

## 核电深度研究报告之一： 技术更新迭代 安全极致优化

### 核心观点：

- 全球核电产业已经历了四个发展阶段。**安全性一直是推动核电行业发展的核心目标**。目前我国在役机组多采用二代加技术，三代机组已经开始陆续投产，预计到2030年左右三代核电站或将成为主力机型。从安全性、经济性以及环保的角度来看，**四代核电技术将成为未来发展的主流方向**。
- **我国从未发生过二级及以上核事故**。核事件共分七级，七级最严重。国外共发生过3起重大核事故，其中三里岛为五级，切尔诺贝利、福岛为七级。自1994年泰山核电站投产，我国46座核电站已累计安全运行326堆年。无论从技术设计、自然禀赋还是人为因素的角度来看，**我国现役机组未来发生重大核事故的概率是微乎其微的**。
- 现阶段我国在运核电站，除泰山三期重水堆和台湾地区少量沸水堆外，全部采用压水堆堆型。相较沸水堆，压水堆增设了二回路循环，将一回路中的放射性冷却剂隔离密封在安全壳内，易于后期维护检修；发生事故时，核泄露的几率大大降低。**我国现役二代加核电站已经彻底解决了切尔诺贝利和三里岛的设计缺陷，在系统设计方面实现了质的提升**。
- **三代核电发生事故的较二代显著下降**。二代能动核电站已进阶到三代非能动和改进型能动核电站。三代技术具有代表性的AP1000和EPR的堆芯损坏频率降低到 $5.09 \times 10^{-7}$ 和 $1.18 \times 10^{-6}$ /堆年，大量放射性释放概率降低至 $5.94 \times 10^{-8}$ 和 $9.6 \times 10^{-8}$ /堆年，相较二代核电降低了一至二个数量级。
- **大幅降低堆芯熔化概率，四代核电开启“零放射”时代**。美国核电用户要求文件（URD）与欧洲核电用户要求文件（EUR）联合提出了四代核电堆芯融化概率低于 $10^{-6}$ /年、完全无场外放射性释放、人为错误不会导致严重事故，不需要厂外应急措施等要求。
- **“五道防线”纵深防御，多重屏障强化核电安全**。2016年发布的《中国的核应急》白皮书中强调，通过“一案三制”预案和法制、体制、机制建设，辅以“五道防线”有力抓手，建立健全国家核应急组织管理体系。
- **政府在核电事故的处理中发挥着无可替代的作用**。对于核安全，不仅要严格管控，从源头上防范核事故的发生，还要做足危机预防、制定高效科学的应对与善后策略，决策要坚决果断。国企承担着更多的社会责任，安全、稳定是其核心诉求，在应该停堆弃堆时会更坚决执行，**国企更值得信赖**。
- **目前核电存在两种发展更安全的反应堆的途径**。一是“精益求精”，在反应堆的设计、建造和操纵方面做进一步的改进。工程师们已经花费了数十年时间设计各种专用安全系统，结果使核动力系统过于复杂冗余，造价高昂。二是进行**技术革新，发展新一代核能系统**，充分利用其固有安全的特点，这样容易向公众说明并为他们所理解和接受。
- **投资建议**。国内筹建项目充足，海外“走出去”进展顺利，**核电市场空间广阔，对设备供应商的长期业绩贡献形成有力支撑**。凭借装机增长以及逆周期防御属性，**核电运营商具备中长期配置价值**。我们推荐久立特材（002318.SZ）、江苏神通（002438.SZ）、中国核电（601985.SH），建议关注流股份（603308.SH）、中广核电力（1816.HK）、中核科技（000777.SZ）、台海核电（002366.SZ）、纽威股份（603699.SH）等。

## 新能源

推荐 维持评级

### 分析师

周然

☎：(8610) 6656 8494

✉：zhouan@chinastock.com.cn

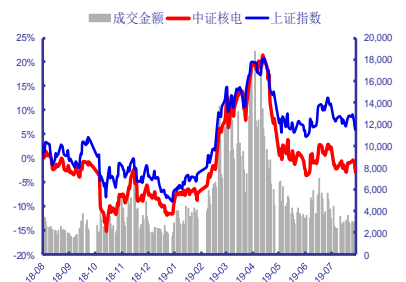
执业证书编号：S0130514020001

### 特别鸣谢

赵腾辉

✉：zhaotenghui\_yj@chinastock.com.cn

### 核电指数相对上证指数表现图



资料来源：wind, 中国银河证券研究院

### 相关研究

1、【银河电新周然】行业点评报告\_项目陆

续核准开工，行业已迎复苏期\_190728

2、【银河电新周然】新能源行业\_核电专题

暨2019年中期策略会 PPT

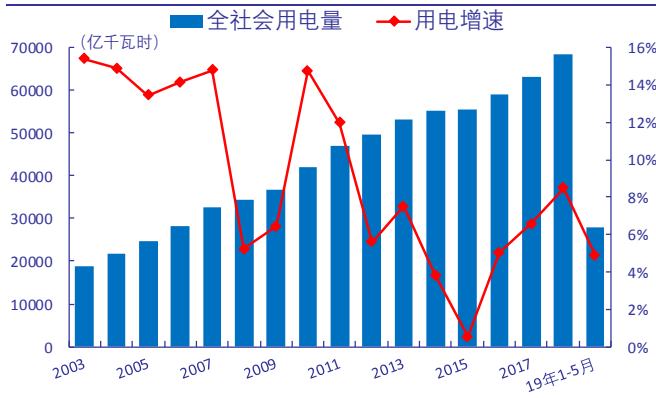
## 目 录

一、核电盈利能力强，仍存发展空间 .....	1
二、在役多为二代加，三代或将成主流.....	2
三、技术更新换代，安全性逐步提升 .....	4
(一) 二代加：设计优化，安全性增强 .....	4
1、自然禀赋构筑天然屏障.....	4
2、新技术弥补设计缺陷.....	5
3、完善核安全法规和标准.....	7
4、国企停堆弃堆执行更彻底.....	8
(二) 三代：安全兜底，在建主流机型 .....	8
1、堆芯熔化概率降低一个量级.....	8
2、我国在建、筹建电站多采用三代技术.....	9
3、“华龙一号”蛟龙出海.....	10
(三) 四代：开启“零放射”时代.....	11
四、安全知识匮乏，科普宣传尚待加强.....	13
五、投资建议.....	15
六、风险提示.....	16
附录 .....	17

## 一、核电盈利能力强，仍存发展空间

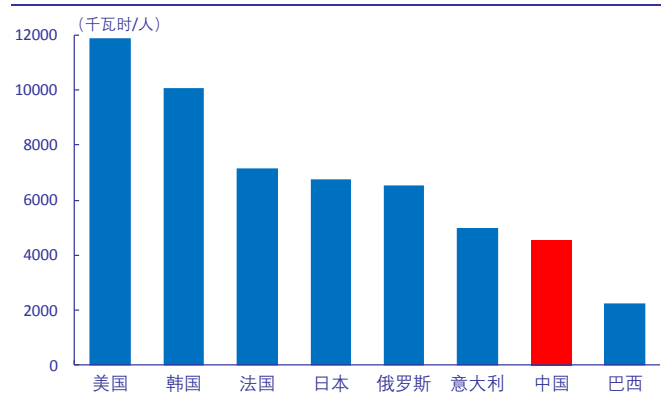
人均用电量偏低，电力需求仍有提升空间。近年来随着 GDP 增长放缓，我国用电增速下移。从人均用电量的角度来看，我国 2017 年仅达到 4537.62 千瓦时/人，远低于美国(11875.7)、韩国(10061.56)、法国(7155.47)等发达国家。中远期看，我国电力需求仍有较大提升空间。

图 1: 我国全社会用电量及增速



资料来源: 国家统计局, 中国银河证券研究院

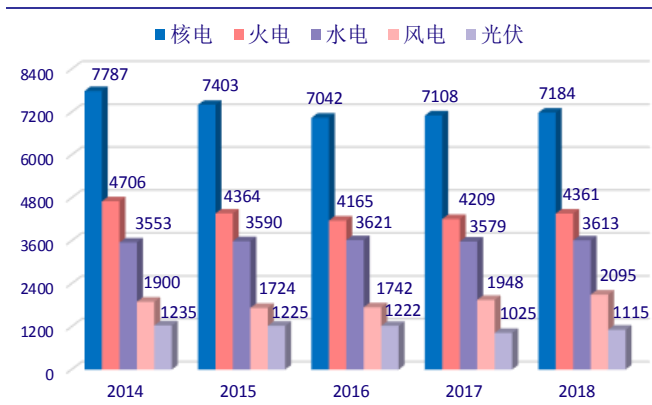
图 2: 2017 年全球各国人均用电量对比



资料来源: BP, wind, 中国银河证券研究院

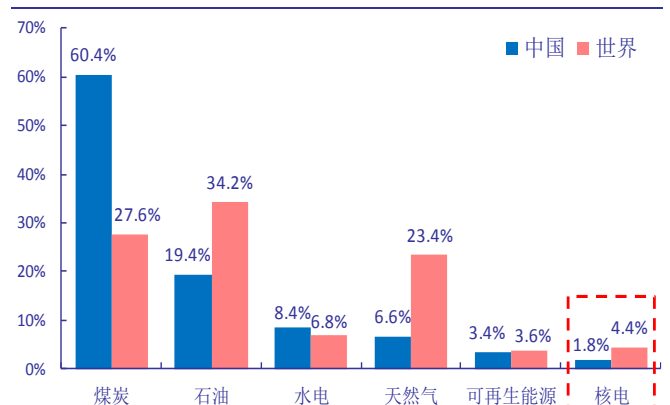
核电利用率维持高位，远优于其他能源。核电具备基荷电源属性，高效、稳定、环保。近 5 年我国核电机组平均利用小时数高达 7305 小时。BP 数据显示，2017 年我国一次能源消费中核电占比仅为 1.8%，与世界平均水平 4.4% 仍存较大提升空间。

图 3: 我国各发电类型机组利用率对比情况



资料来源: 中国电力企业联合会, 中国银河证券研究院

图 4: 2017 年全球及中国一次能源消费中各类型占比情况

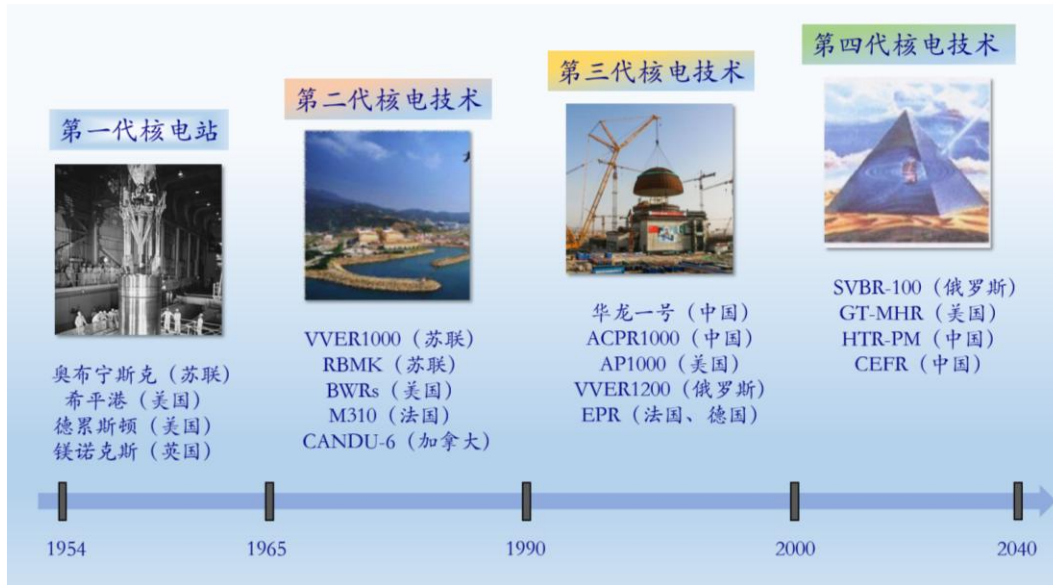


资料来源: 《BP 世界能源统计年鉴 2018》, 中国银河证券研究院

## 二、在役多为二代加，三代或将成主流

自 20 世纪 50 年代核电技术问世，全球核电产业可划分为四个阶段。安全性一直是推动核电行业发展的核心目标。

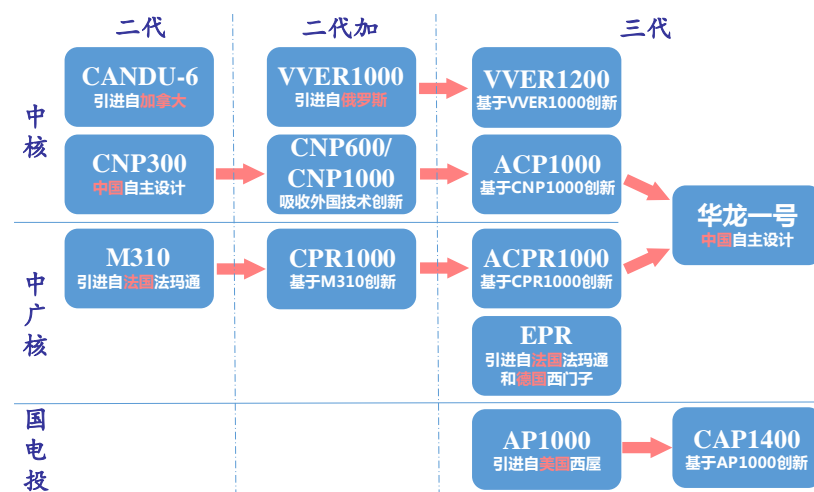
图 5: 核电历史发展脉络



资料来源: 焦保良《浅谈国内外核电技术发展现状及前景》，中国银河证券研究院

目前我国在役机组多采用二代加技术。三代机组已经开始陆续投产，近两年投入商运的 9 台机组中有 7 台选择了三代技术路线。由于目前筹建机组均采用三代技术，预计到 2030 年左右，三代核电站或将成为主力机型。

图 6: 我国核电技术路线

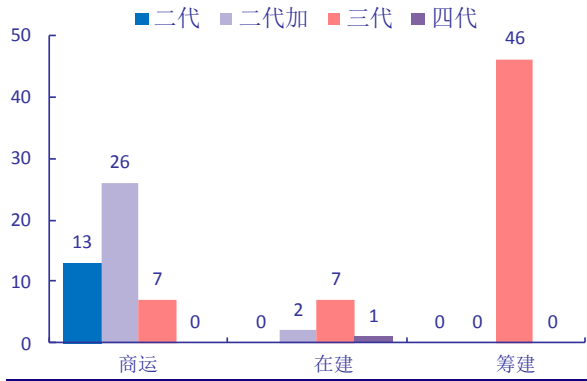


资料来源: 中国核电信息网，中国银河证券研究院

核电发展已历经四个阶段，技术的每一次升级都是对安全性的持续优化。从安全性、经

济性以及环保的角度来看，四代核电技术将成为未来发展的主流方向。

图 7: 我国核电机组技术分布情况 (非内陆)



资料来源: 中国核电信息网, 中国银河证券研究院

表 1: 我国具有代表性的在役及在建核电机组情况

核电站	状态	堆型	技术	容量	地区
泰山核电站 4#	商运	CNP650	二代	66	辽宁大连
防城港核电厂 2#	商运	CPR1000	二代加	108.6	福建福清
岭澳核电厂 2#	商运	M310	二代加	99	广东阳江
方家山核电厂 2#	商运	CNP1000	二代加	108.9	广西防城港
三门核电站 2#	商运	AP1000	三代	125	山东海阳
红沿河核电厂 5#	在建	ACPR1000	三代	111.9	辽宁大连
福清核电厂 6#	在建	华龙一号	三代	116.1	广东阳江
石岛湾核电站 1#	在建	HTR-PM	四代	20	山东荣成

资料来源: 中国核电信息网, 中国银河证券研究院 (机组容量单位: 万千瓦)

### 三、技术更新换代，安全性逐步提升

我国从未发生过二级及以上核事故。核事件分级标准由国际原子能机构（IAEA）制定，共分七级，七级最严重。国外共发生过3起重大核电事故，其中三里岛为五级，切尔诺贝利、福岛为七级。自1994年泰山核电站首台机组投产，我国46座核电站已累计安全运行326堆年。无论从技术设计、自然禀赋还是人为因素的角度，我国现役核电机组未来发生重大核事故的概率都是微乎其微的。

图8：三起重大核事故发生原因及改进措施

	事故发生原因	改进措施
福岛	海啸强度超设计预期	优选受地震海啸影响小的厂址
	电厂受淹停电，冷却系统失效	三代核电除EPR机型均引入非能动安全系统
	基于经济性，后续停堆处置不坚决	遵循安全性凌驾于经济性之上的原则
切尔诺贝利	违规操作	完善核安全法规和标准，完善运行规程和文件
	一味追求经济性，导致设计存在严重缺陷	控制棒增加中子吸收剂，降低空泡反应性系数，安装快速响应应急保护系统等
	操作人员、管理人员缺乏专业知识及经验	严格把关专业水平，加强安全教育以及应急训练；发展人因失误评价方法
三里岛	机械故障、设计缺陷	完善电厂设计与设备要求（单一部件可靠性等），改进主控室人机界面设计等
	人为误判，造成误操作	更新操作员培训与配备要求，提高应急准备水平，建立定期公开报告制度等

资料来源：张灿《世界三大核事故：不能承受之重》，中国银河证券研究院

#### （一）二代加：设计优化，安全性增强

##### 1、自然禀赋构筑天然屏障

福岛核事故发生的直接原因是海啸造成应急冷却系统断电。福岛核电站使用能动型冷却体系，在停堆后依靠柴油发电机发电启动机组运行。海啸冲破了核电厂的防御设施，毁坏了应急柴油发电机，最终导致堆芯丧失冷却能力，堆芯融化，放射性物质外泄。

图9：中日所处大陆板块对比



资料来源：中国核电官网，中国银河证券研究院

图10：中日所处大陆架对比

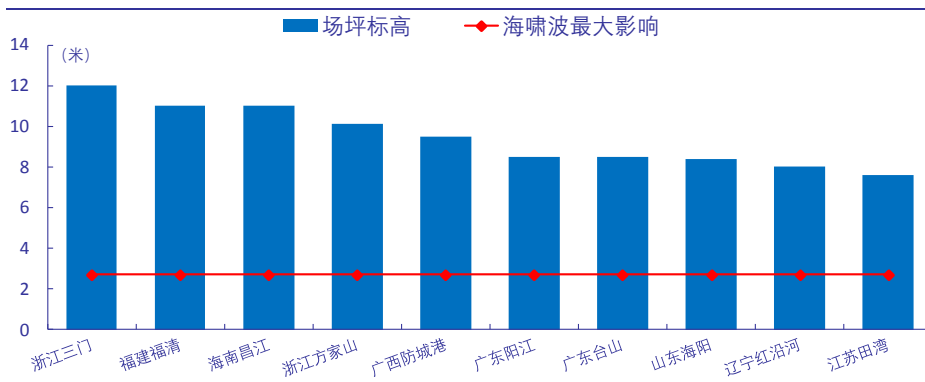


资料来源：中国核电官网，中国银河证券研究院

我国沿海海域发生海啸的可能性很小。从海深条件来看，渤海、黄海平均海深不到 50 米、东海为几百米，而海深与海啸发生几率呈正相关关系，地震震源点海水深度越大，则海啸速度越快，破坏力越强；从地震记录来看，中国沿海从未发生过 8 级以上的地震；从地形地貌来看，中国近海海域内分布着数千个岛屿礁滩，构成了天然屏障。

核电站防洪水平完全可以抵御海啸灾害。在南海发生 9 级地震的情况下，海啸波对我国沿海核电站厂址水位的最大影响仅约 2.7m，远低于在役及在建核电站的防洪水平。近年来我国核电防洪标准不断提升，1991 年我国第一座核电站秦山一期落成，场坪标高为 5 米，防波堤加挡浪墙顶标高为 9 米，目前筹建中的海阳 2 期及广西白龙核电站，设计标高已提升至 8.1 米和 13.47 米。

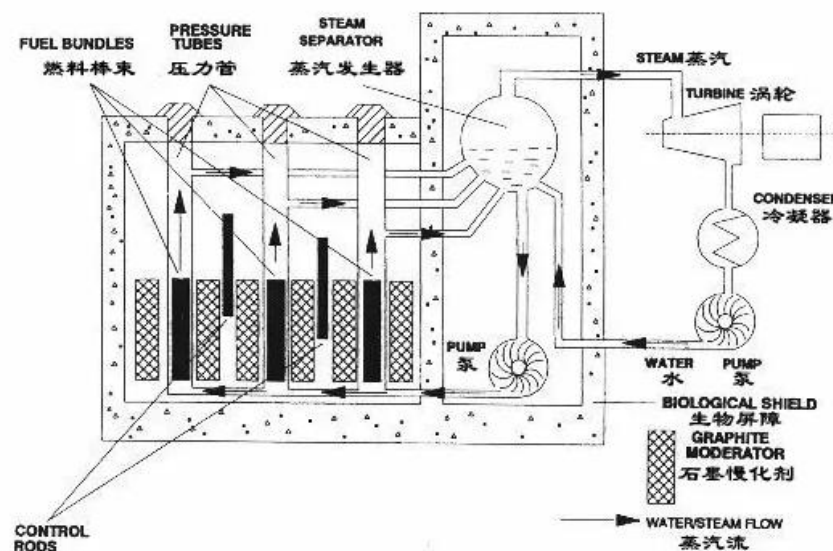
图 11: 我国在运核电站场坪标高



资料来源: 中国环境报, 中国银河证券研究院

## 2、新技术弥补设计缺陷

图 12: 切尔诺贝利压力管式石墨慢化沸水反应堆 (RBMK) 示意图



RBMK-1000型反应堆示意图

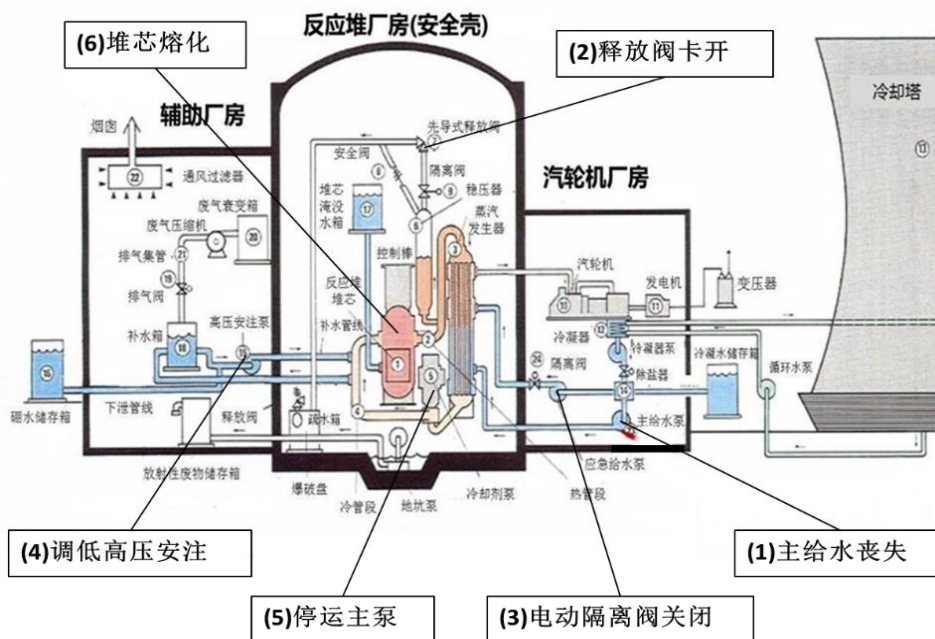
资料来源: 《切尔诺贝利核事故启示录》, 中国银河证券研究院

切尔诺贝利核事故的主要原因是堆型设计存在重大缺陷，从而引起的核电站功率暴走、

裂变反应失去控制，最终导致放射性物质泄露。设计缺陷主要体现在三个方面：1) 石墨和轻水同时做慢化剂，轻水做冷却剂，蒸汽化后造成正空泡系数；2) 控制棒末端的石墨具有慢化中子及排水效应，起始插入阶段反而促进反应增长；3) 老式的石墨堆叠式反应堆，缺少内层压力安全钢壳和外层混凝土安全壳。

三里岛核事故的重要诱因是稳压器释放阀发生卡开故障，在紧急停堆后该阀门无法自动关闭，导致冷却剂持续流失。另外，主控室人机交互设计不合理，致使操纵员在事故处置中判断不明、连续误操作，切断了堆芯裂变产物余热的导出途径，最终导致堆芯熔化。

图 13：三里岛核事故发生过程示意图



资料来源：《三里岛事故是如何终结美国第一核纪元的 / 历史上的今天》，中国银河证券研究院

现阶段我国在运核电站，除秦山三期重水堆和台湾地区少量沸水堆外，全部采用压水堆堆型。相对于福岛、切尔诺贝利等沸水堆而言，压水堆增设了二回路循环，将一回路中的放射性冷却剂隔离密封在安全壳内，汽轮机等设备放射性计量小，易于后期维护检修。即便发生事故，调节两回路间的气压及温差，即可实现自然循环冷却，核泄露的几率大大降低。

我国现役二代加核电站已经彻底解决了切尔诺贝利和三里岛的设计缺陷，在系统设计方面实现了质的提升：

- **加装安全壳**：加装由钢筋混凝土和内衬钢板构成的安全壳，提高收容能力，防止放射性物质外泄。建造成本升高，但安全性明显提升；
- **改进控制棒设计**：将冷却水容器由管道状改成水池状，同时缩短控制棒插入时间至 2—3 秒，减弱了控制棒的排水效应；
- **设计负空泡反应性系数**：仅以水充当慢化剂和冷却剂，水受热产生气泡时，慢化和吸收中子的能力同时下降，总体上表现为对反应的抑制作用，切断了恶性循环；
- **解决阀门卡开等机械故障**：改良设计，在制造过程中采取更严格的质量控制，在使用时采



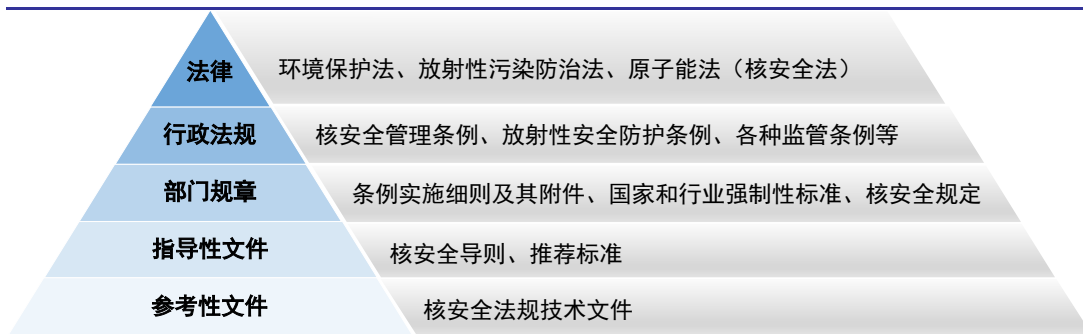
取更严格的检验保养，机械故障是可以消除的；

- ▶ **改进主控室人机界面设计：**主控室配置数字化控制系统，增加重要参数实时监测指示，操纵和控制更自动化、集中和精确，大大降低了人为判断的失误率；
- ▶ **改进的应急系统可在断电情况下使用：**现役核电站使用的三代压水堆采用了非能动型安全冷却体系，能在失去供电的情况下通过重力注入贮存的冷却水对堆芯进行冷却，并排出余热。

### 3、完善核安全法规和标准

**细化核电法规，防范事故发生。**相比于三里岛时期的美国、切尔诺贝利时期的苏联、福岛时期的日本，我国从核工业发展之始就十分重视核安全，明确制定了“安全第一”的方针，并通过专项立法、发布部门规章和指导性文件，建立了一个自顶向下、体制完善的法规系统，强化了监管体系与能力建设，确保国家核安全。

图 14：我国核安全法规体系



资料来源：赵光辉《我国核安全法规探讨》，中国银河证券研究院

**“五道防线”纵深防御，多重屏障强化核电安全。**2016年发布的《中国的核应急》白皮书中强调，通过“一案三制”预案和法制、体制、机制建设，辅以“五道防线”有力抓手，建立健全国家核应急组织管理体系：

- ▶ 保证设计、制造、建造、运行等质量，预防偏离正常运行。履行强军首责，筑牢国家安全基石，确保军工科研生产任务圆满完成。
- ▶ 严格执行运行规程，遵守运行技术规范，使机组运行在限定的安全区间以内，及时检测和纠正偏差，对非正常运行加以控制，防止演变为事故。
- ▶ 如果偏差未能及时纠正，发生设计基准事故时，自动启用电厂安全系统和保护系统，组织应急运行，防止事故恶化。
- ▶ 如果事故未能得到有效控制，启动事故处理规程，实施事故管理策略，保证安全壳不被破坏，防止放射性物质外泄。
- ▶ 在极端情况下，如果以上四道防线均告失效，立即进行场外应急响应行动。同时设置多道实体屏障，防止和控制放射性物质释入环境。

图 15: 国际核事故分级标准

<b>7 级</b>	特大事故：1986年苏联切尔诺贝利核事故
<b>6 级</b>	重大事故：1957年苏联Kyshtym核事故
<b>5 级</b>	场外风险事故：1979年美国三里岛核泄露事故
<b>4 级</b>	无场外风险事故：1999年日本东海村JCO临界事故
<b>3 级</b>	严重事件：1989年西班牙Vandellós核电站事件
<b>2 级</b>	注意事件：法国卡达拉赫核电站事件
<b>1 级</b>	异常事件：2009年法国葛雷夫兰核电站事件
<b>0 级</b>	偏差：安全上无重要意义

资料来源：IAEA，中国银河证券研究院

图 16: 核电站五道安全防线



资料来源：中国核电，中国银河证券研究院

**全方位，深层次，打好保卫核安全之仗。**目前已经落实的法规囊括核设施建设及运行阶段的安全监督、放射性同位素与射线防护、核材料管制、放射性废物运输及处置、环境评价与监测、人员资质管理和核应急“一案三制”（核应急预案、法制、体制、机制），未来将要在核事故应急及问责、核信息公开、核从业人员岗位培训上持续发力。

#### 4、国企停堆弃堆执行更彻底

**民营企业更看重经济利益，事故处理时倾向于保护有价设备。**三里岛核电站的主运营商为大都会爱迪生公司，隶属于美国巴威能源集团。巴威集团是由斯蒂芬·威尔考克斯和乔治·赫尔曼·巴布科克在 1867 年创立，为典型的民营企业。三里岛核事故发生时，为避免主泵汽蚀振动发生损坏，操纵员在堆芯过热的情况下关闭主泵，中止了冷却剂循环，从而切断了堆芯余热导出的唯一通道，最终导致堆芯融化。

**福岛事故后时隔 8 年才决定彻底弃堆。**抱着反应堆冷却系统存在修复可能的侥幸心理，在福岛核电站经历爆炸、起火、堆芯融化等重大事故后，运营福岛核电站的东京电力公司消极应对、封锁信息，直到 2019 年 4 月才首次从严重受损的 1 号至 3 号机组燃料池中转移出核燃料棒，善后工作进展缓慢。8 年时间的不作为，福岛核事故产生的 880 吨核残渣、百万吨污水至今仍难处理。东京电力公司，成立于 1951 年，是日本收入最高的电力公司，也是全球最大的民营核电商。

**政府在核电事故的处理中发挥着无可替代的作用。**对于核电安全来说，不仅要严格管控、从源头上防范核事故的发生，还要做足危机预防、制定高效科学的应对与善后策略，决策要坚决果断。在我国，核电站的主要运营主体为国企。而相对民企来说，国企承担着更多的社会责任，安全、稳定是其核心诉求，将人民的生命安全放到首位，在应该停堆弃堆时会更坚决执行，**国企更值得信赖。**

## （二）三代：安全兜底，在建主流机型

### 1、堆芯融化概率降低一个量级

目前，国际主流核电建设标准主要参考美国核电用户要求文件（URD）和欧洲核电用户要求文件（EUR）。针对应急安全系统的设计，URD 对第三代核电站两种类型的核电厂分别提

出了严格要求。

图 17: URD 对两种类型核电厂的要求

改进型能动核电站 (EPR)	改进型非能动核电站 (AP1000)
<ul style="list-style-type: none"> <li>至少要有两条隔离独立的交流电源与电网相连</li> <li>发生事故后至少30分钟时间内, 不需要操纵员的干预也能保证堆芯不融化</li> <li>在丧失全部给水的情况下至少在2小时内燃料没有损坏</li> <li>在丧失厂内外交流电源的8小时内, 燃料没有损坏</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>要求安全系统不依赖交流电源</li> <li>发生事故后至少72小时内, 不需要操纵员的干预也能保证堆芯不融化</li> <li>在严重事故条件下, 安全壳有足够的的设计余量</li> <li>不需要厂外应急计划</li> </ul>

资料来源: 美国核电用户要求文件 (URD), 中国银河证券研究院

三代核电发生事故的概率较二代显著下降。经过一系列技术设计的优化升级, 二代能动核电站进阶到三代非能动和改进型能动核电站。西屋公司 AP1000 标准设计证书和芬兰 OL3 核电厂建造许可证中显示, 三代技术具有代表性的 AP1000 和 EPR 的堆芯损坏频率分别降低到  $5.0894 \times 10^{-7}$ /堆年和  $1.18 \times 10^{-6}$ /堆年, 大量放射性释放概率降低至  $5.94 \times 10^{-8}$ /堆年和  $9.6 \times 10^{-8}$ /堆年, 相较二代核电降低了一至二个数量级。

表 2: 三代核电技术特点

参数	三代	相对于二代所改进幅度
堆芯热工安全裕量	15%	维持较高安全裕量
堆芯损坏概率	$<10^{-5}$ /堆年	相对二代的 $<10^{-4}$ /堆年 提高了一个数量级
大量放射性向外释放概率	$<10^{-6}$ /堆年	相对二代的 $<10^{-5}$ /堆年 提高了一个数量级
机组额定功率	100~150 万千瓦	提升了 50%-66%
可利用因子	>87%	二代仅为 80%
换料周期	18~24 个月	相对二代的 12-18 个月大幅延长, 减少换料大修停机次数
电厂寿命	60 年	相对二代的 40 年大幅延长
建设周期	48~52 个月	应用模块化施工技术, 现场施工工期缩短 (大概 6 个月), 减少投资成本

资料来源: 《非能动安全先进压水堆核电技术》, 中国银河证券研究院 (备注: 安全裕量即最大破坏载荷超过设计载荷的部分与设计载荷的比值)

## 2、我国在建、筹建电站多采用三代技术

我国目前筹建电站全部使用三代技术, 在建占比高达 80%。与二代相比, 除了安全性更强, 三代核电还具备经济性更高的明显优势: 1) 单机功率从 60-100 提升至 100-150 万千瓦; 2) 换料周期由 12-18 个月延长至 18-24 个月; 3) 建造周期缩短了 6 个月; 4) 设计寿命延长了 20 年。因此, 三代核电已经成为我国在建筹建核电站的首选。目前我国 10 台在建机组中有 7 台采用三代技术, 46 台筹建机组全部采用三代技术。

表 3: 三代核电主要堆型特点

	技术来源	堆型	系统设计	设计理念	特点
AP1000	美国西屋公司	压水堆	非能动	简化成熟的非能动设计, 建造中大量采用模块化建造技术	1) 安全性提升, 严重事故预防与缓解措施到位, 仪控系统和主控室设计更科学 2) 经济性强, 阀门、泵、安全级管道、电缆、抗震厂房相比在役电站容积减少 3) 采用模块化施工建设, 可缩短建设周期, 降低核电机组建设及长期运营成本
CAP1400	国核技消化和吸收创新 AP1000	压水堆	非能动	具有我国自主知识产权、功率更大的非能动大型先进压水堆核电机组	1) 基于 AP1000 的模块化技术, 优化了模块设计, 缩短了建造周期 2) 简化设计, 系统和部件数量大幅减少, 降低了建造成本和运维成本 3) 维修检查的压力减少, 故障几率大幅降低 4) 安全性百倍提升, 组合设计非能动堆芯+安全壳冷却系统, 扩大了安全壳尺寸, 获得了较大的自由容积、更大的安全壳内压分析裕量
华龙一号	自主研发, ACP1000 和 ACP1000+融合	压水堆	能动+非能动	能动和非能动相结合设计理念, 采用多重冗余的安全系统	1) 采用中核 ACP1000 技术 177 堆芯和中核 CF 自主品牌核燃料 2) 单堆布置、双层安全壳。 3) 可根据客户需求, 配置个性化的专设安全系统 4) 全面平衡贯彻纵深防御的设计原则, 设置了完善的严重事故预防和缓解措施
EPR	法马通和西门子联合开发	压水堆	能动	压水堆技术采用“加”的设计理念, 即用增加冗余度来提高安全性	1) 经济和技术性能更高, 单堆四环路机组降低发电成本, 运行灵活, 检修便利 2) 电功率约为 1600 兆瓦, 适宜有大规模电网、人口密度大、场址少的地区 3) 可使用各类压水堆燃料, 实现稳定乃至减少钚存量目标, 核燃料充分利用 (UO <sub>2</sub> 或 MOX), 减少长寿废物的产量。
VVER1200	AES-91/92 衍生的 AES-2006 三代加机型	压水堆	能动+非能动	2 种具体堆型: 能动为主的 V491、非能动占主导的 V392M	1) 卧式蒸汽发生器 2) 六角燃料组件 3) 没有压力容器底部的缝隙 4) 大容量增压器提供一个大型反应堆冷却剂库存。

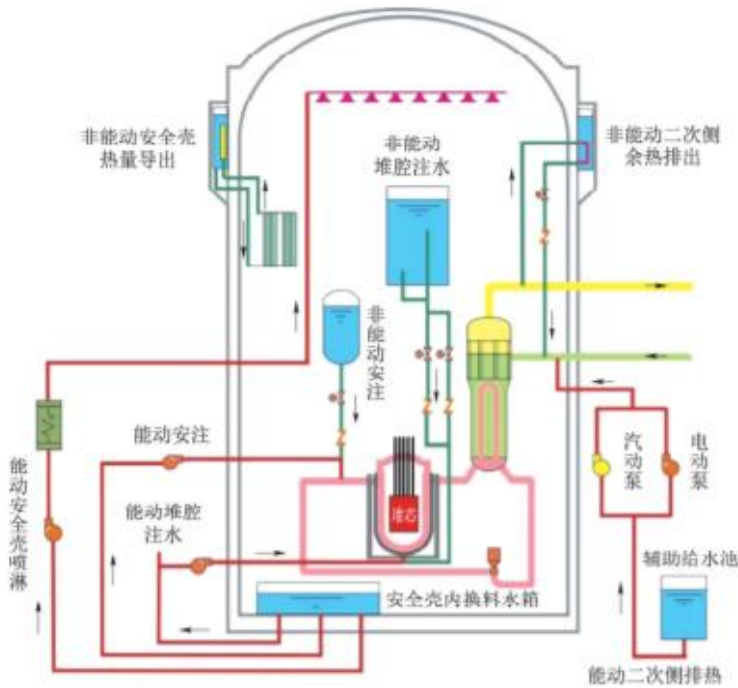
资料来源:《三代核电技术简析及主要堆型对比分析》,《我国第三代核电技术一览》,中国银河证券研究院

### 3、“华龙一号”蛟龙出海

“华龙一号”是中国核电“技术崛起、海外输出”的**主打品牌**,是中广核集团及中核集团在 ACP1000 和 ACP1000+的基础上联合开发的三代加堆型,具有完整自主知识产权,在设计创新方面优势明显。

- 采用**“能动和非能动相结合”的安全设计理念**,反应堆堆芯配备 177 个燃料组件、单堆布置、采用多重冗余的安全系统。非能动以高位冷却水箱为主体,事故后依靠重力快速向堆芯注入大量含硼水,可有效应对能动系统动力源丧失的情况,防止堆芯裸露。
- **全面平衡贯彻了“纵深防御”的设计原则**,设置了完善的严重事故预防和缓解措施,满足事故后 72 小时不干预原则,安全指标和技术性能达到了国际三代核电技术的先进水平。
- **可根据客户需求,定制个性化的专设安全系统**。基于实际情况,可选择性在余热排出、一回路的完整性和安全壳完整性等重要环节上设置非能动系统,次临界、一路水装量可继续沿用传统能动系统,实现资金和资源的有效配置。
- **实现了安全性和经济性的平衡**,经济指标上,电厂设计寿命 60 年,采用 18 个月换料方案,设计可利用率大于 90%,市场竞争力突出。

图 18: “华龙一号” 能动与非能动结合的安全系统



资料来源:《中国核电》, 中国银河证券研究院

“一带一路”延伸新触角，华龙一号出海势头强劲。“一带一路”沿线中，有 28 个国家计划发展核电，规划机组 126 台总规模约 1.5 亿千瓦，市场总量约 2.4 万亿元。受政治、经济、军事等因素影响，中国核电企业在“一带一路”所占的市场份额难以估计。核电出口的必要条件是拥有自主知识产权，由中核与中广核自主研发的华龙一号成为“走出去”明星。截至目前，中核集团已签署两笔华龙一号出口订单——巴基斯坦的卡拉奇 2、3 号机组以及阿根廷阿图查 4 号机组。同时，中广核集团也与英国达成合作协议，帮助布拉德维尔核电站引进华龙一号。

### （三）四代：开启“零放射”时代

目前核电存在两种发展更安全的反应堆的途径。一是采用“纵深防御”策略，在反应堆的设计、建造和操纵方面做进一步的改进。在核事故发生后，被损坏的反应堆中氢积累的可能性、严重的蒸汽爆炸被列为重点研究课题，安全壳被设计实验进行严重事故下的验证。工程师们已经花费了数年时间设计各种专用安全系统，结果使核动力系统过于复杂冗余，造价高昂。

二是进行技术革新，发展新一代核能系统，充分利用其固有安全的特点，这样容易向公众说明并为他们所理解和接受。如今压水堆已不能再通过无限制复杂化纵深防御来解决安全问题，革新型反应堆技术才是最终出路。

积极开展四代研究。第四代核能系统由美国能源部在 1999 年提出。2002 年美国联合 10 余个国家、机构提出将钠冷快堆、铅冷快堆、气冷快堆、超临界水冷堆、超高温气冷堆、熔盐堆 6 种堆型确认为重点研发对象，并预计将于 2030 年开启商业化进程。中核旗下的原子能科学研究院于 2011 年实现了国内首座钠冷快堆实验堆的满功率稳定运行。

国际合作积极推动核电技术发展，2015年9月，比尔盖茨投资的泰拉能源公司就与中核集团签署行波堆（四代核电，属于钠冷快堆的一种）合作协议，致力于行波堆技术的研发、落地和投产。

表 4: 第四代核电技术部分目标

经济性	安全性
核电机组比投资不大于 1000 美元/kw	堆芯融化概率低于 $10^{-6}$ /堆年
发电成本不大于 3 美分/kwh	完全无场外放射性释放
建设周期不超过 3 年	人为错误不会导致严重事故，不需要厂外应急措施
不依赖铀资源的先进燃料循环	防扩散能力强

资料来源：《世界核电主要堆型技术沿革》，中国银河证券研究院

大幅降低堆芯融化概率，开启“零放射”时代。美国核电用户要求文件(URD)与欧洲核电用户要求文件(EUR)联合提出了四代核电堆芯融化概率低于  $10^{-6}$ /年、完全无场外放射性释放、人为错误不会导致严重事故，不需要厂外应急措施等要求。通过加强专设安全系统，设置坚固而大容积的安全壳，收严安全裕量基准，提高新一代核电的抗事故能力。

表 5: 几代核电技术主要参数对比

参数	二代	二代加	三代	四代
堆芯融化概率 (/堆年)	$1.0 \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10^{-4}$	小于 $1.0 \times 10^{-5}$	小于 $10^{-6}$
大量放射性向环境释放概率 (/堆年)	$1.0 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-5}$	小于 $1.0 \times 10^{-6}$	0

资料来源：《非能动安全先进压水堆核电技术》，中国银河证券研究院

提高燃料循环利用率。目前，四代快堆利用热堆乏燃料后处理分离出的钚制成 MOX 燃料，在快堆内进行多轮闭式循环，铀资源利用率可由近 0.6% 提升至 30%，同热堆一次通过模式相比提升了 50 倍。2015 年，中核集团与比尔盖茨主导投资的美国泰拉能源签约，合作开发“行波堆”。美国核能专家预计未来以行波堆为代表的钠冷快堆可将铀资源的利用率进一步提升至 60%，且能以贫铀、乏燃料回收铀或者天然铀为燃料，换料周期有望延长至 10 年以上。

表 6: 世界燃料循环模式对比

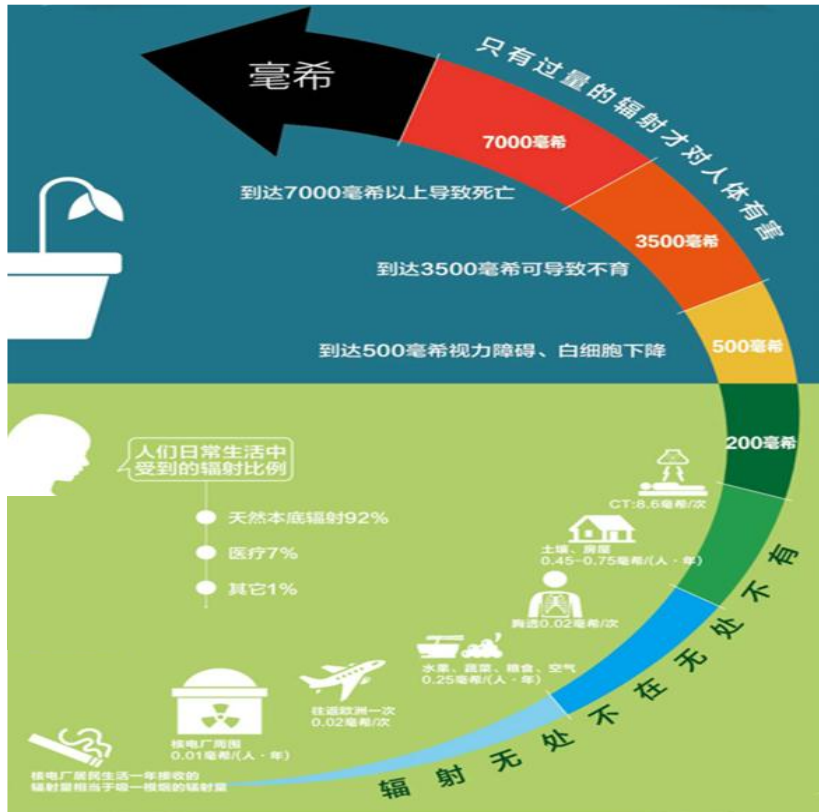
循环模式	适用堆型	铀资源利用率	采用国家	技术特点
一次通过	热堆	0.58%	瑞典、芬兰、加拿大、美国	热堆乏燃料暂存数十年后作为废物进行地质深埋
一次循环	热堆	0.98%	法国、英国、美国、俄罗斯、	热堆乏燃料后处理提纯铀和钚，返回热堆中再次使用
闭式循环	快堆	>30%	韩国、日本、印度、中国	热堆乏燃料后处理分离钚制成快堆燃料（MOX 燃料或金属燃料），燃料在快堆内燃烧并增殖，快堆乏燃料再进行后处理/再循环

资料来源：《原子能工业》，《第 8 个拥有快堆技术的国家——中国》，中国银河证券研究院

首次对经济性提出要求。第四代核能论坛（GIF）首次针对四代核电设置经济指标，要求核电机组单位投资不大于 1000 美元/千瓦（二代加约 11000~14000 元）、发电成本不大于 3 美分/千瓦时（二代加约 0.3 元），同时建设周期从三代核电的 54 个月降低至 36 个月以下。无论从安全性还是经济性角度来看，四代核电有望带领核电产业迈入新纪元。

## 四、安全知识匮乏，科普宣传尚待加强

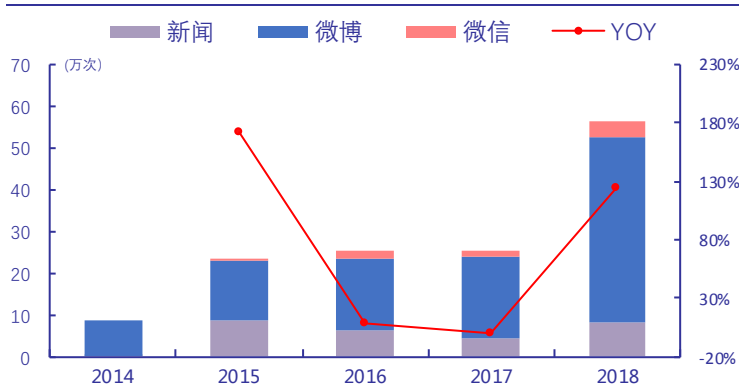
图 19: 辐射在大自然中的存在形式



资料来源: 中国核电, 中国银河证券研究院

“邻避效应”客观存在，需要科学、理性地看待核电。核电进入公众科普领域的时间较晚，目前公众对核电基础知识的了解还比较匮乏，存在一定的误解，其危害性被渲染夸大，导致“邻避效应”较强。破解误解的正确出路在于公开透明，用科学数据说话。事实上，辐射在生活中随处可见，常人一年内允许接受的最大辐射量为 1000 微西弗。在事故等级为五级的三岛核事故中，方圆 80 公里以内的居民平均接受到的辐射量为 10 微西弗，对健康产生的影响非常有限。

图 20: 我国近年来涉核舆情信息数量统计



资料来源: SMAS 社会化媒体数据库, 中国银河证券研究院

**科普宣传、公众沟通仍待加强。**目前，我国核电公众宣传的主体力量是核电运营企业和全国性协会，宣传手段主要包括向公众开放中国核聚变博物馆，定期举办核电工业及装备展览会以及核电企业官网开设科普宣传专栏。近年来公众科普宣传力度已明显增强，但仍与美国、日本、法国等发达国家仍存在不小差距。



## 五、投资建议

虽然近年我国用电增速随着 GDP 增长放缓而有所下移，但从人均用电量的角度来看，我国电力需求仍有较大提升空间。凭借基荷电源属性，且高效、稳定、环保，核电机组利用率常年维持高位，盈利水平得到保障。

全球核电技术已迭代升级至第四代。安全性一直是推动核电行业发展的核心目标。目前我国在役机组多采用二代加技术，三代机组已经开始陆续投产，预计到 2030 年左右，三代核电站或将成为主力机型。从安全性、经济性以及环保的角度来看，四代核电技术将成为未来发展的主流方向。

自 1994 年泰山核电站首台机组投产，我国 45 座核电站已累计安全运行 326 堆年，我国从未发生过二级及以上核事故。国外共发生过 3 起重大核电事故，其中三里岛为五级，切尔诺贝利、福岛为七级。无论从技术设计、自然禀赋还是人为因素的角度，我国现役核电机组未来发生重大核事故的概率是微乎其微的。

目前核电存在两种发展更安全的反应堆的途径。一是采用“纵深防御”策略，在反应堆的设计、建造和操纵方面做进一步的改进。在核事故发生后，被损坏的反应堆中氢积累的可能性、严重的蒸汽爆炸被列为重点研究课题，安全壳被设计实验进行严重事故下的验证。工程师们已经花费了数十年时间设计各种专用安全系统，结果使核动力系统过于复杂冗余，造价高昂。二是进行技术革新，发展新一代核能系统，充分利用其固有安全的特点，这样容易向公众说明并为他们所理解和接受。

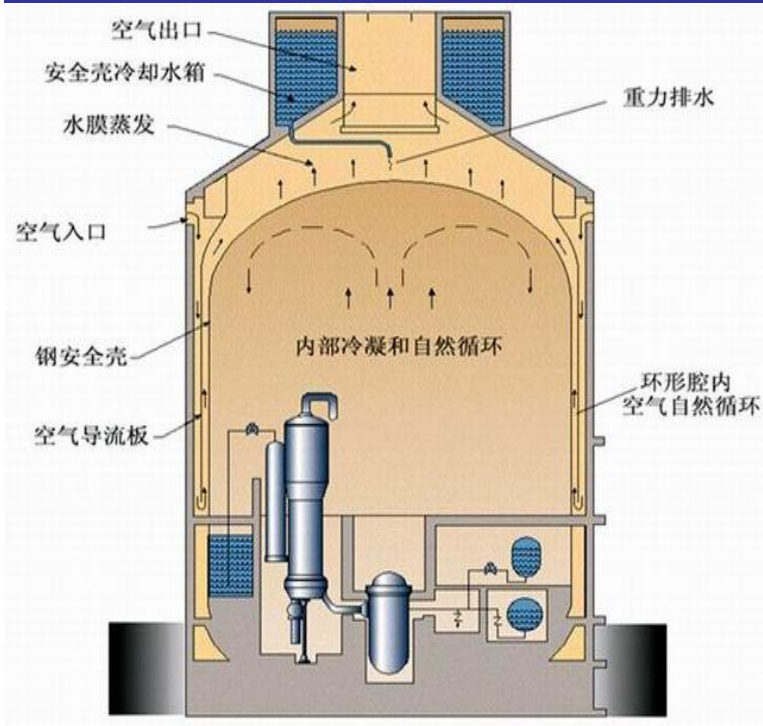
在投资策略方面，国内筹建项目充足，海外“走出去”进展顺利，核电市场空间广阔，对设备供应商的长期业绩贡献形成有力支撑。凭借装机增长以及逆周期防御属性，核电运营商具备中长期配置价值。我们推荐久立特材（002318.SZ）、江苏神通（002438.SZ）、中国核电（601985.SH），建议关注应流股份（603308.SH）、中广核电力（1816.HK）、中核科技（000777.SZ）、台海核电（002366.SZ）、纽威股份（603699.SH）等。

## 六、风险提示

- 1、全社会电力需求增速下滑过快的风险；
- 2、核电审批项目、在建项目的推进情况不达预期的风险；
- 3、核电三代机组尚未经过至少一个换料周期验证的风险；
- 4、核电三代技术造价过高、上网电价不及预期的风险。

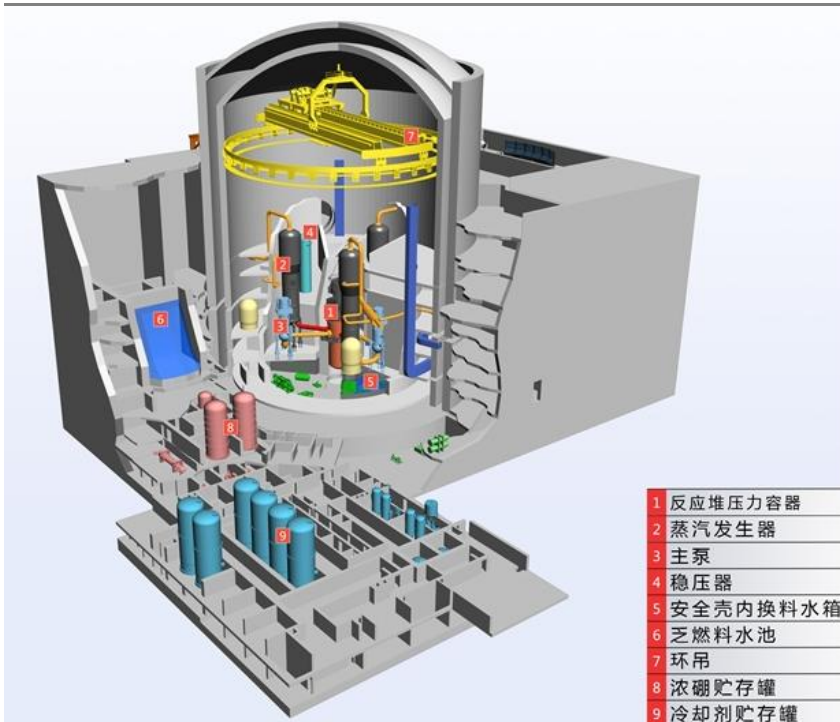
## 附录

图 21: 三代主要机型-AP1000 堆型内部构造图



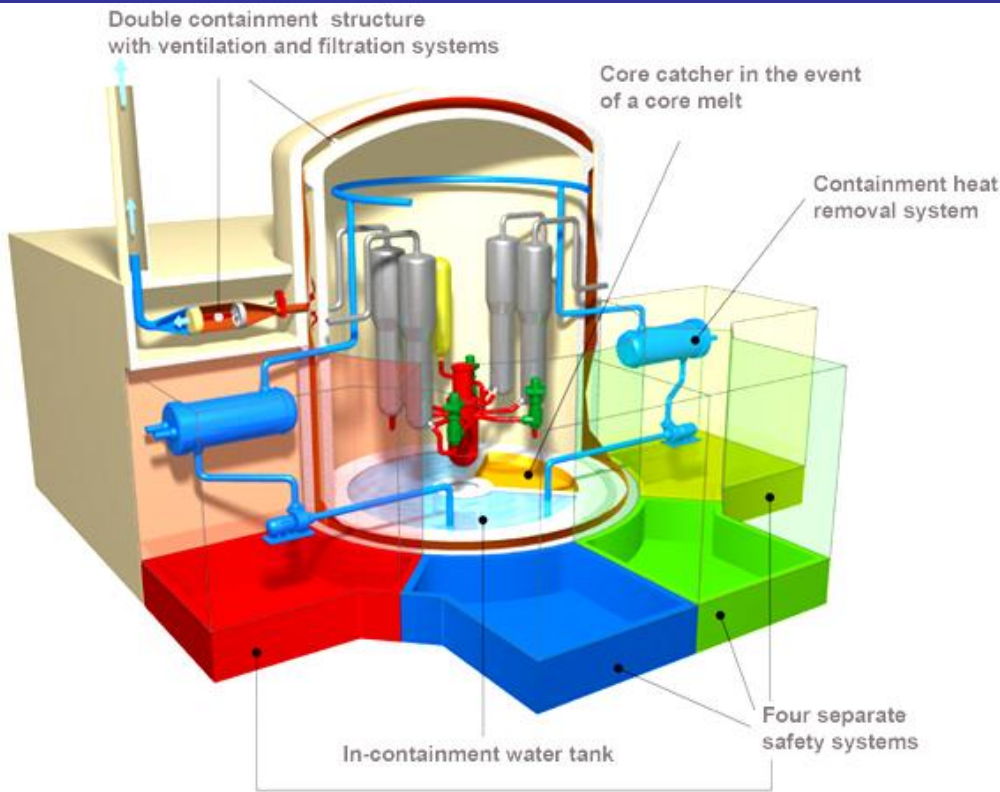
资料来源: 中国核电, 中国银河证券研究院

图 22: 三代主要机型-ACPR1000+堆型内部构造图



资料来源: 北极星电力新闻网, 中国银河证券研究院

图 23: 三代主要机型-EPR 堆型内部构造图



资料来源: EDF 官网, 中国银河证券研究院

表 7: 全球核电站主要堆型参数对比

堆型名称	堆型分类	燃料	冷却剂	慢化剂	原理及技术特点
压水堆 (PWR)	轻水堆	浓缩 UO <sub>2</sub>	水	水	把轻水 (普通水) 加压后能降低沸点, 加压水在 325°C 的高温下仍能保持液体状态。PWR 在其一回路系统中使用加压水吸收热量, 之后在二回路系统中降低气压释放热量。
沸水堆 (BWR)	轻水堆	浓缩 UO <sub>2</sub>	水	水	沸腾轻水在反应堆压力容器内直接产生饱和蒸汽的动力堆。沸水堆与压水堆同属轻水堆, 都具有结构紧凑、安全可靠、建造费用低和负荷跟随能力强等优点。
重水堆 (HWR)	重水堆	天然 UO <sub>2</sub>	重水	重水	重水堆能高效、充分的利用核燃料, 但体积比轻水堆大, 建造费用高, 重水昂贵, 发电成本比较高。
石墨气冷堆 (GCR)	石墨堆	天然 UO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> 或 氦气	石墨	用石墨慢化, 二氧化碳或氦气冷却的反应堆。近期的研究集中在氦气冷却的高温气冷堆 (HTGR) 上。
石墨水冷堆 (LWGR)	石墨堆	浓缩 UO <sub>2</sub>	水	石墨	堆芯和循环回路庞大, 难以设置安全屏障, 运行比较复杂。
快中子增殖堆 (FBR)	快堆	浓缩 UO <sub>2</sub> 、PuO <sub>2</sub> &UO <sub>2</sub>	液态钠	无	由快中子引起链式裂变反应所释放出来的热能转换为电能的反应堆。快堆在反应中既消耗裂变材料, 又生产新裂变材料, 而且所产可多于所耗, 能实现核裂变材料的增殖。

资料来源: 中广核招股说明书, 中国银河证券研究院

表 8: 我国核电站采用的技术路线及技术来源

堆型	技术路线	反应堆类型	设计容量 (万千瓦)	技术来源
M310	二代	压水堆	98.7	中广核集团引进自法国阿海珐公司
CANDU-6	二代	重水堆	72.8	中核集团引进自加拿大坎杜公司
CNP300	二代加	压水堆	31	中核集团设计
CNP600/1000	二代加	压水堆	60	中核集团吸收国际先进技术设计
VVER-1000	二代加	压水堆	106	中核集团引进自俄罗斯国家原子能公司
CPR1000	二代加	压水堆	108	中广核集团在 M310 基础上改进
CPR1000+	二代加	压水堆	108	中广核集团在 CPR1000 基础上改进
AP1000	三代	压水堆	125	国电投集团引进自美国西屋公司
EPR	三代	压水堆	175	中广核集团引进自法国阿海珐公司、德国西门子子公司
ACP1000	三代	压水堆	100	中核集团在 CNP1000 基础上设计
ACPR1000	三代	压水堆	100	中广核集团基于 CPR1000 和 CPR1000+设计
CAP1400	三代	压水堆	140	国电投集团在 AP1000 基础上设计
VVER-1200	三代	压水堆	120	中核集团基于 VVER-1000 创新
华龙一号	三代	压水堆	108	中核集团、中广核集团融合 ACP1000 与 ACPR1000+设计
BN800	三代	钠冷快堆	80	中核集团引进自俄罗斯商用示范快堆 BELOYARSK 电站
HTR-PM	四代	高温气冷堆	20	清华大学自主研发, 华能集团、中核建和清华大学共同投资建设

资料来源: 中国工控网, 中国银河证券研究院

## 插图目录

图 1: 我国全社会用电量及增速 .....	1
图 2: 2017 年全球各国人均用电量对比 .....	1
图 3: 我国各发电类型机组利用率对比情况 .....	1
图 4: 2017 年全球及中国一次能源消费中各类型占比情况 .....	1
图 5: 核电历史发展脉络 .....	2
图 6: 我国核电技术路线 .....	2
图 7: 我国核电机组技术分布情况 (非内陆) .....	3
图 8: 三起重大核事故发生原因及改进措施 .....	4
图 9: 中日所处大陆板块对比 .....	4
图 10: 中日所处大陆架对比 .....	4
图 11: 我国在运核电站场坪标高 .....	5
图 12: 切尔诺贝利压力管式石墨慢化沸水反应堆 (RBMK) 示意图 .....	5
图 13: 三里岛核事故发生过程示意图 .....	6
图 14: 我国核安全法规体系 .....	7
图 15: 国际核事故分级标准 .....	8
图 16: 核电站五道安全防线 .....	8
图 17: URD 对两种类型核电厂的要求 .....	9
图 18: “华龙一号”能动与非能动结合的安全系统 .....	11
图 19: 辐射在大自然中的存在形式 .....	13
图 20: 我国近年来涉核舆情信息数量统计 .....	13
图 21: 三代主要机型-AP1000 堆型内部构造图 .....	17
图 22: 三代主要机型-ACPR1000+堆型内部构造图 .....	17
图 23: 三代主要机型-EPR 堆型内部构造图 .....	18

## 表格目录

表 1: 我国具有代表性的在役及在建核电机组情况 .....	3
表 2: 三代核电技术特点 .....	9
表 3: 三代核电主要堆型特点 .....	10
表 4: 第四代核电技术部分目标 .....	12
表 5: 几代核电技术主要参数对比 .....	12
表 6: 世界燃料循环模式对比 .....	12
表 7: 全球核电站主要堆型参数对比 .....	18
表 8: 我国核电站采用的技术路线及技术来源 .....	19

## 评级标准

### 银河证券行业评级体系：推荐、谨慎推荐、中性、回避

**推荐：**是指未来 6-12 个月，行业指数（或分析师团队所覆盖公司组成的行业指数）超越交易所指数（或市场中主要的指数）平均回报 20%及以上。该评级由分析师给出。

**谨慎推荐：**行业指数（或分析师团队所覆盖公司组成的行业指数）超越交易所指数（或市场中主要的指数）平均回报。该评级由分析师给出。

**中性：**行业指数（或分析师团队所覆盖公司组成的行业指数）与交易所指数（或市场中主要的指数）平均回报相当。该评级由分析师给出。

**回避：**行业指数（或分析师团队所覆盖公司组成的行业指数）低于交易所指数（或市场中主要的指数）平均回报 10%及以上。该评级由分析师给出。

### 银河证券公司评级体系：推荐、谨慎推荐、中性、回避

**推荐：**是指未来 6-12 个月，公司股价超越分析师（或分析师团队）所覆盖股票平均回报 20%及以上。该评级由分析师给出。

**谨慎推荐：**是指未来 6-12 个月，公司股价超越分析师（或分析师团队）所覆盖股票平均回报 10%-20%。该评级由分析师给出。

**中性：**是指未来 6-12 个月，公司股价与分析师（或分析师团队）所覆盖股票平均回报相当。该评级由分析师给出。

**回避：**是指未来 6-12 个月，公司股价低于分析师（或分析师团队）所覆盖股票平均回报 10%及以上。该评级由分析师给出。

**周然，电力设备新能源及公用事业行业证券分析师。**本人具有中国证券业协会授予的证券投资咨询执业资格并注册为证券分析师，本人承诺，以勤勉的职业态度，独立、客观地出具本报告。本报告清晰准确地反映本人的研究观点。本人不曾因，不因，也将不会因本报告中的具体推荐意见或观点而直接或间接接受到任何形式的补偿。本人承诺不利用自己的身份、地位和执业过程中所掌握的信息为自己或他人谋取私利。

## 免责声明

本报告由中国银河证券股份有限公司（以下简称银河证券，银河证券已具备中国证监会批复的证券投资咨询业务资格）向其机构或个人客户（以下简称客户）提供，无意针对或打算违反任何地区、国家、城市或其它法律管辖区域内的法律法规。除非另有说明，所有本报告的版权属于银河证券。未经银河证券事先书面授权许可，任何机构或个人不得更改或以任何方式发送、传播或复印本报告。

本报告所载的全部内容只提供给客户做参考之用，并不构成对客户的投资建议，并非作为买卖、认购证券或其它金融工具的邀请或保证。银河证券认为本报告所载内容及观点客观公正，但不担保其内容的准确性或完整性。客户不应单纯依靠本报告而取代个人的独立判断。本报告所载内容反映的是银河证券在最初发表本报告日期当日的判断，银河证券可发出其它与本报告所载内容不一致或有不同结论的报告，但银河证券没有义务和责任去及时更新本报告涉及的内容并通知客户。银河证券不对因客户使用本报告而导致的损失负任何责任。

银河证券不需要采取任何行动以确保本报告涉及的内容适合于客户。银河证券建议客户如有任何疑问应当咨询证券投资顾问并独自进行投资判断。本报告并不构成投资、法律、会计或税务建议或担保任何内容适合客户，本报告不构成给予客户个人咨询建议。

本报告可能附带其它网站的地址或超级链接，对于可能涉及的银河证券网站以外的地址或超级链接，银河证券不对其内容负责。本报告提供这些地址或超级链接的目的纯粹是为了客户使用方便，链接网站的内容不构成本报告的任何部份，客户需自行承担浏览这些网站的费用或风险。

银河证券在法律允许的情况下可参与、投资或持有本报告涉及的证券或进行证券交易，或向本报告涉及的公司提供或争取提供包括投资银行业务在内的服务或业务支持。银河证券可能与本报告涉及的公司之间存在业务关系，并无需事先或在获得业务关系后通知客户。

银河证券无需因接收人收到本报告而视其为客户。本报告是发送给银河证券客户的，属于机密材料，只有银河证券客户才能参考或使用，如接收人并非银河证券客户，请及时退回并删除。

所有在本报告中使用的商标、服务标识及标记，除非另有说明，均为银河证券的商标、服务标识及标记。

银河证券版权所有并保留一切权利。

## 联系

### 中国银河证券股份有限公司 研究院

深圳市福田区金田路 3088 号中洲大厦 20 层

上海浦东新区富城路 99 号震旦大厦 31 层

北京西城区金融大街 35 号国际企业大厦 C 座

公司网址：[www.chinastock.com.cn](http://www.chinastock.com.cn)

### 机构请致电：

深广地区：崔香兰 0755-83471963 [cuixianglan@chinastock.com.cn](mailto:cuixianglan@chinastock.com.cn)

上海地区：何婷婷 021-20252612 [hetingting@chinastock.com.cn](mailto:hetingting@chinastock.com.cn)

北京地区：耿尤繇 010-66568479 [gengyouyou@ChinaStock.com.cn](mailto:gengyouyou@ChinaStock.com.cn)