

科學圖書大庫

原子能文庫

主編 鄭振華

第 9 — 12 冊



徐氏基金會出版

科學圖書大庫

原子能文庫

主編 鄭振華

第 9 — 12 冊

徐氏基金會出版

徐氏基金會科學圖書編譯委員會

監修人 徐銘信 發行人 王洪鎧

科學圖書大庫

版權所有

不許翻印

中華民國六十八年三月二十四日再版

原子能文庫

9—12

基本定價 1.00

主 編 鄭 振 華

行政院原子能委員會執行秘書

譯 者 第九冊 徐椿壽
第十冊 呂東輝
第十一冊 李寬宏
第十二冊 周祖康

本書如發現裝訂錯誤或缺頁情形時，敬請「刷掛」寄回購換。謝謝惠顧。

(67)局版臺業字第1810號

出版者 臺北市徐氏基金會 臺北市郵政信箱53-2號 電話 7813686號

發行者 臺北市徐氏基金會 郵政劃撥賬戶第 15795號

承印者 大興圖書印製有限公司 三重市三和路四段一五一號 電話 9719739

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

原子能文庫

中文書名

1. 輻射線食品保藏學
2. 核動力與商船
3. 我們的原子世界
4. 稀土元素
5. 人體與輻射
6. 原子在農業上的應用
7. 能量直接轉換
8. 原子燃料
9. 核反應器
10. 分裝式反應器
11. 放射性同位素之工業應用
12. 計算機
13. 全身計數器
14. 太空中之核動力
15. 核子鐘
16. 核能電廠
17. 輻射對遺傳因子之影響
18. 核試爆的殘廢
19. 放射性同位素在醫學上的應用
20. 第一座反應器的故事
21. 合成超鈾元素
22. 加速器
23. 原子能的事業
24. 放射性同位素動力
25. 核子輔助動力系統
26. 原子，大自然以及人類
27. 低溫學
28. 研究用反應器
29. 放射性廢料
30. 科學展覽會中的原子
31. 核能脫鹽
32. 中子活化分析
33. 核術語簡釋
34. 鉈
35. 核燃料來源
36. 太空輻射
37. 原子動力之安全問題
38. 鈍氣化學
39. 原子與海洋
40. 核融合的控制
41. 放射性同位素與生命程序
42. 動物與原子科學研究
43. 耕犁計劃
44. 雷射
45. 物質之細微構造
46. 非破壞性工業試驗

英文書名

1. Food Preservation by Irradiation
2. Nuclear Power and Merchant Shipping
3. Our Atomic World
4. Rare Earth
5. Your Body and Radiation
6. Atoms in Agriculture
7. Direct Conversion of Energy
8. Atomic Fuel
9. Nuclear Reactors
10. Power Reactors in Small Packages
11. Radioisotopes in Industry
12. Computers
13. Whole Body Counters
14. Nuclear Propulsion in Space
15. Nuclear Clocks
16. Nuclear Power Plants
17. Genetic Effects of Radiation
18. Fall-out From Nuclear Tests
19. Radioisotopes in Medicine
20. The First Reactor
21. Synthetic transuranium element
22. Accelerators
23. Careers in Atomic Energy
24. Power from Radioisotopes
25. SNAP
26. Atoms, Nature and Man
27. Cryogenics
28. Research Reactors
29. Radioactive Wastes
30. Atoms at the Science Fair
31. Nuclear Energy for Desalting
32. Neutron Activation analysis
33. Nuclear Terms-A Brief Glossary
34. Plutonium
35. Source of Nuclear Fuel
36. Space Radiation
37. Atomic Power Safety
38. The Chemistry of the Noble Gases
39. The Atom and the Ocean
40. Control of Fusion
41. Radioisotopes and Life Processes
42. Animal in Atomic Research
43. Plowshare
44. Laser
45. Microstructure of Matter
46. Nondestructive Testing

譯者

1. 曾明哲
2. 張世賢
3. 邱月李
4. 錢景常
5. 陳松濤
6. 江祥輝
7. 朱 鈞
8. 甘繼治
9. 徐懷璋
10. 呂東輝
11. 李寬宏
12. 周祖康
13. 蔣榮貴
14. 李偉德
15. 邱秀吉
16. 程育南
17. 鄭錫昌、呂東輝
18. 林國瑞
19. 黃宏仁
20. 黃海水
21. 鄭錫昌
22. 蔡維綱
23. 曾富禮
24. 汪曉康
25. 鍾仁賢
26. 張世賢
27. 黃炳華
28. 陳方賢
29. 彭武洪
30. 盧望盛
31. 盧羽清
32. 丁英順
33. 清華大學核工系1969級
34. 歐紹源、徐懷璋
35. 錢景常、邱月李
36. 徐懷璋、歐紹源
37. 林宗堯
38. 程育南、蔡維綱
39. 江祥輝、鍾仁賢
40. 林伯誠
41. 陳松濤
42. 鍾士熙
43. 李寬宏、汪曉康
44. 李偉德
45. 徐定國
46. 曾明哲、黃炳華

第九冊

核反應器

譯者 徐椿壽

目 錄

緒論	1
反應器如何操作	1
反應器設計	11
研究、教學、以及材料試驗反應器	12
生產反應器	15
發電用反應器	17
供熱反應器	21
推進反應器	22
太空用反應器	25
反應器安全	30
未來的反應器	33
附錄	34

核反應器

原著：約翰·荷金頓

John F. Hogerton

譯述：徐椿壽

緒 論

自從1939年德國科學家奧圖漢 (Otto Hahn)，和佛利斯查曼 (Fritz Strassmann) 發現了核分裂後，給原子能開創了新紀元。但是真正的開始，却是在三年以後，由恩瑞克費米 (Enrico Fermi) 所領導的一群科學家證明了自持分裂連鎖反應 (self-sustaining fission chain reaction) 的可能性，同時更重要的，這種反應能够被人類所控制。

費米的第一座核反應器，於1942年12月2日下午3點25分，在芝加哥大學運動場後面一間臨時的實驗室裏開始操作。如以目前的標準來衡量，這只是一些非常簡陋的裝置而已——由一些鈾和石墨方塊所堆砌成的，邊長24½呎，高19呎，堆砌的方法，只是簡單地把一塊石墨放在另一塊上面，那時我們稱它為原子堆 (atomic pile)，現在則稱它為核反應器 (nuclear reactor)。

從那時起到現在，美國已建造了數百座的核反應器，在後面，我們會討論到反應器如何被運用到各種不同的用途上；以及它的主要發展計劃。在討論這些問題之前，我們必須先知道一般反應器的原理。

反應器如何操作

我們最好先從核分裂反應本身說起，在這反應裏，原子中央的核子被中子撞擊後，分裂成兩個稱為分裂產物的放射性碎片。它們以很大的速度彼此飛離，當撞擊到週圍的材料時，即產生巨大的熱能。在

一個原子核分裂的同時，也會產生類似X光的 γ 射線，和放出兩個或兩個以上的中子，這些中子再撞擊其他核子，又產生分裂，當這種過程繼續下去時，也就是我們所熟知的連鎖反應*。

核反應器只不過是一種引發和控制自持分裂連鎖反應的設計而已，由一些可顯見的理由，我們也可稱它為“中子機器”(neutron machine)。

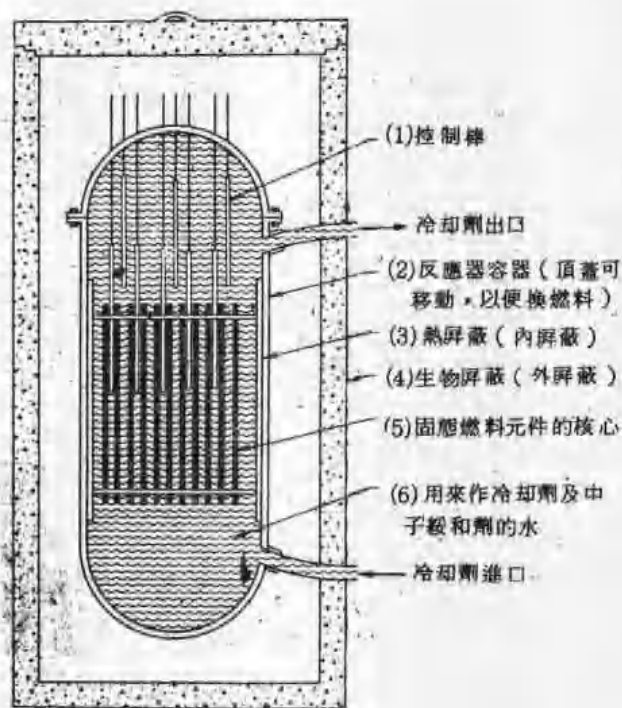


圖 1 核反應器 (壓水式)

*關於基本原子科學知識，可看本叢書中另一本“我們的原子世界”。

核反應器可用於下列諸用途：

1. 供給強密的中子束，以做科學實驗之用。
2. 由中子照射產生新的元素和物質。
3. 供給熱能；以用來發電、推進、工業處理以及其他各種應用等。

核反應器的基本構造如圖一所示，包括：

由燃料所構成的“核心”(core)。(圖中5號)

中子“緩和劑”(moderator)，這種物質能減低中子速度，以促進分裂之進行。(6)

調節自由中子數目的一種裝置，我們可因此而控制分裂的速率。(1)

移去由核心所產的熱的一種裝置，(在這張反應器圖中，是以冷却水來移熱的(6))。

輻射性屏蔽(3和4)。

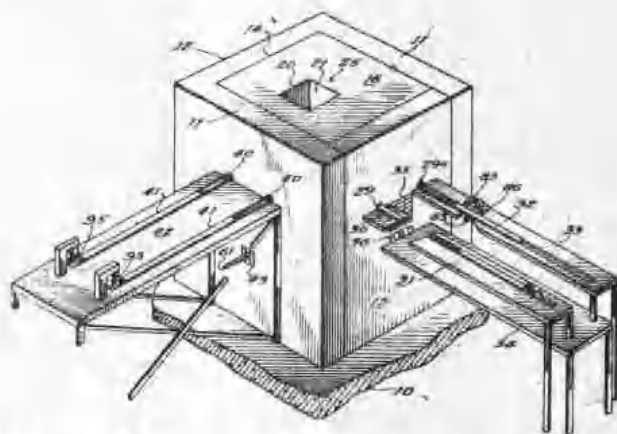


圖2 1956年5月18日所頒布的第2708656號專利。這項發明包括了第一座反應器，芝加哥原子堆1號。參與這項發明的學者有恩瑞克·費米和李奧希勒(Leo Szilard)等。雖然這項專利早在1944年12月就已申請，但却一直等到幾年後，當一切它所包含的秘密公開之後，才頒布下來。這個圖就是當時在專利申請書上所畫的。

燃料 反應器燃料中所不可缺的即可裂性材料——也就是當被中子撞擊時，很容易發生分裂的物質。在自然界中，能以慢中子引起分裂的元素，只有鈾-235，它是鈾的一種同位素，在天然鈾礦中僅佔0.71%，其餘的幾乎均為鈾-238（另含極少量的鈾-234），稱為可孕材料，因為當鈾-238被中子照射時，能變成可裂性的鈾-239*。

反應器燃料通常是由可裂材料及可孕材料所混合組成的。當燃料被操作中的反應器所照射時，可裂材料的原子就被消耗掉，而同時，可孕材料却形成了新的可裂材料。所消耗掉的和所形成的可裂原子數之比，因各個反應器的設計不同而異。在一種名為“滋生式”的反應器中，這個比數可以做到小於1，但是差不多目前的反應器這個比數都大於1。用滋生式反應器來產生較損耗掉更多的可裂材料，並非是不可能的。所謂滋生，就是在一段長時間內，有效地將可孕材料轉變為可裂材料，因此我們有把握能有效地使用核燃料資源。

在燃料中，可裂原子所佔的百分比是一項非常重要的因素，因為它影響到反應器體積的大小。百分比愈大，反應器就可做得愈精緻些，但這個百分比有它一定的限度，在這裡我們不討論這個問題。有些反應器用天然鈾作燃料，它所含的可裂原子數小於百分之一。有些反應器則以輕度濃化鈾作燃料。另有一些，特別是用在推進應用方面的反應器上，由於精緻性在這方面上的重要，所以就用高度濃化鈾作燃料。

另一方面，燃料的物理形態也是一項重要因素。有些反應器用液體燃料，如濃化鈾的水溶液，但大部分的反应器都用固體燃料——如金屬鈾或氧化鈾、碳化鈾等陶瓷物。固體燃料容易做成各種不同形狀——板狀、錠狀、針狀等，把他們聚集在一起就構成所謂的燃料元件

* 同樣地，另一種可裂材料鈾-233，能以中子照射釷元素而產生。所以，有兩種基本可裂材料（鈾-235、鈾-233，和鈾-239）以及兩種可孕材料（鈾-238和釷）。

** 濃化鈾，是將天然鈾經過同位素分離過程所做出來的。其可裂原子的含量可從百分之一到百分之九十以上。

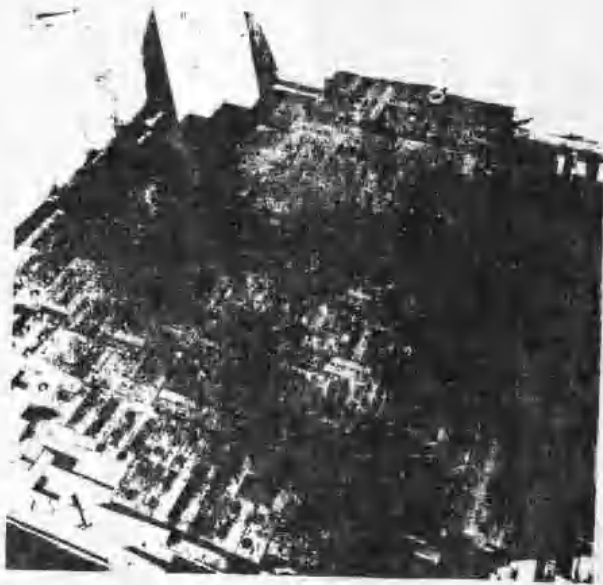


圖3 這是一張第一座核反應器的照片，於1942年11月當它在加第19層石墨時所拍攝下來的。含有金屬鈾和／或氧化鈾的石墨層是和固體塊狀石墨層交替排列的。第18層（幾乎已被蓋住了）含有氧化鈾錠。

。一個反應器的核心含有數十至數百個這種聚集的燃料，每個燃料元件都被固定地放在核心中的格子裏面。

幾乎所有的固體燃料，外面都包有一層護套（cladding），這種護套用以防止燃料和冷卻劑的直接接觸，它的外形就像是保護層或鞘一樣，成為構成燃料元件本身的一部分。不銹鋼和鋳合金是動力反應器中常用的護套材料；在研究用反應器中，則通常以鋁來作護套材料。

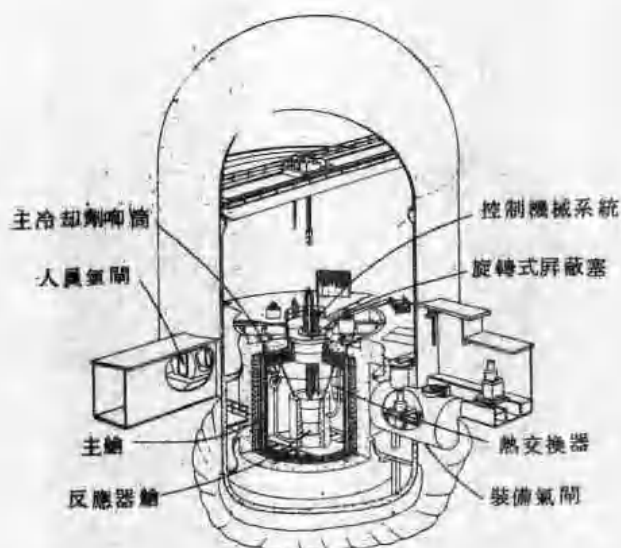
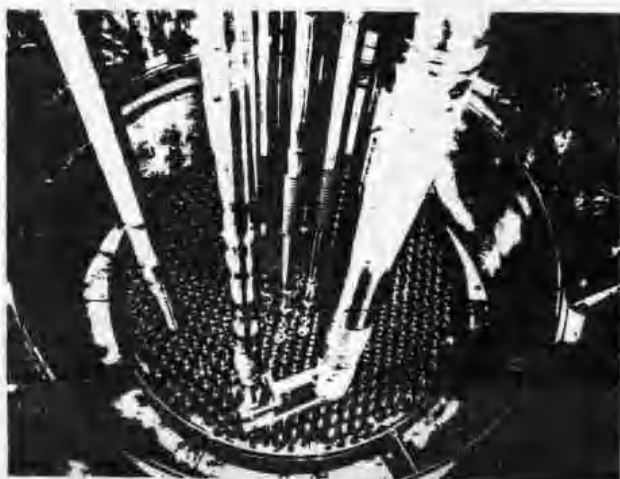


圖 4 上圖是實驗滋生式反應器 (EBR) 第二號的剖面圖，這座反應器是第一座附設有燃料再處理及再製造設備的反應器。下圖是 EBR-2 號反應器核心的照片。前景為壓制傳動軸 (hold-down and gripper drive shafts)，後景為控制棒傳動軸 (control-rod drive shafts)。



緩和劑 剛從連鎖反應中放出來的中子，具有很高的速度，當他們在核心中和週圍的物質產生彈性碰撞時，速度就會降低，這些低速度的中子正是我們所需要的，因他們較高速度的中子更容易引起分裂反應。但是如果我們考慮到很多個碰撞時，一個中子就很可能在某次碰撞中被吸收，而並不產生新的中子（如分裂產物的原子就能吸收中子）。所以，我們需要一種材料，它能很快地減低中子速度，而同時却並不吸收大量的中子，我們稱這種材料為緩和劑。

一個中子的質量大約和氫原子相等，所以，含大量氫原子或較輕原子量原子的材料，都可做為很有效的緩和劑，如水、重水、石墨、鈹和某些有機化合物等。

很顯然的，緩和劑必須被均勻地分布在燃料區內。有些反應器，緩和劑是放在各燃料元件間的空隙中，有些反應器，甚至就把緩和劑和燃料混合在一起。

另外還需附帶說明的，有一種反應器，它以高度濃化燃料集中排列在核心四週，能以快中子引起分裂，也就是不再需要緩和劑了，這種裝置稱之為快中子反應器。

大部分反應器的控制，都是靠調整核心中的中子數以完成的，這可以由一些名為控制“毒物”的物質來擔任——如硼和鏷，都具有很高的中子吸收係數（事實上，所謂控制毒物，其效果即相當於中子吸收劑）。通常，這些物質被做成可調整的棒狀物，插入反應器中，稱之為控制棒。一座典型的反應器，它除了有一組控制棒（亦稱精控棒）用來作正常的控制以外，還有一組補助系統（亦稱安全棒）在反應器發生意外時作急停用。

我們知道，當每個燃料原子分裂時，會放出兩個或三個中子，這些自由中子的生命很短，大約在千分之一秒的時間內，就會被吸收或引起另一個反應。這樣看起來，假如在一次分裂後，雖然只增加微量的中子，但在一秒鐘後，分裂速率却可增加好幾百倍！幸好，在事實上，並不是所有的中子都是馬上被放出來的。假如我們注意到，在維持分裂連鎖反應時，也需要遲中子（delayed neutron）的話，那麼在正常狀況下，反應速率每秒鐘只能增加百分之一或二了。（譯者

按：為什麼遲中子會有這樣大的影響，需由解微分方程式中看出來）。在這樣緩慢的增加率下，我們才能很穩健地控制反應速率。

從這些少數的事實中，我們可以知道控制反應器的基本原理。當燃料放進反應器核心時，所有的精控棒和安全棒都在核心內，當燃料填滿後，就抽出安全棒和部分的精控棒，使反應器開始操作。在抽出精控棒時，其過程必須很緩慢，以配合中子計數器所告示出來的分裂速率的信號。一旦反應器達到臨界狀態，也就是連鎖反應能自持下去後，精控棒的移動調整就能維持反應器於穩態的操作狀態下。假如操作者希望提高功率階——即穩態下的反應率——則可把精控棒抽出更多後再進行調整；假如他想停止反應器操作，則把所有的精控棒和安全棒完全插入反應器中。

還有一點和反應器操作時有關的，即反應率的失落，我們知道，當燃料消耗時，同時會生成分裂產物，這些分裂產物不斷地吸收中子，並且越積越多，於是就減低了燃料的反應率（就好像是一把火，被自己的煙灰罩住而熄滅一樣），為了補救這個缺陷（也就是使燃料能更充分地被利用），必須在核心中放入較發生連鎖反應所需的最低量為多的燃料，這些多出的燃料供給了過剩反應率，我們可由此提取，使得反應能繼續進行，這可由適量的控制毒物來配合，但當反應繼續下去時，這些毒物就需逐漸移去。一個反應器所需的過剩反應率的量，是控制系統在設計時很重要的一點。

移熱系統 在分裂過程中，能量釋放出的形式分配大致如下：

分裂產物的動能	84.0 %
中子的動能	2.5
瞬發的 γ 射線	2.5
分裂產物的放射蛻變	11.0
	100.0 %

反應器如何操作

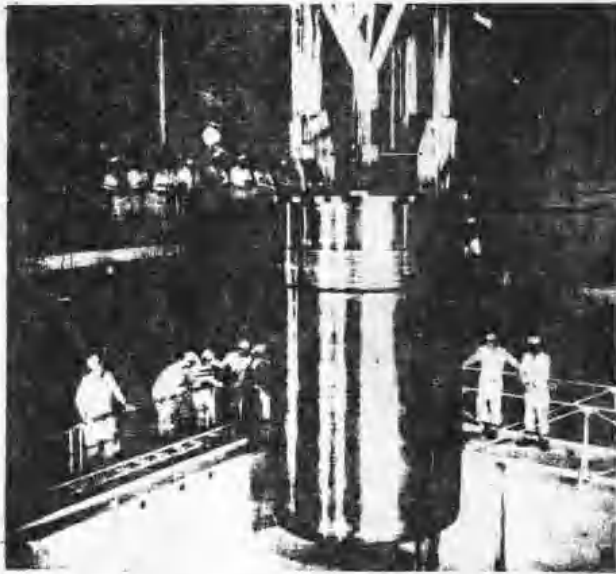


圖 5 上圖為賓夕法尼亞州·西賓堡原子發電廠的反應器核心。正降落在定位中。右下圖表示出這個核心的內部結構，燃料整件是鎖在頂柵格和底板之間，由於緊密的排列而達到臨界質量。連鎖反應所產生出來的熱是由通道中自下而上的冷却水所帶走的。圖中突出的棒狀物即為精控棒和安全棒。

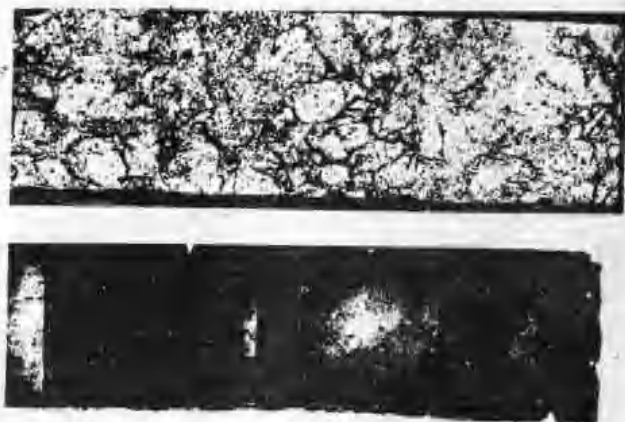


圖 6. 西賓堡核心中所用的原始燃料元件是由濃化二氧化鈾及氧化鈉混合而成的，後者的作用相當於稀釋劑。這些照片，（經過 75 倍放大），顯示出在一短時間的輻射殘曝露下，經照射後的燃料元件（下圖）會較原始的（上圖）為稠密。

當分裂產物（以及中子）和周圍的一些物質發生碰撞時，它們多少會損失掉一部分的動能，這些動能馬上變成熟。由這樣來的熱，大多是在反應器核心中產生的。

假如反應器是在沒有熱輸出（即只有幾瓦特的功率）的狀況下操作的話，那麼由核心產生出來的極少量的熱可任其自行散去，亦即不需要冷卻系統。但大多數的反應器事實上都是在極高的功率階上操作的（千瓦或百萬瓦以上的熱輸出）。所以他們必須被冷卻，以免核心過熱或甚至於融化。在動力和推進應用上，當然，由反應器核心中所產生的熱，是由反應器的初期產物所帶走的。

對於核反應器，我們所最感興趣的一件事，就是在原則上，它能在任何功率階上操作。當然，在實際運用上，它仍受一個因數限制的，那就是冷卻系統把熱從核心帶走的速率。一部分的反應器是靠冷卻劑的自然對流來帶熱的，然而，大多數的反應器却都裝有“外力循環系統”（forced circulation system）。在目前，有各種不同的