

淺談硼中子捕獲治療  
與未來的發展方向

乾裂的台灣—利用核子  
同位素技術優化水資源

日本決定  
將福島處理水排入海洋

芬蘭高放最終處置場開始  
首座處置隧道建設工程

美國印地安角核電廠除役

將房屋變成發電廠—  
瑞典如何翻轉能源生產

# 編輯室手札

截至 2020 年 2 月止，世界上營運中的用過核子燃料中期貯存設施，有 30 座濕式貯存設施，133 座乾式貯存設施。但 2000 年後，國際上僅新增 1 座濕式貯存設施，其餘超過 90 餘座都是乾式貯存設施。乾式貯存已經是成熟的技術，也是國際間普遍採行的做法。美國首座乾式貯存設施運轉至今已 34 年，且獲核准運轉至 2046 年，共計 60 年。

使用過的核子燃料在退出反應爐後，因具有非常高的熱量與放射性，必須先在反應爐廠房內的用過核子燃料池中以循環水進行冷卻，同時讓放射性自然衰變，這段時間被稱為「濕式貯存」，通常需要 5–10 年的時間，待溫度與放射性衰變到一定的程度，再轉移至乾式貯存設施中貯存更長久的時間。以精密工業著稱的經濟大國—瑞士，在 2010 年前其電力結構有 39% 來自核能，也是採用乾式貯存設施的國家之一，本期小編要帶讀者們來看看瑞士是怎樣管理他們的乾式貯存設施。

瑞典在經歷 1973 年和 1979 年的石油危機後，全力發展再生能源，目前是歐洲使用再生能源占比最高的國家，在 2014 年時瑞典的再生能源使用率占全國 53%。瑞典總理 Stefan Löfven 更在 2015 年宣布，瑞典將會成為無化石燃料的國家，並在 2050 年時不再排放溫室氣體。瑞典的目標，除了到 2040 年實現以再生能源生產 100% 電力，還將房屋改造成高效的「產消合一者」，也就是可自行生產所需能源的建築物。在「將房屋變成發電廠—瑞典如何翻轉能源生產」一文中，我們可以看到瑞典是如何將住宅變身為電力供應站。

生質能源是全球最大的自然資源，而生質料源因不同的生產流程會產生不同的生質燃料，可做為定置型發電之用，也可做為交通載具的動力燃料使用，用途相當廣泛且多元。繼玉米和大豆等農作物之後，下一個生質燃料來源可能是巨型海帶。巨型海帶是世界上最大的海藻物種，是生產生質燃料的誘人來源。在最近的一項研究中，測試了一種新的海藻生長策略，可大規模、連續生產海藻。在目前電力緊張的狀況下，這樣的研發成果實在令人期待；若能早日參與台灣的發電結構，也許可以大大減輕國人對於電力短缺的憂慮。⊗

# 目 錄

---

## 專題報導 2 瑞士乾式貯存設施介紹 - 編輯室

### 原子能小學堂 10 乾貯 Q & A - 編輯室

12 用過核子燃料最終處置的 ABC ( 上 ) - 劉振乾

### 生活中的輻射 16 淺談硼中子捕獲治療與未來的發展方向 - 陳一璋

22 乾裂的台灣—用核子同位素技術優化水資源 - 編輯室

### 科普有意思 28 原子能名詞小典故 - 編輯室

### 國際脈動 32 日本決定將福島處理水排入海洋 - 編輯室

34 芬蘭高放最終處置場開始首座處置隧道建設工程 - 編輯室

36 美國印地安角核電廠除役 - 編輯室

37 預計到 2035 年風能成本將下降 35% - 編輯室

38 下一個生質燃料來源可能是巨型海帶 - 編輯室

40 將房屋變成發電廠 - 瑞典如何翻轉能源生產 - 編輯室

### 新聞報馬仔 41 國外新聞 - 編輯室

44 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：林庭安、翁明琪

執 編：長榮國際 文化事業本部

設計排版：長榮國際 文化事業本部

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

---



# 瑞士乾式貯存 設施介紹

文 編輯室

使用過的核子燃料在退出反應爐後，因具有非常高度的熱量與放射性，必須先在反應爐廠房內的用過核子燃料池中以循環水進行冷卻、同時讓放射性自然衰變，這段時間即為所謂的「濕式貯存」。待這些用過核子燃料的溫度與放射性衰變到一定的程度、這通常需要 5-10 年的時間，則可轉移至「乾式貯存」設施中進行更長久的中期貯存。使用乾式貯存設施貯存用過核子燃料，除了可藉由空氣自然對流冷卻的方式，持續地讓燃料進行冷卻之外，同時也是多數國家在等待最終處置設施完工前的這段時間，為了可讓核電廠的除役工程能順利進行，也可安全地暫貯、監管這些燃料，所採用的一種因應方式。

根據我國行政院原子能委員會的統計，截至 2018 年底，全球有 24 個國家設有用過核子燃料乾式貯存設施，運轉中的乾式貯存設施共有 131 座，另外還有 7 座目前正在興建當中，在國際間屬於常見、且成熟的用過核子燃料貯存技術，而瑞士也是採用乾式貯存設施的國家之一。

擁有 4 座核電廠、一共 5 部機組的瑞士，核能發電在 2010 年前占國家電力近

40%，在福島事故後逐年下降，目前仍為國家生產約 1/4 的電力。這些核電機組每年產生 70 噸的用過核子燃料束，目前這些用過核子燃料大多貯存在瑞士一座集中式中期貯存設施內，Beznau 核電廠內也建有一座乾式貯存設施，來容納該座核電廠 2 部機組所產生的用過核子燃料。

### 國家集中式中期貯存設施

瑞士 4 間持有核電廠的電力公司以不同的比例出資，於 1990 年初一同成立 ZWILAG (Zwilag Zwischenlager Würenlingen AG) 公司，負責瑞士這座國家放射性廢棄物集中式中期貯存設施 (Central Interim Storage Facility) 的建設與營運。ZWILAG 公司也於 1996 年獲得瑞士聯邦政府的准許，在瑞士北部的維倫林根 (Würenlingen) 興建這座集中式中期貯存設施，自 2001 年開始為該國所有放射性廢棄物提供中期貯存的地點。

這座集中式中期貯存設施是由多項設施所組成，除了高、中、中低放射性廢棄物各自的貯存建築之外，還有與這些貯存設施相關之接收站、包裝廠、熱室 (Hot cell)、電漿 (焚化熔化) 廠等的輔助設施。不同的放射性廢棄物有各自獨立的接收與處理過程，ZWILAG 公司主要將其分成 4 個種類，分別為高放射性廢棄物貯存、中放射性廢棄物貯存、電漿廠產生的低放射性廢棄物（來自瑞士國內醫療、工業與研究等單位）處理與貯存、以及來自國內核電廠因維修替換所產生的放射性廢棄物處理與貯存。本文將針對高放射性廢棄物的乾式貯存設施與貯存流程進行介紹。

#### 貯存設施與處置設施之差異

設施項目	目的	場址條件、技術與施工
集中式貯存設施	可再取出進行最終處置	單純
最終處置設施	永久與人類生活圈隔離安置	複雜

圖表來源：台灣電力公司

核電廠	反應爐 類型	狀態	地點	裝置容 量(MW)	首次併網發 電時間(年)	用過核子燃料乾式 貯存地點
MUEHLEBERG	沸水式	除役	MUEHLEBERG	373	1971	國家集中式中期貯存設施(ZWILAG)
GOESGEN	壓水式	運轉中	DAENIKEN	1,010	1979	
LEIBSTADT	沸水式	運轉中	LEIBSTADT	1,220	1984	
BEZNAU-1	壓水式	運轉中	BEZNAU	365	1969	廠內獨立乾式貯存設施(ZWIBEZ)
BEZNAU-2	壓水式	運轉中	BEZNAU	365	1971	

資料來源：IAEA-PRIS、OECD-NEA

由於瑞士早期將用過核子燃料送至國外進行再處理，再處理過程中所產生的高放射性廢棄物經玻璃固化過程後必須運回瑞士，但再處理的計畫因日本福島事故、導致瑞士重新修訂國家能源政策（Energy Strategy 2050）後被停止，同時也確立逐步廢核的目標，即各核電廠維持運轉至運轉壽命結束，不會建立新的核電機組。因此，瑞士必須處理的高放射性廢棄物除了用過核子燃料之外，還有因再處理所產生的玻璃固化廢棄物。

### 高放射性廢棄物乾式貯存

當裝有上述高放射性廢棄物的護箱（Cask），自瑞士各核電廠或來自英、法兩國的再處理廠，透過鐵路運輸至該座集中式中期貯存設施附近的轉移站（Transfer station）時，站內的大型吊掛起重機會把在鐵路運輸工具上的護箱卸下、移轉到大型的陸路運輸車輛上，然後行駛約一公里的路程至該集中式中期貯存設施。

運輸車輛在進入廠內時會先至近 30 公尺長的接收站，由廠內專門工作人員替護箱進行詳細檢查、確保無放射性物質外洩等的情形，才會經由運輸車輛運送至高放射性廢棄物貯存廠房內，進行室內乾式貯存。

這座高放射性廢棄物貯存廠房長、寬分別為 68 公尺與 41 公尺，高近 20 公尺，位在集中式中期貯存設施內中心的位置，裝載用過核子燃料與玻璃固化物的護箱均貯存在此，廠房貯滿時約可容納 200 座護箱。

玻璃固化廢棄物與用過核子燃料束乾式貯存的原理，為一項安全且已經過大量測試的貯存概念。這些活性高的高放射性廢棄物會散發熱量，必須設法使這些熱量能夠散發。而該座乾式貯存設施內的空氣可通過廠房側壁和屋頂上的通風孔，進行自然循環，讓熱量自行消散。

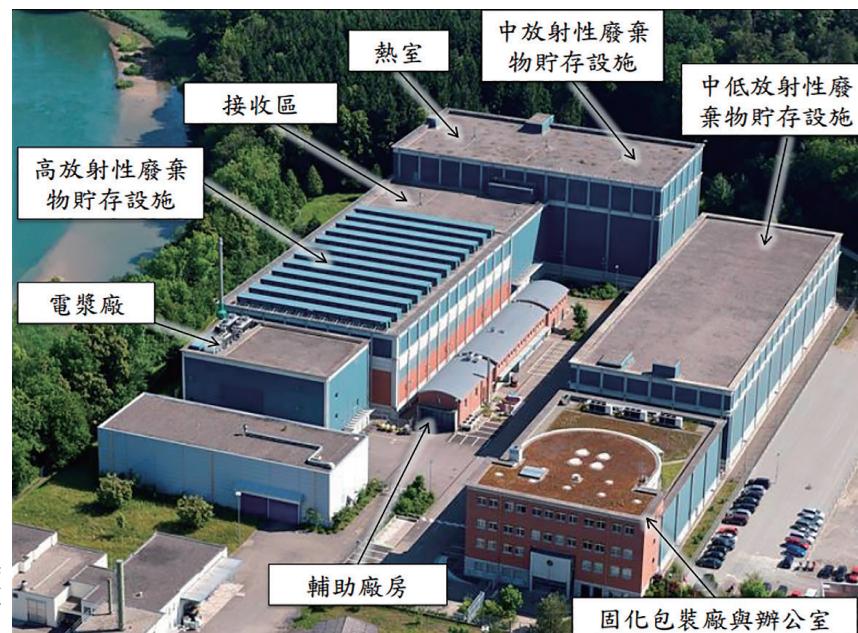
裝滿高放射性廢棄物的鋼製護箱，在一開始進行乾式貯存時的熱量輸出可達 40

至 50 吨，其熱量的輸出會逐年下降，經貯存 10 年後相當於 25 至 30 吨左右，可惜目前的技術發展尚無法利用這些熱能來創造經濟價值。至於經屋頂通風口所排出的熱空氣不具有放射性，因此並不會對環境造成任何負面影響。

在裝有高放射性廢棄物的護箱移入該座乾式貯存設施內時，即會與監控系統進行連接，在整個乾式貯存的期間將會進行不間斷的放射性監測，以確保所有的護箱均維持完全密封的狀態。與多數國家的乾式貯存設施相同，僅有獲得政府頒發許可與批准的護箱型號，才可在該座貯存廠房內做為乾式貯存容器使用。

由於用過核子燃料束的設計會因為反應爐的類型而有所不同，所使用的乾式貯存容器也會因此而採用不同的型號來找尋

合適的護箱。根據我國行政院原子能委員會放射性物料管理局的介紹，目前貯存於瑞士該座乾式貯存設施內的護箱有多種類型，Gösgen 核電廠（壓水式反應爐）的用過核子燃料使用兼具運輸及貯存雙重用途之 TN24G 金屬護箱，每座護箱可盛裝 37 束用過核子燃料；來自 Leibstadt 核電廠（沸水式反應爐）的用過核子燃料使用雙重用途之 TN97L 金屬護箱，每座護箱可盛裝 97 束用過核子燃料；來自 Mühleberg 核電廠（沸水式反應爐）的用過核子燃料使則是採用運輸與貯存雙重用途之 TN24BH 金屬護箱，每座護箱可盛裝 69 束用過核子燃料，但 Mühleberg 是先使用中型的 TN9/4 金屬護箱，將用過核子燃料利用卡車運至該座集中式中期貯存設施，再於其熱室將用過核子燃料移至 TN24BH 金屬護箱，進行乾式貯存。



瑞士國家放射性廢棄物集中式中期貯存設施(圖片來源:ZWILAG)



裝有用過核子燃料的護箱在透過鐵路與陸路運輸至集中式中期貯存設施時，必須先在設施內的接收站進行檢查。(圖片來源：ZWILAG)



瑞士集中式中期貯存設施內的高放射性廢棄物乾式貯存廠房，用來存放來自瑞士核電廠的用過核子燃料以及因再處理所產生的玻璃固化廢棄物。(圖片來源：ZWILAG)

另一方面，貯存於該設施的玻璃固化廢棄物則是採用 CASTOR HAW 20/28 CG 金屬護箱，貯存於同一座乾式貯存廠房當中。不管是用來裝載用過核子燃料或是玻璃固化廢棄物的貯存護箱，都可以保護護箱內的高放射性廢棄物免受墜機、地震、火災或其他事件等的傷害。

根據經濟合作暨開發組織核能署（OECD-NEA）公布的《2020年瑞士國家放射性廢棄物之安全管理與除役報告》顯示，截至2018年底，在瑞士集中式中期貯存設施內已儲存41座用過核子燃料乾式貯存護箱，來自Gösgen、Leibstadt與Mühleberg共3座核電廠，以及1座裝有來自瑞士Diorit研究用反應爐用過核子燃料束的乾式貯存護箱。

除了這座集中式中期貯存設施之外，瑞士Beznau核電廠內也有一座較小型的獨立用過核子燃料乾式貯存設施。截至2018年底，已有18座乾式貯存護箱儲存於該設施內，最多則可以容納48座護箱。而Gösgen核電廠則建有一座用過核子燃料濕式貯存設施，最多可容納1,056束用過核子燃料。

目前瑞士以已除役的Mühleberg核電廠運轉47年，以及其他4部機組運轉60年的時間來計算，屆時將產生4,100噸的用過核子燃料，其中1,140噸已完成再處理，加上再處理所產生的玻璃固化廢棄物，瑞士的高放射性廢棄物最終處置場將約需9,400立方公尺的容量才可以容納這些高放射性廢棄物，這約等於8座單戶住宅。

(Single family home) 的大小。瑞士國家放射性廢棄物處置專責機構 (Nagra) 目前也以這個數字為目標，就高放射性廢棄物最終處置設施開始必要的地質調查與安全評估作業。Nagra 是由瑞士政府與 4 間持有核電廠的電力公司共同成立。

## 安全至上

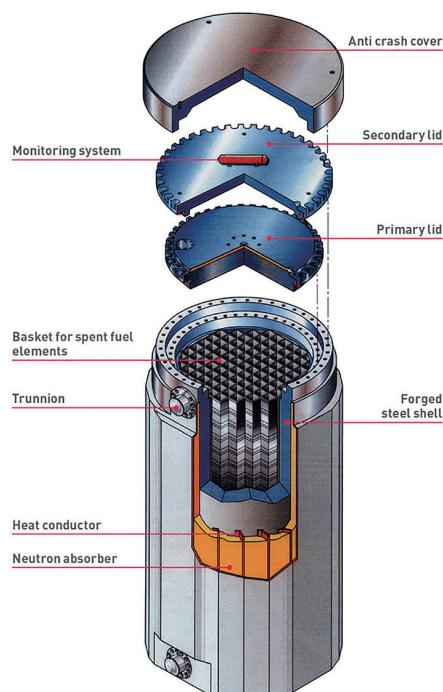
ZWILAG 公司除了在這座集中式中期貯存設施建設時就考量到如強震、墜機等多項安全因素，來採取廣泛的預防措施，以及該設施與環境的相容性之外，營運期間的安全性，例如放射性廢棄物的運送過程、廢棄物的放射性監測、各項設施的安全檢查等，都必須以最優先的順序來看待。

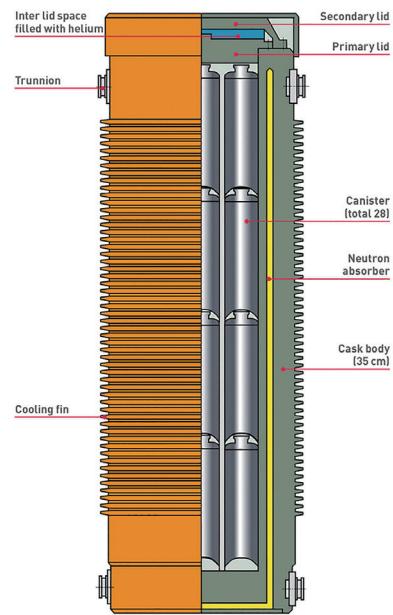
整個設施的營運也都必須符合瑞士國家規定，核能安全、輻射防護與放射性廢棄物處理等均受瑞士法律規範，相關機構主要有聯邦能源局 (Swiss Federal Office of Energy)、核能安全管制機構 (Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate) 與公共衛生局 (Federal Office of Public Health)。

瑞士的高放射性廢棄物在抵達這座集中式中期貯存設施前均使用鐵路或陸路進行運送。放射性廢棄物的運輸在全球各地已累計了數百萬公里的經驗，僅在歐洲就已完成了數千次的用過核子燃料運輸，至今未發生任何一起涉及放射性物質外洩的事故。但高放射性廢棄物由於放射性極高，這



瑞士集中式中期貯存設施內所採用的用過核子燃料貯存護箱 (圖片來源: ZWILAG)





瑞士集中式中期貯存設施內所採用的玻璃固化廢棄物貯存護箱(圖片來源:ZWILAG)

些廢棄物的運輸必須受國際監管，且每一次的運輸都必須事先獲得許可，才可進行。

這座集中式中期貯存設施內所採用的高放射性廢棄物貯存護箱，重量最重可達 140 噸，這些金屬製的護箱除了可作為貯存用容器，同時也可以當作運輸容器使用，也可保護貯存在裡面的高放射性廢棄物免受有可能發生的損傷。這些護箱在正式使用前都必須經過測試，例如需承受自 9 公尺的高度掉落至堅硬的表面，以及暴露在平均高達攝氏 800 度火焰等的測試，確保貯存在內部的放射性物質在極端的狀況下仍不會對周遭環境、人民造成威脅，即使是在運輸過程之間亦同。

該座設施內所有的高放射性廢棄物護箱都必須接受不間斷的控管，貯存廠房內的

放射性監測也是在不間斷的情況下執行。由於瑞士這座集中式中期貯存設施接收國家所有種類的放射性廢棄物，除了用過核子燃料與玻璃固化廢棄物等高放射性廢棄物之外，還有不同種類的中低放射性廢棄物，包含來自中期貯存設施內、瑞士核電廠以及醫療、工業、研究用所產生的中低放射性廢棄物，均貯存在這座集中式中期貯存設施。因此，該座設施周圍都設有完善的量測系統，持續對該地區的空氣、水源（河流、地下水與降水）、食物鏈（土壤抽樣、草地、植物性食物與牛奶）進行監測，量測的結果每年由政府公布。在這數十年來的監測結果，該地區的輻射影響每年最多僅百分之幾毫西弗，跟瑞士人口平均每人每年接受 4 毫西弗的輻射曝露，可說是可以忽略的數值。

ZWILAG 公司當初選擇使用鋼筋混凝土來建設這座集中式中期貯存設施，除了可以將輻射屏蔽在建築內，保護周遭環境免受輻射直接照射之外，還可以為周遭環境提供高度的保護。設施建築內部的壓力水平維持低下也可確保當發生輻射外洩的情況時，空氣只可以進入建築內部。各種預防性措施包含了對各設施進行永久性的監控與維護，以確保所有設施可安全運行，所有機器與人力也會定期進行優化。ZWILAG 公司每年為此投入大筆的資金，來提高運轉的安全水平，「這座集中式中期貯存設施是由受過專業訓練的人員來維持營運的一座現代化設施，這些人員不僅在安全問題上值得依靠，在所有方面都是」，ZWILAG 在公司網站上這樣敘述。

固定在設施內部工作的人員，每年可能吸收超過 1 毫西弗的累計輻射劑量的區域為「控制區」。不管是在該區域工作的員工或是至該區域參訪的訪客，都必須採取額外的安全措施，除了可達到更高程度的保護，同時也可避免將放射性物質外移，這些措施包含了替換衣服與鞋子、配戴輻射劑量偵測計、限制在該區域停留的

時間、避免接觸輻射源、在離開該區域前接受仔細的放射性水平量測等等。另外，在該區域也禁止任何飲食，以避免透過肺部或胃部攝入任何可能的放射性物質。

根據 ZWILAG 公司的資訊顯示，在這座集中式中期貯存設施工作的員工，他們接受到的放射性曝露均遠低於瑞士每人每年 20 毫西弗的法律限制，這項限制適用於瑞士每位會受到游離輻射曝露的專業人員，這也包含了如放射（x 光）師以及參與癌症放射治療等的醫療人員。相比之下，於德國 Menzenschwand 的黑森林（Black Forest）所偵測到的天然輻射劑量，也是每人每年 20 毫西弗，可見這座集中式中期貯存設施的輻射劑量值並無任何異常，也代表內部的放射性廢棄物乾式貯存設施完全具備安全運轉的能力。◎

#### 參考資料：

1. ZWILAG. "Installations and operational process"
2. ZWILAG. "Operation."
3. ZWILAG. "Safety."
4. Nagra. "Volumes of radioactive waste."
5. OECD-NEA. "The control of safety of radioactive waste management and decommissioning in Switzerland."
6. IAEA. "Country Nuclear Power Profiles – Switzerland (Updated 2020)."
7. 台灣電力公司·《「集中式貯存場」構想與初步規劃》
8. 行政院原子能委員會放射性物料管理局·《集中式放射性廢棄物貯存設施 國際相關資訊》



## 什麼是核子燃料及用過核子燃料？



自然界中的鈾元素中，鈾 235 含量約 0.7%，其餘則是鈾 238。核子燃料的製造，是先採集鈾礦，經過精煉、純化後，將鈾 235 的濃度提高到 3%–5% 後，即可用以製作燃料丸。將燃料丸裝在具有抗腐性、高延展性的圓柱形的鋯合金，即成為燃料棒。將燃料棒依不同反應爐的設計，組成 8x8、9x9 或 10x10 型式的燃料束，置入核反應爐進行核分裂反應，即可產生能量用來發電。核子燃料置於核反應爐運轉大約經過 3–5 年的時間，鈾 235 含量會逐步降低至 1–2%，使得核分裂反應的效率降低，這些核子燃料必須更換，以維持發電效率。從核反應爐退出的核子燃料，即稱為「用過核子燃料」。



## 我國的用過核子燃料管理策略？



我國用過核子燃料管理策略，是採「近程以廠內水池式貯存，中程採廠內乾式貯存及在遵守國際核子保防協定下，尋求在國外進行再處理的可行性，長程推動最終處置」等短、中、長程的方案。用過核子燃料從核反應爐退出後，具有很高的放射性和衰變熱，必須放在反應爐廠房的用過核子燃料池裡冷卻，待其放射性及熱量衰減後，再進行後續的乾式貯存及最終處置作業。



## 乾式貯存的特性？

**A** 用過核子燃料在退出核子反應爐的初期，具有較高熱量（每束高達數萬瓦以上）及放射性，須放入核反應爐廠房旁的用過核子燃料池，以循環冷卻水快速移除熱量，並使放射性衰減，此為濕式貯存。用過核子燃料於池水中貯存一段時間後（10 年以上），則可移至乾式貯存設施貯放。乾式貯存是將用過核子燃料置於金屬容器內，經充填惰性氣體後加以密封，藉由空氣的自然對流冷卻方式，將用過核子燃料產生的熱帶走，金屬容器外部則利用混凝土護箱或金屬護箱作為屏蔽，降低輻射強度。



## 國際間乾式貯存設施使用情形？

**A** 依據原能會統計，截至 109 年 12 月底，國際間已有 24 個國家設置乾式貯存設施，包含美國、加拿大、德國、瑞士等，目前正在使用中的乾式貯存設施共有 131 座，另有 7 座興建中或待啟用，顯示乾式貯存已是國際間普遍採用及成熟的用過燃料貯存技術。目前國際上常見的乾式貯存方式有 5 種：混凝土貯存窖、金屬護箱、混凝土護箱、混凝土模組、地下貯存系統。以美國為例，以上 5 種貯存方式均有採用，除混凝土貯存窖的設計有建築物外，其他 4 種乾式貯存方式均採取露天貯存方式。德國與日本則大多使用金屬護箱並採室內貯存型式，主要是考量再處理運送、再取出操作及重覆使用的方便性。



## 乾式貯存設施會不會變成永久儲存場？

**A** 依據我國「高放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」規定，高放射性廢棄物最終處置須採深層地質處置，也就是用過核子燃料必須置放在地表下相當深度的處置設施，國際上一般指地下 300 至 1,000 公尺深，以便將放射性核種與生物圈長期、安全地隔離。乾式貯存設施為地表設施，並不能做為處置設施，也不可能變成「永久儲存場」。

# 用過核子燃料最終處置的 ABC (上)

譯 台電公司退休工程師 劉振乾

## 前言：關於放射性廢棄物的基本常識

2017 年 11 月 21 日由台灣永續能源研究基金會等委託的「台灣電力使用與能源轉型民意調查」，結果顯示，95.6% 受訪民眾不清楚台灣進口能源的比例超過 95%。由此推論，民眾對於放射性廢棄物的知識，幾乎可說是一片空白。因此加強放射性廢棄物的 ABC( 即基本常識 ) 宣傳，已是迫在眉睫之事了。

高放射性廢棄物（用過核子燃料）的最終處置，被討論過的方法有：1. 海洋處置：在深度數千公尺的海底，有海底軟泥的堆積層，可存放於此處。2. 宇宙處置：存放於外太空。3. 冰床處置：在南極或是格陵蘭等地下數千公尺深的冰床。4. 海溝處置：海溝以每年數公分的速度往下陷入地球內部，可利用此機制將放射性廢棄物送往地球內部。5. 核種消滅處置。第 1-4 類的方法都是以隔離為目的之最終處置。而第 5 類方法則是以中子照射，將放射性廢棄物中的放射性元素轉換為不會放出輻射的另一種元素，目前還在研究階段，技術尚未成熟，假以時日必能發展為可減少高放射性廢棄物數量的方法。

## 20 億年前就存在的反應爐—深層地質處置的由來

各位以為這「深層地質處置」的方法是上述介紹的各種方法都行不通，才不得不選擇的方法嗎？不是這樣子，那是大自然

留給我們的寶貴寶物，我們只是「如法炮製」而已。

法國的核能委員會於 1972 年發現「奧克羅天然反應爐」的地球科學現象。非洲靠近赤道的加彭共和國在當時是法國殖民地，從奧克羅的鈾礦山開採的鈾礦石，加工成為核燃料，供法國的核能發電之用。鈾礦在地下約 400 公尺處，當時以國際原子能總署 (IAEA) 為首的研究機構詳細調查研究的結果，證實約在 20 億年前此地即存在天然的反應爐。

如何斷定 20 億年前此地存在天然反應爐？以調查天然鈾中所含的鈾 235 這種放射性物質的含量來斷定。由於自然地衰變，每 7 億年鈾 235 就會減少一半，這稱為半衰期 7 億年。由現今的天然鈾中的 0.72% 含量反推回去，21 億年前鈾 235 約為 5%。而在奧克羅鈾礦山的天然鈾，鈾 235 只有 0.64%，比其他地方的天然鈾為低，可以想見是因為某種原因讓鈾 235 的含量減少。

國際原子能總署詳細調查此地達到能引起鈾的核分裂反應的「臨界」狀態的鈾濃縮部分，證實由於核分裂反應產生的核分裂生成核種，仍好端端地保存於岩石的內部。此一現象和將放射性廢棄物於地下岩盤中進行地質處置類似，稱為「天然類比 (Natural Analogue)」，因此地質處置的想法獲得了重視。

在其他地方，雖然沒有發現天然反應爐現象，但是鈾與核分裂核種在岩盤中濃縮的機制是一樣的。也就是天然的地下環境（岩石與礦物），普遍的具有將元素加以吸附或是濃縮的作用與機制。

## 多重障壁系統—藉著自然素材達成的隔離功能

地質處置的定義是在地面下 300 公尺左右的岩盤中，將用過核子燃料貯存、隔離、處置。我們從「奧克羅天然反應爐」這自然界的妙方，學習應用於將高放射性廢棄物進行地質處置。

這套隔離方法稱為「多重障壁 (Barrier) 系統」。以日本為例，是將被玻璃固化的高放射性廢棄物，放在鋼製的容器內，周邊再以膨潤土（一種黏土礦物）的緩衝材料覆蓋，貯存於地下深層的岩盤中。

「障壁」顧名思義就是抑制某種活動，Barrier 在辭典裡有「障礙、阻礙、隔閡」的意思。最終處置的障壁所要抑制的活動是阻止地下水使玻璃固化體內的放射性元素溶出與移動。這種由地下水帶動的放射性元素的溶出與移動的過程稱為「地下水情境 (scenario)」。

### 第一重障壁：內嵌鑄鐵的銅罐

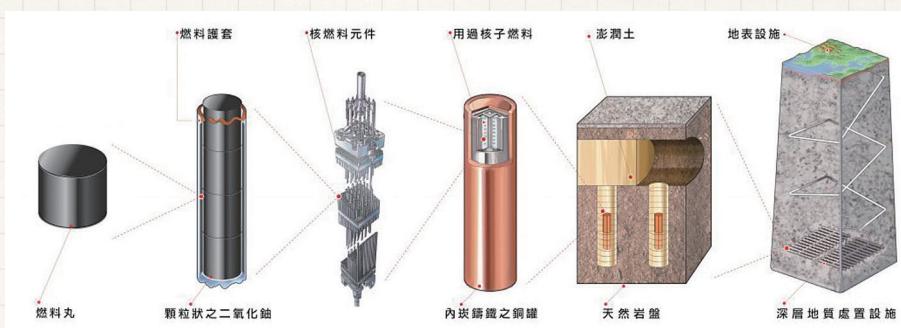
將用過核子燃料組件放入內嵌鑄鐵的銅罐中，選擇鑄鐵材質有兩個理由，首先是輻射的屏蔽，再來是鑄鐵本身氧化後會使周邊環境變為還原狀態，有「還原劑」的功用。在地下岩盤中的地下水幾乎不會和空氣接觸，基本上維持還原狀態。退一步來說，即使溶有氧氣的地下水浸透到地下處置場，由於鑄鐵製的容器會生鏽而消耗掉地下水中的氧氣，而恢復到還原狀態，這是生鏽「因禍得福」的現象。

（註：日本的用過核子燃料是先以玻璃固化後，再放入鋼鐵製的容器內。）

### 第二重障壁：緩衝材料的膨潤土

膨潤土有 3 個功用：1. 吸收水後會膨脹，因此可以塞滿周邊岩盤中的裂縫，抑制地下水的進入。2. 屬於黏土礦物，每一個數微米以下非常細小的礦物集合體。3. 在該集合體內的水與元素的活動以擴散為主，因而可以抑制其活動。

在義大利的杜納洛巴的黏土層中發現約兩百萬年前的化石樹林，這是因為黏土層抑制了樹木的腐蝕與變質，到現在仍然可以用鋸子加工，也可以像一般木材燃燒。還



高放最終處置多重障壁系統圖（圖片來源：原子能委員會）



義大利杜納  
洛巴的化石  
樹林



敘利亞幼發拉底河周  
邊的遺跡內發現 8 千  
年前的黑曜石刀



約 200 年前在捷克製  
造的含鈾玻璃杯

有黏土礦物可以吸著元素。其理由來自它的結晶構造，並確認也能吸著放射性元素。

### 第三重障壁：岩盤（岩石與礦物）

以上第一層到第二層稱為「工程障壁」，而最天然的岩盤的功用，在「奧克羅天然反應爐」中已經見識到它的厲害，不再重複。

### 地質處置與考古學—長期耐久性類比物

各位也許會問，以上所說的隔離功能可以維持多久？也許不到 1 千年就破功了，那有什麼用處？科學家針對這個問題，進行有關耐久性的研究，提出很多正面的研究報告，但是不可否認的，其實驗時間頂多是數年，而用推估法找出數千年以及數萬年後的情形。

### 從考古學找答案

要了解長期的溶解速度或是腐蝕的程度，在考古學中找尋類似現象是最容易的

捷徑。首先看看玻璃，它是天然存在的，其中之一為黑曜石，當從火山噴出的熔岩在地表附近急速冷卻時就會形成黑曜石。自古以來被當作石器的一種而廣泛使用。

此處介紹的是在敘利亞的幼發拉底河周邊的遺跡內，發現了約 8 千年前的黑曜石刀，此刀是在厚度約 1.5 公尺的沙層中找到，幾乎是完全浸泡在地下水的狀態。在遺跡內可以發現不少這一類的刀，其中有些是斷掉的，也許是在使用中折斷，但是每一支都很銳利，至今還可以用來割紙。由此我們可以研究出在數千年的時間裡玻璃的溶出速度。

各位也許會說黑曜石沒有輻射，不能算數。那就用約 200 年前在捷克製造出來的鈾玻璃來說明。捷克境內有許多鈾礦，當鈾氧化時會帶一點黃色，利用此特性將鈾當作玻璃的著色劑。這是當時的貴族們所製造含鈾約 5%（日本高放玻璃固化體鈾含量只有其 1/4）的酒杯。經過 200 年，透

明金黃色的玻璃杯顏色沒有變淡就可證明鈾不溶出於水。我們之所以用玻璃瓶盛裝鹽酸與硫酸，也是因為玻璃可以耐強酸。當時貴族們不知道鈾有輻射，如果知道，他們也許就不敢拿來做為著色劑吧。由於這些貴族們的審美觀，讓我們現在能夠據以研究玻璃對於輻射所產生的影響。

### 羅馬時代的鐵釘

那麼鐵的長期腐蝕又有什麼類比物？其唯一的發現是1995年在蘇格蘭找到，距今約2千年前入侵蘇格蘭的羅馬士兵所埋置的數萬支鐵釘，這些是在地表下約2公尺深的縱穴中找到的。發現當時也證實了前述所說的，鐵生鏽會消耗掉地下水中的氧氣，而恢復到還原狀態的情形。因為鐵釘的表面雖然生鏽，但是鐵釘的內部幾乎沒有生鏽，還十分堪用，由此也可以估計出2千年中鐵的腐蝕狀態與腐蝕速度。這可以說是接近地表位置、在嚴苛的試驗條件下鐵釘的長期腐蝕實驗。

除此之外，瑞典還有從海底拉上來的青銅製大砲的腐蝕研究。瑞典想利用銅做容器，藉此可以得知銅的長期腐蝕情形。這些都是實驗室內無法獲得的寶貴數據。

這些數據與資訊的累積，讓現在的多重障壁系統裡的工程障壁部分，其素材的成分與厚度的調整有所依據，而構築出可靠度更高的多重障壁系統。



羅馬士兵埋置鐵釘之示意圖



約2千年前的鐵釘



本篇資料來源：〈原子力文化〉·2018年1、2、3月號；P14-15 圖片來源：〈原子力文化〉·2018年1、2、3月號。



## 淺談硼中子捕獲治療與未來的發展方向

文 臺北榮總腫瘤醫學部 放射治療科主治醫師 陳一璋

### 惡性腦瘤現今的困境仍棘手

韓劇劇情中的雋美愛情常常是非常吸引人欣賞的題材，但是為了鋪陳一個淒美的結局，往往劇本取材都是以男女主角罹患惡性腦瘤做為悲劇的轉折點。

為什麼惡性腦瘤在 21 世紀醫療快速突破的今日，仍是神經醫療界難以突破的方向，這其實是有其脈絡依循。原來成人罹患的腦瘤疾病主要是以惡性膠質細胞瘤為主 (約莫占 7 成)，其中又以國際衛生組織

(WHO) 定義為第四級的惡性膠質母細胞瘤 (Glioblastoma) 為最常好發的惡性膠質細胞 (台灣一年有約近 400 例此類個案)，主要是由膠質細胞 (Glial cell) 突變產生。

一般人會認為這個顱內膠質細胞是否意味跟膠水一樣黏稠，其實不然，所謂膠質細胞主要是指在我們中樞神經細胞元周遭，一些負責支撐、營養、防禦等功能的輔助性細胞，這些細胞在顱內雖具有其各式生理機能，然亦會因為各種不當刺激而

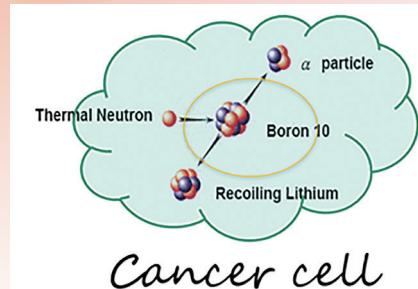
產生癌症突變，造成惡性腫瘤的產生。由於大腦是我們生命的中樞，控管人體各式重要的活動機能，包括思考、語言、運動、感覺等等，一旦惡性腫瘤產生在這些區塊部位，往往會造成這些部位主控的機能受到影響而喪失。

針對這種惡性腦瘤的傳統治療是給予完整性手術，主要將腫瘤區塊盡其可能的予以切除。然而惡性膠質細胞瘤的本質是具有正常組織的浸潤性質，手術只是針對肉眼可見的部分進行切除，但是肉眼未及的部分，就像是樹木在泥土下密布的樹根，即便將樹幹砍除，若後續未能對於殘餘的樹根部分予以清除，腫瘤的再次復發是可預見的。因此，標準性的腦瘤治療在手術完成後，仍必須針對手術邊緣，具有高度風險顯微性殘餘的腫瘤部分，施予局部放射治療或合併相關的化學藥物、標靶治療等處置。

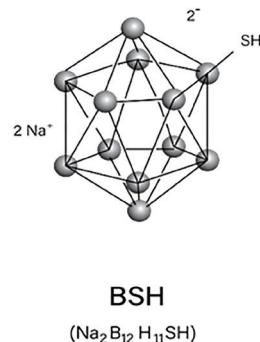
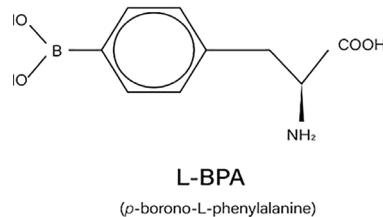
傳統放射治療在惡性腦瘤的術後，或對不能執行手術的患者扮演一個重要的角色。傳統放射治療主要是以光子射源為主( $\text{x光}$ 、 $\gamma$ 射線等)，1週5次，往往需要執行6週30次左右(6,000雷德)的治療安排。然根據相當多的輻射生物實驗研究的資料顯示，惡性膠質母細胞瘤是一種具有高度放射抗性(Radioresistance)的腫瘤疾病，也就是表示傳統放射治療雖然可以協助控制惡性膠質母細胞瘤，但效果非常有限，即便完成了這1個半月的放射治療，再輔以各式化學藥物(如標準口服膠囊藥物Temozolomide)以及標靶藥物(如阻斷腫瘤血管新生的Bevacizumab)等，腫瘤約莫在1年左右(14–16個月)即會面臨復發狀態的產生。

這種疾病復發率幾乎高達百分之百，且一旦復發後能夠再度介入的處置方式則非常有限。如能再度以手術切除是主要的補





硼中子的原理卡通圖



救處置模式，由於放射線治療對於正常神經組織有一定的傷害與影響性，因此再度放射治療往往不是主要的補救選擇，而且再度放射若提供一個不足於過往初始治療的劑量，這將會是一個無效的處置。因此補救治療如果無法有效協助，這個腫瘤疾病即將會吞噬患者寶貴的生命，患者亡歿時往往是因為失控的腦瘤組織造成極大的顱內壓力升高，導致生命機能控管能力的喪失。

近年來對於顱內惡性膠質的各式治療開發雖略有突破，如腦部腫瘤磁場貼片 (Tumor Treating Field; TTF) 等，然治療費用非常昂貴，且療效明顯有限，尚未具備顯著改善協助。另外新式粒子治療如質子、重粒子等，質子雖然有物理劑量分布的優勢 (布拉格峰) 可以減少腫瘤附近正常組織的副作用傷害影響，然生物效益並未優於傳統光子，因此對於惡性膠質母細胞瘤，也沒有較好的治療成效。

至於重粒子雖同時有物理劑量分布優勢 (也有布拉格峰分布)，且生物效益也較傳統光子為優，然由於重粒子的反應效

應過強，對於正常腦組織有極大反應傷害，治療後容易造成放射性潰爛與壞死，因此重粒子放射治療不是惡性腦瘤治療的主要選擇方式。目前國際腫瘤醫學界最熱門的治療免疫治療針對腦部這種免疫禁區 (Immune privilege site)，效果發展也極度有限，無法發揮如顱外腫瘤的優異治療效果。因此現今醫學對於惡性腦瘤有效治療的突破需求是具有高度渴望的。

### 硼中子捕獲治療的基本原理與最初發起

神經外科醫師往往對於惡性膠質母細胞瘤有非常深刻的體驗，因為即便手術技術再精湛，腫瘤的復發仍是完全無法避免，因此造成醫療極大的挫折性，所以尋求腦瘤新式醫療的突破是當務之急，否則病患常常尋求一些非正統之另類療法，不但無效還可能對於身體組織造成危害。因此硼中子捕獲治療 (Boron Neutron Capture Therapy; BNCT) 的需求應運而生。

硼中子捕獲治療是一種具有迷人理論的標靶性粒子放射治療方式，它的原理是透過施打一種具有硼-10 藥物，讓其專一積

聚在腫瘤細胞內，然後施予腫瘤一種低劑量熱中子的照射，這低劑量的熱中子會與硼-10元素結合後，迅速裂解成為兩個高生物效益的粒子，一個是氦核(就是 $\alpha$ 粒子)，另一個是鋰核，但由於鋰核的半生期極短，主要是透過高生物效益的 $\alpha$ 粒子針對腫瘤的雙股螺旋DNA、蛋白質等進行巨大性的殲滅與破壞。 $\alpha$ 粒子不但具有顯著的腫瘤破壞能力，最重要的是它的破壞半徑範圍極小，僅為5-10 $\mu$ M(一個腫瘤細胞最大長徑約為20 $\mu$ M)，這個特殊的反應特性，奠定硼中子捕獲治療為一種優質腫瘤治療模式，不但腫瘤殺傷能力佳，對周邊不攝取硼藥的正常組織細胞保護性亦好，只要能將這個高能量轉換(Linear Energy Transfer; LET)的射束原理實際有效運用於臨床腫瘤患者治療上，這個治療

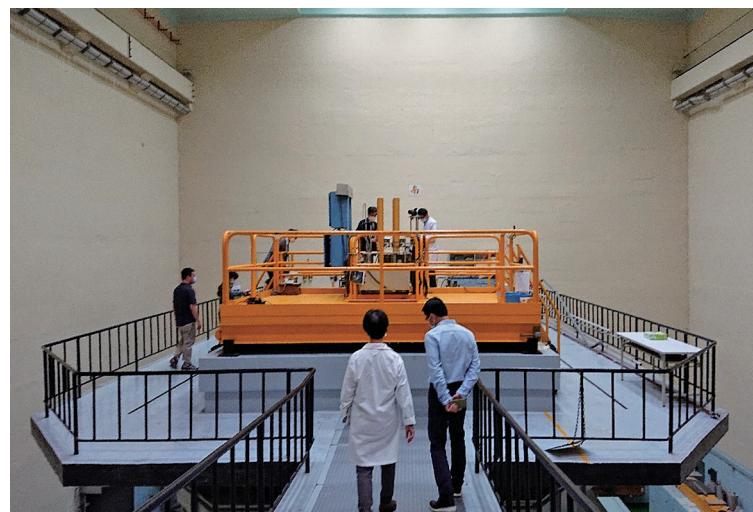
的優異療效性即能有效發揮。

## 台灣硼中子捕獲治療的醫療發想與國際合作

台灣硼中子捕獲治療的發展在上個世紀九零年代已經展開，主要研究發展的動能核心為清華大學原子科學技術發展中心的反應爐團隊(Tsing-Hua Open Pool Research Reactor; THOR)，因為這是台灣唯一的研究用反應爐中心(鈾-235燃料棒射源，額定功率2.0 MW，TRIGA reactor，循環性水池)，可以提供穩定可信賴的熱中子射源。清華大學為因應硼中子捕獲腫瘤治療在台灣的突破與發展，自1990年代起即改建成為一個可以提供超熱中子(epithermal neutron)射源的原子



清華大學原子反應爐(THOR)內部情形





日本 BNCT 加速器中心 (圖片來源: 関西 BNCT 共同医療センター )

反應爐設施，這種超熱中子射束較熱中子具有較高能階，有較深的身體組織穿透能力(7-8公分)，因此對於深部分布的腫瘤具有治療優勢。當超熱中子抵達腫瘤部位時，其能量已降解為熱中子射源，正適合與硼-10元素產生硼中子裂解反應，進一步可以完成摧毀腫瘤的任務。

### 清華大學原子反應爐

清華大學為賦予原子反應爐新的研究生命與時代任務，很快即投入硼中子捕獲研究建構發展的各項協助，並與臺北榮總腫瘤醫學部、日本京都大學粒子放射腫瘤研究中心 (Kyoto University Research Reactor Institute; KURRI, 但其已於 2018 年更名為 Institute for Integrated Radiation and Nuclear Science; KURNS) 進行三方合作簽約，共同為發展硼中子捕獲腫瘤治療進行交流與合作。筆者也因應這個研究發展突破，於 2010 年前往京都大學在小野公二 (Koji Ono) 教授的團隊專研與交流硼中子捕獲治療的技術與臨床發展，同時也與京都大學硼

中子捕獲治療團隊建立深厚的關係。

小野公二教授投入硼中子捕獲治療領域的發展超過 30 年以上的時間，包括硼中子的基礎生物學建立以及臨床技術的突破開發均深入投入，鑑於反應爐無法成為長期正式穩定醫療設備系統 (安全管理與核廢料問題等)，其與日本重工系統住友重工 (Sumitomo Heavy Industry Ltd.co) 迅速合作開發了硼中子專屬的中子加速器系統 (迴旋加速器設計，利用質子擊打鈹靶來產生超熱中子)，並有專屬的硼藥製藥系統 (Stella Pharma company) 來製備治療需要的 BPA，小野教授在京都大學退休後，前往大阪醫科大學 (Osaka Medical College) 主持加速器硼中子捕獲治療中心 (Kansai BNCT Medical Center; 関西 BNCT 共同医療センター) 業務，持續執行他對於硼中子捕獲治療的堅持與理念的推廣。

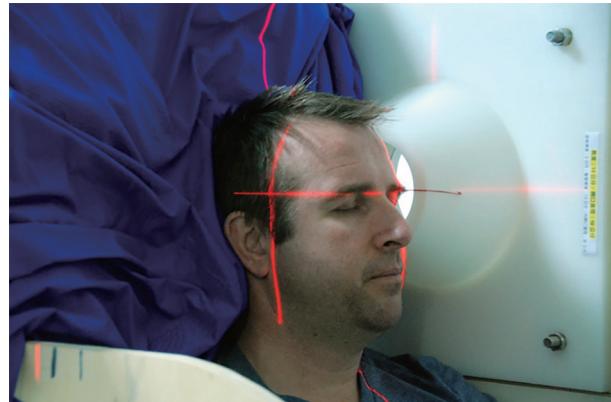
臺北榮總利用清華大學提供的反應爐中子射源，與核子醫學部特殊正子 (PET) 檢測協助下，目前包括臨床試驗 (復發頭頸

癌) 以及緊急醫療恩慈療法(腦瘤及頭頸癌等)，目前已於 2021 年 4 月 23 日突破總數 200 人次的治療(其中亦包括多例國際醫療)，這是繼日本(1,000 多例)，芬蘭(300 多例)，世界上排名第三、迅速累積硼中子捕獲治療經驗的國家。但現今除日本、台灣以外，芬蘭因為政府有核安疑慮，決定關閉其硼中子捕獲治療所需的原子反應爐，臨床硼中子捕獲治療在芬蘭已經全部中止，甚為可惜；但是芬蘭團隊深知硼中子捕獲治療對於特殊腫瘤治療的優勢性，因此已經建構以美國加速器公司的中子加速器(Neutron Therapeutics)，期待在不久的將來亦能再恢復這個優勢醫療對於腫瘤患者的協助。

台灣目前利用清大原子反應爐執行臨床腫瘤患者的硼中子捕獲治療，已經經驗豐富且技術純熟，並發表治療成果於國際重要期刊，最重要的是政府原子能委員會已於 2021 年 4 月，再度核可清華大學延長使用原子反應爐的 10 年年限，台灣硼中子捕獲治療能再利用清大反應爐，協助挽救相關患者的寶貴性命。

希望台灣團隊能持續針對加速器系統的硼中子捕獲治療系統予以積極突破研發，早日建立以醫院為基礎的硼中子捕獲治療系統，讓硼中子捕獲治療在台灣如同日本般亦能成為正式腫瘤醫療，協助更多需要的患者。◎

台灣的硼中子捕獲治療已經可以達到協助國際醫療的水準



#### 參考資料：

1. 衛生福利部國民健康署(台灣)2016 年癌症登記年報(腦部腫瘤部分)(最後更新 2018.12.27): <https://www.hpa.gov.tw/Pages/List.aspx?nodeid=269>
2. 臺灣首例利用硼中子捕獲方式治療復發性顱內惡性膠質細胞瘤之經驗 陳一璋(Yi-Wei Chen)·周鳳英(Fong-In Chou)·田中浩基(Hiroki Tanaka)等·秀傳醫學雜誌 17 卷 1 期 (2018/06), 50-58 10.3966/156104972018061701007
3. Yi-Wei Chen, Tien-Li Lan, Yi-Yen Lee, et al. Using precise boron neutron capture therapy as a salvage treatment for pediatric patients with recurrent brain tumors. Ther Radiol Oncol 2020;4:30
4. Chen YW, Lee YY, Lin CF, et al. Salvage Boron Neutron Capture Therapy for Malignant Brain Tumor Patients in Compliance with Emergency and Compassionate Use: Evaluation of 34 Cases in Taiwan. Biology 2021, 10(4), 334; <https://doi.org/10.3390/biology10040334>



## 乾裂的台灣— 利用核子同位素技術優化水資源

譯 編輯室

### 「藍金」比石油更珍貴

水，對您意味著什麼？值多少錢？對於身處台灣的我們而言，今(2021)年是歷年水情最悲觀的一年，自3月以來即為缺水所苦，桃園以南各地水庫儲水量不斷探底，民眾伸長頸項，在大旱中切望雲霓，最終卻盼到水庫乾裂的表土，和供五停二的限水措施。

今年的世界水資源日的主題是「珍惜水」，重點關注於使水有益於我們生活的所有不同方式：健康、衛生、農業甚至文化。隨著經濟發展和人口增長，全世界對這種重要的資源越來越渴求，同時，氣候變遷對於水的可利用性和品質也帶來了嚴峻的挑戰。

美國副總統賀錦麗發表談話時提到水比

石油更珍貴，過去很多年，美國好幾代人民為石油而戰，但在不久的將來，將會為水而戰。她同時預告美國盯上了水資源，各國可能為了水而大動干戈。

在國際原子能總署（IAEA）的協助下，世界各地的科學家們正深入核子技術和同位素技術領域，以充分利用水的價值。透過研究水的同位素（化學元素的變體），科學家可以觀察到水的來源、年齡、品質和用途，並指導科學家們如何保護和保存這種珍貴的流體資源。

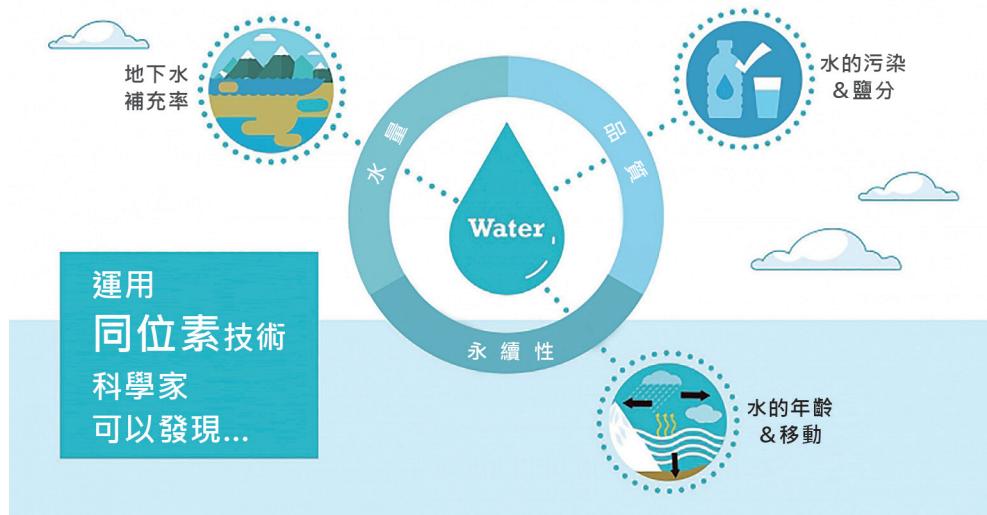
### 如何管理地下水

地下水是在土壤、沙子和岩石之間的地下空間所存在的水，被儲存在地下，並在其中緩慢的移動。根據「中美洲全球水資源夥伴關係計畫」，在中美洲部分地區，地下水是其主要的水資源，原因是地表水資源的品質和蓄水量都下降，包括河流、

湖泊和水庫中的淡水，這主要歸因於聖嬰現象（ENSO）。海洋表面溫度和氣壓的週期性波動，也與週期性的乾旱和洪水有關。

國際原子能總署同位素水文學家歐特加（Lucia Ortega）表示：「聖嬰現象和伴隨而來的水資源短缺，在這些地區造成嚴重的作物損失後，導致糧食供應的不穩定。農業、旅遊業、水力發電、對季節性降雨和地下水的依賴，以及人口的快速增長，更進一步擴大了對地下水資源的使用。」

地下水使用量的增加突顯出需要更深入瞭解影響降雨模式的因素，以及地下水補充與排放之間的關連（即水從地表水流向地下水，反之亦然），以改善水資源的管理。國際原子能總署在哥斯達黎加、薩爾瓦多、洪都拉斯、尼加拉瓜和巴拿馬的新的區域研究中，以同位素工具評估降雨輸入與地面、地下水流的方向與大小之間



利用同位素技術，科學家可以發現地下水的補充率、品質、水量、永續性、年齡、成分和移動情形。（圖片來源：IAEA，本刊譯）



運用同位素技術，科學家可以追蹤水的源頭。(圖片來源：IAEA · 本刊譯)

相互作用的關鍵。這份研究的初步結果於2020年發布，可為決策者提供確保水資源的安全和可永續性所需要的資訊。

在中東和北非，由於缺乏地表水源，許多國家也依賴地下水資源。國際原子能總署環境修復專家蒙肯·費南德斯 (Horst Monken-Fernandes) 說：「許多國家，特別是那些缺乏淡水資源的國家，都依賴地下水作為飲用水和灌溉用水源。」在一項由國際原子能總署技術合作計畫支援的項目中，同位素分析與環境修復專家協助約旦的專家測量和監測從蓄水層取樣的地下水中鐳的濃度，鐳是一種天然的放射性物質 (NORM)，並探索污水處理的選項。

蒙肯·費南德斯解釋說，受當地地質和地球化學控制的自然過程，可能導致天然放射性核種對地下水的污染。該計畫支援建造和安裝使用「含水氧化錳 (hydrous

manganese oxide, HMO)」從水中去除鐳的水處理裝置。國際原子能總署還支援利比亞管理地下水，以改善水中天然放射性核種的濃度。

### 核子技術如何保護珍貴水資源

水雖然可以再生，但經常是有限的，也經常被浪費或污染。同位素水文學 (isotope hydrology) 是一種核子技術，可提供有關地下水層水源的年齡、品質和流動等資訊，協助各國政府更有效地管理水資源。水的同位素是其化學元素的變體，透過研究水的同位素，各國水文學家可獲得如何保護和維護水資源供應的科學知識。

放射性同位素應用，是利用氫 (氚)、碳 (碳-14) 和惰性氣體 (氦-3、氦-4和氖-81) 的天然放射性同位素作為示踪劑，可以更有效地評估和管理地面河流和

地下水資源。因此，提高同位素水文學常用的各種同位素的分析能力，可加強各國在使用同位素水文學方面的獨立自主能力，是用來徹底評估地下水最強大、最值得信賴的工具之一。

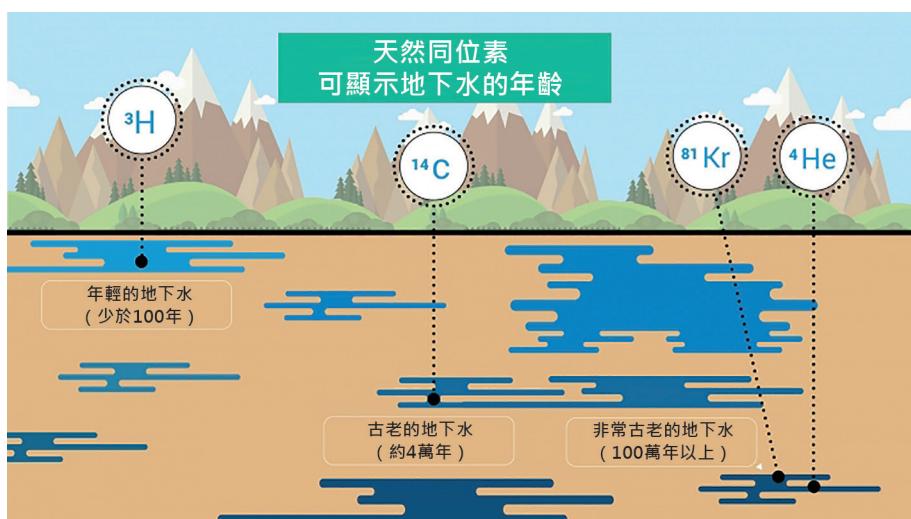
每個水分子都有氫和氧原子，但它們並不完全相同：有些原子較輕，有些原子較重。國際原子能總署同位素水文學家歐特加表示：「所有天然水的氫、氧同位素組成都不同，我們將這種同位素的組成視為水的『指紋』。」科學家利用這些「指紋」追蹤水流在整個水循環過程中的移動路徑—從蒸發、沉澱、滲濾到徑流和蒸騰，然後再回到海洋或大氣中。

「我們正在尋找水分在含水層內部確切的流動方式、它如何與河流相互作用，以及剩餘的水量。」目前正在參與國際原子能總署技術合作的阿根廷門多薩庫約 (Cuyo in Mendoza) 大學同位素水文學

家伊巴涅斯 (Sandra Ibáñez) 說。在與阿根廷的合作計畫中，國際原子能總署派遣同位素水文學專家到當地，培訓他們如何使用這些同位素技術。

水從海洋中蒸發，具有較輕同位素的水分子會較快上升；隨著雨水的降落，具有較重同位素的水分子則會較快落下；雲層向內陸移動的越遠，在雨中帶有較輕同位素的水分子的比例也就越高。歐特加表示，當水落到地面時就會充滿湖泊、河流和含水層，「透過測量輕同位素和重同位素之間的比例差異，我們可以估算出不同水域的起源。」

此外，水中存在的天然放射性同位素（例如氚和碳 14）的濃度，以及溶解在水中的稀有氣體同位素的濃度，可用於估算從幾天到上千年的地下水年齡。當發現地下水已有數萬年的歷史時，這表示水流非常緩慢，如果提取不當，可能需要再耗費





約旦的水處理裝置可為使用較古老的砂岩地下水水井，提供更安全便利的水資源。(圖片來源:A Alsayahien / WAJ)

數萬年的時間才能重新補充。她說：「這是幫助我們評估水的品質、數量和永續性的關鍵。」

### 水處理裝置使約旦的地下水可安全飲用

約旦缺水的問題引起不少人的關注，在國際原子能總署的支持下，一個新的地下水處理場將很快開始提供他們成千上萬戶家庭優質的飲用水。這是約旦第一個試驗性處理系統，其運作原理是從地下水巾去除天然存在的放射性核種，進而使約旦水務局（WAJ）能夠利用以前未曾使用過的含水層，以減輕現有水資源短缺的壓力。

約旦是全世界人均淡水供應量最低的10個國家之一，原因是處於半乾旱氣候，降水量低，以及人口不斷增加。根據世界衛生組織東地中海區域辦事處（WHO-EMRO）表示，預計這種情況將持續惡化，除非採取有效的措施，否則約旦將在2025年進入「極端水資源貧困」的狀態。其中一項措施是開發較深的、較古老的

地下水資源，例如 Ram 含水層（Ram aquifer），Ram 含水層被砂岩包圍，蓄有大量高品質的淡水，幾乎沒有人為污染。然而，砂岩往往含有較高濃度的天然放射性核種，主要是鐳，這可能對使用者構成風險。

在國際原子能總署技術合作計畫的支援下，同位素分析專家與放射性廢棄物技術專家協助約旦測量並監測，從 Ram 含水層取樣的地下水中鐳的濃度，以及探討多種處理水的方法。對水含量進行分析之後，該計畫繼續支援建造和安裝位於水井附近的水處理場。處理場以含水氧化錳來過濾水，隨後將水引導通過一系列陶瓷過濾器，以將核種濃度降低至符合約旦國家標準。

在第一批基本組件（例如泵和計量裝置）製造完成之後，水處理設備的組裝工作於2020年2月開始，土木建造和施工工作則於2021年3月動工。預計到2020年12月完工，可以交由當地水源分配機

構使用。新裝置每小時可處理 40 立方公尺的水，即每秒 12.5 公升，可為大約 2,000 人提供足夠的水。約旦水務局打算建造更多水處理場來處理地下水井中的水資源。

## 天然放射性核種無所不在

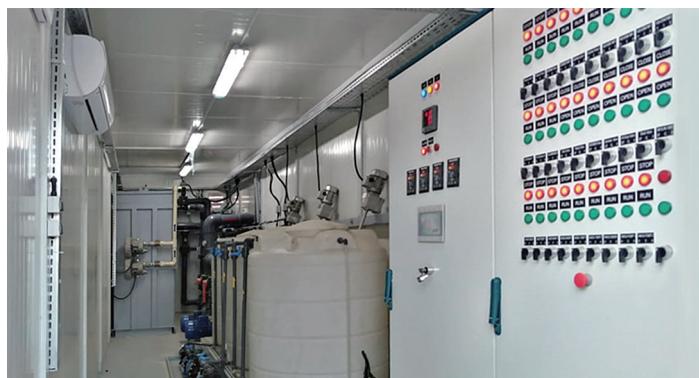
地殼中的所有物質都包含了天然存在的放射性核種，它們散布在岩石和土壤中，通常濃度較低。但是，它們可能會滲入地下水，並因此進入源自地下水和泉水的飲用水中。協助約旦參與該計畫的國際原子能總署環境修復專家蒙肯·費南德斯說：「放射性核種的存在可能需要進行仔細的分析，以瞭解並降低這些與水有關的放射性風險。」飲用水中的放射性是世界上許

多國家的共同問題。

## 科學觀點

中東砂岩盆地的地下水大多品質優良，但是，由於砂岩的組成成分傾向於含有較高濃度的天然放射性核種。由於放射性核種的致癌特性，就約旦而言，天然存在的鐳含量可能會影響地下水的品質。

使用含水氧化錳去除水中鐳的方法是利用碳化矽膜 (silicon carbide membrane)，這層膜可支撐含水的氧化錳層，當水通過過濾器時，含水氧化錳會吸收鐳。在預定的時間長度後，對陶瓷過濾器再進行「反沖洗」，並將含有鐳的含水氧化錳作為廢棄物妥善處理。⊗



約旦的水處理場利用成熟的同位素技術來確保水可以安全飲用。(圖片來源: A Alsayahien / WAJ)

## 參考資料:

1. 水比油更珍貴！全球 22 多億人口缺水 賀錦麗:各國恐為了水大動干戈,中國時報 謐悠文, 05/10/2021
2. World Water Day 2021: Optimizing Water Resources with Nuclear and Isotopic Techniques, IAEA, 03/22/2021
3. <https://www.iaea.org/about/organizational-structure/department-of-nuclear-sciences-and-applications/division-of-physical-and-chemical-sciences/isotope-hydrology-section>
4. Protecting Water Resources - The Role of Isotope Hydrology, IAEA, 12/21/2016
5. Safe to Drink: IAEA-Supported Water Treatment Unit to Make Aquifer Waters Potable in Jordan, IAEA, 02/25/2021
6. Argentina Applies Nuclear Technology to Water, IAEA, 03/06/2021

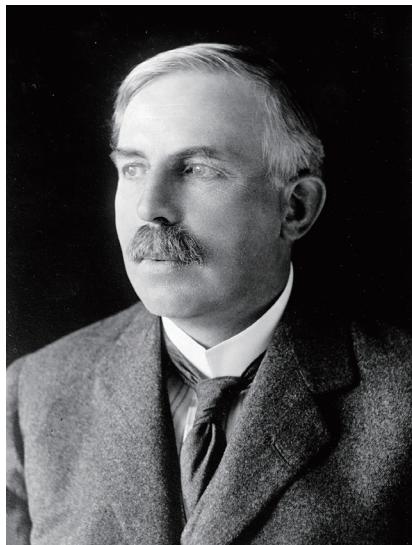
## 原子能名詞的小典故（上）

我們經常用到的一些原子能的專有名詞，例如居里、貝克，或是阿伐粒子、貝他粒子等，這些名稱的來源到底是甚麼？本刊參考美洲保健物理學會 (HPS) 等文獻的說明，並輔以相關前輩人物及物件的資料與圖片，針對這些經常使用而有趣的名詞，做一概括的說明以與讀者分享。



### 阿伐、貝他與加馬輻射

科學文獻上最早是 1899 年由拉賽福先生 (Ernest Rutherford，紐西蘭籍，1871–1937 年，提出半化期概念，並於 1908 年獲得諾貝爾化學獎，被尊稱為原子核物理之父) 提出的，他說明經由實驗顯示鈾元素放出的輻射很複雜，存在至少有兩種截然不同的輻射，其中一種很容易被吸收，為了方便稱之為阿伐 ( $\alpha$ ,  $\alpha$ ) 輻射，另一種較具穿透性者稱之為貝他 ( $\beta$ ,  $\beta$ ) 輻射。一位物理與歷史學家羅莫先生於 1960 年指出，取名阿伐輻射並無其特殊原因。雖然拉賽福先生並未說明以希臘字母取名的原因，但是在那一年代，倫琴先生為  $\text{x}$  射線取名已有先例，繼而於 1902 年拉賽福先生稱非常具穿透性的輻射為加馬 ( $\gamma$ ,  $\gamma$ ) 射線，接著湯姆笙 (Joseph John Thomson) 先生使用了第 4 個希臘字母的得爾他 ( $\delta$ ,  $\delta$ ，二次電子) 射線，我們因此有了各式希臘字母命名的次原子粒子。



左：恩斯特·拉賽福·右：約瑟夫·約翰·湯姆笙  
(圖片來源：維基百科)

## 邦 (barn)

邦 (barn) 是截面的單位，其數值為  $10^{-24}$  平方釐米，與原子核的物理截面積約略相當。何洛里與貝克爾兩位先生於 1944 年說明，於 1942 年 12 月因不能回家而在美國普渡大學聯合大樓餐廳用晚餐，討論到如何為截面



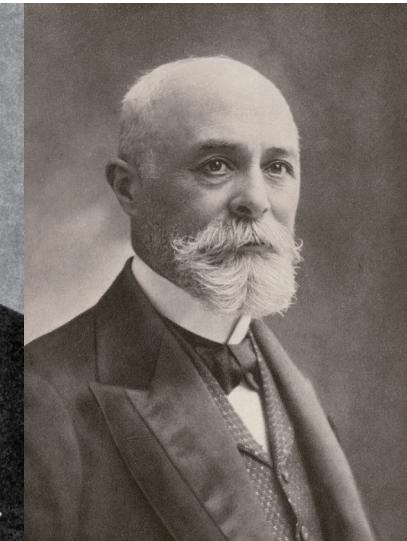
美國普渡大學之聯合大樓

$10^{-24}$  平方釐米取個名字。想要依傳統採取此領域某位偉大前輩名字來命名時遇到了困難，歐本海默因字太長而被捨棄，由於當時已用了許多希臘字所以貝特也不合宜，後來試著以指導普渡大學工作的約翰門雷來命名，因門雷字太長不合適，而約翰有其他不是用於人名的意義（註：指廁所）而被捨棄，一位具鄉村背景的作者想縮小廁所與穀倉 (barn) 差異，覺得穀倉一字很好，隨後並指出  $10^{-24}$  平方釐米的截面對原子核

有關變化而言就像穀倉一樣大，因此就用邦 (barn) 為截面的單位。另外值得一提，在 1940 年代常用棚子 (shed) 作為截面的單位，其數值是  $10^{-48}$  平方釐米，而棚子確實是比穀倉小的多了。

## 貝克 (Becquerel, Bq)

在國際制中每秒一次蛻變為活度的單位稱為貝克，貝克此名詞取代了之前用的活度單位居里。國際輻射單位及度量委員會 (ICRU) 於 1975 年 8 月致函給多家期刊，表示度量衡大會已接受委員會的建議，採用貝克作為活度的單位。委員會說明安東尼·亨利·貝克 (Antoine Henri Becquerel, 法國物理學家，1852–1908 年) 於 1896 年發現了放射性，並與居里夫婦共同獲得 1903 年的諾貝爾物理獎。由於貝克與居里夫婦分享首次頒發給與射性物質有關的諾貝爾獎，所以將活度單位以貝克取代居里應該具有其合宜性。

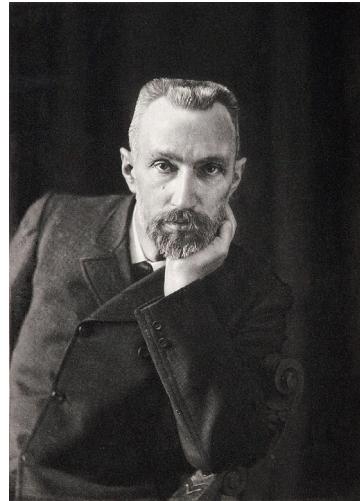


安東尼·亨利·貝克  
(圖片來源：維基百科)



## 居里 (Curie, Ci)

居里為活度的單位，代表每秒  $3.7 \times 10^{10}$  次蛻變，目前已被新單位貝克所取代。原本居里是想代表一個較小而實用的活度，惟居里夫人（波蘭－法國物理學家，1867–1934 年）認為若要用居里做活度單位則必須代表更大的數值。時任標準委員會主席的拉賽福於 1910 年《自然》期刊中指出，在會員大會中建議以居里來紀念去世的皮埃爾·居里（法國物理學家，1859–1906 年）教授，並希望是與鐳或放射有關的單位。經標準委員會後續建議，以居里代表與 1 克鐳元素成平衡的鐳發射物的量或質量。拉賽福並於 1913 年說明，是於 1910 年放射學代表大會中決定採用居里一詞以榮耀居里夫婦。



居里夫婦在巴黎相識，左為居里夫人，右為皮埃爾·居里（圖片來源：維基百科）



## 可愛派 (Cutie Pie)

是指最早有手槍握把的手提式輻射偵檢器，依卡爾·齊格勒·摩根先生說他在二次大戰期間，於美國橡樹嶺國家實驗室首次看到了可愛派 (Cutie Pie)，確信它是於 1944 年發展用以量測橡樹嶺石墨反應爐的輻射場強度。一個廣為流傳的故事說可愛派是因公式  $Q_{tp}$  的發音而命名的，其中  $Q$  是代表在游離腔中收集的電荷， $tp$  是指  $2\pi$ ，代表偵檢器量測的立體角，也有人說  $t$  是代表時間。然而這些解釋都是過度曲折的幻想，其實最簡單的答案就是最好的，可愛派名稱的由來應該就是有人首次看到或使用此輻射偵檢器時，因偵檢器的設計簡潔而驚呼道：「嗨，真是個可愛的派啊！」



## 分裂 (Fission)

莉澤·邁特納 (Lise. Meither, 奧地利 – 瑞典原子物理學家, 1878–1968 年) 與奧托·弗里斯 (Otto.Frisch, 奧地利 – 英國物理學家, 1904–1979 年) 於 1938 年底時, 已認識到當鈾原子受中子撞擊時很可能會分成兩塊。為觀察此現象, 弗里斯在位於丹麥哥本哈根的尼爾斯·波爾理論物理研究所地下室工作, 他將一塊鈾置於比例偵檢器旁, 並使鈾受到中子的曝露; 弗里斯利用示波器看到來自偵檢器非常大的脈衝, 表示原子分成高能量的碎片。研究所內其他人員聚集至地下室觀看, 其中一位是生物學家威廉·阿諾, 他先看到示波器上顯示由鈾原子產生一系列阿伐粒子的小脈衝, 之後在弗里斯的建議下, 他用提把將中子射源移至鈾塊旁邊, 世界改變了! 開始出現了巨大的脈衝, 較阿伐粒子產生者大得多, 是鈾原子核分裂產生的脈衝! 弗里斯當天又追著阿諾並問道: 「你是位生物學家, 針對細胞形成兩個子細胞的現象, 你們用甚麼術語?」, 阿諾說: 「是稱為二分裂 (binary fission)。」弗里斯接著問: 「只用分裂 (fission) 足夠嗎?」阿諾則表示可以, 因此就誕生了「分裂」這一術語。atom



左:莉澤·邁特納·右: 奧托·弗里斯 (圖片來源:維基百科)

資料來源: "Why Did They Call It That?", Paul Frame, The Origin of Selected Radiological and Nuclear Terms

# 日本決定 將福島處理水排入海洋

譯 編輯室

日本政府於今（2021）年4月13日正式宣布，福島第一核電廠除役所產生、含有微量放射性物質的處理水將於2年後排入海中，東京電力公司（Tepco）屆時將在符合國際規範的前提下進行。

福島第一核電廠產生的污水使用一種特殊的多核種去除設備—ALPS放射性污水處理系統，可去除絕大部分的放射性污染物，但唯獨氚例外。這些處理過的處理水目前均貯存於福島第一核電廠廠內超過1,000座的大型儲存槽中，廠內的可貯存容量約為137萬立方公尺，而這些儲存槽預計將在2022年夏季達到貯滿上限。

日本經濟產業省也在同一天發布了有關處置這些處理水的基本政策，「關於安裝在福島第一核電廠內的這些貯存槽，已經被視為對該地區聲譽產生負面影響的原因，長時間的貯存也可能因狀態惡化或災害而產生污水洩漏或是其他的風險」該份文件這樣敘述。「此外，在福島第一核電廠周遭地區建造額外的污水貯存槽將需要更多的土地，但這也將為在該地區努力重建的人員增加額外的負擔。」該項基本政策要求「在完全遵守法律與法規的前提下

才會將經ALPS系統處理過的污水排入海中，同時也會採取措施，將影響該地區聲譽的可能性降至最低。」

在開始排放這些處理水之前，東京電力公司必須先就其具體計畫與必要設施的建設，獲得管制機構原子力規制委員會（NRA）的批准。日本預計將在大約2年後開始將這些處理水排入海中，最初會先排放少量的處理水，並評估是否會對周圍環境造成影響，整個排放計畫將需要數十年的時間來完成。

## 氚的多寡

根據上述的政策文件，這些處理水在排放前會先進行稀釋，將氚的濃度降至每公升1,500貝克，該數值為日本國家規定之安全排放標準的1/40，同時也是世界衛生組織規定之飲用水標準的1/7，才會排入海中。此外，處理水含有氚的年度排放的總量也將比事故發生前（運轉中）的福島第一核電廠所排放的目標值—每年22兆貝克還要低，排放量也會定期受檢，不管是在福島縣內或縣外的核電廠，目前所制定之處理水的氚排放量，均介於這些核電廠氚排放量的範圍內。



福島第一核電廠處理水即將  
於 2022 年貯滿 (圖片來源:  
日本經濟產業省)

根據日本時事通信社的報導，日本首相菅義偉表示：「處置這些處理水是福島第一核電廠除役無法避免的挑戰」，「日本政府最終的推斷，將處理水排入海中為一項務實的處理方式。」另外，日本政府也將為福島縣、以及鄰近縣的多個產業提供援助，如替這些地區的漁業於當地、或是主要消費地區（包括海外）建立或開發銷售管道等。東京電力公司在一份相關的聲明中也表示，「東電會很慎重地看待政府這樣決策，未來也將嚴格遵守所有法律與法規，如符合國際標準的核能安全法規等，同時也將採取相關措施，期望能徹底地將影響該地區聲譽的可能性降至最低。」

## 國際合作

國際原子能總署（IAEA）總幹事格羅西（Rafael Mariano Grossi）對日本將把處理水排入海中的決定表示贊同，「IAEA 已準備好隨時為日本提供技術上的支持，以協助日本監測與審查處理水排放的計畫，以及這項計畫可在安全與資訊透明的情況下進行。」「日本政府今日的決定，將為福島第一核電廠除役工作的持續鋪平了道路，實為一個里程碑。裝載處理水的儲存

槽占了廠內很大部分的面積，加上處理水的管理、包含在不漏掉任何利害關係人的情況下，如何以安全、透明的方式處置這些處理水等，對於該電廠除役工作是否可持續來說至關重要。」格羅西也補充：「即使貯存在福島第一核電廠內的處理水數量龐大，使其成為一件獨特且復雜的案例，但日本政府做出的決定仍符合全球慣例。」

IAEA 對此則表示，日本已要求 IAEA 派遣國際專家團隊就處理水排放方面進行合作，目前已按照 IAEA 的安全標準來審查日本的計畫與執行，同時支援、派代表參加日本環境監測的運作。格羅西強調，IAEA 在日本排放處理水之前、期間與之後都將與日本保持密切的合作，這樣的合作以及 IAEA 的加入將有助於在日本以及全世界樹立信心，確保在進行處理水排放時不會對人類、環境的健康產生不利的影響。

資料來源：

World Nuclear News. "Fukushima Daiichi water to be discharged into sea." 13 April 2021

# 芬蘭高放最終處置場

## 開始首座處置隧道建設工程

譯 編輯室

芬蘭放射性廢棄物管理公司 Posiva Oy 已於最近開始於歐基盧歐托 (Olkiluoto) 附近的國家高放射性廢棄物最終處置設施場址一昂克洛 (Onkalo)，開挖處置設施的第一條處置隧道，該座處置設施預計將於 2020 年代中期開始營運。

芬蘭計畫將用過核子燃料貯存在地下 450 公尺深的母岩中，這座最終處置系統將由一個個密封的鐵銅製處置容器、做為緩衝包圍在處置容器外圍的膨潤土、一種由可膨脹黏土所製成的隧道回填材料、設施內部的隧道等的密封結構，以及最外圍的母岩所組成。Posiva 公司表示，在接下來的 18 個月將開始開挖的前 5 條隧道代表著這項大規模建築工程的開始，而在該座最終處置設施 100 年的營運期間，預計將開挖 100 條的處置隧道，每座隧道約長 350 公尺，隧道長的總和將達 35 公里，隧道的高度與寬度則分別為 4.5 公尺與 3.5 公尺。

前 5 條隧道的開鑿為 Posiva 公司耗資 5 億歐元（約 175 億元新台幣）啟用的 EKA

計畫的一部份，該計畫為最終處置所有必要設施計畫的總稱，包含了相關建設與設備，以及首條處置隧道營運的開始等。

Posiva 公司也指出，挖掘工作的開始是一個非常重要的里程碑，因為這項計畫是經由多年的岩石構造研究以及方法開發後才得以進行，芬蘭核能安全管制機構 STUK 也已在挖掘工作開始前完成檢查，證明了該項挖掘工程所需要的先決條件都已全數滿足。「耗時多年的岩石構造研究，讓我們可以建立適合我國母岩的核子設施建造流程，這些研發活動從 2004 年、在開始昂克洛地下實驗室的建設工程時就已著手進行。」

### 燃料封裝

用過核子燃料在進行最終處置前必須先進行特殊封裝，才可進入最終處置設施。對此 Posiva 公司的計畫是在地表建立一座封裝廠來進行，該座封裝廠的建設工程於 2019 年 9 月開始，預計於 2022 年完工。

Posiva 公司表示，在這座最終處置設施內的每條隧道將可放置約 30 個處置容



芬蘭開始昂克洛最終處置設施首條處置隧道的開挖工程  
(圖片來源:Posiva Oy)

器，但精確的數字必須取決於隧道內有多少個處置坑洞，這則需視隧道內岩石裂縫的分布、以及有多少適合建設處置坑洞的岩石，才可決定。若每條隧道可以放置 30 個處置容器，整座處置設施約可容納 65 噸的用過核子燃料。待芬蘭政府頒布這座最終處置設施的運轉許可，Posiva 公司就會開始於封裝廠將用過核子燃料裝入銅鋼製的容器中，並開始將這些裝有燃料的容器轉移至處置設施內。

根據 Posiva 公司目前的估計，這座最終處置設施將於 2020 年代中期開始運轉，已開始的隧道開挖與加強工程都按照嚴格的法規來進行，這也代表著 Posiva 公司已將這項計畫實際轉移至昂克洛這座複雜的岩石構造上執行。

今（2021）年初時 Posiva 公司就已開始進行隧道的開挖工程，以進行「聯合功能測試」，該項測試涉及在實際條件下進行小規模的最終處置，也是對最終處置設施進行調整的一部份。這條測試用隧道預計將長 80 公尺，於 2023 年開始的測試

期間將開鑿 4 座處置坑洞。Posiva 公司強調，這項測試將證明最終處置相關的程序都井井有條，只有這樣才可獲得該座設施的運轉許可。

芬蘭在 2000 年確立這座最終處置設施的地點，芬蘭議會也在隔年通過這項建設計畫，由芬蘭兩間電力公司所共同持有的 Posiva 公司，在 2013 年向經濟部提出建設工程許可，政府也於 2015 年底頒發施工許可，Posiva 公司也於 2016 年正式開始這座世界上首座用過核子燃料最終處置設施的建設工程。◎

資料來源：

World Nuclear News. "Work starts on first disposal tunnel at Finnish repository" 07 May 2021

# 美國印地安角 核電廠除役

譯 編輯室

位於美國紐約州的印地安角（Indian Point）核電廠運轉了近 60 年，於今（2021）年 4 月底正式關閉最後一部機組的營運。負責印地安角核電廠營運的電力公司 Entergy，與紐約州政府達成協議後，於 2017 年宣布將陸續關閉當時仍運轉中的 2、3 號機。Entergy 公司表示，由於未來能源批發價格將維持低廉導致收入減少，加上紐約州的環保團體及州長庫莫（Andrew Cuomo）多年來不斷敦促關閉印地安角核電廠，認為該座核電廠對當地環境構成了危害。印地安角核電廠 2 號機已於去年 4 月底，依照計畫時程關閉。

Entergy 公司表示，印地安角核電廠 3 號機自 2019 年 4 月 9 日完成燃料替換後一直維持運轉的狀態，連續發電了超過 750 天，創下商用輕水反應爐連續運轉天數的世界紀錄。「印地安角核電廠這 60 年來經由無數的工作人員，在安全、可靠的營運下為紐約市與哈德遜河谷（Hudson Valley）下游提供電力。」

輕水反應爐（如壓水式與沸水式等反應爐）在當今全球運轉中的商用核電廠占了絕大部分，這些反應爐必須停機才可進行

燃料替換（Refuel），而目前連續運轉最久的核電機組的世界紀錄為 1,106 天，為加拿大達林頓核電廠 1 號機組，可以達到這個數字的原因為該機組的型號屬於重水反應爐，可在不停機的情況下進行燃料替換。印地安角核電廠的 2、3 號機分別自 1974 與 1976 年就投入商業運轉，1 號機則是自 1962 年就開始運轉，於 1974 年除役。

紐約州政府在 2016 年時通過立法明確認可核電廠於零碳排放的貢獻，也讓另外 3 座位於紐約州北部的核電廠 Nine Mile Point、RE Ginna、James A Fitzpatrick 持續營運，但州政府卻反對讓 Entergy 公司申請距離紐約市僅 40 公里的印地安角核電廠的延役。根據美國能源情報署（EIA）公布的資訊，印地安角 3 號機在過去 10 年為紐約州最大電力來源之一，整座核電廠除役後的電力缺口將由 3 座燃氣電廠來填補。也由於如此，紐約州將設置更多的零碳排能源，來達到他們於 2019 年所制定「2040 年零碳排放」的目標。⊗

資料來源：

Nuclear Engineering International. "Final closure of Indian Point NPP" 04 May 2021

# 預計到 2035 年 風能成本將下降 35%

譯 編輯室

勞倫斯・伯克萊國家實驗室（Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley Lab）對全球最頂尖的風力發電專家進行的一項調查顯示，技術和商業的精進可望持續降低風能的成本。專家們估計，到 2035 年，由於更大、更高效的渦輪機、更低的資本和營運成本以及其他優化，風電成本可降低 17% – 35%，到 2050 年更可調降 37% – 49%。這是在《自然能源》（Nature Energy）期刊的一篇論文中所發表的內容。

這項研究總結出一項針對全球 140 位風電專家的調查，涉及 3 種風電的應用—陸域風電、固定式離岸風電和浮動式離岸風電。預測這 3 種風電未來的成本是伯克萊實驗室專家在 2015 年類似研究中所預測的一半。

伯克萊實驗室資深科學家威瑟（Ryan Wiser）表示：「近年來，陸域及離岸的風電都出現了成本加速降低的狀況，這使得以前的成本預測已經過時，能源部門需要最新的評估。」

風能發展迅速，但其對能源供應的長期貢獻仍取決於未來的成本和價值。這項新研究發現，近年來成本降低的速度加快了，比大多數預測者先前預測的要快，並且比歷史下降率還快。

任職伯克萊實驗室的論文共同作者西爾（Joachim Seel）總結說：「在其他所有條件相同的情況下，這些趨勢將使風能在全球能源供應中發揮出比以往所認知更大的功用，同時也促進能源部門的脫碳。」分析師、投資者、計畫者和政策制定者應避免過時的假設和預測。同時，正如研究中所記錄的那樣，未來成本降低幅度的不確定性非常顯著，這說明了在建立模型以及擬訂政策、計畫、投資和研究決策時，應嵌入不確定性考慮因素的重要性。

---

資料來源：  
<https://www.renewableenergyworld.com/wind-power/wind-power-experts-expect-wind-energy-costs-to-decline-up-to-35-by-2035/>

# 下一個生質燃料來源 可能是巨型海帶

譯 編輯室

巨型海帶是世界上最大的海藻物種，是生產生質燃料的誘人來源。在最近的一項研究中，測試了一種新的海藻生長策略，此策略可大規模、連續生產海藻。關鍵思惟是每天將海帶種群移動到接近海面處以吸收陽光，之後再下潛到較暗的水域以獲取養分。

與當今的能源作物（例如玉米和大豆）不同，種植海帶不需要土地、淡水或肥料。在理想的條件下，巨型海帶每天可以生長超過 30 公分。海帶通常生長在海岸附近的淺水區，並且僅在陽光和養分都充足的地方才能繁衍生長。然而所面臨的挑戰是：海洋的日照層在海平面以下延伸約 200 公尺或是更淺，但此區域通常缺乏足夠的養分來供應海帶的所需。

## 全年大部分海面的營養不足

在沿海地區，上升水流是季節性的，上升水流是指深水上升到海面，帶來營養。另一方面，較深的水域則營養豐富，但是缺乏陽光。這項研究表明，當我們在海面下 9 公尺和 80 公尺的深度之間循環時，海帶每天承受水壓的變化，種植的海帶從更

深的黑暗環境中獲取了足夠的營養，其生長量是移植到沿海養殖地海帶的 4 倍。

## 在海洋中「種田」

海帶的成分可用來製造生質燃料，不像用玉米和大豆等陸生作物生產的生質燃料，會和農田與淡水等其他民生用途競爭，使用海洋植物的永續、高效和可擴展性更高。

海洋生物質可以轉化為多種能源，包括乙醇，以替代目前在美國混入汽油中的玉米衍生添加劑，也許最吸引人的最終產品是生物原油—來自有機物質的石油。生物原油是經過「水熱液化（hydrothermal liquefaction）」的過程產生的，此過程是利用溫度和壓力將藻類等材料轉化為油。這些油可以在現有的煉油廠中加工成卡車和飛機使用的生質燃料，這些長途運輸工具若全靠電力運轉仍然不可行，因為需要大量的電池儲電。

根據計算，要生產足夠的海帶來為整個美國交通運輸業提供動力，只需要使用美國專屬經濟區的一小部分，距海岸線約 200 海浬的海域。



潛水員在「海帶升降梯」旁進行研究。(圖片來源:Maurice Roper, CC BY-ND)

## 如何進行

這項研究是由美國能源部的「啟發性新型能源研究的巨藻研究 (ARPA-E MARINER)」計畫資助，和南加州大學萊格里研究所 (USC Wrigley Institute) 與海洋生質能公司 (Marine BioEnergy Inc.) 之間的合作。研究團隊包括生物學家、海洋學家、工程師、潛水員、船隻操作員、研究技術員和學生一起工作。

研究團隊將海帶連接到由團隊工程師設計的「海帶升降梯」——一種開放式海洋結構上，測試海帶對深度循環的生物學反應。這座升降梯設置在美國加州卡塔利娜 (Catalina) 島上的南加州大學萊格里海洋科學中心附近。以太陽能為動力的滑輪每天都會升降，以使海帶在深水和淺水之間上下循環。

研究團隊對 35 種海帶幼株進行了深度循環，歷時 3 個月，並在附近的健康海藻床上種植第二套海藻，以進行比較。據研究團隊所知，這是首次嘗試研究物理深度循環對海帶生物學的影響。早先的研究主要集中在將深海營養豐富的海水以人工泵浦輸送到海面。

## 下一步是什麼

研究團隊的結果表明，深度循環是生物學上可行的培養策略。現在研究團隊要分析可以提高產量的因素，包括時間、水深和海帶遺傳學。仍有許多未知數需要進一步研究，包括海帶養殖過程的許可和控管，以及大規模養殖海帶可能產生意想不到的生態後果。但是，海洋生質能具有巨大的潛力，可以幫助我們因應 21 世紀永續發展的挑戰。



巨型海帶 (*Macrocystis pyrifera*) 是一種具有潛力的能源作物，可連結旅遊與自然保護。(圖片來源:Flickr · CC BY)

---

### 資料來源：

Move over, corn and soybeans: The next biofuel source could be giant sea kelp, Diane Kim, Renewable Energy World, 04/08/2021

# 將房屋變成發電廠— 瑞典如何翻轉能源生產

譯 編輯室

- 瑞典 54% 的電力來自再生能源，在當地使用這種能源已經越來越多。
- 智慧電網將瑞典的家庭從能源消耗者轉變為電力「產消合一者 (prosumer)」。
- 當地的區域供暖工廠利用多餘的熱能為瑞典的大多數房屋供暖。
- 瑞典榮登「世界經濟論壇《能源轉型指標》(World Economic Forum's Energy Transitions Index)」榜首。

根據歐盟 2018 年擬定且具有法律效力的目標，到 2030 年，各國所消耗的能源必須有 1/3 來自再生能源，而瑞典正處於領先的地位。

瑞典的目標，除了到 2040 年實現以再生能源生產 100% 電力，還將房屋改造成高效的「產消合一者」，也就是使用自己生產、也消費大部分自產能源的建築物。同時，瑞典的「區域供暖」工廠利用多餘的熱能來生產當地家庭所需超過 75% 的熱能，該國還設法將全世界最高的碳稅與相對便宜的能源價格相結合。

這些都是「世界經濟論壇」為何將瑞典列為能源轉型指標之首的原因，在前所未

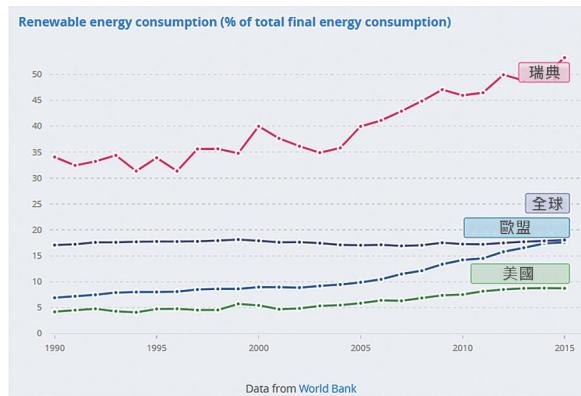
有的大改造之後，瑞典在環保方面更具有領導地位，這就是瑞典在能源革命中如何建立「當地解決方案」的方式。

## 區域供暖系統

瑞典 54% 的電力來自再生能源，並因其天然地理環境而獲益。他們擁有充足的流動水和 63% 的森林覆蓋率，因此兩項最大的再生能源—水力發電與生質能發電也就不足為奇了，而生質能協助支撐著當地的能源榮景。

在像瑞典這樣的寒冷國家，能源的關鍵使用是供暖。近幾十年來，隨著燃油稅的增加，該國的電力公司已經轉向使用再生能源，例如生質能，來為當地區域供暖的工廠提供燃料。在瑞典，這可追溯到 1948 年，當時電廠的多餘熱能優先用於給附近的建築物供暖，蒸汽沿著管路送到需要的任何地方。現在，從主要城市到小村莊，全國大約有 500 個區域供暖系統，為家庭和企業提供熱能。

以往區域供暖主要是由發電廠、廢棄物變電站和工業的副產品提供燃料；如今，瑞典將更多的再生能源納入其中。由於競



瑞典是再生能源消費大國( 圖片來源:Swedish Institute/World Bank )

爭關係，這種本地化的電力形式現在已經成為瑞典家庭供暖市場的領導者。

## 能源產消合一者

但是瑞典並沒有滿足於這種鄉村一級供暖的解決方案，新的能源生產將超越區域性，提升到一個新的水平。其中一個例子是在盧迪維卡市 (Ludvika)，最近那裡用最新的智慧能源技術翻新了一座 1970 年代的舊公寓。分布在 3 座公寓建築物中的 48 個家庭，已獲得太陽能電池板、熱能儲存和熱泵浦系統，以微型能源網路將所有系統連結起來，可為電動汽車提供充電一整夜的電力。

這樣的結果是形成了一組「產消合一性建築」，生產足以滿足 77% 居民所需的電力。由於智慧電錶的使用度很高，因此這種模式可能將普及整個瑞典。

## 擴大應用

E.ON 電力公司最近在瑞典南部馬爾默郊區的 Hyllie，擴大開發一項智慧電網，能源的生產來自當地的風能、太陽能、生質能和廢棄物。然後，智慧電網可以平衡電力，對天氣變化做出反應。在天氣較冷

時配置額外的電力，在氣溫較高時將多餘的電力送入電池儲存。此系統不僅效率更高，而且他們的電費帳單數字也下降了。

Hyllie 的智慧能源發展以及再生能源所驅動的區域供暖，為目前許多國家所依賴的集中式能源系統提供了根本的替代方案。歐盟領袖將面臨到的挑戰—如何在 2030 年之前以再生能源生產 32% 的能源，瑞典為其提供了願景，亦即以技術與本地解決方案將目標變成現實。



瑞典使用智慧電網將建築物變成能源生產者。  
( 圖片來源: Huang et al / Elsevier )

資料來源：

<https://www.weforum.org/agenda/2020/09/sweden-energy-production-renewable-power-district-heating/>



## 國外新聞

### 烏克蘭車諾比核電廠乾貯設施獲准營運

烏克蘭核能安全管制機構 (Ukraine's State Nuclear Regulatory Inspectorate) 已於最近授權車諾比核電廠中期貯存設施 (ISF-2) 的營運，也同意將車諾比 3 座受損反應爐內的用過核子燃料轉移至該座乾式貯存設施中進行中期貯存，車諾比核電廠也在今 (2021) 年 4 月 26 日迎來事故 35 週年，烏克蘭總統澤倫斯基 (Volodymyr Zelensky) 也在當天出席了紀念儀式。

負責車諾比核電廠乾式貯存設施建設的 Holtec International 公司表示，該座設施為全球最大、且最複雜的乾式貯存設施，在建設過程期間也必須克服許多獨特的挑戰，獲得運轉許可、及安全地將這些用過核子燃料束自舊的貯存設施轉移至新的貯存設施，突顯出經由過去二十多的努力，這座新的乾式貯存設施才得以啟用。

為了可讓車諾比核電廠的除役順利進行，新建的這座乾式貯存設施將可提供來自 1、2、3 號機用過核子燃料的貯存空間。資助這座乾式貯存設施建設的歐洲復興開發銀行 (European Bank for Reconstruction and Development) 表示，總共 232 座的雙層護箱，將可於這座獨立的混凝土設施內進行至少 100 年的安全貯存與監管。Holtec International 公司也表示，這對車諾比核電廠的安全、烏克蘭的安全、歐洲的安全，以及全球的安全來說，是非常重要的一個里程碑。

Nuclear Newswire (ANS), 04/28/2021

### 巴西啓用首座乾式貯存設施

國際乾式貯存設施設備商 Holtec International 最近宣布，巴西 Angra 核電廠已將首座含有用過核子燃料的 MPC-32ML 貯存容器，裝載至廠內新建的用過核子燃料乾式貯存設施 (UAS) 中，這也代表著這座預計將營運 50 年的乾式貯存

設施計畫正式開始。

這座乾式貯存設施包含了實體安全保護措施（Physical security）、輻射與溫度偵測、裝甲門禁控制中心，以及一座由 Hotel International 所設計與建造、附有專業工廠的貯存倉庫。由於 Angra 核電廠 1、2 號機的燃料池都已接近貯滿的狀態，這座乾式貯存設施將用來貯存這兩部機組的用過核子燃料，並先從接近貯滿限制的 2 號機燃料池開始移除燃料，1 號機的燃料則預計從 11 月才會開始轉移至該座乾式貯存設施內。

Angra 核電廠這座乾式貯存設施目前設有 15 座 HI-STORM 貯存模組，總共可貯存 288 束來自 2 號機以及 222 束來自 1 號機的用過核子燃料，為 2 部機組的燃料池提供可再運轉 5 年的空間。該座乾式貯存設施最多可容納 72 座貯存模組，預計到 2045 年才會達到貯滿的狀態。

World Nuclear News, 05/05/2021

## 比利時與荷蘭計畫新建中低放射性廢棄物貯存設施

比利時已於最近於德賽爾（Dessel）中低放射性廢棄物處置設施場址，開始一座新的低放射性廢棄物貯存設施的建設工程，這項設施將可容納目前可能有結霜風險的低放射性廢棄物。

比利時放射性廢棄物管理專責機構 Ondraf/Niras，在 2013 年於現有的貯存建築進行例行檢查時，觀察到一些低放射性廢棄物處置容器上出現霜流（Frost flow）的現象，Ondraf/Niras 立即開始相

關的研究，研究結果顯示，所形成的膠狀物是因為廢棄物外圍的混凝土所產生的化學反應，並不是因為放射性反應所造成。目前 Ondraf/Niras 以及其子公司、負責該座處置設施營運的 Belgoprocess 公司，決定將所有可能有結霜風險的廢棄物貯存容器統一放置在另外一座建築內，這座建築將可以安全的儲存、檢查與監測這些低放射性廢棄物。同時，有關長期該如何處理這些廢棄物容器的研究並未停止，Belgoprocess 也在去（2020）年底獲得相關許可，該座新的低放射性廢棄物貯存設施預計將會在 3 年內開始營運。

另一方面，荷蘭放射性廢棄物處理專責機構 COVRA 也在最近宣布，由於現有的貯存建築已快沒有足夠空間，COVRA 計畫新建一座多功能建築，來貯存位於 Petten 的醫療用同位素生產公司所產生的中低放射性廢棄物，以及其未來拆除時所產生的廢棄物等。

World Nuclear News, 03/05/2021

## 瑞典市政當局同意擴建低放廢棄物最終處置設施

瑞典 Östhammar 市政當局於今（2021）年 4 月底時，核准了瑞典放射性廢棄物管理專責機構（SKB）為擴大國家中低放射性廢棄物最終處置場（SFR）所提出的申請。位於 Forsmark 地區的這座中低放廢棄物最終處置設施，主要為來自瑞典核電廠運轉期間所產生的短半衰期廢棄物，以及因醫療、研究與其他工業產生的放射性廢棄物，提供處置空間。SFR 最終處置設

施自 1988 年就已開始營運，目前需要進行擴建才可容納瑞典除役核電廠所產生的放射性廢棄物。

SKB 對此表示，「Östhammar 市政府做出的決定，讓我們能夠處理瑞典數座核電機組因拆除所產生的放射性廢棄物。」瑞典輻射安全局 (SSM) 於 2019 年 10 月根據《國家核子作業法》批准了該項申請，瑞典土地與環境法院也於一個月後表示同意，目前仍在等待瑞典政府做出最終決定。

若瑞典政府給予正向的決定，這項擴建計畫將交由 SSM 與法院來進行進一步的處理和協商，然後才能開始建設工程。SSM 將會在該設施開始試運轉、正常運轉與關閉的期間扮演管制機構的腳色。待完成擴建後，該座最終處置設施的處置容量將可達 18 萬立方公尺，工程預計需要 6 年的時間來進行。

Nuclear Engineering International, 04/29/2021

## 加拿大放射性廢棄物管理組織公布地質處置設施建設最新計畫

加拿大的放射性廢棄物管理專責機構 (Nuclear Waste Management Organization, NWMO) 最近就地質處置公開了新的 5 年策略計畫：《2021–2025 年適應性階段管理執行計畫 (Implementing Adaptive Phased Management 2021 to 2025)》，為了可在規劃與選址流程後實現安全、長期管理用過核子燃料的目標，奠定了基礎。NWMO 表示，「由於我們期望能在 2023 年確立處置設施的地點，在接下來的 5 年內，NWMO 將從一個規劃建立處

置設施的組織轉變為執行該建設計畫的組織」，NWMO 也將邀請民眾填寫線上調查，以協助 NWMO 制定相關計畫，同時也讓計畫可持續進行。

在選址完成之後 NWMO 將開始一系列新的動作，例如與接受處置設施的地區簽署協議、完成於潛在場址的安全論證 (Safety case)、著手建立一座專門知識中心、準備參與監管流程、準備將機構業務轉移至選定的場址等。NWMO 也補充，該項計畫僅會在知情且有意願接受處置設施的地區進行，該地區的市政當局、原住民部落與其他利害關係人將一同努力執行這項計畫。目前 NWMO 計畫於 2023 年從兩處潛在地點中選出最終場址，兩處潛在區域 Ignace 與 South Bruce 都位於安大略省。

NWMO 解釋，一共 52 頁長的適應性階段管理計畫（即加拿大國家最終處置計畫），既是一項技術方法（我們計畫建造什麼），也是一種管理系統（將如何與他人一同完成該項建設）。技術方法涉及該如何在合適的岩層中開發出一座地質處置設施，以安全地容納、隔離用過核子燃料；管理系統則涵蓋了由公眾參與以及持續學習（即將建設過程中學習到的經驗教訓應用在後段的建設上）所支持的階段性與適應性的決策。NWMO 也將開發一套安全、可靠的燃料運輸系統，以將用過核子燃料從目前的中期貯存設施運送到該地點進行最終處置。

Nuclear Engineering International, 03/29/2021

## 國內新聞

### 綠色能源技術開花，核研所輔導業者搶占國際百億市場

目前地球溫度年年升高，能源消耗過大，為降低能源耗損，國際間各主要國家均投入綠色能源開發。其中「電致變色玻璃」能隔離光源及紅外光，達到室內溫度控制效果，減少辦公大樓民用住宅為在夏季保持涼爽和冬季保持溫暖所必需消耗的大量能源，是解決現代不斷惡化的城市污染問題之一。

行政院原子能委員會核能研究所積極從事綠能與系統整合的技術開發，輔導國內廠商技術升級，成功研發電致變色的快速鍍膜製程機台，此機台採用獨特的高密度電漿鍍膜系統，具大量生產及穩定的透光率特色，設備成本僅為傳統磁控濺鍍系統的1/3，鍍膜速率卻可以提高4倍，具備低成本、高產率的雙重優點，大幅提升產品的價格優勢與市場競爭力。

本刊訊，2021/04/09



電致變色節能窗( $20 \times 30\text{cm}^2$ )實景照，左邊為元件去色態，右邊則為著色態，可見光變化率為50%。(圖片來源：原子能委員會)

### 「放射性廢棄物處理貯存及其設施安全管理規則」修正 強化盛裝容器管制

鑑於放射性廢棄物由產生、處理、貯存、運送至最終處置，各階段的作業與盛裝容器的使用息息相關，原能會為強化放射性廢棄物盛裝容器的安全管制，完成修正「放射性廢棄物處理貯存及其設施安全管理規則」，要求放射性廢棄物盛裝容器的使用申請，應考量於處理、貯存、運送與最終處置各階段作業的使用具有技術可行性，以提升盛裝容器的安全。

「放射性廢棄物處理貯存及其設施安全管理規則」已於110年5月13日修正發布施行，並同步刊登於行政院公報及原能會網站(<https://erss.aec.gov.tw/law/LawContent.aspx?id=FL026716#lawmenu>)，供公眾參閱，並落實資訊公開。⊗

本刊訊，2021/05/14



核廢料的存在是既存事實，當它為我們的生活提供便利與貢獻之後，為了讓它與我們的生活隔離，最終處置是最佳選擇，但在國內民眾對最終處置的選址尚未有共識之前，中期暫時貯存的設施是我們中繼的過渡方案。

國際上荷蘭、瑞典、比利時等國家，也面臨與我國相同的問題，他們所採行的中期暫時貯存方式，值得我國參考學習。以荷蘭為例，他們於工業區設置一座高、低放的中期暫時貯存設施，為最終處置場的選址爭取時間並凝聚共識。