

科學圖書大庫

遵照教育部頒布最新課程標準編著

五專教科書

核能發電

凌大爲 編著
許輝雄

徐氏基金會出版

813
3

科學圖書大庫

遵照教育部頒布最新課程標準編著

五專教科書

核能發電

凌大爲 編著
許輝雄

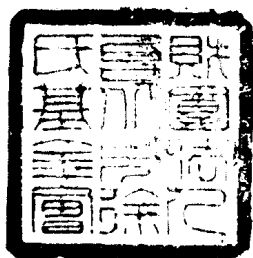
徐氏基金會出版

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

中華民國六十七年九月十八日再版

核 能 發 電

基本定價 2.00

編著者 凌大爲 台電工程師兼健行、華夏工專副教授
許輝雄 台電原子動力處工程師

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。

(67)局版臺業字第1810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 1 5 7 9 5 號
承印者：永輝彩色印刷廠 電 話：3711605：3021880

我們的工作目標

文明的進步，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，尤為社會、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，編譯委員王洪鎧氏為編輯人，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

翻譯之學者五百餘位，於英、德、法、日文出版物中精選最近出版之基本或實用科技名著，譯成中文，供給各級學校在校學生及社會大眾閱讀，內容嚴求深入淺出，圖文並茂。幸賴各學科之專家學者，於公私兩忙中，慨然撥冗贊助，譯著圖書，感人至深。其旅居國外者，亦有感於爲國人譯著，助益青年求知，遠勝於短期返國講學，遂不計稿酬多寡，費時又多，迢迢乎千萬里，書稿郵航交遞，其報國熱忱，思源固本，至足欽仰！

今科學圖書大庫已出版一千餘種，都二億八千餘萬言；尚在排印中者，約數百種，本會自當依照原訂目標，廣續進行，以達成科學報國之宏願。

本會出版之書籍，除質量並重外，並致力於時效之爭取，舉凡國外科學名著，初版發行半年之內，本會即擬參酌國內需要，選擇一部份譯成中文本發行，惟欲實現此目標，端賴各方面之大力贊助，始克有濟。

茲特掬誠呼籲：

自由中國大專院校之教授，研究機構之專家、學者，與從事工業建設之工程師；

旅居海外從事教育與研究之學人、留學生；

大專院校及研究機構退休之教授、專家、學者

主動地精選最新、最佳外文科學名著，或個別參與譯校，或就多年研究成果，分科撰著成書，公之於世。本基金會自當運用基金，並藉優良出版系統，善任傳播科學種子之媒介。尚祈各界專家學人，共襄盛舉是禱！

徐氏基金會 敬啓

中華民國六十四年九月

編輯要旨

本書係依據教育部六十五年六月頒布之五年制工專電機科課程標準，參考有關核能發電技術資料，並就編者實際參與核能發電工作之經驗與心得，彙集編著而成。除可供五專電機科用作教材之外，亦可供工學院選修核能發電同學之參考。

核能發電所涉及之理論及工程範圍均甚廣，且各核能發電廠因所用反應器型式不同，其設計、建造、材料、以及控制方式亦異，故無法在一本教材中逐一詳予敘述。本書之取材，以實用為主，除理論部份力求簡明外，舉凡對核能發電有關之基本知識均予擇要包羅在內，並採用各型核能電廠最新發展之資料，俾初學者對核能發電廠有一基本而實用之觀念。惟因我國即將竣工發電及仍在興建中之三座核能電廠，係全部採用輕水式反應器，故本書若干章節之內容，不免稍微偏重於輕水式反應器核能發電廠之介紹。

本書共分十章，除第二、三章理論部份介紹基本核子物理及反應器物理有連貫性外，其餘各章均為獨立之單元。全部教材足供每週授課三小時一學期之用；如每週授課兩小時，以兩學期授畢，則更易為初學者所吸收。為使初學者易於了解理論上之演變起見，特將第三章第七、九兩節及第九章第一、五兩節次序予以對調，但對部定之內容則未予變更。書中所用核能術語之譯名，係依據教育部公布之「原子能名詞」一書，此外亦有自行逐譯者。

本書係於公餘之暇寫成，時間匆促，加以編者學識淺陋，疏誤之處在所難免，尚祈核能界先進，不吝指教，以便再版時修正。

編者 民國66年6月

目 錄

編輯要旨

第一章 緒 論

- 1-1 能源供求情形…………… 1
- 1-2 核能發電之經濟性…………… 2
- 1-3 核能計畫現狀及發展…………… 4

第二章 基本核子物理及核能發電原理

- 2-1 原子、原子核構造及能階…………… 6
- 2-2 質能互換…………… 10
- 2-3 放射性特性…………… 13
- 2-4 放射性蛻變及其半化期…………… 14
- 2-5 α 、 β 、 γ 與物質之交互作用…………… 16
- 2-6 中子能量、截面、及其相互之關係…………… 21
- 2-7 中子與物質之交互作用…………… 24
- 2-8 中子通量及中子減能作用…………… 26
- 2-9 可分裂物質、分裂過程及產生之能量…………… 29
- 2-10 液滴模型…………… 32
- 2-11 自然分裂及中子撞擊分裂…………… 34

第三章 反應器物理

- 3-1 反應器之分類及其出力…………… 37
- 3-2 增殖因數、四因數公式、及其相互關係…………… 39
- 3-3 中子平衡及臨界公式…………… 45
- 3-4 中子擴散…………… 47
- 3-5 反應器曲度…………… 52
- 3-6 燃料之轉化及滋生…………… 55
- 3-7 中子壽命與瞬發臨界…………… 57
- 3-8 反應度與週期…………… 59
- 3-9 反應器動力學…………… 61
- 3-10 反應度係數…………… 64
- 3-11 反應器毒素之產生、消耗與反應度之關係…………… 66

第四章 反應器熱力學……

- 4-1 熱產生與傳遞…………… 71
- 4-2 反應器之熱平衡…………… 75
- 4-3 壓力降與流量之關係…………… 78
- 4-4 核心熱力性能…………… 80

第五章 反應器結構及材料

- 5-1 反應器中材料及其作用…………… 87
- 5-2 控制棒、燃料及燃料護套之材料特性…………… 87

5-3	緩和劑、反射體、冷卻劑之選擇及其特性……	89
5-4	反應器內部之結構及其材料……	91

第六章 核燃料

6-1	核燃料之種類及特性……	95
6-2	核燃料之循環及製造……	96
6-3	核燃料之運用調配……	99
6-4	核燃料之成本分析……	99

第七章 核能電廠

7-1	反應器之型式……	101
7-2	輕水式反應器……	102
7-3	重水式反應器……	112
7-4	氣冷式反應器……	118
7-5	滋生式反應器……	124
7-6	核能電廠廠址選擇……	129

第八章 核能電廠之控制及運轉

8-1	反應器控制方式……	131
8-2	控制棒作用及其壽命……	134

8-3	放射性之偵測……	136
8-4	放射及功率偵測儀器……	137
8-5	反應器起動……	141
8-6	燃料裝換……	143

第九章 輻射防護

9-1	保健物理簡介……	146
9-2	放射性之種類及來源……	146
9-3	放射性對生物之影響及生物防護標準……	148
9-4	劑量定義及其計算……	151
9-5	屏蔽之觀念……	154

第十章 核能安全

10-1	安全規章及作業……	157
10-2	品質保證及管制……	158
10-3	防護安全屏蔽……	160
10-4	圍阻體及安全系統設備……	160

附 錄

參考文獻

中英名詞對照

第一章 緒 論

1-1 能源供求情形

現代人類所需之能源不外取自水力、化石燃料、核能、以及利用太陽能、風力、潮水、地熱等之能源。水力能源由於具有經濟價值之水力資源已開發殆盡，而尚待開發者又大多位於偏遠地區，開發成本龐大，輸電費用高昂，故不能據以減輕能源長期性之不足。至於太陽能、潮力、風力及地熱發電在能源之利用上雖然可視為永久性的能源，且部份經研究試驗後已臻實用化，但大規模的利用及開發仍受很多條件之限制。因此，具有解決將來能源不足之潛力者僅餘化石燃料及核能二項。

吾人通常所稱之化石燃料，係指煤炭、石油、及天然氣而言。據1974年世界能源會議調查報告之估計，世界煤炭的蘊藏量約有 1.076×10^{18} 公噸，分佈於世界各地。但煤炭的開採，因受地域或技術之限制，增產率難望如石油，天然氣般迅速，估計在2000年代產量將加倍於現時之產量而達 $5.5 \sim 6.0 \times 10^9$ 公噸。在1955年代，煤炭佔世界總能源消耗量的55%，目前已降至35%左右。估計至2000年時由於世界經濟的急速發展，能源的需要日增，能源消費的型態原以煤炭為主將轉為以石油及天然氣為主。

根據1975年8月石油世界(World Oil)發佈的統計資料，世界石油蘊藏量約 5.562×10^{11} 桶。依目前消耗量增長情形推論，世界上可供經濟開採之石油僅能維持卅年的需要。換言之，三十年後世人將面臨缺乏可供經濟開採的石油局面。

根據1975年之國際石油百科全書之報導，世界天然氣的蘊藏量可經濟開發者約 7.2×10^{13} 立方公尺。1950年時天然氣的消耗量佔世界總能源耗量的12%，至1972年已增加到21%左右。根據世界性的長期預測，在本世紀內之天然氣在能源的生產中，仍將佔重要之地位，至1980年天然氣產量將增加兩倍，2000年代將增達四倍。在如此加速開採下，本世紀尚能確保供應，但下一世紀即將匱乏。

2 核能發電

在過去的七十餘年中，世界人口已增長兩倍，估計到2000年時，世界人口勢將加倍而超過70億。由人口繼續增長之壓力及渴求改善生活水準之努力，對能源之需求將更加殷切。如所需之能源完全依賴化石燃料，則至2000年時各項產量須達到現產量的四倍，但這種可能性顯然至為渺小，是故，尋求並開發新能源如核能者，實急如燃眉。

如圖1-1所示，為自1950年起至2000年時各種能源供需的預估百分比。

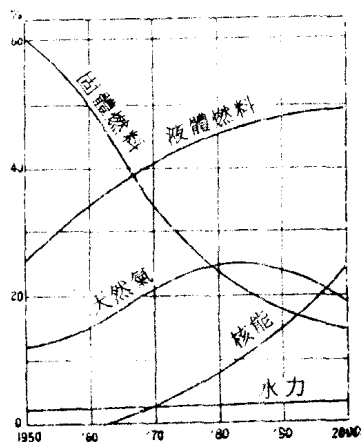


圖 1-1 世界初級能源需求變化百分比

1-2 核能發電之經濟性

核能發電的經濟性研究，通常是在以能同時滿足系統電力需要及供電可靠性的條件下，與同等級之燃油基載火力發電比較以觀其是否經濟。現僅就一般採用之發電成本法，將二者比較分析如次：

一、固定費用一係指因建廠投資而引起之常年負擔，包括利息、折舊、中期更新、保險及稅捐等，均以建廠的投資的百分率表示。電廠年固定費除以年發電量，即得每度發電的固定成本。核能電廠建廠投資較同等級燃油火力電廠為高，故核能發電的固定成本也較高。

二、運轉及維護費用一核能發電廠設備較為複雜，故其運轉及維護費用亦遠較同等級之燃油火力電廠為高。

三、燃料費用一核能發電的燃料費用遠較燃油火力電廠為低。雖然核能電廠的建廠投資及運轉維護費用較高，但燃料費用低廉，就發電成本而言，

核能發電仍遠較燃油火力發電為經濟。這種經濟優勢，因近來油價暴漲而更顯顯著。

為確實明瞭核能發電的經濟優勢起見，現擬舉美國前原子能委員會（USAEC，現改為核能法規委員會（NRC））所發表 1,000 千瓩機組輕水式核能發電與火力發電的經濟比較的結果為例，如表 1-1 所示，此項比較係以 1981 年電廠完成的發電成本為基準，除核燃料費外，所有成本均依 1974 年的價格，假定每年漲價 5%，調整至 1981 年電廠的價格。美國前原子能委員會認為核能發電因電廠利用率及熱效率之提高，將可彌補核燃料之漲價，因此在比較中不考慮核燃料漲價的因素。表中顯示輕水式核能發電成本每度為 15.2 美厘，燃煤與燃油火力發電成本則分別每度為 18.0 及 33.4 美厘。表中同時顯示出若欲使燃煤及燃油火力的發電成本與核能發電相當，則煤價應為每噸 6.2 美元，但美國在 1970 年時的實際平均煤價已高達每噸 8.5 美元，油價應為每桶 3.85 美元，至 1972 年初美國的油價已高達每桶 11.80 美元。可見核能發電，即使在富於煤炭及石油的美國，其經濟優勢仍然非常顯著。

表 1-1 美國 1,000 千瓩機組核能發電成本及平準煤、油價 *1
(以 1981 年完成時之電廠發電成本為準)

項 目	核 能 (輕 水 式)	火 力	
		燃 煤	燃 油
裝 置 容 量 (千 瓩)	1,000	1,000	1,000
廠 利 用 率 (%)	80	80	80
發 電 成 本 (美厘/度)			
固 定 成 本	11.7	10.9	8.0
燃 料 費	2.5**	5.5	24.6
運 維 費	1.0	1.6	0.8
合 計	15.2	18.0	33.4
平準燃料成本，以核能為基準 (美分/百萬英熱單位)		27.0	64.0
或		6.2 美元/噸	3.85 美元/桶
實 際 煤 油 價		8.5 美元/噸 (1972 年平均煤價)	11.08 美元/桶 (1974 年初油價)

註：*1 除核能燃料費外，其餘成本全部假定每年漲價 5% 至 1981 年電廠完成時之價格。

*2 美國前原子能委員會假定核能燃料成本不變，即現價為 25 美分/百萬英熱單位，因核能發電利用率及熱效率之提高，將可抵消核能燃料費之漲價。

1-3 核能計畫現狀及發展

由於世界能源的缺乏，各國對新能源的開發均不遺餘力。核能發電，由於其開發價值甚高，同時更由於運轉中的核能發電廠顯示出其安全可靠，故在最近短短十餘年中，核能發電突飛猛進，使核能在能源供需的陣營中，擔任了一個重要的角色。截至1977年元月止，舉世已有153部各種不同形式之商用反應器（nuclear reactor）在運轉中，另有76部反應器在施工建廠中，及80餘部反應器正擬着手建廠。如表1—2所示，為1977年元月份世界各國核能開發情況，由表中統計數字吾人可以看出，在技術已發展成熟之三種商用反應器中，當以輕水式反應器在世界核能發電市場上獨占鰲頭。

根據美國前原子能委員會之估計，美國核能發電的裝機容量，1980年時為15,000萬瓩，該年之電力將有36%來自核能，至1985年時裝機容量為28,000萬瓩，核能發電佔40%以上，至1990年時將有一半以上之電力由核能發電供應。其次為日本，原先估計1985年時之裝機容量可達4,000萬瓩，但各方面均預測將超過此數，屆時日本之核能發電可能僅次於美國而居世界第二位。再其次為英國和西德，據估計至1985年時之裝機容量均將接近4,000萬瓩，可能居世界核能發電第三位。其他國家如加拿大、法國、瑞士、俄國、意大利、瑞士、西班牙、荷蘭等均有相當規模之核能發電計劃在推展中。

在許多開發中之國家印度為最先步入核能發電之國家，由其經驗可充份證明開發中之國家進行核能發電之可行性。其他將於最近數年內步入核能發電之國家，除我國外，有韓國，及墨西哥等廿餘國。一般相信，至1980年時舉世將有三十個以上的國家享用核能電力。

表 1-2 世界各國家核能開發情況一覽表
(1977 年 1 月份)

國 家	運 轉 中 總機組數	反 應 器 型 式*				總裝機容量 (百 萬 瓦)
		輕水式	重水式	氣冷式	滋生式	
阿 根 廷	1	—	1	—	—	340
比 利 時	3	3	—	—	—	1,744
英 國	31	1	—	29	1	7,455.2
加 拿 大	6	—	6	—	—	3,130
法 國	10	1	—	8	1	3,066
印 度	3	2	1	—	—	620
意 大 利	3	2	—	1	—	630
日 本	13	12	—	1	—	7,428
荷 蘭	2	2	—	—	—	522.5
巴 基 斯 坦	1	—	1	—	—	137
西 班 牙	3	2	—	1	—	1,117.4
瑞 典	5	5	—	—	—	3,312
瑞 士	3	3	—	—	—	1,054
西 德	10	9	1	—	—	5,557.5
美 國	59	57	—	1	1	43,194.2
合 計	153	99	10	41	3	88,116.8

*〔註〕：(1)上表係 1977 年元月統計數字。

(2)反應器型式係依冷卻劑之類別而區分者，例如英國 Winfrith SGHWR 之 HWLWR 雖以重水為緩和劑，但以輕水為冷卻劑，故仍列為輕水式反應器。

第二章 基本核子物理及核能發電原理

2-1 原子、原子核構造及能階

自然界中存在着許多基本的單一物質，在化學上稱為元素（elements）。自然界中的億萬種物質都是由這些元素單獨或數種元素組合而成。目前已知的元素有 104 種，若按原子序排列，其中前 92 種是天然存在的，原子序在 92 以上之元素係近代科學以人工製造的元素，每種元素以其在週期表中之化學符號為其代表，如氫、氧、鈾及鈾等分別以 H, O, U 及 Pu 表示之。

任一元素之最小單位稱為原子（atom），同一種元素之原子均具有與其元素相同之物理與化學之特性。約當紀元前四〇〇年，希臘哲學家德謨克里脫（Democritus）即斷言一切物質均由原子所組成，至十九世紀初，道爾頓（John Dalton），亞佛加德羅（Count A. Avogadro）等相繼提出假說，建立原子理論的基礎。彼等均認為原子是構成物質最小的粒子（particle），不能再被分割，（按“atom”一字來自古希臘，其含意是“不能被割切”）。然而到了廿世紀初，科學實驗證明此一想法之不正確。1897 年，湯姆遜（J.J. Thomson）在實驗中發現了電子（electron）的存在，1911 年，拉塞福爵士（Ernest Rutherford）又繼續實驗，使對此一研究發現達到高潮，創立 Rutherford 原子模型。1913 年，波爾（Niels Bohr），作更進一步之發展，終於建立了原子結構的理論，提出 Bohr 原子模型。波爾描述一個原子可以分成兩個部份，一部份是緊密地聚集在一起的極小的核心，一部份則是環繞此核心運行既輕且大的雲層。核心部份帶正電荷，稱為原子核（nucleus），猶如太陽系中的太陽。環繞核心運行的雲層，則由帶負電荷的電子所組成，猶如太陽系中的衆行星沿一定軌道環繞太陽運行。原子核所帶的正電荷必等於外圍電子所帶的負電荷，故整個原子呈中性，不帶電。

原子核由兩種基本的粒子所組成，一是質子（proton），一是中子（neutron），兩者通常稱為核子（nucleons）。原子的直徑約為 10^{-8}

cm，而原子核的直徑更小，約為 10^{-12} cm，因此在 1 cm 的長度內，幾乎可以容納 1 億個（ 10^8 ）原子。如以直徑的大小來比較，原子核的直徑大約是原子直徑的一萬分之一（ $1/10^4$ ），因此原子核所佔的體積僅佔原子體積的 $1/10^{12}$ ，但其質量甚重，幾佔有整個原子的全部質量（99.9%以上），原子核之密度高達 10^{14} g/cm³。

原子的質量，通常是用各種原子的質量與 ^{12}C （定其原子量為 12）相互比較的大小表示之。此種原子量只是表示各原子之質量比較的大小，而非其本身真正的質量，因此沒有單位。如以克為單位表示時，則稱為克原子量（gram atomic weight）。

根據亞佛加德羅假說（Avogadro's hypothesis），任何物質的一克原子量，都含有相等數目的原子數，此一固定的數目即通常所稱的亞佛加德羅常數（Avogadro number），以 N_A 表示之。目前所測得最精確的數目為 6.02252×10^{23} （通常以 6.02×10^{23} 計算）。在核子物理學上常用之質量單位為原子質量單位（atomic mass unit，簡稱 amu），即定 ^{12}C 原子量的 $1/12$ 為 1 amu，如以克表示，則 $1 \text{ amu} = 1/N_A \text{ 克} = 1.66 \times 10^{-24} \text{ 克}$ 。構成原子的三種基本微粒其主要性質如下：

名稱	符號	原子質量單位	電荷
電子	e^- 或 β^-	0.000549 amu ($9.109 \times 10^{-28} \text{ g}$)	負
質子	p	1.007596 amu ($1.6725 \times 10^{-24} \text{ g}$)	正
中子	n	1.008986 amu ($1.674 \times 10^{-24} \text{ g}$)	無

如圖 2-1 所示，根據波爾的理論，一個原子是由原子核和電子所組

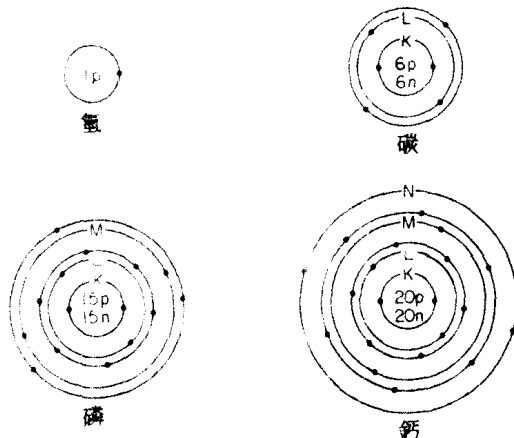


圖 2-1 氫，碳，磷，鈣之原子構造

成，原子核帶正電荷，電子帶負電荷，所有自然形態的原子，其淨電荷必等於零，亦即原子中的負電荷（即電子）數必等於正電荷（即質子）數。電子排列於一連串層次軌道上，環繞原子核沿一定軌道運動，每一層次軌道各具有不同的能量。幾層能量軌道組成一束，稱為壳（shell），分別以字母K, L, M, N, O, P, Q 記之。每一壳最多的電子數是 $2n^2$ ， n 代表原子中壳的數，依此定則，第一壳（ $n=1$ ），最多能有 2 個電子，第二壳（ $n=2$ ），最多能有 8 個電子，第三壳（ $n=3$ ），最多能有 18 個電子，餘類推。電子填滿於原子外層壳以前，必須內層壳已先填滿電子，因此正常情況下，原子中不會有超過一層以上不完全的壳，所謂不完全的壳是指每一壳內，部份軌道沒有電子。

電子能維持在一定的軌道上運行，主要依靠靜電力和離心力，電子帶負電，被帶正電之原子核所吸引，此吸引力和離心力之均衡，使電子能維持在軌道上運行。

原子核中帶有正電荷的質子間，具有庫倫斥力，此一斥力稱為長程力（long-range force），而原子核之能維持穩定，目前係以核子力（nuclear force），亦即所謂短程力（short-range force）解釋之。即質子和質子，中子和中子，或質子和中子在 10^{-13} cm 之短距離內，有幾乎相等的互相吸引力，原子核內互相吸引力之總和約與所有的核子數成正比。這些力之淨效，決定某一原子核中質子數與中子數之比例，亦即決定該原子核是否穩定，如圖 2-2 所示，實點部份為穩定元素，其原子核中之質子數與中子數均成一定之比例。

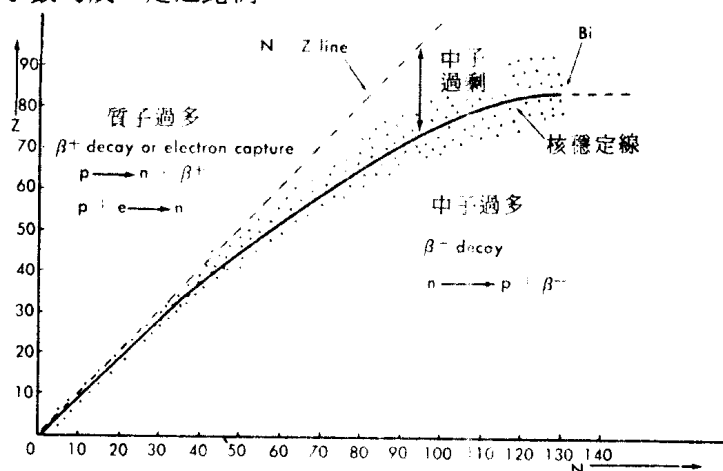


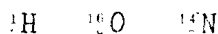
圖 2-2 穩定核種曲線（實點代表穩定核種）

在核子物理或反應器物理學上，一元素或其同位素常以：



表示之，其中X為元素之化學符號，A為質量數（mass number），Z為原子序（atomic number）亦即質子數。

例如：氫、氧、氮之穩定元素可記為：



有些元素有相同的原子序數，但質量數不同，這些元素稱為同位素（isotopes），一個元素可能有一種或更多的同位素，所有同位素其化學性質相同，在週期表中佔同一位置。此外有些元素有相同的質量數（A），但質子數（Z）不同，稱為同量數（isobar）。僅有相同中子數之元素，稱為同中子素（isotone）。

在正常原子中，位於最低壳層軌道上的電子，距離原子核最近，具最小的動能。所有未被佔據的軌道，必在有電子之最外層軌道之外，原子在這種狀況下即稱為基態（ground state）。自一原子中移去一個電子並不困難，電子亦可附加於原子上，移走電子之原子荷正電，因其質子數多於電子數。荷電之原子與不附在原子的自由電子均稱為離子（ions）。中性原子被移去或附加電子之過程即稱為游離（ionization）。從一原子中，完全分離出一個電子所須之能量，稱為游離能（ionization energy）。由中性原子移去電子後，可形成離子對（ion-pair），即自由電子與荷正電之原子。這些帶電之離子，可以具有動能，以某一速度運動，也具有吸引鄰近粒子的靜電吸引力。

假如一個原子與鄰近的原子相碰撞而吸收其能量，或者此一原子受一高速帶電粒子（即離子）撞擊時，此原子即變為激動態（excited state）。通常情形是一個或一個以上的電子，因碰撞而被移至較高能階的軌道上，則此種激動態的原子都不穩定，遲早這些激動態的原子，必會將吸收的能量以放射形態釋出而回到基態。較高能階與較低能階之能差，使電子移位時，可以發射電磁波方式放出能量。故當電子回到基態時，會放出X射線，此X射線的能量，即是兩能階的差。當原子內層（K, L, M）的電子發生轉移現象時，會放出所謂的特性X射線（characteristic X-Rays），如圖2—3所示。