



財團法人 中華民國輻射防護協會

輻射防護簡訊

第 144 期

發行人
鄧希平

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

國際航線機組人員的輻射劑量

我國航空機組人員高空輻射曝露的年劑量為 3 毫西弗以下，不管是從輻射安全的角度或是我國現行法令規範的角度來看，機組人員與搭機民眾並不須為此劑量所造成的效應擔憂。

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 13 頁

福島居民所受到的輻射量，可能遠低於原先想像的

居民實際上受到的輻射曝露劑量大約是直升機測量數據的 15%，僅為日本政府原先估計的四分之一。

輻說 – 廖彥朋專欄

第 16 頁

體內曝露和體外曝露不一樣

我們無時無刻都曝露於輻射中，所以「有或沒有」就不是重點了（因為「沒有」並不存在），「劑量的多寡」才是我們應該關心的。

專題報導

第 19 頁

簡介美國低階核廢料處置的歷史演進及發展

本文的重點是美國對低階核廢料的處置，筆者從有關的歷史背景切入來讓讀者了解處置的發展，希望藉由本篇內容的討論能增進國內對低階核廢料處置相關的議題有更深入的了解。

共同面對核廢料的處理問題

主編 張如琛

日本 311 福島核災 6 週年之際，台灣發起了 311 反核大遊行。今年遊行的一個重要主題就是核廢料的處理。過去三、四十年享受核電帶給我們便利，現在大家必須共同面對核廢料的問題。。

低放射性廢棄物(俗稱低階核廢料)的處理從六零年代的海拋，到七零年代因環保意識抬頭，陸地掩埋方式逐漸成為首選，海拋處理也在 1993 年世界各國簽訂協議後畫下句點。隨著世界各國對核廢料處理的重視，低放射性廢棄物的最終處置不論在技術上、法規上都已成熟，鄰近的日本及韓國已相繼完成最終處置場的建造，我國的低階核廢料將何去何從，有待你我共同努力。本期專題報導由陳士友博士介紹美國低階核廢料處置的歷史演進及發展，相信讀者們讀完後一定和我一樣受益良多。也期許在本刊的核廢料系列報導之後，能消除大眾對低階核廢料最終處置的疑慮，而能凝聚共識，為這些既存的核廢料找到最後的家。

本期輻防新知專欄報導福島居民所接受的輻射劑量，在大規模的居民輻射劑量佩章監測之下，發現實測數值僅為原先預估的 1/4，顯示室內掩蔽的效果比預期的好，此結果非常值得後福島的緊急應變計畫參考，撤離居民所伴隨的負面影響值得受到重視。

本期的協會報導、海外信息與輻說專欄也非常具有可讀性，讓我們一起來享用！

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。

國際航線機組人員的輻射劑量

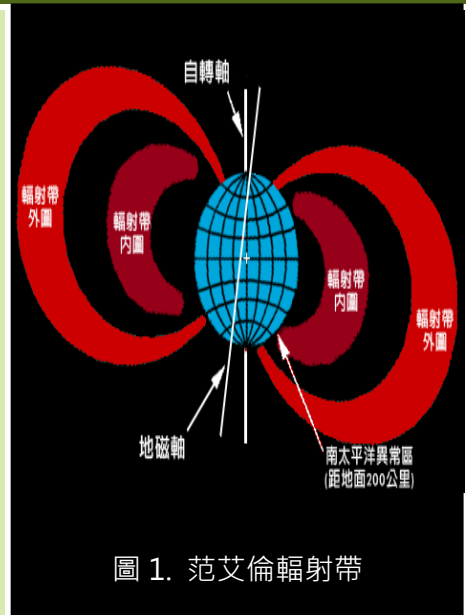


圖 1. 范艾倫輻射帶

我國航空機組人員高空輻射曝露的年劑量為 3 毫西弗以下，不管是從輻射安全的角度或是我國現行法令規範的角度來看，機組人員與搭機民眾並不須為此劑量所造成的效應擔憂。

緣起

筆者最近看了一份美國聯邦航空管理局 2014 年的報告，是有關機組人員在飛行過程中所受有效劑量的評估計算數值，其評估結果筆者個人有些想法想與讀者分享。

回顧近年來，許多國內媒體關注高空游離輻射曝露對其機組人員健康的影響，有時看到其所下的標題，例如“長期高空輻射曝露，空姐易得乳癌”等，筆者想這標題會令讀者心中產生些許擔憂吧，民眾可能也會擔心自己搭乘國際航線時所受的高空輻射曝露。這些報導引用的資料為芬蘭、丹麥等北歐國家的調查結果，其研究資料顯示：若超過 5 年以上飛航年資的機組人員，其乳癌的發生率為地勤人員的 2 倍，進一步推測其原因是與其工作時接受較高的高空輻射曝露有關。本來大氣層對宇宙射線太空輻射屏蔽的效應，隨著高度增加空氣稀薄而漸減，另外受到地球磁場的效應，宇宙射線主要成分為帶電的粒子輻射，也會往南北極高緯度的區域集中(圖 1.范艾

作者

劉代欽

輻射防護協會 編訓組組長

倫輻射帶)，所以如果航線跨越高緯度區域時，輻射劑量就會比較高，而北歐國家的航線主要就飛行於高緯度區域。對於北歐國家呈現這樣的結果，我國航空公司也關心此議題而進行調查，但是並未發現我國機組人員乳癌發生率較地勤人員為高的情況。

行政院原子能委員會針對此議題作出說明，原能會曾對我國籍航空公司的空服人員所接受的高空輻射劑量值進行評估，評估結果為我國航空機組人員高空輻射曝露的年劑量為 3 毫西弗以下，比北歐國家的機組人員所受年劑量 3.2 毫西弗略低，這劑量值屬於國際放射防護委員會 ICRP 所認定的低劑量範圍，不管是從輻射安全的角度或是我國現行法令規範的角度來看，機組人員與搭機民眾並不須為此劑量所造成的效應擔憂。

影響高空輻射劑量的因素

影響機組人員高空輻射劑量的因素主要有下列四項：

1. 飛行的時間：飛行所累積的劑量以年劑量表示，所以與機組人員整年飛行的時數有關。
2. 航線緯度：由於高緯度區域的高空輻射較強，因此在國際航線的巡航高度上(約為 35,000 英尺)，高緯度區域的輻射劑量率約比赤道的輻射劑量率高約 2 倍。可參考圖 2 與圖 3。
3. 巡航高度：地表高度影響大氣層的屏蔽厚度，加上空氣較稀薄減少了輻射屏蔽的效果。影響程度可參考圖 2 與圖 3。
4. 太陽活動(Solar Activity)：太陽活動有其週期性，約為每 11 年一循環，對於機組人員造成的輻射劑量影響，是來自於太陽活動所釋放出的帶電粒子，稱為太陽粒子事件(Solar particle event, SPE)，也是俗稱的太陽輻射風暴。在 SPE 發生期間，所造成的輻射強度可能比平常時期高 1000 倍以上。太陽輻射風暴除了會造成地球上通訊的干擾外，對於飛機上的乘客與機組人員都會大大提高其高空輻射曝露，在高緯度地區更為明顯。

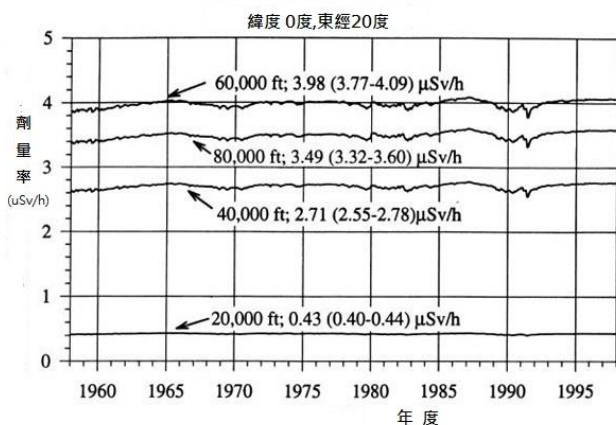


圖 2 赤道上空不同高度的劑量率

(資料來源：Susan Bailey, Air crew radiation exposure-An overview, Nuclear News, January 2000, p32-33)

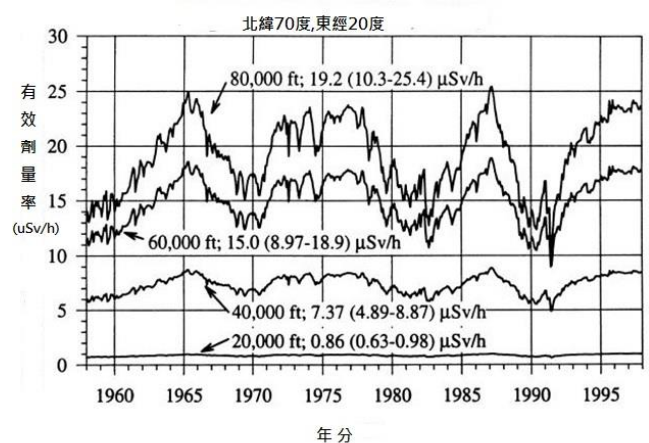


圖 3 高緯度區域上空不同高度的劑量率

(資料來源：Susan Bailey, Air crew radiation exposure-An overview, Nuclear News, January 2000, p32-33)

近年國際上也漸漸關心機組人員輻射劑量的情況，主要評估作法是考慮上述的影響因素進行電腦模擬。美國聯邦航空管理局(FAA)就開發電腦程式並逐年更新資料，自 1989 年發布 CARI 第一版以來，隨著資料漸漸豐富與模擬方式的進步，修正改版多次，目前版本為 2014 年所發佈採用橡

樹嶺國家實驗室(ORNL)開發的 MCNPX 2.7.0 模擬程式的 CARI-7 程式。此外，美國國家航空暨太空總署(NASA)亦開發採用 HZETRN(High Charge (Z) and Energy Transport) 進行模擬評估的 CARI-NAIRAS 程式。

表 1. 以 CARI-7 與 CARI-NAIRAS 模擬評估東京-紐約航線的有效劑量*1

航線	有效劑量*2(微西弗)		飛行條件			
	CARI-7	CARI-NAIRAS	ICAO Codes	爬行降落(分)	巡航高度(×10 ³ 呎)	巡航時間(分)
東京 ~ 紐約	39.5	50.0	RJAA KJFK	33、26	33	115
					35	170
					37	211
					41	176
紐約 ~ 東京	43.1	52.8	KJFK RJAA	35、27	35	316
					39	192
					41	190
					43	19

*1：引用 CARI-NAIRAS : Calculating Flight Doses from NAIRAS Data Using CARI, FAA, 2014.

*2：原報告中的單位為微西弗/小時，應為誤植。

綜合前述，我們來看 CARI-7 與 CARI-NAIRAS 針對東京到紐約航線的空中輻射曝露劑量的評估結果，輸入的太陽活動條件參考 1960 年的情形(1960 年是太陽活動有記錄下相對高的一年)。評估結果如表 1。

輻射防護的觀點

台北到紐約的航線應該是我國航空機組人員接受空中輻射曝露最高的航線了，飛行的時間長

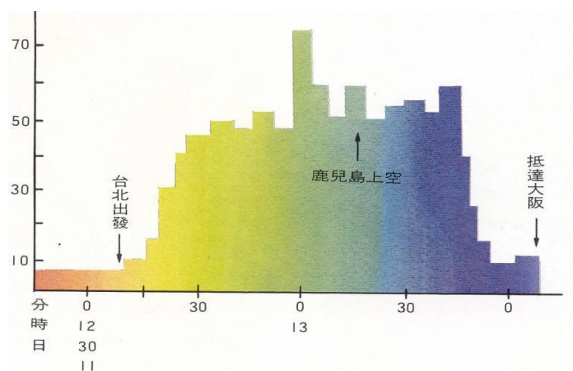
且航線的緯度高，如果從表一所模擬評估出的數值推估往返一趟，空中輻射曝露劑量應該略高於 100 微西弗，這數值對應前述原子能委員會的評估，我國籍航空機組人員高空輻射曝露的年有效劑量一般不超過 3 毫西弗是合理的。年劑量 3 毫西弗，從 ICRP 的觀點是低劑量範圍，也就是在安全上是無虞的，而且如以我國輻射工作人員的劑量限度考慮也幾乎符合，為何用幾乎符合？因為我國對於懷孕的輻射工作人員有腹部表面體外曝

露 2 毫西弗的劑量限度，但是目前我國因為機組人員所接受的空中輻射曝露是屬於天然背景輻射之一，因此機組人員的輻射曝露並不屬於必須受到游離輻射防護法規規範的輻射工作人員。不過這一點我必須再強調的是並非孕婦接受一超過 2 毫西弗的劑量時就有輻射安全上的影響，有關懷孕與輻射劑量的效應關係，NCRP Report No. 174 Preconception and Prenatal Radiation Exposure: Health Effects and Protective Guidance (2013) 是很好的參考。對於懷孕過程中接受 2~3 毫西弗這樣的劑量，NCRP 147 指出，不論是孕婦本身或是胚胎的輻射安全都是無虞的。

結語

機組人員所受的高空輻射劑量這件事值得主管機關與輻射防護界一起來留意，但是這並非從輻射安全的角度出發，而是從國際輻射防護的趨勢來看。ICRP 60 號報告(1991)建議將機組人員的輻射曝露納入職業人員的劑量管理，ICRP103 號報告(2007)也修正了將暴露於天然背景輻射的人員排除於輻射工作人員之外的作法，改以可控制與否的情境條件作為輻射防護的實踐，而且輻射工作人員懷孕期間體外輻射劑量的限值也從 2 毫西弗降為 1 毫西弗。目前歐盟對於機組人員懷孕時所接受的空中輻射曝露已有 1 毫西弗的劑量限度要求，這些國際趨勢值得主管機關留意，將來修訂相關的輻防法規時才能與國際接軌。

台北 -> 大阪 空中輻射相對劑量率



資料來源：輻射偵測中心

輻射防護協會 輻射防護訓練課程

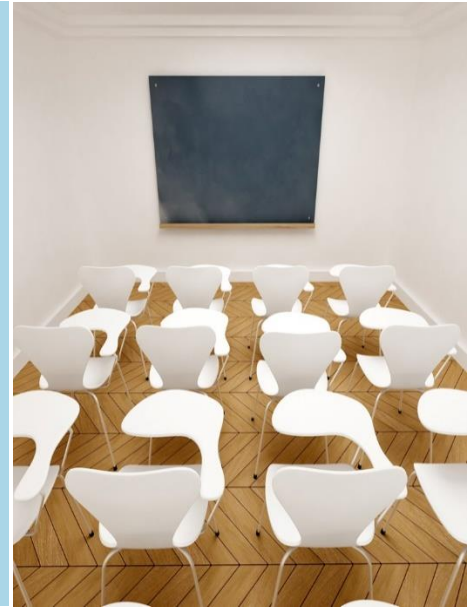
為協助民間提昇專業知識與技術，本協會敦聘國內、外相關單位的學者專家擔任授課教師，舉辦各種研習課程。

目前共有：

- 證照取得訓練
 - ✓ 操作人員資格
 - ✓ 輻防人員資格
 - ✓ 鋼鐵建材輻射偵檢人員資格
- 委辦訓練
- 換照積分（領有輻射安全證書及輻射防護人員認可證者）
- 三小時年度訓練（已受過 18 小時訓練者）

有興趣的朋友請蒞臨[本會網站進一步了解](#)。

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

A3	08 月 01 日 ~ 08 日	高雄 文化大學推廣部
A4	08 月 07 日 ~ 14 日	新竹 帝國經貿大樓

B 組

18 小時登記備查類設備

B7	04 月 19 日 ~ 21 日	高雄 文化大學推廣部
B8	05 月 10 日 ~ 12 日	新竹 帝國經貿大樓
B9	05 月 17 日 ~ 19 日	台北 建國大樓
B10	06 月 07 日 ~ 09 日	台中 文化大學推廣部
B11	06 月 21 日 ~ 23 日	高雄 文化大學推廣部
B12	07 月 11 日 ~ 13 日	新竹 帝國經貿大樓
B13	07 月 18 日 ~ 20 日	台北 建國大樓
B14	08 月 15 日 ~ 17 日	台中 文化大學推廣部
B15	08 月 29 日 ~ 31 日	高雄 文化大學推廣部
B16	09 月 19 日 ~ 21 日	新竹 帝國經貿大樓
B17	09 月 26 日 ~ 28 日	台北 建國大樓
B18	10 月 25 日 ~ 27 日	高雄 文化大學推廣部

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 31 期	第一階段	06 月 26 日～ 30 日
	第二階段	07 月 03 日～ 07 日
	第三階段	07 月 17 日～ 21 日
	第四階段	07 月 24 日～ 27 日
進階 21 期 (原 20 期末開班)	21 - 1	08 月 16 日～ 18 日
	21 - 2	08 月 21 日～ 23 日

輻射防護繼續教育訓練班*

三小時	04 月 13 日	高雄
	05 月 26 日	台北
	06 月 02 日	新竹
	06 月 15 日	高雄
	08 月 25 日	台中
六小時	09 月 06 日	台北
	04 月 26 日	新竹
	05 月 04 日	高雄
	05 月 16 日	台北

鋼鐵建材輻射偵檢人員訓練班*

鋼	04 月 27 日～ 28 日	新竹 帝國經貿大樓
	05 月 23 日～ 24 日	高雄

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 313 李貞君（專業人員、
鋼鐵建材、
繼續教育）

315 邱靜宜（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 1 次輻射防護及操作人員測驗

報名期間：民國 106 年 2 月 13 日起至 3 月 3 日截止。

測驗日期：民國 106 年 4 月 29 日(星期六)。

測驗地點：

台北試區 - 考試院國家考場(台北市文山區木柵路 1 段 72 號)

高雄試區 - 高雄市立三民高級家事商業職業學校(高雄市左營區裕誠路 1102 號) ([相關網址](#))

國內訊息

原能會對 106 年 3 月 28 日有關媒體報導「蘭嶼核廢場運出 5 噸廢鐵 居民憂輻射污染」之回應說明

有關原住民族電視台報導，蘭嶼貯存場運出 5 噸廢鐵，當地居民擔憂輻射外洩乙事，經原能會查證後說明如下：該批廢鐵係台電公司蘭嶼貯存場去(105)年遭颱風吹毀之鋼構廠房鐵皮浪板，於鋼構廠房修復後汰換下來之廢棄浪板，屬於一般事業廢棄物，不具放射性，亦未遭受污染。因蘭嶼地區無法處理該批事業廢棄物，故委託台灣本島的廠商，運回台灣處理。相關合約已完成簽訂，當日承包商依合約執行搬運作業，於開元港遭當地居民攔下，隨後該批廢棄物運回蘭嶼貯存場存放，未運回台灣。該批廢棄物離開蘭嶼貯存場前，均依場方輻射管制作業規定，執行偵測且確認無污染後放行，並開立無污染證明，以供承包商進行後續處理作業。台電公司蘭嶼貯存場亦依據程序書規定，留存相關偵檢紀錄備查。鑒於當地居民反對由開元港進行廢棄物回運作業，台電公司決定修改運送合約內容，改由龍門碼頭進行廢棄物回運作業。本案經查證後，該批廢鐵非屬放射性廢棄物，無輻射外釋之疑慮。對於台電公司蘭嶼貯存場之各項輻射作業，原能會將嚴格把關，請民眾放心、安心。

新增 SIEMENS MAMMOMAT Fusion 數位式乳房 X 光攝影儀輻射醫療曝露品質保證作業操作程序書及校驗紀錄表

「SIEMENS MAMMOMAT Fusion 數位式乳房 X 光攝影儀輻射醫療曝露品質保證作業操作程序書及校驗紀錄表」已公布於原能會網站，請點選相關網站即可下載瀏覽。[相關網站](#)。

輻射偵檢儀器操作研習活動

有鑑於輻射偵檢儀器之使用日益頻繁，且輻射偵檢儀器種類多、功能複雜，為協助檢測者正確使用輻射偵測儀器，並提升檢測結果解讀之能力，原能會規劃辦理輻射偵測儀器操作研習活動。

活動時間：2017-04-07(星期五)。

活動地點：新北市金山區公所 4 樓會議室。

活動對象：關心輻射安全的地方民眾、公民團體及政府機關等。

活動報名：(活動報名人數 50 人為限，請儘早報名)

相關連結：[線上報名](#)、[報名表](#)

原能會對 311 大遊行「核廢料處置動起來」之具體回應

原能會正積極審查台電公司核一廠除役計畫，預定 106 年 6 月底完成審查，另亦要求台電公司於 107 年底及 110 年中如期提出核二廠及核三廠除役計畫。原能會將加強除役管制之公眾參與，廣泛聽取各界的意見，做好除役管制作業，落實 2025 非核家園的目標。

針對台電公司未依時程選定低放處置設施場址，原能會已依法開罰 1000 萬元要求改進，並完成台電公司「低放處置計畫替代應變方案的具體實施方案」及「蘭嶼貯存場遷場規劃報告」兩項報告的審查。在核廢料搬離蘭嶼及核電廠前，原能會將持續嚴格監督台電公司，做好貯存相關之安全營運工作；同時嚴密監督蘭嶼及核電廠地區的環境輻射監測，以確保民眾健康安全及環境品質。

原能會預告修正「核子事故緊急應變法施行細則」部分條文

原能會預告修正「核子事故緊急應變法施行細則」部分條文，修正草案如附件。對於本公告內容有任何意見或建議者，請於本公告刊登公報之次日起六十日內(106 年 5 月 8 日前)陳述意見或洽詢：承辦單位：本會核能技術處；地址：新北市永和區成功路 1 段 80 號 4 樓；電話：02-2232-2346；傳真：02-8231-7852；電子郵件：wykao@aec.gov.tw。附件：[修正草案](#)。

原能會與公民團體共同執行核二廠環境輻射平行監測

原能會與公民團體共同於 106 年 3 月 8 日執行核二廠環境輻射平行監測，並對公民團體所關切的問題進行討論與釐清。其中針對公民團體於 3 月 2 日本會所召開之「公眾參與平台會議」上所提建議予以回應，包括辦理輻射偵測相關訓練，讓關心環境輻射安全之公民，可以瞭解儀器特性，與本會共同監督查證等。活動當天經公民團體指定地點後，隨即由原能會核能研究所進行偵測與取樣，分析結果將擇日由雙方推派專家審議同意後公布。

輻射災害潛勢

輻射災害潛勢資料公開辦法已於本(106)年 3 月 3 日發布施行，相關災害潛勢資料已公布於本會網站，請點選相關網站即可下載瀏覽。[相關網站](#)

106 年 2 月輻安預警自動監測日平均劑量率變動圖

106 年 2 月輻安預警自動監測日平均劑量率，均在背景變動範圍 (0.2 μ Sv/hr) 內。[\(相關網址\)](#)

輻射偵測中心 105 年下半年「臺灣地區放射性落塵與食品調查半年報」

105 年 7 月至 12 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及食品、飲水中放射性含量調查結果，其偵測項目包括直接輻射、落塵、水樣、農畜產物、沉積物試樣及國產與進口食品、飲用水等試樣之放射性分析，共計 561 件次，各項環境輻射監測及放射性含量分析結果皆符合法規劑量限值。

輻射偵測中心 105 年第 4 季「龍門電廠運轉前環境輻射監測季報」

105 年 10 月 1 日至 12 月 31 日期間，行政院原子能委員會輻射偵測中心執行龍門電廠運轉前環境背景輻射調查。監測類別有直接輻射、落塵、植物、水樣、農畜產物及沉積物試樣等，採取熱發光劑量計、空浮微粒、草樣、飲用水、地下水、河川水、海水、奶樣、岸沙、河沙、海底沉積物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 558 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，評估龍門電廠周圍民眾可能接受最大個人劑量符合法規劑量限值。

輻射偵測中心 105 年第 4 季「臺灣地區核設施環境輻射監測季報」

105 年 10 月 1 日至 12 月 31 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、蘭嶼貯存場。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、葉菜、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 2180 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 0.025 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。

海外信息

福島第一核電廠進行一號機圍阻體調查

東京電力公司(Tepco)使用機器人進行一號機內部的輻射與溫度量測，希望蒐集的資料以及錄製的影像可以定位機組內部的融化燃料。Tepco 使用由日立-通用公司以及國際核電廠除役研究所(IRID)所建造的 PMORPH 機器人於 3/18 進行一號機一次圍阻體的底座週邊探索。這次的調查中，機器人在一樓的格柵區域進行移動，於該處量測到的劑量為 7.8 西弗/小時。離一次圍阻體地下樓層一公尺高的位置，記錄到 1.5 西弗/小時的劑量。機器人並記錄到一次圍阻體內部的溫度為 14-23°C。

上個月由東芝公司以及 IRID 建造的蠍狀機器人被送入福島第一核電廠二號機一次圍阻體內部。Tepco 表示："雖然機器人被擋住以致於無法達到基座的位置，仍然得到反應器底部重要的環境資訊"。計讀數據顯示，機器人到達的圍阻體區域溫度在 16.5°C 左右，而輻射劑量率大約為 210 西弗/小時，顯著的高於一號機的量測值。

Tepco 目前正準備使用機器人對三號機進行類似的調查。

UNSCEAR 研究來自電力的輻射曝露

聯合國原子輻射效應科學委員會（UNSCEAR）表示“世界上發電技術的配比會隨著因應氣候、環境、資源、政治、以及經濟等條件而改變。政府與研究者會進行不同種類的比較研究並且考量科技對於公眾、工作人員以及環境的影響。在本評估中游離輻射曝露只是各種因素中唯一考量的因素”。

UNSCEAR 於 1993 年曾經發佈相同的研究。委員會表示輻射外洩所造成公眾曝露的評估方法已進行更新，而新的方法“具有較高的彈性可廣泛的用於考量各種發電技術”。委員會主要利用來自於工作人員劑量計的曝露資料，重新評估不同發電技術的職業曝露。

UNSCEAR 2 月 8 日發表該機構對核能、燃煤、天然氣、生質能、地熱、風力與太陽能發電的輻射曝露比較結果。

委員會表示儘管輻射曝露程度非常低，各種發電技術對全球民眾的影響中，煤炭循環貢獻超過一半的輻射劑量，而核燃料循環只貢獻了其中不到五分之一的輻射劑量。由燃煤發電所造成的集體劑量為 670-1400 人西弗，數值會因電廠的年齡而異，核能發電則是 130 人西弗，其他如地熱發電為 5-160 人西弗，天然氣發電為 55 人西弗，燃油發電為 0.03 人西弗。

UNSCEAR 也以 2010 年做為參考年，評估單位電力所造成的輻射曝露。委員會的結論顯示：在短期內燃煤與核能發電的數值是差不多的，燃煤發電為 0.7-1.4 人西弗/十億瓦而核能發電為 0.43 人西弗/十億瓦。

報告中提出：經過數百年後，“長半衰期的放射性核種所造成的微量輻射劑量經由長期累積後，導致核能發電所造成的集體劑量增加”。然而，“即使考量 500 年內全球循環之長半衰期核種的影響”，燃煤發電每單位電力所產生的集體劑量（對於公眾與工作者）數值仍高於核能發電。

此報告表示嚴重核事故(例如車諾比核事故以及福島核事故)所造成的直接曝露，很難與例行的外釋相比。UNSCEAR 表示嚴重核事故對全球大眾所造成的集體劑量“數個數量級的高於”一般操作情況下每年各種發電技術的貢獻。“重要的是，意外事故後劑量的分佈將侷限於地理上的關聯”。

UNSCEAR 表示：這項結果並不可單獨的指出某種發電技術優於另一發電技術。但當各國選擇適合的發電配比時，可以將輻射曝露列為考量的因素之一。

福島居民所受到的輻射量，可能遠低於原先想像的

居民實際上受到的輻射曝露劑量大約是直升機測量數據的 15%，僅為日本政府原先估計的四分之一。

2017 年 1 月 27 日，在學術界享有盛譽的 science 網頁刊登了一篇跟輻射防護有關且重要的新聞。我們知道從地面上到飛機所在的幾萬公尺高空，人們的生活環境充滿了輻射，但是沒有人知道估算出來的輻射劑量和實際接受到的差距是多少，或許在某些輻射工作場所規定要配戴輻射劑量徽章並記錄之，但是從來沒有長達一年以上且無論是工作或日常生活都配戴輻射劑量徽章並記錄下來的大規模實際案例。

現在出現了第一次的實驗性研究。2011 年發生了福島核災後，有一群居住在福島第一核電廠附近的 65,000 名日本公民，他們沒有選擇撤離，而是開始測量並紀錄自己的輻射曝露劑量。科學家在分析這成千上萬的來自公民的數據後，得到一個驚人的結論：當初的預估值為實際值的四倍之多！

來自美國俄勒岡州立大學核子科學與工程學系的保健物理學家 Kathryn Higley 說：「這項研究是非常重要的，因為在核子事故後進行長時間監測個體受到輻射曝露的案例很少，大多數在事故發生的當下或是不久後就遠離事故地點，要如此大規模分發



A child shows off his dosimeter.

圖片來源：WOSTOK PRESS/MAXPPP

編譯

張文杰

清華大學工程與系統科學所碩士，
現為清華大學工程與系統科學系研究助理。

出處

2017 年 1 月 27 日

Science

Fukushima residents exposed to far less radiation than thought

[原文連結](#)

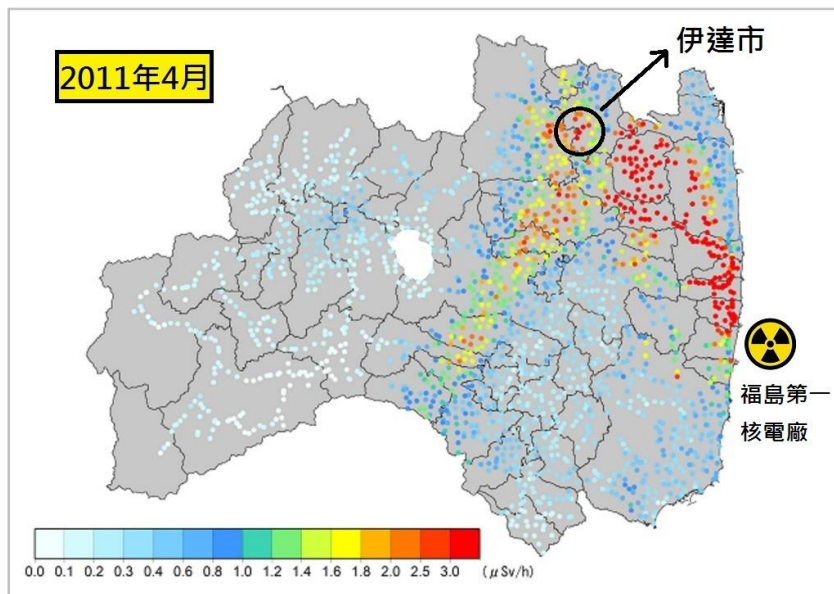
輻射劑量佩章的成本和難度很高。車諾比核災後，烏克蘭等地是有少數的相關研究，但是都受到了一部分的限制，並非完整的監測數據。」

附圖是福島縣在 2011 年 4 月的輻射分布圖，伊達市雖然距離福島第一核電廠 60 公里遠，但是當地的輻射劑量跟附近其他進行撤離城市的劑量是類似的水平。伊達市的仁志田昇司市長做了一個與眾不同的決定，他選擇不要撤離，然後發放輻射劑量佩章給市民。

仁志田昇司市長在 2014 年國際原子能總署的一次會議上表示，儘管調查顯示伊達市的輻射劑量跟附近進行撤離的城市是類似的水平，日本政府也沒有強制命令撤離，只是建議伊達市要進行撤離。但是他決定採取屬於自己的獨立行動，而不都依靠政府。他決定進行伊達市的輻射除汙工作，並發放輻射劑量佩章去監測個人的輻射曝露劑量，此作法在 2011 年 5 月爭取到日本政府的 10 億日元資金。

仁志田昇司市長表示，輻射劑量佩章的大小約為一個糖果棒大小，測量放射線的種類為伽瑪射線。孕婦和 16 歲以下的青少年、兒童是第一批發送輻射劑量佩章的對象，總計有 9,000 名。後來在日本官員的幫助之下擴大了監測的對象，到了 2012 年，幾乎所有約 65,000 名居民都獲得了一個輻射劑量佩章。然後每 3 個月居民會把輻射劑量佩章拿到指定場所進行記錄與更新，總計超過 52,000 名的居民參加了此次行動，時間上是至少一年。

日本政府在這段時間對福島縣進行了 6 次輻射調查。方法是在直升機上放測量輻射的儀器去測量地面上的放射性銫，接著研究人員使用比例法將該數據轉換為地面上的估計輻射劑量。然後因為人們會受到建築物的保護而減少輻射的接受劑量，所以日本政府的科學家假設人們每天有 8 個小時在戶外活動、有 16 小時是在室內，根據此假設，人們接受的輻射劑量是地面上估計輻射劑量的 60%。



圖、2011 年 4 月福島縣的輻射分布圖與伊達市的所在處
(資料來源：福島縣政府 <http://fukushima-radioactivity.jp/pc/>)

福島醫科大學的放射學家 Makoto Miyazaki 和東京大學的物理學家 Ryugo Hayano 從伊達市居民身上的輻射劑量徽章取得了成千上萬的數據，並將這些數據與日本政府用直升機所估計出來的數據進行比較。科學家們得出的結論發表在上個月(2016年12月)的「輻防學報(Journal of Radiological Protection)」，報告中指出居民實際上受到的輻射曝露劑量大約是直升機測量評估數據的15%，跟日本政府之前預估的輻射劑量相比只有四分之一，顯示出進行室內掩蔽的成效比想像的好上許多。

對於兩者差距這麼巨大，研究人員給出了幾個原因，主要是「居民每天在戶外的時間沒有8個小時這麼多。」

對伊達市的居民來說，好消息是他們接受到的輻射劑量遠低於原先的預估，也遠低於建議撤離的輻射水平，甚至對於健康的影響也是微乎其微；壞消息是他們當初花了大把銀子與精神做的除汙工作，例如去除表土與樹皮，很可能是不必要的。

研究團隊希望此項研究結果可以幫助到其他研究人員更準確地去預估實際輻射劑量，因為採取撤離居民的作法是會伴隨相當的負面影響。然後也希望可以幫助那些被撤離的居民，讓他們更早返回家園。

Decontamination Activities



Wiping off rooftop and walls



Wiping off a gutter



High pressure water cleaning of a drain pipe



High pressure water cleaning of paved road



Mowing and removal of sludge



Removal of crushed stones and topsoil, and cover with clean soil

圖片來源：日本福島復興工作站

體內曝露和體外曝露不一樣

我們無時無刻都曝露於輻射中，所以「有或沒有」就不是重點了（因為「沒有」並不存在），「劑量的多寡」才是我們應該關心的。

經常在一些愛鄉土的社會團體討論到關於輻射污染食品的場合中聽到這句話，表面上是一句兼具學術與哲理的箴言，事實上是用來堵我們這些握有知識霸權的保守反動份子的嘴，因為連我們都無法否認兩者有其相異之處。但別忘了我們可是有知識霸權的，你要是再進一步問他：「哪裡不一樣？」，這些人就會立刻脫離戰場，重新搬出「我只是一個關心下一代的媽媽」之類的防護罩，頓時間我們這些花費青春讀書的人又全變成壓迫人民的威權遺毒了。

這讓我想到一個小時後就聽過的腦筋急轉彎題目：「一公斤的棉花和一公斤的鐵，哪個比較重？」多半沒翻到背面偷看答案的小學生都會直覺認為是鐵，因為在他們不到十年的成長經驗中，只要一小塊的鐵就遠比一大包的棉花重多了，鐵當然比棉花重啊！但是題目已經講了兩個都是一公斤，當然是一樣重，這時候出題目的小朋友（已經偷看過答案的那個）可以自得意滿的嘲笑答錯的小朋友笨了。作為一個成人，當我們提到重量的時候，直覺就會想到要秤一秤是幾公斤；談到輻射的時候，當然也要知

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)

道要量一量劑量是幾西弗。如果你問別人棉花和鐵塊哪個重的時候，對方回答你：「棉花和鐵不一樣。」你不會覺得這個人腦袋有問題嗎？

所謂的「體外曝露」是指輻射源在人體周圍，換言之，只要你遠離射源或是關閉射源就不會被曝露；「體內曝露」則是射源（原則是放射性核種）在某種情況下長時間滯留在體內，因此在該射源完全衰變完畢前（也就是瞬時劑量歸零以前）你都會持續接受到曝露。就上面的敘述，「直覺上」會覺得體內比較恐怖，這種直覺就像是對鐵的直覺一樣，如果直覺可以當飯吃，這世界上就不會有饑荒了。所以我們回到問題的源頭，依舊還是劑量的問題，不談論劑量就沒辦法談論生物效應。這時候就會有人問說：「那體內曝露和體外曝露的劑量哪個比較大？」我哪知道啊！在沒有更多資料的情況下你能判斷棉花和鐵哪個重嗎？所以我們先來談談劑量是什麼，然後再來談體內曝露的劑量是怎麼評估的。

輻射劑量是一個物理量，也是一種概念，用來描述單位質量（比如說：每公斤、每公克）的人體組織從放射線（高能光子、粒子）吸收了多少能量，由此可知，如果要知道劑量是多少，至少有三樣東西你要知道：什麼射源？能量多高？什麼組織？在這裡我就不談怎麼測量與計算了，因為再講下去大家就會開始意識模糊了，不過在這邊特



圖片來源：原子能委員會

別要強調的一點是，實務上，我們面對一個特定被曝事件造成的劑量，並不能直接解讀為某人有多少機率會得到癌症，甚至不能解讀為這群人有多少人會得到癌症（ref），劑量僅是一個讓我們客觀了解曝露嚴重性的「指標」。

體內曝露的劑量計算有兩個很重要的資訊，一個是「物理半衰期」，意思是說，如果我們把那個核種放在路邊不去碰它，它要花多少時間才能讓活性降到一半；另一個是「生物半衰期」，用來描述人體攝取一大批這樣的核種時，經過正常新陳代謝之後，總量降到一半的所花的時間。物理衰變和生物代謝是同時進行的，所以整體而言我們可以算出一個「有效半衰期」，表示你實質的瞬時被曝劑量變化。我們在做劑量評估的時候，通



圖片來源：原子能委員會

常是考慮攝取放射性核種後連續五十年的累積劑量，所以不要再對我跳針：「可是會累積！可是會累積！」了，您的需求，我們聽見了。

那麼什麼時候會遭受體內曝露呢？答案是：無時無刻，而且是從你是受精卵的那一刻就開始了。很遺憾的，人體是由元素構成的，自然界的元素又存在一定比例的放射性同位素，這世界上也許存在身上一滴放射性核種也沒有的人（理論上），但那不是你，數量也沒你想像中那麼多，最慘的是，就算你自盡了也沒用，因為元素才不管你是死是活，只要它還有活性的一天，就算是你被埋到土裡插了香，它還是得繼續衰變下去，輻射不僅僅無處不在，而且生死與共，連換帖的結拜兄弟都沒那麼有義氣。

既然我們無時無刻都正在被輻射曝露，所以「有和沒有」就不是重點了（因為「沒有」並不存在），「劑量的多寡」才是我們關心的，這也是為何世界各國對食物、飲水的放射性有所規範，原則上都符合累積劑量一年不得超過一毫西弗的標準。換言之，假設你從出生就開始接受這類的環境曝露，至少要經過一百年才有機會超過「一百毫西弗」那條尚未觀察到顯著生物效應的安全線。

講到這裡，大家應該都十分清楚體內曝露和體外曝露的確有其相異之處，就現代日常生活而言，體內曝露的機會多但是劑量低，體外曝露的機會少但是劑量較高（例如：接受放射性診療或是意外撿到一顆鈷六十磚塊），然而不論是哪一種曝露，原則上都得符合國家法令標準，而國家法令標準也都是依據現有的科學證據所訂定的。經常聽到一種論調，說：「科學研究的結果也不一定對，要是明天就被推翻了怎麼辦？」那就等被推翻再來跟我討論好嗎？人生是很寶貴的，我們沒辦法花那麼多時間去防禦完全沒有概念的東西，否則政府早就該成立「外星人入侵無差別殘殺人類因應小組」了，我們能依靠的，就是經過不斷驗證而得到的知識。下次和別人討論的時候要是再有人噏你「體內曝露與體外曝露不一樣」，就溫柔的看著他的雙眼說：「敢問兄台究竟是何處不一樣？簡答 10 分不倒扣」吧！

簡介美國低階核廢料處置 的歷史演進及發展



本文的重點是美國對低階核廢料的處置，筆者從有關的歷史背景切入來讓讀者了解處置的發展，希望藉由本篇內容的討論能增進國內對低階核廢料處置相關的議題有更深入的了解。

前言

第二次世界大戰後，以美國為首的一些國家考慮將核子的軍事用途轉移為和平的應用。美國總統艾森豪在 1953 年紐約聯合國大會上宣讀的“原子的和平用途”(Atoms for Peace) 一文，奠定世界核能和平應用發展的基石。與此同時，美國國會通過了原子能法案，責成當時的原子能委員會 (Atomic Energy Commission) 專職處理這方面的事務。

更重要的發展是 1974 年的能源重組法案 (Energy Reorganization Act)，該法案將原子能委員會一分為二，民用的核子用途由核能管制委員會 (簡稱核管會，Nuclear Regulatory Commission, NRC) 專職管理，而國防的核子用途則由能源部 (Department of Energy, DOE) 管理。在此，筆者要特別強調美國核管會的獨立性。此委員會設有主席作為召集人，但最終的決定權卻是五位委員的多數決，其決議絕不受上級行政機關或國會的干擾，委員會在營運上擁有絕對的自主權。

作者

陳士友 博士

NCRP 科學委員會 SC5-1 (大型核子或輻射事故後期復原階段的決策) 主席、美國伊利諾理工學院 Director of Professional Health Physics Program

低階核廢料處置在美國的核能發展上佔有極重要的地位，而這些發展大都在核管會領導下完成。本文的重點是美國對低階核廢料的處置，而從有關的歷史背景切入更能了解處置的發展。由於我國對核廢料處置大致沿襲美國的現行法規，筆者也希望藉由以下的討論能增進國內對相關的議題有較深入的瞭解。不過歷史長遠，本文只能在其整體性上作介紹，當然這也包括了最近針對低階核廢料法規作了重要的修訂及其意涵。

低階核廢料定義及其範疇

美國早期對低階核廢料的定義並不清楚，直到八零年代在制訂核廢料政策法時（依 1980 年低階核廢料政策法所訂的當前法規 10 CFR 61）才訂出：**低階核廢料指不包括下列的核廢料 - 高階核廢料 (high level waste), 超鈾核廢料 (transuranic waste) 及法律所規定的核子尾礦 (mill tailing)。**

這定義在低放射性廢棄物處置法規 (10 CFR 61)中得到了比較確切的規範。它大致上依照了核種的輻射毒性 (分成 α 、 β 及 γ 放射核種)、輻射活度、與半衰期擬定出三個類別 (從低到高)：A 類、B 類、和 C 類。還有更高的一類，也就是所謂“超 C 類”(Greater Than Class-C, or GTCC) 的低放射性廢棄物。然而 GTCC 包含相當高的輻射濃度(幾近於高階核廢料，例如反應器的內部組件)，此一類別的處置方式不同於其他低階廢料，故留在後面章節討論。

低放射性廢棄物一般特性分類，如表一，詳細的規格請參照 10 CFR 61.55 法規。基於這個認定，以下是各個廢料類別在陸地淺掩埋 (shallow landfill) 前必須做的處理規範：

1. A 類低階放射性廢棄物：依規定滿足以下有關的規定：包裝規定、固化規定、無腐蝕性、無爆裂性、無毒性、無易燃物、無高壓及不

表一 低階放射性廢棄物的一般特性

分類	核種的濃度	型態	實例	危險期限
A 類	低濃度	需達到最低要求 (不需穩定性要求)	污染的衣服、紙張、鞋套、及垃圾等	一百年
B 類	較高濃度: 約為 A 類的 10-40 倍	需達到最低要求 (另加三百年的穩定性要求)	反應器的化學過濾器和離子交換器	一百年(廢料應保持穩定型態)
C 類	最高濃度: 約為 B 類的 10-100 倍	需達到最低要求 (另加三百年的穩定性要求)	反應器周邊金屬、高活度密封射源等	五百年(廢料應採深埋或使用誤闖者障壁)

帶傳染病源。若廢棄物又具有穩定性地條件則廢棄物之間無需於掩埋時加以區分。

2. B類低階放射性廢棄物：需滿足較A類更嚴格的規定，包括所有A類廢棄物的規定另加穩定性的規定。
3. C類低階放射性廢棄物：需滿足較B類更嚴格的規定，包括所有B類廢棄物的規定，另加對未來誤闖廢料掩埋場人士的保護。

A類廢棄物涵蓋範圍相當廣泛，大部分僅帶有微量放射性殘留的廢棄物，例如實驗室用過的鞋套、衣物等，這一類的廢棄物在一百年後大致就沒有危險性。B類廢棄物包括核子化學過濾器及離子交換器等。這類廢棄物的危險期限大致在

低放射性廢棄物：一般見諸於報章雜誌的「核廢料」，實際上是「低放射性廢棄物」的稱呼，英文名稱為「Low Level Waste」。主要來源為核能電廠運轉時產生的廢水、過濾用的樹脂、受污染的廢棄衣物、手套等；及電廠除役時被中子活化的核反應器組件及拆除受污染廠房產生之廢棄物。另外，來自醫療、農業、工業、研究等不再使用的放射性物質與射源，及受其污染廢棄的衣物與器具等。因有可能沾染到低程度的放射性元素(但不是核物料)，故稱為「低放射性廢棄物」。低放射性廢棄物分為可燃性(如擦拭紙類、防護衣、塑膠、手套等)及不可燃性(如工具、零件、保溫材等)兩種。這兩種廢棄物產生之後，均須經過減容及水泥固化處理，裝桶成為「固化體」以便處置。

高放射性廢棄物：英文名稱為「High Level Waste」，屬高度放射性污染的廢棄物。其來源為核能電廠、清大及核研所用過核子燃料(Spent Fuel)；及用過核燃料為回收其中可再利用的核物料(鈾、鈾)等，經過一連串化學分離的「再處理」程序，產生具有很強的放射性廢液，經再處理後與玻璃固化而得。

一百年內，但應要求廢料的穩定型態。而C類廢棄物，如反應器周邊的金屬則有相當高的輻射活性，這類廢棄物的危險性可能維持到五百年以上(見表一)。

美國民間產生的低階放射性廢棄物每年大約100,000 立方米。以2004年為例，這些廢棄物的總活度大約為 1.30×10^{16} 貝克(或是10,345,000 居里)，其中A類廢棄物約占99%的容積量，而C類廢棄物卻占了69%~97%的活度。近十年來，在各單位積極努力下，廢棄物的容積大大的減少。但是，最近由於核電廠相繼除役的原因，使得廢棄物的容積又有增加的趨勢。

低階核廢料處置的歷史沿革

最早期的處理方式-海拋

早期對核廢料的處理，沒有全盤瞭解，也沒有迫切性，所以並未受到重視。也因此，當局在核廢料的處理上，大大的低估它的難度與重要性(見註一)，也因此耽誤了往後核能的發展。這些作為反映出當時的認知和心態，在當時固然無可厚非，但卻導致爾後核能運作上的一些窘境。

早期(1946 - 1970)美國選擇的處理方式就是直接海拋(Ocean Dumping)，將核廢料棄置在深海裡。這在當時是個方便且合理的選擇，而且在六零年代初期更是得到美國國家科學委員會(National Academy of Sciences)的認可。當時的理解是：藉由大量的海水，將有限的核廢料大量的稀釋，所以看不出長期對人類及環境的危害。尤其絕大部分的核廢料所含的核種半衰期都很短，

註一. 例如在核能歷史上一直被人垢病的官方言論莫過於美國原子能委員會主席路易史特勞斯(Lewis Strauss)。他在1954年9月16日就職時很樂觀地的預告未來的核能是“便宜到不需要用電錶度量”(“too cheap to meter”)。史特勞斯在1953年被艾森豪總統任命為原子能委員會主席，當時的過度樂觀全然無視爾後衍生的一系列的核能問題包括核廢料的長期處置。

所以它們容易隨著時間消逝。五零年代時，美國海軍在軍用核廢料上已經累積了相當的海拋經驗，所以美國原子能委員會採取了國家標準局 (National Bureau of Standards) 的建議，開始進行海拋的處置。該建議選擇水深至少 2,000 米以上海域作為海拋的場所。核廢料裝填在 55 加侖的鋼桶內，以水泥固化後即可填海，水泥一方面可以強化鋼桶，同時也可確保整個廢料包裝有足夠的重量沉入海底。

前後被選定的深海海拋場址共有 65 個，其中太平洋有 5 個主要場址、墨西哥灣 1 個、大西洋有 11 個。約 90% 低階廢料處置集中在其中的 3 個主要場址。

七零年代環保意識興起，美國環境保護法通過，同時國際上也達成確保海洋不再繼續受到核子污染的共識，加上海拋處理日趨昂貴，因此美國到了 1970 年幾乎停止了海拋的運作。1972 年制訂「防止傾倒廢棄物和其他物質污染海洋公約」(簡稱倫敦公約, London Convention)，直到 1993 年世界各國才簽訂協議，終於替海拋的歷史劃下了句點。

早期陸地掩埋處理方式及其衍生的問題

六零年代後期，陸地掩埋的處理方式逐漸受到重視。在原子能委員會的支持下，1971 年時民間設立的商業掩埋場所已擴展到 6 個，包括：畢提 (Beatty, Nevada)、麥克斯平地 (Maxey Flat, Kentucky)、西谷 (West Valley, New York)、里奇蘭 (Richland, Washington)、班維 (Barnwell, South Carolina) 及薛菲德 (Shelfield, Illinois)。其中里奇蘭及薛菲德兩個掩埋場直屬原子能委員會管轄，其他 4 個則歸所屬各州管轄。

早期的場地選擇條件缺乏具體的科學基礎，大概僅考量其地理特質是否能延長在地面下核種的遷移。目前所考慮的重要因素，如：長期的地下水的水文、地質的分析、天候的條件、及廢料本身的處理，當時都付之闕如。其處理方式大致上就是簡單的進行場地挖掘 (約 15 米深)，放入核廢料後加上表面覆蓋來進行掩埋。為了安全的考量，場地四週再加上圍欄。

這種設計的概念，乃是要藉著大自然本身所能提供的特質來阻斷或延遲廢料核種未來在環境中可能的遷移，靠著自然界的屏障提供足夠的時間，等待核廢料蛻變到安全的範圍內。然而，這個想法並未如願，經過了數年的營運後，麥克斯平地、西谷及薛菲德等幾個掩埋場陸續發現污染的情況，直接影響了地上及地下水的水質。這些缺失來自於廢料包裝及場所本身的設計問題，包括：不夠紮實的廢料包裝、廢料底層沒安裝墊布、廢料遭到土壤的侵蝕效應、土壤的鬆動及坍塌等。這 3 個核廢料掩埋場也因此被永久關閉。

其他 3 個核廢料場也陸續出現了不同的問題。在畢提及里奇蘭發生廢料包裝及運輸的違規問題，一度被宣告暫停營運。南卡羅來納州的班維場則是面臨太多的廢料湧入，加上三哩島意外事故後大量的除污廢料，南卡羅來納州長在八零年初不得不宣告將所有運至低階核廢料場的廢料數量在兩年內減半接收。

有鑒於此，美國在七零年代晚期就開始開拓一系列因應未來挑戰的方針。這方面的成就，首推現行低階廢料法規 (10 CFR 61) 的制訂。此法規奠定了美國在低階核廢料處理上有系統性和一致性的處理方式。經過了二十幾年來的實際運作所累積的經驗，證明了此法規的嚴謹與可靠性。

低階廢料法規(10CFR61)的制定

七零年代在美國核能史上是一個重要的時期，大部分的核能電廠都在這期間興建而一直延續到 1979 年三哩島核子事故後才告一段落(台灣的三座核能電廠也是在七零年代末期到八零年代初期完成啟用)。也因三哩島事故，社會上對低階廢料的處置開始重視和期待，相關議題也漸漸的浮上檯面。

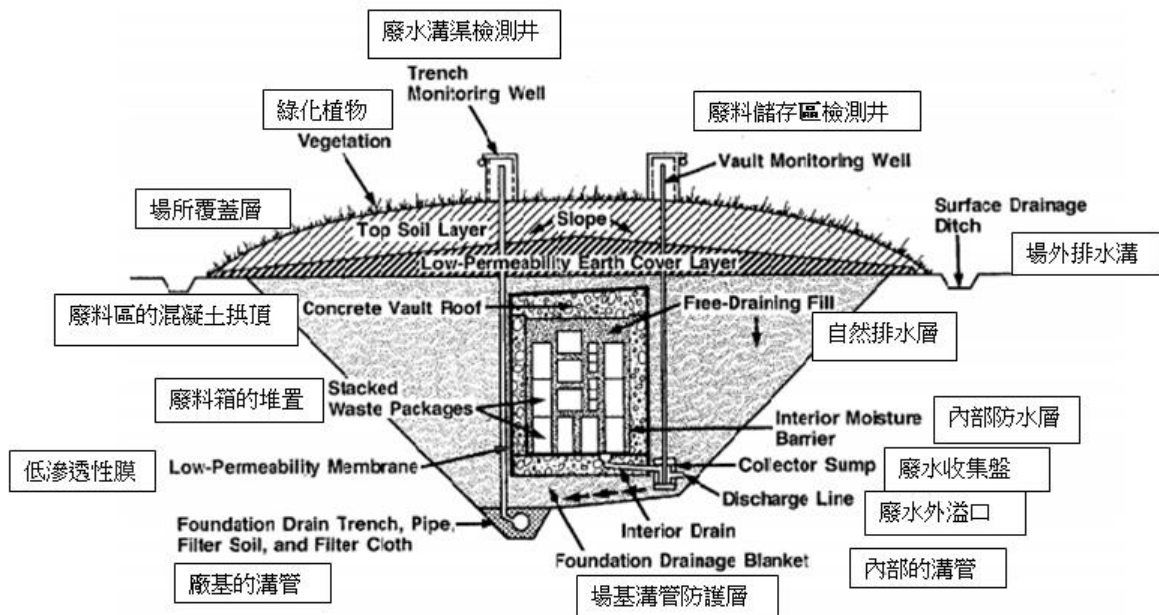
低階廢料法規的制定

美國核管會於 1975 年正式營運，基於先前的經驗和教訓，核管會於 1978 年就開始著手發展有關低階廢料法規的制訂。幾經研究後，委員會決定最好的方向乃是發展可以包含所有的低階廢料，並涵蓋所有有關陸地掩埋方式的法規。然而這個思維遇到兩項挑戰，一個是所訂的法規必須適用於所有美國不同的地區，而這些區域可能具有截然不同的環境特質；二是長期輻射防護的考

量，當政府當局在長遠的未來可能失去有效控制時，針對可能無意闖入者(例如探礦者、考古者等)必須作妥善的保護。

在這些考慮下，委員會將低階核廢料清楚地分成三個不同特性類別(也就是上述的 A, B, 和 C 類)。同時在處理地域的差異上也發展了兩組場地選擇的模式和參數：通用性 (generic)及場地特殊性 (site specific) 的模式。在這思維下，決定了法規須同時提供場地通用性與特殊性的規範，還要訂出嚴格的標準，諸如：場址的選定、場地的設計、執照的申請、營運的監督、場地長期的穩定、至廢料場封閉後的環境考量等。更重要的是，法規上必須明訂以下的設場標準：

- 充分利用場址的天然有利條件，加上工程設計的補強
- 明訂場址選擇的條件和標準
- 列舉並規範營運的方式和條件



圖一. 低階廢料陸地掩埋場設計示意圖 (取自 NUREG-1573)

這些標準和規範都詳述於美國核管會出版的 NUREG-1200 一書中 (標準低階核廢料掩埋場執照申請審查規範書)。圖一顯示低階核廢料掩埋場的設計概念中一些重要的設計及結構。

目前美國在這法規之下營運的低階核廢料掩埋場總共有 4 所。表二列舉了各個場所資料和執照上適用的範疇。

近年來有關低階核廢料的重要發展

低階核廢料法案

美國於 1980 年通過低階核廢料法案 (Low Level Radioactive Waste Policy Act of 1980)。法案規定 50 州 (另加波多黎各和首都華盛頓) 中的各州需互相結為聯盟州 (Compact States)，以各聯盟為單位各自發展低階核廢料的掩埋場所。同時規定這些廢料場所必須在 1986 年前成立並開始營運。在這規範下，總共成立了 14 個聯盟 (詳見：

<http://www.nrc.gov/waste/llw-disposal/licensing/compacts.html>，

其中 4 個聯盟為單一州)，其中 3 個聯盟代表了既有的 3 個低階核廢料掩埋場現址 (在當時位於德州安德魯鎮的掩埋場還沒建立)。由於各種政治和法律因素，沒有任何聯盟在時限內完成此法案之規定。

因此，國會於 1986 年通過了低階核廢料增訂法案 (Low Level Waste Policy Amendment Act of 1985)，將時限延到 1993 年。同時也增加一些新規定：諸如計畫沒完成時可處以罰金、承諾聯邦 (能源部) 輔助處理有關超 C 類低階核廢料 (GTCC)。另外也責成核管會制訂廢料的豁免法規以減少不必要的廢料。然而，還是沒有任何聯盟在規定的期限內興建新的低階核廢料場所。而最晚興建的德州安德魯低階核廢料掩埋場則到 2012 年才開始營運 (見表二)。

我們可以從這裡得出結論：**低階核廢料法案基本上並未達到預期的目標。**

表二. 美國目前商用低階核廢料掩埋場一覽表 (取自 NCRP 175 號報告)

低階核廢料掩埋場 (營運公司)	執照上批准的廢料類別	准許接受廢料來源的州 ^a	場所的允許容積量
班維·南卡州 (Energy Solutions)	A, B, C 類	大西洋聯盟州	每年 425 立方米
克萊佛·猶他州 (Energy Solutions)	A 類, 混合低階核廢料 ^b	對所有的州開放	1.16 百萬立方米 (有計畫增加)
里奇蘭·華盛頓 (US Ecology)	A, B, C 類	西北聯盟及洛磯山聯盟州	0.71 百萬立方米
安德魯·德州 (Waste Control Specialists)	A, B, C 類, 混合低階核廢料 ^b	德克薩斯聯盟州·也考慮對外州開放	0.065 百萬立方米 (商業廢料) 0.75 百萬立方米 (聯邦政府廢料)

註 a：廢料來源的限制在下一節討論。

b：混合低階核廢料乃是在廢料中同時含有管制的化學原料。

沒有成功的豁免法案

低階核廢料增訂法案中有一項是督促核管會加訂廢料的豁免法規。因此，委員會在九零年代初就開始著手研擬此一方案的架構。基本上有兩個思考的方向：個案及通案的考量，引用“微不足道”(de minimis) 的人身輻射劑量來規範豁免。例如：某些廢料如果在豁免值下，可以當作一般的工業廢料處理。初期以個案為出發點，事實上目前的法規已經作了不少個案的範例，諸如在 10 CFR 20 法規 (10 CFR 20.2004 廢料焚化) 允許某些廢料的對外排放。另一個很好的例子就是允許一些含短半衰期核種的廢料在蛻變了相當時間 (如十個半衰期) 後，就可以豁免成為日常的廢料。然而，委員會在諸多考慮之後決定走豁免的通案進行 (後來稱為 BRC 方案，Below Regulatory Concern 意即“低於法規的關注”)。然而在社會強大的壓力下，BRC 的法規也無疾而終。

九零年代晚期，國際原子能總署 (IAEA) 正式批准了輻射物清除 (Clearance) 的標準，美國核管會再次考慮以此為基礎，再進行一次法規的修正。這次所依據的基礎跟國際原子能總署一致，以 10 微西弗 (μSv) 極低的人身劑量為標準。然而，在經過數次與民眾的溝通大會及各界的批評後，這個修訂豁免條文的努力再次遭到挫敗。

有關超 C 類低階核廢料 (GTCC) 的處理

美國國會通過的低階核廢料增訂法案中規定，由能源部接手發展有關超 C 類低階核廢料 (GTCC) 的處理方案。美國能源部在 2016 年初發表了 GTCC 最後的環境評估報告 (DOE/EIS 0375) (按：此環評報告是由筆者在阿岡國家研究所時，所領導的研究團隊完成)。其中除了核管會所管轄的廢料外，還加上能源部本身生產的廢料。雖然總廢料

容積僅約 12,000 立方米，但其具有的輻射活度卻高達 160 百萬居里 (約 6×10^{18} 貝克) (這個輻射量接近日本福島事故的總放射量)。這些廢料包括被中子長期活化的金屬 (如反應器的內部組件或爐體)，及高活性的射源等。

環評報告對於 GTCC 廢料的處理總共提出 4 種方案 (不包括“無作為” No Action 的基本方案)，其中的首選方案 (Preferred Alternative) 乃是：廢料貯存在目前既有的超鈾核廢料 (Transuranic Waste) 的深層地質處置場 (位於新墨西哥州的 WIPP)。其他考慮的方案分別是：深坑掩埋 (Deep Borehole)、加強式陸地淺埋壕溝 (Enhanced Near-Surface Trench)、及地面上加強式的貯存構築 (Above Grade Vault Facility)。一旦經當局批准，這些方案會在未來研議後著手進行。

最近在法規上的重大修訂

個人認為美國在廢料的處理上較世界其他各國先進。然而，幾十年來的慣性及政治的因素，導致改進的步調相當緩慢。在這期間，國際上已經採取了比較有彈性的處理方式，例如國際原子能總署將核廢料類別分為 6 類：(1) 可豁免於法規的廢料 (不受法規管制)；(2) 半衰期極短的廢料 (儲存等待蛻變)；(3) 輻射活性極低的廢料 (掩埋處置)；(4) 低階核廢料 (近地表處置)；(5) 中階核廢料 (中深度處置)；及 (6) 高階核廢料 (深地質處置) (請見圖二)。相對的，美國低階核廢料定義已經涵蓋了所有國際原子能總署所訂定的前 5 項。由於法規上無法細分各類廢料的本質及合理的處理方式，導致整個系統失去彈性，因而遭遇到了各種問題。

在此同時，美國國內核廢料的法規也遇到了新的挑戰。美國能源部於 2004 年發表了一份環境

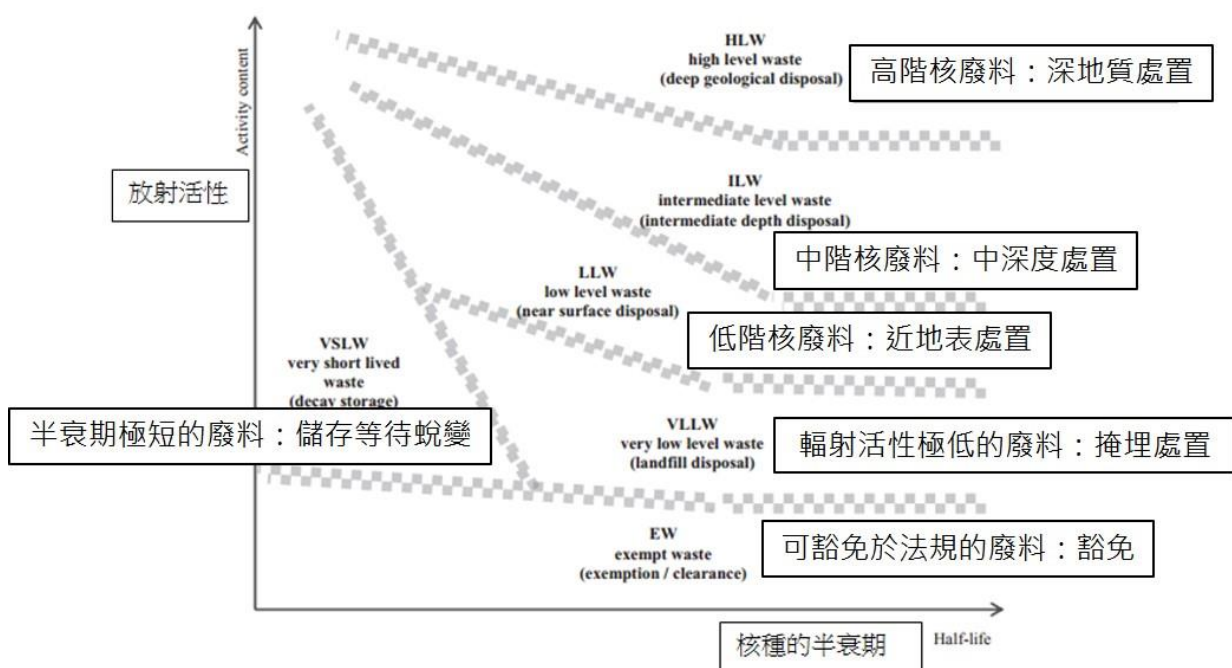
評估報告，決定處理現存大約七萬公噸的耗乏鈾 (Depleted Uranium)。能源部有意將這些耗乏鈾轉化成氧化鈾後再依照現行的低階核廢料法規當作 A 類低階核廢料作後續處置。這個決定在美國國內引起了巨大的反響，以耗乏鈾 (絕大部分是鈾-238) 的特性 (放射 α 粒子) 加上相當長的半衰期 (約 45 億年)，一般咸認將它當 A 類低階核廢料是不合理的。雖然，目前的法規上並未明文規定，然而反對的聲音卻一直不斷。

基於以上的幾項原因，美國核管會決定自 2011 年開始著手研究法規改革的可能性。經過幾年的努力，加上無數次的公聽會，委員會最近 (2016 年 10 月) 發表了 10 CFR 61 最後的修訂版，相關的指導文件也會在近期陸續發布。

基本上，這個新的修訂版回歸到以風險為基準的營運法則，利用廢料場址的特殊性 (site-

specific characteristics) 加上具科學基礎的場地特性分析法 (Site-Specific Performance Assessment) 引導出廢料最終處置的合適性。例如，將來的分析可分成三個漸進的考量：(一) 證明在 1,000 年內會遵守法規的規範 (Compliance Demonstration)；(二) 分析 1,000 到 10,000 年間的對誤闖者 (intruder) 的保護時期 (直到關廠以後)；及 (三) 10,000 年後的分析。如果廢料含有相當長半衰期的核種，這個新方法將更有具體性，可靠性，與說服性。相較於目前法規上制定的硬性表格 (如表一)，這個新的修訂展現出了十足的彈性。

當然，這個新的修訂其後續的發展，要如何作長期的性能分析？它的正確性又如何決定？長期的性能分析？它的正確性又如何決定？等等，得要等到未來針對其執行方式及效果進行觀察。時間將會證明這個新法則的效果，我們就拭目以待。



圖二. 國際原子能總署的核廢料分類系統 (取自 IAEA 2009 報告)

後記

核廢料的處理是一個相當棘手的社會問題，當前核能的發展相當大的程度上被局限於核廢料處理的議題上。然而，在經濟發展中，廢料的處理一向都不被考慮為優先議題，導致往後引起相當的社會紛爭。因此，在核廢料的處理上，我們一定要有前瞻性，能夠在問題還沒發生前，積極找尋未來問題的所在，更要有杜絕於先的態度與作為，才能贏得全民的信任，建立共識，以解決這個高度困難的挑戰。

美國在核廢料的處理上汲取了多年來的教訓，幾經波折後已經慢慢地步上軌道。筆者有幸多年來參與其中的幾項相關計劃，也與多位前輩們有無數的交流，受益匪淺。將來會就一些先進的發展繼續與國內同仁們分享報告。在國內核能已逐漸步入尾聲（核一、二廠將面臨除役，2025 非核家園）的此時，瞭解到國內即將面臨類似的問題，需積極的尋找解決之道，因而筆者更希望藉著本文和各位核廢料的專業同仁們共勉，甚幸。



圖片來源：地球公民基金會

參考文獻

1. Cardile, F.P, and Nelson, R.A., Nuclear Regulatory Commission Plans Rule Making on Clearance of Material and Equipment Having Residual Radioactivity. WM 99' Conference, February 28-March 11 (1999).
2. DOE/EIS-0359, Final Environmental Impact Statement for Construction and Operation of A Depleted Uranium Hexafluoride Conversion Facility at the Paducah. Kentucky, Site. Department of Energy, Washington, DC (June 2004).
3. DOE/EIS-0375, Final Environmental Impact Statement for the Disposal of Greater-Than-Class C (GTCC) Low-Level Radioactive Waste and GTCC-Like Waste. Department of Energy, Washington, DC (January 2016).
4. Eisenhower, Dwight. *Atoms for Peace*, National Archives (1953). (https://www.eisenhower.archives.gov/research/online_documents/atoms_for_peace.html)
5. IAEA Safety Standards, Classification of Radioactive Waste. General Safety Guide No. GSG-1, International Atomic Energy Agency, Vienna (2009).
6. Learn about Ocean Dumping (<https://www.epa.gov/ocean-dumping/learn-about-ocean-dumping> U.S.). U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC.
7. NCRP Report No. 175, Decision Making for Late-Phase Recovery from Major Nuclear or Radiological Incidents. National Council on Radiation Protection and Measurements (2014).
8. NUREG-1573, A Performance Assessment Methodology for Low-Level Radioactive Waste Disposal Facilities: Recommendations of NRC's Performance Assessment Working Group. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC (2000)
9. NUREG-1853, History and Framework of Commercial Low-Level Radioactive Waste Management in the United States. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC (2007)
10. NUREG-0945, "Final Environmental Impact Statement on 10 CFR Part 61: Licensing Requirements for Land Disposal of Radioactive Wastes. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC (1982)
11. NRC, Low-Level Radioactive Waste Disposal (Site-Specific Analysis Rulemaking. (<http://www.nrc.gov/about-nrc/regulatory/rulemaking/potential-rulemaking/uw-streams.html>)). U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC.
12. SECY 16-0106, FINAL RULE: LOW-LEVEL RADIOACTIVE WASTE DISPOSAL (10 CFR PART 61). U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washing, DC (September 15, 2016).