米位移。這種地質結構將需要嚴格採取水平式設計，以應對運輸以及支道的需求。

同樣值得注意的是，許多營運上的風險涉及共同作業 (co-activity) 難度，以及來自緊鄰住宅區的強力氣流干擾。我們也不能忽略此類廠區所涉及的漫長時間尺度，例如在一個世紀之後廠區的基本構造 (如井道的水密度) 狀態會是如何？該如何在可能發生坍塌的貯存廊道中進行維修保養？貯存其中的核廢料又會如何變化？或者像是「廢料桶是否可以在長時間中維持穩定」這種關鍵問題，例如 2014 年時在某些廢料桶上發現的膠體便是一個經典的例子¹⁰³。

計畫成本

由於核廢料存量的不確定性 (與是否進行再處理有關)、截至目前為止尚未處理的核廢料 (位於 Olin)，以及最關鍵的該處置場的設計與結構問題，此計畫成本一直有顯著的波動。包括意外情境的額度在內，整體成本在 2011 年¹⁰⁴ 時預估約為 30 億歐元，如今則高達 80 億到 100 億歐元¹⁰⁵。

考慮到這些已被明確指出的、在漫長時間尺度中由各種複雜狀況所衍生出的風險，以及其他不確定因素，要立即在廢棄物管理的中期解決方案 (長期貯存) 與最終長期解決方案 (深地質處置) 之中做出選擇，看起來並不是妥適的作法。為了不將此負擔留給未來的世代，就像我們上個世代因為缺乏相關知識而採取了將核廢料海拋處理的做法，或許比較好的做法是：同時結合中期解決與最終長期解決方案這兩個選項。

這包括：

1. 將核廢料安全存放在長期貯存設施達至少 100 年，以讓核廢料包的熱功率下降，與此同時也進行除氣 (degassing)。
2. 將兩個選項都提供給未來世代，讓他們可以在知情的狀況下解決核廢料的問題。
3. 確保在這段時間中有充足的資金，這需建立在更明確的成本評估上。
4. 針對不同基質的地底貯存屬性進行長期且有代表性的測試，藉此取得充足的資料與數據，以確保可以在經過充分規劃的情況下做出最終長期解決方案的選擇。

3

法國

FRANCE

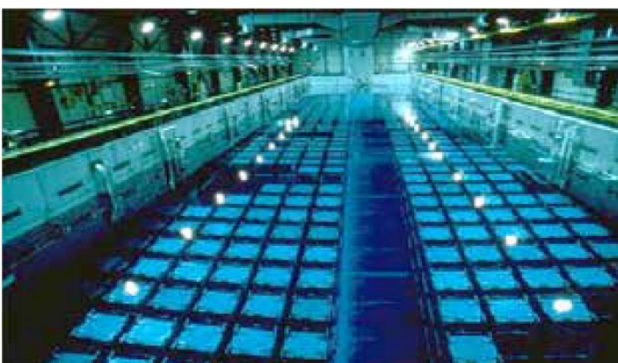
用過燃料棒的處理

核燃料棒在反應爐內使用過約 3 到 4 年之後，用過燃料棒會被貯存在反應爐附近的水池中。這些用過燃料棒將在循環流動的水中持續降溫，藉以消除因為其中的放射性分裂物質與超鈾物質（transuranic elements，主要為鈾）而產生的高熱。

在大多數擁有營運中核電廠的國家，美國、德國、瑞典、日本與南韓等，他們所採用的方式是將用過燃料棒就地存放於貯存池之中。在某些案例中，則會經過幾年等放射性活度與熱度下降後，移至乾式貯存設施存放。然而，在法國的拉阿格（La Hague）與英國的賽拉菲爾德（Sellafield），用過燃料棒中的鈾會在再處理設施（re-processing facilities）中被萃取出來。在法國，用過燃料棒會自燃料池移至拉阿格的池子以將鈾取出¹⁰⁶。

再處理是利用化學方式從用過燃料棒中提取鈾跟鈾。除了鈾之外的可分裂物質與超鈾元素，又稱為次錒系元素（minor actinide），將以液態的形式一起保存下來¹⁰⁷。在歷史上，這項技術出現是為了在第二次世界大戰時製造軍用鈾元素，鈾生產後來持續發展，用以作為快中子增殖反應爐（breeder reactor）的燃料。如法國的鳳凰號反應爐（Phénix）與超級鳳凰號反應爐（Superphénix），目前都無限期關閉中。

圖九 拉阿格的主要用過燃料棒貯存池



為了替代這種方式，一種新的燃料設計作為取代傳統壓水式反應爐中的濃縮鈾燃料，也就是混合氧化物核燃料（Mixed uranium and plutonium oxide, MOX）¹⁰⁸，它含有濃度低於鈾-235 的耗乏鈾，以及濃度 7 ~ 9% 的鈾。

使用過的 MOX 燃料棒並不會經過再處理。在法國，再處理技術僅減少 15% 的既有反應爐所製造的鈾，其中部分存放在拉阿格¹⁰⁹。核分裂產物與次錒系元素則是以液體型態保存在貯存槽中，並且需要持續冷卻與攪動，以避免物質過度集中濃縮。

最後一個步驟，則需要利用核分裂產物與次錒系元素溶液製造玻璃磚，並將其存放於位於拉阿格的乾式貯存場之倉筒內。由於固化玻璃廢料往往會釋出放射性活度，因此這些貯存設施需要時常進行冷卻，而且這些廢棄物至少要等到 60 年之後才可以被移走。

上述這個體系累積各類型的廢棄物。顯而易見地，再處理的真正目的並不是要妥善地處理核廢料，而是為了生產鈾。拉阿格再處理工廠被稱為 UP2 以及 UP3，為法文「使用鈾」（usine plutonium）之意，即為「鈾電廠」（plutonium plant）。

圖十 玻璃固化高階金屬廢棄物貯存容器



法國的放射性廢棄物

一核廢料管理

法國國家放射性廢棄物管理局（The French National Radioactive Waste Management Agency, ANDRA），是一個由法國能源、環境與研究部門所授權的公共機構，負責管理法國內因為核能活動所產生的廢棄物。

ANDRA 於 1979 年作為法國原子能委員會（French Atomic Energy Commission, CEA）的一部分而成立，並在 1991 年時透過 Bataille 法案而獲得獨立地位。ANDRA 負責許多任務，包括蒐集與貯存由核能電廠、研究機構、國防部門與醫院所產生的放射性廢棄物，同時也負責尋找現今科技尚無法處理的最終廢棄物（ultimate waste）的解決方案。

ANDRA 擁有三個貯存場，分別位於蘇蘭訥（Soulaines）、莫爾維利耶爾（Morvilliers）、拉芒什（La Manche），同時還有一個位於布爾（Bure）與索德龍（Saudron）的地下研究實驗室。

一輻射廢棄物的性質

不同類型的廢棄物主要根據其生命週期與放射性活度程度被區分為不同的範疇。根據此一判准，下列為法國所使用的分類系統：

- 生命週期：100 天以及 31 年（極短生命週期，少於 100 天；短生命週期，介於 100 天與 31 年之間；長生命週期，大於 31 年）
- 四個放射性活度程度：極低階（VLL：低於 102 Bq/g）；低階（LL：介於 102 到 105 Bq/g）；中階（IL：介於 105 到 108 Bq/g）、高階（HL：大於 108 Bq/g）

上述兩個標準被結合來定義不同的核廢料範疇

- VVL：極低階，包括 VVL-SL（極低階 - 短生命週期）與 VLL-LL（極低階 - 長生命週期）
- LIL-SL：低階與中階（low and intermediate-level），短生命週期
- LL-LL：低階，長生命週期
- IL-LL：中階，長生命週期
- HL：高階

表七 2013 年不同經濟部分與管理部門生產之放射性廢棄物體積與內容¹¹⁰

立方公尺	核電	研究	國防	產業	醫療	總數	百分比	核電占比
HL	2,700	190	230			3,120	0.22%	0.865
IL-LL	26,000	10,000	6,200	170		42,370	2.93%	0.614
LL-LL:	42,000	20,000	17,000	12,000	2	91,002	6.3%	0.462
LIL-SL	580,000	200,000	61,000	22,000	8,500	871,500	60.32%	0.666
VLL	220,000	160,000	42,000	11,000	3	433,003	29.97%	0.508
Non-sector	2,400	740	650	4	1	3,795	0.26%	0.632
TOTAL	873,100	390,930	127,080	45,174	8,506	1,444,790	100%	0.604
百分比 (%)	60.4%	27.1%	8.8%	3.1%	0.6%	100%		

來源：ANDRA, inventaire 2015（法文）

註：Non-sector 範疇之廢棄物無法歸類進既有的或規劃中的範疇，主要是因為其化學與物理性質。相關研究正在進行中。

上述這些數量所對應的是已經過處理並放置在主要廢料包（primary package）中以進行貯存或運往貯存中心的廢棄物。在某些特定的案例中如地表下乾式貯存或是深地質處置，廢棄物在被貯存之前還需要進行特定的準備程序。

上表顯示：高階放射性廢棄物幾乎完全來自核電部門，即用過燃料棒。法國目前有 58 個運轉中的濃縮鈾與壓水式反應爐，分散在 19 個核電廠中，生產 900 到 1450MW 的電力。

一 輻射廢棄物，以輻射內容區分

貝克（becquerel，Bq）是用來測量放射性物質每秒衰變量的活性度單位。太貝克（Terabecquerel，TBq）等於 10^{12} 貝克，或是一兆貝克。

放射性活度乃是根據輻射放射之程度來偵測。

- 粒子放射（particle emission）：（1）阿法粒子（Alpha），氦核（helium core）；（2）貝塔粒子（Beta），電子（electron）；（3）中子（neutrons）
- 光子放射（photon emission）：（1）伽馬射線（gamma）或（2）X射線

由核電產業所製造的高階放射性廢棄物，構成廢棄物總放射性活度的 98%。

表八 法國截至 2013 年 12 月 31 日止之放射性活度總量，依釋放類型區分

單位：太貝克 (TBq)	阿法粒子	貝塔粒子與伽馬射線 (短生命週期)	貝塔粒子與伽馬射線 (長生命週期)	放射性活度總量
HL	3,500,000	210,000,000	350,000	220,000,000
IL-LL	44,000	4,300,000	1,100,000	5,500,000
LIL-LL	720	16,000	2,800	19,000
LIL-SL	910	27,000	8,300	36,000
VLL	3	4	1	8

來源：ANDRA

Cigéo 深地質處理計畫

深地質處置

除了地表貯存之外，深地質處置被視為是處理核能廢棄物的方案之一，尤其是高階與中階且長生命週期之廢棄物。此方式是將核廢料予以處理並存放在地質穩定的處置場，並透過自然屏障或人工屏障將核廢料與周遭環境隔絕。深地質處置的理論基礎是，核廢料可以透過長久存放以確保其放射性活度衰變，然而時間可長達一百萬年。

目前世界各國皆有針對不同岩層 (rock formation) 的研究或運用，像是凝灰岩 (tuff)、花崗岩 (granite)、鹽岩 (salt)、黏土 (clay) 等。這些不同岩層受到溫度與含水狀態等因素，產生各自的貯存限制，並決定其所需的屏障物類型。在相關立法決定探討花崗岩層或黏土層作為深地質處置場址之可能性後，法國政府因為大眾反對而放棄花崗岩，轉而研究黏土層的可能性。2011 年，法國在亞爾登—香檳區域 (Ardenne and Champagne) 邊緣一個人口稀疏、相對貧窮的城鎮布爾 (Bure)，建造一座由法國國家放射性廢棄物管理局 (ANDRA) 運作的實驗室。

這個研究進一步發展為「Cigéo 計畫」(centre industriel de stockage géologique)，並曾兩次交付公眾辯論，一次是 2005 年針對放射性廢棄物管理問題的整體性討論，另一次則是 2013 年針對 Cigéo 計畫本身的討論。這些辯論突顯這些貯存設施在營運階段，即廢棄物被貯存的數百年期間，所可能產生的無數安全相關問題，並進一步提出「深地質處理是否是最好的貯存方式」之詰問，並希望可以探討其他解決方式。

待貯存之放射性廢棄物

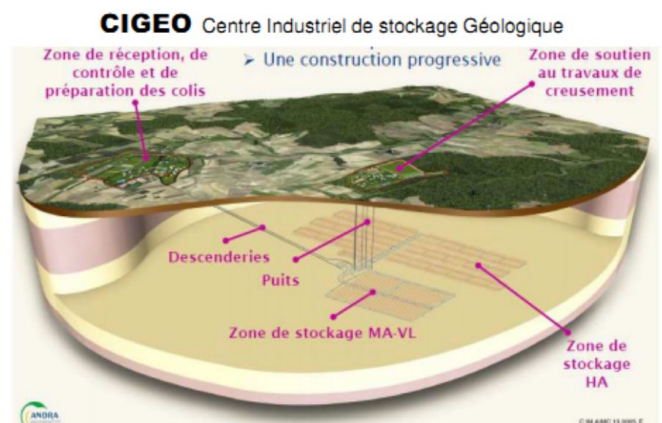
為評估 Cigéo 計畫的規模，其中一項參照情境是「既有之反應爐繼續運作 50 年以延續核

電生產」，此情境並未考慮任何由未來新建的反應爐所生產之廢棄物。Cigéo 將貯存兩種類型的廢棄物：

- 高階放射性、長生命週期 (HLLL) 廢棄物：體積約 1 萬立方公尺的未經固化包裝 (Non-conditioned) 廢棄物以及體積約 3 萬立方公尺的經固化包裝 (Conditioned) 廢棄物，共約 6 萬包 (package)。
- 中階放射性、長生命週期 (MLLL) 廢棄物：體積約 7 萬立方公尺的未經固化包裝 (Non-conditioned) 廢棄物以及體積約 35 萬立方公尺的經固化包裝 (Conditioned) 廢棄物，共約 18 萬包，包括 7 萬 5 千個瀝青基質包 (asphalt package)。

值得一提的是，上述數字並不包括那些目前被歸類為「核材料」(nuclear material)，事實上應被歸類為核廢料的物質，而且此類中高階放射性、長生命週期的廢棄物，也需要透過類似 Cigéo 計畫的方式處理。其中一個例子是並未預定要進行處理的用過燃料棒，包括用過的 MOX 燃料棒。同樣地，目前存放於拉阿格的鈾相關數據也未公開。

圖十一 Cigéo 貯存計畫



—地址

放射性廢棄物將會被貯存在一個位於法國默茲地區 (Meuse) 布爾鎮的黏土層中，此一黏土層形成於厚 130 公尺、深 500 公尺的卡洛夫—牛津地質階段 (Callovian-Oxfordian)。此廠區之建築工程包括挖掘 4 條出入豎井 (access shaft)，與總長達 265 公里的綜合井道系統 (way-shaft) 連結地底通道、貯存室與廊道等，總地底面積約 15 平方公里。此一計畫需要移除 700 萬到 800 萬立方公尺的岩石，並且植入數十萬噸的鋼鐵、27 萬 5 千立方公尺的混凝土建造該設施所需的支撐結構。

—計畫結構

Cigéo 計畫是由一個地下建築體所組成，而放射性廢棄物包將會貯存於此地下建築內，包含興建以及廢棄物裝填在內的營運階段，在廢棄物運送到地底貯存場之前，會先由位於地面的兩個不同廠區進行相關處理，一個是負責廢料包接收、檢查與準備的斜井道廠區 (way-shaft areas)，另一個井道廠區 (shaft areas)¹¹¹ 則負責確認地下工程的運輸作業。地下建築體將會隨著營運階段的推展而擴大。在運作 100 年之後，整體結構的表面積會高達 15 平方公里。

廢棄物存放在兩種貯存室：

- 高階、長生命週期廢棄物貯存室 (HLLL cells)：約 1500 個，透過出入豎井水平地相互連結，由長 100 公尺、70 公分寬的無縫鋼管所連接組成，用來將高階、長生命週期廢棄物推至貯存室內部進行存放。
- 中階、長生命週期廢棄物貯存室 (ILLL cells)：約 50 個，寬 9 公尺 (挖掘區塊面積約 65 平方公尺)，長 375 到 525 公尺，透過與其連結的廊道通風。這些裝載軌道式維護設備的隧道，將用來儲存各種混凝土塗層、平行六邊體形狀的核廢料包。

為了最大化地下空間，這些貯存室並未採用抗輻射屏障，因此將會有輻射外洩的問題。

—Cigéo 計畫成本

由核能發電部門所生產的最終放射性廢棄物源頭紛雜，包括核能設施的營運與拆除，以及核能廢棄物與用過燃料棒的回收與處理—不論是否經過再處理。

要評估核能廢棄物管理的總成本是一件相當困難的任務，尤其成本會隨著時間增加。根據法國國家審計局的估計，2013 年長期核廢料管理的總成本是 320 億歐元，其中的 81%、約 260 億歐元會由法國電力公司出資。此數字尚未包含用過燃料棒的管理，後者經法國電力公司於 2013 年 12 月底時評估，約需耗資 160 億歐元。最後，ANDRA 在 2015 年時估計，利用 Cigéo 計畫對中高階核廢料進行深地質處置的成本將花費 350 億歐元，不過 2016 年時的一則政府法令決定，將此計畫之預算框定在 250 億歐元。

在法國原子能安全署（French Nuclear Safety Authority，ASN）要求下，國際原子能總署組織由不同國籍之監管人員所組成的國際審查小組，對 ANDRA 所提交的 Cigéo 計畫安全選項文件（Safety Option Files，DOS）進行審查¹¹²。根據此份國際審查，以及法國輻射防護暨核能安全研究所（Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire，IRSN）的評估¹¹³，法國原子能安全署針對 ANDRA 所提交的安全選項文件發布意見¹¹⁴。這些審查與評估報告中的負面評論證實一些獨立專家的研究發現，特別是 Bertrand Thuillier 的見解¹¹⁵，以下將介紹的各種風險元素均建立在他的分析之上。值得一提的是，參與該計畫興建與營運的工人將可能暴露在巨大的風險之下，包括建築相關、地底操作相關以及待貯存核廢料的放射性活度相關的風險。

爆炸相關風險

由於持續產生氫氣，導致該計畫存在爆炸風險。假如在任何一個缺乏妥善通風的地方，如貯存室、廊道、核廢料保護櫃或廢料包等，氫氣濃度超過 4%，則即使是來自電池故障、電池液外漏、燈炮故障、過熱引擎上的油污、摩擦甚至是檢查與監控系統本身所造成的細微火花，也可能會導致爆炸。ANDRA 的設計文件顯示這類風險相當巨大，尤其是在特定廢料包中的有機體可能發生輻射解離的中階、長生命週期廢棄物（IILL）貯存室。在此情況下，良好通風將至關重要，不得發生長達十天左右的通風中斷之情形。

然而，我們是否真的可以想像，若發生坍塌、淹水，或僅僅是輕微電力故障，這種長達數周中斷通風的事件絕對不會發生在任何一個貯存區域嗎？

在一個涉及大量運輸工具、裝卸機具、照明設備與無線電通訊控制系統的計畫裡，我們要如何確認微小但致命的火花不會發生在一個缺乏通風、含有氫氣且隨時可能累積的區域中呢？

一旦發生爆炸，廢料包將會被嚴重地破壞，ANDRA 亦承認「**爆炸可能導致圍阻體（confinement）損毀**¹¹⁶」，並意味著放射性同位素將可能外洩至貯存設施中。報告也指出，「**爆炸將可能導致人員受傷、器材受損與毀壞，尤其是圍阻體或抗輻射屏障的受損將可能導致輻射外洩與曝曬的風險**」¹¹⁷。

IRSN 的建議則更為明確，他們指出「ANDRA 應評估爆炸意外的可能後果，且如有需要，應提交『監控、預防、傷害控制與介入』等應對措施的相關資訊」。

火災相關風險

在所有風險之中，最嚴重的風險是與火相關的。因為在中階、長生命週期的廢棄物貯存室中同時存在著下列因素：氫氣、可燃性廢料包（共 1 萬公噸的純瀝青，平均每個貯存室有 100 到 500 公噸），以及用來排出氫氣與放射性氣體的強力通風；在可儲藏區域中，可達到每秒上百立方公尺。

若發生火災，想要在這種地底環境控制住將會特別困難，原因在於：

- 地底建築體之面積達 265 平方公里，偵測火苗位置耗時。
- 消防員進入該區域救災需穿戴沉重又不舒適的抗輻射裝備、進出釋放放射性物質的貯存室，救災難度極高。
- 必須有漸進式停止並兼具阻隔功能的通風過濾系統，同時有防火止回閥（check valve），又能抽出煙霧，這套強力通風系統管理機制不可或缺。
- 在地下黏土層環境需要限制用水，以避免特定廢料包發生潛在的臨界反應，如中子反射效應（mirror effect with neutrons）。

IRSN 已證明前述的貯存缺陷與貯存室中發生大爆炸的風險確實存在。該機構所執行的模擬測試研究指出，一個廢料包上的火苗所釋放出來的熱浪，在短短幾個小時之內，就可能擴散到另一個廢料包。

因此，很難想像如何能在不導致基礎建構受損的情況下，順利於短短幾個小時內在長達數百公里的廊道、貯存室中偵測並控制火苗，進而疏散工作人員、導入急救隊、停止通風系統以及控制火勢。IRSN 發現「**中階、長生命週期廢棄物貯存室所規劃的偵測與消防措施，並不足以在系統失靈的情況下確保一小時之內控制火勢**」。

潛藏的營運關閉

在發生前述這種意外之後，廠區幾乎是不可能回歸「正常」運作的。根據設計，由於通風上的需要，一旦有貯存室或廊道遭到污染，Cigéo 便無法繼續維持運作。在意外發生之後，輻射污染將會直接灌注到周遭環境之中。這一點也同樣地被 IRSN 特別提及，它們表示「**令人感到遺憾的是，ANDRA 在其安全選項文件中並未考慮任何足以讓廠區在意外發生後仍能回歸運作的特別措施**」，並且指出「**ANDRA 未能證明可以在系統崩潰時進行介入**」。因此，在這樣的案例中，無法適用可復原性（reversibility）原則；廠區不可能繼續，也不可能使受損的廢料包復原。

ANDRA 技術人員坦承，目前對於在意外後修復以及處理氫氣存在尚有些問題，「**為了評估控制爆炸風險的可行性，確實需要估算：在不同情境下，於一個難以抵達且封閉的空間中進行重大介入行動所需耗費的時間**」。

岩層中的水流風險

在國際審查小組（L'Équipe de Revue Internationale，ERI）對 ASN 意見的審查中，岩層中的水流是關鍵問題。如下所摘：

摘錄自觀察 12

「雖然 ANDRA 對該地點仔細調查後認為，待深入調查潛在區域（*zone of interest for deepened investigation*，ZIRA）中可能導致水流產生的不穩定因素（例如岩層裂縫）的發生機率低到可被忽略，然而 ERI 的審查報告建議 ANDRA 將 Cox 岩層¹¹⁸ 在已知情境下產生的裂縫列入考慮」。

「計算可能導致水流產生的空間與水力不穩定性的規模，將有助於 ANDRA 清楚說明與呈現 Cox 岩層所擁有的安全性等級（*safety level*）對於此貯存系統在關閉後的整體穩健度有顯著正面影響。這也將幫助 ANDRA 闡明：待調查潛在區域中的 Cox 岩層所具有的不穩定因素對於系統安全將有何種衝擊，如此才有可能評估該設計的穩健程度」。

摘錄自建議 4

「ANDRA 必須在其模擬實驗中納入 Cox 岩層中的水流機制，以加強證明該貯存系統的穩健程度，尤其是 Cox 岩層在安全性上的表現。」

安全與外部攻擊

除了前述該廠區在設計、興建與營運上的風險，該廠區還存在與外部攻擊相關的安全疑慮。其中一種是此廠區在長達一個世紀或更長的營運時間中，完全可能受氣候現象影響，如劇烈風暴、豪雨、洪水、導致道路關閉的暴雪等，這將中斷廠區電力供給，繼而中斷地底建築的通風系統；另一種外部攻擊疑慮，則是在這座用來接收與貯存核廢料、裝滿無數的通風孔道，且廊道與貯存室廣佈至少 15 平方公里的巨大迷宮興建過程中，所可能發生的惡意外部攻擊。這幾乎等同於 2 座標準核電廠，一座位於地上，一座則在地底 500 公尺深，這類廠區的脆弱程度不言可喻。

貯存與可逆性原則

法國立法者在 2006 年 6 月 28 日的立法中加入「可逆性」(reversibility) 原則，該法案第五項規定：「**放射性廢棄物的深地質處置，涉及將這些物質存放在特別為了此目的而設計的地底貯存設施，並需遵從可逆性的原則**」。關於此原則更為詳盡的定義可以在 2016 年 7 月 25 日的法案中找到：

「可逆性意指未來世代有能力選擇，是要持續興建與利用新建的貯存設施，或者重新評估過去的選擇並重新發展核廢料管理方案的方向」。

然而在現實狀況中，可逆性侷限在營運階段，等同於僅限於未來少數幾個世代。況且現在我們已經知道，可逆性的具體實踐方式，即一個或多個核廢料包的「可回收性」(recoverability)，僅僅在廠區早期產業試營運階段是強制的。

事實上，決定要將核廢料埋藏在黏土層時，

可逆性問題就浮上檯面：一旦這個廠區最終決定關閉，則無論是「回到過去」(go back) 或是採取不同的核廢料管理策略，都是不可能的。與無限期貯存(indefinite storage) 這個概念一致，且適用於興建工程完成後的不可逆轉性(irreversibility) 選項，無論如何都不應套用在長達一百年、且早於廠區完工與無人聞問(oblivion) 的漫長興建階段。可逆性原則在興建階段的各個環節中都是相當重要的，用以平衡眾多意料之外的、充滿風險的施工問題，也用以在符合廠區與附近居民安全利益的時間範圍內回收修復有缺陷的核廢料。

如同 ERI 審查報告所特別提及，此工程項目開發人員自己也坦承，須顧及缺陷廢料包的存在以及修復這些廢料包的需求，相同地，即使只是廢棄物處置階段的輕微意外，進行干預處理的需求也不能被排除。假如廠區發生意外，可逆性原則勢必得能與事故後的介入措施相符合。當然這並不適用於在貯存核廢料包件的地底深處廊道發生火警的情境，要移除這些廢料包將耗時數個月之久。儘管有上述考量，ANDRA 依然並未明確給出可逆性原則在一般情況下或是在意外事故狀況下所需花費的時間範圍。

將放射性廢棄物以深地質掩埋於地殼之中 是可被接受的嗎？

若是以為未來世代將可以因為我們使放射性廢棄物「從眼前消失不見」，便免受核廢料之苦，這種想法可說是相當偽善的。將放射性廢棄物以不可逆的方式深深埋藏在地殼之中，並且幾乎不可能有任何變更的機會，這將留給未來世代一個他們終將察覺且將深受其害的地底污染問題，而且他們實際上將無計可施。

當前世代的任務是要確保核廢料在長達十萬年的時間內可以被「無痛貯存」時 (trouble-free storage)，如 ANDRA 前主管那般聲稱「那些現在無法想像的，已經被想像了」，這無疑是相當魯莽的。雖然透過地質層測試可以針對複雜的模型進行校準，但仍無人能擔保那些無法預測或此刻根本無法想像的地質變化。

更具體地說，地質層中的水流滲透 (water infiltration) 或許將是最巨大、最難預防的長期技術性風險，像是含有放射性物質的水份將在多久以後上升到地表？這個狀況可能會在任何一種岩層中發生，不過黏土層在這方面依然比花崗岩層是更好的選擇。

第二個問題，則是未來世代徹底遺忘這個地底貯存設施。深地質掩埋目前正處於研究階段，而且也不乏各種想法的激盪，對某些人來說，此計畫目標是「讓核廢料消失不見」，因此最好的方式就是不要告訴未來世代這個貯存設施的存在，取而代之地讓地質負責照顧這些被小心藏匿與刻意忽視的核廢料。對另一群人來說，認為這世代應該努力嘗試傳遞出這個高風險地下貯存場長期存在於此的訊息；此一議題涉及數世紀乃至數千年的時間，沒人知道這個區域在遙遠的未來會是如何，不論我們提供了什麼樣的預警與訊息，經過戰亂、時代更迭，最終將可能濃縮成一個訊息，「這底下可能有某些特別的東西，而它們應該被挖掘出來」。

假如「全球核能冠軍」 (the world's nuclear champion) 法國採取深地質處置的方式，短期與中期內將會吸引其他國家與企業將會一窩蜂地照做。這個某些人眼中的「完美模式」將會在未經實驗的情況下被各國採用，甚至讓其他類型的有毒廢棄物也都消失。在不到一個世紀之內，地殼中便將會充滿小心翼翼地埋藏好的洞穴，裡面充斥著極度危險的廢棄物。

在難以阻止、難以解決的空氣污染與海洋污染之後，人類此刻又為了解決核廢料開始向下鑽挖，深入富含原物料與能源資源的地底，更貫穿了對地球生靈而言極為重要的水份流動與貯存之處。

如同各種國際公約 (如氣候公約、蒙特羅議定書與奧斯陸－巴黎公約) 皆嘗試改善我們的空氣以及水源一般，或許可以想像未來世代比起現在的世代將較不那麼具毀滅性，並且很快地將會出現某個國際公約禁止任何有毒或放射性廢棄物的深地質埋藏，就像 1993 年禁止放射性廢棄物海拋棄置的倫敦公約。

最後，一個密封的深地質處置場，實際上是一個不可逆的選擇，更是一個強加給未來世代的選擇。深地質處置的支持或反對，並不僅僅是個科學或是技術上的論辯，更同時是一個道德、政治與公民的抉擇。

此處建議三種可能性，一是繼續研究如何降低放射性廢棄物在體積與時間單位上的毒性，二是提升目前貯存與處置設施的安全水準，三是可長期持續的地表下處置。

1991年立法所提出的三條路線之一：群分離 (partitioning) 與核轉變 (nuclear transmutation) 無法「解決」核廢棄物的問題。核轉換技術是利用中子對核廢料進行過度幅照 (overirradiating)。這些中子所帶有的能源取決於核廢料中含有的元素，因此所有的核廢料都必須被完全地分離，從技術層面來說幾乎是個不可能的任務，同時造成經濟極大負擔。不論如何，這都無法消除 (eliminate) 核廢料，僅僅是縮短某些核廢料的生命週期，例如從一萬年縮短至幾百年。核轉變技術目前仍然處於法國原子能署的研究階段，但只處理極小一部份的核廢棄物。2006年一場相關討論總結指出，核轉變技術無法成為解決數萬公噸既存核廢料的產業解方。然而，核轉變技術的缺點，並不構成放棄嘗試減少放射性廢棄物之毒性的理由，應優先持續這個領域的研究。

地表處置或無限期處置 (indefinite) 早已用來處置低階放射性廢棄物，例如 ANDRA 在蘇蘭訥 (Soulaines)、莫爾維利耶爾 (Morvilliers) 與拉芒什 (La Manche) 等地的處置場。這類的處置場必須被監控 (inspected) 長達至少 300 年，在拉芒什的案例中，由於銻在某些狀況下仍存在，監控時間則需長達 800 年。

現階段而言，尚未有任何令人滿意的解決方案可以管理這些核廢料。目前最佳的選項看似是地表下乾式處置 (sub-surface dry disposal)。

Cigéo 計畫建立在讓世人遺忘、對自然的信任以及科技所擔保的安全之上，在 2006 年關於放射性廢棄物管理的國家辯論中引發了大量的爭議。當時，浮現了「受監控且可持續性貯

存」 (monitored and sustainable storage) 概念，拒絕將「遺忘」視為當前與未來的核廢料解決方案。除了對核廢料進行監控，這種貯存方式也要求透過切實的技術手段在任何時間點取出核廢料桶，並將它們以其他方式進行處置。這個替代選項概念的核心，是科學、技術、思維與社會的「進化」 (evolution)，並且在國家放射性廢棄物管理委員會於 2005 年到 2006 年間所舉辦的公眾辯論中，獲得廣泛的支持。

同時我們也有理由相信，在廢棄物封包 (packaging) 與貯存容器的技術上將可以有顯著的重大進展，而這在無限期深地質處置的方案中是不可能發生的。在法國，乾式處置早已被用來處置許多不同種類的廢棄物，包括拉阿格廠區所製造的玻璃固化核廢料，其中含有來自用過燃料棒、並於再處理程序中被分離出來的核分裂物質與次要錒系元素 (minor actinide，銻之外的元素，比鈾更重)。這些高階、長生命週期 (HLLL) 的高溫廢棄物被貯存在拉阿格廠區內的垂直倉筒中，並透過強力的自然與人為通風進行冷卻。法國實際上是唯一大規模進行再處理的國家，相反地在德國與美國，用過燃料棒或幅照 (irradiated) 燃料棒並不會經過再處理，因為它們被視為廢棄物；在這兩個國家中，都已經或正在發展將核廢料長期貯存於核電廠廠區內的方案，計畫將用過燃料棒在反應爐旁的冷卻池放置約五年，再進行乾式貯存。

地表下貯存 (sub-surface storage) 是將自反應爐中退出的用過燃料棒，不經再處理便貯存於淺層的地下貯存廊道中，或是埋藏於花崗岩山旁。這將有助於廢棄物監控，並能確保在發現更好的處置技術問世後，可以將這些用過燃料棒取出。此方式也適用於既存的、經過妥善處理的中階、長生命週期 (ILLL) 廢棄物貯存容器，以及目前貯存於拉阿格的高階、長生命週期 (HL) 且完成必備冷卻階段的玻璃固化核廢料。

結論

- 1.** 該項計畫的各種弱點、缺點以及障礙，都已陸續被三大官方意見點出，這包括法國核能安全局（ASN）、法國輻射防護暨核能安全研究所（IRSN）以及獨立的同儕審查。這也導致由法國國家放射性廢棄物管理局（ANDRA）所提出的 Cigéo 計畫遭到嚴厲質疑。針對 ASN 諮詢過程的許多意見回覆也進一步證實了上述發現。
- 2.** 在如此巨大的問題之下，法國政府與國會應即刻重新檢視 Cigéo 計畫，它除了最終將不可避免地走向失敗的結局，其必須花費的鉅額成本最終將會由法國人民所蒙受。
- 3.** 將放射性廢棄物以深地質處置方式進行埋藏是不可接受的，這舉並不會讓核廢料「消失」，僅是將核廢料藏匿起來，並為未來世代帶來無法復原且永無止盡的地殼污染。這也迫使當地居民在長達一個世紀的時間裡，都必須面對廠區興建與管理工程所帶來的巨大風險。倘若在未經控管的狀況下在全球套用同樣的方案，無庸置疑地將會在全球各地導致大規模的地下水污染。
- 4.** 對於放射性廢棄物管理上相關立法以及公眾辯論建議，應該將地表下乾式貯存的當成選項、進行全面性的研究，並搭配一個或多個先導式計畫測試。
- 5.** 當前的放射性廢棄物管理策略需要大幅度調整，現行策略是在對此問題長時間的漠視才發展出來，並且是建立下列的狹隘選項之上，像是「再處理」、「鈾生產」以及由廢棄物生產者主導的，針對「高潛力資材」與「廢棄物」做出令人質疑的區別。

4

日本

JAPAN

日本採取高階放射性廢棄物（High level waste, HLW）永久性地質處置的政策。然而時至今日，此一政策仍缺乏公眾共識，因為市民對於此系統的安全性抱有高度疑慮。永久性地質處置場的地點至今也尚未決定。

從深海處置到深地質處置

由於地震疑慮與缺乏可用土地，日本在1960年代對於高階放射性廢棄物的政策是將其棄置在深海。在1972年被稱為「倫敦公約」的《防止傾倒廢物等物質污染海洋公約》簽訂後，此項政策改為地質處置。然而，日本的地質相當不穩定，因此在確保地質處置的安全性上，技術屏障比起自然屏障顯得更為重要。

玻璃固化高階廢棄物（Vitrified high level waste, VHLW）與長生命週期低熱度放射性廢棄物（Long-live high level waste, LLHW）

由於日本採取核燃料循環政策，因此政府規定所有的用過燃料棒都必須進行再處理。這就是為什麼用過燃料棒並沒有被歸類為高階放射性廢棄物。然而因為不可能再處理所有的用過燃料棒，因此此政策勢必將在未來被扭轉¹¹⁹。

圖十二 2016年11月時，當地居民抗議日本北海道幌延町的核廢料設施。（攝影：Mihoko Inagaki）



在日本北部的北海道幌延町，一座用來處置用過燃料棒再處理後產生的高放射性廢棄物的地底處置場，目前正處於研究階段。幌延町是個人口略高於2,600人的小鎮，它是全日本唯一一個接受這種研究的地方。這個城鎮在1980年代早期開始嘗試邀請核能相關產業前去該區域設廠，希望藉此減緩人口衰退、復興城鎮¹²⁰。1984年，幌延町成功邀請高階放射性廢棄物的研究與貯存設施進駐。然而，此項計畫卻因為附近其他市町村以及北海道居民的強烈反對而遭到凍結。經過協商折衷之後，該地底研究計畫在2001年4月啟動，前提是僅可進行研究，不得引入任何核能物質。當核廢料議題造成嚴重的社會爭議時，幌延町附近的市町村成立許多居民團體；在1985年1月，「反對核廢棄物設施邀請之北海道北部聯絡議會」（核廢棄物施設誘致に反対する道北連絡協議会，Northern Hokkaido Network against the Invitation of Nuclear Waste Disposal Facilities）成立並組織上述這些居民團體，且在北海道各處都成立許多此類組織。為了決定核廢料處置場的地點並且迅速地重啟核反應爐，政府將處置場場址提名系統從地方志願制轉換為政府指定制。

幌延町地底研究計畫的執行，是建立在一個「於20年後終止研究計畫」的協定之上。然而，負責監督此項計畫的獨立行政法人日本原子能署（Independent Administrative Institution Japan Atomic Energy Agency, JAEA）正試圖延長期限，並且開始否認它們與地方政府所達成的協議，也就是不願承諾在研究終止後將廠區土地重新回填。幌延町依然有些人主張應該邀請核廢料處置設施前來設廠。此外，也越來越多人擔心由於該項計畫不合理的操作，幌延町可能會被政府指定為接收處置設施的地點。

日本有為數眾多的活火山、頻繁的地震以及充沛的地下水源，使科學家們嚴正地質疑地底處置方法的可行性。就地質而言，北海道的地質結構是相對年輕的，僅僅在約 10 萬年前形成，幌延町周遭區域至今仍有地質形變以及地殼構造運動（deformation and tectonic activity）。幌延町附近區域的地表下，為含有大量裂縫與豐沛地下水的泥岩層，這些水源包含來自地表的水份以及古地下水（fossiliferous）。在 2012 年 4 月到 2013 年 3 月間，地下研究設施每日平均排水量約為 310.4 立方公尺，該地同時也有氣體排放的問題。需被隔絕長達 10 萬年的高階放射性廢棄物之處置設施的相關研究，竟是在這樣的地方進行，顯示日本的核能政策有著根本性的問題。

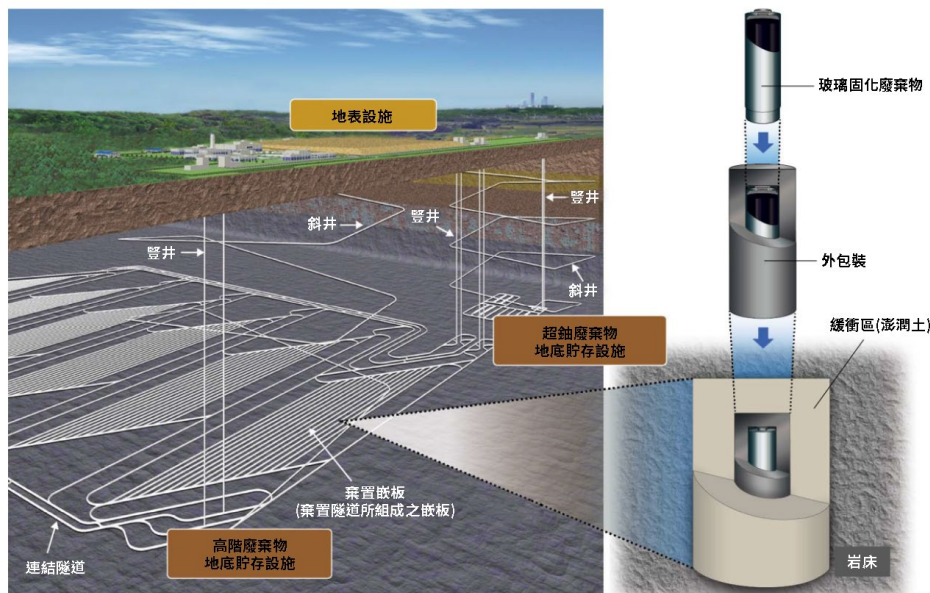
規劃中的永久處置場的空間與容量

2000 年通過的高階放射性廢棄物永久處置法案規定，廢棄物必須被掩埋在深度超過 300 公尺的地底下。日本原子力發電環境整備機構（Nuclear Waste Management Organization of Japan, NUMO）根據此一法案而成立，用於尋找永久處置場之地點，並執行高階放射性

廢棄物的處置任務。

規劃中的處置場的面積將是地上部分 1 到 2 平方公里，地下部分 6 到 10 平方公里。約有 4 萬罐的高階放射性廢棄物將被埋藏於此，這些廢棄物是由六所村核燃料再處理工廠（Rokkasho reprocessing facility）預定針對 3 萬 2000 噸重金屬的用過燃料棒進行的再處理工程所製造出來的。同樣由再生產工程所製造，含有超鈾廢棄物與碘 -129 的長生命週期低熱放射性廢棄物（LLHW）也預計埋藏在同一個地點。假如日本持續使用核能發電 30 年到 50 年，那麼將會需要另外一個處置場。但上述情境在福島核災之後看來並不太可能發生。

一罐玻璃固化高階放射性廢棄物，應該被放置於一個 19 公分厚的碳鋼桶之中，即所謂的外包裝（overpack），再以 70 公分厚的膨潤土（bentonite）包覆。長生命週期低熱放射性廢棄物則應被棄置於 5 公分厚的碳鋼製方盒中。NUMO 表示，隧道總長約為 200 到 300 公里長，包含進出隧道、主要隧道以及棄置隧道。這些隧道將會以含有膨潤土的岩石密封。NUMO 希望將這些隧道中的透水率維持在既有的程度，然而這是不可能的，而且放射性物質可能會通過這些隧道逸散到人們居住的地方。



地表設施：1公里到2公里
地底設施（深於300公尺）：6公里到10公里

圖十三 日本深地質處置設施¹²¹

深地質處置技術可行性報告¹²² (1999 年) 與永久處置法案 (2000 年)

日本原子能研究開發機構 (Japan Atomic Energy Agency, JAEA) 的前身，核燃料循環開發機構 (Nuclear Cycle Development Institute, JNC) 在 1999 年時發布一份報告評估深地質處置方案的安全性。該份報告呈現此一處置場、設施與設備的設計是建立在將自然屏障與科技屏障相結合的概念之上。該份報告指出，「一般而言，在地底深處存在著『氧還原條件』 (即氧化還原環境, reduced environment)，而且水流相當緩慢，因此只要善用科技屏障，日本將有足夠多的區域可以將核廢料持續隔離於人類居住區域之外，長達數十萬年」。然而檢視地底深處的水流狀況時，他們其實只鑽鑿 2 到 3 個樣本區域。

在瑞浪市 (Mizunami) 案例中，JAEA 於該處深度 100 公尺、300 公尺、500 公尺處執行研究，而在長達 20 年的時間中，每天都有 700 立方公尺到 1000 立方公尺的水持續從周圍土壤中滲入，JAEA 至今尚未發現這些水從哪裡來、又往何處去。這意味著 JAEA 對於地底深處的環境如水流與岩石裂縫的認知其實相當有限。然而 NUMO 至今仍尚未宣告像瑞浪市這樣的地點並不適合進行永久處置。除此之外，在處置場廠區的設計與處置的安全標準上，至今也依然沒有任何的規範。即使後續更為詳盡的研究發現不利設置的條件，NUMO 也缺乏相關規範讓他們可以放棄該場址，在這種狀況之下，NUMO 可能會進行所謂的全面評估，結果將可能依然是該場址被宣布適合做為處置使用。

環境衝擊評估

針對玻璃固化高階放射性廢棄物 (vitrified high-level radioactive waste, VHLW)

的環境衝擊評估 (Environmental Impact Assessment, EIA) 包括基本情境與變異情境。在這兩個情境中，地下水都會將放射性物質傳遞到人類居住的環境。基本情境的預設條件包括平地、河水、花崗岩層、70% 的膨潤土與 30% 的矽砂作為包覆層、深度 1000 公尺、距離具高度水透性的裂縫 100 公尺遠。

一個外包裝預計將保存核廢料達 1000 年之久，而玻璃則預計將會在七萬年之後徹底溶解。在這段時間中，放射性物質將會緩慢地隨著水流滲穿 70 公分厚的膨潤土或矽砂包層，並滲入周圍估計厚 100 公尺的區域，而最終這些放射性物質將會進入人類居住的環境。經過計算後，劑量率在設施關閉 80 萬年後將達到高峰期，約為每年 0.005 毫西弗 (micro-sievert per year)。環境衝擊評估的變異情境包含 36 個不同模式，其中 30 個模式是水份、地表水、海水、地下水流以及土壤性質的多層組合，其他模式中的變異項目則包括外包裝的厚度、玻璃溶解的速度、膠體狀況 (colloidal status)，以及防護罩的隆起、下陷與工程缺陷。經過計算後，最大劑量率在上述這些情境低於每年 100 毫西弗。

然而在變異情境中，一次僅考慮一種條件的變異。假如同時間有兩個或更多的因素發生變化，則劑量率將可能至少上升每年 1 毫西弗。舉例來說，假如岩層中的裂縫因為地震而變寬，外包裝將會更快地侵蝕，水流從包覆層到地表的路徑也會發生改變，導致放射性物質出乎預期地且快速地出現在我們的生活環境中，屆時輻射的體內曝射劑量率將遠高於每年 1 毫西弗。

核燃料循環開發機構 (JNC) 在 2005 年時發布長生命週期低熱放射性廢棄物深地質處置的環境衝擊評估。此份評估報告指出，在類似於玻璃固化高階放射性廢棄物處置案例的地質環境之下，劑量率將在一萬年後達到高峰期，估計將是每年 2 微西弗 ($\mu\text{SV}/\text{y}$)。主要的核種是碘-129，具有 1570 萬年的半衰期，並且極易溶於水。

選址程序

相關法規中對於選址程序的步驟規定是：首先，利用該地區的文件紀錄進行初步研究，例如地震、水災風險、火山爆發等等。第二階段是概要研究（outline research），針對樣本區域進行鑽挖探測。最後是針對該場址的地底狀況進行更為詳盡的精細研究。在每個步驟中，NUMO 都必須製作評估報告並向地方居民公布；同時，地方政府的意見必須得到尊重，NUMO 強調，如果地方政府拒絕進入下個階段，他們就會停止相關研究。NUMO 並未針對放棄場址一事做出任何公告，但僅僅是停止他們的研究。人們對此多有批判，因為他們擔心 NUMO 是想拖延到下次選舉，並且試圖影響新任地方政府首長，因此 NUMO 並未放棄該計畫，僅只是「暫緩」。

日本原子力發電環境整備機構（NUMO）與邀請申請制

依據永久處置法案而成立的 NUMO，在 2002 年啟用「邀請申請程序」（inviting application procedur）制度，並求所有的地方當局繳交同意進入文獻調查階段的文件。NUMO 堅稱此套程序是相當公平的方式，因為所有地方政府都擁有同等的權利接受初步文獻調查。5 年之後，高知縣的東洋町町長在缺乏跟議會討論以及未知會町民的情況下，申請於當地進行研究。這位町長的決定引發大規模抗議、反對當地接受設置放射性廢棄物處置場的相關研究，並對町長造成壓力。最後，由另一名反對研究申請的新任町長當選，並撤銷了該

份申請，並且終止所有實驗性測試。除了東洋町之外，這類事件也在其他 8 個地區發生，並開始有人主張應該採取新的選址方法，同一年，開始出現另一套由中央政府主動接觸地方政府的選址系統。

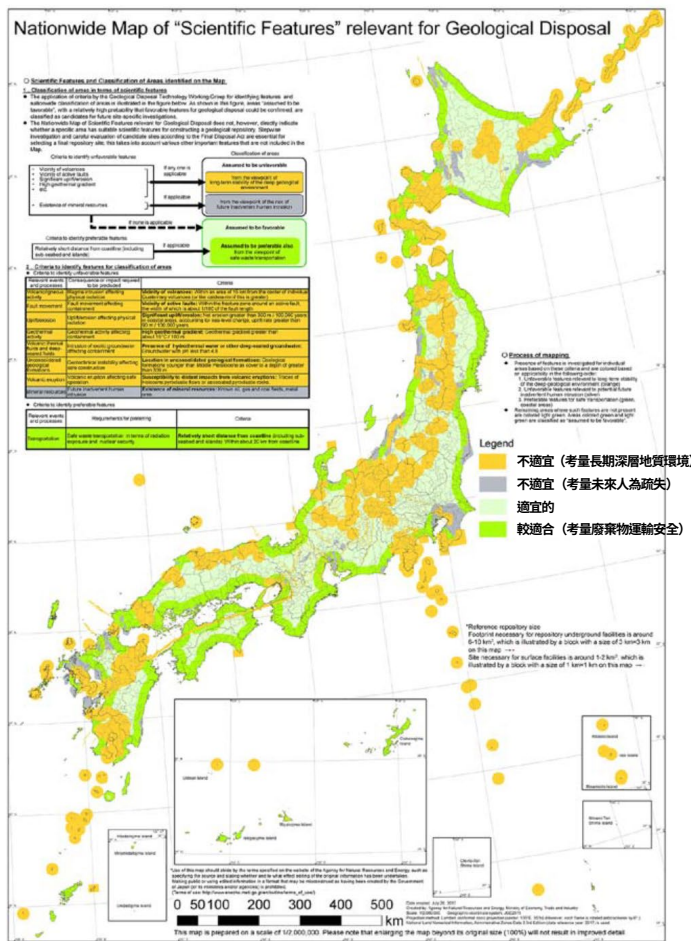
正當日本政府已向對多個地方政府發出研究請求時，就發生福島第一核電廠的事故。對地方政府提供的補助，包括市町村的花費在內，在第一階段最高約為 20 億日圓，第二階段最高達 70 億日圓；最終階段的補助金額則尚未確定。

地質科學特性地圖的公布

日本前任首相小泉純一郎在訪問芬蘭安克爾（Onkal）之後，曾表示日本應該要逐步淘汰核電，因為日本不穩定的地質條件導致日本不可能進行核廢料深地質處置。日本政府相當擔憂引發反核運動，並將 2007 年所採取的深地質處置選址程序具體化。2013 年 12 月時，日本政府表示選址程序具體化將包含 3 個步驟，首先是透過科學訊息與數據指定出適合的地區，第二則是透過對話徵得這些地區的同意，最後則是向這些市町村提出文獻調查的請求。

2017 年 7 月 28 日¹²³，日本政府發布一份地質科學特性地圖（geoscientific characteristics map）作為高階核廢料處置場的選址依據。這幅比例尺 1:2,000,000 的地圖呈現整個日本群島，並包含 5 張航空地圖。此地圖也提供處置場工程選址的建議與解釋，並透過顏色編碼（color-coding）標示個別觀點。

圖十四 地質處置相關科學屬性之全國地圖¹²⁴



這份地圖根據 11 個限制條件 (disqualification condition) 將日本劃分為 3 種區域，分別是優勢區 (advantageous)、適合區 (suitable)、不適合區 (unsuitable)，這些限制條件包括火山活動、斷層活動、地表隆起或侵蝕、礦產資源存在、處置區域之溫度等。為了針對區域進行分類，此地圖使用全國性而非地域性的資料或文獻。根據交通條件的不同，此地圖將靠近海岸的綠色優勢區與適合區進行區分。由於一輛裝載玻璃固化高階放射性廢棄物的貨車可重達 100 噸，因此無法使用一般公共道路，必須使用特殊的私有道路。綠色的海岸區域意味著離海岸線 20 公里之內，NUMO 正規劃在海岸線沿岸的綠色區域遊

說。然而該份地圖公布後，46 個地方政府中有 21 個立刻表示拒絕接受文獻調查。在每場由 NUMO 舉辦的會議中，參與者都堅持在討論核廢料處置之前，必須先停止生產更多的放射性廢棄物。

每個地區的特殊地質條件將會在文獻研究階段審視地質資料，然而地質科學特性圖僅根據可用的全國性資訊劃分區域，因此此地圖並不是反映每個區域的特性。舉例來說，此份地圖原本應該排除火山碎屑流沉積 (pyroclastic flow deposits) 且地質年齡少於一萬年的區域，但此地圖並未考慮鹿兒島鬼界破火山 (Kikai Caldera Volcano) 若爆發的火山碎屑流影響區域，且這座火山最近一次爆發僅在 7300 年前；此類影響將會在文獻調查中納入考慮。

東京許多區域都被歸類為綠色海岸區域，但由於關東平原是在第四紀 (Quaternary period)，其岩床在地底深處仍然柔軟，且有許多尚未岩化固結 (unlithified) 的岩層；這一點也應該要在文獻調查中納入考量。此一地質科學特性圖也未考慮因為立法或是國際協議而禁止使用的土地限制，也未考慮如人口密度或是土地所有權者數量這種社會因素。

在考慮接受調查申請時，NUMO 過去的常規作法只考慮火山活動與斷層活動，其他觀點則納入文獻調查階段審視的社會屬性地圖中。因此，日本政府發表這份地質科學特性圖可謂是一種進步。NUMO 目前也正在修正它們的申請接受條件，以便與地圖中列出的條件相符。

日本群島位於 4 個板塊交會的地殼活動區，即使滿足所有地圖中所列出的條件，依然很難將核廢料與周遭環境隔離長達十萬年之久。此外，要達到長期穩定性，必須處理地底深處相對大量的地下水，但資訊仍有限。日本政府至今仍傾向透過工程技術確保高階放射性廢棄物的長期安全。

公布地質科學特性圖之後，日本政府以及 NUMO 透過政令宣導活動增加大眾認知，尤其是在地質屬性獲評估為「優勢區」的綠色海岸沿線區域。然而，在全國 47 個都道府縣等一級行政區域中，有 20 個一級行政區早已表明拒絕接受調查。自從福島核災事故以來，反對核能發電的公民運動相當興盛，並強硬地要求首先關閉所有的核能電廠，以暫緩增加高階放射性廢棄物；日本學術會議 2012 年也要求訂出高階放射性廢棄物的數量上限。

日本政府強調公布地質科學特性地圖並非是要說服各市町村接受處置場的選址調查，政府將不會在缺乏地方同意的情況下，單方面地展開任何調查活動。據日本政府表示，「這是落實高階放射性廢棄物處置的長路上第一步」。作為第一步，NUMO 計畫在包括交通等各個角度上都被評估為優勢區的地區，組織一小群人進行政策溝通。然而，日本政府與 NUMO 所傾向推廣的廢棄物地質處置概念與計畫都較為傳統，將處置場議題與核能電廠的爭議進行切割，這些顯見的歧異預計還會持續下去。

在高階放射性廢棄物的處理上，日本政府並未努力嘗試促成參與式共識（participatory consensus）。舉例而言，共識聚會或是審議式民調不僅從未舉行，甚至從未納入規劃。政府議會並未討論如何取得社會共識，日本政府至今所做的，僅希望爭取大眾支持深地質處置政策。

高階放射性廢棄物的期程計畫

1995 年，第一批玻璃固化高階放射性廢棄物從法國送抵日本，從日本核燃料有限公司（Japan Nuclear Fuel Limited, JNFL）所擁有

的民營港口登陸，根據日本核燃料有限公司與青森縣政府的協議，這些廢棄物將貯存於六所村的玻璃固化廢棄物貯存中心長達 30 到 50 年，因此 NUMO 必須在 2045 年前開始運作處置場。該廠區距離可以營運的階段大約還需 30 年，包含文獻調查 2 年、概要調查 4 年、場址現場的精細調查 14 年及興建工程需花上 10 年。

NUMO 目前已經落後進度 3 年，並且在可預見的未來之中，依然不太可能找到願意接受研究調查的市町村政府，但由於與青森縣政府的協議，NUMO 無法改變進度期程。

處置成本估算

根據日本產業經濟省的估算，包括長生命週期高階放射性廢棄物在內的廢棄物處置總成本約為 3.8 兆日圓（約 294 億歐元）¹²⁵。假如進度延宕 20 年或是更久，成本還可能會上揚。除此之外，上述估算值也並未包含 NUMO 的營運成本，而這也會增加廢棄物處置費用。

處置資金之籌款

日本產業經濟省以及電力公司透過電價收取核廢料處置的資金，然而由於 2% 的折現率（discount rate）之緣故，前述的 3.8 兆日圓中只有半數可以被直接籌得。每一年產業經濟省都會根據前一年的核能發電量以及前一年對深地質處置成本的評估，來決定今年要向電力公司要求的最終處置成本份額。他們同時也將貼現率納入計算，但成本會因為許多不同的因素而增加。未來世代將面臨嚴重的資金短缺問題，而且即使是核能發電的時代結束了，他們也依然得去面對最後的開銷。

結論

2011年3月的福島第一核電廠事故，強化日本社會大眾對於核能發電的反彈聲浪。2011年時共有54座運轉中的商用反應爐，到了2018年時只剩下9座。雖然政府規劃在2030年時將有高達35座核反應爐投入運轉，但這幾乎已經是不可能發生的事情，核能發電在日本的前景茫然。

與此同時，日本仰賴核能的能源政策產生一個後果是國內有相當大量的中階放射性廢棄物，包括用過燃料棒以及由再處理而來的玻璃固化中階放射性廢棄物。截至今日，所有替這些廢棄物尋找地底貯存場地地點的嘗試，皆以失敗告終，而且不論是在可預見的未來或是遙遠的將來都希望渺茫。日本民眾基於道德上的責任感，認為經由核能發電生產出來的核廢料應該獲得安全管理，並找到長期解決方案。然而，根據一份由日本原子力文化振興財團（Japan Atomic Energy Relations Organization）執行的民調，雖然民眾相當支持核廢料處置研究，然而對於是否可以安全執行處置核廢料，民眾便沒有太多的信心。根據此份民調，民眾對於核廢料地底處置的態度呈現兩極化，支持與反對民眾各有20%。事實上，每當向地方社區提出建議要於該地興建處置場時，公眾意見幾乎都是一面倒地反對地底處置。

深地質處置是不安全的，尤其是在日本這種地震與地殼運動頻繁的地方。現實情況將是中階核廢料會在可預見的將來持續貯存於地表，而它們也該如此。目前日本尚未有中階放射性廢棄物的最終解決方案。日本內閣府在2010年時，要求日本學術議會提供中階核廢料處置選項的分析報告，日本學術議會檢視日本在廢棄物處置的相關研究之後，在2012年9月時建議日本政府將核廢料以中期貯存方式存放300年。這項建議是意識到日本中階核廢料管理的現實困境後所提出，日本政府與NUMO應該接納此一建議¹²⁶。

5

瑞典與芬蘭

SWEDEN AND FINLAND

簡介

這份報告聚焦於瑞典由商用核反應爐運轉發電所產生的輻照核燃料（irradiated nuclear fuel），即所謂「用過燃料棒」管理狀況。核能工業所提議的用過燃料棒貯存場在方法與地點上的不確定性與衝擊影響也將是本篇報告聚焦檢視的重點。此外，本報告也將簡短介紹芬蘭的用過燃料棒管理現況。

瑞典之核廢料管理

瑞典在 1945 年廣島、長崎原爆後展開核子武器研究，也開始生產核廢料。1947 年瑞典政府成立原子能公司（Atomic Energy Company）進行軍用與民用的核能研究與發展。軍用核能的研發在 1960 年代時遭到棄置¹²⁷。1940 年代末的早期研發作業包括涉及鈾運用的研究項目，因此產生污染與放射性廢棄物。此刻瑞典有許多與核燃料循環相關的設施，有些仍在運作中，有些則已停止營運，此外也有許多以不同方式進行管理各類型核廢料。

瑞典目前有一座位於 Ranstad 的已除役鈾礦場、一座位於韋斯特羅斯（Västerås）的核燃料製造廠、一座位於斯德哥爾摩（Stockholm）永久停機的軍用研究核反應爐（R1）、一座位於阿傑斯塔（Ågesta）的永久停機小型商用反應爐（R3）、一座位於 Marviken 從未填裝燃料運作的軍用鈾生產反應爐（R4），以及 4 座分別位於巴賽貝克（Barsebäck）、林哈爾斯（Ringhals）、奧斯卡港（Oskarshamn）、福什馬克（Forsmark）的商用核電廠、共擁有 12 座反應爐，其中巴賽貝克核電廠內有 2 座反應爐永久停機，奧斯卡港核電廠 3 座反應爐中則有 2 個永久停機，林哈爾斯核電廠的 4 個反應爐中有 2 個則分別預計在 2019 年與 2020 年永

久停機。在福什馬克核電廠附近也有一座營運中貯存設施「瑞典最終貯存場」（SKB's Final Repository，SFR），用來存放短生命週期放射性廢棄物。在奧斯卡港也有一座營運中、建於地下 32 公尺岩層中的用過燃料棒中期貯存設施 CLAB。此外，在靠近尼雪平（Nyköping）的 Studsvik 也有一座營運中的測試與實驗中心。此處並未特別提及由研究計畫所產生的用過燃料棒與其他廢棄物。瑞典並沒有進行黃餅（yellow cake）轉化，也沒有進行鈾濃縮與核燃料棒再處理。然而，瑞典確實會將用過燃料棒送往英國的賽拉菲爾德（約 140 公噸）與法國的拉阿格（約 57 公噸）進行再處理。商用核反應爐的興建工程始於 1960 年代，有 6 座反應爐於 1970 年代開始運轉，到了 1985 年時，則多出 6 座反應爐投入運轉¹²⁸。

1980 年一場關於核能發電未來的諮詢性公投後，瑞典政府決定在 2010 年前逐步停用核能發電，但依然允許興建最高達 12 座的新反應爐¹²⁹。關於核電的未來仍持續辯論，且「2010 年非核」的目標一直保留到 1990 年代中期。直到 1999 年代中期，在一份新的跨黨派協議中，政府決定展開非核進程，但放棄 2010 年達成非核目標期限。1999 年停止運轉的巴賽貝克核電廠一號機是第一座關閉的反應爐，2005 年停止運轉的巴賽貝克核電廠二號機則是第二座關閉的反應爐。

瑞典核能爭議至今仍持續進行¹³⁰，2010 年 6 月的一場國會投票中，淘汰核電的法案以 174 票比 172 票的 2 票之差遭到封殺，同時允許興建新反應爐。2016 年 6 月，另一個關乎整體能源政策的跨黨派協議達成共識¹³¹，目前瑞典的能源政策目標是在 2040 年時達到百分百再生能源供電。然而，核反應爐營運商強調他們將會為 6 座反應爐申請延役，延長運轉期限至 2040 年代。

瑞典政府自從 1970 年代中期開始投注大量資源在各類核廢料的長期管理方案，尤其是處理用過燃料棒。以下內容關於用過燃料棒管理現況，以及現存與討論中的中低階核廢料設施的相關資訊。核能工業替長生命週期中低階廢棄物所規劃的設施（Final Repository for Long-lived Radioactive Waste，SFL），目前尚處於規劃程序的起始階段，瑞典核燃料和廢棄物管理公司預計在 2030 年提交 SFL 執照申請，此處尚不做討論。

用過燃料棒之管理

瑞典法規明文規定，核廢料生產者需負責核廢料管理，並承擔相關成本費用，即污染者付費原則（the polluter pays principle）。為了管理核廢料，瑞典的核電公司共同組成瑞典核燃料和廢棄物管理公司（Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company，瑞典語：Svensk Kärnbränslehantering AB，簡

稱 SKB）。這些核電公司在 SKB 中的持股比重分別是：Vattenfall AB 佔 36%，Forsmarks Kraftgrupp AB 佔 30%，OKG Aktiebolag 佔 22%，Sydkraft Nuclear Power AB 佔 12%¹³²。Vattenfall AB 則由瑞典政府百分百持股¹³³。

瑞典的〈公眾獲取資訊與秘密法案〉（Public Access to Information and Secrecy Act）是一部強力的資訊自由法案。社會大眾有各種充分建置的管道，可以提出要求並獲取由各級政府部門與政府機關所掌握的資訊。由於 SKB 是一間私營企業，因此這部法案並無法適用於核廢料的議題，結果便是資訊缺乏公開透明。

用過燃料棒目前的數量與預計數量

根據 SKB 統計，截至 2016 年為止，下列 12 個商用核反應爐（並非全數運轉中）共生產了 7,860 公噸的用過燃料棒，而預計將生產的用過燃料棒總數估計有 11,404 公噸（兩者皆以鈾含量來計算）¹³⁴。

圖十五 SKB 營運資料、電力生產以及燃料棒數量（根據已知營運計算而來¹³⁵）

開始運轉日期	熱容量 / 淨容量 MW	已發電量 (累積至 2016 年) TWh	(漏翻)	運轉規劃		總發電量 TWh	核燃料耗量 (漏翻)	
				規劃運轉 年期	運轉年限			
				Years				
F1 (BWR)	10/12/1980	2928/984	251	883	60.0	08/12/2040	434	1348
F2 (BWR)	07/07/1981	3253/1 120	245	864	60.0	05/07/2041	462	1418
F3 (BWR)	22/08/1985	3300/1 167	270	897	60.0	20/08/2045	536	1509
O1 (BWR)	06/02/1972	1375/473	81	367	45.4	30/06/2017	82	367
O2 (BWR)	15/12/1974	1800/638	154	537	41.1	31/12/2015	154	537
O3 (BWR)	15/08/1985	3900/1400	256	841	60.0	14/08/2045	568	1577
R1 (BWR)	01/01/1976	2540/881	197	720	44.5	14/06/2020	219	773
R2 (PWR)	01/05/1975	2500/807	210	630	44.2	13/07/2019	224	671
R3 (PWR)	09/09/1981	3135/1063	225	607	60.0	07/09/2041	421	1126
R4 (PWR)	21/11/1983	3300/1 118	217	672	60.0	20/11/2043	444	1235
B1 (BWR)	01/07/1975	1800/600	93	419		30/11/1999	93	419
B2 (BWR)	01/07/1977	1800/600	108	424		31/05/2005	108	424
沸水式	22696/7 863	1657	5951				2656	8372
壓水式	8935/2988	651	1909				1089	3032
總計	31631/10851	2308	7860				3746	11404

部分來自研究用反應爐的用過燃料棒包含在 KBS-3 之申請中，但並未包含於估算之公噸數量中，不過有包含於估算之桶數中。

資金與三年期研究發展計畫

SKB 於 2017 年時估計，直到所有國內核能設施關閉為止，處理所有來自核反應爐的核廢料的未來總成本約為 980 億瑞典克朗（約為 95 億歐元），其中用過燃料棒的處理成本約為 315.6 億瑞典克朗（約 30 億歐元）¹³⁶。用於未來核廢料管理與貯存上的經費，有一大部分來自於核能工業依法繳納給瑞典政府管理的核能廢棄物基金（Nuclear Waste Fund）¹³⁷。於 2017 年年底，該基金擁有的資金約為 672.36 億瑞典克朗（約 64.5 億歐元）¹³⁸。SKB 估計，從 1982 年到 2017 年年底，核能廢棄物基金的總支出約為 48 億瑞典克朗（約為 4.6 億歐元）¹³⁹，平均每年約支出 1.9 億瑞典克朗（約每年 1822 萬歐元）。

根據瑞典政府法令，此核能廢棄物基金的年度支出必須接受審查，該審查始於 1986 年、並針對核能工業所提交的涵蓋未來 4 年期間的 3 年期研究與發展報告（triannual research and development reports）¹⁴⁰。值得注意的是，雖然瑞典政府在至今為止的 12 次 3 年期年度審查中，已直接或間接地批准 KBS-3 技術可用於示範與規劃之用途，但瑞典政府也已明確地指出此技術本身尚未被許可¹⁴¹。同樣值得一提的是，負責審查 3 年期年度報告的政府機關、瑞典輻射安全管理局（Swedish Radiation Safety Authority, SSM），在每一次的審查後都建議瑞典政府接受該項技術，但同時也點出其缺陷。SSM 同時也是負責審查核能工業於 2011 年後興建設施申請案的主管機關，過去每一次的 3 年期年度審查報告都持續針對該設施進行發展規劃。該申請案同時也由土地與環境法院（Land and Environment Court, 瑞典語：Mark- och miljöödomstolen, 簡稱 MMD）進行審查，如下所述。

當前正在進行中的法院與管制機關審查

針對 SKB 所提出運用 KBS-3 技術（參見表格）的用過燃料棒地下管理系統建置申請，目前正在進行正式審核¹⁴²。以下是決策過程中不同階段和里程碑摘要。最終決定至少要到 2020 年才會達成，然而也可能花上更久的時間。假如瑞典政府許可此項申請案，也需要採取大範圍的規範。

KBS-3 技術、用過燃料棒管理系統、提案地點與主要不確定性

不論使用哪一種技術，目前全世界沒有任何一個營運中的設施，可以作為貯存由商用核反應爐所生產的用過燃料棒。為了處理用過燃料棒，世界各國的核能工業傾向使用深地質貯存（deep geological repository），而 KBS-3 技術即是其中一種變體¹⁴³。芬蘭的核能工業便採用了 KBS-3 技術（詳見芬蘭章節）。

此處所謂的「深」意指地表下數百公尺，「極深」則為地下數公里的深度，這便是替代「超深鑽孔技術」（deep borehole method）所提議的深度。自從 KBS-3 技術首次採用以來，瑞典社會持續辯論 KBS-3 與替代方案相比的合適性。須進一步討論的其他替代方案包括乾式貯存於核電廠內的高安全性設施中（如強化廠內貯存設施，Hardened On-Site Storage, HOSS¹⁴⁴），或是集中貯存於同一地點（如乾式岩層處置，Dry Rock Deposit, DRD¹⁴⁵）以及超深鑽井之中。滾動式管理（Rolling stewardship）適用於任何技法，但就監控需求而言，超深鑽井方式的監控需求相當小，乾式貯存方式的監控需求則相當高。

KBS：意指 1976 年的 KärnbränsleSäkerhet 計畫，即為「核燃料安全」計畫，由瑞典核燃料供應公司（Swedish Nuclear Fuel Supply Co.，瑞典文 Svensk kärnbränsleförsörjning AB，SKBF）所規劃。瑞典核燃料公司現為瑞典核燃料與廢棄物管理公司（Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.，瑞典文 Svensk Kärnbränslehantering AB，SKB）。

- KBS-1 (1977)：處理已經過再處理的核燃料棒，由於圍繞著再處理的種種爭議而迅速遭到棄置。
- KBS-2 (1979)：首次提及核燃料直接處置。
- KBS-3 (1983)¹⁴⁶：第二次提及核燃料直接處置、且更為細節，將核廢料貯存於地底數百公尺之下，以銅製廢料罐、澎潤土以及岩床等三層屏障包圍。銅製廢料罐與澎潤土兩者相互依賴，因此其中一者須良好運作，否則另一者將不會起作用。

KBS-3 技術與用過燃料棒管理系統包括：

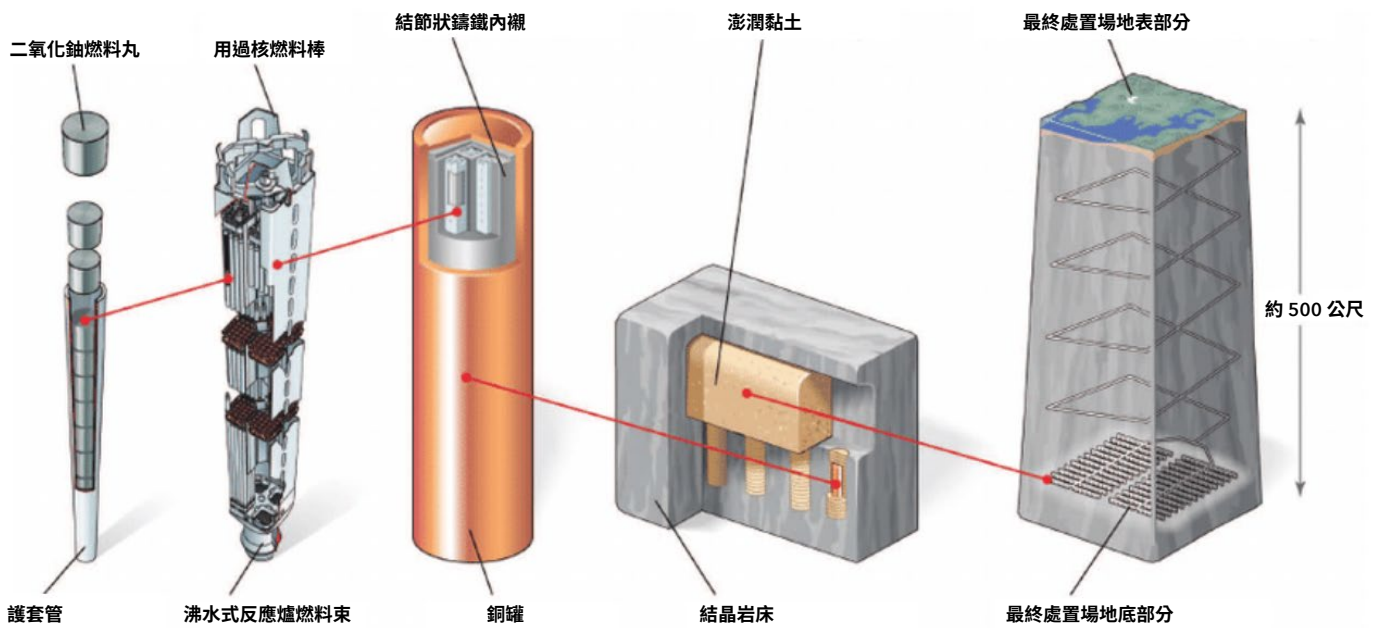
- 在核電廠內貯存於池水中約一年。
- 在位於奧斯卡港的地底 Clab 設施中期貯存約 30 年。Clab 需要依賴電力持續進行冷卻，而地方政府奧斯卡港市（Oskarshamn municipality）希望儘快除役此設施。Clab 的容量可能不足以容納用過燃料棒的預估數量。因此，假如 Clab 容量不足而 KBS-3 貯存場又尚無法進行貯存，則 SKB 也已開始調查在該段空窗期中使用暫時乾式貯存的可能性。

- 用來延遲放射性同位素釋出的多層屏障系統，其中包括三個部分，分別是花崗岩岩床、澎潤土緩衝區，以及封裝在帶有鑄鐵內襯（cast iron insert）的銅製廢料桶中。關於這些屏障設計，仍存有某些疑慮，如下所述。
- 一座核廢料封裝廠預計興建於 Clab 廠旁邊，兩者合稱為「Clink」。
- 預計將有 5,700 的核廢料罐¹⁴⁷。
- 廢料罐的大小為外部直徑 1.05 公尺，長 4.85 公尺，銅壁厚度 4.9 公分，平均最高重量約為 2.5 公噸¹⁴⁸。
- 將核廢料罐放置在位於地下 470 公尺岩床上深 8 公尺深、寬 2 公尺的垂直圓洞中，提議地點位於福什馬克，距離福什馬克核電廠約一公里遠。此深度的土壤可能在下次冰河期來臨時會成為永久凍土（permafrost）¹⁴⁹。細菌對於位於此深度的核廢料罐的影響也是顧慮之一，同時，基於地質學與地球物理學上的條件如地震的風險，該地點可能也不適合。除此之外，太過靠近福什馬克核電廠也是風險之一。鄰近海岸棄置核廢料罐也增加了波羅的海受污染風險，根據波羅的海海洋環境保護委員會（Baltic Marine Environment Protection Commission，HELCOM）指出，波羅的海是全世界遭受放射性污染最嚴重的海域之一¹⁵⁰。

核廢料罐將以澎潤黏土包覆，這層黏土緩衝區有可能會受到多種損壞，特別是由於暴露在水份、熱能與空氣之下。舉例而言，水份能使黏土膨脹以保護銅製廢料罐，然而福什馬克的岩床相對較為乾燥，要使其膨漲可能需費時數千年。在此漫長的時間中，由核廢料罐所釋放出來的熱能將可能導致黏土受熱乾燥，且永遠無法如其所需地膨漲。

核能工業將地底通道填滿至接近地表，將其密封並棄置，上述過程完全沒有任何監控機制。長期而言，將存在著意圖性或非意圖性闖入的風險，而針對是否應設置監控系統、如何在漫長時間中保存關於此廠區之地點與貯存物質危險性的相關資訊，也是爭議之一。

圖十六 KBS-3 技術圖解，將用過燃料棒裝封於銅製廢料罐之中，並以一層澎潤黏土緩衝層加以包圍，放置於地底 500 公尺處岩床中，位於地道系統中的棄置井內¹⁵¹。



銅腐蝕

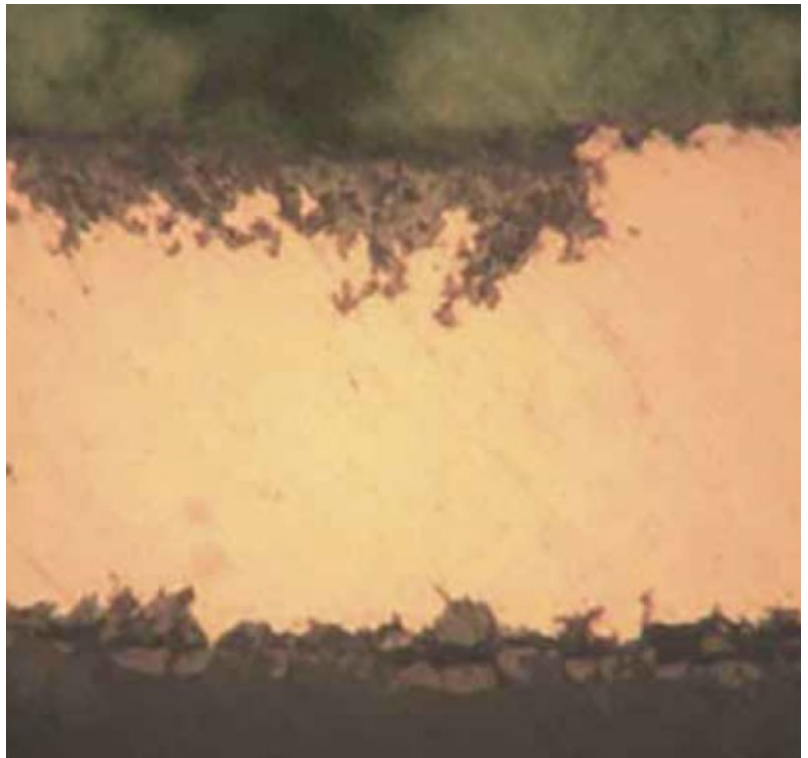
KBS-3 技術的安全性是建立在許多原則性假設之上，其中一個假設是「廢料貯藏罐所使用的材料，『銅』的腐蝕速度將非常緩慢，因而可以確保在核廢料仍對生命體有害的期間中，放射性同位素都不會外洩」。在 1970 年代，銅具有出色的抗蝕能力，因此被選為製作廢料罐的材料¹⁵²。然而，在某些環境之下銅確實是抗腐蝕的，這一點已經由含有銅的地層得到證實，但在任何人造系統中皆會有水分與空氣的存在，因此不可能複製這種不會讓銅被腐蝕的環境條件。如此一來，關鍵便是銅腐蝕的速度，而非腐蝕是否會發生。對此，瑞典輻射安全管理局進行細部評估，並持續檢視相關疑慮¹⁵³。許多因素都會影響銅腐蝕的速度，其中一個主要因素是澎潤土緩衝層是否能夠成功將水份、空氣與銅料隔離，進而阻止隨之而來的化學反應過程，而此過程又如何受到熱能、輻射、以及有氧或無氣狀態所影響¹⁵⁴。瑞典土地與環境法院指出了五大主要疑慮，詳見後述。

由於導致腐蝕的因素十分複雜，因此無法確定銅與鐵是否是適合的材質。核能工業之外的獨立研究發現，由於銅料腐蝕導致放射性物質外洩可能在 100 年之後便發生，而在 1000 年之後大多數的核廢料罐可能都會外洩¹⁵⁵。除此之外，也尚未針對此貯存系統「以廢料桶貯存用過燃料棒」的情境進行模擬測試¹⁵⁶。

圖十七 銅暴露於室溫蒸餾水之中達 15 年後的狀況。腐蝕所產生的氫氣可以從左邊燒杯中逸散，但無法自右邊燒杯中逸散。兩個燒杯一開始的水量都是相同的。



圖十八 暴露於蒸餾水中 15 年後，左邊燒瓶中厚 100 微米的金屬銅片上，一處綠色區域的光學截面，局部腐蝕清晰可見。



核能家族

當前的法律審查程序於 2002 年開始，當年 SKB 啟動申請執照所需的諮詢程序（consultation process）。許多參與此一法律審查程序的人員，都是自核能工業於 1970 年代中期首先提出 KBS 概念以來，便長期關注用過燃料棒管理議題的資深人員。從 2002 年開始，各方利害關係人的互動日益密集。一般而言，過往每年都有十數場的會議可以看到這些利害關係人齊聚一堂，在此之前社會大眾與環境非政府組織往往被排除在外。因此，如今已經有更多機會可以讓所有的利害關係人產生互動。這也導致在 2000 年代早期這些會議的固定班底被稱為「核能家族」。

會議組織者通常會特別努力吸引各方利害關係人參加，核子廢棄物議會（Nuclear Waste Council）是一個由政府所指派的委員會，通常每年至少會召開一次，並邀請除了 SKB 以外的利害關係組織各自派出代表參加圓桌會議，討論當前核廢議題的優先事項。

決策過程以及里程碑日期

1. 公眾諮詢

此階段為 2002 年至 2014 年。從 2005 年開始，核能廢棄物基金開始提供補助給環境議題非政府組織，使其可以參與公眾諮詢程序。自從 2001 年開始，參與潛在場址調查研究的各個地方政府也開始接收來自核能廢棄物基金的補助。在 2007 年時，負責分析與評估各種政府活動與政府資助活動的政府機關「瑞典公共管理局」

（Swedish Agency for Public Management，Statskontoret）提出一份評估報告，評估政府提供給非政府組織的支持，並且建議政府持續對非政府組織提供資金補助¹⁵⁷。資助至今仍持

續進行，不過從 2017 年開始改為由政府整體預算支出，而非由核能廢棄物基金支出。

2. 正式提出申請

此階段之日期為 2011 年 3 月 16 日。根據法律要求，提出申請需依循 2 個法律領域，同時也必須遵守各地方政府的法律。其中一個法律領域是關注整體環境衝擊、健康衝擊的《環境法典》（Environmental Code），由土地與環境法院（Land and Environment Court，瑞典文 Mark- och miljödomstolen，簡稱 MMD）負責。另外一個法律領域是《核子作業法》（Nuclear Activities Act），由瑞典輻射安全管理局（Swedish Radiation Safety Authority，瑞典文 Strålsäkerhetsmyndigheten，簡稱 SSM）負責，並聚焦在輻射安全議題上。排除後續的補充性資訊，初始申請書共有 9000 頁，其中約有 2000 頁重複之處。

3. 申請完整性評估

在此階段，瑞典輻射安全管理局以及環境與土地法院都舉辦多場公聽會，邀請社會大眾參與並針對初始申請文件的完整性提供意見，而後再針對 SKB 的回應給予意見，包括由瑞典輻射安全管理局、環境與土地法院所要求，或著是 SKB 自己提供的補充性資訊在內。

4. 將申請公開予公眾檢視

瑞典輻射安全管理局、環境與土地法院於 2016 年 1 月 29 日公開，隨後的檢視包含進一步的公眾討論。

5. 土地與環境法案所主持之正式、法定、公眾與口頭聽證會

在 2017 年 9 月與 10 月間舉辦為期 5 周的聽證會，其中 3 周位於斯德哥爾摩，東哈爾馬市（Östhammar）與奧斯卡港市各一周，同時也針對此兩個地點進行現場勘查。在這些聽證會之中，提交意見的獨立科學家們認為不應該核可該項申請，因為他們在各自的專業領域中觀察到該計畫存在著不確定性因素。所有與會的環境 NGO 團體與社會大眾也都主張不應批准該項申請，各自主張原因相當廣泛，其中也包括道德與倫理的面向。許多獨立科學家、環境 NGO 代表都是從 1970 年代開始便長期關注核廢料議題的資深人士。奧斯卡港市對該項計畫表示贊同，而東哈爾馬市則拒絕採取立場。

6. 瑞典輻射安全管理局、環境與土地法院提交給政府的最後意見陳述

於 2018 年 1 月 23 日進行，這些意見陳述視為是給政府的建議，將無法在法院系統中上訴。同一天，根據路透社報導，環境與能源部長 Karolina Skog 強調在 2018 年期間將不會做出任何決定¹⁵⁸，這是可預期的，因為該年度瑞典國會選舉的日期訂為 2018 年 9 月 9 日。東哈爾馬市原本規劃在 2018 年 3 月 4 日舉行一場諮詢性公投，但在環境與土地法院於 2018 年 1 月 23 日宣布「不可行」的僅僅幾個小時之後，東哈爾馬市便取消該場諮詢性公投，並表示他們將會在未來重新檢討舉辦公投的必要性。瑞典輻射安全管理局自從 2008 年創立來，便持續檢視核能工業的核廢料計畫，也從該機構的前身繼承相關的職責。對於環境與土地法院而言，該次的審查創下由法院進行該類審查的全球首例。

7. 第一次政府審核

自 2018 年 1 月 23 日至今仍持續進行。政府指派一個工作團隊，要求 SKB 於 2019 年 4 月 30 日前針對特定資訊提供意見。與這次政府審核同時進行的，是政府對於《核子作業法》的特別檢視，並預計最晚將在 2019 年 4 月完成。

8. 政府要求相關地方政府針對許可與否做出決定

假如政府並未在一開始就拒絕 SKB 的申請，那麼在政府做出「許可決定」（decision on permissibility）之前，政府必須先詢問奧斯卡港市跟東哈爾馬市的地方政府是否願意許可在當地進行相關作業。假如地方政府拒絕，但政府希望批准許可，則政府可以在特定條件下依然給予同意，換句話說，即是強迫當地政府接受該設施。雖然瑞典政府至今尚未針對此問題與兩個地方政府進行溝通，奧斯卡港市已在 2018 年 6 月 11 日向政府表示同意讓 Clab 中期貯存設施繼續運作，也同意 Clink 核廢料封裝廠的興建工程。東哈爾馬市地方政府則表示他們將會等瑞典政府主動洽詢，並且可能將會在做出決定前先舉行諮詢性的地方公投。

9. 最終政府審核與決策

在此階段，瑞典政府有權決定是否需要舉行一場完整的國會辯論。前任瑞典首相以及部分議員已經表示他們支持完整國會辯論。假如政府核可該項計畫，則將此一決策上訴至最高行政法院也是有可能的。環境律師已經指出，在缺乏足夠事證的情況下，政府的核可將會與《環境法典》的規範相違背，例如銅製廢料罐腐蝕風險的不確定性¹⁵⁹。

10. 假如政府批准後的相關施行規範

假使政府核准該項申請，則此一核能產業申請案便會回到瑞典輻射安全管理局以及環境與土地法院的手中，他們必須根據各自的法律規範訂定施行條件，而核能工業則有義務要遵從這些施行條件。理論上，施行條件可以嚴格到讓核能工業無法遵從。由環境與土地法院所制定的施行條件可以上訴到更高層級的法院。核能工業可以提出申請，使其可以在上訴的過程中繼續進行施工作業且不被中斷。一旦作業程序開始，郡行政局（County Administrative Board, Länsstyrelsen）以及環境保護署（Environmental Protection Agency, Naturvårdsverket）都有責任進行監控，確保作業遵從《環境法典》。瑞典輻射安全管理局則監督其有確實遵守《核子作業法》。

不確定性之下的決策

「不確定性之下的決策」是由瑞典核廢料委員會（Swedish Council for Nuclear Waste）於 2018 年所出版的《核能廢棄物最新研究進展年度報告》（Nuclear Waste State-of-the-Art Report）的標題。瑞典核廢料委員會是由政府所指派的專家委員會，任務是「釐清與核廢料、核能設施除役以及拆除相關之問題，並提供政府相關建議¹⁶⁰」。不論是這份報告用 118 頁之篇幅所處理的議題或是其標題，都選擇得恰到好處，因為在報告撰寫的同時，KBS 計畫已經開展超過 40 年了，幾乎所有的利害關係人都有一個普遍的共識，即「有太多不確定性了」。抱持這種共同意見的利害關係人，遍及當前審核中的申請案持贊同與反對意見的人士，例如核能工業者、各級政府、獨立研究人員以及環境 NGO 等。然而，在各項不確定性牽涉的嚴重程度以及解決方案上，不同團體與個人則有各自不同且相當多元的意見，看起來幾乎涵括

所有可能的組合。若是將土地與環境法院的審核結果拿來跟輻射安全管理局的審核結果相比，這一點便更為明顯。這兩個機構各自的審核結果以及簡單的比較將陳述如下。

瑞典輻射安全管理局之審核結果

在 2018 年 1 月 23 日呈給政府的意見陳述中，瑞典輻射安全管理局表示，若是滿足特定條件，他們便同意 SKB 的申請案。底下為由該份意見陳述摘出的三段內文：

瑞典輻射安全管理局所建議之先決條件

瑞典輻射安全管理局建議，對於核准該執照申請應該遵循以下的先決條件，即 SKB 需確保其「預備階段初步安全分析報告」（preparatory preliminary safety analysis reports, F-PSARs）以及設施管理系統完成進一步的發展，並確實遵從《核子作業法》中所確立的逐步許可程序（step-wise permitting process）¹⁶¹。

SKB 必須在瑞典輻射安全管理局完成「興建前安全分析報告」（Pre-construction Safety Analysis Report, PSAR）的審查並核可之後，才可以開始設施之興建工程¹⁶²。

在政府根據《核子作業法》做出許可決定之前，SKB 針對核廢料封裝廠以及最終貯存場所準備的「初步安全分析報告」（preliminary safety reports），主要是用來證明其申請中所選擇的場址與技術具有正當性。在「政府做出許可決定」到「瑞典輻射安全管理局允許設施啟用營運」之間的逐步審查階段中，瑞典輻射安全管理局為了檢視 SKB 因應許可審查所提交的相關文件，也會將特定的細節補充性資訊納入考慮¹⁶³。

特別是在銅腐蝕的問題上，輻射安全管理局寫到此問題將可能在未來得到解決。以下摘錄在此一主題上的三段意見：

根據輻射安全管理局所述，利用 50 毫米厚的銅製外包裝，有可能達到合格抗腐蝕屏障的目標¹⁶⁴。

也需要進行研發階段以證明用來製造、封存與測試此類貯存罐所需要的合適技術，以確保其可以符合相關的必要規範¹⁶⁵。

在核廢料封裝的腐蝕速度上，輻射安全管理局尚未訂定特定的規範¹⁶⁶。

環境與土地法院審查：世界唯一一件由法院做出的審查

瑞典法院針對核能工業所提出的「建立用過燃料棒管理系統」的申請案所做出的審查，是全世界第一起由法院針對用過燃料棒管理系統之議題做出的審查¹⁶⁷。此一審查的法源依據是《環境法典》，此法於 1999 年時生效，位階高於眾多法律之上¹⁶⁸。落實《環境法典》的機構是一個特殊的法院部門，即為「土地與環境法院」¹⁶⁹。土地與環境法院的審查是正式的法院程序，其審查結果的形式一方面可能為「判決」（judgement），在某些特殊狀況下，也可能表現為提供給政府關於許可性的「意見陳述」（statement）。在這些特殊狀況下，假如政府決定做出許可，則該案便會回到土地與環境法院的手上，以進一步檢視許可的細節與適用條件。根據《環境法典》第 17 章第一節第一款，「建立用過核燃料棒管理系統」便屬於此特殊例外狀況之一。因此，做出最終決定的責任是在政府身上。土地與環境法院根據《環境法典》以及瑞典輻射安全管理局根據《核子作業法》所分別做出的意見陳述將被視為是給政府的建議，因此無法在法院系統中進行上訴。

土地與環境法院通常是個 4 人小組，由 1 位

法官、1 位技術顧問以及 2 位擁有專業技術能力的特別成員所組成。在例外狀況中，為了擴大此一法庭的專業領域，可能會再增加 2 位成員。此次「建立用過燃料棒管理系統」的案例中，總共由最高可指派人數的 6 位成員組成，包含 2 位法官，2 位法庭技術顧問，2 位特別成員。

法院審查結果：除非特定條件達成，否則不予許可

土地與環境法院在 2018 年 1 月 23 日提供給政府的意見陳述之新聞稿中表示：

「根據現有的安全評估，法院無法判定最終貯存場在長期而言是安全的。」¹⁷⁰

整體而言，土地與環境法院的審查結果是主張不應許可核能工業之申請，但像是用來生產與裝填銅製廢料桶的核廢料封裝廠，外界認為是被土地與環境法院許可的。整體審查結果中的陳述方式，並非是由於某些不足而禁止該項作業，而是主張若解決特定不確定性因素，則此項作業可以被允許。在 2018 年 1 月 23 日意見陳述的第一頁，以及在其獨立發表的摘要的第一頁中，法院如此寫到：

該項處置作業可被許可，前提是：

1. 瑞典核燃料與廢棄物管理公司須提供相關文件證明，即便考量到下列可能影響貯存罐保存能力的不確定性因素，該最終貯存設施長期而言依然能夠符合《環境法典》之規範：

- 不含氧或無氧水體（oxygen-free water）中化學反應所導致的腐蝕
- 硫化物以及蒸氣效應（sauna effect）所造成的孔蝕（pit corrosion）
- 硫化物反應以及蒸氣效應所導致的應力腐蝕（stress corrosion）

- 放射性輻射所導致的孔蝕、應力腐蝕以及氫脆化 (hydrogen embrittlement)

2. 該最終貯存場根據《環境法典》的長期責任歸屬確實得到釐清¹⁷¹。

以下是更多摘自法院意見陳述中，關於各種不確定性因素之部分：

長期責任歸屬

根據 SKB 的申請文件，他們的責任將在設施密封的數十年之後告一段落。然而法院清楚地反對核能工業此一「棄置」(abandonment) 做法。土地與環境法院認為，核廢料的最終貯存是一項即使在最終貯存場密封之後也將持續進行的活動。根據《環境法典》，在另行通知之前，被許可人 (licensee) 皆應對該項活動負有責任，換言之，責任沒有時效限制。東哈爾馬市反對為最終貯存場承擔最終責任，當務之急是釐清誰需要承擔《環境法典》所規範的長期責任¹⁷²。

銅腐蝕之風險

調查研究指出，長期而言究竟存在著多少腐蝕形式以及其他物理與化學過程可能損及貯藏罐收納核廢料的能力，在這一點上仍存有不確定性或是風險。整體而言，關於貯藏罐的不確定性相當巨大，並且也尚未完整地在 SKB 的安全性分析報告結論中提及¹⁷³。

輻射安全

SKB 跟瑞典輻射安全管理局都曾經表示意見，認為《環境法典》所要求的執照許可中，不應放入與輻射安全條件相關的規定。法院認

為，至今為止提交的證據無法作為對此議題進行評估的充份基礎¹⁷⁴。

整體風險

「……需要有一份重新計算過的整體安全評估的結果……」¹⁷⁵

一貯存、輻射安全以及地質條件的整體不確定性

土地與環境法院裁定，在貯存場的防護能力上仍有許多不確定性尚未釐清。至今為止針對輻射安全議題的調查顯示，關於該項作業的可能影響，仍缺乏足夠肯定的預測，故而無法對其制定出任何最終許可條件 (to permit the formulation of any final conditions)。因此可能有需要根據《環境法典》給予一段試用評估期，然而也必須進一步的調查與評估。法院強調，以福什馬克為例，關於岩床地層的研究仍未完整，因此可能確實有試用評估期之需求，以便確立與安全距離 (respect distances) 及預防措施相關的許可條件¹⁷⁶。

一非意圖性與意圖性侵入

- 關於長期知識保留 (knowledge retention) 的問題，最晚應該在貯存場密封 70 年後得到解決¹⁷⁷。
- 比較由瑞典輻射安全管理局、土地與環境法院遞交給政府的意見陳述。
- 瑞典輻射管理局做出滿足特定條件下的「許可」，土地與環境法院則表示除非特定條件滿足否則「不許可」。根據土地與環境法院所繼承而來的法傳統，假如相關事件在未來才最終走向合乎法律規定 (compliance)，那麼他們將不被允許做出許可決定。
- 土地與環境法院在此議題上表示，在評估最終貯存場的長期安全性時，不應該考慮任何在許可決定被做出之後才進行的研究與技術¹⁷⁸。

• 雖然瑞典輻射安全管理局以及土地與環境法院採用了不同的陳述方式，然而這對於 SKB 在某些關鍵領域上所需採取的措施結果是相同的。輻射安全管理局以及土地與環境法院都認為，急切需要提升整體安全性評估以及改善銅腐蝕的問題。對這兩個機關而言，圍繞在銅腐蝕牽涉相當巨大的不確定性，在解決這些不確定因素之前，該項計畫甚至不應該付諸實行。更重要的是，輻射安全管理局以及土地與環境法院都建議政府，現階段不應同意 SKB 著手興建他們申請建置的系統任何部分。

一 低階與中階核廢料

目前瑞典有一座營運中的低階與中階核廢料貯存設施，由瑞典核能工業擁有及營運。此座設施稱為 SFR¹⁷⁹，坐落於福什馬克的東哈爾馬市，位於斯德哥爾摩北方 145 公里處，於 1988 年開始營運。這個設施建於波羅的海下方 50 到 140 公尺的岩床上，並由 4 個長 160 公尺的洞穴以及 1 個擁有 50 公尺深貯存筒倉的房間所組成；該設施透過 2 條相互平行且長達 1 公里的隧道與地表相連接。SFR 可容納 6 萬 3000 立方公尺的核廢料，目前已經使用 60% 的貯存空間。此設施持續地有水滲入，這些水同時持續地被抽出。密封此一設施將導致抽水機具停止運作，進而導致設施淹水，此設施最主要的不確定性因素之一便是波羅的海因為廠區淹水而遭受放射性污染的程度。

有一份提案建議在 SFR 旁邊新設一座低階與中階核廢料貯存設施，目前正處於法律審核階段，新建設施預計比正在運行的 SFR 要大上一倍，而且也預計建於波羅的海底下 120 到 140 公尺處。此座新設施必須經歷與用過燃料棒管理系統一樣的決策過程。SKB 評估，假如他們取得所有核准，興建工程可以在 2020 年開始，並耗時約 6 年的時間興建¹⁸⁰。

芬蘭：現況簡介

目前芬蘭有 2 座核能電廠，分別是奧爾基洛托核電廠（Olkiluoto）以及洛維薩核電廠（Loviisa），洛維薩目前有 2 座運轉中的反應爐，奧爾基洛托核電廠則有 2 座運轉中的反應爐，另有 1 座正在興建中¹⁸¹。奧爾基洛托核電廠 3 號機面臨嚴峻的財政困境，甚至連能否完工看起來都是未知數¹⁸²，還有一座 4 號機則是已經得到芬蘭政府的興建許可，但工程尚未開始。根據芬蘭核能後端營運專責機構 Posiva 公司所述，截至 2017 年年底為止，奧爾基洛托核電廠以及洛維薩核電廠共生產了 2,200 公噸的用過燃料棒¹⁸³。

2011 年時，Posiva 公司向芬蘭輻射與核子安全局（Radiation and Nuclear Safety Authority, STUK）提交申請書，申請興建一座使用 KBS-3 技術的設施，並且在 2015 年得到芬蘭輻射與核子安全局以及芬蘭政府的許可¹⁸⁴，此申請案沒有經過法院審查。這座稱為「安克羅」（Onkalo）的設施可以容納 6,500 公噸的用過燃料棒，並且可以繼續擴充。目前該設施正處於實驗性處置階段，豎井以及隧道已經挖掘到表定深度的 470 公尺，核廢料封裝廠則尚未興建¹⁸⁵。此設施原本預計於 2020 年完工¹⁸⁶，但目前表定完工時間已經延宕到 2023 年¹⁸⁷。

與瑞典相比，芬蘭的設施興建速度相對較快，原因在於 2000 年時芬蘭政府原則上決定使用 KBS-3 技術，並且選擇了安克羅作為場址所在，緊鄰奧爾基洛托核電廠。

在瑞典章節中曾經提及的 KBS-3 設施的技術性問題，也適用在芬蘭已建設的設施上。同時，芬蘭正仰賴瑞典評估銅腐蝕問題，而非自己進行研究。芬蘭與瑞典的地質條件大致相似，兩地設施的深度也相同，因此前文提及的瑞典研究指出的，設施深度不足以在下次冰河期來臨時避免周遭土壤成為永凍土的問題，同樣地也適用於芬蘭¹⁸⁸。在成本問題上，芬蘭經濟事務和就業部（Finnish Ministry of Employment and the Economy）以及能源部於 2015 年時估計，直到芬蘭所有的核能設施關閉為止，處理所有由核反應爐生產的核廢料所需的未來總花費約為 65 億歐元，其中花費在用過燃料棒上的成本約為 35 億歐元¹⁸⁹。

備註

KBS-3：瑞典核能工業所規劃的核能安全計畫（KärnbränsleSäkerhet 計畫）第三代版本。

MMD：土地與環境法院（Mark-och miljödomstolen. Land and Environment Court）

SKB：瑞典核燃料與廢棄物管理公司（Svensk Kärnbränslehantering AB, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.）

SSM：瑞典輻射安全管理局（Strålsäkerhetsmyndigheten, Swedish Radiation Safety Authority），負責主掌輻射相關事務的管制機關。

如需更多瑞典環境 NGO 的資訊，請參考：

瑞典核廢料審查非政府組織辦公室（The Swedish NGO Office for Nuclear Waste Review，MKG）
www.mkg.se/en

瑞典環境運動之核廢料秘書處（The Swedish Environmental Movement's Nuclear Waste Secretariat，Milkas）
www.milkas.se and www.nonuclear.se/en/kbs3

6

英國

UNITED KINGDOM

2018年1月公布兩份新的諮詢文件¹⁹⁰，顯示英國政府在過去42年內第16次試著尋找願意在當地設置放射性廢棄物處置場的社區。從1970年代開始到1990年代，試圖尋找核廢料處置場的場址一無所獲，英國政府決定嘗試一個建立在「志願主義與夥伴關係」(voluntarism and partnership)的新路徑。過往的經驗已經替英國政府與核能工業上了一課，他們已了解無法在缺乏地方同意的情況下強硬地興建核廢料設施，但無論是政府或是核能工業依然堅持深地質處置是唯一的出路¹⁹¹。

英國政府在2003年時新設一個獨立委員會「放射性核廢料管理委員會」(Committee on Radioactive Waste Management, CoRWM)，負責檢視放射性廢棄物管理的各種選項並做出建議。三年之後，該委員會提出一系列建議。雖然該委員會建議深地質處置是用來處理目前既存及表定待產核廢料的最佳解方，但它所提出的許多警告與其他重要建議卻遭到政府忽視。舉例而言，該委員會表示「**圍繞著實施深地質處置的眾多不確定性…促使放射性核廢料管理委員會建議，應持續致力於核廢料的安全妥適管理**」¹⁹²。

放射性核廢料管理委員會的前成員、Andy Blowers教授解釋，「**深層處置或許是最終的長期解決方案，但如何證明安全案例、尋找適合地質條件以及有意願的地方社區，這都是艱鉅的挑戰，並可能得花上相當長的時間。對於苦苦找尋處置場址，導致我們將注意力從替可預見未來尋找切實解決方案一途轉移，也就是確保無可迴避且必須處理的核廢料遺毒能夠被安全與妥適地管理。**」¹⁹³

2013年1月30日，位於英格蘭北部，賽拉菲爾德(Sellafield)核燃料再處理設施以及湖區國家公園(Lake District National Park)所在地的坎布里亞(Cumbria)地方議會，否決政府在當地進行地底放射性廢棄物處置場前期作業的計畫。坎布里亞郡以及其西部的阿勒代爾(Allerdale)與科普蘭(Copeland)，是全英國目前僅存的3個地方議會，仍在參與這個造價120億英鎊的核廢料處置設施可行性研究。因此地方議會的否決導致英國政府再一次面臨無法處理現存核廢料的窘境，更別提若新建反應爐在未來可能生產的核廢料¹⁹⁴。

時間回到2008年，英國政府嘗試第5次尋找核廢料地下處置場址，各地社區都收到詢問當地是否可能接受日後將成為「深地質處置場」的設施。阿勒代爾市議會、科普蘭市議會以及坎布里亞郡議會是僅有的3個自願且願意討論在西坎布里亞地區進行選址可能性的地方政府。「西坎布里亞放射性廢棄物管理合夥計畫」(West Cumbria Managing Radioactive Waste Safely Partnership)是由上述3個地方議會所設立，以「**確保廣泛的社區利益都可以參與討論過程中**」¹⁹⁵。

長達3年多的時間，此合夥計畫大約每6個禮拜開會，檢視西坎布里亞地區參與高階放射性廢棄物貯存場選址過程中所可能遭遇的各種議題。2012年8月16日，該合夥計畫發布最終報告¹⁹⁶。除了由英國地質調查局(British Geological Survey, BGS)所排除的地區之外，坎布里亞郡之中沒有任何地點被排除，但有地質學家指認出2個高度敏感且應該被進一步調查的區域，分別是位於西南湖區的埃斯克代爾(Eskdale)以及位於北湖區的錫勒斯(Silloth)¹⁹⁷。

在許多場於坎布里亞舉行的會議中，愛丁堡大學的 Stuart Haszeldine 教授¹⁹⁸ 以及格拉斯哥大學榮譽教授 David Smythe 都解釋到，早已有相當充分的資訊可以將位於阿勒代爾與科普蘭的某些地點給排除在外。David Smythe 更表示他已經證實埃斯克代爾以及錫勒斯的岩群都不適合設置¹⁹⁹。

有趣的是，西坎布里亞放射性廢棄物管理合夥計畫的主席 Tim Knowles 早已不再支持於坎布里亞郡設置核廢料深地質處置場的想法，他認為坎布里亞郡的地質條件並不適合，而英國其他地方有比坎布里亞更合適的地區，並建議近地表中期貯存或許會是較好的選項，且可能可以選擇在賽拉菲爾德廠區下進行。

近地表中期貯存與地質處置設施的主要差異在於：相較於深層的永久處置設施，這些設施的存放是可取回的 (retrievable)，它們一般而言位於地表下 30 公尺處，生命週期約 100 年到 200 年，因此地質條件的重要性相較深地質處置設施低了許多²⁰⁰。

賽拉菲爾德 – 無法迴避的負面資產

賽拉菲爾德同樣位於坎布里亞郡，是英國 2 座營運中核廢料再處理廠的所在地。在 2012 年時一份英國國家審計局 (National Audit Office, NAO) 的報告批評，由於該處放射性廢棄物貯存設施日益惡化的狀況，拉菲爾德再處理廠「對人民與環境帶來巨大的風險」，並要求即刻改善該廠區主要項目的管理狀態²⁰¹。這促使英國下議會公共帳目委員會 (House of Commons Public Accounts Committee, PAC) 主席 Margaret Hodge 宣布賽拉菲爾德「帶來不可容忍的風險」²⁰²；2013 年 2 月，公共帳目委員會發布一份報告，描述賽拉菲爾德為「堆積成山的危險廢棄物，且大多存放在陳舊過時的核能設施之中」²⁰³。

國家審計局近期詳列賽拉菲爾德核電廠內高度危險的鈾貯存罐處於不穩定狀況，據稱是「比預期中腐壞得更為快速」²⁰⁴。一如預期，許多人認為當務之急應該是「確保無可迴避且必須處理的核廢料能夠被安全與穩當地管理」。

舉例而言，坎布里亞郡議會便要求當局清楚地說明，若未能找到適合的處置場址，則目前大多貯存於賽拉菲爾德的高階核廢料將如何被安全保存？議會指出，「目前沒有任何細節討論，假如在籌備深地質處置設施所需的 20 年內無法找到任何自願性場址，會發生什麼事？在政府估計將耗費 15 年到 20 年的選址期間，在核廢料安全貯存一事上擁有方案 B 將是至關重要的。這些核廢料目前還滯留原處，在這段間隔時間中我們需要安全的地表或近地表貯存設施，且其品質不得低於標準」²⁰⁵。

40 年的選址以失敗告終

英國自從民營核能發電計畫開始以來，至今已經超過 60 年，此刻仍然在替國內的高放射性廢棄物尋找長期解決方案。尋找地底處置設施興建地點的嘗試開始於距今將近 40 年前的 1976 年，當時選出 8 個潛在場址，這在當時引發社會大眾對於核廢料處置的激烈反彈，逼迫政府退讓並且於 1981 年放棄該項計畫。

在嘗試尋找更多處置地點之後，由當時的廢棄物處理機構 Nirex 所推動的第 4 次嘗試，是在賽拉菲爾德建造一座「岩體屬性設施」(Rock-Characterisation Facility)。在 1995 年年底舉行長達 5 個月的公眾諮詢，並於 1996 年 2 月 1 日結束。在 1997 年 3 月 17 日英國大選前夕，當時的環境事務大臣 John Gummer 駁回了 Nirex 的申請計畫。因此，布萊爾 (Anthony Blair) 政府在 2003 年 2 月所發布的第一份能源白皮書相當明智地表示，政府將不會再提出新建核能電廠的計畫，因為「有核廢料這個的重要問題尚待解決」²⁰⁶。

新的反應爐計畫

戈登·布朗 (Gordon Brown) 政府在 2018 年 1 月所發布的另外一份能源白皮書²⁰⁷，則表示在核廢料議題上已取得充足的進展，且足以支持能源政策改走向新建核能電廠的方向，然而該份白皮書卻忽視來自放射性核廢料管理委員會的另一個重要建議。

放射性核廢料管理委員會在 2006 年的建議包括以下觀察，「『製造更多的廢棄物』與『因為表定待產而難以避免的廢棄物』，兩者所引發的政治與倫理問題是截然不同的」。在那之後，該委員會也進一步地指出，「若要從倫理的角度正當化製造新的用過燃料棒，則必須要有一個在倫理上周延完善 (sound)，而非僅是『最不差』 (least bad) 的管理方案…簡而言之，一個在倫理上可被接受的既存用過燃料棒解決方案，在處理新製造的或是轉化過的物質上，卻不必然會是在倫理上可被接受的」²⁰⁸。換句話說，Andy Blowers 教授表示，「透過新建計畫將問題惡化是不正當的，這將會大幅度增加由用過燃料棒與其他高階核廢料所生產的放射性活度，且這些核廢料將無期限地被存放於四散英國沿岸的眾多脆弱設施之中」²⁰⁹。

新製造的核廢料

由英國現有的反應爐所產生的用過燃料棒，通常是藉由火車運往位於坎布里亞的賽拉菲爾德進行再處理，至於由新建反應爐 (如欣克利角 C) 所生產出來的用過燃料棒，英國政府卻不計畫用同樣方式處理。事實上，位於賽拉菲爾德的「熱氧化再處理廠」 (Thermal Oxide Reprocessing Plant, THORP)，主要用來再處理由日益老舊的「先進氣冷式反應爐」 (Advanced Gas-cooled Reactor) 所生產出來的用過燃料棒，預計將在 2018 年關閉，並且目

前沒有建新廠取代它的計畫。

英國政府下屬的放射性廢棄物管理局 (Radioactive Waste Management Ltd) 表示，英格蘭與威爾斯地區提議新建的反應爐將會使用燃耗率 65GW / 噸鈾的「高燃耗型燃料」 (high burn-up fuel)，此類用過燃料棒需要先經過長達 140 年的冷卻期，才可以被安置在地底貯存設施中，這也意味著用過燃料棒將會在新反應爐廠區存放長達 200 年之久 (即反應爐關閉 140 年後)。不過，藉由審慎交雜存放「長冷卻」 (long-cooled) 與「短冷卻」 (short-cooled) 的用過燃料棒，用過燃料棒在核電廠停止營運到進行處置之前的貯存期，將可能可以縮短為 60 年 (即貯存 120 年)²¹⁰。

無論如何，地質處置設施 (Geological Disposal Facility, GDF) 至少要到 2040 年才有可能準備完成並開始接收核廢料。在英國所有現存的核廢料都被放置於地質處置設施之前，由新建反應爐所生產的核廢料都將不會被存放於該處置設施，而前述程序大約需要耗時 90 年，需至 2130 年才能將既有核廢料處置完畢。因此，由英國提議新建反應爐所生產的用過燃料棒，將至少在未來 120 年間持續存放於核電廠內。

英國核能工業以及英國政府再三聲稱，由新建反應爐所生產出來的用過燃料棒體積相當小，僅等同於現有核廢料總量的約 10%，意指新增加的數量並不足以影響人們尋找合適的地底核廢處置場址，以處理英國核能工業已生產的核廢料²¹¹。然而，用「體積」來衡量放射性廢棄物的衝擊影響，無非是相當具有誤導性的。從核廢料管理與處置的角度來說，在衡量新建反應爐所產生的用過燃料棒與核廢料潛在衝擊時，體積並不是最好的衡量單位。

欣克利角 C 核電廠所預計採用的高燃耗型燃料，跟現存反應爐所製造的用過燃料棒相比，具有更高的放射性活度。因此，比起用體

積作為衡量尺度，對於地質處置場所需空間大小有決定性影響的「廢棄物放射性活度總量」（amount of radioactivity），更適合用來衡量由新建反應爐所生產的核廢料影響。

根據放射性核廢料管理局的估計，排除新建反應爐，2200年時既存核廢料的總放射性活度約為477萬太貝克（Terabecquerels, TBq）。倘若不計算其他型態的核廢料，則一個總裝置容量16GW新建反應爐計畫所產生的用過燃料棒放射性活度，預計將高達1,900萬太貝克。欣克利角C核電廠的裝置容量為3.2GW，其所產生的用過燃料棒的放射性活度在2200年時將達到380萬太貝克，約為現有核廢料放射性活度總量的80%²¹²。

最後，還有另外一種方式可以用來檢視英國提議新建反應爐計畫所生產的核廢料將導致的衝擊，便是分別檢視既存核廢料所可能占用的地底面積，以及既存核廢料再加上16GW新建核電計畫所生產的核廢料所可能占用的地底面積。2種狀況所需面積將取決該設施所使用的岩層類型²¹³。

表十 貯存既存反應爐及若新增反應爐產生核廢料所需地底面積

岩層類型	來自既存反應爐的廢棄物存量	來自既存反應爐以及16GW新建核電計畫的廢棄物存量
高強度岩層	5.6 平方公里	12.3 平方公里
低強度岩層	10.3 平方公里	25.0 平方公里
蒸發岩 (Evaporite)	8.8 平方公里	24.1 平方公里

可以發現在某些案例中，新建反應爐計畫幾乎導致廢棄物處置所需的地底面積增加為3倍。

深地質處置設施安全論證 (safety case)

2010年時，核能廢棄物諮詢協會（Nuclear Waste Advisory Associates, NWAA）發布了一份〈問題列表〉（Issues Register），詳列100項開始為深地質處置設施製作安全論證之前，仍有待解決的問題²¹⁴。此外類似的研究還包括綠色和平的國際報告²¹⁵，這些資料重申，已有許多研究質疑，是否真的有可能做出具有科學信度的證明確保核廢料貯存設施附近的人們所接受的輻射劑量，直至未來都將處於可被接受的低程度。

成本

規劃中的高階放射性廢棄物深地質處置設施的成本在2008年時預估為120億英鎊，然而這並未將新建反應爐所生產的用過燃料棒包含在內。然而如同其他國家一樣，依然存在著高度的不確定性。英國原本打算針對新生產的用過燃料棒課徵固定價格，但在2011年時，改為課徵一筆可變動但有上限的「廢棄物處置費」（Waste Transfer Price, WTP）。隨著深地質處置設施在選址、建造以及營運上的最終結算成本將越來越清楚，廢棄物處置費將會隨著時間增加。2011年時，一位顧問Ian Jackson點出成本上的不確定性以及被低估的可能性²¹⁶，含有一公噸鈾的用過燃料棒預計需花費97萬8000元英鎊，然而此數字可能過低且無法涵蓋政府的實際支出，因為這是立基於「核廢料處置成本每年只會比通貨膨脹率高3.3%」的假設之上。但過往的經驗指出，核能成本通常每年會比通貨膨脹率還要高4.2%到4.5%。成本低估將意味著英國核能除役局無法完全回收在新建反應爐用過燃料棒上的處置費用，並且將需要間接的政府補助彌補財務缺口。

結論

作為全英國尋找地質處置場場址一事累積最豐厚經驗的地方政府，坎布里郡郡議會認為政府最近 6 次尋覓場址行動存有缺陷，尤其感到遺憾的是，在用過燃料棒因為過度灼熱而難以在地底安置超過一世紀的情況下，政府仍未能正視安全地中期貯藏核廢料的需求²¹⁷。因此，在是否真的有可能取得任何進展的問題，將存在著巨大的問號。許多研究都質疑，是否真的有可能做出具有科學信度的證明確保核廢料貯存設施附近的人們所接受的輻射劑量，直至未來都將處於可被接受的低程度。與此同時，英國又已開始新的核反應爐興建計畫，此舉將惡化既有的核廢料問題，並大幅度增加用過燃料棒與其他高階核廢料所生產的放射性活度，且這些核廢料將無期限地被存放於四散英國沿岸的眾多脆弱設施之中

附錄—前 5 次選址嘗試

第 1 次嘗試：

1976 年，英國原子能管理局（United Kingdom Atomic Energy Authority, UKAEA）開始尋找興建深層處置場的地點。1981 年時，公眾諮詢會議引發民意強烈反對，然而鑽孔試驗也僅僅在凱瑟尼斯（Caithness）的 Altnabreac 一處進行。英國政府在 1981 年 12 月退讓並且放棄鑽孔試驗的計畫。

第 2 次嘗試：

1982 年時，Nirex 成立並且宣布新政策：克里夫蘭地區（Cleveland）的比林漢姆（Billingham）地底深處的硬石膏岩層（anhydrite mine）被提議作為中階放射性廢棄物的處置場址。貝德福郡（Bedfordshire）的艾斯圖（Elstow）則被提議為低階放射性廢棄物的淺層掩埋場址。在 1986 年時，比林漢姆計畫遭到放棄。

第 3 次嘗試：

1987 年時，除了艾斯圖之外，另外多出 3 個地點被提名。1987 年 5 月，英國政府放棄此計畫。

第 4 次嘗試：

1987 年 11 月，Nirex 啟動了「前進之路」（The Way Forward）計畫。1989 年，Nirex 聚焦於賽拉菲爾德以及杜恩蕾（Dounreay）。1997 年 3 月，英國政府駁回 Nirex 的賽拉菲爾德規劃申請。

第 5 次嘗試：

2002 年 7 月時，英國政府宣布將新設一個獨立委員會，即放射性核廢料管理委員會，用以檢視放射性廢棄物管理的各種選項並做出建議。該委員會建議採用地底深處的廢棄物貯存設施，但同時也做出許多警告。2012 年 8 月，西坎布里亞放射性廢棄物管理合夥計畫發布報告。2013 年 1 月，坎布里亞郡議會決定退出選址程序。

7

美國

UNITED STATES

自從 1957 年美國第一座商用反應爐運轉開始，60 年過去，今日美國的核電反應爐所生產的用過燃料棒大約占全球總量的 30%^{218 219}，高居各國之首。目前約有 80,150 公噸的用過燃料棒存放在 125 個反應爐廠區，其中有 99 個反應爐仍在營運中²²⁰。

1959 年 1 月，約翰霍普金斯大學教授 Abel Wolman 在首次針對核廢料議題舉行的美國國會調查的發言，精準地描述核反應爐所生產的高階放射性廢棄物超乎尋常的毒性：「**整體來說，不論是放射性或化學性的毒性，都遠比我們至今在美國或其他任何國家所處理過的任何工業原料來得致命**」，他表示「**透過將廢棄物實際地轉化為無害的物質，我們幾乎可以處置美國任何一種產業的廢棄物**」，並強調「**在任何一種產業的廢棄物中，這是首次有一系列的廢棄物不適用於那樣的處置方式**」。

Wolman 的觀察至今仍然成立，各個核電使用國在此時此刻，正試圖在遠遠超越承載人類文明所存在地質年代的時間長度上，控制著全世界濃度最高的人造放射性元素。截止 2012 年為止，美國的用過燃料棒估計共含有 851,000 拍貝克²²¹ (PBq，約 230 億居里) 的放射性活度²²²。每一年約有 2,200 公噸的用過燃料棒被生產出來，並且預計將在 2048 年時達到 14 萬 6,500 公噸，並含有高於 122.1 萬拍貝克的放射性活度 (大於 330 億居里)。

美國核電廠內的用過燃料棒，是由超過 24.4 萬束含有數千萬個燃料棒 (fuel rods) 的長方形燃料束 (assemblies) 所組成²²³。這些燃料棒又包含數以兆計、指尖大小的輻照鈾燃

料丸 (irradiated uranium pellet)。當在反應爐核心與中子撞擊後，約 5% 到 6% 的鈾燃料丸會轉化為一堆放射性物質，半衰期從數秒到百萬年不等。若站在剛從反應爐退出不到一年的用過燃料棒一公尺距離內，勢必將在 20 秒內受到致死劑量的輻射曝照²²⁴。

然而，在長年聚焦於反應爐核心熔毀之後，事實的輪廓越來越清晰，美國核電廠冷卻池內累積大量用過燃料棒，構成更為巨大的潛在危害。因為這些冷卻池裝載了許多輻照核燃料 (irradiated cores)，或裝載比初始設計裝載量高出 3 到 4 倍的用過燃料棒，且這些冷卻池缺乏如二次圍阻體 (secondary containment) 這類的深度防禦系統，也缺乏自身的備援電力。

用過核燃料棒經放射性衰變釋放出的熱能是最主要的安全疑慮，一個完整的反應爐核心在卸載之後僅需幾個小時，便足以在一開始便透過衰變熱釋放出足以匹敵鋼鐵工廠鍋爐等級的熱能容量。這個熱度足以融化並點燃燃料棒的活性鋳合金護套，並且使貯存核廢料的地質處置設施陷入不穩定狀態。衰變熱以及放射性活度將會在 100 年之後大幅下降，但依然相當危險。

2011 年 3 月的福島核災明確揭示燃料池的高熱風險並不是什麼抽象的問題。經過地震與海嘯之後，一起爆炸摧毀四號機反應爐的建築體，導致含有整組剛卸載的用過燃料棒的貯存池暴露在空氣中。巧合地是，一條原本並非用來灌注冷卻池的水管發生意外洩漏，意外避免冷卻池水位高度過低，進而防止可能因為鋳合金護套過熱而導致的嚴重火災²²⁵。

貯存於冷卻池中的用過燃料棒的危險性

在長達 30 年的時間裡，核能管制委員會（Nuclear Regulatory Commission, NRC）針對核廢棄物貯存的規範，都是視永久核廢料貯存場的啟用時間調整。如此一來，等同允許核反應爐營運者合法地在冷卻池內，用比初始設計來得更久的時間、更高的密度（約 4 倍的密度）貯存用過燃料棒。長達數十年的核能安全研究指出，假如貯存用過燃料棒的冷卻池失去大量池水，便可能發生因衰變熱所導致的嚴重意外。假如池中的核燃料零件暴露在空氣與液體中，核燃料零件的鋳合金護套將會發生熱反應，並且在數個小時到數天之內，如同煙火秀般壯觀地起火燃燒。由於鋳對熱有高度反應性，它曾經一度被用來作為相機閃光燈中的燈絲。

根據美國核能管制委員會，用過燃料棒中有 69 種核種，並且可能導致重大的事故結果（見列表 1）²²⁶。

假如燃料棒暴露於空氣與液體中，則其鋳合金護套可能會發生熱反應，並在攝氏 800 度到 1000 度之間起火燃燒。尤其值得憂慮的是，貯存用過燃料棒的燃料池中含有大量銫-137，在美國各處燃料池中，此種危險同位素的含量約在 4400 萬到 8400 萬居里之間。銫-137 的半衰期長達 30 年，並且會釋放出具有高度穿透性的輻射，還會如同鉀一般進入食物鏈。

大量核分裂產物所造成的危害，已經在車諾比事故以及福島核災中證實，其中又以銫-137 最為主要。由於銫-137 的污染，車諾比事故迫使超過 10 萬人永久性地流離失所。此一輻射管轄區域的面積極為巨大，超過 1000 平方公里，約等同於三分之二個紐澤西州。肇因於人們往輻射污染較低的區域遷徙，此區域人口在接下來的 10 年間減少將近一半。

列表 1：

對事故後果之研究而言相當重要的 69 種核種²²⁷

銻 241 (241Am)、鋇 137m (137mBa)、鋇 139 (139Ba)、鋇 140 (140Ba)、鈰 141 (141Ce)、鈰 143 (143Ce)、鈰 143 (144Ce)、銅 242 (242Cm)、銅 244 (244Cm)、鈷 58 (58Co β)、鈷 60 (60Co)、銫 134 (134Cs)、銫 136 (136Cs)、銫 137 (137Cs)、碘 131 (131I)、碘 132 (132I)、碘 133 (133I)、碘 134 (134I)、碘 135 (135I)、氙 85 (85Kr)、氙 85m (85mKr)、氙 87 (87Kr)、氙 88m (88Kr)、鐳 140 (140La)、鐳 141 (141La)、鐳 142 (142La)、鉬 99 (99Mo)、銱 95 (95Nb)、銱 97 (97Nb)、銱 97m (97mNb)、釷 147 (147Nd)、釷 239 (239Np)、釷 143 (143Pr)、釷 144 (144Pr)、釷 144m (144mPr)、鈾 238 (238Pu)、鈾 239 (239Pu)、鈾 240 (240Pu)、鈾 241 (241Pu)、銣 86 (86Rb)、銣 88 (88Rb)、銣 103m (103mRh)、銣 105 (105Rh)、銣 106 (106Rh)、釷 103 (103Ru)、釷 105 (105Ru)、釷 106 (106Ru)、銣 89 (89Sr)、銣 90 (90Sr)、銣 91 (91Sr)、銣 92 (92Sr)、銣 99m (99mTc)、碲 127 (127Te)、碲 127m (127mTe)、碲 129 (129Te)、碲 129m (129mTe)、碲 131 (131Te)、碲 131m (131mTe)、碲 132 (132Te)、氙 133 (133Xe)、氙 135 (135Xe)、氙 135m (135mXe)、鉀 90 (90Y)、鉀 91 (91Y)、鉀 91m (91mY)、鉀 92 (92Y)、鉀 93 (93Y)、鋯 95 (95Zr)、鋯 97 (97Zr)

在 2001 年 9 月 11 日的恐怖攻擊之後，我和同事發表一份論文，警告惡意攻擊及意外將可能導致美國用過燃料棒貯存池的池水乾涸，進而導致用過燃料棒護套起火燃燒，並釋出災難性數量的長生命週期輻射，甚至遠比反應爐爐心熔毀更來得多²²⁸。

我的同事們接著在 2016 年發布研究，指出假如這樣的火災在鄰近費城（Philadelphia）的利默里克沸水式反應爐（Limerick boiling water reactor）發生，輻射塵將可能迫使大約 800 萬居民流離失所，並造成 2 兆美元的損失²²⁹。除了大型戰爭外，幾乎沒有什麼科技災害的後果能夠跟核電廠用過燃料棒貯存池大火後果相匹敵。

美國核能管制委員會在 2007 年發布，並且廣為緊急應變人員利用的「大氣擴散模式」(dispersion model) 估計，假如聖奧諾弗雷核電廠 (San Onofre Nuclear Generating Station) 發生大地震並導致池水乾涸，則用過燃料棒的護套會在 6 個小時之內起火燃燒，並釋出大約 8,600 萬居里的放射性物質。其中，用過燃料棒中約 4,000 萬居禮的放射性銫 (radiocesium)，將被釋出約 30%，比所有大氣層核子試驗所釋放總量的 1.5 倍還多。半徑 10 英哩內的區域，包含 314 平方英哩的土地與離岸水域，都可能遭受致命性的污染²³⁰。福島核災事件發生之際，時擔日本首相菅直人清楚地闡釋，當他獲知萬一福島核電廠四號機冷卻池發生火災的可能結果之後，他表示：

「我們可能必須要疏散 5000 萬人，等同於打輸了一場大戰... 我擔憂擔心數十年的動盪將緊隨而來，那將意味著日本這個國家的終結」²³¹

目前美國約有 24.4 萬束用過燃料棒，其中約有 70% 存放於核能電廠反應爐的冷卻池中，剩下的 30% 則是存放於乾式貯存護箱內。濕式貯存的用過燃料棒中，約有三分之一位於機齡數十年的沸水式反應爐旁，存放在離地數層樓高的池水中。其他的用過燃料棒則位於壓水式反應爐旁，該處的冷卻池則是建於地面。

為了大幅降低這種意外發生的可能性，我們呼籲應停止繼續將用過燃料棒密集地貯存於冷卻池中，而應該將大多數的用過燃料棒存放於乾式、經強化的貯存護箱內。根據我們的估計，這種燃料棒貯存方式的改變可以在 10 年內完成，成本約為 35 億到 70 億美金²³²。

2016 年 5 月時，美國國家科學院 (National Academy of Science) 專家小組再一次駁斥美

國核管會對於用過燃料棒貯存池安全性所展現的信心。繼點出美國核管會技術假設上的缺陷後，該專家小組強調，福島核電廠中用過燃料棒貯存池的冷卻失靈「**應該是一記警鐘，提醒核電廠營運者以及管制者至關重要的關鍵，須擁有穩健且可備援 (redundant) 的方案，以衡量、維持以及必要時修復貯存池冷卻系統**」。專家小組成員也敦促美國核管會「**確保電廠營運者採取迅速且有效的措施，以降低燃料池冷卻液流失事故的後果，此類事故可能導致鋁合金護套失火延燒**」。

高燃耗型用過核燃料棒

自從 1990 年代以來，美國核能管制委員會同意提高核燃料棒中鈾 -235 的比例，鈾 -235 是產生能量的關鍵可分裂物質，因此將有效地允許反應爐營運者延長燃料棒可以在反應爐中進行核輻照 (irradiated) 的時間增加一倍。此作法即是提高燃耗值 (burnup)，也就是每一公噸的鈾在一天內所可以產生的電力，以百萬瓦 (megawatts, MW) 計。美國商用核能電廠所使用的鈾燃料棒，其關鍵的可分裂性同位素鈾 -235 之比例，已經從它原本在天然鈾礦床中的狀態加以提高或濃縮。在商業運轉的最初幾十年中，鈾濃縮程度可以讓美國核電廠在下次更換核燃料前維持大約 12 個月的運轉。然而近年來，美國的電力公司開始使用高燃耗核燃料 (high-burnup fuel)，其定義是燃耗值大於每噸鈾每天產能 45GW (> 45 GWd / t)。

經證實，高燃耗用過燃料棒對於安全貯存及處置用過燃料是一種阻礙。十多年以來，有越來越多證據顯示高燃耗對於用過燃料棒護套以及燃料丸有負面的影響，而針對這些問題的解方至今則仍混沌不明。

研究指出，用過燃料棒的燃料護套厚度減少，而且護套的鋁合金表面也會出現氫氣所導致的銹蝕，護套厚度變薄可能會使護套易碎並失效。高燃耗燃料的高溫也讓用過燃料棒在處理以及運輸時更為脆弱。

「目前正在卸載中的用過燃料棒（高利用、高燃耗燃料）的技術基礎並不紮實」，一位美國國家工程學院（National Academy of Engineerin）的專家於 2012 年曾提出看法²³³。2016 年 5 月，向美國能源部提供科學監督的專家小組、美國核廢棄物技術審查委員會（Nuclear Waste Technical Review Board，NWTRB）針對用過燃料棒處置議題表示，幾乎沒有任何數據資料可以支持燃耗值大於 35GWd/t 的用過燃料棒的乾式貯存以及運輸²³⁴。在過去 20 年來，被生產出來的用過燃料棒總量有 70% 都屬於高燃耗²³⁵。截至 2013 年為止，只有 8% 的高燃耗用過燃料棒以乾式貯存的方式存放於乾式貯存護箱中²³⁶。

缺乏貯存與處置規劃

一份近期的彭博能源財經報導指出，越來越多反應爐可能面臨關閉的命運：「美國有超過一半的核子反應爐是大量失血的錢坑，總計一年虧損超過 29 億美元」。美國大量反應爐加速關閉，將可能嚴重衝擊這個缺乏必要規劃與運輸能力以管理激增核廢料存量的系統，美國將近 20% 的用過燃料棒是存放在關閉或是即將關閉的反應爐旁²³⁷。

用過燃料棒的運輸則更為複雜，因為反應爐廠區內所貯存的用過燃料棒是存放在相當複雜的各種貯存容器中，而每一種用過燃料棒貯存罐系統都有各自獨特的困境。

美國核管會列出 51 種不同的乾式貯存護箱設計，其中有 13 種僅供貯存使用，而不能用於

運輸。有多達 11,800 個電廠內的乾式貯存護箱可能需要經歷重新開啟、重新封裝，接著才可以被運送到集中式乾式貯存設施或是永久貯存場²³⁸。

目前這一代的乾式貯存護箱是設計作為短期廠內貯存使用，而非用來在深地質貯存場中直接處置；沒有任何一種用過燃料棒乾式貯存護箱曾獲允許作為長期處置用途。至於核電廠內所使用的大型核廢料貯存罐，在處理並安置這些高熱負荷、高放射性活度的笨重廢料包時，將會對深地質處置設施造成巨大的負擔。

為了處置核廢料而進行的核廢料重新包裝，將可能需要數萬個小型貯存罐，且根據估計，平均每一束用過燃料棒需花費 5 萬到 8 萬 7000 美元，重新包裝工作所費不貲。將用過燃料棒重新裝入廢料罐的過程會產生低階放射性廢棄物，據估計，管理這些低階核廢料的費用約為每束用過燃料棒 9500 元美金，可能比現階段一束用過燃料棒裝進廢料罐的花費還高²³⁹。

等到有集中式乾式貯存設施可供使用的時候，可能已經有一波反應爐關閉潮出現，這波關閉潮可能會導致核廢料的運輸阻塞，並且影響集中式貯存設施的運作。美國能源部所指認出的各種不確定因素包括：

- 各反應爐廠區內以及周邊的交通基礎建設各自殊異且有所變動。
- 每一種用過燃料棒貯存罐的系統都各自面臨獨特的挑戰。例如有些乾式貯存護箱僅被允許作為貯存使用，而不得作為運輸使用。
- 用過燃料棒衰變熱將可能影響到運輸的時間點。
- 用過燃料棒的接收及運送順序尚未決定。目前預設最舊的用過燃料棒有較高的優先順位，存有較新且較熱的用過燃料棒的廠區則必須等用過燃料棒降溫²⁴⁰。

毫無把握的深地質處置選址

2008 年時美國能源部發布一份修訂版的「生命週期成本」(life-cycle cost) 估算，若要於內華達州猶加山廠區 (Yucca Mountain) 處置達 7 萬公噸的商用反應爐用過燃料棒，所需花費的總成本將高達 1130 億美元 (依據 2016 年的美元匯率)²⁴¹。根據目前的法規，超出上述數量的用過燃料棒，必須被放置在第二個處置場。根據〈核廢料政策法案〉(Nuclear Waste Policy Act)，使用核能發電的消費者將被課徵每一度電 1 密爾 (mill，即 0.001 美元) 的費用，以支付核廢料處置的成本。這些課徵而來的費用，並不會用來支付花費在核廢料處置前的地表貯存、運輸以及再包裝上的數十億美元預估成本。各種試圖重新啟動猶加山計畫發證程序的嘗試目前仍停滯不前。

猶加山計畫在 2010 年遭取消，美國能源部預測將需要耗時 16 年運輸多達 12.21 萬公噸的用過燃料棒，以及花 50 年將其全數安置於貯存設施之中。貯存設施將會在 150 年後永久性地關閉²⁴²。一般認為處置用過燃料棒之前先對其進行再處理並不可行，美國的一個能源產業組織「電力研究所」(Electric Power Research Institute) 做出結論：「**美國若在近期採用再處理，將會招致巨大的懲罰成本…再處理需要搭配使用快中子增殖反應爐，然而快中子增殖反應爐的示範案例至今已被證明是昂貴且不可靠的，並且進一步加劇再處理的經濟困境**」²⁴³。

1987 年美國國會選定猶加山貯存場，主要是為了避開當時美國東部各州尋找處置場址上日益尖銳的政治爭議。然而，猶加山場址並不符合由國際核子能總署所訂出的長期核廢料貯存的基本地質要求，其中包括「**地底深處具有穩定的地質化學 (geochemical) 或水化學 (hydrochemical) 條件，主要如還原環境 (reducing environment) 的存在，以及地下水跟造岩礦物 (rock-forming minerals) 達成均衡的成分組合；此外，考慮到重大地層移動、地層型變、斷層、地震或是地熱等，該地需有以百萬年計的長期地質穩定性**」²⁴⁴。除了在隔離核廢料所需的一萬年內有極高機率發生火山爆發之外²⁴⁵，猶加山也存在水份滲透的問題，因此無法達到上述的基本地質要求。

根據美國能源部所述，猶加山設施至少需要長達 100 年的強制通風，以排除可能對核廢料貯存容器以及場址地質環境有負面影響的衰變熱²⁴⁶。為了支持貯存場運作，電力、軌道以及其他運輸系統的維護工作至少需要持續 150 年。能源部在多年來持續堅稱猶加山場址的乾燥性之後，終於退讓且承認水份有可能會滲透並破壞核廢料包²⁴⁷。因此約 100 年後，在一個危險的高溫環境之中，預計須裝置超過 1 萬 1 千個大型鈦合金防滴遮罩 (titanium drip shield) 以避免水份侵蝕廢料包²⁴⁸。製造防滴遮罩將需耗費世界每年鈦消費量的三分之二²⁴⁹。

還需要做些什麼

美國目前所採取的作法，是繼續已長達 60 年的深地質處置設施的場址尋覓工作，並祈禱好運發生。與此同時，美國在可能性日益提高的長期地表貯存上，也缺乏一致性的政策。在意識到此議題的巨大不確定性之後，美國能源部表示「目前正在考慮於美國範圍內採用可達 300 年的長期貯存」²⁵⁰。一位核能工業專家表示，「除非美國聯邦政府可以找到方法迅速地重新啟動貯存場的選址嘗試，否則美國能源部可能永遠不會將用過燃料棒自營運中的電廠中取出。」²⁵¹

美國需要徹底翻新貯存與處置用過燃料棒上的國家政策，以解決用過燃料棒貯存於燃料池中的脆弱性。首先且最為重要的是為了保護公眾安全，應該停止將用過燃料棒密集地貯存於冷卻池中。

為美國國會進行調查工作的美國政府責任署（Government Accountability Office）在 2017 年 4 月時做出報告，指出「用過燃料棒將對人類以及環境帶來極為嚴重的危機，同時對美國政府來說，也造成數十億美元的財政負擔。根據美國國家科學研究委員會以及其他單位所述，假如未能妥善處理與貯存，這類物質將致使污染擴散並對人類造成長期的健康疑慮，甚至導致死亡。」²⁵²

與其坐等問題接踵發生，美國核能管制委員會以及能源部需要發展一套公開透明且完整全面的準則，詳列包括高燃耗燃料在內的所有用過燃料棒在中期貯存、運輸、重新包裝與最終處置上的關鍵因素，特別是目前仍未知的因素。否則，在核廢料貯存的問題上，美國將會持續仰賴「信仰之躍」（leaps of faith），以極度樂觀的態度製造大量、無資金應對的放射性廢棄物，造成如「氣球貸款」（balloon mortgage payments）般巨大的後果²⁵³，並由未來的社會大眾承擔最終代價。

參考資料

- 01 Uranium Mining and Milling, WISE Uranium Project, page.61 <http://www.wise-uranium.org/stk.html?src=stkd01e>
- 02 Status and Trends in Spent Fuel and Radioactive Waste Management, IAEA Nuclear Energy Series, No. NW-T-1.14 2018 https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1799_web.pdf
- 03 Containment, Independent Lens, PBS, January 2016, <http://www.pbs.org/independentlens/films/containment/>
- 04 Containment, Independent Lens, PBS, January 2016, <http://www.pbs.org/independentlens/films/containment/>
- 05 WISE Uranium Project, Slide Talk, Nuclear Fuel Production (Conversion, Enrichment, Fuel Prod.), March 2007, Slide No.22 <http://www.wise-uranium.org/stk.html?src=stkd02e>
- 06 WISE Uranium Project, Slide Talk, Nuclear Fuel Production (Conversion, Enrichment, Fuel Prod.), March 2007, Slide No.22 <http://www.wise-uranium.org/stk.html?src=stkd02e>
- 07 譯註：此處 activity 即為 radioactivity，即「放射性活度」，是放射性元素或同位素每秒衰變的原子數，單位為貝克 (Becquerel, bq)，1 貝克意即每秒有 1 貝克的原子衰變。
- 08 NIRON D TR 2013-12 E, page 133.
- 09 Les échos.be – Des milliards supplémentaires pour stocker les déchets nucléaires – 22 August 2018 (in French).
- 10 SKB. 2017-04. "Plan 2016. Costs from and including 2018 for the radioactive residual products from nuclear power. Basis for fees and guarantees for the period 2018-2020." Technical Report TR-17.02. 52 pp. See p. 35, <https://www.skb.se/publikation/2487964/TR-17-02.pdf>.
- 11 IEEJ Journal, "Major Issues Regarding Nuclear Power Generation Costs Assessment in Japan", Institute for Energy Economics Japan, citing Atomic Energy Commission Japan, 2015, <https://enen.iej.or.jp/data/6474.pdf>
- 12 Ian Jackson, "Research Report Subsidy Assessment of Waste Transfer Pricing for Disposal of Spent Fuel from New Nuclear Power Stations Independent Report for Greenpeace UK, 1st March 2011, <https://www.greenpeace.org.uk/wp-content/uploads/2017/07/FUP-Subsidy-Report-Mar2011.pdf>
- 13 NIRON D TR 2013-12 E, page 133
- 14 Les échos.be – Des milliards supplémentaires pour stocker les déchets nucléaires – 22 August 2018 (in French).
- 15 Szakálos Peter, Leygraf Christofer, Rosengren Anders, Seetharaman Seshadri, Grönder Olle, Linder Jan. 2018-04-26. "Analys av kärnbränsleförvarsfrågan efter mark-och miljödomstolens yttrande till regeringen." ("Analysis of the nuclear fuel management issue after the Land and Environment Court's statement to the government.") In Swedish only. 4 pp. Available at (5 October 2018): <http://www.nonuclear.se/szakalos-et-al20180426analys-av-karnbransleforsvarsfragan>. This document was submitted to the government for its ongoing review, and the government has requested comments from SKB by 30 April 2019. The authors include a group of specialists at The Royal Institute of Technology (KTH) in Stockholm, who are at the forefront of copper corrosion research worldwide, and a former employee of SSM. Research in Sweden on copper corrosion by independent specialists was spearheaded by KTH Associate Professor Gunnar Hultquist, who died in February 2016. He initiated an experiment in 1986 showing that copper corrodes in oxygen-free water. His results were eventually confirmed internationally by independent methods.
- 16 Department for Business, Energy and Industrial Strategy (BEIS) Press Release 25th January 2018 <https://www.gov.uk/government/news/local-communities-to-give-views-on-permanent-disposal-of-radioactive-waste>
- 17 譯註：「噸重金屬 (Tonnes of heavy metal, tHM)」，是專用於鈾、鈾、鈾等重金屬元素的質量單位
- 18 Status and Trends in Spent Fuel and Radioactive Waste Management, IAEA Nuclear Energy Series, No. NW-T-1.14 2018 https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1799_web.pdf
- 19 Uranium Mining and Milling, WISE Uranium Project, Slide 8 <http://www.wise-uranium.org/stk.html?src=stkd01e>
- 20 Hoppin, G. Rydberg, J. Liljenzin, J.O. Radiochemistry and Nuclear Chemistry, Butterworth, Heinmann, Oxford 1995
- 21 For more information see Uranium Mining and Milling Wastes: An Introduction by Peter Diehl <http://www.wise-uranium.org/uwai.html>
- 22 Federal Register / Vol. 48, No. 196 / Friday, October 7, 1983 / See page 45929.
- 23 See Chronology of Uranium Tailings Dam Failures, <http://www.wise-uranium.org/mdaf.html>
- 24 <http://www.wise-uranium.org/uwai.html>
- 25 譯註：聯產品 (co-product) 不同於副產品 (by-product)，聯產品分攤生產成本，對收入有貢獻，與主要產品同為生產之主要目標。
- 26 See slide No.61 <http://www.wise-uranium.org/stk.html?src=stkd01e>
- 27 For an update on Arlit see African Arguments 18th July 2017 <http://africanarguments.org/2017/07/18/a-forgotten-community-the-little-town-in-niger-keeping-the-lights-on-in-france-uranium-arlit-areva/>
- 28 Left in the Dust, AREVA's radioactive legacy in the desert towns of Niger, Greenpeace International 2010 <https://www.greenpeace.org/denmark/global/denmark/p2/other/report/2010/left-in-the-dust.pdf> See also <https://www.youtube.com/watch?v=ioRtzOWm07A>
- 29 History and consequences of uranium mining in Niger from 1969 to 2017 by Almoustapha Alhacen, Arlit, Niger. https://static1.squarespace.com/static/58bd8808e3df28ba498d7569/t/59bd250780bd5e7ca76585f3/1505568010268/Almoushapha_20170910_+English_HN.pdf
- 30 Anwar, T. Uranium Mining in Jharkhand: Radioactive Poisoning Ravaging Lives in Villages, Newsclick 21st June 2018 <https://newsclick.in/uranium-mining-jharkhand-radioactive-poisoning-ravaging-lives-villages>
- 31 Sunday Times 7th February 2010 <https://www.thetimes.co.uk/article/the-great-uranium-stampede-c7p3m6h9xxd>
- 32 World Nuclear Association July 2017 <http://www.world-nuclear.org/information-library/facts-and-figures/uranium-production-figures.aspx>
- 33 <http://www.wise-uranium.org/stk.html?src=stkd02e>

參考資料

- 34 Management of Depleted Uranium, OECD/NEA 2001 <https://www.oecd-nea.org/ndd/pubs/2001/3035-management-depleted-uranium.pdf>
- 35 譯註：噸鈾 (Tonnes of Uranium, tU)，為鈾的質量單位，意即含有 1 噸重之鈾，1 噸鈾約為 1.17924 噸重的八氧化三鈾，參見 https://www.uranium.info/unit_conversion_table.php
- 36 WISE Uranium Project, Slide Talk, Nuclear Fuel Production (Conversion, Enrichment, Fuel Prod.), March 2007, Slide No.22 <http://www.wise-uranium.org/stk.html?src=stk02e>
- 37 Harold Feiveson, Zia Mian, M.V. Ramana and Frank von Hippel (Eds) Managing Spent Fuel from Nuclear Power Reactors Experience and Lessons from Around the World, IPFM, September 2011 <http://fissilematerials.org/library/rr10.pdf>
- 38 <http://www-ns.iaea.org/conventions/results-meetings.asp?s=6&l=40>
- 39 https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/672640/20171020_-_UK_Sixth_National_Report_to_the_Joint_Convention.pdf
- 40 https://www.ensi.ch/de/wp-content/uploads/sites/2/2017/10/Joint_Convention-Sixth_national_report-Switzerland_2017.pdf
- 41 https://inventaire.andra.fr/sites/default/files/documents/pdf/fr/2015_-_rapport_de_synthese.pdf
- 42 Possible Toxic Effects from the Nuclear Reprocessing Plants at Sellafield (UK) and Cap de la Hague (France), European Parliament Scientific and Technological Options Assessment, November 2001 <http://www.wise-paris.org/english/reports/STOAFinalStudyEN.pdf>
- 43 NDA Annual Report 2016/17 <https://www.gov.uk/government/publications/nuclear-decommissioning-authority-annual-report-and-accounts-2016-to-2017>
- 44 NDA Annual Report 2016/17 <https://www.gov.uk/government/publications/nuclear-decommissioning-authority-annual-report-and-accounts-2016-to-2017>
- 45 The Nuclear Decommissioning Authority progress with reducing risk at Sellafield, NAO 20th June 2018 <https://www.nao.org.uk/wp-content/uploads/2018/06/The-Nuclear-Decommissioning-Authority-progress-with-reducing-risk-at-Sellafield.pdf>
- 46 Pearce, F, Shocking state of world's riskiest nuclear waste site, New Scientist 21st January 2015 <https://www.newscientist.com/article/mg22530053.800-shocking-state-of-worlds-riskiest-nuclear-waste-site/>
- 47 International Panel on Fissile Materials, Fissile Material Stocks 12th Feb 2018, <http://fissilematerials.org/>
- 48 Miller, M. M., Are IAEA Safeguards on Plutonium Bulk-Handling Facilities Effective? Nuclear Control Institute, Washington, DC., August 1990. <http://www.nci.org/k-m/mmsgdrds.htm>
- 49 Rob Broomby UK's plutonium stockpile dilemma, BBC 24th Feb 2013 <https://www.bbc.co.uk/news/uk-21505271>
- 50 House of Commons Library, UK Parliament, Briefing Paper Number CBP 8176, 'New Nuclear Power' 28 June 2018 <http://researchbriefings.files.parliament.uk/documents/CBP-8176/CBP-8176.pdf>
- 51 MoX myths, WISE International, 11th April 1997 <https://www.wiseinternational.org/nuclear-monitor/469-470/5-mox-myths-only-lies>
- 52 FT 25th June 2018 <https://www.ft.com/content/9d245eca-7781-11e8-bc55-50daf11b720d>
- 53 Asahi Shimbun 17th June 2018 <http://www.asahi.com/ajw/articles/AJ201806170027.html>
- 54 Beyond Nuclear International 17th June 2018 <https://beyondnuclearinternational.org/2018/06/17/all-that-would-be-destroyed-reprocessing-japan/>
- 55 See <https://www.nrc.gov/waste/spent-fuel-storage.html>
- 56 Stone, R. Spent fuel fire on U.S. soil could dwarf impact of Fukushima, Science 24th May 2016, <http://www.sciencemag.org/news/2016/05/spent-fuel-fire-us-soil-could-dwarf-impact-fukushima> and Frank N. von Hippel and Michael Schoeppner 'Reducing the Danger from Fires in Spent Fuel Pools' Science and Global Security, 2016, VOL.24, NO. 3, pp141-173 <http://scienceandglobalsecurity.org/archive/sgs24vonhippel.pdf>
- 57 Reuters 10th October 2017 <https://uk.reuters.com/article/us-france-nuclear-security/frances-nuclear-spent-fuel-pools-major-security-risk-greenpeace-idUKKBN1CF1HJ>
- 58 Irish Independent 3rd July 2018 <https://www.independent.ie/world-news/europe/watch-greenpeace-crashes-supermanshaped-drone-into-nuclear-plant-37075791.html>
- 59 Daily Mail 2nd July 2018 <http://www.dailymail.co.uk/wires/ap/article-5910093/Oldest-US-nuke-plant-New-Jersey-shutter-September.html>
- 60 Implementation strategy for Scotland's policy on higher activity radioactive waste, Scottish Government December 2016 <http://www.gov.scot/Resource/0051/00511782.pdf>
- 61 Guardian 4th April 2016 <https://www.theguardian.com/environment/2016/apr/04/europe-faces-253bn-nuclear-waste-bill>
- 62 Reuters 16th Feb 2016 <https://uk.reuters.com/article/uk-europe-nuclear-idUKKCN0VP2KN>
- 63 ONDRAF/NIRAS Research, Development and Demonstration (RD&D) Plan 2012 (NIROND TR 2013-12E), page 59
- 64 NIROND TR 2013-12E, page 60 (in French)
- 65 Chamber of Representatives Resolution 541/9-91/92 on the use of fuels containing plutonium and uranium in Belgian nuclear plants and on the advantages of reprocessing fuel rods, adopted on 22 December 1993
- 66 ONDRAF Plan déchets, septembre 2011 (NIROND 2011-02 F), page 24 (in French)
- 67 NIROND-TR 2013-12 E, page 350 (in French)
- 68 NIROND-TR 2013-12 E, page 190 (in French)
- 69 譯註：「戈雷 (Gray, Gy)」，戈雷是吸收劑量的國際專用單位，等於 1 焦耳 / 千克
- 70 Thesis of M. Mouazen, 2011 – Evolution des propriétés rhéologiques des enrobés bitume, page 179 (in French)
- 71 ANDRA – Dossier Argile 2009, concepts d'entreposage, page 282 (report on clay, section on waste management concepts, in French).
- 72 ANDRA – Dossier Argile 2005, Architecture du stockage, page 456 (Idem, section on storage architecture, in French)

參考資料

- 73 MOX 和 UOX 的用過燃料
- 74 NIRONDR-TR 2013-12 E, page 350 (in French)
- 75 ANDRA – Dossier Argile 2005, Evaluation faisabilité, page 47 (feasibility assessment, in French)
- 76 ANDRA – Dossier Argile 2005, Architecture du stockage, page 146 (Idem, section on storage architecture, in French)
- 77 ANDRA – Dossier Argile 2005, Architecture du stockage, page 144 (Idem, section on storage architecture, in French)
- 78 NIRONDR 2011-02 F, page 140 (in French)
- 79 NIRONDR 2011-02 F, page 140 - NIRONDR TR 2013-12 E, page 135
- 80 NIRONDR-TR 2013-12 E, page 89 (in French)
- 81 NIRONDR-TR 2013-12 E, page 253 (in French)
- 82 NIRONDR TR 2013-12 E, pages 69 and 76
- 83 Supercontainers 參考原能會出國報告，譯為超級容器。(https://report.nat.gov.tw/ReportFront/PageSystem/reportFileDownload/C09803628/001)
- 84 NIRONDR TR 2013-12 E, page 69
- 85 NIRONDR TR 2013-12 E, page 71
- 86 NIRONDR TR 2013-12 E, page 74
- 87 Id.24 NIRONDR TR 2013-12 E, page 212
- 88 NIRONDR TR 2013-12 E, page 221
- 89 譯註：1.「綜合斜井 (way shaft)」，此處原文為 way-shaft，但查無對應中譯，查閱 ANDRA 原始文件後發現 way-shaft 法文原文應為 tous puits，字面上應翻為 all-shaft。根據 ANDRA 的 "Dossier Argile 2005, Evaluation de la faisabilité" 報告中第 30 頁之定義 (譯者譯)「ANDRA 所提議的選項是 all-shaft，保留其單一結構之簡單性，以及使井道盡可能地適應重要的起降。為了安全地管理共同存在的不同類型之作業活動，根據功能的不同規劃出四種不同的井道」，可判斷 all-shaft 應該是結合不同功能之井道的系統。再根據 Cigéo 自身的介紹，其中採用此種井道設計的廠區稱為 zone descenderie，即為「斜井區」，故採折衷譯法，此處譯為「綜合斜井系統」。2.「暗井 (winze)」意指裝有升降設備，但沒有直通地面的出口的井道，有垂直式的也有傾斜式的。
- 90 ANDRA – Dossier Argile 2005, Architecture, page 281 (Idem, section on architecture, in French)
- 91 The Praclay heater test, EURIDICE Report, 2017, page 24
- 92 The Praclay heater test, EURIDICE Report, 2017, page 33
- 93 Thesis of Pierre Gérard, Impact des transferts de gaz sur le comportement poro-mécanique des matériaux argileux, May 2011 (TPG) (in French)
- 94 TPG, page 26
- 95 TPG, page 56
- 96 TPG, page 137
- 97 TPG, page 141
- 98 NIRONDR TR 2013-12 E, page 169
- 99 TPG, page 58
- 100 ANDRA – Dossier Argile 2005, Evaluation de la faisabilité, page 30 (feasibility assessment, in French)
- 101 TPG, page 170
- 102 ANDRA – Dossier Argile 2005, Evolutions phénoménologiques du stockage, page 352 (Phenomenological changes and storage, in French)
- 103 ONDRAF – 26/09/2014 Press release
- 104 NIRONDR TR 2013-12 E, page 133
- 105 Les échos.be – Des milliards supplémentaires pour stocker les déchets nucléaires – 22 August 2018 (in French).
- 106 The volume of spent fuel contained in La Hague pools is equal to one hundred 1,000-MW reactor cores.
- 107 Spent fuel, initially composed of enriched uranium from a traditional pressurised water reactor, and enriched uranium, contains approximately 95% uranium, 1% plutonium and 4% fission products and minor actinides combined.
- 108 MOX: "mixed oxide", a mix of uranium oxide and plutonium oxide. Breeder plants also use a plutonium fuel with a much higher (>20%) Pu content than that of MOX
- 109 Significant amounts of plutonium remain in storage at the La Hague re-processing plant, however: of the 56 tonnes present there at the end of 2013, 39.5 belonged to France.
- 110 Source: ANDRA, inventaire 2015 (in French).
- 111 譯註：Cigéo 官方網站將此兩個區域分別稱為 zone descenderie(斜井區，英文版為 ramp zone)，也就是在將核廢料降至地底之前做相關準備的區域，與 zone puits(井道區)，負責地下建築體部分的運輸。但綠色和平報告原文的兩個區域卻分別是 way-shaft area 以及 shaft areas。way-shaft 如前所述暫譯為「綜合斜井道」，但此處在描述具體廠區時，為了與 Cigéo 計畫官方用法的 zone descenderie 相符，故此處譯為「斜井道廠區」。
- 112 https://www.asn.fr/Informer/Actualites/Cigéo-revue-internationale-du-dossier-d-options-de-surete (in French)
- 113 http://www.irsn.fr/FR/expertise/rapports_gp/Documents/Dechets/IRSN_Rapport-2017-0013_GPDOS-Cigéo_Tome-1.pdf (in French)
- 114 https://www.asn.fr/Reglementer/Bulletin-officiel-de-l-ASN/Installations-nucleaires/Avis/Avis-n-2018-AV-0300-de-l-ASN-du-11-janvier-2018 (in French)
- 115 https://www.encyclopedie-energie.org/les-risques-d-exploitation-du-centre-industriel-de-stockage-geologique-Cigéo/
- 116 Andra : https://www.andra.fr/sites/default/files/2018-01/392.pdf — page 143.
- 117 Ibid
- 118 Callavo-Oxfordian 一詞來自專業術語，即此深地質處置場所所在地層中發現的泥岩。

參考資料

- 119 CNIC Seminar report: The problems with Japan's Plutonium: What are they and how do we deal with them? CNIC, 4 June 2018, ; and Frank von Hippel and Masa Takubo, "An alternative to the continued accumulation of separated plutonium in Japan: Dry cask storage of spent fuel, September 2018, https://www.researchgate.net/publication/327927769_An_alternative_to_the_continued_accumulation_of_separated_plutonium_in_Japan_Dry_cask_storage_of_spent_fuel
- 120 CNIC Seminar report: The problems with Japan's Plutonium: What are they and how do we deal with them? CNIC, 4 June 2018, ; and Frank von Hippel and Masa Takubo, "An alternative to the continued accumulation of separated plutonium in Japan: Dry cask storage of spent fuel, September 2018, https://www.researchgate.net/publication/327927769_An_alternative_to_the_continued_accumulation_of_separated_plutonium_in_Japan_Dry_cask_storage_of_spent_fuel
- 121 Actions NUMO is Taking to Promote Deep Geological Disposal of Radioactive Waste. April 12, 2018. Shunsuke Kondo President, Nuclear Waste Management Organization of Japan (NUMO), see <https://www.numo.or.jp/topics/1-4Kondo.pdf>
- 122 "Project to Establish the Scientific and Technical Basis for HLW Disposal in Japan", https://www.jaea.go.jp/04/tisou/english/report/H12_report.html
- 123 Government releases a geoscientific characteristics map showing areas "suitable" for disposal of high-level nuclear waste, CNIC_ OCTOBER 4, 2017
- 124 Map reference - Actions NUMO is Taking to Promote Deep Geological Disposal of Radioactive Waste, April 12, 2018. Shunsuke Kondo President, Nuclear Waste Management Organization of Japan (NUMO), see <https://www.numo.or.jp/topics/1-4Kondo.pdf>
- 125 In Japan the cost of waste disposal was estimated by the Ministry of Economy Trade and Industry (METI) in 2011 as 29 billion
- 126 The Science Council of Japan, Disposal of High Level Radioactive Waste, September 2012, see <http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-22-k159-1.pdf#page=1> (in Japanese).
- 127 Jonter, T. 2002. "Nuclear Weapon Research in Sweden. The Co-operation Between Civilian and Military Research, 1947-1972." SKI Report 02:18. 82 pp. Available in PDF (533 KB) at (10 July 2018): <https://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/en/publications/reports/non-proliferation/2002/200218/>
- 128 IAEA. Undated. "Power Reactor Information System (PRIS), Sweden." Available at (5 October 2018): <https://pris.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/CountryDetails.aspx?current=SE>.
- 129 Lindström Marianne, Åhäll Karl-Inge, Holmstrand Olov, Helander Björn, Goldstick Miles.1998-06. "Nuclear Waste in Sweden - The Problem Is Not Solved!" Available at (5 October 2018): <http://www.nonuclear.se/nuclear-waste-in-sweden1988>. Direct link to the section on the 1980 referendum: <http://www.nonuclear.se/nuclear-waste-in-sweden1988#nwchap4>.
- 130 Karlsson, Lasse. 2016-07-05. "Historien om avvecklingen som inte blivit av. Aktualiserad juni 2016. Framställt för Folkkampanjen mot Kärnkraft-Kärnvapen." ("The Story About the Phase-out that Didn't Happen. Updated June 2016. Prepared for the Swedish Anti-nuclear Movement.") (In Swedish only.) Available at (5 October 2018): <http://www.nonuclear.se/historien-om-avvecklingen-lasse-karlsson>.
- 131 Government Offices of Sweden. 16 June 2016 . "Framework agreement between the Swedish Social Democratic Party, the Moderate Party, the Swedish Green Party, the Centre Party and the Christian Democrats." Available at (5 October 2018): <https://www.government.se/49d8c1/content/assets/8239ed8e9517442580aac9bcb00197cc/ek-ok-eng.pdf>.
- 132 SKB. 2017-09-21. "Organisation." SKB website (10 July 2018): <http://www.skb.com/about-skb/organisation/>
- 133 Vattenfall. 2015-10-22. "Ownership." Vattenfall website (10 July 2018): <https://corporate.vattenfall.com/investors/key-facts/ownership/>.
- 134 SKB. 2017-04. "Plan 2016. Costs from and including 2018 for the radioactive residual products from nuclear power. Basis for fees and guarantees for the period 2018-2020." Technical Report TR-17.02. 52 pp. See p. 35. Available at (5 October 2018): <https://www.skb.se/publikation/2487964/TR-17-02.pdf>.
Some of the spent fuel from the research reactors is included in the KBS-3 application but is not included in the estimated quantity in tonnes, though is included in the estimate in the number of canisters.
- 135 SKB, 2017 年 4 月, 〈2016 計畫。2018 年及以降之核能發電放射性剩餘產品之花費。2018 年至 2020 年費用與保證金之基礎〉, 技術報告 TR17.02. 52 pp. See p. 35. Available at (5 October 2018): <https://www.skb.se/publikation/2487964/TR-17-02.pdf>
- 136 Ibid. See pp. 37-38.
- 137 The Nuclear Waste Fund. 2018. "Facts about the Nuclear Waste Fund 2017". 20 pp. Available at (5 October 2018): <http://www.karnavfallsfonden.se/informationinenglish/annualreport.4.4945b3d81223a8cbbf8800024168.html>. Direct link (5 October 2018): <http://www.karnavfallsfonden.se/download/18.46d462c3159fb761aca1f4f/1523619691724/Fakta+om+K%C3%A4rnnavfallsfonden+2017+engel-ska.pdf> (276 KB).
- 138 Ibid. See p. 2.
- 139 Op. cit., note 8. See p. 39.
- 140 SKB. 2016-09. "Programme for research, development and demonstration of methods for the management and disposal of nuclear waste." Technical Report TR-16-15. 314 pp. Available at (5 October 2018). <https://www.skb.se/publikation/2485289/>. The financial data is given in a separate document, of which "Plan 2016" referenced above is the companion volume for 2016.
- 141 See e.g. the government's decision on the 1995 and 1998 reports, for which the references follow. [1995] Miljödepartementet. 1996-12-19. "Regeringens beslut. Program för forskning m.m. angående kärnkraftavfallens behandling och slutförvaring." In Swedish only. 6 pp. See p. 3. [1998] Miljödepartementet. 2001-11-01. "Regeringens beslut. Komplettering av program för forskning, utveckling och demonstration för kärnavfallens behandling och slutförvaring, Fud-program 98." In Swedish only. 8 pp. See p. 1.
- 142 Much of the application is available in English on the SKB website, e.g. (5 October 2018): <http://www.skb.com/future-projects/the-spent-fuel-repository/our-applications/>.
- 143 See e.g.: Chatzis, Irena (IAEA Department of Nuclear Energy). 5 January 2018. "Solving the Back End: Finland's Key to the Final Disposal of Spent Nuclear Fuel." Available at (5 October 2018): <https://www.iaea.org/newscenter/news/solving-the-back-end-finlands-key-to-the-final-disposal-of-spent-nuclear-fuel#infobox>.

參考資料

- 144 Kamp, Kevin. 2010-11-16. "Statement of Kevin Kamps, Beyond Nuclear to Blue Ribbon Commission on America's Nuclear Future, November 16, 2010, Washington, D.C." Available at (5 October 2018): <http://www.nonuclear.se/KevinKampBRC20101116>.
- 145 Mörner, Nils-Axel. 2013. "Dry Rock Deposit - an alternative of handling the high level nuclear waste - the DRD method - a short presentation." 30 pp. Available at (5 October 2018): http://www.nonuclear.se/drd_method2013morner.
- 146 SKB. 2016-11-02. "Our method of final disposal." Available at (5 October 2018): <http://www.skb.com/future-projects/the-spent-fuel-repository/our-methodology/>. The "3" in "KBS-3" is sometimes interpreted as referring to the three barriers though that was not the meaning initially.
- 147 Op. cit., note 8. See p. 36.
- 148 SKB. 2010-12. "Design, production and initial state of the canister." Technical Report TR-10-14. See p. 28 re. weight, and pp. 33-34 for dimensions. Available from (10 July 2018): <http://skb.se/upload/publications/pdf/TR-10-14.pdf> (3.8 MB).
- 149 SKB addresses the permafrost depth issue on e.g. page 200 in their March 2011 application in the document: "Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark. Main report of the SR-Site project. Volume I. Technical Report TR-11-01." A 2015 study by specialists at the University of Turku, Finland found that in the next ice age permafrost could reach to the depth of the planned repository in Finland and Sweden. Reference for the report: Räsänen, Matti E.; Huitti, Janne V.; Bhattarai, Saroj; Harvey Jerry III; Huttunen, Sanna. 2015. «The SE sector of the Middle Weichselian Eurasian Ice Sheet was much smaller than assumed.» *Quaternary Science Reviews* 122 (2015) 131e141. All authors from University of Turku, Finland. Available at (5 October 2018): <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0277379115002243>.
- 150 Swedish Environmental Movement's Nuclear Waste Secretariat (Milkas). 2006-12. "The Baltic Sea is Radioactive." 4 pp. Available at (5 October 2018): <http://www.nonuclear.se/baltic-radioactive200612.html>.
- 151 SKB. 2011-03. "Environmental Impact Statement, Interim storage, encapsulation and final disposal of spent nuclear fuel." 337 pp. See Figure s-2, p. 12. Available (5 October 2018) at: <http://www.skb.com/future-projects/the-spent-fuel-repository/our-applications/> (PDF, 37.3 MB). Direct link: <http://www.skb.com/wp-content/uploads/2016/03/21014MKB-ENG-webb-150dpi.pdf>.
- 152 Copper Development Association Inc.. December 1998. "Copper's Role in the Safe Disposal of Radioactive Waste: Copper's Relevant Properties - Part I." Available at (5 October 2018): <https://www.copper.org/publications/newsletters/innovations/1998/12/nuclear.html>; and Source: Hultquist, G. B., Szakálos, P., Graham, M. J., Sproule, G. I., & Wikmark, G. 2008. Detection of hydrogen in corrosion of copper in pure water. In *Int. Corros. Congr.: Corros. Control Serv. Soc.* (pp. 2378–2386). Available at (5 October 2018): https://www.researchgate.net/publication/238102363_Detection_of_hydrogen_in_corrosion_of_copper_in_pure_water (PDF, 2.5 MB).
- 153 Macdonald Digby D.; Sharifi -Asl, Samin; Engelhard, George R.; Urquidí-Macdonald, Mirna. "Issues in the corrosion of copper in a Swedish high level nuclear waste repository." 2012. Swedish Radiation Safety Authority (SSM) Report number 2012:11. 160 pp. Available at (5 October 2018): <https://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/en/publications/reports/waste-shipments-physical-protection/2012/201211/>.
- 154 Regarding the presence or absence of oxygen see: He, Xihua & M. Ahn, Tae & Gwo, Jin-Ping. 2017. Corrosion of Copper as a Nuclear Waste Container Material in Simulated Anoxic Granitic Groundwater. *CORROSION*. 74. 10.5006/2471.
- 155 Szakálos Peter, Leygraf Christofer, Rosengren Anders, Seetharaman Seshadri, Grinder Olle, Linder Jan. 2018-04-26. "Analys av kärnbränsleförvar frågan efter mark-och miljödomstolens yttrande till regeringen." ("Analysis of the nuclear fuel management issue after the Land and Environment Court's statement to the government.") In Swedish only. 4 pp. Available at (5 October 2018): <http://www.nonuclear.se/szakalos-et-al20180426analys-av-karnbransleförvarsfragan>. This document was submitted to the government for its ongoing review, and the government has requested comments from SKB by 30 April 2019. The authors include a group of specialists at The Royal Institute of Technology (KTH) in Stockholm, who are at the forefront of copper corrosion research worldwide, and a former employee of SSM. Research in Sweden on copper corrosion by independent specialists was spearheaded by KTH Associate Professor Gunnar Hultquist, who died in February 2016. He initiated an experiment in 1986 showing that copper corrodes in oxygen-free water. His results were eventually confirmed internationally by independent methods.
- 156 Ibid.
- 157 Statskontoret. 2008-04-17. Samråd, stöd och slutförvar – en utvärdering av stöd till ideella organisationer ur Kärnavfallsfonden. 104 pp. In Swedish only. Available at (5 October 2018): <http://www.nonuclear.se/statskontoret20080417.html>.
- 158 Reuters. 2018-01-23. "Swedish regulators disagree on safety of nuclear waste plan." Available at (5 October 2018): <https://uk.reuters.com/article/us-sweden-nuclear-regulator/swedish-regulators-disagree-on-safety-of-nuclear-waste-plan-idUKKBN1FC21P>
- 159 SVT Nyheter (Swedish Television News). 2018-01-25. "Miljöjurister om slutförvaret: Osäkerhet bör leda till ett nej." ("Environmental lawyers comment on the final repository: uncertainty should lead to a no.") In Swedish only. Available at (5 October 2018): <https://www.svt.se/nyheter/lokalt/upsala/miljojuristen-regeringen-borde-saga-nej>.
- 160 This quote is from the Council's website, Available at (5 October 2018): <http://www.karnavfallsradet.se/en>. The annual reports are available in Swedish and English at the Council's website. For the 2018 report see: <http://www.karnavfallsradet.se/en/nuclear-waste-state-of-the-art-report-2018-decision-making-in-the-face-of-uncertainty>. Direct link (10 July 2018) (1.1 MB): http://www.karnavfallsradet.se/sites/default/files/documents/sou_2018_8_eng_webb.pdf.

- 161** SSM. 2018-01-23. "Pronouncement on licence applications for permission to develop facilities for final management of spent nuclear fuel - Statement of the Swedish Radiation Safety Authority." 5 pp. See p. 2. Ref. no: SSM2011-1135 and SSM2015-279. Document no: SSM2011-1135-23. Available at (5 October 2018): <https://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/en/areas/radioactive-waste/spent-nuclear-fuel-repository/final-repository-for-spent-nuclear-fuel/our-review-process/pronouncement-on-repository-applications/>. Direct link to PDF (364 KB) (5 October 2018): <https://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/contentassets/078506f952ae4357847628edcc1785a4/pronouncement-on-licence-applications-for-permission-to-develop-facilities-for-final-management-of-spent-nuclear-fuel-statement-of-the-swedish-radiation-safety-authority>. Swedish original: SSM. 2018-01-23. "Yttrande över ansökningar om tillstånd till anläggningar för slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle." 4 pp. See p. 2. Diariennr: SSM2011-1135 and SSM2015-279. Dokumentnr: SSM2011-1135-23. Available at (5 October 2018): <https://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/omraden/radioaktivt-avfall/slutforvar/slutforvar-for-anvant-karnbransle/stralsakerhetsmyndighetens-granskning-av-ansokan/slutforvarsyttrande-till-regeringen/>. Direct link to PDF (5 October 2018) (345 KB): <https://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/contentassets/b99c23f76a044b57b76174051b587407/ssm2011-1135-23-yttrande-over-ansokningar-om-tillstand-till-anlaggningar-for-slutligt-omhandertagande-av-anvant-karnbransle.pdf>.
- 162** Ibid. See p. 3.
- 163** SSM. 2018-01-23. "2018:02. Sammanfattning. Beredning inför regeringens prövning Slutförvaring av använt kärnbränsle." In Swedish only. Unofficial translation. 102 pp. See p. 10. Report no. 2018:02 ISSN 2000-0456. Available at (5 October 2018): <https://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/omraden/radioaktivt-avfall/slutforvar/slutforvar-for-anvant-karnbransle/stralsakerhetsmyndighetens-granskning-av-ansokan/slutforvarsyttrande-till-regeringen/>. Direct link to PDF (10 July 2018) (2.3 MB): <https://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/contentassets/96342ee1d37e4111b032be88ccb158bf/201802-sammanfattning>.
- 164** Ibid. See p. 66.
- 165** SSM. 2018-01-23. "2018:03. Remissammanställning. Beredning inför regeringens prövning Slutförvaring av använt kärnbränsle." In Swedish only. Unofficial translation. 142 pp. See p. 48. Report no. 2018:03 ISSN 2000-0456. Available at (5 October 2018): <https://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/omraden/radioaktivt-avfall/slutforvar/slutforvar-for-anvant-karnbransle/stralsakerhetsmyndighetens-granskning-av-ansokan/slutforvarsyttrande-till-regeringen/>. Direct link to PDF (10 July 2018) (2.6 MB): <https://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/contentassets/a3ade3d30e7944038eed5dc33ef8edf/201803-remissammanstallning>.
- 166** Ibid. See p. 98.
- 167** There have however been court proceedings that have included spent fuel management in a general sense as part of the case. Two Greenpeace initiated examples are the rejection in 1995 by the Supreme Court regarding construction of a reprocessing plant in Zheleznogorsk in the Krasnoyarsk Territory of Russia, and the High Court ruling in the UK in 2007 that a "misleading" and "seriously flawed" consultation process had been carried out by the government on the construction of new nuclear power plants. An IAEA report from 1993 "Nuclear Energy Inquiries - National and International" documents more than 30 inquiries that vary widely in nature (http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/25/026/25026317.pdf). In Canada, in 1997 a 10-year federal environmental assessment review of AECL's planned concept for a geologic repository was concluded. No site was chosen and the conclusion was that there were many unanswered questions about the system and thus it was not ready to be implemented (see e.g.: www.ccnr.org/fearo_hlw.html). Also in Canada there is a 1980 report of nuclear waste management that followed 15 weeks of hearings by the Parliamentary Select Committee on Ontario Hydro Affairs. The California Energy Conservation and Development Commission under the guidance of Emilio Varanini III conducted a series of hearings in the 1970s on the question of whether or not there exists a safe method for disposing of spent fuel and concluded that such a method did not currently exist, and also stated that such a method may never exist. Emilio Varanini III, in an interview, famously said that the belief in safe disposal was based not so much on scientific evidence but rather on "engineering euphoria". The California Report had legislative consequences, as the California Legislature had previously enacted a law banning any further nuclear reactors in California unless a safe disposal method could be shown to exist. The Legislature accordingly asked the Commission to determine whether or not such was the case. The Legislature accepted the advice of the Commission and so no new reactors were allowed in California.
- 168** Government Offices of Sweden. 1999. "The Swedish Environmental Code, Ds 2000:61." 164 pp. Available at (5 October 2018): <https://www.government.se/legal-documents/2000/08/ds-200061/>. Direct link (10 July 2018): <https://www.government.se/49b73c/contentassets/be5e4d4ebdb4499f8d6365720ae68724/the-swedish-environmental-code-ds-200061> (PDF, 559 KB). This English version does not include revisions that came into force on 1 August 2018, which changed the clause regarding nuclear activities from Chapter 17, Section 1 (6) to Chapter 17, Section 1 (1).
- 169** See the website of the Swedish Courts, e.g. (10 July 2018): <http://www.domstol.se/Funktioner/English/The-Swedish-courts/District-court/Land-and-Environment-Courts/>
- 170** Mark- och miljödomstolen, Nacka tingsrätt. 2018-01-23. "Mark- och miljödomstolen lämnar sitt yttrande till regeringen i målet om ett slutförvar för kärnavfall". (Unofficial translation: "The Land and Environment Court submit their statement to the government in the case regarding a final repository for nuclear waste".) In Swedish only. Available at (5 October 2018): <http://www.nackatingsratt.domstol.se/Om-tingsratten/Uppmarksammade-mal/Ansokan-om-slutforvar-for-anvant-karnbransle-mm/>.
- 171** Nacka District Court, Land and Environmental Court. 2018-01-23. "Summary Statement of the Land and Environmental Court, Case no. M 133-11, Matter: Permit according to the Environmental Code for an integrated system for final disposal of spent nuclear fuel and nuclear waste; at this time a matter of a statement to the government." Unofficial translation. Available at (5 October 2018): <http://www.nonuclear.se/mmd20180123summary-statement-case-m1333-11spent-fuel>.
- 172** Ibid. See page 4 *
- 173** Op. cit., note 44, see page 4.
- 174** Op. cit., note 44, see page 11
- 175** Op. cit., note 44, see page 10
- 176** Op. cit., note 44, see pp. 11-12.
- 177** Mark- och miljödomstolen, Nacka tingsrätt. 2018-01-23. "Yttrande, Mål nr M 1333-11, Saken: Tillstånd enligt miljöbalken till anläggningar i ett sammanhängande system för slutförvaring av använt kärnbränsle och kärnavfall; nu fråga om yttrande till regeringen". 566 sid. Se sid. 80. In Swedish only. Available at (5 October 2018): <http://www.nackatingsratt.domstol.se/Om-tingsratten/Uppmarksammade-mal/Ansokan-om-slutforvar-for-anvant-karnbransle-mm/>.

參考資料

- 178 Op. cit., note 44, see page 6.
- 179 SKB. Undated. "SFR - Final Repository for Short-lived Radioactive Waste." Six pp. Available at (5 October 2018): <http://www.skb.com/our-operations/sfr/>. Direct link to download (5 October 2018): http://skb.se/upload/publications/pdf/SFR_folder_engelsk.pdf.
- 180 SKB. 2017-12-11. "Planned extension of the SFR." SKB website. Available at (5 October 2018): <http://www.skb.com/future-projects/extending-the-sfr/>.
- 181 Posiva Oy. 2012. "Nuclear waste management of the Olkiluoto and Loviisa nuclear power plants. Summary of operations in 2012." 58 pp. See p. 7. Available at (5 October 2018): http://www.posiva.fi/en/databank/publications/other_publications#.Wykbcop9jDA. Direct address: http://www.posiva.fi/files/3197/YJH_2012_Engl_LOW.pdf (3.87 MB).
- 182 World Nuclear News. 2018-03-12. "Olkiluoto 3 EPR parties agree settlement." See (5 October 2018): <http://www.world-nuclear-news.org/C-Olkiluoto-3-EPR-parties-agree-settlement-12031801.html>
- 183 Posiva. 2018-04-30. "Annual Report 2017." 44 pp. See p. 3. Available at (5 October 2018): http://www.posiva.fi/en/databank/publications/annual_reports#.WykX3lp9jDA.
- 184 Ibid. See p. 3.
- 185 Posiva. 2017-03-05. "Annual Report 2016." 44 pp. See p. 5. Available at (5 October 2018): http://www.posiva.fi/en/databank/publications/annual_reports#.WykX3lp9jDA.
- 186 Posiva. 2006-03-29. "Onkalo, Underground Rock Characterisation Facility at Olkiluoto, Finland." 8 pp. See p. 2.
- 187 World Nuclear News. 2018-06-20. "Full-scale tests to start soon at Finnish repository." Available at (5 October 2018): <http://www.world-nuclear-news.org/WR-Full-scale-tests-to-start-soon-at-Finnish-repository-2006185.html>.
- 188 Op. cit., note 23
- 189 Finnish Ministry of Employment and the Economy, Energy Department. July 2015. "Management of spent fuel and radioactive waste in Finland – national programme in accordance with Article 12 of the Council Directive 2011/70/Euratom." 31 pp. See p. 26. Available at (5 October 2018): <https://www.stuk.fi/documents/12547/554501/National+Programme+072015docx+14072015+English+translation+21082015.pdf/b435b514-53e2-4dc2-8999-99cc91b4a886>.
- 190 Department for Business, Energy and Industrial Strategy (BEIS) Press Release 25th January 2018 <https://www.gov.uk/government/news/local-communities-to-give-views-on-permanent-disposal-of-radioactive-waste>
- 191 History of Waste Disposal Proposals in Britain, No2NuclearPower website 3rd Feb 2016 <http://www.no2nuclearpower.org.uk/radwaste/history-of-nuclear-waste-disposal-proposals-in-britain/>
- 192 Managing our radioactive Waste Safely, CoRWM's Recommendations to Government July 2006 https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/294118/700_-_CoRWM_July_2006_Recommendations_to_Government.pdf
- 193 Letter to the Guardian from Prof Andy Blowers 24th Jan 2018 <https://www.theguardian.com/environment/2018/jan/24/exposing-uk-government-fully-of-investment-in-new-nuclear>
- 194 Guardian 30th Jan 2013 <http://www.guardian.co.uk/environment/2013/jan/30/cumbria-rejects-underground-nuclear-storage>
- 195 See <http://www.westcumbriamrws.org.uk/page/83/Introduction.htm>
- 196 Final report of the West Cumbria Managing Radioactive Waste Safely Partnership, WCMRWS 16th August 2012. http://www.westcumbriamrws.org.uk/documents/306-The_Partnership's_Final_Report_August_2012.pdf
- 197 See Map on page 6 here http://www.westcumbriamrws.org.uk/documents/115-BGS_non-technical_summary.pdf
- 198 https://www.geos.ed.ac.uk/homes/rsh/Allerdale_and_Copeland.html
- 199 See <http://www.davidsmythe.org/nuclear/nuclear.htm>
- 200 Cumbria Trust 15th January 2018 <https://cumbriatrust.wordpress.com/2018/01/15/a-change-of-view-for-tim-knowles/>
- 201 Managing Risk Reduction at Sellafield, National Audit Office, November 2012. http://www.nao.org.uk/publications/1213/sellafield_risk_reduction.aspx
- 202 BBC 7th November 2013 <http://www.bbc.co.uk/news/uk-england-cumbria-20228176>
- 203 Nuclear Decommissioning Authority: Managing risk at Sellafield, Public Accounts Committee 4th Feb 2013 <http://www.publications.parliament.uk/pa/cm201213/cmselect/cmpublicacc/746/746.pdf>
- 204 Telegraph 19th June 2018 <https://www.telegraph.co.uk/politics/2018/06/19/sellafield-plutonium-decaying-faster-anticipated-intolerable/>
- 205 Carlisle News and Star 26th April 2018 <http://www.newsandstar.co.uk/news/Search-to-find-nuclear-waste-storage-site-is-flawed-Cumbria-council-chiefs-claim-c7de9658-2bf6-42f28785-d1b67d5ef835-ds>
- 206 Energy White Paper: Our Energy Future, Creating a Low Carbon Economy, February DTI, 2003. <http://webarchive.nationalarchives.gov.uk/+/www.berr.gov.uk/files/file10719.pdf>
- 207 Meeting the Energy Challenge: A White Paper on Nuclear Power, BERR January 2008, para 2.137 <http://webarchive.nationalarchives.gov.uk/20100512172052/http://www.decc.gov.uk/media/viewfile.ashx?filepath=what%20we%20do/uk%20energy%20supply/energy%20mix/nuclear/whitepaper08/file43006.pdf&filetype=4>
- 208 Re-iteration of CoRWM's Position on Nuclear New Build, Gordon Mackerron September 2007. Page 3 [http://webarchive.nationalarchives.gov.uk/20130717140311/http://corwm.decc.gov.uk/assets/corwm/pre-nov%202007%20doc%20archive/doc%20archive/tier%202%20\(7\)%20-%20implementation/tier%203%20-%20implementation%20advice/2162%202%20-%20corwm%20position%20on%20new%20build%20reiterated.pdf](http://webarchive.nationalarchives.gov.uk/20130717140311/http://corwm.decc.gov.uk/assets/corwm/pre-nov%202007%20doc%20archive/doc%20archive/tier%202%20(7)%20-%20implementation/tier%203%20-%20implementation%20advice/2162%202%20-%20corwm%20position%20on%20new%20build%20reiterated.pdf)
- 209 Letter to the Guardian from Prof Andy Blowers 24th Jan 2018 <https://www.theguardian.com/environment/2018/jan/24/exposing-uk-government-fully-of-investment-in-new-nuclear>
- 210 Geological Disposal - Feasibility studies exploring options for storage, transport and disposal of spent fuel from potential new nuclear power stations (NDA/RWMD/060/Rev1), RWM January 2014 <https://rwm.nda.gov.uk/publication/geological-disposal-feasibility-studies-exploring-options-for-storage-transport-and-disposal-of-spent-fuel-from-potential-new-nuclear-power-stations/>

參考資料

- 211 Nuclear Industry Association website (accessed) 9th July 2018 <https://www.niauk.org/industry-issues/waste-management/>
- 212 An overview of the differences between the 2013 Derived Inventory and the 2010 Derived Inventory, RWM Ltd, July 2015 <https://rwm.nda.gov.uk/publication/differences-between-2013-and-2010-derived-inventory/>
- 213 Higher Level Radioactive Waste: Likely inventory range; the process for altering it; how the community might influence it and understanding the implications of new nuclear build. Presented to West Cumbria Managing Radioactive Waste Safely Partnership. See Table 3 http://www.westcumbriamrws.org.uk/documents/94-Inventory_critique_Pete_Roche.pdf
- 214 NWAA Issues Register, 2010 <http://www.nuclearwasteadvisory.co.uk/wp-content/uploads/2011/06/NWAA-ISSUES-REGISTER-COMMENTARY.pdf>
- 215 Rock Solid? A scientific review of geological disposal of high-level radioactive waste, by Dr Helen Wallace, Greenpeace 2010 <http://www.greenpeace.org/eu-unit/en/Publications/2010/rock-solid-a-scientific-review/>
- 216 Ian Jackson, Research Report "Subsidy Assessment of Waste Transfer Pricing for Disposal of Spent Fuel from New Nuclear Power Stations"; Independent Report for Greenpeace UK, 1st March 2011, <https://www.greenpeace.org.uk/wp-content/uploads/2017/07/FUP-Subsidy-Report-Mar2011.pdf>
- 217 Cumbria Trust 29th April 2018 <https://cumbriatrust.wordpress.com/2018/04/29/gdf-site-search-is-flawed-cumbria-council-chiefs-claim/>
- 218 Peter Swift, Recent developments in the disposal of high-level waste and spent nuclear fuel, U.S. Department of Energy, National Nuclear Security Administration, Sandia National Laboratory, October 18, 2017. <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2017/11/f46/Peter%20Swift%20PRACoP%202017%20final.pdf>
- 219 Carylyn Greene, An Overview of Spent Fuel Storage in the United States, Ux Consulting Company, LLC, January 23, 2018. https://www.inmm.org/INMM/media/Documents/Presentations/Spent%20Fuel%20Seminar/2018%20Spent%20Fuel%20Seminar/1-23-18_1300-1Greene-An-Overview-of-Spent-Fuel-Storage-in-the-US.pdf
- 220 Op Cit Ref 1.
- 221 譯註：「拍貝克 (PBq)」，放射性活度之單位，等於 10^{15} Bq
- 222 U.S. Department of Energy, Nuclear Waste Technical Review Board, Commercial spent Nuclear Fuel (2017). http://www.nwtrb.gov/docs/default-source/facts-sheets/overview_snf_hlw.pdf?sfvrsn=15
- 223 U.S. Department of Energy, Energy Information Administration, Nuclear Fuel Data Survey, GC-859, (2013)
- 224 Allan Hedin, Spent nuclear fuel - how dangerous is it ?, Technical Report 97-12. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co, Stockholm, Sweden, International Atomic Energy Agency, March 1997. P 21. http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/29/015/29015601.pdf
- 225 U.S. National Research Council, Committee on Lessons Learned from the Fukushima Nuclear Accident for improving Safety and Security at U.S. Nuclear Plants, Phase 2, the National Academies of Science, National Academies Press, Washington D.C. (2016). <https://www.nap.edu/catalog/21874/lessons-learned-from-the-fukushima-nuclear-accident-for-improving-safety-and-security-of-us-nuclearplants>
- 226 U.S. Nuclear Regulatory Commission, US Commercial Spent Nuclear Fuel Assembly Characteristics: 1968-2013, NUREG/CR-7227, September 28, 2016. <https://www.nrc.gov/docs/ML1626/ML16267A351.pdf>
- 227 J. A. Rollstin, D. I. Chanin and H.-N. Jow, MELCOR Accident Consequence Code System (MACCS), Nuclear Regulatory Commission, NUREG/CR-4691 Vol.3, 2007
- 228 Robert Alvarez, Jan Beyea, Klaus Janberg, Jungmin Kang, Ed Lyman, Allison Macfarlane, Gordon Thompson, Frank N. von Hippel, Reducing the Hazards from Stored Spent Power-Reactor Fuel in the United States, Science and Global Security, 11:1-51 (2003). <https://www.nrc.gov/docs/ML1209/ML120960695.pdf>
- 229 Frank N. von Hippel and Michael Schoeppner, Reducing the Danger from Fires in Spent Fuel Pools, Science and Global Security, Vol 24, No 3, 141-173. <http://scienceandglobalsecurity.org/archive/sgs24vonhippel.pdf>
- 230 U.S. Nuclear Regulatory Commission, Office of Nuclear Security and Incidence Response, RASCAL 3.0.5 Descriptions of Models and Methods, NUREG-1887, August 2007. <http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/staff/sr1887/sr1887.pdf>
- 231 Containment, Independent Lens, PBS, January 2016, <http://www.pbs.org/independentlens/films/containment/>
- 232 Op Cit. Ref 9.
- 233 Andrew C. Kadak, The Storage of Spent Nuclear Fuel, Managing Nuclear Waste, The Bridge, National Academy of Engineering, National Academies of Science, Summer 2012. <https://www.nae.edu/File.aspx?id=60739>
- 234 U.S. Department of Energy, Nuclear Waste Technical Review Board, Letter to Mr. John Kotek, Acting Assistant Secretary for Nuclear Energy, from Rodney C. Ewing, Chairman, May 23, 2016. <https://www.nwtrb.gov/docs/default-source/correspondence/rce0516.pdf?sfvrsn=15>
- 235 OP Cit Ref 6
- 236 Ibid
- 237 Ibid
- 238 U.S. Department of Energy, Office of Nuclear Energy, Task Order 11: Development of Consolidated Fuel Storage Facility Concepts Report, February 12, 2013. https://curie.ornl.gov/system/files/documents/not%20yet%20assigned/AREVA%20-%20TO11%20-%20FINAL%20REPORT_0.pdf
- 239 DOE: J.Jarrell, Standardized Transportation, Aging, and Disposal (STAD) Canister Design, presentation to the Nuclear Waste Technical Review Board June 24, 2015. <http://www.nwtrb.gov/meetings/2015/june/jarrell.pdf>
- 240 Op Cit Ref 19..
- 241 U.S. Department of Energy, Analysis of the Total System Life-Cycle Cost of Civilian Radioactive Waste Management Program, Fiscal Year 2007, DOE/RW-059, July 2008. <https://www.nrc.gov/docs/ML0927/ML092710177.pdf>
- 242 U.S. Department of Energy, Strategy for the Management and Disposal of Used Nuclear Fuel and High-Level Radioactive Waste, January 2013. <http://www.energy.gov/sites/prod/files/Strategy%20for%20the%20Management%20and%20Disposal%20of%20Used%20Nuclear%20Fuel%20and%20High%20Level%20Radioactive%20Waste.pdf>
- 243 A. Machiels, An Updated Perspective on the US Nuclear Fuel Cycle, Electric Power Research Institute, Technical Update, June 2006. <http://www.epri.com/abstracts/Pages/ProductAbstract.aspx?ProductId=00000000001013442>

參考資料

- 244 International Atomic Energy Agency, Scientific and Technical Basis for geological disposal of Radioactive Wastes, Technical Reports Series, No. 413, (2003) p. 6. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TRS413_web.pdf
- 245 Volcanic Hazard At Proposed Yucca Mountain Nuclear Waste Repository Greater Than Previously Thought, Science News, August 2002. <https://www.sciencedaily.com/releases/2002/08/020801075418.htm>
- 246 U.S. Department Energy, License Application for a High-Level Waste Geologic Repository at Yucca Mountain, June 3, 2008. <https://www.nrc.gov/waste/hlw-disposal/yucca-lic-app.html>
- 247 Ibid.
- 248 Ibid.
- 249 Somi Seong, Obaid Younossi, Benjamin W. Goldsmith, Titanium Industrial Base, Price Trends, and Technology Initiatives, The Rand Corporation, 2009. https://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/monographs/2009/RAND_MG789.pdf
- 250 U.S. Department of Energy, Inventory and Description of Commercial Reactor Fuels within the United States, FCRD-Used, 2011-000093, <http://sti.srs.gov/fulltext/SRNL-STI-2011-00228.pdf>
- 251 Adam Levin, What to Expect When Ready to Move Spent Nuclear Fuel from Commercial Nuclear Power Plants, National Transportation Stakeholders Forum, Minneapolis, MN, May 14, 2014. https://curie.ornl.gov/content/what-expect-when-readying-move-spent-nuclear-fuel-commercial-nuclear-power-plants?search_api_views_fulltext=&page=3&curie_origin=solr
- 252 U.S. Government Accountability Office, COMMERCIAL NUCLEAR WASTE, Resuming Licensing of the Yucca Mountain Repository Would Require Rebuilding Capacity at DOE and NRC, Among Other Key Steps, GAO-17-340, April 17, 2017. P.1, <https://www.gao.gov/assets/690/684327.pdf>
- 253 譯註：「氣球式抵押貸款 (balloon mortgage payments)」，是一種貸款方式，其貸款的利息和一部分的本金採分期償還的方式，雖然前期須償還的金額較小，但最後須一次性地償還相對大量的剩餘本金。

著作權及免責聲明

本報告為綠色和平法國辦公室於 2019 年發布，由綠色和平臺北辦公室（以下稱「綠色和平」）翻譯出版。閱讀本報告即表示您已閱讀、理解並接受下列著作權和免責聲明條款的約束。

著作權聲明

本報告由綠色和平發布，綠色和平是本報告的唯一合法著作權所有人。

免責聲明

本報告作環保公益和資訊分享目的使用，不作為公眾及任何協力廠商的投資和決策參考，綠色和平亦不承擔因此引發的相關責任。

本報告為綠色和平於研究期間內基於各種公開訊息獨立調查研究產出的成果，綠色和平不對報告中所涉及資訊的即時性、準確性和完整性擔保。

綠色和平是一個獨立的全球性環保組織，致力於以實際行動推動積極改變，保護地球環境與世界和平。

如您有任何問題或建議，請聯繫 inquiry.tw@greenpeace.org

翻譯：魏揚

綠色和平臺北辦公室 2020 年出版
臺北市中正區重慶南路一段 109 號
+886 22361 2351
www.greenpeace.org/taiwan/zh

GREENPEACE 綠色和平