



中国原子能科学研究院科学技术丛书

# 惯性约束核聚变

王淦昌 袁之尚 著

 原子能出版社

中国原子能科学研究院科学技术丛书

# 惯性约束核聚变

王淦昌 袁之尚 著

原子能出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

惯性约束核聚变/王淦昌,袁之尚著. —北京:原子能出版社,2005.9

(中国原子能科学研究院科学技术丛书)

ISBN 7-5022-3489-6

I. 惯… II. ①王…②袁… III. 惯性约束聚变装置-研究 IV. TL632

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 095336 号

## 内 容 简 介

核能可分为裂变能与聚变能。现今的核电站是裂变能受控释放的装置。为最终解决人类的能源问题,核物理学家们正在进行受控核聚变的研究。受控核聚变有两种方法:一是“磁约束”,即利用磁场将带电粒子约束住使之发生核聚变反应。该方法起于 20 世纪 40 年代,目前仍处在科学可行性验证阶段;二是“惯性约束”(ICF),即利用高能驱动器在极短时间内将聚变燃料小球(靶丸)加热压缩到高温、高密,使之在中心“点火”,实现受控核聚变。现在,世界上许多大国都高度重视 ICF 的研究,大力推动此项研究的进展。我国的 ICF 研究工作也在不断深入和扩大,在国际上亦颇有声望。本书较系统地对这一研究课题的成果与心得进行整理,并从 ICF 基本概念和原理、基本方法和技术的角度加以介绍,以期读者对此领域有较全面地了解 and 认识。

### 惯性约束核聚变

---

出版发行 原子能出版社(北京市海淀区阜成路 43 号 100037)

责任编辑 杨树录 李盈安

责任校对 徐淑惠

责任印制 丁怀兰

印 刷 保定市印刷厂

经 销 全国新华书店

开 本 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 16.625

字 数 313 千字

版 次 2005 年 9 月第 1 版 2005 年 9 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 7-5022-3489-6

印 数 1—2500

定 价 58.00 元

---

版权所有 侵权必究

网址: <http://www.aep.com.cn>

## 《中国原子能科学研究院科学技术丛书》

### 出版委员会

主任 赵志祥

副主任 舒卫国 李金英

委员 (按姓氏笔画为序)

万 钢	王 楠	王国保	尹忠红	石永康	叶宏生
叶国安	刘森林	许谨诚	李林虎	李和香	李树源
杨丙凡	杨河涛	张昌明	张和平	张恩琇	张锦荣
陈建欣	邵焕会	罗志福	赵崇德	柳卫平	姜兴东
强家华	薛小刚	魏素青			

### 编审委员会

顾问 (按姓氏笔画为序)

王乃彦	王方定	方守贤	阮可强	汪德熙	张焕乔
周永茂	钱绍钧	黄胜年	樊明武		

主任 赵志祥

副主任 李金英 许谨诚

委员 (按姓氏笔画为序)

勾 成	卢玉楷	叶国安	吕忠诚	朱升云	刘一兵
关退令	李吉根	杨启法	肖雪夫	张万昌	张天爵
张先业	张伟国	张应超	陆道纲	陈玉宙	陈永寿
陈钟麟	范显华	林灿生	罗上庚	罗志福	竺礼华
金小海	金华晋	周祖英	单玉生	柳卫平	姜 山
贺佑丰	袁履正	顾忠茂	党淑琴	徐 铄	浦胜梯
容超凡	谢建伦	裴鹿成			

### 办公室

主任 尹忠红

副主任 李来霞

成 员 (按姓氏笔画为序)

马英霞	王丽英	王宝金	伍险峰	张小庆	竺 琳
韩翠娥					

## 《中国原子能科学研究院科学技术丛书》

### 编辑工作委员会

主任 侯惠群

副主任 杨树录

委员 (按姓氏笔画为序)

丁怀兰 李 宁 李盈安 杨树录 张 辉 张关铭

张铨清 赵守林 赵志军 侯惠群 黄厚坤

### 编辑工作小组

组 长 杨树录

副组长 张铨清 赵志军

成 员 (按姓氏笔画为序)

丁怀兰 李 宁 杨树录 张铨清 赵志军

# 总 序

中国原子能科学研究院创建于1950年,是我国核科学技术的发祥地和先导性、基础性、前瞻性的综合性核科学技术研究基地。

在党中央和上级部门的关怀和指导下,中国原子能科学研究院为我国的国防建设、国民经济建设和核科学技术的发展做出了重要贡献,造就了7位"两弹一星"功勋和60多位两院院士,培养了大批科技人才,在核物理、核化学与放射化学、反应堆工程技术、加速器工程技术、同位素技术、核电子学与核探测技术、辐射防护、放射性计量等学科形成了自己的特色和优势,并拥有核科学技术和物理学两个一级学科博士学位授予权。

为了系统地总结原子能院在核科学技术相关优势学科积累的知识和经验,吸收和借鉴国内外核科学技术最新成果,促进我国核科技事业的发展,我院决定组织出版《中国原子能科学研究院科学技术丛书》,并选定王淦昌、肖伦、丁大钊、王乃彦、阮可强等院士编著的《惯性约束核聚变》、《放射性同位素技术》、《中子物理学——原理、方法与应用》、《新兴的强激光》、《核临界安全》5本专著首批出版,今后还将组织撰写更多的学术专著纳入本丛书系列。

谨以此套丛书献给为我国核科技事业献身的人们!

《中国原子能科学研究院科学技术丛书》出版委员会

2005年9月1日

## 前 言

核能可分为裂变能和聚变能。现今的核电站是裂变能受控释放的装置。为最终解决人类的能源问题,核物理学家们正在进行受控核聚变的研究。初期的聚变燃料将是氘(D)和氚(T),而最终则要使用 D。D 存在于海水中,它们大约可供人类使用几十亿年,所以聚变能是取之不尽的。太阳能就是轻核聚变释放的能量。聚变能的另一个优点是其反应产物是非放射性的,因此对环境不构成潜在的污染。但是,要使两个带正电荷的原子核彼此接近到足够发生聚变,则必须给予它们足够的动能(上亿度的高温),这比受控裂变要困难得多,所以受控聚变直到目前仍未能实现。

受控聚变有两种方法。

第一是“磁约束”。它是利用磁场将带电粒子约束住使之发生聚变反应。该方法起于 20 世纪 40 年代,90 年代已达到进行科学可行性验证阶段。

第二是“惯性约束”(ICF)。它是基于氢弹原理,即利用高能驱动器在极短时间内将聚变燃料小球(靶丸)加热压缩到高温、高密,使之在中心“点火”,实现受控聚变。

我国自 20 世纪 60 年代开始研究 ICF 以来,已经获得了数次重大突破,取得了令人鼓舞、世界瞩目的研究成果。ICF 研究已迅速发展成为当今世界最重要的前沿科学之一,其高技术密集型和多学科综合性的特点,将会对其他学科和技术产生巨大的推动作用,它的研究也将对一个国家的科学技术产生深远的影响。

现在世界上许多大国对 ICF 研究都给予高度的重视,不惜投入巨大的人力、物力推进此项研究的进展。我国的 ICF 研究工作也在不断地深入和扩大,在国际上也颇有声望。

我们多年来一直感受着 ICF 研究工作的脉搏,跟踪着它的前进步

伐。本书是我们首次对这一研究课题的成果、心得进行的系统整理,并从 ICF 基本概念和原理、基本方法和技术的角度系统地加以介绍,以帮助读者对此领域有较为全面的了解和认识,从中获得收益和启迪。

本书适于高等院校理工科学生、研究生、教师、从事 ICF 研究的科技人员,以及那些对 ICF 感兴趣的人员阅读。我们希望通过本书能使更多的人士对 ICF 产生兴趣。

我们在书中引用了一些很有价值的文献,如果读者对一些问题有进一步深入了解的兴趣,可以据此去查阅。

由于 ICF 涉及广泛的学科并在迅速发展,加之作者水平的限制,书中难免存在缺陷,甚至错误,望读者批评、指正。需要说明的是,本书为我国第一部有关“惯性约束核聚变”的专著,1996 年由安徽教育出版社出版,2004 年由河北教育出版社收入《王淦昌全集》(第 4 集)。这次本书在重新编排后作为《中国原子能科学研究院科学技术丛书》之一(《惯性约束核聚变》)再被收录。因时间紧迫,我们来不及对我国及国际上 ICF 近年来的研究状况进行补充和作进一步的展望,特向读者致歉。

作 者

2005 年 9 月于北京



# 目 录

<b>第 1 章 绪 论</b> .....	( 1 )
1.1 新能源的开发 .....	( 1 )
1.2 核能的利用 .....	( 2 )
1.3 受控核聚变的研究 .....	( 7 )
1.4 惯性约束核聚变(简称 ICF) .....	(13)
1.5 本书的结构 .....	(16)
参考文献 .....	(16)
<b>第 2 章 ICF 的基本原理</b> .....	(17)
2.1 热核反应物理 .....	(17)
2.2 劳逊判据 .....	(22)
2.3 惯性约束核聚变的驱动器条件 .....	(26)
2.4 靶丸的增益和燃烧率 .....	(28)
2.5 惯性约束核聚变的各种驱动手段 .....	(31)
参考文献 .....	(36)
<b>第 3 章 驱动束的能量沉积和输运</b> .....	(38)
3.1 激光的能量沉积 .....	(38)
3.2 离子束的能量沉积 .....	(50)
3.3 等离子体中的能量输运 .....	(56)
参考文献 .....	(67)
<b>第 4 章 ICF 靶丸聚爆物理学</b> .....	(68)
4.1 等离子体流体力学 .....	(69)
4.2 冲击波的传播和等熵压缩 .....	(71)
4.3 流体力学稳定性 .....	(74)
4.4 流体力学效率 .....	(78)
4.5 超热电子的预热 .....	(80)
4.6 自加热和热核燃烧波的传播 .....	(82)
4.7 直接驱动和间接驱动 .....	(88)
参考文献 .....	(89)

<b>第 5 章 ICF 驱动器( I )——高功率激光器</b>	( 91 )
5.1 激光器的基本原理	( 91 )
5.2 ICF 应用的高功率激光器	( 108 )
5.3 KrF 激光器	( 122 )
参考文献	( 136 )
<b>第 6 章 ICF 驱动器( II )——粒子束</b>	( 138 )
6.1 脉冲功率加速器	( 138 )
6.2 轻离子束的产生	( 143 )
6.3 轻离子束的聚焦和传输	( 148 )
6.4 轻离子束脉冲功率加速器的现状	( 158 )
6.5 重离子束聚变	( 160 )
参考文献	( 164 )
<b>第 7 章 靶丸的设计与生产</b>	( 166 )
7.1 ICF 靶丸设计的制约因素	( 166 )
7.2 某些特殊靶的设计	( 170 )
7.3 靶丸生产的某些技术	( 175 )
7.4 靶丸特性的检测技术	( 184 )
参考文献	( 186 )
<b>第 8 章 ICF 的诊断和测量</b>	( 188 )
8.1 聚爆诊断的一般要求	( 188 )
8.2 光学诊断	( 189 )
8.3 X 射线的诊断	( 192 )
8.4 粒子发射的诊断	( 199 )
参考文献	( 206 )
<b>第 9 章 ICF 反应堆的设计</b>	( 207 )
9.1 堆设计的一般考虑	( 207 )
9.2 反应堆堆腔的设计	( 212 )
9.3 ICF 堆设计举例	( 217 )
9.4 ICF 堆工程的几个阶段	( 218 )
9.5 ICF 堆的辅助系统	( 219 )
9.6 裂变-聚变混合堆	( 221 )
参考文献	( 225 )

<b>第 10 章 我国的惯性约束核聚变研究</b> .....	(226)
10.1 引言.....	(226)
10.2 激光核聚变建议的提出.....	(227)
10.3 我国高功率激光器的建立.....	(232)
10.4 我国 ICF 的实验研究 .....	(234)
10.5 我国 ICF 诊断技术的发展 .....	(238)
10.6 中国原子能科学研究所的 ICF 研究工作 .....	(241)
10.7 我国 ICF 研究的现状 .....	(242)
参考文献.....	(244)
<b>第 11 章 ICF 研究的回顾与展望</b> .....	(245)
11.1 历史的回顾.....	(245)
11.2 ICF 研究的现状 .....	(247)
11.3 ICF 研究的展望.....	(250)
参考文献.....	(253)

# 第1章 绪论

## 1.1 新能源的开发

自从世界历史进入工业化社会以来,能源的消费在加速上升,原始的薪炭能源很快就易位于新的能源——煤炭。到20世纪初,石油又逐渐取代了煤变成了主要能源。煤和石油被人们统称为化石燃料。人类正是依靠化石燃料,在短短的一二个世纪内创造出远远超过过去人类几千年所创造的空前灿烂的文化。

现在,一个新的技术革命的浪潮席卷全球,可以预料,它必将大大地推动社会生产力向前发展。与此同时,能源结构也势必发生革命性的变化。

据统计,近几十年来,由于世界经济突飞猛进地发展,人口剧增,导致世界能源消耗量急剧上升。20世纪初,全世界的能源需求量约50年增加1倍,而到了20世纪中叶,就变成30年增加1倍。目前,由于化石燃料仍是主要的能源,全世界的化石燃料消耗量,以每年稍大于4%的速度在增长着。按此速度,则每16年就要翻一番。勘探表明,全世界可开采的化石燃料的储量,若按现在的消耗水平继续下去的话,那么,它们大约只能维持一二百年。分析认为,21世纪的初期或中期,化石燃料将达到它的使用高峰,随后将迅速下降。它在能源中的绝对优势将易位于其他新能源。在这样严峻的形势下,人们必须未雨绸缪,加强新能源的开发研究,以解决世界长远的能源问题。

促使人们积极开发新能源的另一动机是,化石燃料不仅资源有限,而且它的使用造成了日益严重的环境污染。生态学家们早已发出呼吁:我们不能自毁家园。我们必须保护好地球——这块不大的、我们赖以生存的自然。

今天,科学技术的发展已为新能源的开发创造了许多必要的和有利的条件。新的能源正在一个个登台,能源工业亦随之在发生不断的变化。

现在正在被开发和利用的新能源有太阳能、地热能、海洋能、风能、氢能和核能等。然而由于技术和经济条件的限制,预计在化石燃料枯竭之前,太阳能、海洋能和地热能等几种新能源不大可能成为解决人类能源问题的有效途径。人们寄予厚望的新能源就是核能。这是因为作为释放核能的方式之一——核裂变能,不仅在技术上已臻完善,而且现在核能在许多国家能源中的比重已经相当可观了。我们有理由相信,21世纪的中叶,核能将可能是世界能源消费的主要供给者。

## 1.2 核能的利用

在 19 世纪末和 20 世纪初的几十年内,一系列伟大的科学发现使人们不但认识到物质原子的有核结构,而且进一步发现了原子核是由更小的粒子——中子和质子组成的,因此将中子和质子统称为核子。中子不带电,质子带一个单位的正电荷。一个原子核所带的正电荷数  $Z$  等于它所包含的质子数,而原子核的质量数  $A$  就是它所包含的中子数  $N$  和质子数  $Z$  之和,即

$$A = Z + N$$

实验还发现,原子核的质量总是小于组成它的质子和中子的质量和。例如,氢元素的一种同位素氘,其原子核是由一个质子和一个中子组成的。已知氢原子的质量  $m_H = 1.007\ 825\ \text{u}$ ,中子质量  $m_n = 1.008\ 665\ \text{u}$ ,因此

$$m_H + m_n = 1.007\ 825\ \text{u} + 1.008\ 665\ \text{u} = 2.016\ 490\ \text{u}$$

但经实验测定,氘原子的质量  $m_D = 2.014\ 102\ \text{u}$ ,而氘和氢原子都只有一个核外电子,由此可求得一个中子和一个质子在组成氘核后质量发生的变化,即

$$\begin{aligned} (m_H + m_n) - m_D &= 2.016\ 490\ \text{u} - 2.014\ 102\ \text{u} \\ &= 0.002\ 388\ \text{u} \end{aligned}$$

这种质量减少的现象同样存在于其他的原子核中。人们将这种现象称做“质量亏损”。

根据爱因斯坦的质能关系原理,即一定的质量总是与一定的能量相联系的,它们之间存在以下关系

$$E = mc^2 \quad (1.1)$$

式中, $E$  代表能量; $m$  代表质量; $c$  代表光速。核子在组成原子核时质量发生了“亏损”,这标志着在过程中一定有相应的能量释放出来。“亏损”的质量  $\Delta m$  与放出的能量  $\Delta E$  之间的定量关系就是

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

这一能量称为原子核的“结合能”,它就是核能。

核子在组成原子核时放出的结合能是相当大的。就同等质量而言,它要比化学反应中放出的化学能大百万倍。因为  $1\ \text{u} = 931\ \text{MeV}$ ,可以算出中子和质子在组成氘核时放出的结合能为

$$\Delta E = 0.002\ 388 \times 931\ \text{MeV} = 2.22\ \text{MeV}$$

表 1-1 给出了几种原子核的质量、质量亏损和结合能的数据。

表 1-1 几种原子核的质量、质量亏损和结合能

核	质量/u	质量亏损/u	结合能/MeV	平均结合能 MeV/核子
氘(D)	2.014 102	0.002 388	2.22	1.10
氚(T)	3.016 050	0.009 105	8.50	2.80
<sup>3</sup> He	3.016 030	0.008 285	7.71	2.60
<sup>4</sup> He	4.002 603	0.030 377	28.28	7.10
<sup>6</sup> Li	6.015 124	0.034 346	32.00	5.30
<sup>89</sup> Sr	88.907 442	0.831 823	774.42	8.70
<sup>132</sup> Xe	131.904 161	1.194 259	1 111.85	8.40
<sup>235</sup> U	235.043 943	1.915 052	1 782.91	7.59
<sup>238</sup> U	238.050 819	1.934 171	1 800.71	7.57

结合能为核子结合成核时放出的能量,反之,如果要使原子核分裂成单个核子,就必须给予相同数值的能量。不同原子核的结合能是不同的(参见表 1-1),一个核的结合能越大,表明这个核越稳定,即它结合得越紧密,要使之分裂就越困难。因此,原子核结合的紧密程度可以用核子的平均结合能来表示。将原子核的结合能  $B$  除以核中的核子总数  $A$ ,就得到核子的平均结合能(用  $\epsilon$  表示之)。

$$\epsilon = \frac{B}{A} \quad (1.3)$$

对各种原子核进行测量和计算,可以绘出各种原子核的平均结合能曲线(如图 1-1)。由图看出平均结合能有如下规律:①质量数处于中等值的那些核的平均结合能最大。 $A=60$  左右的核,平均结合能达到峰值,约为 8.6 MeV。这说明  $A=60$  附近的那些原子核结合得最紧密;②质量数较小和质量数较大的核的平均结合能都较小,而且小质量数( $<30$ )的一端平均结合能大体上是随质量数迅速上升的。这些事实启示人们,可以采用两种办法使原子核的结合能释放出来。一种是将重的原子核打破,使之分裂成较轻的核;另一种是将轻的原子核结合在一起,使之形成较重的原子核。这两种办法都是将结合能小的核设法变成结合能大的核,变化结果,多余的结合能就能释放出来。前一种由重的原子核分裂成较轻的原子核的反应,就叫做“核裂变”;后一种使较轻的原子核聚合成较重的原子核的反应,就叫做“核聚变”。核裂变和核聚变都能释放大量的核能,这就是获得核能的两种途径。

20 世纪 30 年代末,哈恩和斯特拉斯曼在实验中发现,用中子轰击 <sup>235</sup>U 原子核,铀核分裂成两块质量大体相等的碎片,这就是铀原子核的裂变。在裂变过程中放出 2~3 个中子并伴随能量释放(一个 <sup>235</sup>U 核约放出 200 MeV 的能量)。铀核裂

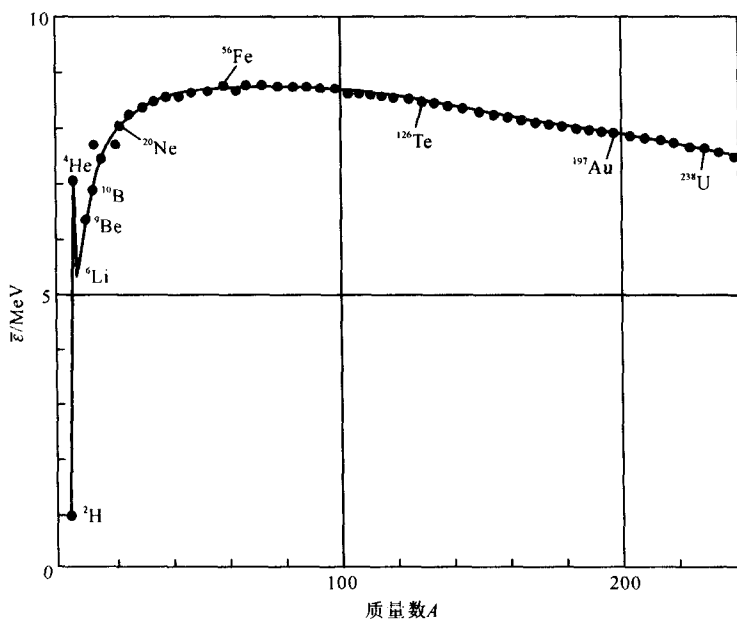


图 1-1 平均结合能曲线

变的图像可以用图 1-2 表示,反应方程式表示为(方式之一)

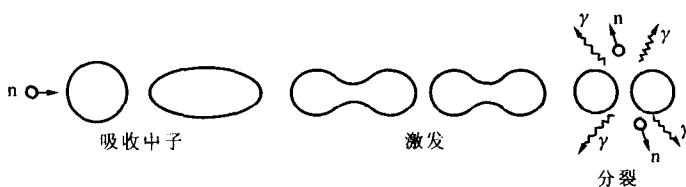
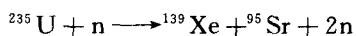


图 1-2 铀核裂变过程示意

由反应式可见,反应产物中出现多余的中子,这些新生的中子又会引起附近的其他 ${}^{235}\text{U}$ 核再发生裂变,新裂变的 ${}^{235}\text{U}$ 核又放出第二代中子,它们又引起新的核裂变。这一过程不断地持续进行下去就形成自持的“链式反应”(如图 1-3)。链式反应若不加控制,就会在极短的时间内释放大量的能量,形成核爆炸。原子弹正是利用这一原理研制的。

但是在一种人工控制的自持链式裂变反应装置中,尽管每个 ${}^{235}\text{U}$ 核裂变时放

出 2~3 个中子,人们可利用吸收材料将多余的中子吸收掉,而只让一个中子去引发新的核裂变,这样就可将链式反应稳定地进行下去,从而维持稳定的能量释放。这样的装置叫做核反应堆。

核裂变能的可控释放,已经通过核反应堆得到实现。核反应堆是由核燃料(铀、钚等)及其包壳、控制棒和安全棒、冷却剂和慢化剂、反射层等基本部分构成的。核燃料使用的是 $^{235}\text{U}$ 、 $^{233}\text{U}$ 和 $^{239}\text{Pu}$ 等,它们都是易裂变的物质。将这些裂变材料制成金属、合金、氧化物或碳化物等形式作为燃料。为防止裂变物质逸出,通常都要用铝、锆等合金或不锈钢制成包壳

将燃料包封起来。为将链式反应的速率控制在一定的范围,采用吸收中子的材料,如硼、碳化硼、镉、铪等制成控制棒和安全棒。用控制棒调节反应堆的反应速率,用安全棒在紧急情况下停止堆运转、快速停止链式反应。反应堆裂变反应中产生的能量必须用冷却剂载运出来,然后通过热交换器产生水蒸气输送给涡轮机发电,这就是核能的利用了。常用的冷却剂有轻水、重水、氨和液态金属钠等。由于铀核在裂变时放出来的是快中子,而快中子不易引发铀核分裂,所以要在反应堆中放入能使中子减速的慢化剂,慢化了的中子易使 $^{235}\text{U}$ 核分裂。常用的慢化剂有水、重水和石墨等。在有些反应堆中,慢化剂也是冷却剂。反应堆的反射层装设在“活性区”周围,其作用是将从活性区逃逸出来的中子反射回去,以减少中子泄漏。常用的反射层材料有轻水、重水、铍或石墨等。

现代的核电站就是利用反应堆产生的热能来发电或供热的动力设施。其心脏部分就是核反应堆。图 1-4 是目前世界上常用的压水堆型核电站的示意图<sup>[1]</sup>。除反应堆部分(核岛)外,其余部分与普通发电站没有什么两样。据国际原子能机构(IAEA)统计,全世界的核发电量已超过总发电量的 1/6 了,这一比例今后仍要升高。20 世纪末,核电比重较大的国家有法国、比利时、瑞典、瑞士、德国、日本和美国等。其中法、比两国的核电已占到它们的总发电量的 60%~70%了。

核电之所以蓬勃发展,一是因核电技术已经成熟并已进入商用阶段。核电的发展已给人类带来巨大的利益,并为解决人类未来的能源问题展示了一条光明的途径。另外,核电的燃料丰富、储能密度高、核电站比较安全和干净等优点,也是核电迅速发展原因。

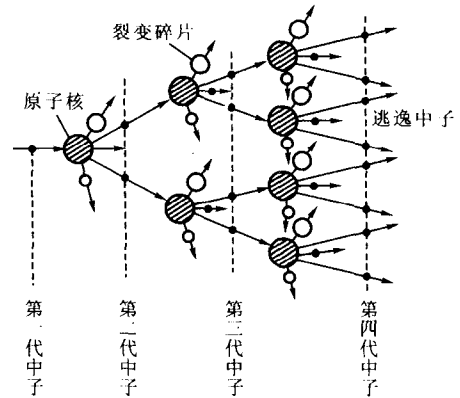


图 1-3 链式核反应



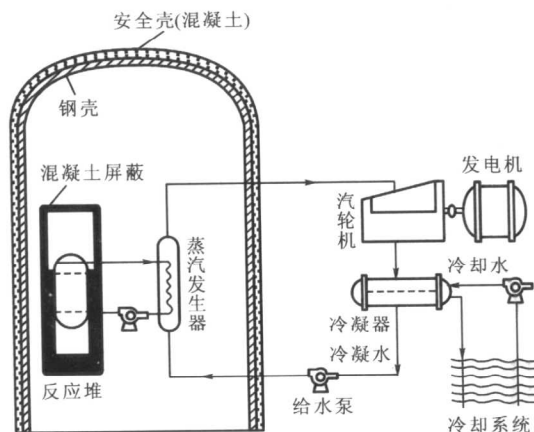


图 1-4 压水堆核电站示意图

然而,核电的一个潜在的危險是反应堆中存在的放射性物质。在一定的条件下,这种潜在的危險就可能变成现实的危害。例如 1979 年 3 月,美国三里岛核电站的燃料元件失去冷却,造成堆芯损坏,大量放射性物质外逸,污染了周围的环境。核电历史上最严重的一次事故是 1986 年苏联的切尔诺贝利核电站 4 号机组发生功率骤增导致蒸汽爆炸,伴之以大火、反应堆被炸毁的灾难性事故。在这次事故中 30 多人死亡,200 多人得急性放射病,反应堆中释放出的大量放射性物质严重地污染了大面积区域,给苏联造成了严重的损失(图 1-5)。

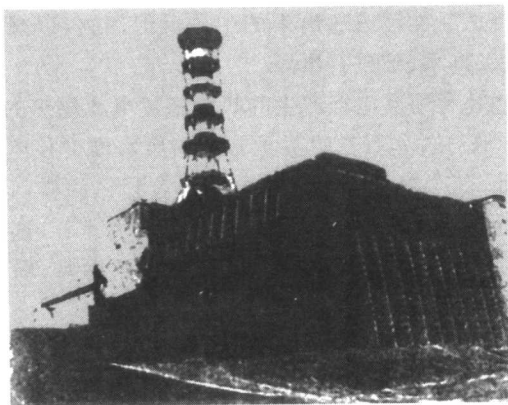


图 1-5 被封在“石棺”中的切尔诺贝利核电站 4 号反应堆