



能源开发概论 A

第九章 核能开发

能源与矿业学院/矿业工程系
中国矿业大学（北京）



目 录

1. 核能及其利用史
2. 核电开发利用现状
3. 典型核反应堆与核电站
4. 核安全基础

1. 核能及其利用史

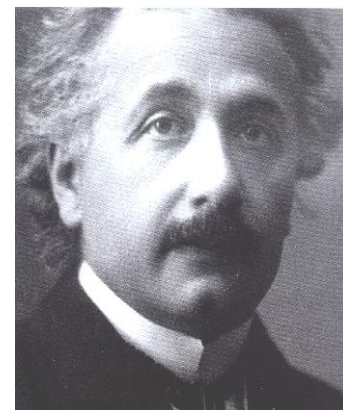
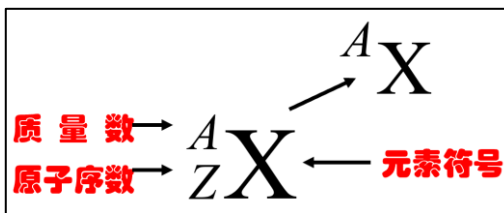
□ 什么是核能？

- 核能 (nuclear energy)

或称原子能，是指原子核里的核子（中子或质子）重新分配和组合时释放出来的能量。符合阿尔伯特·爱因斯坦的质能方程。

- 质能方程

$$E = mc^2$$



阿尔伯特·爱因斯坦

(1) 原子核的结合能：核子结合成原子核所释放的能量或原子核分解为核子时吸收的能量。

(2) 原子核的质量数 $A < 30$ 的轻核，平均结合能表现出周期性的变化，凡 A 等于4的倍数的核有最大值。

(3) 中等核($A=30 \sim 120$)的结合能较大，轻核和重核的较小。

1. 核能及其利用史

□ 有哪些核燃料？

核燃料是指能产生裂变或聚变核反应并释放出巨大核能的物质，可分为裂变燃料和聚变燃料两大类：

裂变燃料主要指易裂变核素如铀-235、钚-239和铀-233等；聚变燃料包含氢的同位素氘、氚，锂6和其化合物等。

- **海洋核能：**含有大量氘和氚，这些氘的聚变所释放出的能量，足以保证人类上百亿年的能源消耗
- **月球核能：**月球上存在大量的氦-3，可以为地球开发1万-5万年用的核电



铀矿

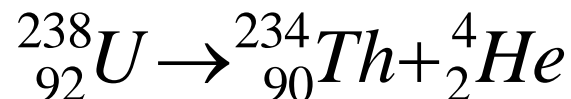
1. 核能及其利用史

□ 如何获得核能？

- (1) 核衰变，原子核自发衰变过程中释放能量。
- (2) 重核裂变，较重的原子核分裂释放核能。
- (3) 轻核聚变，较轻的原子核聚合在一起释放核能。

● 核衰变

放射性衰变：核素自发地放射出某种射线而变成另一种核素、或同激发态过渡到基态的现象。凡能发生放射性衰变的核素叫放射性核素。



1. 核能及其利用史

放射性物质放出的射线的种类

(1) **α 射线**: 氦核 ${}_2^4He$ (称为 α 粒子) , 贯穿本领很小 (在岩石中只有0.001cm, 在空气中为3~8cm, 一张普通的纸就能把它挡住) , 电离作用很强。

(2) **β 射线**: 电子流, 有较大的贯穿本领和较小的电离作用, 其贯穿本领大约是 α 射线的100倍(在金属中为0.09cm, 在空气中为10~20cm) 。

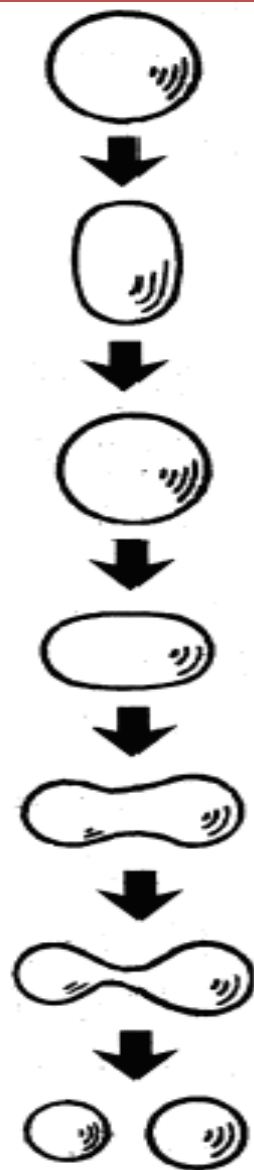
(3) **γ 射线**: 光子流, 波长很短的电磁波, 在电磁波谱上排在x射线之后, 有最大的贯穿本领 (穿过几十厘米厚的铝板) 和最小的电离作用。

1. 核能及其利用史

● 重核裂变

定义：原子核裂变是一个重原子核分裂成两个质量相差不远的碎块的现象。

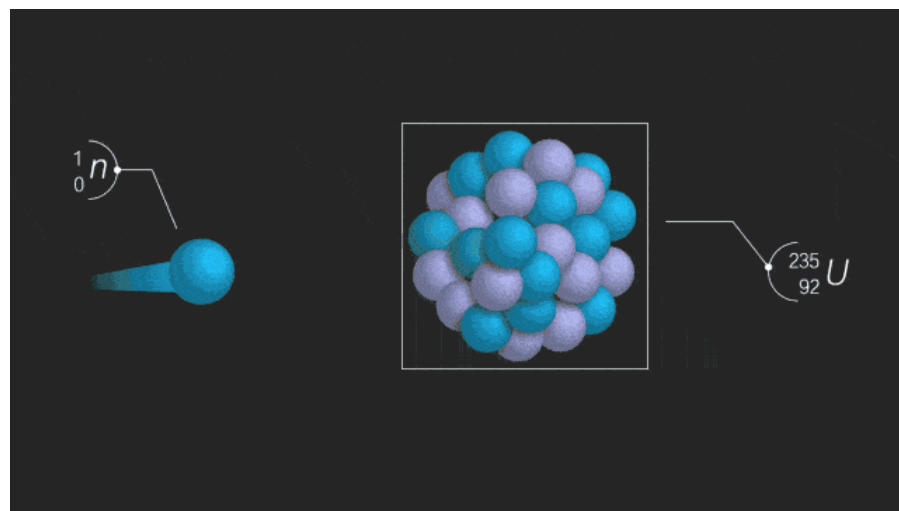
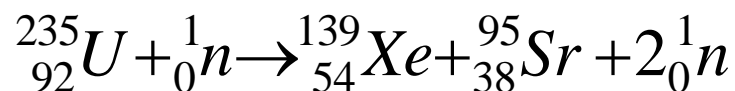
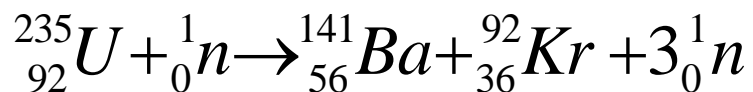
裂变机制（液滴模型）：当中子轰击重核时，重核吸收中子形成复合核，能量增加，核子振荡加剧，由球形变成椭球形。这时核内各核子间距离增加核力减小，而库仑斥力则使原子核进一步增大，形成哑铃状。当哑铃形的两端之间的库仑斥力大于中间收缩部分核子间总的核力时，形变不能恢复，原子核分裂成两块，放出中子，同时释放能量。



核裂变液滴模型

1. 核能及其利用史

核反应方程： $^{235}_{92}\text{U}$ 裂变的产物是多种多样

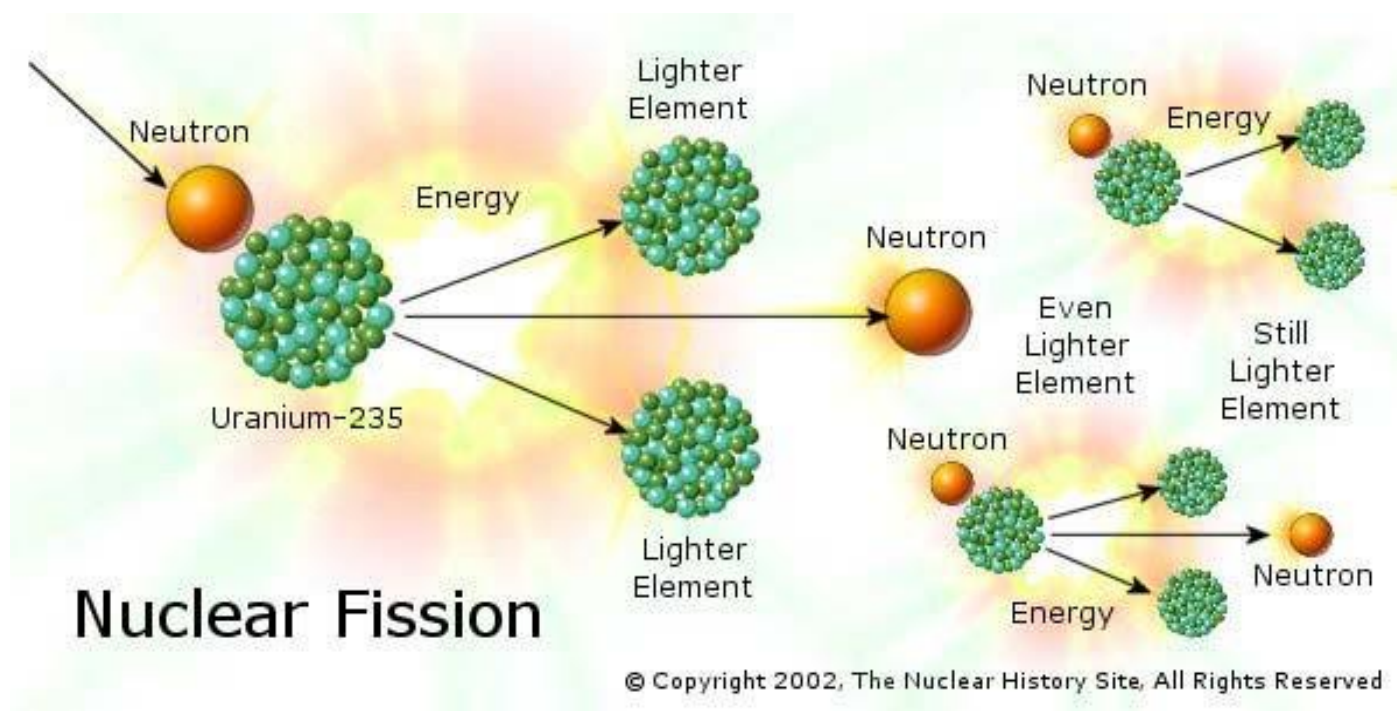


一个 ^{235}U 裂变为 ^{141}Ba 和 ^{92}Kr 释放的能量放出约200MeV（兆电子伏特）的能量，1kg的 ^{235}U 全部裂变，释放出的能量约相当于2000t的标准煤完全燃烧所释放的能量。

1. 核能及其利用史

链式裂变反应

重的原子核俘获一个中子以后发生裂变放出中子，如果这些中子又引起其他的核裂变，使得裂变不断地进行下去，释放出越来越多的能量。

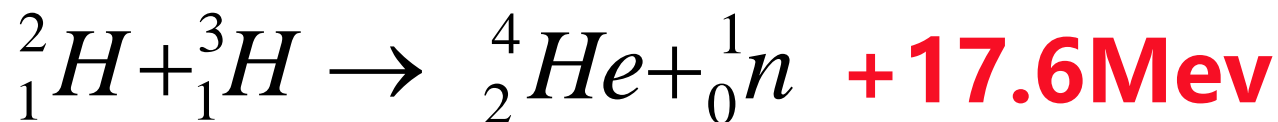


1. 核能及其利用史

● 轻核聚变

定义：将几个轻核结合成较大质量的核叫轻核聚变。

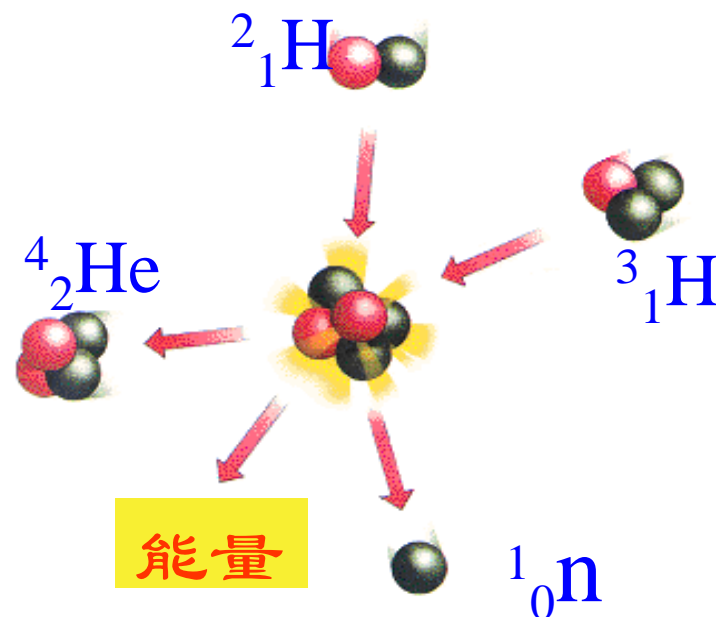
核反应方程：



该反应平均每个核子放出的能量在3Mev以上，聚变比裂变能放出更多的能量。

发生聚变的条件：使原子核间的距离达到 10^{-15}m 。方法有

- (1) 用加速器加速原子核；
- (2) 把原子核加热到很高的温度 $10^8 \sim 10^9\text{K}$ ；



1. 核能及其利用史

□ 核能可以用来干什么？

● 发电、供热和动力

通过核反应堆来发电（核电站）、供热（城市供暖）和提供动力（核动力潜艇、航母等）。



我国第一座核电站——秦山核电站



美国里根号核动力航母

1. 核能及其利用史

● 科技应用

医疗：X光、核磁共振、核照射杀毒等。安检仪、C-14文物鉴定、食品保鲜、PET扫描仪等等。



核磁共振仪

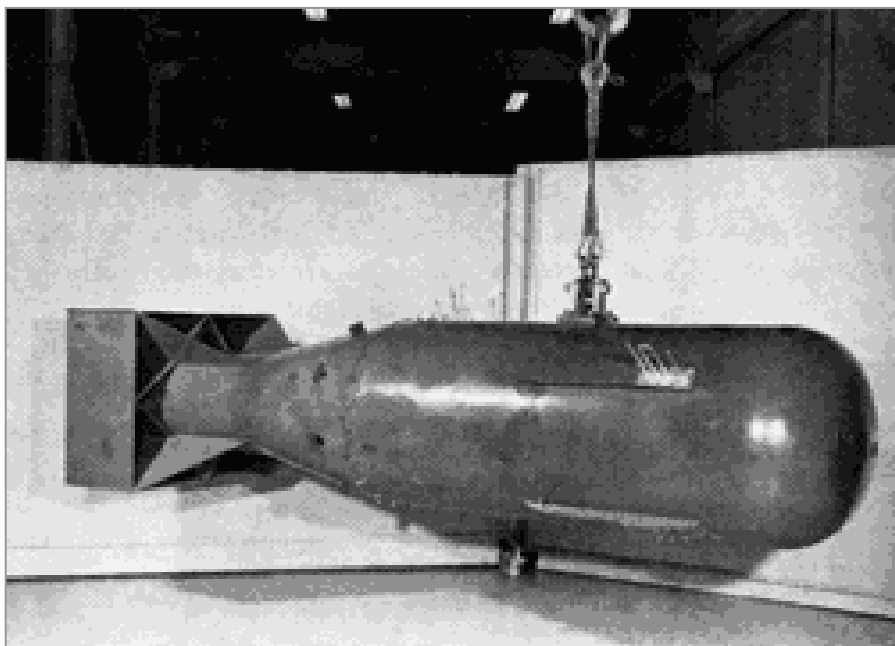


X光安检仪

1. 核能及其利用史

● 核武器

包括裂变武器（通常称为原子弹）和聚变武器（亦称为氢弹）。



美国“小男孩”原子弹



氢弹爆炸

1. 核能及其利用史

□ 核物理的发展

• 第一阶段 探索阶段(1896~1930)

1896年，贝克勒尔发现了天然放射性。

1911年，卢瑟福提出了原子的核式结构模型。

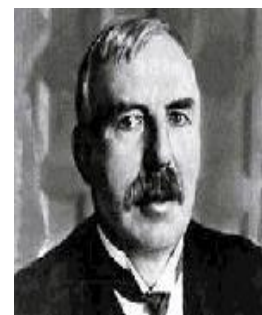
1919年，卢瑟福发现了质子。

1920年，卢瑟福提出了原子核中可能存在中性粒子的猜测。

1928年，盖革和米勒制成探测粒子的计数器。



H.Becquerel



E.Rutherford

1. 核能及其利用史

• 第二阶段 形成阶段(1931~1945)

(1) 重大发现和假说

1932年，查德威克发现了中子，海森堡和伊万宁柯提出原子核由质子和中子组成的假设，安德森从宇宙射线中发现了正电子。

1934年，哈恩和史特拉斯曼发现了铀核裂变现象，开创了人类获取核能的新纪元。

(2) 重要理论和模型

(3) 工程技术

1931年，范德格拉夫发明了静电加速器

1932年，莱里斯发明了回旋加速器

1942年，美国建立了第一座反应堆

1945年，美国爆炸了原子弹



J. Chadwick



E. Fermi

1. 核能及其利用史

- 第三阶段 发展阶段(1946~现在)

(1) 基础研究：发现新核素，研究核物理的基本问题
(主要针对未发现的或不能解释的事物)

(2) 应用研究：核武器、核燃料、能源与动力、辐射防护、核技术应用。



奥本海默

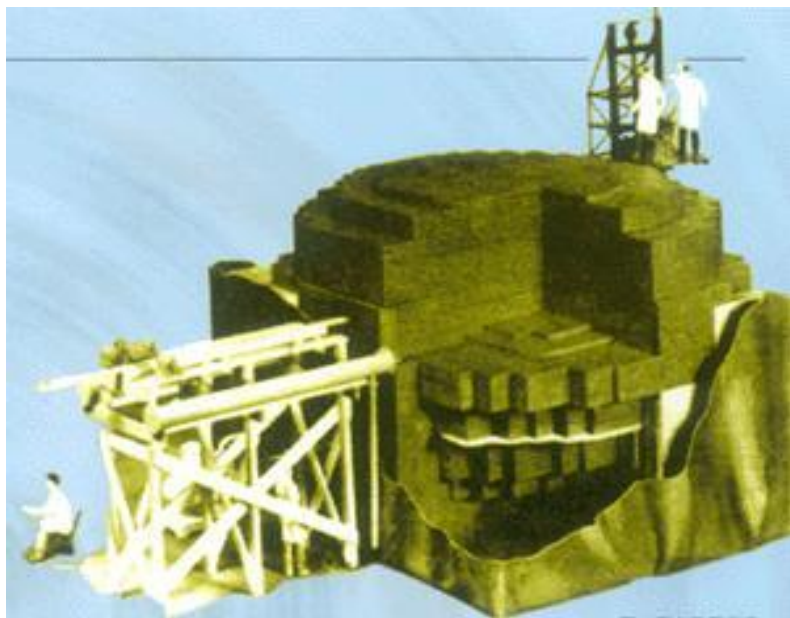


前苏联原子弹

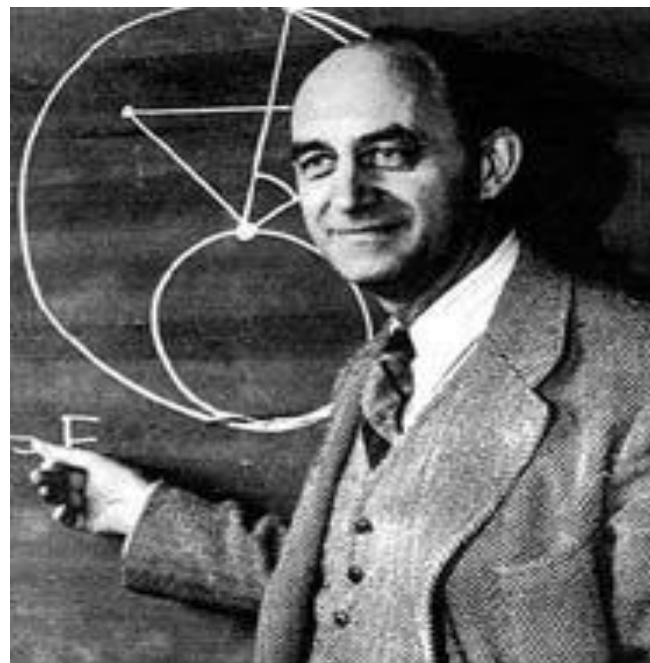
1. 核能及其利用史

□ 核能利用历程

1941年12月到1942年12月，费米领导一批物理学家在芝加哥大学斯塔克运动场的西看台下，成功地建造了世界上第一座核反应堆，发出了200W的电，解决了受控自持链式反应的众多技术问题，这标志着原子能时代的到来。



世界上第一座核反应堆



1. 核能及其利用史

核反应堆发展历史：

- 实验示范阶段（1946-1965）-----第一代核能系统
- 高速发展阶段（1966-1980）-----第二代核能系统
- 滞缓发展阶段（1981-2000）-----第三代核能系统
- 开始复苏阶段（21世纪以来）

能源危机

环境危机

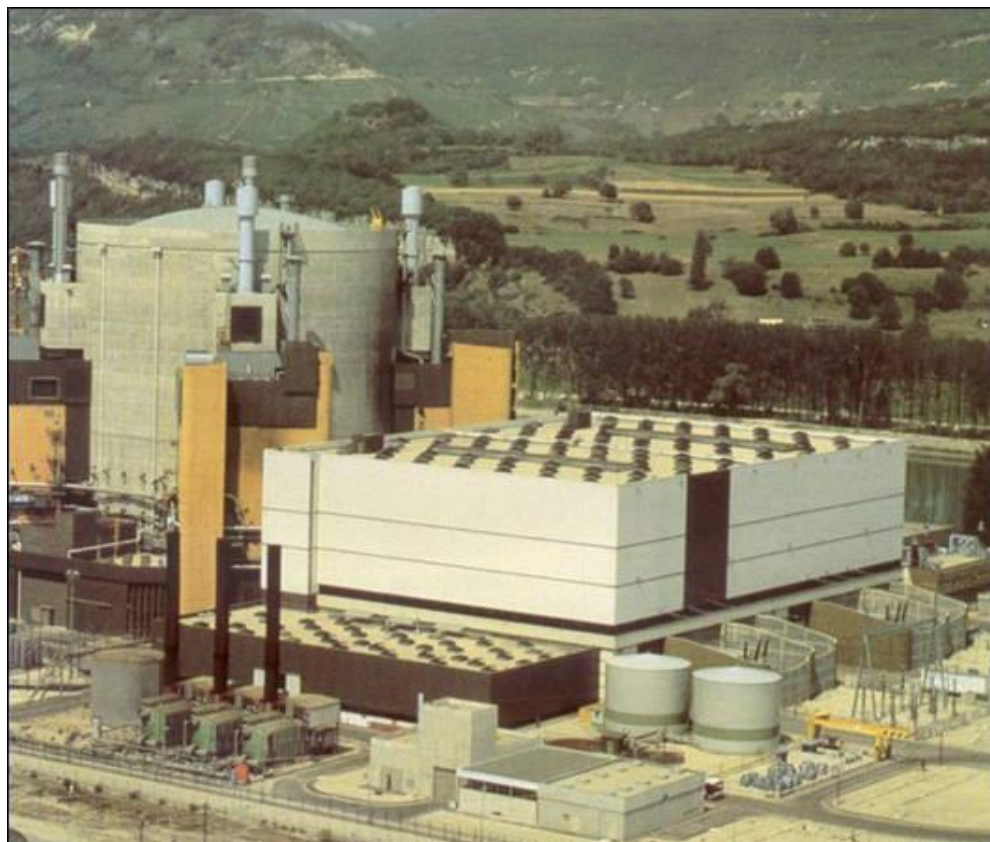
第三代核电站取得重大进展，有的已投入商运

1 安尔史女士的第二代核电站，第二代核能系统应运而生。

1. 核能及其利用史

1954年，前苏联建成了世界第一座核电站，功率50MW。

英国和美国分别于1956年（克得霍尔，Calder Hall）和1959年（宾州船运港，Shipping-port）建成原子能发电站。



1954年问世的世界第一座试验性核电站（莫斯科附近）

1. 核能及其利用史



秦山核电站全景

秦山核电站是中国自行设计、建造和运营管理的第一座30万千瓦压水堆核电站，地处浙江省嘉兴市海盐县。秦山30万千瓦核电站，自1991年12月15日并网发电以来，已安全运行近三十年，累计发电400多亿度。

目 录

1. 核能及其利用史
2. 核电开发利用现状
3. 典型核反应堆与核电站
4. 核安全基础

2. 核电开发利用现状

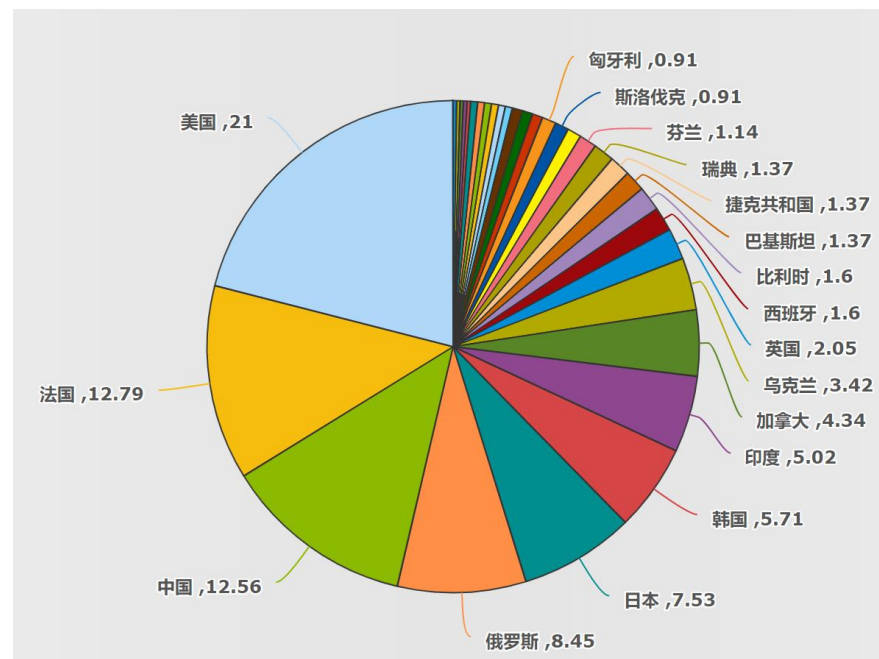
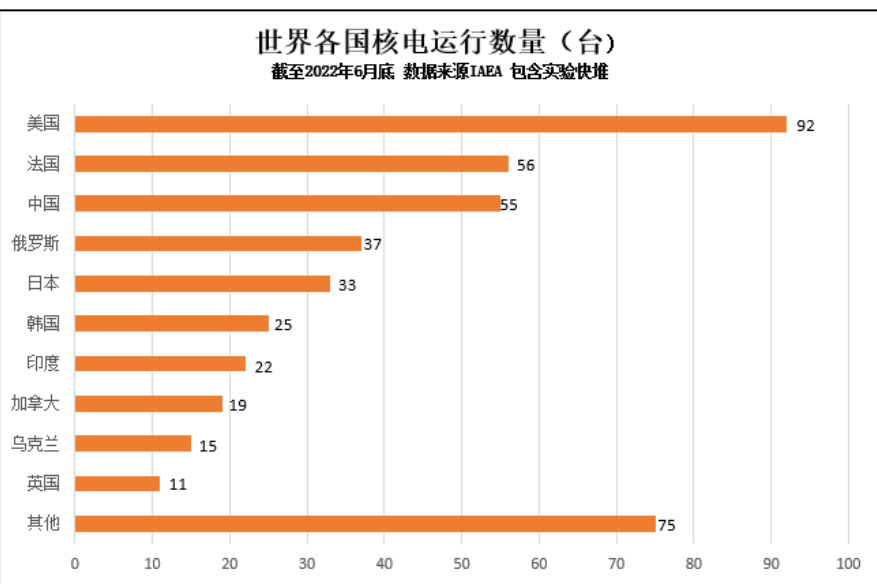


世界核电站分布图

2. 核电开发利用现状

□ 世界核电利用现状

目前世界上已有30多个国家或地区建有核电站。根据国际原子能机构（IAEA）统计，截至2022年8月底，全球在运机组438台，总装机容量约 3.94亿千瓦。核电约占全球总发电量的16%左右。



在运机组数量(台)

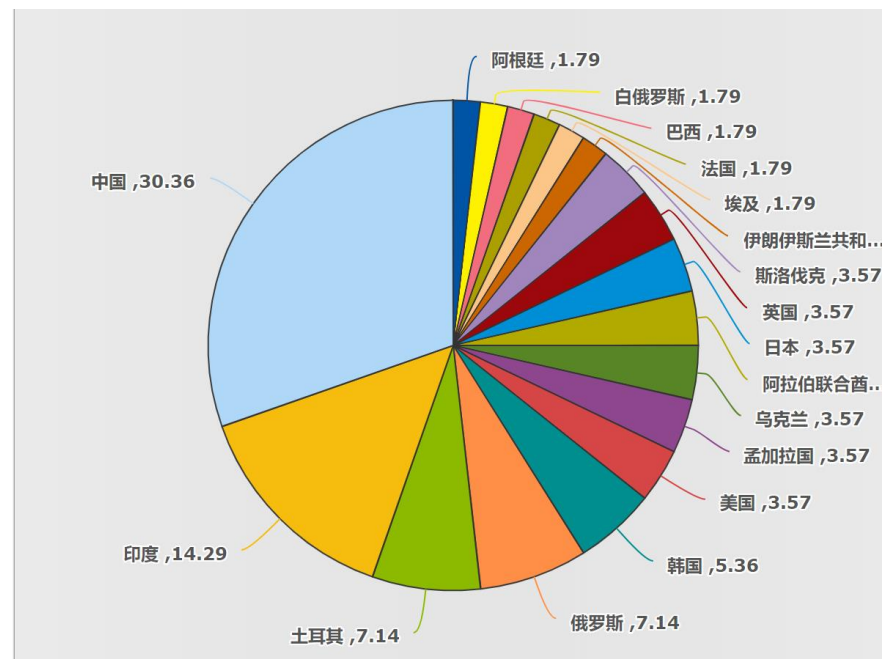
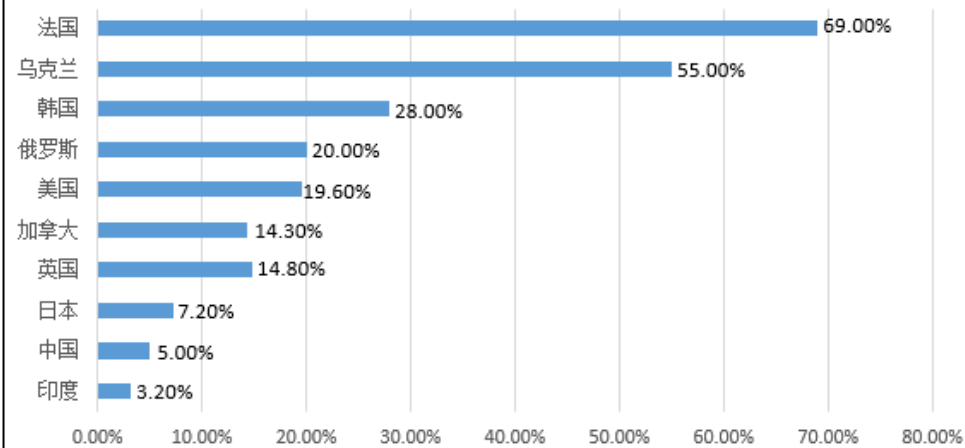
2. 核电开发利用现状

核电约占全球总发电量的10%左右，目前我国核电仅占全国总发电量的5%，未来仍有较大提升水平。

全球在建核电机组共53 台，总装机容量约5784.7万千瓦。在建机组规模居前3位的分别是中国、印度、俄罗斯。

世界主要核电国家核电发电量占比

数据来源IAEA



在建机组数量(台)

2. 核电开发利用现状

□ 我国核电利用现状

- 第一座秦山核电站，30余年
- 大陆商用在运核电机组51台
- 核电占全国总发电量的5%
- 在建核电机组20台，全球第一
- 第三代核反应堆（华龙一号）

在碳达峰、碳中和的背景下，我国能源电力系统清洁化、低碳化转型进程将进一步加快。预计2025年我国核电在运装机7000万千瓦左右；到2030年，核电在运装机容量达到1.2亿千瓦，核电发电量约占全国发电量的8%。积极有序发展核能的战略定位更加明确，核能将在支撑我国碳达峰碳中和目标实现过程中发挥更加不可或缺的作用。



2. 核电开发利用现状



核能与华龙一号

目 录

1. 核能及其利用史
2. 核电开发利用现状
3. 典型核反应堆与核电站
4. 核安全基础

3. 典型核反应堆与核电站

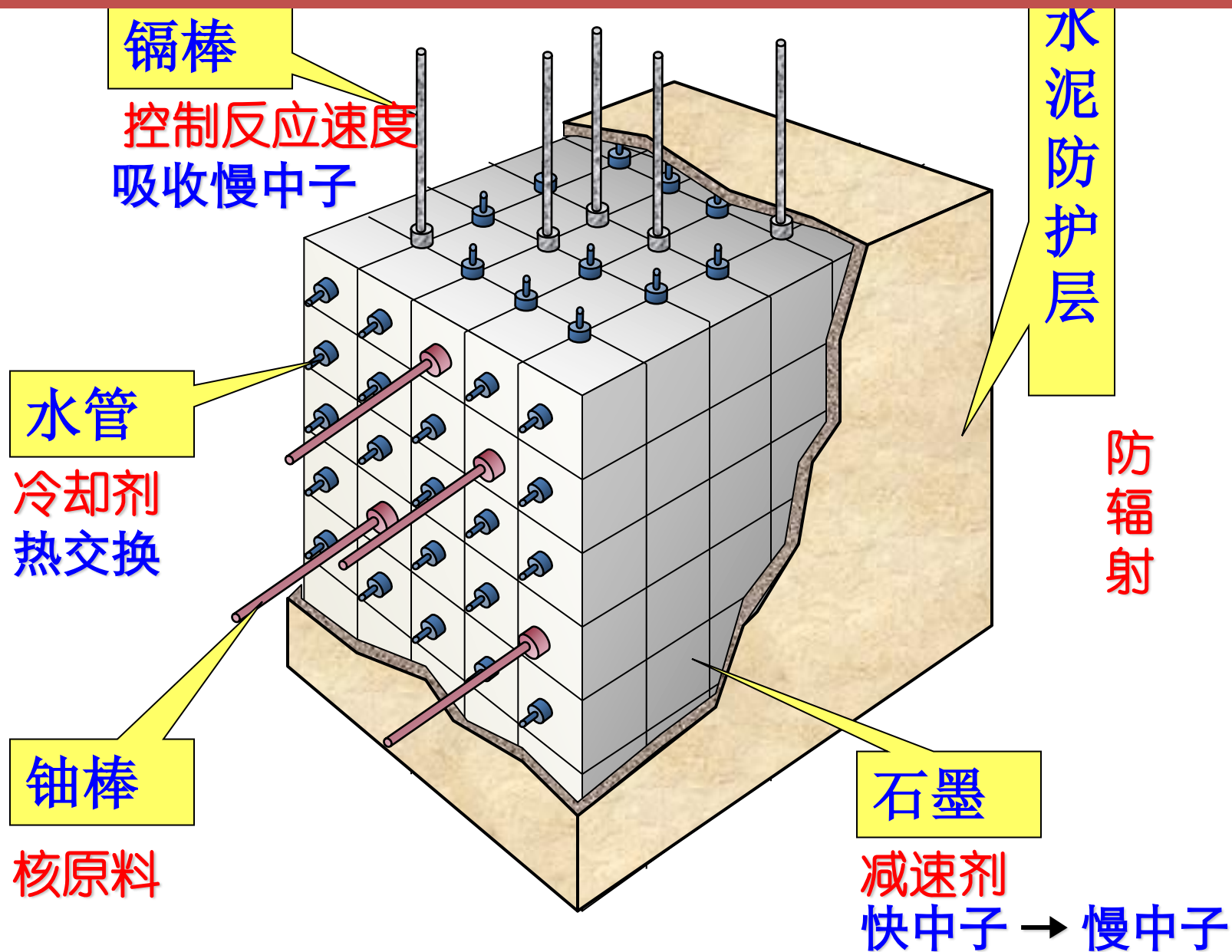
核反应堆：

采用一定的控制措施，在核裂变过程中，使上一代产生裂变反应的中子数与下一代裂变产生的中子数数目相等，使核裂变反应达到临界状态，这时核裂变反应所释放出来的能量基本稳定，继而可以被充分利用。控制这种链式反应的设备通常称为“核反应堆”。

核反应堆的主要功能：

- ① 产生动力，利用核反应堆释放的能量，进行发电、供热或推动舰船；
- ② 生产新的核燃料，如由铀-238生产钚-239；有钍-232生产铀-233；
- ③ 生产放射性同位素，如用钴-59生产钴-60，钴-60在辐射加工生产和医疗中用途很广；
- ④ 进行中子的其他应用和科学研究（中子活化分析、中子照相）。

3. 典型核反应堆与核电站



3. 典型核反应堆与核电站

热中子增殖核反应堆

□ 核反应堆的组成

(1) 核燃料元件

铀-233、铀-235和钚-239

核反应堆的燃料元件部分叫做**堆芯**

水堆（轻水堆和重水堆）的核燃料元件是燃料棒。

(2) 慢化剂

既能很快地使中子的速度减慢，又不要吸收太多的中子。水、重水、石墨和铍等

(3) 反射层

又叫中子反射层，堆芯外面设置反射层，将那些从堆芯逃逸的中子再反射回去。

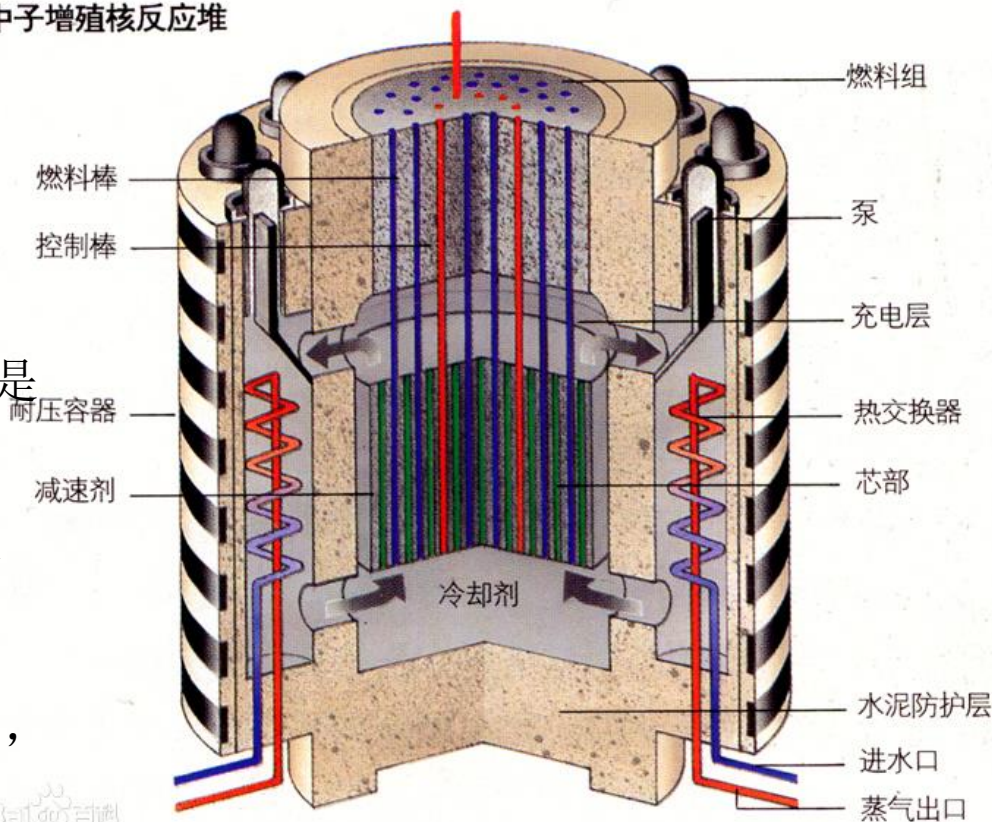
(4) 控制棒

保障核反应堆安全，启停、调节核反应堆功率。强烈吸收中子的元素——中子毒物。硼、碳化硼、镉、镅铟银合金、钐等。

(5) 冷却剂

吸收中子少、传热性好、耐腐蚀： CO_2 、氦气、水、重水、有机液

(6) 屏蔽层：防中子和射线，厚混凝土、钢铁、铅及水、石墨



3. 典型核反应堆与核电站

□ 核反应堆的分类

- 按反应堆的用途分类：

- ① 生产堆—用于生产易裂变或易聚变的物质，当前主要用于生产核材料钚和氚： ^{239}Pu 、 ^{233}U 。

- ② 动力堆—用作核电站或舰船的动力源。

- ③ 实验堆：主要用于进行核物理、辐射化学、生物、医学等领域里的基础实验研究，也可以用于反应堆材料、释热元件、结构材料及反应堆自身的静态与动态特征研究。

- ④ 供热堆：用作供热的热源。

- 按核反应堆采用的燃料分类：

- ① 天然铀堆：以天然铀作为核燃料；

- ② 浓缩铀堆：以浓缩铀为核燃料；

- ③ 钍堆：以钍作为核燃料。

3. 典型核反应堆与核电站

- 按核反应堆采用的慢化剂、冷却剂分类：

- ①石墨堆：以石墨作为核反应堆的慢化剂，又分石墨气冷堆（气体作为冷却剂）和石墨水冷堆（水作为冷却剂）；
- ②轻水堆：以普通水作为核反应堆的慢化剂，包括压水堆和沸水堆；
- ③重水堆：以重水（ D_2O ）作为核反应堆的慢化剂。
- ④熔盐堆：其主冷却剂是一种熔融态的混合盐，它可以在高温下工作（可获得更高的热效率）时保持低蒸汽压，从而降低机械应力，提高安全性，并且比熔融钠冷却剂活性低。

3. 典型核反应堆与核电站

- 按核反应堆采用的冷却剂分类：

- ①水冷堆：采用水作为核反应堆的冷却剂；
- ②气冷堆：采用氦气作为核反应堆的冷却剂；
- ③有机介质堆：采用有机介质作为核反应堆的冷却剂；
- ④液态金属冷却堆：采用液态金属作为核反应堆的冷却剂。

- 按中子的的能量分类：

- ①热中子堆：核反应堆的反应有热中子引起；
- ②快中子堆：核反应堆内的核反应由快中子引起。

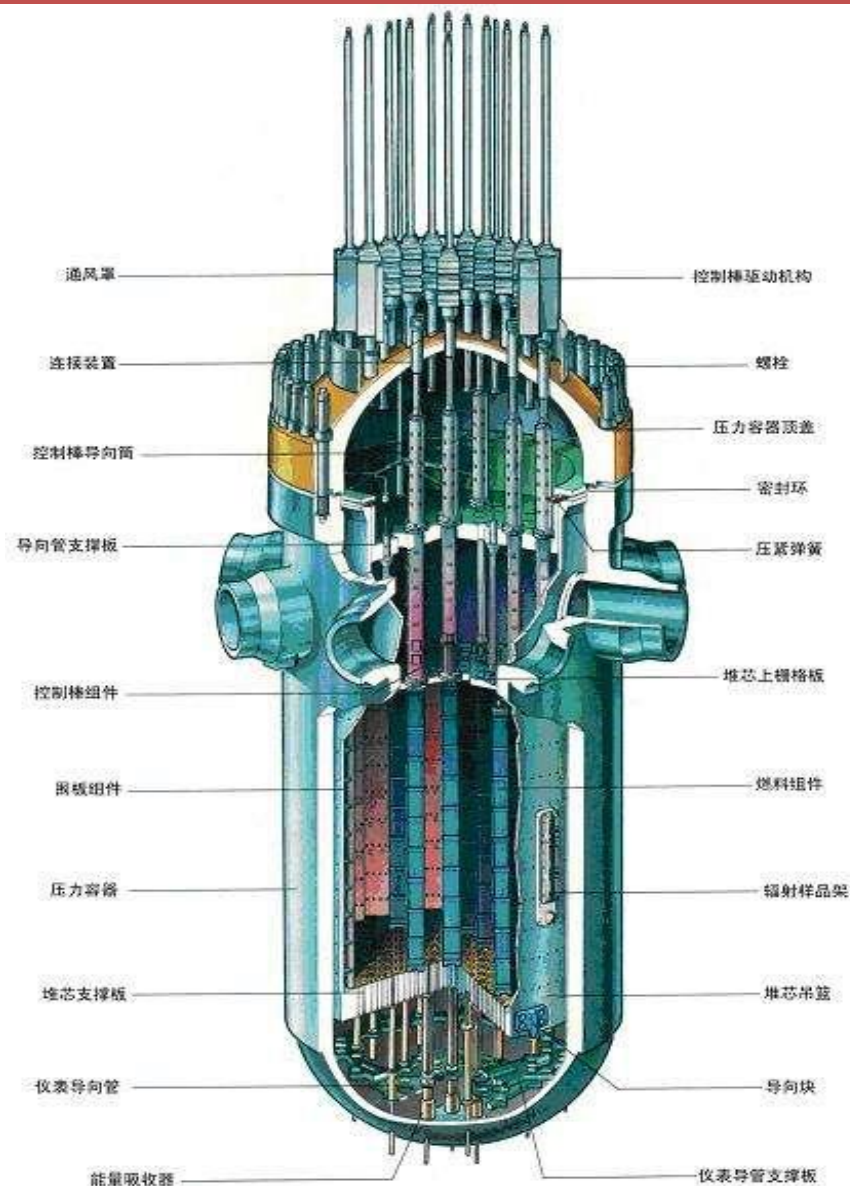
- 按燃料在堆内分布形式

- ① 均匀堆：核燃料、慢化剂、冷却剂均匀混合在一起
- ② 非均匀堆：核燃料及核燃料元件的分布不均匀。绝大多数堆型。

3. 典型核反应堆与核电站

□ 轻水堆

动力堆中最主要堆型，约占85.9%
普通水最为冷却剂，又做慢化剂
分为沸水堆和压水堆（61.3%）

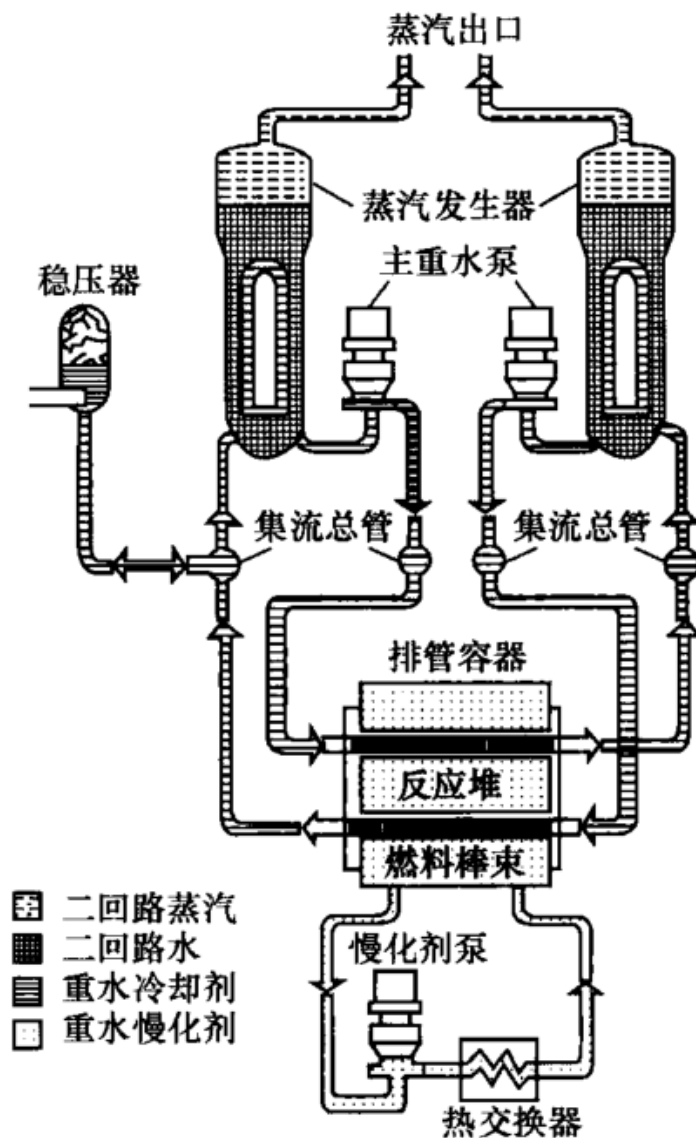


3. 典型核反应堆与核电站

□ 重水堆

以重水 D_2O 作为冷却剂和慢化剂。重水堆中子的慢化作用比轻水（普通水）小，所以重水堆的堆芯体积和压力器的容积要比轻水堆大得多。

在核电站中，重水堆约占4.5%。加拿大研发的卧式压力管式重水堆（坎杜堆），以天然铀为燃料，以重水为冷却剂，是用于核电站的成功堆型。



加拿大坎杜堆流程示意图

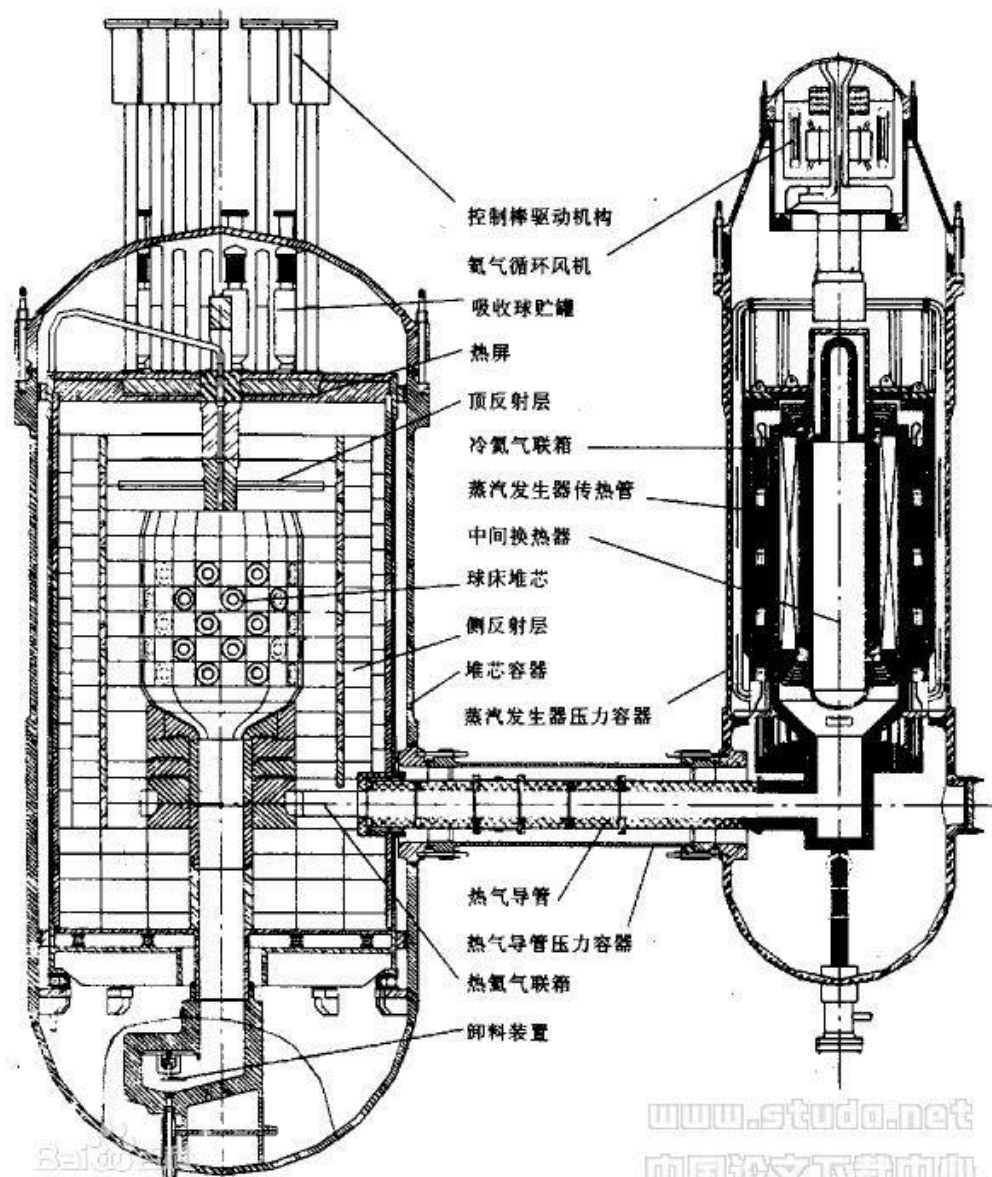
3. 典型核反应堆与核电站

□ 石墨气冷堆

气体作为冷却剂，石墨作为慢化剂。

在核电站的各种堆型中，气冷堆占2%~3%。

石墨气冷堆除用作核电站外，还可直接用于需要高温的场合，如炼钢、煤气化和化工过程等。



3. 典型核反应堆与核电站

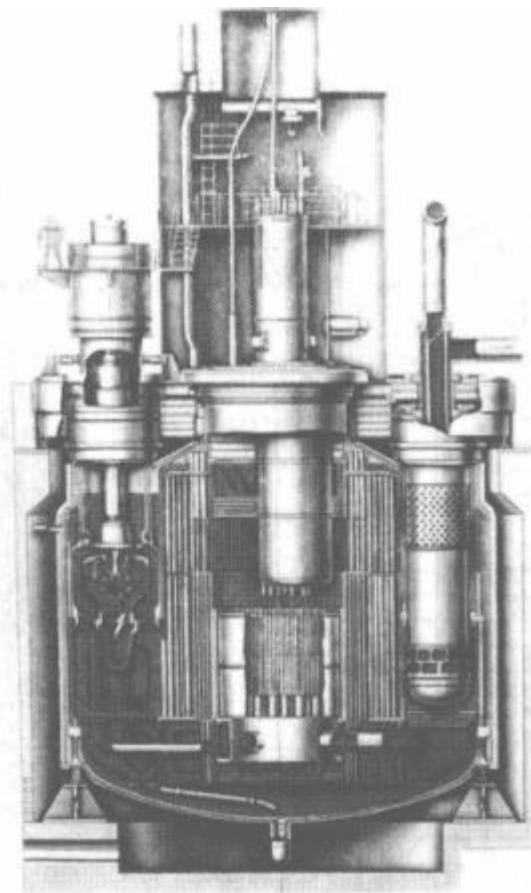
□ 快中子增殖堆

不用慢化剂，裂变依靠能量较大的快中子。

快中子增殖堆能够利用的铀资源中的潜在的能量，要比热中子堆大几十倍，这正是快中子增殖堆的突出优点。

快中子增殖堆没有慢化剂，堆芯的结构十分紧凑、体积小，功率密度比一般轻水堆高4~8倍。功率密度大，传热问题特别突出，一般采用液态金属钠作为冷却剂。

应用前景广阔，但技术难度大，目前在核电站的各种堆型中仅占0.7%。



快中子增殖堆示意图

3. 典型核反应堆与核电站

堆型	在建		在运		永久关闭	
	机组	装机量 MWe	机组	装机量 MWe	机组	装机量 MWe
沸水堆（BWR）	3	2650	92	85976		
快中子堆（FBR）	1	974	1	560	1	246
石墨气冷堆（GCR）			18	8949		
轻水冷却石墨堆（LWGR）	1	915	15	10219		
加压重水反应堆（PHWR）	1	894	46	25840	4	2530
压水堆（PWR）	47	52414	266	263089		
合计	53	57847	438	394633	5	2776

3. 典型核反应堆与核电站

□ 核动力系统（核电站）

核电站（又称核电厂）和火电厂（化石燃料电厂）的主要区别是热源不同。而将热能转换为机械能，再将机械能转换为电能的设备都是汽轮机和发电机。

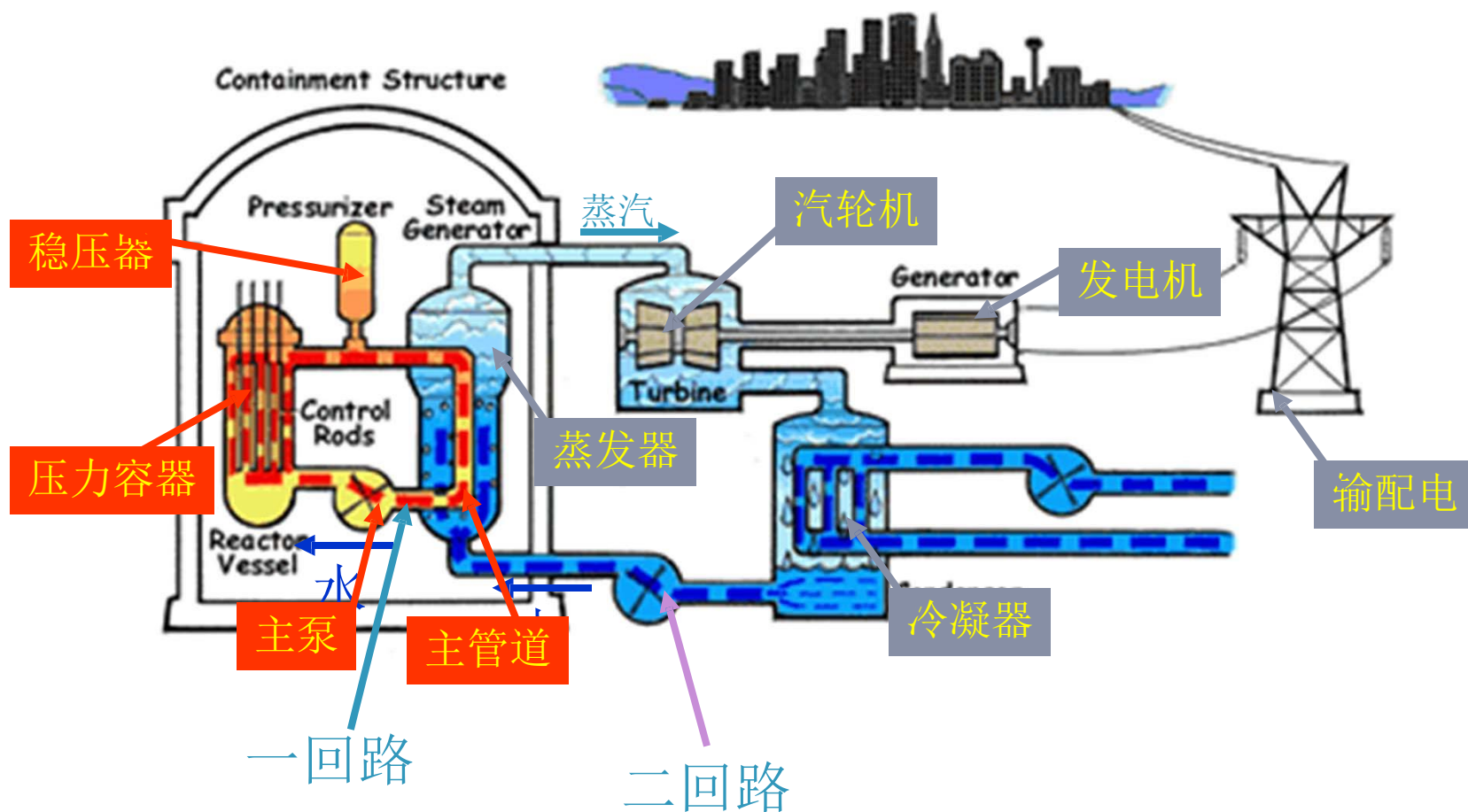
两大部分组成：

核能系统与设备，包括反应堆和蒸汽发生器所在的部分，称为**核岛**；

常规的系统和设备，汽轮机和发电机所在的部分，又称**常规岛**。

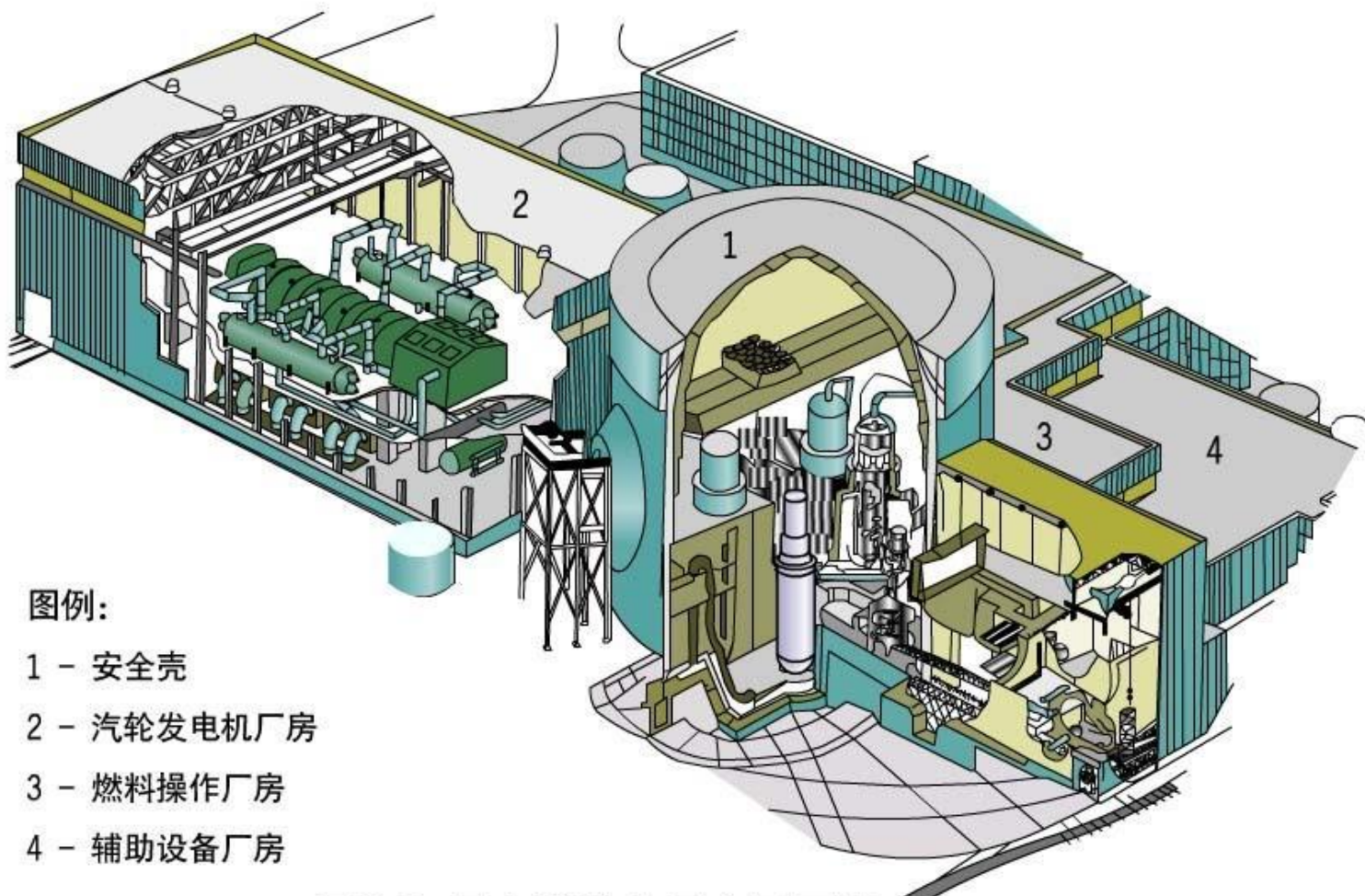
3. 典型核反应堆与核电站

□ 压水堆电厂原理



3. 典型核反应堆与核电站

□ 压水堆核电厂主要厂房布置



3. 典型核反应堆与核电站

□ 核电厂运行的特点

- (1) 火力发电厂中，可以连续不断地向锅炉供给燃料，压水堆核电厂是一次装料、长期运行，过剩反应性较大；重水堆则可以不停堆换料；
 - (2) 反应堆的堆芯内，核燃料发生裂变反应的同时，有放出瞬发中子和瞬发 γ 射线，放射性带来了很多常规电厂所没有的特殊问题；
 - (3) 反应堆在停闭后，有停堆余热问题；
 - (4) 核电厂在运行过程中，会产生气体、液体、固体放射性废物；
 - (5) 核电厂的建设费用高，但在发电成本中，燃料所占费用较为便宜。
- 为此，核电厂应作为基本负荷连续运行，并尽可能缩短反应堆的停闭时间。

目 录

1. 核能及其利用史
2. 核电开发利用现状
3. 典型核反应堆与核电站
4. 核安全基础

4. 核安全基础

□ 历史重大核电站事故

1979年 美国三哩岛核电站事故：

堆芯融化、放射性物质外逸，导致电厂周围80公里范围内生态环境受到污染。这是人类发展核电以来第一次引起世人瞩目的核电厂事故，对社会生活、舆论和世界核能利用的发展都曾带来重大影响。无人员伤亡。

1986年 苏联切尔诺贝利核电站事故：

4月26日今乌克兰境内，发电机组爆炸，核反应堆全部炸毁，大量放射性物质泄漏。到2006年，官方统计4000多人死亡，绿色和平组织数据，20年间受害者达9万人。

2011年 日本福岛核电站事故：

沸水堆，2011年3月12日近海地震，核泄漏。

4. 核安全基础



美国宾州三哩岛核电站

4. 核安全基础

□ 核废料的处理与处置

核废料（Nuclear waste material）：泛指在核燃烧生产、加工和核反应堆用过的不再需要的并具有放射性的废料。固态、液态和气态，简称“三废”。

危害：（放射性）、射线危害、热能释放

低放射性废料：医院、工程、研究机构以及核电厂等产生的包含放射性物质的废弃物，如衣物、纸类、试验器具等。焚化压缩固化，装进大金属罐，在浅地层中掩埋

和高放射性废料：用过的核燃料。“在处理”回收再利用；“直接处置”进行地下埋藏美国内华达州北部的丝兰山脉已有1.1万个30~80t的处理罐被埋在地下几百米深处的隧道里。

4. 核安全基础

□ 核电站的安全措施

(1) 核电站在设计上采取安全措施

陶瓷燃料包块、燃料元件包壳、压力容器和管道、混凝土屏蔽、圆顶的安全壳构筑物、隔离区、低人口区

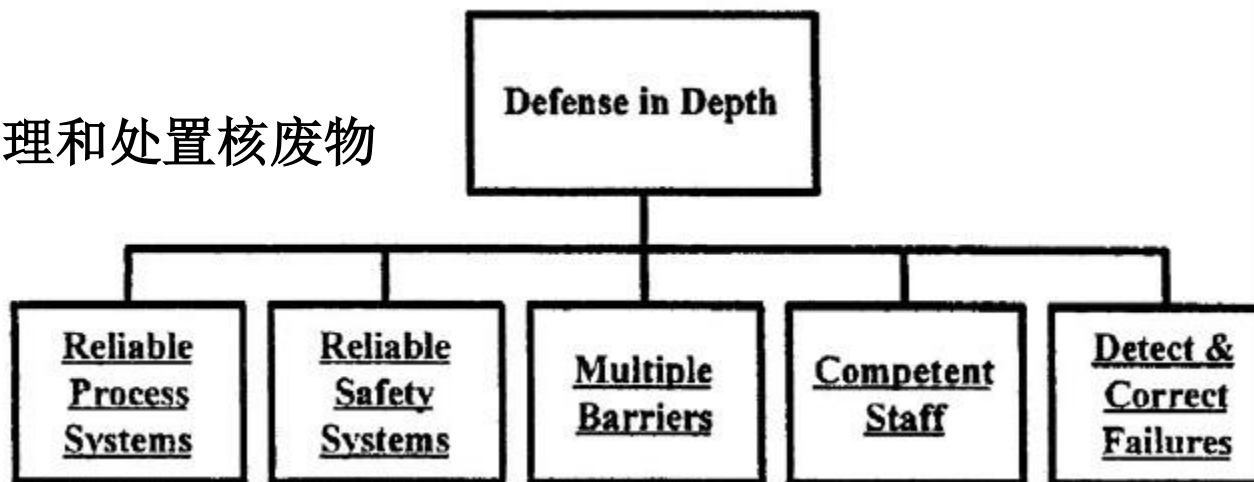
(2) 核电站在管理上采取安全措施

(3) 核电站发生自然灾害时能安全停闭

(4) 纵深防御措施 (Defense in Depth) :

可靠的过程系统、可靠的安全系统、多道屏障、高素质的运行维护人员、检测并纠正错误

(5) 严格按照国家标准处理和处置核废物



思考题

- (1) 什么是核裂变和核聚变？他们各有何特点？
- (2) 全世界和我国核电开发利用现状？
- (3) 什么是核反应堆？简述其分类、特点和用途。
- (4) 简述核电站的安全与保护措施，核废料的处理。