



*INEST · USTC*

# 核能与核安全

报告人：曾勤

**FDS团队**

中国科学院 核能安全技术研究所

中国科学技术大学 核科学技术学院

[www.fds.org.cn](http://www.fds.org.cn)

# 核能与核安全

(原理、安全与环保、发展现状)

- 背景简介
- 核能与清洁能源
- 核辐射与核安全
- 核能与核技术应用



**能源：**

**人类社会赖以生存的基础**

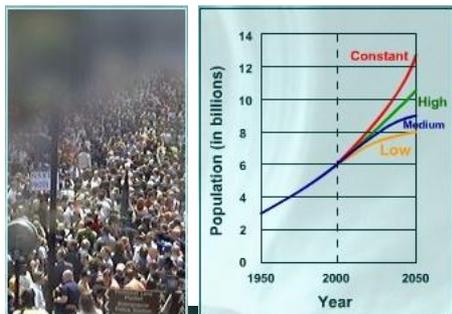
# 世界能源格局

“以化石燃料为主，可再生能源和新能源并存”

- 全球化石能源的枯竭不可避免！

《BP世界能源统计2011》的数据表明，中国占全球能源消费 20.3%，**已经成为世界最大能源消费国。**

✓ 煤炭、石油、天然气等化石能源将在数年后枯竭



联合国预测：到2050年世界人口将超过**90**亿，而全球能源需求的增长速度是人口增长速度的两倍。



联合国规划署评估报告：化石能源的使用会导致二氧化碳排放过量，到2100年全球平均气温会比现在上升**4.3°C**，将引起南北极冰川融化、海平面上升**1.4米**，从而淹没大片经济发达的沿海地区，还可能引起其他一系列严重环境灾难。

# 可再生能源和新能源



## 生物能:

- 能流密度低。
- 大规模使用需要土地资源。
- 单位土地面积的有机物能量偏低。



## 水能:

- 增长的速度跟不上能耗增长速度。
- 对生态环境存在着破坏性的影响。



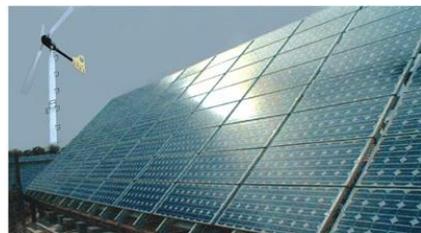
## 风能:

- 能流密度低。
- 很难达到工业化实用的规模。
- 受地域的限制, 一般多建在山区和人口稀少的边远地区。



## 地热能:

- 受地域限制, 通常位于地震带附近。
- 开发难度大, 难以达到工业化应用规模。



## 太阳能:

- 能流密度低。
- 受天气、季节变化影响。
- 造价昂贵, 难以大规模使用。



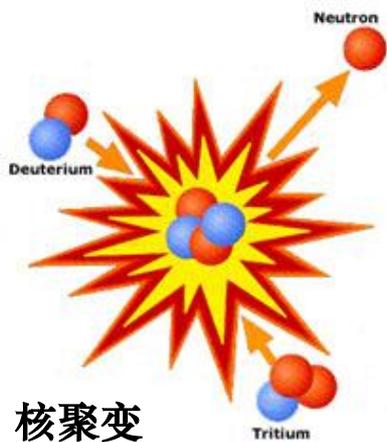
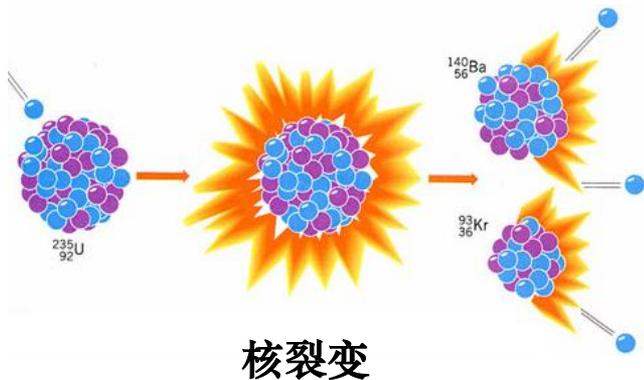
## 潮汐能:

- 受潮汐涨落规律的限制。
- 能量不稳定。
- 投资大, 效率低。

# 核能—解决人类能源危机根本途径

在众多可替代能源中，只有核能才可能被人类大规模使用。核能包括核裂变能和核聚变能。未来核能也将逐步取代化石能源成为人类的主要能源。

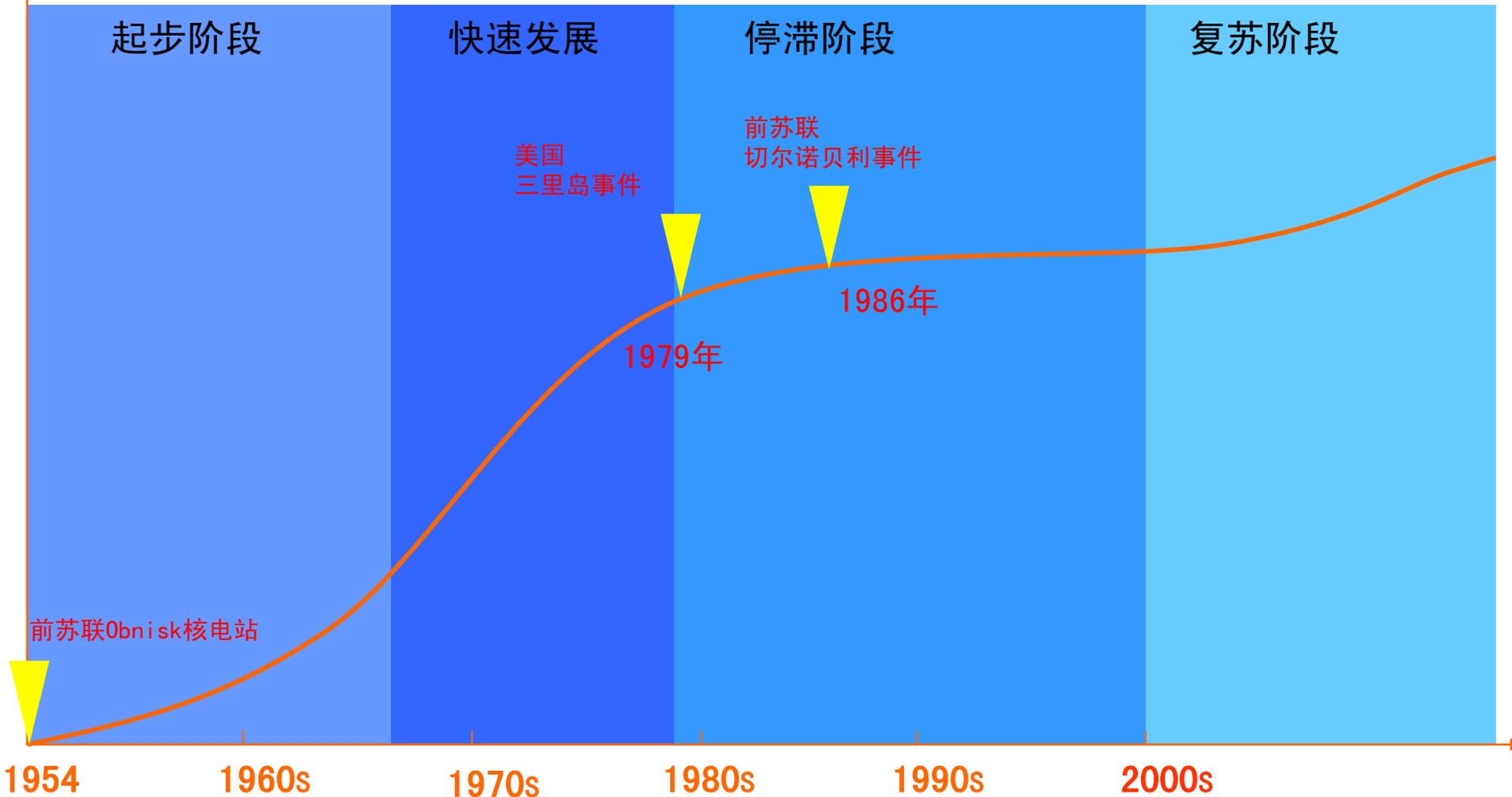
- 由于能源危机迫在眉睫，第一波核反应堆建造高峰将出现在2015年-2020年之间



世界核电站分布图

# 世界核电发展历程

核电发展



# 核能与核安全

(原理、安全与环保、发展现状)

- 背景简介
- 核能与清洁能源
- 核能与核技术应用
- 核辐射与核安全

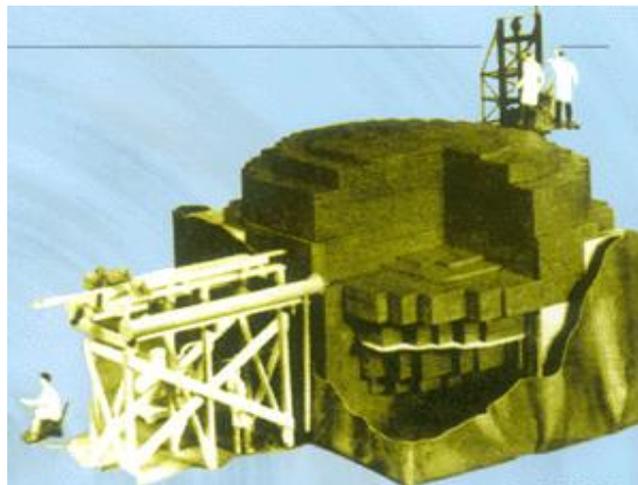
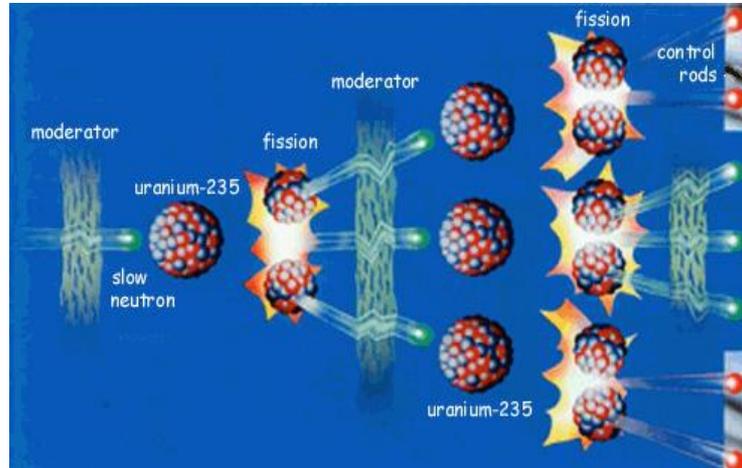
# 什么是核裂变

- 核裂变原理图

$\sim 10^{20}$  次/sec

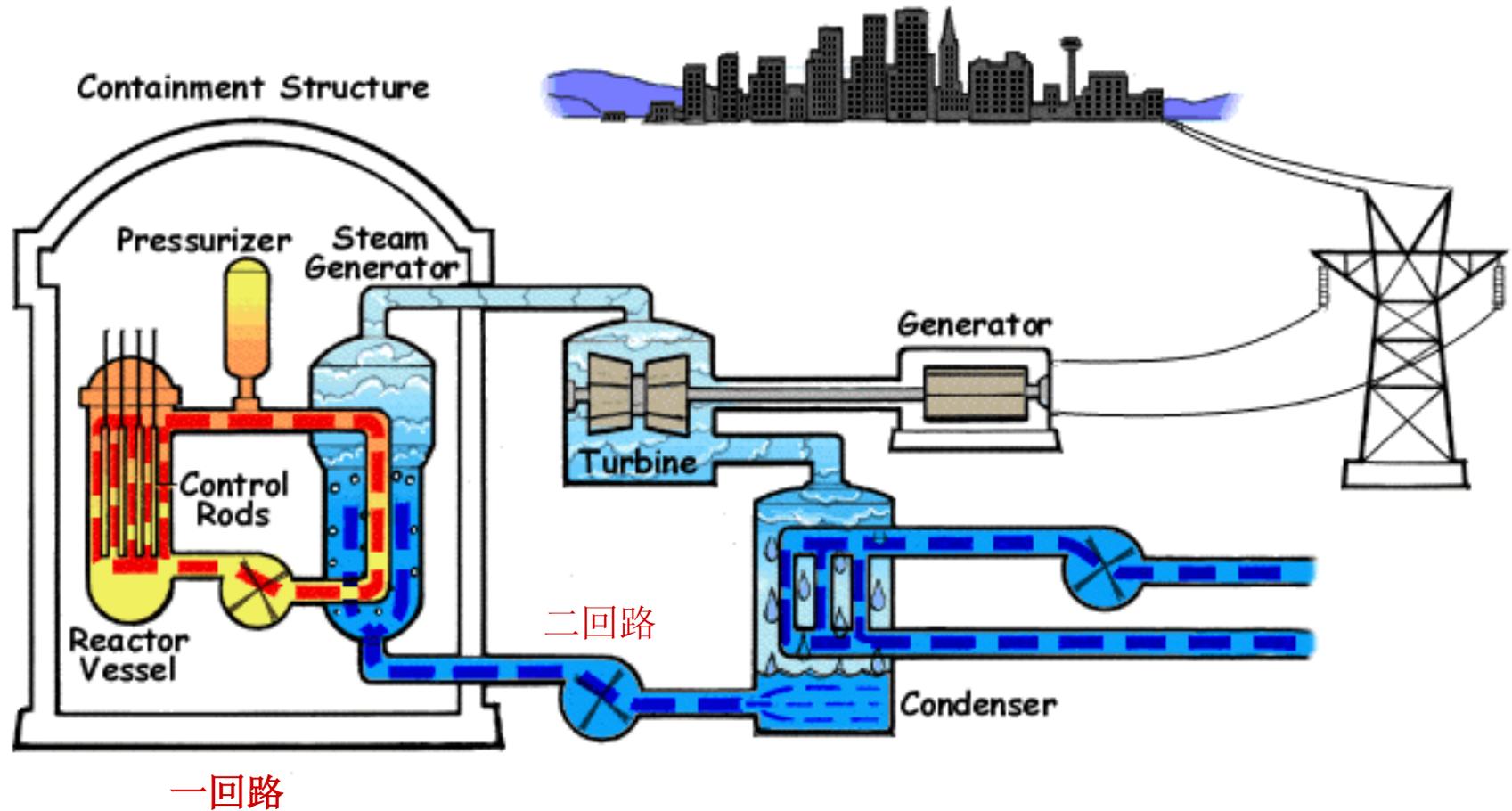


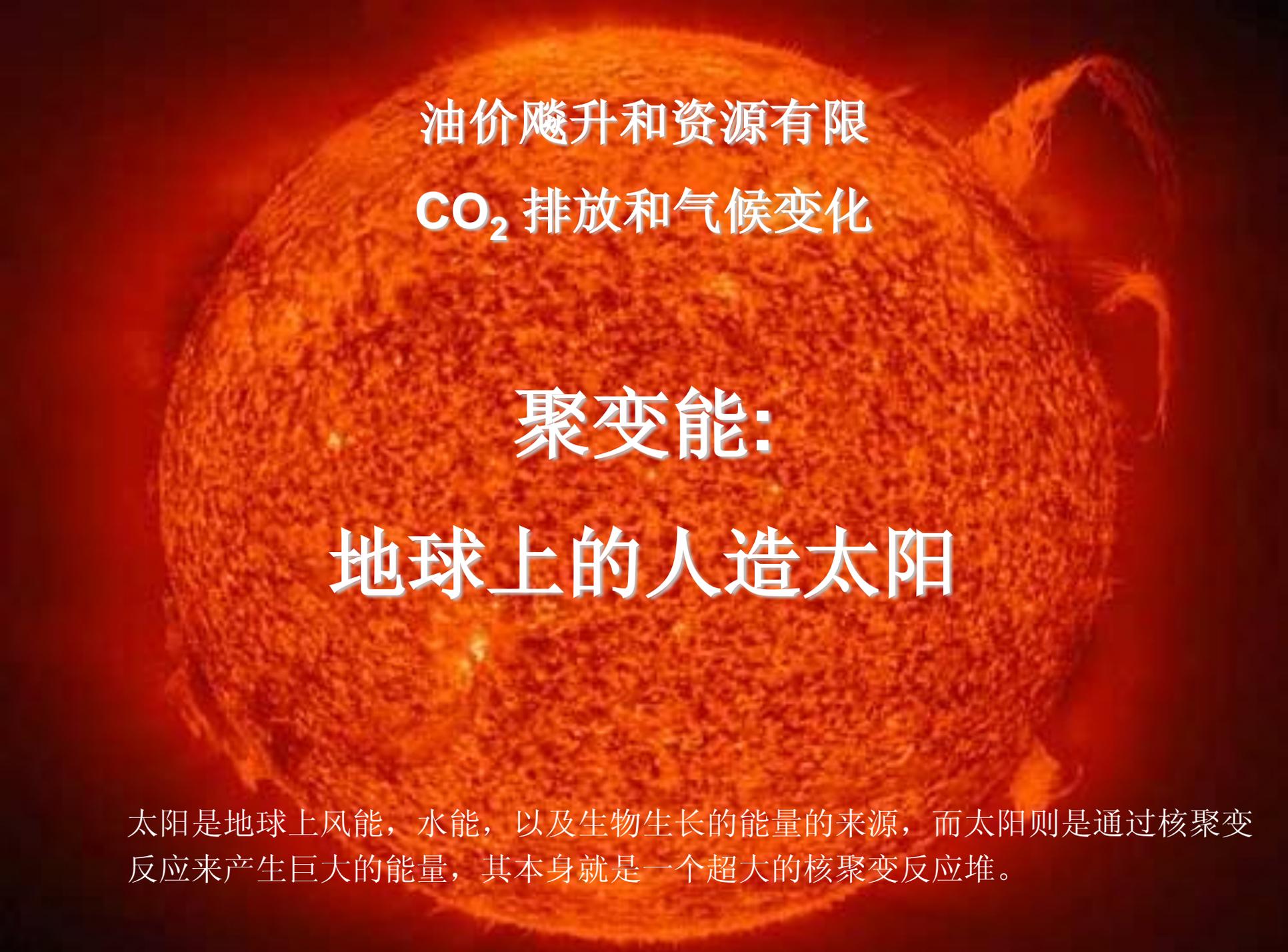
利用核裂变能的原子弹



1942年，费米在美国芝加哥大学建成了世界上第一座自持的链式反应装置，从此开辟了核能利用的新纪元。

# 裂变核电站



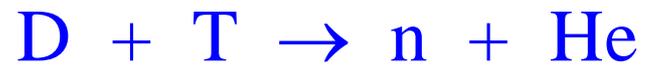


油价飙升和资源有限  
CO<sub>2</sub> 排放和气候变化

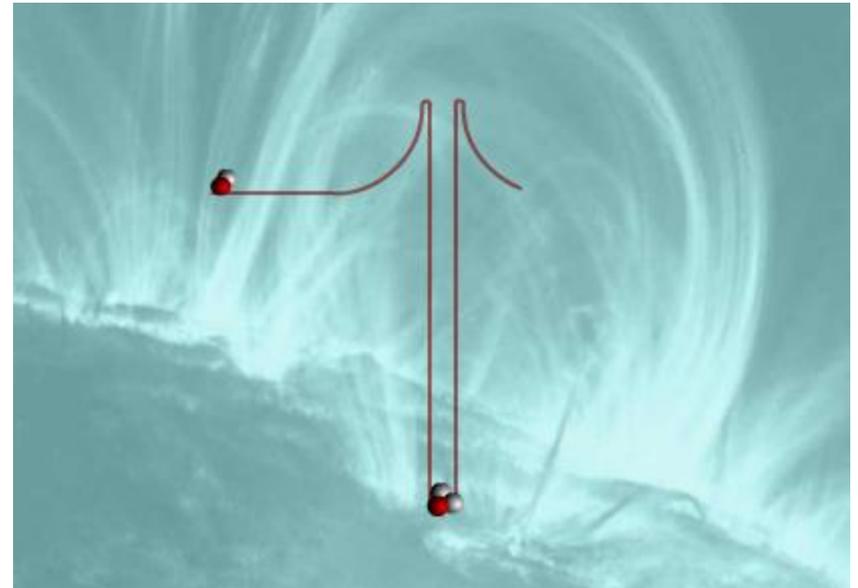
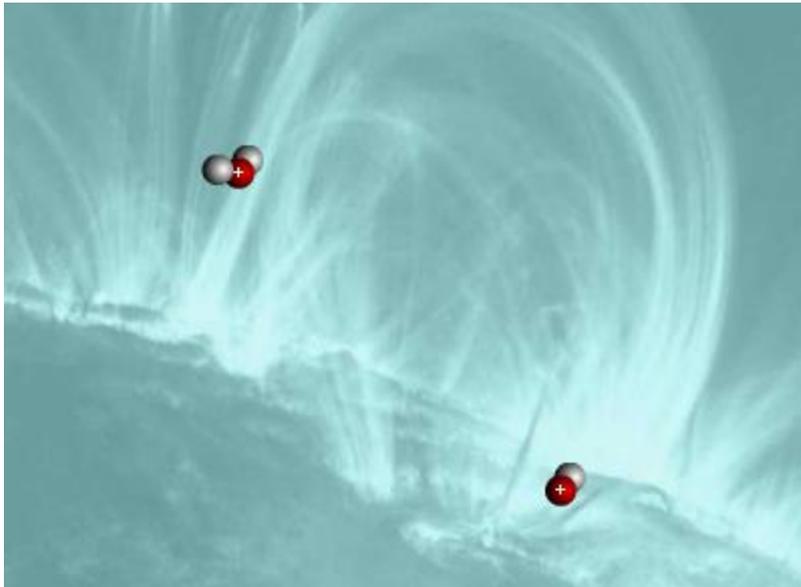
# 聚变能： 地球上的人造太阳

太阳是地球上风能，水能，以及生物生长的能量的来源，而太阳则是通过核聚变反应来产生巨大的能量，其本身就是一个超大的核聚变反应堆。

# 核聚变原理



14MeV 3.6MeV



氘氚聚变需要约2亿度的温度

# 聚变反应装置

聚变反应堆：可控约束聚变反应，有效利用聚变能源的装置

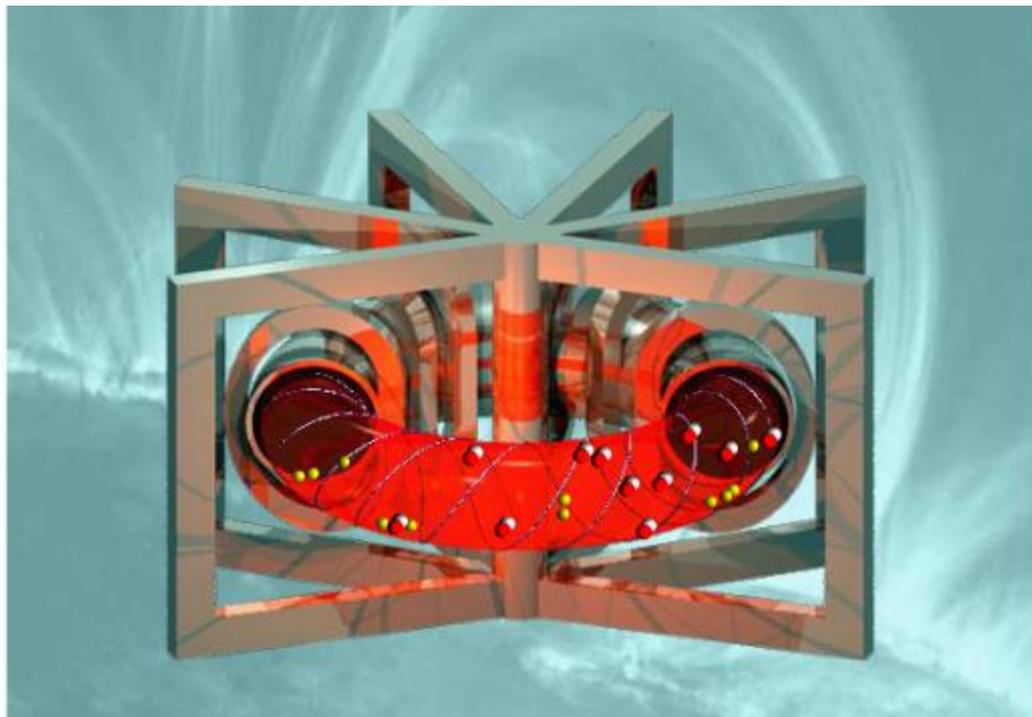
## ◆ 聚变装置分类：

### 1、磁约束聚变装置：

- 托卡马克
- 仿星器
- 磁镜
- 反向场箍缩
- 球形环

### 2、惯性约束聚变装置：

- 激光约束
- 粒子束约束



磁约束聚变实验装置：托卡马克

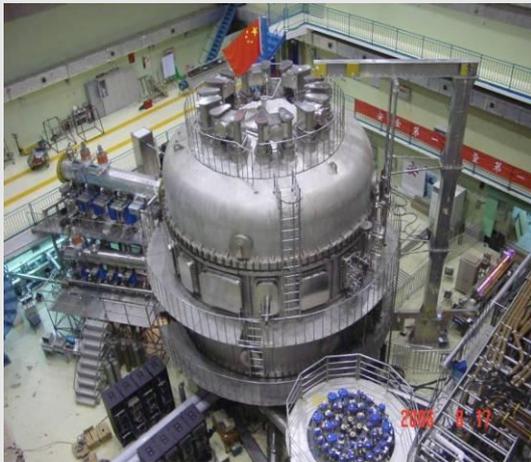
# 国家大科学工程：全超导托卡马克EAST

(世界第一台全超导托卡马克核聚变实验装置)

1998-2006

2006

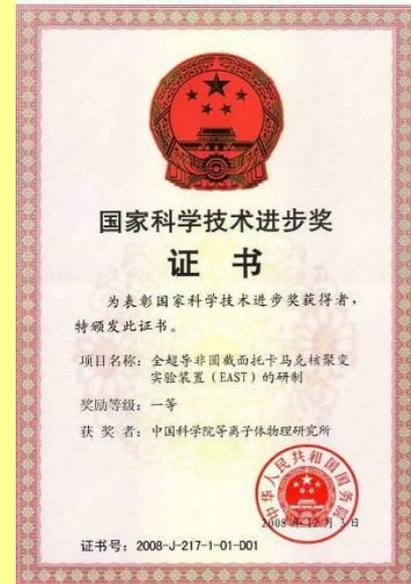
2008



立项：1998年  
总投资：~3+2亿



建成后首次放电成功



国家科技进步一等奖



# 中国最大的国际合作项目

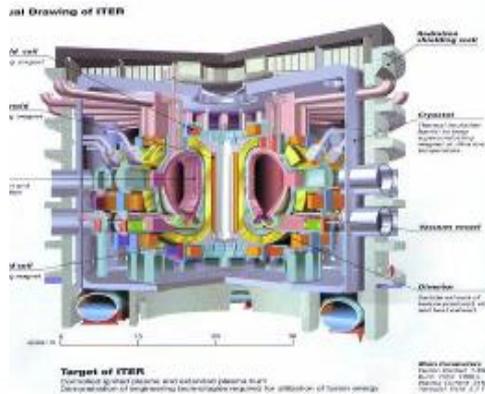
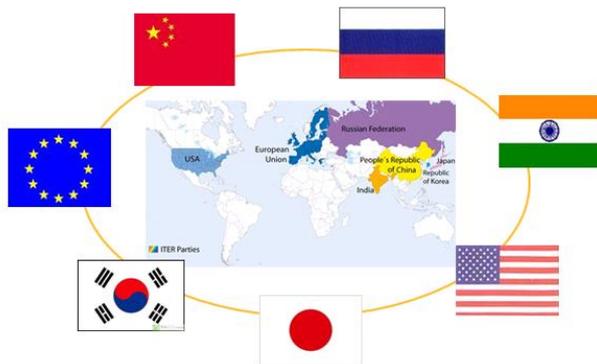
## ITER: 国际热核聚变实验堆

- 2006年11月，科技部徐冠华部长代表中国政府宣布加入 ITER 计划
- 总投资 100亿 欧元  
(欧盟 50% + 其他六方 50%)
- 中国: ~ 50亿 + 50亿 人民币
- 合肥物质院: 承担 >75% 的中方任务



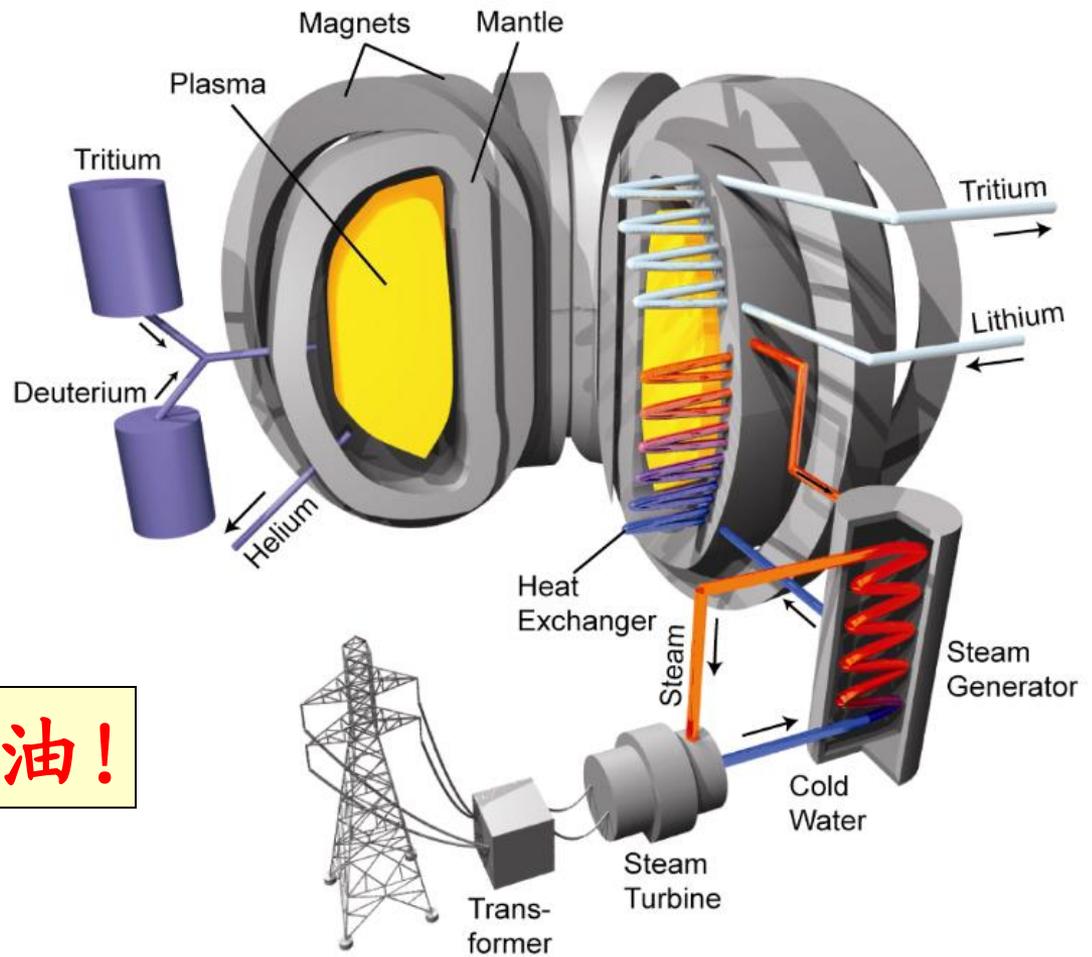
### 中国承担的主要任务

- 屏蔽包层
- 实验包层
- 超导磁体
- 高压变电站
- 真空泵和加料
- 远程操控
- 核分析



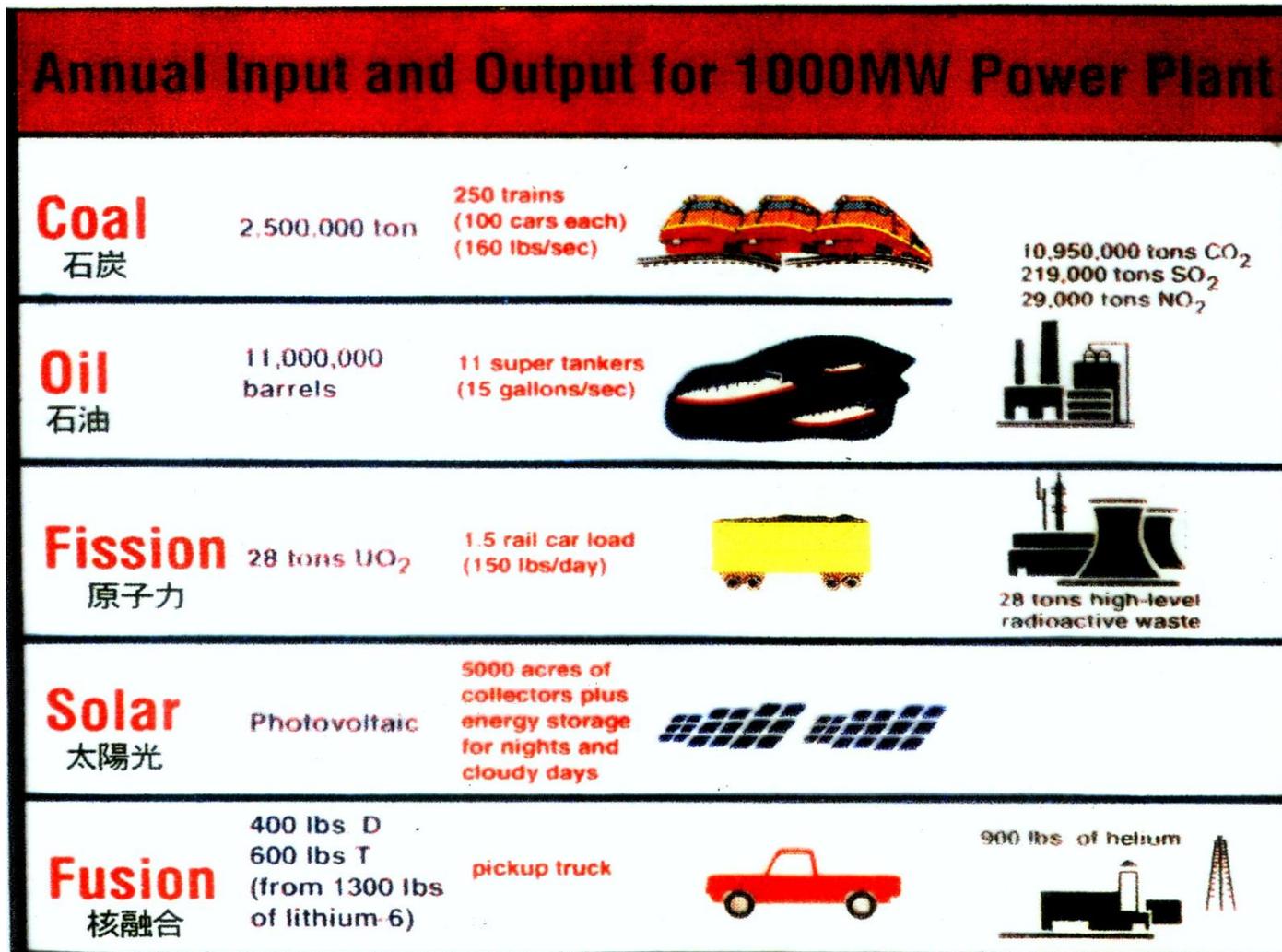
# 聚变能 — 未来清洁、安全和永久性能源

- 几乎无放射性废物
- 运行安全可靠
  - a. 固有安全性
  - b. 无超临界事故等
  - c. 余热安全
- 燃料丰富而且其价格低廉



1升海水=300升汽油!

# 核能 — “清洁” 能源



# 核能与核安全

(原理、安全与环保、发展现状)

- 背景简介
- 核能与清洁能源
- 核能与核技术应用
- 核辐射与核安全

# 核能与核技术应用领域

## 1、工业上的应用

检测、放射性废物的利用、辐射技术的应用、改进材料性能

## 2、农业中的应用

育种、监测农药无公害、食品保鲜、辐照灭菌

## 3、医学上的应用

医学跟踪、**放射治疗**、放射性消毒

## 4、考古辨伪侦察

碳-14考古年代、微量元素的定性及定量测定  
高超的侦破技术

## 5、保护环境和生命安全

分析环境污染情况、对火灾及毒气报警、同位素避雷针



集装箱检测系统



辐射育种后的南瓜

**核能中间技术 → 转化应用 ?**

# 肿瘤治疗的常用有效的三大手段

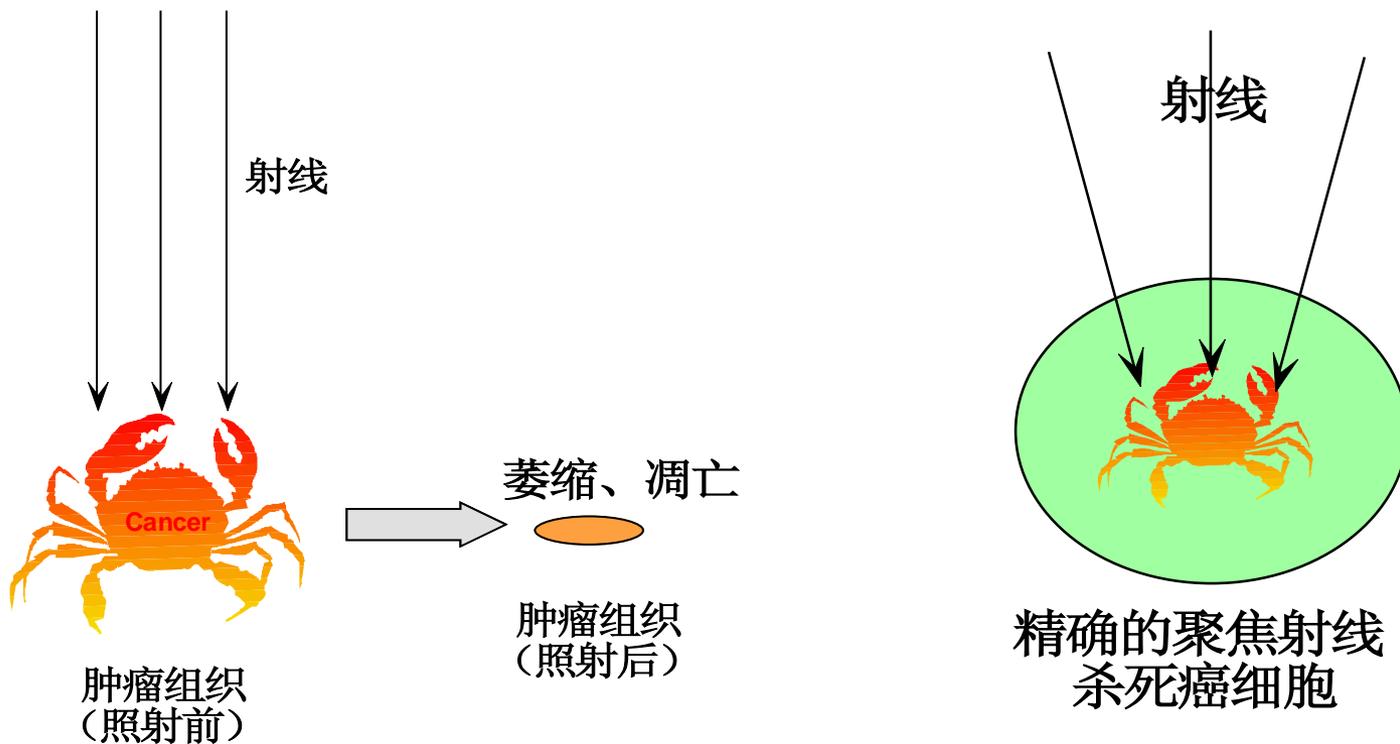
※红色为不利因素；蓝色为有利因素

	放疗	化疗	手术
全身反应	小	大	大
治疗对患者要求	不高	较高	高
组织器官功能	保留	保留	不保留
治疗疗程/次数	一疗程	多疗程	一次
治疗形式	局部	全身	局部



至少70%肿瘤病人需要接受放疗!

# 放疗基本原理



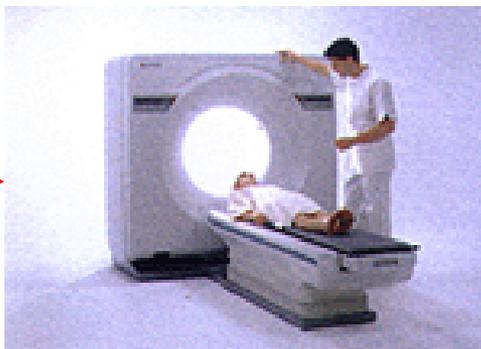
❖ 癌细胞相对于正常细胞更容易被射线杀死

❖ 射线精确地聚焦在肿瘤部位，杀死肿瘤细胞

# 放疗过程



初步接诊



医学影像数据获取



会诊确认



实际治疗/剂量验证



模拟定位



治疗计划制定

# 核能与核安全

(原理、安全与环保、发展现状)

- 背景简介
- 核能与清洁能源
- 核能与核技术应用
- 核辐射与核安全

## 担忧之一：核爆炸（像原子弹、氢弹）？

1、1945年8月，美军先后在日本广岛、长崎投下两颗原子弹。

2、受害者伤亡人数（1990年日本厚生省统计）

到1985年止，受原子弹袭击者，包括非原子弹爆炸引起的自然和一般病理死亡人数在内，40年累积死亡人数：广岛201990人，长崎93966人。

3、爆炸之后，幸存者饱受辐射后遗症的折磨（癌症、白血病和皮肤灼伤）

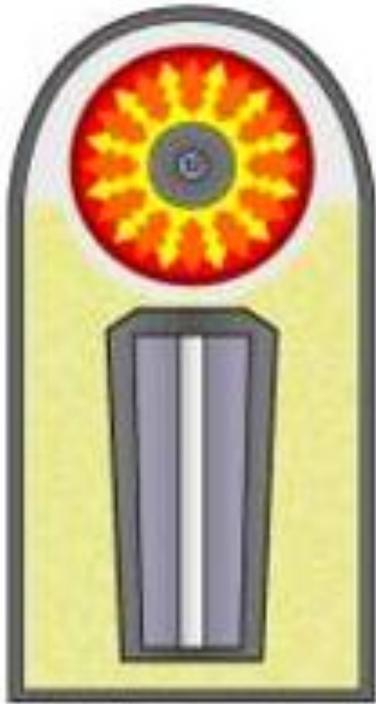


原子弹爆炸后的广岛市区

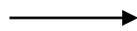


爆炸幸存者

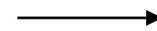
# 氢弹爆炸的条件比原子弹更为苛刻



化学爆炸



原子弹爆炸



氢弹爆炸

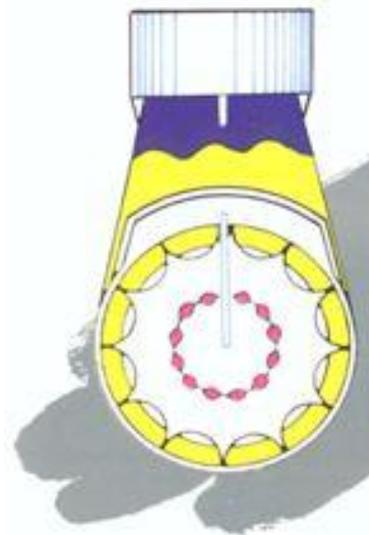
## 核电站不会像原子弹那样爆炸!



**核**燃料中的有效成分是铀—235，铀—235 同样也是原子弹中的核炸药，那么核电站会不会像原子弹那样爆炸呢？不必担心，绝没有这种可能性！

### ■ “啤酒烧不着”

核燃料中铀—235的含量约为3%，而核炸药中铀—235的含量高达90%以上。核燃料引不起核爆炸，正像啤酒和白酒都含有酒精，白酒因酒精含量高可以点燃，而啤酒因酒精含量低却不能点燃一样。



### ■ 发生核爆炸并不简单

原子弹同样是一项高技术产品，形成核爆炸有非常严格的条件。原子弹必须用高浓度的铀—235或钚—239作核燃料，以一套精密复杂的系统引爆高能烈性炸药，利用爆炸力在瞬间精确地改变核装料的形状或位置，才能形成不可控的链式裂变反应，发生核爆炸。这种苛刻的条件，在核电站里是不可能有的。

## 担忧之二：核辐射？

根据现行的GB 18871-2002《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》：

(1) 工作人员：平均每人每年应低于**20mSv**；

(2) 公众：平均每人每年应低于**1mSv**；

外照射防护的一般方法：

- (1) 减少受照射时间
- (2) 增大与辐射源的距离
- (3) 设置屏蔽

内照射防护的一般方法：

- (1) 包容、隔离
- (2) 净化、稀释
- (3) 遵守规章制度、做好个人防护



## 日本地震导致核电站放射性物质泄露， 未对环境造成影响

- 2007年7月16日上午日本中部地区新潟县发生了里氏6.8级强烈地震。
- 8人死亡，800多人受伤，近千栋房屋倒塌。
- 运行状态的机组在地震发生后自动紧急停堆。
- 震动大幅超过机器和设施的抗震设计标准，导致刈(yi)羽核电站发生放射性物质泄漏事故。
- 但放射性物质含量低于日本法律规定限值的10亿分之一，未对环境造成影响。



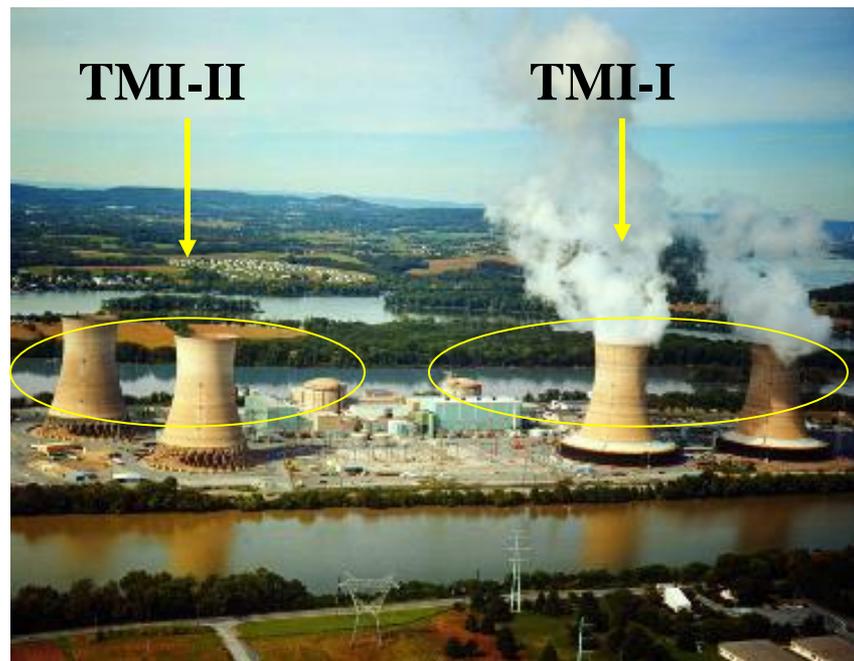
地震后核电站周围状况

## 三里岛核电事故

- 1979年3月29日,三里岛(TMI-II)发生了美国历史上最严重的泄漏事故
- 事故发生过程
  - 由于蒸汽发生器的冷却丧失使得一回路的温度和压力上升
  - 卸压阀未能回座,造成失水事故
  - 工作人员判断失误,最终导致堆芯融化

### 事故后果

- 安全设施自动投入运行,反应堆安全屏障起作用
- 无人员伤亡,3人受到了略高于半年的容许剂量的照射
- 公众受到的剂量不到一年内天然本底的百分之一
- 反应堆已经关闭,放射性燃料已经清除,并进行处理
- 相邻的反应堆(TMI-I)仍在运行直到2014年退役



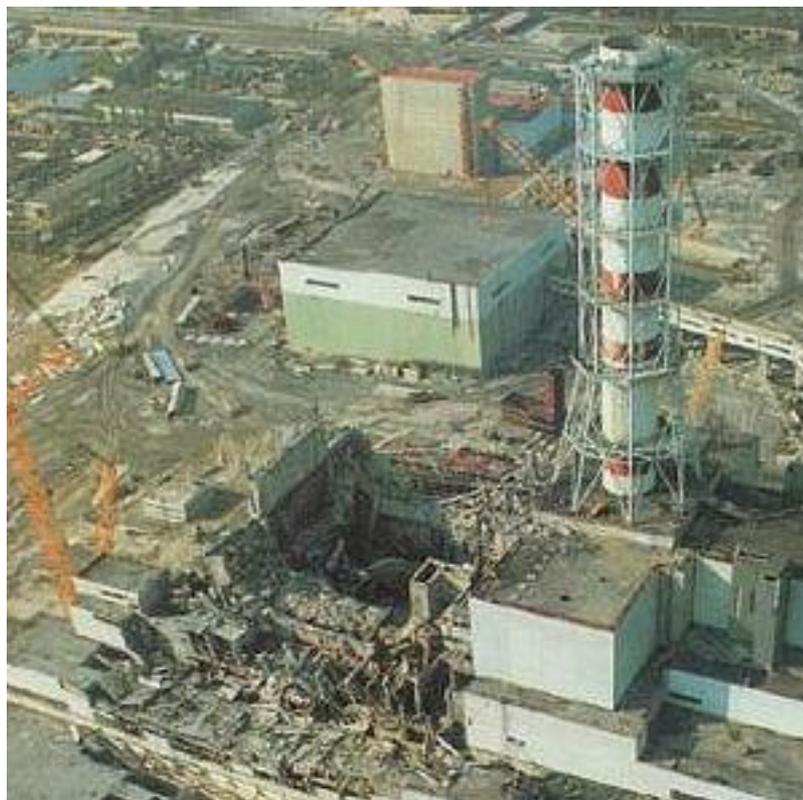
三里岛核电站

# 切尔诺贝利核电事故

1986年4月26日，前苏联的乌克兰共和国切尔诺贝利（Chernobyl）核电厂发生严重泄漏及爆炸事故。事故导致31人当场死亡，8吨多放射性物质泄漏。6万多平方公里土地受到直接污染，320多万人受到核辐射侵害。

## 事故原因

1. 设计缺陷（RBMK反应堆：石墨慢化、轻水冷却的压力管式反应堆）
  - 危险的正空泡系数
  - 控制棒的设计的缺陷
  - 没有安全壳
2. 缺乏核安全意识
  - 核设计单位和监管部门未及时将堆型的缺陷告知核电运营单位
3. 人为的操作失当
  - 操纵员屡次严重违反运行规程



事故后的切尔诺贝利核电站鸟瞰

# 福岛核事故（7级）

## 9级大地震

2011年3月11日，日本东海岸发生**9.0级地震**，核电厂设计承受地震等级：**6.5-8级**。

## 地震引起海啸

福岛第一核电站机组海平面高度：**10m**

设计预防最大海啸高度：**5.7m**

备用电源高度：**13m**

**本次海啸到达电厂时实际高度：14m**



日本福岛核事故可总结为：是极端的自然灾害以及次生灾害引发的重要事故。

**对日本影响：**4月2日 日本福岛县立医科大学一项调查显示，事故发生后精神科接受住院治疗的患者中，有近四分之一与恐核情绪有关。

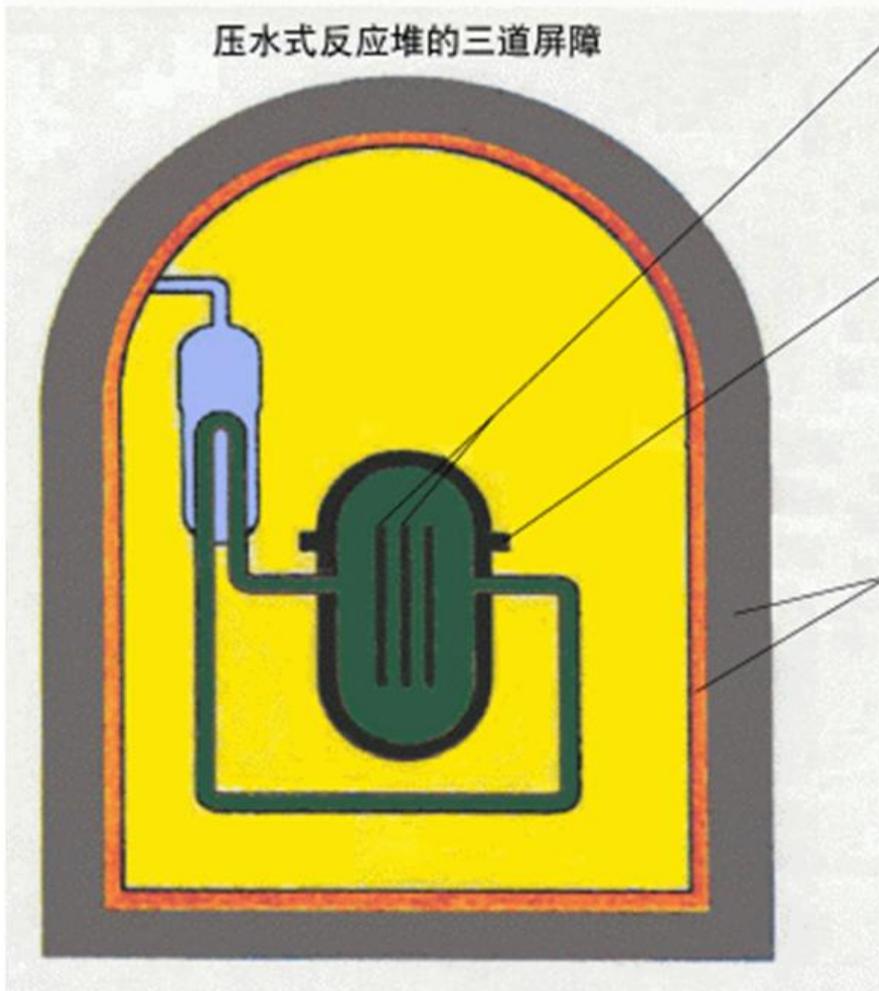
**对国际影响：**德国、瑞士宣布弃核计划，意大利重启核电方案在全民公投中被否决

**对中国影响：**国四条，对核设施进行了全面的安全检查，核安全规划批准前暂停审批核电项目，这包括已开展前期工作的项目，更新《核电安全规划》

## 危而思安

- ▶ 切尔诺贝利事故对社会和公众心理影响造成的损失远远大于辐射直接造成的损失；  
历史上最大事故切尔诺贝利事故中总共死了不超过50人，但国外媒体报道5000人甚至7000人 → 误导让公众的心理形成阴影；
- ▶ 不少自然灾害造成的损失比切尔诺贝利事故要严重得多；
  - 2005年1月20日，印尼海啸死亡人数超22.5万；
  - 2008年5月12日，汶川大地震死亡与失踪人数近9万；
  - 中国每年道路交通事故死亡约10万。
- ▶ 切尔诺贝利事故消极影响延缓了世界核能的发展，但并不能阻止核能的发展；
  - 1970年至1980年，世界核能增加了80倍；
  - 1980年至1990年，10年间又增加了一倍；
  - 1990年至2000年，10年间也增加了11%；
  - 2000年至2007年，7年间又增加了11%
- ▶ 切尔诺贝利事故促进了核电站安全意识  
20年来世界范围内一直在运行的1000座左右的核反应堆，并没有再发生大的核事故。切尔诺贝利事故促进了核电站的安全意识，也加速了先进反应堆的研发，这对核能的长远发展来说是一个极大的贡献。

# 核电站如何阻止核辐射



## 第一道屏障

铀燃料与放射性裂变产物藏在燃料棒的锆合金包壳内。

## 第二道屏障

燃料组件包容在20cm厚的压力容器内，压力容器与一回路构成防止辐射泄漏的第二道屏障。

## 第三道屏障

核反应堆及主冷却剂系统装设在坚固密封的安全壳厂房内，安全壳有1m多厚的预应力混凝土建成，并且有1cm厚的防漏钢质衬垫。安全壳是防止辐射泄漏的第三道屏障。



## 纵深防御 — 几乎完美的安全原则

反应堆设计的安全性就是把核电厂的潜在危险——放射性物质加以控制，把它们包容在安全状态。核电厂的设计、建造和运行贯彻了纵深防御的安全原则。

- 第一层次：防止偏离正常运行和系统故障
- 第二层次：检测和纠正偏离正常运行的情况
- 第三层次：防止可能未被前一层次的防御制止而可能发展为更为严重的事件的情况
- 第四层次：应付可能超过设计基准的严重事故，并保证放射性后果保持在尽量低的水平
- 第五层次：减轻事故工况下可能的放射性物质释放后果

## 数据说话 — 核电站是安全的!

2009年美国各事故引起人身早期死亡风险（总人口3.084亿）

事故	死亡人数 (人)	个人风险 (死亡/人年)
汽车	34000	$1.1 \times 10^{-4}$
飞机	750	$2.4 \times 10^{-6}$
火车	17	$5.5 \times 10^{-8}$
枪击	30000	$9.7 \times 10^{-5}$
龙卷风	21	$6.8 \times 10^{-8}$
雷击	240	$7.8 \times 10^{-7}$
矿难	34	$1.1 \times 10^{-8}$
火灾	4070	$1.3 \times 10^{-5}$
溺水	4000	$1 \times 10^{-5}$
鲨鱼攻击	5	$1.6 \times 10^{-8}$
<b>核电事故</b>	<b>6人 / 100年</b>	<b><math>2 \times 10^{-10}</math></b>

电站的个人风险（美国3.084亿人，每100年因反应堆事故死亡6人）：

$$6 / (100 \times 3.084\text{亿}) = 2 \times 10^{-10}\text{死亡/人年}$$

**核电事故风险远小于其他各种事故!**

核电站运行前必须保证：

- 发生严重堆芯损坏事件的频率低于 $10^{-5}$ /堆年；
- 需要场外早期响应的大量放射性释放事件的频率低于 $10^{-6}$ /堆年。

**核电站是经过精心设计的!**

## 担忧之三：核废料？

### ➤ 什么是核废料？

指在核燃料生产、加工和核反应堆用过的不再需要的并具有放射性的废料。

按放射性的高低分为：

- **中低放射性废料**：核电厂运行或检修时受到辐射污染的衣物以及水处理产生的废弃物等。这种放射性废物放射性较低，大约300年后即可安全无害。
- **高放射性废料**：产生于核反应堆的炉心用过的燃料棒，它是国际政治敏感度极高也是最可怕的废物。尽管它的产量小于中低放废料的1/10，毒性却超过中低放废料的1000倍，而且“解毒”时间超过万年甚至百万年。

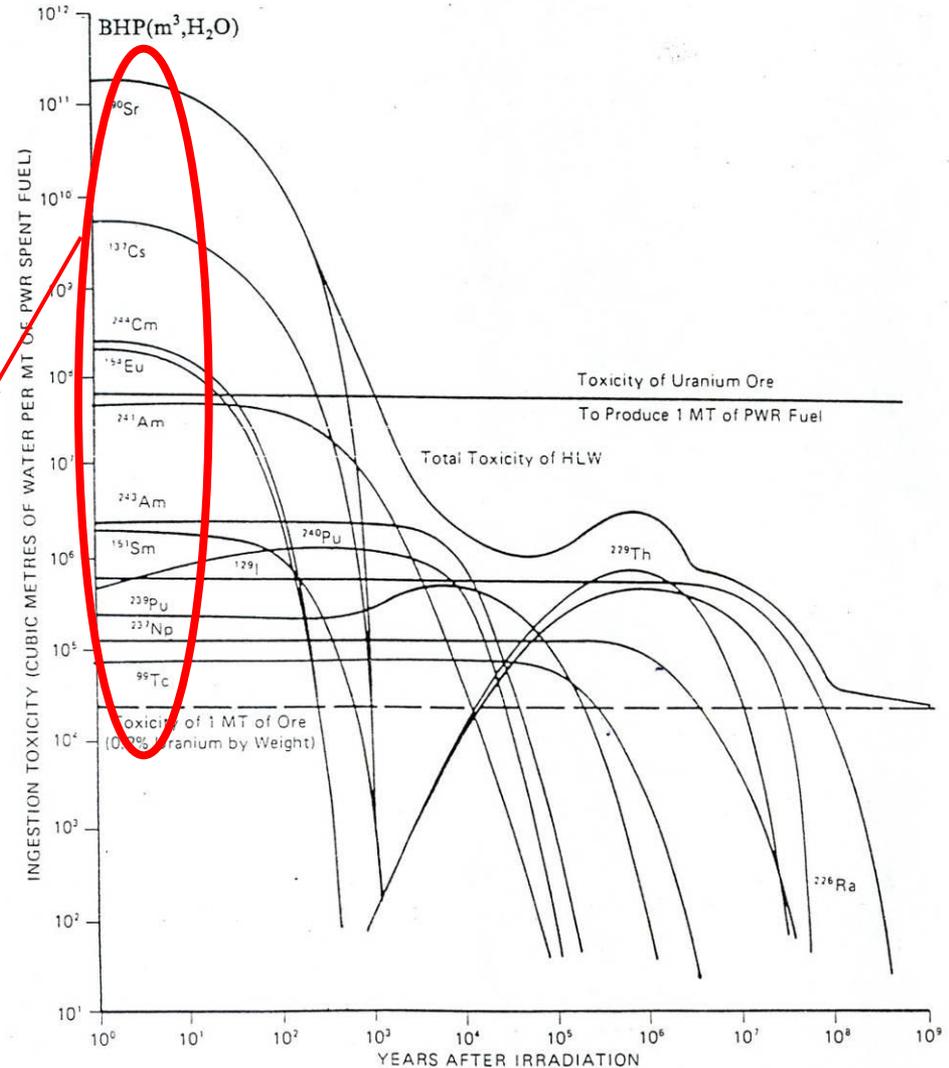
⊕ 目前全球共积累核废料量约5万吨，处理它们需要500~600亿美元！

## 核废料的危害

### 核废料能产生多大的危害？

一座1000MW核电站每年产生约50吨的核废料；其中，高放废料约5吨。

- 要用  $1.2 \times 10^{10}$  万吨水稀释后，才能达到排放标准
- 相当于整条长江136年的水流量

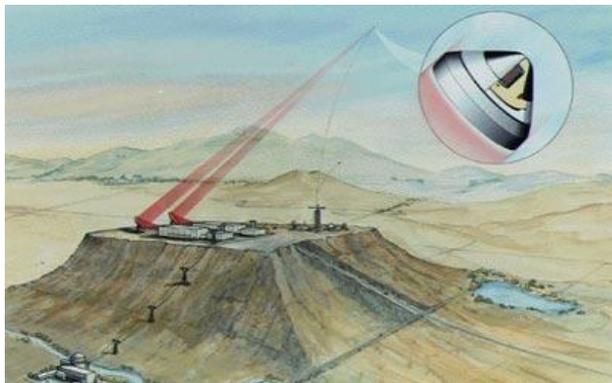


# 核废料处理

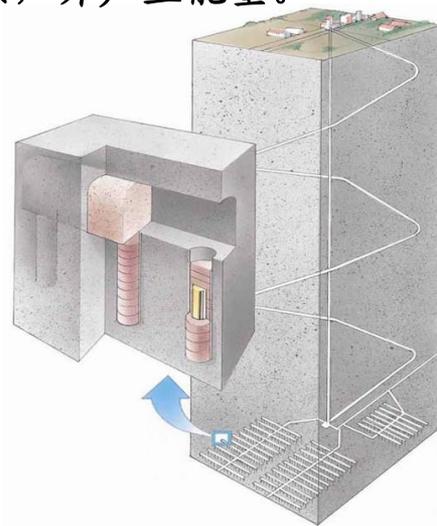
## ► 如何处理核废料？

1. 中低放射性废料大多是采用地表浅埋（地表下几十米）处理。
2. 高放射性废料（主要处置对象）：
  - a) 深储藏处理 → 地表下几百米或更深的岩层（美国内华达州尤卡山，300亿美元）
  - b) 太空处理 → 送出太阳系（地面激光发射装置+满载核废料的太空舱）
  - c) 冰盖处置 → 南极或北极冰盖上，高放废料热量融化冰层，最后沉到冰层底部。  
→ 无法确保绝对安全，而这恰恰是高放废料处理的基本要求！
  - d) 嬗变（变废为宝）：中子轰击核废料，变成短寿命或稳定核，并产生能量。

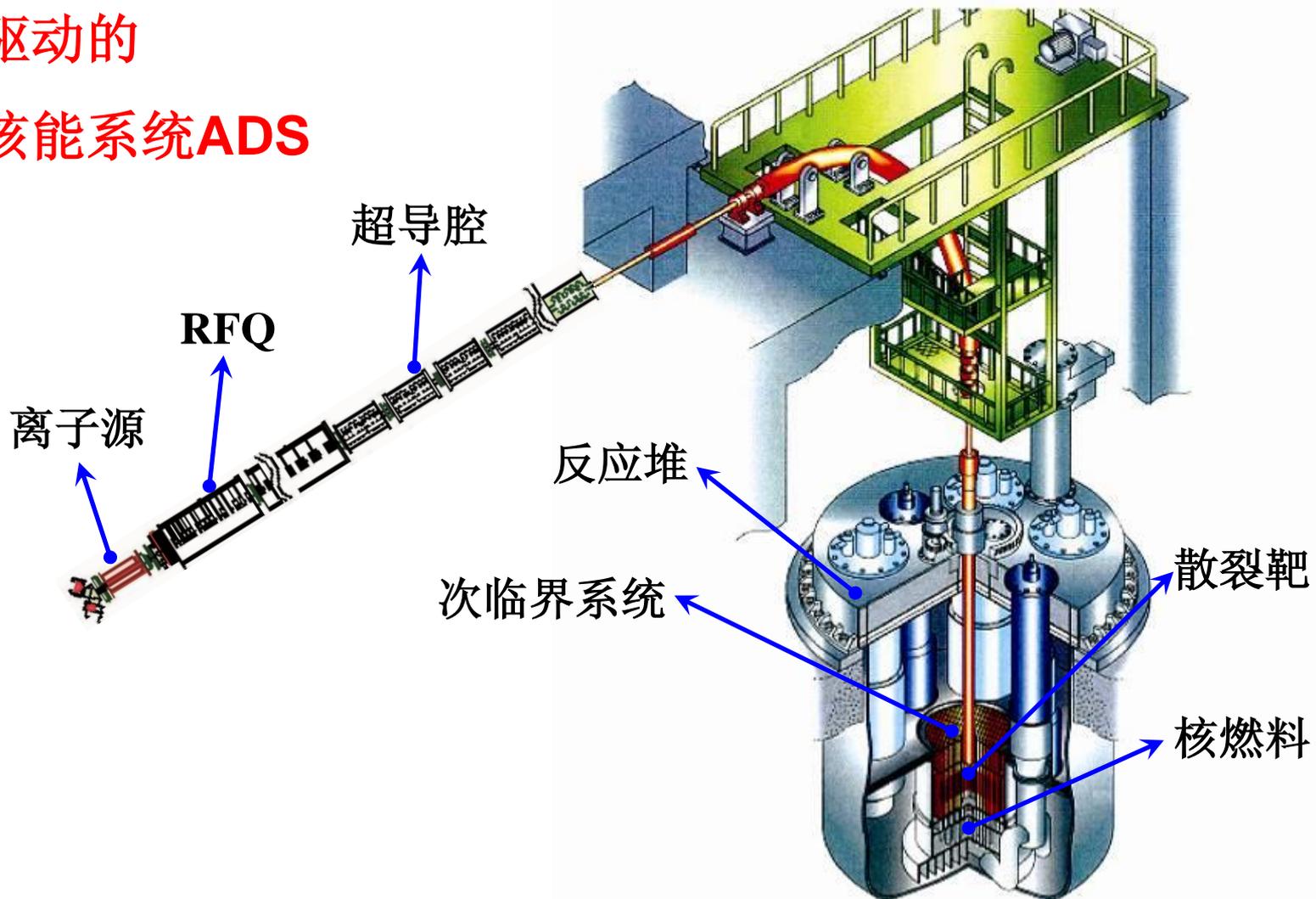
送入太空



深埋



# 加速器驱动的 次临界核能系统ADS

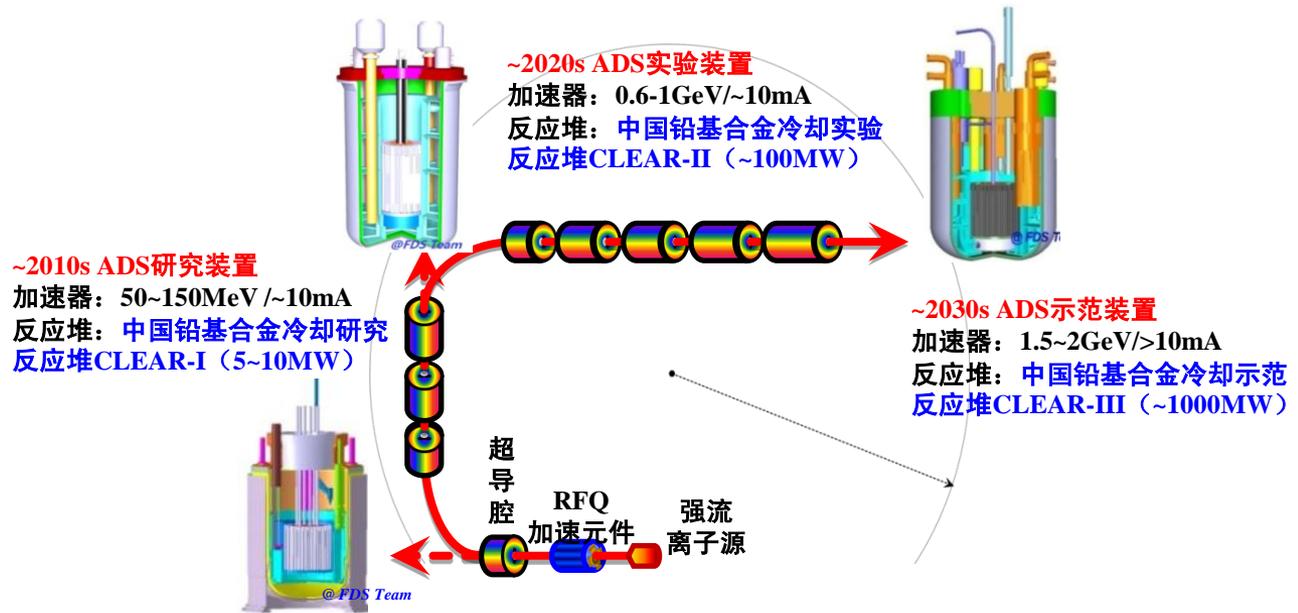


# 中科院ADS专项 铅铋冷却反应堆设计与工程

2011年中国科学院战略性先导科技专项正式立项，计划通过三个阶段实施，分别完成ADS研究装置、ADS实验装置和ADS示范装置的建造与实验研究。

## 研究内容：

- 铅铋反应堆设计与仿真技术
- 堆材料与液态铅铋回路技术
- 核燃料与关键设备研制
- 反应堆运行与控制技术
- .....



第I期>50亿(先导专项+发改委装置+其他)

负责中国科学院战略性先导科技专项“未来先进核裂变能—ADS嬗变系统”铅铋冷却反应堆项目(首期经费概算 ~5.5亿)，计划5年左右在国际上率先建成中国铅基合金冷却研究反应堆，掌握铅基冷却反应堆建造和运行相关工程技术。

# 不用担心: 核电是安全、清洁的



我国某些高本底地区

3.7 毫希 / 年



砖房

0.75 毫希 / 年



宇宙射线

0.45 毫希 / 年



水、粮食、蔬菜、空气

0.25 毫希 / 年

土壤

0.15 毫希 / 年

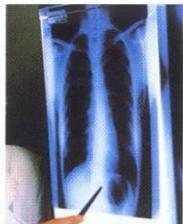


北京—欧洲往返一次

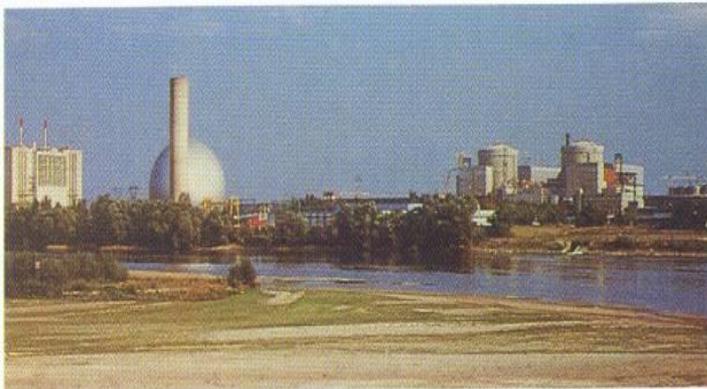
0.04 毫希

肺部透视一次

0.02 毫希



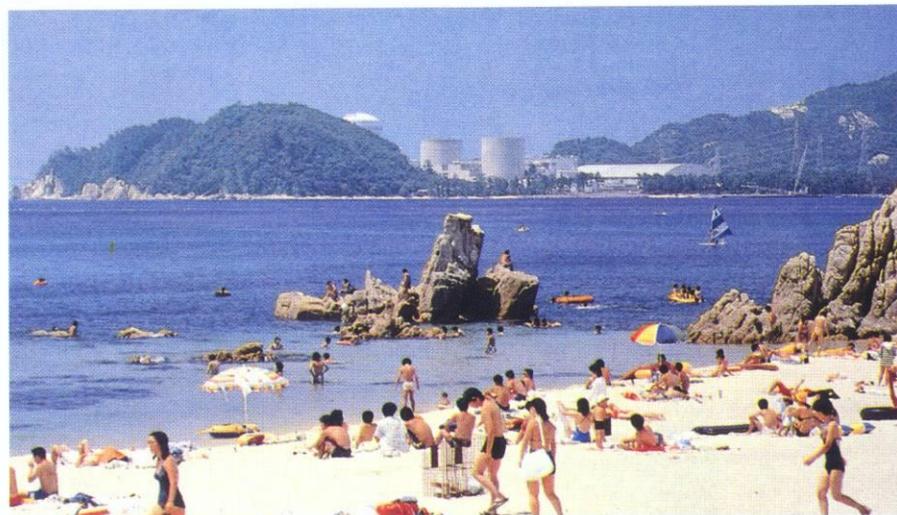
核电站运行对周围居民的辐射影响, 远远低于天然辐射, 可以说微乎其微。



核电站周围

0.01 毫希 / 年

日本美滨核电站



## 中国核电厂分布图

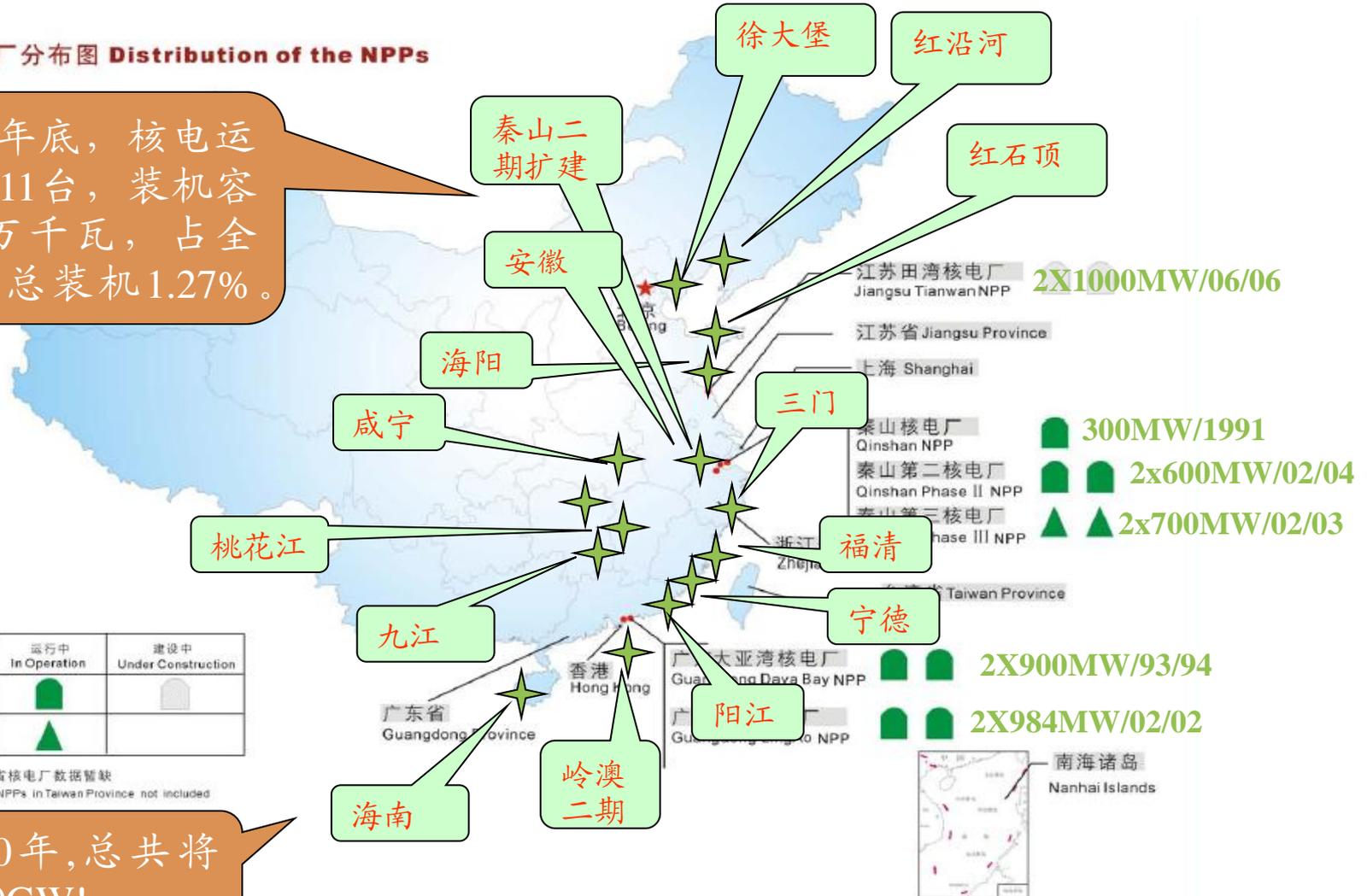
中国核电厂分布图 Distribution of the NPPs

至2007年底，核电运行机组11台，装机容量910万千瓦，占全国电力总装机1.27%。

堆型 Reactor Type	运行中 In Operation	建设中 Under Construction
压水堆 PWR		
重水堆 CANDU		

注：中国台湾省核电厂数据暂缺  
Note: Data of the NPPs in Taiwan Province not included

到2020年，总共将建成40GW!





## 中国核电最新进展——安徽核电

### 安徽四大核电项目相继进入实质性阶段

**芜湖**—— 2006年11月2日，中国广东核电集团芜湖核电筹建处揭牌，规划容量为4台百万千瓦级AP1000压水堆核电机组，一号机组计划于2011年12月核岛主体工程浇筑第一灌混凝土(FCD)，单机建设周期56个月，于2016年8月建成投产；每两台机组的建设间隔为8个月，总投资将超过230亿元人民币。

**池州**—— 2006年7月26日，中国核工业集团总公司与池州市政府签署《安徽吉阳核电项目合作协议》，工程规划容量为4×1000MW级核电机组，一期工程建设2×1000MW级压水堆核电机组，计划分别于2015年1月、2015年9月投入商业运行。该项目总投资高达432亿元，已列入省“861”行动计划重大项目。

**安庆**—— 2009年2月，安庆市政府、华能核电开发有限公司、中核能源科技公司签署了《合作开发建设安庆核电项目会议纪要》；2009年5月27日，安庆核电厂址顺利通过评审；2009年10月31日，华能安徽核电工程筹建处成立揭牌仪式在安庆市举行，标志着华能安庆核电项目进入实质性推进阶段；这是我国第一个高温气冷堆电站商业化推广厂址，具有代表性的意义。

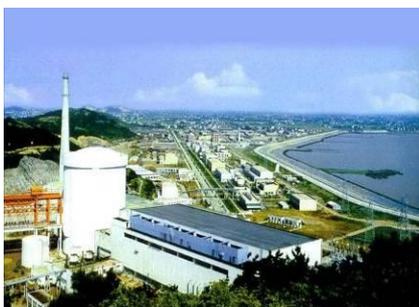
**宣城**——2009年4月，中国大唐集团公司与宣城市签订核电开发项目协议书；2009年5月中旬开始，大唐宣城核电项目先后在宁国、泾县及宣州三地选址；2009年10月15日，大唐宣城核电厂址普选报告顺利通过电力规划设计总院的审查。项目拟装机4台100万千瓦，总投资约400亿元人民币。

## 核电站建设与运行概况

实例

秦山二期两台60万千瓦的机组，总投资为144亿人民币，分别于2002和2004发电。每天发电3200万度。2005年，实现利润7亿元。

海盐县：从一个名不见经传的小县城变成了“全国百强县”



秦山核电站（海盐）





*INEST · USTC*



谢谢!

**Website: [www.fds.org.cn](http://www.fds.org.cn)**

**E-mail: [contact@fds.org.cn](mailto:contact@fds.org.cn)**



# 中国科学院 核能安全技术研究所 (INEST)

—— 中国专业化的核能安全技术基础研究/人才培养/技术支持基地

## 联合共建 (以FDS团队为基础)

- 中科院合肥物质科学研究院
- 中国科学技术大学



## 四大研究领域:

- 核反应堆安全 (设计/实验)
- 辐射安全与环境影响
- 核应急与公共安全
- 核能软件与安全仿真

**愿景:** 引领我国核能安全研究, 提高核安全评价的客观公正性, 推动核能事业可持续发展。

## 规模概况

- 五个科学研究部 + 综合行政部
- 3个综合实验平台 + 若干专业实验室
- 稳定人员规模: ~500 职工 + 500 研究生

## 目标定位

- 基础性、前瞻性、战略性研究
- 1. 国际先进水平的核能安全基础研究基地
- 2. 基于科教结合的高端人才培养中心
- 3. 核电站及其它核设施安全技术支持平台

中科院合肥物质科学研究院和中国科学技术大学在先进核反应堆中子物理方法和技术、环保性核反应堆材料、核电站安全与风险价评研究及相关交叉学科研究领域在国际和国内都具有显著的优势地位……, 具备联合建设核安全相关领域研究机构的优势条件。

# 安徽省精确放疗工程技术研究中心

## 中心目标

- ❖ 国际先进水平“产学研”平台
- ❖ 行业领军，五年内实现产值5亿
- ❖ 企业上市

## 研究基础

- ❖ 核心技术—国际领先
- ❖ 人才队伍—国内最强
- ❖ 市场份额—行内第一

## 支持单位

- ❖ 中科院合肥物质科学研究院
- ❖ 中国科学技术大学
- ❖ 安徽循环经济技术工程院
- ❖ 安徽省立医院
- ❖ 安徽省济民肿瘤医院

