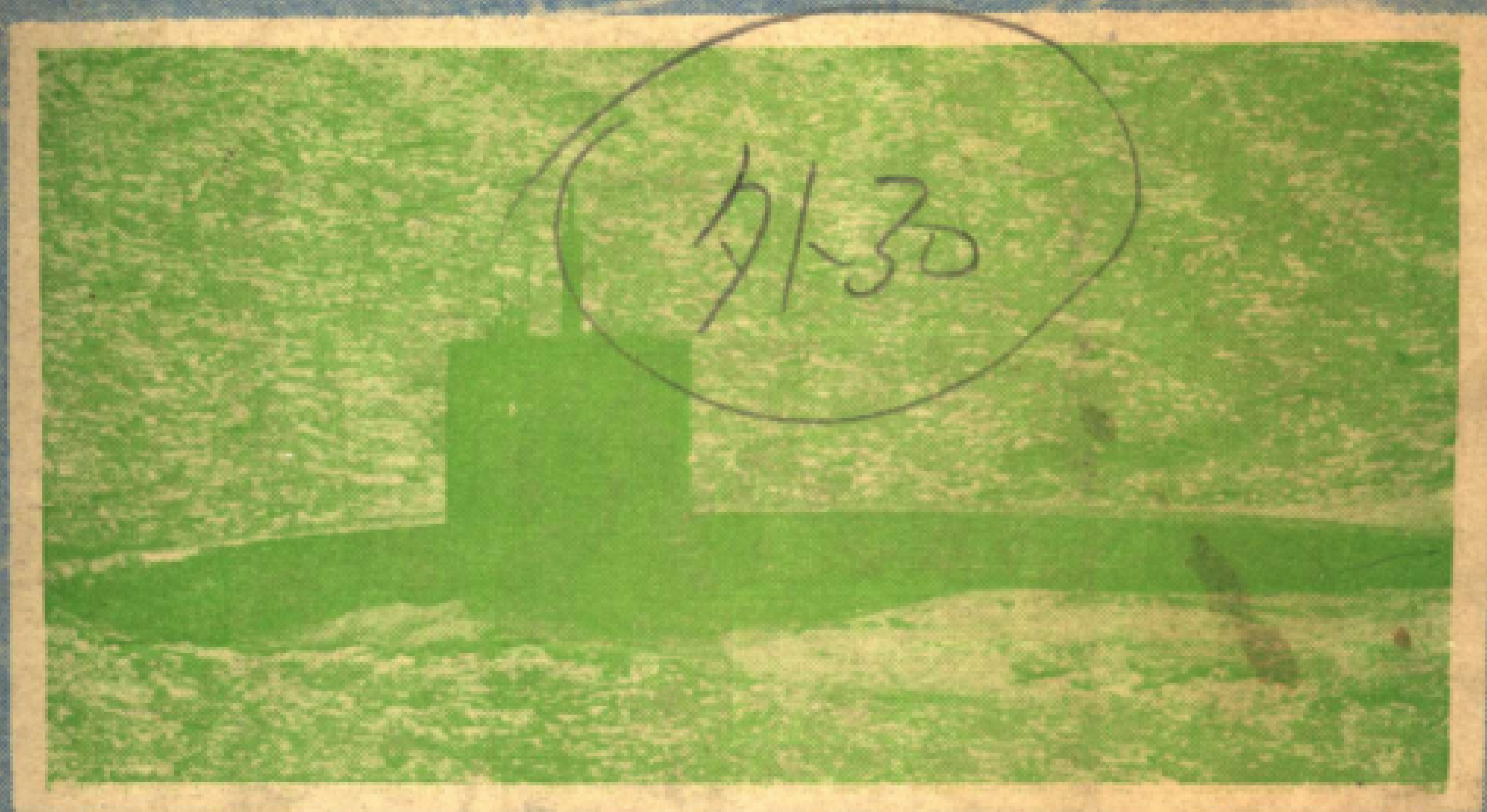


船舶核动力装置 原理与设计

王兆祥 刘国健 储嘉康 编著



国防工业出版社

前 言

本书系根据一九七八年全国高校船舶动力装置专业统编教材会议通过的“船舶核动力装置原理与设计”大纲编写的，供船舶动力装置专业教学使用。计划时数为100学时。

原子能作为船舶推进动力的和平利用，自一九五五年一月第一艘核潜艇“鳐鱼”号首次试航成功至今已有近廿五年的历史。从二十多年的使用经验来看，目前船舶核动力装置无例外地采用压水堆动力装置，因此，本书系以压水堆动力装置为主要对象阐述了船舶核动力装置的原理和设计问题。讲解了它的组成、功用、基本设计原理及主要计算方法，着重介绍了利用焓对整个动力装置进行热力分析的方法以及对装置进行能量平衡计算的方法。同时讲述了船舶压水堆动力装置的设计程序、内容和准则及参数选择问题。这就为进行核动力装置设计打下必要的理论基础。由于目前科学的发展，不仅需要阐明装置的静态问题，而且应对装置的动态问题有所了解并掌握它的分析方法，因此介绍了装置动力学及安全分析的基本方法。另外，对核动力装置的布置设计以及设计和运行中的一些主要问题——放射性安全防护、水质监督、控制调节和管道应力计算等也作了较详细的叙述，以便对它有一定程度的了解。当然，在叙述这些问题时，主要从装置角度来介绍。在讨论上述动力装置的原理与设计问题时，力求能反映国际上船舶核动力装置发展的现状，尽可能地用现代数学工具和计算工具来处理装置中的一些理论和工程设计问题。

学习本书应具有工程热力学、传热学和流体力学的基础，并应对反应堆工程原理、蒸汽发生器、汽轮机和辅助设备等有某些了解。在学习本课程之前，为了增强对动力装置的感性认识，如果能对已运行的动力装置的组成及工作情况进行参观学习，这对学好本课程是很有益处的。

本书可作为高等工业院校船舶动力装置专业高年级学生的教材，也可作为反应堆工程专业的教学参考书。本书还可以供从事核动力装置设计、制造和运行人员参考。

本书由哈尔滨船舶工程学院王兆祥同志编写第二章、第三章及第四章；刘国健同志编写第一章、第五章、第六章、第七章和第十二章；储嘉康同志编写第八章、第九章、第十章和第十一章，最后由王兆祥同志进行全书的统编工作。全书图稿由曲秀民等同志绘制。在本书编写过程中，承蒙彭仕禄总工程师对第五章进行了指导。编后由六机部719研究所张金麟等同志主审，并由上海七二八设计队审阅，他们对本书提出了许多宝贵的意见。除此，还得到上海交通大学二七〇教研室、二机部第二研究设计院和二机部技术情报研究所同志们的积极支持和帮助。在此一并表示衷心感谢。

由于我们的水平有限，本书一定有不少缺点和错误，希望各方面的同志提出批评意见。

编 者

1979.9 于哈尔滨

目 录

前 言

第一章 船舶核动力装置和原子核反应堆

- § 1—1 船舶核动力装置的发展与应用..... 1
- § 1—2 原子核反应和原子核反应堆..... 3
- § 1—3 原子核反应堆的分类和几种主要的反应堆.....19
- § 1—4 船舶压水堆动力装置.....27

第二章 一回路装置

- § 2—1 一回路装置概述.....34
- § 2—2 主载热剂系统.....34
- § 2—3 压力安全系统.....45
- § 2—4 水质控制系统.....53
- § 2—5 辅助水系统.....69
- § 2—6 工程安全设施系统.....77
- § 2—7 放射性废物处理系统.....82

第三章 二路装置

- § 3—1 二回路装置概述.....85
- § 3—2 蒸汽系统.....85
- § 3—3 蒸汽排放系统.....95
- § 3—4 凝水·给水系统.....97
- § 3—5 循环水系统.....111
- § 3—6 润滑系统.....116
- § 3—7 造水装置.....123

第四章 船舶核动力装置循环的热力分析

- § 4—1 船舶核动力装置的热力循环及热力分析的基本方程.....131
- § 4—2 船舶核动力装置中炯的不可逆损失.....137
- § 4—3 热循环分析.....156
- § 4—4 船舶核动力装置能量平衡计算.....169
- § 4—5 船舶核动力装置的部分负荷特性.....180

第五章 船舶核动力装置的设计和参数选择

- § 5—1 船舶核动力装置的设计特点.....192
- § 5—2 设计程序和设计内容.....196
- § 5—3 压水堆核动力装置的设计准则.....200
- § 5—4 压水堆核动力装置总体方案的制定和主要参数的选择.....204

第六章 船舶核动力装置的布置设计	
§ 6—1 布置设计的基本原则	227
§ 6—2 核管道的分级和管道布置的一般原则	233
§ 6—3 装置重量的估算	236
§ 6—4 动力装置的布置设计	239
第七章 放射性安全防护	
§ 7—1 放射性衰变	261
§ 7—2 放射性的来源和放射性屏蔽	269
§ 7—3 生物屏蔽计算	276
§ 7—4 放射性的安全防护	287
第八章 水质监督和水处理	
§ 8—1 装置的水质指标及其意义	293
§ 8—2 金属腐蚀的基本理论	297
§ 8—3 压水堆动力装置的腐蚀特点和规律	305
§ 8—4 水垢的形成和防止方法	314
§ 8—5 船舶核动力装置的水质监督制度	318
第九章 装置动力学	
§ 9—1 目的和方法	327
§ 9—2 反应堆动力学	331
§ 9—3 蒸汽发生器动力学	333
§ 9—4 管道传输动力学	336
§ 9—5 蒸汽稳压器动力学	340
§ 9—6 压水堆动力装置的动态特性	350
第十章 安全分析	
§ 10—1 装置的运行工况和安全分析的范围	355
§ 10—2 失水事故	357
§ 10—3 主载热剂系统断流事故	380
§ 10—4 蒸汽发生器传热管破损事故	387
第十一章 控制调节和安全保护	
§ 11—1 装置调节和控制系统	393
§ 11—2 装置的安全保护系统	412
§ 11—3 测量和数据处理系统	419
§ 11—4 电子计算机在装置控制上的应用	422
第十二章 核动力装置管道应力计算	
§ 12—1 核动力装置管道特点	425
§ 12—2 管道应力计算的基本原理	426
§ 12—3 多分支管道应力计算	431
§ 12—4 多分支管系应力计算程序举例	447
附录	462
参考文献	467

第一章 船舶核动力装置 和原子核反应堆

§1-1 船舶核动力装置的发展与应用

船舶核动力装置是以原子核反应堆作为推进动力的船舶动力装置。它包括核动力反应堆，和为产生功率推动船舶前进所必需的有关设备，以及为提供装置正常运行、保证对人员健康和安全不会造成特别危害的那些需要的结构、系统和部件^[1]。

1955年4月，世界上第一艘核动力推进船舶——美国核潜艇“鳐鱼”号(Nautilus)正式编队下水服役。为了这艘核潜艇的动力装置S₂W^①的建造，曾提前五年于1950年8月，在艾德华(Idaho)州兴建了它的陆上模式堆S₁W。这就是诞生在世界上的第一个核动力装置。从那时候起，到现在的二十多年时间里，世界上已先后约有近十个国家300多艘核动力装置的水下潜艇、水面舰艇、客货轮商船、矿砂船、破冰船等，相继游戈在宽阔的海洋上了。事实充分说明，船舶在使用核动力装置以后，船舶推进能源就又进入了一个完全崭新的阶段。可以期待：随着核能事业的发展，大规模的建造核动力舰船，将会成为各有关国家船舶制造业今后十分关注的发展道路。

如果说过去的两个多世纪，由于人类掌握了利用煤、石油等化石燃料产生动力的技术，曾经使人们摆脱了单纯依靠人力、畜力进行劳动的困境，并进而推动了社会生产突飞猛进的发展，那么，与有限的化学能源相比较，现在已经作为新能源的核能利用，必然将会给人类开辟出又一个全新的，蕴藏量更为丰富的动力资源，它必然将更有力的推动社会生产力更快更好地前进。

早从1939年具有划时代意义的原子核裂变被发现起，核能的利用，事实上就已经成为现实。当时用中子去轰击铀核，伴随某些被轰击的原子分裂成两半的同时，放出了大量能量的事实，曾引起了科学技术界的极大震动，多少科学家和工程技术人士，就开始思考着能不能早日建造出一种能在水中、陆上和空中推进的新型工具来。为什么人们对核能的应用有着如此浓厚热烈的兴趣呢？这正像今天大家所知道的一样，最根本的是核燃料具有极高的能量。1公斤可裂变物质铀完全分裂所产生的能量，大约相当于2800吨优质煤，或相当于2100吨燃油充分燃烧后所得到的能量。这也就是说，核燃料所包含的能量，相当于本身重量280万倍的煤的能量，或者是相当于本身重量210万倍的燃油的能量。一艘大型的10万轴马力的快速舰船，全速航行1小时，大约要消耗35吨燃油，但是，该船采用压水型反应堆的核动力推进装置，1小时仅需消耗17克重的铀-235核燃料。为了保证能每小时净消耗掉这个重量，按目前船用反应堆还存在核装料不均

① 反应堆代号，其中S—潜艇，W—美国威斯汀豪斯(Westing House)公司。

匀、能耗比较浅、需要尽量一次多装料等不足的现实技术水平考虑，参照日本“陆奥”号（むつ）核船装料标准来推算^[2]，该船若全速航行一年，以9000小时计，它所携带的核燃料二氧化铀，最多也只需27.5吨，其中铀-235含量约970公斤。这样，与9000小时满功率航行的燃油消耗量相比，核燃料二氧化铀的装载量也只是燃油的一万一千四百分之一。如果在有足够的食物、用水等生活供应品和充足的武器装备的条件配合下，核动力装置就不难保证这艘舰船不停歇的全速航行200昼夜。显然，曾作为舰船战术技术论证重要指标之一的续航力，就再也不会像其它非核动力的舰船那样受到燃料装载量的限制和束缚了。美国新型弹道导弹核潜艇“三叉戟”（Trident）的续航力，设计指标就是100万海里。

装载少量的核燃料，提供给船舶极大的续航力，对于增加船舶吨位和提高船舶航速来说，其经济上的优越性也是十分重大的。

除了有很长的续航力这个优点以外，由于核反应不是燃烧反应，因此核燃料“燃烧”就不需要氧气供应，省去了过去不断地要为推进船舶前进的动力装置输送氧气的操作，这对于核动力潜艇来讲，是一个极为可贵的突出优点。装有核动力装置的潜水艇，只要能充分保证艇员们在与外界空气完全隔绝的舱室内正常生活的条件，只要在艇员身体健康允许情况下，它就可以在水下，持续的高速潜航很长的时间。“缸鱼”号就曾于1958年8月胜利地进行了人们第一次在冰层下面横跨北极的航行。长时间潜航，无疑地增加了潜艇的隐蔽性，也就极大地扩展了潜艇的攻击能力和防御能力，使核潜艇在未来的保卫祖国的反侵略战争中，真正成为能在水下不受限制，而又可以自由移动的弹道导弹基地。同时，潜艇本身也将成为一个最有效地反潜武器，使其更好地担负起保卫海疆的光荣使命。

核动力装置作为船舶推进动力的第三个优点是功率比较大，而在要求船舶具有较高的平均航速和较大的续航力情况下，该装置总的重量和尺寸，由于节省装载核燃料吨位的弥补，使之相对其功率水平说，并不显得比常规动力装置突出。常规动力装置的最大功率，因为燃油消耗过多，从而其工作时间总是受到限制的。每一次出航过程中，在发出满功率的决定时都不得不慎重考虑。战斗舰艇的航海日志记录表明，其满功率工况或接近满功率工况的使用时间，占其全部航行时间的百分比是很小很小的。但是，对于核动力装置的舰艇说，这种限制，则将因反应堆内单位重量核燃料平均发出的功率大，而几乎再没有什么意义了。核动力舰艇航行实践说明，以尽量多的时间按满功率，或接近满功率进行工作是合理的。而核动力商船在驶离港口后，即完全以满功率航行，则是最为经济合算的。此外，由于功率大、耗用燃料少，使得核动力装置在核燃料的供应、核燃料的运输、和核燃料的装载量等方面，也获得了极为突出的好处，除舰艇而外，就是对其它具有专门特殊使命要求的各种船舶说，这一优点也是十分吸引人，而极易被赞同选取核动力装置进行配套工作的。例如，对于要求具有大功率的破冰船和具有大吨位的矿砂船、运油船、集装箱运输船等，都极为适宜选取核反应堆作为它们的推进动力源。

核动力装置的第四个优点是，与锅炉蒸汽轮机动力装置相比较，其运行特性较为稳定，且又易于控制，其负荷跟随特性也比较好。尤其是压水堆核动力装置本身所固有的那种特殊的负温度效应的自调节特性，能够使反应堆装置可以较迅速地随着汽轮机进汽

阀开度变化而自动跟踪调节，这一特点增大了核动力装置的操纵机动性能，对于核动力装置的控制是十分有利的。今后，随着船舶自动控制技术水平的提高，肯定还可以进一步改进核动力装置的起动和停堆过程上的操作技术，待到核动力装置实现完全自动化以后，也将会像八十年代先进核电站设计一样，使整个装置的操纵管理的船员人数减到更少，同时还减小了可能出现的操作误差几率。

反应堆作为船舶推进动力所具有的上述一些优点是突出的。但是，任何事物都应该一分为二。核能利用这项发展中的新技术，在给人们带来利益的同时，也可能引起某些危害。例如，核燃料的放射性污染就是一个客观存在的潜在危险。特别是在船上这样一个有限空间的生活环境里，放射性对船员身体的损伤、船员所接受的允许放射性小剂量的远期效应等等，都是些应该引起核动力装置设计工作极为重视的问题。尽管现今核能技术的发展进步和放射性设备的机械制造工艺水平，已能保证船舶核动力装置安全运行和能够避免发生较严重的事故。然而，放射性安全防护的各种措施，始终应该引起我们的关注，为把事故防止于未然，在设计中就应该考虑尽可能完善一些放射性安全防护措施，其中包括对船员人体的安全防护、对船舶舱室环境的安全防护和对船舶停泊港口与沿海航行水域的安全防护所应具有的一些常用附加设施。这样做，即使增加了一些船舶吨位，但是与整个动力装置的重量、尺寸相比较，仍然无损于核动力装置所具有的优点。实践已经表明，由于核燃料能量大，船舶长时间航行而不需添加燃料所节省下来的燃油占据的重量和体积，基本可以补偿核动力装置及其附属设施的重量。船舶吨位愈大，船舶推进功率愈大，核动力装置这一特点也愈显得相对优越。所以，总的说，大功率船舶采用核动力装置是合适的，而潜艇用核动力的优越性更是充分肯定的。可以说这正是这些年来，全世界在广泛采用核动力装置，而核动力推进舰船能够较快速度发展的最好说明。

§ 1-2 原子核反应和原子核反应堆

一、原子核

人们在自然界生活中，所接触的水、木材、石油、煤、盐、金属等等绝大多数物质，都是复杂的化学物质。通常我们用物理和化学的方法，可以把它们分解成氢、氧、碳、钠、铁等简单的化学元素。复杂的化学物质，是由我们称作为分子的该物质的最小粒子组成的。例如，水是水分子组成的组合体，煤是煤分子组成的组合体。然而，这些分子，却又是由我们称作为原子的这些物质化学元素的最小粒子组成的。例如，两个氢原子和一个氧原子组合成一个水分子。至此，我们再不可能用化学方法把这些原子分割成更小的粒子了。因此，原子是具有化学性质的化学元素的最小粒子。

分子小，组成分子的原子更小。如果我们有可能把最简单的化学元素氢的原子依次排列成一行，那么，在1厘米的长度内，就可以容纳下一亿个原子。原子的直径大约是 10^{-8} 厘米。虽然原子这样小，但是原子的结构并不简单。原子就像一个太阳系，中心有一个带正电的原子核，周围有若干个带负电荷的电子（e）绕着原子核旋转。在原子核内，又有许多被我们称作基本粒子的质子（p）、中子（n）和其它更小的粒子。有时也统称质子和中子为核子，即核子也是一种基本粒子。表1—1列出了质子、中子和电

子的半径、质量、原子量和它们所带的电荷。

表 1—1 质子、中子、电子比较表

名 称	半径 (厘米)	质 量 (克)	原 子 量	电 荷
质子 (P)	约 10^{-13}	1.6724×10^{-24}	1.00759	单位正电
中子 (n)	约 10^{-13}	1.6724×10^{-24}	1.00867	不带电
电子 (e)		9.106×10^{-28}	5.4862×10^{-4}	单位负电

从表 (1—1) 可以看到：质子、中子和电子都是极其微小的粒子。论质量，中子最重，质子稍轻，而基本上等于中子，电子最轻，其质量仅大约是质子的一千八百四十分之一。因此，原子的质量几乎全部集中于原子核上。由于在一个原子中，原子核的直径大约是 10^{-12} 厘米，只相当原子直径的万分之一，所以原子核的密度是很大的，如果我们也有可能把氢的原子核紧紧地安放在一立方厘米的体积中，它的重量就能高达一亿吨。实际上，从原子构造的角度看，一个原子只有中间很小很小的极为“结实”的核，而核的周围很大很大范围的内部，却是极为空荡的，在这极大空荡的空间范围里，仅仅有些电子在不断地运动。

在正常状态下，一个原子核内的质子数目与围绕原子核旋转的电子数目是相等的，因此整个看来，原子是中性的。由于任何化学元素的化学性质，取决于围绕原子核旋转的电子数目，所以不同的化学反应，只是由于不同化学元素原子的外层电子重新分配，而引起其原子的重新结合而已。可见，化学反应丝毫没有涉及到原子核的变化。如果说原子核发生了变化，也就是说组成原子核的基本粒子参与了原子核之间的变化反应，这种变化是原子核内基本粒子重新分配的结果。在这种变化中，处于原子核外的电子则根本不起作用。例如，中子与极少数几种核物质（其中一种就是铀—235）间的某种特定形式的相互作用结果，必然毫无例外的释放出很大的能量，而这种能量，正是我们期待的并将赖以实际应用的核能。

原子核内质子与中子的总数，称作这一元素的质量数，以 A 表示。任一元素的原子核内所含的质子数等于该核所带的正电荷数，称其为该元素的原子序数，通常以 Z 表示。它也正是化学元素周期表内该元素的序号数。因此，原子核内的中子数目等于 $A - Z$ 。即

$$A - Z = \text{质量数 (质子数 + 中子数)} - \text{原子序数 (质子数)} = \text{中子数}$$

由于中子和质子的质量均接近一个原子质量单位，所以质量数就是最接近于该物质原子量的一个整数。例如， ${}_{92}^{235}\text{U}$ 代表铀的原子核，它的质量数是 235，原子序数是 92。也就是说，铀的原子内有 92 个电子，原子核内有 92 个质子，和 $235 - 92 = 143$ 个中子。为书写方便，有时简写成 U—235 或 铀—235。用同样的方法表示中子的符号为 ${}^1_0\text{n}$ ；质子为 ${}^1_1\text{H}$ ；电子为 ${}^0_{-1}\text{e}$ ；正电子为 ${}^0_{+1}\text{e}$ ，因为电子的质量近似为零，所以表示它的质量数为零。一些简单的原子结构示于图 1—1 上，其中氢原子是最简单的，核内只有一个质子 (P)，核外只有一个电子 (e)。

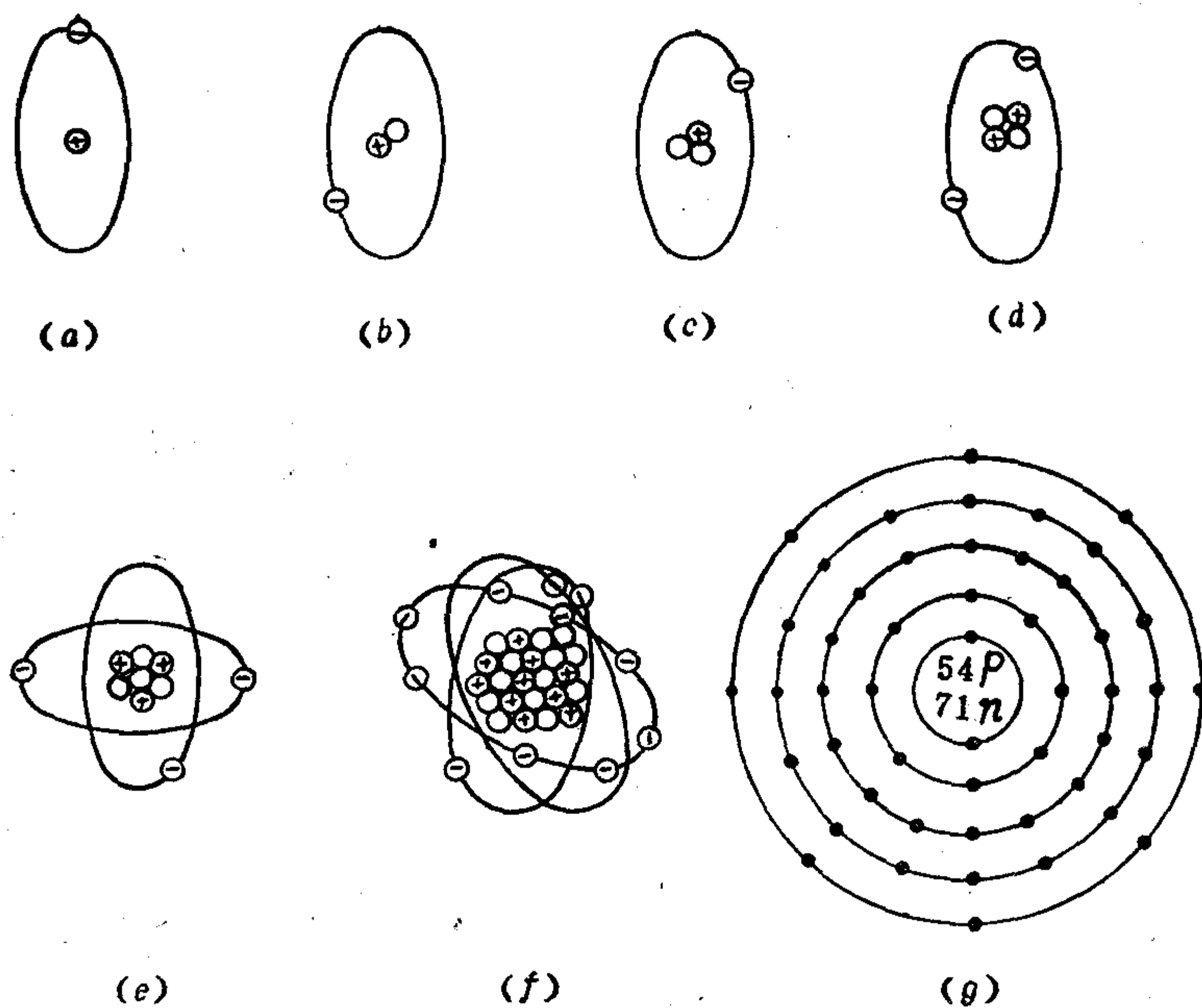


图 1—1 一些简单的原子结构

- = 中子; ⊕ = 质子; ⊖ = 电子;
- (a) 氢 ($A=1, Z=1$); (b) 氦 ($A=2, Z=1$);
- (c) 氘 ($A=3, Z=1$); (d) 铍 ($A=4, Z=2$);
- (e) 锂 ($A=7, Z=3$); (f) 钠 ($A=23, Z=11$);
- (g) 铀 ($A=125, Z=54$);

自然界中的大多数元素，大都是由两种或两种以上属于该元素的原子所组成的，而这些属于同一元素的各种原子具有同样数目的电子，也就是原子核内有同样数目的质子，所以它们的原子序数是一样的，它们在元素周期表内，占据了同一个位置，但是由于它们原子核内的中子数目不一样，致使它们的质量数不一样。我们称这种电荷数目相同，质量数不同的原子核为同一元素的不同同位素。例如，氢有三种不同的同位素， ${}^1_1\text{H}$ ； ${}^2_1\text{H}$ ； ${}^3_1\text{H}$ ，分别取名为氢；氘；氚，或称氢；重氢；超重氢。它们的原子核内都有1个质子，电荷数都是1，但质量数却分别为1；2；3。在天然存在的氢中，含有6400分之一的氘。当它们与氧化合时，氢（即H）和氘（有时用D表示）则分别形成水（即普通水 H_2O ，又称轻水）和重水（ D_2O ）。又例如，自然界的天然铀中，有三种不同的铀的同位素同时存在。它们各占一定的百分比，即 ${}^{234}_{92}\text{U}$ 占0.006%； ${}^{235}_{92}\text{U}$ 占0.712%； ${}^{238}_{92}\text{U}$ 占99.282%。三种同位素的原子核，包含的质子数都是92个，但是中子数分别为142个；143个；和146个。其中我们最关注的是 ${}^{235}_{92}\text{U}$ ，由于它在自然界的天然铀中含量太少，每一吨天然铀中才大约有7.1公斤的铀-235，所以实际应用时，都想要提高铀-235的含量。在经过工业上的离心分离法或者是气体扩散铀等方法的处理后，就能够使铀同位素混合物中的铀-235 相对含量提高，而得到所谓的浓缩铀。浓缩

铀是人们所需要的一种优良核燃料，浓缩度达到90%的高浓铀是核武器的重要装料，低于90%的其它浓缩度的铀，都可以做反应堆燃料，一般动力反应堆用的都是2~4%的低浓铀做燃料。

二、核的结合能

原子核带正电，电子带负电，它们之间因异性电荷而存在着静电引力，就是这种引力使电子结合于原子中。但是，原子核内的质子都是带正电的，它们之间因同性电荷而存在着静电斥力，为什么它们不相互排斥，分解成质子和中子？相反地却结合得那么紧密，在不受外力干涉时，就不会破裂（放射性衰变除外）而又表现的那样极为稳定呢？实验证明，原子核内的粒子之间还存在着一种巨大的引力，这个力能克服质子与质子间的静电斥力，而把核子凝聚成原子核，这个力就是核力。核力是核子的相互作用力，它属于一种基本粒子的强相互作用。核力具有两个特性，首先，核力是短距力，只有核子间距离小于 2.8×10^{-13} 厘米时，才出现核力，而且与静电斥力相反，随着核子间距离的减小，核力反而急剧增大，当核子之间距离小于 2.8×10^{-13} 厘米时，核力就大大地超过静电斥力。核力与静电斥力之差，就是使原子核结合在一起的真正作用力，其所具有的能量，称做结合能。实质上，核结合能就是聚合原子核内质子和中子的能量。结合能愈大，原子核结合愈紧密。因此，轻元素原子核在不受外力作用时，永远不会分裂，而重元素原子核却是另一种情况。例如铀-235原子核，由于存在92个带正电荷粒子的静电斥力存在，就必然会相对削弱其原子核内143个中子和92个质子的粒子结合力，从而使铀-235核分裂的几率（即可能性）增大。核力的第二个特性，是中子与中子间、中子与质子间，以及质子与质子间核力大致相等。

由于原子核内存在着结合能，我们要想把原子核内的全部核子一个一个地“拉开”，我们就必需耗费与核结合能大小相等的能量以克服核引力。当然，根据能量守恒定律，核子与核子结合时，相反的也应当释放出同等数量的能量。

三、原子核反应

每一个原子核存在着的巨大结合能和不同原子核之间相互碰撞几率很小这一事实，使我们在日常生活中所能见到的原子核之间的核反应相对原子间的化学反应来说，是微乎其微的。但是，现代科学技术的进展，已经使人们有可能采用一些特殊的方法，使原子核反应也成为了现实。例如，把温度提高到几百万度，使参加反应的核获得足够大的动能以克服静电斥力的所谓热核反应，依靠原子弹引爆产生的高温以使氘核复合的氢弹热核反应就是这样。又例如，在实验室中利用高能加速器，将带电粒子加速到动能达数兆电子伏水平去撞击其它物质所发生的核反应。再例如，在原子核反应堆中，就是利用中子去轰击其它裂变物质所产生的核反应。

通常根据能在反应堆中引起核反应的中子所具有的用作去轰击其它裂变物质的动能大小，而将中子分为六类，如表1—2所示。

表中有关反应堆的主要有：动能大于0.1兆电子伏（Mev），而又小于10兆电子伏的快中子；动能在零点零几个电子伏（ev）左右，速度约为2200米/秒的热中子；动能比热中稍大的超热中子；动能比快中子小，而又比超热中子大的中能中子。其中，热中子和超热中子有时又统称为慢中子，所谓“慢”，当然是相对快中子说的，实际上慢

表 1—2 中子依据能量大小的分类

中子分类	中子能量
高能中子	>10Mev
快中子	0.1Mev~10Mev
中能中子	100ev~0.1Mev
慢中子	0.025~100ev
超热中子	0.1~100ev
热中子	0.025~0.1ev(20~1000℃)

中子的速度也是每秒几千米。

例如：速度为2200米/秒的热中子动能为：

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} m v^2 &= \frac{1}{2} \times 1.672 \times 10^{-24} \times (2200 \times 100)^2 \\ &= 4.051 \times 10^{-14} \text{ 尔格} \\ &= 0.0253 \text{ 电子伏} \end{aligned}$$

用一定能量的中子（或质子、 α 粒子、 γ 光子）去轰击某一种原子核，通常称这个被轰击的原子核为靶核。如图 1—2 所示。反应前中子以一定的动能，也就是以一定的速度射向靶核，比起入射中子来说，靶核的运动速度是很小的，可近似认为静止。反应后有一个出射粒子，并生成一个新核。

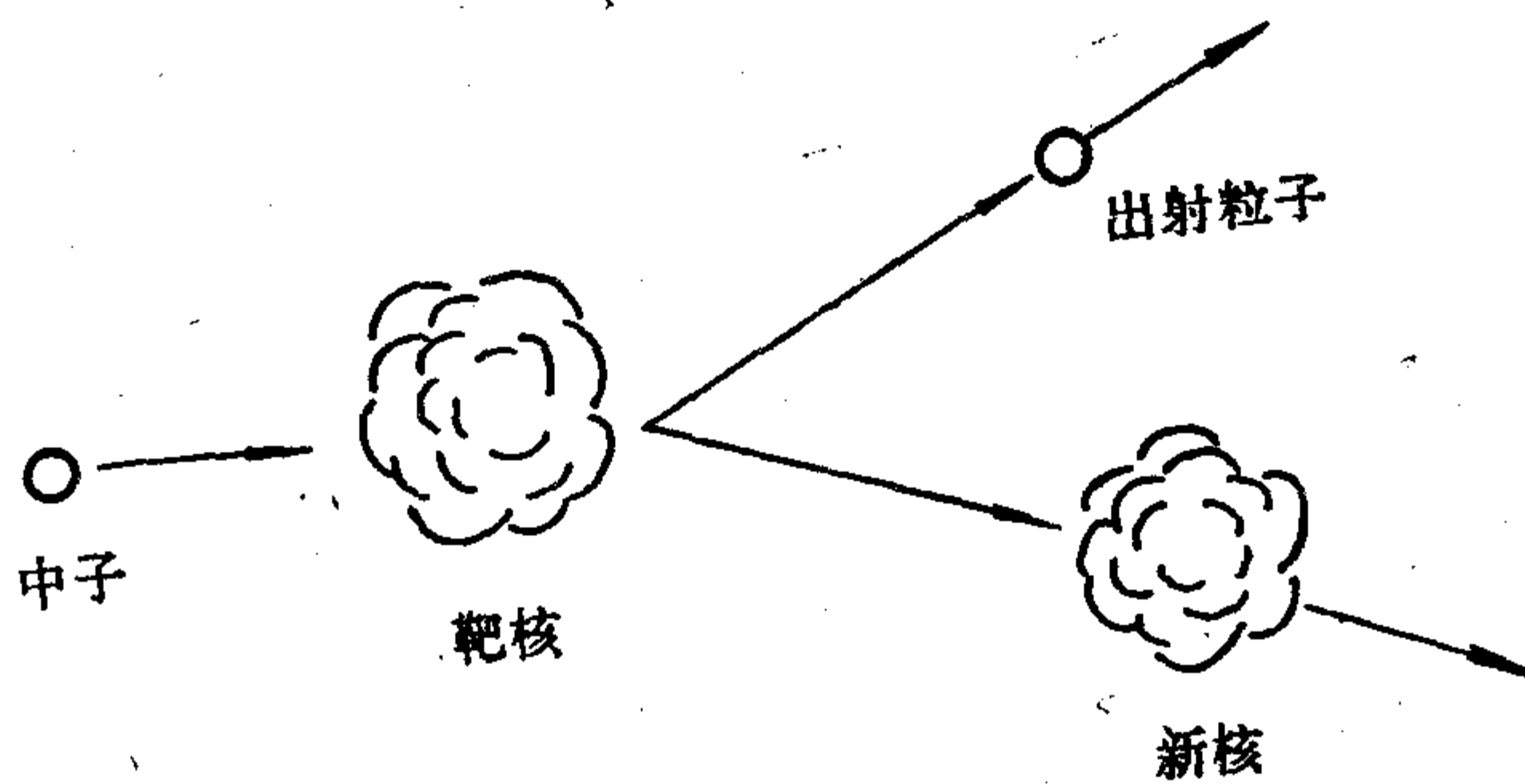


图 1—2 中子的核反应

按中子与靶核相互作用的过程，可将中子引起的原子核反应分为下述几类：

- 中子的核反应 {
 - (n·n) 散射反应 {
 - 弹性散射
 - 非弹性散射
 - 辐射俘获，即(n· γ)反应
 - 吸收中子反应 {
 - 放出 α 粒子，即(n· α)反应
 - 放出带电粒子 {
 - 放出质子，即(n·p)反应
 - 裂变，即(n·f)反应

(一)、弹性散射

两个或两个以上的物体相互碰撞，碰撞前后的总动能没有发生变化，但由于这种弹性碰撞的结果，使得相互碰撞的物体改变了原来的运动方向而朝四面八方飞散出去，则称这种现象为弹性散射。中子轰击靶核，出射粒子仍是中子，新核仍是原来的靶核，但中子与靶核之间产生了能量交换，碰撞前中子的动能加上靶核的动能，等于碰撞后中子的动能加上新核的动能。即：

出射中子的动能 + 新核的动能 = 入射中子的动能 + 靶核的动能 (近似为零)

虽然弹性散射过程前后两者的动能和不变，但单就中子来说，它的动能碰后减少了，其减少的动能传给了靶核。正象一个小球碰在一个原为静止的质量大的球上，碰后小球的动能减少了，大球获得了一些动能。一系列这类碰撞后，可将中子能量，最终减到和分子动能一样。

(二)、非弹性散射

两个或两个以上的物体相互碰撞，若碰撞前后的总动能发生了变化，且由于这种非弹性碰撞的结果，也使相互碰撞的物体改变了原来的运动方向，而飞散到四面八方去，则称此现象为非弹性散射。中子轰击靶核，碰后中子的动能加上新核的动能，小于碰撞前中子的动能加上靶核的动能。即：

出射中子的动能 + 新核的动能 < 入射中子的动能 + 靶核的动能 (近似为零)

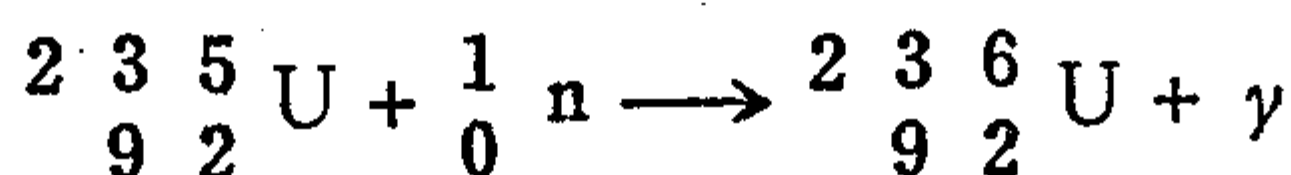
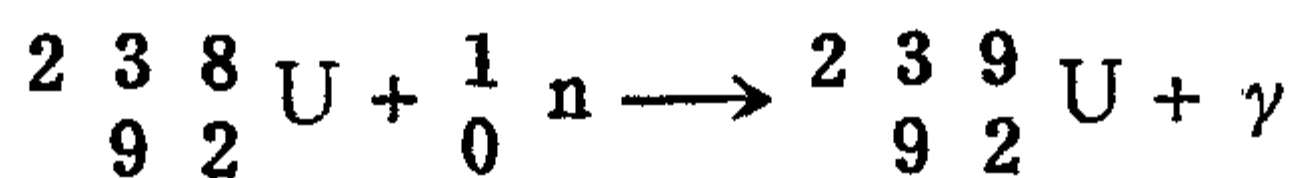
在非弹性散射过程中，原子核吸收中子后处于不稳态，然后放出动能较小的中子，但核仍处于激发态，以后会再把多余的能量以 γ 射线形式放出，才再回到正常态。

(三)、辐射俘获

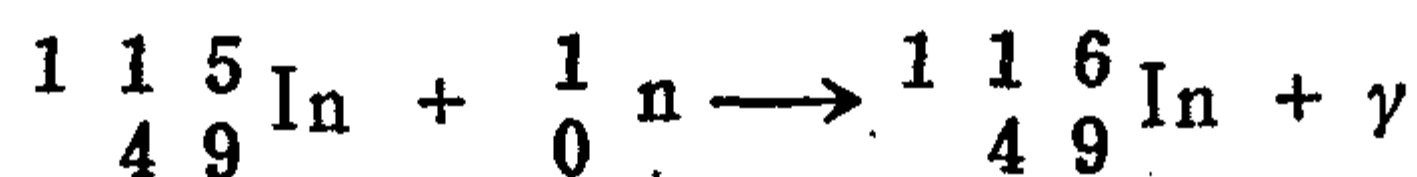
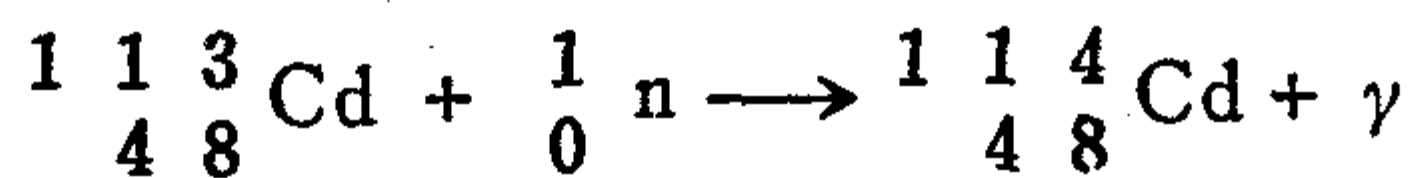
辐射俘获是指靶核吸收中子后，放出 γ 射线，又形成新核的反应，即 (n, γ) 反应。

辐射俘获后形成的新核，绝大多数都是不稳定的，而且具有放射性。这种原来是稳定的没有放射性的原子核，受到中子辐照后变成了不稳定的带有放射性核的现象称为活化。实验证明，中子对于所有原子核在能量上都可能的反应主要是散射和辐射俘获。在反应堆中有许多重要的辐射俘获反应，尤其慢中子 (n, γ) 反应是反应堆生产放射性同位素的主要反应^[3]，例如：

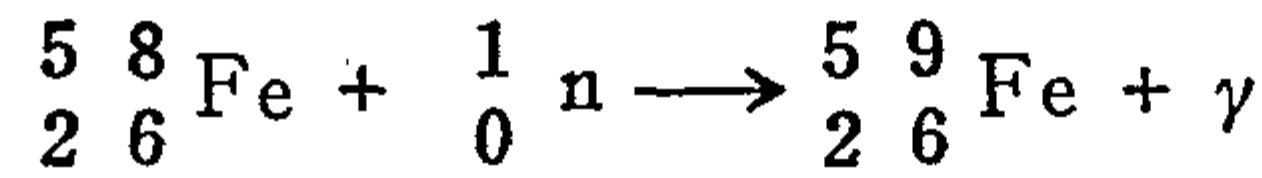
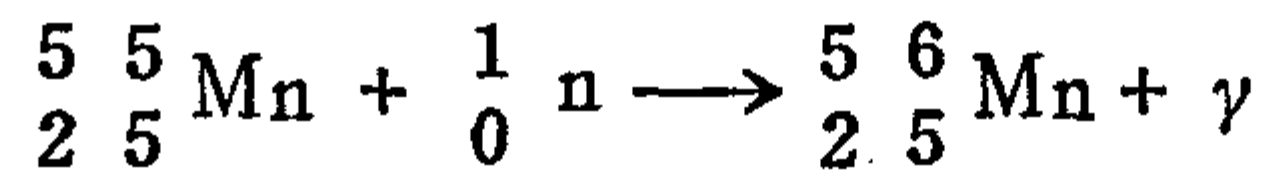
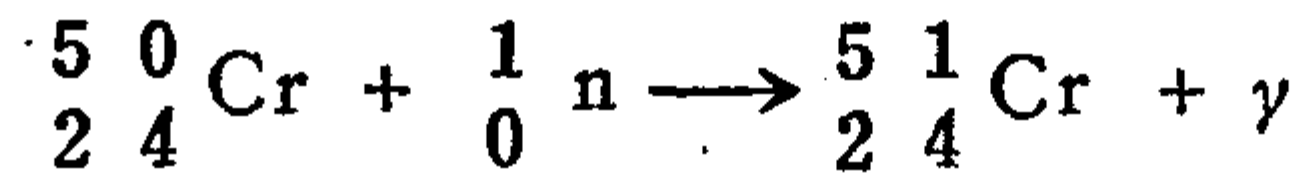
作燃料的铀核对中子的辐射俘获



作控制棒材料的镉和铟对中子的辐射俘获



作结构材料的不锈钢各组成的成分：铬、锰、铁等对中子的辐射俘获



另外，反应堆结构材料的腐蚀产物随载热剂一起流经堆芯时，受到中子辐照也存在活化的可能性。

(四)、吸收中子放出 α 粒子，即(n· α)反应

中子与靶核相互作用后，中子被吸收，放出一个带电的 α 粒子而留下一个新核。 α 粒子是带正电荷的氦核，即 ${}^4_2\text{He}$ 。每个粒子由两个质子和两个中子组成。

如用于反应堆控制技术的可燃毒物硼-10吸收中子，放出 α 粒子而形成新核锂-7。



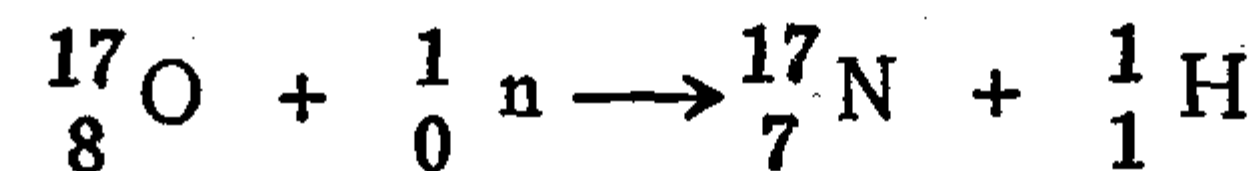
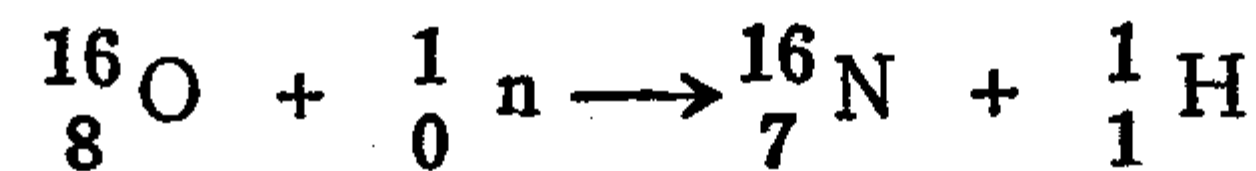
又如锂-6在反应堆内吸收中子，放出 α 粒子后变为氢弹原料氘。



(五)、吸收中子放出质子，即(n·p)反应

中子与靶核相互作用后，中子被吸收，放出一个带电的质子 ${}^1_1\text{H}$ ，而留下一个新核。

如压水型反应堆载热剂里的大量氧原子核流经堆芯时，受到中子辐照而活化的反应。



新核氮-16、氮-17都不稳定而带有放射性，这就是构成压水型反应堆装置必需要有一个封闭的一回路系统的主要原因之一。

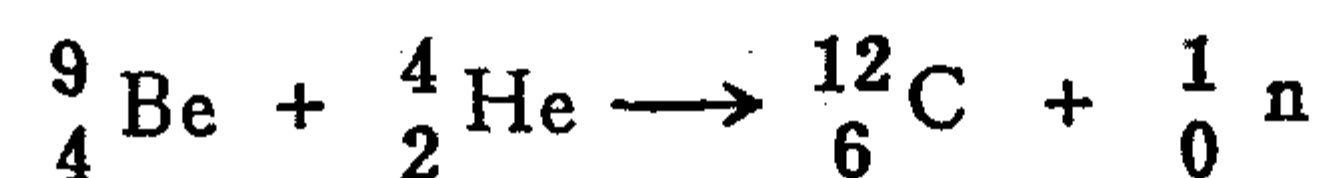
另外，由于质子带正电荷，还可以用其电荷数去探测中子。

(六)、吸收中子发生原子核裂变，即(n·f)反应。

入射中子被靶核吸收后，靶核本身发生分裂，分成两个碎片，同时放出几个中子和相当大的能量。这种因慢中子引起的重原子核的裂变(n·f)反应，是一种极为重要的典型中子反应，这种反应是反应堆技术的基础，在下一个问题中将较详细的讨论。

除了上述中子与靶核的作用，即中子引起的核反应外，入射粒子还可以是原子核内的其它粒子。 α 粒子、 γ 光子、质子也可以引起核反应。

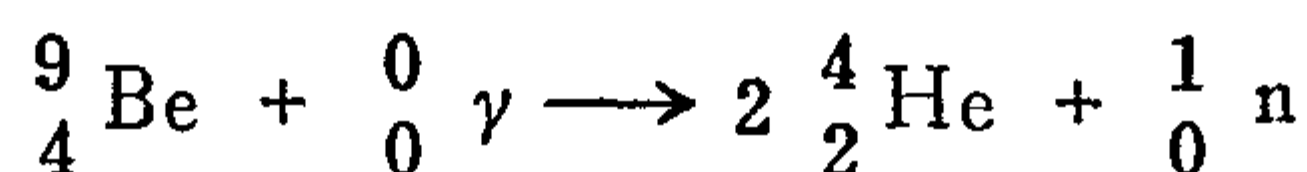
如 α 粒子引起的核反应：



这是将钋(Po)和铍(Be)混合在一起，利用钋的 α 放射性，即钋放出的 α 粒

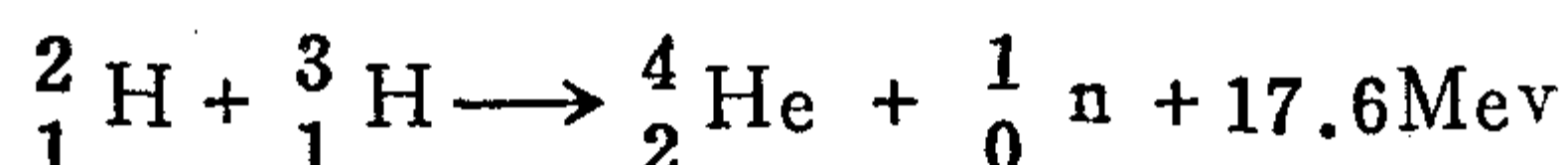
子(${}^4_2\text{He}$ 核)去轰击铍核,就可以产生一个中子,其能量范围在5~12兆电子伏。这就是反堆中“点火”用的钋-铍中子源的原理。

如 γ 射线(又称光子)引起的核反应:



中等能量(约2兆电子伏)的 γ 射线与铍核反应产生中子,这就是光激中子源的制造原理。

如质子引起的核反应:



用加速器加速重氢 ${}^2_1\text{H}$ 去轰击超重氢 ${}^3_1\text{H}$ 的热核反应,这就是氢弹中的核反应原理。

实验证明,上述所有这些核反应的发生,除与入射粒子的种类有关系外,还和入射粒子所具有的动能大小、靶核的性质有关系。

四、核裂变

如果一个靶原子核接受一个轰击的中子以后,入射粒子的能量很快的和靶核中核子相交换,立即会使此靶核变成一个极不稳定的复核,核内激发出的多余能量使核子形状也发生了变化,其变形过程就像一滴带电液体的变形一样。由于可以把原子核看成是由一群强相互作用的粒子所组成,它呈现的性质就是所有组成粒子的平均性质,正如液滴内的分子共同组成一液滴的性质一样,为一不可压缩性体,并具有相同的密度。所以原子核也就犹如液滴表面所呈现的表面张力那样,形成一稳定的球形体。如图1-3所示。一旦当一个中子加入这个稳定的球形体时,使原子核中增加该中子所带来的多余能量,就和加一外力于水滴那样,会引起振荡而变成一椭球体,即图中由(a)变为(b)。若中子作用所激发的能量不够大时,在原子核内的核子吸引下,又会使此椭球体恢复成原来的球形体,使分裂无法产生。相反的,若作用的中子所激发的能量足够大时,可使原子核内呈现出一连串的振荡,引起更大的变形,使成为哑铃体(c),此时每一半哑铃之间的彼此核子吸引力极为微弱,其最近两端点之间的静电排斥力反而变成很大,致使原子核再恢复到原来的球形体已不可能了,只好进一步分裂成(d)状的二块单独的碎片即形成二个各别的稳定球形体(e),并以极大的速度向不同的方向飞去。这种现象就是原子核裂变,这也就是(n,f)反应现象。一般说这个分裂过程平均所需要的时间,约为 10^{-12} 秒。

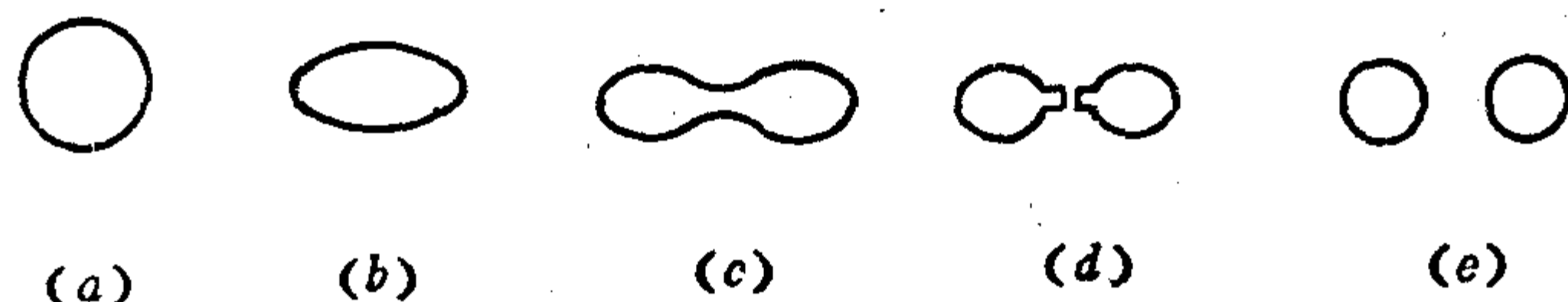
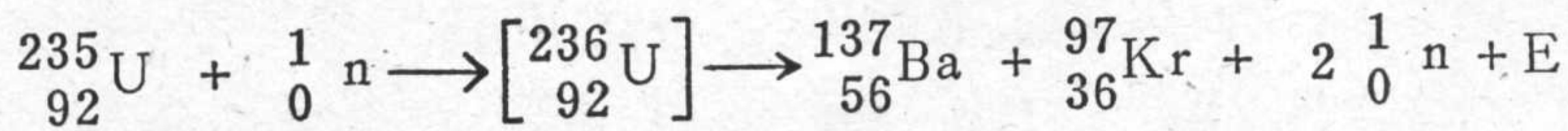


图1-3 核分裂的液滴模型

自然界中,只有少数重原子核同位素是可裂变的。铀-235、钚-239和铀-233可以由各种能量的中子引起它们的裂变。也就是说,中子在高速、中速和低速下轰击这些重核,都可以使它们裂变而不遭受排斥。铀-238、钍-232和钚-240只能由高能中子才

能引起裂变。例如，反应堆中一个典型的核裂变反应：铀-235 吸收一个中子，分裂成钡和氙，同时放出二个新中子，如图 1—4 所示。其反应式是：



即当一个中子 (${}_0^1\text{n}$) 轰击一铀-235核 (含92个质子, 143个中子) 后, 先变成一不稳定的复核铀-236, 随之立刻分裂成二个质量不等的分裂碎片钡-137 (含 56 个质子, 81个中子) 及氙-97 (含36个质子, 61个中子), 同时产生两个中子及释放出能量 E。

核裂变的结果, 都将表现在三个方面。

(一)、产生裂变碎片

如上例所示, 裂变反应的直接(瞬时)产物钡-137 和氙-97 称为裂变碎片。在裂变过程中, 原子核吸收中子后, 一般分裂成为二个或三个质量不等的碎片, 它们以及它们的衰变产物都称为裂变产物。因为裂变碎片都是些新的不稳定的原子核, 它们都带有放射性, 通常要再经过 2—3

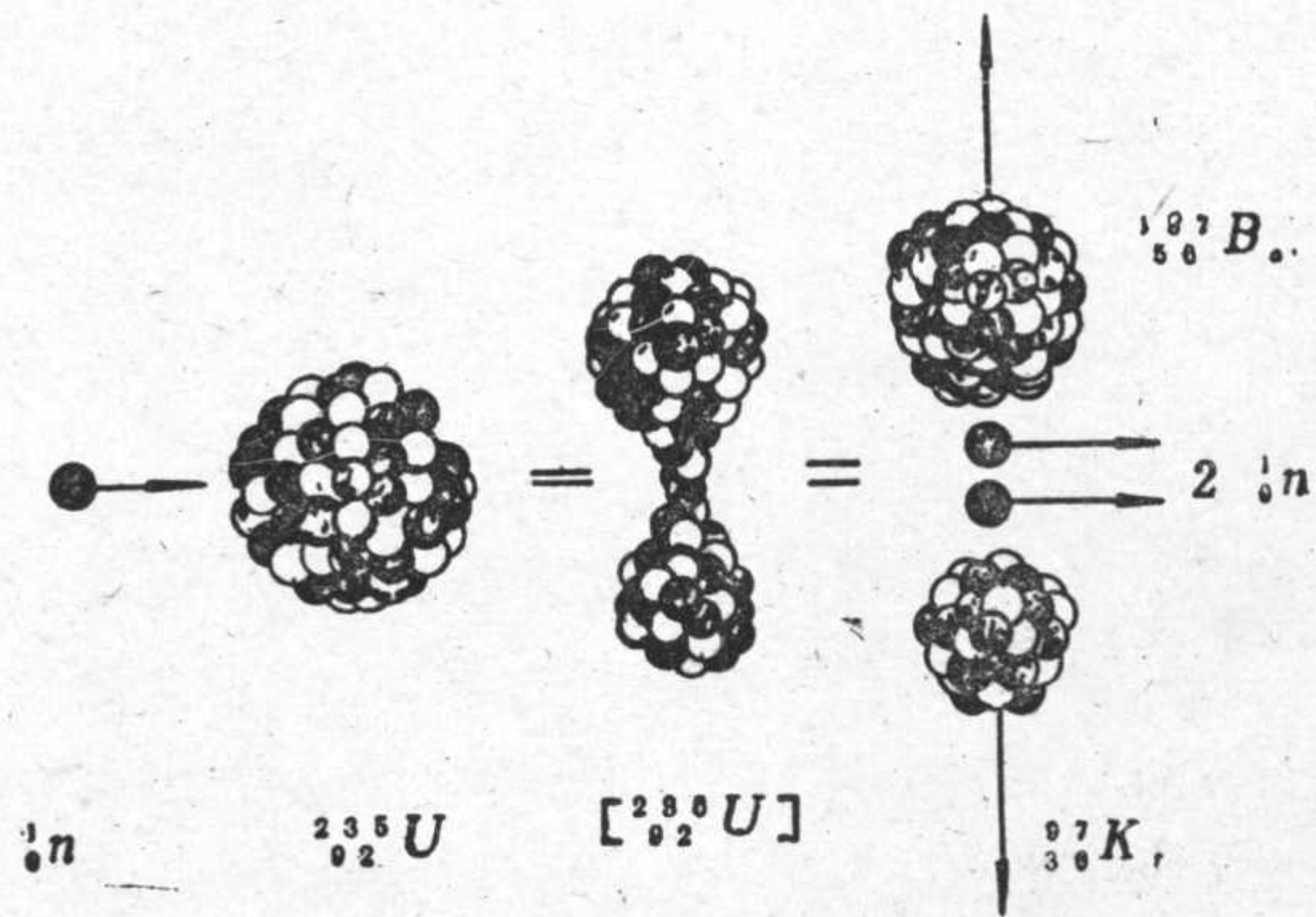


图 1—4 一个铀核的裂变反应

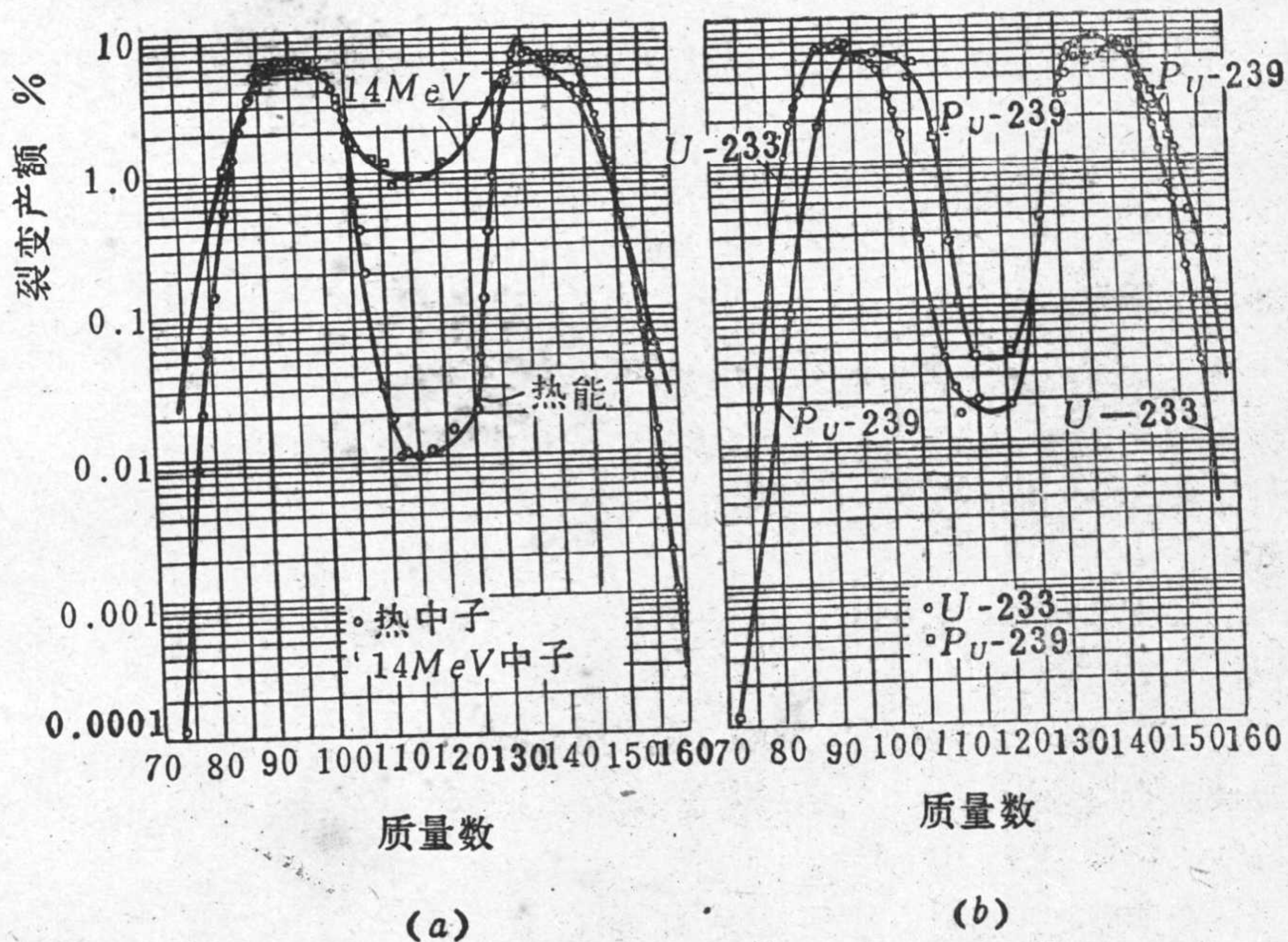


图 1—5 裂变产物产额的数据

次衰变, 放出 β 、 γ 射线后, 才会转变成稳定的原子核。即使对于同一种铀-235, 分裂后产生的裂变碎片也是有各种各样的, 从原子量 $A = 72$ 的锌到 $A = 160$ 的镓, 大约

有80种放射性同位素，而每一种又经过2—3次衰变，致使反应堆内将出现200种以上的放射性同位素。图1—5表示出这些裂变产物产额的数据，即表示某种质量数的裂变产物在全部裂变次数中所占的百分数。图中(a)是热中子和快中子引起的铀—235裂变的数据，(b)是热中子引起的铀—233和钚—239裂变的数据^[4]。裂变产物都用它们的质量数A来表示。

从图中可以看出，最可能发生的一种分裂方式是产生质量数为95和139的二个中等核，这种方式占总数的6.4%，而要分裂成质量数相等的二个中等核的可能性并不大，只占总数的0.01%。

(二)、裂变放出新中子

一个铀—235核吸收入射中子发生裂变后，一般放出2—3个新中子，在设计计算中通常以其平均值2.5个中子考虑。实验发现：

1. 裂变放出的中子能量大部分在2兆电子伏左右，所以一般都认为裂变放出的是动能为2兆电子伏的快中子。

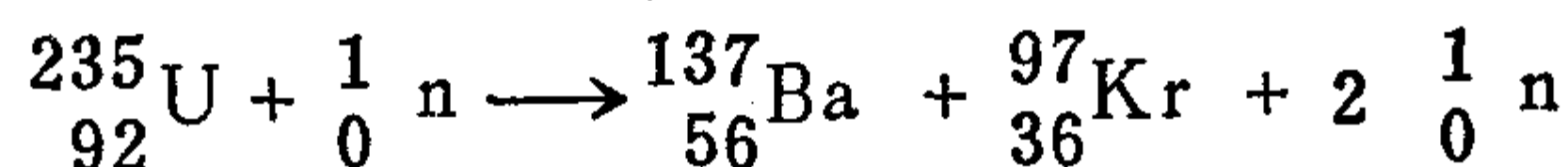
2. 裂变放出的中子，99%以上是在核裂变后的 10^{-12} 秒内立即放出来的，称其为瞬发中子。但是还有0.75%不是裂变后立即放出来的，而是在裂变后几分钟再逐渐由裂变碎片放出来的，称这部分中子为缓发中子。与瞬发中子相比，缓发中子能量相当小，但是在反应堆的控制上，这部分缓发中子却起着相当重要的作用。

(三)、裂变放出能量

一个铀—235核每次裂变平均要放出约200兆电子伏的总能量，其分配如表1—3所示。

表中最主要的一项是裂变过程本身所产生的能量约为193兆电子伏。

如前例：



按其质量平衡：

$$235.0439 + 1.00867 \rightarrow 136.9061 + 96.9212 + 2 \times 1.00867$$

即：

$$236.0526 \rightarrow 235.8446$$

因此：

$$\Delta m = 235.8446 - 236.0526 = -0.2080 \text{ 原子质量单位}$$

所以：

$$\Delta E = 931 \times (-0.2080) = -193.6 \text{ 兆电子伏。}$$

在核反应的质量平衡中，结果通常是取决于两个大数之间的很小的差值。因而同位素质量的值必须取四到五位小数。

因为裂度反应有很多种，它们释放的能量值都不完全一样。但是，平均来说，一个铀—235核的裂变能，大家都公认的是193兆电子伏。

这个193兆电子伏的数值，大致也可用于铀—233和钚—239核的裂变。

这个193兆电子伏的能量，包括了核裂变瞬发过程中产生的能量，和裂变后那些缓

发过程中产生的能量，这些都是裂变碎片和裂变产物的几级放射性衰变引起的过程。

另外，过剩中子在燃料、结构、慢化剂、载热剂、包壳等材料中的非裂变吸收 ($n \cdot \gamma$) 反应所引起的过程中，还约放出 7 兆电子伏的能量。这样总计起来，每一次裂变，在堆芯内产生的能量大约为 200 兆电子伏。如果这些能量全部转变为热能，这就是反应堆内热量的来源。对压水型反应堆来说，大约其中 95% 是核燃料释放出来的，其余的 5% 是慢化剂、载热剂和结构材料中释放出来的。

表 1—3 裂变能的大致分配表

类	型	过 程	反应堆总能量 的百分数	能量 [5] (Mev)	大致的射程
裂 变	I 瞬发能量	裂变碎片的动能	80.5	161	非常短
		新生快中子的动能	2.5	5	中等
		裂变时释放的 γ 能	2.5	5	长
	II 缓发能量	缓发中子的动能	0.02		中等
		裂变产物的 β 衰变能	3.0	6	短
		裂变产物的 γ 能	3.0	6	长
		伴随 β 衰变的中微子	3.0	10	
过剩中子 引起的 ($n \cdot \gamma$) 反应	III 瞬发和缓 发的能量	过剩中子引起的非裂 变反应加上 ($n \cdot \gamma$) 反应产物的 β 衰变能 和 γ 衰变能	3.5	7	有短有长
			≈ 100	≈ 200	

既然一个铀—235原子核每次裂变放出的可用能为200兆电子伏，而由阿伏伽德罗数又知道一个克原子量的铀—235包含有 6.023×10^{23} 个铀—235的原子核，所以，一个克原子的铀—235全部裂变所释放出的能量为：

$$\begin{aligned}
 & 6.023 \times 10^{23} \times 200 \text{ 兆电子伏} \\
 & = 6.023 \times 10^{23} \times 200 \times 1.6 \times 10^{-13} \text{ 瓦} \cdot \text{秒 (焦耳)} \\
 & = 1.93 \times 10^{13} \text{ 瓦} \cdot \text{秒} \\
 & = 5.36 \times 10^6 \text{ 千瓦} \cdot \text{小时}
 \end{aligned}$$

一个克原子量的铀—235重235克，因此1克铀—235完全裂变所释放出的能量为：

$$\begin{aligned}
 \frac{5.36 \times 10^6}{235} & = 2.28 \times 10^4 \text{ 千瓦} \cdot \text{小时} \\
 & = 950 \text{ 瓩} \cdot \text{天} \\
 & = 0.95 \text{ 兆瓦} \cdot \text{天}
 \end{aligned}$$

这说明，如果能够提供一种装置（如反应堆），使其每天能烧掉1克易裂变的物质（即核燃料），那么它所发出的功率就约达1兆瓦。