



中国核能行业协会
CHINA NUCLEAR ENERGY ASSOCIATION

模块化小堆在实现我国“双碳”目标中的 战略地位

赵成昆

中国核能行业协会

2022年1月

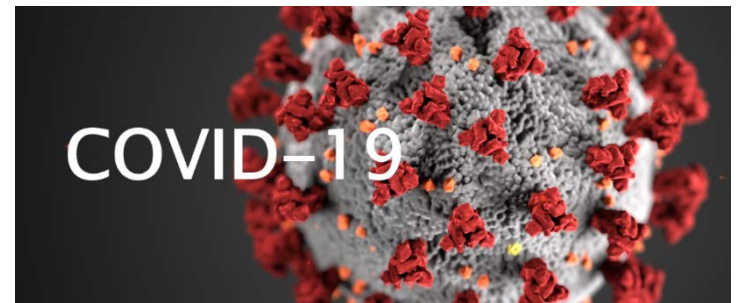


一. 21世纪人类面临的重大挑战 与核能的作用



1.1 21世纪人类面临的重大挑战

- ① 能源
- ② 环境（气候）
- ③ 水资源
- ④ 粮食
- ⑤ 人口
- ⑥ 贫穷
- ⑦ 战争
- ⑧ 疾病（瘟疫）
- ⑨ 教育
- ⑩ 民主





1.2 核能的作用

核能至少可以在能源、环境（气候）以及水资源三个方面发挥重大作用，主要体现在：

- (1) 核能（包括裂变能和聚变能）是一种重要的能源资源，可以永远为人类大规模提供安全、经济、可靠的电力供应和热源供应；
- (2) 核能是清洁能源，不排放CO₂，对改善生态环境和控制气候变化发挥重大作用；
- (3) 核能可以用来海水淡化，提供生活和工业用水。
- (4) 核能与其他清洁能源之间不是相互制约的竞争关系，是相互促进的协调发展关系；核能发电与风能、太阳能发电的合理组合，可以弥补风光发电的间歇性特点，提高电网的稳定性与可靠性，增加抵御极端外部灾害的能力。

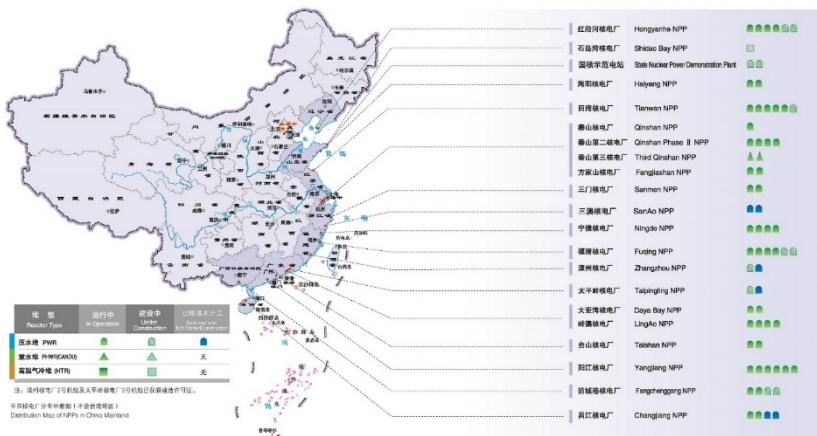




- 2021年7月，国际原子能机构（IAEA）发布的最新版《国际核电状况与前景》报告，强调了在缓解气候变化和实现可持续发展方面将发挥着不可替代的作用。
- 对2050年的预测表明，要实现《巴黎协定》的目标，到2050年，至少需要将目前的核电容量增加一倍。
- 最近欧盟将核能纳入推荐发展的低碳能源。

1.3 我国核能发展取得的巨大成就

- (1) 形成了完整核电工业产业链体系；
- (2) 截止2021年底，已有53台核电机组运行，总装机容量为54646兆瓦，20台机组在建，总装机容量为21356兆瓦，在运和在建总装机7600万千瓦，其规模全球第二，运行业绩良好；
- (3) 形成了很强的技术创新能力，开发了具有自主知识产权的第三代核电技术华龙一号、国和一号和全球首座用于发电的高温气冷堆，第四代核能系统和小型模块化反应堆以及聚变堆的研发工作取得重要成果，为我国核电的未来发展和走出去创造了坚实的基础。





1.4 “双碳”目标为加快我国核电发展带来了新机遇

2020年9月22日，中华人民共和国国家主席习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上发表重要讲话时承诺：

“中国二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值，努力争取2060年前实现碳中和。”



2021年3月5日的十三届人大四次会议上，国务院总理李克强所做的《政府工作报告》中关于2021年重点工作里提出：

“推动煤炭清洁高效利用，大力发展新能源，在确保安全的前提下积极有序发展核电。”



1.4 “双碳”目标为加快我国核电发展带来了新机遇

专栏6 现代能源体系建设工程

01	<p>大型清洁能源基地</p> <p>建设雅鲁藏布江下游水电基地。建设金沙江上下游、雅砻江流域、黄河上游和几字湾、河西走廊、新疆、冀北、松辽等清洁能源基地，建设广东、福建、浙江、江苏、山东等海上风电基地。</p>
02	<p>沿海核电</p> <p>建成华龙一号、国和一号、高温气冷堆示范工程，积极有序推进沿海三代核电建设。推动模块式小型堆、60万千瓦级商用高温气冷堆、海上浮动式核动力平台等先进堆型示范。建设核电站中低放废物处置场，建设乏燃料后处理厂。开展山东海阳等核能综合利用示范。核电运行装机容量达到7000万千瓦。</p>
03	<p>电力外送通道</p> <p>建设白鹤滩至华东、金沙江上游外送等特高压输电通道，实施闽粤联网、川渝特高压交流工程。研究论证陇东至山东、哈密至重庆等特高压输电通道。</p>
04	<p>电力系统调节</p> <p>建设桐城、磐安、泰安二期、浑源、庄河、安化、贵阳、南宁等抽水蓄能电站，实施电化学、压缩空气、飞轮等储能示范项目。开展黄河梯级电站大型储能项目研究。</p>
05	<p>油气储运能力</p> <p>新建中俄东线境内段、川气东送二线等油气管道。建设石油储备重大工程。加快中原文23、辽河储气库群等地下储气库建设。</p>

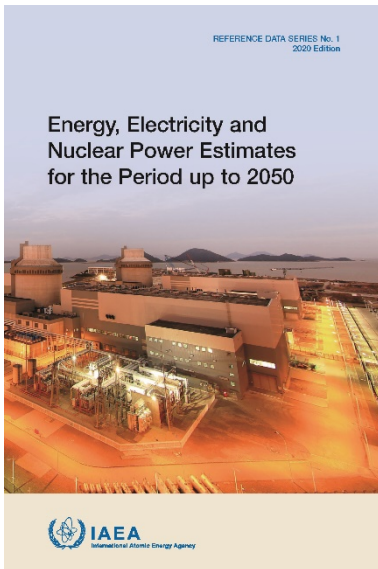
2021年3月14日，我国第十四个五年规划和2035年远景目标纲要发布，重点提及了有关核电的以下内容：

- ① 建设华龙一号、国和一号、高温气冷堆示范工程，积极有序推进沿海三代核电建设；
- ② 推动模块式小型堆、60万千瓦级商用高温气冷堆、海上浮动式核动力平台等先进堆型示范；
- ③ 建设核电站中低放废物处置场，建设乏燃料后处理厂；
- ④ 开展山东海阳等核能综合利用示范；
- ⑤ “十四五”末，核电运行装机容量达到7000万千瓦。



1.5 电力低碳化和热源低碳化

(1) **电力系统的脱碳是全社会实现零碳发展的关键。** 需求侧的大规模电气化零碳排放的前提是，其所使用的电力都是来自零碳能源。核能可为实现我国2060年碳中和这一艰巨目标发挥重大作用。据有关研究单位预测，到2060年，我国需要核电装机规模将达到400GW，约占电力装机16%。





根据国家《能源消费和供给侧革命行动计划（2017-2030）》，核电在未来我国能源结构中的地位和贡献将进一步提升，据有关单位研究预测，到2030年我国核电发电量占比将达到0.84万亿千瓦时，占比为7.3%，2035年将达到1.3万亿千瓦时，占比10%左右；



1.5 电力低碳化和热源低碳化

（2）供热是全球最大的终端能源消费领域。国际原子能机构（IAEA）在2020年9月发布了最新版本的《到2050年的能源、电力和核电预测》。

表：全球终端能源消费量和用电量（EJ）

	2019年	2030年	2040年	2050年
终端能源消费量	427.1	491.4	544.3	592.3
用电量	80.4	109.0	135.8	161.4
电力份额	18.8%	22.2%	24.9%	27.2%

从表中可以看出，从2019年到2050年全球用电量虽然逐年上升，但在终端能源消费总量中最高为27.2%，其它为非电力消费。我国预计到2030年电能占终端能源消费比重的32-35%；展望2050年，达到45%左右。

国际能源署（IEA）数据显示，2018年供热占全球终端能耗的50%，占CO₂排放的40%。热力消费中，工业部门占比约50%，建筑物房屋（主要为采暖和热水供应）占比46%。



1.5 电力低碳化和热源低碳化

结论：

- (1) 供热是全球最大的终端能源消费领域。目前这个领域的主要能源是煤、石油、天然气等传统化石能源；
- (2) 在追求电力低碳化的同时，要十分重视供热领域能源低碳化；
- (3) 核能在该领域有广阔的应用空间，特别是多功能小型模块化反应堆（SMR）的应用。

SMR在供热领域的优点：

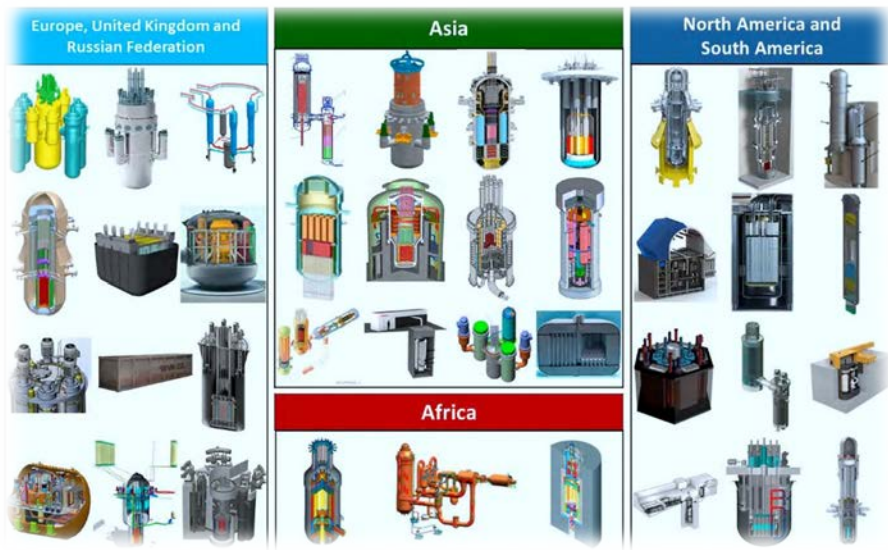
- 由于SMR的初投资低、建造周期短，在选址方面具有较大的灵活性，可根据用户需求灵活设计和配置；
- SMR可采用一体化、模块化设计和工厂制造，较少的堆芯装量，先进的安全设计理念，安全性好，应急要求大大简化等特点，特别适宜作为供热领域的热源。



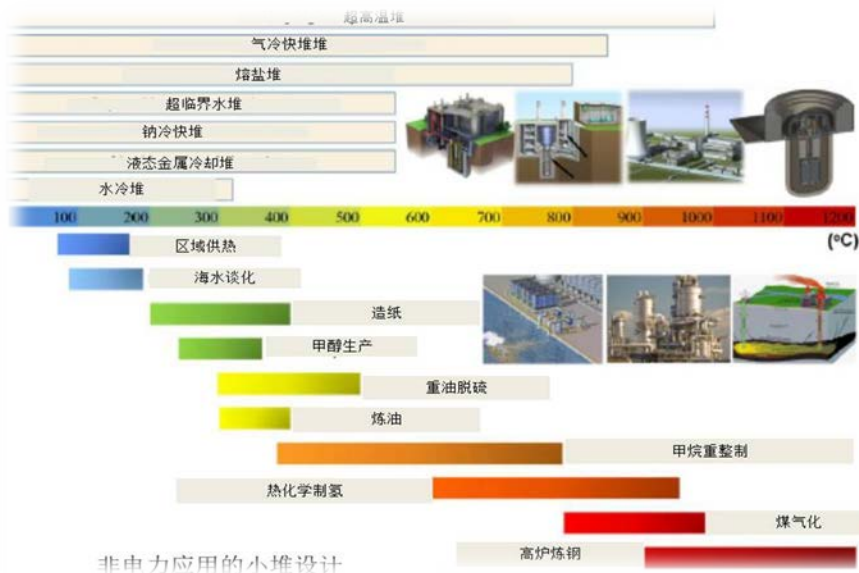
二. 国外小堆发展现状

2.1 国外小堆发展现状

在过去20年来，为适应全球能源低碳化的大趋势，核能发达国家都在努力扩大核能应用范围，多用途的小型堆开发已成为全球核能发展的热点。根据IAEA于2020年发布的《小型模块化反应堆技术进展》，共收录了72种小堆技术。



图：全球SMR堆型示意图



图：非电力应用的小堆设计

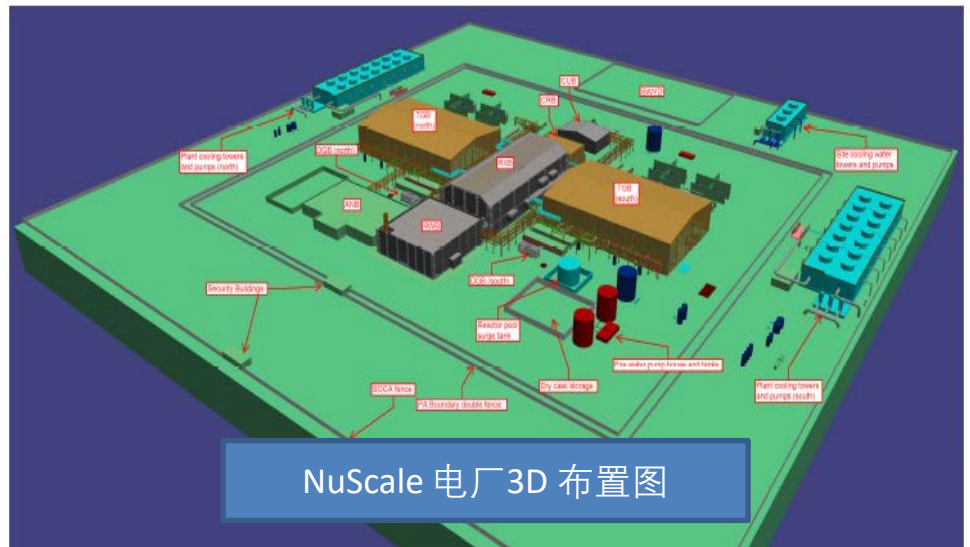
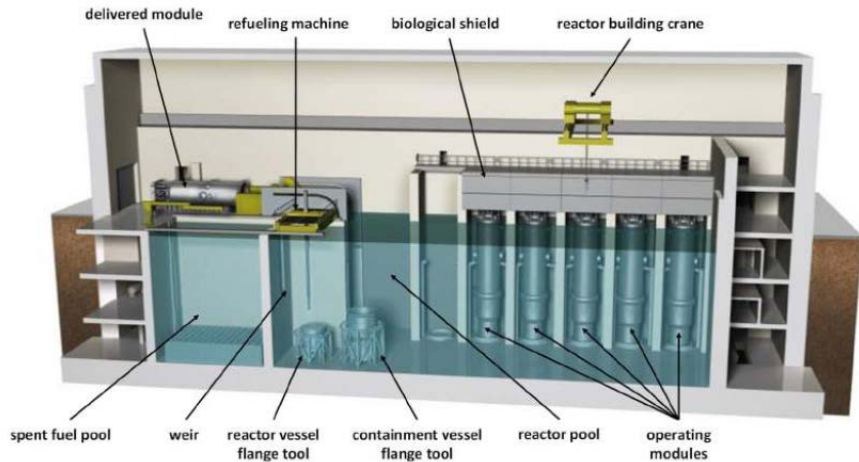


- 从小堆技术发展现状和趋势来看，目前处于研发中的模块化小堆从技术路线上分为五类：以压水堆为主的水冷陆基堆和水冷海基堆、高温气冷堆、快中子堆、熔盐堆以及微型堆。
- 从技术成熟度和先进性来看，又分为先进小型堆和革新型小型堆两类：先进型小堆大都采用成熟技术和设备，在确保安全的前提下追求工程可实施性兼顾先进性，以满足特定条件下的能源需求，应是近期（2025年前后）可部署。革新型采用革新技术，技术跨度较大，关键技术和设备需要较长研发时间，主要面向中期（2030年后）部署。

2.2 国际典型小堆

(1) 美国NuScale

多模块小型轻水冷却反应堆，设计目标是替代老旧火电厂，提供发电和非电工艺热能，减少CO₂排放，并可按需求，灵活增加功率模块。2020年完成了DCA的审查，2022年将获得设计认证批准并开始建设，2026年第一个电厂计划在爱达荷投入商运。



NuScale 电厂3D 布置图

NuScale的模块化布置



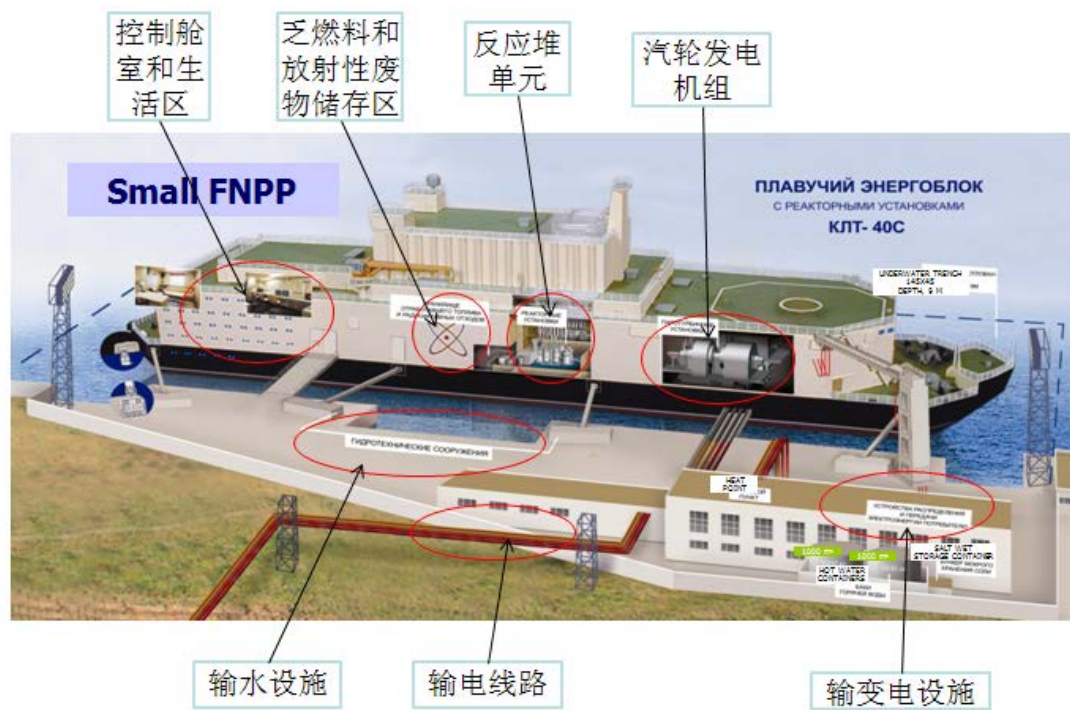
表：NuScale电厂主要技术参数

参数	数值
完整电厂	
名义净输出电功率 (扣除厂用电)	570MWe
功率模块 (NPM)	12
功率模块 (NPM)	
反应堆类型	<u>一体化PWR</u>
冷却剂/慢化剂	轻水
热功率/电功率	160 MWt/50 MWe
一回路循环方式	<u>自然循环</u>
系统压力	12.8 MPa
堆芯进口/出口温度	258°C/314°C
蒸发器	2个, 垂直螺旋管, 亚临界过热再生蒸汽
汽轮机	3600转, 冷凝式
堆芯	
燃料组件形式/数量	17×17排列/37组
燃料富集度, 燃耗, 循环长度	< 4.95%, , >30 GWd/Tu, 24月
反应性控制方式	控制棒, 可溶硼
安全系统	非能动
设计寿命	60年
压力容器高度/直径	17.8 m /3.0m

2.2 国际典型小堆

(2) 俄罗斯海上浮动核电站KLT-40S

俄罗斯“罗蒙诺索夫院士号”是商用海上浮动核电站，搭载两台压水型KLT-40S反应堆，**用于为边远地区提供电力和热能**。2019年12月19日并网发电，停靠于俄远东区楚科奇海岸附近的佩维克港。



KLT-40S浮动
核电站总图



表：KLT-40S主要技术参数

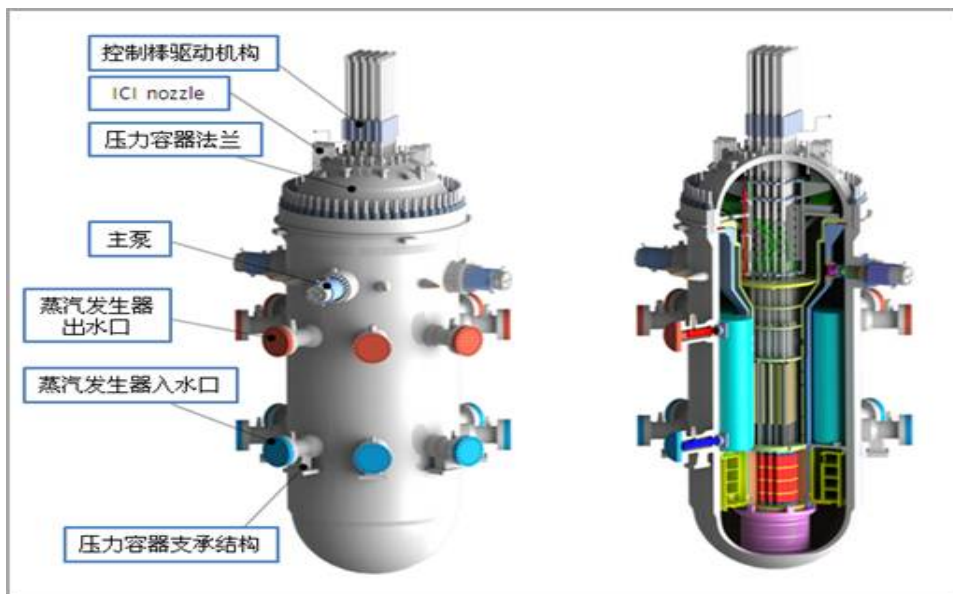
名称	参数值
堆功率	2×150 MW
电功率	70 MW（额定产热模式）
	38 MW（最大产热模式）
供热	50 Gcal/h（额定产热模式）
	146.8 Gcal/h（最大产热模式）
一回路压力	12.7 MPa
一回路运行温度	350°C
蒸汽产量	240t/h
蒸汽压力	3.82MPa（abs）
蒸汽温度	290°C
换料周期	4年
电站寿命	40年
平台尺寸	140×30×10(m)
总排水量	~21000t



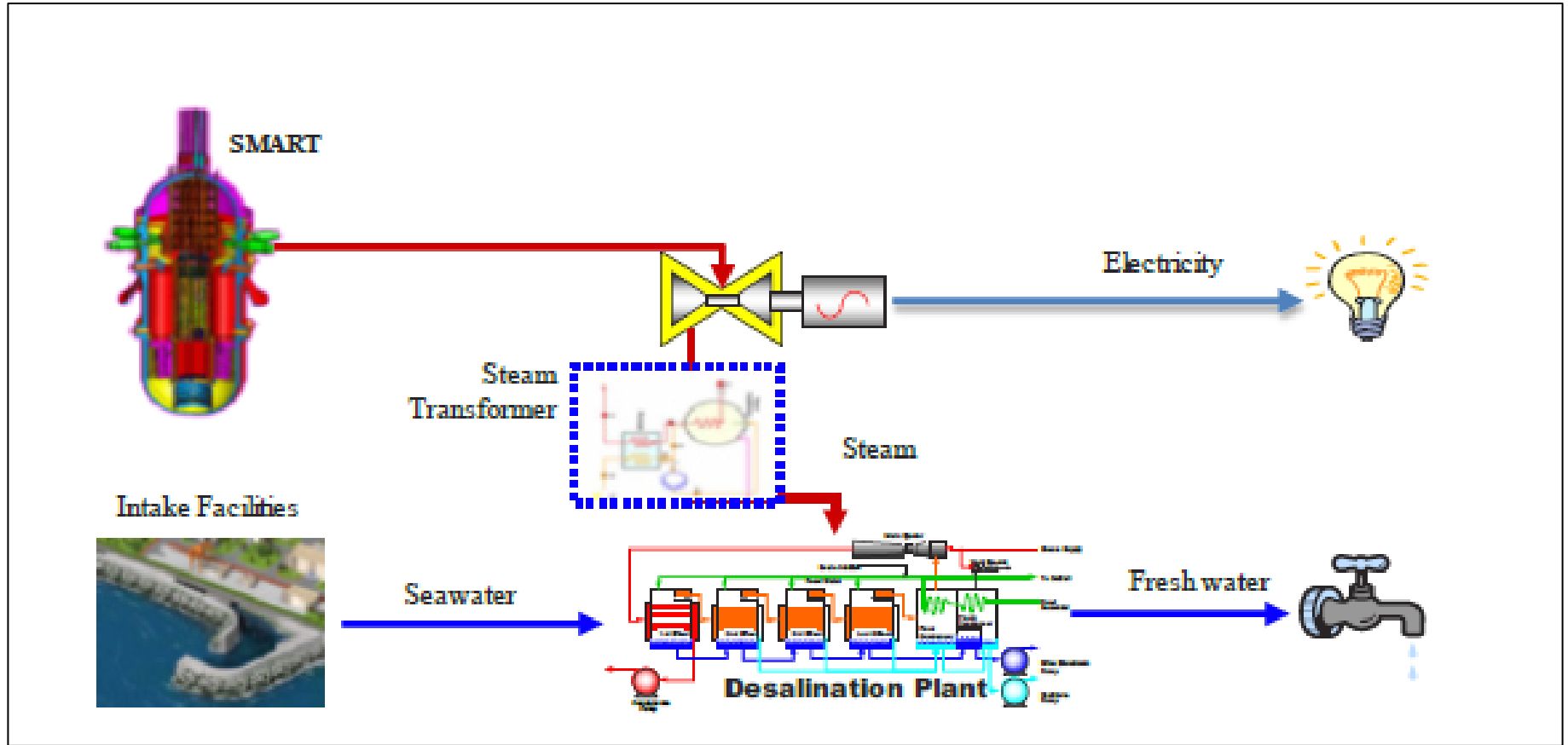
2.2 国际典型小堆

(3) 韩国SMART

SMART是压水反应堆，用于发电和海水淡化。1997年开始研发，2012年获韩国核安全与核安保委员会标准设计认证（SDA），2015年与沙特签署协议（评估在沙特建造至少2台SMART反应堆的可行性），2018年韩沙正式开展联合研究，包括工程设计和建造准备。



SMART反应堆压力容器
及内部构件图



SMART一体化和蒸汽热法海水淡化流程图



表：SMART主要技术参数

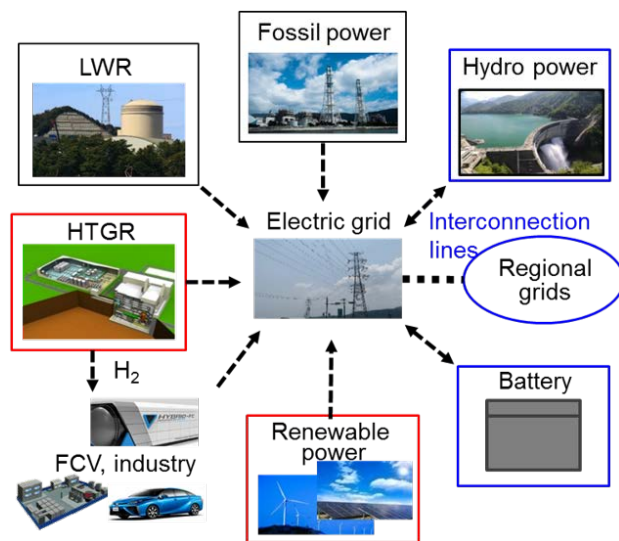
名称	参数值
总热/电输出功率, MWt/MWe	330/100
热力循环类型/效率	间接朗肯循环/ 30.3%
一回路冷却剂, 循环模式	轻水, 强迫循环
一回路压力, MPa	15
堆芯入口温度/出口温度, °C	296/323
堆芯直径*高度, mm	1831.6×2000
燃料类型/初始富集度 (%)	UO ₂ , 4.8%, U-235
燃料周期持续时间, 有效满功率天数	864
排出燃料的平均燃耗, MWday/kg	36.1
运行过程中反应性的控制模式	带有外部驱动的机械控制棒, 液态硼
反应堆容器直径×高度, mm	5994×16162
二回路压力, Mpa	5.2
蒸汽发生器二次侧入口/出口温度, °C	200/298
汽轮机类型	两个串联组合式汽轮机
仪器&控制系统	先进数字化人机交互系统
反应堆机组和电厂高度	布置于地上
安全壳类型和尺寸	内衬钢的混凝土圆柱形钢制安全壳, 44×68.5
热电联用方案	电力和饮用水, 电力和热量
非电力应用工艺类型	多效蒸馏热蒸汽压缩机
电厂面积, m ²	99800

2.3 国际小堆技术开发的技术趋势和特点

(1) 技术趋势

全球使用核电的有30多个国家，但具有小堆开发能力的只有10多个国家，其中，美俄占国际上正在开发和建设小堆总数的一半。不难看出，这两个核电强国从核能长远利用战略角度，在开拓核能应用新领域的重视程度和所做的努力。

- ① 从技术基础及成熟度来看，采用轻水堆（包括陆上和海上）技术，仍是目前小堆技术发展的主流，在示范工程基础上，2030年后可望进入工业化应用阶段。热电联供是其主要运行模式，其他堆型属于第四代核能技术范畴，大多处于概念设计和研发阶段；
- ② 高温堆以其独有特点受到青睐占14种，其中既有采用棱柱状堆芯，也有采用球床堆芯，可见二种技术各有特点；
- ③ 快堆由于在燃料增殖、减少高放废物方面具有独一无二的优势，仍是国际社会小堆研发重点，共有10种（不含中国），特别是铅（铋）冷快堆；





2.3 国际小堆技术开发的技术趋势和特点

(1) 技术趋势

- ④ 值得特别关注的是熔盐堆，美、加、丹麦、日、英以及国际财团等多国发展13种熔盐堆技术，大都处于概念设计阶段，个别进入基本设计和实验阶段。熔盐堆用途广泛，可作为发电、工业热源、制氢。铀-钍混合燃料熔盐堆为使用自然界中丰富的钍资源提供技术途径；
- ⑤ 用于为海洋资源开发提供动力和热能的海上或海下小堆技术有6种，以俄罗斯为最，占6种。中国基于自身的发展需求，近年来在核动力海上平台技术开发领域取得长足的进展；
- ⑥ 微型核动力装置在未来空间和水下电源供给中将发挥重要作用，主要以布雷顿循环和斯特林发动机等热电转换方式发电，目前效率较低，主要应用于航空、航天、军事领域等方面；
- ⑦ 强调模块化、标准化、系列化、系统简化、智能化，以提高小堆的经济性。



2.3 国际小堆技术开发的技术趋势和特点

(2) 主要特点

- ① 国家从战略需求出发，制定鼓励和支持小堆技术发展的政府法案和近远期发展规划，有关政府部门一开始就注重同步开展政策、使用规范标准的研究和制定，以满足小堆开发、监督和管理要求；
- ② 开发单位重视顶层设计、具有明确的用户需求和开发目标，开发工作有一个明确的规划和路线图；
- ③ 强调技术创新，在提升安全性的同时强调提高经济性。

上述特点值得我们重视和借鉴。



三. 国内小堆发展现状和市场前景



为扩大核能应用范围，保障能源安全，适应低碳能源发展需要，过去10多年在有关政府部门的鼓励和支持下，中核、中广核、国家电投、清华大学、中船重工、中科院等单位面向不同应用领域和市场需求，积极开发各具特色的小型堆技术。这些小型堆技术部分正在进行或即将开展示范工程建设。

表：国内正在开发/建设的小型堆

序号	堆型号	堆类型	开发单位	功率	进展阶段
第1部分：水冷小堆（陆基）					
1	ACP100	压水堆	中核集团	125MWe	工程示范
2	DHR-400	常压轻水堆	中核集团	400MWt	初步设计
3	NHR-200	压水堆	中广核与清华	200MWt	初步设计
4	和美一号	压水堆	国家电投	200MWt	初步设计
5	和美五号	压水堆	国家电投	600MWt	初步设计
第2部分：水冷小堆（海基）					
7	ACP100S	压水堆	中核集团	100 MWe	初步设计
8	ACP25S	压水堆	中核集团	25MWe	初步设计
9	ACPR50S	压水堆	中广核集团	50MWe	初步设计
10	HHP25	压水堆	中船重工	25 MWe	详细设计



表：国内正在开发/建设的小堆（续）

序号	堆型号	堆类型	开发单位	功率	进展阶段
第3部分：高温气冷小堆					
11	HTR-PM	高温气冷堆	清华大学 华能集团	2×100MWe	建设阶段
12		车载气冷微堆	中核集团	5MWt	设计研发
第4部分：快中子小堆					
13		钠冷快堆 (回路式)	中核集团	20MWt、3MWe	设计研发
14	CL-100	铅铋快堆	中核集团	100MWe	总体设计
15	CLEAR	铅铋快堆	中科院		概念设计
16	CLFR-100	铅铋快堆	中广核	260-280MWt,100 MWe	概念设计
17	BLESS-D	铅铋快堆	国家电投		概念设计
第5部分：熔盐小堆					
18	TMSR-LF1	熔盐堆	中科院	2MWt	建设阶段



我国小堆在国民经济的各个领域拥有广泛的需求和发展前景，在实现能源低碳化中将发挥重要作用。

(1) 替代落后火电产能

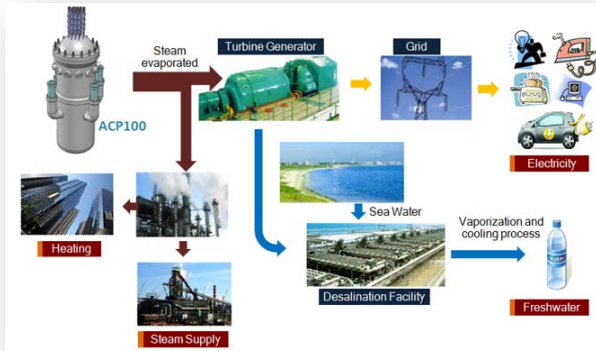
- “十三五”期间，全国停建和缓建煤电产能1.5亿千瓦，淘汰落后产能0.2亿千瓦以上。特别指出，要淘汰关停不符合要求的30万千瓦以下煤电机组，并将燃煤自备机组纳入淘汰范围；
- 现阶段，国内采用小堆技术原址替代小型火电技术基本成熟，前景可期。由于原址替代小堆是一新事物，加上经济性、公众对安全的担心等原因，市场开拓有待加强。小堆对边远地区供电、大中型企业、工业园区热电联供具有优势；
- **适用堆型：ACP100（玲龙一号）、HTR-PM-200等。**



表：ACP100主要参数

项目	参数	项目	参数
堆芯额定热功率	385MWt	压力容器 堆芯段筒体内径	3360mm
机组名义功率	125MWe	周向最大尺寸	5821.5mm
电厂设计寿命	60年	总高	10748mm
换料周期	24个月	主泵	4台立式屏蔽电机泵
电厂可利用率	>90%	扬程	~27.9m
电厂运行方式	基荷运行	稳压器 总体积（冷态最小）	立式蒸汽稳压 12m ³
反应堆冷却剂系统 最佳估算流量	10000m ³ /h	套管直流蒸汽发生器	16组
RPV入口温度	286.5℃	传热管材料	钛合金
RPV出口温度	319.5℃	主蒸汽过热度	36.4℃
RPV进出口平均温度	303℃	出口蒸汽压力	4.5MPa(a)
运行压力	15.0MPa(a)	出口蒸汽温度	293.4℃
设计压力	17.2MPa	给水温度	140℃
设计温度	343℃	给水流量（名义）	596.8t/h
堆芯 燃料组件类型	17×17截短型方型组件		
燃料组件数量	57组		
堆芯活性段高度（冷态）	2150mm		
燃料富集度	≤4.95%		
控制棒组件数量	20组		

目前，由中核集团开发的海南昌江多用途模块化小型堆科技示范工程ACP100在今年7月已开工建设，该堆型功率为125MWe，建设工期58个月，可作发电、热电联供等。





(2) 家庭和工业供热

- 国家统计局《2020年中国统计年鉴》显示，2013-2019年中国供热总量缓慢增长。2019年，我国蒸汽供热总量约为6.51亿吉焦，较2018增长12.71%；热水供热总量约为32.75亿吉焦，同比2018年上涨1.18%；



2013-2019年中国供热总量分析
(单位: 亿吉焦)

25-7 分地区城市集中供热情况 (2019年)

地区	供热能力		供热总量		管道长度 (公里)	供热面积 (万平方米)
	蒸汽 (吨小时)	热水 (兆瓦)	蒸汽 (万吉焦)	热水 (万吉焦)		
全国	100943	550530	65067	327475	392917	925137
北京		45731		18995	60166	63928
天津	2445	30404	937	16751	31427	51410
河北	4810	45491	6625	28397	39110	85882
山西	16374	25766	10218	14717	21287	67828
内蒙古	2451	47395	1435	32508	18331	61375
辽宁	16092	66780	10636	46839	54354	120379
吉林	1767	46151	1015	26451	29971	64619
黑龙江	4516	52674	2383	41297	20241	78100

我国北方部分城市2019年供热情况

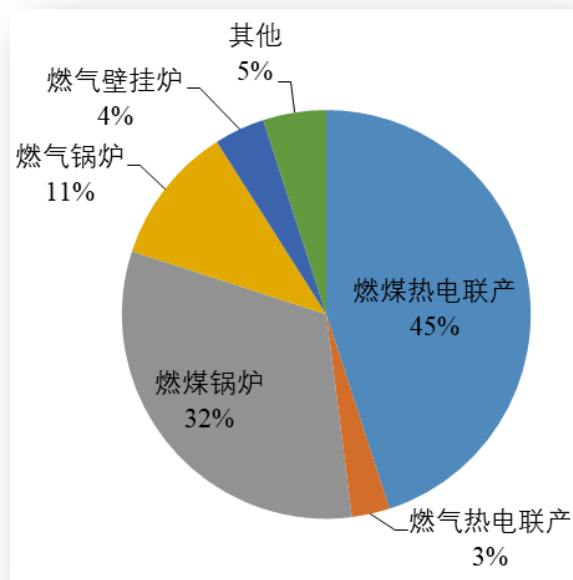


(2) 家庭和工业供热

- 2017年12月，国家发改委等十部委联合发布《北方地区冬季清洁取暖规划（2017-2021）》，2018年出台《打赢蓝天保卫战三年行动计划》，均提出要有效推进北方地区清洁取暖，并取得很大成绩，大大改善了空气质量，污染少了、蓝天多了，但其热源还是以优质化石燃料为主；
- 核能供热技术成熟，在低碳供热领域有广泛的应用前景，但能否被采纳，取决于许多因素，公众对安全的担心，价格接受能力，各级政府的态度等都是面临的主要挑战；
- **适用堆型：和美一号、NHR200-II、DHR-400等。**

(2) 家庭和工业供热

- **热源。**我国城市集中供热的热源基本形成以热电联产为主，区域锅炉房为辅，其它热源补充的格局。80%的热源炭以煤为主要燃料，燃煤锅炉、燃气锅炉和燃煤热电联产为主要供热方式。在占主导地位的集中供热中，热电联产和锅炉是大头，燃煤热电联产占45%，燃煤锅炉占32%，燃气锅炉占11%，其余为其它来源。高污染、低效率的落后产能超过50%；

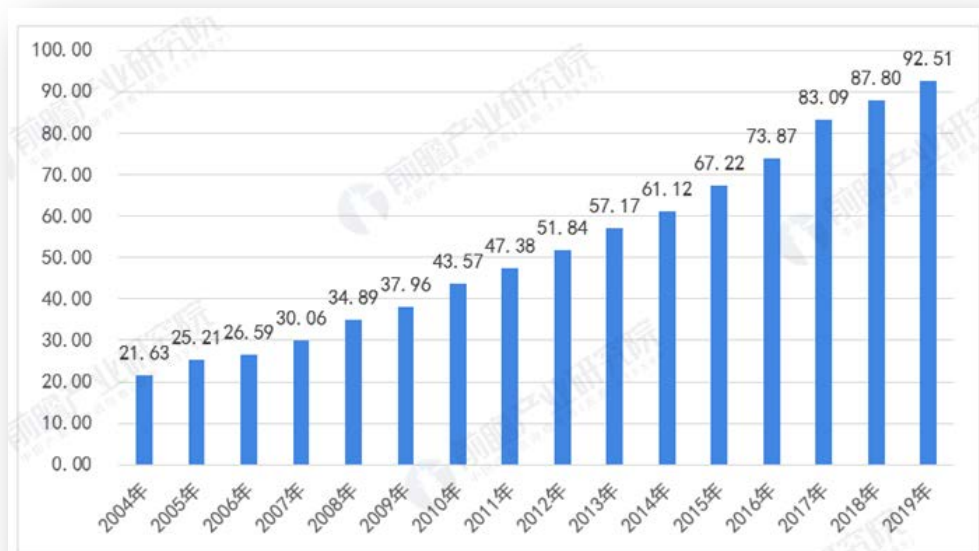


2016年中国北方地区供暖热源结构



(2) 家庭和工业供热

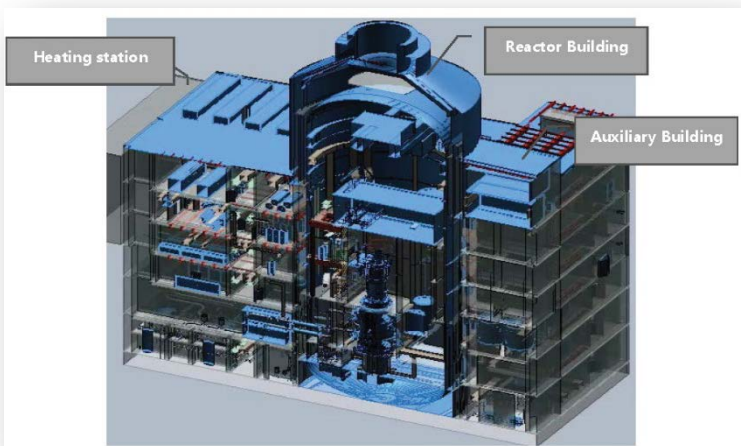
- **供热面积。**截至2021年初，我国北方供暖地区城镇现有燃煤供热面积约131亿平方米，对应热负荷装机容量约为900GWt。城市集中供热面积约110亿平方米，集中供热率约85%。其中，居住建筑面积82亿平方米，占比75%；公共建筑面积28亿平方米，占比25%；随着城镇化发展趋势，北方地区需要供热的面积不断增长。



2004-2019年中国城市集中供热面积变化
(单位：亿平方米)

推进中的小堆供热示范项目

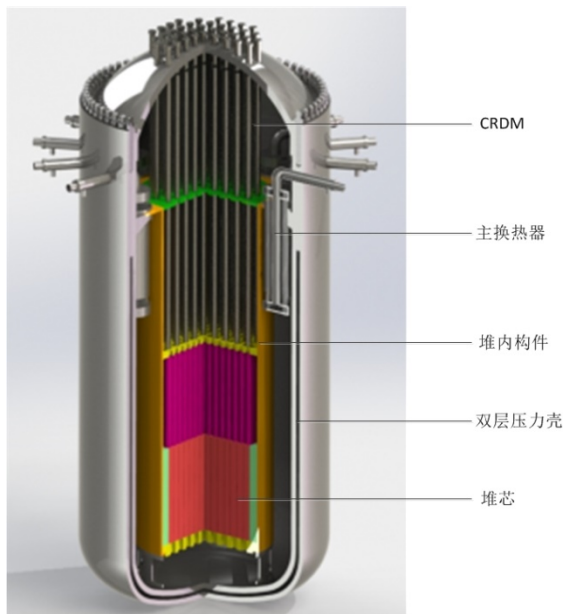
由国家电投开发的和美一号在各级政府的支持下，作为佳木斯核能供热示范项目正在积极有序地推进中，项目规划建设4×200MWt一体化供热堆。一期为2×200MWt，最大供热能力为800万平方米，或供气500吨/小时。该项目计划2021年开工，工期36个月。



参数	单位	数值
堆芯额定功率	MWt	200
电厂设计寿命	年	60
换料周期	月	24
堆芯损伤频率	1/堆年	$<1 \times 10^{-7}$
大量放射性物质释放频率	1/堆年	$<1 \times 10^{-8}$
职业辐照剂量	人·Sv/堆年	<0.2
反应堆冷却剂系统正常运行压力	MPa(a)	9.0
堆芯出口温度	°C	272
堆芯入口温度	°C	202
供热回路供汽出口温度	°C	240
供热回路供汽出口压力	MPa(a)	1.3
供热回路供水出口温度	°C	120



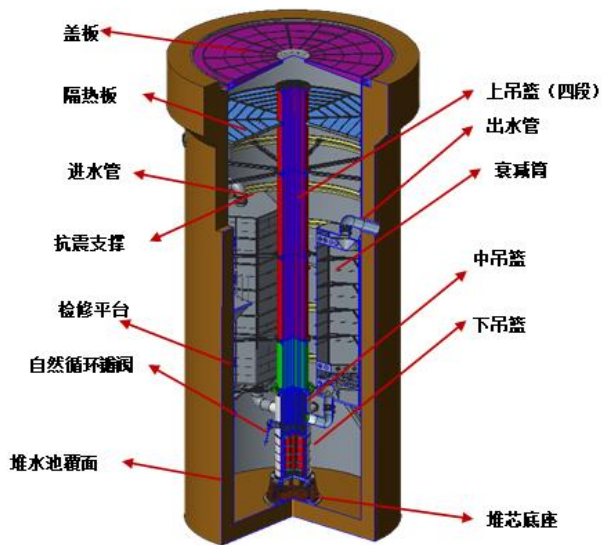
由中广核集团和清华大学联合开发的低温供热堆NHR200-II在各级政府的支持下，作为贵州低温供热堆商业示范项目前期工作在积极、有序推进中，项目规划建设6台NHR200-II型低温核供热机组，一期2台，为贵州大龙经济开发区提供工业蒸汽（500t/h），首台计划于2022年12月开工，是我国核能综合利用以及低温供热技术首次商业应用。



参数名称	单位	数值
热功率/电功率	MWt/MWe	200/50
反应堆设计寿期	a	60
反应堆冷却剂工作压力（额定工况）	MPa	8.0
堆芯入口/出口温度（额定工况）	°C	232/280
中间回路工作压力（额定工况）	MPa	8.8
蒸汽发生器出口蒸汽压力（额定工况）	MPa	1.6
蒸汽发生器出口蒸汽温度（额定工况）	°C	201.4
蒸汽产量（额定工况）	t/h	323
燃料组件总数	盒	208



由中核集团开发的400MWt燕龙（DHR-400）泳池式低温供热堆目前正在吉林辽源开展示范工程，单堆可供热面积约1000万平方米，计划2022年实现FCD，2024年建成投产。



序号	项目	单位	参数
一	反应堆类型	分置式	
1	供热厂设计寿命	年	60
2	换料周期	月	15
3	反应堆热功率，效率	MWt, %	400, 98
4	堆芯损坏概率	堆年 ⁻¹	<10 ⁻⁹
5	大量放射性物质释放频率	堆年 ⁻¹	<10 ⁻¹⁰
6	职业照射剂量	人Sv/堆年	0.5
7	极限地震SL-2	g	0.3
二	供热厂布置	单堆全地下布置，4个环路	
8	采暖平均供热负荷	MW	294.9
9	水池直径，高度	m	10.0, 26.0
10	堆芯高度，等效直径	m	2.4, 2.02
三	燃料组件	截短型CF3-S	
11	燃料组件数，阵列	盒	68, 17×17-25
12	活性区高度	m	2.15
13	平均UO ₂ 比功率	MW/t	18.6,
14	燃料装量/平衡料富集度	吨/%	21.5/3.2
15	每循环换料量	盒	24
四	冷却及热循环		
16	冷却循环方式		强迫
17	堆芯出/入口水温	°C	98/68
18	二回路出/入口水温	°C	93.5/63.5
19	热网出/入口水温	°C	90/60
20	二回路压力，热网压力	MPa	1.2, 1.6
21	余热冷却方式		能动



多模块高温气冷堆大规模供汽或热电联供研究

近年来中核能源科技有限公司基于“两碳”背景，在HTR-PM验证的技术基础上，以匹配石化园区对绿色低碳热能的高参数蒸汽需求为目标，开展了高温气冷堆供热方案研究。

- 以HTR-PM的2个NSSS模块为1个模组（500MWt/200MWe）。初步形成一个可供工程实施的、满足独立运维要求的多模组高温气冷堆供热技术方案，可供大规模蒸汽生产供应或热电联供。
- 采用多模组以满足负荷、供热模组独立运维及故障备用等要求，实现高可靠性、不间断的高温蒸汽供应。



(3) 海水淡化、制氢

- 我国北方和部分沿海地区水资源严重不足，据统计，北方缺水总面积达58万平方公里；全国有300多座城市不同程度缺水，每年缺水量58亿立方米，主要集中在华北、部分沿海和省会城市以及工业型城市；有6个省、区人均水资源低于500立方米；
- 海水淡化的市场很大，但由于反渗透海水淡化技术成熟，以及南水北调有效缓解，国内核能海水淡化的行业发展受到一定制约；
- 制氢在国外（尤其中东国家）有发展前景，氢气在未来的能源市场有广泛应用。高温堆在此方面有优势，但预计在2030年以后；
- 适用堆型：HTR-PM-200、ACP100、和美一号等。



(4) 海洋开发能源供给

- 除台湾省以外，中国海岛数量大，总面积超过6600平方公里，人口740多万；
- 国家已制定海南发展政策，提出要高水平开发海洋海岛资源，逐步形成以海岛为依托的第二海洋经济带；
- 海上浮动式核动力平台是实现上述目标能源供应的重要选择，能同时提供电力和高温高压蒸汽，也可用来进行海水淡化；投资规模小，配置灵活，无需场外电源保障，安全，适合孤岛运行；
- 目前正在开发的堆型：ACPR50S、ACP100S等。

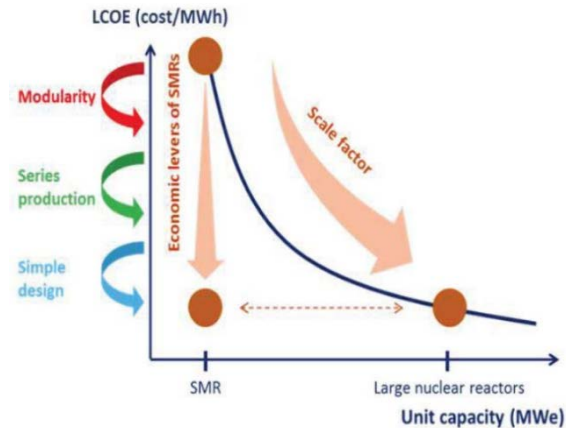
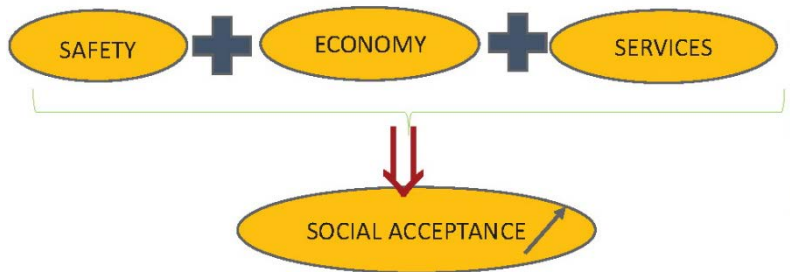




四. 我国小堆发展面临的挑战和建议

1. 挑战

- ① 目前国内尚不具备一套相对完整的适用于模块化小堆发展的法规标准和用户要求。这些法规标准涉及项目核准、安全审评、核应急以及小堆安保等领域，需逐步补充和完善；
- ② 小堆的经济性，特别是与其它清洁能源的价格竞争力，一定程度上影响投资者的参与热情。应在确保安全的前提下，发挥创新精神，努力实现简化系统设计，向标准化、批量化、模块化、工厂制造、现场组装方向发展，以有效提高经济性，增加竞争力；



- ③ 目前我国小堆安全设计水平达到或高于三代大型核电水平，但由于靠近目标用户，公众对安全的担心度较高（特别是作为区域供热的小堆），虽然前景良好，但项目落地相对困难，进展缓慢。需要加大对示范项目的支持力度，在取得成功的基础上，加大宣传，逐步推广。



2. 建议

- ① 基于小型模块化反应堆的特点，具有广泛的应用范围和发展空间，在我国实现“双碳”目标中将发挥十分重要的作用，建议有关政府部门进一步加强促进小堆发展的政策、规范和标准的研究和制定，包括小堆的安全要求、适用标准、应急、安保、监管和小堆的项目核准、许可证申请等；
- ② 加强政府的协调和指导，加强企业和研究单位间的合作，避免同类项目的重复开发，提高开发效率；
- ③ 加强用户需求的调查研究，使开发的小堆技术更具针对性和可应用性；
- ④ 加大示范项目推进力度，在取得成功的基础上，加大宣传力度，加强公众沟通，逐步推广。





谢谢

● Proven

● Safe

● Economic