



清華大學

核能与新能源技术研究院

Institute of Nuclear and New Energy Technology (INET), Tsinghua University



# 贵州玉屏项目海南小堆会议

清华大学核研院 杨星团



2022年1月 海南

# 王大中院士获2020年度国家最高科技奖

## 主要成就：

主持研究、设计、运行成功世界上第一座**5兆瓦壳式一体化低温核供热堆**；主持研发建成世界第一座具有固有安全特征的**10兆瓦模块式球床高温气冷实验堆**。

领导研究团队走出了我国以**固有安全为主要特征**的先进核能技术从跟跑、并跑到领跑世界的成功之路。

# 2020

## 国家最高科学技术奖得主



王大中

中国科学院院士  
清华大学原校长  
国际著名的核能科学家、教育家

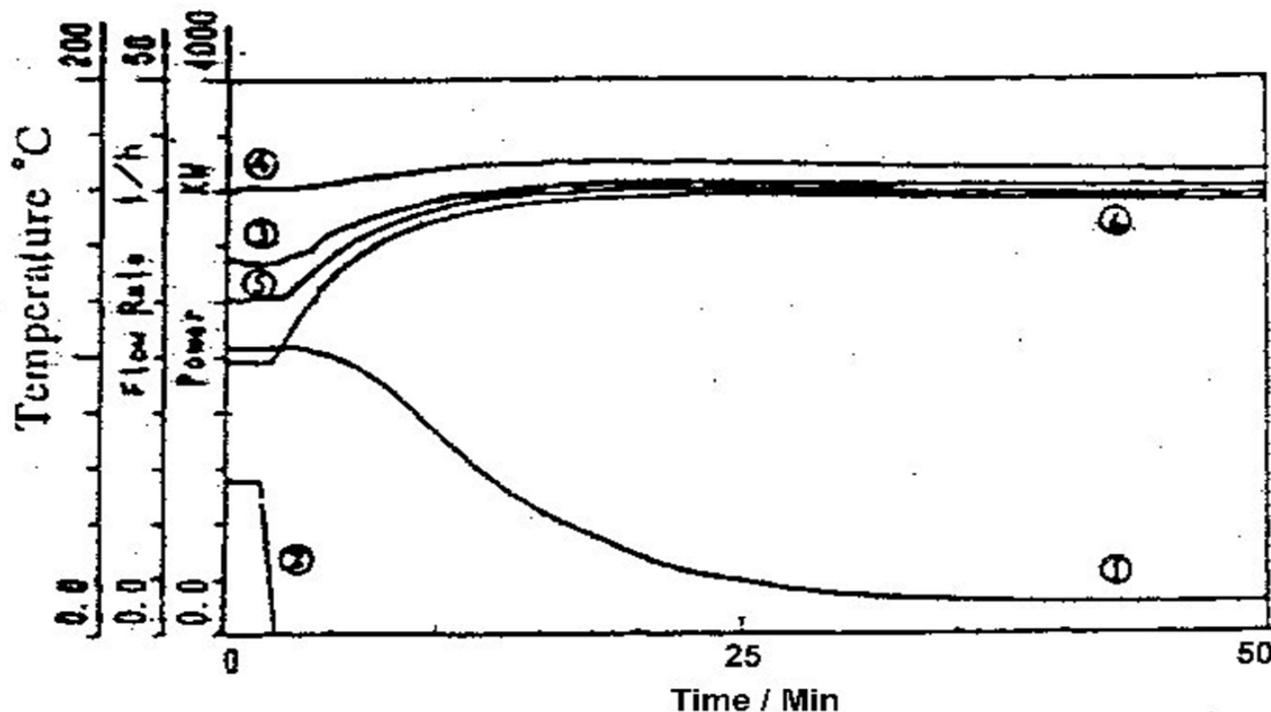
出生年月	1935年2月
出生地	河北昌黎
主要成就	主持研究、设计、建造、运行成功世界上第一座5兆瓦壳式一体化低温核供热堆；主持研发建成了世界第一座具有固有安全特征的10兆瓦模块式球床高温气冷实验堆。领导研究团队走出了我国以固有安全为主要特征的先进核能技术从跟跑、并跑到领跑世界的成功之路。

Baidu 百科



# 5MW堆丧失外部电力的ATWS实堆实验

- 主回路失去冷却，控制棒不插入，假设停堆系统失效
- 比日本福岛事故更严重的事故工况，在实际的5MW实堆上做，全世界只有清华的高温堆和低温堆做过这类实堆实验



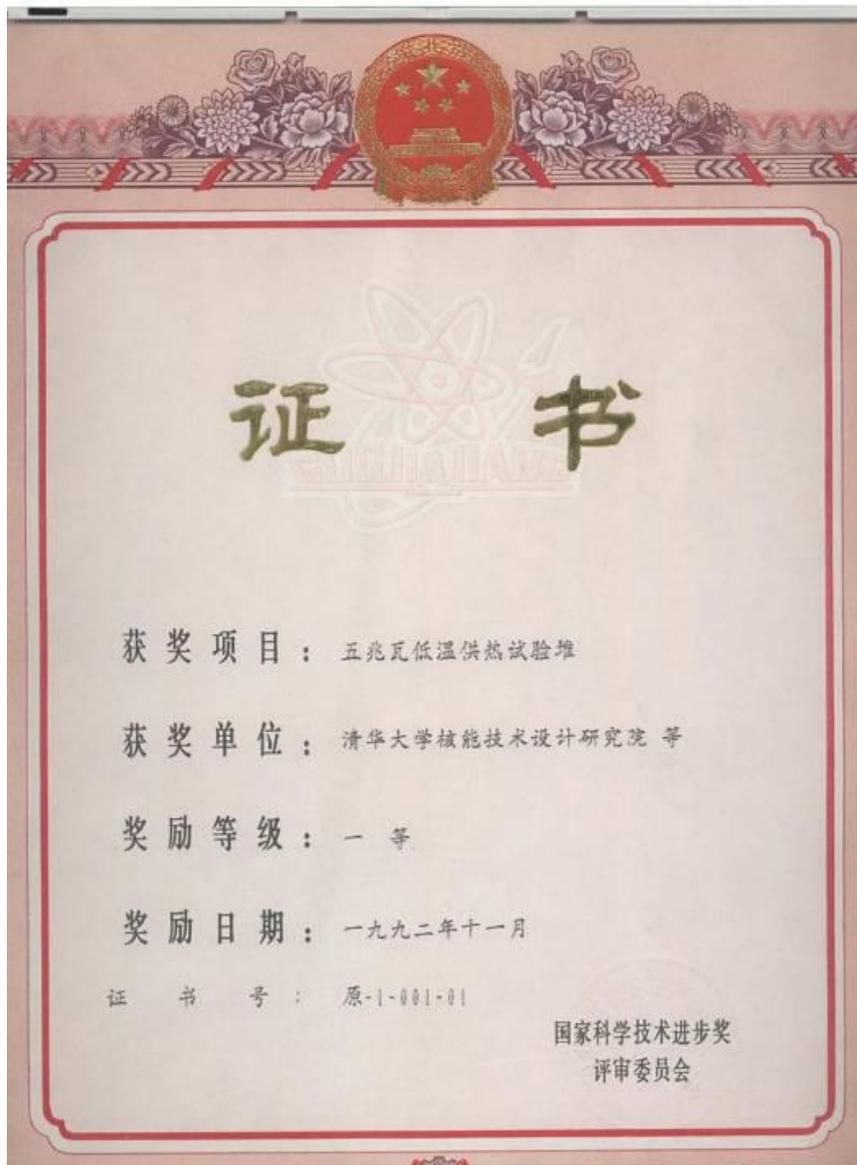
- 1-反应堆功率，2-中间回路通过中换流量，3-堆芯入口温度  
4-堆芯出口温度，5-主换二次水出口温度，6-主换二次水入口温度

固有安全的体现

严格讲是非能动安全

安全是核研院这两个堆最大的特色

# 清华低温供热堆的辉煌历史



## 5MW低温供热堆为世界核能发展做出了重要贡献

- 国际原子能机构评价低温堆是中国对世界核能发展的重要贡献
- 被评为1989年和1990年国内十大科技新闻之一
- 被列为1990年世界十大科技成就之一
- 在1995年第八届全国人民代表大会政府工作报告中，低温供热堆被列为5项有代表性的突破性科技成果之一
- 获得了1992年国家科技进步一等奖

# 清华小型压水堆发展历程

1964年建成游泳池式反应堆，我国第一座自主设计建造的反应堆，科研团队平均年龄23岁半

1989年建成一体化自然循环反应堆—5MW低温供热堆，国际上第一座投入运行的一体化、模块式、全功率自然循环压水反应堆

1994年完成NHR200-I型商用低温供热堆技术攻关和初步设计，通过国家核安全局审查，颁发建造许可证

2006年完成NHR200-II型堆初步设计，在保持I型堆安全特性基础上提高了运行参数，于2016年完成所有试验验证并验收

2017年建成XMW小型核动力堆，2018年初满功率，顺利完成所有试验，已列入型号

2018年NHR200-II堆河北邢台中庄厂址项目获得能源局小路条

2020年NHR200-II堆贵州玉屏厂址项目获得能源局小路条

1964年

1989年

1994年

2006年

2017年

2018年

2020年

清华核研院低温堆（一体化全功率自然循环小型压水堆）从九十年代初（1991年）开始寻求项目落地，经历过大庆、沈阳、吉林、山东海水淡化、沙特海水淡化等项目，历经坎坷，却至今未能如愿；小型核动力堆已跨出历史性一步。

# 清华小型压水堆发展历程

## ➤ 第一阶段：1981-1984，**供热堆堆型研究**

□1981年开始低温核供热堆概念设计研究

□1983、1984年，完成池式低温供热堆的核供热实验

## **确定壳式供热堆为主攻方向**

□1985年，低温供热堆被列入“七五”重点攻关项目，决定建造一座5兆瓦低温核供热试验反应堆

## ➤ 第二阶段：1985-1991，**5MW堆原型堆建设与试验**

□国家七五攻关，成功建成5MW低温供热堆，1989年投入运行

□完成大量运行和安全性能试验，验证了壳式低温供热堆的优异性能，并连续3个冬季的供暖运行

□1988.2—1989.9，5MW堆顺利通过国家核安全局组织的近百名专家为期一年半的全面安全审评，这是我国首次对核反应堆进行的安全审评

# 清华小型压水堆发展历程

## ➤ 第三阶段：1991-， 商用堆技术攻关与推广

□ 国家八五攻关，完成200MW商用低温供热堆（NHR200-I）关键技术以及低温供热堆综合利用技术与开发：

### 热电联供、制冷空调、海水淡化

□ 国家九五攻关，完成NHR200-I工程验证试验

□ 1996. 12， NHR200-I低温核供热堆通过国家核安全局审查，并

### 颁发建造许可证

□ 1998. 10， 10兆瓦核能海水淡化厂通过国际原子能机构的审评

结论：清华低温供热堆具有固有安全性，完全满足IAEA对核安全的要求，并有很大的裕度；核供热堆与MED耦合的核能海水淡化技术是先进、可行的，不存在影响该项目实施的任何技术障碍；核能海水淡化厂绝不会污染环境和危害公众安全，IAEA推荐低温堆为核能海水淡化的优选堆型

□ 2001. 4， 沈阳2x200MW核供热工程立项

□ 2003. 3， 山东核能海水淡化工程立项

**遗憾的是这些都没成功！**

# 清华小型压水堆发展历程

## ➤ 第三阶段（续）：1991-， 商用堆攻关与推广

□2006年，完成NHR200-II型供热堆初步设计，提高了设计参数，可提供工业蒸汽，用于：

**工业蒸汽、核能供热、汽/水联产、热电联供、海水淡化等**

□2007年6月，清华大学核研院与中核能源科技有限公司共同组织召开了低温堆技术研讨会，专家组一致认为NHR200-II保持了NHR200-I的安全特性

□2016年，完成NHR200-II型低温供热堆技术设计的所有试验验证，并通过验收

□2016年5月，通过中国核学会组织召开的“核供热项目技术方案专家评审会”

□2016年6月，国家能源局委托中咨公司组织评审了“小型智能堆示范工程选型技术评估会”，NHR200-II获得专家认可，成为向国家推荐率先进行小型堆示范项目的2种堆型之一

□2018年1月，国家能源局召开专家会，颁发小路条，允许开展河北邢台中庄项目前期工作。

□2020年12月，国家能源局召开专家会，颁发小路条，允许开展贵州玉屏项目前期工作。

**一个不可多得的优秀厂址，与广核合作，计划2022年中核准，2022年底FCD**

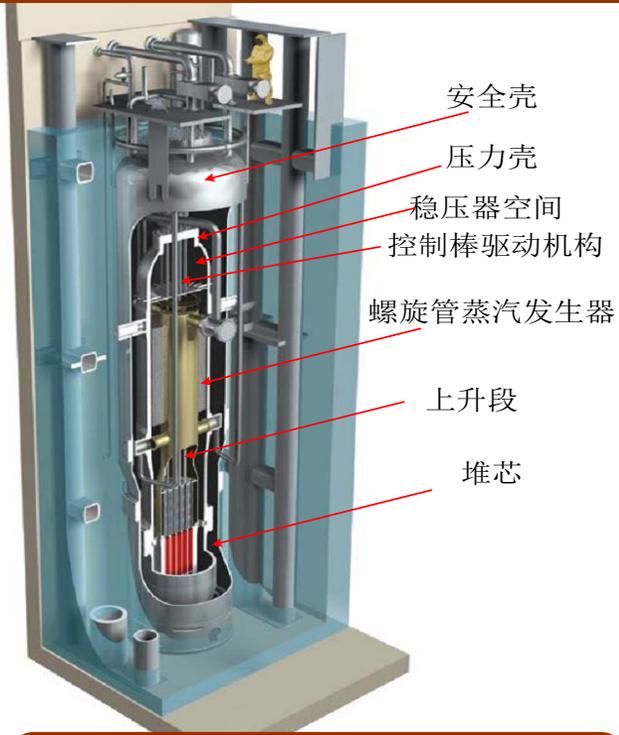
# 清华小型压水堆发展历程

清华大学自主研发的壳式核供热反应堆是经历过**国内、国外系统深入的评审**，获得过**建造许可证**，有两个**实堆运行经验**的固有安全的**多用途反应堆**，技术成熟、先进，运行可靠，并在实堆上进行过安全试验，在国际核能界具有广泛的影响力。

其**一体化布置**和**非能动安全**的设计理念贯穿在整个反应堆及其系统的设计之中，已成为目前先进核能的重要标志，**时至今日**也是先进的。

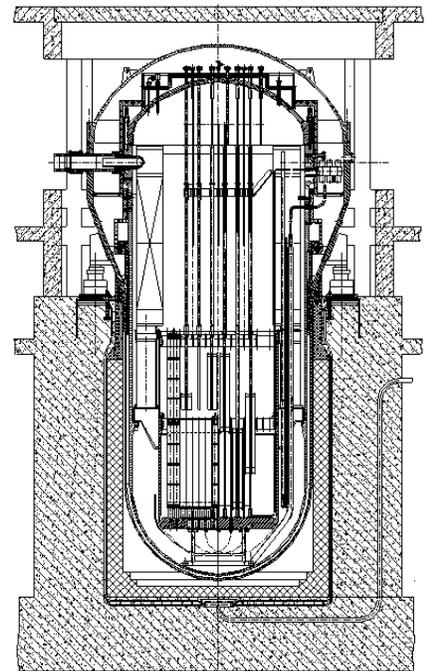
# 清华低温堆已成为被参考的对象

美国于2018年10月发布《美国对中国民用核能合作框架》明确提出限制对中国出口小型核能的相关技术和设备，意味着中国无法获得NuScale的相关技术。



**设计理念几乎相同：**

- 一体化布置
- 全功率自然循环
- 紧贴式钢制安全壳
- .....



美国于近年推出的NuScale小型压水堆获得广泛认可

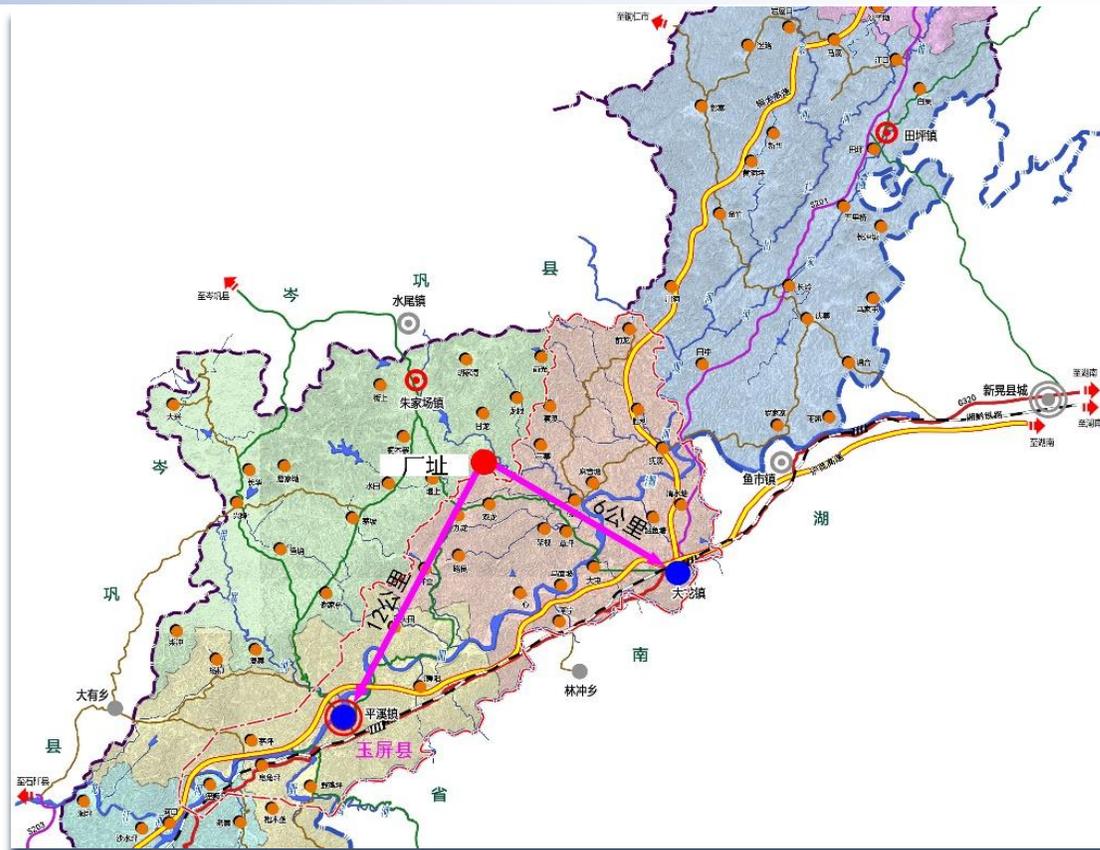
一体化全功率自然循环反应堆

清华大学1989年建成运行的壳式低温供热堆

**NuScale参考了清华小型压水堆的大部分设计**

# 贵州玉屏项目厂址

INOT

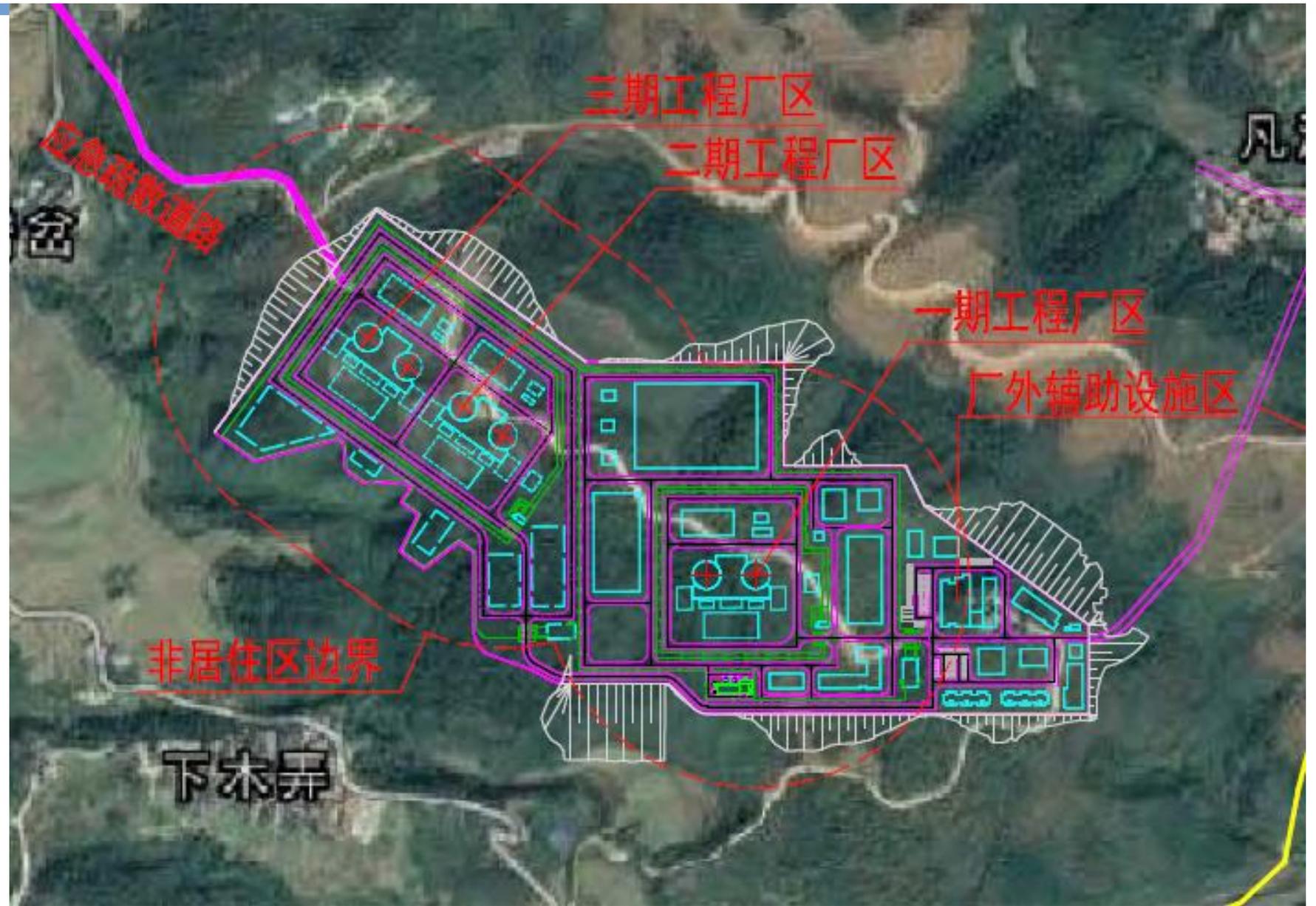


厂址位于贵阳市东北方向约248公里，铜仁市西南方向约50公里，玉屏侗族自治县东北方向约12公里，大龙镇西北方向约6.0公里的大龙经济开发区，南距贵州省和湖南省省界约6公里。

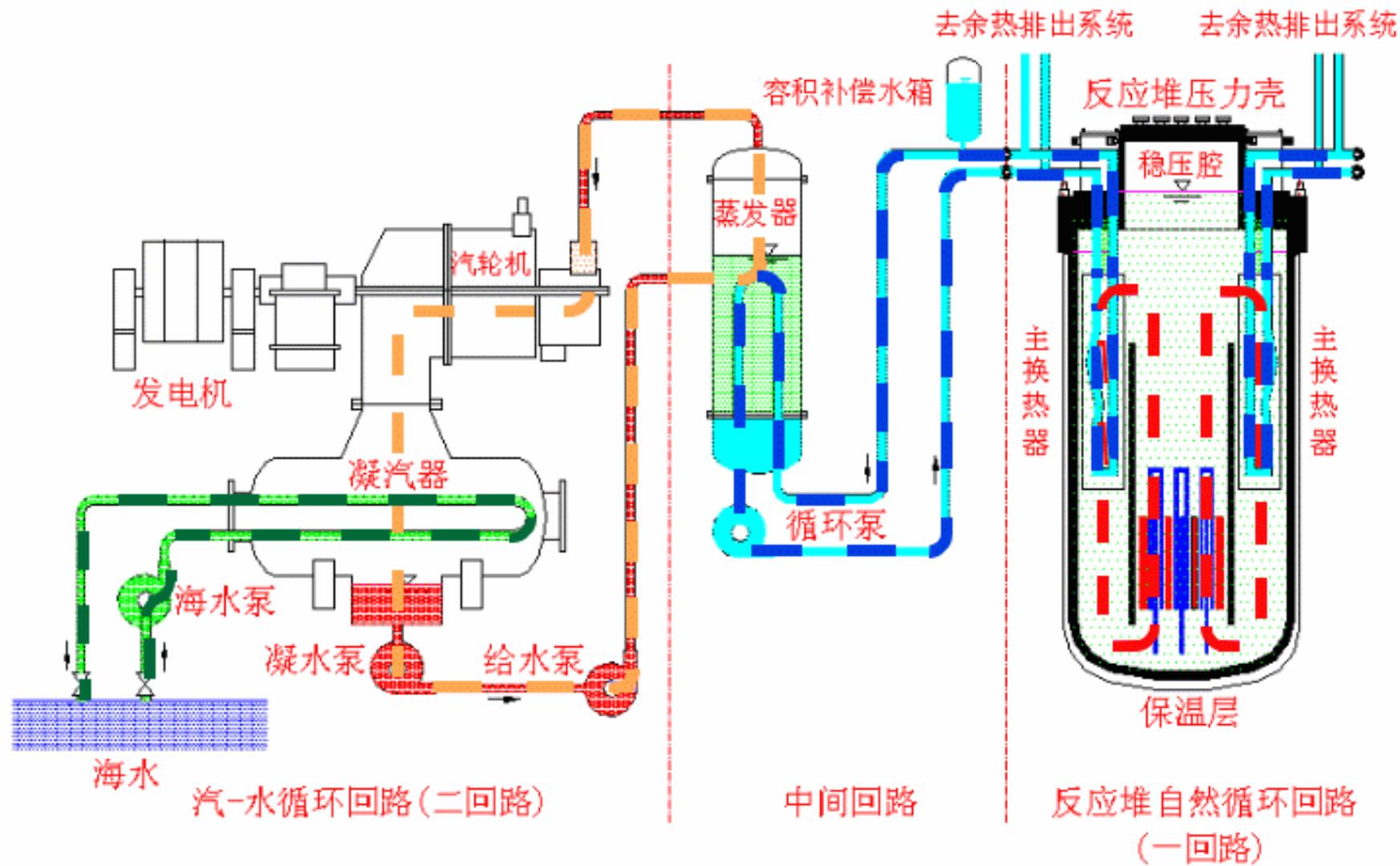
# 项目总体规划

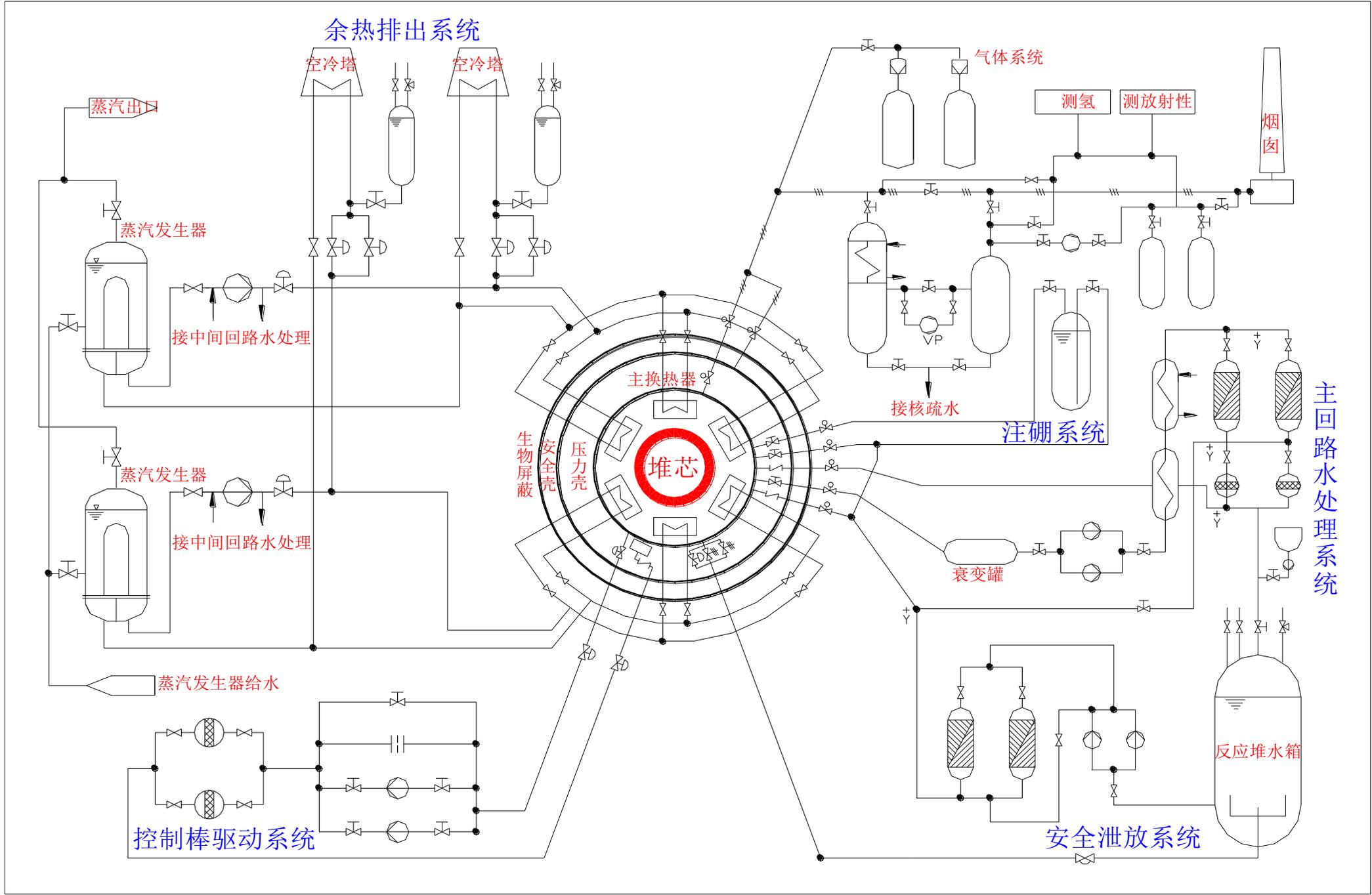
INOT

- 全厂按**6台**机组规划，一期工程建设**2台NHR200-II**型核供热堆机组。
- 全厂总体规划主要分为：厂区、厂前附属建筑区、施工生产区、其它辅助设施区、防排洪设施、进厂道路等。



# 清华的一体化壳式供热堆：三重回路设计





# 技术方案：NHR200-11 一体化全功率自然循环反应堆

## ➤ 一体化布置

没有主管道，消除大破口风险；便于屏蔽  
引出管在上部，容器下部没有管口

## ➤ 全功率自然循环

没有主泵，非能动方式运行

## ➤ 自稳压

不凝结性气体保持压水状态

## ➤ 内置式主换热器

## ➤ 内置式水力驱动控制棒

实际消除弹棒事故风险

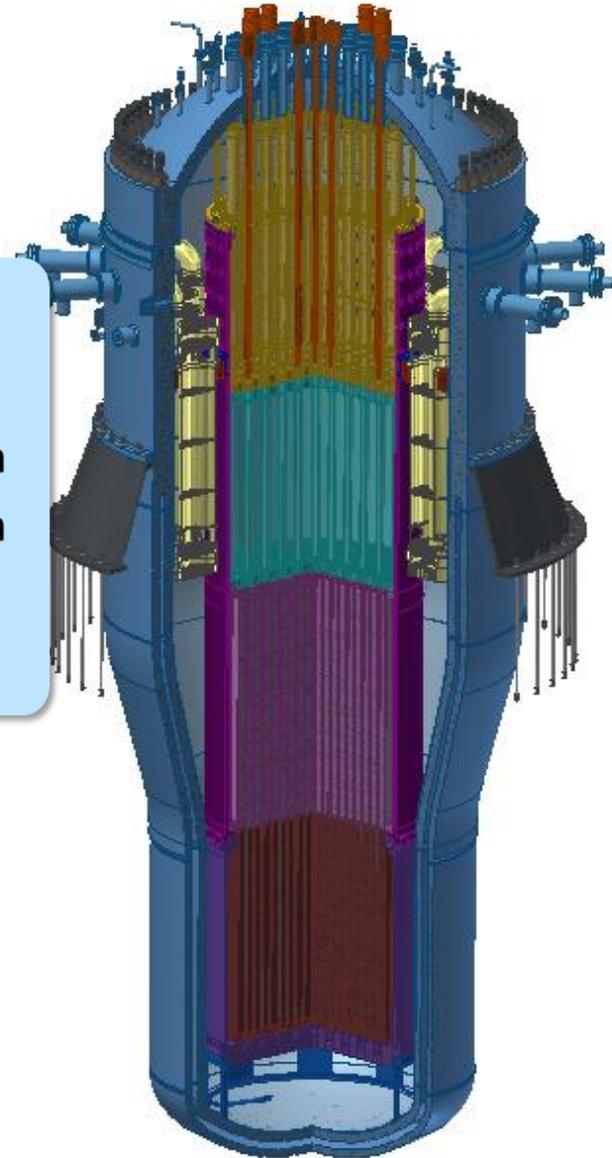
## ➤ 双层压力容器

即使发生容器破裂，仍能保持堆芯淹没

## ➤ 结构简单，便于模块化制造和工厂组装

- 设计压力：10.0MPa
- 设计温度：300℃
- 工作压力：8.0MPa
- 工作温度：278℃

- 内径：4300mm
- 总高：13517mm
- 筒体外径：4942mm
- 运输直径：5383mm
- 内体积：153m<sup>3</sup>
- 总重量：约388t



# 主要设计参数

序号	参数名称	单位	数值
1	热功率	MW	200
2	反应堆设计寿期	A	60
3	反应堆冷却剂工作压力	Mpa	8.0
4	堆芯入口/出口温度	°C	230/278
5	中间回路工作压力	Mpa	8.8
6	蒸汽发生器出口蒸汽压力	Mpa	1.6
7	蒸汽发生器出口蒸汽温度	°C	201.4
8	蒸汽产量	t/h	323
9	燃料组件总数	盒	208

# 试验验证：“七五”攻关项目

主要解决5MW堆的关键技术问题。后期针对200MW堆进行了热工水力试验，以及控制棒驱动机构、计算机控制系统、换料机、主换制造工艺等进行研究

序号	专题名称	序号	专题名称
01	低温供热堆物理实验	08	200MW低温供热堆简易换料机构的研制
02	自然循环微沸腾热工水力学稳定性试验研究	09	供热堆安全排放及余热排出系统设备研制
03	供热堆堆芯热工水力实验研究	10	控制系统及监测系统仪表研制
04	大型控制棒水力驱动机械试验	11	主换热器制造工艺研究
05	供热堆安全分析及事故安全特性试验研究	12	自然循环热交换器热工水力学研究
06	供热堆计算机控制系统及控制特性调节方式的实验研究	13	大型十字型控制棒及其驱动机构研制
07	5MW低温供热堆关键设备制造、安装		

# 试验验证：“八五”攻关项目

- 5MW堆上开展热电联供、空调制冷、海水淡化研究
- NHR200-I的安全系统实验；水力驱动控制棒、主换热器、堆内构件、关键阀门、电气贯穿件、堆内测量仪表等关键设备研究和性能试验

编号	专题名称	编号	专题名称
01	低温供热工程设计研究	07	低温供热堆核能海水淡化的研究及工艺供热技术
02	工程关键设备考验及功能测试	08	微机保护系统实验研究
03	供热堆堆芯结构抗震研究	09	正常运行工况下运行性能试验研究
04	200MW低温堆堆内监测技术及仪表研制	10	低温核供热堆事故工况下的安全性能研究
05	低温核供热发电试验研究	11	安全壳电气贯穿件设计验证试验
06	低温核供热制冷实验研究		

# 试验验证：“九五”攻关项目

针对NHR200-I设计开展国际验证；关键设备研制和试验；工艺研究；安全泄放、注硼等系统实验

编号	专题名称	编号	专题名称
01	200兆瓦核供热堆工程设计验证（与德国siemens/KWU合作）	09	保护系统逻辑柜设计与研制
02	200兆瓦核供热堆工程抗震验证实验（堆体结构，堆芯结构，控制棒，电气仪表柜）	10	过程计算机系统关键技术验证实验研究
03	低温核供热堆保护系统抗震样机柜的性能验证试验	11	200兆瓦供热堆堆芯流量分配验证实验
04	200兆瓦供热堆控制棒水力驱动系统综合性能试验及寿命考验	12	安全泄放系统排放特性及水击验证试验
05	燃料组件定位格架的力学性能实验研究	13	供热堆稳压空间的稳压特性及水击验证实验
06	燃料组件方形长锆盒工艺研究及性能实验	14	重力注硼系统特性实验验证
07	200兆瓦供热堆控制仪表工程验证实验	15	氮气排放实验验证
08	堆内中子测量系统性能验证		

# 试验验证：NHR200-II 关键研发试验

- 提高参数后，对NHR200-II关键系统、关键设备进行试验验证
  - 一回路自然循环热工水力学研究
  - 控制棒水力驱动系统工程验证试验
  - 燃料组件关键技术试验研究
  - 集成优化控制技术研究实验验证
  
- 上述试验均已完成

# 正在开展的试验

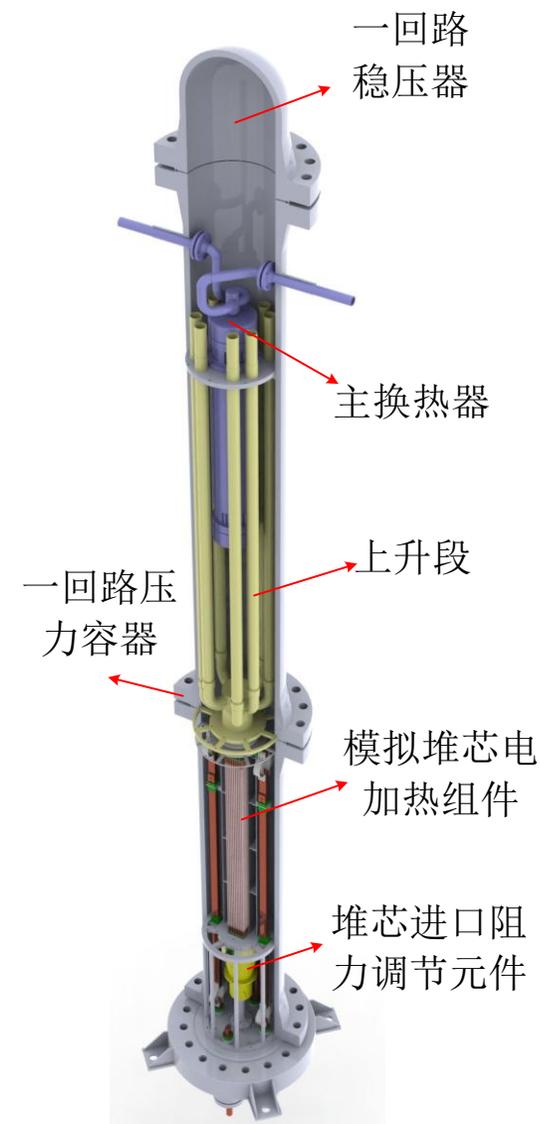
➤ PSAR之前工程验证试验已全部完成，为安全评审（FSAR）提供技术支撑，正在进行及拟开展的工程验证试验包括：

试验名称	试验目的	当前进展	完成时间
临界热流密度验证试验	为FSAR提供数据支撑；用于确定安全裕度，为下一代反应堆的优化设计提供依据	试验方案论证，关键设备制造，实验准备基本完成	2023年4月
非能动余热排出系统、注硼系统试验	专设安全设施开展进一步工程验证，化解安审进度风险	完成试验系统比例分析报告，试验台架建设，正在实验中	2022年10月
主换热器试验	化解关键设备制造风险	完成试验样机制造	2023年4月
锆盒制造工艺试验	化解关键设备制造风险，降低采购成本，优化经济性	完成样机设计方案评审，开展模具设计	2022年10月
蒸汽发生器汽水分离试验	验证汽水分离装置的性能是否满足设计要求	已完成	
控制棒驱动线抗震试验	针对示范工程地震谱，安排1:1工程样机抗震试验	试验件设计	工程建造阶段
仪控系统关键工程样机研制	按法规要求，对系统级工程样机进行研制和验证	调研阶段	工程建造阶段

# 一回路自然循环热工水力学研究

## ➤ 主要成果

- 建成了一套主要几何参数1:1模拟，关键热工水力学参数覆盖NHR200-II的自然循环热工水力学试验台架
- 试验证明NHR200-II能够在设计参数下，安全可靠地全功率自然循环运行



# 控制棒水力驱动系统验证试验

## ➤ 主要成果

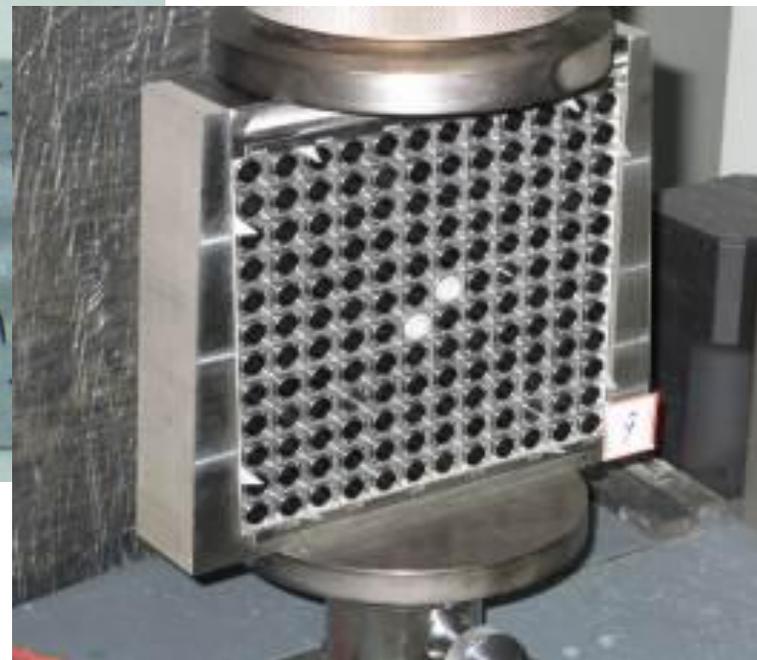
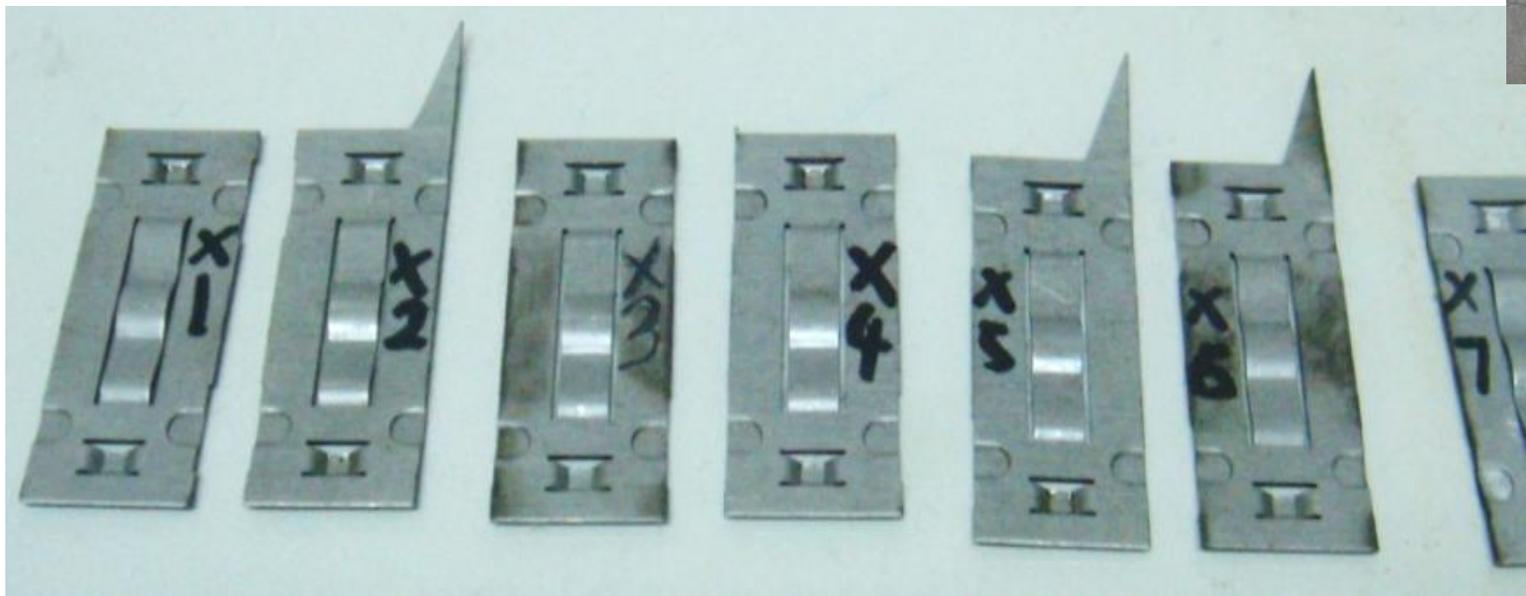
- 建立了控制棒水力驱动系统冷态、热态、寿命综合试验台架
- 制造了控制棒水力驱动机构产品样机
- 完成了冷态、热态性能实验和寿命试验，试验证明其设计满足NHR200-II的使用要求



# 燃料组件关键技术试验研究

## ➤ 主要成果

- 定位格架所有检验项目均合格
- 锆盒的各项性能均达到所规定的技术指标



# 集成优化控制技术与试验

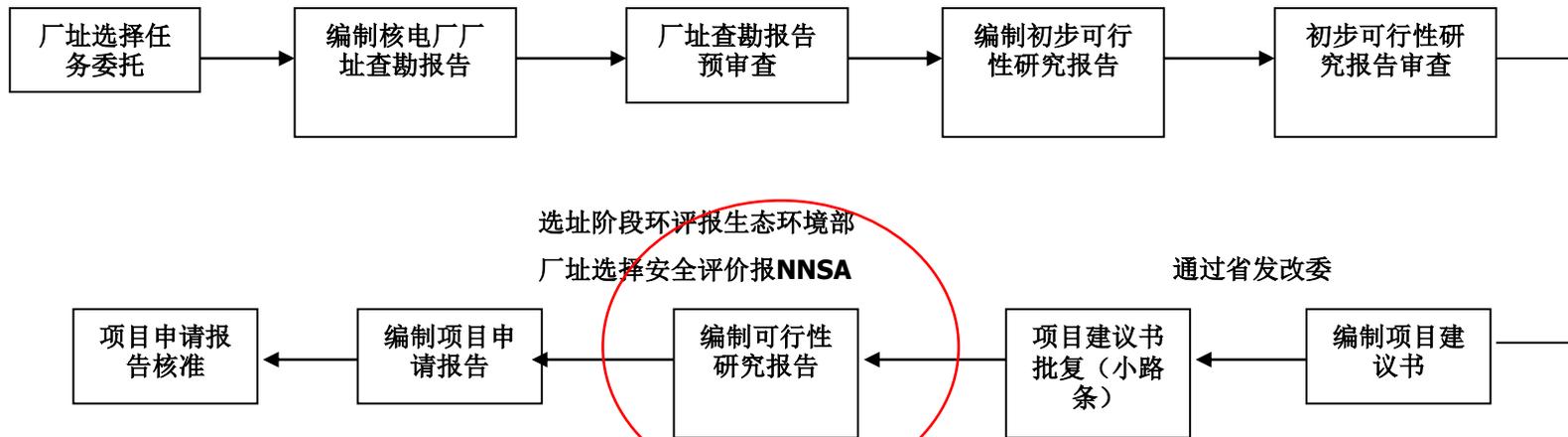
## ➤ 主要成果

- 给出了数字化仪控系统的容错控制设计
- 建立了半实物仿真系统
- 仿真结果表明控制方案满足负荷跟踪要求

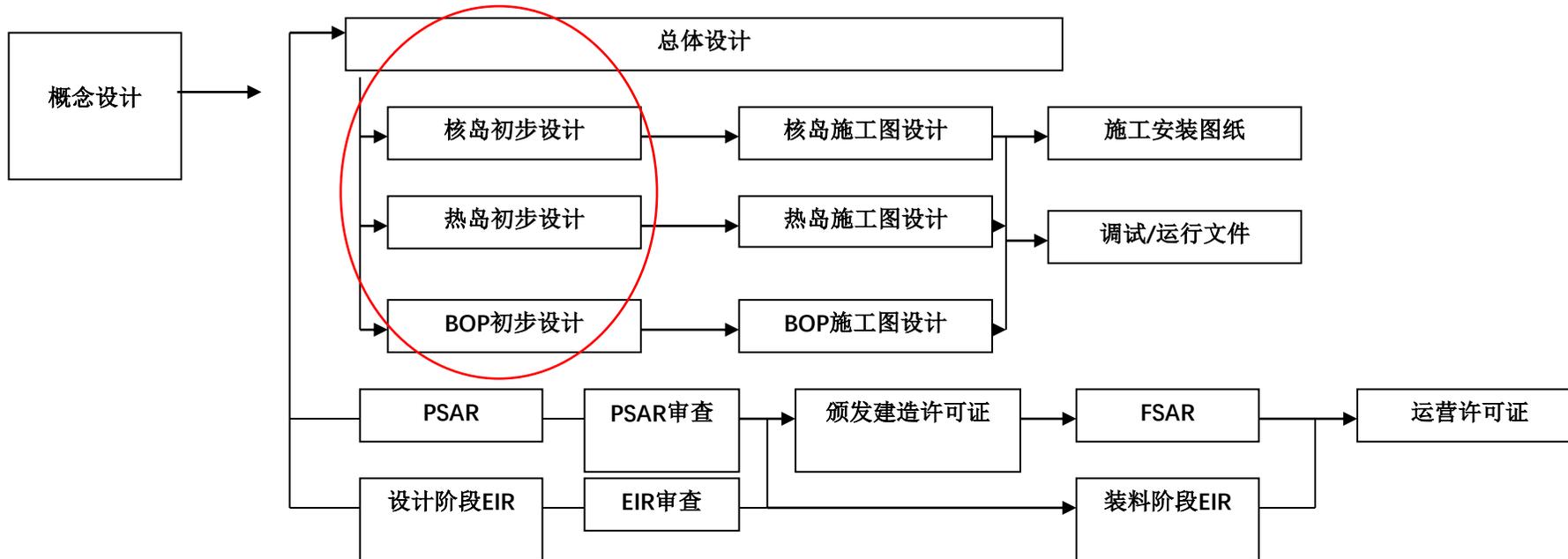


# 当前玉屏项目进展

工程咨询



工程设计



**谢谢!**