

中广核研究院热室设施建设项目

# 环境影响报告书

(建造阶段)

中广核研究院有限公司

二〇二一年二月

中广核研究院热室设施建设项目

# 环境影响报告书

(建造阶段)

中广核研究院有限公司

法定代表人： 王安

地址： 深圳市福田区上步中路 1001 号

邮编： 518000

## 编制单位和编制人员情况表

项目编号	i61345		
建设项目名称	中广核研究院热室设施建设项目		
建设项目类别	55--167核动力厂(核电厂、核热电厂、核供汽供热厂等); 反应堆(研究堆、实验堆、临界装置等); 核燃料生产、加工、贮存、后处理设施; 放射性污染治理项目		
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)	中广核研究院有限公司		
统一社会信用代码	914403007954242367		
法定代表人(签章)	王安		
主要负责人(签字)	舒睿		
直接负责的主管人员(签字)	林继铭		
<b>二、编制单位情况</b>			
单位名称(盖章)	苏州热工研究院有限公司		
统一社会信用代码	913205084669547113		
<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
陈超峰	07351143506110465	BH011462	陈超峰
<b>2. 主要编制人员</b>			
姓名	主要编写内容	信用编号	签字
赵锋	第6章、第7章	BH011457	赵锋
游春华	第2.4节	BH011459	游春华
杨立涛	第3章、第6.2.1节	BH010110	杨立涛
殷煜皓	第2章、第5章	BH010111	殷煜皓

陶乃贵	第6.1.4节	BH022957	陶乃贵
陈超峰	第1、4、8、9、10章	BH011462	陈超峰

# 目 录

<b>1</b>	<b>概述</b>	<b>1</b>
1.1	建设项目名称和建设性质	1
1.2	建设项目的规模和规划	1
1.3	建设项目经费和环保设施投资	4
1.4	建设目的	4
1.5	环境影响报告书编制依据	5
1.5.1	法律法规	5
1.5.2	技术标准和规范	6
1.6	评价标准	7
1.6.1	辐射环境影响评价的标准	7
1.6.2	非辐射环境影响评价的标准	8
1.7	评价范围	9
<b>2</b>	<b>场址与环境</b>	<b>10</b>
2.1	场址地理位置	10
2.2	人口分布与饮食习惯	11
2.2.1	场址半径 5km 范围内的人口分布	11
2.2.2	场址半径 20km 范围内居民点	13
2.2.3	场址评价区内人口分布	16
2.2.4	居民的年龄构成及饮食习惯和生活习性	20
2.3	土地利用及资源概况	24
2.3.1	土地和水体的利用	24
2.3.2	陆生资源及生态概况	25
2.3.3	水产资源及生态概况	27
2.3.4	工业、交通及其它相关设施	29
2.4	气象	31
2.4.1	区域气候	31
2.4.2	灾害性天气	34
2.4.3	当地气象条件	36
2.4.4	大气稳定度	47
2.4.5	联合频率	47
2.4.6	混合层高度及扩散参数值	51
2.5	水文	51
2.5.1	地表水	51
2.5.2	地下水	52
2.5.3	洪水	52
2.6	地形地貌	52
2.7	地质地震	53
<b>3</b>	<b>环境质量现状</b>	<b>54</b>
3.1	辐射环境质量现状	54
3.1.1	$\gamma$ 辐射剂量率	56

3.1.2	空气中放射性核素 .....	59
3.1.3	水中放射性核素 .....	61
3.1.4	土壤、底泥中放射性 .....	64
3.1.5	辐射环境质量现状 .....	68
3.2	非辐射环境质量现状 .....	69
<b>4</b>	<b>工程分析 .....</b>	<b>70</b>
4.1	场区规划及平面布置 .....	70
4.1.1	总平面布置 .....	70
4.1.2	材料中心布置图 .....	71
4.1.3	同位素中心平面布置图 .....	79
4.1.4	通风及固废暂存中心平面布置图 .....	84
4.2	工艺分析 .....	87
4.2.1	概述 .....	87
4.2.2	燃料检验研究线（F 线）工艺分析 .....	91
4.2.3	材料检验研究线工艺分析（M 线） .....	106
4.2.4	微观分析线（X 线）工艺分析 .....	110
4.2.5	钴源生产线（I 线）工艺分析 .....	113
4.2.6	辅助系统 .....	117
4.3	放射性废物系统和源项 .....	135
4.3.1	操作源项 .....	135
4.3.2	放射性废气处理系统及排放源项 .....	137
4.3.3	废液处理系统及排放源项 .....	146
4.3.4	放射性固体废物处理系统及废物量 .....	149
4.3.5	乏燃料暂存系统 .....	160
4.3.6	废旧源贮存系统 .....	164
4.4	非放射性废物处理系统 .....	165
4.4.1	固体废物 .....	165
4.4.2	废水 .....	167
4.4.3	废气 .....	167
4.4.4	噪声 .....	167
4.5	放射性物质场内运输 .....	169
4.5.1	压水堆燃料棒场内运输 .....	169
4.5.2	厂房内运输 .....	169
4.5.3	运输容器 .....	170
4.6	初步退役计划 .....	172
4.6.1	退役策略 .....	172
4.6.2	退役方案初步设想 .....	172
4.6.3	便于退役的初步考虑 .....	173
<b>5</b>	<b>施工建设过程的环境影响 .....</b>	<b>175</b>
5.1	土地利用 .....	175
5.1.1	大气环境的影响 .....	175
5.1.2	水环境的影响 .....	175

5.1.3	声环境的影响 .....	176
5.1.4	生态环境的影响 .....	177
5.1.5	施工固体废弃物对环境的影响 .....	177
5.2	水的利用 .....	178
5.3	施工影响的控制及施工期环境监测 .....	178
5.3.1	减少环境影响的措施 .....	178
5.3.2	施工期环境监测 .....	179
<b>6</b>	<b>正常运行的环境影响 .....</b>	<b>180</b>
6.1	材料中心相关辐射环境影响 .....	180
6.1.1	照射途径 .....	180
6.1.2	释放源项 .....	181
6.1.3	计算模式 .....	181
6.1.4	辐射剂量计算 .....	197
6.1.5	辐射影响评价 .....	206
6.2	同位素中心辐射环境影响 .....	206
6.2.1	辐射水平计算和评价 .....	206
6.2.2	工作人员受照剂量 .....	217
6.2.3	辐射安全与防护措施 .....	225
6.2.4	安全保卫措施 .....	231
6.2.5	辐射安全管理措施 .....	231
6.3	正常运行的非放射性环境影响 .....	232
6.3.1	废水 .....	232
6.3.2	固体废弃物 .....	232
6.3.3	噪声 .....	233
6.3.4	废气 .....	233
<b>7</b>	<b>事故工况下的环境影响和环境风险 .....</b>	<b>235</b>
7.1	概述 .....	235
7.2	潜在的放射性物质释放事故 .....	235
7.2.1	事故描述和事故源项 .....	235
7.2.2	放射性事故后果计算 .....	240
7.2.3	放射性事故后果评价 .....	245
7.2.4	潜在的放射性物质释放事故预防、缓解措施 .....	245
7.3	核事故应急 .....	249
7.4	辐射事故及应急 .....	250
7.4.1	辐射事故及预防措施 .....	250
7.4.2	辐射应急 .....	252
7.5	场内运输事故 .....	252
7.6	环境风险评价（非辐射风险） .....	252
<b>8</b>	<b>流出物监测与环境监测 .....</b>	<b>254</b>
8.1	辐射监测 .....	254
8.1.1	流出物监测 .....	254

8.1.2	辐射环境监测 .....	256
8.1.3	个人剂量监测 .....	256
8.2	监测设施 .....	257
8.2.1	流出物实验室 .....	257
8.2.2	环境监测设施 .....	257
8.3	质量保证 .....	257
8.4	施工期环境监测计划 .....	259
<b>9</b>	<b>利益代价分析 .....</b>	<b>260</b>
9.1	利益分析 .....	260
9.1.1	科学技术效益 .....	260
9.1.2	经济效益 .....	260
9.2	代价分析 .....	261
9.2.1	经济代价 .....	261
9.2.2	社会和环境代价 .....	261
9.2.3	资源代价 .....	261
<b>10</b>	<b>结论与建议 .....</b>	<b>262</b>
10.1	项目工程概况 .....	262
10.2	环境保护设施 .....	262
10.3	放射性排放 .....	263
10.4	辐射环境影响评价结论 .....	263
10.5	非辐射环境影响评价结论 .....	264
10.6	建议 .....	264



# 1 概述

## 1.1 建设项目名称和建设性质

本项目名称为：中广核研究院热室设施建设项目（原中广核先进能源研究与创新中心项目）。2021年1月，依据国家国防科技工业局核准过程中的审查意见，现将项目名称变更为“中广核研究院热室设施建设项目”，建设内容未发生变化。

本项目建设和运营单位为中广核研究院有限公司，设计单位为深圳中广核工程设计有限公司，属于新建项目，该项目主要开展燃料棒和堆内材料的辐照后检验及辐照性能研究、新型包壳材料研发、放射源生产等工作。本项目内规划构筑物有材料中心、通风及固废暂存中心、同位素中心和开闭所。材料中心主要用于乏燃料及结构材料检验研究，包括燃料研究、力学性能研究、微观分析、热物性能分析等，属于“民用核燃料循环设施”；同位素中心主要开展 $^{60}\text{Co}$ 放射源生产，属于“核技术利用设施”。

建设地点位于阳江核电厂的原堆料区，属于工业用地（公共设施用地），占地面积约 $78439\text{ m}^2$ （土地使用证 $121879.8\text{ m}^2$ ）。

## 1.2 建设项目的规模和规划

项目设施规划总建筑面积 $28915.16\text{ m}^2$ ，利用原有建筑面积 $1722\text{ m}^2$ ，新建建筑面积 $27193.16\text{ m}^2$ ，建筑占地面积 $15202.13\text{ m}^2$ ，原有建筑占地面积 $1360.4\text{ m}^2$ ，新建建筑占地面积 $13841.73\text{ m}^2$ 。主要工艺设施包括材料辐照性能研究中心（简称“材料中心”）和同位素研发中心（简称“同位素中心”），主要辅助设施包括通风及固废暂存中心、开闭所和实保保护区入口大门。

材料中心一年最大检验操作量为10根压水堆乏燃料棒，燃耗为 $62\text{GWd/tU}$ 、富集度为4.95%，共配备35间热室、1间屏蔽室和13间铅室。寿期内（40年）设计能力为最多储存乏燃料棒400根。

同位素中心主要开展 $^{60}\text{Co}$ 放射源生产，设计日最大操作量 $5.18\times 10^{15}\text{Bq}$ ，年最大操作量 $3.7\times 10^{17}\text{Bq}$ ，钴源生产线钴靶件接收水池、成品源水池和废旧放射源回收储存水池的设计储存容量均为 $3.7\times 10^{17}\text{Bq}$ ，共配备3间热室。

项目主工艺规划规模和本次建设内容见表 1-1，表中规划内容只建设热室和铅室，

不建设其他工艺设施设备，为预留场所，不在本次评价范围内。

表 1-1 热室规划及主要功能

编号	名称	功能	操作源项	备注	
燃料 检验 研究 线（F 线）	FA	组件检查热室	辐照监督组件外观、尺寸测量及解体，燃料棒 X 射线检查	压水堆燃料棒单棒（破损棒、完整棒）、监督管	
	F1	无损检测热室	燃料棒外观观察，泄漏检查，尺寸测量，涡流探伤， $\gamma$ 扫描，燃料棒刺孔及裂变气体测量分析	压水堆燃料棒单棒（破损棒、完整棒）、考验燃料棒单棒	
	F2	切割热室	燃料棒的切割	压水堆燃料棒（破损棒、完整棒）、考验燃料棒单棒	
	F3	芯块去除热室	芯块的去除	200mm 长燃料棒	
	F4	样品储存热室	芯块样品切断的燃料棒储存	---	
	F5	废物封装、处理热室	废物整备，封装	切割碎屑、擦拭物	
	F6	样品清洗热室	拉伸等样品清洗	200mm 长包壳管	
	F7	金相样品镶嵌热室	金相样品浇铸	100mm 长燃料棒	
	F8	精密切割热室	小样品的切割	100mm 长燃料棒	
	F9	金相样品磨抛热室	金相样品磨抛	10mm 长燃料棒	
	F10	金相样品蚀刻热室	金相样品蚀刻	10mm 长燃料棒	
	F11	金相观察、显微硬度、微区 $\gamma$ 扫描热室	扫描电镜分析、电子探针分析等带燃料的微观样品制备材料	3mm 长燃料棒	
	F12	密度测量热室	芯块密度测量	1 个芯块	
	F13	残余裂变气体测量热室	开展燃料芯块内剩余裂变气体以及挥发性、半挥发性裂变产物随温度升高的释过程	1 个芯块	规划
	F14	RIA 事故工况热室	研究燃料与包壳材料在 LOCA 工况下的行为	200mm 长燃料棒	规划
	F15	表面污染测量热室	测量再组装燃料棒外表面的燃料沾污	1000mm 长再组装燃料棒	
	F16	超声清洗热室	去除燃料棒外表面的燃料沾污	1000mm 长再组装燃料棒	
	F17	燃料棒焊接热室	单棒焊接、堵孔焊	1000mm 长再组装燃料棒	
	F18	燃料棒装配热室	单棒再组装、真空干燥	1000mm 长再组装燃料棒	
F19	可移动壳体热室 1	操作污染性大、气溶胶浓度高的放射性材料	200mm 长燃料棒	规划	

编号	名称	功能	操作源项	备注	
	F20	可移动壳体热室 2	操作污染性大、气溶胶浓度高的放射性材料	200mm 长燃料棒	规划
	F21	设备去污与维护热室	热室内设备去污与维护	沾污的设备	
材料研究线 (M)	M1	样品观察测量热室	---	---	
	M2	冲击试验热室 1	材料冲击试验	结构材料冲击样品	
	M3	冲击试验热室 2	材料冲击试验	结构材料冲击样品	规划
	M4	动态拉伸试验热室	材料拉伸试验	150mm 包壳管	
	M5	静态拉伸试验热室	材料拉伸试验	150mm 包壳管	
	M6	内压蠕变试验热室	包壳管爆破试验	150mm 包壳管	
	M7	蠕变试验热室	材料蠕变试验	10×150mm 包壳管	规划
	M8	疲劳试验热室	材料疲劳试验	结构材料	
	M9	数控加工中心	力学样品加工	150mm 包壳管、结构材料	规划
	M10	线切割装置	力学样品加工	150mm 包壳管、结构材料	规划
	M11	电火花成型	力学样品加工	150mm 包壳管、结构材料	规划
	M12	吸氢、应力腐蚀试验热室	包壳材料加速腐蚀试验, 包壳材料吸氢、应力腐蚀试验等, 材料疲劳试验	150mm 包壳管、结构材料	规划
	M13	样品储存、接收热室	接收材料样品	150mm 包壳管、结构材料	
	---	微观、金相样品制备屏蔽箱	---	结构材料	
微观分析线 (X)	X1	SIMS 分析铅室	二次离子质谱分析	结构材料、3mm 长燃料棒	规划
	X2	透射电镜分析室	透射电镜分析	---	
	X3	FIB 分析铅室	用于 FIB 分析	结构材料、3mm 长燃料棒	规划
	X4	扫描电镜分析铅室	用于包壳及结构件断口分析, 燃料中气孔分布观察	结构材料、3mm 长燃料棒	
	X5	电子探针分析室	用于分析燃料中的裂变产物成分定性定量分析, 裂变气体迁移规律探讨	结构材料、3mm 长燃料棒	规划
	X6	纳米压痕测量室	纳米压痕测量	结构材料、3mm 长燃料棒	
	X7	Raman 光谱仪分析铅室	用于 Raman 光谱分析	结构材料、3mm 长燃料棒	规划
	X8	X 射线衍射仪分析铅室	用于 X 射线衍射分析	结构材料、3mm 长燃料棒	规划

编号	名称	功能	操作源项	备注	
	X9	正电子湮灭谱仪分析铅室	用于正电子湮灭谱仪分析	结构材料	
	X10	热物性分析铅室	热导, 热物性能测量分析	结构材料、3mm 长燃料棒	
	X11	热物性分析铅室	比热, DSC 分析仪, 热物性能测量分析	结构材料、3mm 长燃料棒	
	X12	XRF 分析铅室	XRF 分析	结构材料	规划
	X13	氢含量分析铅室	氢含量分析	150mm 包壳管、结构材料	
钴源生产线 (I 线)	水池	钴靶件接收水池	靶件接收、暂存及废物储存	钴靶件 $3.7 \times 10^{17} \text{Bq}$	
		成品源水池	成品源储存	$^{60}\text{Co}$ 放射源 $3.7 \times 10^{17} \text{Bq}$	
		废旧放射源水池	接收、暂存废旧放射源	废旧 $^{60}\text{Co}$ 放射源 $3.7 \times 10^{17} \text{Bq}$	
		运输容器清洗水池	成品源运输容器清洗	---	
	I1	内包壳封装热室	同位素生产 (切割、分装、内包壳焊接、清洗)	钴芯块、内包壳	
	I2	外包壳封装热室	同位素生产 (外包壳焊接、检漏、表面污染检查)	内包壳、外包壳	
	I3	检验热室	同位素生产 (活度测量、过规检查)	外包壳	

### 1.3 建设项目经费和环保设施投资

本项目建设资金由中广核集团全额出资, 本次建设总投资约 87972 万元, 其中环保设施投资 15344 万元, 环保设施主要包括: 通风及固废暂存中心、通风过滤系统、放射性废液处理设施、固体废物收集暂存设施、环境监测设施和流出物监测设施等。

### 1.4 建设目的

安全性、经济性、可持续发展性已成为核电发展的主题, 由此, 与核电相关的材料研发、放射性部件检测、先进核能发展以及核技术应用等成为目前核电发展的主要方向之一。

我国已是核电应用大国, 核电设备的自主化、国产化水平依然有待提高, 核电设备配套生产能力、核电批量化建设和在运核电厂运行维护及更新的需求之间仍然存在

矛盾，尤其是核燃料加工制造、核技术应用等方面，自主研发能力亟待提高。

随着中国广核集团有限公司（以下简称“集团”）科技研发、运营核电厂技术支持、核技术应用等领域业务的不断拓展和深入，有必要建设中广核研究院热室设施建设项目，为集团相关领域的研究工作提供重要的场所和硬件条件。

本项目建成后能够满足集团在运核电厂燃料棒辐照后性能检测、燃料棒破损原因分析、核电厂运行技术支持、同位素生产、新型燃料研发等需求，建成后将成为国际先进、国内一流的材料研发基地和综合性科研实验平台，未来可为粤港澳大湾区核材料研究领域提供良好的性能检测服务，产生满足国家战略需求的高水平科研成果。

## 1.5 环境影响报告书编制依据

### 1.5.1 法律法规

本项目环境影响评价依据的法律法规包括：

- 《中华人民共和国核安全法》（2018年）；
- 《中华人民共和国放射性污染防治法》（2003年）；
- 《中华人民共和国环境保护法》（2015年修订）；
- 《中华人民共和国环境影响评价法》（2018年修订）；
- 《中华人民共和国大气污染防治法》（2018年修订）；
- 《中华人民共和国水污染防治法》（2018年修订）；
- 《中华人民共和国环境噪声污染防治法》（2018年修订）；
- 《中华人民共和国固体废物污染防治法》（2020年9月1日实施）；
- 《中华人民共和国海洋环境保护法》（2016年11月7日修订）
- 《放射性废物安全管理条例》（2012年3月1日实施）；
- 《放射性废物安全监督管理规定》（HAF401，1997年）；
- 《建设项目环境保护管理条例》（2017年修订）；
- 《中华人民共和国自然保护区条例》（2017年修订）；
- 《放射性物品运输安全管理条例》（2010年）；
- 《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》（2019年修订）；
- 《中华人民共和国核材料管制条例》（HAF501，1987年）；

- 《中华人民共和国民用核设施安全监督管理条例》（HAF001，1996年）；
- 《广东省建设项目环境保护管理条例》（2017年7月16日修订）；
- 《广东省环境保护条例》（2018年11月29日修订）；
- 《危险化学品管理条例》（2013年）等。

## 1.5.2 技术标准和规范

本项目环境影响评价依据或参考的技术标准和规范包括：

- 《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）；
- 《环境影响评价技术导则 大气环境》（HJ2.2-2018）；
- 《环境影响评价技术导则 水环境》（HJ2.3-2018）；
- 《环境影响评价技术导则 声环境》（HJ2.4-2009）；
- 《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）；
- 《环境空气质量标准》（GB3095-2012）；
- 《海水水质标准》（GB3097-1997）；
- 《环境核辐射监测规定》（GB12379-1990）；
- 《放射性物品安全运输规定》（GB11806-2019）；
- 《放射性废物管理规定》（GB14500-2002）
- 《核设施流出物监测的一般规定》（GB11217-89）
- 《核设施流出物和环境放射性监测质量保证计划的一般要求》（GB11216-89）
- 《辐射环境监测技术规范》（HJ/T61-2001）
- 《开放型放射性物质实验室辐射防护设计规范》（EJ380-1989）；
- 《放射性同位素生产和加工中的辐射防护监测》（EJ748-1993）；
- 《操作非密封源的辐射防护规定》（GB11930-2010）；
- 《放射性废物分类》（2018年）；
- 《射线装置分类》（2017年）；
- 《放射源分类办法》（2005年）
- 《民用核燃料循环设施分类原则与基本安全要求（试行）》（2016年）；
- 《放射性固体废物贮存和处置许可管理办法》（2014年）；
- 《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》（2019年修订）；
- 《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》（2011年）；

- 《广东省地方标准 大气污染物排放限值》(DB44/27-2001);
- 《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002);
- 《工业企业厂界环境噪声排放标准》(GB12348-2008);
- 《建筑施工场界环境噪声排放标准》(GB12523-2011);
- 《建设项目环境影响评价分类管理名录》(2021 年版);
- 《国家危险废物名录》(2021 年版);
- 《广东省放射性废物管理办法》(2001 年 4 月 16 日通过, 2001 年 6 月 1 日实施);
- 《污水综合排放标准》(GB 8978-1996)。

## 1.6 评价标准

### 1.6.1 辐射环境影响评价标准

#### (1) 正常运行工况

本项目正常运行期间排放放射性气载流出物, 本次环境影响评价确定该项目正常运行向环境释放的放射性物质对公众中任何个人造成的年有效剂量约束值为 0.01mSv, 气载流出物年排放量设计值为:

- 惰性气体:  $6.98 \times 10^{11} \text{Bq}$ ;
- 碘:  $2.35 \times 10^4 \text{Bq}$ ;
- 粒子:  $1.47 \times 10^9 \text{Bq}$ ;
- 碳 14:  $3.75 \times 10^7 \text{Bq}$ ;
- 氚:  $5.43 \times 10^{10} \text{Bq}$ 。

核技术利用项目(同位素中心)对工作人员的年有效剂量约束值为 5mSv。

#### (2) 事故运行工况

事故工况下, 场界外公众最大照射剂量可接受准则为 5mSv。

#### (3) 辐射工作场所辐射水平

本项目放射性控制区剂量率限值见表 1-2。

表 1-2 辐射工作区辐射水平控制值

区域名称		辐射水平 ( $\mu\text{Sv/h}$ )	居留特征
监督区(白)		$\leq 1$	停留时间不超过 500h/季度
控制区	控制 I 区(绿)	$\leq 2.5$	停留时间不超过 40h/周

	控制 II 区（橙）	≤10	管理进入
	控制 III 区（红）	>10	限制进入

本项目工作场所表面污染控制水平执行 GB18871-2002《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》中“附录 B 剂量限值和表面污染控制水平”的相关要求，具体见表 1-3。

表 1-3 工作场所表面放射性污染控制水平（Bq/cm<sup>2</sup>）

表面类型		α 放射性物质		β 放射性物质
		极 毒 性	其 他	
工作台、设备、墙壁、地面	控制区	4	4×10	4×10
	监督区	4×10 <sup>-1</sup>	4	4
工作服、手套、工作鞋	控制区	4×10 <sup>-1</sup>	4×10 <sup>-1</sup>	4
	监督区	4×10 <sup>-1</sup>	4×10 <sup>-1</sup>	4
手、皮肤、内衣、工作袜		4×10 <sup>-2</sup>	4×10 <sup>-2</sup>	4×10 <sup>-1</sup>

#### （4）含放射性核素废水排放标准

放射性液态流出物经处理后达到《污水综合排放标准》（GB 8978-1996）后排放，即总 α≤1Bq/L，总 β≤10Bq/L。

## 1.6.2 非辐射环境影响评价标准

### 1.6.2.1 环境质量标准

#### （1）环境空气

场址所在区域属于二类区，大气环境执行《环境空气质量标准》（GB3095-2012）中二级标准：

臭氧小时平均浓度：≤0.20mg/m<sup>3</sup>，最大 8h 平均浓度≤0.16mg/m<sup>3</sup>；

氮氧化物小时平均浓度：≤0.25mg/m<sup>3</sup>，24h 平均浓度≤0.10mg/m<sup>3</sup>。

#### （2）声环境

场址所在区域为声环境功能区 2 类区域，声环境执行《声环境质量标准》（GB3096-2008）的 2 类标准，即昼间 60dB（A），夜间 50dB（A）。

#### （3）海水水质

厂址附近海水水质按照厂址近岸海域环境功能区划的要求执行《海水水质标准》（GB3097-1997）中的相应标准。



### 1.6.2.2 排放标准

#### (1) 大气污染物排放

依据《广东省地方标准 大气污染物排放限值》(DB44/27-2001): 氮氧化物排放浓度 $\leq 120\text{mg/m}^3$ , 排放量 $\leq 3.6\text{kg/h}$ 。

#### (2) 废水排放

本项目废水经处理后送阳江核电厂污水处理站处理排放, 执行阳江核电厂生活污水排放标准。

#### (3) 噪声排放

施工期间的厂界噪声执行《建筑施工场界环境噪声排放标准》(GB12523-2011), 昼间 $\leq 70\text{dB(A)}$ , 夜间 $\leq 55\text{dB(A)}$ 。

运行期执行《工业企业厂界环境噪声排放标准》(GB12348-2008) 二类标准, 昼间 $\leq 60\text{dB(A)}$ , 夜间 $\leq 50\text{dB(A)}$ 。

## 1.7 评价范围

辐射环境影响评价的范围指以主要的气载流出物排放点为中心, 半径为 20km 内的区域, 环境保护目标是评价范围内的居民。

依据《环境影响评价技术导则 声环境》(HJ2.4-2009), 项目位于声环境功能区 2 类区域, 声环境评价等级为二级, 周围无声环境敏感目标, 声环境影响评价范围取场址边界外 1m。

依据《环境影响评价技术导则 大气环境》(HJ2.2-2018), 大气环境评价等级为三级, 不设置评价范围。

依据《环境影响评价技术导则 水环境》(HJ2.3-2018), 不直接排放废水, 水环境评价等级为三级 B, 不设置评价范围。

## 2 场址与环境

### 2.1 场址地理位置

本项目位于广东省阳江市阳东区东平镇辖区，隶属地块编码 HD-01-11，地理位置为北纬  $21^{\circ}43'40''$ 、东经  $112^{\circ}16'5''$ ，地理位置见图 2-1。



图 2-1 本项目地理位置图

本项目距离阳江核电厂最近的反应堆直线距离约 2.3km，距离东平镇约 4.3km，周边环境图见图 2-2。



图 2-2 项目周边环境图

## 2.2 人口分布与饮食习惯

### 2.2.1 场址半径 5km 范围内的人口分布

截止 2018 年底，场址半径 5km 范围内涉及阳东区东平镇所辖的瓦北行政村、允泊行政村、海萌行政村和部分渔委会，共有自然村、渔委会及渔业村 30 个，人口 18444 人。按陆域面积计算，平均人口密度约 336 人/km<sup>2</sup>，低于广东省同期的平均人口密度 631 人/km<sup>2</sup>，高于阳江市同期人口密度 321 人/km<sup>2</sup>。

表 2-1 列出场址半径 5km 范围内各自然村（渔委会、渔业村）的方位、距离和人口数。图 2-3 给出场址半径 5km 范围内各自然村（渔委会、渔业村）的分布情况。

离场址最近的居民点为位于场址 NNW 方位 0.8km 处的光星自然村，有人口 286 人。场址 5km 范围内人口最多的居民点为场址 WNW 方位 4.5km 的太阳升渔委会，有人口 2401 人。

场址半径 5km 范围内没有 1 万人以上集中居民点。

场址半径 5km 范围内的流动人口主要为部分游客和阳江核电厂务工人口。场址半径 5km 范围内主要有大澳渔村文化村和东平渔港，其中大澳渔家文化村为国家 3A 级旅游风景区，位于场址西南侧约 3.1km 处，一年中 4 月~10 月旅游人次较多。该旅游

区工作人员约 7~8 人，旅游人次除春节外保守估计每天 1000 人次，春节最多时约 3000 人/天，约 25~30 万人次/年。东平渔港位于东平镇区，近年来，每年的 8 月份会在此举办“文化美食节”。2016 年东平镇共接待游客 130 万人次，游客主要集中在每年 4 月~10 月。

表 2-1 场址半径 5km 范围内自然村（渔委会或渔业村）（2018 年）

镇名	行政村名	自然村名	方位	距离 (km)	人口数 (人)
东平镇	瓦北	光星	NNW	0.8	286
		新村	NW	1.2	125
		那心	NW	1.7	232
		北城	N	2.0	234
		蒲塘	N	2.2	121
		罗屋	NNW	2.9	127
		瓦窑门	NW	3.0	403
		地塘岗	NW	3.2	191
		和平	NW	3.5	50
	允泊	瓦屋	W	1.6	200
		地塘园	W	1.8	325
		允安	W	1.8	507
		盐灶	W	2.1	538
		允新	WNW	2.1	546
		葛塘	W	2.4	480
		平堤	ENE	2.5	628
		泥澳仔	WSW	2.6	345
	海荫	海荫村	NW	4.6	1096
		马屋村	WNW	4.5	485
		高洋村	NW	4.0	202
		晒布村	WNW	4.5	480
		白庚村	WNW	5.0	280
		大澳渔村	SW	3.1	73
		大澳渔委会	WNW	3.9	1083
		鹏程渔委会	WNW	4.0	535
		海胜渔委会	WNW	4.2	1238
		东方红渔委会	WNW	4.3	1253
		红星渔委会	WNW	4.4	2181
	太阳升渔委会	WNW	4.5	2401	
	先锋渔委会	WNW	4.6	1799	
	合计				18444

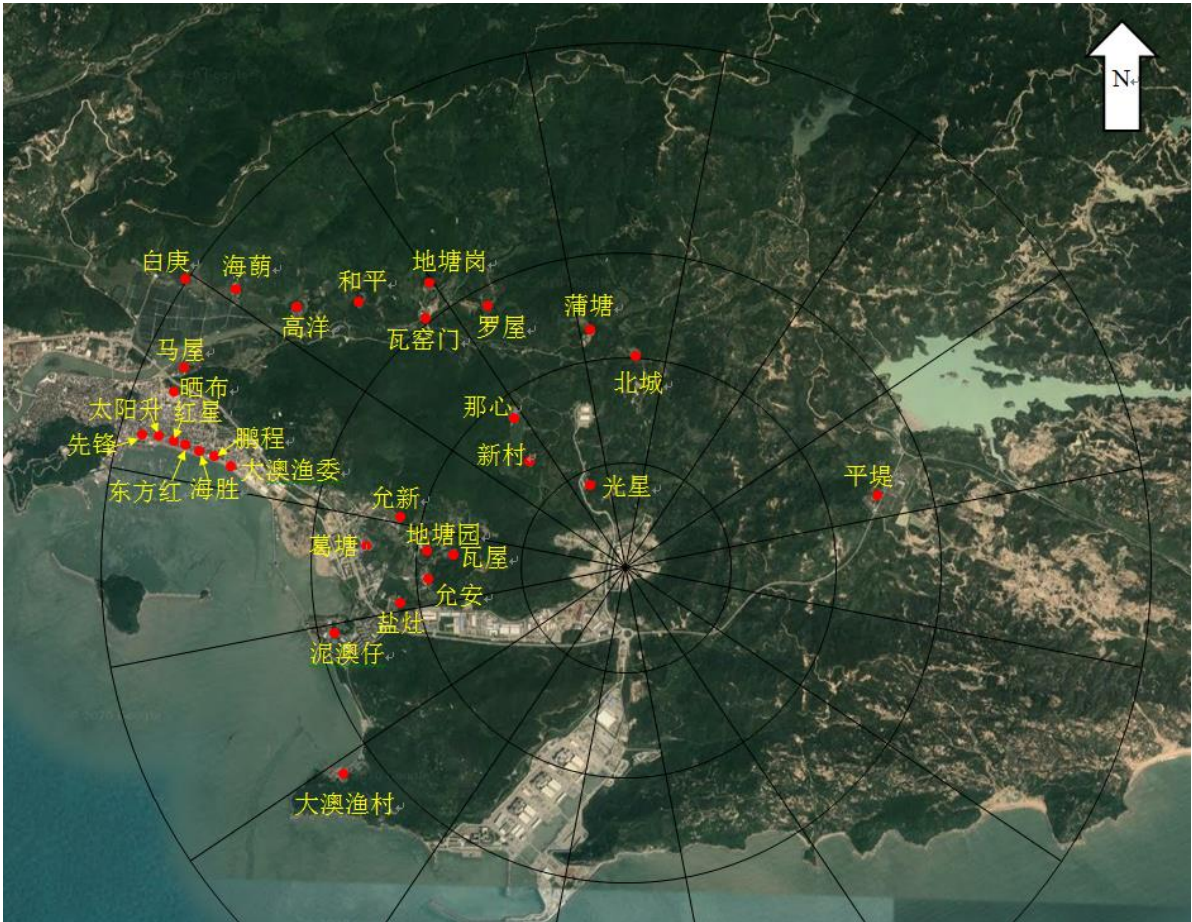


图 2-3 场址半径 5km 范围内自然村（渔委会、渔业村）分布示意图

## 2.2.2 场址半径 20km 范围内居民点

场址半径 5~20km 范围内涉及阳东区东平镇、新洲镇、大沟镇和台山市北陡镇、川岛镇共 5 个乡镇，总共涉及有 48 个行政村。

截止 2018 年，厂址半径 5~20km 范围内共有人口 143307 人，其中千人以上行政村为 42 个。按照镇区作为一个集中居民点来计，场址半径 20km 范围内最大的居民点为 WNW 约 5.5km 的东平镇区（包括东平居委和各渔委会），其中东平居委有 8062 人，各渔委会有 12484 人（包括 5km 内的各渔委会），东平镇区人口总计 20546 人；其次为位于场址 N 方位约 14.5km 的新洲镇区（包括新洲村和新洲居委），共有人口 9955 人。

表 2-2 列出场址半径 5~20km 范围内各行政村分布情况。图 2-4 给出了场址半径 5~20km 范围内的各居民点分布情况。

表 2-2 场址半径 5~20km 范围内行政村（2018 年）

镇名	行政村名	方位	距离 (km)	人口数 (人)
东平镇	东北	WNW	5.1	730
	红旗渔委会	WNW	5.2	1121
	永利渔委会	WNW	5.2	873
	东平居委	WNW	5.5	8062
	大滙	N	5.7	928
	口洋	WNW	6.0	2244
	沙坪	NW	6.9	857
	北环	NW	8.1	1053
	莲北	NNW	10.4	3490
	双安	NNW	12.9	2377
	良垌	NNW	13.2	4190
	北陡镇	沙咀	E	7.8
那琴		E	10	4988
石蕉		ENE	12.8	3363
寨门		ENE	16.2	4635
下洞		NE	18.2	3522
早禾石		NE	19.1	1874
小洞		NE	19.4	2572
总社		NE	19.8	172
新洲镇	龙潭村	N	9.9	5136
	石岗	NNE	13.9	3565
	新洲村	N	14.3	5826
	居委	N	14.5	4129
	三山	N	14.5	2356
	福杨	N	14.6	2228
	旱地村	NNE	15	3605
	平田	N	15	2408
	东安	NNW	15.5	3801
	表竹	NNW	15.8	2486
	乌石	NNW	16.5	3267
	北股	N	17.8	3818
	中六	N	19.2	2850
川岛镇	茫洲	ESE	19.9	718
大沟镇	寿长	NNW	11.7	3574
	三丫	NW	12.3	2495
	沙岗村	NW	14.2	5280
	海头村	NW	15.4	3787
	大沟村	NW	15.8	3894
	徐赤村	NW	15.9	2877
	新梨村	NW	16.4	3277

镇名	行政村名	方位	距离 (km)	人口数 (人)
	赤坎村	NNW	16.6	5051
	大沟居委会	NW	16.6	2893
	花村	NW	16.7	1989
	芦山村	WNW	17.5	4115
	华洞村	WNW	18.8	2987
	那金村	NW	19	1740
	红旗村	NNW	19.5	1529
	高洞村	NNW	19.8	1063
	合计			143307



图 2-4 场址 5~20km 范围内居民点分布图

厂址半径 20km 范围内无大型公共设施。

— 文化

场址半径 15km 范围内的有 1 所 9 年制学校（东平学校）、8 所小学/教学点、5 所幼儿园，有中小學生 3098 人，幼儿园學生 934 人，教職工 303 人。

— 卫生

根据阳东区卫生和计划生育局提供资料，场址半径 5km 范围内有 1 家卫生院，为

东平镇卫生院，位于东平镇镇区，现有医护人员 100 人，注册病床数 99 张，开放病床数 30 张，为一级甲等医院，有全自动生化仪 1 台、洗胃机 1 台、心电监护仪 1 台、CR 机 1 台、彩色 B 超 1 台、全自动血液分析仪 1 台、除颤器 1 台、呼吸机 1 台、胎儿监护仪 1 台和救护车两辆。除镇卫生院外，场址半径 15km 范围内涉及的阳东区东平镇各村以及台山市沙咀村均设有村卫生站。这些卫生站没有大件设施，每个卫生站有医务人员 2~3 人不等，可进行简单的医治活动。

距场址最近的允泊村卫生站位于允泊村（场址 W 约方位 2km）有医务人员 2 人。

#### 一 他公共设施

场址半径 5km 区域主要涉及到阳东区东平镇，1 家敬老院，没有监狱和疗养院等设施。

东平敬老院位于场址 W 方位约 2km 的东平镇允泊村，现有供养人员 24 人，床位 42 张，工作人员 5 人。

### 2.2.3 场址评价区内人口分布

#### 2.2.3.1 场址评价区内现有人口分布

截止 2018 年底，场址评价区内（场址半径 20km 范围）总人口数为 161751 人，评价区内人口密度为 129 人/km<sup>2</sup>，低于广东省同期（2018 年）平均人口密度 631 人/km<sup>2</sup>、也低于阳江市同期人口密度 321 人/km<sup>2</sup>和江门市同期人口密度 484 人/km<sup>2</sup>。

其中 10~20km NW~N 方位人口较为集中，共有人口 81771 人，共占评价区总人口的 50.6%，主要是因为该区域为新洲镇、大沟镇居民点集中区域，人口相对较多。场址半径 20km 范围内 2018 年底各子区的人口分布见表 2-3 和图 2-5。

表 2-3 场址半径 20km 范围内各子区的人口分布（2018 年）

单位（距离：km；人口：人）

距离 (km) 方位	0~1	1~2	2~3	3~5	5~10	10~20	合计
N	0	234	121	0	6064	21259	27678
NNE	0	0	0	0	0	7170	7170
NE	0	0	0	0	0	8140	8140



距离 (km) 方位	0~1	1~2	2~3	3~5	5~10	10~20	合计
ENE	0	0	628	0	0	7998	8626
E	0	0	0	0	8500	0	8500
ESE	0	0	0	0	0	718	718
SE	0	0	0	0	0	0	0
SSE	0	0	0	0	0	0	0
S	0	0	0	0	0	0	0
SSW	0	0	0	0	0	0	0
SW	0	0	0	73	0	0	73
WSW	0	0	345	0	0	0	345
W	0	1032	1564	0	0	0	2596
WNW	0	0	0	11735	13030	7102	31867
NW	0	357	280	1662	1910	28232	32441
NNW	286	0	127	0	904	32280	33597
合计	286	1623	3065	13470	30408	112899	161751

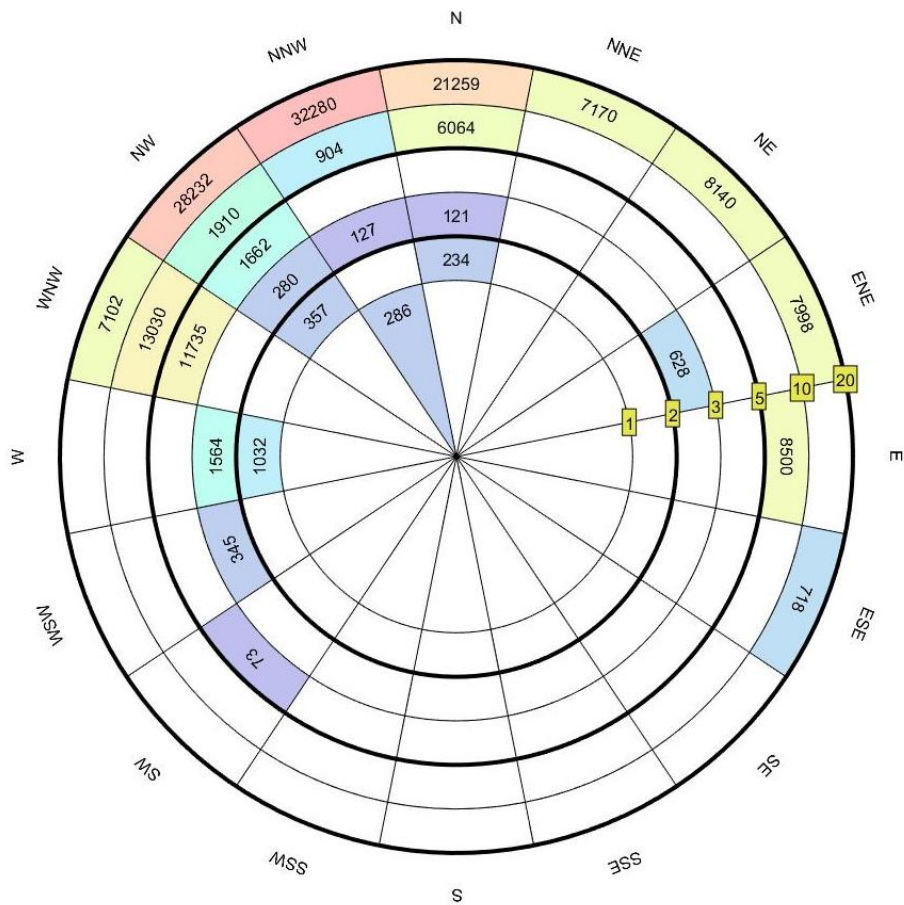


图 2-5 场址半径 20km 范围人口分布图

### 2.2.3.2 场址评价区内预期人口分布

#### 2.2.3.2.1 人口自然增长率

根据广东省 2019 年统计年鉴，阳江市 2019 年统计年鉴，表 2-4 给出场址所在阳江市和广东省 2015~2018 年人口自然增长率情况。

表 2-4 2015-2018 年人口自然增长率（‰）

年度	2015	2016	2017	2018
广东省	6.80	7.44	9.16	8.24
阳江市	7.44	7.57	9.57	6.78

#### 2.2.3.2.2 预期人口增长率

本项目拟于 2023 年运行，预期人口增长率的资料主要来源于《广东省“十二五”人口发展战略研究》（2012 年出版）。本报告主要参考《广东省“十二五”人口发展战略研究》中的高方案（即全面二胎方案）。表 2-5 给出了该资料中广东省、阳江市 2019 年至 2023 年逐年人口增长率。

表 2-5 《广东省“十二五”人口发展战略研究》人口增长率预测结果（高方案）（‰）

年份	广东省	阳江市	年份	广东省	阳江市
2019	1.38	0.95	2035	0.53	0.45
2020	1.27	0.78	2036	0.50	0.42
2021	1.25	0.75	2037	0.48	0.37
2022	1.23	0.69	2038	0.46	0.33
2023	1.18	0.63	2039	0.55	0.39

通过比较表 2-4 和表 2-5 的结果，本报告选用的广东省人口预期增长率在 2023 年前均大于近年来人口实际增长率，阳江市人口预期增长率在 2023 年略小于 2018 年的实际自然增长率。从保守角度考虑，本报告对于场址运行年 2023 年的人口增长率采用表 2-5 中广东省的预期人口增长率数据。

#### 2.2.3.2.3 厂址半径 20km 范围内预期人口分布

本报告人口预测采用指数增长模式计算，模型公式如下：

$$N = N_0 e^{r \cdot t}$$

式中：N：预期人口数（人）；

$N_0$ ：现有人口数（人）；

r：预期年平均人口增长率（‰）；

t：N 与  $N_0$  之间的时间间隔（年）。

根据上述人口预测计算模式以及人口预期增长率可以得出：本项目运行年份 2023 年场址 20km 范围内的人口数为 169529 人，各子区的人口分布情况见表 2-6 和图 2-6。

表 2-6 场址半径 20km 范围内各子区的人口分布（2023 年）

单位（距离：km；人口：人）

距离（km） 方位	0~1	1~2	2~3	3~5	5~10	10~20	合计
N	0	245	127	0	6353	21992	28717
NNE	0	0	0	0	0	9523	9523
NE	0	0	0	0	0	8788	8788
ENE	0	0	658	0	0	8379	9037
E	0	0	0	0	8905	0	8905
ESE	0	0	0	0	0	655	655
SE	0	0	0	0	0	0	0
SSE	0	0	0	0	0	0	0
S	0	0	0	0	0	0	0
SSW	0	0	0	0	0	0	0
SW	0	0	0	76	0	0	76
WSW	0	0	361	0	0	0	361
W	0	1081	1638	0	0	0	2719
WNW	0	0	0	12001	13944	7240	33185
NW	0	374	149	1886	2206	29492	34107
NNW	300	0	133	0	947	32076	33456
合计	300	1700	3066	13963	32355	118145	169529

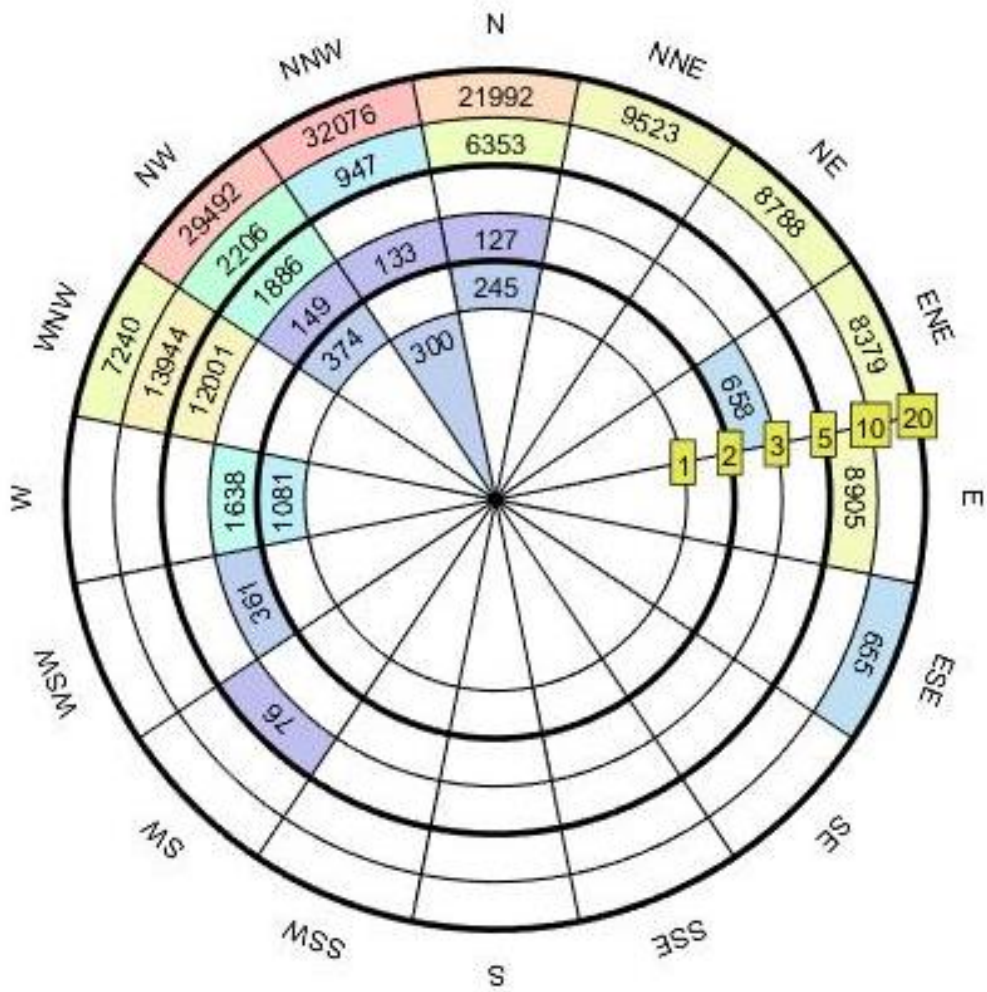


图 2-6 场址半径 20km 范围内各子区的人口分布（2023 年）

## 2.2.4 居民的年龄构成及饮食习惯和生活习性

### 2.2.4.1 居民的年龄构成

根据现有人口普查资料（阳江市、江门市第六次人口普查资料），场址所在阳江市和江门市居民的年龄构成为：

	阳江市：	江门市：
≤1 岁	占 1.41%；	0.90%；
1~7 岁（含 7 岁）	占 8.51%	6.34%；
8~17 岁（含 17 岁）	占 14.21%	12.68%；
>17 岁	占 75.87%	80.08%。

根据阳江公安局阳东分局提供的资料，2020年阳东区居民各年龄组的人口构成比例如下：

阳东区：

≤1岁	占	0.76%；
1~7岁（含7岁）	占	7.66%；
8~17岁（含17岁）	占	13.81%；
>17岁	占	77.77%。

场址半径5km范围内均位于阳东区，20km范围内涉及阳东区和江门市部分区域，故场址5km范围内居民各年龄构成均按照阳东区提供的数据；场址5~20km范围内居民点若位于阳东区则选取阳东区居民年龄构成数据，若居民点位于江门市则选取江门市年龄构成数据。

#### 2.2.4.2 评价区内居民的饮食习惯

苏州热工研究院有限公司于2020年6月对中广核研究院热室设施建设项目周边居民生活与饮食习惯进行了调查。

对于场址半径20km范围内居民食物消费量着重从统计部门收集食物消费资料并在近区进行实地调查。统计时将《广东省统计年鉴-2019》提供的城乡居民食物消费量作为成人食物消费量，根据场址附近现场调查所获得的各年龄组居民食物消费量占成人饮食消费量的比例，得出场址半径20km范围内各年龄组居民的食物消费量。表2-7给出厂址评价区内不同年龄组居民食物消费量统计结果。

表 2-7 场址半径 20km 评价区内不同年龄组居民食物消费量（kg/人·年）

年龄组	城镇居民			农村居民		
	儿童	青少年	成人	儿童	青少年	成人
	1~7岁（含7岁）	8~17岁（含17岁）	>17岁	1~7岁（含7岁）	8~17岁（含17岁）	>17岁
粮食（成品粮）	27.41	45.46	75.11	41.16	68.3	112.78
蔬菜	39.10	63.97	98.52	41.69	68.2	105.04
肉类	21.29	35.16	40.71	21.77	35.9	41.62
油脂	4.71	7.34	8.16	5.91	9.56	11.34

年龄组	城镇居民			农村居民		
	儿童	青少年	成人	儿童	青少年	成人
	1~7岁（含7岁）	8~17岁（含17岁）	>17岁	1~7岁（含7岁）	8~17岁（含17岁）	>17岁
蛋类	3.95	6.92	7.58	3.63	6.4	6.96
水产品	5.36	11.79	23.06	4.60	10.1	19.79
水果	33.74	35.76	45.14	20.19	21.4	27.01
奶类	56.49	36.36	10.76	20.95	13.5	3.99

对于厂址 5km 范围内附近居民的生活及饮食习惯采用发放调查表的方式开展，发放方式主要通过向东平镇各学校发放调查表，同时在厂址周边自然村进行了现场走访。

一 在东平镇选择了晨燕幼儿园、东平镇中心小学、蔡元培小学、东平学校共 4 所学校发放调查表。共计向学生发放 325 份调查表(包括学生和部分家长填写)，剔除部分无效样本后，儿童组（1~7 岁（含 7 岁））有效样本总数 40 份，青少年组（8~17 岁（含 17 岁））有效样本数 235 份，成人组（18 岁以上）共计 24 份。

一 同时在厂址附近自然村进行了现场走访，共发放调查表 20 份，全部回收。

根据调查结果统计分析，厂址附近居民消耗的粮食、蔬菜、肉、水果等农副产品大部分由市场购买，少部分自己生产，所消耗的水产品主要来自附近海域。

同时，由于现场调查到婴儿较少，据现场了解，婴儿在 6 个月前基本均食入母乳，在 6~12 月开始逐渐食入母乳与辅食。本报告对于婴儿的食谱，考虑婴儿在 0~6 月时全部食入母乳，根据中国营养学会 2015 年 12 月发布的《中国 7~24 月龄婴幼儿喂养指南》，6~12 个月婴儿主要食入母乳与辅食，其中婴儿 6~12 个月辅食食入量为：粮食：15.32kg；蔬菜：9.50kg；水果：7.66kg；蛋类：6.21kg；肉类：2.21kg；鱼类：4.23kg；对于母乳与配方奶的食入量，本报告采用喂养指南推荐的每天 800ml。

表 2-8 给出了厂址 5km 范围不同年龄组居民食物消费量，表 2-9 给出了厂址 5km 范围不同职业居民食物消费量，表 2-10 给出了厂址 5km 范围内不同年龄组居民的生活习性情况。

表 2-8 场址附近不同年龄组居民食物消费量

单位: kg/人·年

	成人		青少年		儿童	
	年平均消费量	年最大消费量	年平均消费量	年最大消费量	年平均消费量	年最大消费量
粮食	158.1	183.0	95.7	150.0	57.7	62.7
蔬菜	121.2	148.0	78.7	124.0	48.1	65.3
肉类	63.1	125.0	54.5	114.0	33.0	47.0
奶类	11.6	36.6	39.2	91.5	60.9	73.2
水果	49.1	54.9	38.9	60.0	36.7	54.9
蛋类	20.7	36.6	18.9	36.6	10.8	18.3
海鱼	63.5	145.6	31.5	60.0	9.7	18.3
甲壳类海产品	10.7	36.6	7.4	18.3	5.2	13.0
软体类海产品	12.3	23.0	3.4	18.3	4.9	10.4
海藻类产品	8.2	18.3	6.1	13.0	2.2	5.2

表 2-9 场址附近不同职业成人食物消费量

单位: kg/人·年

人员类别	农民		城镇居民		渔民	
	年平均消费量	年最大消费量	年平均消费量	年最大消费量	年平均消费量	年最大消费量
粮食	153.5	183.0	151.5	164.7	166.1	183.0
蔬菜	112.5	115.5	111.7	120.0	132.6	148.0
肉类	65.1	112.2	60.7	125.0	68.0	102.0
奶类	9.4	36.6	19.3	36.6	1.8	18.3
水果	48.8	54.9	52.8	54.9	45.1	36.6
蛋类	17.7	26.0	24.8	26.0	16.8	36.6
海鱼	72.7	128.1	52.8	109.8	81.3	145.6
甲壳类海产品	14.1	26.0	9.8	26.0	12.5	36.6
软体类海产品	16.9	23.0	9.3	18.3	15.1	18.3
海藻类产品	9.6	18.3	8.1	18.3	8.0	18.3

表 2-10 场址附近居民个人生活习性统计情况

活动方式 年龄组、职业、		岸边活动		海里活动		海上活动	
		人年平均时间 (小时)	人年最大时间 (小时)	人年平均时间 (小时)	人年最大时间 (小时)	人年平均时间 (小时)	人年最大时间 (小时)
成人	农民	101.2	200	6.1	20	18.2	200
	城镇居民	60.1	220	2.0	20	8.3	20
	渔民	125	600	6.3	20	2129	3000
青少年		57.1	216	5.9	54	3.2	34
儿童		61.2	220	/	/	/	/

本次调查范围涵盖了位于厂址 NNW 方位约 0.8km 的关键居民点光星村，经现场调查，光星村目前实际居住人口很少，青壮年人口基本都在镇上居住或在外打工，村内只有零星几个农民，其饮食习惯与厂址 5km 范围内农民饮食习惯接近。因此，本次调查采用 5km 范围内农民饮食习惯代表光星村居民饮食习惯。

## 2.3 土地利用及资源概况

### 2.3.1 土地和水体的利用

#### 2.3.1.1 土地利用

根据《东平镇土地利用总体规划（2010-2020 年）》，按土地用途对东平镇土地进行分区管制，场址半径 5km 范围内多为自然山体，在沿海一带分布有村庄用地和水旱田地；沿海萌河东西走向分布有宽约 600~1000m 不等的基本农田带。

#### 2.3.1.2 水体利用

##### （1）地表水

场址半径 5km 范围内涉及的主要河流为海萌河，主要的水库为平堤水库。



海朗河（又名海朗河、大水河），依据广东省地表水域功能区划，海朗河的功能为综合利用，目标水质为Ⅱ类。

平堤水库位于响水河上，为阳江核电厂建设的配套工程，为阳江核电厂运行期间的生产和生活用水提供淡水水源，并兼顾向阳东区东平镇和台山市北陡镇部分村庄提供生活和农田灌溉用水。

## （2）地下水

场址半径 5km 范围内的居民用水以地表水为主，仅少量村庄涉及地下水利用。东平镇镇区及附近村庄、各渔委会、瓦北村和允泊村的居民生活用水水源主要为东平镇自来水厂、平堤水库和山涧水，仅少量未铺设自来水管线的自然村的生活用水源为地下水。

### 2.3.2 陆生资源及生态概况

#### 2.3.2.1 农业生产概况

场址区域主要粮食作物品种有稻谷、玉米、豆类和薯类，花生是当地的主要油料作物。蔬菜主要有节瓜、莲藕、金瓜、茄子等，水果主要品种有荔枝、菠萝、龙眼、香蕉、甘蔗、黄皮、杨梅和柑橘橙等。

场址所在的阳东区水果以荔枝、龙眼、番荔枝为主，东平镇主要有荔枝、草莓、龙眼，葱、萝卜、土豆、香菜、菜花、黑美人西瓜、莲藕、甘蔗、水稻、油菜花、咸瓜、苗木花卉等，特产农产品为平堤蔗和东平莲藕。

#### 2.3.2.2 副业生产概况

场址半径 5km 范围内畜禽养殖主要以猪、牛以及禽类为主等，一般多为散户个体养殖，有小部分养殖户养殖有羊等其他牲畜。场址周围地区生产的肉类主要是家禽肉、猪肉和牛肉。

#### 2.3.2.3 矿产资源

场址所在的东平镇蕴藏有钨锡、稀土、花岗岩、高岭土、钾长石、钠长石等矿产

资源，其矿产资源特点是：1、以非金属矿产为主，如花岗岩、混合岩、装饰用石材等在东平均有分布；2、有色金属矿种较少，主要是钨锡矿和稀土砂矿；镇中心区附近口洋山产天然耐火石矿，石矿中含铝、硅等；3、陶瓷建材类矿产大量分布，主要分布有高岭土、钾长石、钠长石等。

### 2.3.2.4 陆生生态系统概况

#### （1）生态类型

场址附近主要的生态系统由森林生态系统、湿地生态系统、农田生态系统和城市生态系统。

##### — 森林生态系统

场址附近主要涉及东平镇，没有自然保护区和森林公园。东平镇山地海拔普遍不高，森林植被保存较好，生态环境优越。2015年拥有森林 9168.8hm<sup>2</sup>，大部分为原始森林，以针叶林为主，其中，东北山林的大面积（约 8000 hm<sup>2</sup>）的原始森林针叶林以松树、相思树为主。

##### — 农田生态系统

场址附近主要涉及东平镇，东平镇全镇农作物播种面积有 1977.5 hm<sup>2</sup>，粮食作物播种面积有 1396.2 hm<sup>2</sup>，水果种植面积有 743.3 hm<sup>2</sup>，种植的主要品种有龙眼、香蕉、荔枝、菠萝蜜等，特色水果有“阳东双肩玉荷包”等。

##### — 城市生态系统

城市生态系统是以城市为中心，按人的意愿创建的一种典型的人工生态系统。东平镇现状镇域城乡用地面积 13204.60 hm<sup>2</sup>，其中建设用地面积 847.03 hm<sup>2</sup>，占总用地的 6.41%。

##### — 湿地生态系统

场址附近主要的湿地系统由红树林、沿海防护林带、河川湿地系统等组成。场址附近沿海防护林带沿海岸零散分布，河川湿地系统在河流入海口等处有分布，红树林在流过东平镇镇区的海萌河中有少量分布。寿长河红树林湿地为国家湿地公园(试点)，位于新洲镇、东平镇和大沟镇三镇交界处，距场址约 10.5km，为南海沿岸河流型天然红树林生态系统，红树植物群落沿河分布。湿地公园总面积 423.91 hm<sup>2</sup>，湿地面积 415.47 hm<sup>2</sup>，湿地率 98.01%，湿地类型多样，有红树林、河口水域、永久性河流、洪

泛湿地、沙石海滩等 5 种湿地类型。其中，红树林面积 140.45 hm<sup>2</sup>，已形成红树林连片分布、入海口水面广阔、河流蜿蜒、滩涂交织、河心洲点缀的格局。寿长河红树林湿地公园有湿地植物 36 科 63 属 64 种，有软体动物 31 科 80 种，节肢动物 14 科 46 种；还有松雀鹰、雀鹰等 5 种国家 II 级重点保护野生动物，黑尾鸥、灰痛鸥等 11 种广东省级保护动物。寿长河湿地公园划分为生态保育区、恢复重建区、宣教展示区、合理利用区和管理服务区五大功能区。其中生态保育区包括湿地公园内大部分天然红树林和水面，面积 324.97 hm<sup>2</sup>，占总面积 76.66%，拥有典型的红树林、河品水域、沙石海滩等滨海区湿地类型。

### （2）植物群落分布

东平镇形成了与其气候环境相适应的植被类型，主要自然植物群落为常绿阔叶林针阔叶混交林型植被群落、滨海沙生型植被群落、红树林等。主要人工植物群落主要有海岸木麻黄林、桉树林、农业果林及其他。木麻黄林是主要的海岸防护林，其林相结构单一，分布着单叶蔓荆、仙人掌、茅根等。桉树林也是现状的人工植被的主要类型之一，一般为纯林，林下植物较少。果园有荔枝、龙眼、菠萝蜜、香蕉等果树。

### （3）保护动植物情况

场址附近没有森林保护区及野生动植物保护区，也未发现分布有国家级、广东省级保护的珍稀濒危植物。

## 2.3.3 水产资源及生态概况

### （1）水产品捕捞

项目场址所在的阳东地区濒临南海，海岸线绵长，浅海滩涂资源丰富，全区有漠阳江、那龙河、寿长河、北环河、海河等大小河流入海，沿海生态环境多样性高，是鱼、虾、蟹等近海经济动物繁殖生长的理想场所，海产种类繁多，具有经济价值和产量较高的有 208 种。其中包括 100 多种经济鱼类、30 多种虾类、10 多种蟹类和 50 多种贝类。经济鱼类中产量较高的有篮子鱼、鲮鱼、鲳鱼、石斑鱼、弹涂鱼、舌鳎和斑鱼等；常见的经济虾类有短沟对虾、长毛对虾、刀额新对虾、周氏新对虾、墨吉对虾、斑节对虾、近缘新对虾和长额仿对虾等；主要经济蟹类有锯缘青蟹、远海梭子蟹、三疣梭子蟹、红星梭子蟹和虾蛄等；经济贝类中，牡蛎、翡翠贻贝、毛蚶和文蛤是主要的增养殖对象。

场址周边的捕捞水产品种类有鱼类、头足类和虾蟹类等。东平镇 2015 年捕捞海水产品 130929t，淡水产品 1818t，鱼类为主要水产品，为水产品总量绝大部分，其他为少量的虾、蟹和贝类产品。2016 年捕捞海水产品为 133491t，淡水产品 1917t。海洋捕捞海域为南海。

北陡镇捕捞海水产品总量和淡水产品量分别为 12314t 和 1409t。

### (2) 水产品养殖

场址所在的阳东区淡水养殖范围主要集中在寿长河、那龙河两岸，海水养殖主要分布于三丫港和北环沿海一带。养殖范围由滩涂向浅海和岸上延伸，优势品种养殖向基地化、规模化方向发展；养殖品种以对虾、牡蛎、锯缘青蟹、文蛤、翡翠贻贝和海水鱼类为主；养殖方式以粗养并逐渐为主向粗养、精养和精粗结合多种方式发展，有网箱养鱼、鱼塍养鱼，鱼塍虾蟹混养，增殖护养翡翠贻贝，浮筏养蚝，高位池高密度养殖对虾等。

场址所在东平镇 2016 年海水养殖面积和产量分别为 479.1hm<sup>2</sup> 和 70725t，淡水养殖面积和产量分别为 215hm<sup>2</sup> 和 1917t。

大澳渔委会 2016 年海水养殖面积和产量分别为 3hm<sup>2</sup> 和 1243t，无淡水养殖。海水养殖品种包括鲈鱼、大黄鱼、鲷鱼和石斑鱼等，均为海上普通网箱养殖，养殖渔民 7 人。大澳渔委会所辖的大澳渔村养殖渔民 4 人，养殖品种包括石斑鱼和红鱼，产量 6t。

### (3) 海洋保护区和重要水生生物“三场”

本工程场址附近有 1 个海洋自然保护区，为南鹏列岛海洋生态自然保护区，位于本项目 SSW~WSW 方位，其边缘距离厂址约 10km。该保护区为省级自然保护区，总面积 19816hm<sup>2</sup>，其中核心区面积 7818.7hm<sup>2</sup>，缓冲区面积 9399.7hm<sup>2</sup>，实验区面积 2781.6hm<sup>2</sup>。海域内有南鹏岛、大镬岛等大小 8 个岛屿（礁岩）。保护对象为经济鱼类资源和珍稀野生动物及其栖息地和产卵、育肥场，经济鱼类有银鲳、真鲷、黑鲷、石斑鱼、马鲛、大黄鱼、对虾、虾姑等；珍稀野生动物有国家级保护水生野生动物中华白海豚、江豚、太平洋丽龟、绿海龟、克氏海马等；省级重点保护水生野生动物有中国龙虾、锦绣龙虾、中国鳖、鲸鲨、鲎鱼等。

## 2.3.4 工业、交通及其它相关设施

### 2.3.4.1 工业企业

场址半径 5km 范围主要以农业、渔业生产为主，工业基础相对薄弱，规模以上工业企业较少，主要的工业企业为阳江核电厂，阳江核电厂目前已建成 6 台百万级压水堆核电机组。

东平镇镇区位于场址 NW 方位约 4km 处，东平镇除能源产业外，渔业为支柱产业，传统的渔需工业主要集中在制网、制冰、造船和海产品加工，工厂规模多为几人到数十人的小厂。

### 2.3.4.2 交通

#### (1) 公路

场址所在的阳东区境内公路交通较为发达，阳东区域内有东西走向的 325 国道一级公路，广东省西部沿海高速公路、365 省道二级公路，G15 沈海高速（开阳高速）、南北走向的站港一级公路、热新公路，北部的江珠公路、周田公路，中部的合田公路、大合公路和南部的三北公路、北北公路、良东二级公路等构成公路网的主骨架，目前阳东区域内所有的城镇均由该公路网的主骨架沟通。

场址半径 5km 范围内主要涉及东平镇，交通便利，水陆贯通，其主要对外道路为良东公路（X596 县道），向北连接西北沿海高速和省一级公路 S365 省道，向东连接省二级公路 S276 省道至台山市北陡镇。东平镇乡镇道路建设发展迅速，大部分村基本上实现了村村通公路，路面以沥青和水泥为主。

#### (2) 铁路

场址半径 5km 范围内没有铁路通过。

### 2.3.4.3 外部人为事件

#### 2.3.4.3.1 固定危险源

##### 2.3.4.3.1.1 油、气、危险品仓储设施

###### (1) 油库

场址半径 5km 范围内的油库仅有 1 处——中国石油化工股份有限公司广东阳江阳东葛洲岛油库，位于场址 W 方位约 5km 的葛洲岛上，有 1 个柴油库，可储存约 1000t 柴油，目前储存 100 多 t 柴油，为出海渔船提供加油。此外，东平镇大澳柴油库，位于场址 SW 方位约 3.2km 处大澳村南端，目前已废弃不用。

###### (2) 加油站

场址半径 5km 范围内没有加油站，离场址最近的是阳东区东平暨南加油站，位于场址 WNW 方位约 5.2km，为二级加油站，位于东平镇北侧，县道 X596（东平公路）与核电进厂道路连接处，该加油站共有 4 个贮油罐，其中汽油罐  $30\text{m}^3 \times 2$  个和  $10\text{m}^3 \times 1$  个，柴油罐  $10\text{m}^3 \times 1$  个。

###### (3) 液化气加气站

场址半径 10km 范围内的石油液化气加气站有两个：

- 东平镇安宁液化气有限公司：位于北环至东平的 X596 县道旁，场址 WNW 方位约 7.5km，有 2 个  $25\text{m}^3$  和 1 个  $50\text{m}^3$  液化气储罐，储气设计能力为 30 t。
- 东平镇丰荣液化气有限公司：位于县道 X596（东平公路）与阳江核电进厂道路连接处北侧山脚下，离公路约 500m 处，场址 WNW 方位约 7.8km，有液化气储罐  $50\text{m}^3 \times 2$  个，储气设计能力为 50 t。

###### (4) 炸药库

根据调查，场址 5km 范围内无炸药库，也无其它生产、储存易燃、易爆化学腐蚀气体、毒性和放射性气体及气溶胶等危险品的设施。

##### 2.3.4.3.1.2 油气长输管道

根据调查场址半径 5km 范围内没有天然气管道、燃料油管道以及液体化工产品管道存在。

#### 2.3.4.3.2 移动危险源

东平镇贮存的柴油和汽油以陆路运输为主，海运为辅，油品来源根据市场油价的浮动从各地采购，目前主要从海洋石油公司阳江港油气库购买。公路运输采用不大于 60t 的槽罐车运输。液化气则主要由海洋石油公司阳江分公司通过运气船运往阳江港后，再由运输车运往用气单位，运输液化气的槽罐车的吨位不超过 50t。这些危险品运输车经由高速公路或省道进入 X596 县道最终进入东平镇各油、气单位，行驶路线距离场址的最近距离大于 5km。

海上运输方面，出入东平港的多为小于 500t 的小型渔船和货船，无固定航线，港内有 1 艘 200t 级别的水上加油船供应港内渔船，油品为柴油，加油船可在港内移动，不出港。港内有 300t 级货运码头，使用频次不高。

#### 2.3.4.3.3 机场及航空线

场址半径 16km 范围内无民用和军用机场。场址附近空中航线为连胜围~闸坡航线，为广州白云机场~湛江、昆明、东南亚的国际航路。该航线上飞机机型较多，飞行高度 7000~10000m 不等。该航线离场址的最近投影距离约 4km，为离场址最近的航线。

## 2.4 气象

### 2.4.1 区域气候

场址区域气候深受季风影响，冬半年受极地冷高压脊控制，盛行东北季风，天气较为干冷；夏半年则为季风低压、热带气旋所影响，盛行西南和东南季风，高温多雨。

春季白昼渐长，太阳倾角逐渐增大，地面接收的太阳辐射总量也开始增多。在季风显著的气候区中，春季是从冬半年到夏半年的过渡季节，影响广东的冷空气势力开始减弱，虽也有较明显的冷空气达到沿海，但东移较快，多受弱变性冷高压脊、静止锋和低槽等天气系统控制。

夏季为西南风的盛行期。高层副热带西风已撤离广东上空，而由热带东风所取代，并稳定控制。西风急流位置再次北跳和减弱。副热带高压已为全年最强，位置最北的

时期。夏季在副热带高压的稳定控制下，常出现炎热天气，是极端最高气温出现的主要时期。

秋季是夏、冬过渡季节，此时，高层南亚高压迅速撤离，500hPa 副热带高压的候平均位置已南落至北纬 22°至 18°，地面上锋面的候平均位置已越过南岭，冷高压迅速南下并控制广东。

冬季是北方蒙古冷高压的鼎盛时期，冬季风力强大。广东冬季经常处于干冷气流的控制下，气温为全年最低，降雨稀少，但广东大陆大部分地区位于南亚热带，冬季仍较温暖。

本节中区域气候一般特征描述采用阳江气象站（风资料为 1954~2014 年，温度、雨、相对湿度和气压资料为 1953~2014 年）的统计资料：

阳江气象站位于场址 NW 方位约 35km 处的阳江市郊外新寨村岗背坡顶，东经 111°58′，北纬 21°52′，海拔高度 23.3m，测风仪器高度离地 10m。观测场地周围比较开阔，无高大建筑物直接遮挡，具有气候代表性，为国家基本站。

表 2-11 给出了阳江气象站多年气象参数特征值，表 2-12 给出了阳江气象站多年风向风速特征值。

表 2-11 阳江气象站累年气象参数特征值（1953~2014 年）

项目 时间	气温 (°C)			平均相 对湿度 (%)	最小相 对湿度 (%)	平均气 压 (hPa)	平均降水 量 (mm)
	平均气 温	平均最 高	平均最 低				
一月	14.9	28.8	-1.4	73	8	1016.2	33.9
二月	15.8	28.9	2.2	81	15	1014.3	62.4
三月	18.8	32.2	4.7	85	14	1011.8	83.6
四月	22.6	32.0	9.9	87	24	1008.6	223.5
五月	26.0	35.0	15.3	86	26	1004.9	406.7
六月	27.5	36.8	19.3	86	25	1001.8	426.0
七月	28.2	38.3	21.1	84	36	1001.4	317.3
八月	27.9	37.5	20.6	85	29	1001.3	372.3
九月	26.9	36.8	16.8	82	21	1004.9	256.6
十月	24.3	34.6	9.4	75	15	1010.3	78.2
十一月	20.4	33.1	4.6	70	15	1013.9	46.0
十二月	16.4	29.4	2.2	69	8	1016.3	32.4
全年	22.5	38.3	-1.4	80	8	1008.8	2338.9



表 2-12 阳江气象站（1954~2014 年）累年风特征值

月份	平均风速 (m/s)	主导风向
1	3.2	NE
2	3.2	NE
3	3.3	NE
4	3.1	SE
5	2.9	SSE
6	2.9	S
7	2.9	SSE
8	2.5	SSE
9	2.7	NE
10	2.9	NE
11	3.0	NE
12	3.0	NE
年	3.0	NE

#### 2.4.1.1 气温

阳江气象站的多年平均气温为 22.5℃，其中，月平均气温 7 月份最高，为 28.2℃；月平均气温最低出现在 1 月份，为 14.9℃。

#### 2.4.1.2 气压

气压的多年季变化规律较为简单，曲线一般呈单峰单谷型，夏季平均气压较低，而冬季则平均气压较高。

阳江气象站多年平均气压为 1008.8hPa。最高月平均气压为 12 月的 1016.3hPa，最低月平均气压为 8 月的 1001.3hPa。

#### 2.4.1.3 相对湿度

阳江气象站的多年平均相对湿度为 80%，以 4 月最高，平均为 87%；以 12 月最低，平均为 69%。

#### 2.4.1.4 降雨

阳江气象站多年平均年降水量为 2338.9mm。

场址区域降雨丰富，是广东省多雨地区之一。在一年中，各月的降水差异较大。4~9 月为雨季，该期间的降水量占全年总降水量的 85%左右。在雨季中有明显的前后

汛期之分。4~6 月为前汛期，以冷空气降水为主；7~9 月为后汛期，以热带气旋（台风）降水为主。这两个峰期都有着同等重要的影响。10 月至次年 3 月为旱季，降水较少，平均每月不足 100mm，尤其是 11、12 月和次年 1 月，其月平均降水不足 50mm。

### 2.4.1.5 风

阳江气象站多年平均风速为 3.0m/s，主导风向为 NE。

## 2.4.2 灾害性天气

### 2.4.2.1 热带气旋

热带气旋是场址地区主要的灾害性天气，5~10 月是热带气旋季节，7~9 月是热带气旋的盛期。

根据 1949~2014 年间台风年鉴台风资料统计（统计范围为场址中心半径 400km 范围），千年一遇的台风中心气压为 890hPa。

根据《广东阳江核电站工程可行性研究专题可能最大风暴潮分析计算（1998）》、《阳江核电站可能最大风暴潮（PMSS）复核分析计算专题报告（2005 年）》和《工程可能最大风暴潮复核报告（2014）》的专题报告，可能最大热带气旋的特征参数如下：

- 热带气旋中心最低气压  $P_0=890\text{hPa}$ ;
- 热带气旋外围气压  $P_\infty=1008\text{hPa}$ ;
- 热带气旋最大移速  $V$ ：西方向 40km/h，西北到北方向 26km/h;
- 最大风速半径  $R=40\text{km}$ 。

### 2.4.2.2 龙卷风

龙卷风包括陆龙卷风和海龙卷风。它是一种小尺度的强对流天气系统。龙卷风出现的时间短，范围小，但能量大，因此破坏力大。

对场址为中心经、纬度宽各 3 度范围进行了普查，包括场址附近台山市、阳江市（含阳西县、阳东区、江城区），该地区曾发生过二十多次陆龙卷风，这些龙卷风强度都不大。

调查区域范围内，龙卷风分布差异大，大致以场址附近和场址东、西两侧多，南、北两侧少。1951-2004 年评价区域内共发生 144 次龙卷风，F1 级别的龙卷出现最多为 78 个，占总数的 54.2%；其次是 F0 级 58 个，占总数的 40.3%，调查到 8 个 F2 级别个例，只占总数的 5.6%；调查中未发现 F3 级及以上级别的龙卷风。

根据 2005-2013 年评价区域内发生的龙卷风资料，场址区域共发生 49 次龙卷风，其中 F0 级 19 次，F1 级 27 次、F2 级 3 次，未发现 F3 级以上的龙卷风，3 次 F2 级龙卷风分别发生在 2008 年 6 月 29 日的番禺、2006 年 5 月 5 日的花都、2005 年 05 月 09 日的阳春县。

### 2.4.2.3 雷暴

根据阳江气象站（1953~2004 年）各月雷暴日资料统计可得，年平均雷暴日数为 86.3 天，每年雷暴天气主要发生在 5~9 月，占全年雷暴日的 83%，以 8 月份最多，占全年雷暴日的 20%。

### 2.4.2.4 飏线

飏线在场址区域比较常见，年均发生可达近 100 次。在广东省的分布范围很广，地理分布没有一定的规律性，郁南至高要一线，英德、佛冈、南雄、始兴、惠阳和惠东一带稍多，每年有 2d 以上，其中郁南最长达 3~4d；而连山、广宁、翁源、河源、兴梅盆地和珠江三角洲地区每年不足 1d；省内其余地区在 1~2d。飏线多发生于每年春夏季节的 4~8 月份，占全年的 80%以上，其中以 7~8 月份最多，分别占 21.5%和 21.6%。飏线在一天的任何时间内都可能出现，但以午后 1~6 时较为多见，占近六成，主要是由于太阳辐射对地球大气的影响在午后达到最高峰，这时气温最高，对流旺盛，大气层结构极不稳定，所以强对流天气最易发生。

三分之二左右的飏线持续时间为 5~20min，时间长的则可在 30min 以上。1951~1993 年共发生 8 次持续时间超过 1h 的飏线，主要发生于广东省的中部和西部地区，东部未见出现；其中珠江三角洲的顺德、台山、新会、惠州、博罗和肇庆等地均曾出现长时间的飏线。

### 2.4.3 当地气象条件

场址附近的阳江核电厂建有气象观测系统，观测项目具体如下：

(1) 场址气象塔自动观测系统

气象梯度自动观测共设四层（10m、30m、80m 和 100m），分别测量场址地面以上各层风向、风速、温度。

(2) 场址专用地面气象站

该站与国家气象站网的常规气象站基本相同，观测项目有降雨量、气压、太阳总辐射、净辐射、温湿度和地表温度。

图 2-7 给出了场址和阳江核电厂气象观测系统相对位置示意图。本报告选取 2018 年一整年的场址气象塔自动观测系统以及地面站观测数据，根据统计，该年气象数据联合获取率 > 90%。

表 2-13 给出了场址地面观测气象参数特征值。

表 2-13 场址地面观测气象参数特征值（2018 年）

月	气温			气压			辐射		相对湿度		降雨		
	平均 (°C)	最高 (°C)	最低 (°C)	平均 (hPa)	最高 (hPa)	最低 (hPa)	总辐射 (W/m <sup>2</sup> )	净辐射 (W/m <sup>2</sup> )	平均 (%)	最低 (%)	降雨量 (mm)	降雨 时数 (h)	降雨 日数 (d)
1	15.7	25.2	4.9	1013.0	1023.8	1006.2	234.0	-36.5	73	17	77.4	74	10
2	15.8	26.0	4.9	1014.5	1024.5	1007.2	291.1	-38.6	69	25	7.5	18	4
3	20.6	27.8	8.3	1010.9	1020.0	1004.2	351.4	-52.5	82	23	6.3	20	8
4	22.8	28.7	9.3	1009.0	1021.6	1002.5	301.0	-42.7	87	23	120.4	41	9
5	28.1	33.0	23.5	1005.5	1011.3	999.2	398.3	-43.0	90	52	115.3	47	12
6	28.3	34.1	23.6	999.7	1008.0	991.7	308.8	-33.9	91	51	538.7	146	21
7	28.3	33.0	24.1	998.8	1003.5	992.5	295.5	-34.3	93	52	599.7	195	27
8	27.8	33.5	23.9	996.8	1005.7	988.2	256.3	-35.5	93	56	365.3	192	23
9	27.1	35.0	21.7	1003.9	1010.6	961.4	343.0	-45.8	88	42	312.3	101	16
10	24.2	30.5	16.6	1010.7	1015.5	1005.9	351.6	-45.3	77	22	92.8	25	6
11	22.5	29.6	15.6	1012.1	1017.6	1006.9	288.7	-38.3	80	23	31.5	34	8
12	18.1	27.9	8.0	1014.7	1023.8	1006.9	269.0	-29.6	78	30	1.5	2	1
年	23.3	35.0	4.9	1007.4	1024.5	961.4	308.4	-39.7	83	17	2268.7	895	145



图 2-7 场址和阳江核电厂气象观测系统相对位置示意图

### 2.4.3.1 气温

场址年平均气温为 23.3℃，以 6、7 月最高，平均为 28.3℃；以 1 月最低，平均为 15.7℃。极端最高气温为 35.0℃，出现在 9 月；极端最低气温为 4.9℃，出现在 1、2 月。

### 2.4.3.2 气压

场址年平均气压为 1007.4hPa，月平均气压以 12 月最高，为 1014.7hPa；以 8 月份月平均气压最低，为 996.8hPa。极端最高气压为 1024.5hPa，出现在 2 月；极端最低气压为 961.4hPa，出现在 9 月。

### 2.4.3.3 相对湿度

场址地面观测站年平均相对湿度为83%，7、8月份平均相对湿度最高，为93%；2月最低，为69%。极端最低相对湿度为17%，出现在1月。

### 2.4.3.4 降雨

场址年均降水量为2268.7mm，11月至次年3月降水量较小，12月降水量最小，为1.5mm，7月降水量最大，达599.7mm。场址年降水日数为年均145天，降水时数为年均895小时。

### 2.4.3.5 太阳辐射

场址年平均总辐射308.4W/m<sup>2</sup>，5月平均值最高，为398.3W/m<sup>2</sup>，1月平均值最低，为234W/m<sup>2</sup>。场址年平均净辐射-39.7W/m<sup>2</sup>。

### 2.4.3.6 风特征

表2-14~表2-17给出了场址气象塔10m、30m、80m和100m四层各季及全年的风频和平均风速，并根据白天和夜间分别进行了统计，图2-8给出了气象塔各高度的年均风玫瑰图，图2-9给出10m高度降水期风向玫瑰图。

#### 1) 季、年风向玫瑰

气象塔各层高度风向频率分布较为相近，全年出现频次较高的风向均以NNE为主，冬季主要以偏北风为主，夏季主要以偏南风为主。

- 场址气象塔10m高度主导风向为NE，占14.2%，次主导风向为ENE，占13.2%；
- 场址气象塔30m高度主导风向为NNE，占13.5%，次主导风向为NE，占12.5%；
- 场址气象塔80m高度主导风向为E，占15.3%，次主导风向为ENE，占13.2%；
- 场址气象塔100m高度主导风向为E，占18.4%，次主导风向为NNE，占

16.2%。

## 2) 平均风速

场址气象塔各层高度平均风速随高度的增加而增大，100m 高度和 10m 高度年平均风速差为 1.3m/s。白天的风速比夜间大，夏季的风速最小，冬季的风速最大。

场址地区 10m、30m 高度处全年静风频率分别为 5.1%和 7.3%，而在 80m 高度，场址地区全年静风频率为 1.2%，100m 高度全年静风频率为 1.6%。

场址气象塔各层的年平均风速分别为：

- 10m 高度为 2.6m/s；
- 30m 高度为 2.8m/s；
- 80m 高度为 3.6m/s；
- 100m 高度为 3.9m/s。

### 2.4.3.7 温度

表 2-18 给出了场址气象塔各高度层气温月、年特征值。从表可见，气象塔各高度层温度年变化规律相同，都是单峰单谷型，各层高度 2 月平均值最低；各层高度 6 月平均值最高。各个高度处，气温相差不大，总的趋势是低层气温高于上层。

- 100m 高度温度年平均值为 22.7℃，温度最大值为 33.3℃，温度最小值为 4.5℃；
- 80m 高度温度年平均值为 22.7℃，温度最大值为 32.6℃，温度最小值为 4.7℃；
- 30m 高度温度年平均值为 23℃，温度最大值为 34℃，温度最小值为 5.2℃；
- 10m 高度温度年平均值为 23.1℃，温度最大值为 34.4℃，温度最小值为 5.4℃。



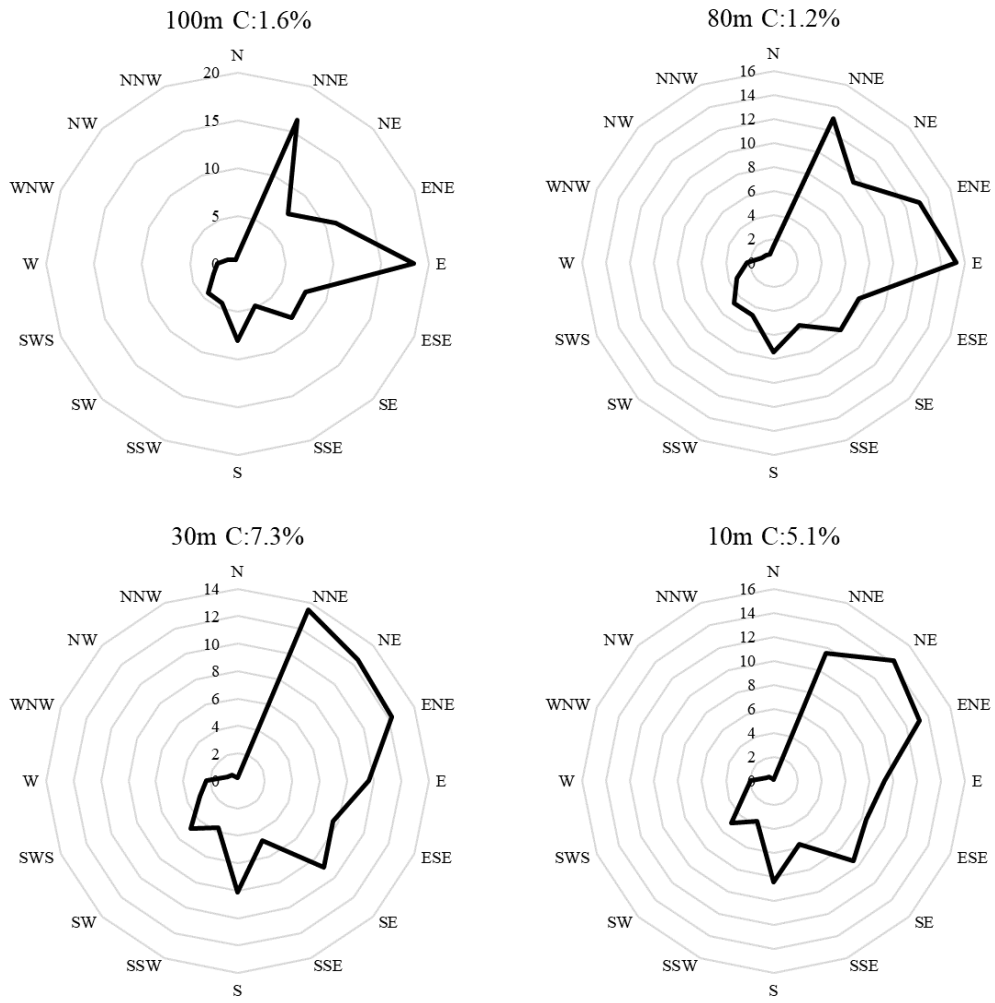


图 2-8 场址气象塔各高度年平均风玫瑰

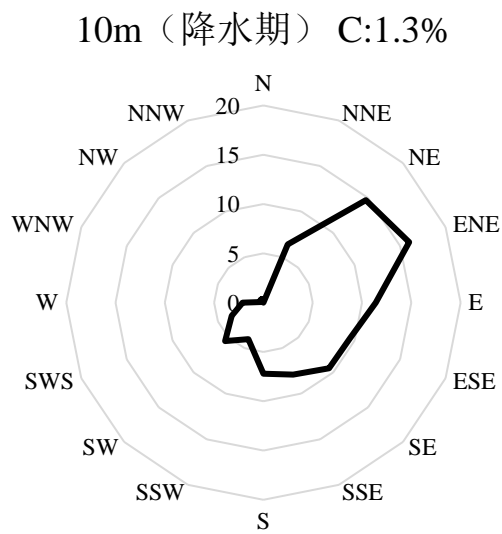


图 2-9 场址气象塔 10m 高度降水期年平均风玫瑰

表 2-14 场址气象塔 10m 高度各季、年风频 (%)、风速 (m/s)

时间	方位	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	静风	平均风速	
春季	白天	风频	0	5.4	7.4	8.6	8.5	11.3	15.9	9.2	17.6	5.4	4.7	2.9	2.3	0.1	0	0	0.9	
		平均风速	0	5.4	2.9	2.7	2.5	3.4	3.1	3	3.2	2.8	2.8	2.2	2.1	0.9	0	0	0.4	3
	黑夜	风频	0	8.4	17.2	16.3	11.2	8	14.5	3.5	6.6	1.7	4.1	0.7	0.1	0.1	0.1	0	7.5	
		平均风速	0	3.9	1.9	1.4	1.5	1.7	2.3	1.8	2.3	1.9	2.7	2.5	1.8	0.9	1.4	0	0.3	1.9
	全天	风频	0	6.8	12.1	12.3	9.8	9.7	15.3	6.5	12.3	3.6	4.4	1.8	1.3	0.1	0	0	4	
		平均风速	-	4.5	2.2	1.9	1.9	2.7	2.8	2.7	2.9	2.6	2.8	2.2	2.1	0.9	1.4	-	0.3	2.5
夏季	白天	风频	0	1.8	7.6	10.5	9.8	7.8	10.1	8.6	14.4	6.1	11	5.2	5	1	0.3	0	0.9	
		平均风速	0	3.7	3	2.5	2.5	2.7	2.8	2.8	3.1	2.6	3.3	2.8	2	1.8	1.7	0	0.3	2.8
	黑夜	风频	0	3.4	14.8	17.4	9.3	7.3	9	6.4	9.5	4.2	8.1	2.5	0.7	0.1	0.2	0	7.2	
		平均风速	0	1.9	1.7	1.7	1.3	1.3	2.7	3.1	3	2.1	3.2	3.2	1.8	1	1.1	0	0.3	2
	全天	风频	0	2.5	10.9	13.6	9.6	7.6	9.6	7.6	12.1	5.2	9.6	3.9	3	0.6	0.3	0	3.8	
		平均风速	-	2.6	2.2	2	2	2.1	2.8	2.9	3.1	2.4	3.3	2.9	2	1.7	1.5	-	0.3	2.4
秋季	白天	风频	0.1	11.8	11.2	14	9.8	12.7	8.6	6.1	5.3	4.9	4.6	3.9	3	1.1	1.1	0.6	1.1	
		平均风速	5.5	4.9	3.5	2.6	2.4	2.9	2.5	2.2	2.5	2.1	2.5	1.9	2.3	2.1	5.2	9.7	0.3	2.9
	黑夜	风频	0.1	14	21.1	16.5	8.1	6.2	5.6	4	3.7	2.1	1.3	1.1	1	0.7	0.6	0.1	13.6	
		平均风速	8.1	4.1	2.1	1.5	1.3	1.2	1.8	1.8	1.7	1.1	1.9	2.4	1	1.2	2.1	2.3	0.3	1.8
	全天	风频	0.1	13	16.3	15.3	8.9	9.3	7.1	5	4.5	3.4	2.9	2.5	1.9	0.9	0.9	0.3	7.6	
		平均风速	6.8	4.5	2.6	1.9	1.9	2.3	2.2	2	2.2	1.8	2.4	2	1.9	1.7	4.1	8.7	0.3	2.4
冬季	白天	风频	0.1	25.1	11.4	9.7	10.7	9.6	7	4.9	6.1	3	4.2	3	1.6	0.9	0.9	0.6	1.1	
		平均风速	5.3	5.7	3.8	3	2.6	2.8	2.3	2.3	2.4	2.1	1.9	2.2	2.4	2.5	2.6	3.2	0.3	3.4
	黑夜	风频	0.2	23.5	23.2	12.9	7.2	5	4.7	2.7	3.2	1.5	2	1.7	1.2	1.2	1.1	0.3	8.5	
		平均风速	3.7	5.1	2.9	1.9	1.5	1.2	1.3	1.1	1.2	1	1.3	1.6	1.6	1.7	2.1	2	0.3	2.6
	全天	风频	0.1	24.2	17.8	11.4	8.8	7.1	5.7	3.8	4.5	2.2	3	2.3	1.4	1.1	1	0.5	5.1	
		平均风速	4.3	5.3	3.1	2.3	2.1	2.2	1.8	1.8	1.9	1.7	1.7	1.9	2	2	2.3	2.8	0.3	3
全年	白天	风频	0	10.4	9.3	10.6	9.7	10.3	10.6	7.3	11.2	4.9	6.3	3.8	3.1	0.8	0.6	0.3	1	
		平均风速	5.4	5.3	3.3	2.7	2.5	3	2.8	2.7	3	2.4	2.9	2.3	2.1	2	3.7	6.5	0.3	3
	黑夜	风频	0.1	12.7	19.3	15.7	8.9	6.6	8.3	4.1	5.6	2.3	3.7	1.5	0.8	0.5	0.5	0.1	9.3	
		平均风速	5.2	4.4	2.2	1.6	1.4	1.4	2.2	2.2	2.3	1.6	2.7	2.5	1.4	1.5	2	2.1	0.3	2.1
	全天	风频	0.1	11.5	14.2	13.2	9.3	8.4	9.4	5.7	8.4	3.6	5	2.6	1.9	0.7	0.5	0.2	5.1	
		平均风速	5.3	4.8	2.6	2	2	2.4	2.5	2.5	2.8	2.2	2.8	2.4	2	1.8	2.9	5.2	0.3	2.6

表 2-15 场址气象塔 30m 高度各季、年风频 (%)、风速 (m/s)

时间		方位	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	静风	平均风速
春季	白天	风频	0	5.5	5	9.9	10.3	10.3	16	8.8	17.3	5	4.5	2.3	3	0.1	0.1	0	1.8	
		平均风速	0	6.3	3.1	2.8	2.8	3.7	3.4	3.2	3.4	3	3	2.6	2.2	1	1	0	0.3	3.3
	黑夜	风频	0.2	8.5	13.4	14.7	11	7.8	13.5	3	5.8	2	4.8	1.2	0.2	0.4	0.1	0	13.4	
		平均风速	8	4.4	2.1	1.6	1.9	2	2.9	2.7	2.7	1.7	2.5	2.9	1	1.3	1	0	0.2	2.1
	全天	风频	0.1	6.9	9	12.2	10.7	9.1	14.8	6	11.8	3.6	4.6	1.8	1.7	0.2	0.1	0	7.3	
		平均风速	8	5.2	2.4	2.1	2.4	3	3.2	3.1	3.2	2.6	2.8	2.7	2.2	1.3	1	-	0.2	2.7
夏季	白天	风频	0.2	1.7	8.1	10.5	9.2	7.4	9.4	6.8	14.5	6.1	10.3	6.2	5.1	1.1	0.4	0.2	3.1	
		平均风速	4	3	3.3	2.8	2.7	3.3	3.1	3.1	3.4	2.8	3.4	3.4	2.4	1.8	2.5	4	0.2	3
	黑夜	风频	0.6	3.3	13	11.4	7.9	5.7	8.5	6.2	10.3	4.2	8.3	3.9	1.1	0.8	0.2	0	14.7	
		平均风速	0.8	2.3	2.1	2.1	1.8	1.9	3.2	3.6	3.4	2.1	3.2	3.7	1.8	1.8	3.1	0	0.2	2.3
	全天	风频	0.4	2.4	10.4	10.9	8.6	6.6	9	6.5	12.5	5.2	9.4	5.1	3.3	1	0.3	0.1	8.4	
		平均风速	1.6	2.5	2.6	2.4	2.3	2.8	3.1	3.3	3.4	2.6	3.3	3.5	2.3	1.8	2.7	4.1	0.2	2.7
秋季	白天	风频	0	15.1	10.7	12.4	12.6	12.3	7.3	4.2	5.5	4.6	4.2	3.5	4.1	0.8	0.9	0.9	1	
		平均风速	0	5.3	3.7	2.6	2.8	3	2.8	2.8	2.4	2.5	2.7	2.5	2.5	1.4	4.8	10.2	0.3	3.3
	黑夜	风频	0.1	17.4	20.3	14.8	9	6.5	6.3	3.1	3	1.8	2	1.5	1.3	1.6	1.1	0.1	10.1	
		平均风速	8.5	4.3	2.5	1.9	1.5	1.3	2	1.6	3.1	1.2	1.8	2.5	1.2	1.1	1.7	3.3	0.3	2.2
	全天	风频	0	16.3	15.7	13.6	10.7	9.3	6.8	3.6	4.2	3.2	3.1	2.5	2.7	1.2	1	0.5	5.7	
		平均风速	8.5	4.7	2.9	2.2	2.2	2.4	2.4	2.3	2.7	2.1	2.4	2.5	2.2	1.2	3	9.5	0.3	2.7
冬季	白天	风频	0.3	28.4	9.5	11	11.4	8.2	7.1	2.7	5.8	2.8	3.1	3.4	2.1	0.3	1.4	0.4	2	
		平均风速	4.9	6.2	3.8	2.9	2.7	3	2.6	2.2	2.4	2.2	2.2	2	2.5	2.7	3.1	3.6	0.3	3.7
	黑夜	风频	0.3	28.7	20	13	5.6	3.2	2.8	2.3	1.8	2.6	1.9	1.7	1.4	1	0.7	0.9	12.2	
		平均风速	3.9	5.4	3.2	2.1	1.8	1.7	1.4	1.8	1.2	1.3	1.3	1.6	1.4	1.6	2.2	2.3	0.2	2.9
	全天	风频	0.3	28.6	15.2	12.1	8.2	5.5	4.8	2.5	3.6	2.7	2.5	2.5	1.7	0.7	1	0.6	7.5	
		平均风速	4.3	5.8	3.4	2.5	2.4	2.6	2.2	2	2.1	1.7	1.8	1.9	2	1.9	2.8	2.6	0.2	3.3
全年	白天	风频	0.1	11.9	8.2	10.9	10.8	9.5	10.1	5.8	11.1	4.7	5.7	3.9	3.6	0.6	0.7	0.3	2	
		平均风速	4.5	5.8	3.5	2.8	2.7	3.3	3.1	3	3.2	2.7	3.1	2.8	2.4	1.8	3.5	7.6	0.3	3.3
	黑夜	风频	0.3	15	16.9	13.5	8.3	5.7	7.6	3.6	5	2.6	4.1	2	1	1	0.5	0.3	12.5	
		平均风速	3.5	4.8	2.6	1.9	1.8	1.7	2.6	2.7	3	1.7	2.6	2.9	1.4	1.4	2	2.4	0.2	2.4
	全天	风频	0.2	13.5	12.5	12.2	9.6	7.6	8.9	4.7	8.1	3.7	4.9	3	2.3	0.8	0.6	0.3	7.3	
		平均风速	3.8	5.2	2.9	2.3	2.3	2.7	2.9	2.9	3.1	2.3	2.9	2.8	2.2	1.6	2.8	5.4	0.2	2.8

表 2-16 场址气象塔 80m 高度各季、年风频 (%)、风速 (m/s)

时间	方位	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	静风	平均风速	
春季	白天	风频	0.3	5.9	2.9	6.8	17.8	11.3	15.1	10.1	16	4.5	3.7	2.6	2.1	0.4	0	0	0.5	
		平均风速	6.8	7	3.8	3.2	3.8	4.2	4.1	3.1	3.7	3	3	2.8	2.2	2.3	0	0	0.3	3.8
	黑夜	风频	0.5	8	7.3	13	22	11.7	12.4	5.4	5.3	5	4.4	1.6	0.4	0.9	0.2	0.2	1.8	
		平均风速	6	6.3	2.1	2.4	3	3.2	3.6	3	3.4	2.3	2.7	2.2	1	1.3	1	1.6	0.3	3.1
	全天	风频	0.4	6.9	5	9.8	19.8	11.5	13.8	7.9	10.9	4.8	4	2.1	1.3	0.6	0.1	0.1	1.1	
		平均风速	6.3	6.6	2.6	2.7	3.4	3.7	3.9	3.1	3.6	2.6	2.8	2.6	2.1	1.7	1	1.7	0.3	3.5
夏季	白天	风频	0	1.5	5.9	9.3	14	7.4	9.4	7.1	14.2	7.8	9.5	6.2	4.5	1.2	0.8	0.5	0.6	
		平均风速	0	4.8	4	3.2	4.3	4.1	3.8	3.7	4	3.1	3.8	3.1	2.4	2	2.6	4.9	0.3	3.7
	黑夜	风频	0.1	3.7	9.1	12.2	13	7.3	9	8	9.5	8	8.6	3.9	3.4	2.3	0.7	0	1.4	
		平均风速	4.9	3.2	2.7	2.9	3.2	2.8	3.9	4.3	4.4	3.2	3.1	2.8	2	1.6	1.5	0	0.3	3.2
	全天	风频	0	2.5	7.4	10.6	13.6	7.4	9.2	7.5	12	7.9	9.1	5.1	4	1.7	0.8	0.3	1	
		平均风速	4.9	3.7	3.3	3	3.8	3.5	3.9	4	4.2	3.2	3.5	3	2.3	1.7	2.2	4.9	0.3	3.5
秋季	白天	风频	1.4	13.2	9.6	11.8	18.4	7.9	6	4.6	5.3	4.5	4.1	5.3	3.1	0.9	1.4	2.1	0.3	
		平均风速	6.9	5.5	3.6	3.5	3.6	4.3	3.3	2.8	3.1	2.6	3	2.7	2.9	2.6	4.4	7.8	0.4	3.8
	黑夜	风频	1.6	22.1	17.5	19.9	11	5.3	3.4	3.1	1.8	3.3	2.4	1.9	1.1	1.1	1.9	1.8	0.9	
		平均风速	5.9	4.8	2.5	2.6	2.8	2.5	3.2	4	2.1	2	2	2.2	1.8	1.9	1.7	3.9	0.4	3.1
	全天	风频	1.5	17.8	13.7	16	14.6	6.5	4.7	3.8	3.5	3.8	3.2	3.6	2.1	1	1.7	1.9	0.6	
		平均风速	6.4	5.1	2.9	3	3.3	3.5	3.3	3.3	2.8	2.4	2.6	2.5	2.6	2.2	2.8	5.9	0.4	3.5
冬季	白天	风频	4.5	21.8	8.2	13.2	17.7	6.7	4.8	4.4	3.7	2.8	3	3.6	1.9	0.5	0.9	1.2	0.8	
		平均风速	8	6.7	4.3	3.5	3.7	2.9	3.1	2.9	2.2	2.3	1.9	2.2	2.6	3.1	3.5	4.2	0.3	4.2
	黑夜	风频	3.2	27.7	15	19.2	9.7	4	3.2	2.2	2.3	1.7	2.1	1.6	1.2	1.7	1	0.9	3	
		平均风速	6.4	6.5	3.6	2.8	2.8	2.2	1.8	2.5	1.7	1.7	1.5	1.3	1.4	1.7	2.2	2.9	0.3	3.8
	全天	风频	3.8	25	11.9	16.5	13.4	5.2	4	3.2	3	2.2	2.5	2.5	1.5	1.2	1	1	2	
		平均风速	7.3	6.6	3.8	3.1	3.4	2.6	2.6	2.8	2	2	1.7	1.9	2.1	2	2.8	3.6	0.3	4
全年	白天	风频	1.4	10	6.5	10.1	16.9	8.4	9	6.7	10.2	5	5.2	4.5	2.9	0.8	0.8	0.9	0.5	
		平均风速	7.7	6.3	3.9	3.4	3.9	4	3.8	3.2	3.6	2.9	3.3	2.8	2.5	2.4	3.6	6.3	0.3	3.9
	黑夜	风频	1.4	15.9	12.4	16.3	13.8	7	6.8	4.6	4.6	4.4	4.2	2.2	1.5	1.5	1	0.7	1.8	
		平均风速	6.2	5.7	2.9	2.7	3	2.8	3.4	3.6	3.5	2.5	2.6	2.3	1.8	1.6	1.8	3.4	0.3	3.3
	全天	风频	1.4	13	9.5	13.2	15.3	7.7	7.9	5.6	7.4	4.7	4.7	3.3	2.2	1.1	0.9	0.8	1.2	
		平均风速	6.9	5.9	3.2	3	3.5	3.4	3.6	3.4	3.6	2.7	3	2.6	2.3	1.9	2.6	5	0.3	3.6

表 2-17 场址气象塔 100m 高度各季、年风频 (%)、风速 (m/s)

时间	方位	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	静风	平均风速	
春季	白天	风频	0.1	6.8	2.3	3.4	20.4	9.7	15.7	8.6	18.2	5	4.2	2.1	2.5	0.4	0	0	0.7	
		平均风速	4.4	7.2	3.4	3.5	4.3	4.3	4.3	3.1	3.7	3.2	3	2.6	2.3	2.5	0	0	0.3	4
	黑夜	风频	0	8.7	5.8	10.1	22.1	12.5	14.3	4.9	7.7	4.8	3.3	1.8	0.4	0.6	0.4	0	2.5	
		平均风速	0	6.4	2.5	2.6	3.6	3.6	4	2.9	3.8	2.7	2.9	2.9	0.9	1.6	1.1	0	0.2	3.5
	全天	风频	0	7.7	4	6.6	21.2	11.1	15	6.8	13.2	4.9	3.8	1.9	1.5	0.5	0.2	0	1.5	
		平均风速	4.4	6.7	2.8	2.8	3.9	4	4.2	3	3.7	3	3	2.8	2.1	2	1.1	0	0.3	3.8
夏季	白天	风频	0.3	1.4	5.4	6.6	15.7	7.9	9.4	6.8	14.3	8.6	9	6.1	4.6	1.8	1	0.3	0.7	
		平均风速	6.3	4.6	4.4	3.7	4.7	4.4	4.1	3.5	4.4	3.5	4	3	2.7	2.2	2.9	4.7	0.3	3.9
	黑夜	风频	0.2	4	6.6	11.2	13.6	8.1	9	6.7	12.5	8.2	7.2	3.3	3.2	3.5	0.5	0	2.4	
		平均风速	4	3.4	2.9	3.3	4	3.4	4.1	3.9	5.1	3.5	3.6	3.4	1.8	1.8	1.6	0	0.3	3.6
	全天	风频	0.3	2.6	5.9	8.7	14.8	8	9.2	6.7	13.5	8.4	8.2	4.8	3.9	2.6	0.8	0.2	1.4	
		平均风速	5.5	3.7	3.7	3.4	4.4	3.9	4.1	3.7	4.7	3.5	3.9	3.1	2.4	1.9	2.5	4.8	0.3	3.8
秋季	白天	风频	1.6	17.7	8.3	9	21.6	8.1	6.2	4.8	4.6	3.2	4.7	3.6	3.3	1.3	0.7	1.1	0.2	
		平均风速	8.2	5.4	3.6	3.5	4.1	4.3	3.6	2.7	3	2.2	3	2.2	2.6	2.6	7.1	10.8	0.3	4
	黑夜	风频	1.7	25.9	13	19.5	16.6	4.7	2.8	2.1	2.1	1.9	2	1.3	1.1	1.4	1.1	0.7	1.9	
		平均风速	6.3	4.9	2.7	2.8	3.4	2.7	4.2	3.4	4.5	2.9	2.1	2.7	1.7	1.4	2.6	2.4	0.4	3.5
	全天	风频	1.6	22	10.8	14.5	19	6.3	4.4	3.4	3.3	2.6	3.3	2.4	2.2	1.4	0.9	0.9	1.1	
		平均风速	7.2	5.1	3	3	3.8	3.7	3.8	2.9	3.5	2.5	2.7	2.3	2.3	1.9	4.2	7.3	0.4	3.7
冬季	白天	风频	2.3	29.3	6.6	10	21.4	7.4	4.9	3.3	2.9	2.4	2.4	2.7	1	0.4	0.5	0.7	1.6	
		平均风速	7.4	6.9	3.8	3.4	4	2.9	2.5	2.2	2.6	2.2	1.7	2.1	2.4	3.2	2.9	4.4	0.3	4.4
	黑夜	风频	1.3	36.1	10.7	19.1	16.6	3.8	2	1.2	1.4	0.7	1.1	0.9	0.7	0.4	0.5	0.3	3.2	
		平均风速	7.6	6.3	3.3	3	3.3	2.3	1.6	1.3	1.7	1.1	1.6	1	2.2	1.2	2.1	1.8	0.3	4.1
	全天	风频	1.8	33	8.8	15	18.8	5.5	3.3	2.2	2.1	1.5	1.7	1.8	0.8	0.4	0.5	0.5	2.5	
		平均风速	7.5	6.6	3.5	3.1	3.7	2.7	2.2	2	2.3	1.9	1.7	1.8	2.3	2.1	2.5	3.6	0.3	4.2
全年	白天	风频	1	13	5.5	7.1	19.6	8.3	9.3	6	10.4	5	5.2	3.7	2.9	1	0.5	0.5	0.8	
		平均风速	7.6	6.4	3.9	3.5	4.2	4.1	3.9	3	3.8	3.1	3.3	2.6	2.5	2.4	4.1	7.7	0.3	4.1
	黑夜	风频	0.8	19.4	9.2	15.2	17.3	7.1	6.8	3.6	5.7	3.8	3.3	1.8	1.3	1.4	0.6	0.3	2.5	
		平均风速	6.7	5.7	2.9	2.9	3.5	3.2	3.9	3.3	4.4	3.1	3	2.8	1.8	1.6	2.1	2.3	0.3	3.7
	全天	风频	0.9	16.2	7.4	11.1	18.4	7.7	8	4.8	8	4.4	4.3	2.7	2.1	1.2	0.6	0.4	1.6	
		平均风速	7.2	6	3.3	3.1	3.9	3.7	3.9	3.1	4	3.1	3.2	2.7	2.3	2	3	5.9	0.3	3.9

表 2-18 场址气象塔各高度层气温月、年特征值 (°C)

	100m			80m			30m			10m		
	月平均	最高	最低	月平均	最高	最低	月平均	最高	最低	月平均	最高	最低
1	15.5	22.7	4.5	15.6	22.9	4.7	15.7	23.3	5.2	15.6	23.6	5.4
2	15.4	23.6	4.7	15.5	23.6	4.9	15.6	23.9	5.3	15.6	24.3	5.5
3	20	24.5	10.1	20.1	24.8	10.3	20.3	25.5	10.7	20.3	26	9.6
4	21.9	26	11.2	22.1	26.2	11.4	22.3	26.8	11.8	22.4	27.1	10.7
5	26.9	29.8	23.4	27.1	30	23.6	27.4	30.7	23.8	27.6	31.2	23.6
6	27.6	31.9	24.4	27.7	32.1	24.6	28	32.7	24	28.1	33	23.8
7	27.5	31.5	23.9	27.6	31.6	24.1	28	32.1	24.2	28.1	32.3	24.1
8	27.3	30.8	23.6	26.8	30.8	23.4	27.6	31.7	24.3	27.6	32	23.9
9	26.7	33.3	22.6	26	32.6	22.3	26.8	34	23	26.8	34.4	22.2
10	24	28.3	19.3	24	27.8	19.6	24.1	29.1	19.8	24	29.4	18.4
11	21.8	26.4	15.4	22	26.7	15.7	22.2	27.2	16.1	22.3	27.7	16.3
12	17.2	25.9	6.9	17.4	26.2	7.2	17.7	26.6	7.6	17.8	27	7.9
年	22.7	33.3	4.5	22.7	32.6	4.7	23	34	5.2	23.1	34.4	5.4

#### 2.4.4 大气稳定度

本报告采用温度梯度分类法判别稳定度。确定场址地区各类稳定度出现的频率为：A类：6.0%，B类：2.5%，C类：3.0%，D类：30.0%，E类：19.9%，F类：8.6%。

#### 2.4.5 联合频率

在联合频率统计中，风向、风速为气象塔 10m 高度观测值，风向分 16 个方位，静风风向延续前一刻风向。将风速划分为 6 级，即：

- 风速小于 0.5m/s 按静风处理，作为第一级风速；
- 0.5~1.9m/s 为第二级风速；
- 2.0~2.9m/s 为第三级风速；
- 3.0~4.9m/s 为第四级风速；
- 5.0~5.9m/s 为第五级风速；
- 大于 6.0m/s 为第六级风速。

统计得出场址全年以及有雨或无雨条件下的风向、风速、稳定度联合频率分布，结果列于表 2-19~表 2-21。

表 2-19 场址风向、风速、稳定度联合频率（有降水）

单位：%

稳定度	风速等级	风速 m/s	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
A	静风	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	<1.9	1.4	0	0	0.01	0.02	0.05	0.01	0.01	0.02	0.01	0.05	0.01	0	0.01	0.01	0	0
	2.0~2.9	2.5	0	0	0	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.05	0	0	0	0	0
	3.0~4.9	3.6	0	0	0	0	0	0	0.01	0.03	0.05	0.03	0.01	0.01	0	0.01	0	0
	5.0~5.9	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	>6.0	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B	静风	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	<1.9	1.3	0	0	0	0.01	0	0.02	0.02	0	0.01	0	0.01	0	0	0	0	0
	2.0~2.9	2.7	0	0	0.01	0.01	0	0.01	0	0.01	0	0.01	0.03	0.01	0	0	0	0
	3.0~4.9	3.8	0	0	0	0	0	0.01	0	0	0	0	0.02	0.03	0	0	0.01	0
	5.0~5.9	5.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.02	0	0	0	0
	>6.0	6.1	0	0	0	0	0	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C	静风	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	<1.9	1.0	0	0	0	0.02	0.02	0.05	0	0.01	0.03	0	0	0	0	0	0	0
	2.0~2.9	2.6	0	0	0	0	0	0.01	0	0	0	0	0.02	0	0	0	0	0
	3.0~4.9	3.9	0	0.01	0	0.05	0.06	0.02	0.01	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0
	5.0~5.9	5.5	0	0	0.01	0	0	0	0	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0
	>6.0	9.5	0	0	0	0	0	0	0.02	0.02	0	0	0	0.01	0	0	0	0
D	静风	-	0	0	0	0.01	0	0	0	0	0	0	0.01	0	0	0	0	0
	<1.9	1.3	0	0	0.17	0.32	0.21	0.18	0.21	0.1	0.11	0.07	0.07	0.07	0.07	0	0	0
	2.0~2.9	2.4	0	0.01	0.23	0.41	0.18	0.15	0.06	0.08	0.06	0.06	0.03	0.02	0.06	0	0	0
	3.0~4.9	3.8	0	0.18	0.25	0.24	0.17	0.14	0.23	0.16	0.22	0.06	0.15	0.06	0.02	0	0	0
	5.0~5.9	5.4	0	0.14	0.07	0.03	0.01	0.01	0.05	0.06	0	0.01	0.02	0.01	0	0	0	0
	>6.0	8.2	0	0.22	0.11	0	0.01	0.03	0.1	0.06	0.08	0	0.03	0	0.01	0	0.02	0.05
E	静风	-	0	0	0	0	0	0.01	0.01	0.03	0.01	0.03	0	0	0	0	0	0
	<1.9	1.3	0	0.01	0.27	0.29	0.25	0.18	0.14	0.19	0.11	0.09	0.07	0.06	0.05	0	0	0
	2.0~2.9	2.4	0	0.07	0.25	0.11	0.14	0.08	0.02	0.02	0.03	0.01	0.02	0.03	0	0	0.01	0
	3.0~4.9	3.5	0	0	0.11	0.1	0.03	0.03	0.03	0	0	0.01	0	0.01	0	0	0	0
	5.0~5.9	5.4	0	0.01	0	0	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	>6.0	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F	静风	-	0	0	0	0	0	0	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	<1.9	0.6	0	0	0	0	0.01	0	0.02	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2.0~2.9	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3.0~4.9	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	5.0~5.9	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	>6.0	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0



表 2-20 场址风向、风速、稳定度联合频率（无降水）

单位：%

稳定度	风速等级	风速 m/s	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
	A	静风	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0	0	0	0	0	0
<1.9		1.4	0	0	0.01	0.03	0.03	0.06	0.07	0.14	0.08	0.09	0.14	0.19	0.17	0.05	0.03	0
2.0~2.9		2.5	0	0	0.02	0.07	0.14	0.08	0.19	0.08	0.34	0.19	0.23	0.19	0.32	0.01	0.01	0
3.0~4.9		3.7	0	0.19	0.24	0.1	0.06	0.17	0.37	0.29	0.35	0.17	0.22	0.03	0.03	0	0.01	0.01
5.0~5.9		5.3	0	0.07	0.05	0.02	0.01	0.02	0	0.05	0	0	0	0.01	0	0	0	0
>6.0		6.5	0	0.03	0	0	0	0	0	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0
B	静风	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0	0	0	0
	<1.9	1.3	0	0	0.03	0.1	0.03	0.06	0.06	0.05	0.02	0.02	0.08	0.02	0.03	0.02	0.01	0
	2.0~2.9	2.4	0	0	0.03	0.07	0.02	0.02	0.03	0.02	0.08	0.02	0.03	0.06	0.11	0	0	0
	3.0~4.9	3.8	0	0.11	0.06	0.06	0.03	0.02	0.14	0.11	0.21	0.07	0.07	0.07	0	0	0	0
	5.0~5.9	5.3	0	0.02	0.02	0.01	0	0.05	0	0	0	0	0.01	0	0	0	0	0
	>6.0	6.6	0	0.03	0	0	0	0.03	0.01	0	0	0.01	0	0	0	0	0	0
C	静风	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	<1.9	1.5	0	0.01	0	0.07	0.02	0	0.01	0.02	0.01	0.07	0.01	0.03	0.02	0	0.01	0
	2.0~2.9	2.5	0	0	0.01	0	0.05	0.01	0.03	0.05	0.02	0.02	0.03	0.06	0.1	0.01	0	0
	3.0~4.9	3.8	0	0.08	0.08	0.05	0.09	0.11	0.35	0.23	0.38	0.06	0.1	0.07	0	0.05	0	0
	5.0~5.9	5.3	0	0.02	0.05	0	0	0.03	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	>6.0	6.9	0.01	0.06	0.01	0.02	0	0.01	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0
D	静风	-	0	0	0.01	0.02	0.03	0.06	0.06	0.01	0.02	0.02	0	0.02	0	0	0	0
	<1.9	1.4	0	0.09	1.38	2.83	1.68	1.26	1.1	0.65	0.79	0.55	0.51	0.49	0.27	0.23	0.11	0.01
	2.0~2.9	2.5	0.01	0.38	1.83	2.37	1.8	1.3	2.07	0.88	1.51	0.95	0.88	0.35	0.29	0.09	0.05	0.01
	3.0~4.9	3.7	0	2.99	3.19	1.98	1.36	1.95	2.2	1.14	2.82	0.45	1.64	0.35	0.07	0.02	0.09	0.05
	5.0~5.9	5.4	0.03	2.42	0.59	0.08	0.05	0.15	0.02	0.02	0.03	0	0.06	0.01	0	0	0	0
	>6.0	7.1	0	2.6	0.42	0.06	0.01	0.03	0	0.01	0	0	0	0.02	0	0	0.02	0.01
E	静风	-	0	0	0.15	0.15	0.33	0.35	0.41	0.38	0.27	0.1	0.09	0.03	0	0	0	0
	<1.9	1.0	0	0.77	2.33	2.15	1.76	1.38	1.32	0.84	0.65	0.41	0.34	0.23	0.26	0.1	0.06	0.02
	2.0~2.9	2.4	0	0.22	0.23	0.21	0.14	0.13	0.1	0.06	0.08	0.02	0.05	0.02	0	0.03	0.08	0.01
	3.0~4.9	3.6	0	0.25	0.1	0.01	0	0.01	0.01	0.02	0.05	0.01	0.01	0.01	0	0	0.01	0.02
	5.0~5.9	5.3	0	0.06	0.02	0	0	0	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	>6.0	6.6	0	0.03	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F	静风	-	0	0.01	0.13	0.27	0.45	0.41	0.37	0.23	0.38	0.14	0.02	0.03	0.01	0	0	0
	<1.9	0.8	0	0.41	2.03	1.24	0.81	0.56	0.37	0.25	0.24	0.1	0.02	0.05	0	0.01	0	0
	2.0~2.9	2.3	0	0.02	0	0.01	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3.0~4.9	3.0	0	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	5.0~5.9	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	>6.0	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

表 2-21 场址风向、风速、稳定度联合频率（有降水和无降水）

单位：%

稳定度	风速等级	风速 m/s	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
	A	静风	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0	0	0	0	0	0
<1.9		1.4	0	0	0.02	0.06	0.08	0.07	0.08	0.16	0.09	0.14	0.15	0.19	0.18	0.06	0.03	0
2.0~2.9		2.5	0	0	0.02	0.08	0.15	0.09	0.22	0.09	0.35	0.21	0.27	0.19	0.32	0.01	0.01	0
3.0~4.9		3.7	0	0.19	0.24	0.1	0.06	0.17	0.38	0.32	0.4	0.21	0.23	0.05	0.03	0.01	0.01	0.01
5.0~5.9		5.3	0	0.07	0.05	0.02	0.01	0.02	0	0.05	0	0	0	0.01	0	0	0	0
>6.0		6.5	0	0.03	0	0	0	0	0	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0
B	静风	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0	0	0	0
	<1.9	1.3	0	0	0.03	0.11	0.03	0.08	0.08	0.05	0.03	0.02	0.09	0.02	0.03	0.02	0.01	0
	2.0~2.9	2.5	0	0	0.05	0.08	0.02	0.03	0.03	0.03	0.08	0.03	0.07	0.07	0.11	0	0	0
	3.0~4.9	3.8	0	0.11	0.06	0.06	0.03	0.03	0.14	0.11	0.21	0.07	0.09	0.1	0	0	0.01	0
	5.0~5.9	5.3	0	0.02	0.02	0.01	0	0.05	0	0	0	0	0.01	0.02	0	0	0	0
	>6.0	6.5	0	0.03	0	0	0	0.05	0.01	0	0	0.01	0	0	0	0	0	0
C	静风	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	<1.9	1.4	0	0.01	0	0.09	0.05	0.05	0.01	0.03	0.05	0.07	0.01	0.03	0.02	0	0.01	0
	2.0~2.9	2.5	0	0	0.01	0	0.05	0.02	0.03	0.05	0.02	0.02	0.06	0.06	0.1	0.01	0	0
	3.0~4.9	3.8	0	0.09	0.08	0.09	0.15	0.14	0.37	0.24	0.38	0.06	0.1	0.07	0	0.05	0	0
	5.0~5.9	5.3	0	0.02	0.06	0	0	0.03	0	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0
	>6.0	7.7	0.01	0.06	0.01	0.02	0	0.01	0.03	0.02	0	0	0	0.01	0	0	0	0
D	静风	-	0	0	0	0.02	0.02	0.03	0.06	0.06	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02	0	0	0
	<1.9	1.4	0	0.09	1.55	3.15	1.88	1.44	1.3	0.75	0.9	0.62	0.58	0.56	0.34	0.23	0.11	0.01
	2.0~2.9	2.5	0.01	0.39	2.06	2.79	1.99	1.45	2.12	0.96	1.56	1	0.91	0.38	0.34	0.09	0.05	0.01
	3.0~4.9	3.7	0	3.17	3.44	2.22	1.53	2.09	2.43	1.3	3.04	0.5	1.79	0.41	0.09	0.02	0.09	0.05
	5.0~5.9	5.4	0.03	2.56	0.66	0.11	0.06	0.16	0.07	0.08	0.03	0.01	0.08	0.02	0	0	0	0
	>6.0	7.3	0	2.82	0.54	0.06	0.02	0.07	0.1	0.07	0.08	0	0.03	0.02	0.01	0	0.05	0.06
E	静风	-	0	0	0.15	0.15	0.33	0.37	0.42	0.41	0.29	0.14	0.09	0.03	0	0	0	0
	<1.9	1.0	0	0.78	2.6	2.43	2.01	1.56	1.46	1.04	0.77	0.5	0.41	0.29	0.31	0.1	0.06	0.02
	2.0~2.9	2.4	0	0.29	0.48	0.32	0.27	0.21	0.13	0.08	0.11	0.03	0.07	0.06	0	0.03	0.09	0.01
	3.0~4.9	3.6	0	0.25	0.22	0.11	0.03	0.05	0.05	0.02	0.05	0.02	0.01	0.02	0	0	0.01	0.02
	5.0~5.9	5.3	0	0.07	0.02	0	0.01	0	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	>6.0	6.6	0	0.03	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F	静风	-	0	0.01	0.13	0.27	0.45	0.41	0.38	0.23	0.38	0.14	0.02	0.03	0.01	0	0	0
	<1.9	0.8	0	0.41	2.03	1.24	0.82	0.56	0.39	0.25	0.24	0.1	0.02	0.05	0	0.01	0	0
	2.0~2.9	2.3	0	0.02	0	0.01	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3.0~4.9	3.0	0	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	5.0~5.9	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	>6.0	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

## 2.4.6 混合层高度及扩散参数值

### 2.4.6.1 混合层高度

参考阳江核电厂开展的边界层观测实验结果，各稳定度混合层高度取值为：A-B 类为 1013m，C 类为 845m，D 类为 424m。

### 2.4.6.2 扩散参数

参考阳江核电厂开展的湍流观测试验、数模试验专题成果，表 2-22 给出了场址扩散参数系数值。

表 2-22 推荐扩散参数

稳定度	低层扩散参数系数				高层扩散参数系数			
	a	b	c	d	a	b	c	d
A	1.31	0.71	1	0.73	0.84	0.8	0.83	0.74
B	1	0.72	0.84	0.71	0.66	0.78	0.75	0.71
C	0.85	0.73	0.62	0.68	0.61	0.77	0.64	0.67
D	0.63	0.75	0.5	0.64	0.9	0.68	0.54	0.63
E	0.48	0.7	0.41	0.59	0.48	0.69	0.39	0.61
F	0.47	0.68	0.28	0.56	0.42	0.66	0.38	0.55

## 2.5 水文

### 2.5.1 地表水

场址附近无大江大河，仅有山溪小河独流入海。场址北部 2.1km 处有海荫河，海荫河位于场址 N 方向，发源于肥山一带，流向总体上自北东东向南西西，进入东平镇后近似由东向西流入南海，全长约 6.5km。大水河的支流都比较短小，一般只有 300~600m，河的右岸支流相对发育，流向以近南北向为主；左岸支流较少，自南向北流，长度一般只有 800~1400m，呈不对称的树状分布。

## 2.5.2 地下水

本项目勘察期间正值雨季，实测 50 个钻孔的水位，其中 20 个钻孔塌孔，无法测得水位，通风固废暂存中心、同位素中心、材料中心、水泵房和污水处理设施附近地下水稳定水位埋深介于 2.53~11.34m，高程介于 21.47~30.08m，平均高程为 25.0m。开闭所位置未测到地下水水位。

根据类似场地经验，地下水位年变化幅度约 2.0~3.0m。

场址半径 5km 范围内涉及东平镇的允泊村和瓦北村和各渔委会，多数渔委会不使用水井，仅大澳渔村有村级公用井，主要用于洗衣，不饮用。允泊行政村所辖部分自然村有村级公用井，直径约 80cm~1.2m，用于洗衣，不饮用。瓦北行政村所辖部分自然村有村级公用井和居民自家使用小井，用于饮用和洗衣等。

## 2.5.3 洪水

根据《先进能源研究与创新中心 外部灾害防护设计要求》（中广核工程设计有限公司，2019.09），先进能源研究与创新中心项目（热室）设计基准洪水位（DBF）考虑 10%超越概率天文潮、可能最大风暴潮叠加海平面异常变化，取值为 7.32m，该项目厂坪设计标高约 31.5m，本项目不受海域洪水及波浪等影响。

本项目场址附近无大型河流，场址半径 5km 范围内涉及的主要河流为海荫河，径流较小。考虑在两百年一遇降雨情况下，本项目不会发生洪水淹没灾害。

## 2.6 地形地貌

拟建场地原始地貌属于滨海丘陵地区，场地现状地势较平坦，西南侧靠山，西侧为进场区道路。场地内地表约高于周边道路，其中西侧道路标高约 23-24m，南侧进场道路为斜坡，标高约 24-32m。

主要建筑区域现状地表高程介于 29.33~36.95m，最大高差 7.62m，道路岗亭位置标高约 24m。

## 2.7 地质地震

拟建场地工程地质条件较好，无活动断裂通过，区域稳定性较好，根据国家标准《建筑抗震设计规范》（GB 50011-2010）（2016年版）及《中国地震动参数区划图》（GB18306-2015），场地的抗震设防烈度为7度，设计基本地震加速度0.10g，设计地震分组为第一组，特征周期：II类场地为0.35s。

### 3 环境质量现状

#### 3.1 辐射环境质量现状

本章节主要根据 2019 年阳江核电厂周围环境的监测结果对场址周围辐射环境质量现状进行描述，并结合本项目的特点和排放核素特征开展了部分补充调查，以评价项目周围辐射环境质量现状。

本报告使用的核电厂 2019 年监测数据的点位、采样频次见表 3-1，其测量使用的方法及仪器设备见表 3-2。

补充调查的点位、采样频次见表 3-3，其测量使用的方法及仪器设备见表 3-4。

表 3-1 阳江核电厂的监测点位及取样频次

序号	监测介质		监测项目	点位数量	点位名称	频次
1	空气		$\gamma$ 核素	6	AS1、AS2、AS3、AS4、AS5、BS1	1 次/月
			$^3\text{H}$	3	AS1、BS1、BS3	1 次/季度
			$^{14}\text{C}$	3	AS1、BS1、BS3	1 次/季度
2	降雨		$\gamma$ 核素	4	AS1、AS4、BS1、BS3	1 次/半年
			$^3\text{H}$	5	AS1、AS3、AS4、BS1、BS3	降雨期
			总 $\beta$	5	AS1、AS3、AS4、BS1、BS3	降雨期
3	水体	地表水	$\gamma$ 核素	2	东平河、平堤水库	1 次/半年
			$^3\text{H}$	2	东平河、平堤水库	1 次/半年
		地下水	$\gamma$ 核素	2	平堤水库、允泊村	1 次/年
			$^3\text{H}$	2	平堤水库、允泊村	1 次/半年
		饮用水	$\gamma$ 核素	2	海滨花园、东平镇	1 次/季度
			$^3\text{H}$	2	海滨花园、东平镇	1 次/半年
4	土壤		$\gamma$ 核素	4	瓦北村、大澳、平堤水库、UA 厂前区	1 次/年
			$^{90}\text{Sr}$	4	瓦北村、大澳、平堤水库、UA 厂前区	1 次/年
5	底泥		$\gamma$ 核素	2	平堤水库、东平河	1 次/年
			$^{90}\text{Sr}$	2	平堤水库、东平河	1 次/年

表 3-2 阳江核电厂的测量方法

项目		分析测量方法	测定装置	探测限
水中 $^3\text{H}$		蒸馏法制样, 测量用 ULTIMA GOLD LLT 闪烁液	Quantulus1220 超低本底液闪 谱仪	1.0Bq/L
			Tri-carb 3180TR/SL 液闪谱仪	1.3Bq/L
			LSC-LB7 超低本底液闪谱仪	0.35Bq/L
空气中 $^3\text{H}$		蒸馏法制样, 测量用 ULTIMA GOLD LLT 闪烁液	Tri-carb 3180TR/SL 液闪谱仪	0.04Bq/m <sup>3</sup>
空气中 $^{14}\text{C}$		2gCaCO <sub>3</sub> +2ml 除盐水+16ml 闪烁液	Tri-carb 3180TR/SL 液闪谱仪	0.1Bq/gC
总 $\beta$	淡水	蒸发法, $\beta$ 测量	美国 CANBERRA12 道 LB4123WX	11Bq/m <sup>3</sup>
$^{90}\text{Sr}$	土壤、 底泥	HDEHP 萃取色层法, $\beta$ 测 量 (B) (GB11222.1-89)	美国 CANBERRA12 道 LB4123WX	0.23Bq/Kg (干)
$\gamma$ 谱	气溶胶	直接测定空气滤膜 $\gamma$ 谱	GC7020 高纯锗 $\gamma$ 谱仪	6.75 $\mu\text{Bq/m}^3$ $^{137}\text{Cs}$
	淡水	蒸发法, $\gamma$ 谱测量		6.50Bq/m <sup>3</sup> $^{137}\text{Cs}$

表 3-3 补充调查监测项目和采样频次

序号	监测介质		监测项目	点位 数量	点位名称	频次
1	地表		$\gamma$ 辐射剂量率	38	厂区内布置 10 个点位, 厂区边界外 半径 10km 范围内布置 28 个点位	1 次
2	空气		$\gamma$ 核素	1	阳江核电气象站 (AS4)	1 次
			$^3\text{H}$	1	阳江核电气象站 (AS4)	1 次
			$^{14}\text{C}$	1	阳江核电气象站 (AS4)	1 次
3	水体	地表水	$\gamma$ 核素	3	厂区东侧池塘、海朗河、平堤水库	1 次
		地下水	$^{90}\text{Sr}$ 、 $^{63}\text{Ni}$ 、 $^3\text{H}$ 、 $^{14}\text{C}$	1	厂区东侧池塘	1 次
			$\gamma$ 核素	1	福龙水井	1 次
4	土壤		$\gamma$ 核素	24	厂区边界外半径 10km 范围内	1 次
			$^{239+240}\text{Pu}$	6	石料加工区、核电气象站、地塘园 村、瓦北村、蒲塘村、平堤村	1 次
			$^{90}\text{Sr}$	2	石料加工区、核电气象站	1 次

表 3-4 补充调查采用的仪器和监测方法

序号	检测项目	仪器设备	监测分析方法	探测限
1	环境 $\gamma$ 辐射瞬时剂量率	FH40G+FH672E	环境地表 $\gamma$ 辐射剂量率测定规范 GB/T 14583-1993	10nGy/h
2	空气中 $^3\text{H}$	Quantulus1220 液闪	水中氚的分析方法 GB/T 12375-90	13mBq/m <sup>3</sup>
3	空气中 $^{14}\text{C}$	Quantulus1220 液闪	空气中 $^{14}\text{C}$ 的取样与测定方法 EJ/T 1008-1996	0.1Bq/gC
4	空气中 $\gamma$ 核素	GEM50P4-83 高纯锗 $\gamma$ 谱仪	空气中放射性核素的 $\gamma$ 能谱分析方法 WS/T 184-2017	6 $\mu$ Bq/m <sup>3</sup>
6	水中 $^{14}\text{C}$	Quantulus1220 液闪	水中碳-14 活度的测定—液闪计数法 ISO 13162-2011	0.02Bq/gC 0.2 mBq/L
7	水中 $^{90}\text{Sr}$	MPC9604 $\alpha$ 、 $\beta$ 测量仪	水和生物样品灰中锶-90 的放射化学分析方法 HJ 815-2016	0.2 mBq/L
8	水中 $^{63}\text{Ni}$	MPC9604 $\alpha$ 、 $\beta$ 测量仪	水中镍-63 分析方法 GB/T 14502-1993	10 mBq/L
9	水中 $\gamma$ 核素	GEM50P4-83 高纯锗 $\gamma$ 谱仪	水中放射性核素的 $\gamma$ 能谱分析方法 GB/T 16140-2018	6mBq/L <sup>137</sup> Cs
10	土壤中 $\gamma$ 核素	GMX50P4-83 高纯锗 $\gamma$ 谱仪	土壤中放射性核素的 $\gamma$ 能谱分析方法 GB/T 11743-2013	0.24 Bq/kg (干) <sup>137</sup> Cs
11	土壤中 $^{90}\text{Sr}$	MPC9604 $\alpha$ 、 $\beta$ 测量仪	土壤中锶-90 分析方法 EJ/T 1035-2011	0.2Bq/kg
12	土壤中 $^{239+240}\text{Pu}$	Alpha Dual 双通道 $\alpha$ 谱仪	水和土壤样品中钚的放射化学分析方法 HJ 814-2016	7.8mBq/kg

### 3.1.1 $\gamma$ 辐射剂量率

$\gamma$  辐射剂量率为本次补充调查结果，调查以项目场址为中心，根据近密远疏的原则在项目场址周围 10km 范围内布置 38 个  $\gamma$  辐射剂量率监测点。其中场址区域共布设 11 个点位（点位序号 1~11），见图 3-1；场址周围 2km 范围内点位布置见图 3-2，共布设 11 个点位（点位序号 12~22）；场址周围 2~10km 范围内共布设 16 个点位（点位序号 23~38），点位布置见图 3-3。



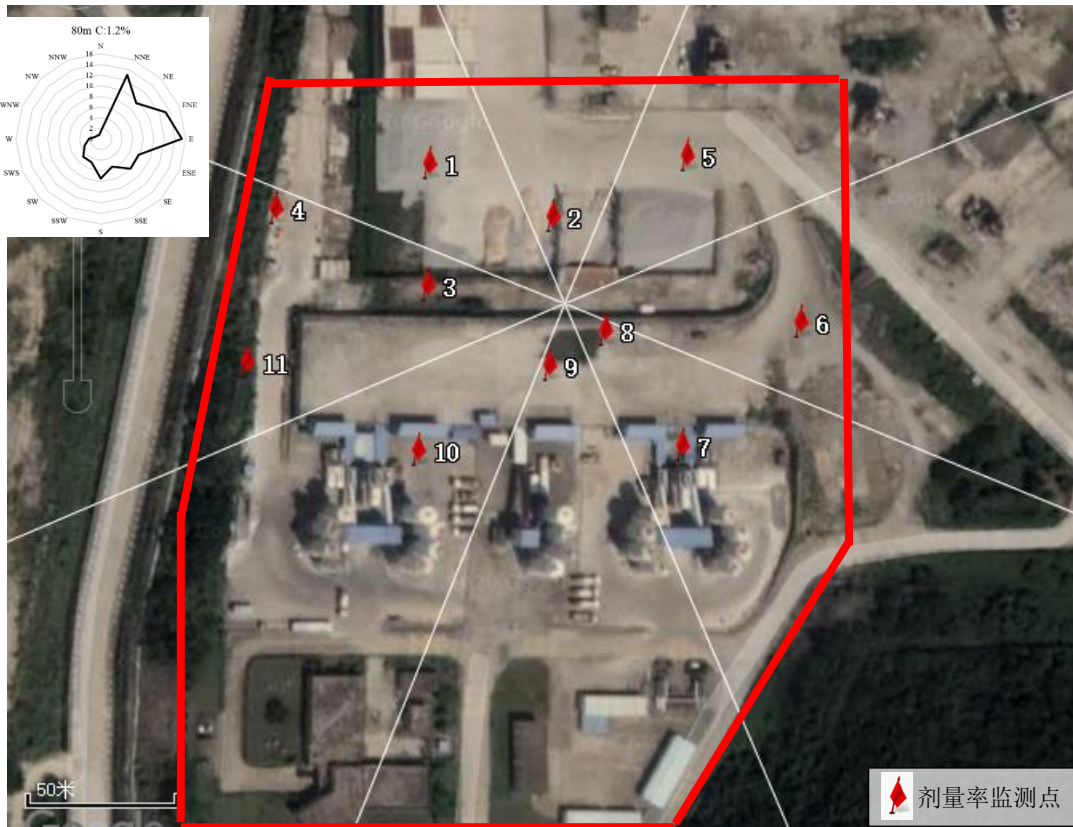


图 3-1 场内  $\gamma$  辐射剂量率调查点位

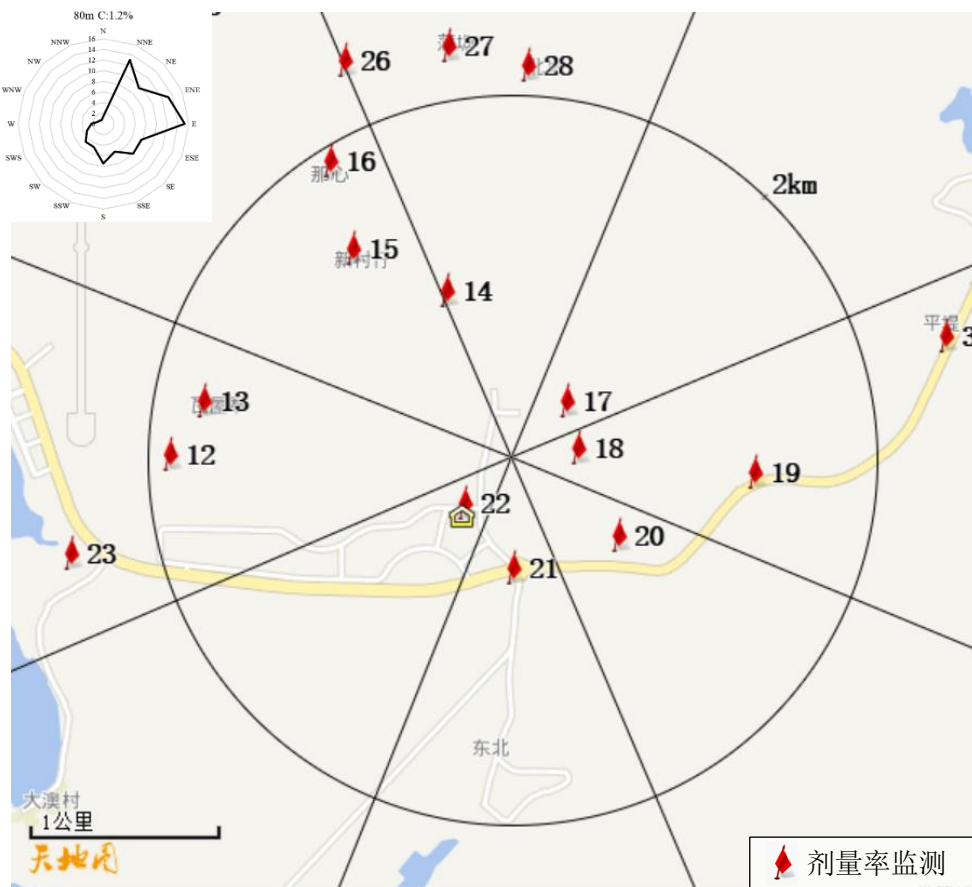


图 3-2 场址周围 2km 范围  $\gamma$  辐射剂量率监测点位布置图

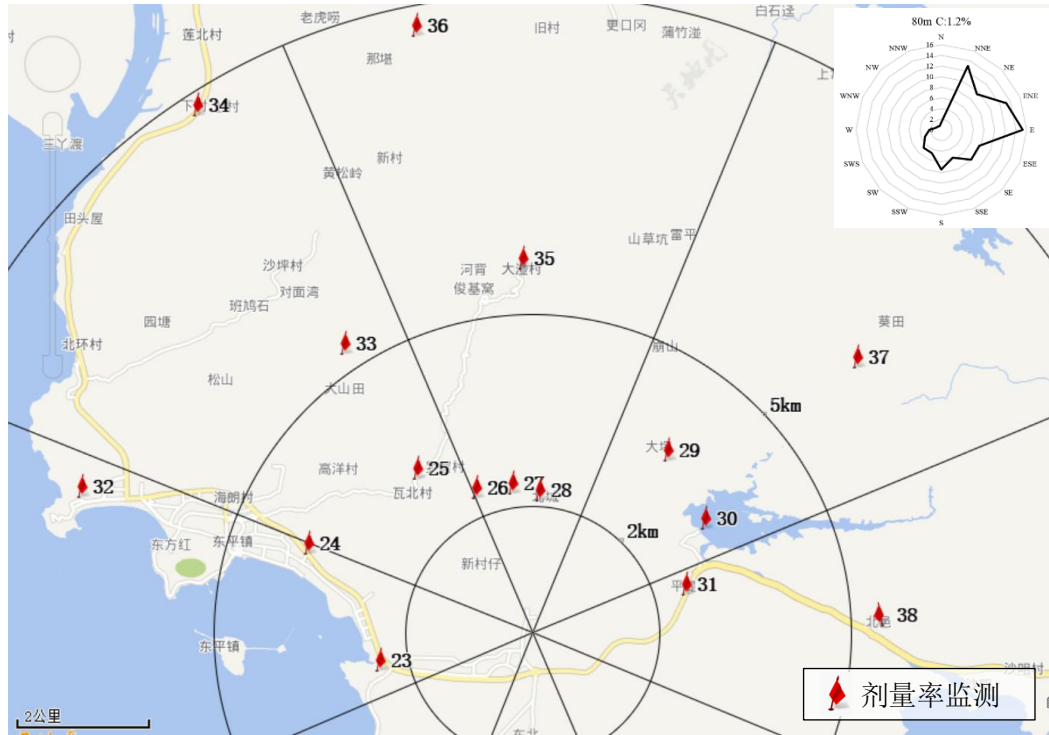


图 3-3 场址周围 2-10km 范围  $\gamma$  辐射剂量率监测点位布置图

本项目场址区域及周围环境  $\gamma$  辐射剂量率结果见表 3-5，监测结果为 123~249 nGy/h。

表 3-5  $\gamma$  辐射剂量率监测结果 (nGy/h)

序号	点位名称	距离 (km)	方位	监测结果	标准偏差
1	场区内点位 1	—	—	222	8
2	场区内点位 2	—	—	218	5
3	场区内点位 3	—	—	158	2
4	场区内点位 4	—	—	174	3
5	场区内点位 5	—	—	162	2
6	场区内点位 6	—	—	193	3
7	场区内点位 7	—	—	136	4
8	场区内点位 8	—	—	148	4
9	场区内点位 9	—	—	154	1
10	场区内点位 10	—	—	139	2
11	场区内点位 11	—	—	171	5
12	地塘园村	1.89	W	249	5
13	瓦屋寨	1.72	W	188	5
14	福龙	0.9	N	197	9
15	新村仔	1.37	NW	170	5
16	那心村	1.81	NW	176	9
17	石料加工区	0.36	NE	198	4
18	场区东侧池塘	0.33	E	192	4

序号	点位名称	距离 (km)	方位	监测结果	标准偏差
19	核电北门东侧道路	1.33	E	209	7
20	弃土场	0.77	SE	188	3
21	核电北门草坪	0.7	S	187	3
22	核电气象站	0.45	SW	173	7
23	核电生活区	2.51	W	206	10
24	东平镇华兴花苑	3.75	W	162	3
25	瓦北村	3.02	NW	147	3
26	海荫河取水点	2.28	NW	178	4
27	蒲塘村	2.19	N	186	3
28	北城村	2.05	N	159	2
29	平堤水库北侧山坡	3.38	NE	228	8
30	平堤水库	3.03	NE	123	4
31	平堤村	2.43	E	186	7
32	东平镇海滨公园	7.39	W	160	3
33	山顶4号风机处	5.26	NW	214	5
34	北政村	9.65	NW	232	6
35	大漕村	5.66	N	134	4
36	莲北村东侧养殖场	9.45	N	147	4
37	平堤水库东北山坡	6.51	NE	222	6
38	北邑村	5.48	E	161	2
范围		—	—	123~249	—

注：监测结果均未扣除仪器宇宙射线响应值。

### 3.1.2 空气中放射性核素

空气样品监测点位布置见图 3-4，共布置 7 个点位，监测项目分别为：

- 气溶胶中  $\gamma$  核素：AS1、AS2、AS3、AS4、AS5、BS1；
- 空气中  $^3\text{H}$ 、 $^{14}\text{C}$ ：AS1、AS4、BS1、BS3；
- 降雨中  $^3\text{H}$ ：AS1、AS3、AS4、BS1、BS3；
- 降雨中总  $\beta$ ：AS1、AS3、AS4、BS1、BS3；
- 降雨中  $\gamma$  核素：AS1、AS4、BS1、BS3。

空气中放射性核素监测结果见表 3-6，空气中氡的活度浓度均小于探测限；空气中  $^{14}\text{C}$  的含量为 0.163~0.28Bq/g 碳；空气气溶胶中未监测到人工放射性  $\gamma$  核素。

降雨中放射性核素监测结果见表 3-7。降雨中总  $\beta$  的活度浓度范围为 0.011~0.383Bq/L；降雨中氡活度浓度范围为 1.00~4.28Bq/L；人工放射性  $\gamma$  核素

监测结果均低于探测限。

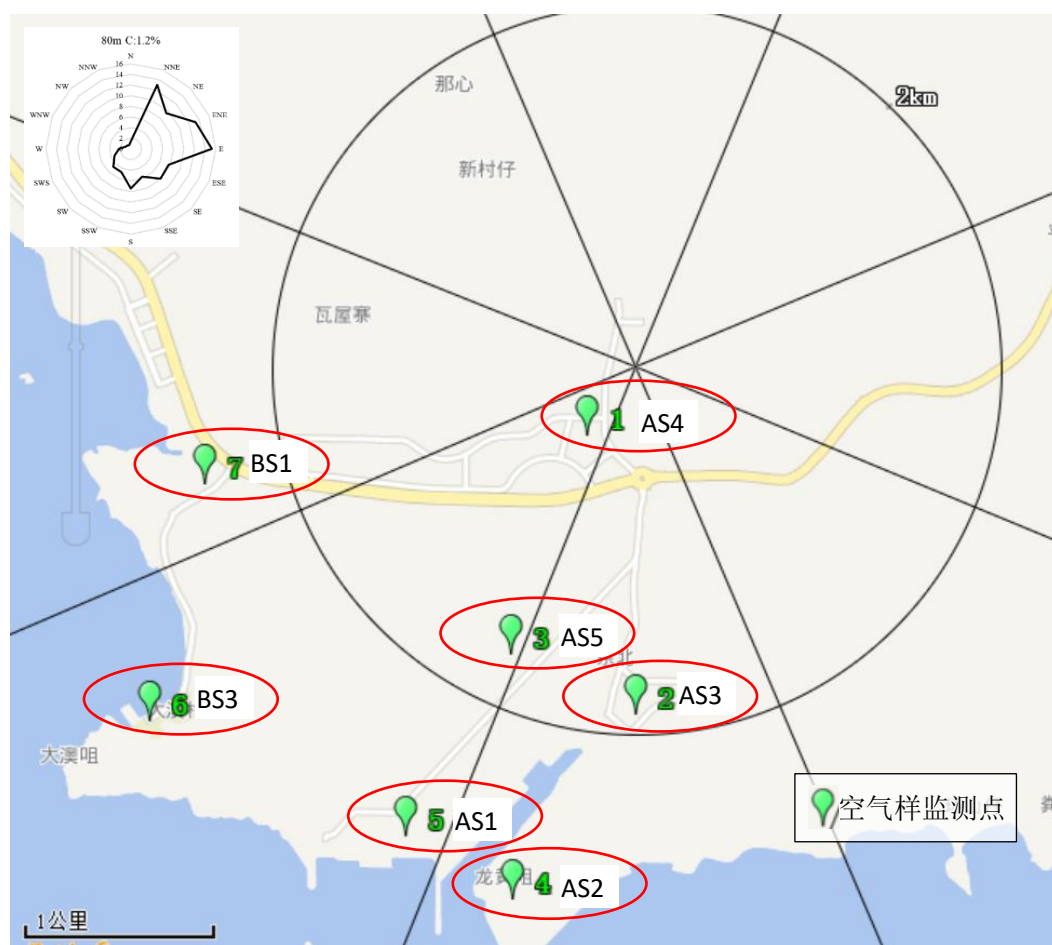


图 3-4 空气样监测点位分布图

(均为核电厂监测点位，其中 AS4 的  $^3\text{H}$  和  $^{14}\text{C}$  为本次补充调查内容)

表 3-6 空气中放射性核素监测结果

核素	点位名称						
	AS1	AS2	AS3	AS4	AS5	BS1	BS3
$^3\text{H}$	< 106	—	—	< 13	—	< 61.8	< 101
$^{14}\text{C}$	0.227~1.09	—	—	0.28±0.03	—	0.167~0.273	0.163~0.272
$^{137}\text{Cs}$	<3.0	<3.7	<3.8	<5.9	<4.3	<4.2	—
$^{134}\text{Cs}$	<3.5	<3.0	<2.8	<5.6	<3.5	<3.5	—
$^{58}\text{Co}$	<3.6	<3.7	<3.6	<5.6	<4.6	<4.2	—
$^{60}\text{Co}$	<4.9	<5.1	<5.0	<5.7	<5.9	<5.9	—
$^{54}\text{Mn}$	<3.6	<3.8	<3.8	<6.0	<4.7	<4.3	—
$^{110\text{m}}\text{Ag}$	<3.0	<3.3	<3.2	<5.6	<3.7	<3.8	—
$^{131}\text{I}$	<2.6	<2.7	<2.6	<6.0	<3.3	<3.1	—

注： $^3\text{H}$  监测结果单位  $\text{mBq/m}^3$ ， $^{14}\text{C}$  监测结果单位  $\text{Bq/g}$  碳， $\gamma$  核素监测结果单位  $\mu\text{Bq/m}^3$ ；  
—表示该站点未监测该项目。

表 3-7 降雨中放射性核素监测结果 (Bq/L)

核素	点位名称				
	AS1	AS3	AS4	BS1	BS3
总 $\beta$	0.019~0.208	0.023~0.149	0.013~0.383	0.011~0.223	0.048~0.187
$^3\text{H}$	<1.00-4.28	<1.3	<1.3	<1.3	<1.3
$^{54}\text{Mn}$	<3.34 E-3	—	<3.35 E-3	<3.25 E-3	<3.17 E-3
$^{58}\text{Co}$	<3.17 E-3	—	<3.19 E-3	<3.29 E-3	<3.37 E-3
$^{60}\text{Co}$	<3.80 E-3	—	<3.60 E-3	<3.75 E-3	<3.54 E-3
$^{110\text{m}}\text{Ag}$	<3.27 E-3	—	<3.34 E-3	<3.22 E-3	<3.23 E-3
$^{131}\text{I}$	<3.82 E-3	—	<3.73 E-3	<3.79 E-3	<3.68 E-3
$^{134}\text{Cs}$	<3.21 E-3	—	<3.22 E-3	<3.00 E-3	<3.19 E-3
$^{137}\text{Cs}$	<3.91 E-3	—	<3.97 E-3	<3.76 E-3	<3.80 E-3

注：—表示该站点未监测该项目。

### 3.1.3 水中放射性核素

在本项目 5km 范围共设置有 9 个水样监测点位，监测点位分布见图 3-5。其中地表水 4 个点位（平堤水库水、场区东侧池塘水、海荫河 1 河水、海荫河 2 河水）；地下水 3 个点位（平堤水厂、福龙、允泊村）；饮用水 2 个点位（海滨花园、东平镇）。

主要监测项目为：

—  $\gamma$  核素：平堤水库、场区东侧池塘、海荫河 1、海荫河 2、平堤水厂、福

龙、允泊村、海滨花园、东平镇；

- $^{90}\text{Sr}$ : 平堤水厂、场区东侧池塘、海荫河 1；
- $^3\text{H}$ : 平堤水库、场区东侧池塘、海荫河 2、平堤水厂、允泊村、海滨花园、东平镇；
- $^{14}\text{C}$ : 场区东侧池塘；
- $^{63}\text{Ni}$ : 场区东侧池塘。

监测结果见表 3-4，氡和人工放射性  $\gamma$  核素监测结果均低于探测限；地表水（厂区东侧池塘、海荫河 1）和地下水（福龙）中  $^{90}\text{Sr}$  的活度浓度范围为 0.29~0.87 mBq/L；厂区东侧池塘中  $^{14}\text{C}$  的活度浓度为 1.17mBq/L， $^{63}\text{Ni}$  监测结果小于探测限。

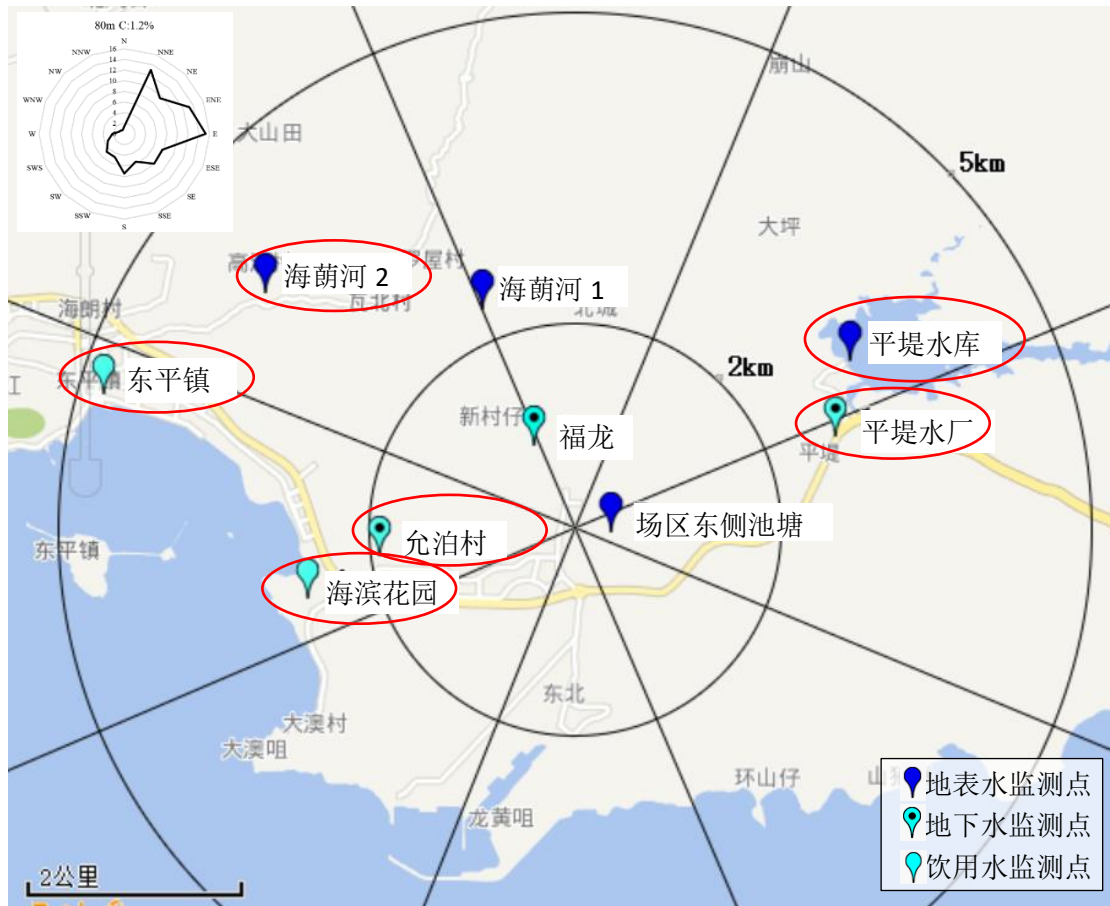


图 3-5 地表水、地下水、饮用水监测点位分布图

（其中厂区东侧池塘、海荫河 1、福龙为补充调查点位，其他为核电监测点位）

表 3-8 地表水、地下水和饮用水中放射性核素活度浓度监测结果 (mBq/L)

介质 类别	序号	点位名称	核素名称										
			<sup>137</sup> Cs	<sup>134</sup> Cs	<sup>58</sup> Co	<sup>60</sup> Co	<sup>54</sup> Mn	<sup>110m</sup> Ag	<sup>131</sup> I	<sup>90</sup> Sr	<sup>3</sup> H	<sup>14</sup> C	<sup>63</sup> Ni
地表 水	1	平堤水库*	<4.21	<3.18	<3.24	<3.79	<3.43	<3.24	<3.85	—	<1300	—	—
	2	场区东侧池塘	<5.9	<5.3	<5.8	<8.1	<6.1	<5.8	<6.1	0.87±0.14	<580	1.17±0.40	<10
	3	海萌河 1	<5.5	<5.0	<5.5	<6.6	<5.7	<5.5	<5.7	0.29±0.09	—	—	—
	4	海萌河 2*	<4.15	<3.16	<3.31	<3.89	<3.37	<3.24	<3.83	—	<1300	—	—
地下 水	5	平堤水厂*	<3.99	<3.20	<3.32	<3.73	<3.38	<3.37	<3.61	—	<1.0	—	—
	6	福龙	<5.8	<5.4	<5.8	<8.0	<6.1	<5.8	<6.1	0.74±0.10	—	—	—
	7	允泊村*	<3.81	<3.11	<3.17	<3.66	<3.34	<3.28	<3.61	—	<1.0	—	—
饮用 水	8	海滨花园*	<6.12	<5.14	<5.05	<7.41	<5.57	<5.78	<5.06	—	<1.3	—	—
	9	东平镇*	<6.12	<5.10	<5.76	<7.16	<6.07	<5.41	<5.02	—	<1.3	—	—

注：\*该数据为阳江核电厂 2019 年在该点位区域的采样监测结果。

—表示该站点未监测该项目。

### 3.1.4 土壤、底泥中放射性

土壤按 10km 内 8 个方位布点，共 26 个监测点位，监测  $\gamma$  核素，其中场址东北侧石料加工区和气象站增加土壤中  $^{90}\text{Sr}$  监测；场址 5km 范围内 8 个方向各选一个点位测量  $^{239+240}\text{Pu}$ ，在场址 5km 范围内共设置 2 个底泥取样点位，分别为东平河和平堤水库，本项目周围土壤和底泥监测点位分布见图 3-6。

土壤和底泥中  $^{90}\text{Sr}$  和  $^{239+240}\text{Pu}$  放射性监测结果见表 3-9， $\gamma$  核素监测结果见表 3-10。土壤中  $^{90}\text{Sr}$  的活度浓度范围为  $<\text{LLD}\sim 0.182\text{Bq/kg}$ ， $^{239+240}\text{Pu}$  的活度浓度范围为  $<\text{LLD}\sim 0.069\text{Bq/kg}$ ， $^{238}\text{U}$  的活度浓度范围为  $70\sim 302\text{Bq/kg}$ ， $^{232}\text{Th}$  的活度浓度范围为  $53.4\sim 296\text{Bq/kg}$ ， $^{226}\text{Ra}$  的活度浓度范围为  $64.3\sim 211\text{Bq/kg}$ ， $^{40}\text{K}$  的活度浓度范围为  $295.2\sim 1478\text{Bq/kg}$ ， $^7\text{Be}$  的活度浓度范围为  $<\text{LLD}\sim 4.6\text{Bq/kg}$ ， $^{137}\text{Cs}$  的活度浓度范围为  $<\text{LLD}\sim 1.96\text{Bq/kg}$ ，其余人工放射性  $\gamma$  核素监测结果小于探测限。

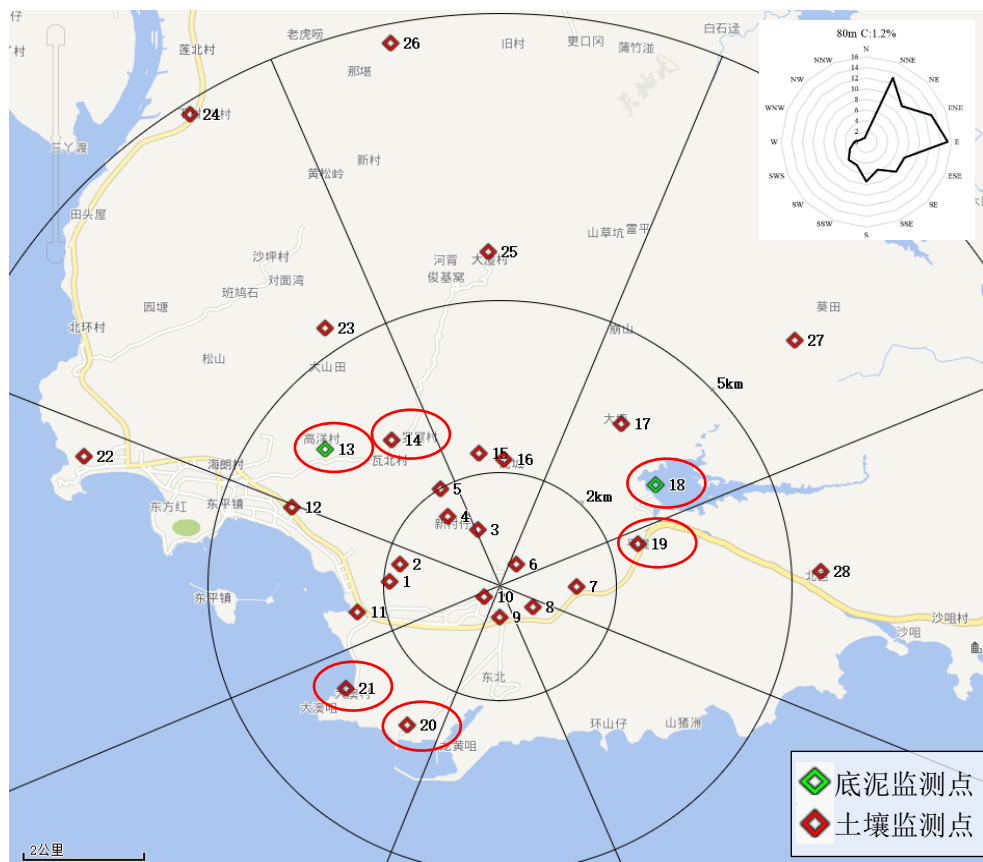


图 3-6 土壤、底泥监测点位分布图

(其中 13、14、18、19、20、21 为核电监测点位，其余为补充调查监测点位)



表 3-9 土壤中  $^{90}\text{Sr}$  和  $^{239+240}\text{Pu}$  监测结果 (Bq/kg)

类别	点位号	点位	$^{90}\text{Sr}$	$^{239+240}\text{Pu}$
土壤	6	石料加工区	0.182±0.09	0.012±0.008
	10	核电气象站	<0.118	< 0.012
	1	允泊	<0.23	0.069±0.019
	14	瓦北村	<0.23*	0.057±0.016
	15	蒲塘村	—	0.019±0.014
	19	平堤水库	<0.23*	< 0.013
	20	UA 厂前区	<0.23*	—
	21	大澳	<0.23*	—
底泥	18	平堤水库底泥	<0.23*	—
	13	东平河底泥	<0.23*	—

注：\*数据为阳江核电厂 2019 年在该点位区域的采样监测结果。

—表示该站点未监测该项目。

表 3-10 土壤及底泥中  $\gamma$  核素监测结果 (Bq/kg)

点位序号	点位名称	$^{238}\text{U}$	$^{226}\text{Ra}$	$^{232}\text{Th}$	$^{40}\text{K}$	$^7\text{Be}$	$^{137}\text{Cs}$	$^{134}\text{Cs}$	$^{58}\text{Co}$	$^{60}\text{Co}$	$^{54}\text{Mn}$
1	允泊	221±16	211.2±2.3	165.0±2.2	1455±19	< 4.9	< 0.62	< 0.54	< 0.61	< 0.65	< 0.65
2	瓦屋寨	160±13	130.0±1.9	90.6±1.3	1478±18	< 4.5	< 0.59	< 0.52	< 0.54	< 0.61	< 0.60
3	福龙	108±12	64.3±1.4	70.9±1.1	559±11	4.2±2.2	< 0.45	< 0.42	< 0.42	< 0.45	< 0.48
4	新村仔	114±12	96.5±1.6	84.0±1.2	488±11	< 4.0	0.69±0.31	< 0.46	< 0.46	< 0.50	< 0.54
5	那心村	152±15	132.3±2.0	105.5±1.4	1385±17	< 4.8	1.22±0.37	< 0.55	< 0.56	< 0.63	< 0.64
6	石料加工区	258±15	192.9±2.3	124.6±1.5	1191±17	< 5.0	< 0.63	< 0.57	< 0.57	< 0.64	< 0.69
7	核电北门路东	252±17	162.8±2.3	296.5±2.3	1219±18	< 6.0	< 0.77	< 0.67	< 0.65	< 0.71	< 0.83
8	弃土场	118±13	75.1±1.4	74.7±1.1	1075±15	< 3.7	< 0.48	< 0.44	< 0.45	< 0.50	< 0.52
9	核电北门草坪	127±13	92.2±1.7	145.9±1.6	655±13	< 4.7	< 0.60	< 0.54	< 0.53	< 0.58	< 0.65
10	核电气象站	145±13	91.8±1.6	104.5±1.4	976±15	< 4.4	< 0.53	< 0.48	< 0.49	< 0.54	< 0.58
11	核电生活区	194±16	150.2±2.1	125.7±1.5	1134±16	< 5.1	< 0.60	< 0.57	< 0.57	< 0.64	< 0.68
12	华兴花苑	56±16	77.2±1.9	79.7±1.6	688±13	< 5.3	< 0.58	< 0.63	< 0.54	< 0.58	< 0.62
13	东平河底泥*	116±24	91.8±1.9	119±3	909±35	< 4.6	< 0.75	< 0.56	< 0.62	< 0.80	< 0.73
14	瓦北村	173±19	151.3±2.1	94.6±1.4	888±14	< 4.8	1.25±0.35	< 0.54	< 0.52	< 0.60	< 0.61
15	蒲塘村	217±23	170.4±2.4	176.7±1.9	614±12	< 5.1	0.73±0.36	< 0.55	< 0.54	< 0.56	< 0.68
16	北城村	70±15	82.6±1.7	76.3±1.4	637±13	< 4.6	0.89±0.34	< 0.54	< 0.53	< 0.57	< 0.57
17	平堤水库北坡	161±16	118.5±1.8	134.6±1.5	636±12	4.6±2.8	< 0.52	< 0.52	< 0.48	< 0.56	< 0.60
18	平堤水库底泥*	236±49	177±4	259±5	1059±40	< 6.2	< 0.88	< 0.76	< 0.77	< 0.96	< 0.85
19	平堤水库*	115±28	97.0±1.4	145±2	842±20	< 3.7	< 0.49	< 0.40	< 0.39	< 0.46	< 0.43
20	UA 厂前区*	125±29	71.9±1.1	105±2	784±19	< 3.2	< 0.45	< 0.35	< 0.35	< 0.40	< 0.37
21	大澳*	98±25	102±1	113±2	1357±32	< 3.5	1.96±0.12	< 0.38	< 0.38	< 0.46	< 0.41
22	海滨公园	169±14	113.2±1.7	83.0±1.2	665±12	< 4.0	< 0.49	< 0.45	< 0.45	< 0.49	< 0.54

点位序号	点位名称	<sup>238</sup> U	<sup>226</sup> Ra	<sup>232</sup> Th	<sup>40</sup> K	<sup>7</sup> Be	<sup>137</sup> Cs	<sup>134</sup> Cs	<sup>58</sup> Co	<sup>60</sup> Co	<sup>54</sup> Mn
23	山顶4号风机	302±16	205.6±2.3	166.4±1.7	649±12	< 5.0	< 0.62	< 0.57	< 0.56	< 0.61	< 0.67
24	北政村	154±14	117.4±1.8	92.8±1.3	617±12	< 4.1	< 0.51	< 0.46	< 0.46	< 0.50	< 0.55
25	大滘村	115±15	100.5±1.7	89.7±1.4	846±14	< 4.4	< 0.51	< 0.50	< 0.47	< 0.55	< 0.56
26	莲北村东侧养殖场	128±11	70.0±1.4	53.4±1.0	295.2±8.6	< 3.4	< 0.43	< 0.39	< 0.40	< 0.44	< 0.46
27	平堤水库东北坡	144±15	90.5±1.7	219.0±1.9	428±11	< 4.8	< 0.62	< 0.55	< 0.54	< 0.57	< 0.67
28	北邑村	176±15	146.6±2.0	164.0±1.7	838±14	< 4.9	0.77±0.38	< 0.56	< 0.56	< 0.59	< 0.69

注：\*数据为阳江核电厂2019年在该点位区域的采样监测结果。

### 3.1.5 辐射环境质量现状

监测结果表明，场址周围  $\gamma$  辐射剂量率水平为 123~249nGy/h，和阳江核电厂长期监测结果的  $\gamma$  辐射水平一致。

空气中氡的活度浓度监测结果均小于探测限。空气中  $^{14}\text{C}$  的含量为 0.163~0.28Bq/g 碳，空气中的  $^{14}\text{C}$  含量处于本底调查范围内(0.12~0.42 Bq/g 碳)。其他放射性核素水平低于探测限，和本底调查结果一致。

降雨中总  $\beta$  的活度浓度范围为 0.011~0.383Bq/L，监测结果在本底调查结果范围 (<LLD~0.460Bq/L) 内波动；降雨中氡监测结果范围为 <LLD~4.28Bq/L，略高于本底调查结果 (0.14~0.39Bq/L)；人工放射性  $\gamma$  核素监测结果均低于探测限。

地表水中  $^{90}\text{Sr}$  的活度浓度范围在 0.29~0.87mBq/L，监测结果在本底调查结果范围 (<LLD~3.22 mBq/L) 内波动。地表水  $^{14}\text{C}$  的活度浓度为 1.17mBq/L，地表水中氡、 $^{63}\text{Ni}$  和人工放射性  $\gamma$  核素监测结果均低于探测限。

地下水和饮用水中  $^{90}\text{Sr}$  的活度浓度为 0.74 mBq/L，监测结果在本底调查结果范围 (0.35~4.78 mBq/L) 内波动。氡和人工放射性  $\gamma$  核素监测结果均低于探测限。

土壤中  $^{90}\text{Sr}$  的活度浓度范围为 <LLD~0.182 Bq/kg，监测结果在本底调查结果范围 (0.016~0.807 Bq/kg) 内波动。 $^{239+240}\text{Pu}$  的活度浓度范围为 <LLD~0.069 Bq/kg。 $^{238}\text{U}$  的活度浓度范围为 70~302 Bq/kg， $^{232}\text{Th}$  的活度浓度范围为 53.4~296 Bq/kg， $^{226}\text{Ra}$  的活度浓度范围为 64.3~211 Bq/kg， $^{40}\text{K}$  的活度浓度范围为 295.2~1478 Bq/kg， $^7\text{Be}$  的活度浓度范围为 <LLD~4.6 Bq/kg。 $^{137}\text{Cs}$  的活度浓度范围为 <LLD~1.96Bq/kg，监测结果在本底调查结果范围 (<LLD~3.14Bq/kg) 内波动。其余人工放射性  $\gamma$  核素监测结果小于探测限。

综上所述，除了空气中氡含量略高于本底调查的范围外，其他所有监测结果都在阳江核电厂本底调查范围内波动。

### 3.2 非辐射环境质量现状

2020年12月2日，苏州热工研究院有限公司环境检测中心对项目厂界声环境质量开展了监测，结果如下：

昼间噪声：东侧 42.3dB (A)，南侧 45.8dB (A)，西侧 46.3dB (A)，北侧 45.5dB (A)，满足该区域 2 类声功能区噪声限值（昼间 60 dB (A)）要求。

夜间噪声：东侧 37.5dB (A)，南侧 40.8dB (A)，西侧 39.9dB (A)，北侧 41.3dB (A)，满足该区域 2 类声功能区噪声限值（夜间 50 dB (A)）要求。

依据阳江核电厂 2019 年 4 月及 5 月期间大气环境监测，距离项目最近的音山变电站（在项目南方 350 米左右）监测结果为：

SO<sub>2</sub> 的 24h 均值为 12~14μg/m<sup>3</sup>，NO<sub>2</sub> 的 24h 均值为 22~24μg/m<sup>3</sup>，TSP 的 24h 均值为 91~111μg/m<sup>3</sup>，PM<sub>10</sub> 的 24h 均值为 59~73μg/m<sup>3</sup>，满足《环境空气质量标准》中的二级标准。

## 4 工程分析

### 4.1 场区规划及平面布置

#### 4.1.1 总平面布置

本项目工程所在地块为不规则形状，东西向长约 270m，南北向约 320m。场区规划图见图 4-1。

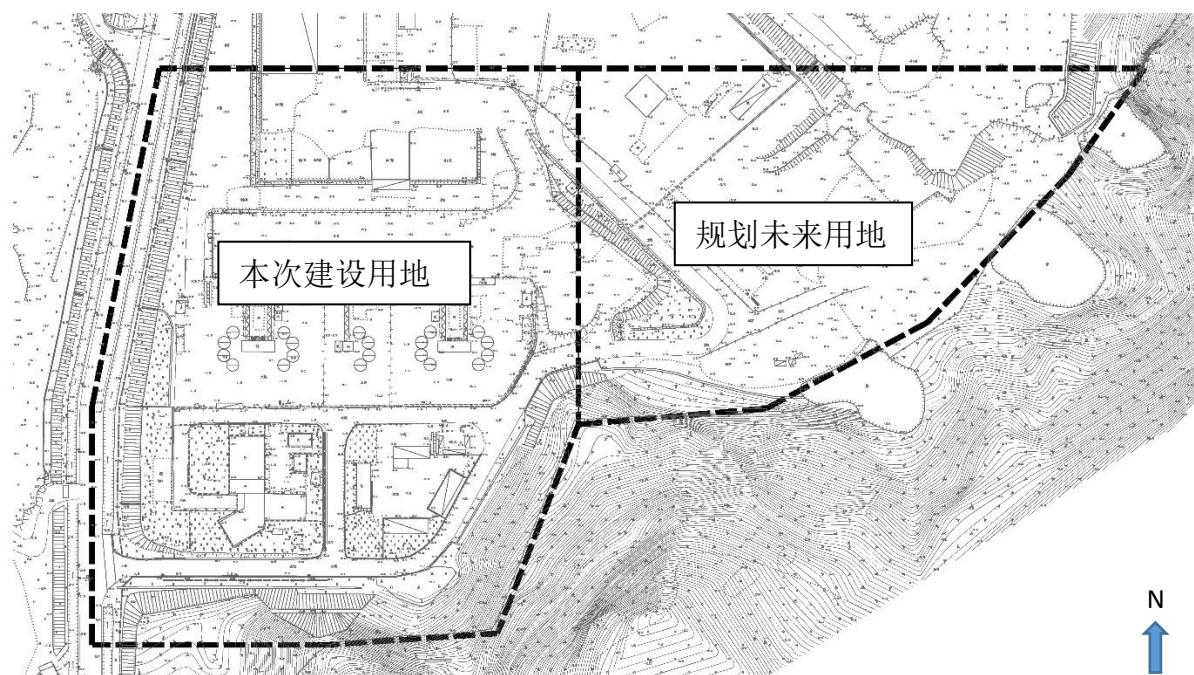


图 4-1 场区规划图

本项目建设内容包括材料中心、同位素中心、通风及固废暂存中心、开闭所、实保保护区入口大门等及其配套设施。各子项沿场区内道路平行分布，办公楼位于场区西南角，其北侧依次为通风及固废暂存中心、同位素中心，材料中心位于场区东北角，在场区西南角开设出入口，并在出入口处设置场区大门及警卫室，对人员和车辆出入进行控制。

总平面布置图见图 4-2，排风塔位于整个厂地的西北角，高 35m，其半径 200m 范围内最高建筑物不超过 27m。

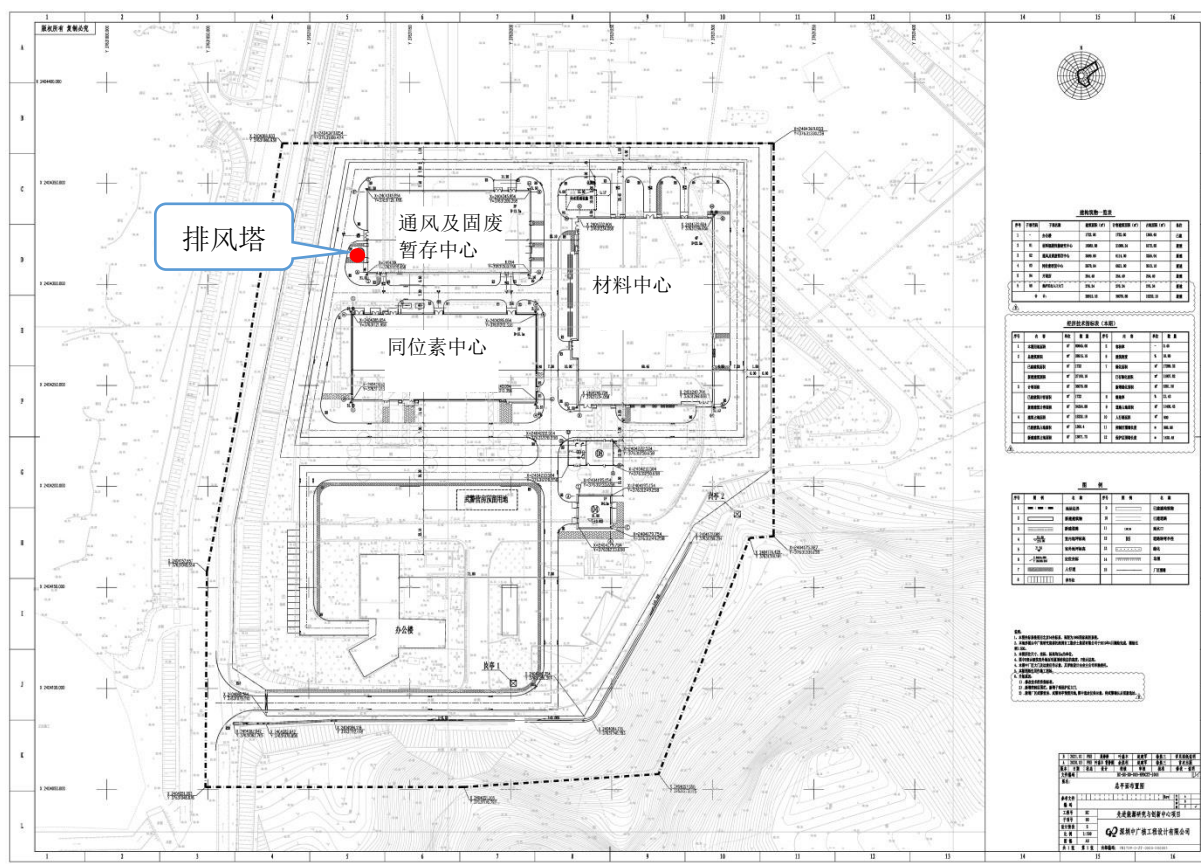


图 4-2 项目平面布置示意图

### 4.1.2 材料中心布置图

材料中心主要布置各燃料研究和材料研究热室，主要用于燃料研究、力学性能研究、微观分析和热物性能分析等。

材料中心厂房整体呈“方正”型布置，在平面上可以划分为组件检查线（FA 线）、燃料检验线（F 线）、材料检验线（M 线）、微观分析线（X 线）和辅助功能区等 5 个功能分区，各功能分区布置格局示意图如图 4-3 所示。

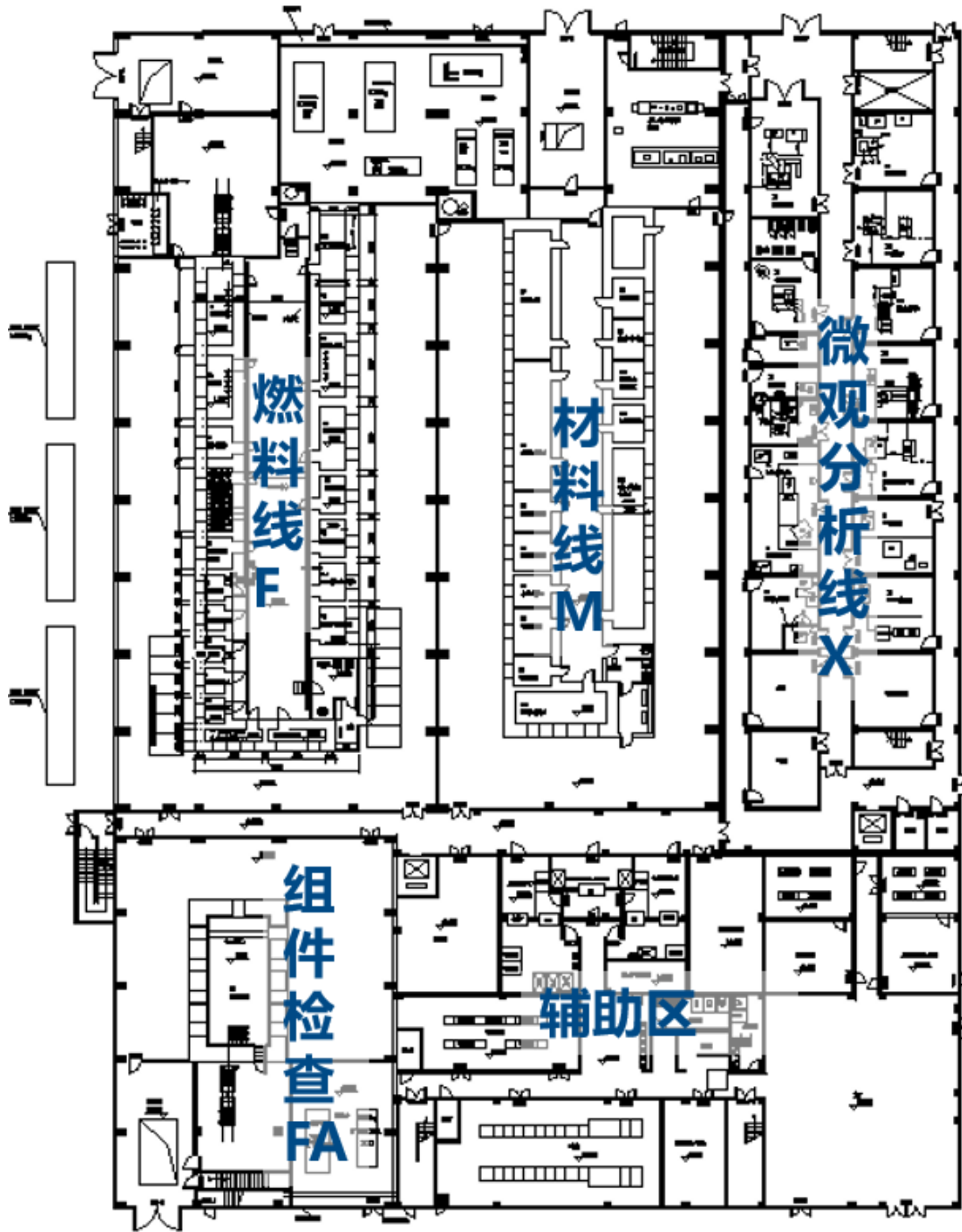


图 4-3 材料中心功能分区示意图

材料中心各楼层布置情况如下：

- -6.00m 标高层：主要布置 FA 热室地下排风过滤器，FA 热室地下排风碘吸附过滤器，F 线热室地下排风过滤器，F 线地下排风碘吸附过滤器，放射性废液暂存间，暖通风廊，通风管廊连接间，FA 热室及 F 线储存井。负一层平面布置图见图 4-4。
- ±0.00m 标高层：主要布置 FA 热室及操作区，F 线 F1 至 F20 热室及操作前区



和维修区，M 线 M1 至 M13 热室及操作区和维修区，X 线 X1 至 X13 铅室，微观金相样品制备屏蔽箱室，汽车房，卫生出入口，辐射防护器材室，暖通送风机房，气瓶间，通信设备间，配电间，集中监控室，实体保卫及消防值班室，以及大厅。一层平面布置图见图 4-5。

- +5.40m/+4.80m/+5.80m 标高层：其中+4.20m 层主要布置预留的放射性实验室等。+4.80m 层主要布置 M 线吊装大厅，M 线吊装大厅排风过滤机房，M 线热室排风过滤机房，M 线吊装大厅排风机房，以及 M 线吊装大厅补风机房。+5.80m 层主要布置 F 线 F21 热室，F 线吊装大厅，F 线吊装大厅排风机房，F 线吊装大厅补风机房，热室气体取样间，以及辅助区暖通机房和备用间。二层平面布置图见图 4-6。
- +10.20m/+9.40m 标高层：其中+10.20m 层主要布置预留的放射性实验室等。+9.40m 层主要布置 FA 热室吊装大厅，FA 热室吊装大厅排风机房，以及 FA 热室吊装大厅补风机房。三层平面布置图见图 4-7。
- +10.20m/+11.50m 标高层：其中+10.20m 层主要布置辅助区备用间。+11.50m 层主要布置 X 线备用间。四层平面布置图见图 4-8。
- 屋面层：主要布置 FA 热室、F 线、M 线以及 X 线的屋顶，其中 X 线屋顶上还布置有屋顶排烟机房、屋顶送风机房。

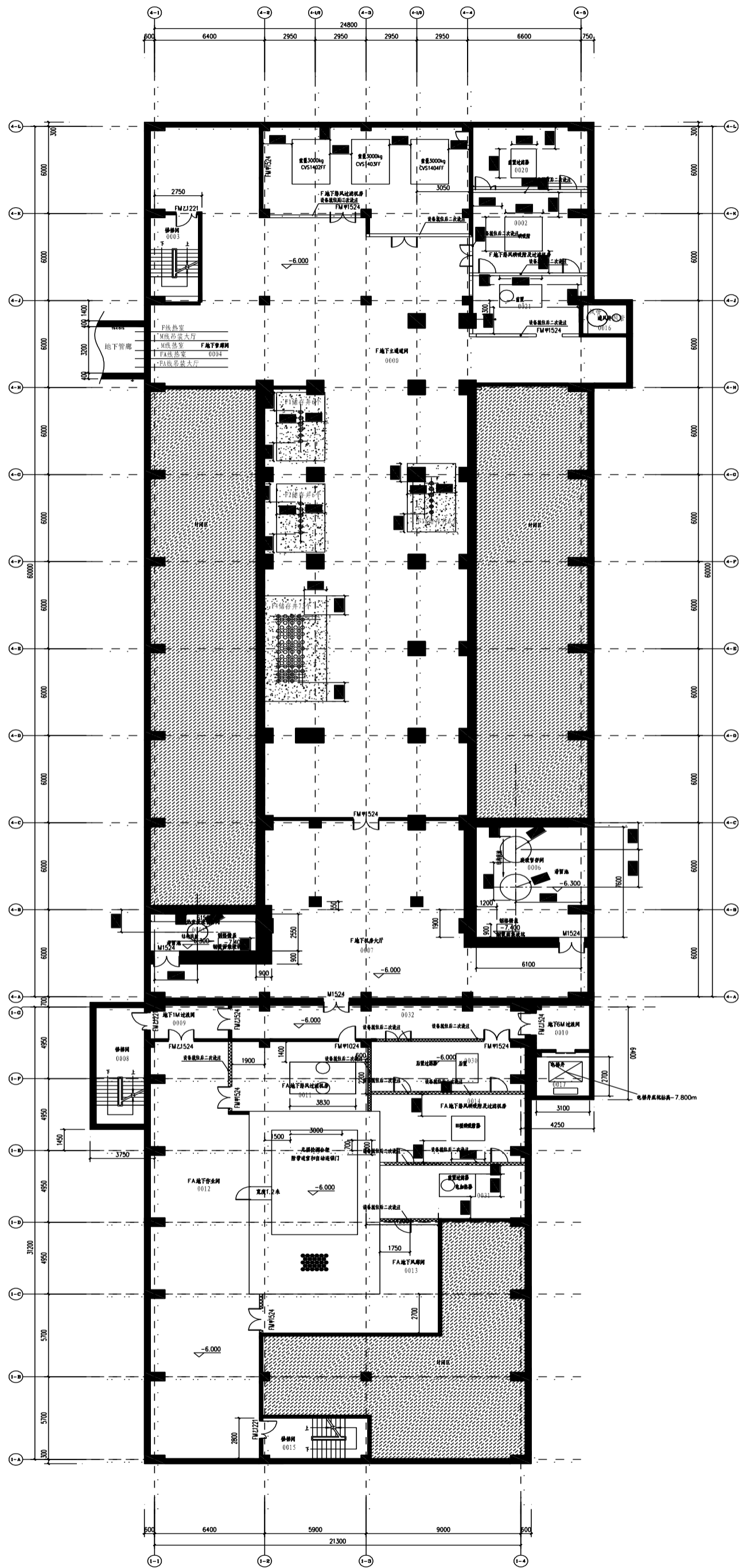
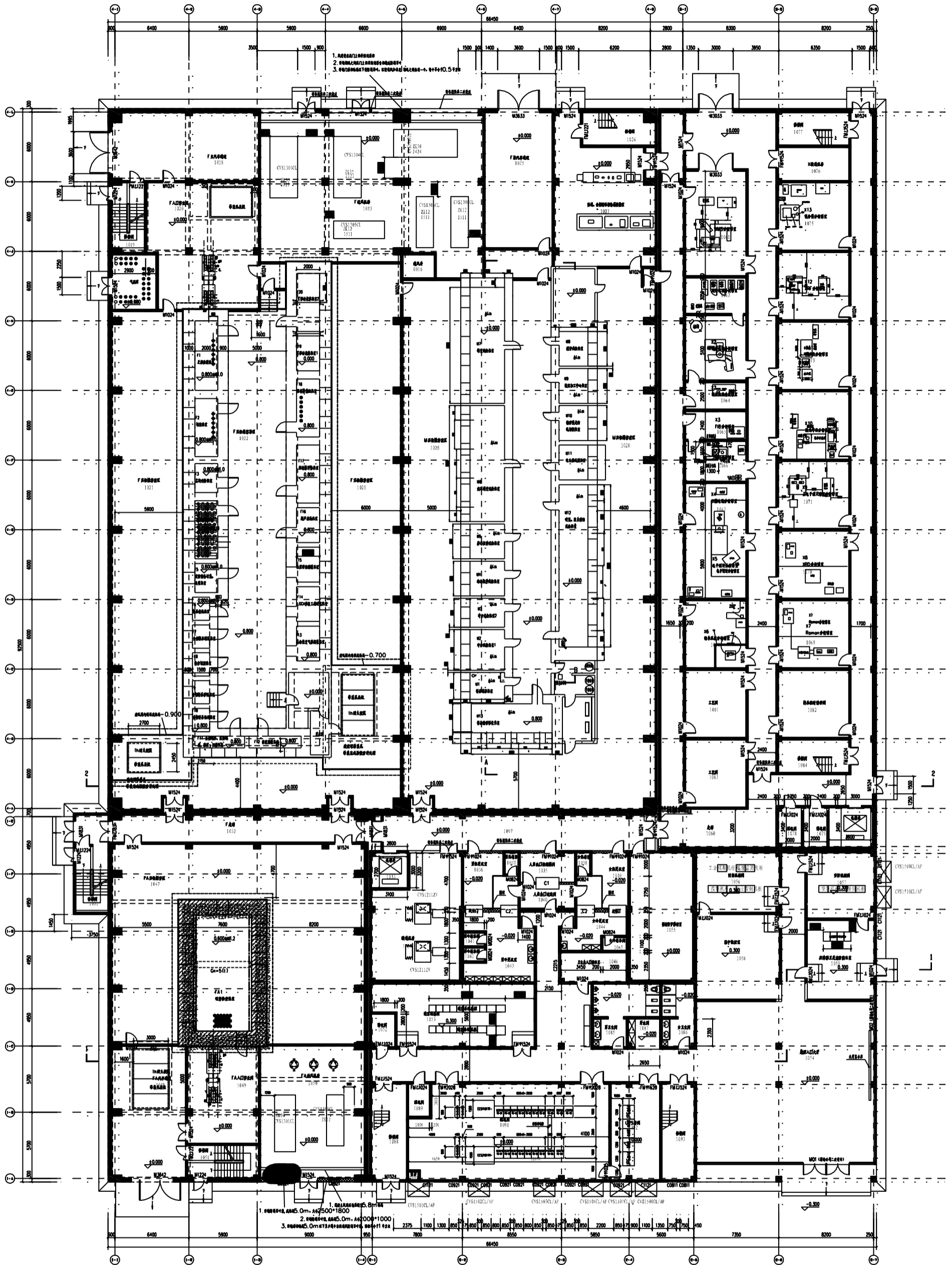
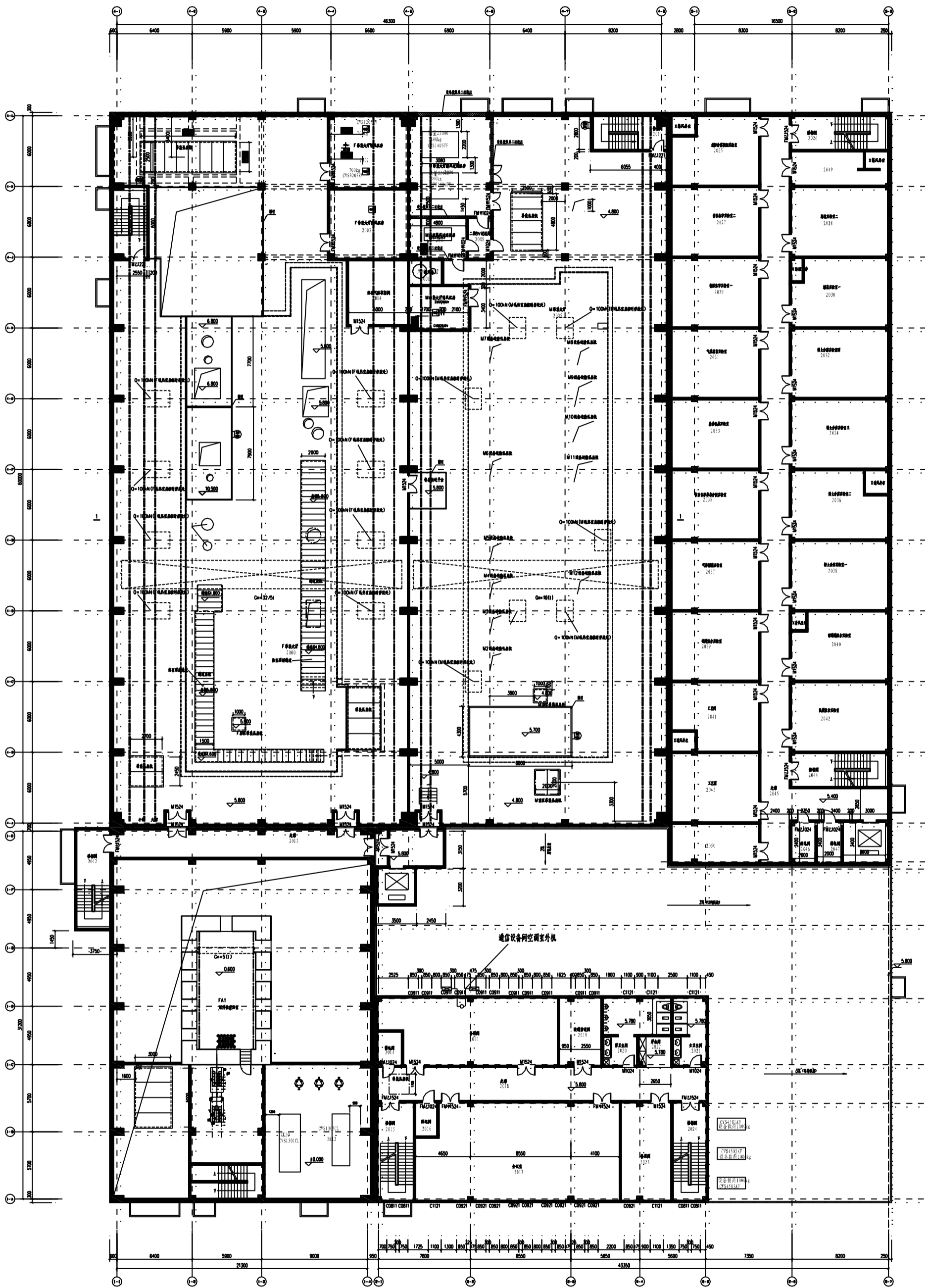


图 4.4 材料中心负一层平面布置图



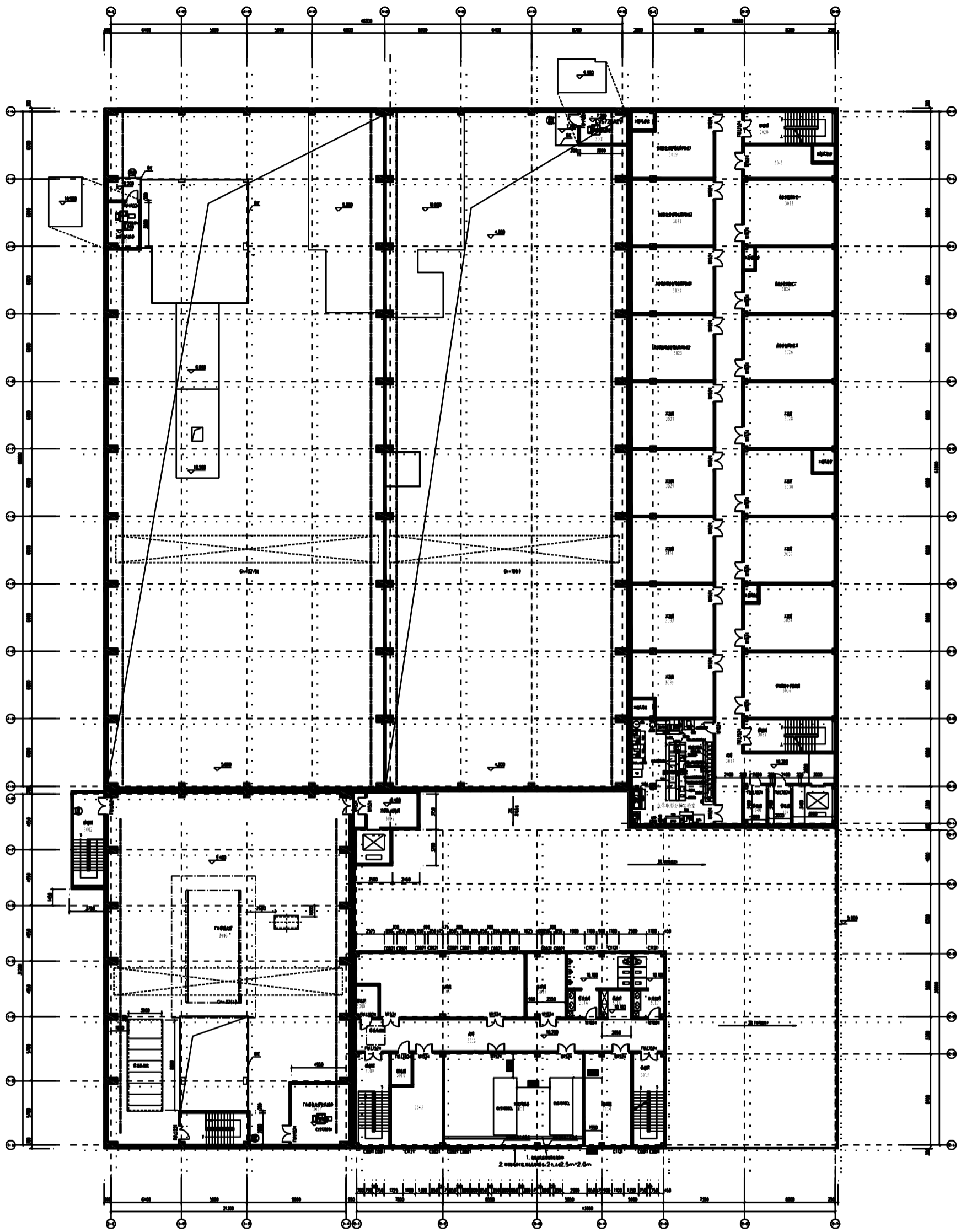
材料照性能研究中心总体布置图首层

图 4-5 材料中心一层平面布置图



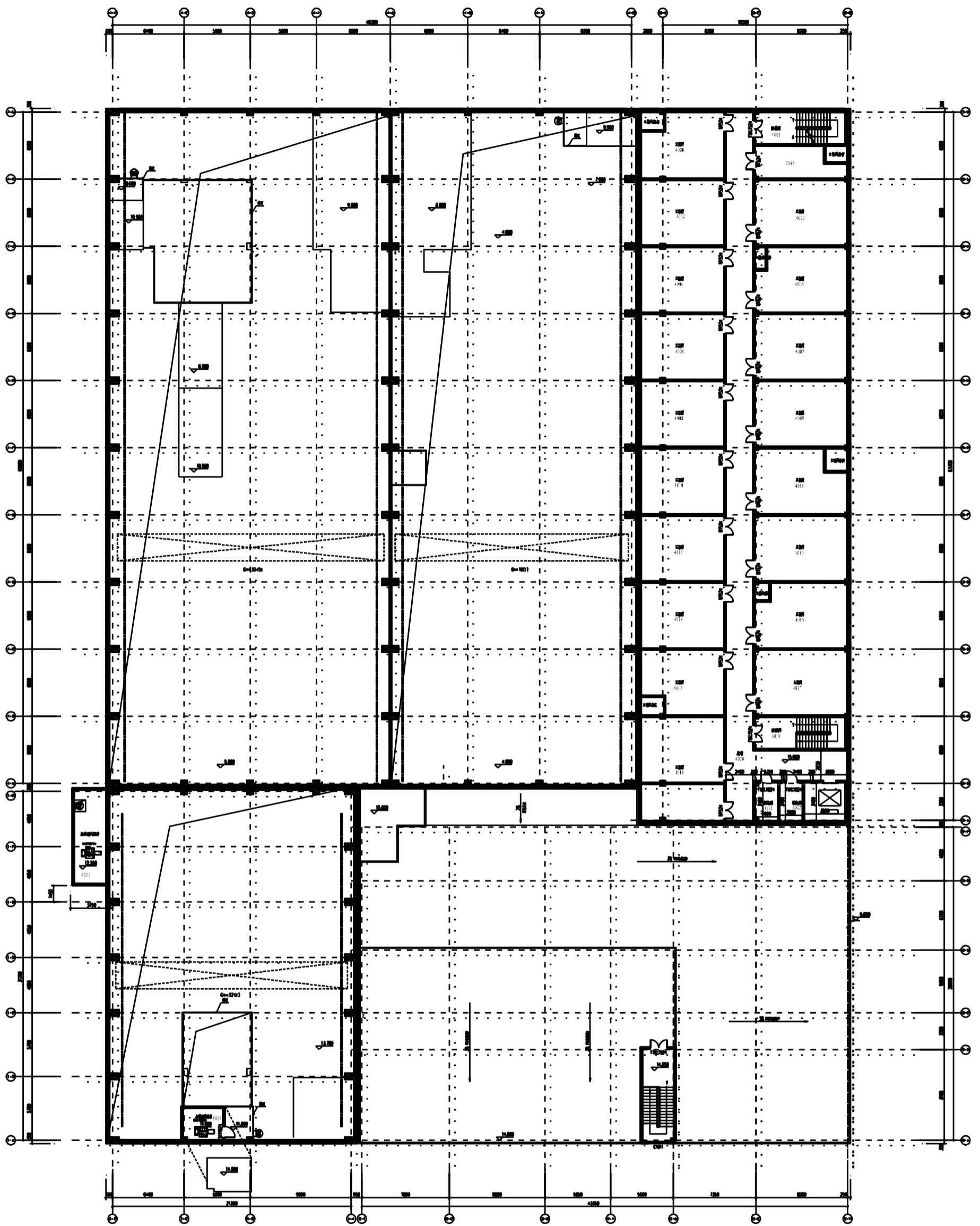
材料辐照性能研究中心布置方案图 4.20m层

图 4-6 材料中心二层平面布置图



材料性能研究中心布置方案图 9.40m层

图 4-7 材料中心三层平面布置图



材料性能研究中心布置方案图 11.40m层

图 4-8 材料中心四层平面布置图

### 4.1.3 同位素中心平面布置图

同位素中心包含同位素研究生产以及钴源同位素生产线，配备 3 间热室和 3 个水池，同时预留一定工业放射源和医用放射源研发生产空间。

同位素中心为三层建筑，同时在地下布置有废液储罐、钴靶件接收水池、成品源水池、废旧放射源回收源水池和容器清洗水池，地下设施布局见图 4-9。一层布置有 3 间热室、水池净化间、排风机房、过滤机房和仪控机房等，其平面布置见图 4-10。二层布置有为化水间（主要用于除盐水的制备）、送风机房、实验室及办公室等，其平面布置见图 4-11。三层主要是实验室及办公室等，其平面布置见图 4-12。

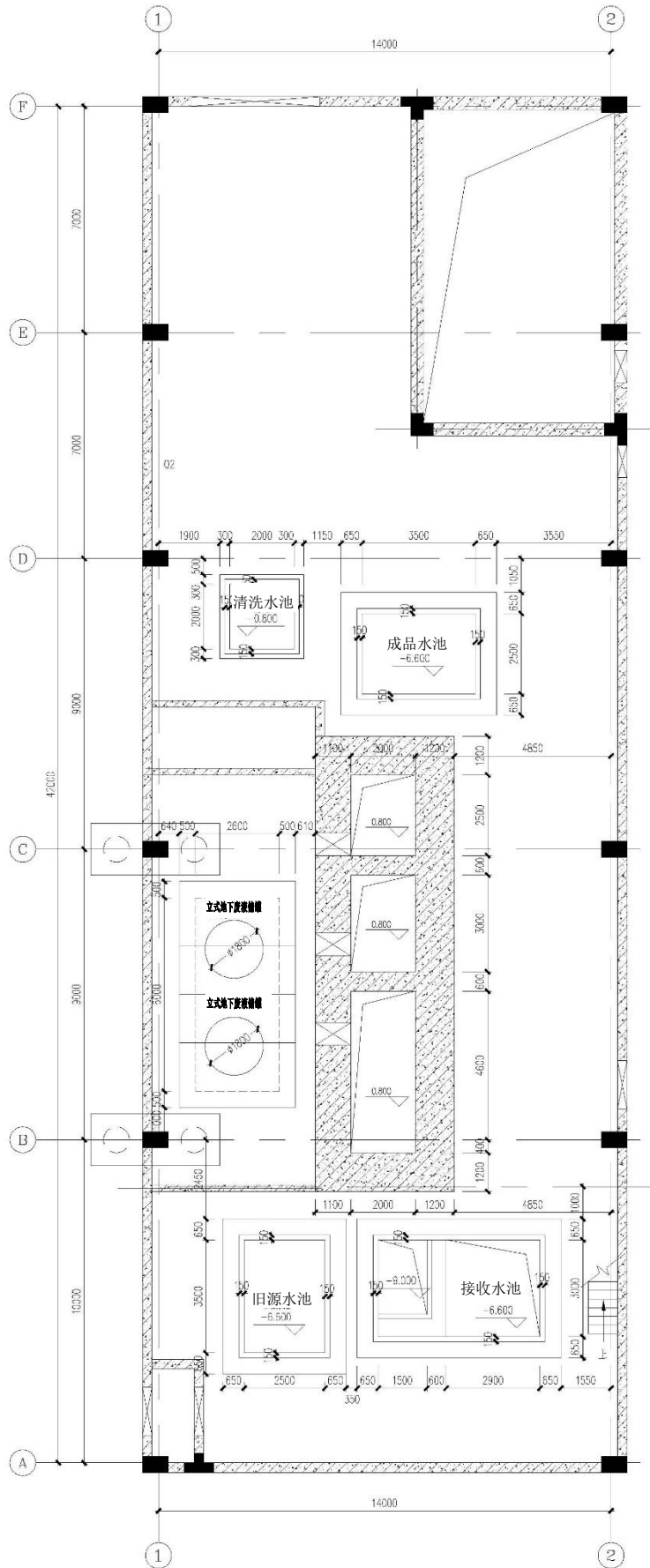


图 4-9 同位素中心地下设施布局图



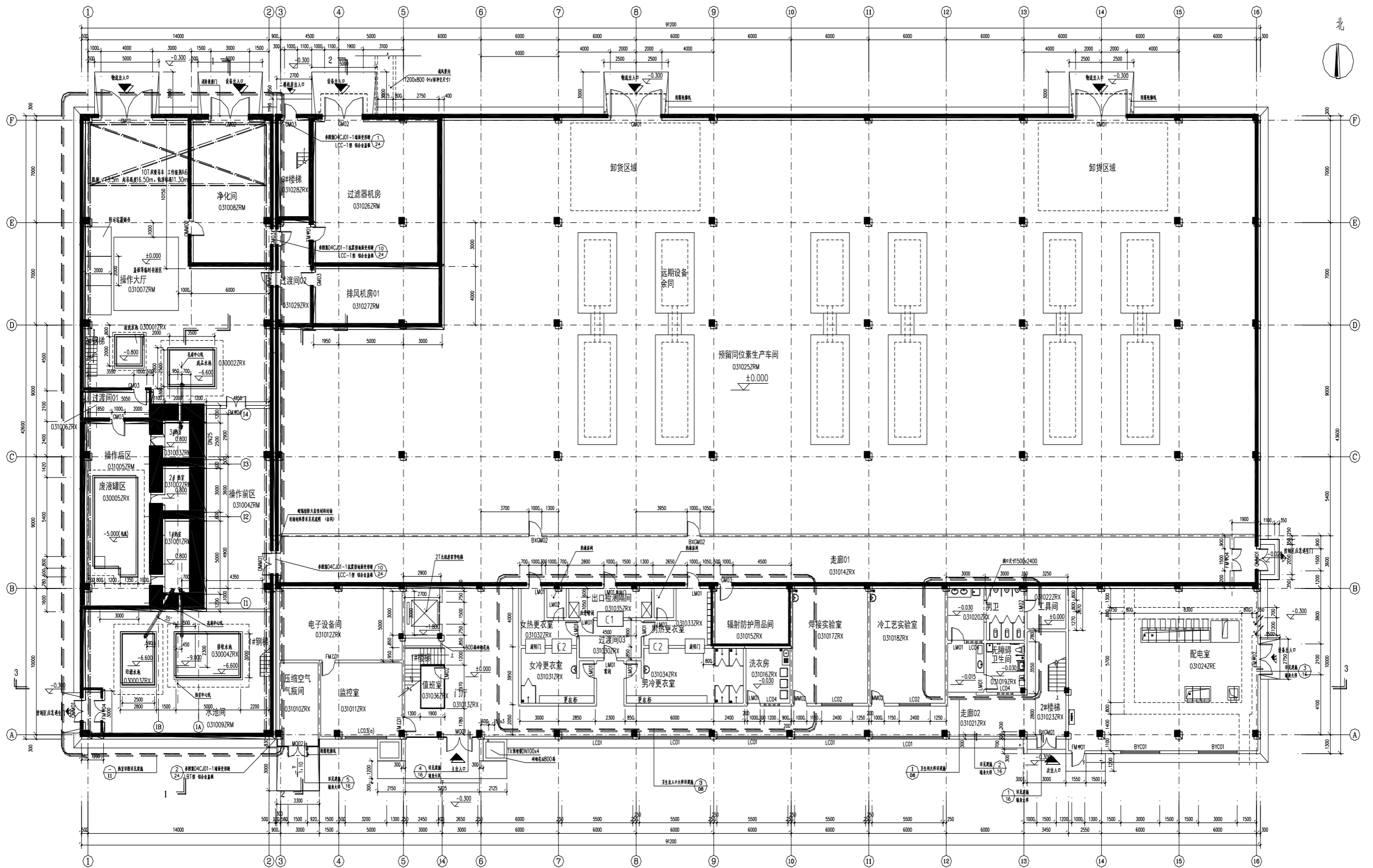


图 4-10 同位素中心一层平面布置图

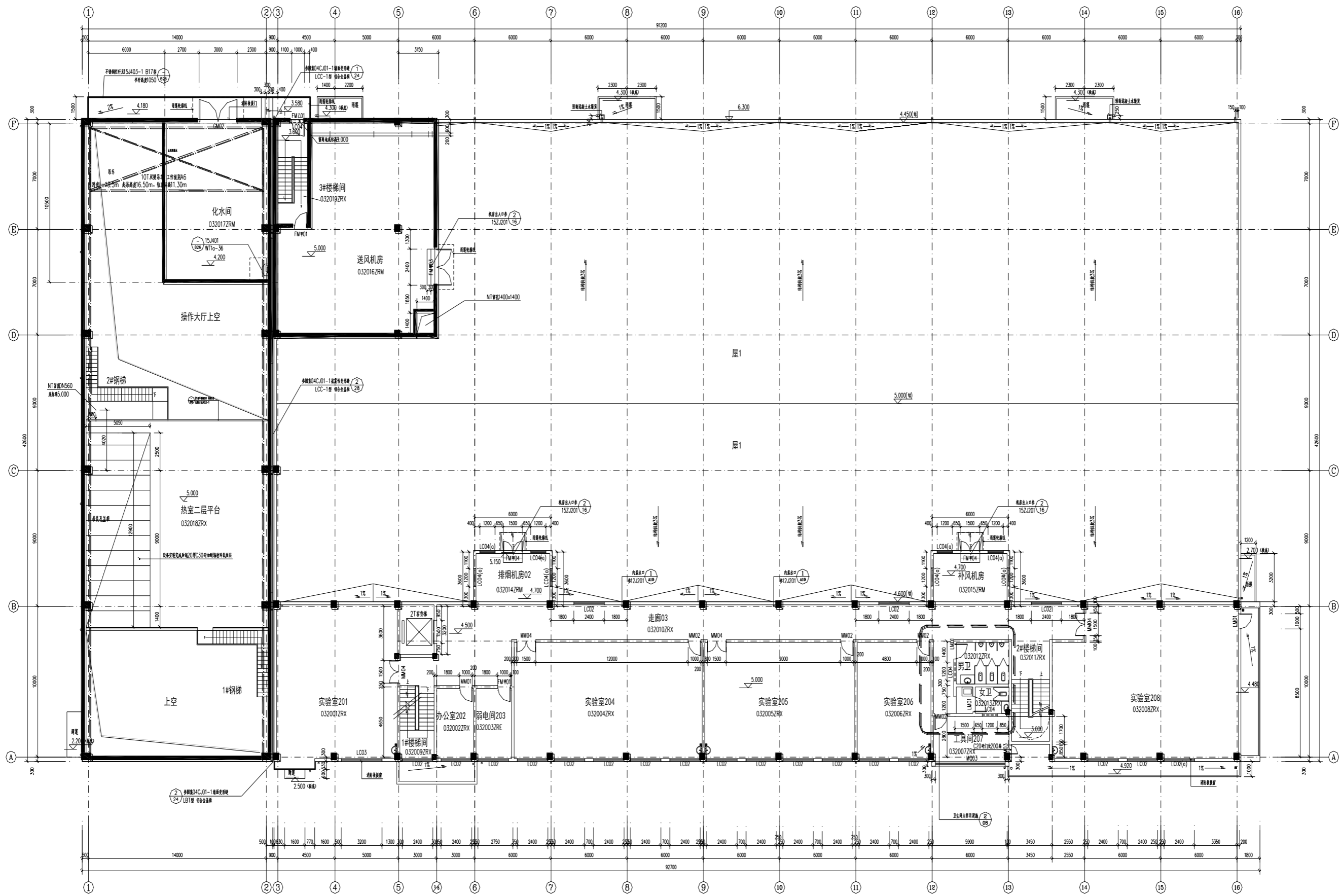


图 4-11 同位素中心二层平面布置图

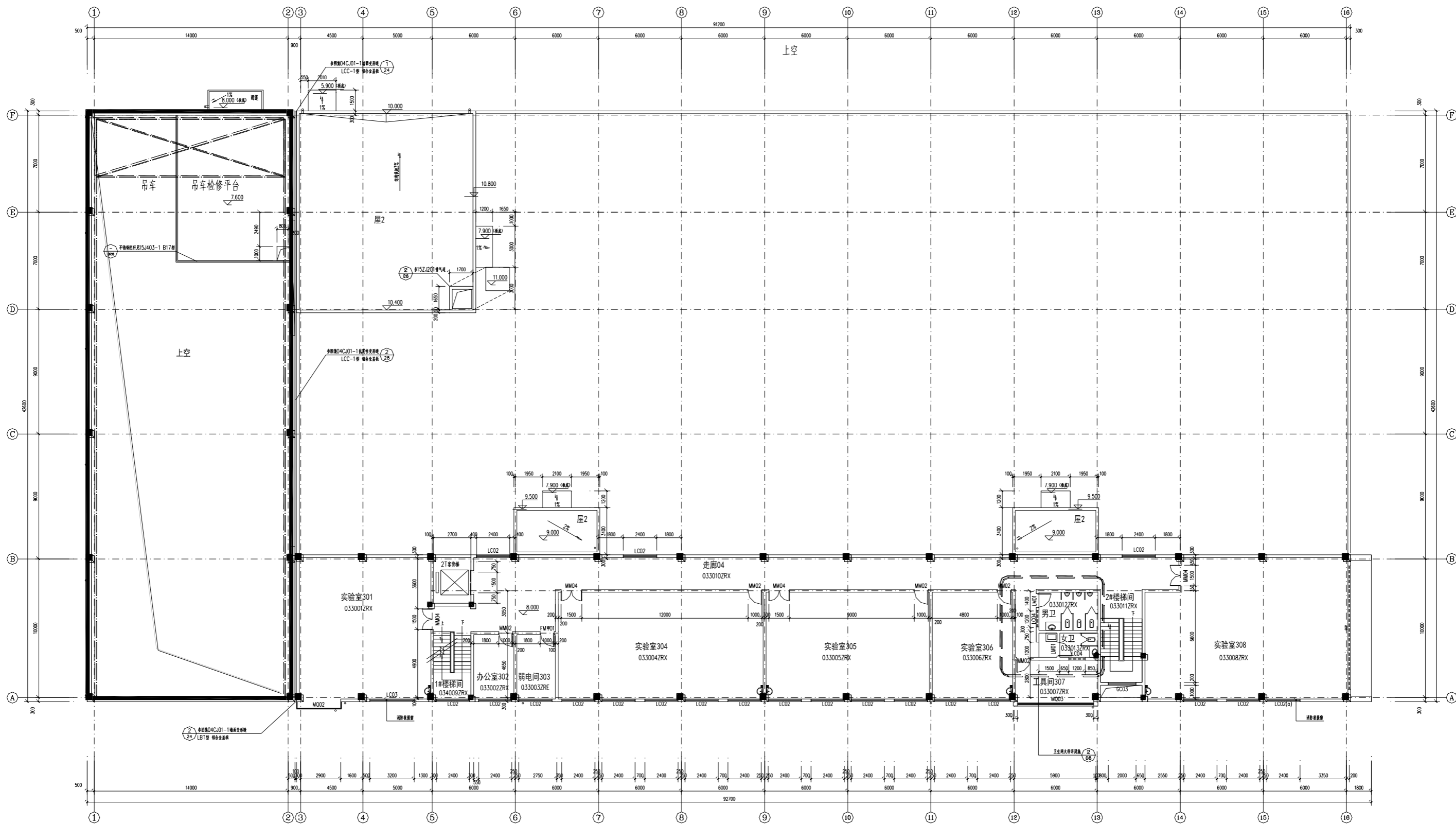


图 4-12 同位素中心三层平面布置图

#### 4.1.4 通风及固废暂存中心平面布置图

通风及固废暂存中心主要用于接收并存储材料中心、同位素中心以及本子项本身产生的放射性固体废物包装容器，并用于将材料中心、同位素中心经就地过滤后的排风，由排风机房区域集中设置的排风机排向烟囱，经监测后排放至环境。

通风及固废暂存中心子项为二层工业建筑，位于场区西北侧，通风及固废暂存中心厂房主要包括固废储存区、工艺线排风区和辅助区，长约 80 m，宽约为 40m。

##### (1) 固废储存区

废物储存区分区设计、单层布置，根据废物的可燃性将整个废物储存区分为非可燃废物暂存区和可燃废物暂存区。可燃废物暂存区进一步分为低放可燃废物临时存储区和极低放废物存储区，非可燃废物暂存区分为中放非可燃废物存储区、低放非可燃废物临时存储区、低放非可燃废物存储区（水泥固化后），相应废物储存区域的墙体考虑屏蔽，减少其对外部环境的辐射。

固废储存区的西侧分别布置废物进出的装卸区域，其中装卸 1 区为可燃部分固废进出服务，装卸 2 区为非可燃区域固废进出服务。在固废储存区域的东侧分别布置冷维修间、排风过滤器机组间，与固废储存区域通过屏蔽墙隔离。

##### (2) 工艺线排风区

工艺线排风区主要设置风机大厅、电机大厅、辐射检测间、烟囱等部分。风机大厅内布置了来自材料中心和同位素研究中心各排风系统的风机蜗壳；电机大厅内设置风机电机，通过联轴器和风机大厅中对应的蜗壳相连，联轴器穿墙处设辐射防护盒密封措施，电机大厅上部设置吊车供后续运维期间使用。材料中心、同位素中心经就地过滤后的排风，由集中设置的排风机排向烟囱，经监测后排放至环境。

##### (3) 辅助区

辅助区用房按二层配置，主要包括卫生出入口、容器暂存间、工具间、备用间、值班室、电气间、楼梯间、吊车操作室、弱电间、仪控设备间、送风机房等工艺辅助用房。

通风及固废暂存中心平面布置图见图 4-13 和图 4-14。

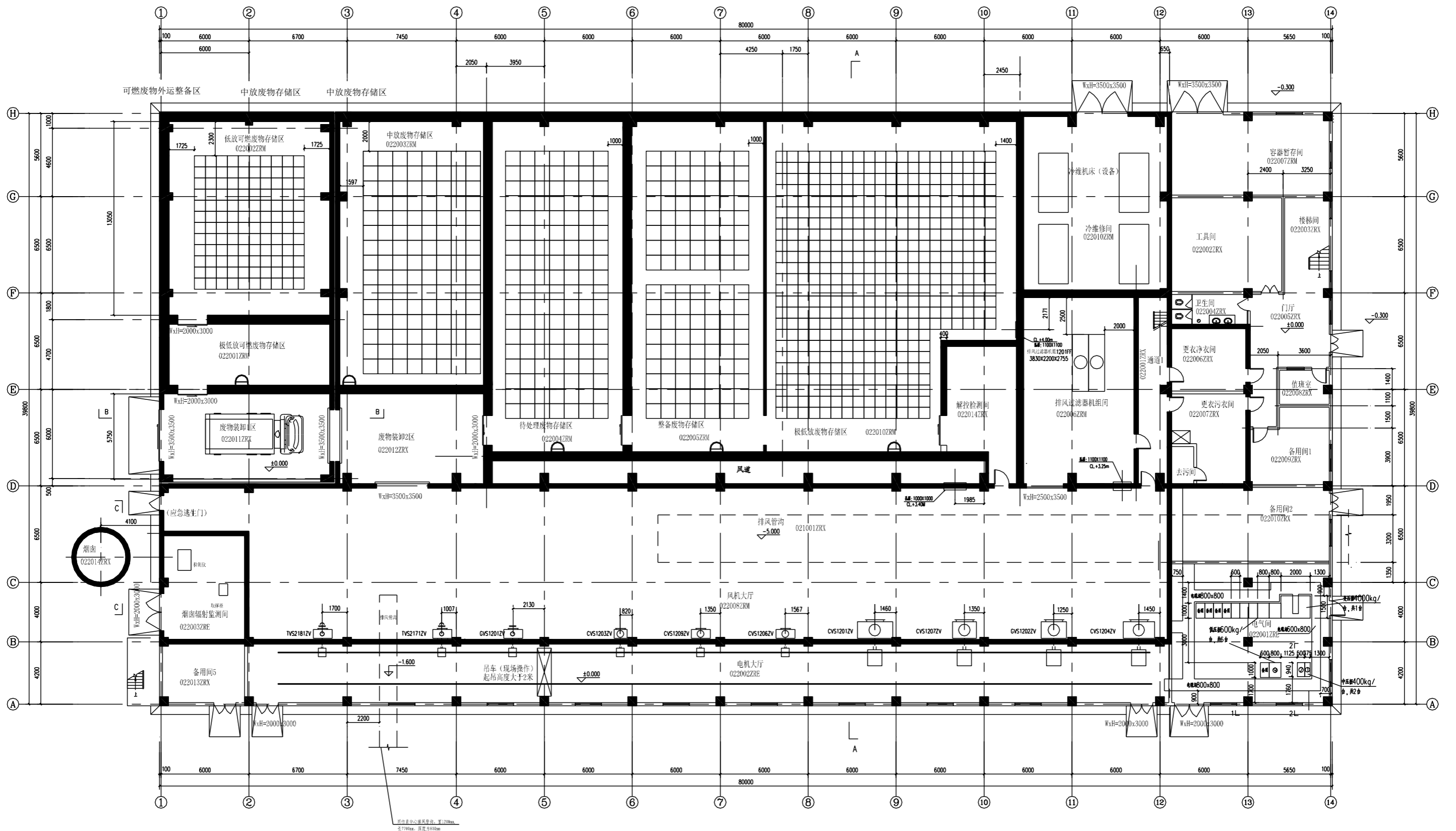
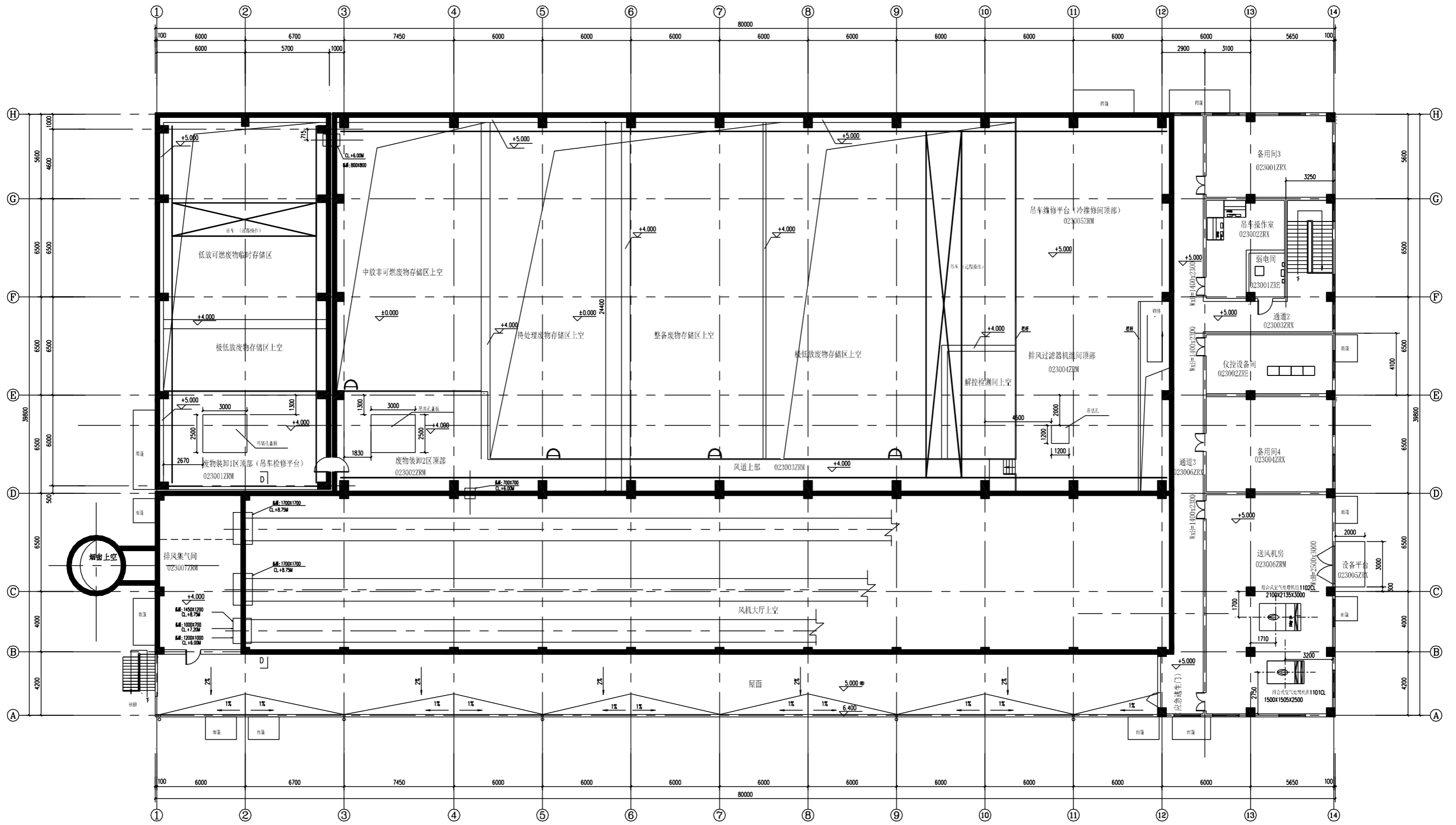


图 4-13 通风及固废暂存中心一层平面布置图



二层布置图 1:100

图 4-14 通风及固废暂存中心二层平面布置图

## 4.2 工艺分析

### 4.2.1 概述

本项目拟建主要构筑物包括：材料中心、通风及固废暂存中心、同位素中心和开闭所，主要开展燃料棒辐照后检验、辐照监督样品检验和钴源生产研发。

材料中心配有 35 间重混凝土热室，1 间屏蔽室，13 间铅屏蔽室，用于乏燃料及结构材料检验研究，包括燃料研究、力学性能研究、微观分析、热物性能分析等 4 个研究方向。

同位素中心配有 3 间重混凝土热室，1 个钴靶件接收水池，1 个成品源贮存水池，1 个废旧放射源回收水池，用于钴源生产，并预留空间用于后续其他同位素生产研发。

通风及固废暂存中心配有排风风机大厅、排风电机大厅、放射性废物装卸区、各类放射性固体废物暂存区等。为材料中心、同位素中心提供通风配套设施，暂存本项目产生的放射性固体废物包装容器。

开闭所主要为整个项目提供 10kV 中压电源。

#### 4.2.1.1 燃料棒辐照后检验

燃料棒辐照后检验包括非破坏性检验、破坏性检验、材料的力学性能分析、材料微观结构分析四大部分。燃料棒辐照后检验工艺流程框图如图 4-15 所示。

辐照后的燃料棒进入 F1 热室进行非破坏性检验，包括：外观检验、泄漏检查、涡流探伤、直径测量、长度测量、 $\gamma$  谱扫描、氧化膜测厚，经非破坏性检验后判断，如果需要开展 X 射线照相检测，则通过厂内运输将燃料棒运至 FA 热室进行 X 射线照相检测，X 射线照相检测完成后再运回 F1 热室，进一步开展裂变气体测量等工作。

然后，通过热室间转运通道将燃料棒运至 F2 热室，根据检测需要在 F2 热室将燃料棒切割成不同大小的样品，经镶嵌（F7 热室）、精密切割（F8 热室）、磨抛（F9 热室）、蚀刻（F10 热室）等前处理后，在 F11 热室和 F12 热室进行检验、测量。根据需要，将部分样品通过厂房内运输至 X 线进行微观分析。最终将所有检测后的样品送 F4 热室储存。如需检测燃料包壳样品，则将 F2 热室切割出来的样品，送至 F3 热室，去除燃料芯块，将包壳转至 F6 热室清洗，清洗后的包壳经厂房内运输至 M 线进行相关检验。

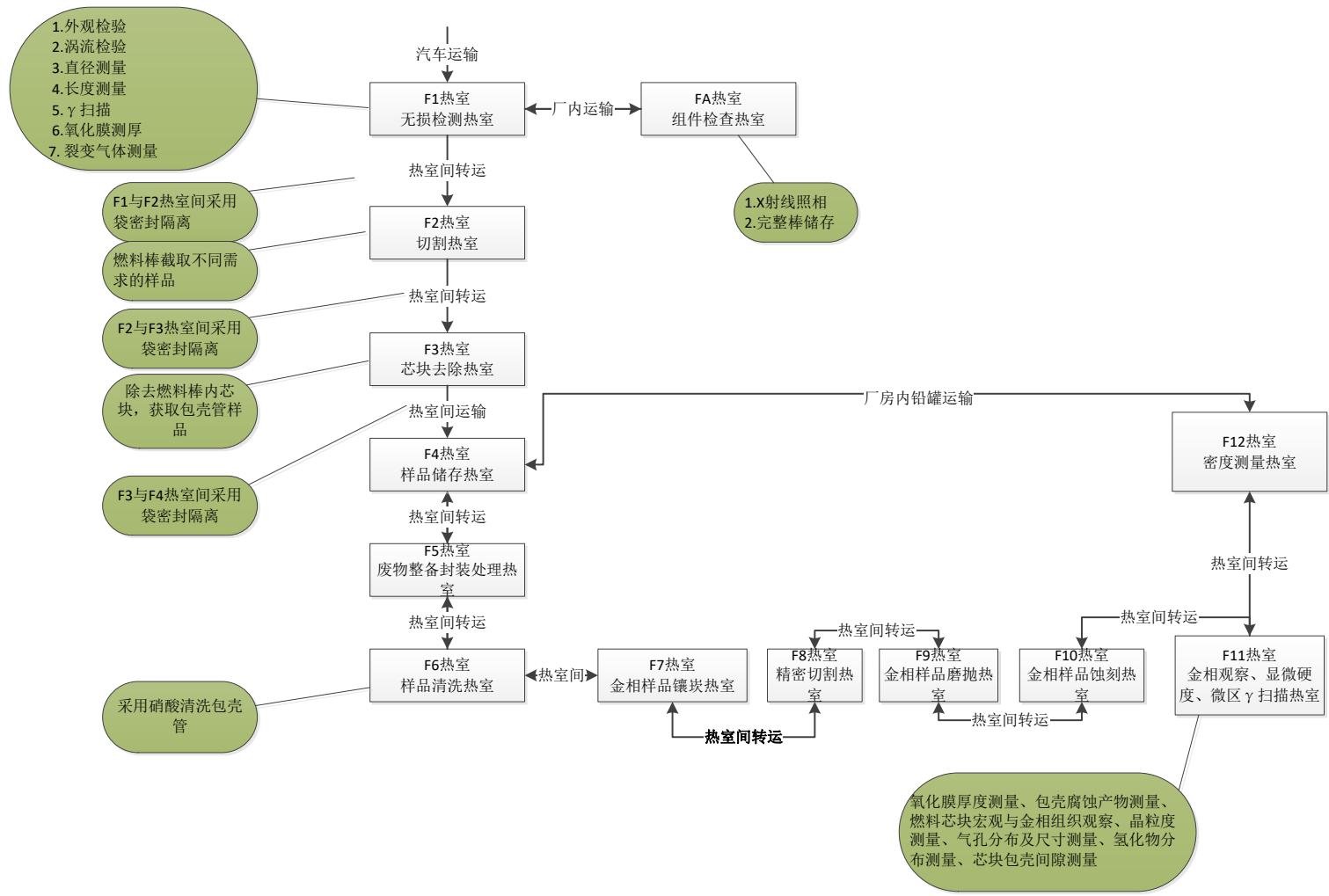


图 4-15 燃料棒辐照后检验工艺流程框图



### 4.2.1.2 辐照监督样品检验工艺

辐照监督样品检测目的在于获得反应堆压力容器材料辐照后的力学性能、脆化程度。为压力容器的力学分析和安全分析提供数据，并未确定在役检验阶段压力容器水压试验的试验温度、压力容器升温及降温阶段的压力-温度运行限值等数据提供依据。整个实验过程涉及多间热室协同完成。试验工艺流程框图如图 4-16 所示。

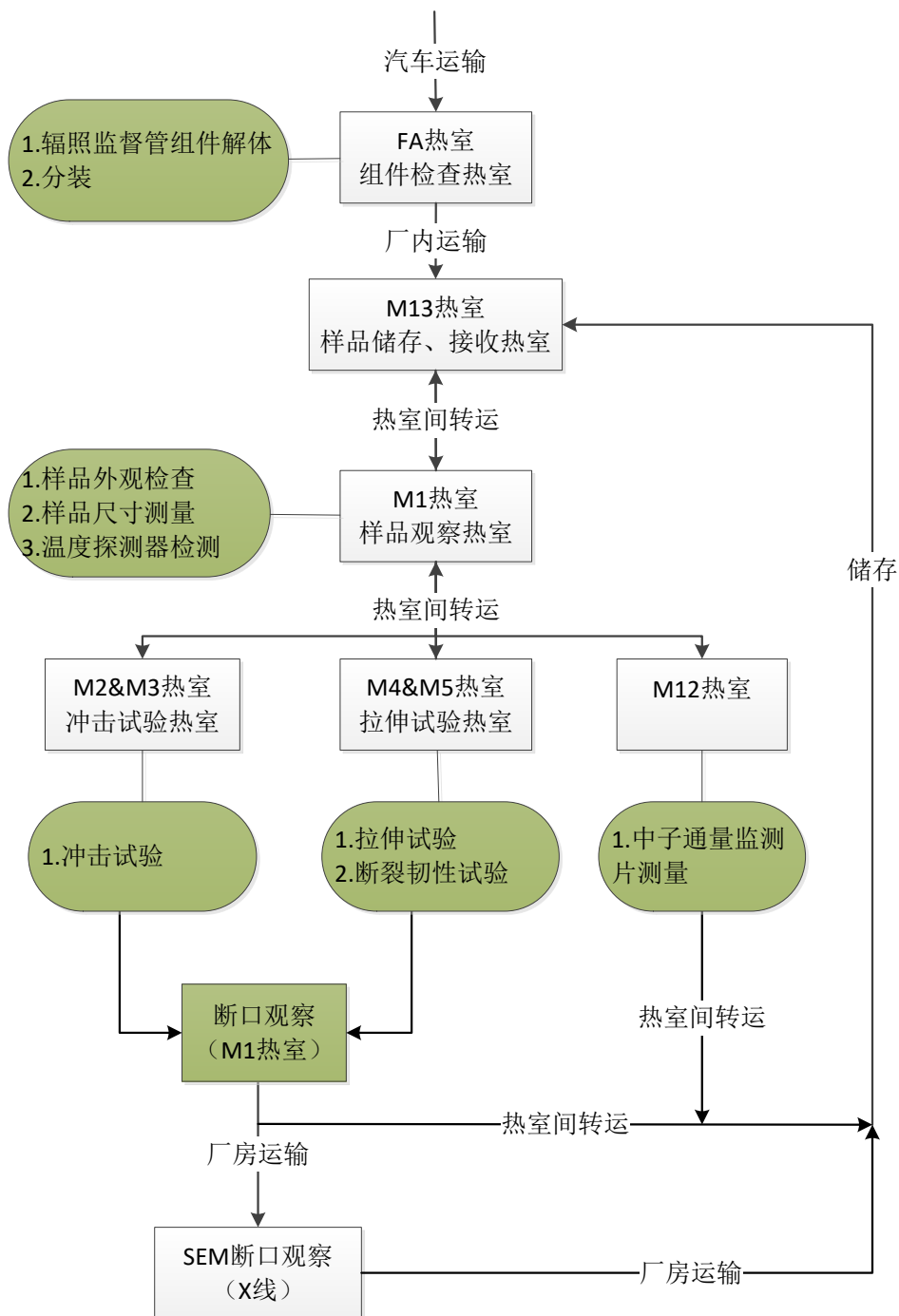
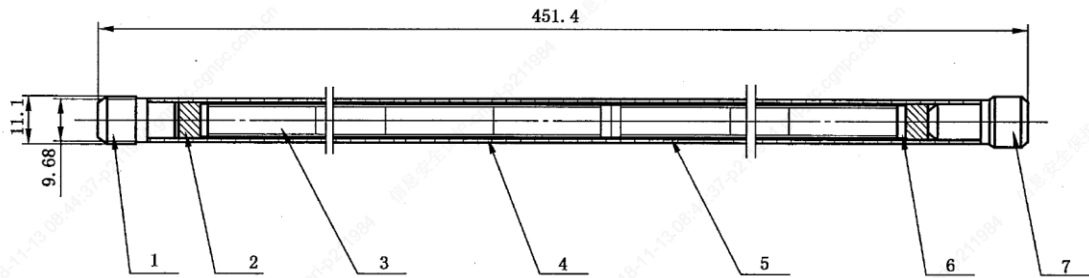


图 4-16 辐照监督样品检验流程示意图

### 4.2.1.3 钴源生产工艺

本项目主要生产供工业辐照用的高活度<sup>60</sup>Co密封放射源。其基本结构如图 4-17 所示，满足 GB/T7465-2015《高活度钴 60 密封放射源》对工业辐照用钴 60 $\gamma$ 源的要求，外形尺寸为  $\phi 11.1\text{mm} \times 451.4\text{mm}$ ，放射性泄漏量和表面可去除放射性污染量分别不大于 200Bq，装载活度为  $1.85 \times 10^{14}\text{Bq} \sim 5.18 \times 10^{14}\text{Bq}$ 。



1. 上端塞；2. 垫块；3. 源芯；4. 外包壳；5. 内包壳；6. 内端塞；7. 下端塞。

图 4-17 <sup>60</sup>Co 密封放射源基本结构示意图

经反应堆辐照后的产钴靶件运输至本项目后，经靶件解体、内层包壳封装焊接、外层包壳封装焊接、产品检验等，最终生产成合格的 <sup>60</sup>Co 放射源。钴源生产工艺流程图如图 4-18 所示。

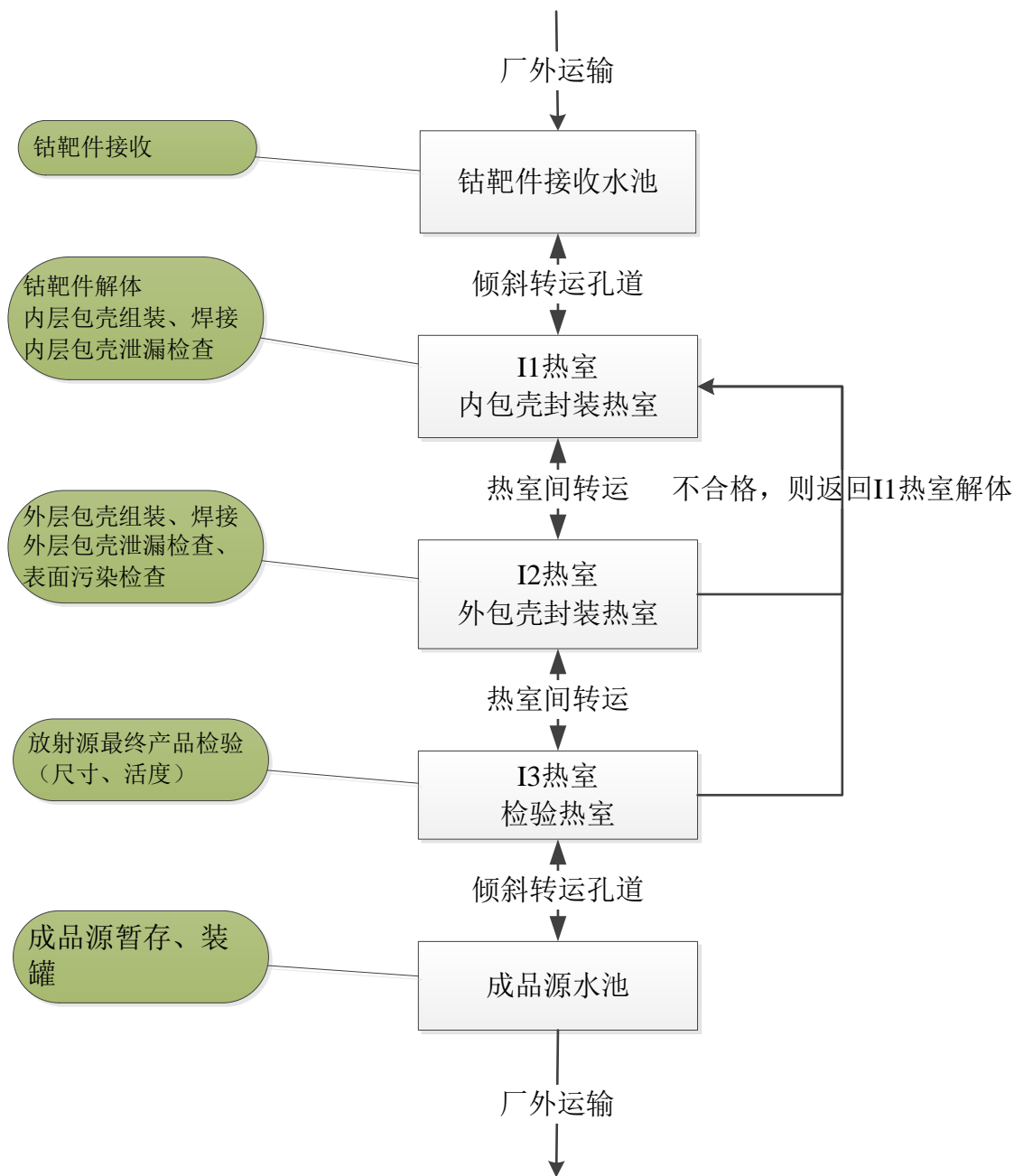


图 4-18 钴源生产工艺流程图示意图

## 4.2.2 燃料检验研究线（F 线）工艺分析

### 4.2.2.1 组件检查热室（FA 热室）

FA 热室的主要功能包括：辐照监督管的接收、外观检查、尺寸测量、解体，燃料棒的 X 射线照相。该热室内部尺寸为 10m×5m×7.5m（宽×深×高，下同），屏蔽能力按  $3.7 \times 10^{16} \text{Bq}$  设计。热室底面标高 0.6m，内衬采用不锈钢覆面，设有 9 个工位，每个工

位配备 1 个窥视窗、1 副密封伸缩式主从机械手。热室顶部配备 5t 吊车，用于吊装大件物品。除配备吊车外还配备 1 套动力机械手，用于吊装和辅助放射性操作。热室顶部设置有设备吊装孔道，垂直样品转运孔道( $\Phi 130\text{mm}$ )、废物垂直转运孔道( $\Phi 300\text{mm}$ )，用于大型设备、放射性样品、辐照监督组件、燃料棒和放射性废物的进出。热室侧墙设有水平转运孔道，用于接收燃料棒。同时设置 28 个储存井，用于储存全尺寸压水堆乏燃料棒。

其主要工艺流程如下：

### (1) 辐照监督管接收

通过转运运输容器从核电站转运来的监督组件，利用 FA 热室顶部的垂直转运孔道将监督组件转入热室内，放入待检区域。

### (2) 辐照监督管解体

辐照监督管解体是为将辐照监督管中的冲击、拉伸、断裂韧性、剂量探测器及温度探测器样品完整的取出，用于后续检验的过程。

整个解体过程均在 FA 热室内完成，解体设备由专门设计的解体台架和铣床组成。通过 FA 热室内吊车，将辐照监督管吊装放置至辐照监督管专用台架上，通过机械手配合锁紧，铣刀系统的操作及控制柜电源布置于热室操作区。为减少污染物在热室内的扩散，降低后续热室去污的工作量，在铣刀口下方设有碎屑收集罩，铣刀采用高质量硬质合金刀具，确保能够完成整根辐照监督管棒的切割不失效。解体过程采用低速小进给量控制、分段切割的方式进行，确保过程不会产生过热或者伤及内部样品。台架锁紧装置拆解和解体后热室去污可通过机械手完成操作。

图 4-19 为辐照监督管尺寸示意图（红色为解体位置）。

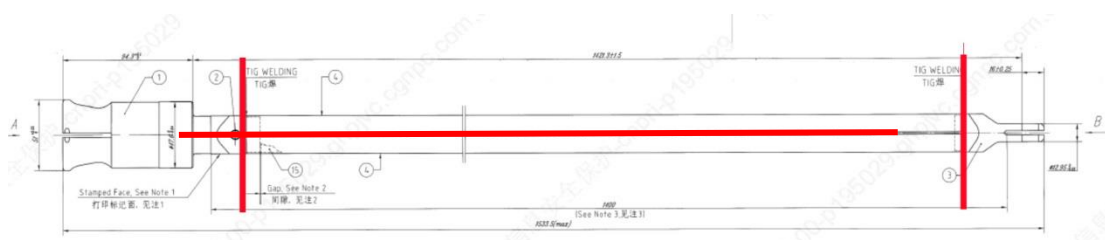


图 4-19 辐照监督管解体示意图

### (3) X 射线照相

燃料棒 X 射线照相，获得芯块及包壳状态。X 射线装置位于 FA 热室。

拟采用三维 CT (Computerized Tomography) 扫描技术，由计算机连续记录整根燃料棒的图像，清晰、直观，更容易发现燃料棒存在的缺陷，其空间分辨率可达到

0.18mm。使用的工业 CT 参数见表 4-1，该射线装置在 FA 热室中使用，FA 热室采用 1.3m 的重混凝土进行屏蔽，该射线装置对热室外的剂量贡献可忽略不计。

表 4-1 工业 CT 参数

序号	射线装置	型号	类型	电压	束流强度	能量	有用线束范围	额定辐射输出剂量率
1	工业 CT	XYD-450-CT	II类	450kV	3mA	1500W	40°×30°	65.4cGy/min

#### 4.2.2.2 无损检测热室（F1 热室）

F1 热室的主要功能包括：燃料棒接收与暂存、燃料棒非破坏性检验（外观观察，泄漏检查，尺寸测量，涡流探伤，氧化膜厚度测量， $\gamma$  扫描）、燃料棒刺孔及裂变气体测量分析。该热室内部尺寸为 6m×2m×5m，屏蔽能力按  $3.7 \times 10^{15} \text{Bq}$  设计。热室底面标高 0.8m。内衬不锈钢覆面，热室设有 2 个工位，每个工位配备 1 个窥视窗、1 副伸缩式主从机械手。配备 1 台 0.3t 吊车，用于设备吊装和放射性操作。热室内设置 6 个储存井，用于燃料棒（短考验棒）和废物的暂存，另外还设置 1 个储存盒用于燃料棒暂存。

热室的顶部设有设备转运孔道（尺寸与热室内设备相关）、垂直样品转运孔道（ $\Phi 130 \text{mm}$ ）和废物垂直转运孔道（ $\Phi 300 \text{mm}$ ），便于大型设备和燃料棒的进出。热室左侧墙设有水平转运孔道，侧墙外设有轨道运输车及轨道，用于实现核电站全尺寸燃料棒运输容器与热室的对接（约  $\Phi 220 \text{mm}$ ，运输容器吊篮进入热室）。

其主要工艺流程如下：

##### （1）燃料棒接收

利用乏燃料棒运输容器完成乏燃料棒的运输和进入热室的操作。

运输容器水平运输至材料中心汽车通道，运输容器水平吊离水平稳定座，经汽车通道水平门吊至轨道车，移除上下减震器，气密性检查、内腔裂变气体检查，移除顶盖，移动轨道车使容器与热室水平通道对接，安装吊篮推杆，开热室水平通道门和容器上部旋转门，推吊篮进热室，取出吊篮内乏燃料棒，拉吊篮回容器，关容器上部旋转门和热室水平通道门，拆吊篮推杆，安装容器顶盖，表面污染检查，安装上下减震器，吊离轨道车至水平稳定座。

##### （2）外观检查

检验燃料单棒的结构完整性、表面水垢状态，表面的腐蚀程度以及腐蚀点位置，端塞焊缝的情况，燃料格架和燃料棒接触点的腐蚀状态以及原始缺陷的发展情况等，

为后续非破坏检验与破坏检验提供依据。其工艺示意图见图 4-20。

机械手将燃料棒安装到无损台架上并固定在驱动电机的卡盘上，利用无损检测台架控制待检测燃料棒水平轴向移动和轴向旋转。先通过窥视窗肉眼观察燃料棒整体结构完整性，利用高清数码相机对燃料棒表面进行照相和摄录像。再利用工业彩色 CCD 和耐辐照摄像头对燃料棒局部进行检查、拍照和录像。

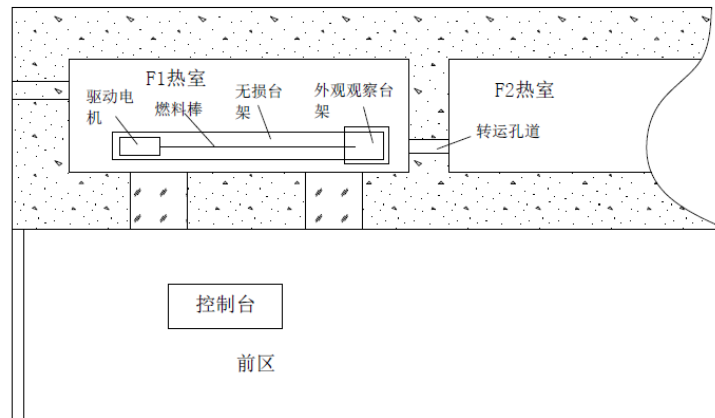


图 4-20 燃料单棒外观观察工艺示意图

### (3) 尺寸测量

测量燃料棒长度和外径，用于评价燃料棒变形程度、研究燃料芯块肿胀、裂变气体释放、芯块-包壳相互作用 (PCI 行为) 等燃料棒的堆内性能。其工艺示意图见图 4-21。

利用无损检测台架控制待检测燃料棒水平轴向移动和轴向旋转，线性可变差动变压器 (LVDT) 通过测量台架固定在无损台架的相应位置，测量燃料棒的长度。

利用无损检测台架控制待检测燃料棒水平轴向移动和轴向旋转，激光测径仪通过测量台架固定在无损检测台架的相应位置，测量燃料棒的外径。

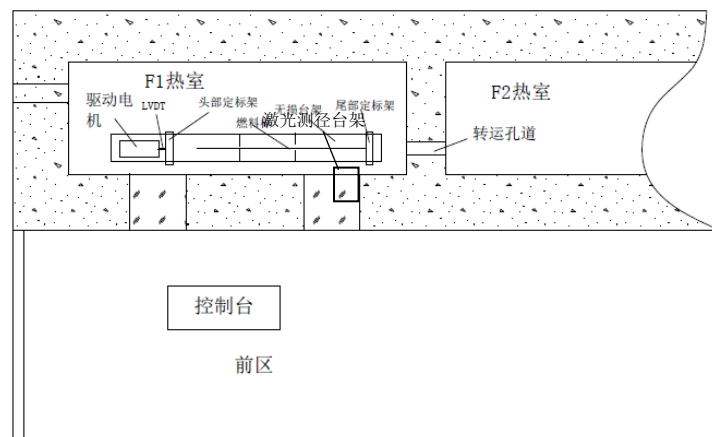


图 4-21 燃料单棒尺寸测量示意图

#### (4) 涡流检查及氧化膜测厚

采用涡流检查的方法对燃料包壳的完整性及外表面氧化膜进行检测。其工艺示意图见图 4-22。

检测燃料棒内外表面、次表面的缺陷，包括腐蚀孔缺陷、裂纹缺陷和划伤产生的沟槽，为后续进一步破损棒的微观分析确定取样位置。测量乏燃料棒包壳氧化膜的厚度，了解燃料包壳外表面氧化程度和氧化状态。

利用无损检测台架控制待检测燃料棒水平轴向移动和轴向旋转，涡流阵列探头、涡流氧化膜测厚探头通过涡流测量架固定在无损台架上，乏燃料棒单独匀速通过涡流阵列探头、涡流氧化膜测厚探头，进行涡流检测。

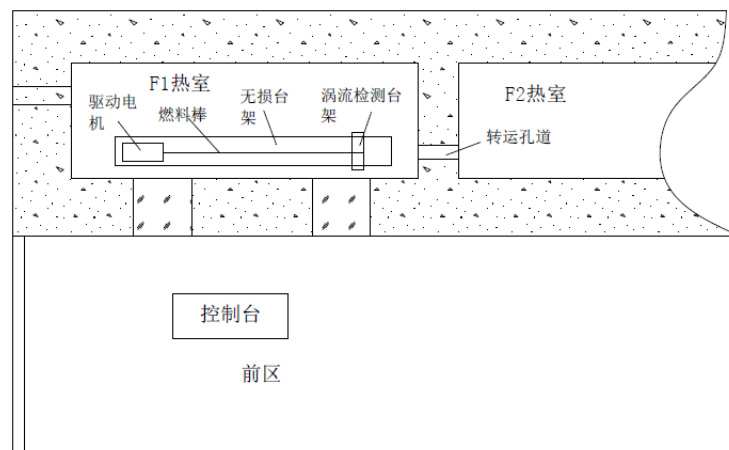


图 4-22 燃料棒涡流检查工艺示意图

#### (5) 轴向燃耗分布 $\gamma$ 扫描

采用  $^{137}\text{Cs}$  作为燃耗监测体，测量辐照后燃料中生成的裂变产物所放出的  $\gamma$  射线，通过准直器和  $\gamma$  谱仪记录下整个燃料棒相对燃耗分布。

将燃料棒安装在多功能台架上，多道分析仪的能量阈值调到的  $^{137}\text{Cs}$  的 661keV 位置，驱动步进电机使燃料棒移动，在整个燃料棒上逐点进行扫描。从而得到整个棒上得  $^{137}\text{Cs}$  放出的  $\gamma$  射线强度的相对分布，即燃料棒燃耗相对分布。工艺示意图见图 4-23。

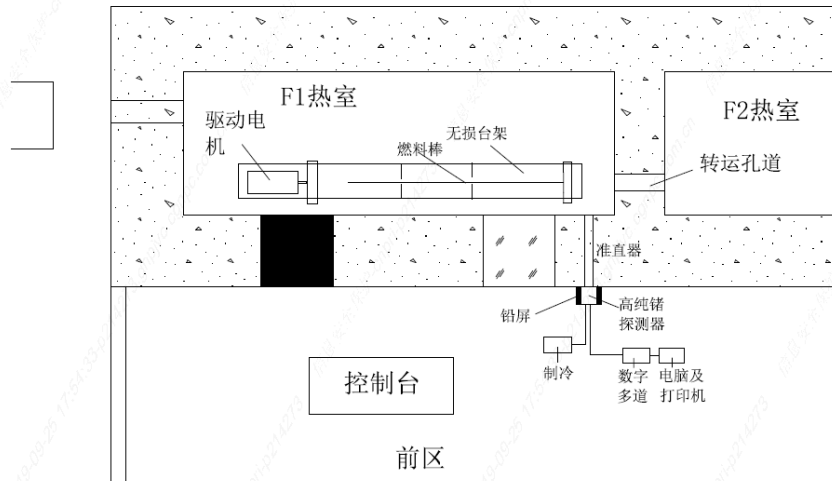


图 4-23 轴向燃耗分布  $\gamma$  扫描示意图

#### (6) 燃料棒检漏

利用氦质谱检漏仪对乏燃料棒泄漏检查，判断燃料棒密封性。燃料棒安装在 F1 热室检漏台架的密封腔室内，密封腔室通过密封管连接到热室操作区的氦质谱检漏仪上，通过检漏仪对乏燃料棒进行泄露检查。其工艺示意图见图 4-24。

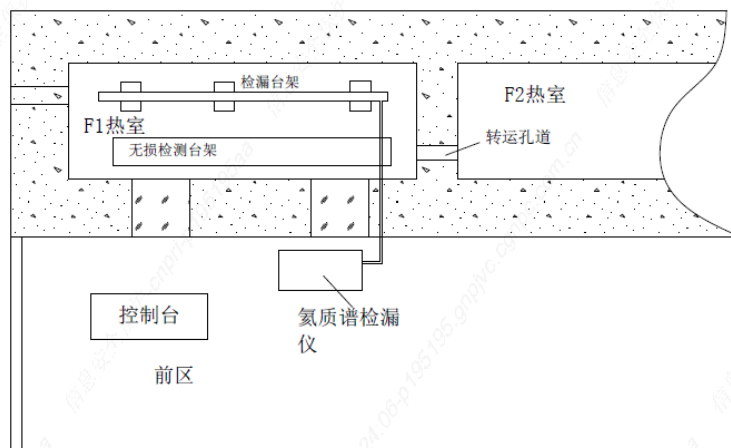


图 4-24 燃料棒检漏示意图

#### (7) 燃料棒刺孔及裂变气体释放测量分析

燃料棒在堆内辐照过程中，产生的裂变气体会释放到空腔中，对燃料元件内气体压力产生影响。分析燃料棒中裂变气体 ( $Kr$ 、 $Xe$ ) 成分、总释放量，燃料棒内压力、空腔体积等，为反应堆安全运行提供参考。

燃料棒刺孔及裂变气体测量分析在 F1 热室进行。

采用激光刺孔方法将燃料棒空腔部分刺穿，燃料棒空腔内的裂变气体释放到密封真空室内，通过刺孔前后真空室内压力变化，计算出燃料棒空腔内压。再将气体收集到气相色谱仪中分析得到裂变气体  $Kr$ 、 $Xe$  的含量。最终计算得到裂变气体释放量和释



放率。其工艺示意图见图 4-25。

燃料棒空腔部分固定在玻璃密封管内，采用激光刺孔方法对燃料棒空腔部分进行刺孔后，空腔内的裂变气体首先进入玻璃密封管中，进行燃料棒空腔体积和压力测量，之后对裂变气体进行取样注入手套箱的色谱仪中进行成分分析。

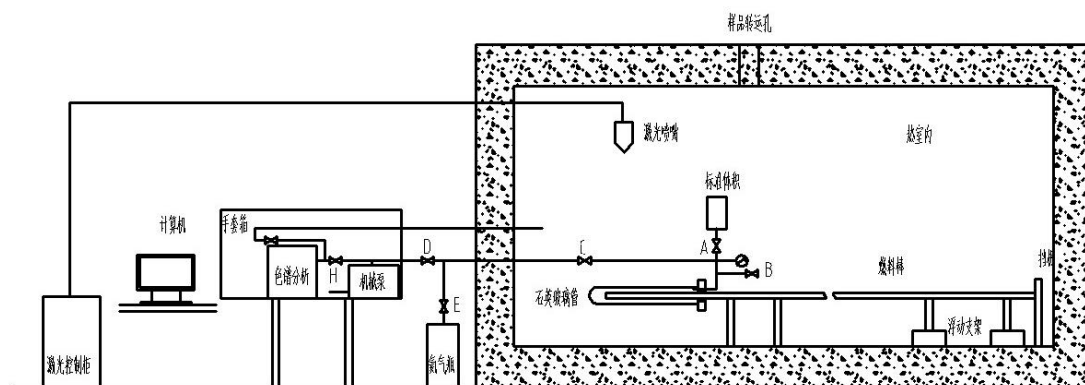


图 4-25 裂变气体释放测量工艺示意图

#### 4.2.2.3 切割热室（F2 热室）

F2 热室的主要功能是燃料棒切割。F2 热室内部尺寸为 5m×2m×4m，屏蔽能力按  $3.7 \times 10^{15} \text{Bq}$  设计。热室底面标高 0.8m，内衬采用不锈钢覆面，热室设有 2 个工位，每个工位配备 1 个窥视窗、1 副密封伸缩式主从机械手。

裂变气体测量完毕，选择比较有特征的燃料棒以及特征位置对燃料棒进行切割。截取所需的样品，包括金相样品、力学性能样品、热物性样品和微观分析样品。

燃料棒切割分为长棒切割和短棒切割，利用燃料棒切割装置将长棒切割成金相检验、力学性能测试、热物性分析、微观分析等所需的短棒。在 F2 热室将金相样品装入金相样品套中。

#### 4.2.2.4 芯块去除热室（F3 热室）

F3 热室的主要功能是去除芯块。热室内部尺寸为 2.5m×2m×4m，屏蔽能力按  $3.7 \times 10^{14} \text{Bq}$  设计。热室底面标高 0.8m，内衬采用不锈钢覆面，设有 1 个工位，配备 1 个窥视窗、1 副密封伸缩式主从机械手。

切割获得的短燃料棒，需要将其内部芯块去除后获得燃料包壳力学性能分析的包壳样品。其工艺示意图见图 4-26。

芯块去除采用顶出或者钻孔的方式，取出芯块后的包壳送入 F6 热室（样品清洗热室）进行清洗，清洗后转运至力学性能分析线进行包壳拉伸试验或包壳爆破试验。取出的芯块用于芯块密度测量、残余裂变气体分析测量等。

芯块顶出采用芯块顶出装置，利用推杆将包壳内的芯块顶出。

芯块钻孔去除工作采用钻床改造的装置，利用钻床旋转样品燃料棒，钻头固定不动，在钻芯块过程中要防止污染扩散。

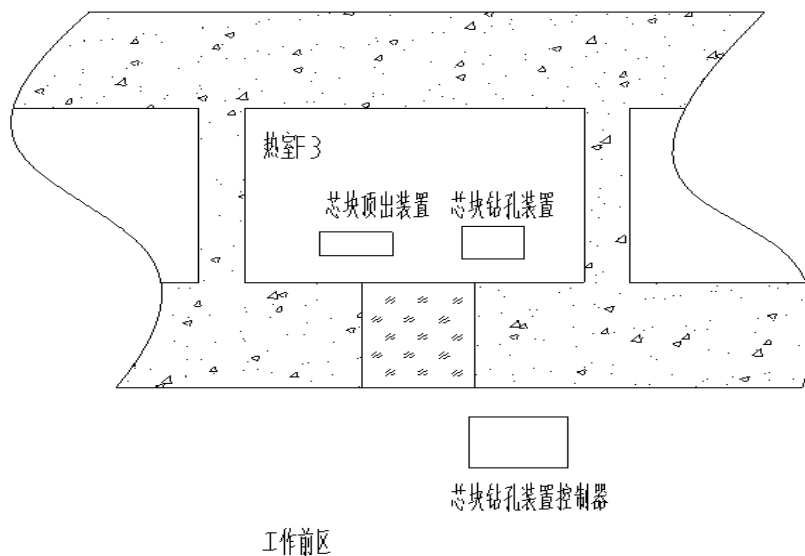


图 4-26 芯块去除工艺示意图

#### 4.2.2.5 样品储存热室（F4 热室）

F4 热室的主要功能是样品储存，包括金相观察样品、微观分析等带燃料样品的储存以及取样过后的燃料样品储存。热室内尺寸为 5m×2m×4m，屏蔽能力按  $3.7 \times 10^{14} \text{Bq}$  设计。热室底面标高 0.8m，内衬采用不锈钢覆面，设有 2 个工位，每个工位配备 1 个窥视窗、1 副伸缩式主从机械手，热室内设有 0.3t 吊车。热室内设置 73 个储存井，用于含燃料样品的暂存。热室的顶部设有垂直样品转运孔道和垂直废物转运孔道。

#### 4.2.2.6 废物整备封装、处理热室（F5 热室）

F5 热室的主要功能是废物的封装、整备。F5 热室内部尺寸为 2.5m×2m×3m，屏蔽能力按  $3.7\times 10^{14}\text{Bq}$  设计。热室底面标高 0.8m，内衬采用不锈钢覆面，设有 1 个工位，配备 1 个窥视窗、1 副伸缩式主从机械手，热室的顶部设有垂直废物转运孔道。

##### （1）中放废物整备

提前将不锈钢容器经 F4 热室送料通道送入 F4 热室，再传递至 F5 热室。不锈钢容器最大外形尺寸为  $\Phi 200\text{mm}\times 300\text{mm}$ ；切割屑、废结构件、磨抛盘等废物通过热室间水平孔道收集至 F5 热室；将上述中放废物装入不锈钢容器，封盖。尺寸不合适的，送入切割热室 F2 进行切割解体至合适尺寸；将装有中放废物的不锈钢容器，置于焊机台架上焊接不锈钢容器封盖，并进行外观检查，确保焊缝外观无缺陷；将中放废物暂存容器通过热室顶部转移至 F4 暂存，测量热室顶部和中放废物暂存容器表面污染水平（ $\alpha\leq 0.4\text{Bq}/\text{cm}^2$ ， $\beta\leq 4\text{Bq}/\text{cm}^2$ ），若不合格，则去污。

##### （2）低放废物整备

提前将低放废物袋（20L）经 F4 热室送料通道送入 F4 热室，再传递至 F5；将各热室产生的低放固体废物通过热室间水平孔道收集至 F5 热室；将低放废物装入废物袋后，再装入 200L 废物桶，废物桶送通风及固体废物暂存中心暂存。

#### 4.2.2.7 样品清洗热室（F6 热室）

该热室主要功能是清洗切割后的包壳样品，主要工艺是酸洗和超声清洗，去除包壳内表面残留的燃料，避免将污染带到其它分析热室或手套箱。F6 热室内部尺寸：2m×1.5m×3m，屏蔽能力按  $3.7\times 10^{13}\text{Bq}$  设计。热室底面标高 0.8m，内衬采用不锈钢覆面，设有 1 个工位，配备 1 个窥视窗、1 副伸缩式主从机械手、垂直样品转运孔道等。

#### 4.2.2.8 金相样品镶嵌热室（F7 热室）

金相样品镶嵌在 F7 热室进行，将切割后 100mm 长的燃料棒放在外径 18mm，高 120mm 的有机玻璃杯模具中，然后固定在样品托架上，将环氧树脂及固化剂在热室外配好，通过热室预留的孔道将配好的树脂送进热室，使用浇注液浇注成直径 18mm 的样品，镶嵌液配置好后要尽快完成浇注过程，放置时间过程导致浇注液体的流动性丧失。

将样品托送入真空腔体内，密封后抽真空，抽真空至 0.2bar，几分钟后释放压力至大气压，重复抽一到两次真空，等树脂的流动性消失后，移出真空腔室，静置 12 小时固化。F7 热室内部尺寸：2m×1.5m×3m，屏蔽能力按  $3.7\times 10^{13}\text{Bq}$  设计。热室底面标高 0.8m，内衬采用不锈钢覆面，设有 1 个工位，配备 1 个窥视窗、1 副伸缩式主从机械手。

#### 4.2.2.9 精密切割热室（F8 热室）

样品固化完成后在 F8 热室进行切割。F8 热室内部尺寸：2m×1.5m×3m，屏蔽能力按  $3.7\times 10^{13}\text{Bq}$  设计。热室底面标高 0.8m，内衬采用不锈钢覆面，设有 1 个工位，配备 1 个窥视窗、1 副伸缩式主从机械手。

在 F8 热室利用远程遥控全自动金相切割机切割成 10mm~20mm 长样品，然后根据需求横切或者纵切样品，热室内配有专门的夹具可以横放或者纵放样品。金相切割机采用金刚砂轮片，单次切割燃料棒损耗厚度最多 1mm。

#### 4.2.2.10 金相样品磨抛热室（F9 热室）

样品磨光抛光在 F9 热室进行。F9 热室内部尺寸：2m×1.5m×3m，屏蔽能力按  $3.7\times 10^{13}\text{Bq}$  设计。热室底面标高 0.8m，内衬采用不锈钢覆面，设有 1 个工位，配备 1 个窥视窗、1 副伸缩式主从机械手。

首先用机械手将 400 号磨抛盘放置在磨抛机底盘上。再用机械手将固化好的镶嵌样品放置试样推进器的样品盘中，在热室外设置磨抛参数，包括底盘和试样推进器转速、加载力、磨抛时间等。磨制过程中需要加去离子水进行冷却。然后将磨盘换成 800 号-1000 号，实现粗磨-细磨的过程。

磨完之后进行抛光步骤，首先用机械手磨抛布放置在磨抛机底盘上。再用机械手将固化好的镶嵌样品放置试样推进器的样品盘中，在热室外设置磨抛参数，包括底盘和试样推进器转速、加载力、磨抛时间等，使用  $3\mu\text{m}$  的氧化铝悬浮液进行抛光，然后将磨盘成长绒布，使用  $1\mu\text{m}$  氧化铝悬浮液进行抛光。实现粗抛-细抛的过程，直到样品呈现光亮的表面。

#### 4.2.2.11 金相样品蚀刻热室（F10 热室）

样品蚀刻在 F10 进行。F10 热室内部尺寸：2m×1.5m×3m，屏蔽能力按  $3.7\times 10^{13}\text{Bq}$

设计。热室底面标高 0.8m，内衬采用不锈钢覆面，设有 1 个工位，配备 1 个窥视窗、1 副伸缩式主从机械手。

首先在热室外将需要的蚀刻液配好（参照表 4-2），通过管道送入热室内，蚀刻液不可在热室内长时间保存，否则可能会失效。同时需要在热室内准备好去离子水以便清洗样品表面。蚀刻在装有蚀刻液的培养皿内进行，蚀刻液需要浸没待观察表面。使用机械手直接进行浸泡蚀刻，不同的材料有不同的蚀刻液和蚀刻时间。

蚀刻以后，对于酸性废液，需要用碱中和以后，等待挥发后处理。蚀刻完成后立即使用去离子水清洗腐蚀表面，防止产生过度腐蚀影响观察，蚀刻完成的样品通过热室间水平转运孔道运到金相观察热室进行下一步分析。

表 4-2 金相样品蚀刻液基本信息

成分	浸蚀方法	适用范围
HNO <sub>3</sub> （浓度为 70%）80ml H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> （浓度为 30%）10ml HF（浓度为 48%）10ml	约 20s	锆包壳的氢化物
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> （浓度 98%）10mL H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> （浓度 30%）90mL	40s-45s	燃料芯块
三氯化铁 5g 盐酸 50mL 水 100mL	浸没 5s-10s	显示奥氏体镍钢及不锈钢组织
三氯化铁 5g 盐酸 50mL 水 100mL（加少许硝酸）	浸没 5s-10s	显示不锈钢组织
硝酸 50mL 醋酸 50mL	浸泡或擦拭 5s-30s，用较长时间 化浸蚀，硫化物边界比常规晶界 易受蚀	纯镍、铜镍、钛镍以及 高镍合金
氢氧化铵 20mL 过硫酸铵 1g 水 60ml	浸泡 5s-30s	铜及铜合金

#### 4.2.2.12 金相观察、显微硬度、微区 $\gamma$ 扫描热室（F11 热室）

F11 热室的主要功能为材料金相观察、显微硬度测试、测量燃料径向相对燃耗分布。F11 热室内尺寸：4.5m×1m×3m，屏蔽能力按  $3.7 \times 10^{13} \text{Bq}$  设计。热室底面标高 0.8m，内衬采用不锈钢覆面，设有 2 个工位，每个工位配备 1 个窥视窗、1 副关节式主从机械手。

##### （1）燃料芯块与包壳金相检验

金相检验在 F11 热室（金相观察、显微硬度、微区  $\gamma$  扫描热室）进行。金相检验的内容包括包壳内外氧化膜厚度测量、包壳腐蚀产物测量、芯块-包壳间隙测量、燃料芯块宏观与金相组织观察、晶粒度测量、气孔分布及尺寸测量、氢化物分布测量。

制备完毕的金相样品，经过微观样品制备热室之间的水平转运孔道转运至 F11 热室进行金相检验。热室内使用全自动倒置式金相显微镜，使用热室外的控制器可以实现载物台移动、图像聚焦、物镜转换，光强调整等。

#### （2）显微硬度测量

利用全自动显微硬度计进行材料微区组织力学性能测试。

将金相观察后的金相样品使用机械手放在硬度计的载物台上，使用热室外的控制器进行聚焦，找到感兴趣区域，加载、卸载和硬度测量。

#### （3）微区 $\gamma$ 扫描

金相观察完毕的样品放置在显微  $\gamma$  扫描平台上，选取  $^{137}\text{Cs}$  核素作为燃耗监测体，通过测量其特征  $\gamma$  射线的强度沿燃料棒径向的分布，获取燃料棒轴向相对燃耗分布。

### 4.2.2.13 密度测量热室（F12 热室）

F12 热室的主要功能为芯块密度测量。F12 热室内部尺寸：4.5m×1m×3m，屏蔽能力按  $3.7\times 10^{13}\text{Bq}$  设计。热室底面标高 0.8m，内衬采用不锈钢覆面，设有 2 个工位，每个工位配备 1 个窥视窗、1 副关节式主从机械手，热室的顶部设有垂直样品转运孔道。

采用密度天平对芯块密度进行测量，获得辐照后芯块的密度和孔隙率数据。在使用时，将辅助溶液（去离子水）倒入玻璃杯。液面超过吊篮即可，液体不会溢出玻璃杯。密度天平放在 F12 密度测量热室中，具体布置如图 4-27 所示，将天平的称量部分放在热室中，通过机械手进行装样操作，控制部分放在热室外。每次称量之前可通过控制部分自动进行水平调整，并可以通过控制部分开启和关闭防风罩。实验使用的浸润液为去离子水，一批实验的用水量大约为 50ml。试验完成后在热室中自然挥发，不产生液体废物，仅产生少量的固体擦拭物废物。

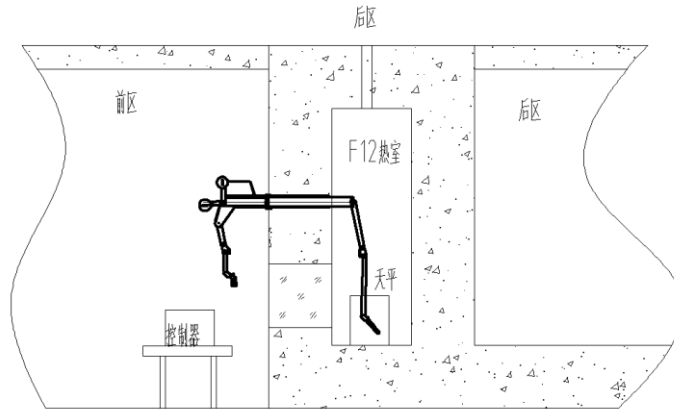


图 4-27 密度天平测量布置示意图

#### 4.2.2.14 残余裂变气体测量热室（F13 热室）

预留热室，本次建设只建设屏蔽体。

#### 4.2.2.15 LOCA 事故工况研究热室（F14 热室）

预留热室，本次建设只建设屏蔽体。

#### 4.2.2.16 表面污染测量热室（F15 热室）

F15 热室主要用于再组装后的燃料短棒表面污染测量。F15 热室内部尺寸： $3\text{m}\times 2\text{m}\times 3\text{m}$ ，屏蔽能力按  $3.7\times 10^{14}\text{Bq}$  设计。热室底面标高 0.8m，内衬采用不锈钢覆面，设有 1 个工位，每个工位配备 1 个窥视窗、1 副伸缩式主从机械手。

#### 4.2.2.17 超声清洗热室（F16 热室）

F16 热室的主要功能为去除燃料棒外表面的燃料沾污，使其符合入堆的要求。F16 热室内部尺寸： $3\text{m}\times 2\text{m}\times 3\text{m}$ ，屏蔽能力按  $3.7\times 10^{14}\text{Bq}$  设计。热室底面标高 0.8m，内衬采用不锈钢覆面，设有 1 个工位，每个工位配备 1 个窥视窗、1 副伸缩式主从机械手。

短棒完成焊接进行焊缝及堵孔焊外观检验后，装入氦质谱检漏装置中检漏。

单棒外表面污染检查及去污操作，棉纱蘸取酒精或丙酮擦拭单棒外表面，取样擦拭后棉纱表面无沾污计数。

F16 热室工艺布置图见图 4-28。

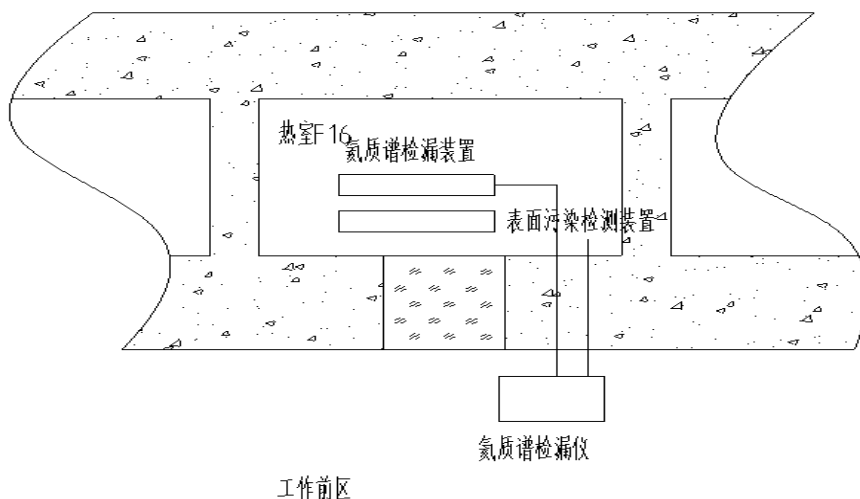


图 4-28 F16 热室工艺布置图

#### 4.2.2.18 燃料棒焊接热室（F17 热室）

F17 热室的主要功能为燃料棒的环焊与堵孔焊，燃料棒检漏。F17 热室内尺寸： $5\text{m}\times 2\text{m}\times 4\text{m}$ ，屏蔽能力按  $3.7\times 10^{14}\text{Bq}$  设计。热室底面标高 0.8m，内衬采用不锈钢覆面，设有 2 个工位，每个工位配备 1 个窥视窗、1 副伸缩式主从机械手。热室内设置 6 个储存井，用于燃料棒和废物的暂存。热室顶部设有设备转运孔道，垂直样品转运孔道，废物垂直转运孔道。

短棒环焊缝焊接采用脉冲激光焊接，短棒局部密封，摄像机观察焊接过程，焊接过程采用保护性气体防止氧化。

短棒堵孔焊接采用钨极氩弧焊接，短棒局部密封，摄像机观察焊接过程，焊接过程采用保护性气体氦气，氦气压力通过密封腔体压力表读取。

F17 热室工艺布置图见图 4-29。

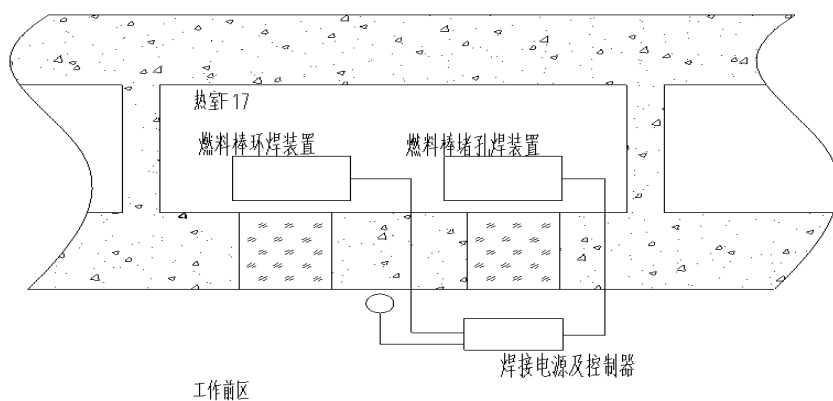


图 4-29 F17 热室工艺布置图



#### 4.2.2.19 燃料棒装配热室（F18 热室）

F18 热室的主要功能为燃料棒的真空干燥与仪表化装配。F18 热室内部尺寸：5m×2m×4m，屏蔽能力按  $3.7 \times 10^{14} \text{Bq}$  设计。热室底面标高 0.8m，内衬采用不锈钢覆面，设有 2 个工位，每个工位配备 1 个窥视窗、1 副伸缩式主从机械手。热室顶部设有设备转运孔道，垂直样品转运孔道，废物垂直转运孔道。热室内设置 6 个储存井，用于燃料棒和废物的暂存。

采用单棒装配工装，将端塞送入热室，清洁短棒两端，短棒安装到工装上固定，装入端塞，通过压力计压入端塞，超压入力限制，停止压入，更换端塞，端塞压入，通过放大镜观察，满足配合要求，取下装配好的短棒，放入样品盒。装配过程擦拭端口时产生少量废物。设备维护过程会产生少量擦拭性废物。

F18 热室工艺布置图见图 4-30。

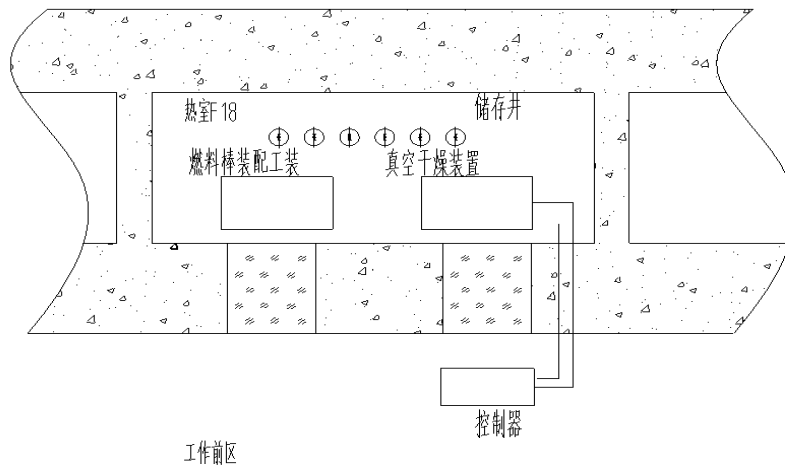


图 4-30 F18 热室工艺布置图

#### 4.2.2.20 F19 热室

预留热室。

#### 4.2.2.21 F20 热室

预留热室。

#### 4.2.2.22 设备去污及维护热室（F21 热室）

用于热室内设备去污与维护。F21 热室内部尺寸：6.5m×2.5m×4m，屏蔽能力按 $3.7\times 10^{12}\text{Bq}$ 设计。热室底面标高 5.8m，内衬采用不锈钢覆面。设有 4 个工位，每个工位配备 1 个窥视窗、1 副关节式主从机械手。热室内配标准 5t 吊车。

#### 4.2.3 材料检验研究线工艺分析（M 线）

M 线规划建设 13 个热室，其中 M3、M7、M9、M10、M11、M12 为预留热室，本期只建设屏蔽体。

##### 4.2.3.1 样品观察测量热室（M1 热室）

样品观察测量热室（M1）内部尺寸：2.3m×3m×4m，屏蔽能力按 $3.7\times 10^{12}\text{Bq}$ 设计。热室底面标高 $\pm 0.00\text{m}$ 。内墙涂树脂漆，设有 1 个工位，每个工位配备 1 个窥视窗和 2 支关节式主从机械手。

通过机械手将铅罐中的冲击样品放置于水平转运小车的样品托盘上，再通过水平转运孔道转运至 M1 热室中，取下样品托盘；通过机械手分别夹取样品放置于体式显微镜下进行非接触式的拍照、测量样品的外观、原始尺寸、表面光洁度等信息。

##### 4.2.3.2 冲击试验热室（M2 热室）

M2 热室为 3.5m×3m×4m，屏蔽能力按 $3.7\times 10^{12}\text{Bq}$ 设计。热室底面标高 $\pm 0.00\text{m}$ 。内墙涂树脂漆，每间热室设有 1 个工位，每个工位配备 1 个窥视窗和 2 支关节式主从机械手。冲击试验热室 1 的顶部设有垂直样品转运孔道便于样品的转运，每间热室设有设备转运孔道。

凭借水平转运小车和样品托盘通过水平转运通道转运至 M2 冲击试验热室，待启动冲击试验机、电脑、预检、输入样品信息、设置试验条件等准备流程确认无误后，通过机械手将冲击样品放置于自动送样系统接口，推动滑杆将样品送入保温系统中，通过电阻加热或液氮方式控温，温度可达 $-180^{\circ}\text{C}$ - $300^{\circ}\text{C}$ ；在到达试验温度并保温 20 分钟后，通过热室操作区控制面板进行试验，待摆锤击打样品飞出后，通过热室操作区摄像头检验样品掉落位置并用机械手收集（试验台架设置隔板，控制样品掉落区域），

随后回摆，记录试验数据，重复以上步骤进行下一次试验。试验过程中无碎屑产生，对于样可能触碰的区域，考虑试验前用物理隔离或试验后通过机械手、棉纱酒精擦拭的方式完成去污，相关废物待检测后做低放废物处理。

### 4.2.3.3 拉伸试验热室（M4、M5 热室）

M4、M5 内部尺寸均为：3m×3m×4m，屏蔽能力按  $3.7 \times 10^{12} \text{Bq}$  设计。热室底面标高  $\pm 0.00 \text{m}$ 。热室内壁涂环氧树脂漆，设有 1 个工位，每个工位配备 1 个窥视窗和 2 支关节式主从机械手。拉伸试验热室顶部设有垂直样品转运孔道便于样品的转运，每间热室设有设备转运孔道。

凭借水平转运小车和样品托盘通过水平转运通道转运至 M4、M5 拉伸试验热室，待启动拉伸试验机、电脑、机柜、输入样品信息、设置试验条件等准备流程确认无误后，通过机械手穿销钉的方式将 CT 样品安装于拉伸试验机上，调整拉伸机确保样品处于垂直拉伸状态，再次通过机械手将引伸计插入预制裂纹的间隙中；拉动环境箱至限位环境箱并锁死，启动温度控制器，通过液氮方式降温，温度最低可达  $-180^\circ\text{C}$ ；在到达试验温度后，通过热室操作区控制电脑板进行拉伸试验，待样品断裂后或到达预定时间后，停止试验；关闭液氮，移开环境箱，取下样品至样品托盘中。重复以上步骤进行下一次试验。试验过程中无放射性气溶胶和碎屑产生，对于样可能触碰的区域，考虑试验前用物理隔离或试验后通过机械手、棉纱酒精擦拭的方式完成去污，相关废物待检测后做低放废物处理。其工艺布置图见图 4-31。

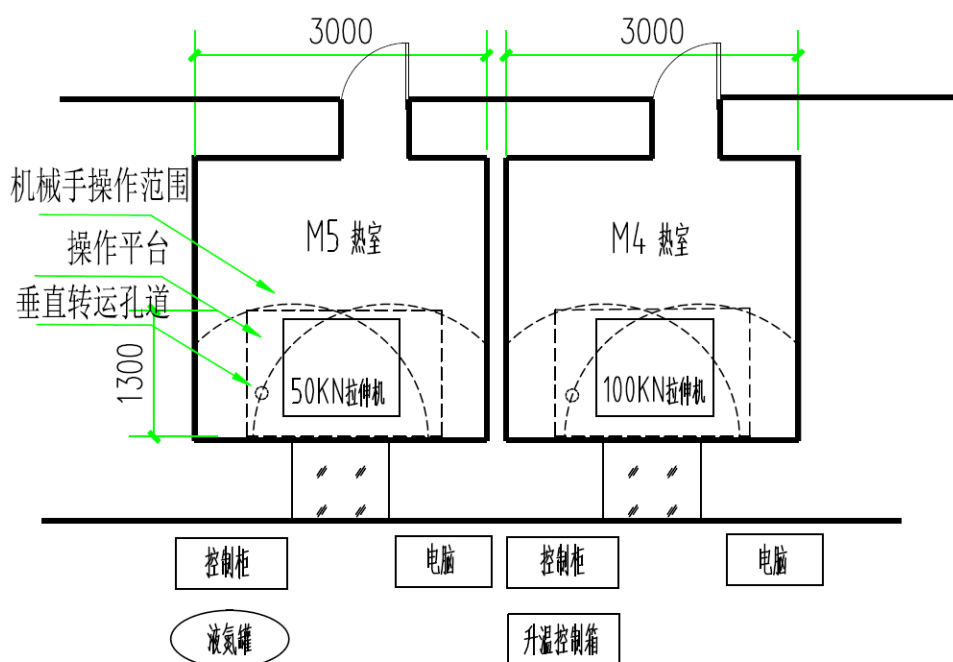


图 4-31 拉伸检测工艺布置图

#### 4.2.3.4 内压蠕变（爆破）试验热室（M6 热室）

内压蠕变（爆破）试验热室（M6）内部尺寸：10m×3m×4m，屏蔽能力按  $3.7 \times 10^{12} \text{Bq}$  设计。热室底面标高  $\pm 0.00 \text{m}$ 。内壁涂树脂漆，设有 4 个工位，每个工位配备 1 个窥视窗和 2 支关节式主从机械手。热室的顶部设有设备转运孔道，垂直样品转运孔道便于设备安装与样品的进出。

内压爆破试验在 M6 热室进行，主要用于测量包壳管的周向的应力应变关系曲线。内压爆破试验采用气压方式进行，通过实验研究包壳在高压环境下的韧脆性，评估分析包壳管材料抵抗内压引起的蠕变及爆破失效的能力。

#### 4.2.3.5 疲劳试验热室（M8 热室）

疲劳试验热室（M8）内部尺寸为：3m×2.5m×4m，热室底面标高  $\pm 0.00 \text{m}$ 。内壁涂环氧树脂漆，设有 1 个工位，每个工位配备 1 个窥视窗和 2 支关节式主从机械手。热室的顶部设有设备转运孔道，垂直样品转运孔道便于设备安装与样品的进出。

开展燃料包壳及核电站主设备材料不同温度下的疲劳试验研究和断裂韧性样品的裂纹预制，为反应堆和压力容器的寿命评估提供数据。

实验样品包含包壳管样品及主设备材料标准样品：

- 包壳管样品：包壳管在 F2 切割热室内被切成长 130mm~150mm 的短棒，将短棒装入铅罐经过垂直转运孔道送入 F3 热室进行芯块去除及去污。去除芯块后的包壳管用铅罐经过热室顶部走廊通过垂直转运孔道送入 M13 样品储存接收热室。
- 主设备材料标准样品：在 FA 热室中从辐照监督组件或辐照考验组件中取出主设备材料标准疲劳样品和断裂韧性样品，经过样品分装后通过热室顶部的走廊和垂直转运孔道送入 M13 样品存储接收热室。

通过机械手将铅罐装样吊兰中的样品取出，通过机械手操作纸巾，沾取丙酮或酒精对样品表面进行擦拭（每个样品丙酮或酒精用量不超过 0.5ml），擦拭产生的废物经过检测后做低放废物处理。

通过机械手将经过清洁的样品放入样品托盘并经过水平转运孔道运送至 M1 样品观察热室中，用机械手将样品放置于体式显微镜下进行非接触式外观检查、尺寸测量、拍照等操作。

外观检查完成后，采用托盘将样品通过水平转运孔道运输至 M8 疲劳热室内，采用机械手完成样品夹具安装、样品夹持、引伸计装配、热电偶接触和合炉等操作。

通过热室操作区的控制器和计算机进行试验参数设置和试验过程控制，疲劳实验温度范围一般设置在室温~800℃。

样品断裂或达到实验结束条件后，停止试验，待炉体冷却后用机械手完成开炉、取样等操作。

整个实验过程中无放射性气溶胶和碎屑产生，对于样品可能接触到的区域，考虑试验后通过机械手擦拭的方式完成去污，产生少量废物经过检测后做低放废物处理。

实验结束后，样品通过水平转运孔道送回 M1 热室进行断口观察、尺寸变形测量等操作。对于需要进一步进行断口观察的样品，放入铅罐通过垂直转运孔道和热室顶部走廊运送至微观、金相样品制备屏蔽箱制样后，送入微观线（X 线）进行 SEM、TEM、XRD 等相关微观表征研究。不需要进一步表征的样品直接用铅罐经垂直转运孔道和热室顶部走廊运送至 M13 样品储存、接收热室进行长期储存。

疲劳试验机布置在热室内靠近窥视窗的位置，详见图 4-32。试验机周围配套有操作平台，试验机主机配有引伸计、高温炉、热电偶等。窥视窗两边墙面安装有机手，操作范围确保覆盖整个操作平台。试验机及高温炉的控制模块和计算机从热室内引出，

布置在热室操作区。试验机配套的液压源和冷水机布置在 M8 热室隔壁的配套房间内。

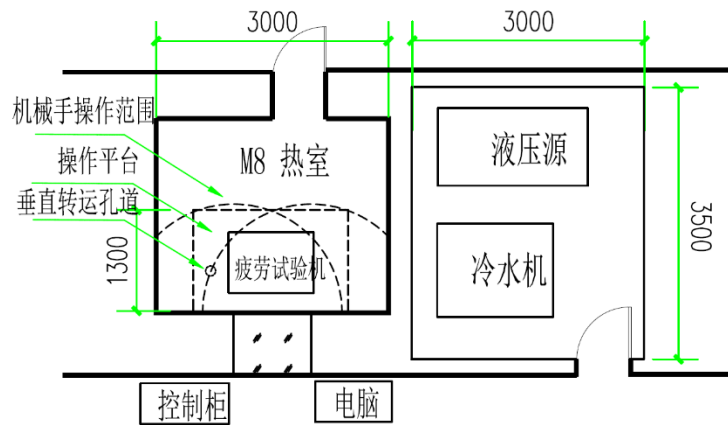


图 4-32 疲劳热室布置示意图

#### 4.2.3.6 样品储存、接收热室（M13 热室）

M13 热室主要用于 M 线样品的接收和暂存。热室内部尺寸：7m×2.5m×4m，屏蔽能力按  $3.7 \times 10^{13} \text{Bq}$  设计。热室底面标高 0.8m，内壁涂环氧树脂漆，设有 3 个工位，每个工位配备 1 个窥视窗、1 副关节式主从机械手。配备 1 台 0.3t 吊车，用于储存井和放射性操作。热室内设置 100 个储存井，用于结构材料样品的暂存。热室顶部设有垂直样品转运孔道用于样品的转运。相邻热室之间设有传送带用于样品的转运。

#### 4.2.4 微观分析线（X 线）工艺分析

X 线规划建设 14 个工艺厂房（X1~X14），其中 X1、X3、X5、X7、X8、X12 为预留用房，分别规划用作次离子质谱分析（X1）、FIB 分析（X3）、电子探针核素分析（X5）、Raman 光谱分析（X7）、衍射分析（X8）和 X 射线荧光分析（X12），本次只建设构筑物，本报告不进行分析和评价。

##### 4.2.4.1 透射电镜分析（X2 铅室）

透射电镜在 X2 铅室进行。主要用于材料晶体结构的电子衍射分析与高分辨像分析，兼具分析微相，观察图像，测定成分和鉴定结构等。

#### 4.2.4.2 扫描电镜观察（X4 铅室）

扫描电镜观察在 X4 铅室进行，主要用于燃料芯块、包壳材料、堆内构件、断口部位等的微观形貌观察及成分分析，研究芯块晶界的多孔性和裂变产物沉积状态等。

扫描电镜试验设备组成部分为扫描电镜、关节机械手以及样品转运箱室。扫描电镜与电子探针共用一间屏蔽铅室以及同一个样品转运箱体，如图 4-33。

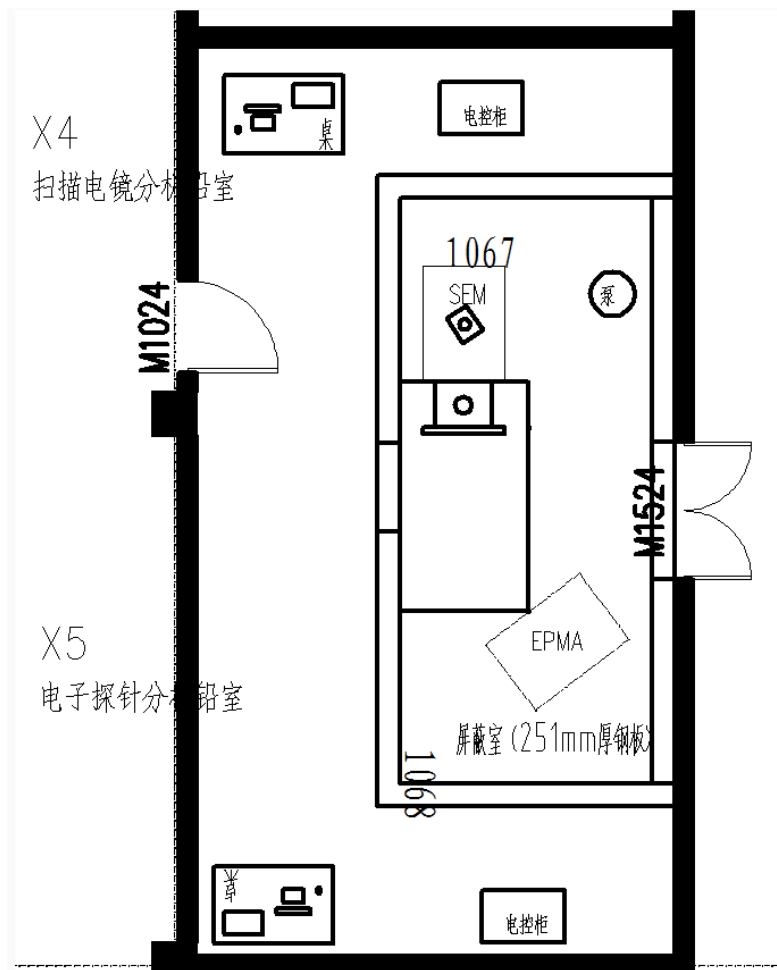


图 4-33 扫描电镜和电子探针平面布置图

#### 4.2.4.3 正电子湮灭（X9 铅室）

正电子湮灭在 X9 铅室进行。研究结构材料和燃料辐照损伤、空位浓度、空位形成能、双空位和空洞的形成、空洞尺寸、空位与杂质的作用、位错密度、位错与杂质的作用。

该试验使用的正电子湮灭寿命谱仪需要用到  $^{22}\text{Na}$  放射源， $^{22}\text{Na}$  源是由铝纸密封的密封源，典型的活度为  $(2.00-5.00) \text{E}+06\text{Bq}$ ，半衰期为 2.6 年。其试验流程如下：

- 使用机械手以及手套将 2 个完全相同的标准规格尺寸样品以及  $^{22}\text{Na}$  同位素正电子放射源制备成“三明治”形式的待检测样品；
- 使用机械手把“三明治”样品放置在样品台架上；
- 开始正式测试；
- 待测试完成后，使用机械手从样品台架上取下“三明治”样品；
- 把“三明治”样品拆解为测试前的两个样品与放射源。

$^{22}\text{Na}$  存放在放射源储存库中，放射源储存库满足 GA1002-2012《剧毒化学品、放射源存放场所治安防范要求》中的三级治安防范要求。

#### 4.2.4.4 导热测量（X10 铅室）

导热测量在 X10 铅室进行，开展压水堆燃料辐照后包壳、燃料芯块导热性能测试，获得辐照后包壳、燃料芯块的热扩散系数、导热系数。采用激光导热仪在屏蔽室内进行测量，屏蔽室内包括高温炉体、样品支架、样品台。

本实验在氦气保护环境，对不同燃耗、不同温度的辐照后材料导热系数进行测量。本实验不产生废液，芯块在高温炉体中会释放气态裂变产物，气态裂变产物通过屏蔽箱过滤器过滤后排入通风系统，试验后的芯块装入铅罐运至储存热室储存。

#### 4.2.4.5 同步热分析（X11 铅室）

同步热分析在 X11 铅室进行，开展压水堆燃料芯块 DSC（差示扫描量热）和 TGA（热重分析），获得燃料芯块的比热及相转变温度。屏蔽室内包括高温炉体、样品支架、样品台、天平。

实验可同时对样品进行 DSC 和 TGA，通过对比已知比热的标准样品与未知比热的待测样品的测量结果获得材料的比热，也可获得随温度变化材料的相转变过程。实验保护气为 Ar、 $\text{N}_2$  或 He，本实验不产生废液，芯块在高温炉体中会释放气态裂变产物（包括 Kr、Xe，挥发性、半挥发性产物等），气态裂变产物通过屏蔽箱过滤器过滤后排入通风系统，试验后的芯块装入铅罐运至储存热室储存。



#### 4.2.4.6 氢含量分析（X13 铅室）

包壳氢含量分析在 X13 铅室进行，用于测量包壳内的氢含量，评估包壳氢化行为。其工艺布置图如图 4-34。

在 F6 热室将去除芯块的燃料包壳（0.3g）用硝酸溶液清洗、无水乙醇清洗、干燥，用转运铅罐运输到氢含量分析铅室，剪开后用精度 0.1mg 的电子天平称重，称完后放入氢分析仪的石墨坩埚中。先对氢分析仪进行空白试验，校准仪器。再将带样品的坩埚安在氢分析仪的电极炉座上，打开氢分析仪进行正式测量。

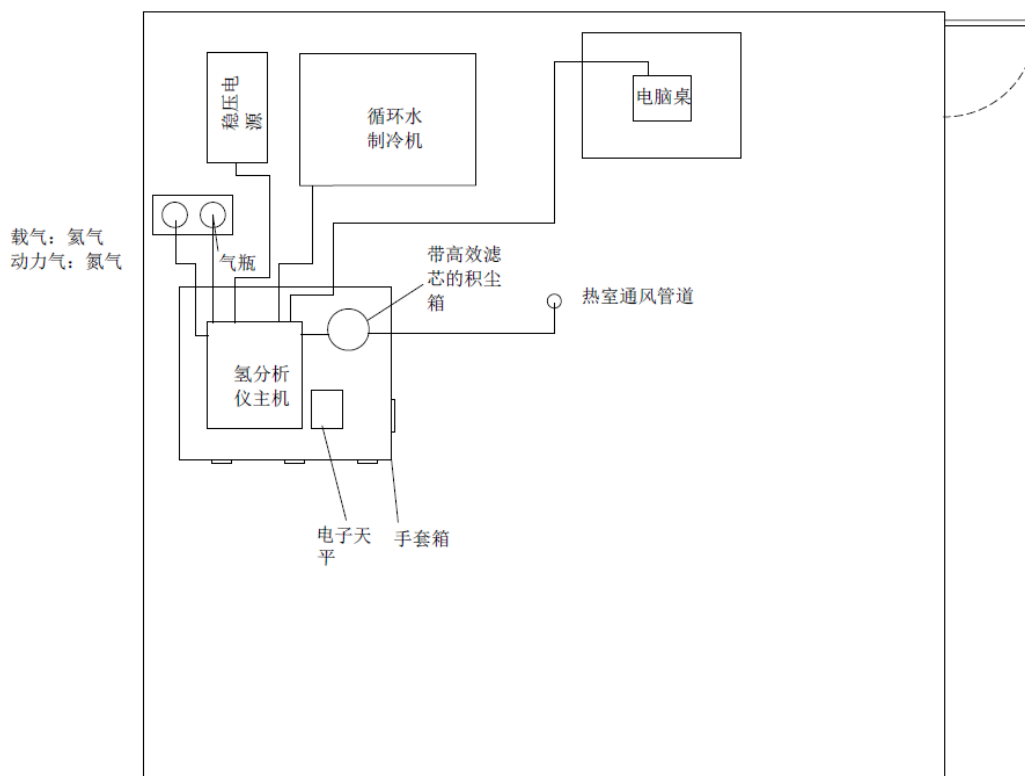


图 4-34 氢含量分析工艺布置图

#### 4.2.5 钴源生产线（I 线）工艺分析

本项目拟使用的  $^{60}\text{Co}$  原料是压水堆生产放射性同位素项目所辐照的钴靶件中装载的钴粒，钴粒是表层镀镍的  $\Phi 1\text{mm} \times 1.75\text{mm}$  实心圆柱体。钴靶件优化方案可能采用表层镀镍的  $\Phi 6.22\text{mm} \times 2\text{mm}$  实心钴片替代上述钴粒，即  $^{60}\text{Co}$  原料也有可能为表层镀镍的  $\Phi 6.22\text{mm} \times 2\text{mm}$  实心钴片。

### 4.2.5.1 原料靶件接收

对运输容器表面污染水平进行测量， $\beta$  表面污染超过  $4\text{Bq}/\text{cm}^2$  或  $\alpha$  表面污染超过  $0.4\text{Bq}/\text{cm}^2$  时进行放射性去污，然后拆除容器防火罩、紧固罩等配件，拆除容器底座、屏蔽塞螺栓，安装容器短吊具，起吊容器，跨过 I1~I3 热室顶部，落在钴靶件水池旁，更换容器吊具（拆短吊具，装长吊具），起吊容器至钴靶件水池底，使用长柄工具取出运输容器内装载钴靶件的吊篮，起吊空容器出钴靶件水池，容器监测、去污。使用长柄工具，抓取钴靶件吊篮内的钴靶件，移至池底的钴靶件暂存格架，进行钴靶件暂存。

### 4.2.5.2 内包壳封装热室（I1 热室）

I1 热室主要用于进行辐照靶件的切割、分装、内包壳焊接、氦质谱检漏、清洗去污等。该热室内部尺寸： $5\text{m}\times 2\text{m}\times 3\text{m}$ ，屏蔽能力按  $3.7\times 10^{15}\text{Bq}$  设计。热室底面标高  $0.8\text{m}$ ，内衬采用不锈钢覆面，设有 2 个工位，每个工位配备 1 个窥视窗、1 副伸缩式主从机械手。顶部设置有垂直废物转运孔道、用于废物与样品的转运。在热室底部设有样品转运通道，通过转运通道完成热室内外运送包壳管及取样纱布等生产物品的运输工作。内包壳封装热室与外包壳封装热室之间设有转运孔道用于样品间传递。热室内设 3 个储存井。侧墙设置有斜孔道与水池联通，生产时，使用长柄工具，抓取钴靶件格架内的钴靶件，转移到池底的斜孔道吊篮，从水池底部通过倾斜孔道进入热室。

#### （1）钴棒切割

钴棒切割采用车削方式，切割点在焊缝处避免切到钴粒。

#### （2）内包壳封装

内包壳封装是将解体后钴棒中的钴粒装入内包壳管、充氦、采用钨极氩弧焊封装、焊缝外观检验。

#### （3）内包壳检漏

焊接完成后的内包壳完成外观检验后，装入氦质谱检漏装置中检漏。

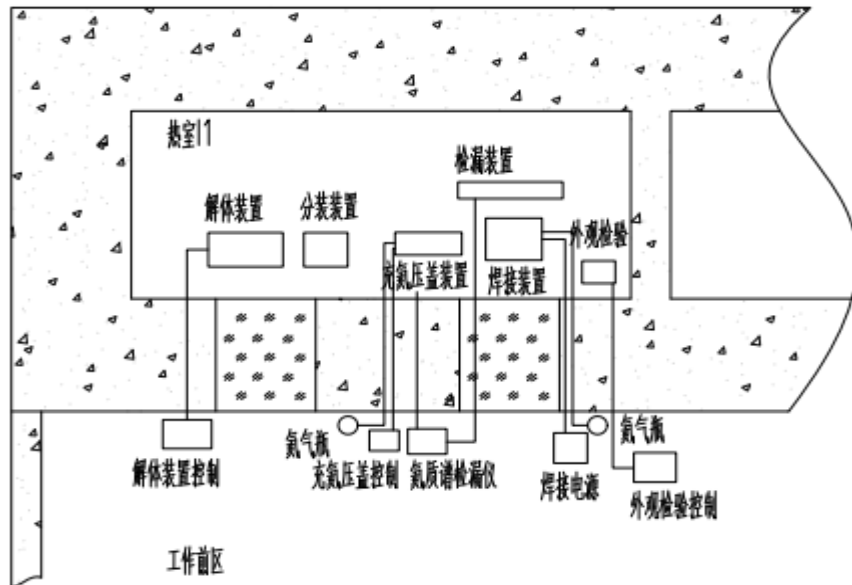


图 4-35 I1 热室工艺布置示意图

#### 4.2.5.3 外包壳封装热室（I2 热室）

I2 热室主要用于钴源外包壳的组装焊接、氦质谱检漏、表面污染检查等。该热室内部尺寸：3m×2m×3m，屏蔽能力按  $3.7 \times 10^{15} \text{Bq}$  设计。热室底面标高 0.8m，内衬采用不锈钢覆面，设有 1 个工位，每个工位配备 1 个窥视窗、1 副伸缩式主从机械手。热室内设 3 个储存井。在热室底部设有样品转运通道，通过转运通道完成热室内外运送包壳管及取样纱布等生产物品的运输工作。外包壳封装热室与检验热室间设有斜孔道。

##### （1）外包壳封装

外包壳封装是将封装好的内包壳装入外包壳管内，充氮、压盖采用钨极氩弧焊封装、焊缝外观检验。

##### （2）外包壳检漏

焊接完成后的内包壳完成外观检验后，装入氦质谱检漏装置中检漏。

##### （3）表面污染检测

表面污染检查采用国标 GB15849《密封放射源检漏方法》擦拭法执行，表面活度应小于 200Bq。

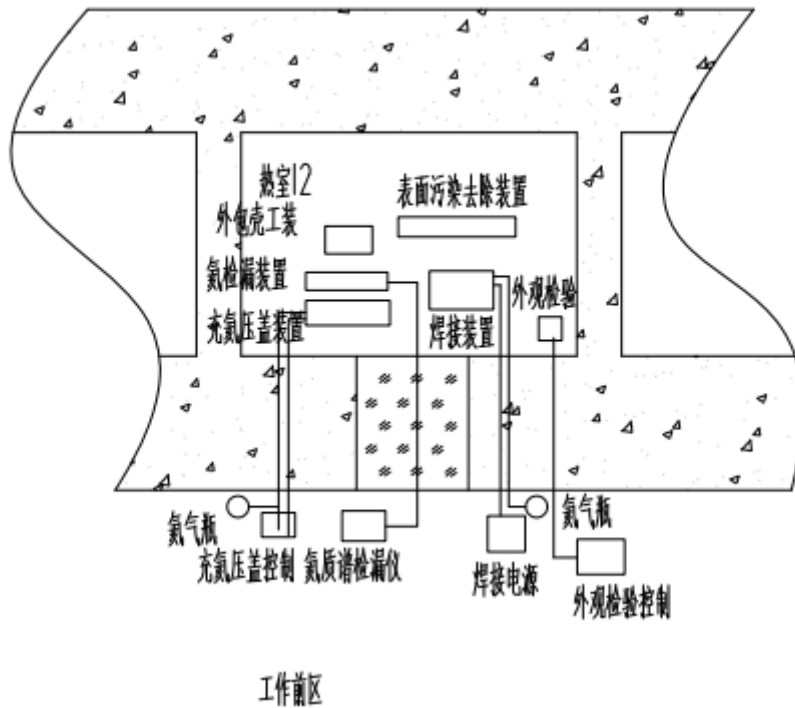


图 4-36 I2 热室工艺布置示意图

#### 4.2.5.4 检验热室（I3 热室）

I3 主要用于  $^{60}\text{Co}$  放射源活度测量与尺寸检查。该热室内尺寸： $3\text{m}\times 2\text{m}\times 3\text{m}$ ，屏蔽能力按  $3.7\times 10^{15}\text{Bq}$  设计。热室底面标高 0.8m，内衬采用不锈钢覆面，设有 1 个工位，每个工位配备 1 个窥视窗、1 副伸缩式主从机械手。检验热室与外包壳封装热室间设有斜孔道，用于样品和放射源的传递。检验热室侧墙设置有倾斜转运孔道与成品源水池联通，成品放射源从热室通过倾斜转运孔道进入水池底部。

##### （1）尺寸测量

尺寸检查采用过规方式进行。机械手将成品源放入管规；用不锈钢棒将成品源推入管规至从另一端退出；不能从另一端推出，需反方向退回成品源；不合格，解体重新封装；合格，活度测量。

##### （2）活度测量

活度测量采用相对测量法和绝对测量法进行。相对测量法是用已知的放射源获得校准曲线。然后测得未知活度的放射源与标准曲线对比获取放射源活度。绝对活度测量采用量热法，通过  $^{60}\text{Co}$  衰变热计算出  $^{60}\text{Co}$  放射源绝对活度。

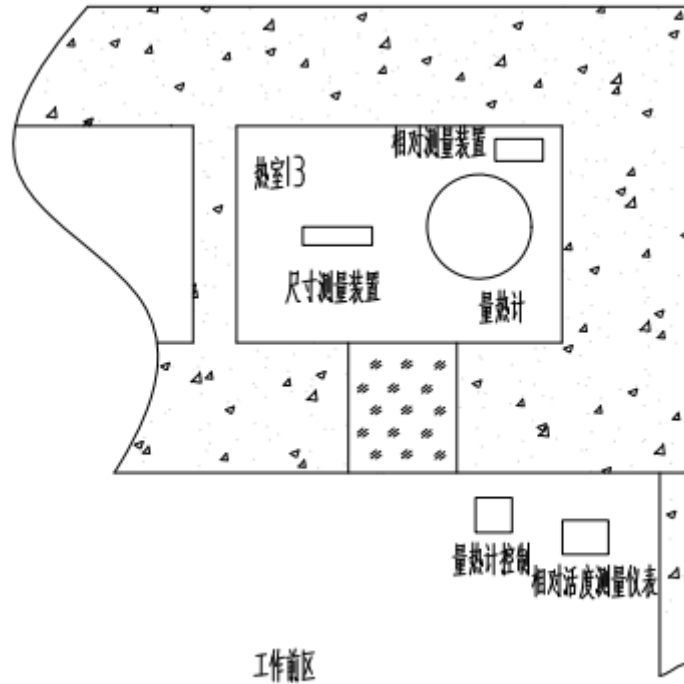


图 4-37 I3 热室工艺布置示意图

#### 4.2.5.5 成品源贮存发货

拆除成品源运输容器防火罩、紧固罩、底座、屏蔽塞螺栓等，吊容器至成品源水池池底；使用长柄工具，抓取装载成品源的吊篮，装入成品源运输容器；起吊运输容器出水池；运输容器表面污染水平和表面辐射水平监测，表面污染水平和表面辐射水平满足《放射性物品安全运输规程》（GB11806-2019）则可以发货。

#### 4.2.6 辅助系统

##### 4.2.6.1 通风系统

###### 4.2.6.1.1 材料中心通风空调系统（CVS）

材料中心通风空调系统（CVS），包括如下几个子系统：

###### 1) 燃料检验研究线 FA 热室通风空调子系统（CVS-1）

CVS-1 服务于燃料检验研究线区域的 FA 热室，包括 FA 热室地下房间、FA 热室、FA 热室工作操作区、FA 热室吊装区、卫生出入口区域。该子系统又包含 2 个送风子系

统(CVS-S1~CVS-S2)和3个排风子系统(CVS-P1~CVS-P3),详细的配置见表4-3。

FA热室为上进风、下排风,FA热室通过吊装大厅转送风;排风管线均布置于地下一层。

FA热室的转送风管线上设置高效过滤器,排风管线上设置两级净化装置,包括高效过滤器和碘吸附器,热室进、排风管上均设有气密性电动隔离阀,且排风经两级净化后由场区烟囱排放;热室操作区、卫生出入口等各C1区房间排风不经过过滤,直接排放到室外。CVS-1系统流程简图见图4-38。

#### 2) 燃料检验研究线 F1~F21 热室通风空调子系统 (CVS-2)

CVS-2 服务于燃料检验研究线 F1~F21 热室区域,包括 F1~F21 热室地下房间、F1~F21 热室、F1~F21 热室维修区、F1~F21 热室操作区、F1~F21 热室吊装大厅。该子系统又包含 3 个送风子系统 (CVS-S3~CVS-S5) 和 3 个排风子系统 (CVS-P4~CVS-P6),详细的配置见表 4-3。F1~F21 热室均为上进风、下排风,F1 热室及 F21 热室通过吊装大厅转送风,其余热室通过热室维修区转送风;排风管线均布置于地下一层。

所有热室转送风管线上设置高效过滤器,排风管线设置两级净化装置,包括高效过滤器和碘吸附器。热室进、排风管上均设有气密性电动隔离阀,且热室排风经两级净化后由场区烟囱排放;热室操作区排风不经过过滤,直接排放到室外。CVS-2 系统流程简图见图 4-39。

#### 3) 材料检验研究线 (M 线) 通风空调子系统 (CVS-3)

CVS-3 服务于材料研究线区域,包括 M1~M13 热室、M1~M13 热室维修区、M1~M13 热室操作区、M1~M13 热室吊装大厅。该子系统又包含 2 个送风子系统 (CVS-S6~CVS-S7) 和 3 个排风子系统 (CVS-P7~CVS-P9),详细的配置见表 4-3。M1-13# 热室均为上进风、下排风,进风由吊装大厅转送,所有热室的转送风管线上设置高效过滤器,排风管线设置两级高效过滤器。热室进、排风管上均设有气密性电动隔离阀,且热室排风经两级净化后由场区烟囱排放;热室操作区排风不经过过滤,直接排放到室外。系统流程简图见图 4-40。

#### 4) 微观分析线 (X 线) 通风空调子系统 (CVS-4)

CVS-4 服务于微观分析线区域。该子系统又包含 1 个送风子系统 (CVS-S8) 和 1 个排风子系统 (CVS-P10),详细的配置见表 4-3。所有排风不经过过滤直接排放到室外。CVS-4 系统流程简图见图 4-41。

#### 5) 辅助用房通风空调子系统 (CVS-5)

CVS-5 服务于辅助用房区域，系统主要采用多联机空调+新风系统、部分需要连续运行的房间采用分体式空调机。所有排风不经过过滤直接排放到室外。CVS-5 系统流程图见图 4-42。

表 4-3 材料中心辐射控制区通风空调系统配置

系统	子系统号	服务对象	设备所在房间	设备编码	风量 m <sup>3</sup> /h	主要设备
CVS-1	CVS-S1	FA 热室地下室+吊装大厅	FA 送风机房	CVS1301CL	30800	送风空调机组 1 套
	CVS-S2	FA 热室操作区+卫生出入口	FA 送风机房	CVS1302CL	13750	送风空调机组 1 套
	CVS-P1	FA 热室地下室+吊装大厅	通风及固废暂存中心	CVS1201ZV	30800	排风过滤机组 1 套、排风机 1 台
	CVS-P2	FA 热室操作区+卫生出入口	FA 热室吊装大厅	CVS1202ZV	15280	排风机 1 台
	CVS-P3	FA 热室	通风及固废暂存中心	CVS1203ZV	3850	二级Ⅲ型碘过滤机组 1 套、一级排风过滤器机组 1 套、排风机 1 台
CVS-2	CVS-S3	F 线地下室+吊装大厅	F 线送风机房	CVS1303CL	33000	送风空调机组 1 套
CVS-2	CVS-S3	F 线地下室+吊装大厅	F 线送风机房	CVS1304CL	33000	送风空调机组 1 套
	CVS-S4	F 线热室操作区	F 线送风机房	CVS1305CL	13750	送风空调机组 1 套
	CVS-S5	F 线热室维修区	F 线送风机房	CVS1306CL	12650	送风空调机组 1 套
	CVS-P4	F 线地下室+吊装大厅	通风及固废暂存中心中心	CVS1204ZV	72600	排风过滤机组 3 套、排风机 1 台
	CVS-P5	F 线热室操作区	F 线吊装大厅排风机房	CVS1205ZV	15280	排风机 1 台
	CVS-P6	F 线热室 (F1~F21)	通风及固废暂存中心	CVS1206ZV	12100	二级Ⅲ型碘过滤机组 1 套、一级排风过滤机组 1 套、排风机 1 台
CVS-3	CVS-S6	M 线热室维修区+吊装大厅	F 线送风机房	CVS1307CL	51700	送风空调机组 1 套
	CVS-S7	M 线热室操作区	F 线送风机房	CVS1308CL	12650	送风空调机组 1 套
	CVS-P7	M 线热室维修区+吊装大厅	通风及固废中心	CVS1207ZV	45100	排风过滤机组 2 套、排风机 1 台

系统	子系统号	服务对象	设备所在房间	设备编码	风量 m <sup>3</sup> /h	主要设备
	CVS-P8	M 线热室操作区	M 线吊装大厅排风机房	CVS1208ZV	13750	排风机 1 台
CVS-4	CVS-S8	X 线	辅助用房 X 线送风机房	CVS1309CL	36300	送风空调机组 1 套
	CVS-S8	X 线	辅助用房 X 线送风机房	CVS1310CL	36300	送风空调机组 1 套
	CVS-P10	X 线	X 线排风机房	CVS1210ZV	39600	排风机 1 台
	CVS-P10	X 线	X 线排风机房	CVS1211ZV	39600	排风机 1 台



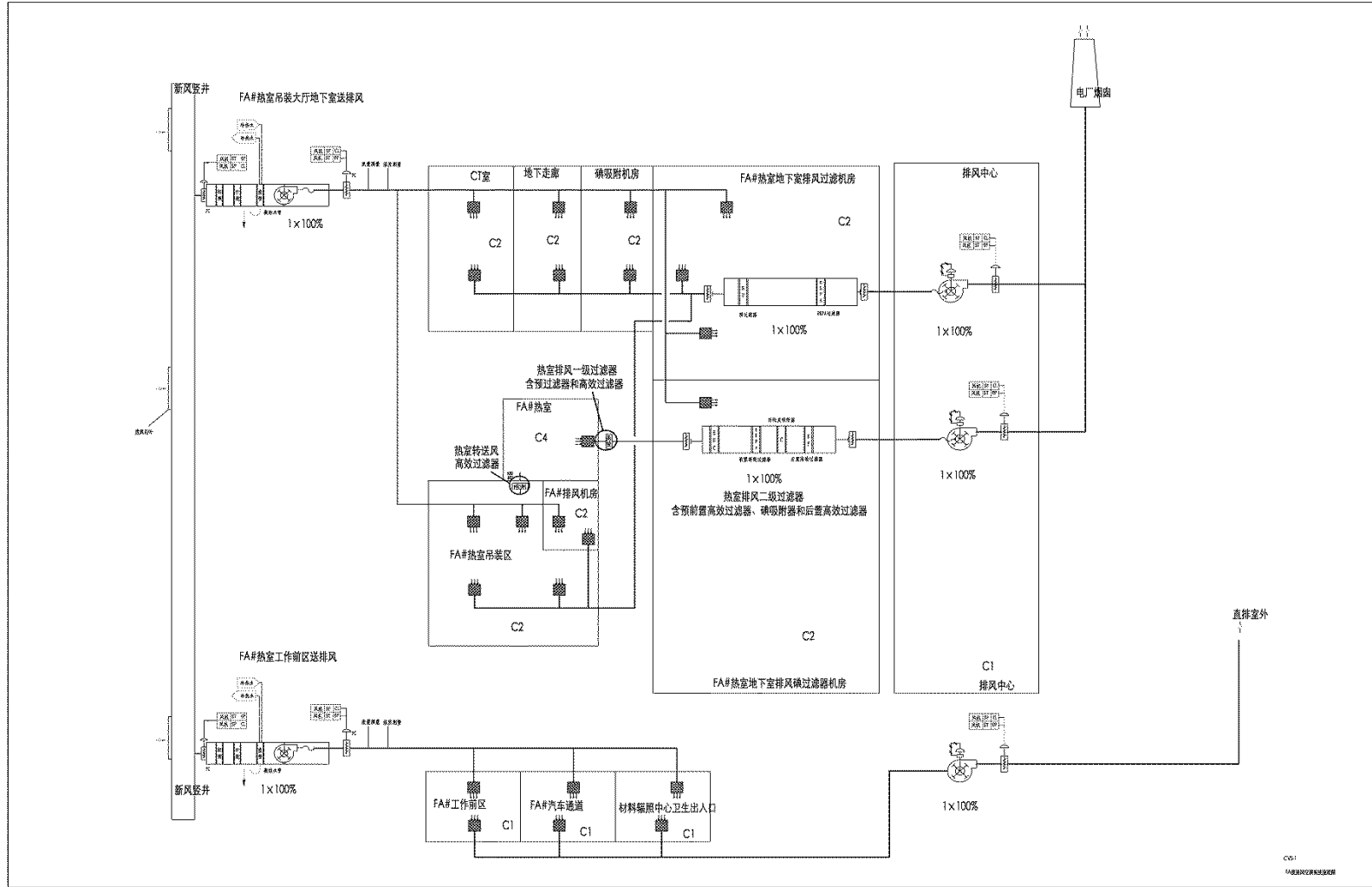


图 4-38 FA 热室通风空调子系统（CVS-1）系统流程简图

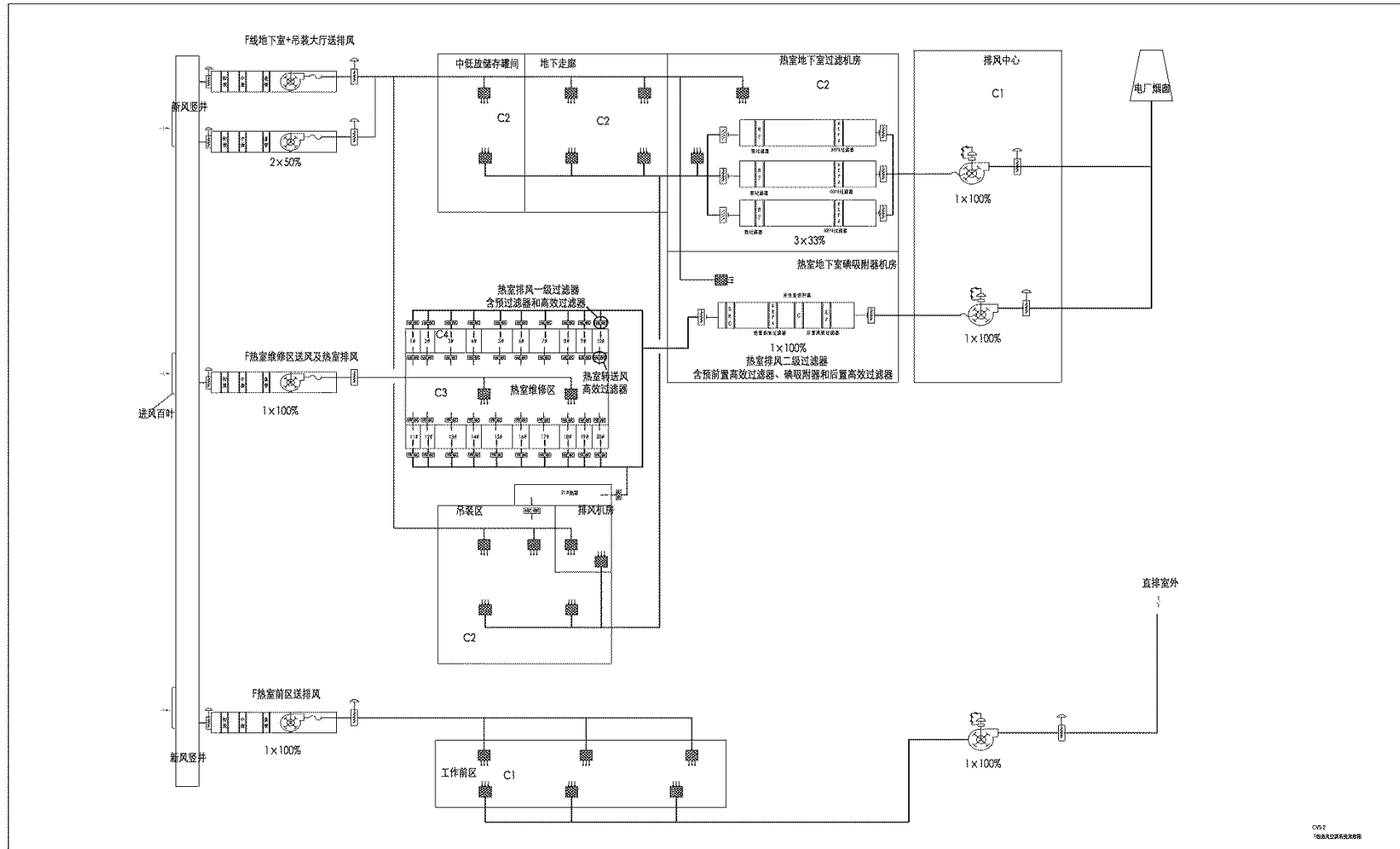


图 4-39 F 线热室通风空调子系统 (CVS-2) 系统流程简图

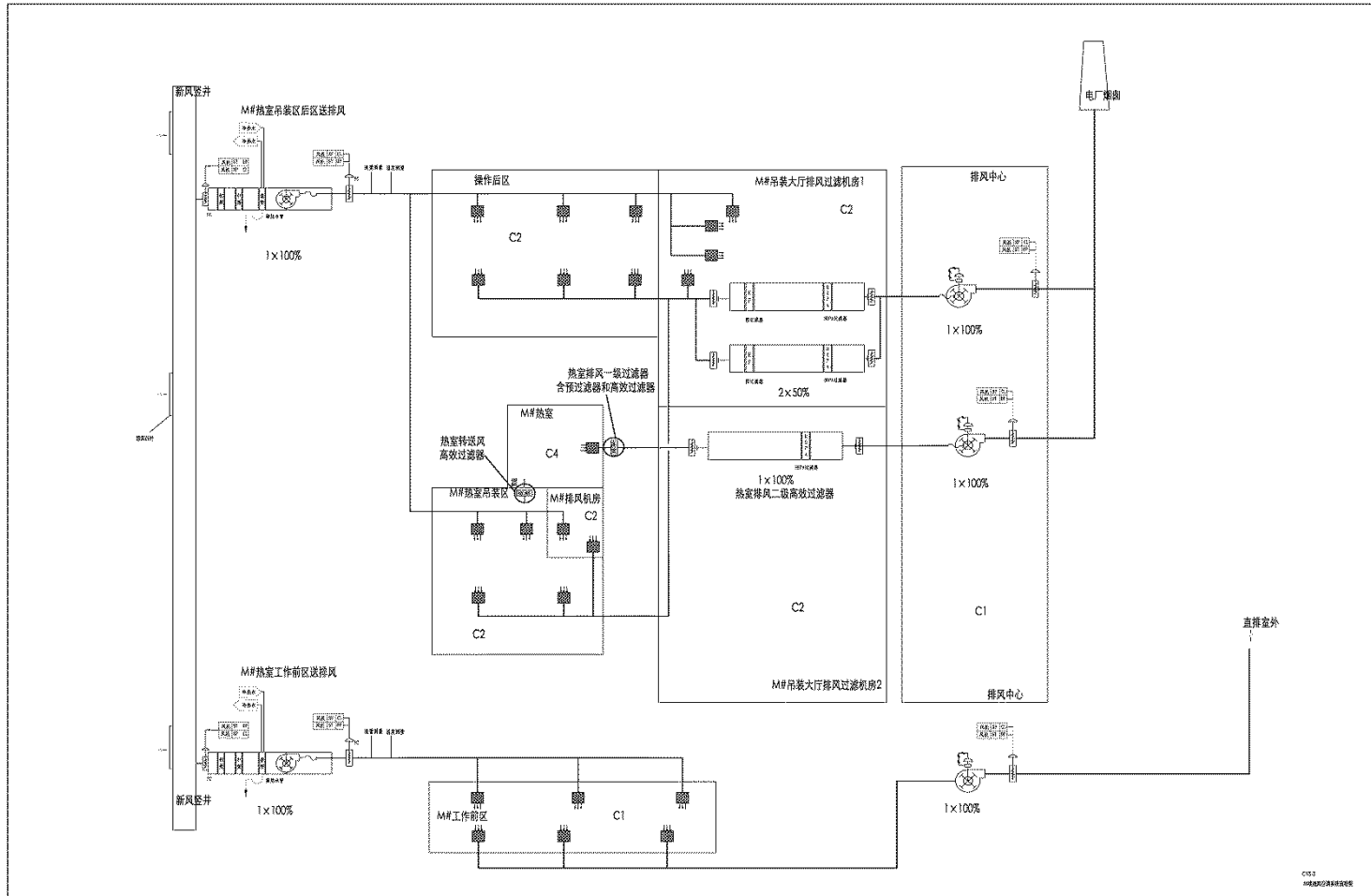
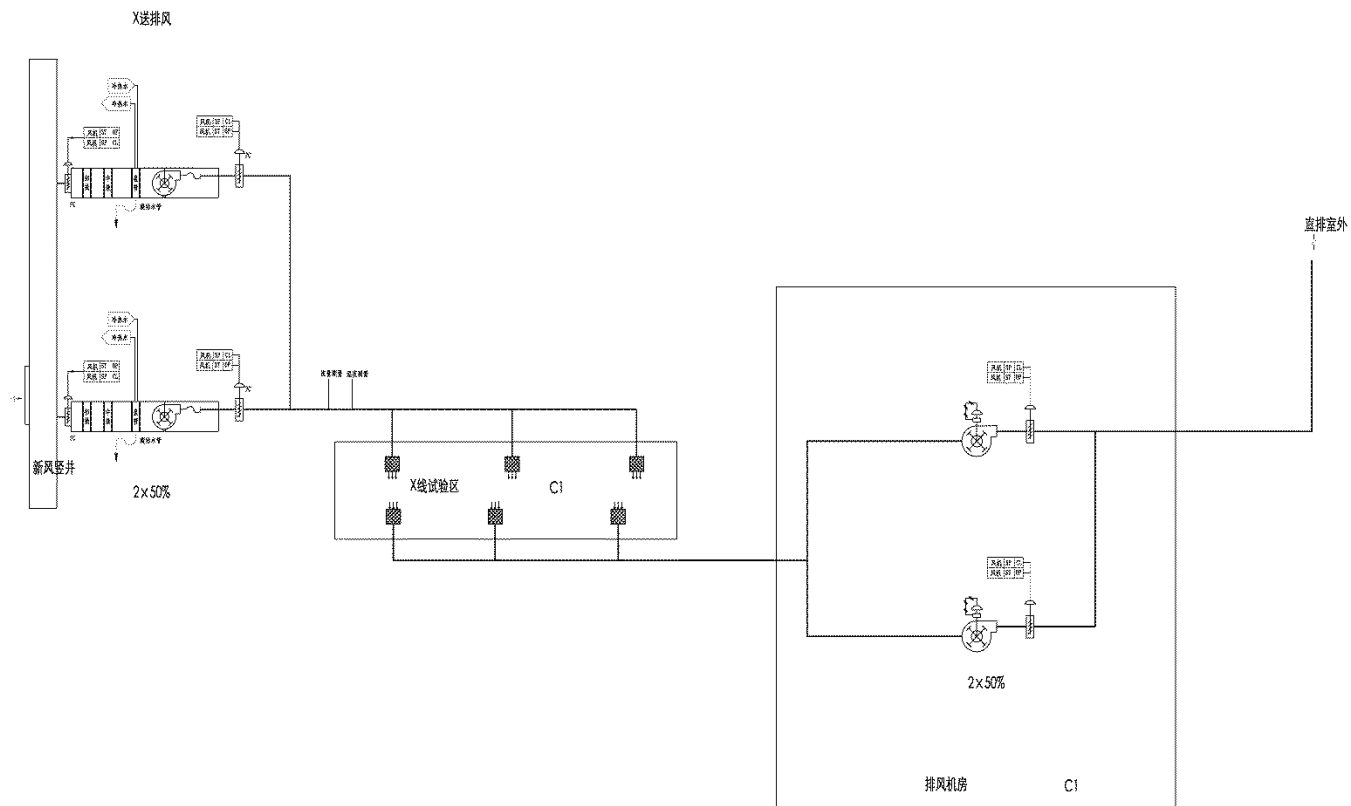


图 4-40 M 线热室通风空调子系统 (CVS-3) 系统流程简图



C/S4  
环境通风系统流程图

图 4-41 X 线通风空调子系统 (CVS-4) 系统流程简图

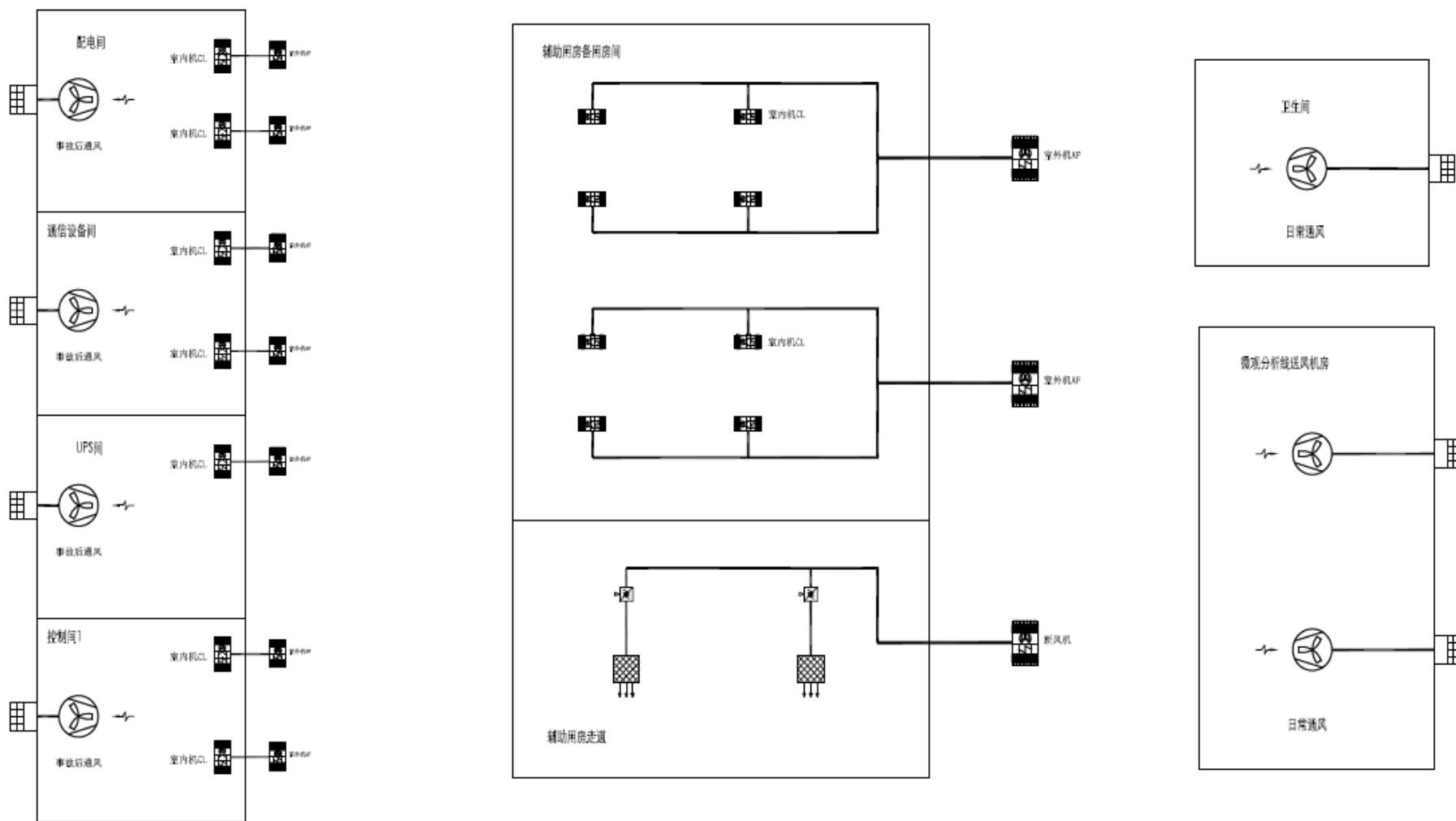


图 4-42 辅助用房通风空调子系统（CVS-5）系统流程简图

#### 4.2.6.1.2 同位素中心通风空调系统

同位素中心通风空调系统（TVS），通过通风或者空气调节手段来维持同位素中心各房间人员工作和设备运行的所需要的环境条件（包括温度、相对湿度）；为热室、热室维修区、热室吊装区等控制区提供适当的换气以维持这些区域内的气载放射性水平处于可接受的水平；保证通风系统的气流方向从“净区”到“脏区”、从低污染区到高污染区，并使不同分区之间保持合适的压差；为潜在高放射性控制区的排风提供排放前的过滤和净化处理。

同位素中心通风空调系统（TVS）流程简图见图 4-43。

##### 1) 排风

同位素中心吊装大厅、池水冷却净化间、水池间、操作大厅、排风机房设置排风子系统 P15，换气次数 2 次，排风量 20130m<sup>3</sup>/h，转排风量 850 m<sup>3</sup>/h，设 1 台排风机（2151ZV），排风不过滤直接就地排放。

同位素中心热室操作区、卫生出入口、通道走廊、辐射防护用品间设置排风子系统 P16，排风量 11400m<sup>3</sup>/h，设 1 台排风机（2161ZV），排风不过滤直接就地排放。

同位素中心热室维修区换气次数 5 次，低放废液储罐间、池水冷却净化间、过滤器机房换气次数 2 次，设置排风子系统 P17，排风量 3700m<sup>3</sup>/h，设 1 台排风过滤机组（2171FF），1 台排风机（2171ZV）。排风经预过滤器和高效粒子空气过滤器过滤后排入排风烟囱。

同位素中心热室设置排风子系统 P18，换气次数 15 次，排风量 1100m<sup>3</sup>/h，在热室出风口设排风空气净化装置，设两级高效粒子空气过滤器；设 1 台排风机（2181ZV）。排风经两级过滤后排入排风烟囱。

##### 2) 送风

同位素中心吊装大厅、水池间、操作大厅、排风机房设置送风子系统 S13，送风量 18975m<sup>3</sup>/h。在送风机房设 1 台送风空调机组（1131CL），设低效过滤段、中效过滤段、冷却/加热段、风机段。送风经过滤、冷却/加热处理后送入室内。

同位素中心热室操作区、卫生出入口、通道走廊、辐射防护用品间设置送风子系统 S14，送风量 12342m<sup>3</sup>/h。在送风机房设 1 台送风空调机组（1141CL），设低效过滤段、中效过滤段、冷却/加热段、风机段。送风经过滤、冷却/加热处理后

送入室内。

同位素中心热室维修区、池水冷却净化间、低放废液储罐间、过滤器机房设置送风子系统 S15，送风量 3146m<sup>3</sup>/h。在送风机房设 1 台送风空调机组(1151CL)，设低效过滤段、中效过滤段、冷却/加热段、风机段。送风经过滤、冷却/加热处理后送入室内。

热室送风通过吊装大厅转送，在各热室进风口设进风空气净化装置，内设高效粒子空气过滤器。

辅助用房为非控制区，按照各房间功能及温湿度要求，设置送风子系统 S16，系统形式为多联机空调系统加新风系统。各实验室、办公室分别安装多联机室内机，多联机室外机均布置于 11.500m 层屋面。每层设 1 台新风换气机（1161EX~1163EX），吊装在走道内。

表 4-4 同位素中心辐射控制区通风系统配置

系统	子系统号	服务对象	设备所在房间	设备编码	风量 m <sup>3</sup> /h	主要设备
TVS	TVS-S13	吊装大厅、池水冷却净化间、水池间、操作大厅、排风机房	同位素中心送风机房	1131CL	18975	送风空调机组 1 台
	TVS-S14	热室操作区、卫生出入口、通道走廊、辐射防护用品间		1141CL	12342	送风空调机组 1 台
	TVS-S15	热室操作区、低放废液储罐间、过滤器机房		1151CL	3146	送风空调机组 1 台
	TVS-P15	吊装大厅、池水冷却净化间、水池间、操作大厅、排风机房	同位素中心排风机房	2151ZV	20130	排风机 1 台
	TVS-P16	热室操作区、卫生出入口、通道走廊、辐射防护用品间		2161ZV	11440	排风机 1 台
	TVS-P17	热室操作区、低放废液储罐间、过滤器机房		2171ZV	3700	排风过滤机组 1 台、排风机 1 台
	TVS-P18	I 线热室 (I1、I2、I3)		2181ZV	1100	排风过滤机组 1 台、排风机 1 台

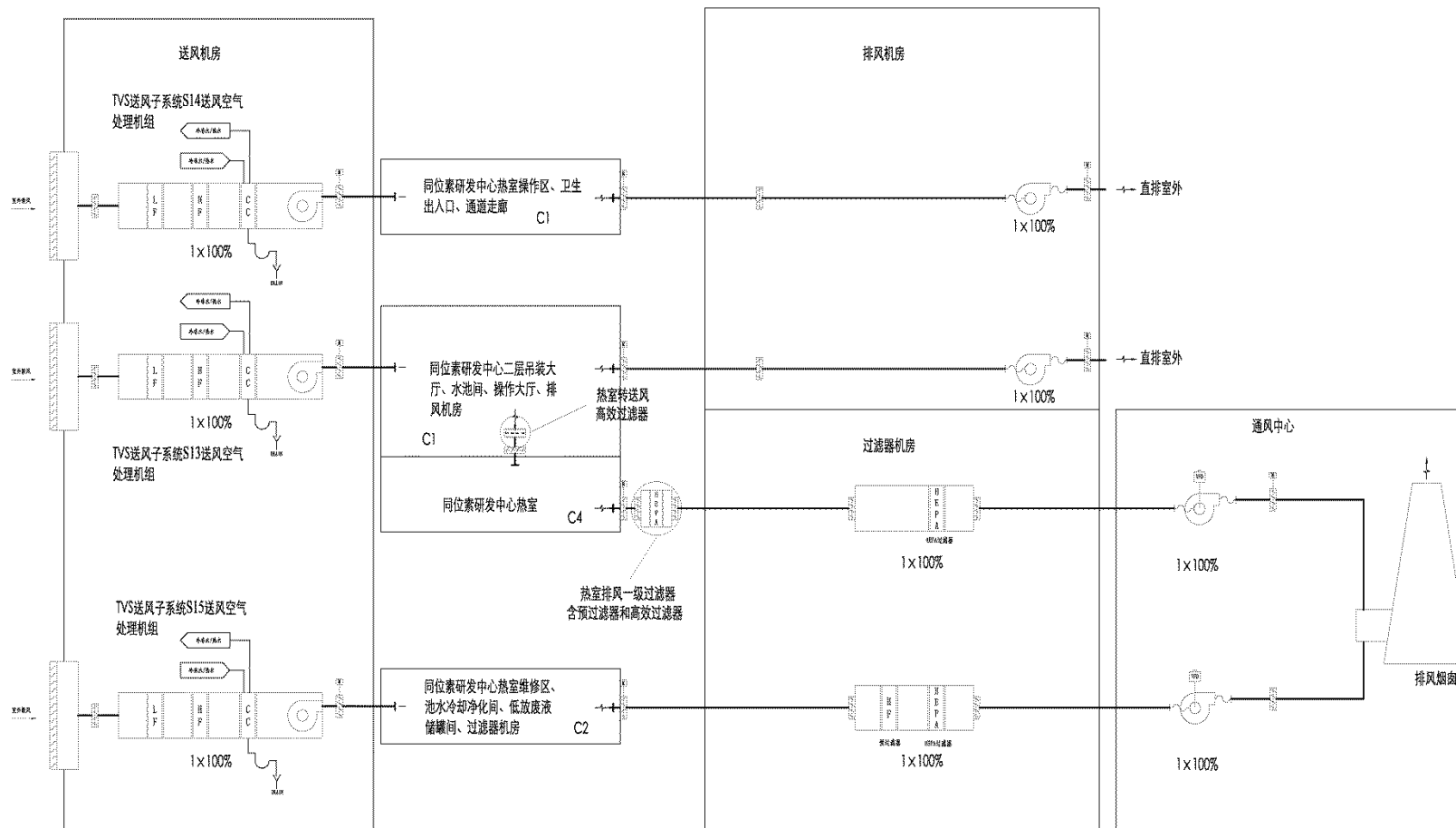


图 4-43 同位素中心通风空调系统 (TVS) 流程简图



#### 4.2.6.1.3 通风及固废暂存中心通风系统

通风及固废暂存中心通风空调系统（GVS），维持通风及固废暂存中心各房间人员工作和设备运行的所需要的环境条件（包括温度、相对湿度）；为通风及固废暂存中心各房间提供的通风以防止这些区域内的气载放射性水平超标，造成对工作人员的伤害；维持潜在放射性控制区相对于清洁区处于一定的负压。

通风及固废暂存中心暖通分为控制区和非控制区，气流流向使建筑物内气流由低污染区向高污染区方向流动。

##### 1) 控制区通风

通风及固废暂存中心控制区送风由送风系统 GVS-S1/GVS-S2 实现。GVS-S1 列风机大厅送风子系统包括 1 台送风空气处理机组，室外新风经送风管送入控制区内各区域。GVS-S2 列固废暂存区域送风子系统包括 1 台送风空气处理机组，室外新风经送风管送入控制区内各区域。送风空气处理机组经过低效过滤段和中效过滤段过滤后送风。

通风及固废暂存中心控制区排风由排风系统 GVS-P1/GVS-P2 实现。固废暂存区域排风由排风系统 GVS-P1 实现，空气经过 1 台排风过滤机组（排风预过滤器、高效粒子空气过滤器）过滤净化后经场区烟囱排至室外。风机大厅排风由排风系统 GVS-P2 实现，空气经过 1 台排风机（不经过过滤）排入场区烟囱，排至室外。

通风及固废暂存中心通风系统信息见表 4-5。

##### 2) 非控制区通风

非控制区通风包括：电气间、送风机房、电机大厅、卫生出入口的通风，主要通过壁式轴流风机将空气直接排至室外。

通风及固废暂存区域通风空调系统流程简图见图 4-44。

表 4-5 通风及固废暂存中心控制区通风基本信息

系统	子系统号	服务对象	设备所在房间	功能编号	风量 m <sup>3</sup> /h	主要设备
GVS	GVS-S1	辐射控制区	02 子项送风机房	1101CL	16165	送风空气 处理机组 1 套
	GVS-S2	辐射控制区	02 子项送风机房	1102CL	36336	送风空气 处理机组 1 套
	GVS-P1	固废暂存区域	风机大厅	1103FF、 1103ZV	21333	排风过滤机组 1 套、排风机 1 台
	CVS-P2	风机大厅	风机大厅	1104ZV	39531	风机 1 台

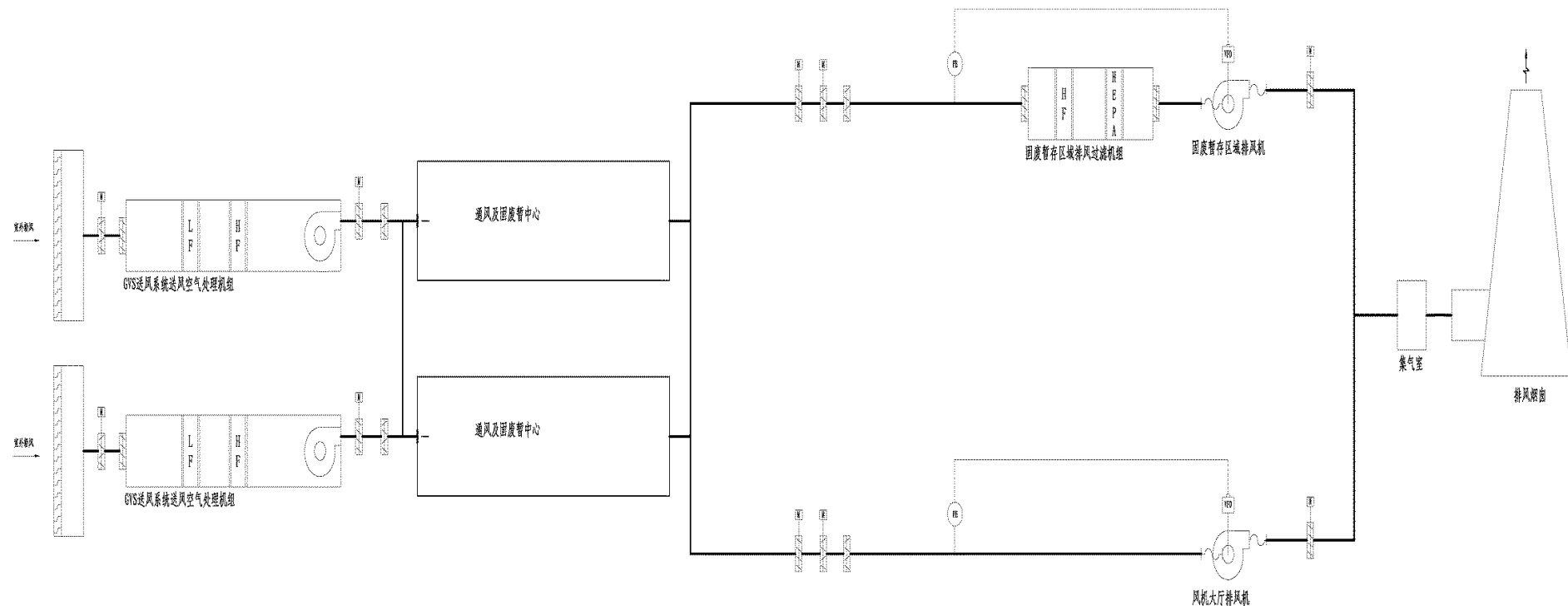


图 4-44 通风及固废暂存区域通风空调系统流程简图

#### 4.2.6.2 供电系统

本项目建设开闭所，由高压室、二次室、控制室及工具室组，为整个项目提供10kV中压电源。

#### 4.2.6.3 压缩空气系统

##### (1) 材料中心压缩空气系统（QTS1）

QTS1 布置于材料中心厂房一层，包括 2 组气瓶，一组用于正常供气，一组备用，每组含 5 瓶 40L 压缩空气气瓶。气瓶内的压缩空气通过全自动切换减压装置降压后，分两路再二次减压，经气体输送管网送往各用气点。

##### (2) 同位素中心压缩空气系统（QTS2）

QTS2 布置于同位素中心厂房一层，包括 2 组气瓶，一组用于正常供气，一组备用，每组含 5 瓶 40L 压缩空气气瓶。气瓶内的压缩空气通过自动切换减压装置降压后，再二次减压，经气体输送管网送往各用气点。

#### 4.2.6.4 池水循环冷却净化系统

池水循环冷却净化系统（CDS）的主要功能是带走钴靶件接收水池、成品源水池和废旧源水池中的热负荷。通过循环泵输送池水流经换热器，经换热冷却后返回到水池内，换热器冷侧冷却水通过冷却泵输送至机械通风冷却塔，最终将热量传递至环境。

CDS 系统还具备净化靶件接收水池、成品贮存水池和废旧源水池池水的功能。CDS 系统的功能如下：

冷却——正常运行期间，带走钴靶件接收水池、成品源水池和废旧源水池内的热量以保持池水温度在可接受的范围内；

净化——正常运行期间，为钴靶件接收水池、成品源水池和废旧源水池提供净化；

补水——正常运行期间，为钴靶件接收水池、成品源水池和废旧源水池提供补水接口，以满足水池正常水装量及辐射屏蔽要求。

CDS 系统分为冷却子系统、净化子系统和补水子系统。

##### a) 冷却子系统

冷却子系统分为一、二两个回路。钴靶件接收水池、成品源水池和废旧源水池分

别设置一套一回路，通过换热器将池水热量传递给共用的二回路。二回路通过机械通风冷却塔将热量释放到环境中。一回路均设置 2 台互为备用的循环泵和 2 台互为备用的板式换热器。二回路设置 2 台互为备用的机械通风冷却塔，3 台冷却水泵 2 用 1 备，1 台循环水箱和 1 台综合水处理装置。

正常运行时，CDS 排出钴靶件接收水池、成品源水池和废旧源水池的热量以保持水池表面温度低于 40°C。

#### b) 净化子系统

钴靶件接收水池、成品源水池和废旧源水池分别设置一套净化回路，包括 1 台除盐床和 1 台机械过滤器。净化回路与冷却子回路一回路并联，由循环泵提供净化驱动力。如果池水的电导率、总氯离子含量或放射性超标，通过除盐床对池水进行净化，保证水质达到以下标准：

- 电导率：≤10μS/cm
- 总氯离子：≤1mg/L
- pH 值：5.5~8.5

CDS 系统能将钴靶件接收水池的剂量水平维持在 500Bq/L 以内；成品源水池和废旧源水池的剂量水平维持在 10Bq/L 以内。CDS 系统净化流量能够在 24 小时内将靶件接收水池、成品贮存水池和废旧源水池池水循环 1 次。

#### c) 补水子系统

钴靶件接收水池、成品源水池和废旧源水池共用一套补水子系统，包括日常补水管线和应急补水管线。除盐水系统作为日常补水水源。自来水和消防水作为应急补水水源。三个水池的补水管线上各设有一台电动阀，通过水池液位信号自动控制阀门开关，实现对水池的自动补水。

为满足辐射屏蔽要求，源上方水层厚度最低为 4.25m，因此补水要保证-0.85m 的最低液位。日常补水量能够满足三个水池的补水要求。

CDS 系统主要设备参数见表 4-7。

表 4-6 CDS 系统主要设计参数

单个水池热负荷（最大）	0.16MW
水池容积	98m <sup>3</sup> （靶件接收水池）
	90m <sup>3</sup> （成品贮存水池）
	53m <sup>3</sup> （废旧源水池）
水池正常表面温度	小于 40°C

表 4-7 CDS 系统主要设备及参数

<b>循环泵</b>		
数量	6	
设计压力 (MPa 表压)	1.0	
设计温度 (°C)	110	
额定扬程 (m)	40	
额定流量 (m <sup>3</sup> /h)	25	
材料	不锈钢	
<b>换热器</b>		
数量	6	
类型	板式	
设计热负荷 (MW)	0.16	
设计热容 (MW/°C)	0.06	
	冷侧	热侧
设计压力 (MPa 表压)	1.2	1.0
设计温度 (°C)	80	110
额定流量 (m <sup>3</sup> /h)	31	25
入口温度 (°C), typ.	31	40
出口温度 (°C), typ.	36	34
工作介质	冷却水	池水
材料	不锈钢	不锈钢
<b>树脂床</b>		
数量	3	
设计压力 (MPa 表压)	1.0	
设计温度 (°C)	100	
额定流量 (m <sup>3</sup> /h)	4	
额定树脂体积 (m <sup>3</sup> )	0.1	
材料	不锈钢	
<b>过滤器</b>		
数量	3	
设计压力 (MPa 表压)	1.0	
设计温度 (°C)	100	
额定流量 (m <sup>3</sup> /h)	5	
过滤要求	>5μm 颗粒物 98%	
容器材料	不锈钢	
<b>机械通风冷却塔</b>		
数量	2	
设计压力 (MPa 表压)	1.2	
设计温度 (°C)	80	
额定流量 (m <sup>3</sup> /h)	60	
材料	铝合金等	
<b>综合水处理装置</b>		
数量	1	

设计压力 (MPa 表压)	1.2
设计温度 (°C)	80
额定流量 (m <sup>3</sup> /h)	5
性能要求	防垢除垢效率: 大于 96%
容器材料	不锈钢
<b>冷却泵</b>	
数量	3
设计压力 (MPa 表压)	1.2
设计温度 (°C)	80
额定扬程 (m)	60
额定流量 (m <sup>3</sup> /h)	31
材料	不锈钢

#### 4.2.6.5 同位素中心安全保护系统

同位素中心安全保卫措施主要有：a) 在同位素中心的人员主出入口、次出入口及3#楼梯口设置电控门，人员通过以上区域刷卡进出同位素中心相关厂房；在钴源生产线的主出入口设置电控门，人员刷卡进出。另在同位素中心的所有边界门设置门磁，监控所有的门扇状态；b) 同位素中心厂房周界设置 3m 高红外对射探测器；c) 在同位素中心电控门、安装门磁的边界门、入侵报警防区内均有摄像机进行监控；d) 在电控门均安装有线对讲终端，可随时与保卫控制中心联系。

同位素中心放射源生产热室以及放射源水池（包括靶件接收水池、废旧源回收水池和成品源水池）周围等区域均设置有固定式  $\gamma$  剂量率监测仪表，能够实时监测和显示关注区域的  $\gamma$  剂量率水平，保证在该区域的工作人员免受不必要的外照射。同时提供的辐射剂量率信息可供分析、查找和判断可能发生的故障或操作事故，以便及时处理，保证人员的安全操作。具体监测区域包括：热室内部、热室操作前区、热室操作后区、放射源水池液面上方、放射源水池周围、净化间树脂床周围、通风过滤器机房等关注区域。热室内固定式剂量率仪表与进入该热室的铸铁屏蔽门联锁，正常情况下屏蔽门处于闭锁状态，人员从外部无法开启进入，避免人员误入。当热室内的剂量率水平低于设定阈值时方可解除屏蔽门闭锁信号，作为具备进入热室内部的条件之一。

## 4.3 放射性废物系统和源项

### 4.3.1 操作源项

#### 4.3.1.1 材料中心源项

本项目材料中心拟接收的最大源项为压水堆燃料棒，按冷却 0.5 年、最大燃耗 62GWd/tU、U-235 初始富集度最高 4.95% 乏燃料棒考虑。其主要核素及活度见表 4-8。

表 4-8 冷却 0.5 年后燃料棒主要核素及活度

铀系及其子核 (Bq)		裂变产物 (Bq)		活化产物 (Bq)	
Tl-208	3.28E+05	Ag-108	4.02E+02	Ag-106	3.11E-02
Pb-212	9.13E+05	Ag-108m	4.52E+03	Ag-108	1.28E+05
Bi-212	9.13E+05	Ag-109m	2.97E+05	Ag-108m	1.44E+06
Po-212	5.85E+05	Ag-110	6.72E+09	Ag-109m	1.03E+08
Po-216	9.13E+05	Ag-110m	5.06E+11	Ag-110	9.09E+05
Rn-220	9.13E+05	Ag-111	3.55E+05	Ag-110m	6.84E+07
Ra-224	9.13E+05	Ba-136m	1.01E+08	Ag-111	1.00E+00
Th-228	9.10E+05	Ba-137m	1.34E+13	Ar-37	1.56E+06
Th-230	2.82E+03	Ba-140	7.86E+09	Ar-39	7.66E+03
Th-231	8.67E+05	C-14	1.63E+04	Be-10	2.89E+02
Th-234	2.28E+07	Cd-109	2.97E+05	Bi-208	2.81E+00
Pa-231	2.02E+03	Cd-113m	9.27E+09	Bi-210	5.32E-05
Pa-232	0.00E+00	Cd-115m	1.21E+10	Bi-210m	2.13E+00
Pa-233	6.63E+07	Ce-141	3.04E+12	C-14	6.50E+07
Pa-234m	2.28E+07	Ce-144	7.74E+13	Ca-41	2.04E+04
Pa-234	2.96E+04	Cs-134	2.95E+13	Ca-45	2.14E+07
U-232	3.23E+06	Cs-135	5.48E+07	Cd-109	1.03E+08
U-233	1.65E+03	Cs-136	6.12E+08	Cd-115m	1.83E+08
U-234	8.47E+07	Cs-137	1.42E+13	Cl-36	1.25E+06
U-235	8.67E+05	Eu-152	5.83E+08	Co-58	3.06E+08
U-236	3.13E+07	Eu-154	1.75E+12	Co-60	1.70E+10
U-237	2.88E+08	Eu-155	1.15E+12	Cr-51	2.57E+07
U-238	2.28E+07	Eu-156	1.06E+10	Er-169	2.70E-02
U-239	0.00E+00	Gd-153	1.57E+09	Eu-152	3.23E+01
U-240	1.99E+02	H-3	7.32E+10	Eu-154	4.89E+06
Np-235	1.12E+06	Ho-166m	9.39E+05	Eu-155	3.04E+06
Np-236m	0.00E+00	I-129	4.23E+06	Eu-156	2.67E+04
Np-236	1.28E+03	I-131	1.43E+07	Fe-55	9.55E+08
Np-237	6.64E+07	In-114	6.02E+07	Fe-59	4.69E+06
Np-238	8.24E+06	In-114m	6.29E+07	Gd-153	8.82E+07

锕系及其子核 (Bq)		裂变产物 (Bq)		活化产物 (Bq)	
Np-239	4.06E+09	In-115m	8.50E+05	Ge-71	3.08E+01
Np-240m	1.99E+02	Kr-85	1.21E+12	H-3	2.09E+10
Np-240	0.00E+00	La-140	9.04E+09	Ho-166m	2.41E+03
Pu-236	1.53E+08	Nb-93m	2.78E+07	In-113m	3.43E+07
Pu-237	6.14E+07	Nb-94	1.91E+04	In-114	1.11E+08
Pu-238	7.84E+11	Nb-95	3.96E+13	In-114m	1.16E+08
Pu-239	3.52E+10	Nb-95m	1.49E+11	Ir-192	2.11E+05
Pu-240	7.13E+10	Nd-147	6.48E+08	Ir-194	4.54E-02
Pu-241	1.17E+13	Pd-107	1.61E+07	K-42	6.91E-05
Pu-242	2.33E+08	Pm-146	4.00E+08	Mn-54	1.02E+08
Pu-243	2.49E+02	Pm-147	8.69E+12	Mo-93	8.25E+04
Pu-245	0.00E+00	Pm-148	6.28E+09	Nb-92	6.05E+01
Am-240	0.00E+00	Pm-148m	1.12E+11	Nb-94	1.03E+02
Am-241	2.19E+10	Pr-143	1.27E+10	Nb-95	8.19E+04
Am-242m	1.65E+09	Pr-144	7.74E+13	Nb-95m	2.57E+02
Am-242	1.64E+09	Pr-144m	9.28E+11	Ni-59	1.03E+06
Am-243	4.06E+09	Rb-86	4.87E+08	Ni-63	1.82E+08
Am-244m	0.00E+00	Rh-102	1.82E+08	Os-191	1.02E+03
Am-244	0.00E+00	Rh-103m	5.74E+12	P-32	1.43E+06
Am-245	6.44E+01	Rh-106	4.84E+13	P-33	3.10E-01
Cm-241	9.48E+04	Ru-103	6.37E+12	Po-210	1.84E+06
Cm-242	2.41E+12	Ru-106	4.84E+13	Pt-193	1.44E+01
Cm-243	4.11E+09	Sb-124	3.71E+10	Re-188	1.24E+07
Cm-244	1.02E+12	Sb-125	1.64E+12	Rh-106	1.65E-05
Cm-245	1.29E+08	Sb-126	2.14E+07	Ru-103	2.96E+04
Cm-246	4.65E+07	Sb-126m	1.08E+08	S-35	6.52E+08
Cm-248	1.19E+03	Se-79	5.63E+07	Sb-124	5.67E+05
Cm-249	7.68E-02	Sm-151	4.76E+10	Sb-125	2.02E+08
Bk-249	4.44E+06	Sn-117m	2.84E+06	Sb-126	4.37E+02
Bk-250	2.01E+02	Sn-119m	1.88E+10	Sc-46	1.36E+06
Cf-249	7.46E+03	Sn-121m	2.89E+07	Si-32	3.12E+00
Cf-250	1.02E+05	Sn-123	1.49E+11	Sn-113	3.43E+07
Cf-252	2.14E+05	Sn-125	2.98E+06	Sn-117m	4.56E+05
		Sn-126	1.08E+08	Sn-119m	4.62E+08
		Sr-89	5.79E+12	Sn-121m	8.04E+04
		Sr-90	9.72E+12	Sn-123	1.51E+07
		Tb-160	4.05E+10	Sn-125	6.12E+02
		Tb-161	2.37E+03	Ta-182	1.29E+06
		Tc-99	1.67E+09	Ta-183	2.73E-04
		Te-123m	2.11E+09	Tb-160	5.19E+08
		Te-125m	3.93E+11	Tb-161	2.07E+01
		Te-127	4.86E+11	Tc-99	1.88E+04
		Te-127m	4.97E+11	Te-123m	4.52E+05



锕系及其子核 (Bq)		裂变产物 (Bq)		活化产物 (Bq)	
		Te-129	7.27E+10	Te-125m	4.84E+07
		Te-129m	1.12E+11	Te-127	3.48E+03
		Tm-170	6.20E+06	Te-127m	3.55E+03
		Tm-171	3.66E+05	Tl-206	2.12E+00
		Xe-127	6.21E+05	Tm-170	5.76E+02
		Xe-131m	7.96E+07	Tm-171	1.72E+01
		Xe-133	7.39E+03	W-181	1.29E+07
		Y-90	9.72E+12	W-185	2.14E+08
		Y-91	1.10E+13	W-188	1.23E+07
		Zr-93	2.46E+08	Y-90	1.43E-02
		Zr-95	2.00E+13	Zn-65	8.09E+09
				Zr-95	3.46E+04

#### 4.3.1.2 同位素中心源项

本项目同位素中心拟接收的源项为反应堆产钴靶件，其主要核素及活度见表 4-9。

表 4-9 钴靶件源项

		卸料时刻	0.5 年	1 年	2 年
<sup>60</sup> Co	Bq	2.09E+16	1.96E+16	1.83E+16	1.61E+16
活化产物	Bq	1.57E+15	9.36E+13	1.42E+13	5.00E+11
总和	Bq	2.25E+16	1.97E+16	1.84E+16	1.61E+16

### 4.3.2 放射性废气处理系统及排放源项

#### 4.3.2.1 放射性废气的产生

本项目放射性废气主要来自 F 线无损检测热室 (F1)、切割热室 (F2)、精密切割热室 (F8)、金相样品磨抛热室 (F9)、残余裂变气体测量热室 (F13) 和 I 线内包壳封装热室 (I1)。F1 热室进行乏燃料棒的无损检测，其部分功能是进行乏燃料刺孔及裂变气体测量分析。F2 热室进行乏燃料棒的切割等。F8 热室进行金相样品的精密切割。F9 热室进行金相样品的二次镶嵌、磨光和抛光等制样工艺，制样过程为非密封操作，会有少量气溶胶产生。I1 热室进行钴靶件的解体和内包壳封装焊接，其中要对钴靶件的包壳进行切割。

##### (1) F1 热室产生量

对于压水堆燃料单棒，根据相关文献 (DOE/ET/34212-50 BAW-1874, The Hot Cell Examination of Oconee 1 Fuel Rods After Five Cycles of Irradiation, 1986) 报道，约有 3.8%

裂变气体从燃料芯块内释放到乏燃料棒的空腔内，这里保守假定有 5%的裂变气体从燃料芯块释放到乏燃料棒空腔内，则卸料 0.5 年后单根乏燃料棒空腔内裂变气体的量见表 4-10。

国外热室对经过 5 个循环的乏燃料棒的裂变气体释放研究中<sup>1</sup>，检测到的裂变气体释放份额（测量值/理论值）范围为 0.7%~3.8%，平均 1.6%。废气释放量中，保守假设单个乏燃料棒芯块内 5%的裂变气体在刺孔操作中全部释放出来。由于 <sup>3</sup>H、<sup>14</sup>C 核素一部分也以气态形式存在，假设其也以同样的份额释放。同时，从芯块逃逸出的碘、铯等裂变产物会被燃料棒内表面吸附，只有一部分存在于气隙，保守假设在裂变气体测量中这些裂变产物随惰性气体被抽出。相关文献（《放射性裂变产物由燃料芯块释放到一回路的影响因素研究》，核动力工程，景福庭等）计算表明 <sup>131</sup>I 在反应堆满功率运行期间从芯块释放到气隙的份额（包括扩散、击出及反冲作用）为  $1.455 \times 10^{-4}$ ，其它碘同位素均小于此数值。本分析中保守假设气隙中 I、Cs 裂变产物释放份额为  $5.0 \times 10^{-3}$ ，其它裂变产物释放份额  $2.0 \times 10^{-4}$ 。

若裂变气体捕集管路密封性能丧失，裂变气体将全部释放至热室内，进而经通风系统排向环境。计算中保守考虑燃料棒空腔内的裂变产物全部被抽出且因气体捕集管路密封性能丧失而全部释放至热室内。

根据如上假设，每年操作 10 根棒，则 F1 热室废气年产生量见表 4-10。

表 4-10 F1 热室实验中裂变气体排放量

核素	单根乏燃料棒源项（冷却 0.5 年），Bq	气隙中释放份额	单次实验产生量，Bq	年产生量，Bq
Kr-85	1.21E+12	5%	6.05E+10	6.05E+11
Xe-127	6.21E+05	5%	3.11E+04	3.11E+05
Xe-131m	7.96E+07	5%	3.98E+06	3.98E+07
Xe-133	7.39E+03	5%	3.69E+02	3.69E+03
H-3	9.41E+10	5%	4.71E+09	4.71E+10
C-14	6.50E+07	5%	3.25E+06	3.25E+07
I-129	4.23E+06	0.50%	2.12E+04	2.12E+05
I-131	1.43E+07	0.50%	7.15E+04	7.15E+05
Cs-134	2.95E+13	0.50%	1.48E+11	1.48E+12
Cs-136	6.12E+08	0.50%	3.06E+06	3.06E+07
Cs-137	1.42E+13	0.50%	7.10E+10	7.10E+11
Rb-86	4.87E+08	0.50%	2.44E+06	2.44E+07
Te-123m	2.11E+09	0.02%	4.22E+05	4.22E+06
Te-125m	3.93E+11	0.02%	7.86E+07	7.86E+08

核素	单根乏燃料棒源项（冷却 0.5 年）， Bq	气隙中释放份额	单次实验产生量， Bq	年产生量， Bq
Te-127	4.86E+11	0.02%	9.72E+07	9.72E+08
Te-127m	4.97E+11	0.02%	9.94E+07	9.94E+08
Te-129	7.27E+10	0.02%	1.45E+07	1.45E+08
Te-129m	1.12E+11	0.02%	2.24E+07	2.24E+08
Sr-89	5.79E+12	0.02%	1.16E+09	1.16E+10
Sr-90	9.72E+12	0.02%	1.94E+09	1.94E+10
Ba-137m	1.34E+13	0.02%	2.68E+09	2.68E+10
Ba-140	7.86E+09	0.02%	1.57E+06	1.57E+07
Ru-103	6.37E+12	0.02%	1.27E+09	1.27E+10
Ru-106	4.84E+13	0.02%	9.68E+09	9.68E+10
Ce-141	3.04E+12	0.02%	6.08E+08	6.08E+09
Ce-144	7.74E+13	0.02%	1.55E+10	1.55E+11
Y-90	9.72E+12	0.02%	1.94E+09	1.94E+10
Y-91	1.10E+13	0.02%	2.20E+09	2.20E+10
Nb-95	3.96E+13	0.02%	7.92E+09	7.92E+10
Zr-95	2.00E+13	0.02%	4.00E+09	4.00E+10
La-140	9.04E+09	0.02%	1.81E+06	1.81E+07
Nd-147	6.48E+08	0.02%	1.30E+05	1.30E+06
Pr-143	1.27E+10	0.02%	2.54E+06	2.54E+07

## (2) F2 热室产生量

F2 热室进行乏燃料棒的切割等。采用金刚砂轮切割机对燃料棒或样品进行低速切割，切割过程中向切口处滴淋去离子水以减少粉尘产生。砂轮片厚约 2mm，即每次切割，将对燃料棒或样品造成 2mm 损耗。

在切割燃料棒时，损耗的 2mm 长燃料棒会有一定份额进入空气中形成放射性气溶胶，其释放份额保守取值见表 4-11。

表 4-11 燃料棒切割工艺放射性核素释放份额

核素	释放份额
H-3/C-14	100%
惰性气体	100%
卤素	100%
固体	10%

燃料棒检验过程中，由切割产生的放射性气溶胶中核素的量计算如下：

$$A_i = A_{i0} \cdot \frac{l}{L} \cdot k$$

其中：

$A_i$ 为放射性气溶胶中核素的活度，Bq；

$A_{i0}$ 为燃料芯块中核素的活度，Bq；

$l$ 为切割损耗段的长度，mm；

$L$ 为单根燃料棒中燃料芯块总长度，mm；压水堆燃料棒芯块总长度取 3657mm；

$k$ 为释放份额。

热室检验中乏燃料棒切割的年操作量为 4 根压水堆乏燃料棒。每根压水堆乏燃料棒切割 12 刀，则压水堆乏燃料棒年切割次数为 48 刀。则 F2 热室放射性气溶胶中核素的年产生量见表 4-12。

F2 热室产生的放射性气溶胶经高效过滤器、除碘过滤器过滤后，从 35m 高的烟囱排放到环境中。

表 4-12 F2 热室放射性气溶胶中核素的年产生量

核素	单根乏燃料棒源项（冷却 0.5 年）	单次切割的释放量，Bq			年产生量 Bq
		2mm 长所含核素的活度，Bq	释放份额	释放到气溶胶中的活度，Bq	
I-129	4.23E+06	2.32E+03	100%	2.32E+03	1.11E+05
I-131	1.43E+07	7.79E+03	100%	7.79E+03	3.74E+05
Kr-85	1.21E+12	6.63E+08	100%	6.63E+08	3.18E+10
Xe-127	6.21E+05	3.40E+02	100%	3.40E+02	1.63E+04
Xe-131m	7.96E+07	4.35E+04	100%	4.35E+04	2.09E+06
Xe-133	7.39E+03	4.04E+00	100%	4.04E+00	1.94E+02
Cs-134	2.95E+13	1.61E+10	10%	1.61E+09	7.75E+10
Cs-136	6.12E+08	3.35E+05	10%	3.35E+04	1.61E+06
Cs-137	1.42E+13	7.74E+09	10%	7.74E+08	3.72E+10
Rb-86	4.87E+08	2.66E+05	10%	2.66E+04	1.28E+06
Te-123m	2.11E+09	1.15E+06	10%	1.15E+05	5.53E+06
Te-125m	3.93E+11	2.15E+08	10%	2.15E+07	1.03E+09
Te-127	4.86E+11	2.66E+08	10%	2.66E+07	1.28E+09
Te-127m	4.97E+11	2.72E+08	10%	2.72E+07	1.30E+09
Te-129	7.27E+10	3.98E+07	10%	3.98E+06	1.91E+08
Te-129m	1.12E+11	6.11E+07	10%	6.11E+06	2.93E+08
Sr-89	5.79E+12	3.17E+09	10%	3.17E+08	1.52E+10
Sr-90	9.72E+12	5.31E+09	10%	5.31E+08	2.55E+10

核素	单根乏燃料棒源项（冷却 0.5 年）	单次切割的释放量, Bq			年产生量 Bq
		2mm 长所含核素的活度, Bq	释放份额	释放到气溶胶中的活度, Bq	
Ba-137m	1.34E+13	7.32E+09	10%	7.32E+08	3.52E+10
Ba-140	7.86E+09	4.30E+06	10%	4.30E+05	2.06E+07
Ru-103	6.37E+12	3.48E+09	10%	3.48E+08	1.67E+10
Ru-106	4.84E+13	2.65E+10	10%	2.65E+09	1.27E+11
Ce-141	3.04E+12	1.66E+09	10%	1.66E+08	7.98E+09
Ce-144	7.74E+13	4.23E+10	10%	4.23E+09	2.03E+11
Pu-238	7.84E+11	4.29E+08	10%	4.29E+07	2.06E+09
Pu-239	3.52E+10	1.92E+07	10%	1.92E+06	9.24E+07
Pu-240	7.13E+10	3.90E+07	10%	3.90E+06	1.87E+08
Pu-241	1.17E+13	6.40E+09	10%	6.40E+08	3.07E+10
Np-239	4.06E+09	2.22E+06	10%	2.22E+05	1.07E+07
Y-90	9.72E+12	5.32E+09	10%	5.32E+08	2.55E+10
Y-91	1.10E+13	6.02E+09	10%	6.02E+08	2.89E+10
Nb-95	3.96E+13	2.17E+10	10%	2.17E+09	1.04E+11
Zr-95	2.00E+13	1.10E+10	10%	1.10E+09	5.26E+10
La-140	9.04E+09	4.94E+06	10%	4.94E+05	2.37E+07
Nd-147	6.48E+08	3.54E+05	10%	3.54E+04	1.70E+06
Pr-143	1.27E+10	6.97E+06	10%	6.97E+05	3.34E+07
Am-241	2.19E+10	1.20E+07	10%	1.20E+06	5.74E+07
Cm-242	2.41E+12	1.32E+09	10%	1.32E+08	6.32E+09
Cm-244	1.02E+12	5.59E+08	10%	5.59E+07	2.68E+09
H-3	9.41E+10	5.15E+07	100%	5.15E+07	2.47E+09
C-14	6.50E+07	3.55E+04	100%	3.55E+04	1.71E+06

#### (4) F8 热室实验的核素产生量

F8 热室进行乏燃料棒金相样品的精密切割（样品二次切割）。采用金刚砂轮切割机对金相样品进行低速切割，切割片四分之一浸泡在水中，切割过程中切割片上附着一层水膜，切割位置始终有水浸润。砂轮片厚小于 0.5mm，切割速度小于 50r/min，每次切割，将对燃料棒或样品最多造成 1mm 损耗。4 根乏燃料棒的金相检验，每年最多进行 20 个金相样品的精密切割，需切割 40 次。

F8 热室精密切割造成的核素排放量的计算同 F2 热室。则 F8 热室进行金相样品精密切割所造成的核素年产生量见表 4-13。

表 4-13 精密切割气溶胶核素年产生量

核素	单次切割的释放量, Bq			年产生量, Bq
	1mm 长所含核素的活度, Bq	释放份额	释放到气溶胶中的活度, Bq	
I-129	1.16E+03	100%	1.16E+03	4.63E+04
I-131	3.90E+03	100%	3.90E+03	1.56E+05
Kr-85	3.15E+08	100%	3.15E+08	1.26E+10
Xe-127	1.61E+02	100%	1.61E+02	6.45E+03
Xe-131m	2.07E+04	100%	2.07E+04	8.27E+05
Xe-133	1.92E+00	100%	1.92E+00	7.67E+01
Cs-134	8.07E+09	10%	8.07E+08	3.23E+10
Cs-136	1.67E+05	10%	1.67E+04	6.70E+05
Cs-137	3.87E+09	10%	3.87E+08	1.55E+10
Rb-86	1.33E+05	10%	1.33E+04	5.32E+05
Te-123m	5.76E+05	10%	5.76E+04	2.30E+06
Te-125m	1.07E+08	10%	1.07E+07	4.29E+08
Te-127	1.33E+08	10%	1.33E+07	5.32E+08
Te-127m	1.36E+08	10%	1.36E+07	5.43E+08
Te-129	1.99E+07	10%	1.99E+06	7.95E+07
Te-129m	3.05E+07	10%	3.05E+06	1.22E+08
Sr-89	1.58E+09	10%	1.58E+08	6.33E+09
Sr-90	2.66E+09	10%	2.66E+08	1.06E+10
Ba-137m	3.66E+09	10%	3.66E+08	1.46E+10
Ba-140	2.15E+06	10%	2.15E+05	8.59E+06
Ru-103	1.74E+09	10%	1.74E+08	6.97E+09
Ru-106	1.32E+10	10%	1.32E+09	5.29E+10
Ce-141	8.31E+08	10%	8.31E+07	3.32E+09
Ce-144	2.12E+10	10%	2.12E+09	8.46E+10
Pu-238	2.14E+08	10%	2.14E+07	8.58E+08
Pu-239	9.62E+06	10%	9.62E+05	3.85E+07
Pu-240	1.95E+07	10%	1.95E+06	7.80E+07
Pu-241	3.20E+09	10%	3.20E+08	1.28E+10
Np-239	1.11E+06	10%	1.11E+05	4.44E+06
Y-90	2.66E+09	10%	2.66E+08	1.06E+10
Y-91	3.01E+09	10%	3.01E+08	1.20E+10
Nb-95	1.08E+10	10%	1.08E+09	4.34E+10
Zr-95	5.48E+09	10%	5.48E+08	2.19E+10
La-140	2.47E+06	10%	2.47E+05	9.89E+06
Nd-147	1.77E+05	10%	1.77E+04	7.08E+05

核素	单次切割的释放量, Bq			年产生量, Bq
	1mm 长所含核素的活度, Bq	释放份额	释放到气溶胶中的活度, Bq	
Pr-143	3.48E+06	10%	3.48E+05	1.39E+07
Am-241	5.98E+06	10%	5.98E+05	2.39E+07
Cm-242	6.58E+08	10%	6.58E+07	2.63E+09
Cm-244	2.80E+08	10%	2.80E+07	1.12E+09
H-3	2.57E+07	100%	2.57E+07	1.03E+09
C-14	1.78E+04	100%	1.78E+04	7.11E+05

#### (5) F9 热室的核素产生量

F9 热室进行燃料棒金相样品的磨光和抛光等制样工艺。样品的磨抛实验是将样品的切口磨抛平整, 达到适合金相观察的粗糙度。磨抛过程中会根据需要添加磨抛液, 并用少量水冲洗磨抛盘。

F9 热室每次最多操作一段 10mm 长的燃料棒样品。磨抛损耗厚度约为 0.5mm。磨抛过程中产生的碎屑、颗粒进入磨抛液, 可能形成气溶胶。根据国内相关科研单位的实验数据, 废液中产生气溶胶的释放率约为  $1 \times 10^{-6}$ , 热室中产生的放射性废气经两级高效过滤器(过滤效率分别为 99.97%) 后释放到环境中的量很小。

F9 热室磨抛损耗的 0.5mm 芯块中所有裂变气体从芯块中逸出, 释放到热室中。按一年进行 20 个金相样品的磨抛, 则 F9 热室进行金相样品磨抛所造成的核素年产生量见表 4-14。

表 4-14 金相样品磨抛的裂变气体产生量

核素	单根乏燃料棒源项 (冷却 0.5 年)	0.5mm 损耗所含核素的活度, Bq	释放份额	单次磨抛工艺排放量, Bq	操作次数	年产生量, Bq
I-129	4.23E+06	5.79E+02	100%	5.79E+02	20	1.16E+04
I-131	1.43E+07	1.95E+03	100%	1.95E+03	20	3.90E+04
Kr-85	1.21E+12	1.57E+08	100%	1.57E+08	20	3.14E+09
Xe-127	6.21E+05	8.07E+01	100%	8.07E+01	20	1.61E+03
Xe-131m	7.96E+07	1.03E+04	100%	1.03E+04	20	2.06E+05
Xe-133	7.39E+03	9.59E-01	100%	9.59E-01	20	1.92E+01
H-3	9.41E+10	1.29E+07	100%	1.29E+07	20	2.58E+08
C-14	6.50E+07	8.89E+03	100%	8.89E+03	20	1.78E+05

#### (6) F13 热室实验的核素产生量

残余裂变气体测量在残余裂变气体测量热室(F13 热室)进行。通过铅罐将芯块(单次试验最多一个芯块)从 F3 热室运至 F13 热室。通过高频感应加热炉加热的方式(最高炉内温度 2800°C, 炉体带循环冷却水), 使燃料芯块内部残留的裂变气体释放到真

空腔室中，通过管道连接气质联用仪，获得芯块内残余裂变气体含量、成分等信息，研究芯块内部裂变气体的释放机理。

假设检验过程中单个芯块内残余的裂变气体全部释放至真空腔室和密封管道。实验完成后，采用专用容器将裂变气体收集贮存。但若管路密封性能丧失，裂变气体将全部释放至热室内。因此，计算中保守考虑燃料棒空腔内的裂变气体全部释放至热室内。每年按进行 10 次残余裂变气体测量实验，则 F13 热室单次实验的核素产生量和年排放量见表 4-15。

表 4-15 残余裂变气体测量工艺的核素产生量，Bq

核素	单根乏燃料棒源项 (冷却 0.5 年)	单个芯块 (1.35cm) 所 含气体核素活度	释放份额	单次实验产 生量	年产生量
I-129	4.23E+06	1.56E+04	100%	1.56E+04	1.56E+05
I-131	1.43E+07	5.26E+04	100%	5.26E+04	5.26E+05
Kr-85	1.21E+12	4.47E+09	100%	4.47E+09	4.47E+10
Xe-127	6.21E+05	2.29E+03	100%	2.29E+03	2.29E+04
Xe-131m	7.96E+07	2.94E+05	100%	2.94E+05	2.94E+06
Xe-133	7.39E+03	2.73E+01	100%	2.73E+01	2.73E+02
H-3	9.41E+10	3.47E+08	100%	3.47E+08	3.47E+09
C-14	6.50E+07	2.40E+05	100%	2.40E+05	2.40E+06

#### (7) I1 热室实验的核素产生量

I1 热室进行钴靶件的解体和靶件包壳的切割的，取出钴芯块用于放射源的生产。包壳切割采用车削方式，车刀定位后固定不动，工件（钴靶件）旋转进行切割，转速小于 300r/min，车刀车削宽度 2mm~3mm，单次进刀 0.1~0.2mm，总进刀量约 0.85mm。切割产生的为车削金属丝，不产生或产生微量的放射性气溶胶，可忽略不计。

### 4.3.2.2 放射性废气的处理及排放源项

F 线热室内产生的放射性废气都经过 2 级 HEPA 高效过滤和 1 级碘过滤，其中 1 级 HEPA 高效过滤安装在热室操作区，1 级 HEPA 高效过滤和 1 级碘过滤安装在地下通风过滤机房。

过滤器的设计过滤效率如下：

- 低效过滤器计重法最低效率为 85%。
- 中效过滤器计数法最低效率为 85%。
- HEPA 过滤器钠焰法最低效率为 99.97%。



- 碘吸附器用于吸附排风中的放射性碘，用甲基碘测试，最低效率为 99.9%（在温度为 30℃，相对湿度<95%时应保证的最低值）。

理论上，对于同类型过滤器串联，第二级过滤器的效率会降低，这里保守认为两级 HEPA 高效过滤为冗余过滤器，仅取其一级的过滤效率，因此，对正常气态排放，各核素净化系数取值如下：

- 气体（惰性气体和氡、碳）：1；
- 碘：100；
- 气溶胶：1000。

本项目单独建设 1 座混凝土排风烟囱，位于通风和固废中心的西侧。排风烟囱总高 35m，壁厚 300mm，烟囱顶部内径 2.3m，底部内径 3.7m，最大排风量 240000m<sup>3</sup>/h，最大排风速率 16m/s。排风总管从通风及固废中心水平引出后接入烟囱，烟道入口中心线标高为 5m。

正常条件下，项目每年通过气态途径排放的放射性核素总量见表 4-16。

表 4-16 每年通过气态途径排放的放射性核素总量 (Bq)

核素名称	F2 产生量	F8 产生量	F1 产生量	F9 产生量	F13 产生量	年产生量	净化系数	年排放量
I-129	1.11E+05	4.63E+04	2.12E+05	1.16E+04	1.56E+05	5.37E+05	100	5.37E+03
I-131	3.74E+05	1.56E+05	7.15E+05	3.90E+04	5.26E+05	1.81E+06	100	1.81E+04
Kr-85	3.18E+10	1.26E+10	6.06E+11	3.15E+09	4.47E+10	6.98E+11	1	6.98E+11
Xe-127	1.63E+04	6.45E+03	3.11E+05	1.61E+03	2.29E+04	3.58E+05	1	3.58E+05
Xe-131m	2.09E+06	8.27E+05	3.98E+07	2.07E+05	2.94E+06	4.59E+07	1	4.59E+07
Xe-133	1.94E+02	7.67E+01	3.69E+03	1.92E+01	2.73E+02	4.25E+03	1	4.25E+03
Cs-134	7.75E+10	3.23E+10	1.48E+12	0	0	1.59E+12	1000	1.59E+09
Cs-136	1.61E+06	6.70E+05	3.06E+07	0	0	3.29E+07	1000	3.29E+04
Cs-137	3.72E+10	1.55E+10	7.10E+11	0	0	7.63E+11	1000	7.63E+08
Rb-86	1.28E+06	5.32E+05	2.44E+07	0	0	2.62E+07	1000	2.62E+04
Te-123m	5.53E+06	2.30E+06	4.22E+06	0	0	1.21E+07	1000	1.21E+04
Te-125m	1.03E+09	4.29E+08	7.86E+08	0	0	2.25E+09	1000	2.25E+06
Te-127	1.28E+09	5.32E+08	9.72E+08	0	0	2.78E+09	1000	2.78E+06
Te-127m	1.30E+09	5.43E+08	9.94E+08	0	0	2.84E+09	1000	2.84E+06
Te-129	1.91E+08	7.95E+07	1.45E+08	0	0	4.16E+08	1000	4.16E+05
Te-129m	2.93E+08	1.22E+08	2.24E+08	0	0	6.39E+08	1000	6.39E+05
Sr-89	1.52E+10	6.33E+09	1.16E+10	0	0	3.31E+10	1000	3.31E+07
Sr-90	2.55E+10	1.06E+10	1.94E+10	0	0	5.55E+10	1000	5.55E+07
Ba-137m	3.52E+10	1.46E+10	2.68E+10	0	0	7.66E+10	1000	7.66E+07
Ba-140	2.06E+07	8.59E+06	1.57E+07	0	0	4.49E+07	1000	4.49E+04
Ru-103	1.67E+10	6.97E+09	1.27E+10	0	0	3.64E+10	1000	3.64E+07
Ru-106	1.27E+11	5.29E+10	9.68E+10	0	0	2.77E+11	1000	2.77E+08

核素名称	F2 产生量	F8 产生量	F1 产生量	F9 产生量	F13 产生量	年产生量	净化系数	年排放量
Ce-141	7.98E+09	3.32E+09	6.08E+09	0	0	1.74E+10	1000	1.74E+07
Ce-144	2.03E+11	8.46E+10	1.55E+11	0	0	4.43E+11	1000	4.43E+08
Pu-238	2.06E+09	8.58E+08	0	0	0	2.92E+09	1000	2.92E+06
Pu-239	9.24E+07	3.85E+07	0	0	0	1.31E+08	1000	1.31E+05
Pu-240	1.87E+08	7.80E+07	0	0	0	2.65E+08	1000	2.65E+05
Pu-241	3.07E+10	1.28E+10	0	0	0	4.35E+10	1000	4.35E+07
Np-239	1.07E+07	4.44E+06	0	0	0	1.51E+07	1000	1.51E+04
Y-90	2.55E+10	1.06E+10	1.94E+10	0	0	5.55E+10	1000	5.55E+07
Y-91	2.89E+10	1.20E+10	2.20E+10	0	0	6.29E+10	1000	6.29E+07
Nb-95	1.04E+11	4.34E+10	7.92E+10	0	0	2.27E+11	1000	2.27E+08
Zr-95	5.26E+10	2.19E+10	4.00E+10	0	0	1.15E+11	1000	1.15E+08
La-140	2.37E+07	9.89E+06	1.81E+07	0	0	5.17E+07	1000	5.17E+04
Nd-147	1.70E+06	7.08E+05	1.30E+06	0	0	3.71E+06	1000	3.71E+03
Pr-143	3.34E+07	1.39E+07	2.54E+07	0	0	7.27E+07	1000	7.27E+04
Am-241	5.74E+07	2.39E+07	0	0	0	8.13E+07	1000	8.13E+04
Cm-242	6.32E+09	2.63E+09	0	0	0	8.95E+09	1000	8.95E+06
Cm-244	2.68E+09	1.12E+09	0	0	0	3.80E+09	1000	3.80E+06
H-3	2.47E+09	1.03E+09	4.71E+10	2.57E+08	3.47E+09	7.23E+09	1	5.43E+10
C-14	1.71E+06	7.11E+05	3.25E+07	1.78E+05	2.40E+06	5.00E+06	1	3.75E+07

### 4.3.3 废液处理系统及排放源项

#### 4.3.3.1 含放射性核素废液的产生

本项目工艺试验中，乏燃料棒的切割取样会用到切割冷却液（单次用量不超过 100mL），金相样品的精密切割和磨抛会用到磨抛液（单次用量不超过 100mL），金相样品的蚀刻会用到化学蚀刻液（单次用量不超过 100mL），上述试验中，在各自设备上设置液体收集装置，尽量重复使用，不能重复使用的，在设备末端设置过滤收集装置。上述液体在试验完成后，不作为放射性废液排放，在各自热室采用小托盘或小水槽收集后，于热室内自然通风晾干，而后采用放射性去污可剥离膜进行涂覆、固化，连同小托盘或小水槽作放射性固体废物处理。

本项目运行过程中，设备维修维护、放射性去污会产生一定量的放射性废液。在放射性去污过程中会用到草酸、中性去污剂等有机物，使用的草酸浓度不超过 5%，放射性废液在收集前经酸碱中和至 pH 值 6~8。放射性废液处理装置每 3 年清洗维护一次，每次产生 600L 的废水，返回材料辐照性能研究中心或材料辐照性能研究中心的废液暂

存罐内暂存，与其他低放废液在下一批次一同处理，均摊到每年的去污低放废液量约为 200L。本项目正常运行期间产生的放射性废液信息见表 4-17。

表 4-17 正常运行期间放射性废液基本信息

序号	产生位置	来源	单次最大产生量 L	年产生量 L	酸碱度	厂房
1	F 线热室维修区	热室外去污	50	100	中性	材料中心
2	M 线各热室内	实验、去污	25	50	中性	
3	材料中心卫生出入口	人员去污	100	100	中性	
小计	年产量 250L 低放水平废液					
4	I 线热室维修区	热室外去污	50	100	中性	同位素中心
5	I 线清洗水池附近	运输容器清洗	50	100	中性	
6	同位素研发中心卫生出入口	人员去污	100	100	中性	
7	同位素中心池水净化间	池水循环冷却净化系统疏排水	40	40	pH: 5.5~8.5	
小计	年产量 340L 低放水平废液					---
8	废液处理装置	废液处理装置清洗去污	600 (每三年清洗一次)	200 (平均至每年)	中性	材料中心、同位素中心
小计	平均年产量 200L 低放水平废液					

### 4.3.3.2 放射性废液的处理

#### 4.3.3.2.1 放射性废液的收集和暂存

本项目设置材料中心放射性废液收集暂存系统（CLS）和同位素中心放射性废液收集暂存系统（TLS），分别用来收集和暂存材料中心、同位素中心产生的放射性废液，对废液进行混匀和取样分析。

##### （1）材料中心放射性废液收集暂存系统（CLS）

CLS 系统配置 2 台废液暂存罐，用于暂存正常运行期间的放射性废液，每台废液暂存罐有效容积为 5m<sup>3</sup>。配置 2 台 F 线热室废液暂存罐，有效容积为 2m<sup>3</sup>，用于临时暂

存异常工况下产生的放射性废液。每台废液暂存罐顶部设压缩空气入口和取样口，分别用于废液的混匀和取样分析。

CLS 系统正常运行时，废液暂存罐通过重力收集来自材料中心产生的放射性废液，当接收废液至高液位时，关闭进水隔离阀之前，切换另一台暂存罐接收废液。然后关闭高液位废液暂存罐进水隔离阀，对罐内废液进行混匀和取样分析后，通过汽车通道内用于废液转运的接口实现废液暂存罐内废液的转运。转运的驱动力主要来源于废液处理装置或废液转运装置，废液暂存罐内压缩空气也可作为辅助驱动力来源。

CLS 系统配置 2 台 F 线热室废液暂存罐，一用一备，用于临时暂存 F 线各热室和 FA 热室内异常工况下产生的放射性废液，每台 F 线热室废液暂存罐有效容积为  $2\text{m}^3$ 。F 线热室内储存井末端设置管道与 F 线热室废液暂存罐连接，储存井内积液可自流入 F 线热室废液暂存罐。FA 热室储存井末端设置排水管，排水总管末端设常关隔离阀，异常工况下产生的放射性废液可通过一个移动式废液收集罐转运至 F 线热室废液暂存罐进行临时暂存。当接收废液至高液位时，关闭进水隔离阀，未排尽的废液滞留在上游管道内。对罐内废液进行混匀和取样分析后，通过汽车通道内用于废液转运的接口的实现废液暂存罐内废液转运。转运废液的驱动力主要来源于废液处理装置或废液转运装置，F 线热室废液暂存罐内压缩空气也可作为辅助驱动力来源。

#### (2) 同位素中心放射性废液收集暂存系统 (TLS)

TLS 系统配置 2 台废液暂存罐，用于暂存正常运行期间的放射性废液，每台废液暂存罐有效容积为  $5\text{m}^3$ 。每台废液暂存罐顶部设压缩空气入口和取样口，分别用于废液的混匀和取样分析。

TLS 系统正常运行时，废液暂存罐通过重力收集来自同位素中心产生的放射性废液，当接收废液至高液位时，关闭进水隔离阀之前，切换另一台暂存罐接收废液。然后关闭高液位废液暂存罐的进水隔离阀，对罐内废液进行混匀和取样分析后，通过汽车通道内用于废液转运的接口的实现废液暂存罐内废液转运。转运废液的驱动力主要来源于废液处理装置或废液转运装置，废液暂存罐内压缩空气也可作为辅助驱动力来源。

#### 4.3.3.2.2 放射性废液的处理

本项目的废液处理装置采用“活性炭过滤吸附+离子交换+反渗透+连续电除盐”工艺，经处理后废液放射性水平的目标值为总  $\alpha$  小于  $1\text{Bq/L}$ 、总  $\beta$  小于  $10\text{Bq/L}$ ，满足《污水综

合排放标准》(GB 8978-1996), 运至阳江核电厂的排放口排入大海。

#### 4.3.4 放射性固体废物处理系统及废物量

##### 4.3.4.1 放射性固体废物的来源及产生量

本项目运行时所产生的放射性固体废物主要来源如下:

- (1) 辐照监督组件在解体过程中产生的固体放射性废物;
- (2) 燃料棒切割过程中产生的固体放射性废物包括切屑的固化物;
- (3) 金相样品制备过程中产生的固体放射性废物如磨抛光所用的砂纸和碎屑固化物;
- (4) 池水净化系统更换下来的池水净化滤芯和树脂;
- (5) 通风系统更换下来的过滤器滤芯;
- (6) 设备检修过程中的废弃零部件、工具等;
- (7) 去污过程中产生的固体放射性废物;
- (8) 个人防护用品, 包括工作服、口罩、手套、鞋、帽、塑料布等;
- (9) 放射性取样分析测量过程的样品等。

本项目工艺运行期间产生的中放废物都为非可燃废物, 中放废物年产量总计为  $0.15\text{m}^3$ 。工艺运行产生的低放可燃废物年产量总计为  $2.96\text{m}^3$ , 低放非可燃废物年产量总计为  $0.55\text{m}^3$ 。通风系统每年产生 292 个废通风滤芯和  $1.98\text{m}^3$  的活性炭。水池循环冷却净化系统运行产生低放废树脂年产量为  $0.22\text{m}^3$ , 低放滤芯年产量为  $0.36\text{m}^3$ , 废液处理系统运行产生低放废树脂年产量为  $0.3\text{m}^3$ , 低放活性炭年产量为  $0.1\text{m}^3$ , 其他废物年产量为  $0.2\text{m}^3$ 。本项目中放固体废物的产生情况见表 4-18, 低放固体废物产生情况见表 4-23。

表 4-18 中放固体废物基本特性

序号	来源	产生位置	年产量(L)	材质	来源	源项及重量
1	组件解体	FA 热室	10	金属(组件格架、切屑), 密度按 M5 包壳 $6.5\text{g}/\text{cm}^3$	格架、监督管等活化产物	其源项小于燃料棒包壳水平, 保守按照包壳水平考虑, 见表 4-19
2	燃料棒切割	F2 热室	20	金属(砂轮片、切屑), 密度按 $3.6\text{g}/\text{cm}^3$ 计算	沾有芯块、包壳粉末的砂轮片、碎屑,	见表 4-20

序号	来源	产生位置	年产量(L)	材质	来源	源项及重量
3	金相制样	金相磨抛热室、屏蔽箱	20	砂纸、磨抛盘、碎屑等, 密度按 3g/cm <sup>3</sup> 计算	沾有芯块、包壳粉末的磨抛盘、碎屑等	见表 4-21
4	堆内活化构件	M 线	50	金属(不锈钢等), 密度按 7.8 g/cm <sup>3</sup> 计算	堆内活化构件	见表 4-19
5	钴源生产	I 线	50	金属, 铅管、结构件, 密度按 6.55 g/cm <sup>3</sup>	钴靶件包壳管、不锈钢结构件的活化产物	钴靶件包壳管活化产物, 见表 4-22

表 4-19 热室内固废废物源项-堆内活化构件

核素	活度浓度(Bq/kg)	核素	活度浓度(Bq/kg)	核素	活度浓度(Bq/kg)	核素	活度浓度(Bq/kg)
Be-10	4.45E+01	Ni-59	6.94E+07	Ca-45	3.13E+05	Hf-181	9.03E+09
Hf-182	1.75E+02	Zr-93	7.85E+07	S-35	7.54E+05	Ni-63	1.23E+10
P-32	9.04E+03	Fe-59	2.16E+08	Mo-93	7.72E+05	Nb-95m	1.28E+10
W-188	1.30E+04	Hf-175	4.11E+08	Lu-177m	1.06E+06	Co-58	2.07E+10
Re-188	1.31E+04	Sr-89	8.85E+08	Sr-90	1.15E+06	Fe-55	4.56E+10
NB-92	5.21E+04	W-185	1.05E+09	Y-90	1.15E+06	Ta-182	1.04E+11
H-3	1.06E+05	Nb-94	1.25E+09	Zn-65	4.45E+06	Co-60	2.53E+11
Tc-99	1.82E+05	Y-91	3.14E+09	Nb-93m	7.49E+06	Zr-95	1.72E+12
Lu-177	2.44E+05	Cr-51	4.29E+09	C-14	8.79E+06	Nb-95	3.47E+12
Ru-103	2.77E+05	Mn-54	4.61E+09	Sc-46	1.87E+07	---	---

表 4-20 燃料棒切割产生的固体废物源项

核素	活度浓度(Bq/kg)	核素	活度浓度(Bq/kg)	核素	活度浓度(Bq/kg)	核素	活度浓度(Bq/kg)
锕系核素							
Tl-208	1.79E+01	Np-239	2.22E+05	Pa-234m	1.25E+03	Am-243	2.22E+05
Pb-212	4.99E+01	Pu-236	8.36E+03	Pa-234	1.62E+00	Cm-241	5.19E+00
Bi-212	4.99E+01	Pu-237	3.36E+03	U-232	1.77E+02	Cm-242	1.32E+08
Po-212	3.20E+01	Pu-238	4.29E+07	U-234	4.63E+03	Cm-243	2.25E+05
Po-216	4.99E+01	Pu-239	1.92E+06	U-235	4.74E+01	Cm-244	5.59E+07
Rn-220	4.99E+01	Pu-240	3.90E+06	U-236	1.71E+03	Cm-245	7.05E+03
Ra-224	4.99E+01	Pu-241	6.40E+08	U-237	1.58E+04	Cm-246	2.55E+03
Th-228	4.98E+01	Pu-242	1.28E+04	U-238	1.25E+03	Bk-249	2.43E+02
Th-231	4.74E+01	Am-241	1.20E+06	Np-235	6.12E+01	Cf-250	5.58E+00
Th-234	1.25E+03	Am-242m	9.01E+04	Np-237	3.63E+03	Cf-252	1.17E+01
Pa-233	3.63E+03	Am-242	8.97E+04	Np-238	4.51E+02	---	---
裂变产物							
Ag-109m	1.62E+01	Pr-143	6.97E+05	Eu-156	5.81E+05	Sn-125	1.63E+02
Ag-110	3.68E+05	Pr-144	4.23E+09	Gd-153	8.60E+04	Sn-126	5.92E+03

核素	活度浓度 (Bq/kg)	核素	活度浓度 (Bq/kg)	核素	活度浓度 (Bq/kg)	核素	活度浓度 (Bq/kg)
Ag-110m	2.76E+07	Pr-144m	5.08E+07	Ho-166m	5.14E+01	Sr-89	3.17E+08
Ag-111	1.94E+01	Rb-86	2.66E+04	I-129	2.32E+02	Sr-90	5.31E+08
Ba-136m	5.52E+03	Rh-102	9.93E+03	I-131	7.80E+02	Tb-160	2.22E+06
Ba-137m	7.33E+08	Rh-103m	3.14E+08	In-114	3.29E+03	Tc-99	9.11E+04
Ba-140	4.30E+05	Rh-106	2.65E+09	In-114m	3.44E+03	Te-123m	1.15E+05
Cd-109	1.62E+01	Ru-103	3.48E+08	In-115m	4.65E+01	Te-125m	2.15E+07
Cd-113m	5.07E+05	Ru-106	2.65E+09	La-140	4.95E+05	Te-127	2.66E+07
Cd-115m	6.62E+05	Sb-124	2.03E+06	Nb-93m	1.52E+03	Te-127m	2.72E+07
Ce-141	1.66E+08	Sb-125	8.94E+07	Nb-94	1.04E+00	Te-129	3.98E+06
Ce-144	4.23E+09	Sb-126	1.17E+03	Nb-95	2.17E+09	Te-129m	6.11E+06
Cs-134	1.61E+09	Sb-126m	5.92E+03	Nb-95m	8.12E+06	Tm-170	3.39E+02
Cs-135	3.00E+03	Se-79	3.08E+03	Nd-147	3.54E+04	Tm-171	2.00E+01
Cs-136	3.35E+04	Sm-151	2.60E+06	Pd-107	8.81E+02	Y-90	5.32E+08
Cs-137	7.74E+08	Sn-117m	1.55E+02	Pm-146	2.19E+04	Y-91	6.02E+08
Eu-152	3.19E+04	Sn-119m	1.03E+06	Pm-147	4.75E+08	Zr-93	1.34E+04
Eu-154	9.59E+07	Sn-121m	1.58E+03	Pm-148	3.44E+05	Zr-95	1.10E+09
Eu-155	6.30E+07	Sn-123	8.15E+06	Pm-148m	6.10E+06	---	---
活化产物							
Ag-108	6.98E+00	Ni-59	5.62E+01	Eu-154	2.67E+02	Sn-121m	4.40E+00
Ag-108m	7.85E+01	Ni-63	9.95E+03	Eu-155	1.66E+02	Sn-123	8.26E+02
Ag-109m	5.61E+03	P-32	7.84E+01	Eu-156	1.46E+00	Ta-182	7.07E+01
Ag-110	4.97E+01	Po-210	1.01E+02	Fe-55	5.23E+04	Tb-160	2.84E+04
Ag-110m	3.74E+03	Re-188	6.80E+02	Fe-59	2.57E+02	Tc-99	1.03E+00
Ca-41	1.12E+00	Ru-103	1.62E+00	Gd-153	4.82E+03	Te-123m	2.47E+01
Ca-45	1.17E+03	S-35	3.57E+04	In-113m	1.88E+03	Te-125m	2.65E+03
Cd-109	5.61E+03	Sb-124	3.10E+01	In-114	6.08E+03	W-181	7.07E+02
Cd-115m	1.00E+04	Sb-125	1.10E+04	In-114m	6.35E+03	W-185	1.17E+04
Cl-36	6.83E+01	Sc-46	7.42E+01	Ir-192	1.16E+01	W-188	6.74E+02
Co-58	1.67E+04	Sn-113	1.88E+03	Mn-54	5.59E+03	Zn-65	4.42E+05
Co-60	9.27E+05	Sn-117m	2.49E+01	Mo-93	4.51E+00	Zr-95	1.89E+00
Cr-51	1.41E+03	Sn-119m	2.52E+04	Nb-95	4.48E+00	---	---

表 4-21 燃料棒金相制样过程产生的固体废物源项

核素	活度浓度 (Bq/kg)	核素	活度浓度 (Bq/kg)	核素	活度浓度 (Bq/kg)	核素	活度浓度 (Bq/kg)
锕系核素							
Tl-208	3.74E+00	Np-239	4.63E+04	Pa-234m	2.59E+02	Am-243	4.63E+04
Pb-212	1.04E+01	Pu-236	1.74E+03	U-232	3.68E+01	Cm-241	1.08E+00
Bi-212	1.04E+01	Pu-237	7.00E+02	U-234	9.65E+02	Cm-242	2.74E+07
Po-212	6.66E+00	Pu-238	8.94E+06	U-235	9.88E+00	Cm-243	4.68E+04
Po-216	1.04E+01	Pu-239	4.01E+05	U-236	3.57E+02	Cm-244	1.17E+07

核素	活度浓度 (Bq/kg)	核素	活度浓度 (Bq/kg)	核素	活度浓度 (Bq/kg)	核素	活度浓度 (Bq/kg)
Rn-220	1.04E+01	Pu-240	8.13E+05	U-237	3.29E+03	Cm-245	1.47E+03
Ra-224	1.04E+01	Pu-241	1.33E+08	U-238	2.59E+02	Cm-246	5.30E+02
Th-228	1.04E+01	Pu-242	2.66E+03	Np-235	1.28E+01	Bk-249	5.06E+01
Th-231	9.88E+00	Am-241	2.49E+05	Np-237	7.56E+02	Cf-250	1.16E+00
Th-234	2.59E+02	Am-242m	1.88E+04	Np-238	9.39E+01	Cf-252	2.44E+00
Pa-233	7.56E+02	Am-242	1.87E+04	---	---	---	---
裂变产物							
Ag-109m	3.38E+00	Pr-143	1.45E+05	Eu-155	1.31E+07	Sn-123	1.70E+06
Ag-110	7.66E+04	Pr-144	8.81E+08	Eu-156	1.21E+05	Sn-125	3.39E+01
Ag-110m	5.76E+06	Pr-144m	1.06E+07	Gd-153	1.79E+04	Sn-126	1.23E+03
Ag-111	4.05E+00	Rb-86	5.55E+03	Ho-166m	1.07E+01	Sr-89	6.59E+07
Ba-136m	1.15E+03	Rh-102	2.07E+03	I-131	1.62E+02	Tb-160	4.61E+05
Ba-137m	1.53E+08	Rh-103m	6.54E+07	In-114	6.86E+02	Tc-99	1.90E+04
Ba-140	8.95E+04	Rh-106	5.51E+08	In-114m	7.17E+02	Te-123m	2.40E+04
Cd-109	3.38E+00	Ru-103	7.26E+07	In-115m	9.69E+00	Te-125m	4.47E+06
Cd-113m	1.06E+05	Ru-106	5.51E+08	La-140	1.03E+05	Te-127	5.54E+06
Cd-115m	1.38E+05	Sb-124	4.23E+05	Nb-93m	3.16E+02	Te-127m	5.66E+06
Ce-141	3.46E+07	Sb-125	1.86E+07	Nb-95	4.52E+08	Te-129	8.28E+05
Ce-144	8.81E+08	Sb-126	2.44E+02	Nb-95m	1.69E+06	Te-129m	1.27E+06
Cs-134	3.36E+08	Sb-126m	1.23E+03	Nd-147	7.38E+03	Tm-170	7.07E+01
Cs-135	6.25E+02	Se-79	6.42E+02	Pd-107	1.84E+02	Tm-171	4.17E+00
Cs-136	6.98E+03	Sm-151	5.42E+05	Pm-146	4.56E+03	Y-90	1.11E+08
Cs-137	1.61E+08	Sn-117m	3.24E+01	Pm-147	9.90E+07	Y-91	1.25E+08
Eu-152	6.64E+03	Sn-119m	2.14E+05	Pm-148	7.16E+04	Zr-93	2.80E+03
Eu-154	2.00E+07	Sn-121m	3.29E+02	Pm-148m	1.27E+06	Zr-95	2.28E+08
活化产物							
Ag-108	1.45E+00	Mn-54	1.17E+03	Cr-51	2.93E+02	Sn-119m	5.26E+03
Ag-108m	1.64E+01	Ni-63	2.07E+03	Eu-154	5.57E+01	Sn-123	1.72E+02
Ag-109m	1.17E+03	P-32	1.63E+01	Eu-155	3.47E+01	Ta-182	1.47E+01
Ag-110	1.04E+01	Po-210	2.10E+01	Fe-55	1.09E+04	Tb-160	5.91E+03
Ag-110m	7.79E+02	Re-188	1.42E+02	Fe-59	5.35E+01	Te-123m	5.15E+00
Ca-45	2.44E+02	S-35	7.43E+03	Gd-153	1.00E+03	Te-125m	5.51E+02
Cd-109	1.17E+03	Sb-124	6.47E+00	In-113m	3.91E+02	W-181	1.47E+02
Cd-115m	2.09E+03	Sb-125	2.30E+03	In-114	1.27E+03	W-185	2.44E+03
Cl-36	1.42E+01	Sc-46	1.55E+01	In-114m	1.32E+03	W-188	1.40E+02
Co-58	3.49E+03	Sn-113	3.91E+02	Ir-192	2.41E+00	Zn-65	9.22E+04
Co-60	1.93E+05	Sn-117m	5.20E+00	Ni-59	1.17E+01	---	---

表 4-22 钴靶件包壳管中主要核素的活度浓度



核素	活度浓度 (Bq/kg)		核素	活度浓度 (Bq/kg)	
	出堆冷却 0.5 年	出堆冷却 5 年		出堆冷却 0.5 年	出堆冷却 5 年
Ta-183	1.99E+01	可忽略	Fe-59	4.89E+07	4.95E-04
Be-10	3.96E+01	3.96E+01	Zr-93	7.08E+07	7.08E+07
Hf-182	1.58E+02	1.58E+02	Hf-175	3.70E+08	3.16E+01
Tc-99	5.41E+03	5.41E+03	Cr-51	4.34E+08	6.03E-10
W-188	1.17E+04	8.68E-04	Sr-89	7.98E+08	1.27E-01
Re-188	1.18E+04	8.77E-04	W-185	9.45E+08	2.44E+02
Nb-92	4.49E+04	0.00E+00	Nb-94	1.09E+09	1.09E+09
C-14	4.84E+04	4.83E+04	Mn-54	1.28E+09	3.33E+07
H-3	9.45E+04	7.34E+04	Y-91	2.83E+09	9.88E+00
Lu-177	2.20E+05	1.41E+02	Hf-181	8.14E+09	1.74E-02
Lu-177m	9.57E+05	6.15E+02	Fe-55	1.05E+10	3.17E+09
Sr-90	1.04E+06	9.30E+05	Nb-95m	1.15E+10	2.13E+02
Y-90	1.04E+06	9.30E+05	Ta-182	9.36E+10	4.66E+06
Nb-93m	6.74E+06	1.91E+07	Zr-95	1.55E+12	2.87E+04
Co-60	2.73E+07	1.51E+07	Nb-95	3.12E+12	6.60E+04

表 4-23 低放固体废物基本特性

序号	来源	产生位置	年产量 (L)	材质	核素活度浓度
1	设备检修	F 线热室维修区	250	金属 (废弃零部件、工具等)	参考去污废物, 见表 4-24
2	放射性去污	F 线热室及维修区	300	纺织品、塑料, 密度按 0.7g/cm <sup>3</sup> 计算。	见表 4-24
3	个人防护用品	各维修区、卫生出入口	1200	纺织品、塑料 (劳保用品、工具等)	保守参考去污废物, 见表 4-24
4	放射性取样	辐射防护检测间	40	滤纸、塑料, 密度按 0.4g/cm <sup>3</sup>	见表 4-25
5	池水净化	I 线水池净化系统	400	水过滤芯	见表 4-26
6	设备检修	I 线热室维修区	200	金属, 废弃零部件、工具等	参考 I 线去污废物, 见表 4-27
7	放射性去污	I 线热室维修区	400	纺织品、塑料, 擦拭物、工具等。密度按 0.7g/cm <sup>3</sup> 计算。	见表 4-27
8	个人防护用品	各维修区、卫生出入口	1000	纺织品、塑料, 劳保用品、工具等。密度按 0.7g/cm <sup>3</sup> 计算。	按 <sup>60</sup> Co 考虑, 预计不超过 4E+02Bq/kg
9	放射性取样	辐射防护检测间	20	滤纸、塑料, 密度按 0.4g/cm <sup>3</sup>	按 <sup>60</sup> Co 考虑, 预计不超过 4E+03 Bq/kg
10	钴源生产	I 线热室	100	金属 (废放射源包壳管), 按不锈钢 7.8g/cm <sup>3</sup> 计算	按 <sup>60</sup> Co 考虑, 预计约 2E+03Bq/kg
11	钴源水池净化	水池净化系统	293	树脂	---

序号	来源	产生位置	年产量 (L)	材质	核素活度浓度
12	废液处理	废液处理系统	100	水过滤滤芯	---
13	废液处理	废液处理系统	300	树脂	---
14	废液处理	废液处理系统	100	反渗透膜	---
15	废液处理	废液处理系统	100	CEDI 膜	---

表 4-24 材料中心放射性去污产生的固体废物源项

核素	活度浓度 (Bq/kg)	核素	活度浓度 (Bq/kg)	核素	活度浓度 (Bq/kg)	核素	活度浓度 (Bq/kg)
裂变产物							
Ag-110	2.25E+03	Pr-144m	3.38E+05	Gd-153	5.73E+02	Sn-125	1.09E+00
Ag-110m	1.69E+05	Rb-86	1.63E+02	I-129	1.42E+00	Sn-126	3.95E+01
Ba-136m	3.68E+01	Rh-102	6.62E+01	I-131	4.77E+00	Sr-89	2.11E+06
Ba-137m	4.88E+06	Rh-103m	2.09E+06	In-114	2.19E+01	Sr-90	3.54E+06
Ba-140	2.86E+03	Rh-106	1.76E+07	In-114m	2.29E+01	Tb-160	1.48E+04
Cd-113m	3.10E+03	Ru-103	2.32E+06	La-140	3.30E+03	Tc-99	6.07E+02
Cd-115m	4.05E+03	Ru-106	1.76E+07	Nb-93m	1.01E+01	Te-123m	7.05E+02
Ce-141	1.11E+06	Sb-124	1.24E+04	Nb-95	1.45E+07	Te-125m	1.31E+05
Ce-144	2.82E+07	Sb-125	5.47E+05	Nb-95m	5.41E+04	Te-127	1.63E+05
Cs-134	9.88E+06	Sb-126	7.17E+00	Nd-147	2.36E+02	Te-127m	1.66E+05
Cs-135	1.83E+01	Sb-126m	3.62E+01	Pd-107	5.87E+00	Te-129	2.43E+04
Cs-136	2.05E+02	Se-79	2.05E+01	Pm-146	1.46E+02	Te-129m	3.74E+04
Cs-137	4.74E+06	Sm-151	1.73E+04	Pm-147	3.17E+06	Tm-170	2.26E+00
Eu-152	2.12E+02	Sn-117m	1.03E+00	Pm-148	2.29E+03	Y-90	3.54E+06
Eu-154	6.39E+05	Sn-119m	6.86E+03	Pm-148m	4.07E+04	Y-91	4.01E+06
Eu-155	4.20E+05	Sn-121m	1.05E+01	Pr-143	4.64E+03	Zr-93	8.95E+01
Eu-156	3.87E+03	Sn-123	5.43E+04	Pr-144	2.82E+07	Zr-95	7.30E+06
活化产物							
Ag-109m	3.44E+01	Nb-95	6.42E+05	Fe-59	4.16E+01	Ta-182	1.92E+04
Ag-110m	2.29E+01	Nb-95m	2.36E+03	Gd-153	3.21E+01	Tb160	1.89E+02
Ca-45	7.87E+00	Ni-59	1.32E+01	Hf-175	7.60E+01	Te-125m	1.62E+01
Cd-109	3.44E+01	Ni-63	2.34E+03	Hf-181	1.67E+03	W-181	4.71E+00
Cd-115m	6.14E+01	Re-188	4.54E+00	In-113m	1.25E+01	W-185	2.72E+02
Co-58	3.94E+03	S-35	2.38E+02	In-114	4.05E+01	W-188	4.49E+00
Co-60	5.30E+04	Sc-46	3.95E+00	In-114m	4.23E+01	Y-91	5.80E+02
Cr-51	8.02E+02	Sn-113	1.25E+01	Mn-54	8.89E+02	Zn-65	2.95E+03
Eu-154	1.78E+00	Sn-119m	1.68E+02	Nb-93m	1.38E+00	Zr-93	1.45E+01
Eu-155	1.11E+00	Sn-123	5.50E+00	Nb-94	2.32E+02	Zr-95	3.19E+05
Fe-55	8.78E+03	Sr-89	1.64E+02				

表 4-25 材料中心放射性取样产生的固体废物源项

核素	活度浓度 (Bq/kg)	核素	活度浓度 (Bq/kg)
活化产物			
Ag-109m	8.65E-03	Cd-115m	1.55E-02
Ag-110m	5.76E-03	Sb-125	1.70E-02
Cd-109	8.65E-03	Te-125m	4.08E-03
裂变产物			
Ag-110	5.67E-01	Sb-124	3.13E+00
Ag-110m	4.26E+01	Sb-125	1.38E+02
Cd-113m	7.81E-01	Sb-126	1.81E-03
Cd-115m	1.02E+00	Sb-126m	9.13E-03
Cs-134	2.49E+03	Te-123m	1.77E-01
Cs-135	4.62E-03	Te-125m	3.31E+01
Cs-136	5.16E-02	Te-127	4.10E+01
Cs-137	1.19E+03	Te-127m	4.19E+01
I-131	1.20E-03	Te-129	6.13E+00
Rb-86	4.10E-02	Te-129m	9.41E+00

表 4-26 同位素中心池水净化产生的固体废物源项

核素	活度浓度 (Bq/kg)	核素	活度浓度 (Bq/kg)	核素	活度浓度 (Bq/kg)
I-129	1.17E-03	Sr-90	1.02E-01	Ba-140	2.12E+00
I-130	1.78E+00	Sr-91	1.26E-02	La-140	1.94E-01
I-131	3.72E+04	Nb-95	3.46E-01	Cr-51	2.98E+05
I-133	4.48E+03	Zr-95	3.54E-01	Mn-54	1.04E+04
I-135	4.36E+00	Mo-99	9.26E+01	Fe-59	9.73E+03
Cs-134	1.13E+06	Tc-99m	3.89E-02	Co-58	1.26E+06
Cs-136	3.58E+05	Te-125m	4.67E-01	Co-60	1.93E+05
Cs-137	6.06E+05	Te-127	3.46E-02	Sb-122	1.11E+04
Br-82	1.03E+00	Te-129m	1.42E+01	Sb-124	3.49E+04
Rb-86	3.88E+00	Te-131m	4.58E+00	Ag-110m	2.15E+04
Sr-89	1.51E+00	Te-132	9.59E+01	Ni-63	3.14E+04

表 4-27 同位素中心放射性去污产生的固体废物源项

核素	活度浓度 (Bq/kg)	核素	活度浓度 (Bq/kg)
Tc-99	2.45E-03	Nb-94	4.95E+02
Sr-90	4.22E-01	Mn-54	1.51E+01
Y-90	4.22E-01	Fe-55	1.44E+03
Nb-93m	8.68E+00	Ta-182	2.12E+00
Co-60	6.86E+00	Zr-95	1.30E-02
Zr-93	3.21E+01	Nb-95	2.99E-02

表 4-28 通风系统放射性废物特性

序号	来源	产生位置	尺寸 (mm)	数量 (个)	材质	可燃性	含水率	源项
1	F/FA/M	管道式过滤器	380×380×220	24	滤芯	非可燃	不含水	以 F8 热室排风过滤器和 F 线吊装大厅排风过滤器为代表。见表 4-29~表 4-30。
2	F/FA/M	管道式过滤器	380×380×50	24	滤芯	非可燃	不含水	
3	F/FA/M	管道式过滤器	430×430×220	11	滤芯	非可燃	不含水	
4	F/FA/M	管道式过滤器	430×430×50	11	滤芯	非可燃	不含水	
5	F/FA/M	管道式过滤器	484×484×220	10	滤芯	非可燃	不含水	
6	F/FA/M	管道式过滤器	484×484×50	10	滤芯	非可燃	不含水	
7	F/FA/M	管道式过滤器	D518×624	18	滤芯	非可燃	不含水	
8	F/FA/M	管道式过滤器	D518×50	18	滤芯	非可燃	不含水	
9	M	热室出口第一级净化箱体	D518×624	3	滤芯	非可燃	不含水	
10	M	热室出口第一级净化箱体	D518×50	3	滤芯	非可燃	不含水	
11	I	管道式过滤器	380×380×220	4	滤芯	非可燃	不含水	
12	I	管道式过滤器	380×380×50	4	滤芯	非可燃	不含水	
13	I	管道式过滤器	430×430×220	2	滤芯	非可燃	不含水	
14	I	管道式过滤器	430×430×50	2	滤芯	非可燃	不含水	
15	F/FA/M	热室净化机组	D518×624	106	滤芯	非可燃	不含水	
16	I	热室净化箱体	D518×624	4	滤芯	非可燃	不含水	
17	FA	热室碘净化机组	D518×624	6	滤芯	非可燃	不含水	
18	F	热室碘净化机组	D518×624	12	滤芯	非可燃	不含水	
19	排风过滤器机组间	净化箱体	D518×624	20	滤芯	非可燃	不含水	
20	FA	热室碘净化机组	---	1.32m <sup>3</sup>	活性炭	可燃	不含水	见 表 4-31
21	F	热室碘净化机组	---	2.64m <sup>3</sup>	活性炭	可燃	不含水	

表 4-29 F8 热室通风系统放射性废物源项

核素	活度浓度 (Bq/kg)	核素	活度浓度 (Bq/kg)	核素	活度浓度 (Bq/kg)	核素	活度浓度 (Bq/kg)
活化产物							
Ag-108	2.80E-02	Ag-110m	1.49E+01	Sb-124	1.24E-01	Te-125m	1.06E+01

核素	活度浓度 (Bq/kg)	核素	活度浓度 (Bq/kg)	核素	活度浓度 (Bq/kg)	核素	活度浓度 (Bq/kg)
Ag-108m	3.14E-01	Cd-109	2.24E+01	Sb-125	4.42E+01	Te-127	7.60E-04
Ag-109m	2.24E+01	Cd-115m	4.00E+01	Tc-99	4.10E-03	Te-127m	7.76E-04
Ag-110	1.99E-01	Mo-93	1.80E-02	Te-123m	9.86E-02		
裂变产物							
Ag-108m	9.88E-04	Cd-109	6.48E-02	Te-127	1.06E+05	Pd-107	3.52E+00
Ag-109m	6.48E-02	Cd-113m	2.02E+03	Te-127m	1.09E+05	Rb-86	1.06E+02
Ag-110	1.47E+03	Cd-115m	2.64E+03	Te-129	1.59E+04	Rh-102	3.96E+01
Ag-110m	1.10E+05	Sb-126	4.68E+00	Te-129m	2.44E+04	Rh-103m	1.25E+06
Ag-111	7.76E-02	Sb-126m	2.36E+01	Cs-134	6.46E+06	Rh-106	1.06E+07
Ba-136m	2.20E+01	Tc-99	3.64E+02	Cs-135	1.20E+01	Sb-124	8.10E+03
Ba-137m	2.92E+06	Te-123m	4.60E+02	Cs-136	1.34E+02	Sb-125	3.58E+05
Ba-140	1.72E+03	Te-125m	8.58E+04	Cs-137	3.10E+06		

表 4-30 F 线吊装大厅通风系统产生的放射性废物源项

核素	活度浓度 (Bq/kg)	核素	活度浓度 (Bq/kg)	核素	活度浓度 (Bq/kg)
活化产物					
Ag-109m	7.62E-03	Cd-109	7.62E-03	Sb-125	1.50E-02
Ag-110m	5.08E-03	Cd-115m	1.36E-02	Te-125m	3.60E-03
裂变产物					
Ag-110	5.00E-01	Cs-137	1.05E+03	Sb-126m	8.04E-03
Ag-110m	3.76E+01	I-129	3.14E-04	Tc-99	1.22E-02
Ba-136m	7.42E-04	I-131	1.06E-03	Te-123m	1.56E-01
Ba-137m	9.86E+01	Rb-86	3.62E-02	Te-125m	2.92E+01
Ba-140	5.78E-02	Rh-102	1.34E-03	Te-127	3.62E+01
Cd-113m	6.88E-01	Rh-103m	4.22E+01	Te-127m	3.68E+01
Cd-115m	9.00E-01	Rh-106	3.56E+02	Te-129	5.40E+00
Cs-134	2.20E+03	Sb-124	2.76E+00	Te-129m	8.30E+00
Cs-135	4.08E-03	Sb-125	1.22E+02		
Cs-136	4.56E-02	Sb-126	1.59E-03		

表 4-31 F 线碘吸附器活性炭中主要核素的活度浓度

核素	比活度 (Bq/kg)
I-129	3.20E+02
I-131	1.08E+03

#### 4.3.4.2 放射性固体废物的处理和管理

##### (1) 放射性固体废物收集

放射性固体废物由运行人员在其产生厂房进行收集封装，产生的各类废物应进行分类收集。废物收集封装应满足下述要求：

- a) 各类包装容器内废物体积含水率都应小于 1%，并且可直接装填进容器内部，无需进行切割；
- b) 放射性废物核素进行详细检测，严格按照放射性废物分类标准将中低放固体废物进行分类收集；
- c) 废物容器收集过程中持续进行检测，确保封盖后的废物包装容器表面剂量率应小于 2mSv/h，距离废物包装容器表面 1m 的区域剂量率应小于 0.1mSv/h；
- d) 若包装容器表面有污染则应进行去污操作，确保去污满足 GB11928-1989 《低、中水平放射性固体废物暂时贮存规定》相关要求后方可转运至通风及固废中心进行存储；
- e) 废物包装容器检测完成后应对包装容器信息进行详细记录，便于后续废物容器转运及存储。记录信息包括废物桶编号，桶内废物类型，主要放射性核素、活度、表面剂量率和距离屏蔽容器表面 1m 处的表面剂量率等信息。

##### (2) 放射性固体废物的处理

本项目放射性固体废物产量较少，配置专用的废物处理设施会产生较多的二次废物，且废物处理设施投资和运营成本较高，因此本项目未设置固体废物处理设施。本项目产生的低放干固体废物分类收集后在通风及固废中心暂存，定期转送至阳江核电固体废物处理系统（OTES）进行处理。根据废物具体特性，可焚烧的废物经过分类打包后外运焚烧；可压缩废物经过分拣分类后采取超压后水泥灌浆固定处理；不可压缩废物直接采用水泥灌浆固定方式处理。外送阳江核电处理整备后形成的废物货包转送回本项目进行存储。

本项目运行产生的废树脂和活性炭在同位素中心的废物暂存罐内存储，拟通过废物转运装置运送至阳江核电厂 3、4 号机组固体废物处理系统（8TES）处理。转运装置运送至 3、4 号机组核辅助厂房后，将输送软管和快速接头与 8TES 系统增设的废物接收接口连接，通过水力输送方式将废物输送至 HIC 容器内，装填废物的 HIC 容器将进行脱水、封盖处理和厂内暂存。

本项目运行产生的中放固体废物通过专用容器收集封装后在通风及固废中心长期

存储，待后续有合适的处理工艺时再进行处理。

阳江核电厂已同意接收本项目产生的低放射性固体废物并进行处理，详见附件 1。

### (3) 放射性固体废物暂存

根据废物特性，将废物存储区分为可燃废物存储区和非可燃废物存储区。可燃废物存储区设置低放可燃废物存储区、可燃废物外运整备区和废物装卸区，非可燃废物存储区设置中放废物存储区、待处理废物存储区、整备废物存储区、极低放废物存储区、解控检测间以及废物装卸区。

#### a) 低放可燃废物存储区

低放可燃废物存储区用于存储各厂房产生的可燃废物包装容器，包装容器为 200L 钢桶。低放可燃废物存储容量按照 2 年设置，单层堆码，设置 120 个存储位。

#### b) 极低放可燃废物存储区

因为低放可燃废物需要外送进行焚烧处理，因此设置可燃废物外运整备区，占地面积约为 40 m<sup>2</sup>。

#### c) 中放废物存储区

中放废物存储区用于存储材料中心和同位素中心产生的中放废物包装容器。中放废物包装容器尺寸约为  $\phi 500\text{mm} \times 500\text{mm}$ ，容器已考虑屏蔽设计，保证封装后的容器表面剂量率小于 2mSv/h，中放废物容器转运及存储不需要屏蔽措施。中放废物都属于非可燃废物，设置钢爬梯用于特殊工况下人员进入中放废物存储区。中放容器单层堆码，总共设置 120 个存储位。

#### d) 待处理废物存储区

待处理废物为非可燃废物，主要包括通风滤芯、水过滤滤芯及其他不可燃干废物。待处理废物采用 400L 钢桶进行分类收集封装。待处理废物存储区按照 2 年存储容量进行设置，单层堆码，设置 126 个 400L 金属桶存储位置。

#### e) 整备废物存储区

本项目待处理废物及部分无法解控的极低放废物外送进行处理，处理整备后的包装容器转运至通风及固废中心的整备废物存储区进行存储。整备废物存储区按照 5 年存储容量进行设置。整备废物包装容器为 400L 钢桶，双层堆码，设置 238 个 400L 金属桶存储位置。

#### f) 极低放废物存储区

非可燃极低放废物主要为通风滤芯，通风滤芯采用 200L 钢桶进行收集封装，极低

放废物存储区按照 2 年存储容量进行设置，设置 432 个存储位置。

g) 解控检测间

解控检测间用于极低放废物的解控检测，设置在极低放废物存储区旁边，占地面积设置约 30 m<sup>2</sup>。

h) 废物装卸区

可燃废物存储区和非可燃废物存储区相互独立，两个区域分别设置专用的废物装卸区，可燃废物存储区为废物装卸 1 区，非可燃废物存储区为废物装卸 2 区。废物装卸区配置专用吊车用于各类废物包装容器的吊装。

(4) 放射性固体废物处置

废树脂配置专用转运装置，将废树脂外运阳江核电厂进行处理。

本项目低水平放射性固体废物依托阳江核电厂进行处理，其中，低放可燃固体废物随阳江核电厂低放可燃固体废物一同外送焚烧处理，其它低放固体废物转送阳江核电厂进行处理，处理后的废物货包包装形式满足相关法规要求，并可满足阳江新建废物处置场的接收要求，本项目的废物包将优先考虑转送阳江处置场进行处置。

本项目将参照国家中放废物处置场的规划和建设情况，最终将本项目的中放废物转送至适合的处置场。

目前，固体废物能够满足在本设施安全暂存，项目建设单位应积极跟踪放射性废物处置场的设计、建设和运行，及时签订最终处置合同。

### 4.3.5 乏燃料暂存系统

本项目材料中心贮存的核裂变材料为压水堆燃料棒或切割样品，乏燃料棒最大燃耗 62GWd/tU、U-235 初始富集度最高 4.95%。

未经切割的乏燃料棒（包括完整乏燃料棒和破损乏燃料棒），在 FA 热室内装入不锈钢管(φ20mm)并焊接密封，暂存入 FA 热室的储存井。切割后的燃料棒和燃料样品，在 F5 热室内装入不锈钢管(φ20mm)并焊接密封，暂存入 F4 热室的储存井。切割产生的燃料棒碎屑和残渣，在热室内收集后装入不锈钢管，在 F5 热室内焊接密封，暂存入 F4 热室的储存井。

密封管材料为 316L 不锈钢，外径 2cm，壁厚 0.1cm。装有燃料棒或燃料切割样品的密封管放入贮存井吊篮，吊篮再放入贮存井中。密封管在贮存井内部密排，按每个贮存井装载 20 个密封管设计。贮存井材料为不锈钢，壁厚 0.4cm。贮存井上端为屏蔽



塞段，内径为 18.4cm，贮存井下端是内径为 15.1cm 的主体，吊篮外径为 12.7cm，壁厚 0.3cm。

焊接后的密封管泄漏检查合格（氦泄漏率 $\leq 1 \times 10^{-6} \text{Pa m}^3 \text{s}^{-1}$ ）方可存入储存井。在运行期间，定期对密封管进行泄漏检查（一般为一年一次），若检查结果不合格，取出乏燃料/样品，重新焊封新的密封管。

组件检查热室（FA）共设计有 28 个贮存井，设计深度为 549.1cm，中心距为 30cm 和 40cm 的贮存井交叉排列。

样品储存热室（F4）共设计有 73 个贮存井，设计深度为 208.1cm，贮存样品中裂变材料部分有效高度为 100cm。

无损检测热室（F1）、切割热室（F2）、燃料棒装配热室（F17）及燃料棒装备热室（F18）均设有 6 个贮存井，各贮存井按中心距 40cm 呈一字排列。

贮存井能满足本项目全寿命周期内产生的 400 根燃料棒的暂存要求，储存井信息见表 4-32，储存井结构示意图见图 4-45~图 4-47。

表 4-32 储存井信息

储存井位置	数量 (个)	深度 (mm)	样品芯块活性区长度 (mm)	储存井中心距 (mm)
组件检查热室（FA）	28	5491	4267.2 (考虑 AP1000 燃料棒)	交叉排列，间距 300、400。
无损检测热室（F1）	6	2081	1000	一字排列，间距 400
切割热室（F2）	6	2081	1000	一字排列，间距 400
样品储存热室（F4）	73	2081	1000	排列方式见图 4-47
燃料棒焊接热室（F17）	6	2081	1000	一字排列，间距 400
燃料棒装配热室（F18）	6	2081	1000	一字排列，间距 400

依据《中广核研究院热室设施建设项目安全分析报告》，对于本项目材料中心各热室燃料棒或切割贮存井系统，其临界安全结论如下：

- 正常工况下系统  $k_{\text{eff}}$  保守值为 0.53523，离临界还有很大的安全裕量，不具有临界风险；
- 事故工况下系统  $k_{\text{eff}}$  保守值为 0.80384，离临界还有很大的安全裕量，不具有临界风险。

因此，本项目材料中心相关热室贮存井在满载裂变材料情况下满足核临界安全准则，不具有临界风险。

本项目的乏燃料和乏燃料样品最终将送往国家指定的废物处置设施进行处置，同

时积极开展本项目内乏燃料/样品最终处置相关科学技术研究，确保其安全、妥善处置。

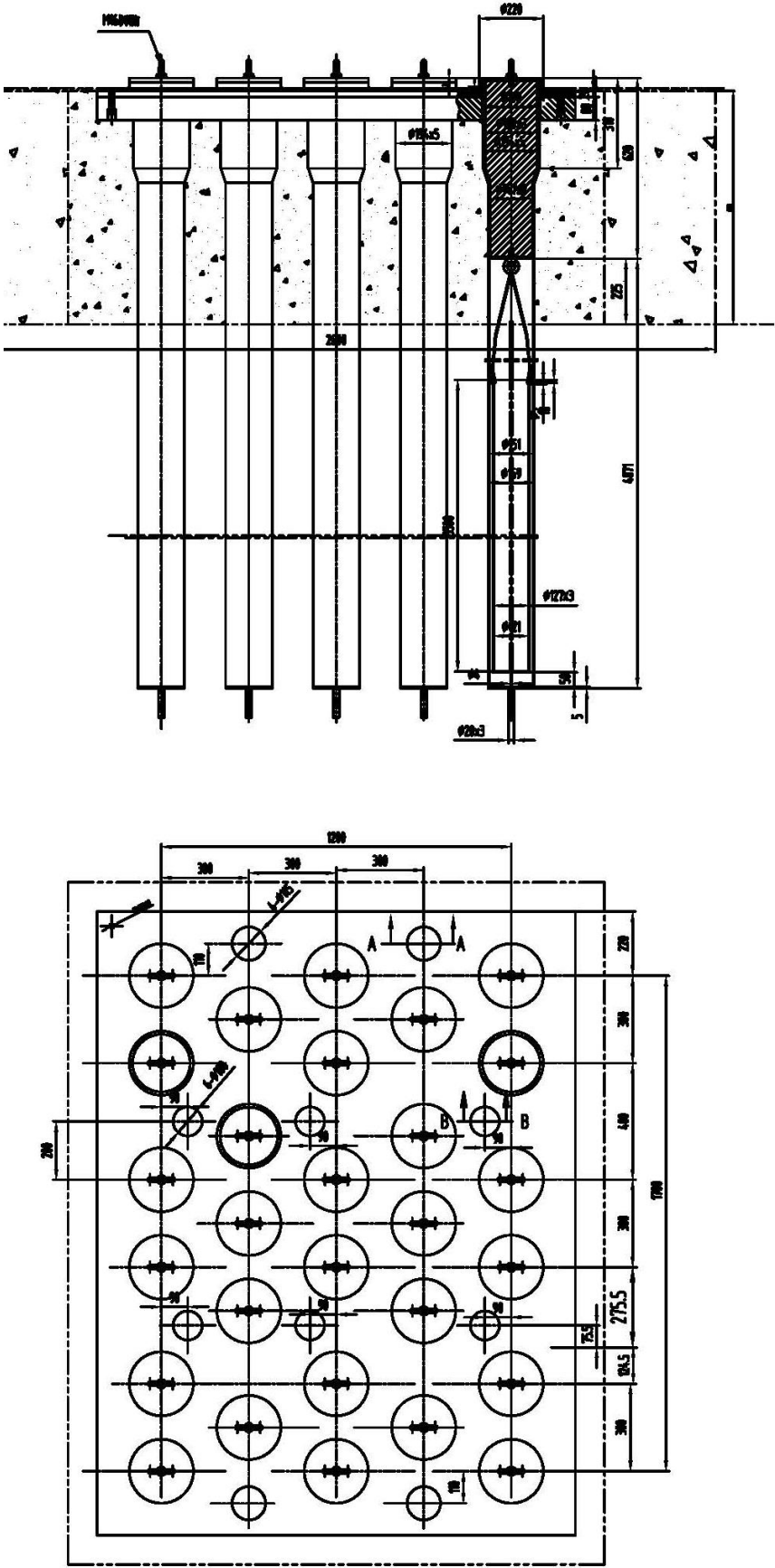


图 4-45 FA 热室储存井结构及布置示意图

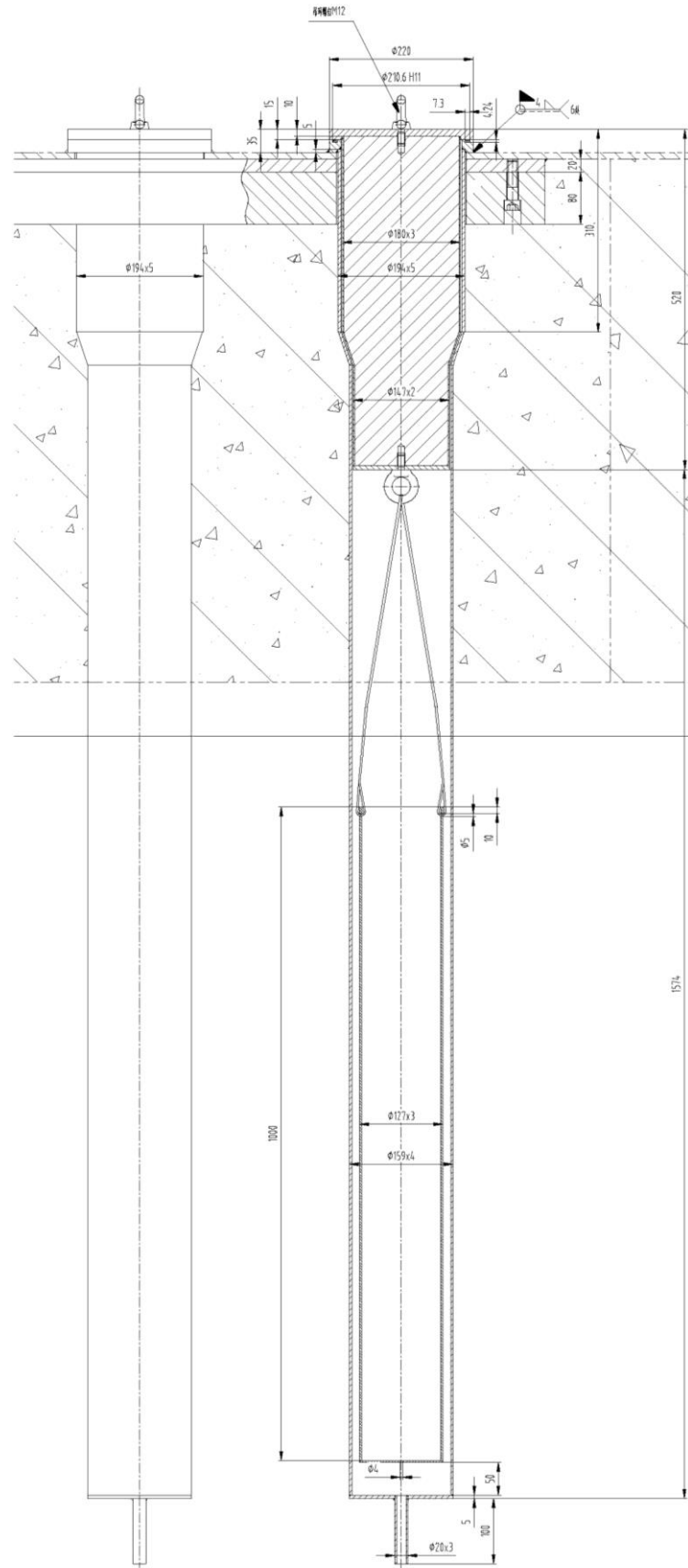


图 4-46 F 线 F1、F2、F4、F17 和 F18 热室储存井布置示意图

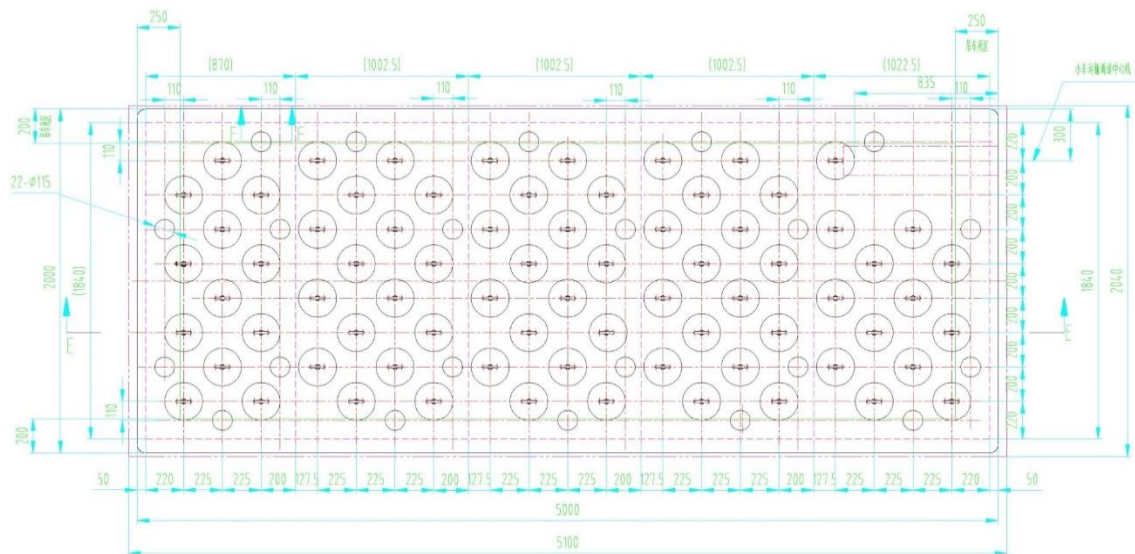


图 4-47 F4 热室储存井布置示意图

### 4.3.6 废旧源贮存系统

本项目  $^{60}\text{Co}$  放射源生产线计划年生产量为  $3.7 \times 10^{17} \text{Bq}$ ，在正常使用环境下，该类型放射源产品可使用 20 年，本项目承诺回收废旧放射源，设置一个贮源量  $3.7 \times 10^{17} \text{Bq}$  的废旧源水池，同时使用屏蔽容器开展废旧源干式贮存工作，该容器满足《放射性物质运输规程》(GB11806-2019)中对于 B(U)型货包的要求，每个容器最大装源量  $7.4 \times 10^{15} \text{Bq}$ ，在项目运行阶段将根据废旧源的回收贮存情况适时开展干式贮存工作，该容器的示意图见图 4-48。

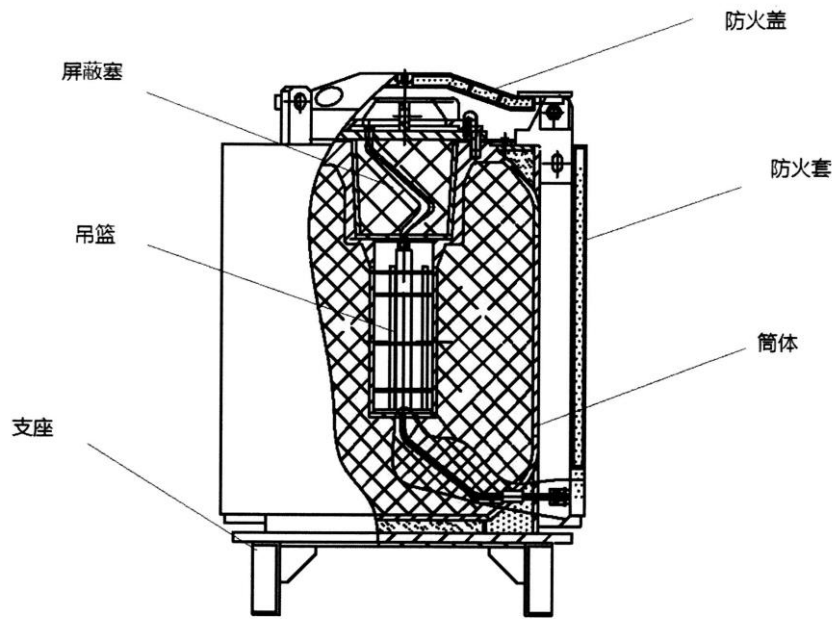


图 4-48 废旧源干式贮存容器示意图

## 4.4 非放射性废物处理系统

### 4.4.1 固体废物

#### (1) 通风系统非放固体废物

通风系统产生的主要非放固体废物是送风空气处理机组的空气过滤器，当送风过滤器阻力达到 2 倍初阻力时更换，按每年更换一次计算，每年产生废送风过滤器 256 个，约 19.8m<sup>3</sup>，作为一般固体废物处理。

#### (2) 除盐水系统非放固体废物

除盐水系统产生的主要非放固体废物是抛光树脂，每年约产生 200L，由生产厂家回收或有委托资质的单位处理。

#### (3) 危险废物

本项目正常运行期间，非放射性的材料试验和除盐水系统会产生一定量的危险废物，见表 4-33。

本项目危险废物的具体设计及管理按照 GB18597《危险废物贮存污染控制标准》执行，主要的管理措施有：

- 隔离贮存，将未使用危险物品和使用后的危险废物分别存放在三楼和二楼的独

- 立房间内，不同物料之间隔开一定距离，采用专用容器存放；
- 专人管理，配备有专业知识的技术人员，人员配备可靠的个人防护用品；
  - 标志：化学危险品容器有明显的标志，注明名称，数量，入库日期，危险特性，应急处置方法等信息；
  - 贮存场所：耐火等级一级，隔墙/楼板的耐火极限符合建筑设计防火规范的规定，配置洗眼器；
  - 电气设备：配电线路、灯具、应急照明、疏散指示标志符合相关安全要求；
  - 通风：安装通风设备，通风设备安装接地装置；
  - 消防：设置移动式灭火器，灭火器种类根据危险物品性质确定，配备经过培训的兼职消防员，设计火灾自动监测及报警系统；
  - 废弃物处理：废弃物品不得任意丢弃，分类收集存放，统一送往指定地点用化学或物理的方法处理，不得直接向环境排放；
  - 人员培训：定期组织人员培训，熟悉贮存物品性质、种类、事故应急处理方法。

表 4-33 本项目危险废物产生量

废物类别	废物代码	危险废物	危险特性	年产生量	产生位置
HW32 无机氟化物废物	900-026-32	使用氢氟酸蚀刻产生的废蚀刻液	T, C	500ml	金相样品制备实验室
HW34 废酸	900-302-34	使用硫酸进行酸蚀产生的废酸液	C	500ml	
	900-307-34	使用酸进行电解抛光处理产生的废酸液		500ml	
	900-349-34	使用盐酸进行酸蚀产生的废酸液		800ml	
	900-349-34	使用硝酸蚀刻产生的酸废液		800ml	
HW35 废碱	900-399-35	使用氢氧化钠腐蚀产生的废碱液		800ml	
HW13 有机树脂类废物	900-015-13	离子交换树脂	T	300L/5 年	
/	/	反渗透膜	/	20 支/3 年	
HW13 有机树脂类废物	900-016-13	过滤器滤芯（20 寸）	T	15 支	
HW49 其他废物	900-039-49	活性炭	T	300kg	

## 4.4.2 废水

本项目生活用水服务人数为 120 人，用水标准取 50L/人·日，最高日用水量 6m<sup>3</sup>；最高日生活污水排水量取生活用水量的 90%，即 5.4m<sup>3</sup>。

生活污水收集系统仅收集非放射性区域的生活污水，通过场区污水管网排至化粪池，最终进入一体化污水处理设施进行处理，污水处理设施的设计处理能力为 1 m<sup>3</sup>/h（6m<sup>3</sup>/d），一体化污水处理设备的工艺流程拟采用如下工艺流程：格栅调节池+A<sup>2</sup>O+MBR 膜池+BAF 曝气生物滤池+消毒池+排放，并可全自动运行，其出水水质满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》（GB18918-2002）的二级标准。

根据阳江核电厂污水处理站《工艺设计总说明》（PY0ED001W02MGJ442SD）中的要求，阳江核电厂污水处理站接收水质限值为 COD<sub>Cr</sub>≤400mg/L，SS≤200mg/L，pH 范围 6~9，本项目出水水质满足阳江核电厂污水处理站的接收标准，阳江核电厂已同意接收本项目产生的生活污水并进行处理排放，详见附件 2。

## 4.4.3 废气

任何致电离辐射都会使空气发生辐射分解产生臭氧（O<sub>3</sub>）和氮氧化物（NO<sub>x</sub>），其产生量见 6.3.4 节。

## 4.4.4 噪声

### 4.4.4.1 噪声源

本项目通风空调系统主要噪声源包括风机、空气处理机组、循环水泵、风冷热泵机组等能动设备，噪声来源于设备的振动及运转。由于通风空调系统根据实验需求控制启停，根据主工艺需求，通风空调系统每天工作 8h，通风及固废暂存中心通风系统连续运行。其中排烟风机、排烟补风机和加压送风风机仅在火灾工况下启动。工业安全事故及事故后风机仅在发生工业安全事故时启动。

对通风空调系统主要设备噪声设计要求如下：

#### （1）风机

轴流风机和轴流式屋顶风机不高于 35 dB（A）。

箱式风机满足：

- 当额定风量为 $\leq 4000 \text{ m}^3/\text{h}$ 时，机组噪声声压级不超过 60dB (A)；
- 当额定风量为  $5000 \text{ m}^3/\text{h}$ - $6000 \text{ m}^3/\text{h}$  时，机组噪声声压级不超过 62dB (A)；
- 当额定风量为  $7000 \text{ m}^3/\text{h}$ - $8000 \text{ m}^3/\text{h}$  时，机组噪声声压级不超过 64dB (A)；
- 当额定风量为  $9000 \text{ m}^3/\text{h}$ - $12000 \text{ m}^3/\text{h}$  时，机组噪声声压级不超过 66dB (A)；
- 当额定风量为  $15000 \text{ m}^3/\text{h}$ - $20000 \text{ m}^3/\text{h}$  时，机组噪声声压级不超过 70dB (A)；
- 当额定风量为  $25000 \text{ m}^3/\text{h}$ - $50000 \text{ m}^3/\text{h}$  时，机组噪声声压级不超过 80dB (A)；
- 当额定风量为  $60000 \text{ m}^3/\text{h}$ - $80000 \text{ m}^3/\text{h}$  时，机组噪声声压级不超过 85dB (A)。

#### (2) 空气处理机组

- 当机组额定风量为  $2000 \text{ m}^3/\text{h}$ - $5000 \text{ m}^3/\text{h}$  时，机组噪声声压级不超过 65dB(A)；
- 当机组额定风量为  $6000 \text{ m}^3/\text{h}$ - $10000 \text{ m}^3/\text{h}$  时，机组噪声声压级不超过 70dB(A)；
- 当机组额定风量为  $15000 \text{ m}^3/\text{h}$ - $25000 \text{ m}^3/\text{h}$  时，机组噪声声压级不超过 80dB(A)；
- 当机组额定风量为  $30000 \text{ m}^3/\text{h}$ - $60000 \text{ m}^3/\text{h}$  时，机组噪声声压级不超过 85dB(A)。

#### (3) 循环水泵

距泵组表面 1m 距离的任何测量点处，测量的声压级不超过加权值 85dB (A)。

#### (4) 风冷热泵机组

任何一台的风冷热泵机组的声压级不超过 85dB (A)

本项目噪声源涉及的风机和空气处理机组见表 4-3~表 4-5，循环水泵和风冷热泵机组见表 4-7。

### 4.4.4.2 噪声污染防治措施

本项目污染区通风系统考虑降噪措施如下：

- 在系统设计中，选择合理的介质流速，管道布置顺畅，管径变化减少突变，尽量减少因管道产生的振动和噪声；
- 局部噪声较大场合配置装置，如空气处理机组下游设置消声器；
- 管道与泵等振动较大的设备接口处尽量采用柔性连接；
- 设备采购时，根据噪声防治标准及振动标准向供货商提出设备噪声和振动限制要求（设置减震器等），并要求配套供应隔音罩等，尽量选用噪声低、振动小的设备；
- 通风设备设在独立机房内，经建筑隔声与衰减。



## 4.5 放射性物质场内运输

### 4.5.1 压水堆燃料棒场内运输

经反应堆辐照一定燃耗，冷却至少 6 个月的燃料棒装入乏燃料棒运输容器，运抵材料中心 F 线汽车房，用吊装大厅的 32t 吊车将容器放在轨道运输车上，移动轨道运输车使其与无损检测热室（F1）侧墙的水平转运孔道对接，将吊篮送入热室，在 F1 中进行无损检测，如果燃料棒需要进行 CT 无损监测，则将燃料棒装入乏燃料棒运输容器，使用汽车将燃料棒从 F1 热室运至 FA 热室，在 FA 热室进行 CT 无损监测，CT 无损监测完成后仍然将燃料棒乏燃料棒运输容器，再通过汽车将燃料棒从 FA 热室运至 F1 热室。

场内运输采用场外运输容器，其安全性能满足场内安全运输要求。

### 4.5.2 厂房内运输

#### （1）燃料棒及样品运输

燃料棒及样品转运指的是燃料棒和样品（金相样品、结构材料样品、力学性能样品、微观分析样品、燃耗分析样品等）在各热室间的运输。

F 线（F1~F18）热室等相邻热室隔墙之间设有水平转运孔道，可进行样品的转运。

F1、F4、F6、F12、F14、F17、F18 等 7 间热室顶部设热室垂直样品转运孔道，可与燃料棒或各类样品转运容器对接，进行燃料单棒或各类样品的转运。

包壳力学性能分析样品需将样品从样品清洗热室（F6）经 F 线吊装大厅与 M 线吊装大厅之间的通道门，转运至 M 线吊装大厅，通过转运铅罐与热室顶部的垂直转运孔道对接完成样品的转入及转出。M 线 M2、M4、M6、M8、M10、M12、M13 等 7 间热室顶部设有热室垂直转运孔道。

材料样品制备热室制备的样品，通过转运铅罐转运至 M 线热室。

F 线热室制备的燃料样品，通过微观样品转运铅罐经 F 线热室顶部垂直样品转运孔道到 F 线吊装大厅，再经 F 线吊装大厅与 M 线吊装大厅之间的通道门到 M 线吊装大厅，通过微观样品制备屏蔽箱房间顶部的吊装孔，将铅罐吊至微观样品制备屏蔽箱房间，然后分别运输到扫描电镜分析铅室、电子探针分析铅室、FIB 分析铅室、XRD 分析铅室、Raman 光谱分析铅室、XRF 分析铅室、热物性能分析铅室等。

## (2) 钴源生产工艺运输

将装有辐照靶件的运输容器，运抵同位素中心钴源生产线的汽车房，利用吊装大厅的 16t 吊车将转运容器入水池，将装有同位素辐照靶件的吊篮装入水池格架上，从而完成钴源辐照靶件的接收。

钴源靶件进入热室主要通过接收水池之间的斜孔道进入内包壳封装热室（II）。同位素生产线热室之间隔墙均设有双盖运输通道，可进行样品的转运。

同位素产品完成封装之后，通过检验热室与成品源水池之间的斜孔道进入水池。

同位素产品储存在成品源水池中，利用水下操作工具将成品源装入转运容器中，利用吊车将容器吊装至运输车中，通过汽车大厅运出同位素中心设施，完成同位素产品的运输。

## (3) 放射性固体废物转运

### 一 中放固体废物转运

热室中产生的中放固体废物有：切割时的碎屑、过滤器芯、废砂轮片以及废砂纸等。

中放废物在热室中被收集，通过热室顶部的废物转运孔道和废物转运容器将固体废物转移至废物整备热室暂存，随后转入中放废物屏蔽容器内通过场内运输运抵固废暂存库。

同位素生产过程中产生的靶件包壳先暂存在接收水池中，后续装桶转运至固废暂存。

### 一 低放固体废物转运

低放固体废物为进入热室或去污维修用过的手套、口罩、塑料制品、沾污的衣帽、棉纱等，放射性水平较低，一般装袋、装桶运抵固废暂存中心固体废物暂存库。

## 4.5.3 运输容器

本项目内设置多种运输容器和转运容器，供乏燃料棒厂内、场外运输，及各类样品的厂内运输。容器基本信息见表 4-34。

表 4-34 运输容器基本信息

序号	容器名称	运输源项	屏蔽能力	数量	内腔尺寸 mm	外型尺寸 mm	运输路径	结构形式	接口方式
1	乏燃料运输容器	≥10 根乏燃料单棒	---	1	>φ210×4580	φ1700×7000	场外→FA、F1	圆柱体，上端旋转门，底端屏蔽塞，带减震器	热室水平转运孔道
2	辐照监督组件运输容器	1 个监督组件	等效铅厚度 150mm	2	φ70×2500	φ400×3000	场外→FA	圆柱体，顶部旋转门，底部推杆，内设吊桶减震。	热室水平样品转运孔
3	微观样品转运铅罐	单个燃料芯块镶嵌样品	3.7E+11Bq ( <sup>137</sup> Cs)	5	φ40×30	φ250×250	F 线→X 线	茶杯状，上部设吊耳、铅屏蔽塞	热室垂直样品转运孔
4	材料样品转运铅罐	包壳样品、结构材料样品、辐照监督样品	等效铅厚度 80mm	3	φ70×200	φ250×400	F 线→M 线→屏蔽箱	圆柱体，上端设手动提升机构，下端抽屉式屏蔽门	热室垂直样品转运孔
5	燃料芯块样品转运铅罐	芯块样品	7.4E+12Bq ( <sup>137</sup> Cs)	1	φ70×200	φ350×500	F2→F13	圆柱体，上端设手动提升机构，下端扇形旋转屏蔽门	热室垂直样品转运孔
6	钴靶件运输容器	钴靶件	1.48E+16Bq ( <sup>60</sup> Co)	5	φ300×480	φ1400×1700	场外→钴靶件接收水池	圆柱体，上端屏蔽塞，设排气孔、排水孔，四周带散热片	水下操作
7	成品源运输容器 1	钴源	7.4E+15Bq ( <sup>60</sup> Co)	5	φ165×480	φ1100×1500	成品源水池→场外	圆柱体，上端屏蔽塞，设排气孔、排水孔，四周带散热片	水下操作
8	成品源运输容器 2	钴源	3.7E+15Bq ( <sup>60</sup> Co)	1	φ165×480	φ1000×1300	成品源水池→场外	圆柱体，上端屏蔽塞，设排气孔、排水孔，四周带散热片	水下操作
9	废物转运铅罐	中放固废	等效铅厚度 150mm	1	φ270×1000		F 线→屏蔽容器	钟罩式，顶部吊装，底部设电动开关门	热室垂直废物转运孔

## 4.6 初步退役计划

### 4.6.1 退役策略

本设施主要有两种退役策略：立即拆除和延缓拆除。

参考 GB/T 19597-2004《核设施退役安全要求》中的规定，在退役经费和退役技术能保障退役活动的安全时，应采取立即拆除的退役策略。在退役经费和退役技术不充分时，可选择延缓拆除的退役策略，但必须向有关部门申述理由并承诺后续退役经费筹措及退役技术研究开发。

从技术上说，本项目的退役策略既可以采取立即拆除也可以采取延缓拆除。随着科技的发展，预期到本项目退役时，与退役相关的去污技术、拆除技术和废物管理技术将有较大发展，这为本项目的安全退役提供了技术保障。如果选择延缓拆除的退役策略，大量熟悉设施的人员将逐步流失。此外，由于设备老化，部分在拆除时还需要用到的供电、通风、运输系统可能无法使用，需要进行维护或更换，连续的维护和监督也需有经费保障。从人员流失及经济性等方面考虑，选择立即拆除更有利。虽然立即拆除的退役策略存在辐射水平高、废物量较多等问题，但可以通过合适的去污手段、辐射防护措施进行优化和控制。

从退役经费上说，本项目将按照国家相关法规标准考虑退役经费，以保证项目最终退役前有足够的费用，以有利于退役的实施。

退役策略的最终确定需要全面考虑利益相关者意见、法规标准、设施设计和运行历史、财务资源等因素。结合我国法规标准、国际退役工程实践、退役技术发展和本项目实际情况，当前阶段考虑采用立即拆除的退役策略，即在本项目关闭后不久就开始源项调查、去污、拆卸/拆除等退役活动，并尽早完成退役。现阶段所考虑的退役最终目标是实现场址无限制的开放和使用。

### 4.6.2 退役方案初步设想

本项目初步考虑采用立即拆除的退役策略。根据 IAEA 和国际上退役设施的实践经验，本项目立即拆除可以分为以下过程：

在确定退役前，必须使存储在本项目中的所有乏燃料棒、切割剩余的核材料等得到

安全处置，否则该项目设施必须长期维护，保证必要的人力和设施以维持设施的安全。

首先，完成退役前期准备工作，该工作在本项目最终关闭前开展，主要工作是开展退役可行性研究、退役执照申请、退役设计及退役技术研发等工作。

在本项目最终关闭不久，进行设施内操作源项移除、源项调查、现场改造、安全维护、运行废物（包括固体废物、废液等）的清理，以及主工艺、辅助设施和工艺厂房的初步去污等活动。

随后是放射性系统、设备及受污染厂房的去污和拆除，并按规定处理、贮存或处置放射性废物。本项目的退役拆除工作主要包括主工艺系统及设施的拆除，如燃料检验研究线、材料研究线、微观分析线、钴源生产热室等。部分拆除工作开展前需要进行进一步去污。去污和拆除的工作可能需要借助远程遥控技术或机器人技术。

上述工作是连续进行的。根据国际相关退役设施经验，大多先进行外围设施的拆除，再进行放射性设施的拆除。本项目退役时拟采用从外至内的拆除顺序。

最后进行场址恢复、场址终态调查、许可证终止等。

本项目最终关闭前就将开始退役前准备工作，根据国际相关退役设施经验，经初步分析和整理，整个退役过程（包括前期准备）预计将在 10 年内完成。

#### 4.6.3 便于退役的初步考虑

参考 IAEA 安全要求和国际设施退役经验反馈，本项目已尽早地考虑未来退役的问题。本项目便于退役的考虑以不影响安全运行和维护为前提，设计贯彻废物最小化的原则，使本项目从运行开始直至退役终止的整个过程中，放射性废物的数量和活度合理可行尽量低。除废物最小化原则外，还需要贯彻纵深防御措施，以减少因疏忽而造成的放射性物质泄漏的风险。

本项目对设计进行综合考虑，以便于在退役期间：

- a) 尽可能降低人员和公众风险；
- b) 尽可能减少环境影响；
- c) 易于去污、拆除；
- d) 尽可能减少废物产生量；
- e) 节省退役相关费用等。

本项目设计中，设计者已充分了解退役有关的问题、策略和技术，结合退役相关法规标准中对材料的选取、必要的可达性和可操作性、放射性废物管理等方面的要求，

在设计中从项目总平面布置、工艺系统设计、建（构）筑物设计、设备设计、布置设计、材料选取、放射性废物管理等方面开展了便于退役的设计考虑，简要概括如下：

a) 总平面布置设计已考虑退役期间所需的物料运输路线，厂房布置充分考虑人员设备流通过程和空间的可达性、可操作性；

b) 系统设计重点从便于去污、便于拆除以及废物最小化等方面考虑了便于退役的设计；

c) 建（构）筑物的设计便于退役时源项调查、去污和拆除等工作，并尽量减少容易产生放射性沉积的结构，便于设备（部件）的移除或就地拆解；

d) 设备采用结构简单、便于维修、更换、运输、排空、去污、拆解的设计；

e) 系统、设备及管道的布置设计结合建（构）筑物、系统和设备的设计要求，考虑了便于去污、便于拆除、可用性等方面因素，其中退役辅助系统筹考虑更换修复可行性，以保证在退役期间持续提供服务的能力；

f) 为便于去污、拆卸及实现废物最小化，选取的材料最大范围内满足低活化特性、耐高温、抗辐照、耐锈蚀、耐腐蚀、机械加工性能良好、化学性质稳定、结构完整性；

g) 结合废物最小化原则，减少废物的产生，统筹考虑退役废物最终去向。

除上述各个方面便于退役的设计考虑外，本项目还考虑了其他便于退役的措施，包括但不限于：

a) 设立辐射监测点，有利于了解退役时被污染的放射性区域；

b) 设置辐射防护措施，不仅有利于运行期间的维护和保养，还有利于退役期间的去污和拆除活动；

c) 持续收集和学习其他类似项目退役的经验反馈；

d) 保存本项目与选址、设计、建造、调试、运行等有关的全部文件和资料，所有资料应分类保存，便于查阅。

## 5 施工建设过程的环境影响

### 5.1 土地利用

本项目建设期间的施工活动主要包括场地平整和工程开挖、道路施工、构筑物建设、设备安装和调试等，这些活动对环境的潜在影响因素主要包括振动、噪声、扬尘、废水、建筑垃圾等方面。

#### 5.1.1 大气环境的影响

施工期间的主要大气污染物包括扬尘、粉尘和汽车尾气，其中，扬尘和粉尘对大气环境质量影响较为明显。施工产生的地面扬尘和粉尘主要来自于施工机械和运输车辆的行驶、土石方开挖和填筑、物料堆放和运输以及施工建筑材料的搅拌等环节，TSP产生量与施工方式、车辆数量、道路路面状况以及天气情况相关。

在施工运输过程中会产生一定量汽车尾气，主要成分为CO、NO<sub>x</sub>和碳氢化合物。汽车尾气的废气量较小，且施工现场均在野外，具有间歇性、短期性和流动性的特点，该类污染源对大气环境的影响较轻。

施工中可采用覆盖、定期洒水等措施减少扬尘的产生。有资料表明，在施工期内对车辆行驶的路面实施洒水抑尘，每天洒水4~5次，可使扬尘减少70%左右；对施工场地实施每天洒水4~5次进行抑尘，可有效地控制施工扬尘，并可将TSP污染距离缩小到20~50m范围。因此，在施工活动中，在采取覆盖、定期洒水等减少扬尘的措施后，施工粉尘及扬尘的影响将局限于施工场地周围，对大气环境影响范围有限。施工结束后这部分大气污染源将不再存在，影响时段有限。

#### 5.1.2 水环境的影响

本工程施工期废水主要为建筑施工废水、含油废水和施工人员的生活污水等，各类废污水处理后回用或外运处理，不直接排入地表水体。

施工期间工程人员集中居住于施工区以外的各村镇或阳江核电生活区，所产生的生活污水由所居住居民点处理，不会对施工人员居住区域的地表水环境造成影响。

施工期间现场的生活污水主要来自场区施工人员和办公人员的生活用水，这部分

污水统一收集后外运处理，不直接向环境水体排放。

施工期间的生产废水来自场地冲洗水、混凝土拌合水、砂石料洗涤用水和车辆冲洗废水，污染物主要为悬浮颗粒物。施工单位在各施工项目区设置沉淀池，废水经沉淀后回用于场地洒水抑尘、绿化等，不外排。此外，机械设备维修保养冲洗产生的含油废水，主要污染物为石油类，通过油水分离装置处理后回用。

### 5.1.3 声环境的影响

施工过程中，施工区域内可能产生噪声的活动包括场地平整和开挖、道路施工、构筑物的建设等，另外设备安装和汽车运输也会产生一定噪声。现场施工机械设备如挖掘机、推土机、钻孔机等噪声值较高，且在实际施工过程中，通常是多台机械设备同时作业，各台设备产生的噪声会互相叠加。表 5-1 给出了施工阶段的主要噪声污染源及噪声级。

表 5-1 施工阶段的主要噪声污染源及噪声级

施工期	主要声源	噪声级 dB (A)
土石方	挖掘机、推土机、平地机、装载机、压路机、打桩机和摊铺机	76~105
底板和结构	混凝土输送泵、振捣机、电锯、电焊机	90~100
内部装修	电钻、电锤、手工钻、无齿锯	100~110
外部装修	升降机、吊车	65~75
交通运输	轻型载重卡车、混凝土罐车、大型载重车	75~95

施工期各种噪声源多为点源，按点声源衰减模式计算施工机械噪声的距离。施工过程中使用的施工机械所产生的噪声主要属于中低频噪声，因此在预测其影响时可只考虑其扩散衰减，计算公式为：

$$L_{A(r_2)} = L_{A(r_1)} - 20 \lg(r_2/r_1)$$

式中：

$L_{A(r_1)}$  及  $L_{A(r_2)}$  分别为距离声源  $r_1$  及  $r_2$  处的等效 A 声级强度 (dB (A)) ；

$r_1$  和  $r_2$  分别为受声点距声源的距离 (m) 。

对某一受声点受多个声源影响时，该点的噪声由下式计算：

$$L_p = 10 \lg \left[ \sum_{i=1}^n 10^{L_{p_i} / 10} \right]$$



式中：

$L_p$ —为几个声源在受声点的噪声迭加，（dB（A））。

$L_{pi}$ —为第  $i$  噪声源在上述受声点的声级，（dB（A））。

可见，施工机械作业时可视为点声源，距离加倍时噪声降低 6dB，如果考虑空气吸收，则附加衰减 0.5~1dB/100m，因此，昼间一般 100m 内所有机械设备施工均可达到《建筑施工场界环境噪声排放标准》（GB12523-2011）中 70dB 的限值标准要求；夜间除电钻噪声外，在 350m 处可达到 55dB 的限值标准要求。可见，施工单位需合理安排高噪设备的施工时间，夜间要严禁高噪声设备使用。

#### 5.1.4 生态环境的影响

施工期主要对建设场地进行平整，本项目所在场地原先为施工场地，已无地表植被，不会对生态环境造成不利影响。在建设过程中，将有规划地对场区和场外道路实施绿化，以改善生态环境。

#### 5.1.5 施工固体废弃物对环境的影响

建设过程中，施工队伍会产生一定量的生活垃圾和工业废弃物，且部分工业废弃物属于危险固废。为此，建设单位需制定严格的施工环境管理规定，对生活垃圾和施工垃圾均需制定相应的管理措施，做到文明施工，尽量减少固废产生量；生活垃圾定点堆放，及时清运；无毒无害固废尽量回收再利用，危险固废按照《危险废物贮存污染控制标准》（GB18597-2001）设置危废暂存仓库，定期交由有资质的单位处理或由供货商回收处置。通过采取上述措施，施工产生的固体废弃物将尽可能实现回收利用和分类处理，以减轻对环境的影响。

本项目建设期间涉及土石方的阶段包括场平阶段和主体施工阶段。其中，场平阶段挖方约 5 万方，填方约 15000 方，外运土方 35000 方；主体施工阶段，地下室开挖外运土方量约 15000 方。

外运弃土交由土方承包单位联系正规弃土场或其他有土方需求的工程进行处理；现场临时堆土采用覆盖措施、做好现场排水，防止雨水冲刷浸泡，并尽量缩短堆土时间。

## 5.2 水的利用

本项目所在地已有 2 根 DN150 供水管经阳江核电厂高位水池供入。施工建设期用水均由阳江核电厂高位水池供水，高位水池池底标高为绝对标高 65.00m，总有效容积 4000m<sup>3</sup>，其中包含消防容积 1000 m<sup>3</sup>，供至本项目入口处压力不小于 0.3MPa，可满足本项目的施工建设用水的流量和压力要求。

因此，本工程施工期间供水水源可行，且不影响周围用户用水需求，水资源利用合理。

## 5.3 施工影响的控制及施工期环境监测

### 5.3.1 减少环境影响的措施

本项目在施工期间对环境的影响主要是不同施工项目对声环境、大气环境和声环境等方面的影响。为最大限度降低该过程对环境的不利影响，建议建设单位采取以下相应的有效缓解措施，主要包括：

#### (1) 减少声环境影响的措施

- 尽量使用低噪声施工设备，对动力机械设备进行定期的维修、养护，维持设备处于良好的运转状态。运输车辆进入现场减速，并减少鸣笛。
- 合理安排施工进度，避免在施工期间同步使用高噪声设备；严格控制夜间施工过程。

#### (2) 减少大气环境影响的措施

- 施工过程中采取洒水抑尘、硬化路面、控制车速和加盖苫布等方式来降低施工起尘量，改善施工区域的大气环境。
- 现场混凝土施工道路每天安排工人清扫，现场安排 2 台洒水车洒水，每天洒水不少于 2 次；未硬化的施工便道根据实际情况确定洒水次数，雨季洒水频次低，旱季洒水频次高，但每天不少于 2 次，效果要求无扬尘。对于运输车辆较集中的未硬化道路，安排相关的承包商负责洒水，每天洒水频次不少于 4 次。通过以上措施，可使扬尘减少 70%~80%左右。
- 施工过程中通过控制车速和加盖苫布等方式来降低施工起尘量，改善施工区域的大气环境。

### （3）减少水环境影响的措施

- 加强对污水处理设施的维护管理，禁止生活污水乱排；生产废水处理回用；
- 施工尽量避开雨季，做好施工期项目管理工作，合理安排施工工序。

### （4）化学物品的使用管理

严格执行制定的化学物品管理使用规定，对化学物品的贮存和使用量严格控制，产生的危险废物由相关资质单位处理或由供应商回收处理。

## 5.3.2 施工期环境监测

本工程是陆域工程的建设，项目建设会造成场址附近局部陆域大气和声环境质量受到影响。为了解工程建设期间对环境造成影响的范围和程度，检验施工期间采取的减缓环境影响措施的实施效果，促使施工单位采用更合理的工艺以最大限度降低工程建设对周边环境的不利影响，建设单位将委托相关有资质单位开展本项目施工期间的的环境监测，于施工期开始后定期场区及附近环境敏感点的环境质量监测，跟踪环境质量变化，及时反馈环境信息。

## 6 正常运行的环境影响

### 6.1 材料中心相关辐射环境影响

#### 6.1.1 照射途径

本项目评价子区按照 0~1km、1~2km、2~3km、3~5km、5~10km、10~20km 六个距离 16 个方位进行划分。

本项目中材料中心在研究过程中会从燃料棒中释放部分惰性气体、放射性粒子等，通过通风系统从通风中心的烟囱释放入环境；正常情况下产生含放射性废液经处理后满足《污水综合排放标准》（GB8978-1996）的要求后排放，液态途径对公众的照射剂量可以忽略不计。因此，对公众的辐射环境影响评价主要考虑气载放射性物质排放的影响，计算中主要考虑如下四种照射途径：

- 空气浸没外照射；
- 地面沉积物外照射；
- 吸入空气内照射；
- 食入陆生食品内照射。

图 6-1 给出了气载放射性流出物排放对场址周围公众造成辐射的途径示意图。

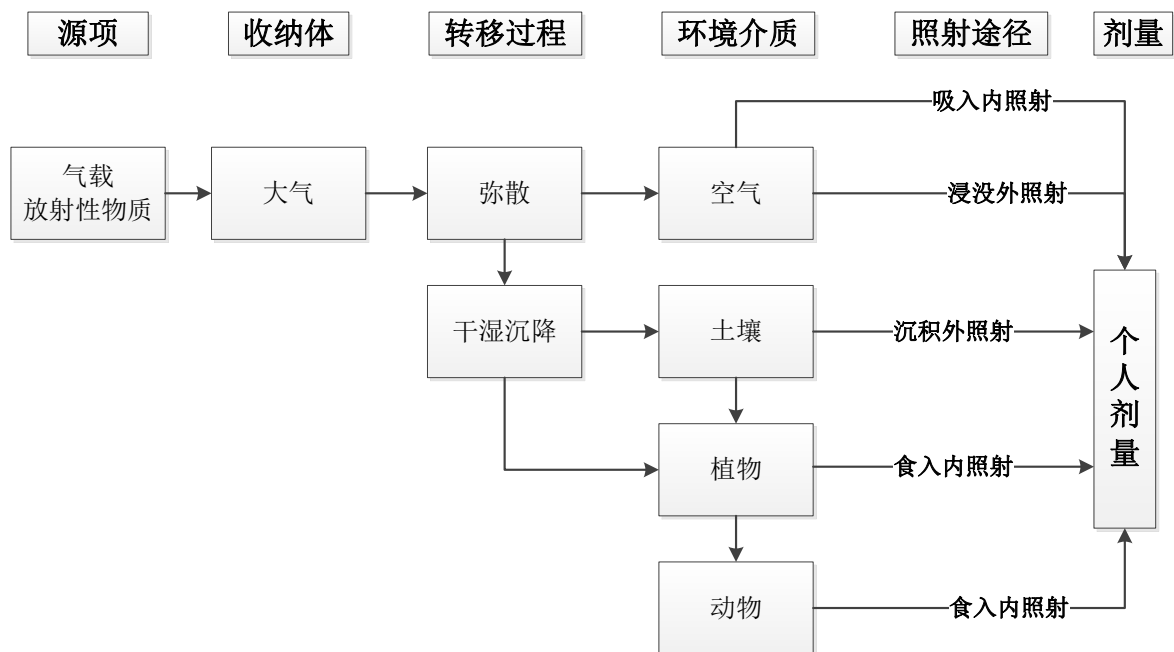


图 6-1 气载放射性流出物排放对公众造成辐射的照射途径示意图

## 6.1.2 释放源项

材料中心向环境排放的年度放射性源项见表 4-16。

## 6.1.3 计算模式

### 6.1.3.1 大气弥散和地面沉积

根据核安全导则 HAD101/02 推荐高斯直线烟羽扩散模型，采用阳江核电场址气象塔 2018 年 1 月到 2018 年 12 月一整年逐时观测的风向、风速和温度，以及地面气象站的逐时雨量等气象数据，计算场址区域的长期大气弥散因子和地面沉积因子，本项目烟囱释放高度为 35m，烟囱内径 2.3m，最大排风速率 16m/s，周围最高建筑物为 25m，由于周围最高建筑物的高度小于烟囱高度，且其 2 倍又大于烟囱高度，因此假定为混合排放方式。大气弥散计算还考虑了气载放射性流出物雨水冲洗、重力沉降、以及核素衰变等因素造成的烟羽损耗和地面沉积。

大气弥散因子和地面沉积因子的计算模式如下：

混合释放情况下的长期大气弥散因子按如下公式进行计算：

$$(\chi/Q) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{m=1}^N [(1-E_m) \cdot (\chi/Q)_{Hm} + E_m (\chi/Q)_{Gm}]$$

式中：

$(\chi/Q)$ —混合释放情况下计算点处的长期大气弥散因子， $s/m^3$ ；

$N$ —全年中总的有效测量小时数，无量纲；

$E_m$ —第  $m$  小时高架释放与地面释放的分配系数，无量纲计算如下：

当  $W_0/U_s < 1$  时，  $E_t=1$

当  $1 \leq W_0/U_s \leq 1.5$  时，  $E_t=2.58-1.58 (W_0/U_s)$

当  $1.5 < W_0/U_s \leq 5$  时，  $E_t=0.3-0.06 (W_0/U_s)$

当  $W_0/U_s > 5$  时，  $E_t=0$

式中：

$W_0$ —烟流出口速度， $m/s$ ；

$U_s$ —烟囱高度处的风速， $m/s$ 。

$(\chi/Q)_{Hm}$ —高架释放情况下计算点处第  $m$  小时的大气弥散因子,  $s/m^3$ ;

$(\chi/Q)_{Gm}$ —地面释放情况下计算点处第  $m$  小时的大气弥散因子,  $s/m^3$ 。

### (a) 高架情况下大气弥散因子的计算

对于高架释放, 根据公式  $He+2.15\sigma_z(x)=Hm$  确定考虑混合层的影响起始距离  $Xb$ ,

其中  $He=Hs+\Delta H$  为烟流的有效高度,  $Hm$  为混合层高度。

当  $X < Xb$  时, 不考虑混合层的影响:

$$(\chi/Q)_{Hm} = \frac{2.032}{X \cdot U_H \sigma_z} \cdot f_{Hm} \cdot \exp(-\lambda_i \cdot \frac{X}{U_H}) \cdot \exp[-\frac{1}{2}(\frac{He}{\sigma_z})^2]$$

当  $Xb \leq X < 2Xb$  时, 假定烟流在地面和混合层之间的多次反射:

$$(\chi/Q)_{Hm} = \frac{2.032}{X \cdot U_H \sigma_z} \cdot f_{Hm} \cdot \exp(-\lambda_i \cdot \frac{X}{U_H}) \cdot \sum_{n=2}^{\infty} \exp[-\frac{1}{2}(\frac{2nHm-He}{\sigma_z})^2]$$

当  $X \geq 2Xb$  时, 假定烟流在地面和混合层之间的均匀混合:

$$(\chi/Q)_{Hm} = \frac{2.032}{X \cdot U_H (0.79788Hm)} \cdot f_{Hm} \cdot \exp(-\lambda_i \cdot \frac{X}{U_H})$$

式中:

$X$ —计算点到释放点的距离,  $m$ ;

$U_{Hm}$ —第  $m$  小时烟流有效高度处的风速,  $m/s$ ;

$\sigma_z$ —计算点处烟流的垂直标准偏差,  $m$ ;

$f_{Hm}$ —高架释放情况下第  $m$  小时干沉降和湿沉降引起的烟流耗减校正因子, 无量纲;

纲;

$$f_{Hm} = f_{Hdm} \cdot f_{Hwm}$$

式中:

$f_{Hdm}$ —高架释放情况下第  $m$  小时干沉降引起的烟流耗减校正因子, 无量纲;

$$f_{Hdm} = \exp\left\{-\left(\frac{2}{\pi}\right)^{0.5} \cdot \frac{V_d}{U_{Hm}} \cdot \int_0^x \frac{1}{\sigma_z} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{H_s + \Delta H}{\sigma_z}\right)^2\right] \cdot dx\right\}$$

$f_{Hwm}$ —高架释放情况下第  $m$  小时湿沉降引起的烟流耗减校正因子, 无量纲。

$$f_{Hwm} = \exp\left(-\frac{\alpha \cdot I_m \cdot X}{U_{Hm}}\right)$$

上两式中：

$V_d$  — 放射性物质的干沉降速度，m/s；

$\alpha$  — 降水对放射性物质的冲洗比例常数，h/(mm s)；

$I_m$  — 第  $m$  小时的降水强度，mm/h。

$\lambda_i$  — 核素  $i$  的放射性衰变常数， $s^{-1}$ ；

$H_s$  — 烟流释放高度（即烟囱高度），m；

2.032 —  $(2/\pi)^{0.5}/(\pi/8)$  的值；

$\Delta H$  — 烟流抬升高度，m。

当烟囱高度为邻近建筑物 2~2.5 倍（或烟囱高度低于邻近建筑物 2~2.5 倍但烟流出口速度大于烟流出口处水平风速 5 倍）时，在中性或不稳定条件下：

$$\Delta H = 1.44 D_i \left( \frac{W_0}{U_s} \right)^{2/3} \cdot \left( \frac{X}{D_i} \right)^{1/3} - C$$

式中：

$W_0$  — 烟流出口速度，m/s；

$U_s$  — 烟囱高度处的风速，m/s；

$D_i$  — 烟囱出口的内径，m；

$C$  — 当  $W_0 < 1.5U_s$  时的下冲修正因子，m。

$$C = 3 \cdot \left( 1.5 - \frac{W_0}{U_s} \right) \cdot D_e$$

式中： $D_e$  — 烟囱外径，m。

用下式进行估算并取较小值作为烟流抬升高度： $\Delta H = 3 \frac{W_0}{U_s} D_i$

在稳定条件下，计算结果要与下面两个公式计算值作比较，并以最小值作为烟流抬升高度：

$$\Delta H = 4 \cdot \left( \frac{F_m}{S} \right)^{1/4} \quad , \quad \Delta H = 1.5S^{-1/6} \left( \frac{F_m}{U_s} \right)^{1/3}$$

上两式中：

$F_m$  — 动量通量参数；

$S$  — 稳定度参数。

$$F_m = W_0^2 \left( \frac{D_i}{2} \right)^2, \quad S \approx \frac{g}{T} \left( -\frac{\partial \theta}{\partial Z} \right)$$

式中:

$g$ — 重力加速度,  $\text{m/s}^2$ ;

$T$ — 周围空气温度,  $\text{K}$ ;

$-\frac{\partial \theta}{\partial Z}$ — 位温递减率,  $\text{K/m}$ 。

对于 E 类稳定度,  $S=8.7 \times 10^{-4}$ ;

对于 F 类稳定度,  $S=1.75 \times 10^{-3}$ 。

### (b) 地面放情况下大气弥散因子的计算

$$(\chi/Q)_{Gm} = \frac{2.032}{X \cdot U_{Gm} \cdot \sum_Z} \cdot f_{Gm} \cdot \exp(-\lambda_i \cdot \frac{X}{U_{Gm}})$$

式中:

$X$ — 计算点到释放点的距离,  $\text{m}$ ;

$U_{Gm}$ — 第  $m$  小时的地面风速,  $\text{m/s}$ ;

$\sum_Z$ — 经建筑物尾流校正后的垂直标准偏差,  $\text{m}$ , 选择以下计算结果较小者:

$$\sum_Z = (\sigma_z^2 + \frac{0.5}{\pi} D_z^2)^{0.5}, \quad \sum_Z = \sqrt{3} \cdot \sigma_z$$

上两式中:

$\sigma_z$ — 计算点处烟流的垂直标准偏差,  $\text{m}$ ;

$D_z$ — 释放点邻近建筑物的高度,  $\text{m}$ 。

$f_{Gm}$ — 地面释放情况下第  $m$  小时干沉降和湿沉降引起的烟流耗减校正因子, 无量纲;

$$f_{Gm} = f_{Gdm} \cdot f_{Gwm}$$

式中:

$f_{Gdm}$ — 地面释放情况下第  $m$  小时干沉降引起的烟流耗减校正因子, 无量纲;

$$f_{Gdm} = \exp\left[-\left(\frac{2}{\pi}\right)^{0.5} \cdot \frac{V_d}{U_{Gm}} \cdot \int_0^x \frac{1}{\sum_Z} \cdot dX\right]$$

$f_{Gwm}$ — 地面释放情况下第  $m$  小时湿沉降引起的烟流耗减校正因子, 无量纲。

$$f_{Gwm} = \exp\left(-\frac{\alpha \cdot I_m \cdot X}{U_{Gm}}\right)$$

上两式中:



$V_d$ —放射性物质的干沉降速度， m/s；

$\alpha$ —降水对放射性物质的冲洗比例常数， h/（mm s）；

$I_m$ —第 m 小时的降水强度， mm/h。

$\lambda_i$ —核素 i 的放射性衰变常数，  $s^{-1}$ ；

2.032—  $(2/\pi)^{0.5} / (\pi/8)$  的值。

(c) 长期地面沉积因子

$$(D/Q) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{m=1}^N \left\{ (1-E_{im}) \cdot [(\chi/Q)_{Hm} \cdot V_d + \frac{8\alpha \cdot I_m}{\pi \cdot X \cdot U_{Hm}}] + E_{im} \cdot [(\chi/Q)_{Gm} \cdot V_d + \frac{8\alpha \cdot I_m}{\pi \cdot X \cdot U_{Gm}}] \right\}$$

式中：

$(D/Q)$  — 混合释放情况下计算点处的长期地面沉积因子，  $m^{-2}$ ；

N — 全年中总的有效测量小时数， 无量纲；

$E_{im}$  — 第 m 小时高架释放与地面释放的分配系数， 无量纲；

$(\chi/Q)_{Hm}$  — 高架释放情况下计算点处第 m 小时的大气弥散因子，  $s/m^3$ ；

$V_d$  — 放射性物质的干沉降速度， m/s；

$\alpha$  — 降水对放射性物质的冲洗比例常数， h/（mm s）；

$I_m$  — 第 m 小时的降水强度， mm/h；

X — 计算点到释放点的距离， m；

$U_{Hm}$  — 第 m 小时烟流有效高度处的风速， m/s；

$(\chi/Q)_{Gm}$  — 地面释放情况下计算点处第 m 小时的大气弥散因子，  $s/m^3$ ， ；

$U_{Gm}$  — 第 m 小时的地面风速， m/s。

根据上述模型和气象数据，表 6-1、表 6-2 和表 6-3 分别列出了本项目场址半径 20km 范围各子区部分放射性核素的长期大气弥散因子（ $^{85}\text{Kr}$ 、 $^{90}\text{Sr}$ 、 $^{131}\text{I}$ ）、长期地面干沉积因子（ $^{90}\text{Sr}$ 、 $^{131}\text{I}$ ）和长期地面湿沉积因子（ $^{90}\text{Sr}$ 、 $^{131}\text{I}$ ）。

表 6-1 场址长期大气弥散因子 单位：  $s/m^3$

距离（km） 方位	0~1	1~2	2~3	3~5	5~10	10~20
$^{85}\text{Kr}$						
N	6.74E-07	3.84E-07	2.11E-07	1.08E-07	4.45E-08	1.83E-08

距离 (km) 方位	0~1	1~2	2~3	3~5	5~10	10~20
NNE	3.50E-07	2.22E-07	1.26E-07	6.57E-08	2.71E-08	1.09E-08
NE	4.02E-07	2.24E-07	1.22E-07	6.22E-08	2.57E-08	1.06E-08
ENE	2.34E-07	1.29E-07	6.96E-08	3.54E-08	1.46E-08	6.05E-09
E	2.02E-07	1.17E-07	6.42E-08	3.28E-08	1.35E-08	5.48E-09
ESE	8.00E-08	5.90E-08	3.54E-08	1.88E-08	7.81E-09	3.01E-09
SE	5.53E-08	3.50E-08	2.00E-08	1.04E-08	4.27E-09	1.65E-09
SSE	2.00E-08	1.04E-08	5.29E-09	2.63E-09	1.02E-09	3.85E-10
S	2.87E-07	2.69E-07	1.76E-07	9.73E-08	3.95E-08	1.40E-08
SSW	9.83E-07	6.11E-07	3.58E-07	1.91E-07	7.80E-08	2.94E-08
SW	1.23E-06	8.03E-07	4.61E-07	2.41E-07	9.78E-08	3.76E-08
WSW	1.23E-06	8.03E-07	4.60E-07	2.39E-07	9.84E-08	3.91E-08
W	9.35E-07	5.99E-07	3.41E-07	1.77E-07	7.30E-08	2.95E-08
WNW	7.31E-07	4.74E-07	2.73E-07	1.42E-07	5.86E-08	2.32E-08
NW	7.94E-07	4.86E-07	2.73E-07	1.41E-07	5.85E-08	2.38E-08
NNW	4.12E-07	2.53E-07	1.43E-07	7.45E-08	3.08E-08	1.24E-08
<b><sup>90</sup>Sr</b>						
N	6.65E-07	3.73E-07	2.01E-07	1.00E-07	3.97E-08	1.56E-08
NNE	3.45E-07	2.16E-07	1.20E-07	6.11E-08	2.42E-08	9.25E-09
NE	3.99E-07	2.21E-07	1.18E-07	5.93E-08	2.37E-08	9.44E-09
ENE	2.31E-07	1.26E-07	6.66E-08	3.31E-08	1.32E-08	5.19E-09
E	2.00E-07	1.14E-07	6.15E-08	3.07E-08	1.22E-08	4.71E-09
ESE	7.92E-08	5.78E-08	3.42E-08	1.78E-08	7.08E-09	2.58E-09
SE	5.49E-08	3.45E-08	1.94E-08	9.92E-09	3.91E-09	1.44E-09
SSE	1.99E-08	1.03E-08	5.21E-09	2.56E-09	9.74E-10	3.59E-10
S	2.85E-07	2.64E-07	1.69E-07	9.03E-08	3.45E-08	1.11E-08
SSW	9.78E-07	6.02E-07	3.46E-07	1.80E-07	7.06E-08	2.52E-08
SW	1.22E-06	7.83E-07	4.42E-07	2.25E-07	8.80E-08	3.21E-08
WSW	1.22E-06	7.82E-07	4.41E-07	2.24E-07	8.84E-08	3.33E-08
W	9.22E-07	5.84E-07	3.26E-07	1.65E-07	6.56E-08	2.51E-08
WNW	7.19E-07	4.59E-07	2.59E-07	1.32E-07	5.21E-08	1.96E-08
NW	7.84E-07	4.71E-07	2.59E-07	1.31E-07	5.16E-08	1.99E-08
NNW	4.04E-07	2.44E-07	1.36E-07	6.89E-08	2.74E-08	1.05E-08
<b><sup>131</sup>I</b>						
N	6.39E-07	3.24E-07	1.48E-07	6.04E-08	1.87E-08	6.31E-09
NNE	3.29E-07	1.83E-07	8.52E-08	3.46E-08	1.02E-08	3.05E-09
NE	3.83E-07	1.93E-07	8.90E-08	3.69E-08	1.16E-08	3.92E-09
ENE	2.23E-07	1.11E-07	5.11E-08	2.12E-08	6.69E-09	2.22E-09
E	1.92E-07	9.99E-08	4.63E-08	1.92E-08	5.88E-09	1.83E-09

距离 (km) 方位	0~1	1~2	2~3	3~5	5~10	10~20
ESE	7.55E-08	4.93E-08	2.44E-08	1.00E-08	2.84E-09	7.21E-10
SE	5.26E-08	2.96E-08	1.39E-08	5.60E-09	1.63E-09	4.80E-10
SSE	1.92E-08	9.26E-09	4.24E-09	1.85E-09	5.89E-10	1.78E-10
S	2.64E-07	2.01E-07	9.39E-08	3.22E-08	5.88E-09	6.50E-10
SSW	9.39E-07	5.12E-07	2.39E-07	9.46E-08	2.65E-08	8.09E-09
SW	1.17E-06	6.68E-07	3.14E-07	1.27E-07	3.60E-08	1.01E-08
WSW	1.16E-06	6.68E-07	3.14E-07	1.27E-07	3.68E-08	1.10E-08
W	8.82E-07	5.00E-07	2.35E-07	9.59E-08	2.85E-08	8.58E-09
WNW	6.87E-07	3.92E-07	1.84E-07	7.45E-08	2.17E-08	6.36E-09
NW	7.50E-07	4.04E-07	1.87E-07	7.63E-08	2.30E-08	7.24E-09
NNW	3.89E-07	2.11E-07	9.88E-08	4.03E-08	1.20E-08	3.70E-09

表 6-2 场址长期地面干沉积因子 单位: 1/m<sup>2</sup>

距离 (km) 方位	0~1	1~2	2~3	3~5	5~10	10~20
<sup>90</sup> Sr						
N	1.33E-09	7.46E-10	4.01E-10	2.00E-10	7.94E-11	3.12E-11
NNE	6.89E-10	4.31E-10	2.41E-10	1.22E-10	4.84E-11	1.85E-11
NE	7.98E-10	4.41E-10	2.37E-10	1.19E-10	4.74E-11	1.89E-11
ENE	4.62E-10	2.52E-10	1.33E-10	6.62E-11	2.63E-11	1.04E-11
E	3.99E-10	2.28E-10	1.23E-10	6.15E-11	2.43E-11	9.41E-12
ESE	1.58E-10	1.16E-10	6.83E-11	3.55E-11	1.42E-11	5.16E-12
SE	1.10E-10	6.90E-11	3.89E-11	1.98E-11	7.82E-12	2.88E-12
SSE	3.98E-11	2.06E-11	1.04E-11	5.12E-12	1.95E-12	7.18E-13
S	5.71E-10	5.28E-10	3.38E-10	1.81E-10	6.91E-11	2.23E-11
SSW	1.96E-09	1.20E-09	6.92E-10	3.60E-10	1.41E-10	5.04E-11
SW	2.44E-09	1.57E-09	8.84E-10	4.51E-10	1.76E-10	6.42E-11
WSW	2.43E-09	1.56E-09	8.81E-10	4.48E-10	1.77E-10	6.67E-11
W	1.84E-09	1.17E-09	6.53E-10	3.31E-10	1.31E-10	5.02E-11
WNW	1.44E-09	9.19E-10	5.18E-10	2.63E-10	1.04E-10	3.91E-11
NW	1.57E-09	9.42E-10	5.19E-10	2.61E-10	1.03E-10	3.97E-11
NNW	8.09E-10	4.89E-10	2.72E-10	1.38E-10	5.48E-11	2.09E-11
<sup>131</sup> I						
N	2.04E-08	1.04E-08	4.73E-09	1.93E-09	5.99E-10	2.02E-10
NNE	1.05E-08	5.86E-09	2.73E-09	1.11E-09	3.25E-10	9.76E-11
NE	1.23E-08	6.18E-09	2.85E-09	1.18E-09	3.72E-10	1.26E-10
ENE	7.13E-09	3.55E-09	1.64E-09	6.79E-10	2.14E-10	7.12E-11
E	6.14E-09	3.20E-09	1.48E-09	6.14E-10	1.88E-10	5.87E-11

距离 (km) 方位	0~1	1~2	2~3	3~5	5~10	10~20
ESE	2.42E-09	1.58E-09	7.82E-10	3.21E-10	9.09E-11	2.31E-11
SE	1.68E-09	9.46E-10	4.44E-10	1.79E-10	5.22E-11	1.54E-11
SSE	6.15E-10	2.96E-10	1.36E-10	5.93E-11	1.89E-11	5.68E-12
S	8.44E-09	6.44E-09	3.01E-09	1.03E-09	1.88E-10	2.08E-11
SSW	3.01E-08	1.64E-08	7.64E-09	3.03E-09	8.47E-10	2.59E-10
SW	3.73E-08	2.14E-08	1.00E-08	4.05E-09	1.15E-09	3.25E-10
WSW	3.72E-08	2.14E-08	1.00E-08	4.05E-09	1.18E-09	3.50E-10
W	2.82E-08	1.60E-08	7.52E-09	3.07E-09	9.11E-10	2.75E-10
WNW	2.20E-08	1.25E-08	5.89E-09	2.39E-09	6.94E-10	2.03E-10
NW	2.40E-08	1.29E-08	6.00E-09	2.44E-09	7.35E-10	2.32E-10
NNW	1.24E-08	6.76E-09	3.16E-09	1.29E-09	3.84E-10	1.18E-10

表 6-3 场址长期地面湿沉积因子 单位: 1/m<sup>2</sup>

距离 (km) 方位	0~1	1~2	2~3	3~5	5~10	10~20
<sup>90</sup> Sr						
N	4.99E-09	2.50E-09	1.50E-09	9.36E-10	4.99E-10	2.50E-10
NNE	3.23E-09	1.61E-09	9.69E-10	6.06E-10	3.23E-10	1.61E-10
NE	1.87E-09	9.36E-10	5.62E-10	3.51E-10	1.87E-10	9.36E-11
ENE	1.66E-09	8.30E-10	4.98E-10	3.11E-10	1.66E-10	8.30E-11
E	1.34E-09	6.68E-10	4.01E-10	2.51E-10	1.34E-10	6.68E-11
ESE	4.49E-10	2.24E-10	1.35E-10	8.42E-11	4.49E-11	2.24E-11
SE	2.86E-10	1.43E-10	8.59E-11	5.37E-11	2.86E-11	1.43E-11
SSE	5.77E-11	2.89E-11	1.73E-11	1.08E-11	5.77E-12	2.89E-12
S	6.20E-11	3.10E-11	1.86E-11	1.16E-11	6.20E-12	3.10E-12
SSW	9.96E-10	4.98E-10	2.99E-10	1.87E-10	9.96E-11	4.98E-11
SW	5.93E-09	2.97E-09	1.78E-09	1.11E-09	5.93E-10	2.97E-10
WSW	8.62E-09	4.31E-09	2.59E-09	1.62E-09	8.62E-10	4.31E-10
W	6.47E-09	3.24E-09	1.94E-09	1.21E-09	6.47E-10	3.24E-10
WNW	5.56E-09	2.78E-09	1.67E-09	1.04E-09	5.56E-10	2.78E-10
NW	5.85E-09	2.92E-09	1.75E-09	1.10E-09	5.85E-10	2.92E-10
NNW	4.69E-09	2.35E-09	1.41E-09	8.80E-10	4.69E-10	2.35E-10
<sup>131</sup> I						
N	3.43E-09	1.72E-09	1.03E-09	6.44E-10	3.43E-10	1.72E-10
NNE	2.22E-09	1.11E-09	6.66E-10	4.16E-10	2.22E-10	1.11E-10
NE	1.29E-09	6.44E-10	3.86E-10	2.41E-10	1.29E-10	6.44E-11
ENE	1.14E-09	5.71E-10	3.43E-10	2.14E-10	1.14E-10	5.71E-11
E	9.19E-10	4.59E-10	2.76E-10	1.72E-10	9.19E-11	4.59E-11

距离 (km) 方位	0~1	1~2	2~3	3~5	5~10	10~20
ESE	3.09E-10	1.54E-10	9.26E-11	5.79E-11	3.09E-11	1.54E-11
SE	1.97E-10	9.84E-11	5.91E-11	3.69E-11	1.97E-11	9.84E-12
SSE	3.97E-11	1.98E-11	1.19E-11	7.44E-12	3.97E-12	1.98E-12
S	4.27E-11	2.13E-11	1.28E-11	8.00E-12	4.27E-12	2.13E-12
SSW	6.85E-10	3.43E-10	2.06E-10	1.28E-10	6.85E-11	3.43E-11
SW	4.08E-09	2.04E-09	1.22E-09	7.65E-10	4.08E-10	2.04E-10
WSW	5.93E-09	2.96E-09	1.78E-09	1.11E-09	5.93E-10	2.96E-10
W	4.45E-09	2.23E-09	1.34E-09	8.34E-10	4.45E-10	2.23E-10
WNW	3.82E-09	1.91E-09	1.15E-09	7.16E-10	3.82E-10	1.91E-10
NW	4.02E-09	2.01E-09	1.21E-09	7.54E-10	4.02E-10	2.01E-10
NNW	3.23E-09	1.61E-09	9.68E-10	6.05E-10	3.23E-10	1.61E-10

### 6.1.3.2 剂量计算模式

正常运行状态下，气载放射性流出物通过空气浸没外照射、地面沉积外照射、吸入空气内照射、食入陆生食品内照射等照射途径对公众造成辐射剂量。气载放射性物质通过各照射途径对公众造成的剂量估算模式如下。

#### (1) 空气浸没外照射剂量

$$D_{EA} = 8760 \cdot \left( \sum_i \chi_i \cdot DF_{EAi} \cdot F \right) \quad (6.1-1)$$

式中：

$D_{EA}$ — 公众个人浸没于污染的半无限烟云中受到的有效剂量，Sv/a；

$DF_{EAi}$ — 浸没于半无限烟云中放射性核素  $i$  对人体的有效剂量转换因子，  
(Sv/h) / (Bq/m<sup>3</sup>)；

$F$ — 建筑物的屏蔽因子，无量纲；

8760— h/a 的换算系数；

$\chi_i$ — 地面空气中放射性核素  $i$  的浓度，Bq/m<sup>3</sup>；

$$\chi_i = 3.17 \times 10^{-8} \cdot Q_{Gi} \cdot (\chi/Q)_i \quad (6.1-1-1)$$

式中：

$\chi_i$ — 地面空气中放射性核素  $i$  的浓度，Bq/m<sup>3</sup>；

$Q_{Gi}$ — 气载流出物中放射性核素  $i$  的年平均释放率，Bq/a；

$(\chi/Q)_i$ — 放射性核素  $i$  的年平均大气弥散因子，s/m<sup>3</sup>；

$3.17 \times 10^{-8}$  — a/s 的换算系数。

### (2) 地面沉积外照射剂量

$$D_{EG} = 8760 \cdot \left\{ \sum_i \gamma_i \cdot [1 - \exp(-\lambda_{Gi} \cdot t_G)] \cdot \lambda_{Gi}^{-1} \cdot DF_{Esi} \right\} \quad (6.1-2)$$

式中：

$D_{EG}$  — 公众个人逗留在污染的地面上受到的有效剂量，Sv/a；

$\gamma_i$  — 放射性核素 i 的表面沉积率，Bq/(m<sup>2</sup>.d)：

$$\gamma_i = \frac{1}{365} Q_{Gi} \cdot (D/Q)_i \quad (6.1-2-1)$$

式中：

$Q_{Gi}$  — 气载流出物中放射性核素 i 的年平均释放率，Bq/a；

$(D/Q)_i$  — 放射性核素 i 的年平均地面沉积因子，1/m<sup>2</sup>；

$\lambda_{Gi}$  — 放射性核素 i 在陆地环境中的有效衰变常数，d<sup>-1</sup>：

$$\lambda_{Gi} = \lambda_G + \lambda_i \quad (6.1-2-2)$$

式中：

$\lambda_G$  — 放射性核素 i 在陆地环境中的物理去除常数，d<sup>-1</sup>；

$\lambda_i$  — 放射性核素 i 的衰变常数，d<sup>-1</sup>。

$t_G$  — 放射性核素在地面上的积累时间，d；

$DF_{Esi}$  — 沉积物中放射性核素 i 对人体的有效剂量转换因子，(Sv/h)/(Bq/m<sup>2</sup>)；

— h/a 的换算系数。

### (3) 吸入内照射剂量

$$D_{EI} = 8760 \cdot \left\{ \sum_i \chi_i \cdot B_r \cdot DF_{Eli} \right\} \quad (6.1-3)$$

式中：

$D_{EI}$  — 公众个人吸入污染空气造成的有效剂量，Sv/a；

$B_r$  — 人的呼吸率，m<sup>3</sup>/h；

$DF_{Eli}$  — 吸入放射性核素 i 对人体的有效剂量转换因子，Sv/Bq；

8760 — h/a 的换算系数；

$\chi_i$  — 地面空气中放射性核素 i 的浓度，Bq/m<sup>3</sup>，见 (6.1-1-1) 式：

### (4) 食入陆生食品造成的内照射剂量

$$D_{EE} = D_{EE1} + D_{EE(H3)} + D_{EE(C14)} \quad (6.1-4)$$

式中：

$D_{EE}$  — 公众个人食入陆生植物食品造成的有效剂量，Sv/a；

$D_{EE1}$  — 公众个人食入除 $^3\text{H}$ 、 $^{14}\text{C}$ 以外的放射性核素造成的有效剂量，Sv/a，见(6.1-4-1)式；

$D_{EE(H3)}$  — 公众个人食入 $^3\text{H}$ 造成的有效剂量，Sv/a，见(6.1-4-2)式。

$D_{EE(C14)}$  — 公众个人食入 $^{14}\text{C}$ 造成的有效剂量，Sv/a，见(6.1-4-3)式。

$$D_{EE1} = \sum_i U_{Ei} \cdot DF_{EEi} \quad (6.1-4-1)$$

式中：

$DF_{EEi}$  — 食入放射性核素*i*对人体的有效剂量转换因子，Sv/Bq；

$U_{Ei}$  — 公众个人通过陆生动植食品食入除 $^3\text{H}$ 以外的放射性核素*i*的剂量，Bq/a，见(6.1-4-1-1)式。

$$\begin{aligned} U_{Ei} = & U_V \cdot (F_{Vi} \cdot C_{V1i} + F_{V2} \cdot C_{V2i}) \cdot \exp(-\lambda_i \cdot T_V) \\ & + U_L \cdot (F_{Li} \cdot C_{L1i} + F_{L2} \cdot C_{L2i}) \cdot \exp(-\lambda_i \cdot T_L) \\ & + U_F \cdot (F_{Fi} \cdot C_{F1i} + F_{F2} \cdot C_{F2i}) \cdot \exp(-\lambda_i \cdot T_F) \\ & + U_M \cdot (F_{Mi} \cdot C_{M1i} + F_{M2} \cdot C_{M2i}) \cdot \exp(-\lambda_i \cdot T_M) \end{aligned} \quad (6.1-4-1-1)$$

式中：

$U_V$  — 公众个人的粮食消费量，kg/a；

$U_L$  — 公众个人的蔬菜消费量，kg/a；

$U_F$  — 公众个人的肉类消费量，kg/a；

$U_M$  — 公众个人的牛奶消费量，kg/a；

$F_{V1}$  — 公众个人食入其所在子区生产的粮食的份额，无量纲；

$F_{L1}$  — 公众个人食入其所在子区生产的蔬菜的份额，无量纲；

$F_{F1}$  — 公众个人食入其所在子区生产的肉类的份额，无量纲；

$F_{M1}$  — 公众个人食入其所在子区生产的牛奶的份额，无量纲；

$F_{V2}$  — 公众个人食入其所在子区以外评价区生产的粮食的份额，无量纲；

$F_{L2}$  — 公众个人食入其所在子区以外评价区生产的蔬菜的份额，无量纲；

$F_{F2}$  — 公众个人食入其所在子区以外评价区生产的肉类的份额，无量纲；

$F_{M2}$  — 公众个人食入其所在子区以外评价区生产的牛奶的份额，无量纲；

$T_V$  — 粮食作物从收获到被消费的时间间隔，d；

$T_L$  — 蔬菜从收获到被消费的时间间隔, d;

$T_F$  — 从产肉动物被屠宰到被消费的时间间隔, d;

$T_M$  — 从挤牛奶到牛奶被消费的时间间隔, d;

$\lambda_i$  — 核素 i 的放射性衰变常数,  $d^{-1}$ ;

$C_{V1i}$  — 公众个人所在子区粮食作物中放射性核素 i 的浓度, Bq/kg, 见 (6.1-4-1-1-a);

$C_{V2i}$  — 公众个人所在子区以外的评价区粮食作物中放射性核素 i 的浓度, Bq/kg, 见 (6.1-4-1-1-a);

$$C_{vi} = \gamma_i \left\{ f_{vi} \cdot [1 - \exp(-\lambda_{vi} \cdot t_v)] \cdot Y_v^{-1} \cdot \lambda_{vi}^{-1} \cdot DDI + B_{vi} \cdot [1 - \exp(-\lambda_{Gi} \cdot t_b)] \cdot \rho^{-1} \cdot \lambda_{Gi}^{-1} \right\} \quad (6.1-4-1-1-a)$$

式中:

$C_{vi}$  — 作物中放射性核素 i 的浓度, Bq/kg;

$\gamma_i$  — 放射性核素 i 的表面沉积率, Bq/( $m^2 d$ );

$f_{vi}$  — 沉积在作物茎叶上的放射性核素 i 转移到可食部分的份额, 无量纲;

$\lambda_{vi}$  — 放射性核素 i 在作物中的有效去除常数,  $d^{-1}$ ;

$\lambda_{vi} = \lambda_v + \lambda_i$ ; 其中  $\lambda_v$  为放射性核素 i 在作物中的物理去除常数,  $d^{-1}$ ;

$t_v$  — 作物在生长季节中的曝污时间, d;

$Y_v$  — 作物可食部分的单位面积产量,  $kg/m^2$ ;

DDI — 清洗因子, 无量纲;

$B_{vi}$  — 作物可食部分从土壤中摄取放射性核素 i 的浓度因子, (Bq/kg)/[Bq/kg(干土)];

$\lambda_{Gi}$  — 放射性核素 i 在土壤中的有效去除常数,  $d^{-1}$ ;

$\lambda_{Gi} = \lambda_G + \lambda_i$ ; 其中  $\lambda_G$  为放射性核素 i 在土壤中的物理去除常数,  $d^{-1}$ ;

$t_b$  — 土壤中放射性核素的累积时间, d;

$\rho$  — 15cm 深度内土壤的有效面密度,  $kg(干土)/m^2$ ;

1/365 — a/d 的换算系数。

$C_{L1i}$  — 公众个人所在子区蔬菜中放射性核素 i 的浓度, Bq/kg, 见 (6.1-4-1-1-b);

$C_{L2i}$  — 公众个人所在子区以外的评价区蔬菜中放射性核素 i 的浓度, Bq/kg, 见 (6.1-4-1-1-b) 式;

$$C_{Li} = \gamma_i \left\{ f_{Li} \cdot [1 - \exp(-\lambda_{Li} \cdot t_L)] \cdot Y_L^{-1} \cdot \lambda_{Li}^{-1} \cdot DDI + B_{Li} \cdot [1 - \exp(-\lambda_{Gi} \cdot t_b)] \cdot \rho^{-1} \cdot \lambda_{Gi}^{-1} \right\}$$



(6.1-4-1-1-b)

式中:

$C_{Li}$  — 蔬菜中放射性核素  $i$  的浓度, Bq/kg;

$\gamma_i$  — 放射性核素  $i$  的表面沉积率, Bq/( $m^2 d$ );

$f_{Li}$  — 沉积在蔬菜茎叶上的放射性核素  $i$  转移到可食部分的份额, 无量纲;

$\lambda_{Li}$  — 放射性核素  $i$  在蔬菜中的有效去除常数,  $d^{-1}$ ;

$\lambda_{Li} = \lambda_L + \lambda_i$ ; 其中  $\lambda_L$  为放射性核素  $i$  在蔬菜中的物理去除常数,  $d^{-1}$ 。

$t_L$  — 蔬菜在生长季节中的曝污时间,  $d$ ;

$Y_L$  — 蔬菜可食部分的单位面积产量,  $kg/m^2$ ;

DDI — 清洗因子, 无量纲;

$B_{Li}$  — 蔬菜可食部分从土壤中摄取放射性核素  $i$  的浓度因子,

(Bq/kg) / [Bq/kg (干土)];

$\lambda_{Gi}$  — 核素  $i$  的放射性衰变常数,  $d^{-1}$ ;

$t_b$  — 土壤中放射性累积时间,  $d$ ;

$\rho$  — 15cm 深度内土壤的有效面密度,  $kg$  (干土) /  $m^2$ 。

$C_{F1i}$  — 公众个人所在子区肉类中放射性核素  $i$  的浓度, Bq/kg, 见 (6.1-4-1-1-c);

$C_{F2i}$  — 公众个人所在子区以外的评价区肉类中放射性核素  $i$  的浓度, Bq/kg, 见 (6.1-4-1-1-c);

$$C_{Fi} = f_{Fi} \cdot [f_{FP} \cdot f_{FF} \cdot C_{Pi} + (1 - f_{FP} \cdot f_{FF}) \cdot C_{Si}] \cdot U_F \quad (6.1-4-1-1-c)$$

式中:

$C_{Fi}$  — 肉类中放射性核素  $i$  的浓度, Bq/kg;

$f_{Fi}$  — 产肉动物每天摄入放射性核素  $i$  转移到肉中的份额, (Bq/kg) / (Bq/d);

$f_{FP}$  — 一年中产肉动物在牧场上放牧的时间份额, 无量纲;

$f_{FF}$  — 产肉动物在牧场上放牧时每天食入鲜饲料的份额, 无量纲;

$C_{Pi}$  — 鲜饲料中放射性核素  $i$  的浓度, 按 (6.1-4-1-1-a) 式计算, Bq/kg;

$C_{Si}$  — 贮存饲料中放射性核素  $i$  的浓度, 按 (6.1-4-1-1-a) 式计算, 并考虑收获至消费时间内放射性衰变的修正, Bq/kg;

$U_F$  — 产肉动物每天消费的饲料量,  $kg/d$ 。

$C_{M1i}$  — 公众个人所在子区牛奶中放射性核素  $i$  的浓度, Bq/kg, 见 (6.1-4-1-1-d);

$C_{M2i}$  — 公众个人所在子区以外的评价区牛奶中放射性核素  $i$  的浓度, Bq/kg, 见

(6.1-4-1-1-d) ;

$$C_{Mi} = f_{Mi} \cdot [f_{MP} \cdot f_{MF} \cdot C_{Pi} + (1 - f_{MP} \cdot f_{MF}) \cdot C_{Si}] \cdot U_C \quad (6.1-4-1-1-d)$$

式中:

$C_{Mi}$ — 牛奶中放射性核素  $i$  的浓度, Bq/kg;

$f_{Mi}$ — 奶牛每天摄入放射性核素  $i$  转移到牛奶中的份额, (Bq/kg) / (Bq/d);

$f_{MP}$ — 一年中奶牛在牧场上放牧的时间份额, 无量纲;

$f_{MF}$ — 奶牛在牧场上放牧时每天食入鲜饲料的份额, 无量纲;

$C_{Pi}$ — 鲜饲料中放射性核素  $i$  的浓度, 按 (6.1-4-1-1-a) 式计算, Bq/kg;

$C_{Si}$ — 贮存饲料中放射性核素  $i$  的浓度, 按 (6.1-4-1-1-a) 式计算, 并考虑收获至消费时间内放射性衰变的修正, Bq/kg;

$U_C$ — 奶牛每天消费的饲料量, kg/d。

$$D_{EE(H3)} = 10^3 \cdot 3.17 \times 10^{-8} \cdot Q_{H3} \cdot \left\{ U_V \cdot \left[ F_{V1} \cdot (x/Q_{H3})_1 + F_{V2} \cdot \frac{\sum_K (x/Q_{H3})_K \cdot T_{V,K}}{\sum_K T_{V,K}} \right] \cdot f_{wV} + U_L \cdot \left[ F_{L1} \cdot (x/Q_{H3})_1 + F_{L2} \cdot \frac{\sum_K (x/Q_{H3})_K \cdot T_{L,K}}{\sum_K T_{L,K}} \right] \cdot f_{wL} + U_F \cdot \left[ F_{F1} \cdot (x/Q_{H3})_1 + F_{F2} \cdot \frac{\sum_K (x/Q_{H3})_K \cdot T_{F,K}}{\sum_K T_{F,K}} \right] \cdot f_{wF} + U_M \cdot \left[ F_{M1} \cdot (x/Q_{H3})_1 + F_{M2} \cdot \frac{\sum_K (x/Q_{H3})_K \cdot T_{M,K}}{\sum_K T_{M,K}} \right] \cdot f_{wM} \right\} \cdot H^{-1} \cdot DF_{ET} \quad (6.1-4-2)$$

式中:

$D_{EE(H3)}$ — 公众个人通过食入陆生食品摄入  $^3H$  造成的有效剂量, Sv/a;

$Q_{H3}$ — 正常运行工况下  $^3H$  向环境的释放率, Bq/a;

$H$ — 空气中的平均湿度, g(水) / m<sup>3</sup>(空气);

$DF_{ET}$ — 食入  $^3H$  对人体的有效剂量转换因子, Sv/Bq;

$10^3$ — g/kg 的换算系数;

$3.17 \times 10^{-8}$ — a/s 的换算系数。

$T_V, K$ — 第  $K$  子区生产的粮食作物总产量, kg/a;

$T_{L, K}$ — 第  $K$  子区生产的蔬菜总产量, kg/a;

$T_{F, K}$ — 第  $K$  子区生产的肉类食品的总产量, kg/a;

$T_{M, K}$ — 第  $K$  子区生产的奶类食品的总产量, L/a;

$(\chi/Q_{H3})_1$ — 公众个人所在子区  $^3H$  的长期大气弥散因子, s/m<sup>3</sup>;

$(\chi/Q_{H3})_K$  — 第 K 子区  $^3H$  的长期大气弥散因子,  $s/m^3$ ;

$U_V$  — 公众个人的作物消费量,  $kg/a$ ;

$U_L$  — 公众个人的蔬菜消费量,  $kg/a$ ;

$U_M$  — 公众个人的肉类消费量,  $kg/a$ ;

$U_M$  — 公众个人的牛奶消费量,  $L/a$ ;

$F_{V1}$  — 公众个人食入其所在子区生产的作物的份额, 无量纲;

$F_{L1}$  — 公众个人食入其所在子区生产的蔬菜的份额, 无量纲;

$F_{F1}$  — 公众个人食入其所在子区生产的肉类的份额, 无量纲;

$F_{M1}$  — 公众个人食入其所在子区生产的牛奶的份额, 无量纲;

$F_{V2}$  — 公众个人食入其所在子区以外的评价区生产的作物的份额, 无量纲;

$F_{L2}$  — 公众个人食入其所在子区以外的评价区生产的蔬菜的份额, 无量纲;

$F_{F2}$  — 公众个人食入其所在子区以外的评价区生产的肉类的份额, 无量纲;

$F_{M2}$  — 公众个人食入其所在子区以外的评价区生产的牛奶的份额, 无量纲;

$f_{wv}$  — 作物中的含水率, 无量纲;

$f_{wL}$  — 蔬菜中的含水率, 无量纲;

$f_{wF}$  — 肉类中的含水率, 无量纲;

$f_{wM}$  — 牛奶中的含水率, 无量纲。

$$\begin{aligned}
 D_{EE(C14)} = & 3.17 \times 10^{-8} \cdot Q_{14} \cdot \frac{F}{C} \cdot \left\{ [F_{1,v} \cdot (x/Q_{14})_1 + F_{2,v} \cdot \frac{\sum_K (x/Q_{14})_K \cdot T_{v,K}}{\sum_K T_{v,K}}] \cdot U_v \cdot f_v \right. \\
 & + [F_{1,F} \cdot (x/Q_{14})_1 + F_{2,F} \cdot \frac{\sum_K (x/Q_{14})_K \cdot T_{F,K}}{\sum_K T_{F,K}}] \cdot W_F \cdot T_F \cdot U_F \cdot f_F + \\
 & \left. [F_{1,M} \cdot (x/Q_{14})_1 + F_{2,M} \cdot \frac{\sum_K (x/Q_{14})_K \cdot T_{M,K}}{\sum_K T_{M,K}}] \cdot W_M \cdot T_M \cdot U_M \cdot f_M \right\} \cdot DF_{14,A}
 \end{aligned} \tag{6.1-4-3}$$

式中:

$D_{EE(C14)}$  — 公众个人通过食入陆生食品摄入  $^{14}C$  造成的有效剂量,  $Sv/a$ ;

$Q_{14}$  — 正常运行工况下  $^{14}C$  向环境的释放率,  $Bq/a$ ;

$F$  — 一年中  $^{14}C$  向大气排放的总时间与一年中植物发生光合作用的总时间 (定为 4400h) 之比, 无量纲, 如果  $^{14}C$  连续排放,  $F=1$ ;

$f$  — 粮食作物和蔬菜中稳定碳的质量份额, 无量纲, 对于食品植物  $f_v$  取 0.18, 对饲

料植物  $f_F$  取 0.09;

$C$ —空气中稳定碳的浓度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ , 取  $1.8 \times 10^{-4}$ ;

$F_{1V}$ —公众个人食入其所在子区生产的陆生植物食品(粮食, 蔬菜)占其食入陆生植物食品总量的份额;

$F_{1F}$ — 公众个人食入其所在子区生产的肉类食品占其食入肉类食品总量的份额;

$F_{1M}$ — 公众个人食入其所在子区生产的奶类食品占其食入奶类食品总量的份额;

$F_{2V}$ — 公众个人食入除其所在子区以外的评价区生产的陆生植物食品(粮食, 蔬菜)占其食入陆生植物食品总量的份额;

$F_{2F}$ — 公众个人食入除其所在子区以外的评价区生产的肉类食品占其食入肉类食品总量的份额;

$F_{2M}$ — 公众个人食入除其所在子区以外的评价区生产的奶类食品占其食入奶类食品总量的份额;

$T_{VK}$ — 第  $K$  子区生产的陆生植物食品(粮食, 蔬菜)的总产量,  $\text{kg}/\text{a}$ ;

$T_{FK}$ — 第  $K$  子区生产的肉类食品的总产量,  $\text{kg}/\text{a}$ ;

$T_{MK}$ — 第  $K$  子区生产的奶类食品的总产量,  $\text{L}/\text{a}$ ;

$(\chi/Q_{14})_1$  — 公众个人所在子区  $^{14}\text{C}$  的长期大气弥散因子,  $\text{s}/\text{m}^3$ ;

$(\chi/Q_{14})_K$  — 第  $K$  子区  $^{14}\text{C}$  的长期大气弥散因子,  $\text{s}/\text{m}^3$ ;

$U_V$  — 公众个人食入陆生植物食品(粮食, 蔬菜)的数量,  $\text{kg}/\text{a}$ ;

$U_F$  — 公众个人食入肉类食品的数量,  $\text{kg}/\text{a}$ ;

$U_M$  — 公众个人食入奶类食品的数量,  $\text{L}/\text{a}$ ;

$W_F$  — 产肉动物食入饲料的数量,  $\text{kg}/\text{d}$ , 取  $5\text{kg}/\text{d}$ ;

$W_M$  — 产奶动物食入饲料的数量,  $\text{kg}/\text{d}$ , 取  $50\text{kg}/\text{d}$ ;

$T_F$  — 产肉动物通过食入饲料而摄入的  $^{14}\text{C}$  转移到肉中的份额,  $(\text{Bq}/\text{kg})/(\text{Bq}/\text{d})$ , 取  $3.1 \times 10^{-2} (\text{Bq}/\text{kg}) / (\text{Bq}/\text{d})$  ;

$T_M$  — 产奶动物通过食入饲料而摄入的  $^{14}\text{C}$  转移到奶中的份额,  $(\text{Bq}/\text{kg})/(\text{Bq}/\text{d})$ , 取  $1.2 \times 10^{-2} (\text{Bq}/\text{kg}) / (\text{Bq}/\text{d})$  ;

$DF_{14,A}$ — 公众  $^{14}\text{C}$  的食入内照射有效剂量转换因子,  $\text{Sv}/\text{Bq}$ ;

$3.17 \times 10^{-8}$  —  $\text{a}/\text{s}$  的换算系数。

### (5) 婴儿食入母乳内照射剂量

参考 ICRP Publication 95: Doses to Infants from Ingestion of Radionuclides in Mother's

Milk，母体吸入和摄入放射性核素后核素一部份份额转移至母乳中，婴儿食入母乳后受到内照射。婴儿食入母乳受到内照射剂量的计算模式如下：

$$D_{Baby} = \sum_i UI_{im} \cdot DI_i + \sum_i UE_{im} \cdot DE_i$$

式中：

$D_{Baby}$ — 婴儿个人食入母乳造成的有效剂量，Sv/a；

$UI_{im}$ — 母体个人通过空气吸入放射性核素 i 的量，Bq/a；

$UE_{im}$ — 母体个人通过食品摄入放射性核素 i 的量，Bq/a；

$DI_i$ — 母体吸入放射性核素 i 对婴儿的有效剂量转换因子，Sv/Bq；

$DE_i$ — 母体摄入放射性核素 i 对婴儿的有效剂量转换因子，Sv/Bq；

## 6.1.4 辐射剂量计算

### 6.1.4.1 计算参数

#### (1) 环境参数

根据对本项目场址周围环境特征的调查成果，以及国际原子能机构 IAEA 19 号安全报告对相关参数的推荐，表 6-4 给出了辐射剂量计算的有关环境介质参数。表 6-5 给出了用于气态途径途径辐射剂量计算的参数。表 6-6 给出了环境辐射剂量计算中陆生产品食物链转移因子及部分参数。

表 6-4 辐射剂量计算环境介质参数

物理意义	单位	数值
产肉动物每天消费的饲料量	kg/d	5
作物在生长季节中的曝污时间	h	2880
叶类蔬菜在生长季节中的曝污时间	h	1080
作物从收获到被消费的时间间隔	h	1800
从产肉动物被屠宰到被消费的时间间隔	h	24
叶类蔬菜从收获到被消费的时间间隔	h	24
作物中的平均含水率	无量纲	0.160
肉类中的平均含水率	无量纲	0.750
叶类蔬菜中的平均含水率	无量纲	0.928

物理意义	单位	数值
空气中碳元素的平均浓度	g/m <sup>3</sup>	0.18
植物产品和叶类蔬菜碳元素的质量份额	无量纲	0.18

表 6-5 辐射剂量计算气态照射途径参数

物理意义	单位	数值
气载放射性流出物在地面上的积累时间	H	350400
土壤中放射性积累时间	H	350400
15cm 深度内土壤的有效面密度	kg 干土/m <sup>2</sup>	200
呼吸率 • 成人 • 青少年 • 儿童 • 婴儿	m <sup>3</sup> 空气/h	0.96 0.96 0.61 0.22
考虑公众在室外滞留时间及建筑物屏蔽作用等因素确定的空气浸没和地面沉积外照射修正因子	无量纲	0.75
清洗因子	无量纲	0.5

表 6-6 环境辐射剂量计算食物链转移因子及部分参数

元素	f <sub>v</sub>	f <sub>l</sub>	f <sub>r</sub> (Bq/kg 肉) / (Bq/d)	B <sub>v</sub> (Bq/kg 作物) / (Bq/kg 干土)	B <sub>L</sub> (Bq/kg 蔬菜) / (Bq/kg 干土)	λ <sub>G</sub> (1/h)	λ <sub>v</sub> (1/h)	λ <sub>L</sub> (1/h)
H	0	0	1.20E-02	0	0	0	0	0
C	0	0	3.10E-02	0	0	0	0	0
Kr	0	0	0	0	0	0	0	0
Xe	0	0	0	0	0	0	0	0
Sr	2.00E-01	2.00E-01	1.00E-02	1.00E+01	3.00E-01	5.83E-06	2.06E-03	2.06E-03
Y	2.00E-01	2.00E-01	1.00E-02	1.00E-01	3.00E-03	0	2.06E-03	2.06E-03
Zr	2.00E-01	2.00E-01	1.00E-05	1.00E-01	1.00E-03	0	2.06E-03	2.06E-03
Nb	2.00E-01	2.00E-01	3.00E-06	2.00E-01	1.00E-02	0	2.06E-03	2.06E-03
Ru	2.00E-01	2.00E-01	5.00E-02	2.00E-01	5.00E-02	0	2.06E-03	2.06E-03
Te	2.00E-01	2.00E-01	7.00E-02	1.00E+01	1.00E+00	0	2.06E-03	2.06E-03
I	2.00E-01	2.00E-01	5.00E-02	1.00E-01	2.00E-02	5.83E-05	2.06E-03	2.06E-03
Cs	5.00E-01	2.00E-01	5.00E-02	1.00E+00	4.00E-02	5.83E-06	2.06E-03	2.06E-03
Ba	2.00E-01	2.00E-01	2.00E-03	1.00E-01	5.00E-02	0	2.06E-03	2.06E-03
La	2.00E-01	2.00E-01	2.00E-03	2.00E-03	2.00E-03	0	2.06E-03	2.06E-03
Ce	2.00E-01	2.00E-01	2.00E-04	1.00E-01	5.00E-02	0	2.06E-03	2.06E-03
Pr	2.00E-01	2.00E-01	4.70E-03	2.50E-03	2.50E-03	0	2.06E-03	2.06E-03
Np	2.00E-01	2.00E-01	1.00E-02	5.00E-01	4.00E-02	0	2.06E-03	2.06E-03
Pu	2.00E-01	2.00E-01	2.00E-04	1.00E-01	1.00E-03	0	2.06E-03	2.06E-03

元素	$f_v$	$f_l$	$f_r$ (Bq/kg 肉) / (Bq/d)	$B_v$ (Bq/kg 作物) / (Bq/kg 干土)	$B_L$ (Bq/kg 蔬菜) / (Bq/kg 干土)	$\lambda_G$ (1/h)	$\lambda_v$ (1/h)	$\lambda_L$ (1/h)
Rb	2.00E-01	2.00E-01	3.00E-02	2.00E+00	2.00E-01	0	2.06E-03	2.06E-03
Nd	2.00E-01	2.00E-01	4.70E-03	2.50E-03	2.50E-03	0	2.06E-03	2.06E-03
Am	2.00E-01	2.00E-01	1.00E-04	2.00E-03	1.00E-01	0	2.06E-03	2.06E-03
Cm	2.00E-01	2.00E-01	2.00E-05	1.00E-03	1.00E-01	0	2.06E-03	2.06E-03

## (2) 剂量转换因子

根据《电离辐射防护和辐射源安全基本标准》(GB18871-2002), 表 6-7 给出了惰性气体空气浸没外照射有效剂量转换因子。

根据国际原子能机构 IAEA 19 号安全报告, 表 6-8 给出了空气浸没和地面沉积外照射有效剂量转换因子。

表 6-9 根据《电离辐射防护和辐射源安全基本标准》(GB18871-2002) 给出了空气吸入及食入有效剂量转换因子。

参考 ICRP CD3 数据库, 表 6-10 给出了母体吸入和摄入放射性核素后, 婴儿通过食入母乳而转移至婴儿体内的份额及对婴儿内照射的有效剂量转换因子。

表 6-7 惰性气体空气浸没外照射有效剂量转换因子

核素	物理半衰期	空气浸没转换因子 (Sv/h) / (Bq/m <sup>3</sup> )	核素	物理半衰期	空气浸没转换因子 (Sv/h) / (Bq/m <sup>3</sup> )
Kr-85	10.7 y	9.17E-13	<sup>133</sup> Xe	5.24 d	5.00E-12
Xe-131m	11.9 d	1.33E-12	<sup>127</sup> Xe	36d	4.51E-11

表 6-8 空气浸没、地面沉积外照射剂量转换因子

核素	空气浸没 (Sv/h) / (Bq/m <sup>3</sup> )	地面沉积 (Sv/h) / (Bq/m <sup>2</sup> )	核素	空气浸没 (Sv/h) / (Bq/m <sup>3</sup> )	地面沉积 (Sv/h) / (Bq/m <sup>2</sup> )
H-3	0.00E+00	0.00E+00	Ba-137m	1.04E-10	2.11E-12
C-14	0.00E+00	5.80E-17	Ba-140	3.09E-11	6.48E-13
Sr-89	1.60E-12	2.51E-13	La-140	4.21E-10	7.78E-12
Sr-90	3.54E-13	4.00E-13	Ce-141	1.26E-11	2.74E-13
Y-90	2.97E-12	4.00E-13	Ce-144	1.26E-11	6.51E-13
Y-91	2.28E-12	2.74E-13	Pr-143	7.56E-14	2.52E-15
Zr-95	1.26E-10	5.37E-12	Np-239	2.85E-11	5.94E-13
Nb-95	1.37E-10	2.74E-12	Pu-241	2.63E-16	3.42E-15
Ru-103	8.22E-11	1.71E-12	Te-125m	1.68E-12	1.32E-13
Ru-106	4.11E-11	1.26E-12	Te-127	1.27E-12	3.79E-14
Te-123m	2.34E-11	5.15E-13	Te-127m	5.54E-13	4.21E-14

核素	空气浸没 (Sv/h) / (Bq/m <sup>3</sup> )	地面沉积 (Sv/h) / (Bq/m <sup>2</sup> )	核素	空气浸没 (Sv/h) / (Bq/m <sup>3</sup> )	地面沉积 (Sv/h) / (Bq/m <sup>2</sup> )
Te-129	9.90E-12	2.16E-13	Pu-238	1.89E-14	3.33E-15
Te-129m	6.16E-12	2.17E-13	Pu-239	1.58E-14	1.44E-15
I-131	6.62E-11	1.37E-12	Pu-240	1.83E-14	3.19E-15
Cs-134	2.74E-10	5.59E-12	Nd-147	2.28E-11	5.35E-13
Cs-136	3.88E-10	7.65E-12	Am-241	2.96E-12	1.01E-13
Cs-137	9.93E-11	2.05E-12	Cm-242	2.18E-14	3.74E-15
I-129	1.39E-12	9.40E-14	Cm-244	1.89E-14	3.44E-15
Rb-86	1.89E-11	6.10E-13	/		

表 6-9 空气吸入、食入内照射有效剂量转换因子

核素	吸入内照射 (Sv/Bq)				食入内照射 (Sv/Bq)			
	婴儿	儿童	青少年	成人	婴儿	儿童	青少年	成人
H-3	6.40E-11	3.10E-11	2.30E-11	1.80E-11	6.40E-11	3.10E-11	2.30E-11	1.80E-11
C-14	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.60E-09	9.90E-10	8.00E-10	5.80E-10
Sr-89	3.30E-08	1.30E-08	9.10E-09	6.10E-09	3.60E-08	8.90E-09	5.80E-09	2.60E-09
Sr-90	1.50E-07	6.50E-08	5.10E-08	3.60E-08	2.30E-07	4.70E-08	6.00E-08	2.80E-08
Y-90	1.30E-08	4.00E-09	2.60E-09	1.40E-09	3.10E-08	1.00E-08	5.90E-09	2.70E-09
Y-91	3.90E-08	1.60E-08	1.10E-08	7.10E-09	2.80E-08	8.80E-09	5.20E-09	2.40E-09
Zr-95	2.00E-08	9.70E-09	6.80E-09	4.80E-09	8.50E-09	3.00E-09	1.90E-09	9.50E-10
Nb-95	6.80E-09	3.10E-09	2.20E-09	1.50E-09	4.60E-09	1.80E-09	1.10E-09	5.80E-10
Ru-103	1.10E-08	5.00E-09	3.50E-09	2.40E-09	7.10E-09	2.40E-09	1.50E-09	7.30E-10
Ru-106	1.40E-07	6.40E-08	4.10E-08	2.80E-08	8.40E-08	2.50E-08	1.50E-08	7.00E-09
Te-123m	1.80E-08	8.00E-09	5.70E-09	4.00E-09	1.90E-08	4.90E-09	2.80E-09	1.40E-09
Te-129	3.30E-10	9.90E-11	6.50E-11	3.70E-11	7.50E-10	2.10E-10	1.20E-10	6.30E-11
Te-129m	3.50E-08	1.40E-08	9.80E-09	6.60E-09	4.40E-08	1.20E-08	6.60E-09	3.00E-09
I-131	2.20E-08	8.20E-09	4.70E-09	2.40E-09	1.80E-07	1.00E-07	5.20E-08	2.20E-08
Cs-134	1.10E-08	1.60E-08	1.20E-08	9.10E-09	2.60E-08	1.30E-08	1.40E-08	1.90E-08
Cs-136	7.30E-09	6.00E-09	3.70E-09	2.50E-09	1.50E-08	6.10E-09	4.40E-09	3.00E-09
Cs-137	8.80E-09	1.80E-08	1.30E-08	9.70E-09	2.10E-08	9.60E-09	1.00E-08	1.30E-08
Ba-140	2.70E-08	1.10E-08	7.60E-09	5.10E-09	3.20E-08	9.20E-09	5.80E-09	2.60E-09
La-140	8.80E-09	3.10E-09	2.00E-09	1.10E-09	2.00E-08	6.80E-09	4.20E-09	2.00E-09
Ce-141	1.40E-08	6.30E-09	4.60E-09	3.20E-09	8.10E-09	2.60E-09	1.50E-09	7.10E-10
Ce-144	1.90E-07	8.80E-08	5.50E-08	3.60E-08	6.60E-08	1.90E-08	1.10E-08	5.20E-09
Pr-143	1.20E-08	4.60E-09	3.20E-09	2.20E-09	1.40E-08	4.30E-09	2.60E-09	1.20E-09
Np-239	5.90E-09	2.00E-09	1.40E-09	9.30E-10	8.90E-09	2.90E-09	1.70E-09	8.00E-10
Pu-241	9.10E-07	9.20E-07	8.30E-07	9.00E-07	5.60E-08	5.50E-09	5.10E-09	4.80E-09
I-129	3.60E-08	3.30E-08	2.40E-08	1.50E-08	1.80E-07	2.20E-07	1.90E-07	1.10E-07
Rb-86	1.20E-08	7.70E-09	2.00E-09	9.30E-10	3.10E-08	2.00E-08	5.90E-09	2.80E-09
Te-125m	1.50E-08	1.10E-08	4.80E-09	3.40E-09	1.30E-08	6.30E-09	1.90E-09	8.70E-10



核素	吸入内照射 (Sv/Bq)				食入内照射 (Sv/Bq)			
	婴儿	儿童	青少年	成人	婴儿	儿童	青少年	成人
Te-127	1.00E-09	7.30E-10	2.40E-10	1.30E-10	1.50E-09	1.20E-09	3.60E-10	1.70E-10
Te-127m	3.50E-08	2.60E-08	1.10E-08	7.40E-09	4.10E-08	1.80E-08	5.20E-09	2.30E-09
Pu-238	7.80E-05	7.40E-05	4.40E-05	4.60E-05	4.00E-06	4.00E-07	2.40E-07	2.30E-07
Pu-239	8.00E-05	7.70E-05	4.80E-05	5.00E-05	4.20E-06	4.20E-07	2.70E-07	2.50E-07
Pu-240	8.00E-05	7.70E-05	4.80E-05	5.00E-05	4.20E-06	4.20E-07	2.70E-07	2.50E-07
Nd-147	1.10E-08	8.00E-09	3.20E-09	2.10E-09	1.20E-08	7.80E-09	2.30E-09	1.10E-09
Am-241	7.30E-05	6.90E-05	4.00E-05	4.20E-05	3.70E-06	3.70E-07	2.20E-07	2.00E-07
Cm-242	2.20E-05	1.80E-05	7.30E-06	5.20E-06	5.90E-07	7.60E-08	2.40E-08	1.20E-08
Cm-244	6.20E-05	5.70E-05	2.70E-05	2.70E-05	2.90E-06	2.90E-07	1.40E-07	1.20E-07

表 6-10 母体吸入和摄入放射性核素对婴儿食入母乳后造成的内照射相应核素份额和有效剂量转换因子

母体吸入或摄入核素	进入婴儿体内核素	吸入进入婴儿体内核素相应份额	摄入进入婴儿体内核素相应份额	吸入对婴儿剂量转换因子 (Sv/Bq)	摄入对婴儿剂量转换因子 (Sv/Bq)
H-3	H-3	3.14E-01	3.14E-01	2.00E-11	2.00E-11
C-14	C-14	1.65E-02	1.85E-01	2.30E-11	2.60E-10
Sr-89	Sr-89	1.61E-02	5.61E-02	5.80E-10	2.00E-09
Sr-90	Sr-90	1.80E-02	6.12E-02	3.00E-09	1.00E-08
	Y-90	9.48E-03	2.96E-02		
Zr-95	Zr-95	1.58E-03	4.12E-04	1.40E-11	4.20E-12
	Nb-95m	8.51E-06	1.78E-06		
	Nb-95	5.85E-05	1.56E-04		
Nb-95	Nb-95	5.01E-04	1.20E-04	2.30E-12	5.50E-13
Ru-103	Ru-103	2.10E-03	1.71E-03	1.50E-11	1.20E-11
	Rh-103m	2.09E-03	1.70E-03		
Ru-106	Ru-106	2.68E-03	2.11E-03	2.10E-10	1.70E-10
	Rh-106	2.68E-03	2.11E-03		
Te-129m	Te-129m	5.88E-04	2.05E-03	2.60E-11	9.10E-11
	Te-129	3.79E-04	1.33E-03		
Te-131m	Te-131m	2.44E-04	9.00E-04	2.80E-10	2.20E-09
	Te-131	5.48E-05	2.02E-04		
	I-131	1.55E-03	1.21E-02		
I-131	I-131	1.71E-01	3.08E-01	3.10E-08	5.50E-08
Cs-134	Cs-134	6.66E-02	1.20E-01	1.70E-09	3.10E-09
Cs-136	Cs-136	2.44E-02	4.40E-02	3.70E-10	6.60E-10
Cs-137	Cs-137	6.89E-02	1.24E-01	1.40E-09	2.60E-09
	Ba-137m	6.51E-02	1.18E-01		
Ba-140	Ba-140	2.17E-03	6.20E-03	8.50E-11	2.00E-10
	La-140	7.76E-04	1.76E-03		
Ce-141	Ce-141	1.50E-03	2.02E-05	1.20E-11	1.60E-13

母体吸入或摄入核素	进入婴儿体内核素	吸入进入婴儿体内核素相应份额	摄入进入婴儿体内核素相应份额	吸入对婴儿剂量转换因子 (Sv/Bq)	摄入对婴儿剂量转换因子 (Sv/Bq)
Ce-144	Ce-144	1.61E-03	2.08E-05	1.00E-10	1.30E-12
	Pr-144m	2.86E-05	3.71E-07		
	Pr-144	1.57E-03	2.08E-05		
Pu-241	Pu-241	1.89E-03	2.42E-05	1.90E-11	1.30E-12
	Am-241	5.58E-08	3.27E-10		
	Np-237	1.07E-15	4.10E-18		
Np-239	Np-239	2.08E-03	2.92E-05	1.50E-12	1.90E-14
	Pu-239	3.09E-10	3.28E-12		
	U-235	1.37E-20	7.35E-23		

### (3) 食物消费和生活习惯因子

本项目评价区范围内居民的食物消费详见本报告第二章。

#### 6.1.4.2 公众个人剂量

根据以上剂量计算模式和参数，表 6-11~表 6-14 给出了本项目气载放射性流出物排放造成场址半径 20km 范围内各子区中各年龄段（成人、青少年、儿童、婴儿）公众个人造成的辐射剂量估算结果。

从表中可以看出，本项目气载放射性流出物排放对各年龄段公众造成的受照剂量最大的子区均为 NNW 方位 0~1km 子区，分别对该子区成人、青少年、儿童和婴儿组公众个人造成的剂量为  $7.98 \times 10^{-6} \text{Sv/a}$ 、 $6.19 \times 10^{-6} \text{Sv/a}$ 、 $4.59 \times 10^{-6} \text{Sv/a}$  和  $3.37 \times 10^{-6} \text{Sv/a}$ ，其中成人组公众为最大受照年龄组。

表 6-11 正常运行对公众个人（成人）造成的年有效剂量 单位：Sv/a

距离 (km) 方位	0~1	1~2	2~3	3~5	5~10	10~20
N	—	4.72E-06	2.77E-06	—	6.58E-07	3.11E-07
NNE	—	—	—	—	—	2.00E-07
NE	—	—	—	—	—	1.11E-07
ENE	—	—	8.10E-07	—	—	9.62E-08
E	—	—	—	—	1.71E-07	—
ESE	—	—	—	—	—	2.89E-08
SE	—	—	—	—	—	—
SSE	—	—	—	—	—	—

S	—	—	—	—	—	—
SSW	—	—	—	—	—	—
SW	—	—	—	1.14E-06	—	—
WSW	—	—	4.44E-06	—	—	—
W	—	5.65E-06	3.32E-06	—	—	—
WNW	—	—	—	4.73E-07	3.66E-07	3.15E-07
NW	—	5.63E-06	3.31E-06	1.13E-06	7.33E-07	3.20E-07
NNW	7.98E-06	—	2.44E-06	—	5.08E-07	2.58E-07

表 6-12 正常运行对公众个人（青少年）造成的年有效剂量 单位：Sv/a

距离 (km) 方位	0~1	1~2	2~3	3~5	5~10	10~20
N	—	3.67E-06	2.15E-06	—	5.14E-07	2.48E-07
NNE	—	—	—	—	—	1.58E-07
NE	—	—	—	—	—	9.47E-08
ENE	—	—	6.51E-07	—	—	7.73E-08
E	—	—	—	—	1.36E-07	—
ESE	—	—	—	—	—	2.35E-08
SE	—	—	—	—	—	—
SSE	—	—	—	—	—	—
S	—	—	—	—	—	—
SSW	—	—	—	—	—	—
SW	—	—	—	9.91E-07	—	—
WSW	—	—	3.57E-06	—	—	—
W	—	4.54E-06	2.67E-06	—	—	—
WNW	—	—	—	4.54E-07	3.37E-07	2.57E-07
NW	—	4.37E-06	2.57E-06	9.30E-07	5.85E-07	2.65E-07
NNW	6.19E-06	—	1.89E-06	—	4.18E-07	2.09E-07

表 6-13 正常运行对公众个人（儿童）造成的年有效剂量 单位：Sv/a

距离 (km) 方位	0~1	1~2	2~3	3~5	5~10	10~20
N	—	2.72E-06	1.59E-06	—	3.86E-07	1.87E-07
NNE	—	—	—	—	—	1.19E-07
NE	—	—	—	—	—	7.30E-08
ENE	—	—	4.86E-07	—	—	5.83E-08
E	—	—	—	—	1.02E-07	—
ESE	—	—	—	—	—	1.76E-08
SE	—	—	—	—	—	—
SSE	—	—	—	—	—	—
S	—	—	—	—	—	—

SSW	—	—	—	—	—	—
SW	—	—	—	8.08E-07	—	—
WSW	—	—	2.67E-06	—	—	—
W	—	3.40E-06	1.99E-06	—	—	—
WNW	—	—	—	4.36E-07	2.89E-07	1.94E-07
NW	—	3.24E-06	1.91E-06	7.48E-07	4.41E-07	2.02E-07
NNW	4.59E-06	—	1.40E-06	—	3.17E-07	1.58E-07

表 6-14 正常运行对公众个人（婴儿）造成的年有效剂量 单位：Sv/a

距离 (km) 方位	0~1	1~2	2~3	3~5	5~10	10~20
N	—	1.99E-06	1.17E-06	—	3.39E-07	1.63E-07
NNE	—	—	—	—	—	1.04E-07
NE	—	—	—	—	—	6.29E-08
ENE	—	—	3.67E-07	—	—	5.21E-08
E	—	—	—	—	9.05E-08	—
ESE	—	—	—	—	—	1.56E-08
SE	—	—	—	—	—	—
SSE	—	—	—	—	—	—
S	—	—	—	—	—	—
SSW	—	—	—	—	—	—
SW	—	—	—	6.72E-07	—	—
WSW	—	—	2.02E-06	—	—	—
W	—	2.56E-06	1.50E-06	—	—	—
WNW	—	—	—	4.11E-07	2.62E-07	1.74E-07
NW	—	2.38E-06	1.40E-06	6.04E-07	3.91E-07	1.80E-07
NNW	3.37E-06	—	1.03E-06	—	2.85E-07	1.41E-07

### 6.1.4.3 三关键分析

通过上述分析，本项目正常运行气载放射性流出物释放对场址 NNW 方位 0~1km 子区瓦北光星村的成人组公众造成的年受照剂量最大，为  $7.98 \times 10^{-6} \text{Sv/a}$ ，同时考虑到场址附近在气载放射性物质辐射途径上未发现其他特殊生活习性，因此，将场址 NNW 方位 0~1km 子区瓦北光星村的成人组公众作为受辐射影响可能的关键人群组。表 6-15 给出了各放射性核素通过各途径对关键人群组（NNW 方位 0~1km 子区瓦北光星村的成人组公众）造成的有效剂量。

由表可以看出：

- 可能的关键照射途径为食入陆生食品内照射途径，对关键人群组个人造成的有

效剂量为  $6.34 \times 10^{-6} \text{Sv/a}$ ，占个人总有效剂量的 79.42%，其他重要照射途径为地面沉积外照射途径，对关键人群组个人造成的有效剂量为  $1.60 \times 10^{-6} \text{Sv/a}$ ，占个人总有效剂量的 20.04%；

- 可能的关键核素为  $^{134}\text{Cs}$ ，对关键人群组个人造成的有效剂量为  $3.95 \times 10^{-6} \text{Sv/a}$ ，占个人总有效剂量的 49.40%，其他重要核素有  $^{137}\text{Cs}$  和  $^{90}\text{Sr}$ ，对关键人群组造成的有效剂量分别为  $2.47 \times 10^{-6} \text{Sv/a}$  和  $1.26 \times 10^{-6} \text{Sv/a}$ ，分别占个人总有效剂量的 30.98% 和 15.82%；
- 关键人群组个人受到的有效剂量为  $7.98 \times 10^{-6} \text{Sv/a}$ ，占本项目剂量约束值（0.01mSv）的 79.8%，满足剂量约束的要求。

表 6-15 各放射性核素通过各途径对关键人群组造成的有效剂量 单位：Sv/a

核素	空气浸没	地面沉积	空气吸入	食入陆生食品	合计	占比
H-3	0.00E+00	0.00E+00	1.07E-10	7.74E-11	1.85E-10	0.00%
C-14	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	9.68E-11	9.68E-11	0.00%
Kr-85	5.49E-11	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	5.49E-11	0.00%
Xe-131m	5.24E-15	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	5.24E-15	0.00%
Xe-133	1.82E-18	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.82E-18	0.00%
Sr-89	4.46E-15	5.93E-11	2.17E-11	1.38E-09	1.46E-09	0.02%
Sr-90	1.65E-15	1.02E-08	2.15E-10	1.25E-06	1.26E-06	15.78%
Y-90	1.39E-14	8.48E-12	8.37E-12	4.18E-11	5.86E-11	0.00%
Y-91	1.21E-14	1.44E-10	4.81E-11	2.05E-09	2.25E-09	0.03%
Zr-95	1.22E-12	5.65E-09	5.95E-11	1.60E-09	7.31E-09	0.09%
Nb-95	2.62E-12	3.12E-09	3.67E-11	9.63E-10	4.12E-09	0.05%
Ru-103	2.52E-13	3.49E-10	9.41E-12	2.37E-10	5.95E-10	0.01%
Ru-106	9.58E-13	1.84E-08	8.35E-10	6.80E-08	8.73E-08	1.09%
Te-123m	2.38E-17	1.07E-13	5.21E-15	7.63E-13	8.75E-13	0.00%
Te-129	3.12E-16	6.11E-16	1.49E-15	1.27E-22	2.42E-15	0.00%
Te-129m	3.31E-16	6.65E-13	4.54E-13	1.79E-11	1.90E-11	0.00%
I-131	9.71E-17	8.00E-14	4.50E-15	8.82E-13	9.67E-13	0.00%
Cs-134	3.67E-11	8.29E-07	1.56E-09	3.12E-06	3.95E-06	49.48%
Cs-136	1.07E-15	4.71E-13	8.86E-15	1.85E-13	6.66E-13	0.00%
Cs-137	6.37E-12	7.23E-07	7.97E-10	1.75E-06	2.47E-06	30.94%
Ba-137m	1.39E-13	3.61E-14	0.00E+00	0.00E+00	1.75E-13	0.00%
Ba-140	1.17E-16	5.29E-14	2.47E-14	1.52E-13	2.29E-13	0.00%
La-140	1.83E-15	9.65E-14	6.11E-15	1.65E-14	1.21E-13	0.00%
Ce-141	1.84E-14	2.21E-11	6.00E-12	8.05E-11	1.09E-10	0.00%
Ce-144	4.70E-13	1.17E-08	1.72E-09	7.09E-08	8.42E-08	1.05%
Pr-143	4.62E-19	3.56E-16	1.72E-14	1.25E-13	1.42E-13	0.00%
Np-239	3.62E-17	3.03E-15	1.51E-15	2.95E-15	7.53E-15	0.00%
Pu-241	9.63E-19	9.55E-11	4.22E-09	9.90E-09	1.42E-08	0.18%

核素	空气浸没	地面沉积	空气吸入	食入陆生食品	合计	占比
I-129	6.05E-19	1.02E-13	8.35E-15	6.88E-11	6.89E-11	0.00%
Xe-127	1.39E-15	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.39E-15	0.00%
Rb-86	4.17E-17	4.25E-14	2.62E-15	1.90E-13	2.35E-13	0.00%
Te-125m	3.18E-16	2.46E-12	8.24E-13	4.07E-11	4.40E-11	0.00%
Te-127	2.93E-16	5.85E-15	3.84E-14	5.28E-15	4.99E-14	0.00%
Te-127m	1.32E-16	1.86E-12	2.26E-12	2.69E-10	2.73E-10	0.00%
Pu-238	4.64E-18	1.21E-11	1.45E-08	3.88E-08	5.32E-08	0.67%
Pu-239	1.74E-19	2.73E-13	7.05E-10	2.00E-09	2.71E-09	0.03%
Pu-240	4.08E-19	1.22E-12	1.43E-09	4.05E-09	5.48E-09	0.07%
Nd-147	7.12E-18	3.11E-15	8.39E-16	4.33E-15	8.29E-15	0.00%
Am-241	2.02E-17	1.15E-11	3.68E-10	8.25E-10	1.20E-09	0.02%
Cm-242	1.64E-17	7.80E-13	5.01E-09	2.77E-09	7.79E-09	0.10%
Cm-244	6.04E-18	9.67E-12	1.11E-08	2.01E-08	3.11E-08	0.39%
合计	1.04E-10	1.60E-06	4.28E-08	6.34E-06	7.98E-06	—
占比	0.00%	20.06%	0.54%	79.46%	100.00%	—

### 6.1.5 辐射影响评价

通过上述计算和分析，本项目正常运行状态下，气载放射性流出物排放造成公众最大有效剂量为  $7.98 \times 10^{-6} \text{Sv/a}$ ，为位于场址 NNW 方位 0~1km 子区的成人组一般公众，占本项目剂量约束值（0.01mSv）的 79.8%，满足剂量约束的要求。

同时，该人群也是可能的关键居民组，需要关注的关键照射途径为食入陆生食品内照射途径，其他重要照射途径为地面沉积外照射途径。需要关注的关键核素为  $^{134}\text{Cs}$ ，其他重要核素有  $^{137}\text{Cs}$  和  $^{90}\text{Sr}$ 。

## 6.2 同位素中心辐射环境影响

同位素中心在开展  $^{60}\text{Co}$  放射源生产中的  $^{60}\text{Co}$  放射源是主要辐射源，本节根据同位素中心的设计和运行情况计算和分析辐射环境影响。

### 6.2.1 辐射水平计算和评价

同位素中心内与辐射源相关的区域主要包括：

- 钴靶件接收水池、废源水池以及成品源水池；
- 三个热室；
- 地下废液暂存罐。

上述区域的工程描述详见本报告书第 4 章。以下就各区域的辐射水平进行分析和评价。

### 6.2.1.1 源水池

钴靶件接收水池、废源水池以及成品源水池分别用于贮存钴靶件、废源和成品源，水池均位于地下，池深设计为 6.6m，用 65cm 厚的混凝土浇筑，池面敞开，设计贮源量均为  $3.7 \times 10^{15} \text{Bq}$  钴源，使用去离子水作为冷却和屏蔽材料，池面上方的辐射水平控制值为  $\leq 2.5 \mu\text{Sv/h}$ 。

池水循环冷却净化系统具备自动补水功能，保证屏蔽水层厚度不小于 4.25m，保守假设为点源，则水面上方 30cm 处剂量率为  $0.17 \mu\text{Sv/h}$ 。

### 6.2.1.2 热室

同位素中心设计中设计有 3 个热室，其平面布置如图 6-2 所示。

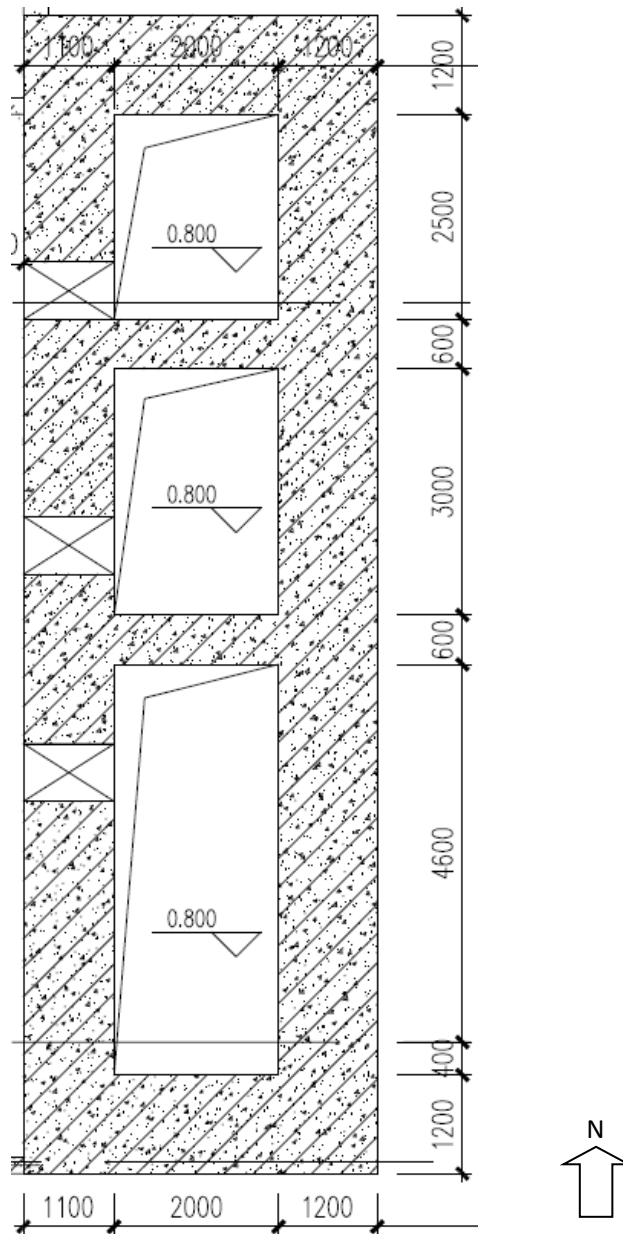


图 6-2 热室平面布置图

### 6.2.1.2.1 屏蔽计算主要计算参数

屏蔽计算中所用物质材料特性见表 6-16。

表 6-16 屏蔽计算中所用物质材料特性

物质材料	密度	化学组分			
		元素	质量分数	元素	质量分数
空气	0.001205 g/cm <sup>3</sup>	C	0.0124%	O	23.1781%
		N	75.5268%	Ar	1.2827%
赤铁混凝土	3.6 g/cm <sup>3</sup>	O	34.469%	Fe	53.554%
		Si	7.790%	H	0.292%
		Ca	3.895%	/	/



物质材料	密度	化学组分			
		元素	质量分数	元素	质量分数
铸铁防护门	7.2 g/cm <sup>3</sup>	C	3.500%	P	0.150%
		Si	2.100%	S	0.120%
		Mn	1.100%	Fe	93.030%
窥视窗	K709 玻璃 2.52 g/cm <sup>3</sup>	O	0.4598	Ca	0.1072
		Si	0.3366	Na	0.0964
	ZF6 铅玻璃 4.77 g/cm <sup>3</sup>	O	0.3327	Ca	0.0716
		Pb	0.3066	Na	0.0644
		Si	0.2247	/	/
	ZF501 铅玻璃 3.86 g/cm <sup>3</sup>	O	0.3814	Ca	0.0852
		Pb	0.1890	Na	0.0767
		Si	0.2677	/	/

计算用  $\gamma$  射线周围剂量当量 ( $H^*(10)$ ) 剂量转换因子见表 6-17 (取自 ICRP74 号报告)。

表 6-17  $\gamma$  射线周围剂量当量 ( $H^*(10)$ ) 剂量转换因子 ( $10^{-3}\cdot\mu\text{Sv/h}\cdot\text{cm}^2$ )

射线能量, MeV	0.01	0.015	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06
剂量转换因子	0.2196	2.988	3.78	2.916	2.304	1.98	1.836
射线能量, MeV	0.08	0.1	0.15	0.2	0.3	0.4	0.5
剂量转换因子	1.908	2.196	3.204	4.32	6.48	8.568	10.548
射线能量, MeV	0.6	0.8	1	1.5	2	3	4
剂量转换因子	12.384	15.768	18.72	24.84	30.96	39.96	48.24
射线能量, MeV	5	6	8	10	/		
剂量转换因子	55.8	63.36	77.76	92.16			

### 6.2.1.2.2 计算模型和结果

#### (1) 混凝土墙屏蔽

各热室的混凝土屏蔽设计相同, I3 热室的面积最小, 以 I3 热室为例进行计算。

根据热室实际几何尺寸, 计算模型见图 6-3, 为提高对目标区域 (操作前区, 东面) 计算精度, 对前墙 (东墙) 进行分层计算, 并通过源偏倚和设置视窗提高计算精度。源项为活度  $3.7\times 10^{15}\text{Bq}$  的  $^{60}\text{Co}$  点源, 位于机械手操作位置处, 距离前墙 70cm。

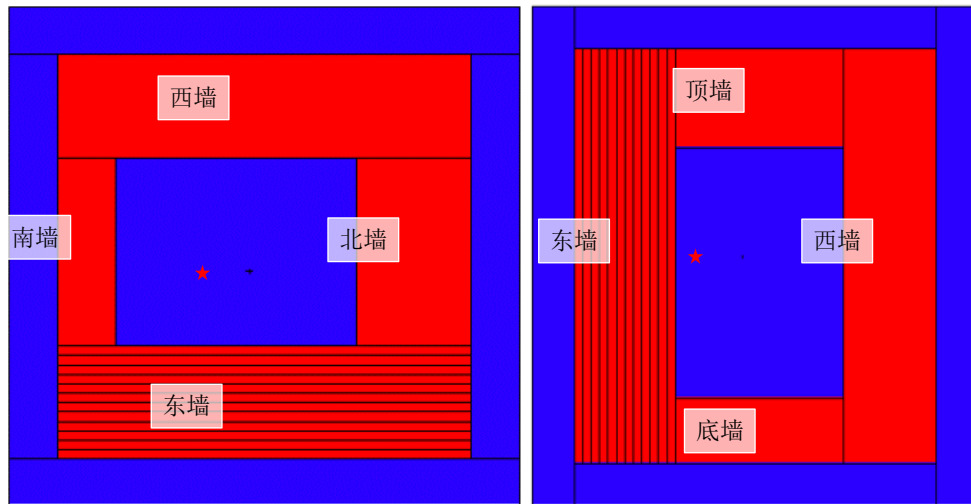
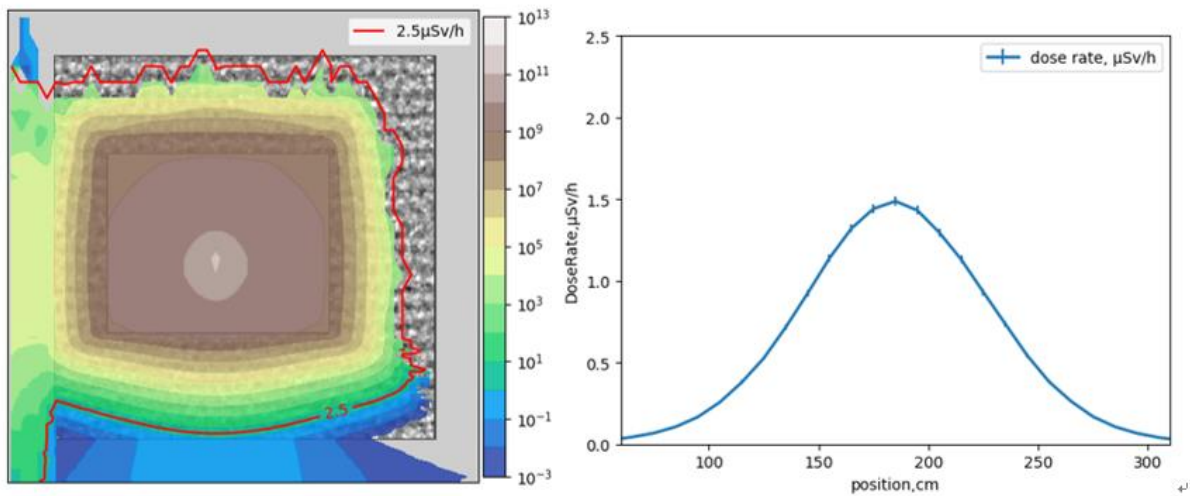


图 6-3 热室屏蔽墙计算模型（左：平面图，右：立面图）

热室周围辐射剂量率分布计算结果见图 6-4，其中左图与  $^{60}\text{Co}$  源等高处的辐射剂量率在水平方向的分布图，从图中可以看到，前屏蔽墙外辐射剂量率均小于  $2.5\mu\text{Sv/h}$ ；右图为墙外  $0\sim 30\text{cm}$  范围的辐射剂量率（与  $^{60}\text{Co}$  源等高处），从图中可知，墙外  $30\text{cm}$  处 X- $\gamma$  辐射剂量率最大值为  $1.49\mu\text{Sv/h}$ 。



热室周围 X- $\gamma$  辐射剂量率分布图

热室前墙外 0-30cm 范围 X- $\gamma$  辐射剂量率

图 6-4 热室周围辐射剂量率分布计算结果

## (2) 防护门

根据设计，热室防护门厚度  $69.5\text{cm}$ 、高  $150\text{cm}$ ，为优化防护门与混凝土墙壁连接处的屏蔽效果，防护门采用内宽： $83.6\text{cm}$ 、外宽  $184.6\text{cm}$  的梯形设计。防护门底部距地面  $20\text{cm}$ 。计算模型见图 6-5。源项为活度  $3.7\times 10^{15}\text{Bq}$  的  $^{60}\text{Co}$  点源，位于机械手操作位置处，距离前墙  $70\text{cm}$ 。

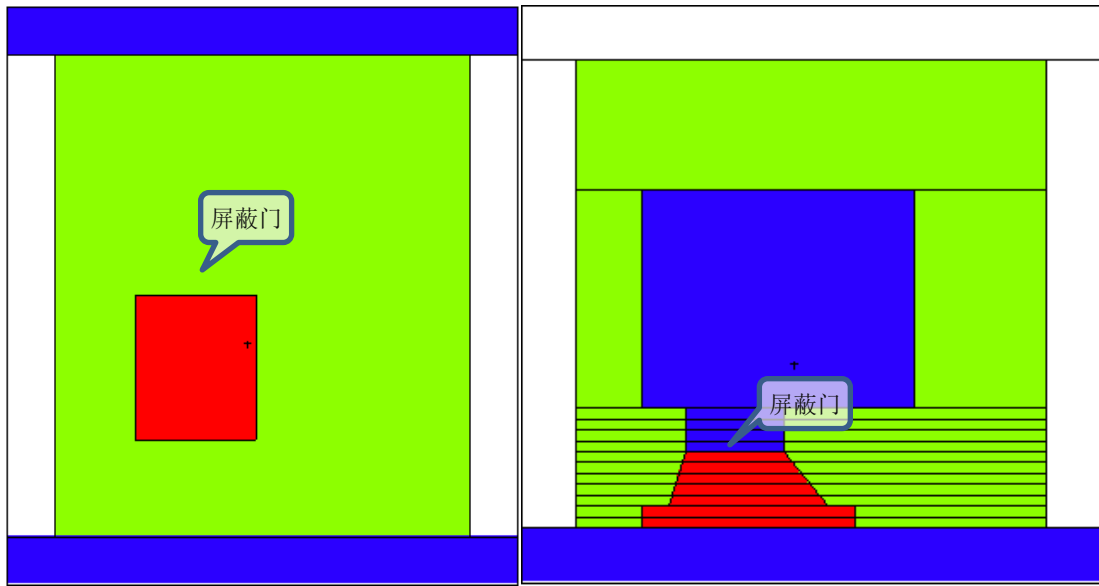
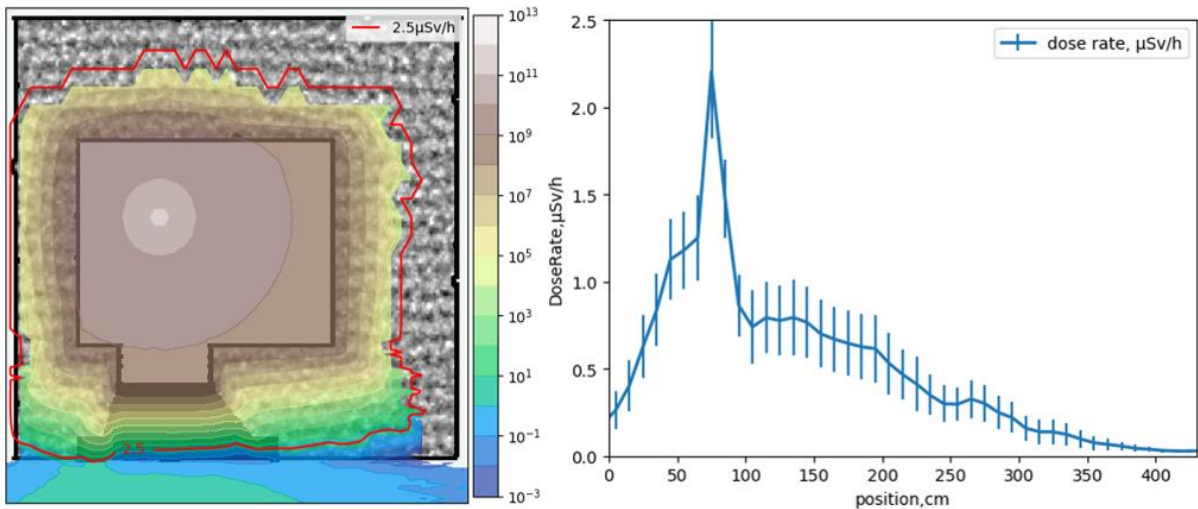


图 6-5 防护门计算模型（左：立面图，右：平面图）

计算结果见图 6-6，左图为与  $^{60}\text{Co}$  源等高平面的  $\gamma$  辐射剂量率分布，右图为防护门外 0~30cm 范围的辐射剂量率。从图中可以看到，防护门外辐射剂量率均小于  $2.5\mu\text{Sv/h}$ ，门外 30cm 处 X- $\gamma$  辐射剂量率最大值为  $2.20\mu\text{Sv/h}$ 。



防护门辐射剂量率分布图

防护门外 0-30cm 辐射剂量率

图 6-6 防护门屏蔽计算结果

### (3) 窥视窗

热室操前屏蔽墙（东）外设有操作工位，每个工位配备一个宽 82.0cm，高 67.0cm，中心距离室内地面 75.0cm 的窥视窗，窥视窗由内到外依次由 ZF6、ZF501、K709 三种铅玻璃材料组成，铅玻璃厚度依次为 44cm、34.5cm 和 37.5cm。计算模型见图 6-7，源项为活度  $3.7 \times 10^{15}\text{Bq}$  的  $^{60}\text{Co}$  点源，位于窥视窗正前方 70cm 处。

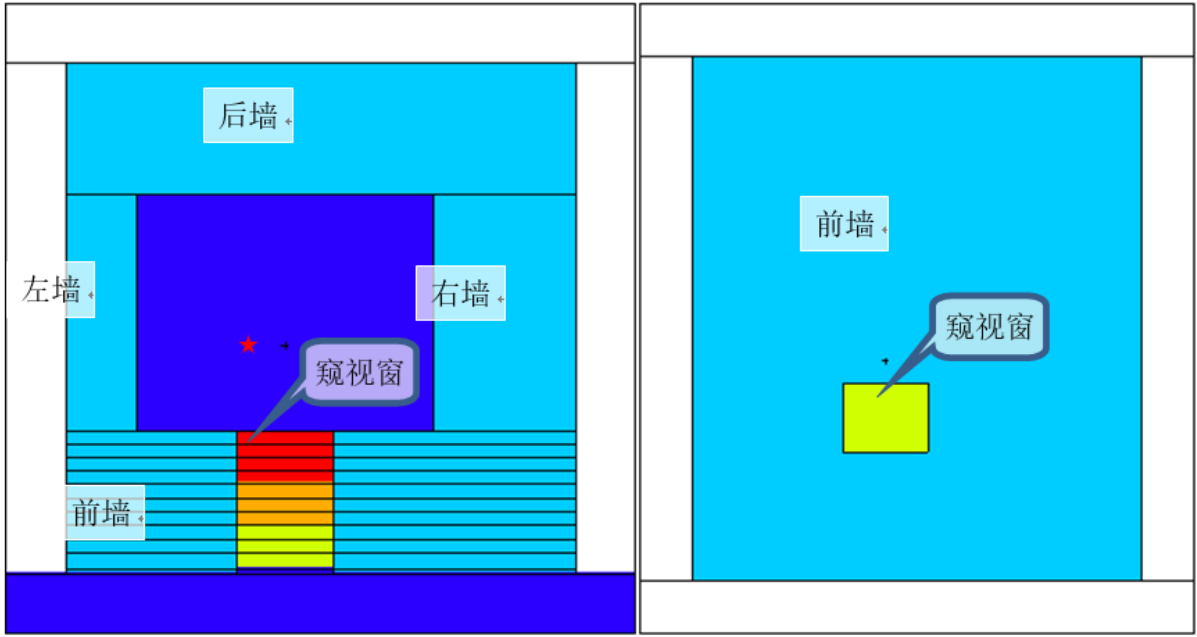
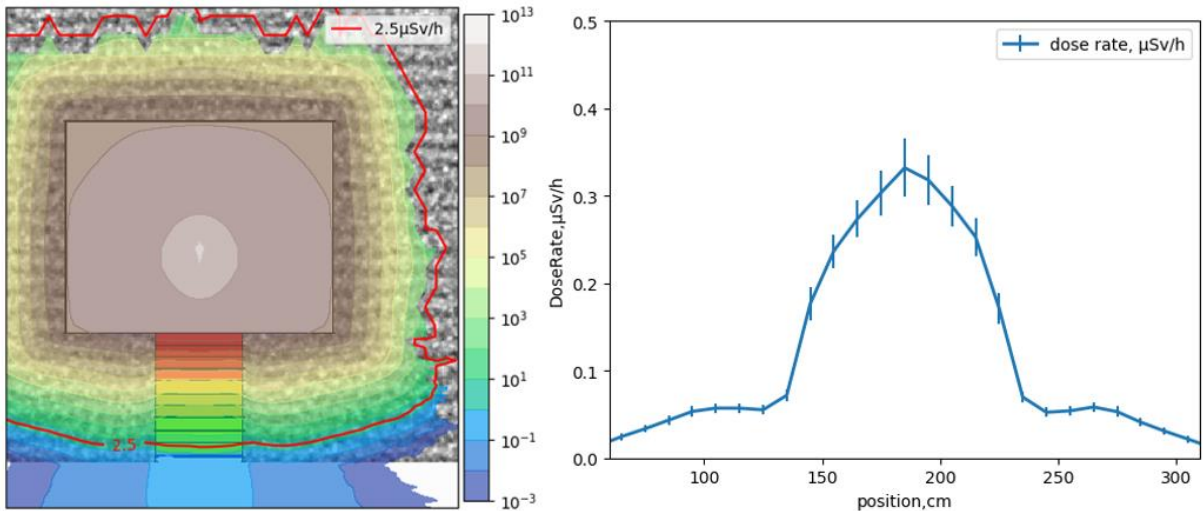


图 6-7 窥视窗屏蔽计算模型（左：平面图，右：立面图）

热室窥视窗周围辐射剂量率计算结果见图 6-8，左图为辐射剂量率平面分布图，从图中可以看到，窥视窗外辐射剂量率均小于  $2.5\mu\text{Sv/h}$ ；右图为墙外  $0\sim 30\text{cm}$  范围的辐射剂量率，从图中可知，墙外  $30\text{cm}$  处 X- $\gamma$  辐射剂量率为  $0.33\mu\text{Sv/h}$ 。



热室窥视周围 X- $\gamma$  辐射剂量率分布

热室窥视窗外  $0\sim 30\text{cm}$  范围 X- $\gamma$  辐射剂量率。

图 6-8 窥视窗屏蔽计算结果

#### (4) 机械臂穿孔屏蔽计算

热室共 2 个机械臂穿孔，间距  $80\text{cm}$ ，孔洞位于前墙高  $2.2\text{m}$  处。每个机械臂穿孔由 7 个内径  $2.5\text{cm}$ 、1 个内径  $3.1\text{cm}$ 、2 个内径  $1.02\text{cm}$  和宽度  $0.25\text{cm}$  的环形缝隙构成，计算模型见图 6-9。计算时  $^{60}\text{Co}$  点源计算距离热室地面  $0.6\text{m}$ ，距离前墙面  $0.7\text{m}$ 。

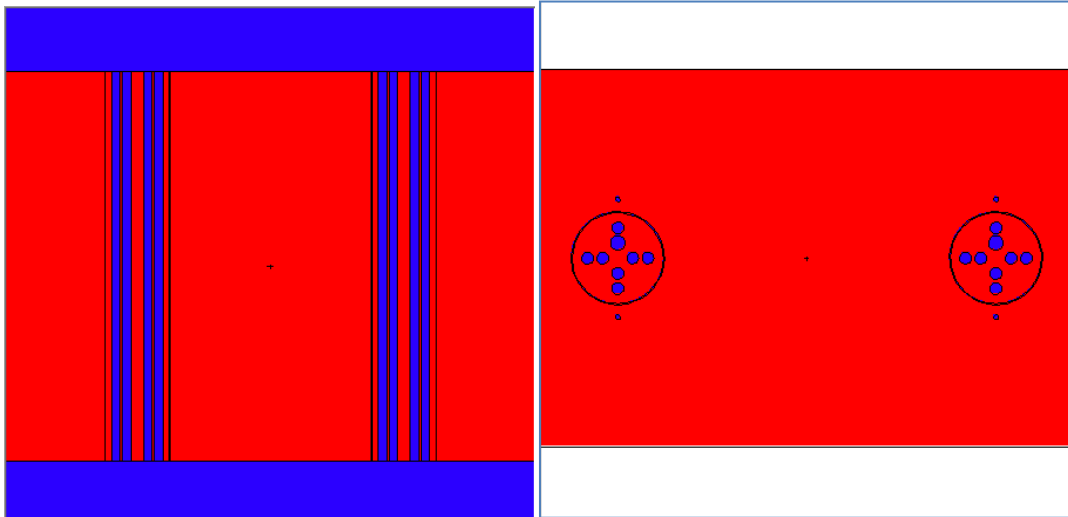
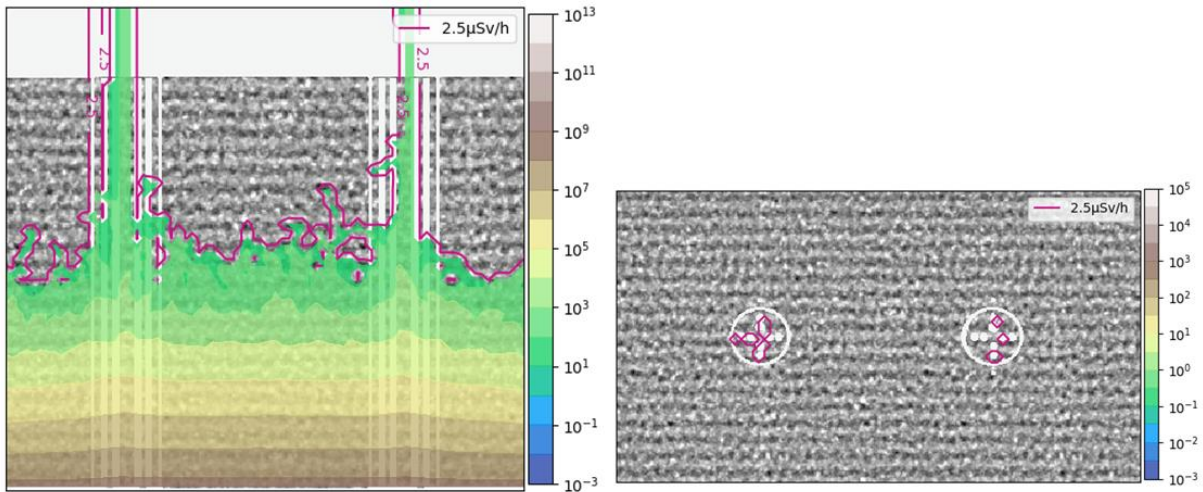


图 6-9 穿墙机械臂辐射剂量率计算模型

机械臂穿孔处辐射剂量率计算结果见图 6-10，左图为穿孔中心平面的剂量率分布图，右图为孔洞外 0-30cm 的剂量率分布图。从图中可以看到，机械臂孔洞四周辐射剂量率小于  $2.5\mu\text{Sv/h}$ ，但孔洞直射方向辐射剂量率超过  $2.5\mu\text{Sv/h}$ ，虽然穿孔高度人员一般不能达到，为进一步保障工作人员，建议对孔洞做进一步的屏蔽措施或通过管理措施防范不必要的照射。



机械手穿孔处辐射剂量率平面分布图

机械手穿孔处墙外 0-30cm 范围辐射剂量率分布图

图 6-10 穿墙机械臂辐射剂量率计算结果

### (5) 进、排风管屏蔽计算

#### 1) II 热室

II 热室内腔尺寸为  $5\text{m}\times 2\text{m}\times 3\text{m}$ （宽 $\times$ 深 $\times$ 高），前墙厚 1.2m、后墙厚 1.1m、左侧墙厚 1.2m、右侧墙厚 0.6m、顶厚 1.2m、底厚 0.8m。

原有设计的进风管管径 22.8cm，室内管口距离地面 2.5m。排风管位于后墙，管径

30.8cm，室内管口距离地面 35cm，II 热室共两个窥视窗工作台位于前墙。进风管屏蔽计算时，放射源位于左侧窥视窗前 70cm，距离地面 60cm；排风管屏蔽计算时，放射源位于右侧窥视窗前 70cm，距离地面 60cm。

经计算管道房顶出口处剂量率超过  $2.5\mu\text{Sv/h}$ ，建议将进风口内径变更为截面积等效的两个管道，内径均为 16.2cm，管道外增加厚 2.3cm 铅屏蔽层，出风管内径变更为截面积等效的两个管道，内径均为 21.8cm，管道外增加厚 2.3cm 铅屏蔽层，变更后的进、排风管示意图见图 6-11，屏蔽计算结果见图 6-12，从图中可以看到顶墙进、排风口辐射剂量率均小于  $2.5\mu\text{Sv/h}$  满足设计要求。

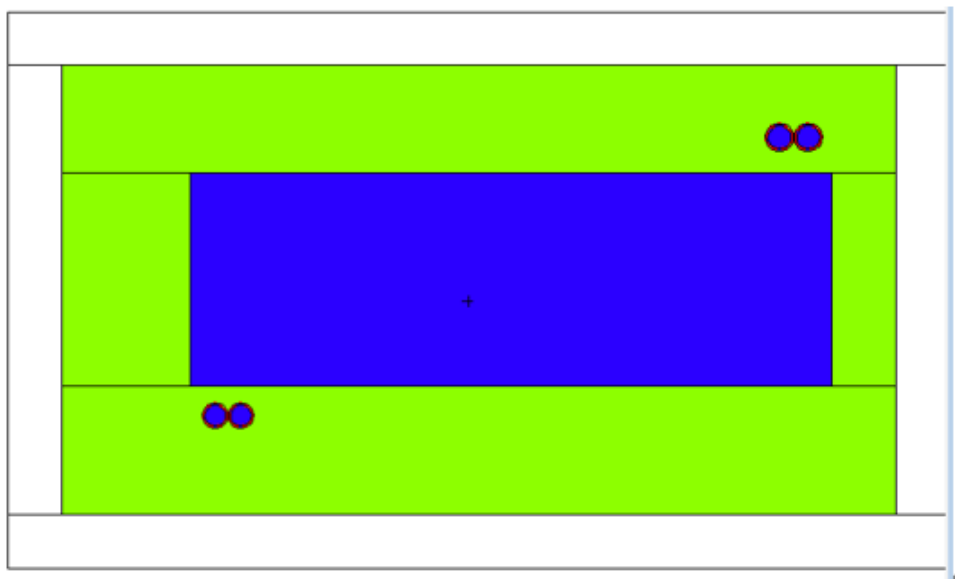


图 6-11 II 热室进、排风管道示意图

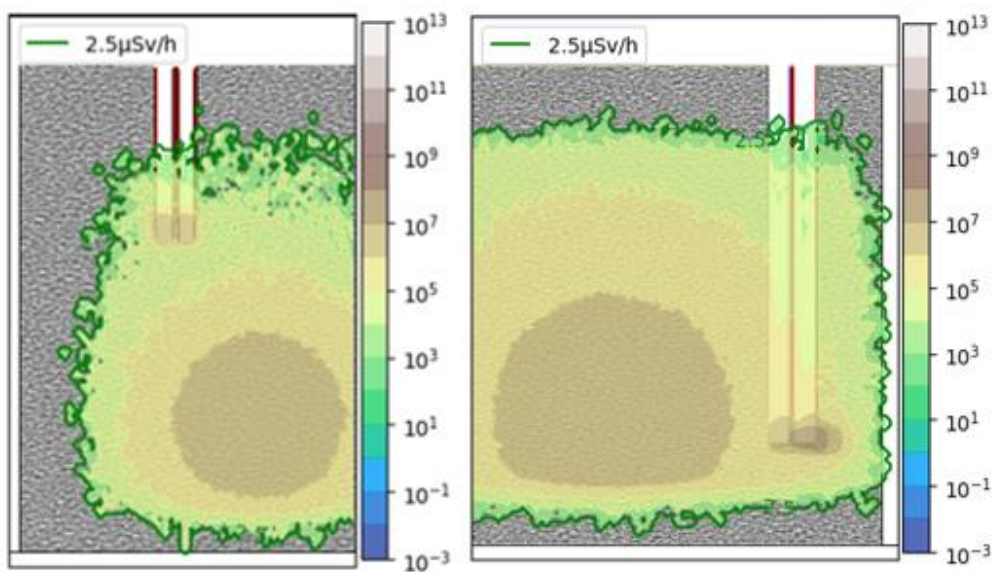


图 6-12 II 热室进、排风管辐射剂量率计算结果

## 2) I2 热室

I2 热室内腔尺寸为 2.5m×2m×3m（宽×深×高），前墙厚 1.2m、后墙厚 1.1m、左侧墙厚 0.6m、右侧墙厚 0.6m、顶厚 1.2m、底厚 0.8m。

进风管位于前墙内垂直顶墙穿去，管径 16.8cm，室内管口距离地面 2.5m。排风管位于左侧墙，管径 20.8cm，室内管口距离地面 35cm，由墙顶穿出，由于射线穿透内墙进入管道后在出口处散射剂量率超过 2.5 $\mu$ Sv/h，因此，在通风管道外增加 2.3cm 厚的铅屏蔽。进、排风管示意图见图 6-13。

I2 热室共 1 个窥视窗工作台位于前墙，进、排风管屏蔽计算时，放射源位于窥视窗前 70cm，距离地面 60cm。屏蔽计算结果见图 6-14，从图中可以看到顶墙进、排风口辐射剂量率小于 2.5 $\mu$ Sv/h，满足控制要求。

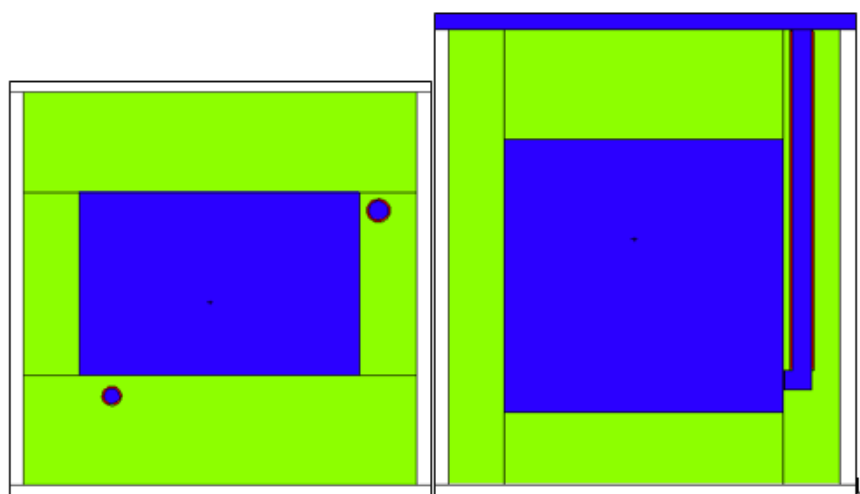


图 6-13 I2 热室进、排风管道示意图

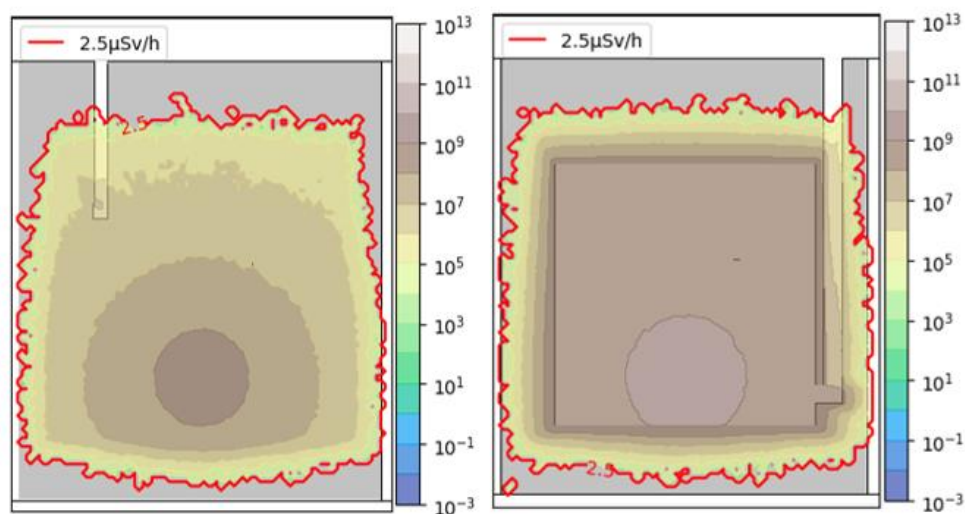


图 6-14 I2 热室进、排风管辐射剂量率计算结果

## 3) I3 热室

每个热室设计有 1 个进入管和 1 个排风管。I3 热室进风管道位于热室后墙左侧，由顶部穿出，管径 16.8cm，管中心距后墙内表面 51cm，距离左墙 35cm，室内进进风管口距地面高 2.5m。I3 热室排风管位于右墙靠近后墙位置，由顶墙垂直穿出，管径 20.8cm，管中心距右墙壁表面 49cm，距离后墙 20cm，室内管口距离地面 35cm。屏蔽计算模型见图 6-15。

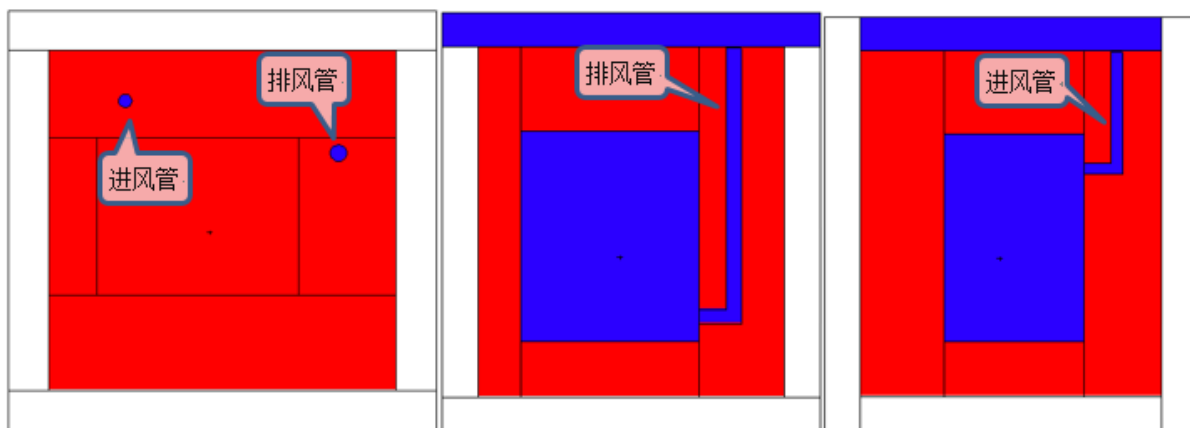


图 6-15 进、排风口计算示意图（平面图、排风管立面图、进风管立面图）

热室进风管、排风管周围辐射剂量率计算结果见图 6-16。图 6-16 为进、排风管所在截面的剂量率分布。从图中可以看到，I3 热室屋顶进、排风管口辐射剂量率低于  $2.5\mu\text{Sv/h}$ ，满足控制要求。

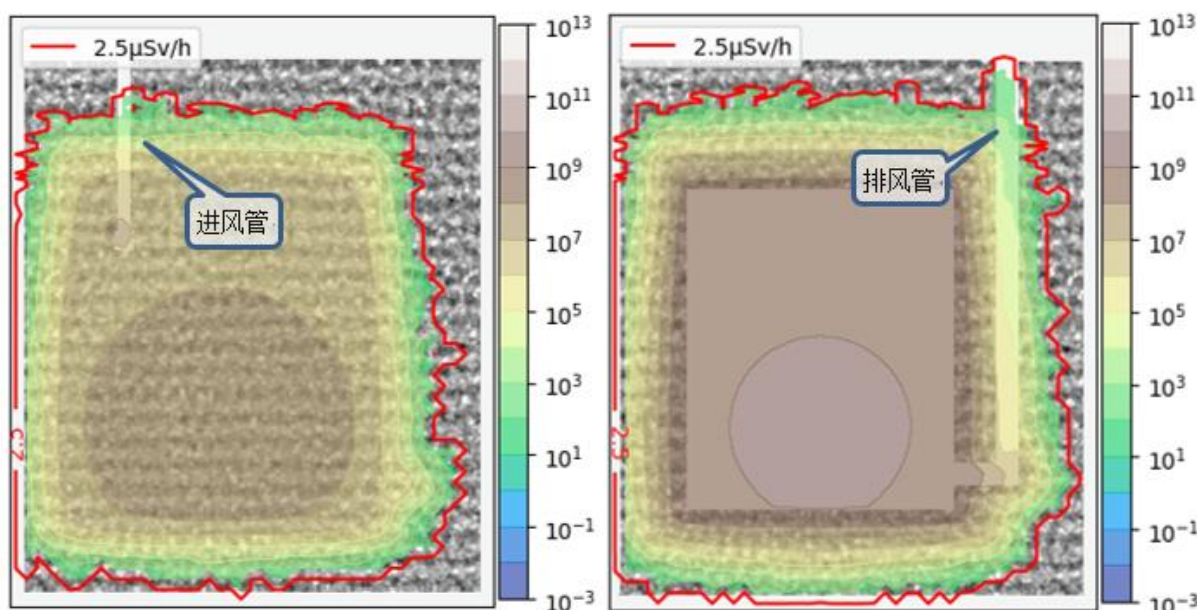


图 6-16 进风管、排风管所在平面辐射剂量率分布



### 6.2.1.3 废液暂存罐区

同位素中心热室操作后区的地下废液暂存罐用于暂存该中心运行期间产生的含放射性废液，核素主要为  $^{60}\text{Co}$ 。罐区布置在地面以下，用混凝土作为屏蔽体，罐区顶部辐射水平控制值为 $\leq 2.5\mu\text{Sv/h}$ 。

采用 MicroShield9.0 分析计算罐区顶部的混凝土设计是否满足剂量率辐射水平控制值。MicroShield 是一款基于点核积分技术的辐射剂量计算软件，它广泛应用于屏蔽体设计与屏蔽外参考点剂量率计算等方面。点核积分技术是处理复杂几何空间辐射屏蔽设计问题的基本方法之一，在该方法中  $\gamma$  光子辐射视为射线状前进，与屏蔽材料的相互作用效应采用线性减弱因子描述。每一个辐射能量  $E$  的点核对剂量点的剂量贡献为：

$$A(\vec{r}, \vec{r}', E) = CONV(E)B(t, E) \frac{\exp(-Ld(E))}{4\pi(\vec{r} - \vec{r}')^2}$$

其中， $CONV(E)$ 为通量密度-辐射剂量转换因子， $B(t, E)$ 为积累因子， $\exp(-t(E))$ 为材料减弱因子， $Ld(E)$ 为沿着 $\vec{r} - \vec{r}'$ 方向的光学距离（mfp）。

屏蔽计算保守考虑废液罐存放活度浓度为  $4.00 \times 10^6 \text{Bq/L}$  的废液，放射性核素为  $^{60}\text{Co}$ ，罐体设计容量  $5\text{m}^3$ 、直径  $1.8\text{m}$ 。考虑均一化的圆柱体体源，不考虑废液罐罐体的屏蔽作用，仅考虑混凝土屏蔽体，经计算可得：贮存区上方采用设计厚度为  $70\text{cm}$  的混凝土屏蔽层时，罐区顶部混凝土外辐射剂量率为  $0.189\mu\text{Sv/h}$ ，满足屏蔽要求。

## 6.2.2 工作人员受照剂量

### 6.2.2.1 同位素中心辐射工作人员受照剂量

同位素中心辐射工作人员按岗位职责不同分为接收与发货人员、放射源生产人员和运行维护人员，各岗位人员工作内容、工作时间和剂量估算见表 6-18。

一 对于接收与发货人员其操作简化为两类：

近距离操作：包括拆除和安装容器的防火罩、紧固罩、底座、屏蔽塞螺栓、更换吊具等，人员所在位置剂量率保守按容器表面最大剂量率  $2\text{mSv/h}$  进行计算；

远距离操作：包括使用长柄工具对源进行水下作业，包括抓取源装入吊篮、将源从吊篮转移到搁架、将吊篮取出或装入容器等，依据 6.2.1.1 节水池屏蔽计算结果，满足控制 I 区（绿区）剂量率小于  $2.5\mu\text{Sv/h}$  要求，人员所在位置剂量率保守按  $2.5\mu\text{Sv/h}$  进行计

算。

一 对于放射源生产人员：

人员位于热室的控制 I 区（绿区），按 6.2.1.2 节计算结果，绿区所有区域剂量率均小于  $2.5\mu\text{Sv/h}$ ，保守按  $2.5\mu\text{Sv/h}$  进行计算。

一 对于运行维护人员其操作简化为三类：：

近距离操作：包括在热室顶部将废物装桶等，人员所在位置剂量率保守按废物桶表面最大剂量率  $2\text{mSv/h}$  进行计算；

控制 II 区（橙区）操作：包括在控制 II 区（白区）开展的维修维护工作，人员所在位置剂量率保守按  $10\mu\text{Sv/h}$  进行计算。

控制 III 区（红区）操作：包括控制 III 区（红区）开展的维修维护工作，工作人员携带个人剂量报警仪进入红区开展工作，单次工作达到  $0.1\text{mSv}$  的报警值则立即离开更换人员继续工作，工作人员受照剂量按每次  $0.1\text{mSv}$  计算。

由表 6-18 可知接收发货人员每年最大受照剂量为  $4.443\text{mSv/a}$ ，放射源生产人员每年最大受照剂量为  $2.5\text{mSv/a}$ ，运行维护人员每年最大受照剂量为  $3.67\text{mSv/a}$ ，各类工作人员年受照剂量均不超过职业人员年剂量约束值  $5\text{mSv/a}$ 。

表 6-18 同位素中心辐射工作人员受照剂量估算表

序号	岗位名称	工艺内容	工作场所	工作流程	单次工作时间 h	年累计工作时间 h	人员受照剂量, mSv
1	接收发货人员	钴靶件接收	操作大厅/ 吊装大厅	1.运输容器表面污染水平和表面辐射水平测量,必要时去污 2.拆除容器防火罩、紧固罩等配件; 3.拆除容器底座、屏蔽塞螺栓; 4.起吊容器进入钴靶件水池池底; 5.使用长柄工具取出运输容器内装载钴靶件的吊篮; 6.起吊容器出钴靶件水池,容器去污、复装;	接收流程约持续2h,其中单台次近距离操作约4~6人,单人近距离操作约2min。	按30次计算,总接收时长60h,单人近距离操作1h,远距离操作59h	2.148
2		成品源暂存		使用长柄工具,抓取斜孔道吊篮内的放射源,移至池底的放射源暂存格架。	单根源操作时间约2min,4人轮流操作	按操作1000根计算,单人远距离操作时间8h	0.02
3		成品源装罐、发货		1.使用长柄工具,将成品源从暂存格架上移至容器吊篮; 2.拆除成品源运输容器防火罩、紧固罩、底座、屏蔽塞螺栓等,吊容器至成品源水池池底; 2.使用长柄工具,抓取装载成品源的吊篮,装入成品源运输容器; 3.起吊运输容器出水池,复装运输容器; 4.运输容器表面污染水平和表面辐射水平监测。	装罐、发货约持续2h,其中单台次近距离操作约4-6人,单人近距离操作约1min。	按60次计算,总共约120h,单人近距离操作共1h,远距离操作119h	2.275
4	放射源生产人员	钴靶件解体	热室操作区	1.使用长柄工具抓取水下的钴靶件,放入斜孔道水底吊篮,吊篮将钴靶件运至I1#热室(电动); 2.切割机切开钴靶件焊缝,倒出钴源芯; 3.使用专用工具将钴源芯装入不锈钢内层包壳,封焊不锈钢内包壳,焊缝外观观察、氦泄漏率检查;	生产工艺为流水线操作,单根源生产过程约1h。一天最多生产10根,约10h。	按生产1000根计算,需要1000h	2.5
5		内包壳封装					
6		外包壳封装					

序号	岗位名称	工艺内容	工作场所	工作流程	单次工作时间 h	年累计工作时间 h	人员受照剂量, mSv
7		产品检验		4.合格的内层包壳运至 I2#热室, 装入不锈钢外层包壳, 封焊外层包壳, 焊缝外观观察、氦泄漏率检查; 5.合格的外层包壳运至 I3 热室, 尺寸检查、活度测量; 6.通过斜孔道, 将合格的放射源运送至成品源水池池底。			
8		放射性三废收集、处理	吊装大厅、池水净化间等	1.热室内产生的废物, 采用废物转移容器, 经热室顶部废物转运孔转移出热室, 在热室顶部吊装大厅装桶; 2.其它区域产生的废物, 产生的同时即分类收集、装桶;	废物量不同, 所需时间不同, 暂按单次 2h 计算, 单人近距离操作约 15min	暂时按 4 次/年计算, 单人近距离操作共 1h, 远距离操作 7h	2.07
9	运行维护人员	设备维修维护	控制 II 区	1.通风系统阀门、过滤器等检修维护; 2.池水冷却净化系统管道、阀门、泵、过滤器等检修维护; 3.辐射监测系统仪器仪表、吊车、水电线路等辅助系统设备检修维护;	视工作量不同, 单次时间不同, 暂按单次 2h 计算	全年不超过 60h 计算, 单人远距离操作 60h	0.6
			热室内	热室内设备检修, 进入前先移出源项, 使用机械手对热室内进行擦拭去污, 降低热室内污染水平和辐射水平后, 人员经临时气帐进入热室。 热室内操作按单次受照剂量控制, 单人单次不得超过 0.1mSv。	单人单次按 0.1mSv 控制	全年热室内检修次数不超过 10 次, 单人不超过 1mSv	1

### 6.2.2.2 场内其他工作人员受照剂量

在本项目场址内除了同位素中心工作人员外，还有材料中心的工作人员和值班等辅助工作人员，图 6-17 给出了同位素中心周围辐射剂量率需要关注的点位，其中 A1~A5 位于控制区内，属于职业照射，B1~B7 位于控制区外，属于厂内其他工作人员照射。

当进行放射源生产时，放射源位于热室内，周围关注点剂量率的计算公式如下：

$$D_2 = D_1 \times 2^{-x/\lambda} \times r_1^2 / (r_2)^2$$

式中：

$D_2$ —为关注点的辐射剂量率；

$D_1$ —为热室屏蔽墙外 30cm 处的蒙卡模拟计算结果；

$r_1$ —为源项距热室屏蔽墙外 30cm 处的距离；

$r_2$ —为源项距关注点的距离；

$\lambda$ —为  $^{60}\text{Co}$  在混凝土墙中衰减的半值层厚度，依据《辐射防护基础》表 5-8， $\lambda = 6.2\text{cm}$ ；

$x$ —为热室屏蔽墙外至关注点所通过的场房屏蔽墙厚度。

当接收源靶件和发货时，放射源在热室外，关注点剂量率的计算公式为：

$$D_2 = D_1 \times 2^{-x/\lambda} \times 1 / (r_2)^2$$

式中，

$D_2$ —为关注点的辐射剂量率；

$D_1$ —为容器外 1m 处的剂量率；

$r_2$ —为源项距关注点的距离；

$\lambda$ —为  $^{60}\text{Co}$  混凝土墙中的半值层厚度，依据《辐射防护基础》表 5-8， $\lambda = 6.2\text{cm}$ ；

$x$ —为源至关注点所通过的场房屏蔽墙厚度。

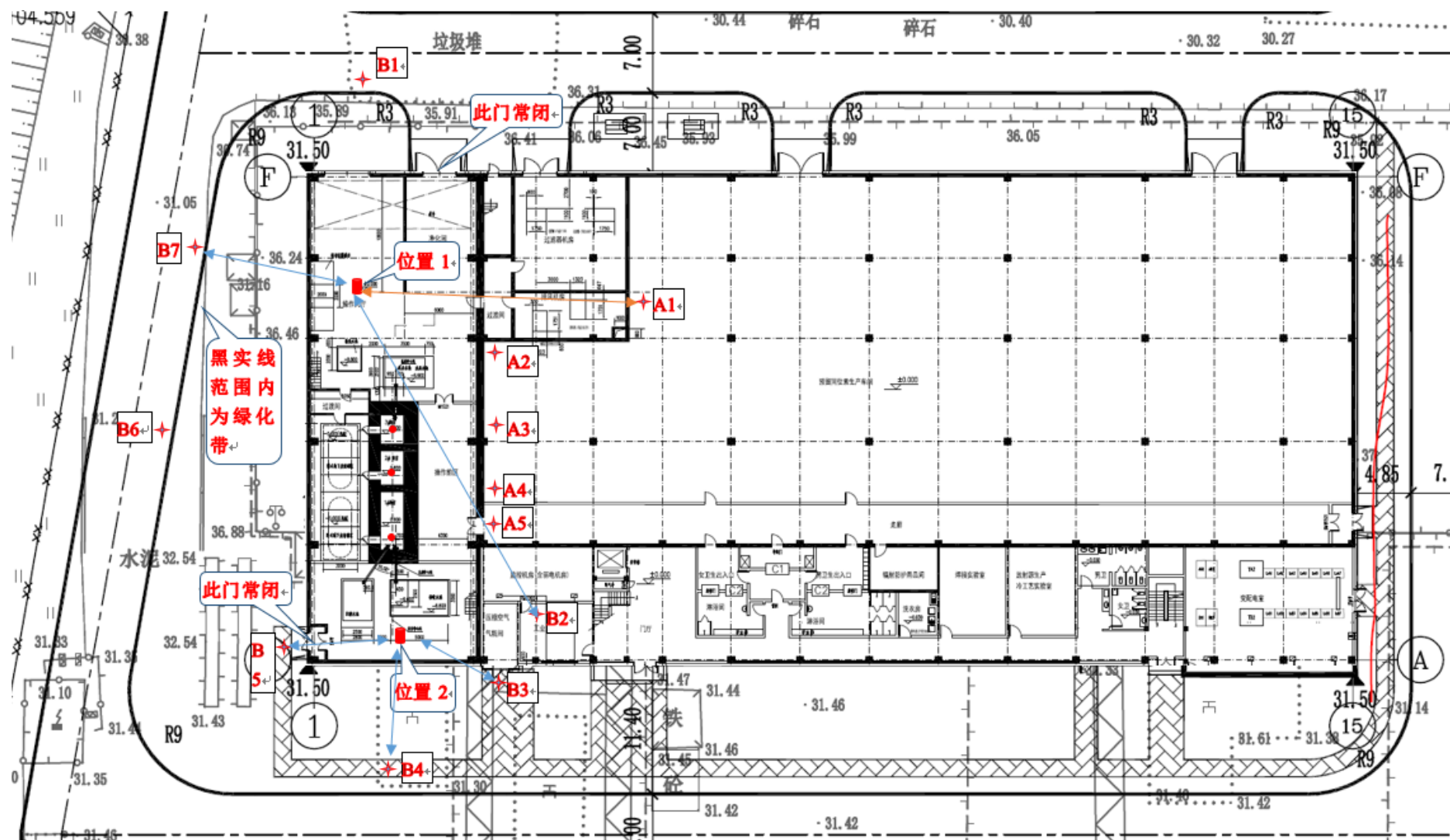


图 6-17 同位素中心周围关注点位

接收靶件时，值得关注的点位和源的距离、屏蔽厚度及剂量率计算结果见表 6-19，成品源发货时，值得关注的点位和源的距离、屏蔽厚度及剂量率计算结果见表 6-20，放射源生产时，值得关注的点位和源的距离、屏蔽厚度及剂量率计算结果见表 6-21。

表 6-19 接收钴靶件时关注点剂量率

关注点	源位置	容器 1 米处剂量率, $\mu\text{SV/h}$	屏蔽厚度, cm	半值层厚度, cm	距离, m	剂量率, $\mu\text{SV/h}$
B1	位置 1	87	0	6.2	17	3.01E-01
B2		87	30	6.2	28	3.88E-03
B5		87	30	6.2	31	3.16E-03
B7		87	30	6.2	11	2.51E-02
B2	位置 2	87	30	6.2	11	2.51E-02
B3		87	30	6.2	6	8.45E-02
B4		87	30	6.2	11	2.51E-02
B5		87	0	6.2	7	1.78E+00
A1	位置 1	87	30	6.2	17	1.05E-02
A2		87	60	6.2	11	8.78E-04
A5		87	0	6.2	24	1.51E-01
A4	位置 2	87	60	6.2	12	7.38E-04
A5		87	0	6.2	12	6.04E-01

注：钴靶件运输采用 GY-40 钴-60 运输容器，其批准的运输指数 $\leq 8.7$ ，因此，接收钴靶件时，运输容器外表面 1 米处剂量率保守取  $87\mu\text{Sv/h}$ 。

表 6-20 成品源装罐、发货时关注点剂量率

关注点	源位置	容器 1 米处剂量率, $\mu\text{SV/h}$	屏蔽厚度, cm	半值层厚度, cm	距离, m	关注点剂量率, $\mu\text{Sv/h}$
B1	位置 1	98	0	6.2	17	3.39E-01
B2		98	30	6.2	28	4.37E-03
B5		98	30	6.2	31	3.56E-03
B7		98	30	6.2	11	2.83E-02
A1	位置 1	98	30	6.2	17	1.19E-02
A2		98	60	6.2	11	9.89E-04

注：成品源运输采用 GY-20 钴-60 运输容器，其批准的运输指数 $\leq 9.8$ ，因此，成品源发货时，运输容器外表面 1 米处剂量率保守取  $98\mu\text{Sv/h}$ 。

表 6-21 放射源生产时关注点剂量率

关注点	热室墙外剂量率, $\mu\text{SV/h}$	源至热室外墙距离, m	源至关注点距离, m	半值层厚度, cm	屏蔽体厚度, cm	关注点剂量率, $\mu\text{Sv/h}$
B1	1.49	2.2	28	6.2	0	9.20E-03
A3	1.49	2.2	8	6.2	60	1.38E-04
A5	1.49	2.2	8	6.2	0	1.13E-01

关注点	热室墙外剂量率, $\mu\text{Sv/h}$	源至热室外墙距离, m	源至关注点距离, m	半值层厚度, cm	屏蔽体厚度, cm	关注点剂量率, $\mu\text{Sv/h}$
B2	1.49	2.2	10	6.2	30	2.52E-03
B3	1.49	3.1	12	6.2	80	1.30 E-05
B4	1.49	2.2	20	6.2	30	6.30E-04
B5	2.2	3.1	12	6.2	80	1.92E-05
B6	2.2	2.7	15	6.2	30	2.49E-03
B7	2.2	3.1	21	6.2	80	6.26E-06

注：生产放射源时，源出于热室内，依据 6.2.1.2.1 节计算结果，当热室内操作  $3.7 \times 10^{15}\text{Bq}$  的钴源时（实际操作量不超过  $1.04 \times 10^{15}\text{Bq}$ ，计算结果是保守的），热室墙外 30cm 处最大剂量率分别为  $1.49\mu\text{Sv/h}$ （东侧）和  $2.2\mu\text{Sv/h}$ （西侧）。

由表 6-18 可知，每年操作钴靶件从接收到转移到贮存水池搁架总共需要 60h，保守假定有 30h 运输容器位于水池外，其中容器位于位置 1 的时间为 24h，位于位置 2 的时间为 6h；每年钴源发货总时间 120h，保守假定有 60h 运输容器位于水池外，全部位于位置 1。

对其他工作人员的照射各点位居留因子取值如下：

- B1、B4、B6、B7 室外道路取 1/16；
- B2 为值班室，取 1；
- B3、B5 平时门常闭，无人经过，取 1/32。

则对 B1~B7 不同点位其他工作人员的照射参数及照射剂量见表 6-22，可以看出，在保守估计的情况下，同位素中心对厂区内其他工作人员的年照射剂量最大为  $3.03\mu\text{Sv/a}$ ，对其他工作人员的影响很小。

表 6-22 各关注点位对其他工作人员年照射剂量

关注点	工作类型	源位置	关注点剂量率, $\mu\text{Sv/h}$	年工作时间, h	居留因子	年照射剂量, $\mu\text{Sv/a}$
B1	接收钴靶件	位置 1	3.01E-01	24	1/16	2.30E+00
		位置 2	—	6	1/16	
	成品源发货	位置 1	3.39E-01	60	1/16	
		放射源生产	热室内	9.20E-03	1000	
B2	接收钴靶件	位置 1	3.88E-03	24	1	3.03E+00
		位置 2	2.51E-02	6	1	
	成品源发货	位置 1	4.37E-03	60	1	
		放射源生产	热室内	2.52E-03	1000	
B3	接收钴靶件	位置 1	—	24	1/32	1.63E-02
		位置 2	8.45E-02	6	1/32	
	成品源发货	位置 1	—	60	1/32	



关注点	工作类型	源位置	关注点剂量率, μSv/h	年工作时间,h	居留因子	年照射剂 量, μSv/a
	放射源生产	热室内	1.30E-05	1000	1/32	
B4	接收钴靶件	位置 1		24	1/16	9.41E-03
		位置 2	2.51E-02	6	1/16	
	成品源发货	位置 1	—	60	1/16	
	放射源生产	热室内	—	1000	1/16	
B5	接收钴靶件	位置 1	3.16E-03	24	1/32	3.43E-01
		位置 2	1.78E+00	6	1/32	
	成品源发货	位置 1	3.56E-03	60	1/32	
	放射源生产	热室内	1.92E-05	1000	1/32	
B6	接收钴靶件	位置 1	—	24	1/16	1.56E-01
		位置 2	—	6	1/16	
	成品源发货	位置 1	—	60	1/16	
	放射源生产	热室内	2.49E-03	1000	1/16	
B7	接收钴靶件	位置 1	2.51E-02	24	1/16	1.44E-01
		位置 2	—	6	1/16	
	成品源发货	位置 1	2.83E-02	60	1/16	
	放射源生产	热室内	6.26E-06	1000	1/16	

注：表中“—”表示该关注点位和源之间由于受到多个热室墙壁屏蔽，其剂量率贡献可忽略不计。

## 6.2.3 辐射安全与防护措施

### 6.2.3.1 辐射防护分区

为有效控制正常照射，防止放射性污染扩散，预防潜在照射或限制潜在照射的范围，便于辐射防护管理和职业照射控制，使工作人员的受照剂量在运行状态下保持在可合理达到的尽量低的水平，对同位素中心厂房进行辐射分区，分区图见图 6-19、图 6-20 和图 6-21。放射性控制区内屏蔽体厚度根据所在分区外照射剂量率限值要求，考虑 2 倍安全系数进行设计，屏蔽材料主要有赤铁矿重混凝土、铸铁、铅玻璃等。控制区内人流按规定的设计路线通行，人流与物料流动分行、避免交叉以减少工作人员的辐射照射。

### 6.2.3.2 卫生出入口控制管理

为实现工作人员辐射安全管理与控制，同时防止和限制潜在放射性污染扩散到控

制区以外的区域，在同位素中心控制区边界设置卫生出入口。该出入口由冷更衣室、热更衣室、值班室和控制区出入监测系统等组成，作为除紧急情况之外的人员（包括运行、维修和参观人员）及随身小物品进出控制区的唯一出入口。卫生出入口功能主要包括：a) 为工作人员提供场所和必备的物品，完成进入控制区作业前的必要准备；b) 控制和管理进出控制区的人员，防止未经授权的人员进入控制区；c) 记录工作人员在控制区内停留期间所受的外照射累积剂量信息，控制工作人员在控制区内所受的累积剂量；d) 监测离开控制区人员的工作服、随身携带的小件物品等表面污染状况，确认无污染或污染低于规定的控制值后方可离开，对被污染的人员和小物品进行去污处理，以避免放射性物质扩散到控制区以外区域，保障人员和环境的安全。

同位素中心控制 II 区（橙区）边界设置有卫生过渡间，作为控制 I 区（绿区）进出控制 II 区的出入口。工作人员从橙区出来时，辐射防护人员使用便携式沾污仪对工作人员体表和衣服的污染情况进行检查，严防已污染的人员、设备、工具等无控制地移出橙区，防止污染弥散，必要时进行擦拭去污。在卫生过渡间还设置有更衣间，将工作人员在进入橙区前穿戴的污染衣服进行更换。

### 6.2.3.3 工作场所辐射监测措施

同位素中心放射源生产热室以及放射源水池（包括靶件接收水池、废旧源回收水池和成品源水池）周围等区域均设置有固定式  $\gamma$  剂量率监测仪表，能够实时监测和显示关注区域的  $\gamma$  剂量率水平，保证在该区域的工作人员免受不必要的外照射。同时提供的辐射剂量率信息可供分析、查找和判断可能发生的故障或操作事故，以便及时处理，保证人员的安全操作。具体监测区域包括：热室内部、热室操作前区、热室操作后区、放射源水池液面上方、放射源水池周围、净化间树脂床周围、通风过滤器机房等关注区域。进入辐射控制区的工作人员，均配备电子式个人剂量报警仪以监测个人受照剂量信息。同位素中心固定式  $\gamma$  剂量率监测仪表布点位置图见图 6-18。热室内固定式剂量率仪表与进入该热室的铸铁屏蔽门联锁，正常情况下屏蔽门处于闭锁状态，人员从外部无法开启进入，避免人员误入。当热室内的剂量率水平低于设定阈值时方可解除屏蔽门闭锁信号，作为具备进入热室内部的条件之一。

定期对工作场所空气进行取样分析，根据空气中放射性核素的活度浓度进行工作人员摄入量或待积有效剂量的评价，取样分析周期按三个月一次进行。

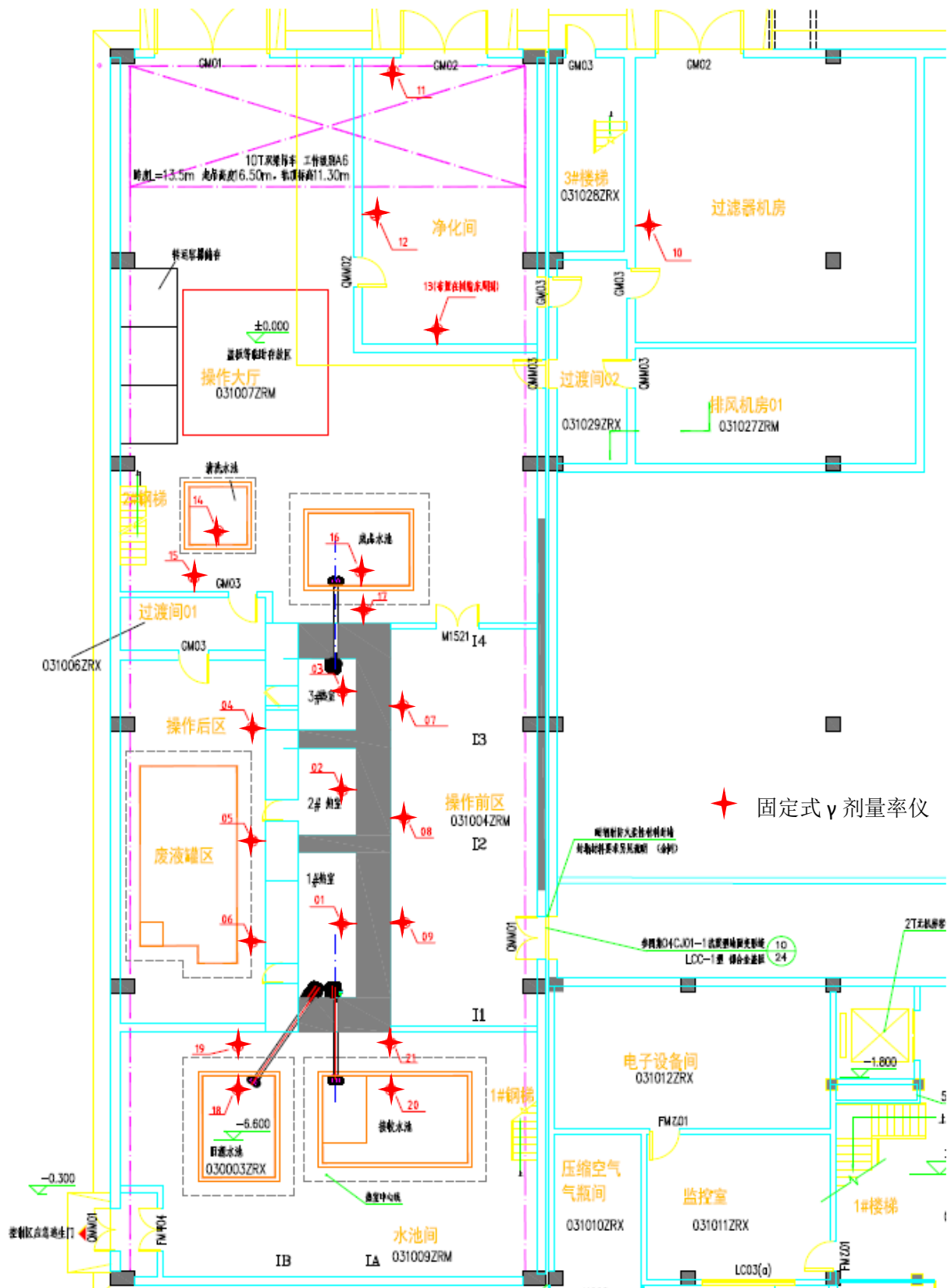


图 6-18 同位素中心固定式  $\gamma$  剂量率监测仪表布点位置图

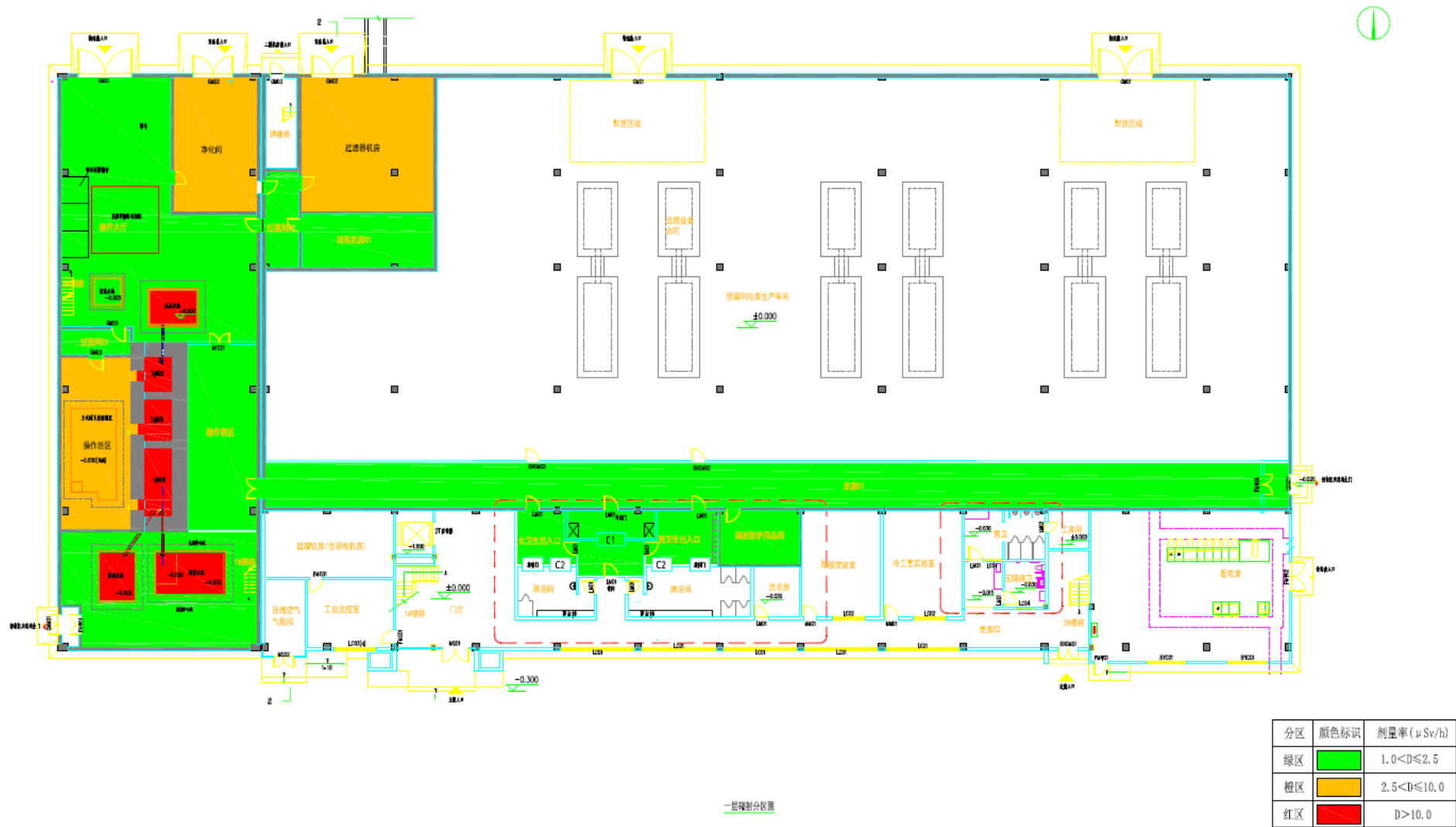


图 6-19 同位素中心一层控制区分区图

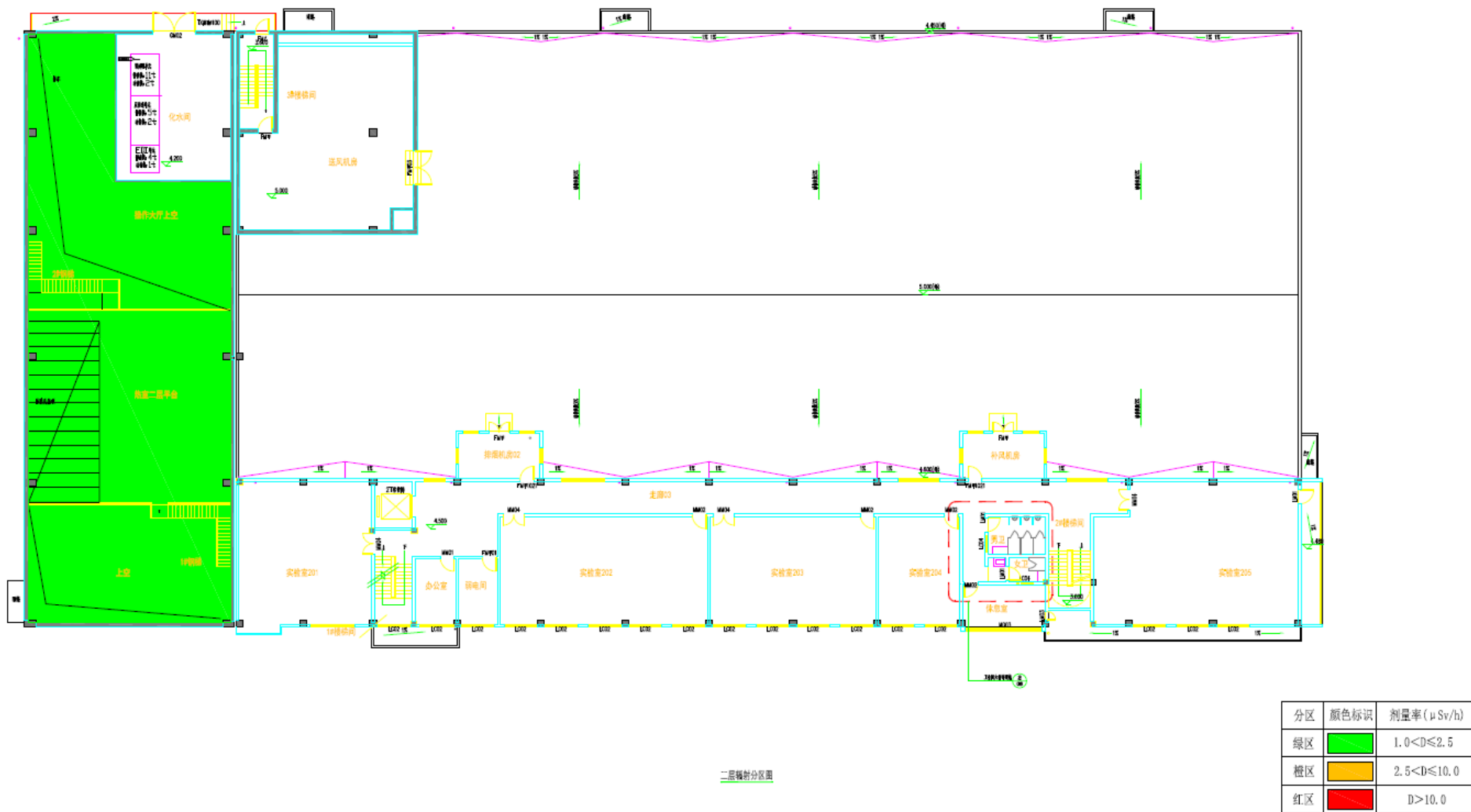
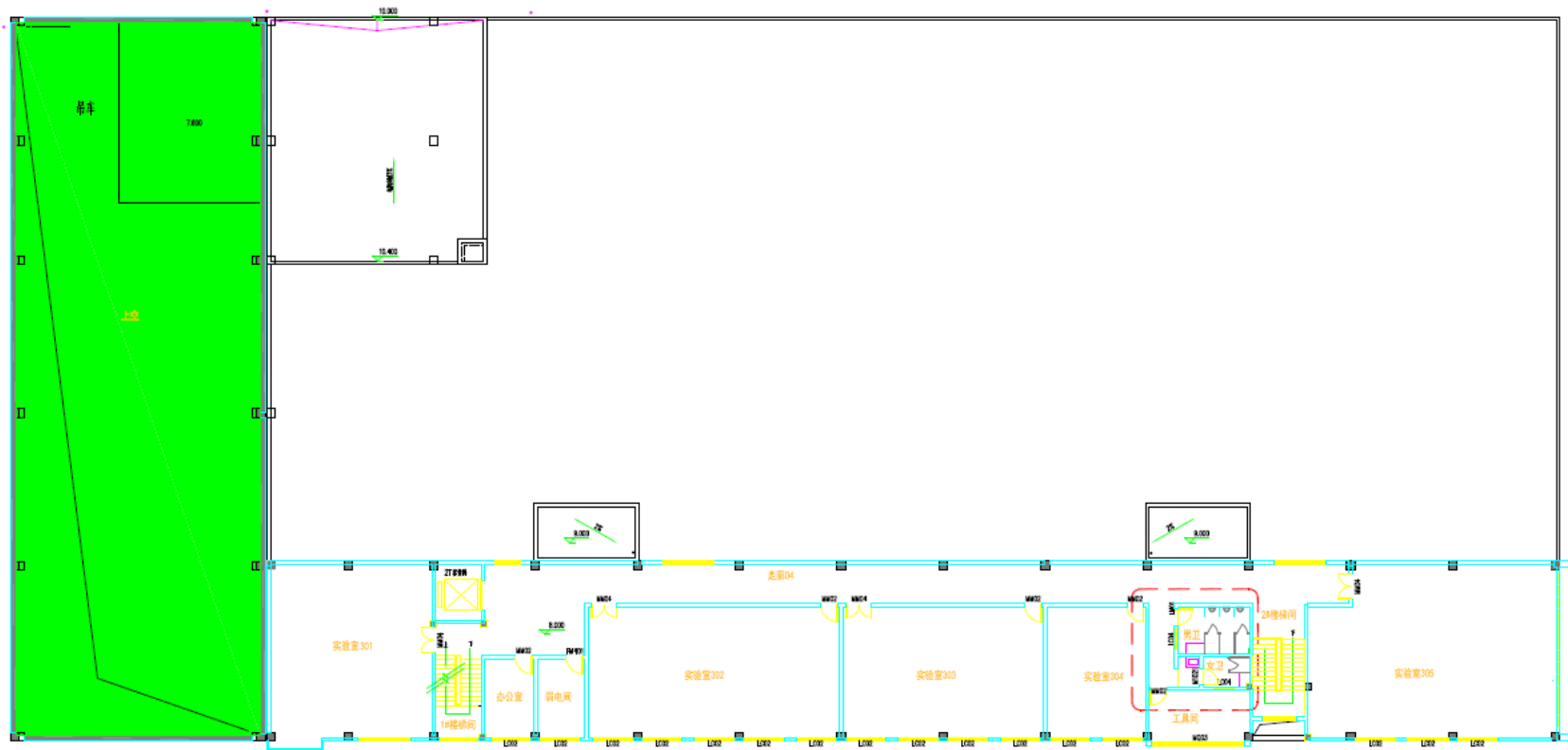


图 6-20 同位素中心二层控制区分区图



三层辐射分区图

分区	颜色标识	剂量率 ( $\mu\text{Sv/h}$ )
绿区	绿色	$1.0 < D \leq 2.5$
橙区	黄色	$2.5 < D \leq 10.0$
红区	红色	$D > 10.0$

图 6-21 同位素中心三层控制区分区图

## 6.2.4 安全保卫措施

同位素中心安全保卫措施主要有：a) 在同位素中心的人员主出入口、次出入口及3#楼梯口设置电控门，人员通过以上区域刷卡进出同位素中心相关厂房；在钴源生产线的主出入口设置电控门，人员刷卡进出。另在同位素中心的所有边界门设置门磁，监控所有的门扇状态；b) 同位素中心厂房周界设置3m高红外对射探测器；c) 在同位素中心电控门、安装门磁的边界门、入侵报警防区内均有摄像机进行监控；d) 在电控门均安装有线对讲终端，可随时与保卫控制中心联系。

## 6.2.5 辐射安全管理措施

按照《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许可管理办法》及《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)等相关规定，本项目运行前将建立辐射安全与环境保护管理机构，制定《辐射防护安全管理机构及职责》，确定单位负责人为本单位辐射工作安全责任人，设置行政主管领导为辐射防护领导机构组长，并指定专人负责安全和防护工作。

在运行前，应按照《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》要求，制定辐射工作操作规程、岗位职责、辐射防护和安全保卫制度、设备检修维护制度、自行检查和年度评估制度、使用登记制度等规章制度及人员培训计划、监测方案等；同时须组织辐射工作人员进行上岗培训和辐射安全防护知识的培训，并进行个人剂量监测和职业健康检查。此外，管理人员应加强辐照场所的现场管理，严禁相关工作人员违规操作，拟建立的管理程序及主要内容见表 6-23。

表 6-23 拟建立辐射安全管理程序

序号	程序名称	程序目的
1	辐射防护管理规定	规定了中广核研究院有限公司辐射防护管理与监督的基本原则、辐射防护管理岗位设置及岗位职责及人员培训要求。
2	个人剂量测量和管理规定	确定个人剂量监测的范围、方式、剂量的记录保存以及相应的职责分工，给出剂量异常情况下的相关管理规定。
3	放射性同位素安全管理规定	规定了中广核研究院有限公司放射性同位素生产、转让、进出口、回收、使用和贮存等各项活动的安全保卫管理要求和工作程序。
4	放射性物品治安管理规定	规定了中广核研究院有限公司放射性物品的治安管理的原则和要求。
5	放射性废物管理程序	规定了中广核研究院有限公司放射性废物管理的原则和要

		求。
6	辐射监测数据与评价报告程序	规定了中广核研究院有限公司辐射环境监测、流出物监测、辐射工作场所监测、个人剂量监测、相关放射性废物统计等数据和评价的报告要求，以及时发现和处理辐射监测中发现的问题，确保安全。
7	同位素中心操作规程	建立全面的辐射工作操作规程，并严禁相关工作人员违规操作。
8	设备检修维护管理规定	规定了中广核研究院有限公司生产设备定期维护和维修的原则和要求。

## 6.3 正常运行的非放射性环境影响

本项目正常运行时，除辐射影响外，还会有部分非放射性影响，主要是废水、固体废物、噪声以及废气等。

### 6.3.1 废水

本项目正常运行期间产生的非放射性废水主要是生活污水。生活污水收集系统仅收集非放射性区域的生活污水，通过场区污水管网排至化粪池，最终进入一体化污水处理设施进行处理，处理后的水质满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》（GB 18918-2002）二级标准（ $COD_{Cr} \leq 100mg/L$ ； $SS \leq 50mg/L$ ；PH：6~9），根据阳江核电厂污水处理站《工艺设计总说明》（PY0ED001W02MGJ442SD）中的要求，设计原水水质为： $COD_{Cr} \leq 400mg/L$ ； $SS \leq 200mg/L$ ；PH：6~9，处理后的废水满足阳江核电厂生活污水处理设施的接收标准，排放至阳江核电厂生活污水处理设施进行处理排放。

### 6.3.2 固体废弃物

项目正常运行期间由于设备维护、维修等会产生一定量的非放射性固体废弃物，其中一般工业固废有除盐水系统抛光混床用废抛光树脂、送风空气处理机组内的空气过滤器、废木材、废塑料、废金属等；危险固废包括废化学品、废灯管、废旧试剂瓶（罐）等，建设单位拟设置专用的危险废物暂存间，暂存间的设计应满足相应国家标准的要求，并委托有资质的单位及时外运处置。

本项目正常运行期间最多时工作人员约 120 人，生活垃圾产生量按 1kg/人 d 计算，工作时间按 330 天考虑，预计生活垃圾年产生量约为 39.6t。生活垃圾将委托环卫部门



负责定期清运。

综上，工业固废和生活垃圾经妥善处理后的影响较小。

### 6.3.3 噪声

本项目正常运行期间的噪声源主要是通风空调系统的风机和污水处理系统的泵，其中通风系统设备均设置在独立机房内，其噪声源最高低于 85dB (A)，且有构筑物用于噪声衰减。

根据华南（沈阳市第十三建筑工程公司）等人的研究<sup>1</sup>，14~18cm 的钢筋混凝土（250~400kg/m<sup>2</sup>）隔声指数在 46~50dB 之间，本项目建筑墙壁为 30cm 的钢筋混凝土，隔声效果大于 50dB，因此，经建筑隔声衰减后，场址边界外 1m 能够达到 2 类声功能区要求。

### 6.3.4 废气

本项目主体设施正常运行期间非放射性废气的来源主要是同位素中心在开展 <sup>60</sup>Co 放射源生产时，热室内操作的钴源产生的  $\gamma$  射线会电离空气产生臭氧 (O<sub>3</sub>) 和氮氧化物 (NO<sub>x</sub>)，两者产生量之比大约是 1: 0.48（摩尔比）。

臭氧的产生量可由下式计算：

$$P = 1.73 \times 10^{-2} AGV^{1/3}$$

式中：

P — 臭氧产生速率，mg/h；

A — 钴源活度，TBq；

G — 空气吸收系数，一般取值范围为 6~10；

V — 空间容积，m<sup>3</sup>。

三个热室中钴源的操作量均为 2 万居里(740TBq)，三个热室的空间分别为 30m<sup>3</sup>、18m<sup>3</sup> 和 15m<sup>3</sup>，根据上述公式，可以得到三个热室内臭氧的产生速率分别约为 239 mg/h、201mg/h 和 189mg/h。

钴源热室设计有连续通风，考虑臭氧自身的化学分解，可以用下式计算热室内臭氧饱和浓度。

<sup>1</sup> 墙体材质与隔声效果分析，房材与应用，1998 年第 6 期

$$C_S(t) = \frac{P \times T_{eff}}{V} (1 - e^{-t/T_{eff}}) = \frac{P \times [T' \times T / (T' + T)]}{V} (1 - e^{-t/T_{eff}}) \text{ 式中:}$$

$C_S$  — 臭氧饱和浓度,  $\text{mg}/\text{m}^3$ ;

$P$  — 臭氧产生速率,  $\text{mg}/\text{h}$ ;

$T_{eff}$  — 有效换气时间,  $\text{min}$ ;

$T'$  — 臭氧分子分解时间,  $50\text{min}$ ;

$T$  — 通风系统每次换气时间,  $\text{min}$ ;

$V$  — 空间容积,  $\text{m}^3$ 。

三个热室的设计通风均为 15 次/h, 则根据热室容积可以得到热室每次的换气时间为 4min, 根据上述公式可以计算得到各热室运行情况下的臭氧饱和浓度分别约为  $0.491 \text{ mg}/\text{m}^3$ 、 $0.690 \text{ mg}/\text{m}^3$ 、 $0.780 \text{ mg}/\text{m}^3$ 。

三个热室的通风系统均通过专用的通风管道汇集排入中心的烟囱, 根据各热室运行期间的臭氧饱和浓度和各自的通风量, 可以得到从烟囱排放的臭氧排放速率为  $9.7 \text{ mg}/\text{s}$ 。

同样, 可以计算得到  $\text{NO}_x$  (以  $\text{NO}_2$  计) 的排放速率为  $0.237 \text{ mg}/\text{s}$ 。

根据烟囱和通风设计和阳江核电厂气象观测系统气象数据, 采用 SCREEN3 估算模式计算得到地面最大落地点位于距离烟囱 125m 处, 其中臭氧浓度最大值为  $0.048 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $\text{NO}_x$  浓度最大值为  $0.022 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 对环境的影响非常小, 可以满足《环境空气质量标准》(GB3095-2012) 二级标准的要求。

因此, 本项目正常运行期间废气的排放对环境的影响是可以接受的。

## 7 事故工况下的环境影响和环境风险

### 7.1 概述

根据本项目的建设和运行特点，考虑到核燃料的操作（核燃料循环设施）以及同位素生产（核技术应用）性质的差异，参考《中广核研究院热室设施建设项目事故后果分析》（HC-CB-TR-002-NPRI-FP-1903），本项目运行期间的事故主要分为潜在的放射性物质释放事故和辐射事故两大类：

- 潜在的放射性物质释放事故：辐照性能研究中心中与燃料棒、燃料芯块操作相关的潜在事故，以及通风固废暂存中心中与放射性废液暂存设施相关的事故；
- 辐射事故：主要是同位素中心同位素生产过程中的潜在事故。

本章按照核事故、辐射事故和其他事故分别描述和评价。

### 7.2 潜在的放射性物质释放事故

#### 7.2.1 事故描述和事故源项

##### 7.2.1.1 事故描述

参考国内外同类项目的事故分析及运行经验，并结合本项目的工艺流程，初步确定了基准事故和设计扩展工况：

- 基准事故是指按确定的设计准则在设计中采取了针对性措施的事故工况，主要包括：
  - 热室内燃料棒跌落；
  - 热室内燃料切割导致的放射性气溶胶异常；
  - 裂变气体收集系统泄漏；
  - 放射性废液收集暂存系统泄漏；
  - 废液输送管路阀门泄漏；
  - 碘吸附器着火；
  - 正常补水丧失。
- 设计扩展工况是指在运行过程中发生放射性操作事故，同时叠加重要系统或部

件故障，本项目主要指通风过滤系统发生故障，主要包括通风过滤系统停运和排风系统二级高效过滤器+碘吸附器失效两种故障。

#### (1) 热室内燃料棒跌落

在热室 FA、F1 及 F2 内进行乏燃料棒无损检测及切割时，需要起吊或抬起乏燃料棒至检测装置或操作平台，高度约为 300mm。当吊车、提升装置或抓具故障，或人员误操作时，致使乏燃料棒跌落在热室地板上，导致乏燃料棒损坏。

#### (2) 热室内燃料切割导致的放射性气溶胶异常

辐照后检验中，在热室 F2 进行切割乏燃料棒取样。取样切割一般采用湿式切割，在切割处滴淋冷却液以控制放射性气溶胶的产生量。当冷却不足时，切割过程可能产生部分放射性粉尘。另外，切割产生的金属细末或粉尘收集不完全时，热室内的其他操作如去污等也可能造成细末或粉尘的再悬浮。

#### (3) 裂变气体收集系统泄漏

在 F 线热室 F1 在进行乏燃料棒裂变气体测量时，在密封的管路内对乏燃料棒进行刺孔，抽取棒内裂变气体进行测量，并在测量装置的末端设置有裂变气体收集装置。当测量管路密封降低或丧失时，乏燃料棒空腔内的裂变气体会释放到热室中。

#### (4) 热室内操作相关基准事故叠加通风过滤系统停运

热室内操作相关基准事故发生的同时，通风过滤系统因失电或故障停运，跌落事故下弥散在热室内的放射性物质经系统管道或壳体泄漏至厂房。

#### (5) 热室内操作相关基准事故叠加二级高效过滤器+碘吸附器失效

热室内操作相关基准事故发生的同时，通风系统运行，通风过滤系统二级高效过滤器和碘吸附器失效，仅考虑一级高效过滤器去除作用。

### 7.2.1.2 事故源项

根据事故情景和释放的初步分析，对于热室内操作相关的事故中，叠加通风过滤系统停运、叠加二级高效过滤器+碘吸附器失效的扩展工况释放入环境的放射性物质比基准事故更大，因此，从事故始发条件及后果包络的角度，本节主要给出四个事故的源项用于事故后果评价：

- 热室内燃料棒跌落叠加通风过滤系统停运；
- 热室内燃料棒跌落叠加二级高效过滤器+碘吸附器失效；
- 热室内燃料切割导致的放射性气溶胶异常叠加通风过滤系统停运；

— 热室内燃料切割导致的放射性气溶胶异常叠加二级高效过滤器+碘吸附器失效。

(1) 热室内燃料棒跌落叠加通风过系统停运事故

源项计算基本假设如下：

— 1 根燃料棒跌落造成包壳破损后放射性物质立即释放；

— 从燃料棒释放到热室空气中的裂变产物份额如下（ANSI 推荐值）：

- 惰性气体：0.10；（其中 Kr-85 为 0.30）
- 卤素：0.10；（其中 I-129 为 0.30）
- 挥发性固体（铯、铷、钷等）：0.01。

— 通风过滤系统停运，失去负压；

— 热室空气中 10%的放射性物质在 12h 内均匀泄漏至环境中。

材料中心的相关研究操作对象基本上包括单根燃料棒、燃料芯块、及燃料包壳，

表 7-1 给出了单根乏燃料棒中所含的放射性核素活度。

表 7-1 单根乏燃料棒的放射性核素活度

核素		活度 (Bq)	核素		活度 (Bq)
卤素	I-129	4.23E+06	铈组	Ce-141	3.04E+12
	I-131	1.43E+07		Ce-144	7.74E+13
惰性气体	Kr-85	1.21E+12		Pu-238	7.84E+11
	Xe-127	6.21E+05		Pu-239	3.52E+10
	Xe-131m	7.96E+07		Pu-240	7.13E+10
	Xe-133	7.39E+03		Pu-241	1.17E+13
铯组	Cs-134	2.95E+13		Np-239	4.06E+09
	Cs-136	6.12E+08	镧组	Y-90	9.72E+12
	Cs-137	1.42E+13		Y-91	1.10E+13
	Rb-86	4.87E+08		Nb-95	3.96E+13
碲组	Te-123m	2.11E+09		Zr-95	2.00E+13
	Te-125m	3.93E+11		La-140	9.04E+09
	Te-127	4.86E+11		Nd-147	6.48E+08
	Te-127m	4.97E+11		Pr-143	1.27E+10
	Te-129	7.27E+10		Am-241	2.19E+10
	Te-129m	1.12E+11		Cm-242	2.41E+12
钷和锶组	Sr-89	5.79E+12		Cm-244	1.02E+12
	Sr-90	9.72E+12	其它	H-3	9.41E+10
	Ba-137m	1.34E+13		C-14	6.50E+07
	Ba-140	7.86E+09	/		
铷组	Ru-103	6.37E+12			
	Ru-106	4.84E+13			

根据上述假设计算得到的事故释放源项见表 7-2。

表 7-2 燃料棒跌落叠加通风过系统停运事故释放源项

核素	源项 (Bq)	核素	源项 (Bq)
I-129	1.27E+05	Cs-134	2.95E+10
I-131	1.42E+05	Cs-136	6.12E+05
Kr-85	3.64E+10	Cs-137	1.42E+10
Xe-127	6.21E+03	Rb-86	4.87E+05
Xe-131m	7.96E+05	Ru-103	6.37E+09
Xe-133	7.39E+01	Ru-106	4.84E+10
H-3	2.82E+09	C-14	1.95E+06

(2) 热室内燃料棒跌落叠加二级高效过滤器+碘吸附器失效事故

源项计算基本假设如下：

- 1 根燃料棒跌落造成包壳破损后放射性物质立即释放；
- 从燃料棒释放到热室空气中的裂变产物份额如下 (ANSI 推荐值)：
  - 惰性气体：0.10； (其中 Kr-85 为 0.30)
  - 卤素：0.10； (其中 I-129 为 0.30)
  - 挥发性固体 (铯、铷、钌等)：0.01。
- 通风系统运行，一级高效过滤器有效，保守假设过滤效率为 90%。
- 通风过滤系统的二级高效过滤器及碘吸附器失效。

根据上述假设计算得到的事故释放源项见表 7-3。

表 7-3 燃料棒跌落叠加过滤器失效事故释放源项

核素	源项 (Bq)	核素	源项 (Bq)
I-129	1.27E+06	Cs-134	2.95E+10
I-131	1.42E+06	Cs-136	6.12E+05
Kr-85	3.64E+11	Cs-137	1.42E+10
Xe-127	6.21E+04	Rb-86	4.87E+05
Xe-131m	7.96E+06	Ru-103	6.37E+09
Xe-133	7.38E+02	Ru-106	4.84E+10
H-3	2.82E+10	C-14	1.95E+07

(3) 热室内燃料切割导致的放射性气溶胶异常叠加通风过系统停运事故

源项计算基本假设如下：

- 进行切割取样的乏燃料棒包壳空腔内的放射性物质在切割操作前已释放；
- 每次切割产生约 2mm 损耗，该 2mm 芯块内的裂变气体 100%释放，其它放射

性核素释放份额假设 30%释放入热室；

— 通风系统停运；

— 弥散在热室内的放射性物质有 10%在 12h 内均匀泄漏至环境。

根据上述假设计算得到的事故释放源项见表 7-4。

表 7-4 燃料切割导致的气溶胶异常叠加通风过系统停运事故释放源项

核素	向环境的放射性释放量 (Bq)	核素	向环境的放射性释放量 (Bq)
I-129	6.95E+01	Ba-140	1.29E+05
I-131	2.34E+02	Ru-103	1.04E+08
Kr-85	6.30E+07	Ru-106	7.94E+08
Xe-127	3.23E+01	Ce-141	4.99E+07
Xe-131m	4.13E+03	Ce-144	1.27E+09
Xe-133	3.84E-01	Pu-238	1.29E+07
H-3	5.15E+06	Pu-239	5.77E+05
C-14	3.55E+03	Pu-240	1.17E+06
Cs-134	4.84E+08	Pu-241	1.92E+08
Cs-136	1.00E+04	Np-239	6.66E+04
Cs-137	2.32E+08	Y-90	1.59E+08
Rb-86	7.99E+03	Y-91	1.81E+08
Te-123m	3.45E+04	Nb-95	6.50E+08
Te-125m	6.44E+06	Zr-95	3.29E+08
Te-127	7.95E+06	La-140	1.48E+05
Te-127m	8.15E+06	Nd-147	1.06E+04
Te-129	1.16E+06	Pr-143	2.09E+05
Te-129m	1.83E+06	Am-241	3.59E+05
Sr-89	9.49E+07	Cm-242	3.95E+07
Sr-90	1.59E+08	Cm-244	1.68E+07
Ba-137m	1.21E+08	/	/

(4) 热室内燃料切割导致的放射性气溶胶异常叠加二级高效过滤器+碘吸附器失效事故

源项计算基本假设如下：

— 进行切割取样的乏燃料棒包壳空腔内的放射性物质在切割操作前已释放；

— 每次切割产生约 2mm 损耗，该 2mm 芯块内的裂变气体 100%释放，其它放射性核素释放份额假设 30%释放入热室；

— 通风系统运行，一级高效过滤器有效，保守假设过滤效率为 90%。

— 通风过滤系统的两级高效过滤器及碘吸附器失效。

根据上述假设计算得到的事故释放源项见表 7-5。

表 7-5 燃料切割导致的气溶胶异常叠加过滤器失效事故释放源项

核素	向环境的放射性释放量 (Bq)	核素	向环境的放射性释放量 (Bq)
I-129	6.95E+02	Ba-140	1.29E+05
I-131	2.34E+03	Ru-103	1.04E+08
Kr-85	6.30E+08	Ru-106	7.94E+08
Xe-127	3.23E+02	Ce-141	4.99E+07
Xe-131m	4.13E+04	Ce-144	1.27E+09
Xe-133	3.84E+00	Pu-238	1.29E+07
H-3	5.15E+07	Pu-239	5.77E+05
C-14	3.55E+04	Pu-240	1.17E+06
Cs-134	4.84E+08	Pu-241	1.92E+08
Cs-136	1.00E+04	Np-239	6.66E+04
Cs-137	2.32E+08	Y-90	1.59E+08
Rb-86	7.99E+03	Y-91	1.81E+08
Te-123m	3.45E+04	Nb-95	6.50E+08
Te-125m	6.44E+06	Zr-95	3.29E+08
Te-127	7.95E+06	La-140	1.48E+05
Te-127m	8.15E+06	Nd-147	1.06E+04
Te-129	1.16E+06	Pr-143	2.09E+05
Te-129m	1.83E+06	Am-241	3.59E+05
Sr-89	9.49E+07	Cm-242	3.95E+07
Sr-90	1.59E+08	Cm-244	1.68E+07
Ba-137m	1.21E+08	---	---

## 7.2.2 放射性事故后果计算

### 7.2.2.1 事故大气弥散因子计算

#### (1) 计算模式

考虑到本项目事故释放点距离场址最近的边界距离均小于 100m，本次计算采用了美国 NRC RG1.194“核电厂控制室放射性可居留性评价的大气相对浓度”中推荐的短期



大气弥散因子计算模型。因本项目烟囱高度（35m）低于周围建筑物高度的 2.5 倍，也有部分事故产生的放射性物质从厂房释放，因此，计算采用了其中的地面释放模式。

计算模型基于直线高斯烟羽扩散模式，其地面排放的计算公式为：

$$\frac{\chi}{Q} = \frac{1}{\pi U \sigma_y \sigma_z} \exp\left[-0.5(y/\sigma_y)^2\right]$$

式中：

$\chi/Q$ ：大气弥散因子， $s/m^3$ ；

$\sigma_y$ 、 $\sigma_z$ ：扩散系数， $m$ ；

$U$ ：风速， $m/s$ ；

$y$ ：距烟羽中心的距离， $m$ 。

针对低风速和建筑物尾流中的扩散情况，对上式中的扩散参数进行如下修正：

$$\Sigma_y = (\sigma_y^2 + \Delta\sigma_{y1}^2 + \Delta\sigma_{y2}^2)^{1/2}$$

$$\Sigma_z = (\sigma_z^2 + \Delta\sigma_{z1}^2 + \Delta\sigma_{z2}^2)^{1/2}$$

式中：

$\sigma_y$ 、 $\sigma_z$ ：标准扩散系数；

$\Delta\sigma_{y1}$ 、 $\Delta\sigma_{y2}$ ：低风速修正项；

$\Delta\sigma_{z1}$ 、 $\Delta\sigma_{z2}$ ：建筑物扰流修正项。

低风速修正项计算为：

$$\Delta\sigma_{y1}^2 = 9.13 \times 10^5 \left[ 1 - \left( 1 + \frac{x}{1000U} \right) \exp\left(\frac{-x}{1000U}\right) \right]$$

$$\Delta\sigma_{z1}^2 = 6.67 \times 10^2 \left[ 1 - \left( 1 + \frac{x}{1000U} \right) \exp\left(\frac{-x}{1000U}\right) \right]$$

式中，

$x$ ：排放点到受照点的距离（ $m$ ）；

$U$ ：风速（ $m/s$ ）。

扰流修正项计算为：

$$\Delta\sigma_{y2}^2 = 5.24 \times 10^{-5} U^2 A \left[ 1 - \left( 1 + \frac{x}{10\sqrt{A}} \right) \exp\left(\frac{-x}{10\sqrt{A}}\right) \right]$$

$$\Delta\sigma_{z2}^2 = 1.17 \times 10^{-2} U^2 A \left[ 1 - \left( 1 + \frac{x}{10\sqrt{A}} \right) \exp\left(\frac{-x}{10\sqrt{A}}\right) \right]$$

式中，A 为临近建筑物截面面积。

## (2) 计算参数

图 7-1 给出了释放点与受照点的位置示意图。根据事故分析，本次计算中包括烟囱释放点和材料中心厂房释放点，受照点为距离释放点最近的场址边界。

计算采用 ARCON96 程序，采用地面释放模式，主要计算参数为：

— 烟囱释放：

- 烟囱设计高度为 35m，邻近最高建筑物高度为 27m；
- 释放点与受照点水平直线距离 47m；
- 受照点至释放点连线的方向，以及风向窗范围分别为 100°和 90°
- 建筑物横风方向投影面积 430m<sup>2</sup>。

— 厂房释放：

- 释放点与受照点水平直线距离 87m；
- 受照点至释放点连线的方向，以及风向窗范围分别为 270°和 90°
- 建筑物横风方向投影面积 615m<sup>2</sup>。

气象数据选取阳江核电厂场址气象塔 2018 年 1 月~12 月一整年的气象观测数据。

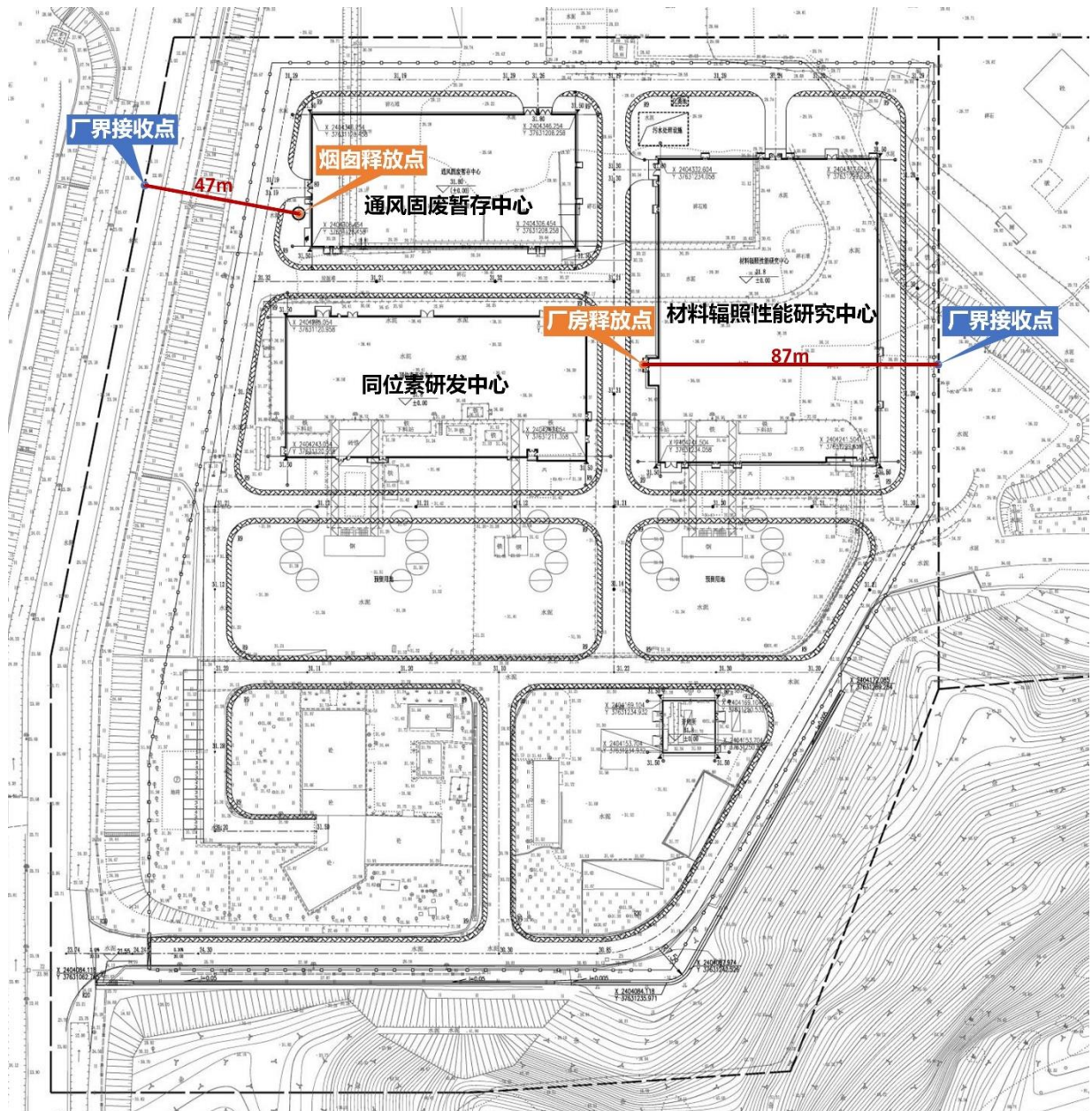


图 7-1 释放点与受照点的位置示意图

### (3) 短期大气弥散因子

根据上述模式和参数计算得到的短期大气弥散因子为：

- 烟囱到场界 95%概率水平的短期大气弥散因子：0-2h,  $1.69E-03 \text{ s/m}^3$ ；
- 厂房到场界 95%概率水平的短期大气弥散因子：
  - 0-2h,  $5.34E-04 \text{ s/m}^3$ ；
  - 2-8h,  $2.00E-04 \text{ s/m}^3$ ；
  - 8-24h,  $1.08E-04 \text{ s/m}^3$ 。

### 7.2.2.2 事故剂量

#### (1) 剂量计算模型

事故放射性释放造成的剂量后果估算考虑事故期间起主要作用的放射性烟云浸没外照射、沉积在地面的放射性物质外照射、从烟云中吸入放射性物质内照射等三个照射途径；

— 烟云浸没剂量  $D_a$

$$D_a = \sum_n \left[ \sum_e Q_n(e) \cdot \left( \frac{\hat{X}}{\dot{Q}} \right)_e \right] \cdot DF_a(n)$$

— 空气吸入剂量  $D_{inh}$

$$D_{inh} = \sum_n \left[ \sum_e Q_n(e) \cdot \left( \frac{\hat{X}}{\dot{Q}} \right)_e \cdot B_r(e) \right] \cdot DF_{inh}(n)$$

— 地面沉积剂量  $D_g$

$$D_g = \sum_n \left[ \sum_e Q_n(e) \cdot \left( \frac{\hat{X}}{\dot{Q}} \right)_e \cdot V_d \cdot S_n(e) \right] \cdot \frac{DF_g(n)}{\lambda_n}$$

$$\text{式中: } S_n(e) = 1 - \frac{1 - e^{-\lambda_n T_e}}{\lambda_n T_e} e^{-\lambda_n (t_r - T_e - t_e)}$$

上述式中，各参数的含义为：

$D_a$ 、 $D_{inh}$ 、 $D_g$ ：剂量，Sv；

$Q_n(e)$  — e时段核素 n 的释放总活度，Bq；

$\left( \frac{\hat{X}}{\dot{Q}} \right)_e$  — e时段事故（短期）大气扩散因子， $s \cdot m^{-3}$ ；

$B_r(e)$  — 成人在 e时段的呼吸率， $m^3 \cdot s^{-1}$ ；

$\lambda_n$  — 核素 n 的衰变常数， $s^{-1}$ ；

$V_d$  — 核素的干沉积速度， $m \cdot s^{-1}$ ；

$DF_a(n)$  — 核素 n 的浸没剂量转换因子， $Sv \cdot (s \cdot Bq \cdot m^{-3})^{-1}$ ；

$DF_{inh}$  — 核素 n 的吸入剂量转换因子， $Sv \cdot Bq^{-1}$ ；

$DF_g(n)$  — 核素 n 的沉积剂量转换因子， $Sv \cdot (s \cdot Bq \cdot m^{-2})^{-1}$ ；

$S_n(e)$  — e 时段沉积剂量修正因子；

$t_e$  — e 时段的起始时间，s；

$T_e$  — e 时段的释放时间，s；

$t_r$  — 沉积剂量的评价时间，s。

## (2) 事故后果

根据计算得到短期大气弥散因子和事故源项，可以计算得到各事故在最近场界处公众个人受到的有效剂量，具体结果为：

- 热室内燃料棒跌落叠加通风过系统停运事故：0.475mSv；
- 热室内燃料棒跌落叠加二级高效过滤器+碘吸附器失效事故：3.86mSv；
- 热室内燃料切割导致的放射性气溶胶异常叠加通风过系统停运事故：0.25 mSv；
- 热室内燃料切割导致的放射性气溶胶异常叠加二级高效过滤器+碘吸附器失效事故：2.03 mSv。

## 7.2.3 放射性事故后果评价

根据事故辐射后果计算结果，所计算的事故中，各事故的辐射后果均可以满足 5mSv 的要求，其中，热室内燃料棒跌落叠加二级高效过滤器+碘吸附器失效事故通过烟囱排放对西边场界处公众造成的有效剂量最大，为 3.86 mSv，占要求的 77.2%。

## 7.2.4 潜在的放射性物质释放事故预防、缓解措施

### 7.2.4.1 热室内燃料棒跌落

#### (1) 起因和情景

在热室 FA#、F1#及 F2#内进行乏燃料棒无损检测及切割时，需要起吊或抬起乏燃料棒至检测装置或操作平台，高度约为 300mm。当吊车、提升装置或抓具故障，或人员误操作时，致使乏燃料棒跌落在热室地板上，导致乏燃料棒损坏。

#### (2) 预防措施

定期检查维护吊车、提升装置和吊具，必要时进行预防性维修；

加强人员培训，规范操作。

#### (3) 探测手段

操作人员目视。

#### (4) 缓解措施

收集破损乏燃料棒，防止放射性物质进一步外溢；  
加强放射性气体的收集，减少其向环境的释放量。

### 7.2.4.2 热室内燃料切割导致的放射性气溶胶异常

#### (1) 起因和情景

辐照后检验中，切割取样的年操作量为 4 根压水堆乏燃料棒，每根棒切割 12 刀，切割操作在热室 F2#进行。

取样切割一般采用湿式切割，在切割处滴淋冷却液以控制放射性气溶胶的产生量。当冷却不足时，切割过程可能产生大量放射性粉尘。另外，切割产生的金属细末或粉尘收集不完全时，热室内的其他操作如去污等也可能造成细末或粉尘的再悬浮。

切割全程有工作人员目视观察，可及时发现切割操作过程中的状态，包括冷却液状态。因此，此事故发生概率极低。

#### (2) 预防措施

加强人员培训，严格控制和管理切割工序；  
切割作业前确认设备状态，保证切割设备正常可靠；  
加强热室内辐射水平监测，及时发现异常，尽早做出控制和缓解；  
加强切割碎屑和细末的收集，规范热室内各项操作，防止污染扩散。

#### (3) 探测手段

热室内设空气取样点，切割过程中利用放射性气溶胶取样系统对热室内空气取样后经实验室分析得出热室内放射性浓气溶胶浓度；

过滤器设备间设区域 $\gamma$ 辐射监测仪，对过滤器表面辐射水平进行连续在线监测，若过滤器的辐射水平异常升高则表明放射性气溶胶浓度升高。也可利用便携式仪表对过滤器表面辐射水平进行监测。

#### (4) 缓解措施

终止操作，加大热室内排风量；  
采用合适的去污方式，降低热室内放射性污染水平；  
判断排风过滤器是否需要更换，保证排风过滤器工作状态。

### 7.2.4.3 裂变气体收集系统泄漏

#### (1) 起因和情景

在 F 线热室 F1#在进行乏燃料棒裂变气体测量时，在密封的管路内对乏燃料棒进行刺孔，抽取棒内裂变气体进行测量，并在测量装置的末端设置有裂变气体收集装置。当测量管路密封降低或丧失时，乏燃料棒空腔内的裂变气体会释放到热室中。

#### (2) 预防措施

试验前检查管路密封性，必要时进行预防性维修，保证试验装置正常使用；  
在试验管路上设置多道密封阀，分段密封，降低泄漏风险；  
加强操作培训，避免人因失误。

#### (3) 探测手段

烟囱气态流出物监测，放射性惰性气体活度浓度报警。

#### (4) 缓解措施

终止试验，防止乏燃料棒内其它放射性物质随实验外溢；  
加强放射性气体的收集，尽可能减少其向环境的释放量。

### 7.2.4.4 材料中心放射性废液收集暂存系统泄漏

#### (1) 起因和情景

材料辐照性能研究中心放射性废液收集暂存系统（CLS）设有废液暂存罐，用于收集和暂存正常运行期间产生的放射性废液。假设废液暂存罐贮存期间发生泄漏或破损，放射性废液将泄漏至滞留池内，由滞留池包容。

#### (2) 预防措施

废液暂存罐材质选用为不锈钢，具有良好防腐蚀和辐射屏蔽性能。废液暂存罐接管均设在罐顶部，除了液位计接口连接方式为法兰，其它设备接口采用焊接的全封闭结构，能够有效防止废液泄漏。

#### (3) 探测手段

废液暂存罐布置在滞留池内，滞留池的容量能容纳所有贮槽内的全部废液，防止放射性物质向环境释放。滞留池内设置集液坑，集液坑设置不锈钢敷面，集液坑内设高液位报警，用于监测废液暂存罐泄漏情况。

#### (4) 缓解措施

废液暂存罐有效容积分别为  $5\text{m}^3$  和  $2\text{m}^3$ ，放射性废液泄漏的最严重情况是废液暂存罐内废液全部泄漏至滞留池内，可通过临时潜水泵从集液坑将废液输送到另一个完好的废液暂存罐。

### 7.2.4.5 废液输送管路阀门泄漏

#### (1) 起因和情景

在废液输送管路中误排入强腐蚀性介质，或工作人员在阀门检修安装失败后有可能使管路阀门泄漏。

#### (2) 预防措施

为防止此事件的发生，采取如下预防措施：

- 定期巡检制度，确保阀门的有效性；
- 采用耐酸碱腐蚀的不锈钢阀门与管道；
- 建立废液排放制度。

#### (3) 探测手段

废液暂存罐布置在滞留池内，滞留池内设置集液坑，集液坑设置不锈钢敷面，集液坑内设高液位报警，用于监测废液泄漏情况。

#### (4) 缓解措施

通过临时潜水泵从集液坑将废液输送到废液暂存罐。

### 7.2.4.6 碘过滤器着火

#### (1) 起因和情景

过滤器上游气体温度过高，比如上游发生火灾、电加热器故障等，导致碘吸附器自燃；或者由于碘吸附器吸附物质衰变热过大，导致碘吸附器自燃。

#### (2) 预防措施

定期巡检或试验，排除故障可能。

#### (3) 探测手段

碘吸附器设置有温度计，排风温度过高或接收到火灾报警信号报警。



#### (4) 缓解措施

碘吸附器着火时有如下缓解措施：

在碘吸附器上部设有手动喷淋接口，发生火灾时，消防人员可通过软管接到距受保护箱体小于 10m 的消防接口上；

碘吸附器上下游设有防火阀，火灾时自动关闭，隔离碘吸附器。

### 7.2.4.7 废物储存桶着火

#### (1) 起因和情景

该子项可燃废物主要为纺织物、塑料、滤纸、活性炭等，用 200L 钢桶封装。在通风及固废暂存中心可燃废物存储区内，在开盖检测过程意外情况下可能发生着火。

#### (2) 预防措施

子项整体按戊类厂房进行防火设计，其中火灾危险性高的废物存储区部分作为丙类中间仓单独划分为一个防火分区；

设置防火分区，与非可燃废物存储区进行实体隔离。防火分区间采用防火墙、甲级防火门等措施隔离，发生火灾时将火灾控制在一定范围，避免向相邻区域蔓延。

#### (3) 探测手段

在可燃废物存储区设置有感烟探测器进行监视，用于监测早期火灾的发生。

#### (4) 缓解措施

在发生火灾时，可燃废物储存区通风系统可实现对厂房内必要的气流控制。排风管道穿越可燃废物储存区前后均设置电动防火阀，以维持防火隔断的耐火等级；

防火阀根据设定的温度自动熔断关闭或根据火灾报警信号连锁关闭，将着火区域隔离，并将关闭后阀位信号反馈至火灾报警系统；

设置有干粉灭火器，用于扑灭初期火灾。

## 7.3 核事故应急

项目营运单位将在项目投运前，根据《核燃料循环设施营运单位的应急准备和应急响应》（HAD 002-07-2019）的要求，结合本项目的特点制定场内核事故应急预案，得到国务院核安全监督管理部门的审查认可后生效。

## 7.4 辐射事故及应急

本节主要分析同位素中心内钴-60 生产过程中的可能发生的辐射事故、预防措施和应急预案。

### 7.4.1 辐射事故及预防措施

#### 7.4.1.1 钴源泄漏和贮源水池渗漏

本项目钴源生产线上有钴靶件接收水池、成品源水池和废旧源水池共三个水池贮存不同的类型的钴源，相应钴源在入水池前均进行相应的检查工作，一般不会造成池水的污染，但也不排除由于源包壳密封性能欠佳或者长期浸泡在水中被腐蚀，造成钴源的泄漏。

如果由于各种原因引起钴源泄漏，放射性钴进入池水，钴在水中以  $\text{Co}(\text{OH})_2$  形式存在，经氧化而形成棕色  $\text{Co}(\text{OH})_3$ ，其溶解度均极小，易沉于井底，使水中的放射性浓度逐渐升高。由于钴源泄漏的发展过程缓慢，只要及时检测，可以在泄漏初期发现并妥善处理，可以控制泄漏产生的不利影响，本项目设置了池水电导率、总氯离子含量、pH 值和放射性监测系统，可及时发现池水水质的变化，同时，各水池均设置了水净化系统，可以有效维持池水的清洁度要求，水净化系统产生的固体废物需进行放射性检测，如果有泄漏则会形成放射性固体废物，则纳入本项目放射性固体废物统一处理。

此外，由于水池均设计了有效的防渗设施，池水有放射性污染，也不会对环境造成直接影响。

为了防止钴源泄漏和贮源水池渗漏，建设单位应加强设施的施工管理和验收等工作，确保工程质量，同时在运行期间加强钴源的入池前检测和池水的监测，及早发现及早处置。

#### 7.4.1.2 同位素研发中心放射性废液收集暂存系统泄漏

同位素研发中心放射性废液收集暂存系统（TLS）设有废液暂存罐，用于收集和暂存放射性废液，假设废液暂存罐贮存期间发生泄漏或破损，放射性废液将泄漏至滞留池内，由滞留池包容。

为防止废液泄露，废液暂存罐材质选用为不锈钢，具有良好防腐蚀和辐射屏蔽性能。

废液暂存罐接管均设在罐顶部，除了液位计接口连接方式为法兰，其他设备接口采用焊接的全封闭结构，能够有效防止废液泄漏。

废液暂存罐布置在滞留池内，滞留池的容量能容纳所有贮槽内的全部废液，防止放射性物质向环境释放。滞留池内设置集液坑，集液坑设置不锈钢敷面，集液坑内设高液位报警，用于监测废液暂存罐泄漏情况。

废液暂存罐有效容积为 $5\text{m}^3$ ，放射性废液泄漏的最严重情况是废液暂存罐内废液全部泄漏至滞留池内，可通过临时潜水泵从集液坑将废液输送到另一个完好的废液暂存罐。

### 7.4.1.3 正常补水丧失

正常工况下，除盐水系统（CYS）执行向靶件接收水池、成品贮存水池和废旧源水池补水的功能。在因失电或设备故障情况下，有可能导致正常补水丧失。

靶件接收水池、成品贮存水池和废旧源水池分别设置液位仪表，在低液位时发出报警；水池正上方设置有固定式 $\gamma$ 剂量监测仪表，补水丧失致液位过低使贮源屏蔽能力减弱，触发剂量仪报警。

在 CYS 补水丧失的情况下，生活水系统（SEP）可以向靶件接收水池、成品贮存水池和废旧源水池补水；在 CYS 和 SEP 均不可用的情况下，还可以通过消防系统（JPD）对靶件接收水池、成品贮存水池和废旧源水池进行补水。

### 7.4.1.4 爆炸

同位素中心内发生爆炸的可能性极小，但由于钴源在水池中会使水分解产生氢气，池水每吸收 $100\text{eV}$ 辐射能量可产生 $0.45$ 个氢分子，如果水池空间内长时间不通风，当氢气浓度积累到一定比例条件（ $4.0\%\sim 75.6\%$ （体积比））时，会由于静电效应或其他原因产生的火花有可能引起爆炸。

对于本项目中的钴源，本次评价保守选取 $4.0\%$ 作为控制值。 $^{60}\text{Co}$ 衰变出 $\gamma$ 射线的平均能量为 $1.25\text{MeV}$ ，根据各水池的设计贮源量均为 $1000$ 万居里，计算得到水池中的氢气产生量约为 $560\times 3=1680\text{L/h}$ 。

保守假设氢气不溶于水而 $100\%$ 的逸出水面进入水池上方空间空气中，在本项目的设计中，各水池、热室、吊装大厅、池水冷却净化间等在同一通风区域内，空气体积约为 $7250\text{m}^3$ ，如果停止排风，其达到爆炸控制值所需时间为 $7$ 天左右。

本厂房内设置有排风系统，设计换气次数 2 次/h，排风量为 18975m<sup>3</sup>/h，可以有效避免厂房内氢气的浓积至爆炸条件。

## 7.4.2 辐射应急

建设单位将针对本项目的特点制定有效的辐射应急预案，包括成立辐射应急响应组织，明确各个岗位的人员职责；开展应急人员的培训和演练；配备相应的应急响应装备和物资；明确事故分级和应急响应措施；制定辐射事故调查、报告和处理程序、制定辐射事故信息公开和公众宣传方案等，相应的工作应满足《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，HAF802-2011）的要求。

## 7.5 场内运输事故

本项目运行期间，厂房外的放射性物质运输主要涉及乏燃料棒运入、钴靶件的运入、成品钴源的运出和废钴源的运入，上述运输过程中，均按照要求采用满足相应国家标准的运输容器，预期的车辆运输事故不会对周围环境和人员造成不可接受的后果。

## 7.6 环境风险评价（非辐射风险）

对于危险化学品环境风险，表 7-6 给出了运行期间各贮存单元贮存危险化学品最大储存量。根据 HJ169-2018 附录 C 判断，危险物质最大储存量与临界量的比值之和 Q 为 1.84E-03 (Q<1)，因此本项目环境风险潜势划分为 I 级，对应评价工作等级为简单分析。

表 7-6 运行期间各贮存单元危险化学品最大储存量

序号	辨识单元	物质	最大储存量 (kg)	参考 HJ169-2018 附录 B 临界量 (t)	q/Q
1	金相样品制备实验室	氢氟酸	0.5	1	5.00E-04
2	金相样品制备实验室	硫酸	1.5	10	1.50E-04
3	金相样品制备实验室	盐酸	1.2	7.5	1.60E-04
4	金相样品制备实验室	硝酸	1.5	7.5	2.00E-04
5	除盐水生产系统	氢氟酸	0.5	1	5.00E-04
6	取样分析实验室	盐酸	1	7.5	1.33E-04
7	取样分析实验室	硝酸	1.5	7.5	2.00E-04

本项目贮存的危险化学品用于日常实验和除盐水生产，贮存量较小。金相样品制备

实验室为非放实验室，位于材料中心；气体分析取样实验室位于材料中心三层；除盐水系统位于同位素中心二层化水间。因此，本项目所贮存的少量酸碱均位于实体房间中，不会对地表水和地下水产生环境风险，其泄漏影响途径主要为大气，影响范围局限于所在房间的有限区域内，不会对外界大气环境产生影响。

为进一步防范危险化学品带来的环境风险，通过加强对危险化学品安全管理，制定完善、有效的安全防范措施，可降低危化品环境风险事故发生的概率。采取风险防范措施如下：

(1) 建立危险化学品安全管理制度，制定完善的管理和监督规程，健全工作人员上岗培训和考核制度；

(2) 定期开展对危险化学品贮存现场的检查；

(3) 制定危险化学品泄漏的处置规程。

通过建立危险化学品安全管理及风险防范机制，危险化学品引起的环境风险很小。

## 8 流出物监测与环境监测

### 8.1 辐射监测

#### 8.1.1 流出物监测

##### 8.1.1.1 气载流出物监测

###### (1) 连续在线监测

本项目气载流出物均通过通风及固废暂存中心的烟囱排放，在通风及固废暂存中心烟囱内设置了连续在线监测系统，对烟囱气载流出物中的气溶胶、碘、惰性气体进行连续监测，在同位素中心排风管道设置了气溶胶连续在线监测系统，对同位素中心排放的<sup>60</sup>Co进行连续监测，其监测通道性能参数见表 8-1。

表 8-1 气载流出物连续监测通道参数

序号	监测位置	监测项目	量程	报警阈值	报警联锁动作
1	通风及固废暂存中心烟囱	气溶胶	3.7E-02Bq/m <sup>3</sup> ~3.7E+03Bq/ m <sup>3</sup>	一级：5.0E+01Bq/ m <sup>3</sup> 二级：2.5E+02 Bq/ m <sup>3</sup>	无
2		碘	3.7E-01Bq/m <sup>3</sup> ~3.7E+05Bq/ m <sup>3</sup>	一级：2.0E+01Bq/ m <sup>3</sup> 二级：1.0E+02 Bq/ m <sup>3</sup>	无
3		惰性气体	3.7E+03Bq/ m <sup>3</sup> ~3.7E+09Bq/ m <sup>3</sup>	一级：4.0E+05Bq/ m <sup>3</sup> 二级：4.0E+06 Bq/ m <sup>3</sup>	无
4	同位素中心排风管道	气溶胶	3.7E-02Bq/m <sup>3</sup> ~3.7E+03Bq/ m <sup>3</sup>	一级：5.0E+01Bq/ m <sup>3</sup> 二级：2.5E+02 Bq/ m <sup>3</sup>	无

###### (2) 取样监测

本项目在通风及固废暂存中心的烟囱设置了气溶胶、碘、<sup>3</sup>H 和 <sup>14</sup>C 的取样装置，在同位素中心排风管道设置气溶胶取样装置，取样装置性能参数见表 8-2。

对于气溶胶、碘、<sup>3</sup>H 和 <sup>14</sup>C 均采用连续取样一周，送实验室进行分析，对于 <sup>90</sup>Sr，将气溶胶滤纸累积季度样灰化后分析测量，监测内容及方法见表 8-3。

表 8-2 取样通道性能参数

序号	取样位置	装置	性能
1	通风及固废暂存中心烟囱	气溶胶取样装置	使用滤纸取样 捕集效率: >95%
2		碘取样装置	使用活性炭盒取样 捕集效率: >95%
3		<sup>3</sup> H 取样装置	采样效率: >95%
4		<sup>14</sup> C 取样装置	采样效率: >97%
5		惰性气体取样装置	3L
6	同位素中心排风管道	气溶胶取样装置	使用滤纸取样 捕集效率: >95%

### 8.1.1.2 液态流出物监测

液态流出物经处理后满足《污水综合排放标准》(GB8978-1996)后运输至阳江核电厂排放,排放前对废水进行取样监测,监测内容及方法见表 8-3。

表 8-3 流出物监测大纲

种类	取样点	取样频次	介质	分析项目	方法	分析核素及探测限 (Bq/m <sup>3</sup> )
液态	贮存罐	排放前取样	水	总 α	水质 总 α 放射性的测定 厚源法 HJ 898-2017	5.00E+01
				总 β	水质 总 β 放射性的测定 厚源法 HJ 899-2017	2.00E+01
气态	烟囱	连续取样	气体	γ 能谱	3L 专用取样瓶, 测量 5000s	<sup>85</sup> Kr, 5.71E+04
						<sup>88</sup> Kr, 6.66E+02
						<sup>133</sup> Xe, 2.83E+02
						<sup>135</sup> Xe, 1.68E+02
			滤纸	γ 能谱	直接测量, 测量 5000s	<sup>58</sup> Co, 6.11E-04
						<sup>60</sup> Co, 6.31E-04
						<sup>134</sup> Cs, 4.99E-04
			<sup>90</sup> Sr (季度混合样)	灰化后放化分析	2.0E-01	
			碘盒	γ 能谱	直接测量, 测量 5000s	<sup>131</sup> I, 1.24E-03
						<sup>133</sup> I, 1.48E-03
氚水	<sup>3</sup> H	5ml 样品+15ml 闪烁液, 20min	3.83E+00			
碱溶液	<sup>14</sup> C	6ml 样品 +14ml 闪烁液, 60min	3.68E-01			
同位素中心排风管道	连续取样	滤纸	γ 能谱	直接测量, 测量 5000s	<sup>60</sup> Co, 6.31E-04	

### 8.1.2 辐射环境监测

根据项目正常和事故条件下对周围的影响情况，确定环境 $\gamma$ 辐射水平的监测范围按半径 5km 考虑，其余项目的监测范围按半径 1km 考虑。

运行期间的环境监测方案初步考虑如下：

#### (1) 环境 $\gamma$ 辐射

- $\gamma$ 辐射固定点连续监测：在落地点浓度最大的子区设连续监测监测站；
- $\gamma$ 辐射剂量率瞬时监测：采用便携式 $\gamma$ 辐射剂量率仪测量，对材料中心、同位素中心四周外墙进行监测，每年至少 1 次，进行燃料棒或钴源操作时监测；在 5km 范围内主要居民点布点进行 $\gamma$ 辐射剂量率瞬时监测，每年 1 次。

#### (2) 气态放射性物质及其沉降物

- 大气气溶胶：在落地点浓度最大的子区设气溶胶取样，取样监测总 $\alpha$ 、总 $\beta$ ，总 $\beta$ 偏高时测 $\gamma$ 谱；累积样品测量 $\gamma$ 能谱；
- 空气中氡碳：在落地点浓度最大的子区测量氡和 C-14。

#### (3) 水

- 地表水：测量总 $\beta$ 、氡和 $\gamma$ 能谱，设 1 个点，海荫河，每年 1 次；
- 地下水：测量总 $\beta$ 、氡、 $\gamma$ 谱，设 1 个点，福龙，每年 1 次。

#### (4) 土壤与沉积物

- 陆地土壤：测量 $\gamma$ 谱和 $^{90}\text{Sr}$ ，八个方位，每个方位至少 1 个点，每年 1 次。

### 8.1.3 个人剂量监测

进入辐射控制区的工作人员，均配备电子式个人剂量计和热释光剂量计以监测个人受照剂量，热释光剂量计每三个月测量一次。工作人员内照射监测的常规监测采用体外直接测量的方式，监测周期为三个月，拟采用阳江核电厂 WBC 开展内照射体外直接测量。同时定期对工作场所空气进行取样分析，根据空气中放射性核素的活度浓度进行工作人员摄入量或待积有效剂量的评价，取样分析周期按三个月一次进行。



## 8.2 监测设施

### 8.2.1 流出物实验室

在材料中心三层设有气体取样分析实验室，仪器设备配置方案见表 8-4。

表 8-4 气体取样分析实验室设备配置表

序号	检测项目	检测仪器	设备性能参数
1	$\alpha$ 核素	$\alpha$ 谱仪	- 能量分辨率： $^{241}\text{Am}$ ， $\leq 20\text{keV}$ ，探测效率 $\geq 25\%$ 。
2	气溶胶、惰性气体、碘	高纯锗 $\gamma$ 谱仪	- 探测器：P型HPGe同轴探测器； - 探测效率 $\geq 50\%$ ； - 能量相应范围： $40\text{keV}\sim 7\text{MeV}$ ； - 能量分辨率： $\text{Co-60}\leq 1.85\text{keV}$ 。 - 低本底铅室； - 软件：谱分析软件。
3	$^3\text{H}$ 、 $^{14}\text{C}$	液闪仪	- $^3\text{H}$ 本底（ $0\sim 18.6\text{Kev}$ ）： $< 2.6\text{Cpm}$ （采用仪器自带本底）； - $^3\text{H}$ 本底（ $0\sim 4\text{Kev}$ ）： $< 1.0\text{Cpm}$ （ $8\text{mL}$ 去离子水+ $12\text{mL}$ 闪烁液，塑料瓶）； - $^3\text{H}$ 效率（ $0\sim 18.6\text{Kev}$ ）： $> 60\%$ （采用仪器自带 $^3\text{H}$ 标准源）； - $^3\text{H}$ 效率（ $0\sim 4\text{Kev}$ ）： $> 20\%$ （ $8\text{mL}$ 去离子水+ $12\text{mL}$ 闪烁液，塑料瓶）； - $^3\text{H}$ 优值（ $0\sim 18.6\text{Kev}$ ）： $> 1500$ 。 - $^{14}\text{C}$ 本底（ $0\sim 156\text{Kev}$ ）： $< 3.2\text{cpm}$ ； - $^{14}\text{C}$ 效率（ $0\sim 156\text{Kev}$ ）： $> 95\%$ ； - $^{14}\text{C}$ 优值（ $0\sim 156\text{Kev}$ ）： $> 7000$ ； - 自带 $^{133}\text{Ba}$ 监测源； - $^{14}\text{C}$ 淬灭校正源1套； - 短期稳定性：测量时间20分钟，循环次数20次，应符合 $2\sigma$ 检验值； - 配有制冷装置保证设备温度恒定。

### 8.2.2 环境监测设施

拟委托有资质的单位开展环境监测，本项目不建设环境监测设施。

## 8.3 质量保证

为保证流出物监测数据的质量，拟采取以下质量控制措施：

#### (1) 人员培训与授权

从事流出物监测工作的人员需经过专业培训并考核合格后给予授权。

#### (2) 设施与环境控制

进行实验室的定期检查，严格控制实验室内的环境（温度、湿度、照明、通风、电源、清洁度等），使其满足测量分析的要求，并严格遵守各项工业安全的要求。

#### (3) 仪器和仪表的质量控制

仪器仪表在投入使用前需进行检定/校准，并按规定定期检定/校准。仪器仪表维修后，安装和恢复使用前应重新进行检定/校准。

仪器在检定或校准有效期内，应持续跟踪仪器是否处于可用状态，定期对仪器的性能参数（如本底、探测效率、能量分辨率等）进行核查或校准（性能试验），并根据核查或校准（性能试验）结果对仪器当前状态作出评价。

#### (4) 实验室试剂、气体的质量控制

所采购的试剂，厂家应有生产资质，并附有化学品安全技术说明书和检验报告等，定期对试剂进行空白试验。

#### (5) 放射源的质量控制

仪器仪表的检定或校准所使用的放射性或非放射性标准参考物质应能追溯到国家标准，即使用经过国家计量监督部门或权威部门认可的标准参考物质，并有标准物质证明文件，国外进口的标准参考物质需有相应证明文件。

#### (6) 检测方法控制

监测方法的选用和验证原则上按国家推荐的最新标准分析方法进行分析测量，若使用其它方法进行分析，必须做方法验证和对比实验，以证明该方法的主要技术参数、方法检出活度、精密度、准确度、干扰影响等与标准方法有等效性，并及时编写相关技术程序、操作规程等，待批准生效后方可作监测方法。

#### (7) 内部质量控制措施

样品测量过程应进行质量控制，一般总体质控控制数不得低于 10%，质量控制的方法有多种，下面几种方法（但不限于）可供选择：空白样分析、平行样分析、加标样分析、质控样品分析、样品复检等。

#### (8) 外部质量控制措施

尽可能参加国内外机构组织的实验室间比对和能力验证活动，比较鉴别本实验室的测量误差是否在合格范围内，从中发现可能存在的系统误差，及时采取必要的改正

措施，确保实验室检测能力和水平，保证数据的可靠性和有效性。

## 8.4 施工期环境监测计划

本项目的施工主要为陆域工程。建设单位将委托相关有资质单位开展本项目施工期间的相关环境监测。

本项目环境监测内容包括环境空气、废水和厂界及敏感点噪声三部分。

### 1) 环境空气

监测内容：总悬浮颗粒物（TSP）、可吸入颗粒物（PM<sub>10</sub>）、二氧化氮（NO<sub>2</sub>）、二氧化硫（SO<sub>2</sub>）、一氧化碳（CO），测小时浓度值，同步监测气压、风向、风速、气温、干湿度。

监测点位：施工区点位共设置 4 个（施工场界主导风向上风向设置一个参照点，下风向设置三个监控点，监测点位设在主要污染源下风向边界外 10m 处）；敏感区点位共设置 3 个点（光星村、新村、瓦屋村）。

监测频次：1 年 4 期，每季度监测 1 次。

监测要求：施工区点位每次监测一天，敏感区点位每次连续监测 5 天。每天采样 4 次，每次采样 1 小时。

监测标准：参考《大气污染物综合排放标准》（GB16297-1996）和《环境空气质量标准》（GB3095-2012）执行；采用其它方法应满足国家规范要求。

### 2) 噪声监测

监测内容：昼间等效连续 A 声级（Leq）。

监测点位：施工场界共设置 5 个点位；敏感区噪声共设置 1 个点位（光星村）；

监测频次：1 年监测 4 期，每季度监测 1 次。

检测要求：施工噪声监测每次于昼、夜间各监测 1 次，每次监测 20 分钟；敏感区噪声每次 24 小时连续监测。

检测标准：参考 GB12523-2011《建筑施工场界环境噪声排放标准》和 GB3096-2008《声环境质量标准》执行；采用其它方法应满足国家规范要求。

## 9 利益代价分析

### 9.1 利益分析

#### 9.1.1 科学技术效益

本热室基地的科研方面工作能够满足中国广核集团在运核电厂安全运行、核技术应用、压水堆燃料研发等多方面的需求。热室是放射性操作必备的设施，开展对破损燃料棒及一回路失效部件进行分析，提高在运电厂安全运行经验、数据反馈；为核技术应用研究及产业化发展、获取核技术应用创新成果提供重要实施平台；同时热室基地为先进压水堆核燃料、包壳材料性能分析研究提供筛选平台，为得到性能良好的先进压水堆燃料给予硬件支持，从而筛选得到能够增强抵御事故能力的核燃料系统，不断提高核燃料技术，改善核电站安全性、可靠性和经济性，确保我国核燃料供应安全，摆脱燃料核心技术受制于人的局面，为我国核电技术国产化、核电“走出去”提供必要平台支撑。

此外，本项目建成后，围绕材料科学、核技术应用等，以满足国家战略需求的高水平科研成果为目标，带动企校产学研合作，围绕材料等领域带动高校的学科建设及发展，建立世界一流的核科学与核技术、材料科学专业，形成多学科交叉的应用平台，实现科研设备共享，助力粤港澳大湾区创新共同体建设，提升国家科研软实力；同时形成核技术应用产业群，为全国带来材料、医学、农业及其它核技术应用等领域的产业链效益，对国家清洁能源产业的发展具有重大的意义及社会效益。

#### 9.1.2 经济效益

开展辐照监督管检测业务，按中广核集团未来 20 年年均 5.4 根辐照监督管试验计算，年均产生经济效益 600 万左右。

随着电厂的运行时间的增加，核电厂内一些部件与材料失效，直接影响反应堆的安全运行。通过对部件及材料的失效分析，避免或降低失效的发生，提高和电厂运行的安全与经济性。此类业务年均经济效益约 500 万元。

燃料棒及破损原因分析方面，燃料棒破损影响核电厂运行安全，降低了核电厂运行经济性。开展燃料检查及破损原因分析，预计年效益约 500 万元。

同位素生产方面，按年加工 160 万居里计算，则每年产生经济效益 600 万元以上。

综合以上工程应用方面，本项目每年大概有两千万左右的经济效益。后续还考虑其他在运核电服务，例如进行电气等设备的抗辐照鉴定，该项为长期、稳定的业务。

## 9.2 代价分析

### 9.2.1 经济代价

本次建设总投资约 87972 万元，其中中广核集团投资 81237 万元，中广核研究院自筹 6705 万元。

### 9.2.2 社会和环境代价

场址用地为阳江核电厂征地范围内的工业用地，场址原用于阳江核电厂建设期间石料处理，已经完成场址平整工作，不涉及居民搬迁，对社会的影响较小。

场址原用于阳江核电厂建设期间石料处理，已经完成场址平整工作，经本报告分析评价，本项目对环境的影响满足国家标准要求，对环境的影响是可接受的。

### 9.2.3 资源代价

项目用地为工业用地，不涉及风景名胜保护区、基本农田保护区、生态功能保护区、饮用水源保护区等环境资源和自然资源。

## 10 结论与建议

### 10.1 项目工程概况

本项目名称为中广核研究院热室设施建设项目，建设地点位于阳江核电厂的堆料区，属于工业用地，用地面积约 78439 m<sup>2</sup>，建筑占地面积约 15202 m<sup>2</sup>，建筑面积约 27193 m<sup>2</sup>。

主要工艺设施包括材料中心和同位素中心，材料中心一年最大检验操作量为 10 根压水堆乏燃料棒，能耗为 62GWd/tU、富集度为 4.95%，共配备 35 间热室、1 间屏蔽室和 13 间铅室。同位素中心主要开展 <sup>60</sup>Co 放射源生产，设计日最大操作量 5.18×10<sup>15</sup>Bq，年最大操作量 3.7×10<sup>17</sup>Bq，最大日等效操作量为 5.18×10<sup>17</sup>Bq，钴源生产线钴靶件接收水池、成品源水池和废旧放射源水池的设计储存容量均为 3.7×10<sup>17</sup>Bq，共配备 3 间热室。

同时项目还使用 2 枚 V 类放射源 <sup>22</sup>Na。

本项目主要用于辐照后核燃料元件的检验和同位素研发，有利于先进核燃料元件的研发和同位素应用技术的开发，属于国家发展和改革委员会发布的《产业结构调整指导目录》（2019 年）中的鼓励类产业，项目的建设符合国家的产业政策。

### 10.2 环境保护设施

本项目的三废治理设施设备包括：通风及固废暂存中心、通风过滤系统、废液收集暂存系统、放射性废液处理系统、放射性固体废物收集转运系统和一体化生活污水处理设施。

通风及固废暂存中心主要用于接收并存储材料中心、同位素中心以及本子项本身产生的放射性固体废物包装容器，并用于将材料中心、同位素中心经就地过滤后的排风，由排风机房区域集中设置的排风机通过烟囱排出。

通风过滤系统包括材料中心通风空调系统（CVS）、通风及固废暂存中心通风空调系统（GVS）和同位素中心通风空调系统（TVS），实现放射性废气的就地过滤净化。

废液收集暂存系统包括材料中心废液收集暂存系统（CLS）和同位素中心废液收集暂存系统（TLS），分别用来收集和暂存材料中心、同位素中心产生的含放射性核素的废液。

放射性废液处理系统采用“活性炭过滤吸附+离子交换+反渗透+连续电除盐”工艺，

将放射性废液处理达标后排放。

放射性固体废物收集转运系统包括各个热室的固体废物收集转运系统和场区内的固体废物转运系统。

一体化生活污水处理设施主要用于收集本项目产生的生活废水并进行初步的处理，初步处理后送阳江核电厂生活污水处理站进行进一步的处理排放。

### 10.3 放射性排放

本项目产生的放射性废液经放射性废液处理系统处理后满足《污水综合排放标准》(GB 8978-1996)，不作为放射性废物管理，运输至阳江核电厂的排放口排放。

本项目仅向环境排放放射性废气，放射性废气在排放前经过 2 级高效气溶胶过滤器和 1 级碘过滤器，排放过程中进行连续在线监测和取样监测，保证排放量满足申请的气载流出物排放量申请值。

废树脂运输到阳江核电厂进行处理。需要整备的放射性固体废物送阳江核电厂整备后在通风和固废中心暂存，不需要整备的放射性固体废物和中放废物直接在通风和固废中心暂存，最终送处置场处置。项目中涉及的乏燃料棒在本设施中暂存，最终送国家处置场进行处置。

### 10.4 辐射环境影响评价结论

本项目正常运行状态下，气载放射性流出物排放造成公众最大有效剂量为  $7.98 \times 10^{-6}$  Sv/a，为位于场址 NNW 方位 0~1km 子区的成人组一般公众，占本项目剂量约束值 (0.01mSv) 的 79.8%，满足剂量约束的要求。

热室内燃料棒跌落叠加二级高效过滤器+碘吸附器失效事故后果最大，通过烟囱排放对西边场界处公众造成的有效剂量最大为3.86mSv，小于5mSv的事故接收准则。

同位素中心的接收发货人员每年最大受照剂量为4.443mSv/a，放射源生产人员每年最大受照剂量为2.5 mSv/a，运行维护人员每年最大受照剂量为3.67mSv/a，各类工作人员年受照剂量均不超过职业人员年剂量约束值5mSv/a。

同位素中心对厂区内其他工作人员的年照射剂量最大为3.03 $\mu$ Sv/a，对其他工作人员的影响很小。

综上所述，正常运行和事故条件下对环境的辐射影响都是可以接受的。

## 10.5 非辐射环境影响评价结论

### (1) 废水

本项目正常运行期间产生的非放射性废水主要是生活污水和处理后满足《污水综合排放标准》的生产废水，送阳江核电厂生活污水处理站处理排放。

### (2) 固体废弃物

产生的危险废物在专用的危险废物库暂存，委托有资质的单位处理，产生的其他工业固废和生活垃圾经妥善处理对环境的影响较小。

### (3) 噪声

本项目的噪声源经建筑隔声衰减后，场址边界外1米能够达到2类声功能区要求。

### (4) 废气

本项目排放的非放射性废气主要是臭氧和氮氧化物，地面最大落地点臭氧浓度最大值为 $0.048\mu\text{g}/\text{m}^3$ ， $\text{NO}_x$ 浓度最大值为 $0.022\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，远小于《环境空气质量标准》(GB3095-2012)中的二级标准。

## 10.6 建议

(1) 本项目放射性废液处理系统设计尚未给出各个工艺的具体方案和工艺参数，建设单位应积极开展放射性废液处理系统工艺研究，在下一个阶段的环境影响评价报告中提供相应的工艺技术参数，确保处理后的废水能满足排放要求。

(2) 本项目产生的部分废物需依托阳江核电厂的废物处理设施进行处理，建设单位应积极推动阳江核电厂取得废物处理的相应资质或许可证，以满足本项目废物处理要求。

(3) 建设单位应积极协调固体废物处置场设计和建设，及时将本项目产生的放射性固体废物送最终处置场处置，并在项目运行过程中预留固体废物和乏燃料棒最终处置的经费。



附件 1:

## 关于《中广核先进能源研究与创新中心项目》低水平放射性废物 处理的说明

为满足中广核先进能源研究与创新中心项目建设的环境保护要求，中广核研究院有限公司（建设单位）拟将本项目产生的低水平放射性液体废物和低水平放射性固体废物委托阳江核电厂处理。阳江核电厂拟接收上述废物进行处理，并承诺与中广核研究院有限公司共同按照国家相关法律法规要求办理相关安全和环保手续。

  
中广核研究院有限公司  
2020年7月9日

  
阳江核电有限公司  
2020年7月9日

附件 2:

关于《中广核先进能源研究与创新中心项目》  
生活污水处理的说明

为满足中广核先进能源研究与创新中心项目运行期间的环境保护要求，中广核研究院有限公司（建设单位）拟将本项目产生的生活污水委托阳江核电厂处理，阳江核电厂拟接收上述生活污水进行处理。

中广核研究院有限公司

2020年11月24日



阳江核电有限公司

2020年11月24日

