

# 紧凑型聚变能实验装置 环境影响报告书



聚变新能(安徽)有限公司

2024年1月

# 紧凑型聚变能实验装置 环境影响报告书



建设单位名称：聚变新能（安徽）有限公司

建设单位法人代表（签名或盖章）：王康峰

通讯地址：安徽省合肥市庐阳区三十岗乡三国城路与科学院北路交口西北侧

邮政编码：230031

联系人：王凡

电子邮箱：wangfan@ie.ah.cn

联系电话：18355392891

打印编号: 1702878403000

## 编制单位和编制人员情况表

项目编号	y70b4b		
建设项目名称	聚变新能变能实验装置		
建设项目类别	55-172核技术利用建设项目		
环境影响评价文件类型	报告书		
<b>一、建设单位情况</b>			
单位名称 (盖章)	聚变新能(安徽)有限公司		
统一社会信用代码	91340100MA8E3FRW98R		
法定代表人 (盖章)	杨峰		
主要负责人 (签字)	杨峰		
直接负责的主管人员 (签字)	胡思富		
<b>二、编制单位情况</b>			
单位名称 (盖章)	中国原子能科学研究院		
统一社会信用代码	12700000400000300R		
<b>三、编制人员情况</b>			
<b>1. 编制主持人</b>			
姓名	职业资格证书管理号	信用编号	签字
陈峻	06351123506110497	B11009720	陈峻
<b>2. 主要编制人员</b>			
姓名	主要编写内容	信用编号	签字
严琛	审核	B15013174	严琛
陈峻	主持编制	B11009720	陈峻
罗欣	全本	B11009733	罗欣



持证人签名:  
Signature of the Bearer

管理号: 06351123506110497  
File No.

姓名: 陈凌  
Full Name: 陈凌  
性别: 男  
Sex: 男  
出生年月: 1967.07  
Date of Birth: 1967.07  
专业类别: \_\_\_\_\_  
Professional Type: \_\_\_\_\_  
批准日期: 2006年5月14日  
Approval Date: 2006年5月14日

签发单位盖章:  
Issued by: [Red Seal]  
签发日期: 2006年9月11日  
Issued on: 2006年9月11日

本证书由中华人民共和国人力资源和社会保障部  
批准颁发并由人力资源和社会保障部  
统一印制。凡取得该证书者  
即具备从事环境影响评价  
工作的资格。

This is to certify that the bearer of this Certificate  
has passed national examination organized by the  
Chinese government departments and has obtained  
qualification for Environmental Impact Assessment  
Engineer.



Ministry of Personnel  
The People's Republic of China



State Environmental Protection Administration  
The People's Republic of China

编号:  
No.: 0004200

# 目 录

1	概述	1
1.1	项目名称、地点	1
1.2	项目概况	1
1.2.1	建设单位概况	1
1.2.2	项目背景、意义	2
1.2.3	建设规模	3
1.2.4	拟建项目选址合理性分析	13
1.2.5	周围环境概况	22
1.2.6	核技术利用及辐射安全管理现状	23
1.3	编制依据	23
1.3.1	国家法律、法规和规章	23
1.3.2	地方法规及文件	25
1.3.3	技术导则、标准	27
1.3.4	其它文件、资料	29
1.4	评价标准	29
1.4.1	电离辐射评价标准	30
1.4.2	非放射性评价因子及评价标准	33
1.5	评价范围和保护目标	35
1.5.1	电离辐射评价范围和保护目标	35
2	自然环境与社会环境状况	38
2.1	地理位置	38
2.2	自然环境状况	38
2.2.1	地形地貌	38
2.2.2	地质条件	38
2.2.3	水文特征	39
2.2.4	气候	40
2.3	社会环境概况	40
2.3.1	人口	40
2.3.2	经济	41
2.3.3	教育	41
2.3.4	科技	41
2.3.5	医疗	41
2.4	辐射环境质量现状与评价	42
2.4.1	环境天然放射性水平	42
2.4.2	辐射环境现状监测	43
2.4.3	小结	50
2.5	场址适宜性评价	50
3	工程分析与源项	51
3.1	项目规模与基本参数	51
3.1.1	总体项目建设规模	51

3.1.2	3#、4#、5#楼与园区项目设施的依托关系 .....	55
3.1.3	核技术利用内容基本参数 .....	69
3.1.4	装置运行计划 .....	70
3.2	工程设备与工艺分析 .....	70
3.2.1	托卡马克主机 .....	70
3.2.2	真空抽气与加料系统 .....	71
3.2.3	低温系统 .....	76
3.2.4	射频波与中性束注入加热系统 .....	79
3.2.5	电源系统 .....	86
3.2.6	水冷系统 .....	89
3.2.7	诊断与运行控制系统 .....	93
3.2.8	测试包层系统 .....	96
3.2.9	氦燃料循环系统 .....	99
3.2.10	通风系统 .....	112
3.2.11	热室与遥操作维护系统 .....	116
3.2.12	辐射工作人员岗位 .....	123
3.2.13	非放部分 .....	124
3.3	污染源项分析 .....	127
3.3.1	装置污染源项 .....	128
4	辐射安全与防护设施 .....	146
4.1	辐射工作场所分区 .....	146
4.2	人流物流走向 .....	155
4.3	辐射安全联锁系统 .....	157
4.3.1	系统概述 .....	157
4.3.2	主要组成 .....	157
4.4	辐射监测系统 .....	164
4.4.1	系统概述 .....	164
4.4.2	监测方案 .....	164
4.5	其他辐射安全防护措施 .....	183
4.6	辐射安全与防护设施小结 .....	185
4.7	三废治理 .....	186
4.7.1	放射性三废治理 .....	186
4.8	服务期满后的环境保护措施 .....	191
5	环境影响分析 .....	192
5.1	非放射性环境影响分析 .....	192
5.1.1	施工期环境影响分析 .....	192
5.1.2	营运期环境影响分析 .....	195
5.2	正常运行期间辐射环境影响分析 .....	197
5.2.1	屏蔽体外剂量率水平 .....	197
5.2.2	工作人员受照剂量估算 .....	201
5.2.3	公众的受照剂量估算 .....	202
5.3	事故工况辐射环境影响分析 .....	207
5.3.1	事故列表 .....	207

	5.3.2	地震工况安全分析 .....	212
	5.3.3	氙处理中心事故情景及后果分析 .....	241
6		辐射安全管理 .....	244
	6.1	机构与人员 .....	244
	6.1.1	辐射安全与环境保护管理机构及职责 .....	244
	6.1.2	辐射工作人员管理 .....	245
	6.2	辐射安全管理规章制度 .....	246
	6.3	辐射监测 .....	246
	6.3.1	个人剂量监测 .....	246
	6.3.2	辐射工作场所监测 .....	247
	6.3.3	辐射环境监测 .....	247
	6.3.4	竣工环保验收监测 .....	248
	6.4	辐射事故应急 .....	250
	6.5	申请者从事辐射工作能力评价 .....	251
	6.5.1	辐射安全与环境保护管理 .....	251
	6.5.2	辐射工作人员培训 .....	251
	6.5.3	工作场所的安全防护措施 .....	252
	6.5.4	个人防护用品及监测仪器 .....	252
	6.5.5	规章制度 .....	253
	6.5.6	辐射事故应急 .....	253
	6.5.7	放射性三废治理 .....	253
	6.6	环保投资一览表 .....	254
7		利益-代价分析 .....	255
	7.1	利益分析 .....	255
	7.2	代价分析 .....	255
8		结论和建议 .....	257
	8.1	结论 .....	257
	8.1.1	项目工程概况 .....	257
	8.1.2	实践的正当性 .....	257
	8.1.3	选址、布局合理性分析 .....	257
	8.1.4	辐射安全与防护措施 .....	257
	8.1.5	辐射环境影响分析 .....	258
	8.1.6	放射性三废排放和处理 .....	258
	8.1.7	辐射安全管理 .....	258
	8.1.8	公众参与 .....	259
	8.1.9	总结 .....	259
	8.2	建议 .....	259

## 文中图目录

图 1-1 BEST 三维设计图（侧视剖面） .....	3
图 1-2 项目鸟瞰图（东南方向） .....	5
图 1-3 项目总平面示意图 .....	6
图 1-4 项目主要构筑物布局关系图 .....	7
图 1-5 项目地理位置图 .....	8
图 1-6 项目周边关系图 .....	9
图 1-7 本项目与周边片区位置关系图 .....	10
图 1-8 项目用地规划图 .....	11
图 1-9 项目周边现状图 .....	12
图 1-10 董铺水库、大房郢水库水源保护区与本项目位置示意图 .....	15
图 1-11 “三线一单”环境管控单元与本项目位置示意图 .....	16
图 1-12 本项目电离辐射评价范围及保护目标示意图（园区内） .....	36
图 1-13 本项目电离辐射评价范围及保护目标示意图（园区外） .....	37
图 2-1 拟建场址外照射剂量率监测点位图 .....	46
图 2-2 土壤、地表水取样点位图 .....	46
图 3-1 紧凑型聚变能实验装置园区总平面图 .....	51
图 3-2 3#楼内部设备布局平面图 .....	56
图 3-3 3#楼常规冷却水来源、去向示意 .....	57
图 3-4 3#楼供电来源 .....	57
图 3-5 3#楼市政供暖来源示意 .....	58
图 3-6 3#楼排水设置 .....	59
图 3-7 BEST 低温系统结构图 .....	60
图 3-8 3#楼与 4#楼之间管廊连接示意图 .....	60
图 3-9 4#楼市政供暖来源示意 .....	61
图 3-10 户外罐体设备区 .....	61
图 3-11 4#楼电源接入示意图 .....	62
图 3-12 5#楼建筑划分示意图 .....	63
图 3-13 5#楼循环供水来源示意图 .....	64
图 3-14 5#楼电力来源走向示意图 .....	64
图 3-15 5#-4 设备区配置空调系统示意图 .....	65
图 3-16 氙处理中心 HVAC 系统覆盖主机大厅单层工艺设备间示意图 .....	65
图 3-17 5#楼气流路径示意图 .....	66
图 3-18 5#-1B2 层设置排灌室示意图 .....	67
图 3-19 5#-1、5#-2 含氙水处理流程示意图 .....	67
图 3-20 柴油发电机位置示意图 .....	68
图 3-21 固废处理流程示意图 .....	68
图 3-22 5#-2 氙处理中心内部固体部件转出处理示意图 .....	69
图 3-23 BEST 主机主要部件示意图 .....	71
图 3-24 BEST 真空抽气与加料系统结构图 .....	72
图 3-25 等离子体放电真空室真空抽气系统布局图 .....	73
图 3-26 L2 层加料系统分布 .....	74



图 3-27 L1 层加料系统分布 .....	75
图 3-28 B1 层加料系统分布 .....	76
图 3-29 BEST 低温系统构成 .....	77
图 3-30 氦制冷机系统构成 .....	77
图 3-31 低温分配系统流程简图 .....	79
图 3-32 电子回旋共振加热系统组成架构图 .....	80
图 3-33 BEST 电子回旋共振加热系统布局示意 .....	81
图 3-34 离子回旋系统组成图 .....	83
图 3-35 BEST 离子回旋子系统主要架构 .....	84
图 3-36 BEST 离子回旋波源大厅发射机布局示意图 .....	85
图 3-37 中性束注入加热 NNBI 系统构成方框图 .....	86
图 3-38 磁体电源系统结构 .....	87
图 3-39 NNBI 电源系统图 .....	89
图 3-40 BEST 水冷系统组成示意图 .....	90
图 3-41 BEST 水冷系统结构图 .....	91
图 3-42 涉氚排水系统工艺流程图 .....	92
图 3-43 BEST 燃烧等离子体诊断研究路线图 .....	94
图 3-44 BEST CODAC 控制系统组成示意图 .....	94
图 3-45 BEST CODAC 系统结构图 .....	96
图 3-46 BEST COOL/WCCB TBM .....	97
图 3-47 BEST TBM 窗口布置 .....	97
图 3-48 BEST 氚燃料循环工艺流程框图 .....	99
图 3-49 除氚系统总体设计参考示意图 .....	102
图 3-50 BEST 氚处理中心 L1 层各子系统区域 .....	104
图 3-51 BEST 氚处理中心 B1 层各子系统区域 .....	104
图 3-52 BEST 氚处理中心 B2 层各子系统区域 .....	105
图 3-53 除氚系统 L3 层管路连接 .....	106
图 3-54 除氚系统 L2 层管路连接 .....	106
图 3-55 除氚系统 L1 层管路连接 .....	107
图 3-56 除氚系统 B1 层管路连接 .....	107
图 3-57 除氚系统 B2 层管路连接 .....	108
图 3-58 热室除氚系统管道连接 .....	109
图 3-59 氚处理中心主工艺管道连接 .....	110
图 3-60 水去氚化系统与水冷系统管道连接及开孔情况 .....	111
图 3-61 BEST 氚处理中心内部主管道连接示意 .....	112
图 3-62 BEST 通风系统流程图 .....	115
图 3-63 热室系统示意图 .....	116
图 3-64 热室维护对象 .....	118
图 3-65 热室屏蔽防护方案 .....	119
图 3-66 热室屏蔽门方案 .....	120
图 3-67 热室内部分区管道开口 .....	120
图 3-68 废物处理以及存储空间 .....	121
图 3-69 有效存储空间 .....	121

图 3-70 废物存储钢箱型号.....	122
图 3-71 固废转运过程示意图.....	123
图 3-72 制冷机工艺流程及产污环节图.....	126
图 3-73 回收纯化工艺流程及产污环节图.....	127
图 3-74 BEST 主机部件模型几何示意图.....	128
图 3-75 BEST 22.5 度扇段模型 x-z 截面, y=0.....	129
图 3-76 BEST 22.5 度扇段模型 x-y 截面, z=0.....	129
图 3-77 BEST 建筑模型示中子学截面图(x-z 截面, y=0).....	130
图 3-78 BEST 建筑模型中子学截面图(x-y 截面, z=0).....	131
图 3-79 分析评估方法流程.....	132
图 3-80 BEST 200MW 功率下中子通量率云图.....	133
图 3-81 BEST 200MW 功率下光子通量率云图.....	134
图 3-82 BEST 200MW 功率下运行总剂量率云图.....	134
图 4-1 BEST 装置大楼 L1 层辐射分区 .....	147
图 4-2 BEST 装置大楼 L2 层辐射分区 .....	148
图 4-3 BEST 装置大楼 L3 层辐射分区 .....	148
图 4-4 BEST 装置大楼 B1 层辐射分区 .....	149
图 4-5 BEST 装置大楼 B2 层辐射分区 .....	149
图 4-6 BEST 装置大楼 L1 层氡包容分区 .....	151
图 4-7 BEST 装置大楼 L2 层氡包容分区 .....	151
图 4-8 BEST 装置大楼 L3 层氡包容分区 .....	152
图 4-9 BEST 装置大楼 B1 层氡包容分区 .....	152
图 4-10 BEST 装置大楼 B2 层氡包容分区 .....	153
图 4-11 5#楼各楼栋单体货运入口示意图.....	155
图 4-12 5#楼人员进出通道-1 .....	156
图 4-13 5#-3、5#-4 人员通道示意 .....	156
图 4-14 BEST 辐射安全联锁系统结构及逻辑框图.....	159
图 4-15 BEST 辐射安全联锁系统运作流程.....	160
图 4-16 BEST 辐射安全联锁装置布置点位 (L1 层) .....	161
图 4-17 BEST 辐射安全联锁装置布置点位 (L2 层) .....	162
图 4-18 BEST 辐射安全联锁装置布置点位 (L3 层) .....	162
图 4-19 BEST 辐射安全联锁装置布置点位 (B1 层) .....	163
图 4-20 BEST 辐射安全联锁装置布置点位 (B2 层) .....	163
图 4-21 BEST 辐射安全联锁装置布置点位 (控制大厅) .....	164
图 4-22 <sup>3</sup> He 正比计数管中子探测器(左)高压 Ar <sub>2</sub> 伽马电离室探测器(右) .....	165
图 4-23 BEST 装置大楼 L3 层中子伽马剂量率实时监测探测器布置 .....	166
图 4-24 BEST 装置大楼 L2 层中子伽马剂量率实时监测探测器布置 .....	167
图 4-25 BEST 装置大楼 L1 层中子伽马剂量率实时监测探测器布置 .....	167
图 4-26 BEST 装置大楼 B1 层中子伽马剂量率实时监测探测器布置 .....	168
图 4-27 BEST 装置大楼 B1 层中子伽马剂量率实时监测探测器布置 .....	168
图 4-28 外围环境中子伽马剂量率实时监测及氡采样监测点位布置.....	169
图 4-29 便携式中子剂量仪 (左) 便携式伽马剂量仪 (右) .....	170
图 4-30 电子直读式 X/γ (中子、β) 个人剂量报警器.....	171

图 4-31 空气氡连续采集监测仪（左）便携式氡采集监测仪（右） .....	171
图 4-32 表面 $\alpha/\gamma$ 检测仪（左）手脚表面污染监测仪（中）全身污染监测仪（右） .....	172
图 4-33 射频辐射强度检测仪 8GHz（左）工频电磁辐射强度检测仪（右） .....	172
图 4-34 光释光/固体核径迹片（热释光）个人剂量计（左）累积剂量读出器（右） .....	173
图 4-35 自动制样换样高纯锗 $\gamma$ 谱仪 .....	174
图 4-36 气氡、水氡综合采样器（左）低本底液闪 $\beta/\gamma$ 射线谱仪（右） .....	175
图 4-37 空气气溶胶（微粒）自动采样仪（左）样品 $\alpha/\beta$ 辐射监测仪（中）高纯锗 $\gamma$ 射线谱 仪（右） .....	175
图 4-38 氡处理中心 B2 监测位置示意图 .....	181
图 4-39 氡处理中心 B1 监测位置示意图 .....	181
图 4-40 氡处理中心 L1 层监测位置示意图 .....	181
图 4-41 氡处理中心分区图与监测位点图 .....	182
图 4-42 氡处理中心发生氡泄漏事故时的紧急撤离路线图 .....	185
图 4-43 5#楼废气产生及流向示意图 .....	187
图 4-44 热室固废转运过程示意图 .....	190
图 5-1 BEST 关注点所在区域示意图 .....	198
图 5-2 BEST L1 层典型位置示意图(x-y 截面, z=0) .....	198
图 5-3 真空室内部部件至热室转运过程中含氡气的排放路径 .....	211
图 5-4 X\Y 向层间位移角 .....	213
图 5-5 典型框柱和剪力墙位置 .....	214
图 5-6 X\Y 向楼层剪力 .....	215
图 5-7 SSG 软件构件损伤示意图 .....	215
图 5-8 梁性能包络结果统计 .....	216
图 5-9 1~3 层框架梁性能水平 .....	216
图 5-10 4~5 层框架梁性能水平 .....	216
图 5-11 6~8 层框架梁性能水平 .....	217
图 5-12 屋盖层钢梁性能水平 .....	217
图 5-13 1~3 层框架梁损伤 .....	217
图 5-14 4~5 层框架梁损伤 .....	218
图 5-15 6~8 层框架梁损伤 .....	218
图 5-16 柱性能统计 .....	219
图 5-17 1~3 层框架柱性能水平 .....	219
图 5-18 4~5 层框架柱性能水平 .....	220
图 5-19 6~钢屋盖层框架柱性能水平 .....	220
图 5-20 1~3 层框架柱损伤 .....	221
图 5-21 4~5 层框架柱损伤 .....	221
图 5-22 6~钢屋盖层框架柱损伤 .....	222
图 5-23 钢骨柱钢材应变/屈服应变 .....	222
图 5-24 剪力墙性能包络结果统计 .....	223
图 5-25 剪力墙及连梁性能包络结果统计 .....	223
图 5-26 1~3 层剪力墙及连梁性能水平 .....	224
图 5-27 4~5 层剪力墙及连梁性能水平 .....	224
图 5-28 6~8 层剪力墙及连梁性能水平 .....	225

图 5-29 1~3 层剪力墙及连梁损伤 .....	225
图 5-30 4~5 层剪力墙及连梁损伤 .....	226
图 5-31 6~8 层剪力墙及连梁损伤 .....	226
图 5-32 地下一层楼板 X 向设防地震下楼板应力 (MPa) .....	227
图 5-33 地下一层楼板 Y 向设防地震下楼板应力 (MPa) .....	228
图 5-34 一层楼板 X 向设防地震下楼板应力 (MPa) .....	228
图 5-35 一层楼板 Y 向设防地震下楼板应力 (MPa) .....	229
图 5-36 二层楼板 X 向设防地震下楼板应力 (MPa) .....	229
图 5-37 二层楼板 Y 向设防地震下楼板应力 (MPa) .....	230
图 5-38 三层楼板 X 向设防地震下楼板应力 (MPa) .....	230
图 5-39 三层楼板 Y 向设防地震下楼板应力 (MPa) .....	231
图 5-40 三 (1) 层楼板 X 向设防地震下楼板应力 (MPa) .....	231
图 5-41 三 (1) 层楼板 Y 向设防地震下楼板应力 (MPa) .....	232
图 5-42 三 (2) 层楼板 X 向设防地震下楼板应力 (MPa) .....	232
图 5-43 三 (2) 层楼板 Y 向设防地震下楼板应力 (MPa) .....	233
图 5-44 三 (3) 层楼板 X 向设防地震下楼板应力 (MPa) .....	233
图 5-45 三 (3) 层楼板 Y 向设防地震下楼板应力 (MPa) .....	234
图 5-46 屋面 1 楼板 X 向设防地震下楼板应力 (MPa) .....	234
图 5-47 屋面 1 楼板 Y 向设防地震下楼板应力 (MPa) .....	235
图 5-48 BEST 真空室模态分析结果 .....	235
图 5-49 地震工况真空室各部件应力 .....	236
图 5-50 BEST 杜瓦地震工况下的变形及应力分布: (a) 杜瓦变形分布; (b) 杜瓦等效应力分布 .....	239
图 5-51 BEST 杜瓦非线性屈曲分析 .....	240
图 5-52 BEST 杜瓦地震工况下的疲劳损伤分布 .....	240
图 6-1 竣工环保验收工作流程 .....	250

## 文中表目录

表 1-1 本项目建筑主要指标.....	4
表 1-2 本项目射线装置主要参数.....	4
表 1-3 本项目非密封放射性物质主要参数.....	4
表 1-4 “三线一单”符合性分析 .....	16
表 1-5 与《安徽省饮用水水源环境保护条例》的符合性分析.....	18
表 1-6 与《长江经济带发展负面清单指南（试行，2022 版）》的符合性.....	19
表 1-7 与《中华人民共和国水污染防治法》《合肥市饮用水水源保护条例》符合性.....	20
表 1-8 与《中共安徽省委安徽省人民政府关于全面打造水清岸绿产业优美丽长江（安徽）经 济带的实施意见》（升级版）（皖发[2021]19 号文）符合性分析 .....	21
表 1-9 与安徽省生态环境厅关于印发加强高耗能、高排放项目生态环境源头防控的实施意见 的通知（皖环发〔2021〕28 号）符合性 .....	22
表 1-10 本项目辐射工作场所屏蔽体外剂量率控制水平.....	31
表 1-11 非密封放射性物质工作场所分级.....	31
表 1-12 工作场所的放射性表面污染控制水平.....	31
表 1-13 放射性废液中主要核素的 $ALI_{min}$ .....	32
表 1-14 放射性固体废物中相关核素的解控水平.....	33
表 1-15 $O_3$ 和 $NO_x$ 排放限值和室内浓度限值.....	34
表 1-16 废水排放执行标准（单位 mg/L，pH 无量纲） .....	34
表 1-17 噪声执行标准（单位：dB（A）） .....	35
表 1-18 本项目电离辐射评价范围保护目标情况表.....	36
表 2-1 安徽省环境 $\gamma$ 辐射剂量率自动监测结果（nGy/h） .....	42
表 2-2 安徽省土壤中天然放射性核素含量，Bq/kg-干.....	42
表 2-3 安徽省水体中天然放射性核素含量.....	42
表 2-4 监测对象和监测项目.....	43
表 2-5 仪器设备及型号.....	43
表 2-6 本项目拟建场址及周边 $\gamma$ 辐射剂量率和中子周围剂量当量率监测结果.....	47
表 2-7 土壤、地表水、空气样品分析测量结果.....	48
表 3-1 5#楼分层面积表.....	53
表 3-2 3#楼水冷系统厂房分层面积表.....	54
表 3-3 4#楼低温大厅分层面积表.....	55
表 3-4 本项目射线装置主要参数.....	69
表 3-5 本项目非密封放射性物质主要参数.....	69
表 3-6 BEST 氚运行各阶段中子产额上限.....	70
表 3-7 中性束注入加热系统的总体性能参数与设计指标表.....	86
表 3-8 TBM 系统在 BEST 不同运行阶段的氚产生能力 .....	98
表 3-9 热室中主要维护对象.....	117
表 3-10 BEST 主机遥操作维护流程.....	117
表 3-11 BEST 装置的辐射工作人员安排.....	123
表 3-12 非放部分实验用原辅材料情况表.....	124
表 3-13 原辅材料理化性质 .....	124
表 3-14 实验用仪器设备情况表.....	125

表 3-15 BEST 模型主要部件材料.....	129
表 3-16 VDS 尾气氙排放估算结果.....	138
表 3-17 BEST 感生放射性分析用简化辐照方案.....	139
表 3-18 BEST 50MW 1000 秒单脉冲辐照后空气放射性核素模拟结果.....	140
表 3-19 无净化条件下空气感生放射性模拟结果.....	140
表 3-20 偏滤器水在无净化条件下受辐照停机时刻的最大放射性比活度.....	141
表 3-21 偏滤器水在无净化条件下受辐照停机 1 小时的放射性比活度.....	142
表 3-22 BEST 偏滤器活化腐蚀产物总量及放射性水平.....	142
表 3-23 BEST 部分部件体积（未压缩）与质量.....	143
表 3-24 偏滤器在停机不同时间的放射性特征.....	143
表 3-25 中窗口汤姆逊散射系统停机不同时间的放射性特征.....	143
表 3-26 偏滤器靶板在停机不同时间的放射性特征.....	144
表 3-27 偏滤器在停机不同时间的放射性特征.....	144
表 3-28 中窗口汤姆逊散射系统停机不同时间的放射性特征.....	144
表 3-29 偏滤器靶板在停机不同时间的放射性特征.....	145
表 3-30 包层第一壁在停机不同时间的放射性特征.....	145
表 3-31 BEST 主要活化固体部件质量及废物分类.....	145
表 4-1 BEST 辐射工作场所分区表.....	146
表 4-2 BEST 规划的非密封放射性物质工作场所分区.....	150
表 4-3 进入氙处理中心控制区采取的措施.....	154
表 4-4 氙处理中心监测电离室布置情况.....	176
表 4-5 Tokamak 大厅氙监测电离室布置情况.....	178
表 4-6 热室氙监测电离室布置情况.....	180
表 4-7 BEST 辐射安全与防护对标情况.....	185
表 4-8 水去氙化系统氙水储存罐和应急水池的参数.....	188
表 4-9 BEST 主要活化固体部件质量及废物分类.....	190
表 5-1 施工期距施工机械不同距离处的噪声值 单位：dB (A) .....	194
表 5-2 噪声源强表.....	197
表 5-3 BEST 屏蔽体外关注点的模拟计算结果.....	199
表 5-4 工作人员所在关注点的剂量率水平汇总.....	201
表 5-5 热室操作、活化部件/固废转移和氙处理中心工作人员操作位剂量率水平.....	201
表 5-6 装置正常运行期间工作人员受照剂量计算结果.....	202
表 5-7 主要气载流出物排放源项.....	203
表 5-8 装置放射性排风口参数.....	203
表 5-9 各关注点处地面空气浓度计算结果，Bq/m <sup>3</sup> .....	204
表 5-10 剂量转换因子.....	205
表 5-11 空气浸没外照射剂量计算结果，Sv/a.....	205
表 5-12 吸入内照射剂量计算结果，Sv/a.....	206
表 5-13 放射性气体排放所致关注点处公众总受照剂量计算结果，Sv/a.....	206
表 5-14 BEST 初始事件事故列表.....	209
表 5-15 地震作用取值参数.....	212
表 5-16 大震弹塑性层间位移角.....	213
表 5-17 典型剪力墙和框柱大震弹塑性程度和小震反应谱工况位移对比.....	214

表 5-18 316L-BG 许用应力表 .....	237
表 5-19 真空室上各部件应力线性化结果.....	237
表 5-20 BEST 杜瓦地震工况分析载荷设计 .....	238
表 5-21 BEST 杜瓦分析校核标准.....	238
表 5-22 地震工况下 BEST 杜瓦的应力线性化校核结果.....	239
表 6-1 本项目环境监测计划.....	247
表 6-2 本项目辐射环境保护措施及环保投资一览表.....	254

# 1 概述

## 1.1 项目名称、地点

项目名称：紧凑型聚变能实验装置

建设性质：新建

建设地点：安徽省合肥市庐阳区三十岗乡三国城路与科学院北路交口西北侧

建设单位：聚变新能（安徽）有限公司

建设规模：本项目建设内容为紧凑型聚变能实验装置，主要包括 5#楼主机大厅，内含主机、氚处理中心、预装大厅（热室）、控制大厅、磁体电源大厅、波加热电源大厅、NBI 中性束系统电源大厅、诊断大厅，另外还同步建设 3#楼水冷系统厂房、4#楼低温大厅。核技术利用建设内容为使用 I 类射线装置和甲级非密封放射性物质工作场所。

项目投资：总投资为 850592.47 万元（来自项目建议书），环保投资约 8500 万元，占总投资的 1.00%。

## 1.2 项目概况

### 1.2.1 建设单位概况

本项目建设单位为聚变新能（安徽）有限公司（全文简称“聚变新能公司”、“建设单位”）。2023 年 5 月在国家主管部门、中科院、安徽省政府及合肥市政府的大力支持下注册成立，注册地位于中国（安徽）自由贸易试验区合肥市高新区望江西路 900 号中安创谷科技园 A3A4 栋 7 楼 799-5 室，注册资本 500000 万元，营业执照见附件 1。公司是国有资本、科研机构、社会资本共同组建的创新综合体，通过引入市场化机制，鼓励承载国家战略导向的中央企业及社会科技创新型企业积极参与，公司致力于集成国内能源领域科技力量和工程力量，成为国际核聚变商业化突破的开拓者和实践者。

聚变新能公司是国内首家核聚变商业化 AE 公司及商业聚变电站投资公司。公司目



标是核聚变电站建设及商业化推广，成为国际一流核聚变能源高新科技公司。聚变新能公司通过实验装置/示范装置建设实践，打造一支聚变工程技术研发及管理团队，建立技术研发、工程设计、项目管理为主的综合业务体系，服务我国商业聚变电站加速进入市场。

聚变新能公司目前未持有辐射安全许可证，后期将作为建设单位向生态环境部申请本项目辐射安全许可证。

## 1.2.2 项目背景、意义

发展清洁能源是人类必经之路。核聚变能具有资源丰富、无碳排放和安全等突出优点，最有希望彻底解决人类能源问题，是构建清洁低碳、安全高效的能源体系的重要途径之一，可为碳中和的实现做出重大贡献。

经过近几十年的发展，我国磁约束聚变研究实现了从跟跑、并跑到部分领跑的跨越，磁约束核聚变研究总体上已进入国际第一方阵，在长脉冲稳态运行物理、超导磁体工程技术等方面已处于国际领先，并取得了一系列原创性成果，为我国未来独立建设、运行聚变堆奠定了坚实的基础。目前，国家发展改革委已部署了三个聚变研究重大科技基础设施，国家科技部部署了一系列高水平科学研究、聚变工程堆设计和人才培养项目，一支完整的聚变堆设计、建设、科研的队伍已经形成。

然而，在氦氖运行的燃烧等离子体研究领域，我国仅在理论模拟和相关诊断技术方面有所布局，没有能够开展氦氖聚变研究的重要的、自主的研究平台，缺乏氦氖聚变相关物理和关键工程技术方面的积累，制约了我国建造稳态高效磁约束聚变堆，难以实现上述国务院、国家发展改革委、国家能源局提出的聚变能发展战略目标。因此，为了彻底解决制约我国社会和经济发展的能源问题，引领世界的能源变革，实现中华民族的腾飞，必须在核聚变能的科学技术和工程上勇于突破和创新。为此，提出建造紧凑型燃烧等离子体聚变能综合研究系统(Burning plasma Experimental Superconducting Tokamak, 以下简称 BEST, 中文名“夸父启明”), BEST 将采用紧凑高场超导托卡马克技术路线，利用高性能超导磁体、高功率中性束加热、氦氖(DT)聚变燃料等新的技术，率先开展燃烧等离子体前沿物理研究，抢占国际聚变研究制高点，集成验证聚变发电相关工程和技术，在世界上首次演示聚变能发电，加快我国聚变能实用化进程。BEST 建成后将在世

界上首次验证聚变真实燃料环境下功率增益因子  $Q$  (输出功率/输入功率) 大于 1, 率先开展燃烧等离子体物理最前沿的科学研究, 为中国聚变能的发展做出前沿和开创性探索。

2021 年 11 月 6 日, 安徽省生态环境厅向生态环境部提交了《安徽省生态环境厅关于中国聚变能紧凑型燃烧等离子体装置适用射线装置类别的请示》(皖环[2021]78 号)。2021 年 12 月 10 日, 生态环境部向安徽省生态环境厅复函(《关于中国聚变能紧凑型燃烧等离子体装置适用射线装置类别的复函》, 环办辐射函[2021]553 号, 见附件 2), 同意安徽省生态环境厅关于 BEST 及其辐射工作场所参照 I 类射线装置和甲级非密封放射性物质工作场所管理的认定和建议。目前本项目装置名称已由“中国聚变能紧凑型燃烧等离子体装置”变更为“紧凑型聚变能实验装置”, 简称仍为“BEST”, 装置基本参数与皖环[2021]78 号文件中一致。

根据《建设项目环境影响评价分类管理名录》(生态环境部令第 16 号, 2021 年) 以及《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》(生态环境部令第 20 号, 2021 年) 的规定, 本项目 I 类射线装置和甲级非密封放射性物质工作场所环境影响评价文件类别确定为编制环境影响报告书。因此, 中国原子能科学研究院受建设单位的委托, 负责本项目的环评工作(委托书见附件 3)。

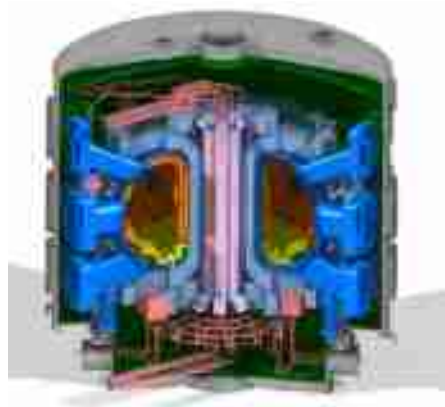


图 1-1 BEST 三维设计图(侧视剖面)

### 1.2.3 建设规模

本项目所在园区的建设已编制环境影响评价文件, 并于 2023 年 9 月 5 日获得合肥市生态环境局颁发的《关于合肥未来大科学城建设投资有限公司紧凑型聚变能实验装置园区项目环境影响报告表审批意见的函》(环建审[2023]7007 号, 见附件 4)。

本报告书的评价内容为紧凑型聚变能实验装置，主要位于5#楼主机大厅，内含主机厅、氚处理中心、预装大厅（热室）、控制大厅、磁体电源大厅、波加热电源大厅、NBI电源大厅、诊断大厅，另外还同步建设3#楼水冷系统厂房、4#楼低温大厅，主要建筑指标见表1-1。

表 1-1 本项目建筑主要指标

序号	名称	地上（下）层数	高度，m	总面积，m <sup>2</sup>	地上建筑面积，m <sup>2</sup>	地下建筑面积，m <sup>2</sup>
1	5#楼主机大厅	3（2）	43.4	75356.97	47081.45	28275.52
2	3#楼水冷系统厂房	3（0）	36	5585.25	5585.25	0
3	4#楼低温大厅	1（1）	32	4949.28	4334.68	614.6

本项目核技术利用建设内容为使用 I 类射线装置和甲级非密封放射性物质工作场所，详见表 1-2、表 1-3。

表 1-2 本项目射线装置主要参数

名称	类别	数量	型号	装置类型	主要工况				用途	工作场所
					聚变功率 (MW)	脉冲长度 (sec)	单个脉冲最大中子产额 (n/pulse)	单个脉冲最大氚消耗量 (g/pulse)		
紧凑型聚变能实验装置 (BEST)	I 类	1 台	自研	磁约束聚变实验装置	50	1000	1.8E+22	0.09	磁约束聚变能实验研究	五号楼主机大厅
					200	10	7.1E+20	0.004		

表 1-3 本项目非密封放射性物质主要参数

核素名称	理化性质	活动种类	实际日最大操作量 (Bq)	日等效最大操作量 (Bq)	年最大消耗量 (Bq)	用途	操作方式	使用场所	贮存方式与地点
氚	低毒	使用	4.07E+16 (<110g)	4.07E+16	4.07E+15 (<11g)	磁约束聚变实验	简单操作	主机厅、氚处理中心、热室	氢同位素采用储气罐、金属储氢床及液氢（低温精馏过程中）方式贮存于五号楼氚处理中心



图 1-2 项目鸟瞰图（东南方向）



图 1-3 项目总平面示意图

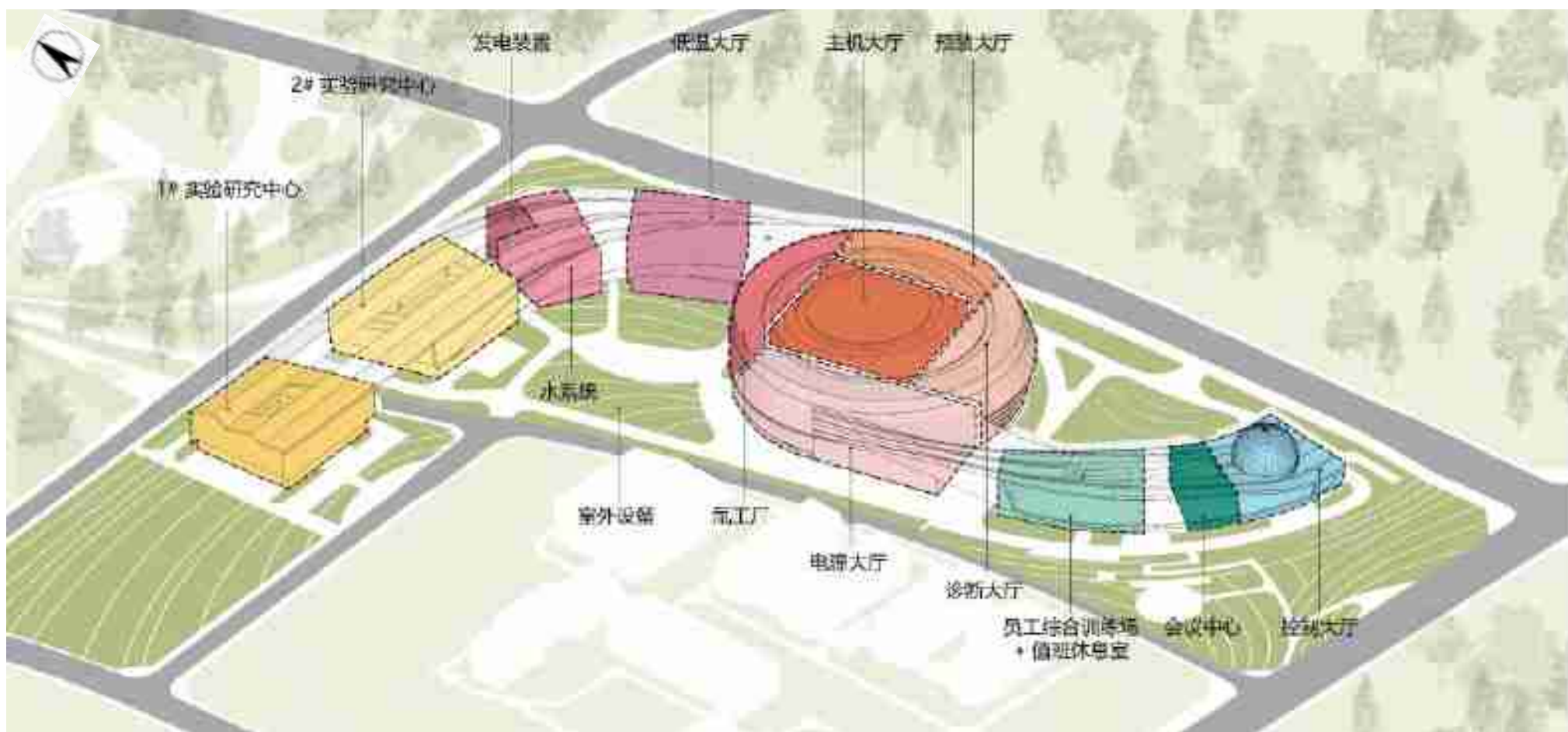


图 1-4 项目主要构筑物布局关系图



图 1-5 项目地理位置图



图 1-6 项目周边关系图





图 1-7 本项目与周边片区位置关系图



图 1-8 项目用地规划图



总用地面积: 约 163094 m<sup>2</sup> (约 244.6 亩)  
 04-01 地块: 约 17175 m<sup>2</sup> (约 25.8 亩)  
 04-03 地块: 约 145919 m<sup>2</sup> (约 218.8 亩)

用地性质: 均为科研用地



用地面积: 17174.91 m<sup>2</sup>  
 容积率 ≤ 1.2  
 建筑密度 ≤ 35%  
 绿化率 ≥ 35%

用地面积: 145919.53 m<sup>2</sup>  
 容积率 ≤ 1.6  
 建筑密度 ≤ 35%  
 绿化率 ≥ 35%

图 1-9 项目周边现状图

## 1.2.4 拟建项目选址合理性分析

### 1.2.4.1 产业政策符合性分析

本项目属于《产业结构调整指导目录》（2021 年本）中“鼓励类”中第六条第 6 项——“同位素、加速器及辐照应用技术开发”，以及第三十一条“科技服务业；国家级工程（技术）研究中心、国家产业创新中心、国家农业高新技术产业示范、国家农业科技园区、国家认定的企业技术中心、国家实验室、国家重点实验室、国家重大科技基础设施、高新技术企业创业服务中心、绿色技术创新基地平台、新产品开发设计中心、科教基础设施、产业集群综合公共服务平台、中试基地、实验基地建设”的范畴。因此，本项目建设符合国家相关产业政策。

另外，根据安徽省节能减排及应对气候变化工作领导小组办公室关于《安徽省节能减排及应对气候变化工作领导小组办公室关于印发安徽省“两高”项目管理目录（试行）的通知》（皖节能【2022】2 号）可知，本项目不属于“两高”项目。

综上所述，项目符合国家产业政策和地方产业政策要求。

### 1.2.4.2 选址符合性分析

#### ①用地规划符合性分析

根据用地规划图（图 1-8），项目所在地为科研用地，符合土地利用总体规划要求。项目建设用地规划许可证见附件 5。批准用地机关为合肥市人民政府，批准用地文号为：合地庐阳经营[2022]272 号。

#### ②环境相容性分析、四至关系相容性分析

经现场勘查，项目现状为空地，项目北侧为聚变堆主机关键系统综合研究设施园区，西侧为合肥综合性国家科学中心能源研究院和合肥滨湖投资控股集团有限公司用地，东侧为农用地，南侧为空地，见图 1-6。

### ③本项目对董铺水库、大房郢水库的影响分析

根据合肥市董铺水库、大房郢水库水源保护区划分方案，项目位于董铺水库饮用水源准保护区内，见图 1-10。项目东侧边界距离二级水源保护线约 30 米，见图 1-8。按照《合肥市饮用水水源保护条例》第十六条规定：“禁止在饮用水水源准保护区新建、扩建对水体污染严重的建设项目；改建建设项目，不得增加排污量”。本项目生活污水通过化粪池处理达标，经市政污水管网进入望塘污水处理厂。望塘污水处理厂服务范围主要包括合肥市黄山路以北、环城西路及亳州路以西的区域以及长丰县岗集镇镇区及工业园区、三十岗、大杨店、蜀山新产业园、城市森林公园、中科院合肥研究院的建设用地，规划服务面积 66km<sup>2</sup>，属于合肥市污水规划系统中的南淝河系统。项目所在区域属于望塘污水处理厂的收水范围，区域污水均纳入望塘污水处理厂。因此，本项目不会对董铺水库、大房郢水库产生影响。

# 合肥市董铺水库、大房郢水库水源保护区划分方案

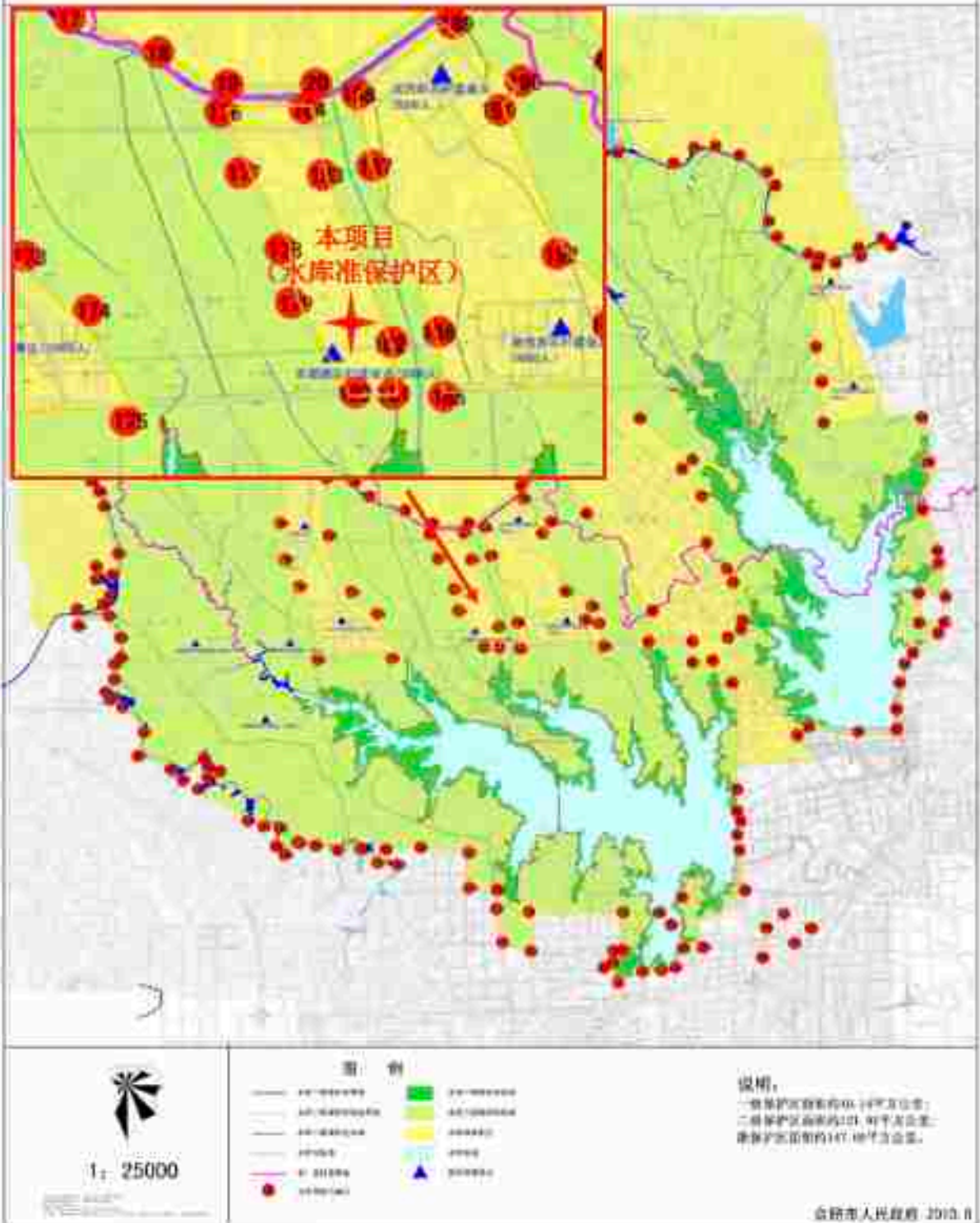


图 1-10 董铺水库、大房郢水库水源保护区与本项目位置示意图

## 1.2.4.3 “三线一单”符合性分析

根据原环境保护部“环评[2016]150号”文《关于以改善环境质量为核心加强环境影响评价管理的通知》、《安徽省人民政府关于加快实施“三线一单”生态环境分区管控的通知》（安徽省人民政府，2020年6月29日）以及《合肥市“三线一单”编制文本》的要求，建设项目选址选线、规模、性质和工艺路线等应与“生态保护红线、环境质量底线、资源利用上线和生态环境准入清单”（以下简称“三线一单”）进行对照，更好地发挥环评制度从源头防范环境污染和生态破坏的作用，加快推进改善环境质量。本项目与“三线一单”的符合性分析见表 1-4。



图 1-11 “三线一单”环境管控单元与本项目位置示意图

表 1-4 “三线一单”符合性分析

分析项目	分析过程	符合性
生态红线	根据《安徽省生态保护红线》其中合肥市生态保护红线分布区域可知，项目不位于自然保护区、森林公园、风景名胜、世界文化自然遗产、地质公园等保护区内，与生态红线相符。	符合
环境质量底线	根据《2022年合肥市环境质量公报》相关数据可知，项目所在地环境空气质量为达标区；根据《合肥市2023年6月水环境质量月报》，南淝河监测结果表明亳州路桥和支流关镇河断面2个断面均为III类水质，水质良好。董铺水库水质达到《地表水环境质量标准》III类水质标准要求；	符合

		大房郢水库水质达到《地表水环境质量标准》Ⅲ类水质标准要求。	
	资源利用上限	根据项目园区环评文件，本项目能源、水、土地等资源消耗符合资源利用上线的要求。	符合
	优先保护单元	该项目所在区域不在合肥市 51 个优先保护单元内，无建设条件限制。	符合
准入清单	《产业结构调整指导目录》(2021 年本)	该项目属于《国家产业结构调整指导目录(2021 年本)》中鼓励类项目	符合
	《限制用地项目目录(2012 年本)》、《禁止用地目录(2012 年本)》	本项目不在国家《限制用地项目目录(2012 年本)》、《禁止用地目录(2012 年本)》中	符合
	《巢湖流域禁止和限制的产业产品目录》	本项目不在《巢湖流域禁止和限制的产业产品目录》中	符合

由上表可知，本项目的建设符合“三线一单”相关要求。

#### 1.2.4.4 “三区三线”符合性分析

“三区三线”是根据城镇空间、农业空间、生态空间三种类型的空间，分别对应划定的城镇开发边界、永久基本农田保护红线、生态保护红线三条控制线。其中“三区”突出主导功能划分，“三线”侧重边界的刚性管控。它是国土空间用途管制的重要内容，也是国土空间用途管制的核心框架。

“三区”内部统筹要素分类，是功能分区和用途分类的基础；“三线”是“三区”内部最核心的刚性要求。空间关系上，“三区”各自包含“三线”。生态空间，包括生态保护红线范围和一般生态空间；农业空间，包括永久基本农田和一般农业空间；城镇空间，包括城镇开发边界内和边界外部分城镇空间。

根据合肥市“三区三线”的划定，本项目不在永久基本农田保护红线、生态保护红线范围内，符合规划要求。



### 1.2.4.5 与《巢湖流域水污染防治条例》的相符性分析

表 1-5 与《巢湖流域水污染防治条例》的相符性分析

相关要求	符合性分析	相符性
第三条：巢湖流域水环境实行三级保护。巢湖湖体，巢湖岸线外延一公里范围内陆域，入湖河道上溯至一公里及沿岸两侧各二百米范围内陆域为一级保护区；巢湖岸线外延一千至三公里范围内陆域，入湖河道上溯至一公里沿岸两侧各二百至一公里范围内陆域为二级保护区；其他地区为三级保护区。巢湖流域水环境一、二、三级保护区的具体范围，由省人民政府确定并公布	根据《安徽省人民政府关于公布巢湖流域水环境保护区范围的通知》（皖政秘(2017)254号），本项目所在地为三级保护区，本项目不属于《巢湖流域禁止和限制的产业、产品目录》中水环境三级保护区内禁止或限制的产业。	符合
直接或者间接向水体排放污染物的，应当按照规定取得排污许可证；城镇污水集中处理设施的运营单位，也应当取得排污许可证	项目生产废水量较少；生活污水经化粪池处理后接入市政污水管网。项目运营前需取得排污许可证。	符合
在巢湖流域新建、改建、扩建直接或者间接向水体排放污染物的建设项目和其他水上设施，应当依法进行环境影响评价。建设项目的环境影响报告书、报告表未依法经有审批权的生态环境主管部门审查或者审查后未予批准的，建设单位不得开工建设	本项目为新建项目，依法进行环境影响评价。建设项目的环境影响报告书未依法经有审批权的生态环境主管部门审查或者审查后未予批准的，不得开工建设。	符合
编制环境影响报告书、环境影响报告表的建设项目，其水污染防治设施经建设单位按照国务院生态环境主管部门规定的标准和程序验收合格，方可投入生产或者使用；未经验收或者验收不合格的，不得投入生产或者使用。不得擅自拆除或者闲置水污染防治设施	本项目仅生活污水经化粪池处理后接入市政污水管网。	符合

### 1.2.4.6 与《安徽省饮用水水源环境保护条例》的符合性分析

表 1-5 与《安徽省饮用水水源环境保护条例》的符合性分析

相关要求	本项目情况	符合性
第十四条 在饮用水水源准保护区内，禁止下列行为：	不属于	符合
（一）新建扩建制药、化工、造纸、制革、印染、染料、炼焦、炼硫、炼砷、炼油、电镀、农药等对水体污染严重的建设项目；	不属于	符合
（二）改建增加排污量的建设项目；	不属于	符合
（三）设置易溶性、有毒有害废弃物暂存和转运站；	不涉及	符合

(四) 施用高毒、高残留农药;	不涉及	符合
(五) 毁林开荒;	不涉及	符合
(六) 法律、法规禁止的其他行为。	不涉及	符合

由上表可知，本项目与《安徽省饮用水水源环境保护条例》相符。

#### 1.2.4.7 与《长江经济带发展负面清单指南（试行，2022版）》符合性分析

表 1-6 与《长江经济带发展负面清单指南（试行，2022版）》的符合性

相关要求	本项目情况	符合性
1.禁止建设不符合全国和省级港口布局规划以及港口总体规划的码头项目，禁止建设不符合《长江干线过江通道布局规划》的过长江通道项目。	不属于	符合
2.禁止在自然保护区核心区、缓冲区的岸线和河段范围内投资建设旅游和生产经营项目。禁止在风景名胜区核心景区的岸线和河段范围内投资建设与风景名胜资源保护无关的项目。	不属于	符合
3.禁止在饮用水水源一级保护区的岸线和河段范围内新建、改建、扩建与供水设施和保护水源无关的项目，以及网箱养殖、畜禽养殖、旅游等可能污染饮用水水体的投资建设项目。禁止在饮用水水源二级保护区的岸线和河段范围内新建、改建、扩建排放污染物的投资建设项目。	不属于	符合
4.禁止在水产种质资源保护区的岸线和河段范围内新建围湖造田、围海造地或围填海等投资建设项目。禁止在国家湿地公园的岸线和河段范围内挖沙、采矿，以及任何不符合主体功能定位的投资建设项目。	不属于	符合
5.禁止违法利用、占用长江流域河湖岸线。禁止在《长江岸线保护和开发利用总体规划》划定的岸线保护区和保留区内投资建设除事关公共安全及公众利益的防洪护岸、河道治理、供水、生态环境保护、航道整治、国家重要基础设施以外的项目。禁止在《全国重要江河湖泊水功能区划》划定的河段及湖泊保护区、保留区内投资建设不利于水资源及自然生态保护的项目。	不属于	符合
6.禁止未经许可在长江干支流及湖泊新设、改设或扩大排污口。	不属于	符合
7.禁止在“一江一口两湖七河”和 322 个水生生物保护区开展生产性捕捞。	不属于	符合
8.禁止在长江干支流、重要湖泊岸线一公里范围内新建、扩建化工园区和化工项目。禁止在长江干流岸线三公里范围内和重要支流岸线一公里范	不属于	符合

围内新建、改建、扩建尾矿库、冶炼渣库和磷石膏库，以提升安全、生态环境保护水平为目的的改建除外。		
9.禁止在合规因区外新建、扩建钢铁、石化、化工、焦化、建材、有色、制浆造纸等高污染项目。	不属于	符合
10.禁止新建、扩建不符合国家石化、现代煤化工等产业布局规划的项目。	不属于	符合
11.禁止新建、扩建法律法规和相关政策明令禁止的落后产能项目。禁止新建、扩建不符合国家产能置换要求的严重过剩产能行业的项目。禁止新建、扩建不符合要求的高耗能高排放项目。	不属于	符合

由上表可知，本项目的建设不属于《长江经济带发展负面清单指南（试行，2022版）》中的禁止项目，符合相关要求。

#### 1.2.4.8 与《中华人民共和国水污染防治法》《合肥市饮用水水源保护条例》符合性分析

表 1-7 与《中华人民共和国水污染防治法》《合肥市饮用水水源保护条例》符合性

相关要求	本项目情况	符合性
《中华人民共和国水污染防治法》中第六十七条禁止在饮用水水源准保护区新建、扩建对水体污染严重的建设项目；改建建设项目，不得增加排污量。	本项目生活污水通过化粪池处理经市政污水管网进入望塘污水处理站处理后再排入南淝河，不会对水体造成严重污染。	符合
《合肥市饮用水水源保护条例》中第十六条禁止在饮用水水源准保护区新建、扩建对水体污染严重的建设项目；改建建设项目，不得增加排污量。	本项目生活污水通过化粪池处理经市政污水管网进入望塘污水处理站处理后再排入南淝河，不会对水体造成严重污染。	符合

由上表可知，本项目的建设符合《中华人民共和国水污染防治法》《合肥市饮用水水源保护条例》的相关要求。

#### 1.2.4.9 与《中共安徽省委安徽省人民政府关于全面打造水清岸绿产业优美丽长江（安徽）经济带的实施意见》（升级版）（皖发[2021]19号文）符合性分析

表 1-8 与《中共安徽省委安徽省人民政府关于全面打造水清岸绿产业优美丽长江（安徽）经济带的实施意见》（升级版）（皖发[2021]19 号文）符合性分析

相关要求	本项目情况	符合性
严控 5 公里范围内新建项目。长江干流岸线 5 公里范围内，全面落实长江岸线功能定位要求，实施严格的化工项目市场准入制度，除提升安全、环保、节能水平，以及质量升级、结构调整的改扩建项目外，严格控制新建煤化工和石油化工等重污染、重化工项目。严禁新建布局重化工园区。合规化工园区内，严禁新批环境基础设施不完善或长期不能稳定运行的企业新建和扩建化工项目。	本项目不在长江干流岸线 5km 范围内。本项目生活污水经市政污水管网进入望塘污水处理站处理后再排入南淝河。污染物能够达标排放。	符合
全面治理“散乱污”企业。	本项目不属于“散乱污”企业	
依法依规推动落后产能退出。以钢铁、煤炭、水泥、平板玻璃等行业为重点，严把能耗、环保、质量、安全、技术等标准，严格常态化执法，促使一批达不到标准和生产不合格产品或淘汰类产能的企业，依法依规关停退出。	本项目不属于落后产能项目	符合
严格控制污染物排放。加快构建市场导向的绿色技术创新体系，采用节能低碳环保技术改造传统产业，推进冶金、化工、印染、有色、建材、电镀、造纸、农副食品加工等行业清洁生产改造，从源头上减少高浓度难降解有机废水、挥发性和持久性有机污染物、重金属等排放量及固体废物产生量。监督土壤污染重点监管单位全面落实土壤污染防治义务，督促关闭搬迁企业落实设备设施拆除及腾退地块土壤污染防治措施，防范土壤污染风险。	本项目严格控制污染物排放。污染物均按要求达标排放。	符合
园区企业污水处理全覆盖。园区工业污水和生活污水全部纳入统一污水管网，实行统一处理、不留死角。企业工业废水在排入园区污水处理厂之前，必须经过预处理且达到园区污水处理厂纳管标准。园区污水集中处理设施和管网全部建成运行。鼓励有条件的园区实施化工企业“一企一管、明管输送、实时监测”，确保化工污水全收集、全处理。	本项目园区设置有完备的污水处理系统。	符合

由上表可知，本项目的建设符合《中共安徽省委安徽省人民政府关于全面打造水清岸绿产业优美丽长江（安徽）经济带的实施意见》（升级版）（皖发〔2021〕19 号文）的相关要求。

#### 1.2.4.10 与《安徽省节能减排及应对气候变化工作领导小组办公室关于印发安徽省“两高”项目管理目录（试行）的通知》皖节能【2022】2号文件符合性分析

根据安徽省节能减排及应对气候变化工作领导小组办公室关于《安徽省节能减排及应对气候变化工作领导小组办公室关于印发安徽省“两高”项目管理目录（试行）的通知》皖节能【2022】2号文件可知，本项目不属于“两高”项目。

#### 1.2.4.11 与《安徽省生态环境厅关于印发加强高耗能、高排放项目生态环境源头防控的实施意见的通知》（皖环发〔2021〕28号）符合性

表 1-9 与安徽省生态环境厅关于印发加强高耗能、高排放项目生态环境源头防控的实施意见的通知（皖环发〔2021〕28号）符合性

相关要求	本项目情况	符合性
三、严格环境准入。各地不得受理钢铁、水泥、电解铝、平板玻璃、铸造等产能严重过剩行业新增产能项目的环评文件；对国家明令淘汰、禁止建设、不符合国家产业政策的项目环评文件，一律不批；沿江各市应按国家推长办《长江经济带发展负面清单指南（试行）》及我省实施细则要求，对合规园区外新建、扩建钢铁、石化、化工、焦化、建材、有色等“两高”项目的环评文件一律不批。新增主要污染物排放量的“两高”项目应按照生态环境部办公厅《关于加强重点行业建设项目区域削减措施监督管理的通知》（环办环评〔2020〕36号）要求，依据区域环境质量改善目标，制定配套区域污染物削减方案，采取有效的污染物区域削减措施，相应的减排措施应在项目投产前完成。	本项目选址安徽省合肥市庐阳区三十岗乡三国城路与科学院北路交口西北侧，根据用地总体规划，项目用地属性地类为科研用地；根据皖节能办〔2022〕2号文，本项目不属于“两高”项目。	符合

由上表可知，本项目的建设符合《安徽省生态环境厅关于印发加强高耗能、高排放项目生态环境源头防控的实施意见的通知》（皖环发〔2021〕28号）的相关要求。

综上所述，本项目的建设符合相关政策和规划的要求。

### 1.2.5 周围环境概况

本项目现状为空地，较为平坦，场地内无污染源及建筑物，北侧为聚变堆主机关键系统综合研究设施园区，西侧为合肥综合性国家科学中心能源研究院和合肥滨湖投资控股集团有限公司用地，东侧为农用地，南侧为空地。项目地理位置见图 1-5，周边环境

图见图 1-6。

### 1.2.6 核技术利用及辐射安全管理现状

本项目的建设单位为聚变新能（安徽）有限公司，该公司此前未从事过核技术利用项目，未申请辐射安全许可证，未涉及核技术利用及辐射安全管理。

## 1.3 编制依据

### 1.3.1 国家法律、法规和规章

- (1) 《中华人民共和国环境保护法》（中华人民共和国主席令第 9 号，2015 年 1 月 1 日施行）；
- (2) 《中华人民共和国环境影响评价法》（全国人民代表大会常务委员会，2018 年 12 月 29 日施行）；
- (3) 《中华人民共和国放射性污染防治法》（中华人民共和国主席令第 6 号，2003 年 10 月 1 日）；
- (4) 《中华人民共和国大气污染防治法》（国家主席[2015]31 号令，2018 年 10 月 26 日修订通过）；
- (5) 《中华人民共和国水污染防治法》（2017 年 6 月 27 日修订，2018 年 1 月 1 日实施）；
- (6) 《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》（2020 年 4 月 29 日修订）；
- (7) 《中华人民共和国土壤污染防治法》（2018 年 8 月 31 日审议通过，2019 年 1 月 1 日起施行）；
- (8) 《中华人民共和国噪声污染防治法》（2022 年 6 月 5 日起施行）；
- (9) 《中华人民共和国水法》（2002 年 10 月 1 日施行，2016 年 7 月 2 日修订）；
- (10) 《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》（国务院令第 709 号，2019 年

- 3月22日修正版);
- (11) 《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》(生态环境部令第20号, 2021年1月4日修订版);
  - (12) 《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》(环境保护部令第18号, 2011年5月1日施行);
  - (13) 《关于发布<射线装置分类>的公告》(环境保护部 国家卫生和计划生育委员会公告 2017年第66号, 2017年12月5日);
  - (14) 《建设项目环境保护管理条例》(国务院令第682号, 2017年10月1日起施行);
  - (15) 《建设项目环境影响评价分类管理名录(2021年版)》(生态环境部令第16号, 2021年1月1日起施行);
  - (16) 《产业结构调整指导目录(2021年本)》(国家发展和改革委员会令第49号, 2021年12月30日);
  - (17) 《建设项目环境影响报告书(表)编制监督管理办法》(生态环境部令第9号, 2019年11月1日);
  - (18) 《关于磁约束聚变实验装置辐射安全管理有关事项的通知》(原环境保护部办公厅, 环办辐射函〔2016〕1670号, 2016年9月20日);
  - (19) 《关于核技术利用辐射安全与防护培训和考核有关事项的公告》(生态环境部公告 2019年第57号, 2019年12月23日);
  - (20) 《部分工业行业淘汰落后生产工艺装备和产品指导目录(2010年本)》(国家工业和信息化部, 工产业[2010]第122号);
  - (21) 《关于发布实施<限制用地项目目录(2012年本)>和<禁止用地项目目录(2012年本)>的通知》(国土资发[2012]98号);
  - (22) 《危险化学品安全管理条例》(国务院第591号令, 2011年12月1日);
  - (23) 《关于切实加强风险防范严格环境影响评价管理的通知》(环发[2012]98号);

- (24) 《环境影响评价公众参与办法》(生态环境部部令第4号,2019年1月1日起执行);
- (25) 《关于发布<环境影响评价公众参与办法>配套文件的公告》(公告2018年第48号,生态环境部,2019年1月1日起执行);
- (26) 《关于印发<建设项目环境影响评价政府信息公开指南(试行)>的通知》(环办[2013]103号);
- (27) 《国务院关于印发大气污染防治行动计划的通知》(国发[2013]37号);
- (28) 《关于认真学习领会贯彻落实〈大气污染防治行动计划〉的通知》(环发[2013]103号);
- (29) 《关于印发环境保护部落实〈大气污染防治行动计划〉实施方案的通知》(环办[2013]118号);
- (30) 《关于落实大气污染防治行动计划严格环境影响评价准入的通知》(环办[2014]30号);
- (31) 《国务院关于印发水污染防治行动计划的通知》(国发[2015]17号);
- (32) 《国务院关于印发土壤污染防治行动计划的通知》(国发[2016]31号);
- (33) 《关于以改善环境质量为核心加强环境影响评价管理的通知》(环环评[2016]150号);
- (34) 《排污许可管理办法(试行)》(2019修订);
- (35) 《市场准入负面清单》(2022年版)。

### 1.3.2 地方法规及文件

- (1) 《安徽省环境保护条例》(2010年11月1日起施行,2018年1月1日修订);
- (2) 《安徽省饮用水水源环境保护条例》(2016年12月1日起施行);



- (3) 《安徽省城镇生活饮用水水源环境保护条例》(2001年7月28日);
- (4) 《安徽省实施<中华人民共和国固体废物污染环境防治法>办法》(2021年9月1日起施行);
- (5) 《安徽省实施<中华人民共和国土地管理法>办法》(2022年5月27日修订,2022年12月1日起施行);
- (6) 《安徽省人民政府贯彻国务院关于落实科学发展观加强环境保护决定的实施意见》(皖政〔2006〕71号,2006年9月);
- (7) 《安徽省实施<中华人民共和国水土保持法>办法》(2015年1月1日起施行);
- (8) 《中共安徽省委安徽省人民政府关于全面打造水清岸绿产业优美丽长江(安徽)经济带的实施意见(升级版)》(皖发[2021]19号);
- (9) 《安徽省人民政府关于发布安徽省生态保护红线的通知》(皖政秘〔2018〕120号);
- (10) 《安徽省建设项目环境监理试点工作实施办法》(环建函[2012]329号,2012年4月);
- (11) 《安徽省环保厅关于加强建设项目环境影响评价及环保竣工验收公众参与工作的通知》(皖环发[2013]91号,2013年10月);
- (12) 《安徽省生态功能区划》(2003年11月);
- (13) 《安徽省主体功能区规划》(皖政〔2013〕82号,2013年12月4日);
- (14) 《安徽省环保厅关于在全省范围内开展建设项目环境监理试点工作的通知》,(2014年1月);
- (15) 《安徽省人民政府关于印发安徽省水污染防治工作方案的通知》(皖政〔2015〕131号,2015年12月29日);
- (16) 《安徽省污染源排放口规范化整治管理办法》(安徽省环境保护厅环法函[2005]114号);

- (17) 《安徽省环保厅关于进一步加强建设项目新增大气主要污染物总量指标管理工作的通知》(皖环发〔2017〕19号);
- (18) 《合肥市大气污染防治条例》(2019年1月1日);
- (19) 《合肥市饮用水水源保护条例》(2021年7月1日);
- (20) 《合肥市区声环境功能区(2020修订)划分方案》;
- (21) 合肥市城乡建设委员会关于印发《合肥市建设工程扬尘污染防治暂行规定》的通知(合建【2015】33号,2015年3月30日);
- (22) 《关于印发落实全面打造水清岸绿产业优美丽长江(安徽)经济带河(湖)长制工作方案的通知》(皖河长办〔2018〕45号)。

### 1.3.3 技术导则、标准

- (1) 《辐射环境保护管理导则 核技术利用建设项目 环境影响评价文件的内容和格式》(HJ 10.1-2016);
- (2) 《环境影响评价技术导则 总纲》(HJ 2.1-2016);
- (3) 《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB 18871-2002);
- (4) 《辐射环境监测技术规范》(HJ 61-2021);
- (5) 《环境 $\gamma$ 辐射剂量率测量技术规范》(HJ 1157-2021);
- (6) 《粒子加速器辐射防护规定》(GB 5172-1985);
- (7) 《操作非密封源的辐射防护规定》(GB 11930-2010);
- (8) 《电离辐射工作场所监测的一般规定》(EJ 381-1989);
- (9) 《职业性外照射个人监测规范》(GBZ 128-2019);
- (10) 《工作场所有害因素职业接触限值化学有害因素》(GBZ 2.1-2019);
- (11) 《放射性废物管理规定》(GB 14500-2002);

- (12) 《可免于辐射防护监管的物料中放射性核素活度浓度》(GB27742-2011);
- (13) 《电磁环境控制限值》(GB 8702-2014);
- (14) 《地表水环境质量标准》(GB3838-2002);
- (15) 《声环境质量标准》(GB3096-2008);
- (16) 《环境空气质量标准》(GB3095-2012);
- (17) 《大气污染物综合排放标准》(GB 16297-1996);
- (18) 《污水综合排放标准》(GB8978-1996);
- (19) 《工业企业厂界环境噪声排放标准》(GB12348-2008);
- (20) 《环境影响评价技术导则大气环境》(HJ 2.2-2018);
- (21) 《环境影响评价技术导则地表水环境》(HJ 2.3-2018);
- (22) 《环境影响评价技术导则声环境》(HJ 2.4-2021);
- (23) 《环境影响评价技术导则生态影响》(HJ 19-2022);
- (24) 《环境影响评价技术导则地下水环境》(HJ 610-2016);
- (25) 《环境影响评价技术导则土壤环境(试行)》(HJ 964-2018);
- (26) 《建设项目环境风险评价技术导则》(HJ 169-2018);
- (27) 《国家危险废物名录》(2021年版);
- (28) 《环境保护综合名录(2017年版)》;
- (29) 《有毒有害大气污染物名录(2018年)》;
- (30) 《有毒有害水污染物名录(第一批)》(生态环境部国家卫生健康委员会公告2019年第28号);
- (31) 《危险化学品重大危险源辨识》(GB18218-2018);
- (32) 《一般工业固体废物贮存和填埋污染控制标准》(GB18599-2020);

- (33) 《危险废物贮存污染控制标准》(GB18597-2023);
- (34) 《危险废物鉴别技术规范》(HJ 298-2019);
- (35) 《固体废物鉴别标准通则》(GB 34330-2017);
- (36) 《危险废物鉴别标准通则》(GB 5085.7-2019);
- (37) 《建设项目危险废物环境影响评价指南》(环保部公告 2017 年第 43 号);
- (38) 《危险废物识别标志设置技术规范》(HJ 1276-2022);
- (39) 《危险废物收集 贮存 运输技术规范》(HJ 2025-2012);
- (40) 《国民经济行业分类》(GB/T4754-2017);
- (41) 《排污单位自行监测技术指南总则》(HJ819-2017);
- (42) 《固定污染源排污许可分类管理名录》(2019 年版);
- (43) 《排污单位环境管理台账及排污许可证执行报告技术规范总则 (试行)》(HJ944-2018);
- (44) 《污染源源强核算技术指南准则》(HJ884-2018);
- (45) 《关于发布计算污染物排放量的排污系数和物料衡算方法的公告》(环境保护部公告 2017 年第 81 号, 2017 年 12 月 28 日)。

#### 1.3.4 其它文件、资料

- (1) 《中国科学院 A 类战略性先导科技专项立项建议书——紧凑型燃烧等离子体聚变能综合研究系统》，2021 年 10 月；
- (2) 《紧凑型聚变能实验装置 (BEST) 项目建议书》，2022 年 7 月；
- (3) 《紧凑型聚变能实验装置园区项目环境影响报告表》，2023 年 9 月。

### 1.4 评价标准

## 1.4.1 电离辐射评价标准

### 1.4.1.1 剂量限值和剂量约束值

#### 1.4.1.1.1 剂量限值

执行《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)规定, 工作人员的  
职业照射和公众照射的剂量限值如下:

##### (1) 职业照射

应对任何工作人员职业照射水平进行控制, 使之不超过下述限值: 1) 审管部门决  
定连续 5 年的年平均有效剂量 (但不可作任何追溯性平均), 20mSv; 2) 任何一年中的  
有效剂量, 50mSv。

##### (2) 公众照射

实践使公众中关键人群组的成员所受到的平均剂量估计值不应超过下述限值: 1)  
年有效剂量, 1mSv; 2) 特殊情况下, 如果 5 个连续年的年平均剂量不超过 1mSv, 则  
某一单一年份的有效剂量可提高到 5mSv。

#### 1.4.1.1.2 剂量约束值

根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002), 参考同类型项目,  
本次评价以 5mSv/a 作为本项目的职业人员剂量约束值 (针对本项目), 以 0.1mSv/a 作  
为公众人员剂量约束值。

事故工况下, 单次工作人员个人剂量约束值为 10mSv, 公众剂量约束值为 1mSv。

#### 1.4.1.2 辐射工作场所屏蔽体外剂量率/剂量控制水平

结合本项目特点并参考同类型项目, 本项目辐射工作场所屏蔽体外剂量率控制水平  
按照表 1-10 执行。

表 1-10 本项目辐射工作场所屏蔽体外剂量率控制水平

分区名称	分区颜色	剂量率控制水平	备注
控制区	红色	$Dr > 2.5\mu\text{Sv/h}$	等离子体放电运行时，较高的辐射水平，人员禁止入内；停机检修维护期间结合现场辐射剂量监测值，以及个人剂量实测值进行人员出入与居留时间控制
监督区	黄色	$0.25\mu\text{Sv/h} < Dr \leq 2.5\mu\text{Sv/h}$	非常低辐射，辐射工作人员无居留限制

#### 1.4.1.3 非密封放射性物质工作场所分级

根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)，非密封放射性物质工作场所按日等效最大操作量的大小进行分级，见表 1-11。

表 1-11 非密封放射性物质工作场所分级

分级	日等效最大操作量, Bq
甲级	$>4 \times 10^9$
乙级	$2 \times 10^7 - 4 \times 10^9$
丙级	豁免活度值以上- $2 \times 10^7$

##### 1.4.1.3.1 表面污染水平

根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)，工作人员体表、内衣、工作服、以及工作场所的设备和地面等表面放射性污染的控制应遵循附录 B 表 B11 所规定的限制要求。详见表 1-12。

表 1-12 工作场所的放射性表面污染控制水平

表面类型		$\beta$ 放射性物质, Bq/cm <sup>2</sup>
工作台、设备、墙壁、地面	控制区	40
	监督区	4
工作服、手套、工作鞋	控制区和监督区	4
手、皮肤、内衣、工作袜		0.4

#### 1.4.1.4 放射性废物管理要求

#### 1.4.1.4.1 放射性废液

本项目可能产生的放射性废液主要包括活化的主机冷却水、氟处理中心贫化氟水和氟操作人员洗涤用水等。本项目废液暂存一定时间后，排放前需进行取样监测。监测结果需满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）中相关核素的排放限值方可排放，其中主要核素氟的排放限值列于下表。

表 1-13 放射性废液中主要核素的  $ALI_{min}$

核素	单次排放限值 $1ALI_{min}$ , Bq	单月排放限值 $10ALI_{min}$ , Bq
$^3H$	4.76E+08	4.76E+09

#### 1.4.1.4.2 放射性固体废物

本项目运行期间可能产生的放射性固体废物主要包括废旧的活化部件如第一壁和热沉、偏滤器第一壁靶板、窗口插件和运维产生的防护器具等。

放射性固体废物的管理按照国际原子能机构《安全标准丛书》第 GSR Part 3 号《国际辐射防护和辐射源安全基本安全标准 一般安全要求第三部分》执行，具体如下：

“对于含有一个以上人工来源放射性核素的放射性物质的解控，根据表 I.2 中给出的水平，解控条件是单个放射性核素的放射性浓度的总和低于导出的该混合物 ( $X_m$ ) 的解控水平， $X_m$ 按下述公式确定：

$$X_m = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{f(i)}{X(i)}}$$

式中：

$f(i)$  是混合物中放射性核素  $i$  占放射性浓度的分数；

$X(i)$  是如表 I.2 给出的放射性核素  $i$  的可适用水平；

$n$ 是存在的放射性核素的数量。”

根据 IAEA 报告，本项目运行期间放射性固体废物中主要相关核素的解控水平列于表 1-14。

表 1-14 放射性固体废物中相关核素的解控水平

核素	放射性浓度, Bq/g
$^3\text{H}$	100
$^7\text{Be}$	10
$^{14}\text{C}$	1
$^{35}\text{S}$	100
$^{38}\text{Cl}$	10
$^{48}\text{V}$	1
$^{51}\text{Cr}$	100
$^{51}\text{Mn}$	10
$^{52}\text{Mn}$	1
$^{54}\text{Mn}$	0.1
$^{55}\text{Fe}$	1000
$^{56}\text{Mn}$	10

备注：未列出的相关核素解控水平按《国际辐射防护和辐射源安全基本安全标准 一般安全要求第三部分》表 I.2 的要求执行。

## 1.4.2 非放射性评价因子及评价标准

### 1.4.2.1 评价因子

①环境空气：SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、CO、O<sub>3</sub>、PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>；

②噪声：连续等效 A 声级；

③水环境：pH 值、化学需氧量、五日生化需氧量、氨氮、总磷、总氮、石油类、阴离子表面活性剂、硫化物、粪大肠菌群。

### 1.4.2.2 评价标准

#### 1.4.2.2.1 废气

本项目 NO<sub>x</sub> 排放限值执行《大气污染物综合排放标准》(GB 16297-1996) 表 2 中的相关要求；室内 O<sub>3</sub> 和 NO<sub>x</sub> 执行《工作场所所有害因素职业接触限值化学有害因素》



(GBZ2.1-2019) 中工作场所空气中化学物质容许浓度限值。具体标准值见表 1-15。

表 1-15 O<sub>3</sub> 和 NO<sub>x</sub> 排放限值和室内浓度限值

大气污染物	排放限值		室内浓度限值	
	最高允许排放浓度, mg/m <sup>3</sup>	最高允许排放速率, kg/h	最高容许浓度, mg/m <sup>3</sup>	时间加权平均容许浓度, mg/m <sup>3</sup>
NO <sub>x</sub>	240	23*	—	5
O <sub>3</sub>	—	—	0.3	—

\*备注：取自 GB 16297-1996《大气污染物综合排放标准》表 2 中排气筒高度 70m、二级的数据。

#### 1.4.2.2.2 废水

项目运营期废水主要为工作人员产生的生活污水, 污染因子为 pH 值、COD、BOD<sub>5</sub>、SS、NH<sub>3</sub>-N、动植物油, 经厂区内化粪池处理后接入市政污水管网。废水排放执行望塘污水处理厂接管标准, 望塘污水处理厂 (I 类) 出水执行《巢湖流域城镇污水处理厂和工业行业主要水污染物排放限值》(DB34/2710-2016), 见表 1-16。

表 1-16 废水排放执行标准 (单位 mg/L, pH 无量纲)

排放口名称	执行标准	污染物指标	单位	标准限值
园区生活污水排口	望塘污水处理厂接管标准	pH	无量纲	6~9
		COD	mg/L	380
		BOD <sub>5</sub>		180
		SS		200
		NH <sub>3</sub> -N		30
		LAS		20
		TP		5
		石油类		20
望塘污水处理厂排口	《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918-2002) 一级标准中 A 标准	pH	无量纲	6-9
		BOD <sub>5</sub>	mg/L	10
		SS		10
		TP		0.5
	《巢湖流域城镇污水处理厂和工业行业主要水污染物排放限值》(DB34/2710-2016) 表 2 标准	石油类		1
		COD	40	
		LAS	/	
		NH <sub>3</sub> -N		2.0 (3.0)

注：括号外数值为水温 >12℃ 时的控制指标，括号内数值为水温 ≤12℃ 时的控制指标。

### 1.4.2.2.3 噪声

本项目施工期噪声执行《建筑施工场界环境噪声排放标准》(GB12523-2011),运营期项目厂界噪声执行《工业企业厂界环境噪声排放标准》(GB12348-2008) 2 类标准,见表 1-17。

表 1-17 噪声执行标准(单位: dB (A))

阶段	标准	昼间	夜间
施工期	《建筑施工场界环境噪声排放标准》(GB12523-2011)	70	55
运营期	《工业企业厂界环境噪声排放标准》(GB12348-2008) 2 类	60	50

## 1.5 评价范围和保护目标

### 1.5.1 电离辐射评价范围和保护目标

#### 1.5.1.1 电离辐射评价范围

本项目内容为使用 I 类射线装置和甲级非密封放射性物质工作场所。本项目主要的辐射环境影响途径为瞬发辐射外照射以及运行期间排入环境的放射性气体对人员造成的辐射影响。根据《辐射环境保护管理导则 核技术利用建设项目 环境影响评价文件的内容和格式》(HJ 10.1-2016)“1.5 节评价范围和保护目标”中的规定,“放射性药物生产及其他非密封放射性物质工作场所项目的评价范围,甲级取半径 500m 的范围”,“放射源和射线装置应用项目的评价范围,通常取装置所在场所实体屏蔽边界外 50m 的范围(无实体边界项目视具体情况而定,应不低于 100m 的范围),对于 I 类放射源或 I 类射线装置的项目可根据环境影响的范围适当扩大”。参照 HJ 10.1-2016 的要求,本项目的电离辐射环境影响评价范围取主机大厅辐射工作场所屏蔽体向外 500m 的范围。

#### 1.5.1.2 电离辐射环境保护目标

本项目辐射环境影响评价范围内不涉及自然保护区、风景名胜和文物古迹等需要特殊保护的环境敏感对象。保护目标以本项目相关的辐射工作人员、场所周围活动的其它

非辐射工作人员以及公众为主，详见图 1-12、图 1-13、表 1-18。

表 1-18 本项目电离辐射评价范围保护目标情况表

位置	方位	距离, m	保护目标所在地	保护目标类型	人数
园区内	5#楼主机大厅内部		控制室、值班室等	职业	165
			安保室、武警岗亭等	公众	40
	北	25~120	4#楼低温大厅	公众	50
	北	95~175	3#楼水冷系统厂房	公众	60
	西北	15~25	7#水泵房	公众	5
	西北	70~95	8#附属设施	公众	5
	西北	130~230	2#实验研究中心 B	公众	300
	西北	210~315	1#实验研究中心 A	公众	300
园区外	南	30~190	6#国际交流中心	公众	450
	北	260~500	聚变堆主机关键系统综合研究设施园区	公众	300
	东	100~500	采摘园	公众	50
	南	320~500	躬耕小筑	公众	50
	西南	60~300	合肥综合性国家科学中心能源研究院	公众	400
		280~480	合肥滨湖投资控股集团有限公司用地	公众	100
	400~500	风景村委会	公众	200	



图 1-12 本项目电离辐射评价范围及保护目标示意图（园区内）



图 1-13 本项目电离辐射评价范围及保护目标示意图（园区外）

## 2 自然环境与社会环境状况

### 2.1 地理位置

本项目位于安徽省合肥市庐阳区三十岗乡三国城路与科学院北路交口西北侧。三十岗乡隶属于安徽省合肥市庐阳区，地处合肥市西北部，董铺水库北岸，东与大杨镇相连，南邻董铺水库与蜀山区井岗镇相望，西与肥西县高刘镇接壤，北隔滁河干渠与长丰县岗集镇毗邻。

### 2.2 自然环境状况

#### 2.2.1 地形地貌

三十岗乡地势南低北高，东低西高，地形为丘陵。最高点海拔 56 米，最低点海拔 29 米。

#### 2.2.2 地质条件

拟建场地一级构造单元属于中朝准地台，二级构造单元为江淮台隆。构造位置处于华北板块南部边缘，南部为大别山造山带，东侧以郟庐断裂带为界，其形成与演化与这两大构造体系密切相关，是两者共同作用下形成的中生代残留盆地。

自第四纪以来，合肥地区的新构造运动明显继承了早期构造运动的特点，并受其严格控制，池河—西山驿断裂以东为相对上升的低山丘陵区，而该断层以西为相对下降的平原区，这是自燕山运动初期就已经形成的地貌格架。地壳表现为大幅度的水平和垂直升降运动，并以振荡性垂直升降运动为主。由于间歇性升降运动，使低山丘陵和分水岭地带继续上升，其两侧相对下沉，形成了逐渐降低的层状地貌带，使流水地质作用加强，河流地质作用和河流地貌发育，合肥地区广泛堆积了第四系松散沉积物。

根据区域地质资料，拟建场地未见活动构造断裂带通过，拟建场地范围内及周边未见崩塌、滑坡、泥石流、采空区等对工程有影响的不良地质作用。在勘察范围内未发现

埋藏的河道、沟浜、墓穴、防空洞、孤石等对工程不利的埋藏物。

### 2.2.3 水文特征

三十岗乡地处丘陵地带，属淮河流域。项目所在地附近水体为南淝河和巢湖。

南淝河是巢湖一级支流，发源于合肥中部的将军岭，毕子店一带，全长 7 公里，其间有四里河、板桥河、廿里河汇入，在施口处流入巢湖，流域面积 1700 平方公里，上游建有董铺、泗水、大官塘等大、中型水库，由于淝河干集的切割及董铺水库的蓄水，自董铺水库到施口 27.8km 河段已无主水源，径流来自降水补给和接纳合肥市 90% 的工业废液和生活污水，基本属渠化河道。市区河段水质自上而下污染逐渐加重。

巢湖是我国五大淡水湖泊之一，属长江下游左岸水系，距合肥市约 15km。巢湖流域面积 13350km<sup>2</sup>，其中巢湖闸以上 9130km<sup>2</sup>，多年平均水位为 8.31m，平均水深 3.06m，水位变化幅度平均为 2.5m，水位为 7.5~7.8m 时湖泊水域面积约 760km<sup>2</sup>。

巢湖沿岸入湖河流有店埠河、南泥河、派河、十五里河、丰乐河、杭埠河、兆河等 33 条水系，主要通过裕溪河与长江进行水交流，因建巢湖闸和裕溪河闸，巢湖由原来的过水性河流性湖泊变成了受人工控制的半封闭、封闭式湖泊，其水域的水基本上不与长江水交流。

地表水环境保护目标基本情况：

(1) 淝河干渠：淝河干渠是集农业灌溉、城市防洪、城市供水、旅游观光于一体的大型水利工程。沟通江淮两水系，横跨合肥市中部全境，西起肥西县新民坝，劈将军岭穿越江淮分水岭，沿分水岭南绕肥西县、长丰县、庐阳区、瑶海区、肥东县曲折东流，经淝河注入长江，全长 100.61 km。

(2) 董铺水库：董铺水库位于安徽省合肥市西北近郊，距市中心仅 7 公里，巢湖支流南淝河上游，大坝坐落在二环路旁，是一座以合肥城市防洪为主，结合城市供水、郊区农菜灌溉及发展水产养殖等综合利用的大型水库。

董铺水库集水面积 207.5 平方公里。1956 年建库时，设计总库容 1.73 亿立方米。1978 年加高加固后，提高到 2.42 亿立方米。

(3) 南淝河(纳污水体): 南淝河, 古称施水, 长江流域巢湖的支流。发源于合肥市西北部江淮分水岭东南侧, 跨蜀山区、长丰县两地交界处高刘镇岗北村何老家村民组西北侧的红石桥。经鸡鸣山, 向东南流入董铺水库, 穿合肥城区, 再转向东南流经合肥市包河区和肥东县边界, 于施口注入巢湖。南淝河全长 70 公里, 流域面积 1700 平方公里。

(4) 大房郢水库: 大房郢水库位于安徽省合肥市庐阳区杏花村街道境内, 在南淝河支流四里河上, 是庐阳区标志性民生工程。

2001 年 12 月 29 日开始动工修建, 2002 年 10 月实现河道截流, 2003 年底通过阶段验收并下闸蓄水, 2004 年大房郢水库与董铺水库实现连通, 是以防洪为主, 结合城市供水的大型水库。

## 2.2.4 气候

庐阳区境地处中纬, 东距海洋仅 450 千米, 受海洋影响较大, 属北亚热带季风气候。气候温润, 四季分明, 春季天气多变、冷暖无常, 初夏多梅雨, 盛夏多炎热, 秋季降温快, 冬季干冷, 雨雪较少。一年四季冬季最长, 夏季次之, 春季最短, 日照充足, 光能资源丰富。根据气象部门历年资料分析表明, 庐阳区域年平均气温 15.8℃, 最热月(7 月)平均气温 28.3℃, 极端最高气温 41.0℃, 最冷月(1 月)平均气温 2.1℃, 极端最低气温-2.6℃。年均日照时数 2218 小时, 平均气压 1012.5 百帕。年均蒸发量 1514.7 毫米, 年均相对湿度 76%。冬、秋季节风向以东北偏南为主, 常年主导风向为东北偏东, 年平均风速 2.7 米/秒, 静风频率 18%, 全年大风(8 级以上)日数 10.6 天。年均农耕期 336 天, 无霜期 226~230 天, 冰冻期 80 天。年降雨量适中, 年均降水量 988.4 毫米, 最大年降水量 1541.9 毫米, 最小年降水量 557.3 毫米, 但分配不均匀, 夏季暴雨较多, 占年降水量 42%, 春秋次之, 冬季降水最少, 仅占年降水量 11%, 季风气候显著, 旱、涝灾害频繁。

## 2.3 社会环境概况

### 2.3.1 人口

2021年，庐阳区常住人口70.3万人，比上年增加0.6万人，城镇化率99.33%。2021年，庐阳区户籍人口53.64万人。少数民族37个，户籍少数民族约0.79万人，少数民族流动人口约0.57万人。

### 2.3.2 经济

2021年，庐阳区地区生产总值1233.48亿元，按可比价格计算，比上年增长7.1%。其中，第一产业增加值1.41亿元，下降0.7%；第二产业增加值231.06亿元，增长6.7%；第三产业增加值1001.02亿元，增长7.2%。三次产业结构为0.1:18.7:81.2。其中，主导产业金融业增加值增长6.0%，占全市金融业增加值比重超三成，拉动全区GDP增长1.7%。

### 2.3.3 教育

庐阳区驻有：安徽农业大学、合肥滨湖职业技术学院、合肥工业大学、安徽中医药大学、合肥经济技术职业学院、安徽中澳科技职业学院、安徽工商职业学院。

截至2021年，庐阳区共有39所中小学，其中高中1所、初中11所13个校区、小学27所38个校区，高中在校学生2370人、初中在校学生21166人，小学在校学生57946人，教师总数5199人（在职）。

### 2.3.4 科技

2021年，庐阳区成功认定国家级高新技术企业107家，累计总数228家，增长35.7%；技术合同交易额45.89亿元，增长64.5%；引进高层次科技人才团队6个；新登记科技成果270项，就地转化科技成果150项。

### 2.3.5 医疗

截至2021年，庐阳区共有医疗卫生机构（含村卫生室）284个，其中医院24个、卫生院1个、妇幼保健院（所、站）4个、疾病预防控制中心和专科疾病防治机构3个、社区卫生服务中心（站）26个。卫生机构床位数10960张，其中医院、卫生院床位9234张。



卫生技术人员 14308 人，其中执业（助理）医师 6214 人、注册护士 6828 人。

## 2.4 辐射环境质量现状与评价

### 2.4.1 环境天然放射性水平

#### 2.4.1.1 天然外照射水平

根据《2022 年全国辐射环境质量报告》（生态环境部，2023 年 7 月），安徽省环境  $\gamma$  辐射剂量率自动监测结果列于表 2-1。

表 2-1 安徽省环境  $\gamma$  辐射剂量率自动监测结果（nGy/h）

区域	年均值范围
安徽	57.5~77.6
备注：自动测量结果包含仪器宇宙射线响应。	

#### 2.4.1.2 土壤中天然放射性水平

根据《2022 年全国辐射环境质量报告》（生态环境部，2023 年 7 月），安徽省土壤中天然放射性核素含量列于表 2-2。

表 2-2 安徽省土壤中天然放射性核素含量，Bq/kg-干

监测项目	范围
$^{238}\text{U}$	28~59
$^{232}\text{Th}$	46~69
$^{226}\text{Ra}$	25~42
$^{137}\text{Cs}$	0.93~2.8
$^{90}\text{Sr}$	0.22~1.2

#### 2.4.1.3 水体中天然放射性水平

根据《安徽省水体中天然放射性核素浓度调查》（陈淑萍等,辐射防护,1991,11(4):295-300），将安徽省水体中天然放射性核素含量列于表 2-3。

表 2-3 安徽省水体中天然放射性核素含量

水体类型	U, $\mu\text{g/L}$		Th, $\mu\text{g/L}$		$^{226}\text{Ra}$ , mBq/L		$^{40}\text{K}$ , mBq/L	
	范围	均值	范围	均值	范围	均值	范围	均值

江河	0.08~3.30	0.63	<0.03~0.37	0.13	1.9~11.4	4.9	18.9~212	67.6
湖泊	0.05~2.97	0.27	<0.03~0.27	0.14	1.8~18.7	3.3	8.9~192	41.2
水库	<0.02~0.39	0.06	<0.03~0.32	0.05	1.5~6.1	3.7	18.2~246	35.9
泉水	<0.02~1.88	0.76	<0.03~0.22	0.04	1.7~267	26.8	7.0~358	92.3
农村井水	0.03~14.6	2.62	<0.03~0.20	0.05	<0.6~16.6	4.7	8.9~1845	184
自来水	0.03~1.29	0.27	<0.03~0.09	0.07	<0.6~4.6	2.7	21.3~88.6	48.3

## 2.4.2 辐射环境现状监测

2023年8月,中国原子能科学研究院辐射监测与评价实验室(CMA:170012184003)对项目拟建场址外照射及周围环境的土壤、地表水及空气进行了监测。

### 2.4.2.1 监测内容

参照《辐射环境监测技术规范》(HJ 61-2021),根据本项目主要辐射污染因子的类别和特征,本次辐射环境现状调查选取的监测对象为外照射、土壤、地表水和空气。本次辐射环境现状监测对象和监测项目见表 2-4。

本项目射线装置运行期间的辐射场为中子和 $\gamma$ 辐射混合场,因此外照射监测内容包括 $\gamma$ 辐射剂量率和中子剂量当量率。

本项目装置运行期间,贯穿射线装置底板屏蔽体的次级辐射可能会引起底板周围土壤的活化。因此本次辐射环境现状调查中,对项目所在地土壤及地表水中相关核素的活度浓度进行了分析。此外,本项目涉及氡,因此也检测了空气中氡的活度浓度。

表 2-4 监测对象和监测项目

序号	监测对象	监测项目
1	外照射	环境地表 $\gamma$ 辐射空气吸收剂量率
		中子周围剂量当量率
2	土壤	$^3\text{H}$ 、 $^7\text{Be}$ 、 $^{22}\text{Na}$ 、 $^{238}\text{U}$ 、 $^{232}\text{Th}$ 、 $^{226}\text{Ra}$ 、总 $\alpha$ 、总 $\beta$ 活度浓度
3	地表水	$^3\text{H}$ 、 $^7\text{Be}$ 、 $^{22}\text{Na}$ 、总 $\alpha$ 、总 $\beta$ 活度浓度
4	空气	$^3\text{H}$ 、 $^7\text{Be}$ 活度浓度

### 2.4.2.2 监测设备

本次监测使用的仪器设备详见表 2-5,仪器均在检定有效期内。

表 2-5 仪器设备及型号

仪器名称	型号	出厂编号	主要技术性能指标	检定有效日期
辐射测量仪	FH40G+ FHZ672 E-10	023290 +0700	测量范围： 10nGy/h~100μGy/h； 能量范围：48keV~6MeV； 相对响应之差：<±15%。 校准因子 1.14	2024 年 1 月 10 日
中子周围剂量当量 率仪	LB123+LB6411	178982- 4092 +1501	测量范围：热中子 ~20MeV； 校准因子 1.1	2024 年 1 月 2 日
高纯锗 γ 谱仪	BE3830P	13490	分辨力 3keV 相对误差≤10.0%	2025 年 3 月 22 日
液闪谱仪	Quantulus 1220	2200266	相对误差≤4.0% 短期稳定性 0.1% 重复性 0.4%	2024 年 10 月 23 日

### 2.4.2.3 监测方法

γ 辐射剂量率和中子周围剂量当量率：采用便携式监测仪表，以定点的测量方式进行。监测时，便携式监测仪表离地 1m 高，每点测量 4 次，每次间隔 5 秒钟，取平均值。

土样放射性分析：在取样点位采集土壤表层样品，使用土壤采集器，在 10×10m<sup>2</sup> 范围内，采用梅花五点法采集，条件不具备时用蛇型布样采集，每点采 10×10cm<sup>2</sup> 的表层土样（1~5cm），在现场充分混合，去除石头、草根等杂物后取 3kg 装入双层聚乙烯塑料袋内保存。土样送实验室开展放射性分析。

水样放射性分析：样品容器选用聚乙烯塑料桶（取 <sup>3</sup>H 样时应采用硬质玻璃容器）。采集工具先用洗涤剂除去油污、用自来水冲洗干净，再用 10%硝酸或者盐酸洗刷，用自来水冲洗干净后使用。往盛水容器中按 10mL 酸/L 水样加入浓 HNO<sub>3</sub> 使水样 pH 为 1.5 左右，避免器壁对放射性的吸附。（监测 <sup>3</sup>H 的水样品不能加酸）。样品送实验室开展放射性分析。

空气中氡活度浓度分析：使用硅胶悬挂法采集，即采用直径 5cm、长 50cm 左右的硬质玻璃或硬质塑料管中，填充非常干燥的硅胶（1.98~2.36mm 粒度，称出其重量），上下端塞以石英棉将其固定。使空气通过该管一定时间，把水分捕集在硅胶上。硅胶取回后用玻璃瓶保存后运回实验室进行分析。

空气中核素活度浓度：气溶胶样品采集使用崂应 2031 型 TSP 大流量或其他种类大流量空气采样器，滤材选用对直径 0.5 μm 粒子捕集效率 99.95% 以上的 TD/G-99B 聚丙

烯滤膜（可完全灰化）。采样器布设在开阔的平地上，应避免选择在异常微气象情况或其他由于人为因素的影响距离，采样口高出基础面 1.5m，进气口和出气口之间有一定的距离，取样流量在取样过程中要保持稳定，在正常运行和预期的滤纸负荷变化范围内，流量变化大于 5%时，及时更换滤纸。取样量至少 10000m<sup>3</sup>（空气取样体积换算为标准状态下的取样空气体积）。滤纸可把载尘面向里折叠成较小尺寸，用塑料膜包好密封。详细记录样品采集信息（温湿度、气压、采样体积等），并在样品袋上注明样品编号，以便样品交接。样品送实验室开展放射性分析。

#### **2.4.2.4 质量保证措施**

- (1) 监测单位具备所监测项目的资质；
- (2) 合理布设监测点位，保证各监测点位布设的科学性和可比性；
- (3) 监测方法采用国家相关标准，监测人员经考核并持有合格证书上岗；
- (4) 监测仪器每年定期经计量部门检定，检定合格后方可使用；
- (5) 每次测量前、后均检查仪器的工作状态是否正常；
- (6) 由专业人员按操作规程操作仪器，并做好记录；
- (7) 监测报告严格实行三级审核制度，经过校验、审核，最后由技术总负责审定。

#### **2.4.2.5 监测点位**

经现场实地考察，在拟建场址及周围环境选取了若干监测取样点位，见图 2-1、图 2-2。



图例 ①  $\gamma$  辐射剂量率和中子周围剂量当量率监测点位

图 2-1 拟建场址外照射剂量率监测点位图



图例  $\triangle$  1 地表土取样点  $\triangle$  2 气溶胶和空气中氡取样点

$\square$  1 地表水取样点

图 2-2 土壤、地表水取样点位图

## 2.4.2.6 监测结果与评价

### 2.4.2.6.1 外照射剂量率

本项目拟建场址及周围环境 $\gamma$ 辐射剂量率和中子周围剂量当量率监测结果见表 2-6。

表 2-6 本项目拟建场址及周边 $\gamma$ 辐射剂量率和中子周围剂量当量率监测结果

监测 点位	监测点位	GPS	$\gamma^*$ nGy/h	n $\mu$ Sv/h
1	拟建西场址	E117.1580167 N31.9342481	64.4±1.1	<LLDn
2		E117.1592834 N31.9339723	63.4±2.0	<LLDn
3		E117.1591666 N31.9336352	67.3±2.5	<LLDn
4		E117.1588342 N31.9333058	64.3±1.5	<LLDn
5		E117.1595888 N31.9333058	66.0±1.8	<LLDn
6	拟建东场址	E117.1605140 N31.9338957	65.5±1.8	<LLDn
7		E117.1617088 N31.9340259	68.8±0.7	<LLDn
8		E117.1614303 N31.9328615	67.2±1.2	<LLDn
9		E117.1612596 N31.9313446	68.7±1.3	<LLDn
10		E117.1628945 N31.9316280	67.8±0.7	<LLDn
11		E117.1625352 N31.9303563	69.1±0.7	<LLDn
12		E117.1619244 N31.9295672	66.7±1.9	<LLDn
13		E117.1633527 N31.9294139	65.6±0.9	<LLDn
14	合肥综合性国家科学 中心能源研究院东门	E117.1608913 N31.9311454	35.9±1.5	<LLDn
15	东干渠	E117.1664518 N31.9295212	39.6±0.9	<LLDn
16	场址南道路	E117.1614662 N31.9284563	44.8±1.3	<LLDn

监测点位	监测点位	GPS	$\gamma^*$ nGy/h	n $\mu\text{Sv/h}$
17	西干渠	E117.1524023 N31.09314250	54.6±2.1	<LLDn
18	北道路	E117.1591486 N31.9410195	44.0±1.2	<LLDn

注：\*监测结果已扣除宇宙射线响应值 10.2nGy/h；LLD<sub>n</sub>是中子周围剂量当量率的 Lower Limit of Detction, LLD<sub>n</sub>=0.05 $\mu\text{Sv/h}$ 。

由上表可知，本项目拟建场址及周围环境  $\gamma$  辐射剂量率的范围为 35.9nGy/h~69.1nGy/h(监测结果已根据 HJ 1157-2021《环境  $\gamma$  辐射剂量率测量技术规范》中的计算方法扣除了宇宙射线响应值 10.2nGy/h)，中子周围剂量当量率均小于仪表探测下限。

对照表 2-1，本项目拟建场址及周围环境  $\gamma$  剂量率水平与 2021 年安徽省环境  $\gamma$  辐射剂量率自动监测结果及全国环境  $\gamma$  辐射剂量率自动监测结果相符，属于环境正常水平。

#### 2.4.2.6.2 样品分析结果

拟建场址土壤、地表水及空气样品分析测量结果见表 2-7。

表 2-7 土壤、地表水、空气样品分析测量结果

样品编号	检测项目	结果
西场址东土壤	$^7\text{Be}$	$\leq\text{MDC}=3.2\text{E}+00\text{Bq/kg}$
	$^{22}\text{Na}$	$\leq\text{MDC}=6.9\text{E}-01\text{ Bq/kg}$
	$^3\text{H}$	$<\text{MDC}=2.7\text{Bq/kg}$
	$^{226}\text{Ra}$	$(4.03 \pm 0.61) \text{E}+01 \text{ Bq/kg}$
	$^{232}\text{Th}$	$(4.40 \pm 0.66) \text{E}+01 \text{ Bq/kg}$
	$^{238}\text{U}$	$(4.14 \pm 0.62) \text{E}+01 \text{ Bq/kg}$
	总 $\alpha$	$(6.32 \pm 0.33) \text{E}+02 \text{ Bq/kg}$
西场址西土壤	总 $\beta$	$(1.09 \pm 0.02) \text{E}+03 \text{ Bq/kg}$
	$^7\text{Be}$	$\leq\text{MDC}=4.6\text{E}+00 \text{ Bq/kg}$
	$^{22}\text{Na}$	$\leq\text{MDC}=1.1\text{E}+00 \text{ Bq/kg}$

	$^3\text{H}$	$<\text{MDC}=2.8 \text{ Bq/kg}$
	$^{226}\text{Ra}$	$(3.77 \pm 0.57) \text{ E}+01 \text{ Bq/kg}$
	$^{232}\text{Th}$	$(4.07 \pm 0.61) \text{ E}+01 \text{ Bq/kg}$
	$^{238}\text{U}$	$(3.85 \pm 0.58) \text{ E}+01 \text{ Bq/kg}$
	总 $\alpha$	$(4.55 \pm 0.29) \text{ E}+02 \text{ Bq/kg}$
	总 $\beta$	$(8.73 \pm 0.19) \text{ E}+03 \text{ Bq/kg}$
东场址北土壤	$^7\text{Be}$	$\leq\text{MDC}=4.5\text{E}+00 \text{ Bq/kg}$
	$^{22}\text{Na}$	$\leq\text{MDC}=9.2\text{E}-01 \text{ Bq/kg}$
	$^3\text{H}$	$<\text{MDC}=2.7 \text{ Bq/kg}$
	$^{226}\text{Ra}$	$(3.19 \pm 0.48) \text{ E}+01 \text{ Bq/kg}$
	$^{232}\text{Th}$	$(3.49 \pm 0.52) \text{ E}+01 \text{ Bq/kg}$
	$^{238}\text{U}$	$(3.34 \pm 0.50) \text{ E}+01 \text{ Bq/kg}$
	总 $\alpha$	$(7.48 \pm 0.36) \text{ E}+02 \text{ Bq/kg}$
	总 $\beta$	$(9.34 \pm 0.19) \text{ E}+03 \text{ Bq/kg}$
东场址南土壤	$^7\text{Be}$	$\leq\text{MDC}=3.2\text{E}+00 \text{ Bq/kg}$
	$^{22}\text{Na}$	$\leq\text{MDC}=7.3\text{E}-01 \text{ Bq/kg}$
	$^3\text{H}$	$<\text{MDC}=2.9 \text{ Bq/kg}$
	$^{226}\text{Ra}$	$(3.33 \pm 0.50) \text{ E}+01 \text{ Bq/kg}$
	$^{232}\text{Th}$	$(4.22 \pm 0.63) \text{ E}+01 \text{ Bq/kg}$
	$^{238}\text{U}$	$(3.39 \pm 0.51) \text{ E}+01 \text{ Bq/kg}$
	总 $\alpha$	$(4.61 \pm 0.27) \text{ E}+02 \text{ Bq/kg}$
	总 $\beta$	$(1.00 \pm 0.02) \text{ E}+03 \text{ Bq/kg}$
场址东滁河干渠地表水	$^7\text{Be}$	$\leq\text{MDC}=2.7\text{E}-02 \text{ Bq/L}$
	$^{22}\text{Na}$	$\leq\text{MDC}=9.7\text{E}-04 \text{ Bq/L}$
	$^3\text{H}$	$\leq\text{MDC}=1.6\text{Bq/L}$
	总 $\alpha$	$\leq\text{MDC}=8.1\text{E}-03 \text{ Bq/L}$
	总 $\beta$	$(8.55 \pm 0.27)\text{E}-02 \text{ Bq/L}$
场址西滁河干渠地表水	$^7\text{Be}$	$\leq\text{MDC}=3.1\text{E}-02 \text{ Bq/L}$



	$^{22}\text{Na}$	$\leq\text{MDC}=4.1\text{E}-03\text{ Bq/L}$
	$^3\text{H}$	$\leq\text{MDC}=1.6\text{Bq/L}$
	总 $\alpha$	$\leq\text{MDC}=7.3\text{E}-03\text{ Bq/L}$
	总 $\beta$	$(1.14\pm 0.03)\text{E}-01\text{ Bq/L}$
场址空气	$^7\text{Be}$	$4.53\text{E}-03\text{ Bq/m}^3$
	$^3\text{H}$	$(5.94\pm 0.09)\text{E}-02\text{Bq/m}^3$

由上表可知，土壤中  $^3\text{H}$ 、 $^7\text{Be}$ 、 $^{22}\text{Na}$  活度浓度的分析结果均小于探测限， $^{226}\text{Ra}$  活度浓度的分析结果在 31.9~40.3 Bq/kg 范围内， $^{232}\text{Th}$  活度浓度的分析结果在 34.9~44.0 Bq/kg 范围内， $^{238}\text{U}$  活度浓度的分析结果在 33.4~41.4Bq/kg 范围内，总  $\alpha$  分析结果在 455~748 Bq/kg 范围内，总  $\beta$  分析结果在 873~1090 Bq/kg 范围内；地表水的  $^3\text{H}$ 、 $^7\text{Be}$ 、 $^{22}\text{Na}$ 、总  $\alpha$  活度浓度分析结果均小于仪表探测限，总  $\beta$  分析结果在 0.0855~0.114 Bq/L 范围内；场址空气中  $^7\text{Be}$  活度浓度分析结果为  $4.53\text{E}-03\text{ Bq/m}^3$ ， $^3\text{H}$  活度浓度分析结果为  $5.94\text{E}-02\text{ Bq/m}^3$ 。

### 2.4.3 小结

对本项目拟建场址及周围环境辐射环境质量现状的调查结果表明，拟建场址及周围环境的辐射环境现状水平未见异常。

## 2.5 场址适宜性评价

本项目所在区域地质条件良好，没有影响射线装置安全稳定运行的颠覆性因素。

结合本项目特征辐射污染因子和电离辐射环境影响评价范围，区域周边社会环境相对简单，条件较好。

环境质量和辐射现状调查结果表明，项目区域的辐射环境质量良好，环境电离辐射水平均处于当地天然本底波动范围内。

综上所述，本项目选址适宜开展所申请的核技术利用活动。

### 3 工程分析与源项

#### 3.1 项目规模与基本参数

##### 3.1.1 总体项目建设规模

紧凑型聚变能实验装置园区总体布局以 5#楼主机大厅为中心，其余建筑沿主机大厅南北两侧延伸布置。5#楼主机大厅北侧由近到远分别为 4#楼低温大厅、3#楼水冷系统厂房、2#实验研究中心 B（不属于本次评价内容）、1#实验研究中心 A（不属于本次评价内容）；南侧为 6#国际交流中心（不属于本次评价内容），见图 3-1。



图 3-1 紧凑型聚变能实验装置园区总平面图

园区总平面图见附图 1，5#楼主机大厅各层平面、剖面布局图见附图 2，3#楼水冷系统厂房各层平面、剖面布局图见附图 3，4#楼低温大厅各层平面、剖面布局图见附图 4。

### 3.1.1.1 5#楼

#### (1) 主机大厅 5#-1

主机大厅地上 3 层，地下 2 层，建筑高度 43.4 米。

其中地下二层层高 11.2 米，地下一层层高 4.75 米，一层层高 4.15 米，二层层高 11.75 米，三层层高 26.2 米。主机大厅 L3 层包含托卡马克水冷、设备水冷、TBM（测试包层模块）、ICRF（离子回旋系统）波源室以及主机大厅诊断设备。主机大厅 L2 层加热系统磁体电源、传输线、母线罐、低温阀箱等。主机大厅 L1 层有设备用房、诊断设备、各系统控制室、遥操作转运通道等功能。主机大厅 B1 层真空低温泵组、诊断室、NBI 中性束加热系统、真空系统等。主机大厅 B2 层为失超保护系统、低温系统、超导母线罐、托卡马克水冷管网、氙化水储罐间、磁体电源、电流引线及升降平台。

#### (2) 氙处理中心 5#-2

氙处理中心地上 2 层，地下 2 层，建筑高度 34.0m。其中地下二层 10.6m，地下一层 8.6m，一层 16.1m，二层 16.0m。氙处理中心功能包含氙燃料系统、真空系统和配套 2 个部分。氙燃料系统将供给 BEST 运行需要的燃料，保障 BEST 的正常和安全运行。BEST 氙系统包括燃料循环系统和氙安全包容两大主系统，其中燃料循环系统主要由真空室抽气与排灰气转移系统、燃料净化与配气系统、氢同位素分离系统、气体成分分析、监测与自动控制系统四个子系统构成。氙安全包容系统由气氛除氙系统、排放气除氙系统、手套箱气氛除氙系统、水去氙化系统和氙泄漏监控与应急响应系统五个子系统构成。各系统与聚变堆主机加料抽气系统、冷却系统等辅助系统、大厅以及热室均存在功能和物理接口。氙处理中心楼顶布置通风系统送风系统和排风系统（烟囱顶高 70.8m）。

#### (3) 电源大厅 5#-3

NBI 电源大厅地上 1 层，建筑高度 26.4m。为低压设备（35kV 开关设备、相控整流系统、直流母线系统、NPC 逆变器及控制系统），高压设备（换流变压器、高压整流器、

直流滤波器、电压电流检测系统、假负载)。

#### (4) 波源及诊断大厅 5#-4

诊断大厅地上 3 层，建筑高度 23.8m，层高依次为 6m、4.5m、11.2m。包含诊断区域和电子回旋共振加热 (ECRH) 系统波源区。诊断区用作 BEST 诊断研发、测试、装配、集成调试、标定、维护维修及测试、仪器设备存储、备品备件存储，还用作 BEST 诊断值班室。

#### (5) 预装大厅 5#-5

预装大厅 (热室) 地上 1 层，地下 1 层，建筑高度 43m。

BEST 装置预装大厅主要功能如下：

- 1) 所有主机部件在进入主机大厅总装前必须进行装配前的清点、清洁和临时存放；
- 2) 所有主机部件在总装前必须开展部件测试和检测，保证装配件质量控制；
- 3) 多工位进行大尺寸部件的制造及组件高精度装配，保证装配精度和提高总装效率。

预装大厅地上规划约 3000 m<sup>2</sup>，按功能划分可以分为两个区域：临时存放清洁区和调试组装区，其中，临时存放清洁区主要用于装配部件的临时存放、来料清点、清洁等；调试装配区主要用于装配部件的状态测试、尺寸检查、组件装配组装和测试等。

预装大厅在主机预装完成后，改造为电源大厅使用，放置各类波加热电源。

热室 (地下一层) 面积约 2000 m<sup>2</sup>，高度 12.1m。主要功能为带放射性的零件、设备的清洗、维修、退役和换新等。

**表 3-1 5#楼分层面积表**

楼层	主要内容	建筑面积 (m <sup>2</sup> )	层高 (m)
B2F	科研用房	13879	11.2
B1F	科研用房	10268	4.75
	地下管廊	4129	
1F	科研用房	21714	4.15
2F	科研用房	9124	11.75

3F	科研用房	13964	26.3
RF	设备用房	2280	4.9
地上建筑面积	——	47082	——
地下建筑面积	——	28276	——
总建筑面积	——	75358	——

### 3.1.1.2 3#楼水冷系统厂房

3#楼地上3层，建筑高度32米。3#楼大厅一楼层高6米，二楼层高11米、三楼层高13m。

3#楼是BEST主机辅助系统-水冷设施楼，里面主要布局设备有托卡马克水冷二回路、辅助加热水冷系统（不包括NBI）和磁体电源水冷系统、低温水冷系统、水质在线处理系统、工艺冷冻水系统、HVAC系统、市政热力设备等。3#楼主要作为水冷系统厂房，其主要功能主要是为BEST设备水冷、冷冻水系统和外循环系统提供空间。3#楼大厅需要有散热系统和连通其他大厅的综合管廊隧道配合使用。这些系统主要设备包括离心泵、板式换热器、储水罐、稳压罐、管道及阀门、管道支撑、旁滤系统、过滤器、脱盐系统、脱氧系统、电气开关柜、仪控柜及电缆桥架。

在该大厅布置的系统主要包括二回路冷却系统、真空系统水冷、ECRH波加热系统水冷、LHCD波加热系统水冷、ICRH波加热系统水冷、低温系统水冷、暖通空调和氙处理中心冷冻水系统、真空室和除氙安全冷冻水系统、外循环系统、除盐水系统、水冷系统电气控制系统、控制室和备品备件间。

预留发电装置区，发电系统主要包括发电装置、热交换器、控制单元组成。

表 3-2 3#楼水冷系统厂房分层面积表

楼层	主要内容	建筑面积 (m <sup>2</sup> )	层高 (m)
1F	科研用房	2120	6
2F	科研用房	1431	11
3F	科研用房	2034	13.15
地上建筑面积	——	5585	——
地下建筑面积	——	0	——
总建筑面积	——	5585	——

### 3.1.1.3 4#楼低温大厅

低温大厅地上 1 层，建筑高度 32 米。

BEST 低温系统的基本功能是冷却 BEST 装置超导磁体、冷屏、高温超导电流引线、低温泵等部件，并维持这些部件工作所需的温度。

根据功能，低温大厅共划分为压缩机厅、制冷厅、配电间和附属厅。压缩机厅主要包含氨压缩机，氮压缩机，收气压缩机、纯化器等设备，配备 50t+20t 行车。压缩机厅四周应做好隔音处理，配备冷暖气，设有强制通风风扇。

表 3-3 4#楼低温大厅分层面积表

楼层	主要内容	建筑面积 (m <sup>2</sup> )	层高 (m)
B1F	地下管廊	615	9
1F	科研用房	4335	25.2
地上建筑面积	——	4335	——
地下建筑面积	——	615	——
总建筑面积	——	4950	——

据建筑设计，3#楼水冷系统厂房与 4#楼低温大厅结构上连为整体，形成一个结构单体。

## 3.1.2 3#、4#、5#楼与园区项目设施的依托关系

### 3.1.2.1 3#楼

3#楼主要用于 BEST 装置及其附属设备提供冷冻循环水及公用气（压缩空气、氮气、呼吸空气等）。

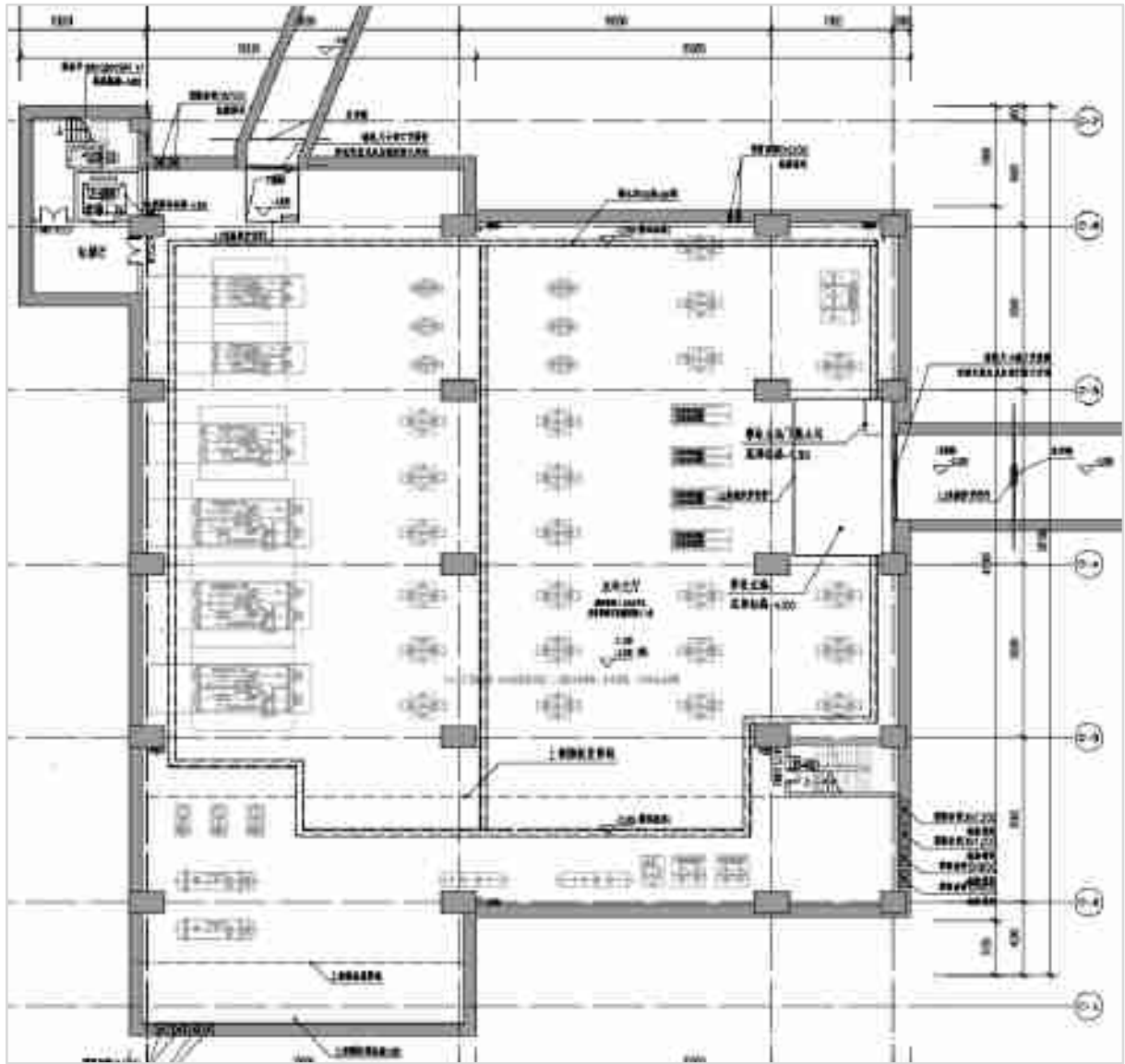


图 3-2 3#楼内部设备布局平面图

3#楼内会使用到的主要是常规水，来源自 CRAFT 聚变堆园区，通过直埋通水管道的  
方式连接 CRAFT 园区供水中心和 BEST 园区 3#楼，3#楼内无特殊工艺用水，其最终  
排放将会在 CRAFT 园区现有设施处理，满足排放要求后直排放，如下图所示。



图 3-3 3#楼常规冷却水来源、去向示意

3#楼电源由 CRAFT 园区电力管廊进入 BEST 园区后，采用直埋电力管线的方式进入 3#楼内，如下图所示。



图 3-4 3#楼供电来源



3#楼的供热系统，由市政供暖提供。由市政道路修建幸三路，配套建设市政供暖管道接入 BEST 园区并分配至 3#楼内，如下图所示。

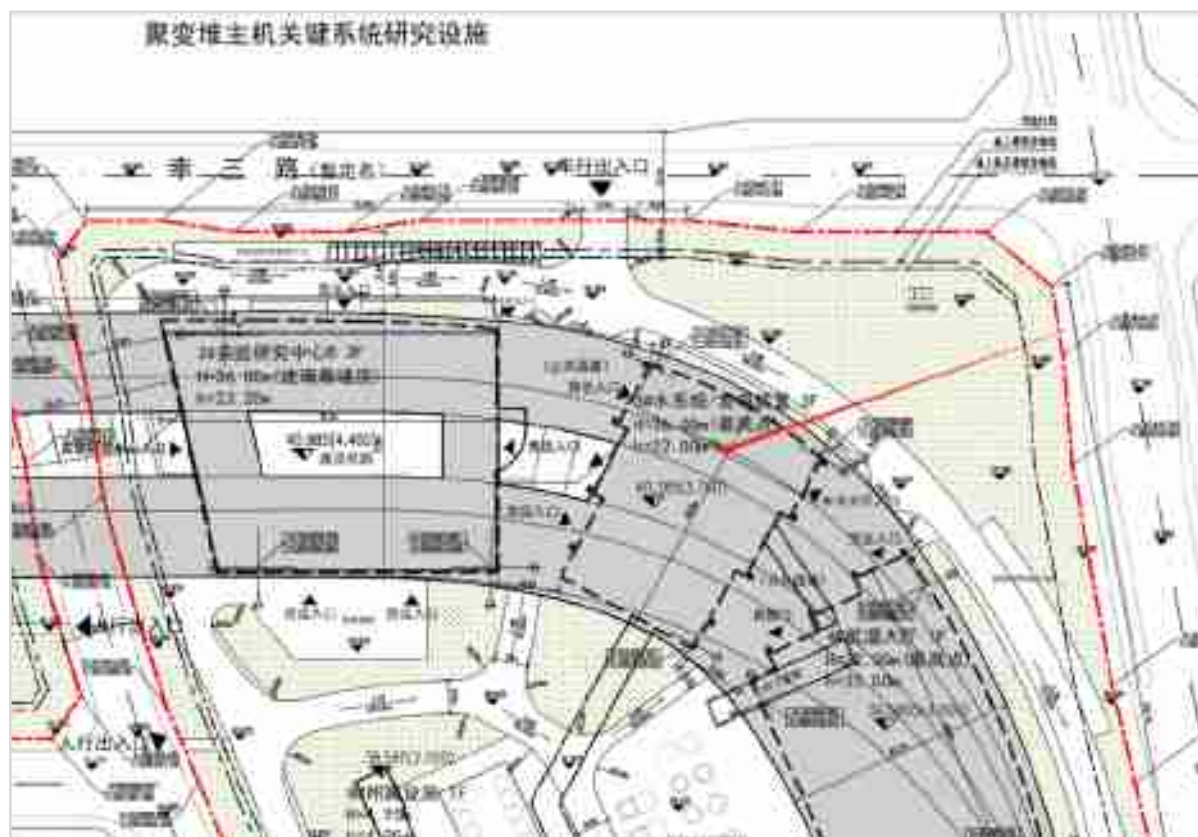


图 3-5 3#楼市政供暖来源示意

3#楼设备不产生废气，因此不设置废气处理设施。

3#楼内沿外墙周边设置相应的排水沟，尺寸为 300mm 宽，200mm 深，并在楼梯内部设置事故状态下水池下集水坑，如下图所示。

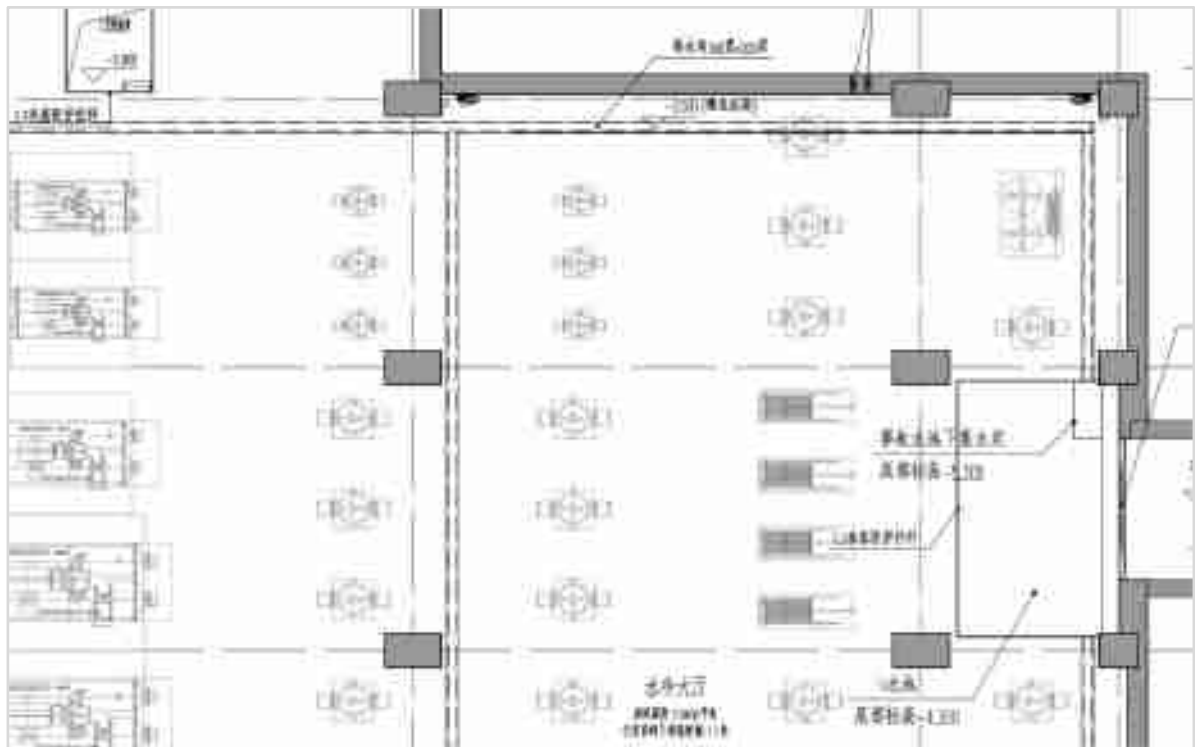


图 3-6 3#楼排水设置

### 3.1.2.2 4#楼

4#楼作为低温大厅厂房，设计时按 2 台 25kW@4.5K 氮制冷机机位考虑，同时将配备氮液化器，将制冷机的预冷排空的氮气进行液化，降低外购液氮的消耗。下图为 BEST 低温系统的结构图，由两台 4.5K 氮制冷机，1 台 80K 冷箱，1 套氮液化器，氮回收纯化系统和储气系统等构成。4#楼低温系统的基本功能是为 5#楼 BEST 装置冷却超导磁体、冷屏、高温超导电流引线、低温泵等部件，并维持这些部件工作所需的温度。

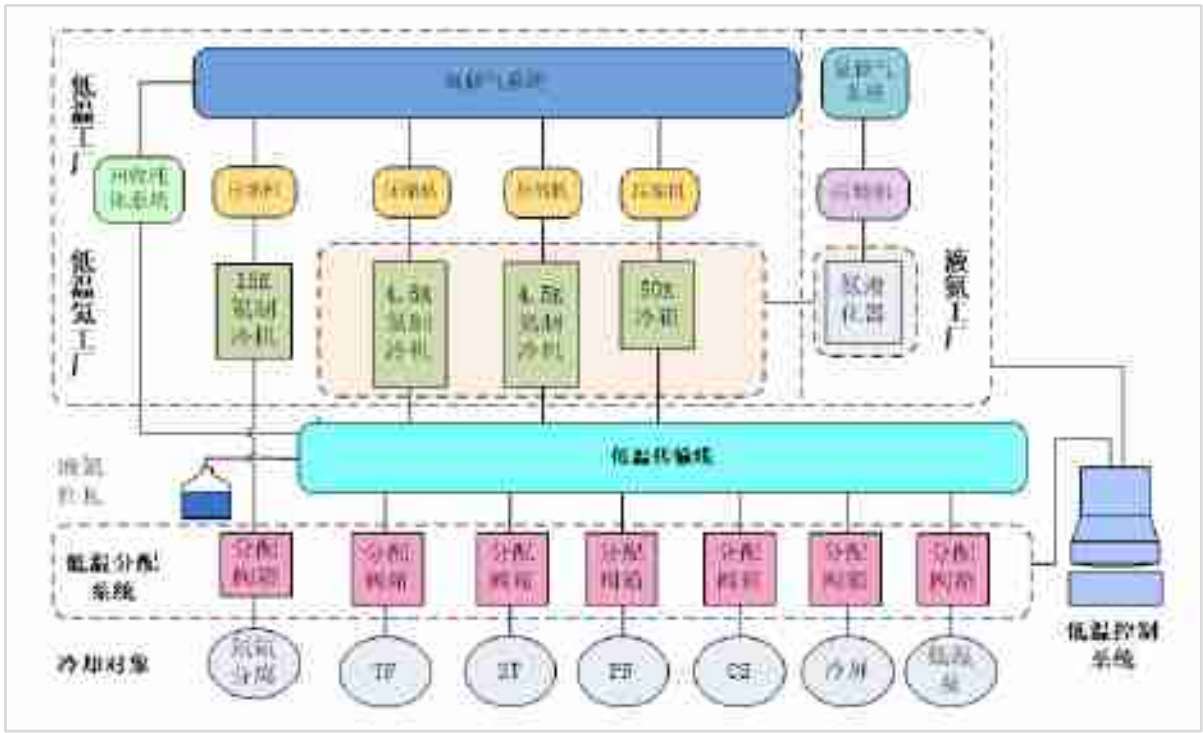


图 3-7 BEST 低温系统结构图

4#楼低温大厅厂房主要配置常规水，其来源自 3#楼。3#楼与 4#楼之间开设一段底下管廊，用于连接两栋楼之间的常规水、冷却水管，如下图所示。



图 3-8 3#楼与 4#楼之间管廊连接示意图

4#楼的供热系统，由市政供暖提供。由市政道路修建幸三路，配套建设市政供暖管道接入 BEST 园区并分配至 4#楼内，如下图所示。



图 3-9 4#楼市政供暖来源示意

4#楼低温大厅厂房西侧设置户外设备区，用于摆放气体储存罐体。如下图所示。



图 3-10 户外罐体设备区

4#楼电源由 CRAFT 园区引入，在 BEST 园区主电力管廊进行分流，采用直埋的方式接入 4#楼内。如下图所示。



图 3-11 4#楼电源接入示意图

4#楼设备主要是空气压缩机，产生的废气在设备内部实现自循环，不对外排放，因此不设置废气处理设施。

4#楼设备在维护时会产生废弃润滑油及活性炭，但该固体废物会由专业的公司和专业的设备进行维护处理和收集，因此不设置固体废物存储。

### 3.1.2.3 5#楼

5#楼作为主机大厅，主要有 5 栋附属建筑，如下图所示。

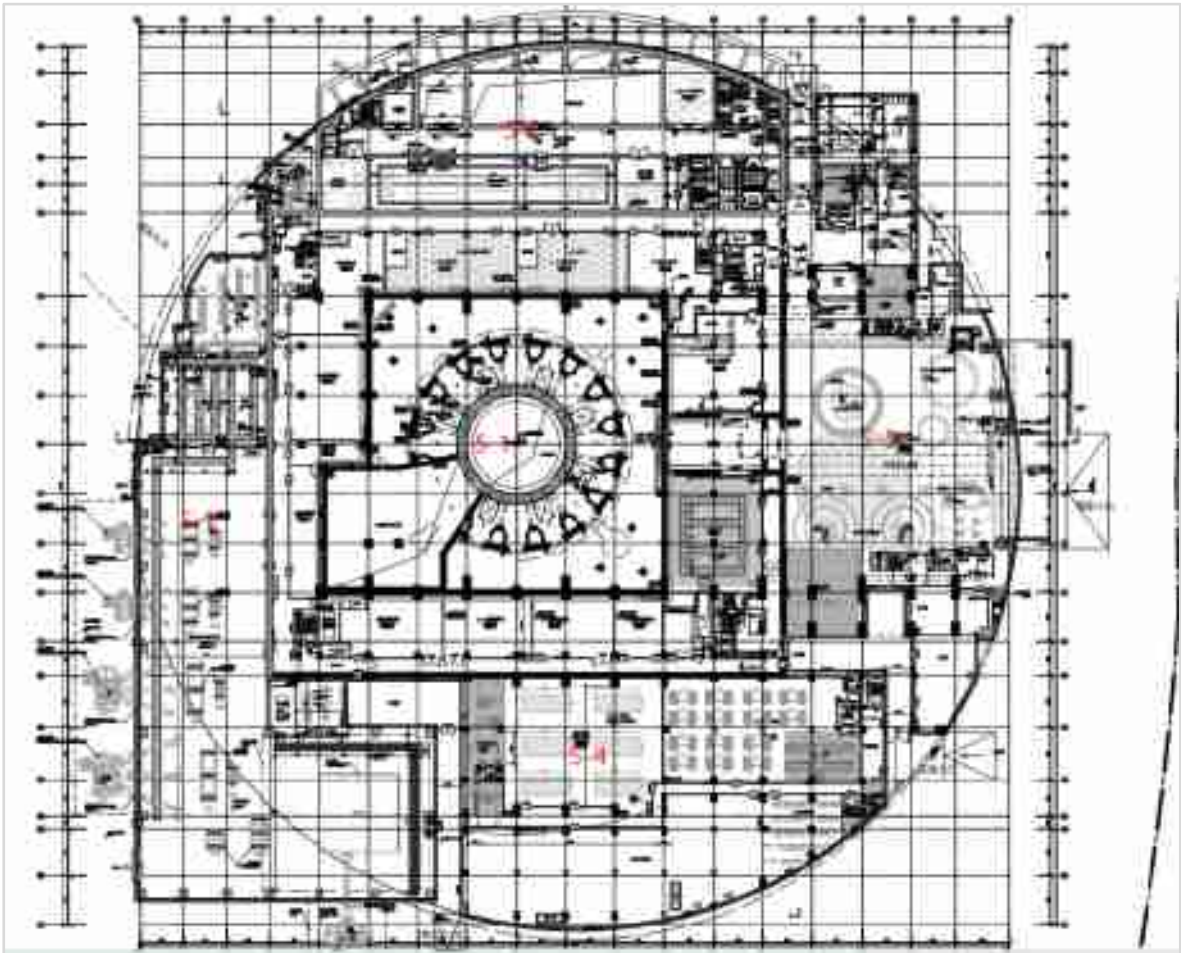


图 3-12 5#楼建筑划分示意图

其中，5#-1 是 BEST 主机大厅，5#-2 是氙处理中心，5#-3 是 NBI 电源大厅，5#-4 是波源及诊断大厅，5#-5 是预装大厅，预装大厅负层为热室。

5#楼号建筑群中，供水主要由 3#楼水冷大厅提供，通过工艺管廊铺设水冷管道进入 5#楼环形管廊，最终分别进入不同的楼栋，如下图所示。

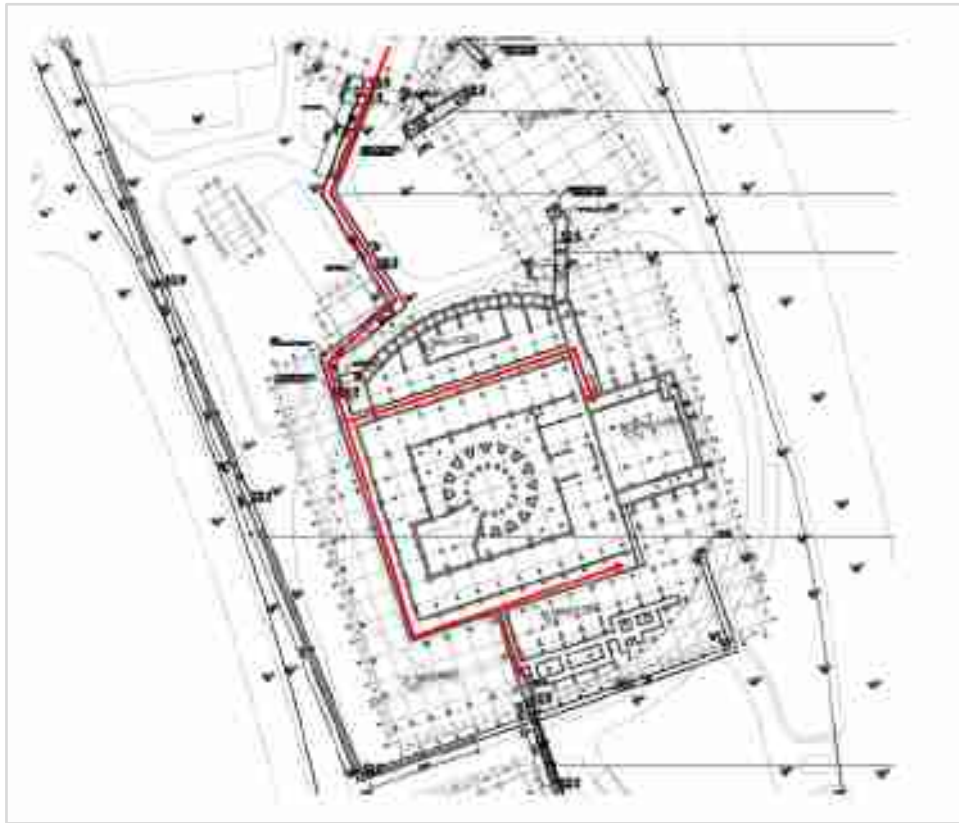


图 3-13 5#楼循环供水来源示意图

5#楼供电来源自 CRAFT 园区，由整体的电力管廊分流，采用直埋的方式进入 5#楼环形工艺管廊，外部各楼栋由直埋进入。如下图所示。

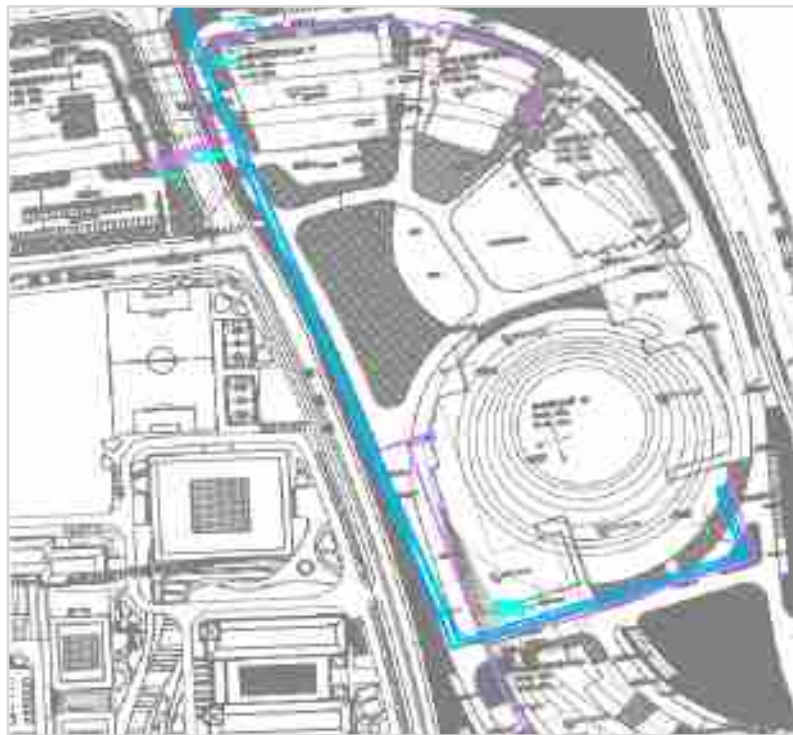


图 3-14 5#楼电力来源走向示意图

5#楼不采用市政供暖的方式，根据设备工艺的需求，配置相应的集中空调系统。如下图所示。

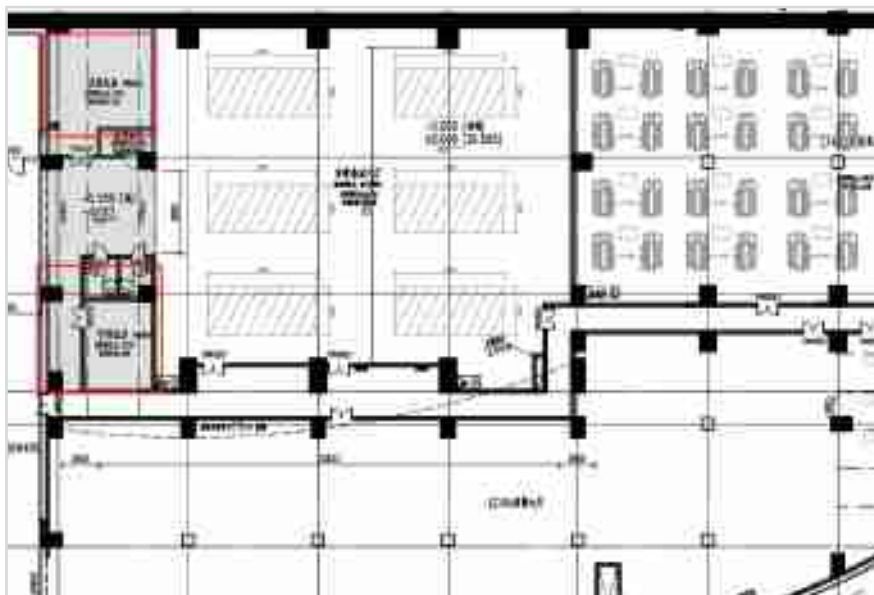


图 3-15 5#-4 设备区配置空调系统示意图

而 5#-1 主机大厅内部各工艺系统设备间，根据辐射防护包容分区的要求，通过氡处理系统 L3 层设置的 HVAC 系统进行布局通风、暖通系统。如下图所示。

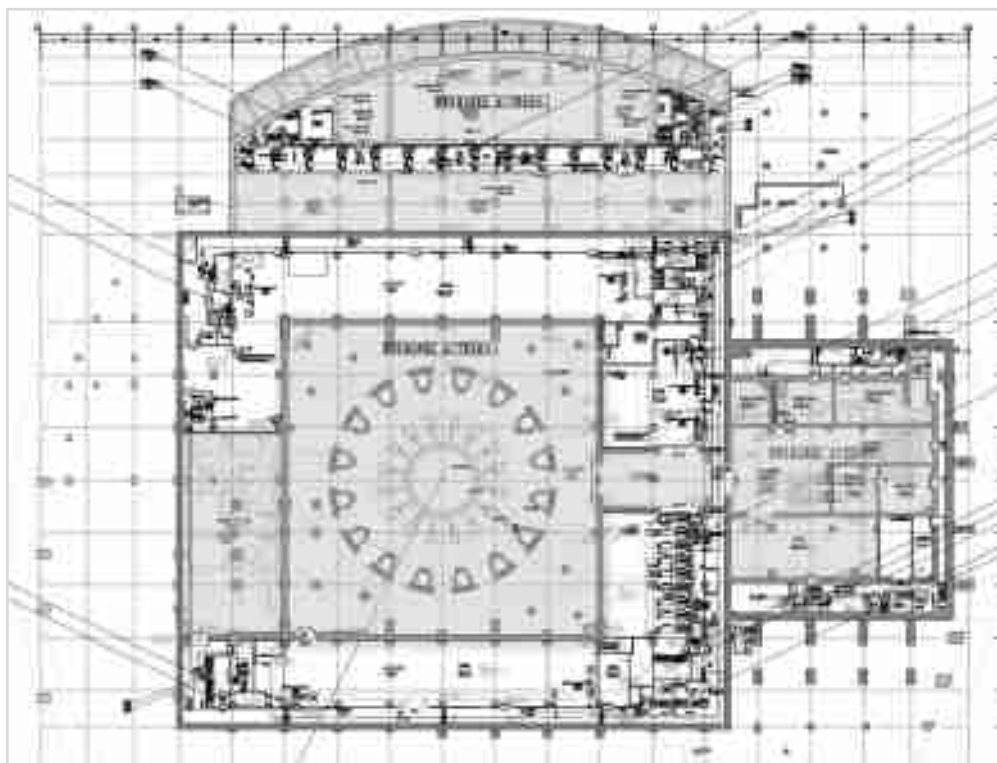


图 3-16 氡处理中心 HVAC 系统覆盖主机大厅单层工艺设备间示意图



5#楼内 5#-3、5#-4、5#-5（预装大厅）内无废气产生。5#-1、5#-2、5#-5（热室）内根据氙包容防护的需求，气体无法直接排放，5#-1 和 5#-2 内的气体需经过 5#-2 内的除氙设备处理后，由 5#-2 北面墙体设置的高空烟囱进行排放。如下图所示。

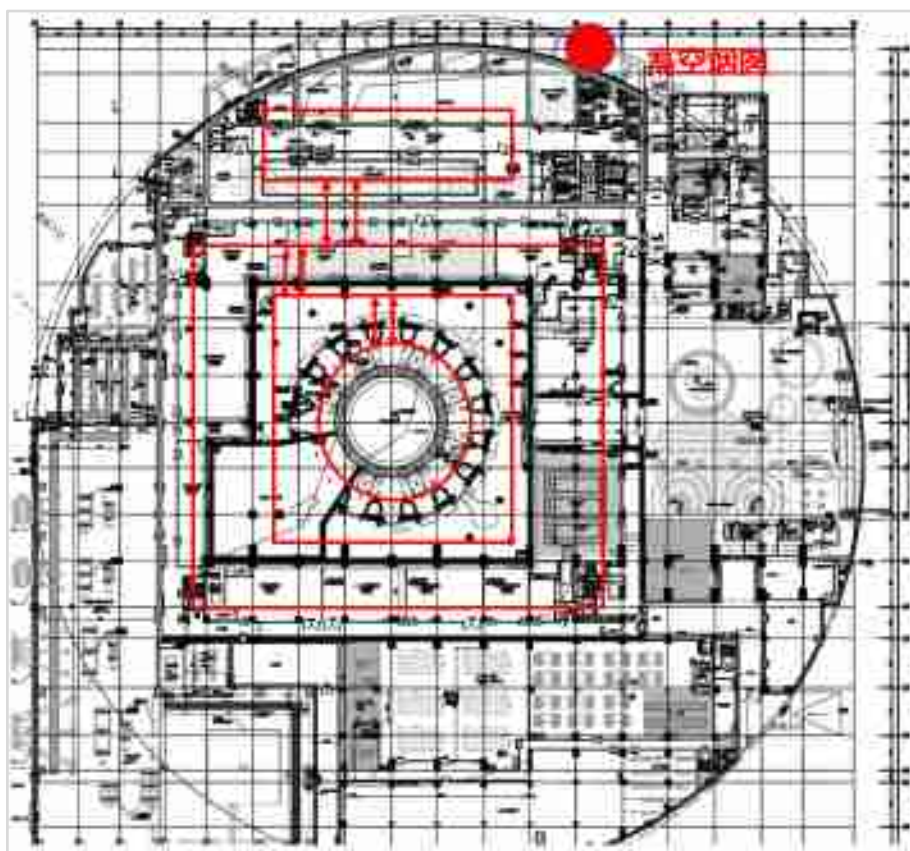


图 3-17 5#楼气流路径示意图

5#楼内 5#-3、5#-4、5#-5（预装大厅）内无工艺废水产生，故障状态下的设备排水等设置相应的集水坑进行收集。5#-1、5#-2、5#-5（热室）内根据氙包容防护的需求，产生的含氙水需经过 5#-1 内的 B2 层排灌室收集后，送至 5#-2 氙处理中心进行处理。如下图所示。

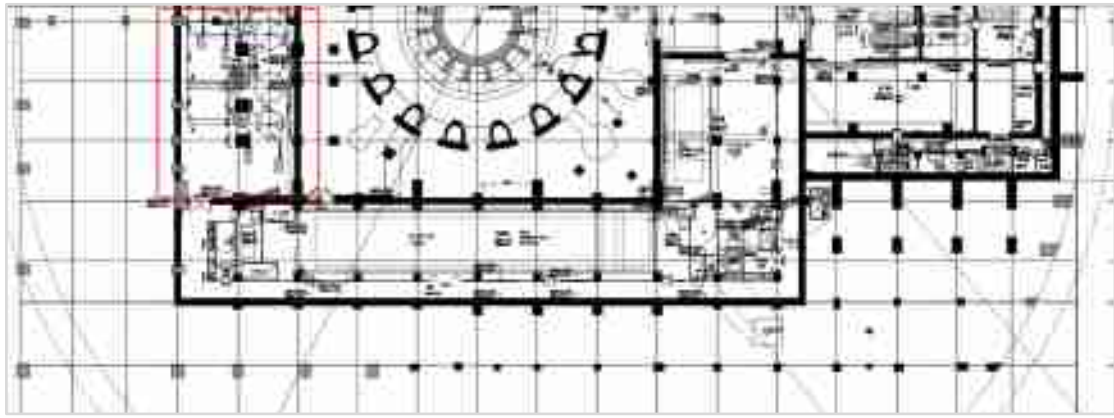


图 3-18 5#-1B2 层设置排灌室示意图

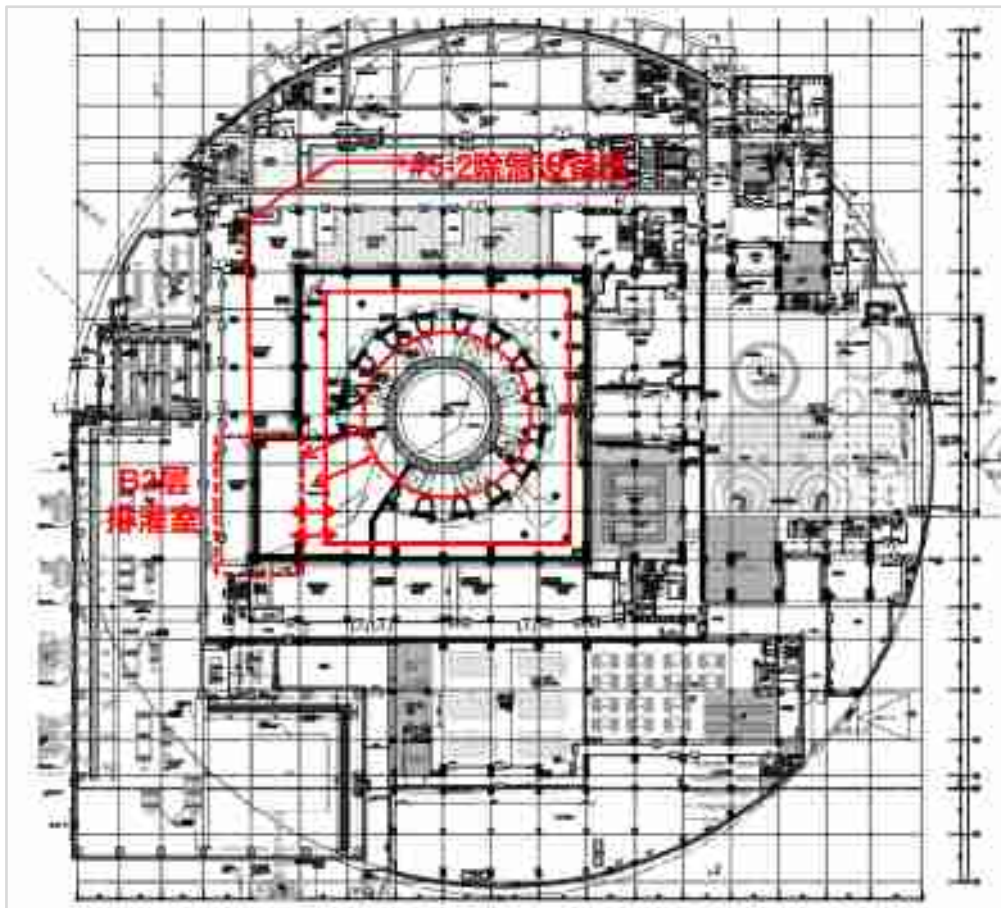


图 3-19 5#-1、5#-2 含氡水处理流程示意图

5#-2 氡处理中心因特殊工艺要求，需考虑紧急断电情况，因此会配置单独的柴油发电机。柴油发电机在维护时会有废油产生，该部分由专业的技术团队进行维护保养及废油处理。如下图所示。



图 3-20 柴油发电机位置示意图

5#楼内因工艺的特殊性,无非放射性固体废物的产生。5#-1 内维护更换产生的部件,需经过遥操作维护进入热室后进行工艺处理、整備和暂存。具体流程如下图所示。

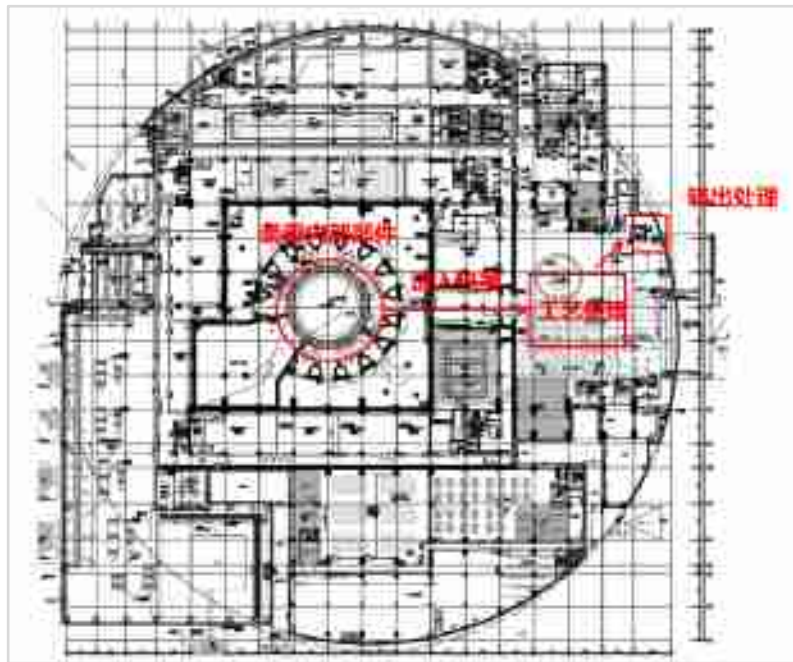


图 3-21 固废处理流程示意图

5#-2 楼维护部件由工艺团队或专业设备厂家进行处理,其转运路线如图 3-22 所示。

维护拆卸设备需要经过检测满足要求后方能转出,检测方法一般采用表面擦拭液闪测试,设备表面低于  $8\text{Bq}/\text{cm}^2$  可直接转移,当高于  $8\text{Bq}/\text{cm}^2$  需要使用包装箱转移,且包装箱表面低于  $8\text{Bq}/\text{cm}^2$ 。



图 3-22 5#-2 氚处理中心内部固体部件转出处理示意图

### 3.1.3 核技术利用内容基本参数

本项目核技术利用内容概况见下表。

表 3-4 本项目射线装置主要参数

名称	类别	数量	型号	装置类型	主要工况				用途	工作场所
					聚变功率 (MW)	脉冲长度 (sec)	单个脉冲最大中子产额 (n/pulse)	单个脉冲最大氚消耗量 (g/pulse)		
紧凑型聚变实验装置 (BEST)	I 类	1 台	自研	磁约束聚变实验装置	50	1000	1.8E+22	0.09	磁约束聚变实验研究	五号楼主机大厅
					200	10	7.1E+20	0.004		

表 3-5 本项目非密封放射性物质主要参数

核素名称	理化性质	活动种类	实际日最大操作量 (Bq)	日等效最大操作量 (Bq)	年最大消耗量 (Bq)	用途	操作方式	使用场所	贮存方式与地点
氚	低毒	使用	4.07E+16 (<110g)	4.07E+16	4.07E+15 (<11g)	磁约束聚变实验	简单操作	主机厅、氚处理中心、热室	氢同位素采用储气罐、金属储氢床及液氢（低温精馏过程中）方式贮存于五号楼氚处理中心

### 3.1.4 装置运行计划

BEST 装置是可控的磁约束核聚变装置，将在环形真空腔室中心发生以氘（D-D）或氘氚（D-T）为燃料的聚变反应。燃料介质将以等离子体物理形态存在，需要高真空环境和强磁场的约束。任何驱动和辅助系统的异常将会影响聚变反应所需条件从而聚变反应自动停止，不存在裂变堆所具有的超临界风险，也不会产生长寿命高放射性乏燃料和裂变核废料，因此具有固有安全性。运行生命周期中将包含纯氘等离子体和氘氚等离子体运行，面向聚变能发展的关键科学与工程问题开展实验研究。BEST 装置在氘氚运行阶段会产生一定的辐射影响，其运行模式包括短脉冲和长脉冲两类：

- (1) 短脉冲运行：100-200MW，单脉冲长度为 5-10 秒。
- (2) 长脉冲运行：30-50MW 聚变功率，典型单脉冲长度为 1000 秒。

其中，BEST 装置计划运行 20 年，氘氚运行将分为三个阶段开展，各阶段中子产额上限如表 3-6。

表 3-6 BEST 氘氚运行各阶段中子产额上限

方案编号	总中子产额	总运行时间
阶段 I	2.5E+23	≥2 年
阶段 II	1E+24*	≥5 年
阶段 III	██████████	≥10 年

\*：阶段 I 和 II 总中子产额；  
\*\*：三个阶段总中子产额。

## 3.2 工程设备与工艺分析

BEST 装置由托卡马克主机、真空抽气与加料系统、低温系统、射频波与中性束注入加热系统、电源系统、水冷系统、诊断与运行控制系统、测试包层系统、氘燃料循环系统、热室与遥控操作维护系统等部分组成。

### 3.2.1 托卡马克主机

BEST 托卡马克主机总高约 15.5m，直径 14.7m，见图 3-23，主要包括磁体系统、真空室、冷屏、杜瓦、偏滤器、包层系统、遥操作系统、真空系统、诊断系统、控制系统、辅助加热系统、低温系统、电源系统、水冷系统和氦系统。对辐射安全防护影响较大的系统主要包括真空与加料系统、偏滤器、屏蔽包层、诊断系统、辅助加热系统、水冷系统和氦系统。

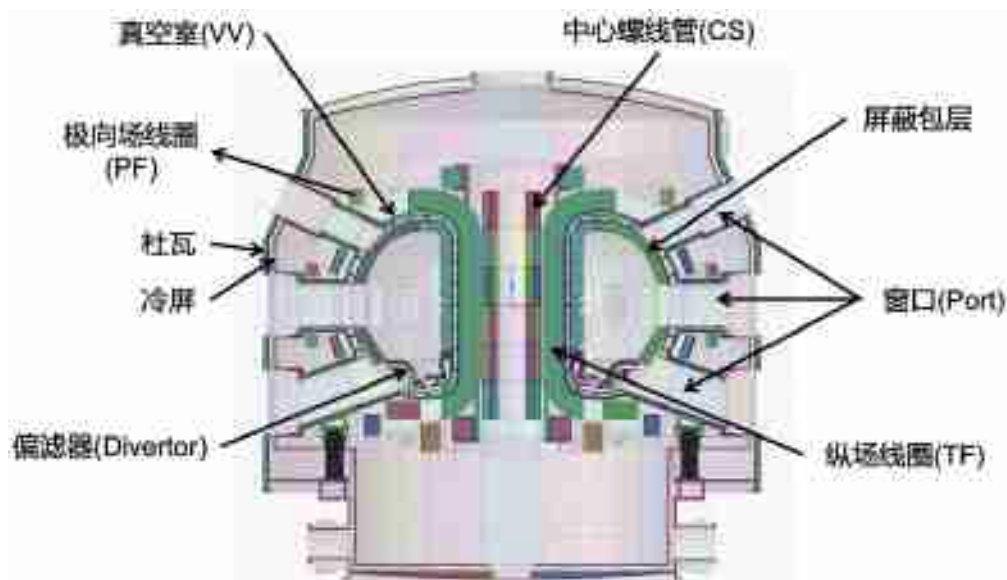


图 3-23 BEST 主机主要部件示意图

### 3.2.2 真空抽气与加料系统

涉氦的真空抽气与加料系统主要包括装置真空抽气系统、涉氦加料系统。通过装置真空抽气系统，为等离子体放电真空室以及其他涉氦子系统提供良好的真空条件，同时还能够将所有可能含氦的被抽气体输送到氦处理中心。通过各种加料系统包括弹丸加料系统、超声分子束加料系统、普通充气系统和紧凑环芯部加料系统，以不同注入位置、注入量、注入深度等向等离子体中注入聚变燃料或杂质粒子，来满足长脉冲、高参数等离子体运行需求。

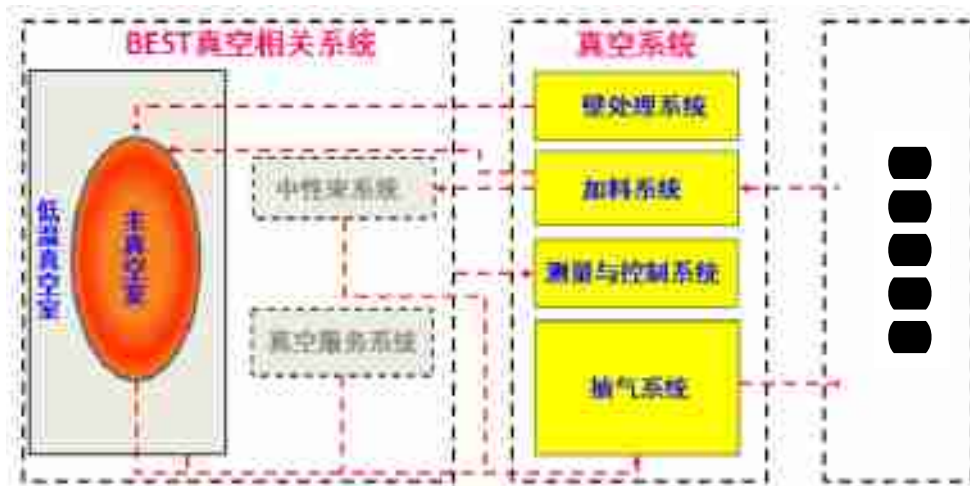


图 3-24 BEST 真空抽气与加料系统结构图

### 3.2.2.1 真空抽气系统

真空抽气系统主要为 BEST 等离子体放电真空室、杜瓦真空室、及其它辅助真空腔体提供高真空实验环境，并将抽除的气体以可控的方式安全地运输到氦处理中心进行尾气处理。

其中主要涉氦的抽气系统为等离子体放电真空室真空抽气系统，该系统主要由低温泵抽气系统、低温泵再生系统、主抽管道分子泵抽气系统、前级粗抽系统等，其位于 L1 层，如图 3-25 所示，主要功能是为等离子体放电提供洁净的超高真空环境和强粒子排出能力。

低温泵抽气系统主要由八台低温泵组成，分别位于 A, C, E, G, I, K, M, O 八个下偏滤器窗口，其主要功能是为等离子体放电提供稳定的粒子排除能力。单台低温泵对氢气的标称抽速不低于 [REDACTED]。在放电过程中产生的所有废气以及未反应的工作气体均被低温泵抽除并储存在其泵腔内，待低温泵饱和后，再利用低温泵再生抽气系统安全的转移到氦处理中心，在此过程中，低温泵需要根据时间情况开展不同等级的再生过程，以释放不同的气体。在氦放电过程中，低温泵作为装置尾气的排出和储存设备，其内部为高浓度氦，其后期的再生处理，需要根据不同的实验工况采取不同的再生工艺进行再生处理。

每台低温泵单独配备 [REDACTED] 低温泵再生抽气系统，然后 [REDACTED] 低温泵的再生抽气系统的尾气汇集在一个总管道内，再统一排放到氦处理中心进行尾气处理，低温泵释放出来的气体为高浓度氦尾气、低温泵的再生一般分为三个温度等级再生， [REDACTED] [REDACTED] [REDACTED]

在下偏滤器 G 窗口布置一个抽气管道，在抽气管道上设计安装了磁悬浮分子泵，作为低温泵的辅抽泵，同时也作为真空室壁处理时的抽气泵。单台分子泵对氮气的标称抽速为，因此，其排除的尾气中氙的浓度较低，后期如果分子泵需要拆除维护，以降低泵腔内氙的残留。

在泵房里安装了无油罗茨泵机组作为装置的粗抽泵，同时也作为真空壁处理时的前级泵。该泵的第一个功能是在装置启动初期，把真空腔体内部的气体以达到低温泵和分子泵启动的气体压强。其第二个功能是作为壁处理的前级泵，也就是作为抽气管道上分子泵的前级泵，主要是把壁处理期间分子泵排出的气体输送到氙处理中心，其处理的气体含氙浓度较低。后期如果前级泵需要拆除维护，以降低泵腔内氙的残留。

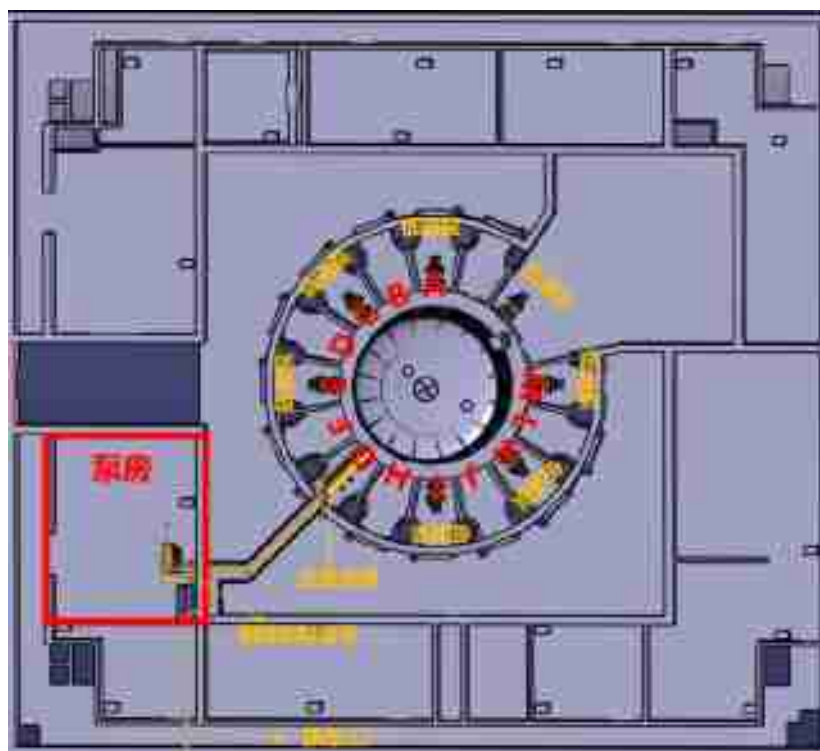


图 3-25 等离子体放电真空室真空抽气系统布局图



### 3.2.2.2 加料系统

加料系统为等离子体的击穿、维持和控制提供燃料气体和杂质气体，为装置壁处理提供工作气体。加料系统主要包括气体注入系统(GIS)、超声分子束注入系统(SMBI)、燃料弹丸注入系统(PI)以及紧凑环芯部加料系统(CT)等。

气体注入系统主要由气体分配传输系统、阀门箱和注入管道组成，具体包括供气管道、阀门、稳压罐、压力传感器和注入管道。气体注入系统通过充气阀门在等离子体控制系统的控制下将供气管道内的工作气体注入到等离子体放电真空室内，为等离子体的击穿和维持提供燃料气体。气体分配传输系统主要涉及供气管道和连接到分配阀箱的管路，目前考虑在 L1 层即水平窗口层布置环形供气管道。L2 层及 B1 层均由该环形管道通过竖井引到加料系统所在的位置。同时在加料系统所在位置附近设分配阀箱与供气管道连接，为加料系统以及其他系统提供各种工作气体。阀门箱的位置如图 3-26、图 3-27 所示。

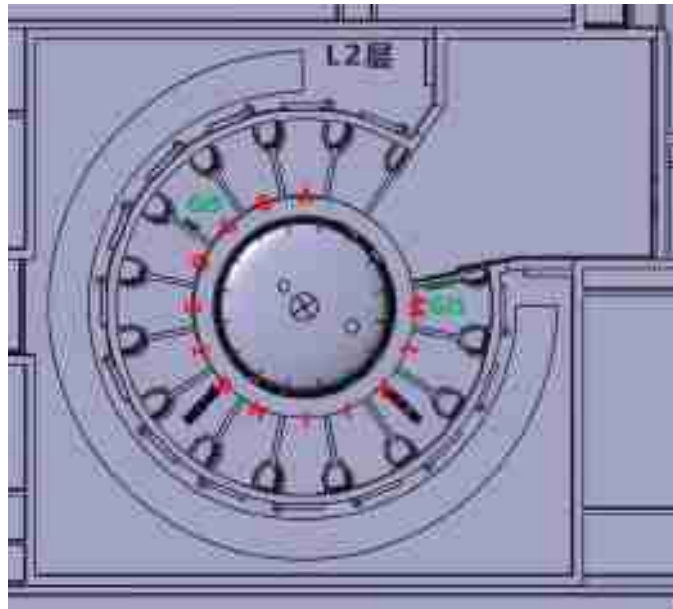


图 3-26 L2 层加料系统分布

超声分子束注入系统主要是为等离子体提供加料、ELM 调制、热流缓解以及开展粒子运输的研究。超声分子束注入系统主要涉及真空室内部送气管路、穿透管路、高压配气箱等。SMBI 系统总计两套，安装在 L1 层水平 A 和 I 窗口。[REDACTED]  
[REDACTED]。SMBI 系统的氙的现场 [REDACTED] 用于满足 SMBI 系统加料需求。[REDACTED]  
[REDACTED]。在 BEST 一轮实验结束后，需要将储气罐里的剩余氙气抽回到氙处理中心处理。

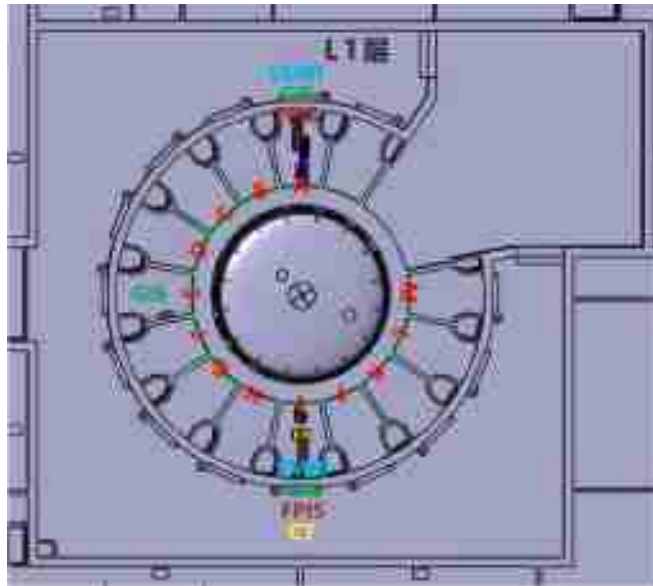


图 3-27 L1 层加料系统分布

燃料弹丸注入系统由弹丸低温制备系统、气体供应系统、真空抽气系统、控制与诊断系统组成。其原理就是利用弹丸低温制备系统将氢或者氢的同位素(氘, 氚)等丸料气体直接冷冻成毫米量级的固态弹丸, 再利用高压推进气将弹丸加速并定向发射到等离子体放电真空室中。弹丸制备系统的主要功能是制备弹丸和加速弹丸。BEST 计划安装 3 套燃料弹丸注入系统, 其中 1 套位于 B1 层下 C 窗口, 2 套位于 L1 层水平 A 和 I 窗口, 如图 3-27、图 3-28 所示

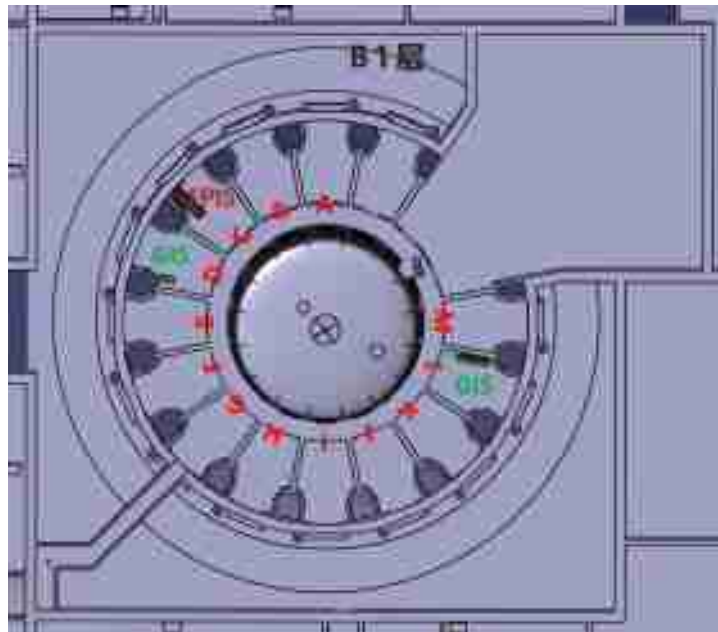


图 3-28 B1 层加料系统分布

紧凑环芯部加料系统主要由以下几个部分组成：主机系统、脉冲电源系统、控制系统、诊断系统和采集系统。主机系统包括成型区、压缩区、加速区、漂移管、脉冲气阀、螺线管、中子屏蔽防护和磁屏蔽防护。氘氚燃料气体由脉冲气阀充入成型区，在螺线管产生磁场的辅助下，在成型区高压击穿形成球马克位型的紧凑环等离子体，再经过加速区进一步加速，最终经由漂移管传输至托卡马克装置。该系统位于 L1 层水平 I 窗口，如图 3-27 所示，其加料气体由普通充气系统阀箱提供，真空抽气由服务真空系统提供。

[REDACTED]

### 3.2.3 低温系统

BEST 低温系统包括低温工厂，低温传输线、低温分配系统和低温辅助系统。根据介质分配，低温工厂由低温氦工厂和低温氮工厂构成。其中低温氦工厂包括 4.5K 氦制冷机、80K 氦制冷机和 80K 冷箱，主要采用氦气作为制冷工质，产生 80K、50K、4.5K

的冷量。由于氮制冷机均采用液氮预冷，故设有液氮工厂，对预冷后氮回气进行再液化，降低液氮的外购量。制冷机系统主要产生低温流体，低温分配与传输系统将制冷机产生的低温流体按需分配至各低温用户。为了保证系统的运行，低温系统还设有低温辅助系统，包括气袋、回收压缩机、纯化器、氮气储罐、空气源等系统。

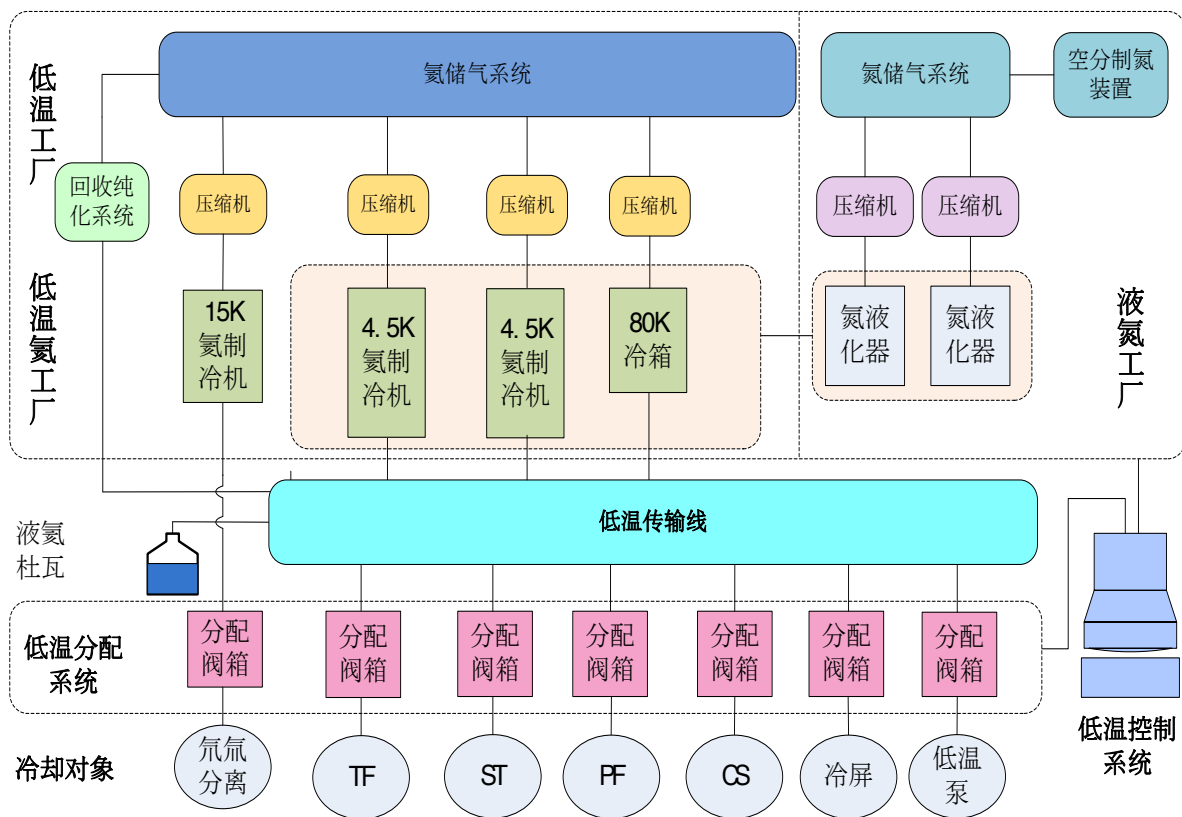


图 3-29 BEST 低温系统构成

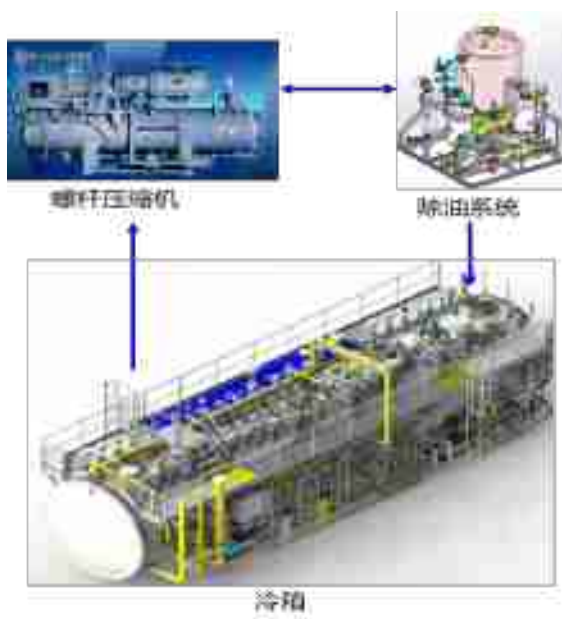


图 3-30 氮制冷机系统构成

氮制冷机系统主要包括压缩机、除油系统和冷箱系统。氮制冷循环的高压氮气需由压缩机压缩气体得到。大型氮制冷系统常采用喷油螺杆压缩机，压缩过程中喷油雾进行冷却，使压缩过程尽量接近等温压缩。除油系统是氮制冷系统的组成部分，具有气体净化的功能，主要由后冷却器、滤油器、活性炭油吸附器、分子筛干燥器、粉尘过滤器等部分组成，通过物理分离过滤方式去除氮气中的油、水等杂质，使得氮气的油含量低于 10 ppb，含水量低于 1 ppm。

氮压缩机将氮气压缩过程中，会产生大量热，通过冷却水带走。氮螺杆压缩机采用润滑油润滑、冷却。每运行一定时间后，会对润滑油进行更换。整个更换由专业公司来处理，更换下来的润滑油装入金属容器，拉到专业回收公司进行处理。同时氮压缩机运行中会有噪声，因而压缩机厅会采用隔声措施。由于氮气是一种极其容易泄漏的气体，且价格昂贵，因此在低温系统中氮管路及设备对其密封性能要求极高，会尽可能避免任何的氮气泄漏。在低温系统调试及运行过程中，需要采用高纯氮气对活性炭吸附器、80K 吸附器进行加热再生，会有少量的氮气排到室外。

冷箱主要包含氮透平膨胀机，换热器，吸附器，真空系统和低温阀门等关键设备。氮制冷机的所有低温部件放入一真空容器中集成在一起构成冷箱，采用多层绝热。冷箱中包含低温换热器、透平膨胀机、低温吸附器、过滤器及低温管道阀门等。为防止冷量损失，冷箱需抽至高真空 [REDACTED] 且需要将这些设备用一组合支撑悬空支撑在冷箱容器内 [REDACTED] [REDACTED]，获得 4.5K 的温度。低温用户热量将液氮槽中液氮蒸发，回流的氮气经多级换热器回收冷量至常温，进入压缩机的吸气口，形成一个制冷循环。

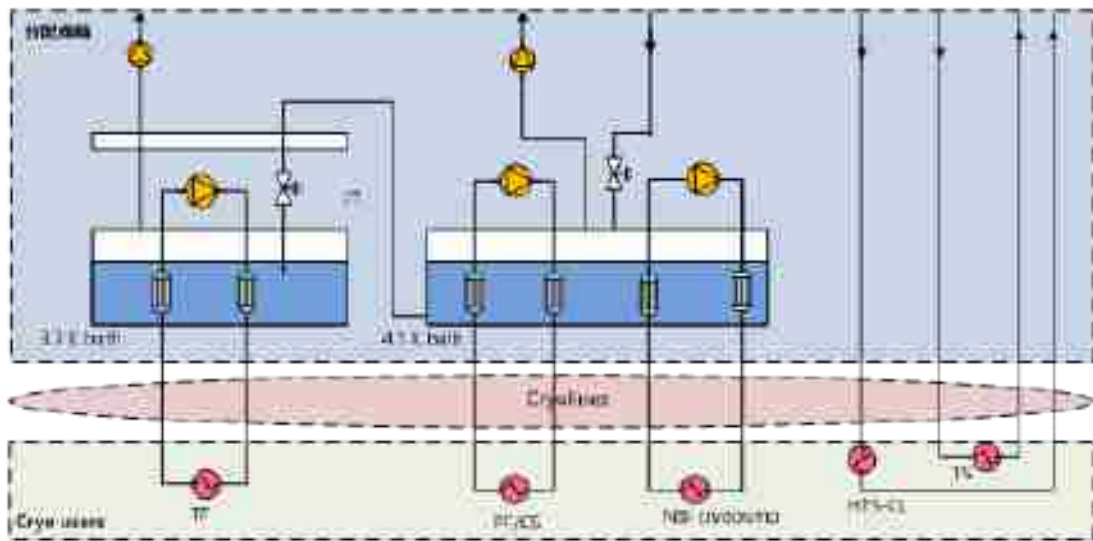


图 3-31 低温分配系统流程简图

低温分配系统主要用于将低温冷量分配给超导磁体、冷屏、低温泵、高温超导电流引线等用户。

[Redacted text block]

氦气回收纯化系统内的主要功能对氦气进行回收、纯化，使之满足纯度要求

[Redacted text block]

### 3.2.4 射频波与中性束注入加热系统

#### 3.2.4.1 电子回旋共振加热系统

BEST 电子回旋共振加热 (ECRH) 系统包括以下子系统：微波源 (source)、传输线(transmission line)、发射天线(launcher)、监控保护(control & interlock)和附属设施 (冷却、真空等)，系统组成架构如下图所示。微波源用于产生微波能量，由大功率回旋管 (gyrotron) 和回旋管运行所必需的制冷机型超导磁体、低温以及各类辅助电源等附属设备组成。高压电源为回旋管提供所需的直流高压电能。回旋管输出的大功率微波能量由封闭的波导(waveguide)传输线传输至与装置真空室相连的发射天线，由其发射至目标等离子体区域。ECRH 本地控制保护子系统用于进行系统运行状态监控、设备故障诊断与保护、以及与 BEST 装置 CODAC 系统的通讯等。冷却及真空等附属设施为系统各组成设备提供必要的冷却及真空处理条件，以保障 ECRH 系统长脉冲可靠运行。

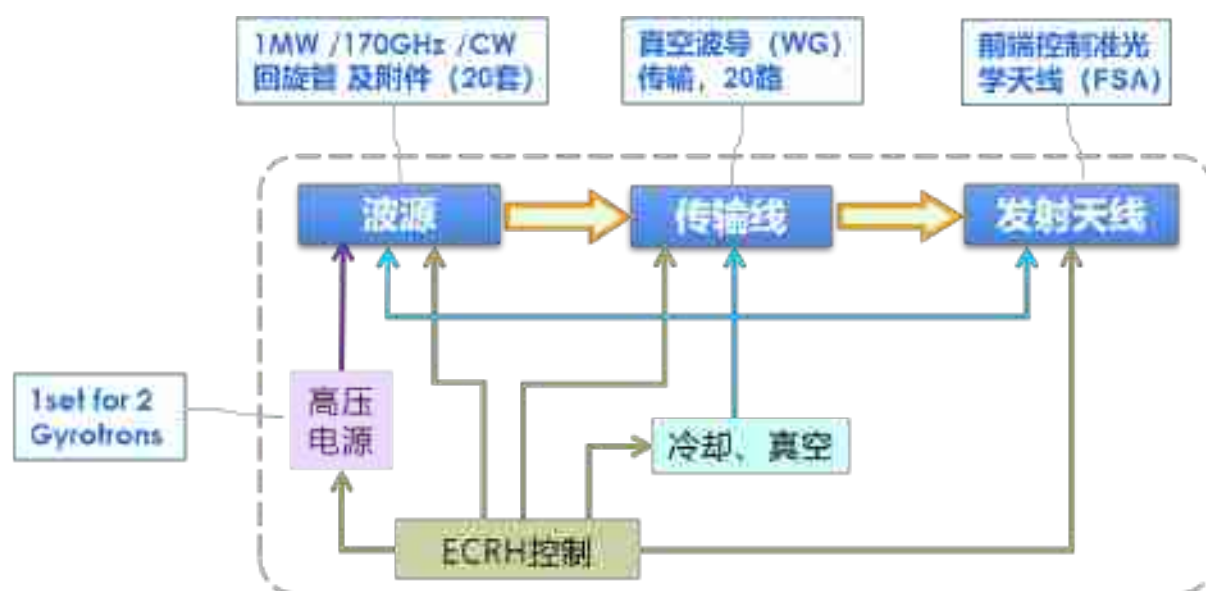


图 3-32 电子回旋共振加热系统组成架构图

### (1) 电磁辐射及防护

位于 5#楼主机大厅建筑群外缘的 5#-4 波源及诊断大厅内，距离装置中心 75m 范围以外如下图所示。回旋管工作需要高压电源供电、超导磁体提供磁场位形，通电过程中在其收集极部位会产生电磁辐射，考虑到人员安全和系统运行安全需求，采取的安全防护和管理措施包括：设备周围安置铅屏蔽进行电磁辐射防护，设备安装区域铺设接地绝缘设施；微波产生、传输和发射链路完全封闭，ECRH 系统工作时微波能量在封闭的传输通道内，各波导接口采用专用的金属密封和连接部件进行真空密封，可确保运行过程中基本无微

波泄漏。由于工作波长不足 2 毫米，微波功率在自由空间剧烈衰减，几乎无法从传输通道接口位置泄漏。同时，波设施周围设置安全围栏，并在醒目位置设置警示标识、系统工作状态指示灯和声音提示装置；设备运行区域安装视频监控、并与控制系统联锁，确保 ECRH 系统运行前人员离开设备区。

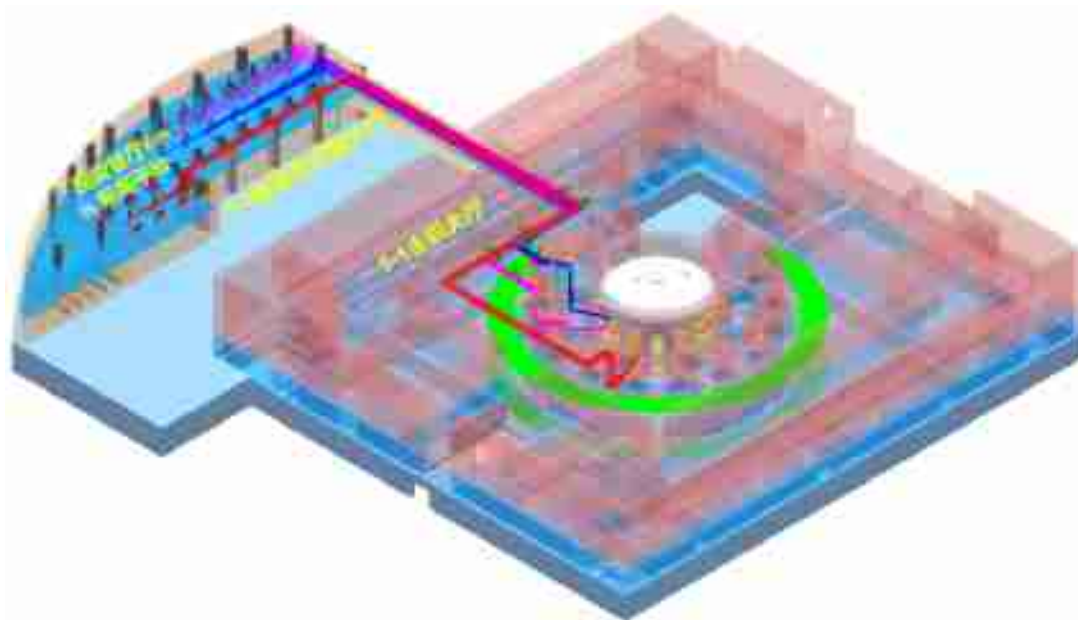


图 3-33 BEST 电子回旋共振加热系统布局示意

## (2) 低杂波系统组成及工艺分析

低杂波电流驱动系统（Lower Hybrid Current Drive System），主要实现高功率微波的产生、传输、及波与等离子体耦合。主要包括以下几大部分：1) 微波源系统；2) 微波传输线；3) 天线系统；4) 支撑和保障上述系统运行的监测控制系统、水冷系统以及其他附属设备。

主要子系统各自的作用及构成如下。

1) 微波源系统通过速调管放大器将高压电源的电能转化为微波能，其主要由低功率微波激励源电路、高功率速调管放大器及辅助电源系统组成。

2) 微波传输线系统的作用是将速调管放大器输出的微波能量馈送到耦合天线的输入端口。由环行器、陶瓷窗、水负载、定向耦合器、隔直器、换向波导、矩（圆）形波导等多种功能器件级联而成。

3) 天线系统利用若干行、若干列辐射单元组成的多结波导阵，将微波能量以特定波谱的形式耦合进目标等离子体中，用于加热等离子体和驱动等离子体电流。由多结



波导阵、功分器件、过渡连接波导、水冷组件、真空室及其配套部件、以及支撑导行机构组成。

4) 监测控制系统用来保证系统安全稳定运行并实现物理实验要求的功能。由高反射保护、打火保护、过流保护、微波源系统时序控制、功率与相位控制、稳态监控等部分组成。

### (3) 电磁辐射及防护

产生高频电磁辐射的设备之一为大功率速调管，[REDACTED]  
[REDACTED]，能够保证良好的电接触，确保微波不泄漏。

产生高频电磁辐射的设备之二为微波传输线，[REDACTED]  
[REDACTED]能够保证良好的电接触，确保微波不泄漏。

#### 3.2.4.2 离子回旋加热系统

离子回旋共振加热是未来聚变堆重要的辅助加热手段，它具有直接加热芯部离子、锯齿控制、产生高能粒子和无高密度限制等优点，成为未来聚变堆加热潜力。根据 BEST 物理需求，一期计划注入 10MW 以上的离子回旋功率，联合其它加热手段最终实现 D-T 聚变的物理目标。

离子回旋系统（简称 ICRF）主要由发射机功率源系统、传输系统、天线系统、控制系统和其它附属系统等组成，如下图所示。射频信号源经过放大后发射机输出兆瓦级功率，经由传输线传输到天线系统，通过天线辐射的电磁波与磁化等离子体中的右旋极化波发生共振，从而把能量传递给等离子体，最终实现等离子体的有效加热。

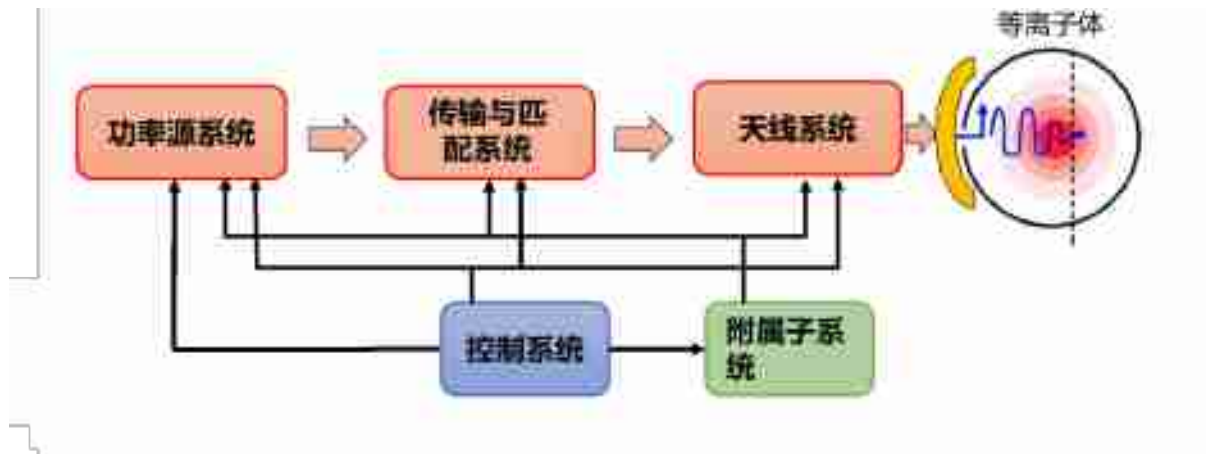


图 3-34 离子回旋系统组成图

### (1) 离子回旋各子系统的主要功能和架构

**发射机功率源系统：**其功能主要将几毫瓦的射频信号通过多级射频放大最终实现兆瓦级射频功率输出。其主要由射频放大系统和监测控制系统等组成。

**传输与匹配系统：**传输线系统的主要功能是将发射机输出的高功率有效地传输到天线，它是连接发射机与天线之间的桥梁。主要由同轴传输线，阻抗调配器和真空馈口等组成。

**天线系统：**天线将发射机源传输的功率转换成电磁波形式，能量通过天线耦合到等离子体，以实现等离子体的有效加热。主要由天线主体结构、天线支撑辅助系统和 neutron 屏蔽系统等组成。

**控制系统：**主要包括对功率输出、相位监测、数据采集和电源保护、漏水监测等的控制。

各子系统的组成架构如下图所示。



图 3-35 BEST 离子回旋子系统主要架构

## (2) 离子回旋系统电磁辐射及防护

离子回旋系统产生高频电磁辐射的设备主要是发射机，位于 L3 层#1 波源大厅 8 套发射机、#2 和#3 波源大厅各 4 套发射机，如下图所示。发射机运行频率范围：50-100MHz；射频波辐射主要的屏蔽措施：对于波源大厅发射机放大器产生的高频电磁辐射，主要采取的措施：发射机腔体的腔板设计成双层的簧片结构，能有效的屏蔽射频信号，从而防止射频波的泄漏。

即使射频波有些微泄漏，也会随着距离很快衰减，对人体伤害较小。

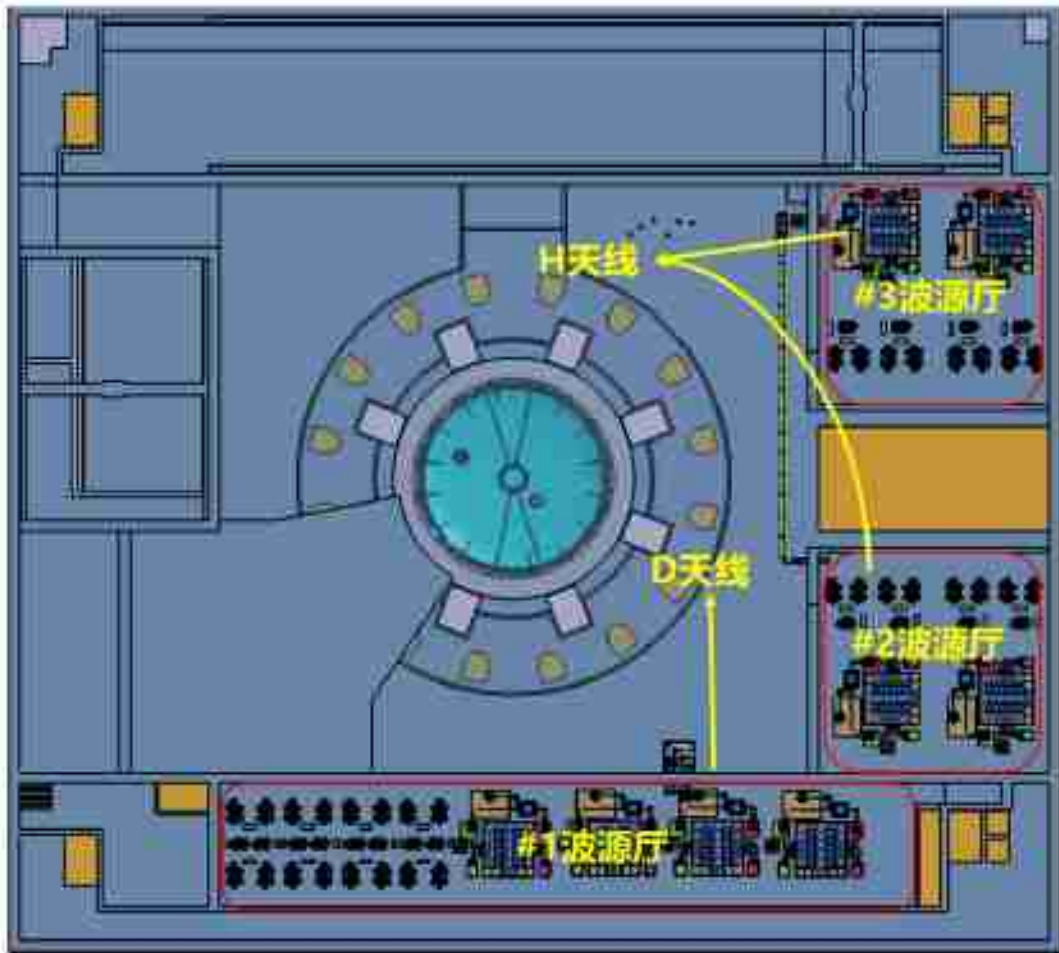


图 3-36 BEST 离子回旋波源大厅发射机布局示意图

### 3.2.4.3 中性束注入加热系统

在磁约束聚变装置中，中性束注入加热是重要的辅助加热手段之一。中性束注入加热系统离子源引出的离子经过加速电极后，获得较高能量，高能离子与中性化室的气体发生碰撞及电荷交换后，形成高能的原子离子混合束，离子被偏转系统过滤后，剩余的中性束通过束通道被输送到聚变装置内。高能中性束与等离子体发生碰撞、电离和电荷交换等作用，将自身携带的大部分能量传递给等离子体，从而实现加热和驱动等离子体的目的。由于中性束注入加热效果显著且驱动电流效率高，因此中性束注入加热是聚变装置和未来聚变堆重要的辅助加热手段。

针对 BEST 辅助加热系统对中性束的物理需求（一期：500keV、4MW，二期：800keV、10MW），拟采用基于负离子束源的中性束注入（NNBI）系统以获得理想的中性化效率。其总体性能参数与指标如下表所示：

表 3-7 中性束注入加热系统的总体性能参数与设计指标表

序号	参数名称	性能指标 (I期)	性能指标 (II期)
1	中性束能量	500keV	800keV
2	中性束功率	4MW	10MW
3	注入器数量	1	1
4	中性束脉宽	100s	1000s

拟建的 NNBI 主要由负离子束源系统、束线系统、电源系统、控制系统、诊断系统组成。其系统构成方框图如下图所示。



图 3-37 中性束注入加热 NNBI 系统构成方框图

### 3.2.5 电源系统

本项目“电源系统”根据聚变设施的需求和特点，分为“高压供变电”、“磁体电源”、“开关网络及直流传输”、“内真空室电源”、“微波加热高压电源”、“中性束超高压电源”、“低压配电系统”七个技术支撑系统，分系统设计、建设和管理，由电源系统统一协调。

#### (1) 高压供变电系统

高压变电站及其供变电系统是 BEST 的技术支撑系统之一，  
 可实现向 BEST 的实验子系统设备、建筑及设施等负荷进行配供电。高压变电站及供变电系统的建设将实现对其综合设施各子系统实现电能输送、分配、运行、控制与保护，保障综合设施的各用电负荷所需电能的分配和稳定安全运行。BEST 的各子系统负荷数量多且种类繁多，据负荷特质区分主要为脉冲性负荷(其供配电网简称 PPEN)和稳态性负荷(其供配电网简称 SSEN)两大类；据负荷具体性质区分，分为电源类、电机类、涉核类及常规类四种类型。

PPEN 电网主要作用为各类磁体线圈、加热及电流驱动供电，并包含因负荷自身低功率因数和非线性需配置的无功补偿及谐波抑制系统。SSEN 电网（即为子系统-低压配电系统）为 BEST 所有需稳态电力供应的设备供电，同时兼顾发生紧急事件时，为现场应急电源如柴油发电机、不间断电源及直流电池等相关设备及组件供电的需求。

(2) 磁体电源系统

BEST 装置磁体电源系统主要包括磁体电源(CPS: Coil Power Supply)、开关网络及直流传输系统(SNDT: Switching Network and DC Transmission System)和内真空室电源(IVC PS: In Vessel Coil Power Supply)。

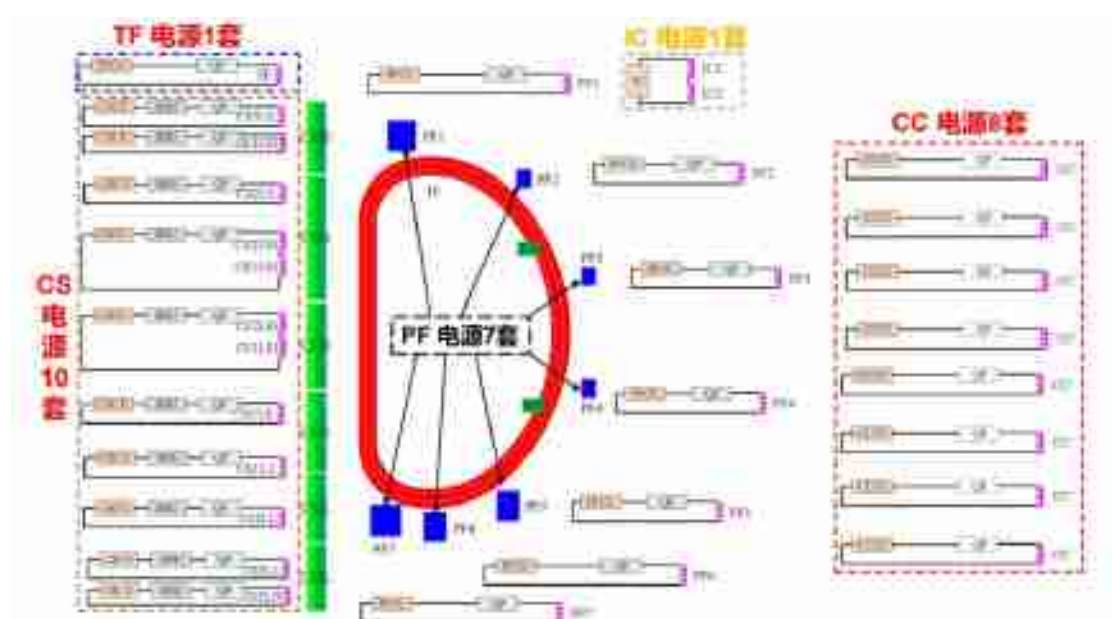


图 3-38 磁体电源系统结构

磁体电源系统的主要功能是为等离子体的约束、维持、加热，以及等离子体电流、位置、形状、分布和破裂的控制，提供必要的工程基础和控制手段。对于装置运行的性能与安全，物理实验的成败与效率，有着至关重要的作用。

### (3) 开关网络及直流传输

开关网络和直流传输系统的主要功能是提供击穿并建立等离子体电流所需的高电压，实现磁体电源和超导磁体在失超等故障下高储能磁体能量的安全可靠转移和快速泄放，并且提供电源和超导磁体运行时高功率传输的可靠通路。

### (4) 内真空室电源

内真空室电源的主要功能是控制等离子体在垂直方向的快速漂移，实现等离子体在垂直方向的平衡与定位。

### (5) 微波加热高压电源

高压直流电源是一个集功率微波管技术、高电压技术、电力电子技术和自动控制技术等学科的综合技术实体，作为加热系统的重要组成，高压直流电源是其庞大的子系统之一，电源将数十千伏和兆瓦功率输入高功率真空管，其造价、建设周期和布局都占有相当大的比例，合理的设计在满足性能的前提下将节约巨大的造价和占地成本，这对电源的技术研究和设计提出了极高的要求。

依据负载特性和总体建设要求，微波加热高压电源系统包括：

- 1) 16套 50-100MHz ICRF 高压电源系统的建设:包括新建 16套末级-30kV/130A (FPA) 高压电源和 16套前级-20kV/15A (DPA) 高压电源，其中 1套 FPA 高压电源和 1套 DPA 高压电源服务于单套 1MW ICRF 高功率电子管；
- 2) 12套 4.6GHz LHCD 高压电源系统的建设，具体包括新建 12套-63kV/40A 高压电源，其中单套高压电源服务于两只并联连接的 0.5MW 速调管；
- 3) 7套 140GHz ECRH 高压电源系统的建设：具体包括新建 7套 -60kV/100A 高压电源，单套高压电源服务于两只并联连接的 1MW 电子回旋管。

### (6) 中性束超高压电源

BEST N-NBI 的加速器四级加速，系统的验收指标是 200keV~800keV，  
需要配套总输出电压-800kV，四级串联的高压电源。

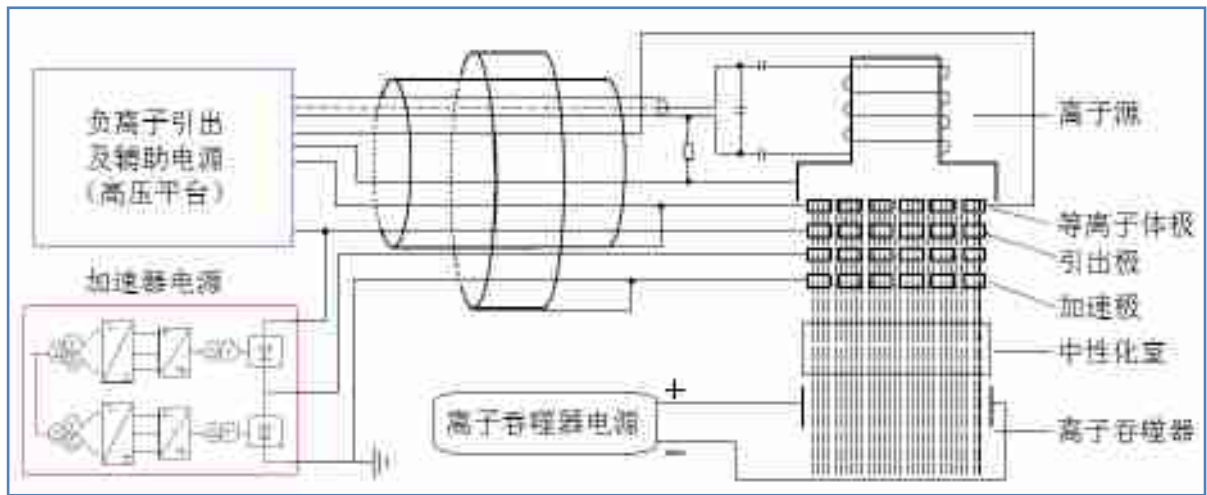


图 3-39 NNBI 电源系统图

### (7) 低压配电系统

低压供电网络系统为电力系统的重要组成部分，承载传输、变换、分配电能的作用，为 BEST 核聚变实验装置各系统用电的基础。在运行过程中，全程不断地给核聚变实验装置及各实验系统设备运行输入能量，以便维持装置及设备的持续、安全、稳定运行。低压供电网络系统一般由配电变压器、低压配电线路、进线柜、电容补偿柜、联络柜、出线柜以及相应的控制保护设备组成。为 BEST 所有需稳态电力供应的设备供电，同时兼顾发生紧急事件时，为现场应急电源如柴油发电机、不间断电源及直流电池等相关设备及组件供电的需求。安全、合理、稳定、可靠的低压供电网络系统有利于核聚变实验装置各系统高效运行。

### 3.2.6 水冷系统

BEST 水冷系统包括托卡马克水冷系统(TCWS: Tokamak Cooling Water System)、设备水冷系统(CCWS: Component cooling water system)、冷冻水系统(CHWS: Chilled Water System)和散热系统(HRS: Heat Rejection System)。水冷仪控系统 (I&C: Instrument and Control System) 为整个水冷系统提供所需的仪表仪器、控制及与 BEST 的其它子系统的数据接口。



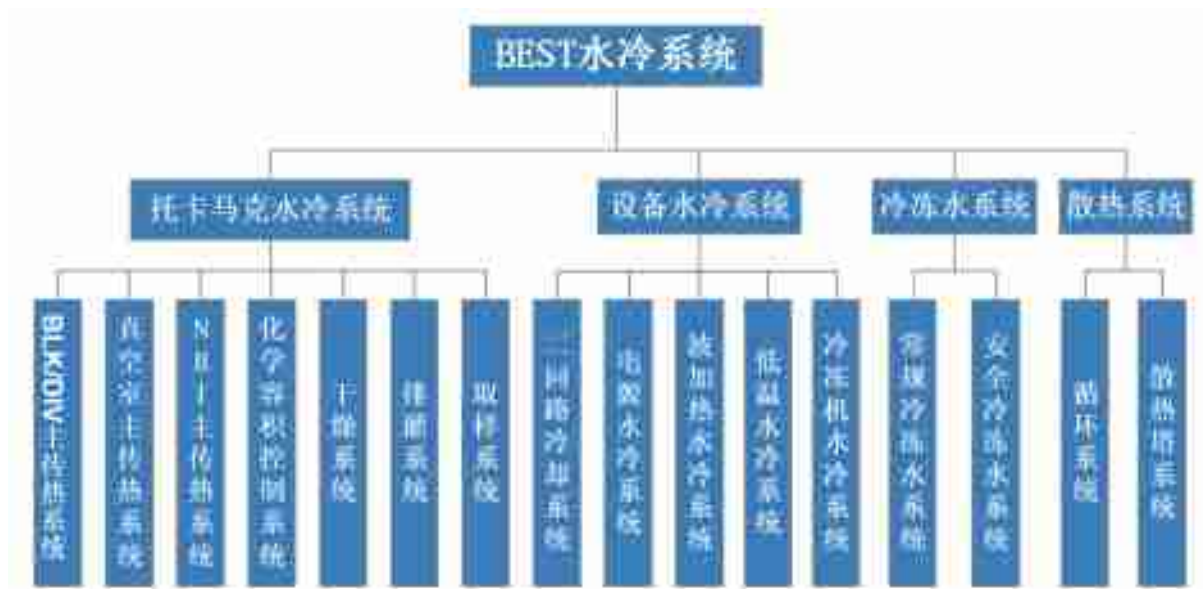


图 3-40 BEST 水冷系统组成示意图

托卡马克水冷系统位于 5#楼，分为三个主传热系统、两个化学容积控制系统、一个排灌系统和一个干燥系统。三个主传热系统主要包括 BLK/DIV 主传热系统、真空室主传热系统和中性束注入主传热系统。BLK/DIV 主传热系统主要将 BEST 真空室内部包层、偏滤器和窗口部件上面沉积的热负荷转移到二回路，同时也为包层、偏滤器和窗口部件提供高温高压水进行烘烤。此外 BLK/DIV 主传热系统还配备有安全余热排出功能，以保证在事故工况下转移真空室内部部件的衰变热。真空室主传热系统主要为真空室、内真空室线圈提供冷却水以转移其在等离子体运行过程中沉积的热负荷，同时也为各负载部件提供高温氮气进行烘烤。中性束注入主传热系统主要为中性束注入系统的低压和高压组件提供冷却水以转移其在运行过程中所产生的热负荷。托卡马克水冷系统利用两个化学容积控制系统来控制水体积膨胀和收缩以及冷却水的水质，其包括装置主传热系统化学容积控制系统和中性束注入化学容积控制系统。干燥系统需要吹扫和干燥内部部件，干燥中性束部件和真空室，以支持这些部件和真空室定期进行泄漏检查和维护工作。干燥系统还要为偏滤器提供热氮气进行气体烘烤。氮气被循环使用以控制正常通气和减少氙的释放。排灌系统为各主传热系统提供排水、排气和填充/重复填充等操作，在系统维护检修阶段将氟化水储存在储水罐里；排气收集系统是排灌系统的一个子系统，它接收并缓冲来自托卡马克水冷系统设备的排气和安全阀排气，分离出水分并将气体释放到 N-VDS。取样系统提供监测整个托卡马克水冷系统水质化学和放射性物质污染的功能。

设备水冷系统位于 3#楼，主要包括二回路水冷系统、电源水冷系统、波加热系统、

低温系统冷却水和冷冻水系统，设备水冷系统的功能是把辅助系统产生的热量通过冷却水带出，热量将被传输到末端散热装置，最终排放到大气环境中。

冷冻水系统包括常规冷冻水系统和安全冷冻水系统，具体指真空室、氚处理中心冷冻水系统和暖通空调系统冷冻水系统。真空室冷冻水系统主要为除氚系统和真空室系统提供冷冻水，其仅在聚变装置出现故障时需要采用安全回路带走冷冻水的衰变热负荷时才需要启动。

散热系统由循环水系统和冷却塔系统（包括热水池、闭式冷却塔和冷水池）组成。

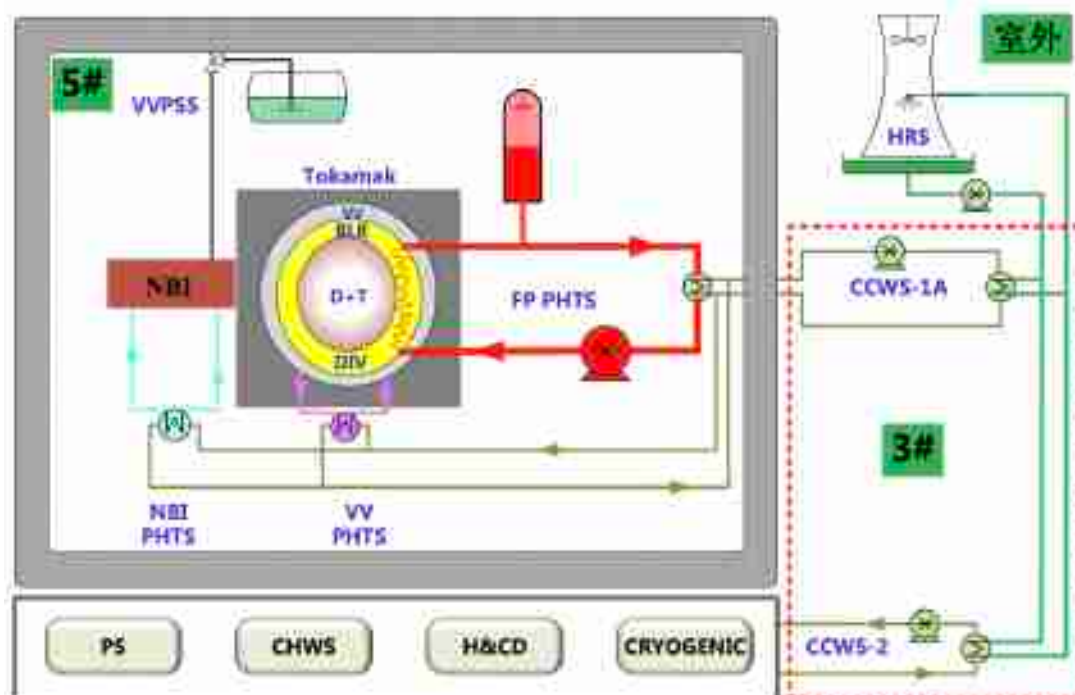


图 3-41 BEST 水冷系统结构图

上图中的简写说明如下：主传热系统（PHTS: Primary Heat Transfer System）；化学容积控制系统（CVCS: Chemical and Volume Control System）；聚变功率（FP: Fusion Power）；真空室（VV: Vacuum Vessel）；包层（BLK: Blanket）；偏滤器（DIV: Divertor）；电源（PS: Power Supply）；冷冻水系统（CHWS: Chill Water System）；真空室压力抑制系统（VVPSS: Vacuum Vessel Pressure Suppressing System）；设备水冷系统（CCWS: Component Cooling Water System）；散热系统（HRS: Heat Rejection System）。

托卡马克水冷系统含有的冷却水包含放射性物质如活化腐蚀物（ACPs: Activated Corrosion Product）和氚，其为放射性物质提供第一层包容，并在所有运行模式中保证

整体密封性。托卡马克水冷系统全部位于 5#楼主机大厅氙包容 C2 区，主机大厅为其提供第二道包容。托卡马克水冷通过中间换热器将热负荷转移到位于 3#楼的设备水冷系统。

主机厅涉氙排水系统的功能是：将房间内的消防水、工艺管道破口水以及 C3 区域局部冷却器产生的冷凝水排放到 B2 层 C3 区域的储罐中；将 C2 区域房间内的消防水和工艺管道破口水排放到 B2 层 TWCS 房间的保留区域；将 C2 区域局部冷却器产生的冷凝水排至 B2 层 C2 区域的储罐；在没有排水条件下保持密封。

氙处理中心涉氙排水系统的主要功能是：将消防用水和工艺管道破口水排放到 B2 层保留水箱中；将冷凝液排放到 B2 层储罐中；将屋顶暖通空调机组产生的冷凝水排入工业废水系统。

这些排水井和储罐都配备了水质检测接口，可对其水质进行分析以确定相应处理和排放要求。如果低于排放标准要求，则排放至工业污水网，如果高于排放值则输送至氙处理中心进行除氙处理。正常情况下，排水系统所配备双重冷凝液储罐每周交替使用（一个接收，另一个可以进行分析并清空）。夏季时，由于增加了散热负荷而导致生成更多冷凝液，

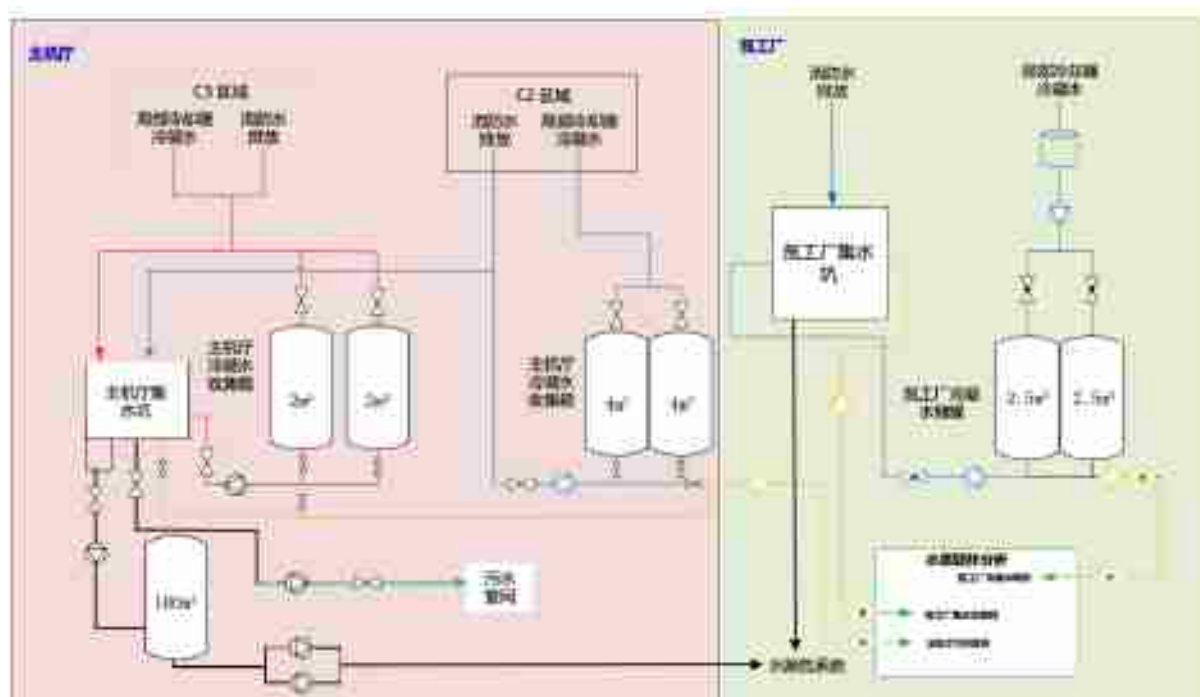


图 3-42 涉氙排水系统工艺流程图

## 3.2.7 诊断与运行控制系统

### 3.2.7.1 诊断系统

BEST 诊断系统将基于 ITER、CFETR 装置诊断系统的设计经验和目前 DEMO 装置的诊断系统设计思想，为 BEST 装置设计、研制、建设燃烧等离子体诊断系统。诊断系统的主要功能包括：面向氘氚运行，装置和环境核安全相关的诊断技术发展，装置安全保护的关键参数诊断系统；等离子体运行控制参数诊断，以及可能影响装置运行的长期监测诊断；并针对 BEST 装置的科学目标，完备的物理理解诊断。对于 BEST 燃烧等离子体研究，已将所需诊断系统功能分为三类：1. 装置安全保护，2. 运行控制，3. 物理理解。按照三类诊断的分类，提出完整的等离子体诊断方案并研制出准确、可靠的诊断系统。

目前针对 BEST 装置与运行所提出的测量需求，已选择 28 套诊断系统完成对 43 个物理量的测量。将所有诊断系统分为六大类诊断及四大类通用技术，即磁诊断、激光诊断、中子及聚变产物诊断、光谱诊断、辐射及辐射功率诊断、微波诊断及窗口集成技术、第一镜及 PWI 技术、核电子学技术、综合诊断技术。BEST 装置燃烧等离子体对诊断测量技术有一些更为苛刻的要求，如诊断窗口集成度要求高、要求诊断系统抗辐照能力强及等离子体多组分（离子、电子、 $\alpha$  粒子、中子）等。对于诊断技术方案的确定，需要结合目前等离子体诊断研究的现状与前沿技术，同时进行关键技术的攻关，共同保障 BEST 装置中诊断系统的可靠测量。

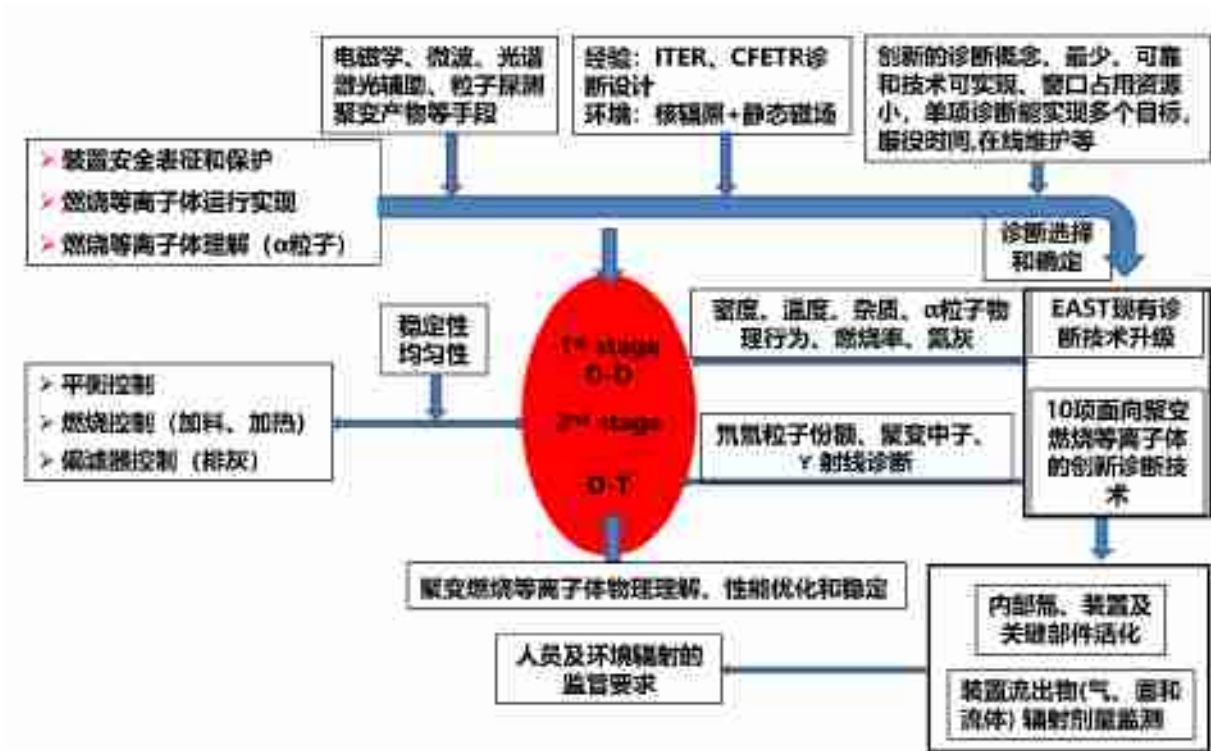


图 3-43 BEST 燃烧等离子体诊断研究路线图

### 3.2.7.2 控制系统

BEST CODAC 系统包括中央控制系统（Central Control System）、中央联锁系统（Central Interlock System）、数据采集系统（Data Acquisition System），数据服务系统（Data Service System）和网络服务系统（Network Service System）

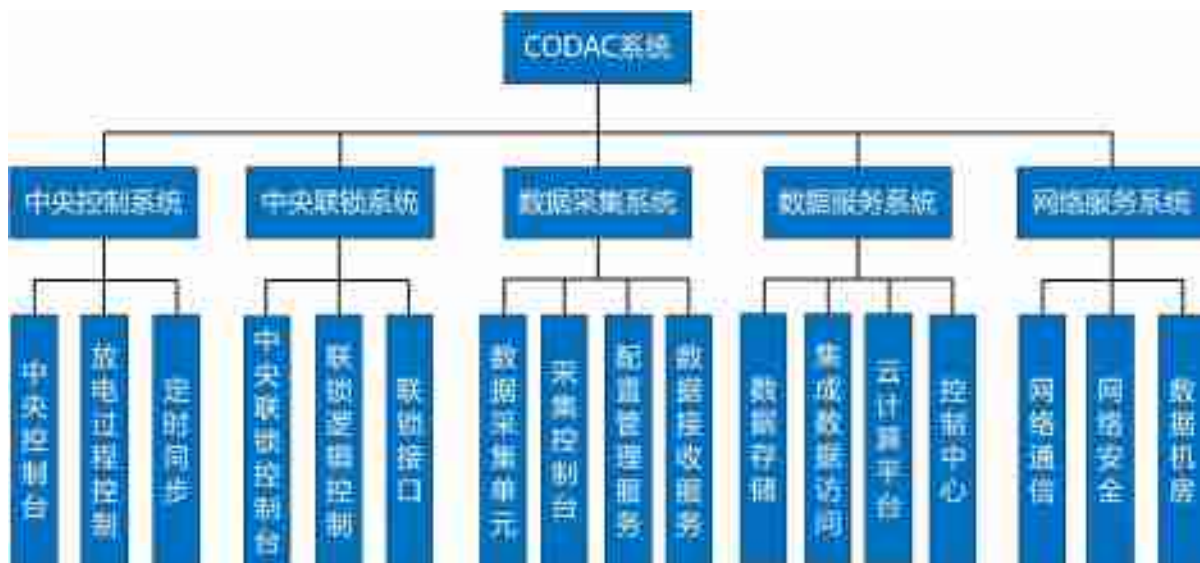


图 3-44 BEST CODAC 控制系统组成示意图

中央控制系统包括：中央控制台、放电过程控制、定时同步三个组成部分。中央控制台作为放电过程控制系统的上位机，用于设置、显示装置运行的关键信息，并为运行人员提供友好的人机交互界面；放电过程控制作为中央控制台下位机，与实验区域内主要分控系统联系，并基于工业通信构架发布分系统配置信息，同时监控、管理装置运行状态，检测是否按照预设逻辑运行；定时同步负责给分布在不同物理空间的子系统提供精确的同步控制，协调这些子系统按照预设的时序进行工作。

中央连锁系统包括：中央连锁控制台、连锁逻辑控制、连锁接口三个组成部分。中央连锁控制台作为中央连锁系统的上位机，用于设置、显示装置子系统的连锁状态信息，为运行人员提供人机交互界面以及存储发布连锁事件信息等；连锁逻辑控制作为中央连锁系统的下位机，与各子系统相连，用于监管子系统运行状态，做出相关的连锁逻辑判断并上报中央连锁控制台；连锁接口用于中央连锁系统与子系统之间信号连接，将所有信号转化为光信号传输，保障各系统安全。

数据采集系统包括：数据采集单元、采集控制台、配置管理服务、数据接收服务四个组成部分。数据采集单元是用于采集诊断信号并将数据上传到数据存储服务器；采集控制台用于与中央控制系统通信，并协调所有采集单元和数据存储服务器运行过程；配置管理服务用于管理数据采集系统的配置参数，并监控数据采集系统的运行状态；数据接收服务用于接收采集单元采集的数据，并将其写入到诊断数据库中。

数据服务系统包括：数据存储、集成数据访问、云计算平台、控制中心四个组成部分。数据存储为 BEST 各系统提供统一的数据存储；集成数据访问为实验人员提供集成化的数据和信息访问，提供统一的数据访问入口和访问环境；云计算平台作为整个数据服务系统的基础架构；控制中心是一个集成化信息中心，可以进行放电实验和总体协调。

网络服务系统包括：网络通信、网络安全、数据机房三个组成部分。网络通信为所有系统提供网络通信功能；网络安全保障实验网络通信安全；数据机房为保障 CODAC 系统和等离子体控制等相关系统的安全平稳连续不间断运行，提供一个恒温恒湿并且具有高供电质量的环境。

CODAC 系统结构如下图所示。

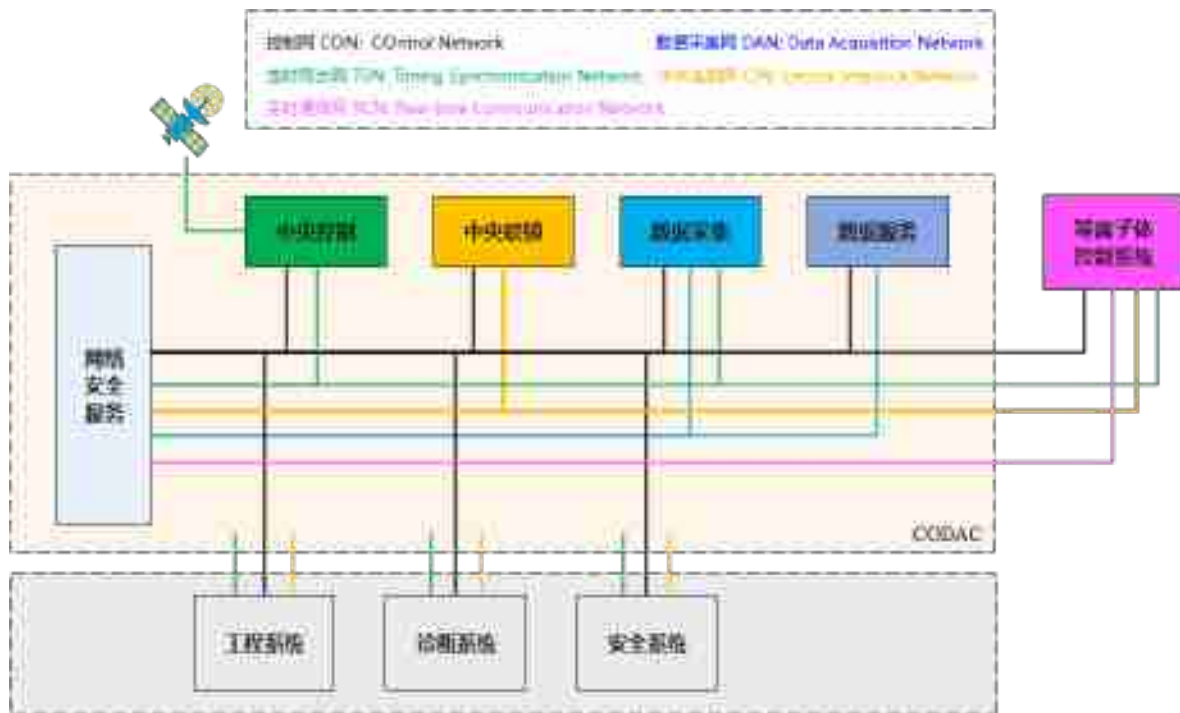


图 3-45 BEST CODAC 系统结构图

从功能上包括五个网络：控制网 Control Network (CON)，主要用于控制系统内部及相互之间的通信；数据采集网 Data Acquisition Network (DAN)，主要用于诊断系统的数据采集和传输；定时同步网 Timing Synchronization Network (TSN)，主要用于 CODAC 向各系统提供准确的时间同步；中央联锁网 Central Interlock Network (CIN)，主要用于中央联锁系统和分系统联锁系统之间的通信；实时通信网 Real-time Communication Network (RCN)，主要用于等离子体控制系统相关的实时数据传输。CODAC 通过上述网络与其他各系统进行通信和数据交互，将所有系统联系起来，协同实现实验运行。

### 3.2.8 测试包层系统

#### (1) TBM 系统简介

为了验证 CFETR 氚增殖技术可行性，BEST 装置提供两个中窗口分别对 CFETR 超临界二氧化碳液态锂铅 (Supercritical CO<sub>2</sub> cooled lithium-lead, COOL) 包层及 CFETR 水冷固态增殖剂 (Water Cooled Ceramic Breeder, WCCB) 包层进行测试。其中，COOL 测试包层模块 (Test Blanket Module, TBM) 位于 BEST 装置外赤道面 L 窗口布置，WCCB 测试包层模块 (Test Blanket Module, TBM) 位于 BEST 装置外赤道面 M 窗口布置，如

下图所示。

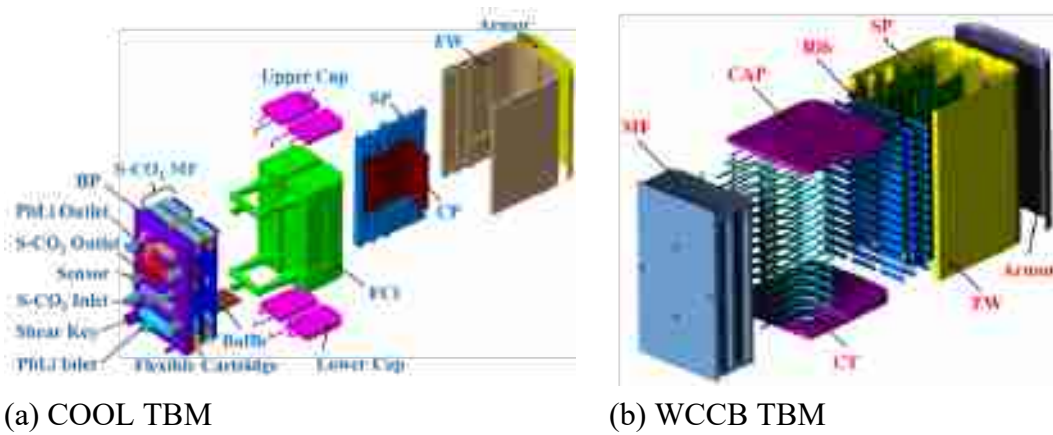


图 3-46 BEST COOL/WCCB TBM

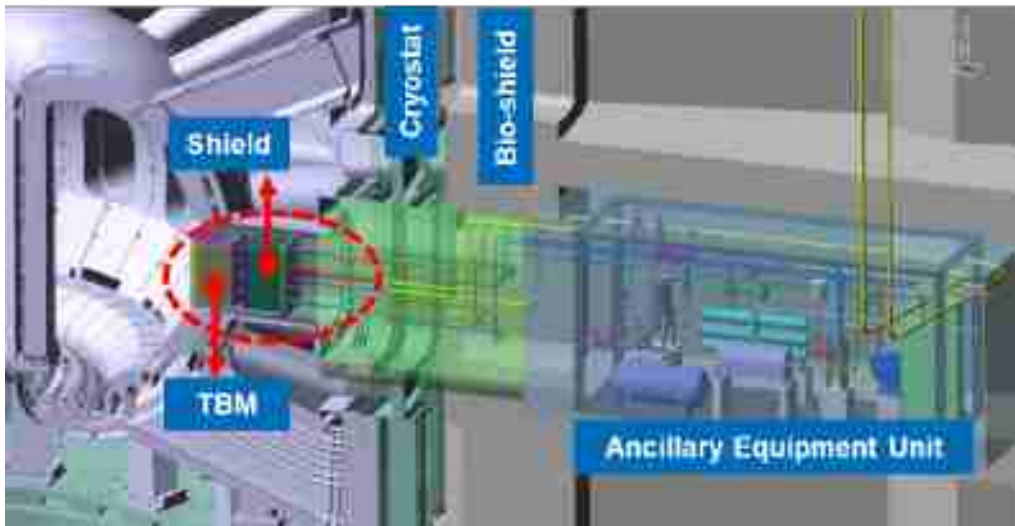


图 3-47 BEST TBM 窗口布置

COOL 及 WCCB TBM 系统主要由 TBM 组件、TBM 窗口插件、主传热系统、核测量系统、氦提取系统和氦衡算系统等组成。在聚变中子场下，包层中的铍或铅材料通过中子倍增反应实现中子倍增，而其中的锂材料与中子发生  $\text{Li}(n, \alpha)\text{T}$  反应产生氦，这发生在安装于 BEST 真空室中窗口的 TBM 组件中的氦增殖区。之后通过载带气体或液态锂铅氦增殖剂将氦载带入位于托卡马克主机建筑 TBM 辅助设备间的氦提取系统进行氦提取。整个过程通过氦衡算系统进行氦的计量。

假设不考虑 TBM 模块中增殖氦的提取、衰变和其他损失，在 BEST 不同运行阶段，TBM 模块的氦产生能力总量如下表所示。



表 3-8 TBM 系统在 BEST 不同运行阶段的氚产生能力

运行阶段	总中子产额	总运行时间	WCCB TBM 氚产生能力	COOL TBM 氚产生能力
阶段 1	2.5E+23	2 年	41 mg	26 mg
阶段 2	1E+24*	5 年	165 mg	105 mg
阶段 3	●	10 年	●	●
*: 阶段 I 和 II 总中子产额; **: 三个阶段总中子产额。				

(2) TBM 氚工艺及操作流程

WCCB TBM 系统的氚工艺及操作流程如下: (a) WCCB TBM 的  $\text{Li}_2\text{TiO}_3\&\text{Be}_{12}\text{Ti}$  氚增殖区与聚变中子反应实现产氚, 产生的氚随氦吹扫气载带进入氚提取系统; (b) 进入氚提取系统的载氚气体通过热金属床还原和钯膜渗透进行氚的纯化与分离, 分离出来的极少量氚经过处理后作为废物排出 TBM 系统; (c) 与此同时, 吹扫气体中经催化氧化转化为氚化水, 利用冷阱吸附法回收氚化水。通过冷阱收集到的氚水, 由高精度的液闪计数法计量; 电离室用于工艺中的氚检测, 杂质含量分析通过气相色谱法; (d) 滞留极少量氚的 TBM 在 BEST 大修维护时, 随窗口插件一起由转运小车运送至热室进行清洗除氚; (e) 渗透入水冷却剂的极低量氚随冷却剂排放进入 BEST 含氚废水处理系统进行集中处理。

COOL TBM 系统的氚工艺及操作流程如下: (a) COOL TBM 的 PbLi 氚增殖区与聚变中子反应实现产氚, 产生的氚随 PbLi 载带进入氚提取系统; (b) 进入氚提取系统的载氚气体通过真空渗透法实现气体的分离, 再通过 ZrCo 吸氢床实现吸氢和再生。分离出来的极少量氚经过处理后作为废物排出 TBM 系统; (c) 与此同时, 利用电离室测量贮氚 ZrCo 床中的总氚量, 利用特殊的氢同位素探测器在线测量液态 PbLi 中的氚浓度, 利用高精度的液闪计数法进行氚的离线计量; (d) 滞留极少量氚的 TBM 在 BEST 大修维护时, 随窗口插件一起由转运小车运送至热室进行清洗除氚; (e) 渗透入二氧化碳冷却剂的极低量氚随冷却剂一起被搜集进入含氚废气处理系统进行集中处理。

TBM 系统在装置运行初期就安装; 拆卸策略是: 如 TBM 系统出现损坏, 1) 易损部件更换, 采用 port-cell 区域现场搭建屏蔽箱, 人工辅助进行更换; 2) 功能性损坏, TBM 及窗口插件一起由自动引导搬运车小车转运至热室存储。

### (3) 产污环节

产污环节如下：(a) WCCB 及 COOL TBM 模块在热室维护时需清洗除氙，少量氙释放到维持负压的热室房间内并通过气氛除氙净化；(b) TBM 氙提取系统及氙衡算系统置于特制的负压手套箱内，泄漏的少量氙通过与之相连的气氛除氙系统净化；(c) 水及二氧化碳冷却剂的少量渗透氙排放进入含氙废水处理系统或含氙废气处理系统进行集中处理。

### 3.2.9 氙燃料循环系统

BEST 的氙操作量可达百克量级。在燃料循环工艺中，绝大部分氙以氢同位素气体分子形式存在而具有易逃逸的特性，按照国家标准的要求仍需建立完善的安全包容系统，确保氙处理中心的安全、稳定和经济运行，以实现氙环境排放量、工作人员和公众辐射剂量的有效控制。

BEST 向环境排放的放射性废气主要是氙气 (HT) 和氙化水 (HTO)，排出路径包括各排放气体除氙系统尾气、水去氙化系统稀释氢气和 HVAC。

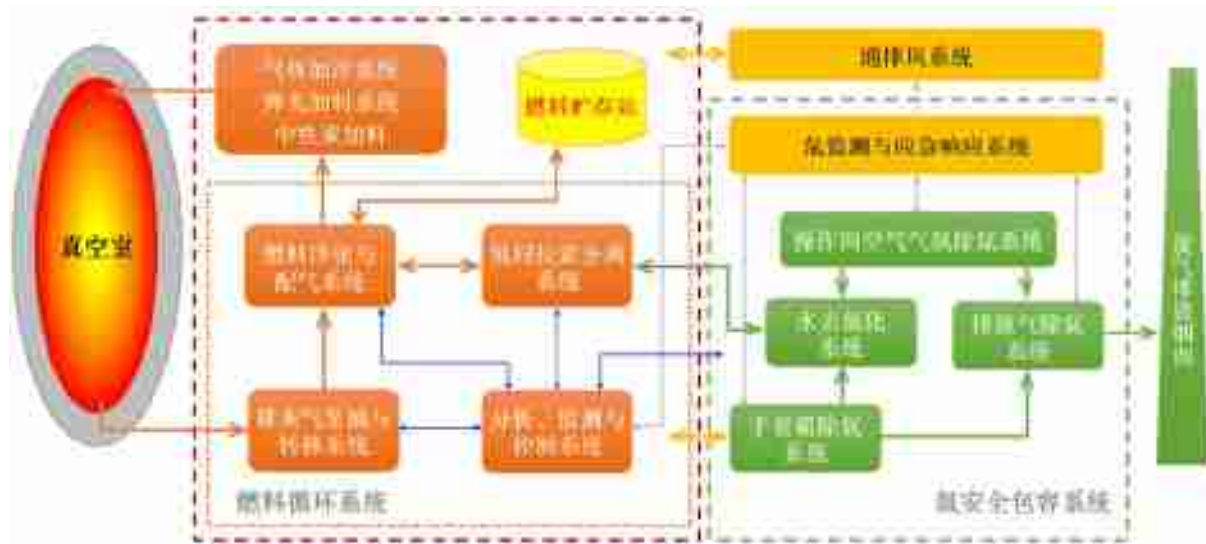


图 3-48 BEST 氙燃料循环工艺流程框图

根据 BEST 氙处理中心总体功能要求，图 3-48 是整个氙处理中心氙燃料循环流程示意图。整个氙处理中心分为两大部分，氙燃料主循环系统和氙安全包容系统。其中，氙燃料主循环系统包括排灰气泵抽与转移系统 (EPT)、燃料净化与配气系统

(FCM)、氢同位素分离系统 (HIS) 以及分析、监测与自动控制系统 (AMC); 氦安全包容系统包括三级包容系统以及环境流出气氛氦浓度实时监测系统, 并配备有手套箱气氛除氦系统 (GDS)、房间气氛除氦系统 (ADS)、排放气体除氦系统 (VDS)、水去氦化系统 (WDS) 四大除氦系统及对氦泄漏进行应急响应及处理的氦监测与应急响应系统 (LMR)。以下分别简要介绍各子系统。

氦处理中心氦氦燃料循环工艺流程的产污节点主要有如下几个:

(1) 燃料净化与配气系统的排灰气净化环节可能产生气态污染物。根据等离子体气体加料情况, 可能产生  $^{41}\text{Ar}$  ( $T_{1/2} = 109.61\text{min}$ ) 等放射性核素, 另外排灰气净化后的尾气中也含有微量的氦。这部分含放射性核素的气体会在  $^{41}\text{Ar}$  等完成衰变后, 经 VDS 深度除氦处理, 达标后才排放, 不会对环境造成影响。

(2) 分析、监测与控制系统的分析环节可能产生气态或液态污染物。含高浓度氦的分析尾气将用化学床吸收, 不外排; 低浓度氦分析尾气将通过 VDS 深度除氦处理, 达标后才排放; 含氦水完成分析后, 将送回 WDS 系统, 不直接外排。因此, 分析环节虽然会产污, 但不会对环境造成影响。

(3) 气氛除氦系统 (含手套箱除氦系统、操作间空气气氛除氦系统和排放气除氦系统) 运行过程中会产生含氦水。但这些含氦水会送至 WDS 系统进行水去氦化处理, 通过水去氦化系统 WDS 处理后, 氦以氢气形式排放, 可实现无含氦液废排放, 因此也不会对环境造成影响。

### 3.2.9.1 氦氦燃料主循环系统

**排灰气泵抽与转移系统 (EPT):** 主要功能是通过大抽速的低温泵组及时抽除真空室的氢粒子、杂质粒子和反应产物氦灰, 维持等离子体放电所需的动态真空度, 并通过转移泵组将排灰气及时转移至燃料净化与配制系统 (FCM), 以实现大部分氦氦燃料的快速循环加料。

**燃料净化与配气系统 (FCM):** FCM 主要包括氦氦燃料的净化及储存供给两部分功能。氦氦燃料净化方面, 在装置脉冲放电燃烧及驻留阶段高效快速回收排灰气中未燃烧的氦氦; 净化产生的极低氦含量的废气, 送往缓冲罐暂存, 经排放气除氦系统深度除

氘后排放；处理中性粒子束气体、真空室壁处理解吸气、加热组件真空包容腔气体等其他来源的含氘浓度较高的气体。氘氚燃料的转移供给及储存方面，FCM为加注系统提供氘氚燃料；根据需要为氢同位素分离系统提供净化后的氘氚气体用于氢同位素分离；为中性粒子束提供氘气；向加注系统供给杂质气体如氮、氖、氩等；放电周期结束后，储存氘氚燃料；定期进行氘储存库中氘和He-3的分离，并收集衰变产物He-3；氘的计量。

**氢同位素分离系统 (HIS)：**用于 BEST 氘氚燃料的同位素分离，该系统可实现单柱 180NL，50NL 以及 10NL 的吸附容量，冷热循环单周期时间控制在 30min 内，；针对 50%D-50%T 的氘氚混合气体，产品气氘丰度 $\geq 90\%$ ，尾气中氘丰度 $\geq 90\%$ ，生产模式下提取率不低于柱容量的 10%，总氘提取率优于 99.5%；针对 90%D-10%T 的氘氚混合气体，产品气氘丰度 $\geq 50\%$ ，尾气中氘丰度 $\geq 99\%$ ，生产模式下提取率不低于柱容量的 10%，总氘提取率优于 99.5%。可满足 BEST 运行工况下氢同位素气体的分离需求。

**分析、监测与自动控制系统 (AMC)：**主要任务是对燃料循环系统及氘安全系统的中化学成分进行全流程监控与计量控制，确保装置稳态运行与安全经济；对氘处理中心各子系统关键环节、关键部件中的氘分布进行检测分析，验证及保证子系统部件正常运行及运行效率；同时对废气、废液中的氘浓度进行分析监测，确保公众健康和环境安全。

### 3.2.9.2 氘安全包容系统

针对 BEST Tokamak 大厅、氘处理中心和热室进行整体除氘系统设计，如图 3-49 所示。

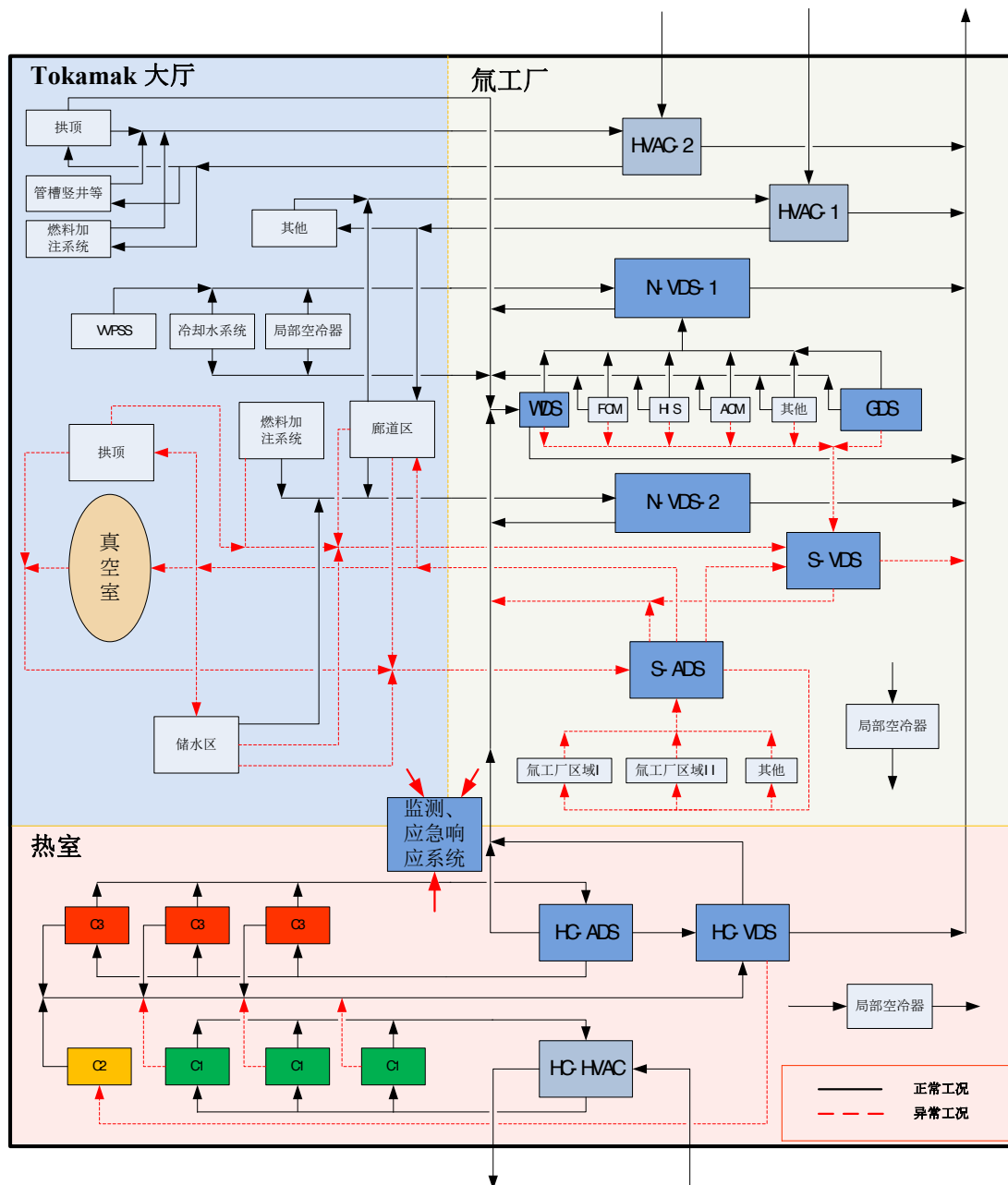


图 3-49 除氚系统总体设计参考示意图

上图中：FCM:燃料净化与配气系统；HIS:氢同位素分离系统；AMC：分析检测与控制；VDS：排放气除氚系统；HC-VDS 热室排风除氚系统；ADS：空气气氛除氚系统；HC-ADS：热室空气除氚系统；GDS：手套箱除氚系统；WDS：水去氚化系统；LMR：氚泄漏监控与应急响应系统；HVAC:暖通空调系统

**空气气氛除氚系统（ADS）**：主要用于去除氚操作房间、Tokamak大厅及热室红区中浓度超标的氚，维持相关环境和房间的氚浓度处于正常水平。通过该系统，可对房间气氛进行循环除氚，减少氚向环境的释放。

**排放气氛除氙系统 (VDS):** VDS 作为 BEST 系统含氙气体向外界排放的出口, 其主要功能为: 1. 氙处理系统工艺尾气与吹扫气的深度除氙及排放; 2. 制造相关空间负压使含氙气从低浓度区域向高浓度区域定向流动, 并对抽提气进行除氙。最终实现系统排出气的达标排放并降低氙排放量。

**手套箱气氛除氙系统 (GDS):** 主要用于处理捕集各系统包容手套箱中浓度超标的氙, 维持其氙浓度处于正常水平。通过该系统, 可对手套箱进行循环除氙, 减少氙进一步向房间的渗透或泄漏。

**水去氙化系统 (WDS):** 通过与氙处理中心气氛除氙系统的协同作用, 控制氙排量在设计限值以内, 最终实现氙处理中心的安全包容目标。

**氙泄漏监控与应急响应系统 (LMR):** 主要功能是通过在氙操作房间和手套箱内配置氙浓度监测仪对相应环境和空间进行氙浓度实时监测, 当发现氙浓度高于设置的事故等级报警限值时发出报警, 并对相应房间和空间进行封闭, 同时结合工艺系统报警、手套箱报警等信息综合判断并启动相关的除氙系统进行应急除氙处理, 直至氙排放源得到控制和气氛中氙浓度降低至安全限值以下。

**三级包容系统:** 按照国标要求, 氙操作设施应该根据操作量配备三重包容措施, 第一级包容系统为操作氙的工艺设备、管路; 第二级包容系统为包容涉氙工艺设备的手套箱及通风系统; 第三级包容系统为涉氙操作的房间及通风系统。

### 3.2.9.3 氙处理中心布局及氙管道走向

基于 BEST 装置总体空间安排, 对氙处理中心区域进行了布局设计。L1 层包含除氙系统高区, 以及燃料净化与配气系统、氢同位素分离系统、监测与自动控制系统、氙泄漏监控与应急响应系统工艺单元等。B1 层目前包含排放气体除氙系统、空气气氛除氙系统等除氙系统泵房, 除氙系统高区, 水去氙化系统工艺单元, 真空泵组等。B2 层目前包含 S-VDS 泵房, 除氙系统高区, 应急储水池, 水去氙化系统和排放气体除氙系统工艺单元等。BEST 主要分为主工艺区、热室除氙区、常规除氙区、氙分析与监测区。其中 L1 层主工艺房间、监测与自动控制系统房间以及 B1 层的热室空气除氙系统泵房、热室排风除氙系统泵房在氙分区上为 C3 区, 其余区域均为 C2 区域。如图 3-50-图 3-52 所示。

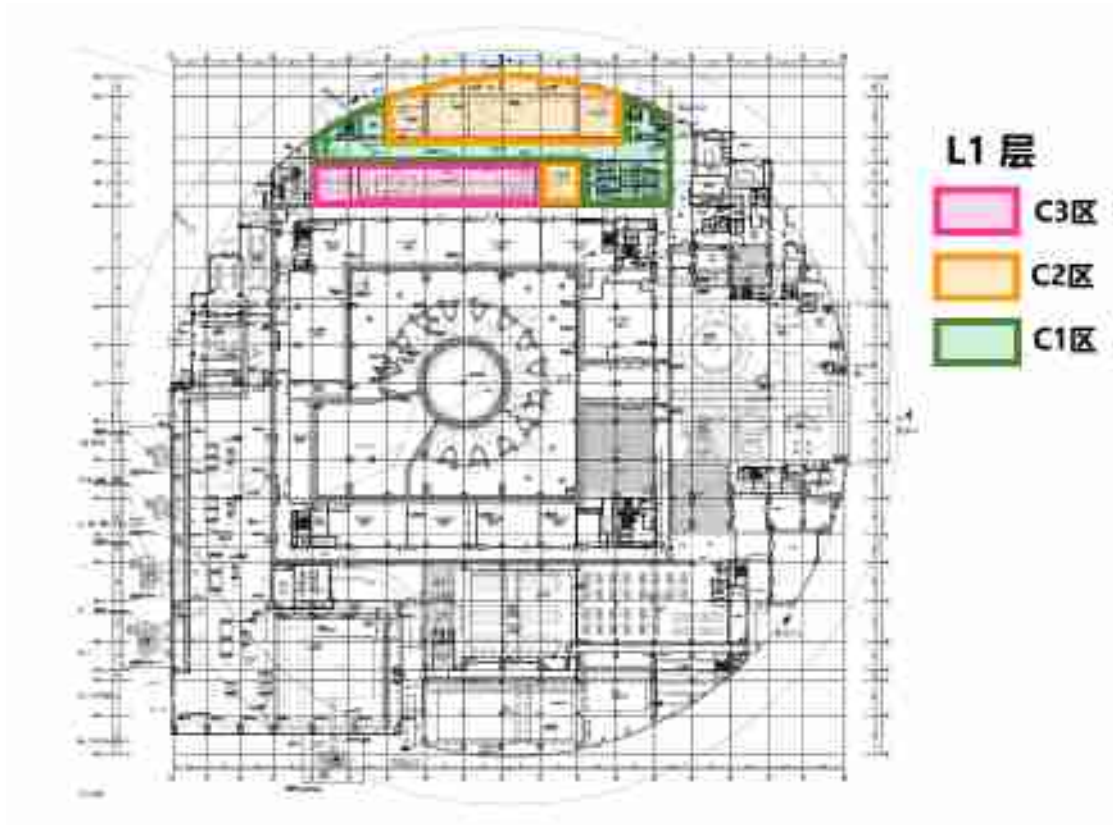


图 3-50 BEST 氚处理中心 L1 层各子系统区域

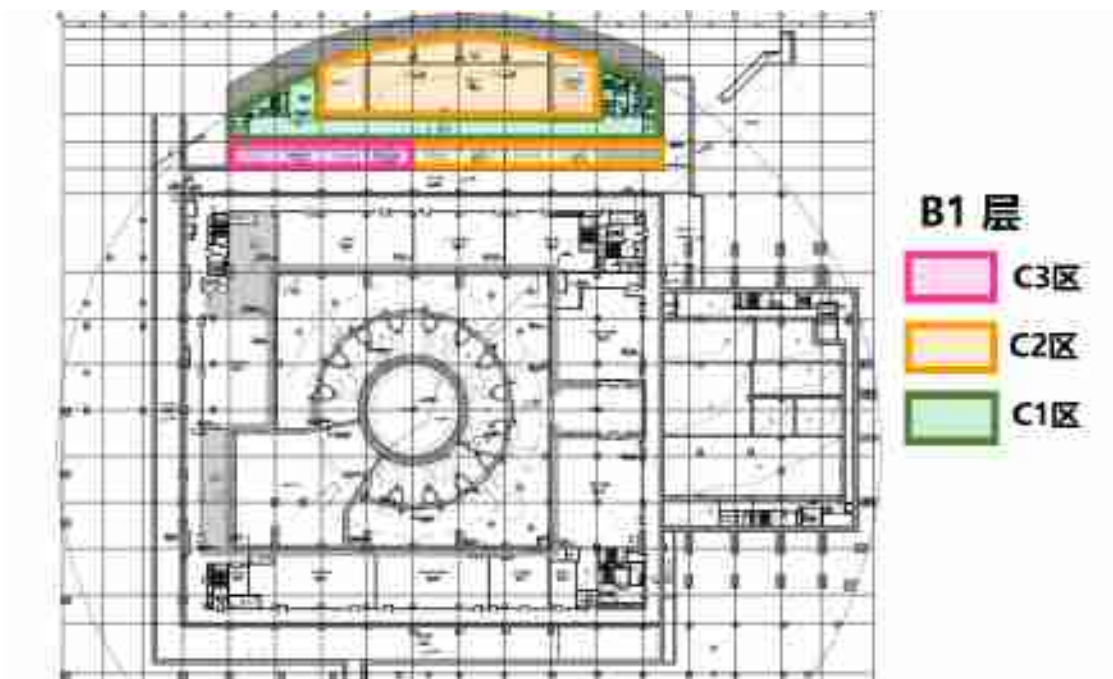


图 3-51 BEST 氚处理中心 B1 层各子系统区域

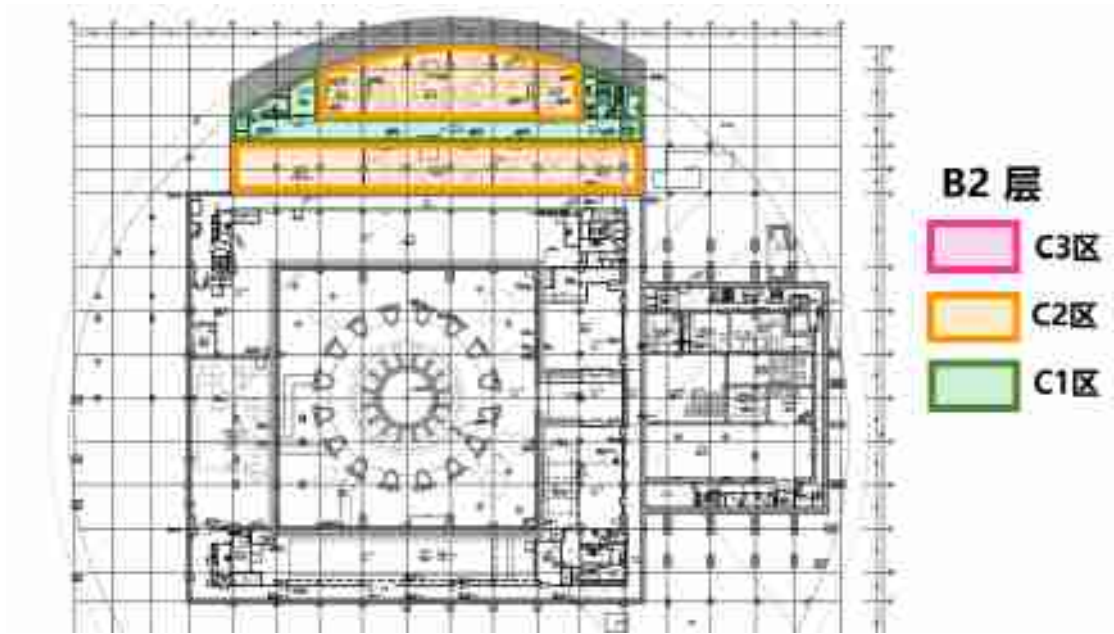


图 3-52 BEST 氚处理中心 B2 层各子系统区域

常规除氚系统中的 S-ADS, 排放气体除氚系统中的 N-VDS-1、N-VDS-2 和 S-VDS, 手套箱除氚系统中的手套箱除氚系统-1 和手套箱除氚系统-2, 三大系统所涉 17 根管道将在氚处理中心 B1 层汇集成 2500mm×2000mm 的管廊, 由氚处理中心 L1 层顶部穿墙进入氚处理中心大厅, 通过主机大厅 L2 层磁体电源房间西侧, 经空间转角变换进入主机大厅内部区域, 如图 3-53 至图 3-57 所示(图中绿色为排放气体除氚系统管道, 蓝色为空气气氛除氚系统管道, 红色为手套箱除氚系统管道)所示。



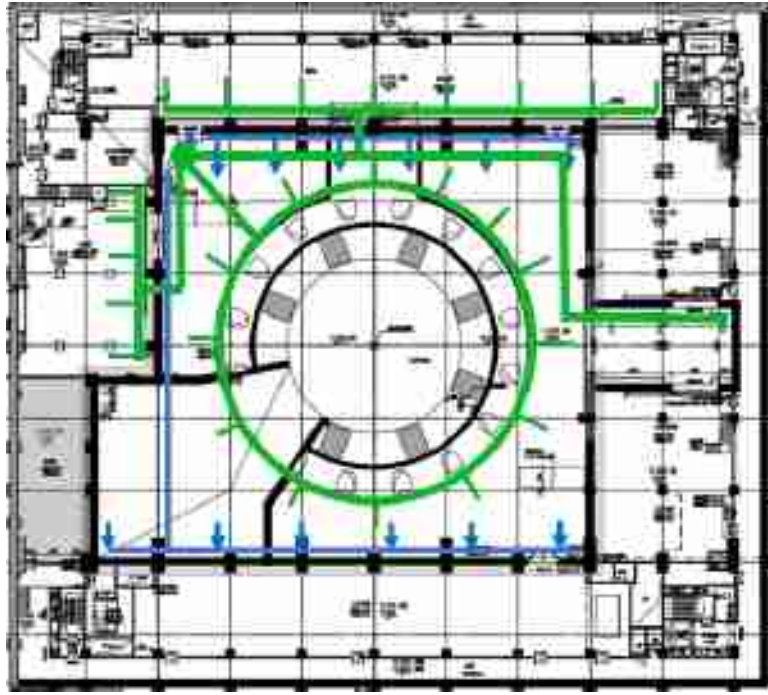


图 3-53 除氮系统 L3 层管路连接

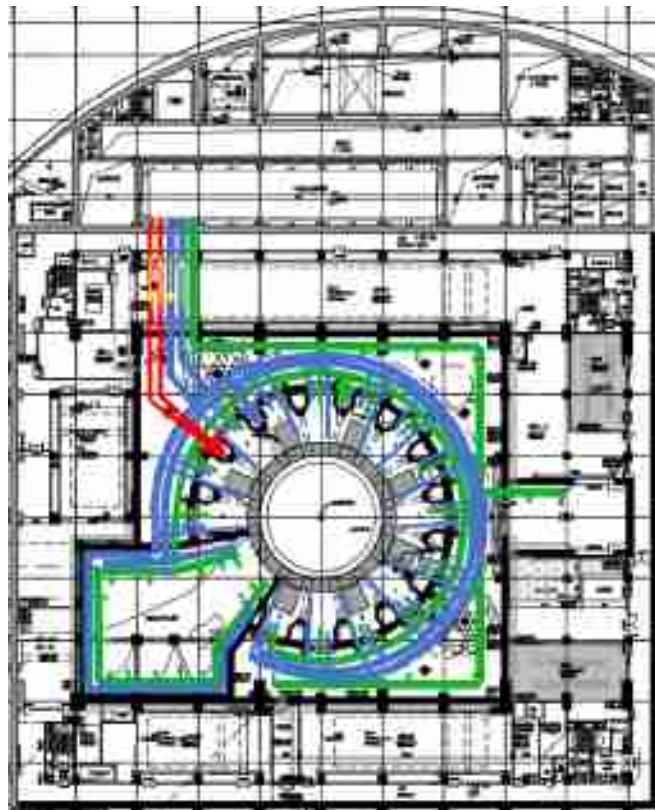


图 3-54 除氮系统 L2 层管路连接

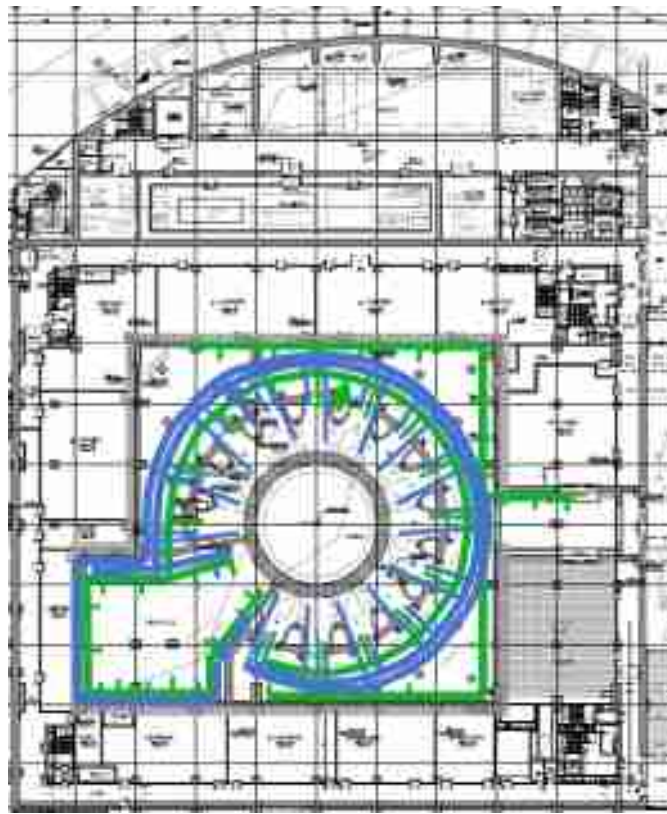


图 3-55 除氟系统 L1 层管路连接

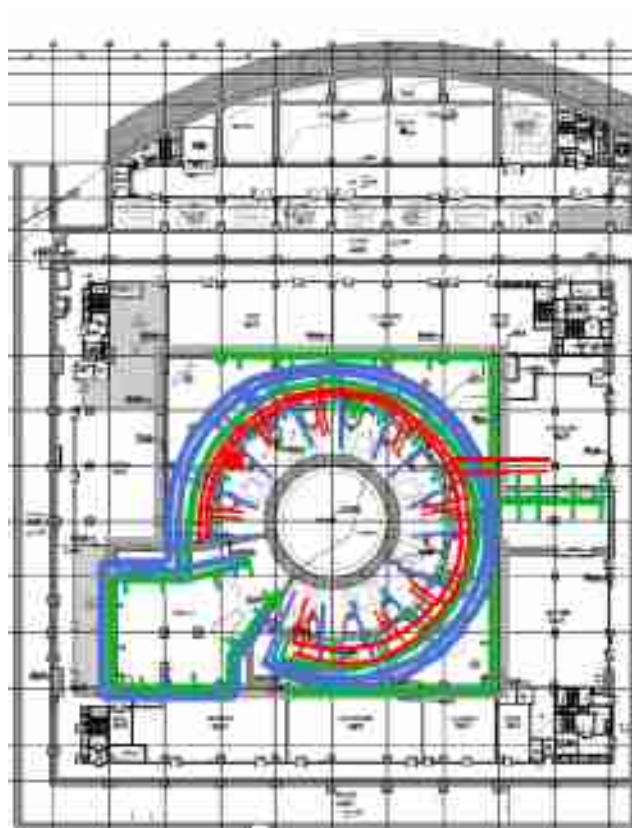


图 3-56 除氟系统 B1 层管路连接

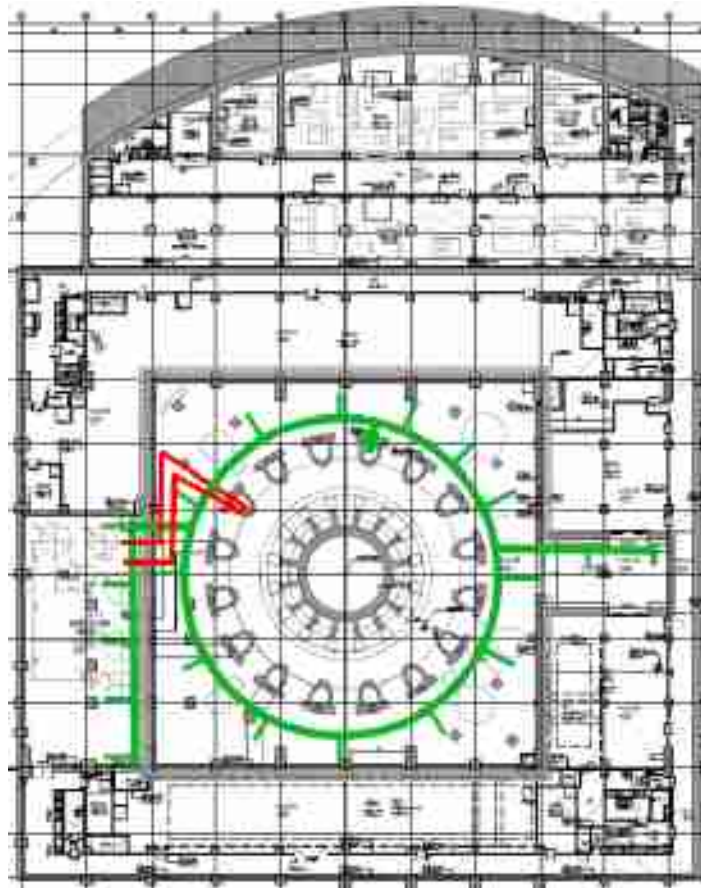


图 3-57 除氙系统 B2 层管路连接

ADS 系统中的热室空气除氙系统，排放气体除氙系统中的热室排风除氙系统两大系统所涉 7 根管道将在氙处理中心 B1 层汇集成 1300mm×1600mm 的管廊，沿氙处理中心 B1 层管廊穿过走道进入热室，如图 3-58（蓝色为热室空气除氙系统管道，绿色为热室排风除氙系统管道）所示。

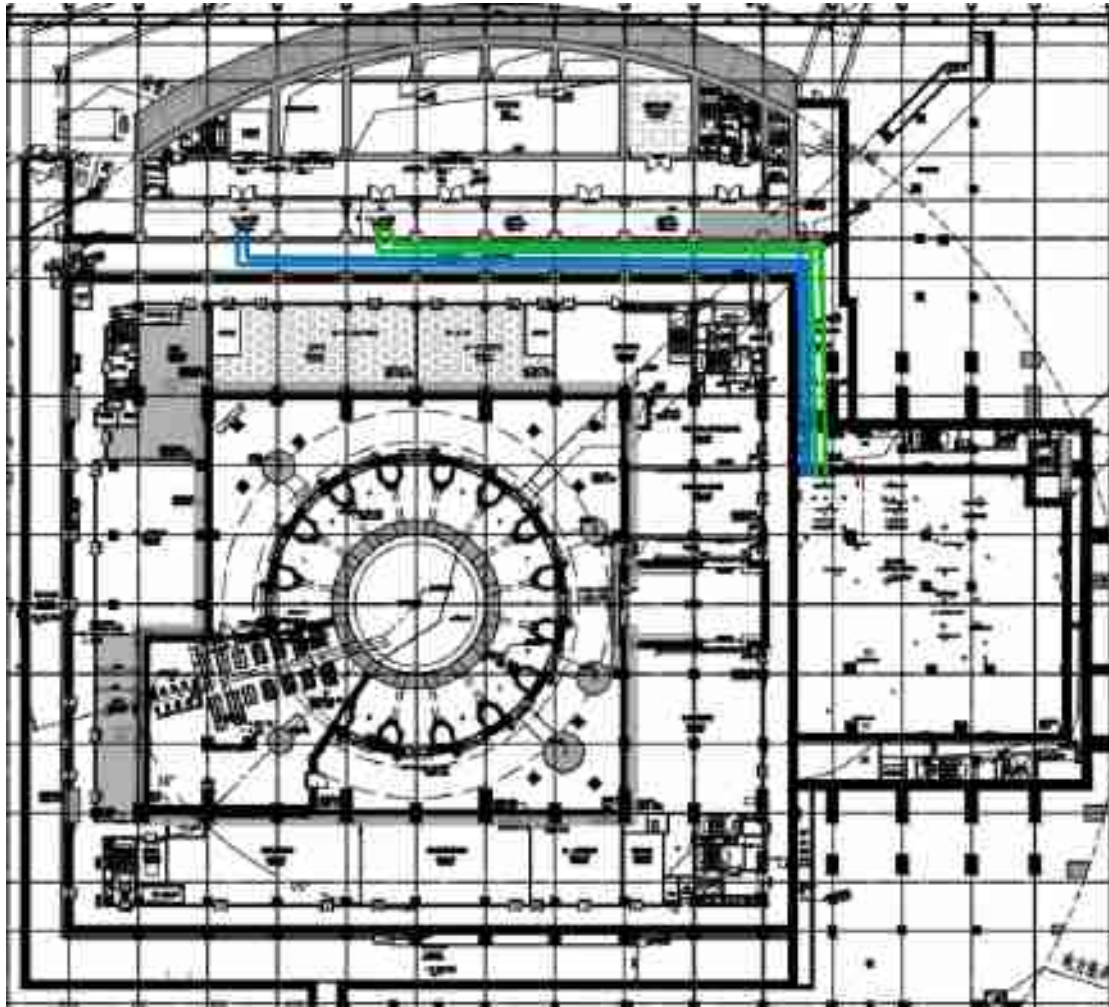


图 3-58 热室除氚系统管道连接

主工艺管道所涉 10 根管道将在氚处理中心 L1 层燃料净化与配气系统 & 氢同位素分离系统房间汇集成 200mm×200mm 的管廊，下穿进入北侧地下管廊，经下图所示路由分别进入东侧和南侧真空系统设备及控制室，贯穿件开孔情况如图 3-59 所示。

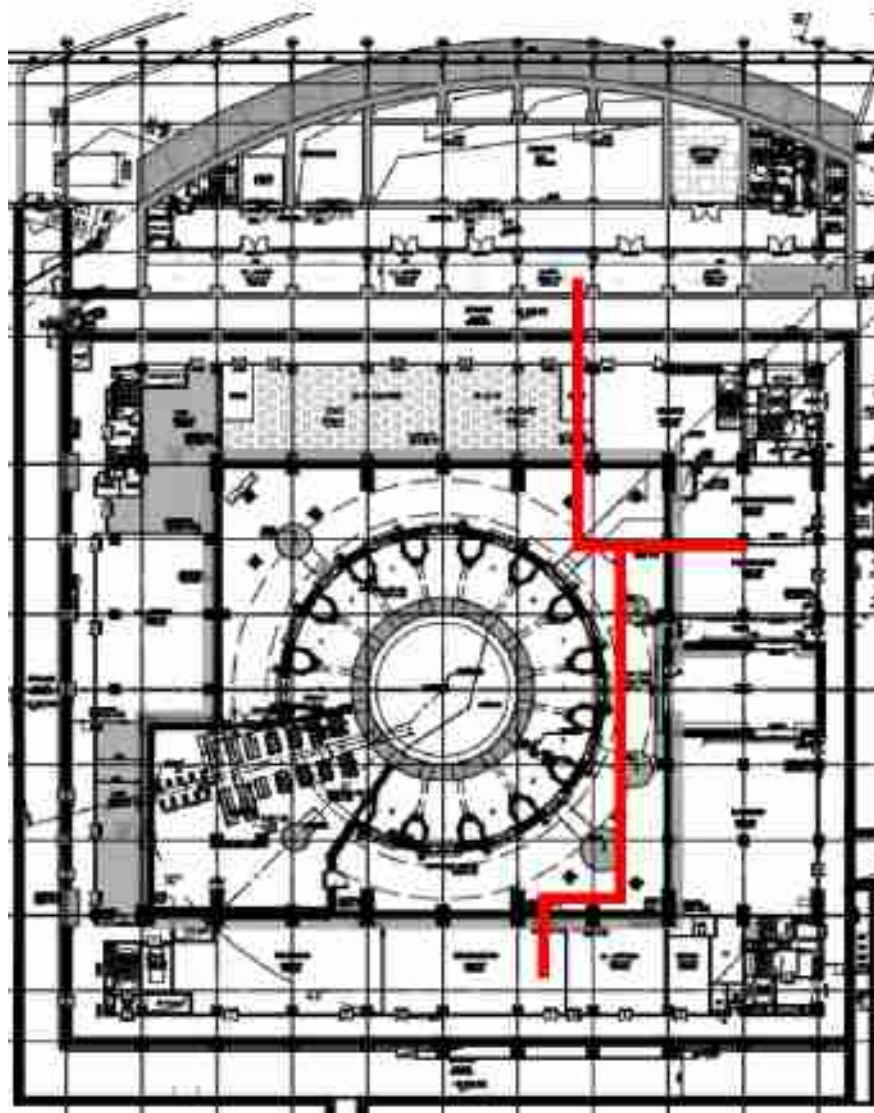


图 3-59 氡处理中心主工艺管道连接

水去氡化系统与水冷系统的连接管道将从氡处理中心 B2 层水去氡化系统应急房间顶部穿墙进入托卡马克大厅 B2 层的氡化水处理及真空室压力抑制系统存储区。如图 3-60 所示。

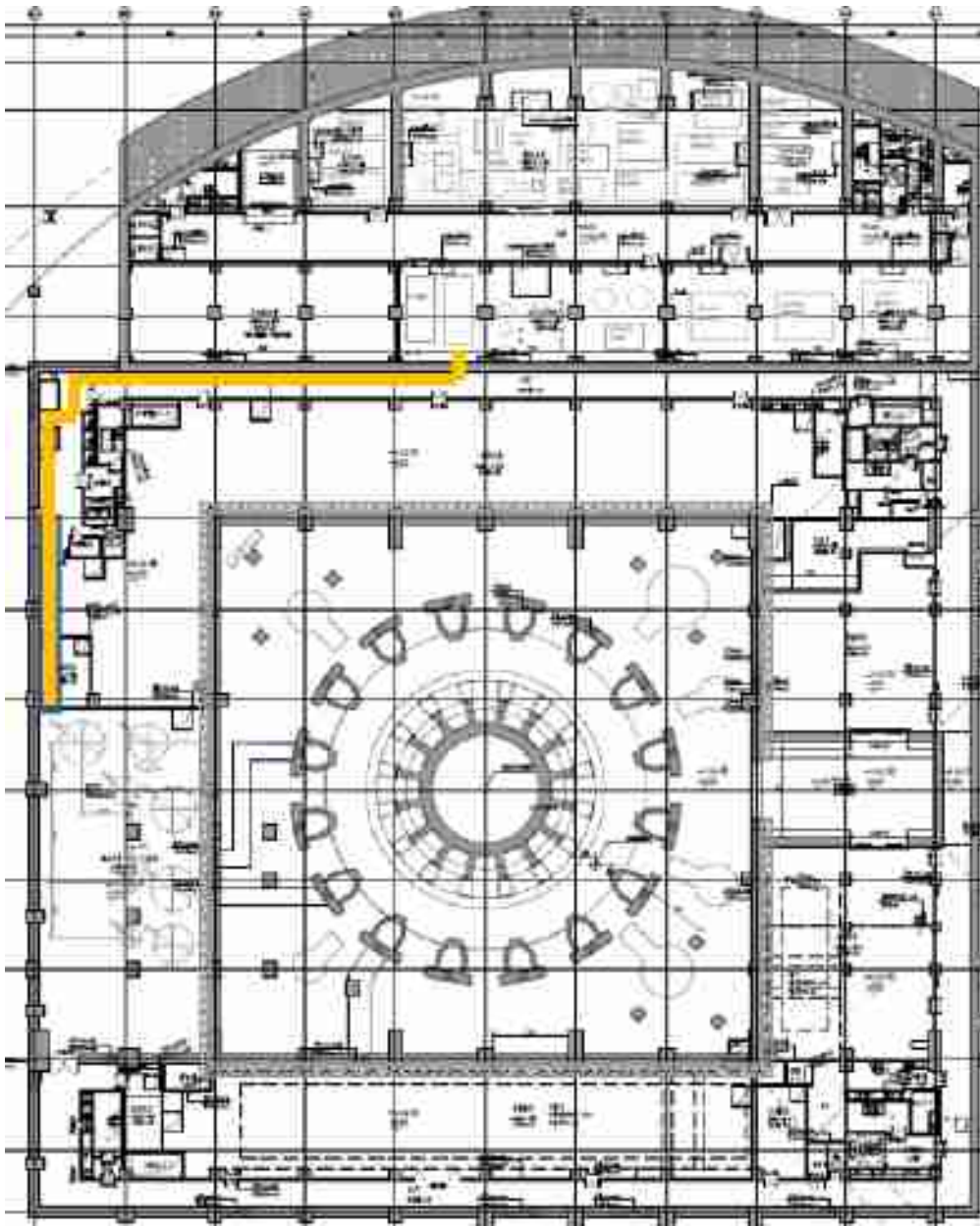


图 3-60 水去氟化系统与水冷系统管道连接及开孔情况

在氟处理中心内部，除氟系统的管道连接先经过 B1 层的各类泵房，再经过各除氟系统的催化氧化单元、喷淋洗脱单元后再返回至各除氟区域或经烟囱排放至大气。对于主工艺系统，除水去氟化系统中低温精馏与主工艺房间有连接外，主要连接大部分在主工艺房间内。如图 3-61 所示。

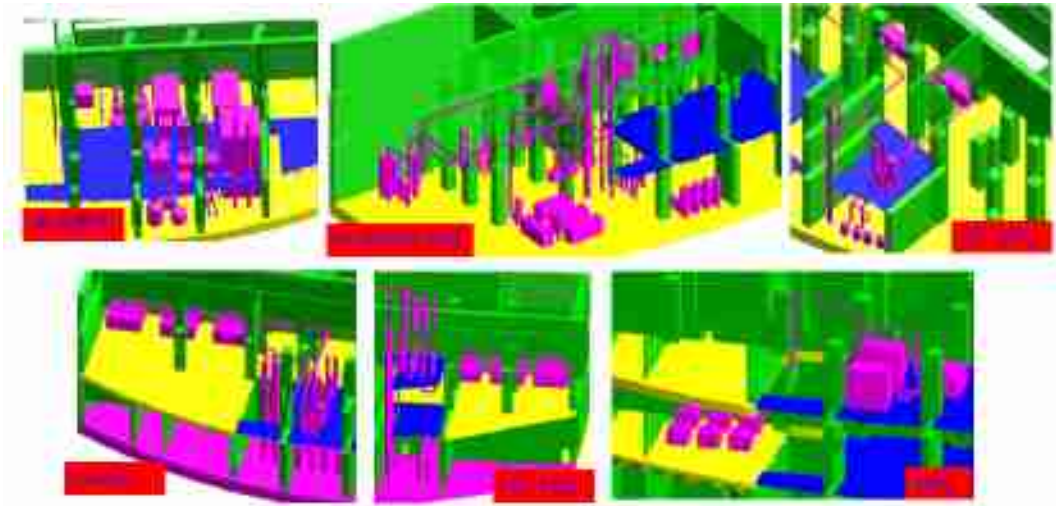


图 3-61 BEST 氡处理中心内部主管道连接示意

### 3.2.10 通风系统

BEST 装置运行与维护期间，在氡处理中心、主机大厅和热室涉及到的非密封放射性物质主要为氡。为了防止氡扩散造成放射性污染，对这些场所进行氡包容分区管控，分为 C1、C2、C3 区。C1 区正常情况下无表面污染或气载污染，例外情况下会产生，但是可接受的轻微污染；C2 正常情况下无污染，仅在特殊情况下，因事故造成中等表面污染或可接受的气载污染，应采取合理的控制措施；C3 有一定程度的表面污染，但正常情况下无气载污染，在某些情况下，会因事故造成比 C2 区高的潜在表面污染或气载污染，应当采取适当的控制措施。

通风系统主要为主机厅氡包容区、氡工厂和热室提供空气调节通风及氡包容。

其主要功能有：

#### (1) 房间空气调节

对主机厅、氡工厂和热室提供通风换气，保证换气率和移除非氡相关设备散发的热负荷，排出房间设备所产生的热负荷。为了在合理范围内减少意外的氡污染水的产生，不在氡污染区域提供空气加湿功能。

#### (2) 负压和污染控制

将主机厅、氙工厂和热室保持在负压的状态，以实现环境空气流向建筑内部。在正常情况下、在没有氙污染的火灾情况下或者当出口处的防火阀在 [REDACTED] 时未自动关闭时，由 HVAC 系统的排气单元与气流控制器连接来维持负压，以保持恒定的排气量流量。为了避免任何交叉污染，HVAC 系统中没有空气自循环。整个空气流最终通过位于氙工厂的烟囱进行排放。

灰尘或气溶胶上潜在的放射性污染通过排气单元中的 HEPA 过滤器进行过滤去除。这些特定的核过滤器是为核电厂设计的，包括更换受污染滤芯的“安全更换袋”。由于低放射性污染，也可能是在包括批准的防污染保护措施下人工更换过滤器。为进一步保护工人，可使用加压服更换滤芯。

从排出的空气中提取氙（HT 和 HTO）是由除氙系统提供的一项附加功能，该系统包括通风除氙（VD）功能和空气除氙（AD）功能。正常情况下，托卡马克穹顶区域、单元室（Port cells）、手套箱、ISS 和包含水箱的水去氙化系统都需要 VD 功能。由于这些隔间中的负压，通过 DS 的空气流速来自泄漏空气。

### （3）非正常运行条件下的氙包容

#### A：氙污染

空气中的氙浓度由在线氙监测器在排风口进行监测。如果氙污染为 [REDACTED] 或以上，将立即启动人员疏散。如果氙污染在 [REDACTED] 之间，则来自污染室的空气将被排放到释放点，并且 HVAC 系统将污染室进一步保持在 [REDACTED] 的亚大气压。控制室的操作员应根据需要启动事件调查，并进行局部检查。

如果发生氙意外释放（超过预定阈值 [REDACTED]），受影响的隔间将通过隔离阀自动与 HVAC 系统隔离，并通过打开指定除氙管道中的隔离阀切换至除氙系统。由于除氙系统的作用，该房间内大气压力水平略低于未受影响舱室中 HVAC 系统所控制的大气压力。受影响舱室中的亚大气压由与压力控制器相连的 DS 排气扇和与受影响舱室内 DS 回风管中的流量阀来维持。在严重氙污染（[REDACTED]）的情况下，通过除氙系统的再循环空气，在空气除氙模式下促进受影响隔室中的空气清洁。



## B.火灾

在发生火灾的情况下，应采取以下措施：人员将立即从消防部门撤离，关闭对应防火区的 HVAC 供气系统，如果未检测到空气中的氙污染，或氙污染水平低于 [REDACTED] 的水平，则由控制室的操作员做出灭火命令。

如果排气防火阀自动关闭 ([REDACTED])，则 VD 功能中的 DS 将保持负压。如果起火房间内部的氙污染水平高于 [REDACTED] 的水平，则该分区将自动与 HVAC 系统隔离，并自动连接至除氙系统。可能通向除氙系统的热空气将通过安全冷却器进行冷却。

## C: 设备故障

如果 HVAC 子系统发生故障，则执行以下操作：

疏散建筑物内人员，如果房间监测器未检测到空气污染，则在 HVAC 子系统功能恢复之前，不会采取进一步措施，如果存在氙气溶胶报警，控制室的操纵员决定是否启动由除氙系统控制的的负亚。如果与 HVAC 系统隔离的隔室空气氙监测器启动（氙污染水平高于 [REDACTED]），隔间将自动连接至除氙系统，亚大气压控制由除氙系统提供。为了在事故条件下保持氙包容，需要提高除氙系统的可靠性，包括房间隔离设备和监测器/探测器如氙污染监测器、火灾探测器和气体流量探测器等设备。

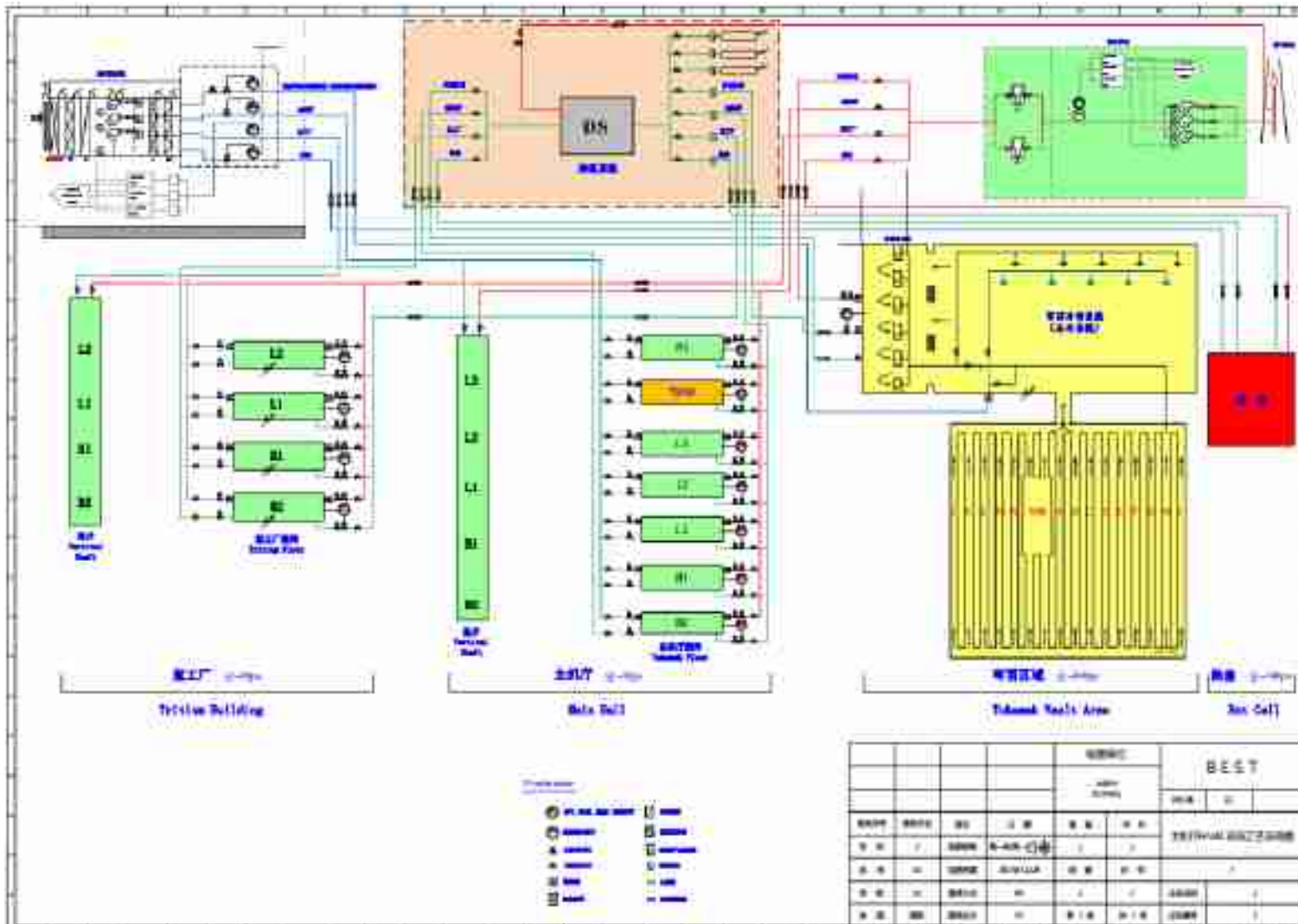


图 3-62 BEST 通风系统流程图

### 3.2.11 热室与遥操作维护系统

#### 3.2.11.1 热室

BEST 装置的热室主要为放射性或污染的托卡马克装置内部部件和材料提供空间和维护处理设备。其不仅用于活化或氙化元件的检验、处理和维护，而且还用于辐射废物处理和遥操作工具的测试及维护。热室位于预装大厅的负一层，主机厅的东侧，尺寸为 40m×50m，面积 2000m<sup>2</sup>。

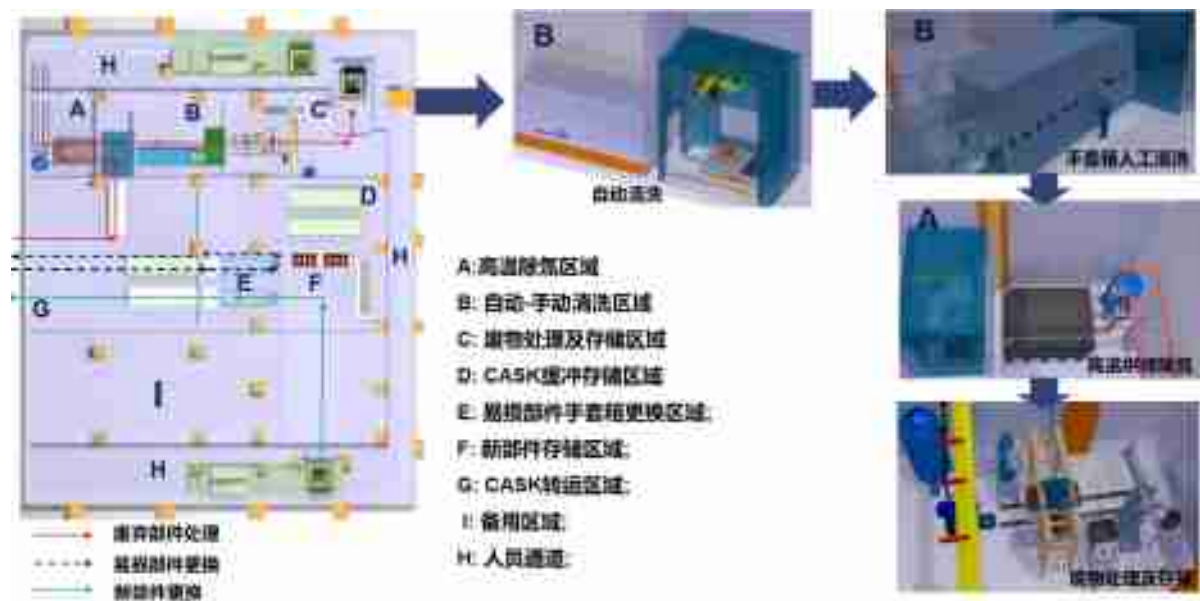







图 3-63 热室系统示意图

热室系统主要有三个功能：

- (1) 接收、储存内部部件：热室是活化的及被污染的内部部件从托卡马克中拆除后对进行接收，清洗，除氙和存储的场所。
- (2) 遥操作装置的储存和维护：在热室中对遥操作所有的 RH 装置进行组装、维护、整修、检测。
- (3) 放射性废物处理及存储：所有的活化部件及结构件废物的处理及封装均在热室系统中进行。

热室中主要维护对象见下表。

表 3-9 热室中主要维护对象

维护对象	尺寸 (m)	重量 (kg)	处理方式
偏滤器内靶板	0.69* (0.3-0.4) *0.71		清洗、除氚直接报废处理、钢箱临时存储
偏滤器外靶板	1.1* (0.4-0.56) *0.82		清洗、除氚直接报废处理、钢箱临时存储
包层第一壁钨瓦	0.1*0.1*0.04		清洗、除氚直接报废处理、钢箱临时存储
上窗口插件组件	0.91*0.61*4.37		清洗、除氚后如辐射剂量满足要求直接转移出热室，或者临时存储在热室
中窗口插件组件	1.45*1.1*3.72		清洗、除氚后如辐射剂量满足要求直接转移出热室，或者临时存储在热室

### 3.2.11.2 遥操作维护系统

BEST 装置遥操作维护系统,通过对 BEST 主机部件的一系列远程维护操作(拆装、转运、切割、打磨、焊接、探伤等),使用两个相邻 90 度水平窗口导入两个多自由度机械臂,通过机械臂携带的执行器和前端工具实现偏滤器靶板模块、维护包层第一壁模块;窗口插件作为整体模块,实现窗口位置与转运车之间的整体插拔和输运。使用 CASK 输运系统实现维护模块及遥操作设备从真空室窗口到热室的传输工作。

遥操作维护过程中,所有的设备、工装夹具都设计为故障态自动锁紧部件,避免出现部件跌落的情况;遥操作维护系统设计了自救援方案,当维护设备出现故障时,将会由其他遥操作设备进行故障救援。

BEST 主机遥操作维护流程见下表。

表 3-10 BEST 主机遥操作维护流程

序号	流程	具体操作
1	打开窗口	移除窗口联接线缆 打开维护窗口
2	CASK 与遥操作维护窗口对接	CASK 移动至对接窗口区域 通过相应定位传感器进行对接 遥操作系统线缆联接
3	遥操作维护系统在真空室内部的安装	维护机械臂系统由 CASK 运输至真空室内部 维护机械臂系统(操作臂、输运臂、执行器)在真空内部组织调试
4	维护工具准备	准备维护任务所需的所有工具,包括但不限于管道切割、焊接、螺栓拆卸、内窥等。

5	第一壁模块拆卸	冷却管道切割 紧固件拆卸 模块抓取移除
6	第一壁模块转运	第一壁模块转运至特定维护窗口 第一壁模块转运至热室
7	第一壁模块热室维修	第一壁更换 电缆更换 分支管道更换
8	第一壁模块转运	第一壁模块由热室转运至维护窗口 第一壁模块由维护窗口转运至真空室内部
9	第一壁模块安装	将第一壁模块定位到真空室内壁相应位置 管道焊接 管道内窥及检漏 紧固件安装固定
10	维护工具移除	将维护工具由维护窗口移除
11	遥操作系统移除	遥操作系统转运至维护窗口区域 遥操作系统由维护窗口移除 内部轨道移除
12	转运车 CASK 移除	将线缆联接断开 将遥操作设备、线缆转移至 CASK 内 CASK 与窗口对接断开 移除 CASK
13	维护窗口关闭	窗口相关线路联接 窗口密封门关闭

### 3.2.11.3 热室防护设计方案

热室作为内部部件清洗维护的主要场所，维护对象主要如下：


维护对象	示意图	尺寸 (m)	重量 (Kg)	维护需求分析
偏流器内架板		0.69' (0.3-0.4) * 0.71	5	清洗、除氙直接报废处理
偏流器外架板		1.1' (0.4-0.56) * 0.32	3	清洗、除氙直接报废处理
恒层码瓦		0.1*0.1*0.04	1:0	清洗、除氙直接报废处理

图 3-64 热室维护对象

为了保证在内部部件清洗及维护过程中的辐射防护以及安全需求。热室的主体墙体均采用钢混结构，墙体本身作为屏蔽结构的一部分，其中最外墙厚度为 1.3m，次外墙厚度为 1m。对于内部部件在热室内部进行清洗以及除氙的包容设备和墙体，则主要采用铅板和不锈钢内衬作为屏蔽层；各区域的屏蔽防护方案如下图所示：

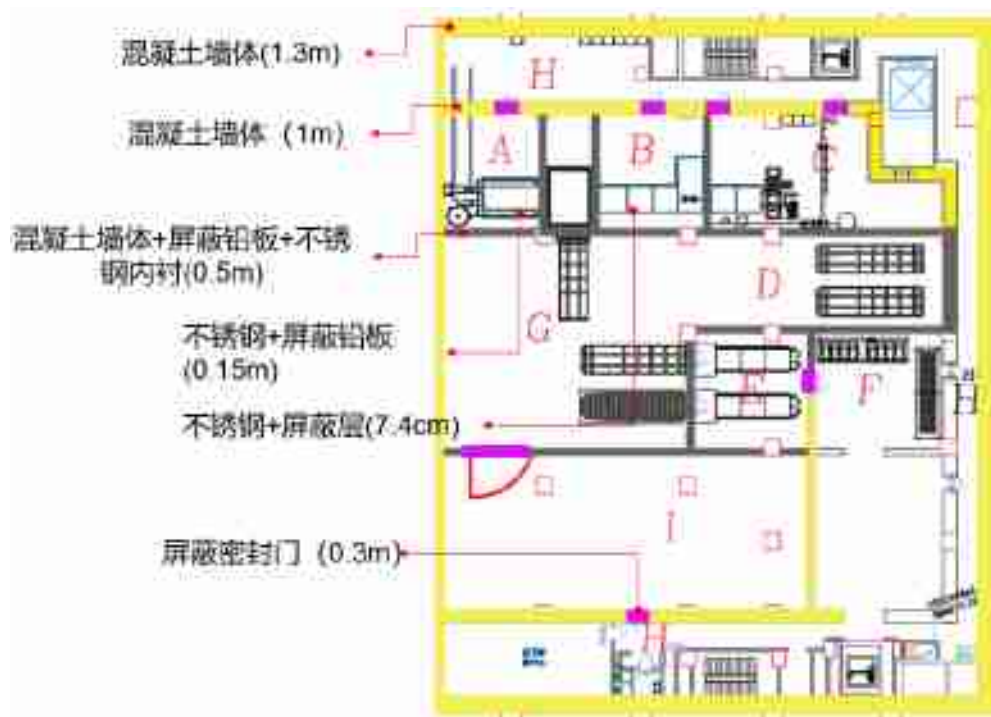


图 3-65 热室屏蔽防护方案

其中黄色墙体主体采用钢混结构，厚度分别为 1.3m 和 1m；灰色墙体为主体屏蔽层，由钢混，屏蔽铅板以及不锈钢内衬构成，总厚度为 0.5m,其中屏蔽铅板为 14cm；而对于清洗设备区，设备本身的屏蔽层采用不锈钢和铅板，厚度为 7.4cm；对于区域之间的门主要采用不锈钢屏蔽门，整体厚度为 0.3m；不锈钢的屏蔽门兼具密闭功能，屏蔽门嵌入墙体，尺寸及侧面图如下。

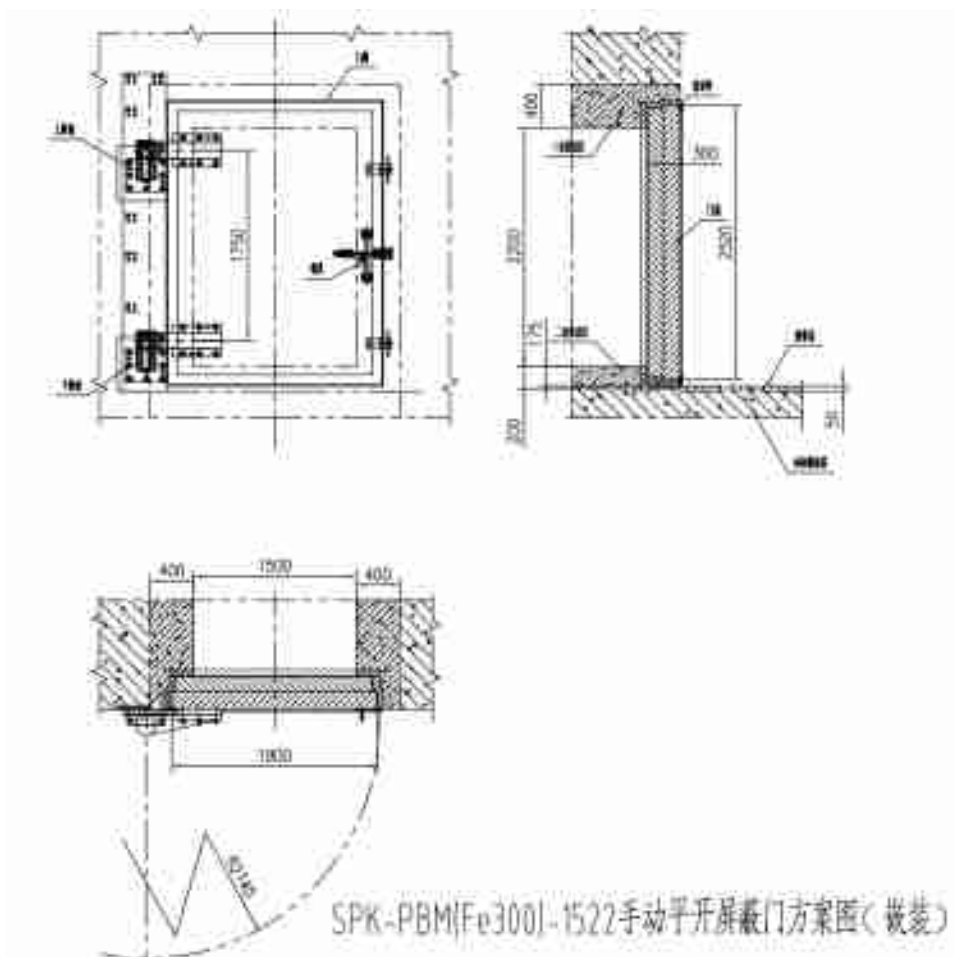


图 3-66 热室屏蔽门方案



图 3-67 热室内部分区管道开口

针对这个热室的包容分区以及相对应的各区域的通风要求，热室内部统一布置了 HVAC/VDS/ADS 的管道接口，管道接口都从北面的地下管廊穿过热室的侧墙进入热室，再由热室的夹层进入各不同分区。上图详细布置了各区域之间的管道的位置以及开口情况。人员主要活动在绿区，黄区和橙区。其中人员参与的区域主要是 ABCE 四个区域，人员在一些特定情况下需要进入这些区域进行设备维护。进入时，人员需要先经过负压过渡区，再进入操作区进行设备检修、内部部件辅助维护等操作。

人员需要穿戴防护以及监控设备确保人员安全以及区域包容性要求；

C 区域为内部部件处理和存储区域，整体房间尺寸图如下：



图 3-68 废物处理以及存储空间



图 3-69 有效存储空间



有效存储空间标识如上图所示，有效体积约为 400m<sup>3</sup>。整体屏蔽方式为外侧钢混墙体，厚度为 1.3m，内侧为钢混墙体，屏蔽铅板和不锈钢内衬，整体厚度为 0.5m。整体尺寸如上，约为 13m×8.3m；存储钢箱按照中华人民共和国核行业标准《低、中水平放射性固体废物容器 钢箱》（EJ 1076-2014）选定，型号为 FA-V 型。

**表1 废物直接包装型钢箱（F型）**

序号	型号	外部长度 mm		外部宽度 mm		外部高度 mm		R (%)
		基本尺寸	允许偏差	基本尺寸	允许偏差	基本尺寸	允许偏差	
1	FA-I	6058	0~-5	2438	0~-5	1331	0~-5	30
2	FA-II	3070	0~-5	2438	0~-5	1331	0~-5	20
3	FA-III	1968	0~-5	2438	0~-5	1331	0~-5	10
4	FA-IV	1573	0~-5	1565	0~-5	1331	0~-5	8
5	FA-V	1573	0~-5	783	0~-5	1331	0~-5	5
6	FB-I	6068	0~-5	2438	0~-5	1331	0~-5	30
7	FB-II	3070	0~-5	2438	0~-5	1331	0~-5	20
8	FB-III	1968	0~-5	2438	0~-5	1331	0~-5	10
9	FB-IV	1573	0~-5	1565	0~-5	1331	0~-5	8
10	FB-V	1573	0~-5	783	0~-5	1331	0~-5	5

注：F—直接包装废物钢箱；  
R—钢箱额定质量，是钢箱质量I和钢箱内部净载重Z之和。

**图 3-70 废物存储钢箱型号**

固体废物经过清洗除氙，分拣后，放入钢箱，对箱体顶部进行封焊，并对钢箱外侧的辐射剂量进行监测。标准按照中华人民共和国《低、中水平放射性固体废物包安全标准》GB12711-2018。固废包装完后，采用吊车码垛的方式堆码在废物存储空间，存储周期为 6 个月，再检测固废包装外侧的放射性剂量，放射性剂量满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》后进一步转运出存储区。

转运过程如下：

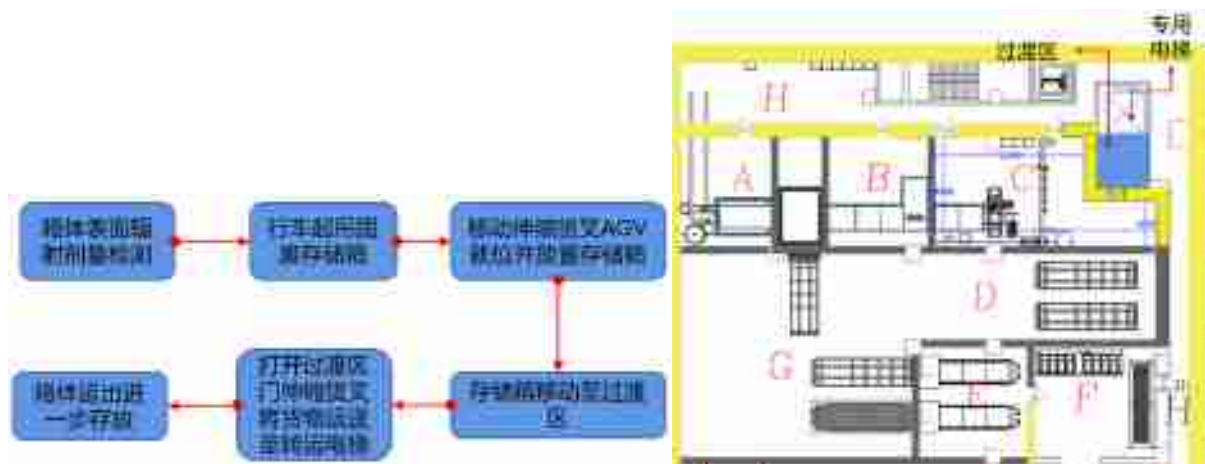


图 3-71 固废转运过程示意图

### 3.2.12 辐射工作人员岗位

BEST 装置的辐射工作人员安排如下表所示。

表 3-11 BEST 装置的辐射工作人员安排

序号	岗位名称	工作内容	工作地点	人数	工作时长
1	辐射防护	辐射工作场所监测运维	5#-1 主机大厅、5#-2 氚处理中心、5#-5 热室	10	维护期间每人 400h/年
2	主机内部部件维护	内部部件遥操作更换	5#-1 主机大厅	15	维护期间每人 400h/年
3	热室维护	损坏部件清洗、除氚、存储	5#-5 热室	10	维护期间每人 300h/年
4	氚处理中心运维	涉氚操作	5#-2 氚处理中心	30	运行期间每人 400h/年； 维护期间每人 200h/年
5	真空系统运维	真空检漏及维护	5#-1 主机大厅	20	维护期间每人 200h/年
6	诊断系统运维	运行和维护诊断系统	5#-1 主机大厅	40	维护期间每人 200h/年
7	其它辅助系统运维	运行和维护辅助系统	5#-1 主机大厅	20	维护期间每人 200h/年
总计				165	/

### 3.2.13 非放部分

#### 3.2.13.1 原辅材料及仪器设备

本项目使用的非放部分原辅材料情况见表 3-12，原辅材料理化性质见表 3-13，实验仪器设备情况见表 3-14。

表 3-12 非放部分实验用原辅材料情况表

序号	名称	重要组分、规格	年耗量	厂内存储方式	来源及运输	工段
1	二氧化碳	二氧化碳，纯度 99.99%，5m <sup>3</sup> 储罐	10 储罐	储罐	气体供应商，危化品运输车	TBM 系统
2	氩气	氩气，纯度 99.999%，3m <sup>3</sup> 储罐	10 储罐	储罐	气体供应商，危化品运输车	TBM 系统
3	氦气	氦气，99.999%	1000m <sup>3</sup>	4#低温厅室外氦气储罐存放	气体供应商，危化品运输车	4# 低温大厅
4	液氮	液氮，99.999%	7200 m <sup>3</sup>	4#低温厅室外液氮储罐存放	液氮供应商，危化品运输车	4# 低温大厅
5	润滑油	合成油	1t	压缩机需维护时，临时存放在压缩机厅，更换下来的润滑油装筒拉走到专业处理公司处理	危化品运输车	4# 低温大厅
6	氮气	氮气，99.999%	1000m <sup>3</sup>	4#低温厅室外氮气储罐存放	液氮蒸发，管路	4# 低温大厅
7	活性炭	C*4*8	8t	除油系统需维护时，临时存放在压缩机厅	维护厂家，物流车辆	4# 低温大厅

表 3-13 原辅材料理化性质

名称	主要成分及理化性质	燃烧爆炸性	毒性毒理
二氧化碳	二氧化碳 100%，无色无味的惰性气体，熔点：-56.6℃，沸点：-78.5℃，溶于水，溶于烃类等多数有机溶剂	不燃	LCLo: 657190ppm (大鼠吸入, 15min) 人吸入 LCLo: 10% (1min), 9% (5min)
氩气	氩 100%，无色无味的惰性气体，沸点：-185.9℃，临界温度：-122℃，微溶于水	不燃	/
氦气	氦 100%，无色无味的惰性气体，沸点：-268.93℃，临界温度：-268℃，微溶于水	不燃	/
液氮	液氮 ≥99.5%，无色无味的惰性气体，沸点：	不燃	/

	-195.6℃，临界温度：-147℃，微溶于水、乙醇		
氮气	氮 100%，熔点：-210℃，沸点：-196℃，临界温度：-147℃，微溶于水，乙醇，溶于液氨	不燃	/

表 3-14 实验用仪器设备情况表

序号	设备名称	规格型号或用途	数量 (台)	对应工艺	使用地点
1	水泵	待定	32	水冷	3#厂房负一层及二层
2	空调离心机	待定	5	水冷	3#厂房负一层
3	水箱和稳压罐	待定	6	水冷	3#厂房负一层及二层
4	热交换器	待定	6	水冷	3#厂房负一层及二层
5	空气压缩机	待定	2	水冷	3#厂房二层
6	纯水过滤器	待定	2	水冷	3#厂房二层
7	冷却塔	待定	20	水冷	室外
8	压缩机	MYCOM, 用于压缩氦气、氮气	16	压缩	4#厂房压缩机厅
9	除油系统	非标, 用于氦气中油蒸汽分离, 并回流至压缩机	4	物理分离	4#厂房压缩机厅
10	冷箱	非标, 用于制取低温, 或者 4K 温区的冷量	4	膨胀、节流制冷	4#厂房制冷机厅
11	纯化器	非标, 采用低温吸附的方式将氦气中的氮、氧分离	1	低温吸附	4#厂房压缩机厅

### 3.2.13.2 劳动定员

(1) 3#楼内水冷及空调运行的工作人员约 24 人，主要工作就是 BEST 水冷系统及园区空调系统运行值班，包括巡视、操作、维护、检修等。

(2) 4#楼内 16 人（4 班 2 倒，每班 4 人），运行与巡视岗，负责系统的运行与巡视，主要工作地点在值班室，每班组会到设备现场巡视两次。

(3) 5#楼空调运行与 3#楼系统运行人员合并，水冷空调运行的工作人员约 24 人，主要工作就是 BEST 水冷系统及园区空调系统运行值班，包括巡视、操作、维护、检修等。NBI 系统 22 人，主要负责 NBI 相关子系统的运维。

### 3.2.13.3 工艺流程及产污环节分析

(1) 空调系统运行：市政自来水充满管网，通过空调离心机将水制热（或制冷），再用水泵将热水（或冻水）运送到各使用单元，离心机本身利用冷却塔的冷水冷却。全

过程不产生污水，仅离心机、水泵电机等在运行时产生一些噪声。

(2) 水冷系统运行：从 CRAFT 园区过来的去离子水充满各冷却环路后，水泵运送到各用水点并对目标进行冷却，被加热后的水经热交换器冷却后回到泵前端，再由水泵送到各用水点，如此闭路循环。全程也不产生污水（运行一段时间后可能会根据水质变化进行一些去离子水置换）。

(3) 压缩空气（公共设施）运行：本系统是为 BEST 大厅内气动设备等提供一个压力相对稳定的空气源的，全过程也不产生污染物，仅压缩机工作时有一些噪声。

#### (4) 制冷机工艺



图 3-72 制冷机工艺流程及产污环节图

- (1) 压缩机压缩：常温常压氦气经压缩机压缩至 20bar，润滑油润滑冷却。该工序会产生噪声（N）。润滑油为闭式循环，只有运行超过 2 万小时左右，才需更换润滑油，更换下来的润滑油由维护厂家，装筒后运到专业公司进行处理。
- (2) 除油系统物理分离：主要将压缩机出口含油的氦气进行分离，采用聚结过滤器、活性炭吸附等方式分理处油杂质。聚结过滤器分离的油，通过管道又回到压缩机中去，吸附筒的吸附油留在吸附筒中，待吸附饱和后需更换活性炭，然后运到专业公司进行处理。
- (3) 制冷机冷箱：通过与液氮进行换热、透平膨胀机膨胀制冷方式制冷 4.5K 的温度。透平

膨胀机工作原理是，氮气进入透平中膨胀推动叶轮转动，出口温度和压力降低。

(5) 回收纯化工艺：

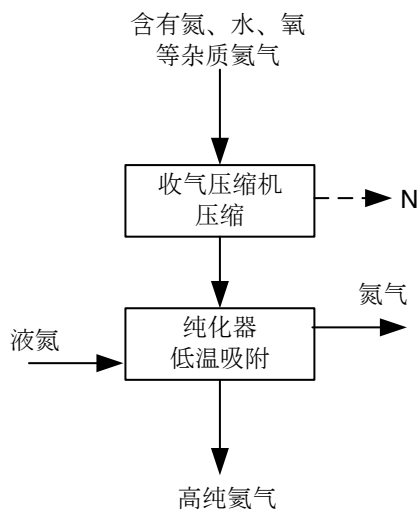


图 3-73 回收纯化工艺流程及产污环节图

- 1) 压缩机压缩：含有杂质的氮气经压缩机压缩至高压。该工序会产生噪声（N）。
- 2) 纯化器低温吸附：主要将低温吸附方式将氮气中的杂质进行分离。该过程中需要消耗液氮，会有高纯氮气排出。杂质被冻在吸附筒中，待吸附饱和后通过加热方式将氮、氧解析，由于是空气的组成部分，因而一般直接排入到大气中。

产排污分析：

废气：制冷机、纯化器中会有高纯氮气排出。

废水：无。

废液：压缩机运行到一定时间后，需对压缩机的润滑油进行更换，更换下来的润滑油装筒，拉到专业公司进行处理。

固体废物：除油系统的吸附筒饱和后，需进行更换活性炭 8t/a，然后运到专业公司进行处理。

噪声：压缩机设备运行时会产生噪声（N）。

### 3.3 污染源项分析

### 3.3.1 装置污染源项

本次评价采用建模计算的方式进行装置污染源项的分析。

#### 3.3.1.1 模型和分析方法

##### 3.3.1.1.1 主机模型

BEST 主机主要部件如图 3-74 所示。

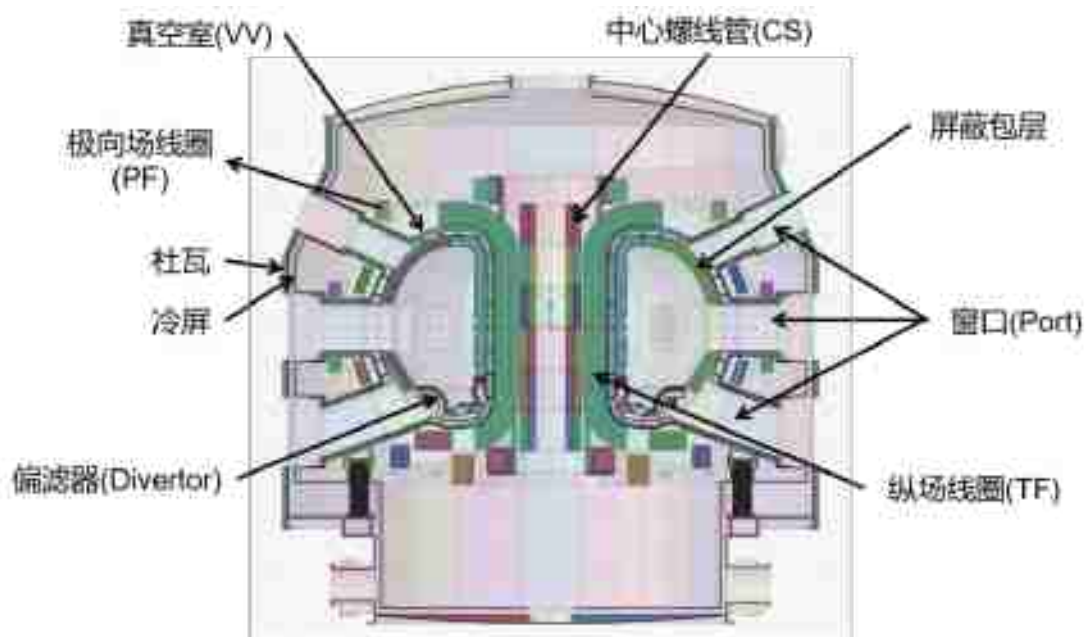


图 3-74 BEST 主机部件模型几何示意图

由于主机和建筑在环向上总体存在一定对称性，为降低建模及计算资源消耗，模拟分析中采用环向  $22.5^\circ$ （1/16 扇段）的中子学模型，如图 3-75 和图 3-76 所示。模型包含 BEST 主要部件，并对窗口及生物屏蔽层处的光路及抽气等贯穿通道进行了简化建模。中子学模型所用各部件材料成分如表 3-15。

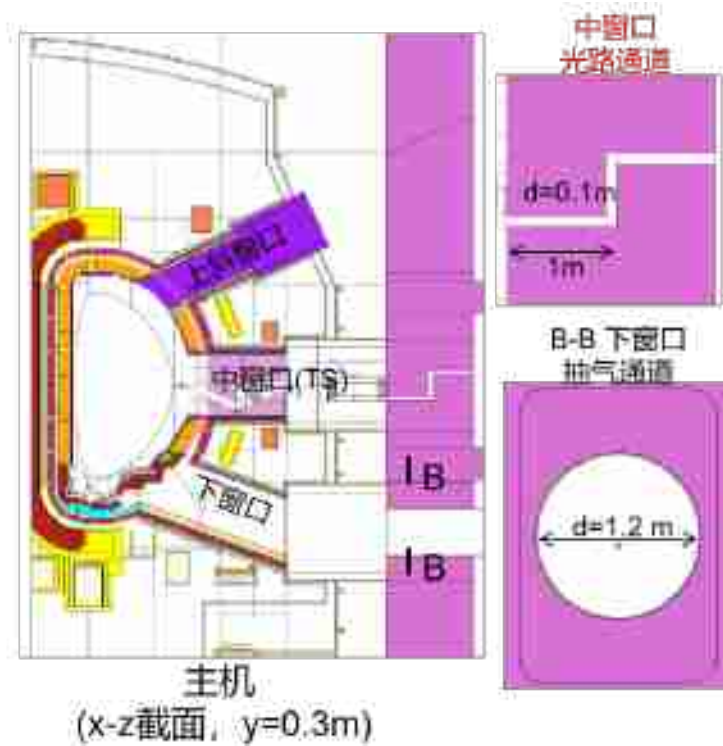


图 3-75 BEST 22.5 度扇段模型 x-z 截面,  $y=0$

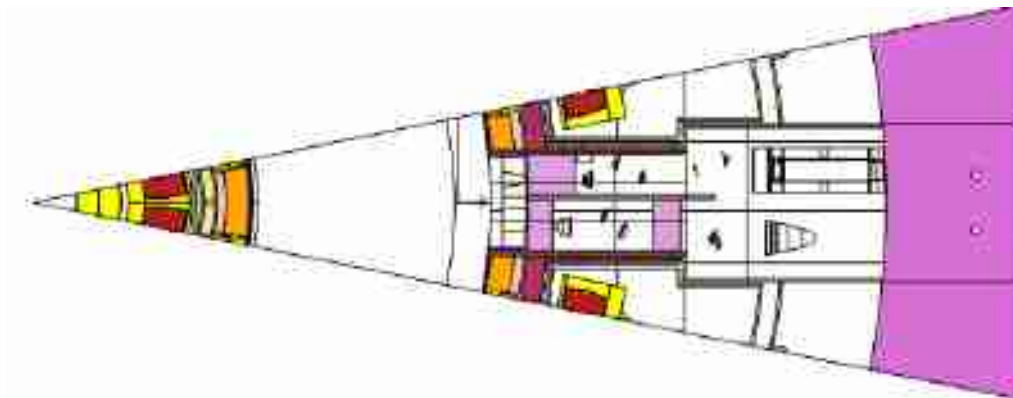


图 3-76 BEST 22.5 度扇段模型 x-y 截面,  $z=0$

表 3-15 BEST 模型主要部件材料

部件	材料成分	
杜瓦	SS304	
超导线圈结构	SS316LN	
超导线圈绝缘体	G10	
超导线圈导体	Nb <sub>3</sub> Sn/NbTi 等超导磁体	
热屏蔽	SS304LN	
真空室	壳体	SS316LN
	填充材料	不锈钢与水混合物
包层	面向等离子体材料	钨



	结构材料	不锈钢与水混合物
	屏蔽材料	不锈钢与水混合物
偏滤器	面向等离子体材料	钨
	结构材料	不锈钢与水混合物
窗口插件	上窗口	填充等效屏蔽材料钢水混合物
	中窗口	不锈钢与水混合物及探测器材料
	下窗口	真空/抽气通道开口

### 3.3.1.1.2 建筑模型

在对 BEST 的模拟分析中，中子学模型也包含了 5#楼建筑，建筑包含多层不同厚度的屏蔽墙，如图 3-77 和图 3-78 所示。主要包括厚度为 2 米的生物屏蔽墙，诊断小室、转运通道及 5#楼建筑外围墙体厚度为 1 米。模拟分析采用中子学模型各层楼板厚度为 0.75 米。建模中屏蔽门被等效为其所在位置的同等屏蔽墙体。

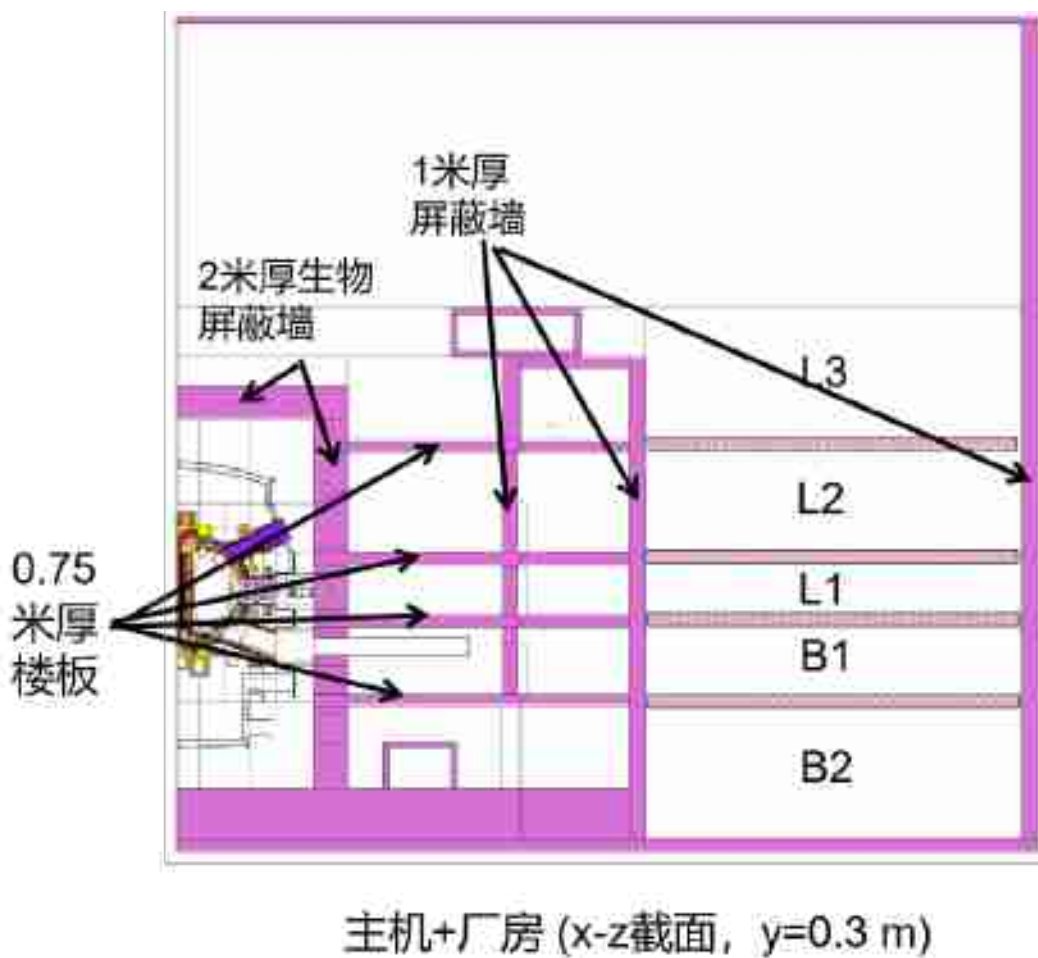


图 3-77 BEST 建筑模型示中子学截面图(x-z 截面, y=0)

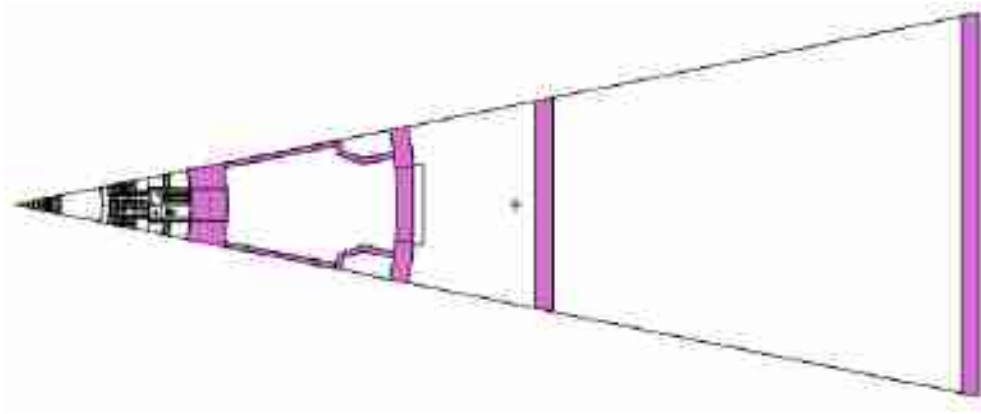


图 3-78 BEST 建筑模型中子学截面图(x-y 截面,  $z=0$ )

### 3.3.1.1.3 分析方法

分析评估步骤包括:

- (1) 使用三维中子学模型进行蒙特卡罗粒子输运计算模拟, 得到装置各区域的中子通量并根据通量至剂量率转换因子得到响应的运行剂量率;
- (2) 然后使用 NATF 软件进行前处理, 综合辐照方案信息、杂质成分信息及部件栅元列表信息, 生成 FISPACT 活化计算用输入文件;
- (3) 使用欧洲总量计算程序 FISPACT-II 执行活化计算;
- (4) 使用 NATF 软件进行后处理, 根据用于指定的核素处理条件 (如氙的提取分离等), 对活化后材料的产物进行处理模拟;
- (5) NATF 软件根据处理后的材料放射性特性, 结果废物分类标准, 计算废物分类指数, 并给出停机不同时间的废物分类。



图 3-79 分析评估方法流程

### 3.3.1.2 瞬发辐射场

BEST 在开展氦或氘等离子体放电实验时，通过  $T(d,n)^4He$  和  $D(d,n)^3He$  核聚变反应，会产生大量的中子（2.45MeV、14.1MeV）和高能光子（16.63MeV）。等离子体内部一些杂质离子的核反应，如  $^{12}C(\alpha,\gamma)^{16}O$   $E_\gamma \sim 7.16MeV$ 、 $^7Li(\alpha,\gamma)^{11}B$   $E_\gamma \sim 8.67MeV$ 、 $^{14}N(d,\gamma)^{16}O$   $E_\gamma \sim 20.74MeV$  等，也会产生高能伽马射线。此外，逃逸的高能带电粒子与器壁结构材料作用，产生能量高达兆电子伏特的连续韧致辐射（X 射线）。聚变中子不受磁场的约束，在向外输运的过程中，会与装置主机及外围设备结构材料（不锈钢、铜、铝、钨、硼钢、碳化硼等）和冷却剂（水、液氮、液氦）发生非弹性散射，以及各种俘获反应，产生次级伽马射线和放射性核素（ $^{56}Mn$ 、 $^{60}Co$ 、 $^{58}Co$ 、 $^{99}Mo$  等）。放射性核素衰变发射的伽马射线是装置停机维护期间人员外照射的主要源项，而氦燃料衰变产生的  $\beta$  射线则是造成内照射的主要源项。

BEST 主机在 D-T 运行时产生瞬发中子、瞬发  $\gamma$ 。氘氚聚变功率和脉冲长度包括：

- 短脉冲运行：100-200MW，单脉冲长度为 5-10 秒。
- 长脉冲运行：30-50MW 聚变功率；典型单脉冲长度为 1000 秒。

BEST 装置 200MW 功率条件下，瞬发中子云图如下图所示。

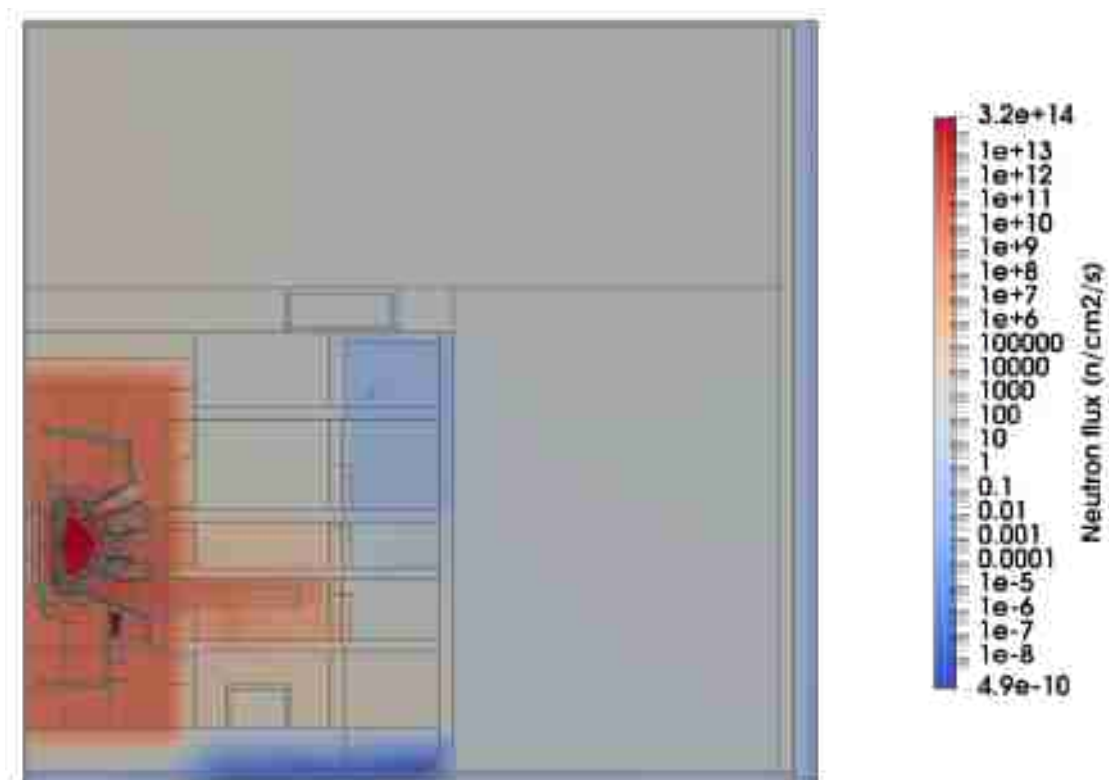


图 3-80 BEST 200MW 功率下中子通量率云图

BEST 装置 200MW 功率条件下，瞬发光子云图如下图所示。

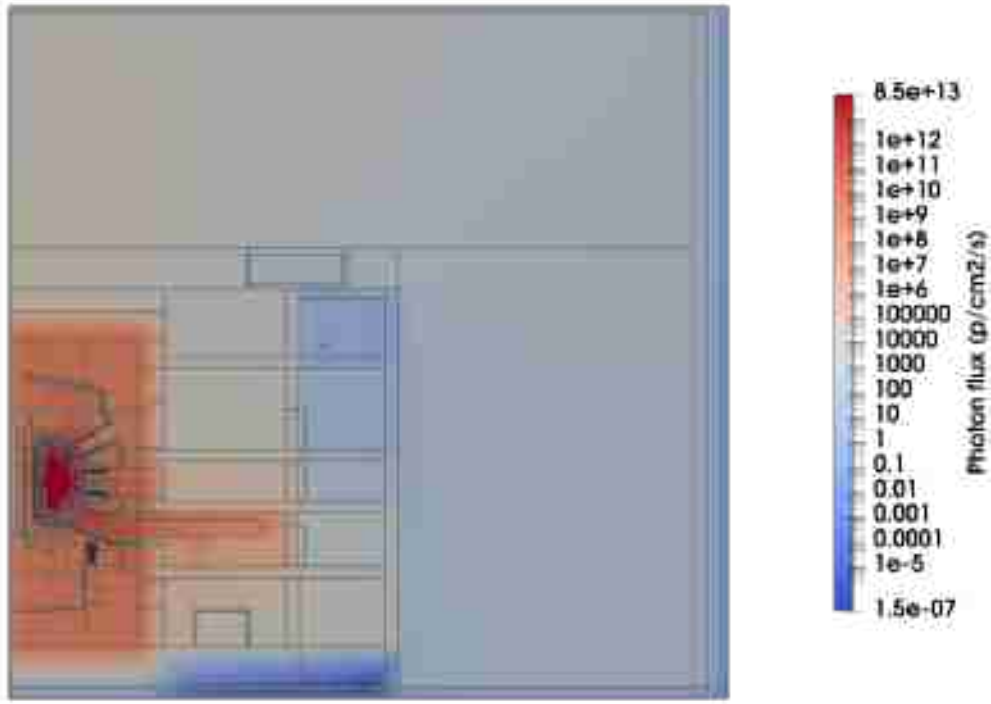


图 3-81 BEST 200MW 功率下光子通量率云图

BEST 装置 200MW 功率条件下，运行剂量率（中子剂量率与光子剂量率之和）如下图所示。

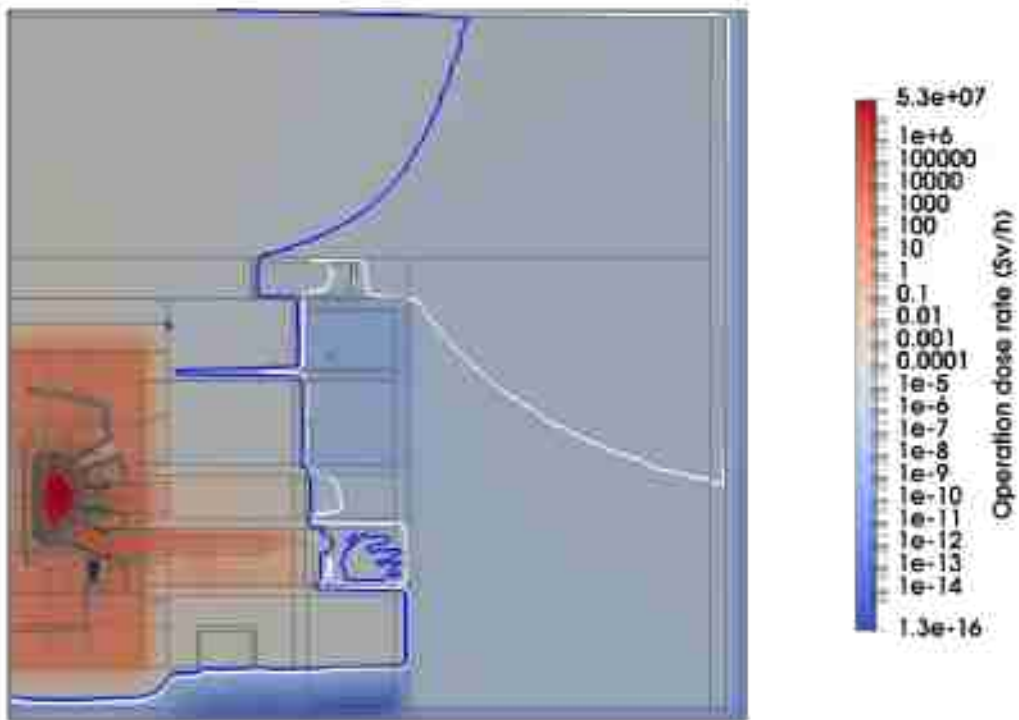


图 3-82 BEST 200MW 功率下运行总剂量率云图

### 3.3.1.3 氚源项

#### (1) 主机大厅氚操作量

氚聚变功率和脉冲长度包括以下两个阶段：

- 1) 短脉冲运行：100-200MW，单脉冲长度为 5-10 秒。
- 2) 稳态运行：30-50MW 聚变功率，典型单脉冲长度为 1000 秒。

因为 BEST 是实验装置，探索高的聚变燃料燃耗率是实验内容之一。假设等离子体中聚变燃料燃耗率 [ ] 单个脉冲需要的氚量约为 [ ]。根据 BEST 装置设计，以 50MW 聚变功率长脉冲运行时，总运行时间将控制在一天不超过 [ ]（即 [ ] 个长脉冲的时间），对应的单日氚需求量最大，为 90 克；按照装置设计的燃耗率为 [ ] 计算，同时考虑氚在真空室内部部件、抽气系统的滞留裕量 20 克，则对应的单位氚的单日总需求量约 110 克，活度约为  $4.07E+16Bq$ 。年氚消耗量按 [ ] 考虑，为 11g ( $4.07E+15 Bq$ )。

#### (2) 热室氚操作量

热室中的氚来自于待维修操作的内部部件，单轮维修数量为：

- 屏蔽包层对应的第一壁模块，钨瓦 100 块；
- 偏滤器模块靶板 10 块。

真空室内部部件中氚滞留量计划控制不超过 10g，其在内部部件中基本分布屏蔽包层（176 块）、偏滤器 cassette（48 块）、包层第一壁（15000 块）及偏滤器靶板（96 块）等部件中，热室内同时存储在维修操作的内部部件数量不超过 2 组，相比总体内部部件的数量，需要存储和维护的部件是占比 < 1%，则：热室中单轮维护氚存量上限为  $10g * 1\% = 0.1g$ ；在此基础上，进一步考虑内部部件中氚滞留的非均匀性、评估方法的准确性，综合定义：

- 热室中氚量上限控制为 1.0g ( $3.58E+14 Bq$ )。

#### (3) 含氚废水

聚变装置在运行和维修期间都会产生氚化水。各种气氛除氚系统，包括通排风除氚

系统（Ventilation Detriation System, VDS）、空气除氚系统（Air Detriation System, ADS）和手套箱除氚系统（Glovebox Detriation System, GDS），经过催化氧化过程都会产生氚化水，这是主要来源；为了维持包层和偏滤器冷却水氚浓度，需要抽取一定比例的含氚水进行去氚处理后，再返回冷却水系统；各类涉氚部件维护过程和除氚过程中也会产生含氚水；事故状态，如托卡马克水冷管道破裂，会产生含氚水，并最终流入水去氚化系统（Water Detriation System, WDS）的氚水储罐。

水去氚化主体工艺为水精馏预处理浓集（Water Distillation, WD）+电解耦合催化交换（Combined Electrolysis Chemical Exchange, CECE）+氢同位素低温精馏（Cryogenic Distillation, CD）。具体工艺过程为，各单元过程控制相对稳定的进料能力和原料浓度，浓度符合要求的输入对应单元进行处理，低浓氚水和高浓氚水根据浓度和存量调配特定浓度后输入，其中 WD 处理能力 [REDACTED] 原料浓度 [REDACTED] CECE 处理能力 [REDACTED] 原料浓度 [REDACTED] CD 处理规模应达到 [REDACTED] 对应的氢同位素气体组成预计为：[REDACTED] 摩尔百分比，下同)，[REDACTED] 其余为 H。为便于含氚氢同位素气体后续的存储和处理，通过 CD 将待处理的氢同位素气体的氚浓集 1000 倍后收集贮存，浓集后的富氚氢同位素气体组成预计为：[REDACTED] [REDACTED] 其余为 H。同时，对于分离得到的贫氚氢同位素气体 [REDACTED] 将返回 CECE 进行进一步除氚处理，以满足环境排放要求。

正常运行情况下，各部件产生的氚化水利用重力作用转移到水去氚化系统氚水存储子系统储罐之中暂存，并由水去氚化系统其他子系统处理。

氚处理中心无液相氚水排出路径，在 CECE 顶部，经过稀释后的氢气和夹带的水蒸气排出体系，其中 HT 和 HTO 参考浓度分别为浓度分别为 [REDACTED] 和 [REDACTED] Bq/m<sup>3</sup>，全年氚排放量仅有 [REDACTED]。

BEST 装置运行过程中产生的放射性废液主要为氚化水，主要产生途径有：

- 1) 气氛除氚工艺（含 VDS、ADS 和 GDS）产生主要高浓含氚水，其浓度 [REDACTED]
- 2) 偏滤器和包层冷却水（Tokamak Cooling Water System, TCWS）产生大量较低浓度的氚水，浓度参考 [REDACTED]
- 3) 维修和异常状况可产生浓度高于 [REDACTED] 的含氚水；

4) Tokamak 大厅、氚处理中心、热室绿区等位置的暖通空调系统 HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning System) 及局部空冷器 (Local Air Cooling System, LAC) 运行过程中产生低浓含氚废水。

正常运行时, 偏滤器和包层冷却水约百吨, 在线取出部分进行除氚处理, 参考氚水处理的速率为 [REDACTED], 气氛除氚系统产生含氚水速率为 [REDACTED], 按年运行 [REDACTED] 算, 总产生量为 [REDACTED]; 其他涉氚系统产生含氚水速率为 [REDACTED], 按年运行 [REDACTED] 算, 总产生量为 [REDACTED]。异常工况下, 如大厅冷却水管道破裂及 Tokamak 装置破损情况下, 氟化水年产生量为 [REDACTED]。

BEST 装置正常运行或事故工况下产生氟化水将由水去氟化系统进行处理。

#### (4) 含氚废气

BEST 向环境排放的放射性主要是氚气 (HT) 和氟化水 (HTO), 排出路径包括各 VDS 尾气、WDS 稀释氢气和 HVAC 排出气, 所有的排放出口均经过处理达标之后再排放。因此, BEST 氚操作没有无组织排放。

排放气体除氚系统主要用于常规条件下氚处理系统工艺尾气与吹扫气的排放处理, 减小常规氚的排放量; 同时也用于 Tokamak 大厅内廊道、拱顶及热室橙区房间等处的气氛除氚。来自过滤器、鼓风机和氚安全检测系统中的废气通过排放气体除氚系统除氚后才能排放到大气中。事故条件下, 联用空气气氛除氚系统和手套箱除氚系统, 抽取相关房间及系统的气体并除氚排放以维持负压, 并对空气气氛除氚系统及手套箱除氚系统的尾气深度除氚后排放。

BEST 运行过程中废气来源主要包括:

- 1) 氚处理中心中各氚处理工艺系统 (如 AMC、FCM、HIS、EPT、WDS、燃料加注系统、GDS 等) 的尾气及排放气、各涉氚工艺系统组件的夹层吹洗气;
- 2) Tokamak 大厅中系统排出气及吹洗气。包括泄漏检测系统、TBM 系统的排出气、Port Cell 中的系统排出气及包容体吹洗气、真空室早期的抽空排出气等;
- 3) Tokamak 大厅中含 HTO 的系统排出气及吹扫气 (如 VVPSS、TCWS 等);



4) Tokamak 大厅拱顶、廊道、TBM 设备间、NBI 与 VVPSS 设备室、真空系统设备室的气氛；氟化水处理及 VVPSS 应急氟水储存区与燃料加注系统的二次包容体吹扫气；

5) 氟处理中心中氟库存房间、氟活动操作间、除氟系统泵房的通排风气体；

6) 热室 C3 区系统的排放气与吹洗气；

7) 热室 C3 区的房间气氛；

8) 事故状态下 ADS 的尾气；

9) 常规及事故状态下 HC-ADS 的尾气。

排放气除氟系统（VDS）的排放量：

表 3-16 VDS 尾气氟排放估算结果

系统	设定的尾气排放限值 (Bq·m <sup>-3</sup> )	排放流量 (m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	年氟排放量 (g·a <sup>-1</sup> )	备注
N-VDS-1	HT: [REDACTED] HTO: [REDACTED]	1000	0.0108	正常工况；[REDACTED] [REDACTED] 下
N-VDS-2		1000	0.0108	正常工况；[REDACTED] [REDACTED] 以 下
HC-VDS		1000	0.0108	正常工况；[REDACTED] [REDACTED] 下
S-VDS		3000	0.0060	[REDACTED] 入氟处理中心；处理 时 [REDACTED]
N-VDS		1000	0.0020	Tokamak 漏水事故；处理时间 [REDACTED]

假设计算中的氟排放浓度按  $1 \times 10^6$  Bq·m<sup>-3</sup> 计，且运行时间均按极大值 4000 h 计算（实际运行时间应远小于此），则通过 VDS 排放至环境的总氟量为约 [REDACTED] (1.45E+13 Bq/a)，满足排放限值的设计要求。

BEST 涉氟废气处理方式：含氟废气均需通入对应的排放气除氟系统（N-VDS-1、N-VDS-2、HC-VDS、S-VDS（事故状态）），采用催化氧化+喷淋洗脱两级工艺深度除氟。工艺主要基于两个步骤：1) 单质态氟的催化氧化和氟化烃的催化重整（氧化），使氟转化为氟化水；2) 含氟水蒸气在喷淋洗脱系统中的浓缩收集。除氟后确保

气相产物中的氚浓度符合排放标准将尾气送入废气排放站排放至大气中。除氚过程中产生的氚水输送至 WDS 进行再处理。

#### (5) 含氚固废

BEST 正常工况产生的废物主要包括：不可焚烧的固体废物（如系统管道、阀门、低温泵、气体循环泵、真空泵等金属零部件），可焚烧的固体废物（如防护装备、手套、纸张、布、棉花等），其他特定工艺废物（如活性炭、分子筛、钯净化器、贮氚床、电解池、除氚催化剂、离子交换树脂、HEPA 过滤器、主机包层、偏滤器等）。

BEST 正常工况运行固废约为 5 m<sup>3</sup>/a。

### 3.3.1.4 感生放射性

BEST 运行产生的中子与在系统中扩散，将导致结构部件、设备冷却水、空气、混凝土墙、土壤和地下水等材料被活化产生放射性。其放射性强度取决于所在区域的中子通量、聚变装置功率及运行时间、被照材料性质等因素。

#### 3.3.1.4.1 感生放射性计算方法及模型

BEST 感生放射性分析使用的为总中子产额为 [REDACTED] 的辐照方案，将辐照方案进行简化为表 3-17 所示用于评价参考。

表 3-17 BEST 感生放射性分析用简化辐照方案

聚变功率 (MW)	脉冲长度 (s)	脉冲数目
2.09E-01	2765	1
2.31E-01	590	1
3.47E-01	294	1
150	1	40

#### 3.3.1.4.2 空气的感生放射性

BEST 运行期间，中子与空气反应 <sup>3</sup>H、<sup>14</sup>C 等放射性核素。估算得空气体积约 4.3E+04m<sup>3</sup>，计算用空气密度 1.205E-03g/cm<sup>3</sup>，则总质量 5.2E+04kg。

BEST 是脉冲运行方式，在脉冲运行期间 DT 聚变产生中子活化空气产生放射性核

素，这些空气中的放射性核素在脉冲间隔将自发衰变以及通过空气循环系统吸附去除。则正常运行工况下，空气放射性核素浓度最大情况出现在中子产额最大的脉冲运行结束时刻。根据当前 BEST 辐照方案，即以 50MW 聚变功率运行 1000 秒后的结束时刻，空气放射性核素浓度最大，其模拟结果见表 3-18。

**表 3-18 BEST 50MW 1000 秒单脉冲辐照后空气放射性核素模拟结果**

核素	比活度(Bq/m <sup>3</sup> )	活度(Bq)	半衰期(s)
H-3	9.89E+00	4.45E+05	3.89E+08
C-14	5.74E+00	2.58E+05	1.80E+11
N-13	3.77E+05	1.70E+10	5.98E+02
N-16	1.33E+06	5.99E+10	7.13E+00
S37	1.41E+04	6.37E+08	2.99E+02
Cl-36	2.32E-07	1.04E-02	9.50E+12
Cl-40	9.52E+03	4.29E+08	8.10E+01
Ar-37	1.80E+01	8.09E+05	3.03E+06
Ar-39	3.43E-02	1.55E+03	8.49E+09
Ar-41	3.17E+05	1.43E+10	6.58E+03
Be-10	4.71E-09	2.12E-04	5.05E+13
S-35	8.21E-03	3.70E+02	7.54E+06
Cl-38	2.03E+01	9.12E+05	2.23E+03
Cl-39	7.33E+01	3.30E+06	3.34E+03

无净化条件下，BEST 空气活化产生的短寿命放射性核素将达到动态平衡，而长寿命核素逐渐累计增多。为保守估计，模拟计算得到无净化条件下停机后包层部件的放射性核素活度浓度如表 3-19。空气中的放射性核素将通过吸附净化系统去除 <sup>3</sup>H 等放射性核素达到排放标准后排入外界环境。

**表 3-19 无净化条件下空气感生放射性模拟结果**

核素	比活度(Bq/m <sup>3</sup> )	活度(Bq)	半衰期(s)
H-3	1.13E+04	4.87E+08	3.89E+08
Be-10	7.44E-06	3.20E-01	5.05E+13
C-14	8.44E+03	3.63E+08	1.80E+11
N-13	1.08E+04	4.65E+08	5.98E+02
N-16	1.60E+06	6.88E+10	7.13E+00
S-35	7.02E-01	3.02E+04	7.54E+06
Cl-36	3.42E-04	1.47E+01	9.50E+12
Ar-37	5.67E+02	2.44E+07	3.03E+06
Ar-39	5.00E+01	2.15E+06	8.49E+09
Ar-41	2.58E+04	1.11E+09	6.58E+03

S-37	5.07E+02	2.18E+07	2.99E+02
Cl-40	1.19E+03	5.13E+07	8.10E+01
P-32	6.14E-03	2.64E+02	1.23E+06
Cl-39	2.42E+00	1.04E+05	3.34E+03

### 3.3.1.4.3 水的感生放射性

基于 BEST 运行目标，偏滤器将是 BEST 中受辐照高、水活化产物及活化腐蚀产物放射性水平较高的部件。在 BEST 偏滤器水活化的计算中，使用以下假设及参数：

- 1) 以偏滤器部件的平均中子通量为冷却剂中子通量；
- 2) 使用 BEST 最大中子产额上限 [REDACTED] 来模拟水受照活化情况；
- 3) 将冷却剂视为固态，不考虑水冷却剂的流动及循环打混导致的放射性水平降低；
- 4) 不考虑水冷却剂的更换和净化。

本报告采用保守的假设条件，并选取受辐照较高的位置评估水活化产物，所得结果为保守值。BEST 单个偏滤器模块冷却剂体积 [REDACTED] 48 个偏滤器模块： [REDACTED]

水活化产物的最大放射性水平如表 3-20 所示。基于此假设，将下表中的核素比活度乘以偏滤器内部（不含外部循环管道）体积即为偏滤器系统的总放射性核素活度值。BEST 偏滤器中 H-3 总量为 [REDACTED] [REDACTED] [REDACTED] [REDACTED] 进行保守估算)。

表 3-20 偏滤器水在无净化条件下受辐照停机时刻的最大放射性比活度

核素	放射性比活度(Bq/kgH <sub>2</sub> O)	半衰期(s)
H-3	1.20E+04	3.89E+08
Be-10	2.31E-04	5.05E+13
C-14	2.13E+03	1.80E+11
C-15	3.53E+07	2.45E+00
N-16	5.78E+10	7.13E+00
N-17	1.41E+07	4.17E+00
N-18	3.06E+06	6.30E-01
O-19	2.70E+05	2.69E+01

表 3-21 偏滤器水在无净化条件下受辐照停机 1 小时的放射性比活度

核素	放射性比活度(Bq/kgH <sub>2</sub> O)	半衰期(s)
H-3	1.20E+04	3.89E+08
Be-10	2.31E-04	5.05E+13
C-14	2.13E+03	1.80E+11

### 3.3.1.4.4 水活化腐蚀产物

偏滤器是受辐照高、活化腐蚀产物放射性水平高的部件。BEST 以偏滤器为典型部件，在总中子产额为 2.5E+25 的条件下，活化腐蚀产物所能达到的最高水平，如表 3-22 所示。

表 3-22 BEST 偏滤器活化腐蚀产物总量及放射性水平

区域	质量 (kg)	放射性水平
辐照区管道	■	■
非辐照区管道	■	■ <sup>2</sup>
冷却剂	■	■
过滤器	■	■

### 3.3.1.4.5 活化固体的感生放射性

根据 BEST 的设计和运行方案，部分部件在一定条件下，需要存放于热室，包括：

- 1) 停机检修临时存放，如窗口插件等部件；
- 2) 运行时损坏替换部件，如偏滤器靶板及包层第一壁等；
- 3) 定期更换部件。

热室中的部件在达到一定条件后，可以移出热室，包括：

- 1) 正常部件检修完成返回主机；
- 2) 放射性水平达到清洁解控水平，解除控制；
- 3) 达到废物处理、处置条件，移交处置单位。

表 3-23 BEST 部分部件体积（未压缩）与质量

部件	体积 (m <sup>3</sup> )	质量 (t)
偏滤器靶板	1.1	9.2
偏滤器整体	29.6	202
中窗口	56.9	257
包层第一壁	5.4	38.3

为保守考虑，以 BEST 运行的前两个阶段的最大中子产额条件来评估中间移除部件的放射性。例如，在阶段 I 被移出的部件，其活化水平按照阶段 I 最大中子产额  $2.5E+23$  来评估其放射性。

BEST 中可能被移出系统放入热室的部件主要包括偏滤器、包层第一壁和窗口系统。本报告给出偏滤器整体、偏滤器靶板，包层第一壁，中窗口汤姆逊散射系统等受到辐照较高的典型部件，并给出其在停机不同时间的放射性特征。

(1)  $2.5E+23$  中子中子产额的部件放射性特征

当 BEST 按照  $2.5E+23$  中子产额辐照方案运行后，各部件的放射性特征如下。

表 3-24 偏滤器在停机不同时间的放射性特征

参数	停机 30 天	停机 1 年后	停机 10 年后	停机 100 年后
比活度 (Bq/kg)	4.48E+08	1.56E+08	1.45E+07	3.75E+05
总活度 (Bq)	7.43E+13	2.59E+13	2.40E+12	6.22E+10
表面剂量率 (Sv/h)	2.51E-02	1.12E-02	2.34E-03	5.76E-08

表 3-25 中窗口汤姆逊散射系统停机不同时间的放射性特征

参数	停机 30 天	停机 1 年后	停机 10 年后	停机 100 年后
比活度 (Bq/kg)	2.55E+07	4.13E+06	2.88E+05	3.24E+03
总活度 (Bq)	4.88E+12	7.92E+11	5.52E+10	6.20E+08
表面剂量率 (Sv/h)	2.94E-04	1.21E-04	1.80E-05	4.89E-10

表 3-26 偏滤器靶板在停机不同时间的放射性特征

参数	停机 30 天	停机 1 年后	停机 10 年后	停机 100 年后
比活度 (Bq/kg)	2.67E+09	4.62E+08	3.16E+07	1.22E+06
总活度 (Bq)	2.45E+13	4.24E+12	2.90E+11	1.12E+10
表面剂量率 (Sv/h)	5.17E-02	2.65E-02	6.10E-03	9.16E-08

表 5 包层第一壁在停机不同时间的放射性特征

参数	停机 30 天	停机 1 年后	停机 10 年后	停机 100 年后
比活度 (Bq/kg)	2.94E+09	1.52E+09	1.28E+08	8.52E+05
总活度 (Bq)	1.12E+14	5.81E+13	4.89E+12	3.26E+10
表面剂量率 (Sv/h)	2.13E-01	7.48E-02	1.05E-02	3.70E-07

(2) 1E+24 中子产额的部件放射性特征

当 BEST 按照 1E+24 中子产额辐照方案运行后，各部件的放射性特征如下。

表 3-27 偏滤器在停机不同时间的放射性特征

参数	停机 30 天	停机 1 年后	停机 10 年后	停机 100 年后
比活度 (Bq/kg)	2.61E+09	6.15E+08	5.36E+07	1.54E+06
总活度 (Bq)	4.33E+14	1.02E+14	8.89E+12	2.55E+11
表面剂量率 (Sv/h)	1.32E-01	4.40E-02	8.91E-03	2.32E-07

表 3-28 中窗口汤姆逊散射系统停机不同时间的放射性特征

参数	停机 30 天	停机 1 年后	停机 10 年后	停机 100 年后
比活度 (Bq/kg)	1.66E+08	1.94E+07	1.07E+06	1.32E+04
总活度 (Bq)	3.19E+13	3.72E+12	2.05E+11	2.54E+09
表面剂量率 (Sv/h)	1.52E-03	4.78E-04	6.84E-05	1.98E-09

表 3-29 偏滤器靶板在停机不同时间的放射性特征

参数	停机 30 天	停机 1 年后	停机 10 年后	停机 100 年后
比活度 (Bq/kg)	1.71E+10	2.16E+09	1.18E+08	5.01E+06
总活度 (Bq)	1.57E+14	1.98E+13	1.08E+12	4.60E+10
表面剂量率 (Sv/h)	2.58E-01	1.04E-01	2.32E-02	3.64E-07

表 3-30 包层第一壁在停机不同时间的放射性特征

参数	停机 30 天	停机 1 年后	停机 10 年后	停机 100 年后
比活度 (Bq/kg)	1.44E+10	5.69E+09	4.69E+08	3.50E+06
总活度 (Bq)	5.50E+14	2.18E+14	1.80E+13	1.34E+11
表面剂量率 (Sv/h)	1.18E+00	2.99E-01	4.00E-02	1.50E-06

### 3.3.1.4.6 退役废物总量及放射性水平

BEST 由主机部分和厂房建筑组成。主机部分包括包层、偏滤器、窗口插件、中心螺线管、纵场线圈、极向场线圈、冷屏、杜瓦。预估 BEST 各主要部件的质量及废物活化及分类情况如表 3-31 所示。

表 3-31 BEST 主要活化固体部件质量及废物分类

部件	体积 (m <sup>3</sup> )	质量 (吨)	停机时刻放射性比活度(Bq/kg)	停机时刻废物等级	暂存 30 年后废物等级	暂存 100 年后废物等级
包层	7.9E+01	██████	7.98E+11	LLW	LLW	LLW
偏滤器	2.4E+01	██████	8.90E+11	LLW	LLW	LLW
真空室	1.4E+02	██████	1.14E+09	LLW	LLW	VLLW
窗口插件	4.6E+01	██████	9.41E+10	LLW	LLW	VLLW
中心螺线管	6.2E+01	██████	1.80E+07	LLW	VLLW	VLLW
纵场线圈	2.0E+02	██████	1.15E+08	LLW	LLW	LLW
极向场线圈	8.0E+01	██████	4.84E+07	LLW	LLW	LLW
冷屏	2.5E+01	██████	1.02E+08	LLW	LLW	VLLW
杜瓦	7.0E+01	██████	1.16E+07	LLW	LLW	EW
建筑	5.3E+04	██████	2.74E+05	LLW	EW	EW

备注：LLW——低放废物；VLLW——极低放废物；EW——豁免废物。



## 4 辐射安全与防护设施

### 4.1 辐射工作场所分区

为了对辐射源及职业受照的工作人员保持控制，需要对放射性场所进行合理的辐射防护分区管控。根据 GB18871-2002 《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》，并参考国际放射防护委员会(ICRP)在其第 60 号出版物中建议，将 BEST 放射性场所分为控制区和监督区。其中场所边界范围取值分别为，BEST 装置主机大厅屏蔽墙体边界外 50m（I 类射线装置），主机大厅和氙处理中心外围取半径 500m（甲级非密封放射性物质工作场所）。

**控制区：**该区为 BEST 放射性工作场所的重点。根据工作场所辐射水平、表面污染水平和气载污染浓度设置对应的辐射分区，并相应地规定工作时段和必须的个人防护条件，以及必要的行政管理措施。

**监督区：**该区的辐射工作人员必须评价其职业受照，评估必须根据所在工作场所监测的结果或个人监测的结果进行。

参考中国核技术利用《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》、GB18871-2002 和 ITER 辐射防护分区规则，BEST 项目涉及放射性工作场所的 5#楼，将划分为控制区、监督区进行管理，详细分区见表 4-1。规划采用黄色标识监督区，用红色标识控制区。监督区最低边界取辐射剂量率  $0.25\mu\text{Sv/h}$ ，控制区最低边界取辐射剂量率  $2.5\mu\text{Sv/h}$ 。

表 4-1 BEST 辐射工作场所分区表

分区名称	分区颜色	剂量率控制水平	备注
控制区	红色	$D_r > 2.5\mu\text{Sv/h}$	等离子体放电运行时，较高的辐射水平，人员禁止入内；停机检修维护期间结合现场辐射剂量监测值，以及个人剂量实测值进行人员出入与居留时间控制
监督区	黄色	$0.25\mu\text{Sv/h} < D_r \leq 2.5\mu\text{Sv/h}$	非常低辐射，辐射工作人员无居留限制

结合 BEST 不同的运行阶段和状态，辐射防护将按照实验运行期间、等离子体放电

脉冲间隙期间、停机维护期间进行管理。辐射防护分区在实验运行期间主要考虑中子、X/γ射线的穿透辐射，在脉冲间隙期间主要考虑中子活化产生的放射性核素次级γ射线辐射，在停机维护期间主要考虑氙的β内照射以及中子活化次级γ射线。分区的边界主要结合射线的种类、主要操作类型和辐射屏蔽墙体进行划定。

在进行等离子体放电运行期间，BEST装置的辐射分区（按剂量率）规划如图4-1~图4-5所示。在主机大厅屏蔽墙内部，放电期间存在着大量的瞬发中子、X/γ射线，运行期间人员禁止入内。主机大厅屏蔽墙与大厅外蔽墙体之间，如诊断采集机房、ICRF/ECRH/LHCD/NBI控制室、辅助系统外围设备室等区域，在装置进行等离子体放电运行期间辐射剂量率超过 $2.5\mu\text{Sv/h}$ ，需要设置为控制区，限制人员的进入与驻留。在等离子体放电实验的脉冲间隙期，放射性工作人员可进入该区域开展检修与维护工作，但必须进行实时辐射剂量监测和时长控制。氙处理中心部分的辐射主要为内照射（β射线），根据其涉氙操作方式、数量，以及气载扩散途径，该区域全部划分为控制区。位于B2层地下室的热室，将开展部件转运、除氙、维护操作，以及进行放射性废物暂存，辐射主要为γ射线（中子活化产物衰变）和β射线（氙衰变）。热室既存在外照射辐射源又有内照射风险，因而全部划分为控制区。BEST装置大楼（5#楼）除去控制区以外的其它区域，均设置为监督区（黄色）。

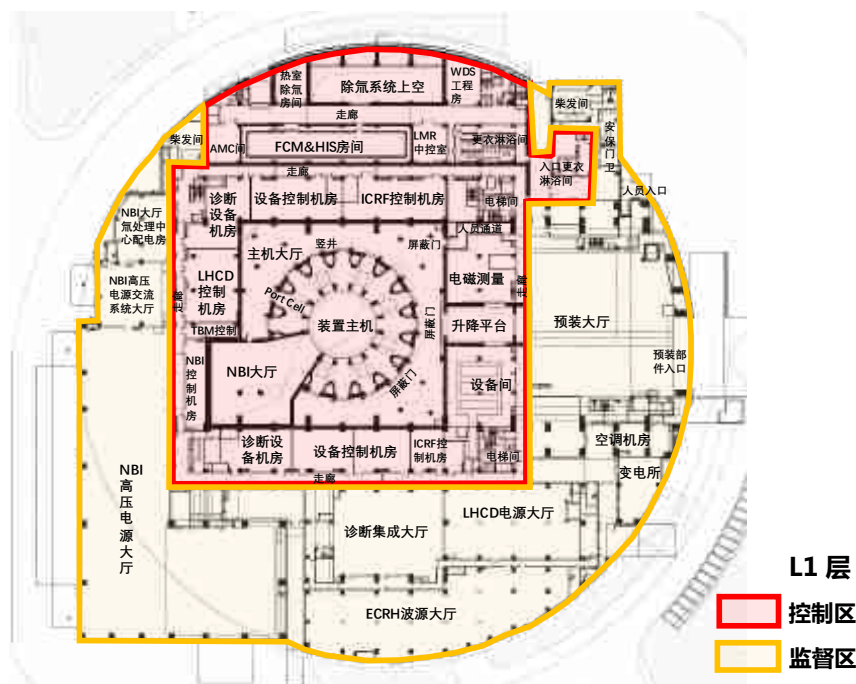


图 4-1 BEST 装置大楼 L1 层辐射分区

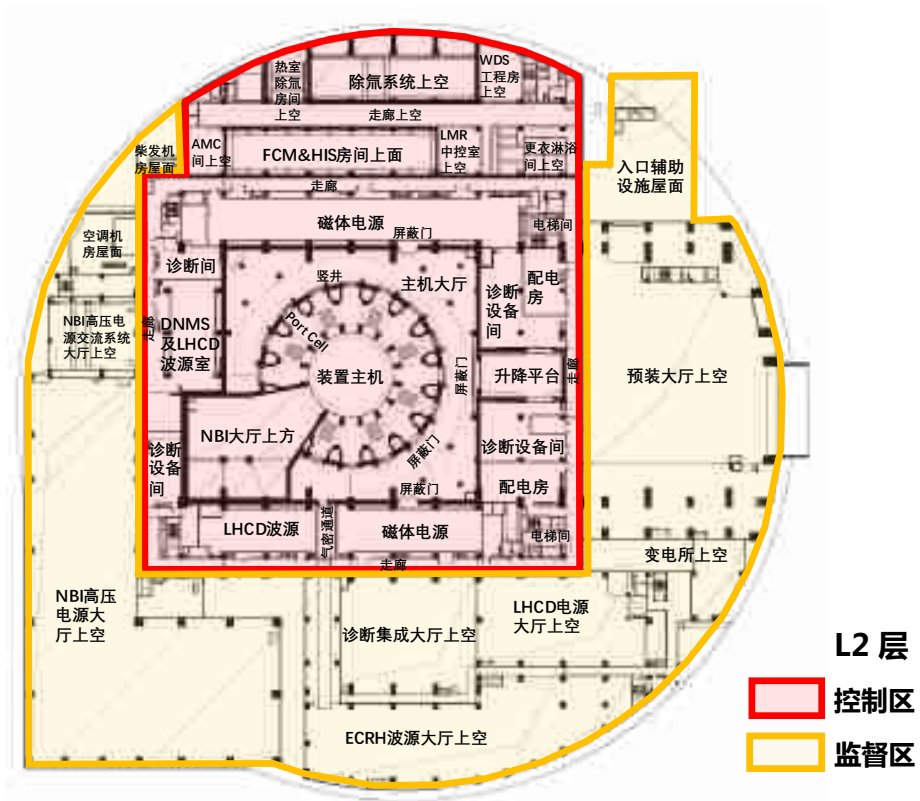


图 4-2 BEST 装置大楼 L2 层辐射分区

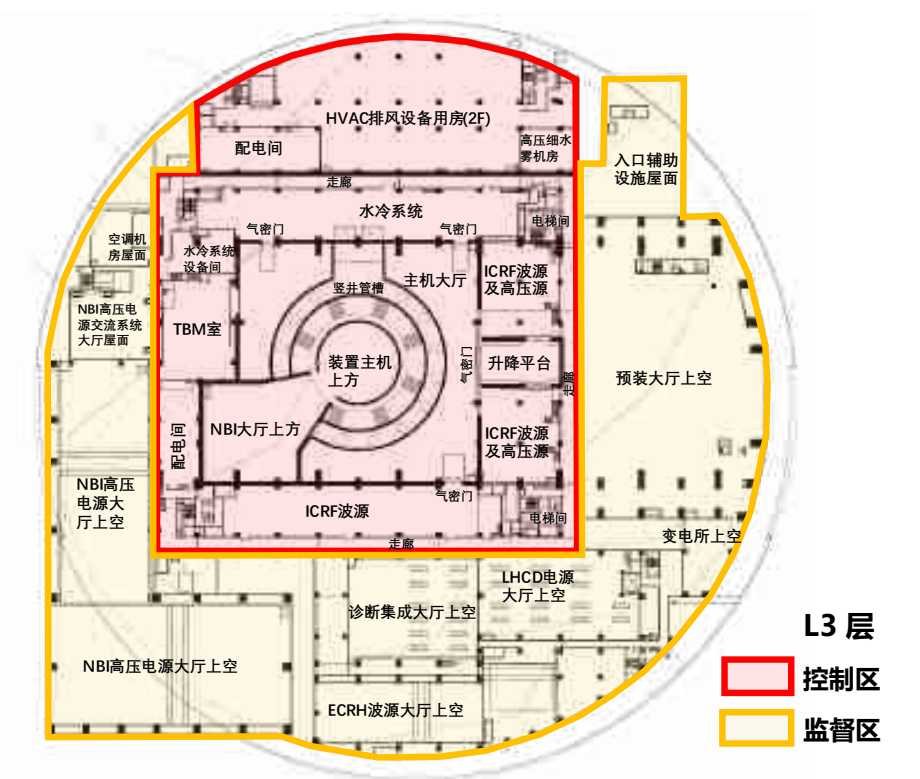


图 4-3 BEST 装置大楼 L3 层辐射分区

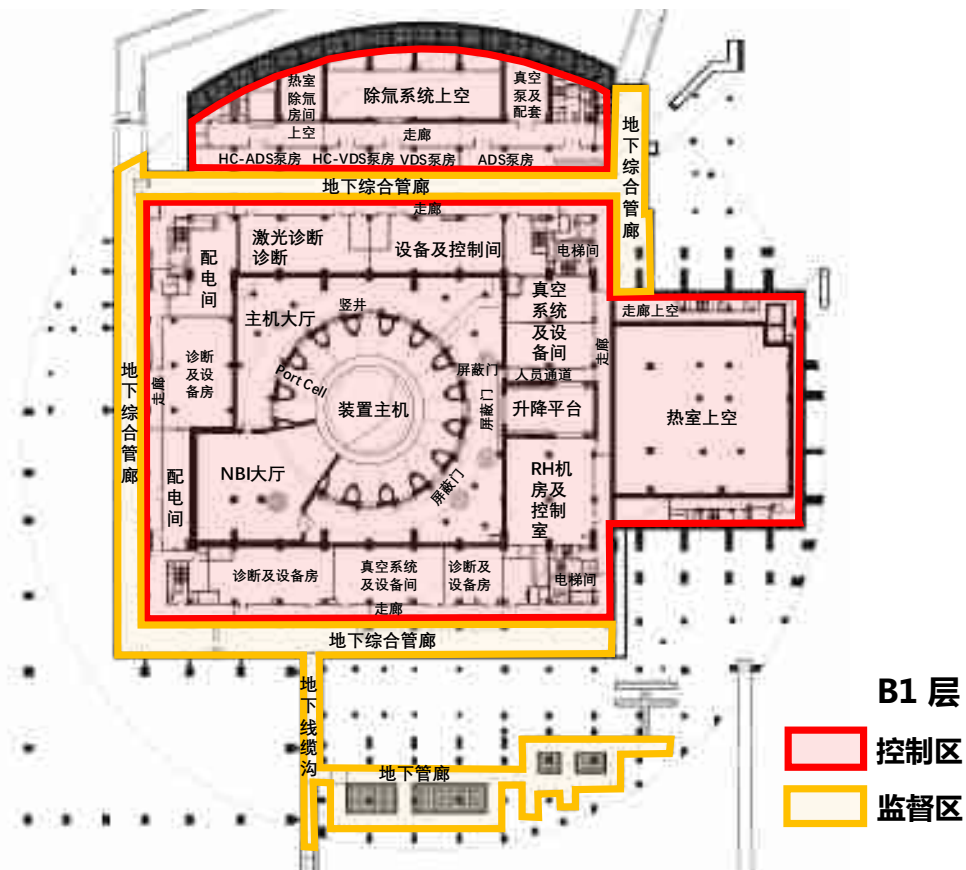


图 4-4 BEST 装置大楼 B1 层辐射分区

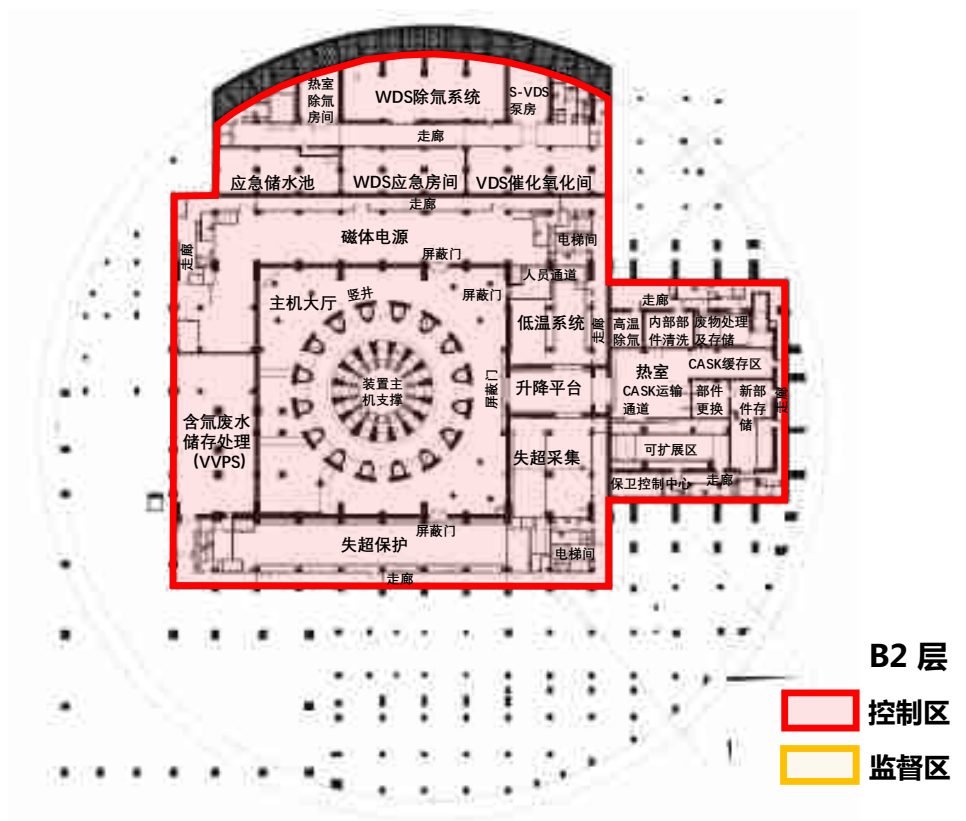


图 4-5 BEST 装置大楼 B2 层辐射分区

在 BEST 涉氙的非密封放射性物质工作场所，将参考 GB18871-2002 附表 B11，进行辐射防护分区，详情见表 4-2。托卡马克聚变装置基本不涉及  $\alpha$  放射性物质，其主要的表面污染源来自氙的  $\beta$  射线。根据表面类型的不同，工作台、设备、墙壁、地面，监督区与控制区的最低边界分别取  $4 \text{ Bq/cm}^2$ 、 $40 \text{ Bq/cm}^2$ ；工作服、手套、工作鞋的监督区与控制区最低边界均为  $4 \text{ Bq/cm}^2$ ；而手、皮肤、内衣、工作袜子则  $\beta$  放射性物质表面活度超过  $0.4 \text{ Bq/cm}^2$  就需要进行去污处置。

表 4-2 BEST 规划的非密封放射性物质工作场所分区

表面类型		$\beta$ 放射性物质 $\text{Bq/cm}^2$
工作台、设备、墙壁、 地面	控制区 <sup>1)</sup>	$4 \times 10$
	监督区	4
工作服、手套、工作鞋	控制区	4
	监督区	
手、皮肤、内衣、工作袜		$4 \times 10^{-1}$
1) 该区内的高污染子区除外		

BEST 装置运行与维护期间，在氙处理中心、主机大厅和热室涉及到的非密封放射性物质主要为氙。为了防止氙扩散造成放射性污染，对这些场所进行氙包容分区管控，分为 C1、C2、C3 区。C1 区正常情况下无表面污染或气载污染，例外情况下会产生，但是可接受的轻微污染；C2 正常情况下无污染，仅在特殊情况下，因事故造成中等表面污染或可接受的气载污染，应采取合理的控制措施；C3 有一定程度的表面污染，但正常情况下无气载污染，在某些情况下，会因事故造成比 C2 区高的潜在表面污染或气载污染，应当采取适当的控制措施。C2 与 C3 区域内进行负压通排风，并配备空气除氙系统。BEST 装置大楼各楼层的氙包容分区，分别见图 4-6~图 4-10。



图 4-6 BEST 装置大楼 L1 层氚包容分区

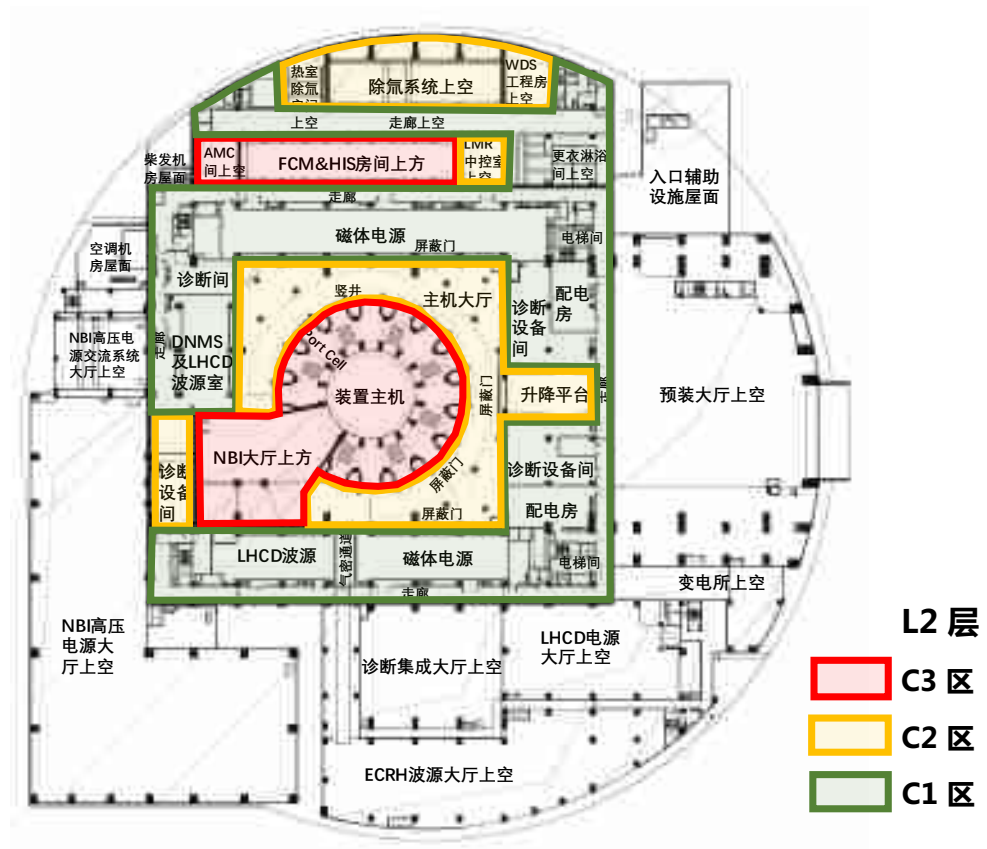


图 4-7 BEST 装置大楼 L2 层氚包容分区

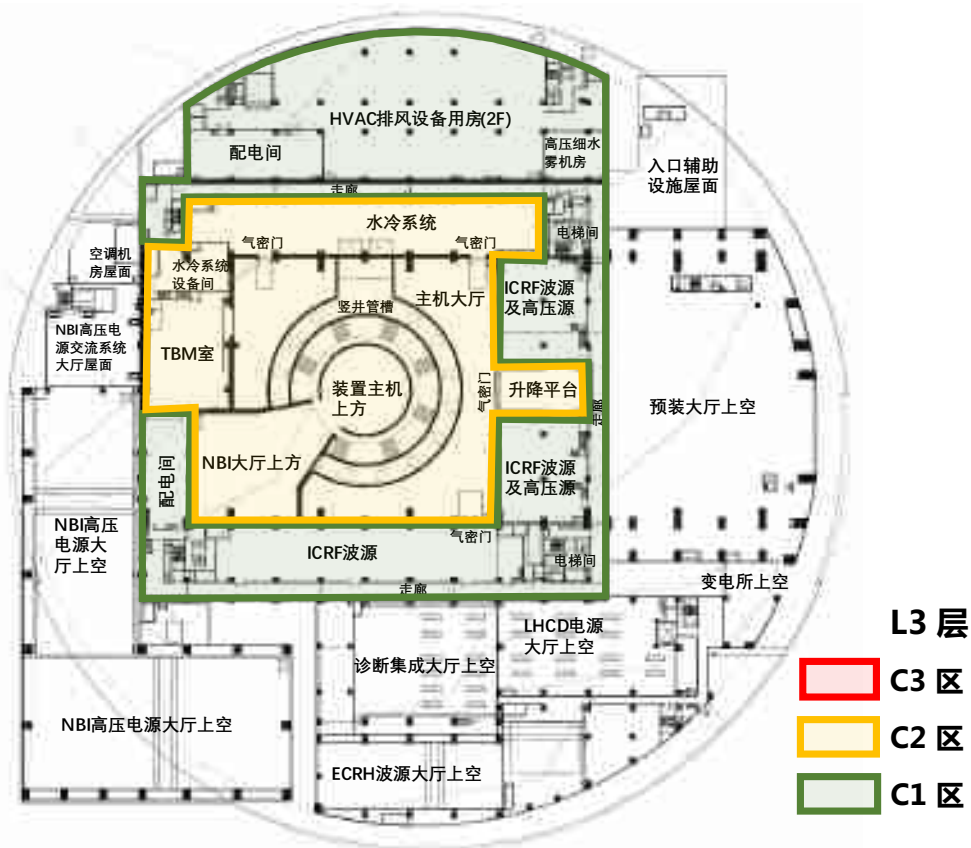


图 4-8 BEST 装置大楼 L3 层氡包容分区

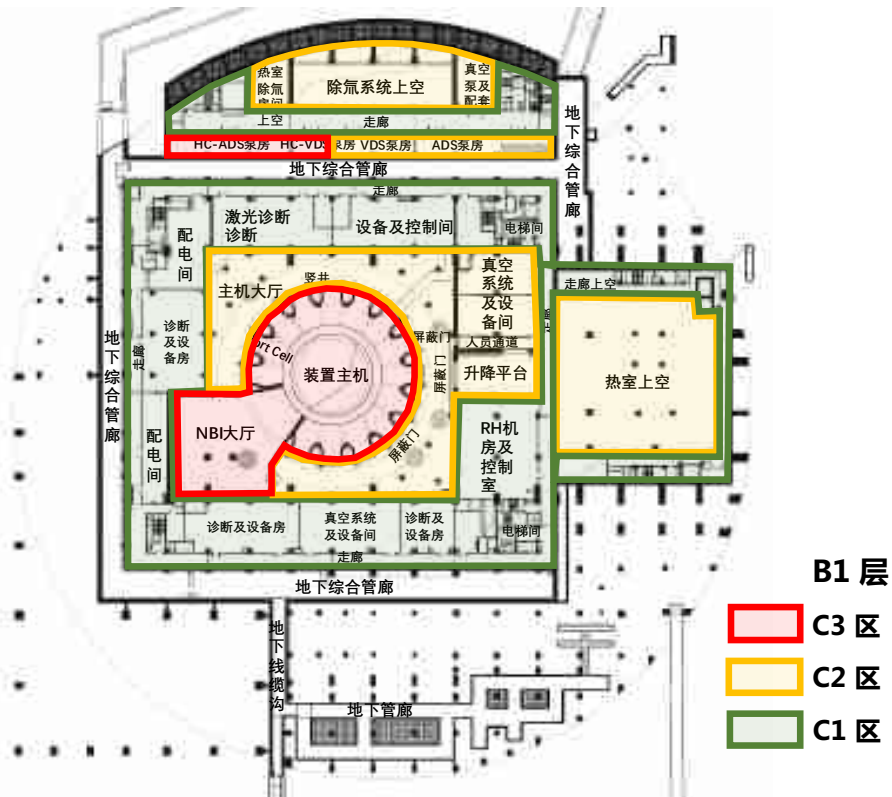


图 4-9 BEST 装置大楼 B1 层氡包容分区

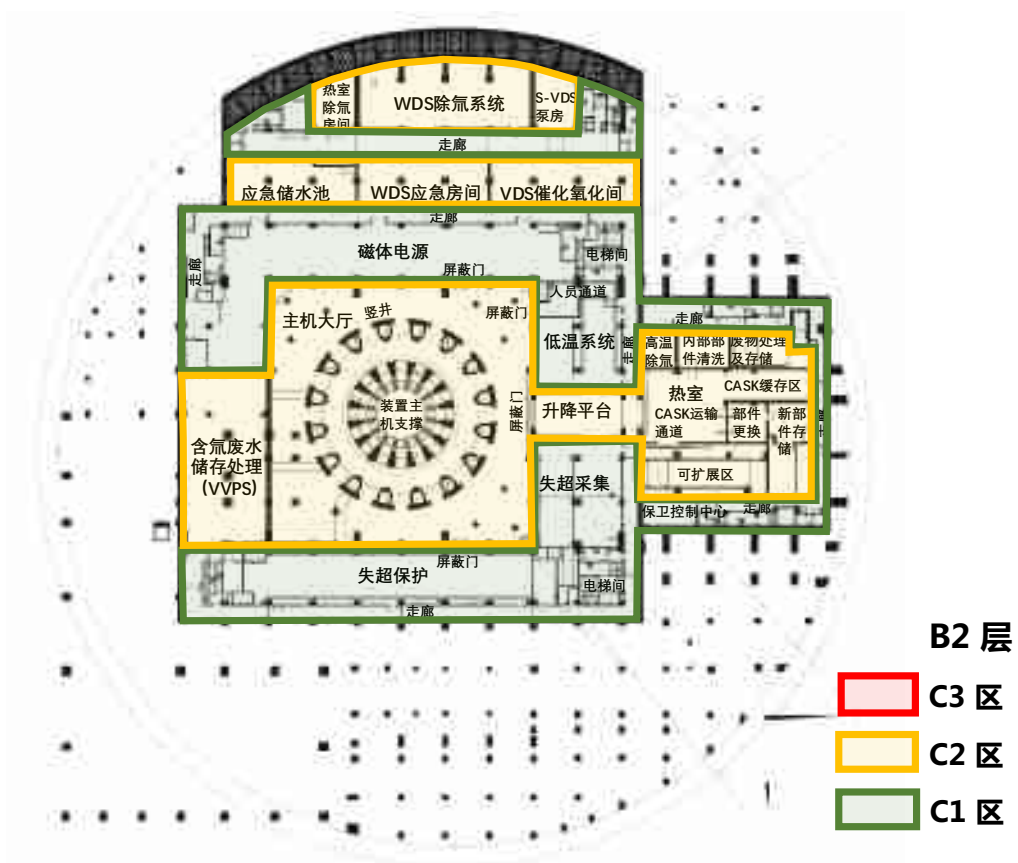


图 4-10 BEST 装置大楼 B2 层氚包容分区

受控区包括主要包括燃料净化与配气系统、氢同位素分离系统、监测与自动控制系统主工艺区、泵房和循环风机区域，需要和可能需要专门防护手段或安全措施的区域，以便控制正常工作条件下的正常照射或防止污染扩散，并预防潜在照射或限制潜在照射范围。对于该区域，设有可靠的个人安全防护和剂量监测措施，且对进入该区域工作的工作人员配备必须防护用品。控制措施：

- 1) 采用实体隔离将控制区与监督区隔开，并使气流按监督区、控制区的顺序进行组织。
- 2) 定期对工作场所中设备、地面、墙壁和工作台等进行表面污染水平监测，控制表面污染。
- 3) 通过分区和集中布置的原则，将含有高浓度氚的工艺系统集中布置，尽可能缩短工艺管道，工艺管道连接尽可能选择焊接；设备、管道和密封件的材质选择低扩散率和防止“氢脆”的材料，连接方式选择焊接，阀门选用金属波纹管阀，减少通过第一道密封屏障释放到工作场所的氚量。



4) 场所中设置氡浓度在线监测。工作场所的部分独立区域内工艺系统内（高氡房间）含有大量氡物质，这些氡物质在正常运行条件，通过扩散导致工作场所中氡浓度较高，或在潜在事故条件发生泄漏，在这些房间内设置在线氡浓度监测系统，及时发现异常浓度；对于低氡操作的房间设置有氡监测取样管路，通过剂量监测间内的氡监测设备实现取样监测。

5) 潜在污染区域主要考虑事故和检修导致工作场所氡浓度升高和表面污染水平增大，针对氡泄漏事故设计有预防措施和缓解措施，设置有三级氡包容及剂量监测系统，房间墙壁采用光洁金属包覆面，不采用吊顶。

**表 4-3 进入氡处理中心控制区采取的措施**

序号	GB 18871-2002 中 6.4.1.4 的规定	设计采取的措施
1	采用实体边界划定控制区	分区布置，各区之间采用实体墙作为辐射分区的边界
2	在控制区的进出口及其它适当位置处设立醒目的、符合规定的警告标志，并给出相应的辐射水平和污染水平的指示	在辐射工作场所各分区的入口设置有附录 F 规定的警告标志；将根据规定在各分区的入口位置设置辐射水平和污染水平的指示
3	制定职业防护与安全措施，包括适用于控制区的规则与程序	制定有《辐射防护大纲》，并按照大纲要求制定有相关管理程序
4	运用行政管理程序（如进入控制区的工作许可证制度）和实体屏障（包括门锁和联锁装置）限制进出控制区；限制的严格程度应与预计的照射水平和可能性相适应	利用实物保护的门禁系统控制进入辐射工作场所各区域的工作人员
5	按需要在控制区的人口处提供防护衣具、监测设备和个人衣物贮存柜	设置有卫生出入口，在卫生出入口配置有相关防护用品，如工作服、手套、口罩等
6	按需要在控制区的出口处提供皮肤和工作服的污染监测仪、被携出物品的污染监测设备、冲洗或淋浴设施以及被污染防护衣具的贮存柜	卫生出入口设置有事故专用淋浴设施。
7	定期审查控制区的实际状况，以确定是否有必要改变该区的防护手段或安全措施或该区的边界	设置有场所氡监测、手套箱氡监测。对含有大量氡物质的工作场所和手套箱进行氡在线监测，及时发现异常浓度；对操作氡物料较少的岗位进行定期巡检，切换监测。

本工程进入控制区采取的措施严格按照《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）的要求执行。

## 4.2 人流物流走向

BEST 园区 5#楼共分为 5 栋单体建筑，分别是 5#-1 主机大厅、5#-2 氙处理中心、5#-3NBI 电源大厅、5#-4 波源及诊断大厅以及 5#-5 预装大厅（热室）。总体货运通道如下图所示。

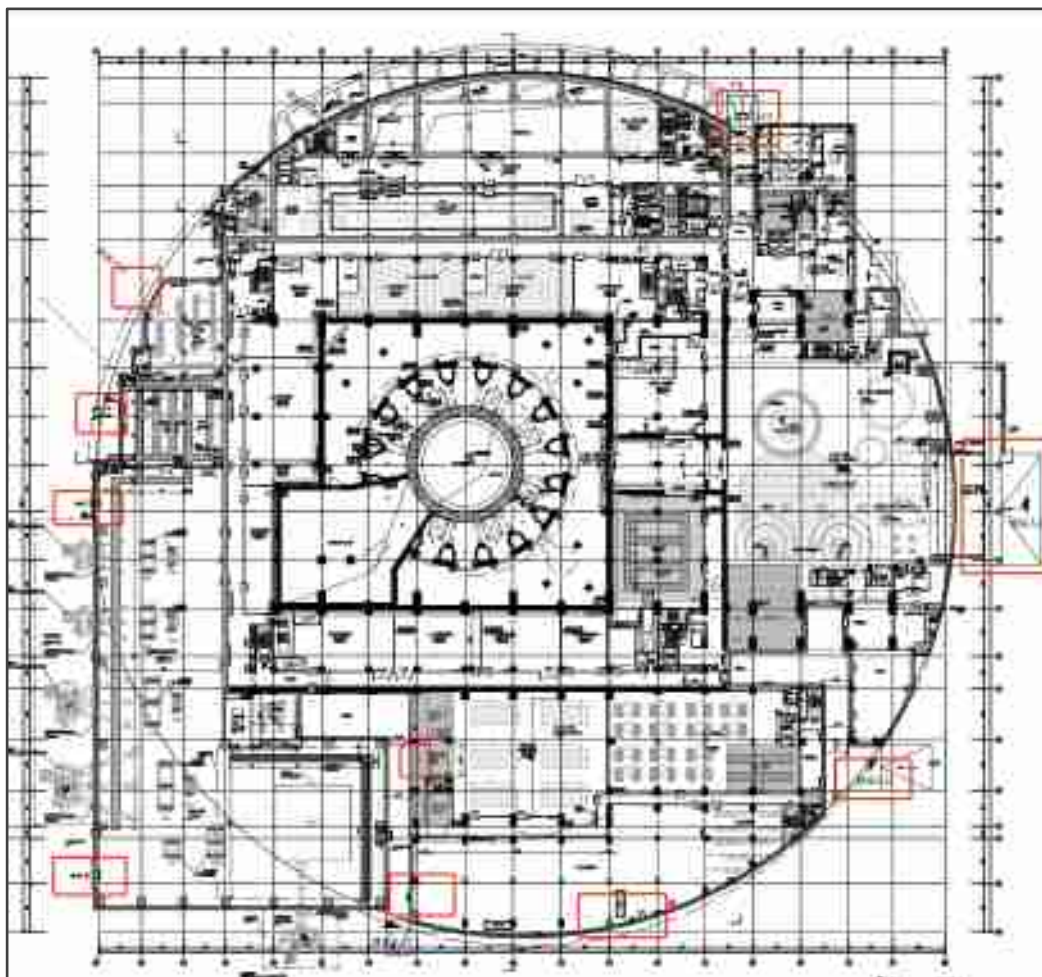


图 4-11 5#楼各楼栋单体货运入口示意图

5#楼的人员通道受到实物保护及实验区管理的要求，相关人员进出需受到严格的管控，5#-1 主机大厅及 5#-2 氙处理中心、5#-5 热室等统一规划为一个入口（综合管理门岗），如图 4-12 所示。

综合管理门岗配置安保办公、放射性检测室、换衣间、备用电源发电间等设施。人员进出需通过安保及放射性检测后方能进出，佩戴相关检测仪器进行人员安全防护。

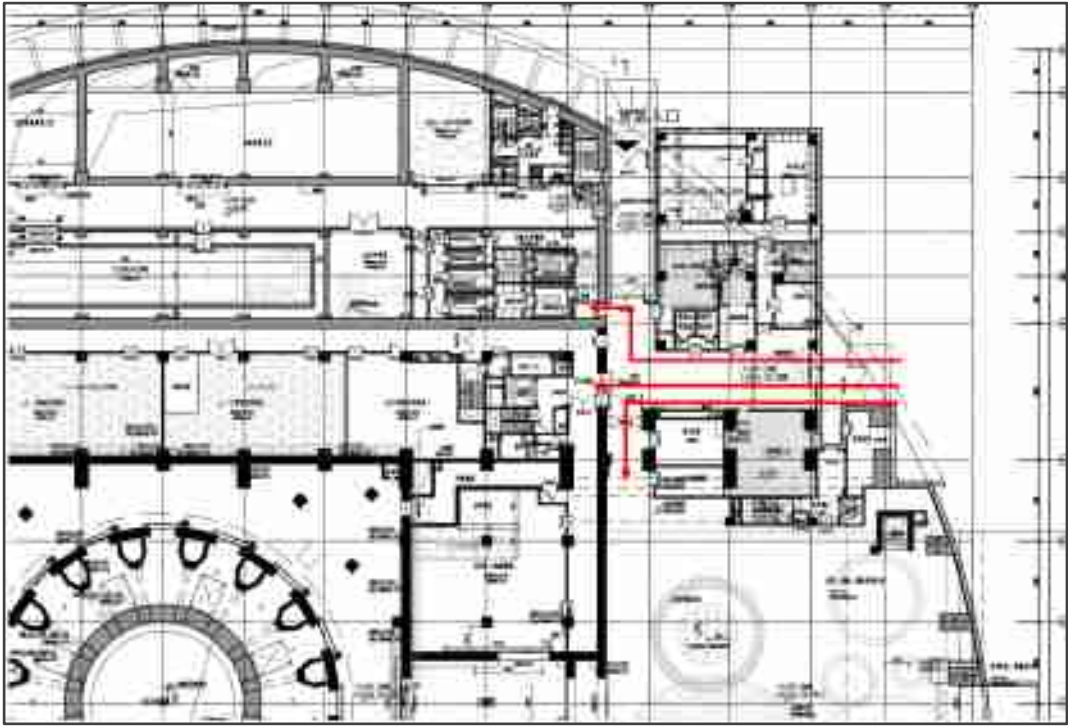


图 4-12 5#楼人员进出通道-1

5#-3NBI 电源大厅、5#-4 波源及诊断大厅作为常规钢构设备厂房，人员通道设置如下图所示。

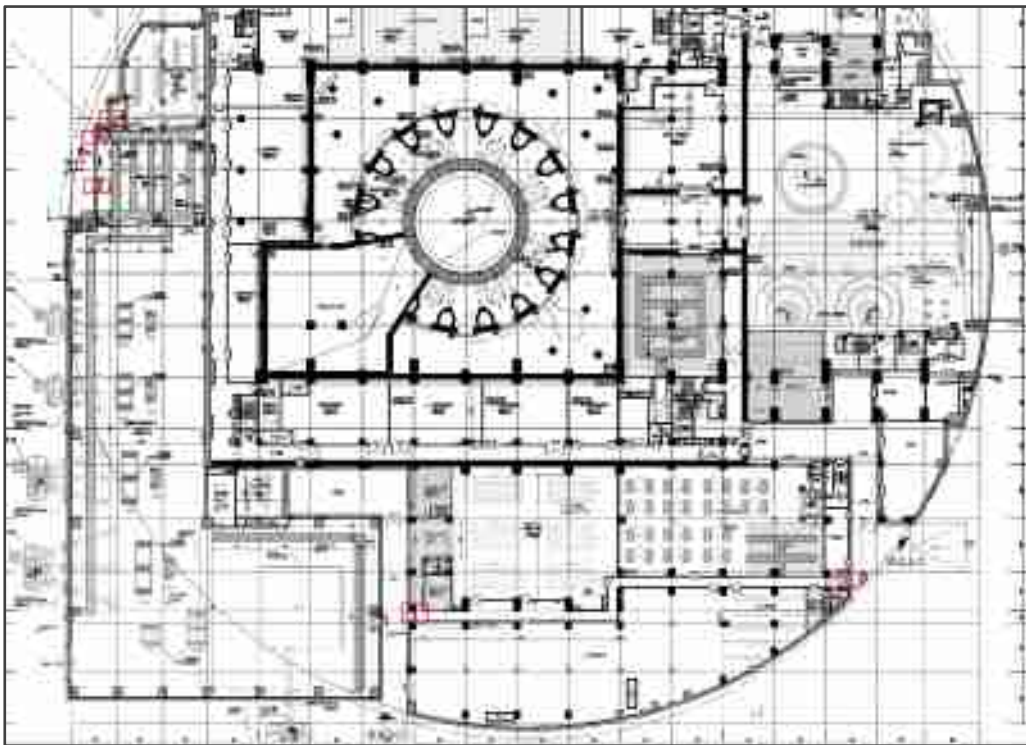


图 4-13 5#-3、5#-4 人员通道示意

## 4.3 辐射安全联锁系统

### 4.3.1 系统概述

辐射安全联锁系统是射线装置上控制人员受照剂量，防止误照射事故发生的重要技术保障设施。BEST 的辐射安全联锁系统将根据托卡马克装置运行和维护的特点，并结合辐射防护分区实体边界，以及辐射剂量监测系统运行和测量结果进行设计建设。

BEST 辐射安全联锁系统将主要包括：门禁联锁、紧急停止联锁、巡更联锁、停机辐射剂量联锁、关键位置剂量监测设备状态联锁和声光告警部分。辐射安全联锁状态信号将接入 BEST 运行总控制系统，可对等离子体辐射源的启停状态进行实时操控。

### 4.3.2 主要组成

BEST 装置在前期氘氘等离子体运行阶段，中子产额相对较低（ $10^{11}\text{n/s}\sim 10^{16}\text{n/s}$ ），新建成的主机和辅助系统需要进行大量的测试和改进完善。实验人员进出装置主机大厅各个功能区域较频繁，存在人员滞留辐射较高区域发生误照射的风险。利用辐射安全联锁系统的声光告警、巡更联锁和紧急停止联锁，可以有效避免此类误照射事故的发生。在开展氘氘等离子体阶段，聚变中子产额将达到很高水平（ $10^{16}\text{n/s}\sim 10^{19}\text{n/s}$ ），高辐射区的强中子与  $\gamma$  射线能够对人体产生不可逆损害。辐射安全联锁系统的声光告警和门禁联锁，可以防止人员靠近，并杜绝误闯入高辐射危险区。在 BEST 主机停机维护和大修改造期间，停机辐射剂量联锁和门禁联锁，可以确保获得授权的放射性职业人员有序的进入辐射安全区域开展检修作业。此外，主要屏蔽门上的门禁联锁和关键位置上的辐射剂量联锁，还是防止装置运行期间中子、 $X/\gamma$  穿透辐射和大修改造期间氘污染流出物造成  $\beta$  内照射的重要手段。

BEST 辐射安全联锁系统结构及逻辑，见图 4-14，主要包括门禁联锁、巡更联锁、紧急停止联锁、总控钥匙联锁、关键位置辐射剂量监测设备状态联锁，以及声光报警装置部分，其各部分概述功能如下。

- ① 门禁联锁：BEST 装置主机大厅内辐射水平较高区域（暂定黄区）的边界所有

屏蔽防护门，其开启和完全关闭的状态将接入门禁连锁系统。只有在所有的屏蔽防护门均完全关闭的状态下，BEST 装置才有可能通电开展等离子体放电实验。在停机检修和大修改造期间，相应区域的屏蔽门只有在获得对应区域授权钥匙，并且该区域停机辐射剂量监测值低于设定的限值时，才能正常开启，放射性职业工作人员才可进入检修。辐射屏蔽门的关闭需要相关责任人，使用授权钥匙才可操作。

② 巡更连锁：又可称为搜寻按钮连锁或清场按钮连锁。在 BEST 准备开始放电实验前，装置大厅安保人员或检修作业负责人在完成某区域内所有人员撤离后，按下该区域的巡更连锁按钮。只有当所有连锁管控区域内的巡更按钮均按压闭合后，BEST 装置才能够正常放电运行。在装置停机检修开启屏蔽门之后，该区域内的巡更按钮将自动跳转至断开状态。巡更按钮的闭合需要使用授权钥匙才可进行操作。

③ 紧急停止连锁：是由安装在各个高辐射控制区域内 ██████████ 人员方便迅速到达触及的紧急停止按钮开关组成。其作用是维护检修人员因极端原因，在屏蔽门已关闭状态仍滞留在高辐射区域内，通过按下附近的紧急停止按钮，可以阻止 BEST 总控连锁巡检通过或是使装置运行直接停止，使得内部滞留人员免受过量照射。紧急停止按钮断开操作无须授权，但其闭合复位需要授权人员现场进行操作。只有当高辐射控制区域内全部的紧急停止按钮都闭合复位后，BEST 装置才能正常放电运行。

④ 总控钥匙连锁：在 BEST 主控制室内存放开启控制区域内屏蔽门的授权钥匙，以及开启装置主机总控制系统的钥匙（总控系统钥匙也可是各类授权密匙）。只有在屏蔽门授权钥匙均已归还钥匙箱内复位，BEST 装置才能正常放电运行。总控授权钥匙更加辐射分区进行分类存放，只有获得相应的授权钥匙，才可开启对应区域的屏蔽防护门。通常情况下辐射区域的授权钥匙，应由放射性职业工作人员按照授权等级进行取用。

⑤ 停机辐射剂量连锁：其作用是在 BEST 装置停止运行，防止一些区域内残余辐射水平过高的情况下，人员进入检修作业遭受较高辐射照射的连锁装置。在 BEST 装置正常运行阶段，停机辐射剂量连锁自动与辐射安全连锁系统断开，不参与总控连锁巡检；在装置处于停机检修和大修改造阶段，停机辐射剂量连锁接入辐射安全连锁系统，只有在相应区域残余辐射低于限值情况下，对应区域的屏蔽门才可以利用授权钥匙打开。各处停机辐射剂量的接入或断开，以及限值的设定由专业的辐射安全保障人员进行操作。

⑥ 剂量监测设备状态连锁：是指主屏蔽防护门后方，以及重要点位在线氚监测的辐射监测设备，其运行状态是否正常的结果接入 BEST 辐射安全连锁系统，保障装置运行时这些关键位置点上的监测设备处于正常工作状态，从而确保屏蔽门未完全关闭、氚溢出管控区等辐射事件能够及早发现并加以处置。剂量监测设备状态连锁的接入、断开操作，由对应的辐射安全保障专业人员进行操作。

BEST 上与辐射安全连锁系统配套建设的设备，还将包括声光报警和视频监控。在装置放电运行时，声光报警可以告知区域内辐射的存在（或即将存在），使得区域内的人员远离辐射源（或应急按下紧急停止按钮）。视频监控可以发现控制区域内的人员异常滞留或闯入，并及时采取干预措施。

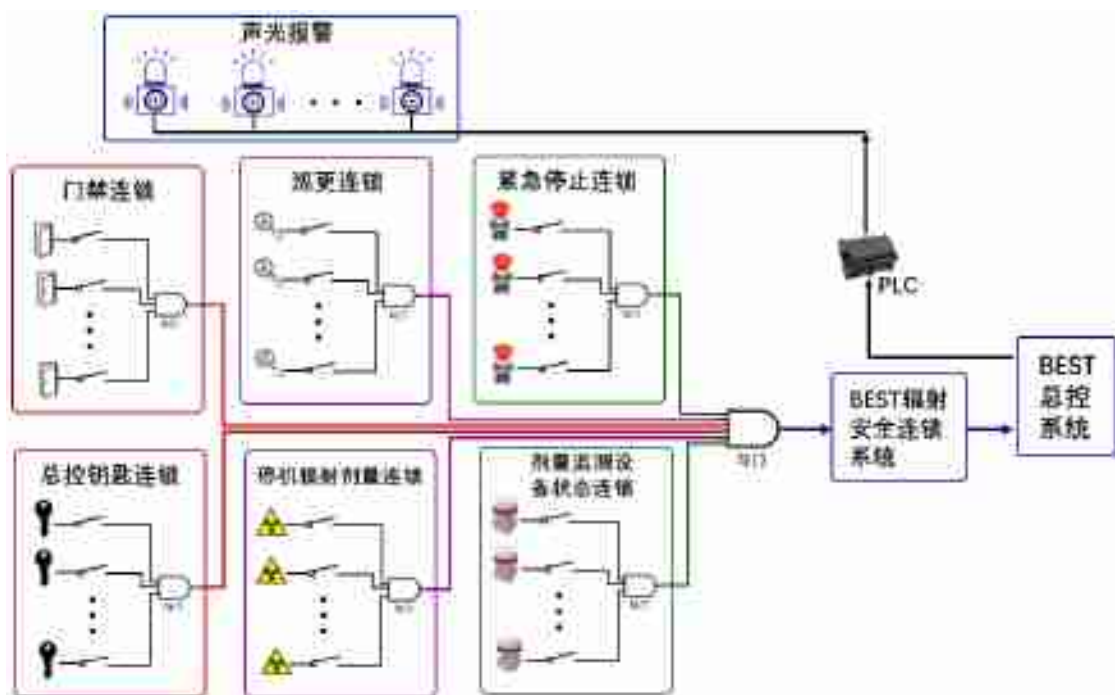


图 4-14 BEST 辐射安全连锁系统结构及逻辑框图

BEST 装置上拟建设的辐射安全连锁系统运行流程框图，见图 4-15，主要分为准备实验运行和停机维护（含大修改造）。

① 准备实验运行的运行流程：在开始等离子体放电运行（及 NBI 系统运行测试）前，由大厅安保人员或维护检修作业负责人对各区域进行现场清场，并按压闭合巡更连锁，检查并复位紧急停止连锁按钮。现场人员完成撤离后，相关责任人利用授权钥匙关闭辐射屏蔽门，门禁连锁闭合，并将授权钥匙归还至总控制室内钥匙连锁箱。当所有授

权钥匙均已归还，总控钥匙箱联锁自动闭合复位。辐射安保专业人员操作，停机辐射剂量联锁断开，辐射剂量监测设备根据其运行状态自动进行闭合。辐射安全联锁系统完成联锁安全巡检，对 BEST 总控发出联锁正常状态，装置运行准备就绪，开始等离子体放电实验。

② 停机进行维护的运行流程：等离子体放电停止后，辐射安保专业人员操作停机辐射剂量联锁闭合。在相应控制区域内的辐射剂量率衰减至设定的限值以下后，维修作业人员获得进入许可授权。进入辐射控制区的维修作业人员拔取授权钥匙，总控钥匙联锁断开。利用授权钥匙开启对应区域的辐射屏蔽门，门禁联锁断开，对应区域的巡更联锁自动断开。授权人员通过核验（如人脸自动识别），方可进入控制区域现场进行检修作业。

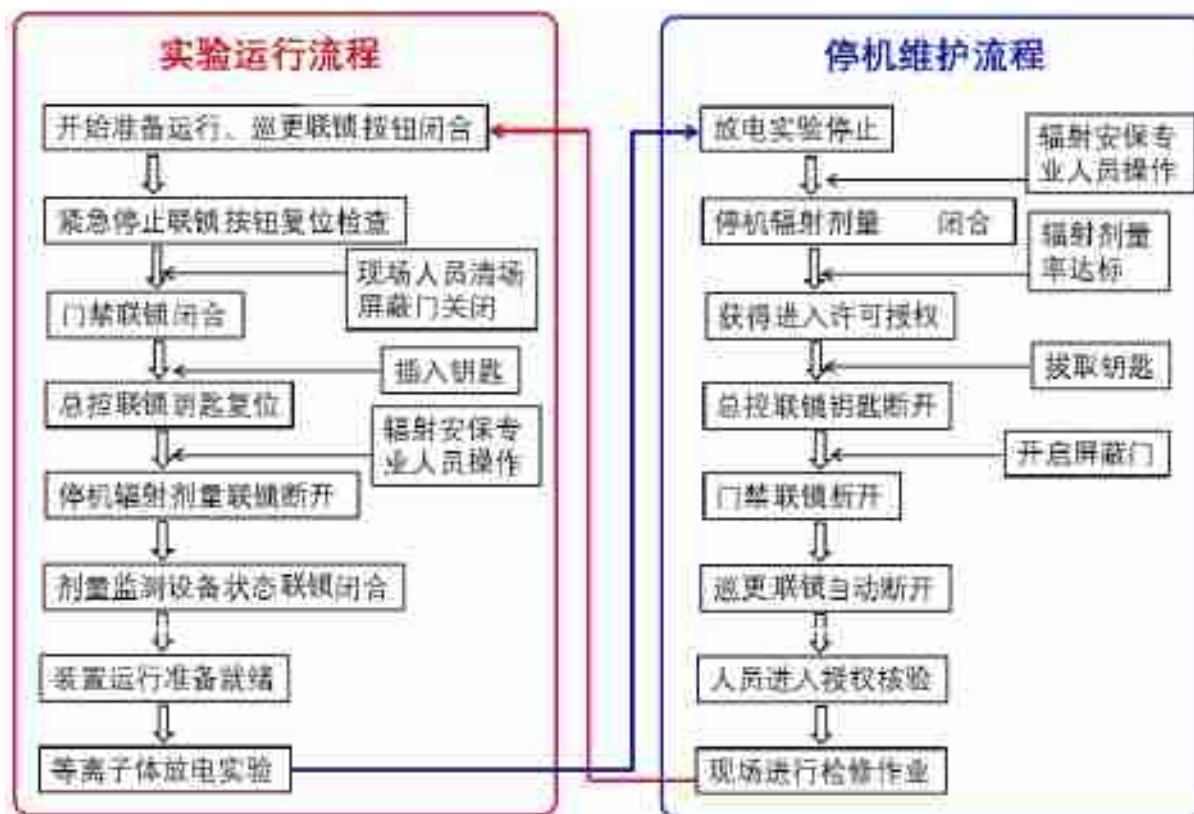


图 4-15 BEST 辐射安全联锁系统运作流程

辐射安全联锁主要围绕 BEST 装置主机进行布设，以确保装置运行时的人员辐射安全。相关的门禁联锁、紧急停止按钮、巡检联锁、总控钥匙联锁，在 BEST 主机大厅（5#楼）和控制大厅（6#楼）的各层分布点位，分别见图 4-16~图 4-21。结合主机大厅人员的主要通道，以及进入主机屏蔽墙内部的屏蔽门分布，进行门禁联锁、紧急停止按钮

和巡检联锁装置布设。在各楼层的主电梯与楼梯间门口分别布置联锁装置，确保通往主机大厅控制区各设备间的人员均受到联锁系统控制。此外，在进入高辐射区的屏蔽门位置布设联锁装置，以防止装置运行期间人员滞留而导致大剂量误照射事故的发生。在主机大厅 L1 层人员出入口门厅，布设个人辐射剂量监测管理系统，在人员个人剂量达到约束值时，门禁联锁系统将禁止其进入高辐射的控制区。停机辐射剂量联锁和剂量监测设备状态联锁，直接引入在线辐射监测系统设备的监测值和工作状态，其点位分布参见下章节。

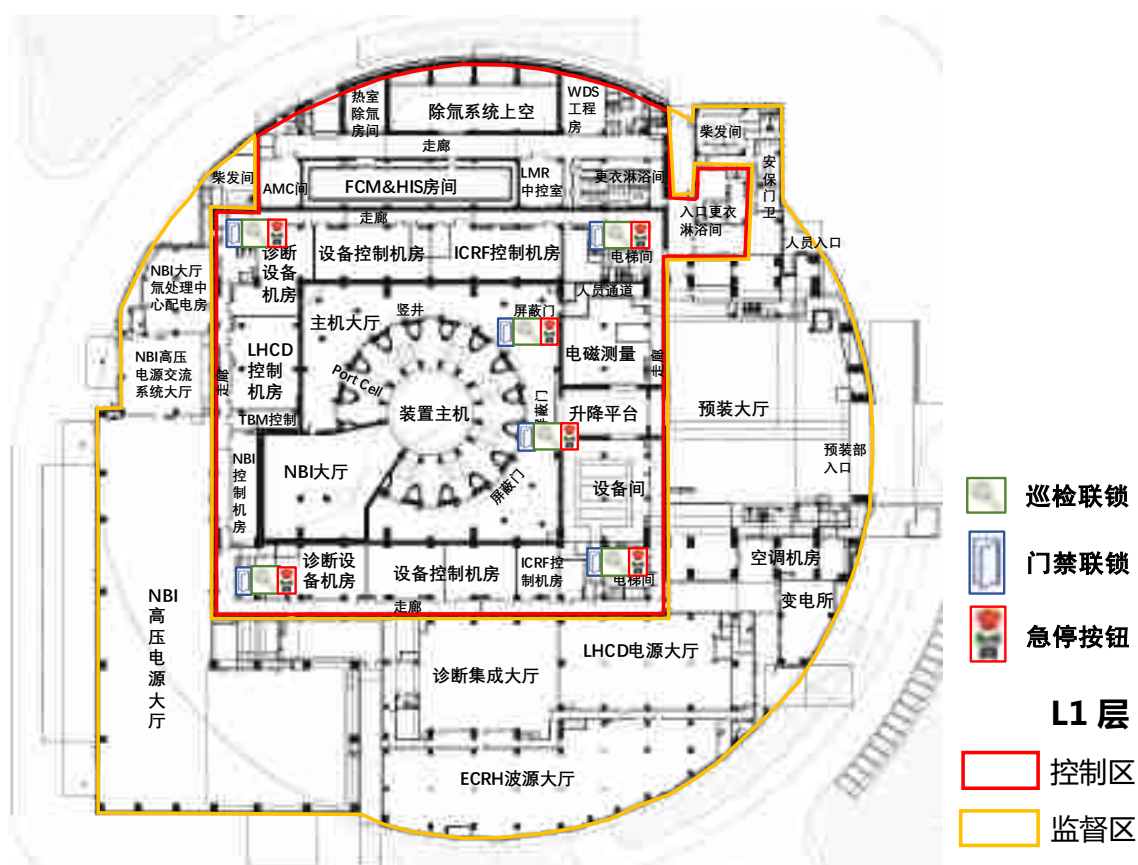


图 4-16 BEST 辐射安全联锁装置布置点位 (L1 层)



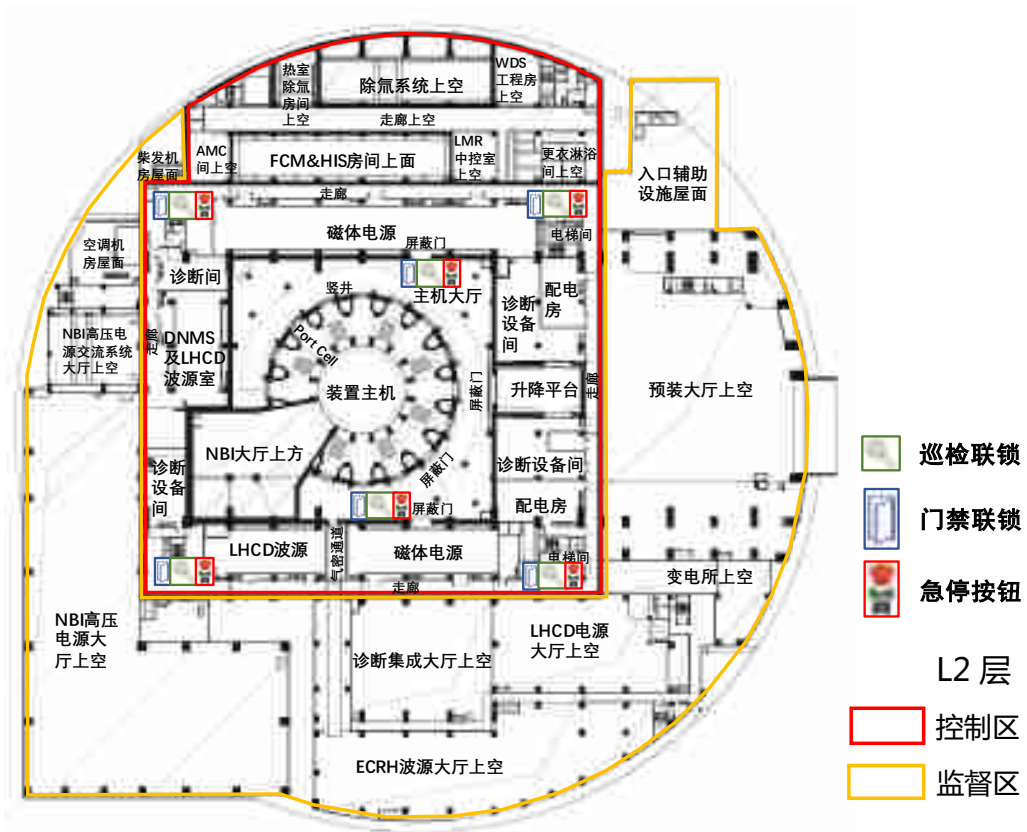


图 4-17 BEST 辐射安全联锁装置布置点位 (L2 层)

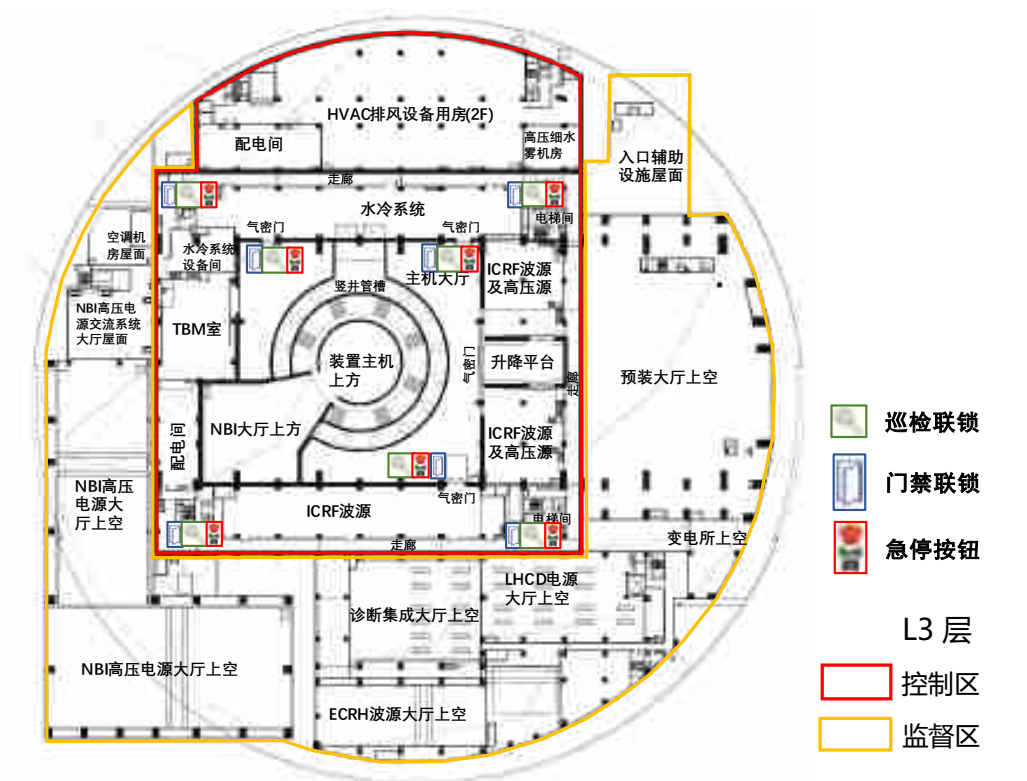


图 4-18 BEST 辐射安全联锁装置布置点位 (L3 层)

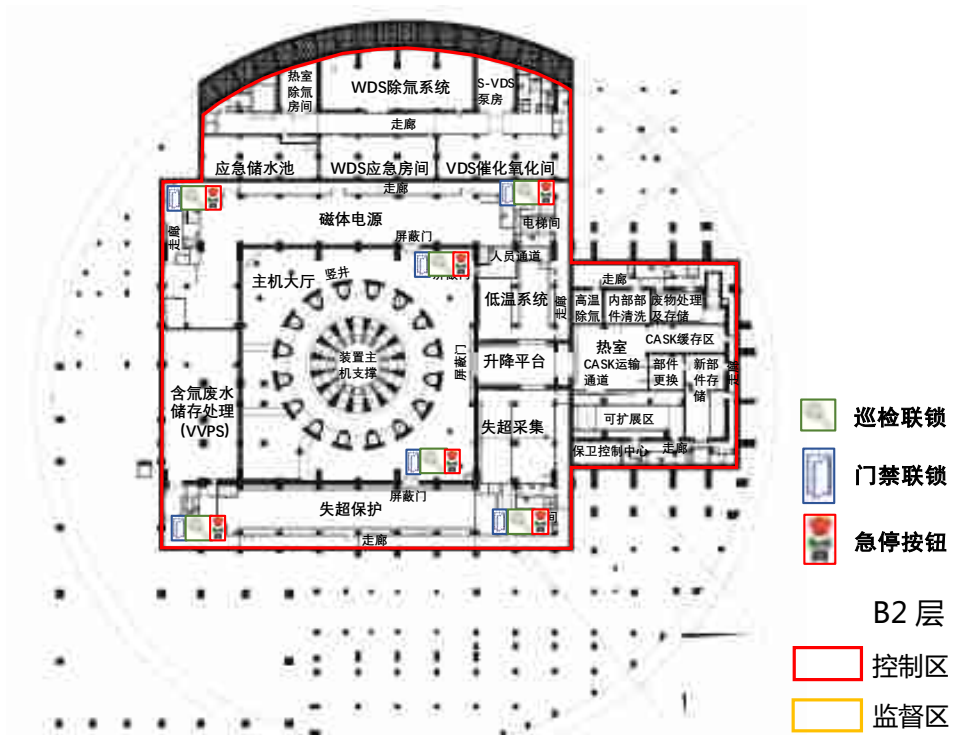
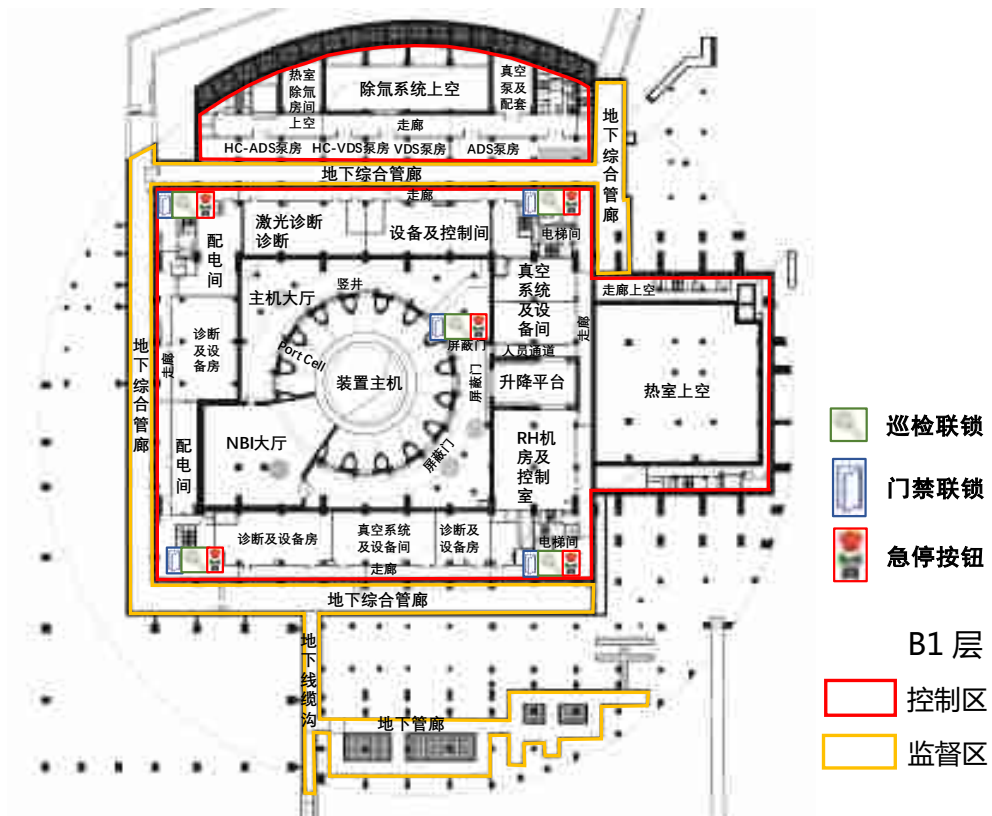




图 4-21 BEST 辐射安全联锁装置布置点位（控制大厅）

## 4.4 辐射监测系统

### 4.4.1 系统概述

辐射剂量监测与控制是保障人员、环境和 BEST 装置辐射安全的重要环节，根据监测性质可分为在线实时监测、采样离线监测两大类。在线实时监测包括：装置大厅及外围环境中子与  $\gamma$  射线剂量率在线实时监测，中子与  $\gamma$  射线剂量率巡测，电子直读式个人报警器监测，场所内氡浓度在线监测，人员及设备表面放射性污染监测，电磁辐射强度监测等。采样离线监测包括：个人累积剂量监测，限制区材料中子活化产生的放射性核素取样监测，环境气氡、水氡、有机氡采样监测，空气、水体、土壤总放射性采样监测等。在线实时监测根据装置所处运行、维护、大修的状态，按需进行连续或间隔监测；采样离线监测则根据监管要求及辐射防护计划，按时定期取样或抽样进行监测。

### 4.4.2 监测方案

#### 4.4.2.1 中子与 $\gamma$ 射线剂量率在线实时监测

BEST 装置等离子体放电运行时，产生的强穿透性辐射主要有中子、 $\gamma$  射线，停机检修阶段残余放射性主要来自中子活化产生放射性核素的衰变  $\gamma$  辐射。因而，需要在装

置主机大厅、热室及外围环境一些敏感区域，安装中子、 $\gamma$  射线探测器，进行联网实时监测。为了确保监测仪长期连续运行的稳定性和测量结果的可靠性，将采样气体电离室类型的中子、 $\gamma$  射线探测器。图 4-22 展示的两款国产固定式中子、 $\gamma$  剂量率监测探测器（示意图），分别采样  $^3\text{He}$  正比计数管和高压  $\text{Ar}_2$  电离室探头，具有高灵敏度和长期稳定特性，适合在 BEST 外围环境和辐射剂量中低强度区域应用（黄区及以下区域）。



图 4-22  $^3\text{He}$  正比计数管中子探测器(左)高压  $\text{Ar}_2$  伽马电离室探测器(右)

在中子、 $\gamma$  射线辐射更强的区域（红区），该类商业成品探测器面对装置运行的脉冲辐射场，容易发生计数率饱和堵塞情况，需要采用定制适合高剂量场的宽量程探测器，以及采用抗  $\gamma$  射线干扰能量更强的中子探头（ $\text{BF}_3$ 、涂硼电离室、裂变电离室）。探测器自身的外壳和主要的结构，需要选择一些中子低活化材料，避免自身产生过多的放射性核素，影响停机残余  $\gamma$  射线剂量率测量的准确性。对应长期安装在红区的中子、 $\gamma$  剂量率监测探测器，可以考虑采用分体式结构设计，将探测器的电子学部分置于射线屏蔽体内进行辐射保护。各个区域大量布置的中子、 $\gamma$  剂量率监测探测器采用同一类型、相同协议的通信方式，以便大规模组网和外围扩展。探测器组网可采用基于串口 RS485 通信的 Modbus 协议，或基于以太网通信的 Ethercat 协议。重点区域的监测探测器将采用星型直连组网方式，提升其稳定性；外围监测探测器将采用总线型网络，便于拓展布置。

根据 BEST 装置大楼内部的主机大厅、氙处理中心、热室建筑物结构及功能分区，对中子、伽马实时监测系统探测器进行了优化布置，详细的点位布局分别见图 4-23~图 4-27。其中标注 NG 的点位同时布置中子和伽马射线探测器，装置大楼 5 层一共布置了 32 组，标注 G 的点位仅布置伽马射线探测器，一共布置了 30 个。这些点位尽可能布置于具有代表性、可参考对比，且检修维护人员居留概率较高的位置。在一些更关注停机检修期间残余伽马辐射的位置，仅布置了伽马剂量率探测器。考虑到放电实验时聚变等

离子体大环赤道面主要位于 L1 层（地面层），且 L1 层水平窗口尺寸较大，因而该层布置的监测点位较多。此外，在该层主机大厅屏蔽墙外面及装置大楼外墙面，分别布置 4 组中子、伽马监测点，用于对穿透至边界外围环境的辐射进行监测评估。在 BEST 装置控制区内的混凝土屏蔽顶部、底部，防辐射屏蔽门外部，以及上、中、下窗口外围的诊断与加热设备间，布置了一些中子伽马辐射监测点。监测装置实验运行时这些区域的辐射剂量率，用于评估快中子和伽马辐射的泄漏量，为辐射剂量连锁和屏蔽防护提供基础数据。在装置停机维护和大修改造期间，控制区内辐射监测获得的停机伽马剂量率，将作为人员可否接近检修作业的重要依据。对于缺少二级屏蔽墙体、上下层贯通，且束线注入水平窗口直通孔径大的 NBI 加热辐射屏蔽薄弱区域，在 L2、L1 层 NBI 注入加热的小室，重点布置了多组中子伽马辐射测点。其相邻外围的房间内，同样也布置了一些中子伽马辐射测点。在通往热室的转运通道上，重点加强伽马辐射探测器的布置，以便获得装置大修改造期间转移部件时，这些区域的辐射剂量水平。一级生物屏蔽墙体内部由于中子、伽马辐射过强（1Sv/h 以上量级）且电磁干扰严重，一般商品辐射剂量率仪超过量程，或受干扰无法准确测量。因而此区域未布置辐射剂量率测量点，将利用中子、伽马诊断系统测量数据进行辐射剂量计算评估。

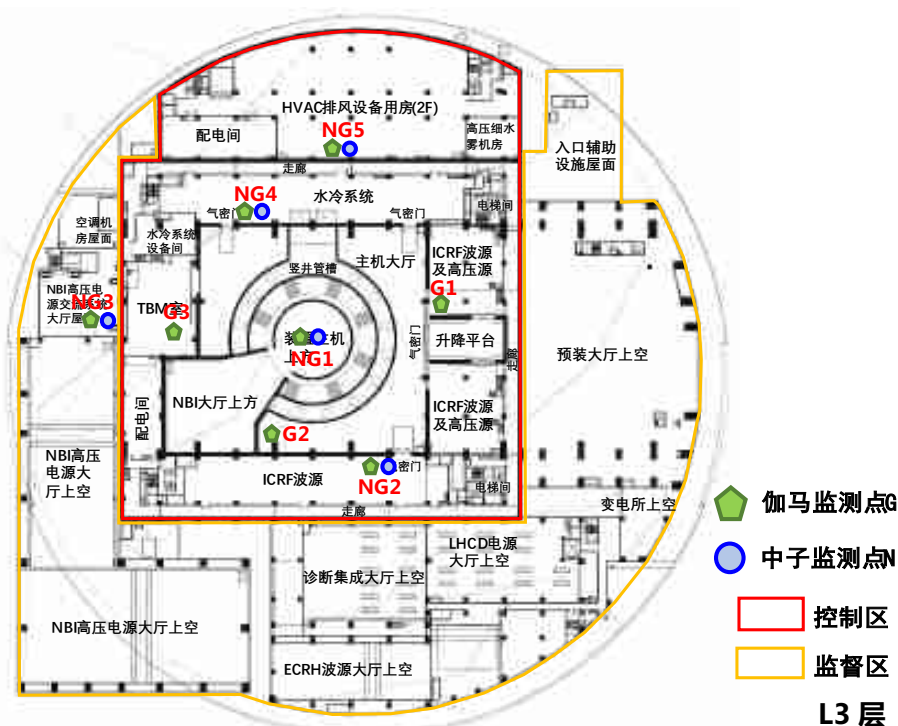


图 4-23 BEST 装置大楼 L3 层中子伽马剂量率实时监测探测器布置

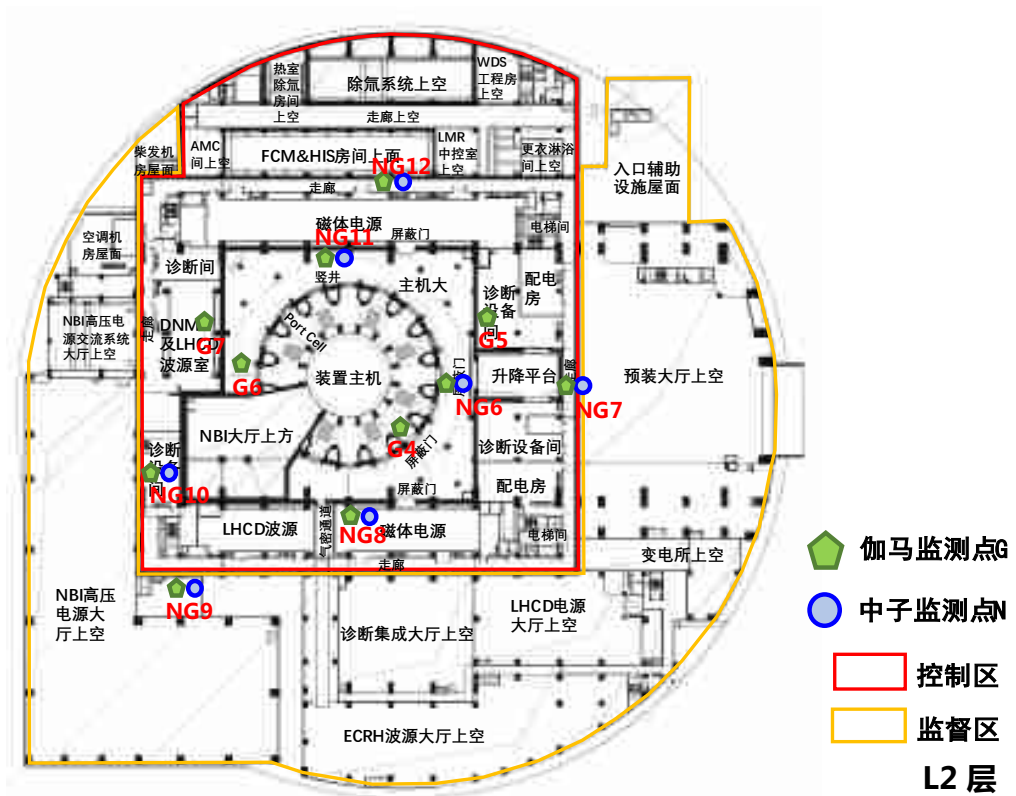


图 4-24 BEST 装置大楼 L2 层中子伽马剂量率实时监测探测器布置

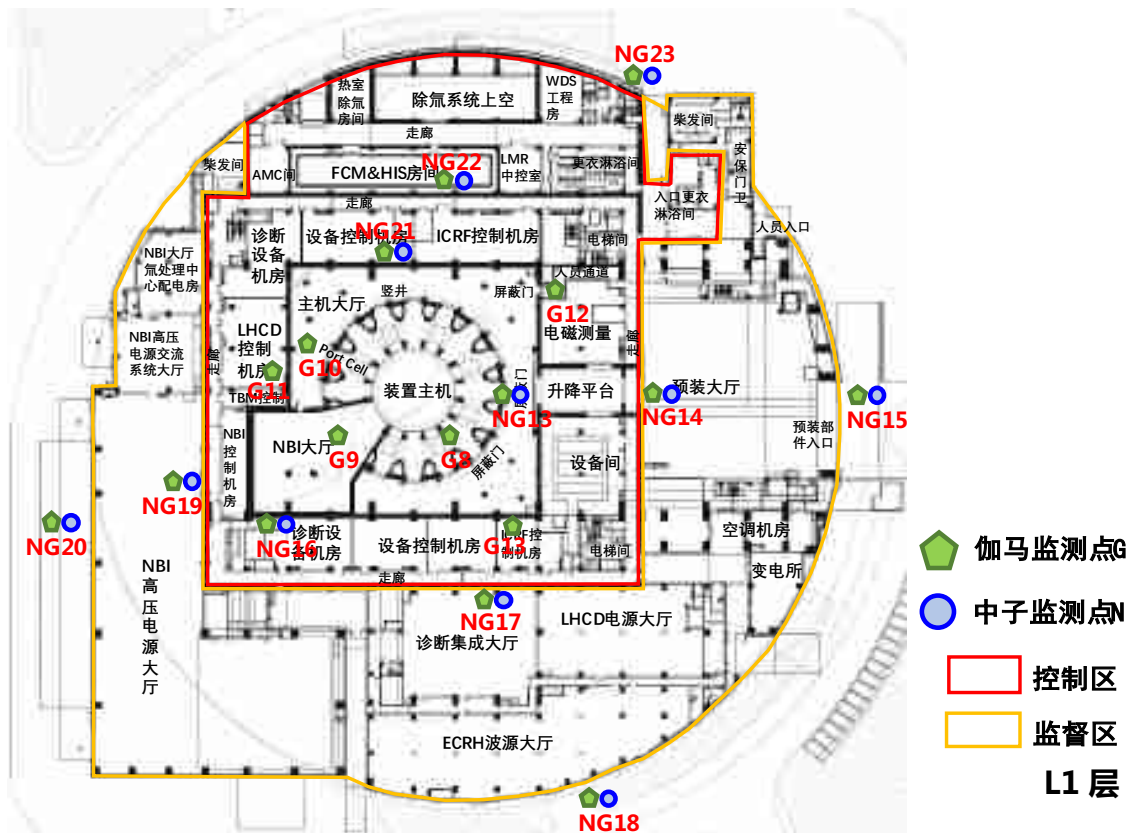


图 4-25 BEST 装置大楼 L1 层中子伽马剂量率实时监测探测器布置

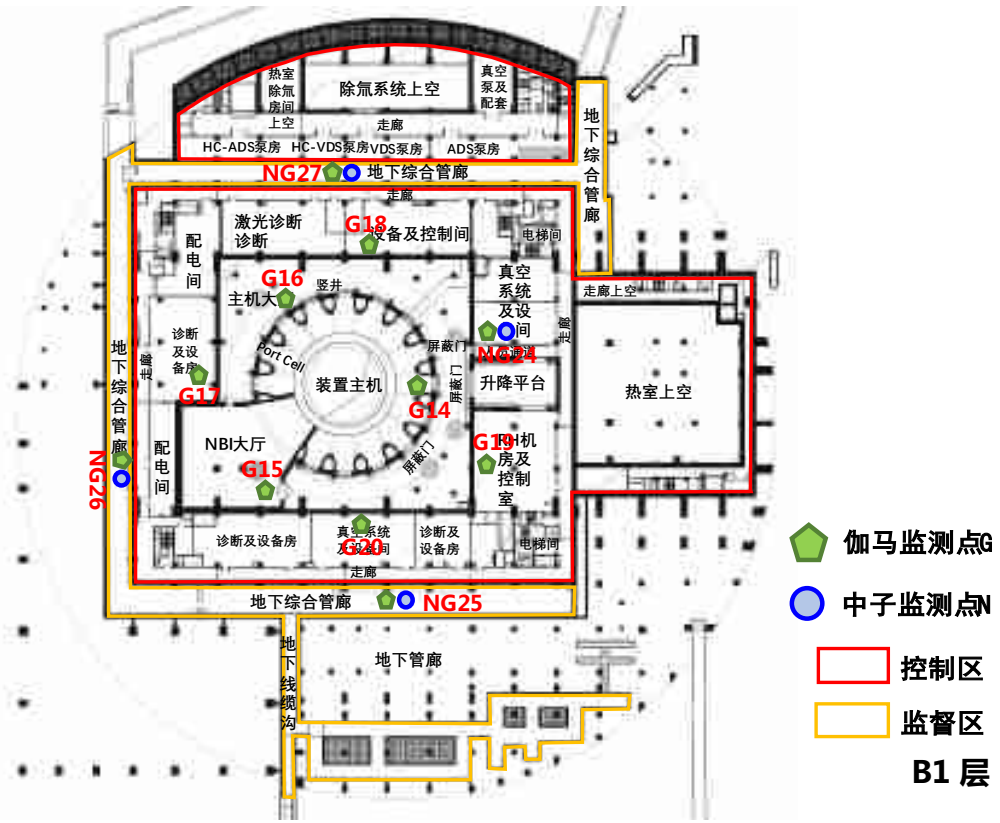


图 4-26 BEST 装置大楼 B1 层中子伽马剂量率实时监测探测器布置

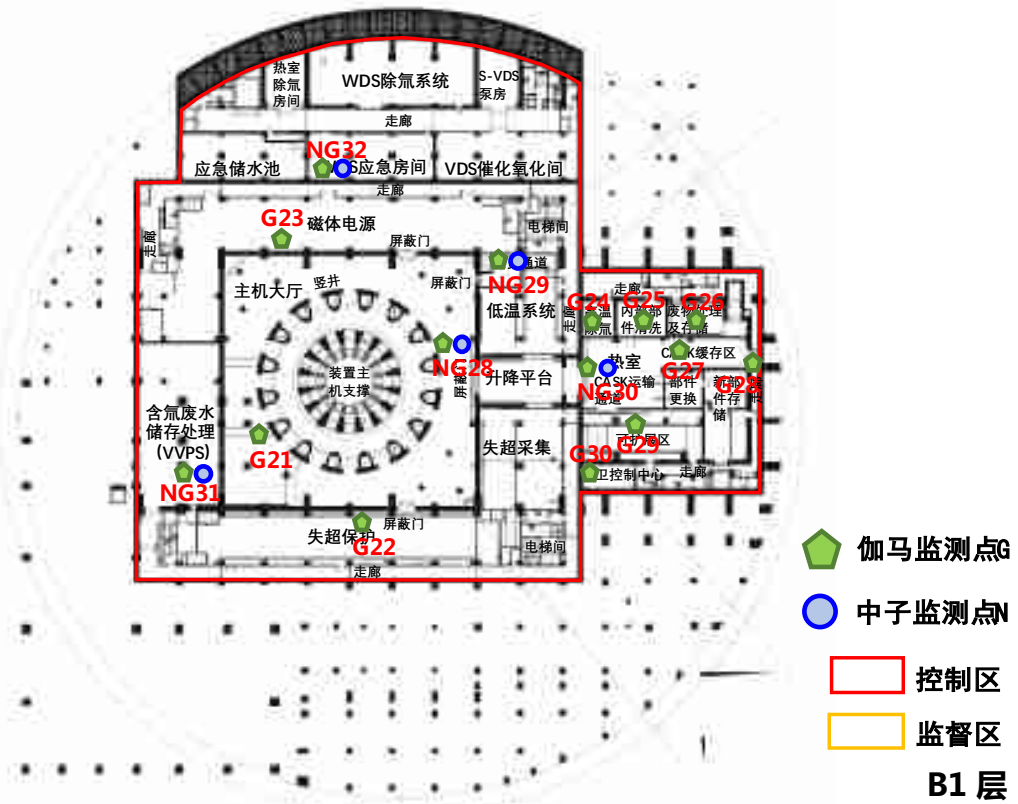


图 4-27 BEST 装置大楼 B1 层中子伽马剂量率实时监测探测器布置

BEST 装置运行维护期间的辐射源项主要为中子、伽马射线和氡，为了评估其对于外围环境的影响，在本项目园区及外围布置固定的中子、伽马和氡监测点，如图 4-28 所示。在 BEST 装置大楼（5#楼）外围约 50m（I射线装置）的四个方向上，分别布置高灵敏度的环境中子、伽马剂量率监测点，以及空气氡采样监测点（ENGTA-1\2\4\5）。东向和西向的两组监测点(ENGTA-1\4)位置已靠近本项目的东西向边界，而南北两组监测点距离项目边界较远。因而，需要在本项目南、北向边界处，再布置两组监测点（ENGTA-3\6）。为了监测本项目对于周围环境水体的影响，在本项目园区和东侧的采摘园区（距离 500m），分别布置地下水监测井，对地下水及周边地表水的氡浓度进行采样监测。

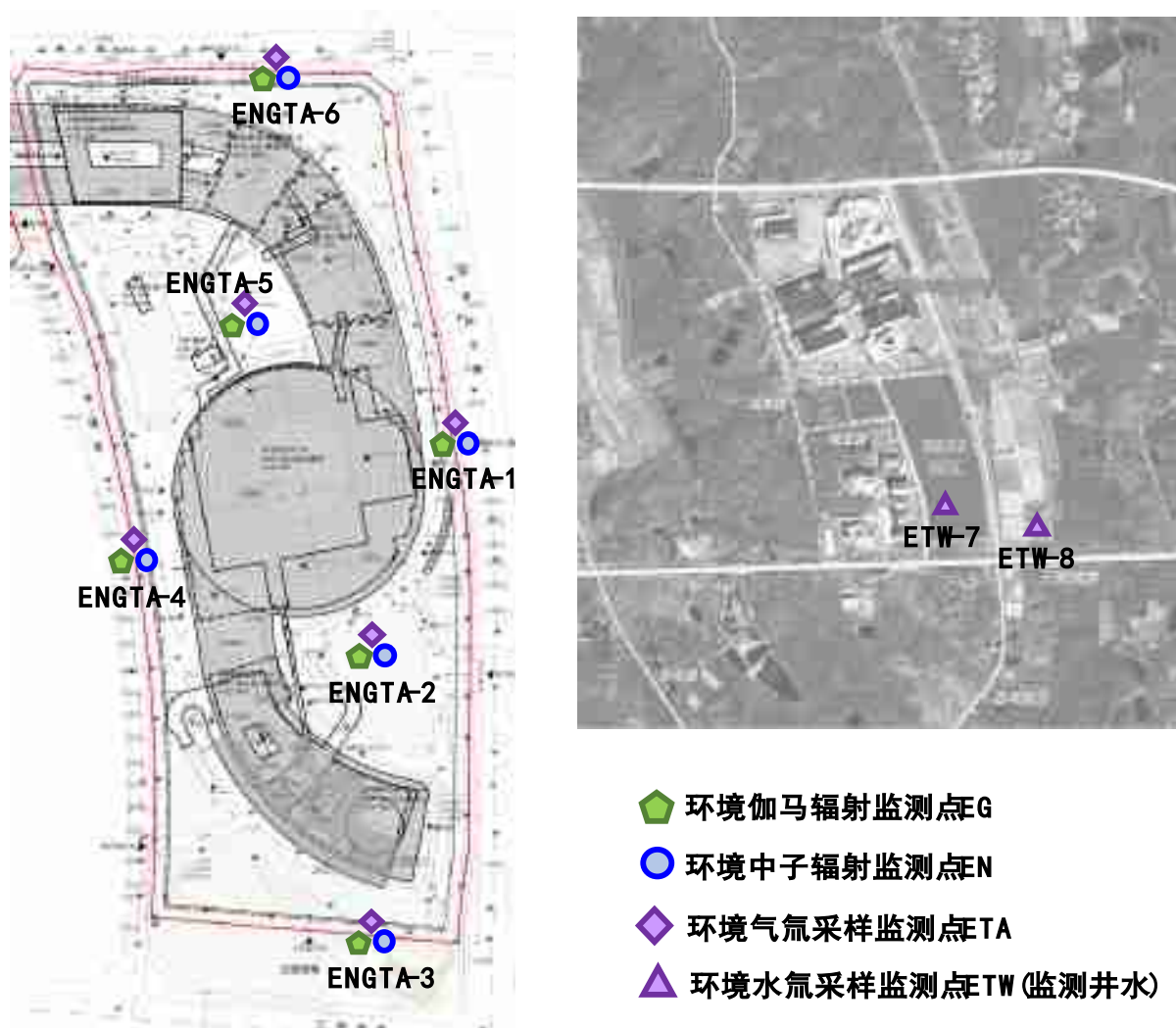


图 4-28 外围环境中子伽马剂量率实时监测及氡采样监测点位布置



#### 4.4.2.2 中子与 $\gamma$ 射线剂量率巡测

在 BEST 开展高功率实验期间，需要对屏蔽墙体外的一些敏感点，且固定式在线监测仪未布置的区域进行中子、 $\gamma$  剂量应急巡测。停机维护和大修改造期间，需要对残余辐射较高区域进行  $\gamma$  剂量调查监测。BEST 装置重要系统发生故障需要紧急处置时，也需要对拟进入区域进行辐射剂量水平应急测量。着些情形均需要使用到便携式中子、伽马剂量率仪，相关产品示意图见图 4-29。BEST 核辐射防护与监测将根据需求配备一定数量的便携式中子、伽马剂量率仪，用于正常运行、检修工况下的剂量巡测调查，以及事故工况下的应急辐射监测。



图 4-29 便携式中子剂量仪（左）便携式伽马剂量仪（右）

#### 4.4.2.3 电子直读式个人剂量报警器监测

停机维护和大修改造期间，需要进入 BEST 装置大厅较高辐射区域（黄区）进行检修作业，以及在事故工况下需要短暂进入橙区抢修作业的人员，必须佩戴电子直读式  $\gamma/\beta$ （中子）个人剂量报警器，相关产品示意图见图 4-30。该设备具备实时剂量率和累积剂量监测的能力，小巧便携带，且具备剂量率与累积剂量超阈值声光报警功能。在检修作业过程中存在超预期水平的高辐射局部区域，该剂量报警器可以及时监测并提醒作业人员注意防范，可以有效避免偶然长时间累积的超剂量管控限值照射事件的发生。BEST 上电子直读式个人剂量报警器将根据检修人员规模进行配备，由辐射安全保障专业人员进行发放和人员受照剂量登记。进入较高辐射区域作业的放射性职业工作人员，除了佩戴累积个人剂量计之外，还需要佩戴电子直读个人剂量报警器。一般工作人员及交流访问人员需要进入辐射控制区，也需要临时申领佩戴该类剂量报警器。



图 4-30 电子直读式 X/γ（中子、β）个人剂量报警器

#### 4.4.2.4 场所内氙浓度实时监测

BEST 装置将开展氙氙等离子体实验，对于氙处理中心、装置主机大厅、热室和冷却水系统等场所，需要对发生涉及包容边界失效导致氙的不可控溢出事故进行安全评估，因此需要对涉氙场所的包容边界进行分析评估，选择一些薄弱位置处安装空气氙连续采样检测仪，并且配备一定量的便携式氙采集监测仪，相关产品示意图见图 4-31。对敏感场所中的空气进行氙浓度连续监测，重要监测点的氙测量数据将接入安全联锁系统，在发生意外氙不可泄漏时及时发出警报，并立即进行停机处置。在某处出现氙浓度异常升高或是应急处置前，除了固定点监测仪进行实时数据测量、采集和分析，相关专业技术人员穿带气密良好的防护服（自带呼吸气源），并利用便携式氙采集监测仪对事发区域进行巡测，验证氙泄漏事故的真实性，以及查找主要泄漏点的位置。



图 4-31 空气氙连续采集监测仪（左）便携式氙采集监测仪（右）

#### 4.4.2.5 人员及设备表面放射性污染监测

由于 BEST 将开展氙放电实验，控制区内可能存在各种状态的氙，以及高的中子产额（ $10^{19}\text{n/s}$ ）对材料的活化而产生的放射性核素。在装置停机检修，特别是大修改造期间，如果这些氙和放射性核素扬起重新附着于新的接触面，会造成进入人员及设备的外

表面沾污。此外，控制区内需要维修替换的设备，其外表面也可能被这些放射性核素严重污染。为了避免这些表面附着的氡和放射性核素流出扩散，意外摄入人体造成长时间的内照射，必须利用图 4-32 所示的各种污染监测仪，对出控制区的人员及设备进行表面放射性污染监测。在手脚、工作服、设备表面剂量率超限值情况下，需要进行清洁去污处理，直至达到解控限值下才能离开控制区。



图 4-32 表面  $\alpha$   $\beta$  /  $\gamma$  检测仪（左）手脚表面污染监测仪（中）全身污染监测仪（右）

#### 4.4.2.6 电磁辐射强度监测

磁约束聚变装置在运行时，主机本身就会产生很强的磁辐射，而各种大功率的辅助射频波加热系统（LHCD、ECRH、ICRF）更会产生很强的电磁波辐射。虽然绝大部分的电磁波辐射被装置不锈钢真空腔室，以及波导管屏蔽吸收，但依然存在一些非金属密封窗口法兰，泄漏电磁波造成电磁辐射超标的可能性。因而，针对高频的射频波和低频的电磁场辐射，BEST 将配备示意图如图 4-33 所示的电磁辐射强度检测仪。对装置主机或波加热系统运行时，实验场所和外围环境的电磁波辐射强度进行巡测。在检出电磁波辐射超限值的情况下，将对主要的电磁辐射源进行屏蔽处理，从而确保实验人员及公众的电磁辐射安全。



图 4-33 射频辐射强度检测仪 8GHz（左）工频电磁辐射强度检测仪（右）

#### 4.4.2.7 个人累积剂量监测

根据职业健康管理法规要求，从事放射性相关工作人员必须佩戴个人剂量计，对受照的辐射剂量进行连续监测并记录存档。BEST 项目主要涉及I射线装置和甲级非密封放射性物质工作场所，对于人员的辐射防护要求较高。进出装置主机大厅、热室、氚处理中心等控制区进行工作的人员，需要定义为放射性职业工作人员，并分别配发胸章式个人剂量计（包含监测 X/γ 射线、中子），常见的个人剂量计及读出器示意图如图 4-34 所示。X/γ 累积剂量监测采用光释光（或热释光）剂量片，中子累积剂量监测采用固体核径迹片（或  $^6\text{Li}/^7\text{Li}$  热释光片）。对于氚及中子活化产生的放射性核素摄入导致内照射监测，除了进行手脚和全身表面放射性污染监测外，还将定期进行尿氚浓度及尿液总放射性活度检测。结合表面污染、尿氚浓度及总放射性活度检测结果，来获得工作人员的内照射剂量评价值。BEST 装置的实验运行工作人员主要进行 X/γ 射线、中子辐射剂量监测；氚处理中心和涉氚操作工作人员主要进行 X/γ 射线和内照射监测；装置维护检修工作人员需要进行 X/γ 射线、中子辐射和内照射监测。放射性职业人员在进入高辐射区工作时正确佩戴剂量计，应避免剂量计单独遗留在高辐射区受照。个人剂量计每季度由辐射安全保障人员进行轮换，并读出累积剂量值进行存档保管。



图 4-34 光释光/固体核径迹片（热释光）个人剂量计（左）累积剂量读出器（右）

#### 4.4.2.8 中子活化产生的放射性核素取样监测

在聚变中子高强度的辐照下，控制区域的各种结构材料会产生一些放射性核素，这些核素衰变产生的  $\gamma$  射线是停机辐射剂量的重要来源。为了预估控制区的残余辐射衰减时间，以及确定受中子照射设备产生放射性的比活度，需要对这些放射性核素种类和比

活度进行取样监测测量。监测样品可取自 BEST 主机大厅内部设备维护更换部件；可采集主机大厅内部的气溶胶颗粒及灰尘；可收集装置内部的冷却水和水净化树脂等。。BEST 将主要采样高纯锗  $\gamma$  射线谱仪示意图，见图 4-35 所示，对采集的活化样品进行制样、换样和自动测量。依靠高纯锗谱仪极高的能量分辨率（1.5% @ 0.661keV），根据核素库特征峰能量，能够准确的各种放射性核素种类进行识别，结合核素的半衰期可以推算出残余辐射的时间衰减规律。此外，结合高纯锗谱仪的表征刻度，可以对样品中放射性核素的比活度进行准确测量。



图 4-35 自动制样换样高纯锗  $\gamma$  谱仪

#### 4.4.2.9 水氡、气氡采样监测

磁约束聚变装置开展氦氦等离子体实验，将要使用足量的氦作为聚变核燃料，对于具有  $\beta$  放射性内照射危害的各种形式氦进行采样监测将十分必要。在线实时的氦采样监测仪，其灵敏度相对较低，探测下限高，难以有效监测随空气和水外泄流出的微量氦。而长时间连续采样浓缩的气氦采样和水氦采样，可以显著提高检测样品的氦浓度，并结合低本底高灵敏度液闪  $\beta/\gamma$  射线谱仪，可以有效的检测出环境级微量氦的比活度，氦采样器及检测谱仪示意图见图 4-36。因而，BEST 将引入多套氦采样器和低本底液闪  $\beta/\gamma$  射线谱仪，主要用于氦处理中心、主机大厅外围环境，以及装置循环水体中的微量氦监测，确保环境的辐射安全。另外，氦处理中心及涉氦场所也可以定期进行氦采样监测，发现氦浓度异常后，尽早进行氦包容安全排查，避免隐患进一步发展导致氦大量外溢事故的发生。



图 4-36 气氚、水氚综合采样器（左）低本底液闪  $\beta/\gamma$  射线谱仪（右）

#### 4.4.2.10 环境空气、水体、土壤总放射性采样监测

为了确保 BEST 装置外围及周边环境的辐射安全，需要在监控范围内（距离 I 射线装置大厅外墙 50m，距离甲级非密封放射性物质操作场所外墙 500m）定期进行大气、水体、土壤放射性采样监测，常用主要的采样与监测设备示意图如图 4-37。根据实验阶段需要，BEST 将引入空气气溶胶（含微粒）自动采样仪，对装置大厅、氚处理中心外围及顶部的气体进行取样，并进行  $\alpha/\beta/\gamma$  总放射性活度的监测。此外，还将定期采集实验场所外排的清洁废水，以及外围的土壤进行总放射性活度的监测。



图 4-37 空气气溶胶（微粒）自动采样仪（左）样品  $\alpha/\beta$  辐射监测仪（中）高纯锗  $\gamma$  射线谱仪（右）

#### 4.4.2.11 氚监测

主要包括:

- 通风系统在线和取样
- 水冷系统取样

- 氙包容系统在线和取样

为覆盖氙监测电离室测量浓度范围  $1 \times 10^5 \text{Bq/m}^3 \sim 1 \times 10^{13} \text{Bq/m}^3$ ，在每个监测点至少布置两台氙监测电离室用于氙浓度实时监测。其中，氙处理中心各房间位置设置监测点，B2 包括 WDS 应急房间、VDS 催化氧化房间、S-VDS 泵房、除氙系统高区，B1 包括 HC-ADS 泵房、HC-VDS 泵房、VDS 泵房、ADS 泵房、真空泵组及配套房间、除氙系统高区，L1 包括 FCM&HIS 房间、WDS 电解房间、AMC 房间、WDS 公用工程房间、管制房间、除氙系统高区，L1 中间层包括 HC 催化氧化房、GDS 催化氧化房间、ADS 电催化氧化房间、WDS 干燥房间、除氙系统高区，共 21 个监测点。Tokamak 大厅各房间位置设置监测点，L1 包括 L1-J 设备及控制室、L1-G 设备及控制室、ICRF 控制室及机房、备用区、配电&设备机房、L1-A 设备及控制室、L1-B 设备及控制室、诊断及其他设备区、NB 现场控制室、LHCD 现场控制室、诊断设备机房，其他楼层预估 10 个监测点，共 21 个监测点。热室各房间位置设置监测点，L1 包括拼装焊接区域、卸货清洁临时存放区域、组装区域、部件预组装检测临时存放区域，其他楼层预估 10 个监测点，共 14 个监测点。

### (1) BEST 氙处理中心

拟将氙处理中心各个房间作为监测点位，每个监测点位布置 2 台电离室，以完整覆盖氙浓度监测范围。根据氙处理中心系统布局，共设置 21 个监测点位，氙处理中心房间氙监测电离室布置情况如下表所示。

表 4-4 氙处理中心监测电离室布置情况

楼层	房间	电离室监测范围及数量
B2	水去氙化系统应急房间	$2 \times 10^4 \text{Bq/m}^3 \sim 2 \times 10^{10} \text{Bq/m}^3$ ，1 台
		$2 \times 10^7 \text{Bq/m}^3 \sim 2 \times 10^{13} \text{Bq/m}^3$ ，1 台
	排放气体除氙系统催化氧化房间	$2 \times 10^4 \text{Bq/m}^3 \sim 2 \times 10^{10} \text{Bq/m}^3$ ，1 台 $2 \times 10^7 \text{Bq/m}^3 \sim 2 \times 10^{13} \text{Bq/m}^3$ ，1 台
	S-VDS 泵房	$2 \times 10^4 \text{Bq/m}^3 \sim 2 \times 10^{10} \text{Bq/m}^3$ ，1 台 $2 \times 10^7 \text{Bq/m}^3 \sim 2 \times 10^{13} \text{Bq/m}^3$ ，1 台

	除氙系统高区	$2 \times 10^4 \text{Bq/m}^3 \sim 2 \times 10^{10} \text{Bq/m}^3$ , 1 台 $2 \times 10^7 \text{Bq/m}^3 \sim 2 \times 10^{13} \text{Bq/m}^3$ , 1 台
B1	热室空气除氙系统泵房	$2 \times 10^4 \text{Bq/m}^3 \sim 2 \times 10^{10} \text{Bq/m}^3$ , 1 台 $2 \times 10^7 \text{Bq/m}^3 \sim 2 \times 10^{13} \text{Bq/m}^3$ , 1 台
	热室排风除氙系统泵房	$2 \times 10^4 \text{Bq/m}^3 \sim 2 \times 10^{10} \text{Bq/m}^3$ , 1 台 $2 \times 10^7 \text{Bq/m}^3 \sim 2 \times 10^{13} \text{Bq/m}^3$ , 1 台
	排放气体除氙系统泵房	$2 \times 10^4 \text{Bq/m}^3 \sim 2 \times 10^{10} \text{Bq/m}^3$ , 1 台 $2 \times 10^7 \text{Bq/m}^3 \sim 2 \times 10^{13} \text{Bq/m}^3$ , 1 台
	空气气氛除氙系统泵房	$2 \times 10^4 \text{Bq/m}^3 \sim 2 \times 10^{10} \text{Bq/m}^3$ , 1 台 $2 \times 10^7 \text{Bq/m}^3 \sim 2 \times 10^{13} \text{Bq/m}^3$ , 1 台
	真空泵组及配套房间	$2 \times 10^4 \text{Bq/m}^3 \sim 2 \times 10^{10} \text{Bq/m}^3$ , 1 台 $2 \times 10^7 \text{Bq/m}^3 \sim 2 \times 10^{13} \text{Bq/m}^3$ , 1 台
	除氙系统高区	$2 \times 10^4 \text{Bq/m}^3 \sim 2 \times 10^{10} \text{Bq/m}^3$ , 1 台 $2 \times 10^7 \text{Bq/m}^3 \sim 2 \times 10^{13} \text{Bq/m}^3$ , 1 台
L1	燃料净化与配气系统&氢同位素分离系统房间	$2 \times 10^4 \text{Bq/m}^3 \sim 2 \times 10^{10} \text{Bq/m}^3$ , 1 台 $2 \times 10^7 \text{Bq/m}^3 \sim 2 \times 10^{13} \text{Bq/m}^3$ , 1 台
	水去氙化系统电解房间	$2 \times 10^4 \text{Bq/m}^3 \sim 2 \times 10^{10} \text{Bq/m}^3$ , 1 台 $2 \times 10^7 \text{Bq/m}^3 \sim 2 \times 10^{13} \text{Bq/m}^3$ , 1 台
	监测与自动控制系统房间	$2 \times 10^4 \text{Bq/m}^3 \sim 2 \times 10^{10} \text{Bq/m}^3$ , 1 台 $2 \times 10^7 \text{Bq/m}^3 \sim 2 \times 10^{13} \text{Bq/m}^3$ , 1 台
	水去氙化系统公用工程房间	$2 \times 10^4 \text{Bq/m}^3 \sim 2 \times 10^{10} \text{Bq/m}^3$ , 1 台 $2 \times 10^7 \text{Bq/m}^3 \sim 2 \times 10^{13} \text{Bq/m}^3$ , 1 台
	管制房间	$2 \times 10^4 \text{Bq/m}^3 \sim 2 \times 10^{10} \text{Bq/m}^3$ , 1 台 $2 \times 10^7 \text{Bq/m}^3 \sim 2 \times 10^{13} \text{Bq/m}^3$ , 1 台



	除氚系统高区	$2 \times 10^4 \text{Bq/m}^3 \sim 2 \times 10^{10} \text{Bq/m}^3$ , 1 台 $2 \times 10^7 \text{Bq/m}^3 \sim 2 \times 10^{13} \text{Bq/m}^3$ , 1 台
L1 中间层	HC 催化氧化房间	$2 \times 10^4 \text{Bq/m}^3 \sim 2 \times 10^{10} \text{Bq/m}^3$ , 1 台 $2 \times 10^7 \text{Bq/m}^3 \sim 2 \times 10^{13} \text{Bq/m}^3$ , 1 台
	手套箱除氚系统催化氧化房间	$2 \times 10^4 \text{Bq/m}^3 \sim 2 \times 10^{10} \text{Bq/m}^3$ , 1 台 $2 \times 10^7 \text{Bq/m}^3 \sim 2 \times 10^{13} \text{Bq/m}^3$ , 1 台
	空气气氛除氚系统电催化氧化房间	$2 \times 10^4 \text{Bq/m}^3 \sim 2 \times 10^{10} \text{Bq/m}^3$ , 1 台 $2 \times 10^7 \text{Bq/m}^3 \sim 2 \times 10^{13} \text{Bq/m}^3$ , 1 台
	水去氚化系统干燥房间	$2 \times 10^4 \text{Bq/m}^3 \sim 2 \times 10^{10} \text{Bq/m}^3$ , 1 台 $2 \times 10^7 \text{Bq/m}^3 \sim 2 \times 10^{13} \text{Bq/m}^3$ , 1 台
	除氚系统高区	$2 \times 10^4 \text{Bq/m}^3 \sim 2 \times 10^{10} \text{Bq/m}^3$ , 1 台 $2 \times 10^7 \text{Bq/m}^3 \sim 2 \times 10^{13} \text{Bq/m}^3$ , 1 台

低浓度电离室监测范围为  $2 \times 10^4 \text{Bq/m}^3 \sim 2 \times 10^{10} \text{Bq/m}^3$ ，共计 21 台；高浓度电离室监测范围为  $2 \times 10^7 \text{Bq/m}^3 \sim 2 \times 10^{13} \text{Bq/m}^3$ ，共计 21 台。

## (2) Tokamak 大厅氚浓度监测

拟将 Tokamak 大厅各个房间作为监测点位，每个监测点位布置 2 台电离室，以完整覆盖氚浓度监测范围。根据 Tokamak 大厅房间初步规划，初步设置 21 个监测点位，Tokamak 大厅氚监测电离室布置情况如下表所示。

表 4-5 Tokamak 大厅氚监测电离室布置情况

楼层	房间	电离室监测范围及数量
L1	L1-J 设备及控制室	$2 \times 10^4 \text{Bq/m}^3 \sim 2 \times 10^{10} \text{Bq/m}^3$ , 1 台 $2 \times 10^7 \text{Bq/m}^3 \sim 2 \times 10^{13} \text{Bq/m}^3$ , 1 台
	L1-G 设备及控制室	$2 \times 10^4 \text{Bq/m}^3 \sim 2 \times 10^{10} \text{Bq/m}^3$ , 1 台 $2 \times 10^7 \text{Bq/m}^3 \sim 2 \times 10^{13} \text{Bq/m}^3$ , 1 台

	ICRF 控制室及机房	2×10 <sup>4</sup> Bq/m <sup>3</sup> ~2×10 <sup>10</sup> Bq/m <sup>3</sup> , 1 台 2×10 <sup>7</sup> Bq/m <sup>3</sup> ~2×10 <sup>13</sup> Bq/m <sup>3</sup> , 1 台
	备用区	2×10 <sup>4</sup> Bq/m <sup>3</sup> ~2×10 <sup>10</sup> Bq/m <sup>3</sup> , 1 台 2×10 <sup>7</sup> Bq/m <sup>3</sup> ~2×10 <sup>13</sup> Bq/m <sup>3</sup> , 1 台
	配电&设备机房	2×10 <sup>4</sup> Bq/m <sup>3</sup> ~2×10 <sup>10</sup> Bq/m <sup>3</sup> , 1 台 2×10 <sup>7</sup> Bq/m <sup>3</sup> ~2×10 <sup>13</sup> Bq/m <sup>3</sup> , 1 台
	L1-A 设备及控制室	2×10 <sup>4</sup> Bq/m <sup>3</sup> ~2×10 <sup>10</sup> Bq/m <sup>3</sup> , 1 台 2×10 <sup>7</sup> Bq/m <sup>3</sup> ~2×10 <sup>13</sup> Bq/m <sup>3</sup> , 1 台
	L1-B 设备及控制室	2×10 <sup>4</sup> Bq/m <sup>3</sup> ~2×10 <sup>10</sup> Bq/m <sup>3</sup> , 1 台 2×10 <sup>7</sup> Bq/m <sup>3</sup> ~2×10 <sup>13</sup> Bq/m <sup>3</sup> , 1 台
	诊断及其他设备区	2×10 <sup>4</sup> Bq/m <sup>3</sup> ~2×10 <sup>10</sup> Bq/m <sup>3</sup> , 1 台 2×10 <sup>7</sup> Bq/m <sup>3</sup> ~2×10 <sup>13</sup> Bq/m <sup>3</sup> , 1 台
	NB 现场控制室	2×10 <sup>4</sup> Bq/m <sup>3</sup> ~2×10 <sup>10</sup> Bq/m <sup>3</sup> , 1 台 2×10 <sup>7</sup> Bq/m <sup>3</sup> ~2×10 <sup>13</sup> Bq/m <sup>3</sup> , 1 台
	LHCD 现场控制室	2×10 <sup>4</sup> Bq/m <sup>3</sup> ~2×10 <sup>10</sup> Bq/m <sup>3</sup> , 1 台 2×10 <sup>7</sup> Bq/m <sup>3</sup> ~2×10 <sup>13</sup> Bq/m <sup>3</sup> , 1 台
	诊断设备机房	2×10 <sup>4</sup> Bq/m <sup>3</sup> ~2×10 <sup>13</sup> Bq/m <sup>3</sup> , 1 台 2×10 <sup>7</sup> Bq/m <sup>3</sup> ~2×10 <sup>16</sup> Bq/m <sup>3</sup> , 1 台
其他楼层	(预估)	2×10 <sup>4</sup> Bq/m <sup>3</sup> ~2×10 <sup>13</sup> Bq/m <sup>3</sup> , 10 台 2×10 <sup>7</sup> Bq/m <sup>3</sup> ~2×10 <sup>16</sup> Bq/m <sup>3</sup> , 10 台

低浓度电离室监测范围为 2×10<sup>4</sup>Bq/m<sup>3</sup>~2×10<sup>10</sup>Bq/m<sup>3</sup>, 共计 21 台; 高浓度电离室监测范围为 2×10<sup>7</sup>Bq/m<sup>3</sup>~2×10<sup>13</sup>Bq/m<sup>3</sup>, 共计 21 台。

### (3) 热室氡浓度监测

拟将热室各个区域作为监测点位, 每个监测点位布置 2 台电离室, 以完整覆盖氡浓

度监测范围。根据热室初步规划，初步设置 14 个监测点位，热室氡监测电离室布置情况如下表所示。

表 4-6 热室氡监测电离室布置情况

楼层	房间	电离室监测范围及数量
L1	拼装焊接区域	$2 \times 10^4 \text{Bq/m}^3 \sim 2 \times 10^{10} \text{Bq/m}^3$ ，1 台
		$2 \times 10^7 \text{Bq/m}^3 \sim 2 \times 10^{13} \text{Bq/m}^3$ ，1 台
	卸货、清洁、临时存放区域	$2 \times 10^4 \text{Bq/m}^3 \sim 2 \times 10^{10} \text{Bq/m}^3$ ，1 台
		$2 \times 10^7 \text{Bq/m}^3 \sim 2 \times 10^{13} \text{Bq/m}^3$ ，1 台
组装区域	$2 \times 10^4 \text{Bq/m}^3 \sim 2 \times 10^{10} \text{Bq/m}^3$ ，1 台	
		$2 \times 10^7 \text{Bq/m}^3 \sim 2 \times 10^{13} \text{Bq/m}^3$ ，1 台
	部件预组装、检测、临时存放区域	$2 \times 10^4 \text{Bq/m}^3 \sim 2 \times 10^{10} \text{Bq/m}^3$ ，1 台
		$2 \times 10^7 \text{Bq/m}^3 \sim 2 \times 10^{13} \text{Bq/m}^3$ ，1 台
其他楼层	(预估)	$2 \times 10^4 \text{Bq/m}^3 \sim 2 \times 10^{10} \text{Bq/m}^3$ ，1 台
		$2 \times 10^7 \text{Bq/m}^3 \sim 2 \times 10^{13} \text{Bq/m}^3$ ，1 台

低浓度电离室监测范围为  $2 \times 10^4 \text{Bq/m}^3 \sim 2 \times 10^{10} \text{Bq/m}^3$ ，共计 14 台；高浓度电离室监测范围为  $2 \times 10^7 \text{Bq/m}^3 \sim 2 \times 10^{13} \text{Bq/m}^3$ ，共计 14 台。

为覆盖氡监测电离室测量浓度范围  $1 \times 10^5 \text{Bq/m}^3 \sim 1 \times 10^{10} \text{Bq/m}^3$ ，在每个监测点至少布置两台氡监测电离室用于氡浓度实时监测。氡处理中心各房间位置设置监测点，B2 包括 WDS 应急房间、VDS 催化氧化房间、S-VDS 泵房、WDS 除氡系统房间、热室除氡系统房间。

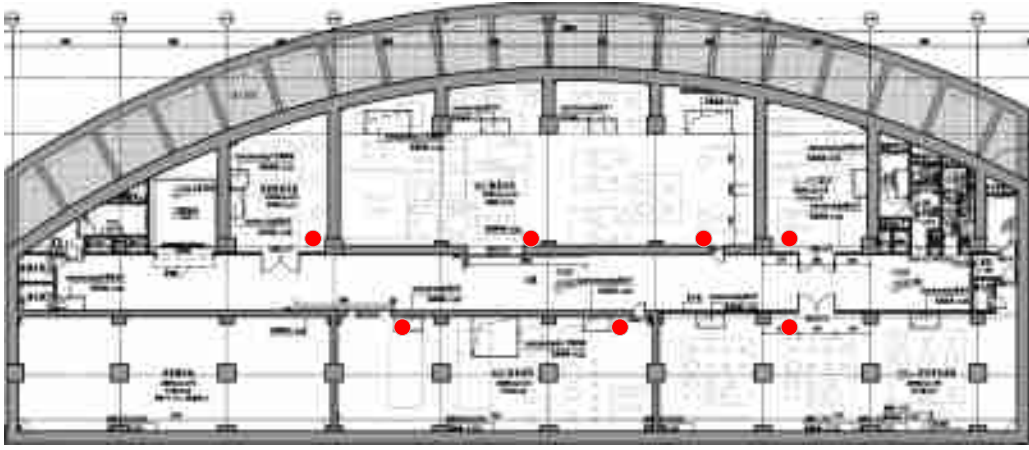


图 4-38 氡处理中心 B2 监测位置示意图

B1 包括 HC-ADS 泵房、HC-VDS 泵房、VDS 泵房、ADS 泵房、真空泵组及配套房间、除氡系统高区、热室除氡系统高区。

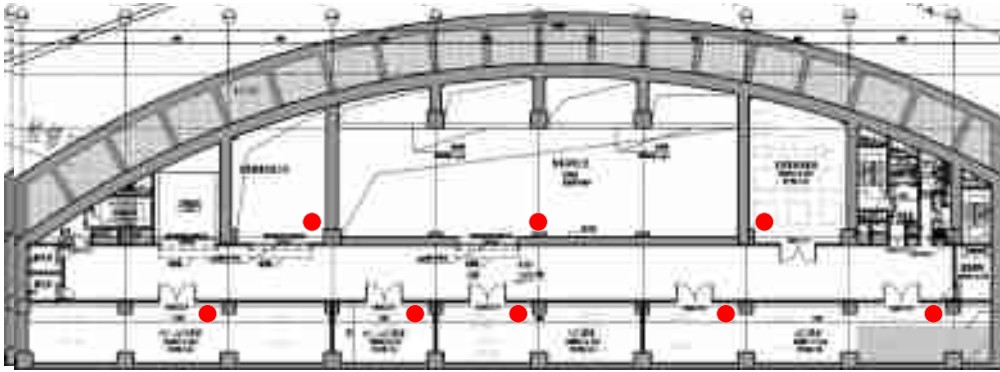


图 4-39 氡处理中心 B1 监测位置示意图

L1 包括 AMC 房间、FCM&HIS 房间、LMR 中控室、WDS 公用工程房间、除氡系统高区、热室除氡系统高区。

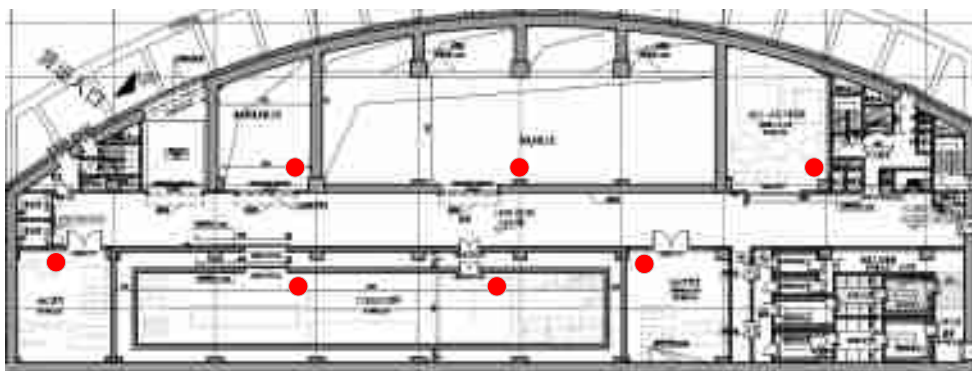
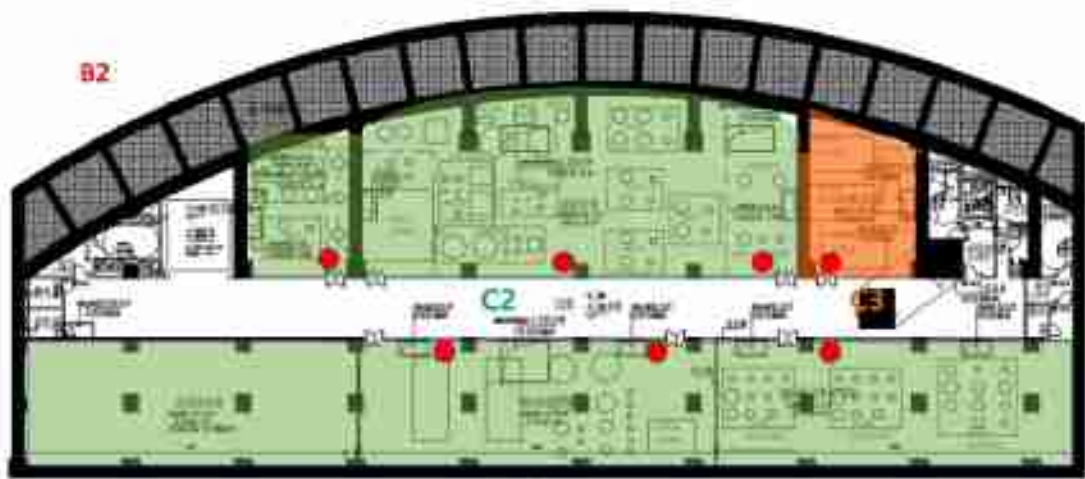
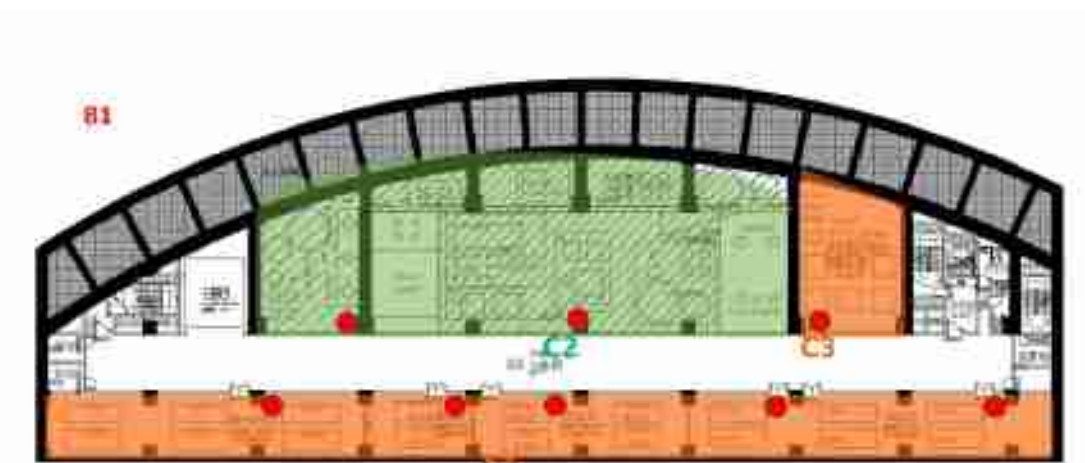


图 4-40 氡处理中心 L1 层监测位置示意图



C2



C2

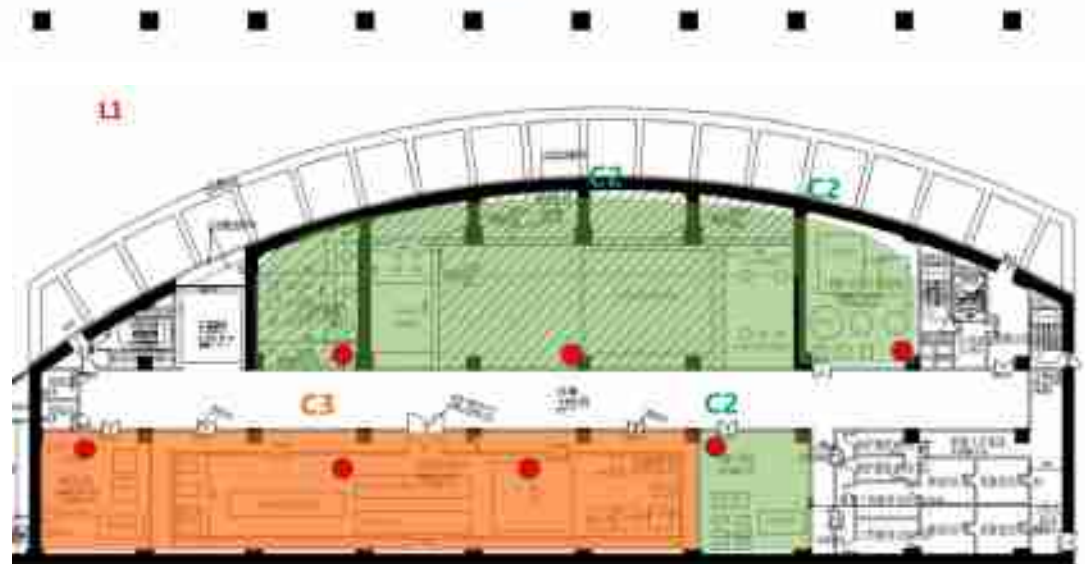


图 4-41 氡处理中心分区图与监测位点图

## 4.5 其他辐射安全防护措施

BEST 辐射监测系统由中子/伽马射线实时监测与巡测、氡浓度实时监测与巡测、表面放射性污染监测、放射性核素监测与分析、个人剂量监测等部分组成，可为日常得辐射防护和应急监测提供基础数据。

装置运行维护期间的辐射防护，主要依靠多重混凝土屏蔽墙（生物屏蔽墙、PortCell 屏蔽墙与屏蔽门、主机厅屏蔽墙与屏蔽门）和多级的氡包容（装置真空边界、PortCell 气密包容、主机厅气密包容、手套箱、气密服等），来确保人员和环境的辐射安全。其他辐射安全防护措施主要如下：

### （1）真空泵设备的检修防护措施

设备检修过程中的主要危害因素及途径是吸入氡造成的内照射危害，则检修过程中主要防护措施如下：

1) 设备设计时，设备表面光滑、易去污；密封性要求高的设备满足密封要求，密封材料耐腐蚀、耐低温、抗“氢脆”，能有效地将氡物质包容起来；所有需检修的设备能将物料排空，阀门和管道的连接死区少，拆卸方便，易于检修和更换，减少物料的滞留量，以减少维修时氡物质的释放。按照最少维修原则采用高可靠性设备或增加备用。

2) 按照最少维修原则采用高可靠性设备或增加备用。

3) 重要测量参数的仪表采用冗余设计，当在役系统失效时，立即切换到冗余系统。

4) 工艺系统和设备进行维修前，首先将物料排空，进行多次清洗和吹扫。

5) 在检修操作方面，拆卸的设备、工器具按污染程度分开放置，以减少交叉污染，有利于清洗去污。同时要及时清理现场，保持工作场所整洁，废物分类收集。

### （2）氡管道的防泄漏措施

氡管道泄漏包括两条路径：一是通过设备和管道壁面的系统氡渗透，由壁温、壁厚、壁面材料、流体中氡的分压等因素确定；二是系统氡泄漏，由系统泄漏率决定。

BEST氡防泄漏措施主要包括：

1) 高氙工艺系统设备和器件（如循环泵、阀门、流量控制器等）要求低漏率，且氙兼容，管道接头采用焊接或VCR连接，系统整体漏率 $<10^{-8}\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ 量级。

2) 超温保护，加热器涉氙部件的温度采用监测专用温度传感器，如果实际温度显著高于设定温度时，自动关闭加热器，并发出报警。

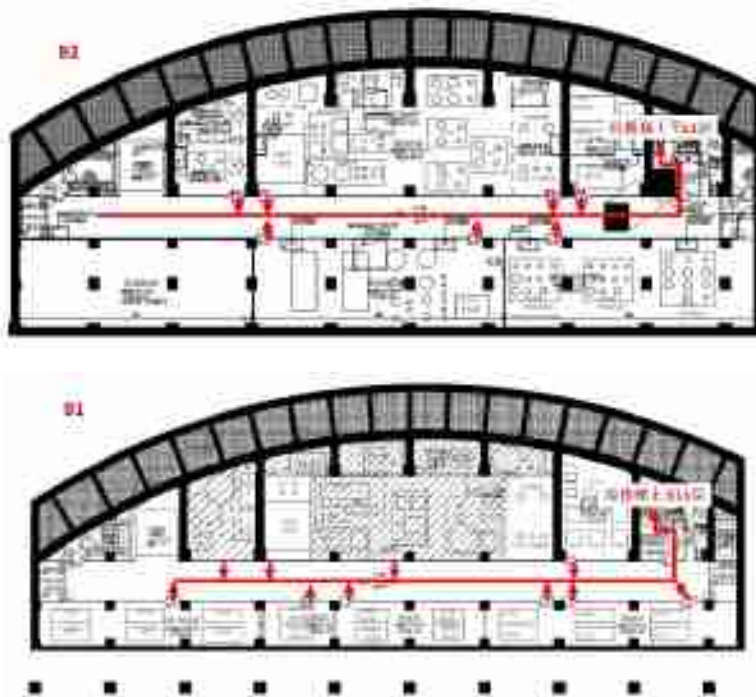
3) 超压保护，涉氙压力部件的压力监测采用专用压力传感器，如果实际压力显著高于设定压力时，系统立即报警，并根据情况启动安全泄压。

4) 为防止氙高温渗透，对高温高氙部件（如贮氙床、钯管净化器等）采用二级包容设计，必要时可对结构材料进行阻氙涂层处理。

5) BEST设有氙泄漏监控与应急响应系统（LMR）和除氙系统，LMR实时监测涉氙系统的各监测点的氙浓度，一旦超过阈值，及时启动相应的除氙系统对泄漏的氙进行处理。

### (3) 氙泄漏报警措施及紧急撤离路线

氙处理中心设置了氙泄漏报警装置。发生氙泄漏事故时，B2和B1层从各房间进入走廊，经步梯上至L1层，L1层从各房间进入走廊，经换衣淋浴后出氙处理中心，紧急撤离路线如下图所示：



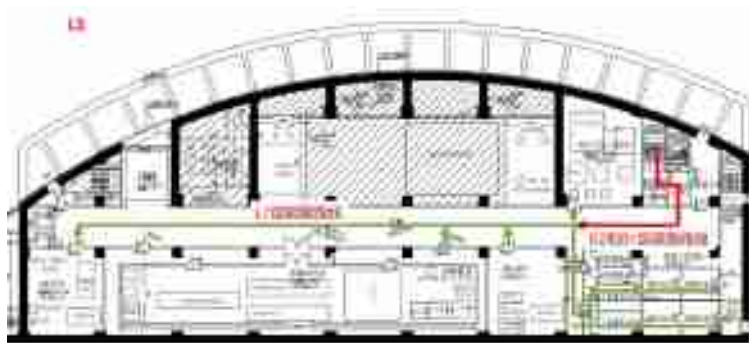


图 4-42 氡处理中心发生氡泄漏事故时的紧急撤离路线图

#### (4) 通风系统

描述详见 3.2.10 小节。

### 4.6 辐射安全与防护设施小结

参照生态环境部磁约束聚变实验装置监督检查技术程序，BEST 的辐射安全与防护设施情况对标如表 4-7 所示。由表可知，本项目的辐射安全与防护设施符合相关要求。

表 4-7 BEST 辐射安全与防护对标情况

序号	对照项目		是否符合
1*	A 场所设施	厅内为控制区	√
2*		入口电离辐射警告标志	√
3		入口装置工作状态显示	√
4*		大厅门与中控联锁	√
5*		视频监控系统	√
6*		门内紧急开门按钮（指示、说明）	√
7		紧急出口标志	√
8		广播提示或对讲装置	√
9		应急照明	√
10*	B 安全联锁	控制台密码解锁	√
11*		人员出入记录接入控制台	√
12*		高压电源系统与中控联锁	√
13		声光报警紧急停机按钮联锁	√
14*		运行期间剂量实时监控	√
15*		运行期间有辐射剂量超范围报警	√
16*		联锁触动停机后须人工复位才能重启	√
17*		运行前有清场巡查操作	√
18*	控制台上有关复位确认按钮	√	
19*	C 紧急停机装置	控制区内设有紧急停机按钮	√



序号	对照项目		是否符合
20		按钮位置醒目及说明指示	√
21		有紧急停机按钮自锁及复位	√
22*		控制台或联锁系统有紧急停机按钮	√
23*	D 监测设备	控制区内固定式辐射剂量监测仪	√
24*		个人剂量报警仪	√
25*		γ 和中子个人剂量计	√
26*		便携式 γ 和中子剂量测量仪	√
27#		便携式表面沾污仪	√
28#		气溶胶监测仪或装置	√
29#		放射性气体监测仪或装置	√
30#	E 氚的防护	氚靶操作防护措施	/
31#		氚靶贮存容器、真空泵油等置于通风柜	/
32#		真空泵检修防护	√
33	F 其它	控制区通风系统	√
34		火灾报警与易燃易爆气体探测	√
35*		灭火器材	√

## 4.7 三废治理

### 4.7.1 放射性三废治理

#### 4.7.1.1 放射性废气及其处理措施

##### (1) 氚

BEST 向环境排放的放射性废气主要是氚气 (HT) 和氚化水 (HTO)，排出路径包括排放气体除氚系统 (VDS) 尾气、水去氚化系统 (WDS) 稀释氢气和暖通空调系统 (HVAC)。根据 ICRP 标准结合 BEST 系统的氚处理量及运行工况，设定 BEST 排放限值为：以单质态排放到环境的氚浓度小于  $3.7 \times 10^7 \text{ Bq/m}^3$ ，以水蒸气形式排入环境的氚浓度小于  $5 \times 10^3 \text{ Bq/m}^3$ ，年环境排放总氚量不超过 0.1g/a。

含氚废气收集在正常运行、维护 (如需要) 或事故/事故情况下释放到内部大气中的气态氚于气氛除氚系统 (ADS)，经 ADS 处理以及托卡马克综合设施的例行监测，废气达到排放限值后释放到环境中。

## (2) 活化气体

BEST 是脉冲运行方式，在脉冲运行期间 DT 聚变产生中子活化主机及厂房区域空气产生放射性核素，这些空气中的放射性核素在脉冲间隔将自发衰变以及通过空气循环系统吸附去除。根据当前 BEST 辐照方案，即以 50MW 聚变功率运行 1000 秒后的结束时刻，空气放射性核素浓度最大，停机时空气放射性比活度为  $2.1\text{E}+06 \text{ Bq/kg}$ ，或  $2.2\text{E}+06 \text{ Bq/m}^3$ 。

在保守估计条件下，假定主机及厂房空气不做净化，空气活化产生的放射性核素逐渐累积。模拟计算得到无净化条件下停机后包层部件的放射性核素活度浓度如表 3-19。停机时空气的平均放射性活度浓度为  $1.6\text{E}+06 \text{ Bq/m}^3$ ，或  $1.4\text{E}+06 \text{ Bq/kg}$ 。

在空气活化放射性废气产生处，通过通风系统高效空气过滤器 HEPA 净化吸附后以及托卡马克综合设施的例行监测废气达到排放限值后释放到环境中。放射性废气由 5#-2 北面墙体设置的高空烟囱（70.8m）进行排放。废气产生及流向如下图所示。

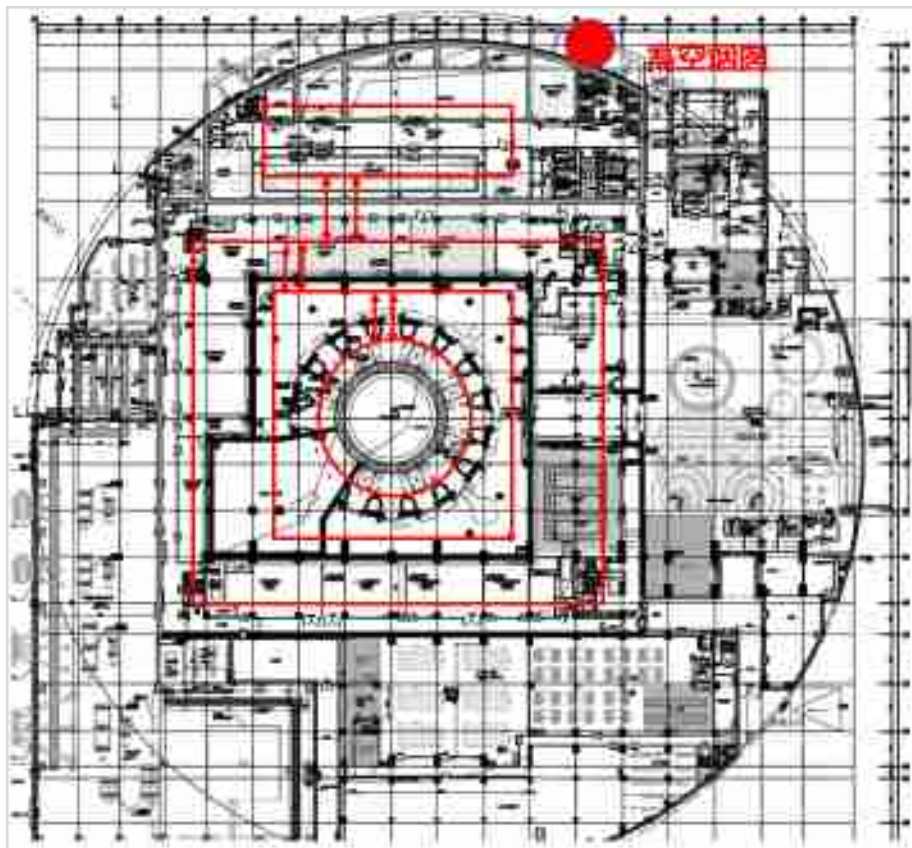


图 4-43 5#楼废气产生及流向示意图

#### 4.7.1.2 放射性废液及其处理措施

本项目主要的放射性废液是含氚废水。BEST 氚化水主要来源包括除氚系统回收的含氚水、包层/偏滤器冷却水以及事故含氚废水（消防废水以及破口事故废水）等三类。人员进出氚处理中心的洗涤用水进行监测，氚浓度超过限值[REDACTED]的废水收集。放射性废水正常工况产生量约为 12t/a，异常工况产生量约为 20t/a。上述含氚废水，通过水去氚化系统 WDS 处理后，氚以氢气形式排放，可实现无含氚液废排放。

包层/偏滤器冷却水的最大可能水装量约为 350m<sup>3</sup>，包括 6 个储水罐。

含氚废液由氚处理中心水去氚化系统中氚水储存子系统收集储存，氚水储存子系统包括四个浓度级的氚水储罐，及 250m<sup>3</sup> 的应急氚水储罐，其操作空间和系统设计需求如下：

- 1) 充分利用重力作用来转移不同建筑 and 不同工厂系统、设备中产生的氚化水，氚水储罐置于建筑最低层；
- 2) 尽可能优化减少储罐连接至 WDS 系统的管道设计和布局，降低氚水在管道中的滞留，尤其针对 H 和 M 级氚水；
- 3) 减少氚化水在储存罐底部的滞留量；
- 4) 针对氚水储罐，考虑其辐射分解积累氧气和氢气的危险因素，设置氮气吹扫管线，尾气连接到 N-VDS。

表 4-8 水去氚化系统氚水储存罐和应急水池的参数

储存罐	容积, m <sup>3</sup>	参考氚浓度, Bq/m <sup>3</sup>	尺寸, mm
H 级	2.5	[REDACTED]	内径 800, 高度 2800, 2 个 (V081101)
M 级	5	[REDACTED]	内径 1100, 高度 2800, 2 个 (V081102)
L 级	10	[REDACTED]	内径 1600, 高度 2800, 2 个 (V081103)
LL 级	20	[REDACTED]	内径 2400, 高度 2800, 2 个 (V081104)
应急	250	[REDACTED]	长 4000×宽 7000×高 4500, 2 个 (V081105)

综合设计需求，考虑到需要利于氟化水从不同建筑 and 不同工厂系统、设备中通过重力转移到储罐中，将氟水存储系统储罐设计于氟处理中心 B2 楼，位于氟处理中心最低层。考虑到氟水储罐因辐射分解积累氧气和氢气的因素，设置氮气吹扫管线，并控制储存罐中气氛中氢气浓度水平控制在 1% 以内。

为了检查主回路的水化学成分，托卡马克水冷系统 TCWS 将定期在线检查，使用取样系统实验室进行离线分析，取样分析后作为废液的产生量约为  $0.38\text{m}^3/\text{a}$ 。

#### 4.7.1.3 放射性固体废物及其处理措施

BEST 正常工况产生的废物主要包括：不可焚烧的固体废物（如系统管道、阀门、低温泵、气体循环泵、真空泵等金属零部件），可焚烧的固体废物（如防护装备、手套、纸张、布、棉花等），其他特定工艺废物（如活性炭、分子筛、钯净化器、贮氟床、电解池、除氟催化剂、离子交换树脂、HEPA 过滤器、主机包层、偏滤器等）。

废树脂在每次长期维修停机时更换，因此每年更换一次。废树脂会被封装在屏蔽容器中运到热室进行检测处理。

废过滤器在每次长期维修停机时更换，因此每年更换一次。根据过滤器上的压降，如果需要，在短期维修停机时将更换过滤器废物。过滤器会被封装在封闭容器中运到热室进行检测处理。

保守估计 BEST 每年放射性固废产生量为  $10\text{m}^3$ 。

热室处的固体废物经过清洗除氟，分拣后，放入钢箱，对箱体顶部进行封焊，并对钢箱外侧的辐射剂量进行监测。标准按照《低、中水平放射性固体废物包安全标准》（GB12711-2018）。固废包装完后，采用吊车码垛的方式堆码在废物存储空间，存储周期为 6 个月，再检测固废包装外侧的放射性剂量，放射性剂量满足相关标准后进一步转运出存储区。

转运过程如下：

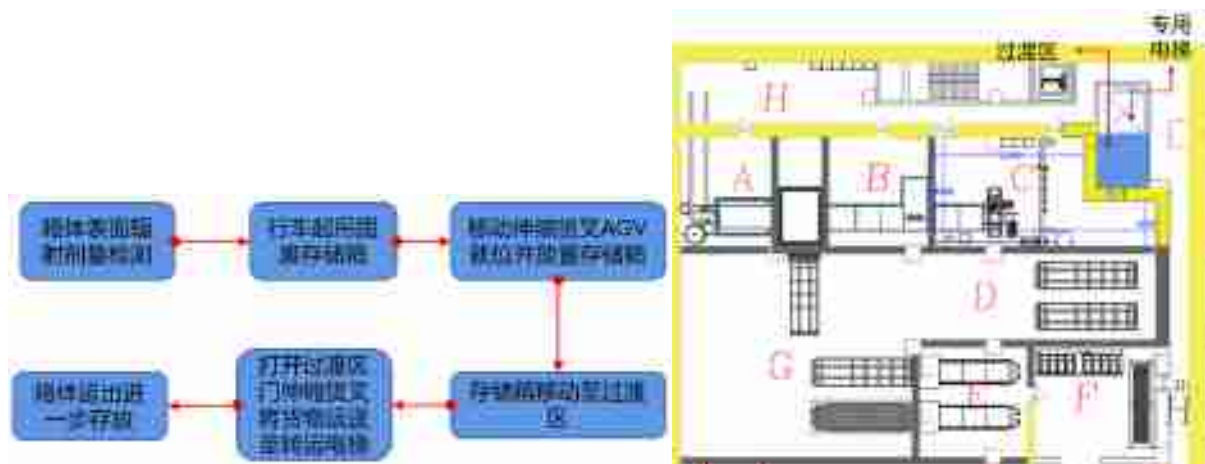


图 4-44 热室固废转运过程示意图

放射性固废将进行暂存封装转运至可接受处理的机构进行处理。

#### 4.7.1.4 退役废物考虑

BEST 各主要部件的质量及废物活化及分类情况如下表所示。

表 4-9 BEST 主要活化固体部件质量及废物分类

部件	体积 (m <sup>3</sup> )	质量 (吨)	停机时刻放射性比活度(Bq/kg)	停机时刻废物等级	暂存 30 年后废物等级	暂存 100 年后废物等级
包层	7.9E+01	██████	7.98E+11	LLW	LLW	LLW
偏滤器	2.4E+01	██████	8.90E+11	LLW	LLW	LLW
真空室	1.4E+02	██████	1.14E+09	LLW	LLW	VLLW
窗口插件	4.6E+01	██████	9.41E+10	LLW	LLW	VLLW
中心螺线管	6.2E+01	██████	1.80E+07	LLW	VLLW	VLLW
纵场线圈	2.0E+02	██████	1.15E+08	LLW	LLW	LLW
极向场线圈	8.0E+01	██████	4.84E+07	LLW	LLW	LLW
冷屏	2.5E+01	██████	1.02E+08	LLW	LLW	VLLW
杜瓦	7.0E+01	██████	1.16E+07	LLW	LLW	EW
建筑	5.3E+04	██████	2.74E+05	LLW	EW	EW

备注：LLW——低放废物；VLLW——极低放废物；EW——豁免废物。

BEST 退役是一门综合性工程，退役中涉及的技术很多，包括源项调查、去污、拆除解体、废物管理、辐射检测、辐射防护、场址清污等。BEST 退役将按照国家和地方相关部门的规定和惯例进行。将充分考虑工作人员和公众的健康与安全及环境保护而采取的行动。

## 4.8 服务期满后的环境保护措施

本装置终止运行后可能产生放射性污染，因搬迁等原因不再使用时，应编制相应的退役方案、制定退役目标，确保放射性废物得到安全、妥善处理，并按照相关法规规定完善退役环保手续。

## 5 环境影响分析

### 5.1 非放射性环境影响分析

#### 5.1.1 施工期环境影响分析

##### 5.1.1.1 施工期废气

施工期产生的废气主要包括土建施工过程产生的扬尘、车辆机械运行产生的尾气。

根据有关研究资料，施工扬尘的起尘量与许多因素有关，挖土机等在工作时的起尘量与挖坑深度、挖土机抓斗与地面的相对高度、风速、土壤的颗粒度、土壤含水量等因素有关。对于渣土堆场而言，起尘量还与堆放方式、起动风速及堆场有无防护措施等有关。国内研究结果和类比调查表明，在起动风速以上，影响起尘量的主要因素分别为：防护措施、风速、土壤湿度、挖土方式或土堆的堆放方式等。在不同的风速和稳定度下，挖土的扬尘对环境的浓度贡献都较大。但随着距离的增加，浓度贡献衰减很快。在土壤湿度较大的情况下，其浓度贡献大的区域一般在施工现场 100 米以内。建议采取以下施工期大气污染防治措施：

(1) 工程施工产生扬尘污染活动的相关责任主体，应当采取扬尘污染防治措施，并做到方案完善、措施有效、手续齐全、人员落实、监控到位和资源配置齐全。

(2) 工程施工现场扬尘污染防治应当做到工地周边围挡、物料堆放覆盖、路面硬化、土方开挖湿法作业、出入车辆清洗、渣土车辆密闭运输。

(3) 施工期间，应在物料、渣土、垃圾运输车辆的出口内侧设置洗车平台，车辆驶离工地前，应在洗车平台清洗轮胎及车身，不得带泥上路。

(4) 施工期间，应当对工地建筑结构脚手架外侧设置密目防尘网或防尘布。

(5) 施工现场建筑材料实行集中、分类堆放。施工现场禁止焚烧沥青、油毡、橡胶、垃圾等易产生有毒有害烟尘和恶臭气体的物质。

(6) 物料、渣土、垃圾运输车辆，应采用密闭车斗，保证物料不遗撒外漏。建筑垃圾、工程渣土等应当及时清运，在 48 小时内未能清运的，应当在施工工地内设置临时堆放场内临时堆放，临时堆放场应采取围挡、遮盖等有效防尘措施。

(7) 施工过程中使用水泥、石灰、砂石、涂料、铺装材料等易产生扬尘的材料，应当密闭存储。若工地内堆放，应当采用防尘布苫盖，或采取其他有效的防尘措施。需使用混凝土的，应当使用预拌商品混凝土，或者进行密闭搅拌并采取相应的扬尘防治措施，不得现场露天搅拌混凝土、消化石灰及拌石灰土等。

(8) 施工工地内及工地出口至铺装道路间的车行道路应铺设钢板、混凝土、细石等材料，并辅以洒水、喷洒抑尘剂等措施。施工工地道路积尘可采用吸尘或水冲洗的方法清洁路面。

项目施工期会增加施工现场的起尘量，但是施工期相对较短，施工活动引起粉尘、扬尘增加仅在施工区内和周围地区，对项目周边环境空气质量影响较小。

#### **5.1.1.2 施工期废水**

施工过程中产生的废水主要为施工人员排放的生活污水和施工作业产生的废水。

施工废水主要产生于施工机械清洗等，废水中主要污染物为泥沙、悬浮物等。施工期可在场区设置简易沉淀池，施工废水经沉淀池处理后回用，不外排。

本项目施工人员排放的生活污水和城市居民生活污水水质相似，污水中主要污染物为 pH、SS、COD、BOD 等。污水经化粪池初步处理后排入市政污水管网。

采取这些措施以后，施工期产生的污水对环境的影响会降到最低水平，施工期产生的废水其对环境的影响是短暂的，一旦施工结束，其影响随之消失。

#### **5.1.1.3 施工期噪声**

施工期的噪声包括施工现场的各类机械设备噪声及物料运输时运输车辆产生的交通噪声，本项目施工期的主要噪声源以施工机械噪声为主，运输车辆辐射噪声为辅。

施工机械噪声可近似视为点声源处理，根据点声源噪声衰减模式，估计距离声源不同距离处的噪声值，预测模式如下：



$$L_p(r) = L_p(r_0) - 20 \lg(r/r_0) \quad (\text{公式 5-1})$$

式中： $L_p(r)$  —距声源  $r$  处的 A 声级，dB (A)；

$L_p(r_0)$  —参考位置  $r_0$  处（声源）的 A 声级，dB (A)；

根据上述计算模式，施工期距施工机械不同距离处的噪声值见表 5-1。

**表 5-1 施工期距施工机械不同距离处的噪声值 单位：dB (A)**

施工设备名称	5m	10m	20m	50m	100m	150m	200m
液压挖掘机	86	80	74	66	60	56	54
轮式装载机	93	87	81	73	67	63	61
推土机	86	80	74	66	60	56	54
重型运输车	86	80	74	66	60	56	54
静力压桩机	73	67	61	53	47	43	41
混凝土输送泵	92	86	80	72	66	62	60
风镐	90	84	78	70	64	60	58
压路机	85	79	73	65	59	55	53
木工电锯	96	90	84	76	70	66	64
商砼搅拌车	88	82	76	68	62	58	56
云石机、角磨	93	87	81	73	67	63	61

根据《建筑施工场界环境噪声排放标准》(GB12523-2011)的规定，施工场界昼间的噪声值为 70dB (A)，从表 5-1 可知，昼间施工机械在距施工机械 100m 外可以达到标准限值。

由于施工机械噪音强度较大，对周边环境有一定影响，本工程在施工期间应采取如下降噪措施：

(1) 合理安排施工时间

制定施工计划，避免大量高噪音设备同时施工，严禁夜间施工。

(2) 降低设备噪音

设备选型上尽量采用低噪声设备；对动力机械设备进行定期的维修、养护，防止松动部件的振动或消声器的损坏而增加其工作时声级；闲置不用的设备应及时关闭，运输车辆进入现场应减速，并减少鸣笛。

(3) 合理布局施工场地

施工时应工程条件允许的前提下，尽量避免将高噪声设备布置在施工工地临近敏感点的区域。

#### (4) 降低人为噪音

按规定操作机械设备；模板、支架拆卸过程中，遵守作业规定，减少碰撞噪音。

#### 5.1.1.4 施工期固废

施工现场的固体废物主要来源于施工过程中产生的建筑垃圾及生活垃圾等。建筑废料其数量比较多，包括施工中砖、水泥、钢材等废料，将其中可回收的部分回收作为建筑材料进行再利用，其余的运送至渣土堆放场统一处理，以免造成环境污染和物质浪费。

施工人员将产生的少量生活垃圾，平均每人每天 0.5kg 左右。施工场地临时宿营地应自建垃圾箱，定时清运。

项目施工期较短，采取如上措施后，施工期产生的建筑垃圾及生活垃圾对环境的影响较小。

#### 5.1.1.5 施工期生态环境影响

本项目位于产业园内，其项目的建设对场所内现有地表植物造成一定的破坏，不会造成当地生物量大量减少和生物多样性的破坏。另外，随着施工建设结束，场所内将进行人工绿化，因此，本项目建设对当地的生态影响是可以接受的。

### 5.1.2 运营期环境影响分析

#### 5.1.2.1 运营期废气

本项目运营期间无非放废气需要外排，因此不设置非放废气处理设施。

### 5.1.2.2 运营期废水

#### (1) 废水来源

本项目运营期间非放废水主要来自 3#楼。3#楼内会使用到的主要是常规水，来自 CRAFT 聚变堆园区，通过直埋通水管道的方式连接 CRAFT 园区供水中心和 BEST 园区 3#楼，3#楼内无特殊工艺用水。废水经 CRAFT 园区现有污水处理设施处理，满足排放要求后排放。

#### (2) 废水接管可行性分析

根据《环境影响评价技术导则-地表水环境》，本项目水污染物属于间接排放，依托污水处理设施环境可行性分析如下：

望塘污水处理厂服务范围主要包括合肥市黄山路以北、环城西路及亳州路以西的区域以及长丰县岗集镇镇区及工业园区、三十岗、大杨店、蜀山新产业园、城市森林公园、中科院合肥研究院的建设用地，规划服务面积 66km<sup>2</sup>，属于合肥市污水规划系统中的南淝河系统。项目所在区域属于望塘污水处理厂的收水范围。

望塘污水处理厂已建工程位于潜山路、清溪路、青阳路、高刘路及金牛路围合的街区里，现总占地 16.61ha，由一期（设计规模 8 万 m<sup>3</sup>/d）和二期工程（设计规模 10 万 m<sup>3</sup>/d）组成。望塘污水处理厂一期工程已经于 2004 年投入使用、二期工程于 2009 年投产。

本项目排放废水通过市政污水管网进入望塘污水处理厂处理，处理后达到《巢湖流域城镇污水处理厂和工业行业主要水污染物排放限值》（DB34/2710-2016）中表 2 相关标准以及《城镇污水处理厂污染物排放标准》（GB18918-2002）一级标准 A 标准，最终排入南淝河。因此，采取以上措施后，本项目废水可以达标排放。

综上所述，项目废水接入望塘污水处理厂是可行的，经上述处理措施后，项目废水能做到达标排放，对南淝河水环境影响较小，不会降低南淝河水环境现有功能。

### 5.1.2.3 运营期噪声

#### (1) 噪声源强及特性

本项目噪声主要来自压缩机等设备运行产生的噪声，各设备均采取了隔声减振的

措施，主要噪声源强见下表。

表 5-2 噪声源强表

序号	名称	数量, 台	所在位置	至场界距离 m				噪声源强	声源类型	持续时间	拟采取降噪措施	降噪效果	降噪后
				东	南	西	北						
1	压缩机	16	4#厂房压缩机厅	53.1	479.7	189.9	127.8	85	频发	00:00~24:00	选用低噪声设备, 机座进行减震处理, 压缩机厅整体进行隔声处理	≥30	55

## (2) 噪声治理设施

①选择低噪声设备；②对设备加装减振基础；③合理布局设备；④厂房隔声；⑤噪声随距离衰减。

## (3) 声环境影响预测

本次环评声环境影响预测方法采用《环境影响评价技术导则声环境》（HJ2.4-2021）中噪声预测计算模式。本项目主要噪声设备经距离衰减和厂房隔声后，到厂界贡献较小，满足《工业企业厂界环境噪声排放标准》（GB12348-2008）2类标准。

## (4) 预测结果评价

预测结果表明，项目投产后四面厂界噪声贡献值满足《工业企业厂界环境噪声排放标准》（GB12348-2008）中的2类标准要求，项目周围200m范围内没有敏感保护目标存在。因此，该项目产生的噪声对周围环境影响较小。

### 5.1.2.4 运营期固体废物

4#楼设备在维护时会产生废弃润滑油及活性炭，该固体废物直接交由专业公司进行维护处理和收集，因此不设置固体废物存储设施。

## 5.2 正常运行期间辐射环境影响分析

### 5.2.1 屏蔽体外剂量率水平

#### 5.2.1.1 模拟计算模型和分析方法

本次评价的计算模型和分析方法在 3.3.1.1 小节已介绍。

### 5.2.1.2 计算关注点选取及计算结果

下图给出了 BEST 关注点位置示意。表 5-3 给出了 BEST 屏蔽体外关注点的模拟计算结果。监督区剂量率均低于  $2.5\mu\text{Sv/h}$

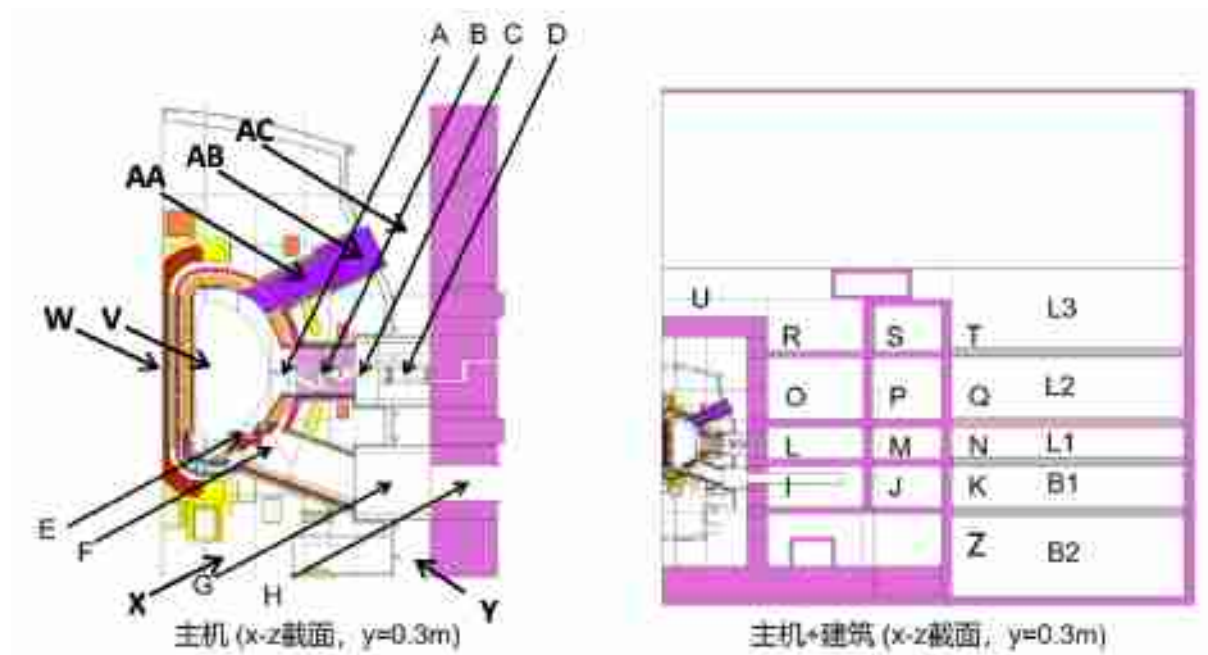


图 5-1 BEST 关注点所在区域示意图

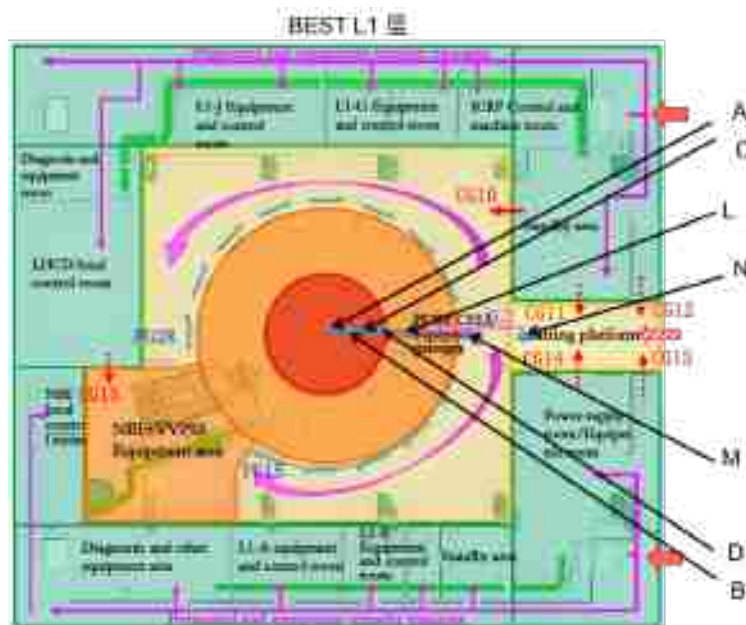


图 5-2 BEST L1 层典型位置示意图(x-y 截面, z=0)

表 5-3 BEST 屏蔽体外关注点的模拟计算结果

编号	位置	20MW 功率时快中子 (E>0.1MeV) 通量率 (n/cm <sup>2</sup> /s)	20MW 功率时运 行剂量率(Sv/h)	累积剂量率 (Gy)@中子产额 2.5E+25	停机剂量率(2.5E+23 中子产额, 停机 14 天) (Sv/h)	停机剂量率(1E+24 中子产额, 停机 14 天) (Sv/h)	停机剂量率 中子产额, 停机 14 天) (Sv/h)
A	等离子体腔室靠近高场侧包层处	4.82E+12	1.61E+07	1.58E+10	4.02E-01	2.05E+00	2.89E+02
B	中窗口内部	8.04E+10	1.25E+05	1.22E+08	3.88E-03	1.98E-02	2.86E+00
C	中窗口远离等离子体侧	3.42E+09	6.66E+03	6.52E+06	1.04E-04	5.73E-04	8.53E-02
D	外杜瓦与生物屏蔽层之间	2.93E+09	3.81E+03	3.73E+06	6.43E-05	3.20E-04	5.28E-02
E	偏滤器	3.05E+12	4.25E+06	4.16E+09	2.03E-01	1.02E+00	1.52E+02
F	下窗口靠近偏滤器处	2.07E+11	2.68E+05	2.62E+08	1.83E-02	9.40E-02	1.39E+01
G	下窗口与生物屏蔽层连接通道处	8.03E+09	6.23E+03	6.10E+06	5.14E-04	2.64E-03	3.62E-01
H	下窗口生物屏蔽层贯穿处	4.58E+09	3.03E+03	2.97E+06	2.93E-04	1.08E-03	1.95E-01
I	B1 层诊断小室	1.65E+09	3.00E+02	1.22E+06	1.02E-04	5.74E-04	6.91E-02
J	B1 层设备转运通道	3.78E+05	1.99E-04	1.69E+02	2.73E-11	6.00E-10	6.31E-08
K	B1 层设备间/设备控制室	3.50E+01	2.58E-07	1.29E-02	1.41E-14	1.08E-14	8.11E-14
L	L1 层诊断小室	2.02E+05	3.84E-02	3.76E+01	1.64E-10	7.04E-10	1.59E-07
M	L1 层设备转运通道	2.03E+02	3.55E-05	3.48E-02	1.77E-11	1.79E-11	2.83E-11

N	L1 层设备间/设备控制室	1.16E+01	1.06E-06	1.04E-03	1.75E-14	1.77E-14	9.13E-14
O	L2 层诊断小室	1.87E+03	1.74E-04	1.70E-01	2.72E-11	2.96E-11	5.87E-10
P	L2 层设备转运通道	9.82E-01	1.57E-07	1.54E-04	1.87E-11	1.10E-11	1.07E-11
Q	L2 层设备间/设备控制室	1.19E+01	1.01E-06	9.89E-04	2.04E-14	2.14E-14	1.44E-13
R	L3 层诊断小室	3.33E+02	3.07E-05	3.01E-02	2.01E-11	2.08E-11	1.28E-10
S	L3 层设备转运通道	5.89E-02	6.86E-09	6.72E-06	1.01E-12	1.04E-12	1.02E-12
T	L3 层设备间/设备控制室	1.29E+01	1.09E-06	1.07E-03	1.14E-14	1.08E-14	9.16E-14
U	生物屏蔽层顶部	2.80E+02	8.27E-05	8.10E-02	1.12E-11	1.16E-11	1.34E-10
V	等离子中心体	4.54E+12	4.19E+07	4.10E+10	3.24E-01	1.65E+00	2.34E+02
W	中心螺线管中心	9.14E-04	3.80E-10	3.72E-07	0.00E+00	0.0	0.0
X	托卡马克装置底部	9.78E+08	3.07E+02	3.01E+05	6.47E-06	3.15E-05	5.70E-03
Y	L1 地表靠近层生物屏蔽层处	1.06E+09	2.43E+02	2.38E+05	4.60E-06	2.57E-05	3.92E-03
Z	B2 层诊断小室	9.54E+04	9.92E-05	1.35E+01	5.03E-11	3.11E-10	7.06E-08
AA	上窗口内部	1.67E+08	1.10E+02	1.08E+05	2.74E-05	1.32E-04	2.18E-02
AB	上窗口远离等离子体侧	3.81E+05	1.86E-01	1.82E+02	9.24E-07	4.21E-06	9.63E-04
AC	下窗口与生物屏蔽层连接通道处	9.89E+08	2.95E+02	2.89E+05	7.08E-06	3.33E-05	5.96E-03

## 5.2.2 工作人员受照剂量估算

工作人员受到的外照射剂量可由下式 5-1 进行计算：

$$H=D \times T \times t \quad (5-1)$$

式中，

$H$  为工作人员年受照剂量，mSv/a；

$D$  为工作人员所在区域剂量率，mSv/h；

$T$  为工作人员的居留因子，取 1；

$t$  为工作人员年受照时间，h/a。

### 5.2.2.1 工作人员所在关注点的剂量率水平汇总

本项目装置运行期间，工作人员所在处的关注点剂量率水平汇总如表 5-4 所示。

表 5-4 工作人员所在关注点的剂量率水平汇总

关注点	关注点名称	剂量率结果 (μSv/h)
K	B1 层设备间/设备控制室	2.58E-01
N	B1 层设备间/设备控制室	1.06E+00
Q	L2 层设备间/设备控制室	1.01E+00
T	L3 层设备间/设备控制室	1.09E+00
L	L1 层诊断小室	1.59E-01 (停机 14 天)

另外，对于热室操作、活化部件/固废转移和氚处理中心的工作人员，其操作位剂量率水平如下表所示。

表 5-5 热室操作、活化部件/固废转移和氚处理中心工作人员操作位剂量率水平

人员类型	工作处最大剂量率水平	单次工作时长	年工作频次
热室-清洗去污	0.05mSv/h	小于 2 小时	小于 25 次/人
热室-分拣装箱	0.05mSv/h	小于 2 小时	小于 25 次/人



热室-零部件更换	0.05mSv/h	小于 2 小时	小于 20 次/人
活化部件/固废转运	0.01mSv/h	小于 2 小时	小于 20 次/人
氟处理中心	1 $\mu$ Sv/h	小于 8 小时	小于 75 次/人

### 5.2.2.2 正常运行期间工作人员受照剂量估算

正常运行期间，辐射工作人员的外照射受照剂量计算结果见表 5-6。

表 5-6 装置正常运行期间工作人员受照剂量计算结果

工作人员岗位	剂量率水平, $\mu$ Sv/h			受照时间, h	受照剂量, mSv/a
	瞬发辐射	控制室	1.09		
控制室操作	瞬发辐射	控制室	1.09	6	6.54E-03
L1 层诊断小室维检	感生放射性	设备区	1.59E-01	400	6.36E-02
热室操作	感生放射性	热室外	50	50	2.50E+00
活化部件/固废转运	感生放射性	转运容器外	10	40	4.00E-01
氟处理中心	感生放射性	操作位	1	600	6.00E-01

备注：现场控制室工作人员受照时间按 BEST 放电时间估计，BEST 放电时间按年操作次数估计最多 6h/a。L1 层诊断小室维护检修工作人员受照时间按每年 50 天，每天 8 小时估算，最多 400h/a。

根据上述计算结果可知，热室操作的辐射工作人员年受照剂量最大，为 2.5mSv/a，低于辐射工作人员剂量约束值 5 mSv/a。

## 5.2.3 公众的受照剂量估算

本项目装置正常运行期间，对公众的辐射影响主要来自装置运行期间产生的瞬发辐射直接外照射以及气态流出物（主要含  $^3\text{H}$ 、 $^{14}\text{C}$ 、 $^{16}\text{N}$  和  $^{41}\text{Ar}$ ）的排放。公众距离主机大厅辐射源项较远，因此公众因外照射的受照剂量可忽略不计，主要考虑气载流出物的辐射影响。

### 5.2.3.1 气载流出物源项

气载流出物主要废气源项详见下表。

表 5-7 主要气载流出物排放源项

序号	核素	年排放量, Bq
1	H-3	1.45E+13
2	C-14	1.45E+09
3	Ar-41	1.03E+05

备注: 1. H-3 按实际控制排放浓度 1E+06 Bq·m<sup>-3</sup>、最大运行排放时间 4000 h 计算得到。  
2. C-14、Ar-41 年排放量由表 3-19 无净化条件下停机后的放射性核素浓度、每年排放 4 次估算得到。

### 5.2.3.2 放射性气体排放造成的辐射剂量

本次评价使用 IAEA NO.19 报告《Generic Models for Use in Assessing the Impact of Discharges of Radioactive Substances to the Environment》中推荐的简单稀释模式, 估算装置正常运行工况下放射性气态流出物的影响, 放射性气体对公众的照射途径主要考虑空气浸没外照射和吸入内照射。计算时主要关注排风口近距离范围内公众的受照剂量。

表 5-8 装置放射性排风口参数

排风高度, m	最靠近关注点的建筑物的最大截面积 A <sub>b</sub> , m <sup>2</sup>	临近最高建筑物高度 H <sub>b</sub> , m
70.8	1275	51

#### 5.2.3.2.1 空气浸没外照射

(1) 与排风口近距离范围内的公众,  $x \leq 2.5 \sqrt{A_b}$  ( $x \leq 89.3\text{m}$ )

根据 IAEA NO.19 号报告, 当  $x \leq 2.5 \sqrt{A_b}$  时, 关注点处地面空气浓度可由式 5-3 计算:

$$C_{a,i} = \frac{P_p Q_i}{\pi u_a H_b K} \quad (5-3)$$

式中,

$C_{a,i}$  为距离排风口  $x$  米处核素  $i$  的地面空气浓度, Bq/m<sup>3</sup>;

$Q_i$  为放射性核素  $i$  的年均排放率, Bq/s;

$P_p$  为一年中风吹向接收点所在扇形方位  $p$  的时间份额，保守的取为 0.25；

$u_a$  为释放高度上年平均风速，m/s，取值按庐阳区年平均风速取 2.7m/s；

$K$  为经验常数，m，取值  $K=1m$ ；

(2) 与排风口距离  $x > 2.5\sqrt{A_b}$  ( $x > 89.3$  m)

根据 IAEA NO.19 号报告，当  $x > 2.5\sqrt{A_b}$  时，关注点处地面空气浓度可由式 5-4 计算：

$$C_{a,i} = \frac{P_p B Q_i}{u_a} \quad (5-4)$$

式中：

$B$  为在下风距离  $x$  处的高斯扩散因子， $1/m^2$ ；由下式 5-5 计算。

$\sigma_z$  为垂直扩散参数，m，

$$B = \frac{16}{\sqrt{2\pi^3}} \frac{1}{x \sum z}, \quad \sum z = (\sigma_z^2 + A_b / \pi)^{0.5}, \quad \sigma_z = \frac{0.06x}{\sqrt{1+0.0015x}} \quad (5-5)$$

各关注点处地面空气浓度计算结果列于表 5-9。

**表 5-9 各关注点处地面空气浓度计算结果，Bq/m<sup>3</sup>**

关注点	<sup>3</sup> H	<sup>14</sup> C
聚变堆主机关键系统综合研究设施园区	1.67E+00	1.67E-04
采摘园	2.74E+00	2.74E-04
躬耕小筑	1.12E+00	1.13E-04
合肥综合性国家科学中心能源研究院	7.51E+00	7.52E-04
合肥滨湖投资控股集团有限公司用地	1.45E+00	1.45E-04
风景村委会	9.03E-01	9.05E-05

空气浸没外照射剂量可由下式 5-6 计算：

$$H_A = t \cdot S_f \cdot C_{a,i} \cdot G_A \cdot T \quad (5-6)$$

式中： $H_A$  为空气浸没照射所致年受照剂量，Sv/a；

t 为年受照时间，s/a；取值 3.15E+07s；

$S_F$  为建筑物屏蔽因子，本次评价取 1；

G 为各放射性核素的空气浸没外照射剂量转换因子，见表 5-10，取值来自 IAEA NO.19；

T 为居留因子。

表 5-10 剂量转换因子

核素	剂量转换因子	
	空气浸没, (Sv/s)/(Bq/m <sup>3</sup> )	吸入, Sv/ Bq
<sup>3</sup> H	3.31E-19	4.50E-11
<sup>14</sup> C	2.24E-19	2.00E-09
<sup>41</sup> Ar	6.50E-14	—

空气浸没外照射剂量计算结果见表 5-11。

表 5-11 空气浸没外照射剂量计算结果，Sv/a

关注点	<sup>3</sup> H	<sup>14</sup> C	<sup>41</sup> Ar	总计
聚变堆主机关键系统综合研究设施园区	1.74E-11	1.18E-15	2.43E-14	1.75E-11
采摘园	2.86E-11	1.93E-15	3.98E-14	2.86E-11
躬耕小筑	1.17E-11	7.96E-16	1.64E-14	1.18E-11
合肥综合性国家科学中心能源研究院	7.84E-11	5.31E-15	1.09E-13	7.85E-11
合肥滨湖投资控股集团有限公司用地	1.51E-11	1.02E-15	2.11E-14	1.51E-11
风景村委会	9.43E-12	6.39E-16	1.32E-14	9.44E-12

### 5.2.3.2.2 吸入内照射

吸入内照射剂量可由式 5-7 计算：

$$H_{h,i} = t \cdot C_{a,i} \cdot u \cdot g_{h,i} \cdot T \quad (5-7)$$

式中：

$H_{hi}$  为年吸入内照射待积有效剂量，Sv/a；

$u$  为公众个人正常情况下的呼吸率， $m^3/h$ ，成人： $1.2m^3/h$ ；

$g_{hi}$  为吸入放射性核素  $i$  产生的待积有效剂量转换因子，Sv/Bq；

吸入内照射剂量计算结果见表 5-12。

表 5-12 吸入内照射剂量计算结果，Sv/a

关注点	$^3H$	$^{14}C$	总计
聚变堆主机关键系统综合研究设施园区	7.91E-07	3.52E-09	3.16E-06
采摘园	1.29E-06	5.76E-09	5.18E-06
躬耕小筑	5.32E-07	2.37E-09	2.13E-06
合肥综合性国家科学中心能源研究院	3.55E-06	1.58E-08	1.42E-05
合肥滨湖投资控股集团有限公司用地	6.85E-07	3.05E-09	2.74E-06
风景村委会	4.27E-07	1.90E-09	1.71E-06

### 5.2.3.2.3 总受照剂量

放射性气体排放所致关注点处公众总受照剂量计算结果列于表 5-13。由结果可知，放射性气体排放所致关注点处公众总受照剂量很小，项目运行期间对公众所致的最大个人剂量为  $3.57E-03mSv/a$ （合肥综合性国家科学中心能源研究院），远低于公众剂量约束值  $0.1mSv/a$ 。

表 5-13 放射性气体排放所致关注点处公众总受照剂量计算结果，Sv/a

关注点	$^3H$	$^{14}C$	$^{41}Ar$	总计
聚变堆主机关键系统综合研究设施园区	7.91E-07	3.52E-09	2.43E-14	7.94E-07
采摘园	1.29E-06	5.76E-09	3.98E-14	1.30E-06
躬耕小筑	5.32E-07	2.37E-09	1.64E-14	5.34E-07
合肥综合性国家科学中心能源研究院	3.55E-06	1.58E-08	1.09E-13	3.57E-06
合肥滨湖投资控股集团有限公司用地	6.85E-07	3.05E-09	2.11E-14	6.88E-07
风景村委会	4.27E-07	1.90E-09	1.32E-14	4.29E-07

## 5.3 事故工况辐射环境影响分析

### 5.3.1 事故列表

为确保 BEST 装置安全运行, BEST 设计考虑事故工况可能引发的放射性泄漏风险, 表 5-14 列出 BEST 初始事件事故列表, 并总结了事故的发生原因、可能产生的后果、设计的应急措施和预防措施。事故的选择主要考虑以下几个方面:

- 1) 装置真空室和真空室延伸管道可能发生的破裂事故(序号 1 和 2): 该事故将存在破坏真空室对其中含氙燃料和放射性产物的包容功能可能性, 因此纳入主要事故列表。一方面 BEST 装置在运行过程中真空室内的可迁移氙量将控制不超过 [REDACTED] 另一方面真空室在等离子体运行放电期间内部真空度一般不超过 1Pa, 即便发生破口事故, 在内部真空程度达到外部压力之前都不会发生内部物质向外迁移。在此过程中等离子体放电所需的真空条件被破坏, 因此等离子体放电终止, 即聚变反应将不可能再发生。此外, 真空室主体之外的杜瓦将作为另一层包容屏障, 维持较高的真空度, 以确保超导磁体所需的低温环境。此类事故不作为引发最恶劣放射性后果的包络性事故考虑。
- 2) 超导磁体事故(序号 3 和 4): 超导磁体失超或者线圈短路将引发的磁体电流响应将会导致等离子体约束或者位形或者电流无法维持, 以致于等离子体被停止。针对该类事故的预防措施包括失超保护系统、过电保护系统, 即便考虑极端工况预防措施没有及时响应和启动, 最坏的工况将是磁体系统被损坏, 或液氦泄漏至杜瓦或者主机大厅环境中, 基于 BEST 装置的运行特点, 这类事故不作为引发最恶劣放射性后果的包络性事故考虑。
- 3) 杜瓦破裂事故(序号 5): 杜瓦是真空室之外的另一层真空包容屏障, 无论是外力破坏或者是磁能失控事故引发电弧事故损坏杜瓦密封性, 都不产生直接放射性物质泄漏后果, 因此不作为引发最恶劣放射性后果的包络性事故考虑。
- 4) 屏蔽系统(序号 6): 屏蔽系统一般是大体积固定部件, 运行期间将通过辐射防护安全措施降低人为破坏屏蔽系统的可能性, 此外, 人员可达之处的剂量水平已在其他

章节给出，此处不作为引发最恶劣放射性后果的包络性事故考虑。

- 5) 热室包容破坏 (序号 7): 基于 BEST 装置维修策略和热室的功能定义, 通过遥操作对真空室内部部件进行局部维修, 限制热室中最大氙量不超过 1g, 因此不作为引发最恶劣放射性后果的包络性事故考虑。对于维修期间从真空室开启, 到将真空室内部部件转移至热室全过程中含氙气和水蒸汽的排放路径总结见图 5-3。
- 6) 外界自然灾害 (序号 8): BEST 装置外部自然灾害主要考虑地震工况, 建筑主体、真空室和杜瓦均针对 BEST 项目所处地理位置的地震频率加速度进行了抗震设计, 评估结果将在 5.3.2 小节给出。
- 7) 失去电源事故 (序号 9): BEST 装置需要持续供电才能维持等离子体状态, 任何意外断电将会导致等离子体状态无法维持, 运行将终止。考虑到氙燃料循环、处理和安全除氙持续运行的必要性, 配备了 UPS 电源和柴油机发电机组保证氙燃料的及时回收至氙处理中心。因此不作为引发最恶劣放射性后果的包络性事故考虑。
- 8) 火灾 (序号 10): BEST 项目针对火灾消防开展了安全措施论证, 因此不作为引发最恶劣放射性后果的包络性事故考虑。
- 9) 加料系统氙管线破裂 (序号 11): 对于加料系统氙工艺管线破裂事故, 将导致加料无法持续, 以致于无法维持氙氙燃烧等离子体状态和氙氙聚变反应, 因此其最恶劣的后果将是氙向管路外的泄漏。对于 BEST 实验装置, 等离子体参数没有达到预期, 等离子体放电过程将被终止, 同时停止加料操作。此外, BEST 装置中氙最大使用量的局限性导致了加料过程是少量逐渐加入的模式, 因此不会出现大量氙向外泄漏的情况。此处不作为引发最恶劣放射性后果的包络性事故考虑。
- 10) 对于氙处理中心可能存在的事故工况 (序号 12、13 和 14), 将在 5.3.3 小节进行介绍。

表 5-14 BEST 初始事件事故列表

序号	事故名称	事故描述	可能原因	后果	应急措施	预防措施
1	失真空事故	真空室密封或真空边界延伸管道漏气，空气向真空室内流	阀门密封性失效或者失控无法关闭	等离子体放电停止，压力升高至气体和粉尘外泄至真空室外-杜瓦/port cell-主机大厅	真空检漏维修； 监测辐射剂量； 启动事故应急预案	负压； 真空室压力抑制系统
2	失冷和失流	冷却剂泄漏（真空室内、外）	冷却管道出现破口	冷却剂泄漏； 如果在真空室外泄漏，导致放射性向外泄漏	停止等离子体； 监测辐射剂量； 启动事故应急预案	关闭阀门，降低冷却剂泄漏量； 如果监测到大气污染，启动除氙系统
3	超导磁体磁能失控事故	磁能失控泄放导致真空室或延伸管道损坏	失超失控或电弧事故或线圈短路	磁能泄放失控导致磁体损坏或真空室边界损坏	停止等离子体；	失超保护系统； 过电保护系统
4	超导磁体冷却剂液氦泄漏和流失	压力升高	氦冷却管道破裂	氦泄漏至杜瓦中或主机大厅环境中导致压力升高	停止等离子体；	失超保护系统； 快速放电系统启动
5	杜瓦破裂事故	杜瓦内真空环境受到破坏	外力破坏或磁能失控导致电弧事故损坏杜瓦	无直接放射性泄漏后果	停止等离子体；	失超保护系统； 过电保护系统； 快速放电系统启动
6	屏蔽系统	运行期间中子光子辐照；停机期间衰变光子辐照	人为因素	瞬时剂量或停堆剂量受照提高	启动相应事故应急预案	控制降低人为误操作风险
7	热室包容破坏	薄弱联通贯穿件破口或破裂导致热室安全包容损坏	隔离阀失效，外力因素或长期疲劳	热室房间之间交叉污染，放射性转移和泄露	封闭热室，疏散人员； 除氙系统启动；	剂量监测；除氙系统



8	外界自然灾害	地震、飞机坠落、台风等	/	关键部件和系统已进行设计评估	启动相应事故应急预案	提高设计裕量； 避免相关自然灾害带来的放射性后果
9	失去电源事故	停电事故	外界其他原因导致意外断电	无法维持等离子体，运行终止； 无法继续加料，燃料循环终止	迅速启动应急柴油机发电	配备 UPS 电源、柴油机发电机组
10	火灾	引发爆炸以致于放射性向外泄漏的工况	电线短路	释放到房间内的氙的排放将被除氙系统缓解	除氙系统启动运行	火灾探测； 氙剂量监测； 除氙系统
11	等离子体加料系统	氙向外泄漏或者氢同位素向外泄漏	加料管道破裂	燃料氙向主机大厅泄漏	员工疏散；通过监测系统阈值响应启动除氙系统	双层管道； 监测系统； 除氙系统
12	氙处理管路损坏	氙向管道外泄漏	管道破裂	氙向管道外泄漏，导致房间氙浓度超标	员工疏散，封闭房间	阀门关闭； 监测系统； 启动除氙
13	氙处理系统失效	氙存储系统或同位素分离系统失效导致氙向外非正常释放	某一个部件或者设备失效	一个部件失效导致氙向设备所在房间中释放	氙释放后启动除氙系统；人员疏散	隔离阀或其他隔离系统； 二级包容； 氙监测
14	氙化水泄漏	水除氙系统管道破裂或者氙化水存储罐破裂导致含氙水在操作区域排放	外力导致管道破裂	放射性向主机大厅内或氙处理中心内泄漏	氙释放后启动除氙系统；人员疏散	隔离阀关闭； 氙监测

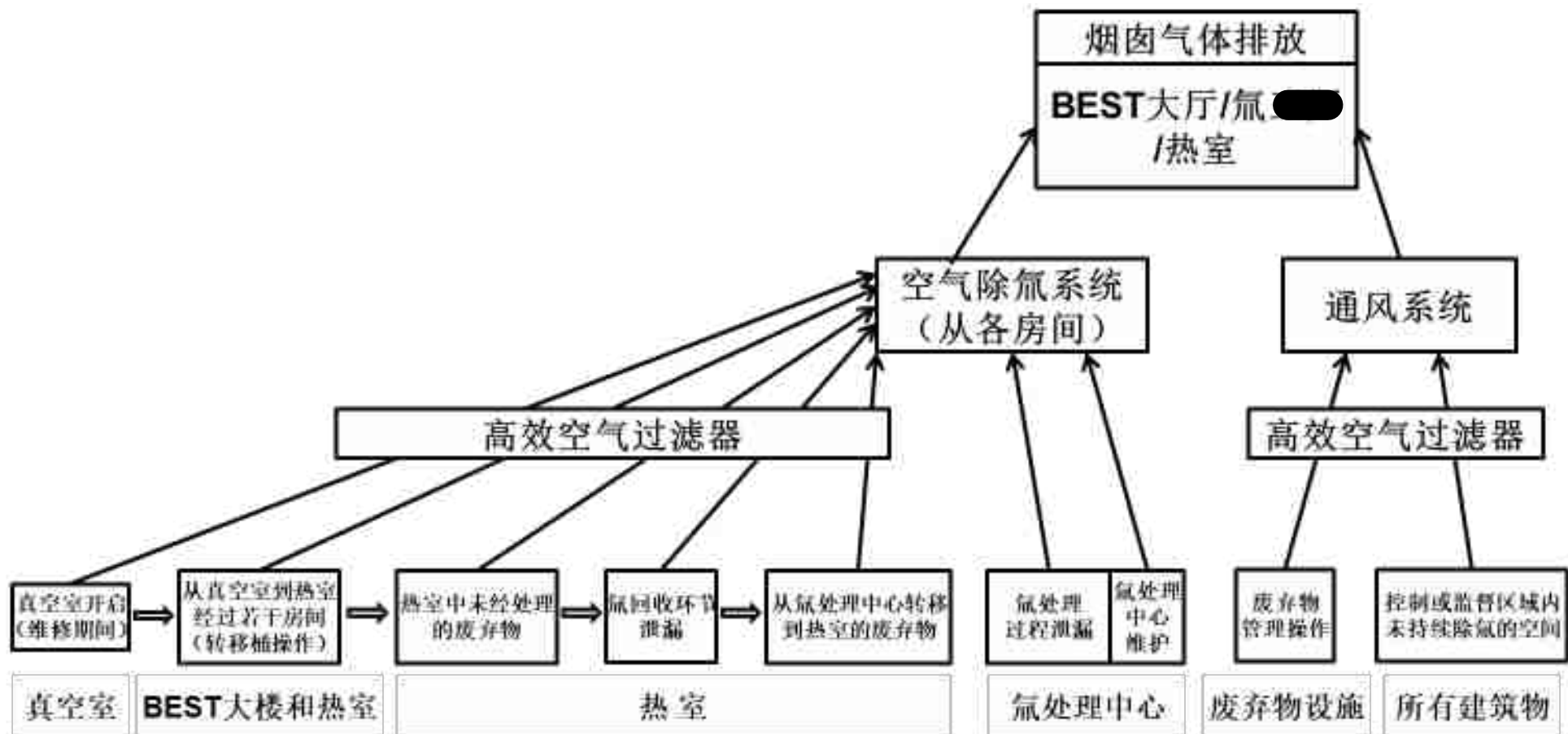


图 5-3 真空室内部部件至热室转运过程中含氡气的排放路径

## 5.3.2 地震工况安全分析

### 5.3.2.1 地震工况下建筑物主体结构分析

#### 5.3.2.1.1 地震作用取值标准

BEST 项目抗震设防烈度为 7 度，BEST 抗震设防烈度为 7 度，设计基本地震加速度为 0.10g。小震、中震、大震，工程场地地表水平向地震动峰值加速度及反应谱参数值均采用安评结果，且不低于本地区抗震设防烈度要求，如下表 5-15 所示。

表 5-15 地震作用取值参数

地震影响	概率值	$\alpha_{max}$	$\alpha_{max}$	$T_1$ (s)	$T_g$ (s)	$\beta$ (T)	$\gamma$	$A_{max}$ (gal)
多遇地震	50 年 63%	0.095 (增大 19%)	0.08	0.1	0.35	2.5	0.9	38
设防地震	50 年 10%	0.288 (增大 25%)	0.23	0.1	0.35	2.5	0.9	115
罕遇地震	50 年 2%	0.540 (增大 8%)	0.5	0.1	0.4	2.5	0.9	220

竖向地震影响系数最大值（水平地震影响系数最大值\*0.65）： 0.06175（小震），0.1872（中震）、0.351（大震）。

根据不同部位构件的重要性，参照《高层建筑混凝土结构技术规程》（JGJ3-2010）以及《建筑抗震设计规范》（GB50011-2010），对构件的抗震性能目标进行确定。

BEST 建筑物主体结构分析以罕遇地震作为整体计算结果输出评估。分析目标为罕遇地震条件下的主机大厅核心区内混凝土剪力墙、框架梁柱、连梁，主机大厅核心区外底部加强区混凝土剪力墙、框架柱，混凝土转换梁柱以及#5 号楼整体隔振基础等关键构件绝大部分处于无损或轻微损坏状态。

#### （1） 楼层位移

大震结构的层间位移角最大值见下表。

表 5-16 大震弹塑性层间位移角

工程	方向	大震弹塑性层间位移角	限值
RCBL(Tg0.40)	X	1/240	4%
	Y	1/284	6%
Tibet, Iran, NO.139(Tg0.39)	X	1/322	4%
	Y	1/407	4%
Chi-Chi, Taiwan-04, NO.2097(Tg0.41)	X	1/240	4%
	Y	1/184	4%

两个方向最不利工况下层间位移角分别为 1/240 (X) 和 1/284 (Y)，满足 1/200 的限值要求，各楼层位移角及位移分布见下图。

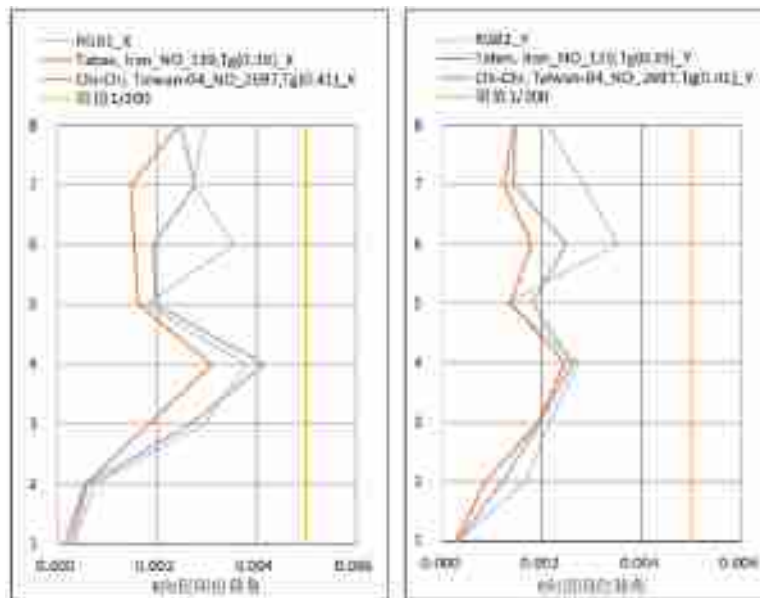


图 5-4 X\Y 向层间位移角

(2) 典型剪力墙和框柱位移

选取典型位置剪力墙角点和框柱，如下图所示。

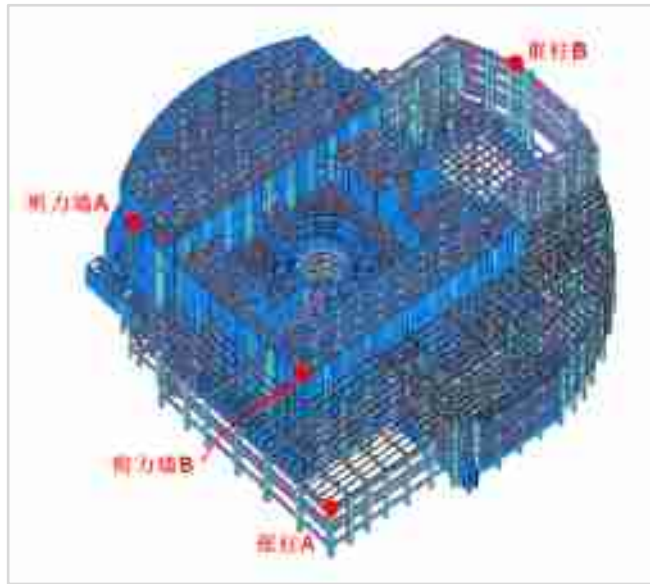


图 5-5 典型框柱和剪力墙位置

考察在大震弹塑性时程度和小震反应谱工况下的位移情况，其中大震弹性塑性时取三条地震波的网络值，结果如下表所示。

表 5-17 典型剪力墙和框柱大震弹塑性程度和小震反应谱工况位移对比

材料类	方向	大震弹塑性时位移	小震反应谱位移	大震弹塑性/小震 位移比
		mm	mm	
框柱 A	X	41.30	5.02	8.2
	Y	21.90	2.14	10.0
框柱 B	X	33.30	4.46	7.4
	Y	40.00	7.56	6.5
剪力墙 A	X	6.54	1.61	4.2
	Y	4.73	1.22	3.9
剪力墙 B	X	5.30	1.60	3.3
	Y	6.87	1.47	4.9

总结：由上表可知，框柱大震弹塑性位移与小震反应谱位移的比值，要远大于剪力墙弹塑性位移与小震反应谱位移的比值，说明大震下框架的塑性开展情况要大于剪力墙，大震下结构的弹塑性层间位移由框架部分的位移控制。

### (3) 楼层剪力

不同工况下的楼层剪力如下图所示。

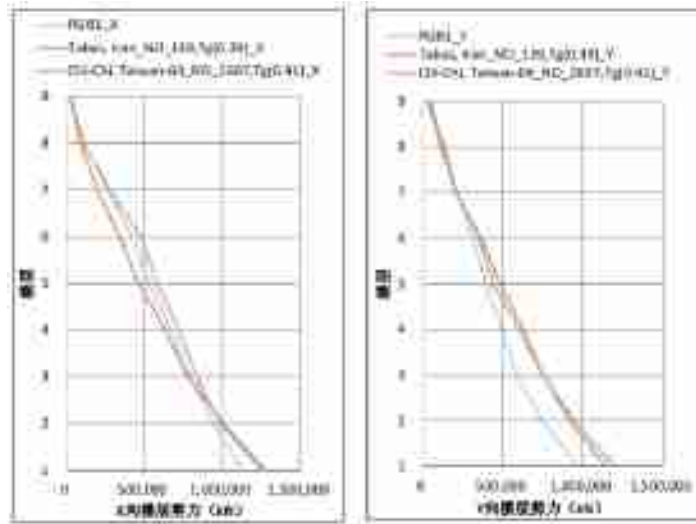


图 5-6 X\Y 向楼层剪力

### 5.3.2.1.2 地震载荷下的建筑物主体结构性能分析评价

BEST 在 SSG 软件构件损伤分类如下图所示。

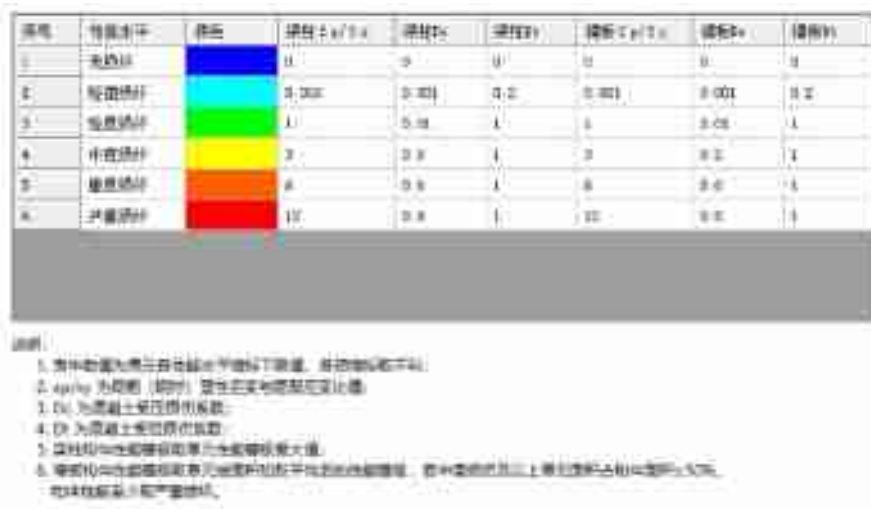


图 5-7 SSG 软件构件损伤示意图

#### (1) 框架梁

在罕遇地震作用下, 绝大部分框架梁均处于无损坏或轻微损坏状态, 其中仅有 1% 左右的框架梁为轻度损坏状态, 而几乎无框架梁为中度及以上损坏, 优于预定的抗震性能目标, 分析结果如下图所示。



图 5-8 梁性能包络结果统计

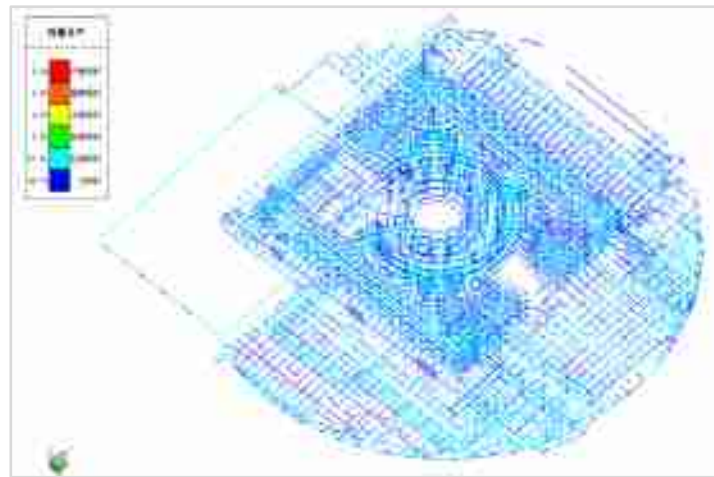


图 5-9 1~3 层框架梁性能水平



图 5-10 4~5 层框架梁性能水平

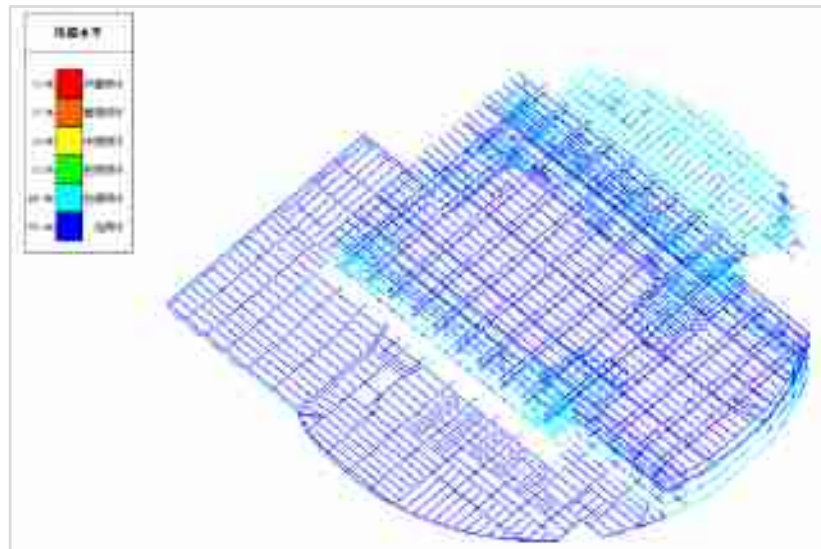


图 5-11 6~8 层框架梁性能水平

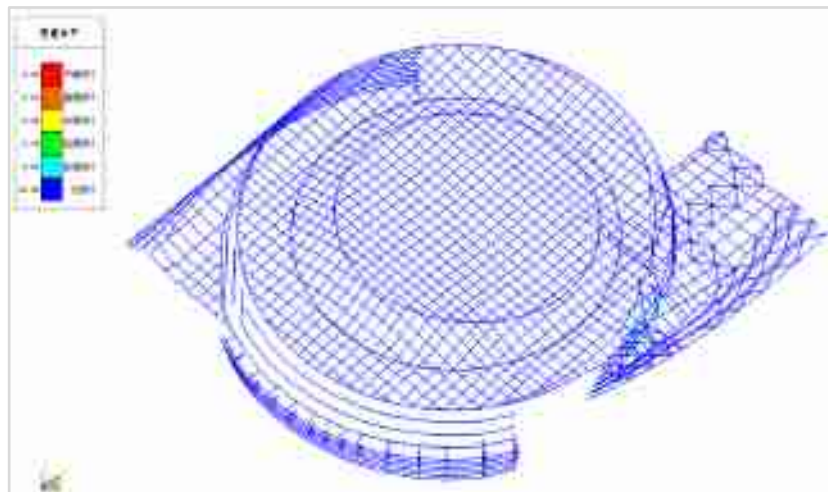


图 5-12 屋盖层钢梁性能水平

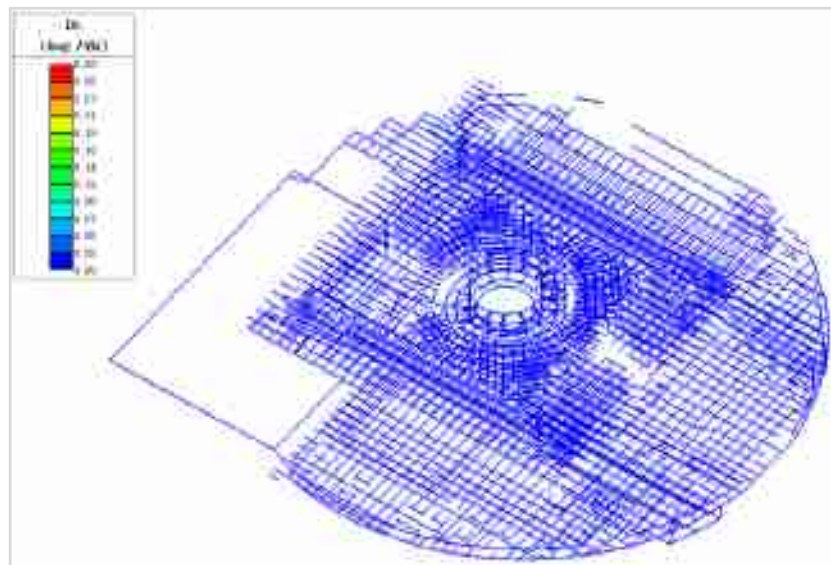


图 5-13 1~3 层框架梁损伤



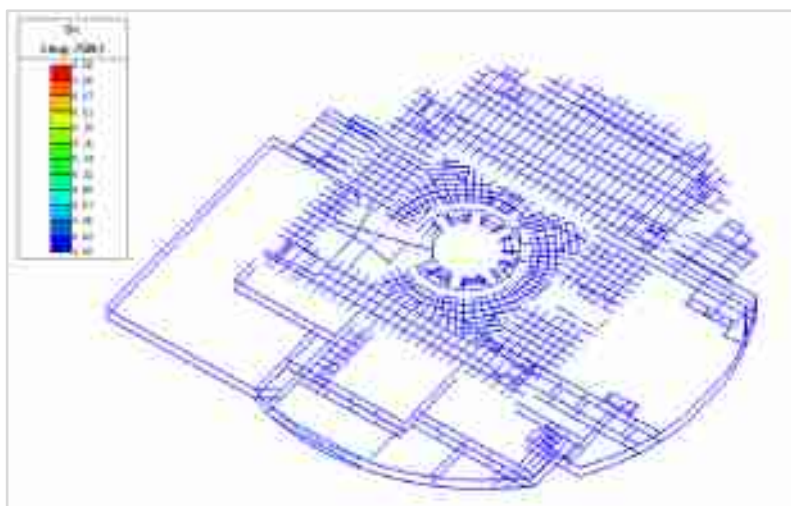


图 5-14 4~5 层框架梁损伤

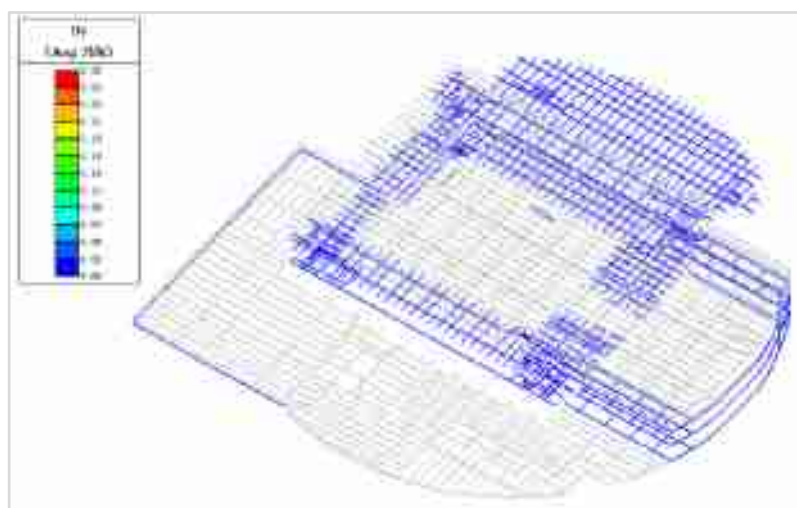


图 5-15 6~8 层框架梁损伤

## (2) 框架柱

在罕遇地震作用下，绝大部分框柱处于无损坏或轻微损坏状态，仅有 2%左右的框架柱处于轻度损坏状态，而几乎无框架柱为中度及以上损坏，优于预定的抗震性能目标。

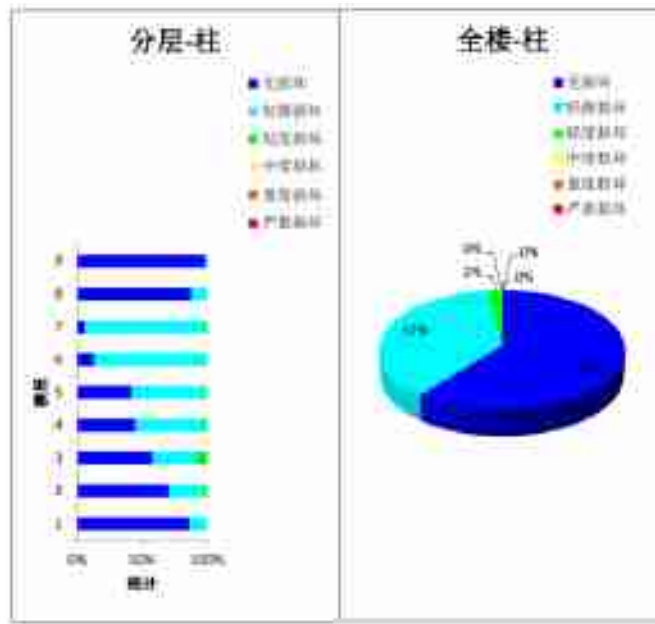


图 5-16 柱性能统计

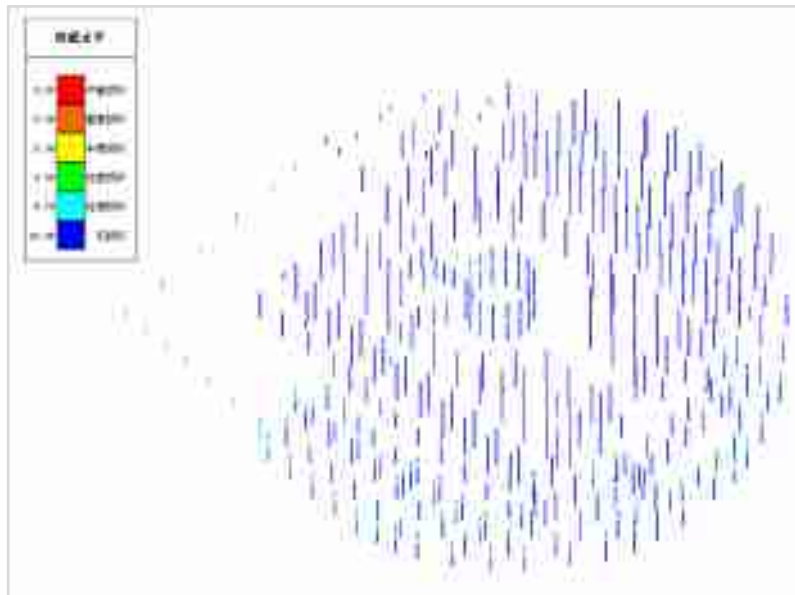


图 5-17 1~3 层框架柱性能水平

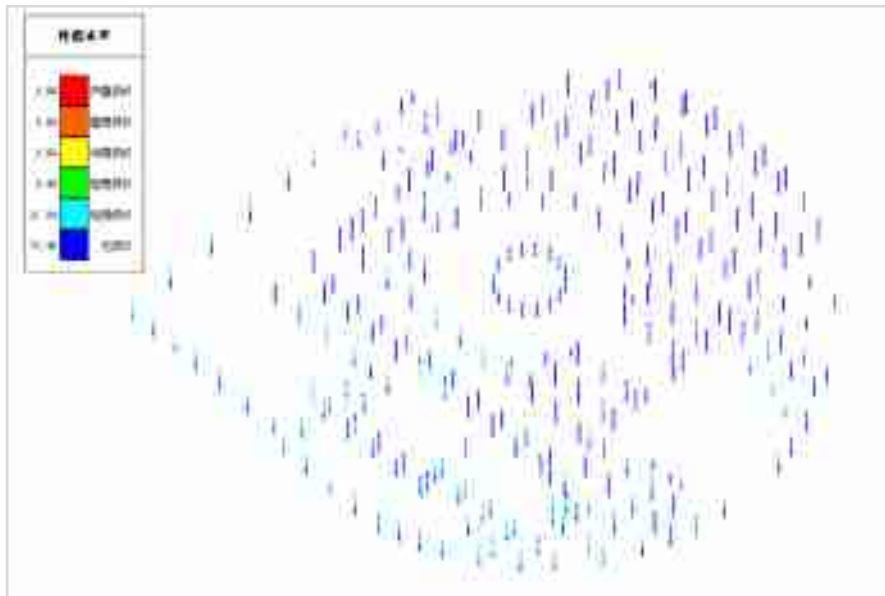


图 5-18 4~5 层框架柱性能水平

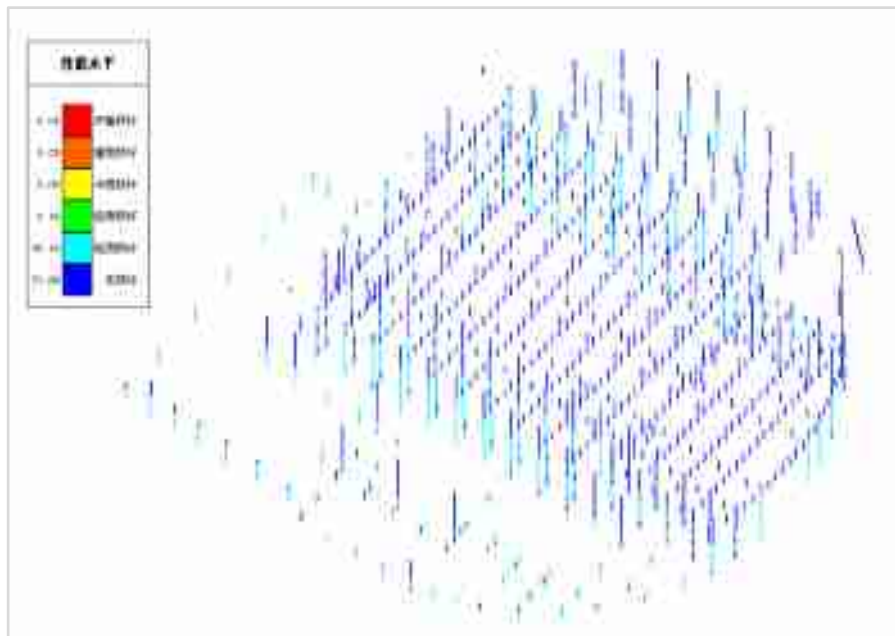


图 5-19 6~钢屋盖层框架柱性能水平

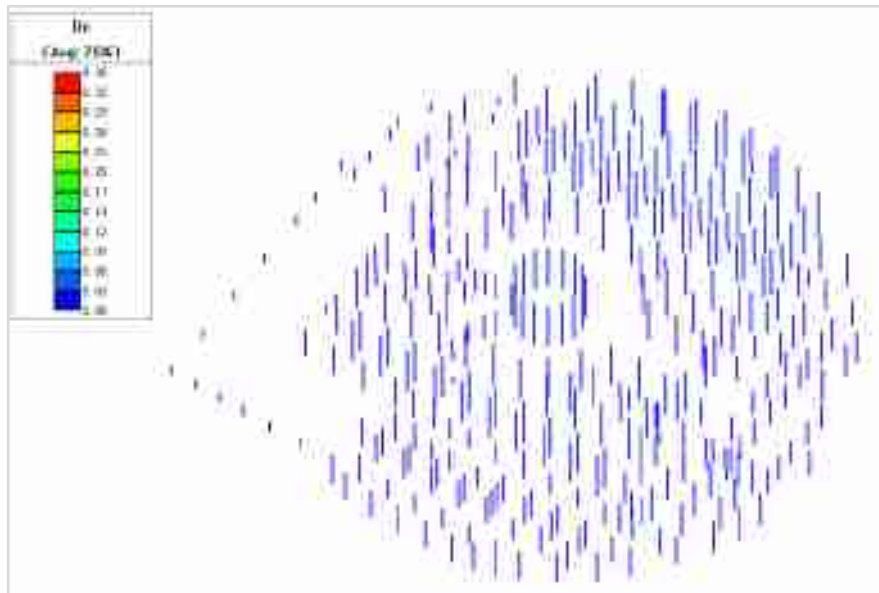


图 5-20 1~3 层框架柱损伤

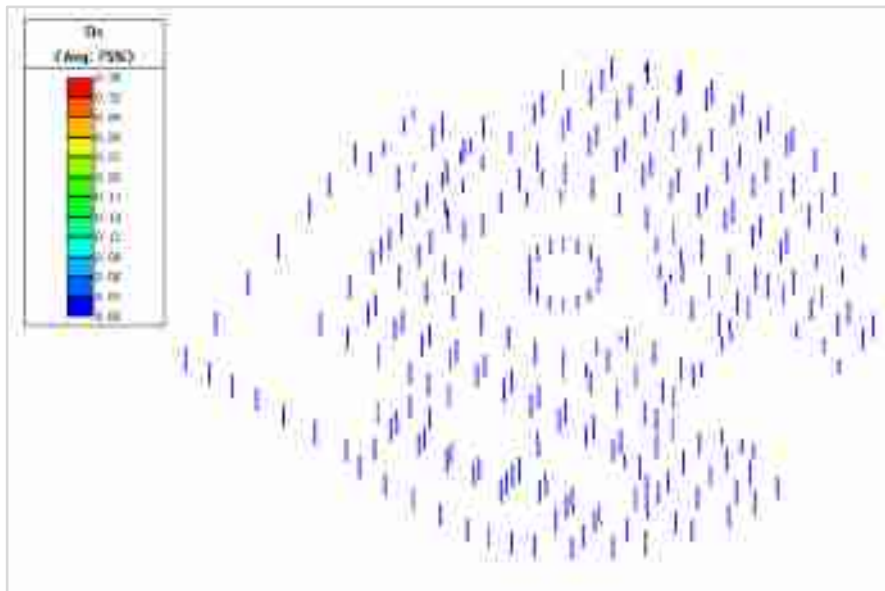


图 5-21 4~5 层框架柱损伤

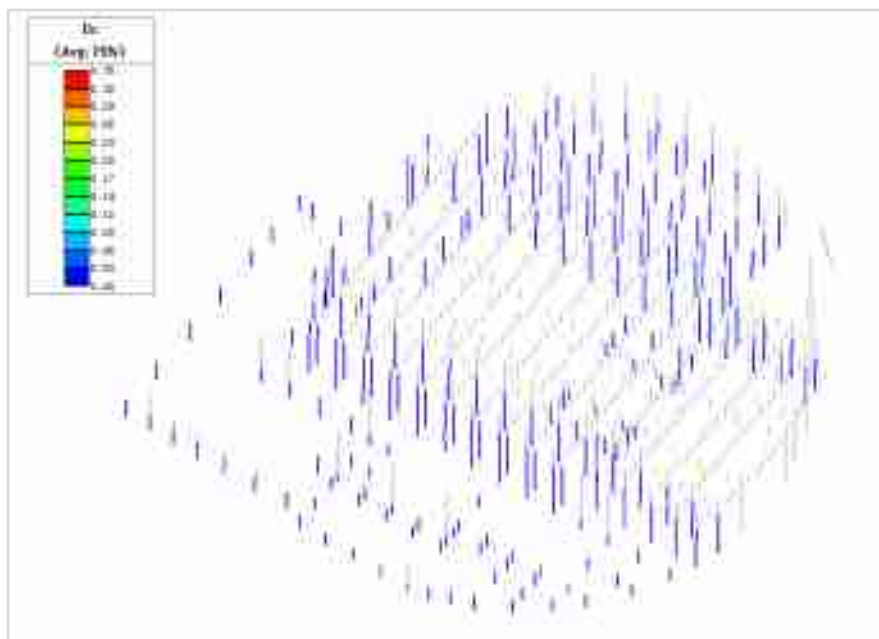


图 5-22 6~钢屋盖层框架柱损伤

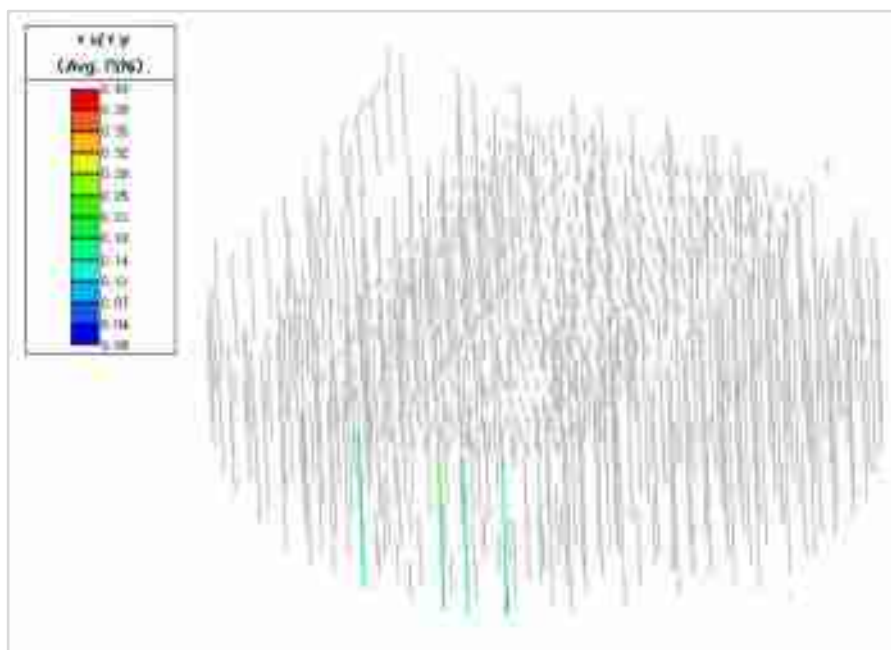


图 5-23 钢骨柱钢材应变/屈服应变

### (3) 剪力墙及连梁

在罕遇地震作用下，绝大部分剪力墙处于无损坏或轻微损坏状态，仅有 1%左右的剪力墙处于轻度损坏状态，而几乎无剪力墙为中度及以上损坏，满足预定的抗震性能目标。

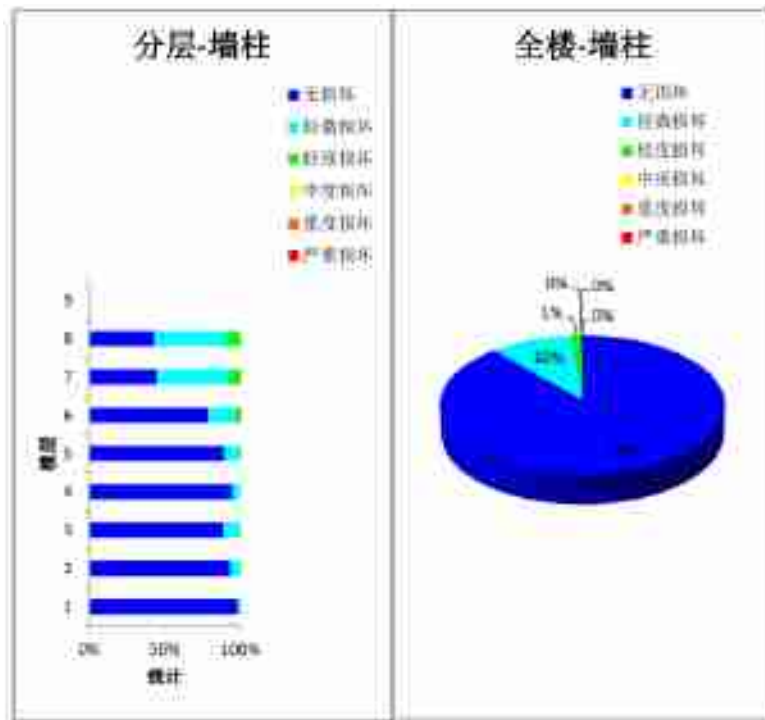


图 5-24 剪力墙性能包络结果统计

在罕遇地震作用下，绝大部分连梁处于无损坏或轻微损坏状态，仅有 4%左右的连梁处于轻度损坏状态，而几乎无连梁为中度及以上损坏，满足预定的抗震性能目标。



图 5-25 剪力墙及连梁性能包络结果统计

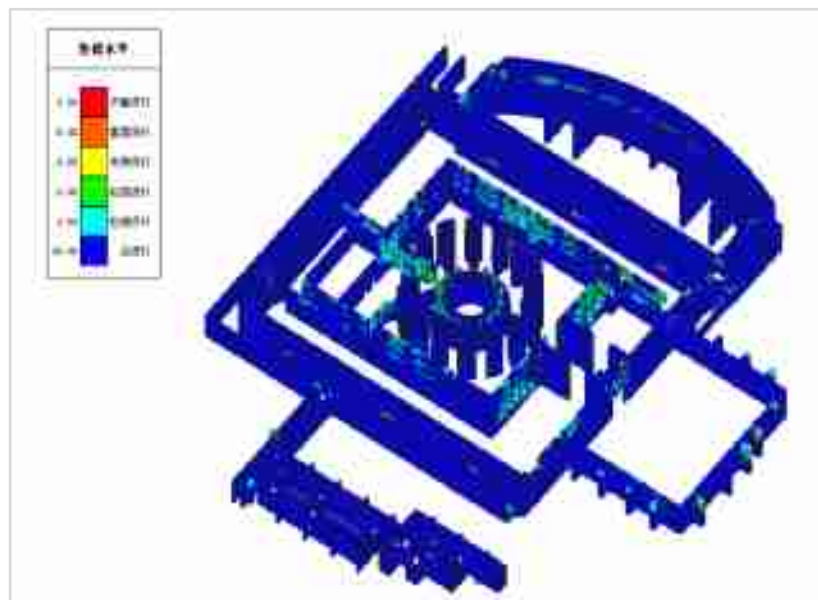


图 5-26 1~3 层剪力墙及连梁性能水平

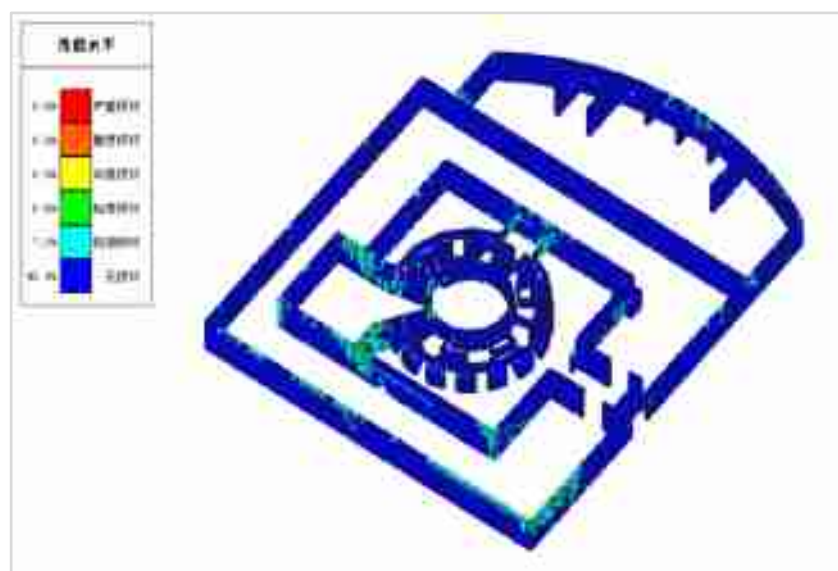


图 5-27 4~5 层剪力墙及连梁性能水平

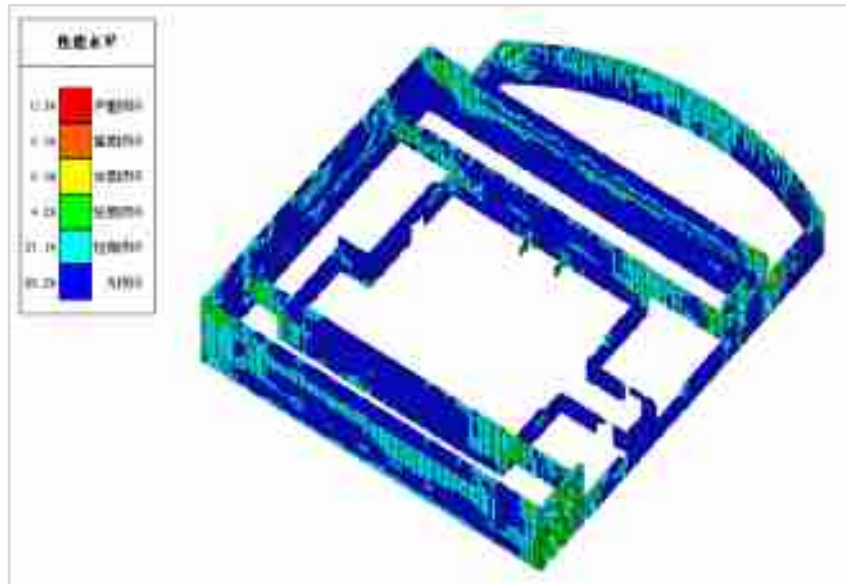


图 5-28 6~8 层剪力墙及连梁性能水平

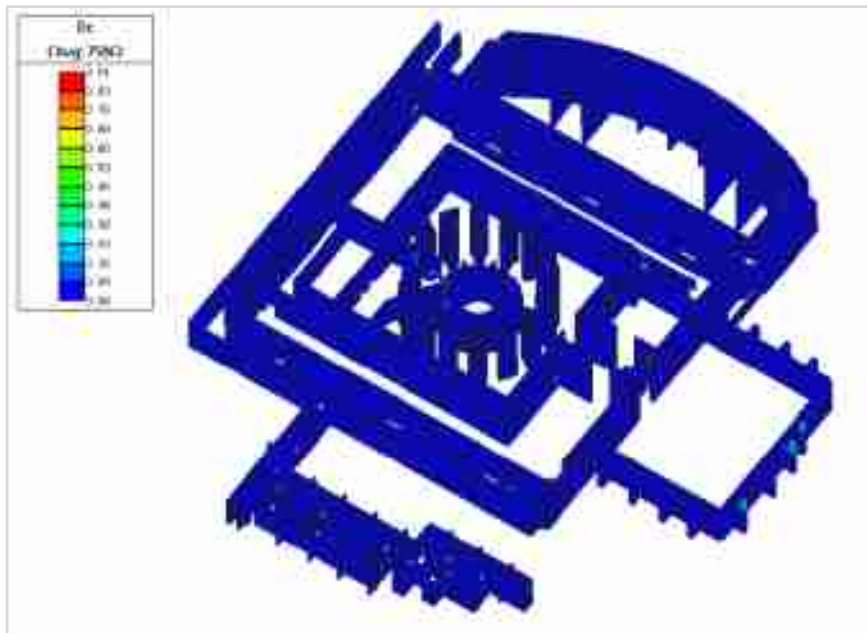


图 5-29 1~3 层剪力墙及连梁损伤





图 5-30 4~5 层剪力墙及连梁损伤

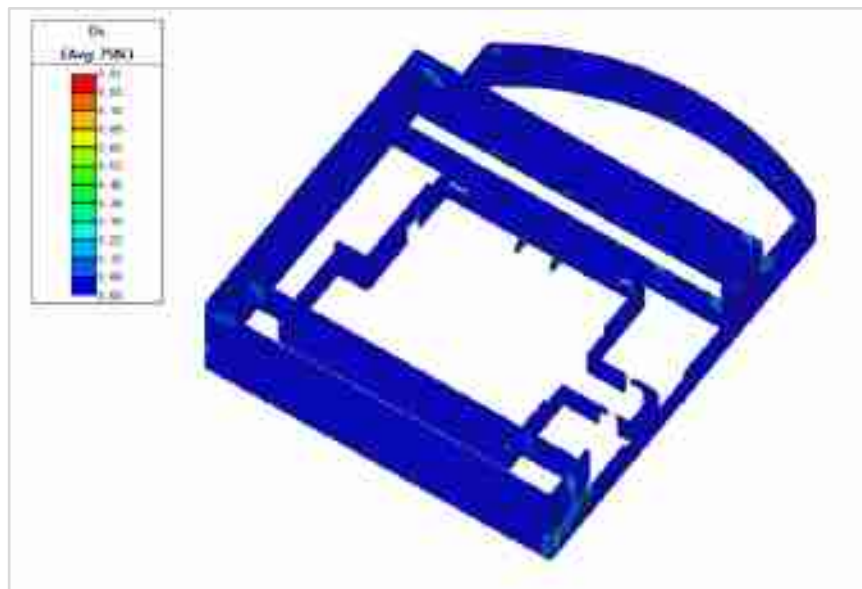


图 5-31 6~8 层剪力墙及连梁损伤

通过 SAUSAGE 对本工程进行罕遇地震下的动力弹塑性时程分析，结果表明：

1) 结构在三组罕遇地震波作用下最大弹塑性层间位移角包络值 X 向约为 1/240，Y 向约为 1/284，满足规范 1/200 的限值要求；

2) 如结构损伤结果所示，主机大厅核心区内混凝土剪力墙、框架梁柱、连梁，主机大厅核心区外底部加强区混凝土剪力墙、框架柱，混凝土转换梁柱、与钢屋盖柱相连的混凝土框架柱、错层处框架柱、屋面钢桁架、钢屋盖柱、钢屋盖主梁等关键构件绝大

部分处于无损坏或轻微损坏状态，少部分处于轻度损坏状态，均可满足性能目标 C 的性能要求；

3) 一般部位剪力墙、框架柱基本处于无损坏~轻度损坏状态，高于预定性能目标；

4) 一般部位框架梁、连梁、钢屋盖其余梁基本处于无损坏~轻度损坏状态，高于预定性能目标。

#### (4) 楼板地震应力分析性能评估

针对本结构平面凹凸不规则，楼板开洞较多，开洞面积大，局部楼板宽度小、连接薄弱的情况，为确保地震作用下楼板能够可靠有效传递地震水平力，保证结构的整体抗侧性能，按照全楼弹性楼板假定进行多遇地震、设防地震下的楼板应力分析。楼板的性能目标为“小震弹性，中震不屈服”。如下图所示为中震下的建筑主体楼板应力分析结果。（注：不屈服即为不损伤基础）

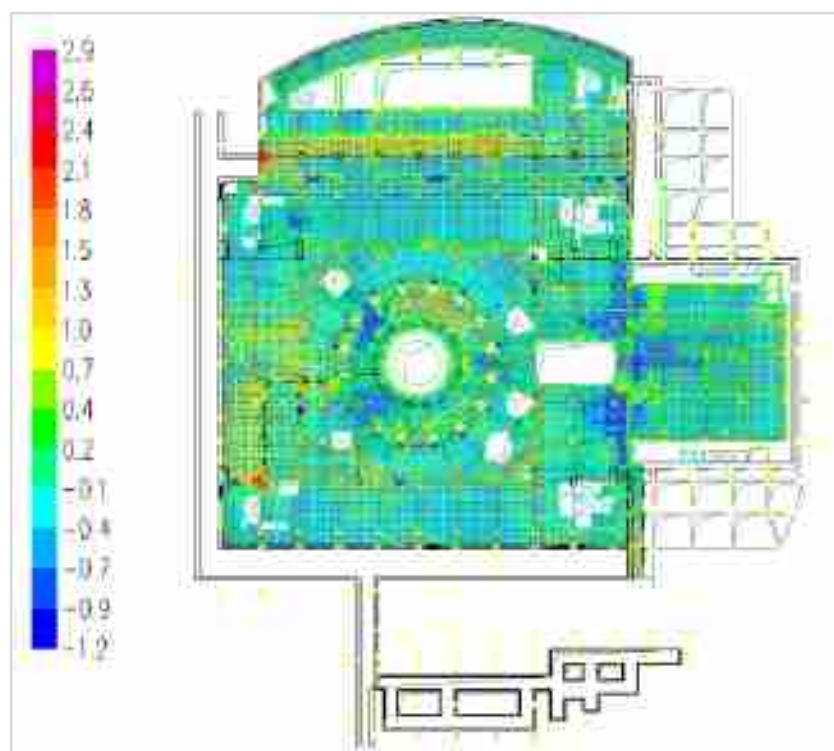


图 5-32 地下一层楼板 X 向设防地震下楼板应力 (MPa)

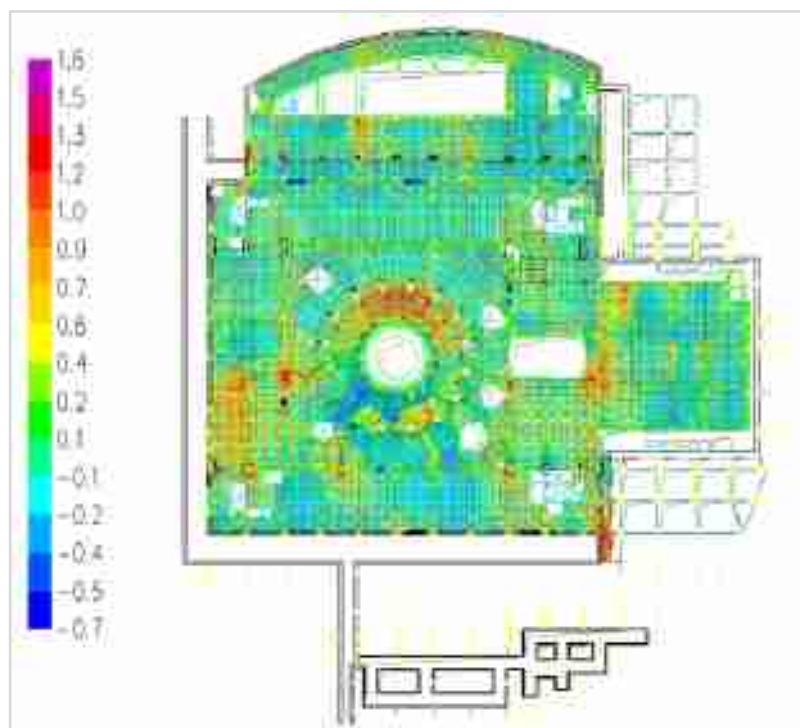


图 5-33 地下一层楼板 Y 向设防地震下楼板应力 (MPa)

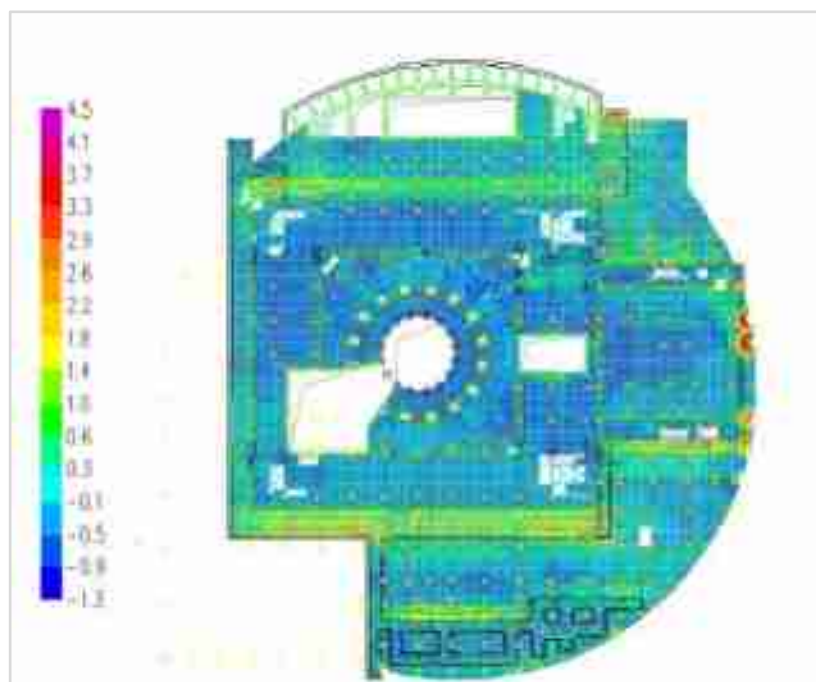


图 5-34 一层楼板 X 向设防地震下楼板应力 (MPa)

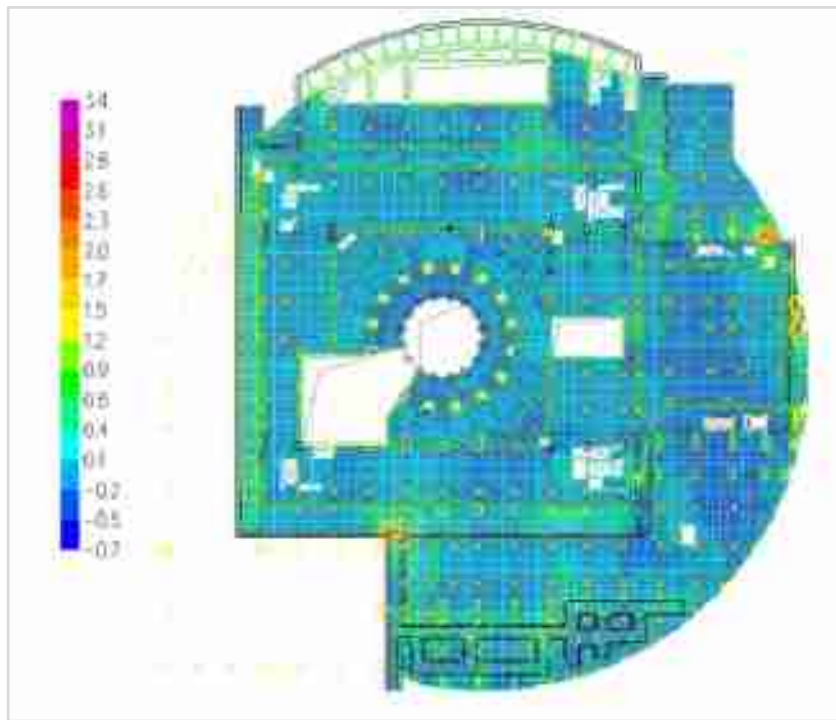


图 5-35 一层楼板 Y 向设防地震下楼板应力 (MPa)

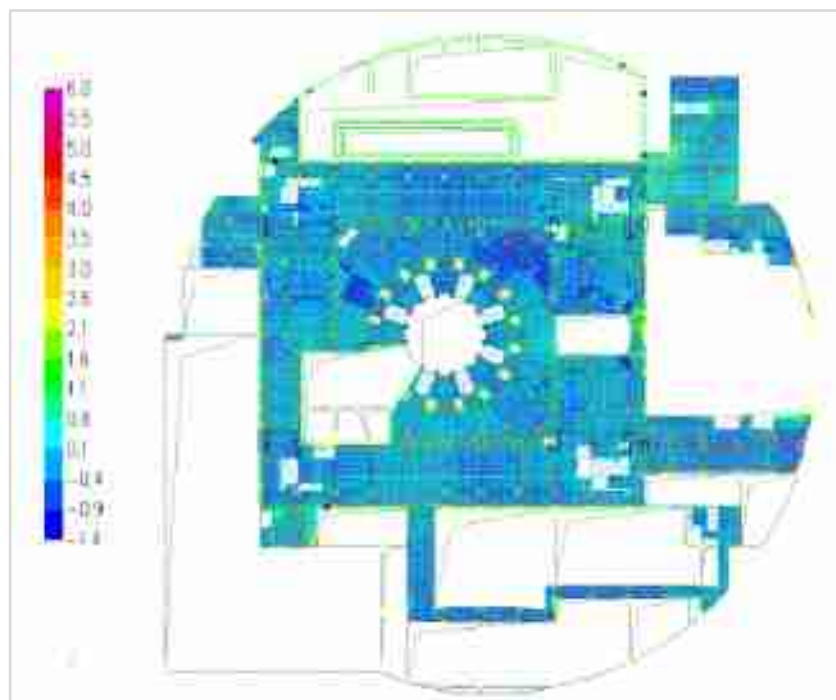


图 5-36 二层楼板 X 向设防地震下楼板应力 (MPa)

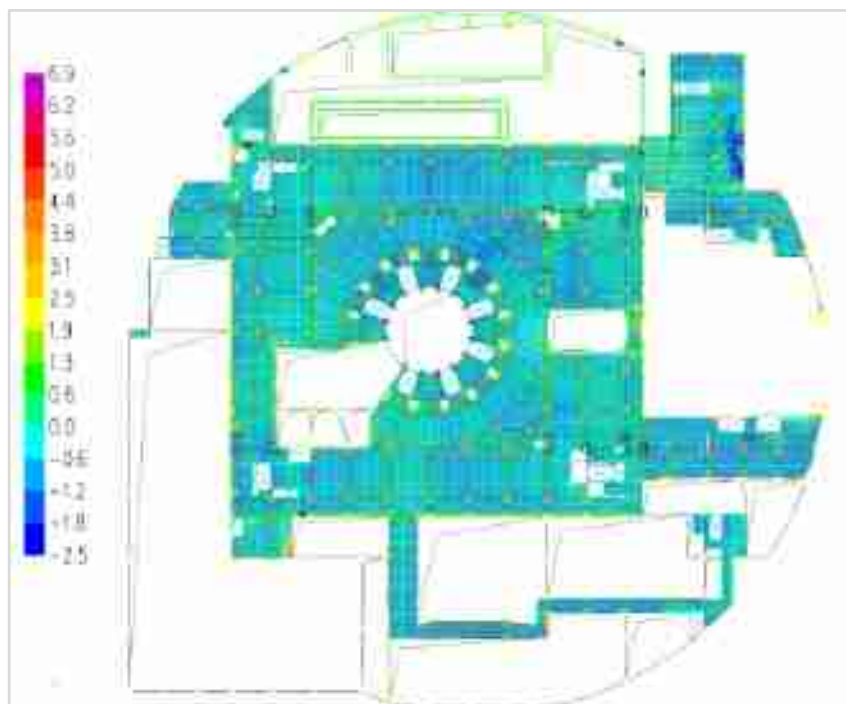


图 5-37 二层楼板 Y 向设防地震下楼板应力 (MPa)

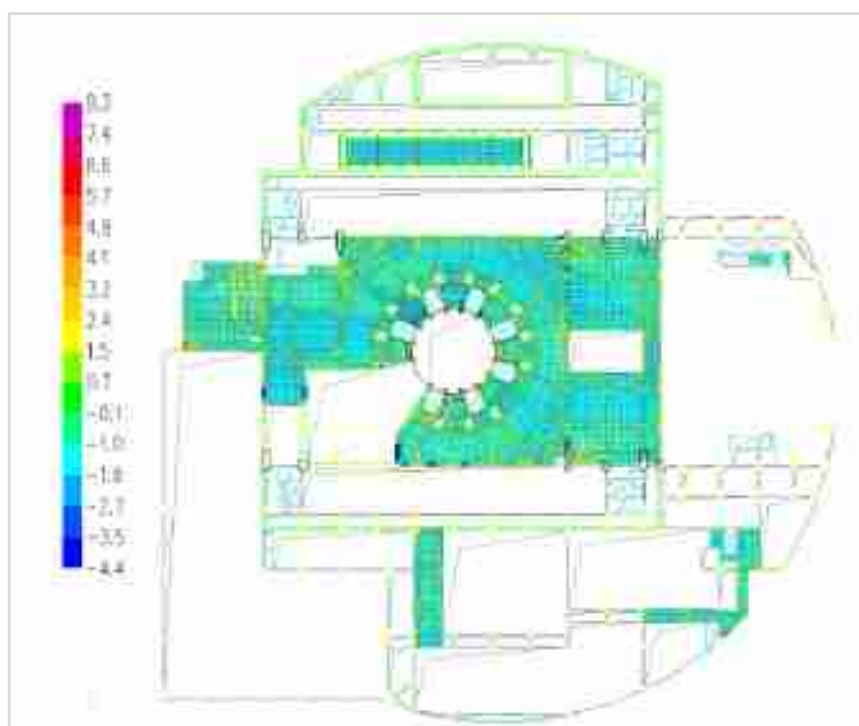


图 5-38 三层楼板 X 向设防地震下楼板应力 (MPa)

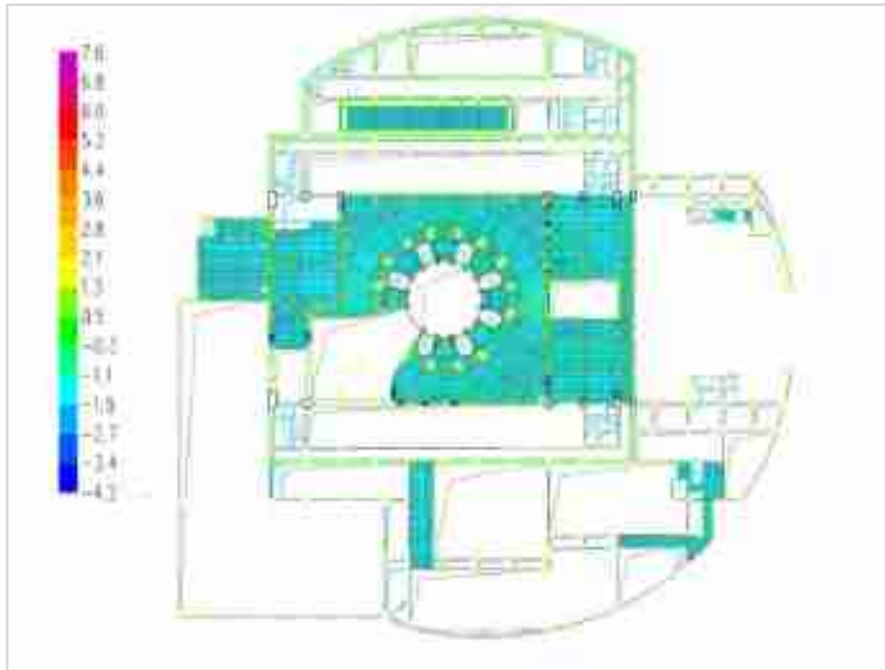


图 5-39 三层楼板 Y 向设防地震下楼板应力 (MPa)

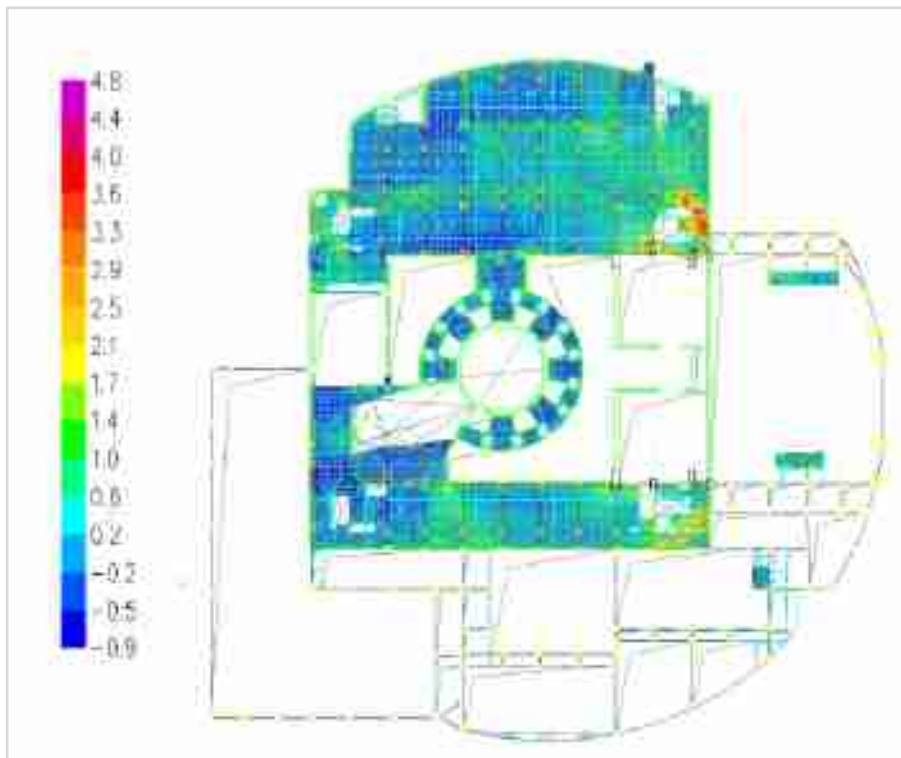


图 5-40 三 (1) 层楼板 X 向设防地震下楼板应力 (MPa)

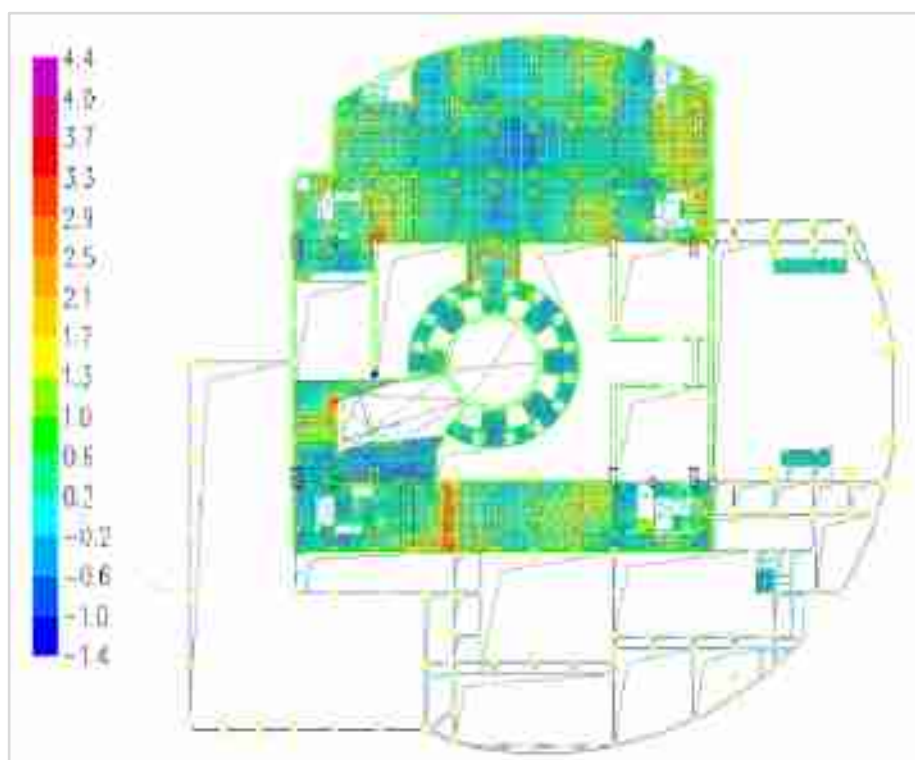


图 5-41 三（1）层楼板 Y 向设防地震下楼板应力（MPa）

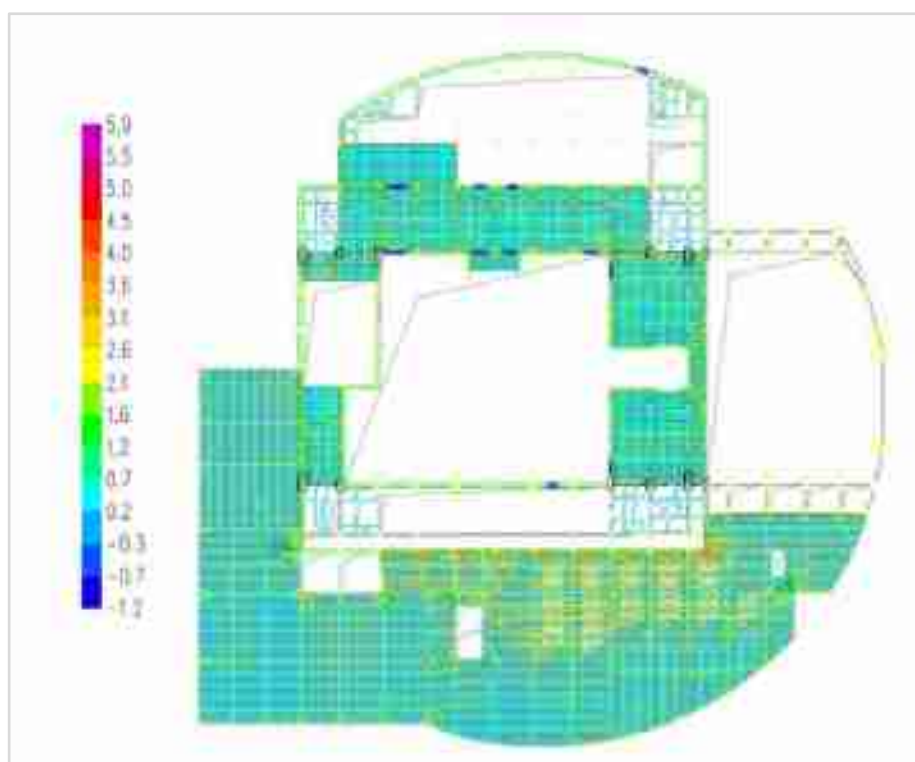


图 5-42 三（2）层楼板 X 向设防地震下楼板应力（MPa）

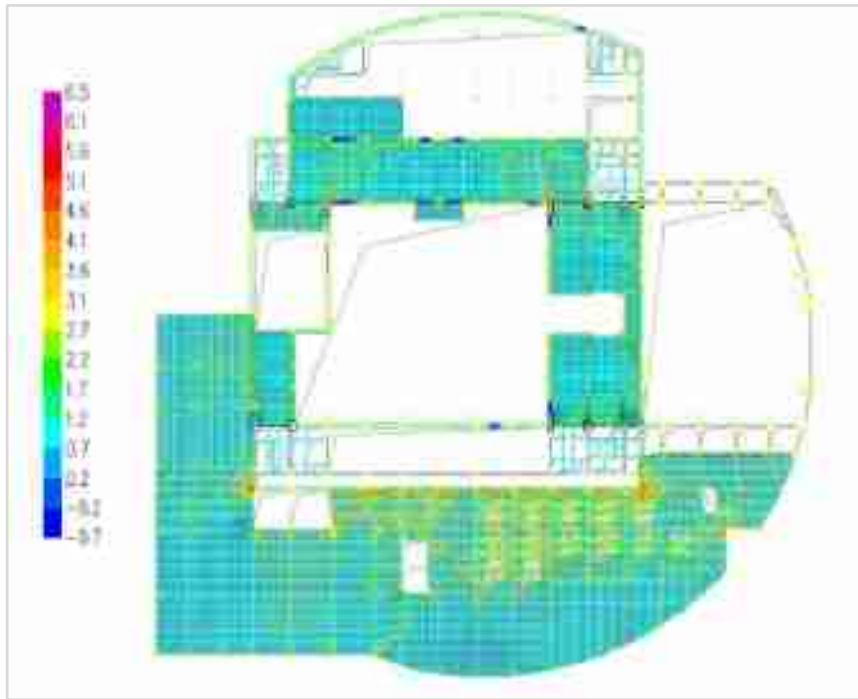


图 5-43 三（2）层楼板 Y 向设防地震下楼板应力（MPa）

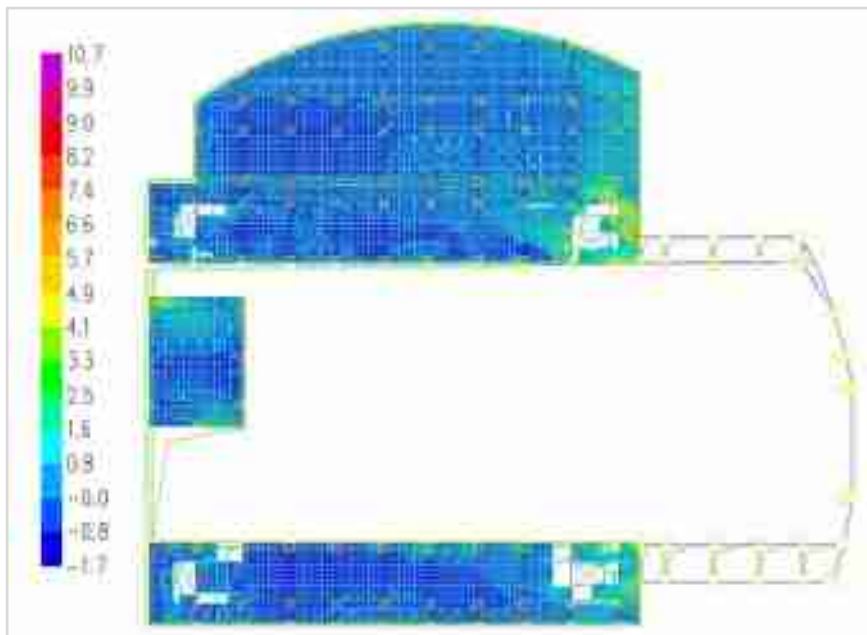


图 5-44 三（3）层楼板 X 向设防地震下楼板应力（MPa）



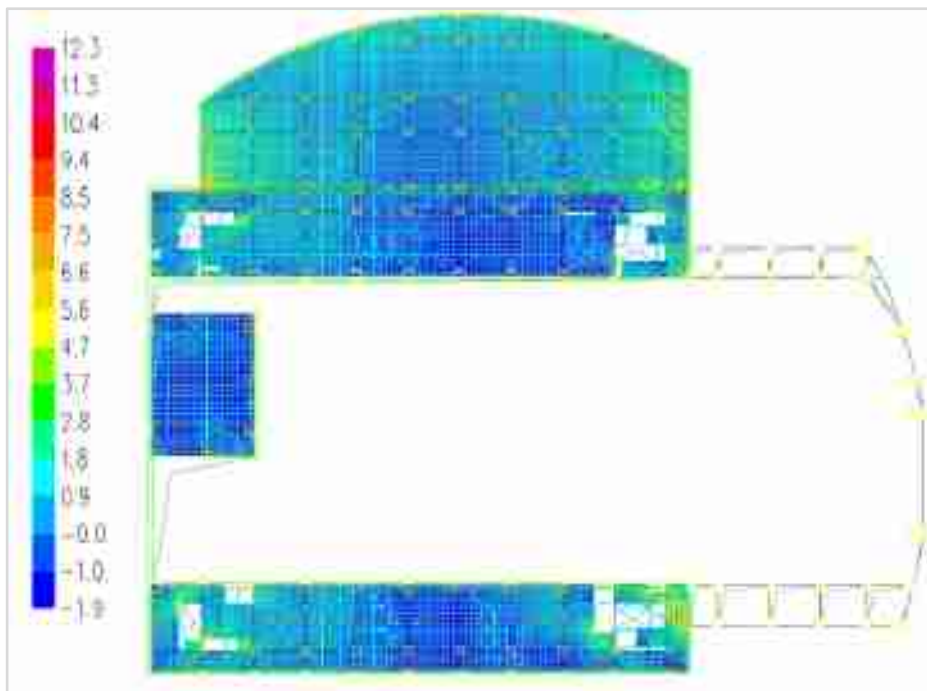


图 5-45 三（3）层楼板 Y 向设防地震下楼板应力（MPa）

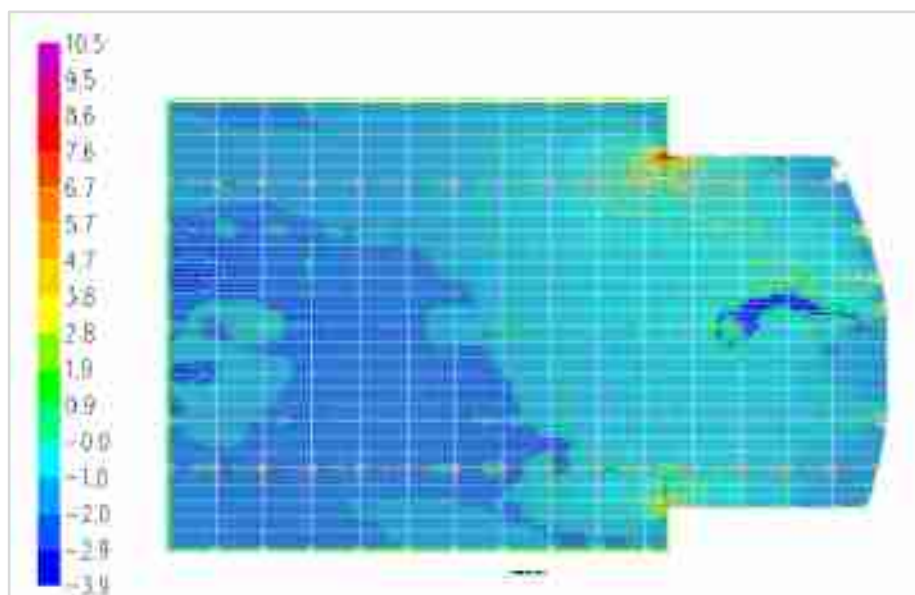


图 5-46 屋面 1 楼板 X 向设防地震下楼板应力（MPa）

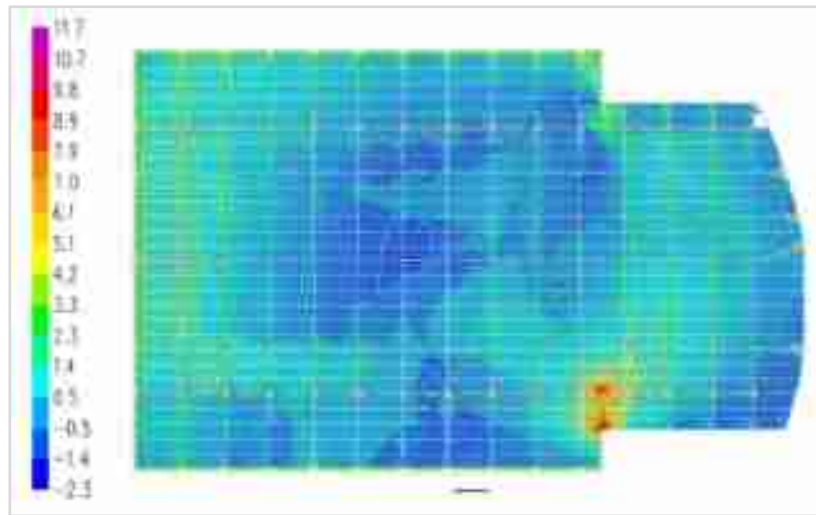


图 5-47 屋面 1 楼板 Y 向设防地震下楼板应力 (MPa)

结果表明，设防地震作用下，各楼层楼板大部分区域应力分布较均匀，洞口周边、框架梁和框架柱连接区域和楼板凹角处存在应力集中。除去个别应力集中区域较大应力外，大部分楼板应力处于 $-2.0\text{MPa}\sim 4.0\text{MPa}$   $> 2.39\text{MPa}$  (C40)，说明拉应力较大处混凝土已经开裂，拉应力较大处设置附加钢筋来承受楼板的拉应力。

每延米楼板拉应力： $0\sim 4.0\text{MPa} \times 1000\text{mm} \times 200\text{mm} = 0\sim 800\text{kN}$ ；根据地震应力附加钢筋，每延米板内全截面附加筋计算  $0\sim 2000\text{mm}^2$ ，楼板拉应力较大处附加筋可取  $14@150$  (双排)。通过增加附加钢筋，楼板满足中震不屈服的性能目标。

### 5.3.2.2 地震工况下真空室结构分析

下图的真空室模态分析结果显示一阶模态 12.87 Hz，二阶模态 16.88Hz，二阶模态 17.19Hz，结合合肥地震谱，水平加速度取 1.88g，垂直加速度 0.6g。

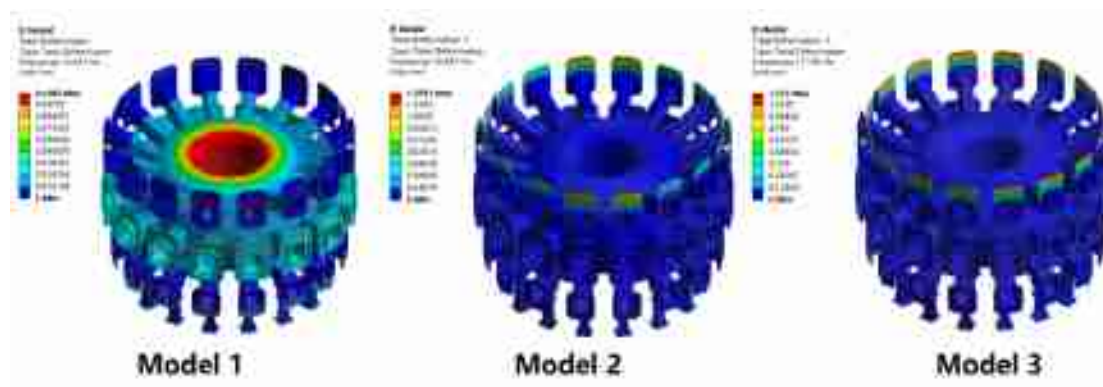


图 5-48 BEST 真空室模态分析结果

在地震工况下，真空室仅承受地震载荷，地震工况下真空室上各部件最大应力和变形如下图所示。

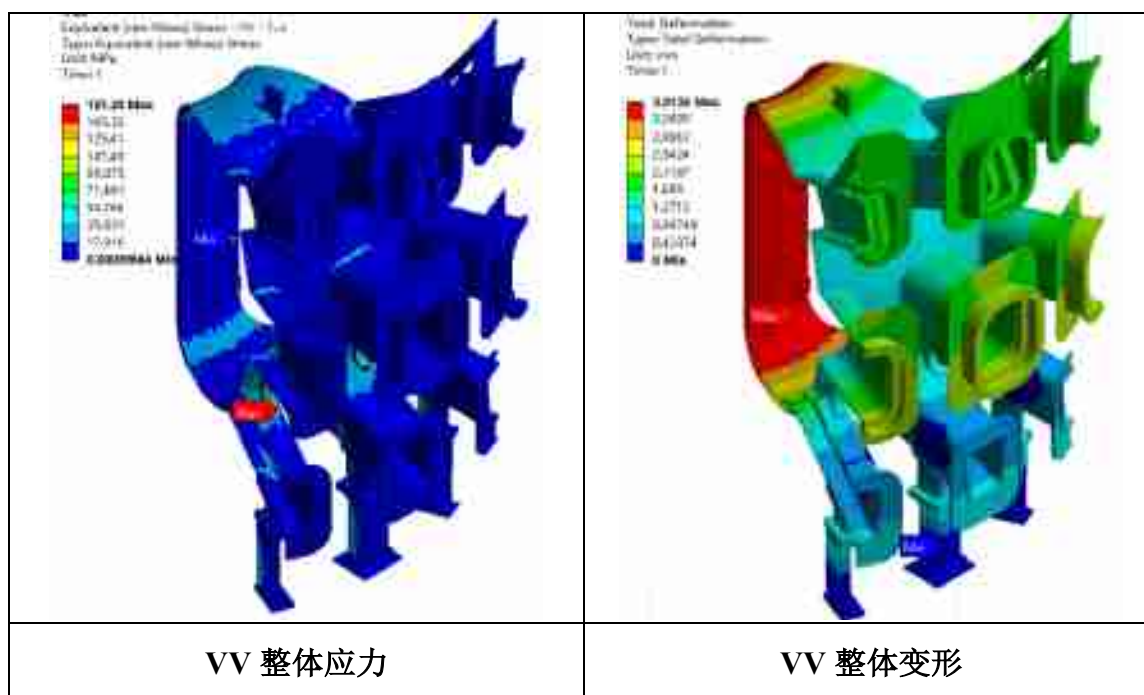


图 5-49 地震工况真空室各部件应力

真空室系统结构分析准则参考 RCC-MR，为避免真空室出现 P 型损伤（主应力损伤），地震工况下的结构应力须在满足第 I & II 类事件分析标准：

1) 总体一次薄膜应力强度  $\overline{P}_m$  不超过  $S_m(\theta_m)$ ： $\overline{P}_m \leq S_m(\theta_m)$

其中  $S_m(\theta_m)$  是指材料在加载过程的平均温度下和厚度为  $\theta_m$  时的许用应力。所有地方都需要校核该条件，无论其是否处于非连续区，或者当地局部主薄膜应力强度与下述条件无关。

2) 局部薄膜应力强度  $\overline{P}_L$  不得超过  $S_m(\theta_m)$  的 1.5 倍： $\overline{P}_L \leq 1.5S_m(\theta_m)$ ，同时须校核非叠加后的应力强度  $\overline{P}_L$  仅在局部区域超过  $1.5S_m(\theta_m)$ 。

3) 局部薄膜应力加弯曲应力强度  $\overline{P}_L + \overline{P}_b$  不得超过 1.5 倍  $S_m(\theta_m)$ ： $\overline{P}_L + \overline{P}_b \leq 1.5S_m(\theta_m)$ 。

真空室的结构材料是 316L-BG，其力学性能如下表所示。

表 5-18 316L-BG 许用应力表

	$P_m$	$P_L = P_m + L_m$	$P_L + P_b$
第 I & II 类事件 (等级 A)	$S_m^{I,II}$	$1.5S_m^{I,II}$	$1.5S_m^{I,II}$
20°C	147	221	221
100°C	147	221	221
150°C	141	211.5	211.5
第 III 类事件 (等级 C)	$S_m^{III}$	$1.5S_m^{III}$	$1.5S_m^{III}$
20°C	199	299	299
100°C	172	258	258
150°C	156	234	234
第 IV 类事件 (等级 D)	$S_m^{IV}$	$1.5S_m^{IV}$	$1.5S_m^{IV}$
20°C	353	530	530

在应力评定时，在最大等效应力区域选取沿结构材料厚度方向的评定线，基于这条应力评定线将结构的应力张量线性化，即可得到薄膜应力、弯曲应力、薄膜+弯曲应力、峰值应力和总应力。在有限元分析后处理中，需要对分析结果进行应力评定。首先找到结构云图中最大等效应力区域，选择沿结构材料厚度方向作为应力评定的评定线。在这条评定线上做应力张量的线性化。这就能计算出该位置的薄膜应力、弯曲应力、薄弯曲应力和峰值应力等，经过应力线性化处理，真空室自重+地震工况上各部件应力线性化结果如下表所示。

表 5-19 真空室上各部件应力线性化结果

部件	等效应力 /MPa	Pm/MPa (147)	安全裕度	PL+Pb/MPa(221)	安全裕度
扇区主体	107.1	23.3	6.31	69.9	3.16
三角支撑	161.3	55.2	2.66	109.6	2.01
上窗口	57.3	16.5	8.9	35.5	6.22
中窗口	20.2	12.2	12.05	18.7	11.8
下窗口	51.2	29.3	5.01	47.2	4.68
重力支撑	107.1	23.3	6.31	69.9	3.16

真空室扇区主体 Pm 值 23.3MPa，安全裕度 6.31，PL+Pb 值 69.6MPa，安全裕度

3.16; 三角支撑位置  $P_m$  值 55.2MPa, 安全裕度 2.66,  $PL+P_b$  值 109.6MPa, 安全裕度 2.01; 上窗口  $P_m$  值 16.5MPa, 安全裕度 8.9,  $PL+P_b$  值 35.5MPa, 安全裕度 6.22; 中窗口  $P_m$  值 12.2MPa, 安全裕度 12.05,  $PL+P_b$  值 18.7MPa, 安全裕度 11.8; 下窗口  $P_m$  值 29.3MPa, 安全裕度 5.01,  $PL+P_b$  值 47.2MPa, 安全裕度 4.68; 重力支撑窗口  $P_m$  值 23.3MPa, 安全裕度 6.31,  $PL+P_b$  值 69.6MPa, 安全裕度 3.16。自重+地震工况真空室上应力最薄弱区域位于三角支撑, 最小安全裕度 2.01, 大于标准的 1.2, 结构足够安全。

### 5.3.2.3 地震工况下杜瓦结构分析

BEST 真空杜瓦地震工况下的仿真分析主要用于探究所设计真空杜瓦结构在地震及其相应组合工况下的结构强度和结构稳定性, 从而保证 BEST 装置主机的安全运行。具体分析载荷设计及评判标准如下表 5-20 和表 5-21 所示:

表 5-20 BEST 杜瓦地震工况分析载荷设计

载荷工况	分析类型	载荷组合设计	备注
地震工况	静力学分析	$P+D+SL$	P: 大气压力 D: 部件自重 SL: 地震载荷
	疲劳失效	$P+D+SL$	
	屈曲分析	$2.1[P+D]+1.7SL$	

在 BEST 服役寿命中, 地震发生次数设计为 5 次。因此在进行地震疲劳分析时, 综合考虑分析的保守性, 在疲劳循环定义中乘以系数 10, 即是定义 BEST 杜瓦地震载荷循环设计次数为 50 次。

表 5-21 BEST 杜瓦分析校核标准

载荷工况	分析类型	校核标准 ASME	备注
地震工况	静力学分析	$P_m < S_m$ $P_m+P_b < 1.5S_m$	Pm 为薄膜应力 Pb 为弯曲应力 Sm 为材料许用应力
	疲劳失效	$D_f \ll 1$	
	屈曲分析	$\phi_B > 2.1$	

#### 5.3.2.3.1 结构强度校核

在  $P+D+SL$  组合载荷下, 杜瓦的变形及等效应力分布如下图所示。该工况下杜瓦最大变形为 9.53 mm, 发生在上顶盖的中心维护孔处。杜瓦在地震工况下的最大等效应力

为 129.84 MPa，小于材料 SS304/SS304L 的许用应力。具体的对最大等效力点开展应力线性化分析见下表所示。

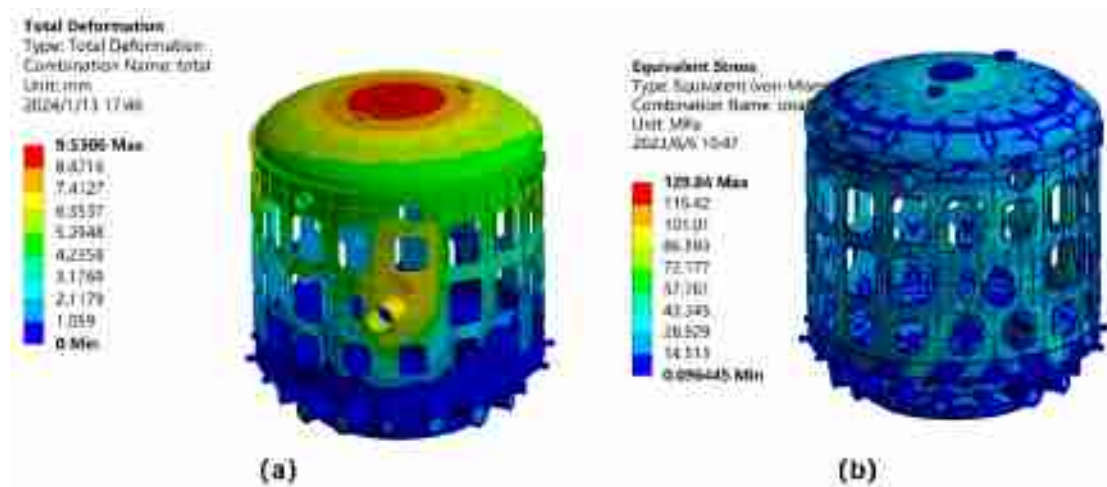


图 5-50 BEST 杜瓦地震工况下的变形及应力分布：（a）杜瓦变形分布；（b）杜瓦等效力分布

表 5-22 地震工况下 BEST 杜瓦的应力线性化校核结果

运行工况	Pm/ MPa	安全因子	Pm+Pb/ MPa	安全因子
P+D+SL	117.97	1.2	129.84	1.6

由上表可知，杜瓦在地震工况下的最小安全系数为 1.2，说明所设计杜瓦结构强度足够，满足设计要求。

### 5.3.2.3.2 屈曲分析

基于分叉点失稳分析方法在 2.1[P+D]+1.7SL 组合载荷下开展杜瓦非线性屈曲分析，结果如下图所示。BEST 杜瓦在地震组合工况下的临界载荷系数为 5.14，大于临界载荷系数 2.1，即可认为杜瓦在地震组合工况下结构足够稳定，不会发生屈曲变形。

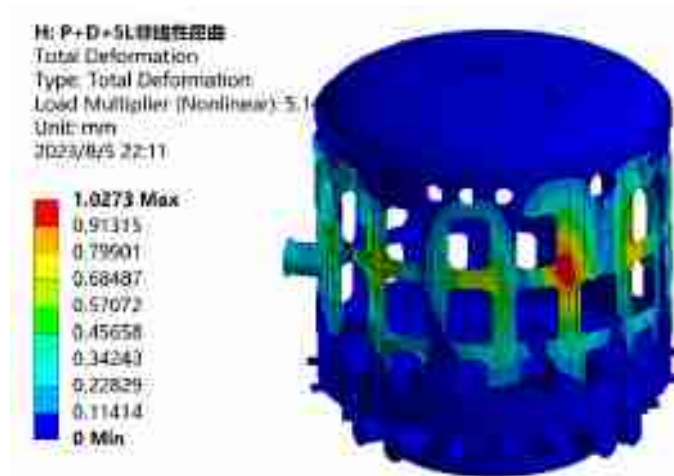


图 5-51 BEST 杜瓦非线性屈曲分析

### 5.3.2.3.3 疲劳分析

在 P+D+SL 组合工况下开展 BEST 杜瓦疲劳分析，结果如下图所示。由图可知，在地震设计循环次数下，杜瓦最大疲劳损伤系数为  $1.83 \times 10^{-6}$ ，远远小于 1，表明杜瓦在地震循环工况下不会发生疲劳失效。

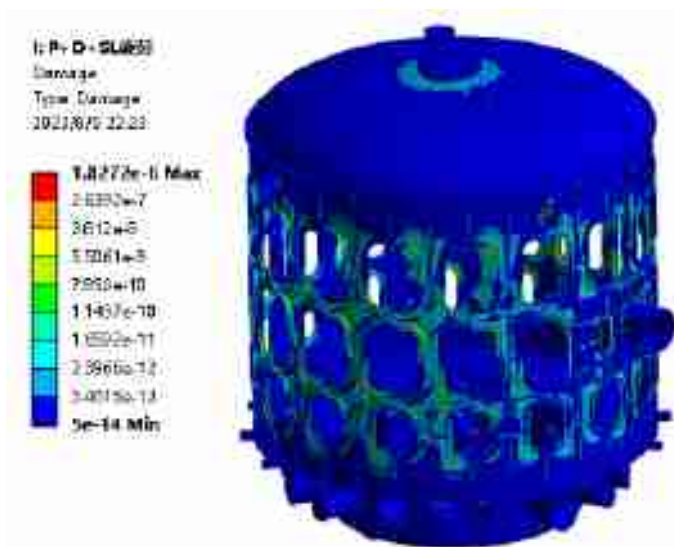


图 5-52 BEST 杜瓦地震工况下的疲劳损伤分布

综上所述，依据 ASME 校核标准和相关分析可知，所设计 BEST 杜瓦在各类地震组合工况下具有足够的强度和稳定性，满足 BEST 装置主机设计要求。

### 5.3.3 氙处理中心事故情景及后果分析

#### 5.3.3.1 氙处理中心事故情景及后果分析

氙处理中心事故分析主要为氙处理中心操作间氙泄漏，主要包括：

- 1) 氙工艺管路泄漏；
- 2) 贮氙床故障氙泄漏；
- 3) WDS 含氙水泄漏；
- 4) 维修过程中氙泄漏。

发生氙工艺管路氙泄漏或贮氙床故障氙泄漏事故后，操作间氙泄漏监控与应急响应系统 LMR 将联锁控制安全阀门关闭，而泄漏的氙将首先被释放到手套箱中，由于手套箱内充有惰性气体，泄漏的氙与惰性气体混合，进而通过手套箱除氙系统 GDS 与排出气除氙系统 VDS 的串联工作，及时将手套箱内的氙抽取并处理，因此可以确保只有极少量氙气混合气渗透到手套箱外，从而保证了氙泄漏影响最小化。因此该类氙泄漏事故对工作人员、工作及环境的影响是轻微的。

水去氙化系统（WDS）储水罐破裂是氙处理中心中氙泄漏的主要事故情形，由于储水罐内存储了较大库存的氙，一旦破裂，将会导致一定量的氙化水流失到建筑区域，因此水去氙化系统（WDS）中的储水罐破裂是氙处理中心中氙泄漏相对较为严重的事故。在 BEST 设计中，WDS 氙化水储罐中的总氙量将控制在 10g 以下，当发生储水罐破裂造成含氙水泄漏到房间内时，由于含氙水的蒸发，氙泄漏监控与应急响应系统 LMR 将很快检测到氙浓度超过设定值，警报将被激活，安全隔离阀自动关闭，暖通空调系统 HVAC 自动隔离，而空气除氙系统 ADS 自动开启，持续抽取房间内蒸发出的含氙水蒸气，直至将房间中的氙浓度降低至  $3.7 \times 10^7 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ 。因此，可以预计发生 WDS 氙化水泄漏事故对工作人员、公众和环境的影响将低于安全限值，可控制在安全目标范围内。因此，BEST 发生 WDS 含氙水泄漏对工作人员、工作和环境的影响在可控范围内。

含氙部件维修主要包括真空室维修和热室中器件维修等，两者均设置了专用的除氙系统。针对 Tokamak 真空室维修需求，空气气氛除氙系统 S-ADS 拟采用模块化设计，考虑循环裕量，S-ADS 单个模块处理量按 [REDACTED] 计，总设计流量为 [REDACTED]  $\text{Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 。针对热室红区房间器件维修需求，热室设置独立的除氙系统，记作 HC-ADS



(Hotcell-ADS)，HC-ADS 同样采用模块化设计，单个模块处理量按  $\text{Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  设计。经过除氙系统 (ADS、VDS 和 WDS) 协同处理，可保障维修过程中泄漏的氙得到及时处理，且排放气氙含量满足设定的排放限值，因此不会对环境造成影响。

总的来说，BEST 在正常运行和基准事故下，工作人员所受照射剂量主要来自吸入氙核素引起的内照射。在对工作人员内照射剂量进行估算时，空气中放射性气溶胶浓度值偏保守取 0.1 DAC 进行计算，工作人员工作时间按 2000 h (每年工作 250 天，每天 8h) 考虑，在一个工作年呼吸和皮肤吸收的氟化水蒸气体积约为  $3.6 \times 10^3 \text{ m}^3$ ，则工作人员工作一年的内照射剂量为 2.3 mSv/a, 不超过 BEST 工作人员剂量约束值。因此，在正常运行和预计运行事件下，氙泄漏对工作人员、公众及环境的放射性影响较小，可有效控制在安全目标范围内。

### 5.3.3.2 氙处理中心事故防范措施

事故防范措施主要包括：1) 涉氙主工艺系统 (EPT、FCM、HIS、AMC) 采用三级包容，工艺设备、管路及阀门的选择上选用市面上成熟的产品，且对于高氙系统的设计提升质保等级，防止阀门等连接处受损；2) 根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002) 中“6.4 辐射工作场所分区”规定，对辐射工作场所分区，并制定严格的分区进入措施；3) 设置良好的通排风；4) 设置氙浓度在线监测装置及报警系统；5) 为了确保系统可靠性，除氙系统关键部件如循环风机、催化床、喷淋洗脱柱及阀门等运动部件均设置备份，当出现故障时可立即切换气路以保证系统迅速恢复正常；6) 加强人员培训和管理。

当发生氙泄漏事故，BEST 将进行事故处理：当在线监测系统检测到操作间气氛氙浓度异常上升，立即封闭系统向环境排放的接口 (如 HVAC)，封闭相关操作间，并启动报警系统，向操作人员发出工艺系统异常警报，以阻止氙向环境的进一步扩散。同时结合工艺系统相关参数，判断事故类别，将氙源限制在尽可能小的区域启动相应除氙系统 (包括手套箱除氙系统、空气气氛除氙系统、排放气体除氙系统等)，将相关操作间内含氙气体引出处理。在短时间内完成大部分氙的捕集，直到处理区域内氙浓度达到控制标准。手套箱氙泄漏时流程类似，在捕集过程中要始终保持处理区域内的负压，控制压力梯度确保氙不从高污染区流入低污染区，减小氙的环境释放量。经气氛除氙系统运

行产生的所有含氟水、大量泄漏的含氟冷却水和操作空间水蒸气冷凝含氟水，则主要基于水去氟化系统进行除氟处理。

## 6 辐射安全管理

### 6.1 机构与人员

#### 6.1.1 辐射安全与环境保护管理机构及职责

根据《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》(国务院令第 449 号),使用射线装置、非密封放射性物质的单位申请辐射安全许可证,应有专门的辐射安全和防护管理机构或者专职/兼职辐射安全管理人员,并配备必要的防护用品和监测仪器。

本项目运行后,为保障项目工作人员与公众的健康和安全,保护项目所在区域周围环境,结合项目辐射安全与防护工作的实际情况,建设单位拟设置辐射安全管理委员会作为辐射安全工作的最高管理机构,主要成员为单位负责人、项目分管领导、安全分管领导以及各相关部门负责人等。

辐射安全管理委员会的主要职责是对以下事宜进行调查、协调、审议、建议和决策:

- (1) 辐射安全管理工作基本方针的制定;
- (2) 辐射安全规程的修订;
- (3) 向上级审管部门申请、汇报或提交相关资料;
- (4) 在异常或事故情况下,采取紧急措施和进行事故调查;
- (5) 其它辐射安全相关重大事项。

在辐射安全管理委员会领导下拟设置专门的辐射安全管理部门负责本项目运行期间的安全和防护工作的统一监督管理,其主要职责是:

- (1) 贯彻落实国家有关辐射安全的法律法规及标准,建立辐射安全规章制度;
- (2) 辐射安全系统的运行和维护,辐射安全措施的实施;
- (3) 辐射监测与评价;

- (4) 放射性废物的监测处理；
- (5) 放射性废物的辐射安全管理；
- (6) 辐射工作人员的健康管理；
- (7) 辐射安全教育和培训；
- (8) 参与辐射事故应急处置，以及其他与辐射安全相关的工作。

其他各相关部门设专职或兼职辐射安全员，在部门负责人的领导下，根据规定开展相关工作：

- (1) 认真学习辐射安全相关知识，积极参加主管部门组织的培训；
- (2) 对本部门工作人员进行放射性防护知识和法规的宣传教育；
- (3) 协助制订和督促执行本部门的安全操作规程和防护措施；
- (4) 负责收发本部门人员防护用品和个人剂量计；
- (5) 规定的其他工作。

### 6.1.2 辐射工作人员管理

BEST 对辐射工作人员进行必要的防护知识培训和应急演练，并定期进行个人剂量监测、尿氚监测和放射性职业健康体检，建立个人剂量和体检档案。此外，定期组织开展遥操作、穿着气密服维护操作、表面去污操作和应急辐射监测实践训练，提升操作人员的技能熟练度，以便减少操作时间、降低出错发生的概率，从而减少人员受照剂量，保护环境辐射安全。

拟制定辐射工作人员培训和考核计划，单位承诺新上岗及调入人员，在上岗前参加生态环境部门认可的电离辐射安全与防护考核，考核合格者方可从事辐射工作，以后每五年接受一次再考核，现有辐射工作人员在现有培训合格证书过期前参与考核，不再考核的人员或者考核不合格的人员，不得从事辐射工作。单位定期安排有资质单位对辐射工作人员进行职业健康体检，并建立健康体检档案。

根据国家核安全局文件《关于规范核技术利用领域辐射安全关键岗位从业人员管理的通知》（国核安发[2015]40号）的规定：

“（二）使用半衰期大于 60 天的放射性同位素且场所等级达到甲级的单位，辐射安全关键岗位两个，分别为辐射防护负责人、辐射环境监测与评价专职人员，每岗最少在岗人数 1 名；（三）生产、使用放射性药物且场所等级达到甲级的单位，非医疗使用 I 类源单位，销售（含建造）、使用 I 类射线装置单位，辐射安全关键岗位一个，为辐射防护负责人，最少在岗人数 1 名。同一单位从事以上多种类型工作时，岗位设置和最少在岗人数以其中要求高的为准。”

本项目拟配备 2 名注册核安全工程师作为辐射防护负责人，分别为辐射防护负责人、辐射环境监测与评价专职人员。

## 6.2 辐射安全管理规章制度

为了加强放射性同位素和射线装置的安全和防护管理，根据《中华人民共和国放射性污染防治法》《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》《放射性废物安全管理条例》等，并结合项目实际，BEST 拟制定一系列辐射安全管理规章制度，内容涵盖辐射安全和防护管理的组织机构、场所的安全与防护措施、设备操作规程、设备检修维护、放射性同位素和射线装置使用管理、放射性废物的管理、辐射工作人员安全与防护管理、辐射监测、辐射事故应急预案等内容，确保本项目运行过程中的辐射安全。

## 6.3 辐射监测

本项目辐射监测总体包括个人剂量监测、工作场所监测和环境监测。

### 6.3.1 个人剂量监测

本项目辐射工作人员个人剂量监测采取累积式个人剂量计监测为主，个人剂量报警仪为辅的方式进行。本项目配备的个人剂量计和个人剂量报警仪均需具有监测 X- $\gamma$  和中子的功能。

个人剂量计用于对辐射工作人员的常规个人剂量监测。所有辐射工作人员须正确佩戴个人剂量计，个人剂量计每3个月（一个监测周期）更换一次，委托有检测资质的单位进行检测。发现个人剂量监测结果异常的，应立即核实和调查，并将有关情况及时报告辐射安全许可证发证机关。

个人剂量报警仪用于辐射工作人员在控制区内部工作时使用，报警仪能够实时显示工作人员该次工作的受照剂量和场所的剂量率水平，能够进行实施剂量预警。

BEST 安排专人负责个人剂量监测管理，建立辐射工作人员个人剂量档案，包括个人基本信息、工作岗位、剂量监测结果等材料。个人剂量档案应终生保存。

此外，定期组织对 BEST 辐射工作人员进行健康体检，两次体检的时间间隔不超过2年。建立个人健康档案，档案中详细记录历次体检报告结果及其评价处理意见，并妥善长期保存。

### 6.3.2 辐射工作场所监测

本项目工作场所监测方案详见 4.3 小节。

### 6.3.3 辐射环境监测

本项目辐射环境监测包括自行监测和委托有资质单位监测两种类型，监测数据记录存档，具体环境监测计划列于表 6-1。

表 6-1 本项目环境监测计划

监测类别	监测内容	监测项目	监测方式	监测点位	监测频次
自行监测	外照射	γ 辐射剂量率、 中子剂量当量率	固定式仪表监测	园区内外环境敏感点处	实时
			便携式仪表监测	园区内外环境敏感点处	1 次/月
	固体废物外表面	γ 辐射剂量率	便携式仪表监测	放射性固体废物暂存区域	收集及送贮时

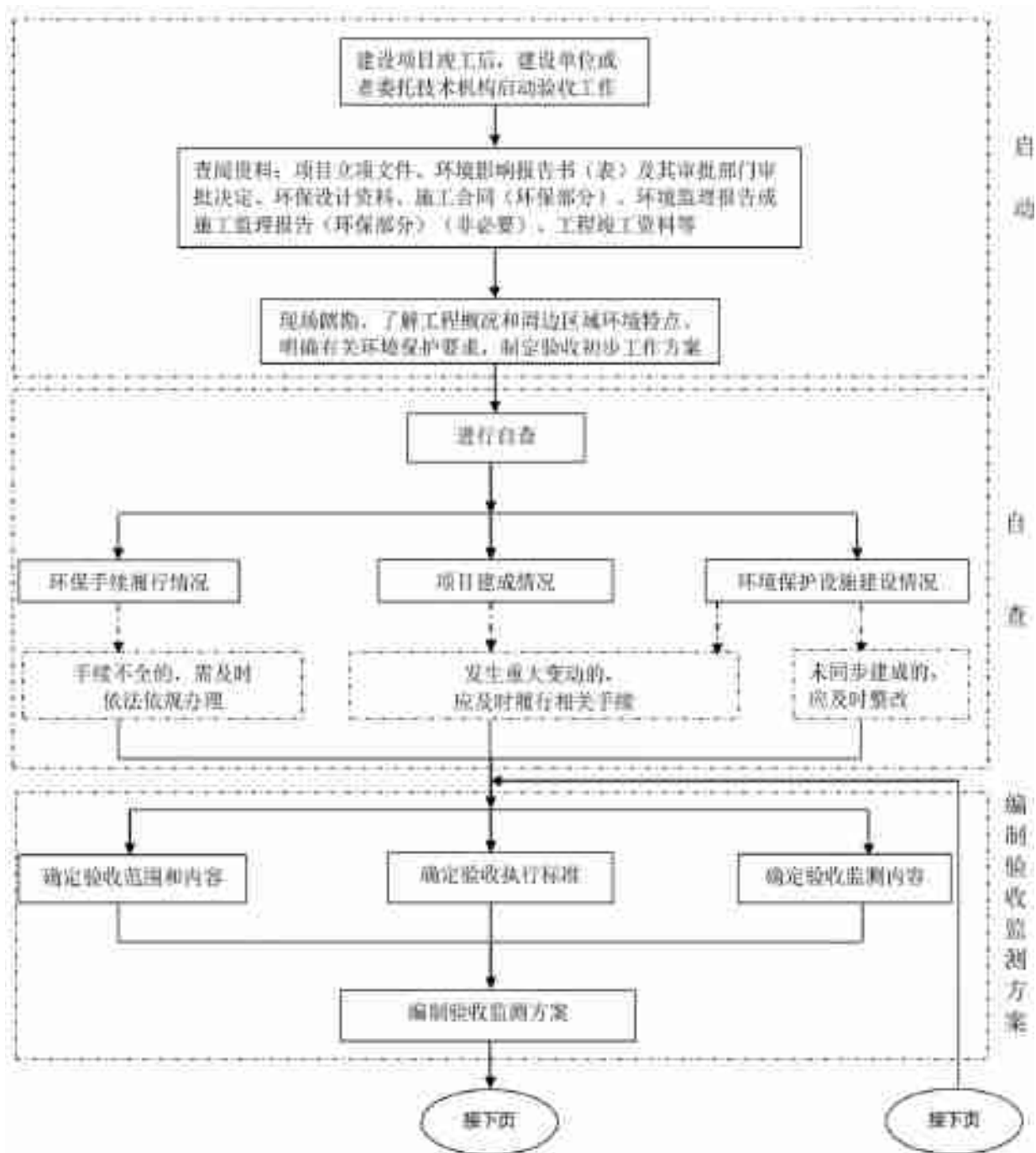
委托 监测	外照射	$\gamma$ 辐射剂量率、 中子剂量当量率	便携式仪表巡测	同自行监测点位	1 次/年
	含氚废水	$^3\text{H}$ 、总 $\beta$ 活度浓 度	取样分析	水去氚化系统	1 次/年
	土壤	$^3\text{H}$ 、总 $\beta$ 活度浓 度	取样分析	园区东、南、西、北四侧 的土壤	1 次/年
	空气	$^3\text{H}$ 活度浓度	取样分析	排风口	1 次/年
	地表水	$^3\text{H}$ 、总 $\beta$ 活度浓 度	取样分析	附近地表水	1 次/年

### 6.3.4 竣工环保验收监测

为有效落实环境保护“三同时”要求，确保环保设施的有效性，根据《建设项目环境保护管理条例》、《建设项目竣工环境保护验收暂行办法》等法规的要求，本项目竣工后，建设单位应自主开展竣工环保验收工作，对本项目相关环境保护设施的建设、调试、管理及其效果和污染物排放情况开展查验和监测工作，编制验收监测报告。

#### 6.3.4.1 工作流程

参照《建设项目竣工环境保护验收技术指南 污染影响类》，本项目竣工环保验收监测的工作流程如图 6-1 所示。





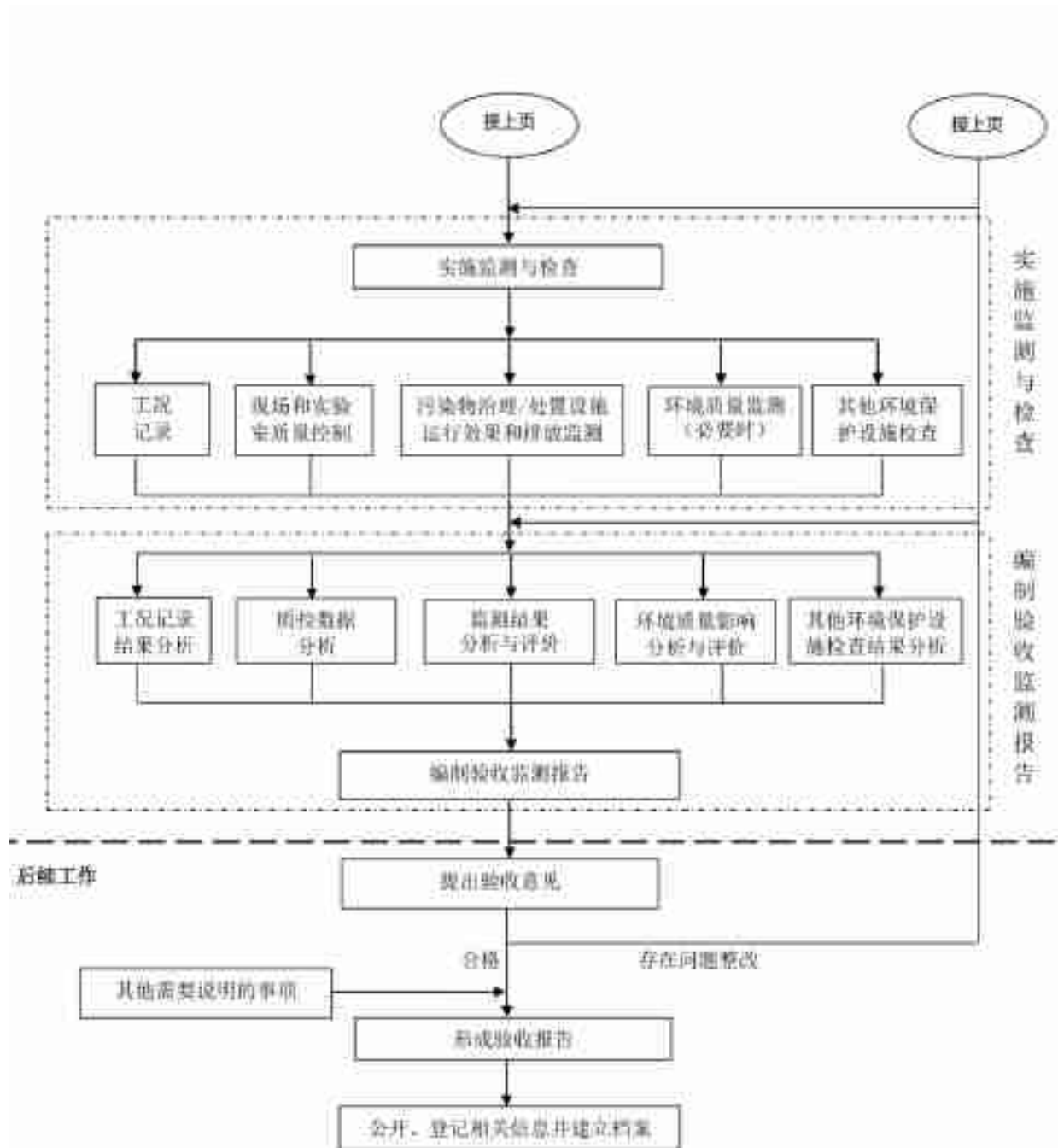


图 6-1 竣工环保验收工作流程

## 6.4 辐射事故应急

依据《中华人民共和国突发事件应对法》《中华人民共和国放射性污染防治法》《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》等相关法律法规，建设单位拟制定《BEST 辐射事故应急预案》，内容涵盖辐射事故风险分析、应急指挥机构及职责、处置程序、应急保障、预案的修订与实施、应急联系

方式、应急物资清单等，一旦发生辐射事故能快速响应，采取有效措施保护辐射工作人员、公众的健康和安全。

发生辐射事故时，应立即启动辐射事故应急预案，采取必要的防范措施，并在 2 小时内填写《辐射事故初始报告表》，向当地生态环境部门报告。造成或可能造成人员超剂量照射的，还应同时向当地卫生行政部门报告。同时，需进行工作人员的意外事故剂量监测和工作场所及周围环境的应急监测，并做好详细的监测记录。

## 6.5 申请者从事辐射工作能力评价

### 6.5.1 辐射安全与环境保护管理

本项目运行后，为保障项目工作人员与公众的健康和安全，保护项目所在区域周围环境，结合项目辐射安全与防护工作的实际情况，建设单位拟设置辐射安全管理委员会作为辐射安全工作的最高管理机构。在辐射安全管理委员领导下拟设置专门的辐射安全管理部门负责本项目运行期间的安全和防护工作的统一监督管理。

由上可知，项目辐射安全与环境保护管理工作可满足相关要求。

### 6.5.2 辐射工作人员培训

根据《关于核技术利用辐射安全与防护培训和考核有关事项的公告》（生态环境部公告 2019 年第 57 号），新从事放射性同位素与射线装置生产、销售、使用等辐射活动的人员以及原持有的辐射安全培训合格证书到期的人员，应通过生态环境部培训平台报名并参加考核。

拟制定辐射工作人员培训和考核计划，单位承诺新上岗及调入人员，在上岗前参加生态环境部门认可的电离辐射安全与防护考核，考核合格者方可从事辐射工作，以后每五年接受一次再考核，现有辐射工作人员在现有培训合格证书过期前参与考核，不再考核的人员或者考核不合格的人员，不得从事辐射工作。单位定期安排有资质单位对辐射工作人员进行职业健康体检，并建立健康体检档案。

项目严格落实人员培训计划，辐射工作人员的能力能够满足相关要求。

### 6.5.3 工作场所的安全防护措施

根据《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》要求，申请者辐射工作场所满足防止误操作、防止工作人员和公众受到意外照射的安全要求。

本项目使用的装置用于科学研究，经预测分析评价，各辐射工作场所的辐射屏蔽设计能确保屏蔽体外剂量率水平满足国家相关标准的要求。项目设计了完备、冗余的安全联锁系统，通过门-机联锁、清场搜索、紧急停机、声光报警、视频监控等安全设施防止人员误操作、防止工作人员和公众意外照射。本项目的辐射防护设计方案满足辐射防护与安全的要求。

项目应按照辐射防护设计方案进行施工建设，并确保经验收合格后投入使用。在此基础上，各辐射工作场所能满足防止误操作、防止工作人员和公众受到意外照射的安全要求。

### 6.5.4 个人防护用品及监测仪器

根据《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》要求，申请者应配备必要的防护用品和监测仪器。

本项目为每名辐射工作人员配备个人剂量计，进入辐射工作场所必须正确佩戴个人剂量计，并委托有资质单位监测，监测周期不超过三个月。建立辐射工作人员个人剂量档案，长期进行信息跟踪、监控。配备个人剂量报警仪，用于工作人员在控制区内部工作时使用，报警仪能够实时显示工作人员该次工作的受照剂量和场所的剂量率水平，能够进行实施剂量预警。

本项目在工作场所和周围环境设置固定式监测仪表，能够对工作场所和周围环境的辐射水平进行实时在线监测，并设定了报警阈值。此外，拟配备便携式中子辐射巡测仪、便携式 X-γ 辐射巡测仪等监测仪器，定期对工作场所和环境的辐射水平进行巡测。

项目按设计方案建成/配备相应的防护用品及监测仪器后，方能满足相关要求。

### 6.5.5 规章制度

根据《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》要求，申请者应有健全的操作规程、岗位职责、辐射防护措施、台账管理制度、培训计划和监测方案。

BEST 拟制定一系列辐射安全管理规章制度，内容涵盖辐射安全和防护管理的组织机构、场所的安全与防护措施、设备操作规程、设备检修维护、放射性同位素和射线装置使用管理、放射性废物的管理、辐射工作人员安全与防护管理、辐射监测、辐射事故应急预案等内容，确保本项目运行过程中的辐射安全。

在按要求全部制定完成并严格落实的基础上，本项目的各项操作规程和管理制度能够满足相关要求。

### 6.5.6 辐射事故应急

根据《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》要求，申请者应有辐射事故应急措施。

建设单位拟制定《BEST 辐射事故应急预案》，内容涵盖辐射事故风险分析、应急指挥机构及职责、处置程序、应急保障、预案的修订与实施、应急联系方式、应急物资清单等，一旦发生辐射事故能快速响应，采取有效措施保护辐射工作人员、公众的健康和安全。

在按要求全部制定完成并严格落实的基础上，本项目的辐射事故应急预案能够满足相关要求。

### 6.5.7 放射性三废治理

本项目运行期间产生的放射性三废主要来自 BEST 装置的运行。

项目设置了三废处理设施，按要求建成后可以满足要求。

## 6.6 环保投资一览表

本项目总环保投资为 8500 万元，详见表 6-2。

表 6-2 本项目辐射环境保护措施及环保投资一览表

序号	项目	环境保护（辐射防护）措施	投资金额 (万元)
1	辐射安全管理	辐射安全管理机构：成立辐射安全防护领导小组	——
		辐射安全管理制度：制定操作规程，岗位职责，辐射防护和安全保卫制度，设备检修维护制度，人员培训计划，监测方案，辐射事故应急预案等	——
2	人员考核	辐射工作人员参加辐射安全与防护考核	——
3	监测仪器和防护用品	固定式区域 $\gamma$ 监测仪、固定式区域中子监测仪、固定式环境 $\gamma$ 监测仪、固定式环境中子监测仪、便携式 X- $\gamma$ 辐射巡测仪、便携式中子辐射巡测仪、便携式表面污染仪、个人剂量计、个人剂量报警仪等监测仪器仪表	4000
		工作服、手套等防护用品	
4	辐射防护设施工程（主要是辐射屏蔽、安全联锁、通风系统、三废治理设施等）		4500
辐射环境保护措施及环保投资合计			8500

## 7 利益-代价分析

### 7.1 利益分析

BEST 项目的建成，其重要意义体现在：

(1) 建造紧凑型低成本聚变能实验装置，在世界上率先开展燃烧等离子体研究，加速聚变研究进程；

(2) BEST 能在强磁场、高密度聚变等离子体条件下验证多种先进的运行模式，为 ITER 和 CFETR 的先进运行模式提供实验支持；

(3) BEST 将作为集成平台，验证聚变堆所需的关键工程技术和部件，为 CFETR 等未来聚变堆在工程技术方面奠定更坚实的基础；

(4) BEST 将较为完整的验证包层工程技术，并在世界上首次实现聚变能发电，此外，目前正在运行的、以及在建的所有聚变装置（包括 ITER），都没有将聚变能发电作为研究目标。BEST 将在世界上首次演示聚变能发电，加快聚变能应用进程。

综上所述，本项目的建设具有良好的社会性效益和经济性效益。

### 7.2 代价分析

#### (1) 社会代价

本项目的社会代价主要考虑两个方面：资源和能源。

资源方面，项目用地面积约 16 万平方米，占用一部分土地资源。

能源方面，项目运行期间需用水、电等能源。

#### (2) 经济代价

本项目的经济代价主要包括建筑场地成本、设备投资成本和环保投资等方面的成本。

#### (3) 环境代价

本项目的环境代价主要为：少量的瞬发辐射穿过屏蔽体进入周围环境，工作人员和周围公众受到少量的辐射照射；少量的放射性气体进入大气环境；每年将有少量的放射性固体废物产生等。根据前面章节的分析，项目运行期间对环境的影响均低于国家标准中规定的限值。

综上所述，本项目建设带来的利益远高于付出的代价，其建设将造福于国家、造福于广大人民。因此，本项目的实施是正当的。

## 8 结论和建议

### 8.1 结论

#### 8.1.1 项目工程概况

紧凑型聚变能实验装置项目用地面积约 16 万平方米，建设内容包括 3#水冷系统厂房、4#楼低温大厅、5#楼主机大厅（包含控制大厅、磁体电源大厅、波加热电源大厅、NBI 电源大厅、诊断大厅、主机大厅、氦处理中心、预装大厅(热室)）。核技术利用建设内容为使用 I 类射线装置和甲级非密封放射性物质工作场所。总投资为 850592.47 万元（来自项目建议书），环保投资约 8500 万元，占总投资的 1.00%。

#### 8.1.2 实践的正当性

项目运行期间的辐射污染源主要是使用装置时产生的“瞬发辐射”和装置停机后依然存在的“感生放射性”，以及运行期间产生的放射性三废。

本项目装置的设计采取了安全、冗余的辐射安全与防护措施，以尽可能降低对工作人员和公众的辐射影响。经分析评价，本项目对工作人员和公众的辐射影响满足国家相关标准要求。本项目对国家和社会所带来的利益大于可能引起的辐射危害。因此，本项目核技术利用实践活动是正当的。

#### 8.1.3 选址、布局合理性分析

本项目拟建于安徽省合肥市庐阳区三十岗乡三国城路与科学院北路交口西北侧，与周围环境敏感点距离较远，设置了相对独立的区域，并设置物理隔离及人员和物流通道，有利于辐射安全防护；项目布局考虑了场所功能需要，便于辐射工作场所的辐射防护和安全管理。从辐射防护与环境保护的角度，项目的选址可行，平面布局合理。

#### 8.1.4 辐射安全与防护措施

(1) 辐射工作场所分区：按照控制区和监督区对辐射工作场所进行划分，采取安



全控制措施严防人员进入控制区内。

(2) 辐射安全联锁系统：辐射工作场所设计了安全、冗余的辐射安全联锁系统，包括门禁控制、门机联锁、清场搜索、急停按钮、声光报警器、工作状态指示灯、视频监控以及电离辐射警告标志和中文警示说明，可有效防止工作人员和公众受到意外照射。

(3) 辐射屏蔽：根据我国法规标准要求确定各辐射工作场所屏蔽体外剂量率控制水平，采用混凝土作为主屏蔽体，经计算各辐射工作场所屏蔽体外瞬时剂量率均低于其剂量率控制水平。

(4) 通风系统：辐射工作场所设有独立的通风系统，其排风量、换气次数、进排风方式、排风高度等的设计能够确保排入环境的放射性废气对环境的影响满足相关标准的要求。

(5) 工作场所辐射监测系统：本项目工作场所和周围环境均设有固定式辐射监测仪表，对场所内剂量率水平进行实时监测和显示，确保工作人员和公众的安全。

### 8.1.5 辐射环境影响分析

通过理论预测，本项目正常运行期间，工作人员的年最大有效剂量低于本次评价确定的  $5\text{mSv/a}$  的职业照射剂量约束值；公众所受年最大有效剂量低于本次评价确定的  $0.1\text{mSv/a}$  的公众照射剂量约束值。

### 8.1.6 放射性三废排放和处理

本项目运行期间，主要的放射性三废主要来自装置的运行。

项目设置了三废处理设施，能够保证放射性三废得到妥善控制和管理。

### 8.1.7 辐射安全管理

项目拟成立专门的辐射安全防护领导小组；并基于人员岗位职责、辐射防护、设备检修、废物管理、人员培训、辐射监测等方面内容建立一系列的辐射安全管理制度；制定辐射工作人员培训制度，确保辐射工作人员在参加辐射安全与防护考核，并考核合格

后方可上岗；目前制定的辐射环境监测方案、辐射工作场所监测方案能够满足本项目运行的要求。

### 8.1.8 公众参与

本项目参照《环境影响评价公众参与办法》的要求，主要通过网络公示、报纸媒体公示、现场张贴公告等方式进行了公众参与，公示期间未收到其他社会公众、国家机关、社会团体、企事业单位以及其他组织的反馈意见。本项目公众参与的开展情况详见《紧凑型聚变能实验装置环境影响评价公众参与说明》。

### 8.1.9 总结

综上所述，建设单位拟开展的紧凑型聚变能实验装置项目在严格按照环评中的要求进行建设后，项目运行期间对工作人员和环境的影响符合环境保护的要求，该项目对环境的影响是可以接受的。建设单位及使用单位在落实本报告书中的各项污染防治措施和管理措施后，将具备其所从事的辐射活动的技术能力和辐射安全防护能力，故从辐射防护和环境保护的角度考虑，本项目的建设是可行的。

## 8.2 建议

(1) 建设单位在本项目施工过程中必须加强监督，保证建筑材料和施工质量，混凝土施工时要确认成型密度、均匀、表观密度符合设计要求。

(2) 落实环评中提出的管理措施和辐射防护措施要求，在实践中建立和不断完善各项辐射管理规章制度和事故应急预案，并采取切实措施保证各种规章制度的有效执行。