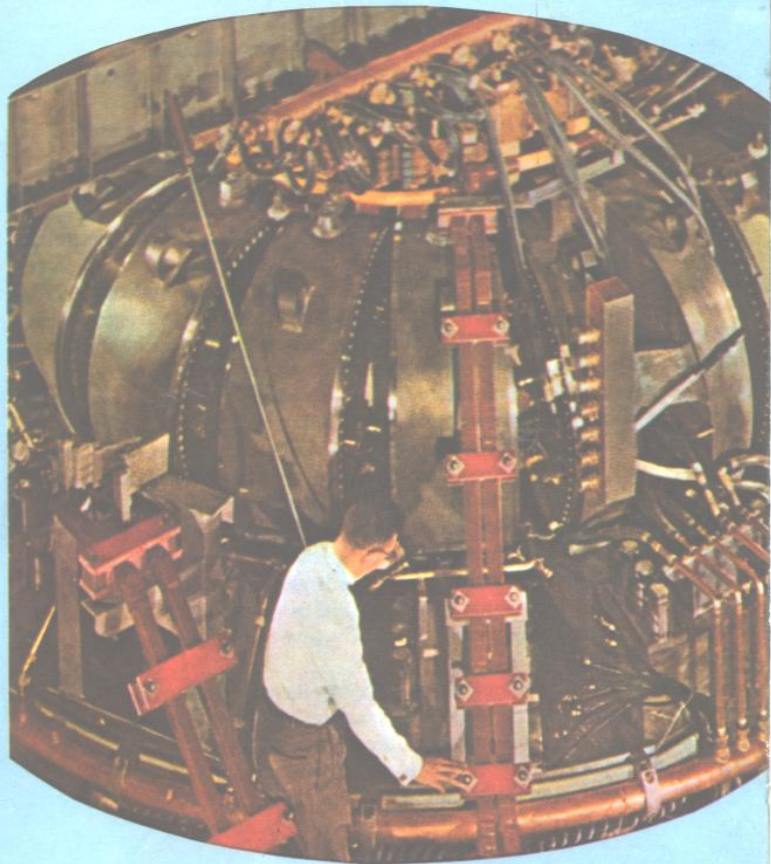


NUCLEAR
POWER



核能發電

薛健中編著・萬里書店出版

核 能 發 電

薛建中編著

出 版 者：萬 里 書 店

香港北角英皇道486號三樓

電話：5-632411 & 5-632412

承 印 者：信 義 印 刷 公 司

九龍官塘偉業街154號五樓

定 價：港 幣 三 元 八 角

版 權 所 有 * 不 准 翻 印

(一九七七年三月版)

前 言

核能 (Nuclear energy) 問世至今，已有三十多年的歷史了。日本廣島和長崎上空原子彈的轟然巨響，使人類第一次認識到原子能 (Atomic energy) 的巨大破壞力，然而也使人們看到它的巨大威力的有益方面，科學家早就想到用原子能產生的龐大動力來造福人類，其中最主要的用途就是利用它來發電。

隨着工農生業產的發展，世界各國對電力的需求量日益增長，在某些西方國家中，由於長期開採，煤和石油等地下燃料 (Fossil fuels) 已日漸枯竭，另闢能源就成了他們的當務之急。另一方面，許多發展中的國家，煤和石油資源仍未充分開發，雖不存在資源趨向枯竭問題，由於工農業等的迅速發展，對於電力需求也越來越多，利用核子能也可以解決大量的電力供應問題。

所謂原子能，究其實並不能確切表明這種能的性質，因為它實際上來自原子 (Atom) 中央的原子核 (Nucleus) 所產生的裂變反應 (Fission)，所以這種能，正名應該為「核能」(Nuclear energy)。人類利用核反應堆 (Nuclear reactor) 來生產這種能。1 公斤鈾 (Uranium) 中所含的

能量如果會在核反應堆中全部放出的話，就相當於燃燒大約 3,000 噸煤所能產生的能量，這是一個多麼驚人的懸殊對比。

核反應堆是以熱 (Heat) 的形式放出核能的，放出的熱被用來產生蒸汽 (Steam)，而接着就用普通的發電設備進行蒸汽發電。到本世紀五十年代中期，核能發電已經成功，而目前許多國家也實現核能發電了。

六十年代後期起，人們越來越注意大規模使用地下燃料所產生的環境問題，其中包括地下採煤對健康的危害，地面開礦招致的生態損害，石油運輸引起的海洋污染，以及燃燒煤和石油造成的空氣污染。相比之下，核電站似乎對環境比較無害。當然，輻射漏洩則另當別論了。七十年代初期起，一些國家的核電力在總電力輸出量中所佔的成分迅速增加。有人認為，在較長的期間內，煤和石油將成為化學工業無法取代的原料，因而應該留作這些用途，而核能就用來發電。將來能的需求量的增長，核能起決定性作用。

雖然如此，目前利用核反應堆產生核能的技術，還需要逐步改善。而對於放射性物質的處理，也需要徹底解決。

本書分別介紹核子物理的一些基本知識，核子反應堆產生核能的原理和各種類型的反應堆，核反應堆的燃料，各國利用核能的概況，使讀者對這方面有比較全面的認識。由於水平所限，錯漏之處，還望讀者指正幸。

一九七七年春

目 次

前 言	1
第一章 核子物理的一些基本知識	1
鈾原子核的奧妙	2
放射性與輻射	4
連鎖反應和反應堆	7
反應堆的其他問題	16
反應堆發電的基本原理	19
第二章 反應堆的各種類型	21
初期的核反應堆	23
氣冷動力反應堆	26
輕水反應堆	38
重水反應堆	45
快中子增殖反應堆	49
第三章 核反應堆燃料的循環	57
鈾的生產和濃縮	57
鈾燃料的製造與運輸及重水的生產	63
燃料的再加工	68
放射性廢料的管理	70
第四章 核能的和平利用	74
各國發展核能發電計劃	74

	反應堆的重大事故	76
第五章	受控熱核反應的試驗	79
	怎樣實現受控熱核反應	81
	幾種受控熱核反應裝置	84
	受控熱核反應的新進展	89

第一章 核子物理的一些基本知識

原子 (Atom)、原子核 (Nucleus)、核子 (Nucleon)、放射性 (Radioactivity)、輻射 (Radiation)、核反應堆 (Nuclear radiator) 等術語都是核子物理學的基本名詞。在談到核能發電之前，我們必須先明確它們的含義。

原子是什麼呢？原子是各種元素 (Element) 最終能被分割而成的最小單位，它仍保持該元素的本來性質。例如，鉛原子就是最後可能被分割而成的最微小的鉛。再分割下去所形成的就已不是鉛了。如果分割一個原子的話，首先得到的部分叫做電子 (Electron)。電子帶負電荷，而原子的其餘部分則帶正電荷。這時原子的兩個部分已成為離子 (Ion)：電子是負 (Negative) 離子，而原子的其餘部分則是正 (Positive) 離子。電子每次被分割出去後，原子的其餘部分就留下更多的正電荷。這種作用就叫做電離作用 (Ionization)。由於正負電荷相互吸引，要電離出越來越多的電子，困難就會越來越大。

假定所有電子都能被分離出來（實際上大多數原子很難達到這個程度），剩下的就是原子內部的心臟，這就是原子核 (Nucleus)，也是所有正電荷所在的地方。令人驚

奇的是，雖然原子核只含有相互排斥的正電荷，它的組成部分却能緊緊結合在一起。

鈾原子核的奧妙

談到原子時，許多人也會想到鈾這種東西。鈾有什麼特別的地方呢？要了解鈾的獨有特性，就必須明白原子核由什麼組成以及它們是怎樣活動的。原子由電子繞着原子核組成，而原子核則由質子 (Proton) 和中子 (Neutron) 組成。一粒質子有一正電荷，而中子則沒有電荷，因而是中性 (Neutral) 的。最初人們似乎很難理解原子核究竟是怎樣合為一體的。照理，質子的正電荷應會把質子猛烈分開。但由於原子核的內部有一種特殊的力在起作用，這是在質子和中子之間起相等作用的一種極為強大的近距離吸引力 (Short-range attractive force)。這種近距離核力把質子和中子結合在一起，抵消了質子正電荷的排斥效應。我們可把在這種核吸引力作用下的質子和中子都看成是核子 (Nucleon)，而中子則起了核結合劑的作用。

然而在鈾原子核這種含有九十二個質子的原子核中，質子間的排斥力快要戰勝那種核力，幸好這個核中有一百四十六個中子，使原子核足以保持完整。這種共有二百三十八個核子的鈾稱為鈾-238或 $^{238}_{92}\text{U}$ 。由於核子的組合作用和兼容性的緣故，另一種鈾原子核很可能少了三個中子，這

就叫鈾-235或 $^{235}_{92}\text{U}$ 。這種較輕原子核的鈾，只佔自然生產的鈾的千分之七而已。同一種化學元素的每一個原子核都含有同樣數目的質子，所以含九十二個質子的就是鈾的原子核。其核所含質子數目相同而中子數目不同的原子稱為該元素的同位素 (Isotope)，如鈾-238和鈾-235都是鈾的同位素。鈾-235的原子核擁有自然界已發現的二百多種有效數量的原子核當中獨有的一種特性，它已處在接近破裂的內部應力之下，只要有一個雜散 (Stray) 中子偶然鑽進核裏它就能完全破裂。

鈾-235 原子核中多了一個雜散中子就變成短命的鈾-236複合原子核。這中子所加的能影響原子核本來就靠不住的穩定性，使原子核幾乎立刻就會炸開。破裂的原子核通常約有五分之二飛往一個方向，而約有五分之三則飛向相反的方向，也許還會有兩三個零星的中子射了出來。分裂時常形成兩種物質，一種是含有三十八個質子和五十二個中子的一塊，這是銣-90 (Strontium-90) 的原子核；一種是含有五十四個質子和八十九個中子的一塊，這是惰性氣體氙-143 (Xenon-143) 的原子核。此外還有三個零星的中子。

飛出的碎核以非常多的能量爆裂開來，值得注意的是，原子核經過爆裂之後，其質量就減少。這是因為原子核原有的質量中，有一部分在爆裂時已轉化為能。這就是原子核放出巨大的能的來源。

原子核的這種完全破裂現象叫做「裂變」(Fission)。由一個額外中子沖擊而引起的裂變作用，稱為「感應裂變」

(Induced fission)，如鈾-235 就是如此。一些很重的原子核太不穩定，即使不被一個中子打中也可能自行破裂，這種叫「自發裂變」(Spontaneous fission)。

放射性與輻射

不論感應或自發的裂變，都是原子核最猛烈的分裂方式。但原子核也有其他分裂方式。例如鈾-238原子核雖不像較輕的鈾-235核那樣接近破裂，但它仍處在極大的應力下，以致它遲早可能噴出一個由兩質子和兩中子組成的塊團或粒子。這種粒子在各方面都和普通氦原子核相同，但它以相當大的速度噴出，並在它所經過的地方(不論碰到什麼東西)「犁」出一道溝，這種粒子特稱為 α 粒子(Alpha particle)。大多數，至少有八十三個質子的原子核都會經歷這麼猛烈的分裂而稱為 α 發射體(Alpha emitter)。

α 粒子噴出後，原子核內剩下九十個質子和一百四十四個中子，這就變成了金屬鈾-234 (Thorium-234)的原子核。它的應力雖然較小，但內部常不能保持平衡狀態，它會突然噴出一個電子，和原子核外面的電子完全相同，但因它以相當大的速度噴出而特稱為 β 粒子(Beta particle)。這時的原子核中就多了一個正電荷，核子數目不變，但其中一中子已變成質子，而使核中含九十一個質子和一百四十三個中子，這就是鏷-234 (Protactinium-234)的原子

核。鎂-234和鈷-234一樣，都是 β 發射體(Beta emitter)。它射出一 β 粒子後成為鈷-234，而鈷-234又是 α 粒子的發射體。這麼一來，這些原子核就按照跳背遊戲式交替射出 α 和 β 粒子，直到原子核中最後剩下八十二個質子和一百二十四個中子時才穩定下來，而這便是鉛-206的原子核。

在這個過程中，原子核在射出一個 α 或 β 粒子之後仍然動盪不安。爲了安定自己，原子核會放出一陣能量，這近似普通的光，但比光更強烈而且肉眼看不見，它叫做 γ 射線 (Gamma ray)。它和人所共知的X射線 (X-ray) 完全相同，但X射線來自原子核外的電子層，而 γ 射線則來自核內。

綜上所述，原子核能以四種方式改變自己，那就是裂變、 α 發射、 β 發射和 γ 發射，統稱為衰變 (Decay)。從一塊含有這些不穩定原子核的物質中，這些活動所產生的發射物朝四面八方輻狀射出，這塊物質就被說成是有放射性的 (Radioactive)。而中子、 α 和 β 粒子及 γ 射線的發射就叫輻射 (Radiation)。每秒鐘射出三百七十億這種發射物的一團原子核、表示它有一居里 (Curie) 的放射性。這正是一克鐳 (Radium) 的放射性。

我們雖然不可能斷定放射性物質中某個原子核是否快要衰變。然而任何放射性物質中總是有一部分原子核在一定時間內發生衰變。例如鋇-90 開始時有一千個核，二十八年後衰變了一半而只剩五百，再過二十八年後又衰變了一半而只剩二百五十，並順此衰變下去。不論開始時有

多少，二十八年後都會衰變一半而留下一半，顯然其放射性也相應減少一半。對鋇-90 來說，二十八年的時期就是它的半衰期 (Half-life)。不同的放射性同位素的半衰期也各異，短者只有一秒鐘的百萬分之幾，而長者可達幾百萬年。

核輻射對周圍物質的影響要看該物質的性質、輻射類型、釋出的能量及其強度而定， α 粒子能同周圍的原子相互作用，奪去電子並把原子核撞離原位。 α 粒子在這過程中迅速放出自己的能。 α 粒子的射程很短但在它所經之處造成嚴重損害。 β 粒子能夠干擾並逐開鄰近的電子，但不那麼迅速損失其能量，因而比 α 粒子的射程較遠一點。大多數 β 輻射在一塊金屬薄板的厚度內停下。 γ 射線沒有電荷，其能量的損失就慢得多，而射程也很長，在所經之處的任何一點造成的干擾也較少。中子同樣是射程很長，主要在和原子核直接碰撞時才放慢下來。 γ 射線或中子輻射能穿過 1 公尺以上的混凝土。

從原子中逐出一電子就使原子成為離子，所以從核中發射就叫做電離輻射 (Ionizing radiation)。當電離輻射穿過一種物質時，它能引起該物質結構中的變化，這些變化有時是暫時的，有時是永久的，有時有用，有時有害。電離輻射的效果大致取決於這種輻射把多少能量加於一定數量的物質中，能量越多，破壞性越大。輻射受量的基本單位是倫琴 (Roentgen)。

如果輻射穿過生物，足以打亂生物的分子安排，其後果很是嚴重的。有幾種單位用來測定輻射對生物的影響，

最常用的是「輻射吸收劑量」(Radiation absorbed dose)，簡稱拉德 (Rad)，和「人體倫琴當量」(Roentgen equivalent man)，簡稱雷姆 (Rem)。後者在能量輸送情況下中子或 α 損害嚴重性較大。對 β 和 γ 輻射來說一拉德約等於一雷姆。而對中子和 α 粒子來說一拉德可能多達二十雷姆，這取決於粒子的能量。

根據研究，全身受 400 雷姆劑量輻射的人有一半是會被殺死的。即使是很少的劑量也會造成細胞損壞而導致白血球增多症 (Leukaemia) 或其他類型的癌症，輻射對生殖細胞內複雜分子的損害可能產生畸形子孫。即使一道 γ 射線也能破壞一個遺傳基因 (Gene)。如果這基因存在生殖細胞裏，那麼後果更是不堪設想。

連鎖反應和反應堆

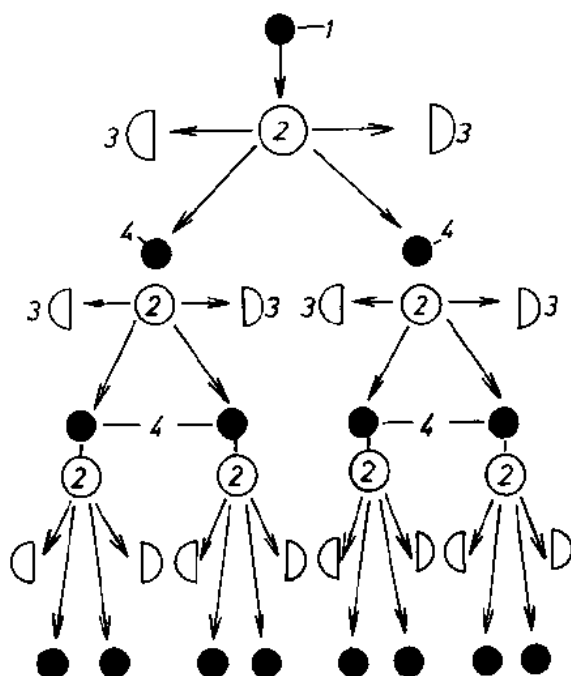
一塊鈾中總是有一些自發裂變或宇宙射線 (Cosmos ray) 所形成的雜散中子，假定其中之一誘發一個鈾-235 原子核的裂變，在產生這樣兩個裂變的同時也許還會射出兩、三個高能量中子。這些高能量中子的射出，可以出現三種情況：第一，一個中子可能跑到那塊鈾的表面而逃出；第二，它也可能擊中另一個原子核並為它所吸收，但沒有立刻引起分裂；第三它可能擊中另一個原子核而接着使該核即刻破裂。中子引起這種感應裂變正是由於它的高能量和

擊中原子核的緣故。我們還要知道剛從裂變中噴出的一粒快中子 (Fast neutron) 能使鈾-238原子核裂變，但它還不是使鈾-235原子核破裂的最有效工具。如果一粒中子在其他原子核之間跳來跳去並一點一點地放出其能量，它不久就會慢了下來，可是它並不停息，它還會靠着這塊鈾其他部分共用的熱能使它來回衝撞，這時它就成了一個熱中子 (Thermal neutron)。只有快中子才能使鈾-238原子核裂變，而熱中子則更加可能導致鈾-235原子核裂變。

如果一塊鈾-235中，有一原子核發生裂變，它放出的中子可能擊中其他原子核而引起更多裂變，並放出更多中子。在這情況下，如果有足量的鈾-235原子核，並且聚集在一起，那就會以加倍的速度把裂變擴展起來。越來越多的中子造成越來越多破裂的原子核，它們的碎片飛來飛去而放出越來越多的能量。這就是連鎖反應 (Chain reaction)。如果有足量鈾-235長時間緊包在一起而且連鎖反應失去控制，那麼就會發生核爆炸。這就是原子彈的原理。

一粒中子可能鑽進鈾-238 原子核中，但沒有使它破裂。如果這種情況發生的話，該原子核不久就射出一 β 粒子，後來又再射出一個，它就變成釷-239 (Plutonium-239)的原子核。釷像目前非常稀有的鈾-235和其他幾種同位素一樣是裂變性的，它能產生連續裂變的連鎖反應，因而釷是用作原子彈的人造原料。

連鎖反應是可以控制的。事實上釷正是用此方式生產



1. 中子分裂原子核
2. 裂變前的原子核
3. 裂變碎片
4. 被裂變和再分裂的原子核釋出來的中子

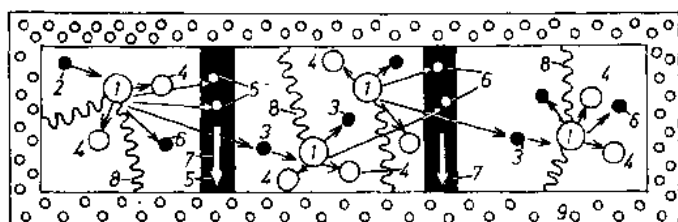
圖 1 核子連鎖反應

的。用來引起和控制持續連鎖反應的裝置，稱為核反應堆 (Nuclear reactor)。

不受控制和受控制的連鎖反應之間差別極大。不受控制的連鎖反應（即核爆炸）的裂變性 (Fissile) 原子核的排列的發生，必須是突然而又是最終的。而持續進行受控制的連鎖反應的裂變性原子核必須更加仔細地組織。建造一座反應堆比引爆一枚核彈需要多得多的原子核，也就是說需要更多的材料。其中一個原因是這樣的核爆需要較純的裂變性材料，而反應堆內的裂變性材料也比較稀薄，因而相應地要有多得多的材料。但本身也必須有更多的裂變性原子核。因為中子在這裏擔任着極重要的角色。

如果使連鎖反應能夠自動持續，它就必須不斷得到中子的供應，下列程序是典型的：一粒中子衝進一個鈾-235 原子核中，原子核立刻裂變，在產生兩個裂變的同時也射出三粒中子。其中一粒衝出鈾塊表面而消失掉；另一個中子被鈾-238 原子核所吸收而使它開始變為釷-238 的兩級變化但並不破裂。這時只留下一粒中子。如果這第三粒中子衝入另一個鈾-235 原子核中使它破裂，這個過程就能使裂變繼續，不然的話連鎖反應就停頓下來。

不論任何時候，鈾塊內部都必須有適當數量的含有一定能量的中子來維持其連鎖反應。實際上在持續連鎖反應的情況下，每一個因引起裂變而損失的中子必須恰好由另一個具有同樣作用的中子所取代。這時反應堆的繁殖係數 (Reproduction factor) 就是 1。當達到這種情況時這個裝



- | | |
|-------------------------|-------------|
| 1. 可裂變元素的原子核 | 5. 減速劑 |
| 2. 用中子轟擊 | 6. 被釋出的中子 |
| 3. 中子釋出和分裂出
來的另一些原子核 | 7. 產生的能量 |
| 4. 兩個新的原子核 | 8. 像X光樣的輻射線 |
| | 9. 混凝土防護牆 |

圖 2 受控連鎖反應

置被說成是臨界的 (Critical)，而這種情況稱為臨界狀態 (Criticality)。為什麼叫做「臨界」呢？因為在引起裂變後損失的每個中子，如果平均是由一個以上的中子取代時，反應就會脫離控制，繁殖係數就大於 1，這個情況就叫做「脫節」 (Divergent)。如果這樣損失的每個中子平均由少於一個中子取代的話，繁殖係數就小於 1，反應就會停止。這種情況的出現常常是由於鈾塊有太多表面讓中子漏出的緣故。

因此，連續受控制的連鎖反應必須有兩個基本條件：第一，是一批裂變性原子核要佈置得很適當；第二是要有足夠數目和能量的中子使連鎖反應維持下去。在天然鈾中