

科學圖書大庫

核反應器工程

譯校者 清華大學核子工程系

徐氏基金會出版

序

民國六十三年五月七日於核工館舉行系務會議時，與會全體教員因鑒於國內核能工業發展迅速，參與核能建設人員日益增多，亟需一本良好之中文參考書或教材，遂有翻譯核工原理課程所用教材之議。清華大學自民國四十八年起即採用 Samuel Glasstone, Nuclear Reactor Engineering, Van Nostrand Reinhold Company, New York 為課本，其第二版係於一九六七年發行，頁數近千。惟部分材料稍為陳舊，系務會議乃決議由全體教員擔任校閱工作並增補新的材料，翻譯則由畢業系友擔任，預定於一年內完成此項工作。

徐氏基金會於民國六十四年六月三日同意印行此書。六月二十三日於應屆畢業核工研究生聚餐時，全體教員贊同將發行此書之收入捐贈核工系作為核工基金，以無息貸款方式資助核工系清寒同學完成學業。

本書之完成，在系主任楊覺民教授鼓勵之下，全體教職員生通力合作和支持。筆者忝負編輯聯絡與協調之責，深為感動。六十三學年度畢業同學，於就業或受訓之前，留校協助校對或抄寫，周冬寶同學之貢獻尤多。核工系四年級同學亦多人參與此項工作。但願今後能繼續匯合群體力量，發揮團隊精神，致力於我國之核能建設。

翁寶山 謹識

民國六十五年六月

於新竹國立清華大學

清華大學核子工程系參與執筆者

編	譯	校	閱
第一章	謝得志	楊覺民	
第二章	謝得志	王永祥	
第三章	何耀峰	陳漢章	
第四章	周冬寶	蔡健三	
第五章	彭賜楨	翁寶山	
第六章	王琅琛	陳家威	
第七章	錢景台	徐商祥	
第八章	吳宗學、呂弘錫	翁寶山、楊末雄	
第九章	葉世禧	翁寶山	
第十章	林則棟、林明觀、申健生	黃龍瑞	
第十一章	喻冀平	黃海永	
第十二章	林文昌	劉岳生	
第十三章	王源泉、黃正富	袁立基	
第十四章	何松齡		
附錄、索引	王哲成		

目錄

序

第一章 核反應器工程緒論

前言	1
地球的能源	1
分裂能的重要	1
原子構造	2
原子序和質量數	2
同位數	3
核能和核力	4
結合能	4
核穩定	6
放射性	8
中子反應	9
核分裂	11
分裂過程	11
分裂能	12
臨界質量	14
核分裂反應器	15
核反應器之一般特色	15
反應器型式	16
反應器燃料循環	18
反應器發展史	18
第一章所用的符號	23
第一章參考文獻	24

習題	24
----	----

第二章 核反應與輻射

前言	26
放射性	26
放射性同位素	26
放射衰變率	27
放射性平衡	29
放射性單位	32
伽馬射線	33
制動輻射	35
阿伐和貝他粒子與物質之互應作用	35
游離輻射	35
阿伐粒子的吸收	37
貝他粒子的吸收	38
謝倫可夫輻射	42
伽馬射線和物質的互應作用	42
前言	42
光電效應	42
康普吞效應	42
成對發生	44
伽馬射線的衰減	45
衰減係數與伽馬能量	46
中子和物質的互應作用	50
中子的產生	50

中子反應：吸收.....	51	第二章參考文獻.....	96
輻射捕獲反應.....	52	習題.....	96
阿伐粒子的發射.....	53	第三章 中子之擴散與減能	99
快中子反應.....	54	前言.....	99
非彈性散射.....	54	中子平衡.....	99
彈性散射.....	55	中子擴散.....	99
馬克士威·波耳茲曼分布	56	中子擴散.....	101
與中子互應作用所造成的		遷移理論.....	101
結構變化.....	59	擴散理論近似法.....	101
中子反應截面.....	60	中子滲漏的計算.....	103
截面的重要性.....	60	擴散方程式.....	104
巨觀截面.....	60	解擴散方程式的邊界條件...	105
以透射方法求截面.....	63	直線外推距離.....	106
中子反應之速率.....	64	來自點源單能中子的擴散...	108
以活化方法求截面.....	65	擴散長度.....	110
平均自由行程.....	66	擴散長度的決定.....	112
多能中子體系.....	67	有限厚度介質內的無限平面	
截面與中子能量之關係.....	71	源.....	115
實驗結果.....	71	中子減能.....	117
共振吸收之理論闡述.....	72	彈性散射.....	117
散射截面.....	73	散射時的能量改變.....	119
高能量中子的截面.....	75	經驗散射定理.....	121
熱中子截面.....	75	平均對數減能.....	122
分裂過程.....	76	減能本須與緩和比.....	124
核分裂之機械論（理論）	76	停頓.....	125
分裂截面.....	79	在無限介質中減能.....	126
分裂速率和反應器功率...	80	沒有吸收時的能量分布.....	126
分裂中子和伽馬射線.....	81	有吸收時的能量分布.....	128
遲延中子.....	83	減能中子的空間分布.....	129
分裂產物.....	85	費米年積（連續減能）模型	129
放射性與分裂產物之衰變	87	年積方程式.....	131
特定分裂產物之累積.....	92	年積方程式的解二年積的意義	132
第二章所用的符號.....	93		

減能和遷移長度.....	136	f 與 n 的計算.....	193
第三章所用的符號.....	1377	中子捕獲與散逸機率.....	195
第三章參考文獻.....	139	快分裂因數.....	197
習題.....	140	不漏機率.....	197
第四章 反應器理論：穩態	142	無限增殖因數與曲度.....	198
臨界條件.....	142	快中子反應器.....	200
增殖因數.....	142	前言.....	200
四因數公式.....	143	多群方程式.....	201
單群臨界方程式.....	146	曲度的評估.....	205
兩群臨界方程式.....	148	核心組成與臨界質量.....	207
年積擴散法.....	149	臨界尺寸的實驗決定.....	213
臨界尺寸.....	151	臨界裝置.....	213
各種形狀的反應器.....	153	指數實驗.....	215
不漏機率.....	155	第四章所用的符號.....	216
有效增殖因數.....	158	第四章參考文獻.....	219
反射反應器.....	159	習題.....	220
反射體的效應.....	159	第五章 核反應器控制	223
單群法.....	160	反應器動力學.....	223
反射體節約.....	162	前言.....	223
多群法.....	164	中子壽命.....	223
均質反應器系統.....	167	裸反應器之動力方程式：	
無限增殖因數.....	167	單群模型.....	225
臨界尺寸的計算.....	171	穩定反應器周期.....	228
混質反應器系統.....	177	單群遲延中子.....	229
前言.....	177	單群遲延中子：負反應率... 234	
熱中子利用因數的計算.....	178	反應率與周期：正反應率... 236	
共振散逸機率的計算.....	183	反應率與周期：負反應率... 238	
快分裂因數.....	188	反時公式.....	239
最適格子的決定.....	189	瞬臨界條件.....	240
水緩和、低濃度格子系統.....	190	溫度對反應率之效應.....	242
前言.....	190	一般考慮.....	242
修正四因數模式.....	191	均質系統.....	243

混質系統.....	244	冷卻環路轉移函數.....	288
不漏機率.....	246	穩定性分析.....	289
反應器溫度係數.....	248	正常運轉中之瞬態行爲...	290
分裂產物毒物.....	250	反應器模擬器.....	290
毒物對反應率之效應.....	250	異常運轉中之瞬態行爲...	291
運轉中之氙毒.....	252	反應器控制儀表.....	291
停機後之氙毒.....	254	前言.....	292
氙不穩性.....	257	離子對的產生.....	292
鈾毒物.....	258	離子對在電場中之行爲...	293
分裂產生之其他毒物.....	259	游離腔.....	295
反應器控制之一般特徵.....	260	比例計數器.....	299
基本控制原理.....	260	反應器運轉.....	300
控制方法.....	261	用於各種不同範圍之儀器	300
控制材料.....	262	初期器範圍.....	301
控制環路.....	264	周期範圍.....	302
控制系統的設計.....	266	動力範圍.....	302
控制系統的規格.....	266	運轉階.....	303
控制棒功能.....	267	摘要.....	304
控制系統的範圍.....	268	初期起動.....	304
溫度效應.....	268	急停後之起動.....	306
燃料耗乏.....	269	動力範圍起動.....	307
分裂產物之毒害.....	269	反應器之正常運轉.....	307
反應率規格.....	270	反應器之停機.....	307
控制棒的效率.....	271	第五章所用符號.....	308
控制棒的校準.....	274	第五章參考文獻.....	311
危險係數與堆振盪器.....	275	習題.....	313
反應器系統分析.....	276	第六章 能量的傳移	315
前言.....	276	反應器設計中的熱量問題	315
拉普拉斯表象.....	278	前言.....	315
燃料・緩和劑時間常數...	279	反應器系統中的熱量產生	
轉移函數.....	279	及處理.....	316
反應器動力學之轉移函數...	282	特殊的熱問題.....	316
負溫度係數反饋.....	285		

冷卻系統的設計.....	318	沿著反應器冷却劑行程的溫度分布.....	346
冷卻劑的迴路.....	318	一般冷却劑通道.....	346
熱源的分布.....	319	餘弦縱向熱源分布.....	348
溫度分布.....	320	熱通道因數.....	352
額外的熱問題.....	320	流體的傳熱特性.....	352
反應器系統中的熱源.....	321	片流和紊流.....	352
分裂能量.....	321	普通流體的紊流傳熱係數預測.....	355
反應器核心中能源的空間分布.....	323	液金屬的紊流傳熱係數.....	357
單一燃料通過的平均和極大功率.....	324	自由對流中的傳熱係數.....	360
功率及通率白勻化.....	235	入口效應.....	361
緩和劑中熱的產生.....	326	沸騰液體的傳熱.....	361
反射體和屏蔽中熱的產生.....	326	表面和整體的沸騰.....	361
熱傳移原理.....	327	反應器系統中的沸騰.....	363
傳導與對流.....	327	熔損條件的預測.....	365
無限條件的熱傳導，對流邊界條件.....	329	沸騰傳熱係數.....	366
空心圓柱的熱傳導，對流邊界條件.....	330	至蒸汽系統的熱交換.....	368
輻射熱傳移.....	332	包含體熱源的系統.....	368
有內熱源系統中的熱傳移.....	334	由循環燃料的傳熱.....	368
一維平板的推廣.....	334	核心水力學.....	369
無限平板中有均勻內熱源的傳導.....	335	由於摩擦的壓力降.....	370
有護套平板式燃料元件內的熱源移.....	336	兩相壓力降.....	373
有護套圓柱形燃料元件中的熱傳移.....	339	局部沸騰對壓力降的影響.....	374
屏蔽和壓力容器的熱傳移：有指數熱源的平板.....	342	壓力降和自由對流冷卻.....	375
固體之間的接觸熱阻.....	344	冷却劑系統中的幫浦功率.....	377
在不規則形狀中的傳導.....	345	反應器冷却劑.....	378
		一般特性.....	378
		冷卻劑傳熱特性的比較.....	380
		水當冷却劑.....	381
		重水當冷却劑.....	382
		液金屬當冷却劑.....	383
		有機冷却劑.....	385
		熔融鹽.....	387

氣體冷卻劑.....	387	冷卻管路.....	425
第六章所用的符號.....	390	腐蝕與侵蝕.....	425
第六章參考文獻.....	393	材料的選擇.....	426
習題.....	395	化學反應.....	426
第七章 反應器結構與緩和劑材料	398	第七章所用的符號.....	427
前言.....	398	第七章參考文獻.....	427
材料問題.....	398	習題.....	429
對材料的輻射效應.....	399	第八章 反應器燃料	430
一般原則.....	399	前言.....	430
原子位移.....	400	燃料循環.....	430
熱及位移加強.....	401	燃料材料.....	430
中子捕獲效應.....	401	反應器燃料之生產.....	431
輻射的物理效應.....	402	鈾的原料.....	431
有機化合物的輻射效應.....	404	鈾和其化合物之生產.....	433
結構材料.....	407	鈾同位素的分離.....	435
一般特性.....	407	鈷.....	438
用於熱中子反應器的材料.....	408	銻.....	438
適用於快中子反應器的材料.....	410	燃料元件材料的性質.....	438
不銹鋼.....	410	前言.....	438
碳鋼.....	412	金屬鈾.....	439
鋁.....	413	二氧化鈾.....	443
緩和劑及反射體的材料.....	415	碳化鈾.....	446
前言.....	415	散布型燃料.....	448
石墨.....	416	鈾燃料的材料.....	450
鈹.....	419	鈷燃料的材料.....	452
氧化鈹.....	421	燃料元件的護套.....	454
輕水.....	422	接合材料.....	455
重水.....	422	照過燃料的再處理.....	456
水的輻射分解.....	423	前言.....	456
有機材料.....	424	冷卻照射過的燃料元件.....	456
氫化鈾.....	424	前處理.....	459
		燃料溶解.....	461

分離程序.....	462
前言.....	462
重元素的化學性質.....	463
溶劑萃取法的一般原理.....	464
銻鈾萃取法.....	466
離子交換.....	468
揮發法分離.....	471
高溫冶金法.....	472
廢料處置法.....	474
液廢料.....	474
氣態廢料.....	475
固態廢料.....	476
附錄鈾燃料之濃化.....	477
前言.....	477
氣體擴散法.....	477
氣體離心法.....	477
氣體噴射分離法 (Aerodynamic Processes).....	479
雷射法分離同位素.....	480
第八章所用的符號.....	483
第八章參考文獻.....	483
習題.....	486
第九章 輻射防護與反應器 保防	487
輻射危害與保健物理.....	487
反應器在設計與運轉上的輻 射問題.....	487
保健物理的工作.....	488
輻射的生物效應.....	489
急性與慢性暴露.....	490
部分與全身暴露.....	490
各種輻射的效應.....	490

體內的輻射暴露.....	492
輻射傷害的一航特徵.....	492
輻射劑量單位.....	493
倫琴.....	493
空氣中能量的吸收.....	495
劑量率與輻射源強度的關 係.....	497
生物劑量率的通率等值..	502
輻射防護的標準.....	502
輻射防護守則.....	503
放射性濃度守則.....	504
急性輻射劑量.....	506
人員防護.....	506
遙控.....	506
安全方法.....	507
偵測儀器.....	508
空氣與水之偵測：固定的 儀器.....	509
輻射偵測：手提儀器.....	510
人員偵測.....	513
人員測量儀器.....	517
反應器保護.....	518
前言.....	518
廠址選擇.....	518
安全要點.....	519
圍阻或圍控.....	520
美國的反應器許可.....	521
附錄輻射單位.....	523
第九章所用的符號.....	526
第九章參考文獻.....	526
習題.....	527

第十章 核反應器的屏蔽	529
--------------------------	-----

反應器屏蔽原理.....	529	前言.....	577
前言.....	529	實驗設施.....	577
屏蔽設計.....	530	蓋圓屏蔽設施度量的應用	579
來自反應器的輻射.....	532	各向異性介質的屏蔽.....	581
熱與生物屏蔽.....	534	線源.....	581
反應器屏蔽要求.....	535	圓柱源.....	583
屏蔽材料.....	538	圓盤源.....	584
屏蔽幾何轉換.....	541	伽馬線的屏蔽.....	584
分布源與點衰減核仁.....	541	源強度的計算.....	584
各向同性源形平面(圓盤)		衰減的計算.....	585
源.....	542	輻射在屏蔽中的加熱.....	586
各向同性球面源.....	543	前言.....	586
各向同性圓柱面源.....	545	中子加熱效應.....	587
輻射衰減.....	546	伽馬線加熱效應.....	588
增建因數.....	546	附錄.....	588
鬆弛長度.....	550	幾何轉換:平面源.....	589
指數點核仁.....	551	一般的曲面源.....	
分布源.....	552	第十章所用的符號.....	595
來自無限大平面源的輻射	552	第十章參考文獻.....	597
有限平面各向同性源.....	555	習題.....	599
球面源.....	555		
具自吸收的體積分布源..	555		
反應器屏蔽.....	557	第十一章 機械和結構成件	601
快中子的衰減.....	557	前言.....	601
水屏蔽.....	559	反應器系統的特殊條件..	601
移除截面.....	560	機械成成.....	601
混凝土屏蔽.....	562	動力循環部分.....	601
原始伽馬線的衰減.....	563	水冷反應器.....	602
二次伽馬線的分布.....	566	鈉冷反應器.....	604
反射體的屏蔽效應.....	572	操作燃料的機械裝置.....	606
鐵水屏蔽的結果.....	574	保養和拆開機械裝置.....	606
一般結論.....	574	控制棒機械裝置.....	608
屏蔽設計的比較法.....	577	結構成件.....	608
		前言.....	608

反應器容器.....	609	熱和流體設計.....	648
圍阻結構.....	612	一般的考慮.....	648
反應器成件內的熱應力...	616	熱通道因數.....	649
前言.....	616	熱通道因數之估計：乘積	
均勻熱源的熱應力.....	620	法.....	652
無熱源中空圓柱體的熱應		熱通道因數之估計：統計	
力.....	621	法.....	653
均勻熱源中空圓柱的熱應		流體設計.....	654
力.....	623	楊基反應器熱和流體設計	
指數熱源的熱應力.....	623	的數據.....	655
未受限制平板燃料元件護		屏蔽設計.....	656
套的熱應力.....	627	屏蔽準則.....	656
材料的比較.....	628	近似的衰減計算.....	657
蠕變.....	629	機械設計.....	663
壓力容器設計.....	630	壓力容器.....	663
前言.....	630	燃料利用.....	665
應力強度.....	630	前言.....	665
第十一章所用的符號.....	633	燃料燃耗.....	665
第十一章參考文獻.....	634	轉化比.....	669
習題.....	635	燃料營運.....	670
第十二章 反應器初步設計	637	滋生.....	672
一般設計步驟.....	637	結論.....	676
前言.....	637	第十二章所用的符號.....	676
設計的階段.....	637	第十二章參考文獻.....	678
反應器設計準則.....	638	習題.....	679
壓水反應器.....	639	第十三章 核反應器系統	682
燃料元件特性.....	639	動力反應器.....	682
核心組成.....	642	前言.....	682
核設計.....	643	輕水緩和反應器.....	686
控制棒.....	646	沸水反應器.....	689
燃料營運計畫.....	647	核蒸汽過熱器.....	692
燃料子整件的設計.....	647	重水緩和反應器.....	693

XII

中子譜移控制觀念.....	694	基本計算公式.....	742
有機冷卻反應器.....	695	核能電廠發電成本之計算...	744
鈉 - 石墨反應器.....	697	建廠成本.....	744
氣冷反應器.....	700	直接成本費	
重水緩和氣冷反應器.....	705	間接成本費	
快中子反應器.....	706	建廠時程與承建方式...	748
流體燃料反應器.....	711	固定開支費.....	751
前言.....	711	固定開支費與固定開支率	751
求溶液均質反應器.....	711	固定開支率之計算.....	752
熔鹽反應器.....	713	運轉維護費.....	755
液金燃料反應器.....	714	直接費用.....	756
流體燃料快中子反應器...	715	間接費用 - 營運資金.....	757
太空動力用的系統.....	715	核燃料循環費.....	757
前言.....	715	核燃料循環.....	757
一般性的要求.....	716	核燃料循環費之計算.....	760
史奈普 (SNAP) 反應器	716	直接費用.....	760
熱離子轉換.....	718	間接費用.....	765
月球上的動力廠.....	718	計算實例.....	771
研究試驗及訓練用反應器...	718	平準價格.....	773
前言.....	718	計算本準發電成本之公式	
高通率試驗用反應器.....	719	計算本準核燃料循環費之	
通率設陷反應器.....	723	公式	
脈衝試驗反應器.....	724	核能電廠發電成本計算實例	777
中等通率研究用反應器...	725	影響核能發電成本的因素...	778
低通率訓練用反應器.....	730	參考資料.....	779
第十三章參考文獻.....	732	參考書目.....	779
習題.....	736	附錄.....	780
第十四章 核能經濟.....	738	中英文對照索引.....	795
前言.....	738		
核能經濟的重要性.....	738		
電力價格.....	739		
名詞釋義.....	740		

第一章 核反應工程緒論

前 言

地球的能源

1.1 1939年核分裂的發現乃是劃時代的大事，給世界帶來了全新的能源，即利用原子核的內能。可由分裂釋出核能的基本材料是鈾和釷，而含此二種元素的礦物廣布於地球表面，因此它們無疑是一種極具潛力的能源，此點下文將予闡明。

1.2 過去半個世紀，能源主要是來自化石燃料，亦即煤油和天然氣。然而吾人早已體會到，此種能源在不久即將要大部耗竭。目前每年世界各國的總能量消耗約為 1×10^{17} 英熱單位。而世界人口不斷增加，每人使用能量也在增加，到了公元 2000 年能量的使用率很可能是現在的五到十倍。據估計能以低於目前價格的兩倍加以開採的煤、油以及天然氣約相當於 4×10^{19} 英熱單位¹。這表示約 100 年內世界上有經濟價值的化石燃料礦藏可能幾乎耗盡。

分裂能的重要

1.3 即使考慮到上面的估計可能的誤差，仍免不了得到以下的結論：如果在人口增長下還要提高生活水準，則約 50 年內必須尋找新的能源。此類新能源有兩種：太陽能和核能，雖然直接利用太陽能非常吸引人，但是大規模的發展尚待多年以後。核能可由重元素的分裂或是輕元素的熔合獲得。控制熔合能量的釋放仍有很大的問題，而正在研究之中。另一方面，核分裂已經發展成產生能量的實用方法，足以和化石燃料相抗衡。本書的目的即在解

*此數目是列於各章後面的參考文獻的號碼。

說產生分裂能量之核反應器，其設計及運轉的基本原理。

1.4 三哩深的地球表面所含的鈾和鈾的總量非常多，可能有 10^{12} 噸。可惜其中大部分存在於含此二元素百分比並不高的礦物中，開採費用異常昂貴。事實上，吾人相信高級的礦藏不會超過 2×10^6 噸。假設技術進步後，使自開採低級礦砂至冶煉每磅此種金屬的費用降至美金100元以下，則據估計，世界的礦藏量為鈾二千萬噸而鈾一百萬噸²。但是從以後的過程即可瞭解：在經濟原則下，分裂不可能將這些材料全部加以利用，有利情況下大約可用三分之一。

1.5 (§ 1.46) 中會證明一磅可裂材料約可產生 3×10^{10} 英熱單位的能量。因此， 21×10^6 噸的鈾和鈾有經濟價值的能量約為 4×10^{20} 英熱單位。此種能量的藏量遠比得自化石燃料的豐富，只要適當發展必可成為世界重要能源。

原子結構

原子序和質量數

1.6 核反應器的運轉是由於中子和原子核的互應作用，為了明瞭這些反應的本質和特性，茲將基本的原子和原子核物理^{3,4}，簡略介紹如下。

1.7 原子的構造是一些帶負電的電子圍繞著一個帶正電的原子核，整個原子是屬於中性的。原子核中又含有兩種基本粒子，亦即質子和中子，通稱為核子。質子帶一單位的正電荷，電荷大小與電子相等。事實上，質子就是氫的原子核，亦即氫原子扣除一個電子。中子比質子略重 (§ 1.13)，顧名思義，它是不帶電荷的中性粒子。除了平常的氫，所有的原子核都含有一個以上的中子。

1.8 一元素之原子核所含的原子數和它所帶電荷的數目相等，此數稱為此元素之原子序，以符號 Z 表示。與元素周期表中的排列順序相同。氫的原子序是1、氦是2、鋰3、循此以往，自然界存在最重的元素鈾是92。更重的元素可用人工製造，其中鈾，原子序94，在核能釋放中很重要。

1.9 原子核中核子的總數，亦即中子數加質子數，稱為此元素之質量數，以 A 表示。質子數是 Z 。所以原子核中的中子數是 $A - Z$ ，因為中子和質子的重量都趨近於一原子質量單位，顯然質量數是最接近於此種核種原子重量的整數值。

同位素

1.10 原子序亦即原子核中的質子數，決定一元素之化學性質。這是因為化學性質是由圍繞於原子核的軌道電子而定。而整個原子是中性，電子數和質子數必須相等。因此具有相同的原子序而質量數不同的原子，它們的化學性質是一樣的，雖然它們的原子核特性往往有顯著的差異。這種具有相同原子序而質量數不同的核種稱為同位素。它們的性質在化學上無法分辨，但是具有不同的原子重量。

1.11 一元素之同位素是以此元素之名稱或符號加上質量數加以辨別的。例如，氧最普通的同位素，質量數是16，亦即原子核中有8個中子和8個質子，寫作氧16、O-16或 ^{16}O 。有時為方便起見，在左下方再加上原子序，寫成 $^{16}_8\text{O}$ 。

1.12 1962年以前氧是作為原子重量度量的標準，天然存在有三種同位素，亦即 ^{16}O 、 ^{17}O 和 ^{18}O ，後二者所佔的比例很小。此種情況使得原子重量有兩套不同的表示法。傳統的原子重量尺度是按此三種氧同位素在大氣中所佔比例而求得平均原子重量定為16.00000。用後一種尺度所得的原子重量約比傳統尺度大0.028%。到了1962年1月1日，所有的原子重量都規定以一種尺度表示，此即將碳最普遍的同位素 ^{12}C 之原子重量定為12.00000。所得的原子重量較傳統化學原子重量少 $37/1,000,000$ ，較以前用的物理原子重量少 $318/1,000,000$ 。然而此新尺度之普現於各種文獻尚需若干年，本書中之物理原子重量是採舊尺度（以 ^{16}O 為準）。

1.13 在原子核物理或相關的課程中，原子、原子核和核子的質量一律採用所謂的物理尺度。原子質量單位（amu）定成 ^{16}O 原子質量的十六分之一*。換算成較實用單位時，1 amu等於 $1/N_A$ 克， N_A 是亞佛加厥數，亦即 16.00000 克 ^{16}O 同位素（或1“克原子”）所包含的原子總數，其值等於 0.6025×10^{24} 。因此1原子質量單位等於 1.660×10^{-24} 克。質子的質量是1.007596原子質量單位，亦即 1.6725×10^{-24} 克。電子的質量只有0.000549原子質量單位或 9.11×10^{-28} 克，因此原子的重量幾乎全部等於集中在原子核中的質子和中子。

1.14 目前，鈾是利用分裂釋出核能的最重要元素，天然存在的鈾同

*如果採用碳12的尺度，原子質量單位必須定成碳12原子質量的十二分之一。所造成的差額在此無關緊要。

位素至少有三種，質量數各為 234、235、238。這些同位素在天然鈾中所佔比例和它們的原子質量，列於表 1.1 中。由表中可看出鈾 238 佔絕大部分，而鈾 235 的含量略高於 0.7%。這二種同位素對於產生核能都很重要，到適當的時候可以看出可直接用來釋出分裂燃料的是鈾 235。鈾 234 所佔的比例太少了，實用上都將它忽略。

表 1-1 天然鈾中的同位素成分

質 量 數	重 量 百 分 比	原 子 質 量 單 位
234	0.0058	234.1140
235	0.711	235.1175
238	99.283	238.1252

1.15 從核能觀點，另一具有重要性的元素是釷，其原子序為 90。天然存在的同位素幾乎只有一種，質量數 232。有跡象顯示亦有其他同位素，但是太少而可以忽略。

核能和核力

結合能

1.16 由質譜儀或其他方法直接測出的原子核質量顯示：實際的質量總是比構成粒子的總質量少。差額稱為質量欠缺，相當於將粒子結合於原子核中所需的能量，可由下面的方法決定。因為原子是中性，必定有 Z 個電子圍繞原子核，尚有 Z 個質子和 $A - Z$ 個中子於原子核中。如果用 m_p 、 m_n 、 m_e 各代表質子、中子和電子的質量，則構成原子的粒子總質量是 $Zm_p + Zm_e + (A - Z)m_n$ 。假設觀察到的原子質量是 M ；則

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

此時將 $m_p + m_e$ 換成 m_H ，亦即氫原子質量。 m_H 是 1.008145， m_n 是 1.008986 原子質量單位，核種只要原子質量測出後即可求出質量欠缺。

1.17 根據特殊相對論所得的質能互換的觀念，質量欠缺可以度量 Z 個質子和 $A - Z$ 個中子結合成原子核所釋出的能量*。反之，也就是將原子* Z 個電子也需一小部分結合能，在 (1.1) 式中將 $m_p + m_e$ 換成 m_H 時已被大部分考慮過。