

佳木斯核能供热示范项目 推进情况汇报

上海核工程研究设计院有限公司

2022年1月25日

知识产权声明

本文件的知识产权属国家电力投资集团公司及其相关产权人所有，并含有其保密信息。对本文件的使用及处置应严格遵循获取本文件的合同及约定的条件和要求。未经国家电力投资集团公司事先书面同意，不得对外披露、复制。

Intellectual Property Rights Statement

This document is the property of and contains proprietary information owned by SPIC and/or its related proprietor. You agree to treat this document in strict accordance with the terms and conditions of the agreement under which it was provided to you. No disclosure or copy of this document is permitted without the prior written permission of SPIC.

CONTENTS

目录

1. 背景概述
2. 总体技术方案
3. 主要技术特征
4. 示范项目推进情况
5. 关键试验验证需求分析和开展情况
6. 小结

1、背景概述—战略支撑和市场需求

支撑北方清洁供暖，当地政府普遍支持供热堆建设

区域		需求	规划容量	地方政府态度
黑龙江	克山县	清洁供暖，具备与生物质电厂或垃圾发电厂耦合条件	4台	支持，且已签订相关协议
	齐齐哈尔（昂昂溪区）	清洁供暖	4台	支持
	齐齐哈尔（富拉尔基区）	清洁供暖	4台	支持
	大庆	清洁供暖	4台	支持
	牡丹江	清洁供暖	4台	支持
吉林	通化	清洁供暖+制药企业用汽	4台	支持
	白山	清洁供暖+火电厂替代	4台	支持
内蒙古	满洲里	清洁供暖+木材加工用汽	4台	支持
	海拉尔	清洁供暖	4台	支持
山东	滨州	清洁供暖+工业园区用汽	6台	支持
新疆	阿勒泰	清洁供暖	4台	自治区支持
	图木舒克	清洁供暖+供汽	4台	支持
	五家渠	清洁供暖	4台	支持
	阿克苏	清洁供暖	4台	支持
	石河子	清洁供暖	4台	支持
乌鲁木齐	清洁供暖	4台	支持	



我国潜在供热需求地区示意图

1、背景概述—供热堆选型考量

选型：中压一体化供热堆

■ 发展要求

- 示范先进小堆技术
- 提升固有安全
- 可兼容/可拓展/可标准化

一体化设计

■ 经济性

- 满足民用供暖和工业供汽热市场需求
- 工业供热热价较高，可全年运行，提升经济价值

中压设计

■ 安全/可靠性要求

- 高安全近零风险要求
- 简单易运行、易维护、易退役

非能动+全自然循环

■ 环境要求

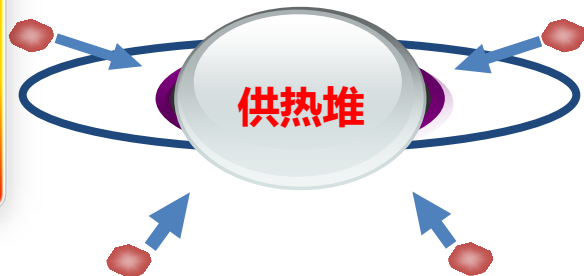
- 靠近城市周边建设，厂址灵活要求
- 北方供暖地区缺水较为普遍

放射性废液零排放/无硼堆芯设计

■ 工程要求

- 具备快速上工程条件，设计成熟
- 先进性与成熟性的平衡

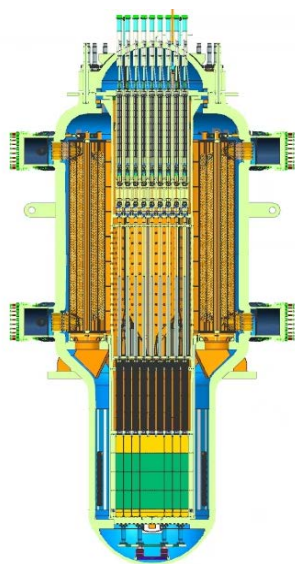
基于成熟或已验证技术



2、总体技术方案

一体化全自然循环反应堆

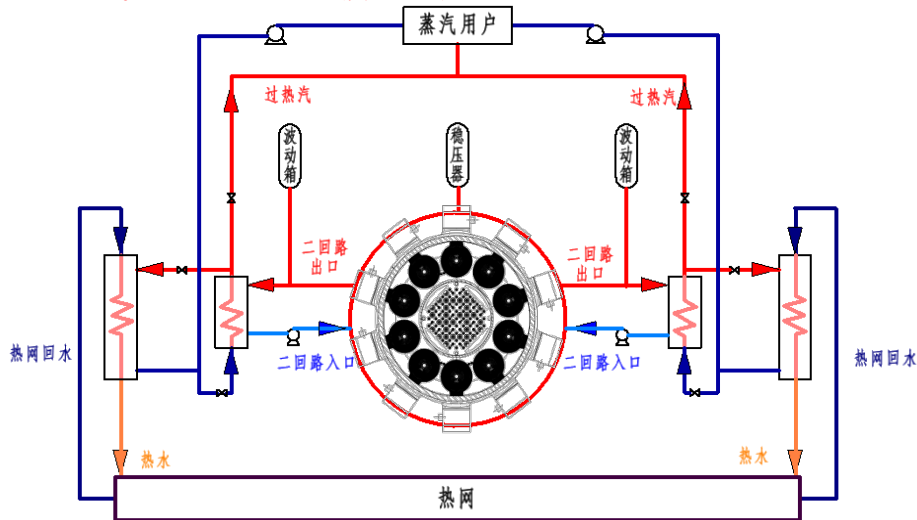
参数	单位	数值
堆芯额定功率	MWt	200
燃料组件类型	/	SAF-6
燃料组件数	盒	57
一回路运行压力	MPa(a)	9.5
一回路流量(冷段)	m ³ /h	2484
一回路出入口温度	°C	268 / 197
二回路运行压力	MPa(a)	10
二回路出入口温度	°C	246 / 186
供汽温度	°C	230
供汽压力	MPa(a)	1.2
供暖(热水)温度	°C	120
供暖压力	MPa(a)	1.2



三个主要回路

- 在主回路和供热回路之间设置中间隔离回路，隔离主回路向供热回路（用户侧）放射性泄漏。

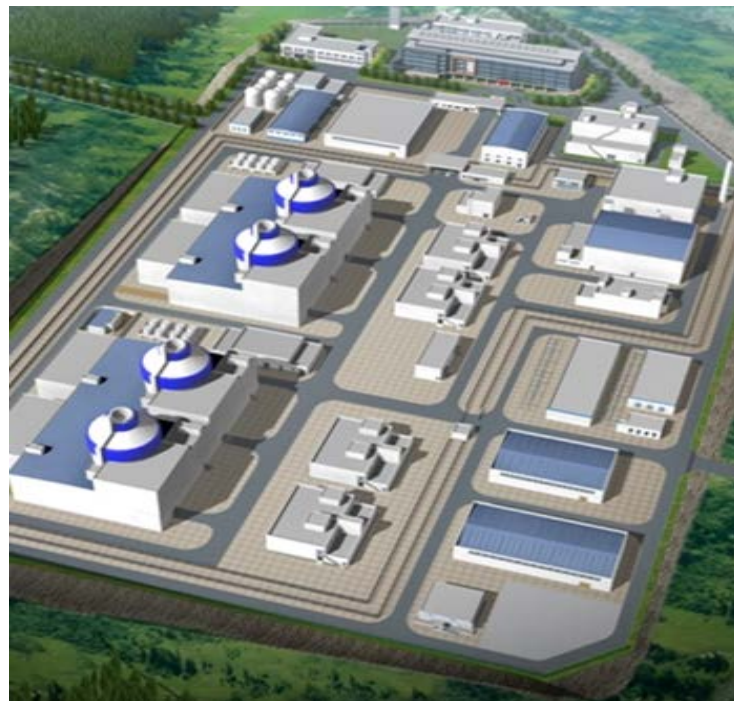
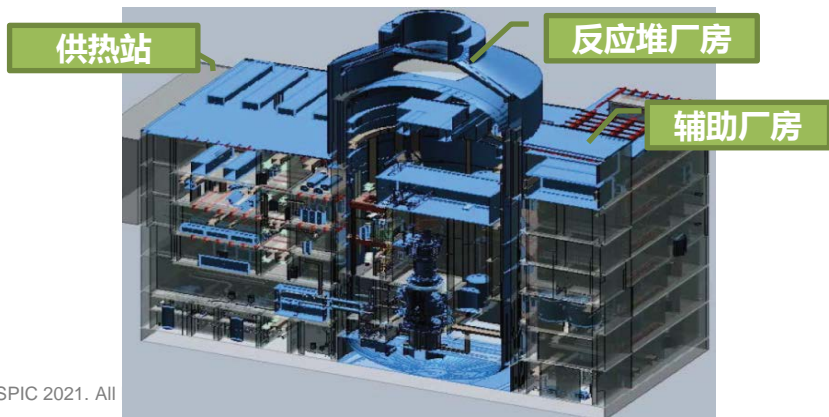
单堆供汽250t/h或供暖400万m²



2、总体技术方案

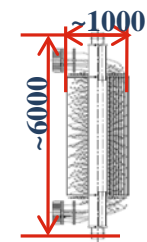
三个主要厂房、最小化占地面积

- 三个主要厂房：反应堆厂房、辅助厂房和供热站。辅助厂房全包覆反应堆厂房设计，保障反应堆厂房安全，最优化占地面积。
- 示范工程厂区用地23.96ha。一期工程双机组核岛厂房占地7670平方米，地下地上各三层，地下约20m，地上约28m，屏蔽厂房顶面标高约为48m。



3、主要技术特征

反应堆特征：一体化+全自然循环



高效换热
组件内置



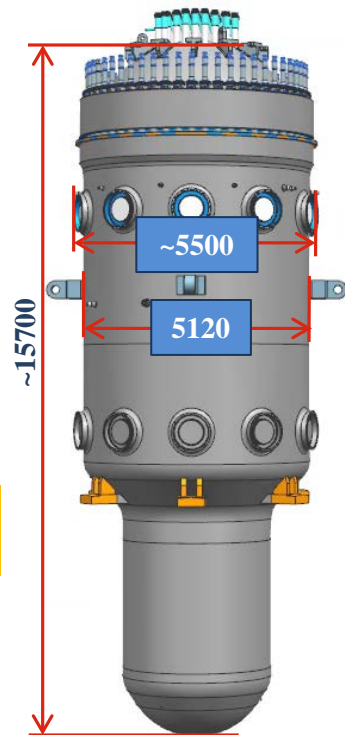
稳压器外置



无主泵+全自然循环



丝杠螺母式
CRDM内置



先进性+成熟性+可维护性

集成紧凑，固有安全性高

- 内置高效换热组件、CRDM
- 取消主管道，消除大/中破口
- 单位功率水装量大，固有安全性高

全自然循环，可靠易维护

- 简化设备，简化维护，提升可靠性

保证成熟性和可维护性

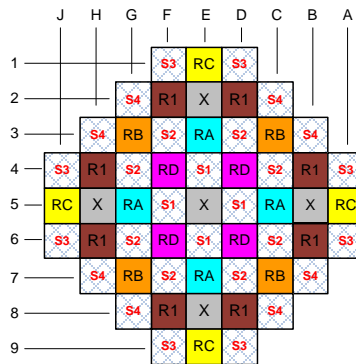
- 稳压器外置

3、主要技术特征

厂址适应性广：无硼堆芯设计、实现放射性废液零排放

✓无硼堆芯设计，环境友好，提高运行稳定性

- 具备放射性废液零排放条件，操作简化、环境友好，厂址可选择范围大
 - 采取无硼堆芯方案后取消了启停堆、补偿燃耗、负荷跟踪等调硼操作
 - 每年从源头上减少调硼排水量约**250m³**，冷却剂流出液产生量减少至**21m³**，有力支撑放射性液态零排放
- 具有高负慢化剂温度系数，增强固有安全性，提高运行稳定性



控制棒分组	数量
功率调节X棒组	5束
反应性控制R棒组	24束
停堆S棒组	28束

3、主要技术特征

可邻近城市建设：技术上不需厂外应急

预防运行风险：

高运行裕量

放射性废液零排放：

无硼堆芯/废物厂区内处理

消除大/中破口及主泵事故：

一体化全自然循环设计

放射性隔离多道屏蔽：

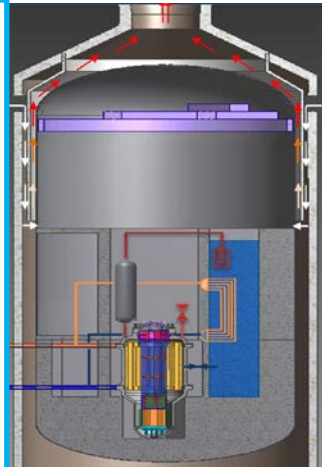
RPV、CV、中间隔离回路

非能动固有安全：

实现无限时非能动安全

事故类型	场区边界 (最近距离167m, 30天)	应急计划 区边界 (1km, 30天)	国核应办函 【2017】37号文 及NNSA相关文 件要求	
	有效剂量 (mSv)	有效剂量 (mSv)	有效 剂量 (mSv)	甲状腺 剂量 (mSv)
DBA- LOCA	2.82	<10	10	100
典型严 重事故	4.78	<10	10	/

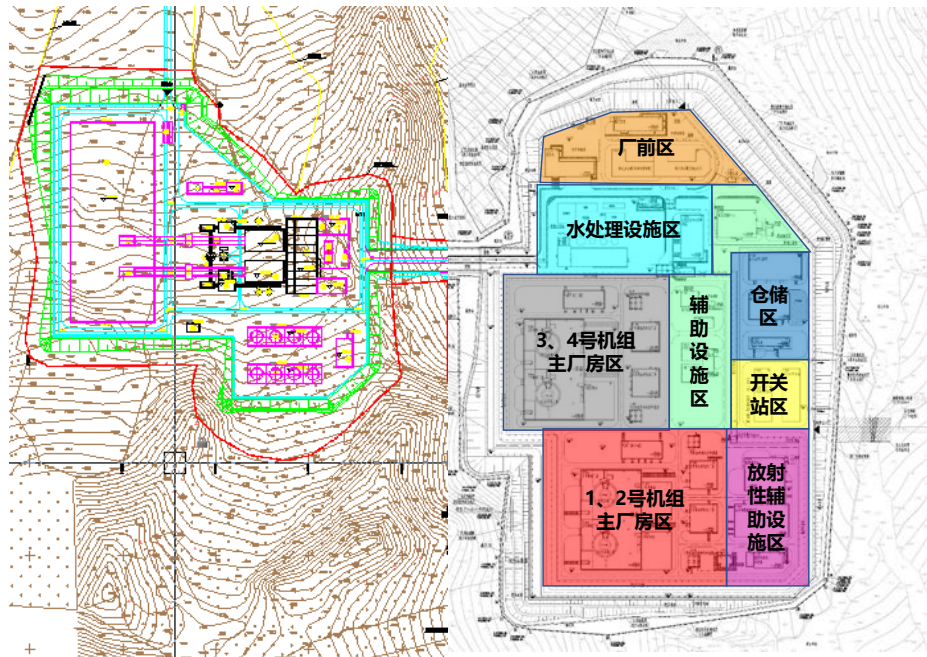
- 破口事故下，应急堆芯冷却系统依靠高位重力水箱和自动卸压阀门，在重力驱动下投入运行带走堆芯衰变热；
- 非破口事故下，二次侧余排系统依靠自然循环投入运行带走堆芯衰变热；
- 安全壳空冷系统无需水箱，仅采用空气自然循环即可带出安全壳内衰变热，**实现无限时冷却。**



4、示范项目推进情况

规划建设内容

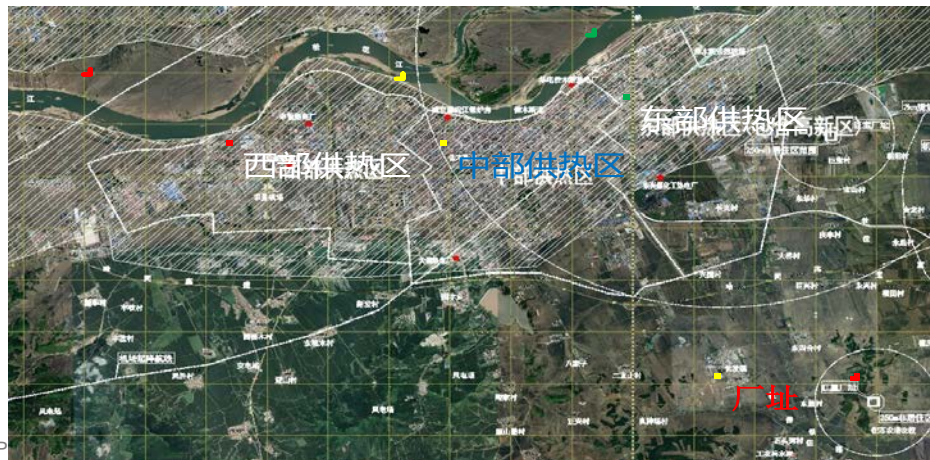
- ❑ 项目投资主体为国家电投黑龙江分公司，规划建设4×200MWt一体化核能供热堆。
- ❑ 一期工程投资50.5亿元，建设2×200MWt一体化核能供热堆，配套158MW生物质热电联产机组，计划2023年开工建设，2026年投产。
- ❑ 一期工程投产后新增民生供暖能力800万平米或工业供汽500吨/小时。



4、示范项目推进情况

厂址位置和地形地貌

- 厂址位于佳木斯市市区中心东南约18km，隶属黑龙江省佳木斯市四马架镇，厂址东北距四马架镇约6.4km，西距长发镇约4.6km，北距松花江约13.5km。
- 厂址位于丘陵区，地面高程一般为125~206m，厂区内部地形起伏较小、地面高程一般为140~170m，地貌成因类型为剥蚀丘陵，地貌类型为丘陵、斜坡地。



4、示范项目推进情况

2021年完成示范工程初步设计

2019年5月完成概念设计，2021年6月30日完成初步设计，当前正在开展施工设计。

佳木斯供热堆初步设计共7个卷册，含**1104**份文件（其中外部文件642份）。设计范围和深度满足《核电厂初步设计文件内容深度规定》NB/T 20401-2017的要求。

序号	第一卷	第二卷								第三卷		第四卷				第五卷		第六卷										第七卷								
文件编码	总体设计文件		核岛工艺系统设计文件								核岛电气仪控设计文件		核岛布置设计文件				核岛建筑结构设计文件		核岛工程设备文件										BOP文件							
名称	外部文件	第一册 总技术文件	第二册 堆芯物理热工屏蔽设计	第三册 厂址与平面设计	第一册 反应堆冷却剂系统及其相连系统	第二册 专设安全设施系统	第三册 其它工艺辅助系统	第四册 放射性废物处理系统	第五册 工艺运输系统	第六册 核岛厂房暖通风空调系统	第七册 动力系统	第八册 给排水系统	第九册 消防系统	第一册 电气系统	第二册 仪控系统	第三册 核岛工艺系统控制逻辑图	第一册 核岛厂房总布置图	第二册 反应堆厂房布置图	第三册 辅助厂房布置图	第四册 柴油发电机厂房布置图	第一册 厂房编号	第二册 核岛厂房结构设计	第一册 反应堆压力容器、控制棒驱动机构	第二册 堆内构件、棒驱机构	第三册 安全壳	第四册 稳压器	第五册 设备人员闸门	第六册 装卸料机、环吊	第七册 热交换器	第八册 其它辅助设备	第九册 泵	第十册 阀门	第十册 电仪设备	第十二册 燃料组件及相关件	第十三册 材料和焊接技术条件	第十四册 BOP设计文件
份数		25	6	18	13	11	43	15	2	14	5	9	2	26	17	34	2	10	14	4	3	12	45	29	6	14	12	5	16	21	5	1	3	47	29	124

4、示范项目推进情况

前期工作

- 2018年上半年，启动佳木斯核能供热示范项目的选址工作。
- 2018年11月28~30日，上海核工程研究设计院有限公司在黑龙江省佳木斯市组织召开了厂址普选报告评审会，推荐红星、巨宝和长虹厂址为候选厂址。
- 2019年6月，中国国际工程咨询有限公司对《国家电投佳木斯核能供热示范项目初步可行性研究报告》进行了评审，同意红星厂址为优先候选厂址。
- 2020年9月3日国家能源局召开国家电投佳木斯核能供热示范项目前期工作专家座谈会，会议评价本项目“固有安全性高，环境友好；项目厂址条件基本查明，不存在影响项目建设的颠覆性因素”。
- 2020年12月14日~16日国家核安全专家委员会召开了2020年年会暨第四季度例会，对可研阶段“两评”报告审查意见开展审查工作，认为审查意见合适，建议生态环境部（核安全局）批复“两评”报告。
- 2021年9月14日~16日中国国际工程咨询有限公司组织审查专家组召开了《国家电投佳木斯核能供热示范项目可行性研究报告》审查会，并完成了收口问题答复。

4、示范项目推进情况

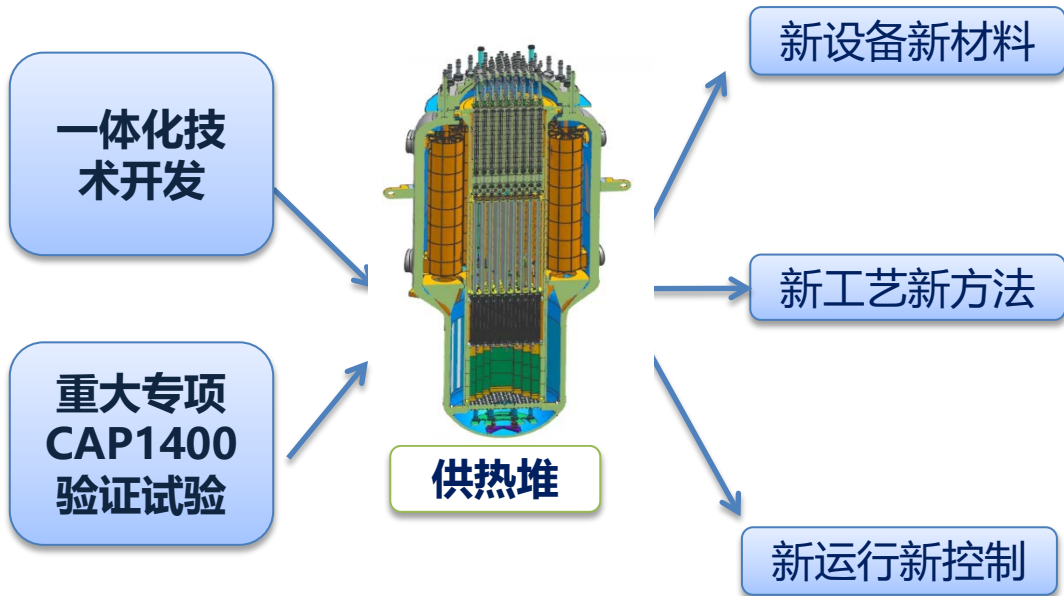
核准及支持性文件获取

□ 根据国家法律法规规定，共**9**份支持性文件，其中**7**份已获取，**2**份文件正在获取。

序号	支持性文件
1	关于国家电投佳木斯核能供热示范项目用地预审意见的复函（黑自然资预审字（01）[2020]73号）
2	建设项目用地预审与选址意见书（佳木斯市自然资源和规划局，用字第230800202000035号）
3	关于《国家电投佳木斯核能供热示范项目可行性研究阶段地震安全性评价专题报告》技术审查的意见（震学安评[2020]081号）
4	国家电投佳木斯核能供热示范项目取水许可申请准予水行政许可决定书（松辽许可[2020]37号）
5	国家电投佳木斯核能供热示范项目水土保持方案审批准予行政许可决定书（水许可决[2021]4号）
6	关于国家电投佳木斯核能供热示范项目文物保护和考古许可（黑文物许准字[2020]第43号）
7	佳木斯市人民政府关于国家电投佳木斯核能供热示范项目社会稳定风险评估报告的批复（佳政函[2021]79号）
8	关于向国家电投佳木斯核能供热示范项目一期工程1、2号机组提供核燃料及乏燃料相关服务的承诺函（国家电投铀业函〔2020〕23号）
9	中国建设银行贷款意向书（意编号[2020]第4号）

5、关键试验验证需求分析和开展情况

主要研发需求分析



- 丝杠螺母式驱动机构
- 内置螺旋管换热组件
- 堆内核测仪表（国产化）

- ✓ 压力容器具备制造能力，制造厂已核实
- ✓ 需开展必要的设备鉴定

- 无硼堆芯设计
- 新安全配置（PRHR和空冷）
- 放射性废液载带蒸发工艺
- 新启动方式（无泵/辅汽加热）
- 临界测量、温度测量（无主管道）

- ✓ 已完成工程设计，部分需开展验证

- 全自然循环流动与换热性能
- 三回路及自然循环控制策略和方案
- 新运行方式（规程开发等）

- ✓ 已开展理论分析，进一步试验验证

根据NB/T 20511-2018核电技术成熟度评价规范及其应用指南，开展供热堆成熟度评价，表明供热堆技术成熟度介于6级和7级之间。随设计验证试验开展，技术成熟度将进一步提升。

5、关键试验验证需求分析和开展情况

试验需求分析

设计特点

机理分析与成熟度评价

已有试验和实践覆盖性分析

试验清单

燃料临界热流密度试验

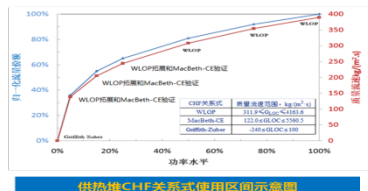
供热堆DNB准则相关事故评价采用WLOP、MacBeth-CE和Griffith-Zuber关系式，其中WLOP关系式满足燃料组件特征且适用于低压低流量；MacBeth-CE用于流量超WLOP范围的低功率事故评价；Griffith-Zuber关系式仅用于零流量事故工况评价。

结合CHF关系式适用范围可完整覆盖供热堆准则事故极限点的状态参数范围。且各CHF关系式都有批准用于工程设计者优先；供热堆DNB准则验收的II类和III类事故工况满足DNB验收准则，且DNBR裕度较大，设计安全性高。

WLOP关系式和MacBeth-CE关系式：

- ✓ 质量流速 $> 31.2 \text{ kg/(m}^2\cdot\text{s)}$ ：分析中考虑双冷型和转弯中等10% DNBR裕度
- ✓ $100 < \text{质量流速} < 31.2 \text{ kg/(m}^2\cdot\text{s)}$ ：分析中额外考虑流量超范围10%不确定性，并通过NRC批准的MacBeth-CE同步验证。

Griffith-Zuber关系式：仅用于零流量工况。



供热堆CHF关系式使用区间示意图

范围：

结合供热堆设计特点，梳理可能被认为是需试验验证的设计特征。

1

已有试验覆盖性：

梳理依托项目、重大专项科研中已有试验成果，对供热堆部分设计具有一定覆盖性，供热堆不重新开展

2

关键性能验证试验：

基于供热堆新的设计特点和工程判断，策划开展的关键系统、设备和部件的性能验证试验

3

4

工程常规验证试验：

根据标准、规范的要求开展的其他一般重要或特有系统的常规性能验证试验。

反应堆自动卸压性能试验

自动卸压阀系统阀门处涉及的现象主要有临界流、次临界流和两相流压降，供热堆从设计上考虑选取的设计参数（卸压整定值、出口含气率和阀门的压降）可被重大专项、西屋试验、电厂现场调试试验包络。另外，在重大专项整体性能试验中有系统性验证，同时在供热堆调试阶段开展该系统性能验证。

参数	单位	西屋ADS单项试验	AP600整体试验 ¹	供热堆
触发压力	MPa	1.3~15.5	2.6~6.8	6.8
阀门压降	MPa	0.46~12.2	0.79~3.48	0.2~1.5
入口含气量	%	1.0~100	1.3~60.4	1.0~75

安全壳热量导出性能验证试验

供热堆事故后安全壳空冷的关键参数范围（流量、流速、安全壳排热量等）均可以被重大专项WAFIT试验包络，具体参数包括：流体密度、Re数、Pr数、空气平均温度、平板温度等。

参数	单位	重大专项WAFIT试验	供热堆设计
热流密度	kW/m ²	0.5~3.8	<1
空气平均温度	°C	99~135	<110
平板温度	°C	100~145	<125
雷诺数	/	$1.9 \times 10^4 \sim 1.6 \times 10^5$	$< 1.2 \times 10^5$

5、关键试验验证需求分析和开展情况

关键性能验证试验

高效换热组件和控制棒驱动机构定型样机已经通过小堆研发平台研制完成，无颠覆性风险

序号	试验名称	试验目的	计划完成时间
1	自然循环整体性能试验	认识全自然循环条件下的小型一体化反应堆的运行机制，探索其中热工水力现象与过程的复杂物理机理，为小型一体化反应堆全自然循环系统论证提供试验依据	2020/12/31
2	启动加热试验	验证外置启动加热能够建立堆内全自然循环；验证外置启动加热能够实现堆内整体升温；验证启动加热自然循环流量计算方法	2021/7/30
3	反应堆压力容器材料及焊缝金属低温辐照性能试验	供热堆由于采用了中压设计，使得压力容器的运行温度在197~268°C之间，超出了传统压水堆核电厂应用的经验范围。本试验目的是为了进一步确认反应堆压力容器堆芯区筒体母材及焊材的低温辐照性能，并通过试验结果对当前预估的 ΔRT_{NDT} 进行修正	2022/6/30
4	高效热交换装置的工程化应用研究及试验	研究供热堆换热组件瞬态热工水力性能，验证供热堆换热组件瞬态分析程序；通过螺旋缠绕管式换热组件抗震试验，验证供热堆工况下一二回路换热组件的抗震分析方法。	2023/3/30
5	控制棒驱动线系统综合性能研究及试验	在海洋堆新型丝杠螺母式控制棒驱动机构的研发基础上，针对一体化多用途供热堆的设计要求进行控制棒驱动线系统设计和试验验证。	2024/3/30
6	堆芯仪表套管组件堆上试验	实现基于新型钒自给能探测器和热电偶测量技术的堆芯仪表系统设计研究，以及相关设备的研发和试验验证工作	2023/12/31
7	液态流出物载带蒸发工艺研究	开展相关废液的离子交换处理工艺研究，试验获得的成果可指导后续供热堆液态流出物载带蒸发系统工程设计	2022/12/31

5、关键试验验证需求分析和开展情况

工程常规验证试验

序号	试验名称	试验目的	计划完成时间
1	中间隔离回路环形集管研制	验证制造工艺可行性和接管座与主管材料性能的一致性，测量环形集管多管嘴安装后各接管处的应力状态，验证安装可行性	2022/6/30
2	控制棒驱动机构棒控装置工程样机研制	在电机、保持线圈控制模块板级集成，所有控制功能一体化的基础上，需要进行设备柜整体设计，对所有部件、电源、线缆等进行合理的布置，满足空间、散热、电磁兼容（EMC）、运维、安装等方面的约束	2021/12/31
3	设冷水空冷塔热力阻力性能试验	采用试验方式验证空冷塔的冷却能力，并对空冷塔的进行设计优化	2021/12/31
4	烟囱气载流出物辐射监测取样代表性设计验证	验证供热堆烟囱气载流出物取样和监测系统设计是否满足NB/T 20374-2016 (ISO 2889-2010) 中的代表性要求，为供热堆烟囱气态流出物取样系统设计提供指导	2023/2/28
5	供热堆水化学条件下包壳材料腐蚀性能验证	获得锆合金的腐蚀性能与LiOH或KOH浓度、空泡份额之间的规律	2022/12/31
6	化学和去污废液离子交换处理工艺研究	开展相关废液的离子交换处理工艺研究。试验获得的成果可指导后续供热堆化学和去污废液移动式处理设施的工艺流程设计和设备设计	2021/12/31
7	深埋供热堆抗震及设计优化研究	采用理论分析与试验验证相结合的方法，重点对深埋结构动力相互作用、土体与墙体界面非线性、软土厂址桩-土-结构相互作用以及结构空间联动减隔震体系进行研究	2022/12/31

1、佳木斯核能供热示范项目采用一体化供热堆可兼顾民用供暖和工业供汽，实现零碳供热，减排效果显著，是核能综合利用的重要举措，能够有力支持我国“双碳”目标实现。

2、一体化供热堆的设计方案兼顾了先进性、安全性和环境友好性需求，技术方案是完整的、合理的、可行的；供热堆科研方案综合考虑了供热堆的成熟度和技术创新情况，并基于重大专项和小堆科研成果形成了供热堆科研计划，涵盖了供热堆各项创新设计，能够有效地支撑供热堆设计验证。

3、一体化供热堆的型号开发着眼于国际先进小堆发展技术路线，采用**一体化、全自然循环及无硼堆芯设计理念，并采用非能动安全设计，实现无限时安全壳冷却**大幅提升了安全性、经济性和易维护性，**从源头上减少放射性废液产生，并利用废液复用和载带蒸发工艺实现了放射性废液零排放**，大幅提升了环境友好性。

4、示范项目初步设计工作已经完成，前期工作主体已经完成，正在积极推进施工设计和各项设计验证工作。

谢 谢
Thank you