

# 高温气冷堆核电站示范工程 创优经验介绍

华能山东石岛湾核电有限公司

2019年12月12日

# 目 录

- 一、工程概况
- 二、建造特点
- 三、质量特色
- 四、科技创新
- 五、绿色施工
- 六、存在问题

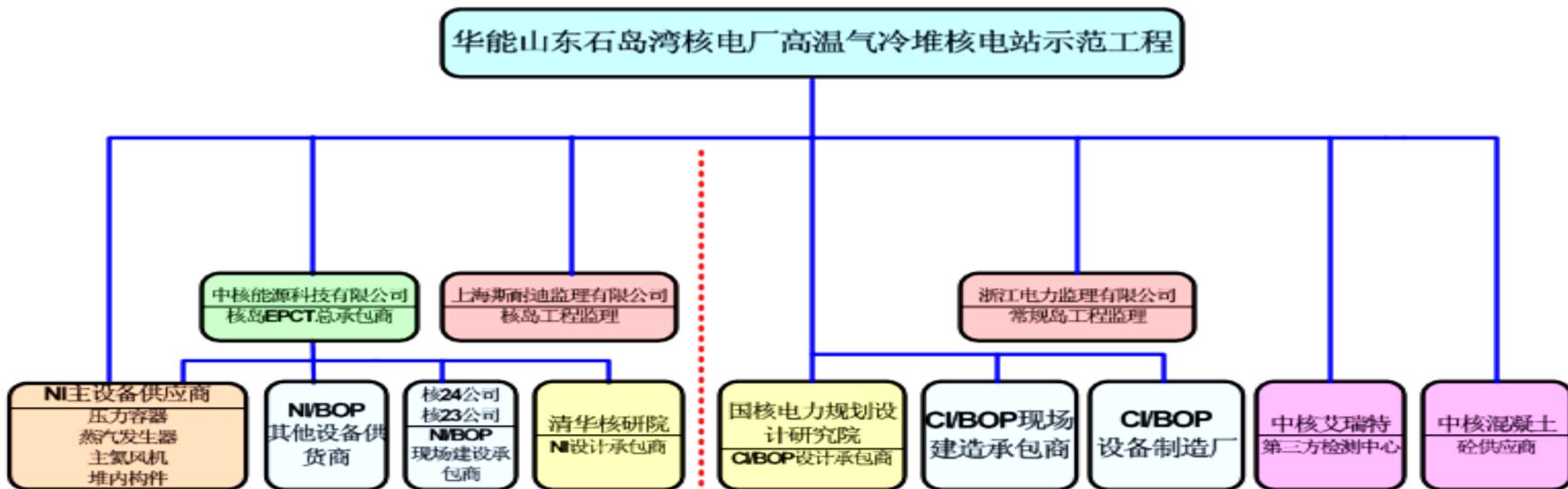


华能石岛湾高温气冷堆示范电站（下文简称示范电站）是全球首座将四代核电技术商业化的示范项目，是列入《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006-2020）》中的科技重大专项之一。项目以建成的10MW高温气冷实验堆为技术基础，采用我国具有自主知识产权的高温气冷堆发电技术，具有提升我国自主创新能力、保持高温气冷堆技术优势、加快核电建设国产化进程和促进国家可持续能源发展的战略意义。

# 一、工程概况

## (一) 工程管理模式

工程项目采用“项目业主全面负责、核岛及其BOP工程EPC总承包、常规岛及其BOP工程业主自主管理、业主主持联合调试”的模式。主要设计单位有中核能源科技有限公司（设计总包单位）、清华大学核能技术设计研究院和国核电力规划设计研究院；核岛EPC总承包单位为中核能源科技有限公司，土建工程承包单位为中国核工业第二四建设公司；核岛及BOP安装工程承包单位为中国核工业第二三建设公司，常规岛及BOP安装工程承包单位为中国核工业第五建设公司。



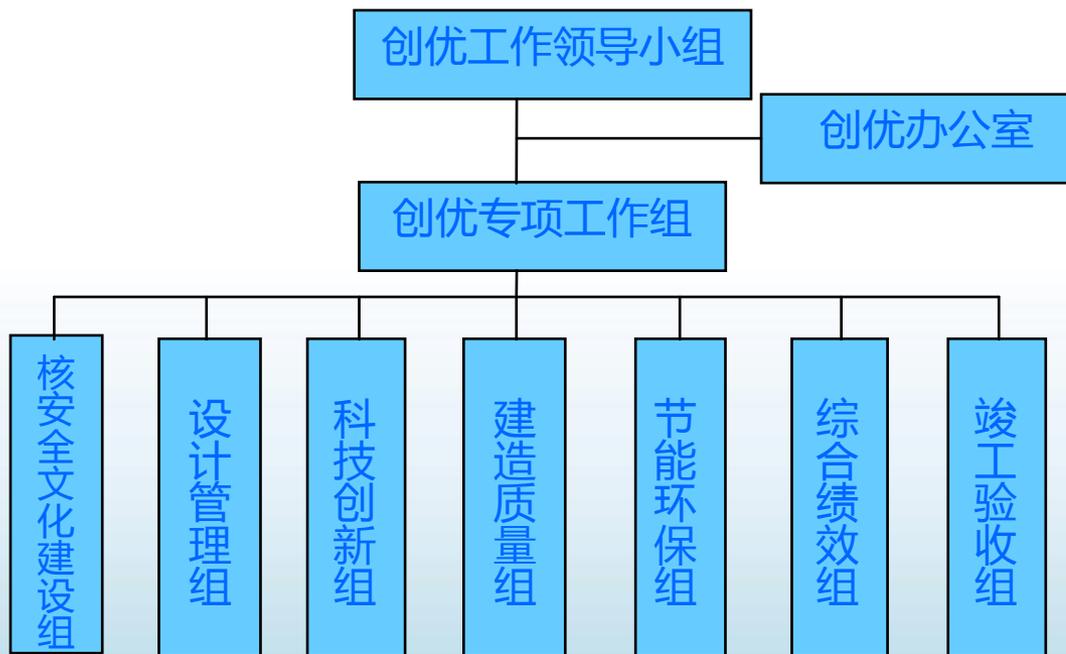
代码说明：  
NI—核岛  
CI—常规岛  
BOP—电厂配套设施

说明：  
(1)常规岛由业主直接管理，核岛五大主设备与中核能源联合采购。  
(2)中核艾瑞特提供除NDT之外的现场试验和检测服务  
(3)中核混凝土负责运行搅拌站和砂石厂

## 一、工程概况

### (二) 创优工作

追求卓越、铸就经典，将示范电站打造为业内设计领先、技术先进、质量优良、绩效良好、节能环保的国家级优质工程。为保障创优工作有序推进，石岛湾公司成立了示范电站创优工作领导小组、创优办公室和七个创优专项工作组。组织制订了工程创优实施方案，明确了创优工作目标和实施计划。





# 一、工程概况

## (三) 工程建设情况



### 核岛与常规岛土建工程量

混凝土	149077	立方米
钢筋	32604.4	吨

### 核岛与常规岛安装工程量

电气设备	1490	台
敷设电缆	1233.76	千米
工艺管道	77258.4	米
辅助设备	740	台
通风设备	524	台

序号	核岛主要子项
1	反应堆厂房
2	核辅助厂房
3	电气厂房
4	应急柴油机厂房
5	乏燃料厂房
6	氦气储罐
7	环境辐射自动监测站
8	放射性固体废物库
序号	常规岛主要子项
1	常规岛主厂房
2	循环水泵房
3	电解制氯间
4	辅助锅炉房
5	除盐水厂房
6	网控楼与开关站

## 一、工程概况

### (四) 项目发展历程



# 一、工程概况

## (五) 厂区现貌



培训中心



主厂区



综合办公楼



主控制室



除盐水厂房

## 二、建造特点

### (一) 施工特点

- 工程建设期间存在大量的设计验证和设备验证，设备到场时间分散。
- 模块化土建施工，以屏蔽冷却水系统的施工为例：

屏蔽冷却水系统施工贯穿土建施工全过程。按照反应堆压力容器舱室与蒸汽发生器舱室土建的分段、分层施工情况，将两个舱室的屏蔽冷却水系统进行了二次分段设计和分段模块化施工，均分成A、B、C、D四个模块，将各层的钢筋、埋件与水管在加工厂整合成一个模块，然后吊入核岛相应区域。成功解决了屏蔽冷却水系统与大型预埋件、贯穿件及钢筋的冲突问题，避免了核岛内土建与安装交叉作业中的施工困难，缩短了施工工期，节省了人力物力，保证了施工质量。

## 二、建造特点

### (一) 施工特点

- 安装模块化施工，以核岛厂房屋盖的施工为例：



核岛厂房采用了长方形的大型钢混结构屋盖，以大型钢骨梁为主要受力结构，长44.8米、宽34.5米、厚度达2米。具有结构简单，模块化安装等特点。钢骨梁与周围结构的间隙小于9毫米。

## 二、建造特点

### (一) 施工特点

- 设备接口尺寸精度高，施工质量要求高，安装难度大。
- 设备布置紧凑，工作面窄。
- 土建与安装交叉作业、高空作业多，作业安全风险大。
- 高新技术与设备广泛应用，施工具有极大的挑战性。

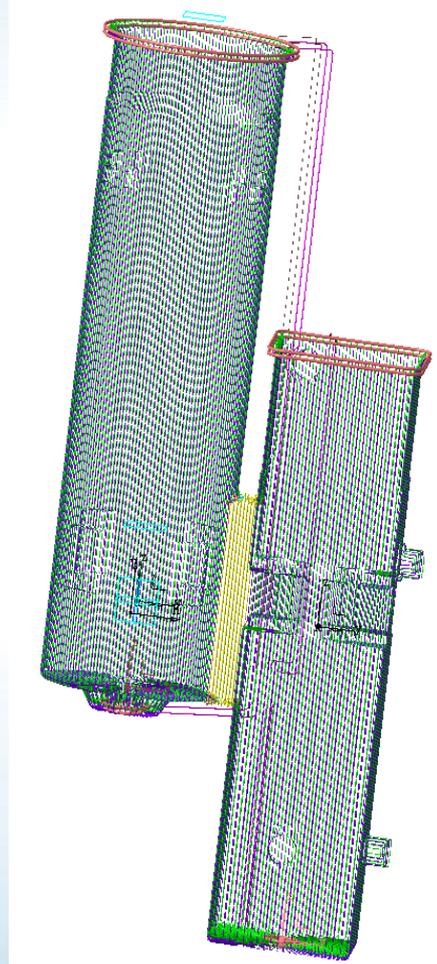
## 二、建造特点

### (二) 施工难点

#### 1、反应堆和蒸汽发生器舱室预埋件的施工

一回路舱室由反应堆舱室和蒸汽发生器舱室组成，两舱室间从反应堆舱室底部开孔用于安装热气导管。两舱室的屏蔽冷却水系统、一回路支撑结构和舱室贯穿件等预埋件的施工特点和难点：

- ① 关键路径上的施工作业周期长；
- ② 涉及机械、管道、电气、仪表、通风等多个专业；
- ③ 作业量大，且与土建交叉作业多；
- ④ 施工场地狭窄，高空作业有高风险；
- ⑤ 屏冷水系统施工区域广，安装技术要求高；
- ⑥ 主设备承重支承、侧向支承预埋精度要求高。



屏蔽冷却水系统图

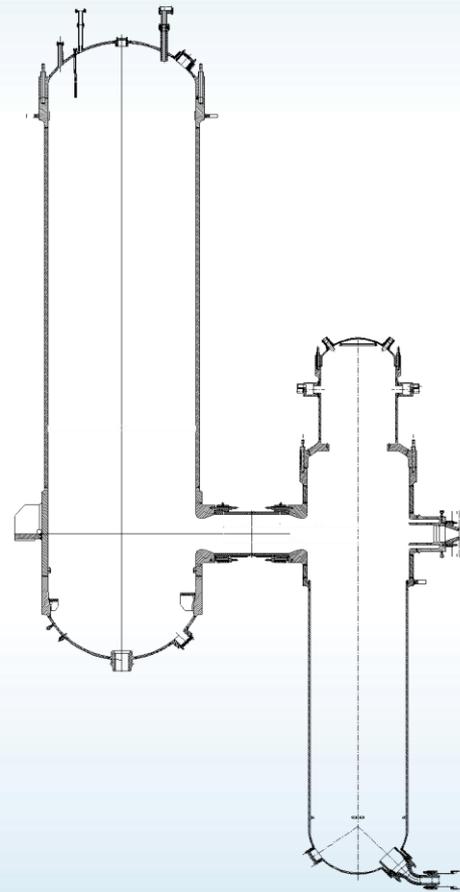
## 二、建造特点

### (二) 施工难点

#### 2、三壳组对的施工

三壳组对是反应堆压力容器（包括堆芯壳）、蒸汽发生器和热气导管壳体的定位和连接。安装要求即要保证在一回路系统整个寿期内及各种运行工况下不发生放射性物质外泄的可靠性，又要保证压力容器中控制棒掉棒的灵敏性和主氦风机主轴的垂直度，施工难点是：

- ① 法兰面水平度、垂直度和同轴度误差的控制和调整；
- ② 三壳就位的精度测量和误差控制。



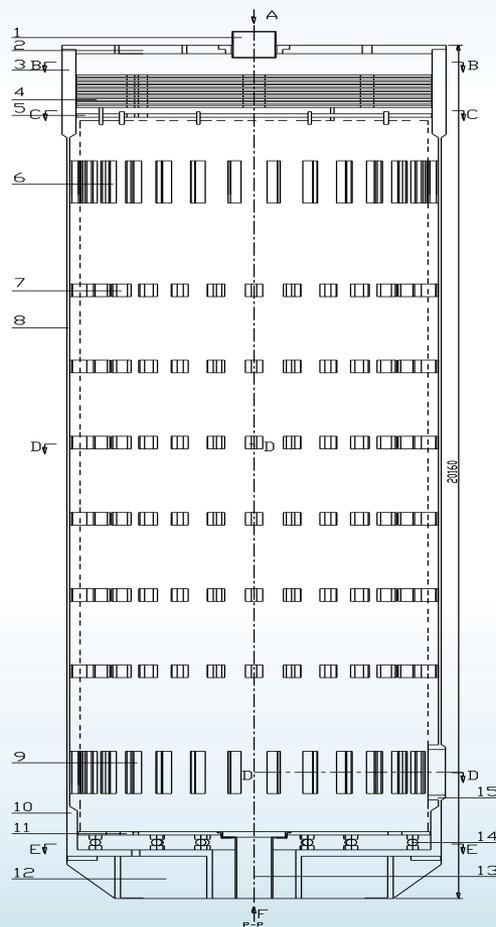
三壳组对简图

## 二、建造特点

### (二) 施工难点

#### 3、堆芯壳的施工

堆芯壳是一个细、长、薄壁筒型结构，侧向刚度较低，堆芯壳下部限位台与导向键间间隙2mm，就位吊装时与压力容器不能发生任何碰撞和划痕。堆芯壳法兰和压力壳法兰的同轴度为1.0mm。堆芯壳上支承板上表面和压力壳法兰平面的平行度为1.0mm；堆芯壳和压力壳热气导管法兰的同轴度为1.0mm。



- 1、屏蔽塞
- 2、上支承板
- 3、堆芯壳法兰
- 4、压紧板
- 5、定位板
- 6、上定位工字钢
- 7、防旋定位键
- 8、堆芯壳筒身
- 9、下定位工字钢
- 10、堆芯壳下加厚段
- 11、下支承板
- 12、堆芯壳底部结构
- 13、金属卸球管
- 14、陶瓷堆内构件支承滚柱
- 15、连接热气导管法兰

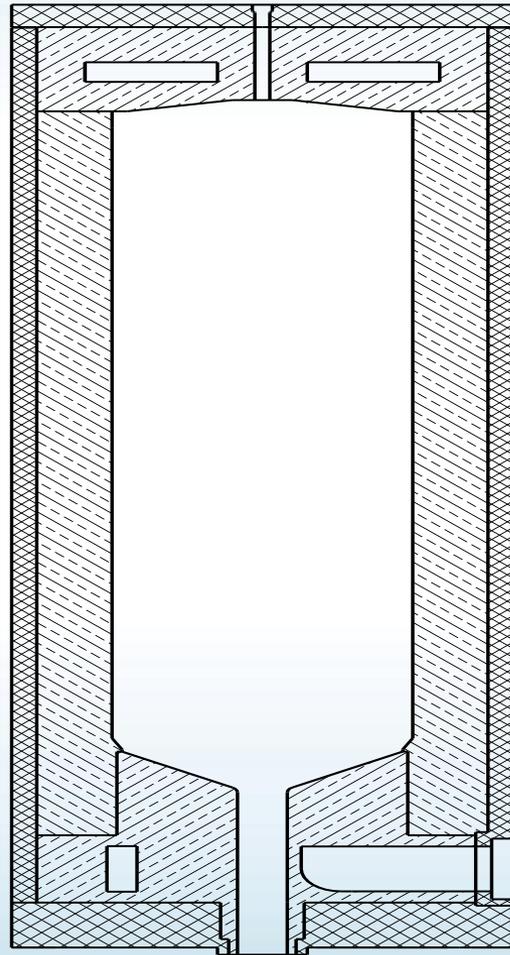
堆芯壳结构图

## 二、建造特点

### (二) 施工难点

#### 4、陶瓷堆内构件的施工

- ① 结构复杂、组装精度要求高，分段分层组装时需要消除多层组装累积的误差。
- ② 部件数量多，陶瓷堆内构件的数量3116块，还有各种套筒、套环，各型号樨、种键等共约两万件，在底反射层和热气室结构内共安放有近万根石墨棒，安装实物工作量大。
- ③ 施工周期长，需长期保持现场的清洁度。



陶瓷堆内构件示意图

### 三、质量特色

石岛湾公司依据国家核安全法律、法规，在工程建造质量控制中以争创国家优质工程金奖为质量管理最高目标，通过新技术研究与应用、同行评估、核安全文化建设等专项活动，不断优化质量管理体系。针对核岛、常规岛主设备施工，成立专项小组，设立监督组，严把施工方案的审核关，以质量计划为核心，严格进行施工全过程质量控制，确保工程质量可控、在控。

各参建单位严格落实工程建设强制性条文，遵照施工工艺质量手册，以施工方案为准绳，发扬工匠精神，实施清洁化、精细化施工，优化示范电站的施工工艺，提升工程建造质量水平。

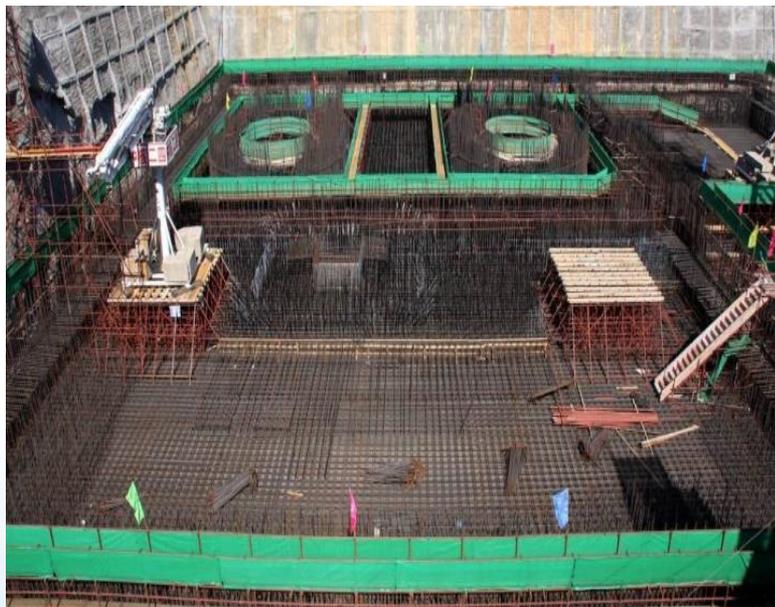


A	CFC	第一次发布	李明	张树刚	刘奎林	2015.04.17
版本	状态	修订 - 评语	编制人	审核人	批准人	批准日期
<p>NEC 中国核建</p> <p>华能山东石岛湾核电厂 高温气冷堆核电站示范工程</p>						
文件编码	H S I E E M T 5 5 0 U J A 0 3 0 4 T L 0 0 1	文件类型	文件分类	技术级别	所属专业	
技术性文件	施工方案	A		机械		
<p>文件名称:</p> <p>压力容器筒体吊装施工方案</p>						
发布单位	中国核工业二三建设有限公司石岛湾高温堆项目部					
编制部门	内部标识码	适用范围				
主设备队	EMT-WP-1001	石岛湾高温堆项目部				
<p>版权说明:</p> <p>此文件内容属中国核工业二三建设有限公司所有，未经同意不得引用、复制、借閱、发表。</p>						

## 三、质量特色

### (一) 土建领域

#### 1、核岛筏板大体积混凝土浇筑和养护技术的成功应用

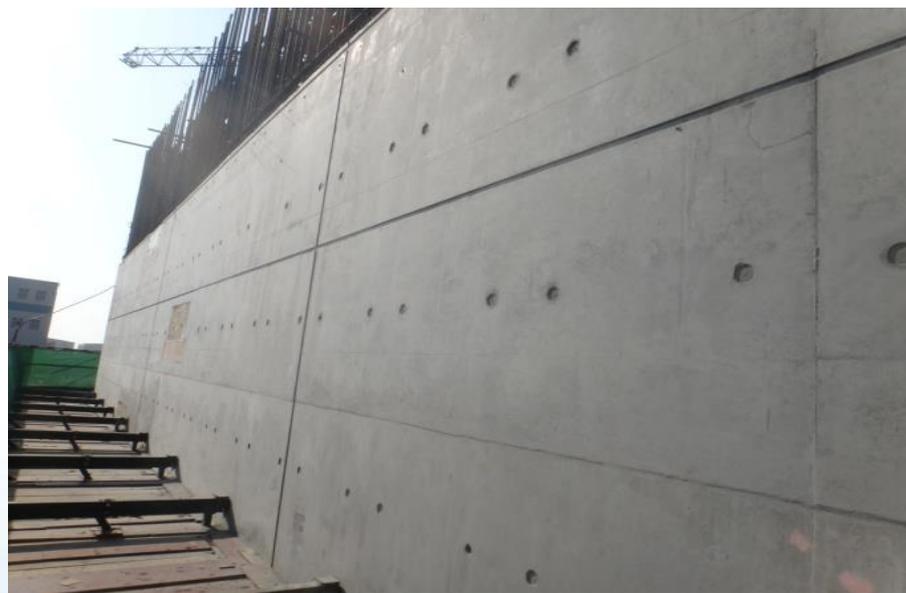


核岛筏板采用了整体跳仓法大体积混凝土浇筑技术和妥善的保温保湿养护技术，有效减少了地基对筏板的约束，防止了收缩裂缝的产生，确保了筏板的浇筑质量。

## 三、质量特色

### (一) 土建领域

#### 2、清水混凝土墙外观质量好



清水混凝土墙水平、竖向明缝条间距均匀，施工缝顺直、接茬平滑。混凝土外观质量、结构尺寸、强度等级均符合设计要求和质量验收标准。

## 三、质量特色

### (一) 土建领域

#### 3、模板体系选择合理、应用得当

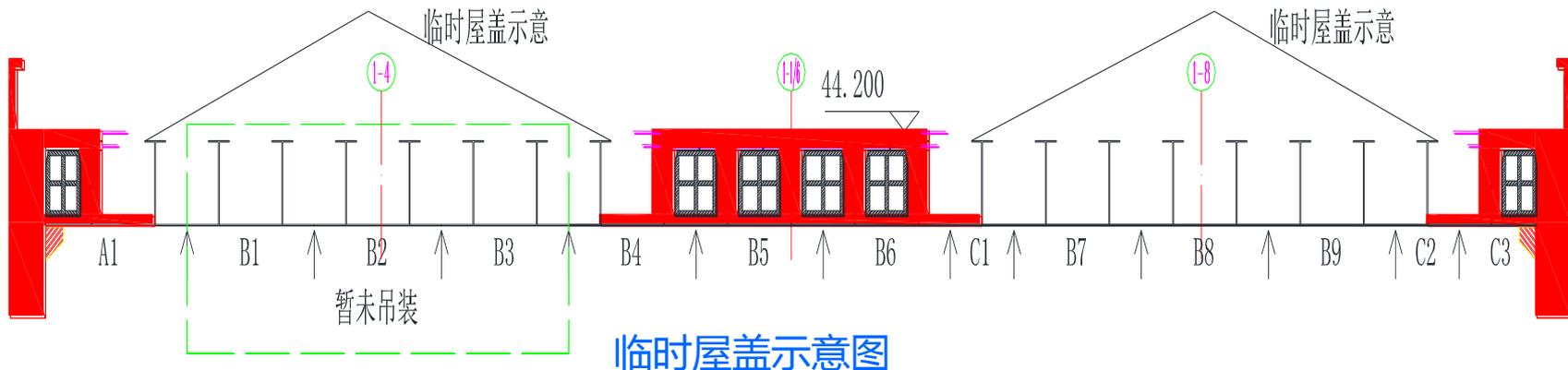


核岛清水混凝土施工模板体系选择合理。面板采用优质维萨模板，遇水不膨胀变形。连接系统的竖向背楞采用厚木工字梁，水平背楞采用双槽钢背楞，面板采用反钉法通过自攻螺丝和连接卡片与木梁固定连接，对拉螺栓用来保证模板体系的稳定性和承载力；模板支设体系选用“外挂架+清水模板”组合。通过外挂架后移装置进行清水模板支设，清水模板与已浇筑墙体內的爬锥锥体通过拉杆进行底部加固，上部通过对拉螺杆进行加固，并通过外挂架斜撑加固模板并调整模板垂直度。

## 三、质量特色

### (一) 土建领域

#### 4、采用临时屋盖封闭反应堆厂房预留吊装孔（开顶法施工）



在反应堆厂房具备正式封闭的条件下，鉴于反应堆压力容器、蒸汽发生器等大件设备分散到场的特点，创造性地实施了开顶法施工法，专门设计了结构简单、容易拆卸的临时屋盖（20吨）代替正式屋盖（170吨）对反应堆厂房正上方的预留吊装孔进行封闭，在保证反应堆厂房土建施工主线工期的同时，又保证了大件设备随到随吊的安装要求，避免了频繁拆装正式屋盖引发的吊装风险、材料变形等安全质量问题，节省了频繁使用大吊车吊装正式屋盖的高昂费用。

## 三、质量特色

### (二) 安装领域

#### 1、反应堆压力容器、蒸汽发生器等主设备吊装一次精准就位



核电史上最大反应堆压力容器（直径约6.4m）穿越最小吊装间隙一次性精准就位。

## 三、质量特色

### (二) 安装领域

#### 2、管道焊接工艺规范



核燃料装卸系统管道焊缝表面无咬边、裂纹、焊瘤、气孔、弧坑等缺陷，焊肉饱满、过渡平滑、外形美观。

## 三、质量特色

### (二) 安装领域

#### 3、管道保温外型美观



容器及管道保温层错缝、压缝搭接规范；表面光滑无凹痕，造型美观。

## 三、质量特色

### (二) 安装领域

#### 4、仪表管布置美观



除盐水仪表管、二回路加药取样管标高、弯管角度一致，布置整齐美观。

## 三、质量特色

### (二) 安装领域

#### 5、电缆敷设排列整齐



DCS盘柜电缆固定牢固、排列整齐、绑扎规范，标识牌字迹清晰、悬挂整齐、美观。



常规岛6.3米层垂直电缆敷设排列整齐、绑扎均匀、固定牢靠。

## 三、质量特色

### (二) 安装领域

#### 6、管道施工清洁化



凝汽器钛管数量多（共6294根），分布密集。钛管隔板和管孔经清洁化处理，管壁内光洁，无锈蚀、毛刺、划痕、油垢、灰尘和杂物；钛管外观整洁。

## 四、科技创新

示范工程对项目管理模式和运作机制进行了有益探索，已形成“政府推动、企业主导、研发牵头、市场运作、合作共赢，产学研用相结合”的科技创新体系，运作有效，有力保障了重大专项的实施，得到了中共中央政治局委员、国务院副总理刘延东及国家科技部、能源局等主管部门的认可。

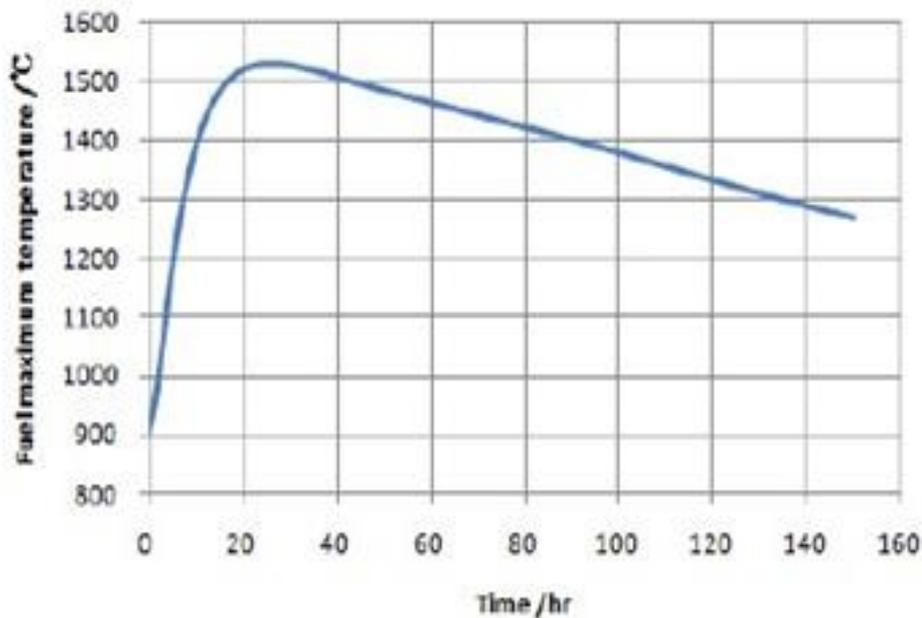


2013年1月13日，中共中央政治局委员、国务院副总理刘延东视察示范电站施工现场

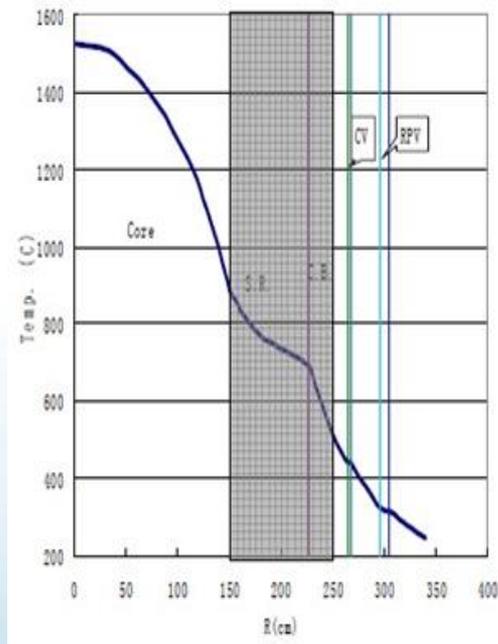
## 四、科技创新

### (一) 反应堆具有固有安全性

- ① 在各种极限情况下燃料元件最高温度均不会超过安全限值1620℃；
- ② 在各种极端自然灾害叠加的情况下堆芯不会熔化、无大量放射性释放；
- ③ 不会对工作人员、公众和环境造成过量放射性危害。



极限失冷失压事故后反应堆温度时间分布

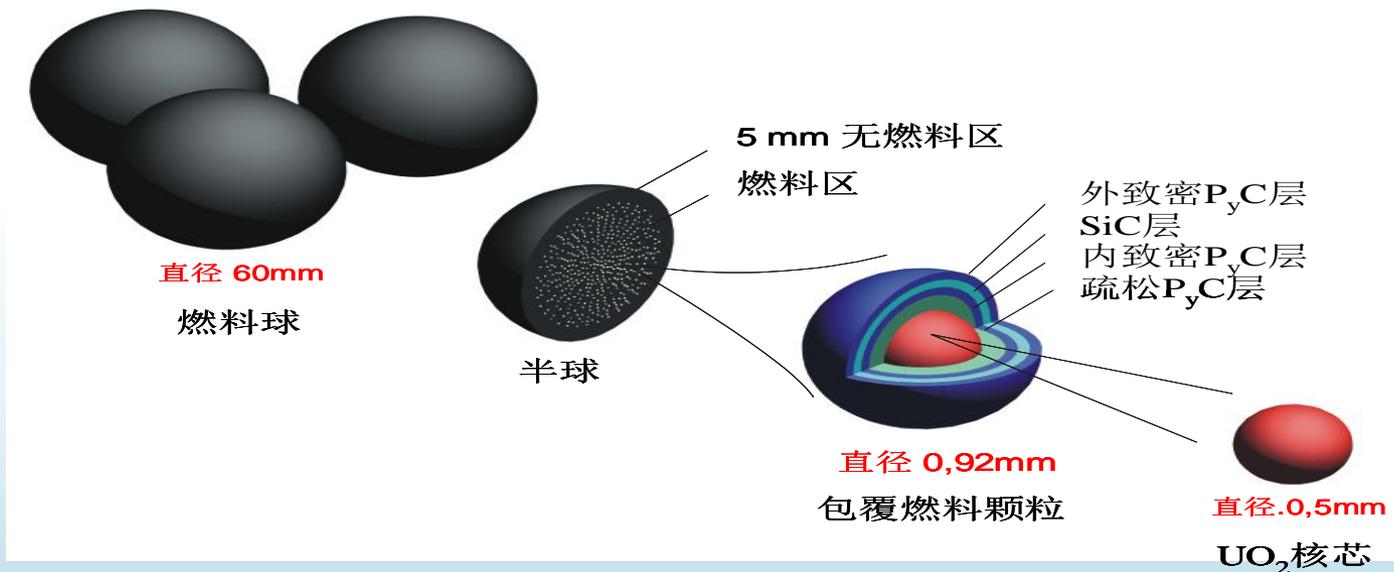


极限失冷失压事故后反应堆温度径向分布

## 四、科技创新

### (二) 安全、可靠的燃料元件

主氦包覆颗粒燃料可包容气态和固体裂变产物，耐高温，数量多，失效概率低、可靠性高，适合于最终地质储存。



## 四、科技创新

### (三) 全球首台主氦风机研制成功

主氦风机是我国具有完全自主知识产权的高温气冷堆核心设备，为全世界首台大功率、高温热态、采用电磁轴承悬浮支撑的立式风机。自2009年以来，石岛湾公司与相关设计、制造方精诚合作，完成了主氦风机结构设计验证、电机电磁设计验证、转子120%超速验证、电磁轴承跌落试验验证、风机挡板最大传递扭矩试验验证、传热验证、200次启停试验验证、主叶轮焊接、转子动力学试验验证和设备出厂性能验收试验，攻克了众多核心关键技术难题。



## 四、科技创新

### （四）设备安装自动找正和调平装置研制成功

主设备自动找正、调平装置包括钢结构梁、拉索系统和液压调整系统，工作原理是依据测量系统实测待安装设备的位置数据，并与设备需调整到位的数据进行对比，分析设备位置的偏差，通过同步控制台控制实现设备多维空间（ $x$ 、 $y$ 、 $z$ 方向位移及绕 $z$ 轴旋转）的精确调整。此装置在HTR-PM示范电站反应堆压力容器筒体、堆芯壳和蒸汽发生器的安装就位中成功应用，保证了一回路主设备的安装质量。



安装自动找正调平装置

## 四、科技创新

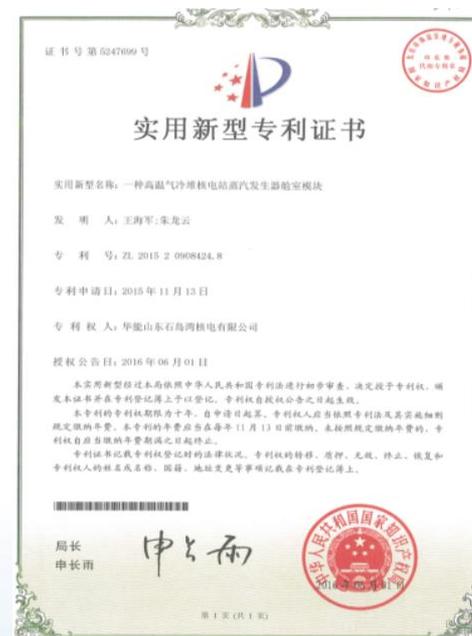
### （五）科技进步

截至目前，石岛湾公司承担国家科技重大专项科研课题10项、华能集团科技项目17项，内容主要涵盖示范工程调试、运行、维修技术研究相关工作。承担国家能源局软科学研究课题1项，华能集团软科学研究课题2项。高温气冷堆石墨粉尘去污技术研究项目已通过技术验收。

获得国家能源局软科学研究优秀成果三等奖1项，核能行业协会科技进步奖二等奖2项、三等奖1项，华能集团软科学研究优秀成果一等奖1项、二等奖1项，华能集团企业管理创新成果优秀奖4项。

## 四、科技创新

### (五) 科技进步 (续)



已申请发明及实用新型专利共52件，其中已授权19件，  
科技成果已初步显现。

## 五、绿色施工

示范电站现场的空气质量优良、自然环境优美、施工现场整洁。为确保环境无污染、施工不扰民、水土无流失，工程建设中采取了一系列节能、节水、保土、降噪和除尘等环保措施：

### （一）绿色施工措施

- 优化施工工序，尽量减少夜间和冬季施工时间；
- 选用节能型电气设备，暖通空调系统采用变频控制，照明系统采用感应控制措施；
- 施工采用低噪声、低振动的施工机具，如采用低噪声混凝土振捣设备；
- 室外埋地管道采取耐腐蚀的管材管件，避免管网漏损；
- 加强危化品管理和应急演练；
- 施工道路进行硬化处理、路面及时洒水；
- 临时堆土集中堆放，并用防尘网覆盖；
- 施工临时占地及时栽种乔木绿化；
- 废水达标排放，固体废弃物按标准及时处理。

## 五、绿色施工

### (二) 环保设施建设和运行情况

#### ■ 崮山环境监测站：

是华能石岛湾公司与国核示范电站共用工程子项。环境 $\gamma$ 辐射监测系统共设8个子站，分布在厂内外35公里范围内，能够实时监测气象环境数据、 $\gamma$ 剂量率，同时完成气溶胶、碘取样采集，实现电站机组正常运行及事故下的环境监测。

#### ■ 施工生活区污水处理站：

已完成竣工环保验收，废水、噪声、大气污染物能稳定达标排放。水污染物执行《城镇污水处理厂污染物综合排放标准》（GB 18918-2002），噪声执行《工业企业厂界环境噪声排放标准》，大气污染物执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》（GB 18918-2002）。



## 六、存在问题

高温气冷堆示范工程主系统设备采用了许多新技术、新材料和新工艺，在安装、调试和试运行期仍需要进行大量的设计验证和设备性能验证工作，以便充分设备暴露系统设备在设计和制造阶段潜在的质量问题，在处理此类问题过程中，会造成许多已安装的设备长期闲置，增加了系统设备维护保养的难度和成本。

### **（一）部分已安装的系统设备因设计不够成熟需要改造**

以2#堆燃料装卸系统为例，该系统于2018年10月完成系统性能试验验证，试验期间发现存在卡球故障，经原因分析需要对系统中的碎球分离器、阻流器等16台设备进行改造，2019年11月25日已完成第一阶段的系统改造工作，目前正在进行系统落球试验，以检验第一阶段的改造效果。第二阶段改造工作主要是增加部分管件，目前设备管件正在制造，预计于2020年9月底完成整个系统的改造。

## 六、存在问题

### **（二）示范电站相关系统设备长期闲置，增加了成品保护成本**

示范电站是产、学、研、用四者紧密结合的工程项目，系统设备从安装完成到核燃料首次装料试运有较长的时间间隔。核岛水系统、汽轮机本体、辅机系统等相关热力系统安装后处于停运状态，大部分设备已经闲置近2年，出现了不少质量问题：譬如受海洋气候的影响，部分设备的地脚螺栓、支座、法兰以及部分管道出现锈蚀；部分露天或半露天存放的设备出现面漆脱落；部分设备柜体内外积尘结垢等等。为了保持示范电站系统设备的健康水平、保证示范电站运行安全可靠，石岛湾公司开展了大量的防腐、去锈、清灰、除湿等成品保护工作，如对长期停运状态的氨净化系统等容器类设备进行充氮保护，对汽轮机采用外加除湿机通热干风干燥保养，内部悬挂腐蚀监测试片；转机定期盘动；静机通干燥压缩空气保养，定期测湿度；油系统定期运转保养等等，增加了成品保护成本。

## 六、存在问题

### （三）示范电站调试期备品备件储备不足

由于设计方未将调试备品备件清单列入设计文件，工程概算中未列支调试期备品备件，签订设备采购合同时未将调试期备品备件纳入供货范围，安装调试期出现的设备故障或缺陷，往往通过挪用生产期的备品备件进行修复，对已经停产的合同设备或其零部件还需要找寻性能匹配的替代品。

鉴于示范电站即将进入调试关键期，且示范电站核岛系统工艺和设备具有自身的独特性，在调试及试运行过程中系统设备出现问题具有不可预估性，因此，有必要储备数量合理的备品备件。目前公司已针对关键敏感设备、安全级设备、长周期设备、进口设备和卡脖子设备制定了备件储备方案，确定了备件采购清单，决定储备足量的备件以保证调试的顺利实施和电站的安全可靠运行。

# 汇报完毕！

