

能 源 科 普 丛 书

核电科普手册

中国能源研究会编著



中国能源研究会

目录

- Q1: 核电是如何产生的? /03
- Q2: 核能是如何发电的? /03
- Q3: 为什么要发展核电? /04
- Q4: 核技术在生活中有哪些应用? /05
- Q5: 核电主要分布在哪些国家? /06
- Q6: 什么是辐射? /08
- Q7: 辐射对人体有什么影响? /09
- Q8: 核事故会有什么辐射影响? /10
- Q9: 核电站会发生核爆炸吗? /14

Q10: 核电站如何防御核事故? /15

Q11: 核事故会发生在中国吗? /17

Q12: 核电站会产生哪些核废物? /20

Q13: 核电站如何处理“三废”? /21

Q14: 如何处置核废物? /22

Q15: 核废物处置在哪儿? /23

Q16: 如何处理“核废料”? /24

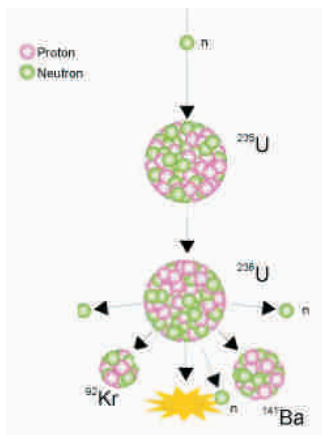
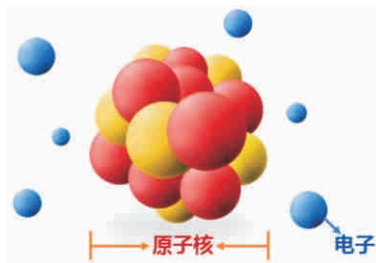
Q17: 乏燃料最终去哪儿了? /26

Q18: 我国有哪些先进的核电技术? /27

Q19: 核电的未来发展方向是什么? /28

Q1: 核能是如何产生的？

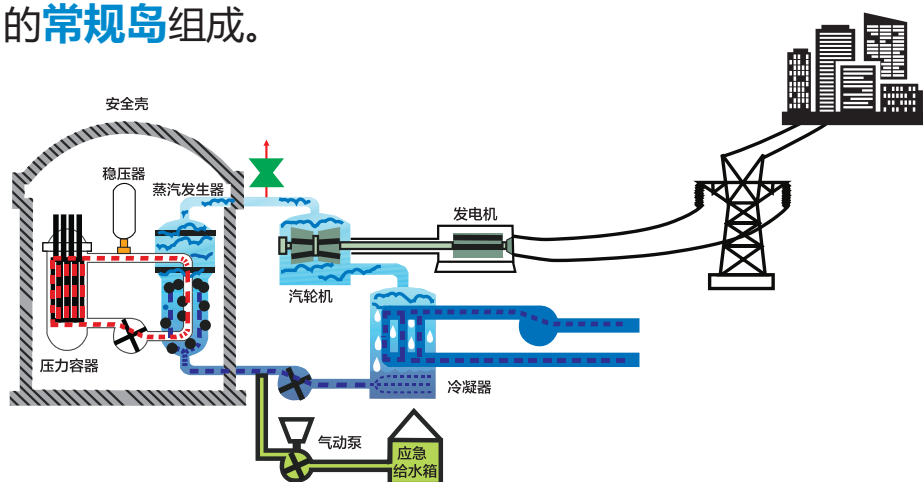
核能又称原子能，是指**重核裂变**或**轻核聚变**时从原子核所释放出的巨大能量。



目前核能发电利用的是**裂变能**。当外来中子轰击铀235原子核时，原子核发生裂变，释放大量能量并形成链式反应，从而源源不断地释放能量。

Q2: 核能是如何发电的？

核电是以核能加热水，制造蒸汽驱动汽轮机发电。**反应堆**是核电厂的心脏，是产生能量的场所。核电站主要由利用原子核裂变生产蒸汽的**核岛**和利用蒸汽发电的**常规岛**组成。



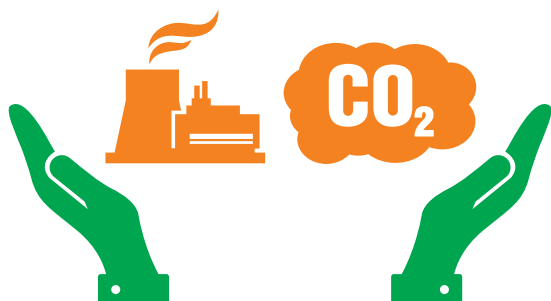
Q3: 为什么要发展核电?

与化石能源发电相比

清洁、低碳
资源储量丰富

与太阳能、风能发电相比

能量密度高、易储存
发电出力稳定



有助于解决空气
污染、减缓全球
气候变暖

有助于拉动国民经
济建设、提升国际
竞争力



Q4：核技术在生活中有哪些应用？

放射诊疗

放射诊疗是利用物质的放射性进行医学诊断和治疗。主要包括**X射线诊断**、**核医学**、**放射治疗**和**介入放射学**。



放射治疗是治疗恶性肿瘤的重要手段，它利用电离辐射照射肿瘤组织，将肿瘤细胞杀死以达到治疗目的。

安检

机场、火车站、地铁等公共场所都有安检仪的身影。其原理与X射线诊断相似，通过探测从物品透射出来的射线强度判断物品的结构信息。



辐照杀菌

辐照杀菌是利用射线（包括X射线、 γ 射线和加速电子束等）的辐照来杀灭有害细菌和昆虫的技术，被广泛用于食品行业。

Q5：核电主要分布在哪些国家？



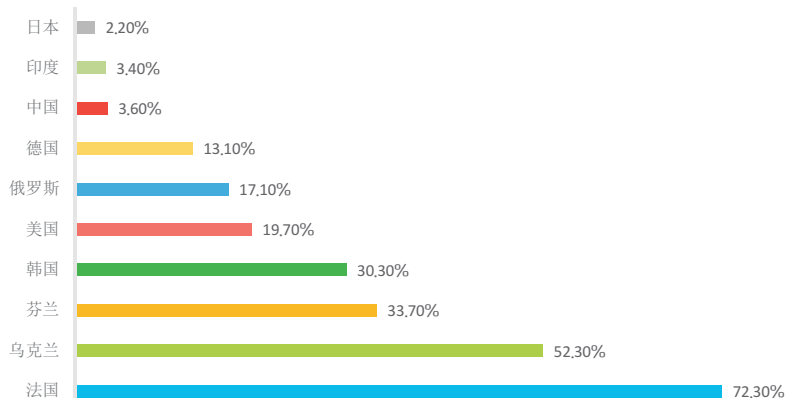
截至2017年，世界在运核电机组共447台



美国是拥有核能发电机组数量最多的国家



我国在运核电机组数量为37台



各国核能发电比例，统计截至2016年



2016年核能发电量供应了全球电力的11.5%

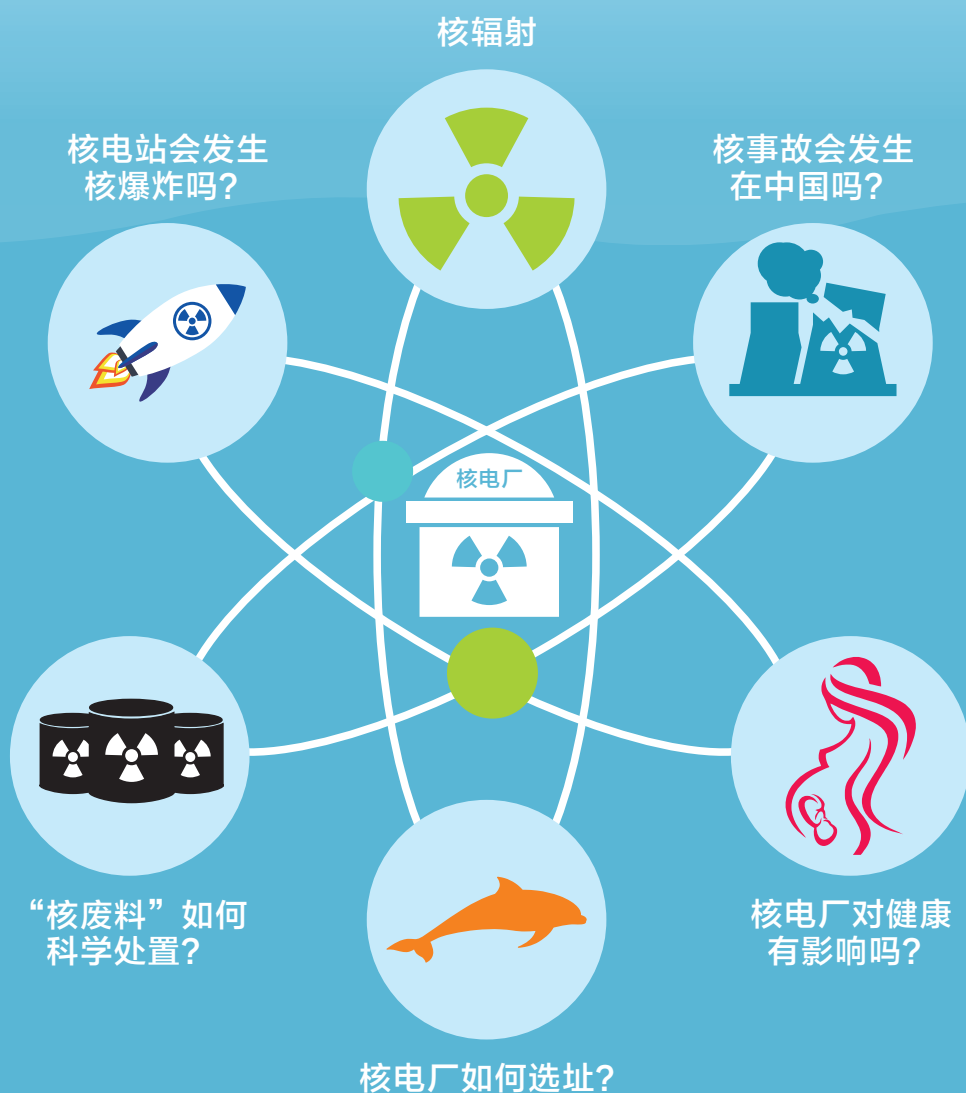


法国是核能发电比例最高的国家，高达72.3%



我国核电占总发电的比重为3.6%

核电安全的公众疑虑



Q6: 什么是辐射?



辐射无处不在。自然界中的一切物体，只要温度在绝对零度（ -273.15°C ）以上，都时刻不停地向外传递热量，这种现象称为辐射。

根据能量的高低，辐射可分为**电离辐射**和**非电离辐射**。电离辐射的能量高，会引起水和机体组织电离。



核辐射是电离辐射的一种，**通常称之为放射性**，存在于所有物质之中，是一种正常现象。

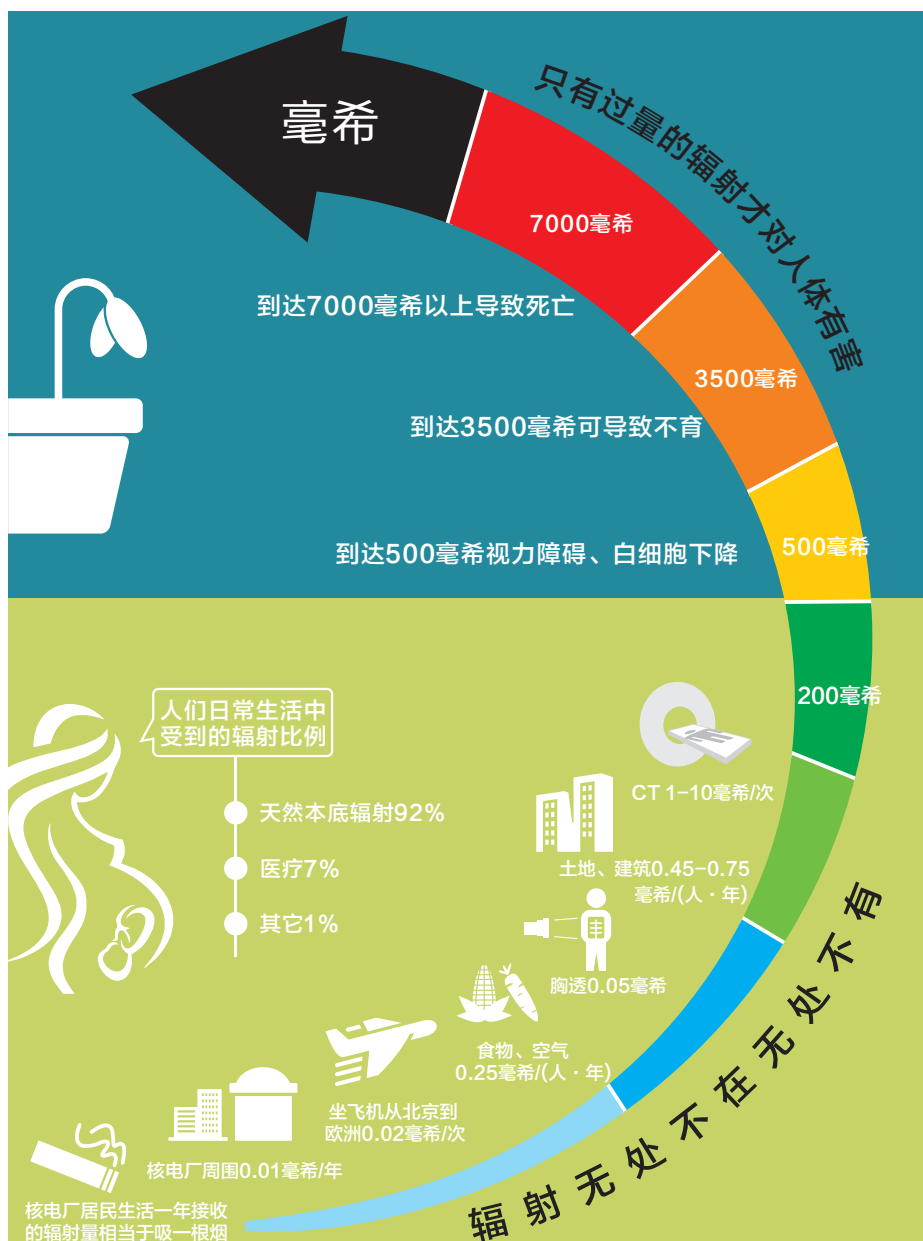
通常采用放射性活度来表示某物体放射性的强弱，常用单位为贝克勒尔，简称**“贝可”**。1贝可表示每秒内发生一次衰变，是个很小的单位。



1896年贝克勒尔发现天然放射线

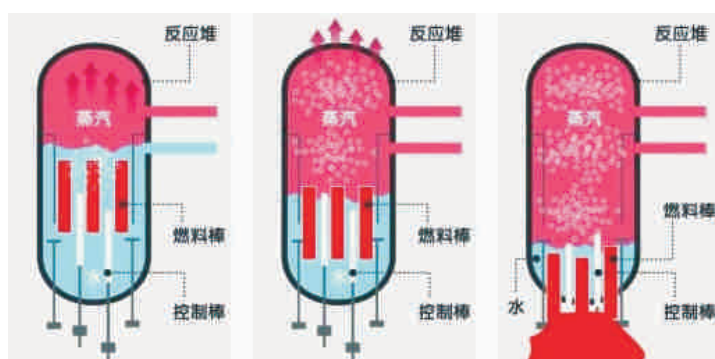
Q7：辐射对人体有什么影响？

只有过量的辐射才会对人体有害。通常使用“**辐射剂量**”来衡量辐射对人体的影响，其常用单位为“**毫希**”。日常生活中，坐飞机从北京到欧洲的辐射为0.02毫希，一次胸透的辐射为0.05毫希，一次CT为1-10毫希，而居民在核电站周围一年接收的辐射仅**0.01毫希**，相当于吸一支香烟的辐射。



Q8：核事故会有什么辐射影响？

核事故分7级。核电站发生的较为严重的核事故主要是**堆芯熔毁事故**。堆芯熔毁是核反应堆因无法及时冷却而熔化导致的损毁，可**引发放射性物质外泄**，影响人类及其他生物的健康，也会对环境造成一定影响。

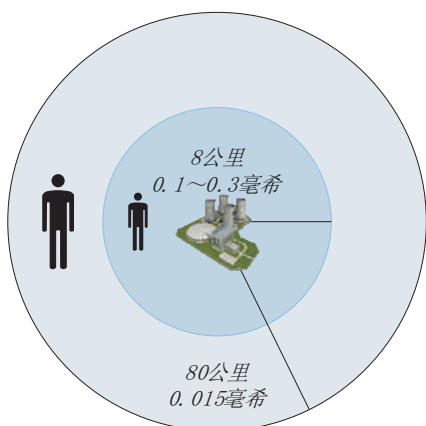


三哩岛核事故与核辐射

1979年3月28日，美国三哩岛压水堆核电站2号反应堆发生堆芯熔毁**5级核事故**，导致大量放射性物质泄漏到安全壳内。



工作人员的误操作和设备故障是导致三哩岛核事故的主要原因。这次事故中，由于主要的工程安全设施都自动投入，同时有反应堆安全壳这一屏障，**从安全壳向环境中释放的放射性物质相对来说比较少。**

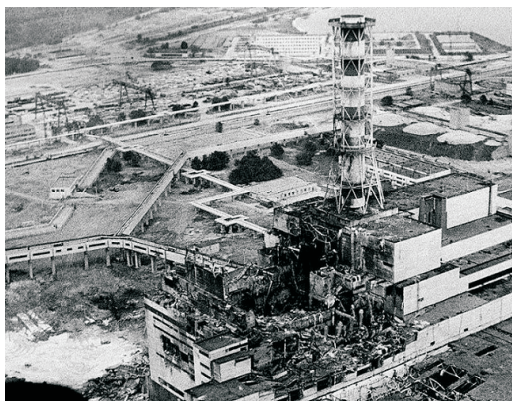


事故中，公众受到的最大有效剂量为**0.85毫希**；8公里范围内，平均辐射剂量约为**0.1-0.3毫希**；80公里范围内，平均个人剂量为**0.015毫希**。土壤、食物、空气、水中均未发现放射性超标。

尽管三哩岛核事故的严重程度为5级，但对环境的影响较小，也没有造成任何人员死亡。

切尔诺贝利核事故与核辐射

1986年4月26日，位于乌克兰境内的切尔诺贝利核电站发生了人类历史上**首例7级特大核事故**。**由于堆芯无安全壳，放射性物质大量外泄。**



切尔诺贝利核电站的**RBMK型压力管式石墨慢化沸水反应堆型是事故发生的关键**，反应堆缺少钢制厚壁压力容器。此外，操作人员未严格遵循章程、肆意更改试验方案，核安全监管不得力、事故应急处理不当也是造成严重后果的原因。



事故中**超过8吨的放射性物质**泄漏到环境中，造成附近**约3万平方公里土地**严重污染，**超21万居民**撤离，早期确诊急性放射性病人**134例**，**28人**三月内辐射致死。长期研究表明，事故对儿童有明显影响，儿童甲状腺癌的患病率从十万分之0.03-0.05增加到**十万分之4**。

福岛核事故与核辐射

2011年3月11日，日本福岛核电站发生**7级核事故**。海啸摧毁了应急供电系统，导致反应堆内核燃料无法冷却，引发氢气爆炸。部分机组的安全壳边界破裂同时为排气，**大量放射性物质**泄漏到大气中。



福岛核事故的发生，**大地震引起海啸这种极端外部自然灾害是主要原因**，此外，**设计上预判不足、设备在极端事件下的安全隐患、特殊事故应急处置不当**等是导致此次事故后果严重的重要原因。



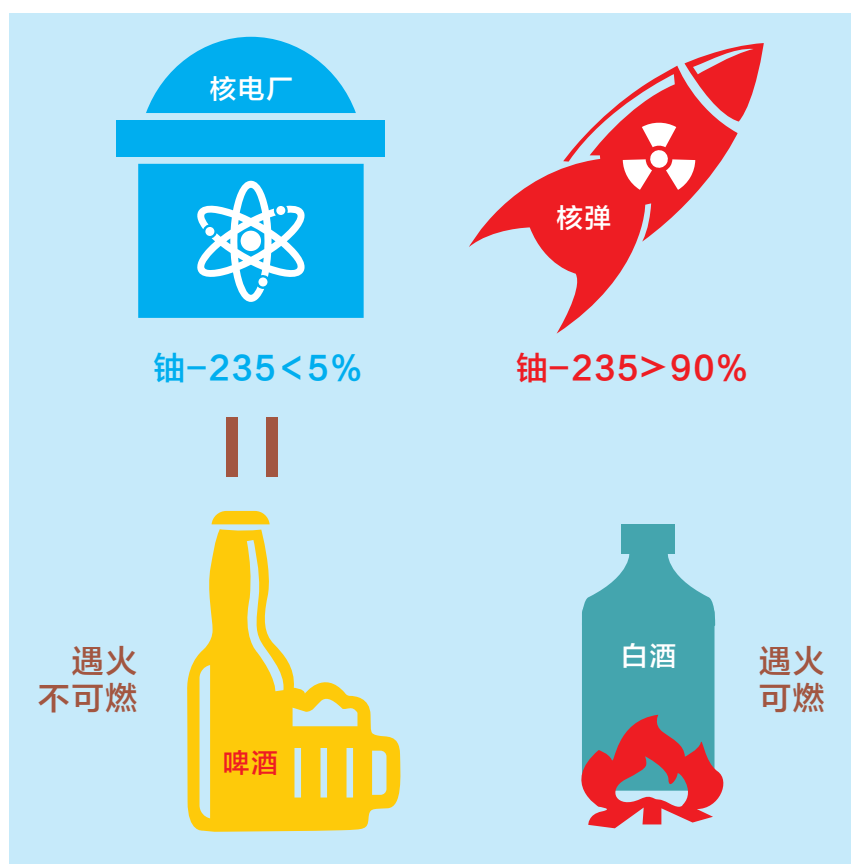
由于核材料本身并未直接外泄，**基本未造成工作人员和公众直接受害**。进入受事故影响区域工作人员的人均辐射剂量**7.7毫希**，其中**30人**受到辐射剂量**超100毫希**。

福岛核事故的放射性积水污染了地下水系，大量放射性超标的冷却水和蒸汽外排，污染了环境，**对全球生态系统造成一定影响**，其对海洋环境、食品安全和人类健康的影响仍在持续评估中。



Q9：核电站会发生核爆炸吗？

不会。原子弹使用的铀-235富集度大于90%，核电站的铀-235富集度仅3%-5%，两者之间的区别就像烈性白酒可以点燃，啤酒不能用火点燃一样。**核电站所采用的核燃料的浓缩度从根本上排除了核电站发生核爆炸的可能性。**



切尔诺贝利事故中发生的是蒸汽和氢气混合气体的爆炸，**日本福岛事故**中发生的是氢气爆炸，两者**都是化学爆炸**而非核爆炸，

Q10：核电站如何防御核事故？

严格的安全标准

国际原子能机构组织制修定的核安全标准达**160余项**，其中关于核电站的特定安全标准**约40项**，**涵盖了一座核电站从选址、设计、建造到调试、运行、管理的全过程。**



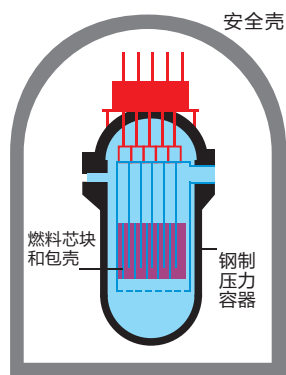
选址、设计过程中还要综合考虑极端自然灾害及飞机事故坠毁、撞击等人为诱发外部事件的影响。

科学地选址



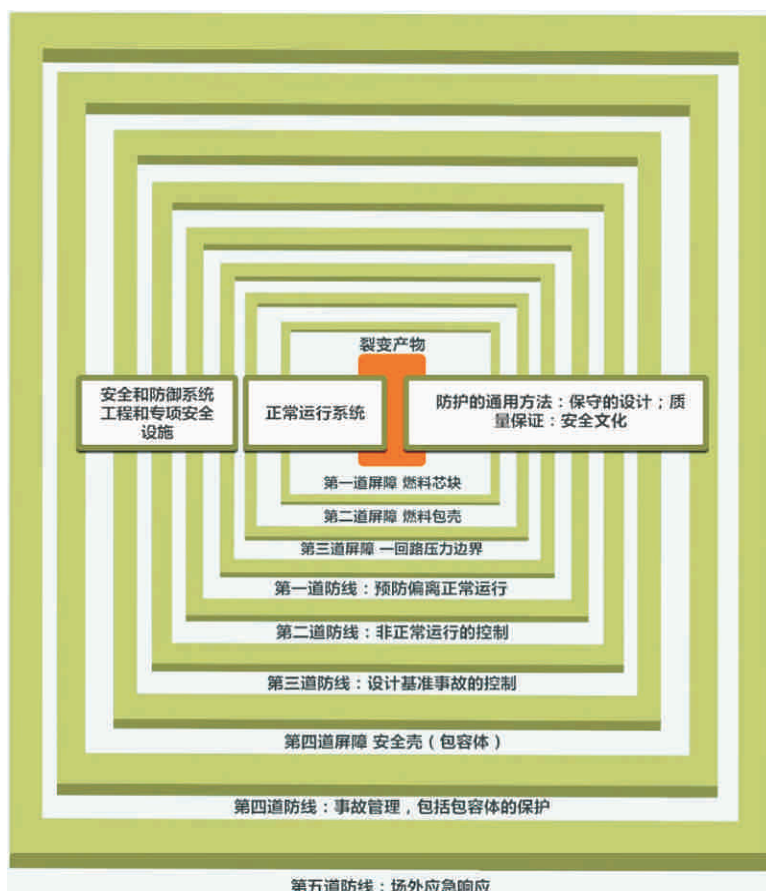
纵深防御体系

核电站的设计、建造和运营、管理都必须遵循“**纵深防御**”原则。

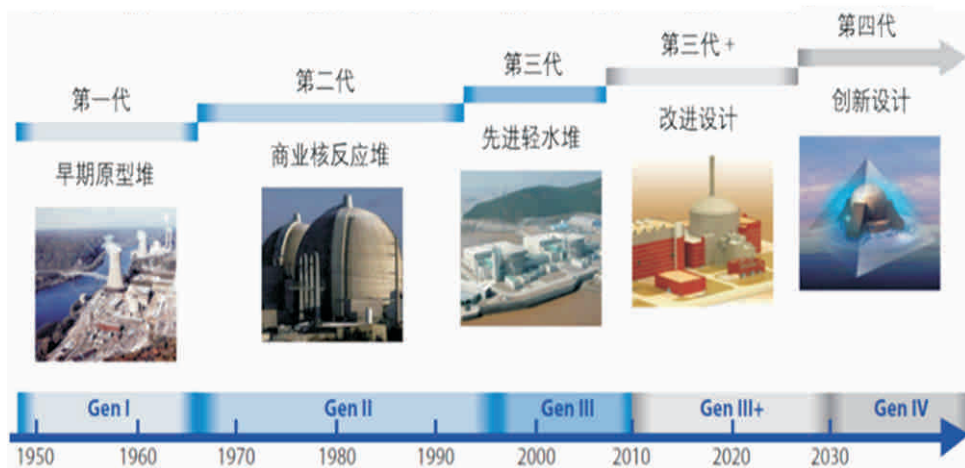


为防止放射性向外界释放，反应堆设有**四道物理屏障**，即燃料芯块、燃料包壳、钢制压力容器和安全壳。

核电站的纵深防御共有五个防御层级，对应核电站的**五条安全防线**，结合四道物理屏障，保障安全运行。



不断进步的技术



核电安全越来越得到重视，在二代核电技术的基础上核电技术发展了新的安全理念、方法和要求，形成了如**AP1000、EPR等第三代核电机组**。

目前正在研发的**第四代核电技术**更是**要求在事故条件下无放射性厂外释放、无需厂外应急**。

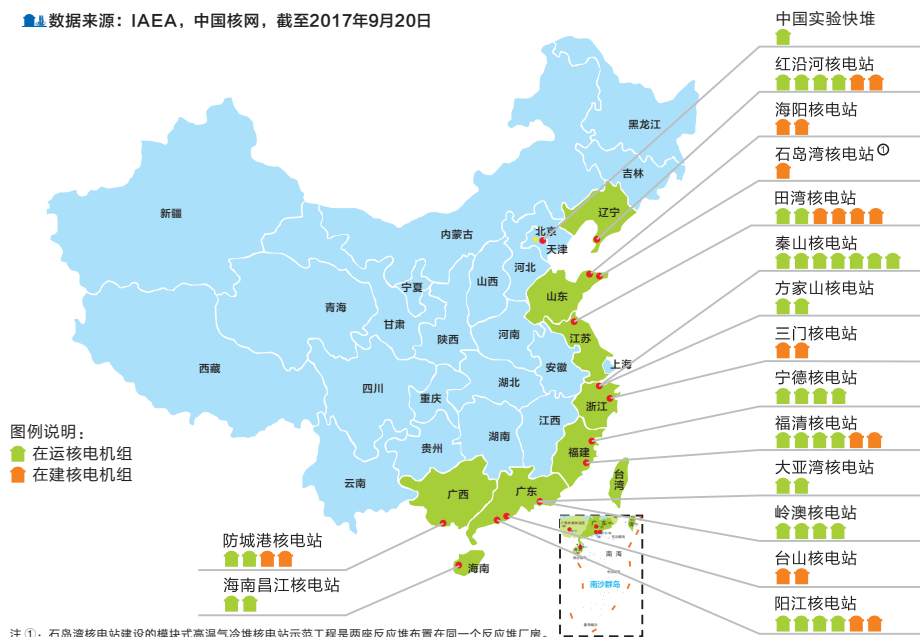
Q11：核事故会发生在中国吗？

我国对核电安全问题高度重视，进行严格地核电选址、采用更先进的技术路线、管理与规范并举，发展核电30多年来从未发生过核事故。



核电选址

数据来源：IAEA，中国核网，截至2017年9月20日



我国核电站的选址均**远离地质断裂带和地震多发高发区**，从源头上避免了高强度地震对核电站安全的影响。同时，我国建造的核电站都**可以抵御海啸、风暴潮、特大暴雨的袭击，核电站不会被水淹没而引发事故**，源头上不具备福岛核事故发生的故事链。

技术路线

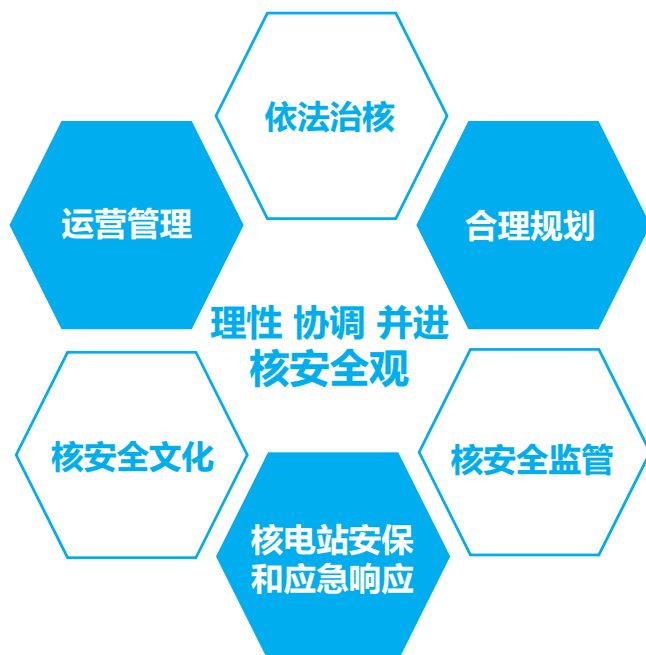


在堆型选择和核电站设计方面，我国遵循更高的安全标准。



比于切尔诺贝利核电站的石墨堆和福岛核电站的沸水堆，我国的压水堆堆芯设计具有固有安全性，核电站的反应性控制技术成熟可靠。我国还致力于通过消化吸收、自主研发更高安全标准的第三代和第四代核电技术。

管理与规范



Q12：核电站会产生哪些核废物？

按照物理状态，核废物分为**废气、废液、固废**，即核电站“**三废**”。按照放射性水平的高低，核废物分为**高放、中放和低放废物**。核电站运行和维修过程中基本只产生低中放废物。每年产生的核废物中，**97%为低、中放废物**，另外**3%为高放废物**。

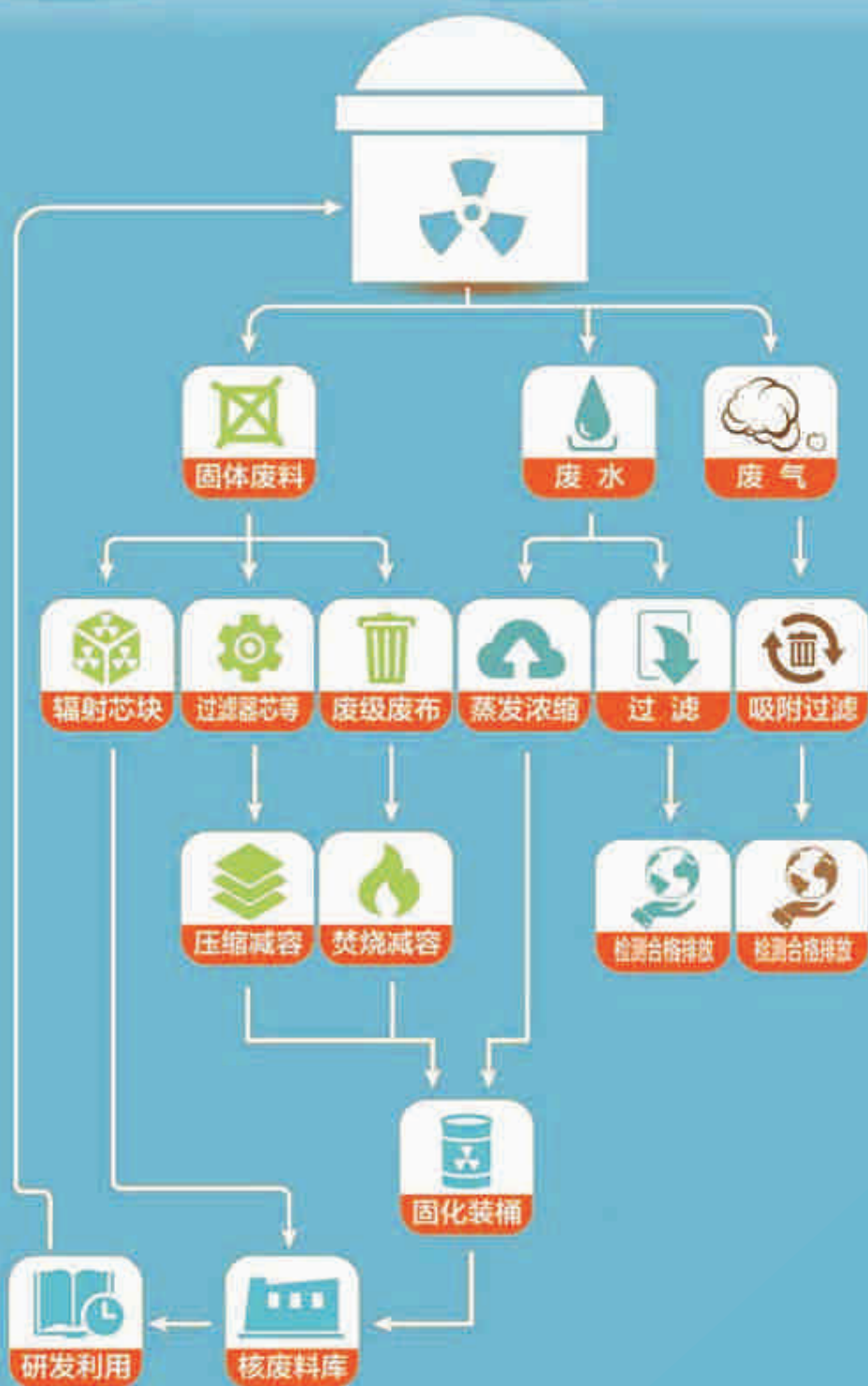


低放废物常见于**被污染的设备工具、废气废水，工作人员的劳保用品等**。中放废物包括**运行时的水化系统、交换树脂、废水废液等**。

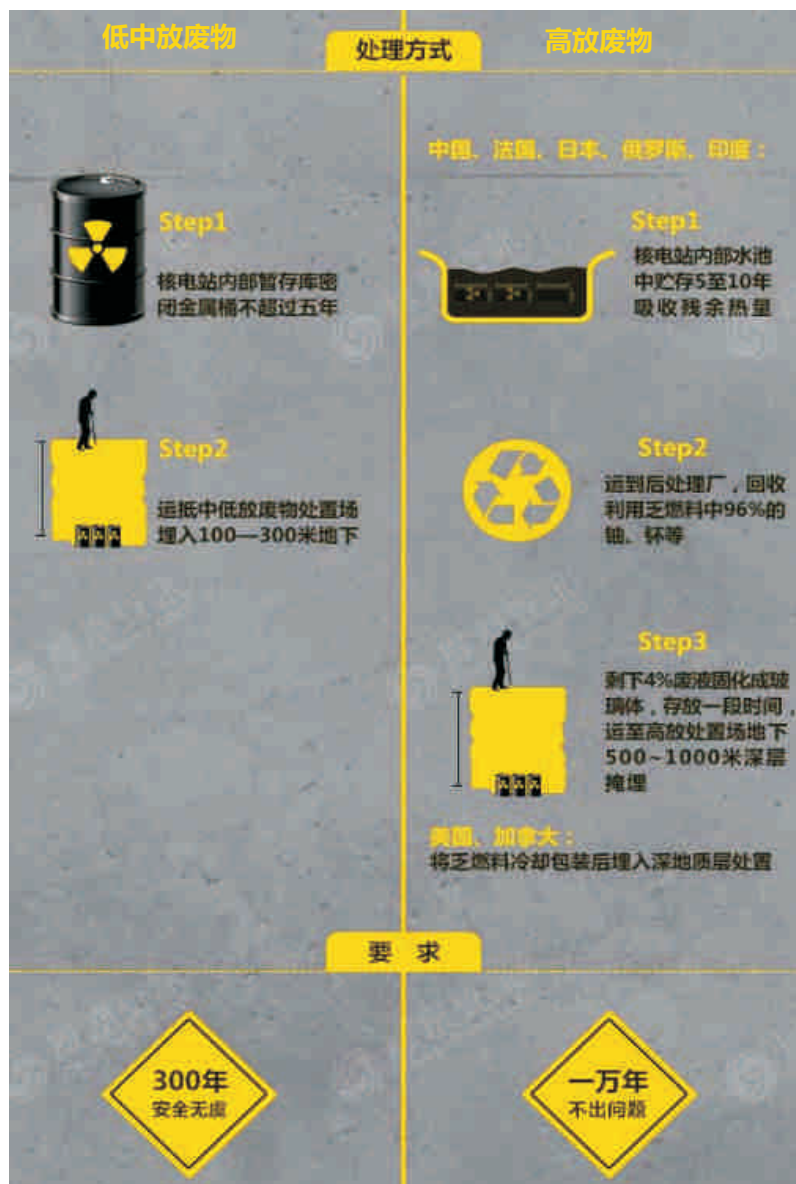


高放废物是指**燃烧利用过的乏核燃料本身及其处理过程中产生的废液**。

Q13: 核电站如何处理“三废”？



Q14：如何处置核废物？



低中放废物通过**减容处理**，**封装在金属桶**中，最后**填埋到浅层地底处置设施**里。**高放废物**一般先**贮存在水池**内，经长期的冷却后**直接埋入稳定的深层岩石内**或运到后处理厂回收利用后进行**深地质处置**。

Q15：核废物处置在哪儿？

目前全球有低中放废物处置库**100多座**，分布在发展核电的多个国家；高放废物处置库方面，仅**芬兰奥尔基洛托处置库**在建。



我国目前已建**甘肃玉门、广东北龙**两个近地表处置场，**四川飞凤山**处置场仍在建。

高放废物处置库方面，已在**甘肃北山**开展研究。

Q16：如何处理“核废料”？

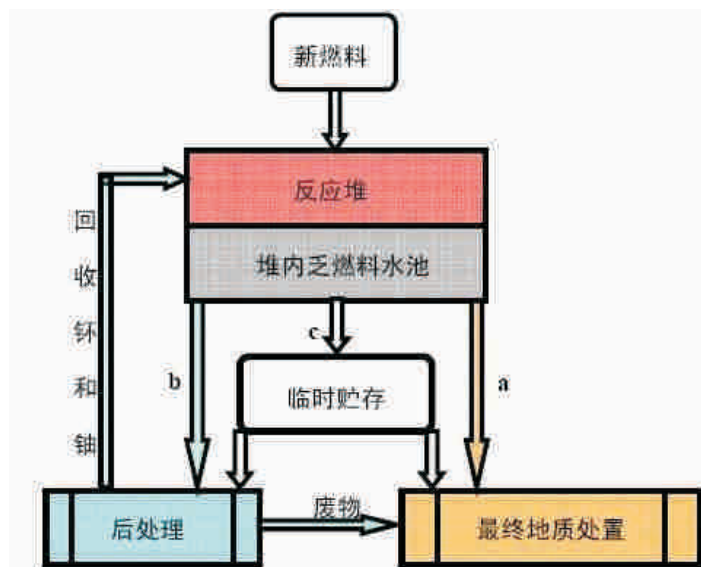
“核废料”实指**乏燃料**，是使用过的核燃料。



“核废料”是非常珍贵的材料，属于“**未被利用的资源**”。乏燃料中占比95%左右的铀、钚都是有用的核燃料原料，可以分离后回收利用。

目前全球已累积约**40万吨**乏燃料，并以**每年1万吨**左右的速度增长着，我国**2020年**乏燃料累积量将达到**7000余吨**，**2025年**将达到**1.4万多吨**。

乏燃料的处理处置主要有以下三条路径：

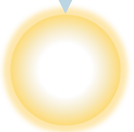




在堆贮存



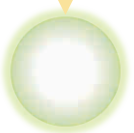
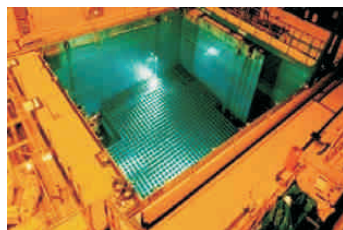
刚卸出的乏燃料必须在紧靠反应堆的**贮存水池**中**至少存放冷却几个月**，降低放射性和衰变热。



中间贮存



中间贮存分为**湿法贮存**和**干法贮存**。



后处理



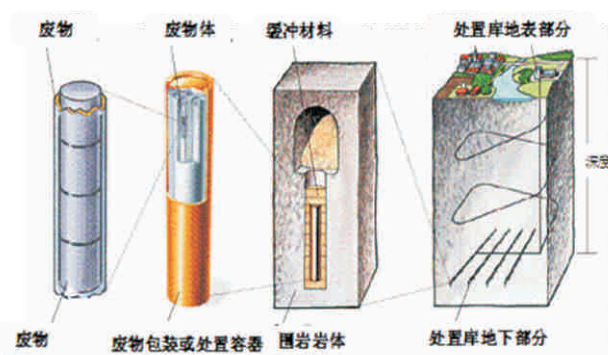
后处理对乏燃料中的有用核材料进行**分离后回收利用**，制成新的燃料元件；对于废液，浓缩处理后玻璃固化，再进行安全处置或分离嬗变。



深地质处置

Q17: 乏燃料最终去哪儿了?

对于乏燃料的安全处置，目前普遍接受且技术上可行的方案是**深地质处置**，深地质处置库采用**“多重屏障系统”** 设计思路。



深地质处置库涉及选址、工程设计、安全评价和研究开发等，是前所未有的万年工程。但“万年”是相对的，现有技术足以保障数百年的放射性安全，深地质处置仍需长期跟踪管理及技术研究。



Q18：我国有哪些先进的核电技术？

2017年5月，福建福清核电站5号机组 **“华龙一号”** 核岛封顶，标志着我国成为继美国、法国、俄罗斯之后第四个拥有独立自主三代核电技术的国家。



2016年9月，中国 **“麒麟一号”** 铅基快中子**反应堆**取得多项关键技术突破，实现了核心技术自主化，具备在短期内大规模应用的潜力。

铅基反应堆是有望首个实现工业示范和商业应用的第四代反应堆，同时，还可以小型化设计为集装箱大小的 **“核电宝”**，用于内陆偏远地区分布式供电、海上浮动核电站等。



Q19：核电的未来发展方向是什么？

核聚变

核聚变是由较轻的原子核聚合成较重的原子核而释放出能量，俗称人造太阳。核聚变具有显著优点，其安全可靠，不会产生长寿命高放射性的核废料和温室气体，地球上蕴藏的资源可供人类使用100亿年以上。



研究方面，目前我国已经研发出高温反应堆磁力约束装置**东方超环EAST**，并加入国际合作项目**ITER**，致力于核聚变技术的开发。

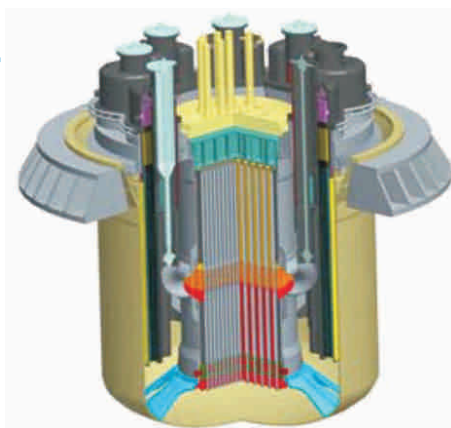
第四代先进核电系统

第四代先进核电系统不仅考虑核反应堆装置，还把核燃料循环也包括在内，组成完整的核能利用系统，实现更高的安全性、经济性、可持续发展性，并满足防止核扩散和恐怖袭击的要求。

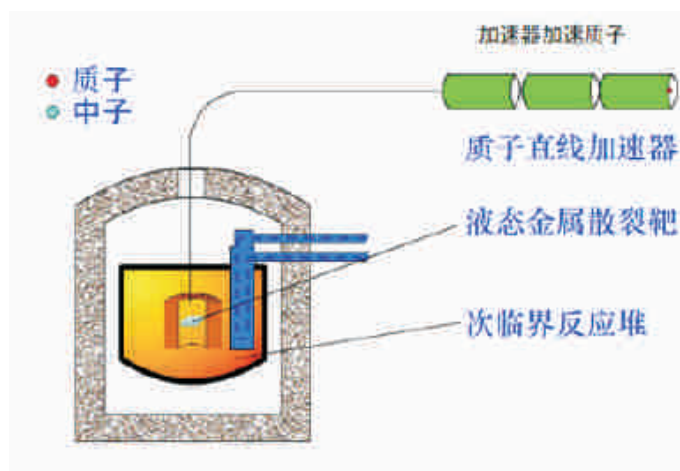
目前第四代核反应堆尚处于原型堆研究阶段。按照计划，将在2020年前后选定一种或几种堆型，2025年前后建成创新的原型机组系统示范，2030年左右实现广泛运行。

我国已建有10兆瓦**超高温气冷堆**，并有示范工程在建。

铅基反应堆是未来先进能源的主力堆型，各国正积极推进其商业化应用，我国已实现核心技术自主化。



加速器驱动次临界系统（ADS）是加速器和反应堆的“结合体”，目前世界上尚无建成先例。ADS有更多的富余中子、燃料范围广，次临界运行具有固有安全性，并能避免核扩散。



| 能 | 源 | 科 | 普 | 丛 | 书 |

核电科普手册



中国能源研究会编著