

核科普教材标准化

吴宏峰 秦山核电运行五处

摘要：目前国内核电厂还没有通俗易懂的核科普教材出版，在互联网上查到的核电知识要么简单笼统，要么泛泛而谈，难以全面深入了解核电。本文指导编写的教材面向普通民众，从核裂变原理入手，全面系统地介绍核电生产原理、核安全运行原则、核电安全运行保障措施、以及核辐射的防护方法，最终目的是让公众了解核电，支持核电。

关键词：科普教材，通俗易懂。

一、引言

核电是清洁、安全的能源。在互联网时代，公众的知识很多是从互联网上学来的。在百度上搜索“核电厂”，“核安全”等关键词，得到的信息五花八门，纵然是 360 百科，介绍的知识或过于简单，或泛泛而谈，难以全面深入地理解核电。查阅各家核电公司的官网，宣传的重点公司的历史、业绩和业务，没有核科普宣传材料。其实，每家核电厂都有给来访人员介绍的材料，通常是介绍核电发展史、核电工作原理、电厂系统布置、核电安全控制等，然而这些资料都没有公开，也不够详尽。对公众来说，核电给他们的感觉是神秘和危险。2011 年 3 月日本福岛核事故发生之后，核恐慌成为主流媒体报道的热点，还出现了抢购加碘食盐的情形。由于公众对核电站工作原理、安全防御知之甚少，恐核就不足为奇了。一个很重要的原因是核行业宣传不够，缺乏通俗易懂、标准化的核科普教材也是原因之一。

核科普教材的阅读对象应该为对核知之甚少的民众，从零基础讲起，目标是通俗易懂，循序渐进，引人入胜。核科普教材可以借鉴白居易写诗读给老奶奶听的故事。老奶奶听懂了，就是核科普教材编写成功的标准。

二、核科普教材内容规划

公众最关心的是核电厂会不会像原子弹那样爆炸，所以文章必须切中要害，第一章讲解核裂变反应的原理和条件，重点讲核裂变反应条件苛刻，引入慢化、临界的概念，说明核电厂不会发生核爆炸。

第一章 核电站不具备核爆炸的条件

1.1 核裂变原理

曾经有人做过试验，把一个乒乓球快速射向排列整齐的乒乓球堆，乒乓球互相碰撞散开。核裂变原理与之相似。当一个 ^{235}U 原子核吸收了一个中子后，这个原子核由于内部不稳定而分裂成多个质量较小的原子核，这个过程叫做核裂变。每次核裂变可释放出约 200 兆电子伏能量和 2~3 个新中子。

核电使用的燃料是浓度非常低的铀，大约 3%~5%，绝大部分是 ^{238}U ，不易发生反应。参与核裂变的中子是低能热中子，高能快中子不易引发核反应。所以，要想发生裂变反应，必须先把中子慢化下来，怎么办呢？

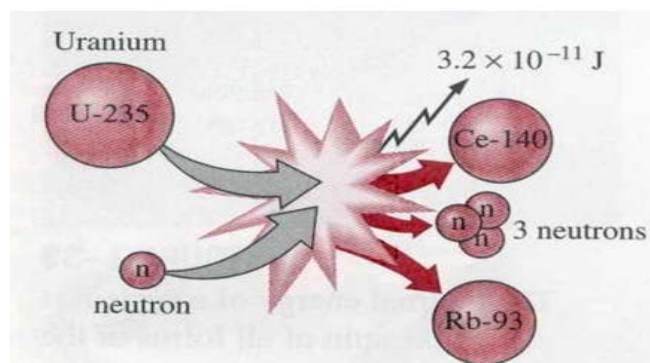


图1 核裂变示意图

1.2 中子的慢化

要想把快中子的能量从 0.1MeV 降到 1eV ，核反应堆中必须使用慢化剂。慢化原理可以这样简单理解：当两个质量相当的小球撞在一起时，两者的速度都能降下来，这个现象叫做弹性散射。如果小球撞到大石头上，小球被弹回去，石头状态几乎没有变化，这个现象叫做非弹性散射。中子的慢化原理就是中子与质量相当的氢核相撞，快中子被慢化成热中子，水是反应堆常用的慢化剂。

中子在反应堆内有产生、泄漏、慢化、俘获和引起裂变五个过程。中子也是有寿命的，要想维持自持式链式裂变反应，必须使中子的诞生数和死亡数相等，这就是常说的临界。

1.3 反应堆临界

反应性表示堆内中子数的相对变化，用字母 ρ 表示。当 $\rho < 0$ 时，死亡的中子数大于产生的中子数，反应堆处于次临界状态，无法维持链式反应；当 $\rho = 0$ 时，产生的中子数与死亡的中子数相等，反应堆处于临界状态，反应堆在受控状态升降功率；当 $\rho > 0$ 时，产生的中子数大于死亡的中子数，反应堆处于超临界状态，反应性不可控，核电厂禁止反应堆处于这种状态。

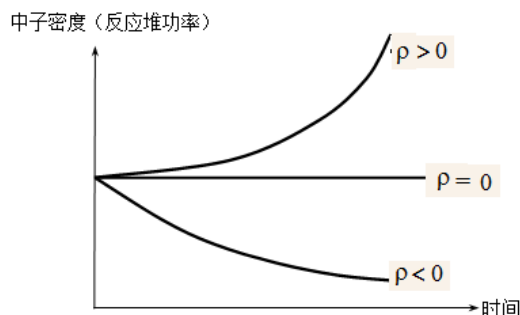


图2：反应堆临界示意图

1.4 核电站不会像原子弹那样发生爆炸

尽管核电与原子弹爆炸的基本原理相同，但是核电厂燃料中的铀-235的浓缩度一般不超过5%，而原子弹核装料中的铀-235含量高达90%以上。原子弹爆炸有非常严格的条件，它以一套精密复杂的系统引爆高能烈性炸药，利用爆炸力瞬间将易裂变物质压紧，形成不可控的链式裂变反应，瞬间产生大量能量，发生核爆炸。这种条件在核电厂是不可能达到的。

第二章讲解核电是怎么产生的，他与火电有什么区别。同时简单介绍核电厂主要的系统名称和功能。

第二章 核能如何转换为电能

人类和平利用核能的重要成果就是核电。与火电相比，发电原理是一样的，只是能量来源不同，从蒸汽管道出来后，二者的发电过程是一样的。核电生产过程分为三个阶段：核能转化为热能、热能转化为机械能、机械能转化为电能。

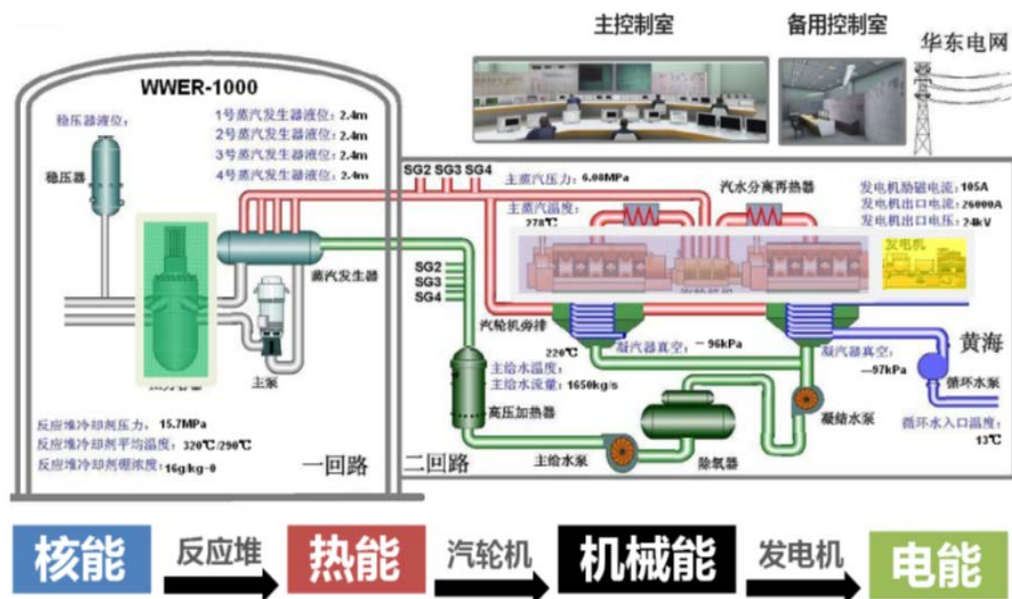


图 3：核电产生过程

2.1 核能转化为热能

U235 裂变产生的能量传递给主热传输系统的纯净水，核能转化为热能。主热传输系统的纯净水蒸发器内能量传递给二次侧的给水。由于经过反应堆的纯净水中可能会含有放射性物质，所以在蒸发器内，二者隔开。蒸发器管内带有放射性的水被封闭循环，称为一回路。管外的给水进入到汽轮机做功，称为二回路。

为了提供压力稳定的蒸汽，主系统通常设置稳压器和安全阀。当主系统压力不足时，稳压器通过电加热器产生蒸汽来提升压力；当主系统超压时，安全阀打开泄压，压力正常时阀门关闭。当然，一回路的水是在封闭的系统内循环，防止放射性外漏。

2.2 热能转化为机械能

高压蒸汽进入汽轮机高压缸中，饱和蒸汽带动汽轮机叶片高速旋转，将部分热能转化为叶片和转子的机械能。做功后的蒸汽进入汽水分离再热器，被加热的蒸汽通过再热主汽门和再热调门进入低压缸，最后乏汽进入凝汽器经过冷凝后变成凝结水。

经过冷却的凝结水经过凝结水泵、低压加热器、除氧器、主给水泵、高压加热器，再次进入蒸汽发生器，给水和一回路的的高温重水进行热交换，变成饱和蒸汽后，又进入汽轮机做功。

二回路也是一个封闭的循环系统，任务是将一回路中的热能带到汽轮机中做功转化为机械能。

2.3 机械能转化为电能

发电机的主要功能是将机械能转换为电能，所用的发电原理就是电磁感应。当汽轮机转动时，拖动发电机一起旋转，切割磁力线发电，并通过发电机出口开关、主变向电网输送电能。

2.4 核反应堆家谱

核电技术发展大致可分为四代。第 1 代为原型堆，第 2 代为商业堆及改进型反应堆，第 3 代为改良设计的先进的更安全的反应堆，第 4 代为安全升级堆。

在役反应堆中主要有三种堆型：压水堆、沸水堆和重水堆，分别占总数的 63.0%、18.6%和 11.0%。

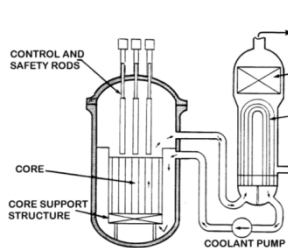


图 4：压水堆示意图

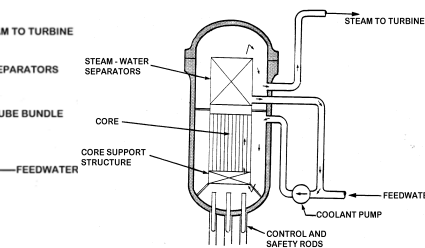


图 5：沸水堆示意图

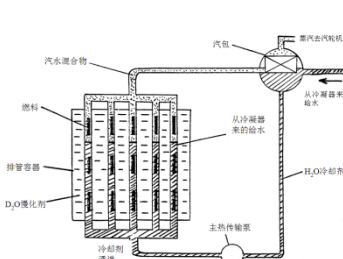


图 6：重水堆示意图

2.5 中国核电发展之路

我国的反应堆以压水堆为主，还有重水堆、高温气冷堆等堆型。

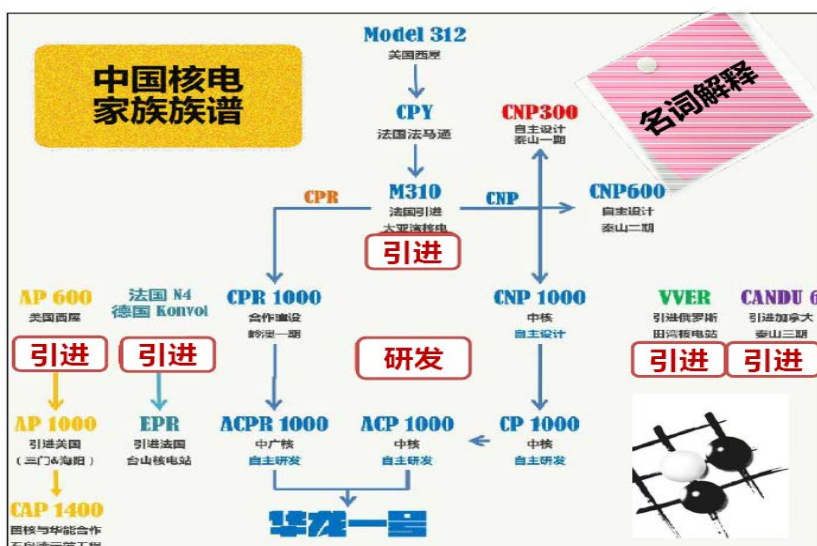


图 7：中国核电堆型

电站所有决策优先考虑核安全，第三章阐释核安全运行原则，如何组织活动不得违反。

第三章 核电安全运行原则

保障核安全做到反应性始终可控（CONTROL）、燃料始终得到充分冷却（COOL）、放射性物质始终被包容（CONTAIN），简称为 3C 原则。

3.1 CONTROL 原则--反应性始终可控（停堆深度）

任何情况下反应性必须可控。反应性的控制装置有调节棒、机械吸收棒、停堆棒、液体毒物注入装置等。其中调节棒和机械吸收棒参与反应性控制，停堆棒和液体毒物注入装置用于停堆保护。

重水堆日常运行要求维持的过剩反应性约为 1~2 mk，调节棒可提供-7mk，机械吸收棒-15mk，停堆棒-80mk，液体毒物-400mk，负反应性远远满足控制要求。

3.2 COOL 原则--燃料始终得到充分冷却（热阱配置）

任何时候反应堆的冷却热阱必须保证。热阱相关系统有：主热传输系统及其辅助系统、给水系统、设备冷却水和海水冷却水系统、应急给水系统、应急堆芯冷却系统、慢化剂系统及其辅助系统、端屏蔽系统。

根据使用优先顺序，热阱分为正常热阱、备用热阱、应急热阱、严重事故后热阱。也就是冷却系统的不同组合。

3.3 CONTAIN 原则--放射性物质始终被包容（安全屏障）

设置安全屏障的目的是防止放射性释放到环境中。核电厂均设有 4 道安全屏障。第 1 道，核电站的燃料是二氧化铀的陶瓷体芯块，能把绝大部分的裂变产物自留在芯块内；第 2 道，性能相当好的锆合金包壳管把芯块密封在管里；第 3 道，压力容器及一回路压力边界；第 4 道，安全壳。

核电厂通常采取什么措施来保障核安全，第四章讲解核电厂纵深防御的安全设计、异常运行及事故处理措施。

第三章 核电安全运行保障措施

4.1 纵深防御的安全设计

在选址方面，不允许存在影响核电安全而又无有效措施解决的因素，包括地震断裂、活动断层、溶洞、火山活动。为保证核电站抗震稳定，反应堆厂房首选建在完整基岩上。

核电站系统设计有冗余度。比如，核电站有二路独立的厂外电源、厂内应急电源、可移动电源等；

为避免虚假信号，核电站的控制信号取自现场不同的位置，称之为“通道”，然后三取二，或取中值作为控制信号。

重要的设备、管道、仪表有抗震要求，发生地震时，不但要保持系统的完整性，还要能执行其功能。

4.2 专设安全系统保障安全

为了保证停堆、防止放射性外漏，核电厂有专设安全系统，包括两个停堆系统、应急堆芯冷却系统（安注系统）、安全壳系统。后备安全支持系统包括：应急供水系统、应急供电系统。

停堆系统必须保证迅速性和可靠性。例如，重水堆的两个停堆系统能够在 2 秒内完成停堆。停堆系统不可用性概率小于 1×10^{-3} 年/年（8.8h/年）。

安全壳隔离系统保证反应堆厂房内的放射性物质对环境的影响维持在可以接受的低水平。在事故工况下，所有安全壳隔离阀关闭时间为 2 秒，特别重要的阀门为 1 秒内关闭。

4.3 异常运行工况处理

异常运行工况，指的是系统中的设备失效，没有实现既定功能，但是不影响系统有效性。对于重要的工艺系统，关键设备通常为双重设计，一些设备为甚至三重设计。

每个系统都有详细的操作规程--《运行手册》，第 4 章为正常设备试验和切换操作，第 5 章为异常运行工况操作规程。异常运行规程对故障有清晰的入口条件和操作步骤，操纵员根据规程处理系统异常。

4.4 设计基准事故处理

根据设备失效的概率，电站设计时考虑了系统故障情况，电站有专门的应急运行规程（EOP），针对系统泄漏/LOCA、失电、失去设备冷却水、失去仪表压空系统、失去计算机控制等事故工况。应急运行规程分为入口规程、关键安全参数恢复规程、事件定向最佳恢复规程。在应急状态中，关键安全参数必须时刻关注。

4.5 严重事故管理

严重事故指的是超设计基准事故，非常低概率核动力厂状态，可能由安全系统多重故障而引起，并导致堆芯明显恶化。简言之，严重事故就是造成堆芯严重损坏的超设计基准事故。针对超设计基准事故，核电厂开发了事故处理规程。

4.6 减少/避免人因失误

人是容易犯错误的，为了减少/避免失误，核电厂通过不断的培训和观察指导，将防人因失误工具的应用作为必须的技能。防人因失误工具包括：自检、三向交流、质疑的态度/不确定时暂停、遵守程序、他检、监护、独立验证、工前会和工后会。

第五章讲辐射防护，从天然辐射讲起，介绍三废的排放标准，辐射防护方法，用数据说明核辐射对环境的影响甚微。

4.7 经验反馈及改进

由于核行业的特殊性，世界范围内的核电厂共享管理经验，每次核事故之后进行学习自查，有则改之，无则加勉。

1979年3月28日，美国三哩岛核电厂由于设备故障、仪表失灵和操纵员误操作，发生了压水堆核电厂有史以来最严重的一次事故，导致堆芯部分熔化……

公众对辐射感到神秘，时刻准备远而避之。第五章介绍辐射的防护，消除大家的疑虑。

第五章 核辐射不可怕

5.1 生活中的辐射无处不在

人类在日常生活中会受到各种各样的辐射，这些辐射照射有的是天然的，也有的是人工的。天然辐射照射也叫天然本底照射，人们吃的食物、喝的水、住的房屋、用的物品、周围的天空大地、山川草木乃至人体本身都含有一定的放射性。这些微量的放射性对人体并不构成损害，我们祖祖辈辈就是在这样的环境里生存繁衍的。

5.2 严格监控核电厂废物排放

放射性物质的排放有严格的限制，并且接受各级环保部门的严格监督。核电站只有极少量的符合排放标准所要求的放射性物质排入环境，不会对环境造成危害。在核电站周围建立核电与地方两套辐射监测系统，实时监测周围环境的辐射水平，及时向公众发布核电站周围环境监测结果。

5.3 辐射防护

为了便于辐射防护管理，核电厂辐射工作场所分为三个区：控制区、监督区、非限制区。

根据辐射能量的不同，采用不同的防护方法。一张纸就可以挡住 α 射线，它的穿透能力最弱； β 射线可以穿透纸张，但无法穿透铝板，介于 α 射线和 γ 射线之间；而 γ 射线的穿透力最强，需要适当厚度的混凝土或铅板才能有效阻挡。

限制外照射，可通过减少污染和设置屏蔽，远距离操作及缩短照射时间；限制内照射，可通过隔离、通风、清洗、使用防护衣和呼吸道保护用品。

5.4 核事故应急响应

我国核事故应急组织体系分为国家核应急组织、省（自治区、直辖市）核应急组织和核设施营运单位核应急组织三级。根据核事故的严重程度，核事故应急状态分为4级：应急待命、厂房应急、场区应急和

场外应急。

一旦发生核事故，公众首先应避免紧张恐慌，及时收听广播或收看电视，尽可能获取政府部门有关的决定和通知，了解核事故的处理进程，切不可轻信谣言和小道消息。其次是在有可能发生放射性污染的情况下，尽量停留在室内进行隐蔽，关好门窗和通风设备，配合政府准备有序地撤离。

第六章讲解核物理发展过程，学习科学家励志事迹，倡导青少年投身和平利用核能的科研大军。

第六章 核物理那点事儿

6.1 谁发现了铀

德国化学家克拉普罗特，他从沥青铀矿中分离出了铀，并用 1781 年新发现的天王星命名它为 uranium，元素符号定为 U。……

6.2 伦琴与 X 光

伦琴发现了一种神秘射线，并取名为“X 射线”，又叫“X 光”……

6.3 原子核结构模型--卢瑟福

1911 年，卢瑟福在曼彻斯特大学做 α 粒子实验，偶然发现向金箔发射带正电的 α 粒子时有少量被弹回，卢瑟福根据 α 粒子散射实验现象提出原子核结构模型（行星模型）。一举把原子结构的研究引上了正确的轨道，于是他被誉为原子核物理学之父。

6.4 镭的母亲--居里夫人

居里夫人在实验中发现一些特殊的元素并将其标记为“放射性元素”，同时证实放射线是放射性元素发射出来的。这是一项具有革命性的实验发现。居里夫妇先后成功地提纯了两种放射性新元素，分别以“钋”和“镭”命名。

6.5 费米和第一座反应堆

1942 年 12 月 2 日，在芝加哥大学体育场的网球厅内，世界上第一座核反应堆正式启动并达到临界，第一次实现了输出能大于输入能，宣告人类利用核能时代的到来。

6.6 两弹一艇精神永流传

我国核工业的发展，是在不断创业、不断逐梦中实现的，半个多世纪以来，核工业人以国家需要为己任，艰苦创业，用智慧、血汗乃至生命，浇铸着核工业人心中最神圣而伟大的强国梦，成功的研制出决定中国命运的“两弹一艇”——原子弹、氢弹、核潜艇。……

三、 小结

本文深度应用电站系统知识，讲解操纵员如何控制反应性，怎么把电厂置于安全状态。事实和数据非常有说服力，我相信经过宣传培训，核科普教材能够消除公众顾虑，引导青年学子积极投入到核电发展大军中去，因为核电已经成为我国的一张名片。

核科普教材涉及的知识面广，而且我国堆型复杂，各电厂的系统设计差异较大，编写核科普教材需成立专家组收集各电厂的信息，争取写出具有代表性的作品。

参考资料

- | | | |
|---------------------|--------|------------|
| [1] 核能与核安全科普知识 | 国家能源局网 | 2014-10-27 |
| [2] 核电科技馆解说词 | 秦山核电 | |
| [3] CANDU 堆高级课堂培训教材 | 秦山核电 | |