



財團法人 中華民國輻射防護協會

輻射防護簡訊

第 148 期

發行人
張似璵

主編
張似璵

編輯委員
尹學禮 江祥輝
劉代欽 蔡惠予 魯經邦

出版單位
財團法人中華民國輻射防護協會

地址
30017 新竹市
光復路二段 295 號 15 樓之 1

03-5722224 電話
03-5722521 傳真
01486683 統編

rpa.newsletter@gmail.com 電郵
www.rpa.org.tw 網站

行政院新聞局 出版事業登記證
局版北市誌字 第柒伍零號

協會報導

第 3 頁

淺介我國鋼鐵廠之輻射異常物偵檢

輸油管路內部沉積油垢中的 Ra-226，造成管路有輻射劑量，劑量偏高的原因並非來自人工刻意增強其活度，因此這類異常物被歸類為天然輻射異常物。

訓練班公告

第 7 頁

公告本會各項訓練班開課時間。

新聞廣場

第 9 頁

各項證照考試資訊、國內產官學界最新消息、以及近日全球輻防新聞。

輻防新知

第 12 頁

質子治療加速器的屏蔽設計與劑量分析

利用準確的蒙地卡羅計算有系統的產生擬合參數，據此建立一套適用於質子治療加速器的屏蔽設計與劑量分析簡單而有效的方法。

輻說 – 廖彥朋專欄

第 17 頁

媒體如何影響我們的認知？

媒體是一般民眾最重要的資訊來源，即便我們經常批判當下的媒體選擇性報導、疏於查證、缺乏專業，但是對一般人而言，這就是他們唯一的管道。相較於科學實證的苦悶、乏味，所有反對現實的議題都是辛辣的、吸引目光的。

專題報導

第 21 頁

如何實現用過核子燃料深層地質處置的長期安全性

深層地質處置是國際公認可行的用過核子燃料處置方式，結合多重障壁之安全理念，可將潛在有害的放射物質深埋於穩定的地層中，免除對後代人類與環境可能造成之危害。

回顧 2017 展望 2018

主編 張如琛

值此歲末，先祝各位讀者新年快樂！

2017 年，隨著電業法的修訂，我國正式走入了「2025 非核家園」時代。雖然，隨著全球暖化及全台空汙嚴重化的議題，社會上開始出現不同的聲音，但是對於既定政策，身為輻射專業人員，只能盡力提供技術支援，以期國家可以穩健的向前走。基於這個自我期許，本刊特別選定了核廢料作為 2017 年專題報導的主題，涵括美國經驗(144 期簡介美國低階核廢料處置的歷史演進及發展及 147 期一個歡迎核廢料的社區：美國德州安德魯斯郡)、法規(143 期簡介台灣放射性廢棄物管理的輻射防護)、國內各階放射性廢棄物處理處置介紹(145 期簡介我國低放射性廢棄物的歷史及發展、146 期簡介乾式貯存設施之設計考量、148 期如何實現用過核子燃料深層地質處置的長期安全性)。希望藉由這一系列的報導，讀者們對於核廢料的議題可以有一概括性的認識。

2018 年 12 月 5 日核一廠一號機的運轉執照即將到期，我國電廠開始進入除役階段，因此 2018 年本刊專題報導將以電廠除役的輻射防護為主題，敬請期待。

本期協會報導介紹鋼鐵廠所發生的輻射異常物的原因及建議處理方式。煉油廠的輸油管路內部長年累積油垢中因含有鐳-226 天然放射性物質，造成其成為輻射異常物，這類異常物通常體積龐大且輻射強度低，若全部當作放射性廢棄物處理，勢必造成我國放射性廢棄物的貯存空間不足，也造成最終處置場的負擔。因此根本之道應該進行除汙，而除汙後達到清潔標準的管路可當成廢五金回收後再利用，並能減低放射性廢棄物的量，可謂一舉兩得。這個減量的概念也可適用於電廠除役時的廢棄物，全民應該建立豁免管制的概念，而不是一味地要求零輻射，這個觀念的溝通需要你我的參與，本刊也會期許自己成為大家討論的平台。

本協會一直以提升國內輻防專業為己任，為了培育更多人才進入輻防領域，特別於 2017 年開始設立輻防協會獎學金，本年度的得主之一賴柏倫同學特別在輻防新知專欄中介紹他在質子治療加速器的屏蔽設計研究。國內有愈來愈多的醫院建立質子治療中心，賴同學的研究將可提供非常有價值的參考。我們誠摯地希望未來有更多的年輕人投入輻射防護領域，和我們一同努力！

歡迎賜稿，稿件請寄：

輻防協會編輯組

300 新竹市光復路二段 295 號

15 樓之 1 或

傳真 (03)572-2521 或

電郵 rpa.newsletter@gmail.com

來稿一經刊登，略奉薄酬；

政令宣導文章，恕無稿酬。

淺介我國鋼鐵廠之輻射異常物偵檢

輸油管路內部沉積油垢中的 $Ra-226$ ，造成管路有輻射劑量，劑量偏高的原因並非來自人工刻意增強其活度，因此這類異常物被歸類為天然輻射異常物。

緣起

民國 81 年，行政院原子能委員會在台北市某家牙科診所檢查 x 光機時，無意中發現該處輻射劑量值偏高，進一步追查下，才發現該社區的許多棟建築物使用的鋼筋裡面摻了 $Co-60$ 放射性物質。這批輻射異常鋼筋是桃園某家鋼鐵廠在民國 71 年底至 72 年初製造，該廠因在熔化鐵料過程中，誤熔了高活度放射性物質 $Co-60$ 所致，至於 $Co-60$ 的來源則無法確切判定是否來自國內。消息一出，全國人心惶惶，社會大眾莫不擔心自己也是輻射鋼筋的受害者。輻射鋼筋與一般鋼筋的外觀無異，僅能以輻射偵檢器量測之。有鑑於此，原能會除了立即針對民國 71 年後數年間蓋的建築物進行輻射普查外，為杜絕再有放射性物質誤熔的情形發生，政府規定凡設有煉鋼爐的鋼鐵廠，均須在廠內的廢五金進出口處裝設自動輻射偵檢系統，並制定相關作業程序，以確保這些鋼筋的原料以及成品，均無輻射污染之虞。



廠商會同原能會人員進行北棟第 12 層列管輻射鋼筋檢測作業

圖片來源：台北市工務局大龍市場暨國宅社區拆除紀錄

作者

王祥恩

輻射防護協會 技術組組長

門框式輻射偵檢系統

自動輻射偵檢系統因其外型像門框，因此也俗稱為門框式輻射偵檢系統。此偵檢系統架設在原料的入口處，同時也是成品的出口處。偵測時，貨車須以低速緩慢通過，否則偵檢器會無法偵測到。偵測值如高於背景值數個標準偏差時(標準偏差數與偵檢器的靈敏度有關)，系統的警報聲便會響起。這套系統的偵檢器係由數個高靈敏度的閃爍偵檢器組成，分別架設在門框的二側。閃爍偵檢體有碘化鈉(NaI)及塑膠體二種，前者反應速度快、靈敏度高，很適合應用於輻射源的搜尋。但遺憾的是 NaI 晶體對於溫度與濕度的耐受度則較差，尤其門框式偵檢系統大都裝設在戶外，在日曬雨淋的情況下，NaI 偵檢器的靈敏度容易變差，這是 NaI 偵檢器的最大缺點。另一款塑膠閃爍偵檢體雖然反應速度及靈敏度不及 NaI 晶體，但具有不易受溫度和

濕度影響的優點，至於靈敏度較差的缺憾，則可藉由增大偵檢體的體積來彌補。

決定門框式偵檢系統的偵測效果除了偵檢體外，另一個因素是標準偏差數目的設定，數目設定越少，則越靈敏，只要偵測值稍微高於背景值，警報聲就會立即響起。靈敏度高的優點是較不會有漏網之魚，但常常會有誤判的情形發生，造成工作人員的困擾。應知道一旦系統判斷原料輻射異常時，便須將整卡車的廢五金卸載，接著以人工搜尋方式，人員穿梭在廢五金堆中，以手提式偵檢器尋找異常物，過程既辛苦又危險。然而如果標準偏差數目調太高的話，一旦輻射物的強度較弱，或是躲藏在廢五金堆深處，則又會被誤判為合格品而進入熔煉爐。有些鋼鐵廠為求謹慎，甚至在廢五金的輸送帶上方裝設偵檢系統，這樣就不用擔心有遺漏的情形發生。



圖 2 門框式輻射偵檢系統

國內常見輻射異常物種類及處置方式

國內鋼鐵廠常檢出的輻射異常物可分為三大類，第一類是廢射源，這類異常物活度通常較高，以工業用的射源居多，常見的射源有 Co-60、Cs-137、Am-241 等。由於受到廢五金擠壓的緣故，屏蔽容器狀況往往不太理想，甚至會有裸射源掉出容器的情形發生，在後續的檢整處理方面，危險性較大，需特別小心謹慎。在這些射源中，以 Co-60 的危害性最大，除了因為放射出的加馬射線能量高之外，最主要是它的熔點低於

熔煉爐溫度，但氣化點又高於熔煉爐溫度，一旦發生誤熔，99%以上的放射性物質會留在鋼液中，進而變成鋼筋的一部分，造成國內輻射鋼筋事件的射源即是 Co-60。至於 Cs-137 雖然其加馬射線能量也不低，但因其氣化點低於熔煉爐溫度，因此有 99%以上會變成氣體，然後附著在集塵灰表面，被集塵系統收集起來。雖然會造成廠房的污染，但因為只有微量的 Cs-137 會殘留鋼液中，因此不會成為輻射鋼筋。



圖 3 廢鐵堆中發現的射源



圖 4 Cs-137 裸射源



圖 5 含 Ra-226 的儀表板

第二類異常物較為罕見，主要是從古早船舶、飛機拆卸下來的儀表板。這些儀表板為求夜視效果，會在指針及刻度塗上發光塗料。早期的發光塗料使用放射性的鐳鹽(即 Ra-226)放出的高能量加馬射線激發螢光塗層而使其發光，其輻射強度不容忽視。如今發光塗料使用的放射性物質已改為氚(H-3)，因氚僅會放射貝他粒子，無安全之虞。這類異常物視為人工的放射性物質裝備處理，而非被歸類為天然放射性物質。

累月沉積油垢，油垢裡面因含有 Ra-226，造成管路有輻射劑量。然而追究其生成原因，這些輻射劑量偏高的原因並非來自人工刻意增強其活度，因此這類異常物被歸類為天然輻射異常物。

第三類異常物則是煉油廠的輸油管路及其組件，這些帶輻射的管路和組件佔國內鋼鐵廠輻射異常物檢出的最大宗。輸油管路內部長年



圖 6 含天然放射性物質的輸油管路及其組件

結語

目前主管機關原能會針對上述的第一及第二類異常物的處理原則是，一律退回原廠，我國拒絕收容，這也是世界各國在處理這類異常物的通則，否則一旦開放收容的話，豈不淪為各國的廢射源收容機構！至於第三類異常物的處理方式則較為尷尬，因為既然是天然放射性物質，強迫退運的理由並不充分，同時原廠接受的意願往往也不高。如原廠願意收回，當然是第一選項，否則這些異常物會被運至核能研究所當作放射性廢棄物存放。

這類管路的特性是體積龐大、輻射強度低，表面輻射劑量率通常僅每小時數個微西弗而已，在距離 1 公尺處，即已降至天然背景值。這類天然的輻射異常物對核研所造成很大的困擾，因核研所存放放射性廢棄物的廠房空間其實非常有限，主要是用來放置國內的廢射源，將這些有限的寶貴空間用來存放這類低強度的輻射異常物，實在是不智之舉。

筆者認為，根本的解決之道是將這些沉積油垢中含有較高 Ra-226 的管路進行除污。因為管路的輻射源只是附著在其內部的沉積物，屬於物理性附著，只需經過適當處理，便可去除管垢。經過除污的管子及組件，跟正常的管子沒什麼兩樣，當成廢五金再回收利用，都不成問題。如此業者既可以省下一大筆處置的規費，而接受單位核研所也無需擔心貯存空間不足，如此一來，豈不是皆大歡喜的雙贏局面！

輻射防護協會技術組 介紹

隨著輻射應用日趨廣泛，協會除了協助政府執行專案，也提供民間輻射安全防護技術的服務，以保障民眾與環境的輻射安全。

主要服務項目如下：

1. 民眾住宅輻射污染偵測
2. 建築鋼筋、鋼材輻射偵測
3. 非醫用 X 光機安全檢測
4. X 光管報廢處理
5. 醫院核醫設施、照射設施安全評估及工程
6. 工業用射源輻射污染擦拭與洩漏檢查
7. 鋼鐵廠門框式輻射偵檢系統功能檢查
8. 鋼鐵廠偵檢作業輔導
9. 密封性射源報廢處理
10. 放射性核種分析
11. 實驗室、工廠輻射防護計畫制訂及工程
12. 公共設施、場所環境安全評估及輻射防護計畫書撰寫
13. 放射性物質、可發生游離輻射設備使用執照申請

有興趣的朋友請蒞臨 [本會網站進一步了解](#)，或請致電

服務專線：03-5722224

訓練班開課時間



放射性物質或可發生游離輻射設備 操作人員研習班

A 組 36 小時許可類設備	107 年 A1	01 月 16 日 ~ 23 日	高雄 文化大學推廣部
	107 年 A2	01 月 23 日 ~ 30 日	新竹 帝國經貿大樓
B 組 18 小時登記備查類設備	B22	12 月 26 日 ~ 28 日	高雄 文化大學推廣部
	107 年 B1	01 月 09 日 ~ 11 日	台中 文化大學推廣部
	107 年 B2	02 月 06 日 ~ 08 日	台北 建國大樓
	107 年 B3	02 月 21 日 ~ 23 日	新竹 帝國經貿大樓
	107 年 B4	03 月 07 日 ~ 09 日	高雄 文化大學推廣部
	107 年 B5	03 月 21 日 ~ 23 日	台中 文化大學推廣部
	107 年 B6	04 月 11 日 ~ 13 日	台北 建國大樓
	107 年 B7	04 月 25 日 ~ 27 日	新竹 帝國經貿大樓
	107 年 B8	05 月 09 日 ~ 11 日	高雄 文化大學推廣部
	107 年 B9	05 月 23 日 ~ 25 日	台中 文化大學推廣部
	107 年 B10	06 月 06 日 ~ 08 日	台北 建國大樓
107 年 B11	06 月 20 日 ~ 22 日	新竹 帝國經貿大樓	

輻射防護專業人員訓練班

輻防師 144 小時、輻防員 108 小時

／新竹帝國經貿大樓

員 32 期	第一階段	12 月 11 日～ 15 日
	第二階段	12 月 18 日～ 22 日
	第三階段	107 年 01 月 02 日～ 05 日
	第四階段	107 年 01 月 08 日～ 12 日
進階 21 期	21 - 1	107 年 08 月 15 日～ 17 日
	21 - 2	107 年 08 月 20 日～ 22 日

輻射防護繼續教育訓練班*

三小時	107 年 03 月 13 日	台北
	107 年 03 月 16 日	新竹
	107 年 03 月 27 日	台中
	107 年 03 月 30 日	高雄
	107 年 05 月 18 日	台北
六小時	107 年 05 月 21 日	新竹
	107 年 04 月 17 日	新竹
	107 年 04 月 24 日	台北

鋼鐵建材輻射偵檢人員訓練班*

鋼	107 年 04 月 18 日～ 19 日	高雄 文化大學推廣部
	107 年 05 月 03 日～ 04 日	新竹 帝國經貿大樓

上課地點

台北	建國大樓	台北市館前路 28 號
新竹	帝國經貿大樓	新竹市光復路二段 295 號 20 樓
台中	文化大學推廣部	台中市西屯區台灣大道三段 658 號
高雄	國立科學工藝博物館-南館	高雄市三民區九如一路 797 號
	文化大學推廣部 高雄教育中心	高雄市前金區中正四路 215 號 3 樓

* 上課地點如果僅註明區域，但是沒有詳細地點，將依照當期報名人數來決定適當地點。屆時會再通知已報名的學員。

訓練班簡章可至[本會網站查詢](#)。

課程安排問題，請聯絡本會

電話 (03) 572-2224

分機 300 林珽汶（專業人員）

313 李貞君（繼續教育）

315 邱靜宜（鋼鐵建材、

放射物質與游離輻射設備）

傳真 (03) 572-2521

輻防新聞廣場

這裡有您最關心的證照考試資訊、國內產官學界最新消息、以及近日全球輻防新聞



最新證照考試日期與榜單

行政院原子能委員會 106 年第 2 次輻射防護專業測驗與輻射安全證書測驗

及格人員名單已公布於原能會網站。[\(相關連結\)](#)

試題與解答已公布於原能會網站，請點選相關連結即可下載瀏覽。[\(相關連結\)](#)

國內訊息

輻射偵測中心通過 2017 年 IAEA 放射性能力試驗

輻射偵測中心參加國際原子能總署 2017 年舉行 IAEA-TEL-2017-03 放射性分析能力試驗，測試樣品有 2 件水樣、1 件生物試樣及 1 件沈積物，參加測試項目有加馬核種(銻-133、銻-140、銻-137、釷-103、鏷 La-140、銻 Ce-141、鈾-232、鐳-226、鐳-228)、銻-90、總貝他等，所提報各項測試結果之準確性及精確性，全部皆獲得接受 (A) 之評定。

106 年 11 月 30 日廠商自主送驗及 12 月 1 日食藥署送驗樣品之檢測結果

原能會核能研究所於 11 月 30 日接受廠商委託，對 1 件山桑子相關產品進行放射性含量分析，結果如下：統園企業股份有限公司-山桑子萃取物：未檢出。

原能會核能研究所於 12 月 1 日接受衛福部食藥署送檢 2 件藍莓相關食品進行放射性含量分析，其中 2 件樣品測得銻-137 核種，結果如下：(一) D'ARBO 70% 藍莓果醬：銻-137 含量為 145 貝克/公斤。(二)「沙巴東」藍莓果醬 350 G：銻-137 含量為 77 貝克/公斤。

(註：衛福部食藥署所訂「食品中原子塵或放射能污染容許量標準」銻-134+銻-137 之限值 100 貝克/公斤。)

中南生物科技股份有限公司輻射狀況檢查結果

106 年 11 月 25 日上午原能會會同食藥署中區管理中心及南投縣政府衛生局人員，赴南投縣中南生物科技股份有限公司檢查，就「去醣基山桑子萃取物」原料於製成「預倍保明智膠囊」過程，對作業人員及環境之輻射安全影響進行查察。

經調查該公司僅使用原料製造 3 批成品，工作人員於生產作業期間，在 1 樓秤量室、原料調配室等作

業時間每次各約 5 分鐘，會接觸該萃取物。為確認是否仍有少量輻射殘留，原能會人員對作業區域進行空間輻射劑量率量測、污染擦拭與空浮抽氣取樣。另對先前存放原料之 4 樓原料待驗區與合格原料室，進行空間輻射劑量率量測。各區域空間輻射劑量率量測結果：1 樓秤量室：0.19 微西弗/時；1 樓原料調配室：0.11 微西弗/時；4 樓原料待驗區：0.11 微西弗/時；4 樓合格原料室：0.14 微西弗/時。量測結果均在背景輻射變動範圍內，沒有輻射異常情形，人員無輻射安全顧慮。污染擦拭與空浮抽氣樣品，需送回原能會放射性分析實驗室進行計測，待計測完成，結果將即時上網公布。

外媒報導歐洲 9 月底疑似發生核事故，原能會持續掌握相關資訊

有關外媒引述法國輻射防護暨核能安全研究所（IRSN）聲明指出，歐洲近日出現放射性污染雲，疑似 9 月底在俄羅斯或哈薩克曾經發生核子事故案，掌握資訊如下：

原能會之核安監管中心及輻射偵測中心，已於 9 月底加強監控全國 46 處即時環境輻射監測站數據變化，目前國內環境輻射監測值均為正常。IRSN 部分監測站測得微量的放射性物質 Ru-106，濃度介於 $6.8 \times 10^{-6} \sim 7.4 \times 10^{-6} \text{ Bq/m}^3$ ，經 IRSN 評估並不會對歐洲民眾健康或環境造成影響，惟將持續進行監測。另，因未測得其他分裂產物，故 IRSN 初步排除事故發生在核子反應爐，指出可能發生在核燃料處理廠或核醫藥物中心。目前尚無法確認事故地點，但根據天候及擴散模式，事故區域可能介於烏拉山脈南方的烏拉河與窩瓦河之間，有可能是俄羅斯或哈薩克。

原能會參與「106 年行動科教館臺東縣科學巡迴教育園遊會」

為使國中、小師生認識核子事故緊急應變與輻射防護相關原子能知識，原能會透過參與國立臺灣科學教育館於臺東縣 11 月 25~26 日辦理的科學巡迴教育園遊會，以二款原子能科普知識電子遊戲、動手量輻射操作體驗及原子家族繪圖遊戲與參與的師生及家長進行交流互動，期以寓教於樂方式，提供生活中環境游離輻射的知識，並提昇國中小學生對原子能科普的興趣。

台灣地區核能設施環境輻射監測民國 106 年第 03 季報

本報告係 106 年 7 月 1 日至 9 月 30 日期間，行政院原子能委員會輻射偵測中心執行臺灣地區核設施周圍環境輻射監測結果，包括核電廠、核能研究所與清華大學等研究用核設施、蘭嶼地區。監測類別有直接輻射、落塵、植物、環境水樣、農畜產物、海產物及沉積物等，採取熱發光劑量計、空浮微粒、草樣、飲用水、地下水、海水、奶樣、海魚、指標生物、土壤、岸沙等試樣進行輻射劑量率偵測、總貝他活度、氡活度、碘-131、加馬核種能譜等放射性分析作業，本季共計分析 2128 件次，各項環境輻射監測及放射性含量分析結果皆小於環境試樣放射性分析預警措施之調查基準值，評估各核設施周圍民眾可能接受最大個人體外劑量小於每季 0.026 毫西弗，體內劑量小於每季 0.001 毫西弗，皆符合法規劑量限值。[下載檔案](#)

台灣地區放射性落塵與食品調查 106 年上半年報

本報告係 106 年 1 月至 6 月期間，行政院原子能委員會輻射偵測中心執行臺灣地區放射性落塵、食品及飲用水中放射性含量調查結果。偵測項目包括直接輻射、落塵、水樣、農畜產物、沉積物、國產與進口食品及飲用水、磁磚建材等試樣放射性含量分析，共計 677 件次。依據分析結果，評估國人經由吸入空氣、攝入食品及飲用水所造成約定有效劑量，均符合法規規定。[下載檔案](#)

研討會訊息

2017 輻射防護程式分析與維護應用研討會

國立清華大學
NATIONAL TAIWAN UNIVERSITY

2017 輻射防護程式
分析與維護應用研討會
RAMP
Workshop on Radiation Protection Computer Code
Analysis and Maintenance Program

時間	議程	演講者
08:30 - 09:00	報到與註冊	
09:00 - 09:20	大會開幕式、來賓致詞	許榮鈞 教授
09:20 - 09:40	RAMP程式建立與應用	王仲富 教授
09:40 - 10:00	RADTRAD輻射劑量與評估	王亭懿 工程師
10:00 - 10:20	控制室適居性評估程式應用 (HABIT/RADTRAD/ALPHA)	陳雄智
10:20 - 10:30	茶 敘	
10:30 - 11:10	RASCAL應用實例介紹與EPZDose 廠外劑量模擬結果比較	陳詔置
11:10 - 11:30	XOQDOQ程式使用經驗與案例分享	陳瓊婷 工程師
11:30 - 11:50	核三廠GALE2.0程式應用與介紹	蔣 宇 葉文福
11:50 - 13:10	午 餐	
13:10 - 13:30	GALE程式應用與案例探討	江樹鎮至 工程師
13:30 - 13:50	GENII程式介紹與案例應用	辜郁盛
13:50 - 14:10	YARSKIN 皮膚汙染劑量估算應用	楊聯華 博士
14:10 - 14:30	茶 敘	
14:30 - 14:50	PVAL程式使用經驗與案例分享	林聰丞 技術員
14:50 - 15:10	RESRAD與DandD的案例分析和比較	陳紹文 教授 沈宗逸
15:10 - 15:30	PC-CREAM.08 廠外民眾劑量評估程式簡介	潘承亞 技士
15:30 - 16:00	綜 合 討 論	
16:00	閉 幕	

日期: 2017/12/19 會議地點: 清華大學工科館NE69

主辦單位: 財團法人核能與新能源教育研究協會、美國核能與物理學會臺灣總會、亞洲核能物理學會臺灣總會

協辦單位: 國立清華大學工程與科學系、國立清華大學核子工程與科學研究所

專題演講：核能電廠除役作業與管制規範

核能電廠除役作業與管制規範

簡介美國核能電廠除役管制作業 | 核能電廠除役作業規範 | 核能電廠除役技術重要議題

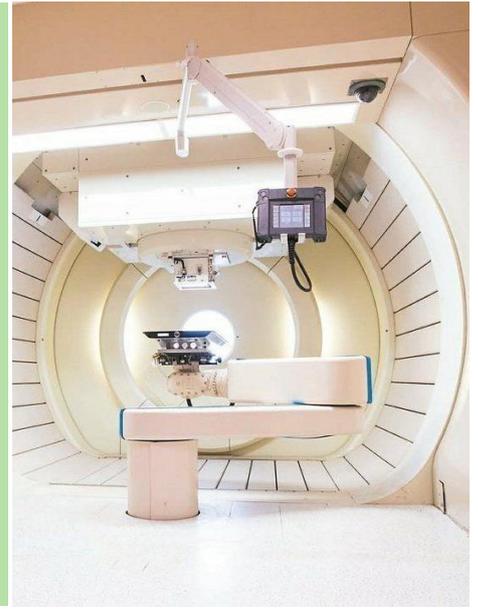
106年12月26日(二) 9:00~12:00
地點：清華大學工科系NE69講堂

主講人 陳士友 博士

- 中華民國輻射防護協會 (Radiation Protection Association, R.O.C.) 海外諮詢委員
- 美國伊利諾理工學院 (Illinois Institute of Technology, IIT) 教授及 Director of Professional Health Physics Program (2013-)
- 美國國家輻射防護與度量委員會 (National Council on Radiation Protection and Measurement, NCRP) 理事及 Environmental Radiation and Radioactive Waste Issues 科學副主席 (1999-2017) ; 榮譽理事 Emeritus Council Member (2017-)
- 美國環保局 (Environmental Protection Agency, EPA) 科學諮詢與輻射顧問委員會委員 (2005-2011)

主辦單位: 財團法人中華民國輻射防護協會 HPS 美國保健物理學會臺灣總會
協辦單位: 國立清華大學核子工程與科學研究所

質子治療加速器的屏蔽設計與劑量分析



利用準確的蒙地卡羅計算有系統的產生擬合參數，據此建立一套適用於質子治療加速器的屏蔽設計與劑量分析簡單而有效的方法。

前言

衛福部公布國人於民國 105 年的十大死因統計結果，毫無意外，惡性腫瘤(癌症)蟬聯榜首。目前主流癌症治療方法有外科手術、化學治療與放射治療。在體外放射治療技術中，相較於傳統的光子治療，質子治療因其物理與生物特性的優勢，越來越受重視。截至 2015 年底，全球質子治療中心已達 60 多座，治療實例超過 13 萬例。林口長庚紀念醫院裝置有台灣第一部質子治療設備，配有一座 235 MeV 質子迴旋加速器與 4 間治療室，目前已正式使用，估計每年可服務 1500 位病患。繼林口長庚醫院之後，高雄長庚醫院、台大醫院、台北醫學大學附設醫院以及彰化基督教醫院等亦規劃興建類似相關設施。

大型加速器的運轉會產生多種不同特性與能量的二次輻射，其複雜程度主要取決於射束能量、損耗情節、以及機器與屏蔽的配置，必須謹慎評估以達輻射防護的目標。有鑑於國內將有多座的質子治療設施，本文首先針對此類加速器運轉的輻射特性進行

作者

賴柏倫

- 國立清華大學核子工程與科學研究所博士生
- 清華大學原科院輻防協會獎學金 106 年得主

探討。另外，考慮文獻上的屏蔽數據雜亂且不一致，本研究利用準確的蒙地卡羅計算有系統的產生一系列的擬合參數，並據此建立一套簡單有效的辦法，可提供合理或保守的劑量評估，特別適用於質子治療加速器的屏蔽設計與劑量分析，其結果將與完整的蒙地卡羅計算進行比對驗證。

屏蔽案例

圖 1 顯示一個典型簡化的質子治療室，室內大小為 6.5 米x6.5 米，高 3 米，周邊混凝土牆厚度假設為 1.5 米。此一厚度比常見設施的混凝土牆薄，筆者刻意使用該厚度以凸顯屏蔽參數選擇在簡化法使用的重要性。治療室出入採三段式迷道設計，從入口到出口之長度約為 9.5 米。假設單能 250 MeV 質子筆形射束由北向南撞擊位於中心的銅靶，其尺寸產生最大量二次輻射的厚度，以此運轉條件作為本文屏蔽分析的案例。

蒙地卡羅計算

關於加速器輻射屏蔽的分析，蒙地卡羅法能完整的將加速器規格、屏蔽設計與運轉條件詳細地納入遷移計算模擬。因此，一般被認為是最準確可靠的方法。本研究選用美國洛斯阿拉莫斯國家實驗室所發展的多粒子全能量蒙地卡羅程式 MCNPX，該程式最重要的特色之一是使用基於最新 ENDF/B 截面庫的連續能量中子截面，相較於多能群近似的中子截面，其計算結果一般公認最為可靠準確。射源項的正確對於輻射屏蔽分析非常重要，為了驗證 MCNPX 對於質子撞擊靶材產生中子的模擬準確度，本研究重複 Meier et al. 在 1999 年進行的實驗，以 256 MeV 質子束撞擊厚

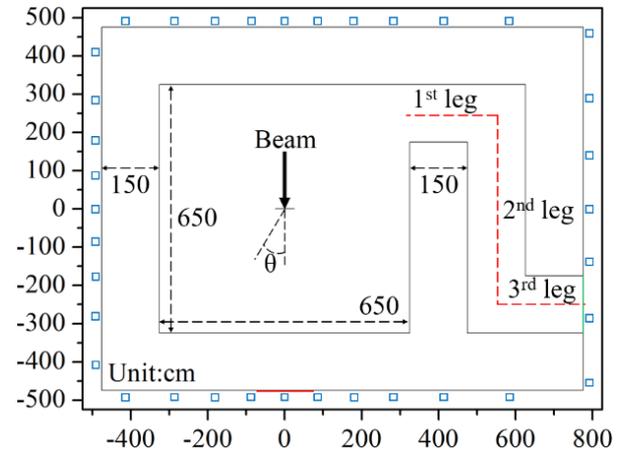


圖 1. 典型的質子治療室結構平面圖，藍色小方框為治療室外劑量評估位置，共 36 點(與射束夾角每十度為一評估點)。

鐵靶，在數個角度詳細度量中子的強度與能量分布。圖 2 顯示測量與計算所得之結果，以絕對值方式呈現，實驗與計算在很大的範圍都相當吻合，驗證了本研究計算模型的正確。

本研究利用 MCNPX 程式執行二種計算，第一種是根據圖 1 實際條件直接模擬照射時治療室周遭的輻射環境，其結果當作簡化方法驗證比對的參考。第二種則是在簡化幾何條件下(圖 3)計算質子撞擊靶材產生之二次輻射在屏蔽的深度劑量分布，透過曲線擬合產生一系列屏蔽參數

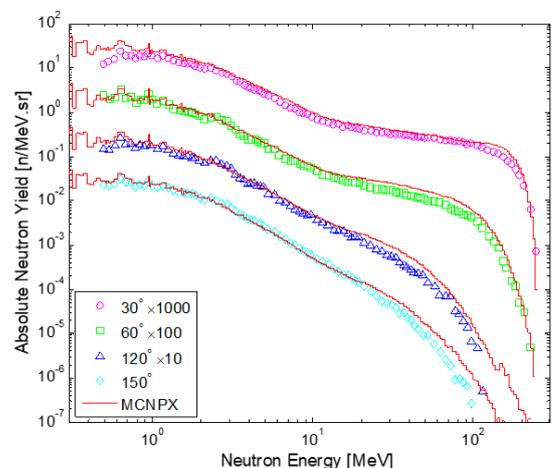


圖 2. 質子撞擊鐵靶產生二次中子之計算與文獻度量結果的比較。

以利後續使用。為涵蓋絕大部分質子治療加速器的屏蔽分析使用，本研究考量的質子射束能量為 100-300 MeV，靶材料有人體組織、石墨、鐵與銅等金屬，屏蔽則包含混凝土、鐵和鉛等常用材質。如圖 4 所示，考慮二次輻射在屏蔽深度劑量分布的特性，參數擬合建議分為淺、深兩部分較佳，淺部擬合範圍在混凝土為 40-150 公分、在鐵或鉛為 20-75 公分；深部擬合範圍在混凝土為 200-600 公分、在鐵或鉛為 100-300 公分。

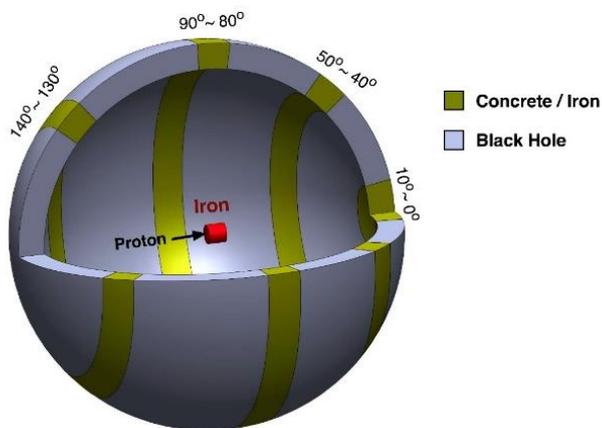


圖 3. 質子撞擊鐵靶產生二次輻射之簡化屏蔽計算模型。

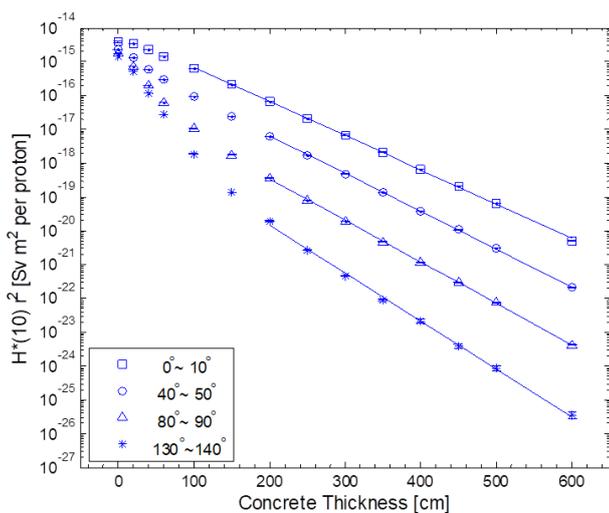


圖 4. 200 MeV 質子撞擊鐵靶產生之二次輻射在混凝土中的深度劑量分布與擬合結果。

屏蔽參數與簡化分析模式

雖然蒙地卡羅法被認為是最準確可靠的屏蔽分析方法。然而，此方法在複雜問題的模擬上相當困難，計算耗時且出錯不易查驗。在實務的屏蔽設計上，保守易驗證的簡化方法通常更受歡迎，尤其是在初步的設施規劃階段。簡化方法通常是立基於下列方程式所謂點射源直接穿透的假設 (point-source line-of-sight approximation) 或其他變型，其可靠與否的關鍵在於選用的參數 (包含射源項 H_0 和衰減長度 λ) 是否與欲評估問題的本質類似。

$$H(E_p, \theta, d / \lambda) = \frac{H_0(E_p, \theta)}{r^2} \exp\left(-\frac{d}{\lambda(E_p, \theta)}\right) \quad (1)$$

觀察前述一系列蒙地卡羅計算結果所擬合建立的屏蔽數據庫，射源項和衰減長度存在角度依存性，前向發射的中子往往具有較高的強度和能量，因此前向比後向顯示較高的射源項和較長的衰減長度。另外，中子產率隨著質子能量的遞增有顯著增加，特別是對高原子序的靶材；對於低原子序的靶材如組織或石墨，儘管總中子數目較低，但其高能中子的比例卻較多，高能中子的穿透力在加速器屏蔽設計不容忽視。

案例分析與驗證

針對圖 1 的質子治療室，圖 5 顯示完整蒙地卡羅計算預測的劑量分布，包含中子和光子的貢獻。如圖所示，從射束損失點到治療室屏蔽外的劑量分布涵蓋數個數量級的衰減，因此計算非常耗時。另外，圖 6 則分別顯示 0° 牆外和迷道口處之中子能譜，前者顯示三個顯著的能峰，從低能到高能依序是 Maxwellian 分佈的熱中子、受

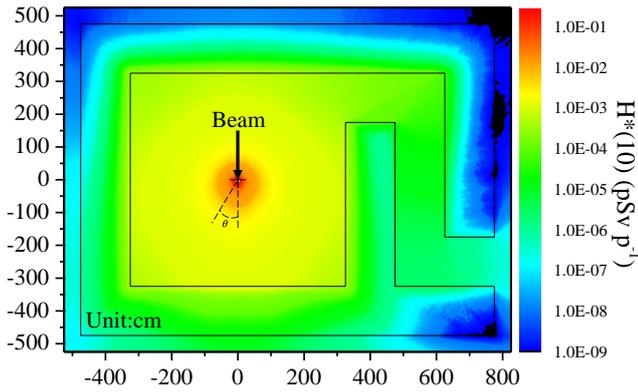


圖 5. 單能 250 MeV 質子射束撞擊銅靶，治療室內外周遭之輻射劑量分布。

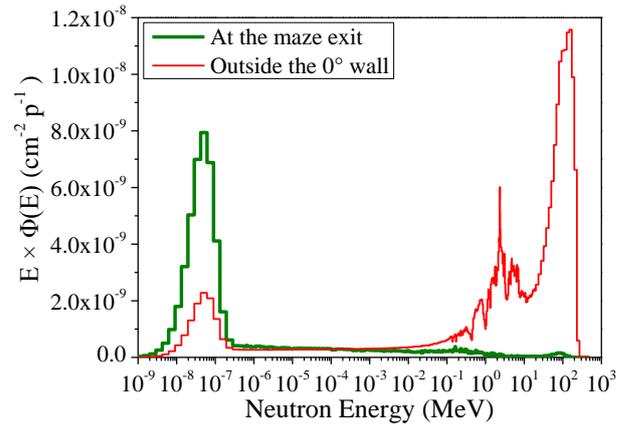


圖 6. 在治療室外射束 0 度方向與迷道出口之中子能譜。

激發原子核經由蒸發機制產生的中子(~2 MeV)、以及直接撞擊而出的高能中子(~100 MeV)。值得注意，高能中子因其穿透力與高劑量轉換因子，可以預期屏蔽外的劑量貢獻以高能中子為主。相較之下，迷道出口之中子能譜則截然不同，以熱中子為主，因其來源為經過多段迷道連續散射與反射的結果。

相較於複雜耗時的蒙地卡羅計算，簡化分析模式的進行簡單直覺，對於一組特定射束/靶材/屏蔽的組合，使用者可從上述資料庫中選擇合適的參數，搭配方程式(1)應用於劑量評估。針對圖 1 質子治療室屏蔽外 360 度的劑量分析，圖 7 顯示二種評估方法(簡化分析模式與直接蒙地卡羅計算)的結果與比較。由於質子撞擊產生二次輻射的特性，在 0° 方向的劑量是最高的，比反向(180°)高約三個數量級。同時，有效混凝土厚度隨著角度增加而變厚，因此最低劑量出現在治療室後向二個屏蔽牆角落。另外，迷道口的劑量由於輻射滲流效應也有明顯的上升。

圖 7 呈現二種簡化分析模式的結果，其中 Model A 使用深部區域擬合的參數(H_2, λ_2)，而

Model B 使用淺部區域擬合的參數(H_1, λ_1)，結果顯示在屏蔽厚度在深淺部交接附近應該使用(H_2, λ_2)為佳，因其劑量預測明顯貼近蒙地卡羅計算結果。整體而言，除了在迷道口附近(250°至 310°)之外，簡化分析模式對於室外劑量的評估相當準確，或至少提供較保守的劑量估計。

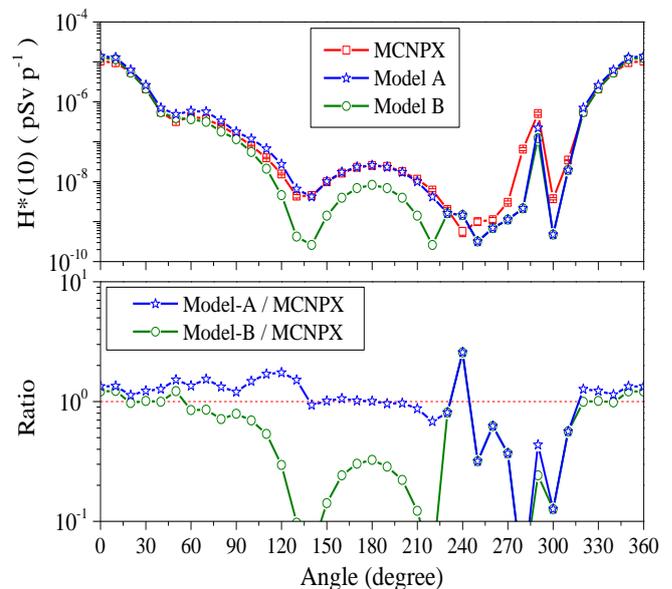


圖 7. 比較簡化分析模式(Model A、Model B)與直接蒙地卡羅計算(MCNPX)對於治療室屏蔽外 360 度的劑量分析。

迷道的劑量評估

在迷道口附近，簡化分析模式的評估有顯著低估現象，主要原因在於其主要劑量貢獻不再是以直接穿透輻射為主，而是輻射滲流效應，二者的物理機制明顯不同，必須另尋其他分析方式。文獻上已有許多評估迷道輻射滲流的經驗公式，其基本精神主要將每一段迷道以一個衰減方程式取代，逐段連結，但是使用者還是必須根據問題提供第一段迷道入口的劑量。本研究的屏蔽數據庫正好可以協助用以評估迷道入口處之劑量，建議以兩倍淺部擬合射源項($2 \times H_1/r^2$)乘上經距離平方反比的衰減作為迷道入口劑量的近似值。針對圖 1 質子治療室的迷道設計，本研究引入兩個文獻常見經驗公式，搭配前述建議之迷道入口劑量估計值，評估沿著迷道的劑量分布並與直接蒙地卡羅計算來比較，結果如圖 8 所示，考量直接穿透輻射與迷道滲流效應貢獻，我們可以得到迷道出口的合理劑量估計。

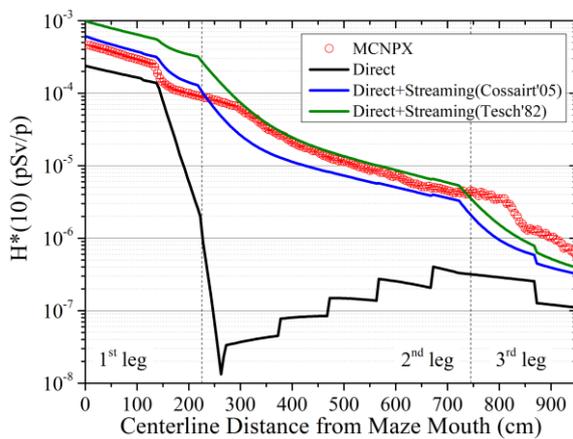


圖 8. 質子治療室迷道輻射劑量的分析與比較。

結論

本研究產生一套適用於 100-300 MeV 質子治療加速器輻射屏蔽分析的資料庫，內容涵蓋常見靶材與屏蔽材料的組合。屏蔽資料庫中的等效射源項與衰減長度，係使用經過驗證可靠的計算模型，考量一系列射束/靶材/屏蔽等不同組態，經由正確的深度劑量分布曲線進行擬合而得。相較於複雜耗時的直接蒙地卡羅計算，基於本數據庫的簡化分析模式則有計算快速、簡單直覺，且易於驗證等優點，特別適用於質子治療設施的初期規劃與屏蔽設計。

媒體如何影響我們的認知？

媒體是一般民眾最重要的資訊來源，即便我們經常批判當下的媒體選擇性報導、疏於查證、缺乏專業，但是對一般人而言，這就是他們唯一的管道。相較於科學實證的苦悶、乏味，所有反對現實的議題都是辛辣的、吸引目光的。

很多人從小都應該都曾經聽過一個都市傳說，那就是「如果用手指月亮的話，會被割耳朵」。回想第一次聽到這種說法的時候，我第一時間思考的是：「到底是整個耳朵會被割掉，還是耳垂的地方被割開一小段呢？誰負責擔任這個『割耳執行官』呢？什麼時候會來割呢？」我不確定如此認真地思考這個問題是不是一件正常的事情，不過即便當時只是小孩子的我也不斷地思索這件事情發生的可能性，長大之後當然很明確的理解到這不過就是個偽科學罷了。

在 Wikipedia 上所定義的「偽科學」是指「任何宣稱為科學、或描述方式看起來像科學，實際上並不符合科學方法基本要求的知識」。其實這根本稱不上是「知識」了，因為這東西多半是杜撰出來的，並不具有「人類共同經驗」的特質。講到這裡，我們稍微回顧一下科學方法。所謂的科學方法，必須要歷經觀察、假說、實驗、修正假說、再實驗、再修正假說、再實驗，直到這個理論能在任意

福說

廖彥朋 專欄



作者

廖彥朋

《台灣網民》專頁原作者，網友暱稱為「養殖戶」，自稱「周魚民的老闆」。大學念的是放射科學，發現自己沒有這方面才華，碩士轉讀醫學物理，又發現這行沒有前途，在醫院工作三年半之後帶著兩把吉他逃到日本，在京都大學醫學研究科當醫學專攻博士生。

- ✓ 長庚大學醫學物理暨影像科學碩士
- ✓ 雙和醫院醫學物理師
- ✓ 中華民國醫學物理學會醫學物理師認證
- ✓ 日本京都大學醫學研究科醫學博士生(ing)

條件下不斷再現後才會成為定律。而偽科學多半只停留在假說的階段就自稱是科學，這就像是「只把冷凍蔬菜的包裝打開就算是大廚」一樣荒謬。不過大家也不要小看偽科學的力量，偽科學之所以盛行，正是因為它的脈絡夠簡單，所以即便是完全沒受過任何科學訓練的人，也能輕易地順著這樣的邏輯去相信這些毫無根據的謠言。

為什麼偽科學會盛行呢？要怪就怪我們的老祖宗說過一句至理名言，叫做「寧可信其有、不可信其無」，這句話原本是古代人在資訊貧乏時代安身立命的人生觀，到資訊爆炸的今天反而成了散布謠言的溫床了。最慘的是，這種觀念絕對不是說改就改的。

許多人排斥輻射，歸根究底都是因為對輻射的恐懼，因為輻射的生物效應是如此難用一語解釋，可以操作的空間自然就變得非常大，對多數的民眾而言，是非題是最簡單的了，所以如果能選擇要或不要，我只想選擇不要。所以我說，恐輻的三段論是長這個樣子的：「輻射會致人於死地、某物具有輻射、某物會致人於死地」在這個前提下，輻射必須是有害的、骯髒的、邪惡的、泯滅人性的，否則這故事就說不下去了。

對於我們這種放射線從業人員而言當然不是如此，要談輻射前得先判斷這輻射是否具有游離性，知道是有游離性後還要看

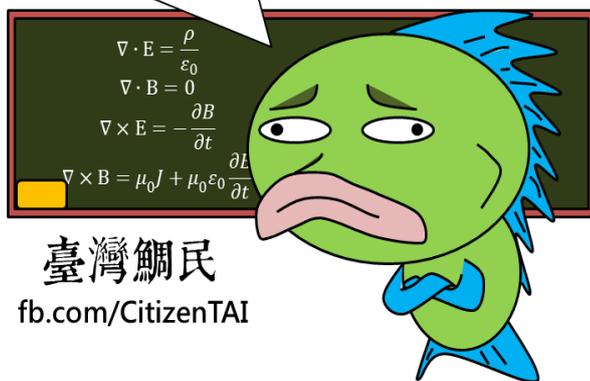
看是粒子輻射還是光子輻射，分辨後還要知道該怎麼阻擋，阻擋後還得知道對人體產生的劑量有多少，經過這一連串的檢驗之後我們才能確知這樣的「輻射」對人體能有多大的影響。

在座的各位多數都已經知道，從廣島長崎倖存者資料顯示，輻射的機率效應在低劑量，特別指 100 毫西弗的情況下，不具有統計顯著性，這理由非常多，包括：可能因為相較於其他的環境因子，輻射的貢獻度低到看不到；可能在低劑量的時候，人體自我修復的情況更為顯著；也可能是因為有其他的生理機制補償了輻射傷害；當然，也許是劑量過低時根本沒有任何的效應。在學界有各式各樣的理論在詮釋低劑量輻射時的生物效應，到今天都沒有一個定論，唯一我們能肯定的是，不論那樣的「效應」存在與否，都無法在巨觀的世界被觀察到。

這幾年我發現許多有心人士都有「科學自助餐」的習慣。所謂的科學自助餐，就是指「與意識形態相符的理論視

為事實；與意識形態相左的證據視為偽物」，對這些人而言，他們專門搜集能支持「輻射是有害的、骯髒的、邪惡的、泯滅人性的」的資料，不論是直接的還是暗示的，只要有益於論述的穩固就是好資料。即便這完全是反科學的謬行，只要有足夠

宇宙間的科學定律與我的意識形態牴觸者無效。



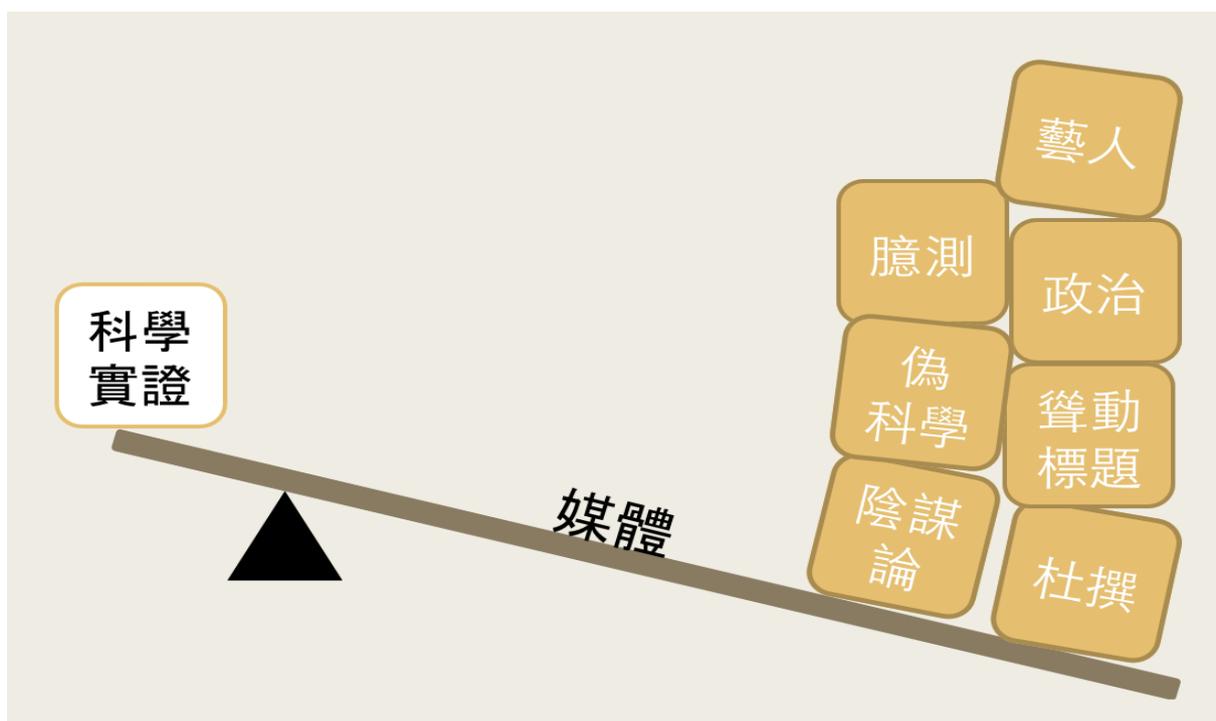
的媒體力，就算是糞便也能被說成是黃金。

福島事故發生後，媒體鋪天蓋地的將核電塑造成世紀毒瘤、人人皆得而誅之的形象，福島死士、幸福牧場的白斑牛、核電廠工人的白血病、力挺福島的名人罹癌、兒童甲狀腺癌問題等，這些數不盡的傳言並不是為了「理解問題」而生的，而是為了收視率、為了放大反核論述核心價值：「輻射為惡」而刻意被製造出來的，所以不論再多的專業人士對這些議題進行解說，也絲毫無法動搖他們對輻射的國仇家恨。

前陣子，我和一位堅持反核的朋友茶敘，他問了我：「你覺得福島的食品真的沒問題嗎？」我說明了我對這些東西的看法後，他告訴我：「我想你如果說沒問題，那應該就是沒問題了。」很顯然地，他對於我花了半個小時所闡述的理論可能吸收有限，但是因為是我廖彥朋所說的，就無條件地接受了，資訊接受者並不是真的那麼在意你所提出的證據，反而更在意是誰說了這些話。

相較於信任專業，一般人更容易相信他所以喜愛的、認同的、崇拜的對象，好比說：明星、大學教授、政治人物、媽媽團體、NGO、親朋好友，而一位不知從何而來、跟自己生命從未有過任何連結的「專家」，人們反而更心存疑慮，這也是為何我們的資訊一直難以傳遞到民間的主因。

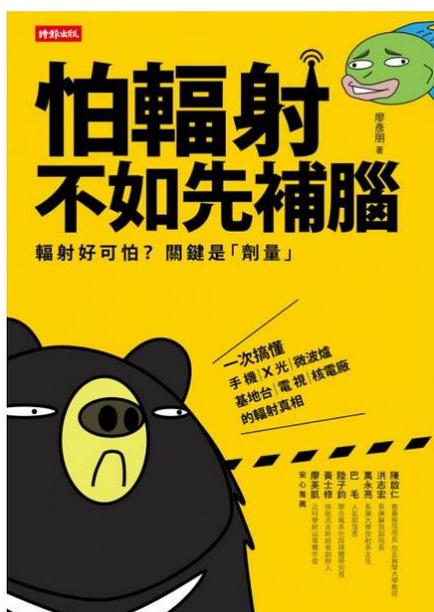
媒體是一般民眾最重要的資訊來源，即便我們經常批判當下的媒體選擇性報導、疏於查證、缺乏專業，但是對一般人而言，不管喜不喜歡，這就是他們唯一的管道，「如果不是真的為什麼會被爆出來？」大概是多數人對於報導的共識。相較於科學實證的苦悶、乏味，所有反對現實的議題都是辛辣的、吸引目光的，媒體一向以作為批判者自豪，如果我們希望媒體能成為我們的助力，我們勢必得製造出「爭議」，或是說「話題」。這幾年來我們很喜歡談所謂的「風向」，事實上風向就是媒體賴以生存的食糧，有風向就有閱聽，有閱聽就有廣告，有廣告就有收入，有收入



才有媒體。而風向往往來自於道德的制高點，誰能率先定義出道德標準、站上那個制高點，誰就能獲得話語權、帶領風向。

總結以上的一些想法，我想說的是，對一般民眾而言，他們所期待的往往不是所謂的「真相」，更可能是「信賴」。因為多數人不具有相關背景，任何人都沒有權利要求一位世界級大導演讀完 ICRP 報告後發表五千字感言，實務上也是不切實際的。我們都知道，唯有解決輻射疑慮才有可能根除非理性的意識形態，這方面我們需要努力的地方還非常多，只有我一個人在做其實效果是很有限的，畢竟我也是個一窮二白的留學生，我唯一能做的就是盡可能的曝光、盡可能的回覆一般民眾的疑慮，若要更進一步的改善社會氛圍，還是需要有更多資源、更多人才進入，我們才有足夠的能力去製造話題、響應話題、形成氛圍。

最後我想一提的是，很多人習慣用「教導」的方式來處理知識落差的問題，其實這是非常危險的。我們都聽過伊索寓言裡的「北風與太陽」的故事，真正能讓旅人脫下外衣的絕不是強加的外力，而是讓他自發性寬衣解帶的環境。我們必須理解每個人對於議題觀點的基調，才能針對那樣的基調，以相應的答案填補他們內心的空缺。如同我說的，媒體需要的就是閱聽，只要我們能夠滿足媒體的需求，並且持續在這方面努力，我們才有機會將我們滿腹的知識傳遞到民眾的心中。



時報文化出版（2016/03/15）

如何實現用過核子燃料 深層地質處置的長期安全性

深層地質處置是國際公認可行的用過核子燃料處置方式，結合多重障壁之安全理念，可將潛在有害的放射物質深埋於穩定的地層中，免除對後代人類與環境可能造成之危害。

前言

國內自民國 67 年首度啟動核能發電，陪伴台灣近半個世紀以來的經濟發展，然核能發電雖能提供低碳能源與提升能源穩定性，但其所留下的用過核子燃料既可說是一種可再利用資源，亦可說是一種廢棄物。故在國際上，有些國家如法國，發展再處理技術來二次提煉可分裂物質，再製成混合氧化物(MOX)核燃料，以增進使用率並降低廢棄物量；而有些國家如美國，為避免核子擴散，則將其視為廢棄物而採行直接處置。

國內用過核子燃料管理的策略規劃係近程採核能電廠內濕式貯存，中程進行乾式貯存，長程推動最終處置，並依現行「用過核子燃料最終處置計畫書(2014 年核定版)」之規劃，進行長程處置技術之推動，依計畫時程訂於 2055 年完成最終處置場的建造。



Final disposal of spent nuclear fuel

圖片來源：

www.europarl.europa.eu/document/.../20101202ATT04971EN.pdf

作者

張淑君 副組長

核能研究所保健物理組

用過核子燃料含有錒系元素，是屬於長半衰期的放射性核種，因此被形容為萬年遺毒。而為解決此既存的問題，科學家分析用過核子燃料在生物圈中的放射性危害演變後，認為以深層地質處置技術來長期處置用過核子燃料是安全可行的作法。本文即是希望能透過簡明的文字，介紹國際上如何實現深層地質處置的長期安全性，揭開技術的神秘面紗。

用過核子燃料輻射特性

為了安全處置用過核子燃料，首要須對用過核子燃料的輻射特性進行瞭解。用過核子燃料內部所含的放射性核種活度會隨時間而衰變，定義為「半衰期」，不同的放射性核種具有特定的半衰期，如常見的銫-137 核種的半衰期約為 30 年，此表示在 30 年後的銫-137 活度會減少 1/2，60 年後活度減少到 1/4，90 年後活度減少到 1/8，持續減少直至可忽略的程度。

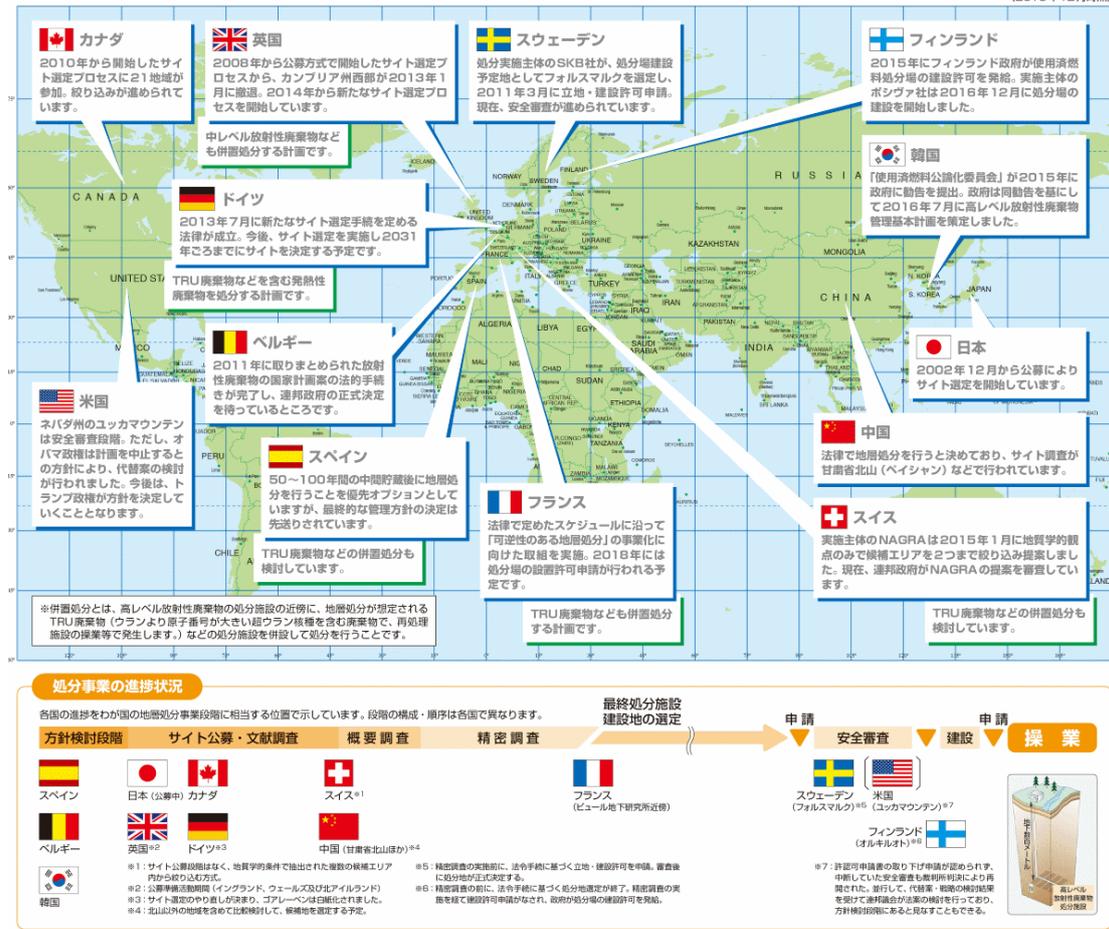
以國內沸水式反應器所產生的最高燃耗之用過核子燃料為例，當其自反應器退出並經中期貯存而至最終處置階段時，推算約 95% 仍是屬於鈾系列的核種，其中仍以天然存在的鈾-238 核種為主，高達 90% 以上，鈾-235 核種僅剩不到 1%，除此之外，在核分裂過程產生銻、錒、錒等超鈾元素約有 1% 左右，而鋇-90、碘-129、銫-137、鎘-99 等分裂產物約占 4%。潛在危害後代子孫元凶的關鍵核種係指具有萬年以上長半衰期的超鈾元素，這些核種主要是釋出阿伐粒子，一旦攝入至體內將會造成相對嚴重的健康效應，故發展深層地質處置技術的目的即是在防患這些核種對後代子孫與環境的潛在有害影響。

用過核子燃料深層地質處置

用過核子燃料長時間尺度的深層地質處置，可藉由自然界存在的相似環境進行「天然類比」，如日本岐阜縣東濃鈾礦床之鈾礦埋藏超過 1,000 萬年、澳洲的昆嘎拉鈾礦床約在距今 16 億年至 15 億年前形成，透過研究上述礦床周邊的地質條件以及天然鈾系核種的遷移與遲滯現象，已獲國際一致認同「深層地質處置」是可以達到安全處置的方式。

用過核子燃料深層地質處置計畫需結合處置場選址、設計、建造、運轉與封閉等階段進行全程發展規劃，通常需費時近百年。目前各國的推動進度：芬蘭運用瑞典發展的 KBS-3 處置概念已通過 Okiluoto 場址之花崗母岩處置執照申請，已於 2016 年底開始興建最終處置場，預計於 2023 年啟用；瑞典正進行 Forsmark 場址之花崗岩處置執照申請，目前已完成技術審查並進入環境影響公聽會的最後階段；法國國會已於 2016 年批准選定 Bure 的鄰近村落為最終處置場預定地，目前正由核廢料專責機構準備執照申請作業。

除上述 3 個選址程序領先的國家外，筆者引用日本 2017 年 2 月發表的「關於各個國家高放射性廢棄物處置」報告 (RWMC, 2017)，該報告整理世界各國發展深層地質處置的最新進度(如圖一)，其中瑞士與大陸已針對可能的候選場址進行概要性的鑽孔調查，其餘國家仍處於全國性普及調查或是文獻調查，而國內預計 2017 年底完成深層地質處置技術之可行性評估。



圖一：日本財團法人原子力環境整備促進與資金管理研究中心整理各國深層地質處置技術與選址發展進度

處置安全性的確保

深層地質處置主要是運用「隔離」、「圍阻」與「遲滯」的觀念，以多重障壁及深層防禦的設計原理來達成，以下將簡易說明：

- 「隔離」是指遠離人類生活所涉及的生物圈範圍。國際上通常界定處置深度超過地下300公尺深，除此之外，放置高放射性廢棄物的地質岩體(通常稱為處置母岩)須具備適當的地質環境，發揮長期將放射性核種與生物圈安全隔離的效果。

我國「高放射性廢棄物最終處置及其設施

安全管理規則」第4條與第5條(行政院原子能委員會，2013)則分別提出對處置場址禁制與限制的基本要求：

「高放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」第4條

高放處置設施場址，不得位於下列地區：

- 活動斷層或地質條件足以影響處置設施安全之地區。
- 地球化學條件不利於有效抑制放射性核種污染擴散，並足以影響處置設施安全之地區。

- 三、地表或地下水文條件足以影響處置設施安全之地區。
- 四、高人口密度之地區。
- 五、其他依法不得開發之地區。

「高放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」第 5 條

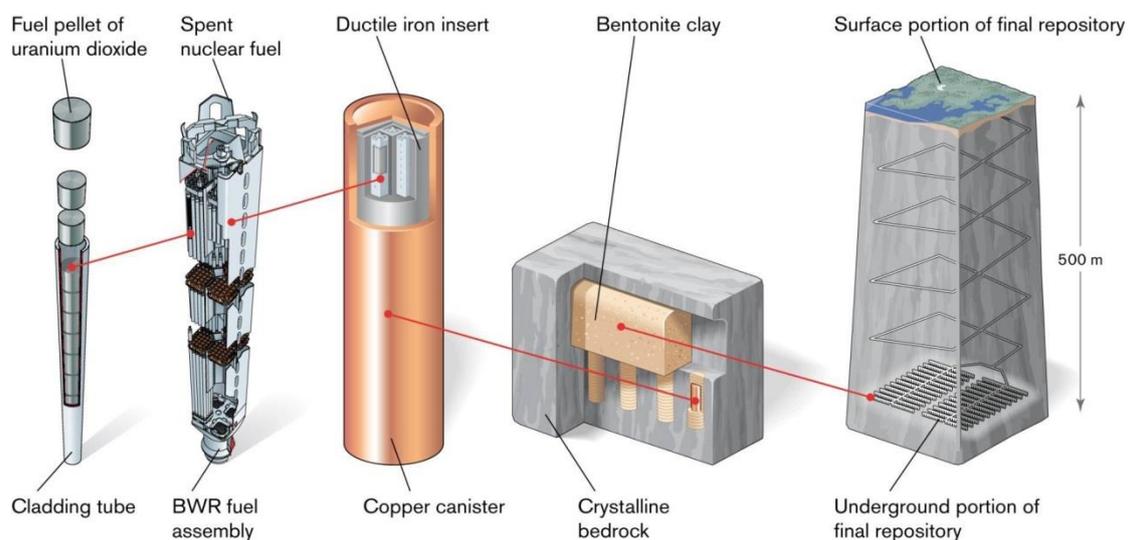
高放處置設施場址，避免位於下列地區：

- 一、有山崩、地陷及火山活動之虞者。
- 二、地質構造可能明顯變化者。
- 三、水文條件易改變者。
- 四、處置母岩具明顯劣化現象者。
- 五、地殼具明顯上升或侵蝕趨勢者。

高放處置設施場址有前項情形時，其經營者應提出確保高放處置設施符合安全要求之解決方法。

2. 「圍阻」是指運用多重障壁理念，防止用過核子燃料之放射性核種釋出，國際上通用的多重障壁，除用過核子燃料本身的銻合金護套具有圍阻功能外，還須額外設計廢棄物罐、緩衝材料與回填材料，此通常稱為工程障壁系統。筆者引用瑞典 SKB 公司發展的 KBS-3 處置概念系統如圖二(SKB, 2011)，簡述各個系統元件之功能，以使讀者更了解多重障壁的設計理念。

- 一、廢棄物罐：主要功能是發揮長期將用過核子燃料及其所含的放射性核種包封在罐內，選用的材料必須考慮對抗腐蝕、應力的條件。
- 二、緩衝材料：每個處置孔均置放一個廢棄物罐，而在廢棄物罐周圍須填充一定厚度的緩衝材料，用以維持廢棄物罐不易受到地下岩體的影響，保持廢



圖二、瑞典 SKB 公司發展 KBS-3 處置概念系統

註：圖中標註中文翻譯(由左至右，由上至下)

Fuel pellet of urarium dioxide：二氧化鈾燃料丸；Cladding tube：燃料護套；Spent nuclear fuel：用過核子燃料；
 BWR assembly：BWR 元件；Ductile iron insert：內部球墨鑄鐵元件；Copper canister：廢棄物銅罐；
 Bentonite clay：膨潤土；Cystalline bedrock：結晶岩體；Surface portion of final repository：最終處置場地表設施；
 Underground portion of final repository：最終處置場地底設施

棄物罐能長期處於無氧、還原的環境。為此，緩衝材料通常採用含有高含量蒙脫石的膨潤土，可具備低滲透性與高回脹壓力，除防止地下水侵入處置孔外，亦可緩衝周圍母岩所施與的應力，以及支撐廢棄物罐。

三、回填材料：回填材料的性質需求與緩衝材料相似，回填材料主要是充填於處置隧道中，利用回脹壓力確保處置孔中的緩衝材料不會變形，同時也具有低滲透性，可確保處置設施於回填後不易形成水流通道。

3. 「遲滯」是指當處置達足夠長的時間後，「圍阻」功能是有可能無法維持而使得放射性核種有機會釋出，當放射性核種釋出到工程障壁系統中，在多重障壁及深層防禦理念下，將同時發揮延緩或阻斷放射性物質的遷移路徑，如緩衝材料除具有低滲透性與高回脹壓力之特性外，亦具有吸附核種、膠體瀝濾等功能；如此一來，因放射性核種的活度會衰變，將可延緩放射性核種再度進入生物圈的時間與活度濃度。

原子能委員會發布之「**高放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則**」(行政院原子能委員會, 2013)，明訂高放處置設施之設計，應確保其輻射影響對設施外一般人所造成之個人年有效劑量不得超過 0.25 毫西弗，而對設施外關鍵群體中個人所造成之個人年風險，不得超過百萬分之一。

為確保深層地質處置的安全性，建立系統性的安全評估方法是國際通用的作法，安全評估方法首要需彙集可能影響場址與處置設施安

全的各項因子，包括熱、水、力、化的特性與其耦合的作用行為，此部分將集合大量的科學知識，透過技術研究可增進知識庫的完備性，可基於地質環境特性進行各個系統單元的功能評估，以實現多重障壁與深層防禦的工程設計理念。而為確保深層地質處置能具備長時間的安全性，可以透過情節發展描述未來可能發生的各種條件與狀況，抑或是透過情節發展進行系統功能的健全性分析，在量化分析計算過程中可探討其中所存在的不確定性與靈敏度影響，如此在處置計畫發展的各個階段，以滾動式管理可逐一確認影響因子的本質與關聯性，明確技術突破目標，推動達成具安全可靠與可行性的場址與深層地質處置方案。

安全評估是結合安全防護策略與綜合性專業技術的表現，而為達到對深層地質處置安全的信賴度與接受度，國際原子能總署(IAEA)提出「安全論證(Safety Case)」的觀念(IAEA, 2012)，安全論證係源自於法律領域的術語，說明律師如何為辯護人進行舉證、辯證的過程，最後由法官裁定；深層地質處置亦是如此，透過安全評估呈現安全防護策略與各項科學證據，透過情節發展與量化分析說明對安全標準的符合性，在各項品質保證與文件化管理提供利害關係人與主管機關的決策判斷；所以安全論證是結合科學、技術、資訊統整與決策管理而構成的辯證集合體，須涵蓋處置計畫的各個階段，從初始的地質調查、設計分析、建造、運轉、到最後的封閉，各階段都應發展該階段的安全論證，透過每一個階段的迭代回饋與知識傳承，最終獲取對處置設施安全性與可信度的最大集合體。

結語

「非核家園」的終極目標在於妥適的解決用過核子燃料最終處置問題，避免將困擾遺留給後代子孫。我國用過核子燃料處置相關研發計畫積極循序推動中，透過計畫分階段的管理，將可適時有效解決問題，獲取社會大眾的理解與認同，承擔起應負的世代責任。

深層地質處置是國際公認可行的用過核子燃料處置方式，結合多重障壁之安全理念，可將潛在有害的放射物質深埋於穩定的地層中，免除對後代人類與環境可能造成之危害。

用過核子燃料最終處置之國際關注的焦點議題，各國莫不投入人力與物力積極尋求持續提升安全性的可靠技術。善用國際經驗將可以加速我國處置技術成長，並增進公眾信心與提升安全品質。

參考文獻

- 行政院原子能委員會(2013)·高放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則·會物字第1020001007號令；2016/05/24取自
http://gazette.nat.gov.tw/EG_FileManager/eguploadpub/eg019013/ch07/type1/gov61/num19/Eg.htm
- IAEA (2012), The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste, Series No. SSG-23, IAEA, Vienna.
- RWMC (2017), 諸外国における高レベル放射性廃棄物の処分について, 日本原子力環境整備促進・資金管理センター. <http://www2.rwmc.or.jp>.
- SKB (2011), Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark Main report of the SR-Site project, TR-11-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.