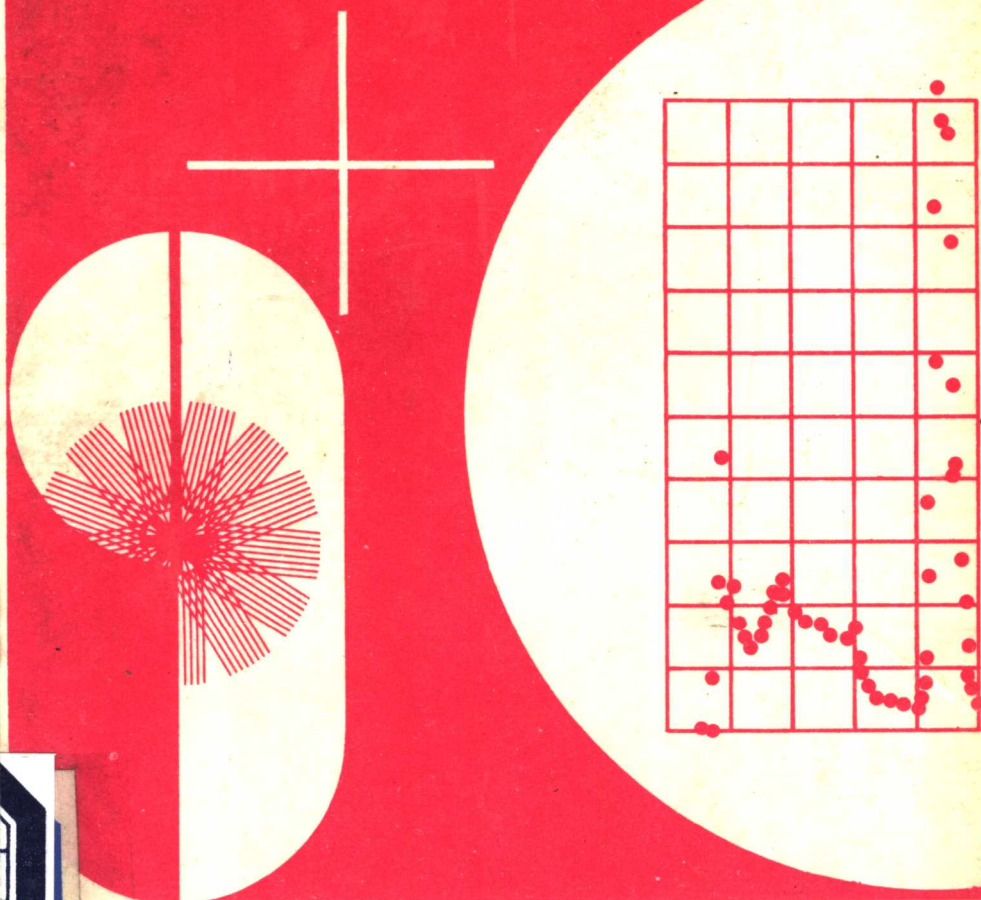


原子能文庫

主編 鄭振華

第 29—32 冊



徐氏基金會出版

原子能文庫

主編 鄭振華

第29—32冊

徐氏基金會出版

內政部登記證內版台業字第1374號

中華民國五十八年九月卅日出版

原子能文庫

29-32

版權所有

不准翻印

出版者 徐氏基金會出版部

台北郵政信箱 3261 號

香港郵政信箱 1284 號

發行人 鄧 普 賢

台北市林森北路 608 號三樓

主 編 鄭 振 華

行政院原子能委員會執行秘書

譯 者 第二十九冊 彭 武 洪

第三十冊 盧 堃 盛

第三十一冊 董 琍 清

第三十二冊 丁 英 原

印刷者 之江彩色印刷廠

台北縣三重市光復路 1 段 30 號

定 價 新台幣二十元 港幣三元五角

序

在世界科學文明已進步到太空時代的今天，任何一個人都了解發展科學的重要性，談發展科學，必需提高大家研究科學的興趣，才能按步就班地求發展。

本基金會對於海內外中國人士從事發展科學研究的情況，向來都寄予深切的關心，過去六年，本會曾資助大學理工科畢業學生前往國外深造，贈送一部份學校科學儀器設備，同時選譯世界著名科學技術書籍出版供給在校學生及社會大眾閱讀，其目的都在幫助促進科學發展。

我們深深希望自由中國的科學家和工程師們了解本基金會的用意，主動的重視科學技術書籍為發展科學的基本工具，從事寫作和翻譯，並且熱誠盼望與我們聯繫合作，我們願意運用基金從事各種出版工作，共同為我們邁進工業化的途徑而努力。

徐氏基金會

1967年8月

徐氏基金會啓事

一、凡對本書任何一部份，或本會所出版之其他書籍，能在內容及文字方面，提供建議，致使讀者更易迅捷了解書中意義者，如被採納，當致酬美金十二元五角至一百二十五元（折合新臺幣五百元至五千元），以示謝意。

二、本基金會爲了提倡及鼓勵我國同胞研究科學的興趣，進一步希望達到發展科學的目的，特公開徵求下面各類有關的中文創作及翻譯稿件。

甲、自然科學類：

數學，化學，物理學，及生物學。

乙、技術及工程類：

機械工程，電機及電子工程，無線電，電視，電信，汽車修理，鐘錶修理及製造，房屋建築，木工，水泥工等以及機械工程，電機工程及土木工程的製圖。

丙、醫學類：

個人及家庭保健衛生等一般醫學常識及教育方法。

凡是應徵的稿件必需採用通俗而流暢的筆調，使得社會一般人士及中等以上學校的學生容易吸收及了解爲原則，至於科學同技術方面的名詞應以國立編譯館所譯經教育部審定公佈的名詞爲標準。

稿酬：應徵稿件經過本會審查接受者，一律按每一千字新臺幣一百元（美金二元五角）核付稿費，如果本會認爲

內容特佳，並得提高其稿酬。

三、獎助：經本會接受付給稿費以後之創作及譯稿，其版權即屬於本會所有，並由本會出版，分別在臺灣、香港、星加坡等地區銷售。

本會將在各該書籍出版以後的第二年年底，核計其總銷售量，並分別贈與作者及翻譯者下面三種獎金。

1. 銷數佔第一位者：獎給新臺幣二十四萬元（美金六千元）
2. 銷數佔第二位者：獎給新臺幣一十六萬元（美金四千元）
3. 銷數佔第三位者：獎給新臺幣八萬元（美金二千元）

獎助辦法實行期間：自即日起，每年頒獎一次，暫定實行三年。

應徵者請直接向香港郵政第一二八四號信箱徐氏基金會接洽

序

民國五十七年四月十三日，中美原子能委員會假台北市聯合舉辦原子能應用示範展覽會。會中展出一部原子能文庫（Understanding the atom series），凡四十餘冊，執筆者均為美國當代的原子能學者與專家。此文庫以通俗與淺顯文字，介紹有關原子能基本知識。國立清華大學核子工程學系四年級同學為響應推廣原子能和平用途，利用課餘時間，協力逐譯此文庫，並蒙該系主任翁寶山博士協助解答質疑與校對；復蒙徐氏基金會資助，陸續出版。預計在核四同學畢業之前，可全部譯竣付印。

我國正力圖發展與推廣原子能和平用途，此文庫之逐譯，適逢其時。希望不久的將來，原子能將為我國帶來繁榮與福祉，更希望有志青年，多參與發展原子能的工作。

鄭 振 華

民國五十七年國慶日
於行政院原子能委員會

本會出版之「原子能文庫」蒙國立清華大學原子科學研究所所長鄭振華教授賜任主編，熱心籌劃，嘉惠後學，純盡義務，不受報酬。至深榮感，敬表謝忱。

徐 氏 基 金 會 謹 啓

目 錄

人類與灰燼之間.....	1
放射性廢料的性質.....	3
放射性廢料的來源.....	3
廢料的放射性程度.....	10
輻射對人體的潛在影響.....	11
廢料處置.....	13
液體廢料的處置：低度和中度放射性廢料.....	14
氣體廢料的處置.....	19
固體廢料的處置.....	20
高度放射性廢料的處置.....	22
研究與發展.....	27
高度放射性廢料的處理.....	27
低度放射性廢料的處理.....	31
中度放射性廢料的處理.....	33
環境的研究.....	34
附錄 1 在鈾燃料循環系統中，開礦，磨礦，和燃料製造所遇 見的天然放射性同位素	37
附錄 2 放射性廢料裏主要的分裂產物放射性同位素.....	39
附錄 3 非燃料材料受中子照射所產生的主要活化放射性產物	40

放射性廢料

原著：Charles H. Fox

譯述：彭武洪

人類與灰燼之間

一個考古學家，跪在鐵霍肯（Tehuacan）的墨西哥山谷裏，正在小心翼翼地擦拭幾千年前人類所遺留下滿是塵土的粗糙物品。從這些古代的石器和陶器的火灰碎片中，我們能知道從前的事，這些遺跡便是美洲大陸開始有文化就產生的廢料。

今天，在肯薩斯州的麥田裏，每年有數以噸計的去了麥粒的麥桿等著處理，將來的考古學家雖然未必會發現這些麥桿；但是，他們會對其他的廢物更感興趣——鋼鐵工廠所排出成堆的溶滓，都市的垃圾，和堆積如山的老爺車。

凡是有人類的活動，就必定會產生廢物——從獵人打出去的子彈頭，工廠的裊裊黑煙，教室的廢紙，到理髮店地板上的頭髮。

當然，走在時代尖端的核心工業也不可避免地有廢料需要處置——諸如運送，處理，和存置等問題。在許多方面，放射性廢料的處理和其他廢物的處理很類似；但是基於其特殊的性質，有幾點不同的處置方法是不容忽視的。

核子工業所產生的廢料與其他各種廢物最重要的差別乃是核廢料具有放射性，因而需要特殊的處置方法。放射性特別強的用過核燃料就是個令人頭痛的問題，因為既不能把它們堆積在廣場裏，也不能把它們排到河流與海洋中去。還有一個問題是：如何去處置每年從核子工廠所排出數以百萬加侖計含放射性的水。由此可見，如何處理放射性廢料實在是一項很複雜而值得研究的問題。

自從 1942 年，人類完成了第一次自持鏈反應以來，核能工業迅速起飛，現在全美國有三百個以上的核反應器在運轉中*。此外，放射性材料在研究，醫葯，和工業方面的應用也日趨重要。只要是核子時代繼續下去，放射性廢料無疑的也會越來越多，控制和處置廢料的方法不但要普及化而且要力求其安全而經濟。



圖 1 依里諾州，芝加哥附近的得雷司登核能發電廠，顯示美國核子工業的蓬勃發展。

在美國，原子能委員會（簡稱 AEC）負責有關放射性材料傷害的公共安全，在不過度抑制核子工業發展的情形下，AEC 製訂了許多規則以確保徹底控制放射線。AEC 也指導研究發展新的處理放射性廢料的方法。當然，還有很多東西尚待研究，但是由到目前為止研究所得的資料，可以知道放射性廢料在未來的核子科學發展上，並不構成經濟上的障礙。

* 要明瞭有關核反應器的情形，請閱讀本文庫的“核反應器”和“研究用反應器”。

放射性廢料的性質

核子工業產生種種放射性廢料*——一百種以上的元素，包括九百多種放射性同位素[†]。含有這些同位素的廢料可能是氣體、液體或是固體；有些可溶於水，也有些是不溶解的，但是都能放出各種不同能量的輻射線。雖然有些同位素衰變得很快**，有些卻需要好幾百年才能衰變到安全的程度。

放射性物質的傷害，在於其基本的特性：輻射是感覺不到的，（除非是一下子接受了巨量的輻射線），其傷害有累積性（有些細胞無法復原），而且不但會傷害到他個人本身，又因為影響了生殖細胞，甚至傷害到他的後代子孫。幸好由於輻射的特性，現在已能相當準確地測出它的存在和強度。

最後要強調一點是：放射性不受外在環境的影響。每一種同位素衰變的速率是一定的，與溫度、壓力、化學藥品完全無關，而且無論你用什麼方法，它都照樣衰變下去。讓這些放射性同位素自然地衰變下去是唯一消除放射性的辦法。所有的處置、儲存都是一種中間步驟，其最後目的仍是讓其自然衰變。

放射性廢料的來源

只要使用放射性材料，就會產生放射性廢料。到目前為止，最主要的廢料來自核能燃料的處理：開礦、磨礦、和提鍊鈾用作反應器燃料或用於製造核武器所產生的廢料中含有天然放射性同位素；或是核燃料受中子撞擊分裂所產生的分裂產物廢料；或是反應器四週的材料

* 要進一步的瞭解輻射線的性質，測量和控制，請閱讀本文庫的“原子動力之安全問題”。

[†] 放射性同位素：指某一元素之具有放射性者。關於不熟悉的名詞，請閱本文庫的“核術語簡釋”。

** 衰變：指原子核發生改變，變成不具放射性之新物質。

受照射而變成放射性。下面分別說明這幾種來源。

天然放射性 是指自然界存在的物質所具有的放射性，這些物質就是核燃料的原料——鈾礦和釷礦。因此，從開礦、磨礦、到製造燃料所產生的廢料中，含有這種天然放射性物質，包括鈾、釷、氦（氣體）和鐳（請參閱圖2及附錄1）。

大多數的礦物是乾燥的，但是有些則需不斷地抽出大量的水，以保持礦物乾燥。這些水僅含有微量的放射性物質，並不構成對人體的傷害。提鍊鈾礦的工廠以每分鐘三百至五百加侖的速率把液體廢料排至池中或湖裏（此等工廠平均每天能提鍊一千噸的礦石），美國有二十幾個這種工廠。鐳是其中主要的放射性同位素，參雜在其他的固體殘渣——叫做礦尾——中，是不可溶的。

提鍊鈾燃料的次一步驟是先鍊製饋料，濃化的鈾礦用化學的方法加以淨化，製成鈾鹽——叫做饋料，再由氣體擴散工廠分離鈾235和238，或是直接用來製造金屬鈾或氧化鈾的燃料元件。處理每一噸的鈾，大約產生一千加侖的液體廢料。

用來製造燃料元件的淨化鈾，其放射性是很弱的，因為鐳、釷等主要的放射性衰變產物已經去除了（鈾本身的放射性很弱）。因此最後這製造燃料元件的工廠所產生的液體廢料很少，放射性很低，不過也會產生污染廢物。

分裂產物 反應器裏的核燃料受中子撞擊而分裂為兩個較輕的具放射性的原子核，是如今放射性廢料的主要來源，這些放射性分裂碎片要經過一次或數次的衰變後，才能變為穩定而無害的原子核（參附錄2）。在反應器裏的用過燃料中，仍然有些能夠拿來再使用的材料混雜在分裂產物裏，所以從裏頭提鍊出這些可用的燃料是很重要的。因此，用化學方法來處理用過核燃料是核子工業不可缺少的一部分。這種化學處理產生了大量的強放射性廢料，不僅是分裂產物，還包括了一些反應器材料，化學藥品和腐蝕物的活性化產物。

用過核燃料的化學處理，現在已在美國原子能委員會所屬的工廠進行中，隨著核子工業的發展，將來私人企業也一定會進展到這個範圍。座落於紐約州的第一個商用化學處理工廠正由美國核燃料服務公

司建造中。

有好幾種溶劑萃取法能用來把留存的有用燃料從使用過的燃料廢物中分離出來。處理每一公斤的鈾，要產生一到一百加侖的高放射性溶液——處理天然鈾或是微量濃縮鈾燃料產生一到十加侖，若是高度濃縮的鈾燃料則產生十到一百加侖的廢料。到目前為止，大部分經過化學處理的鈾燃料是美國原子能委員會所屬的產鈾工廠所用過的天然鈾燃料，但將來定有更多核能電廠所使用過的鈾燃料須要這種處理。

對未來從核能工廠由於這種化學處理核燃料所產生的高度放射性廢料量的預測並不十分確定，現在一般的估計是1970年將產生大約四萬加侖的廢料，到本世紀末，就可能增至每年三百萬加侖了*。放射性較弱的大量廢料也將隨之產生，在過去二十年裏，就大約產生了四十億加侖這種程度的廢料，不過，就量而言，比起其他工業所產生的廢料如造紙工廠、化學工廠或垃圾處理廠，還是小巫見大巫。

活性化產物 由於核反應器內靠近燃料的其他材料受照射而生成。建築材料，冷卻劑[†]所含的雜質，和冷卻劑本身，吸收了中子就會變成活性（放射性）。例如說：某些反應器的冷卻劑常含有微量的鐵、鎳和其他的腐蝕物，當它們經過反應器時，受到中子照射而變成有放射性（附錄3列了幾種典型的活性化放射性同位素）。

美國的六個核能電廠——賓夕法尼亞州的史賓波特廠（Shippington），麻塞諸塞州的揚基廠（Yankee），紐約州的印地安點廠（Indian Point），依里諾州的得雷司登廠（Dresden），密西根州的大岩克點廠（Big Rock Point），和加利福尼亞州的韓波爾特灣廠（Humbolt Bay）——在1963年約產生了十億加侖的低放射性液體廢料，佔了所有核能電廠的95%以上。這種體積和其他工業的廢料比較起來並不算大，而其總放射性也很弱，這些廢料已由發電廠所附屬的工廠很成功而安全地處置掉了。

* 以上的估計值是取現行各種估計值的平均值，約為其5%至200%。

† 冷卻劑是指流經反應器用以傳導熱的流体。最常見的是水，但空氣、二氧化碳、油、鈉、鉀等都可用做冷卻劑。

圖2 放射性廢料的類型及其

放射性廢料的類別	廢料的來源	廢料的形態
天然 放射性	鈾 礦 的 開 採	固 態
		液 態
		氣態和塵埃
	核 燃 料 製 造 廠	固 態
		液態（酸性）
		塵 埃
分裂產物 放 射 性	核燃料受照 射和處理	固態（人爲使之變成固態）
		液 態 （除去鋇和銻）
		氣 態
活 性 化 產 物 放 射 性	反應器運轉時 各種材料受 中子照射	固 態
		液 態 （溶於水中）
		氣 態
	製 造 同 位 素	固 態

處置方法（參閱附錄）

主要的放射性同位素	輻射類別	處置方法
鈾 — 238	α, γ	堆置於曠野
釷 — 230	α, γ	滲入地中
鐳 — 222	α	飄散大氣中
鈾 — 238 鈾 — 235	α, γ	除去污染
鈾 — 238 鈾 — 235	α, γ	中和，濃縮；埋入地中
鈾 — 238 鈾 — 235	α, γ	通風過濾後排於大氣中
鋇 — 90 銻 — 137	β β, γ	裝在容器裏，長久置於曠野或土中。（ ~ 600 年）
碲 — 99 鈳 — 103 銻 — 144	β β, γ β, γ	存置於罐中數年後再就地加以固化
碘 — 131	β, γ	與化學藥品作用，變為固態沉澱—如碘化銀。
氬 — 85	β, γ	排到大氣中
鋁 — 28 鎂 — 56	β, γ β, γ	包裝後埋於地中
鈷 — 58	β^+, γ	蒸發或加以「離子交換」處理再把殘渣埋入地中
氮 — 16	β, γ	等它衰變後（半化期很短）再排至大氣中
鈷 — 60	β, γ	沒有利用價值後埋入土中（半化期頗長）
磷 — 32	β	保存著使之衰變至安全程度（半化期很短）



圖 3 圖示美國新墨西哥州的鈾礦產地，開採礦石是製造核燃料循環的第一步驟。

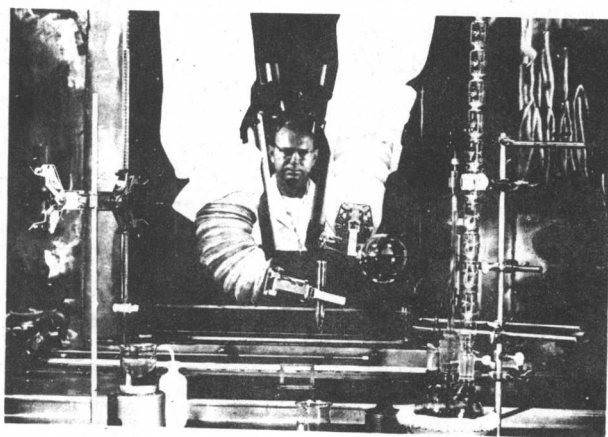


圖 4 美國原子能委員會在田納西州的橡嶺國家實驗所的一名工作者在「熱室」*裏正使用機械手來把有用的分裂產物從核廢料中分開來。

* 熱室是指輻射很強的房間。

美國原子能委員會的產鈾工廠由於冷卻劑流經反應器，倒是產生了較大量的低放射性液體廢料，尤其是華盛頓州利契蘭郡的韓佛特廠（Hanford），必須設法處置從哥倫比亞河引進直接用來冷卻反應器的大量的水。美國原子能委員會在南卡羅里那州艾肯郡的薩凡娜河廠也使用河水，不過河水未直接流經反應器，所以並不具有放射性；反應器另外使用純水作為冷卻劑，自成一循環系統，中間有熱交換機來隔開冷卻劑和河水，所以就量而言，處理有放射性的廢水不成問題。

有些活性化產物是氣體，在以水為冷卻劑的反應器裏，這些氣體產物是由於水和水中的空氣受了中子照射而產生的；它們大都是半化期* 很短的放射性同位素，如氮-16 和氫-41，但氦（氫-3）的半化期卻超過 12 年。空氣冷卻反應器會產生氫-41，這種型式的主要例子是布洛克海文和橡嶺國家實驗所的已經運轉多年之大型研究用

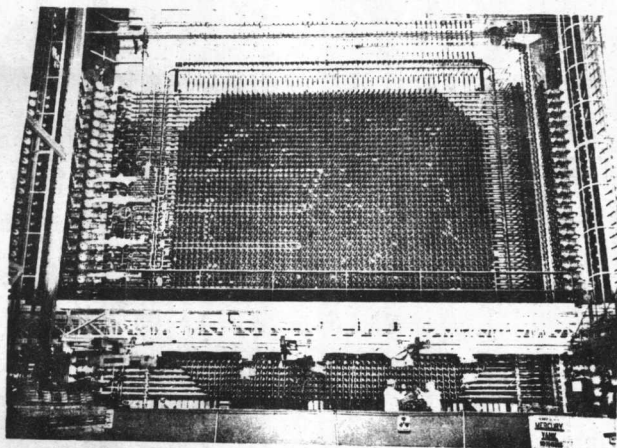


圖 5 位於華盛頓州利契蘭郡的產鈾反應器。

* 半化期是指放射性物質的質量（代表其強度）有一半衰變成穩定的物質所須要的時間。例如說經過兩個半化期後，該放射性同位素只剩了四分之一，其餘的四分之三都變成了無放射性的穩定物質。