



瑞士核電廠 除役的經驗



淺談正子磁振造影機
(PET/MR) 原理與應用

氣候變化與咖啡：
利用核技術抗擊咖啡葉銹病

美國電力研究所
回顧過去的一年

澳洲選定國家放射性
廢棄物設施場址

2022 年太陽能將占
新增發電容量的一半

美國重新啟動雅卡山
用過核子燃料管理計畫

編輯室手札

隨著 1960 年代台灣的經濟發展，當時台灣的電力來源已經由火力取代水力發電；火力發電的燃料需仰賴進口，而當時燃料進口來源地的中東地區局勢長期不穩定。為了確保能源的穩定供應，同時支撐國內經濟蓬勃發展所需的電力，政府決定興建核能發電廠來因應需要。

核一廠於 1970 年核准興建，1971 年底開始施工，興建期間 1973 年 10 月發生第一次石油危機，第 4 次中東戰爭爆發，石油輸出國組織（OPEC）為了打擊對手以色列及支持以色列的國家，宣布石油禁運，暫停出口，造成油價上漲；當時原油價格曾從 1973 年每桶不到 3 美元漲到超過 13 美元，火力發電成本爆增，影響能源的供應，核能發電的需求隨之提高。核一廠運轉期間總發電量約 3,380 億度，對台灣產業經濟民生發展具有極大貢獻。隨著 1 號機的運轉執照於 107 年 12 月 5 日屆滿、2 號機於 108 年 7 月 15 日到期後，核一廠正式除役，成為全台首座邁入除役的核電廠。

相較於台灣核電廠的除役現況，本期的「專題報導」是借鏡瑞士 Mühleberg 核電廠的除役經驗。BKW 公司是瑞士第一家除役核電廠的營運商，於 2019 年 12 月關閉 Mühleberg 沸水式反應爐後，立即進行除役。BKW 認為安全是重中之重，為保護民眾、員工和環境免受輻射風險，Mühleberg 的工作人員、控制區和周圍環境仍持續不斷的監測輻射劑量，並且輻射防護措施和避免事故的措施將一直持續到 Mühleberg 不再是危險的放射性來源為止。此外，對 BKW 而言，在除役期間透明溝通仍是優先的事項，對於計畫里程碑的公共資訊會議仍持續進行，也邀請媒體專業人士瞭解關鍵項目的步驟。目前全世界正在拆除或已經除役的核電廠有 150 多座。因此，我們應借重國外的寶貴經驗，與其他核電廠除役計畫保持密切關係，交流相關經驗與專業知識，瞭解除役領域的最新進展和發現。

咖啡是現今世界上交易量最大的商品之一，咖啡產業每年約有 1,000 億美元的收入。但是，隨著氣候變化及其造成天氣模式的改變，在許多傳統的種植區，曾經適合咖啡植物生長的條件正在惡化，咖啡葉銹病（一種導致咖啡樹死亡的疾病）的發病率正在上升。本期「生活中的輻射」單元報導來自受咖啡葉銹病影響最嚴重的中美洲的專家，聚集在國際原子能總署，學習如何應用核科學與技術來培育對這種致命真菌具有抗性的品種，保護咖啡對抗病菌的侵害。☼

目錄

專題報導 2 瑞士核電廠除役的經驗 - 編輯室

原子能小學堂 12 我國核電廠除役策略 - 編輯室

生活中的輻射 16 淺談正子磁振造影機 (PET/MR) 原理與應用 - 楊邦宏

20 氣候變化與咖啡：利用核技術抗擊咖啡葉銹病 - 編輯室

24 同位素技術拯救巴拿馬的可可出口 - 編輯室

科普有意思 26 我們的身體有放射性嗎？(下) -HPS

國際脈動 30 澳洲選定國家放射性廢棄物設施場址 - 編輯室

32 美國重新啟動雅卡山用過核子燃料管理計畫 - 編輯室

33 加拿大在第一個處置場候選地點完成鑽孔 - 編輯室

34 Pilgrim 的燃料移除工作在創紀錄的時間內完成 - 編輯室

36 芬蘭 Posiva 申請用過核子燃料處理設施的營運執照 - 編輯室

38 烏克蘭開始將用過核子燃料運送到處置設施 - 編輯室

39 美國電力研究所回顧過去的一年 - 編輯室

40 2022 年太陽能將占新增發電容量的一半 - 編輯室

41 隨著供應趨緊，可再生能源 PPA 價格繼續攀升 - 編輯室

新聞報馬仔 42 國外新聞 - 編輯室

45 國內新聞 - 編輯室

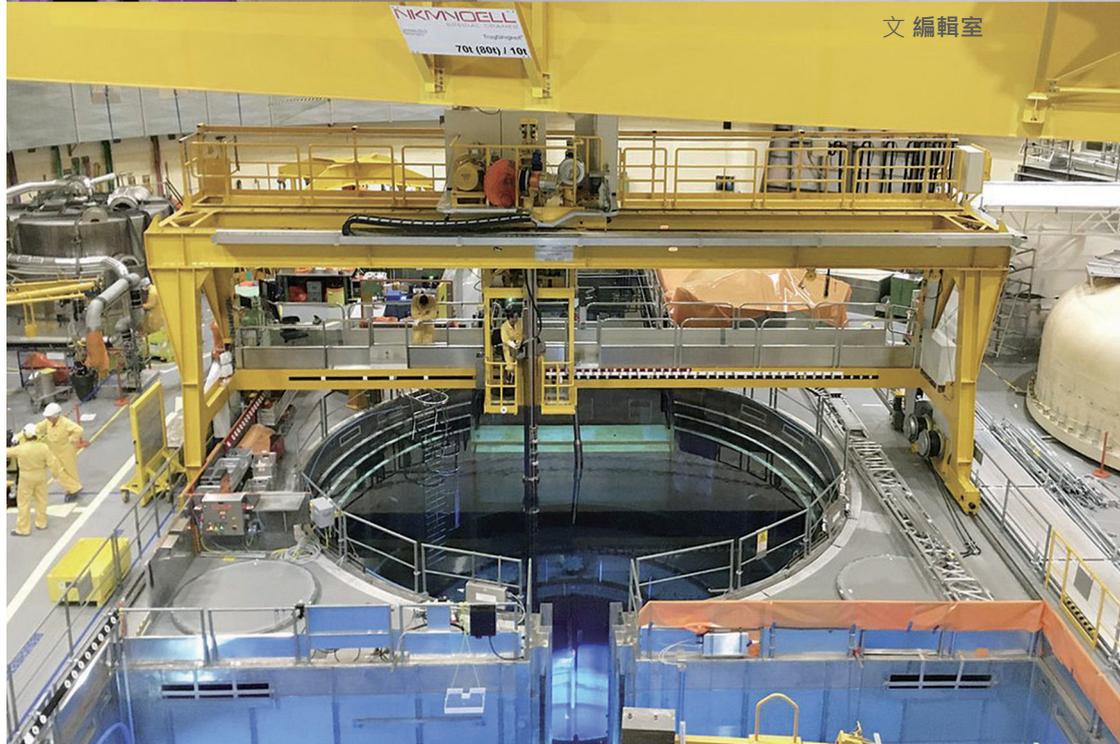
出版單位：財團法人核能資訊中心
地 址：新竹市光復路二段一〇一號
電 話：(03) 571-1808
傳 真：(03) 572-5461
臉書粉絲專頁：請搜尋「財團法人核能資訊中心」
電子郵件：nicentersys@gmail.com
發行人：郭瓊文
編輯委員：李四海、陳條宗、郭瓊文、謝牧謙（依筆畫順序）

主 編：鍾玉娟
文 編：呂樂樂、翁明琪
執 編：長榮國際文化事業部
設計排版：長榮國際文化事業部
地 址：臺北市民生東路二段 166 號 6 樓
電 話：02-2500-1175
製版印刷：長榮國際股份有限公司 印刷廠
行政院原子能委員會敬贈 廣告
台灣電力公司核能後端營運處敬贈 廣告



瑞士核電廠 除役的經驗

文 編輯室



瑞士的核電

- 瑞士目前有 4 座核子反應爐，生產高達 40% 的電力。計畫新建兩座大型新機組（截至 2021 年 2 月底資料）。
- 2011 年 6 月，議會決定不再更動任何反應爐，因此逐步淘汰核電，這在 2017 年的公投結果中獲得確認。

電力部門

- 總發電量（2018 年）：691 億度
- 發電組合：水力 378 億度 (55%)、核能 255 億度 (37%)、生質燃料與廢棄物 31 億度 (4%)、太陽能 19 億度 (3%)、天然氣 6 億度 (1%)、風力 1 億度。
- 進出口餘額：16 億度淨出口
- 總消耗量：576 億度
- 人均消費電量：6,800 度 / 年

(資料來源：
2019 年電力資訊與 2018 年世界銀行的數據)

過去 10 年，瑞士每年的用電量一直穩定維持在 550-600 億度。從並法國、奧地利和德國進口電力，2018 年進口總量為 310 億度，電力出口主要是義大利，總



運轉中的反應爐
296 萬瓩



興建中的反應爐
0 萬瓩



關閉的反應爐
37.9 萬瓩

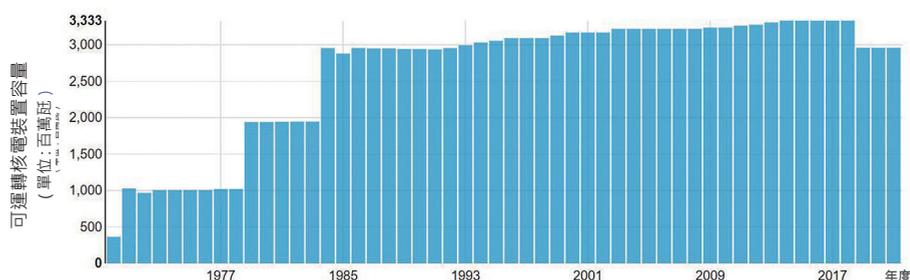
量為 326 億度，2018 年出口到義大利為 22.8 億度。進出口總額基本上保持平衡。為確保冬季月份的供電安全，瑞士電力公司與法國 EDF 電力公司簽訂了長期合約，以溢價進口 250 百萬瓩的法國核電。2017 年 3 月，瑞士國民議會以 136 票對 52 票通過繼續維持此一安排。

核電產業

瑞士所有運轉中的反應爐都進行了功率提昇—2014 年 Beznau 機組從 35 百萬瓩增加到 36.5 百萬瓩，Gösgen 機組從 92 百萬瓩增加到 101 百萬瓩（2013 年更換主要設備），Leibstadt 從 99 百萬瓩逐步增加到 122 百萬瓩。

只要能向監管機構證明安全，瑞士所有運轉中的反應爐都擁有無期限的運轉執照，只不過需要每 10 年核發一次新執照，

瑞士歷年核能發電量 (資料來源: WNA)



反應爐名稱	型式	反應爐類型	淨容量 (MWe)	開始興建	首次併網
Beznau 2 號機	W (2 迴路)	壓水式	365	1968-01	1971-10
Gösgen	PWR (3 迴路)	壓水式	1,010	1973-12	1979-02
Beznau 1 號機	W (2 迴路)	壓水式	365	1965-09	1969-07
Leibstadt	BWR-6	沸水式	1,220	1974-01	1984-05

瑞士運轉中的反應爐 (資料來源: WNA)

條件是必須符合安全的要求。Mühleberg 核電廠於 2009 年 12 月獲得了 10 年的執照，然而，2012 年，聯邦行政法院裁定，由於安全考慮，該反應爐應在 2013 年年中關閉。法院裁定的內容表示，安全問題非常重要，不能由監管機構—瑞士聯邦核安全檢查局 (ENSI) 單獨負責，如果核電廠擁有者 BKW 公司想要在 2013 年年中以後繼續營運，需要為此提出強而有力的理由。BKW 與能源部共同提出上訴，最高法院於 2013 年 3 月推翻了原裁決。

BKW 考量 Mühleberg 核電廠安全相關升級的選項，於 2013 年 10 月決定花費約 2 億瑞士法郎 (約 64 億新台幣) 提昇安全設備，並於 2019 年關閉反應爐。因為若按照最初計畫將其運轉壽命延長至 2022 年，將花費更高的成本，以及「被政治和監管趨勢的不確定性包圍」。

2014 年 5 月，伯恩州舉行公民投票，這是自 2011 年政府決定逐步淘汰核電以來，瑞士首次對核電進行公民投票。民眾以 63% 的投票結果否決了提前關閉核電廠的提案，而有效地批准了 2019 年關

閉的日期。2015 年 1 月，ENSI 批准了 BKW 修訂後的 Mühleberg 維護計畫，允許營運至 2019 年。

Mühleberg 核電廠的除役

BKW 公司是瑞士第一家除役核電廠的營運商，於 2019 年 12 月關閉 Mühleberg 沸水式反應爐後，立即對其進行除役。這項工程耗資約 8 億瑞士法郎 (約 256 億新台幣)，預計將於 2031 年完成，在 2034 年之前可釋出該廠區。此外，以 13 億瑞士法郎 (約 416 億新台幣) 預算，大約在 2040 年完成放射性廢棄物處理。BKW 的除役基金中已經有 9.3 億瑞士法郎 (約 297.6 億新台幣)，並且已經做好準備。到 2024 年，用過核子燃料將轉運到 Würenlingen 的貯存設施，其餘約 4,000 噸的是因污染較嚴重而無法除污和回收的拆除材料。

2015 年 3 月，Alpiq 成立了一家名為 Swiss Decommissioning 的公司，為核子設備的後期運轉和拆除，以及輻射防

護與除污提供綜合解決方案。2017年9月，BKW收購了德國輻射防護服務公司 Dienstleistungen für Nukleartechnik GmbH。這家德國公司自2009年以來一直為Mühleberg核電廠提供輻射防護的服務。

從2034年起Mühleberg廠區可以無限制地再次使用，在此之前，將一步一步地進行拆除。Mühleberg除役時程的規劃如下：

2013年至2019年底：電力運轉與除役規劃

2013年10月，由於業務考量，BKW決定將Mühleberg核電廠營運至2019年底之後關閉。這讓BKW有時間為瑞士核子反應爐的首次除役做好準備。除役與處置負責人Stefan Klute表示：「在2019年底停止發電後，BKW在2020年初即開始拆除Mühleberg核電廠。」

2020年：開始拆除

2019年12月20日Mühleberg正式停機後，2020年1月6日即開始拆除工作。為了創造作業空間，需將物料搬運清空。BKW拆除了機房中不再需要的系統組件。在反應爐建築中，BKW移除反應爐上方的數噸材料，並將所有用過核子燃料組件從反應爐移至燃料貯存池。在那裡存放數年，隨著貯存水池獨立運轉的冷卻系統，用過核子燃料的輻射強度將逐漸降低。

2021年至2024年：核子組件拆除與用過核子燃料組件的清除

在可能的情況下，BKW會在反應爐廠房內進行拆除行動。來自反應爐內部的高放射性組件在水下被拆除並包裝。同時，BKW在機房中創造更多空間並清除其中的放射性污染材料。從2022年起，BKW將用過核子燃料組件從貯存池運送到位於Würenlingen的集中式中期貯存設施(Zwilag)，直到2024年底，Mühleberg內將不再存有用過核子燃料組件。

2025年至2030年：核子組件拆除

從2025年起，Mühleberg核電廠內所有與放射性物質接觸的剩餘部分都將被拆除。例如，反應爐壓力容器、圍阻體部分或不再需要的燃料貯存池。所有拆解的組件都在機房內分類，盡可能地除污後，檢查其放射性並加以包裝。除污後可釋出的材料作為普通廢棄物處理，或者如果可能就加以回收利用。BKW將放射性廢棄物送到Zwilag。在工作結束時，BKW清潔並檢查所有在運轉過程中可能接觸到放射性的建築結構，並確保不再具有放射性。

2031：批准後釋出該廠區

到2030年底，Mühleberg將不再有放射性物質。現在整個區域都被政府當局監管，當確認不再偵測出有危險的放射性射源之後，監管機構將釋出該廠區以供新的用途。

2031年至2034年：常規拆解

未來將視Mühleberg廠區的用途是用於工業使用或保持自然狀態，再決定是否拆除不再需要的建築物。為此，Mühleberg將在2027年之前向監管機

構提交常規拆除申請。拆除建築物的瓦礫將在垃圾掩埋場處理，或是被回收。該廠區可以從 2034 年起再次重新使用。

拆除的第一年

Mühleberg 核電廠永久關閉後進行拆除的第一年，員工就達到了不同的里程碑。然而，這項工作才剛剛開始。還有很多事情要做。

移動中的巨人

一個巨大的影像一公分一公分地穿過 Mühleberg 核電廠的機房，它是兩個發電機定子中的一個。在運轉過程中，它與轉子一起工作來發電。因為它對於機艙中的起重機來說太重了，所以必須架設一根重型吊杆才能將其吊起。在運離 Mühleberg 核電廠區域之前，必須先清潔。之後再以一輛有 18 個車軸和 124 個車輪的卡車運往回收公司。在此將處理其材料，可以回收利用。

除役過程中產生的材料

大部分除役產生的廢棄物是一般的建築廢棄物，在操作過程中，只有一小部分材料與放射性物質接觸，大部分的材料可以清潔後回收或另做處置。

廢棄物的數量

Mühleberg 除役的廢棄物總量約為 20 萬噸，其中大約 8% 受到放射性污染，但其中大部分只是輕微的污染。經過特殊除污後，這種材料可以做為普通建築垃圾處理或回收利用。這使得必須專門處理的放射性廢棄物不到 2%。

清潔和間隙測量

BKW 的主要目標是將放射性廢棄物維持在最低限度，這就是 BKW 盡可能清潔相關材料的原因。在某些情況下，只需將髒污擦掉就可以了；其他部分則用水或鋼球高壓清洗。所謂的除污測量，是用於檢查材料是否不再有放射性污染，是否可以正常處理或回收。任何無法除污的物品都會被包裝起來，以便日後進行深層貯存。

衰減貯存

根據法律，如果讓某些低放射性物質衰變 30 年，它的放射性就會下降到非常低而無需特殊處理，以至於不再被認為是放射性材料。衰變後的材料可以視為一般廢棄物處理或回收。經過衰變貯存，放射性廢棄物的數量將大為減少。

中低放射性廢棄物

低放射性與中放射性廢棄物包括來自廢水處理中除污系統的樹脂、發電廠工作人員受污染的工作服，或拆除建築物和管道的部分。如果無法清洗，則必須進行處理和包裝，然後運送到 Zwiilag，直到它們在深層地質處置場中進行最終處置。

用過核子燃料組件—高放射性廢棄物

用過核子燃料組件在 Mühleberg 的貯存池中先存放數年，然後才運往 Zwiilag，之後會放置在深層地質處置場中。到 2024 年，所有燃料組件都將從 Mühleberg 廠區中移除。

位於 Würenlingen 的集中式中期貯存設施

放射性廢棄物貯存在 Würenlingen 的 Zwiilag 集中式中期貯存設施中，直到深層地質處置場開始運轉。Zwiilag 容納空間大，可以容納瑞士所有 5 座核電廠（以 60 年的運轉壽命為準）運轉和拆除過程中產生的所有廢棄物。

深層地質處置場

從長遠來看，深層地質處置場可以保護人類和環境免受放射性廢棄物的影響。瑞士國家放射性廢棄物處置專責機構 Nagra，是由核電廠營運商和聯邦政府共同創立，其任務是為深層地質處置場尋找安全地點，並建造和營運。尋找最終處置場的安全地點是一個漫長的過程，必須分階段進行。對高度活動和弱與中度活動的 3 個可能地區進行深入的地質調查，場址的選擇就是在此基礎上進行。

瑞士的放射性廢棄物管理概念提供兩種深層地質處置場：一種是高放廢棄物貯存設施，一種是中低放廢棄物貯存設施。另有一項替代方案，還可以選擇將兩種深層地質處置場合併為一座組合式處置場。處置場位於地下數百公尺深處的乳白粘土層礦床中。根據廢棄物不同的類型，處置場由貯存隧道或貯存洞穴、用於監測廢棄物代表性部分的試驗貯存設施、測試區、基礎設施和通道所組成。深層地質處置場確保了人類和環境可受到長期的保護。

放射性廢棄物的安全處置

放射性廢棄物是在核電廠運轉期間產

生的一尤其是在拆除核電廠時，這些必須妥善處理。瑞士的處置概念可在深岩層中貯存。在位置確定且處置場準備好運轉之前，廢棄物會暫時貯存在 Zwiilag 集中式中期貯存設施中。

放射性廢棄物的包裝

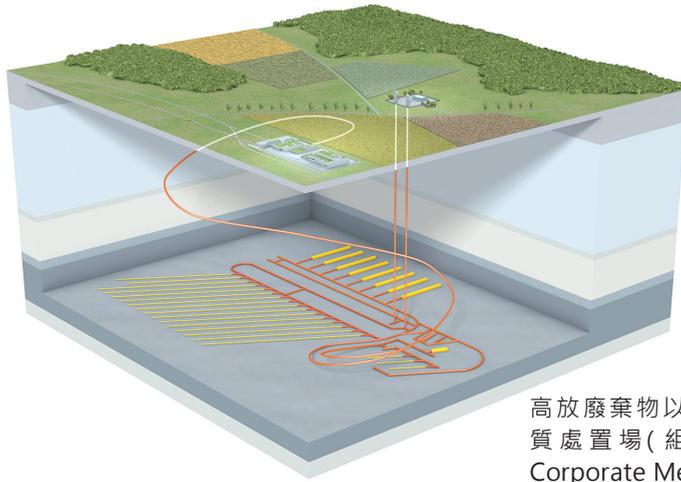
用過核子燃料組件最初會在 Mühleberg 的燃料貯存池中保存幾年，當它們的放射性顯著下降並且放出的熱量較少時，會被裝在貯存池內的運輸容器中，運送到 Zwiilag，然後轉移到高放廢棄物貯存容器中。在機組運轉服務期間，BKW 就已經定期展開這項工作。在停機後的最初幾年，Mühleberg 電廠周邊的運輸量與運轉發電時的運輸量大致相同。

中低放廢棄物，例如廢水處理中除污系統產生的樹脂，或核電廠工作人員受輻射污染的工作服，經過處理後貯存在深層地質處置場中。在 Zwiilag 的電漿系統中，液態廢棄物被固化，可壓縮廢棄物被壓縮，可燃廢棄物被焚化。產生的廢氣被淨化，殘餘物作為放射性廢棄物處理。廢棄物在 Zwiilag 中包裝，密封於處置容器中，使它們可以輕鬆安全地處理，並且堅固耐用。

運輸和物流

在 Mühleberg 拆除過程中，主要產生的是一般建築物瓦礫，放射性廢棄物只占運輸的一小部分。BKW 計畫優化整個停機期間的卡車行駛次數，並將其減少到必要的最低限度。

到 2024 年，Mühleberg 電廠附近的



高放廢棄物以及中低放廢棄物的深層地質處置場(組合式儲存設施) © Infel Corporate Media(圖片來源: BKW 公司)

運輸量與發電期間的運輸量大致相等：超過一半的卡車行程用於為系統供電，例如用於員工餐廳。2019 年至 2020 年期間不到 5%，2020 年至 2024 年期間不到 10% 是運往 Zwiilag 的放射性廢棄物。到 2024 年底，所有用過核子燃料組件都將從 Mühleberg 中移除。從那時起，只有中低放廢棄物會送往 Zwiilag。

BKW 預計從 2024 年到 2030 年卡車運輸量會略有增加，因為必須清除越來越多的放射性物質以及一般的廢棄物。2030 年之後，當 Mühleberg 沒有放射性物質但尚未接受監管機構控制時，只會進行一般廢棄物的處置作業。監管機構將在 2031 年開始控制此區域。如果沒有任何危險的放射性來源，此區域既可以用於工業用途，也可以恢復為自然狀態。2031 年後的運輸次數將取決於除役完成後將如何使用 Mühleberg 廠區。如果 BKW 拆除所有建築物並清除現場的瓦礫，預計每天將有大約 20 車次的運輸。

專業知識

核電廠的除役是一項複雜的大型計畫，BKW 依靠 Mühleberg 核電廠的工作人員以及具有拆除經驗的人員，也得到從事高度專業化工作的外部專家的支援。

沒有人比這裡的員工更瞭解 Mühleberg，其中一些人已經在電廠工作了幾十年，他們的專業知識對於拆除工作非常重要，因此 BKW 主要與自己的員工一起進行除役。每年在大修期間，他們都會打開反應爐壓力容器，然後將燃料組件從反應爐移入貯存池。在這裡，機組的運轉經驗可以直接用於除役，但也需要新的技能。到目前為止，經常重複發生的活動在停工期間大多變成了一次性工作。BKW 及時適應了這種變化，並提前做好準備。

國外經驗

在瑞士，BKW 是第一個拆除反應爐的電力公司，但在全世界，目前正在拆除或

已經除役的核電廠有 150 多座。因此，BKW 充分瞭解技術與規劃的挑戰，並借鏡國外經驗：BKW 與其他核電廠除役計畫保持密切關係，在國際上交流相關經驗與專業知識，因此瞭解核電領域除役的最新進展和發現。

其中一個例子是 BKW 與西班牙放射性廢棄物處置組織 (ENRESA) 的合作。自 2010 年以來，ENRESA 一直負責拆除馬德里東邊的 José Cabrera 核電廠。該電廠於 1968 年開始運轉，於 2006 年 4 月關閉。目前，拆除工作正在進行中，且進展順利。Mühleberg 和 José Cabrera 核電廠之間有定期交流，包括相互訪問。同時，這些已經有核子設施拆除經驗的員工也參與 Mühleberg 的除役。

某些拆除工作，例如拆除爐心內部組件，即在運轉期間位於反應爐內部的組件，是高度專業化的工作；若要為此建立特定的專業知識並不值得，因此，BKW 依靠外部專家來完成這類工程。

實施成功

除役工作從 2020 年初開始，很明顯的，提前除役的決定和全面的除役準備已經取得成效。Mühleberg 的員工已為新任務做好準備，在拆除過程中，他們利用運轉發電階段中已有的知識和新學得的知識。Mühleberg 的正式員工和具有拆除經驗的同事之間不斷交流，每個人都從中受益。參與的人每天都在學習，因此可以在必要時調整和優化流程與程序。現在員工從拆除 Mühleberg 中累積的經驗，不僅

在瑞士，以後都將廣受歡迎。

安全是重中之重

為保護民眾、員工和環境免受輻射風險，因此瞭解運轉發電期間的真實情況也是 BKW 在停機期間的首要任務。這就是為什麼 Mühleberg 的工作人員、控制區和周圍環境仍持續監測輻射劑量的原因。

在機組關閉後不久，就不再釋放高溫和高压等主要的危險因素；電廠現場也逐漸清除放射性物質，因此核電廠在除役期間的潛在危險會降低。儘管如此，除役期間與運轉期間同樣適用嚴格的規定：輻射防護措施和避免事故的措施將一直持續到 Mühleberg 不再是危險的放射性來源。

放射性迅速下降

用過核子燃料占了 Mühleberg 的大部分放射性總量。與正常運轉相比，在關閉僅 3 個月後，放射性衰變就將其減少了 1,000 倍。隨著拆除工作的進行，會再進一步減少。到 2024 年，當所有用過核子燃料都從 Mühleberg 運輸到 Zwiilag 時，放射性總量會只剩原本的百萬分之一。

保護人與環境免受輻射影響

BKW 輻射防護專家的任務是保護人與環境免受不允許的輻射侵害。在停機期間，按照與運轉期間相同的高標準，對防護目標和法律允許的輻射曝露持續監控。BKW 使用必要的保護措施在建築物內進行所有與放射性物質有關的工作，例如拆除、除污和包裝。如有必要，可在封閉的

工作箱或設有過濾空氣迴路的劃定區域中進行。為了控制輻射曝露，工作人員持續接受輻射監測：在控制區內，所有人員都佩戴輻射劑量計，像他們在運轉發電期間一樣，用於測量工作人員的輻射曝露。

全面監測放射性排放

除了控制區內的所有房間和工作場所外，BKW 也對廢氣和廢水進行監測。雖然在停機期間進行大量的拆除和除污工作，但 BKW 繼續遵守運轉發電時對廢氣和廢水現有的放射性排放限制。廢水在分批排入阿勒河前，會先經過除污和檢查。只有當放射性小到不會影響民眾或環境時才會排放。釋放到環境中的放射性物質將遠低於法定的排放限值，並且降至最低——這包括除役和運轉都適用。

除役費用基金

瑞士放射性廢棄物管理的總成本估計為 186 億瑞士法郎（約 5,952 億新台幣），其中包括 50 年的運轉後監測階段。核電廠業主向 2002 年設立的國家廢棄物處理基金繳納費用。此外，1984 年設立的除役基金，電廠營運商也每年為此繳納費用。預計需求為 37 億瑞士法郎，外加 17 億瑞士法郎用於營運後準備。截至 2017 年底，這兩個基金的累計資本為 77 億瑞士法郎，其中 58 億瑞士法郎已用於廢棄物管理。

這兩個計畫都根據《核能法》通過對核電徵收每度約 1 美分（約 3 元新台幣）的稅來挹注。儘管 2011 年和 2016 年的基金審查均顯示負債將得到全面的支付，但

瑞士政府仍要求從 2014 年年中起大幅增加對這兩個基金的收費。

除役成本提供者

用於除役和放射性廢棄物處置的資金由瑞士聯邦政府控制的基金管理，BKW 將承擔全部費用。

在 2019 年底服務營運最終停止之前，Mühleberg 就已經籌得 7,000 萬瑞士法郎（約 22 億 4,000 萬新台幣）用於計畫和準備停機的費用，除役基金向 BKW 取得相對應的款項。最終停機後，將產生以下的除役費用：

- 除役期間產生的放射性廢棄物的運輸和處置
- 拆除所有技術設施和建築物
- 一般性垃圾掩埋
- 放射性污染系統組件拆除、粉碎和除污
- 輻射與職業安全措施

運轉後會產生進一步的成本，即從最終停止運轉發電到燃料組件閒置期間的營運成本，BKW 將支付這些費用。

整個除役所需的資金——即拆除和後端營運——已延遲到 2022 年。即使對於放射性廢棄物的處置，運轉期間也累積了 8.2 億瑞士法郎（約 262.4 億新台幣）的費用，例如用於移除用過核子燃料組件及其中期貯存，或尋找深層地質處置場的地點。在最終停止營運服務後，處置費用將由 BKW 定期支付給處置基金的款項支應，直至 2022 年。處置包括以下費用：

- 核電廠放射性廢棄物的運輸和處置
- 中期貯存
- 深層地質處置場研究規劃及建造運轉
- 深層地質處置場 50 年監控期

大部分處置費用只會在未來深層地質處置場開始建造時發生，即最早從 2040 年開始。與除役基金相比，處置基金將在數十年內產生資本收入。已經發生和將發生的除役與處置總成本為 30 億瑞士法郎（約 960 億新台幣），目前已經取得其中 80% 以上。剩餘的 20% 將自 2126 年起由進一步的資金和核電廠的獲益支付。

在瑞士聯邦機構的監督下，除役成本每 5 年將重新計算一次，作為成本研究的一部分，基於當前國外和科學技術的經驗，並由獨立專家檢查。這些成本研究構成了營運商必須向基金支付費用的基礎。

Mühleberg 的除役大約需要 15 年，到 2034 年結束。在除役期間，重點將放在公眾、環境和員工的安全上，如同在運轉期間一樣。

BKW 正在轉型

Mühleberg 的除役將使 BKW 的發電量減少 1/4，伯恩州的電力供應也減少一半。除役是 BKW 從能源公司轉型為國際能源與基礎設施服務供應商的要素之一。近年來，BKW 已發展到約 10,000 名員工，其中大部分活躍於服務部門，這表示 BKW 已做好因應未來能源與基礎設施挑戰的準備。

除役期間繼續進行透明溝通

對 BKW 而言，在除役期間持續透明溝通仍將是優先的事項，從 2019 年 12 月 20 日起，Mühleberg 遊客中心展示該電廠營運與除役的圖片與資訊。關於計畫里程碑的公共資訊會議也將繼續進行，媒體專業人士將受邀並告知關鍵項目的步驟。第一次媒體活動是在 2020 年上半年舉行。☢



身穿防護衣的員工正在使用高壓清洗機 (圖片來源: BKW 公司)

參考資料:

1. <https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-o-s/switzerland.aspx>
2. <https://www.bkw.ch/en/energy/energy-generation/decommissioning-of-the-muehleberg-nuclear-power-plant>

核發的除役許可後 25 年內完成除役。拆除或移出的放射性污染設備、結構或物質，將貯存於主管機關核准的放射性廢棄物貯存設施。

電廠營運期間的用過核子燃料目前暫存於廠內用過核子燃料池中，未來除役後將暫時存放在室內乾式貯存設施內，當高放射性廢棄物最終處置設施或放射性廢棄物中期暫時貯存設施建置完成後，就會運送至最終處置設施進行處置或放射性廢棄物中期暫時貯存設施貯存。

除役時產生的低放射性廢棄物，將暫存於廠內的廢棄物貯存庫中，等低放射性廢棄物最終處置設施或放射性廢棄物中期暫時貯存設施建置完成後，連同運轉時所產生的低放射性廢棄物運送至最終處置設施進行處置或放射性廢棄物集中貯存設施貯存。

核一廠未來完成除役後，除了保留區(含放射性廢棄物貯存設施)外，其餘土地將朝電力事業用途來做規劃，如興建各類電力設施等。

除役作業現況

核一廠目前仍因第一期用過核子燃料乾式貯存設施尚未獲新北市府核發水保完工證明而無法啟用，反應爐爐心內核燃料未能順利移出，影響反應爐及相關廠房等拆除工作。即使除役，因為用過燃料仍在爐心，核能安全仍然非常重要，必需同時進行維持反應爐停機安全和推動除役。因此，首件除役拆除工作提報未受輻射影響的「核一廠主變壓器至開關場間連絡鐵塔拆除作



核一廠空拍圖
(圖片來源:台電公司)

台電核一廠除役計畫時程說明



業方案」，此方案涉及水土保持、環保申報及拆除作業管制等，經陳報新北市政府、經濟部及原能會等相關主管機關核准後，於 108 年 11 月 20 日舉行核一廠除役開工典禮及核一廠主變壓器至開關場間連絡鐵塔拆除儀式。

經原能會審查核准後，台電公司於 108 年 11 月 20 日執行兩部機聯絡鐵塔 (G1-T1 及 G2-T1) 拆除作業。G1-T1 聯絡鐵塔於 109 年 1 月 13 日拆除完成，G2-T1 聯絡鐵塔於 109 年 2 月 27 日拆除完成。

環境輻射監測

台電公司依據法規規劃了核一廠除役期間的環境輻射監測，藉以評估核一廠除役期間所造成的民眾最大個人年劑量，以確保環境及民眾的輻射安全。有關核電廠環境輻射監測，台電公司於「環境輻射監測資訊透明化網站」(<http://wapp4.taipower.com.tw/nsis/web/index.html>) 提供相關資料供公眾查閱。有關環境輻射的取樣與分析作業項目如下：

空氣樣本分析

環境中的空氣樣本（灰塵、煙、霧、蒸氣，或氣體形式散布於空氣中的放



左圖：拆除鐵塔施工現場圖·右圖：核一廠一號機鐵塔拆除施作圖(圖片來源：台電公司)

射性物質)以連續抽氣裝置收集後，分析空氣中懸浮微粒的總貝他輻射及碘-131的含量。

水樣分析

定期採取海水、飲水、河水及池水等樣本，經處理後進行分析，以瞭解核設施附近的各類水樣中放射性核種的含量。

生物試樣分析

依據農、漁、牧產位置分析，定期採取各類樣本，進行加馬能譜、碘-131及銻等核種分析，以瞭解各類樣本中放射性物質的含量。

沉積物試樣分析

定期採取土壤及岸沙樣本進行加馬能譜分析，以瞭解放射性物質在環境中的累積效應。

核一廠環境輻射監測結果，截至民國108年第4季，都是遠低於「環境試樣放射性分析預警措施基準」的調查基準，經過評估對附近民眾造成的輻射劑量同樣都是遠低於法規限值。☸

核一廠環境輻射監測表(單位:毫西弗/年)

年份	104年	105年	106年	107年	108年	法規年限值
廠外民眾最大個人劑量值	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<1

資料來源：台灣電力公司核能後端營運專屬網站 <https://nbmi.taipower.com.tw/> 核一廠除役計畫 new/



淺談正子磁振造影機 (PET/MR) 原理與應用

文 臺北榮總核醫部醫事放射師 楊邦宏博士

正子斷層造影 (Positron Emission Tomography, 英文簡稱 PET) 以下簡稱「正子造影」，主要為功能性影像檢查，藉由正電子 (positron) 放射性核種如 F-18、O-15、N-13、C-11 的物理特性進行正子蛻變 (β^+ decay) 可釋放出正電子，正電子會立刻與組織中的負電子產生互毀作用 (annihilation)

後，產生兩個方向相反的 511 keV 高能光子輻射線 (γ -ray)，再由正子造影儀器接收，經過電腦的影像處理，分析出人體的生理藥物分布立體影像 (下頁圖 1)。

正子藥物會釋放出正電子，使用不同藥物的生理機轉可以反映出不同組織器官病變的存在、範圍大小與嚴重程度。目前使

用氟化去氧葡萄糖正子藥物 (F-18 FDG) 可用於評估體內器官組織的代謝情形，臨床上可以用於腫瘤造影、心肌存活評估及癲癇病灶定位。因為癌細胞通常會有較高的代謝，因此氟 18 標記葡萄糖的攝取會較正常組織來的高，因此利用這個特性作為腫瘤癌症的分期與療效的評估工具，因此中央健康保險局自民國 93 年 7 月起，開始給付部分疾病正子斷層掃描的檢查費用。其適應症如下：

- 一、腫瘤部分的適應症：1. 乳癌、淋巴癌的分期、治療及懷疑復發或再分期。2. 大腸癌、直腸癌、食道癌、頭頸部癌 (不包含腦瘤)、原發性肺癌、黑色素癌、甲狀腺癌及子宮頸癌的分期及懷疑復發或再分期。
- 二、非腫瘤部分的適應症：1. 存活心肌偵測：限 LVEF \leq 40% 以下。2. 癲癇病灶術前評估。

正子影像需要經過光子衰減校正 (attenuation correction) 後，才能提供清

晰與量化的影像，因為輻射強度會隨著距離正子儀器偵檢頭越遠，以及經過體內組織器官的衰減，造影輻射生理訊號而減弱，重建影像中體內組織器官訊號微弱，體表皮膚訊號過強的現象，因而判讀不易 (下頁圖 2)，所以需要計算體內組織的直線衰減係數值來做校正。

西元 1997 年美國匹茲堡大學 Townsend 教授等人將電腦斷層 (Computed Tomography, 英文簡稱 CT) 和 PET 的儀器整合在一起，創造出 PET/CT 造影機，可以同時兼顧功能和解剖結構影像。因為利用 CT 產生 X 光穿透人體不同密度的組織器官，造成 X 光不同程度的衰減，再使用電腦影像重建法運算出人體各切面組織密度分布的影像，也就是輻射光子受物質直線衰減程度的衰減修正圖譜 (attenuation map)，正好適合當作 PET 造影的衰減校正補償資訊，故目前臨床都以 PET/CT 造影機應用於臨床檢查，但唯一的缺點是因為 CT 穿透掃描多增加了些微

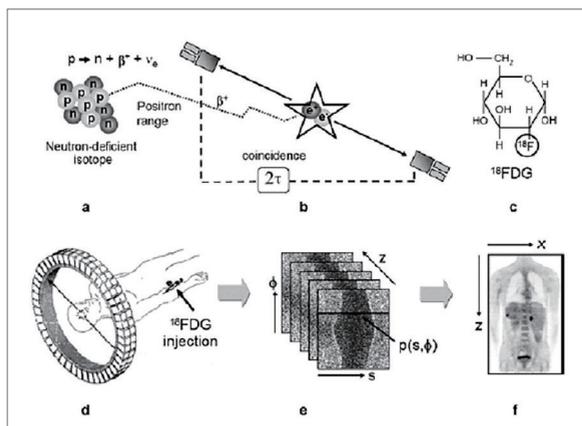


圖 1. 圖 a-f 為正子影像產生的流程圖：a. 代表正子核種經過正子蛻變釋放正電子；b. 代表正電子與電子互毀產生方向相反的 γ -ray；c. 代表正子藥物中常用的氟化去氧葡萄糖 (F-18 FDG) 結構式；d. 代表注射正子藥物到體內後，正子偵檢器收集身體的生理代謝訊號；e. 原始正子影像座標圖；f. 利用 e 進行影像重建法後產生可以判讀的正子影像。

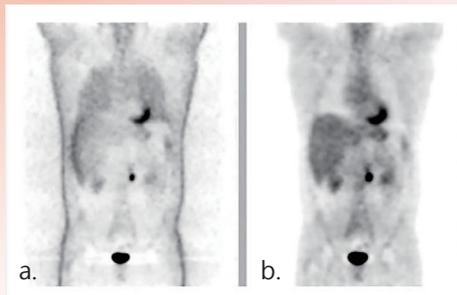


圖 2. 此為同一受試者，a. 代表未經過光子衰減校正的正子影像，b. 代表為經過光子衰減校正訊號後的正子影像。

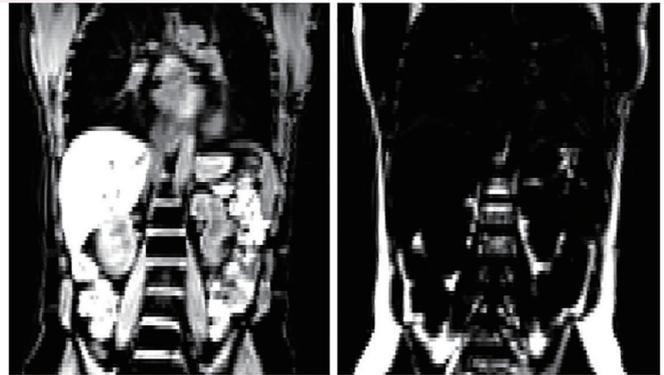


圖 3. 利用狄克森法脈衝波序 (Dixon pulse sequence) 可以將身體組織分割不同訊號，左上方為純水訊號 (water) 影像，右上方為純脂肪 (fat) 影像訊號，正下方為兩者訊號結合重新分隔產生的衰減校正圖譜，包含肺部、脂肪組織、軟組織和背景圖。(參考來源: Magn Reson Mater Phy (2013) 26:99–113)

的輻射劑量，所以近幾年開始提到使用磁共振造影儀 (Magnetic Resonance Imaging, 英文簡稱 MRI) 來做 PET 的影像衰減校正與解剖定位，2003 年首部正子 / 磁共振造影機 (PET/MRI) 高階儀器因而產生。

磁共振造影儀 (MRI) 原理是人體在高磁場環境中，利用無線電波激發體內的氫原子，使其產生共振訊號，經電腦影像重組運算得到高解析度的影像。可是 MRI 本身沒有輻射線訊號，缺乏如 CT 可以穿透組織的輻射直線衰減係數資訊，但因為科技突飛猛進，儀器軟硬體獲得大幅改善提升後，磁共振衰減修正 (magnetic resonance attenuation correction,

MRAC) 可以藉由 MRI 本身的狄克森法脈衝程序 (Dixon pulse sequence) 產生的純水、純脂肪、水加脂肪、水減脂肪 4 種組織訊號進行衰減修正 (圖 3)，當然還有一些其他的波序可以進行衰減校正的影像重建，目前也都在開發研究中。

由於 MRI 優點具有高解析度及良好的軟組織對比度，並有多種脈衝序列影像可以參考，對於鑑別癌症病灶的位置及特性十分有幫助；而 PET 對於癌症轉移病灶的偵測相當敏感，故這兩種醫學影像檢查對於癌症的偵測、分期及療效評估相當重要。

根據美國麻省總醫院的統計，有約兩成接受 PET-CT 檢查的患者，仍需要接受

MRI 檢查以評估病情，所以現行的正子造影都是結合電腦斷層定位的 PET/CT。而上述需要接受 MRI 及 PET 檢查的患者，就必須分開接受兩次檢查，需要花費較多的時間，也無法在同一天完成檢查，因此分開取得的兩種影像之間，可能因為身體姿勢擺位的不同，或因兩次檢查相隔了一段時間，出現諸如無法精確定位病灶，或無法表現出一致的影像生理發現的問題。

正子磁振造影機 (PET / MR) 是當今醫學影像最具獨特性的發明，並於近年逐步改進，成為目前臨床研究與應用的重要

工具。台灣目前共有 4 台，分別位於台大醫院、台北榮總、三軍總醫院以及林口長庚。它的特性是利用 PET/MR 同步取像，提供一機台、一次檢查流程，可在 20 到 60 分鐘內完成全身 PET 與 MR 檢查，同步獲取生理解剖及即時性細胞與代謝功能訊息，較傳統檢查更方便與快速。此外，相較於目前臨床常規使用的正子造影與電腦斷層融合影像 (PET/CT)，可進一步降低輻射劑量，對軟組織與骨關節系統也有更好的解析度，目前適用於神經退化、精神、疼痛、心血管疾病與腫瘤診療 (圖 4) 追蹤等。

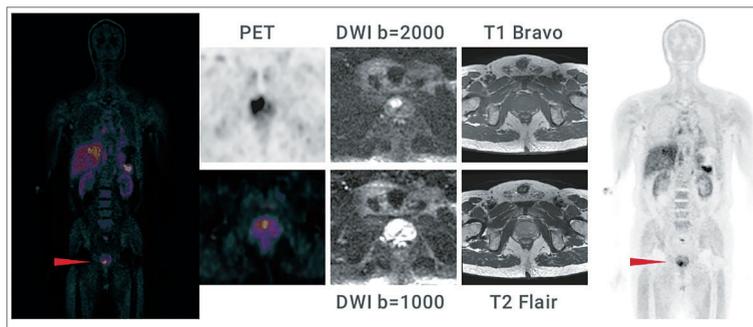


圖 4. 65 歲男性健康檢查發現腫瘤指數 (前列腺特異抗原, PSA) 升高, 使用 碳-11 醋酸 (C-11 Acetate) 正子藥物使用正子磁振檢查 (PET/MR), 紅色箭頭為異常吸收區域, 經手術診斷為前列腺癌, 但未發現有淋巴結或遠處轉移。

參考資料:

1. Pichler, Bernd J., et al. "PET/MRI: paving the way for the next generation of clinical multimodality imaging applications." *Journal of Nuclear Medicine* 51.3 (2010): 333-336.
2. Judenhofer, Martin S., et al. "Simultaneous PET-MRI: a new approach for functional and morphological imaging." *Nature medicine* 14.4 (2008): 459.
3. Wagenknecht, Gudrun, et al. "MRI for attenuation correction in PET: methods and challenges." *Magnetic resonance materials in physics, biology and medicine* 26.1 (2013): 99-113.
4. Valk, Peter E., et al. "Positron emission tomography." Springer-Verlag London 1 (2003): 5
5. Hofmann, Matthias, et al. "MRI-based attenuation correction for PET/MRI: a novel approach combining pattern recognition and atlas registration." *Journal of nuclear medicine* 49.11 (2008): 1875-1883.



氣候變化與咖啡： 利用核技術抗擊咖啡葉銹病

譯 編輯室

咖啡是世界上交易量最大的商品之一，咖啡產業每年約有 1,000 億美元的收入。但是，隨著氣候變化及其造成天氣模式的改變，在許多傳統的種植區，曾經適合咖啡植物生長的條件正在惡化，咖啡葉銹病（一種導致咖啡樹死亡的疾病）的發病率正在上升。

原子能總署與聯合國糧食與農業組織（糧農組織）合作，一直在與各國專家共同努力利用核技術緩解咖啡葉銹病對咖啡樹的影響。原子能總署第一次培訓專家利用植物育種技術開發對引起咖啡葉銹病的真菌具有抗性的咖啡品種。在一個為期 5 年的協調研究項目中，來自 6 個國家的科

學家一直在研究抗病咖啡的品種，而這項培訓是該項目的一部分。

「種植者一直注意到氣候變化對其咖啡作物的影響，導致收成減少，而且這些咖啡產區的很多地區正在經歷不穩定的降雨，助長了疾病的傳播。」糧農組織 / 原子能總署糧農核技術聯合中心植物育種與遺傳學實驗室主任 Ivan Ingelbrecht 說：「阿拉伯品種的咖啡通常生長在氣候較涼爽的地方，在山坡上、陰涼的地區，但現在我們看到山上的溫度在提高，這對咖啡葉銹病等疾病的傳播產生影響。」

哥斯大黎加的咖啡種植

在哥斯大黎加，大多數咖啡種植園都座落在小型到中型的土地上。這些家庭式農場經常依靠季節性工人以手工採摘咖啡豆。這個過程既要及時又是勞動密集型，在收穫季節需要多達 1.4 萬名來自哥斯大黎加和巴拿馬的工人。但隨著氣候變化加

劇了不適合咖啡植物生長的天氣模式，季節性工作機會減少，影響了生計。人們還發現，不斷變化的降雨模式和不斷上升的溫度縮短了咖啡植物感染葉銹病的時間，也增加了感染率，從一株植物蔓延到另一株植物。

哥斯大黎加咖啡研究所與原子能總署 / 糧農組織合作，一直在研究咖啡葉銹病對整個國家的影響以及如何防治。隨著紀錄顯示自 2010 年以來溫度的上升和降雨模式的變化，咖啡種植者發現他們無法在通常的時間收穫作物。

「生產力的降低影響了種植者的收入，減少了可用於協助種植園的資源，將使子孫後代保護農場的工作置於危險之中。這可能會影響我國未來的土地占有模式。」哥斯大黎加咖啡研究所生物技術專家 Reina Céspedes 說，「推動咖啡樹的遺傳學研究對於改善咖啡生產家庭的生活品



感染咖啡葉銹病的咖啡葉。(圖片來源:維基百科)



質、維持土地所有權和促進環境永續性至關重要。」

葡萄牙的咖啡研究

葡萄牙也參與了原子能總署 / 糧農組織的這個計畫，是咖啡葉銹病研究中心的所在地。來自全球 40 個國家約 3,600 個咖啡葉銹病樣本在咖啡葉銹病研究中心進行評估，科學家們在 23 個咖啡樹品種中鑑定出 50 種不同類型的咖啡葉銹病。在這個計畫中，發現了咖啡銹病病原菌的 3 個新變種。對這些形式的全球咖啡銹病的研究將有助於鑑別對咖啡銹病具有抗性的咖啡品種。

「2011 年，通過對咖啡種植國的咖啡種植者、病理學家的技術公告，我們首次體認到天氣模式變化對咖啡收成的影響。」咖啡葉銹病研究中心植物病理學家 Vítor Várzea 說，「當務之急是尋找和鑑定抗咖啡葉銹病的咖啡的新品種，然後可以推廣到其他國家。」

中美洲專家在原子能總署的塞伯斯多夫實驗室接受咖啡植物突變育種方法的培訓。來自受咖啡葉銹病影響最嚴重的地區—中美洲的專家，聚集在國際原子能總署，學習如何應用核科學與技術來培育對這種致命真菌具有抗性的品種。

在奧地利塞伯斯多夫的聯合國糧食及農業組織植物育種與遺傳學實驗室以及奧地利自然資源與生命科學大學（Universität für Bodenkultur Wien）進行培訓。這是一項計畫的一部分，部分由歐佩克國際發

展基金資助，旨在建立一個以拉丁美洲為核心的全球研發網絡，以幫助生產國應對咖啡葉銹病。

這種疾病於 1861 年在肯亞首次被發現，現在幾乎在所有咖啡生產國都已有發現。這種使植物的葉子枯萎而殺死植物的真菌，幾十年來一直是對中美洲咖啡種植者的潛在威脅。

由於咖啡產業是該地區的主要雇主，廣泛的疾病爆發可能導致嚴重的經濟損失。瓜地馬拉和宏都拉斯躋身世界十大咖啡生產國之列，2013 年，瓜地馬拉在真菌蔓延到大約 193,000 公頃（約占該國作物的 70%）的咖啡植物後宣布進入農業緊急狀態。

培訓期間，咖啡專家學習如何利用輻射來創造可以抵禦咖啡葉銹病的品種，植物突變育種可以加速引入植物基因組成變化的過程，這有助於研究人員比使用傳統育種方法更快地找到具有所需特性（如抗病性）的植物，並且不會影響其他所需特性（如咖啡的味道）。

參與者、哥斯大黎加咖啡研究所育種和遺傳學協調員 Noel Arrieta Espinoza 說：「咖啡的傳統育種需要 20 年，透過加馬輻射誘導突變，可以更快地開發新品種。」

咖啡葉銹病等真菌病害是對作物的最大威脅之一，因為它們會迅速克服植物的天然抗性。咖啡，尤其是廣受歡迎的阿拉比卡咖啡品種，由於栽培植物之間的遺傳多樣性低，因此特別容易患病。氣候變化導

致平均氣溫升高和降雨量增加，也創造了使疾病可以在咖啡種植區更快、更廣泛傳播的環境。

負責培訓的糧農組織 / 國際原子能總署遺傳學家 Stephan Nielen 說：「植物突變育種可快速開發出具有新的有用特徵的改良作物，這種方法還提供了一種被廣泛接受、經濟且環境永續的方法，以保護產量並確保無農藥作物的數量充足。」

培訓課程包括講座和實驗室實習，使參與者可以學習技術並更瞭解如何在自己的國家建立作物突變育種計畫。

幾十年來，原子能總署與糧農組織合作，一直在協助成員國利用核技術開發新的植物品種。今天，FAO/IAEA 聯合「突變品種數據庫」統計了 3,200 多個已發布的突變品種，其中 510 個已培育成對病蟲害等生物脅迫具有更強的抵抗力，340 個則用於抵抗真菌感染。☸



資料來源：

1. <https://www.iaea.org/newscenter/news/climate-change-and-coffee-combatting-coffee-rust-through-nuclear-techniques>
2. <https://www.iaea.org/newscenter/pressreleases/iaea-training-addresses-devastating-coffee-disease>



同位素技術拯救 巴拿馬的可可出口

譯 編輯室

隨著 2019 年歐盟進口法規的改變，巴拿馬的可可出口受到威脅：出口商必須證明其產品中的鎘含量低於歐盟規定的每公斤 0.8 毫克的法定門檻。同位素技術可以有助於確定重金屬的來源和移動，進而幫助農民防止水果受到污染—提高食品安全並恢復出口。

巴拿馬西北部的博卡斯德爾托羅省擁有該國 90% 的優質有機白可可。在這裡，農民使用傳統方法種植可可樹，與周圍的

自然生態和諧相處。然而，大多數可可種植區的土壤天然富含鎘，這使可可豆的品質和大約 1,400 名農民及其家庭的生計面臨風險。巴拿馬農業研究所 (IDIAP) 研究員 Jose Ezequiel Villarreal 說：「可可豆的出口是幫助該省減輕貧困的重要收入來源。」

IDIAP 的專家正在努力改進土壤管理和有機可可的整體品質。原子能總署與聯合國糧農組織合作，協助巴拿馬專家瞭解和掌握可可種植土壤中的鎘含量。然後，他

們將土壤中的鎘與可可果實中的鎘含量比對出關聯性，以計算出果實中含有多少重金屬。

糧農組織 / 國際原子能總署糧食和農業核技術聯合中心還向當地專家和農民提供培訓，以確保更多的鎘留在土壤中。這可以透過在土壤中添加有機改良劑來達成；這些有助於增加有機質和土壤的 pH 值，並可鎖定鎘，使其不再被樹木及其果實吸收。

聯合國糧農組織綜合土壤肥力管理專家 Joseph Adu-Gyamfi 解釋說：「同位素有助於確定鎘被植物吸收的程度——一種稱為生物有效性的條件——並追蹤它從土壤到植物的遷移。」瞭解這個過程是減少樹木對鎘攝入量的第一步。

巴拿馬農業研究所的工程師 Adolfo Santo 會見了一群農民，解釋對土壤、樹葉和可可豆進行採樣以測量鎘濃度的目的。在同位素技術的幫助下，專家們現在正在採取措施提高巴拿馬可可豆的安全性。

將鎘同位素添加到土壤中後，科學家們可以確定肥料和土壤本身的重金屬來源。這使他們能夠追蹤重金屬以查看它有多少從土壤遷移到果實，或者它是否真的有遷移。

國際原子能總署針對如何使用鎘同位素作為示踪劑來評估和選擇避免鎘的可可變種，對當地專家進行培訓。此外，大約 150 名農民已經接受了農業實習培訓，以防止土壤中的鎘被植物吸收。

在接下來的幾個月裡，將有更多的農民接受培訓。正如國際原子能總署計畫管理

官員 Karla Molina Diaz 所說：「我們正在利用科學、核科學來產生發展影響，並幫助參與的農民獲得穩定和不斷增加的收入。」

使用同位素追蹤土壤中的重金屬

鎘是一種在攝入後對人體多個器官健康有害的金屬，可被植物從土壤中吸收，具體含量取決於其生物利用度。金屬從土壤到植物的各個部分——根、樹幹、樹枝和果實——並不總是遵循特定的模式。穩定同位素是原子的非放射性形式，可用作示踪劑，以監測養分 / 金屬從土壤中的吸收以及向不同部分的傳輸，這要歸功於其獨特的特性：每種養分的同位素各有其特徵，不僅可做為鎘來源的指紋，也可以追蹤金屬在植物中的遷移。

使用標有鎘 -114 (^{114}Cd) 與「正常」鎘 -110 相比——科學家可以追蹤同位素以確定鎘從土壤到可可果實的移動，這是因為它們具有與常規原子相同的化學性質，但具有更重的原子核，因此可以區分和追蹤。此技術用於評估和選擇可可植物，這些植物可以在鎘含量高的土壤中生長，但轉移到果實中的金屬成分較少。☸

資料來源：

<https://www.iaea.org/newscenter/news/isotopic-techniques-help-save-panamas-cocoa-exports>



我們的身體具有放射性嗎？（下）



我能量測自己身體內的輻射嗎？

我們能以全身計測器內靈敏的偵檢頭量測輻射，偵檢頭可以量測在身體內部或表面放射性物質發射出的加馬射線。不同放射性物質會發射不同能量的加馬射線，是一種用來確認是何種物質的技術。其他形式的放射性衰變（貝他與阿伐）則不能以此方法計測到，但幸運的是，加馬射線時常會伴隨著它們而來，所以，大多數放射性核種能被計測到。

儀器是非常靈敏的，計測的低限已足夠監測到健康需關切的水準。例如，全身計測器能很容易的量測到在每人身體內天然發生的鉀-40（所有鉀-40的0.0117%）的活度量。



甚麼是身體內鐳 -226 與鐳 -228 量測的最好方法？

不論是鐳 -226 或鐳 -228，都不容易直接以全身計測器量測，因為二者都不是一種強加馬射線的發射體；然而，二者的衰變產物都有強加馬發射體，使得它們容易地被全身計測所量測。

對鐳 -226 而言，加馬發射衰變產物有鉛 -214 與鉍 -214，後者發射出 0.609、1.12 與 1.76 MeV 能量的加馬射線；其中，1.76 MeV 加馬射線，因為它較天然發生鉀 -40 發出的 1.46 MeV 加馬射線的能量高，通常被用來作為全身計測。由這些發出的加馬射線，全身計測能量測出身體內的鉛 -214/ 鉍 -214 含量。推導鐳 -226 的體內含量，必須先作些量測與假設，以決定由身體留存的氫 -222 (為鐳 -226 第一個衰變產物，且為鉛 -214/ 鉍 -214 的母核)。這能從呼吸的呼氣中量測氫 -222 來達成，但這技術尚未能可用。在長期追蹤鐳的工作從業人員，平均長期氫 -222 留存為 37%，但這個因數對近期受曝露者可能會有不同。

對於鐳 -228 而言，其第一個衰變產物為銻 -228，發射約 0.9 MeV 能量的加馬射線，能被直接地量測；因為銻 -228 的半化期只有 6.15 小時，故能被假設會與鐳 -228 達成平衡。另一鐳 -228 的衰變產物成員，其衰變鏈為鉍 -208，發射一強 2.26 MeV 加馬射線，它與鐳 -228 的相對平衡能被比較體內鉍 -208 與銻 -208 量測的活度來決定。研究用品質全身計測器，如位於美國阿崗東部國家實驗室 (Argonne National Laboratory-East)，特別設計的對以往鐳工作者的鐳 -226 與鐳 -228 量測，對鉍 -214 或銻 -228 的量測低限值約為 100 Bq。商業用全身計測器因為有較高的背景水平，其量測低限值為前者的數倍。

應該注意的是，例如來自環境中井水的鐳 -226 與鐳 -228，超過美國環境保護署 (EPA) 對飲用水的標準 (對任一放射性核種為 185 Bq L-1)，將不像是會超過全身計測器的量測低限值；而室內氫 -222 水平在 EPA 限值 (空氣中幾百 Bq L-1) 下，將嚴重地影響到用鉍 -214 來量測鐳 -226。



頭髮量測分析結果顯示頭髮中含有高的鈾水平，是甚麼造成這個結果？

鈾是一個天然發生、重的金屬元素，幾乎可天然地存在岩石、土壤、植物與我們體內，到處都可找得到。平均每人每天從食物與飲水中攝入約 $2\mu\text{g}$ (大約 1 盎斯的 1/15,000) 的鈾，但只有非常小的部分 (1-2%) 會被身體所吸收。因此，幾乎所有我們食入的鈾，都不會被吸收而是在糞便中排出。

在這小部分食入並被腸道吸收的鈾，大部分很快地會在尿中被排泄，只有很微小量會進入頭髮中，這是正常的。不同人的頭髮—或甚至是相同的人—將隨著人們飲用與食入的水與食物中含有多少鈾，而使體內含有不同量的鈾。有些人頭髮裡可能會比其他人有 10 或甚至數百倍鈾的數量。

這裡也提醒一下，頭髮內鈾的分析，既不是決定身體內鈾含量的一個可接受、也不是可靠的方法。鈾是一種金屬，它會進入頭髮與指甲，但鈾的頭髮量測分析有著過高的誤差；因為該分析亦會同時量測到通常會在洗髮乳、肥皂、頭髮敷料、染髮劑及各種形式的頭髮護理品中所含的鈾。進一步地，因為鈾在環境中無處不在，頭髮樣本必須在嚴密管控下，小心地取得、處理、包裝與運送，以確保不會被含有鈾的環境而污染了頭髮的樣本。

假如分析步驟沒有以謹慎的管控及執行的話，高錯誤的結果也可能會發生。管控包括適當的清洗樣本以去除可能殘留的外表鈾，並使用特殊的、經過認證的、十分純正的反應劑。實驗室器具必須是同樣地沒有鈾污染；鈾可能由玻璃器皿浸出而污染樣本，導致錯誤的高讀數。因為頭髮樣本如此地小，甚至一微小量的鈾污染，就可能得到嚴重誇張錯誤的結果。

在同儕審查科學文獻數據中，關於頭髮裡有多少正常的鈾水平，或這些水平如何與鈾食入、體內鈾量及進入頭髮的鈾量有關；若有的話，也

應很少。故有關頭髮鈾含量與什麼組合了「正常」範圍的數據是貧乏的。因而沒有一般被認可與建立的頭髮鈾含量標準。頭髮鈾含量的背景水平會隨著大量飲食上的計測，在人與人及區域與區域而有很大的變異；因為大多數我們體內的鈾，是來自我們所吃的食物。☸

參考資料：

Toohey RE, Keane AT, Rundo J. Measurement techniques for radium and the actinides in man at the Center for Human Radiobiology. Health Phys 44(1):323-341; 1983.

核後端雙月刊第 7 期第 32 頁內容有誤，茲更正如紅字部分；特此勘誤，深感抱歉。



在典型的人身體內有多少鉀 -40 與碳 -14 ？

鉀 -40 在人體內的含量，能由其在鉀的天然豐度為 0.0117% 求得，鉀 -40 的原子量為 39.0983，半化期為 1.28×10^9 年；其計算方式如下說明：

一 特定物質的活度除以其質量，是為比活度 (A_s)；其公式為 $A_s = \lambda N = [0.693 / (t_{1/2})] N$ ，式中 λ 為衰變常數， $t_{1/2}$ 為半化期， N 為單位質量中放射原子的數目。因為 $N = 6.023 \times 10^{23}$ 個原子 / 原子質量，所以， $A_s = [0.693 / 1.28 \times 10^9 \times 365 \times 86,400 (\text{秒})] \cdot [(6.023 \times 10^{23} \times 0.000117) / 39.0983] = 30.94 \text{Bqg}^{-1}$ 。

人體內含鉀為 0.2%，所以，對體重 70 公斤重的人而言，鉀 -40 大約為： $30.94 \text{Bqg}^{-1} \times 70 \text{kg} \times 1,000 \text{g/kg} \times 0.2\% = 4.33 \text{kBq}$ 。人體內含碳 -14 是根據天然中每 1,000,000,000,000 個碳 -12 存在一個碳 -14，其半化期為 5,730 年，可得碳的比活度為 0.19Bqg^{-1} 。人體的碳含量有 23%，則 70 公斤重的人約含有 3kBq 的碳 -14。

澳洲選定國家 放射性廢棄物設施場址

譯 編輯室

南澳大利亞金巴 (Kimba) 附近的納潘迪 (Napandee) 已被正式選為國家中低放射性廢棄物貯存設施的所在地。根據相關法令，澳洲資源與水務部長基斯皮特 (Keith Pitt) 於 2021 年 12 月 29 日發表的聲明，使聯邦具有獲得約 211 公頃土地的效力，目的是設立國家放射性廢棄物管理設施 (NRWMF)。

澳洲政府在 2015 年公開徵求處置場址地點提名後，2017 年納潘迪被其土地所有者自願提名為潛在的設施所在地。

2020 年 9 月 17 日，澳洲參議院委員會建議議會通過立法，使納潘迪成為該設施的首選地點。該法案將藉由修改 2012 年《國家放射性廢棄物管理法》建立一座永久處置低放射性廢棄物和中放射性廢棄物中期貯存的國家級設施，其中包括指定選定的地點並能夠獲得額外的土地做為處置設施。

該委員會舉行了 4 次公開聽證會，收到 105 份意見書，和 3,600 多封信件以回應調查。在其最終報告中，建議通過該法案而不作進一步修改。同時還建議澳洲放射性廢

棄物管理局與 Barnjarla Determination Aboriginal Corporation 共同討論這些問題，並找到持續協商的方法。

2021 年 8 月 11 日，皮特部長發布通知，宣布納潘迪為該設施的潛在場址。經過一段時間的進一步協商，澳洲政府於 11 月 29 日確認該地點已被選為國家放射性廢棄物管理設施的場址。

這座設施的建造將在詳細設計、技術和文化遺產研究完成後開始。該設施的營運將由位於阿德萊德的澳洲放射性廢棄物管理局 (ARWA) 管理。申請和審核程序預計需要數年時間才能完成。

澳洲放射性廢棄物管理局指出，這份公告「是朝向支持設施所在地的 3,100 萬澳幣 (約 6 億 3,500 萬新台幣) 社區發展計畫跨出的又一步。」

皮特部長表示：「我很高興地確認，我們在成立這個國家設施的工作中已經達到了一個重要的里程碑，這是一個 40 多年來一直沒有得到政府支持的解決方案。這個新設施將在金巴當地創造 45 個新的永



ARWA 對國家放射性廢棄物處理設施的設計概念 (圖片來源: ARWA)

久性工作機會，與安全、行政、環境監測、科學服務、健康和 safety 等各個領域相關。」

澳洲雖不生產核能，但在操作研究型反應爐和生產用於醫學、研究和工業的放射性同位素方面擁有長期的經驗。根據世界核能協會表示，澳洲每年透過製造和使用放射性同位素產生大約 45 立方公尺的放射性廢棄物，大部分屬於低放射性廢棄物。這些廢棄物目前貯存在全國一百多個地點，包括科學設施、醫院和大學。被列入這兩種廢棄物的國家處置場的候選名單有 6 個自願場址，經過持續約 28 年的過程，2020 年納潘迪被政府確定為低放射性廢棄物貯存設施的首選地點。

澳洲核子科學技術組織 (ANSTO) 表示，開發建造專屬的國家設施對 ANSTO 及其核子醫學和研究活動非常重要，澳洲產生的廢棄物中有 90% 以上與 ANSTO 生產核子醫學藥品的設施有關。

皮特部長說：「核子醫學用於診斷各種心臟、肺和肌肉骨骼疾病，以及治療特定癌症，其產生的副產品就是低放射性廢棄物。隨著好處而來的是管理這些副產品的

責任。沒有這樣的設施，我們就無法持續享有核子醫學帶來的重大利益。」

「該設施將承擔澳洲的核子醫學供應，並為金巴地區好幾代的民眾提供良好的、永久性的、全職工作以及全新的產業。」

澳洲放射性廢棄物管理局成立於 2020 年 7 月，為管理澳洲的所有放射性廢棄物，並帶領成立國家放射性廢棄物管理設施的過程。此外，放射性廢棄物管理局還將引導一個獨立的程序，以建立永久處置該國中放射性廢棄物的設施。這可能是位於不同地點的深層地質處置設施。

資料來源：

1. <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/South-Australian-site-to-host-national-radwaste-fa>
2. <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Senate-inquiry-recommends-passing-of-Australian-wa>

美國重新啓動雅卡山 用過核子燃料管理計畫

譯 編輯室

美國能源部 (DOE) 日前發出需求資訊，以助其在同意的基礎上創設一種方法，來為美國用過核子燃料中期貯存地點選址。在 2009 年放棄於雅卡山建造一座處置場的計畫後，此舉代表了美國聯邦計畫的重新啟動。能源部長 Jennifer Granholm 表示：「聽取對這些設施之一感興趣的社區表達意見，然後與他們合作，是最終解決國家用過核子燃料管理問題的最佳方式。」

美國能源部於 2021 年 12 月 1 日在聯邦公報中發布了「需求資訊」，希望完成自 2015 年以來一直在制定的選址流程草案。它鼓勵個人和團體針對該計畫相關的一系列社會問題提供意見。DOE 指出，他們特別渴望聽取過去沒有得到充分代表的團體的意見。

負責核能事務的首席副助理部長 Katy Huff 說：「希望社區能探詢聯邦中期貯存設施對他們所需要的利益和條件。」能源部長表示：「我們知道，就業和新的基礎設施帶來的真正利益將引起全國各地的興趣。公眾的意見對於確定這些地點非常重要，以使此一過程盡可能具有包容性和有效性。」

能源部此舉代表著自 2009 年歐巴馬總統將雅卡山處置場專案的資金歸零，並宣布這「不是一種選擇」以來，從先前的處置計畫中恢復的第一個實際步驟。美國核能管制委員會在 2010 至 2011 年終止了該處置場的審核作業。需求資訊和選址過程草案將焦點集中在中期貯存上，而不邀請外界對潛在貯存地點做評論。能源部必須在 2022 年 3 月 4 日之前收到對需求資訊的答覆。

美國用過核子燃料處置受 1982 年「核廢棄物政策法案」約束，該法案賦予能源部責任，於 1998 年之前設置一座處置場，並開始向各電力公司收取核廢棄物基金以支付費用。1987 年該法案的修正案指定雅卡山為唯一的處置場。

根據美國主計總署的資料，目前共有約 86,000 噸用過核燃料貯存在 33 個州的 75 座運轉中或關閉的核電廠內。

資料來源：

<https://www.world-nuclear-news.org/Articles/USA-relaunches-used-fuel-management-programme>

加拿大在第一個 處置場候選地點完成鑽孔

譯 編輯室

加拿大核廢棄物管理組織 (NWMO) 已在伊格納斯 (Ignace) 完成鑽孔工作，正在研究將其作為加拿大用過核子燃料深層地質處置場的可能所在地。在為期 4 年的鑽探計畫中，已開挖出約 6 公里的岩石。

NWMO 的第一個鑽孔位於伊格納斯以西約 35 公里處，位於伊格納斯和瓦比貢湖奧吉布韋族 (WLO) 之間，於 2017 年 11 月開始。從那時起，在已知的 Revell Batholith 岩層中鑽了 6 個鑽孔，每個鑽孔長度為 1 公里。NWMO 表示，鑽探的完成代表地球科學工作的一個重要里程碑，以確定該場址是否可以成為安全的處置場。鑽孔底部的測試將在未來幾個月內完成。

NWMO 是一個非營利組織，負責在地主知情而且願意的地區，建造深層地質處置場並安全、長期地貯存用過核子燃料。安大略省的伊格納斯和南布魯斯正在研究作為可能的貯存區，透過 2010 年啟動的程序，從 21 個感興趣的地區名單中縮小範圍。南布魯斯的鑽孔、取心和孔底測試於 2021 年稍早時開始，預計將於 2022 年年中完成鑽探。

加拿大的深層地質處置場計畫只會在地主知情而且願意的地區進行。NWMO 表示，WLO 的社區監測員在鑽孔期間也在現場；在現場與 WLO 共享資訊和見解，是該團隊的重要工作之一。

NWMO 伊格納斯場址主管 Bill Gascon 說：「作為 NWMO 選址過程的一部分，我們需要確保用過核子燃料可以安全地貯存在岩石中，以確保水、人和環境的安全。鑽孔是其中的重要組成部分。我們致力於與社區合作，包括市政府、原住民和 Métis 社區，以及此地區的其他族群，以便將這項計畫安全地設置在一個知情且願意的地區。」

NWMO 計畫在 2023 年選定一個場址，詳細的場址特徵、聯邦影響評估和許可程序將於 2024 年開始。2021 年 NWMO 發布的一項 5 年戰略計畫，預計將於 2033 年開始建造處置場，約於 2040 年到 2045 年間開始營運。

資料來源：

<https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Drilling-completed-at-first-Canadian-repository-ca>

Pilgrim 的燃料移除工作 在創紀錄的時間內完成

譯 編輯室

Holtec Decommissioning International (HDI)—Holtec International 的全資子公司 - 已宣布紐澤西州 Oyster Creek 核電廠和麻薩諸塞州 Pilgrim 核電廠的除役進展。Oyster Creek 反應爐建築中的所有裂變材料現已轉移到現場獨立用過核子燃料貯存設施 (ISFSI)，而 Pilgrim 將濕式貯存中的用過燃料轉移到其 ISFSI 的速度創下歷史新高。

2021 年 12 月 13 日，麻塞諸塞州 Pilgrim 核電廠最後一個裝有用過核子燃料的多用途容器放置在乾式貯存場中，這表示從反應爐建築中清除了所有放射性材料。Holtec International 公司表示，這項作業在反應爐關閉 30 個月後完成，創造了將核電廠用過核子燃料以最快的速度轉移到廠內貯存設施的新世界紀錄。

Pilgrim 核電廠的 68 百萬瓦沸水式反應爐在運轉 47 年後於 2019 年 5 月 31 日關閉，並於 8 月經美國核能管制委員會核准將電廠的執照轉讓給 Holtec 公司，包括其現有的用過核子燃料乾式貯存設施。這

是繼紐澤西州的 Oyster Creek 核電廠之後，Holtec 取得的第二個美國核電廠除役計畫。

停機後，Holtec 在兩次裝載行動中總共裝載了 45 座大容量 HI-STORM 100 系統，使用的是 MPC-68 多用途容器。Holtec 團隊在 2020 年的行動中裝載了 11 個護箱，並在 2021 年 6 月開始、2021 年 12 月 13 日結束的最後一次裝載行動中又裝載了 34 個護箱。現在總共有 62 座 HI-STORM 100 系統安全地存放在 Pilgrim 新的 ISFSI，它是在 2020 年在廠區內建成。

Holtec 表示，為了實現創紀錄的轉移行動，其團隊必須設計製造一種創新裝置，以取回自 1970 年代以來就存放在燃料架中嚴重損壞的燃料組件，它們阻礙了之前所有試圖取回和裝箱的嘗試。為解救這些遺留的故障燃料組件而開發的技術，現在可供任何面臨回收嚴重損壞的燃料組件的核電廠使用。

Holtec 在 Pilgrim 創造的新紀錄，在



Pilgrim 的獨立用過核子燃料貯存設施 (圖片來源: Holtec International)

2021 年 5 月 Oyster Creek 核電廠類似的紀錄 (在 32 個月內完成) 基礎上再做精進

Holtec 除役國際總裁 Kelly Trice 說:「我們應該感謝在核電部門富有創造性的專業人員, 他們設計了一個絕妙的解決方案, 巧妙地解開位於 Pilgrim 用過核子燃料架中嚴重損壞的燃料組件, 在此過程中創造了一種新技術來處理損壞的燃料組件。」

Holtec 表示, Pilgrim 用過核子燃料將安全地儲存在廠內 ISFSI 的 HI-STORM 100 乾式護箱中, 直到美國政府接管, 或是這些護箱被轉送到其他地點, 例如 Holtec 提議的 HI-STORE 綜合中期貯存設施 (CISF), 目前正在接受核能管制委員會的審核。HI-STORE CISF 的最終監管審核預計在 2022 年初開始。

在 Pilgrim 濕式貯存中的用過核子燃料以每週兩個多用途容器的速度轉移到 ISFSI, 就像 Oyster Creek 核電廠一樣, 這是同業前所未有的速度。

Holtec 還宣布了於 2020 年 4 月關閉的紐約 IndianPoint 核電廠和將於 2022 年關閉的密歇根州 Palisades 核電廠的買賣協議。

「我們應該感到自豪的是, 我們在兩個計畫中都取得了巨大進展, 同時完全達到了我所說的 7 個卓越的關鍵指標, 即最小的人員劑量、無污染擴散、沒有違反 OSHA、沒有排放到環境中, 沒有工人受傷, 完全遵守時間表, 並最大限度地減少了待處理的廢棄物數量。」Holtec 除役國際總裁 Kelly Trice 說。☸

資料來源:

1. <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Defuelling-of-Pilgrim-completed-in-record-time>
2. <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Decommissioning-progresses-apace-at-Oyster-Creek-a>

芬蘭 Posiva 申請用過核子燃料 處理設施的營運執照

譯 編輯室

芬蘭放射性廢棄物管理公司 Posiva Oy 已提交其在 Olkiluoto 建造中的用過核子燃料封裝廠和最終處置設施的營運執照申請。該處置場—世界上第一座用過核子燃料處置場—預計將於 2020 年代中期開始營運。

Posiva 於 2021 年 12 月 30 日向經濟事務與就業部 (TEM) 提出營運執照申請，運轉期限為 2024 年 3 月至 2070 年底。

Posiva 的封裝廠於 2019 年 9 月開始建造，預計於 2022 年年中完成。用過核子燃料裝入銅罐內，然後放置於地下 400-430 公尺深的母岩中。這套處置系統包括密封的銅罐、包圍銅罐的膨潤土緩衝物、由可膨脹粘土製成的隧道回填材料、隧道的密封結構以及封閉的岩石。

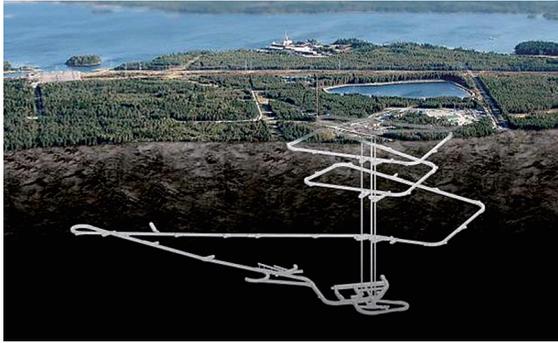
根據申請內容，Teollisuuden Voima Oyj (TVO) 和 Fortum Power & Heat Oy 擁有大部分用過核子燃料，將在 2024 年至 2070 年期間在該設施中處理。TVO 和 Fortum 所有用過核子燃料的處理是根據

現有的核電營運計畫，預計將在 2120 年代後期完成。

TEM 表示將在稍後進行有關執照申請的公眾諮詢，然後要求受影響地區的地方政府和組織發表聲明，並為民眾和社區提供表達意見的機會，這些陳述和意見將在處理運轉執照申請時予以考慮。

TEM 已要求輻射與核安全局 (STUK) 針對封裝廠和處置設施的安全發表聲明。STUK 將進行評估，以確保封裝廠和處置設施按計畫建造，作為一個整體的核設施可以安全地使用，並且核設施的人員已接受過安全運轉的培訓。STUK 將監督封裝廠和處置設施在其整個使用壽命期間的運轉和維護。STUK 將評估該設施的長期安全性，做為其聲明的重要組成部分。

Posiva 開發資深副總裁 Tiina Jalonen 表示：「Posiva 為申請營運執照編寫的安全論證是 40 多年研究的成果，證明了最終處置的安全。預計營運執照申請的審查程序將持續進行，以便 Posiva 能在 2020 年



芬蘭 Olkiluoto 用過核子燃料最終處置場示意圖(圖片來源: Posiva 公司)

代中期開始最終處置。」

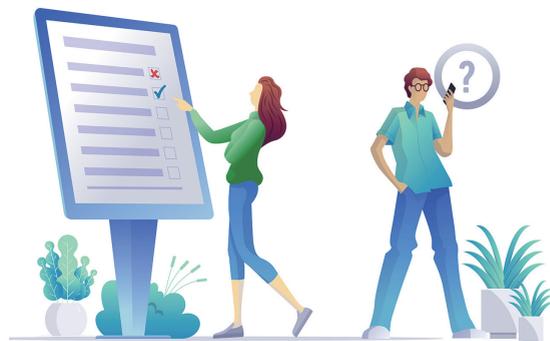
Posiva 於 2000 年選定處置場的場址，芬蘭議會於次年批准了處置場計畫的原則性決定。Posiva 於 2013 年 12 月向就業與經濟部提送施工執照申請。該公司對 Olkiluoto 的岩石進行研究，並使用 Onkalo 地下實驗室的結果準備執照申請，該實驗室正在擴展以形成處置場的基礎。

芬蘭政府於 2015 年 11 月核發建造執照，處置場遂於 2016 年 12 月開始施工。

Onkalo 地質處置場將是世界上第一座用過核子燃料最終處置設施，瑞典計畫在 Forsmark 也建造一座類似的處置場。

Posiva 執行長兼總裁 Janne Mokka 說：「幾十年來我們為證明 Onkalo 的長

期安全性和開發最終處置設施概念，以適應 Olkiluoto 的條件而展開的工作現已完成，我們可以專注於在封裝廠和最終處置場中安裝設備、設施的測試和營運活動的準備。」



資料來源：

<https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Posiva-applies-to-operate-used-fuel-disposal-repos>

烏克蘭開始將用過核子燃料 運送到處置設施

譯 編輯室

烏克蘭核電廠營運商 Energoatom 正在車諾比核電廠現場，對集中用過核子燃料儲存設施 (CSFSF) 進行最後的試運轉試驗。最近該公司的代理總裁視察了使用美國 Holtec International 公司提供的技術，從 Rovno 核電廠 3 號機組移除燃料的模擬試驗。向 CSFSF 運送燃料的計畫將於 2022 年開始。

Energoatom 和 Holtec 於 2017 年 11 月開始建造 CSFSF，將接收來自烏克蘭 15 座反應爐中 9 座的核燃料—7 座 VVER-1000 和兩座 VVER-440—位於烏克蘭南部的 Rovno 和 Khmelnytsky。

CSFSF 是一個乾式貯存設施，用過核子燃料將儲存在雙層不銹鋼壁的容器中。來自烏克蘭燃料再處理的玻璃固化高放廢棄物也將從俄羅斯運回，並儲存在 CSFSF 中。新設施將有助於烏克蘭不再需要每年花費 2 億美元，以及依賴俄羅斯安排運輸和再處理用過核子燃料。

Holtec 表示，它們提供的主要設備包括 HI-STORM 190 垂直通風儲存系統、HI-STAR 190 通用運輸護箱、HI-TRAC 190 轉

運護箱，以及每座核電廠現場操作需要的裝載、脫水和焊接雙壁的多用途容器設備。

經過乾燥且密封的容器放在 HI-STAR 190 運輸護箱中從核電廠運送到 CSFSF，然後放置在 HI-STORM 190 垂直通風系統中進行儲存。

2021 年 8 月，Energoatom 宣布 CSFSF 的第一階段已準備完成，並獲得烏克蘭建築與施工監察局的核准。11 月 6 日，Energoatom 代理總裁 Petro Kotin 在 Rovno 3 號機組監督 HI-TRAC 190 運輸容器的示範測試。

即將營運使用的 CSFSF 是烏克蘭決心在用過核子燃料管理方面實現完全獨立營運的象徵，並為長期管理用過核子燃料提供安全和經濟的解決方案。Holtec 表示，CSFSF 將使烏克蘭在用過核子燃料的長期管理領域內躋身精英國家的行列，許多人認為這是一個國家使用核能的必要前提，老化的化石燃料發電廠也需要淘汰。

資料來源：

<https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Transfer-of-used-fuel-to-Ukrainian-facility-set-to>

美國電力研究所 回顧過去的一年

譯 編輯室

從與美國能源部合作制訂國家電動汽車充電基礎設施藍圖，到在 COP26 上主導的眾多脫碳研究計畫發表演講，過去一年對電力研究所 (EPRI) 來說是積極的。

4 月，美國政府宣布能源部將與 EPRI 合作制定國家電動汽車充電基礎設施藍圖，包括快速充電和電網互動。該藍圖將評估從電力公司到車輛的連接、通信和協議方面的需求，以支持整個車業的電氣化。EPRI 並通過新的交互式電動汽車消費者指南，為電池式電動車和插電式混合動力汽車提供可搜尋數據庫。

4 月，EPRI 宣布了資源充足計畫，透過更好地預測和評估極端天氣以及其他災害對電力供應資源的風險，幫助確保持續滿足電力需求的能力。此計畫匯集來自整個電力行業的電網運轉商、電力公司、研究人員和其他主要利害關係者，以加速資源充足流程和工具的發展。

6 月，EPRI 發布了一項重要分析，檢查了 4 種可能的部署方案，這些方案重新設想了核能在滿足未來全球能源需求方面的作用。將包括造船廠的製造和浮動核設施，

以及大規模的氫氣生產。

9 月，EPRI 發布了 5 項重大挑戰，以加快人工智能技術在高價值領域的應用：推進電網交互智能社區、減少環境影響、加強能源系統的彈性、實現智能和自主發電廠，並加強網絡安全。人工智能具有極大改善系統運轉、靈活整合分布式能源、改善巡檢等耗時任務的潛力。

11 月在英國格拉斯哥舉行的 COP26 氣候峰會上，EPRI 宣布將與世界經濟論壇和 Accenture 公司合作，以加速產業群聚走向淨零的過渡期。產業群聚是由位於同一地點的能源供需公司組成的地理區域。產業群聚約占全球二氧化碳排放量的 15% 至 20%，使其成為具有影響力的減排目標。該倡議的目標是到 2024 年加入 100 多個產業群聚，來自澳洲、英國和西班牙的 4 個群聚已經加入。🌐

資料來源：

<https://www.renewableenergyworld.com/policy-regulation/epri-reflects-on-the-year-gone-by/>

2022 年太陽能 將占新增發電容量的一半

譯 編輯室

美國能源資訊管理局（EIA）表示，2022 年計畫增加的產能中有近一半將是太陽能資源。

EIA 表示，預計今年美國電網將新增 46.1 百萬瓩的電力公司規模的發電容量。其中約 21.5 百萬瓩（46%）來自太陽能項目，9.6 百萬瓩（21%）來自天然氣項目，7.6 百萬瓩（17%）來自風電項目。EIA 表示，預計額外的 5.1 百萬瓩（11%）將來自儲能項目。

該機構表示，美國計畫在 2022 年新增的 5% 的電力容量將來自喬治亞州 Vogtle 核電廠的兩座新反應爐。其中一座反應爐，即 3 號機組，被推遲到 2022 年 6 月，以便有更多時間進行建造和測試。拖延已久的項目一再增加計畫成本。

EIA 的新增容量數據來自開發商和發電廠營運商提交的月度和年度報告。在這些調查中，EIA 要求開發商提供未來 5 年內發電機連網上線的日期。

預計 21.5 百萬瓩的太陽能將在 2022 年上線，超過去年的 15.5 百萬瓩。EIA

根據截至 2021 年 10 月報告的新增裝機量，以及 2021 年最後兩個月的預計新增裝機量做出了這個預估數量。預計 2022 年的大部分太陽能將於德州新增裝機（6.1 百萬瓩，占總數的 28%），其次是加州（4 百萬瓩，占 18%）。

EIA 表示，預計 2022 年將有 7.6 百萬瓩的風電裝機容量上線。這將不到 2021 年創紀錄的 17.1 百萬瓩上線的一半。2022 年新增的風電裝機容量中約有一半（51%）位於德州。位於奧克拉哈馬州 999 百萬瓩的 Traverse 風能中心是預計將於 2022 年上線的最大風能項目，計畫於 4 月開始營運。

在 9.6 百萬瓩的預估新增天然氣發電容量中，複循環電廠占總量的 8.1 百萬瓩（超過 84%），火力電廠占 1.4 百萬瓩。約 88% 的天然氣產能計畫新增於俄亥俄州、佛羅里達州、密西根州和伊利諾州。

資料來源：

<https://www.renewableenergyworld.com/solar/solar-to-make-up-half-of-new-generating-capacity-in-2022/>

隨著供應趨緊 可再生能源 PPA 價格繼續攀升

譯 編輯室

根據 LevelTen Energy 的最新價格指數，北美最具競爭力的可再生能源購買協議（PPA）價格從 2021 年第三季度到 2021 年第四季度上漲了 5.9%。

根據 LevelTen 的數據，價格連續第三個季度呈上漲趨勢。太陽能 PPA 報價的市場平均價格上漲 5.7% 至每一千度（MWh）34.25 美元（約 942 新台幣），而風能則上漲 6.1% 至每一千度 38.36 美元（約 1,055 新台幣）。

LevelTen 指數分析了歐洲和北美 21 個國家或地區的能源市場上，所列出的數千種風能和太陽能 PPA 的定價報價。該公司查看了來自美國 205 個可再生能源項目的 265 個報價數據。該報告發現，供應鏈限制、通貨膨脹、商品成本上升和政府拍賣加劇了宏觀經濟和監管的挑戰，導致 PPA 供應減少和價格上漲。

報告稱，隨著通貨膨脹推高價格，北美的開發成本可能會在 2022 年繼續增加。根據該指數，在歐洲可再生能源 PPA 的季增率上漲了 7.8%。

報告發現，歐洲可再生能源 PPA 價格在過去 9 個月上漲了 17.4%。因此，歐洲的 P25 指數—風能和太陽能 PPA 報價中最低 25% 的總和—現在為每一千度 60.14 美元（約 1,656 新台幣），比第三季度上漲 4.33 美元（約 119 新台幣）。該報告稱，高批發電價促使開發商提高購電協議價格，以彌補他們本可以在下一日市場（day-ahead market）銷售更大比例的電力所獲得的收入。

根據行業組織的數據，儘管存在不利因素，但在 2020 年至 2021 年期間，歐洲的年度合約產能仍增長了 69%。

LevelTen Energy 開發人員解決方案的副總裁 Rob Collier：「好消息是，PPA 交易仍在完成，針對當前市場條件量身訂製的合約創新，正在促進成功的 PPA 交易。到目前為止，買家並未受到市場狀況的影響，這意味著需求仍然很高。」

資料來源：

<https://www.renewableenergyworld.com/issues/renewable-ppa-prices-continue-to-climb-as-supply-tightens/>



國外新聞

Ignalina 2021 年拆除 7,600 噸設備和混凝土

立陶宛 Ignalina 核電廠在 2021 年共拆除了 3,429 噸設備和 4,200 噸混凝土廢料，其中 7,000 噸放射性廢棄物已視為非放射性廢棄物清除，並將拍賣出售。自 2010 年兩座 RBMK 反應爐開始除役以來，Ignalina 已拆除約 71,000 噸設備和混凝土廢料。到 2038 年除役結束時，還要處理 105,000 噸的設備。

Ignalina 擁有兩座水冷石墨減速隧道型 RBMK-1500 反應爐。1 號機組於 1983 年併網，2 號機組則是在 1987 年。車諾比事故後，兩座機組的額定功率均降至 136 百萬瓩。立陶宛同意關閉該電廠，做為其加入歐盟協議的一部分，Ignalina 1 號機於 2004 年關閉，2 號機於 2009 年關閉。

Ignalina 除役計畫的總估計成本超過 25 億歐元（約新台幣 800 億元），歐盟承諾為這些成本將提供 14 億歐元（約新

台幣 448 億元），資金主要來自歐洲復興開發銀行 (EBRD) 管理的 Ignalina 國際除役援助基金 (IIDSF)，以及歐洲復興開發銀行管理的另外兩個基金。

2021 年 10 月，Ignalina 核電廠獲得了國家核能安全監察局 (Vatesi) 的許可，可以拆除和除污 1 號機組渦輪機及其結構，包括渦輪機基礎、地板結構、排水系統、熱交換器和渦輪機金屬結構。Ignalina 計畫拆除鋼筋混凝土和金屬結構，並在渦輪機拆除後空出的部分設置臨時貯存新產生廢棄物的區域。這些廢棄物隨後將被轉移到地表處置場，用於存放壽命短、非常低水平的廢棄物。

NEI Magazine, 01/14/2021

Barsebäck 拆除反應爐壓力容器

Nukem Technologies 公司已完成瑞典 Barsebäck 核電廠 1 號機反應爐壓力容器的切割。該公司表示，其兩階段熱切割技術將改良並用於 Barsebäck 2 號機以及

Oskarshamn 核電廠 1 號和 2 號機。

總經理 Sergey Molodtsov 說，這證明熱切割技術在拆除反應爐壓力容器方面的效率是 Nukem 的一個重要里程碑。

Barsebäck 1 號機的圓柱形壓力容器被熱切割成 13 個高 0.9 至 1.8 公尺的環，Nukem 將其稱為「桶殼 (barrel shells)」。它們被一個一個地移到另一個區域，切成更易於管理的塊狀，並包裝以待處理。Nukem 總共拆除了 430 噸鋼材。

Barsebäck 2 號機以及 Oskarshamn 1 號和 2 號機將使用相同的技術。Nukem 公司說：「在過去的 13 個月中，設備不斷優化，以便可以更高效、更安全地拆除其他 3 個反應爐壓力容器。」。

Nukem 總部位於德國，但歸俄羅斯國家核子企業 Rosatom 所有。他們慶祝首次拆除沸水式反應爐，這是俄羅斯未曾使用過的技術。這項工作由 Nukem 與擁有 Barsebäck 核電廠的 Uniper 電力公司的除役子公司 Uniper Anlagenservice 共同成立的 UNNU 集團進行。

NEI Magazine, 12/06/2021

俄羅斯 TVEL 與法國、捷克公司簽署除役合作協議

Rosatom 的燃料公司和除役工業整合商 TVEL JSC 公司於 2021 年 12 月 2 日與法國的 Robatel Industries 和法國公司 D&S 集團，以及捷克 Škoda JS 簽署除役合作協議。這些協議是在巴黎世界核子展覽會 (WNE 2021) 期間簽署。

這次簽署的協議，目的在共同參與國際

計畫，並加強彼此在國際上再生能源與放射性廢棄物管理市場的地位。著重於與除役相關的放射性廢棄物的壓實、整備和包裝工作。雙方同意以各種形式合作，為潛在客戶提供服務。

Sukhikh 說：「TVEL 燃料公司和 Rosatom 企業希望展開國際合作，並利用他們在解決國外核子除污問題方面的經驗。」「核子材料的管理和相關輻射安全問題的解決，既是保護環境的重要任務，符合聯合國永續發展目標，也是發展新業務線的重要工作。與 Robatel Industries 的合作對於 Rosatom 參與國外計畫非常重要。」

Sukhikh 還與 D&S 集團總裁 Julien Feyta 簽署合作協議，聯合開發核子與輻射危險設施除役、工程和廢棄物管理技術。D&S 集團在放射性廢棄物管理、核子與輻射安全領域擁有廣泛的專業知識和已完成的完整實績。

與捷克 Škoda JS 公司商務總監 Milos Mostecky 簽署的另一項協議，是有關西歐核子設施的除役和拆除、放射性廢棄物管理以及核子設施和輻射危險設施的拆除方面進行合作，共同開發技術和製造設備，以成功執行西歐地區的後端計畫。

2019 年，TVEL 被指定為俄羅斯核子工業在核子設施除役和放射性廢棄物管理方面的單一整合商。到 2021 年，TVEL 企業已經執行 39 個獨立的計畫，涵蓋核子除役、放射性廢棄物和俄羅斯國內的土地復原。目前，Rosatom 在 20 個國家執行核子與輻射危險設施除役、放射性廢棄物

和用過核子燃料管理計畫。

NEI Magazine, 12/03/2021

Škoda JS 為捷克處置場開發貯存罐

Škoda JS 公司表示，在計畫的地下處置場中為 Dukovany 和 Temelín 核電廠的用過核子燃料生產貯存包裝組件（貯存罐）模型，已經開發完成這種類型的貯存罐，客戶是放射性廢棄物處置場管理局 (SÚRAO)。

在計畫中，提出了貯存罐的優化設計，並在未來處置場模擬環境腐蝕試驗的基礎上，選擇具有高耐腐蝕性的材料，保證用過核子燃料貯存數十萬年都不會破壞貯存罐的密封性。這保證了最重要的方面—放射性核種不會外洩到外部環境中。材料的腐蝕測試是與該計畫的分包商、研發公司 ÚJV Rež (CEZ 公司的一部分)、布拉格化學技術大學和布爾諾的 Energovýzkum 專家合作進行。

貯存罐由直徑為 91.4 公分的厚壁碳鋼管製成的外殼組成，外殼內部有一個內置結構，是由厚壁不銹鋼製成的內殼組成。每個外殼設計用於一個燃料組件。在 VVER 440 燃料 (Dukovany 核電廠) 的情況下，貯存罐組件包含 7 個內殼，而在 VVER 1000 燃料 (Temelín 核電廠) 的情況下，貯存罐組件僅有 3 個內殼，因為這些燃料組件尺寸較大。外殼和外殼的兩側均以焊接蓋密封。

蓋子的最終焊接將由焊接機器人在地下處置場現場的熱室中進行。每個燃料組件都密封在單獨的外殼中，提高了燃料在運

送到貯存罐期間的安全性。

貯存罐的長度由貯存的燃料類型決定。對於來自 Dukovany 的燃料，設計的罐長近 4 公尺，重 14 噸；對於來自 Temelín 的燃料，長度幾乎為 5 公尺，重量為 18 噸。這兩種類型的貯存罐的直徑相同都是 91.4 公分，以便於地下處置場作業的一致，特別是搬運和焊接機器人、運輸工具或將貯存罐嵌入的岩石鑽孔。

貯存罐的模型是按照實際直徑製作，但長度縮短，以便將其放置在 SÚRAO 計畫的資訊中心內。為此，該模型製作了部分切口，以便民眾可以查看其剖面構造的所有細節。

為地下處置場開發包裝組件，是 Škoda JS 在整個用過核子燃料管理循環的經驗延續。Škoda JS 為冷卻水池製造貯存架，用於貯存從反應爐中取出的用過核子燃料。在水池中貯存幾年後，燃料組件轉移到貯存與運輸容器中，再貯存於核電廠的乾式中期貯存設施中。

為此，Škoda JS 過去向核電廠供應曾獲德國 GN 公司許可所生產的 Casto 罐，但現在根據自己的設計供 Škoda 1000/1 和 Škoda 440/8 的容器。預計燃料將在這些容器中貯存 60 年。在此之後，燃料組件將轉移到地下處置場的包裝組件中。30 年來，Škoda JS 生產了近 470 個放射性材料貯存容器，其中絕對大部分用於用過核子燃料。Škoda JS 是俄羅斯 OMZ 工程集團的一部分。

NEI Magazine, 11/25/2021

國內新聞

我國持續關注福島排放氬水最新動態

原能會針對「福島核災含氬廢水的海洋排放實施計畫申請」相關說明：

1. 日本東京電力公司於 2021 年 12 月 21 日上午正式向日本原子力規制委員會 (NRA)，提出福島核災含氬廢水的海洋排放實施計畫申請，此實施計畫內容是東京電力公司根據日本政府 2021 年 4 月所公布的海洋排放政策方針而擬訂，現東京電力公司向 NRA 提出相應的實施計畫申請。
2. NRA 已將東京電力公司提交的實施計畫等申請資料公布於其官方網頁，後續將由 NRA 辦理計畫內容相關的安全審查。
3. 原能會本於全民的原能會理念，將秉持專業持續關注日本 NRA 就福島核災含氬廢水的海洋排放實施計畫審查進度，同時亦全力做好各項輻射安全的監測與管制工作，以確保公眾健康與安全。

本刊訊，12/11/2021

核二廠 1 號機於 2021 年 12 月 28 日進入除役

核二廠 1 號機運轉執照於 2021 年 12 月 27 日屆期，並於隔 (28) 日起進入除役期間。台電公司已於 2018 年 12 月依「核子反應器設施管制法」第 23 條規定，於運轉執照屆期前 3 年提出核二廠除役計畫，原能會並於 2019 年 10 月完成審查。目前台電公司正辦理環境影響評估作業，待取得環保署審核通過的核二廠除役計畫環境影響評估相關資料，並經原能會審查確認符合法規規定後，即可依法核發核二廠除役許可。

核二廠 1 號機因受限於用過核子燃料池貯存近滿貯，反應爐內用過核子燃料於停機後暫時無法退出爐心，原能會已參照國際間類似機組狀態的管制作法及比照核一廠除役期間管制要求，進行核安、輻安、保安、核子保防、廢料管理等管制，並督促電廠比照運轉期間品質要求，確保除役期間核燃料安全。☸

本刊訊，12/27/2021



台電核二廠除役計畫時程說明

109年7月29日(三)
經濟部召開環境影響評估現場勘查及公聽會
現勘時間：中午12:40-13:50
地點：北部展示館
公聽會時間：下午14:00-16:00
地點：萬里區公所5樓國際會議廳

1. 除役過渡階段 (8年)

2. 除役拆廠階段 (12年)

3. 最終狀態偵測階段 (3年)

4. 廠址復原階段 (2年)




西式工法
多重保護

西班牙的集中式貯存設施(ATC)，採用窖式貯存

西班牙於1984年成立放射性廢棄物的專責機構（Enresa），在長期努力之下、達成民眾共識，選定昆卡市（Cuenca），作為中期暫時貯存設施場址。這座集中式中期貯存設施的規劃，採用窖式貯存方式，以多重障壁、自然空氣對流與低輻射劑量的設計原理，將用過核燃料先裝在密封鋼桶中，再放入不鏽鋼製成的貯存管，存放在混凝土建造的廠房內，達到有效安全的屏蔽作用；預期未來，西班牙可望循序漸進，實現非核家園的願景。

