

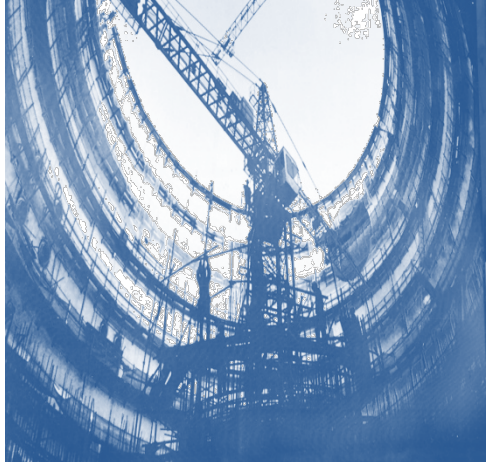
玲龙一号技术方案与工程进展

中国核动力研究设计院

2022/1/10

目 录

- 1 概述
- 2 国内外小型堆发展现状
- 3 小型堆发展需求
- 4 ACP100研发概况
- 5 玲龙一号示范工程进展
- 6 结语

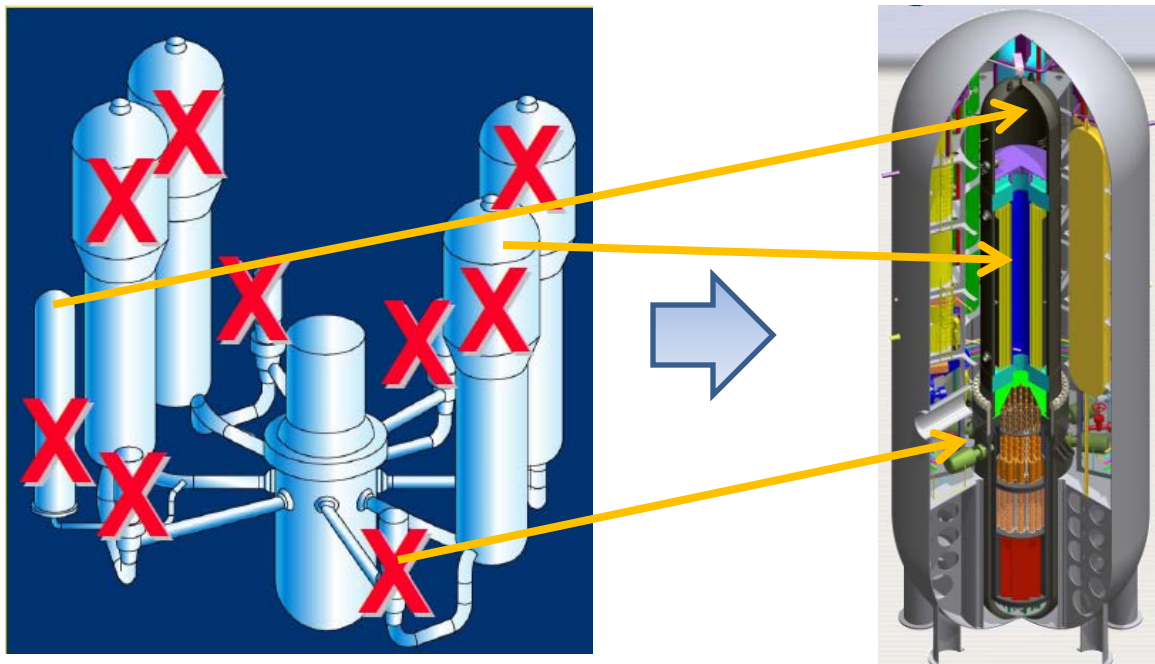


一、概述



- 核能是一种**高效、清洁**的能源，在国民经济发展中扮演越来越重要的角色。但仅依靠大型核电，还不能使核能充分发挥其应有的效用。
- **模块化、多用途**小型堆，具有“**小、快、灵**”的特点，其单模块功率规模小、可根据市场需求灵活组合，满足不同的功率需求。
- 国际原子能机构（IAEA）将“**小型核反应堆**”定义为电功率**小于300 MW**的核反应堆动力装置，简称“**小型堆**”。美国在IAEA的基础上加入了**模块化概念**，即小型模块化反应堆，英文简称SMR（Small Modular Reactor）。

- 将反应堆及反应堆冷却剂系统集成成为反应堆模块,反应堆模块可在工厂制造、整体运输、快速安装、通过批量模块实现规模经济。

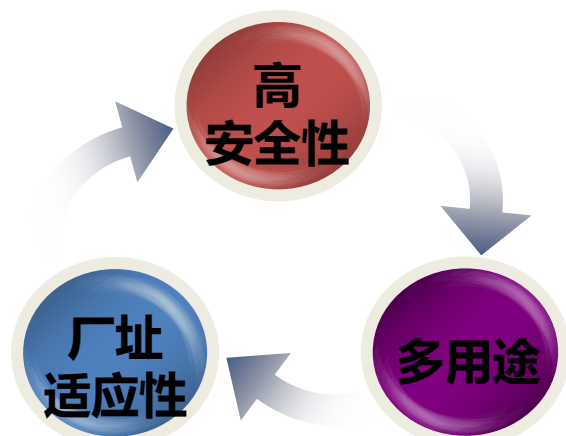


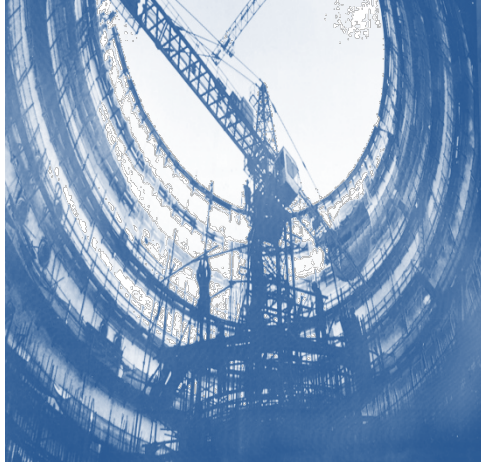
□ 相比于大型反应堆，小型反应堆具有自身的特点和优势：

- 功率规模小，系统简单，建造初投资少
- 安全性能高，可建于大城市等人口密集地区周边
- 运行灵活，对传输配套设施要求较低，适应负荷变化能力强
- 模块式建造，建造周期短
- 厂址条件要求简化，选址灵活

□ 多用途综合应用，市场前景广阔：

- 偏远地区及孤网热电联供
- 城市区域供热
- 海水淡化
- 工业工艺供热
- 海上浮动核电站等





二、国内外小型堆发展现状



□ 已投运的小型堆

- 小型核电：26座在运行（大都属于2代早期核电技术）
 - 瑞士本兹劳(Beznau)核电站
 - 俄罗斯比利比诺(Bilibino)核电站等
- 核能供热：50余座在运
 - 抽气供热或海水淡化核能装置约50余座，主要在前苏联地区；
 - 专用供热堆，如加拿大的2MW SLOWPOKE池式供热堆和我国的5MW壳式供热实验堆

上述反应堆历时均较为久远，或为试验堆，进入21世纪，世界各国开始致力于“革新型小型堆”设计

□ 国外先进小型堆技术——模块化小型堆

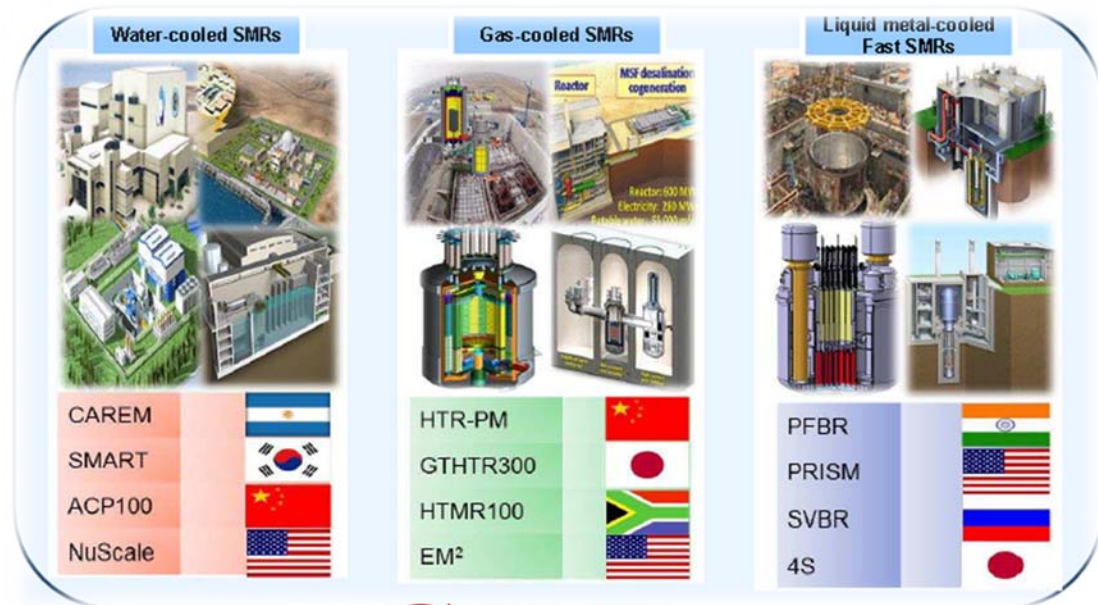
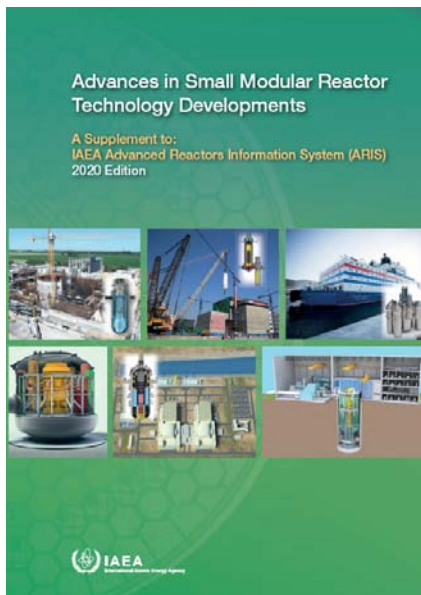
➤ 美国能源部 (DOE) 率先提出模块化小型堆 (SMR) 概念

- 反应堆主系统模块化设计、模块化制造、模块化运输，现场快速装配、采用革新技术的新一代小型反应堆
- 反应堆主系统成为在工厂里批量生产的产品(工厂预制反应堆)
- 以期带动制造成本大幅降低，缩短工期

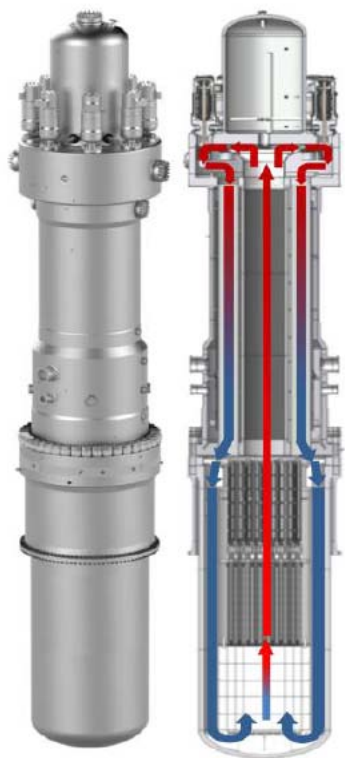


(二) 国内外小型堆发展现状

- 截止2020年，IAEA SMR年度手册统计了全世界范围内18个国家正在开发或建设的72座反应堆
 - 其中31个采用压水堆技术，且大部分为一体化小型压水堆设计
 - 还有瞄准未来长远应用的新堆型，如小型铅冷快堆、小型气冷快堆等，大都处于概念或方案设计阶段



(二) 国内外小型堆发展现状

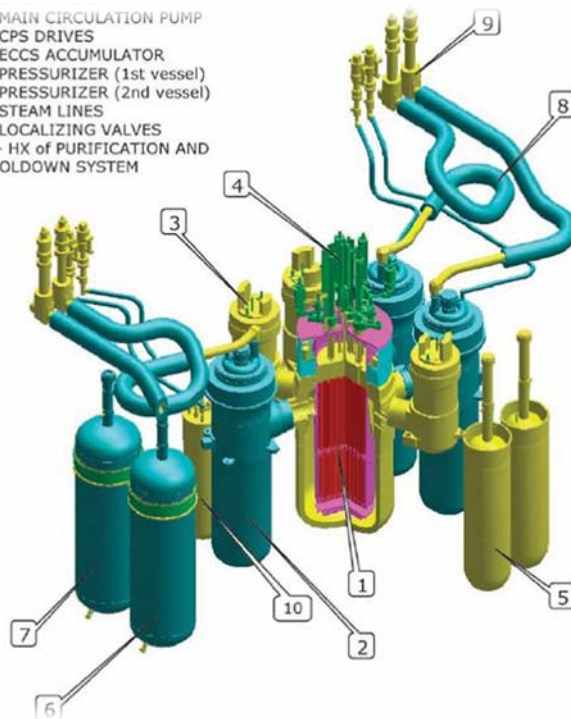


mPower



NuScale

- 3- MAIN CIRCULATION PUMP
- 4- CPS DRIVES
- 5- ECCS ACCUMULATOR
- 6- PRESSURIZER (1st vessel)
- 7- PRESSURIZER (2nd vessel)
- 8- STEAM LINES
- 9- LOCALIZING VALVES
- 10- HX of PURIFICATION AND COOLDOWN SYSTEM



KLT40S浮动核电站



RITM-200

□ 小结：从国外小型堆研发情况来看，主要存在以下特点

- 呈现出以**压水堆**为主的特征，且逐渐聚焦于**一体化压水堆**设计
 - 美国能源部：在未来25至30年，核能仍将以**压水堆技术**为基础
- 功率水平集中于25-195MWe的范围
 - 有利于实现一体化设计，设备制造难度小
 - 有利于模块化制造，反应堆整体运输

(二) 国内外小型堆发展现状

国内先进小型堆技术

中核集团

- 模块化小型堆ACP100(玲龙一号), 已开始**工程建设**
- 浮动核电站ACP25S、ACP100S, 正在开展初步设计
- 低温供热堆(燕龙), 正在开展方案设计

中广核集团

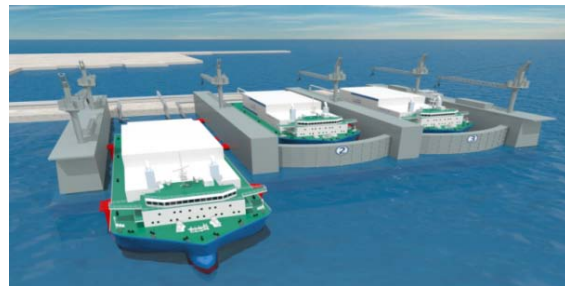
- 浮动核电站ACPR50S, 正在开展初步设计

国电投

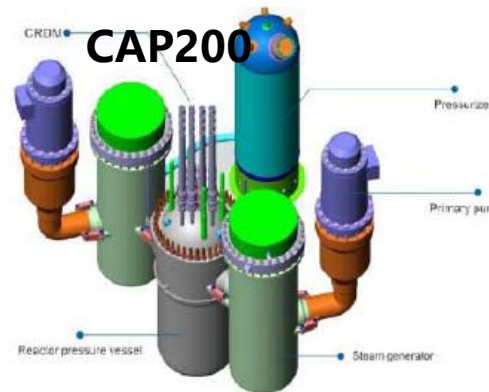
- 模块化小型堆CAP150, 和美一号(200Mwt) 供热堆

清华大学

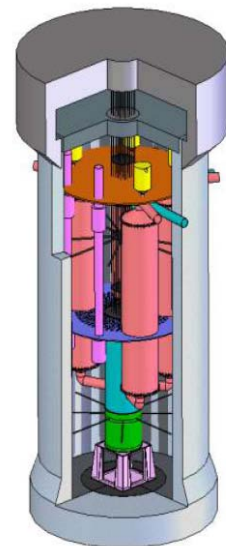
- 低温供热堆, 已完成初步设计



浮动核电平台
ACP100S



ACPR50S



DHR400

□ 小结：从国内小型堆研发情况来看，主要存在以下特点

➤ 同样以**压水堆**为主的特征，且**一体化压水堆**设计占据主流

- 压水堆：一体化5种，紧凑式1种，分散式1种

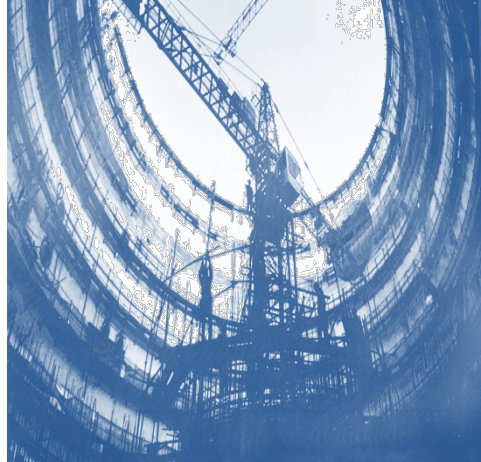
- 小型金属冷却快堆还处于研发起步阶段

➤ 一体化压水堆的**技术成熟度较高**，处于世界领先地位

- ACP100已工程应用

➤ 重视小型堆的**多用途利用**

- 在设计上，对热电联供、工业蒸汽、海水淡化等功能进行综合考虑

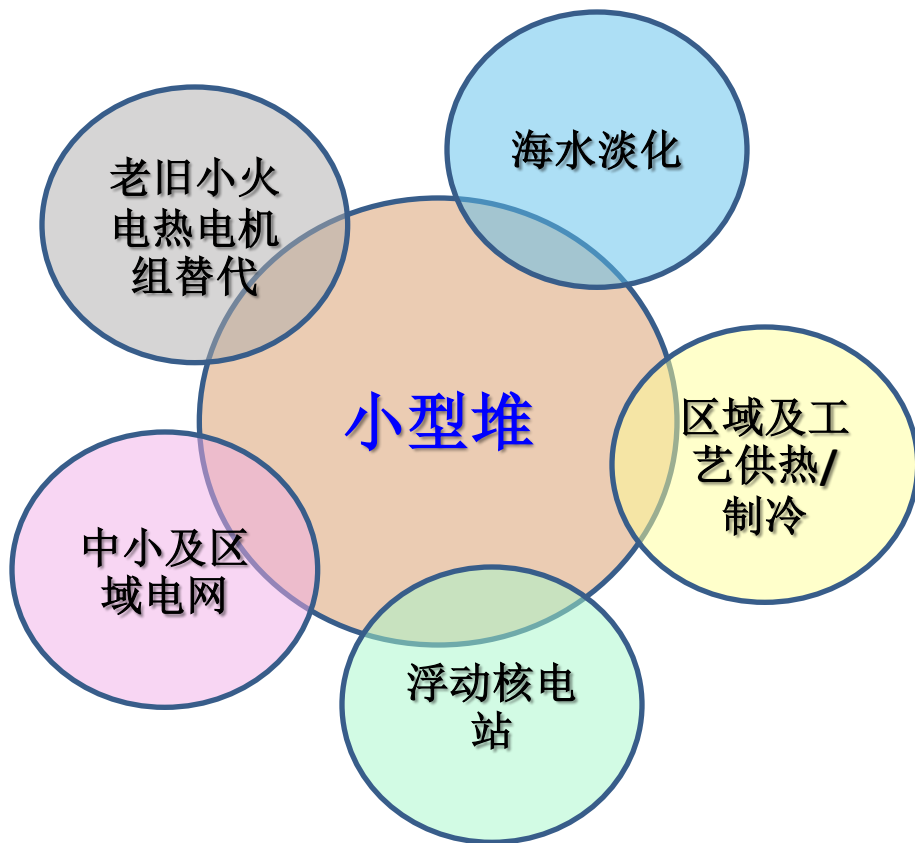


三、小型堆发展需求



■ 小型堆技术民用用途

聚焦特殊用途，与大机组差异化互补



□ 老旧小火电热电机替代

- 我国“三北”地区兼顾城市供热的纯凝小火电机组约**8000万千瓦**，小火电监管难，环保措施不到位，存在高能耗、高污染。
- **淘汰20万千瓦以下落后小火电**是我国政府大力推进能源结构转型的重要举措，但是淘汰落后小火电特别是热电联供小火电必须有替代能源。



□ 中小及区域电网

- 美国加州大学统计，在现有运行的所有类型电站中，全球有**93%的装机容量在500MWe以下**（中小机组占绝对主流）。
- **追求核能的发展中国家**：成为全球核电市场增长的主力军。大都是**中小电网**，出于资源禀赋及电网稳定性要求对小型堆表现出兴趣。避免“**小网大机**”长期降功率运行的尴尬。
- **发达国家**：经济低速增长，电力需求微增长。SMR可最佳匹配电网微增长容量。典型国家：美国、英国——区域电网众多。
- **自备电厂**：偏僻矿山开采、高能耗石化冶金、海岛开发等。

□ 区域及工艺供热/制冷

➤ 工业工艺供热

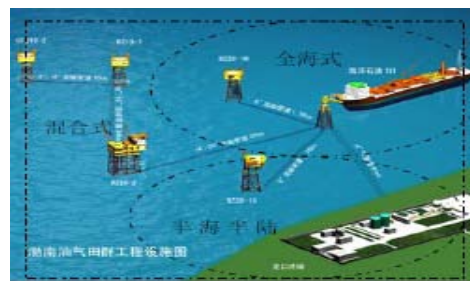
- **存量规模大：**中国每年需求工业工艺蒸汽9亿吨——相当于1.2亿kW的热源，温室气体排放量约占全年温室气体排放总量的10%
- **增量显著：**预计到2020年，仅石家庄市工业热负荷将新增1539MW

➤ 城市区域供热

- **存量规模大：**“三北”地区采暖期达4-6个月，每年需要采暖热功率高达几十万兆瓦，年耗煤数十亿吨，占总能源消耗的15%以上。
- **增量显著：**城镇化导致我国北方地区城市区域供热规模迅猛增长，气候异常导致南方地区多年的雨雪冰冻灾害也出现供热呼声。

□ 浮动核电站

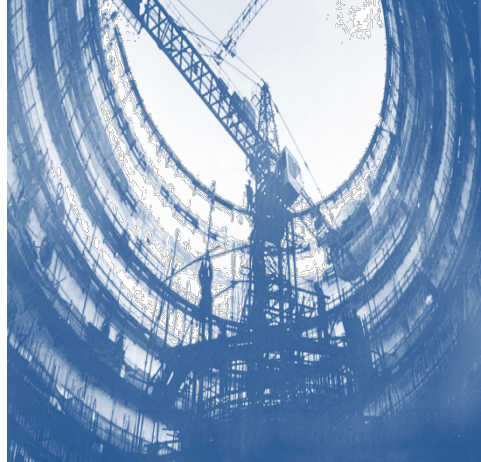
- 中国有广袤的海洋国土，有丰富的海洋资源，开发海洋资源要有可靠的能源供给；
- 浮动式核电站可以为**海洋资源开发，岛礁建设，远洋补给**提供安全可靠的能源；
- 以海上油气开发为例，油田伴生气和原油发电不可持续：目前我国海上油气开采的能源供应的主要方式，存在几方面的不足：
 - 原油发电成本高、污染大（1.5-2.0元/kWh）
 - 伴生气只能满足油田的前1/4-1/3开采期
 - 能源需求规模大：油渤海油田（60-100万Kwe），东海、南海等需求量更大



□海水淡化

- 海水淡化可提供一个不受气候变化影响的稳定水源，可有效增加沿海地区水资源总量；
- 中国**九成**沿海城市缺水
 - 南水北调是有限水资源的再分配，未能从根本上增加水资源总量，若无财政补贴，原水价格将达到8-10元/吨；
- 中东、非洲长期严重缺水
 - 以色列依靠海水淡化满足至少10%的用水需求。
 - 沙特已建成30个海水淡化厂，全国饮用水的46%依靠淡化水。





四、ACP100研发概况



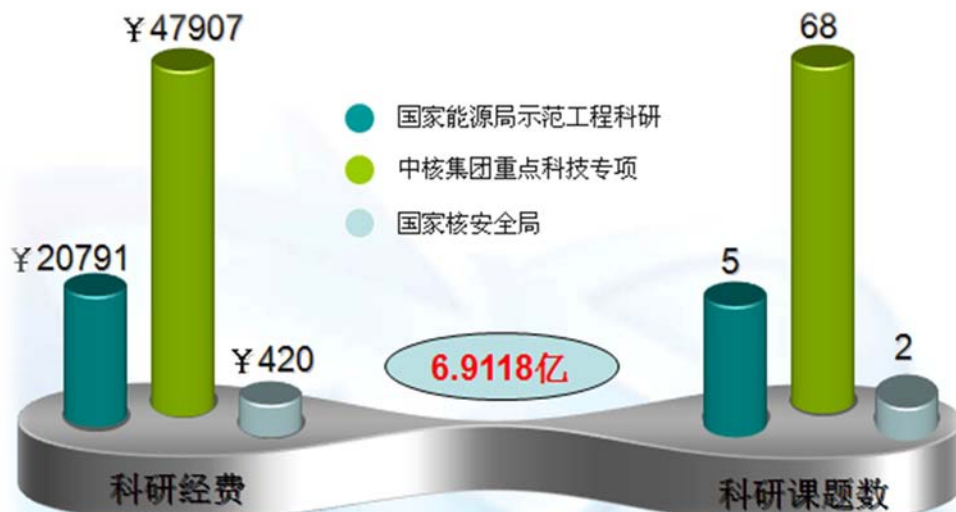
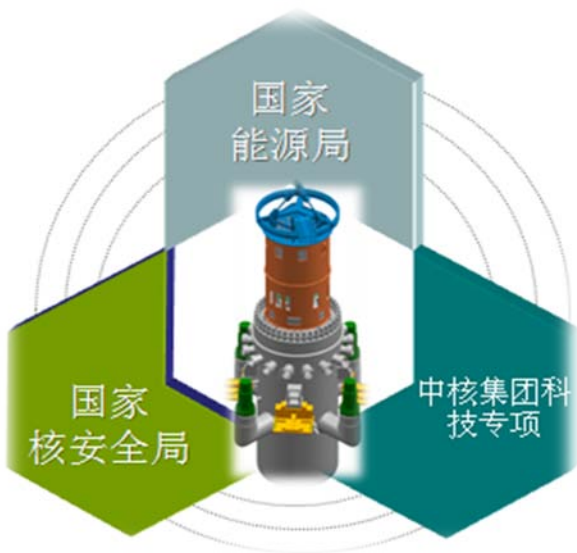
(四) ACP100研发概况

- 中核集团民用小堆研发起步于上世纪八十年代;
- 依托中核集团**50余年**小型动力堆技术及**30年**核电技术基础;
- 多年来持续自主研发, 安全性及经济性持续提升;
- 从低参数—中等参数—高参数;
- 从单一供热——热、电、水多联产。

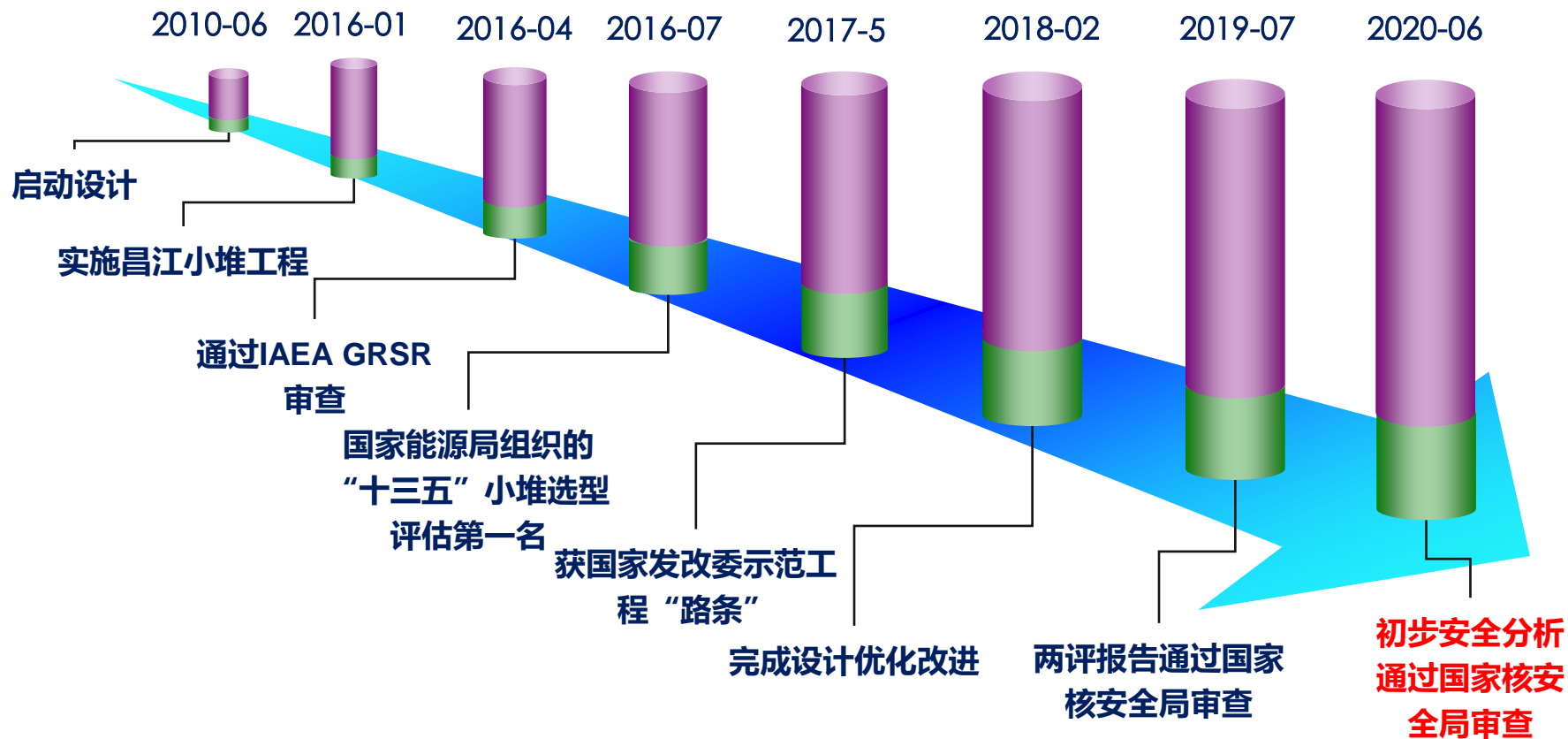


(四) ACP100研发概况

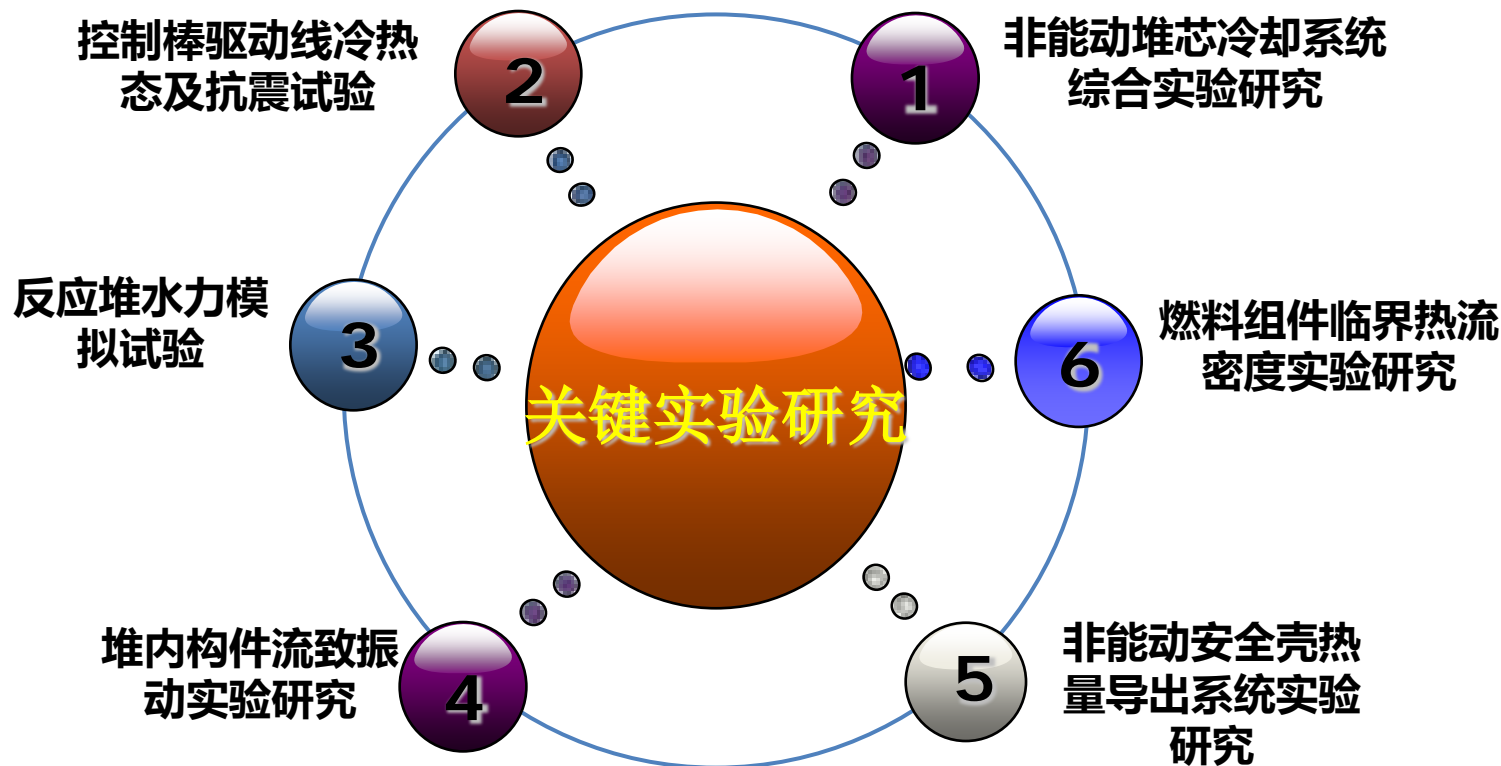
- ACP100研发进入《国家能源科技“十二五”规划》，被列为**重大研究(Y28)**和**重大示范项目(S26)**；
- 发改办高技[2011]2433号以高技术产业项目批准开展ACP100模块式小型堆关键技术研究及工程示范科研；
- 仅“十二五”得到国家能源局、国家核安全局、中核集团重点科技专项等渠道科研经费支持近**7亿元**。



1. 设计研发历程



2. 试验验证



2. 试验验证

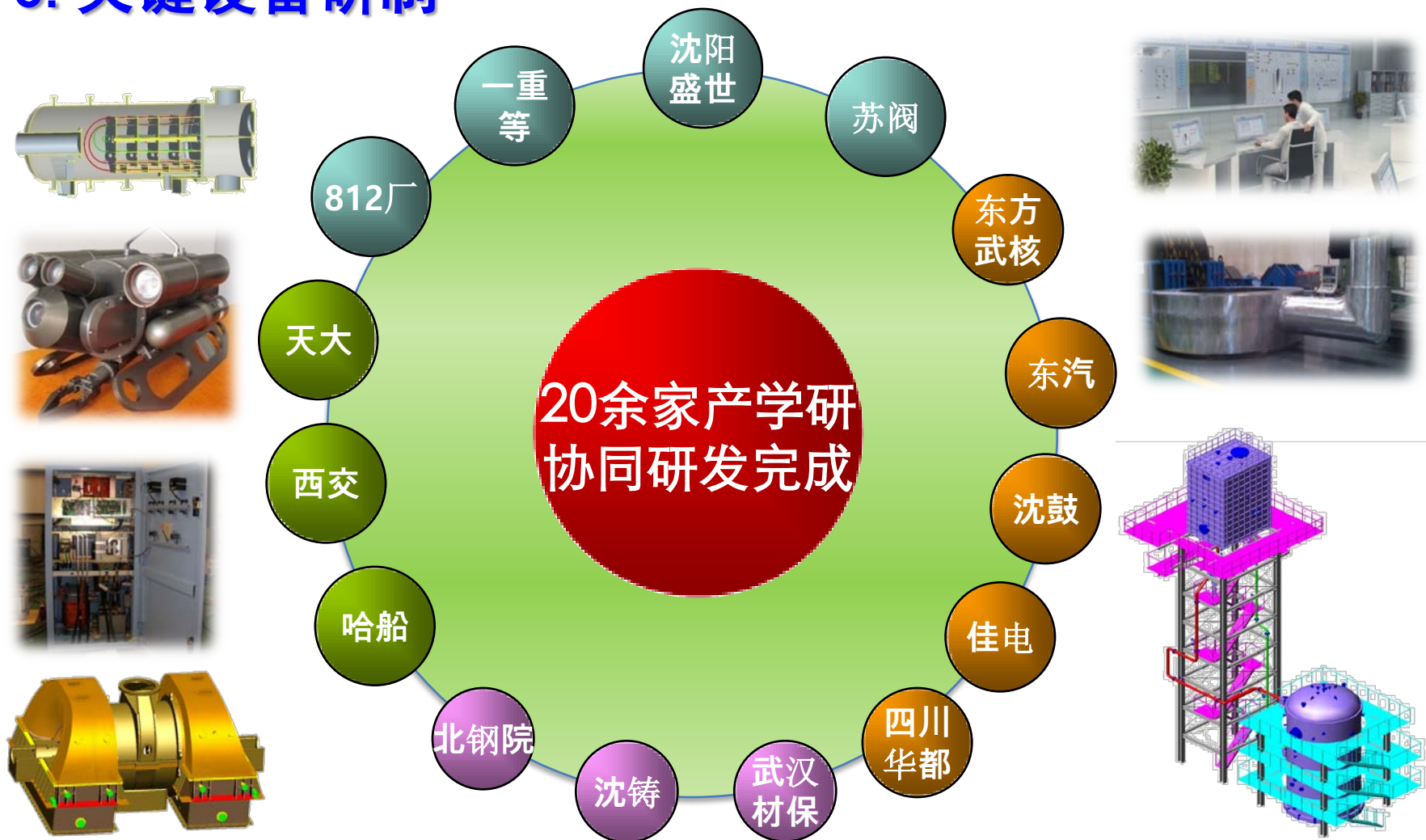
形成了多套试验台架

- ✓ 非能动堆芯冷却系统综合实验研究
- ✓ 控制棒驱动线冷热态及抗震试验
- ✓ 反应堆水力模拟试验
- ✓ 堆内构件流致振动实验研究
- ✓ 非能动安全壳热量导出系统实验研究
- ✓ 燃料组件临界热流密度实验研究



(四) ACP100研发概况

3. 关键设备研制



3. 关键设备研制

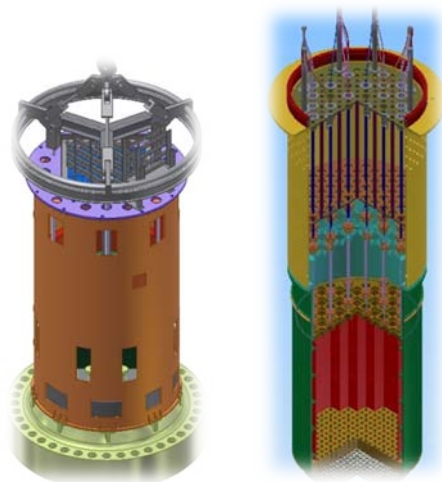
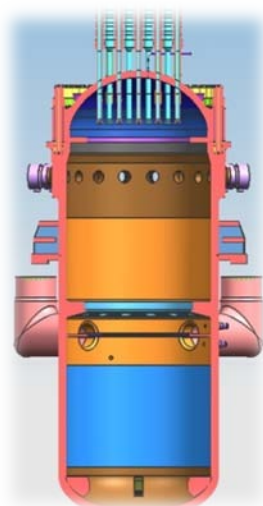
① 12项样机设备研制完成

② 反应堆6大主设备制造技术全部攻克，可全部实现国产

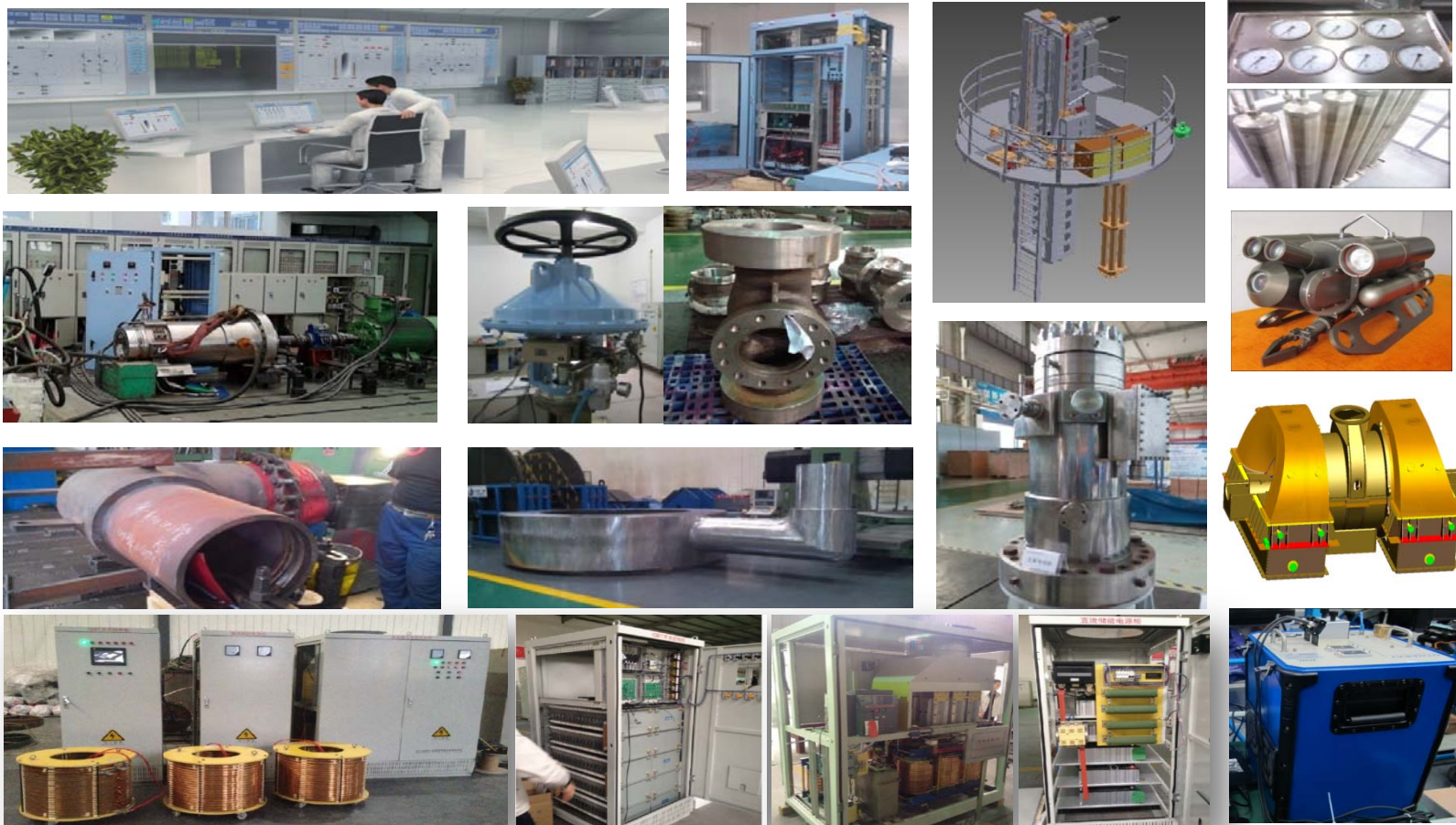
- 反应堆压力容器（一重、二重、上海锅炉）
- 直流蒸汽发生器（中核集团）
- 屏蔽式主泵（沈鼓佳电、东方）
- 堆内构件（东方武核、上海电气）
- 控制棒驱动机构（四川华都、上海先锋）
- 稳压器（524厂、一重、二重）

➢ 燃料组件可采用中核集团自主知识产权的截短型CF3S

➢ 100MWe级小核电汽轮发电机组国内多个厂家可选



3. 关键设备研制



多台样机设备研制完成

4. 第三方验证

- 为保障ACP100模块式小型堆安全性，国家核与辐射安全中心**全程**参与设计试验研发过程；
- 独立开展**5个年度共25项**安全研究及**第三方独立计算及试验验证**。这些工作在**2015年12月全部完成**。**满足我国最新核安全法规要求**。

环境保护部核与辐射安全中心

环核安中心函(2016)96号

关于ACP100模块式小型堆安全性专题 研究结论及建议的报告

中国核动力研究设计院、中国核电工程有限公司：

为了加快推动模块式小堆核能技术的进步和广泛应用，贵院(司)联合我中心从2010年开始，针对ACP100小型堆开展了多用途模块式小型反应堆ACP100的安全性联合研究。通过五年多来双方共同努力，ACP100型号核安全性能评价研究方面取得了不错的成绩。

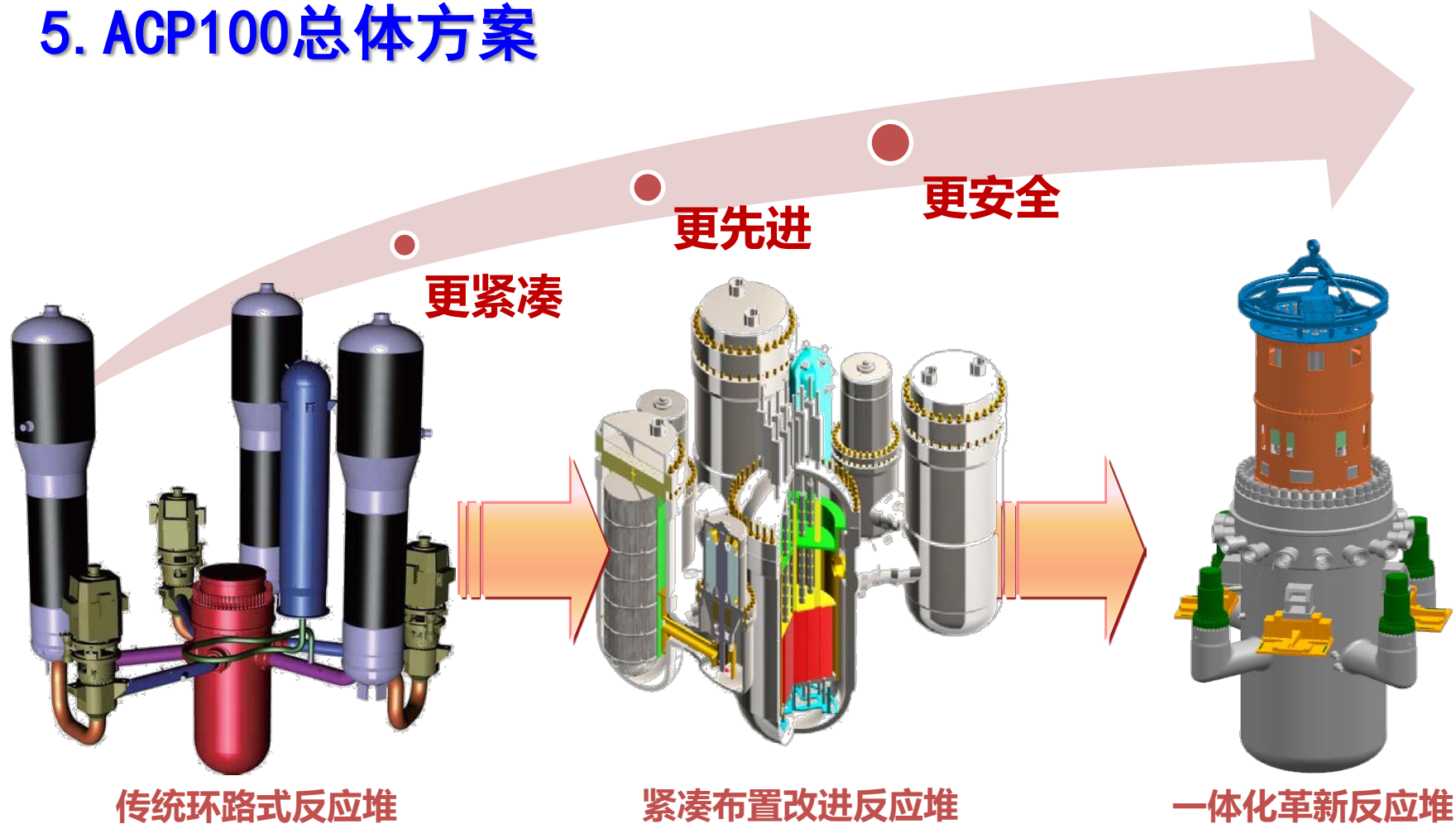
根据2012年、2013年双方签订的“模块式小型堆安全性联合专题研究”合同，针对部分关键技术和关键试验，双方联合开展了十多项

4. 第三方验证

- 2016年4月22日, IAEA在维也纳总部向中核集团提交了ACP100通用反应堆安全审查最终报告, **全球首个通过GRSR审查的小堆技术**;
- IAEA专家认为, ACP100的设计是个**创新**的小型压水堆设计, 采用“**固有安全加非能动安全**”设计, 预期能够处理极端环境条件和多重故障, 保证早期或大规模放射性释放的**实际消除**。

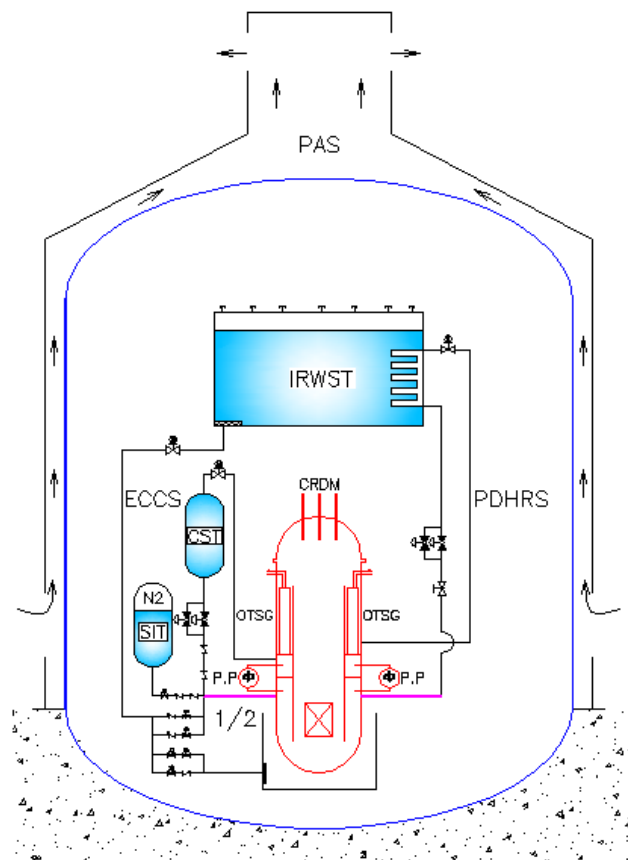


5. ACP100总体方案

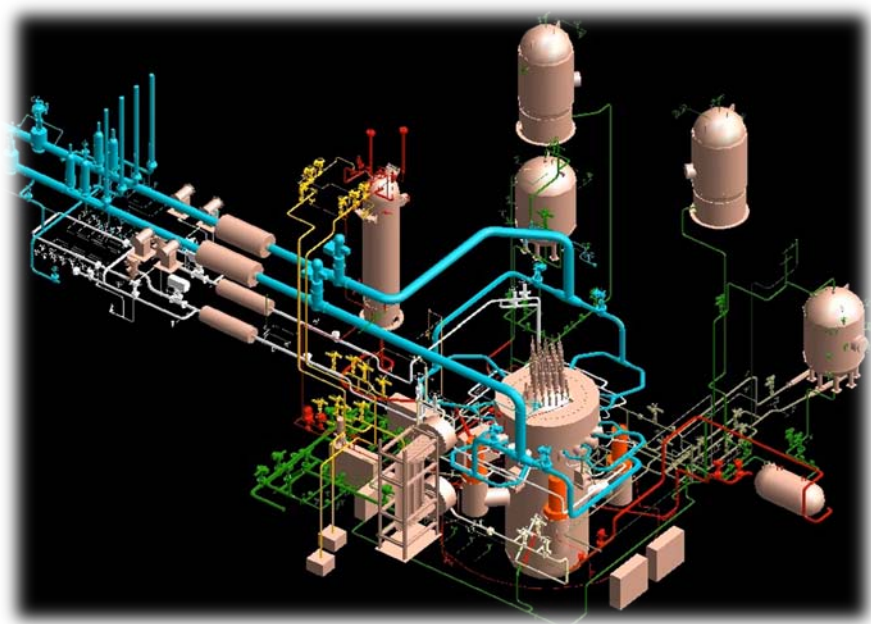


一体化反应堆+非能动安全

- 一体化反应堆设计：从设计上消除大破口失水事故
- 完全非能动安全系统设计：堆芯损坏频率低于 10^{-6} ，安全性高于三代核电
- 基于空气自然对流的钢制安全壳最终热阱：事故后可长期无需人为干预
- 从设计上可取消厂外应急：放射性源项低，并具有多重放射性包容屏障，具有极好的厂址适应性
- 可实现多用途：电、热、淡水、蒸汽联供，还可用于海上核动力平台

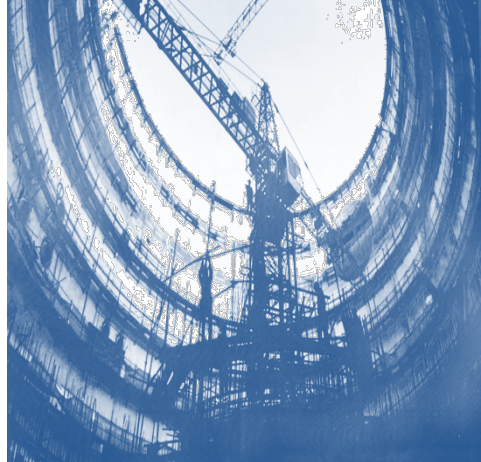


● 采用单堆单机布置



ACP100总体参数

指标	海南小堆示范工程
反应堆热功率, MWt	385
机组名义功率, MWe	126.5
电厂设计寿命, 年	60
换料周期, 年	2
SL-2水平峰值加速度g	0.3
堆芯损坏频率(CDF)	<1E-6/堆年
大量放射性释放频率(LRF)	<1E-7/堆年
燃料组件类型	AF3GS
燃料组件数量, 组	57
堆芯活性段高度, m	2.15
OTSG主蒸汽温度, °C	293.8
OTSG主蒸汽压力MPa	4.5
OTSG主给水流量 (名义), t/h	596.8



五、玲龙一号示范工程进展



2017年5月27日，采用ACP100技术方案的“玲龙一号”示范工程获得国家发改委下发的《关于海南昌江多用途小型堆示范工程有关问题的复函》（发改办能源〔2017〕915号），同意开展前期工作。规划在海南昌江建设一台具有中核集团自主知识产权，装机容量125MW的“玲龙一号”核电机组，建设工期58个月。

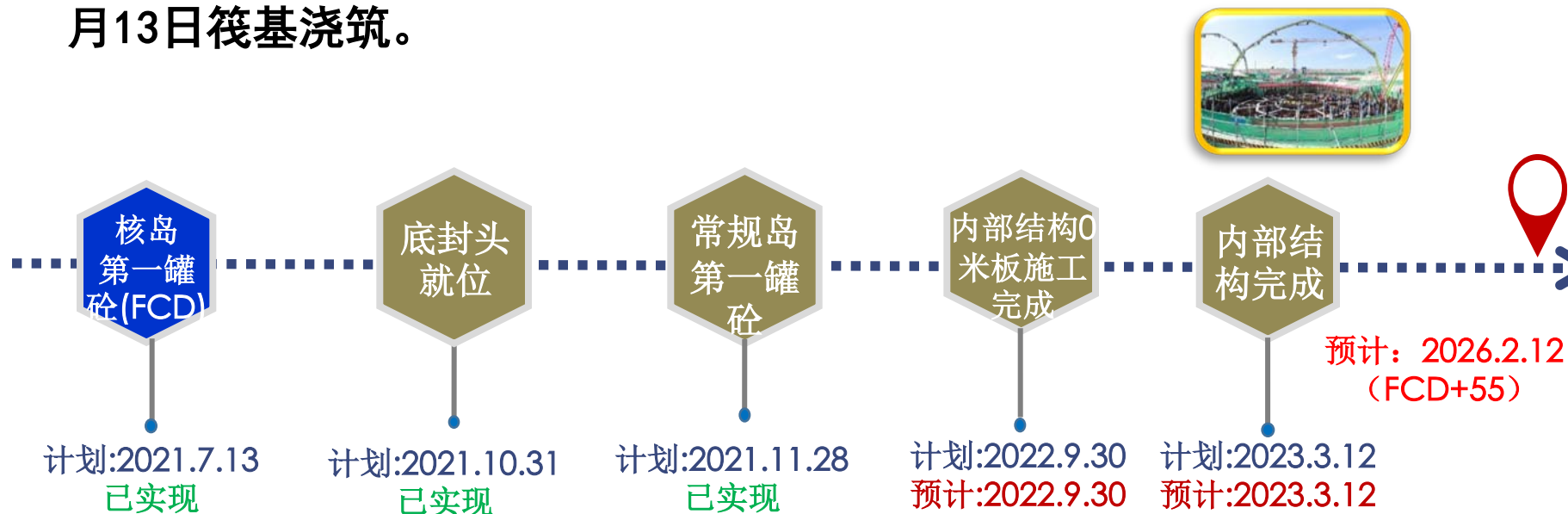
2019年10月，中核海南核电有限公司（小堆项目公司）正式注册成立，由中国核电全资。小堆项目采用工程总承包模式，小堆项目公司、海南核电、工程公司签订三方总包合同；小堆项目公司与海南核电签订委托协议，海南核电代行小堆项目业主职责，负责小堆项目建设和运营管理。

(五) 玲龙一号示范工程进展



1. 进度计划

截至目前，根据55个月一级进度计划，应完成一级里程碑3项，已完成3项。反应堆厂房筏基B层施工中，底封头2021年10月31日前吊装就位；常规岛1#筏基钢筋绑扎中，循环水进水管顶板钢筋绑扎中，2021年11月13日筏基浇筑。



2. 项目申请

- 2020年4月29日，国家发改委正式受理项目核准申请文件；
- 2020年6月3-5日，中咨公司在海口组织召开核准评估会议；
- 2020年6月22日，中咨公司将核准评估意见发国家能源局；
- 2020年12月11日，项目核准申请文件提交国务院；
- 2021年4月14日，项目核准通过国务院常务会议核准。

3. 建造许可

- 2019年8月，国家核安全局受理建造许可证申请；
- 2019年12月，召开PSAR、EIR、质保大纲第一次审评对话会；
- 2020年4月，召开PSAR第二次审评对话会；
- 2020年6月15日，质保大纲提交至核安全局；
- 2020年6月23日，PSAR报告、EIR报告通过核安全局第二季度专家委员会审议；
- 2021年7月1日，颁发建造许可证。

4. 设计管理

当前主要开展设备采购技术规格书的编制、初步设计和施工图设计等工作。具体进展如下：

序号	设计类型	计划完成 (册)	实际完成 (册)	完成比例
1	初步设计	225	224	99.6%
2	施工图设计	40	37	92.5%
3	系统手册	622	600	96.5%

5. 设备采购

- 反应堆压力容器、直流蒸汽发生器、汽轮发电机组、钢制安全壳等设备合同已签订，部分设备处于科研阶段（主泵、主泵转速测量、装卸料机）。



RPV主泵接管锻件



RPV支承段筒体堆焊



RPV容器法兰堆焊



RPV主泵接管待堆焊



主泵试验回路



SG钛管热轧



主泵电机组装

6. 现场准备

➤ 2019年7月18日，启动场地平整，在相关方的支持和配合下，现场正在开展土石方工作。



小堆施工现场



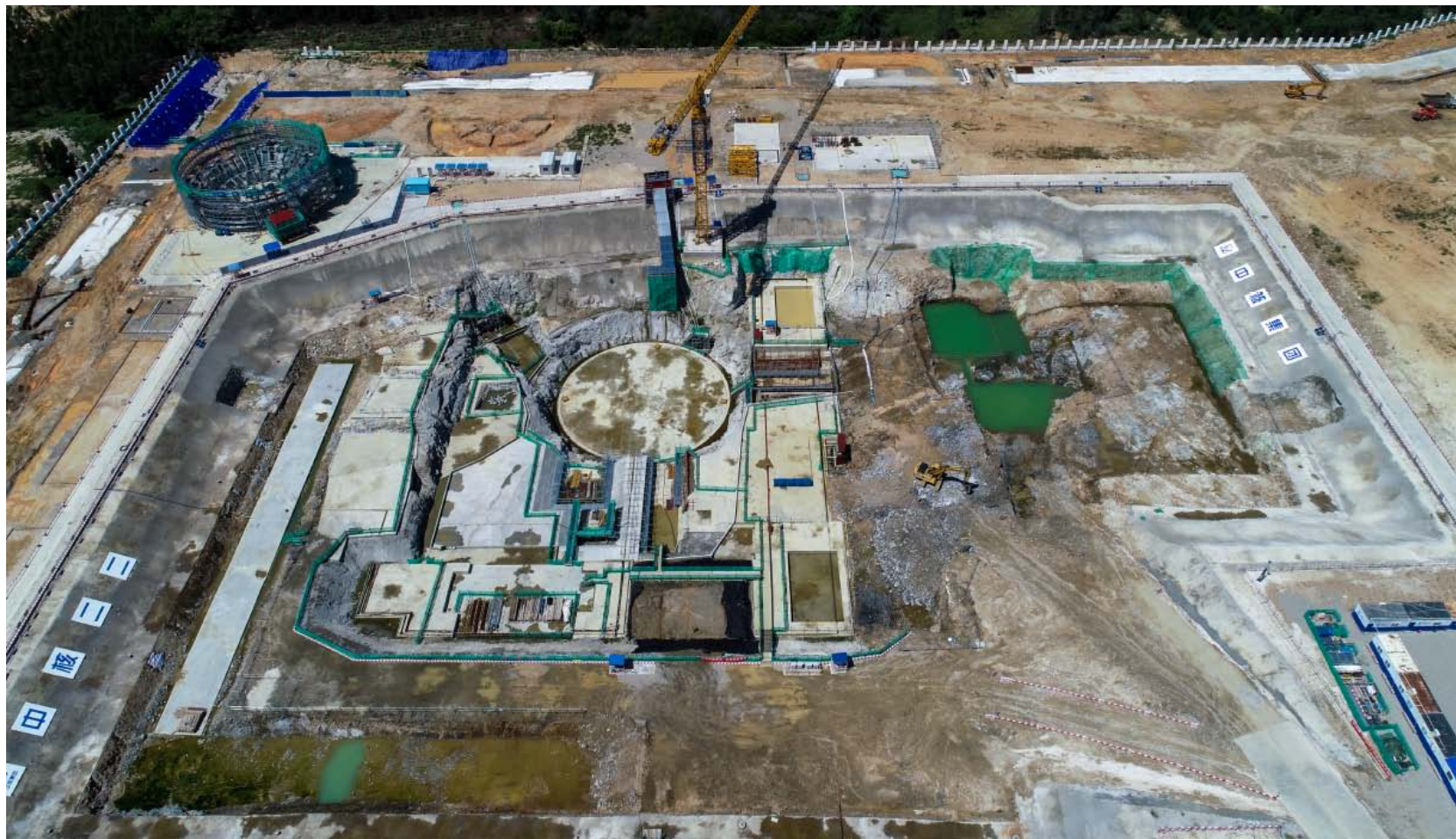
(五) 玲龙一号示范工程进展

➤ 2019年12月31日，现场基坑找平，混凝土开始浇灌



(五) 玲龙一号示范工程进展

➤ 2020年6月30日，现场



(五) 玲龙一号示范工程进展

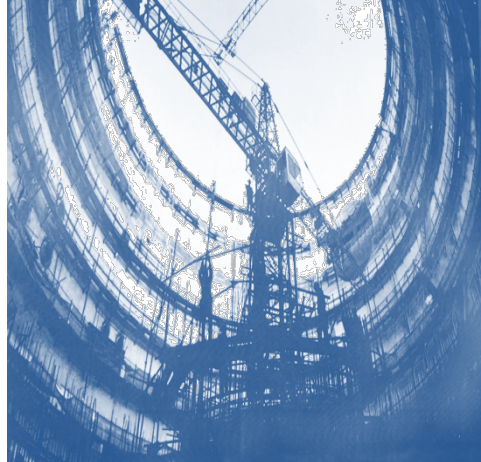
➤ 2021年2月26日，现场



(五) 玲龙一号示范工程进展

➤ 2021.07.13 示范工程FCD





六、结语



□ 小堆后续发展建议与探讨

- 将具有热电联供功能的轻水型模块化小堆，作为核能应用战略的优先选择技术路线，纳入有关规划，系统布局
- 按照国家建设“清洁低碳、安全高效”的现代能源体系要求，大力推进和拓展核能综合利用的技术创新、商业模式创新，开发小堆技术对发挥核能在能源转型和构建现代能源体系（智慧综合能源系统）中的引领作用至关重要。建议国家在后续规划中考虑给予具有热电联供功能的轻水型模块化小堆技术重点支持

□ 小堆后续发展建议与探讨

➤ 研究细化模块化小型堆安全审评原则和制定小堆标准

为了实现模块化小型堆技术上取消场外应急、实际消除大量放射性释放的可能性，除了不断提高小型堆的安全性，更要在审批原则上进行改进和优化。国家核安全局2016年印发了《小型压水堆核动力厂安全审评原则（试行）》（国核安发[2016]1号）相关部委参考文件，并在目前几个小堆示范项目中试行。通过主要依据大堆的安全审批原则，采用差异化方式评价小堆的实践积累和经验反馈，进一步优化制定小堆的专用审评原则和适用标准，将大力助推小堆技术开发与应用，实现小型堆靠近城镇及工业园区部署，让核能“贴近城市、靠近用户”的目标

汇报完毕，
谢谢大家！