

科學圖書大庫

核子工程學

編著者	莊明家
校閱者	周良翰 翁寶山

徐氏基金會出版

科學圖書大庫

核子工程學

編著者	莊明家
校閱者	周良翰 翁寶山

徐氏基金會出版

徐氏基金會科學圖書編譯委員會

科學圖書大庫

監修人 徐銘信 科學圖書編譯委員會主任委員
編輯人 林碧鏗 科學圖書編譯委員會編譯委員

版權所有

不許翻印

中華民國六十五年五月十八日初版

核子工程學

基本定價 2.80

編著者 莊明家 美國羅徹斯特大學工學博士
校閱者 周良翰 德國Tübingen 大學化學工程博士
翁寶山 美國德州農工大學核子工程博士

本書如發現裝訂錯誤或缺頁情形時，敬請「刷掛」寄回調換。謝謝惠顧。

(63)局版臺業字第0116號

出版者 財團法人 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 財團法人 臺北市徐氏基金會 郵政劃撥賬戶第15795號
承印者 大原彩色印製企業有限公司地址：台北市興寧街24號 電話：3611986. 3813998

我們的工作目標

文明的進度，因素很多，而科學居其首。科學知識與技術的傳播，是提高工業生產、改善生活環境的主動力。在整個社會長期發展上，乃對人類未來世代的投資。從事科學研究與科學教育者，自應各就專長，竭智盡力，發揮偉大功能，共使科學飛躍進展，同將人類的生活，帶進更幸福、更完善之境界。

近三十年來，科學急遽發展之收穫，已超越以往多年累積之成果。昔之認為若幻想者，今多已成為事實。人類一再親履月球，是各種科學綜合建樹與科學家精誠合作的貢獻，誠令人無限興奮！時代日新又新，如何推動科學教育，有效造就科學人才，促進科學研究與發展，允為社會、國家的基本使命。培養人才，起自中學階段，此時學生對基礎科學，如物理、數學、生物、化學，已有接觸。及至大專院校專科教育開始後，則有賴於師資與圖書的指導啟發，始能為蔚為大器。而從事科學研究與科學教育的學者，志在貢獻研究成果與啟導後學，旨趣崇高，彌足欽佩！

本基金會係由徐銘信氏捐資創辦；旨在協助國家發展科學知識與技術，促進民生樂利，民國四十五年四月成立於美國紐約。初由旅美學人胡適博士、程其保博士等，甄選國內大學理工科優秀畢業生出國深造，前後達四十人，惜學成返國服務者十不得一。另曾贈送國內數所大學儀器設備，輔助教學，尚有微效；然審情度理，仍嫌未能普及，遂再邀請國內外權威學者，設置科學圖書編譯委員會，主持「科學圖書大庫」編譯事宜。以主任委員徐銘信氏為監修人，編譯委員林碧鏗氏為編輯人，各編譯委員擔任分組審查及校閱工作。「科學圖書大庫」首期擬定二千種，凡四億言。門分類別，細大不捐；分為叢書，合則大庫。為欲達成此一目標，除編譯委員外，本會另聘從事

序 言

核反應器爲揭開原子之謎，釋出其所含巨大能量原子能以造福人群的器械。迄今，核反應器爲解決能源危機唯一可用的大規模發電的裝備。核反應器動力廠的設立，不但可以解決能源危機，提高人民的生活水準，並且可以增高一個國家的聲望。因此世界先進國家莫不投下巨額的資金及動員各類的專門人材，從事於核反應器的研究與發展。我國現正在推進核子科學的研究工作，並已建立核能發電廠，以求能源自足而有助於國計民生。職此之故，對於成爲原子能和平用途最大關鍵的核反應器實有加強瞭解及推廣其智識的必要。

本書主要的目的在於描述核反應器的操作及設計原理，核反應器的結構及核動力廠的概況，放射性廢料處理及核反應器的安全設施等，使讀者瞭解其作用及原理。

本書可作爲機械工程，電機工程，核子工程各學系及核子物理等學科的教科書，也可作爲核子工程及發電等各方面從業人員，以及想瞭解原子能及利用原子能器械的一般讀者的參考書。爲便於對核反應器想作更深一層瞭解與研究的讀者，本書也附列各有關题目的參考文獻以備查閱。本書所用術語及工程名詞，以教育部公佈的譯名爲準。書末附有中英文名詞對照索引，以便檢查。書中容有疏漏及謬誤之處，甚望各界先進不吝指教與斧正。

莊明家 識於美國西屋電器公司
研究及發展中心

目 錄

第一章 原子結構與核能 .. 1	第三章 反應器的基本結構 66
1.01 物質與原子結構..... 1	3.01 燃料元件及其裝置... 66
1.02 核結合能..... 5	3.02 控制元件及控制系統
1.03 核分裂反應及其產生的 能量..... 9	3.03 核心裝置及反應器壓力 容器..... 85
1.04 變換及滋生過程..... 15	3.04 屏蔽系統..... 90
1.05 核融合反應及其產生的 能量..... 19	附錄 3.01 輻射損害 ... 97
第二章 反應器的物理特性 26	3.02 (n, γ) 及 (n, α) 反應 98
2.01 反應器的功用..... 26	第四章 反應器的熱傳遞及 流體動力學問題 .. 100
2.02 分裂中子的特性及中子 源..... 27	4.01 核能抽取問題..... 100
2.03 核截面..... 30	4.02 冷却劑的選擇..... 102
2.04 核臨界性、反應率及增 值因數..... 35	4.03 熱傳遞原理..... 107
2.05 中子擴散理論與反應器 的臨界尺寸..... 38	4.04 反應器內核心的溫度 分佈..... 117
2.06 緩和劑及反射體..... 46	4.05 壓力落差及排吸動力..... 122
2.07 反應器的臨界質量... 53	4.06 高熱點因數..... 128
2.08 反應器的反應率係數... 56	4.07 沸騰熱傳遞..... 130
附錄 2.01 擴散方程式 的求解法..... 58	4.08 兩相流..... 140
附錄 2.02 費米年積理 論..... 60	4.09 熱交換器..... 151
	4.10 熱應力及材料問題... 159
	附錄 4.01 流體力學及 熱傳遞的基本公式導 演法..... 163

附錄 4.02 燃料元件的 熱傳導公式特例.....	166
-------------------------------	-----

第五章 核動力廠 169

5.01 核動力廠的概要.....	169
5.02 壓水反應器核動力廠	171
5.03 沸水反應器核動力廠.....	177
5.04 重水反應器核動力廠.....	186
5.05 鈉石墨反應器核動力廠	190
5.06 氣冷反應器核動力廠.....	196
5.08 熔鹽滋生反應器廠	211
5.09 太空中的核動力廠—— 核火箭.....	215
5.10 核動力船.....	224

第六章 核動力廠的安全及 放射性廢料的處理 法 229

6.01 輻射及人體健康.....	229
6.02 輻射監測儀器的保防設 置.....	233
6.03 用過核燃料再處理法	234
6.04 放射性廢料的管理問題 及處理法.....	237
6.05 高放射強度廢料表面儲 存法.....	242
6.06 放射性廢料燃燒處理及	

不釋放於環境的處理 法.....	245
6.07 核動力廠址的選擇...	248
6.08 反應器的保安裝置...	250
單位換算關係式.....	252
參考文獻.....	256
英漢名詞對照 ...	270

第一章 原子結構與核能

1.1 物質與原子結構

若將物質組成的成份逐步分析，吾人會發現各種物質係由個別的分
(Molecule) 所組成。每種分子又由個別的原子 (Atom) 所組成。原子本身則係
由帶正電荷的原子核 (Nucleus) 及環繞原子核運轉的帶負電荷的電子 (Elec-
tron) 所構成。原子核的成分主要係帶正電荷的質子 (Proton) 及不帶電荷的中
子 (Neutron) 組成。故質子及中子合稱為核子 (Nucleon)。電子的負電荷數
目等於質子的正電荷數目，故整個原子核呈中性，不帶電荷。質子與中子質
量約略相等 (中子質量較大一些)。電子的質量則甚小，約等於質子質量的

$\frac{1}{1836}$ 。故一個原子的質量大部分集中於原子核內。

原子核與電子依靠彼此之間的電力 (Electric Force) 而維持原子於平衡
狀態。但吾人可以由原子中打掉一個或一個以上的電子，使原子結構有一個
或一個以上的過剩正電荷，此時的原子吾人稱為帶正電荷的離子 (Ion)。原
子在此結構下成一不穩定狀態，其離子將會尋找機會捕捉足夠的電子，以恢
復原子淨電荷成為零或中性不帶電荷的平衡狀態。

原子既不帶電荷，它們是如何結合在一起形成分子或物質？其主要原因
為各別原子內的正電荷質子與負電荷電子所佔據的空間不同，故原子與原子
之間仍然會呈現互相排斥與吸引的力量，其合力完全決定於原子核外層環繞
運轉的電子排列或分佈。原子與原子之間在遠距離時所呈現的吸引力很微弱
，但當彼此接近時，在軌道上運轉的電子就會互相重疊，此時原子之間相互
的排斥力或吸引力變成很大。在一般情況下，除非原子運動的速度非常大，
原子之間的排斥力較吸引力為強大，原子與原子並不互相滲透。原子運動的
速度決定於物質的溫度，在常溫下，原子運動速度低，不致引起原子與原子
之間的滲透。當原子互相靠近，其軌道外層的電子幾乎接合在一起時所呈現
的結合力，吾人稱作為化學力 (Chemical Force)，因其為構成物質的化學現

2 核子工程學

象的主因。例如：兩個氫原子結合形成一個穩定結構的氫分子。此結合後的分子以不規則的方向作無規運動，並對其他分子發生相互排斥的力量。氫氣並非以單原子存在而是以成對的原子存在。分子可由二個或二個以上的原子依據化學力組成。當原子結合成分子後，須利用具有相當大能量的原子或分子衝擊方能使之再分離。此種使分子中的原子再分離的最小能量吾人稱為分子的結合能 (Binding Energy)，約為幾個或幾十個電子伏特。

原子核內所含的質子數目，稱作為原子序數 (Atomic Number)，而原子核內所含的核子 (即質子與中子) 數目，則稱作為質量數 (Mass Number)。因為一個質子或一個中子的質量約等於一原子質量單位 (Atomic Mass Unit，簡稱為 amu， $1 \text{ amu} = 1.66 \times 10^{-24}$ 公克)，所以原子核的原子質量單位可代表一個原子的約略質量數。由原子序數相同的個別原子結合而成的物質，吾人稱為元素 (Element)。由原子序數不同的個別原子藉化學力結合而成的物質；吾人稱為化合物 (Compound)。簡言之：元素由同一種原子組成，化合物則由兩種或兩種以上的不同原子組成。例如：氫、氧為元素，而水含有氫、氧兩種原子即為化合物。具有相同原子序數但不同質量數的元素，吾人稱為同位素 (Isotopes)，亦即同位素為元素中含有相等數目的質子或電子，但不等數目的中子者。由於原子核內的質子或核外電子決定一種元素的主要化學性質，故同位素所呈現的化學性質相同，僅質量或中子的總質量略有差異。例如：氫原子為所有原子中最簡單者，可有 0 至 2 個中子，亦即氫原子可有同樣的一個原子序數，但不同的原子質量。氫原子中無中子者稱為氫或氕 (Protium， ${}^1_1\text{H}$)；有一中子者稱為氘 (Deuterium，D 或 ${}^2_1\text{H}$)；有二中子者稱為氚 (Tritium，T 或 ${}^3_1\text{H}$)。氕及氘為氫的同位素 (參考圖 1.1 典型的原子結構)。一種同位素的化學記號常用 ${}_Z^AX$ 表示之，X 為元素的化學符號，A 為質量數，Z 為原子序數。

在自然界中有很多的元素以同位素混合而成一混合物 (Mixture)。例如：天然鈾中含有重量 99.238 % 的鈾 238 (${}_{92}^{238}\text{U}$)，0.711 % 的鈾 235 (${}_{92}^{235}\text{U}$)，及 0.0058 % 的鈾 234 (${}_{92}^{234}\text{U}$)。有很多的同位素並不存在於自然界中，但可在實驗室或核反應器 (Nuclear Reactor) 中造成，以供吾人使用。在核燃料鈾中，已知的同位素約有 14 種，質量數由 227 至 240 不等。

環繞在原子核周圍的電子并不只是局限在同一軌道上，而是分佈於具有不同量子數，n 為 1，2，3，4……等的殼層上。此等殼層由最內一層向外依次常用 K (n=1)，L (n=2)，M (n=3)，N (n=4)，O (n=5)，……等記號表示之。當原子在不受激的基態 (Ground State) 下，任

何一殼層所含的電子數目不能多於 $2n^2$ 。如圖 1.1 所示的典型原子結構；鋰原子 ($Z=3$, $A=7$)，K 層含有二個電子，L 層含有一個電子，鈉原子 ($Z=11$, $A=23$)，K 層含有二個電子，L 層含有 8 個電子，最外的 M 層含有一個電子等。在最外一殼層軌道上運轉的電子，吾人稱為價電子 (Valence Electrons)。一個元素的化學性質決定於價電子的數目。鈍氣 (Inert Gas)，氦 (${}_2\text{He}$)、氖 (${}_{10}\text{Ne}$)、氬 (${}_{18}\text{Ar}$)、氪 (${}_{36}\text{Kr}$)、氙 (${}_{54}\text{Xe}$)、(${}_{86}\text{Rn}$) 為單原子氣體，其電子殼層完全為電子所佔滿，無空位餘留，故不易由其他原子中獲得或對其他原子釋出電子，亦即不易與其他元素引起化學作用形成多原子的分子。在元素週期表中個別位於鈍氣後的元素如鉀、鈉、銅等大部分金屬元素，僅含一個價電子，很容易失去此價電子而成正離子 (原子核內有多餘的正電荷)，為優良的電導體。相反的，位於鈍氣前的非金屬元素如氟、氧等則易於獲得電子而成為負離子 (原子含有多餘的負

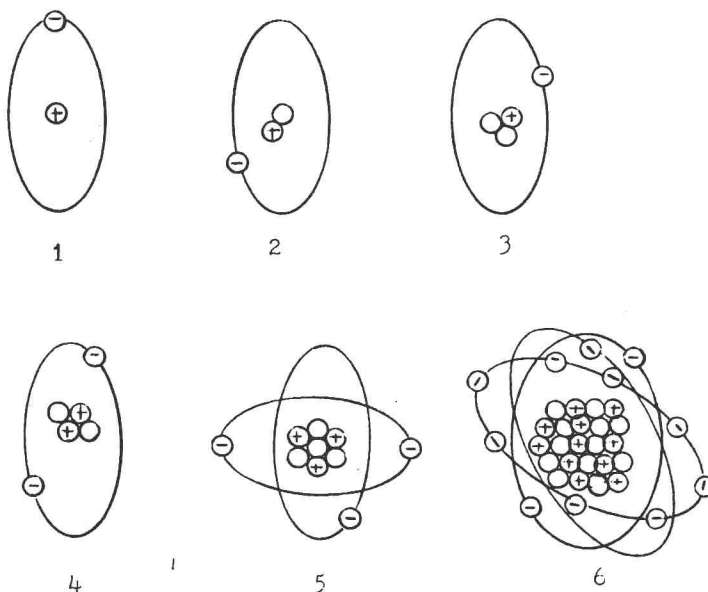


圖 1.1 典型的原子結構 (⊕：質子，⊖：電子，○：中子) [1：氫原子 ($A=1$, $Z=1$)，2：氦原子 ($A=2$, $Z=1$)，3：氦原子 ($A=3$, $Z=1$)，4：氦原子 ($A=4$, $Z=2$)，5：鋰原子 ($A=7$, $Z=3$)，6：鈉原子 ($A=23$, $Z=11$)]。

A = 質量數 = 質子數 + 中子數

Z = 原子序數 = 質子數

電荷)，爲電的不良導體。

原子與原子之間很容易釋出與獲得單獨的價電子，形成正、負離子，互相吸引形成一分子，此種結合稱爲離子鍵 (Ion Bond)。例如：鈉原子很容易失掉最外層 (M 殼層) 的一個電子於氯原子最外層 (M 殼層) 的七個電子 (氯原子， $Z=17$ ，K 層有 2 個電子，L 層有 8 個電子，M 層有 7 個電子)，形成一穩定的氯化鈉化合物 (NaCl 或 Na^+Cl^-)。原子也可經由電子共有 (sharing) 而形成一穩定分子，例如：兩個氫原子可以共用 K 殼層的每一個價電子，佔滿 K 層的最大的電子容量，成爲一穩定的氫分子 (H_2) 等。此種結合稱爲共價鍵 (Covalent Bond)。此外，如鈉、鐵、銅等金屬，其原子最外一層的電子可以在同一元素內自由遷移於正離子之間，形成一種化學結合。此種結合稱爲金屬鍵 (Metallic Bond)。以金屬鍵結合的物質具有很高的導電與傳熱性質。一種物質可具有一種或一種以上的化學鍵，例如：天然鈾屬於金屬鍵，氧化鈾 (UO_2) 屬於離子及共價鍵，碳化鈾 (UC) 即屬於共價及金屬鍵。熟知一物質或材料由何種化學鍵結合而成，即可決定該材料能否抵抗核輻射，此爲決定採用反應器材料時一種重要依據 (參考文獻 1)。

前已敘述原子與原子利用化學力結合成爲元素或物質，電子與核子 (原子核) 也藉着電力保持彼此之間的平衡狀態，然則原子核內帶正電荷的質子與不帶電荷的中子是以何種力量相結合？科學家嘗試圖發現其答案，於是助長近代物理—〔高能物理〕的進展。吾人所知的核子間力有兩種：一種爲質子與質子之間相互排斥的靜電力，遵循庫倫定律 (Coulomb's Law)；另一種爲核子之間所呈現的非常強大的吸引力，使核子緊密結合，此種力量不同於化學力、電力、電磁力、重力等吾人通稱爲核力 (Nuclear Force)。核力僅在核子非常接近 (約 10^{-13} cm 的原子核半徑) 時，方能呈現出來。由實驗得知質子與質子之間，中子與中子之間，及質子與中子之間的核力相同，均爲短距力 (Short Range Force)。核力可由高能物理所發現的基本粒子 (Elementary Particles) 解釋之 (參考文獻 2)。

迄今吾人所已發現有關原子結構的基本粒子約可歸納爲三類即：重子 (Baryon)，輕子 (Lepton) 及玻子 (Boson)。玻子爲遵循波司 - 愛因斯坦統計法 (Bose-Einstein Statistics) 的基本粒子，其自轉 (Spin) 數爲整數如 0, 1, 2, 3, ………等。自轉爲粒子沿自己的旋轉軸旋轉所引起的量子化角動量，若以 $\frac{h}{2\pi}$ 作爲單位 ($h = \text{普郎克常數 Planck's Constant} = 6.625 \times 10^{-27}$ erg-sec)，此數值必爲 1/2 的整數倍 (包括零在內)。玻子依其在原子

核內的作用不同，可分成介子 (Meson)，光子 (Photon)，引力場量子 (Graviton)，間子 (Intermediate Boson 或 W-Boson) 四類。其中傳遞強交互作用 (Strong Interaction) 的基本粒子稱為介子。最輕的一種介子稱為派子 (Pi-Meson，或 Pion 或 π)，為引起核力的基本粒子，可分成正派子 (π^+ ，帶一正電荷)，負派子 (π^- ，帶一負電荷) 及中性派子 (π^0 ，不帶電荷)。中子與質子放射或吸收此三種派子而引起強交互作用，使中子與質子緊合在一起。其他所發現的介子，也略似派子，在核子間短距離內 (約在原子核半徑內) 引起的強交互作用，產生核力。

光子為傳遞電磁交互作用 (Electromagnetic Interaction) 的基本粒子，兩個帶有電荷的粒子，互呈吸引或排斥作用完全依靠它們互相交換光子而來。電磁交互作用較強交互作用為弱，其強度約為後者的千分之一。光子的質量為零，自轉數為 1。傳遞重力 (Gravitation) 的基本粒子稱為引力場量子，質量為零，自轉數似乎為 2，尚無法直接測出，也無法確認其不存在。傳遞弱交互作用 (Weak Interaction) 的基本粒子稱為間子，為一種理論上假定存在的粒子，自旋數似乎為 1，帶有正電荷或負電荷，其質量當在 2000 MeV ($1 \text{ MeV} = 1 \text{ 百萬電子伏特} = 1.6 \times 10^{-6} \text{ 爾格}$) 以上為一種很重的粒子，其實際存在可能需利用能產生非常高能量的加速器實驗證明之。

重子及輕子合稱為費子 (Fermion)，其自旋數為 $1/2$ 的奇數倍，遵循費米 - 狄悅克統計法 (Fermi-Dirac Statistics)。重子的質量較輕子重的很多，重子與介子一樣具有強交互作用，而輕子則否。已發現的重子有核子 (質子及中子)，拉目達粒子 (Lambda)，西格馬粒子 (Sigma)，串級粒子 (Cascade) 等。已發現的輕子有電子， μ 子 (Muon, μ^-)，電子微中子 (Electron-neutrino, ν^0) 及 μ 子微中子 (Muon-neutrino, ν_μ) 等。每一種粒子皆有電荷相反，但質量、自旋及壽命等相同的相對粒子，吾人稱為反粒子 (Antiparticles)。光子，引力場量子及中性派子，其反粒子就是粒子的本身。重子及介子常有壽命短至 10^{-20} 至 10^{-23} 秒的不穩定粒子，可以衰變為二種或二種以上的粒子，吾人稱作為共振子 (Resonon)，因其可由穩定粒子散射 (Scattering) 時的截面所呈現的共振狀態判定它們的存在。表 1.1 示一些基本粒子的特性 (參考文獻 3-8)。基本粒子為構成物質及能量的基本。瞭解原子結構的基本粒子及其相互的作用，可幫助吾人設法有效的利用緊束着這些粒子的巨大能量，為人類造福。

1.2 核結合能

表 1.1 基本粒子的特性

特 性 名 稱	符 號	電 ⁽¹⁾ 荷	反粒子 ⁽²⁾ 符 號	質 量 ⁽³⁾ Mev	自 旋	平均有效 壽命秒	強交 互作 用	電磁 交互 作用
重子 Baryons								
質 子 } 核 中 子 } 子	p n	+e 0	$\bar{p}$ $\bar{n}$	938 940	$\frac{1}{2}$ $\frac{1}{2}$	∞ (穩 定) 10^3	是	是
拉目達粒子 Lambda		0	$\bar{\Lambda}$	1115	$\frac{1}{2}$	2.5×10^{-10}		
西格馬拉子 Sigma	Σ^+	+e	$\bar{\Sigma}^+$	1190	$\frac{1}{2}$	0.8×10^{-10}		
	Σ^0	0	$\bar{\Sigma}^0$	1192	$\frac{1}{2}$	$\approx 10^{-19}$		
	Σ^-	-e	$\bar{\Sigma}^-$	1196	$\frac{1}{2}$	1.6×10^{-10}		
串級粒子 Cascade	Ξ^0 Ξ^-	0 -e	$\bar{\Xi}^0$ $\bar{\Xi}^+$	1311 1318	$\frac{1}{2}$ $\frac{1}{2}$	1.5×10^{-10} 1.3×10^{-10}		
輕子 Leptons								
電 子	e^-	-e	e^+ (正子)	0.511	$\frac{1}{2}$	∞ (穩 定)	否	是
牟 子 Muon	μ^-	-e	μ^+	106	$\frac{1}{2}$	2.26×10^{-6}		
電子微中子 } 微中子	ν_e	0	$\bar{\nu}_e$	< 0.00025	$\frac{1}{2}$	∞ (穩 定)		
牟子微中子 } Neutrino	ν_μ	0	$\bar{\nu}_\mu$	< 2.5	$\frac{1}{2}$	∞ (穩 定)		
Neutrino ν								
玻子 Bosons								
派子 Pion	π^+	+e	π^-	140	0	2.6×10^{-8}	是	是
介 子 Meson	π^0	0	π^0	135	0	2.3×10^{-16}		
	k^+	+e	$\bar{k}^+$	494	0	1.2×10^{-8}		
	k^0	0	$\bar{k}^0$	498	0	10^{-10} , 6×10^{-8}		
克子 k								
光 子	γ	0	γ	0	1	∞ (穩 定)	否	是否 是?
引力場量子	G	0	G	0	2?			
間 子	W	+e,-e	?	> 2000	1?			

註：(1) $e = 4.8 \times 10^{-10} \text{ e.s.u.}$

(2) 粒子與反粒子具有同樣的質量，自旋及壽命，惟其電荷相反。

(3) $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-6} \text{ erg} = 1 \text{ 百萬電子伏特}$ ，

$1 \text{ eV} = 1 \text{ 電子伏特} = 1.602 \times 10^{-12} \text{ erg}$

如前節所述，核子藉核力緊密結合在原子核內。若欲將核子隔開，使彼此之間不呈現作用力，需要加入一些能量，此能量稱為核結合能 (Nuclear Binding Energy)。核結合能也可視為自由核子結合為原子核時所釋出的能量。

由質譜儀 (Mass Spectrograph) 或其他方法測定的核質量 (Nuclear Mass) 常比組成原子核的各個核子質量的總和為小，此減少的質量稱為質量欠缺 (Mass Defect)。如前節所述的一個原子 ${}^A_Z X$ 中含有 Z 個質子 (原子序數為 Z)，及 $(A-Z)$ 個中子，若以 m_p ， m_n ， m_e 分別表示質子，中子及電子的質量，並以 M 表示原子質量，則質量欠缺 m_d 可寫成

$$\begin{aligned} m_d &= [Z(m_p + m_e) + (A-Z)m_n] - M \\ &= Zm_H + (A-Z)m_n - M \end{aligned} \quad (1.1)$$

在上式中，質子及電子質量的總和可認為相當於一個氫原子 (含一質子及一電子，而無中子，參看圖 1.1 氫原子結構) 的質量 m_H 。凡可以由實驗測定同位素質量的任何原子核種類 (Nuclear Species 或核種 (Nuclide，為能以原子核組成表示其特性的原子)，均可按上式算出質量欠缺的數值。

根據愛因斯坦特別相對論中的質量與能量互換定律，吾人得知質量可以轉變為能量而遵循下列關係式：

$$E = mc^2 \quad (1.2)$$

式中， E 為能量， m 為質量， c 為光速。光速為宇宙內所有速度的極限，約等於 3×10^{10} 公分/秒。若質量 m 以原子質量單位， amu ，表示之 ($1 \text{ amu} = 1.66 \times 10^{-24}$ 克)，並以百萬電子伏特， Mev 為表示能量 E 的單位 ($1 \text{ Mev} = 1.602 \times 10^{-6}$ 爾格)，則上式可改寫成

$$\begin{aligned} E(\text{Mev}) &= \frac{1.66 \times 10^{-24}}{1.602 \times 10^{-6}} \times (3 \times 10^{10})^2 m \\ &= 931 \cdot m(\text{amu}) \end{aligned} \quad (1.3)$$

上式表示每改變 1 amu 的質量，可以產生 931 MeV 的能量，亦即原子中的質量欠缺變為一種能量，此能量實等於將原子核中的核子分成個別的質子、中子及電子所需的核結合能。故核結合能 E_B 可計算如下：

$$E_B = 931 \cdot m_d = 931 \cdot [Z \cdot m_H + (A-Z) \cdot m_n - M] \quad (1.4)$$

上式中， E_B 的單位為 MeV ， m_H ， m_n ， M 的單位為 amu 。

若將核結合能視為均勻的分佈於各核子中 (電子的質量很小可忽略不計，則每一核子的平均結合能 E_b 為

$$E_b = \frac{E_B}{A} \quad (1.5)$$

因爲原子核內含有 A 個核子（ A 爲質量數，等於質子與中子的總和）之故。

若將各種穩定核種按照（1.4）及（1.5）兩式計算，然後將每一核子的平均結合能 E_b 與質量數 A 繪成曲線，即可得圖 1.2 的結合能曲線（參考文獻 9）。由此曲線吾人可以察出：核子的平均結合能以質量數最小的原子核爲最低，隨質量數增加而增大；在質量數 40~120 之間，每一核子的平均結合能約接近最大值 8.5 MeV；自此以後，結合能即隨質量數的增加而減少，直至鈾核的 7.6 MeV。核結合能高達幾百萬電子伏特，百萬倍於分子的化學結合能（在化學反應中，原子與原子結合的能量僅幾個電子伏特而已，例如：將一個氫分子 H_2 分開成二個氫原子 $2H$ ，需要的能量約爲 4.4 電子伏特），此乃人類所以致力啓開原子的謎的原因。

由核子的結合能曲線，吾人亦可察出：若將質量數 $A = 240$ 的重原子核分裂成兩個質量數 $A = 120$ 的部分，則每一核子的結合能可由約 7.5 MeV 增加至 8.5 MeV，亦即每一核子的平均結合能增加約 1 MeV，故一個具有 240 個核子的原子核分裂成兩個具有 120 個核子的原子核時，共釋出約 240 MeV 的能量。此實爲核分裂 (Nuclear Fission) 或原子彈爆炸所依據的原理。同理，若將質量數低的兩輕原子核結合，也可使核子的結合能增加，例如：二個

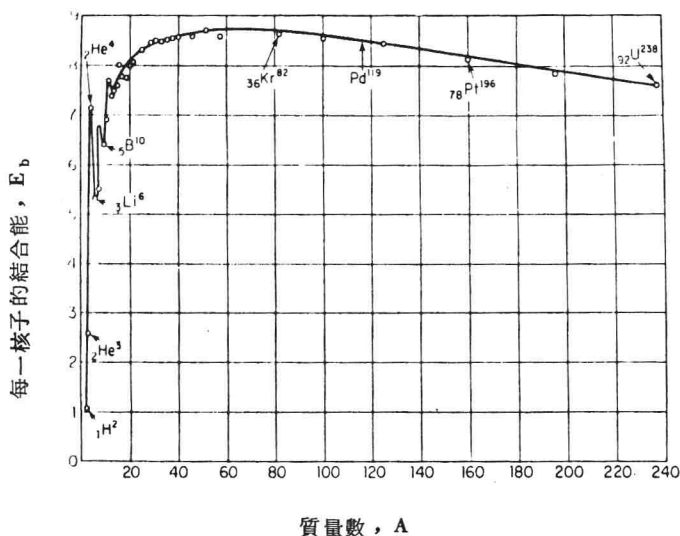


圖 1.2 質量數與每一核子的結合能關係曲線。

氘核 (${}^2_1\text{H}$) 結合形成一個氦核 (${}^4_2\text{He}$) 時，每一核子的結合能約可增加 6 Mev。此即為核融合 (Nuclear Fusion) 或氫彈爆炸的原理。

1.3 核分裂反應及其產生的能量

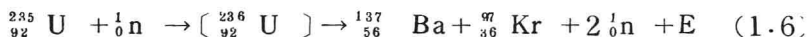
核分裂反應為一種將較重的原子核分裂成二種或二種以上較輕的原子核，使其釋出核結合能的反應。由前節吾人得知若將重原子核分裂成二個較輕的原子核，則可釋出巨大的核結合能，供我們使用。然則吾人需利用何種方法才能使原子核分裂呢？質量數超過 230 的很多核種，可以自然分裂，但其半化期 (Half-Life，為放射性物質衰變至原來質量的一半所需的時間) 甚長，例如：天然鈾 238 的半化期約為 10^{16} 年，鈾 (Plutonium) 239 的半化期約為 5×10^{15} 年，此種自然分裂，稱為放射衰變 (Radioactive Decay)，我們無法加以利用。

由 1.1 節吾人得知原子核帶有正電荷，若利用正電荷的粒子去衝擊原子核，由於原子核內的庫倫排斥力很大，頗為困難；若利用帶有負電荷的粒子（如電子）去衝擊原子核，則因電子圍繞原子核，此負電荷粒子僅能在電子周圍引起作用而無法進入原子核內。雖則利用電磁輻射 (Electromagnetic Radiation) 方法可使重原子核受激而引起分裂，但其效果不大，無實際採用的價值。因此剩下可以採用作為衝擊原子核的粒子只有中性不帶電荷的粒子。由實驗得知，在這些不帶電荷的粒子中，以利用中子衝擊原子核為最有效的引起核分裂的方法。其理由如下：(1) 中子為中性，不帶電荷，到達原子核內時無庫倫的排斥力；(2) 中子與圍繞原子核的電子，不引起相互作用，很容易越過電子殼層而進入原子核；(3) 中子在原子核內所呈現的核力為短程力，故當中子由外面滲透至原來穩定的原子核內時很容易與鄰近的核子引起交互作用，成不穩定的複合核，然後很快的分裂成二個或二個以上的穩定核，達到分裂的目的；(4) 中子衝擊原子核時除了可以引起分裂外，尚可釋出二個或二個以上的中子，此中子可以再用於衝擊另一重原子核，使分裂反應繼續進行，形成所謂鏈反應 (Chain Reaction)。

並不是所有原子核均可利用中子衝擊而引起核分裂反應，在各種化學元素中，僅有少數的同位素是如此。鈾 233 (${}^{233}_{92}\text{U}$)，鈾 235 (${}^{235}_{92}\text{U}$) 及鈾 239 (${}^{239}_{94}\text{Pu}$) 通稱為可裂材料 (Fissionable，或 Fissile Material)，可以利用各種不同能量的中子衝擊引起核分裂反應。釷 232 (Thorium, ${}^{232}_{90}\text{Th}$)，鈾 238 (${}^{238}_{92}\text{U}$) 通稱為可孕材料 (Fertile Material)，僅能利用高能中子（即中子能量大於 10^5 電子伏特，此種中子常稱為快中子，(Fast

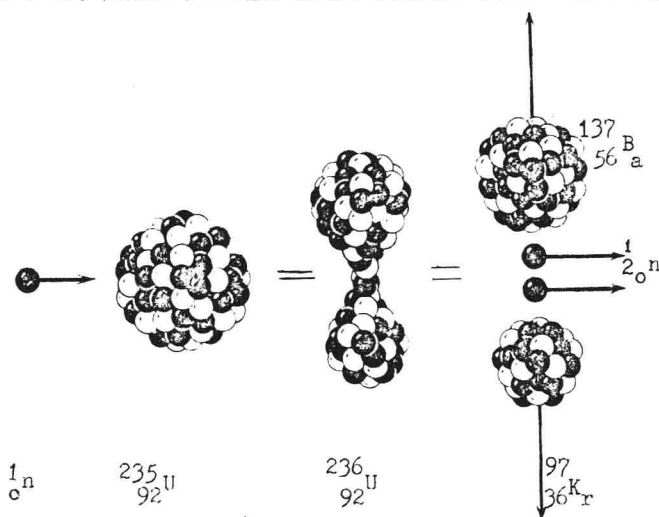
Neutron) 衝擊使之轉變為可裂材料，始能發生核分裂反應。

圖 1.3 甲示一典型的核分裂反應，可用下列反應式表示之：

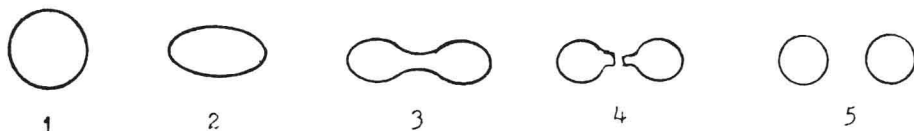


即當一個中子(${}_0^1\text{n}$)衝擊一鈾 235 核(含有 92 個質子，143 個中子)後，先變成一不穩定的複合核鈾 236，立刻分裂成二個質量不等的分裂碎片(Fission Fragments) 鋇 137 (Barium, ${}_{56}^{137}\text{Ba}$ ，含有 56 個質子及 81 個中子)及氪 97 (Krypton, ${}_{36}^{97}\text{Kr}$ ，含有 36 個質子及 61 個中子)，同時產生兩個中子及釋出能量 E。此能量 E 所以會釋放出來係因反應後的物質總和少於反應前的物質總和，此減少的物質，如 1.2 節所述，轉變為能量。

中子衝擊原子核為何會引起分裂呢？為回答此問題，吾人可採用原子核



甲、核分裂反應次序



乙、核分裂的液滴模型

(1：球形體，2：橢圓體，3：啞鈴體，4：分裂，5：分裂後兩球形體)

圖 1.3 典型的核分裂反應次序及模型。