

特辑

华龙一号 更安全的核电技术

“华龙一号”是我国研发设计的具有完全自主知识产权的三代压水堆核电技术，创新采用了“能动和非能动”相结合的安全系统及双层安全壳等技术，在安全性上满足国际最高安全标准要求。作为中国核电技术走向世界的“国家名片”，华龙一号是当前核电市场上接受度最高的三代核电机型之一，是我国核电创新发展的重大标志性成果。

华龙一号全球首堆——福建福清核电站5号机组在2015年5月7日正式开工建设，已于2020年11月27日实现并网发电，2021年1月30日正式投入商业运行。华龙一号核电机组是怎样发电的？它有哪些独特的安全技术？让我们走进去一探究竟。

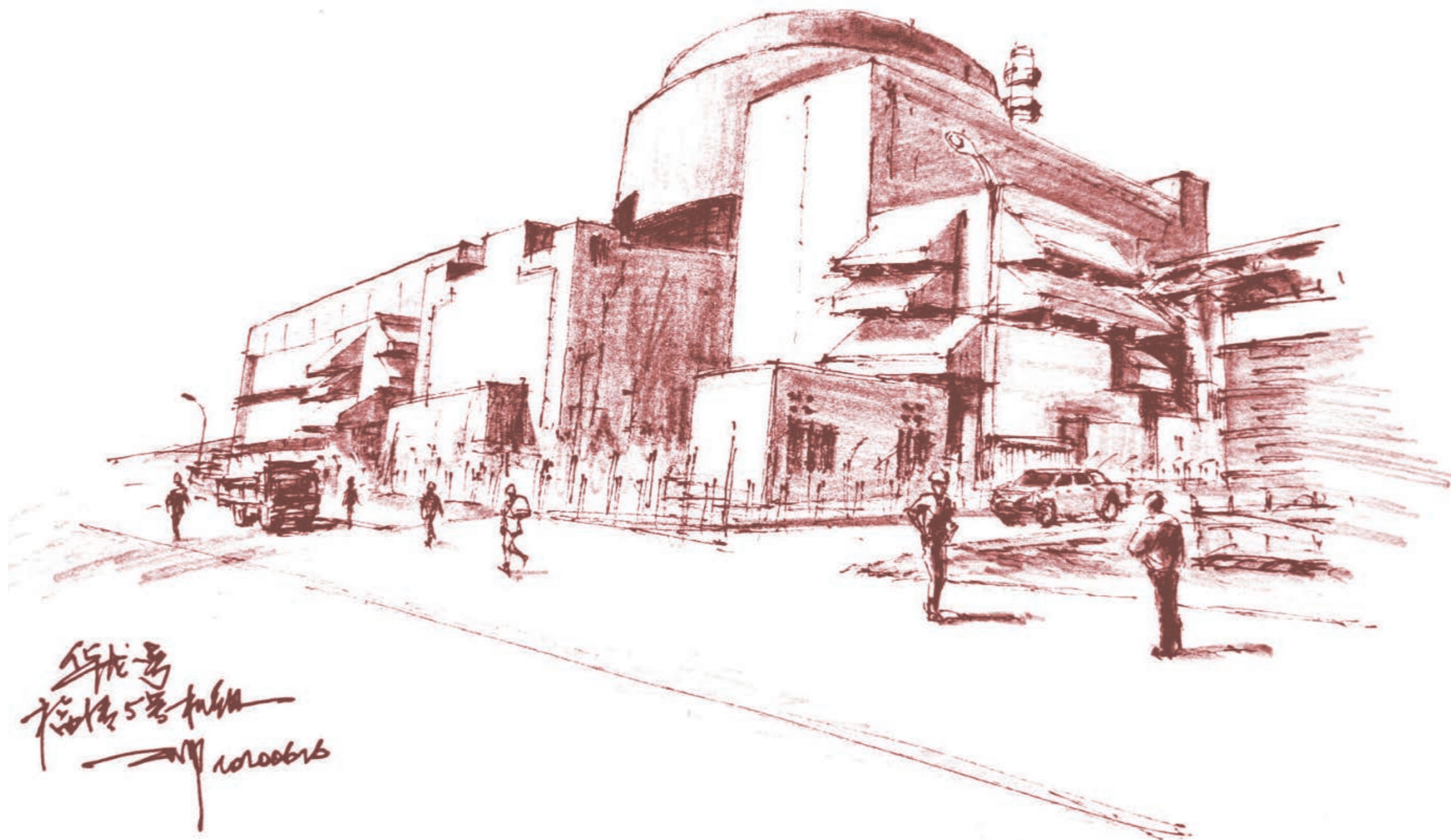
协助 中国核电工程有限公司



第1部分

了解核电厂

核电厂利用铀235裂变时发出的能量转化为电能。这一过程是如何实现的？



第1部分的内容

- ★ 核能是优秀的清洁能源
- ★ 核反应堆是如何产生热能的？
- ★ 铀裂变的产物
- ★ 华龙一号从“弃核”阴霾中走出

核能是优秀的清洁能源

能源对于可持续的经济增长和提升人类福祉至关重要，可以说，能源是社会发展的基础。

2014年，我国已经成为世界第一大能源生产国和消费国。但在能源生产快速发展的同时，能源资源分布不平衡和能源结构不合理的矛盾也凸显出来。

未经人工加工的能源形式被称为“一次能源”，如太阳能、风能、潮汐能、煤炭、石油、核能等。一次能源的多元化，是国家能源安全战略的重要保证。不过，一次能源通常要加工成二次能源，如电力、蒸汽、汽油、沼气、焦炭等形式，才能供人们直接使用。在大部分场景下，使用电器设备已经成了每个人的生活习惯，形成了“电力社会”。在转化为电能方面，核能具有不少优势，具有可观的前景。

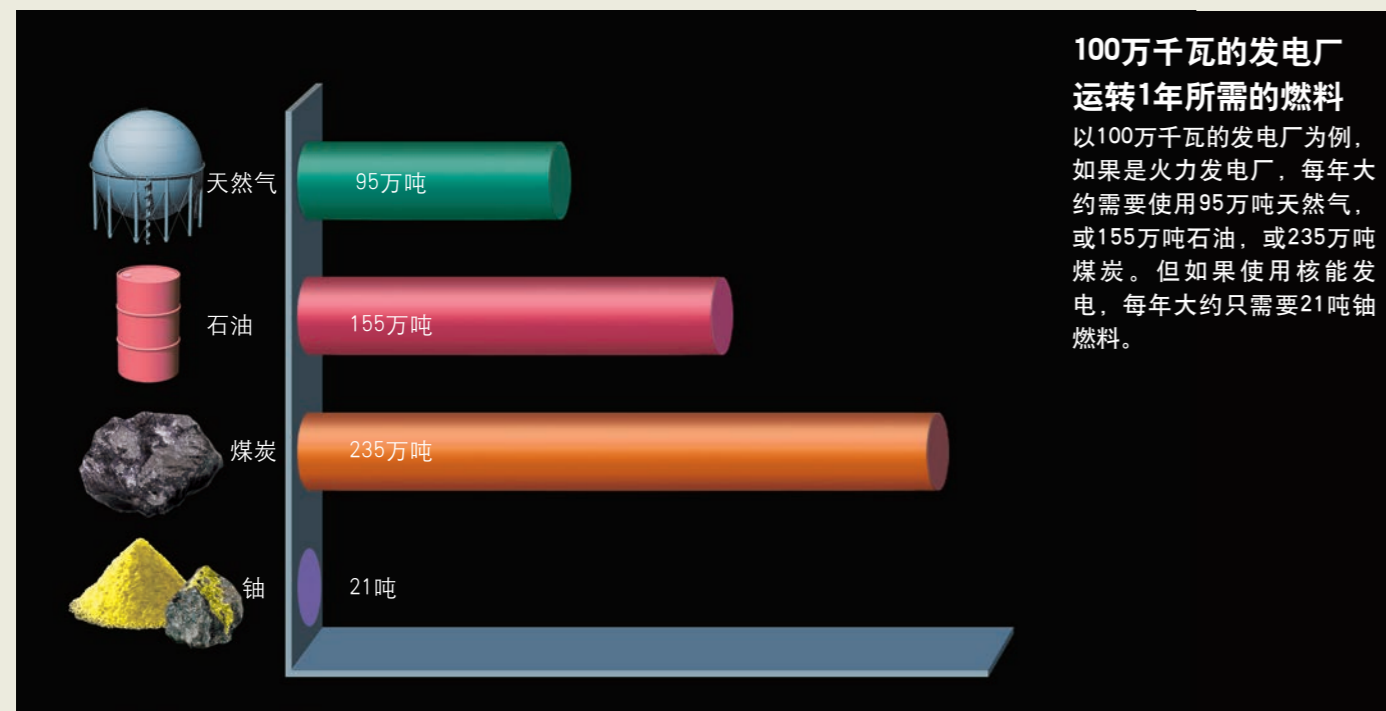
核能是一种高效、低碳的清洁能源。核能的能量密度高，核燃料的裂变能大约是相同质量的标准煤燃烧释放能量的250万倍。如果核能发电替代部分以煤炭为燃料的火力发电，可

以减少煤炭的开采、运输和燃烧总量，还不排放二氧化硫、烟尘、氮氧化物和二氧化碳，是电力工业减排污染物的有效途径。

核能与化石燃料一样，都属于非可再生资源。尽管地热、风能、太阳能、潮汐能等能源都是可再生能源，但受制于人类的科技水平，风能受地域和气候限制，太阳能成本过高，目前还无法实现不间断地大量提供电力。水力发电受季节、气候、枯水期等环境因素的影响，相比之下，核能发电的适用性较强。目前，核能发电技术已经成熟，从发电成本到稳定性都胜于其他新能源。为了提高新能源在能源消费中的占比，核能是最现实可靠的选择。

世界能源需求离不开核能

核能是世界能源结构的重要组成部分，预计在未来数十年内，其用量还会继续增长。根据国际能源机构的预测数据，到2030年，全球能源消耗量将增加18%，到2050年将增加39%。世界各地对能源依然有很大的



需求，这对未来如何增加能源供给带来了要求。铀基核燃料有望成为低碳核电的基本可靠来源。随着技术不断发展，新型核电厂对铀资源的使用量可能会更少，以往形成的核废料甚至还可以作为新燃料继续使用。

我国核电未来的发展趋势

2010~2019年，我国核电运行装机规模持续增长。目前正在运行的核电装机规模仅次于美国、法国，位列全球第三，在建规模为世界第一。截至2019年年底，全国（未

含台湾地区）商业运行核电机组共计47台，总装机容量4875.1万千瓦；在建核电机组13台，总装机容量1387.1万千瓦。核电总装机容量占全国电力装机总量的2.42%。

到2035年，我国的核电总装机容量有望达到1.4亿~2.1亿千瓦（建成1.4亿千瓦、在建0.7亿千瓦左右），年发电量1.4亿~1.5亿千瓦时，提供4.5亿~5.5亿吨标准煤的能源。届时，核电装机容量占电力总装机容量的8%~9%，核电发电量占总发电量的13%~15%，提供相当于8%以上的一次能源。

我国核电厂分布情况表

所在省份	核电厂名称	状态
辽宁	红沿河核电厂	运行中
辽宁	徐大堡核电厂	建设中
山东	石岛湾核电厂	建设中
山东	国核示范电站	建设中
山东	海阳核电厂	运行中
江苏	田湾核电厂	运行中
浙江	秦山核电厂	运行中
浙江	秦山第二核电厂	运行中
浙江	秦山第三核电厂	建设中
浙江	方家山核电厂	运行中
浙江	三门核电厂	运行中
浙江	三澳核电厂	建设中
福建	宁德核电厂	运行中
福建	福清核电厂	运行中
福建	漳州核电厂	建设中
广东	太平岭核电厂	建设中
广东	大亚湾核电厂	运行中
广东	岭澳核电厂	运行中
广东	台山核电厂	运行中
广东	阳江核电厂	运行中
广西	防城港核电厂	运行中
海南	昌江核电厂	运行中

图例	堆型	运行中	建设中	已核准未开工
	压水堆	■	▨	■
	重水堆	▲	▨	无
	高温气冷堆	■	▨	无

注：本表格信息未包含台湾地区。目前，我国共有49个核电机组装料投入运行，分布在16座核电厂中。

核反应堆是如何产生热能的？

核燃料吸收中子，引起核裂变

虽然铀235 (^{235}U) 是容易发生裂变的重核元素，但一般情况下也不会轻易裂变。在核电厂的核燃料发生裂变之前，要将可以释放中子的铍9 (^9Be) 和钷252 (^{252}Cf) 放入核燃料组件之间进行“点燃”，这些物质释放的中子就是核裂变链式反应的“启动”中子。只有当铀235原子吸收了中子，其原子核变得不稳定时，才会发生分裂。在大多数情况下，一个原子核分裂成2个（核分裂生成物），同时放出大量的热能。

铀235在发生裂变时，也会释放中子。释放的中子撞击其他的铀235，被吸收后会引发次级核裂变，而次级核分裂释放的中子又会引起再下一级核裂变。这样不断继续，就形成了核裂变的“链式反应”。

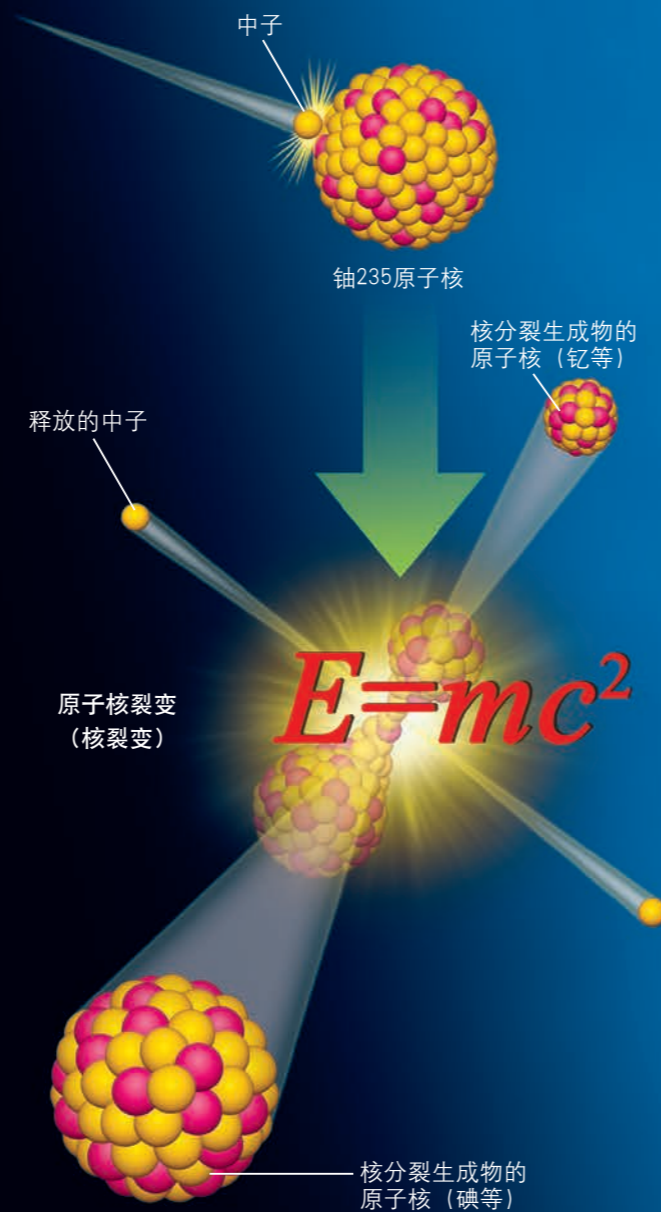
为了保证核裂变的顺利进行，必须调控核反应堆内的中子数量，使得一个铀235核的裂变恰好引发另一个铀235核的裂变，这种链式反应的状态叫做“临界状态”。

在大多数情况下，铀235发生裂变时会释放2~3个中子。如果这些中子全部引发次级核裂变，那么核裂变的次数将会以几何级数的方式不断增加（超临界状态）。这种情况下热量释放过多，可能会出现危险。相反，如果这些中子的大部分被核燃料以外的物质吸收，那么次级核裂变就无法顺利进行，链式反应也会随之终止（次临界状态）。

核裂变过程中减少的质量转化为热能

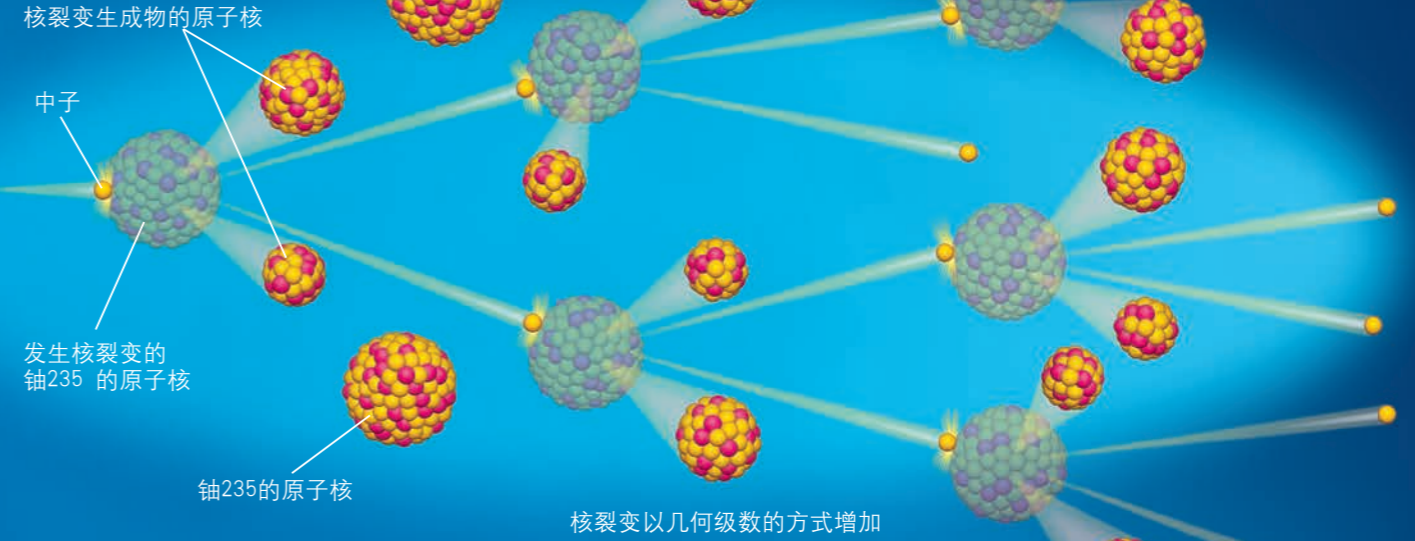
核裂变发生时，其生成物与中子的质量之和略低于原来铀235原子核的质量（约减小0.1%）。这些减少的质量转化成了热能（铀235的每次核裂变产生的热量约为 2.79×10^{-11} 焦耳）。世界上首次提出质量可以转化为能量的是著名物理学家阿尔伯特·爱因斯坦（1879~1955），后来这个理论用 $E=mc^2$ 表示。从这个公式可以看出，核裂变过程中产生的能量（ E ）等于减少的质量（ m ）与光速（ c ）的平方的乘积。

1克铀燃料所含的铀235裂变产生的热量，可以让10吨左右初始温度20℃的水沸腾。采用核能发电，核裂变产生的热能中30%~35%可以转化为电能。火力发电燃烧化石燃料产生的能量中，约40%可以转化为电能。

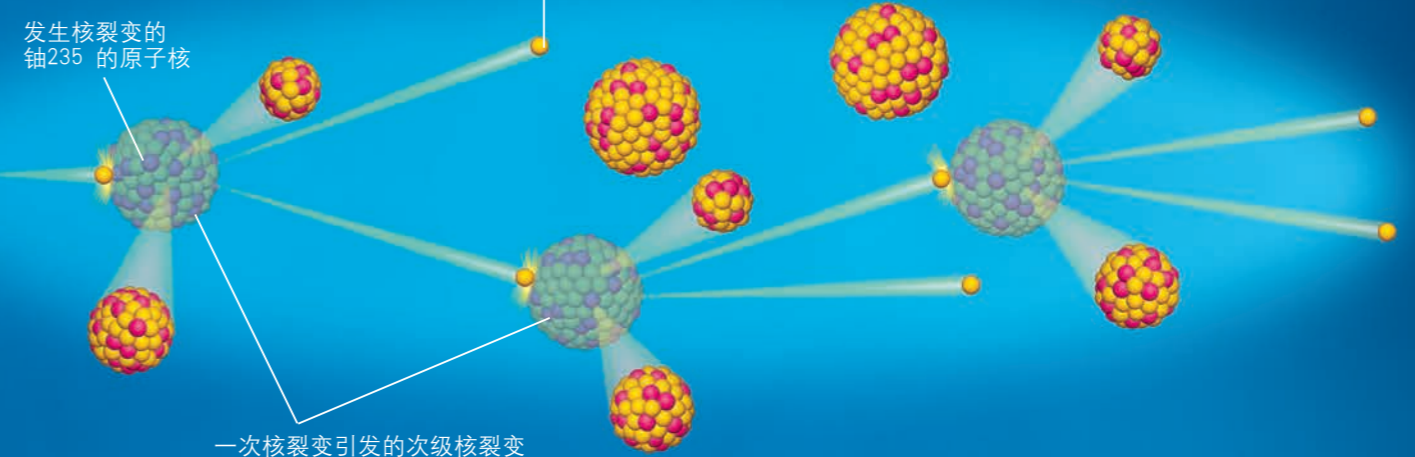


火力发电靠燃烧煤、石油或天然气，从化学能获取热能。“燃烧”是指燃料与空气中的氧气结合，发出剧烈的光和热的现象。但用核能发电时，核反应堆内的铀燃料不会像石油或天然气一样燃烧，而是利用原子能的“核裂变”现象获取热能的。

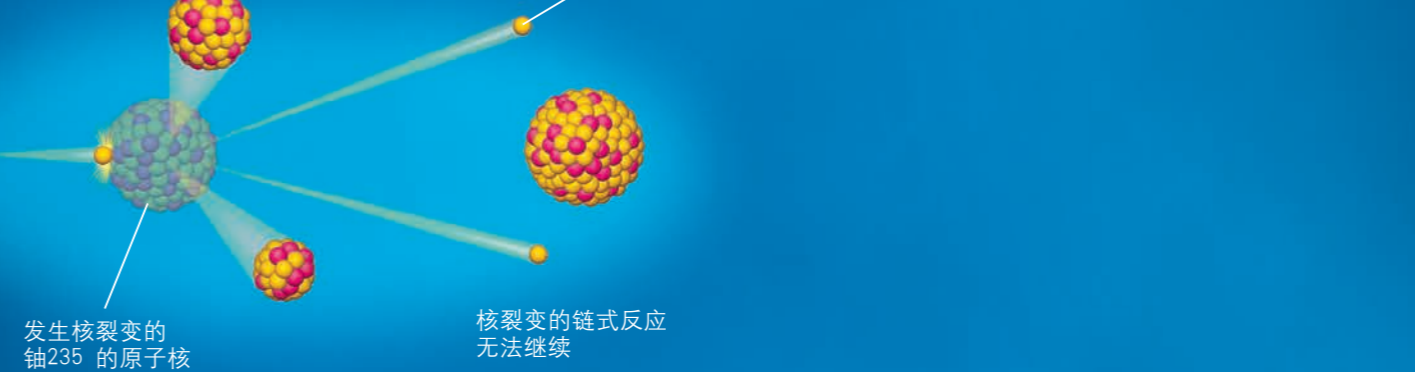
超临界状态（危险的状态）



临界状态（运行中的核反应堆）



次临界状态（最终核裂变停止）



铀裂变的产物

核能发电时，会生成各种放射性同位素

核能发电时，核燃料中的铀可以生成各种放射性同位素。

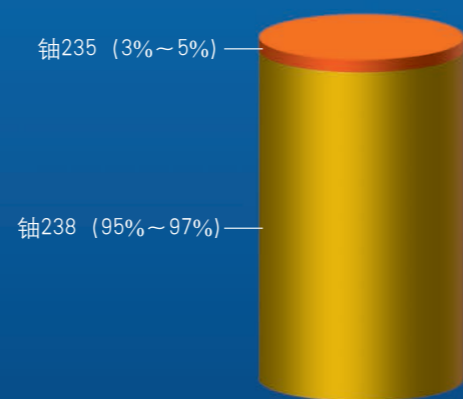
铀235在吸收中子后一分为二，分别变成不同的原子。由于其分裂方式多种多样，因此可生成各种原子，例如，变为铯137 (^{137}Cs) 和铷95 (^{95}Rb) (右页上方的图片)。之后，铯137放射出 β 射线，变为钡137m ($^{137\text{m}}\text{Ba}$)；铷95放射出 β 射线，变为锶95 (^{95}Sr)。与此相反，铀238即便吸收了铀235核裂变所生成的中子也不会分裂，而是变为铀239 (^{239}U , 右页下图)。铀239放射出 β 射线，变为镎239 (^{239}Np)。镎239放射出 β 射线，变为钚239 (^{239}Pu)。核能发电时，当核燃料中的铀235消耗减少到1%左右后，核燃料就变成了乏燃料。经化学处理回收铀和钚后，乏燃料变为高水平放射性废物。高水平放射性废物中含有遗留的铀和钚以及在核能发电过程中产生的其他各种放射性同位素。钚239的半衰期大约为2.4万年，铯137的半衰期约为30年。也就是说，需要超过10万年的时间，高水平放射性废物放射出的放射剂量才能衰减到足够低的水平。

为什么核电厂的发电效率低于火电厂？

汇集了更多科技含量的压水堆核电厂，也是通过“烧开水”的办法来发电，发电效率竟然比火电厂还低（核电厂效率约30%，火电厂效率约40%）。这是为什么呢？

压水堆核电厂使用没有放射性的水蒸气来推动蒸汽轮机发电，和火力发电使用的发电机组没有太大差别。高温高压的水蒸气（进气）从喷嘴处进入发电机组后，压力减小，体积膨胀形成高速气流，推动蒸汽轮机的一层层叶片旋转做功，最终的排气温度和压力变低，作为乏气被冷却成水，继续循环使用。在这个过程中，水蒸气温度和压力变化，可视转化为机械能的能量和热损失。对于蒸汽轮机来说，如果前后的温度差越大，说明转化为机械能的能量越多，转化效率也越高。

使用前的铀燃料成分



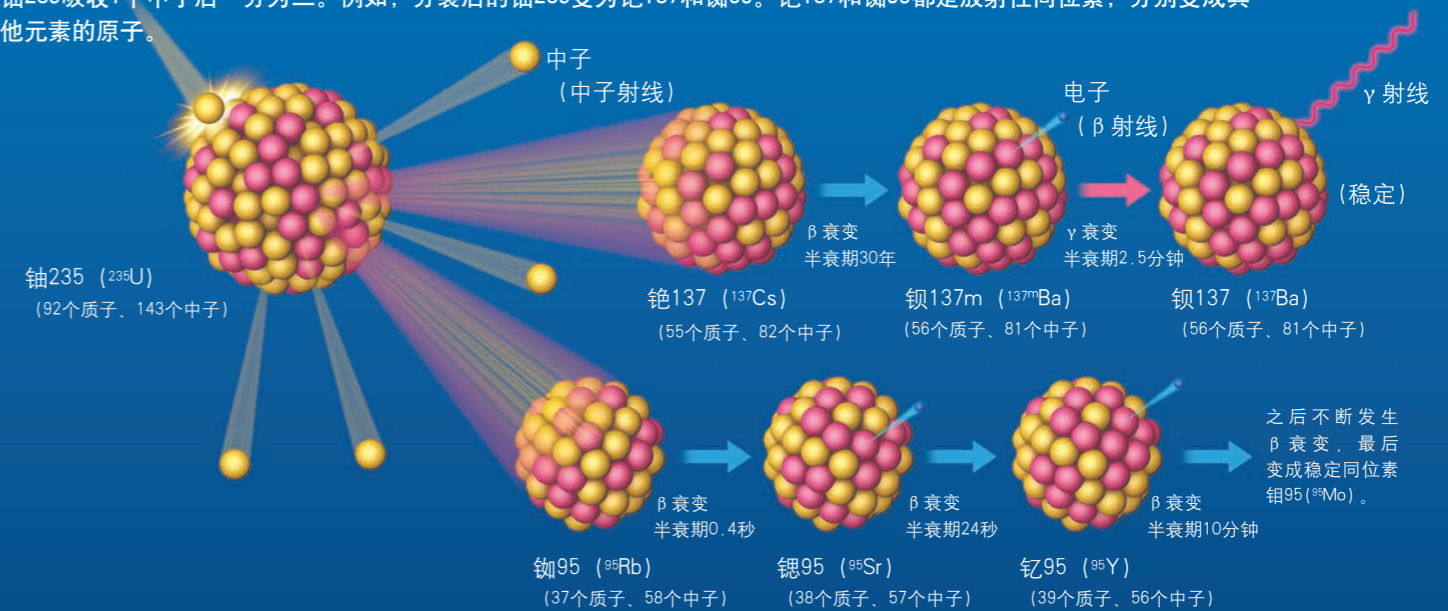
从能量传输的步骤来看。火电厂的能量转换过程是：化石燃料燃烧→加热水→高温高压蒸汽推动蒸汽轮机→发电。以华龙一号为代表的压水堆为例，能量转换过程是：核裂变反应→加热一回路水→加热二回路水→高温高压蒸汽推动蒸汽轮机→发电。火电厂的进气端温度可达600℃，压力可达310个大气压（超超临界），可谓“优质蒸汽”，在排气时，温度差较大，意味着转化成的机械能较多。

而核电厂首先要考虑到放射性物质的安全性，压水堆核电厂增加了“二次换热”，即将具有放射性的一回路水通过蒸汽发生器，传热到没有放射性的二回路，所以进气端的水蒸气的温度、压力比火力发电要低一些，最后的蒸汽温度差也更小。因此，核电厂的发电效率比火电厂低。

利用核能就像驯服一匹脾气暴躁的烈马，为了确保核电厂的安全，人们不得不用一系列手段将核能层层化解。华龙一号核电机组安全系统的建造成本几乎占了总成本的一半。即便如此，核能输出的能量依然很可观。目前的核电厂发电效率，是以保证安全为大前提，并综合了如材料耐辐射性、耐腐蚀性等各方面因素的结果。随着技术的不断发展，核能发电的效率有望得到进一步的提升。

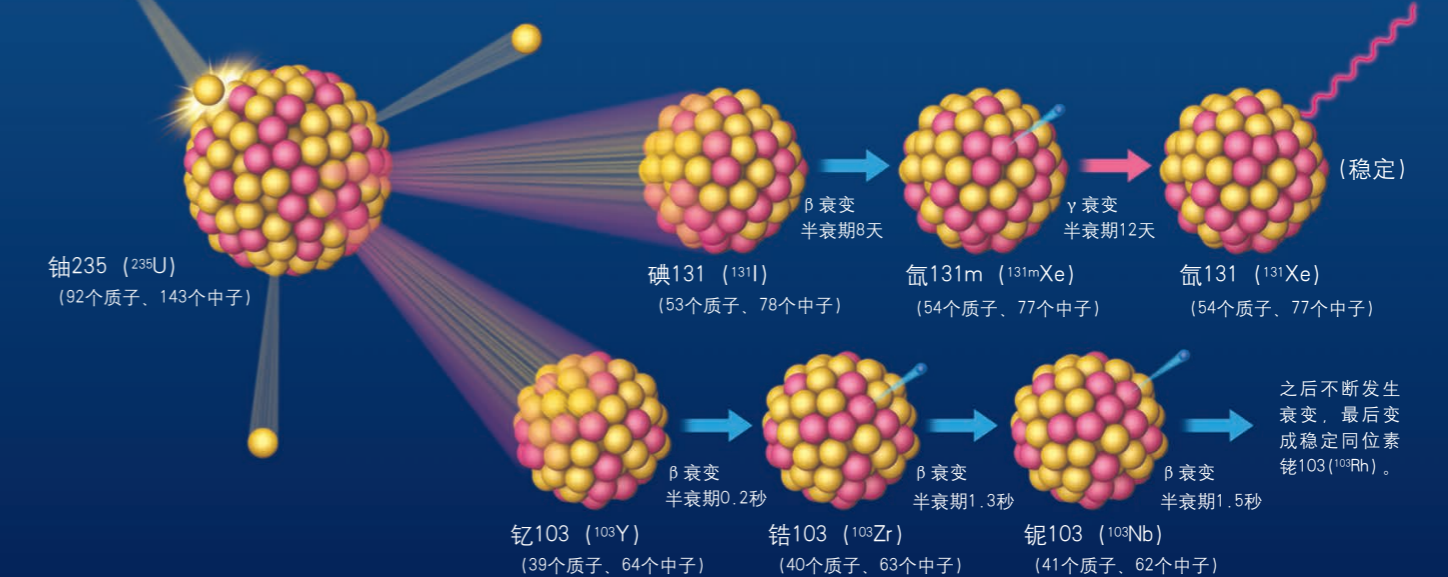
A. 铀235所生成的放射性同位素的例子（仅画出了原子核）

铀235吸收1个中子后一分为二。例如，分裂后的铀235变为铯137和铷95。铯137和铷95都是放射性同位素，分别变成其他元素的原子。



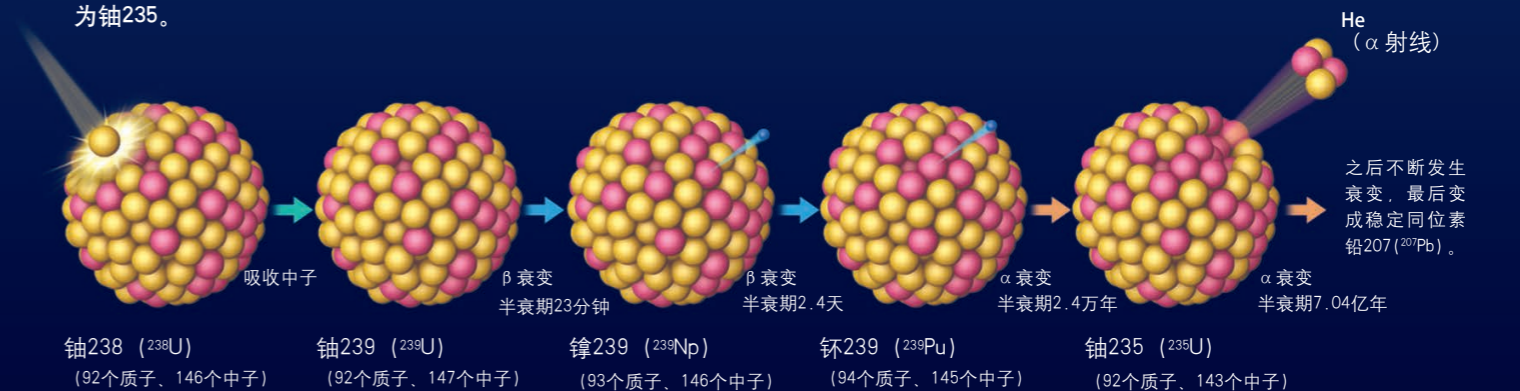
B. 铀235所生成的放射性同位素的例子（仅画出了原子核）

铀235吸收1个中子后一分为二。例如，分裂后的铀235变为碘131和钇103。碘131和钇103都是放射性同位素，分别变成其他元素的原子。



C. 铀238所生成的放射性同位素的例子（仅画出了原子核）

铀238吸收中子后变为铀239。铀239是放射性同位素，变为镎239。之后，镎239变成钚239，钚239变为铀235。

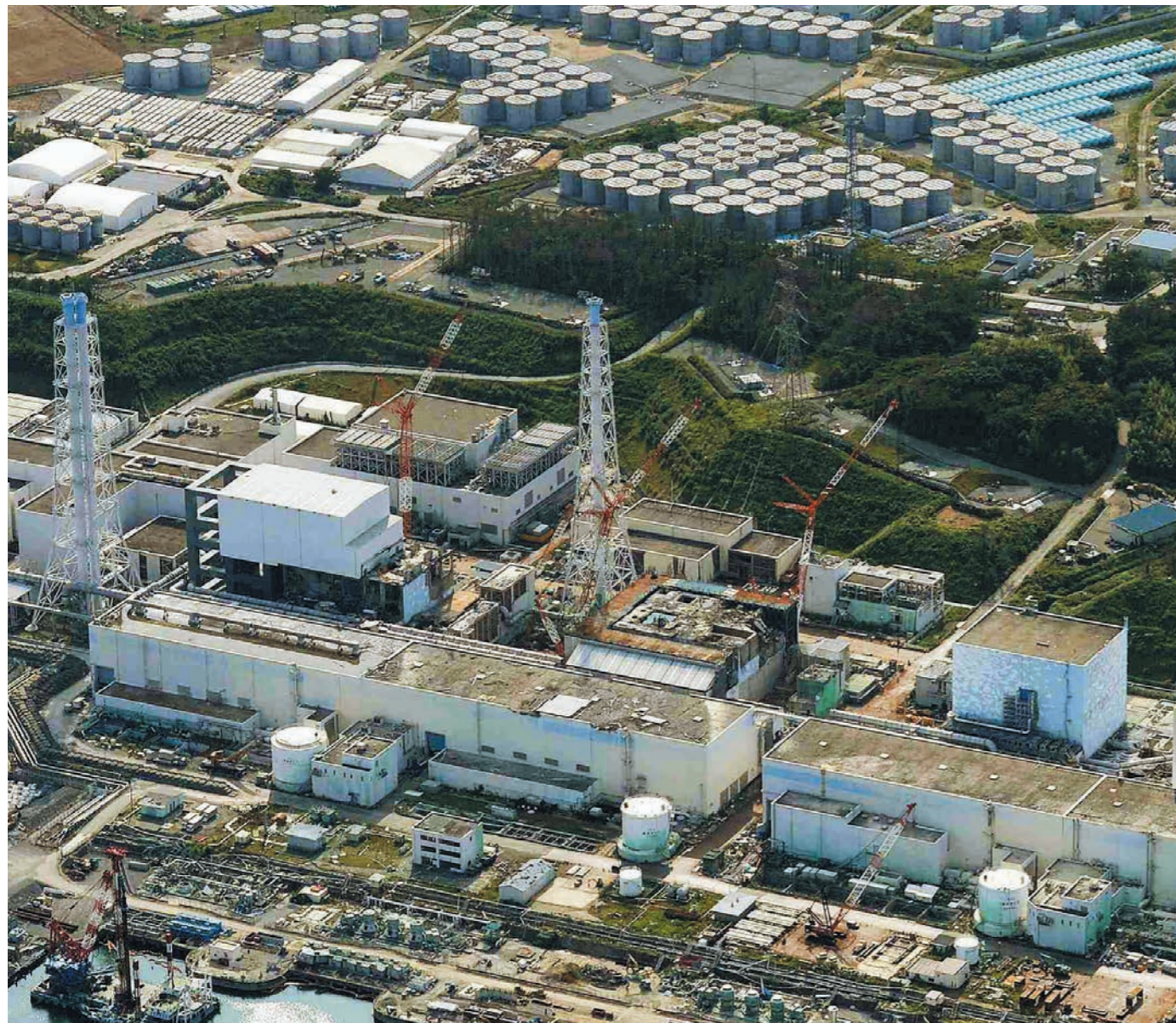


华龙一号从“弃核”阴霾中走出

日本福岛核事故引发了全球“弃核”风潮

2011年3月11日，日本福岛第一核电站因为大地震引发的海啸，导致一系列安全措施出现故障，发生了严重的核泄漏事故。这一事故不仅对当地的环境造成了重大影响，还使全世界的核电发展前景充满迷雾。1979年

发生的美国三哩岛核事故、1986年发生的苏联切尔诺贝利（现属乌克兰境内）核泄漏事故已经在人们脑海里留下了深刻的印象。此次事故让各国民众进一步对核电站的安全性产生了怀疑，世界各国的核电计划受到了重大冲击。



日本福岛核事故

2011年3月11日，日本宫城县外海遭遇大地震并引发了巨大的海啸。海啸的波浪冲上岸后很快淹没了核电站，并导致应急柴油发电机房断电。此后，核岛里的堆芯热量无法通过电力驱动的泵导出。随着堆芯温度不断上升，堆芯最终融毁。接着，燃料棒表面的锆合金与水在高温下发生了“锆水反应”，过程中不断产生氢气。当反应堆厂房积累的氢气浓度超过极限后，引起氢气爆炸，掀翻厂房，将大量放射物质抛了出来，引发了日本有史以来最严重的核泄漏灾难。

瑞士

瑞士政府在2011年5月25日表示，瑞士当时存在的5座核电厂将于2019~2034年陆续达到最高使用年限，之后将不再重建或更新核电厂。

德国

德国环境部长在2011年5月30日宣布，德国将于2022年前关闭国内所有的核电厂，发展再生能源技术，德国将成为首个不再使用核能的主要工业国家。不过，德国目前每年还要从法国购买相当比例的电能，而这些进口的电能很多来自核能发电。

法国

2011年3月23日，欧盟委员会与西欧核监管协会（WENRA）发布倡议，要求开展欧洲范围内的核电厂风险和安全评估，即“压力测试”。作为核电大国，法国随即成立专职应急组织，负责国内安全检查与评估的相关工作。6~10月，法国核安全局在其境内开展了针对福岛核事故的专项大检查工作。考虑到核电在法国电力生产中占有相当大的比重，法国政府没有做出关停大部分核电厂的决定。

2019年9月，法国通过的《能源与气候法案》中详细规划了法国能源未来的转型轨迹，希望在2035年前降低核能在电力生产中的份额，由目前的75%降低至50%，并最终达成与可再生能源平衡的目标。

日本

福岛核事故发生后，日本菅直人政府紧急下令关停所有在运核电厂。后续接任的野田佳彦政府为进一步平息国内反核情绪，提出“2030年零核电”的目标。但在核事故发生前，日本核电约占能源供给的30%。核电厂关闭后，电力短缺问题已经严重影响日本经济民生，并且短时间内难以靠其他能源替代核电地位。2014年初出台的《能源基本计划》草案中，日本政府将核电定位为“重要的基本负荷电源”，明确在安全的条件下推进核电厂重启的方针。

中国

在福岛核事故之前，福建福清核电厂原计划要上马建造的是具有三代核电技术特征的CP1000机组（华龙一号的前身）。2011年

初，国家核安全局已经启动了该项目许可证安全审批，进入开工许可证审查的阶段。然而在3月11日发生的日本福岛核事故，对我国核电厂的建设和后续计划造成了重大影响。事故发生5天后，我国紧急发布了应对措施：暂停国内所有核电项目的审批；暂停所有新建核电站、重新评估；对所有核电设施进行逐一排查，发现安全问题，立即解决，不能解决的，要停止运行。CP1000机组在临近开工之时被迫搁浅，只能重新设计。

重整旗鼓

不过，福岛核事故的发生，客观上让我国提高了安全发展核电的标准和要求。当时，国产自主品牌、自主设计不被看好，许多人普遍相信美国和法国的技术优于国内。为了追赶核电强国的技术水平，除了引进国外先进技术，中国核工业集团有限公司（以下简称“中核集团”）开启了自主研发的新征程。经过一年多的反复迭代更新，2012年底，华龙一号总体技术方案已经成型。

2013年，华龙一号可行性研究报告通过审查，标志着我国自主研发的三代核电机组获得了国内专家认可。2014年，华龙一号总体技术方案通过国家能源局、国家核安全局专家评审，专家一致认为华龙一号的成熟性、安全性和经济性可满足三代核电技术要求；核心技术具有自主知识产权，可自主出口并尽快启动示范工程。

2014年底，华龙一号通过了国际原子能机构（IAEA）反应堆通用设计审查（GRSR）。这是我国自主三代核电技术首次面向国际同行审查。专家认为，华龙一号在设计安全方面是成熟可靠的，满足IAEA关于先进核电技术最新设计安全要求；其在成熟技术和详细的试验验证基础上进行的创新设计是成熟可靠的。

2015年5月7日，中国自主三代核电技术“华龙一号”首堆示范工程——中核集团福清核电厂5号机组正式开工建设。

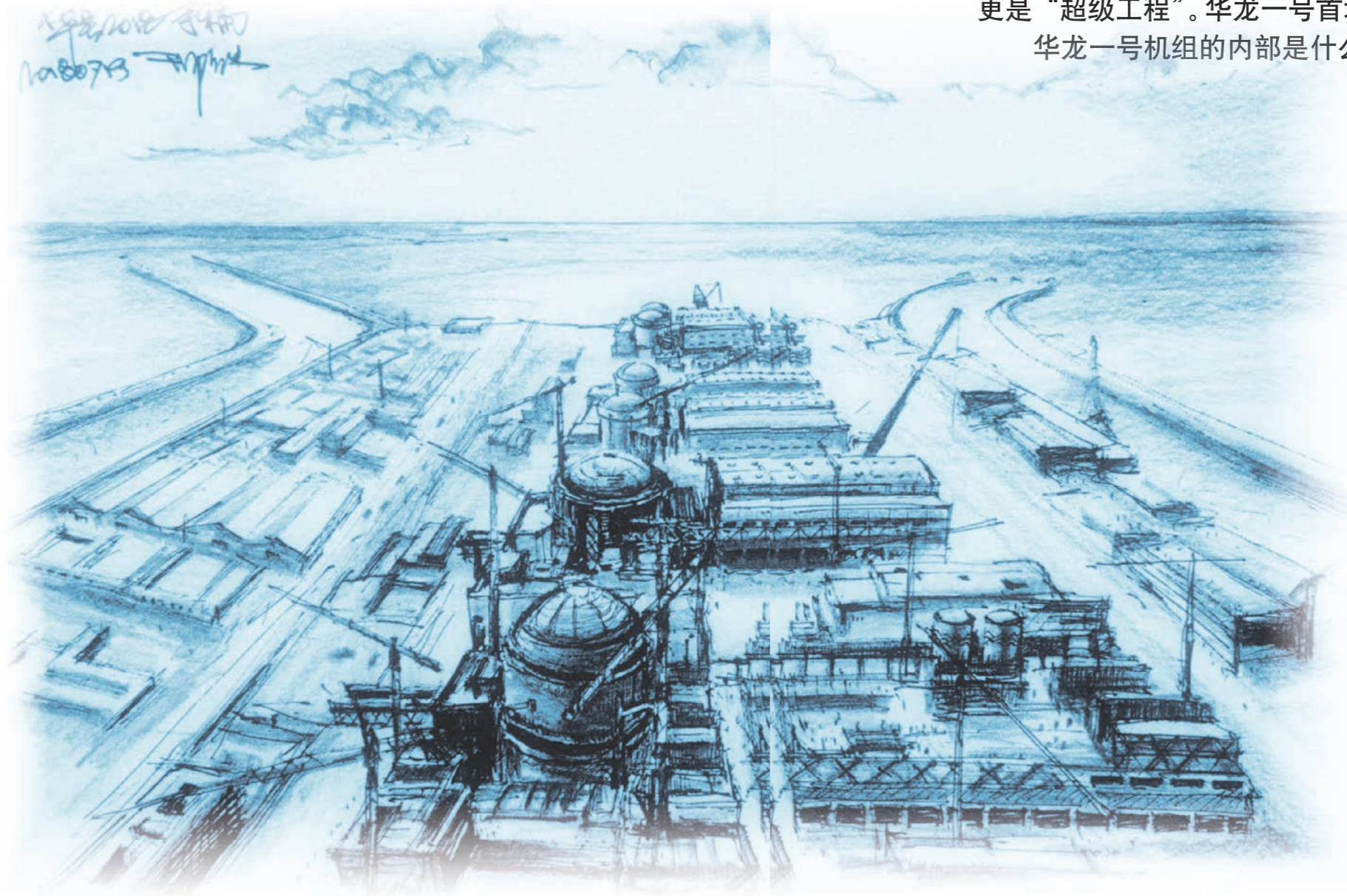
2021年1月30日，华龙一号全球首堆示范工程中核集团福建福清5号机组正式投入商业运行。

第2部分

走进华龙一号

6万台（套）设备，165千米管道，2200千米电缆，上千人的研发设计团队，5300多家设备供货厂家，近20万人参与建造……这是“大国重器”，更是“超级工程”。华龙一号首堆的国产化率达到88%以上。

华龙一号机组的内部是什么样的？有哪些重要的组成部分？



第2部分的内容

- ★ 华龙一号首堆全貌
- ★ 华龙一号机组的结构
- ★ 华龙一号怎样发电？
- ★ 反应堆内部的主要组成
- ★ “点燃”核燃料

华龙一号首堆全貌

遥感卫星拍摄的福清核电站

我国的“高分2号”卫星于2019年9月23日拍摄



华龙一号首堆

福清核电站全貌

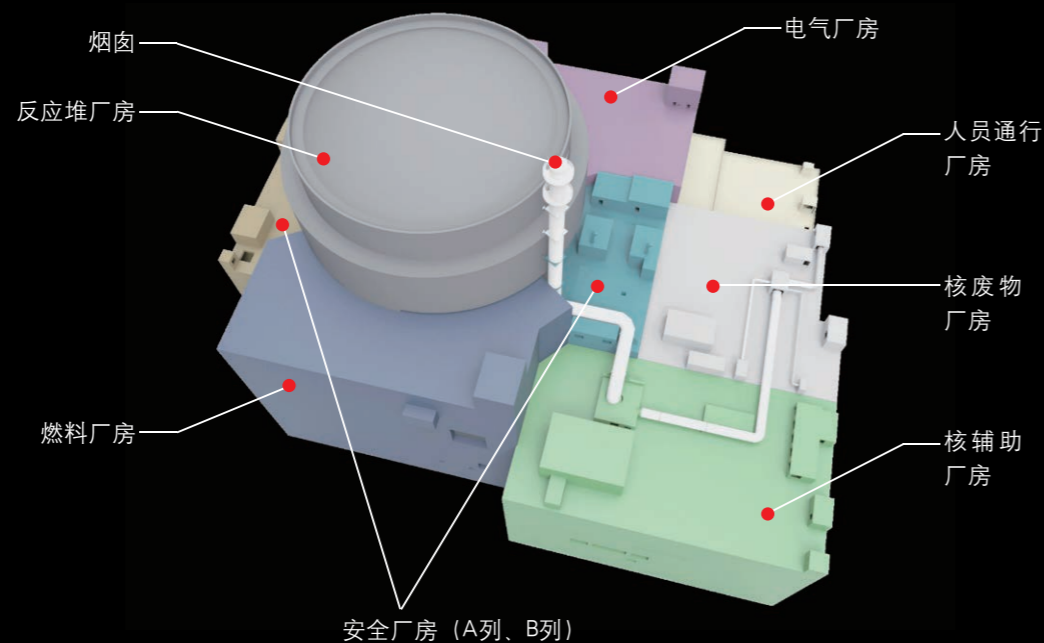
福清核电站位于福建省中部沿海，福清市境内。目前一共有6台核电机组，每台都是百万千瓦级压水堆。1~4号机组为M310改进型，1~2、3~4号机组呈双堆布置，即两台机组之间有共用的厂房。5号、6号机组为单堆布置，均为华龙一号机组。5号机组即为华龙一号首堆。6号机组正在建设中。

华龙一号每台机组装机容量为116.1万千瓦，每年可发电近100亿度，设计寿命60年。

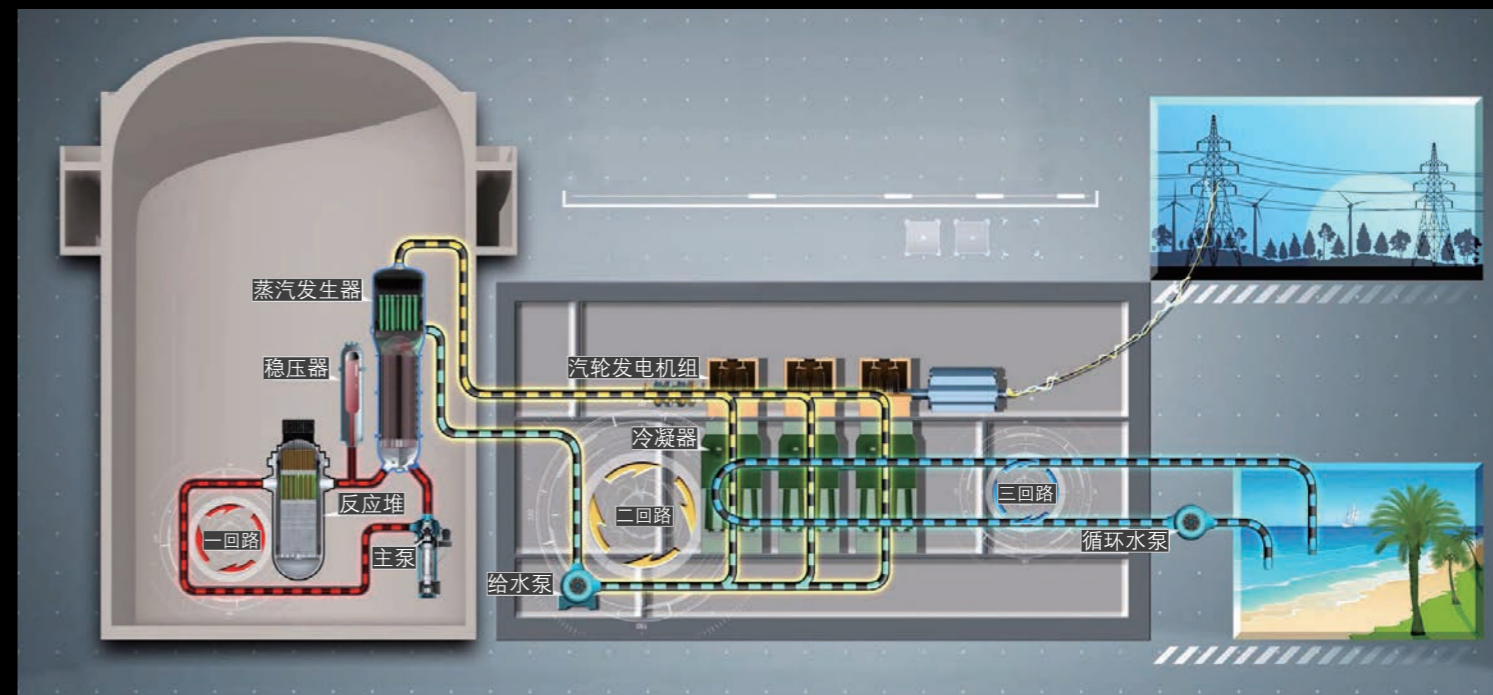
华龙一号机组的结构

福清核电站1~4号机组是双堆结构，即两个机组的核岛反应堆靠得很近，互相连接，共用服务厂房。华龙一号的机组是单堆结构，即服务厂房以核岛为中心紧密布置。这种结构的优点在于可以在厂址上灵活布置，节省用地成本。

华龙一号的核岛厂房以反应堆厂房为核心进行布局，安全厂房和电气厂房紧靠反应堆厂房，以便管道和电缆的铺设，燃料厂房的位置以燃料转运通道为基准。



使用华龙一号技术的5、6号机组



华龙一号机组有3个回路

反应堆是核电厂的最核心设备，核燃料组件放在压力容器中。堆芯核燃料发生中子反应产生大量的热，加热冷却剂（水）而形成高温高压水，为核电厂提供动力源。这些高温高压水通过管道被送往蒸汽发生器，加热二回路的水，使之变成高温高压的水蒸气。因为送往汽轮机的水蒸气不含放射性物质，所以没必要为汽轮机厂房做防辐射设计。

一回路：反应堆压力容器、蒸汽发生器、冷却剂泵等设备和管线组成的封闭回路，冷却剂为硼酸水，直接与核燃料组件接触。加热后的水温约为320℃，压力为150多个大气压，仍然不会沸腾。

二回路：蒸汽发生器内有密集排列的金属管道，其中密封管道

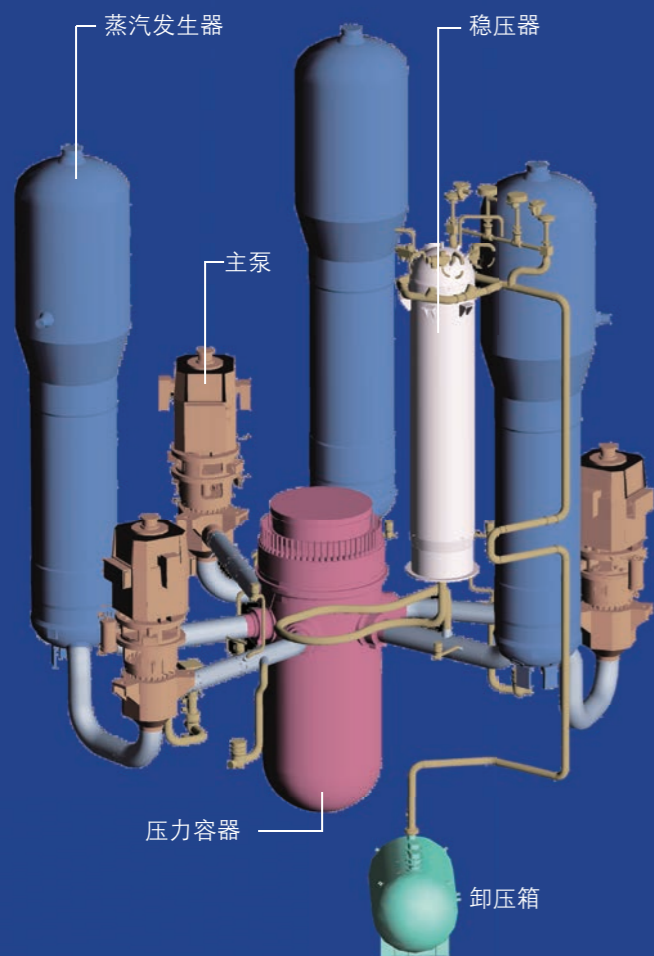
内的是一回路水，管道外侧是二回路水，被加热后的水变成水蒸气从上方流出。高温（280℃）高压（68个大气压）蒸汽推动蒸汽轮机，热能转化为机械能，再转化为电能。工作后的乏气冷凝为水，继续参与二回路循环。

三回路：海水作为最大的热阱，冷却二回路的乏气。根据环保的要求，除了排放的冷却水的辐射值要达标，同时，在距离出水口临近水域，还需要分析取水排水工程对水体、水生生物、近岸海域环境等的影响，满足相应的标准。

本图为了简化，反应堆厂房只显示了冷却剂系统的1个环路，华龙一号具有3个环路。



华龙一号怎样发电？



用一回路的高温高压水使二回路中的水沸腾

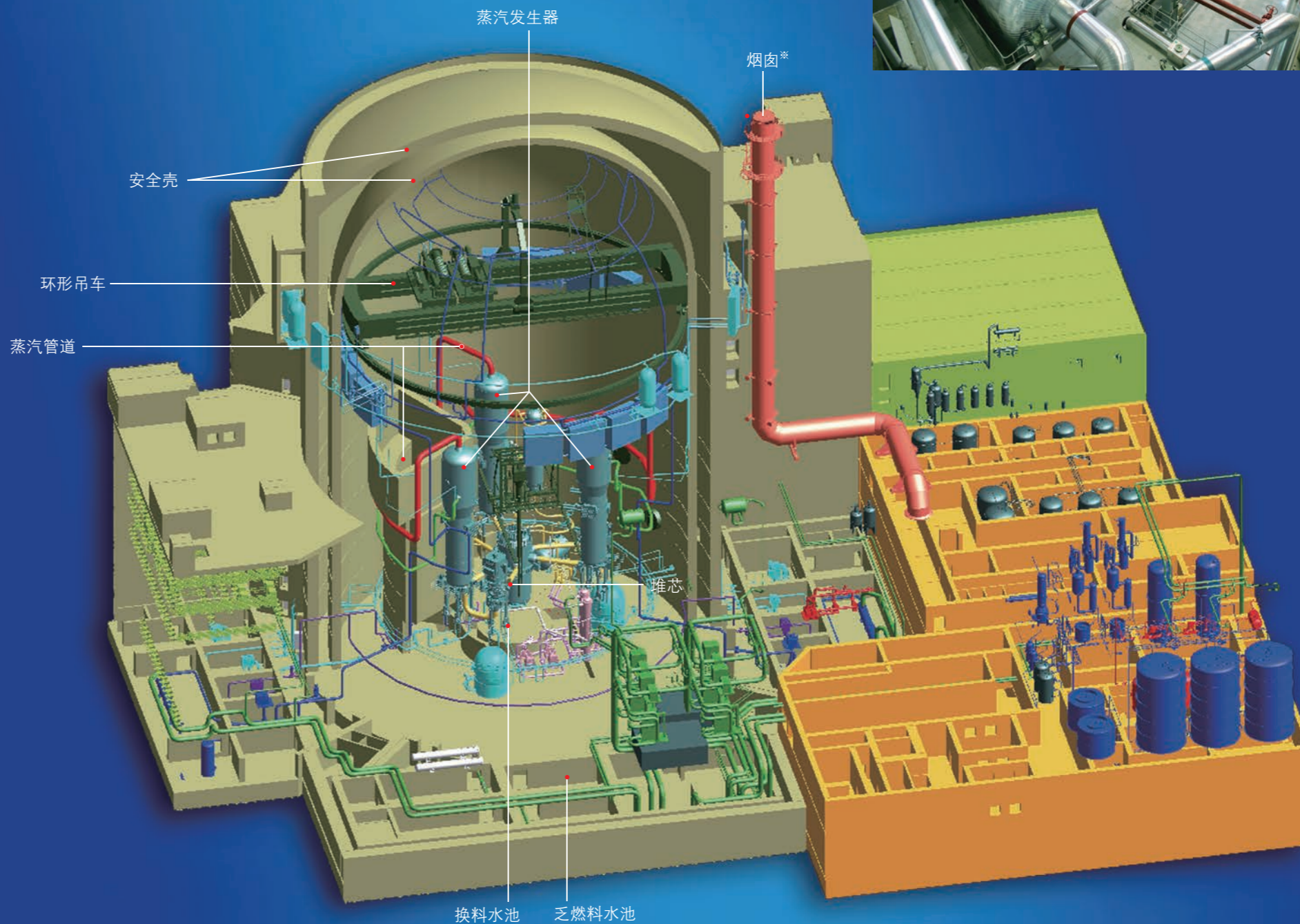
华龙一号机组将177组长约4米的燃料组件放置在厚约20厘米的钢质压力容器。压力容器总高20米（含堆顶结构），直径5米，充满水的重量约为940吨。核燃料发生中子反应时，这些水被加热。因为压力容器中的压强维持在155个大气压（15.5MPa）左右，所以水被加热到320℃，仍然不会沸腾。

这些高温高压水被送往蒸汽发生器，利用自身的热能将二回路管道中的水加热至沸腾，产生高温高压（280℃，约68个大气压）的水蒸气。这些水蒸气被送到汽轮机厂房，推动汽轮机带动发电机发电。因为送往汽轮机的水蒸气不含有放射性物质，所以，就没有必要对汽轮机厂房做特殊的防辐射设计了。正因为如此，压水堆的构造也更加复杂。

压力容器和蒸汽发生器都放置在安全壳里面。压水堆的安全壳内壁是一层6毫米厚的薄钢板，外面包裹着预应力钢筋混凝土结构。安全壳本身也兼具厂房的功能。万一压力容器遭到了损坏，安全壳也能密封住泄漏的放射性物质。

含有放射性物质的水被密封在安全壳内

压水堆最大的特点是将由核燃料直接加热的水和推动汽轮机发电的水分离开。正因为如此，含有放射性的水被密封在安全壳内。蒸汽是在蒸汽发生器里制造出来的，平均每小时约有2.3万吨的水从压力容器运送到每个蒸汽发生器。这些水将热量传递到二回路中的水以后，又返回到压力容器继续加热。蒸汽发生器中的水被加热沸腾，成为压强约60个大气压、温度约280℃的水蒸气，被送往汽轮机发电。



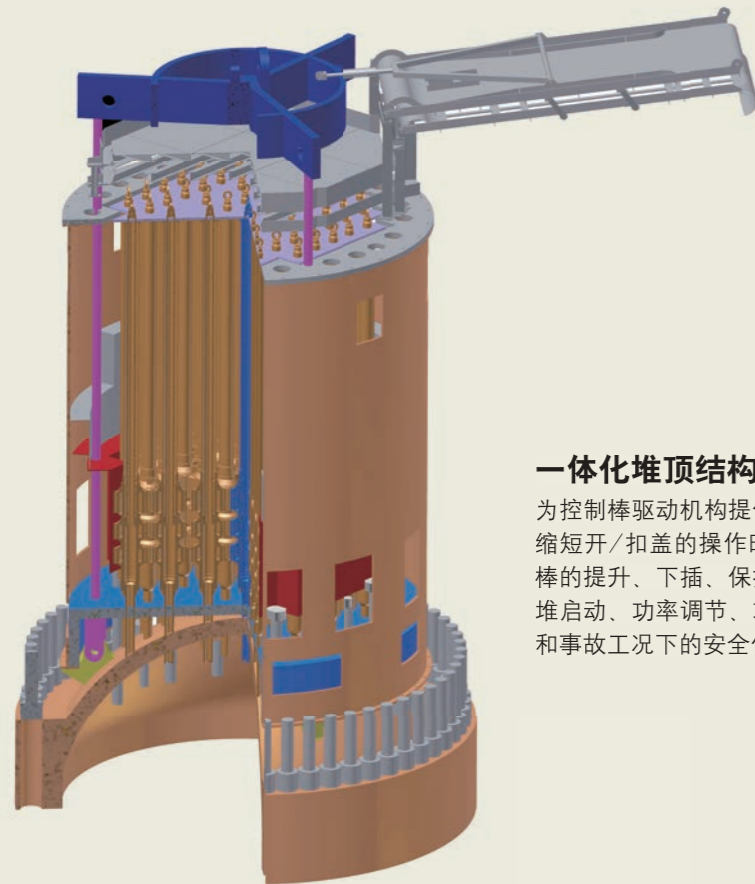
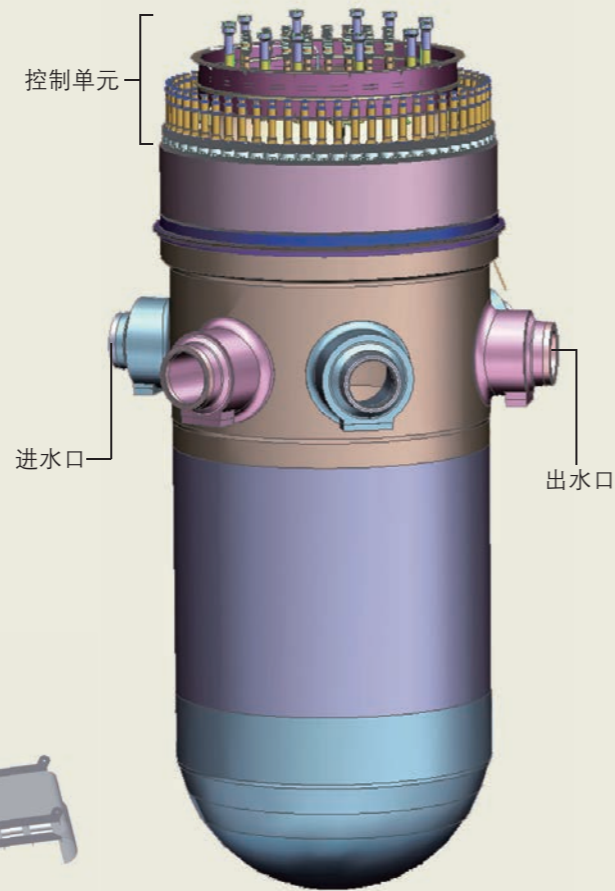
华龙一号机组内部

※ 核岛厂房工作时不排放二氧化碳等气体，运行期间都是密封的。这根烟囱里面装有过滤器，平时主要是核辅助厂房的工作人员用来通风换气，在紧急事故中，可以临时用来释放气体。

反应堆内部的主要组成（一）

压力容器

压力容器是反应堆的压力边界，由顶盖组件、容器组件和紧固密封件3部分组成，用作支承和包容反应堆堆芯，起固定和支承控制棒驱动机构、堆内构件的作用，并与堆内构件一起为冷却剂提供流道。为了减少热损失，压力容器外部还包裹了一层不锈钢保温层（本图未画出）。



一体化堆顶结构

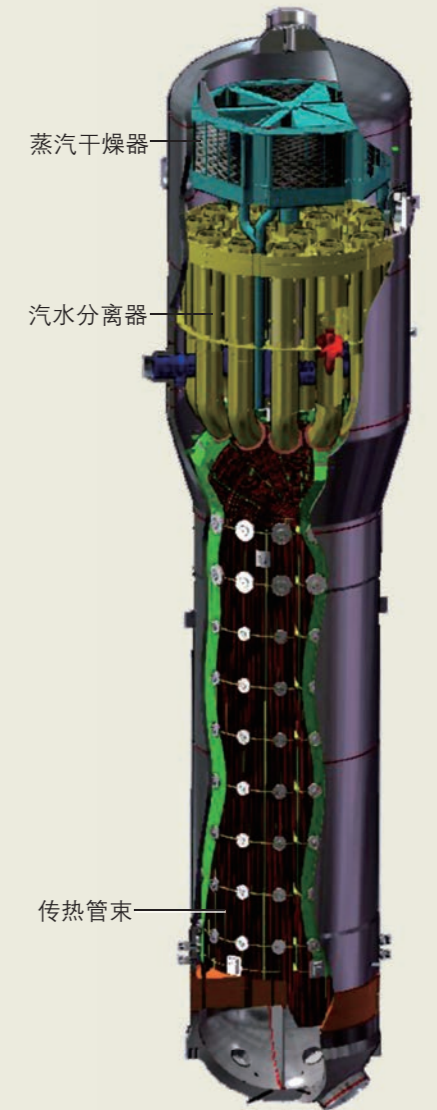
为控制棒驱动机构提供冷却和抗震支承，缩短开/扣盖的操作时间。通过驱动控制棒的提升、下插、保持及落棒，实现反应堆启动、功率调节、功率维持，以及正常和事故工况下的安全停堆。



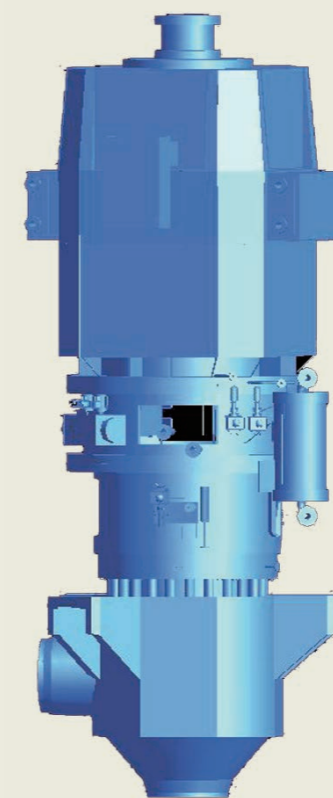
吊装蒸汽发生器

蒸汽发生器

一回路水和二回路水在这里相遇，却不会直接接触，而是被密封的金属管隔开。蒸汽发生器将反应堆冷却剂从堆芯带出的热量传递给二回路水，产生流量、压力和湿度符合要求的饱和水蒸气，驱动汽轮机发电。以管板和U形管管壁为屏障，隔离一回路和二回路的水，防止带放射性的一回路水进入二回路中。U形管之内为“一次侧”，之外为“二次侧”。在正常停堆冷却或者某些事故的情况下，蒸汽发生器还可以紧急导出堆芯的衰变余热，保护反应堆的安全。传热管束是蒸汽发生器的核心部件之一，一台蒸汽发生器中有传热管5835根，总换热面积约6494平方米。



蒸汽发生器



反应堆冷却剂泵

也称为“主泵”。驱动冷却剂在一回路中流动，确保有适当流量的冷却剂流经堆芯，把堆芯中产生的热量传递给蒸汽发生器的二回路水。单台泵的流量是每小时约2.3万吨水。

反应堆内部的主要组成 (二)



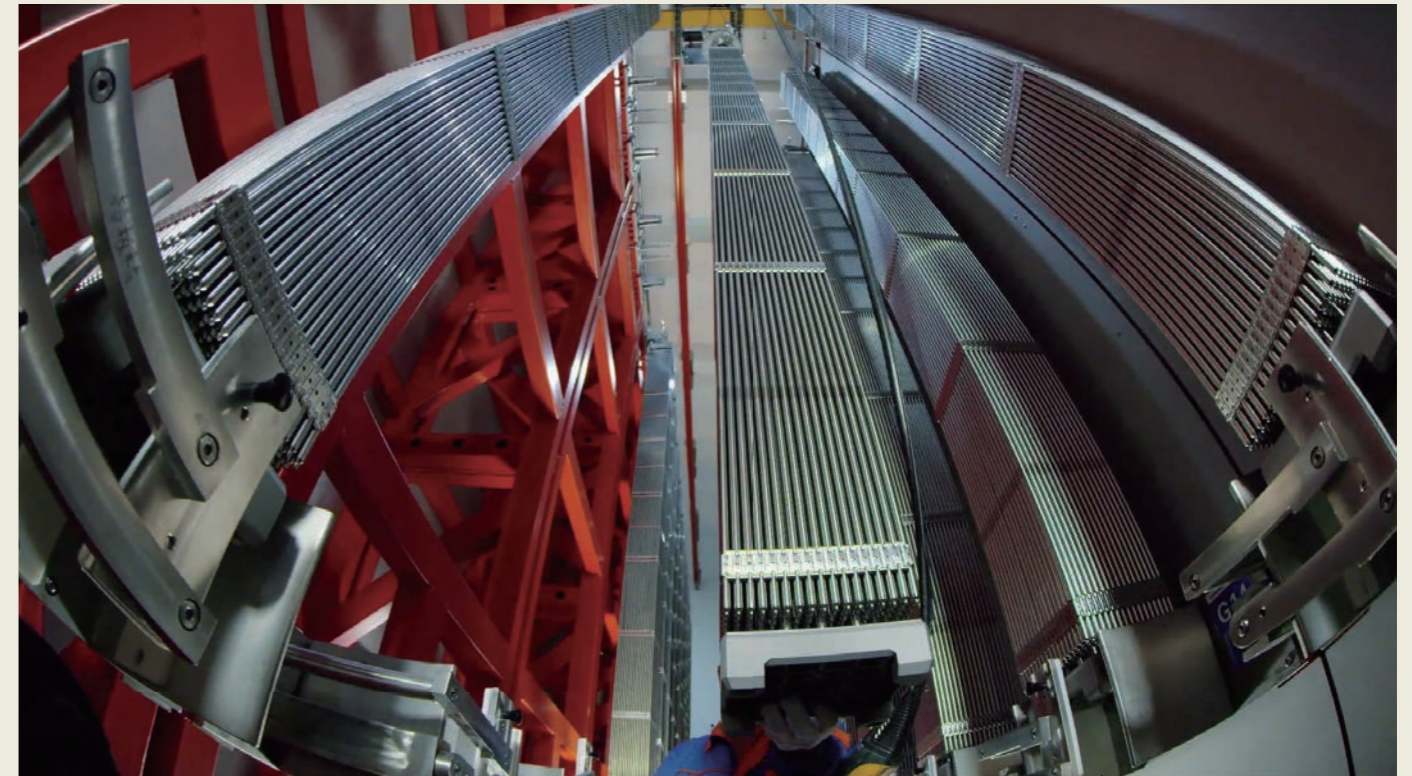
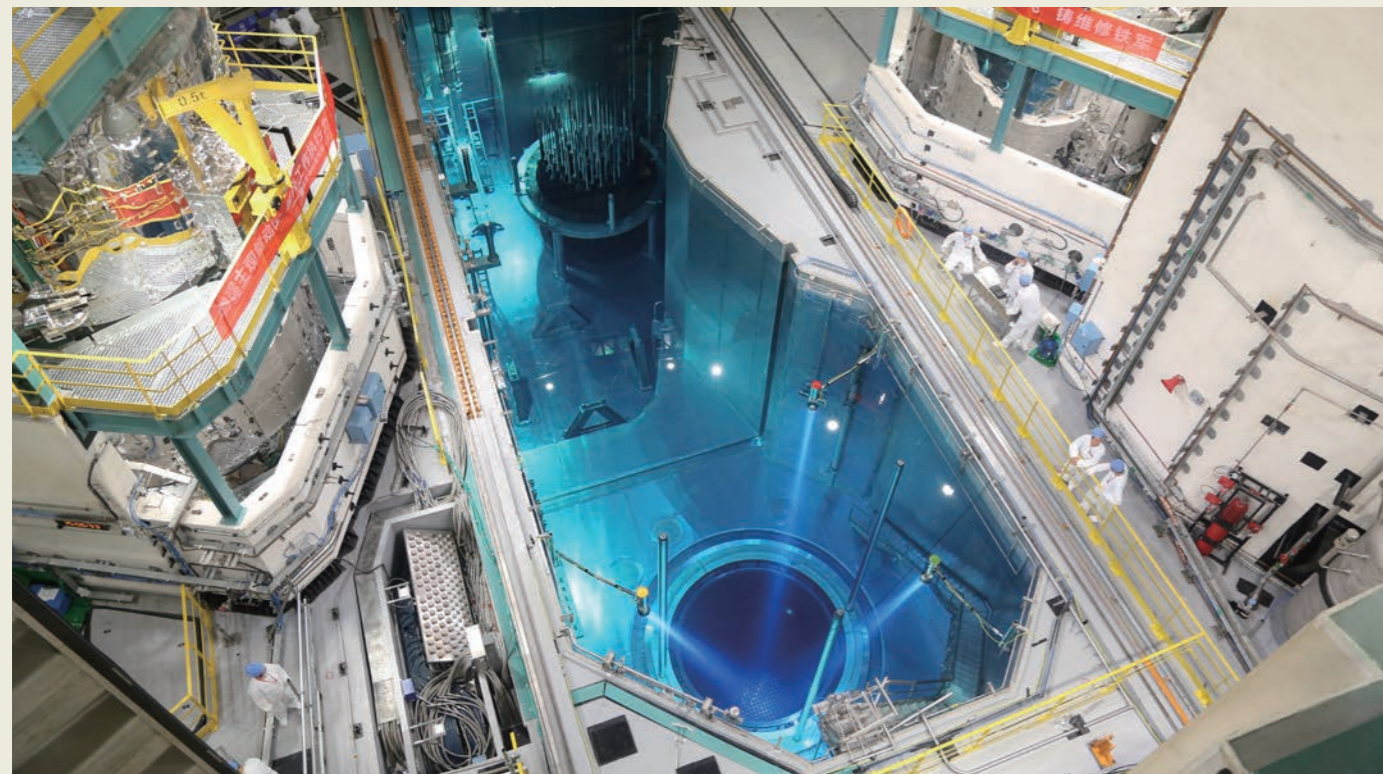
稳压器

用于调节因负荷瞬时变化引起反应堆冷却剂系统的压力波动，提高系统的运行稳定性。

冷却水

为什么核电站反应堆和乏燃料池的冷却剂都是蓝色的？冷却剂是溶解了硼酸的高纯水，本身是无色透明的。照明的灯光在水中发生散射，才呈现漂亮的湖蓝色。硼原子具有较大的中子吸收截面，可以调节部分的核反应进程。此外，含硼水对堆芯结构部件没有腐蚀性，并且不会吸附在部件上。

华龙一号首堆装填核燃料场景



核燃料组件

华龙一号采用我国自主研发的CF3燃料组件，整个反应堆布置177组，组成的堆芯近似于圆柱状，位于反应堆中下部。燃料组件和中子慢化剂、冷却剂等一起构成堆芯，点燃后发生链式裂变反应，是反应堆的核心。

CF3燃料组件以正方形阵列（17×17）排列，由264根燃料棒及燃料定位格架等部件组成。燃料组件除了用于支撑的隔架，还有24根导向管、1根仪表管。24根导向管用于插拔对应的控制棒。

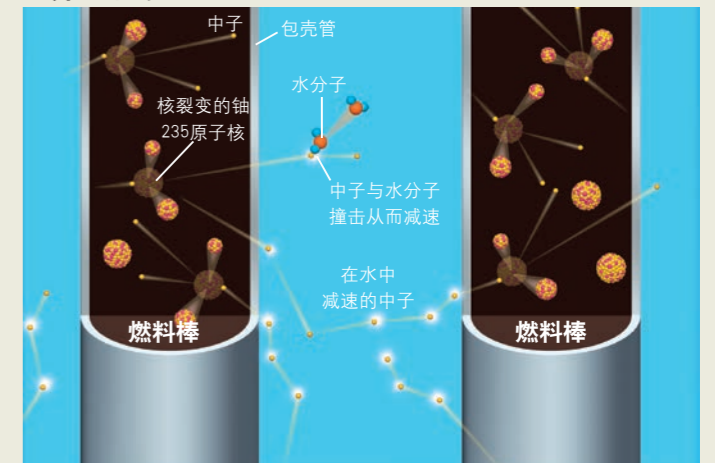
用控制棒调节核反应速度

要调节核反应堆的反应速度（核反应产生的热量），就必须控制核裂变的链式反应。核燃料中的铀235发生核裂变的时候需要吸收中子，所以，调节中子的数量就可以加快或者减缓核裂变链式反应的速度。

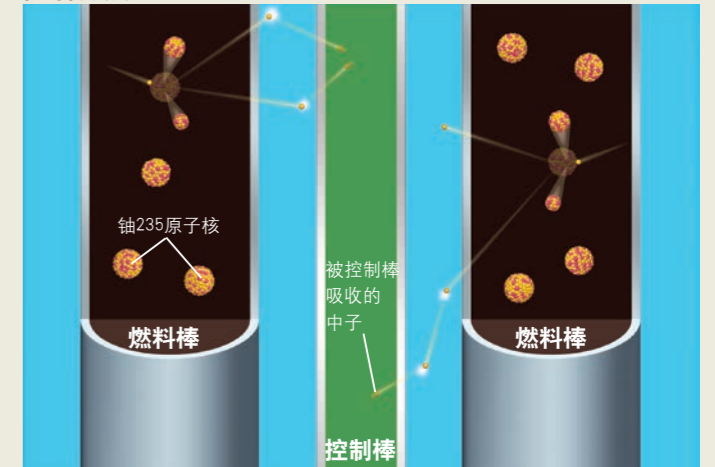
控制棒是反应堆中用来调节中子数量的装置。控制棒一般用易于吸收中子的材料制成，并包裹锆合金外壳，它通过插入或者抽出反应堆来调节中子的数量。

在有强烈地震和核反应堆出现异常的情况下，为了防止事故的发生，控制棒会自动快速地插入反应堆来阻止核裂变链式反应的继续进行，以达到紧急停机的目的。

临界状态的堆芯



控制棒插入堆芯



“点燃”核燃料

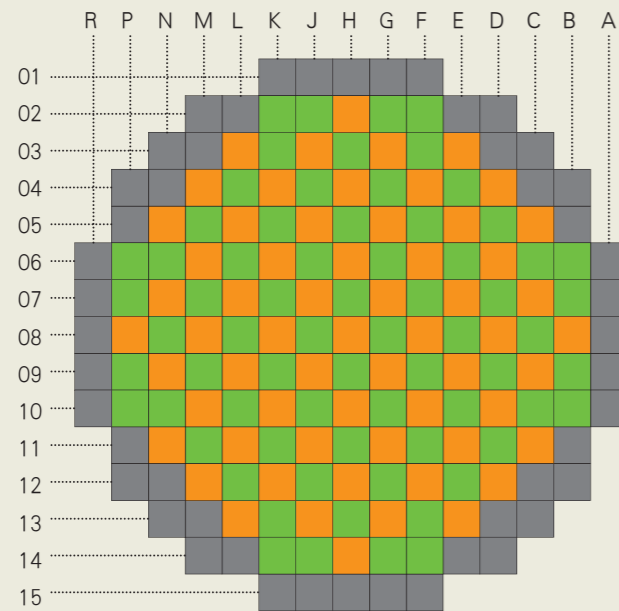
反应堆装入核燃料并封存以后，就要进入临界（点火）的阶段。

堆芯排布方式

华龙一号的创新之一，是堆芯采用了177组核燃料组件。与传统的核反应堆采用157

个燃料组件相比，多出了20组，同时考虑到运行安全的要求。这样做的优点在于，可以使核电厂停堆更换核燃料的时间间隔变得更长，可以18个月更换一次。

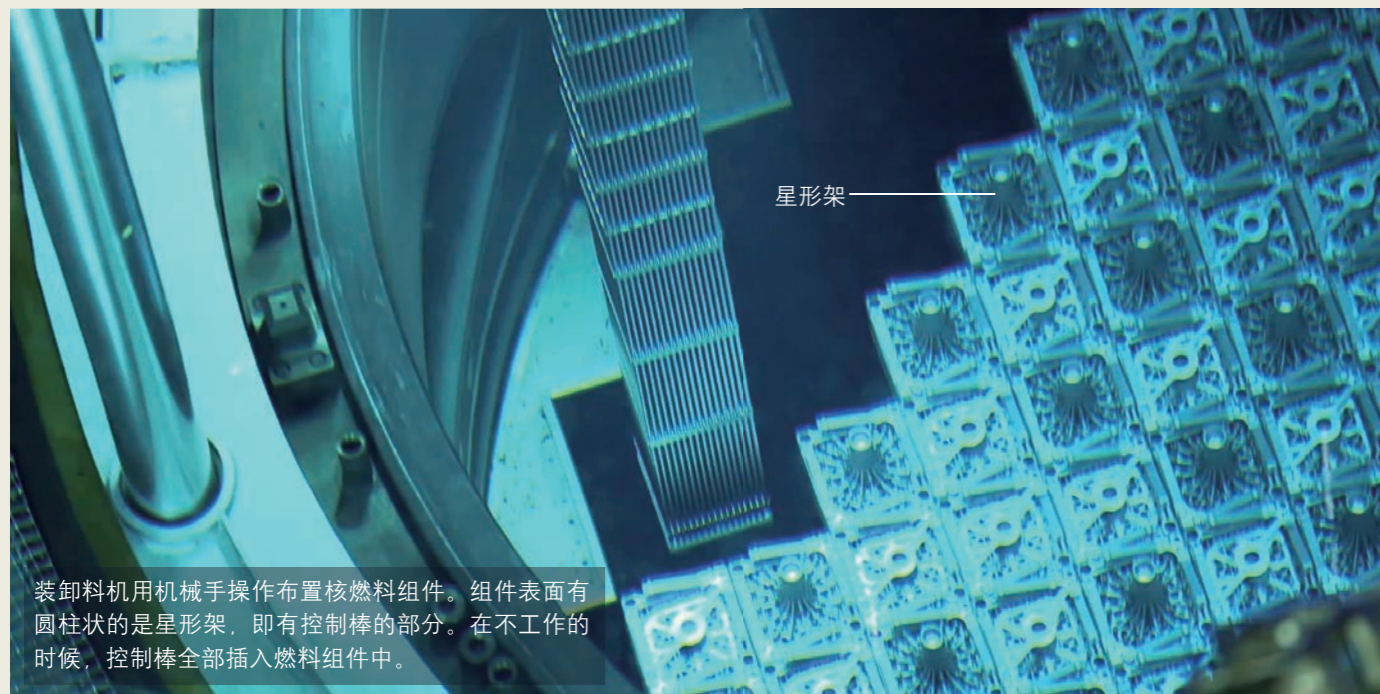
这些核燃料组件虽然外形一致，内部却按照铀235的富集度，分为1.8%、2.4%、3.1%



堆芯排布方式

如果堆芯内部的所有燃料组件的富集度都一样，容易造成中心区域的中子通量密度过高，也就是中心区域容易过热，对安全不利。因此需要按一定的规则排列核燃料组件。

- 富集度 3.1%
- 富集度 2.4%
- 富集度 1.8%



装卸料机用机械手操作布置核燃料组件。组件表面有圆柱状的是星形架，即有控制棒的部分。在不工作的时候，控制棒全部插入燃料组件中。

共3种组件。富集度越大的组件，意味着其中含有可以裂变的铀原子越多，同样的时间里会放出更多的热量。为了在工作时不至于局部过热，需要对不同富集度的核燃料组件按一定的规律排布，这被称为“功率展平”。在堆芯内部区域，用较低富集度（1.8%、2.4%）的核燃料组件，像国际象棋的棋盘那样交叉排布。最高富集度（3.1%）的核燃料组件发热能力强，位于堆芯的最外层区域。堆芯周围有中子反射层，使一部分从内部发出的中子返回堆芯，提高堆芯外围的发热能力。这样设计的堆芯排布方式，更有利于将核燃料组件的热量传递给周围循环的冷却水。

“点燃”核燃料

一切就绪后，就该“点燃”核燃料来发电了。在核能发电领域，这一步称为“临界状态”。

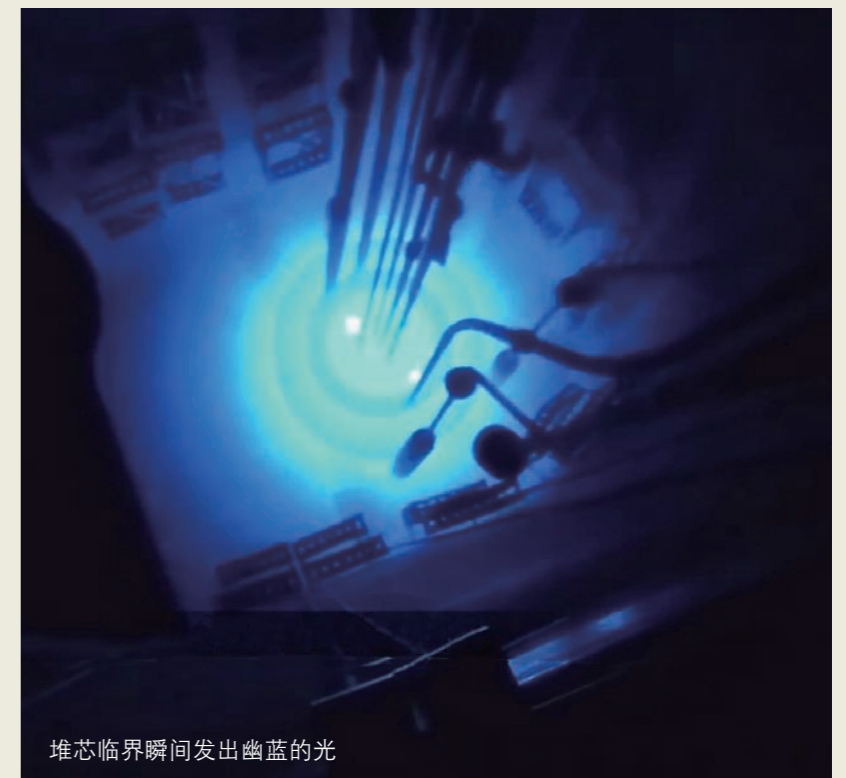
主要由氧化铀组成的核燃料，被加工成一节一节的短圆柱状，装入铝合金材质的金属包壳管中，再束扎成捆，成为核燃料组件。在进入临界状态（即“点燃”）之前，它的放射性都非常小，人甚至可以直接用手触摸。

核反应堆使用特制的控制棒来“点燃”核燃料，那就是含有铍9和镉252的特殊控制棒，这些物质向四面八方释放的中子就是核裂变链式反应的“启动”中子。只有当铀235原子吸收了中子，其原子核变得不稳定时，才会发生分裂。一旦燃料组件被“点燃”，核燃料开始了核反应，就有了高强放射性，人绝不可以直接接触，也不能直接暴露在它的面前。

反应堆的核燃料在被点燃后，发出幽幽蓝光，这种光是“切连科夫辐射”（Cerenkov radiation）。这是因为冷却水中粒子运动的速度超过了水中光速（约为真空中光速的75%）时发生的一种电磁辐射，呈现蓝色辉光的现象。

紧急停堆时，还要继续排出余热

反应堆在达到临界状态后，核燃料就开



堆芯临界瞬间发出幽蓝的光

始了裂变。但是，一旦遇到事故，即使紧急停堆，用控制棒完全停止反应，燃料组件还会持续生成余热。这是为什么呢？

这是因为，在铀235发生核裂变的过程中，所有参与裂变的中子并不都是瞬发中子^{※1}，还有很小份额的缓发中子^{※2}。尽管缓发中子所占的份额极小，但这些中子缓发的时间很长，可长达数十秒，寿命远大于瞬发中子。缓发效应大大增加了两代中子之间的平均时间间隔，从而延缓了中子密度的变化率。

反应堆紧急停堆时，在所有控制棒毒物的作用下，使绝大多数瞬发中子被吸收。然而缓发中子还在继续发射，没有瞬间消失。此外，由于裂变产物会发生β和γ衰变，这些衰变过程释放出的能量也存在一定时间延迟。因此，即便是反应堆安全停堆，堆芯尚有大量的余热需要向外导出。这也是处置核事故中的重点所在。

※1 瞬发中子（prompt neutron）：核裂变后 10^{-15} 秒内发射出的中子，称为瞬发中子。

※2 缓发中子（delayed neutron）：核裂变产物在后续的衰变过程中发射出的中子，在总的发射中子数中仅占不到1%，对反应堆控制有着极为重要的作用。

第3部分

何为更安全的核电技术？

华龙一号充分借鉴了福岛核事故的经验反馈，创新性地采用“能动与非能动相结合”的安全设计理念，实现堆芯应急冷却、二次侧余热排出、堆内熔融物滞留和安全壳热量导出等安全功能。为了应对可能出现的最坏情况，华龙一号的工程师提前预想出一系列安全手段。



第3部分的内容

- ★ 抵抗地震和海啸
- ★ 纵深防御
- ★ 三道屏障
- ★ 访谈：华龙一号的自主研发之路

抵抗地震和海啸

为了给核电机组提供冷却条件，我国现有的核电厂都位于沿海地区。在沿海地区建设核电厂，会不会像福岛核事故那样面临地震和海啸的威胁呢？

选址是第一步

2011年3月11日发生在日本宫城县外海的里氏9.0级地震及其引发的海啸，至今还令人记忆犹新。地震对核电厂的威胁的确不可忽视，因此，我国在选址之初就明确了一条基本规则，不能在有高风险的地震带建造核电厂。

不过日本和我国所在的地理、地质环境有很大的差别，需要分别考虑。日本岛整体都位于环太平洋地震带，由于板块运动活跃，地震发生的频率和风险确实比我国高很多。

我国为核电厂选址时，必须考虑以候选厂址为圆心、周围300千米半径的区域内，在历史上是否发生过地震。不仅要回溯长达两千年内是否发生过地震的历史记录，还要预测未来50年一遇地震的发生概率。我国正在建设和已经建成的核电厂都不处于地震带，并且都建设在坚固的基岩之上。

核电厂有更高的抗震标准

核电厂中不仅有高放射性的堆芯、乏燃

料，还有高温高压、带放射性的一回路水，以及厂房里复杂布置的管道、电缆，一旦发生地震，都将面临严峻的考验。因此，与核安全有关建筑结构的抗震设防标准，要高于一般的民用建筑。各国在制定核电厂的抗震标准时，一般分为两级：对于低等级的地震，要求核电厂在震后保持正常安全运行；对于高等级的地震，则要求核电厂能够维护安全状态，防止放射物外泄。

核电厂结构抗震设计的每个环节，包括设计地震能量的确定、结构对地震响应的计算，以及结构抗力的估计等，都会从保守的角度出发，留有足够的安全裕度，从而保证在意外的超强地震作用下，核电厂的结构依然具有足够的抵御能力。

具有特殊抗震结构，可以防御9级烈度

地震发生时，除了反映震源处地震总能量的“震级”，还有反映对某地破坏程度的“烈度”。发生地震时，地面瞬间运动的加速度可以作为确定地震烈度的依据。在核电厂建筑抗震能力的参数中，用“地震动峰值加速度”来表示建筑抵抗所在位置的地震烈度。M310二代改进型机组可以抵抗0.2g（g为重力加速度，约为9.8米/秒²）的地震动峰值加速度，华龙一号机组将这一能力提高到0.3g，安全性大幅提高。为什么二者看起来仅有0.1g的差别，就可以说抗震能力得到大幅提高呢？

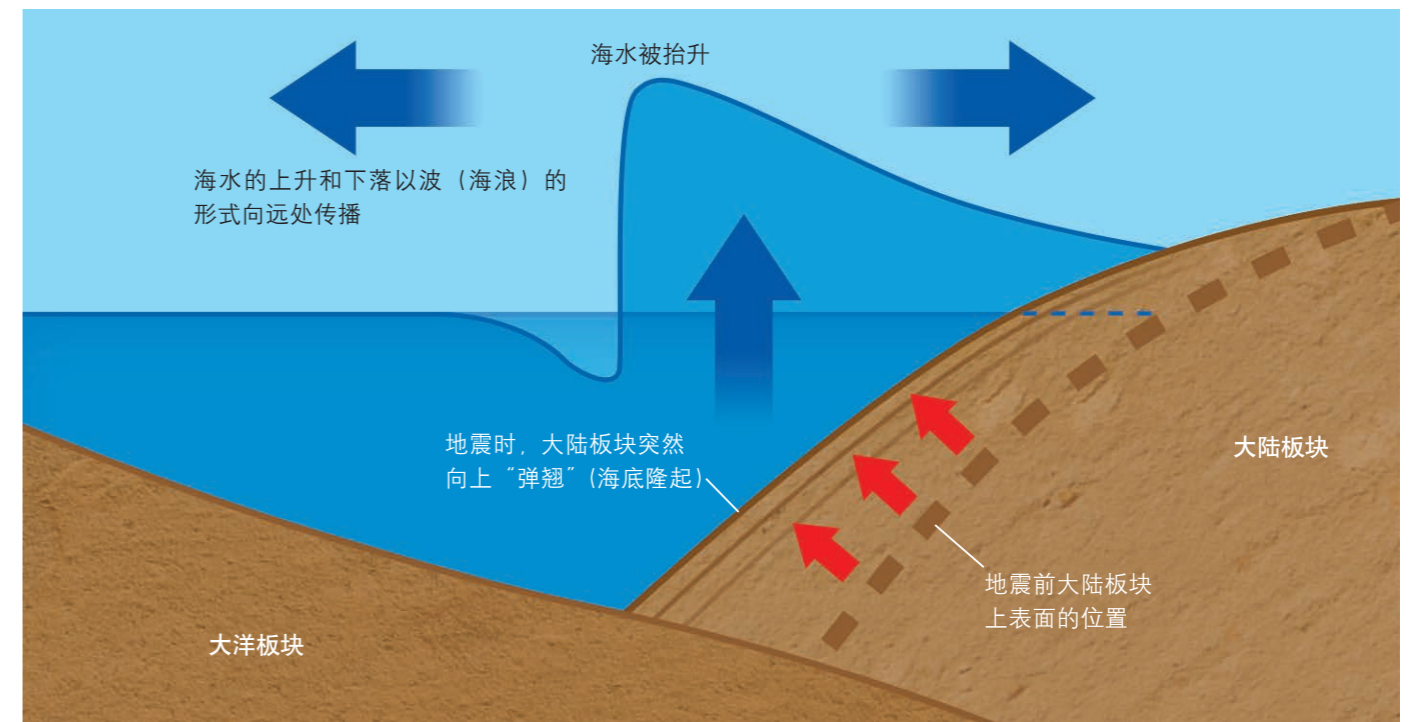
根据中国的地震烈度表，7级烈度对应的地震动峰值加速度为0.125g，8级烈度对应的地震动峰值加速度为0.25g。华龙一号可以抵抗9级烈度，对应的地震动峰值加速度为0.3g。

当时，日本福岛核电厂抗震的初始设计标准是承受水平方向峰值加速度0.18g。而在2011年3月11日的东日本大地震中，核电厂所在位置的水平方向峰值加速度达到了0.4g，不过，事后发现，这样大的地震并未对核电厂造成致命破坏。真正摧毁了福岛核电厂的，实际是大地震引发的海啸。

核电厂内部有大量的管道



海啸的发生机制



海啸是一种灾难性的海浪，地震引发的海啸要具备三个条件：1. 地震要发生在海底且地壳需大范围的急剧地垂直升降；2. 地震强度需在6.5级以上，且震源深度小于50千米；3. 地震发生海区的海水需达到足够深度，一般要在1000米以上。

让华龙一号化解地震影响的秘诀在于最开始施工时打下的特殊混凝土地基——十字阀基结构。尽管核电机组建造于整块基岩之上，假如发生了大地震，在地震波的支配下，天然的基岩不一定还能作为一个整体运动。一旦核电机组厂房地基发生不均匀的运动沉降，会造成内部管道错位、拉裂，使放射性物质泄漏，引起厂房设备的故障。华龙一号所用的“十字阀基”的最大特性就是，地震时，各个阀基能同步上下移位，作为一个整体带动上方厂房的运动，从而保证厂房里的管道同步运动。

为了满足抗震要求，华龙一号机组的厂房设计尽量采用刚度、质量较为均匀的布置，使结构尽量均匀、对称。为了减少地震反应，重型设备以及重要的系统、设备应尽量放置在较低处。

沿海核电厂如何防海啸？

当海底发生地震时，海底会突然隆起或者下陷，使其正上方的海水随之突然升高或者下落，从而引发海啸波。海啸不是普通的

海浪，而是汹涌而来的“水墙”。在深海中，海啸波的传播速度极快，但在海面上的振幅并不大。当它进入浅海，水深越来越浅，海啸会在海岸附近形成高达十几米，甚至数十米的巨浪。距离海底地震的震中越远，海啸的能量也越弱。

我国沿海的各海区中，渤海的平均水深约为20米，黄海、东海平均水深均在100米之内，距发生地震海啸要求水深的条件相差甚远；南海绝大部分6级以上的地震都集中在我国台湾南部和菲律宾一带，受外海岛链（台湾岛、南沙群岛、西沙群岛等）的阻挡作用，导致海啸波能量衰减，至我国大陆沿海海区时，能量已大大减少。

福岛核事故后，国家核安全局、中国地震局及国家海洋局联合开展了中国沿海可能的最大海啸研究。研究表明，南部海域可能的最大海啸高度约为2米，其他海区可能的最大海啸高度小于1米，该量值的海啸破坏程度远小于由天文潮和风暴潮共同作用导致的外部洪水影响，因此，在我国沿海各核电厂址防洪设计中，不需要考虑海啸的影响。

纵深防御

核电厂的事故有很多种，其中以核燃料熔穿、放射性物质泄漏最为严重，这也是每个核电厂竭力避免的事情。核电厂的安全设计中首先要确保3项基本功能：反应性控制、余热导出、放射性包容。为了实现基本安全功能，“纵深防御”概念贯彻于与华龙一号安全有关的全部活动，以确保这些活动均置于防御措施的保护之下。“纵深防御”借用了军事术语，意思是面对重大核电厂事故，依然有层层防护可以控制。

华龙一号创新性地采用“能动与非能动相结合”的安全设计理念，以非能动安全系统作为高效、成熟、可靠的能动安全系统的补充，提供了多样化的手段保证核电厂的安全。在这里，“能动安全系统”用电力驱动，“非能动安全系统”不需要电力

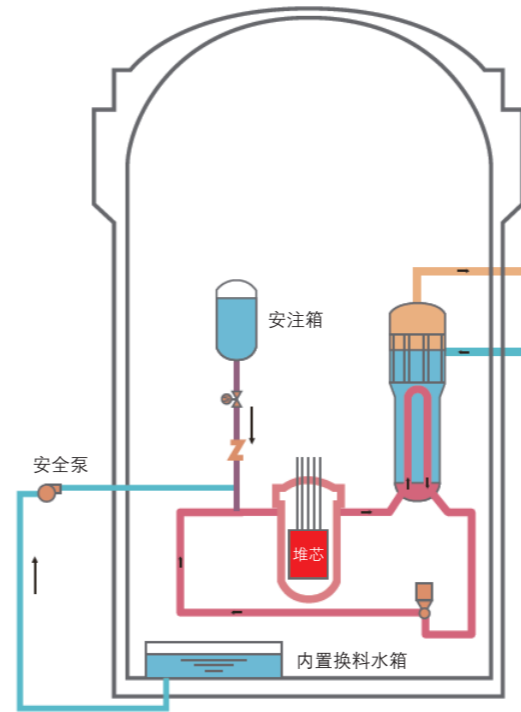
就可以运行。

能动技术最突出的特点是，在核电厂偏离正常时，能高效可靠地纠正偏离。非能动系统则是利用自然循环、重力、化学反应、热膨胀、气体膨胀等自然现象，在无需电源支持的情况下保证反应堆的安全，使设计更加简化。能动与非能动相结合的技术用于确保应急堆芯冷却、堆芯余热导出、熔融物堆内滞留和安全壳热量排出等安全功能，能够充分发挥能动安全技术成熟、可靠、高效的优点，和非能动安全技术不依赖外力的自有安全特性，符合目前核电技术发展的潮流。需要注意的是，非能动系统的应用并不意味着可以降低能动系统的设计要求。能动系统的可用性仍然置于首位并予以保证，非能动系统只是作为应急情况下的备用措施。

纵深防御原则贯穿于华龙一号安全系统的全部活动中，形成了五个层次

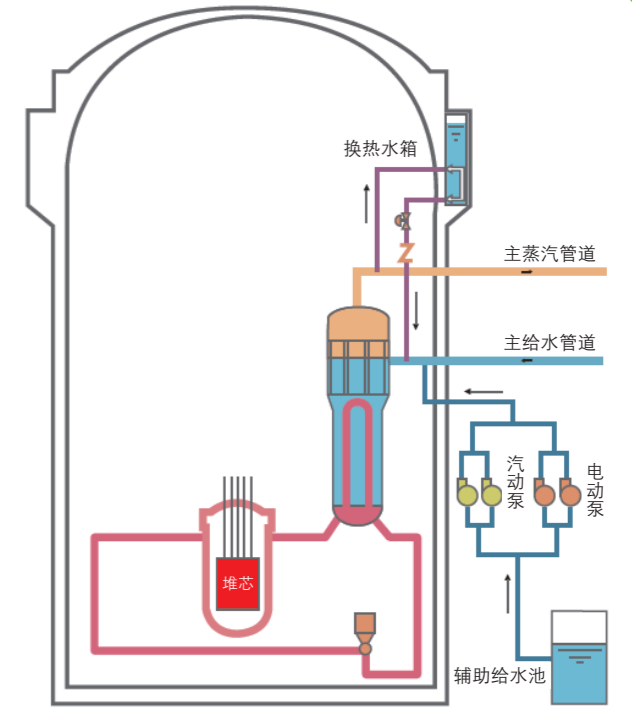
层次	功能
第一层次	保持稳定运行，防止运行偏离或系统失效。例如：增大堆芯热工裕量、改进压力容器材料、增加一回路冷却剂装置、增大稳压器容积等。
第二层次	检测和纠正偏离，避免升级为事故。应用了先进堆芯测量系统、数字化仪控系统和先进的主控室。
第三层次	控制事故后果，防止堆芯熔化。有专设的安全设施，如安全注入系统、安全壳喷淋系统、辅助给水系统等。这些设施在事故时可以自动投入运行，缓解事故后果，防止发展为堆芯熔化的严重事故。
第四层次	缓解严重事故后果，包容放射性物质。在严重事故情况下保证安全壳的完整性，使放射性物质释放保持在尽可能低的水平。
第五层次	执行应急响应计划，减轻放射性泄漏的后果。

反应堆的冷却方案



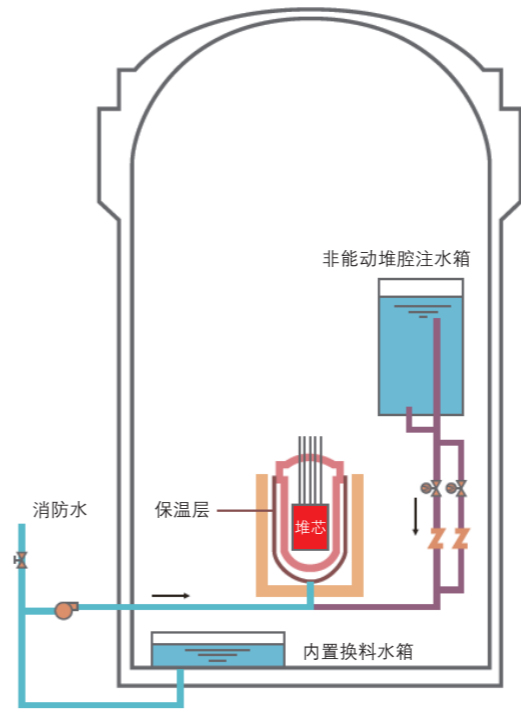
应急堆芯冷却

利用能动的安全注入系统或非能动的安注箱注入系统，在反应堆冷却剂丧失或者主蒸汽管道破裂的事故下，提供应急堆芯冷却。



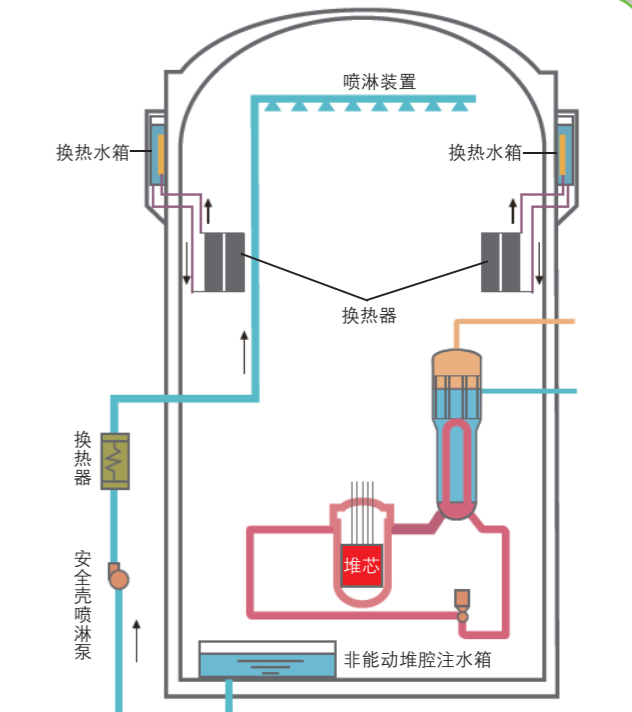
二次侧导出堆芯余热

利用能动的辅助给水系统或非能动二次侧余热排出系统，在主给水丧失时，为蒸汽发生器二次侧提供给水，导出堆芯余热。



堆腔淹没冷却

利用能动或非能动的堆腔注水冷却系统，冷却压力容器的下封头，保持其完整性，实现熔融物的堆内滞留，防止安全壳底板熔穿。



安全壳热量导出

利用能动的安全壳喷淋系统或非能动的安全壳热量导出系统，带走安全壳内的热量，降低安全壳的温度和压力，保持安全壳的完整性。

三道屏障

为了保证核电厂的安全，必须对放射性物质层层设防。核岛中存放着核燃料和用过的乏燃料，是核电厂的核心部位，在转运和使用的过程中，设有三道实体屏障。

第一道：包壳管

核燃料芯块是低富集度的氧化铀（铀235的浓度只有1.8%~3.1%），通常做成短圆柱状，用压紧弹簧装入锆合金制作的包壳内，上下两端密封焊接而成。核燃料棒的包壳能承受1200℃的高温，可以防止核燃料棒与冷却水直接接触，避免核裂变反应生成的放射性物质随着冷却水泄漏到外界。包壳管是防止放射性外泄的第一道实体屏障。

锆合金具有很小的热中子俘获截面，并且具有惊人的耐腐蚀性能，因此被广泛应用

于核反应堆的零件，如堆芯的包壳管、导向管、压力管道等。中子俘获截面大的材料，会使很多中子在撞击到壁面的时候被吸收，降低链式反应的效率。同时，核燃料放出热量时，包壳金属和高温水接触，会被腐蚀。而锆合金具有优秀的耐腐蚀性能，可以减少换堆芯的机会，降低成本。

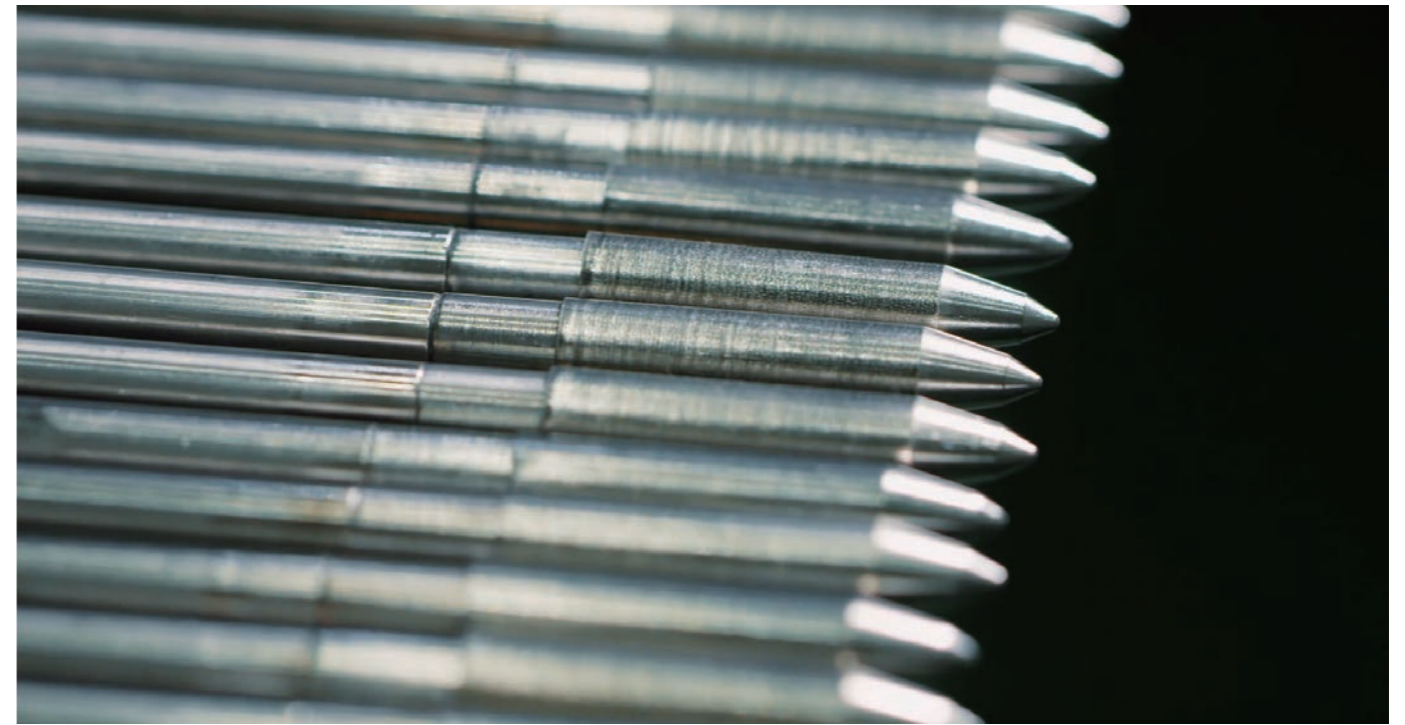
第二道：反应堆与一回路压力边界

反应堆压力容器用于固定和包容反应堆的堆芯，将核燃料的裂变反应限制在一个密封的空间里进行，运行期间要承受堆芯内的高温、高压和强辐照条件。压力容器由特种不锈钢制成，非常厚，其中堆芯段的压力容器壁厚220毫米。压力容器和整个一回路循环系统的管道和部件是能承受高温高压的密封体系，是防止放射性物质外

核燃料芯块



核燃料芯块被密封在锆合金制作的包壳管中



泄的第二道实体屏障（见第26页）。

第三道：双层安全壳

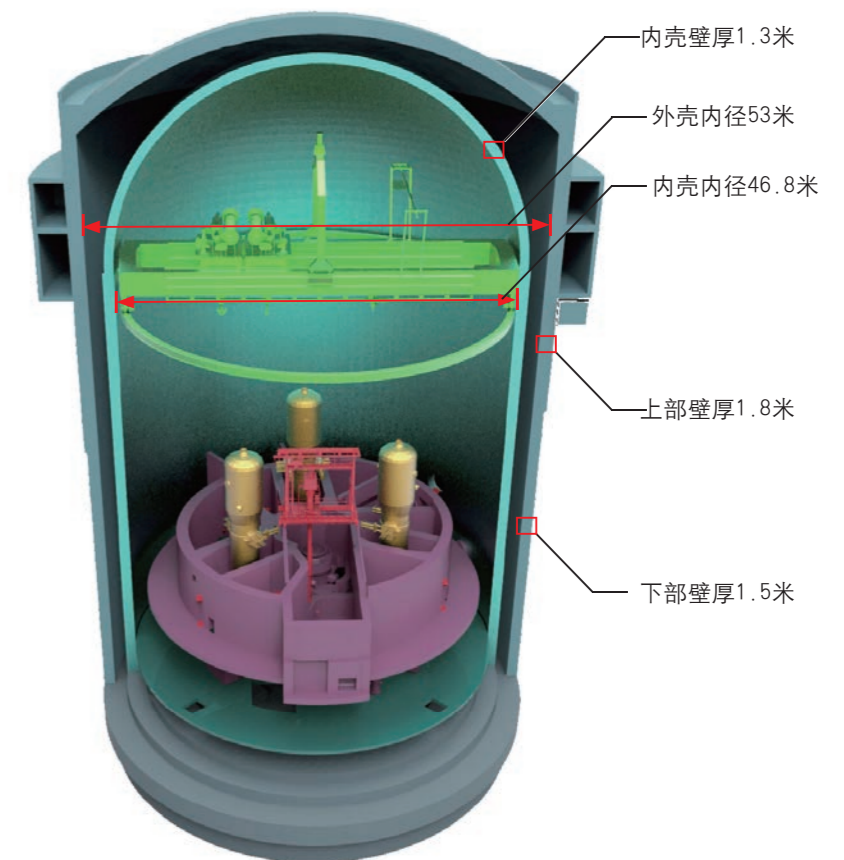
2001年“911恐怖袭击”中，恐怖分子劫持了客机撞击纽约世贸中心的双子塔大楼。恐怖袭击对核电厂的安全提出了挑战。

华龙一号在安全性设计时就充分考虑到了这一点，采用了双层安全壳，这是阻止放射性裂变产物向环境释放的最后一道实体屏蔽。在正常运行和事故工况下，对内部事故而言，可以包容放射性物质，确保对泄漏放射性物质的密封。对外部威胁而言（如台风、大飞机撞击），可以保护反应堆冷却剂系统免受外部灾害的影响。在核电厂正常运行和事故工况中，双层安全壳都可以为人员提供辐射防护。

其中，内壳为带密封钢衬里的预应力钢筋混凝土结构，壁厚1.3米，内径46.8米，自由容积89000立方米，提高了内壳在事故中承受压力的能力。

外壳为钢筋混凝土结构，内径53米，下部壁厚1.5米，上部壁厚1.8米，主要用来抵抗大飞机撞击、龙卷风以及外部爆炸等威胁。

双层安全壳



华龙一号的自主研发之路

“华龙一号”是我国设计的第一个具有完全自主知识产权的三代压水堆核电机组，是我国一张新的“国家名片”。本刊记者专程采访华龙一号的总设计师邢继，请他来讲讲华龙一号背后的那些故事。

记者/闫凯

请问您是怎样进入核能发电这个领域的？

邢继：从小我就对国防感兴趣，特别是对武器装备。高考填报志愿之前，一位在哈尔滨船舶工程学院（现在的哈尔滨工程大学，前身是“哈军工”）读书的学长对我影响很大，他当时回家经常跟我谈起学校里的事儿，让我对国防比较感兴趣。

当时我报的志愿是哈尔滨船舶工程学院的船舶工程专业，后来服从分配，被核动力工程和动力装置专业录



邢继

现任中核集团“华龙一号”总设计师、首席专家，中国核电工程有限公司总工程师。

取了。然而我并不了解这个专业到底是干什么的。当时国内开设这门专业的学校很少，应该说是唯一的。

不过我们大部分的课程都是在讲船上的核动力装置。真正接触核电知识是到了快毕业的时候，老师给大家“科普”了一下。从学校毕业以后，我被分配到核工业第二研究设计院，那也正是国家刚刚起步开始发展核电的时候。

自主研发核电技术，究竟是怎么实现的？

邢继：对于核电技术，我国走的是“引进、消化、吸收”的路线。

1990～1992年，我被派到大亚湾核电站现场的FRAMATOME设计部工作，大亚湾核电站是我国引进的第一个先进核电站。当时我国的装备制造业还非常落后，连水泥、电话线都是从法国进口的，我们还不不懂核电设计，完全就是“小学生”。我们当时都在想，什么时候才能不用依赖别人，建设我国自己的核电站？大亚湾核电厂建完以后，紧接着建设岭澳核电站。岭澳核电站实现了核岛土建工程的自主设计，可以说我们在自主设计百万千瓦级核电站上往前跨越了一步，但是系统设备的设计还是由法国人负责。2003年，当我们建设岭澳二期核电站时，虽然设备还是国外采购的，但我们实现了完全自主设计，这也为后来国家批量建设一批“M310二代+”机组奠定了条件。从大亚湾到岭澳一期，再到岭澳二期，中国核

电自主化在引进的这条路上实现了百万千瓦级核电站的“三级跳”。

我国的核电技术为什么一定要自主研发？

邢继：从我国引进和消化、吸收国外核电技术的经历来看，我们要想在这个领域真正站起来，自主研发是唯一的路线。中国核工业是在国外技术的封锁中艰难起步的。从我国核电发展之初，就一直存在“自主研发还是国外引进”的争论。如果自主研发，所需的人力、财力巨大，研发周期长，况且谁也不敢肯定最终是否能够成功。而一旦成功，就会拥有我们的自主知识产权，实现出口，并且能够拉升上下游装备制造业整体升级。如果从国外引进技术，优点是很快就能落地，可是核心技术会受制于人，我们也不能出口。

有件事我至今记忆犹新。当我们引进国外先进核电技术接受技术转让时，因为对方提供的技术资料不完整，我和对方核电项目经理开会讨论这个问题，并研究如何尽快让我们的设计人员掌握技术。而对方经理却说：“让你们的设计人员放下手中的笔，打开复印机就行了。”关键的核心技术是买不来的。可见，即使我们交纳了高额学费，老师并没有想教会学生。

具有完全自主知识产权的华龙一号意味着什么？

邢继：作为中国核电“走出去”的主打品牌，在设计研发方面，“华龙



在华龙一号首堆建设工程进入吊装穹顶的前夕，邢继把这一幕用油画记录了下来。

一号”提出“能动和非能动相结合”的安全设计理念。通过华龙一号的型号研发，我们培养了一大批自主研发设计、安装建造、采购调试等各种人才，形成了超过10万人的核电相关技术人才队伍。

通过华龙一号首堆的建设，成功带动了核电工业上下游领域高端装备制造业的整体升级，真正实现了从“中国制造”到“中国创造”

而华龙一号全球首堆福清核电5号机组的成功商运，也将会大幅提升中国核电行业的竞争力，同时对优化能源结构、推动绿色低碳发展，助力国内国际双循环新发展格局的建成具有重要意义。

与世界上同类机组比较，华龙一号的竞争力在哪里？

邢继：华龙一号采用渐进式的技术发展路径，在成熟技术的基础上集成了众多的先进技术特征，在保证成熟可靠性的基础上显著提升了电厂的安全性，平衡了经济性。

华龙一号从顶层设计出发，采取了切实有效的提高安全性的措施，满足中国政府对“十三五”及以后新建核电机组“从设计上实际消除大量放射性物质释放的可能性”的远景目标，完全具备应对类似福岛核事故极端工况的能力。华龙一号首台套国产化率达到88%，经济性与当前国际订单最多的俄罗斯核电技术产品相比具有明显的经济竞争力。

未来的华龙一号会是什么样子？

邢继：除了福清核电厂的5号机组，与之相邻的6号机组，还有巴基斯坦卡拉奇K-2、K-3机组，以及漳州核电厂1、2号机组，海南昌江核电厂3、4号机组，都用了华龙一号的技术。然而同样的技术并非简单地复制、粘贴，每一台华龙一号的堆型都有改进和优化。

从华龙一号落地的那一刻起，我们就要不断地“否定华龙”，去研发更符合国家需要的新堆型。只有持续改

进、持续创新，才能保持华龙一号旺盛的生命，引领标准、引领发展，为我国能源供给提供有力支撑。

有年轻读者对核能发电很感兴趣，您对他们有什么想说的吗？

邢继：中国核工业自出生之日起就与国家战略紧密联系在一起，承担着国家发展自主核技术的使命与责任。“核工业精神”里面有一条是“责任重于一切”。“建设核电强国”是核工业人共同的愿望，每一位从事核工业的工作者，都会非常深刻地感受到自己在这份工作中所要承担的责任。承担责任不能靠空喊口号，我们必须提升自身能力，才能承担起责任。未来，希望广大的青年朋友们多多关注核能、了解核电，好好学习，提升自身能力。面对困难要勇于攻克，做新时代的主人。请保持好奇心，发挥想象力，用你们的热情，去创造更美好的未来。

谢谢您！

责任编辑/闫凯