



西安交通大学

核科学与技术学院

核反应堆热工分析

核反应堆热工分析

秋穗正

西安交通大学

Tel: 029-82665607

13152410318

Email: szqiu@mail.xjtu.edu.cn



一、核科学与技术发展历史

★十九世纪末物理学上三大发现

1、发现X射线

1895年，德国物理学家伦琴发现X光。

1901年获诺贝尔奖



2007.9.-2007



秋穗正



2、发现天然放射性

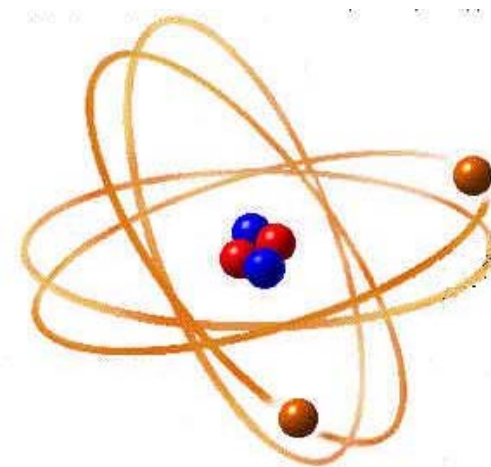
1896年，法国物理学家贝克勒尔发现了铀(U)放射现象。1903年获诺贝尔奖



3、发现电子



1906年，由于汤姆逊对电子研究的重要贡献而被授予诺贝尔物理学奖。



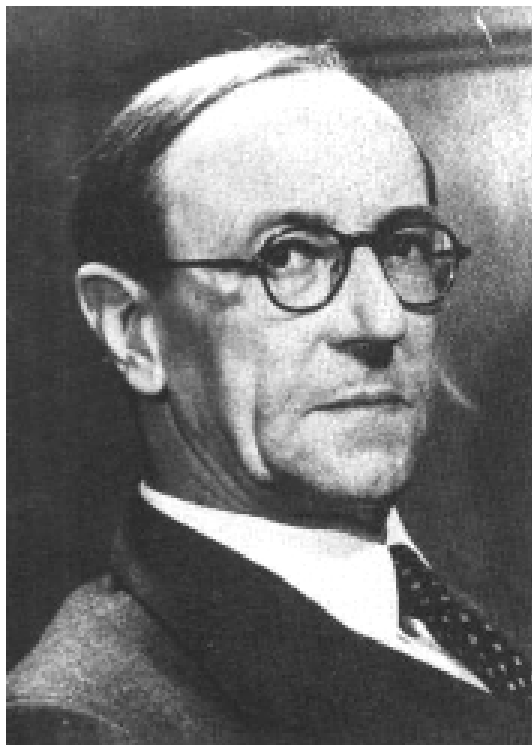


★二十世纪重大发现

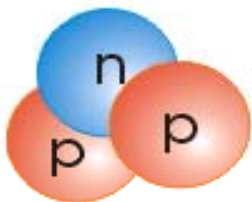
中子的发现

1930年法国物理学家玻特（Bothe）用 $\alpha \rightarrow \text{Be}$ 观测到比硬 γ 射线传透本领更大的射线，称Be辐射。

1932年约里奥·居里夫妇重复了这一实验，他们惊奇地发现，这种硬 γ 射线的能量大大超过了天然放射性物质发射的 γ 射线的能量。同时他们还发现，用这种射线去轰击石蜡，竟能从石蜡中打出质子来。约里奥·居里夫妇把这种现象解释为一种康普顿效应。



The Neutron



1932年，英国物理学家查德威克发现了中子。

查德威克很快重做了 α 粒子轰击铍上面的实验。再用铍产生的射线轰击氢、氮，结果打出了氢核和氮核。由此，他断定这种射线不可能是 γ 射线。因为 γ 射线不具备将从原子中打出质子所需要的动量。他认为，只有假定从铍中放出的射线是一种质量跟质子差不多的中性粒子，才能解释。

1935年获诺贝尔物理学奖



核裂变

1938年，德国物理学家哈恩发现核裂变现象。

哈恩和斯特拉斯曼发现铁核受快中子轰击会发生裂变，由于发现核裂变，哈恩获得1944年诺贝尔化学奖。

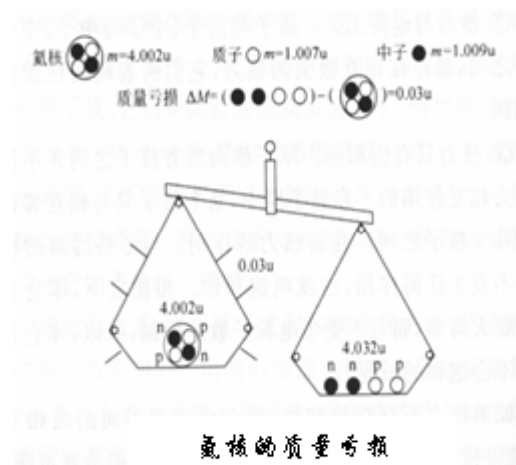




质能方程

质能亏损和结合能：单个核子的质量总是比结合在原子核里的每个核子的质量大。单个核子组成原子核时，由于核子间强大的核力作用，迫使核子相互强力碰撞而紧紧地结合时，发生了质量溅射。减少的这份质量。核子结合前后的质量差值，称为“质量亏损”，把结合时放出的能量称为“结合能”。

$$E = mc^2$$



$$\Delta E = \Delta Mc^2 = 28.30MeV$$



核裂变能：将某个重核分裂，变成中等质量核，中等质量核的结合能要比重核大，因此这个重核的每个核子就要继续发生质量亏损而放出能量。

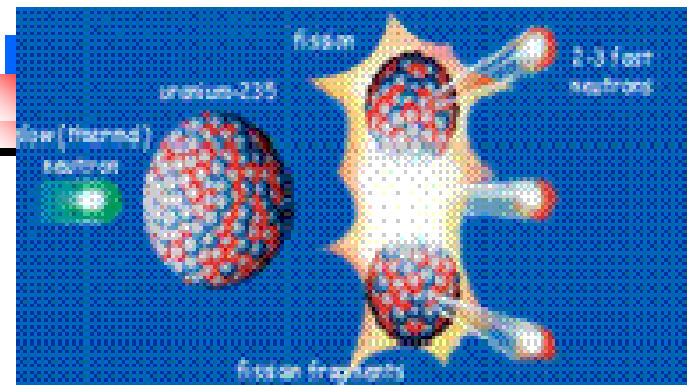
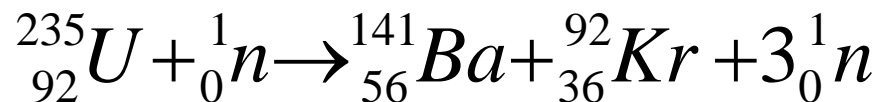
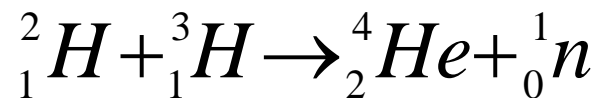
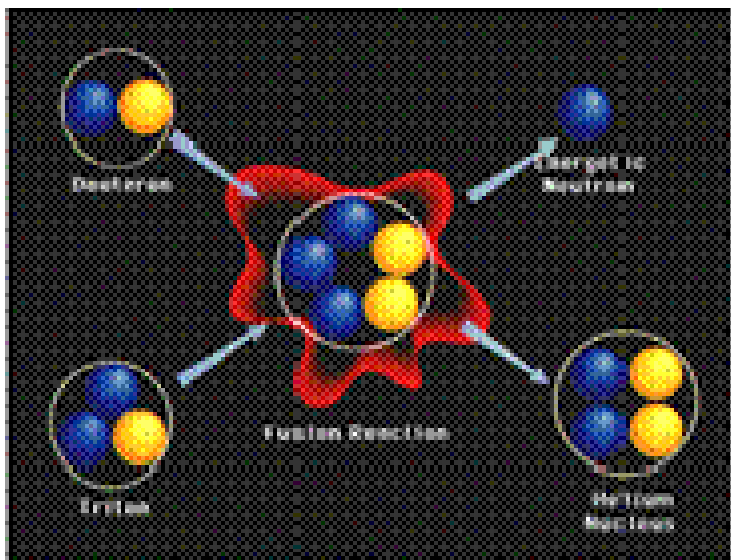


图 2-6 铀-235 的



$$\Delta E = \Delta m * c^2 = 200\text{Mev}$$

聚变能：几个轻核相互结合起来变成中等质量核，同样该过程中的核子将继续发生一部分质量亏损，变成能量放出。

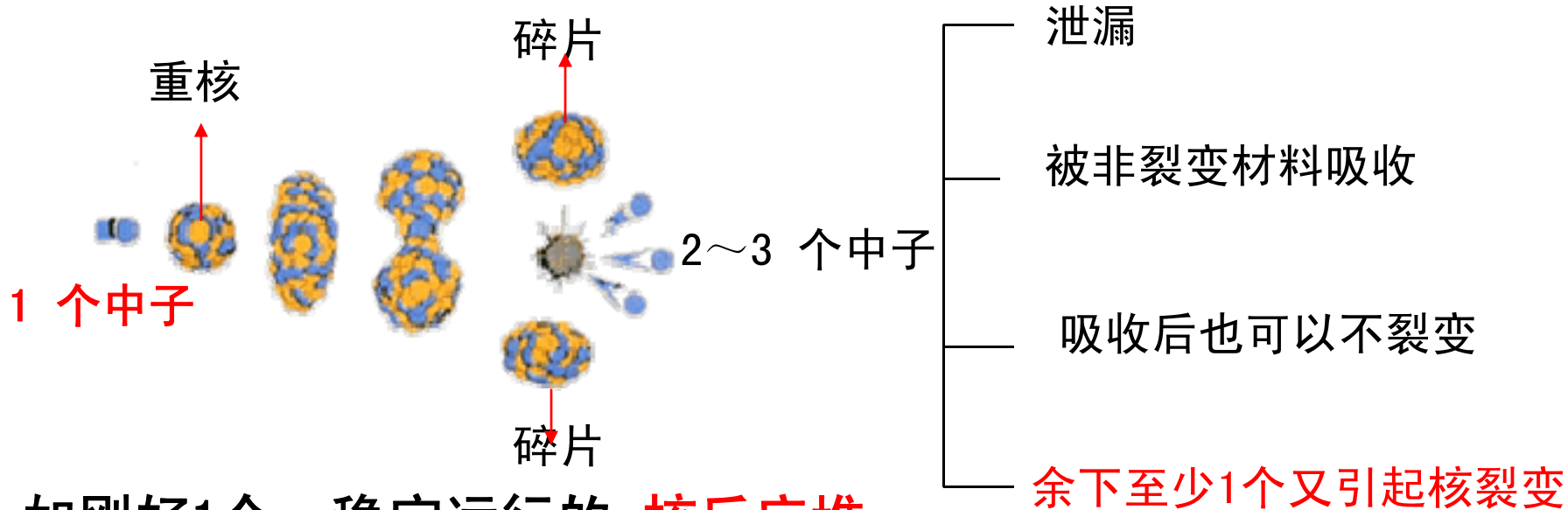


$$\Delta E = \Delta m * c^2 = 17.6\text{Mev}$$

秋穗正



自持链式反应的条件



如刚好1个，稳定运行的 **核反应堆**
 如果不断飞速增加，不加控制 **原子弹**

中子增殖因数 k : 系统中某一代中子数对于上一代中子数之比。

临界质量: 为实现自持链式反应 $k=1$ ，所需要的最小的核燃料质量。增加核燃料的质量(系统尺寸)总是有利于维持链式反应，泄露出去的中子与系统表面积即系统尺寸成二次方关系，产生的中子数同系统体积即系统尺寸成三次方关系。

临界质或临界尺寸与系统的物质组成和几何形状有关: 单纯天然铀不能临界 (CANDU: 重水慢化反射); 球形系统具有最小的临界状态 (原子弹—两个半球)



Aztec



2007.9. 2007.12 西安交大

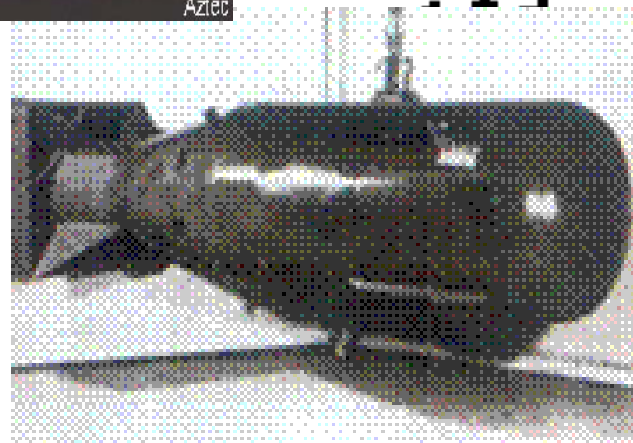


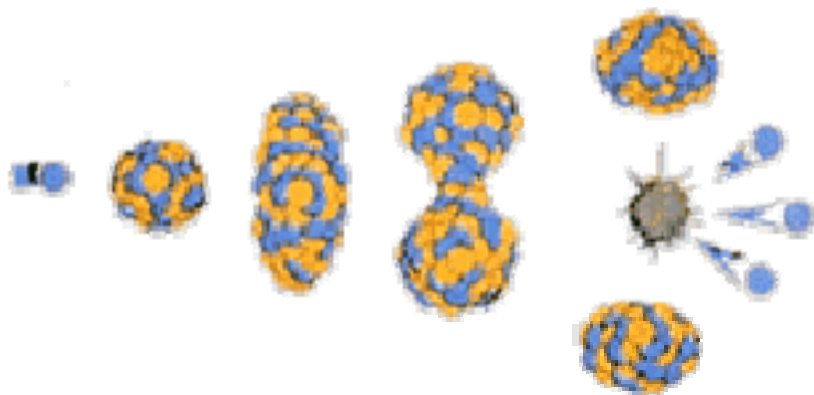
图1-27 “小男”

秋穗正



反应堆内的核反应

重核元素（如铀-235 U-235）收到中子轰击后，发生裂变：



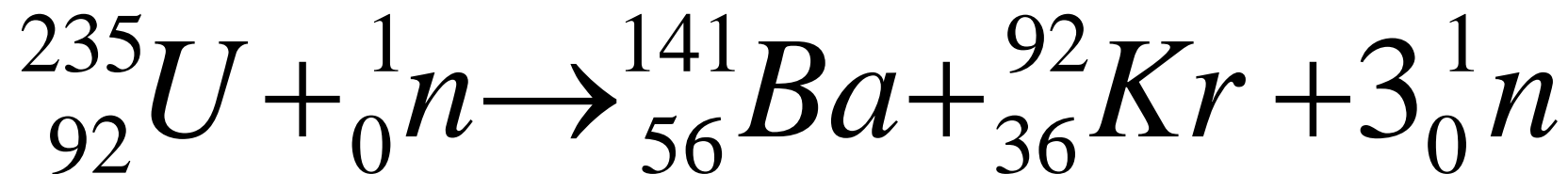
一个核一次裂变放出**200 Mev**的能量
—**公斤**的U-235全部裂变放出的能量
与**2700吨**标准煤相当



$$\Delta E = \Delta m * c^2 = 200\text{Mev}$$



核反应堆基本工作原理



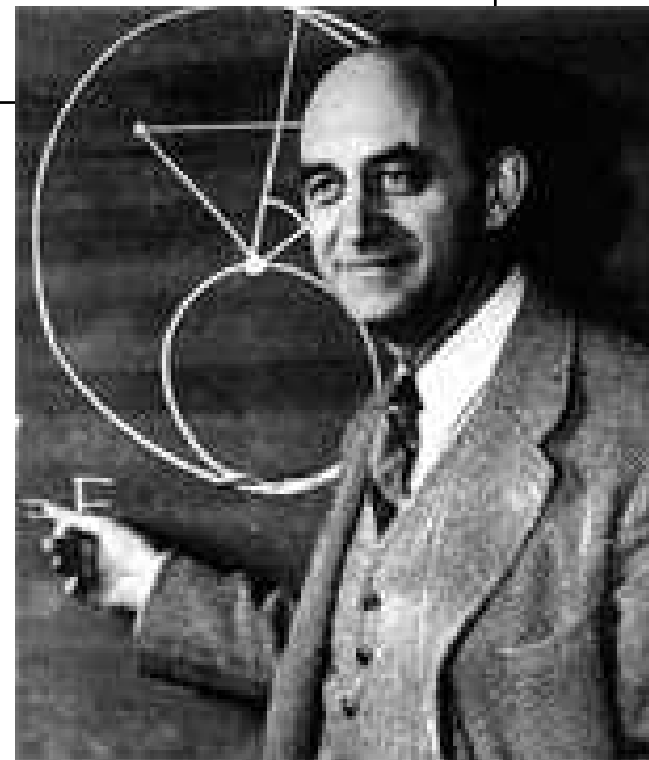
$$\Delta E = \Delta m * c^2 = 200\text{Mev}$$

核燃料，冷却剂，慢化剂，反射层，控制材料。。。。。



世界第一座反应堆

1942年，费米发明第一座核反应堆。



芝加哥一号
0.5W

核反应堆



反应堆的分类

反应堆的功能:

- 1 热能利用: 发电, 供热, 或者动力
- 2 生产新的核燃料
- 3 生产放射性同位素
- 4 进行中子的其它应用和科研

按冷却剂、慢化剂分类

轻水堆 (压水堆, 沸水堆)

重水堆

石墨气冷堆

石墨水冷堆

钠冷堆

按中子能量分类

快中子堆

中能中子堆

热中子堆



反应堆的类别和构成归类

分类的着眼点	名称和特征
A. 用途	<p>A1 动力堆,用于发电、供热和作为推进动力</p> <p>A2 生产堆,生产裂变燃料^{239}Pu和(或)^3H</p> <p>A3 研究试验堆</p> <p>A4 特殊用途堆</p>
B. 中子能量	<p>B1 热中子堆,其中裂变反应主要由热中子(能量小于 0.1 eV)引起</p> <p>B2 中能中子堆,其中裂变反应主要由超热中子(能量约为 1 eV~10 keV)引起</p> <p>B3 快中子堆,其中裂变反应主要由快中子(能量超过 0.1 MeV)引起</p>
C. 核燃料布置(限于热中子堆和中能中子堆)	<p>C1 均匀堆,其中核燃料同慢化剂均匀混合(如铀化合物溶解或悬浮在慢化剂中,形成溶液、悬浮液或浆液;铀与聚乙烯或氢化锆弥散混合等)</p> <p>C2 非均匀堆,其中固体或液体核燃料(如熔盐)同慢化剂不相混合</p>
D. 核燃料	<p>D1 天然铀(限于热中子堆)</p> <p>D2 低富集铀,或铀钚混合氧化物 MOX</p> <p>D3 高富集铀,或钚-239</p> <p>D4 钚-239 + 转换原料铀-238(铀-钚循环)</p> <p>D5 铀-233 + 转换原料钍-232(钍-铀循环)</p>



E. 慢化剂	E1 石墨 E2 重水 E3 轻水或含氢物质(轻水堆包括压水堆和沸水堆) E4 铍或氧化铍
F. 冷却剂	F1 气体(空气, CO ₂ , He, 水蒸气等) F2 液体(水, 重水, 有机溶液等) F3 液态金属(钠, 钠钾合金, 铅, 铅铋合金等)
G. 核燃料转换性能	G1 燃烧堆(无明显的核燃料转换) G2 转换堆(有显著的核燃料转换, 但转换比小于 1) G3 增殖堆(核燃料转换比大于 1)
H. 新堆型开发阶段	H1 实验堆 H2 原型堆 H3 商业示范(验证)堆
I. 结构形式	I1 重水堆有压力容器式与压力管式之分 I2 钠冷快堆有池式与回路式之分 I3 高温气冷堆有球床式与柱床式之分 I4 轻水型研究试验堆有游泳池式、水罐式与池内罐式之分
J. 空间位置(除作为推进动力)	J1 陆上固定式 J2 陆上可移动或可拆装式 J3 海上浮动式 J4 海底或空间



核能和平利用

世界能源状况及其特点

- ◆ 目前全世界能源总消费量约为130亿吨标准煤，化石能源占85%以上，从能源的供应结构来看，目前世界上消耗的能源主要来自煤、石油、天然气三大资源。
- ◆ 美国能源部对世界常规石油产量高峰值的预测显示：本世纪中叶，石油产量达到高峰值，然后逐渐下降。
- ◆ 矿石能源利用率低，而且对生态环境造成严重的污染。



矿石能源的污染问题

大量有机燃料的消耗给自然生态环境带来了严重污染。有机能源在燃烧过程中会产生大量的污染物质，其主要的污染物质有 NO_x 、 SO_2 、 CO 、 CO_2 、有害烟尘等，这些污染物将对人类造成很大的危害。在所有污染物中，对人体危害较大的无机气体主要有 NO_x 、 SO_2 、 CO 等。

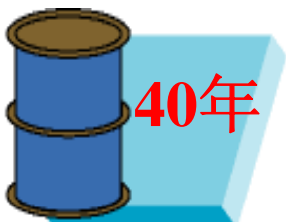
百万千瓦级的燃煤电厂每天燃烧8000t优质煤，向大气排放出300多吨有害物质。

可持续发展战略：尽量减少污染物的排放总量，保护环境和自然资源，维持人类与环境协调发展。



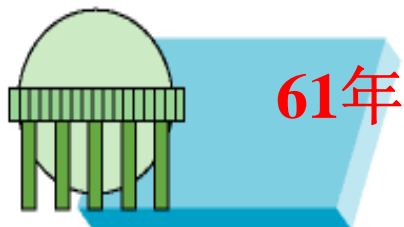
Energy is a gift of nature, but it is limited

Oil :
1兆460亿桶



节约能源是我们的责任, 也是
我们的素质的具体体现
从我做起, 从今天做起

Nature Gas :
150兆立方米



Coal :
9842亿吨



Uranium:
395万吨





我国能源结构特点 (2002年)

一次能源消费量为14.8亿吨标准煤，产量为13.87亿吨标准煤，为世界第二大能源消费国

一次能源以煤为主，占近70%

人均能源消费水平还很低，只有世界平均水平的一半

发电装机容量3.57亿千瓦，居世界第2位

近年来我国能源需求已呈明显增长的趋势

能源分布不均匀，与经济发展不协调



地区	能源合计	煤炭	水力	石油天然气
华北	43.9	64.0	1.8	14.4
东北	3.8	3.1	1.8	48.3
华东	6.0	6.5	4.4	18.2
中南	5.6	3.7	9.5	2.5
西南	28.6	10.7	70.0	2.5
西北	12.1	12.0	12.5	14.0

我国各地区能源资源占全国比重(%)





未来我国能源需求预测

2020年，我国一次能源需求值在25~33亿吨标煤之间，均值是29亿吨标煤

- 煤炭：21~29亿吨
- 石油：4.0~4.5亿吨
- 天然气：1600~2000亿立方米
- 发电装机容量：8.6~9.5亿千瓦

2050年要到目前中等发达国家水平，人均能源消耗应达3.0吨标煤以上，能源需求总量约为50亿吨标煤

- ◆ 煤炭：占50%以下，年产35亿吨，相当于目前全世界产量的80%
- ◆ 石油：2020年达到2亿吨的高峰，之后逐年下降，2050年约1.2亿吨
- ◆ 天然气：估计约2000亿m³
- ◆ 水电：400GW
- ◆ 核电：340GW，相当于目前全世界核电的装机容量
全部常规能源供应只相当于33亿吨标煤



世界核能发展状况

核能的优点:

1

污染小:

不排放大量烟尘、
二氧化硫、二氧化碳
和固体废渣

放射性小于火电站

2

需要燃料少:

每一公斤铀²³⁵,
经过全部裂变后,
释放出来的能量
是相当于 2,400
~2,700 吨标准
煤, 缓解大量运
输压力

3

重量轻、体积
小、不需要空
气, 装一炉料
可运行很长时
间:

可作为核潜艇、
宇宙飞行器



世界核电发展的几个阶段

1954—1960 试验阶段

1961—1969 实用化阶段

1969—上世纪70年代末：大发展阶段

上世纪80年代—上世纪末：低潮阶段

1979年美国三哩岛（TMI）事故

1986年 前苏切尔诺贝利事故

这个阶段，核能仍在持续增长，而且是各种能源中增长速度最快的。同时在法国，日本，韩国，中国等国家，这个阶段仍坚持发展核电。

本世纪初：美国、德国等国家重新修正自己的核电方针，布什政府提出了核电复苏计划，发展中国家也在积极准备筹建核电站，核能在本世纪必将大放异彩。



世界各国核电情况 (截止2003年)

国家	运行机组	运行净功率 (MWe)	全部机组	全部净功率 (MWe)
阿根廷	2	1018	3	1710
比利时	7	5680	7	5680
巴西	2	1901	3	3176
保加利亚	4	2722	4	2722
加拿大	22	15113	22	15113
中国	7	5426	11	8764
中国台湾	6	4884	8	7584
捷克共和国	4	1648	6	3610
芬兰	4	2656	4	2656
法国	59	63203	59	63203
德国	20	22594	20	22594
匈牙利	4	1755	4	1755
印度	14	2548	22	6128
伊朗	0	0	1	915



日本	53	44041	58	48883
立陶宛	2	2370	2	2370
墨西哥	2	1364	2	1364
荷兰	1	452	1	452
朝鲜	0	0	2	2000
巴基斯坦	2	425	2	425
罗马尼亚	1	655	5	3135
俄罗斯	27	20799	33	26074
斯洛伐克	6	2512	8	3392
斯洛文尼亚	1	656	1	656
南非	2	1800	2	1800
韩国	18	14970	22	18970
西班牙	9	7565	9	7565
瑞典	11	9460	11	9460
瑞士	5	3220	5	3220
乌克兰	13	11195	18	15945
英国	31	11802	31	11802
美国	104	99034	107	102637
合计	444	363844	494	406136



截止2003年

堆 型	运行 机组	运行净功 率 (MWe)	全部 机组	全部净功 率 (MWe)
压水堆 (PWR)	262	236236	293	264169
沸水堆 (BWR)	93	81071	98	87467
各种气冷堆	30	10614	30	10614
各种重水堆	44	22614	54	27818
石墨慢化轻 水堆 (LGR)	13	12545	14	13470
液态金属快 中子增殖堆 (LMFBR)	2	793	5	2573
合计	444	363844	494	406136

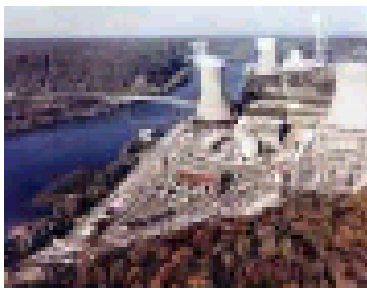


世界核能发展趋势

The Evolution of Nuclear Power

Generation I

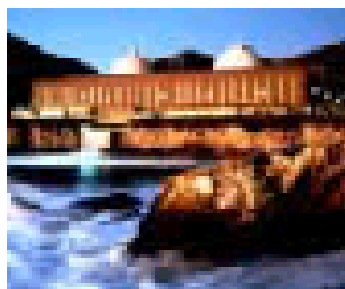
Early Prototype Reactors



- Shippingport
- Dresden, Fermi I
- Magnox

Generation II

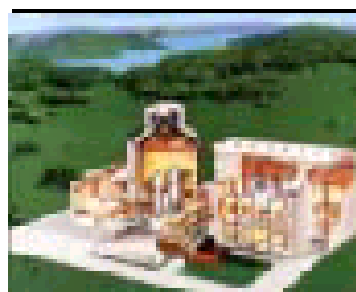
Commercial Power Reactors



- LWR-PWR, BWR
- CANDU
- VVER/RBMK

Generation III

Advanced LWRs

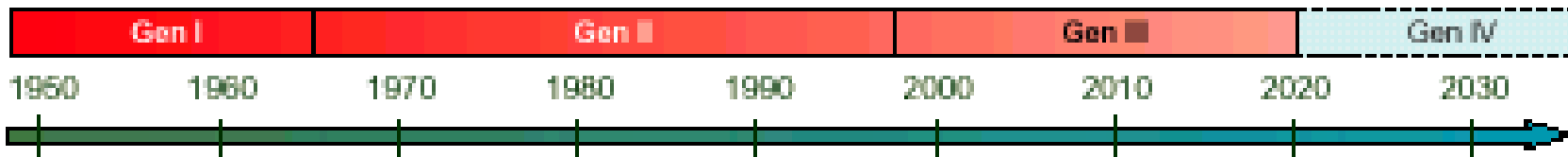


- ABWR, System 80+, AP600, EPR

Generation IV



- Highly economical
- Enhanced safety
- Minimized wastes
- Proliferation resistant





中国核能发展

我国目前已建的核电站装机容量为**870万千瓦**，约占总电量**1.8%**，远远低于**18%**的世界平均水平

我国的能源结构、能源资源供给，交通运输以及环境保护等矛盾决定着我国必须**大力发展核电**

国家发改委2003年1月14日宣布，未来几年中国将大力发展核电，到2020年，中国核发电量占总发电量的比例有望达到**4-6%**



2006年1至6月，9台商运机组总计发电252亿千瓦时。

运行期间，未发生非计划停堆，人员剂量、放射性流出物排放量等远低于国家标准规定的限值，环境监测表明，核电厂未对周围环境带来任何不良影响。

辽宁红沿河核电站一期工程于6月28日开始负挖，

山东海阳等核电项目前期准备工作正在按计划进行之中。

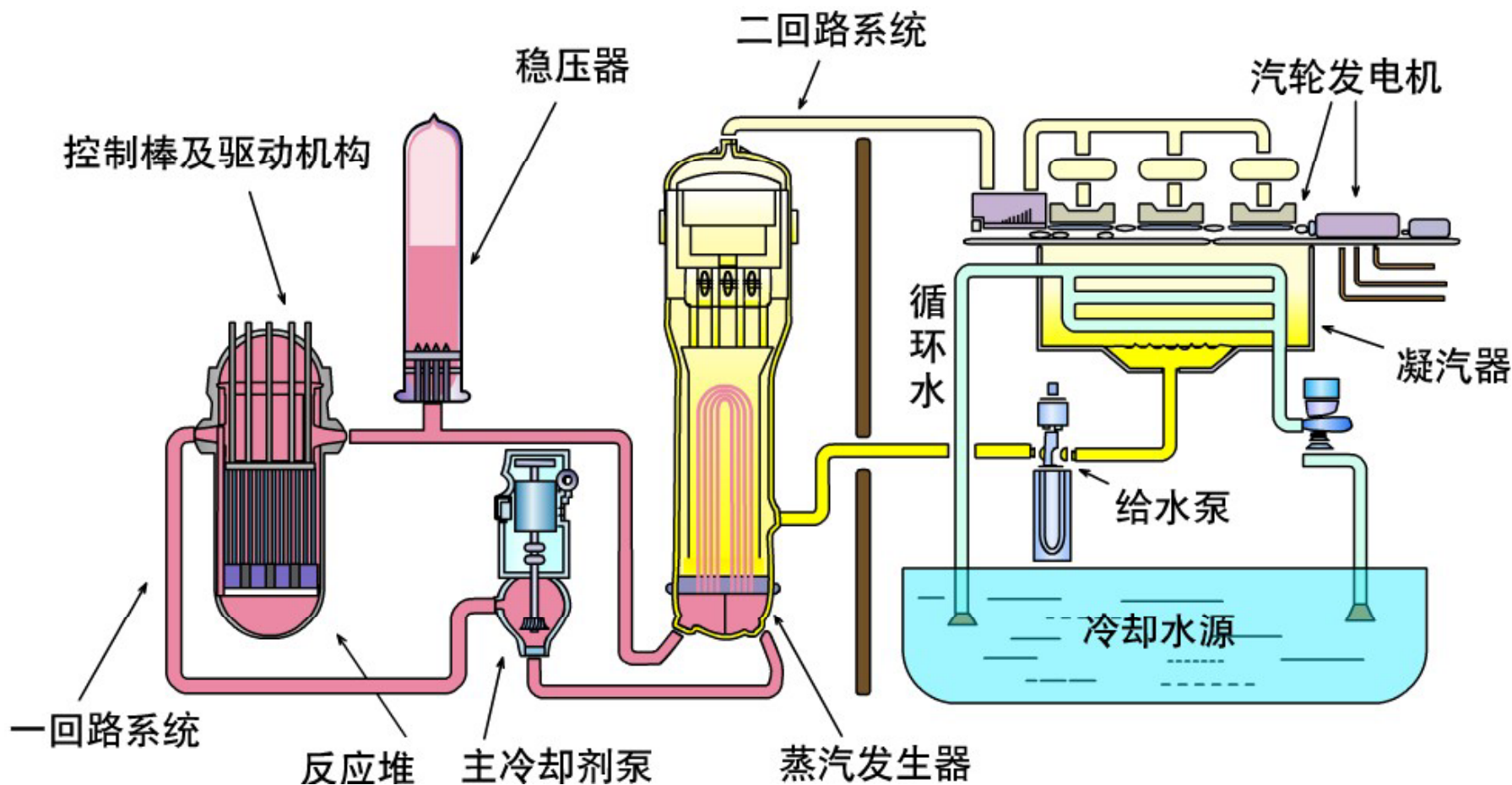
浙江三门和广东阳江核电项目作为我国第三代核电技术自主化依托项目，现场前期工作进展顺利，具备机组负挖条件。

有关投资方和地方政府在广西、福建、浙江、安徽、江西、湖北、湖南、广东等省沿海和内陆厂址的前期准备工作也在积极推进中。



核电厂基本工作原理

利用核能生产电能的电厂称为核电厂。由于核反应堆的类型不同，核电厂的系统和设备也不同。压水堆核电厂主要由压水反应堆、反应堆冷却剂系统（简称一回路）、蒸汽和动力转换系统（又称二回路）、循环水系统、发电机和输配电系统及其辅助系统组成。



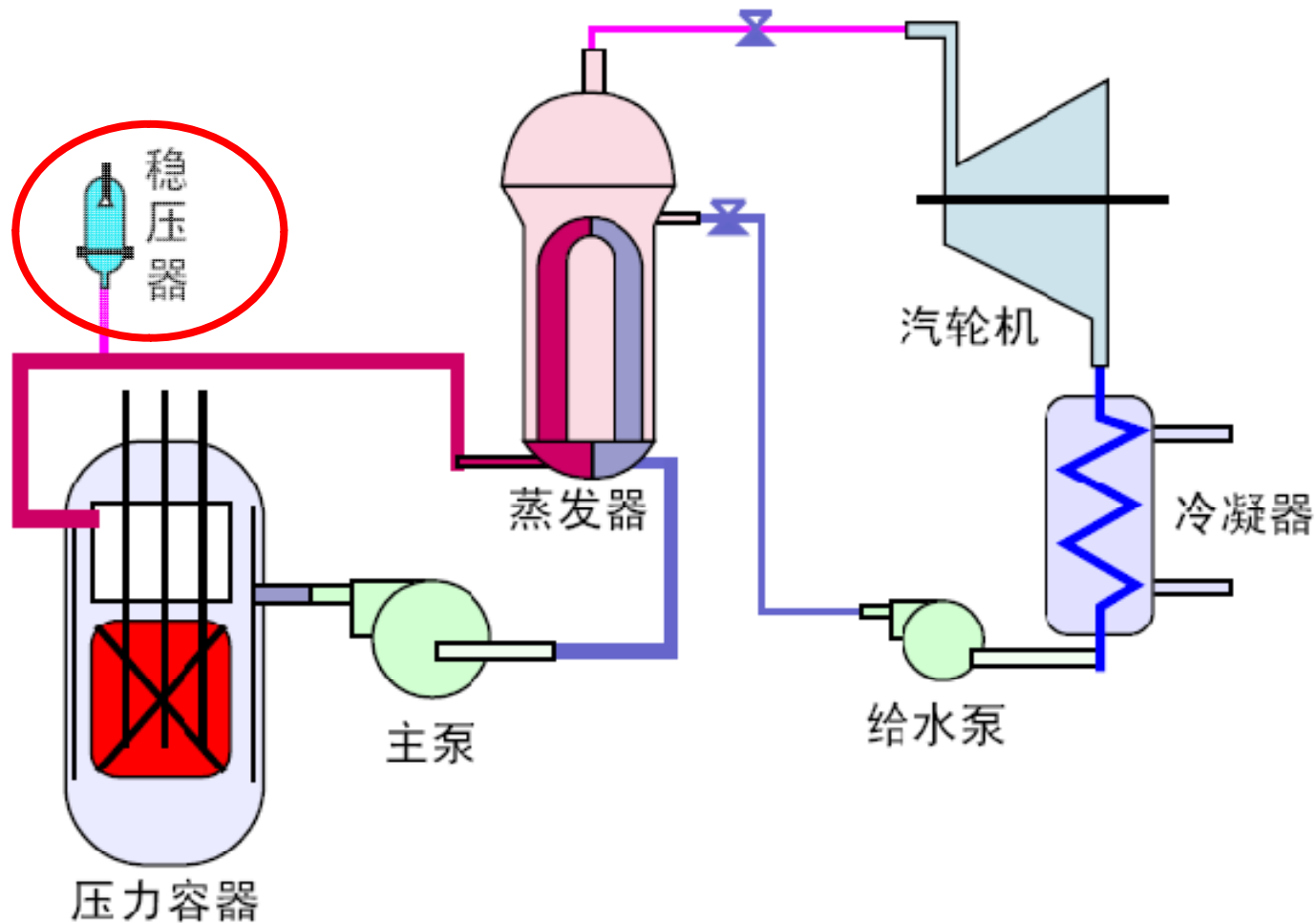
压水堆核电厂原理图



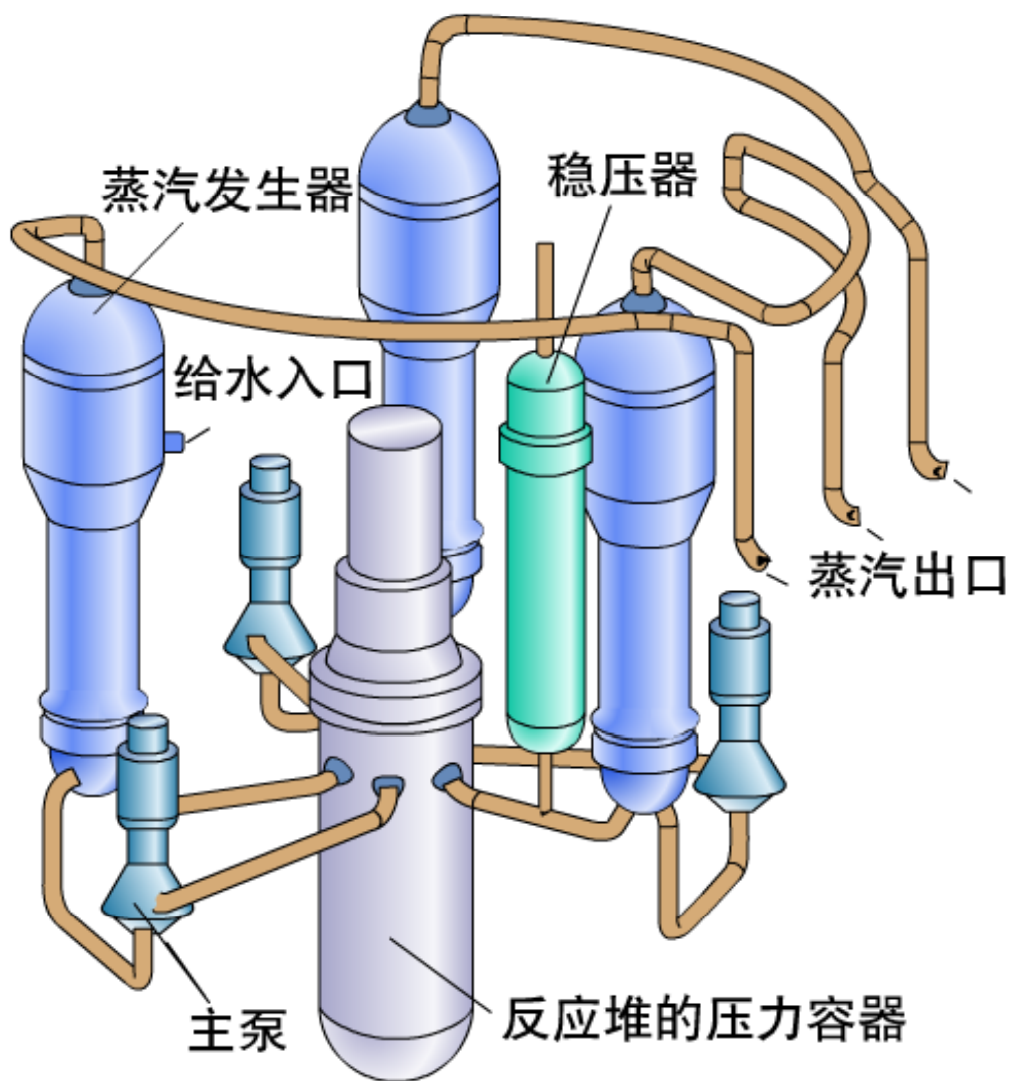
堆型简介——压水堆

反应堆冷却剂压力由**稳压器**来建立和维持

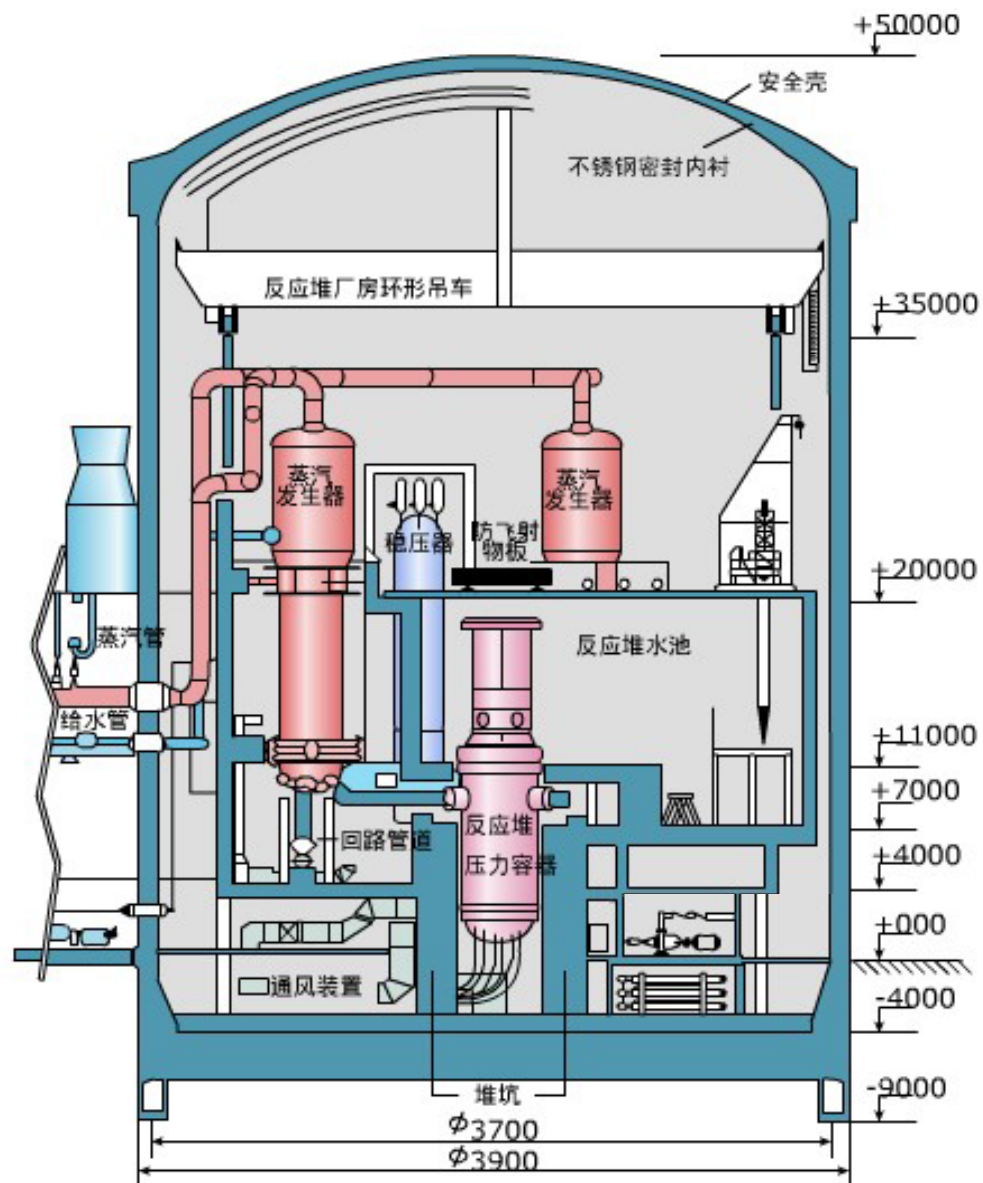
稳压器：立式圆筒形高压容器，上部为**蒸汽空间**，下部为**水空间**，通过其下部的一根波动管连接在一条冷却剂循环回路的热管上



压水堆两回路热力系统示意图



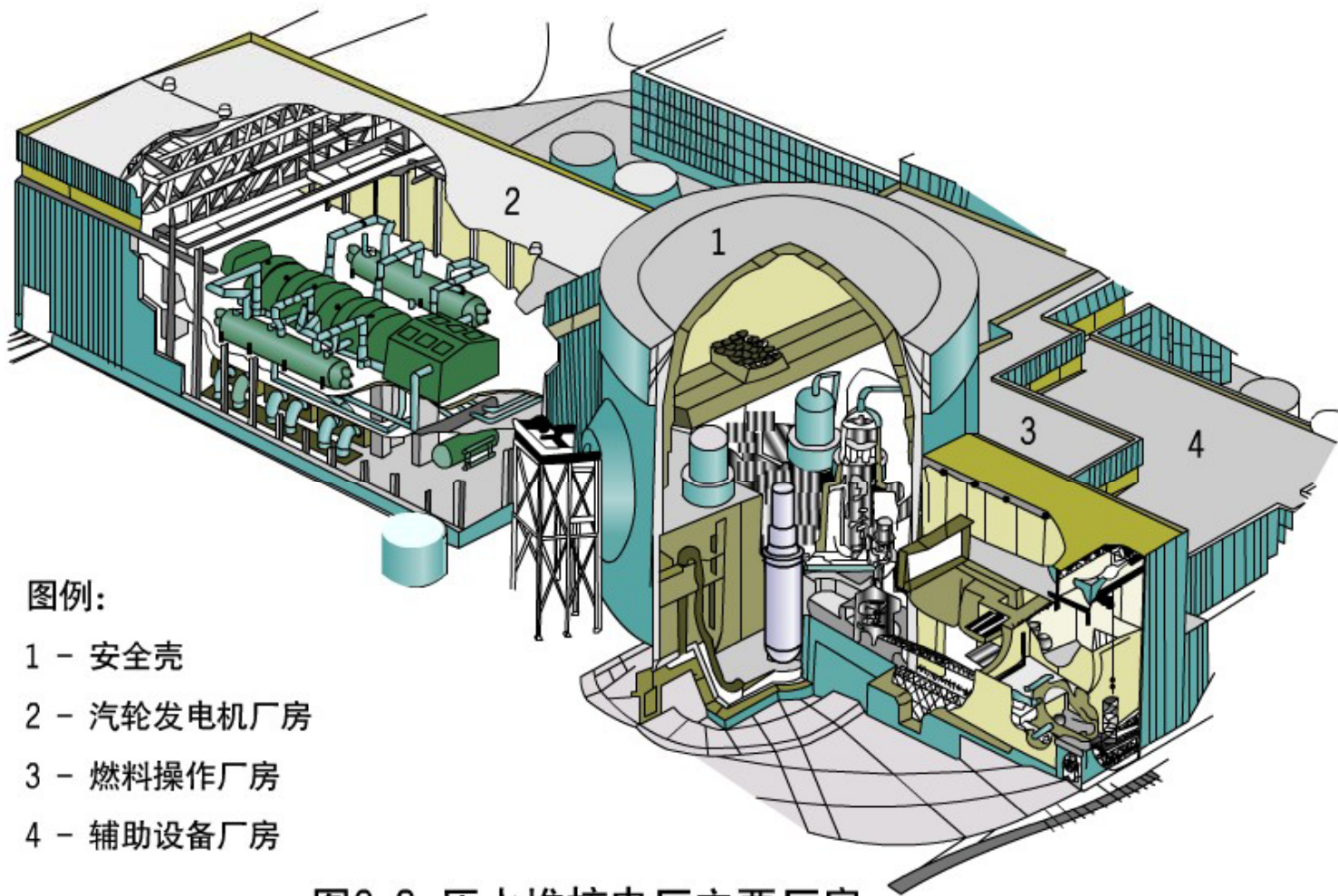
三环路压水堆一回路由系统



压水堆安全壳内纵剖面图

2001.9.-2001.12 四女父入

秋穗正



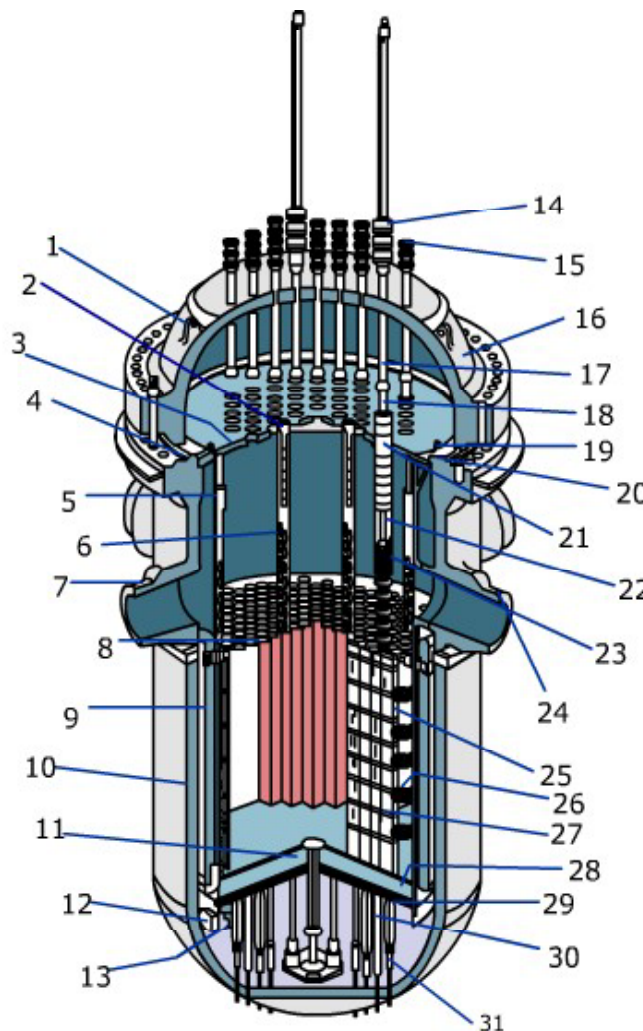
图例:

- 1 - 安全壳
- 2 - 汽轮发电机厂房
- 3 - 燃料操作厂房
- 4 - 辅助设备厂房

压水堆核电厂主要厂房布置

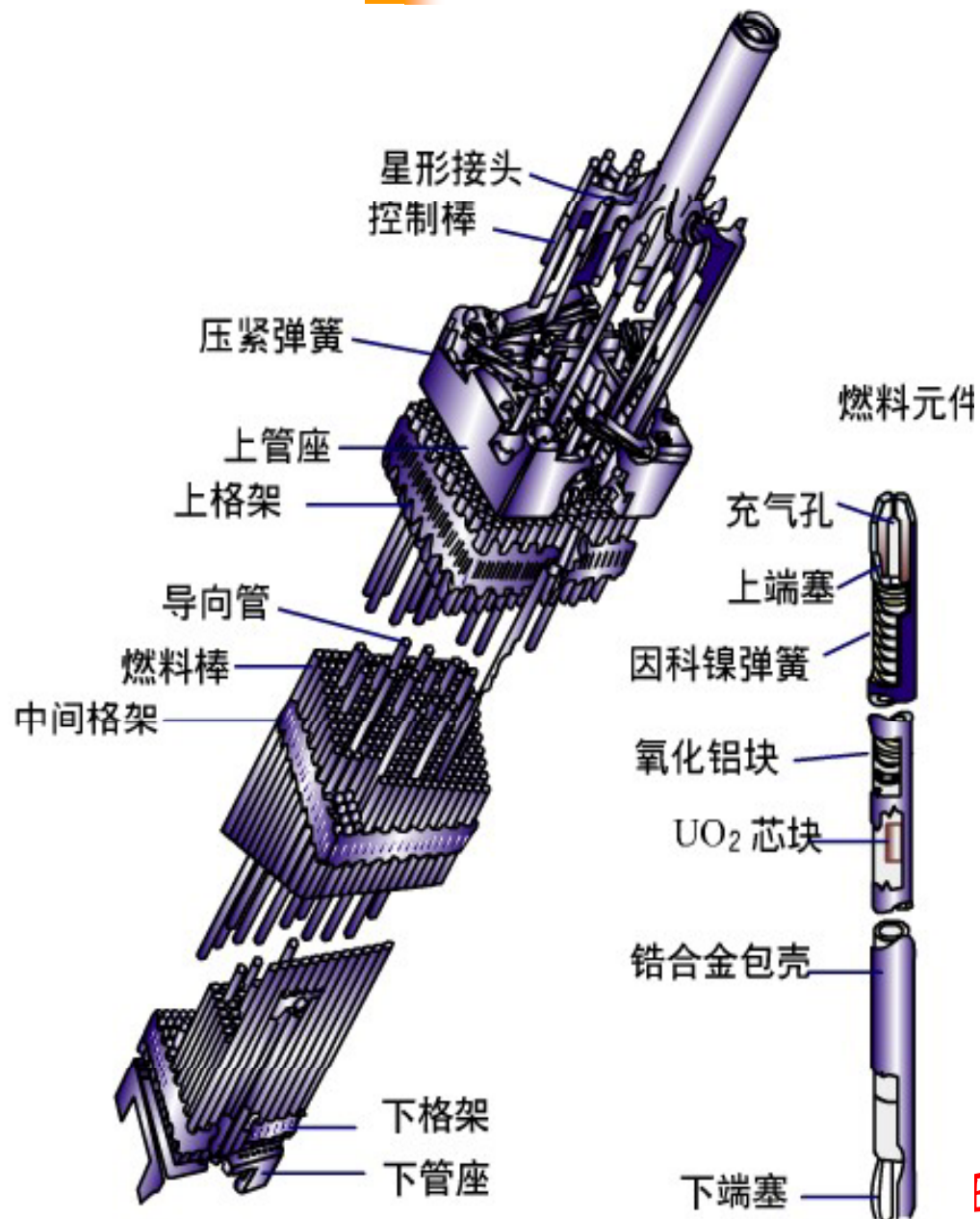
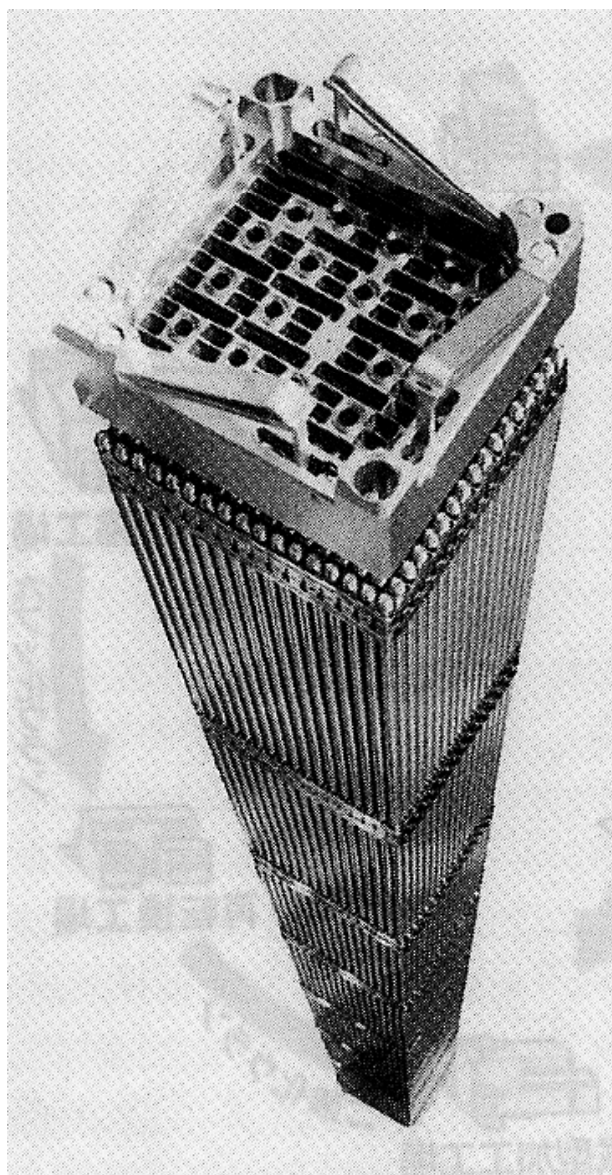


- 1 - 吊耳;
- 2 - 厚梁;
- 3 - 上部支撑板;
- 4 - 内部构件支撑凸缘;
- 5 - 堆心吊篮;
- 6 - 支撑柱;
- 7 - 进口接管;
- 8 - 堆芯上栅格板;
- 9 - 热屏蔽;
- 10 - 反应堆压力容器;
- 11 - 检修孔;
- 12 - 径向支撑;
- 13 - 下部支撑锻件;



- 14 - 控制棒驱动机构;
- 15 - 热电偶测量口;
- 16 - 封头组件;
- 17 - 热套;
- 18 - 控制棒套管;
- 19 - 压紧簧板;
- 20 - 对中销;
- 21 - 控制棒导管;
- 22 - 控制棒驱动杆;
- 23 - 控制棒组件(提起状态);
- 24 - 出口接管;
- 25 - 围板;
- 26 - 幅板;
- 27 - 燃料组件;
- 28 - 堆芯下栅格板;
- 29 - 流动混合板;
- 30 - 堆芯支撑柱;
- 31 - 仪表导向套管_中子探测器

典型压水堆压力容器与堆芯结构原理图





2

堆型简介——压水堆

堆本体结构图

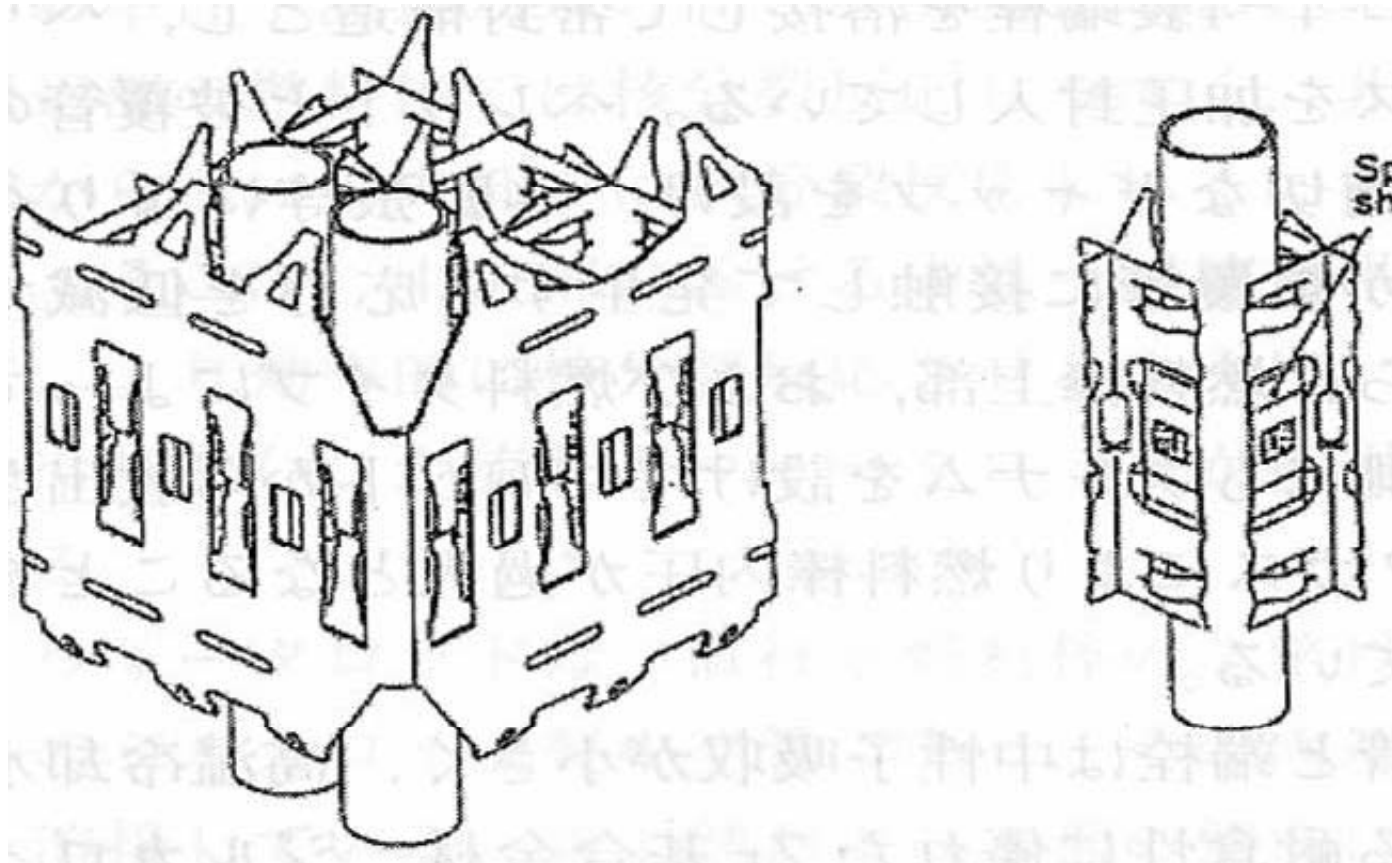
燃料组件

定位格架

上管座

下管座

燃料芯块





2

堆型简介——压水堆

堆本体结构图

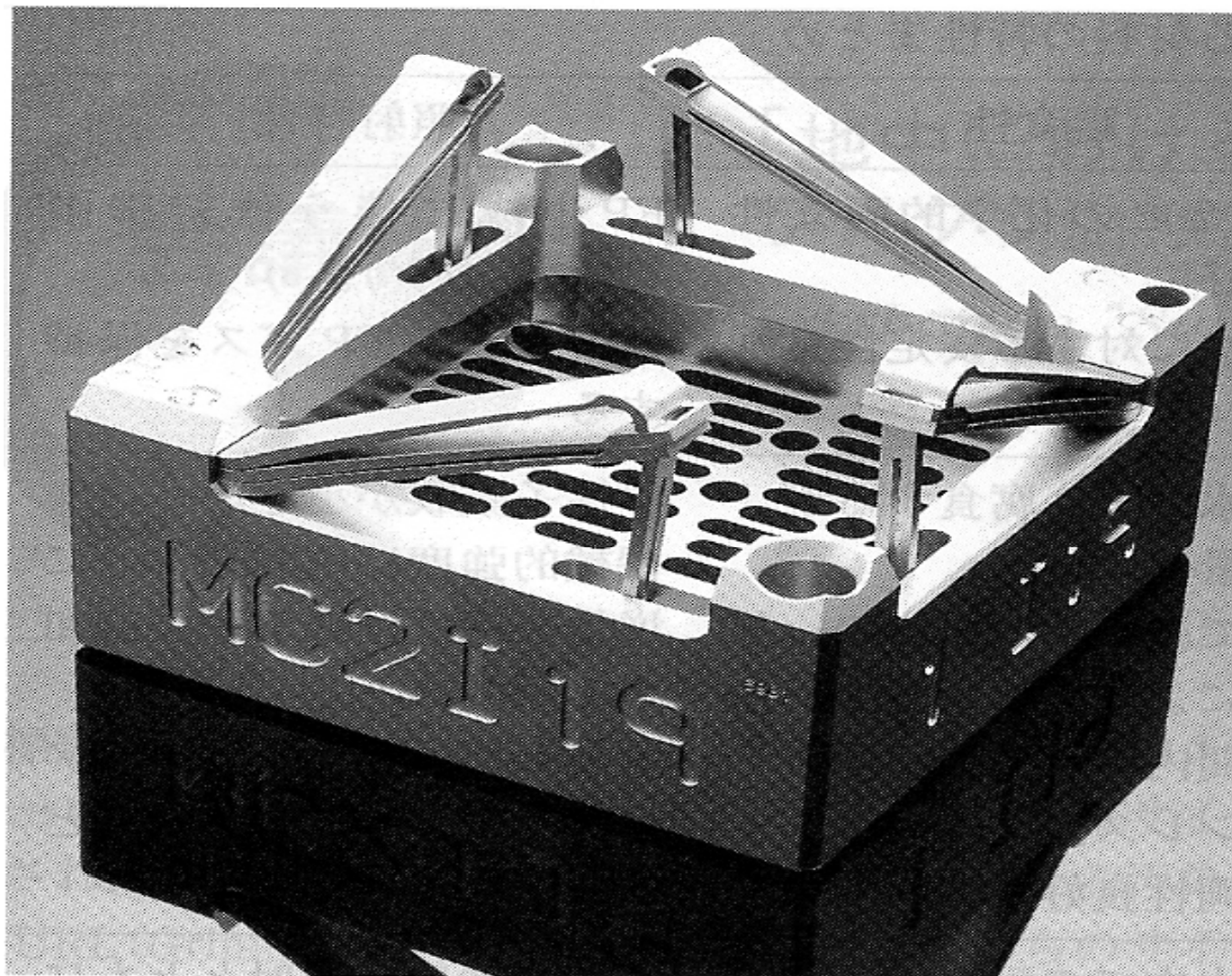
燃料组件

定位格架

上管座

下管座

燃料芯块





2

堆型简介——压水堆

堆本体结构图

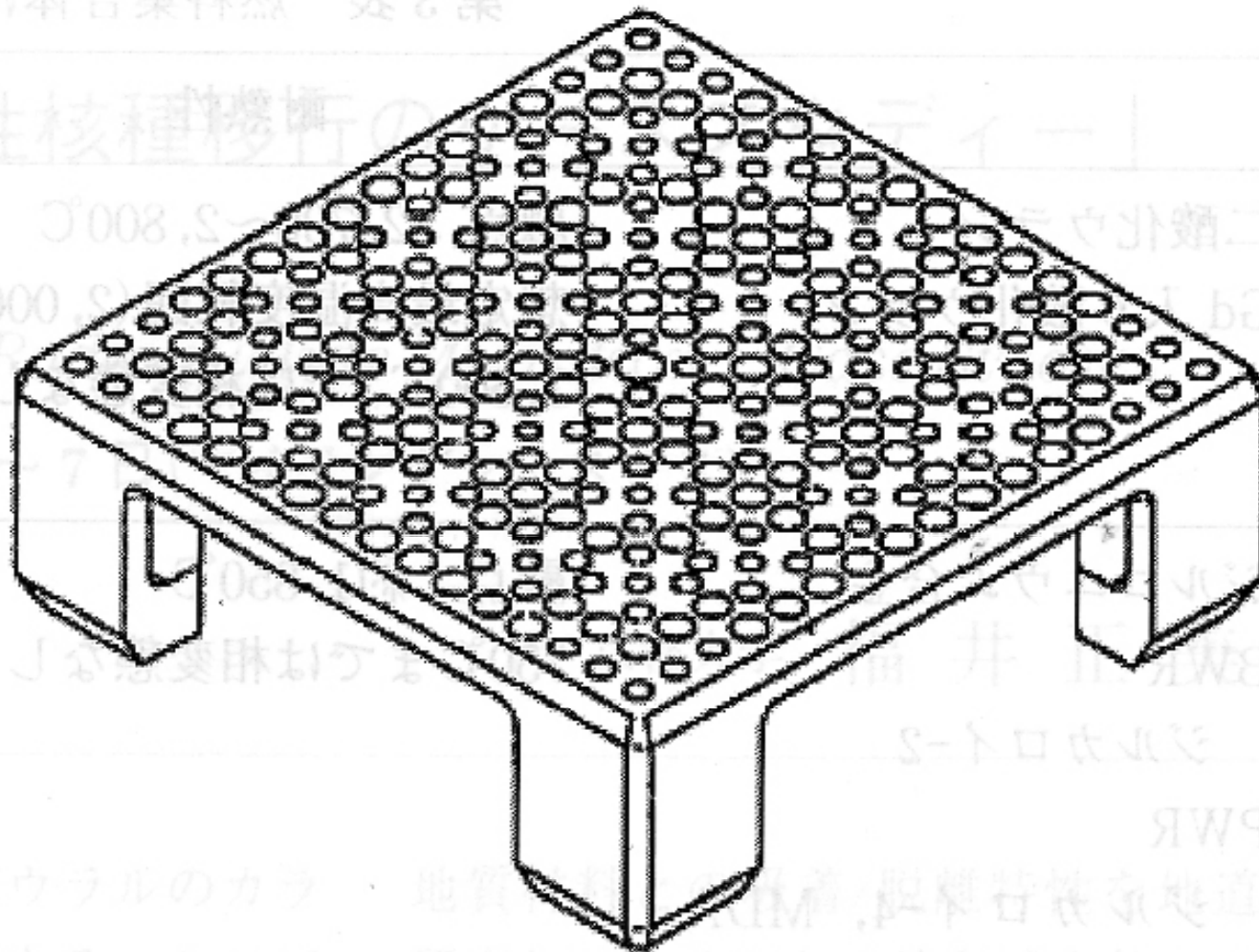
燃料组件

定位格架

上管座

下管座

燃料芯块





2

堆型简介——压水堆

堆本体结构图

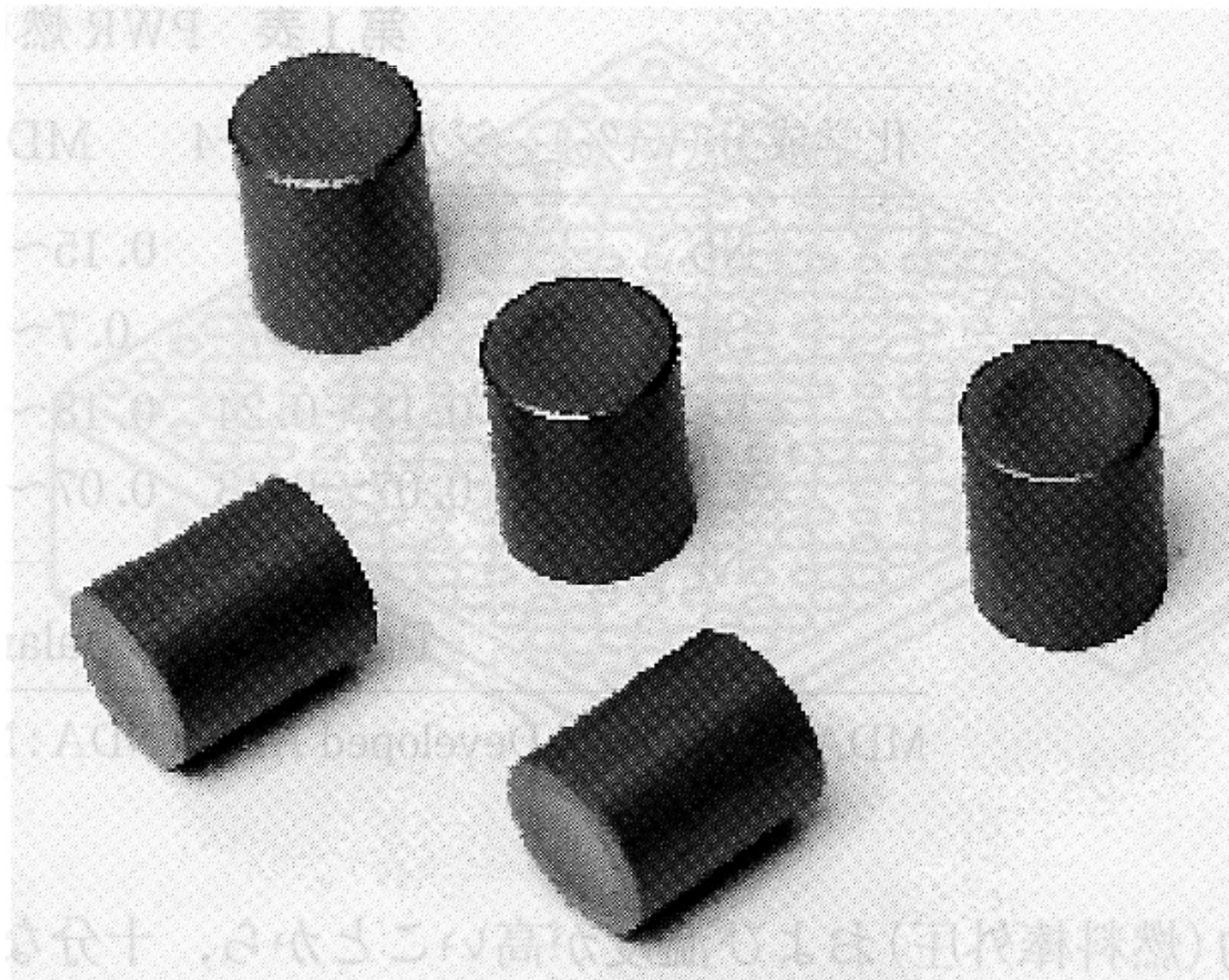
燃料组件

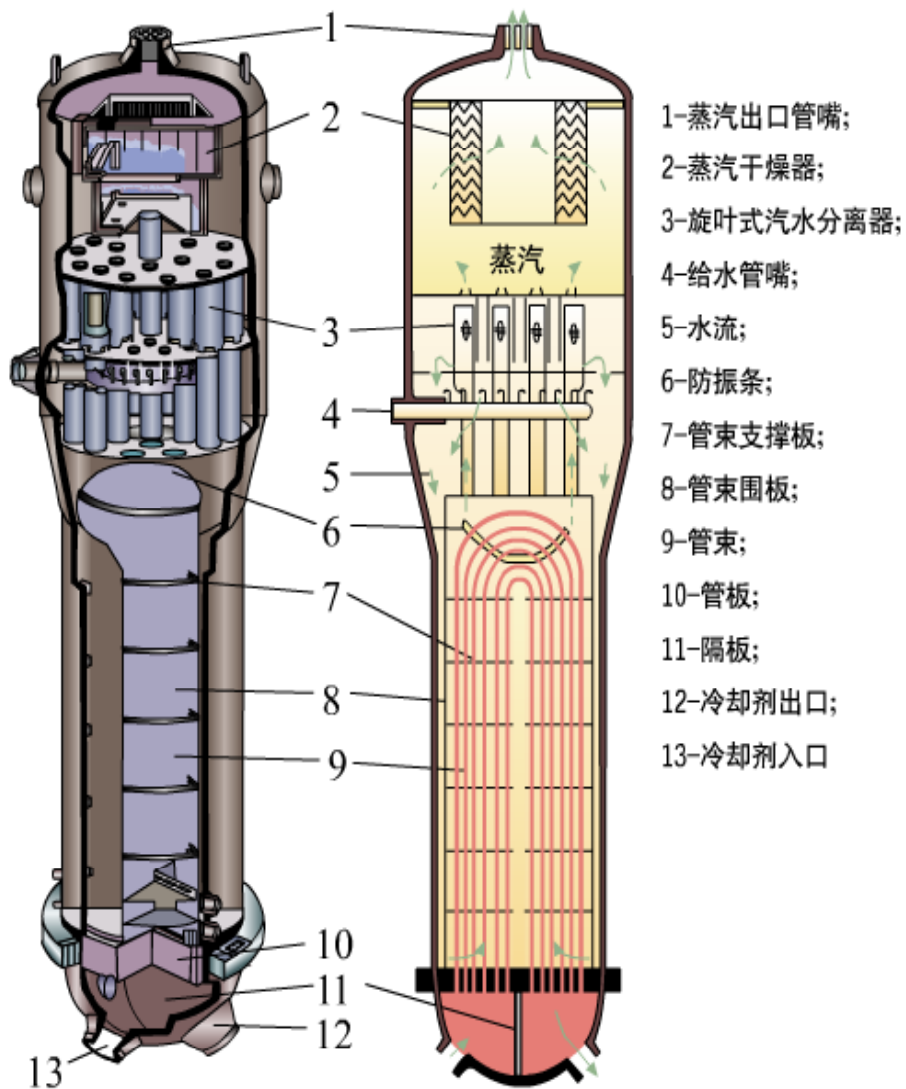
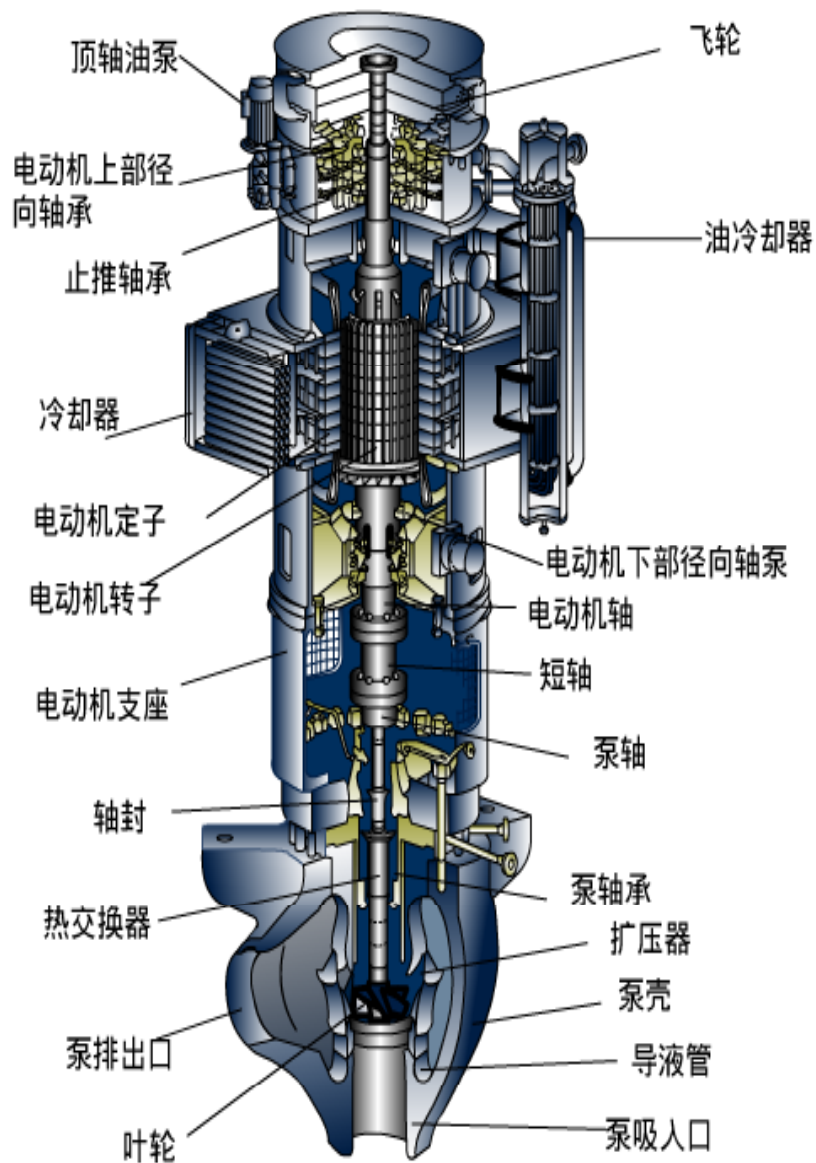
定位格架

上管座

下管座

燃料芯块





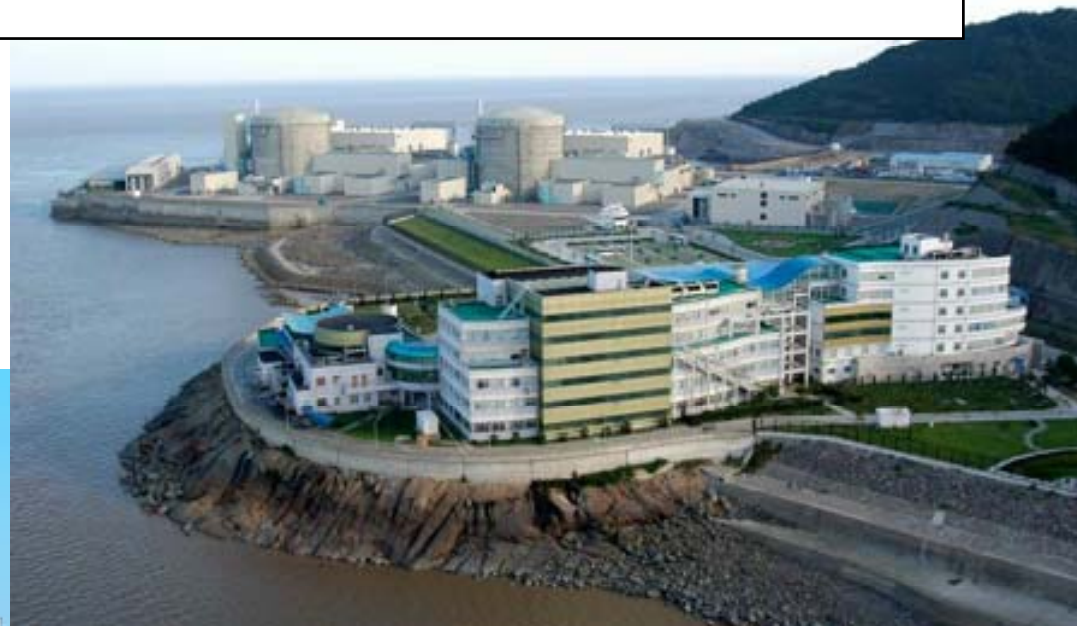


秦山一期核电厂





秦山三期核电厂



2007.9.-2007.12 西安交大

秋穗正



大亚湾核电厂厂区

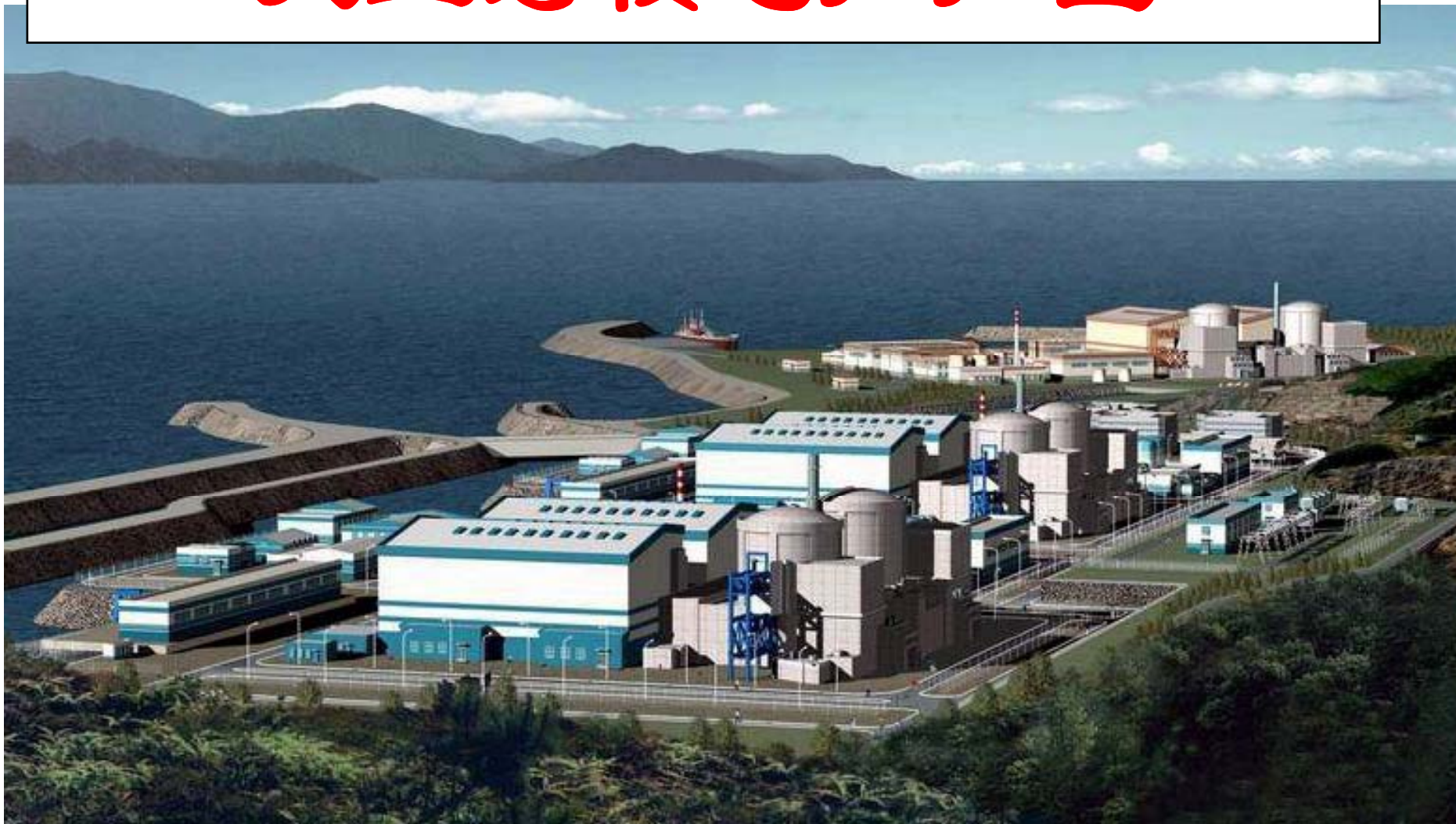


2007.9.-2007.12 西安交大

秋穗正



大亚湾核电厂厂区





大亚湾核电站厂区





田湾核电厂



2007.9.-2007.12 西安交大

秋穗正



浙江三门核电厂



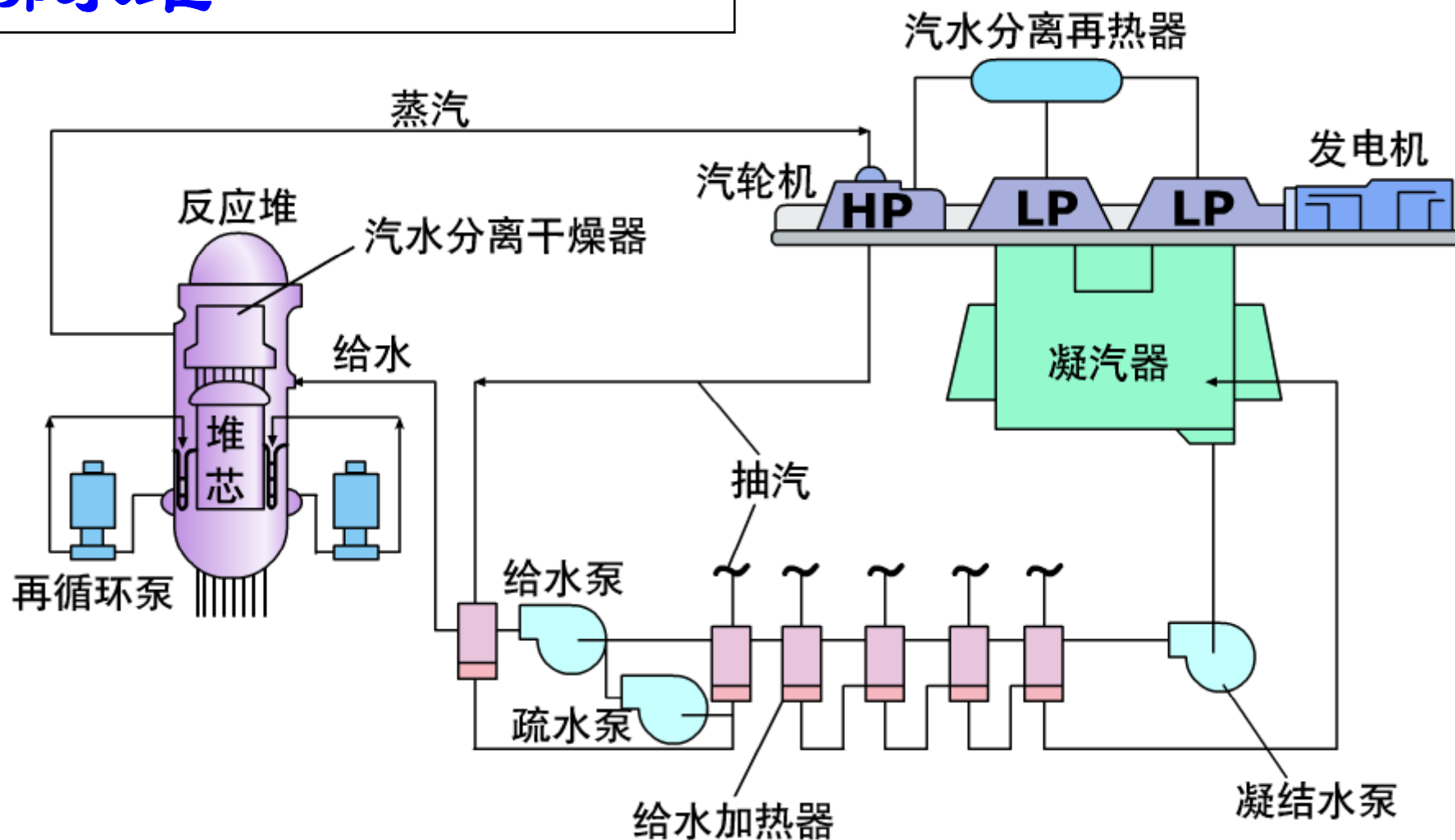
2007.9.-2007.12 西安交大

秋穗正



其他核动力反应堆

沸水堆





2

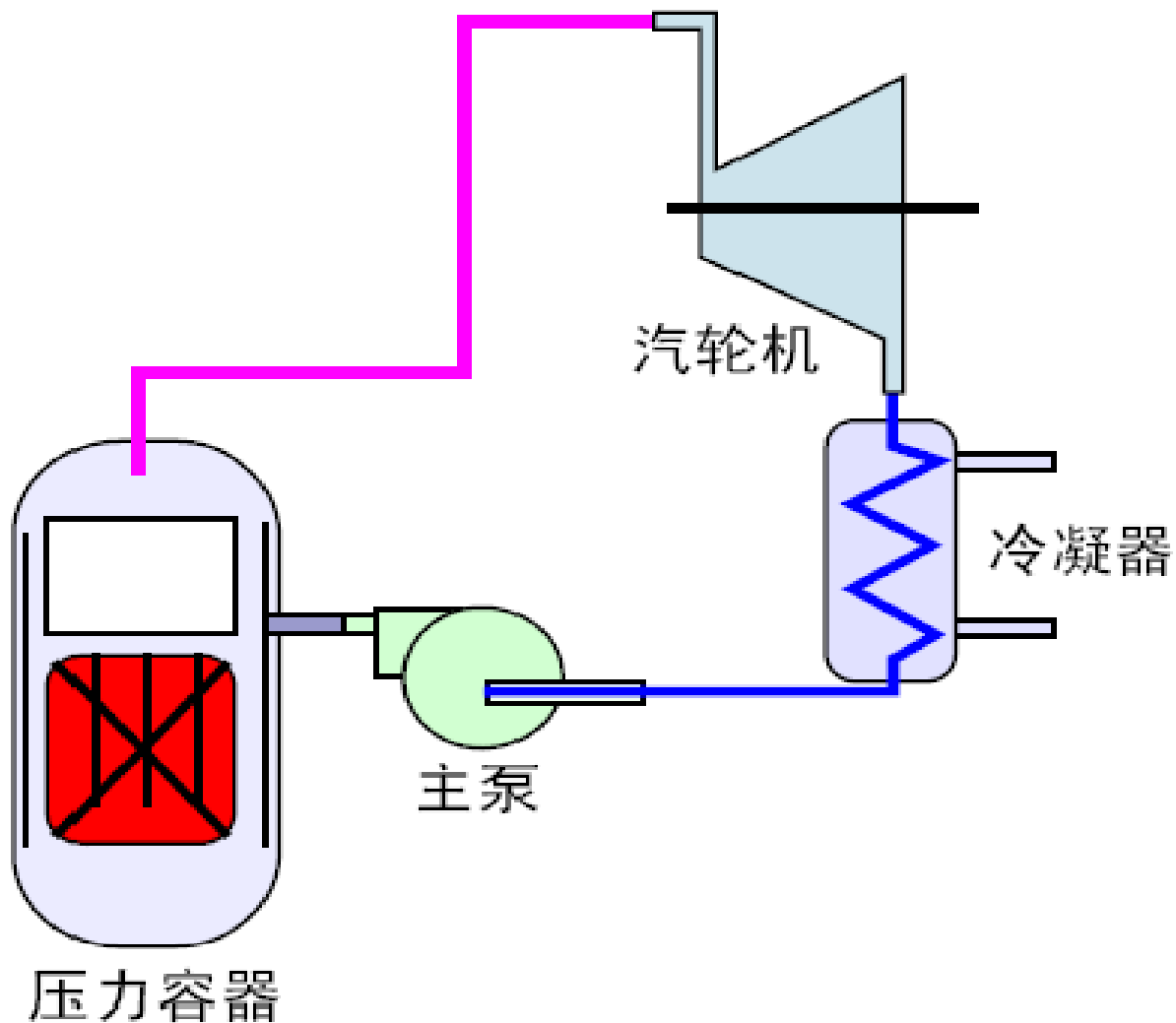
堆型简介——沸水堆

堆本体结构图

热力循环图

循环水系统

燃料组件

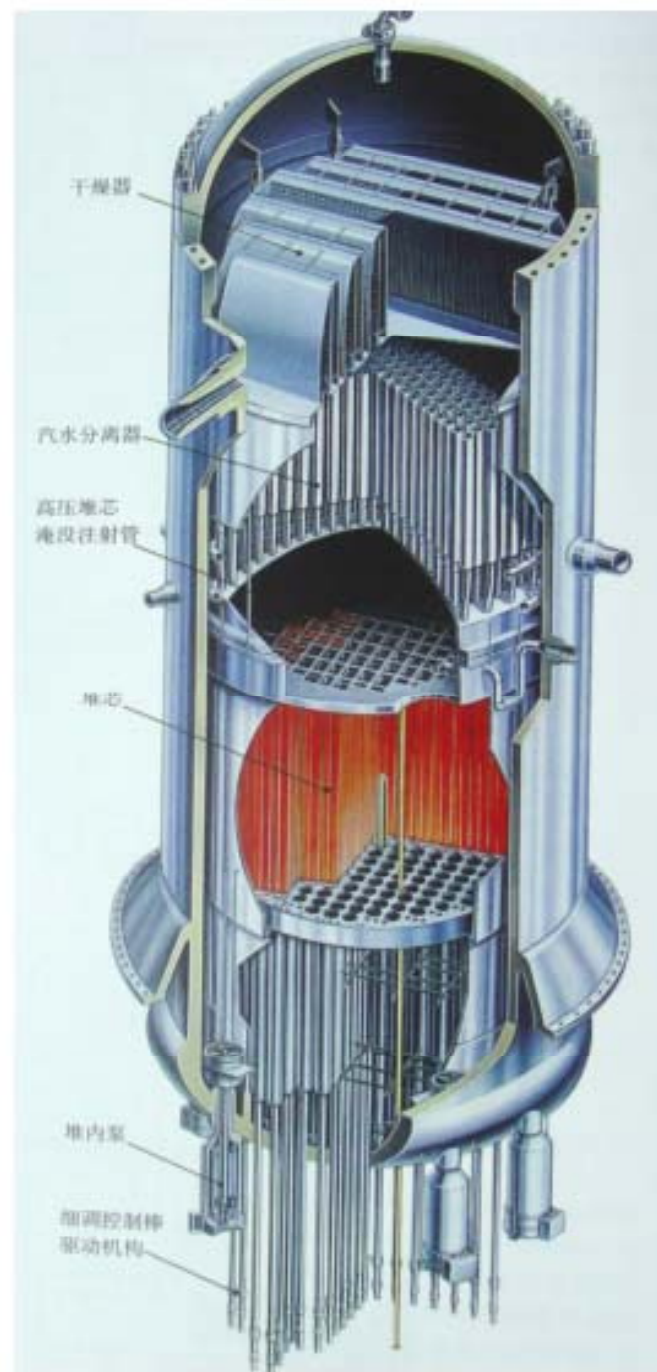




沸水堆特点

- 1 压力低，压力容器厚度可以减薄，但堆内设备多，压力壳尺寸较大。
- 2 沸水堆电站系统简单，回路少，不知紧凑。省去了SG，事故减少，效率提高。
- 3 再循环系统
- 4 运行灵活，控制棒功率控制，再循环流量控制，基本负荷和变动负荷
- 5 燃料比功率校，燃料转载量大（50%），总体投资大
- 6 含有放射性的蒸汽直接推动汽轮机做功，系统维修困难
- 7 燃料元件尺寸大，元件棒间隙也大，堆芯直径大。
- 8 控制棒设计和布置的独特性

2007.9.-2007.12 西安交大

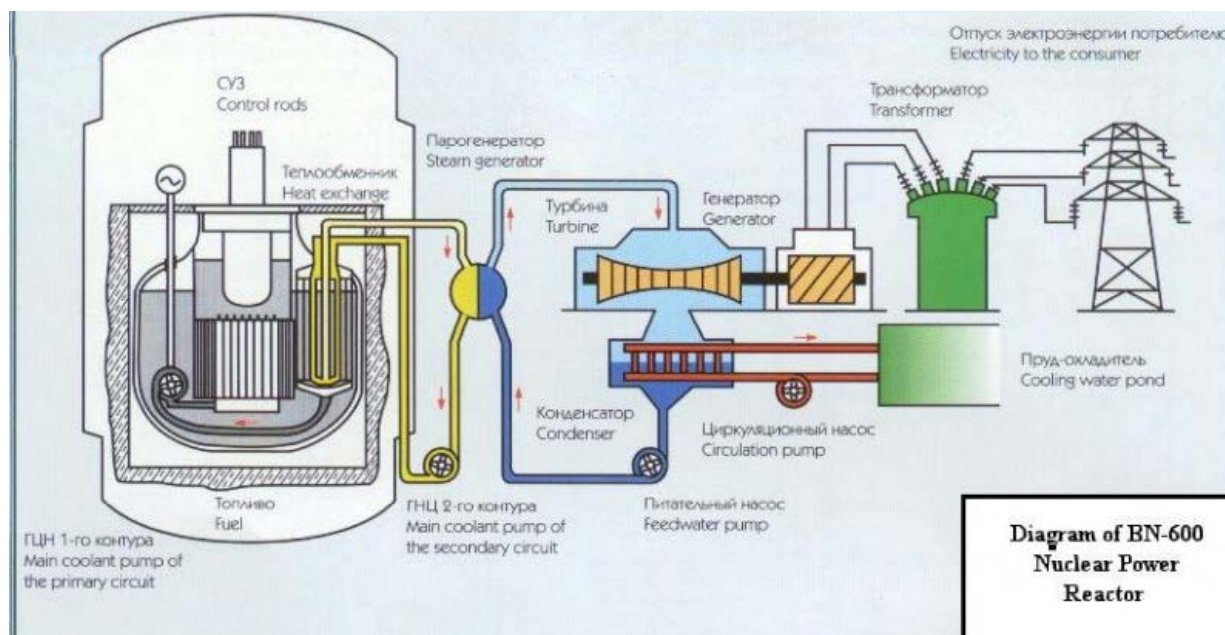




快中子增殖堆 (FBR)

我国目前的核电站中，有两个装机为重水堆型，其余全部为压水堆型。世界各国研究表明：快堆可以解决大规模的压水堆核电站发展带来的核燃料短缺及长寿命核废物处置问题。

快堆是封闭的燃料循环必不可少的环节已经得到世界公认。封闭燃料循环可将铀资源的利用率从单单发展压水堆的1%左右提高到60~70%。





国际快堆的发展

快堆是目前唯一能够实现增殖核燃料的先进堆型。
 国外快堆发展已有50多年历史，1946年建成第一个实验快堆。
 目前世界上已建成了21座快堆。
 其中俄罗斯、法国、日本等国家一直在致力于快堆的发展。
 当前国际上最引人注目的消息是：

印度政府已经批准在英迪拉·甘地原子研究中心建造一座500MWt的原型快堆！

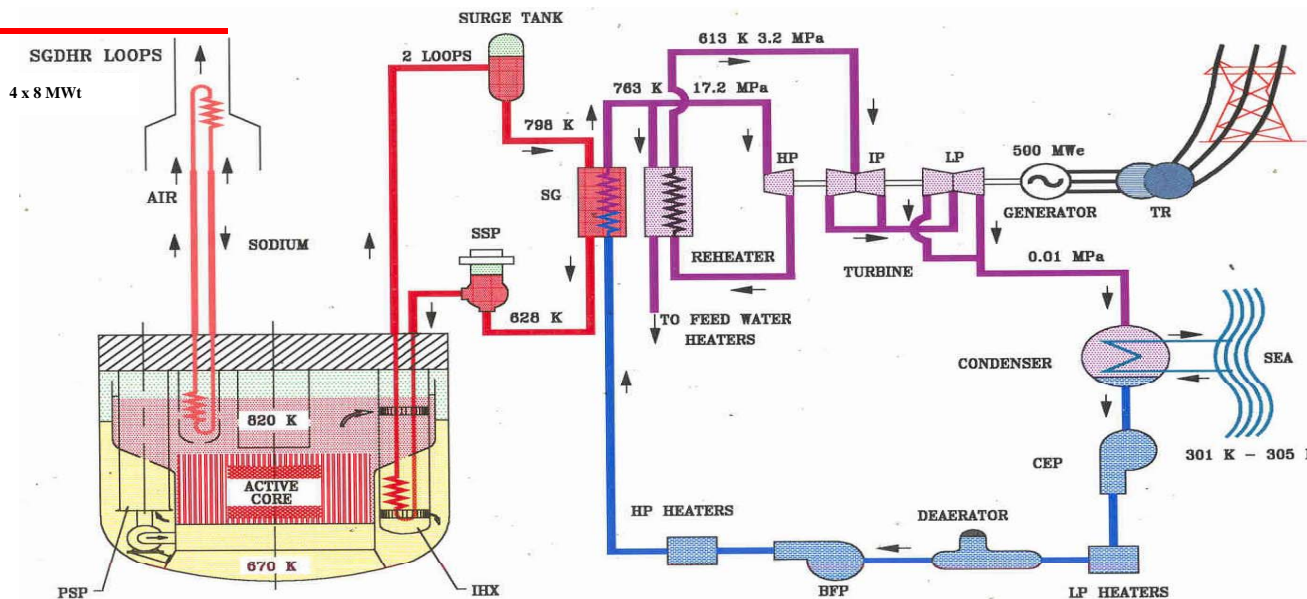


Fig.1 PFBR flow sheet

2007.9. -2007.12 (池式/回路) 西安交大



西安交通大学

核科学与技术学院

核反应堆热工分析

CEFR - 中国原子能科学研究院 (北京/房山区)



2007.9.-2007.12 西安交大

秋穗正



西安交通大学

核科学与技术学院

核反应堆热工分析

重水反应堆 (HWR)

目前国际上已投入运行的重水堆核电站共30余座，总电功率为2335.4万千瓦，约占全世界核电厂总功率的6.5%。



2007.9.-2007.12 西安交大

秋穗正



CANDU的基本结构特点

CANDU的概念: CANada

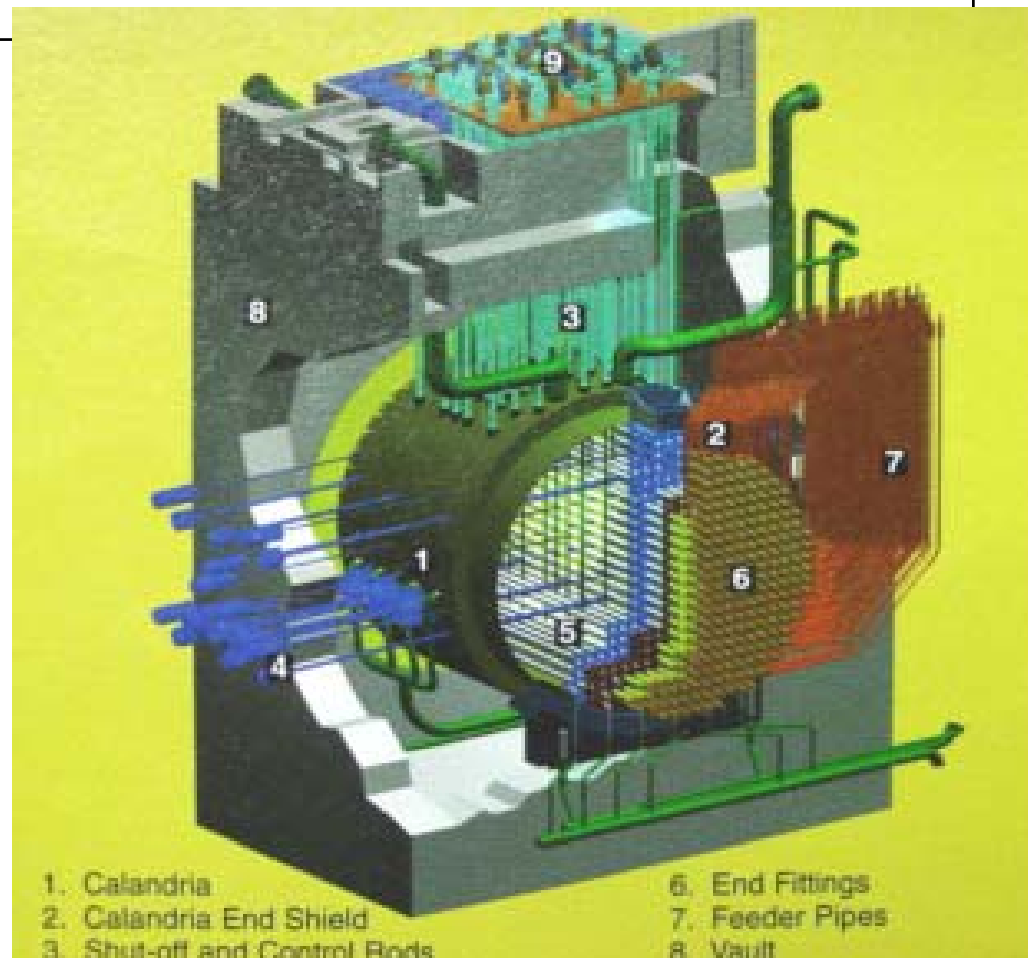
Deuterium Uranium

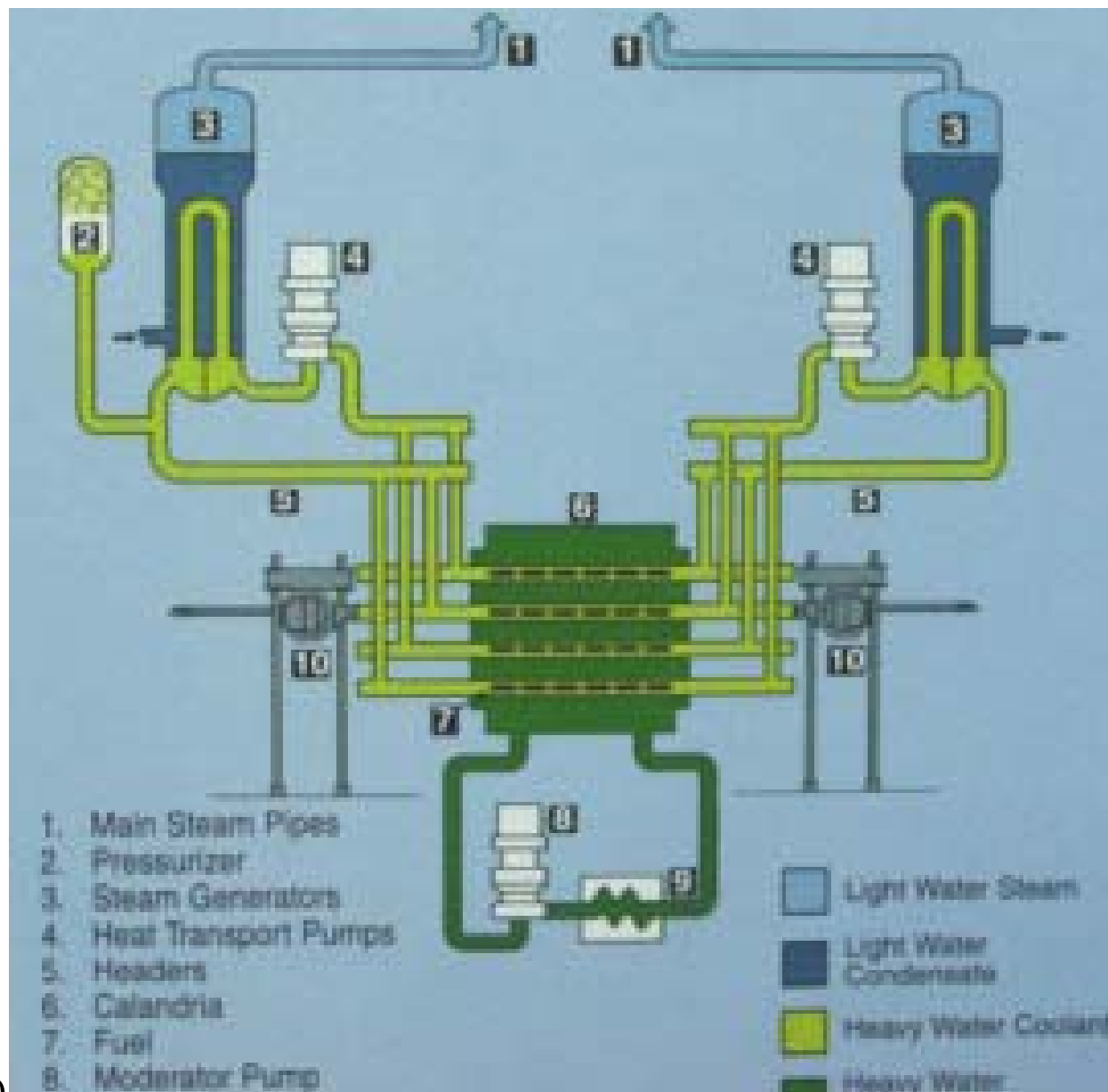
重水堆的特点: 天然铀作燃料, 收到发展中国家青睐

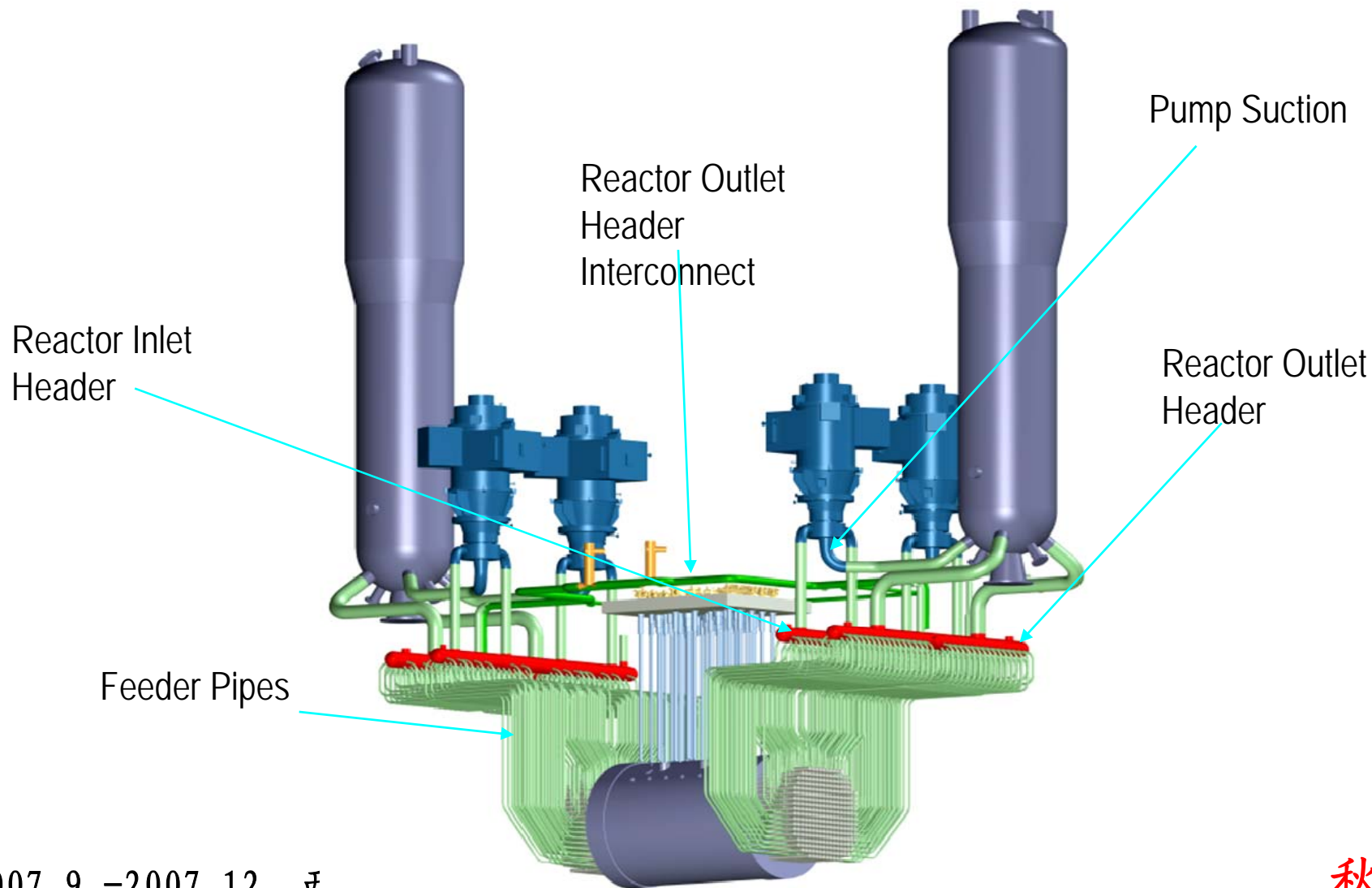
重水做慢化剂, 造价较高

重水堆的分类:

压力管式, 压力壳式





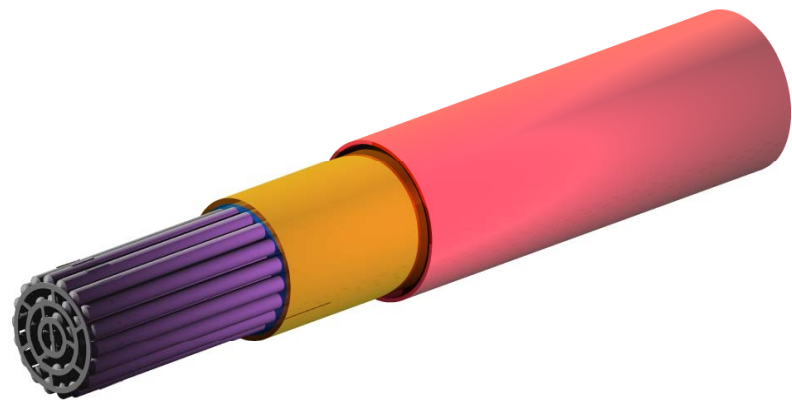
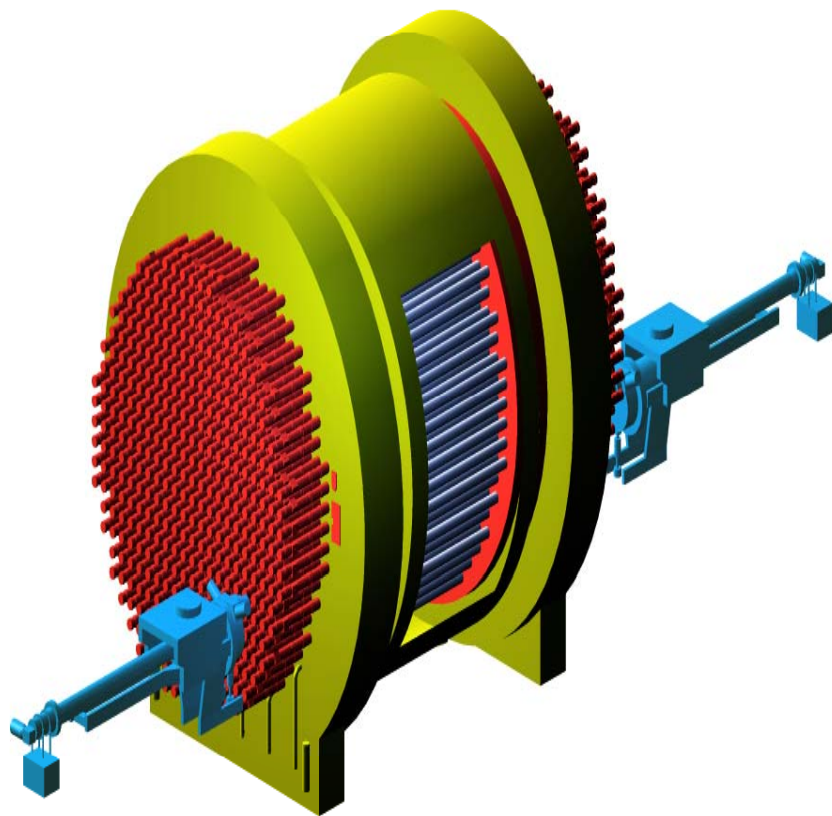




西安交通大学

核科学与技术学院

核反应堆热工分析



2007.9.-2007.12 西安交大

秋穗正

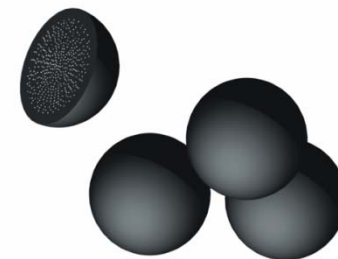
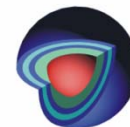


高温堆

模块式高温堆建造周期2—3年，
建造成本和电价：1300美元/千瓦，
3.3美分/度。

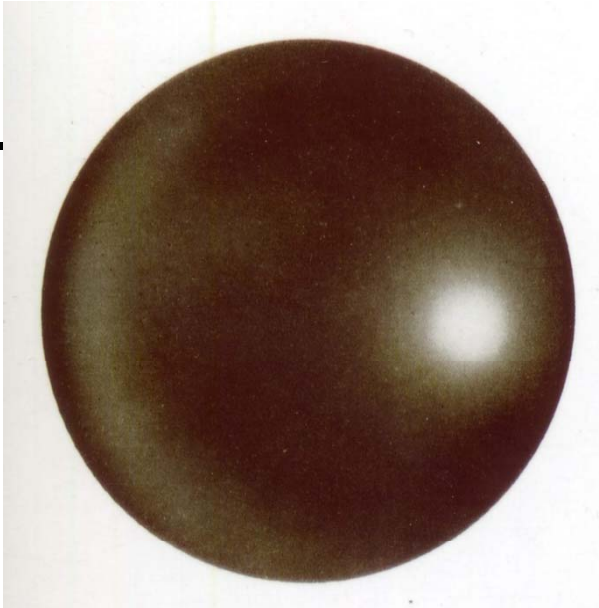
出口950℃，发电效率高，蒸汽循环40%左右，氦气循环48%左右。

高温堆安全、经济好，广泛用途：
开采稠油和炼制石油，
生产各类化工产品，
煤气化、液化，
制氢、甲醇等等。





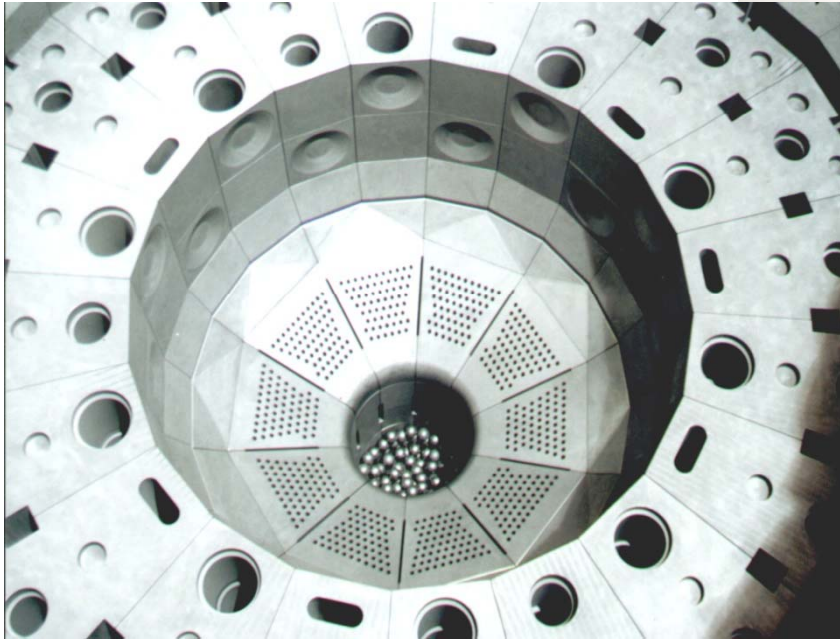
两个模块式高温堆 - 柱状 & 球形



中国 - HTR10



2007



日本 - HTTR30
交大



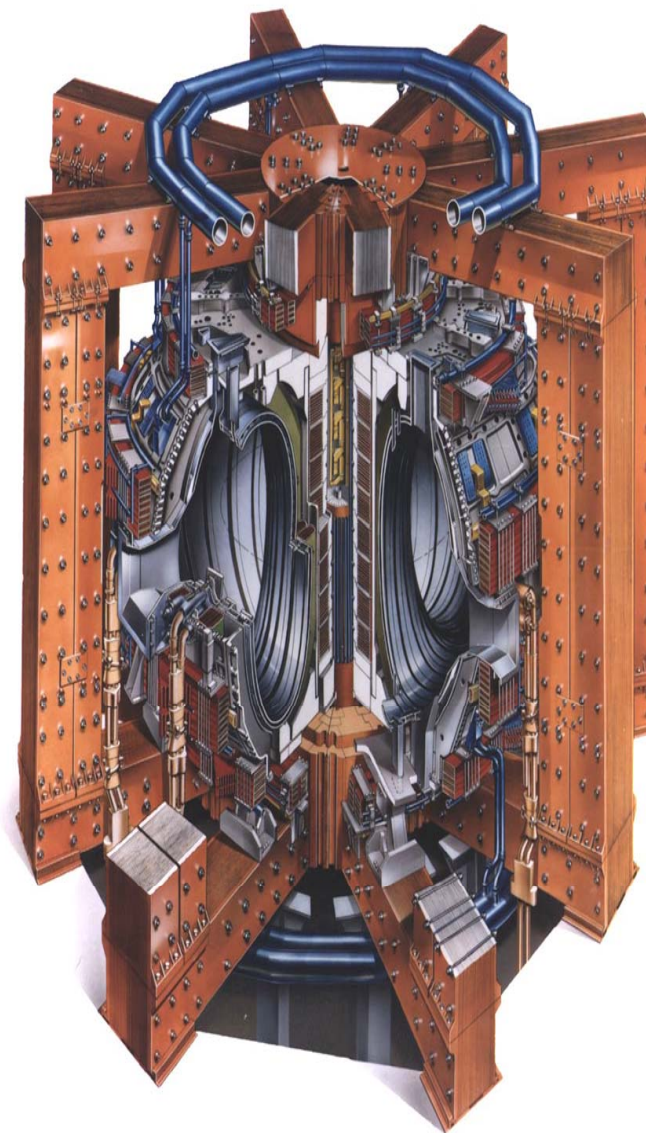
永久能源—核聚变能

● 核聚变能源

核聚变能是资源无限、清洁安全的理想能源，是目前认识到解决人类能源问题的最重要的途径之一。

氘核聚变反应的燃料是氘（从海水中提取）和锂（可产生氘），在地球上藏量极为丰富。反应产物是没有放射性的氦，不存在温室气体排放问题，不污染环境。聚变反应堆本身是安全的，没有核泄露、核辐射等潜在威胁。

因此，核聚变能源被认为是人类未来的永久能源。



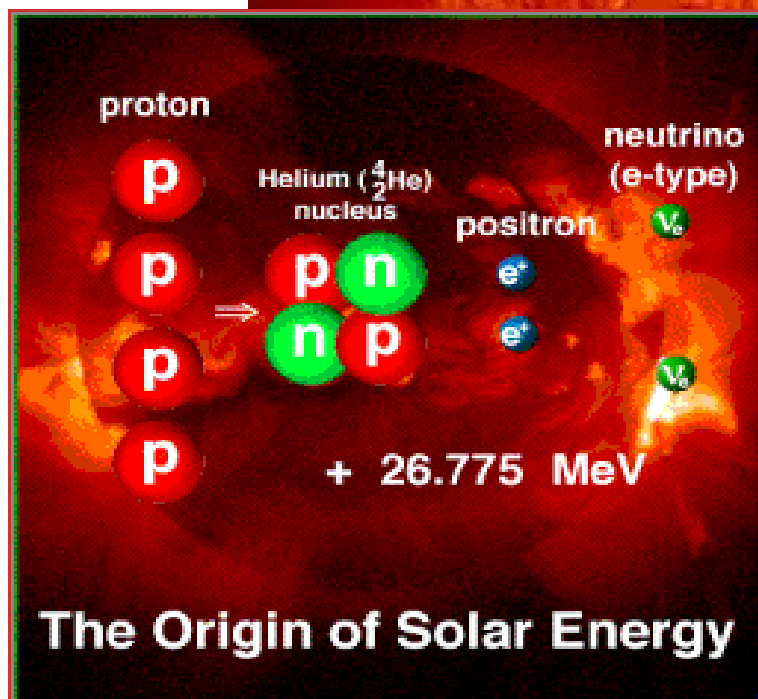
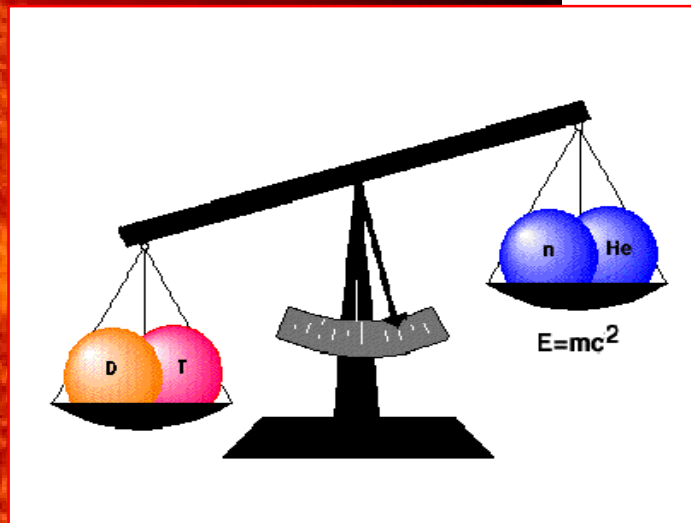


巨大的太阳能

能量来自轻核聚变反应

每秒将6.57亿吨氢聚变成氦

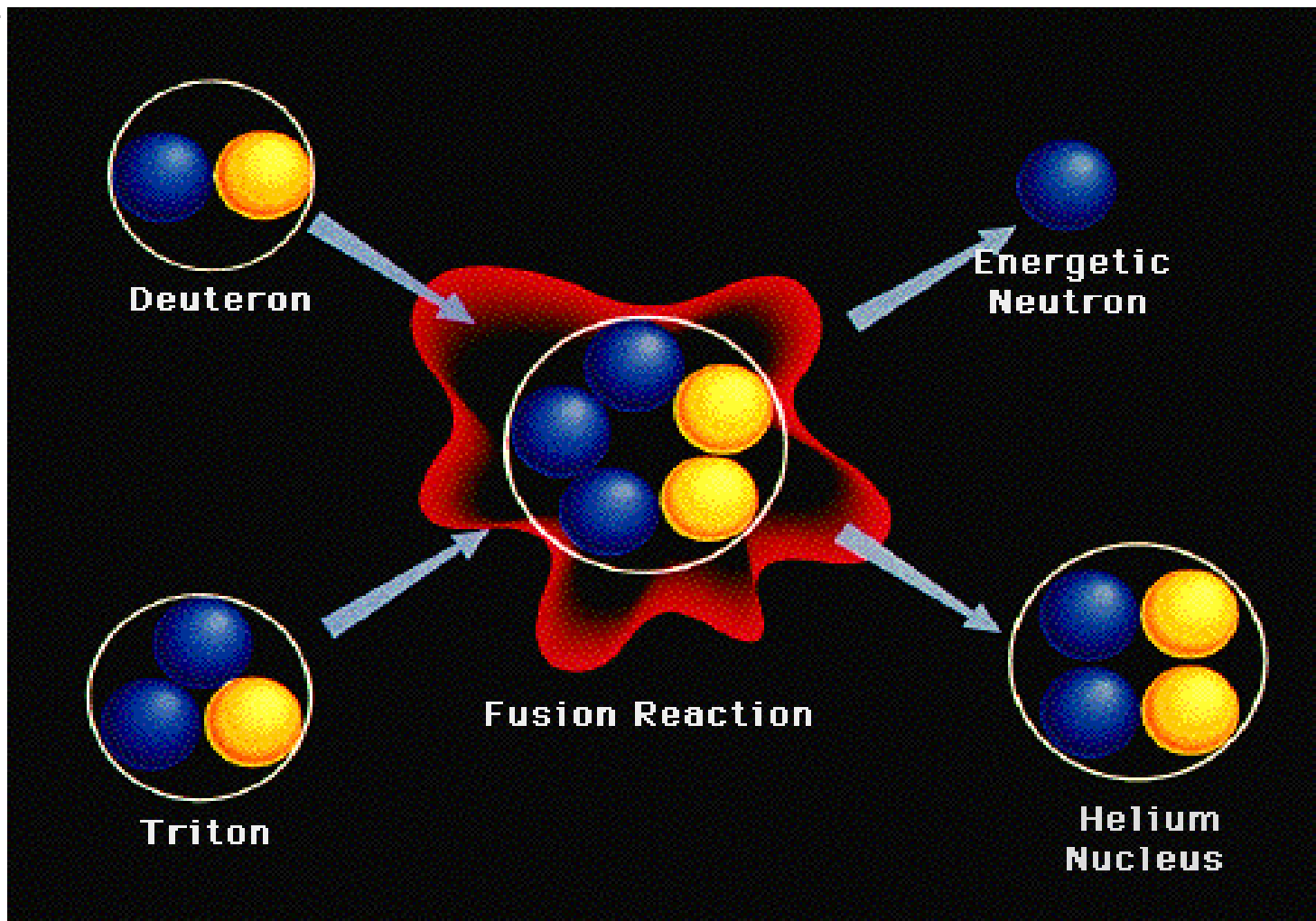
的质量转化为巨大的太阳能



穗正



D-T 核聚变反应





- 一升海水中的氘通过聚变反应可释放出的能量相当于300升汽油的能量

地球上的水中含有约40万吨氘，足以满足人类未来几十亿年对能源的需求

- 聚变能源的开发和应用，被认为是人类科学技术史上所遇到的最具挑战性的特大科学技术工程

300亿美元

50年

100年

2050年

- 磁约束受控核聚变途径的探索

快箍缩、磁镜、仿星器、托卡马克等

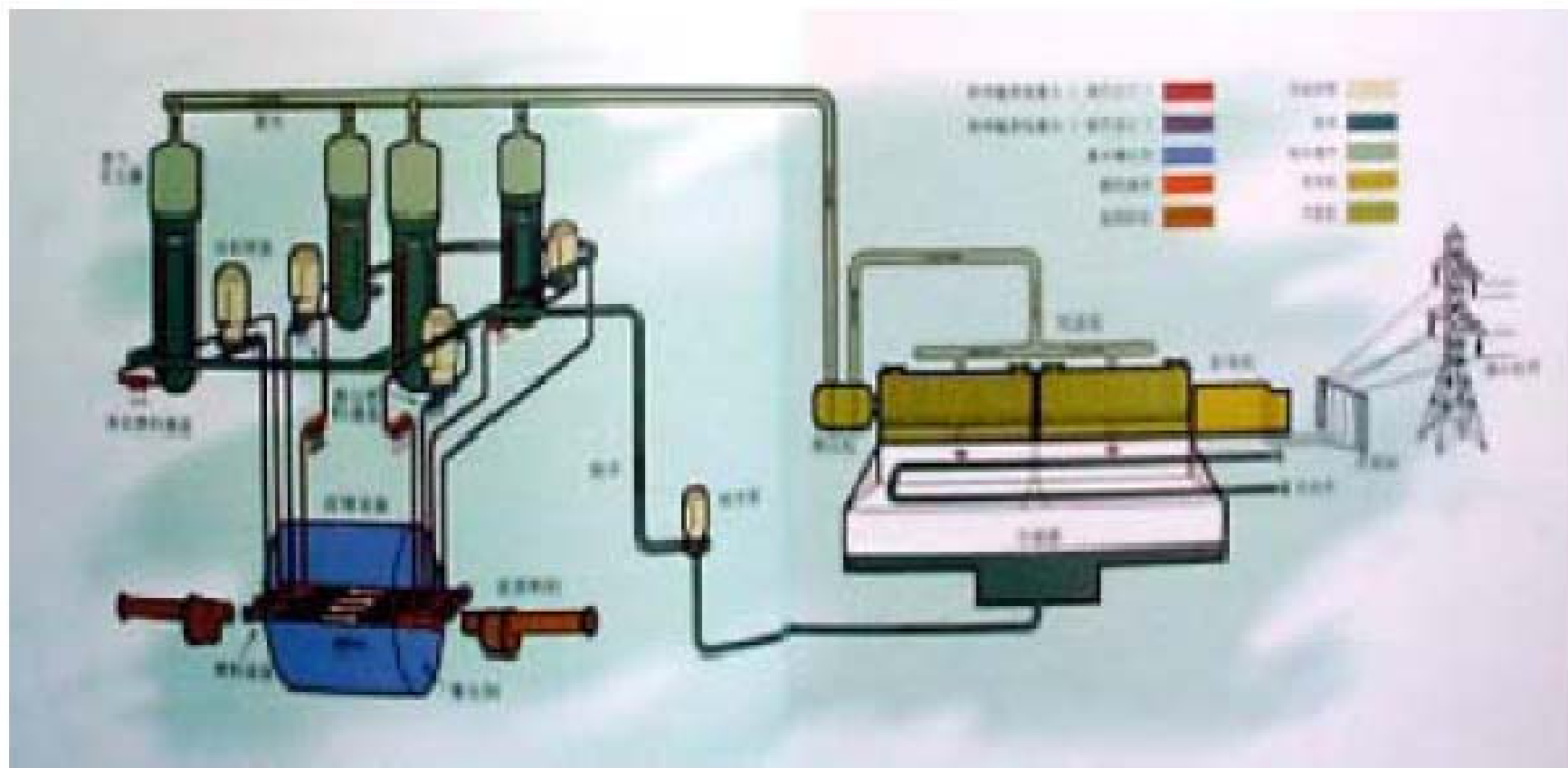
托卡马克——已具备建造实验性聚变反应堆的基本条件



2

堆型简介——重水堆

加拿大压力管式天然铀重水堆CANDU核电站系统图





3

核反应堆热工分析的任务

安全:

稳定运行，能适应瞬态稳态变化，且保证在一般事故工况下堆芯不会破坏，最严重事故工况下也要保证堆芯放射性不泄漏

经济:

降低造价，减少燃料装载量，提高冷却剂温度以及电厂热力循环效率

要求

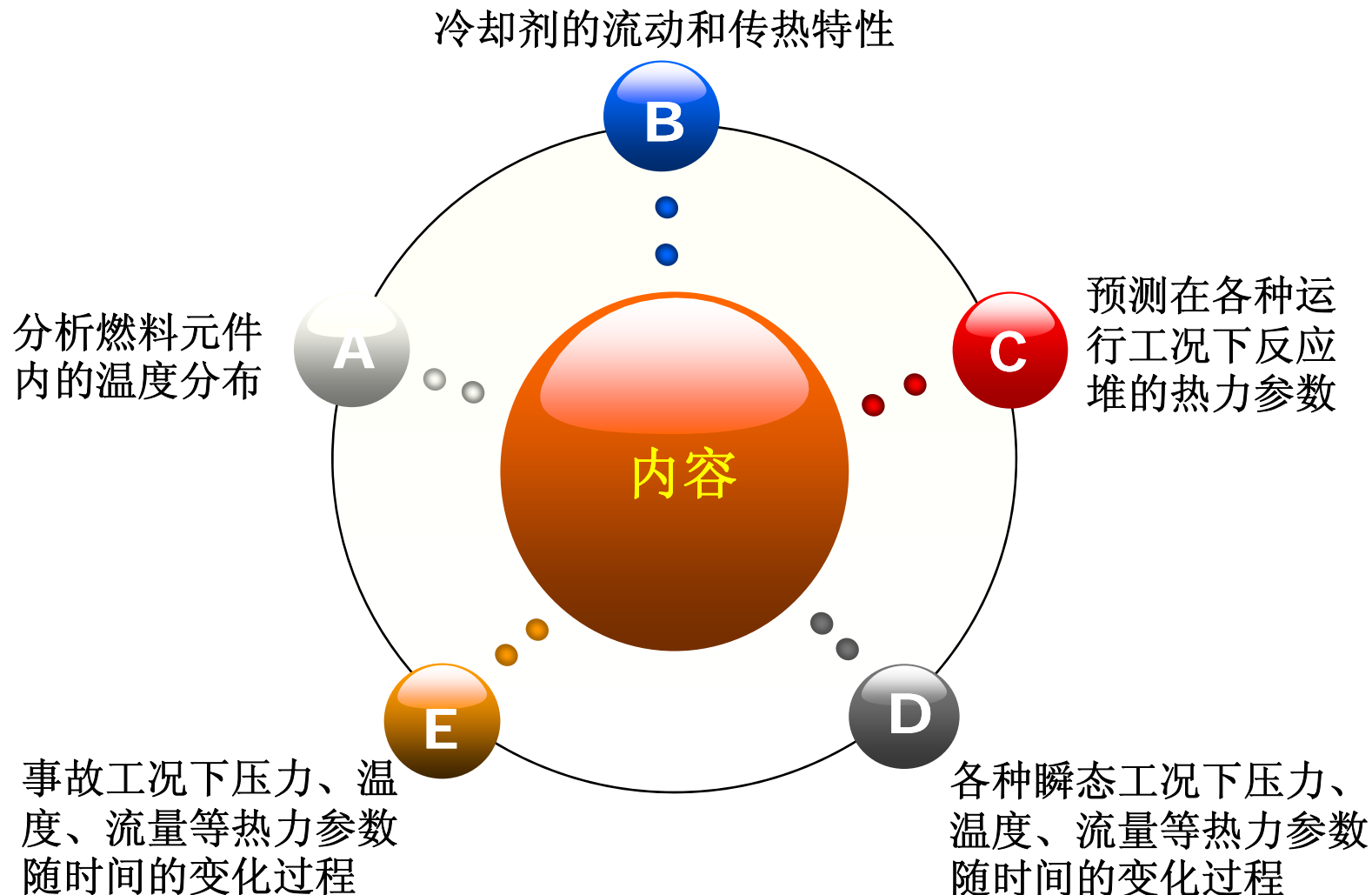
可靠性:

其他特殊要求:

比如一体化堆芯对结构紧凑的要求等



核反应堆热工分析的任务





3

核反应堆热工分析的任务

反应堆热工水力分析

包括

稳态分析

稳态分析主要用于反应堆热工设计，结果是瞬态分析的初始条件

瞬态分析

瞬态分析主要用于反应堆瞬态过程和事故分析以及安全审查

分析方法：反应堆热工分析与水力实验的密切配合