
中国科学院近代物理研究所
甘肃省同位素实验室（一期）变更项目

中国科学院近代物理研究所

二零二六年七月

中国科学院近代物理研究所
甘肃省同位素实验室（一期）变更项目

建设单位名称： 中国科学院近代物理研究所

建设单位法人代表（签名或签章）： 孙志宇

通讯地址： 甘肃省兰州市城关区南昌路 509 号

邮政编码： 730000

联系人： 徐俊奎

电子邮箱： xujunkui@impcas.ac.cn

联系电话： 18509316532

目 录

1 概述	1
1.1 项目名称、地点	1
1.2 项目概况	1
1.2.1 建设单位	1
1.2.2 项目背景和意义	2
1.2.3 本次环评内容	4
1.3 产业政策和规划符合性分析	3
1.4 建设地点	3
1.5 核技术利用现状	2
1.5.1 已获许可情况	2
1.5.2 核技术利用项目环保手续履行情况	2
1.6 编制依据	2
1.6.1 法律法规	2
1.6.2 技术导则、标准	4
1.6.3 其他	4
1.7 评价标准	5
1.7.1 剂量限值和剂量约束值	5
1.7.2 辐射工作场所屏蔽体外剂量率控制水平	6
1.7.3 非密封放射性物质工作场所分级	7
1.7.4 表面污染水平	7
1.7.5 放射性污染物排放限值	8
1.8 评价范围和保护目标	10
1.8.1 评价范围	11
1.8.2 保护目标	11
2 自然环境与社会环境状况	14
2.1 自然环境状况	14
2.1.1 地形地貌	14

2.1.2 地震	14
2.1.3 气候气象	15
2.1.4 水文地质概况	15
2.2 社会经济概况	16
2.2.1 社会发展状况	16
2.2.2 经济发展状况	16
2.2.3 文化、教育和科技	16
2.3 环境质量和辐射现状	17
2.3.1 辐射环境质量现状监测与评价	17
2.3.2 监测内容	17
2.3.3 取样点位及取样方法	17
2.3.4 监测设备	22
2.3.5 监测方法	23
2.3.6 质量保证措施	23
2.3.7 监测结果	24
2.4 场址适宜性评价	30
3 工程分析与源项	32
3.1 项目规模与基本参数	32
3.1.1 加速器隧道	34
3.1.2 靶站/热室	34
3.1.3 超重乙级实验室	35
3.1.4 靶向药物实验室	35
3.1.5 辐射管理中心	35
3.1.6 排风塔	36
3.1.7 配套建筑	36
3.1.8 小结	36
3.2 工作原理及工艺流程	38
3.2.1 基于质子加速器的同位素应用研发	38
3.2.2 超重乙级实验室	79

3.2.3 靶向药物实验室	89
3.2.4 辐射管理中心	105
3.3 工作规划	105
3.4 辐射污染源项分析	107
3.4.1 基于质子加速器的同位素应用研发-加速器装置	107
3.4.2 基于质子加速器的同位素应用研发-靶站/热室	130
3.4.3 超重乙级实验室	138
3.4.4 靶向药物实验室	141
3.4.5 辐射管理中心	144
4 辐射安全与防护设施	145
4.1 辐射工作场所分区	145
4.2 人流物流	147
4.2.1 靶站/热室	147
4.2.2 超重乙级实验室	148
4.2.3 靶向药物实验室	149
4.2.4 辐射管理中心	150
4.3 辐射屏蔽	150
4.3.1 加速器隧道	150
4.3.2 靶站	151
4.3.3 分离系统、超重乙级实验室、靶向药物实验室	152
4.4 人身安全联锁系统	153
4.4.1 系统功能及联锁控制逻辑	153
4.4.2 用户界面	155
4.4.3 系统组成	158
4.4.4 人身安全联锁系统的安全分析	161
4.5 在线辐射监测系统	162
4.5.1 监测布点	162
4.5.2 数据处理与报警系统	167
4.5.3 辐射监测软件	168

4.6 通风系统	169
4.6.1 加速器隧道	169
4.6.2 靶站/热室	170
4.6.3 超重乙级实验室	174
4.6.4 靶向药物实验室	174
4.6.5 辐射管理中心	175
4.7 放射性三废	176
4.7.1 放射性废气	177
4.7.2 放射性废液	177
4.7.3 放射性固体废物	181
5 运行期环境影响分析	185
5.1 建设阶段的环境影响分析	185
5.1.1 施工废气	185
5.1.2 施工噪音	185
5.1.3 施工废水	185
5.1.4 施工垃圾	185
5.2 正常运行的环境影响分析	186
5.2.1 屏蔽体外剂量率计算	186
5.2.2 辐射工作人员受照剂量	220
5.2.3 公众受照剂量	229
5.3 事故工况下的环境影响分析	236
5.3.1 人员误入高辐射区	236
5.3.2 过滤器失效事故	237
5.3.3 物料掉落	239
5.3.4 溶液洒漏	240
5.3.5 人员受照剂量超出年剂量限值	240
5.3.6 冷却水泄漏事故	241
5.3.7 小结	241
6 辐射安全管理	243

6.1 辐射安全与环境保护管理机构	243
6.2 辐射工作人员管理	243
6.3 辐射安全管理制度	244
6.4 辐射监测	244
6.4.1 工作场所监测	245
6.4.2 环境监测	245
6.4.3 个人监测	245
6.4.4 监测设备	249
6.5 辐射事故应急	249
6.6 环保投资一览表	253
6.7 环保竣工验收	253
7 利益-代价分析	257
7.1 利益分析	257
7.2 代价分析	258
8 结论和承诺	260
8.1 结论	260
8.1.1 项目工程概况	260
8.1.2 实践的正当性	260
8.1.3 辐射安全与防护	260
8.1.4 环境影响分析	261
8.1.5 辐射安全管理	261
8.2 承诺与建议	261
8.2.1 承诺	261
8.2.2 建议	262

1 概述

1.1 项目名称、地点

项目名称：中国科学院近代物理研究所甘肃省同位素实验室（一期）变更项目

建设地点：甘肃省兰州新区中国科学院近代物理研究所大科学装置科技创新创业园东北角

建设性质：新建

建设单位：中国科学院近代物理研究所

项目投资：总投资约 54000 万元，其中环保投资约 8000 万元，占总投资的 14.8%。

1.2 项目概况

1.2.1 建设单位

中国科学院近代物理研究所（以下简称“近物所”）是根据 1956 年周总理指示设立的原子核科学研究基地，前身为 1957 年成立的中国科学院兰州物理研究室，1962 年正式使用现名。近代物理所是一个依托大科学装置，开展重离子科学与技术、加速器驱动的先进核能系统研究的基地型研究所。战略定位是建成国际一流的重离子科学与技术、加速器驱动的先进核能技术研究基地。主要研究方向有：原子核物理、原子分子物理、放射生物学、核材料与工艺技术、乏燃料后处理技术、核技术相关材料科学、粒子加速器研究等。

近代物理所先后建成了 1.5 米回旋加速器（SFC，“一五”大科学工程）、大型分离扇回旋加速器（SSC，“七五”大科学工程）、兰州放射性次级束分离器（RIBLL）、兰州重离子加速器冷却储存环（CSR，“九五”大科学工程）等大科学装置，在加速器研制方面拥有雄厚的技术和人才储备。1991 年 8 月，原国家计委批准成立兰州重离子加速器国家实验室，依托近代物理所管理，面向国内外开放。近代物理所还建有甘肃省同位素实验室、甘肃省重离子束辐射医学应用基础重点实验室、甘肃省空间辐射生物学重点实验室、甘肃省重离子创新中心、中国科学院重离子束辐射生物医学重点实验室、中国科学

院高精度核谱学重点实验室、中国科学院离子加速器及质量检验检测工程实验室等，拥有 320kV 高电荷态综合研究平台、大功率电子加速器等重要科研设施及装置，在实验平台方面拥有不可替代的优势。

1.2.2 项目背景和意义

中国科学院近代物理研究所（以下简称“近物所”）在甘肃省兰州市兰州新区中国科学院近代物理研究所大科学装置科技创新创业园内开展甘肃省同位素实验室项目（一期）（以下简称“一期项目”），一期项目旨在创新我国同位素关键技术，解决我国基本依赖进口医用同位素关键技术的瓶颈问题，实现先进放疗技术产业的创新和突破。

2021 年 3 月，一期项目首次取得甘肃省生态环境厅的批复（甘环核发[2021]4 号），2022 年项目因涉及重大变动重新进行了环境影响评价，2022 年 11 月取得《兰州新区生态环境局关于甘肃省同位素实验室（一期）项目变更环境影响报告书的批复》（新环审发[2022]24 号）（附件 1），环评内容主要包括如下：

（1）超重元素合成研究

利用超重加速器、超重乙级实验室和超重实验终端开展超重元素的合成，包括 1 台 I 类射线装置（超重加速器）的使用和一个乙级非密封放射性物质工作场所（超重乙级实验室，使用核素包括 Am-243、Am-241、Nb-95 和 Ta-179）；

（2）基于质子加速器的同位素应用研发

利用质子加速器、靶站和热室区域实现 Ac-225 和 Ra-223 的相关研究，包括 1 台 I 类射线装置（质子加速器）的使用和一个甲级非密封放射性物质工作场所（靶站热室区域）；

（3）靶向药物实验室

靶向药物实验室开展放射性药物研发实验，主要包括显像实验、细胞实验、动物实验，场所为乙级非密封放射性物质工作场所，使用核素包括 Ge-68/Ga-68、Ac-225、Ra-223。

(4) 辐射管理中心

辐射管理中心为整个场所的放射性三废管理中心，各辐射工作场所放射性废气输送至辐射管理中心排风机房经过滤后经排风塔排放，各辐射工作场所放射性废液在场所内分类暂存一段时间后输送至辐射管理中心废液暂存场所进行暂存，各辐射工作场所放射性固体废物在场所内分类暂存一段时间后转移至辐射管理中心放射性固体废物暂存场所进行暂存处理。

上述环评文件中基于质子加速器的同位素应用研发中的质子加速器调试内容以及靶向药物实验室内开展 Ge-68/Ga-68、Ac-225、Ra-223 的使用活动以于 2026 年 7 月 9 日完成辐射安全许可证的申请。

现建设阶段期间辐射工作场所布局、靶站数量和排气口数量等内容进行调整，主要变动内容对照生态环境部发布的《核技术利用建设项目重大变动清单（试行）》对照情况 表 1-1，本次变动属于重大变动，项目需重新开展环境影响评价，根据《建设项目环境影响评价分类管理名录》以及《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》的规定，本项目环境影响评价文件类别确定为编制环境影响报告书。中国原子能科学研究院接受建设单位的委托，负责本项目的环境影响评价工作，委托书见附件 2。

表 1-1 本次变动内容与《核技术利用建设项目重大变动清单（试行）》对照情况

序号	《核技术利用建设项目重大变动清单（试行）》		本次变动内容	是否属于重大变动
1	性质	由核技术利用建设项目变更为其他类别建设项目	不涉及	否
2	建设地点	重新选址	不涉及	否
3		调整辐射工作场所位置（包括总平面布置变化）导致调整后评价范围内出现新的环境保护目标	不涉及	否
4	规模	放射源类别升高	不涉及	否
5		射线装置类别升高	不涉及	否
6		非密封放射性物质工作场所级别升高	靶站/热室甲级密封放射性物质工作场所等级不变，超重乙级实验室增加核素种类，场所等级仍为乙级，靶向药物实验室增加核素种类，场所等级仍为乙级。	否
7		放射源的总活度或放射源数量增加 50%及以上	不涉及	否

8		射线装置额定功率或输出剂量率或中子产生率增大 50%及以上	质子加速器能量由 100MeV 增至 115MeV，额定输出功率未增大 50% 及以上。	否
9		放射性核素活度或种类增加导致非密封放射性物质工作场所的日等效最大操作量增加 50%及以上	不涉及	否
10		增加新的辐射工作场所	不涉及	否
11	工艺	生产工艺或使用方式变化导致不利影响加重，含主要工艺装置、配套设备及放射性三废处理设施任何一项变化	靶站数量从 1 个增至 2 个；分离系统工作箱室组合由 1 套增至 2 套。	是
12		辐射防护措施改变导致不利影响加重	不涉及	否
13	辐射安全与防护措施	辐射安全联锁系统的联锁方式、联锁逻辑发生改变导致联锁功能减弱	不涉及	否
14		非密封放射性物质工作场所功能和布局变化导致增加控制区	不涉及	否
15		新增放射性液态流出物排放口或气载流出物排放口	靶站 2 中 T2 热室放射性废气经过滤后在靶站屋面烟囱排放，此烟囱为新增气载流出物排放口	是

1.2.3 本次环评内容

已获批项目内容包括超重元素合成研究、基于质子加速器的同位素应用研发、超重乙级实验室、靶向药物实验室以及辐射管理中心，本次环评内容不再包括超重元素合成研究中超重加速器的使用，主要包括基于质子加速器的同位素应用研发、超重乙级实验室、靶向药物实验室以及辐射管理中心。此外，基于质子加速器的同位素应用研发中的质子加速器调试内容以及靶向药物实验室内开展 Ge-68/Ga-68、Ac-225、Ra-223 的使用活动以于 2026 年 7 月 9 日完成辐射安全许可证的申请，上述内容不再开展评价，但场所内辐射工作场所等级的评定、辐射影响均考虑叠加。本次环评具体内容如下：

(1) 基于质子加速器的同位素应用研发

利用质子加速器的质子束轰击钍靶发生散裂反应产生 Ac-225、Ra-223 等一些列核素，通过分离纯化操作去除杂质核素，最终得到 Ac-225、Ra-223 产品。基于质子加速器的同位素应用研发主要包括质子加速器、靶站和分离系

统，质子加速器位于加速器隧道，用途为产生并加速质子，靶站和分离系统位于靶站/热室，加速后的质子在靶站 1/2 辐照室内轰击钽靶，辐照后的钽靶在分离系统工作箱室内开展分离、纯化和质检等操作。

本项内容涉及 1 台 I 类射线装置的使用，新增 1 处甲级非密封放射性物质工作场所，包括 Ac-225、Ra-223 放射性同位素的生产、销售和使用活动。

表 1-2 本次评价中射线装置主要技术指标

射线装置名称	规格型号	主要参数 (能量/管电压, 管电流)	生产厂家	数量	类别	所在位置
质子加速器	自研	质子束最大能量 115MeV, 最大流 1mA, 总功率 115kW	中国科学院近代物理研究所	1	I	加速器隧道、靶站 1
	自研	质子束最大能量 115MeV, 最大流强 0.25 mA, 总功率 28.75kW		1		加速器隧道、靶站 2

表 1-3 基于质子加速器的同位素应用研发核素操作量一览表

序号	核素 ¹		操作因子	操作方式	毒性因子	日最大操作量, Bq	日等效最大操作量, Bq	年最大操作天数（批次）	年操作量, Bq	活动种类	操作场所/来源	
1	靶材	Th-232	0.01 ²	表面有污染的固体, 特别危险的操作	0.0 ₁	4.05E+05	4.05E+05	20	8.10E+06	使用	靶站 1 靶材, 靶站区域自制/外购	
		Th-232	0.01 ²	表面有污染的固体, 特别危险的操作	0.0 ₁	5.44E+05	5.44E+05	12	6.53E+06		靶站 2 靶材, 靶站区域自制/外购	
2	目标核素	Ac-225	0.1	表面有污染的固体, 简单操作	10	1.59E+10	1.59E+12	160	2.54E+12	生产、销售、使用	靶站 1、分离系统	
		Ra-223	0.1	表面有污染的固体, 简单操作	10	4.22E+10	4.22E+12	160	6.75E+12			
3	目标核素	Ac-225	0.1	表面有污染的固体, 简单操作	10	1.71E+10	1.71E+12	24	4.12E+11		靶站 2、分离系统	
		Ra-223	0.1	表面有污染的固体, 简单操作	10	7.02E+10	7.02E+12	24	1.68E+12			
总计							8.73E+12 ³	甲级				
备注：1. 辐射工作场所仅考虑目标核素日最大操作量时已评定为甲级非密封放射性物质工作场所，且最终作为产品进行生产、销售和使用的核素仅限于 Ac-225 和 Ra-223,因此，非密封放射性物质工作场所分级过程中主要考虑目标核素及靶材核素，辐射屏蔽设计与辐射防护措施评价中，则综合考虑目标核素和杂质核素的辐射影响； 2.制靶过程中涉及高温操作，保守按表面有污染的固体的特别危险的操作考虑； 3.辐照后靶件在分离系统进行操作期间，保守按照 2 套工作箱室同时操作考虑，即操作 4 片 T1 辐照后靶件，或操作 2 片 T2 辐照后靶件，分离系统区域同时最多开展两套箱室的操作,根据计算可知,该区域同时操作 2 片 T2 辐照后靶件期间日等效最大操作量较大，整个场所日等效最大操作量为分离系统处理 2 片 T2 辐照后靶件及靶站区域进行靶材的处理日等效最大操作量的叠加。												

(2) 超重乙级实验室

超重乙级实验室包括放射性同位素制靶、放射性同位素的回收与提纯、超重化学研究与微流体萃取实验研究,主要操作的放射性同位素包括 Am-243、Am-241、Cf-252、Cf-251、Cf-249、Cm-248、Cm-244、Pu-244、Pu-240、Ta-182、Ta-179、Nb-95。其中 Am-243、Am-241、Cf-252、Cf-251、Cf-249、Cm-248、Cm-244、Pu-244、Pu-240 主要用于制靶及回取, Ta-182、Ta-179、Nb-95 主要用于微流体溶剂萃取实验。

本项内容新增 1 处乙级非密封放射性物质工作场所,包括 Am-243、Am-241、Cf-252、Cf-251、Cf-249、Cm-248、Cm-244、Pu-244、Pu-240、Ta-182、Ta-179、Nb-95 放射性同位素的使用。

表 1-4 超重乙级实验室核素操作量一览表

实验类型	序号	核素	物理、化学性状	日最大操作量, Bq	操作因子	毒性因子	日等效最大操作量, Bq	年最大操作量, Bq	操作方式	活动种类	操作场所	来源
靶件制备 ₁	1	²⁴³ Am	液体	2.66E+07	1	10	2.66E+08	1.06E+09	简单操作	使用	超重乙级实验室非密封放射性工作场所	外购
	2	²⁴¹ Am	液体	1.00E+07	1	10	1.00E+08	4.00E+08	简单操作	使用		
	3	²⁵² Cf	固体	1.00E+06	0.1	10	1.00E+08	4.00E+07	简单操作	使用		
	4	²⁵¹ Cf	固体	1.00E+06	0.1	10	1.00E+08	4.00E+07	简单操作	使用		
	5	²⁴⁹ Cf	固体	1.00E+06	0.1	10	1.00E+08	4.00E+07	简单操作	使用		
	6	²⁴⁸ Cm	液体	1.00E+07	1	10	1.00E+08	4.00E+08	简单操作	使用		
	7	²⁴⁴ Cm	液体	1.00E+07	1	10	1.00E+08	4.00E+08	简单操作	使用		
	8	²⁴⁴ Pu	液体	1.00E+07	1	1	1.00E+07	4.00E+08	简单操作	使用		
	9	²⁴⁰ Pu	液体	1.00E+07	1	10	1.00E+08	4.00E+08	简单操作	使用		
回取实验 ₂	1	²⁴³ Am	固体	2.61E+06	0.01	10	2.61E+09	2.61E+07	特别危险	使用		从近物所南昌路园区转运至
	2	²⁴¹ Am	固体	9.80E+05	0.01	10	9.80E+08	9.80E+06	特别危险	使用		
	3	²⁵² Cf	固体	9.80E+04	0.1	10	9.80E+06	9.80E+05	简单操作	使用		

	4	²⁵¹ Cf	固体	9.80E+04	0.1	10	9.80E+06	9.80E+05	简单操作	使用	超重 乙级 实验室
	5	²⁴⁹ Cf	固体	9.80E+04	0.1	10	9.80E+06	9.80E+05	简单操作	使用	
	6	²⁴⁸ Cm	固体	9.80E+05	0.1	10	9.80E+07	9.80E+06	简单操作	使用	
	7	²⁴⁴ Cm	固体	9.80E+05	0.1	10	9.80E+07	9.80E+06	简单操作	使用	
	8	²⁴⁴ Pu	固体	9.80E+05	0.1	10	9.80E+07	9.80E+06	简单操作	使用	
	9	²⁴⁰ Pu	固体	9.80E+05	0.1	10	9.80E+07	9.80E+06	简单操作	使用	
微流溶剂 萃取实验 和超重化 学实验 ³	10	⁹⁵ Nb	粉末	3.70E+06	0.001	0.1	3.70E+08	1.85E+08	特别危险	使用	外购
	11	¹⁸² Ta	粉末	3.70E+06	0.001	0.1	3.70E+08	1.85E+08	特别危险	使用	
	12	¹⁷⁹ Ta	粉末	3.70E+06	0.001	0.1	3.70E+08	1.85E+08	特别危险	使用	
场所等级							2.61E+09	乙级			
注：1. 本项目制靶过程中，主要为靶材在沉积槽中进行操作，不涉及高温操作，根据《辐射防护分册 第三分册》按简单操作考虑； 2. 本项目回取实验中，Am-241/Am-243 涉及蒸干操作，根据《辐射防护分册 第三分册》保守特别危险操作考虑，其他核素均为冷操作，根据《辐射防护分册 第三分册》按简单操作考虑； 3.微流溶剂萃取实验和超重化学实验涉及粉末的操作，根据《辐射防护分册 第三分册》保守特别危险操作考虑， 4.根据实验安排，超重乙级实验室非密封放射性工作场所每天仅操作一种核素的一种实验。											

（3） 靶向药物实验室

靶向药物实验室开展放射性药物研发实验，主要包括显像实验、细胞实验、动物实验，Ge-68/Ga-68、Ac-225、Ra-223 的使用活动涵盖已于 2026 年 7 月获得辐射安全许可证的申请内容，本次环评新增 Lu-177、F-18、Tb-161 和 Tc-99m 的使用，新增核素后场所仍为乙级非密封放射性物质工作场所。

表 1-5 靶向药物实验室核素操作量一览表

序号	核素	日最大操作量，Bq	操作因子	毒性因子	日等效最大操作量，Bq	年操作量，Bq	活动种类	操作场所	备注
1	Ra-223	5.29E+07	1	10	5.29E+08	1.32E+09	使用	靶向药物实验室	辐射安全许可证中已许可内容
2	Ac-225	5.29E+07	1	10	5.29E+08	2.64E+09			
3	Ga-68	5.29E+07	1	0.01	5.29E+05	6.61E+09			
4	Ge-68 (Ga-68)	7.40E+07	100	0.1	7.40E+04	7.40E+07			
5	Lu-177	2.00E+08	1	0.1	2.00E+07	4.00E+10			本次环评新增内容
6	F-18	1.00E+08	1	0.01	1.00E+06	1.50E+10			
7	Tb-161	2.00E+08	1	0.1	2.00E+07	4.00E+10			

8	Tc-99m	1.00E+08	1	0.01	1.00E+06	1.50E+10			
场所等级					1.10E+09	乙级			

(4) 辐射管理中心

辐射管理中心为整个场所的放射性三废管理中心，各辐射工作场所放射性废气输送至辐射管理中心排风机房经过滤后经排风塔排放，各辐射工作场所放射性废液在场所内分类暂存一段时间后输送至辐射管理中心废液暂存场所进行暂存，各辐射工作场所放射性固体废物在场所内分类暂存一段时间后转移至辐射管理中心放射性固体废物暂存场所进行暂存处理。

1.3 产业政策和规划符合性分析

根据《产业结构调整指导目录》（2024 年本），本项目属于其中鼓励类第六项“核能”第 4 条“同位素、加速器及辐射应用技术开发，辐射防护技术开发与监测设备制造”项目，因此，本项目符合国家产业政策。

1.4 建设地点

本项目建设地点位于兰州市兰州新区中国科学院近代物理研究所大科学装置科技创新创业园东北角，地理位置见图 1-1，大科学装置科技创新创业园位于兰州新区洮河街（纬五路）南侧、鸣沙山路（经六路）东侧、渭河街（纬七路）北侧、祁连山大道（经七路）西侧区域。

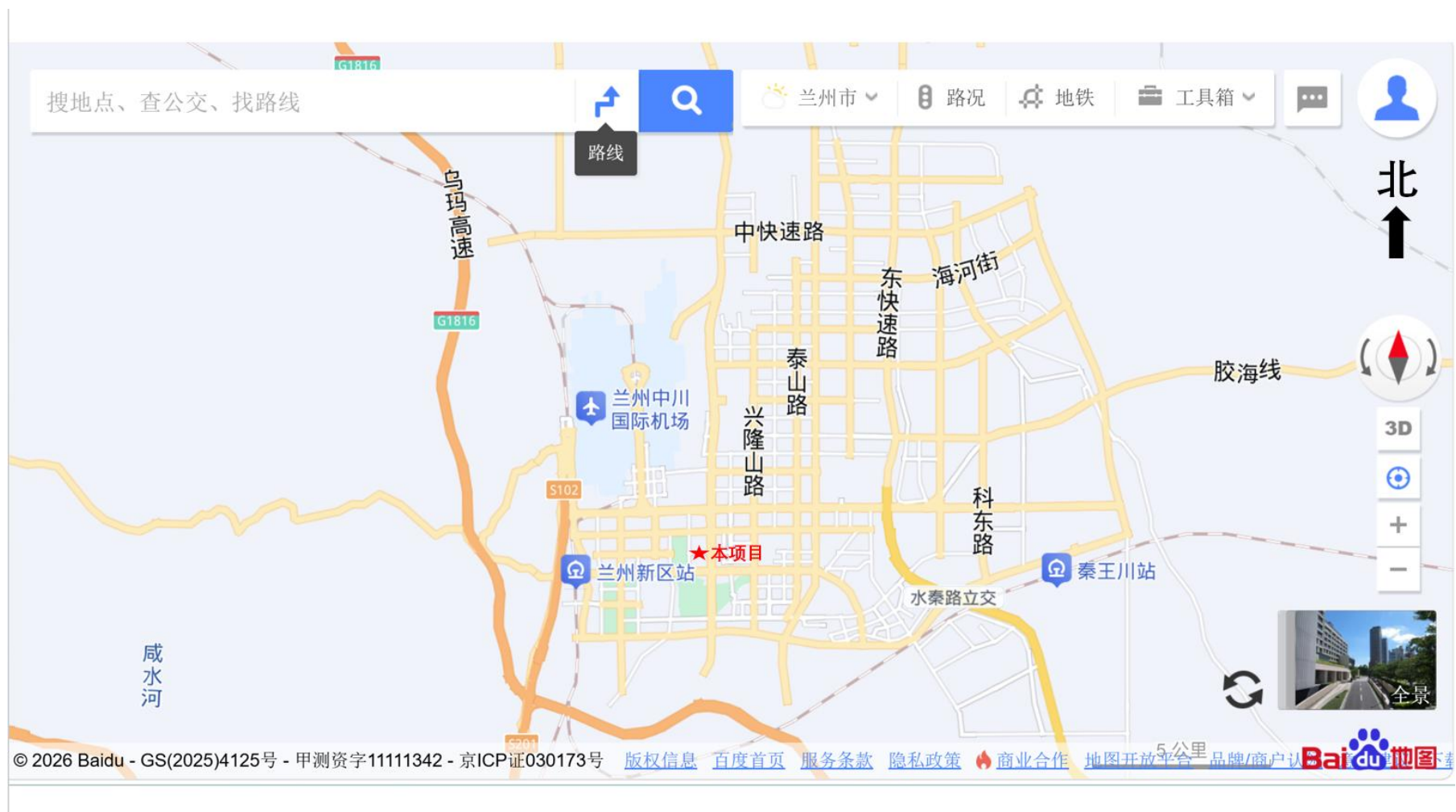


图 1-1 本项目地理位置图

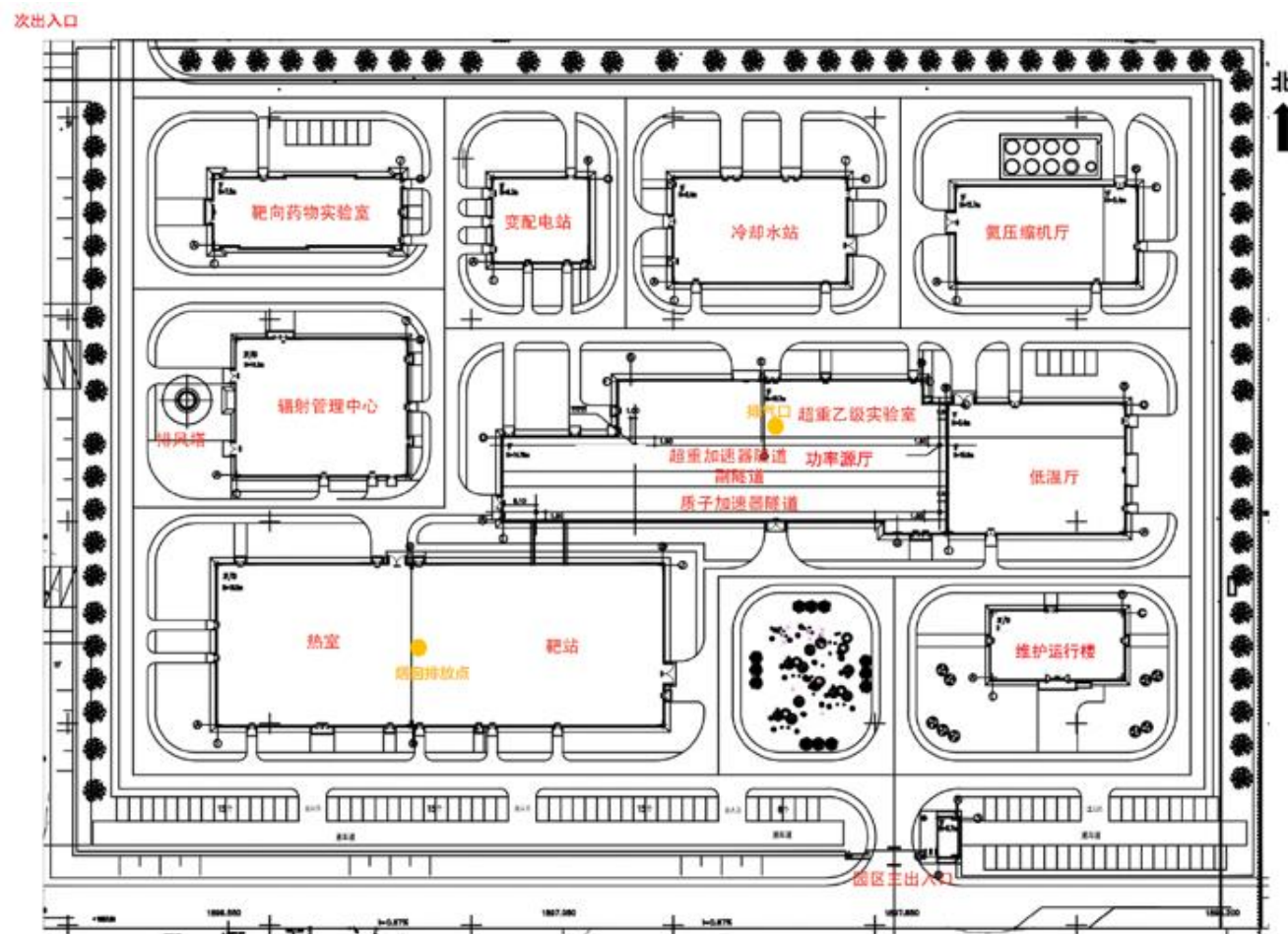


图 1-2 本项目总体布局

1.5 核技术利用现状

1.5.1 已获许可情况

本项目建设单位近代物理所已持有生态环境部颁发的辐射安全许可证（国环辐证[00298]，见附件3），有效期至2028年12月31日。许可的种类和范围是：使用Ⅰ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ类放射源；生产、销售、使用Ⅱ类射线装置；使用Ⅰ类、Ⅲ类射线装置；销售（含建造）Ⅰ类射线装置；使用非密封放射性物质，乙级、丙级非密封放射性物质工作场所。

1.5.2 核技术利用项目环保手续履行情况

近物所在兰州新区目前核技术利用项目的环保手续履行情况如下。

表 1-6 近物所兰州新区核技术利用项目环评审批和环保验收情况统计

序号	项目名称	环评批复号	辐射安全许可证、环保竣工验收情况
1	甘肃省同位素实验室项目（一期）	新环审发[2022]24号	质子加速器调试内容以及靶向药物实验室 Ge-68/Ga-68、Ac-225、Ra-223 的使用活动，已于 2026 年 7 月取得辐射安全许可，拟开展竣工环保验收。
2	多功能电子束辐照装置生产、销售和使用建设项目	新环审发[2023]23号	安装 2 台加速器主机(1 台 2.5MeV 电子加速器、1 台 0.5MeV 电子加速器)，机房一层辐照室设 1 个真空辐照终端和 2 个普通辐照终端，已于 2026 年 7 月取得辐射安全许可，拟开展竣工环保验收。
3	同轴腔电子辐照加速器建设项目	新环审发[2021]9号	建设电子辐照加速器屏蔽室，屏蔽室内安装一台同轴腔电子辐照加速器，已于 2026 年 7 月取得辐射安全许可，拟开展竣工环保验收。

1.6 编制依据

1.6.1 法律法规

（1）《中华人民共和国生态环境法典》（2026年3月12日第十四届全国人民代表大会第四次会议通过）；

（2）《中华人民共和国环境保护法》（中华人民共和国主席令第9号，

2015 年 1 月 1 日施行）；

（3）《中华人民共和国环境影响评价法》（全国人民代表大会常务委员会，2018 年 12 月 29 日施行）；

（4）《中华人民共和国放射性污染防治法》（中华人民共和国主席令第 6 号，2003 年 10 月 1 日）；

（5）《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》（国务院令第 709 号，2019 年 3 月 2 日修正版）；

（6）《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》（生态环境部令第 20 号，2021 年 1 月 4 日修订版）；

（7）《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》（环境保护部令第 18 号，2011 年 5 月 1 日施行）；

（8）《放射性物品运输安全监督管理办法》（环境保护部令 第 38 号，2016 年 5 月 1 日施行）；

（9）《关于发布<射线装置分类>的公告》（环境保护部 国家卫生和计划生育委员会公告 2017 年第 66 号，2017 年 12 月 5 日）；

（10）《建设项目环境保护管理条例》（国务院令第 682 号，2017 年 10 月 1 日起施行）；

（11）《建设项目环境影响评价分类管理名录（2021 年版）》（生态环境部令 第 16 号，2021 年 1 月 1 日起施行）；

（12）《产业结构调整指导目录》（2024 年本）；

（13）《建设项目环境影响报告书（表）编制监督管理办法》（生态环境部令第 9 号，2019 年 11 月 1 日）；

（14）《关于核技术利用辐射安全与防护培训和考核有关事项的公告》（生态环境部公告 2019 年第 57 号，2019 年 12 月 23 日）；

（15）《发布<建设项目竣工环境保护验收暂行办法>的公告（国环规环评[2017]4 号，2017 年 11 月 22 日起施行）；

(16) 《甘肃省辐射污染防治条例》，甘肃省人民代表大会常务委员会公告第 50 号，2020 年 12 月 3 日。

1.6.2 技术导则、标准

(1) 《辐射环境保护管理导则 核技术利用建设项目 环境影响评价文件的内容和格式》（HJ10.1-2016）；

(2) 《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）；

(3) 《辐射环境监测技术规范》（HJ61-2021）；

(4) 《环境 γ 辐射剂量率测量技术规范》（HJ1157-2021）；

(5) 《粒子加速器辐射防护规定》（GB5172-85）；

(6) 《开放型放射性物质实验室辐射防护设计规范》（EJ380-1989，1989 年 10 月 1 日起实施）；

(7) 《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）；

(8) 《操作非密封源的辐射防护规定》（GB 11930-2010）；

(9) 《放射性废物管理规定》（GB14500-2002）；

(10) 《可免于辐射防护监管的物料中放射性核素活度浓度》（GB27742-2011）；

(11) 《放射工作人员健康要求及监护规范》（GBZ 98-2020）；

(12) 《职业性外照射个人监测规范》（GBZ128-2019）；

(13) 《职业性内照射个人监测规范》（GBZ 129-2016）；

(14) 《污水综合排放标准》（GB8978-1996）。

1.6.3 其他

(1) 已批复的《中国科学院近代物理研究所甘肃省同位素实验室(一期)变更项目环境影响报告书》(2022 年);

(2) IAEA. Safety Reports Series NO.19. Generic Models for Use in Assessing the Impact of Discharges of Radioactive Substances to the Environment. IAEA,2001;

(3) (美) 帕特森 (H.W.Patterson), (美) 托马斯 (R.H.Thomas) 著; 刁会昌等译. 加速器保健物理[M].北京, 原子能出版社.1983;

(4) 建设单位提供的与本项目相关的管理制度和其他技术资料。

1.7 评价标准

1.7.1 剂量限值 and 剂量约束值

1.7.1.1 剂量限值

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

(1) 职业照射

应对任何工作人员职业照射水平进行控制, 使之不超过下述限值:

审管部门决定连续 5 年的年平均有效剂量(但不可作任何追溯性平均), 20mSv。

(2) 公众照射

实践使公众中关键人群组的成员所受到的平均剂量估计值不应超过下述限值:

年有效剂量, 1mSv。

1.7.1.2 剂量约束值

根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002），本次评价以职业照射剂量限值的 1/4 即 5mSv/a 作为职业人员的年剂量约束值，以公众照射剂量限值的 1/10 即 0.1mSv/a 作为公众人员的年剂量约束值。

1.7.2 辐射工作场所屏蔽体外剂量率控制水平

（1）射线装置

根据本项目的辐射防护设计资料，射线装置所在辐射工作场所屏蔽墙体外剂量率控制水平按表 1-7 执行。

此外，根据文献《恒健质子治疗装置的辐射与屏蔽设计》（吴青彪等，南方能源建设，2016 年第 3 卷第 3 期），同时参考日本 J-PARC 以及中国散裂中子源的辐射防护设计，当混凝土与土壤边界处瞬发辐射剂量率低于 5.5mSv/h 时，可忽略土壤和地下水的感生放射性。因此，本次评价以“5mSv/h”作为各辐射工作场所地板外表面与土壤交界处的剂量率控制水平，具体见表 1-7。

表 1-7 本项目射线装置辐射工作场所屏蔽体外剂量率控制水平

工作场所	功能区域	位置描述（居留因子）	剂量率控制水平
本项目射线装置辐射工作场所屏蔽墙体外	四侧墙体外、屋顶外、防护门外	居留因子 $T \geq 1/2$	2.5 μ Sv/h
		居留因子 $T < 1/2$	10 μ Sv/h
	地板外表面与土壤交界处	射线装置辐射工作场所地板外表面与土壤交界处	5mSv/h

（2）非密封放射性物质工作场所

对于非密封放射性物质工作场所，参照《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）以及复函中有关规定：

“6.1.5 距离工作场所内各控制区内房间防护门、观察窗和墙壁外表面 30 cm 处的周围剂量当量率应小于 2.5 $\mu\text{Sv/h}$ ，如屏蔽墙外的房间为人员偶尔居留的设备间等区域，其周围剂量当量率应小于 10 $\mu\text{Sv/h}$ 。

6.1.6 放射性药物合成和分装的箱体、通风柜等设备应设有屏蔽结构，以保证设备外表面 30cm 处人员操作位的周围剂量当量率小于 2.5 $\mu\text{Sv/h}$ ，放射性药物合成和分装箱体非正对人员操作位表面的周围剂量当量率小于 25 $\mu\text{Sv/h}$ 。

1.控制区内工作人员经常性停留的场所（人员居留因子 $\geq 1/2$ ），周围剂量当量率应小于 2.5 $\mu\text{Sv/h}$ 。

2.控制区内工作人员较少停留或无需到达的场所（人员居留因子 $< 1/2$ ），周围剂量当量率应小于 10 $\mu\text{Sv/h}$ 。”

1.7.3 非密封放射性物质工作场所分级

根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002），非密封放射性物质工作场所按日等效最大操作量的大小进行分级，见表 1-8。

表 1-8 非密封放射性物质工作场所分级

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

1.7.4 表面污染水平

根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002），工作人员体表、内衣、工作服、以及工作场所的设备和地面等表面放射性污染的控制应遵循附录 B 表 B11 所规定的限制要求。详见表 1-9。

表 1-9 工作场所的放射性表面污染控制水平

表面类型	α 放射性物质,		β 放射性物质, Bq/cm ²
	极毒性	其他	

工作台、设备、墙壁、地面	控制区	4	40	40
	监督区	0.4	4	4
工作服、手套、工作鞋	控制区和监督区	0.4	0.4	4
手、皮肤、内衣、工作袜		0.04	0.04	0.4

1.7.5 放射性污染物排放限值

1.7.5.1 放射性废气

参照《开放性放射性物质实验室辐射防护设计规范》（EJ380-1989）：

“10.1 从事开放性放射性物质工作的各类设备和装置，设计上应采用密封技术。根据其工作特性分别提出密封要求，防止放射性液体泄漏和放射性气体及气溶胶逸出；

10.2 操作易挥发的高毒、极毒放射性物质及产生大量放射性气体和气溶胶的工作，应尽可能把污染源局限于较小的工作容积内并高度密封，限制可能被污染的体积和表面；

10.3 气流流向应是从放射性污染可能性小的方向流向污染可能性大的方向(从白区流向红区)，各区之间维持一定的压差。”

1.7.5.2 放射性废水

本项目产生的放射性废水主要包括加速器活化冷却水、冲洗废液和工艺废液等，上述放射性废液需在暂存场所进行暂存，满足暂存时长后，经检测满足要求[根据《污水综合排放标准》（GB8978-1996），车间或者车间处理设施排放口处总 α 和总 β 排放限值分别为 1 Bq/L 和 10Bq/L。]，关键放射性核素活度浓度低于豁免水平，并经审管部门认可后的废液可排放。对于不可解控的放射性废液，暂存后委托有资质单位进行处置。

放射性废液的排放参照《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）的 8.6.2 条对放射性废液排放做出的规定如下：

不得将放射性废液排入普通下水道，除非经审管部门确认是满足下列条件的低放废液，方可直接排入流量大于 10 倍排放流量的普通下水道，并应对每次排放作好记录：

a) 每月排放的总活度不超过 $10\text{ALI}_{\min}$ （ $\text{ALI}_{\min}$ 是相应于职业照射的食入和吸入 ALI 值中的较小者，其具体数值可按 B1.3.4 和 B1.3.5 条的规定获得）；

b) 每一次排放的活度不超过 $1\text{ALI}_{\min}$ ，并且每次排放后不少于 3 倍排放量的水进行冲洗。

1.7.5.3 放射性固体废物

（1）射线装置

（1）射线装置

加速器运行期间可能产生的放射性固体废物主要为结构部件。

本项目放射性固体废物清洁解控参照《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）附录 A 中 A2.1 的规定“任何时间段内在进行实践的场所存在的给定核素的总活度或在实践中使用的给定核素的活度浓度不超过表 A1 所给出的或审管部门所规定的豁免水平”执行。

GB18871-2002 附录 A 表 A1 中给出的与本项目相关的放射性核素的豁免活度浓度和活度如表 1-10 所示。对于存在一种以上放射性核素的情况，仅当各放射性核素的活度或活度浓度与其相应的豁免总活度或豁免活度浓度之比的小于 1 时，方可给予豁免。放射性固体废物经监测后低于豁免水平的方可作为一般固体废物处理。

表 1-10 放射性核素的豁免活度浓度与豁免活度

核素	活度浓度, Bq/g	活度, Bq	核素	活度浓度, Bq/g	活度, Bq
^3H	1E+06	1E+09	^{56}Mn	1E+01	1E+05
^7Be	1E+03	1E+07	^{52}Fe	1E+01	1E+06
^{35}S	1E+05	1E+08	^{55}Fe	1E+04	1E+06
^{37}Ar	1E+06	1E+08	^{59}Fe	1E+01	1E+06
^{42}K	1E+02	1E+06	^{55}Co	1E+01	1E+06
^{43}K	1E+01	1E+06	^{56}Co	1E+01	1E+05
^{45}Ca	1E+04	1E+07	^{57}Co	1E+02	1E+06
^{47}Ca	1E+01	1E+06	^{58}Co	1E+01	1E+06
^{46}Sc	1E+01	1E+06	^{60}Co	1E+01	1E+05
^{47}Sc	1E+02	1E+06	^{61}Co	1E+02	1E+06
^{48}Sc	1E+01	1E+05	^{59}Ni	1E+04	1E+08
^{48}V	1E+01	1E+05	^{63}Ni	1E+05	1E+08
^{51}Cr	1E+03	1E+07	^{65}Ni	1E+01	1E+06
^{52}Mn	1E+01	1E+05	^{64}Cu	1E+02	1E+06
^{54}Mn	1E+01	1E+06	^{65}Zn	1E+01	1E+06

(2) 非密封放射性物质工作场所

放射性固体废物主要包括废靶件结构件、通风过滤器芯、一次性耗材及劳保用品等，先暂存于场所内设置的固体废物暂存场所，后续转移至辐射管理中心，建设单位定期监测，根据监测结果开展以下活动：

对于可解控的放射性固体废物，参照《核医学辐射防护与安全要求》（HJ1188-2021）中有关规定：经监测辐射剂量率满足所处环境本底水平， α 污染小于 $0.08\text{Bq}/\text{cm}^2$ 、 β 表面污染小于 $0.8\text{Bq}/\text{cm}^2$ 的，可对废物进行清洁解控并作为一般固体废物进行处理。

对于不可解控的放射性固体废物，暂存后委托有资质单位进行处置。

1.8 评价范围和保护目标

1.8.1 评价范围

根据《辐射环境保护管理导则 核技术利用建设项目 环境影响评价文件的内容和格式》(HJ10.1-2016)“1.5 节评价范围和保护目标”中的相关规定“放射性同位素生产项目(放射性药物生产除外)的评价范围半径不小于 3km,放射性药物生产及其他非密封放射性物质工作场所项目的评价范围,甲级取半径 500m 的范围,射线装置应用项目的评价范围,通常取装置所在实体屏蔽物边界外 50m 的范围,对于 I 类射线装置的项目可根据环境影响的范围适当扩大”,本项目的定位为利用加速器开展多种放射性同位素的研发、生产和应用,且使用 I 类射线装置,确定本项目评价范围为本项目辐射工作场所所在建筑四周边界向外 3km 范围内的区域,见图 1-3。

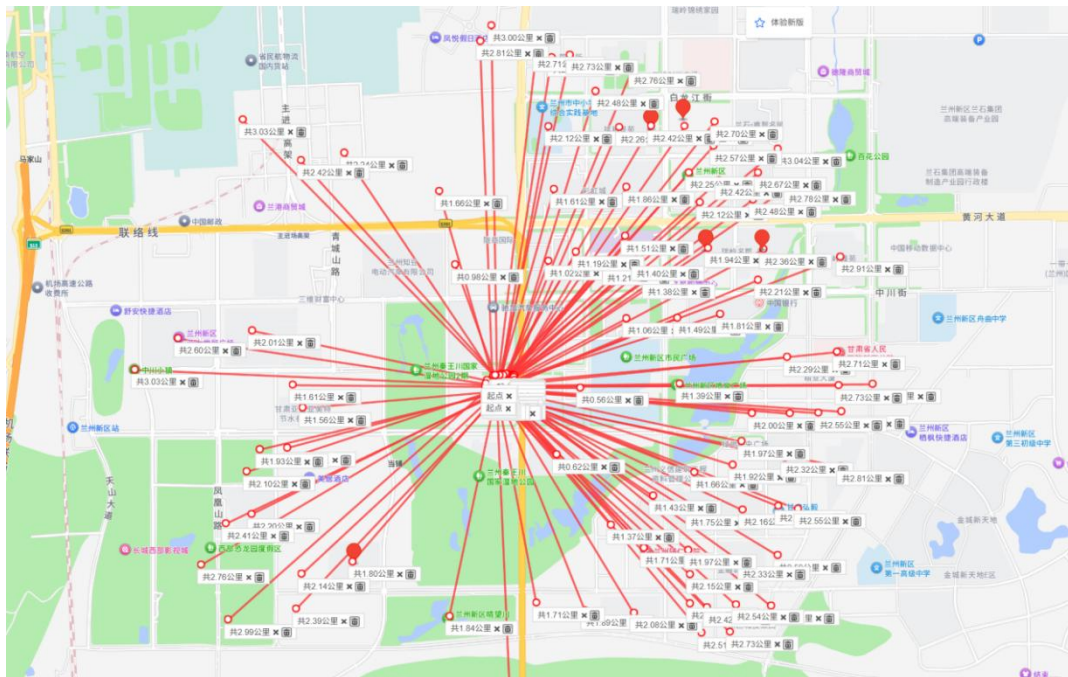


图 1-3 辐射环境影响评价范围 and 环境保护目标示意图

1.8.2 保护目标

本项目评价范围内的环境保护目标以本项目相关工作人员、周边相关场所周围其他工作人员以及在相关场所周围活动的公众成员为主，具体见表1-11。

表 1-11 本项目辐射评价范围内环境保护目标情况

方位	周围环境情况	与项目边界最短距离	照射类型	规模	照射途径
本项目边界北侧	国家创业孵化基地	420m	公众照射	约 1200 人	感生放射性
本项目边界北侧	汇丰科技园	430m	公众照射	约 3300 人	感生放射性
本项目边界北侧	吉利家苑	980m	公众照射	约 860 人	感生放射性
本项目边界北侧	云尚华庭	1020m	公众照射	约 5000 人	感生放射性
本项目边界北侧	东航金城映象	1190m	公众照射	约 3200 人	感生放射性
本项目边界北侧	引大家园	1210m	公众照射	约 180 人	感生放射性
本项目边界北侧	建投·时光	1400m	公众照射	约 2200 人	感生放射性
本项目边界北侧	兰州瑞岭国际商业广场	1510m	公众照射	流动人群	感生放射性
本项目边界北侧	彩虹城	1620m	公众照射	约 2000 人	感生放射性
本项目边界北侧	红玉新村	1660m	公众照射	约 1900 人	感生放射性
本项目边界北侧	兰州新区中川商务中心	2120m	公众照射	流动人群	感生放射性
本项目边界北侧	兰州市第十一中学新区分校	2120m	公众照射	约 1500 人	感生放射性
本项目边界北侧	民航甘肃空管分局空管小区	2240m	公众照射	约 1100 人	感生放射性
本项目边界北侧	祥和景苑	2260m	公众照射	约 5700 人	感生放射性
本项目边界北侧	甘肃省计量研究院	2420m	公众照射	约 50 人	感生放射性
本项目边界北侧	兰州新区公安消防支队	2480m	公众照射	约 160 人	感生放射性
本项目边界北侧	兰州新区第九小学	2570m	公众照射	约 2000 人	感生放射性
本项目边界北侧	甘肃煤矿安全监察局安全技术中心	2670m	公众照射	约 150 人	感生放射性
本项目边界北侧	瑞岭雍和郡	2700m	公众照射	约 1400 人	感生放射性
本项目边界北侧	国家电网(新区供电公司)	2710m	公众照射	约 190 人	感生放射性
本项目边界北侧	甘肃昆仑燃气(兰州新区分公司)	2730m	公众照射	约 40 人	感生放射性
本项目边界北侧	甘肃省消防救援总队训练和战勤保障支队	2760m	公众照射	约 65 人	感生放射性
本项目边界东北侧	兰州兰园	220m	公众照射	约 7500 人	感生放射性
本项目边界东侧	甘肃国际会展中心	170m	公众照射	流动人群	感生放射性
本项目边界东侧	甘肃省经济社会发展展览馆	569m	公众照射	流动人群	感生放射性
本项目边界东侧	兰州新区产业孵化大厦	1060m	公众照射	约 2000 人	感生放射性
本项目边界东侧	璀璨时代	1430m	公众照射	约 2800 人	感生放射性
本项目边界东侧	亚太·清湖湾	1490m	公众照射	约 1900 人	感生放射性
本项目边界东侧	瑞岭翠苑	1810m	公众照射	约 2300 人	感生放射性
本项目边界东侧	瑞岭名郡	1940m	公众照射	约 9000 人	感生放射性
本项目边界东侧	兰州新区瑞岭名郡学校	2210m	公众照射	约 3500 人	感生放射性
本项目边界东侧	绿地智慧金融城	2290m	公众照射	约 3500 人	感生放射性
本项目边界东侧	甘肃弘毅绿地实验学校	2410m	公众照射	约 1800 人	感生放射性

本项目边界东侧	状元尊府	2550m	公众照射	约 1200 人	感生放射性
本项目边界东侧	兰州新区第十小学校	2550m	公众照射	约 1500 人	感生放射性
本项目边界东侧	琨宇·书香名府	2670m	公众照射	约 3500 人	感生放射性
本项目边界东侧	甘肃省人民医院新区分院	2710m	公众照射	约 650 人	感生放射性
本项目边界东侧	兰州新区实验小学	2730m	公众照射	约 3400 人	感生放射性
本项目边界东侧	兰州市第六十一中学新区分校	2780m	公众照射	约 1600 人	感生放射性
本项目边界东侧	瑞岭雅苑	2910m	公众照射	约 6700 人	感生放射性
本项目边界南侧	检验检测中心	120m	公众照射	约 50 人	感生放射性
本项目边界南侧	朱雀湖别墅区	415m	公众照射	约 2500 人	感生放射性
本项目边界南侧	朱雀湖	620m	公众照射	约 4500 人	感生放射性
本项目边界南侧	翡翠园	1370m	公众照射	约 150 人	感生放射性
本项目边界南侧	兰州市公安局交通管理支队兰州新区大队	1710m	公众照射	约 180 人	感生放射性
本项目边界南侧	兰州辅仁医院	1710m	公众照射	约 100 人	感生放射性
本项目边界南侧	瑞岭御景苑	1800m	公众照射	约 7500 人	感生放射性
本项目边界南侧	兰州新区晴望川民俗文化村	1840m	公众照射	流动人群	感生放射性
本项目边界南侧	碧桂园	1890m	公众照射	约 6000 人	感生放射性
本项目边界南侧	方家坡社区	1970m	公众照射	约 4000 人	感生放射性
本项目边界南侧	宗家梁学校	2140m	公众照射	约 1350 人	感生放射性
本项目边界南侧	湖南名苑	2150m	公众照射	约 4500 人	感生放射性
本项目边界南侧	云锦华府	2280m	公众照射	约 4000 人	感生放射性
本项目边界南侧	海亮·时光印	2390m	公众照射	约 2800 人	感生放射性
本项目边界南侧	兰州新区第十二小学	2420m	公众照射	约 1800 人	感生放射性
本项目边界南侧	瑞辰·金悦府	2510m	公众照射	约 4000 人	感生放射性
本项目边界南侧	七号御景	2540m	公众照射	约 1000 人	感生放射性
本项目边界南侧	方家坡	2730m	公众照射	约 4000 人	感生放射性
本项目边界西侧	秦王川国家湿地公园二期	390m	公众照射	流动人群	感生放射性
本项目边界西侧	甘肃亚盛亚美特节水有限公司	1560m	公众照射	约 100 人	感生放射性
本项目边界西侧	甘肃新西北碳素科技有限公司	1610m	公众照射	约 100 人	感生放射性
本项目边界西侧	新中花园	1720m	公众照射	约 800 人	感生放射性
本项目边界西侧	金润嘉苑	1930m	公众照射	约 1800 人	感生放射性
本项目边界西侧	中国铁建大桥局	2010m	公众照射	约 100 人	感生放射性
本项目边界西侧	瑞岭悦府	2100m	公众照射	约 4300 人	感生放射性
本项目边界西侧	宗家梁小区	2200m	公众照射	约 8000 人	感生放射性
本项目边界西侧	兰州新区第一人民医院	2410m	公众照射	约 800 人	感生放射性

2 自然环境与社会环境状况

2.1 自然环境状况

2.1.1 地形地貌

项目建设场地处于兰州新区秦王川盆地，秦王川盆地形成于第三纪，在中更新世晚期由于受东西两侧边界断裂挤压逆冲活动的影响而成为一个封闭式的断陷盆地。中更新世晚期～晚更新世早期金强河及黑马圈河沿盆地两侧古河道穿过秦王川盆地，注入黄河，从而使盆地内堆积了较厚的冲洪积砂砾石层。晚更新世晚期～全新世早期由于坪城盆地的持续抬升，河流改道，使秦王川盆成为一个干旱盆地。兰州新区也是祁连山脉东延之余脉插入陇西盆地的交错地带，属典型的黄土高原丘陵地貌类型，平川、梁峁、沟壑及河谷地貌发育。整个地域宽阔，地势由西北向东南倾斜，东西两面是低矮黄土山丘，南北长约60km，东西最宽处约20km，平均海拔高度1910m。兰州新区地势由NE 向SW倾斜，北部为低山，东西南三面为低缓的黄土丘陵，相对高差为40～60m。盆地基底为上第三系（N）河湖相及山麓相的碎屑堆积物，厚约400～500m，以淡紫红色、桔红色泥岩、泥质砂岩、砂砾岩为主。其上为冲洪积砾石层，砾石层厚5～30m，砾石的分选性和磨圆度较好。上覆次生黄土，土质多为黄绵土，表土层平均厚度在0.5～3m 之间，自然植被稀疏。

2.1.2 地震

根据《建筑抗震设计规范》（GB50011-2016）有关规定，该场地抗震设防烈度为 7 度，设计基本地震加速度值为 0.15g，设计地震分组为第三组，设计特征周期为 0.45s，建筑场地类别属II类，场地属对建筑抗震一般地段。拟建场地位于断陷盆地边缘的黄土丘陵地带，20m 深度范围内无地下水，无饱和土分布。

2.1.3 气候气象

场地处于兰州市秦王川盆地，水文区划属兰州北部干旱区，大陆性季风气候特征显著。兰州新区深居内陆，远离海洋，受地形和大气环流影响，气候具

有明显的温带大陆性季风气候特征，冬季寒冷干燥，春季多风少雨，夏无酷暑，秋季温凉。根据甘肃省气象局《关于兰州新区建设应重视气象灾害风险防范的意见》甘气发（2011）206 号文件提出的兰州新区的主要气象特征为：兰州新区年平均降水量218.7mm；年平均气温为6.9℃，年平均相对湿度54.9%，年平均风速1.9m/s，风向偏北，约占32%。另外，根据《兰州新区近地层风场时空特征分析》中4个测风塔布设位置，本项目拟建场所距离该文献中兰州新区东南角测风塔位置最近，由文献资料可知，新区东南角，春夏两季以东北风为主，出现频率为11%~12%，秋冬两季以东风为主，出现频率分别为10.8%和11.5%。夏季东南风明显增加，出现频率接近10%。

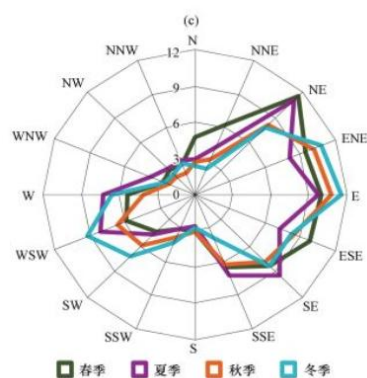


图 2-1 兰州新区东南角 2017 年 70m 高度四季风向玫瑰图

2.1.4 水文地质概况

兰州新区属黄河流域，庄浪河、大通河、咸水河、李麻沙沟、大沙沟、倒

水沟、牛可沟等七条独立流出县境的河（沟）中，只有大通河和庄浪河属常年性河流，其他为泉水排泄或季节性洪水河。根据甘肃省建筑设计研究

院有限公司 2020 年 7 月完成的《兰州新区大装置科创园甘肃省同位素实验室项目勘察》（详细勘察、工程号 2020-109），场地内稳定地下水埋深 1.4~6.9m，层面高程为 1891.44~1892.62m 之间。地下水位埋藏较浅，主要赋存于透水性较强的粗颗粒砾砂层和透水性弱的粉土层中；粉质粘土层具有一定的隔水性，其下的地下水具有一定的承压性；泥岩在不扰动情况下为相对隔水层。粉土中渗透系数 $K=0.01\text{m/d}$ ，砾砂层中渗透系数 $K=25\text{m/d}$ ，属潜水类型。场地地下水主要接受地下径流、大气降水等补给，排泄方式主要以径流排泄、人工开采和蒸发消耗为主。

2.2 社会经济概况

2.2.1 社会发展状况

兰州新区辖彩虹城、栖霞、文曲、小横路等 4 个中心社区 18 个社区、72 个行政村。2025 年底，实有人口突破 76 万人。

2.2.2 经济发展状况

2025 年，兰州新区完成地区生产总值 500.5 亿元、增长 14.5%，一二三产增加值分别增长 5.2%、20.8%、9%，三次产业结构为 1.58：47.78：50.64。规上工业增加值增长 23.9%。一般公共预算收入完成 33.9 亿元、增长 5%。社会消费品零售总额完成 84.3 亿元、增长 10.2%。城乡居民人均可支配收入分别为 46304 元、19332 元，增长 4.7%、6.5%。

2.2.3 文化、教育和科技

兰州新区内有全国最大的“工匠摇篮”—兰州新区科教园区，已入驻院校 19 所、师生 16.5 万人。获批创建国家绿色金融改革创新试验区、普惠金融示范区，赋能产业转型升级和实体经济发展。现有中科院大科学装置检验检测中心、同位素实验室、新型裂变核燃料实验室等各类创新平台 193 个，创新型企业超 200 家，高新技术企业累计达到 184 户，全社会研发投入强度达

3.8%。区域科创综合服务平台“甘智汇”建成投运，1.5 万米超深海洋钻机、3.5 微米极薄铜箔、医用同位素等 22 项技术达到国际领先，稀土配合物发光材料、动物疫苗等 180 项技术实现国内领跑。入选第二批“科创中国”试点城市。

2.3 环境质量和辐射现状

2.3.1 辐射环境质量现状监测与评价

中国原子能科学研究院辐射监测与评价实验室于 2020 年 6 月~8 月对拟建甘肃省同位素实验室场址及周边 500 米范围进行了辐射现场监测和环境样品取样实验室分析，2022 年 5 月~6 月针对项目变更内容补充了环境样品取样和分析，监测报告附件 4。目前场所内直线加速器处于调试状态，非密封放射性物质工作场所未涉及核素的使用活动，场所辐射本底现状未发生变化，因此仍沿用原辐射环境监测报告。

2.3.2 监测内容

根据本项目主要辐射污染因子的类别和特征，本次辐射环境现状调查选取的监测对象为土壤和地表水。辐射环境现状监测对象和监测项目列于表 2-1。

表 2-1 监测对象和项目

序号	监测对象	监测项目
一期项目（2020）		
1	外照射剂量率	γ 辐射剂量率，中子周围剂量当量率
2	气溶胶	总 α ，总 β
3	土样	总 α ，总 β
4	水样	总 α ，总 β
变更补充监测（2022）		
1	土壤	Ra-223、I-131、Be-7
2	地表水	Ra-223、I-131、H-3、Be-7

2.3.3 取样点位及取样方法

一期项目环境地表 γ 剂量率和中子剂量率监测点位示意图见图 2-2~图 2-4, 气溶胶、水样和土壤样品取样点位示意图见图 2-5, 此次环境介质样品补充监测的取样点位见图 2-6。

环境地表 γ 剂量率和中子剂量率: 现场测量采用网格布点的方法, 网格点约为 20m×25m 网格, 测量点交叉点位上。仪器开机预热稳定后, 在距离地面 1m 高度处, 记录 10 个数, 取平均值作为测量结果。

气溶胶取样: 根据当地气象特点, 本项目所在地区春夏两季以东北风为主, 秋冬两季以东风为主, 结合本项目现场条件, 分别在春夏上风向东北角、下风向西南角各布设 1 个气溶胶取样点, 另外在场所东南角设置 1 个气溶胶取样点。气溶胶样品采集使用森雅 JL150 大流量空气采样器, 滤材选用对直径 0.5 μ m 粒子捕集效率 99.95%以上的 TD/G-99B 聚丙烯滤膜(可完全灰化)。采样器布设在开阔的平地上, 周围 100m 范围内无高大建筑, 采样口高出基础面 1.5m, 以 2m³/min 的流量采样, 取样量约为 10000m³, 并同时测量温湿度和气压。观察取样流量变化及时更换滤膜。每次采样详细记录样品详细信息, 并在样品袋上注明样品编号, 以便样品交接。

水样: 根据现场调查, 本项目评价区内无水井等地下水取样点, 地表水体只有秦川湿地公园内水域, 因此, 本项目水样布设点为有地下水补给的秦川湿地公园二期中的水体。样品容器选用聚乙烯塑料桶。采集工具先用洗涤剂除去油污、用自来水冲洗干净, 再用 10%硝酸或者盐酸洗刷, 用自来水冲洗干净后使用。往盛水容器中按 10mL 酸/L 水样加入浓 HNO₃ 使水样 pH 为 1.5 左右, 避免器壁对放射性的吸附(监测 ³H 的水样品不能加酸)。地表水在湿地公园水池中取样, 取样量为 25L。

土壤: 在场所四周及场址各布设一个取样点。使用土壤采集器, 在 10×10m² 范围内, 采用梅花五点法采集。条件不具备时用蛇型布样采集。每点采 10×10cm² 的表层土样(1~5cm), 在现场充分混合, 去除石头、草根等杂

物后取 3kg 装入双层聚乙烯塑料袋内保存。采集的土壤样品主要为表层土壤，每个样品的采样量一般为 3kg。



图 2-2 场址周边 500m 点位



图 2-3 场址周边相关监测点位

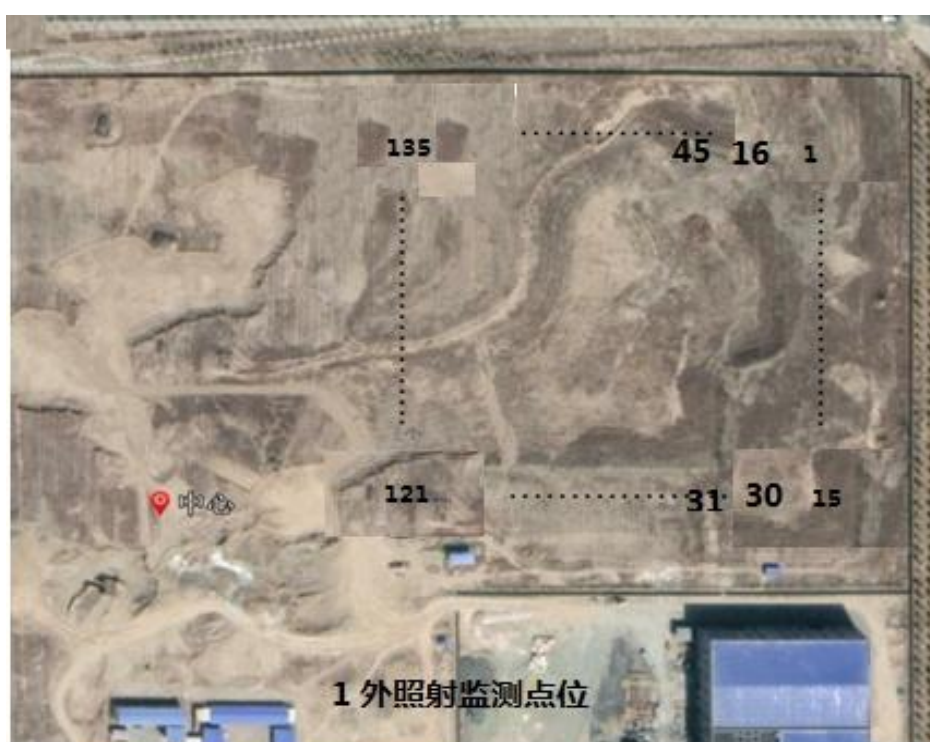


图 2-4 场址监测点位



图 2-5 气溶胶、水及土壤取样点示意图



图 2-6 水样及土壤取样点示意图

2.3.4 监测设备

本次监测使用的仪器设备详见表 2-2。

表 2-2 仪器设备及性能指标

设备名称	设备型号	设备编号	检定有效期
一期项目监测			
辐射测量仪	FH40G-X+ FHZ672 E-10	023290 +0700	监测期间均在有效期内
中子周围剂量 当量率仪	LB123+LB6411	178982-4092/1501	
HPGe γ 谱仪	GEM35P4-83	104687	
液闪谱仪	QUANTULUS1220	2200266	
低本底 α 、 β 测 量仪	BH1227	1003	
α 谱仪	7200-08	090927	
补充监测			
高纯锗 γ 能谱测 量系统	GR5021	FS-015	2021.08.09-2023.08.08

电子天平	YH-C30002	FS-030	2021.09.30-2022.09.29
低本底液闪测量仪	Quantulus GCT 6220	FS-017	2021.08.09-2023.08.08
电子天平	BSM-120.4	FS-018	2021.09.30-2022.09.29

2.3.5 监测方法

本次监测使用的仪器设备详见表 2-3。

表 2-3 监测方法

序号	监测对象	监测方法	标准依据
1	外照射	采用便携式监测仪表，以定点的测量方式进行。监测时，便携式监测仪表离地 1m 高，每点测量 10 次，取平均值作为监测结果。	《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002） 《环境γ辐射剂量率测量技术规范》（HJ 1157-2021）； 《高纯锗γ能谱分析通用方法》（GB/T11713-2015）； 《土壤中放射性核素的γ能谱分析方法》（GB/T 11743-2013）；
2	环境样品	在甘肃省同位素实验室场址及周围环境进行气溶胶、土壤和水样样品的获取，送实验室按照国家标准或行业标准进行核素分析。	《水质总α放射性的测定 厚源法》（HJ 898-2017）； 《水质总β放射性的测定 厚源法》（HJ 899-2017）； 《水中放射性核素的γ能谱分析方法》（GB/T 16140—2018）； 《空气中放射性核素的γ能谱分析方法》（WS/T 184-2017）；

2.3.6 质量保证措施

- （1）监测单位具备所监测项目的资质；
- （2）合理布设监测点位，保证各监测点位布设的科学性和可比性；
- （3）针对各类样品的采集，监测单位制定了操作规程，要求参加采样人员在实施采样前充分了解，并在采样过程中严格执行；
- （4）采样器符合国家技术标准的规定，使用前须检验并确认其性能良好后方可采样，保证采样器和样品容器的清洁，防止交叉污染；

(5) 采样后按规定方法进行暂存或预处理，并尽快送往实验室，做好样品交接工作；

(6) 监测方法采用国家有关部门颁布的标准，监测人员经考核并持有合格证书上岗；

(7) 监测仪器每年定期经计量部门检定，检定合格后方可使用；

(8) 每次测量前、后均检查仪器的工作状态是否正常；

(9) 由专业人员按操作规程操作仪器，并做好记录；

(10) 监测报告严格实行三级审核制度，经过校验、审核，最后由技术总负责审定。

2.3.7 监测结果

2.3.7.1 一期项目监测结果（2020 年）

外照射剂量率监测结果见表 2-2、表 2-3、表 2-4，气溶胶、土样及水样监测结果见表 2-5。

表 2-4 场址周边 500m 外照射剂量率监测结果

监测 点位	点位描述	γ 辐射剂量率* (nGy/h)	中子周围剂量当量率 (μ Sv/h)
1	西 50m	66.2 $\pm$ 2.6	<LLDn
2	西 250m	68.0 $\pm$ 1.0	<LLDn
3	西 500m	72.2 $\pm$ 0.5	<LLDn
4	北 50m	67.8 $\pm$ 0.6	<LLDn
5	北 250m	66.4 $\pm$ 0.5	<LLDn
6	北 500m	67.5 $\pm$ 0.5	<LLDn
7	南 50m	69.1 $\pm$ 1.1	<LLDn
8	南 250m	68.7 $\pm$ 1.1	<LLDn
9	南 500m	69.0 $\pm$ 0.7	<LLDn
10	东 50m	67.2 $\pm$ 1.4	<LLDn
11	东 250m	67.5 $\pm$ 0.4	<LLDn
12	东 500m	69.4 $\pm$ 0.4	<LLDn
13	中心	73.9 $\pm$ 0.5	<LLDn
注：*监测结果含宇宙射线响应值；LLDn=0.05 μ Sv/h。			

表 2-5 场址周边敏感点照射剂量率监测结果

监测 点位	点位描述	γ 辐射剂量率* (nGy/h)	中子周围剂量当量率 (μ Sv/h)
1	东在建建筑	72.0 $\pm$ 0.5	<LLDn
2	东北兰州壹号	71.8 $\pm$ 0.6	<LLDn
3	汇丰科技园	71.9 $\pm$ 0.5	<LLDn
4	全国创业孵化示范基地	71.1 $\pm$ 0.6	<LLDn
5	西侧湿地公园	71.3 $\pm$ 0.5	<LLDn
6	朱雀湖小区	72.4 $\pm$ 0.5	<LLDn
7	检验检测中心	72.1 $\pm$ 0.4	<LLDn
注：*监测结果含宇宙射线响应值；LLDn=0.05 μ Sv/h。			

表 2-6 场址内部外照射剂量率监测结果

监测 点位	点位描述	γ 辐射剂量率* (nGy/h)	中子周围剂量当量率 (μ Sv/h)
1	东北角第一排 1	65.5 $\pm$ 1.5	<LLDn
2	东北角第一排 2	61.9 $\pm$ 2.2	<LLDn
3	东北角第一排 3	62.5 $\pm$ 1.6	<LLDn
4	东北角第一排 4	67.8 $\pm$ 1.9	<LLDn
5	东北角第一排 5	68.7 $\pm$ 1.7	<LLDn
6	东北角第一排 6	67.2 $\pm$ 2.8	<LLDn
7	东北角第一排 7	63.6 $\pm$ 1.8	<LLDn
8	东北角第一排 8	69.4 $\pm$ 3.8	<LLDn
9	东北角第一排 9	66.8 $\pm$ 2.1	<LLDn
10	东北角第一排 10	66.0 $\pm$ 1.1	<LLDn
11	东北角第一排 11	66.0 $\pm$ 0.5	<LLDn
12	东北角第一排 12	64.2 $\pm$ 1.1	<LLDn
13	东北角第一排 13	60.2 $\pm$ 1.0	<LLDn
14	东北角第一排 14	59.8 $\pm$ 1.3	<LLDn
15	东北角第一排 15	65.5 $\pm$ 4.3	<LLDn
16	东北角第二排 1	56.5 $\pm$ 4.4	<LLDn
17	东北角第二排 2	61.4 $\pm$ 5.4	<LLDn
18	东北角第二排 3	65.1 $\pm$ 6.4	<LLDn
19	东北角第二排 4	66.8 $\pm$ 1.6	<LLDn
20	东北角第二排 5	65.1 $\pm$ 0.5	<LLDn
21	东北角第二排 6	74.2 $\pm$ 1.0	<LLDn
22	东北角第二排 7	68.2 $\pm$ 1.1	<LLDn
23	东北角第二排 8	69.7 $\pm$ 1.9	<LLDn
24	东北角第二排 9	67.5 $\pm$ 3.0	<LLDn
25	东北角第二排 10	70.4 $\pm$ 0.9	<LLDn
26	东北角第二排 11	68.7 $\pm$ 2.0	<LLDn
27	东北角第二排 12	66.8 $\pm$ 1.0	<LLDn
28	东北角第二排 13	72.2 $\pm$ 0.8	<LLDn
29	东北角第二排 14	68.7 $\pm$ 1.8	<LLDn
30	东北角第二排 15	66.6 $\pm$ 3.4	<LLDn

监测 点位	点位描述	γ 辐射剂量率* (nGy/h)	中子周围剂量当量率 (μ Sv/h)
31	东北角第三排 1	68.2 $\pm$ 0.6	<LLDn
32	东北角第三排 2	66.5 $\pm$ 0.9	<LLDn
33	东北角第三排 3	65.5 $\pm$ 0.7	<LLDn
34	东北角第三排 4	67.0 $\pm$ 0.8	<LLDn
35	东北角第三排 5	68.1 $\pm$ 1.4	<LLDn
36	东北角第三排 6	63.3 $\pm$ 1.6	<LLDn
37	东北角第三排 7	68.3 $\pm$ 0.7	<LLDn
38	东北角第三排 8	68.1 $\pm$ 0.8	<LLDn
39	东北角第三排 9	67.6 $\pm$ 0.8	<LLDn
40	东北角第三排 10	67.7 $\pm$ 0.9	<LLDn
41	东北角第三排 11	67.3 $\pm$ 0.5	<LLDn
42	东北角第三排 12	65.4 $\pm$ 0.5	<LLDn
43	东北角第三排 13	62.0 $\pm$ 0.6	<LLDn
44	东北角第三排 14	67.3 $\pm$ 1.1	<LLDn
45	东北角第三排 15	65.6 $\pm$ 0.8	<LLDn
46	东北角第四排 1	65.3 $\pm$ 0.6	<LLDn
47	东北角第四排 2	62.6 $\pm$ 0.7	<LLDn
48	东北角第四排 3	60.6 $\pm$ 0.4	<LLDn
49	东北角第四排 4	62.0 $\pm$ 0.5	<LLDn
50	东北角第四排 5	65.4 $\pm$ 0.5	<LLDn
51	东北角第四排 6	61.6 $\pm$ 0.6	<LLDn
52	东北角第四排 7	60.1 $\pm$ 0.4	<LLDn
53	东北角第四排 8	63.3 $\pm$ 0.4	<LLDn
54	东北角第四排 9	65.1 $\pm$ 0.4	<LLDn
55	东北角第四排 10	61.4 $\pm$ 0.7	<LLDn
56	东北角第四排 11	62.0 $\pm$ 0.4	<LLDn
57	东北角第四排 12	64.3 $\pm$ 0.5	<LLDn
58	东北角第四排 13	63.9 $\pm$ 0.9	<LLDn
59	东北角第四排 14	64.2 $\pm$ 0.7	<LLDn
60	东北角第四排 15	60.9 $\pm$ 0.3	<LLDn
61	东北角第五排 1	64.8 $\pm$ 0.8	<LLDn
62	东北角第五排 2	65.3 $\pm$ 0.5	<LLDn
63	东北角第五排 3	64.7 $\pm$ 0.5	<LLDn
64	东北角第五排 4	62.3 $\pm$ 0.4	<LLDn
65	东北角第五排 5	62.4 $\pm$ 0.5	<LLDn
66	东北角第五排 6	62.4 $\pm$ 0.7	<LLDn
67	东北角第五排 7	62.6 $\pm$ 0.3	<LLDn
68	东北角第五排 8	61.4 $\pm$ 0.7	<LLDn
69	东北角第五排 9	63.6 $\pm$ 1.5	<LLDn
70	东北角第五排 10	62.7 $\pm$ 0.5	<LLDn
71	东北角第五排 11	64.3 $\pm$ 0.8	<LLDn
72	东北角第五排 12	64.3 $\pm$ 0.4	<LLDn
73	东北角第五排 13	67.1 $\pm$ 1.1	<LLDn
74	东北角第五排 14	68.0 $\pm$ 0.7	<LLDn

监测 点位	点位描述	γ 辐射剂量率* (nGy/h)	中子周围剂量当量率 (μ Sv/h)
75	东北角第五排 15	67.1 $\pm$ 1.1	<LLDn
76	东北角第六排 1	67.4 $\pm$ 0.5	<LLDn
77	东北角第六排 2	67.5 $\pm$ 0.5	<LLDn
78	东北角第六排 3	62.8 $\pm$ 0.6	<LLDn
79	东北角第六排 4	66.8 $\pm$ 0.9	<LLDn
80	东北角第六排 5	65.5 $\pm$ 0.6	<LLDn
81	东北角第六排 6	64.8 $\pm$ 0.4	<LLDn
82	东北角第六排 7	62.2 $\pm$ 0.7	<LLDn
83	东北角第六排 8	66.5 $\pm$ 0.6	<LLDn
84	东北角第六排 9	63.7 $\pm$ 0.6	<LLDn
85	东北角第六排 10	62.6 $\pm$ 0.5	<LLDn
86	东北角第六排 11	60.7 $\pm$ 0.6	<LLDn
87	东北角第六排 12	62.5 $\pm$ 0.5	<LLDn
88	东北角第六排 13	65.7 $\pm$ 0.6	<LLDn
89	东北角第六排 14	69.4 $\pm$ 0.9	<LLDn
90	东北角第六排 15	69.1 $\pm$ 0.5	<LLDn
91	东北角第七排 1	68.4 $\pm$ 0.3	<LLDn
92	东北角第七排 2	67.1 $\pm$ 0.7	<LLDn
93	东北角第七排 3	66.4 $\pm$ 0.7	<LLDn
94	东北角第七排 4	66.5 $\pm$ 0.6	<LLDn
95	东北角第七排 5	65.5 $\pm$ 0.5	<LLDn
96	东北角第七排 6	65.3 $\pm$ 0.7	<LLDn
97	东北角第七排 7	64.4 $\pm$ 0.5	<LLDn
98	东北角第七排 8	61.8 $\pm$ 0.6	<LLDn
99	东北角第七排 9	61.4 $\pm$ 0.4	<LLDn
100	东北角第七排 10	65.6 $\pm$ 0.4	<LLDn
101	东北角第七排 11	65.9 $\pm$ 1.0	<LLDn
102	东北角第七排 12	65.6 $\pm$ 0.4	<LLDn
103	东北角第七排 13	66.4 $\pm$ 0.6	<LLDn
104	东北角第七排 14	62.5 $\pm$ 0.4	<LLDn
105	东北角第七排 15	66.3 $\pm$ 0.4	<LLDn
106	东北角第八排 1	65.0 $\pm$ 0.6	<LLDn
107	东北角第八排 2	65.0 $\pm$ 0.8	<LLDn
108	东北角第八排 3	65.8 $\pm$ 0.9	<LLDn
109	东北角第八排 4	67.0 $\pm$ 0.8	<LLDn
110	东北角第八排 5	67.7 $\pm$ 0.7	<LLDn
111	东北角第八排 6	67.4 $\pm$ 0.6	<LLDn
112	东北角第八排 7	67.0 $\pm$ 0.8	<LLDn
113	东北角第八排 8	68.0 $\pm$ 0.7	<LLDn
114	东北角第八排 9	67.1 $\pm$ 0.8	<LLDn
115	东北角第八排 10	66.6 $\pm$ 0.5	<LLDn
116	东北角第八排 11	64.5 $\pm$ 0.5	<LLDn
117	东北角第八排 12	63.1 $\pm$ 0.8	<LLDn
118	东北角第八排 13	64.7 $\pm$ 0.7	<LLDn

监测 点位	点位描述	γ 辐射剂量率* (nGy/h)	中子周围剂量当量率 (μ Sv/h)
119	东北角第八排 14	64.4 $\pm$ 0.8	<LLDn
120	东北角第八排 15	65.1 $\pm$ 1.0	<LLDn
121	东北角第九排 1	67.8 $\pm$ 0.6	<LLDn
122	东北角第九排 2	68.6 $\pm$ 0.7	<LLDn
123	东北角第九排 3	68.4 $\pm$ 0.5	<LLDn
124	东北角第九排 4	67.8 $\pm$ 0.8	<LLDn
125	东北角第九排 5	71.1 $\pm$ 0.7	<LLDn
126	东北角第九排 6	69.6 $\pm$ 0.9	<LLDn
127	东北角第九排 7	66.9 $\pm$ 0.9	<LLDn
128	东北角第九排 8	67.9 $\pm$ 0.8	<LLDn
129	东北角第九排 9	68.4 $\pm$ 0.6	<LLDn
130	东北角第九排 10	67.9 $\pm$ 0.9	<LLDn
131	东北角第九排 11	68.1 $\pm$ 0.8	<LLDn
132	东北角第九排 12	69.2 $\pm$ 0.4	<LLDn
133	东北角第九排 13	68.0 $\pm$ 1.0	<LLDn
134	东北角第九排 14	66.7 $\pm$ 0.9	<LLDn
135	东北角第九排 15	66.2 $\pm$ 0.5	<LLDn
注：*监测结果含宇宙射线响应值；LLDn=0.05 μ Sv/h。			

表 2-7 气溶胶、土样及水样监测结果

样品编号	检测项目	结果	备注
2020008-20200604-场址 东南角（气溶胶样）	总 α	$\leq$ LD=5.8E-05 Bq/m ³	-
	总 β	(5.32 $\pm$ 0.15) E-04 Bq/m ³	-
2020008-20200604-场址 东北角（气溶胶样）	总 α	$\leq$ LD=5.6E-05 Bq/m ³	-
	总 β	(1.05 $\pm$ 0.02) E-03 Bq/m ³	-
2020008-20200604-场址 西南角（气溶胶样）	总 α	$\leq$ LD=7.7E-05 Bq/m ³	-
	总 β	(1.07 $\pm$ 0.02) E-03 Bq/m ³	-
2020008-20200604-场址 东周界外（土壤样）	总 α	$\leq$ LD=3.9E+02 Bq/kg	-
	总 β	(7.63 $\pm$ 0.53) E+02 Bq/kg	-
2020008-20200604-场址 西周界外（土壤样）	总 α	$\leq$ LD=3.7E+02 Bq/kg	-
	总 β	(1.14 $\pm$ 0.07) E+03 Bq/kg	-
2020008-20200604-场址 南周界外（土壤样）	总 α	$\leq$ LD=3.6E+02 Bq/kg	-
	总 β	(6.88 $\pm$ 0.64) E+02 Bq/kg	-
2020008-20200604-场址 北周界外（土壤样）	总 α	$\leq$ LD=2.6E+02 Bq/kg	-
	总 β	(4.48 $\pm$ 0.43) E+02 Bq/kg	-
2020008-20200604-场址 周界内（土壤样）	总 α	$\leq$ LD=2.6E+02 Bq/kg	-
	总 β	(5.63 $\pm$ 0.44) E+02 Bq/kg	-
2020008-20200604-场址 附近湿地（水样）	总 α	$\leq$ LD=1.3 Bq/L	-
	总 β	$\leq$ LD=4.9E-01 Bq/L	-

由表 2-2、表 2-3、表 2-4 可知，场址周边 500 米 γ 辐射剂量率在（66.2～73.9）nGy/h 范围内，中子周围剂量当量率均小于仪表探测限；周边敏感点监测点位辐射剂量率在（71.1～72.4）nGy/h 范围内，中子周围剂量当量率均小于仪表探测限；场区内部东北角 γ 辐射剂量率在（60.1～74.2）nGy/h 范围内，中子周围剂量当量率均小于仪表探测限。由表 2-5 可知，气溶胶样品总 β 检测结果在 $5.32\text{E-}04\sim 1.07\text{E-}03\text{Bq/m}^3$ ，其余检测项目均小于探测限；土样总 β 检测结果在 $4.48\text{E+}02\sim 1.14\text{E+}03\text{Bq/m}^3$ ，其余检测项目均小于探测限；水样 ^{210}Po 检测结果为 $1.31\text{E-}02\text{Bq/L}$ ，其余检测项目结果均小于探测限。

2.3.7.2 补充监测（2022 年）

（1）土壤

本项目拟建场址及周围环境的土壤样品监测结果见表 2-8。

表 2-8 土壤样品分析结果

样品名称	样品编号	核素名称	检测结果* (Bq/kg)	备注
建设厂址西侧土样	FS2022006-001	Be-7	5.11	样品中核素活度浓度校正参考时间为 2022 年 5 月 25 日。
		I-131	$<5.88\times 10^{-1}$	
		Ra-223	<3.57	
建设厂址北侧土样	FS2022006-002	Be-7	<4.90	样品中核素活度浓度校正参考时间为 2022 年 5 月 26 日。
		I-131	$<5.75\times 10^{-1}$	
		Ra-223	<3.30	
建设厂址东侧土样	FS2022006-003	Be-7	<4.52	样品中核素活度浓度校正参考时间为 2022 年 5 月 27 日。
		I-131	$<6.00\times 10^{-1}$	
		Ra-223	<3.09	
建设厂址南侧土样	FS2022006-004	Be-7	<4.57	样品中核素活度浓度校正参考时间为 2022 年 5 月 29 日。
		I-131	$<5.91\times 10^{-1}$	
		Ra-223	<3.21	
建设厂址西侧 500m 处土样	FS2022006-005	Be-7	<4.70	样品中核素活度浓度校正参考时间为 2022 年 5 月 30 日。
		I-131	$<6.12\times 10^{-1}$	
		Ra-223	<3.11	
建设厂址北侧 500m 处土样	FS2022006-006	Be-7	<5.07	样品中核素活度浓度校正参考时间为 2022 年 5 月 31 日。
		I-131	$<6.40\times 10^{-1}$	
		Ra-223	<3.74	
建设厂址东	FS2022006	Be-7	<4.91	样品中核素活度浓度校正

侧 500m 处土样	-007	I-131	$<6.32 \times 10^{-1}$	参考时间为 2022 年 6 月 11 日。
		Ra-223	<3.95	
建设厂址南侧 500m 处土样	FS2022006-008	Be-7	<4.96	样品中核素活度浓度校正参考时间为 2022 年 6 月 9 日。
		I-131	$<6.40 \times 10^{-1}$	
		Ra-223	<3.78	

*注：置信度：95%；“<”后值为测量活时间 24h 时，该核素检测的最小探测下限。

（2）地表水

本项目拟建场址周围环境的地表水样品 γ 放射性核素活度浓度监测结果见表 2-9，水中氚活度浓度的监测结果见表 2-10。

表 2-9 水样中 γ 放射性同位素活度浓度检测结果

样品名称	样品编号	核素名称	检测结果* (Bq/g)	备注
湿地公园水样	FS2022006-009	Be-7	$<2.81 \times 10^{-5}$	样品中核素活度浓度校正参考时间为 2022 年 6 月 13 日。
		I-131	$<3.68 \times 10^{-6}$	
		Ra-223	$<2.18 \times 10^{-5}$	

*注：置信度：95%；“<”后值为测量活时间 24h 时，该核素检测的最小探测下限。

表 2-10 水中氚活度浓度检测结果

样品名称	样品编号	水中氚的活度浓度 (Bq/kg)	备注
湿地公园水样	FS2022006-009	$<MDL$	方法检出限 (MDL) 为 1.56 Bq/kg。

综上，土壤样品中各核素的活度浓度检测结果基本低于探测限或接近探测下限，水中各核素的活度浓度检测结果均低于探测下限。

2.4 场址适宜性评价

本项目地震烈度按 7 度设防考虑，设计基本地震加速度值为 0.15g，最大冻土深度 145cm。本项目为干旱少雨区，周围地势广阔平坦，距离河渠较远，除及时排除场区雨水外，不存在防洪、防潮、排涝等问题。

本项目位于兰州新区中川镇的洮河街（纬五路）南侧、北侧为纬五路、西侧经六路、南侧纬七路、东侧的七路，场区交通便利。

与本项目相临的经七路、纬七路、经六路、纬五路等市政道路下均埋有给水、排水、电力、电讯、燃气、供暖等市政管道或线缆，场区公用及辅助设施可对应就近接入。

本项目建设内容不在周围住宅小区的主导风向的上风向，与周边湿地公园有一定距离，采用一定的屏蔽措施和辐射防护措施，对周围环境的辐射影响较小。

项目用地为兰州新区中科院近代物理所无偿划拨科研用地，场地为待开发空地，不存在征地、拆迁、移民安置等问题。

本项目严格按照甘肃省兰州新区有关部门规划要求设计，项目周围环境质量良好，与现有周边建筑物布局合理，项目运行不会对周边建筑物和居民生活造成影响，施工条件有保障，周边环境许可。

3 工程分析与源项

3.1 项目规模与基本参数

本项目位于兰州市兰州新区中国科学院近代物理研究所大科学装置科技创新创业园东北角，地块基本呈矩形，总建筑面积约 28181m²，本工程主工艺设施区由加速器装置区、靶站热室装置区、配套工艺区组成，主要包括超重加速器隧道（非本次环评内容）、质子加速器隧道、副隧道、靶站、热室、超重乙级实验室、辐射管理中心、靶向药物实验室、功率源厅、低温厅、氦压缩机厅、冷却水站、变电站和运行维护楼，园区总体布局鸟瞰图见图 3-1。



①加速器隧道：含超重加速器隧道（北）、加速器副隧道（中）、质子加速器隧道（南） ②靶站（东）、热室（西） ③超重乙级实验室 ④辐射管理中心
⑤靶向药物实验室 ⑥功率源厅 ⑦低温厅 ⑧氦压缩机厅
⑨冷却水站 ⑩变配电站 ⑪运行维护楼
（备注：红色序号表示涉及电离辐射区域；蓝色序号表示不涉及电离辐射区域）

图 3-1 园区总体布局鸟瞰图

超重加速器隧道（非本次环评内容）、质子加速器隧道、副隧道组成联合隧道，呈成东西向布置在地下，副隧道布置在其他两个隧道中间。功率源厅布置在联合隧道上方，低温厅紧邻功率源厅东侧外墙布置，超重乙级实验室布置在超重加速器隧道终端右侧，紧邻功率源厅北侧外墙布置。质子加速器隧道在西南角向南接靶站，靶站和热室从东向西布置在厂区西南部，组成联合厂房。氦压缩机厅、冷却水站、变配电站、靶向药物实验室从东向西布置在功率源厅北侧，靠近厂区北侧用地边界。辐射管理中心和排风塔布置在功率源厅的西侧、靶站和热室联合厂房北侧、靶向药物实验室南侧，西侧临厂区用地边界。

运行维护楼布置在厂区东南部，东侧临厂区围墙，靠近厂区主要出入口，方便厂区内联系；厂区设两个出入口，主出入口布置南侧围墙上，靠近南侧围墙东端，经园区道路向东接祁连山大道（经七路），在主出入口两侧靠近厂区南侧围墙设置一定数量的停车场，次出入口布置在北侧围墙上，靠近北侧围墙西端，出厂区直接接洮河街（纬五路）。

各主体建筑的结构尺寸及其周围环境分布情况列于表 3-1。

表 3-1 各建筑主体的结构尺寸

建筑名称	长（m）	宽（m）	建筑高度（m）	建筑面积（m ² ）	层数
超重加速器隧道（非本次环评内容）	110.20	44.50	—	3240	地下一层
质子加速器段隧道					
副隧道					
靶站	111.00	40.20	19.20	9923	地上三层地下一层
热室					
超重乙级实验室	45.60	13.85	10.70	757	地上一层局部二层
辐射管理中心	42.0	33.5	14.1	4500	地上两层，地下一层
靶向药物实验室	46.80	18.80	7.50	819	地上一层
功率源厅	110.25	21.30	14.38	2400	地上一层
低温厅	44.15	32.30	15.90	1423	地上一层

氮压缩机厅	45.20	24.10	15.70	1083	地上一层
冷却水站	43.20	26.20	8.40	1122	地上一层
变配电站	24.10	21.10	6.30	509	地上一层
运行维护楼	33.50	17.40	20.00	2316（地上： 1773，地下： 543）	地上三层地下一层
园区主出入口	13.10	10.25	5.70	89	地上一层
排风塔	直径底部 3.9m，顶部 2.6m			-	-
小计				28181	-

3.1.1 加速器隧道

加速器隧道位于园区中心区域，布置有超重加速器隧道（非本次环评内容）、质子加速器隧道、副隧道、超重加速器隧道大厅、加速器隧道终端等，为地下一层结构。加速器隧道与靶站、热室大厅、功率源厅、低温厅作为厂区内主体性建筑物，在总平面布置上为一个整体性建筑。加速器隧道平面布局图见附图 1。

3.1.2 靶站/热室

靶站/热室为一个整体建筑，位于园区西南侧，其中加速器输出的质子在靶站中与靶材料进行核反应，辐照后的靶件在热室大厅通过分离纯化等工艺得到用于目标的放射性同位素，地上三层地下一层结构，

地下一层东侧用于靶件的辐照和转运等工作，主要包括靶站 1 辐照室、T1 热室、靶站 2 辐照室、主工艺预留实验室、冷却间等区域；地下一层西侧用于靶站、热室放射性废液和放射性固体废物的暂存以及废气的过滤处理等，主要包括固废暂存间、通风过滤器间、工艺过滤器间、低放废液暂存间、中放废液暂存间等区域。

一层西侧用于放射同位素的分离纯化，主要包括热室区域、放化实验室、谱仪间和人员出入口等区域；东侧主要包括倒罐区、T2 热室、吊装大厅、送风机房和实验室等区域。

二层为预留区域，不属于本次环评内容；

三层西侧用于一层分离热室纯化后放射性同位素的质检分析，主要包括放射化学测量室、物理测量实验室、留样间、质谱仪间、光谱仪间、高效液相室、无菌检查间、阳性对照间、废物暂存间、人员出入口等区域；东侧主要为吊装大厅。

靶站、热室各层平面布局图见附图 2。

3.1.3 超重乙级实验室

超重乙级实验主要用于制靶、放射性同位素回取实验等相关的化学研究。超重乙级实验室南侧毗邻功率源厅，北侧和西侧为室外园区，东侧毗邻低温厅，为地上一层、局部二层建筑，平面布局图见附图 3。

一层的主要房间有数据获取室、靶件制备室 1、靶件制备室 2、靶件检测室、固废贮藏间、去污间、检测间、废水暂存间等。

局部二层为送、排风机房。

3.1.4 靶向药物实验室

靶向药物实验室位于园区西北侧，主要用于放射性药物面临的靶向性与安全性临床需求研究，为地上一层建筑，平面布局图见附图 4。

地上一层主要包括放射性标记室 1、细胞培养室、放射性标记室 2、动物饲养室、放射性标记室 3、CT 室、放射性废物储藏室、废物储存间、质控室等。

3.1.5 辐射管理中心

辐射管理中心位于园区西侧，专门用于控制、收集、输送和暂存本项目各辐射工作场所产生放射性废气、废液及固体废物等。辐射管理中心为地下一层、地上二层配套建筑，平面布局图见附图 5。

地下一层主要包废水间、废水净化间、废液处理工艺研究间、固废暂存区域、中放废液暂存间、操作间、低放废液暂存间、低放废液操作间等；

地上一层主要包括人员出入口、汽车门斗、备用间、送风机房、低压配电间、控制室、辐射防护用品间等；

地上二层为排风机房。

3.1.6 排风塔

排风塔主要用于放射性废气的高架排放。排风塔主体为钢筋混凝土筒体结构，塔顶结构标高 35.0m，塔底最大内径为 3.9m，塔顶出口内径为 2.6m，塔壁根部壁厚 0.3m，顶部壁厚 0.2m。

3.1.7 配套建筑

功率源厅主要用于放置功率源柜和标准电源柜以及电缆、馈管、波导管等设备。功率源厅位于隧道上方，为地上一层建筑物。

低温厅主要用于液氮制冷机、除油器、液氮杜瓦、液氮制冷机机柜、低温液氮阀箱等低温设备。低温厅西侧与功率源厅毗邻，为地上一层建筑物。

氮压缩机厅用于安放氮气压缩机，是液氮低温系统的关键设备之一，为地上一层建筑物。

冷却水站为实验区各个实验室等提供所需去离子冷却水，包括去离子水的产生及净化设备、泵、散热器等，为地上一层建筑物。

变配电站布置高压配电柜，为地上一层建筑。

运行维护楼为多层民用建筑，为公共建筑，地下一层，地上三层。

3.1.8 小结

本次环评内容包括基于质子加速器的同位素应用研发、超重乙级实验室、靶向药物实验室以及辐射管理中心。

(1) 基于质子加速器的同位素应用研发

该内容涉及加速器隧道、靶站/热室两个辐射工作场所，组成部分包括质子加速器、靶站和分离系统。质子加速器产生并加速质子束，质子束在靶站轰击钽靶，发生核反应产生 Ac-225、Ra-223 目标核素及杂质核素，辐照后靶件从靶站转移至分离系统，在分离系统区域开展辐照后靶件的分离、纯化等操作去除杂质核素，最终形成 Ac-225、Ra-223 放射性同位素产品。

本项内容涉及 1 台 I 类射线装置的使用，新增 1 处甲级非密封放射性物质工作场所，包括 Ac-225、Ra-223 放射性同位素的生产、销售和使用活动，射线装置参数见表 1-2，甲级非密封放射性物质工作场所核素参数见表 1-3。

(2) 超重乙级实验室

超重乙级实验室包括放射性同位素制靶、放射性同位素的回收与提纯、超重化学研究与微流体萃取实验研究，主要操作的放射性同位素包括 Am-243、Am-241、Cf-252、Cf-251、Cf-249、Cm-248、Cm-244、Pu-244、Pu-240、Ta-182、Ta-179、Nb-95。其中 Am-243、Am-241、Cf-252、Cf-251、Cf-249、Cm-248、Cm-244、Pu-244、Pu-240 主要用于制靶及回取，Ta-182、Ta-179、Nb-95 主要用于微流体溶剂萃取实验。

本项内新增 1 处乙级非密封放射性物质工作场所，包括 Am-243、Am-241、Cf-252、Cf-251、Cf-249、Cm-248、Cm-244、Pu-244、Pu-240、Ta-182、Ta-179、Nb-95。其中 Am-243、Am-241、Cf-252、Cf-251、Cf-249、Cm-248、Cm-244、Pu-244、Pu-240 放射性同位素的使用活动，乙级非密封放射性物质工作场所核素参数见表 1-4。

(3) 靶向药物实验室

靶向药物实验室开展放射性药物研发实验，主要包括显像实验、细胞实验、动物实验，Ge-68/Ga-68、Ac-225、Ra-223 的使用活动已于 2026 年 7 月完成辐射

安全许可证的申请，本次环评新增 Lu-177、F-18、Tb-161 和 Tc-99m 的使用，新增核素后场所仍为乙级非密封放射性物质工作场所，乙级非密封放射性物质工作场所核素参数见表 1-5。

（4）辐射管理中心

辐射管理中心为整个场所的放射性三废管理中心，各辐射工作场所放射性废气输送至辐射管理中心排风机房经过滤后经排风塔排放，各辐射工作场所放射性废液在场所内分类暂存一段时间后输送至辐射管理中心废液暂存场所进行暂存，各辐射工作场所放射性固体废物在场所内分类暂存一段时间后转移至辐射管理中心放射性固体废物暂存场所进行暂存处理。

3.2 工作原理及工艺流程

3.2.1 基于质子加速器的同位素应用研发

3.2.1.1 工作原理

本项目利用质子作为入射粒子，轰击靶核引起相应的核反应生成放射性同位素，放射性同位素经分离、纯化和质检等操作，最终得到 ^{225}Ac 、 ^{223}Ra 产品。

质子辐照钍靶会引起许多核反应。每个反应道都提供了所获得放射性核素的汇总截面的贡献，包括所有可能的反应道，包括直接的和由母体放射性核素衰变产生的反应道（累积截面）。经理论计算 Ac-225 理论累积截面见图 3-2。

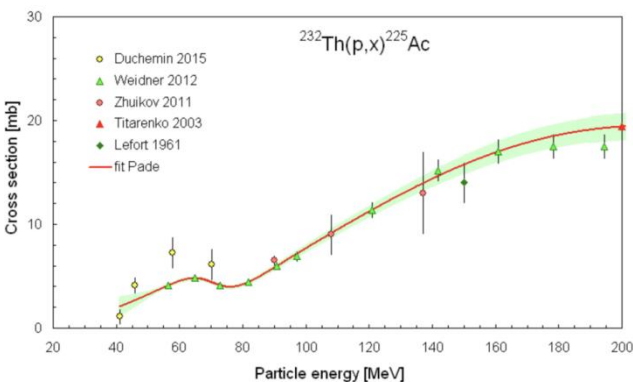


图 3-2 钍靶发生散裂反应生成 ^{225}Ac 的理论计算（分支比）×（累积截面）

3.2.1.2 主工艺流程

本项目将质子加速器产生的质子束传输至靶站系统辐照室（靶站 1、2），束流轰击钍靶发生核反应产生 Ac-225、Ra-223 目标核素及杂质核素，辐照后靶件经由 T1/T2 热室转移至分离系统区域，在同分离系统区域开展辐照后靶件的分离、纯化等操作去除杂质核素，最终形成 Ac-225、Ra-223 放射性同位素产品。辐射工作场所主要包括质子加速器区域、靶站系统和分离系统区域，示意图见

图 3-4，本项内容包括 1 台 I 类射线装置的使用，并包括 1 个甲级非密封放射性物质工作场所，I 类射线装置设计参数见表 3-2，甲级非密封放射性物质工作场所等级核算结果见表 3-3。

表 3-2 医用同位素生产研究加速器束流设计参数

射线装置名称	规格型号	主要参数 (能量/管电压, 管电流)	生产厂家	数量	类别	所在位置
质子加速器	自研	质子束最大能量 115MeV, 最大流 1mA, 总功率 115kW	中国科学院近代物理研究所	1	I	加速器隧道、靶站 1
	自研	质子束最大能量 115MeV, 最大流强 0.25 mA, 总功率 28.75kW		1		加速器隧道、靶站 2

表 3-3 基于质子加速器的同位素应用研发非密封放射性物质工作场所等级估算一览表

序号	核素 ¹		操作因子	操作方式	毒性因子	日最大操作量, Bq	日等效最大操作量, Bq	年最大操作天数 (批次)	年操作量, Bq	活动种类	操作场所/来源
1	靶材	Th-232	0.01 ²	表面有污染的固体, 特别危险的操作	0.01	4.05E+05	4.05E+05	20	8.10E+06	使用	靶站 1 靶材, 靶站区域自制/外购
		Th-232	0.01 ²	表面有污染的固体, 特别危险的操作	0.01	5.44E+05	5.44E+05	12	6.53E+06		靶站 2 靶材, 靶站区域自制/外购
2	目标核素	Ac-225	0.1	表面有污染的固体, 简单操作	10	1.59E+10	1.59E+12	160	2.54E+12	生产、销售、使用	靶站 1、分离系统
		Ra-223	0.1	表面有污染的固体, 简单操作	10	4.22E+10	4.22E+12	160	6.75E+12		

3	目标核素			作						靶站 2、分离系统	
		Ac-225	0.1	表面有污染的固体，简单操作	10	1.71E+10	1.71E+12	24	4.12E+11		
		Ra-223	0.1	表面有污染的固体，简单操作	10	7.02E+10	7.02E+12	24	1.68E+12		
总计							8.73E+12 ³	甲级			
备注：1. 辐射工作场所仅考虑目标核素日最大操作量时已评定为甲级非密封放射性物质工作场所，且最终作为产品进行生产、销售和使用的核素仅限于 Ac-225 和 Ra-223,因此，非密封放射性物质工作场所分级过程中主要考虑目标核素及靶材核素，辐射屏蔽设计与辐射防护措施评价中，则综合考虑目标核素和杂质核素的辐射影响； 2.制靶过程中涉及高温操作，保守按表面有污染的固体的特别危险的操作考虑； 3.辐照后靶件在分离系统进行操作期间，保守按照 2 套工作箱室同时操作考虑，即操作 4 片 T1 辐照后靶件，或操作 2 片 T2 辐照后靶件，分离系统区域同时最多开展两套箱室的操作,根据计算可知,该区域同时操作 2 片 T2 辐照后靶件期间日等效最大操作量较大，整个场所日等效最大操作量为分离系统处理 2 片 T2 辐照后靶件及靶站区域进行靶材的处理日等效最大操作量的叠加。											

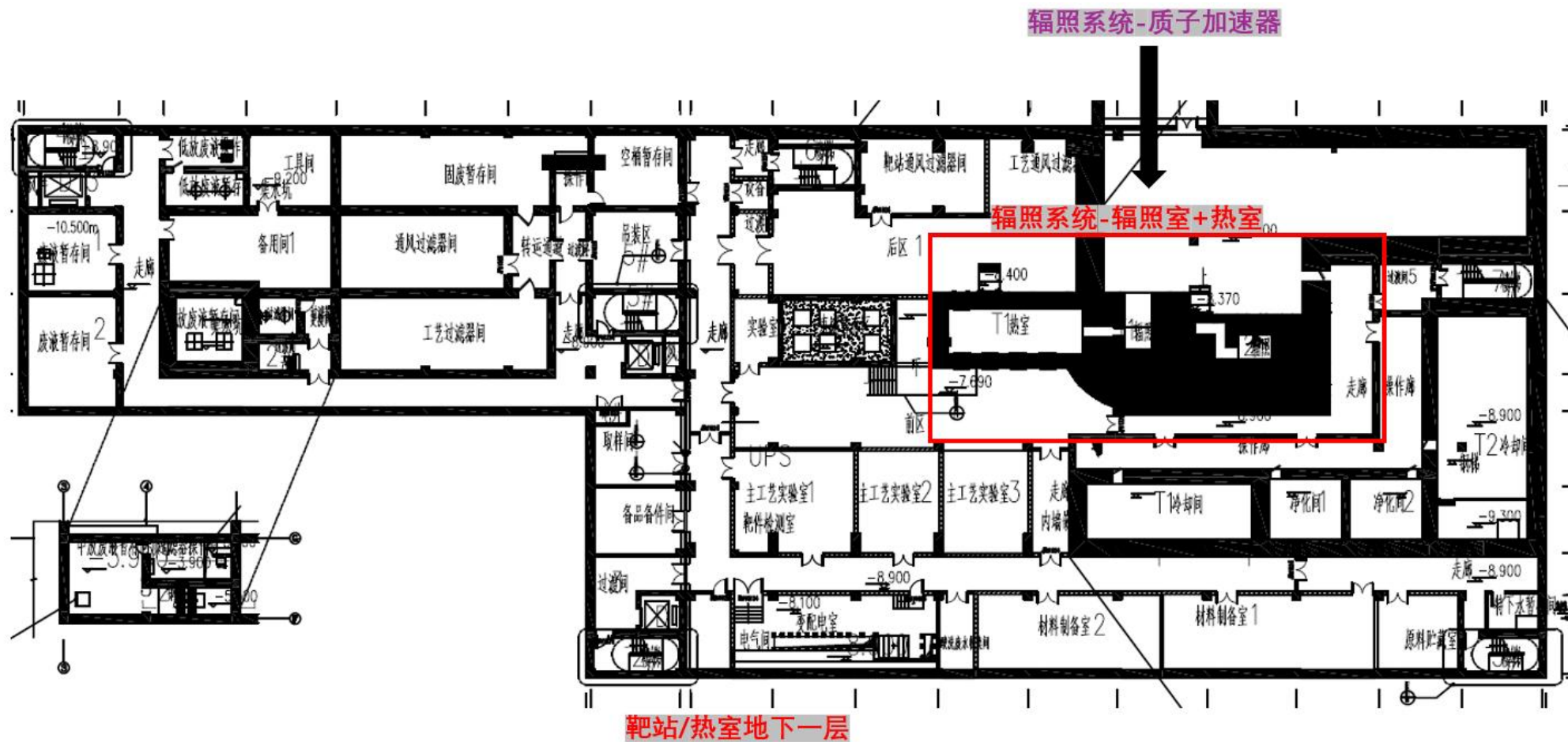


图 3-3 项目主工艺场所布局图-1

主工艺流程如下：

（1）制靶/外购。本项目靶件外购或自制，外购均为成品靶，制靶流程如下：
炼制靶（金属 Th）：本项目使用的靶件为金属形态的 Th 靶。首先，需要外购粉末压制的钍块，在主工艺实验室 1，利用真空熔炼炉完成熔炼，得到金属钍形态的钍锭。然后，利用主工艺实验室 1 的切割、打磨设备，得到目标尺寸规格的靶片。

（2）靶件辐照前准备工作：靶站工作人员在操作热室进料手套箱处，通过手动操作，将封装好的靶片送入手套箱，并通过水平旋转进料通道送入操作热室。然后通过远程操作热室内设备完成靶片装填、靶容器密封等操作，最后通过拖车将靶装置推送到打靶位置。

（3）靶件辐照：靶站人员确认辐照条件并请求过束。加速器工作人员确认过束条件，操控加速器系统，将束流输送至靶站，束流在靶站系统辐照室内打靶。

（4）靶件运输：辐照后靶件通过维护拖车将靶件从辐照室退回至 T1/T2 热室。

（5）放射性同位素制备：在 T1/T2 热室实现靶件的拆解和封装，并将封装好的靶件从维护热室底部通过底部传输小车送至对应的分离系统区域，在各层箱室中通过分离纯化实现放射性同位素的提取。

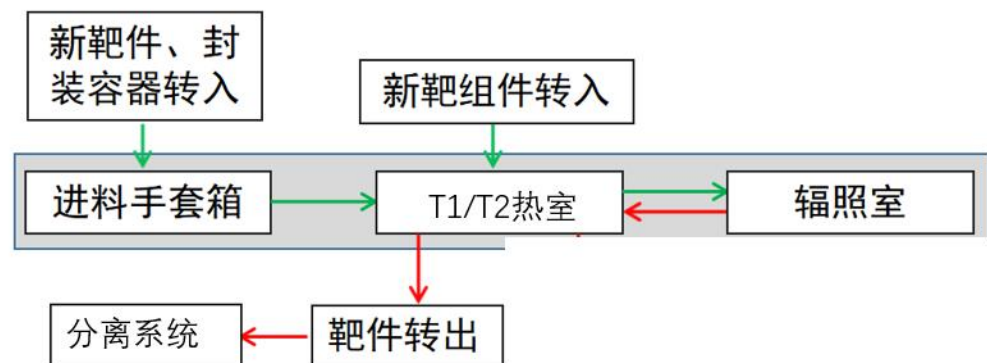


图 3-5 项目工作流程示意图

3.2.1.3 靶件

项目靶件外购或自制，外购均为成品靶，制靶流程如下：炼制靶（金属 Th）：本项目使用的靶件为金属形态的 Th 靶。首先，需要外购粉末压制的钍块，在主工艺实验室 1，利用真空熔炼炉完成熔炼，得到金属钍形态的钍锭。然后，利用主工艺实验室 1 的切割、打磨设备，得到目标尺寸规格的靶片。

3.2.1.4 靶件辐照前准备工作

靶站工作人员在操作热室进料手套箱处，通过手动操作，将封装好的靶片送入手套箱，并通过水平旋转进料通道送入操作热室。然后通过远程操作热室内设备完成靶片装填、靶容器密封等操作，最后通过拖车将靶装置推送到打靶位置。

3.2.1.5 靶件辐照

靶站人员确认辐照条件并请求过束，加速器工作人员在运行维护楼的中控室内确认过束条件，操控加速器系统，将束流输送至靶站，束流在靶站系统辐照室内打靶，完成目标同位素的产生，该阶段主要包括质子加速器和靶站系统。靶站系统设计及运行参数见表 3-4。

表 3-4 靶站打靶参数

辐照室	目标核素	粒子	靶材	打靶参数（最大参数）	打靶时间/批次	年最大束流打靶批次	年打靶出束时间，h/年
靶站 1	Ac-225	质子	Th-232	115MeV/1mA	10d	20	4800h
靶站 2	Ac-225	质子	Th-232	115MeV/0.25mA	10d	12	2880h
备注：靶站 1 和靶站 2 不会同时出束，年最大束流打靶批次不超过 20 次，年总打靶出束时间为 4800h。							

3.2.1.5.1 质子加速器

该装置的质子加速器由离子源、低能传输线、RFQ 加速器、中能传输线、超导加速段以及高能传输线组成。加速器束流设计参数如表 3-5 所示。

表 3-5 医用同位素生产研究加速器束流设计参数

离子	能量	流强
H ⁺	115MeV	1mA

(1) 离子源

离子源用于产生稳定的质子束流，拟采用 2.45GHz ECR（电子回旋共振）离子源，主要由微波馈入系统、源体及引出系统三部分组成。由于 ECR 离子源属于无极放电，能够产生高流强和高电荷态的离子束，可在较大范围气压下长期稳定工作、重复性好、引出束的能散和发射度低、离子种类广，没有寿命限制，也不会带来束流的污染，可以提供较纯净的离子束。

(2) 低能传输段

低能传输段 LEBT 的主要作用是为了实现 ECRIS 与 RFQ 之间的束流匹配，同时肩负着主加速离子筛选、机器保护、束流诊断的作用。具体功能如下：1）将离子源引出的束流匹配传输至 RFQ 加速器中；2）分离杂质离子，获得纯净的质子束，并且对束流强度进行连续调节；3）根据超导加速器注入时将束流进行脉冲化切割，在微秒时间内偏转束流并进行设备快保护。LEBT 的布局结构为：两个螺线管之间放置一个真空室，真空室内有法拉第筒和单丝探测器，第二个螺线管与 RFQ 之间放置静电切束器、束流接收锥和 ACCT 探测器。切束器在束流占空比 1%至 90%之间连续可调，以配合 RFQ 和直线加速器的调试。

(3) 射频四极加速器

RFQ 采用了 162.5MHz 的谐振频率,并在动力学设计时考虑使用较低的极间电压,从这两个方面来尽量降低腔体单位面积的高频热功耗。RFQ 的动力学设计采用不变孔径不变电压的设计方案。为了避免损失的粒子打在真空管道、磁体、高频腔体等元件上引起铜材料的活化辐射, RFQ 的输出能量选择在 2.1 MeV。

(4) 中能传输段

中能传输段 MEBT 主要用于束流从 RFQ 到超导段的横向和纵向匹配。结合目前在运行加速器的调试运行经验,在中能传输段对束流的横纵向参数的准确测量,是实现超导段束流调试匹配的关键所在,因此,MEBT 的设计考虑了束流诊断相关功能。MEBT 的束流能量为 2.1MeV,注入器 MEBT 全长约 2.796m,主要由 6 个四极磁透镜和 2 个 162.5MHz 常温聚束腔 QWR 以及一系列的束诊元件组成,分别用于横向和纵向的束流匹配和测量。RFQ 出口束流为不对称束,而超导段入口要求为对称束,因此 MEBT 段选用四极磁铁作为横向聚焦元件。为了实现束流横、纵向匹配,以结构紧凑为设计原则,MEBT 段采用双四极磁铁及双聚束器结构进行匹配设计。利用前一段四极磁铁对束流包络进行控制,再将束流传输到第一个聚束器进行聚束,此聚束器后长漂移段用于束诊元件布置,束流将通过第二个四极磁铁以及第二台聚束器到达超导段入口。

(5) 超导加速段

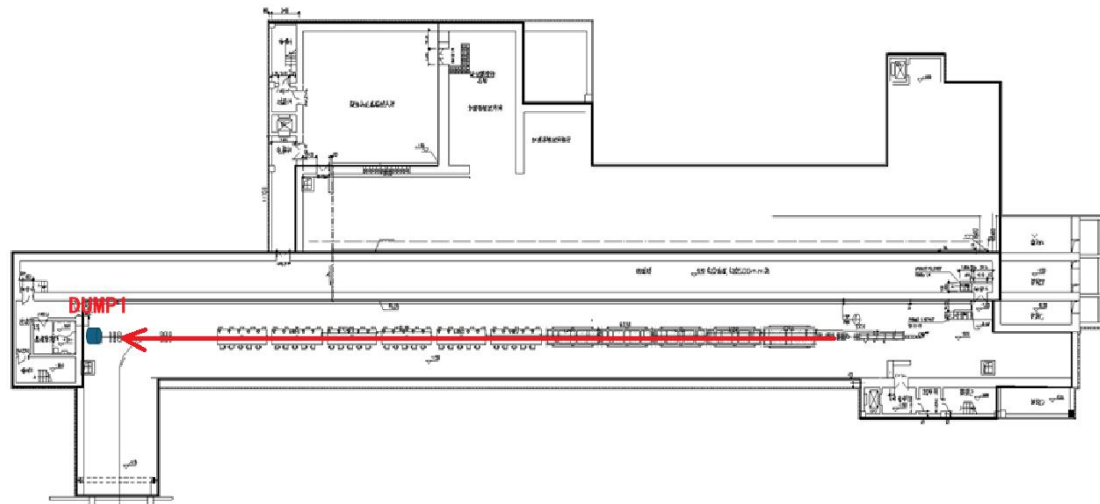
同位素直线加速器运行模式为连续波模式,超导加速段是整个加速器的主要加速部分。超导加速段是以低温恒温器为基本物理单元的集成,以及与之相匹配的超导腔体、固态功率源、超导螺线管、超导磁铁电源、束诊元件等。根据束流能量需求,超导加速段采用四种类型的腔体,分别为频率为 162.5MHz, β 值为 0.10 和 0.15 的二分之一波长腔 (HWR), 以及频率为 325MHz, β 值为 0.40 的 HWR 腔体。在超导段末端新增 1 个恒温器,能量从 100 MeV 升至 115 MeV。

(6) 高能传输段

高能传输线（HEBT）将束流匹配和传输至终端，共包括 4 段：①D1 段：超导加速段出口的束流经一组 Doublet（双组合四极磁铁组）与 Triplet（三组合四极磁铁组）后进入低功率束流收集器 DUMP1，用于束流流强、能量、横向剖面与发射度测量；②T1 段：在 Triplet 之后向左偏转 90°，再经一组 Doublet、一组 Triplet、4 台扫描磁铁后将束流传输至靶 1；③D2 段：将束流向左两次偏转 90°后，用一组 Triplet 约束束斑在高功率束流收集器 DUMP2 处的尺寸，用于高功率束流稳定性测试；④T2 段，将束流向左两次偏转 90°后在向右偏转 90°，用一组 Triplet 和 2 台扫描磁铁将束流传输至靶 2。

低功率束流收集器 DUMP1 本体为铜，用于最高 115 MeV，质子束流收集，最高束流功率 23W，利用冷却水进行热移除，外围利用聚乙烯屏蔽。

高功率束流收集器 DUMP2 本体为铜，用于最高 115 MeV，质子束流收集，最高束流功率 230W，利用冷却水进行热移除，外围利用碳钢屏蔽。



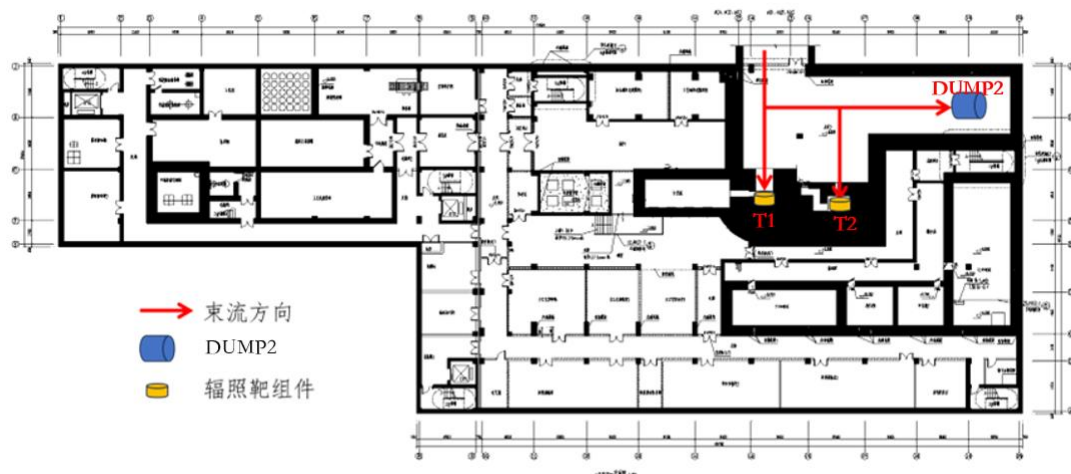


图 3-6 高能传输线（HEBT）将束流分配路线示意图

3.2.1.5.2 靶站系统

靶站系统在同位素生产中起着承上启下的作用，上耦合加速器实现多种同位素高效的产生，下连接化学分离使其能够有效的分离出目标同位素，是同位素生产中的关键组成部分，靶站系统包括靶站 1 系统和靶站 2 系统，两个系统相互独立，不同时运行。

靶站布局俯视图见图 3-7，质子束线以 1.5 米的中心高度水平进入靶站 1。为了满足加速器束流调试的需求，在靶站东北区域设置束流垃圾桶（DUMP2），与靶站共用天车。HEBT 束线在靶站后区分为三支：一分支接入 DUMP2 上，第二分支和第三分支分别接入靶 1 和靶 2 辐照室，用于同位素的生产。

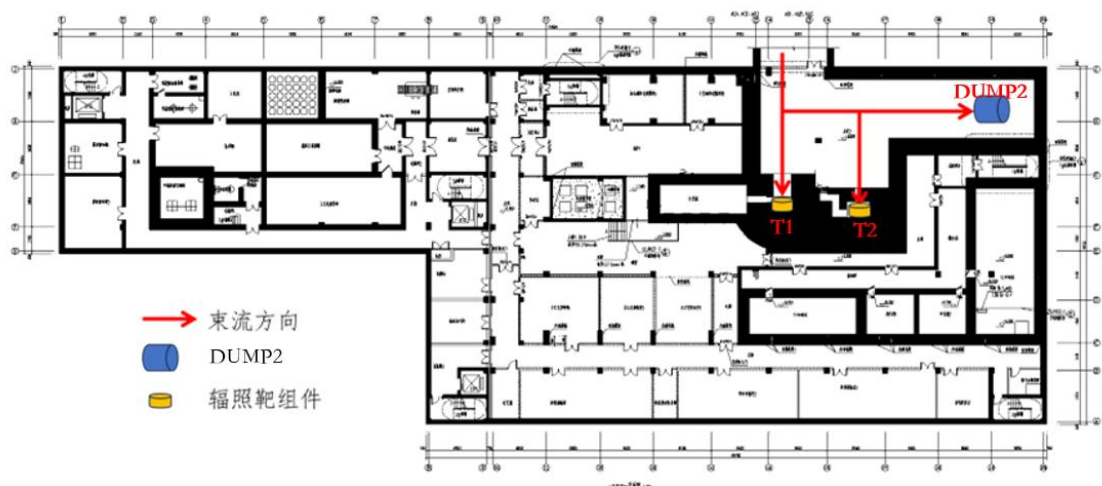


图 3-7 靶站布局俯视图（地下一层）

靶站 1 系统主要包括靶 1 辐照室和靶 1 操作热室（T1 热室）。T1 热室内净尺寸为 $9.8\text{m} \times 3.3\text{m} \times 5.6\text{m}$ （宽 $\times$ 深 $\times$ 高），操作热室前墙厚度为 1000mm （重混，密度 $4.2\text{g}/\text{cm}^3$ ），侧墙厚度为 1300mm （普混，密度 $2.4\text{g}/\text{cm}^3$ ），后墙厚度为 1200mm （普混，密度 $2.4\text{g}/\text{cm}^3$ ），顶部厚度为 1000mm （普混，密度 $2.4\text{g}/\text{cm}^3$ ）；辐照室内净尺寸为 $2\text{m} \times 1.6\text{m} \times 2\text{m}$ ，辐照室前墙厚度为 4750mm （重混，密度 $4.2\text{g}/\text{cm}^3$ ），后墙屏蔽活动盖板厚度为 2250mm （普混，密度 $2.4\text{g}/\text{cm}^3$ ），顶部厚度为 4400mm （普混，密度 $2.4\text{g}/\text{cm}^3$ ）。操作热室和辐照室内衬采用不锈钢覆面，按二级密封标准设计。操作热室设有 4 个工位，每个工位配备 1 个窥视窗、操作热室共配备 5 个主从机械手。辐照室未设有工位。

操作热室内顶部配备动力机械手（包含 1 台 2t 电葫芦），用于抓取转移靶组件靶容器、拆卸靶容器密封盖和启闭靶容器暂存坑等操作。操作热室顶部设置有设备吊装孔（净通行尺寸为 $2000\text{mm} \times 1500\text{mm}$ ）用于大型设备的进出，吊装检修孔（净通行尺寸为 $\phi 1100\text{mm}$ ，对接尺寸为 $\phi 1080\text{mm}$ ），用于用于动力机械手的检修和废靶容器的转出。操作热室侧墙设有进料手套箱和水平转运孔道，用于接收新靶片。热室底部设有靶容器暂存坑和靶组件暂存坑，分别用于废靶容器和的靶组件的暂存。

靶 1 辐照室和 T1 热室按 2 级密封标准设计，热室布置图见图 3-8~图 3-10。

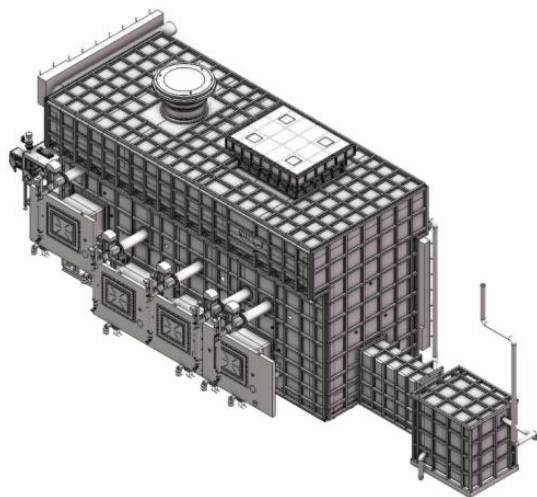


图 3-8 热室等轴测三维简图

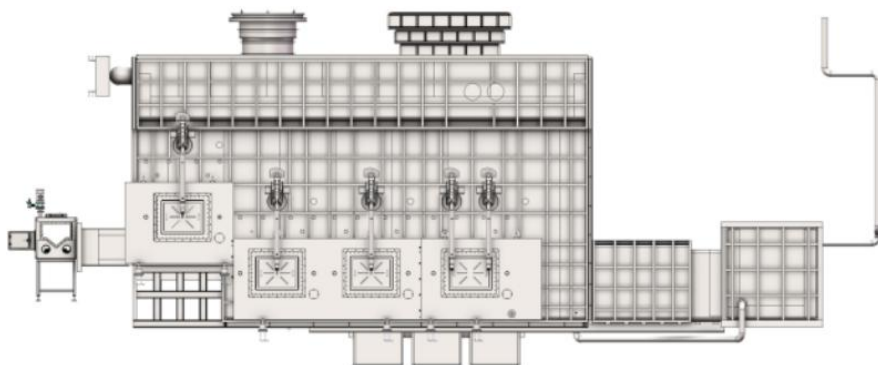


图 3-9 热室前向三维简图

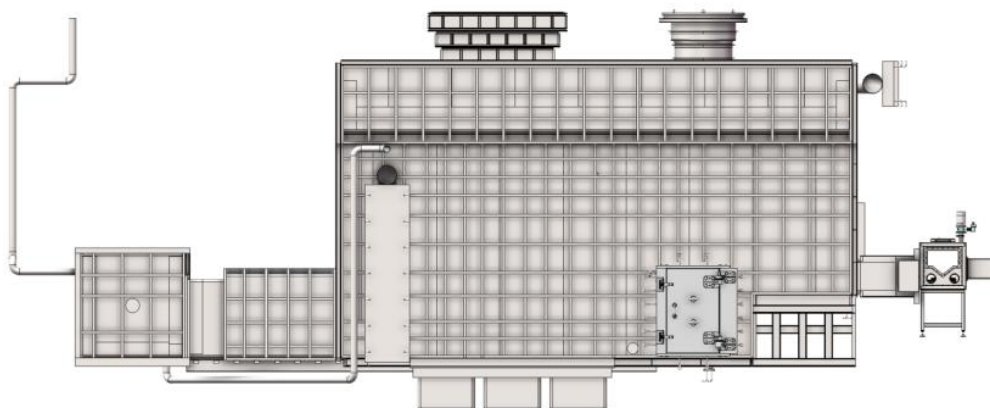


图 3-10 热室后向三维简图

靶站区域主要变更项为：在原来单辐照室的基础上，增加一个低功率辐照室靶站 2（图 3-11），该辐照室与原辐照室不同时启动运行，即当其中一个辐照室工作时，另外一个辐照室不启用。同时新增辐照室为低功率辐照室，设计最高能量为 115MeV，最高流强不超过 0.25mA。新增辐照室在原辐照室区域及地基上建设，变更后平面图如图 3-7 所示，其中原辐照室右侧圆形标记区域为新增辐照室。辐照室尺寸为 2500×1800×2500mm（长×宽×高）。同时，为了实现辐照室和操作热室高低剂量分区，提高系统运行可靠性和安全性，新增辐照室及维护热室为垂直布局，中间通过内部充水的管道连接。其中辐照室位于地下一层，维护热室位于地上一层。辐照室前区增加重混屏蔽，从而实现辐照过程中射线屏蔽，北侧区域为设施区，区域内为低功率束流束线传输及诊断装置。

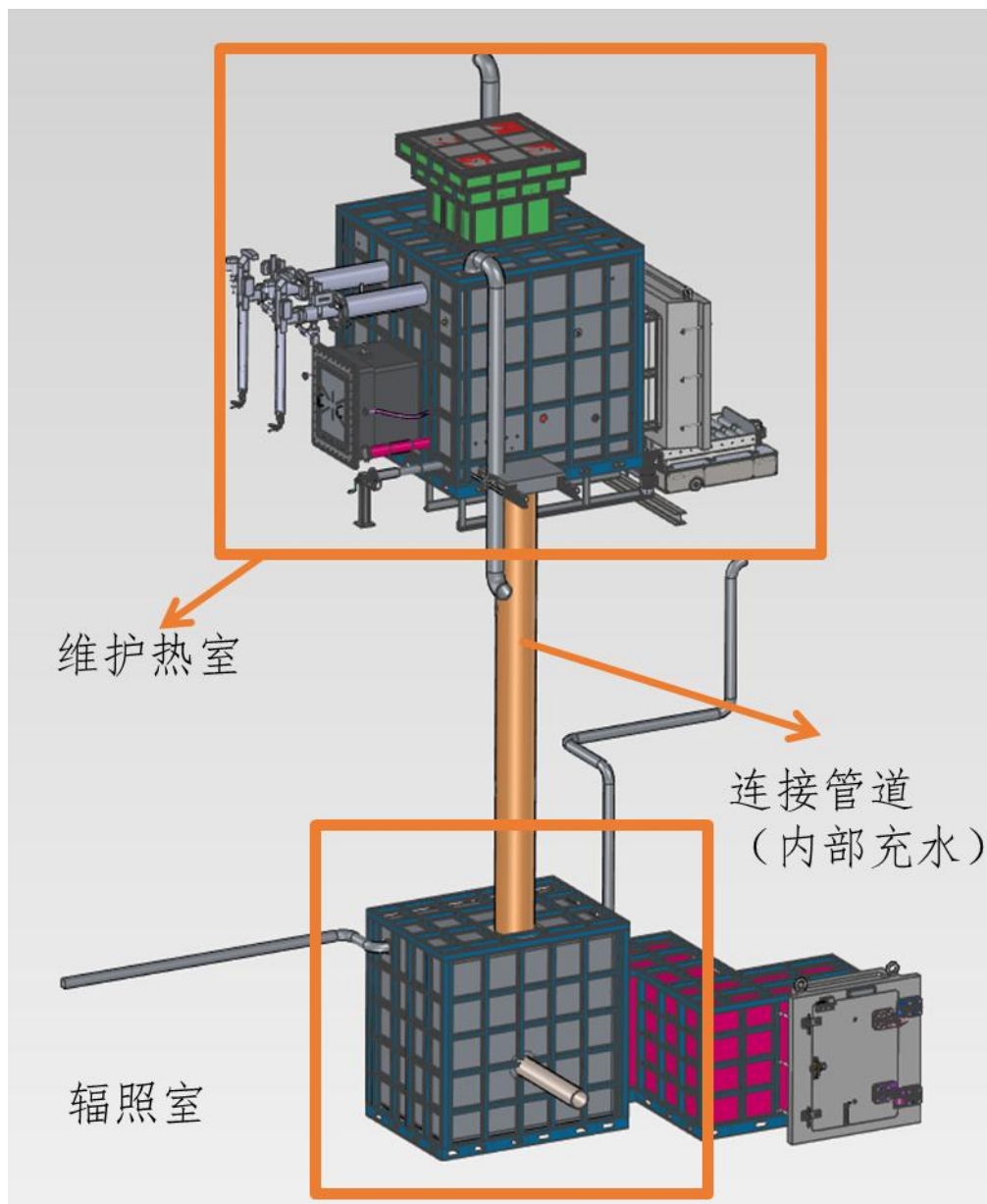


图 3-11 新增靶站 2 等轴测三维示意图

靶站地上一层主要为吊装大厅和辅助配套设施，吊装大厅设置一台 32t 吊车，用于靶站大型、重型设备的吊装；配电室及送风机房辅助配套设施布置于靶站 1 层大厅南边界墙向北 9 米的范围内。本层主要功能间包括：汽车门斗、吊装大厅、配电室、送风机房等。另外靶站与同位素分离工作人员共用的卫生通道，位于靶站西侧分离热室区。在新增辐照室顶部，增加 T2 热室，用于新增辐照室靶片上下基座操作，该维护热室由 1.0~1.2m 厚的混凝土屏蔽靶组件受照活化后的剂量。T2 热室尺寸为：3000×2500×2500mm（长×宽×高）。同时，在

T2 热室西侧区域，布置检修间和过渡区，用于对 T2 热室内设备进行定期检修及保养等操作；在该维护室东侧区域，布置有操作间，用于放置电气柜等设备。相关布局图如图 3-17-2 所示。

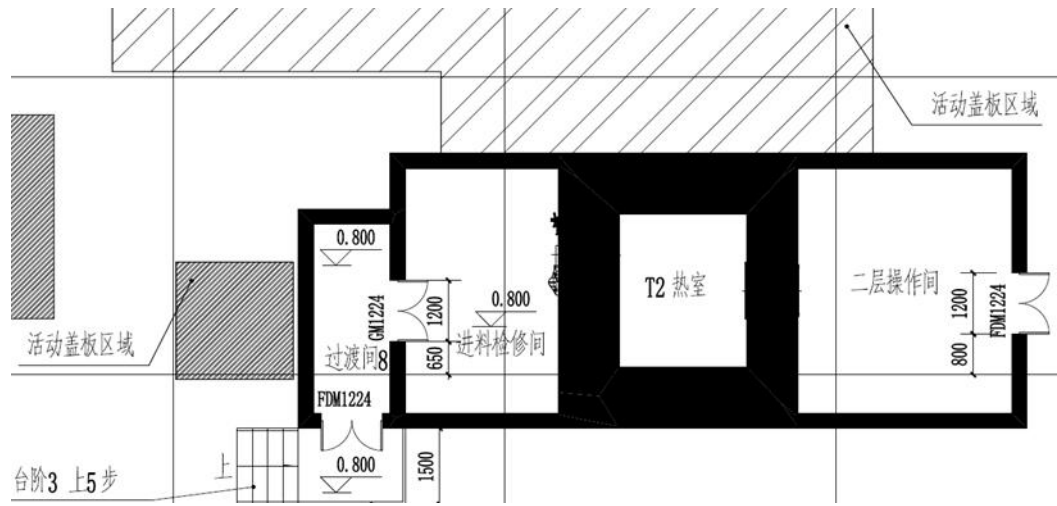


图 3-12 新增靶站 2 维护热室布局图（地上一层局部）

靶站局部地上二层南边界墙向北 9 米的范围主要布置非放实验室、会议室及靶站控制室，便于靶站系统的独立控制和运行。靶站控制室主要对靶系统的一回路水、配电、照明、靶站热室配套条件等进行远控及监视，对靶站热室就地控制系统中束流连锁及实时显示信号进行接收、存储、监视及传递。主要控制内容包括靶片进出料、靶片在维护热室内的装卸等自动化操作，以及操作主从手对靶片进行装卸操作等。

3.2.1.5.2.1 靶站 1 系统

(1) 设备组成

靶站系统的核心工艺是将新靶片由外部转入操作热室内，在操作热室内进行靶组件装配，并转移至靶容器内，再将靶容器整体推入辐照热室，进行质子打靶。辐照完成后，退出靶容器，提取靶组件、拆卸靶片，并将辐照后靶片通过出料系统转出热室。

1) 靶站 1 辐照热室设备

靶站 1 辐照热室位于靶站 1 操作热室（T1 热室）和靶站 2 中间，内部设备主要为用于同位素生产的靶装置，在生产放射性同位素的同时为周围环境及其他设备提供了一道安全屏障，加速器束流管道从北向南水平入射到同位素生产的靶装置上。同位素生产靶装置由靶容器、靶容器盖、靶组件及进出水法兰组成，进出水法兰接口用于与靶车冷却基座的连接及冷却水的流入、流出，靶装置的靶容器面向束流侧设有 4×4 阵列排布的靶窗，靶容器中阵列排布有 4 组靶组件，靶容器盖通过螺栓连接实现与靶容器的水密封；辐照热室上设有管道及法兰接口 C 与上游加速器束线相连，束流从靶窗穿过射入靶容器内的靶组件上，完成同位素的生产。

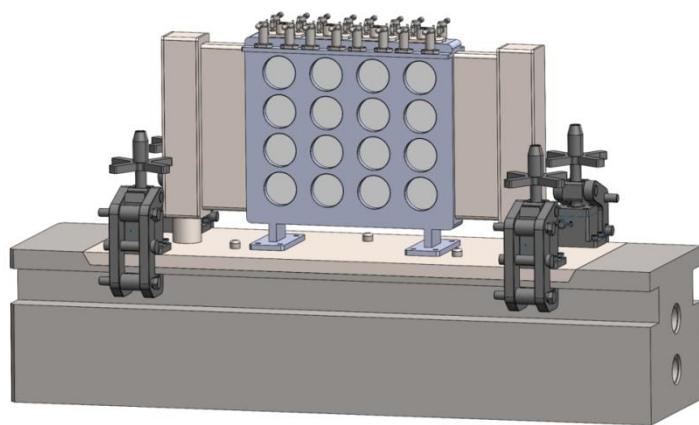


图 3-13 靶装置结构示意图

2) 靶站 1 操作热室设备

T1 热室容纳维护靶车一部，用于在较长周期内对靶装置进行维护和更换、完成靶片及靶组件的进料、出料，同时用于紧急维护情况下靶组件的更换和维护，人员可通过动力机械手和/或主从式机械手对靶车上的设备进行维护。维护室顶部设置有吊装口，便于大件设备与材料转移，底部设置转运口实现紧急维护情况下辐照后靶组件的转出。

a. 维护靶车

维护靶车主要由基座、移动小车、屏蔽块、密封法兰、链传动组件、动力贯穿件、锁紧定位机构、管道拖链组件以及驱动机构等组成，靶装置通过密封法兰上的支撑架连接到维护靶车的屏蔽体的前端面，呈悬臂状态。靶站运行时，安装有靶装置的靶车由操作热室移动到连接操作热室和辐照热室之间的屏蔽体的靶车通道中，通过锁紧定位结构实现靶装置的定位操作，通过靶车前端的密封法兰实现与辐照热室接口处的气密封。靶站停止运行，需要维护靶装置或更换新的靶装置时，通过驱动机构带动移动小车向操作热室中运动，从而使靶装置整个进入操作热室中，便于其维护及更换。

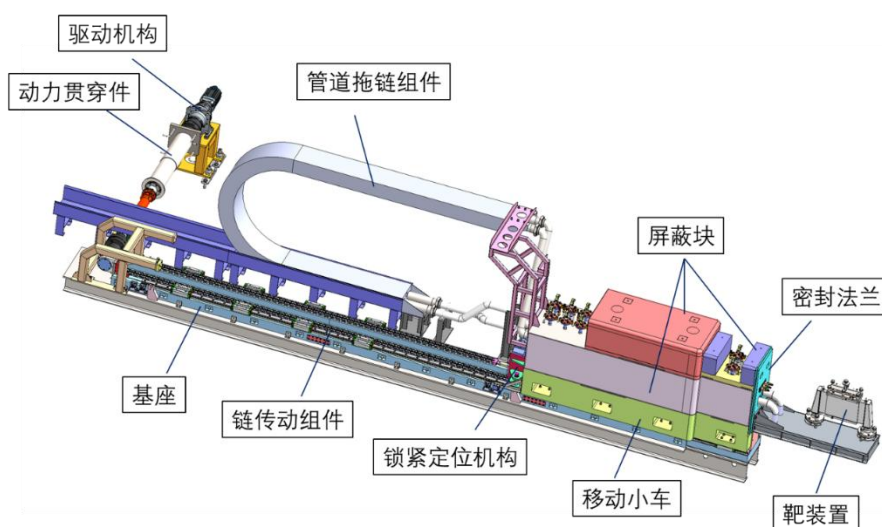


图 3-14 靶维护拖车

b. 动力机械手系统

动力机械手系统主要由大车、小车、伸缩套筒和动力机械臂等组成。动力机械手系统布置在操作热室顶部，通过大小车和伸缩套筒可实现动力机械手在操作热室内的空间移动。动力机械手主要用于实现：1) 操作热室内靶组件、靶容器、靶容器盖等相关设备的空间转移；2) 靶容器、传感器等设备的拆卸、更换；3) 旧靶容器、旧靶组件和旧密封圈等放射废料的辅助转出。

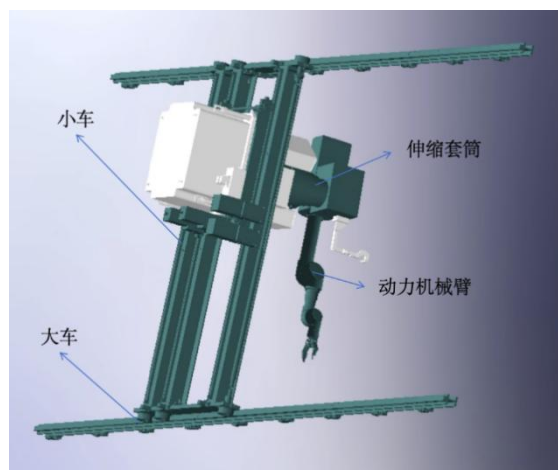


图 3-15 动力手系统

b. 进出料系统设备

靶站 1 进出料系统主要由手套箱（热室外）、水平转运通道、进料轨道、ER 机械手、靶组件挂架、开罐装置、双盖装置、屏蔽转运容器（热室外）、输运辊道（热室外）、滑动补偿屏蔽（热室外）和后区屏蔽门（热室外）等设备组成。该系统总体布局位于热室的左侧，通过增大与辐照热室侧的距离，以距离防护方式确保台面设备的稳定运行。进出料系统承担以下两项核心工艺流程：1）新靶片由热室外向热室内的转运及靶组件装配；2）辐照后靶组件的靶片拆解及热室外转运。

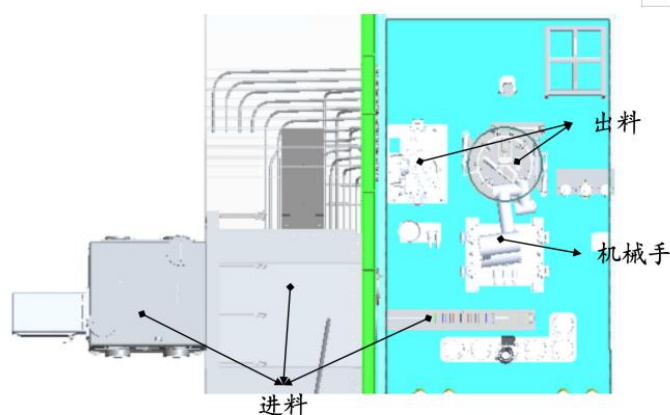


图 3-16 进料及操作台面系统设备组成

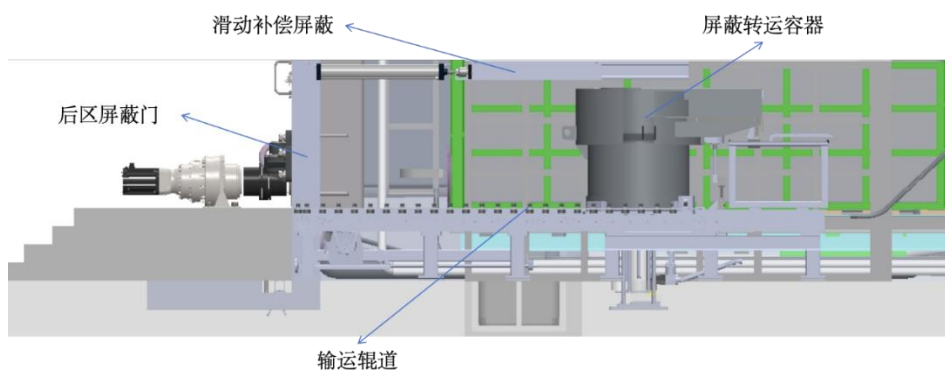


图 3-17 热室外出料系统设备

(2) 靶片转运

靶片为常规工艺流程热室转出的最小单元。下图所示为辐照后靶片由辐照热室经操作热室转出路线。辐照完成后，通过步骤①靶车退出，将靶容器（含靶片）由辐照热室转移至操作热室，步骤②为靶组件拆卸、转移并暂存至 1#暂存坑流程，再经过步骤③将靶组件转移至操作台面，由台面操作系统进行靶片拆卸、装罐、转出至屏蔽转运容器（步骤④），最后步骤⑤实现 AGV 小车对接，输运屏蔽转运容器。

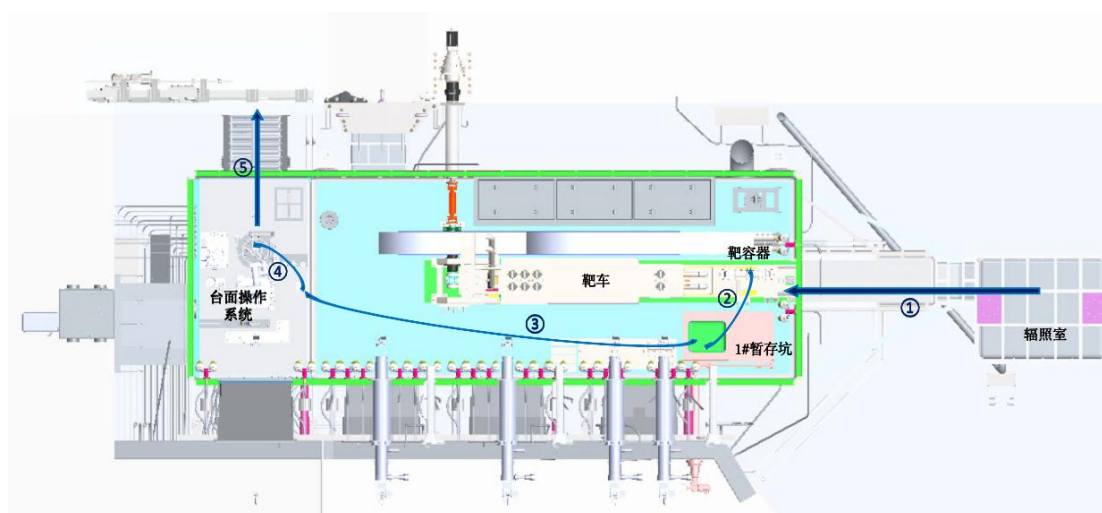


图 3-18 辐照后靶片由辐照热室经操作热室再转出路径



图 3-19 操作热室外屏蔽转运容器（含辐照完靶片）转运路线

靶件从靶站通过 AGV 小车运输到分离热室。靶件通过 T1 热室机械手装在转运容器中，通过双盖屏蔽转运容器将转运容器从过渡室转出至过渡室后区，再通过转运小车水平转运至负一层分离热室区的吊装平台下，接着通过提升机垂直转运至一层分离热室区接收热室中。

（3）靶站 1 束窗更换及暂存

靶站 1 束窗设在靶站 1 辐照热室的北侧，其布局如图 3-20 所示，位于加速器和辐照热室的交接处，确保将加速器产生的高功率束流高效传输至靶装置上，并承担着隔离加速器高真空环境与辐照热室低真空环境的重要职责。

束窗由束窗组件、刮束组件、充气波纹管用组件、局部屏蔽体及管路组成一个整体吊装组件，安装在位于辐照室北侧的导向定位盒中，束窗结构如图 3-21 所示。束窗就位后，如图 3-22 所示，其上游管道和顶部均设有混凝土屏蔽体，上游管道混凝土屏蔽体整体尺寸为 $3.5\text{m} \times 4.5\text{m} \times 4.2\text{m}$ ，顶部混凝土屏蔽体整体尺寸为 $4\text{m} \times 3.5\text{m} \times 4.7\text{m}$ 。

由于长期受束流的辐照，束窗需要定期更换，更换时，先吊移开束窗顶部混凝土屏蔽块，再将束窗专用转运容器吊至束窗顶部，坐于束窗安装区域顶部混凝土墙体上，调整到位后可通过转运容器内部设置的吊具将束窗从导向定位盒中吊起至转运容器内，如图 3-23 所示；拆除后的束窗需要通过转运容器吊至位于靶站 1 西侧的束窗暂存井中，共计 6 个暂存井，单个暂存井可容纳 2 个废束窗的暂

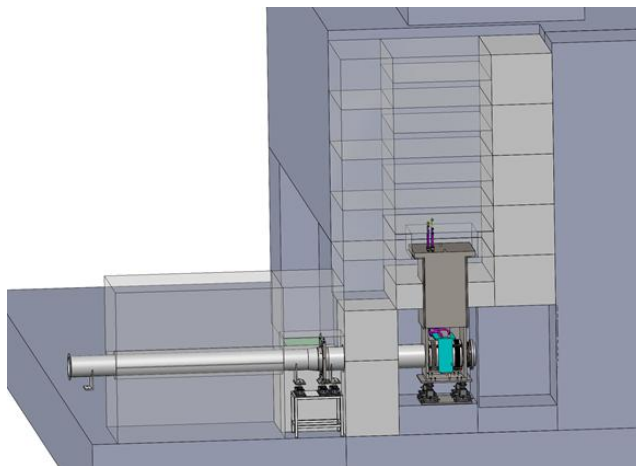


图 3-22 束窗就位图

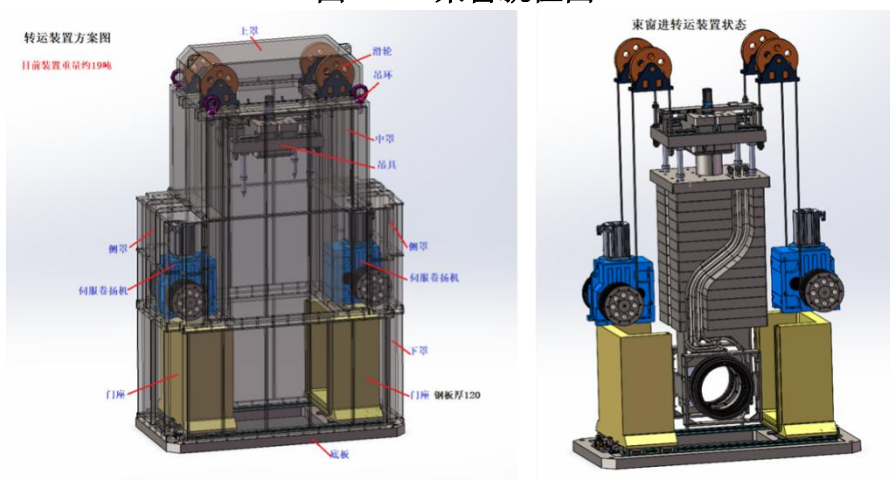


图 3-23 束窗转运容器结构图

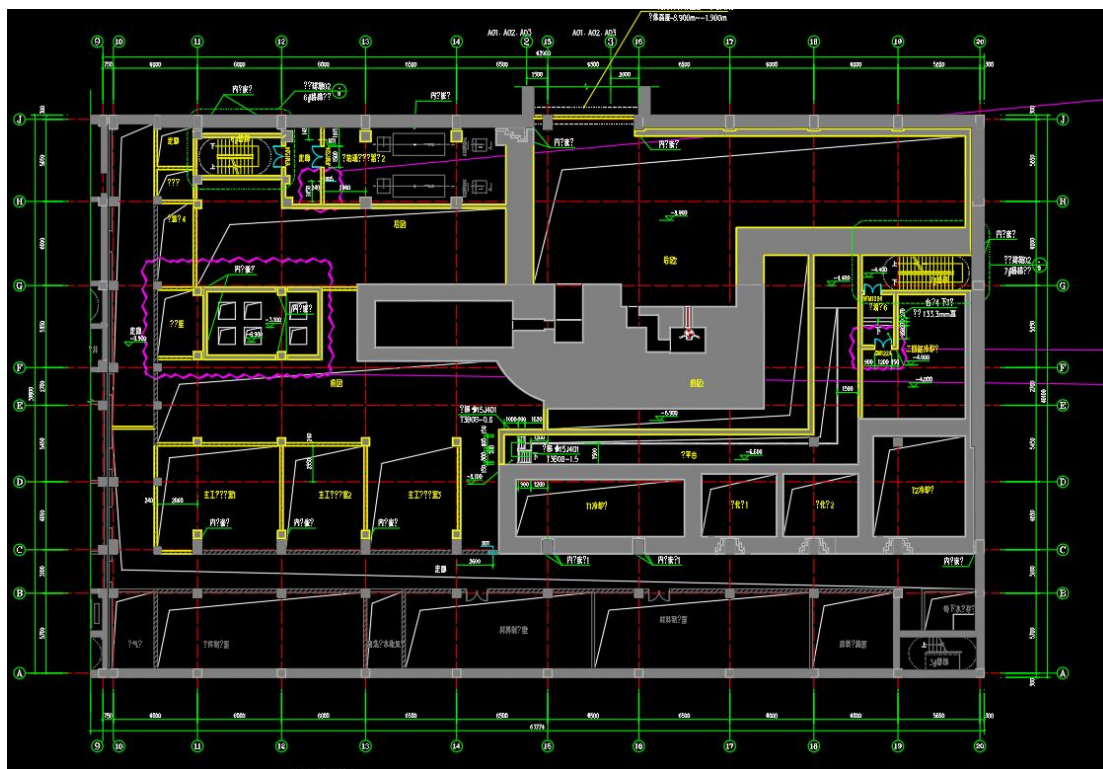


图 3-24 束窗暂存井平面布局图（图中西侧玫红色框线内）

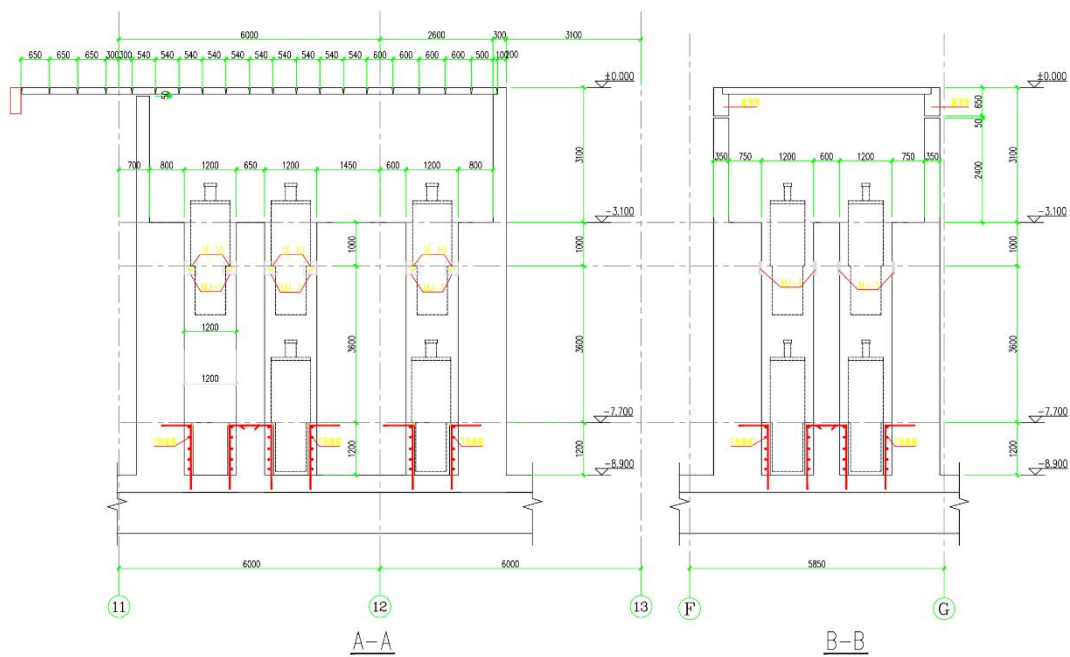


图 3-25 束窗暂存井 A 和 B 立面布局图

(4) 靶容器更换及暂存

靶站 1 靶容器作为靶片承载单元，按照两年的使用寿命进行设计。靶容器更换时，需要利用操作热室内的动力手系统，将其从靶维护拖车上拆卸下来，并放入操作热室内部的暂存坑进行暂存。然后，动力手抓取储备于热室内的新容器，转移至靶拖车头部，完成螺栓连接后，完成靶容器更换过程。操作热室内共设置 6 个废靶容器暂存工位，当坑位用完后，将启动靶容器转出及处置流程。统一通过操作热室顶部吊装孔，利用自屏蔽转运装置（参考束窗转运装置），将废靶容器从操作热室内逐一转出至辐射管理中心。

(5) 工作流程

质子束连续辐照靶材和结构材料小于等于 10 天后，靶组件的放射性活度高、剂量大，人员无法靠近进行有效的操作和维护。需要通过操作热室内装置设备遥控操作维护系统，用远程控制的方式完成靶容器及靶组件的安装与拆卸、靶组件在操作热室内的转运和分拣、靶容器与冷却结构的装配与拆卸，并在操作过程中保证各转运和操作系统与操作热室对接时良好的屏蔽和密封效果，避免放射性物质的泄漏。正常运行工况下靶辐照和转运的主要工艺流程如图 3-26 所示。

流程如下：

- 1) 进料：未辐照靶件通过进料手套箱及水平进料通道，将装有靶片的托盘送入 T1 热室的靶片操作台；
- 2) 上靶：T1 热室内完成靶组件靶片装填、靶容器盖锁紧密封后，推入靶车，完成上靶；
- 3) 辐照：T1 辐照室打靶，完成后将辐照后靶件送入 T1 热室；
- 4) 出料：T1 热室内设备将靶件从后区去取，装入 AGV 上双盖屏蔽容器；
- 5) 转运：AGV 经提升机到一层，然后将辐照后靶片送到分离系统区域。

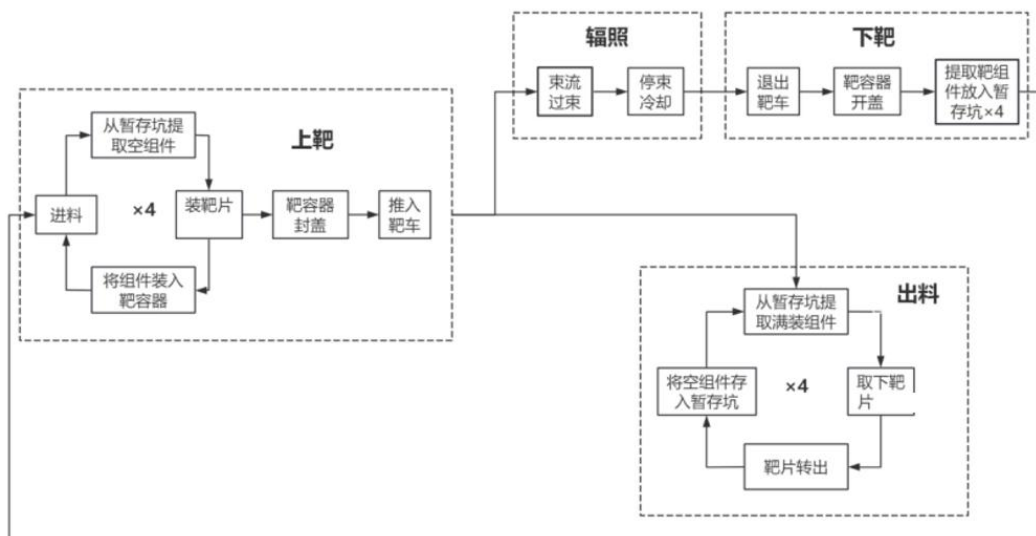


图 3-26 靶 1 运行工艺流程

3.2.1.5.2.2 靶站 2 系统

(1) 设备组成

靶站 2 系统的核心工艺与靶站 1 类似，同样是将靶组件由外部转入维护热室，再转入辐照室。靶件经过质子束照射后，将靶组件原路返回，经由靶组件、封装容器操作装置完成靶件的封装工作，之后利用屏蔽转运装置将封装容器转出。

靶站 2 由于束流辐照功率小，因此内部转运及部分设备有一定区别，具体如下。

1) 靶组件

靶站 2 靶组件采用单组叠片式靶件设计，总共由 4 片靶片及 4 片束流挡板组成，具体结构下图所示。其中靶体材质为 ^{232}Th ，外层覆膜为镍基合金，框架为不锈钢组成，镍基合金与外层不锈钢框架密封焊接，实现内部 ^{232}Th 的严密封装，避免后续放射性气体产物的释放。

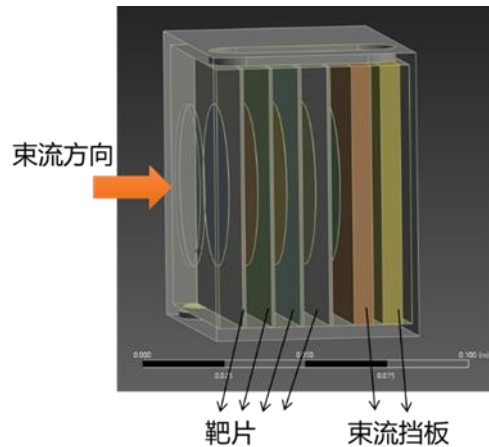


图 3-27 靶组件示意图

2) 辐照室设备

靶站 2 辐照室尺寸约为 2.5×1.8×2.5 米（长*宽*高），该室内设备主要包括冷却钢桶，用于靶组件冷却及辐照时定位。束流方向从下图右侧向左，穿过屏蔽墙内预埋管道辐照到靶组件上，束流管道端面带有金属密封装置，可以实现与辐照室壳体的密封，避免辐照时管道内的冷却水泄露。

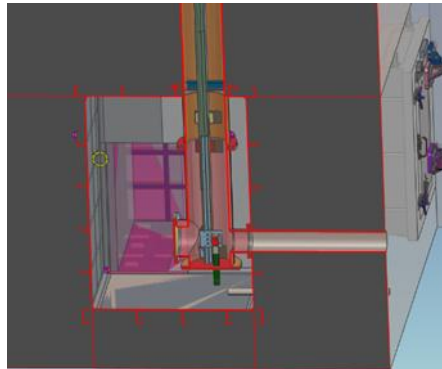


图 3-28 靶站 2 辐照室设备示意图

3) 维护热室设备

靶站 2 维护热室（T2 热室）区域尺寸约为 3×2.5×2.5 米（长*宽*高），布局如下图所示。内部主要设备包括管道传输装置，用于靶件底座安装及靶组件从地上一层到地下一层的转运；AGV 进料通道主要用于载有屏蔽罐的 AGV 经由滑动屏蔽门进入维护热室前的进出料操作，其中热室内有密封盖板，用于热室的密封；同时，维护热室内还布置有靶件装卸装置，用于从 AGV 屏蔽罐及管道传输装置上取、放靶片。

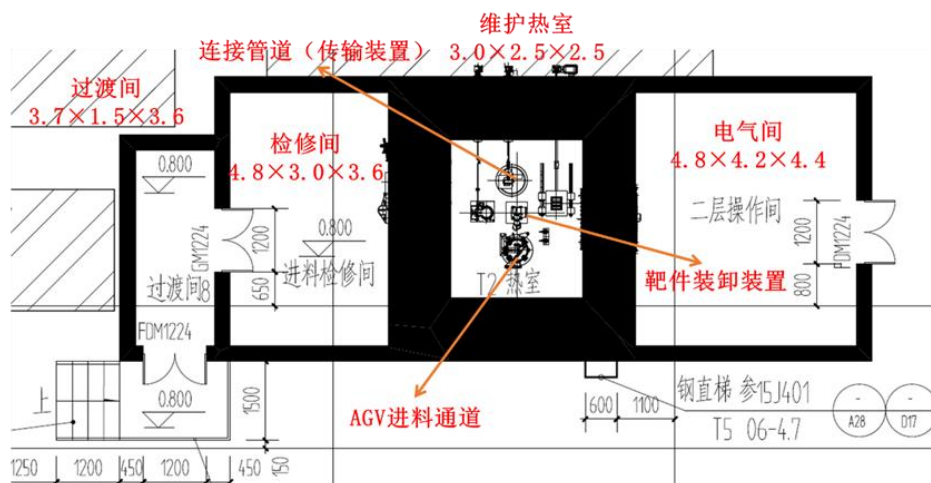


图 3-29T2 热室设备示意图

4) 检修间及过渡间

检修间及过渡间用于维护热室内设备的定期保养和维护所用，与维护热室通过壁厚为 1.2 米的混凝土屏蔽墙及密封门隔离。检修间内部布置有常用的检修工具。

检修间尺寸：4.8×3.0×3.6 米（长宽高）。

过渡间尺寸：3.7×1.5×3.6 米（长宽高）。

5) 电气间

电气间与维护热室通过厚度为 1.0 米的屏蔽墙屏蔽，内部主要用于放置维护热室内靶件装卸装置、管道传输装置等的操作台和电气柜。

电气间尺寸：4.8×4.2×4.4 米（长宽高）。

(2) 靶件运输

靶站 2 靶件运输主要采用 AGV 运输小车，示意路径如下图所示，其中双向箭头为靶站 2 靶片转入转出路线，虚线部分为从负一层往顶部维护热室垂直转运路线。靶件运输主要由自动导航 AGV 及其上载有的双盖屏蔽转运容器完成靶件在分离热室、维护热室及三废区域等的转运和传输。由于分离热室、维护热室等部分需要转运的房间不在同一层，因此涉及上下楼层的区域布置有自动升降装置，用于 AGV 的升降操作。

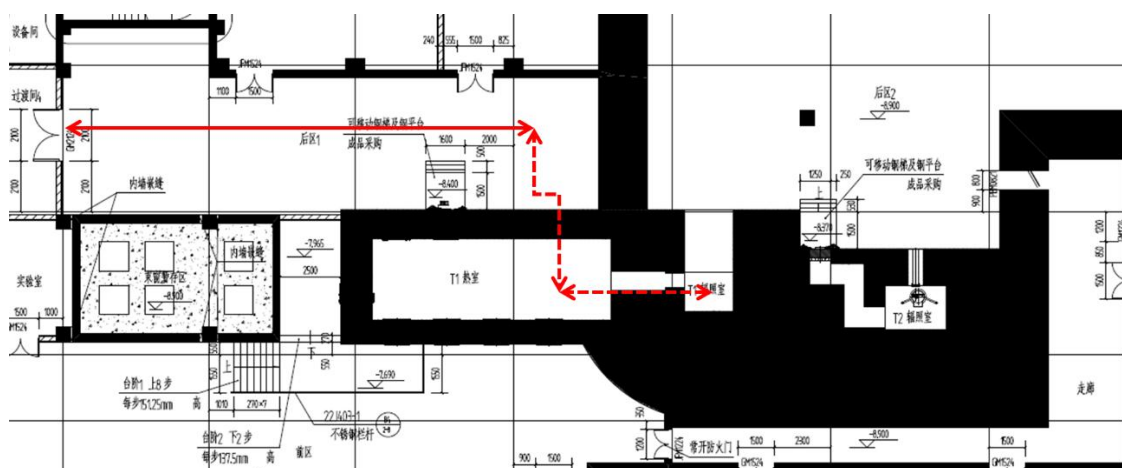


图 3-30 靶站 2 靶件转运路线示意

(3) 靶站 2 固废转运

靶站 2 固废主要包括辐照过程中由于束流扫描系统或者冷却系统失效等原因意外损伤且无法进行分离处理的靶片，以及需要每半年更换一次的靶窗管道。

对于意外损伤的靶片，在通过管道传输装置从辐照室转移到维护热室，维护热室下靶后传入废靶件处理罐体，该罐体与转运系统内双盖系统匹配。由双盖系统转出热室后，全程密封，并经 AGV 运往负一层西侧的固废暂存间。转运路径与靶件转运路径一致。

对于辐照过后需要更换靶窗管道，处理流程如下图所示。

辐照后的靶窗管道由于窗体等发生活化，因此在转运过程中全程装在屏蔽容器内进行转运，屏蔽容器由一定厚度的铅层外覆不锈钢包壳组成。

新靶窗管道及辐照后靶窗管道更换作业流程主要由自动化机构实现。当辐照后管道被自动装入屏蔽容器后，由操作人员短暂从负一层通过安全吊钩吊装到一层倒罐区临时存储，最后由倒罐区吊装到汽车门斗区域，随后由自动化小车转运到辐射管理中心，示意图见图 3-31，该过程的三维示意图见图 3-32，倒罐区位置，以及靶窗管道在一层的移动路线见图 3-33。



图 3-31 新靶窗管道安装及辐照后靶窗管道更换作业流程

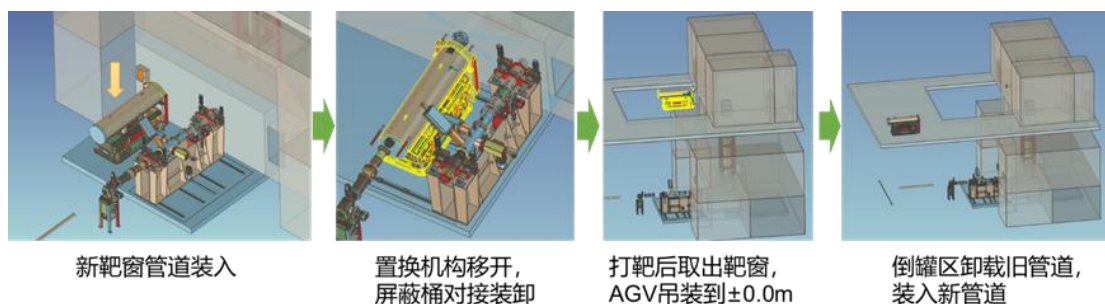


图 3-32 靶窗管道转移三维示意图

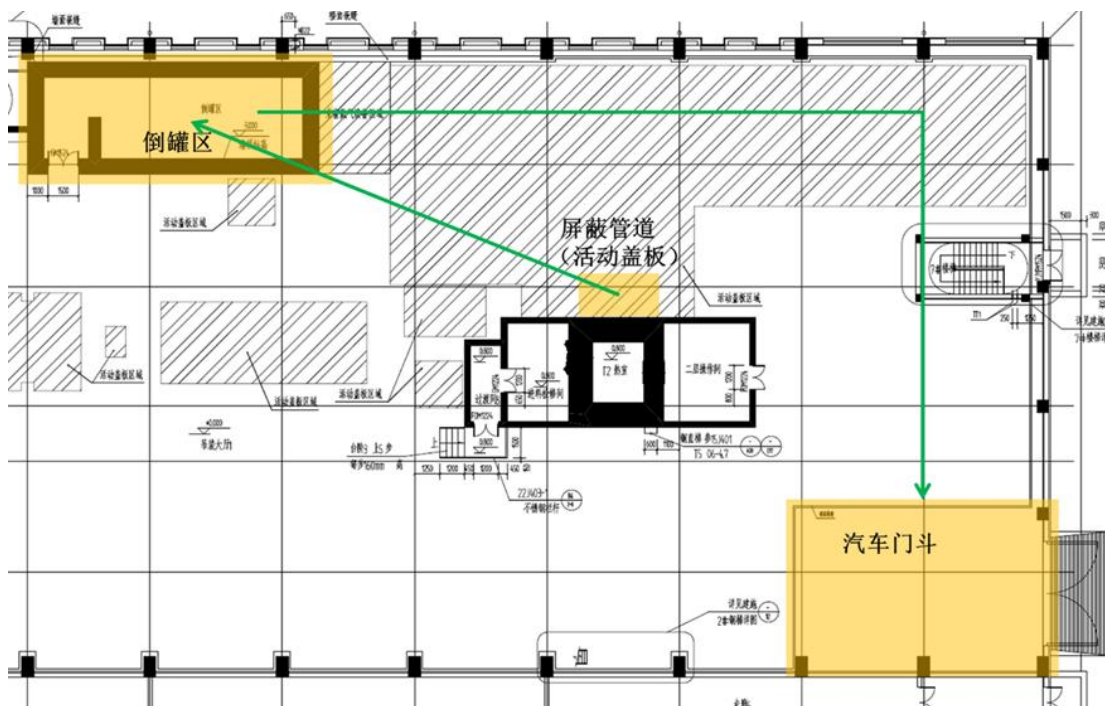


图 3-33 靶窗管道倒罐及临时储存区

(4) 工作流程

靶站 2 辐照室设计指标为 115MeV@0.25mA 质子束连续辐照靶材，辐照时间小于等于 10 天，采用远程操作方式实现靶件与靶座的装卸、转运等操作。操作流程如下图所示：



图 3-34 操作流程图

- 1) 进料：未辐照靶片通过 AGV 上的转运屏蔽罐转运到靶站，经滑动屏蔽门送入地上一层维护热室；
- 2) 上靶：维护热室内设备将靶件装入管道运输装置上的底座内，完成后通过运输装置从地上一层送入地下一层辐照室；
- 3) 辐照及下靶：辐照室打靶，完成后再由管道运输装置将辐照后靶件送入地上一层维护热室；
- 4) 出料：地上一层维护热室内机械手设备将靶件从底座内取下，装入 AGV 上双盖屏蔽转运容器；
- 5) 转运：AGV 经提升机将辐照后靶片送到分离系统。

3.2.1.6 同位素分离和质量检测

3.2.1.6.1 分离热室大厅

本项目于分离热室子项一层分离热室大厅内布设两条分离热室线。单条分离热室线配置 4 座热室（编号 1#~4#）及 2 台分装手套箱（编号 5#~6#），两条分离热室线共用前区功能区域。项目整体设置 2 套核素分离设备体系，可实现

独立运行或同步作业。两条分离热室线的操作对象、源项条件及生产工序流程完全一致。两条分离热室线整体布置示意详见图 3-35。

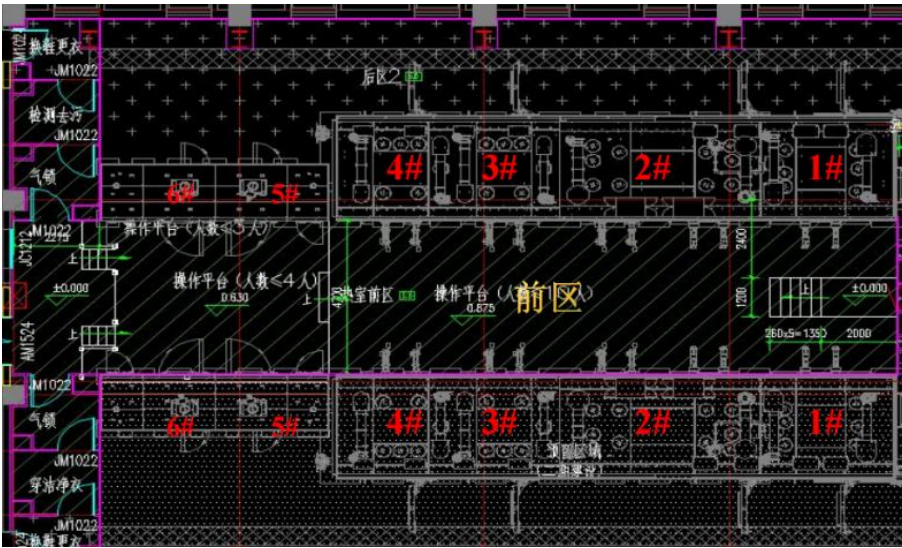


图 3-35 分离系统设备示意图

分离热室线的主要功能是：靶件接收、切割及溶解，同位素分离，同位素纯化，以及同位素分装，同时保障操作人员与环境的辐射安全。分离热室线设备参数详见表 3-6。

表 3-6 单条分离热室线设备参数表

设备名称	功能描述	数量，台	主要参数	备注
1#热室	实现辐照后靶件的拆解、溶解	1	屏蔽厚度：前：220mm（铅），后：190mm（铅），左：0mm，右：330mm（碳钢），底：210mm（碳钢），顶：270mm（碳钢）；密封等级：1 级密封；	配备 ER 机械臂 1 支，机械手 2 只；窥视窗 1 个；进排风高效过滤器；
2#热室	实现辐照后靶件的粗分离	1	屏蔽厚度：前：220mm（铅），后：190mm（铅），左：60mm（铅），右：0mm，底：210mm（碳钢），顶：270mm（碳钢）；密封等级：1 级密封；	配备 ER 机械臂 1 支，机械手 4 只；窥视窗 2 个；进排风高效过滤器；

3#热室	粗产品中 Ra-223 的纯化	1	屏蔽厚度：前：180mm（铅），后：150mm（铅），左：0mm，右：0mm，底：150mm（碳钢），顶：180mm（碳钢）； 密封等级：1 级密封；	配备 ER 机械臂 1 支，机械手 2 只；窥视窗 1 个；进排风高效过滤器；
4#热室	粗产品中 Ac-225 的纯化	1	屏蔽厚度：前：180mm（铅），后：150mm（铅），左：280mm，右：0mm，底：150mm（碳钢），顶：180mm（碳钢）； 密封等级：1 级密封；	配备 ER 机械臂 1 支，机械手 2 只；窥视窗 1 个；进排风高效过滤器；
5#手套箱	纯化后 Ra-223 的分装	1	屏蔽厚度：前：90mm（铅），后：70mm（铅），左：90mm，右：90mm，底：120mm（碳钢），顶：70mm（铅）； 密封等级：1 级密封；	配备窥视窗 1 个；进排风高效过滤器；
6#手套箱	纯化后 Ac-225 的分装	1	屏蔽厚度：前：90mm（铅），后：70mm（铅），左：90mm，右：90mm，底：120mm（碳钢），顶：70mm（铅）； 密封等级：1 级密封；	配备窥视窗 1 个；进排风高效过滤器；

3.2.1.6.2 工作流程

以单条分离热室线为例，其核素分离过程包含靶件接收、切割、溶解、同位素分离、纯化、分装全套工序，整套连续工艺作业耗时约 5 天。全流程作业均集中于 1#~6#密封箱室内完成，无跨区转运及外露作业环节，工艺集成度与安全性能优异。分离全程中，各密封箱室持续维持-100Pa~-200Pa 的稳定负压工况，可有效阻隔放射性介质外泄、防止外界杂质侵入，规避交叉污染与安全隐患，符合核素生产安全及工艺规范要求。该分离热室线主工艺设备为一体化全自动装置，可实现就地/远程两种操作模式。操作人员可通过中央控制室计算机远程控制，或热室前区机柜现场控制，全自动完成整套核素分离工艺流程。分离系统工艺流程及产污示意图见图 3-36，流程具体如下：

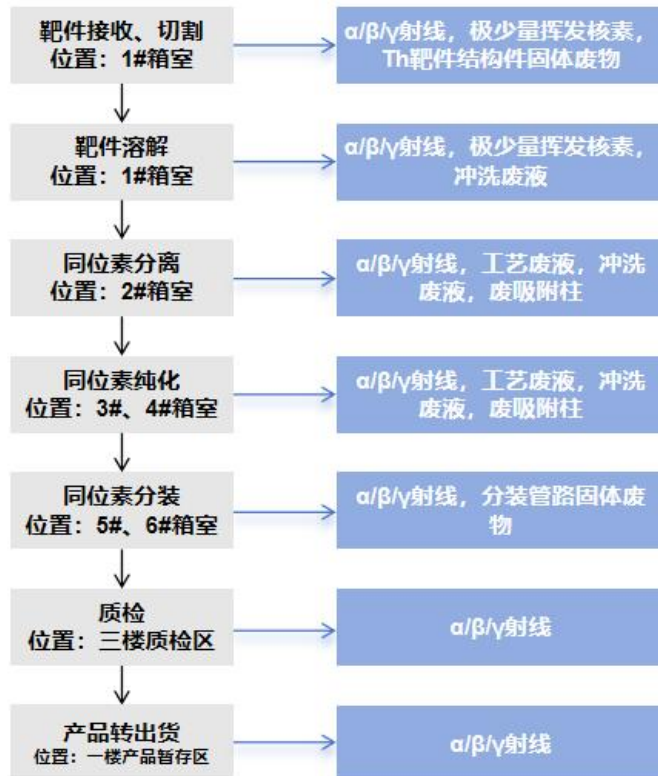


图 3-36 分离系统工艺流程及产污示意图

3.2.1.6.2.1 靶件的接收

经靶站辐照后的钚靶组件，于靶站热室完成拆解并置入转运内罐；在人员监护下，采用双盖密封屏蔽罐配合 AGV 转运小车输送至分离热室后区，经双盖密闭机构转入 1#箱室内进行后续操作。单次转运靶件 1~2 件，单条分离热室生产线日处理上限为 2 件，本工序无三废产出。

3.2.1.6.2.2 辐照靶片切割和溶解

在 1#箱室中，工作人员通过远程控制系统将钚靶件从转运内罐放置切割台上完成切割，靶片转至溶解罐中，在酸作用下完成靶片溶解，最终获得澄清溶液。其中靶件结构件作为固废放在热室内固废桶中，在系统流程运行结束后通过密封双盖机构转出热室，送至负一层固废暂存间。而在切割和溶解过程产生了极少量的挥发核素，通过热室工艺排风系统过滤排放。该运行过程无工艺废液产生。在

非运行状态下产生的极少量的管路冲洗液通过低放废液管路排入负一层低放废液罐。该过程工艺操作耗时约 1 天。辐照后靶件进入 1#热室时刻的辐射源项见附件 5。

3.2.1.6.2.3 同位素分离

1#箱室的溶解液通过热室屏蔽内液体管路输送到 2#箱室进行同位素分离操作，工作人员通过远程控制系统，利用自动化分离系统，在一定工艺条件下，分离得到粗组分 1、粗组分 2、粗组分 3。其中分离柱作为固废放在热室内固废桶中，在系统流程运行结束后先通过热室底部通道送至 1#箱室，然后通过密封双盖机构转出热室，送至负一层固废暂存间。在分离过程产生工艺废液，在系统流程运行结束后，通过废液管路，排入负一层中放废液罐中。该运行过程无工艺废气产生。热室工艺排风系统过滤排放。在非运行状态下产生的极少量的管路冲洗液通过低放废液管路排入负一层低放废液罐。该过程工艺操作耗时约 1 天。

3.2.1.6.2.4 Ra-223 的纯化

2#箱室内的同位素粗组分 1 溶液通过箱室内部液体管路传输至 3#箱室内。工作人员通过计算机控制自动化色谱纯化装置，在一定工艺条件下，从粗组分 1 中纯化得到 ^{223}Ra 溶液。其中色谱柱作为固废放在热室内固废桶中，在系统流程运行结束后先通过热室底部通道送至 1#箱室，然后通过密封双盖机构转出热室，送至负一层固废暂存间。在纯化过程产生了工艺废液，在系统流程运行结束后，通过废液管路，排入负一层中放废液罐中。该运行过程无工艺废气产生。热室排风通过热室工艺排风系统过滤排放。在非运行状态下产生的极少量的管路冲洗液通过低放废液管路排入负一层低放废液罐。该过程工艺操作耗时约 2 天。3#热室内的辐射源项见源项见附件 5。

3.2.1.6.2.5 Ac-225 的纯化

2#箱室内的粗组分 2 通过箱室内部液体管路传输至 4#箱室内。工作人员通过计算机控制自动化色谱纯化装置，在一定工艺条件下，从粗组分 2 中纯化得到 ^{225}Ac 溶液。其中色谱柱作为固废放在热室内固废桶中，在系统流程运行结束后先通过热室底部通道送至 1#箱室，然后通过密封双盖机构转出热室，送至负一层固废暂存间。在纯化过程产生了工艺废液，在系统流程运行结束后，通过废液管路，排入负一层中放废液罐中。该运行过程无工艺废气产生。热室排风通过热室工艺排风系统过滤排放。在非运行状态下产生的极少量的管路冲洗液通过低放废液管路排入负一层低放废液罐。该过程工艺操作耗时约 2 天。4#热室内的辐射源项见源项见附件 5。

3.2.1.6.2.6 Ra-223 的分装

3#箱室产生的 ^{223}Ra 溶液，通过管路传输至 5#箱室。工作人员通过远程控制系统操作分装装置，将 ^{223}Ra 溶液样品自动分装入多个西林瓶中，完成一批次分装后，每个同位素产品西林瓶被机械臂放置于贴标出料舱，贴好标签装入铅罐后，由工作人员从前区工作箱的贴标出料舱中将包装好的放射性产品移出，并送至一层产品存储间进行暂存。同时，分装过程中分装少量产品溶液作为质检样品，通过铅罐包装，工作人员送至质检区进行产品检测。其中分装管路作为固废放在工作箱内固废桶中，在分装流程运行结束后将固废桶通过分装工作箱底部的废物仓转出，送至固废暂存间存放解控。在分装过程无工艺废气和工艺废液产生。分装箱室排风通过热室工艺排风过滤排放。在非运行状态下产生的极少量的管路冲洗液收集到西林瓶中，作为固废暂存，由于废液中放射性核素基本为 ^{223}Ra 及其衰变子核，当放置 10 个半衰期后，西林瓶中的放射性活度接近本底，可完成放射性解控。该过程工艺操作耗时约 1 天。5#手套箱内的辐射源项见源项见附件 5。

3.2.1.6.2.7 Ac-225 的分装

4#箱室产生的 ^{225}Ac 溶液，通过管路传输至 6#箱室。工作人员通过远程控制系统操作分装装置，将 ^{225}Ac 溶液样品自动分装入多个西林瓶中，完成一批次分装后，每个同位素产品西林瓶被机械臂放置于贴标出料舱，贴好标签装入铅罐后，由工作人员从前区工作箱的贴标出料舱中将包装好的放射性产品移出，并送至一层产品存储间进行暂存。同时，分装过程中分装少量产品溶液作为质检样品，通过铅罐包装，工作人员送至质检区进行产品检测。其中分装管路作为固废放在工作箱内固废桶中，在分装流程运行结束后将固废桶通过分装工作箱底部的废物仓转出，送至固废暂存间存放解控。在分装过程无工艺废气和工艺废液产生。分装箱室排风通过热室工艺排风过滤排放。在非运行状态下产生的极少量的管路冲洗液收集到西林瓶中，作为固废暂存，由于废液中放射性核素基本为 ^{225}Ac 及其衰变子核，当放置 10 个半衰期后，西林瓶中的放射性活度接近本底，可完成放射性解控。该过程工艺操作耗时约 1 天。6#手套箱内的辐射源项见源项见附件 5。

3.2.1.6.2.8 质检区

本项目于分离热室子项三层质检区用于开展同位素产品的检测。质检区主要分为理化检测区和生物检测区。

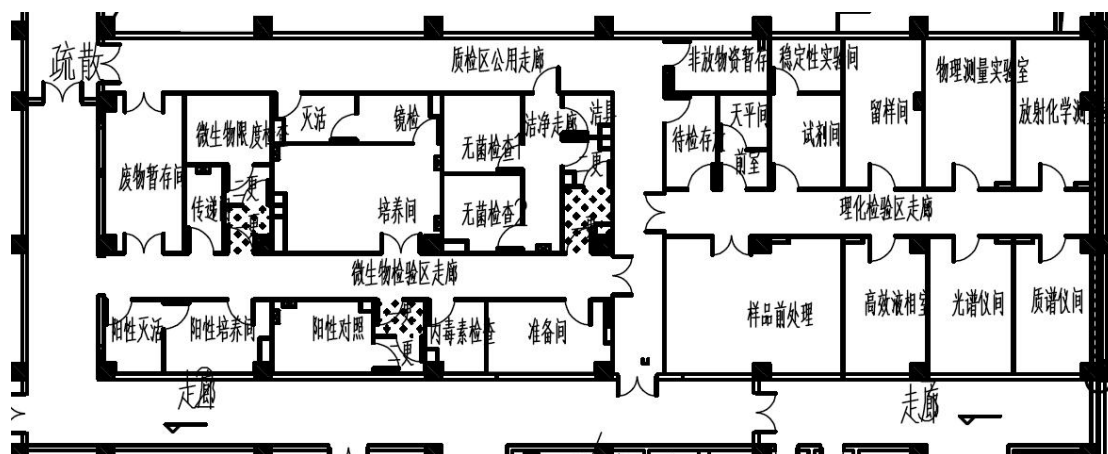


图 3-37 质检区功能布置图

3.2.1.6.2.9 质量检验内容

完成核素分装后，需要对产品进行抽样检测，主要确定产品的核纯度和微生物指标，该过程主要在三楼质检区完成。

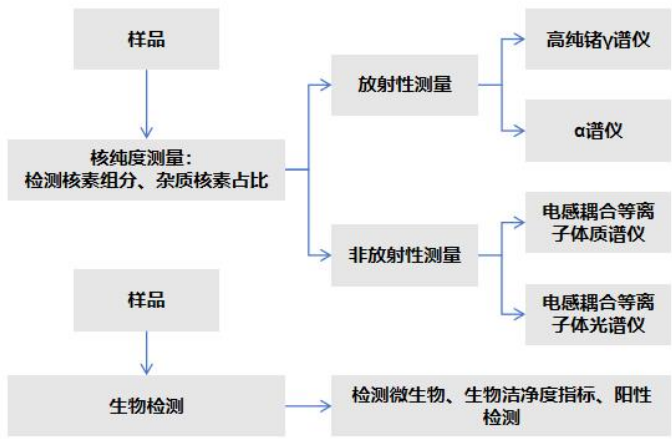


图 3-44 质检工艺流程示意图

质检样品由工作人员从热室前区出料仓取出后，送至三楼质检区检测。其中²²⁵Ac 质检常规活度不超过 700k Bq，²²³Ra 质检常规活度不超过 110k Bq。

²²⁵Ac 和 ²²³Ra 产品的质检内容基本一致，下面以 ²²⁵Ac 展开描述。质量检验主要包括同位素产品、原料的物理化学性质检测和生物检测的测定。物理化学检测包括：产品性状、pH 值、化学纯度、放射性核纯度、放射化学纯度，生物检测包括：无菌检测、内毒素检测、微生物检查、阳性对照等。

（1）放射化学纯度的测定

工作人员在三层质检区域制样间对 1 个质检样品进行分样，一部分分装样品在高效液相间内使用放射性薄层扫描仪和高效液相色谱仪进行样品的放射化学纯度的测定。每种放射性同位素质检样品，质检人员进行放射化学纯度检测过程所需的时间约 2 小时/次。

（2）化学纯度的测定

上述制备的另一部分分装样品送至三层光谱仪间和质谱仪间，使用电感耦合等离子质谱仪（ICP-MS）和电感耦合等离子光谱仪（ICP-OES）进行杂质元

素的测定，计算产品的化学纯度。每种放射性同位素质检样品，每台设备操作时间需要 1 小时/次，总计约 2 小时。

（3）放射性核纯度的测定

工作人员在质检区样品前处理室通风橱中对质检样品在利用电化学沉积法完成 ^{225}Ac 和 ^{223}Ra 溶液样品的 α 面源制备，之后将面源送至物理测量实验室，使用 α 谱仪进行杂质核素的测定。每种放射性同位素质检样品，工作人员从制样到开始 α 测量该过程所需时间约 1 小时/次。

对质检样品在物理测量实验室，放置样品在低本底铅室，利用高纯锗 γ 系统进行放射性测量，通过分析谱图获得产品放射性核纯度。开始 γ 测量该过程所需的时间约 2 小时/次。

分离热室最终的目标核素产物通过一部分用于靶向药物实验室的各项实验，剩余核素现阶段在热室内进行暂存，待其衰变一段时间后作为废液处理。

（4）阳性对照

验证试验体系（培养基、环境、操作）有效，排除假阴性验证试验体系（培养基、环境、操作）有效。在阳性培养间，将样品接入阳性标准菌种，按规定温度、时间培养；通过阳性对照实验观察菌种生长情况，确认对照验证试验有效性。

（5）内毒素检查

在内毒素检查间，利用鲎试剂法，在衰变一段时间的放射性样品中加鲎试剂，经过恒温孵育，观察凝胶或读数，分析得到内毒素限值，进行同位素产品和原料样品的细菌毒素（热原）的检查。

（6）无菌检查

在培养间，将衰变一段时间的放射性样品接入培养基，按规定温度、时间培养；观察培养基菌种生长变化情况，完成阳性镜检鉴定。判定整批产品是否符合无菌要求。

（7）微生物限度检查

在微生物限度检查间，进行微生物数量检测，在规定的温度下培养后进行菌落数检测，完成微生物限度检查。

同位素产品和原料通过以上各项检测，完成放行检测。放射性同位素成品、原辅料、包材、中间产品留样，专门存放于留样间，实行双人双锁、分区存放，
满足 GMP、辐射安全和药典留样管理要求。

3.2.1.7 成品运输以及销售

3.2.1.7.1 产品运输

本项目销售的成品由建设单位委托有资质单位进行运输，运输期间的辐射安全管理由运输单位负责。

建设单位应开展辐射工作人员可能遭受的辐射危害以及应采取的防护措施进行培训，确保限值辐射工作人员的职业照射。本项目从事放射性药品分类、包装、标记、贴标签的人员应开展熟悉《放射性物品安全运输规程》

（GB11806-2019）一般规定的培训，并接收与其履行职责有关的详细培训，并开展货包操作设备的正确使用和放射性物品恰当贮存办法的培训，并明确现有的应急响应信息，并培训工作人员防护服和防护设备的使用。

建设单位生产和销售的产品，按照《放射性物品安全运输规程》

（GB11806-2019）等相关法律法规要求，采用专用包装容器，放射性药物产品在出厂运输前必须进行表面剂量率及表面污染水平监测，需满足放射性药物货包外表面任一点的最高辐射水平不超过 2mSv/h， β 和 γ 发射体及低毒性 α 发射体的表面污染水平不超过 4Bq/cm²，对所有其他 α 发射体不超过 0.4Bq/cm²。

运输工作由建设单位委托有资质的专业公司，遵守《放射性物品运输安全管理条例》、《放射性物品运输安全监督管理办法》和《放射性物品安全运输规程》等法律法规的要求，确保放射性物品的运输安全。

3.2.1.7.2 销售

公司针对产品的销售签发、运输、意外退回签收等各个环节制定相应的规程制度来确保销售过程的安全管理，销售模式采用以销定产形式，即产即销，根据销售订单，将包装好的货包从成品仓库中取出，委托有资质单位外运，销售给需求单位。外运前对运输容器、货包表面污染和辐射水平进行检测，满足运输要求方可发货。货包外黏贴、填写签收单，内容包括：品名、批号、放射性活度、体积、标定时间、发货时间、订购单位以及订购剂量。

在销售放射性药物的过程中，将严格按照相关法律法规的要求，严格按照销售流程进行销售：

- （1） 用户与公司签订放射性药物销售合同；
- （2） 审查用户具有辐射安全许可证，确认该用户的许可证的有效期和许可的种类和范围可以满足相关要求；
- （3） 与用户签订《非密封放射性物质转让协议》；
- （4） 由用户在国家核技术利用辐射安全监管系统中填写转让核素名称和数量，提交审批表申请并打印；
- （5） 将协议、转让审批表，或审批时要求提供的其他材料连同公司《辐射安全许可证》正副本复印件加盖公司公章后交用户单位，由用户单位去当地省级环保部门办理非密封放射性物质转让审批；
- （6） 全部手续办理完成后，与用户确定送药的时间地点。公司依照用户提前预订告知的放射性药品种类、剂量和数量，制备放射性药物，并配备专门的运输车辆进行配送；
- （7） 公司在进行放射性药物转移前，需进行在《非密封放射性物质销售台账》上进行登记确认，做到账物相符；

放射性药物运输到用户单位后，填写药品交接单。每次的转让活动，双方人员应履行交接手续，并在交接单上签字确认。

3.2.2 超重乙级实验室

3.2.2.1 工艺分析

超重乙级实验室包括实验制靶、放射性同位素回收、超重化学研究与微流体萃取实验研究，基于实验终端的需求，实验制靶和回取实验每年仅针对一种核素进行操作。

场所内放射性同位素包括 Am-243、Am-241、Cf-252、Cf-251、Cf-249、Cm-248、Cm-244、Pu-244、Pu-240、Ta-182、Ta-179、Nb-95。其中 Am-243、Am-241、Cf-252、Cf-251、Cf-249、Cm-248、Cm-244、Pu-244、Pu-240 主要用于实验制靶及放射性同位素回取实验，Ta-182、Ta-179、Nb-95 主要用于超重化学研究与微流体萃取实验研究。

表 3-7 超重乙级实验室实验类型一览表

核素	半衰期	实验类型
Am-243	7370a	实验制靶、放射性同位素回收
Am-241	432.2a	
Cf-252	2.645a	
Cf-251	898a	
Cf-249	351a	
Cm-248	348000a	
Cm-244	18.1a	
Pu-244	81300000a	
Pu-240	6561a	
Nb-95	34.9d	超重化学研究、微流体萃取实验研究
Ta-182	114d	
Ta-179	1.82a	

3.2.2.2 工艺设备

超重乙级室工艺设备参数见表 3-8。

表 3-8 超重乙级实验室工艺设备参数一览表

区域	设备名称	规格参数（长×宽×高，mm）	屏蔽参数（材质+厚度）	数量
靶件制备室 2	手套箱	1200×900×750	3mm 钢板+5mm 铅板 +3mm 的钢板	1
靶件制备室 2	通风橱	1300 ×1190×800	/	2
靶件制备室 1	通风橱	1300 ×1190×800	/	1
靶件检测间	通风橱	1300 ×1190×800	/	1
备注：工作人员在通风橱进行操作期间采用定制的 L 型 5mm Pb 屏进行屏蔽； ²⁵² Cf 采用 L 型 10mm Pb+5cm 含硼聚乙烯复合中子屏蔽。				

3.2.2.3 工作原理及工作流程

3.2.2.3.1 超重元素合成实验制靶及放射性同位素回取

各核素的超重元素合成实验制靶及放射性同位素回取工作流程见图 3-38，由于实验终端的需求，实验制靶和回取实验每年仅针对一种核素进行操作，实验制靶和放射性同位素回取实验不会再同一天操作。

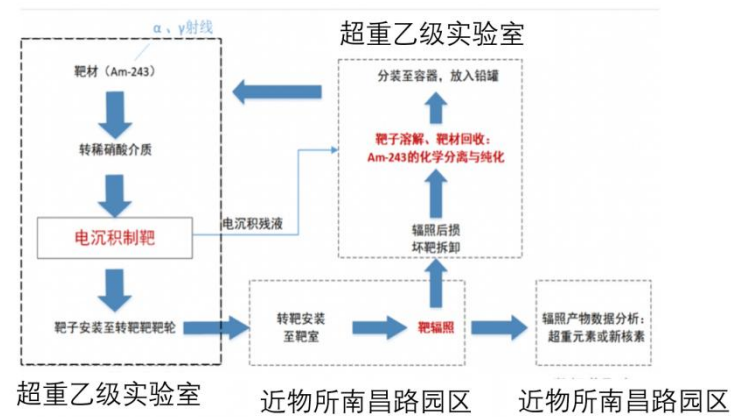


图 3-38 超重元素合成实验制靶及放射性同位素回取示意图

注：图示中超重乙级实验室为本次环评内容，近物所南昌路园区内的活动，以及两地间的靶件的运输不属于本次环评范围。

（1） 分核素制靶工艺（9 种核素分级独立流程）

该实验主要目的是为超重元素合成实验进行制靶。针对不同核素的化学性质、辐射类型、毒性等级、沉积行为差异，采用基准工艺+分级差异化操作，其中²⁴¹Am、

^{243}Am 共用通用分子镀基准工艺（ ^{241}Am 高活度场景仅升级屏蔽与剂量管控，核心电沉积、纯化工艺参数不变）， $^{240}\text{Pu}/^{244}\text{Pu}$ 、 $^{244}\text{Cm}/^{248}\text{Cm}$ 、 $^{249}\text{Cf}/^{251}\text{Cf}/^{252}\text{Cf}$ 分别执行对应分级流程，严禁交叉操作与混批处理。超重元素合成实验制靶以及放射性同位素回取实验流程及产物图见图 3-39 和图 3-40。

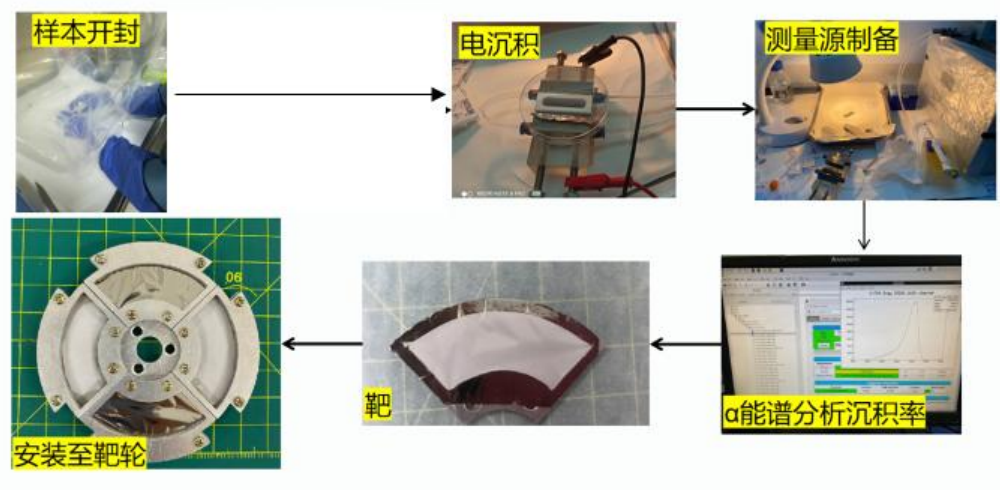


图 3-39 超重元素合成实验制靶实验流程及产物示意图

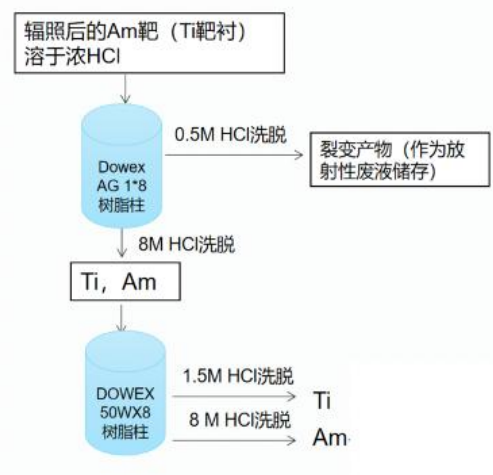


图 3-40 超重元素合成实验放射性同位素回取实验流程及产物示意图

按辐射风险等级与化学特性分为四类独立流程：①基准流程： ^{241}Am 、 ^{243}Am ；②Pu 系列流程： ^{240}Pu 、 ^{244}Pu ；③Cm 系列流程： ^{244}Cm 、 ^{248}Cm ；④高风险 Cf 系列流程： ^{249}Cf 、 ^{251}Cf 、 ^{252}Cf ，所有流程均在靶件制备室 2 通风橱内完

成，由于实验终端的需求，每次仅操作一种核素靶件，超重乙级实验室同一天仅操作一种核素的一种实验。

①基准流程： ^{241}Am 、 ^{243}Am 分子镀制靶

a. 原料外购、储存

以 $^{241}\text{AmO}_2$ 、 $^{243}\text{AmO}_2$ 为原料，以液体形式密封于铅罐中，转运至近物所超重乙级实验室靶件制备室 2 保险柜。

b. 电沉积制靶

电沉积制靶位于靶件制备室 2 通风橱/手套箱，将原液进行电镀制靶，沉积过程中采用定制的 L 型 5mmPb 屏对沉积槽进行屏蔽，沉积完毕分析沉积残液的 α 能谱，计算 Am 沉积率，沉积过程约人员近距离操作时间约 10 分钟/次，分析时间约 10 分钟/次。

合格靶件运输至近物所南昌路园区进行辐照实验，不合格靶件/沉积残液进入回收纯化工序，提纯后重复回收用于后续电沉积制靶，电沉积过程中的废液及废料中含可回收 ^{241}Am 、 ^{243}Am ，收集后进入回收纯化流程，提纯制备制靶母液循环利用。

多次循环后无再利用价值的残余废液和固废不再回收，分类存入废水暂存间和固废贮藏间。

②Pu 系列独立流程： ^{240}Pu 、 ^{244}Pu 分子镀制靶

a. 原料外购、储存

以 $^{240}\text{Pu}(\text{NO}_3)_4$ 、 $^{244}\text{Pu}(\text{NO}_3)_4$ 硝酸溶液为原料，属于极毒 α 核素、低 γ ，无中子辐射，单独密封于 2.5mm Pb 罐，与 Am/Cm/Cf 核素分区存放，专用保险柜双人双锁管理，严禁与其他核素混放。

b. 电沉积制靶

电沉积制靶位于靶件制备室 2 通风橱/手套箱，将原液进行分子镀电镀制靶，沉积持续时间 1.5 小时。沉积过程中采用定制的 L 型 5mm Pb 屏对沉积槽进行屏蔽，沉积完成后单独收集 Pu 残液，单样分析时长 10min。沉积过程约人员近距离操作时间约 10 分钟/次，分析时间约 10 分钟/次。

合格靶件运输至近物所南昌路园区进行辐照实验，不合格靶件/沉积残液进入回收纯化工序，提纯后重复回收用于后续电沉积制靶，电沉积过程中的废液及废料中含可回收²⁴⁰Pu、²⁴⁴Pu，收集后进入回收纯化流程，提纯制备制靶母液循环利用。

多次循环后无再利用价值的残余废液和固废不再回收，分类存入废水暂存间和固废贮藏间。

③Cm 系列独立流程：²⁴⁴Cm、²⁴⁸Cm 分子镀制靶

a. 原料外购、储存

以²⁴⁴Cm(NO₃)₃、²⁴⁸Cm(NO₃)₃硝酸溶液为原料，属于强α放射性、中γ辐射、半衰期差异大，单独密封于 3mm Pb 罐，专用保险柜存放，与 Pu、Am 分区存放，与 Cf 中子核素严格隔离。

b. 电沉积制靶

电沉积制靶位于靶件制备室 2 通风橱/手套箱，将原液进行分子镀电镀制靶，沉积持续时间 2 小时。沉积过程中采用定制的 L 型 5mm Pb 屏对沉积槽进行屏蔽，沉积完毕分析沉积残液的α能谱，计算 Cm 沉积率，分析时间约 10 分钟。沉积过程约人员近距离操作时间约 10 分钟/次，分析时间约 10 分钟/次。

合格靶件运输至近物所南昌路园区进行辐照实验，不合格靶件/沉积残液进入回收纯化工序，提纯后重复回用于后续电沉积制靶，电沉积过程中的废液及废料中含可回收²⁴⁴Cm、²⁴⁸Cm，收集后进入回收纯化流程，提纯制备制靶母液循环利用。

多次循环后无再利用价值的残余废液和固废不再回收，分类存入废水暂存间和固废贮藏间。

④高风险 Cf 系列独立流程： ^{249}Cf 、 ^{251}Cf 、 ^{252}Cf 分子镀制靶

本流程为最高风险等级， ^{252}Cf 为强中子、强 γ 、极毒 α 核素。

a. 原料外购、储存

外购放射源，以 $\text{Pd-Cf}_2\text{O}_3$ 为原料，以液体形式密封于铅罐中，转运至近物所超重乙级实验室靶件制备室 2 的 Cf 专用保险柜,其中：

● ^{249}Cf 、 ^{251}Cf ：强 α 、强 γ 核素，密封于 5mm Pb+2cm 含硼聚乙烯复合屏蔽罐；

● ^{252}Cf ：强中子、强 γ 、极毒 α 核素，密封于 10mm Pb+5cm 含硼聚乙烯专用中子屏蔽罐；

b. 电沉积制靶（与其他核素完全差异化流程）

电沉积制靶位于靶件制备室 2 通风橱/手套箱，将取原液进行电镀制靶，沉积持续时间 1.5 小时。沉积过程中采用定制的 L 型 5mm Pb 屏对沉积槽进行屏蔽（ ^{252}Cf 采用 L 型 10mm Pb+5cm 聚乙烯复合中子屏蔽，全程屏蔽中子与 γ 辐射，禁止无屏蔽直触），全程机械手/长柄镊子操作，人员不直面沉积槽。沉积完毕分析沉积残液的 α 能谱，计算 Cf 沉积率，分析时间约 10 分钟。沉积过程约人员近距离操作时间约 10 分钟/次，分析时间约 10 分钟/次。

合格靶件运输至近物所南昌路园区进行辐照实验，不合格靶件/沉积残液进入回收纯化工序，提纯后重复回用于后续电沉积制靶，电沉积过程中的废液及废料中含可回收 ^{249}Cf 、 ^{251}Cf 、 ^{252}Cf ，收集后进入回收纯化流程，提纯制备制靶母液循环利用。

多次循环后无再利用价值的残余废液和固废不再回收，分类存入废水暂存间和固废贮藏间。

(2) 分核素靶材回收与纯化

回收纯化严格执行一核素一流程、废液固废分类收集，全程冷操作、分批次、屏蔽值守。

①Am 系列独立流程： ^{241}Am 、 ^{243}Am 辐照靶与废液回收纯化

a. 辐照靶中 Am 核素回收纯化

将辐照过的 Am 靶装入铅罐运送至超重乙级实验室靶件制备室 2 通风橱内，全程为冷操作，且分批次操作，操作全程采用 L 型 5mm Pb 屏进行屏蔽。溶解后用共沉淀法将微量的 Am 载带为沉淀，离心后 Am 与水相中 Ti 分离，经过离心、分离操作后，最终获得制靶溶液待用。

该过程操作时间约 4~6h，人员近距离接触时间约 1h。

b. 电沉积废液中 Am 回收与纯化：

电沉积制靶过程中会产生一定量的电镀废液，废液中目标核素的含量极少，约 1%，通过红外灯烘干废液后向废液烧杯中加入 $\text{HCl}+\text{H}_2\text{O}_2$ 后蒸干。加入 $\text{HCl}+\text{MeOH}$ (Methanol) 制成溶液流经阳离子 Dowex 树脂柱，用浓 HCl 将 Am 洗脱，洗脱液烘干后制成粉色的 Am 氧化物，然后加浓 HNO_3 后蒸干，再过一次 Dowex 阴离子树脂后得纯化产物，下柱液蒸干，转化为硝酸盐介质作为制靶母液，留待下一次制靶。

该回收流程约 6~8 小时，人员近距离接触时间约 1h。

两个环节制得的 ^{243}Am 溶液均储存在靶件制备室 2 保险柜中。

②Pu 系列独立流程：辐照靶与废液 ^{240}Pu 、 ^{244}Pu 回收纯化

a. 辐照靶中 Pu 核素回收纯化

将辐照过的 Pu 靶装入铅罐运送至超重乙级实验室靶件制备室 2 通风橱内，全程为冷操作，且分批次操作，操作全程采用 L 型 5mm Pb 屏进行屏蔽。溶解后用共沉淀法将微量的 Pu 载带为沉淀，离心后 Pu 与水相中 Ti 分离，经过离心、分离操作后，最终获得制靶溶液待用。

过程操作时间约 4.5~6.5h，人员近距离接触时间约 1h。

b. 电沉积废液中 Pu 回收与纯化

电沉积制靶过程中会产生一定量的电镀废液，废液中目标核素的含量极少，约 1%，通过红外灯烘干废液后向废液烧杯中加入 HCl+H₂O₂ 后蒸干。加入 HCl+MeOH（Methanol）制成溶液流经阳离子 Dowex 树脂柱，用浓 HCl 将 Pu 洗脱，然后加浓 HNO₃ 后蒸干，再过一次 Dowex 阴离子树脂后得纯化产物，下柱液蒸干，转化为硝酸盐介质作为制靶母液，留待下一次制靶。

该回收流程约 6.5~8.5 小时，人员近距离接触时间约 1h。

两个环节制得的 Pu 溶液均储存在靶件制备室 2 保险柜中。

③ Cm 系列独立流程：²⁴⁴Cm、²⁴⁸Cm 回收纯化

a. 辐照靶中 Cm 核素回收纯化

将辐照过的 Cm 靶从靶框上切割剥离，装入铅罐运送至超重乙级实验室靶件制备室 2 通风橱内，全程为冷操作，且分批次操作，操作全程采用 L 型 5mm Pb 屏进行屏蔽。溶解后用共沉淀法将微量的 Cm 载带为沉淀，离心后 Cm 与水相中 Ti 分离，经过离心、分离操作后，最终获得制靶溶液待用。

过程操作时间约 4~6h，人员近距离接触时间约 1h。

b. 电沉积废液中 Cm 回收纯化

电沉积制靶过程中会产生一定量的电镀废液，废液中目标核素的含量极少，约 1%，通过低温烘干废液后，采用适配三价锕系的阳离子树脂洗脱工艺，减少

水解损失与杂质吸附，二次阴离子树脂深度去污，转化为硝酸盐介质作为制靶母液，留待下一次制靶。

该回收流程约 6~8 小时，人员近距离接触时间约 1h。

两个环节制得的 Cm 溶液均储存在靶件制备室 2 保险柜中。

④Cf 系列独立流程： ^{249}Cf 、 ^{251}Cf 、 ^{252}Cf 回收纯化

^{252}Cf 均执行中子屏蔽专项操作。

a. 辐照靶中 Cf 回收纯化

将辐照过的 Cf 靶从靶框上切割剥离，装入对应等级复合屏蔽罐运送至超重乙级实验室靶件制备室 2 通风橱内，全程为冷操作，且分批次操作，操作全程采用 L 型 5mm Pb 屏（ ^{252}Cf 采用 L 型 10mm Pb+5cm 含硼聚乙烯复合中子屏蔽）进行屏蔽。采用控温 HNO_3+HF 低泡溶解体系（避免气溶胶产生），溶解后用共沉淀法将微量的 Cf 载带为沉淀，离心后 Cf 与水相中 Ti 分离，经过离心、分离操作后，最终获得制靶溶液待用。

过程操作时间约 5~7h，人员近距离接触时间约 1h。

b. 电沉积废液中 Cf 回收纯化

电沉积制靶过程中会产生一定量的电镀废液，废液中目标核素的含量极少，约 1%，通过红外灯烘干废液后向废液烧杯中加入 $\text{HCl}+\text{H}_2\text{O}_2$ 后蒸干。加入 $\text{HCl}+\text{MeOH}$ （Methanol）制成溶液流经阳离子 Dowex 树脂柱，用浓 HCl 将 Pu 洗脱，然后加浓 HNO_3 后蒸干，再过一次 Dowex 阴离子树脂后得纯化产物，下柱液蒸干，转化为硝酸盐介质作为制靶母液，留待下一次制靶。

该回收流程约 7~9 小时，人员近距离接触时间约 1h。

两个环节制得的 Pu 溶液均储存在靶件制备室 2 保险柜中。所有 Cf 系列纯化母液采用中子- γ 复合屏蔽容器密封，单独存放于高活度保险柜，与其他核素完全物理隔离。

3.2.2.3.2 微流体溶剂萃取实验和超重化学实验

(1) 微流体溶剂萃取实验

该实验的主要目的是测定多种核素在不同体系的分配系数、萃取效率，为超重元素化学分离、萃取工艺参数优化提供基础实验数据。该实验涉及 ^{95}Nb 、 ^{182}Ta 、 ^{179}Ta ，以 ^{95}Nb 为例展开描述：

①原料外购、储存

^{95}Nb 原料外购，原料转运至靶件制备室 2 保险柜中暂存。

②萃取实验

实验日从保险柜中取出 ^{95}Nb 溶液至靶件制备室 2 通风橱，在通风橱内进行当天所需放射性溶液的分装， ^{95}Nb 的最大日操作量为 $3.70\text{E}+06\text{Bq}$ ，将含 ^{95}Nb 示踪剂的 $\text{HF-H}_2\text{SO}_4$ 溶液 2mL 与等体积的 TOA-甲苯有机相混合，两相震荡，离心分离，分别取 1mL 有机相与水相，用 HPGe 测量 γ 能谱，计算 ^{95}Nb 分配系数 D。按照最佳萃取条件，将 ^{95}Nb 示踪剂溶液用微注射泵注入玻璃微芯片混合器，每次注射体积约 150 μL ，调整泵流速，在微芯片通道内完成萃取后从各自出口两相分离，萃取液收集于塑料瓶，用 γ 能谱分析两相活度。计算分配系数 D 与萃取效率 E%。萃取流程约 1 小时。

④本流程核素最终处理方式

对实验后含 ^{95}Nb 、 ^{182}Ta 、 ^{179}Ta 的微流体萃取废弃水相、有机相残液、器皿清洗废液收集，在靶件制备室 2 负压通风橱内，分少量多次盛入聚四氟乙烯蒸发皿，全程 L 型 3mm Pb 屏蔽围护，采用电热恒温板 80~110 $^{\circ}\text{C}$ 低温缓慢蒸

干，严控微沸、避免液体飞溅和气溶胶产生。逐步挥发水分、硫酸、氢氟酸挥发组分、甲苯及有机萃取剂，最终在蒸发皿底部形成含 Nb、Ta 核素硫酸盐/氟化物片状固体残渣。自然冷却后，用长柄专用工具将片状残渣刮出，收集封装后装入 5 mmPb 5L 铅罐固废桶。分类存入固废贮藏间，后期委托处置。

（2）超重化学实验

超重化学实验的主要目的是完成真空腔体能量刻度、锕系核素化学行为基础研究，支撑超重元素化学机理分析。该实验主要涉及 ^{243}Am ，超重化学实验均在靶件制备室 2 的通风橱内完成。在真空腔体中，利用硅探测器进行能量刻度。

3.2.3 靶向药物实验室

3.2.3.1 工艺分析及主工艺流程

靶向药物实验室包括影像实验、细胞实验以及动物实验，总工艺流程见图 3-41，本次环评新增 Lu-177、F-18、Tc-99m 和 Tb-161。影像实验用于筛选靶向分子，涉及 Lu-177、F-18、Tc-99m 和 Tb-161 四种核素和 Micro-PET-SPECT/CT 小动物分子影像系统的使用；细胞实验用于细胞实验确定肿瘤细胞对药物的摄取效果，涉及 Lu-177、F-18、Tc-99m 和 Tb-161 四种核素；动物实验包括肿瘤模型治疗实验和动物体内分布实验，对放射性药物进行生物学论证，评价药物的治疗效果和安全性，涉及 Lu-177 和 Tb-161，各放射性同位素涉及的各类实验不会在同一天开展。

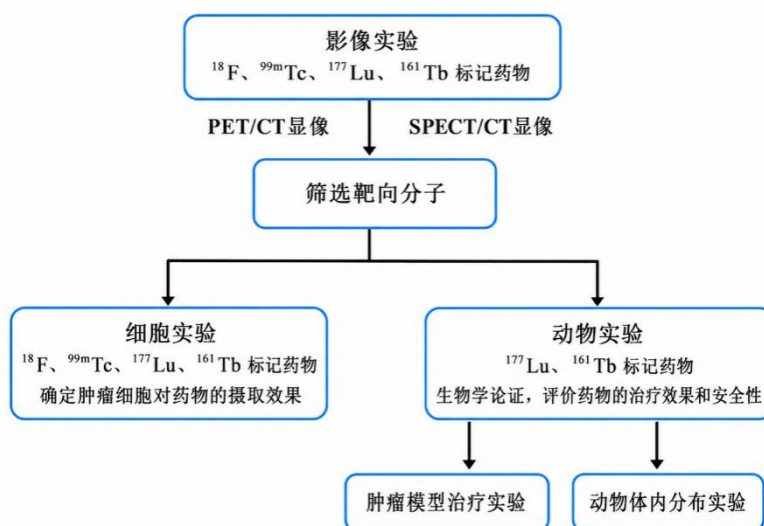


图 3-41 靶向实验室主工艺总流程示意图

3.2.3.2 设备组成

靶向药物实验室设备组成包括 Micro-PET-SPECT/CT 小动物分子影像系统及工作箱室。

(1) Micro-PET-SPECT/CT

本项目配置 Micro-PET-SPECT/CT 小动物分子影像系统，用于小动物正电子发射断层显像（PET）、单光子发射断层显像（SPECT）及 X 射线计算机断层成像（CT）。系统主要由以下部分组成：

- 射线产生与核素源相关部件：

PET/SPECT 放射性来源：来自经许可使用的放射性药物/放射性核素（如正电子核素 F-18 等；单光子核素如 Tc-99m、Lu-177、Tb-161 等）。

CT 射线源：内置 X 射线球管及高压发生器，用于 CT 扫描产生 X 射线，最大管电压 80kV，最大管电流 700μA。

- 探测器系统：

PET 探测器系统：由高密度闪烁晶体阵列（LYSO）与 SiPM（硅光电倍增器）读出模块组成，探测器呈多模块环绕布局，配合前端电子学实现能量判别与时间符合判别，用于探测正电子核素湮没产生的 511keV 成对 γ 光子符合事件，形成符合线（LOR）数据，为 PET 断层重建提供原始测量信息。

SPECT 探测器系统：采用 YSO 闪烁晶体阵列+SiPM（硅光电倍增器）光电读出组成的 γ 射线探测器，前端配置平行孔准直器（根据核素能量可配置低中能或高等平行孔准直器），用于对动物体内放射性核素发射的 γ 光子进行空间方向选择与探测，实现多角度投影采集并用于断层重建。

CT 探测器系统：采用 CMOS 平板探测，用于接收穿透动物体后的 X 射线透射信号，并将其转换为数字图像数据；配合机架旋转/几何扫描方式采集多角度投影数据，经重建获得 CT 断层图像，用于解剖定位及多模态融合（并可为 PET/SPECT 提供衰减校正所需的结构信息）。

- 小动物扫描舱及门机联锁：

大/小鼠动物舱：用于放置小鼠/大鼠等实验动物，具备固定装置、麻醉接口、动物监控系统等。

联锁装置：CT 子系统具备门机联锁装置。当机房防护门处于开启、未关严或联锁回路异常状态时，系统将禁止/中断 CTX 射线曝光，防止人员在未受控状态下进入机房而受到不必要的外照射。CT 曝光仅在防护门关闭且联锁状态正常、操作权限确认后方可启动。

小动物床：具备精密进出仓运动、分段/多床位扫描能力；可支持定位激光定位。

控制与重建工作站：用于采集、重建、定量分析、数据存储与传输等。设备示意图见图 3-42。



图 3-42 micro-PET-SPECT/CT 示意图

1) PET 显像原理

在动物实验中，首先按实验方案对小鼠/大鼠等实验动物进行麻醉、固定，并通过尾静脉注射/灌胃等方式给予正电子核素标记的放射性示踪剂（如 F-18、Ga-68 等）。示踪剂在动物体内分布并参与代谢过程，达到预设候显时间后将动物转运至 Micro-PET-SPECT/CT 设备扫描舱内进行 PET 采集。

正电子核素在动物体内衰变放出正电子，正电子在短程内与电子发生湮没，产生两束近 180° 、能量为 511keV 的 γ 光子。PET 环形探测器对两束 γ 光子进行符合探测并记录事件信息，形成符合线（LOR）数据；经能量窗/时间窗筛选等数据处理后，采用断层重建算法（如 OSEM/ML-EM）重建得到体内放射性分布图像。重建结果可用于组织/器官摄取评估与定量分析（如 SUV、%ID/g、TAC 等），并可与 CT 图像融合实现解剖定位与分析。

扫描结束后，动物按实验设计进入观察、取样或安乐死处置流程，相关器具与可能污染物按放射性废物要求分类收集并进行衰变暂存管理。

2) SPECT 显像原理（含 Lu-177 等）

在动物实验中，按实验方案对小鼠/大鼠等实验动物进行麻醉与固定，并给予单光子核素标记的放射性药物（如 Tc-99m、Lu-177、Tb-161 等）。在预设候显时间后将动物置入 Micro-PET-SPECT/CT 的扫描舱内进行 SPECT 采集。

单光子核素在动物体内衰变发射特征能量 γ 射线。 γ 光子首先经过平行孔准直器，仅允许满足几何方向限制的光子进入探测器并形成投影计数；通过探测器（或机架/床体）相对动物进行多角度投影采集，结合能量窗筛选及必要的散射/衰减校正处理后，采用迭代重建算法（3D-OSEM）获得体内放射性分布的断层图像，并可与 CT 融合用于解剖定位与定量分析（如 ROI/VOI 计数、活度浓度等）。

对于 Lu-177 等治疗核素，SPECT 成像主要利用其 γ 发射分支设置相应能窗进行采集，用于动物体内分布观察、靶器官摄取评估及剂量学相关研究。扫描结束后，动物及其笼具/垫料等可能污染物按放射性防护要求分类收集与衰变暂存管理。

3) CT 成像原理

在动物实验中，动物完成摆位并固定于床体后，启动 CT 扫描。CT 由 X 射线球管产生 X 射线束穿透动物体，由 CMOS 平板探测器采集不同角度的透射投影信号，经滤波反投影获得动物体内的解剖结构断层图像。CT 图像可用于多模态图像的解剖定位与融合显示，并可为 PET/SPECT 提供衰减校正所需的结构信息。

CT 扫描属于间歇式曝光工况，设备配置门机联锁装置，在防护门未关闭或联锁异常时禁止/中断 X 射线曝光，以降低人员误入机房造成的外照射风险。

设备可实现同床位 PET/SPECT 与 CT 的配准融合（硬件同轴及软件配准），输出融合影像用于定位与定量分析。

3) 工作方式

①常态工作方式：隔室操作为主

放射性动物置于设备扫描舱内进行采集，操作人员在控制室/操作区通过工作站远程控制采集与重建。扫描期间尽量避免人员在机旁停留。扫描期间动物状态观察采用隔离窗+监控系统的方式进行：机房与控制/观察区域之间设置由铅屏蔽玻璃构成的隔离观察窗；同时在动物舱内配置动物监控系统（如视频监控及必要的生命体征监测接口），用于实时观察动物体位、麻醉状态与呼吸情况。

通过上述方式可在不进入机房或减少近台停留时间的前提下完成观察与处置决策，降低工作人员的外照射风险，并满足辐射防护“时间—距离—屏蔽”原则要求。

②必要近台操作情形（短时）

在未曝光时通过手套孔进行小剂量核素分装或标记时以及受检动物模型在进行摆位、体位调整、麻醉/生命体征连接、拿出动物舱体，工作人员需进行短时近台操作，上述操作均在设备未出束状态下进行，即曝光开关未触发、设备处于待机或停止出束状态，因此不属于人员受照射操作工况。工作人员完成近台操作后立即离开机房并撤至安全位置，再进行设备曝光，在正常扫描过程中，工作人员在控制台远程操作，不在机房内停留。项目通过操作规程、工作状态指示、声光报警/联锁管理等措施，工作人员会穿戴个人防护用品并佩戴个人剂量报警仪，防止人员在近台状态下误触发出束。故该类近台操作对工作人员辐射影响很小。

（2）热室及通风橱

本次环评新增核素（Lu-177、F-18、Tb-161、Tc-99m）主要在放射性标记室3中开展相关的操作，设备主要参数见表3-9，示意图见图3-43~图3-44。

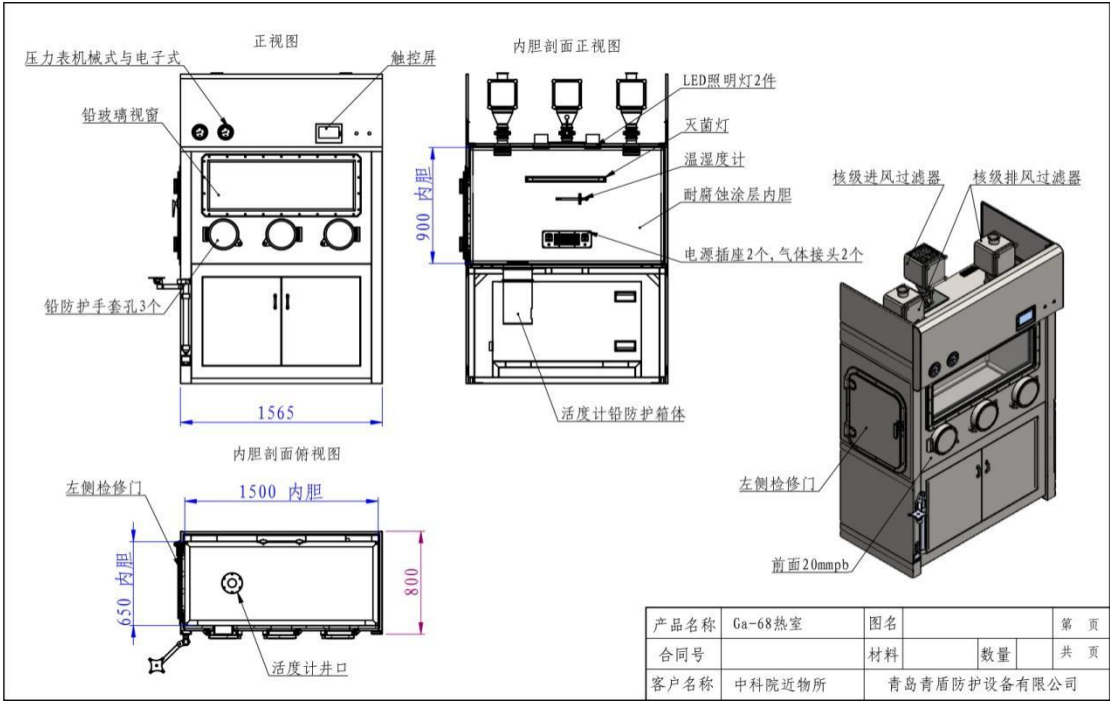


图 3-43 放射性标记室 3 热室

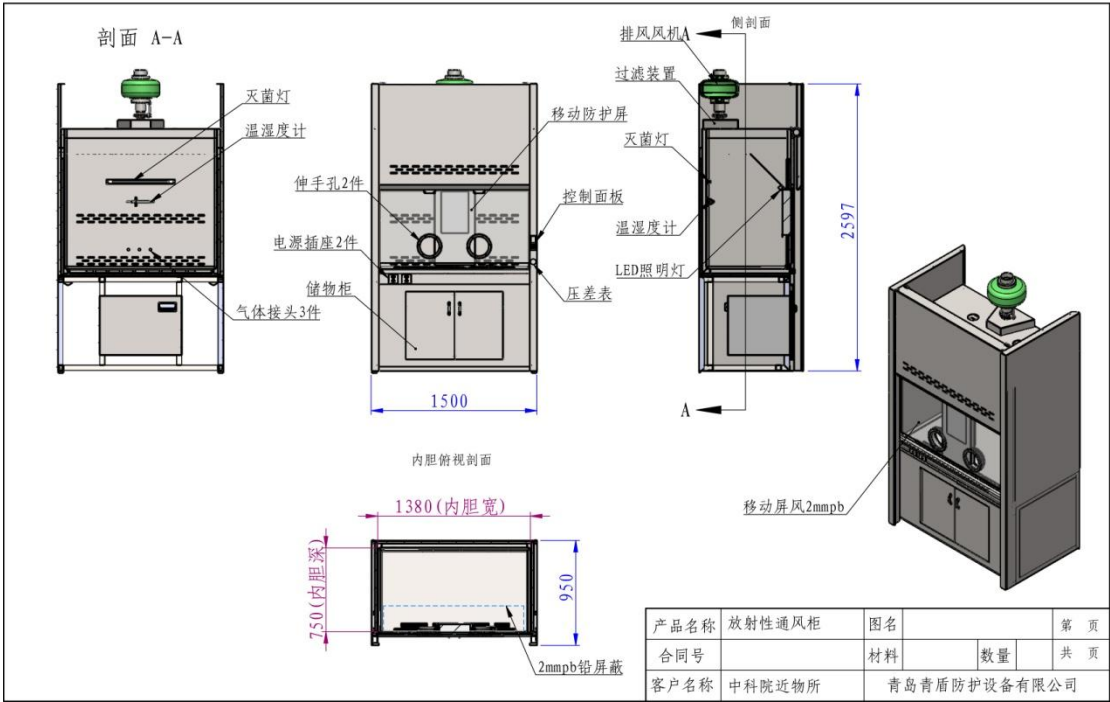


图 3-44 通风橱

表 3-9 设备主要参数一览表

区域	设备名称	规格参数（长×宽×高）	屏蔽参数（材质+厚度）	数量
放射性标记室 3	热室	1.5×1.2×2.4 m	20 mmPb	1 个
放射性标记室 3	通风橱	1.5×1.2×2.4 m	2 mmPb	1 个
备注：放射性标记室 3 内原使用核素为 Ga-68，靶向药物实验室工作箱室屏蔽体外剂量率、对辐射工作人员和公众的影响将叠加原有活动的影响。				

3.2.3.3 工作流程

靶向实验室工作流程示意图见图 2-10，核素完成标记、质检分析后开展影像实验、细胞实验和动物实验，其中显像实验整实验周期为 1 天，细胞实验整实验周期为 1 天，动物体内分布实验整实验周期为 10 天，肿瘤模型治疗实验整实验周期为 30 天。

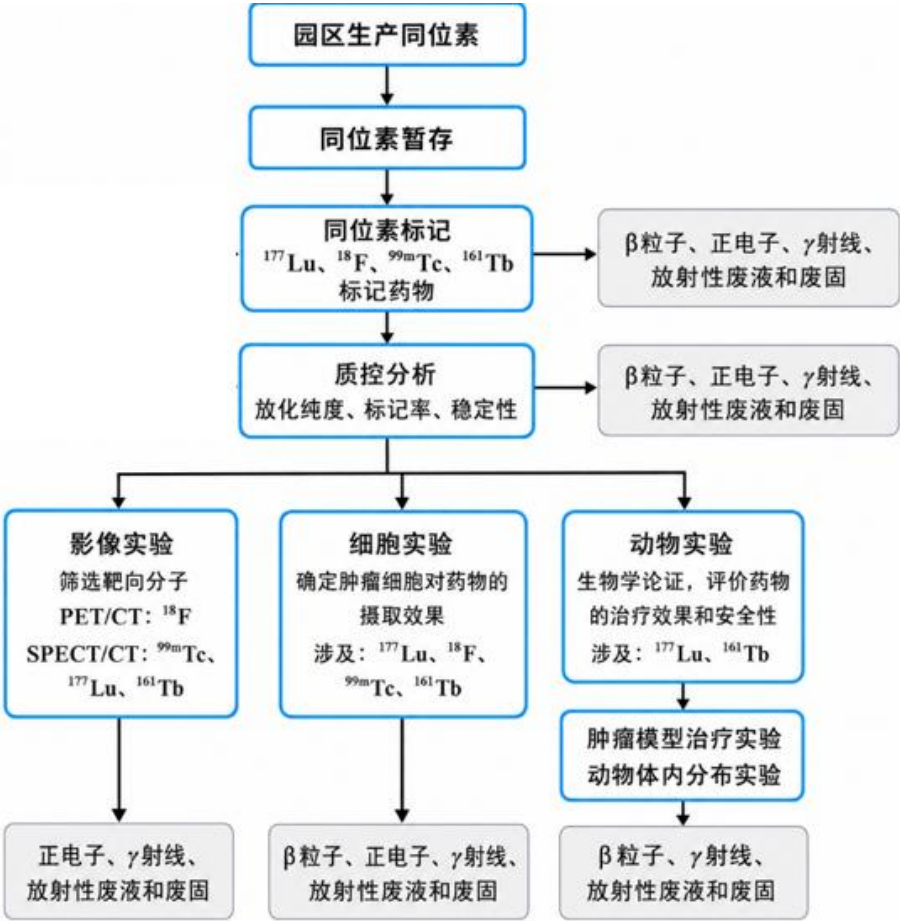


图 3-45 靶向药物实验室工作流程示意图

3.2.3.3.1 放射性同位素订购

本项目的医用同位素药物研发平台未完全建成时，因此实验所用核素均采用外购方式，在实验室放射性物流通道门口于监控下点对点交接，完成表面污染和剂量率监测后，完成交接，转入放射性物料储存室。

3.2.3.3.2 放射性同位素标记、分装

根据实验计划，辐射工作人员到放射性物料储存室将暂存的同位素通过铅罐（10mmPb）转移至放射性标记室3，将铅罐转移至热室内，取出含有同位素的西林瓶进行标记。全程两人参与，一人操作，另外一人监督并做好记录。

表 3-10 同位素标记、分装实验涉及同位素相关参数

实验室名称	操作核素	实验内容	日最大操作量, Bq
放射性标记室3	Lu-177	手动标记、分装	2.00E+08
	F-18	手动标记、分装	1.00E+08
	Tb-161	手动标记、分装	2.00E+08
	Tc-99m	手动标记、分装	1.00E+08

标记实验流程基本一致，以 Lu-177 为例描述具体的操作过程如下：

（1）将装有同位素的西林瓶利用铅罐送至放射性标记室3的热室中，测量其活度（图 3-461）。

（2）按活度比例取少量同位素，置于装有靶向分子的 5ml 离心管（靶向分子在抗体制备室生产，不涉及放射性操作），使用金属浴加热器（图 3-472）进行标记反应，其余同位素还回放射性物料储存室。

（3）标记反应完成后，利用注射器先吸取 10mL 超纯水与标记产物混匀，将混合物注入色谱柱，废液转入废液桶，利用 1mL 乙醇洗脱纯化药物至西林瓶。

(4) 药物纯化完成后分装为两部分，一部分样品置于铅罐中，在放射性标记室 3 完成质检。另一部分的样品再次进行分装，装至西林瓶，分别送往细胞培养室和动物饲养室进行后续操作。



图 3-46 活度计示意图图 3-47 金属浴加热器示意图

3.2.3.3.3 质控分析

质控分析主要包括化学纯度、pH 值、药物形状和放射化学纯度等研究内容。该阶段放射性同位素标记实验涉及同位素的操作参数见表 3-11。

表 3-11 质控分析涉及同位素相关参数

实验室名称	操作同位素	实验内容	日最大操作量, Bq
质控室	Lu-177	化学纯度、pH值、药物形状、放射化学纯度	3.7E+06
	F-18		3.7E+06
	Tb-161		3.7E+06
	Tc-99m		3.7E+06

- 质控分析操作步骤如下：
- (1) 性状：在放射性通风橱目视检查，操作时间约为 30s；
 - (2) pH 值：在通风橱内利用 pH 计准确测定药物的 pH 值，操作时间约为 1min；
 - (3) 化学纯度：利用高效液相色谱仪（图 3-483）检测化学纯度，人员近距离操作时间约为 1min；

（4）放射化学纯度（TLC）：利用薄层扫描仪检测放化纯度（图 3-494），取供试品溶液点在合适的薄层纸上，在展开剂中展开后，用 TLC 扫描仪扫描，放射性标记化合物操作时间约为 2min。



图 3-48 高效液相色谱仪图 3-49 TLC 扫描仪

3.2.3.3.4 显像实验

Lu-177、F-18、Tb-161 和 Tc-99m 均开展显像实验，实验日完成同位素标记、质检后，在同一天内先对动物进行注射，之后进行显像扫描，该实验当日完成整个实验流程。

表 3-12 PET-SPECT/CT 显像实验涉及同位素相关参数

实验名称	涉及核素	日最大注射量，Bq
PET-SPECT/CT 显像实验	Lu-177	2.00E+08
PET-SPECT/CT 显像实验	F-18	1.00E+08
PET-SPECT/CT 显像实验	Tb-161	2.00E+08
PET-SPECT/CT 显像实验	Tc-99m	1.00E+08

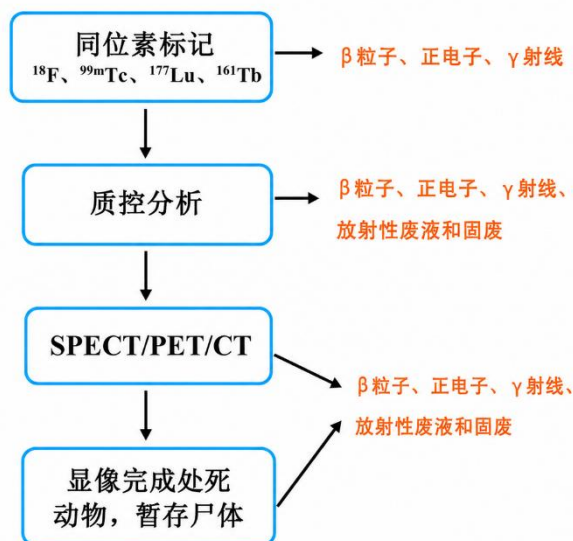


图 3-50 Micro -PET-SPECT/CT 显像实验工作流程及产污示意图

具体流程如下：

(1) Lu-177、F-18、Tb-161 和 Tc-99m 在放射性标记室 3 完成标记、质检分析后，分别分装 $2.00\text{E}+08\text{ Bq}$ (Lu-177、Tb-161) 和 $1.00\text{E}+08\text{ Bq}$ (F-18、Tc-99m) 的量在放射性标记室 3 通风橱开展动物的注射，将小动物（小鼠或大鼠）固定在装置内，采用异氟烷将其麻醉后，通过尾静脉注药物，每组动物 10 只，每只注射量为 $2.00\text{E}+07\text{ Bq}$ (Lu-177、Tb-161) 和 $1.00\text{E}+07\text{ Bq}$ (F-18、Tc-99m)。

(2) 扫描、显像：分别于给药后不同时间显像。将小动物在麻醉状态下置于小动物 PET-SPECT/CT 的小动物舱内，摆位合适后，进行显像（每次显像 3 只同时扫描），在工作站完成重建、定量分析与数据存档；必要时进行多模态融合、ROI/VOI 分析等。每组小动物扫描三次。

(3) 图像采集结束后将小动物装于 5mm Pb 的手提式屏蔽箱内，由小动物 PET-SPECT/CT 室转移至饲养室，继续饲养并衰变，衰变结束后在动物饲养室解剖台对动物进行处死。

(4) 根据实验方案不同，必要时，会对衰变至解控水平后在动物饲养室解剖台的小动物实施安乐死（CO₂ 吸入法）后解剖。

3.2.3.3.5 细胞实验

细胞实验实验日当天完成同位素标记、质检，在同一天后续开展细胞实验，该实验当日完成整个实验流程。放射性同位素操作量见表 3-13。

表 3-13 细胞实验涉及放射性同位素相关参数

实验名称	涉及核素	日最大操作量, Bq
细胞实验	Lu-177	9.25E+05Bq
	Tb-161	9.25E+05Bq
	F-18	9.25E+05Bq
	Tc-99m	9.25E+05Bq

完成质检的标记药物用铅罐转移至细胞培养室的超净工作台，操作人员在 1.4mm 铅玻璃（ $\rho=4.5\text{g}/\text{cm}^3$ ）防护屏后，进行细胞实验，每组实验具体流程如下：

- （1）细胞接种于 60mm 培养皿，密度达到 70%时，向其中 5 个培养皿中加入非标记靶向分子；另外 5 个培养皿中加入标记药物（活度约 $1.85\text{E}+05\text{Bq}$ / 皿），在 37°C 、5% CO_2 条件下孵育 6h；
- （2）上述样本于 12000rpm 离心 5 min，分离上清及细胞沉淀；
- （3）用缓冲液（约 0.5mL）清洗细胞三次，将洗液与上清一起用 γ 计数器测量，同时对细胞沉淀进行计数；
- （4）数据分析，得到实验结果。

3.2.3.3.6 动物实验

动物实验包括动物体内分布实验和肿瘤模型治疗实验，实验日当天完成同位素标记、质检，后续开展动物实验，动物体内分布实验整实验周期为 10 天，肿瘤模型治疗实验整实验周期为 30 天。放射性同位素操作量见表 3-14。

表 3-14 动物实验涉及同位素相关参数

实验名称	涉及核素	日最大操作量
------	------	--------

肿瘤模型治疗实验	Lu-177	4.92E+07 Bq
	Tb-161	4.83E+07 Bq
体内分布实验	Lu-177	4.92E+07 Bq
	Tb-161	4.83E+07 Bq

体内分布实验涉及 Lu-177 和 Tb-161，具体工艺流程图见图 3-51。

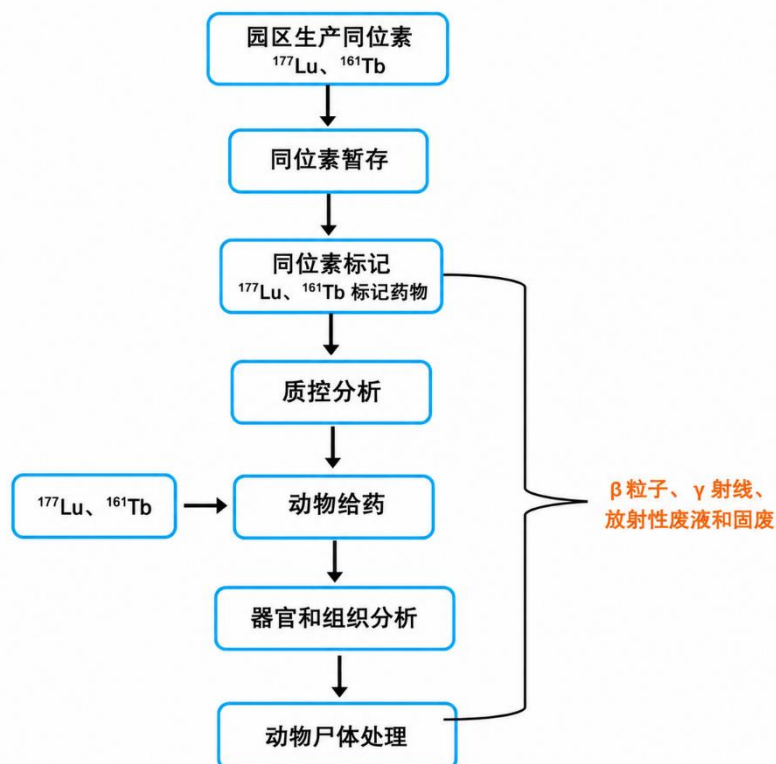


图 3-51 动物体内分布实验工作流程及产污示意图

具体的工作流程如下：

- (1) 将实验动物从动物饲养室转移至放射性标记室 3 通风橱；
- (2) 实验人员身穿 0.5mm 铅当量防护服，将完成分装和质控的同位素药物，经尾静脉注射给药，每组实验需 20 只小鼠；
- (3) 注射药物后的动物放置在饲养笼具中，快速将笼置于 5mm 铅当量的手提式屏蔽箱移到 IVC 饲养系统暂养；

(4) 给药后 1、3、7、10 天后在动物饲养室解剖台解剖动物（每次动物操作量约 5 只），操作者前方 20~30cm 处放置 20mm 铅当量的铅玻璃，取器官和组织置于盛有 PBS 溶液的培养皿，利用 γ 计数器测量各脏器放射性计数；

(5) 将组织置于组织收集装袋，贴上标签，注明实验者姓名、所用同位素、总活度和时间等信息，置于放射性废物储存室的铅屏蔽冰箱暂存。

肿瘤模型治疗实验具体工艺流程图见图 3-527。

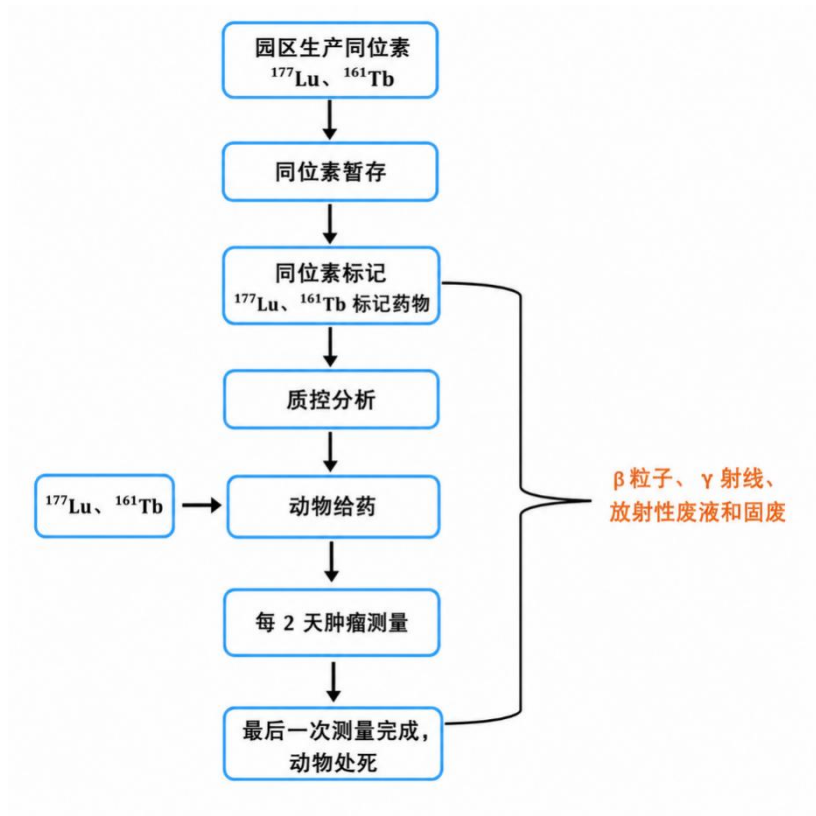


图 3-52 肿瘤模型治疗实验工作流程及产污示意图

具体流程如下：

- (1) 将实验动物从动物饲养室转移至放射性标记室 3 的放射性通风橱；
- (2) 实验人员身穿 0.5mm 铅当量防护服，将完成分装和质控的放射性药物，经尾静脉注射给药，每次实验需 20 只小鼠，一天内完成；

(3) 给药后的动物放置在饲养笼具中，快速将笼置于 5mm 铅当量的手提式屏蔽箱移到 IVC 饲养系统暂养；

(4) 给药后的动物次日起每 2 日测量肿瘤和体重，将实验动物转移至放射性标记 3 通风橱，用卡尺进行肿瘤体积、动物体重测量，测量后放回动物饲养室；

(5) 待完成整个实验周期后（一般 1 个月），或动物肿瘤体积超过 1 立方厘米、肿瘤溃烂、体重下降超过 20%，在实验动物饲养室解剖台处死动物（操作人员在 L 屏蔽铅玻璃后方操作），收集动物尸体装袋，贴上标签，注明实验者姓名、所用同位素、总活度和时间等信息，置于放射性废物储存室的铅屏蔽冰箱暂存。

3.2.3.3.7 动物饲养

IVC 单笼饲养系统每只饲养盒内可饲养 5 只实验动物，可使用约 40 个笼位。每周饲喂 2 次，每天 3-5 天更换 1 次垫料。实验人员进入动物饲养室时要穿戴好洁净服、口罩、铅防护服等防护用品，离开动物饲养室时应利用辐射剂量仪和表面测污仪进行辐射剂量和表面沾污检测，确定无污染后，方可离开。动物饲养操作均在动物饲养室内进行，具体流程如下：

(1) 喂养操作

实验动物每周饲喂 2 次，每次时长约 1h，饲养员身穿铅衣进入饲养间，添加灭菌水、饲料后退出。

(2) 更换垫料操作

将动物笼具转移至超净台，操作人员位于 L 型铅玻璃后方。将实验动物从原笼具转移至铺好干净垫料的新笼具，并送回 IVC；每次更换时长约 1h。

(3) 笼具更换

实验结束后，操作人员位于 L 型铅玻璃后方；将旧笼具与垫料分离，垫料装袋后扎口密封，注明同位素类型和封存时间，转移到放射性废物储存室的铅屏蔽冰箱暂存衰变；用酒精、双氧水对原笼具消毒并进行擦拭后转移至放射性废物储存室，放置一段时间其表面剂量符合解控标准时，将其取出转移至非放区进行清洗消毒。

3.2.3.3.8 小计

各核素在不同实验中日最大操作量见表 3-15。

表 3-15 各核素在不同实验中的日最大量，Bq

核素	标记分装量	质控分析量	显像实验量	细胞实验量	动物实验	
					体内分布	肿瘤模型治疗
Lu-177	2.00E+08	3.70E+06	2.00E+08	9.25E+05	4.92E+07	4.92E+07
F-18	1.00E+08	3.70E+06	1.00E+08	9.25E+05	/	/
Tb-161	2.00E+08	3.70E+06	2.00E+08	9.25E+05	4.83E+07	4.83E+07
Tc-99m	1.00E+08	3.70E+06	1.00E+08	9.25E+05	/	/

3.2.4 辐射管理中心

辐射管理中心为整个场所的放射性三废管理中心，各辐射工作场所放射性废气输送至辐射管理中心排风机房经过滤后经排风塔排放，放射性废液在其他辐射工作场所内分类暂存一段时间后定期监测，无法满足清洁解控要求的放射性废液输送至辐射管理中心废液暂存场所进行暂存，放射性固体废物在场所内分类暂存一段时间后定期监测，无法满足清洁解控要求的放射性固体废物转移至辐射管理中心放射性固体废物暂存场所进行暂存处理。

3.3 工作规划

质子加速器装置、靶站、辐射管理中心相关工作人员安排见表 3-16。

表 3-16 质子加速器系统相关工作人员安排

场所	岗位	人数	备注
----	----	----	----

加速器装置	加速器运行及设备维护	6 人	每班 2 人，共计 3 班次
靶站	靶站设备维护、运行控制、安全监测	6 人	每班 2 人，共计 3 班次
	靶件制备	2 人	一天一班，一班 8h，每班 8h
辐射管理中心	放射性废物处理	2 人	一天一班，一班 8h，每班 8h
小计		16 人	/
备注：加速器装置和辐射管理中心辐射工作人员为新增/调配人员；靶站辐射工作人员为新增。			

分离系统工作人员工作安排见表 3-17。

表 3-17 分离系统辐射工作人员安排

场所	目标核素	工作步骤	单次最长操作时间（min）	新增/调配人员
分离系统	Ac-225、 Ra-223	靶件拆解	30	每班 3 人， 共计 2 班 次，总计 6 人
		靶件溶解	30	
		分离	30	
		Ac 纯化	30	
		Ra 纯化	30	
		Ac -225 分装	1	
		Ra -223 分装	1	
		Ac -225 质检	30	3 人
		Ra -223 质检	30	
小计				9 人
备注：人员为新增/调配人员，核素进行溶解、分离、纯化、分装过程中为自动化操作， 辐射工作人员近距离操作时间保守按照表中进行估算。				

超重乙级非密封放射性工作场所单日仅对 1 种核素的一类实验进行操作，辐射工作人员工作规划见表 3-18。

表 3-18 超重乙级实验室辐射工作人员工作负荷一览表

工作场所	工作内容	人数，人	人员近距离操作时间，h/批次	年最大操作批次，批次/年
超重乙级实验室	制靶	4	0.33	40
	靶件运输	4	1	10
	放射性同位素回收		1	
	微流体溶剂萃取	5	1	50
	超重化学分析		1	
	小计	13	——	
备注：人员为新增/调配人员				

靶向药物实验室工作人员配备情况见表 3-19。

表 3-19 靶向药物实验室辐射工作人员配备情况

工作场所	工作内容	人数，人	年工作量
靶向药物实验室	放射性药物标记、分装	4	本项目每年 CT 显像实验总计不超过 100 组，细胞实验年总计不超过 50 组，动物体内实验年总计不超过 20 组，肿瘤模型治疗实验年总计不超过 30 组。
	放射性药物质检		
	影像实验		
	动物实验、细胞实验		
	动物饲养		
备注：人员为新增/调配人员			

3.4 辐射污染源项分析

3.4.1 基于质子加速器的同位素应用研发-加速器装置

3.4.1.1 瞬发辐射污染源项和束流损失

质子加速器在质子加速、注入、传输、引出等过程中都会发生束流的损失。尤其是高能区的束流与物质的相互作用以原子的电离和激发为主, 同时会穿过原子核的库仑势垒, 进入原子核内, 发生核内级联, 通过核反应产生瞬发次级粒子。在产生的次级粒子中, 带电粒子因电离作用迅速停止, π 介子等又因产生截面很小可以忽略, 因此从靶中出来的主要是次级中子和 γ 。其中产生的次级中子能量由低到高可分为热中子、蒸发中子和级联中子三部分。在屏蔽材料的作用下, 初始的热中子、蒸发中子和 γ 的数量迅速减少, 级联中子成为穿透屏蔽的主要贡献者。级联中子在穿透屏蔽过程中, 通过弹性散射、非弹性散射、核反应等方式损失能量和数目, 一部分转变成了热中子和蒸发中子, 一部分通过 (n, γ) 反应等转化成了光子, 使得达到一定屏蔽深度, 中子能谱各种能量成分的比重基本保持不变, 形成“平衡谱”。最终屏蔽内、外的瞬发辐射场都成为中子、光子的混合场。

质子加速器束流损失源项见表 3-20, 质子打靶后产生的中子、 γ 瞬发源项如图 3-53 所示, 从计算结果可知, 中子是屏蔽设计的主要考虑对象。

表 3-20 束流损失参数表

损失部位		最大能量	最大束流强度	最大损失流强	靶材料	损失方式
质子加速器	传输线	质子：115MeV	1mA	1W/m	/	均匀损失
	Dump1	质子：115MeV	0.2μA	0.2μA	Cu	集中损失
	Dump2	质子：115MeV	2μA	2μA	Cu	集中损失
靶站 1		质子：120MeV	1mA	1mA	Th-232	集中损失
靶站 2		质子：115MeV	0.25mA	0.25mA	Th-232	集中损失

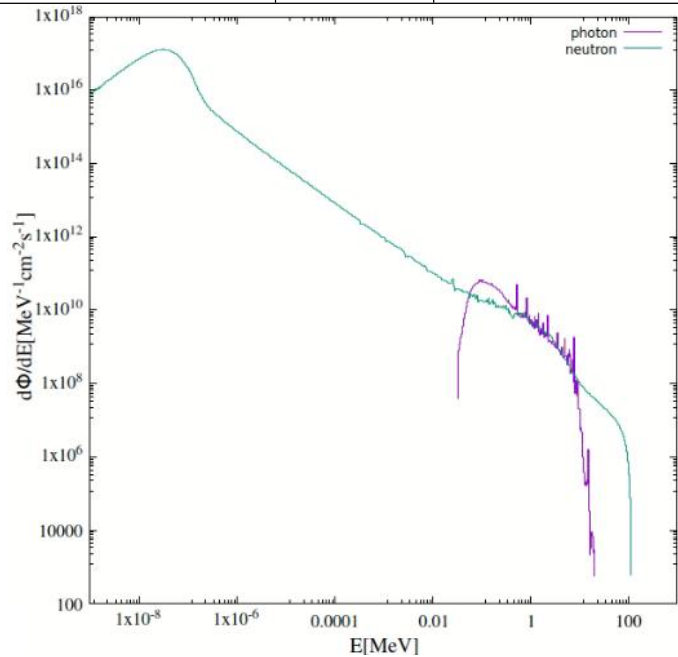


图 3-53 质子打靶后产生的中子、 γ 瞬发源项图

3.4.1.2 感生放射性

3.4.1.2.1 空气感生放射性

加速器运行期间初级粒子或次级粒子与空气相互作用产生放射性气体，主要通过热中子俘获、 $(n, 2n)$ 、 (γ, n) 反应和散裂反应产生 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 和 ^{41}Ar 等放射性同位素，具体见表 3-21。

表 3-21 空气活化产生的主要放射性核素

放射性核素	半衰期	母核	空气中母核的质量份额	产生机制	活化反应截面 σ^2 , mb
-------	-----	----	------------	------	------------------------

^{11}C	20.5min	N	7.55×10^{-1}	散裂反应	10
		O	2.3×10^{-1}	散裂反应	5
		Ar	1.3×10^{-2}	散裂反应	0.7
^{13}N	9.96min	N	7.55×10^{-1}	散裂反应	10
		N	7.55×10^{-1}	(γ, n) 反应	9
		O	2.3×10^{-1}	散裂反应	9
		Ar	1.3×10^{-2}	散裂反应	0.8
^{15}O	2.04min	O	2.3×10^{-1}	散裂反应	40
		O	2.3×10^{-1}	(γ, n) 反应	10
^{41}Ar	1.83h	Ar	1.3×10^{-2}	热中子俘获	660

注：表中数据均取自 NCRP NO.144 报告和 IAEA 第 283 号技术报告。

3.4.1.2.1.1 空气感生放射性活度浓度

本次评价采用 FLUKA 计算质子加速器以及两个辐照室区域的空气活化。计算考虑的源项为：

(1) 质子加速器隧道：能量及束流损失情况见表 3-20，运行时间为 4800h，建模模型图见图 3-54；

(2) 靶站 1 辐照室：能量 115 MeV、流强为 1mA 的质子束连续辐照 Th 靶 10 天，建模模型图见图 3-55；

(3) 靶站 2 辐照室：能量 115 MeV、流强为 0.25mA 的质子束连续辐照 Th 靶 10 天，建模模型图见图 3-56。

计算结果列于表 3-22。

表 3-22 质子加速器及两个辐照室空气感生放射性活度浓度

辐射工作场所	核素	静态活度浓度, Bq/m ³
质子加速器隧道	C-11	8.66E+02
	N-13	3.40E+03
	O-15	7.73E+02
	Ar-41	5.04E+03
靶站 1 辐照室	C-11	2.32E+10
	N-13	1.88E+10
	O-15	1.49E+10

	Ar-41	2.94E+09
靶站 2 辐照室	C-11	4.16E+07
	N-13	1.43E+08
	O-15	3.24E+07
	Ar-41	1.53E+08

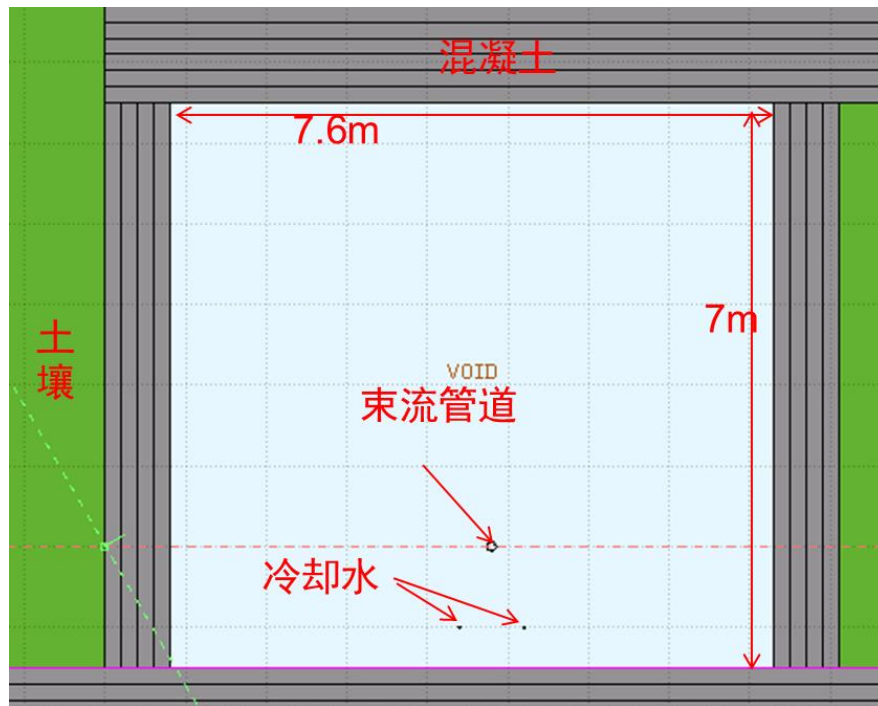


图 3-54 质子加速器隧道空气水感生放射性模型图

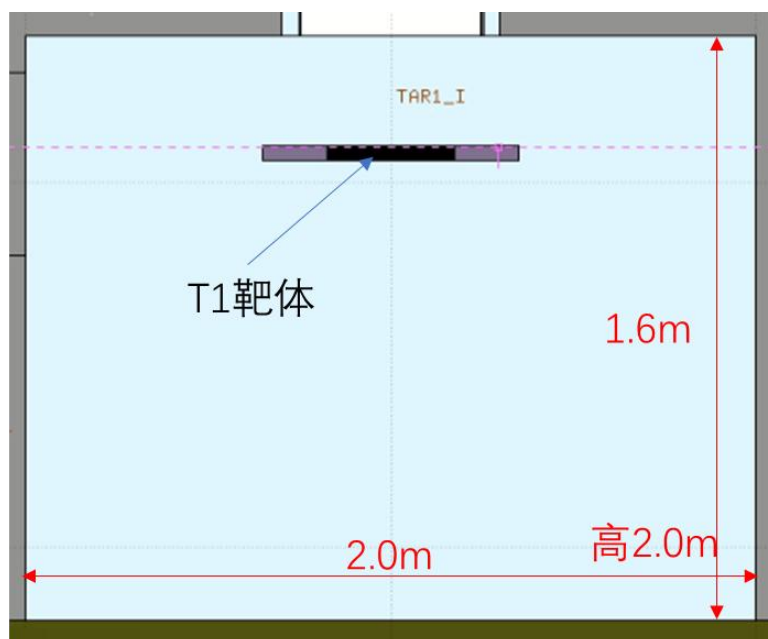


图 3-55 靶站 1 辐照室感生放射性空气模拟计算模型图

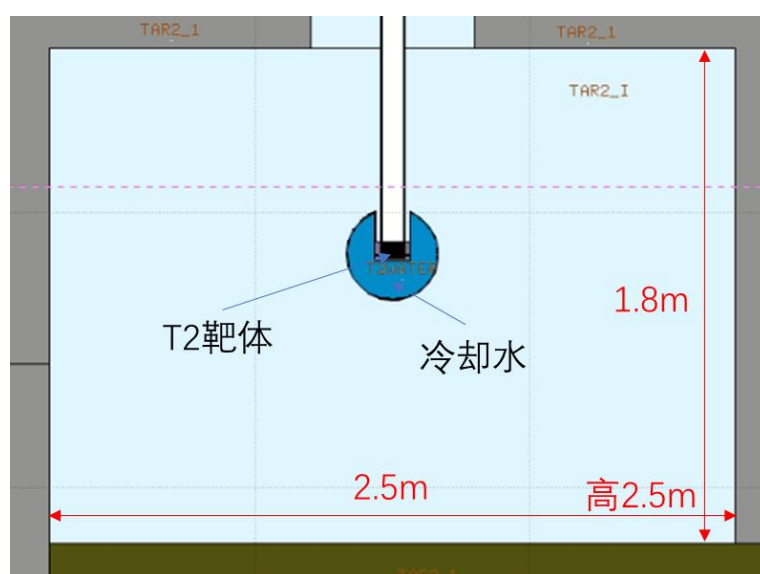


图 3-56 靶站 2 辐照室感生放射性空气模拟计算模型图

加速器运行期间，加速器隧道的换气次数 0.5 次/h，维持微负压，辐照室内封闭 2 天后再开启排风，辐照室活化气体经过 2 天的衰变后活度较低，主要考虑加速器隧道的影响。

根据《加速器保健物理》（H.W.帕特森，R.H.托马斯）P296 和 NCRP NO.144 报告 P345，在考虑通风的情况下，机房内空气感生放射性动态饱和和活度浓度可由下式计算得到：

$$C_t = \frac{\lambda}{\lambda + r_1} C_{sat} \quad (3-1)$$

式中，

C_t 为考虑通风的情况下，停机时刻机房内空气感生放射性核素的动态饱和和活度浓度，Bq/m³；

C_{sat} 为不考虑通风的情况下，停机时刻机房内空气感生放射性核素的静态饱和和活度浓度，Bq/m³；

λ 为放射性核素的衰变常数，s⁻¹， $\lambda = \ln 2 / T_{1/2}$ ；

r_1 为正常运行时机房内的换气次数，s⁻¹。

根据上述公式，得到加速器机房内的空气感生放射性核素的动态饱和和活度浓度计算结果见表 3-23。

表 3-23 空气动态活度计算结果

核素	加速器隧道
	动态饱和 C_t , Bq/m ³
¹¹ C	6.96E+02
¹³ N	3.04E+03
¹⁵ O	7.54E+02
⁴¹ Ar	2.17E+03

3.4.1.2.1.2 排入环境的空气感生放射性核素量

根据 NCRP NO.144 报告“6.3.1.4 节”，正常运行和停机通风期间向周围环境排放的空气感生放射性总活度可由下式计算。

$$Q_t = \int_0^t C_t R_t dt = \int_0^t \frac{\lambda}{\lambda + r_1} N \sigma \phi (1 - e^{-(\lambda + r_1)t}) R_t dt = \frac{\lambda}{\lambda + r_1} N \sigma \phi R_t \int_0^t (1 - e^{-(\lambda + r_1)t}) dt$$

$$= \frac{\lambda}{\lambda + r_1} N \sigma \phi R_t (t - \frac{1}{\lambda + r_1} + \frac{e^{-(\lambda + r_1)t}}{\lambda + r_1}) \quad (3-2)$$

式中，

λ 为放射性核素的衰变常数， s^{-1} ， $\lambda = \ln 2 / T_{1/2}$ ；

r_1 为正常运行时机房内的换气次数， s^{-1} ，

Q_t 为加速器运行 t 时间向周围环境排放的空气感生放射性的总活度，Bq；

R_t 为正常运行下的通风速率， m^3/s ；

质子加速器和两间辐照室每年排入环境的空气感生放射性核素总量和年均排放速率计算结果列于表 3-24。

表 3-24 每年排入环境的空气感生放射性核素总量和年均排放速率

核素	年排放量，Bq	年平均排放速率，Bq/s
^{11}C	9.35E+09	5.41E+02
^{13}N	4.08E+10	2.36E+03
^{15}O	1.01E+10	5.84E+02
^{41}Ar	2.92E+10	1.69E+03
总计	8.95E+10	5.18E+03

3.4.1.2.2 冷却水感生放射性

3.4.1.2.2.1 计算模型和计算参数

本次评价利用 FLUKA 程序对质子加速器和两间辐照室冷却回路中的感生放射性进行了模拟计算，计算时使用的参数如下：

(1) 质子加速器：束流管道材料为不锈钢，管道内径为 110mm、壁厚为 2mm，管道中心距地面高度为 1.5m。在束流管道下方距离 1m 远处设置内径 25mm、壁厚 4mm 的冷却水铜管，管道内充满去离子冷却水。根据建设单位规

划，本项目一年打靶出束时间不超过 4800h。计算时采用的束流损失见表 3-20，建模模型图见图 3-57；

（2）靶站 1 辐照室：束流持续辐照时间取每年最大出束时间 4800h，束流为 115MeV 的质子束，流强为 1mA，建模模型图见图 3-58；

（3）靶站 2 辐照室：束流持续辐照时间取每年最大出束时间 2880h，束流为 115MeV 的质子束，流强为 0.25mA，建模模型图见图 3-59。

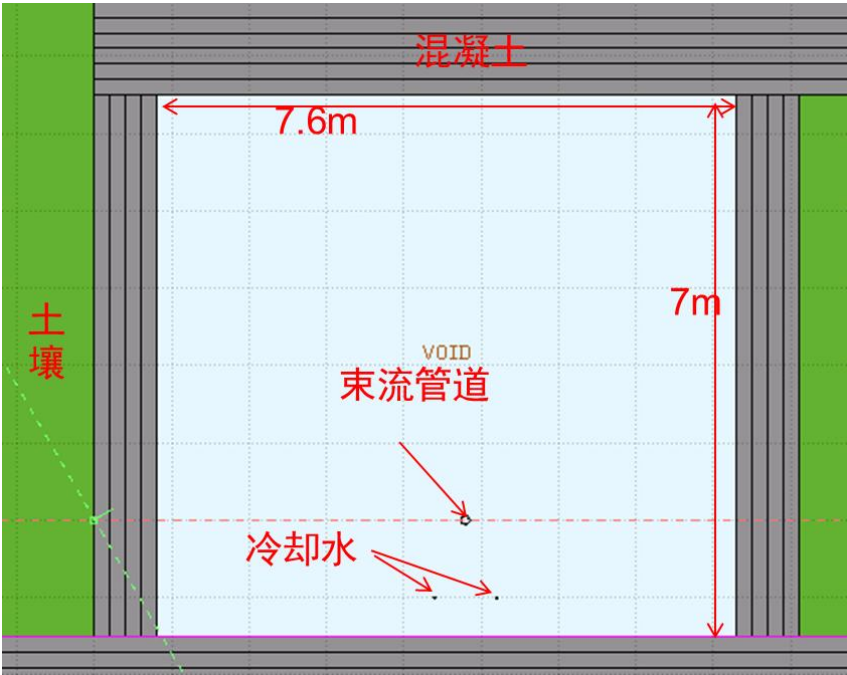


图 3-57 质子加速器冷却水模拟计算模型图

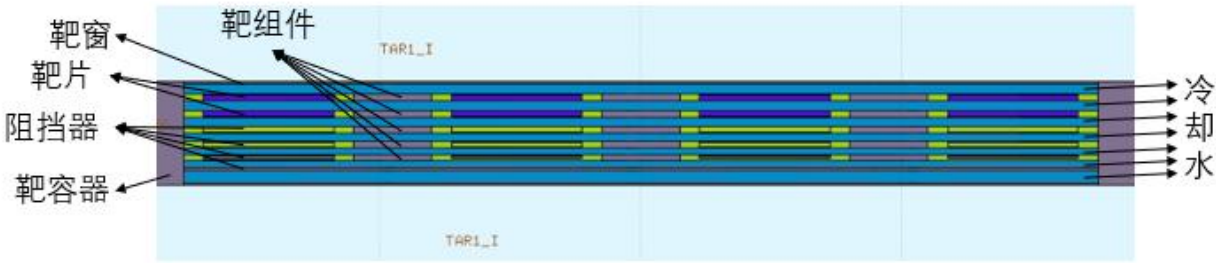


图 3-58 靶站 1 辐照室冷却水模拟计算模型图

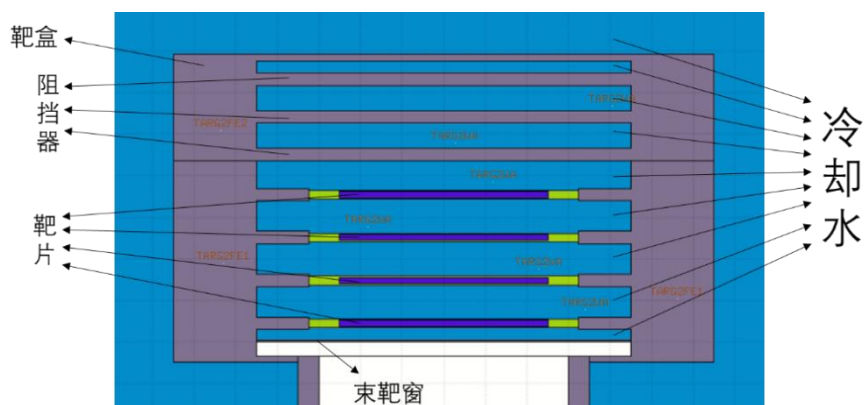


图 3-59 靶站 2 辐照室冷却水模拟计算模型图

3.4.1.2.2.2 计算结果

计算结果列于表 3-25。质子加速器内隧道内的冷却水为去离子水，隧道内的水量为 10 m^3 ，隧道外水量为 80 m^3 ，水路总水量为 90 m^3 。靶体冷却包括冷却一回路和二回路，一回路冷却水冷却靶体，一回路通过换热器与二回路进行热量交换，二回路与一回路隔离，不涉及活化，仅一回路涉及活化，冷却水循环利用不外排，靶站 1 辐照室一回路的冷却水量为 4 m^3 ，靶站 2 辐照室一回路每年产生的冷却水量为 2.5 m^3 。由计算结果可知靶站 1、2 辐照室产生的活化冷却水活度高于豁免活度，需要暂存。

表 3-25 冷却水感生放射性计算结果

场所	核素	活度, Bq	活度浓度, Bq/g	豁免活度, Bq
质子加速器隧道	^3H	$8.00\text{E}+03$	$8.89\text{E}-05$	$1.0\text{E}+09$
	^7Be	$4.30\text{E}+04$	$4.78\text{E}-04$	$1.0\text{E}+07$
靶站 1 辐照室	^3H	$4.44\text{E}+09$	$1.11\text{E}+03$	$1.0\text{E}+09$
	^7Be	$3.46\text{E}+11$	$8.65\text{E}+04$	$1.0\text{E}+07$
靶站 2 辐照室	^3H	$2.57\text{E}+09$	$1.03\text{E}+03$	$1.0\text{E}+09$
	^7Be	$1.84\text{E}+11$	$7.36\text{E}+04$	$1.0\text{E}+07$

3.4.1.2.3 结构部件感生放射性

结构部件的感生放射性主要由粒子直接与装置结构材料相互作用产生，主要部位为束流损失较大的部位。

3.4.1.2.3.1 计算模型和计算参数

根据质子加速器及两间辐照室主要的束流损失点位分布，利用 FLUKA 程序计算了束流收集器和辐照室的感生放射性，计算时所用参数如下：

(1) DUMP1：计算采用的质子能量为 115MeV，束流强度为 $0.2\mu\text{A}$ ，假设束流集中损失在铜 dump 中。铜 dump 外为聚乙烯屏蔽体，用于慢化高能质子轰击铜 dump 产生的高能中子。束流照射时间为 1 月。

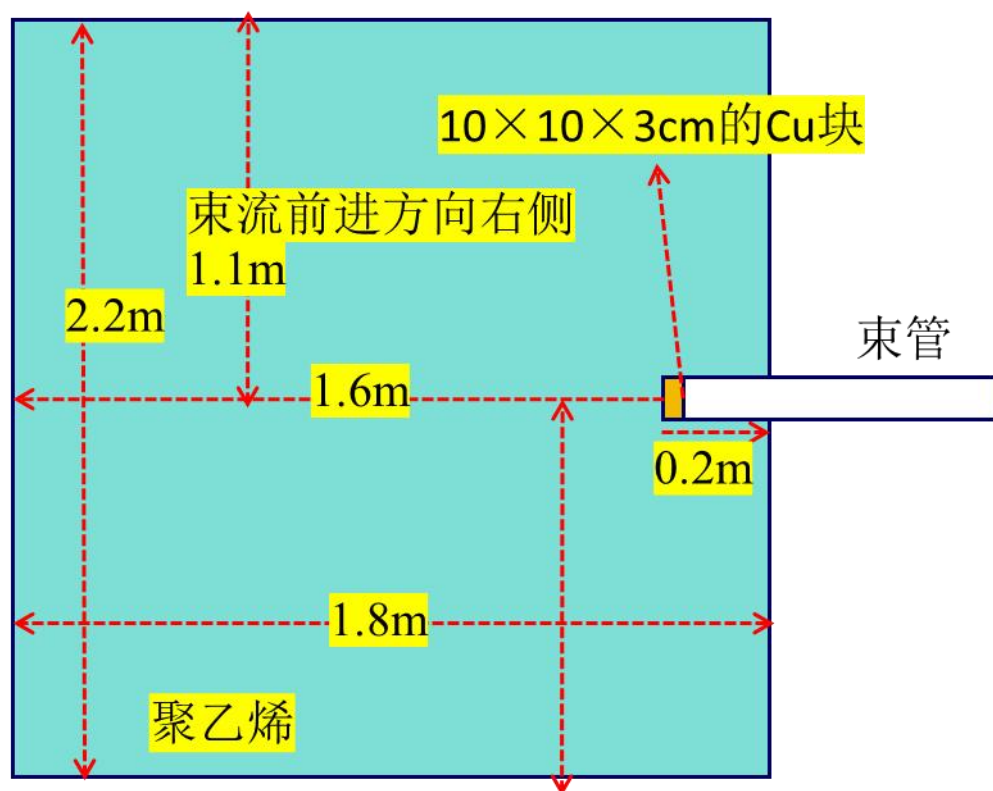


图 3-60 DUMP1 计算模型图

(2) DUMP2: 计算采用的质子能量为 115MeV，束流强度为 2 μ A，假设束流集中损失在铜 dump 中。铜 dump 外为碳钢屏蔽体和混凝土屏蔽体，用于慢化高能质子轰击铜 dump 产生的高能中子。束流照射时间为 1 月。

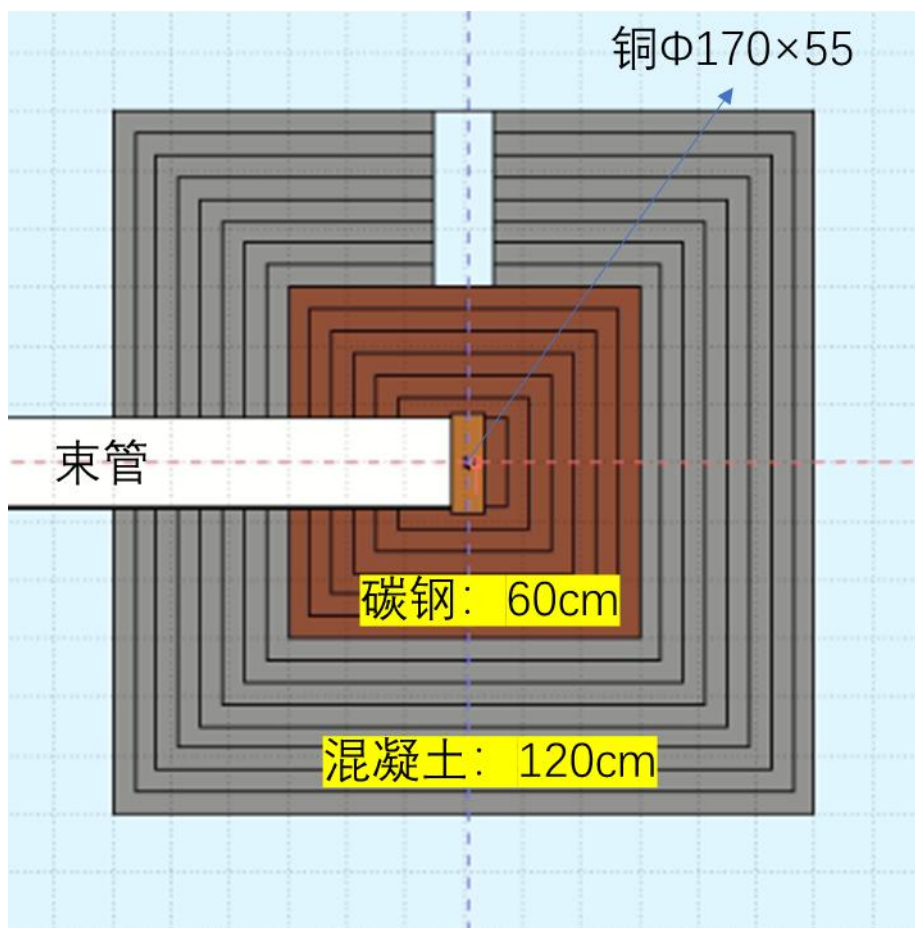


图 3-61 DUMP2 计算模型图

(3) 靶站 1 辐照室: 115MeV，束流强度为 1mA 的质子束连续辐照复合 Th 靶 10 天，靶体位于辐照室中心位置处，距离辐照室底面 1.5m。材料组成包括 Th、Inconel-718、不锈钢；

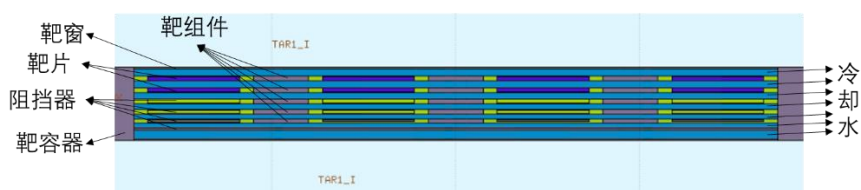


图 3-62 靶站 1 钚靶计算模型图

(3) 靶站 2 辐照室：115MeV，束流强度为 0.25mA 的质子束连续辐照复合 Th 靶 10 天，靶体位于辐照室中心位置处，距离辐照室底面 0.5m。材料组成包括 Th、Inconel-718 等。

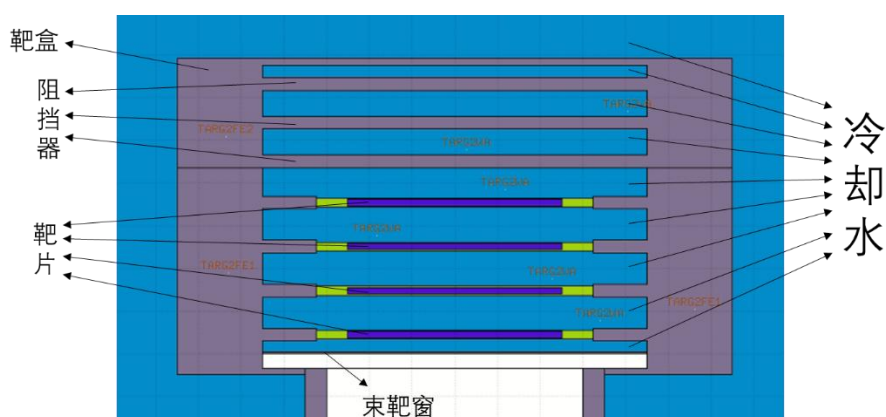


图 3-63 靶站 2 钚靶计算模型图

3.4.1.2.3.2 计算结果

(1) DUMP1

DUMP1 辐照 1 个月后，冷却 0 秒、4 小时、1 天和 7 天的剂量率分布情况见图 3-64~图 3-67，由计算结果可知冷却 7 天后，隧道内距 dump 屏蔽墙 1m 处束管外 1m 区域的剂量率约为 12 μ Sv/h。

在加速器寿期内，束流收集器始终置于局部屏蔽体内，保证局部屏蔽体外的剂量率在维护维修人员能短时间居留的要求。加速器寿期结束后，将拆除局部屏蔽体，再将束流收集器放入专用的转运容器内，最后外送处置。

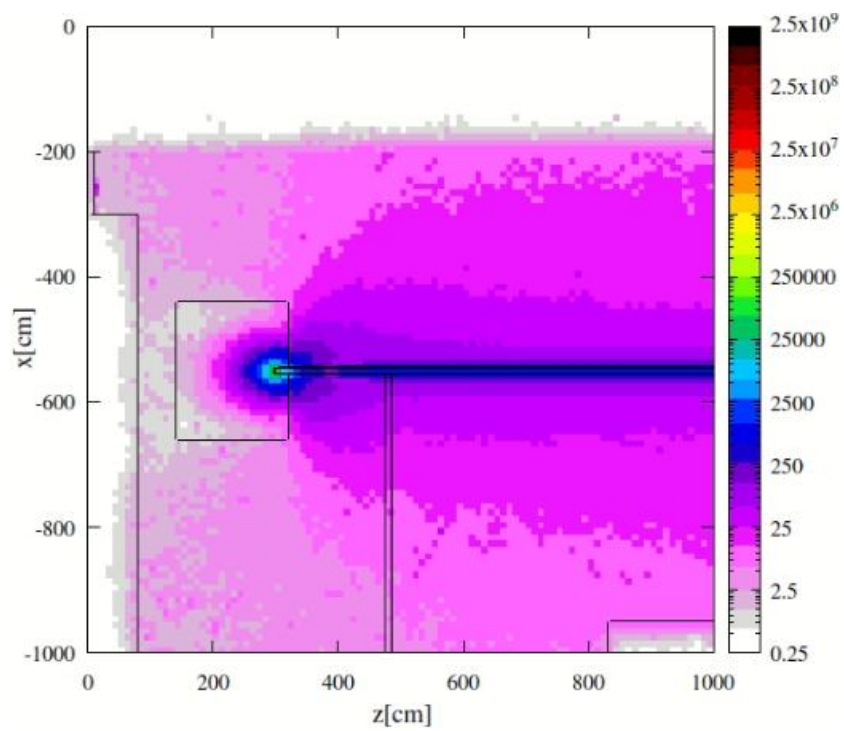


图 3-64 质子束辐照 1 个月冷却 0 秒剂量率分布图

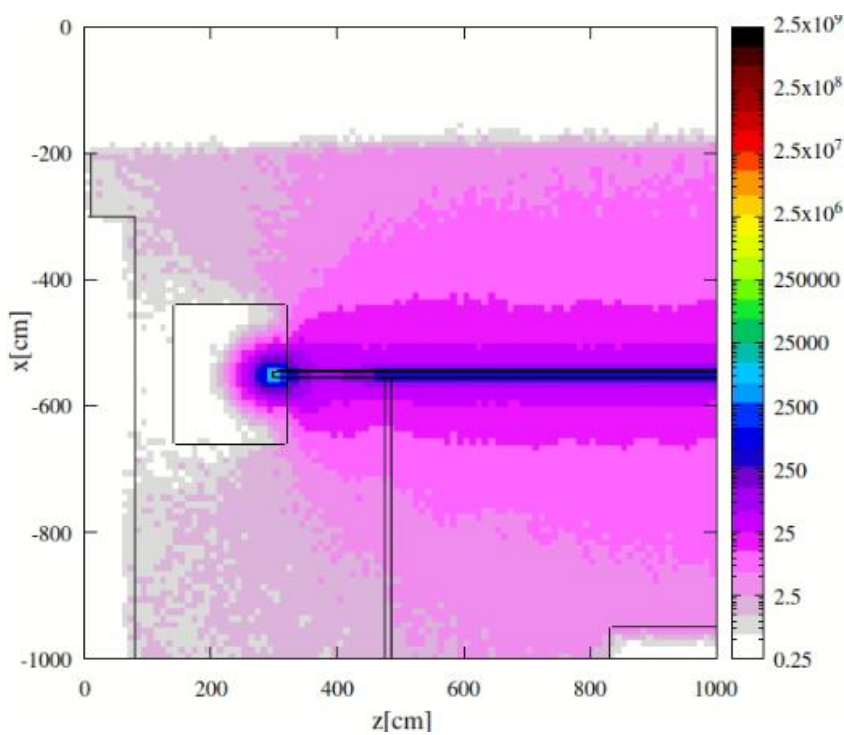


图 3-65 质子束辐照 1 个月冷却 4 小时剂量率分布图

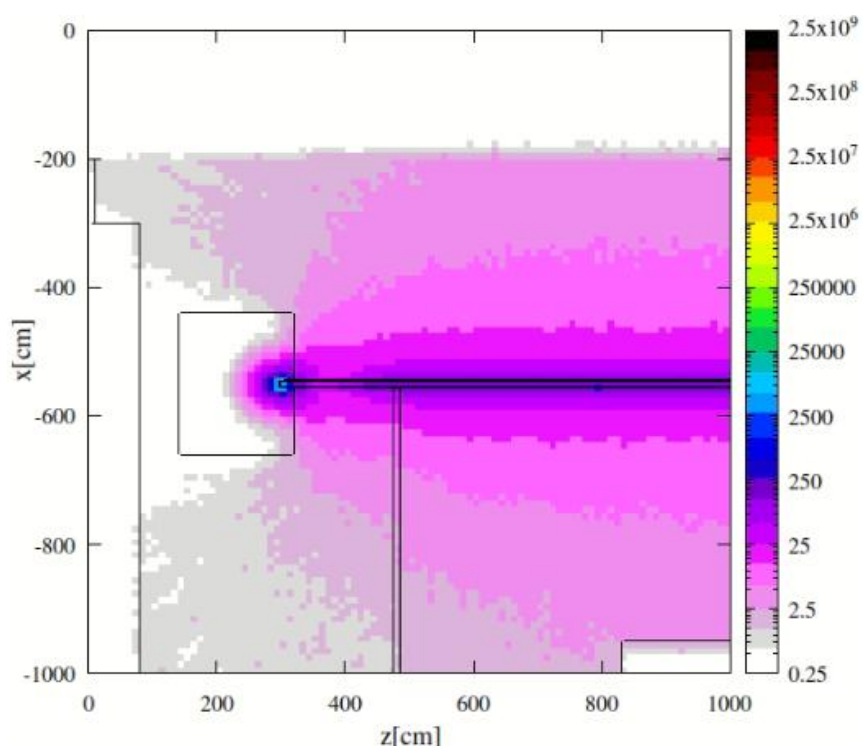


图 3-66 质子束辐照 1 个月冷却 1 天剂量率分布图

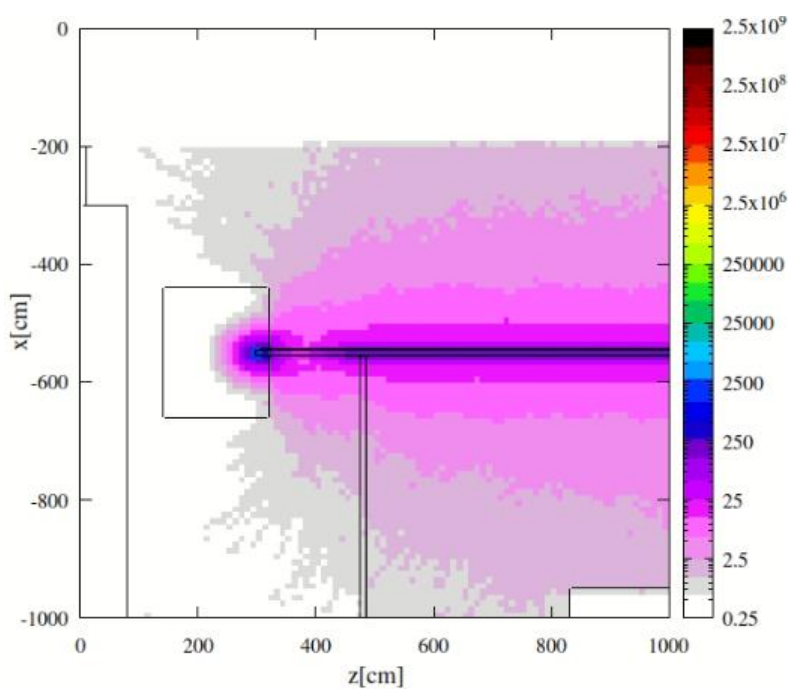


图 3-67 质子束辐照 1 个月冷却 7 天剂量率分布图

(2) DUMP2

DUMP2 辐照 1 个月后，冷却 0 秒、1 天、3 天和 7 天的剂量率分布情况见图 3-68~图 3-71。由计算结果可知冷却 7 天后，隧道内距 dump 屏蔽墙 1m 处束管外 1m 区域的剂量率约为 $15\mu\text{Sv/h}$ 。

在加速器寿期内，束流收集器始终置于局部屏蔽体内，保证局部屏蔽体外的剂量率在维护维修人员能短时间居留的要求。加速器寿期结束后，将束流收集器与局部屏蔽体一起放入专用的转运容器内，最后外送处置。

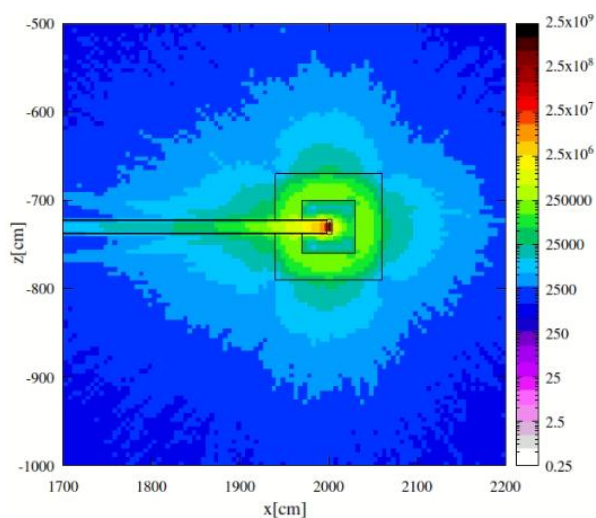


图 3-68 质子束辐照 1 个月冷却 0 秒剂量率分布图[$\mu\text{Sv/h}$]

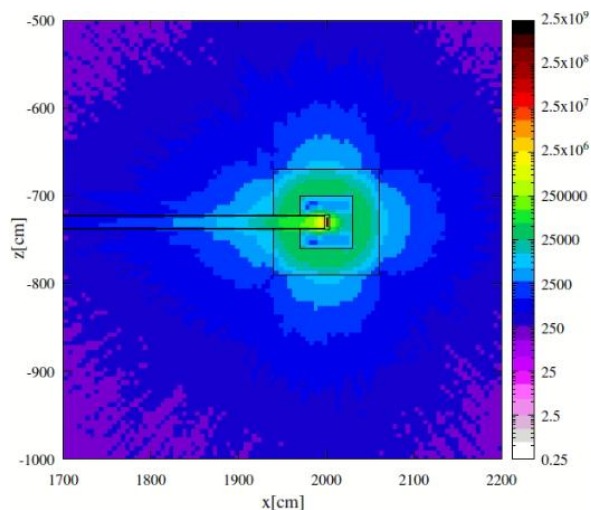


图 3-69 质子束辐照 1 个月冷却 1 天剂量率分布图[$\mu\text{Sv/h}$]

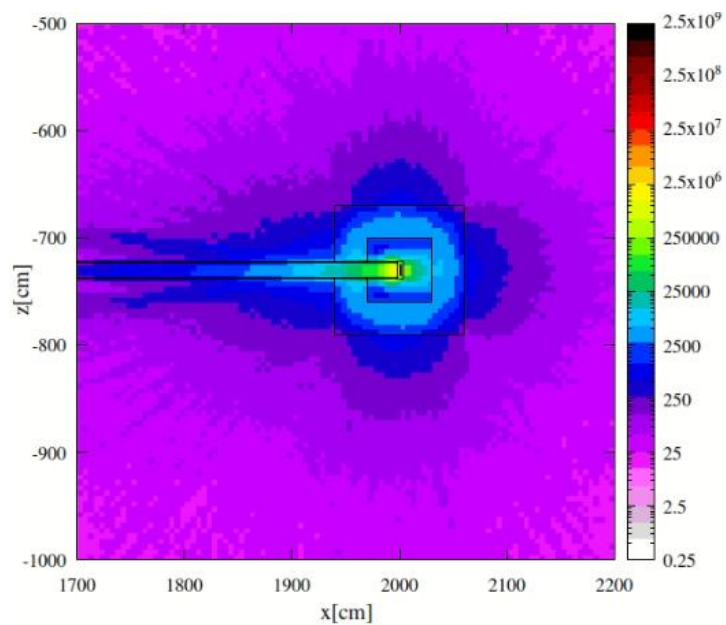


图 3-70 质子束辐照 1 个月冷却 3 天剂量率分布图[$\mu\text{Sv/h}$]

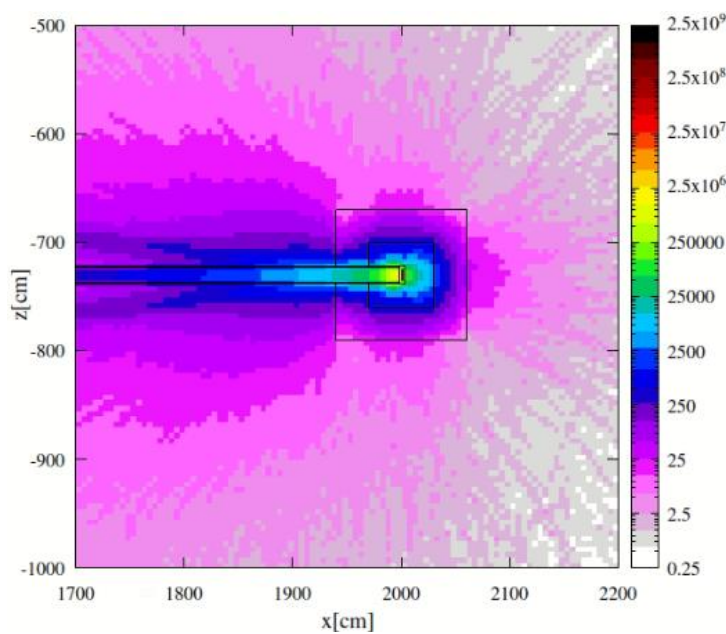


图 3-71 质子束辐照 1 个月冷却 7 天剂量率分布图[$\mu\text{Sv/h}$]

(3) 辐照室

靶站 1、2 辐照室辐照靶件后冷却时间 0 s、15 min、30 min、2 h、1d 时 Th 靶周围剂量率分布图见图 3-72 和图 3-73。

表 3-26 距离靶 1m 处最大剂量率, $\mu\text{Sv/h}$

结构部件	停机时刻最大剂量率	停机 15min 后最大剂量率	停机 30min 后最大剂量率	停机 2h 后最大剂量率	停机 24h 后最大剂量率
靶站 1Th 靶	7.89E+07	4.47E+07	4.06E+07	3.22E+07	1.52E+07
靶站 2Th 靶	1.46E+07	6.85E+06	6.02E+06	4.33E+06	1.68E+06

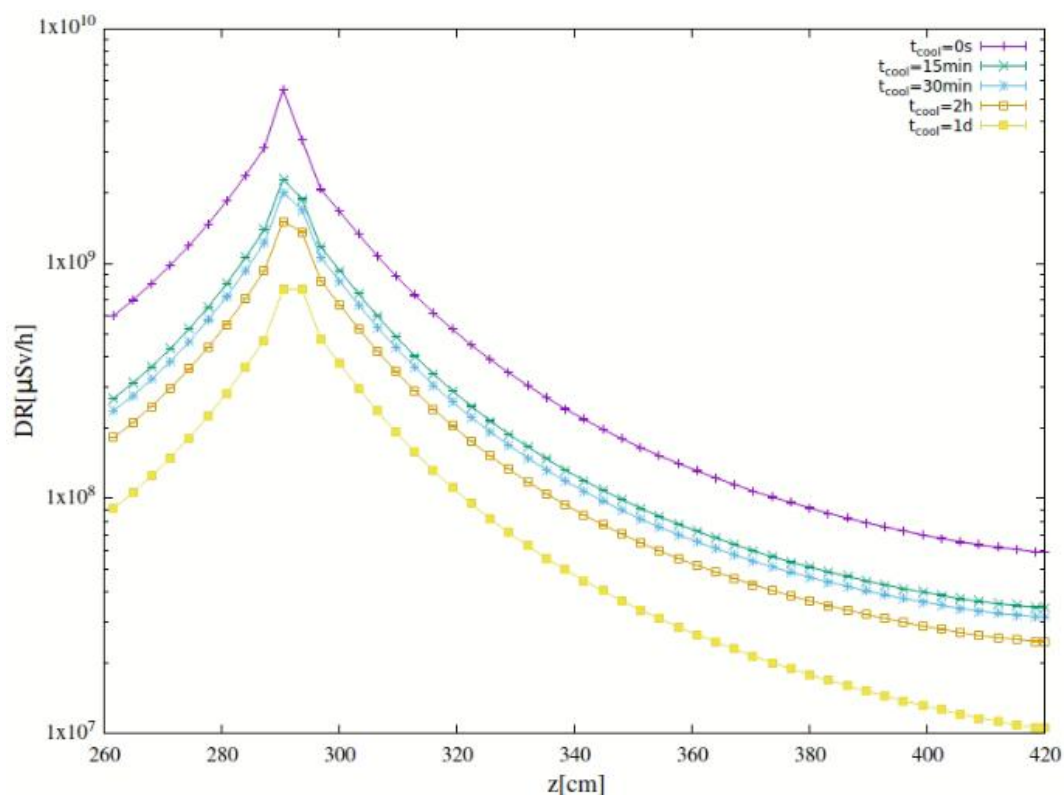


图 3-72 不同冷却时间复合 Th 靶周围剂量率分布, 靶站 1

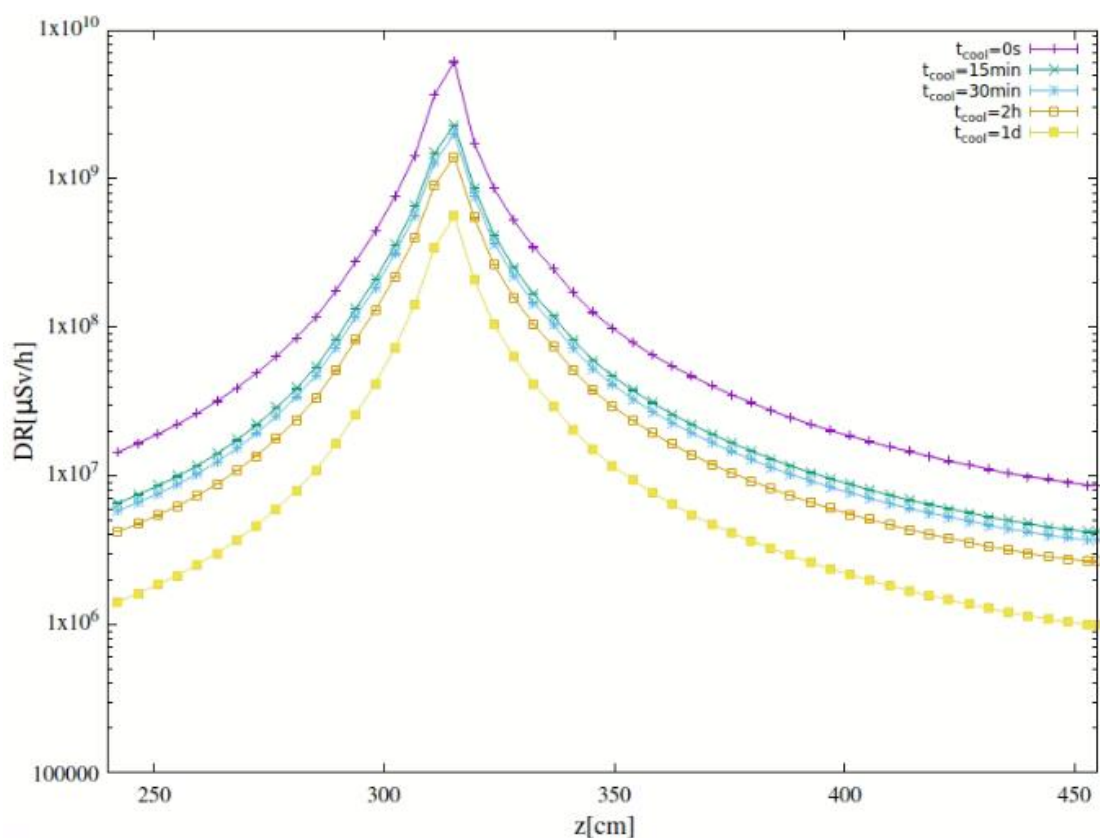


图 3-73 不同冷却时间 Th 靶周围剂量率分布，靶站 2

(3) 辐照室结构部件

辐照室结构部件的感生放射性主要是粒子直接与装置结构材料相互作用产生，主要包括靶站 1 束窗、靶站 1 靶窗、靶站 1 靶容器、靶站 2 靶窗、靶站 2 靶容器。利用 FLUKA 程序计算上述结构部件的感生放射性，计算时所用参数如下：

靶站 1 辐照室结构部件（束窗、靶窗、靶容器）：连续照射 10 天，冷却 3 天，如此循环 2 年，最后一次照射结束后冷却 3 天；束流参数：能量为 115MeV，流强为 1mA。

靶站 2 靶窗：连续照射 10 天，冷却 20 天，如此循环 0.5 年；束流参数：能量为 115MeV，流强为 0.25mA。

靶站 2 靶容器：连续照射 10 天，冷却 20 天，如此循环 20 年；束流参数：能量为 115MeV，流强为 0.25mA。

各结构部件感生放射性饱和活度的计算结果见表 3-27~表 3-31。

停机后感生放射性主要来自 ^{48}V 、 ^{55}Fe 、 ^{59}Fe 、 ^{54}Mn 、 ^{56}Co 、 ^{57}Co 、 ^{58}Co 、 ^{60}Co 、 ^3H 等半衰期在月级别的中长寿命放射性核素。

表 3-27 靶站 1 束窗的感生放射性

核素	活度[Bq]	半衰期
H-3	1.36E+09	12.32y
Ar-37	1.39E+09	35.04d
Ca-45	1.80E+09	162.61d
Sc-44	7.32E+09	3.97h
Sc-44m	6.86E+09	58.61h
Sc-46	1.54E+10	83.79d
Sc-47	5.13E+09	3.3492d
V-48	1.23E+11	15.9735d
V-49	8.79E+10	330d
Cr-51	3.31E+11	27.7025d
Mn-52	6.97E+10	5.591d
Mn-54	9.29E+10	312.2d
Fe-55	7.78E+10	2.744y
Co-55	3.15E+09	17.53h
Co-56	1.61E+11	77.236d
Co-57	1.78E+11	271.74d
Co-58	2.77E+11	70.86d
Co-60	5.17E+10	1925.28d
Ni-56	6.33E+09	6.075d
Ni-57	1.55E+10	35.6h
Rb-83	1.12E+09	86.2d
Sr-85	1.47E+09	64.849d
Y-87	3.06E+09	79.8h
Y-88	5.78E+09	106.626d
Y-89m	8.58E+09	15.663s
Zr-88	8.67E+09	83.4d
Zr-89	8.59E+09	78.41h
Nb-91m	5.44E+09	60.86d
Nb-95	1.36E+09	34.991d
Tc-95m	1.12E+09	61d
Tc-96	1.39E+09	4.28d

Lu-171	3.08E+09	8.24d
Lu-173	3.00E+09	1.37y
Hf-173	1.79E+09	23.6h
Hf-175	2.37E+10	70d
Ta-177	2.02E+10	56.56h
Ta-178	3.35E+10	9.31m
Ta-179	8.67E+09	1.82y
W-178	3.35E+10	21.6d
W-181	2.37E+10	121.2d
W-185	7.29E+09	75.1d
W-187	4.20E+09	24h
Re-181	1.12E+09	19.9h
Re-182	2.10E+09	64.2h
Re-183	4.66E+09	70d
Re-184	1.33E+09	35.4d

表 3-28 靶站 1 靶窗的感生放射性

核素	活度[Bq]	半衰期
Sc-44	2.42E+10	3.97h
Sc-44m	2.27E+10	58.61h
Sc-46	5.09E+10	83.79d
Sc-47	1.31E+10	3.3492d
V-48	4.35E+11	15.9735d
V-49	3.27E+11	330d
Cr-51	1.21E+12	27.7025d
Mn-52	3.29E+11	5.591d
Mn-54	2.42E+11	312.2d
Fe-55	3.09E+11	2.744y
Co-55	2.34E+10	17.53h
Co-56	1.03E+12	77.236d
Co-57	8.38E+11	271.74d
Co-58	5.40E+11	70.86d
Ni-56	8.87E+10	6.075d
Ni-57	2.15E+11	35.6h
Rb-82	7.17E+09	1.2575m
Rb-83	2.18E+10	86.2d
Sr-82	7.17E+09	25.34d
Sr-85	5.32E+10	64.849d
Y-86	1.54E+10	14.74h

Y-87	1.25E+11	79.8h
Y-88	1.61E+11	106.626d
Y-89m	1.70E+11	15.663s
Zr-88	2.13E+11	83.4d
Zr-89	1.71E+11	78.41h
Nb-90	9.66E+09	14.6h
Nb-91m	1.17E+11	60.86d
Nb-92m	5.49E+10	10.15d
Nb-95	7.97E+09	34.991d
Tc-95m	6.81E+09	61d
Tc-96	7.30E+09	4.28d

表 3-29 靶站 1 靶容器的感生放射性

核素	活度[Bq]	半衰期
H-3	4.96E+08	12.32y
Be-7	1.21E+08	53.22d
Na-22	1.66E+07	2.6018y
Na-24	5.92E+06	14.997h
P-32	3.00E+09	14.268d
P-33	3.06E+07	25.35d
S-35	4.48E+07	87.37d
Ca-45	6.37E+07	162.61d
Sc-44	9.11E+07	3.97h
Sc-44m	8.57E+07	58.61h
Sc-46	1.06E+09	83.79d
Sc-47	8.80E+08	3.3492d
Sc-48	3.66E+08	43.67h
V-48	5.56E+09	15.9735d
V-49	1.91E+10	330d
Cr-48	2.05E+07	21.56h
Cr-51	9.62E+11	27.7025d
Mn-52	7.41E+09	5.591d
Mn-54	2.25E+11	312.2d
Fe-52	9.00E+05	8.275h
Fe-55	2.99E+11	2.744y
Fe-59	1.39E+10	44.495d
Co-55	1.13E+08	17.53h
Co-56	2.37E+10	77.236d
Co-57	1.07E+11	271.74d

Co-58	6.20E+11	70.86d
Co-58m	1.89E+09	8.856h
Co-60	1.90E+09	1925.28d
Ni-56	5.16E+08	6.075d
Ni-57	5.75E+09	35.6h
Ni-59	1.10E+07	7.60E+04y
Ni-63	1.29E+09	101.2y

表 3-30 靶站 2 束靶窗的感生放射性

核素	活度[Bq]	半衰期
Be-7	2.42E+08	53.22d
Ca-45	2.28E+08	162.61d
Sc-44	4.75E+08	3.97h
Sc-44m	4.41E+08	58.61h
Sc-46	2.83E+09	83.79d
Sc-47	4.59E+08	3.3492d
V-48	2.74E+10	15.9735d
V-49	1.50E+10	330d
Cr-51	8.22E+10	27.7025d
Mn-52	1.62E+10	5.591d
Mn-54	1.13E+10	312.2d
Fe-55	1.35E+10	2.744y
Co-56	5.69E+10	77.236d
Co-57	3.90E+10	271.74d
Co-58	2.46E+10	70.86d
Ni-56	4.60E+09	6.075d
Ni-57	1.16E+09	35.6h
Rb-82	3.55E+08	1.2575m
Rb-83	1.40E+09	86.2d
Sr-82	3.55E+08	25.34d
Sr-85	2.86E+09	64.849d
Y-87	3.86E+09	79.8h
Y-88	6.75E+09	106.626d
Y-89m	4.87E+09	15.663s
Zr-88	1.13E+10	83.4d
Zr-89	4.87E+09	78.41h
Nb-91m	6.24E+09	60.86d
Nb-92m	2.99E+09	10.15d
Nb-95	3.46E+08	34.991d

Mo-99	2.18E+08	65.976h
Tc-95m	4.04E+08	61d
Tc-96	2.42E+08	4.28d
Tc-99m	2.10E+08	6.0067h

表 3-31 靶站 2 靶容器的感生放射性

核素	活度[Bq]	半衰期
H-3	1.80E+07	12.32y
Be-7	6.21E+06	53.22d
P-32	6.60E+08	14.268d
S-35	1.57E+07	87.37d
Ca-45	3.68E+06	162.61d
Sc-44	3.08E+06	3.97h
Sc-44m	2.87E+06	58.61h
Sc-46	1.55E+08	83.79d
Sc-47	2.75E+07	3.3492d
Sc-48	9.92E+06	43.67h
V-48	8.00E+08	15.9735d
V-49	1.71E+09	330d
Cr-51	5.12E+11	27.7025d
Mn-52	9.36E+08	5.591d
Mn-54	2.06E+10	312.2d
Fe-55	5.61E+10	2.744y
Fe-59	9.12E+09	44.495d
Co-56	3.09E+09	77.236d
Co-57	8.69E+09	271.74d
Co-58	7.23E+10	70.86d
Co-60	1.72E+08	1925.28d
Ni-56	5.03E+07	6.075d
Ni-57	5.26E+07	35.6h
Ni-59	5.61E+06	7.60E+04y
Ni-63	6.90E+08	101.2y

3.4.1.2.4 土壤和地下水的感生放射性

由第五章的计算结果可知，底板与土壤交接处的剂量率小于 5.5mSv/h，本项目的运行对土壤和地下水的影响可忽略。

3.4.2 基于质子加速器的同位素应用研发-靶站/热室

3.4.2.1 核素衰变

放射性核素自身发生衰变，衰变过程中伴随产生的 α 粒子、 β 粒子、 γ 射线。
目标核素的主要衰变参数见表 3-32。

表 3-32 本项目目标核素放射性衰变参数

序号	核素名称	半衰期	衰变模式	α 最大能量(MeV) 与绝对强度 (%)
1	^{225}Ac	9.9d	α	5.83 (50.7)
2	^{223}Ra	11.43d	α	5.71 (52.6)

3.4.2.2 物料平衡

本项目辐照后靶件进入分离系统工作箱室中开展目标核素与杂质核素的分离，辐射工作人员开展上述操作的过程中，放射性核素会按照一定比例分配至气态、液态和固态。

本项目各生产线辐照靶件经由靶室热室传送至分离系统工作箱室开展相应的分离纯化操作，各层级工作箱室的核素的活度和种类依次减少，具体数据详见 3.2.1.6 同位素分离和质量检测小节中数据，此处保守均按人员开始长时间操作的箱室（靶室热室后对应的第一个热室，1#热室）开展物料平衡分析。

分离系统单条生产线处理 2 片 T1 辐照靶片或 1 片 T2 辐照靶片，1#热室中两类靶片的活度见附件 5，1 片 T2 辐照靶片活度相对较大，以此作为典型进行物料平衡分析。

靶片处理过程主要为溶液状态，释放至气相的份额取值如下：惰性气体和 H-3 考虑 100%释放；综合考虑体系温度与碘的挥发温度、硝酸浓度以及 NO_2 的分压，初步判断 I 系核素的释放量按照 0.1 考虑；Po 系释放量主要以气溶胶形式存在，实验表明在 50 摄氏度的条件下，几乎没有测量到 Po 元素，此处保守

按照释放份额取值为 0.001；Cs 处于高温或含特定元素（如 Tc）的复杂体系中，具有挥发风险，此处保守按照释放份额取值为 0.003；其他核素空气释放份额根据《DOE HANDBOOK 2010 94》可知，液体非沸腾状态下空气释放份额保守取值按照 1.0E-04 考虑。非惰性气体核素分配至固相按 0.001 考虑，剩余部分均进入液相。各核素的物料平衡见表 3-38。

表 3-33 分离系统区域辐射工作场所物料平衡一览表

核素	半衰期	活度, Bq/单批次	液相, Bq/单批次	气相, Bq/单批次	固相, Bq/单批次
Ac-225	9.92d	8.57E+09	8.56E+09	8.57E+05	8.57E+06
Ac-226	29.37h	1.03E+08	1.02E+08	1.03E+04	1.03E+05
Ac-227	21.772y	3.66E+07	3.65E+07	3.66E+03	3.66E+04
Ac-228	6.15h	1.45E+06	1.45E+06	1.45E+02	1.45E+03
Ag-111	7.45d	1.19E+11	1.19E+11	1.19E+07	1.19E+08
Ag-112	3.13h	2.04E+08	2.03E+08	2.04E+04	2.04E+05
As-77	38.83h	7.01E+08	7.00E+08	7.01E+04	7.01E+05
Ba-140	12.7527d	3.58E+10	3.58E+10	3.58E+06	3.58E+07
Bi-210	5.012d	4.91E+09	4.90E+09	4.91E+05	4.91E+06
Br-82	35.282h	7.88E+07	/	7.88E+07	/
Cd-115	53.46h	1.83E+10	1.83E+10	1.83E+06	1.83E+07
Cd-115m	44.56d	6.15E+09	6.15E+09	6.15E+05	6.15E+06
Ce-137	9h	6.47E+05	6.46E+05	6.47E+01	6.47E+02
Ce-137m	34.4h	4.81E+05	4.81E+05	4.81E+01	4.81E+02
Ce-139	137.641d	9.76E+07	9.75E+07	9.76E+03	9.76E+04
Ce-141	32.511d	2.63E+10	2.63E+10	2.63E+06	2.63E+07
Ce-143	33.039h	8.87E+08	8.86E+08	8.87E+04	8.87E+05
Ce-144	284.91d	2.81E+09	2.81E+09	2.81E+05	2.81E+06
Cs-131	9.689d	8.39E+08	8.36E+08	2.52E+06	8.39E+05
Cs-132	6.48d	1.59E+09	1.58E+09	4.76E+06	1.59E+06
Cs-136	13.04d	1.43E+10	1.43E+10	4.29E+07	1.43E+07
Fr-221	286.1s	8.57E+09	8.56E+09	8.57E+05	8.57E+06
Ga-72	14.1h	3.66E+08	3.66E+08	3.66E+04	3.66E+05
I-126	12.93d	1.26E+09	1.13E+09	1.26E+08	1.26E+06
I-131	8.0252d	4.53E+10	4.07E+10	4.53E+09	4.53E+07
I-133	20.83h	4.63E+07	4.16E+07	4.63E+06	4.63E+04
In-115m	4.486h	2.00E+10	1.99E+10	2.00E+06	2.00E+07
La-135	19.5h	9.13E+04	9.12E+04	9.13E+00	9.13E+01

La-137	6.00E+04y	1.84E+03	1.84E+03	1.84E-01	1.84E+00
La-140	1.67855d	4.14E+10	4.13E+10	4.14E+06	4.14E+07
Mo-99	65.976h	1.95E+10	1.95E+10	1.95E+06	1.95E+07
Nb-95	34.991d	7.59E+09	7.58E+09	7.59E+05	7.59E+06
Nb-95m	3.61d	7.91E+08	7.90E+08	7.91E+04	7.91E+05
Nb-96	23.35h	1.62E+07	1.62E+07	1.62E+03	1.62E+04
Nd-147	10.98d	1.92E+10	1.92E+10	1.92E+06	1.92E+07
Pa-229	1.5d	7.74E+08	7.73E+08	7.74E+04	7.74E+05
Pa-230	17.4d	5.46E+09	5.45E+09	5.46E+05	5.46E+06
Pa-231	3.28E+04y	4.94E+05	4.93E+05	4.94E+01	4.94E+02
Pa-232	1.32d	1.49E+08	1.49E+08	1.49E+04	1.49E+05
Pa-233	26.975d	1.85E+11	1.85E+11	1.85E+07	1.85E+08
Pb-209	3.234h	8.71E+09	8.70E+09	8.71E+05	8.71E+06
Pb-212	10.64h	7.57E+09	7.56E+09	7.57E+05	7.57E+06
Pd-109	13.7012h	2.64E+06	2.64E+06	2.64E+02	2.64E+03
Pd-112	21.04h	1.73E+08	1.73E+08	1.73E+04	1.73E+05
Pm-149	53.08h	2.19E+09	2.19E+09	2.19E+05	2.19E+06
Pm-151	28.4h	9.10E+07	9.09E+07	9.10E+03	9.10E+04
Po-208	2.898y	2.73E+06	2.72E+06	2.73E+03	2.73E+03
Po-209	124y	5.45E+05	5.44E+05	5.45E+02	5.45E+02
Po-210	138.376d	1.44E+09	1.44E+09	1.44E+06	1.44E+06
Pr-143	13.57d	3.76E+10	3.76E+10	3.76E+06	3.76E+07
Ra-223	11.43d	3.51E+10	3.50E+10	3.51E+06	3.51E+07
Ra-224	3.6319d	7.35E+09	7.34E+09	7.35E+05	7.35E+06
Ra-225	14.9d	1.37E+08	1.37E+08	1.37E+04	1.37E+05
Ra-226	1600y	6.66E+04	6.65E+04	6.66E+00	6.66E+01
Ra-228	5.75y	1.45E+06	1.45E+06	1.45E+02	1.45E+03
Rb-86	18.642d	1.63E+09	1.63E+09	1.63E+05	1.63E+06
Rh-101	3.3y	4.71E+04	4.70E+04	4.71E+00	4.71E+01
Rh-101m	4.34d	1.26E+06	1.26E+06	1.26E+02	1.26E+03
Rh-102	207.3d	1.37E+06	1.37E+06	1.37E+02	1.37E+03
Rh-102m	3.742y	2.78E+05	2.78E+05	2.78E+01	2.78E+02
Rh-103m	56.114m	5.01E+10	5.01E+10	5.01E+06	5.01E+07
Rh-105	35.36h	4.34E+09	4.34E+09	4.34E+05	4.34E+06
Rn-222	3.8235d	5.95E+04	/	5.95E+04	/
Ru-103	39.247d	5.02E+10	5.01E+10	5.02E+06	5.02E+07
Ru-106	371.8d	7.80E+09	7.79E+09	7.80E+05	7.80E+06
Sb-122	2.7238d	1.74E+09	1.74E+09	1.74E+05	1.74E+06
Sb-124	60.2d	5.53E+09	5.52E+09	5.53E+05	5.53E+06

Sb-126	12.35d	9.26E+09	9.25E+09	9.26E+05	9.26E+06
Sb-127	3.85d	2.06E+10	2.06E+10	2.06E+06	2.06E+07
Sm-153	46.284h	4.74E+08	4.74E+08	4.74E+04	4.74E+05
Sn-121	27.03h	6.18E+08	6.17E+08	6.18E+04	6.18E+05
Sn-123	129.2d	2.78E+09	2.78E+09	2.78E+05	2.78E+06
Sn-125	9.64d	1.43E+10	1.43E+10	1.43E+06	1.43E+07
Sr-89	50.563d	2.85E+10	2.84E+10	2.85E+06	2.85E+07
Tc-99m	6.0067h	1.88E+10	1.88E+10	1.88E+06	1.88E+07
Te-127	9.35h	2.20E+10	2.20E+10	2.20E+06	2.20E+07
Te-127m	106.1d	3.19E+09	3.19E+09	3.19E+05	3.19E+06
Te-129	69.9m	4.47E+09	4.47E+09	4.47E+05	4.47E+06
Te-129m	33.6d	6.98E+09	6.97E+09	6.98E+05	6.98E+06
Te-131m	33.25h	1.25E+08	1.24E+08	1.25E+04	1.25E+05
Te-132	3.204d	7.42E+09	7.41E+09	7.42E+05	7.42E+06
Th-227	18.697d	4.66E+10	4.65E+10	4.66E+06	4.66E+07
Th-228	1.9125y	5.71E+09	5.71E+09	5.71E+05	5.71E+06
Th-229	7932y	1.53E+06	1.53E+06	1.53E+02	1.53E+03
Th-230	7.54E+04y	2.09E+05	2.09E+05	2.09E+01	2.09E+02
Th-231	25.52h	1.06E+09	1.05E+09	1.06E+05	1.06E+06
Th-232	1.40E+10y	4.93E+00	4.92E+00	4.93E-04	4.93E-03
U-230	20.8d	2.36E+08	2.35E+08	2.36E+04	2.36E+05
U-232	68.9y	8.20E+06	8.19E+06	8.20E+02	8.20E+03
U-233	1.59E+05y	4.01E+04	4.00E+04	4.01E+00	4.01E+01
Xe-131m	11.84d	3.74E+09	/	3.74E+09	/
Xe-133	5.2475d	4.86E+10	/	4.86E+10	/
Xe-133m	2.198d	1.56E+09	/	1.56E+09	/
Y-90	64.053h	4.83E+08	4.83E+08	4.83E+04	4.83E+05
Y-91	58.51d	2.53E+10	2.53E+10	2.53E+06	2.53E+07
Zn-72	46.5h	2.55E+08	2.55E+08	2.55E+04	2.55E+05
Zr-95	64.032d	2.31E+10	2.31E+10	2.31E+06	2.31E+07
Zr-97	16.749h	1.10E+07	1.09E+07	1.10E+03	1.10E+04

3.4.2.3 放射性废气

分离系统区域开展放射性同位素生产期间，辐照后靶件在溶解、分离和纯化过程中会产生气溶胶，单批次操作情况下的气载流出物源项见表 3-34，放射性废气均经过滤后，经排风塔排放，具体的通风系统参数详见 4.6 通风系统小节。

表 3-34 分离系统区域气载流出物源项

核素	半衰期	释放量, Bq/单批次
Ac-225	9.92d	8.57E+05
Ac-226	29.37h	1.03E+04
Ac-227	21.772y	3.66E+03
Ac-228	6.15h	1.45E+02
Ag-111	7.45d	1.19E+07
Ag-112	3.13h	2.04E+04
As-77	38.83h	7.01E+04
Ba-140	12.7527d	3.58E+06
Bi-210	5.012d	4.91E+05
Br-82	35.282h	7.88E+07
Cd-115	53.46h	1.83E+06
Cd-115m	44.56d	6.15E+05
Ce-137	9h	6.47E+01
Ce-137m	34.4h	4.81E+01
Ce-139	137.641d	9.76E+03
Ce-141	32.511d	2.63E+06
Ce-143	33.039h	8.87E+04
Ce-144	284.91d	2.81E+05
Cs-131	9.689d	2.52E+06
Cs-132	6.48d	4.76E+06
Cs-136	13.04d	4.29E+07
Fr-221	286.1s	8.57E+05
Ga-72	14.1h	3.66E+04
I-126	12.93d	1.26E+08
I-131	8.0252d	4.53E+09
I-133	20.83h	4.63E+06
In-115m	4.486h	2.00E+06
La-135	19.5h	9.13E+00
La-137	6.00E+04y	1.84E-01
La-140	1.67855d	4.14E+06
Mo-99	65.976h	1.95E+06
Nb-95	34.991d	7.59E+05
Nb-95m	3.61d	7.91E+04
Nb-96	23.35h	1.62E+03
Nd-147	10.98d	1.92E+06
Pa-229	1.5d	7.74E+04

Pa-230	17.4d	5.46E+05
Pa-231	3.28E+04y	4.94E+01
Pa-232	1.32d	1.49E+04
Pa-233	26.975d	1.85E+07
Pb-209	3.234h	8.71E+05
Pb-212	10.64h	7.57E+05
Pd-109	13.7012h	2.64E+02
Pd-112	21.04h	1.73E+04
Pm-149	53.08h	2.19E+05
Pm-151	28.4h	9.10E+03
Po-208	2.898y	2.73E+03
Po-209	124y	5.45E+02
Po-210	138.376d	1.44E+06
Pr-143	13.57d	3.76E+06
Ra-223	11.43d	3.51E+06
Ra-224	3.6319d	7.35E+05
Ra-225	14.9d	1.37E+04
Ra-226	1600y	6.66E+00
Ra-228	5.75y	1.45E+02
Rb-86	18.642d	1.63E+05
Rh-101	3.3y	4.71E+00
Rh-101m	4.34d	1.26E+02
Rh-102	207.3d	1.37E+02
Rh-102m	3.742y	2.78E+01
Rh-103m	56.114m	5.01E+06
Rh-105	35.36h	4.34E+05
Rn-222	3.8235d	5.95E+04
Ru-103	39.247d	5.02E+06
Ru-106	371.8d	7.80E+05
Sb-122	2.7238d	1.74E+05
Sb-124	60.2d	5.53E+05
Sb-126	12.35d	9.26E+05
Sb-127	3.85d	2.06E+06
Sm-153	46.284h	4.74E+04
Sn-121	27.03h	6.18E+04
Sn-123	129.2d	2.78E+05
Sn-125	9.64d	1.43E+06
Sr-89	50.563d	2.85E+06
Tc-99m	6.0067h	1.88E+06

Te-127	9.35h	2.20E+06
Te-127m	106.1d	3.19E+05
Te-129	69.9m	4.47E+05
Te-129m	33.6d	6.98E+05
Te-131m	33.25h	1.25E+04
Te-132	3.204d	7.42E+05
Th-227	18.697d	4.66E+06
Th-228	1.9125y	5.71E+05
Th-229	7932y	1.53E+02
Th-230	7.54E+04y	2.09E+01
Th-231	25.52h	1.06E+05
Th-232	1.40E+10y	4.93E-04
U-230	20.8d	2.36E+04
U-232	68.9y	8.20E+02
U-233	1.59E+05y	4.01E+00
Xe-131m	11.84d	3.74E+09
Xe-133	5.2475d	4.86E+10
Xe-133m	2.198d	1.56E+09
Y-90	64.053h	4.83E+04
Y-91	58.51d	2.53E+06
Zn-72	46.5h	2.55E+04
Zr-95	64.032d	2.31E+06
Zr-97	16.749h	1.10E+03
备注：释放量指核素从液相释放至气相的量。		

3.4.2.4 放射性废液

分离系统区域产生的放射性废液主要包括冲洗废液、工艺废液和活度极低的放射性废水，冲洗废液在同位素分离、纯化工艺运行结束后管路冲洗所产生，工艺废液在同位素分离和纯化工艺过程中产生，活度极低的放射性废水源于质检、实验室研究等过程中的各类操作废液过程中的各类操作废液，源项见。

表 3-35。

表 3-35 分离系统区域放射性废液源项

序号	废物名称	年产生量	放射性浓度 Bq/L	主要核素	来源
----	------	------	------------	------	----

1	冲洗废液	15L	低放废液	^{233}Pa 、 ^{227}Th 、 ^{103}Ru 、 ^{140}La 等	分离系统，靶件溶解、分离、纯化过程
2	工艺废液	630L	中放废液	^{233}Pa 、 ^{227}Th 、 ^{103}Ru 、 ^{140}La 等	分离系统，靶件分离和纯化过程
3	极低活度的放射性废水	240L	低放废液	^{233}Pa 、 ^{227}Th 、 ^{103}Ru 、 ^{140}La 等	分离系统，质检、实验室研究等过程

冲洗废液热室箱室产生后经管道接入靶站/热室地下一层低放废液暂存间的暂存罐内，低放废液暂存间内设置 2 暂存罐，单个暂存罐容积约 0.5 m^3 ，后续通过管道将低放废液输送至辐射管理中心低放废液暂存罐中。工艺废液在工作箱室产生后经管道接入靶站/热室地下一层中放废液暂存间的废液罐，废液暂存间设置 2 个中放废液暂存罐，单个暂存罐容积约 0.5 m^3 ，后续将中放废液通过管道输送至辐射管理中心中放废液罐中。活度极低的放射性废水经管道接入靶站/热室地下一层废液暂存间 1 的储存罐中，储存罐容积为 1 m^3 ，后续将通过管道输送至辐射管理中心特下水废水池 2 中。上述废液在辐射管理中心的处理措施详见 4.7.2 放射性废液小节。

3.4.2.5 放射性固体废物

分离系统区域产生的放射性固体废物主要靶片结构件、废树脂柱和废劳保用品，源项见表 3-36。

表 3-36 分离系统区域放射性固体废物年产量一览表

序号	固废名称	固废年产生量/频次	含核素种类	产生子项
1	T1/T2 靶片结构件（靶膜）	2.5 天/次，总计 80 次/年，8.3kg	^{65}Zn 、 ^{63}Ni 、 ^{62}Co 、 ^{60}Fe 、 ^{60}Co 、 ^{59}Fe 、 ^{59}Ni 、 ^{58}Co 、 ^{57}Co 、 ^{55}Fe 、 ^{54}Mn 、 ^{14}C 、 ^7Be 、 ^3H 、 ^{58}Co 、 ^{60}Co 等	分离系统
2	废树脂柱	2.5 天/次，总计 80 次/年，600kg	^{223}Ra 、 ^{225}Ac 、 ^{227}Th 、 ^{89}Sr 等	分离系统

3	劳保用品	约 120 套, 25kg	/	分离系统
4	设备维护更换	150kg	^{223}Ra 、 ^{225}Ac 、 ^{227}Th 、 ^{89}Sr 等	分离系统

T1/T2 废靶结构件先在分离热室内装入厚型双盖屏蔽容器中，通过 AGV 小车转运至靶站/热室地下一层固废暂存间暂存，装入 200L 钢桶，并临时存放在暂存间，待暂存间存放满时，200L 钢桶和屏蔽容器通过 AGV 小车，经提升机 2 转运至地上一层，再通过小车经室外运输路线转移至辐射管理中心。废树脂先在分离系统热室内装入薄型双盖容器中，通过 AGV 小车转运至靶站/热室地下一层固废暂存间暂存，与上面废物处理一致，最终转移至辐射管理中心。废劳保用品在卫生通过间出口处设置分类收集暂存桶，经监测满足清洁解控标准的，作为一般固体废物处理；不满足清洁解控标准的，须密封包装、张贴标签后通过小车转移至辐射管理中心。上述放射性固体废物在辐射管理中心的处理措施详见 4.7.3 放射性固体废物小节。

3.4.3 超重乙级实验室

3.4.3.1 核素衰变

核素 Am-243、Am-241 衰变发生 α 衰变，同时伴随发射 γ 射线及 β 射线，能量较低。

核素 Nb-95、Ta-182 衰变方式是 β 衰变，能衰变出多条 β 射线，还能释放 γ 射线。 β 射线穿透能力较弱，在组织内辐射距离较短，不会对环境产生明显影响，但 β 射线被周围其他物质阻止时产生的轫致辐射会对周围环境产生辐射污染，本项目主要考虑轫致辐射影响。

核素 Ta-179 衰变方式是 EC 衰变，能衰变出多条 X 射线，主要考虑核素的 X 射线影响。

核素 Cf-252、Cf-251、Cf-249、Cm-248、Cm-244、Pu-244、Pu-240 衰变发生 α 衰变。

表 3-37 超重乙级实验室涉及的核素特性一览表

核素	半衰期	α 、 β 粒子能量, MeV	γ 能量, MeV
Am-243	7370a	5.27 (α)	0.07264
Am-241	432.2a	5.486 (α)	0.0595
Cf-252	2.645a	6.118 (α)	-
Cf-251	898a	5.68 (α)	-
Cf-249	351a	5.81 (α)	-
Cm-248	348000a	5.078 (α)	-
Cm-244	18.1a	5.763 (α)	-
Pu-244	81300000a	4.666 (α)	-
Pu-240	6561a	5.168 (α)	-
Nb-95	34.9d	0.04345 (β -)	0.7656
Ta-182	114d	0.1265 (β -)	0.6614
Ta-179	1.82a	EC 衰变	-

3.4.3.2 物料平衡估算

超重乙级实验室进行放射性核素操作期间，各核素的物料平衡见表 3-38。

表 3-38 超重乙级实验室辐射工作场所物料平衡一览表

核素	日最大操作量	分配至气相、液相和固相的量			
		气相, Bq	液相, Bq	回收, Bq	固相, Bq
Am-243	2.66E+07	2.66E+03	5.27E+05	2.58E+07	2.66E+05
Am-241	1.00E+07	1.00E+03	1.98E+05	9.70E+06	1.00E+05
Cf-252	1.00E+06	1.00E+02	1.98E+04	9.70E+05	1.00E+04
Cf-251	1.00E+06	1.00E+02	1.98E+04	9.70E+05	1.00E+04
Cf-249	1.00E+06	1.00E+02	1.98E+04	9.70E+05	1.00E+04
Cm-248	1.00E+07	1.00E+03	1.98E+05	9.70E+06	1.00E+05
Cm-244	1.00E+07	1.00E+03	1.98E+05	9.70E+06	1.00E+05
Pu-244	1.00E+07	1.00E+03	1.98E+05	9.70E+06	1.00E+05
Pu-240	1.00E+07	1.00E+03	1.98E+05	9.70E+06	1.00E+05
Nb-95	3.70E+06	3.70E+02	3.66E+06	/	3.70E+04
Ta-182	3.70E+06	3.70E+02	3.66E+06	/	3.70E+04
Ta-179	3.70E+06	3.70E+02	3.66E+06	/	3.70E+04

注：1.对于 Am-243、Am-241、Cf-252、Cf-251、Cf-249、Cm-248、Cm-244、Pu-244、Pu-240 来讲，其进入废气的释放份额保守取 1.0E-04，进入固废的份额取 1.0E-02，回收实验中会将液相中 98%的核素回收；
2.对于其他三个核素来讲，其进入废气的释放份额保守取 1.0E-04，进入固废的份额取 1.0E-02，其余全部进入废液。

3.4.3.3 放射性废气

超重乙级实验开展实验期间，实验制靶仅在原液开盖分装及电沉积制靶过程中产生少量的放射性气溶胶；放射性同位素回取实验中在废靶溶解离心分离、树脂装柱和洗脱过程中产生少量放射性气溶胶；放射性溶液分装、震荡、离心操作扰动产生微量放射性气溶胶，各类实验单次气载流出物源项见表 3-39，放射性废气均经高效过滤器过滤后，在屋面排气口排放，具体的通风系统参数详见 4.6 通风系统小节。

表 3-39 超重乙级实验室气载流出物源项

序号	核素	单次释放量, Bq/次
1	Am-243	2.66E+03
2	Am-241	1.00E+03
3	Cf-252	1.00E+02
4	Cf-251	1.00E+02
5	Cf-249	1.00E+02
6	Cm-248	1.00E+03
7	Cm-244	1.00E+03
8	Pu-244	1.00E+03
9	Pu-240	1.00E+03
10	Nb-95	3.70E+02
11	Ta-182	3.70E+02
12	Ta-179	3.70E+02
备注：释放量指核素从各种状态释放至气相的量，此处未考虑过滤效率。		

3.4.3.4 放射性废液

超重乙级实验室放射性废液主要源于靶件制备、回取以及其他实验废液，主要核素为 ^{243}Am 、 ^{95}Nb 、 ^{182}Ta 、 ^{179}Ta 等，年产生量不超过 2L，先就地收集于通风橱废液瓶中，后续转移至废水间暂存间铅罐废液桶（3 mmPb，5L）中，最终转移至辐射管理中心进行暂存。对于控制区内人员清洗过程中产生的放射性活度极低的废水，年产量约为 0.5m^3 ，集中收集在备用间内集水坑中，后续转移至辐射管理中心进行暂存，在辐射管理中心的处理措施详见 4.7.2 放射性废液小节。

3.4.3.5 放射性固体废物

超重乙级实验室实验过程中主要包括：①沾染核素的一次性移液管、枪头、离心管、实验耗材；②操作过程污染擦拭布、纸巾、防护手套、防护服；③废离子交换树脂。上述放射性固体废物先分类装入固废垃圾袋扎带封口就地收集与房间内废物桶，收集满后转移至固废贮藏间内分类暂存于铅罐固废桶（5 mmPb，35L），后续转移至辐射管理中心进行暂存处理，在辐射管理中心的处理分析详见 4.7.3 放射性固体废物小节。

3.4.4 靶向药物实验室

3.4.4.1 核素衰变

靶向药物实验室涉及 Lu-177、F-18、Tb-161 和 Tc-99m，核素特性见表 3-40。

表 3-40 靶向药物实验室涉及的核素特性一览表

核素	半衰期	α 、 β 粒子能量，MeV	γ 能量，MeV
Lu-177	6.73d	0.2058 (β^-)	0.208
F-18	109.8min	0.63 (β^+)	0.511
Tb-161	6.89d	0.522 (β^-)	0.025
Tc-99m	6.02h	-	0.14

3.4.4.2 放射性废气

靶向药物实验室开展实验期间单次操作的核素量较低，且核素均非挥发性核素，操作过程中产生放射性废气较少，该区域设置独立的排风系统，放射性废气最终输送至辐射管理中心排风机房过滤后经排气塔排放，具体的通风系统参数详见 4.6 通风系统小节。

3.4.4.3 放射性废液

靶向药物实验室废液主要包括工艺废液和放射性废水。

标记和质检过程中会产生少量的工艺废液，根据实验规模估算，每批次实验产生的放射性废液约 0.10~0.15 L，全年按约 200 批次实验计，总量不超过 30L。实验室设置 3 个容积为 20 L 的专用放射性废液桶，总暂存容积为 60 L。废液先收集于废液桶中，并记录同位素名称及日期，达到规定收集量后由专人转移至放射性废物储存室暂存。暂存期满足所含最长半衰期核素的 10 个半衰期后，经监测达标并经审管部门认可后，作为普通废液处理。

放射性废水包括应急废水和冲洗废液。应急事故下，在放射性标记室设置应急用放射性洗手盆和洗眼器，应急情况下产生的放射性废水通过提升泵抽至放射性废物储存室的衰变废水罐（2 个 200L 废水罐）中暂存。辐射工作场所内冲洗废液集中收集于放射性废物储存室内集水坑中暂存。定期监测，监测合格后排放。

3.4.4.4 放射性固体废物

靶向药物实验室产生的放射性固体废物参数见表 3-41。

表 3-41 放射性固体废物年产量一览表

序号	固废名称	固废年产生量 (kg)	比活度 (Bq/kg)	体积 (L)	含核素种类	固废来源
1	注射器、手套、试剂瓶等	30	低放	120	Lu-177、F-18、Tc-99m 和 Tb-161	放射性标记、实验动物注射
2	实验动物尸体	50	低放	100		实验动物处理和暂存
3	动物垫料	450	低放	1500		实验动物饲养

靶向药物实验室产生的放射性固体废物主要包括注射器、手套、试剂瓶等一般放射性固体废物、实验动物尸体和动物垫料。实验室现配置 3 个容积为 35 L 的专用放射性废固桶和 4 个容积为 200 L 的专用放射性废固桶。各废固桶均按照不超过 80%的装填率使用，其中 35 L 废固桶的有效容积为 28 L，200 L 废固桶的有效容积为 160 L，总有效暂存容积为 724 L。根据废物类别和产生量，将 2 个

35 L 废固桶用于一般放射性固体废物，1 个 200 L 废固桶和 1 个 35 L 废固桶用于实验动物尸体，另外 3 个 200 L 废固桶用于动物垫料。

注射器、手套、试剂瓶等一般放射性固体废物年产生量约为 30 kg。按照最长 70 d 暂存时间计算，70 d 内最大产生量约为 5.75 kg。该类废物实装密度按 0.25 kg/L 核算，70 d 内产生体积约为 23.0 L。每个 35 L 废固桶的有效容积为 28 L，折合可容纳约 7.0 kg 一般放射性固体废物，单桶装满约需 85.2 d。实验室设置 2 个 35 L 废固桶交替使用，一个废固桶装满并封闭暂存期间，另一个废固桶可容纳 70 d 内产生的 5.75 kg 废物，能够满足一般放射性固体废物的连续收集和衰变暂存要求。

实验动物尸体年产生量约为 50 kg，70 d 内最大产生量约为 9.59 kg。动物尸体密封包装后的实装密度按 0.50 kg/L 核算，70 d 内所需暂存体积约为 19.2 L。实验室设置 1 个 200 L 专用废固桶作为主要暂存容器，其有效容积为 160 L，折合可容纳约 80 kg 动物尸体；另设置 1 个 35 L 专用废固桶作为周转容器，其有效容积为 28 L，折合可容纳约 14 kg 动物尸体。200 L 废固桶封闭进入 70 d 暂存期间，35 L 周转桶可收集同期产生的约 9.59 kg 动物尸体。因此，两个容器交替使用能够满足实验动物尸体的连续收集和暂存要求。实验动物尸体经双层废物袋密封后放入专用废固桶，并置于专用低温暂存设施内，采取防腐、防渗漏和必要的屏蔽措施。

动物垫料年产生量约为 450 kg，70 d 内最大产生量约为 86.30 kg。动物垫料装袋并整理装载后的实装密度按 0.30 kg/L 核算，70 d 内产生体积约为 287.7 L。实验室设置 3 个 200 L 废固桶用于动物垫料收集，每个废固桶有效容积为 160 L，折合可容纳约 48 kg 动物垫料。按动物垫料日均产生量约 1.233 kg 计算，一个 200 L 废固桶约 38.9 d 装满，装满后继续暂存 70 d，单桶总占用周期约为 108.9 d。3 个 200 L 废固桶依次轮换的周期约为 116.7 d，大于单桶 108.9 d 的占用周期。因此，第一个废固桶完成暂存并经监测解控后，可在第三个废固桶装满前重新投入使用，3 个 200 L 废固桶能够满足动物垫料连续产生和最长 70 d 暂存的要求。

通排风系统过滤器废滤芯放置低放固体废物暂存间。根据操作核素的最长半衰期，冷却 10 个半衰期以上，进行解控，按普通废物处理。

放射性固体废物暂存达到规定期限后，对废物包装表面的周围剂量当量率和表面污染水平进行监测。监测结果达到清洁解控要求并经审管部门认可后，按照相应的医疗废物或一般固体废物管理要求进行后续处置；监测结果不符合要求的，继续暂存或者交由有资质的单位处理。暂存期满不能直接视为达到解控条件，仍应以现场监测结果作为废物出库和后续处置的依据。

3.4.5 辐射管理中心

辐射管理中心场所内产生少量的放射性废液和放射性固体废物，其中放射性废液主要为人员去污放射性废水，收集至地下一层低放废液操作间内储存罐中，储存罐容积为 3 m³，设置液位监测仪表，定期监测，满足清洁解控要求方可排放，不满足清洁解控则交由有资质单位进行处理。

放射性固体废物主要为劳保用品和地上二层排风机房的废过滤器芯，劳保用品经地下一层分拣压缩装置处理后装入 200L 钢桶，经吊车送至地下一层废劳保用品暂存区域暂存。废过滤器芯经地下一层废滤芯挤压装置处理后装入 200L 钢桶，经吊车送至地下一层废过滤器芯暂存区域暂存。

4 辐射安全与防护设施

4.1 辐射工作场所分区

加速器区域、超重乙级实验室和靶向药物实验室三个辐射工作场所根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）进行控制区和监督区的划分，各场所辐射工作场所分区见附图 6~附图 9。

控制区：是指需要和可能需要专门防护手段或安全措施的区域，进出口设置符合 GB18871 中规定的电离辐射警告标识，加速器区域需设置工作状态指示装置；

监督区是指通常不需要专门的防护手段或安全措施，但需要经常对职业照射条件进行监督和评价的区域，设置表明监督区的相关标识。

具体的分区情况见表 4-1。

表 4-1 加速器区域、超重乙级实验室和靶向药物实验室辐射工作场所分区

辐射工作场所	控制区	监督区
加速器区域	质子加速器隧道（含引至靶站的部分）、加速器副隧道、质子加速器隧道西侧外的过渡间、废液收集间及楼梯。	与控制区相邻的加速器隧道防护门外的电梯、楼梯、过渡间及屋顶（功率源厅）等区域。
超重乙级实验室	靶件检测室、靶件制备室 1、靶件制备室 2、天平室、前室、固废贮藏间、废水暂存间、过渡间、试剂间、气瓶间、去污间、检测间等	工作服更衣间、家庭服更衣间、淋浴间、数据获取室
靶向药物实验室	缓冲间 2、监测去污、动物饲养室、动物检疫室、代理监测及药代、药动分析室、放射性标记室 1、放射性标记室 2、放射性标记室 3、CT 室、操作间、试剂暂存间、放射性废物储存室、废物储存间、放射性物料、质控室、化学合成和抗体制备室、细胞和分子生物学实验室、细胞培养室、细胞饲养室、放射性物料暂存室等	一更、二更、缓冲间 1、缓冲间、清洗灭菌间

靶站/热室和辐射管理中心辐射工作场所根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）以及《开放型放射性物质实验室辐射防护设计规范》（EJ380-1989）的规定进行控制区和监督区的划分，并设置明显分区标识，设置电离辐射警告标志和中文警示说明，各场所分区图详见附图 9 和附图 10。

监督区：采取适当的手段划出监督区的边界，并在监督区入口处设置表明监督区的标识；

控制区分为控制一区、二区、三区：

控制一区：主要包括实验室内从事隔离操作放射性物质的工作区，包括热室/屏蔽工作箱/手套箱的操作房间和去污间等；

控制二区：主要包括实验室工作人员不经常停留的区域，只有在进行去污、检修和取样等工作时才进入，如热室/屏蔽工作箱/手套箱的检修区、放射性污染物暂存间等；

控制三区：主要包括实验室内放射性物质所在的区域，包括热室、屏蔽工作量、手套箱的内部及辐照室等。

对上述控制区，需在控制区进出口设置电离辐射警告标识，制定职业防护与安全措施，入口处提供监测设备等，具体的分区情况见表 4-2。

表 4-2 靶站、热室和辐射管理中心辐射工作场所辐射工作场所分区

辐射工作场所		控制三区	控制二区	控制一区	监督区
靶站 热室	地下一层	T1 热、T1 辐照室、T2 辐照室、固废暂存间、中放废液暂存间。	后区、通风过滤间、低放废液暂存间、工艺过滤器间、靶站通风过滤器间等。	地下一层靶站、热室其他区域	/
	地上一层	热室及工作箱、T2 热室	后区、热室小车检修间、进料检修间、倒罐区等	热室前区、设备大厅、放化实验室、去污间、检测间、吊装大厅等	控制一区相邻区域
	地上三层	/	吊装大厅	放射化学测量室、物理测量实验室、留样间、质谱仪间、光谱仪间、高效液相室、无菌检查间、阳性对照间、废物暂存间等	控制一区相邻区域
辐射管理	地下一层	固体废物贮存区、中放废液暂	/	地下一层其他区域	/

中心		存间、过渡间			
	地上一层	/	/	汽车门斗、进桶间、废物桶暂存区 大厅、去污间、取样间、备用间、 维修间等	控制区相邻 区域
	地上 二层		排风机房	电梯厅、楼梯间、过渡间、备用间 等	/

4.2 人流物流

4.2.1 靶站/热室

靶站、分离系统人流、物流图见附图 10。

(1) 辐射工作人员

靶站工作人员：经地上一层家庭更衣间和工作服更衣间后然后通过电梯进入地下一层，进入靶站工作场所，工作结束后通过去污间、检测合格后经家庭更衣间离开工作场所。

热室前区操作人员：经地上一层家庭更衣间和工作服更衣间进入辐射工作场所，经西侧洁净区人员出入口进入热室前区进行操作，工作结束后通过去污间、检测合格后离开工作场所。

包装工作人员：经地上一层家庭更衣间和工作服更衣间进入辐射工作场所，进入场所东侧产品存藏检进行操作，工作结束后通过去污间、检测合格后离开工作场所。

质检工作人员：质检工作人员经三层一更、二更进入辐射工作场所，在质检区域完成工作后，经检测合格后经三层卫生出入口离开工作场所。

(2) 原料

原料经东北侧汽车门斗进入场所，经过渡间后，从热室后区进入热室内。

(3) 产品

产品经工作箱前区进入走廊，经物料通道后进入汽车门斗，经汽车门斗北侧出入口离开场所。

（4）放射性废物

靶站产生的放射性废物暂存在西侧废物暂存区域；热室产生的放射性固体废物经工作箱后区进入走廊，经物料通道后进入汽车门斗吊装区域，吊装至地下一层废物暂存场所进行分类暂存。；三层质检区域放射性固废经场所内废物桶收集暂存，定期经西北侧电梯运送至地下一层废物暂存区域；后续统一输送至辐射管理中心。

（5）质检样品

质检样品经传递窗进入场所西侧走廊，经西北侧专用电梯进入地上三层质检区域。

综上所述，靶站/热室非密封放射性物质工作场所设置了工作人员、原料、产品、放射性废物路线，从图中可以看出，地上一层人员与质检产品、原料路线存在交叉，地上三层人员和放射性废物、质检样品存在交叉，建设单位通过时间管控避免交叉，并在通道的出、入口设计了单向门禁，无关人员不得入内，可保证工作场所内的工作人员和公众免受不必要的照射，综合考虑，靶站/热室非密封放射性物质工作场所布局及人流、物流路线基本合理。

4.2.2 超重乙级实验室

超重乙级实验室人流、物流图见附图 11。

辐射工作人员路径：分别经过家庭更衣间和工作服更衣间后，经检测间和去污间进入辐射工作场所，分别进入靶件制备室、靶件检测、试剂间等房间进行工作，工作结束后通过去污间、监测合格后离开工作场所。

物料：物料经走廊东侧门进入辐射工作场所。

放射性废物：放射性废液分类收集、专桶存放，暂存于实验室废水暂存间，后续转移至辐射管理中心；放射性固体分类收集、专桶存放，暂存于固废贮藏，后续转移至辐射管理中心。

超重乙级实验室辐射工作场所设置辐射工作人员、放射性废物、物料的路线，从图中可以看出人流物流存在交叉情况，建设单位通过时间管控避免交叉即物料、放射性固体废物转移的时间与辐射工作人员工作时间不会在同一时间开展，可保证工作场所内的工作人员和公众免受不必要的照射，综合考虑超重乙级实验室辐射工作场所布局及人流、物流路线基本合理。

4.2.3 靶向药物实验室

靶向药物实验室人流、物流图见附图 12。

工作人员路径：分别经过一更、二更后，从缓冲间 2 进入辐射工作场所，分别进入放射性标记室、动物饲养室、细胞培养室、细胞和分子生物学实验室、化学合成和抗体制备室以及代理监测及药代、药动分析室等工作区域进行操作，工作结束后通过去污间、监测合格后经缓冲间 1 离开工作场所。

小动物路径：小动物通过缓冲间传递窗进入动物检疫室，经检疫合格后送至动物饲养室，后续开展动物实验。

放射性废物：放射性标记室、动物饲养室、细胞培养室、细胞和分子生物学实验室、化学合成和抗体制备室以及代理监测及药代、药动分析室等工作区域产生的放射性废物暂存至放射性废物储存室内，后续暂存监测，满足清洁解控水平后申请解控。

靶向药物实验室辐射工作场所设置辐射工作人员、放射性废物、物料的路线，从图中可以看出人流物流存在交叉情况，建设单位通过时间管控避免交叉即物料、放射性固体废物转移的时间与辐射工作人员工作时间不会在同

一时间开展，可保证工作场所内的工作人员和公众免受不必要的照射，综合考虑靶向药物实验室辐射工作场所布局及人流、物流路线基本合理。

4.2.4 辐射管理中心

辐射管理中心人流、物流图见附图 13。

工作人员路径：分别经过家庭服、工作服间，通过走廊 2 进入辐射工作场所，或通过电梯、楼梯进入地下一层辐射工作场所，完成工作后原路返回至地上一层，经走廊 2 通过去污间、监测合格后方可离开。

放射性废物：其他各子项放射性废液经管道或其他方式输送至地下一层废液暂存场所，其他各子项放射性固废经汽车门口进入场所内，经远程处理后操作后在指定区域进行暂存。

辐射管理中心辐射工作场所设置辐射工作人员和放射性废物的路线，两者不存在交叉，人流物流设置合理。

4.3 辐射屏蔽

4.3.1 加速器隧道

质子加速器隧道和副隧道辐射工作场所的屏蔽涉及情况见表 4-3。其中混凝土的密度为 2.3g/cm^3 。

表 4-3 加速器隧道屏蔽设计情况

位置	屏蔽墙厚度（普通混凝土）
质子加速器隧道	隧道引出区南墙：120cm
	其余区域东南西北四周墙：80cm
	顶板：190cm
	底板：140cm
	东南侧出入口 L 型迷道：长 200cm+170cm、厚 50cm（可活动） 西侧出入口迷道：长 170cm、厚 80cm（可活动）
加速器副隧道	北侧墙：80cm
	南侧墙：80cm

	东侧墙：80cm
	西端墙：80cm
	顶板：190cm
	底板：100cm

屏蔽体门布点示意图见图 4-1，表 4-4 列举了各门的材质和屏蔽厚度信息。

表 4-4 屏蔽门材质和屏蔽厚度

屏蔽门位置	说明
A	3mm 铅当量
B	10cm 聚乙烯+1cm 的钢
C	10cm 聚乙烯+1cm 的钢

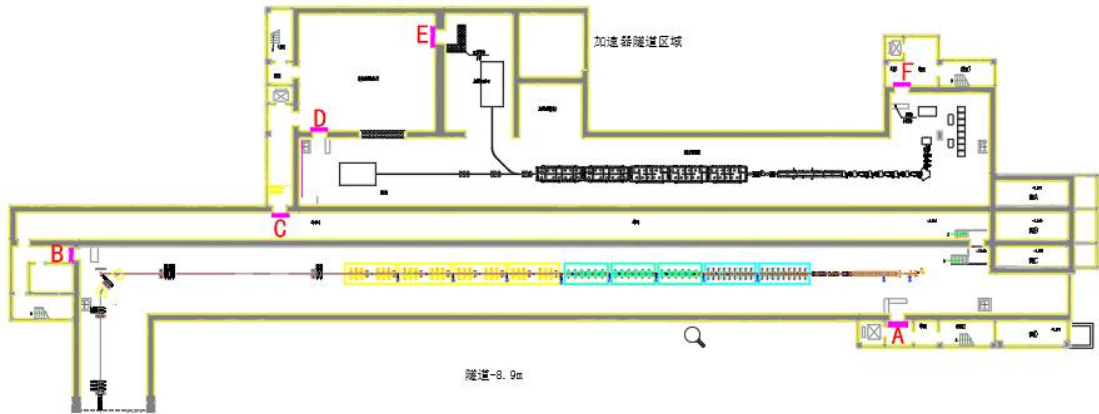


图 4-1 屏蔽门位置示意图

4.3.2 靶站

靶站屏蔽设计见表 4-5。

表 4-5 靶站屏蔽设计情况

位置		屏蔽设计
靶站 1	T1 辐照室	束流前向（南墙）：475cm（最大）混凝土
		东墙：275cm 混凝土
		西墙：300cm 重混凝土
		北墙：250cm 混凝土
		顶板：460cm 混凝土
	T1 热室	南墙：100cm 重混凝土

靶站 2		西墙：130cm 混凝土
		北墙：120cm 混凝土
		东墙：300cm 重混凝土
		顶板：100cm 混凝土
	T2 辐照室	束流前向（南墙）：400cm 重混凝土
		东墙：420cm 混凝土
		西墙：620cm 混凝土
		北墙：150cm
		顶板：390cm 混凝土
		西北侧多折 L 形迷道： 170cm+260cm+225cm+150cm，墙体最薄处 60cm
	T2 热室	东墙：100cm 混凝土
		南墙：120cm 混凝土
		西墙：120cm 混凝土
		北墙：120cm 混凝土
		顶板：120cm 混凝土
备注:混凝土密度 $\geq 2.4\text{g/cm}^3$ ；重混凝土密度 $\geq 4.2\text{g/cm}^3$ 。		

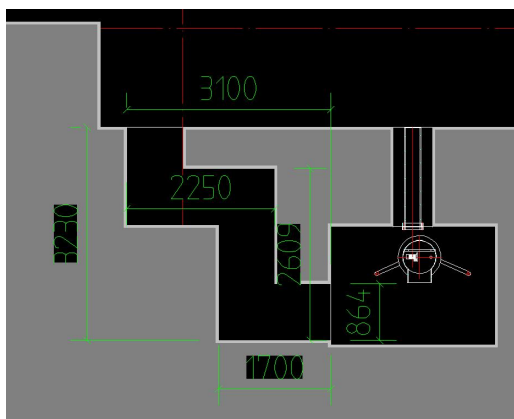


图 4-2 T2 辐照室迷道示意图

4.3.3 分离系统、超重乙级实验室、靶向药物实验室

为了达到降低外照射、控制污染和安全操作的目的，分离系统、超重乙级实验室和靶向药物实验室内进行核素操作期间，主要在工作箱室内进行，上述个场所内工作箱室的屏蔽设计在第三章工艺设备中均有描述，详见表 3-6、表 3-8 和表 3-9。

4.4 人身安全联锁系统

4.4.1 系统功能及联锁控制逻辑

人身安全联锁系统的主要目的是在系统运行期间，确保工作人员的人身安全。系统的设计遵循模块化、冗余及独立安全的原则，考虑了整个系统的使用流程、工作流程及操作状态，且由于联锁系统与控制系统之间唯一的交互就是接受并发送状态信息，使得人身安全联锁系统独立于其他控制系统运行，故而能最大限度的降低在各种情况下的风险。

系统采用可编程控制技术、门禁控制技术、自动门禁技术、集散式控制技术、计算机网络与通讯技术、探测与数据处理技术、设备自诊断与自恢复技术等。在加速器等控制区域，对各联锁部件进行实时监测，并将信号输入到安全联锁系统，只有在各系统均正常的条件下，束流的产生和加速才被允许。

辐射安全联锁系统一旦触发后，须人工就地复位触发联锁的位置并且通过控制台才能重新启动束流。触发辐射安全联锁系统引起加速器停机时，必须自动切断束流。没有特殊理由，不得旁路安全联锁系统。因工作需要旁路安全联锁系统时，应通过单位辐射安全管理机构的批准与见证，对时间、原因等内容进行记录，并在控制台上给出显示，工作完成后应及时进行联锁恢复及功能测试，测试正常后方可继续使用。

人身安全联锁系统分为运行模式和维修模式。在运行模式下，主副隧道间通道门处于常闭状态。在维修模式下，主副隧道间通道门才能打开。在极端情况下，停束后隧道内活化剂量高，检修人员需通过审批由辐射防护人员强制开门程序进入隧道。

人身安全联锁系统结构示意图见图 4-3，人身安全联锁系统网络结构示意图见图 4-4。其中查询显示 PC 机是用专用软件来显示所有联锁部件的状态，服务器及子站则主要用来控制系统不同区域的联锁部件。人身安全联锁

系统通过硬线或总线 IO 将各辐射区域的联锁组件、传感器、执行部件及应用软件连接在一起，且其总线网络、传感器及执行部件都采用失效保护及冗余设计。联锁控制逻辑见图 4-5，联锁设备拓扑图见图 4-6，加速器隧道控制区的联锁部件分布及清场巡检路线图见图 4-7。

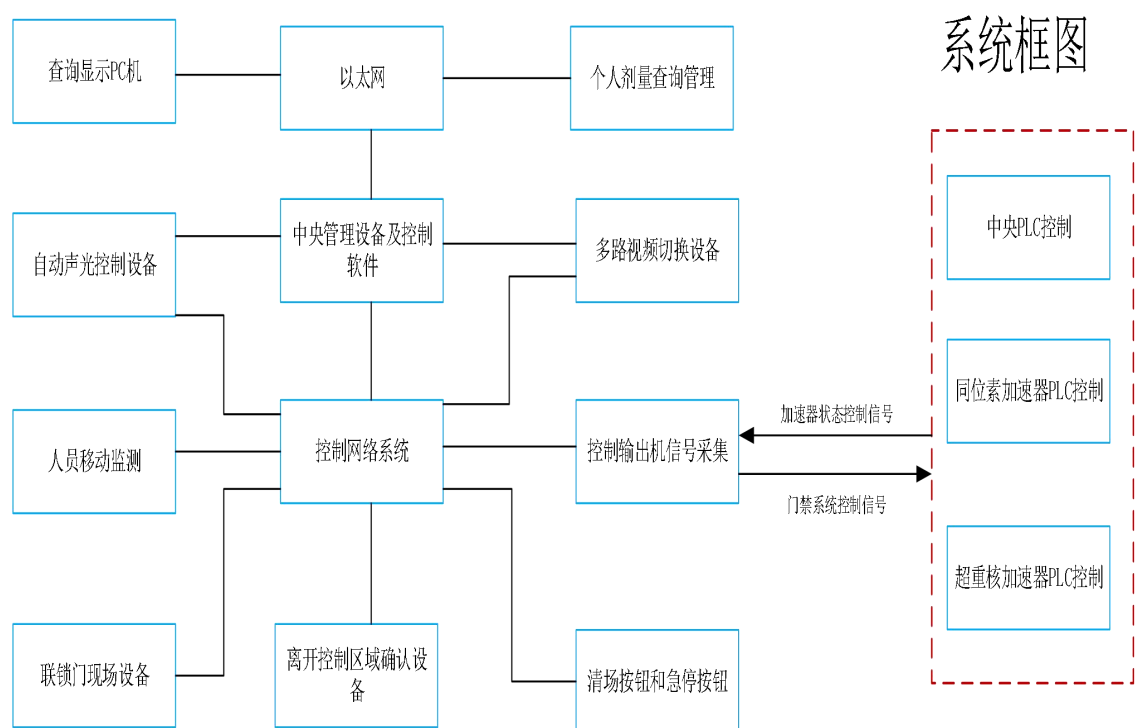


图 4-3 人身安全联锁系统框图结构示意图

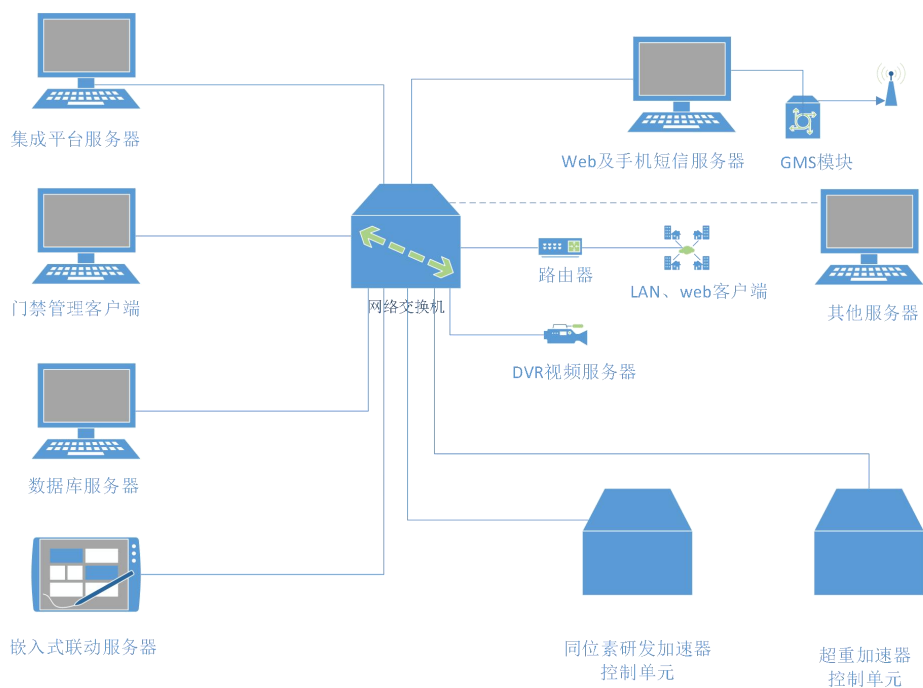


图 4-4 人身安全联锁系统网络控制结构示意图

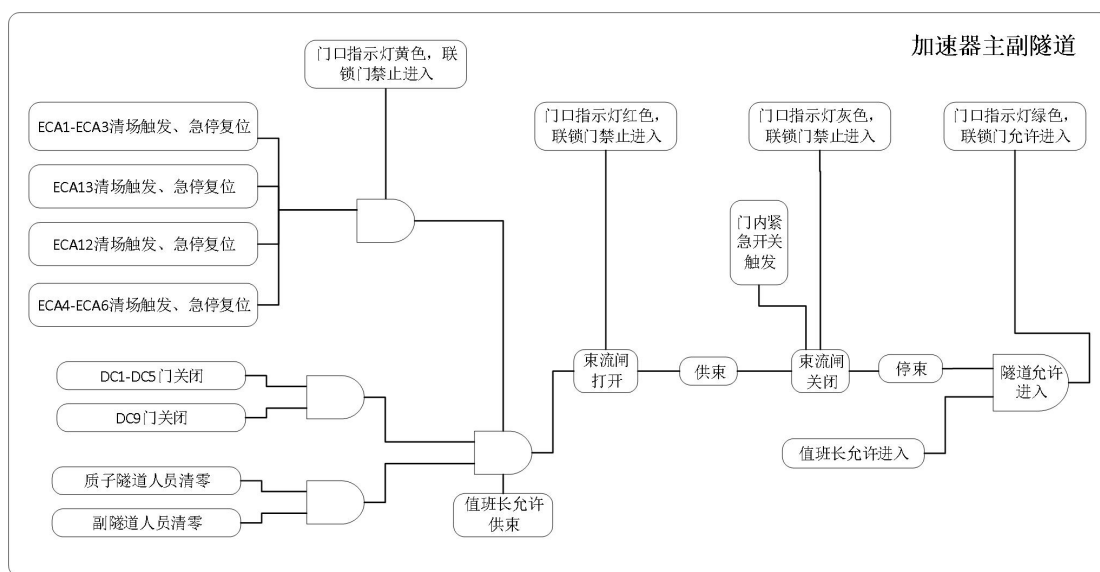


图 4-5 人身安全联锁控制逻辑流程图

4.4.2 用户界面

人身安全联锁系统中所有的设备状态、联锁关系及信息都在用户界面（UI）上显示，且 UI 同时支持系统的维护、检修、设置、安全检测等操作。当联锁出现错误时，为了识别联锁出错的原因系统会提供信号指示和带有时间标签的错误

日志，此时操作员可根据故障情况，终止操作，操作员也可据此对系统的状态作出评估。在对错误信息进行确认后，操作员即可将系统恢复至正常状态。人身安全联锁系统有两种操作模式：一是工作模式，用于系统的日常运行操作；二是维护模式，用于加速器各系统检修、测试等系统维护。

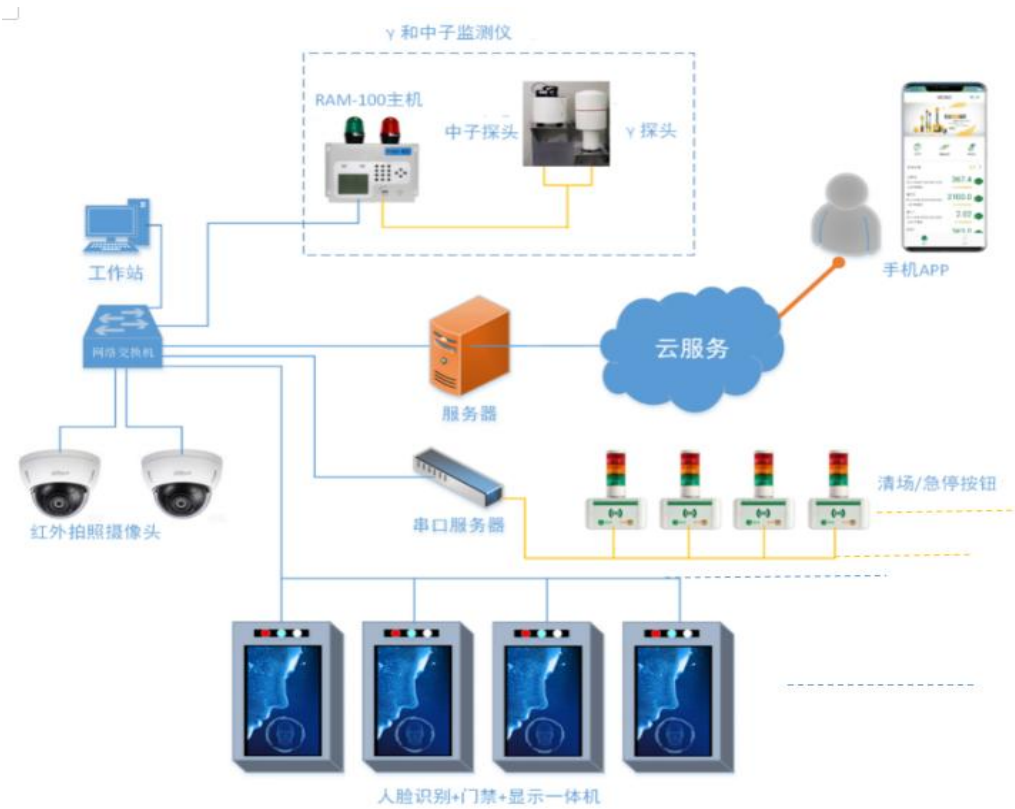


图 4-6 人身安全联锁设备拓扑图

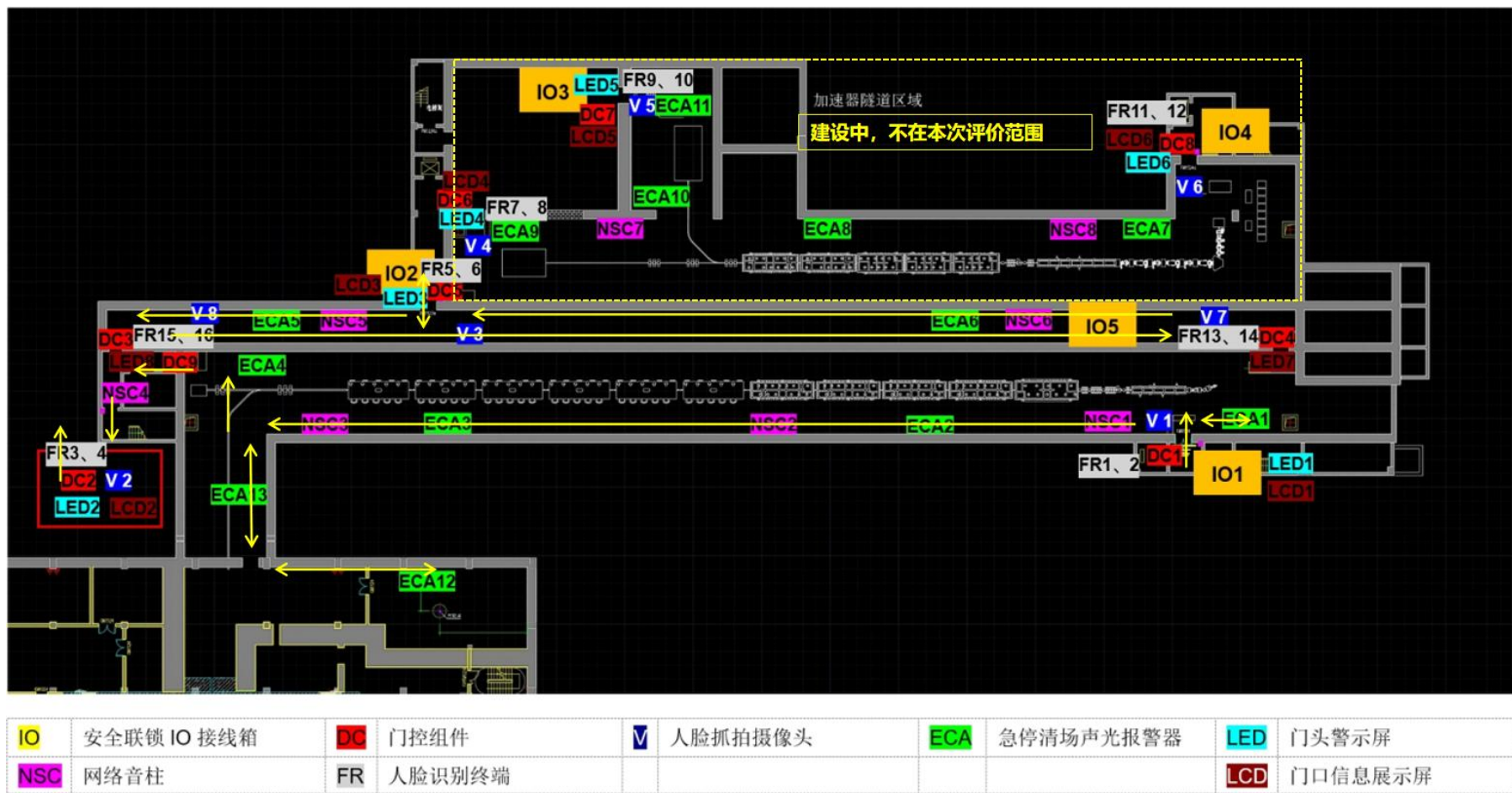


图 4-7 加速器隧道人身安全联锁部件布局及清场巡检路线（黄色）

4.4.3 系统组成

安全联锁设施设置平面布局及清场巡检路线图见图 4-7，系统各部分组成详情如下。

（1）密钥控制

本项目加速器主控系统采用人身安全联锁系统的安全密钥控制，在系统内部设置操作控制系统人员的权限，确保在非运行期间安全密钥由专人妥善保管。该安全密钥用于与加速器隧道出束互锁。

（2）出入控制

人身安全联锁系统对进入控制区的人员进行出入控制，以防止人员未经授权进入或误入。出入口设有门禁控制箱（即人脸识别终端），只有授权的人员才可以进出，系统对出入人员进行监控，并形成记录日志。在供束期间，任何人都不允许进入控制区内。只有在该区域停止供束，且经辐射安全管理人员确认后，经授权的人员才能进入该区域。

人脸识别终端接入附近的安全联锁 IO 接线箱，加速器副隧道设 2 个 IO 接线箱（IO2 和 IO5），质子加速器隧道设 1 个 IO 接线箱（IO1）。

（3）门-机联锁

加速器控制区出入口的门设置门-机联锁。联锁门未完全关闭时不能出束，出束状态下开门停止出束。加速器副隧道有 1 个联锁门（DC5），2 个用于检修的常闭门（DC3、DC4），质子加速器隧道有 2 个联锁门（DC1、DC2），DC9 为常闭屏蔽门。

（4）紧急开门按钮

加速器隧道门内设紧急开门按钮，可从区域内部无条件开门，位于每个联锁门的内侧。

（5）急停按钮

在加速器隧道内部墙壁、控制台的显著位置，设有足够数量的急停按钮。急停按钮周围设有醒目标识及文字显示能确保上述区域内的人员从各个方向均能观察到且便于触发。

急停按钮的数量：控制台有 1 个（控制质子加速器切断束流）；加速器副隧道有 2 个（ECA5 和 ECA6），质子加速器隧道有 6 个（ECA1~ECA4、ECA12 和 ECA13）。其中加速器隧道内的急停按钮与清场巡检按钮设置位置相同。

（6）清场巡检

加速器隧道设有必须手动操作的清场巡检装置，并设定一定的清场巡检响应时间和顺序，超出规定时间或违反顺序，清场会失效，需重新按顺序进行清场。本次申请的加速器隧道仅包括加速器副隧道及质子加速器隧道，共 2 个清场搜索子区，各子区出入口设有联锁门，确保清场完成且所有子区联锁门关闭后清场方可生效。如果质子加速器需要出束，那么质子加速器隧道和副隧道都需要巡检。

清场巡检按钮的数量：加速器副隧道有 2 个（ECA5 和 ECA6），质子加速器隧道有 5 个（ECA1~ECA4、ECA13），靶站后区有 1 个（ECA12）。清场巡检按钮与加速器隧道内的急停按钮设置位置相同。清场巡检路线见图 4-7，具体如下：

清场路线 1：质子加速器隧道由 DC1 进入，沿 ECA1-ECA2-ECA3-ECA13-ECA12-ECA4，经 DC9 最后由 DC2 门出。

清场路线 2：副隧道从 DC5 进入，沿 ECA5-ECA6，最后由 DC5 门出；

清场巡检的流程如下：当加速器准备供束时，由最后一名离开该区域的工作人员负责对该区域进行清场巡检；清场巡检时，清场路线 1 清场路线 2 的巡

检不分先后，工作人员在独立按照一定的顺序，按动分布在该区域不同位置处的清场巡检按钮；当清场巡检按钮被按下时，区域内的报警装置发出声、光报警信号，提醒人员离开该区域，联锁门此时处于禁止进入状态，该区域所有的联锁门只能出不能进；当工作人员按下最后一个清场巡检按钮后离开控制区，该控制区域通道门最后关闭，清场巡检完成。按下清场按钮后，触发信号经由控制系统逻辑处理，通过网络协议向按钮附近的网络音柱下发播报指令，音柱随即启动音频输出，播放预设的离场提示语音。

（7）束流闸

清场巡检流程完成且值班人员运行供束后，束流闸方可打开，该区域才允许供束。控制区停束后，且值班人员关闭束流闸，并允许进入隧道控制区，授权的辐射工作人员才能打开门禁进入控制区。

（8）声光警示装置

加速器隧道内部设有声光警示装置，采用不同颜色的光信号进行警示。加速器清场巡检期间，声光警示装置同时发出声、光信号，提示人员离开。控制室里的用户界面会显示该区域的状态。加速器控制区出入口设有门头警示屏：加速器副隧道有 1 个（LED3），质子加速器隧道有 4 个（LED1~LED2、LED7~LED8）。门头警示灯绿色是准进状态，黄色是清场状态，红色是清场完毕准备供束状态。

声光报警装置可表示区域在安全、不安全和故障状态间的转换。当控制区联锁被触发时，操作员可进行如下操作：利用加速器中的安全制动器关闭束流、在相应区域开启报警灯、在用户界面显示报警信息等，以保障区域内人员的辐射安全。

（9）视频监控系统

加速器隧道内部设有视频监控系统并在控制室内显示。

摄像头数量：加速器副隧道有 3 个（V3、V7~V8），质子加速器隧道有 2 个（V1 和 V2）。

（10）剂量联锁

控制区设有剂量联锁，当隧道内剂量率高于 $10\mu\text{Sv/h}$ 时，该区域联锁门不能被打开；此时如必须要进入维修，需通过辐射安全管理部门授权打开，并根据实际测量剂量，制定特定维修方案后方可进入。剂量联锁状态及剂量率监测结果会显示在控制室的显示屏上。

4.4.4 人身安全联锁系统的安全分析

安全联锁系统的设计重点考虑了“硬件最可靠”、“纵深防御”、“失效保护”等原则，具体分析如下：

（1）硬件最可靠：系统关键联锁信号尽可能硬件设备给出；

- 1) 选用质量可靠的联锁硬件和软件，保证其使用的高可靠性；
- 2) 采用急停按钮、清场搜索按钮等硬件措施保障人员安全。

（2）纵深防御：充分考虑并合理设置联锁设施实现对人身辐射安全的多重冗余保护且各重保护措施之间具有相互独立性，不会因为一套系统的实效而影响到其他系统的安全性：

- 1) 每个联锁门未完全关闭时不能出束，出束状态下开门停止出束；
- 2) 出束前通过清场搜索确保控制区内无人停留；万一出现人员误留控制区内的情况，可通过按下急停按钮或紧急开门按钮，停止出束，确保人员安全。

（3）失效保护：系统关键设备出现故障或失效时能避免出现失控性后果，自动导向预定的安全状态：安全联锁系统的关键设备都设有失效保护措施，设备失效时，切断联锁系统以保障人身安全；各设备的状态由 PC 实时监测。

综上，搜索清场功能保障了人员在出束前及时离开控制区，从而防止了人员被困在高辐射水平的控制区内；急停按钮、紧急开门等功能保障了万一发生人员被困或误入正在出束的控制区内、或设备异常等情况时可以紧急关闭辐射源；信息管理功能使工作人员了解情况，从而按规定工作和方便系统管理；可靠性设计则保障了系统运行的稳定可靠。

4.5 在线辐射监测系统

辐射监测系统的主要功能是测量辐射工作场所和周围环境中的辐射水平，以便控制人员的活动，使其接受的辐射剂量能实现“合理达到的尽可能低(ALARA)”的原则，保证工作人员和公众的安全，并为安全联锁系统提供辐射水平信号；验证屏蔽措施的可靠性，防止辐射泄漏造成环境污染。

4.5.1 监测布点

(1) 工作场所辐射监测布点

工作场所在线辐射监测点位示意图见图 4-8~图 4-14。其中加速器区域和靶站控制区、监督区总计布置 11 个中子、 γ 在线监测点位；在靶站、热室地下一层和地上一层、分离热室、辐射管理中心等控制区布置总计 42 个 γ 在线监测点位。探测器探测器类型及技术指标见表 4-6。

表 4-6 探测器类型及技术指标

探测器类型	型号	技术参数
固定式区域 γ 探测器	FHT192	高气压电离室，剂量范围：100nSv/h-1Sv/h；能量范围：30keV-7MeV；能响范围：±30%。
	RT32ADPG	GM 管，剂量范围：100nSv/h-10Sv/h；能量范围：60keV-3MeV；相对固有误差：<15%。
固定式区域 中子探测器	FHT762	高能中子剂量仪，剂量范围：0.01 μ Sv/h-100mSv/h，灵敏度：0.84cps/(μ Sv/h)，能量范围：25meV-5GeV。

从表中设备的技术参数结合仪器设备市场，与闪烁体探测器相比，电离室在极高能量射线环境下不容易出现“堆积效应”或响应饱和，因此能更准确地测量能量上限更高的 γ 射线，高气压电离室能量范围上限至 7MeV，已经是市场上目前能达到的较高能量上限，能满足加速器运行时对实际能量的测量。上限 1Sv/h 的探测器在全球各类核设施、环保系统中已可靠运行超过 30 年，具备在加速器高辐射区依然能提供关键数据的能力。

本项目采用的中子探测器将测量上限从常规的十几 MeV 推高至 5GeV，同时保证了从本底水平到 100mSv/h 的宽量程覆盖，在加速器运行时的高辐射区域这个上限足以应对绝大多数常规运行和突发状况下的测量需求，它确保了仪器在高剂量率场中不会因信号饱和而失效。

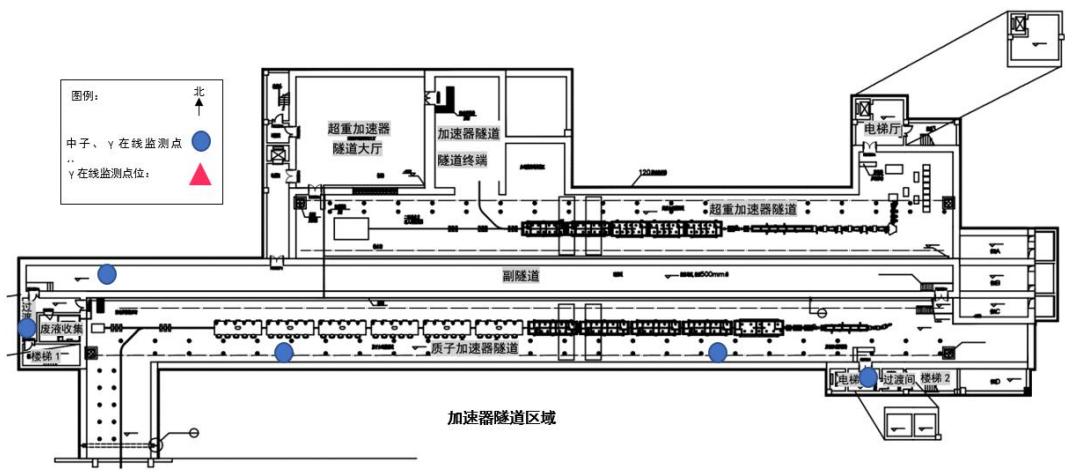


图 4-8 加速器区域辐射在线监测点位示意图

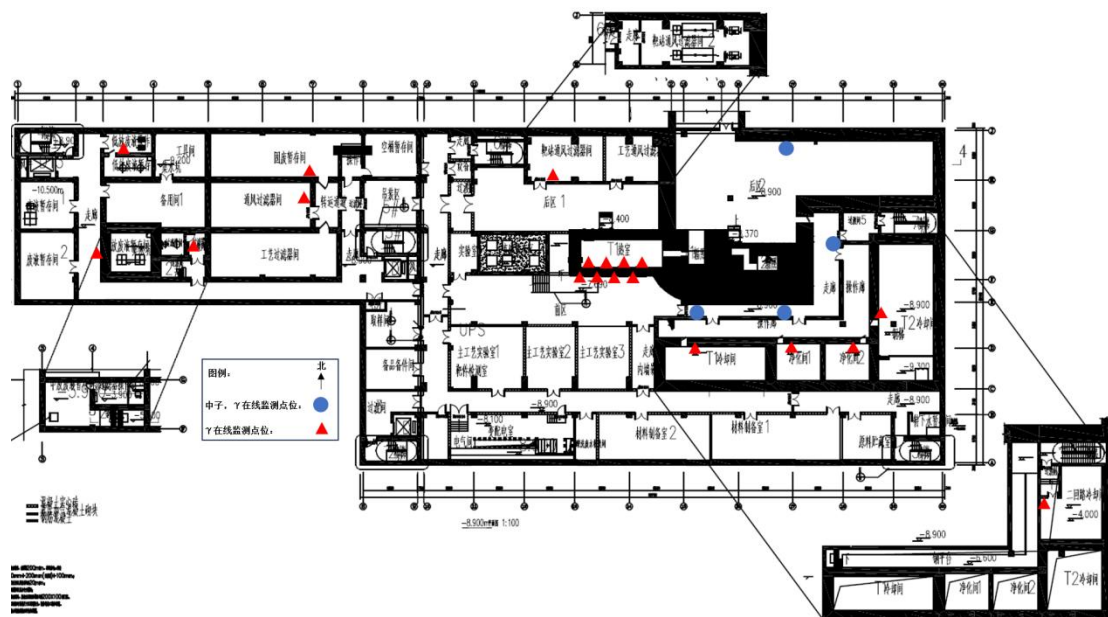


图 4-9 靶站、热室地下一层区域辐射在线监测点位示意图

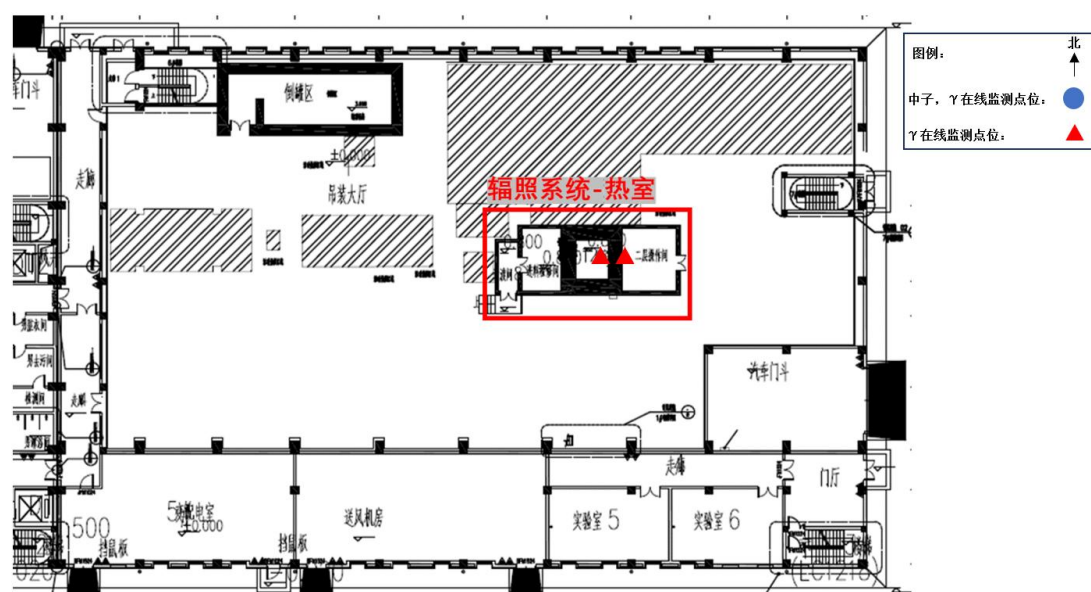
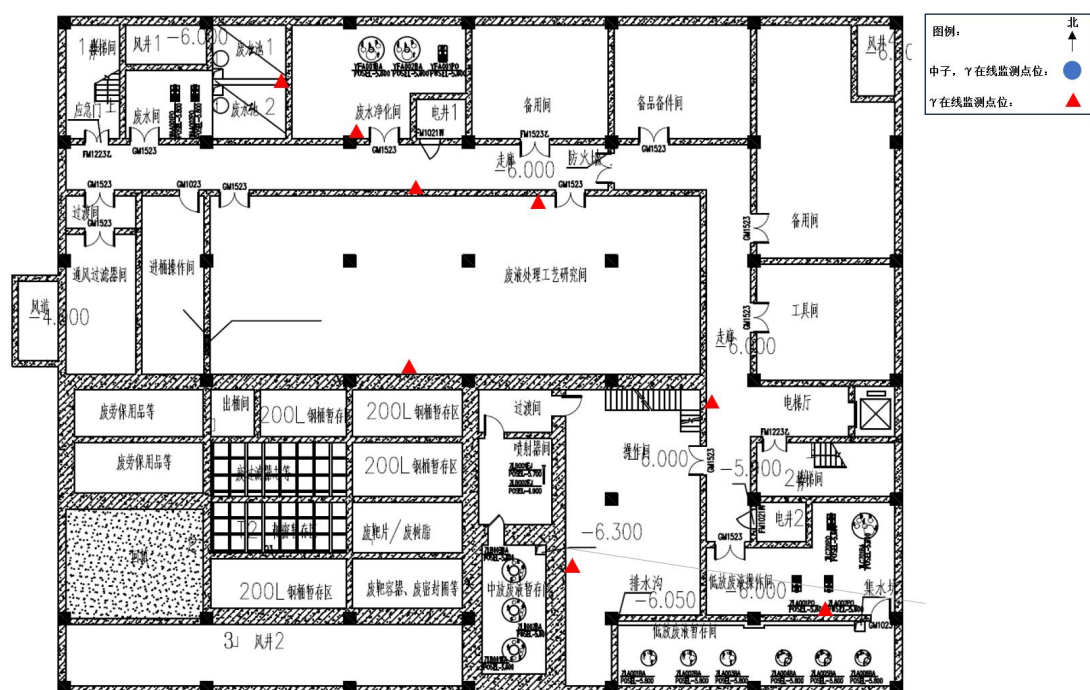
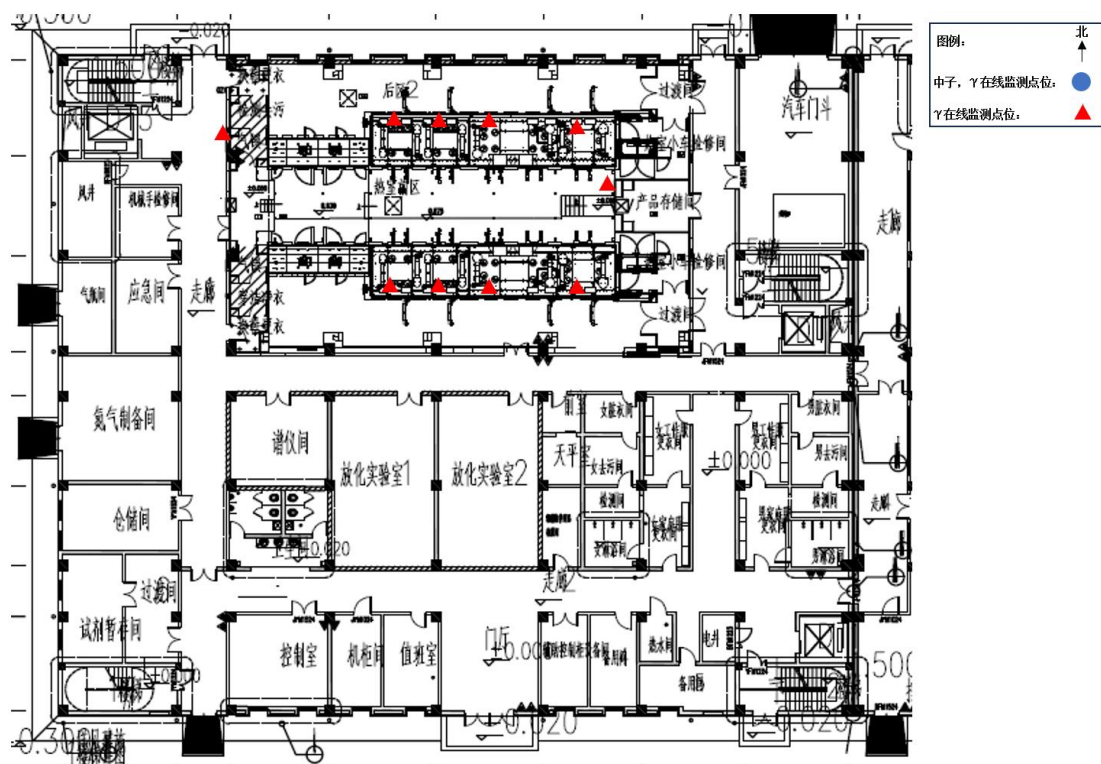
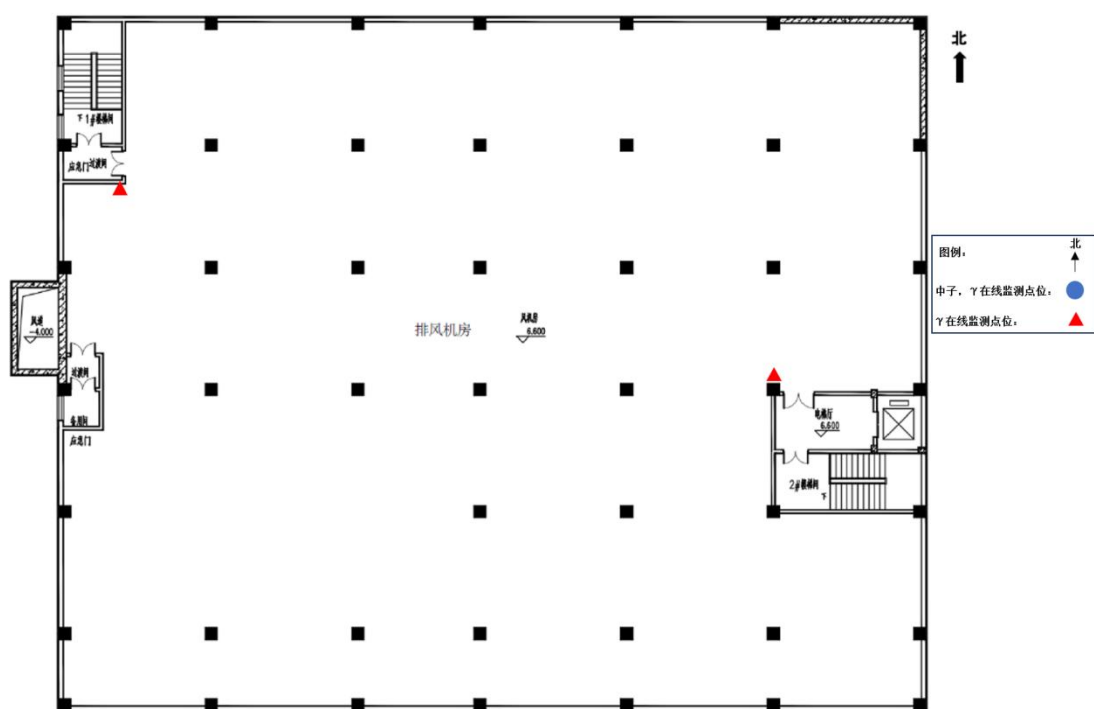
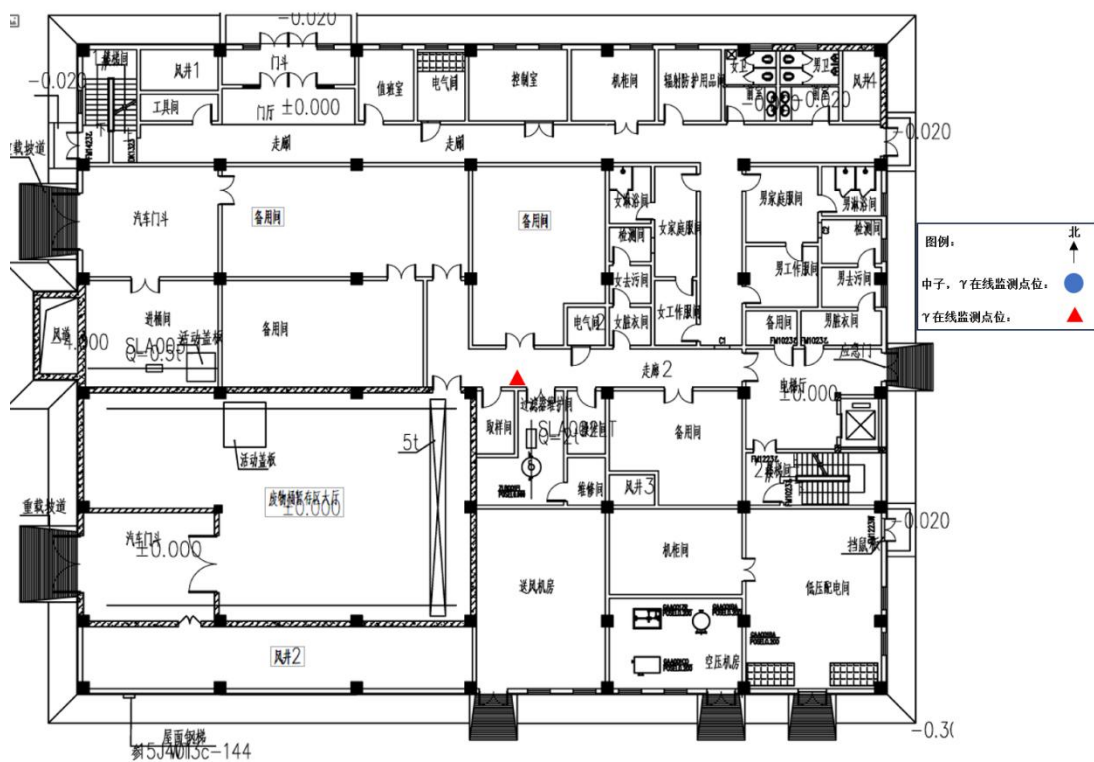


图 4-10 靶站、热室地上一层区域辐射在线监测点位示意图





(2) 周围环境监测布点

本项目周围环境设置 4 个环境监测站，分别用于中子、 γ 和气象（温度、湿度、风速、风向、气压和雨量）在线连续监测，气溶胶采样，监测点位示意图见。环境监测站中子/ γ 监测仪测量伽马剂量率的范围为 100nGy/h -1Gy/h；测量中子能量范围为 25meV-5GeV；中子剂量的范围为 10nSv/h-100mSv/h；气溶胶采样器的采样流量范围 500m³/h-1200m³/h。采样的气溶胶样品通过实验室的高纯锗探测器进行测量和分析，监测点位示意图见下图。

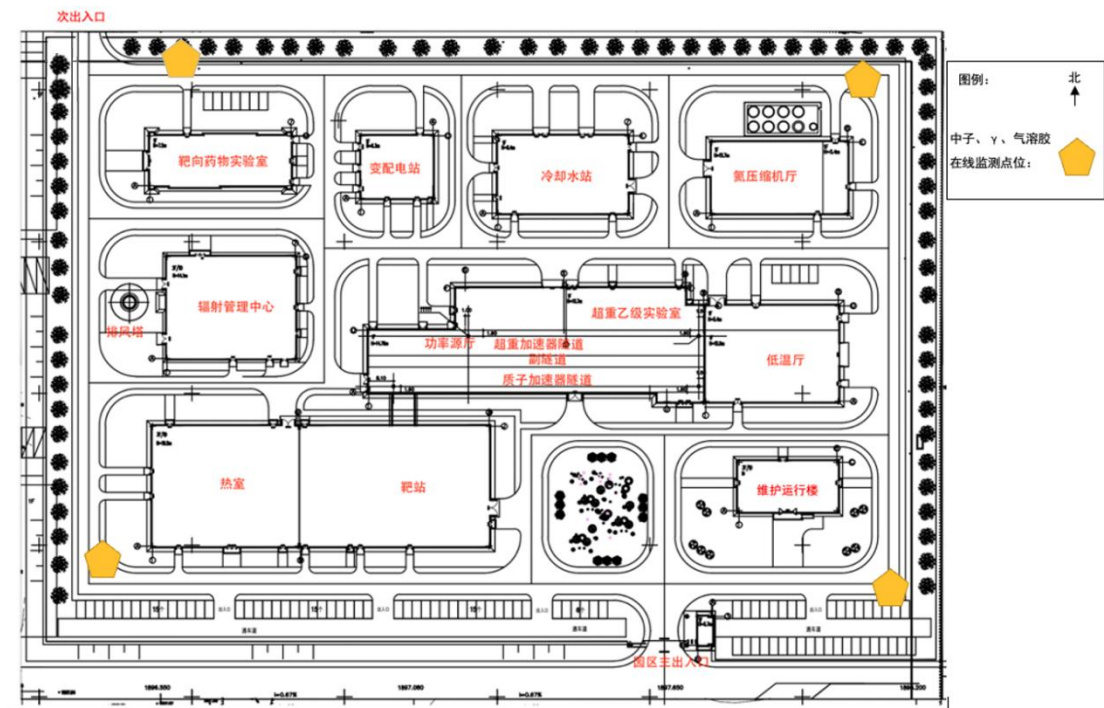


图 4-15 本项目环境辐射监测点位分布图

4.5.2 数据处理与报警系统

数据处理与报警系统其主要特点：（1）可连接多达 16 个探测器，全面的测量信息显示；（2）兼容多种探测器；（3）具有 RS232 接口和 RS485 接口；（4）模拟输入和输出，对监测条件和报警的数字输入和输出；（5）可容易地使用程序进行设置，对使用者提供了几乎是无限的编制各种测量任务的自由；

（6）具有强大的数据存储能力；（7）提供多重报警设置和分析，本地和远程的声光报警及误操作报警；（8）报警继电器可接入安全联锁系统；（9）灵活方便的使用和安装方式。

4.5.3 辐射监测软件

辐射监测软件的主要功能见表 4-7。

表 4-7 辐射软件的详细功能

模块	功能
实时数据	实时接收数据； 实时存储数据； 实时发布数据； 实时统计数据；
数据多种展示功能	趋势曲线展示 柱状图标展示 图形界面展示 表格数据展示 定制站点展示；
数据查询与报表	历史数据自动数据补发功能； 支持最近一周、最近一月、最近一年及任意时间段数据查询功能，查询数据同步下载； 查询数据时域趋势曲线展示； 查询数据柱状分析图展示 数据报表功能； 数据下载功能；
报警管理	监测数据报警功能，数据超限预警、数据超限报警、温度（高、低）报警、打开报警、数据存储报警、探头故障报警等； 数据传输中断报警功能； 短信报警功能，报警信息支持实时下发到多个指定用户手机； 报警信息操作处理审核功能；
统计分析	支持查询任意站点、任意时间段统计场强功能； 支持重点区域内密集站点实时监测数据等值线图绘制；
站点管理	可以建立及管理多层级站点 站点日志功能，支持站点报警信息、站点操作日志查询； 支持站点现场照片上传及展示，支持站点位置地图展示及查询； 站点信息管理 无限量站点接入，满足海量监测需求；
设备管理	远程设置参数
用户管理	分层级用户权限设计； 用户可管理单一站点或区域站点
系统管理	特定权限用户操作； 监测目录层级管理功能；

	系统参数管理； 系统日志管理功能； 系统资讯标准信息新闻管理。
--	---------------------------------------

4.6 通风系统

4.6.1 加速器隧道

加速器速隧道送、排风管道走向示意图见附图 14。具体设置如下：

质子加速器隧道根据工艺要求，设置全面通风系统。

通风空调系统分以下三种运行模式：

（1）可进入模式：加速器不运行，人员可进入。

（2）加速器正常运行模式：隧道为禁入区，需密闭处理，排风系统处于关闭状态。

（3）过渡模式：从加速器正常运行模式到可进入模式的过渡期，放射性气体可经适当延时衰减后，采取大风量排风，置换隧道中的空气。

为满足以上三种运行模式，通风系统按照两种工况运行：即正常运行工况和大风量过渡通风工况。正常运行工况主要是在工艺设备正常运行时维持隧道内负压，并保证隧道内一定的温湿度要求；过渡运行工况是在加速器停机检修等人员进入前，对各隧道进行大风量通风换气，使各隧道或大厅中有害物浓度达到允许的标准，满足人员进入时的卫生要求。

通风运行工况与工艺工作模式的对应见表 4-8：

表 4-8 工作模式对应表

工艺运行模式	加速器运行	过渡模式（加速器停机后）	人员进入
通风工况	正常运行	过渡通风	正常运行或过渡通风

加速器运行期间人员不进入，排风换气次数为 0.5 次/h。

人员进入前，排风换气次数为 3 次/h。

为保证质子加速器隧道在正常运行时隧道内的温湿度要求，各区域设置若干组循环通风系统组进行过滤、降温、除湿处理，循环通风处理过程如下：

道内空气→净化过滤→冷却盘管（冷却除湿）→电加热盘管器→循环送风机→送入隧道内。

为保证在过渡模式下隧道内环境的要求，隧道设置过渡排风系统。小流量排风系统：为副隧道和加速器隧道同时排风，总排风量为 $4000\text{m}^3/\text{h}$ ；过渡排风系统：为副隧道和加速器隧道同时排风，总排放风量为 $22800\text{ m}^3/\text{h}$ 。

正常运行模式：

送、回风系统：送风机房内设置 1 台直膨式处理机组，循环风量 $32000\text{m}^3/\text{h}$ ，机组包括新风段+粗效过滤段+直膨段（加热段）+风机段+中效过滤器+出风段等功能段，送风机组设在送风机房。

小流量排风系统：质子隧道排风量 $3000\text{m}^3/\text{h}$ ，副隧道排风量 $1000\text{ m}^3/\text{h}$ ，在排风机房设 2 台空气净化装置（一用一备），配预过滤器及高效粒子过滤器，额定风量 $6800\text{m}^3/\text{h}$ ，配 2 台离心风机（一用一备），额定风量 $6572\text{m}^3/\text{h}$ ，空气净化装置及风机均设在排风机房，排风经过滤后通过排风塔高空排放。

过渡模式：

排风系统：排风换气次数约 3 次/h，质子加速器隧道总风量约 $16800\text{ m}^3/\text{h}$ ，副隧道总风量约 $6000\text{ m}^3/\text{h}$ ，总排放量为约 $22800\text{ m}^3/\text{h}$ 。在排风机房设 1 台空气净化装置，配预过滤器及高效粒子过滤器，额定风量 $17000\text{m}^3/\text{h}$ ，配 1 台离心风机，额定风量 $18750\text{m}^3/\text{h}$ ，小流量过滤器额定风量 $6800\text{m}^3/\text{h}$ 、离心风机额定风量 $6572\text{m}^3/\text{h}$ 同时运行，空气净化装置及风机均设在排风机房，排风经过滤后通过排风塔高空排放。

4.6.2 靶站/热室

4.6.2.1 靶站

(1) 靶站地下一层过渡室通风系统

排风系统：地下一层 T1 热室为控制 III 区，排风换气次数取 25 次/h，风量为 4980m³/h，在热室就地设置第 1 级过滤器，热室通风出口管道上设置电动密闭阀，排风管道预留接工艺过滤器接口，在通风过滤器间配置 1 台高效粒子过滤器；在辐射管理中心（A07）排风机房设置 2 台碘吸附过滤机组（1 用 1 备）。碘吸附过滤机组额定风量 5000m³/h，配置电加热器、预过滤器、高效过滤器、碘吸附器、后置高效过滤器。在辐射管理中心（A07）排风机房设置 2 台离心风机（1 用 1 备），排风经过滤、除碘净化后通过排风塔高空排放。

送风由控制 II 区通过进风过滤器转送。

(2) 靶站地下一层辐照室通风系统

排风系统：地下一层辐照室 1、辐照室 2 为控制 III 区，排风换气次数取 25 次/h，按 1 个使用考虑，排风量为 180m³/h，在通风过滤器间就地设置第 1 级过滤器，每个辐照室通风出口管道上分别设置 1 个电动密闭阀，根据工艺需求进行切换，排风管道预留接工艺过滤器接口，在通风过滤器间配置 1 台高效粒子过滤器；在辐射管理中心（A07）排风机房设置 2 台碘吸附过滤机组（1 用 1 备）。碘吸附过滤机组额定风量 200m³/h，配置电加热器、预过滤器、高效过滤器、碘吸附器、后置高效过滤器。在辐射管理中心（A07）排风机房设置 2 台离心风机（1 用 1 备），排风经过滤、除碘净化后通过排风塔高空排放。

送风由控制 II 区分别通过进风过滤器转送。

(3) 靶站地上一层热室通风系统

排风系统：地上一层 T2 热室为控制 III 区，排风换气次数取 25 次/h，风量为 560m³/h，在热室就地设置第 1 级过滤器，热室通风出口管道上设置电动密闭阀，在靶站（A04）靶站通风过滤器间配置 1 台高效粒子过滤器；在靶站

(A04)排风机房设置2台碘吸附过滤机组(1用1备)。碘吸附过滤机组额定风量800m³/h,配置防爆型电加热器、预过滤器、高效过滤器、碘吸附器、后置高效过滤器。在靶站(A04)排风机房设置2台防爆型离心风机(1用1备),排风经过滤、除碘净化后通过靶站(A04)排风烟囱高空排放。

送风由控制I区通过进风过滤器转送。

(4) 靶站地下一层控制二区通风系统

排风系统:地下一层控制二区(地下一层靶站通风过滤间、靶站工艺通风过滤器间、后区、设备维护区及DUMP区)设排风系统,排风换气次数取3次/h,风量12000 m³/h,在辐射管理中心(A07)排风机房设1台空气净化装置,额定风量13600m³/h,配预过滤器及高效粒子过滤器,配1台离心风机,空气净化装置及风机均设在辐射管理中心(A07)排风机房,排风经过滤后通过排风塔高空排放。

送风系统:设送风系统,维持控制II区相对于控制I区30~50Pa的负压,送风量取排风量80%,送风量14500 m³/h,其中4500 m³/h转送至维护室、过渡室区域,送风机房内设置1台直膨式空调机组,内配初效过滤段、直膨段、加热盘管段、风机段、中间段、中效过滤段、送风段,新风经初、中效过滤器、制冷(夏季直膨段)/加热(冬季加热盘管段)处理后送至送风区域。

(5) 靶站地下一层控制一区通风系统

排风系统:地下一层控制I区(前区、材料制备室、水冷设备间及靶件制备室等房间)设排风系统,排风换气次数取2次/h,风量17000 m³/h,在辐射管理中心(A07)排风机房设1台空气净化装置,额定风量20400m³/h,配预过滤器及高效粒子过滤器,配1台离心风机,空气净化装置及风机均设在辐射管理中心(A07)排风机房,排风经过滤后通过排风塔高空排放。

送风系统：设送风系统，维持控制 I 区相对于监督区 20~30Pa 的负压，送风量取排风量 90%，送风量 21500 m³/h，其中 6000 m³/h 转送至通风柜、手套箱区域，送风机房内设置 1 台直膨式空调机组，内配初效过滤段、直膨段、加热盘管段、风机段、中间段、中效过滤段、送风段，新风经初、中效过滤器、制冷（夏季直膨段）/加热（冬季加热盘管段）处理后送至送风区域。

（6）靶站地上一层控制一区通风系统

排风系统：地上一层控制区（设备大厅）设排风系统，排风换气次数取 1 次/h，风量 32000 m³/h，在辐射管理中心（A07）排风机房设 2 台空气净化装置，单台额定风量 17000m³/h，配预过滤器及高效粒子过滤器，配 2 台离心风机，空气净化装置及风机均设在辐射管理中心（A07）排风机房，排风经过滤后通过排风塔高空排放。

送风系统：设送风系统，维持控制 I 区相对于监督区 20~30Pa 的负压，送风量取排风量 90%，送风量 29000 m³/h，送风机房内设置 1 台直膨式空调机组，内配初效过滤段、直膨段、加热盘管段、风机段、中间段、中效过滤段、送风段，新风经初、中效过滤器、制冷（夏季直膨段）/加热（冬季加热盘管段）处理后送至送风区域。

（7）靶站通风柜通风系统

通风柜通风系统服务于材料设备室 1 通风柜 1~3、材料设备室 2 通风柜 4~6、靶件制备室通风柜 7 设备排风，排风量按维持操作口风速不小于 1m/s 进行计算，每台排风量为 2000 m³/h，按四台同时使用考虑，计算总排风量 8000 m³/h。在辐射管理中心（A07）排风机房设 1 台空气净化装置，单台额定风量 10200m³/h，配预过滤器及高效粒子过滤器，配 1 台离心风机，空气净化装置及风机均设在辐射管理中心（A07）排风机房，排风经过滤后通过排风塔高空排放。

（8）靶站地下一层工作箱通风系统

地下一层工作箱通风系统服务于材料设备室 1 工作箱 1、材料设备室 2 工作箱 2、靶件制备室工作箱 3 设备排风，排风换气次数 25 次/h，排风量为 1000 m³/h，工作箱自带进、排风过滤器，工作箱通风出口管道上设置电动密闭阀；在辐射管理中心（A07）排风机房设置第 2 级过滤器，配置空气净化装置（2 台，1 用 1 备），额定风量 1700m³/h，配预过滤器及高效粒子过滤器，配 2 台离心风机（1 用 1 备），空气净化装置及风机均设在辐射管理中心（A07）排风机房，排风经过滤后通过排风塔高空排放。

4.6.2.2 分离系统

4.6.3 超重乙级实验室

分离系统送、排风管道走向示意图见附图 16。具体设置如下：

（1）送风系统：送风量 11000m³/h，其中 6500m³/h 送至通风橱区域，送风机房内设置组合式送风机组，内配初效过滤段、直膨段、风机段；

（2）手套箱排风系统：换气次数 20 次/h，风量为 40m³/h，工作箱内部设置 1 台预过滤器和高效过滤器，在排风机房置高效过滤器，放射性废气经二级过滤后在屋面排气口处排放；

（3）通风橱排风系统：风速不小于 1.5m/s，每台排风量为 3000m³/h，二层排风机房设置高效过滤器，放射性废气经过滤后在屋面排气口处排放；

（4）控制区排风系统：换气次数 4 次/h，风量 4500m³/h，二层排风机房设置过滤器及高效粒子过滤器，放射性废气经过滤后在屋面排气口处排放。

4.6.4 靶向药物实验室

靶向药物实验室送、排风管道走向示意图见附图 17。具体设置如下：

送风系统：送风量为 90%，送风量 17000 m³/h，送风机房内设置 1 台直膨式净化恒温恒湿全新风处理机组，机组包括新风段+粗效过滤段+直膨段(加热段)+加湿段+风机段+中效过滤器+出风段等功能段。

控制区排风系统：设 P-1 排风系统，排风换气次数取 15 次/h，风量 19000m³/h，在排风机房设 1 台空气净化装置，额定风量 20400m³/h，配预过滤器及高效粒子过滤器，配 1 台离心风机，额定风量 21963m³/h，全压 3140Pa，空气净化装置及风机均设在排风机房，排风经过滤后通过排风塔高空排放。

通风柜排风系统：设 P-2 排风系统，排风量风速不小于 1m/s，每台排风量约 2000 m³/h，按 2 台同时使用考虑，总排风量 4000 m³/h。在排风机房设置排风净化装置，额定风量 10200m³/h，配预过滤器、高效粒子过滤器，配 1 台离心风机，额定风量 6785m³/h，全压 2097Pa，空气净化装置及风机均设在排风机房，排风经过滤后通过排风塔高空排放。

工作箱排风系统：设 P-3 排风系统，排风换气次数取 20 次/h，风量为 250m³/h，工作箱就地设置第 1 级过滤器，在工作箱内部配置 1 台预过滤器，工作箱通风出口管道上设置电动隔离阀，在工作箱配置 1 台高效粒子过滤器；在排风机房设置第 2 级过滤器，配置排风净化装置（2 台，1 用 1 备），额定风量 17000m³/h，配预过滤器、高效粒子过滤器，在排风机房设置 2 台离心风机（1 用 1 备），额定风量 1655m³/h，全压 3284Pa，排风经过滤后通过排风塔高空排放。

工作箱过滤器的过滤器滤材与辐射管理中心排风机房的过滤系统滤材基本相同，由前置预过滤、高效过滤。过滤类材料主要用于拦截颗粒物：预过滤采用玻纤滤纸，作为第一道防线过滤灰尘与大颗粒物，以保护后端高效元件；高效 HEPA 材料选用超细玻璃纤维，具有耐高温、容尘量大和稳定性强、高效吸附菌类的特点，可有效滤除 99.99%的 0.3μm 颗粒物。

4.6.5 辐射管理中心

辐射管理中心通排风系统示意图见附图 18，具体如下：

(1) 辐射管理中心地下一层、地上一层控制一区

排风系统：排风换气次数取 4 次/h，风量 25000 m³/h，在排风机房设 2 台空气净化装置，额定风量 17000m³/h，配预过滤器及高效粒子过滤器，配 2 台离心风机，额定风量 20332m³/h，全压 1960Pa，空气净化装置及风机均设在排风机房，排风经过滤后通过排风塔高空排放。

(2) 辐射管理中心地下一层控制三区

排风系统：排风换气次数取 5 次/h，风量 11000m³/h，在房间就地设置第 1 级过滤器，在房间内部配置 1 台预过滤器，房间通风出口管道上设置电动密闭阀，在过滤器间配置 1 台高效粒子过滤器；在排风机房设置第 2 级过滤器，配置排风净化装置（2 台，1 用 1 备），额定风量 17000m³/h，配预过滤器、高效粒子过滤器，在排风机房设置 2 台离心风机（1 用 1 备），额定风量 20332m³/h，全压 1960Pa，排风经过滤后通过排风塔高空排放。送风由控制 I 区通过进风过滤器转送。

(3) 辐射管理中心地上二层排风机房

排风系统：排风换气次数取 2 次/h，风量 17500 m³/h，在排风机房设 1 台空气净化装置，额定风量 20400m³/h，配预过滤器及高效粒子过滤器，配 1 台离心风机，额定风量 20332m³/h，全压 1960Pa，空气净化装置及风机均设在排风机房，排风经过滤后通过排风塔高空排放。

4.7 放射性三废

放射性废物管理包括在废物产生子项内的就地废物管理和在辐射管理中心的废物管理。原则上园区内不考虑对废物的深度处理，只采取必要的预处理（分类、收集等）、处理、贮存等步骤后，满足废物的安全排放或场外安全运输要求。放射性废物管理通过源头控制、合理分类和选择合理的废物处理工艺来实现废物最小化管理。

4.7.1 放射性废气

4.7.1.1 来源

本项目运行期间产生的废气主要来源于加速器运行过程中产生的活化空气，以及非密封放射性物质工作场所操作过程中少量逸出的放射性气体。

4.7.1.2 处理措施

(1) 加速器

加速器运行中因辐照产生的活化空气（如隧道厂房内活化气体），放射性水平较低，经过在房间内短时间衰变后，即可由控制区排风系统送至辐射管理中心排风机房过滤后经排风塔外排。

(2) 非密封放射性物质工作场所

超重乙级实验室产生少量的放射性废气，经高效过滤后在实验室屋顶经排气口外排。

靶站 2 热室产生极少量的放射线废气，经高效过滤机除碘净化后再靶站屋顶排气口外排。

其余非密封放射性物质工作场所产生的放射性废气，由排风管道送至辐射管理中心排风机房过滤后经排风塔外排。

4.7.2 放射性废液

4.7.2.1 源项

本项目放射性废液源于加速器装置、靶站和分离系统、超重乙级实验、靶向药物实验室和辐射管理中心，上述子项场所内放射性废液首先暂存在其子项内部

的暂存场所，定期监测后经过场内输送至辐射管理中心（靶向药物实验室除外），需在辐射管理中心进行进一步处理的放射性废液源项见表 4-9。

表 4-9 放射性废液年产量一览表

序号	废物名称	年产生量	放射性浓度 Bq/L	主要核素	来源	备注
1	靶站排水	6.5m ³	约 1×10 ⁸	³ H、 ⁷ Be 等	靶站	活化冷却水
2	隧道排水	10m ³	<1×10 ⁶	³ H、 ⁷ Be 等	隧道	活化冷却水
3	冲洗废液	15L	低放废液	²³³ Pa、 ²²⁷ Th、 ¹⁰³ Ru、 ¹⁴⁰ La 等	分离系统	/
4	极低活度的放射性废水	240L	低放废液	²³³ Pa、 ²²⁷ Th、 ¹⁰³ Ru、 ¹⁴⁰ La 等	分离系统	/
5	工艺废液	630L	中放废液	²³³ Pa、 ²²⁷ Th、 ¹⁰³ Ru、 ¹⁴⁰ La 等	分离系统	/
6	实验室废液	2L	低放废液	²⁴³ Am、 ¹⁸² Ta、 ¹⁷⁹ Ta、 ⁹⁵ Nb 等	超重乙级实验室	/
7	极低活度放射性废水	500L	低放废液	²⁴³ Am、 ¹⁸² Ta、 ¹⁷⁹ Ta、 ⁹⁵ Nb 等	超重乙级实验室	/

4.7.2.2 处理措施

（1）活化冷却水

根据运行经验，加速器装置正常运行期间，活化冷却水只有在装置检修时才会排放。加速器装置的检修频率为一年一次，则活化冷却水的排放频率也为一年一次。加速器装置运行期间产生的活化冷却水年产量约 10 m³。加速器隧道内设有集水坑，用于暂存排放出来的活化冷却水。集水坑总体积 12.5 m³ 能完全容纳加速器的活化冷却水。

T1\T2 辐照室冷却水循环使用不外排，事故情况下的泄露冷却水经地漏收集至 T2 冷却水间暂存池（最大容积约 10m³）中暂存，后续将暂存池中的泄露冷却水通过废液泵经净化间 1、2 内净化系统净化后输送至 T1/T2 冷却水间冷却水箱中继续循环使用。

（2）低放废液

根据表 4-9 可知，低放废液源于分离系统区域和超重乙级实验室，其中分离系统年产量约 0.26 m^3 ，超重乙级实验室年低放废液产量为 2L。超重乙级实验室的人员清洗过程还会产生极低活度放射性废水，年产量约 0.5 m^3 。

分离热室产生的低放废液首先暂存在靶站热室地下一层低放废液暂存间的暂存罐内，低放废液暂存间内设置 2 暂存罐，单个暂存罐容积约 0.5 m^3 ，后续通过管道将低放废液输送至辐射管理中心低放废液暂存罐中。

超重乙级实验室实验废液产生量较小，暂存于场所内废液间废液桶中，后续废液转运罐将低放废液输送至辐射管理中心低放废液暂存罐中。清洗过程还会产生极低放射性废水则通过废液转运罐输送至辐射管理中心低放废液暂存罐中。

辐射管理中心地下一层设置低放废液暂存间收集上述低放废液，总计设置 6 个废液罐，单个罐子容积 0.5 m^3 ，低放废液年产量约 0.8 m^3 ，场所内设置的废液罐至少 2 年的暂存，设置液位监测仪表，定期监测，满足清洁解控要求方可排放，不满足清洁解控则交由有资质单位进行处理。低放废液暂存罐材质为不锈钢（304L），低放废液四周采用 30cm 的混凝土，任一废液罐一旦发生泄露，东北侧设置废液收集坑进行收集，经收集后转移至其他废液罐中进行暂存。低放废液暂存间设置摄像机，用于实时观察系统运行状态。

（3）中放废液

中放废液年产量不超过 0.7 m^3 ，主要源自分离系统，分离热室产生的中放废液首先暂存在靶站热室地下一层中放废液暂存间的废液罐，废液暂存间设置 2 个中放废液暂存罐，单个暂存罐容积约 0.5 m^3 ，后续将中放废液通过管道输送至辐射管理中心中放废液罐中。

辐射管理中心地下一层设置低放废液暂存间收集靶站/热室中放废液，总计设置 3 个废液罐，单个罐子容积 1 m^3 ，中放废液年产量约 0.7 m^3 ，场所内设置的

废液罐至少 3 年的暂存，设置液位监测仪表，定期监测，交由有资质单位进行处理。

废液罐材质为不锈钢（304L），中放废液四周、楼顶采用 1m 的混凝土，门采用屏蔽门（200mm 碳钢），地面及四周墙体（1.2m）均采用不锈钢钢敷面防渗漏，任一废液罐一旦发生泄露，东北侧设置废液收集坑进行收集，经收集后转移至其他废液罐中进行暂存。中放废液暂存间设置耐辐照摄像机，用于实时观察系统运行状态。

（4）靶站/热室//辐射管理中心的极低放射性废水

辐射管理中心地下一层废水间设置 2 个废水池收集加速器/靶站/热室以及辐射管理中心（辐射管理中心内人员去污废水收集至地下一层低放废液操作间内储存罐中，储存罐容积为 2m^3 ，）的极低放射性废水，有效容积为 14.4m^3 ，设置液位监测仪表，采用不锈钢钢敷面防渗漏，定期监测，满足清洁解控要求方可排放，不满足清洁解控则交由有资质单位进行处理。废水间内设置摄像机，用于实时观察系统运行状态。

（5）清洁解控措施

经监测满足排放标准的活化冷却水、极低放射性废水、低放废液排入废水净化间内监测排放槽，再次监测达标后申请排入污水管网。单个监测排放槽有效容积为 2m^3 ，总计 2 个。

2	T1 靶容器、 T1 废密封圈	2 年/次, 150kg/ 次	^{65}Zn 、 ^{63}Ni 、 ^{62}Co 、 ^{60}Fe 、 ^{60}Co 、 ^{59}Fe 、 ^{59}Ni 、 ^{58}Co 、 ^{57}Co 、 ^{55}Fe 、 ^{54}Mn 、 ^{14}C 、 ^7Be 、 ^3H 、 ^{58}Co 、 ^{60}Co	靶站
3	T1/T2 靶片结 构件（靶 膜）	2.5 天/次, 总计 80 次/年, 10kg	^{65}Zn 、 ^{63}Ni 、 ^{62}Co 、 ^{60}Fe 、 ^{60}Co 、 ^{59}Fe 、 ^{59}Ni 、 ^{58}Co 、 ^{57}Co 、 ^{55}Fe 、 ^{54}Mn 、 ^{14}C 、 ^7Be 、 ^3H 、 ^{58}Co 、 ^{60}Co 等	分离系统
4	废树脂柱	2.5 天/次, 总 计 80 次/年, 600kg	^{223}Ra 、 ^{225}Ac 、 ^{227}Th 、 ^{89}Sr 等	分离系统
5	废过滤器芯	30 个/年, 60kg/ 年	/	各子项
6	实验耗材	1 次/年, 20kg/ 年	/	超重乙级实验室
7	劳保用品	约 120 套, 25kg	/	靶站、分离系统、 辐射管理中心等
8	设备维护更 换	150kg	^{223}Ra 、 ^{225}Ac 、 ^{227}Th 、 ^{89}Sr 等	分离系统

4.7.3.2 处理措施

(1) 靶站/热室活化部件

主要包括 T1/T2 靶结构件、T2 废靶窗、T1 靶容器、T1 废密封圈。

T1/T2 废靶结构件先在分离热室内装入厚型双盖屏蔽容器中, 通过 AGV 小车转运至靶站/热室地下一层固废暂存间暂存, 暂存两年后, 装入 200L 钢桶屏蔽容器, 经提升机 2 转运至地上一层, 再通过 VQA 小车经室外运输路线转移至辐射管理中心, 经吊车送至地下一层废靶片/废树脂暂存区域暂存, 暂存 5 年后交由有资质单位进行处理。

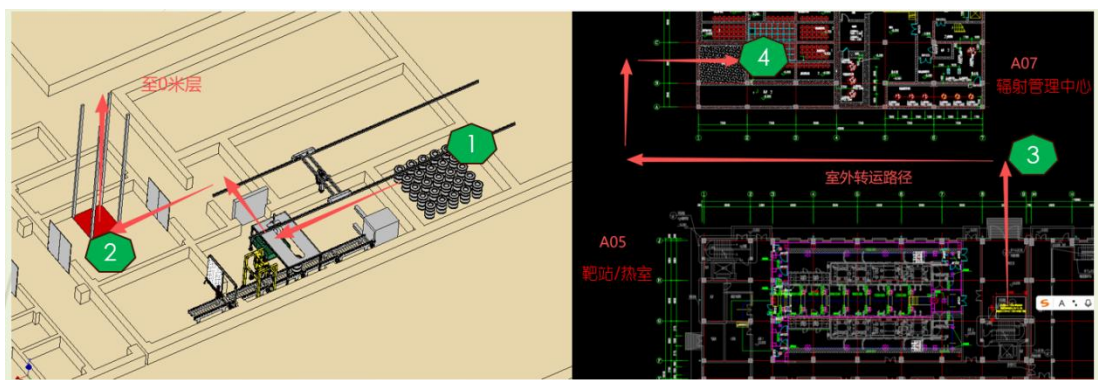


图 4-17 废靶结构部件转运路线示意图

T1 废束窗更换后暂存于场所内束窗暂存井内，T2 废靶窗经吊车在地上一层倒罐区装入 FA-V 型钢箱，装入运输容器后经室外路线转移至辐射管理中心，经吊车送至地下一层 T2 靶窗暂存区域暂存，T2 靶窗每半年更换一次，按照 20 年使用寿命考虑，寿期内产生量为 40 个，该区域可容纳 44 个存放搁架，可满足寿期内的暂存需求。

T1 废靶容器和 T1 废密封圈经吊车在地上，层倒罐区装入 FA-V 型钢箱，装入运输容器后经室外路线转移至辐射管理中心，经吊车送至地下一层废靶容器、废密封圈等区域暂存，T1 废靶容器每 2 年更换一次，按照 20 年使用寿命考虑，寿期内产生量为 10 个，每 2 个废靶容器装 1 箱，总计产生 5 箱，T1 废密封圈 1 年更换一次，按照 20 年使用寿命考虑，寿期内产生量为 20 个，每 8 个废靶容器装 1 箱，总计产生 3 箱，废靶容器、废密封圈等区域规划可暂存 10 个存放位，可满足寿期内的暂存需求。

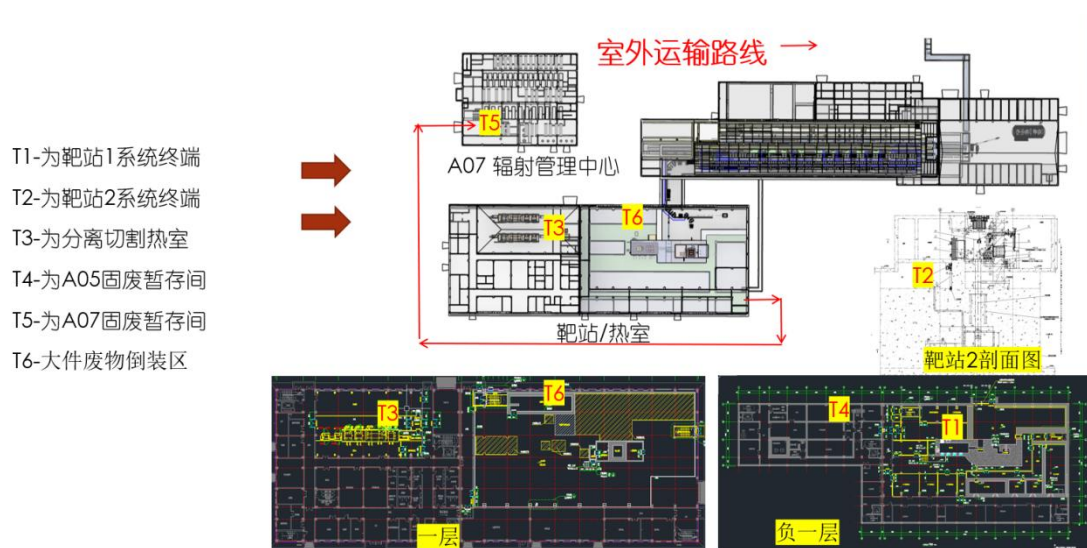


图 4-18 废靶窗、废靶容器和废密封圈转运路线示意图

(2) 废树脂柱

废树脂先在分离系统热室内装入薄型双盖容器中，通过 AGV 小车转运至靶站/热室地下一层固废暂存间暂存，装入 200L 钢桶屏蔽容器，经提升机 2 转运至

地上一层，再通过 RGV 小车经室外运输路线转移至辐射管理中心，场内转运路线见图 4-17，经吊车送至地下一层废靶片/废树脂暂存区域暂存，暂存 5 年后交由有资质单位进行处理。

（3） 废过滤器芯

辐射管理中心产生的废过滤器芯经地下一层低放废物暂存间，年产量为约 30 个，可满足 5 年的暂存量，经监测，满足清洁解控标准则按照一般固体废物处理，不可解控废过滤器芯委托有资质单位进行处理。不能解控的废滤芯挤压装置处理后装入 200L 钢桶，1 个桶可以装 4 个压缩后的废过滤器芯。

（4） 劳保用品

辐射管理中心以及其他辐射工作场所产生的废劳保用品经地下一层分拣压缩装置处理后装入 200L 钢桶，年产量为 120 个，即产生 6 桶 200L 钢桶，经吊车送至地下一层废劳保用品暂存区域暂存，该区域可容纳 36 桶的暂存，暂存 5 年后监测，满足清洁解控标准则按照一般固体废物处理，不可解控废过滤器芯委托有资质单位进行处理。

（5） 实验耗材（超重乙级实验室）

实验室耗材以长寿命核素污染为主，半衰期长，不可靠衰变减容，须按放射性固废严格管理。分类收集——实验区设 α/β - γ 专用容器，耗材脱卸即测表面污染，按核素、半衰期、可燃性分流；其产量较低，年产废物 10kg，可再寿期内暂存，最后进行退役处置。

5 运行期环境影响分析

5.1 建设阶段的环境影响分析

5.1.1 施工废气

施工期大气污染物主要为施工扬尘。施工产生的扬尘主要来源于项目拆除和新建过程中建筑垃圾和建材的装载、搅拌和运输。施工期间，工地四周应设置警示牌，拆除过程采用湿法，遇到干燥、易起尘的工程作业时，应辅助以洒水压尘，尽量缩短起尘操作时间。施工过程中产生的弃土、弃料及其他建筑垃圾，应及时清运。施工期间使用混凝土时，应使用使用预拌商品混凝土，不得现场露天搅拌混凝土。工地应设专职人员负责扬尘控制措施的实施和监督。

5.1.2 施工噪音

施工噪声主要来自拆除过程和新建过程中不同作业的机械产生的噪声和震动。施工期声环境保护措施:施工现场合理布局，在施工过程中要合理安排施工时间，晚 10:00 以后至次日早晨 6:00 期间禁止施工，并定期对机械设备进行维护和保养，使其一直保持良好的状态，减轻因设备运行状态不佳而造成的噪声污染等。

5.1.3 施工废水

施工期废水主要为施工废水和施工人员的生活污水。施工废水上清水重复利用，淤泥集中堆放后期用作回填土，施工人员生活污水主要为洗涤废水和粪便污水，本项目施工期生活污水排入污水处理系统，经污水管道排入市政污水管网，不直接外排环境。

5.1.4 施工垃圾

施工过程可产生两类固体废物:第一类是生活垃圾,由施工人员日常生活产生,集中收集后处理;第二类是建筑垃圾,包括拆除现有建筑产生的弃渣、损坏或废弃的各类建筑装修材料及施工过程中产生的渣土、泥土、废弃的混凝土、水泥和砂浆等,建筑垃圾也应定点存放集中处置。这些废物不含有毒有害成分,但粉状废料会随风飘入大气成为扬尘而污染大气环境,除此之外,施工期固体废物若处置不当,乱堆乱放,也会给环境景观带来极大的负面影响。施工过程中产生的建筑垃圾倾倒至环卫部门指定的弃渣场,不随意倾倒。

经采取以上措施,施工期对周围环境影响较小。

5.2 正常运行的环境影响分析

5.2.1 屏蔽体外剂量率计算

5.2.1.1 质子加速器及靶站

5.2.1.1.1 计算模型

(1) 模拟模型及束流损失参数

本项目采用 1/10 减弱厚度法及通用蒙特卡洛计算程序包 FLUKA 来计算质子加速器隧道、靶站 1 和靶站 2 屏蔽体外剂量率水平。FLUKA 可以对 keV 到 TeV 量级的电子、光子、中子、质子和重离子及其可能的相互作用进行输运模拟。在计算过程中,利用 FLUKA 对各辐射工作场所进行了 3D 建模,并通过 2D 和 1D 辐射剂量分布来确定辐射区屏蔽内外的剂量率,质子加速器和靶站束流损失参数见如表 5-1 所示。

表 5-1 质子加速器束流损失分布

损失部位		最大能量	最大束流强度	最大损失流强	靶材料	损失方式
质子加速器	传输线	质子: 115MeV	1mA	1W/m	/	均匀损失
	Dump1	质子: 115MeV	0.2μA	0.2μA	Cu	集中损失
	Dump2	质子: 115MeV	2μA	2μA	Cu	集中损失
靶站 1		质子: 115MeV	1mA	1mA	Th-232	集中损失

靶站 2	质子: 115MeV	0.25mA	0.25mA	Th-232	集中损失
------	------------	--------	--------	--------	------

（2）模拟参数及模拟模型

隧道模拟计算：采用加速器实际模型隧道，用 115 MeV 的质子均匀损失在不锈钢管壁上进行估算，损失功率 1W/m。周围的混凝土屏蔽墙密度为 2.3g/cm³。

DUMP1 模拟计算：计算采用的质子能量为 115MeV，束流强度为 0.2μA，假设束流集中损失在铜 dump 中。铜 dump 外为聚乙烯屏蔽体，用于慢化高能质子轰击铜 dump 产生的高能中子。

DUMP2 模拟计算：计算采用的质子能量为 115MeV，束流强度为 2μA，假设束流集中损失在铜 dump 中。铜 dump 外为碳钢屏蔽体和混凝土屏蔽体，用于慢化高能质子轰击铜 dump 产生的高能中子。

靶站 1 模拟计算：在靶的设计中，防护计算时采用最大的损失流强计算，瞬发辐射屏蔽取质子能量为 115 MeV，流强为 1mA。靶站 1 前侧为 4.2g/cm³ 重混凝土，其余侧为 2.3g/cm³ 混凝土。

靶站 2 模拟计算：在靶的设计中，防护计算时采用最大的损失流强计算，瞬发辐射屏蔽取质子能量为 115 MeV，流强为 0.25mA。靶站 1 前侧为 4.2g/cm³ 重混凝土，其余侧为 2.3g/cm³ 混凝土。

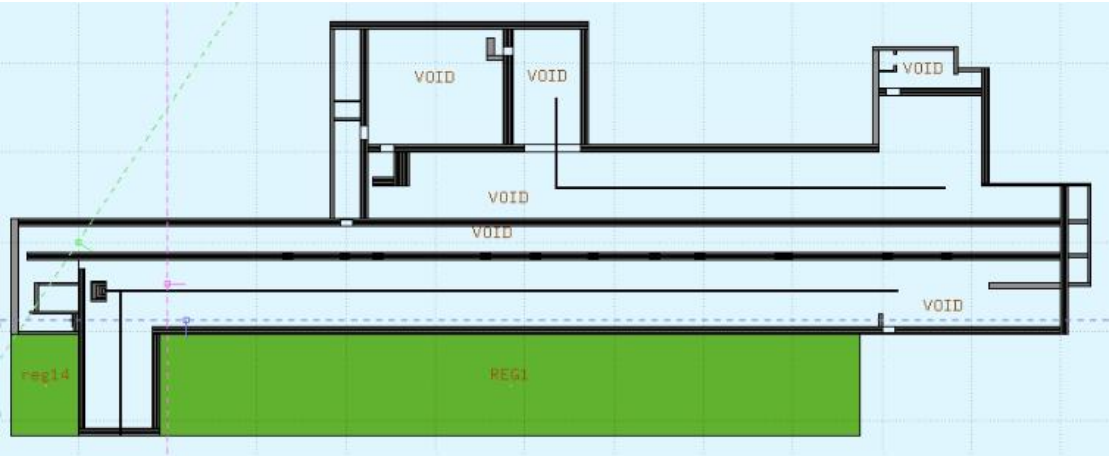


图 5-1 质子加速器隧道模拟计算模型图

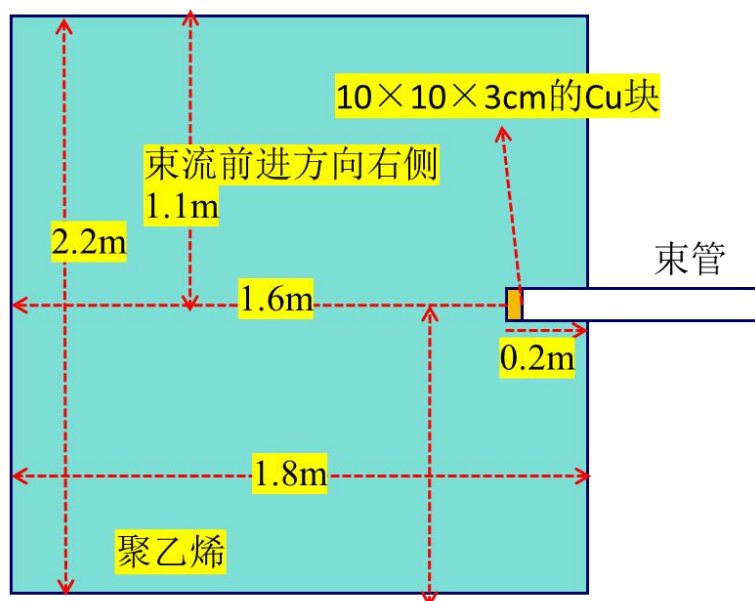


图 5-2 DUMP1 模拟计算模型图

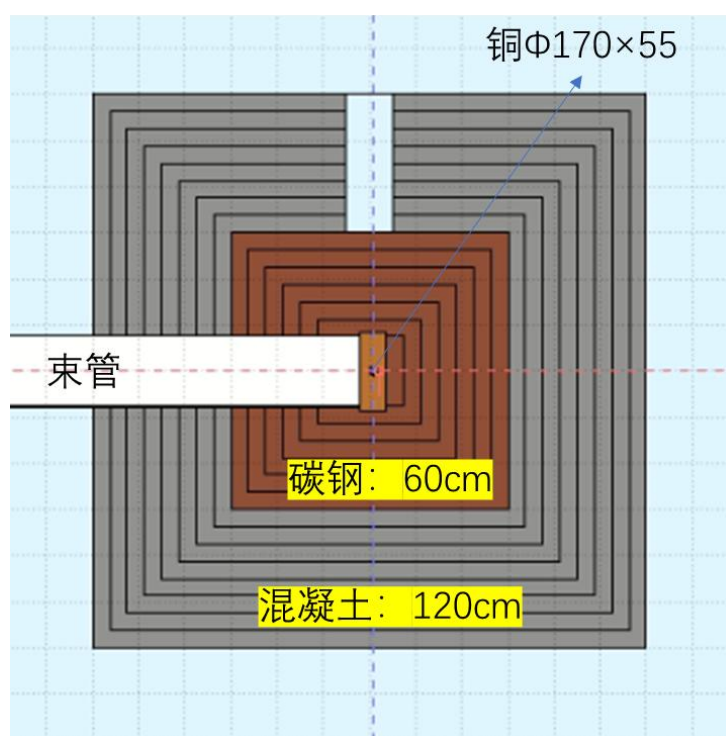


图 5-3 DUNMP2 模拟计算模型图



图 5-4 靶站 1 模拟计算模型图

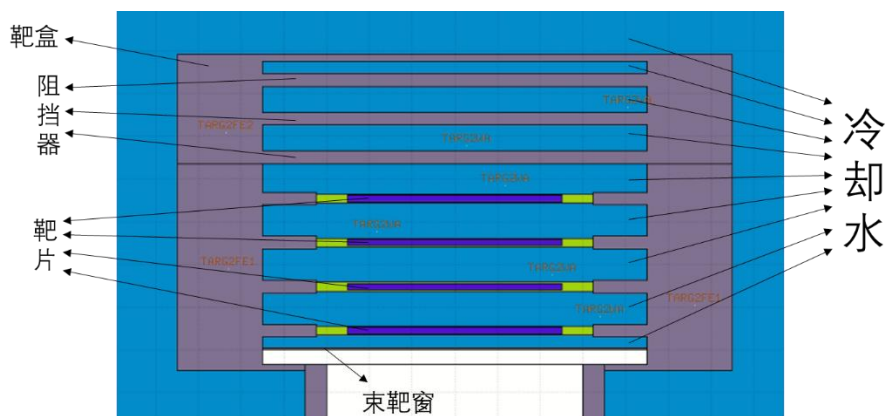


图 5-5 靶站 2 模拟计算模型图

5.2.1.1.2 计算结果

(1) 剂量率分布图

质子加速器隧道平面和剖面的剂量率分布图见图 5-6 ~图 5-7 所示，DUMP1 和 DUMP2 剂剂量率分布图见图 5-8 和图 5-9，靶站 1、2 剂量率分布如图 5-10 所示和图 5-11 所示。

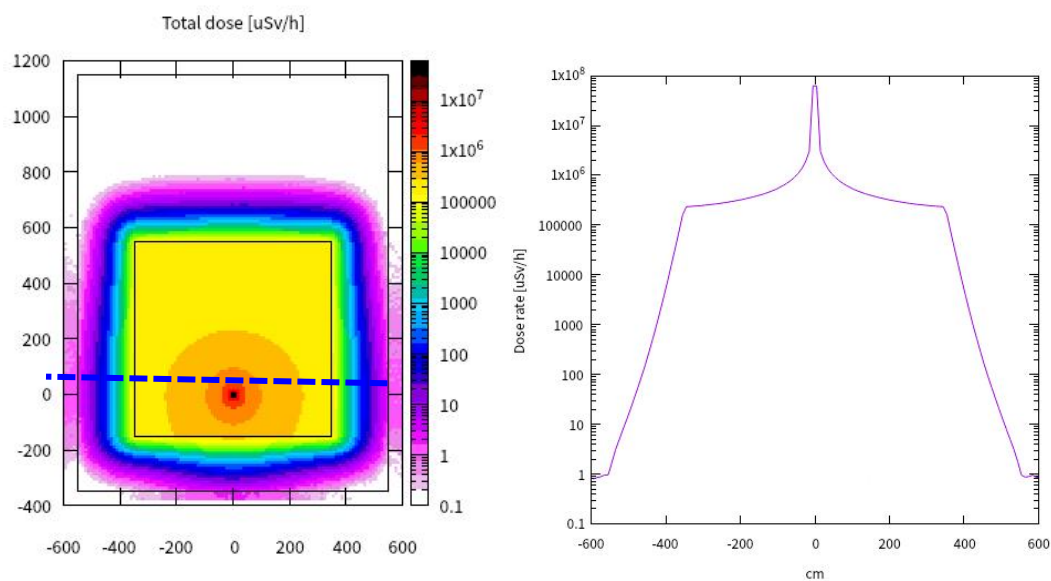


图 5-6 115 MeV 质子加速器隧道剂量率分布（左）和蓝线处水平 1D 剂量率分布（右） [$\mu\text{Sv/h}$]

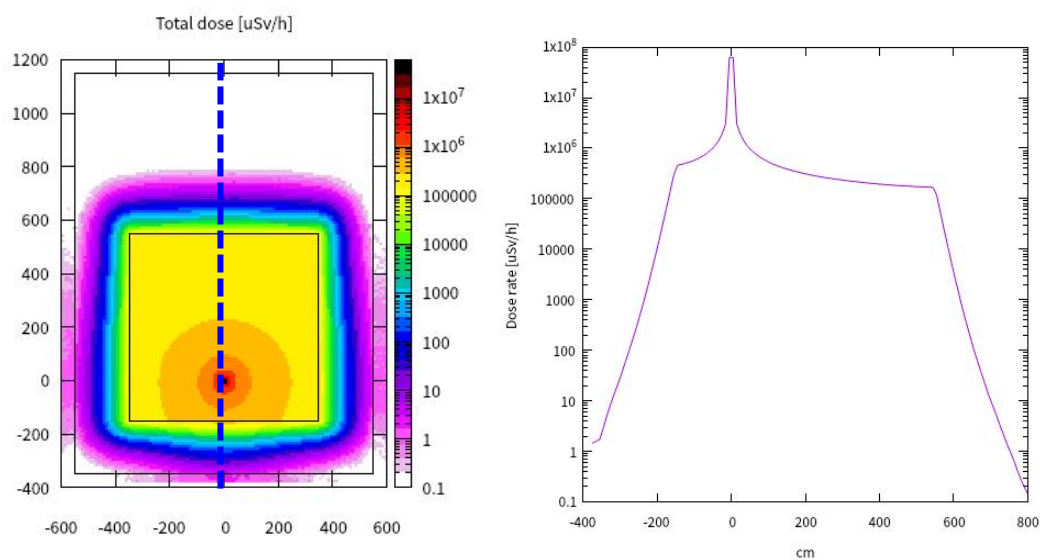


图 5-7 115 MeV 质子加速器剖面剂量率分布（左）和蓝线处垂直 1D 剂量率分布（右） [$\mu\text{Sv/h}$]

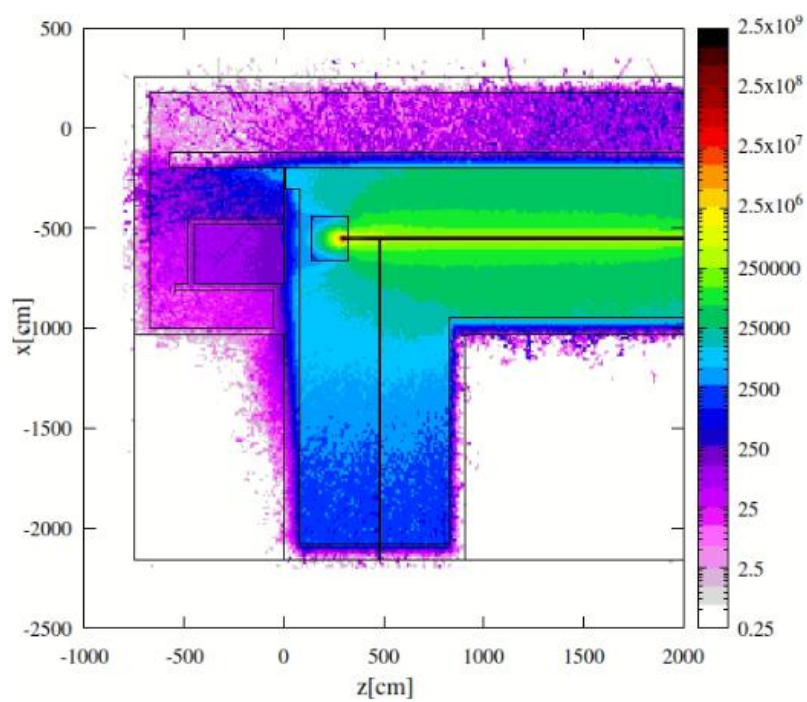


图 5-8 DUMP1 剂量率分布图[$\mu\text{Sv/h}$]

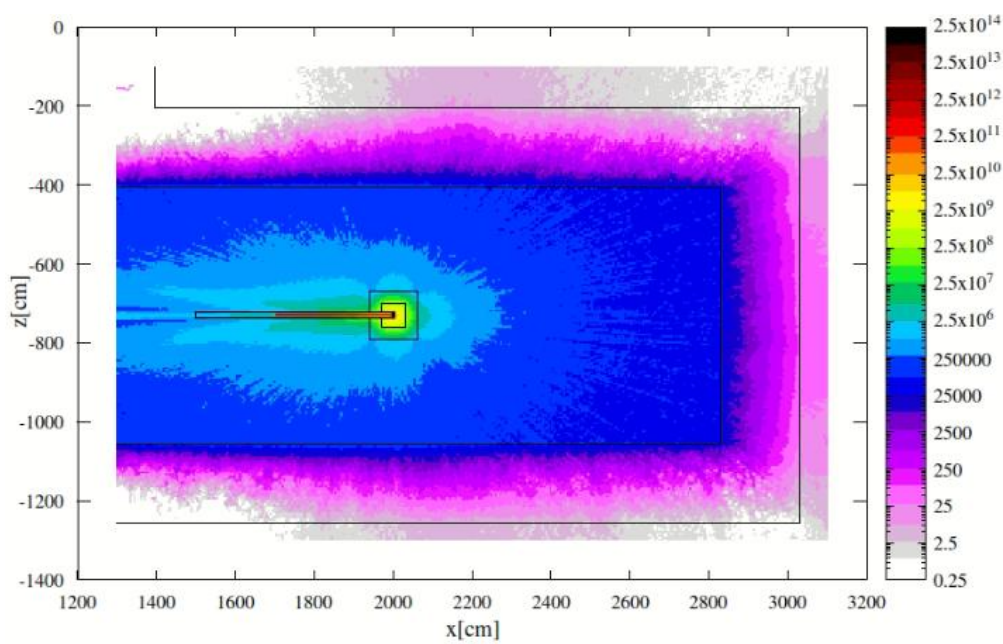


图 5-9 DUMP2 剂量率分布图[$\mu\text{Sv/h}$]

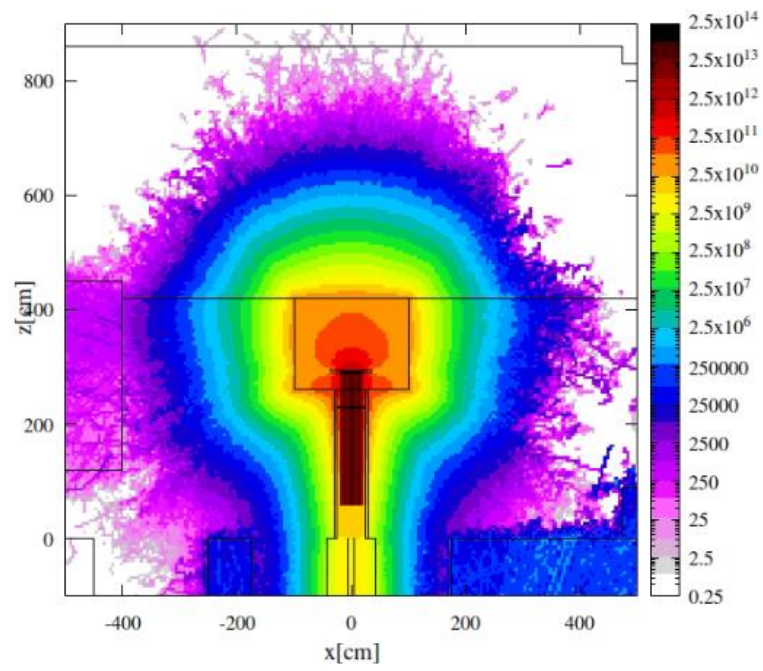


图 5-10 靶站 1 剂量率分布图[$\mu\text{Sv/h}$]

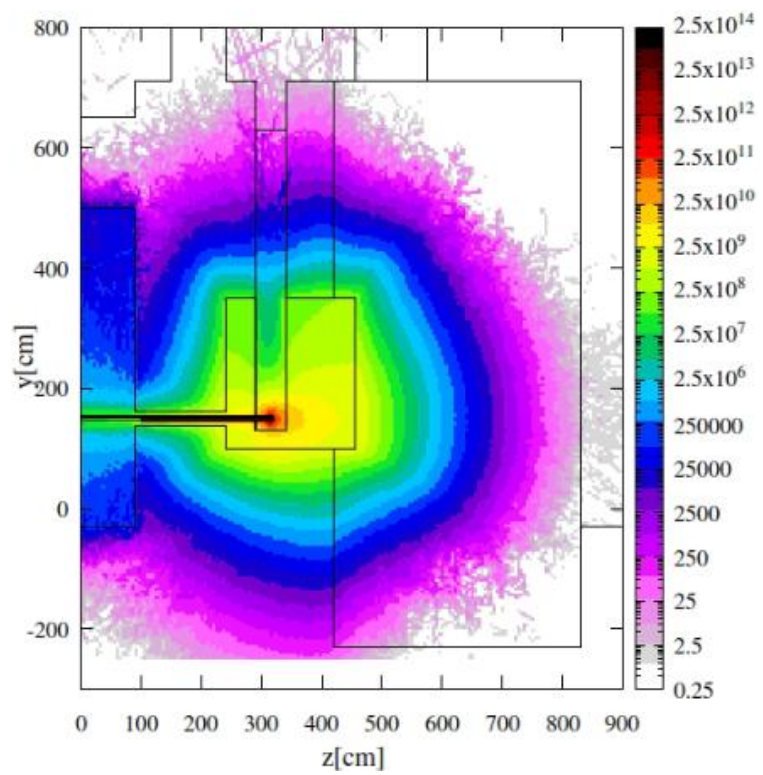


图 5-11 靶站 2 剂量率分布图[$\mu\text{Sv/h}$]

(2) 关注点剂量率

加速器运行期间，加速器隧道、DUMP1、DUMP2、靶站 1 和靶站 2 屏蔽体外剂量率计算结果见，关注点位置如所示。

表 5-2 靶站/DUMP 运行期间，加速器隧道及靶站屏蔽体外关注点剂量率计算结果

区域	关注点序号	周围环境情况	位置描述 ¹	剂量率计算结果 ² , μSv/h	剂量率控制水平, μSv/h
加速器隧道 -8.9m 平面图	1	超重加速器隧道东北侧出入口（电梯厅）	监督区	2.0	2.5
	2	超重加速器隧道东北侧楼梯	监督区	<0.1	2.5
	3	超重加速器隧道大厅西侧出入口	监督区	<0.1	2.5
	4	超重加速器隧道大厅西南侧出入口	监督区	<0.1	2.5
	5	超重加速器隧道大厅西侧楼梯	监督区	<0.1	2.5
	6	加速器副隧道北侧出入口	监督区	2.3	2.5
	7	质子加速器隧道东南侧出入口（电梯厅）	监督区	2.1	2.5
	8	质子加速器隧道东南侧过渡间	监督区	<0.1	2.5
	9	质子加速器隧道东南侧楼梯	监督区	<0.1	2.5
	10	超重加速器隧道东侧管沟 A	人员不可达	<0.1	10
	11	加速器副隧道东侧管沟 B	人员不可达	<0.1	10
	12	质子加速器隧道东侧管沟 C	人员不可达	<0.1	10
	13	质子加速器隧道东南侧管沟 D	人员不可达	<0.1	10
	14	超重加速器隧道吊装区北侧	人员不可达	197	5000
	15	超重加速器隧道终端北侧土壤层	人员不可达	437	5000
	16	超重加速器隧道束流调试终端西侧走廊外土壤层	人员不可达	<0.1	5000
	17	加速器副隧道北侧土壤层	人员不可达	<0.1	5000
	18	加速器副隧道西侧土壤层	人员不可达	198	5000
	19	质子加速器隧道西侧过渡间西侧土壤层	人员不可达	1.9	5000
	20	质子加速器隧道与靶站连接区西侧土壤层	人员不可达	540	5000
	21	质子加速器隧道与靶站连接区东侧土壤层	人员不可达	540	5000
	22	质子加速器隧道高能传输线南侧土壤层	人员不可达	30	5000
	23	质子加速器隧道超导加速段南侧土壤层	人员不可达	0.9	5000
	24	质子加速器隧道中能传输线南侧土壤层	人员不可达	<0.1	5000
	25	质子加速器隧道东侧土壤层	人员不可达	<0.1	5000
	26	超重加速器隧道东侧土壤层	人员不可达	<0.1	5000

	27	超重加速器隧道 RFQ 加速段北侧土壤层	人员不可达	0.9	5000
	28	超重加速器隧道中能传输段北侧土壤层	人员不可达	1.4	5000
	29	超重加速器隧道超导加速段北侧土壤层	人员不可达	<0.1	5000
加速器隧道 1-1 剖面图	30	超重加速器隧道顶板上方（功率源厅）	监督区	1.5	2.5
	31	质子加速器隧道顶板上方（功率源厅）	监督区	<0.1	2.5
	32	加速器副隧道顶板上方（功率源厅）	监督区	<0.1	2.5
	33	超重加速器隧道终端顶板上方（功率源厅）	监督区	<0.1	2.5
加速器隧道 ±0.0m 平面图	34	超重加速器隧道大厅上空西侧（电梯厅）	监督区	<0.1	2.5
	35	超重加速器隧道大厅上空西侧（门厅）	监督区	<0.1	2.5
	36	超重加速器隧道大厅上空西侧（楼梯）	监督区	<0.1	2.5
	37	超重加速器隧道大厅上空西侧（建筑外）	户外区域	<0.1	2.5
	38	超重加速器隧道大厅上空北侧（建筑外）	户外区域	<0.1	2.5
	39	超重加速器隧道终端上空北侧（建筑外）	户外区域	<0.1	2.5
	40	超重加速器隧道吊装区上空北侧（建筑外）	户外区域	<0.1	2.5
	41	超重加速器隧道吊装区上空（汽车门斗）	监督区	<0.1	2.5
	42	超重加速器隧道吊装区上空东侧（超重乙级实验室西侧走廊）	监督区	<0.1	2.5
	43	超重加速器隧道大厅上空南侧（功率源厅）	监督区	<0.1	2.5
功率源厅 ±0.0m 平面图	44	功率源厅内东侧（离子源区顶板上方）	监督区	<0.1	2.5
	45	功率源厅内中侧（超导加速段顶板上方）	监督区	1.8	2.5
	46	功率源厅内西侧（束流终端区顶板上方）	监督区	1.8	2.5
	47	功率源厅西南侧楼梯厅出入口（建筑外）	户外区域	<0.1	2.5
	48	功率源厅西南侧出入口（建筑外）	户外区域	<0.1	2.5
	49	功率源厅 4#变配电室西北侧出入口（建筑外）	户外区域	<0.1	2.5
	50	功率源厅 4#变配电室东北侧出入口（建筑外）	户外区域	<0.1	2.5
	51	超重乙级实验室（固废贮藏间）	监督区	<0.1	2.5
	52	超重乙级实验室（天平室）	监督区	<0.1	2.5
	53	超重乙级实验室（靶件制备室 2）	监督区	<0.1	2.5
	54	超重乙级实验室（靶件制备室 1）	监督区	<0.1	2.5
	55	超重乙级实验室（靶件检测室）	监督区	<0.1	2.5
	56	超重乙级实验室（走廊 2）	监督区	<0.1	2.5
	57	超重乙级实验室（去污间）	监督区	<0.1	2.5
	58	超重乙级实验室（检测间）	监督区	<0.1	2.5
	59	超重乙级实验室（淋浴间）	监督区	<0.1	2.5
	60	超重乙级实验室（走廊 1）	监督区	<0.1	2.5
	61	超重乙级实验室（卫生间）	监督区	<0.1	2.5
	62	低温厅（管道井）	人员不可达	<0.1	2.5

	63	功率源厅东南侧楼梯	监督区	<0.1	2.5
	64	功率源厅东南侧电梯厅	监督区	<0.1	2.5
	65	功率源厅南侧出入口（建筑外）	户外区域	<0.1	2.5
	66	功率源厅南墙外（建筑外）	户外区域	<0.1	2.5
靶站 -8.9m 平面图	67	靶站 DUMP 打靶点北墙外土壤层	人员不可达	111	5000
	68	靶站 DUMP 打靶点东墙外土壤层	人员不可达	733	5000
	69	靶站 DUMP 打靶点南墙外楼梯间	控制区	1.4	——
	70	过渡间 5	控制区	1.6	——
	71	T2 辐照室东北侧屏蔽墙外	监督区	1.2	2.5
	72	T2 辐照室东侧屏蔽墙外	监督区	1.5	2.5
	73	T2 辐照室南侧屏蔽墙外	监督区	2.2	2.5
	74	T1 辐照室南侧屏蔽墙外	监督区	2.1	2.5
	75	T1 辐照室西南侧屏蔽墙外	监督区	2.0	2.5
	76	T1 热室西侧屏蔽墙外	监督区	0.7	2.5
	77	T1 辐照室西北侧屏蔽墙外	监督区	<0.1	2.5
	78	T1 辐照室北侧屏蔽墙外	控制区	7.56E+09	——
	79	T2 辐照室北侧屏蔽墙外	控制区	8.77E+07	——
	80	T2 冷却间	监督区	<0.1	2.5
	81	操作廊	监督区	0.2	2.5
	82	操作廊	监督区	0.3	2.5
	83	净化间 2	监督区	<0.1	2.5
	84	净化间 1	监督区	<0.1	2.5
	85	T1 冷却间	监督区	<0.1	2.5
	86	走廊	监督区	<0.1	2.5
	87	主工艺实验室 3	监督区	<0.1	2.5
	88	主工艺实验室 2	监督区	<0.1	2.5
	89	主工艺实验室 1	监督区	<0.1	2.5
	90	实验室	监督区	<0.1	2.5
	91	工艺通风过滤器间	监督区	<0.1	2.5
	92	靶站通风过滤器间 1	监督区	<0.1	2.5
	93	过渡间 4	监督区	<0.1	2.5
	94	靶件制备室	监督区	<0.1	2.5
	95	材料制备室 2	监督区	<0.1	2.5
	96	材料制备室 1	监督区	<0.1	2.5
	97	原料贮藏室	监督区	<0.1	2.5
靶站 ±0.0m 平面图	98	T2 热室北侧屏蔽体外	监督区	2.1	2.5
	99	T2 热室东侧屏蔽体外	监督区	1.7	2.5
	100	T2 热室南侧屏蔽体外	监督区	1.2	2.5
	101	T2 热室西侧屏蔽体外	监督区	1.7	2.5

102	二层操作间东侧	监督区	1.4	2.5
103	T2 热室顶部屏蔽体外	监督区	<0.1	2.5
104	T1 辐照顶部屏蔽体外	监督区	2.0	2.5
105	汽车门斗	监督区	<0.1	2.5
106	走廊 1	监督区	<0.1	2.5
107	实验室 5	监督区	<0.1	2.5
108	送风机房	监督区	<0.1	2.5
109	配电室	监督区	<0.1	2.5
110	走廊 1	监督区	<0.1	2.5
111	倒罐区	监督区	<0.1	2.5
112	设备大厅北侧墙外（建筑外）	户外区域	<0.1	2.5
113	设备大厅东侧墙外（建筑外）	户外区域	<0.1	2.5
114	设备大厅东侧出入口（建筑外）	户外区域	<0.1	2.5
备注：1.加速器运行时，除加速器开机需要清场的区域外，剩余其他工作场所区域均作为加速器运行时的监督区考虑;2.各关注点剂量率值取各类工况下最大值。				

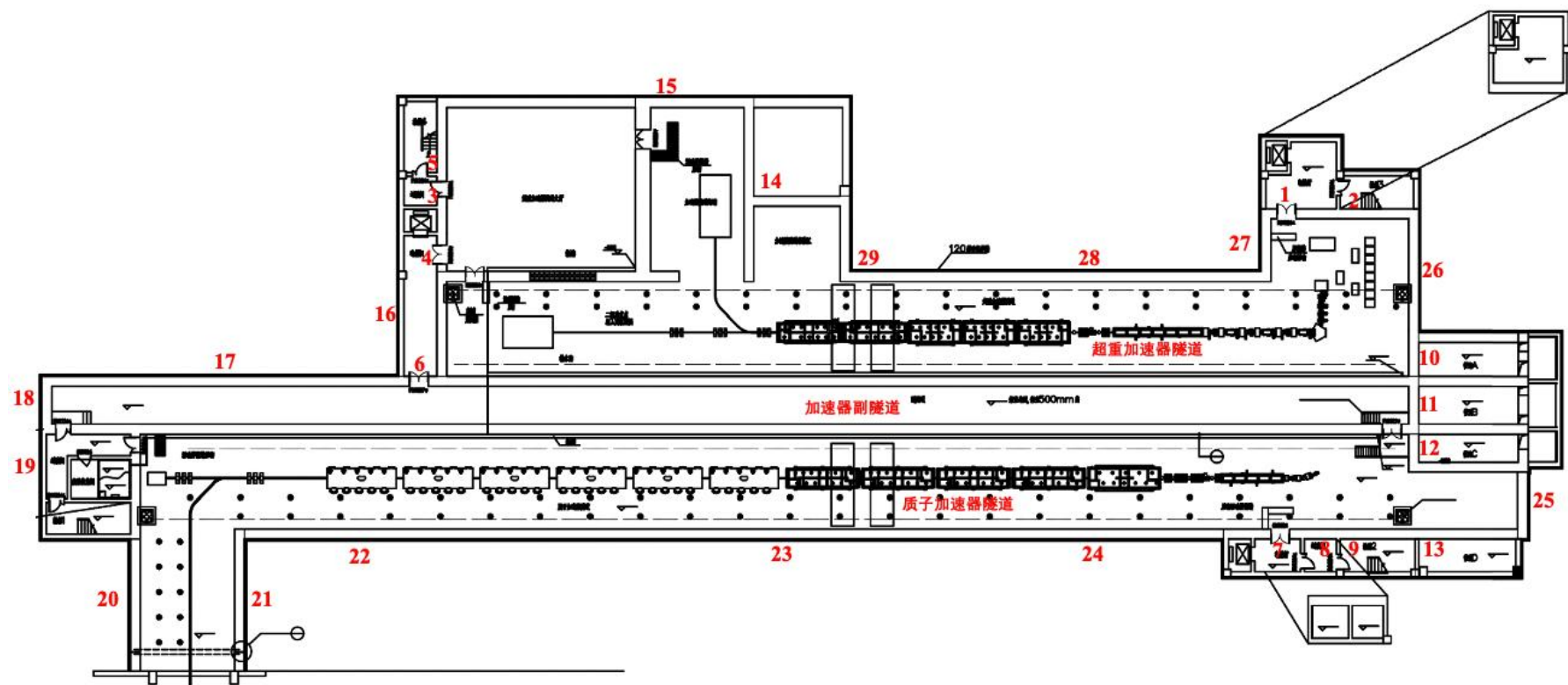


图 5-12 加速器隧道-8.9m 平面图关注点示意图

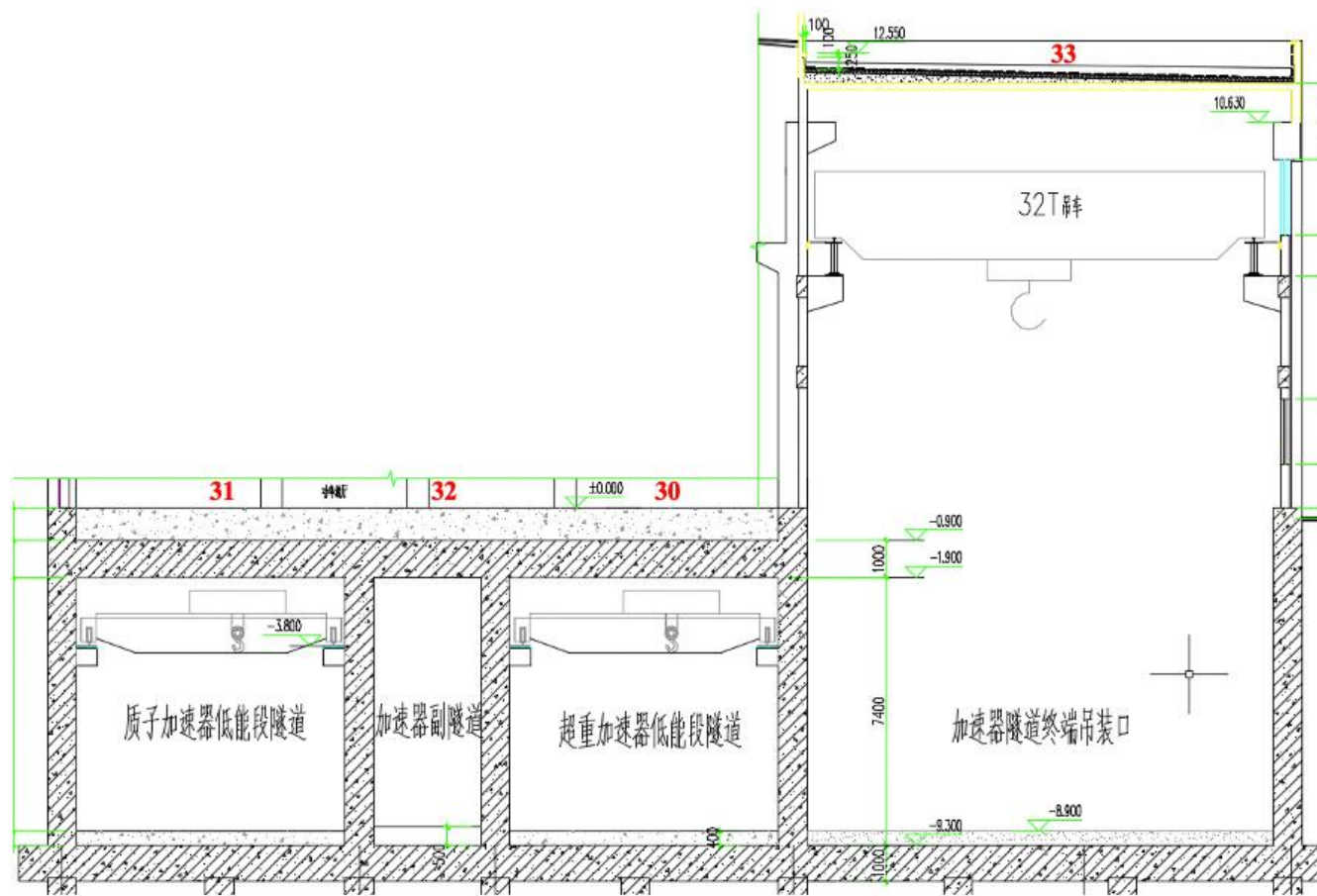


图 5-13 加速器隧道 1-1 剖面关注点示意图

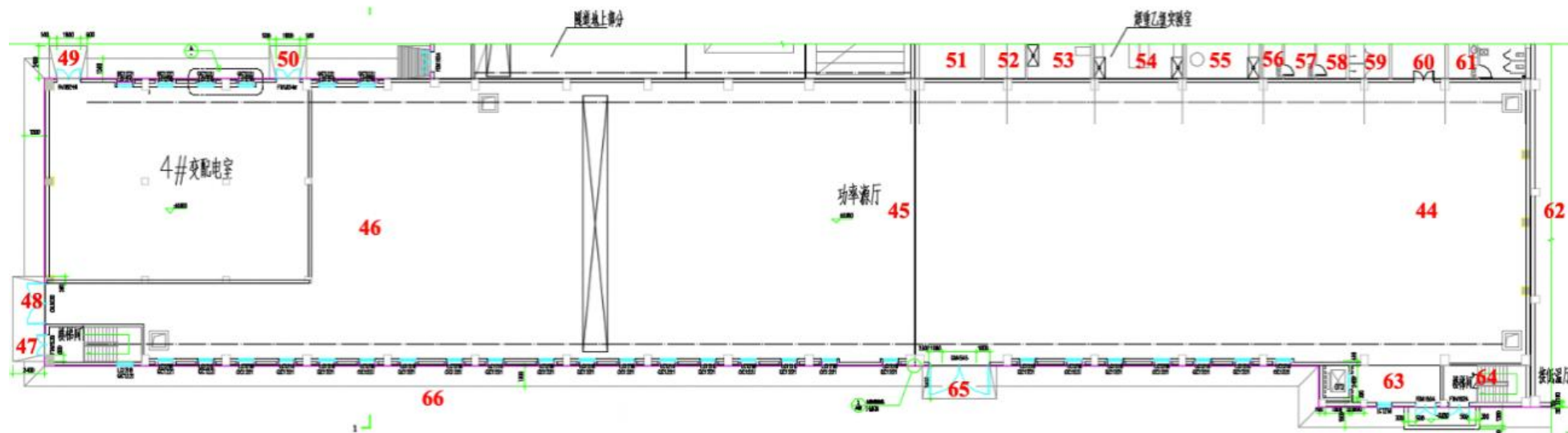


图 5-15 功率源厅±0.0m 平面关注点示意图

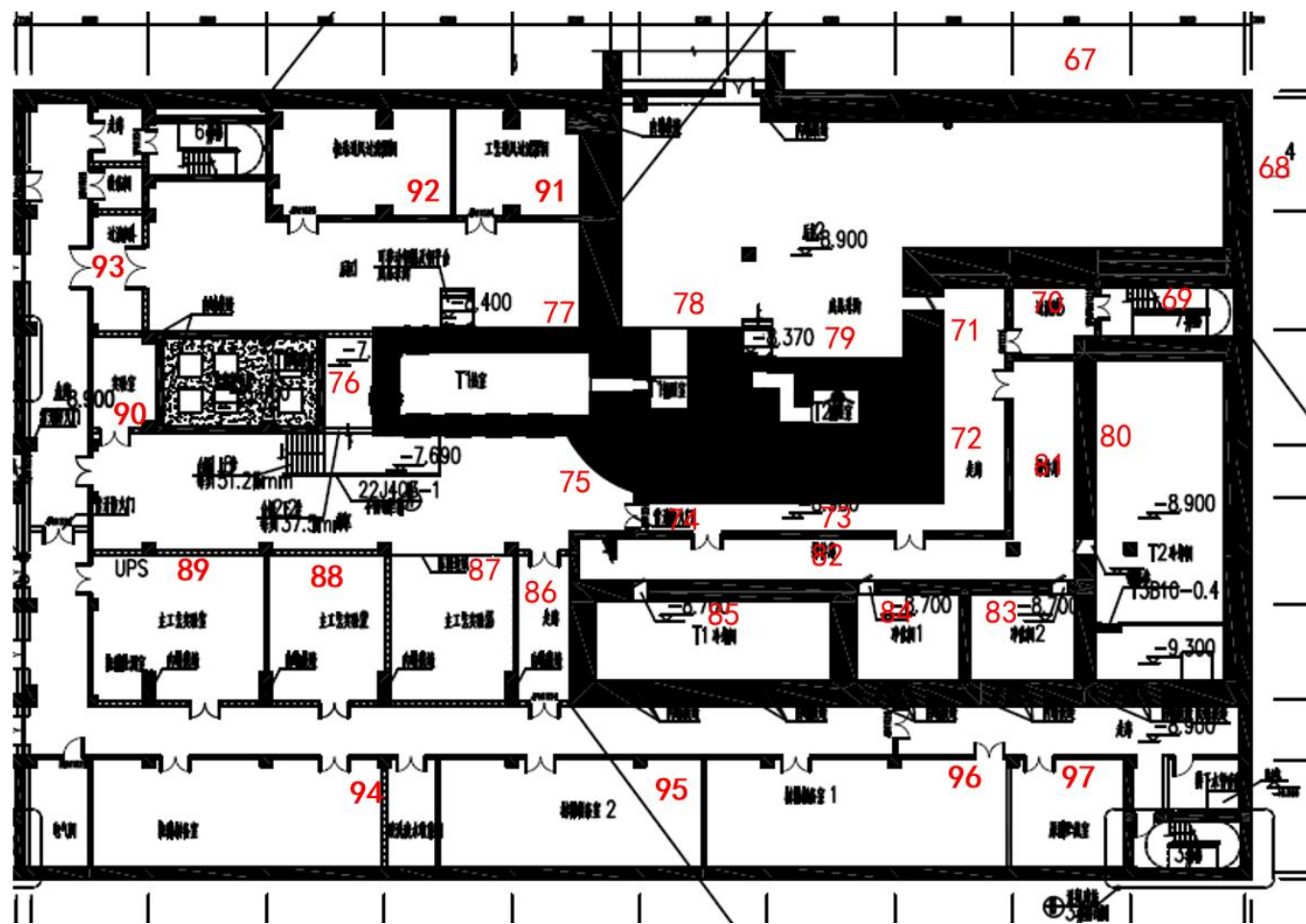


图 5-16 靶站-8.9m 平面关注点示意图

5.2.1.2 分离系统

(1) T1/T2 热室

采用 FLUKA 程序计算 T1/T2 热室以及分离系统工作箱室屏蔽体外剂量率的水平，T1/T2 热室建立的计算模型示意图见图 5-18 和图 5-19。T1/T2 热室屏蔽体外剂量率分布图见图 5-20 和图 5-21，计算源项见附件 5，屏蔽箱室设计见表 4-5，屏蔽体外剂量率估算结果见表 5-3，从表中可以看出，箱室前区即人员操作位处剂量率最大为 $0.16\mu\text{Sv/h}$ ，满足剂量率限值。

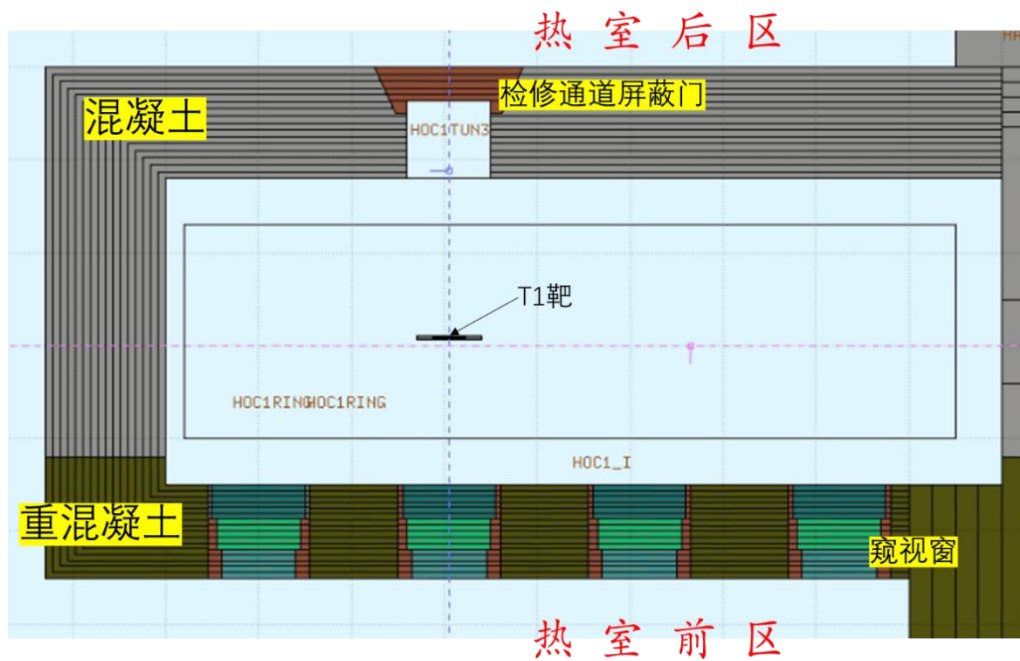


图 5-18 T1 热室计算模型

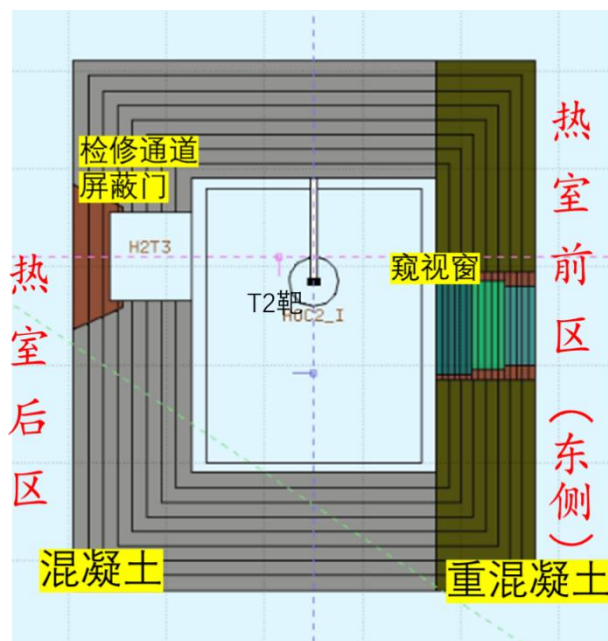


图 5-19 T2 热室计算模型

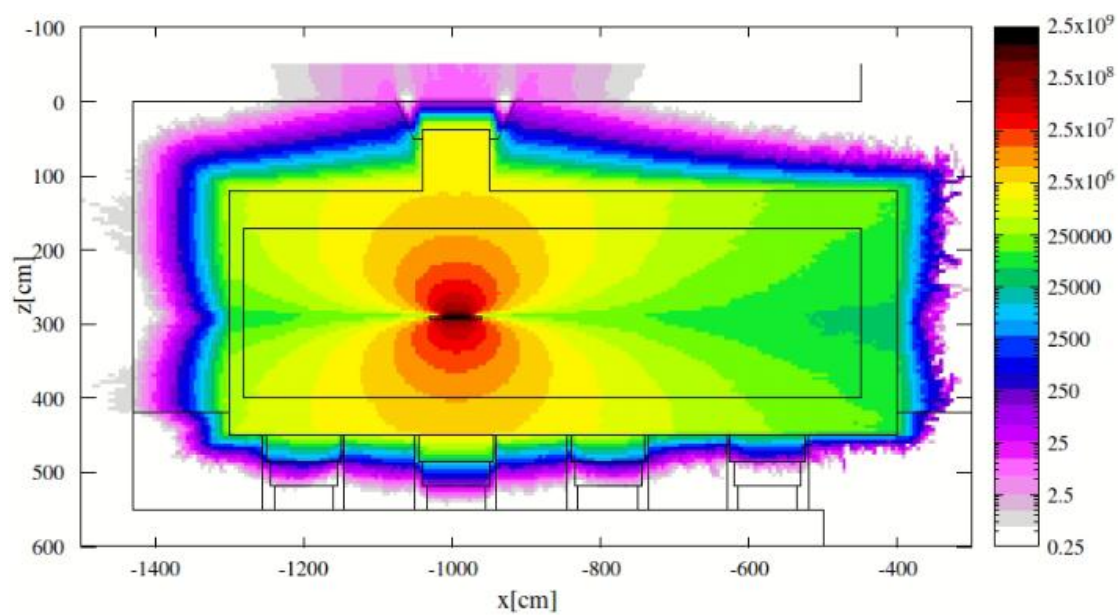


图 5-20 T1 热室屏蔽体外剂量率分布图[$\mu\text{Sv/h}$]

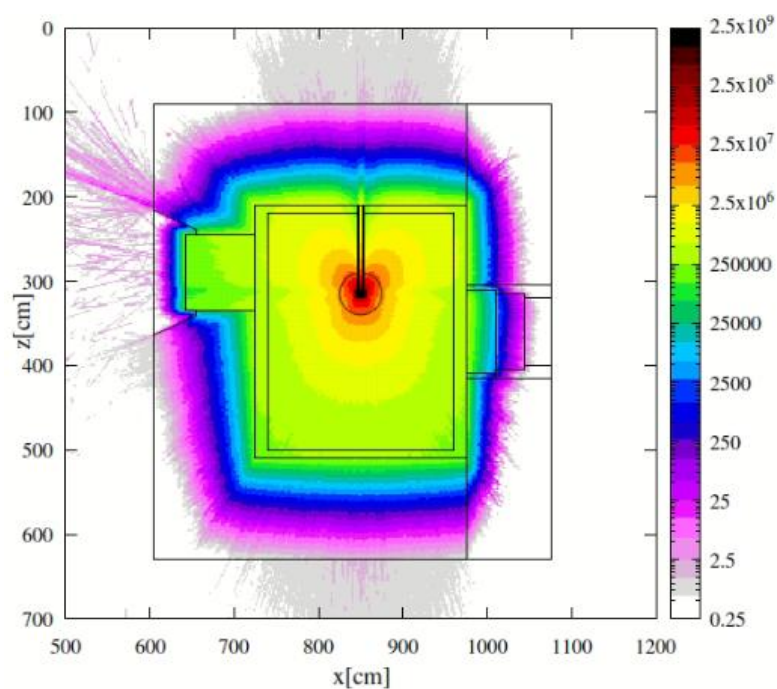


图 5-21 T2 热室屏蔽体外剂量率分布图[μSv/h]

表 5-3 靶站 1、2 辐照后靶件，T1/T2 热室屏蔽体外剂量率

箱室	位置	屏蔽设计	源项与关注点之间距离, m	箱室外 30cm 处剂量率, μSv/h
T1 热室	南侧（人员操作位）	100cm 重混凝土	3.0	<0.1
		360mm K709 玻璃+ 330mm ZF501 铅玻璃+ 300mm ZF6 铅玻璃	3.0	0.16
	北面	120cm 混凝土	3.2	6.51
		370mm 碳钢	3.2	6.17
	西面	130cm 混凝土	4.6	0.66
T2 热室	东侧（人员操作位）	100cm 重混凝土	2.8	<0.1
		360mm K709 玻璃 330mm ZF501 铅玻璃 300mm ZF6 铅玻璃	2.8	<0.1
	南面	120cm 混凝土	3.5	1.06
	西面	120cm 混凝土	2.8	15.2
		370mm 碳钢	2.8	1.53
	北面	120cm 混凝土	2.6	1.22

(2) 分离系统工作箱室

辐照后靶件运输至分离系统进行溶解、纯化、质检等操作，最终形成放射性同位素产品，单次操作源项包括 T1 辐照室辐照后靶件（2 片）及 T2 辐照室辐照后靶片（1 片），各箱室内对应的源项见附件 5，通过分析可知，两者核素种类类似，但 T2 辐照室辐照后靶片单批次量的活度大于 T1 辐照室辐照后靶片的活度，因此采取 T2 辐照室辐照后靶片单批次量作为源项进行估算，工作箱室建立的计算模型示意图见图 5-22~图 5-24，工作箱室屏蔽体外剂量率分布图见图 5-25 图 5-30，屏蔽箱室设计见表 3-6，上述工作箱室屏蔽体外剂量率见表 5-4，从表中可以看出，箱室前区即人员操作位处剂量率最大为 xxxSv/h，满足剂量率限值。

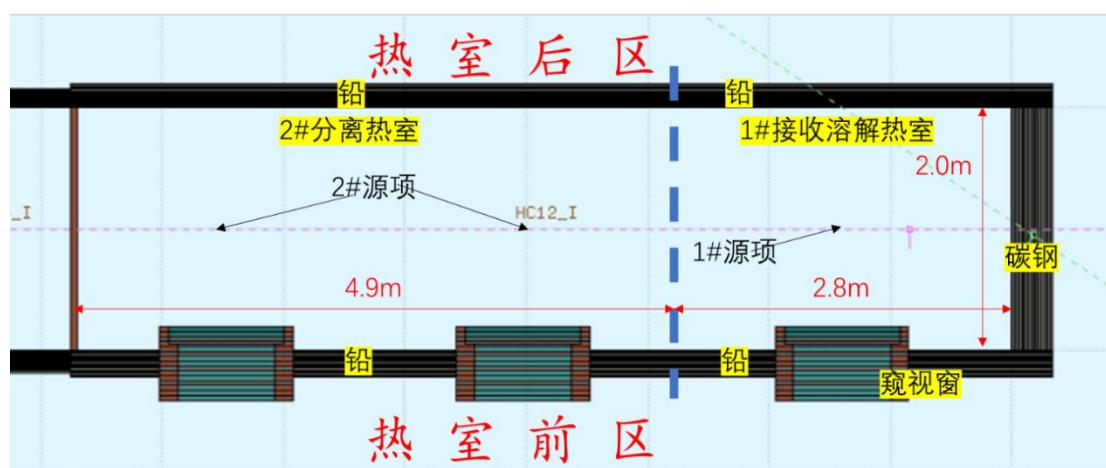


图 5-22 1#、2#热室计算模型

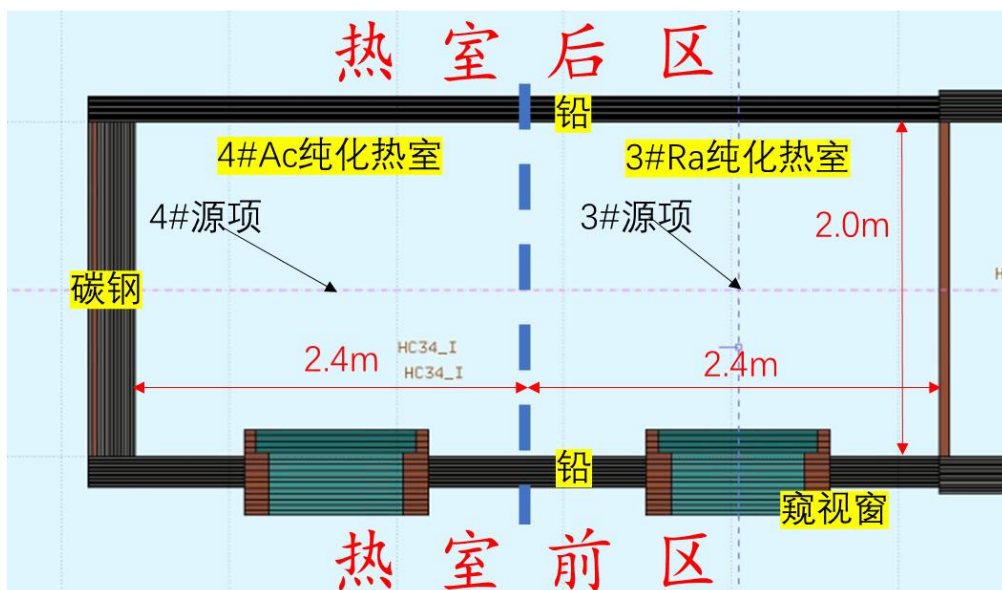


图 5-23 3#、4#热室计算模型

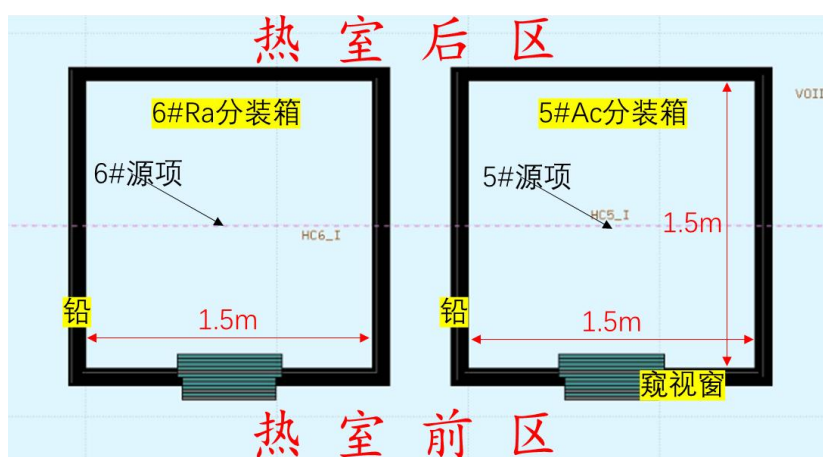


图 5-24 5#、6#分装箱计算模型

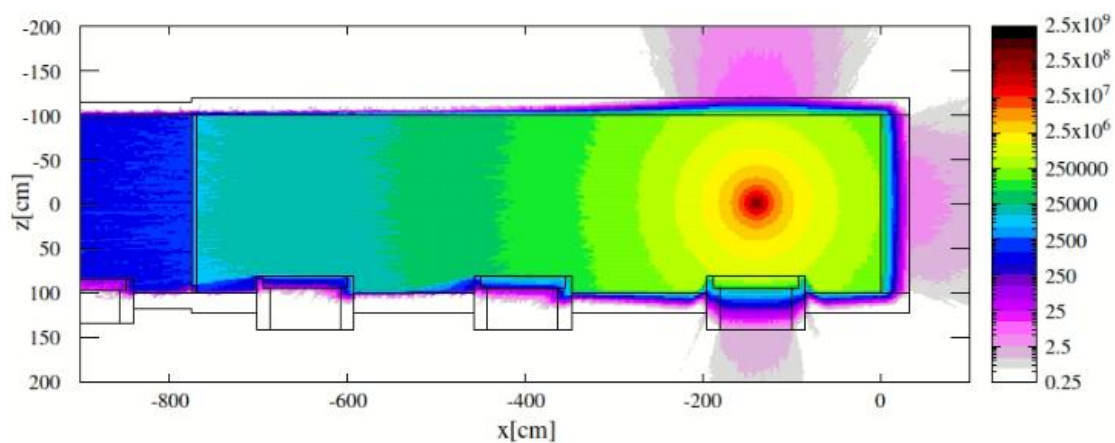


图 5-25 1#热室屏蔽体外剂量率分布图[$\mu\text{Sv/h}$]

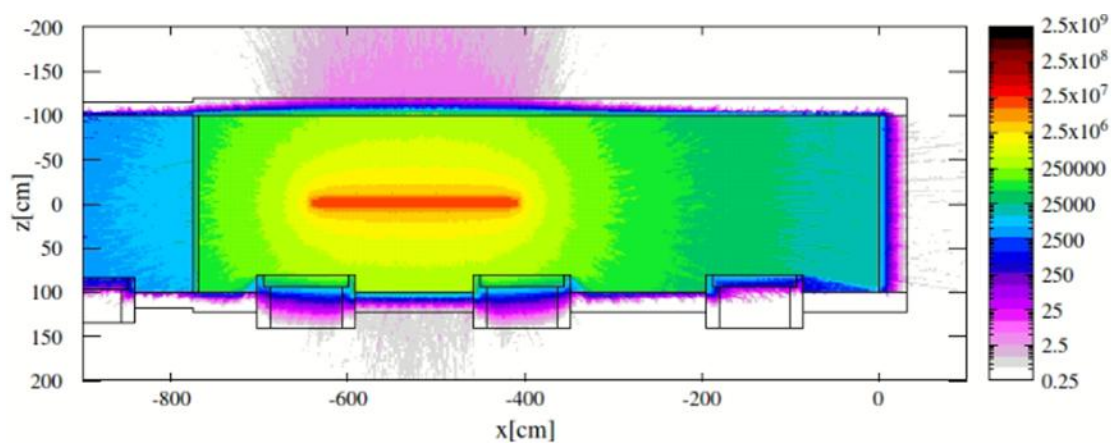


图 5-26 2#热室屏蔽体外剂量率分布图[$\mu\text{Sv/h}$]

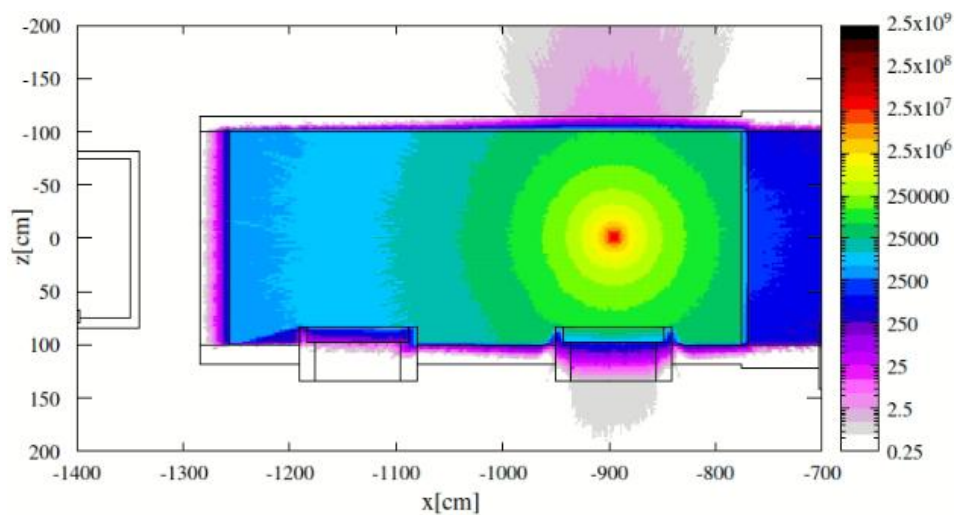


图 5-27 3#热室屏蔽体外剂量率分布图[$\mu\text{Sv/h}$]

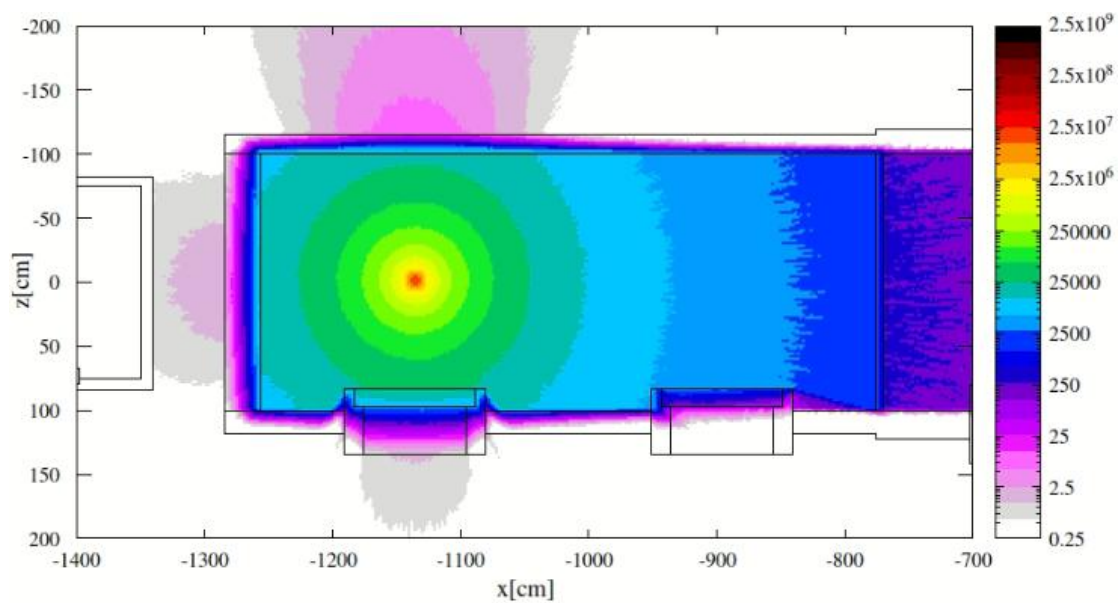


图 5-28 4#热室屏蔽体外剂量率分布图[$\mu\text{Sv/h}$]

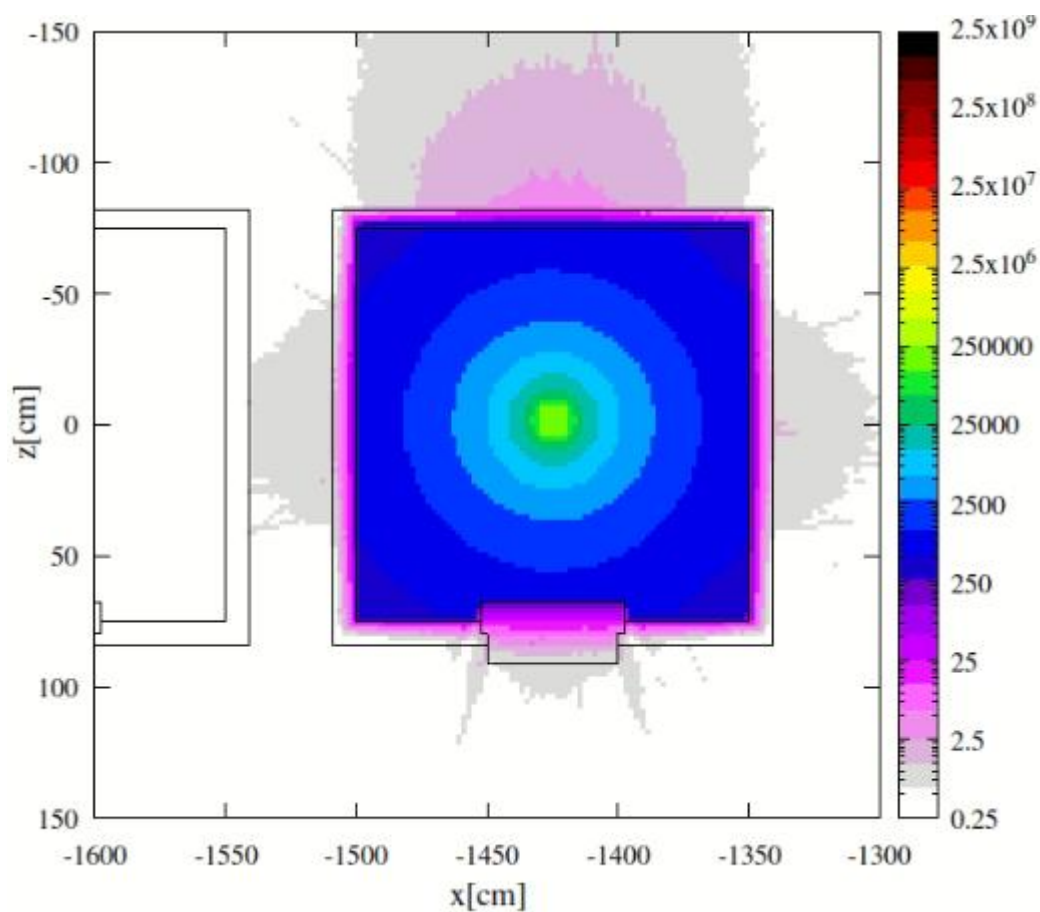


图 5-29 5#工作箱屏蔽体外剂量率分布图[$\mu\text{Sv/h}$]

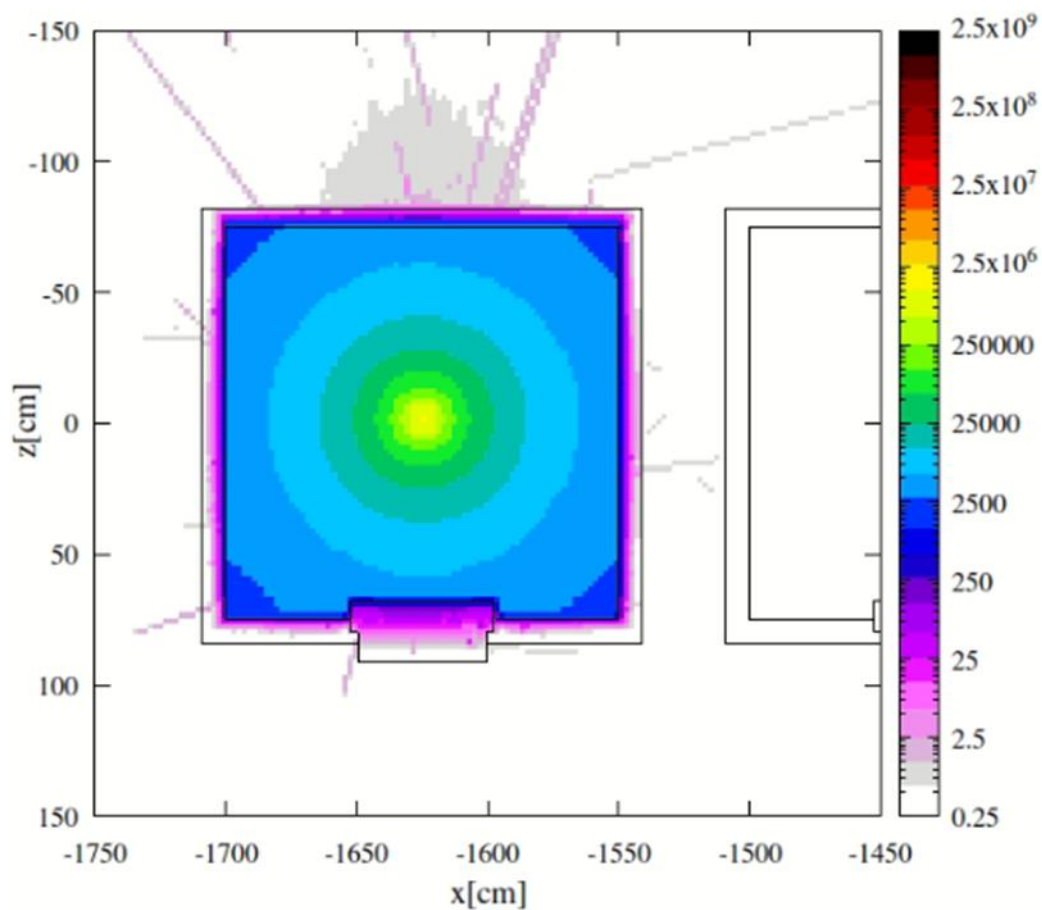


图 5-30 6#工作箱屏蔽体外剂量率分布图[μSv/h]

表 5-4 靶站 2 辐照后靶件，工作箱室屏蔽体外剂量率

箱室		屏蔽设计	源项与关注点之间 距离, m	箱室外 30cm 处/ 罐体外剂量率, μSv/h
T2 热室→1#热室		补充	0.5	267
1#热室	前侧	220mmPb	1.9	1.44
	前侧	140mm K709 玻璃 465mm ZF6 铅玻璃	1.9	1.58
	外侧面	330mm 碳钢	2.2	2.38
	后侧	190mmPb	1.9	6.74
2#热室	前侧	220mmPb	1.9	0.83
	前侧	140mm K709 玻璃 465mm ZF6 铅玻璃	1.9	0.82
	后侧	190mmPb	1.9	3.49

3#热室	前侧	180mmPb	1.9	0.70
	前侧	140mm K709 玻璃 370mm ZF6 铅玻璃	1.9	0.67
	后侧	150mmPb	1.9	2.99
4#热室	前侧	180mmPb	1.9	1.31
	前侧	140mm K709 玻璃 370mm ZF6 铅玻璃	1.9	0.84
	外侧面	280mm 碳钢	2.1	1.39
	后侧	150mmPb	1.9	5.14
5#热室	前侧	90mmPb	1.7	0.59
	前侧	235mm ZF6 铅玻璃	1.7	0.40
	侧面	90mmPb	1.7	0.59
	后侧	70mmPb	1.7	1.73
6#热室	前侧	90mmPb	1.7	0.12
	前侧	235mm ZF6 铅玻璃	1.7	0.10
	侧面	90mmPb	1.7	0.12
	后侧	70mmPb	1.7	0.70
<u>Ac-225 质检</u> (7.0E+05Bq)	前侧	/	<u>0.5</u>	<u>0.10</u>
<u>Ac-225 产品</u> (3.7E+07Bq)	前侧	<u>18mmPb</u>	<u>0.5</u>	<u>0.47</u>
<u>Ra-223 质检</u> (1.1E+05Bq)	前侧	/	<u>0.5</u>	<u>0.03</u>
<u>Ra-223 产品</u> (3.7E+07Bq)	前侧	<u>18mmPb</u>	<u>0.5</u>	<u>0.28</u>

5.2.1.3 超重乙级实验室

采用 PHITS 程序计算超重乙级实验室工作箱室屏蔽体外剂量率的水平，场所设备的参数详见表 3-8，其中 Pu-240、Cm-244、Cf-252、Am-241 考虑了自发裂变产生的中子剂量影响。

本次评价中建立的计算模型示意图见图 5-31，靶件制备和核素回取实验中 Cf-252 和 Pu-244 操作期间屏蔽体外剂量率较高，建模模型和屏蔽体外剂量率以 Cf-252 和 Pu-24 为例见图 5-32~图 5-35。

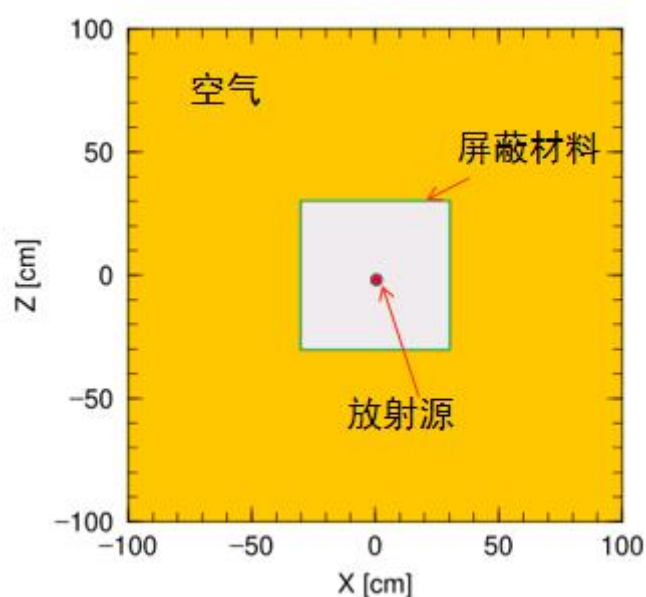


图 5-31 计算模型

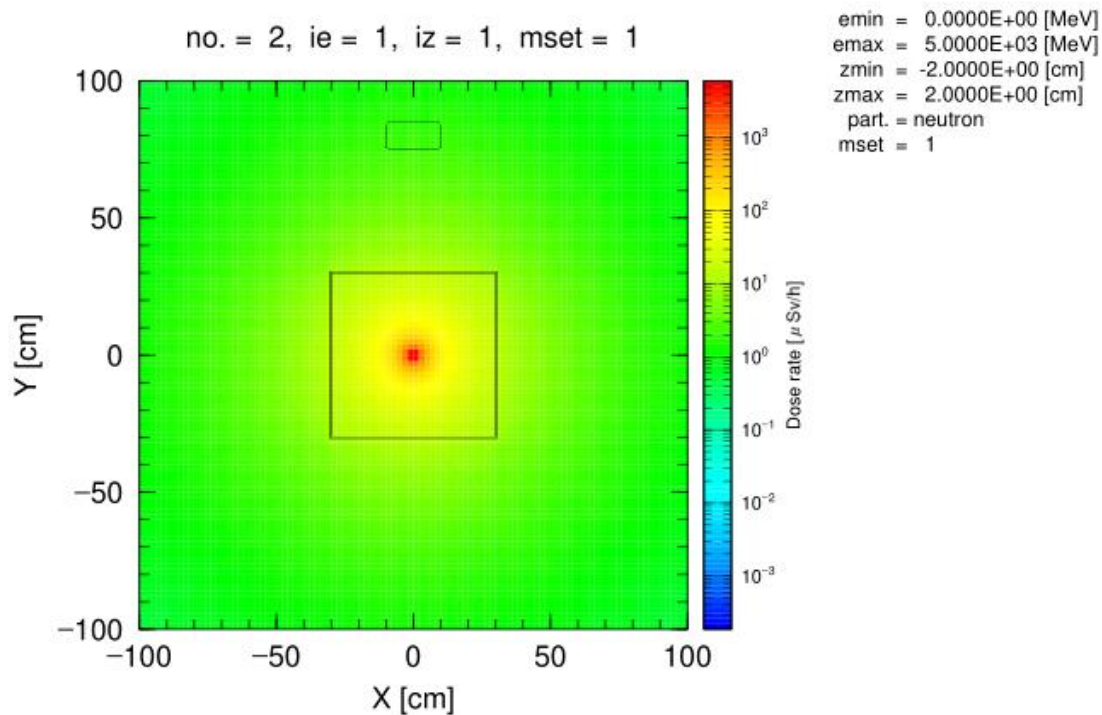


图 5-32Cf-252 进行靶件制备实验期间，辐射剂量场分布 [μ Sv/h]

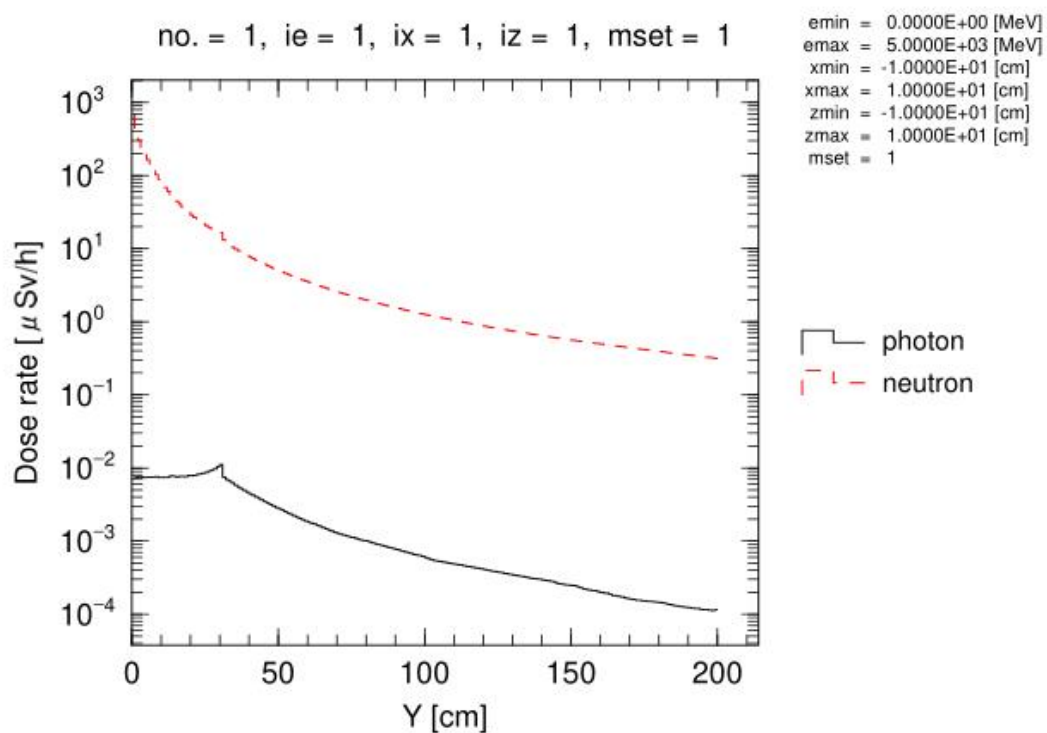


图 5-33Cf-252 进行靶件制备实验期间，辐射剂量与辐射源距离关系[μ Sv/h]

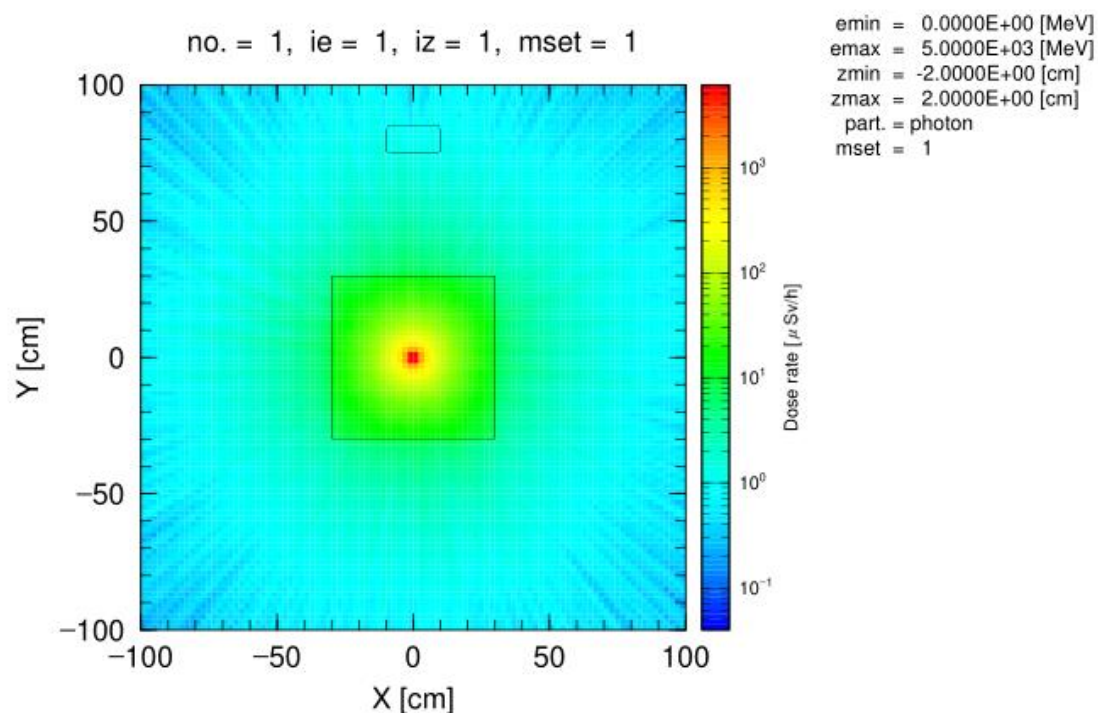


图 5-34 Pu-244 进行靶件制备实验期间，辐射剂量场分布 [μ Sv/h]

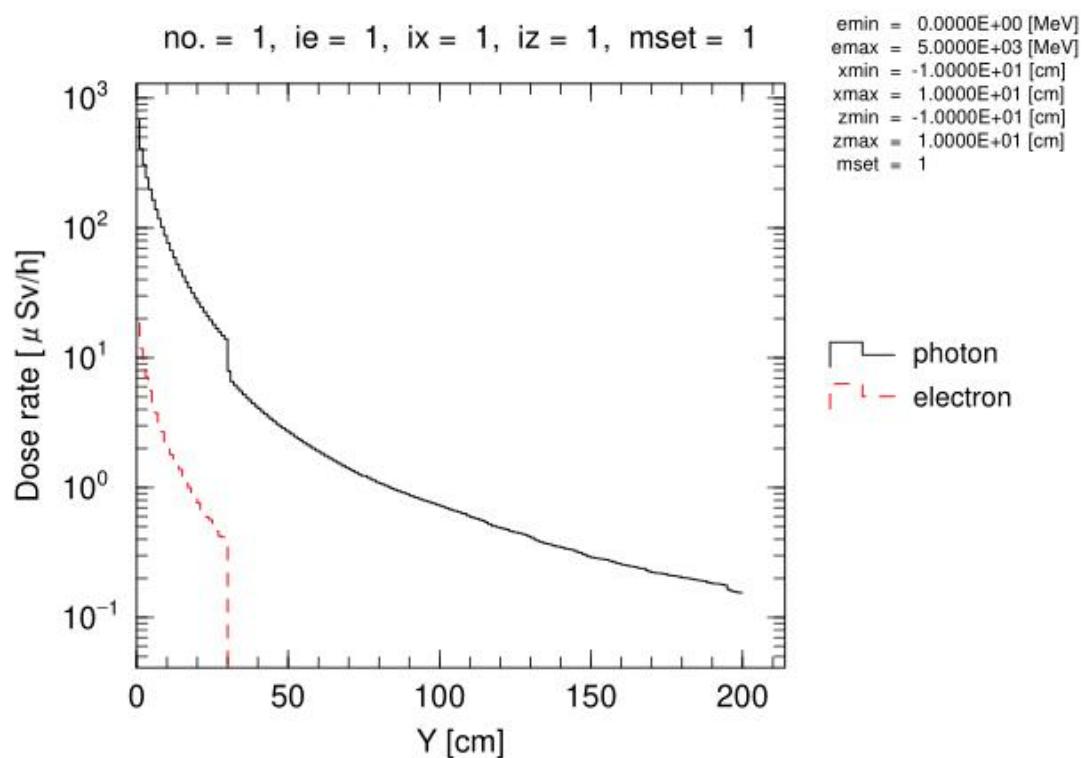


图 5-35 Pu-244 进行靶件制备实验期间，辐射剂量与辐射源距离关系 [μ Sv/h]

超重乙级实验室工作箱室屏蔽体外剂量率见表 5-5，从表中可以看出，人员操作位处剂量率最大为 1.53μSv/h，满足剂量率限值。

表 5-5 超重乙级实验室工作箱室屏蔽体外剂量率

实验类型	序号	核素	日最大操作量, Bq	工作箱室屏蔽设计	距离, m	屏蔽体外剂量率, μSv/h	
靶件制备	1	²⁴³ Am	2.66E+07	5mmPb	0.9	人员操作位	3.83E-02
	2	²⁴¹ Am	1.00E+07	5mmPb	0.9	人员操作位	3.55E-04
	3	²⁵² Cf	1.00E+06	10mm Pb+5cm 含硼聚乙烯	0.9	人员操作位	1.53E+00
	4	²⁵¹ Cf	1.00E+06	5mmPb	0.9	人员操作位	5.03E-01
	5	²⁴⁹ Cf	1.00E+06	5mmPb	0.9	人员操作位	1.90E-02
	6	²⁴⁸ Cm	1.00E+07	5mmPb	0.9	人员操作位	4.60E-02
	7	²⁴⁴ Cm	1.00E+07	5mmPb	0.9	人员操作位	5.03E-04
	8	²⁴⁴ Pu	1.00E+07	5mmPb	0.9	人员操作位	8.21E-01
	9	²⁴⁰ Pu	1.00E+07	5mmPb	0.9	人员操作位	3.09E-05
回取实验	1	²⁴³ Am	2.61E+06	5mmPb	0.9	人员操作位	3.77E-03
	2	²⁴¹ Am	9.80E+05	5mmPb	0.9	人员操作位	3.46E-05
	3	²⁵² Cf	9.80E+04	10mm Pb+5cm 含硼聚乙烯	0.9	人员操作位	1.50E-01
	4	²⁵¹ Cf	9.80E+04	5mmPb	0.9	人员操作位	4.94E-02
	5	²⁴⁹ Cf	9.80E+04	5mmPb	0.9	人员操作位	1.86E-03
	6	²⁴⁸ Cm	9.80E+05	5mmPb	0.9	人员操作位	4.51E-03
	7	²⁴⁴ Cm	9.80E+05	5mmPb	0.9	人员操作位	4.91E-05
	8	²⁴⁴ Pu	9.80E+05	5mmPb	0.9	人员操作位	8.06E-02
	9	²⁴⁰ Pu	9.80E+05	5mmPb	0.9	人员操作位	3.09E-05
微流溶剂萃取实验和超重化学实验	1	⁹⁵ Nb	3.70E+06	5mmPb	0.9	人员操作位	3.67E-01
	2	¹⁸² Ta	3.70E+06	5mmPb	0.9	人员操作位	5.77E-01
	3	¹⁷⁹ Ta	3.70E+06	5mmPb	0.9	人员操作位	3.09E-05

5.2.1.4 靶向药物实验室

靶向药物实验室辐射影响屏蔽主要源自热室和通风橱，场所设备的参数详见表 3-9。

屏蔽体外剂量率采用采用 MicroShield 软件进行 γ 射线所致屏蔽体外剂量率的估算。MicroShield 软件是一款辐射剂量计算软件，它广泛应用于屏蔽体设计与屏蔽体外参考点剂量率计算等问题。该软件设有 16 种源项模型并自带一个含 12 种屏蔽材料的材料库以及一个含 497 种放射性核素的核素库，用户还可以根据工程需要自行添加屏蔽材料，这些功能使用户在建模时有更广泛的选择范围。

本项目采用点源模型，屏蔽体剂量率估算结果见表 5-6。通过计算可知屏蔽工作箱室人员操作位、控制区墙体外人员长居留场所剂量率低于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 。

靶向药物实验室操作核素包括 F-18、Lu-177、Tb-161 和 Tc-99m，上述四种核素中 F-18 的辐射影响较大，因此在同一类实验中以 F-18 作为典型核素进行核算。

表 5-6 靶向药物实验室辐射工作场所辐射屏蔽计算结果

房间	源项	具体位置	操作最大活度, Bq	屏蔽体, mmPb	距离, m	剂量率水平, $\mu\text{Sv/h}$
核素转运	Lu-177	转移铅罐外	2.00E+08	10	0.5	3.06E-03
	F-18	转移铅罐外	1.00E+08	10	0.5	1.48E+01
	Tb-161	转移铅罐外	2.00E+08	10	0.5	1.35E-02
	Tc-99m	转移铅罐外	1.00E+08	10	0.5	2.47E-09
放射性标记室 2 (标记)	F-18	通风橱外 30cm	1.00E+08	20	0.8	1.26E+00
		四周墙体外人员可达	1.00E+08	20	2	2.02E-01
		门口处	1.00E+08	20	4	5.04E-02
放射性标记室 3 (质检)	F-18	L 屏 30cm	3.70E+06	2	0.8	6.46E-01
		四周墙体外人员可达	3.70E+06	2	2	1.03E-01
		门口处	3.70E+06	2	4	2.58E-02
放射性标记室 2 (注射, 动物实验)	Tb-161	通风橱外 30cm	2.42E+06	2	0.8	2.81E-04
		四周墙体外人员可达	2.42E+06	2	2	4.50E-05
		门口处	2.42E+06	2	4	1.12E-05
放射性标记室 3 (注射, 动物实验)	Lu-177	L 屏 30cm	2.46E+06	2	0.8	2.61E-03
		四周墙体外人员可达	2.46E+06	2	2	4.18E-04
		门口处	2.46E+06	2	4	1.04E-04
放射性标记室 3 (注射, 显像)	F-18	L 屏 30cm	1.00E+07	2	0.8	1.75E+00
		四周墙体外人员可达	1.00E+07	2	2	2.80E-01

		门口处	1.00E+07	2	4	7.00E-02
CT 机房	F-18	四周墙体外人员可达	3.00E+07	0	2.5	6.88E-01
		观察窗外	3.00E+07	5	2.5	6.32E-01
		门口处	3.00E+07	0	4	2.69E-01
		摆位处	3.00E+07	0	0.5	1.72E+01
动物饲养室	Lu-177, 40 只, 肿瘤模型治疗实验和体内分布重叠) 屏蔽: 饲养笼 (5mmPb)	四周墙体外人员可达	9.84E+07	5	6	1.54E-04
		门口处	9.84E+07	5	6	1.54E-04
		饲养笼外	9.84E+07	5	0.5	2.22E-02
动物饲养室	Tb-161 (40 只, 肿瘤模型治疗实验和体内分布重叠) 屏蔽: 饲养笼 (5mmPb)	四周墙体, 外人员可达	9.66E+07	5	6	9.52E-05
		门口处	9.66E+07	5	6	9.52E-05
		饲养笼外	9.66E+07	5	0.5	1.37E-02
动物饲养室	Tb-161 (10 只, 影像实验) 屏蔽: 饲养笼 (5mmPb)	四周墙体, 外人员可达	2.00E+08	5	6	1.98E-04
		门口处	2.00E+08	5	6	1.98E-04
		饲养笼外	2.00E+08	5	0.5	2.85E-02
动物饲养室	Lu-177 (10 只, , 影像实验) 屏蔽: 饲养笼 (5mmPb)	四周墙体外人员可达	2.00E+08	5	6	3.14E-04
		门口处	2.00E+08	5	6	3.14E-04
		饲养笼外	2.00E+08	5	0.5	4.52E-02
动物饲养室	F-18 (10 只, 影像实验) 屏蔽: 饲养笼 (5mmPb)	四周墙体外人员可达	1.00E+08	5	6	4.39E-01
		门口处	1.00E+08	5	6	4.39E-01
		饲养笼外	1.00E+08	5	0.5	6.32E+01
动物饲养室	Tc-99m (10 只, 影像实验) 屏	四周墙体外人员可达	1.00E+08	5	6	7.98E-05

	蔽：饲养笼（5mmPb）	门口处	1.00E+08	5	6	7.98E-05
		饲养笼外	1.00E+08	5	0.5	1.15E-02
动物饲养室剂量率 （总计）	总计 120 只老鼠	四周墙体外人员可达	/	5	6	4.40E-01
		门口处	/	5	6	4.40E-01
		饲养笼外	/	5	0.5	6.33E+01
动物饲养室（动物 分析、处死，体内 分布试验）	Lu-177（5 只）铅玻璃 （20mmPb）	操作位	1.23E+07	20	0.5	4.44E-06
		四周墙体，外人员可达	1.23E+07	20	5.5	3.67E-08
		门口处	1.23E+07	20	2.3	2.10E-07
动物饲养室（动物 分析、处死，体内 分布试验）	Tb-161（5 只）铅玻璃 （20mmPb）	操作位	1.21E+07	20	0.5	2.15E-04
		四周墙体，外人员可达	1.21E+07	20	5.5	1.78E-06
		门口处	1.21E+07	20	2.3	1.02E-05
放射性标记室 2 （肿瘤测量）	Lu-177（1 只，）通风橱 （2mmPb）	操作位	2.46E+06	2	0.8	2.61E-03
		四周墙体，外人员可达	2.46E+06	2	2	4.18E-04
		门口处	2.46E+06	2	4	1.04E-04
放射性标记室 1 （肿瘤测量）	Tb-161（1 只）通风橱 （2mmPb）	操作位	2.42E+06	2	0.8	2.81E-04
		四周墙体，外人员可达	2.42E+06	2	2	4.50E-05
		门口处	2.42E+06	2	4	1.12E-05
细胞培养室（细胞 实验）	F-18	操作位	9.25E+05	1.4	0.5	5.24E-01
		四周墙体，外人员可达	9.25E+05	1.4	3	1.46E-02
		门口处	9.25E+05	1.4	2.3	2.48E-02

5.2.2 辐射工作人员受照剂量

正常运行期间，对辐射工作人员外照射剂量可按下式计算：

$$H = \dot{H} \times T \times t \quad \text{公式 5-1}$$

式中，

H 为外照射所致人员年有效剂量，mSv/a；

$\dot{H}$ 为关注点剂量率，mSv/h；

T 为居留因子，取值为 1；

t 为年受照时间，h/a。

5.2.2.1 质子加速器

(1) 加速器正常运行

本项目质子加速器在运行过程中，加速器操作人员位于运行维护楼的中控室，运行维护楼位于院区内东南角，距离加速器隧道 70m 以上，从表 5-2 可知，质子加速器四周屏蔽体外、距离运行维护楼较近的关注点为功率源厅一层东南侧的几个点（关注点 62、63、64），剂量率均 $< 0.1 \mu\text{Sv/h}$ ，在运行维护楼屏蔽和距离衰减下，中控室剂量率为本底水平，因此加速器运行对中控室操作人员受照剂量可忽略不计。另外，加速器运行时，中控室工作人员偶尔去功率源厅进行设备的检查维护，每年工作时间不会超过 1000h，根据模拟结果，功率源厅内关注点剂量率最大值为 $1.8 \mu\text{Sv/h}$ （关注点 44、45、46），则工作人员受照剂量为 1.8mSv/a 。

(2) 加速器设备维修维护

加速器设备维修维护人员进入加速器隧道或终端进行设备维修维护时，主要受到结构部件活化感生放射性的影响。根据本项目特点，设备维修维护人员主要

进入加速器隧道进行设备的维修维护，剂量率保守取 Dump 辐照 1 个月后，冷却 7 天后，隧道内距 dump 屏蔽 1m 处的剂量率值，约为 25 μ Sv/h，隧道内巡查时间不超过 10h，则加速器维修维护人员年受照剂量最大为 0.25mSv/a。

(3) 小计

由以上计算结果可知，加速器运行及维护工作岗位年受照剂量为 2.05mSv/a，根据加速器运行及维护岗位设置，该工作岗位设有三班，则每班工作人员年受照剂量 0.68mSv/a，其工作人员年受照剂量小于工作人员剂量约束值 5mSv/a。

5.2.2.2 靶站

5.2.2.2.1 正常工况

正常运行工况下，靶件在热室内的更换、拆解和转运等流程以自动化设备为主，机械手操作为辅，靶站操作人员均在前区远程遥控操作。

根据靶站各关注点剂量率计算结果，在加速器运行期间，靶站前区的剂量率最大为 2.2 μ Sv/h，靶站人员在靶站热室进行靶件的操作次数不超过 320 次/年，单次操作时间 1h，年总工作时间 320 小时。则靶站工作人员从事远程遥控工作的年受照剂量如下表所示。

表 5-7 靶站工作人员从事远程遥控工作的年受照剂量

位置	工况	瞬时剂量率， μ Sv/h	年操作时间，h	年受照剂量，mSv
靶站前区	正常运行期间远程遥控	2.2	320	7.04E-01

靶件从过渡室往分离热室的转运是通过屏蔽转运车和 AGV 小车转运，人员辅助，转运时屏蔽容器外表面剂量最高为 267 μ Sv/h，年转运次数不超过 320 次/年，人员辅助时间不超过 10h，靶站工作人员从事容器转运工作的年受照剂量为 2.67mSv/a。

5.2.2.2.2 维修工况

根据工作计划，进入热室维修的人员，需要等待热室内剂量率降低到 $100\mu\text{Sv/h}$ 以下方可进入，单次维修时间不超过 10h，每年维修总计两次。则靶站工作人员从事维修工作的年受照剂量如下表所示。

表 5-8 靶站工作人员从事维修工作的年受照剂量

位置	工况	瞬时剂量率, $\mu\text{Sv/h}$	年操作时间, h	年受照剂量, mSv
热室	维修工况	100	20	2.00E+00

5.2.2.2.3 小计

根据上述分析，靶站工作人员在正常运行工况及维修工况下，年受照剂量汇总情况如下表所示。

表 5-9 靶站工作人员的年受照剂量汇总

工况		年受照剂量, mSv	总年受照剂量, mSv
正常工况	远程遥控	0.77	5.44
	容器转运	2.67	
维修工况		2.00	

根据靶站工作人员岗位设置，该工作岗位设有三班，则每班工作人员年受照剂量 1.81mSv/a ，其工作人员年受照剂量小于工作人员剂量约束值 5mSv/a 。

5.2.2.3 分离系统

5.2.2.3.1 外照射

分离系统工作规划详见表 3-17，工作箱室外剂量率详见表 5-3 和表 5-4，根据公示 5-1 计算外照射辐射影响，结算结果见表 5-10。

表 5-10 分离系统外照射辐射影响估算结果

工作内容	受照时间, h	剂量率, $\mu\text{Sv/h}$	受照剂量, mSv/a
靶件拆解	1.60E+02	1.44E+00	2.30E-01

靶件溶解	1.60E+02	1.44E+00	2.30E-01
分离	1.60E+02	8.30E-01	1.33E-01
Ac 纯化	1.60E+02	1.31E+00	2.10E-01
Ra 纯化	1.60E+02	7.00E-01	1.12E-01
Ac -225 分装	5.33E+00	1.20E-01	6.40E-04
Ra -223 分装	5.33E+00	5.90E-01	3.15E-03
Ac 产品外包等	5.84E+01	4.70E-01	2.74E-02
Ra 产品外包等	2.48E+02	2.80E-01	6.94E-02
Ac 产品运送	5.00E+00	8.23E+01	4.12E-01
Ra 产品运送	5.00E+00	2.08E+02	1.04E+00
Ac -225 质检	1.60E+02	1.00E-01	1.60E-02
Ra -223 质检	1.60E+02	3.00E-02	4.80E-03
小计			2.49E+00

5.2.2.3.2 内照射

$$D_{inh,i} = C \cdot DF_{inh,i} \cdot R \cdot t \cdot \eta \quad (\text{公式 5-2})$$

$D_{inh,i}$ 为吸入放射性同位素 i 造成的吸入内照射，mSv/a；

C 为空气中核素的浓度，Bq/m³，在放射性同位素生产过程中，放射性核素以一定的比例进入气态，综合考虑工作箱室换气次数以及工作箱室泄漏率得到泄漏至工作前区的量，分离系统工作箱室泄率保守按二级考虑。

$DF_{inh,i}$ 为核素 i 的吸入内照射剂量转换因子，Sv/Bq，取自 GB18871-2002 表 B7；

R 为呼吸率，取 1.2m³/h；

t 为操作时间，根据工作人员岗位安排，详见表 3-17；

η 为口罩过滤效率，此处取值为 0.1。

表 5-11 分离系统辐射工作人员内照射受照剂量计算结果

核素	操作区核素的 活度， Bq/m ³	DF， 吸入内照射剂量转 换因子，Sv/Bq	R,呼吸 率，m ³ /h	操作时 间，t，h/a	口罩过 滤效率	受照剂量， mSv/a
I-131	2.30E+02	7.60E-09	1.2	810.67	0.1	1.70E-01

Po-210	7.29E-02	7.10E-07	1.2	810.67	0.1	5.04E-03
I-126	6.38E+00	1.00E-08	1.2	810.67	0.1	6.21E-03
Th-227	2.36E-01	6.20E-06	1.2	810.67	0.1	1.42E-01
Ra-223	1.78E-01	5.70E-06	1.2	810.67	0.1	9.85E-02
Ac-225	4.34E-02	1.00E-06	1.2	810.67	0.1	4.22E-03
Ra-224	3.72E-02	2.40E-06	1.2	810.67	0.1	8.69E-03
U-230	1.19E-03	4.20E-07	1.2	810.67	0.1	4.88E-05
Ac-227	1.85E-04	6.30E-04	1.2	810.67	0.1	1.13E-02
小计						5.27E-01

5.2.2.3.3 设备维护及三废处理

本项目设备日常维护频率为 2 次/年，根据以往实际经验数据，一般设备表面剂量率小于 75 μ Sv/h。日常维护期间，2 人一组，单次近距离操作时间小于 4h，单次受照剂量为 0.3mSv，日常维护期间年受照剂量小于 0.6mSv/a。

三废处理中主要考虑固废转运过程中辐射影响，本项目辐射工作人员定期开展固废转运，根据建设单位要求，包装后废物桶表面 1m 处的剂量率<0.1mSv/h，保守假设运输人员距离废物桶 0.5m，每次固体废物转运时间为 6min，单次受照剂量为 0.04mSv，产线每年最多转运 20 次，操作人员受照剂量为 0.8mSv/a。

5.2.2.3.4 小计

上可知，各辐射工作场所辐射工作人员年受照剂量见表 5-12，本项目辐射工作人员最大年受照剂量为 1.93mSv/a，小于工作人员剂量约束值 5mSv/a。

表 5-12 分离系统辐射工作人员年受照剂量，mSv/a

外照射	设备维护维修和三 废处理	内照射	总计
2.49E+00	1.40E+00	5.27E-01	4.42E+00

根据分离系统工作人员岗位设置，该工作岗位设有两班，则每班工作人员年受照剂量 2.21mSv/a，其工作人员年受照剂量小于工作人员剂量约束值 5mSv/a。

5.2.2.4 超重乙级实验室

5.2.2.4.1 外照射

超重乙级实验室工作规划详见表 3-18，工作箱室外剂量率详见表 5-5，根据公示 5-1 计算外照射辐射影响，结算结果见表 5-13。

表 5-13 超重乙级实验室外照射辐射影响估算结果

工作内容	受照时间，h ¹	剂量率，μSv/h ²	受照剂量，mSv/a
靶件制备	13.2	1.53E+00	2.02E-02
核素回取	20	1.50E-01	3.01E-03
微流溶剂萃取实验和超重化学实验	50	5.77E-01	2.89E-02
小计			5.21E-02
备注：1.受照时间参照表 3-18，靶件制备实验年总次数不超过 40 次，即人员近距离操作时间不超过 13.2h，核素回取实验年总次数不超过 10 次，即人员近距离操作时间（靶件运输和实验操作）不超过 20h，微流溶剂萃取实验和超重化学实验年总次数不超过 50 次，即人员近距离操作时间不超过 50h；2.各类实验均涉及过个核素，根据建设单位实验安排，各类核素不会同时操作，此处剂量率按同类型实验中剂量率最高的核素进行保守计算，工作箱室外剂量率详见表 5-5，其中靶件制备和核素回取均采用 Cf-252，微流溶剂萃取实验和超重化学实验采用 Ta-182。			

5.2.2.4.2 内照射

$$D_{inh,i} = C \cdot DF_{inh,i} \cdot R \cdot t \cdot \eta \tag{公式 5-3}$$

D_{inh, i} 为吸入放射性同位素 i 造成的吸入内照射，mSv/a；

C 为空气中核素的浓度， Bq/m^3 ，开展放射性同位素实验过程中，放射性核素以一定的比例进入气态，考虑工作箱室换气次数得到泄漏至工作前区的量。

$DF_{inh, i}$ 为核素 i 的吸入内照射剂量转换因子， Sv/Bq ，取自 GB18871-2002 表 B7；

R 为呼吸率，取 $1.2\text{m}^3/\text{h}$ ；

t 为操作时间，根据工作人员岗位安排，详见表 3-18；

η 为口罩过滤效率，此处取值为 0.1。

表 5-14 超重乙级实验室辐射工作人员内照射受照剂量计算结果

核素	操作区核素的活度， Bq/m^3	DF， 吸入内照射剂量转换因子， Sv/Bq	R,呼吸率， m^3/h	操作时间，t， h/a	口罩过滤效率	受照剂量 1, mSv/a
Am-243	3.49E-01	2.70E-05	1.2	13.20	0.1	1.49E-02
Am-241	1.31E-01	2.70E-05	1.2	13.20	0.1	5.62E-03
Cf-252	1.31E-02	1.30E-05	1.2	13.20	0.1	2.70E-04
Cf-251	1.31E-02	4.60E-05	1.2	13.20	0.1	9.57E-04
Cf-249	1.31E-02	4.50E-05	1.2	13.20	0.1	9.36E-04
Cm-248	1.31E-01	9.50E-05	1.2	13.20	0.1	1.98E-02
Cm-244	1.31E-01	1.70E-05	1.2	13.20	0.1	3.54E-03
Pu-244	1.31E-01	1.30E-05	1.2	13.20	0.1	2.70E-03
Pu-240	1.31E-01	1.50E-05	1.2	13.20	0.1	3.12E-03
Nb-95	4.86E-02	1.30E-09	1.2	50.00	0.1	3.79E-07
Ta-182	4.86E-02	5.80E-09	1.2	50.00	0.1	1.69E-06
Ta-179	4.86E-02	1.30E-10	1.2	50.00	0.1	3.79E-08
小计						5.18E-02

5.2.2.4.3 小计

综合考虑外照射和内照射，超重乙级实验室辐射工作人员年受照剂量为 $1.04\text{E-}01\text{mSv/a}$ ，小于工作人员剂量约束值 5mSv/a 。

5.2.2.5 靶向药物实验室

靶向药物实验室内操作的核素毒性较低，均不易于挥发，且操作量较小，主要考虑其外照射的影响，工作规划详见表 3-19，工作箱室外剂量率详见表 5-6，根据公示 5-1 计算外照射辐射影响，结算结果见表 5-13，从表中可以看出，靶向药物实验室辐射工作人员年受照剂量为 2.18mSv/a，小于工作人员剂量约束值 5mSv/a。

表 5-15 靶向药物实验室外照射辐射影响估算结果

工作内容	剂量率, $\mu\text{Sv/h}$	工作时间, h	居留因子	年受照剂量, mSv/a
药物转运	1.48E+01	33.3	1	4.92E-01
合成、标记、分装	1.26E+00	100.0	1	1.26E-01
质检	6.46E-01	200	1	1.29E-01
注射	1.75E+00	16.5	1	2.89E-02
扫描 (CT)	3.13E+00	333.0	1	1.04E+00
摆位 CT)	1.72E+01	33.0	1	5.68E-01
肿瘤测量	2.61E-03	112.5	1	2.94E-04
生物分布中动物处死、分析等	2.15E-04	20.0	1	4.30E-06
饲养	6.33E+01	100.0	1	6.33E+00
总计, mSv/a		9.15E+02		8.72E+00
个人最大受照剂量, 总计 4 人				2.18E+00

5.2.2.6 辐射管理中心

放射性三废中的废气经过滤后通过管道直接由排风塔排放，产生的放射性废液由泵直接转运至辐射管理中心通过自动化控制进行废液的处理，放射性固体废物包装后通过小车运至辐射管理中心，废物暂存区设有 1 台吊车，用于对废物桶的接收、暂存和转运操作，废物桶的运输和堆码均有工作人员进行远距离遥控操作，并可由监视器系统进行监督。辐射管理中心工作人员主要在接触废物桶期间、以及在操作间进行相关操作期间受到辐射影响。

对于固废转运过程中受照剂量，根据固体废物包装要求可知，根据建设单位要求，包装后废物桶表面 1m 处的剂量率 $<0.1\text{mSv/h}$ ，保守假设运输人员距离废

物桶 0.5m，每次固体废物转运时间为 6min，每年最多转运 20 次，则操作人员受照剂量为 0.8mSv/a。

对于工作人员在辐射管理中心地上一层操作间进行吊装操作期间，主要考虑地下一层废液暂存间废液暂存期间对人员的辐射影响，根据计算可知，中放废液暂存间顶层屏蔽体外剂量率按 1 μ Sv/h 考虑，工作人员按照每年操作 50 次，单次操作时间约 2 h，受照剂量约 0.1 mSv/a；地下一层操作间主要用于常规设备巡视、阀门检查等工作，该处剂量率按照 2.5 μ Sv/h 考虑，工作人员按照每年操作 50 次，单次操作时间约 0.2 h，受照剂量约 0.025 mSv/a。

综上，辐射管理中心人员年受照剂量约 9.25E-01mSv/a，工作人员年受照剂量小于工作人员剂量约束值 5mSv/a。

5.2.2.7 辐射工作人员年受照剂量小结

综上所述，各辐射工作场所辐射工作人员年受照剂量见表 5-12，本项目辐射工作人员最大年受照剂量为 2.21mSv/a，根据建设单位工作安排，同一年度工作人员一般不会同时参与近物所原有的工作以及本项目的工作，出于保守考虑，此处按人员同一年度同时参与两处辐射工作后受照剂量的叠加，近物所辐射工作人员正常工况下个人年最大受照剂量不超过 1mSv/a，保守按叠加考虑后人员年最大受照剂量约 3.21mSv/a，年最大受照剂量小于工作人员剂量约束值 5mSv/a。

表 5-16 本项目辐射工作人员年受照剂量

序号	工作岗位	个人年最大受照剂量，mSv/a
1	加速器系统	0.68
2	靶站	1.81
3	分离系统	2.21
4	超重乙级实验室	0.11
4	靶向药物实验室	2.18
5	辐射管理中心	0.93

5.2.3 公众受照剂量

本项目正常运行期间，对公众的辐射影响主要来自装置开机出束产生的瞬时辐射的直接外照射以及感生放射性气体的排放。

5.2.3.1 瞬发辐射造成的辐射剂量

瞬发辐射中加速器辐射源项相对其他非密封放射性物质工作场所较大，主要考虑加速器运行期间瞬发辐射造成的辐射剂量。

公众所受瞬时辐射照射剂量由下式计算

$$H = D \times t \times T \times 1 \quad (\text{公式 5-4})$$

H 为公众的年受照剂量， $\mu\text{Sv/a}$ ；

D 为公众所在区域剂量率， $\mu\text{Sv/h}$ ；

t 为公众年受照时间， h/a ；

T 为居留因子。

由项目总平面布局图可知，加速器装置运行过程中，公众可能会从其附近的道路经过。根据表 5-4 中的计算结果，在功率源厅周围，关注点 47（功率源厅西南侧楼梯厅出入口）处剂量率最高，为 $0.1\mu\text{Sv/h}$ 。加速器隧道内加速器年运行时间最多不超过 4800h，公众主要为进入该场地的后勤服务人员，居留因子取 1/20，由此可计算得出公众所受瞬时辐射外照射剂量，列于表 5-17。

表 5-17 加速器系统周围公众所受瞬时辐射外照射剂量

瞬时剂量率， $\mu\text{Sv/h}$	居留因子	年受照时间，h	年受照剂量， mSv/a
1.00E-01	1/20	4800	2.40E-02

5.2.3.2 气载流出物造成的辐射剂量

5.2.3.2.1 源项

本项目主要考虑排气塔处气载流出物对公众造成的辐射影响，其中排气塔处放射性废气源自加速器隧道、靶站、分离热室、靶向药物实验室以及辐射管理中心，其中主要考虑分离热室以及加速器隧道处气载流出物的影响。在分析气载流出物对周围公众影响时，综合考虑核素排放率和核素有效剂量转换因子的基础上，关键气载流出物源项详见表 5-18。

表 5-18 气载流出物源项

序号	核素	单次释放量, Bq/次	排放量, Bq/次	排放率, Bq/s
1	Xe-133	4.86E+10	4.86E+10	1.69E+06
2	I-131	4.53E+09	4.53E+07	1.57E+03
3	Xe-131m	3.74E+09	3.74E+09	1.30E+05
4	Xe-133m	1.56E+09	1.56E+09	5.41E+04
5	Po-210	1.44E+06	1.44E+03	5.00E-02
6	I-126	1.26E+08	1.26E+06	4.38E+01
7	Br-82	7.80E+07	7.80E+04	2.71E+00
8	Cs-136	3.47E+07	3.47E+04	1.21E+00
9	Pa-233	1.85E+07	1.85E+04	6.44E-01
10	Ag-111	1.19E+07	1.19E+04	4.14E-01
11	Th-227	4.66E+06	4.66E+03	1.62E-01
12	Ra-223	3.51E+06	3.51E+03	1.22E-01
13	Cs-132	3.10E+06	3.10E+03	1.08E-01
14	Cs-131	1.89E+06	1.89E+03	6.57E-02
15	Ac-225	8.57E+05	8.57E+02	2.97E-02
16	Ra-224	7.35E+05	7.35E+02	2.55E-02
17	Th-228	5.71E+05	5.71E+02	1.98E-02
18	Th-231	1.06E+05	1.06E+02	3.67E-03
19	U-230	2.36E+04	2.36E+01	8.18E-04
20	Ac-227	3.66E+03	3.66E+00	1.27E-04
备注:年释放量指核素在操作过程中进入气相的量, 排放量指气相中核素经过滤后释放至外环境大气中量, 核素的操作均在密闭箱室内进行, 根据项目通风系统的设计, 惰性气体不考虑过滤效率, I 系核素的净化效率按照 99%考虑, 其他核素过滤效率按低于 99.9%考虑。				

表 5-19 加速器隧道气载流出物源项

核素	年排放量, Bq	排放率, Bq/s
C-11	9.35E+09	5.41E+02
N-13	4.08E+10	2.36E+03
O-15	1.01E+10	5.84E+02
Ar-41	2.92E+10	1.69E+03
备注:不考虑过滤效率		

5.2.3.2.2 照射途径

本次评价范围内主要有道路、小区、企业公司及公园等，无农业种植基地，因此其对公众的照射途径主要是：空气浸没外照射、地表沉积物外照射、吸入内照射。

5.2.3.2.3 评价方法

本评价将采用 IAEA NO.19 号报告推荐的筛选模式进行评价。评价指标为年最大个人有效剂量。

(1) 大气弥散模式

①对于距离小于 50m 范围的区域；

$$H \leq 2.5H_B \text{ and } x \leq 2.5\sqrt{A_B} \quad (\text{公式 5-5})$$

$$C_{a,i} = \frac{P_p Q_i}{\pi u_a H_b K} \quad (\text{公式 5-6})$$

式中：

$C_{a,i}$ —为下风向 x (m) 距离处的核素 i 的地面空气浓度, Bq/m³;

P_p —一年中风吹向接收点所在扇区方位 p 的时间份额, 取 0.25;

Q_i —为放射性同位素 i 的排放率, Bq/s;

U_a —为排放口处的平均风速，取当地平均风速 1.9m/s；

H_b —临近最高建筑物高度，14.1m；

K —经验常数，取值为 1m。

②对于距离 50m~500 范围的区域，

$$H \leq 2.5H_B \text{ and } x > 2.5\sqrt{A_B} \quad (\text{公式 5-7})$$

$$C_{a,i} = \frac{P_p B Q_i}{u_a} \quad (\text{公式 5-8})$$

式中：

$C_{a,i}$ —为下风向 x (m) 距离处的核素 i 的地面空气浓度，Bq/m³；

B —在下风距离 x 处的高斯扩散因子，1/m²，参考 IAEA19 号报告 P22，表 2；

Q_i —为放射性同位素 i 的排放率，Bq/s；

U_a —为排放口处的平均风速，取当地平均风速 1.9m/s；

(2) 空气浸没外照射

空气浸没外照射剂量由下式计算：

$$H_A = t \cdot S_f \cdot C_{a,i} \cdot G_A \quad (\text{公式 5-9})$$

式中：

H_A —为空气浸没照射所致总受照剂量，Sv；

t —为总受照时间，s/a；

S_F —为建筑物屏蔽因子，对个人取 0.7；

$C_{a,i}$ —下风向 x (m) 距离处的核素 i 的地面空气浓度， Bq/m^3 ；

G_A —为各放射性同位素的空气浸没外照射剂量转换因子，取值来自 IAEA NO.19，（见表 5-20）；

（3）地面沉积外照射

地面沉积外照射计算公式如下：

$$H_{b,i} = 3600 \cdot G_{g,i} \cdot K_{b,i} \cdot g_{b,i} \cdot b \quad (\text{公式 5-10})$$

$$G_{g,i} = (V_d + V_w) \cdot C_{a,i} \quad (\text{公式 5-11})$$

$$K_{b,i} = \frac{1 - \exp[-(\lambda_i + \lambda_w)t_{b,i}]}{\lambda_i + \lambda_w} \quad (\text{公式 5-12})$$

式中：

$H_{b,i}$ —为沉积在地面上的放射性同位素 i 产生的外照射有效剂量，Sv；

$G_{g,i}$ —为核素 i 在地面上的年均沉积率， $Bq/(m^2 \cdot s)$ ；

$g_{b,i}$ —为放射性同位素 i 的地面辐射产生的外照射有效剂量转换因子， $(Sv/a)/(Bq/m^2)$ ，（见表 5-20）；

b —为考虑地面粗糙度和渗透到深层土壤的校正因子，取值 1；

V_d —为干沉降速度，m/s；

V_w —为湿沉降速度，m/s；

$C_{a,i}$ —为地面空气浓度，Bq/m³；

λ_i —为放射性同位素 i 的衰变常数，1/h；

$\lambda_{w,i}$ —为放射性同位素 i 在陆地环境中的去除常数，1/h；根据 IAEA NO.19 报告 P64 表 8， λ_w 取值为 5.00E-02d⁻¹，即 2.08E-03h⁻¹。

$t_{b,i}$ —为放射性同位素 i 在地面上的沉积时间，h，取 $t_b=30a$ 。

根据 IAEA NO.19 报告 P27，对气溶胶而言， (V_d+V_w) 可保守取值 1000m/d，即 1.16E-02m/s。

4) 吸入内照射

吸入放射性同位素 i 产生的内照射有效剂量由下式计算：

$$H_{hi} = T \cdot C_{a,i} \cdot u \cdot g_{hi} \tag{5-14}$$

式中：---核素 i 产生的吸入内照射有效剂量，Sv/a；

H_{hi} —为吸入内照射待积有效剂量，Sv；

T —为受照时间，8760h/a；

u —为公众个人正常情况下的呼吸率，m³/h，成人：1.2 m³/h；

$C_{a,i}$ —为评价点的核素的地面空气浓度，Bq/m³；

g_{hi} —为吸入放射性同位素 i 产生的待积有效剂量转换因子，Sv/Bq（见表 5-20）。

表 5-20 放射性核素有效剂量转换因子

序号	核素	G_A ，（Sv/s）/ （Bq/m ³ ）	g_{bi} ，（Sv/s）/ （Bq/m ² ）	g_{hi} ，（Sv/Bq）
----	----	--	---	-------------------

1	Xe-133	1.39E-15	0.00E+00	0.00E+00
2	I-131	1.82E-14	3.76E-16	7.40E-09
3	Xe-131m	3.70E-16	0.00E+00	0.00E+00
4	Xe-133m	1.27E-15	0.00E+00	0.00E+00
5	Po-210	4.71E-16	9.57E-18	6.10E-07
6	I-126	2.15E-14	4.47E-16	9.80E-09
7	Br-82	1.30E-13	2.55E-15	3.50E-10
8	Cs-136	1.06E-13	2.09E-15	1.20E-09
9	Pa-233	9.35E-15	1.95E-16	3.90E-09
10	Ag-111	1.29E-15	2.67E-17	4.00E-10
11	Th-227	4.88E-15	1.04E-16	6.70E-07
12	Ra-223	6.09E-15	1.28E-16	1.20E-07
13	Cs-132	3.34E-14	6.93E-16	2.30E-10
14	Cs-131	3.28E-16	2.39E-17	4.40E-11
15	Ac-225	7.21E-16	1.58E-17	8.80E-07
16	Ra-224	4.71E-16	9.57E-18	7.50E-08
17	Th-228	3.38E-16	8.32E-18	7.70E-09
18	Th-231	5.22E-16	1.85E-17	3.30E-10
19	U-230	9.20E-17	2.35E-18	3.80E-07
20	Ac-227	5.82E-18	1.57E-19	5.50E-04
21	C-11	4.89E-14	/	1.80E-11
22	N-13	4.90E-14	/	/
23	O-15	4.91E-14	/	/
24	Ar-41	6.50E-14	/	/

5.2.3.2.4 评价结果

气载流出物对本项目评价范围内不同距离公众造成的影响见表 5-21，本项目评价范围内最大受照剂量为 5.09E-02mSv/a，低于本项目公众人员的年剂量约束值（0.1 mSv/a）。

表 5-21 本项目评价范围内气载流出物所致周围公众辐射影响小计，mSv/a

x, m	空气浸没外照射	地表沉积外照射	吸入内照射	总计
50	1.21E-04	2.66E-02	2.41E-02	5.09E-02
100	8.59E-05	1.89E-02	1.71E-02	3.60E-02
150	8.59E-05	1.89E-02	1.71E-02	3.60E-02
200	4.30E-05	9.44E-03	8.53E-03	1.80E-02

250	4.30E-05	9.44E-03	8.53E-03	1.80E-02
300	4.30E-05	9.44E-03	8.53E-03	1.80E-02
350	4.30E-05	9.44E-03	8.53E-03	1.80E-02
400	1.72E-05	3.77E-03	3.41E-03	7.20E-03
450	1.72E-05	3.77E-03	3.41E-03	7.20E-03
500	1.72E-05	3.77E-03	3.41E-03	7.20E-03
1000	3.44E-06	7.55E-04	6.83E-04	1.44E-03
2000	8.59E-07	1.89E-04	1.71E-04	3.60E-04
3000	8.59E-07	1.89E-04	1.71E-04	3.60E-04

5.2.3.3 小结

公众受照剂量计算结果汇总见表 5-22，正常运行期间，公众可能受到的最大个人剂量为 6.47E-02mSv/a，低于本项目公众剂量约束值 0.1mSv/a。

表 5-22 公众受照剂量汇总

公众所在位置	瞬发辐射所致年受照剂量, mSv/a	气载流出物所致年受照剂量, mSv/a	年受照剂量总计, mSv/a
加速器隧道外地面	2.40E-02	4.07E-02	6.47E-02

5.3 事故工况下的环境影响分析

5.3.1 人员误入高辐射区

5.3.1.1 事故分析

该类事故是装置运行期间可能发生的最严重事故，人员在运行出束期间误入加速器隧道、靶站等控制区内，短时间的照射可使受到照射的人员产生严重放射损失，甚至导致人员伤亡。

本次评价的事故分析假设在加速器轰击 DUMP1 期间，人员误入左侧场所，时间经历按 5min 考虑，根据图 5-8 可知，则该事故情况下人员所处位置剂量率低于 10000 μ Sv/h 之间，该事故情况下人员单次受照剂量最大为 0.83mSv。

5.3.1.2 事故防范措施

由于各辐射工作场所屏蔽结构保持完好，因为该类事故对周围环境不会造成超过控制水平限值的辐射影响。

射线装置运行控制区设计有功能齐全，具有安全冗余的高安全等级的安全联锁系统，采用清场搜索、紧急停机、分区控制、警报装置等安全设备和措施，确保当某一区域有束流时，该区域的门无法打开，工作人员不能进入该区域；当某一区域有人时，束流也不能被传输到该区域，能够有效防止误入事故的发生。

为防止各项安全联锁硬件设施失效，建设单位在每次开机出束前，都需确认安全联锁设施的有效性，并随身佩戴有效的剂量报警仪。

可以采取的事故应急措施如下：

- (1) 一旦发生人员误入事故，就近按下控制区内急停开关或操作台上的急停开关，立即停止装置出束，误入人员迅速撤离；
- (2) 评估误入人员是否受到超剂量照射；
- (3) 查找事故原因，确认安全联锁系统是否发生故障并及时排除故障。

5.3.2 过滤器失效事故

5.3.2.1 事故分析

(1) 事故源项

假设分离系统区域处理靶件期间过滤器失效事故情况下排风系统过滤器完全失效，该情形下释放源项如下表所示。

表 5-23 过滤器失效事故下气载流出物释放源项

序号	核素	事故状态下释放量，Bq/次	排放率，Bq/s
1	Xe-133	4.86E+10	4.86E+10
2	I-131	4.53E+09	4.53E+09

3	Xe-131m	3.74E+09	3.74E+09
4	Xe-133m	1.56E+09	1.56E+09
5	Po-210	1.44E+06	1.44E+06
6	I-126	1.26E+08	1.26E+08
7	Br-82	7.80E+07	7.80E+07
8	Cs-136	3.47E+07	3.47E+07
9	Pa-233	1.85E+07	1.85E+07
10	Ag-111	1.19E+07	1.19E+07
11	Th-227	4.66E+06	4.66E+06
12	Ra-223	3.51E+06	3.51E+06
13	Cs-132	3.10E+06	3.10E+06
14	Cs-131	1.89E+06	1.89E+06
15	Ac-225	8.57E+05	8.57E+05
16	Ra-224	7.35E+05	7.35E+05
17	Th-228	5.71E+05	5.71E+05
18	Th-231	1.06E+05	1.06E+05
19	U-230	2.36E+04	2.36E+04
20	Ac-227	3.66E+03	3.66E+03
备注：过滤器失效事故期间，气载流出物过滤效率不计入考虑。			

(2) 事故时公众剂量估算模式

过滤器失效事故下所致周围公众的影响计算公式参照 5.2.3 小节评价方法进行估算，本项目评价范围内公众受照剂量估算结果见表 5-24，过滤器失效事故下本项目评价范围内周围公众最大受照剂量为 2.14mSv。

表 5-24 评价范围内事故情况下气载流出物所致周围公众剂量估算结果

x, m	空气浸没外照射	地表沉积外照射	吸入内照射	总计, mSv/次
50	9.71E-03	2.13E+00	5.25E-04	2.14E+00
100	8.60E-03	1.89E+00	4.65E-04	1.90E+00
200	4.30E-03	9.45E-01	2.33E-04	9.49E-01
300	4.30E-03	9.45E-01	2.33E-04	9.49E-01
400	1.72E-03	3.78E-01	9.31E-05	3.80E-01
500	1.72E-03	3.78E-01	9.31E-05	3.80E-01
1000	3.44E-04	7.56E-02	1.86E-05	7.59E-02
2000	8.60E-05	1.89E-02	4.65E-06	1.90E-02
3000	8.60E-05	1.89E-02	4.65E-06	1.90E-02

5.3.2.2 事故防范措施

过滤器失效事故防范及应对措施如下：

（1）本项目箱室排风机及其机房侧过滤器均为一用一备，风机故障时自动切换，切换时间保守估计 1 分钟内完成，防止放射性废气未经过滤外排，同时避免放射性废气聚集在箱室内不能排出；工作过滤器达到滤芯更换条件时，人工操作滤器进出口处风阀实现切换至备用过滤器上。新装滤芯后，可参照《核空气净化系统的现场检验》（EJ/T 791-2014）的相关要求进行检漏试验。

（2）本项目放射性废气排风口处设置气载流出物在线监测系统，一旦出现过滤器失效事故，在线监测到异常数值将报警，接收到报警信号后工作人员立即停止生产，紧急将热室或手套箱密闭；

（3）此外建设单位过滤器装置前后端均设置压力计，用于监测过滤装置的过滤效率，定期更换过滤器，保证其有效性。

（4）辐射工作人员需加强专业知识学习，加强辐射安全与防护培训，严格遵守操作规程和规章制度。管理人员应强化管理，落实安全责任制，经常督促检查。

（5）制定《辐射安全和防护设施维护维修制度》和《辐射工作场所和环境辐射水平监测方案》，定期开展设备的维护维修，当过滤器失效时将显示故障提示进行检修。

（6）根据该事故制定对应的辐射事故应急预案响应措施和响应程序，定期开展应急演练。

5.3.3 物料掉落

该类事故为放射性物料在转运过程中，由于人员操作不慎，物料掉出转运容器。

可采取防范及应对措施如下：

（1）放射性物料放置在专用容器中，转运过程中专人负责，减少物料掉落发生概率；

（2）当发生物料掉落出转运容器的情况时，若包装容器不破损，则不会产生污染。若包装容器破损，剂量员利用表面污染仪对可能沾污的区域进行检测，并进行去污处理，多次擦拭去污后，直至利用表面污染仪检测达到环境本底水平。

5.3.4 溶液洒漏

该类事故大部分工艺过程操作对象为溶液，操作过程中由于操作不慎，导致溶液洒漏造成表面沾污或人员沾污。

本项目工艺过程大多在热室或手套箱中由专业人员操作，其发生溶液撒漏的可能性很小，一旦由于意外导致溶液洒漏时，采用去污材料进行擦拭，对可能沾污的区域多次擦拭后进行表面污染测量，直至达到环境本底水平。人员沾污将在去污间进行干法去污。

5.3.5 人员受照剂量超出年剂量限值

本项目运行期间，由于辐射安全系统故障或工作人员操作不当等原因，造成人员误入控制区内部，导致人员受照剂量超过国家规定的年剂量限值。根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002），职业照射连续 5 年的年平均有效剂量不超出 20mSv，且任何一年中的有效剂量不超出 50mSv，公众关键人群组成员年有效剂量不超出 1mSv，特殊情况下，如果 5 个连续年的年平均剂量不超过 1mSv，则某一单一年份的有效剂量可提高到 5mSv。

发生该类事故时，由应急工作小组组织相关人员对年剂量限值的辐射工作人员的工作情况以及周围环境可能超出剂量率控制水平的区域进行调查，查找人员受到超年剂量限值照射的原因，尽快提出解决方案。

可以采取的事故应急措施如下：

（1）定期测试和维护辐射安全系统，确保其正常运行。同时加强对工作人员的辐射安全宣传教育，确保各项操作规程得到有效的贯彻和落实；

（2）开机出束前，撤离控制区时应清点人数，必须按照既定的清场搜索路线和程序对各区域进行清场。出束期间一旦发现有人员滞留在控制区内，就近按下急停按钮。工作人员进入控制区内部工作时应随身佩戴有效的剂量报警仪，以便随时了解控制区内的辐射水平并在辐射水平超出阈值时发出报警信号；

（3）辐射工作人员需加强专业知识学习，加强辐射安全与防护培训，严格遵守操作规程和规章制度。管理人员应强化管理，落实安全责任制，经常督促检查；

（4）做好设备稳定性和状态检测，使装置始终保持在最佳状态下工作。

5.3.6 冷却水泄漏事故

本项目可能活化的冷却水主要加速器运行过程中发生冷却水管故障或破裂事故，导致冷却水泄露。

加速器运行维护人员定期对冷却水管道进行维护检查，减少事故发生概率；另外，若发生该事故时，应立即停止出束，对冷却水系统进行检查、维修；若发生破裂，立即维修或更换。另外，加速器隧道内设有集水坑，用于暂存排放出来的活化冷却水，经检测满足要求后外排，其造成的环境影响很小综上所述，建设针对项目期间可能发生的事故采取了一系列辐射安全防护措施，这些措施具有可行性和安全冗余性，本项目事故工况下的影响较小。

5.3.7 小结

综上所述，建设单位针对项目运行可能发生的事故、放射性污染事故与人员、场所去污等，制定较完善的事故防范与应急措施，以降低事故发生概率，并使在发生事故时，能够对事故现场进行妥善的处理和处置，及时控制事故对环境的影响，将事故影响降到最低。

6 辐射安全管理

6.1 辐射安全与环境保护管理机构

近代物理所安全工作委员会是近代物理所辐射安全工作的管理机构，研究所所长任委员会主任，党委书记、副所长、纪委书记任委员会副主任，委员会成员由各中心主任、副主任（主持工作）、各职能部门处长、副处长（主持工作）及其他相关部门负责人担任。

技术安全办公室是近代物理所安全工作委员会在全所辐射安全管理方面的执行部门。

各室组安全员根据本规定开展相关工作。

研究所安全工作委员会负责全所安全工作的组织领导和业务指导，研究安全管理方面的重要事项，负责处理突发应急事件。

（1）贯彻落实国家和地方政府辐射安全相关的法律法规及标准，负责全所辐射安全工作的统一监督管理及决策；

（2）制订全所辐射安全管理工作基本方针及工作计划；

（3）建立健全所辐射安全管理规定及辐射事故应急预案等相关辐射安全管理制度；

（4）其它辐射安全相关重大事项。

6.2 辐射工作人员管理

根据国家核安全局文件《关于规范核技术利用领域辐射安全关键岗位从业人员管理的通知》（国核安发[2015]40号）的规定，按“生产放射性同位素(放射性药物除外)的单位，辐射安全关键岗位四个，分别为辐射防护负责人、辐射防护专职人员、质量保证专职人员和辐射环境监测与评价专职人员，每岗最少在岗人数1名”本项目拟配备4名注册核安全工程师，分别为辐射防护负责人、辐射防护专职人员、质量保证专职人员和辐射环境监测与评价专职人员。”执行。近代物

理所目前有 3 名注册核安全工程师，另外有 6 名工作人员取得了核安全工程师资格证书，将于本项目取得辐射安全许可前完成注册，确保满足注核人数要求。

近物所现有 785 人辐射工作人员，均已取得生态环境部门认可的辐射安全与防护培训合格证书。

近物所制定了辐射工作人员培训和考核计划，单位承诺新上岗及调入人员，在上岗前参加生态环境部门认可的电离辐射安全与防护考核，考核合格者方可从事辐射工作，以后每五年接受一次再考核，现有辐射工作人员在现有培训合格证书过期前参与考核，不再考核的人员或者考核不合格的人员，不得从事辐射工作。

单位定期安排辐射工作人员进行职业健康体检，并建立健康体检档案。

6.3 辐射安全管理制度

中国科学院近代物理研究所制定了《中国科学院近代物理研究所辐射安全管理规定》、《中科院近代物理研究所辐射事故应急预案》、《近代物理研究所放射化学实验室安全管理规定》、《近代物理研究所放射源库安全管理规定》《近代物理研究所个人剂量监测管理规定》、《近代物理研究所环境辐射监测计划》、《加速器管理岗位职责》、《加速器销售、安装调试、维修维护辐射安全管理办法》、《加速器维护、检修规程》等制度。

针对本项目，近代物理所拟制定《放射性同位素生产工艺规程》、《放射性三废管理规定》，并在原有制度中补充与本项目相关的内容，基本能够满足《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》等法规要求和近代物理所核技术利用项目的管理需求。

6.4 辐射监测

本项目辐射监测总体包括工作场所监测、个人剂量监测和环境监测。工作场所监测采用固定式在线区域辐射监测和巡测相结合的方式；环境监测主要以巡测

的方式进行；个人剂量监测采取累积式个人剂量监测计监测为主，个人剂量报警仪为辅的方式进行。

6.4.1 工作场所监测

本项目工作场所监测包括自行监测和委托监测。其中，自行监测采用固定式在线区域辐射监测和巡测相结合的方式，具体监测计划列于表 6-1。

6.4.2 环境监测

本项目环境监测包括自行监测和委托监测。其中，自行监测采用固定式在线区域辐射监测和巡测相结合的方式，具体环境监测计划列于表 6-2。

6.4.3 个人监测

本项目辐射工作人员个人剂量监测采取累积式个人剂量监测计监测为主，个人剂量报警仪为辅的方式进行。其中加速器系统工作人员个人剂量计和个人剂量报警仪具有监测 X- γ 和中子的功能。

本项目个人剂量监测包括外照射剂量监测和内照射剂量监测。

（1）外照射剂量监测

甘肃省同位素实验室从事辐射工作人员均配备个人剂量计，工作人员工作时严格按照要求佩戴个人剂量计，每季度委托有资质的单位负责测定一次。

（2）内照射剂量监测

对从事非密封放射性物质工作的辐射工作人员进行内照射剂量监测，每半年委托有资质单位监测一次。

建设单位对本项目辐射工作人员建立个人健康档案。

表 6-1 本项目辐射工作场所监测计划表

监测模式	工作场所	监测对象	点位布设	监测项目	监测频次	监测方式
自行监测	加速器隧道	外照射	根据第四章固定监测布点点位，见	γ 辐射空气吸收剂量率、中子剂量当量率	实时	固定式仪表监测
			隧道控制区四周屏蔽墙外 30cm 处、顶板上方、迷道口、防护门外、控制室以及其他人员全居留场所		2 次/年	便携式仪表监测
	靶站	外照射	根据第四章固定监测布点点位，见、	γ 辐射空气吸收剂量率、中子剂量当量率	实时	固定式仪表监测
			靶面、DUMP 打靶间四周屏蔽墙外 30cm 处、顶板上方、防护门外以及其他人员全居留场所		1 次/季	便携式仪表监测
		表面污染	工作场所（操作位、工作台、墙壁、地面等）、工作人员防护用品（防护服、手套、工作鞋等）、工作场所周围环境	α 、 β 表面污染	每天工作结束后	便携式仪表监测
	分离系统	外照射	根据第四章固定监测布点点位，见、	γ 辐射空气吸收剂量率	实时	固定式仪表监测
			操作位、四周屏蔽墙外 30cm、防护门、楼上等场所		1 次/季	便携式仪表监测
		表面污染	工作场所（操作位、工作台、墙壁、地面等）、工作人员防护用品（防护服、手套、工作鞋等）、工作场所周围环境	便携式仪表监测	每天工作结束后	便携式仪表监测
	超重乙级实验室、辐射管理中心	外照射	根据第四章固定监测布点点位，见、	γ 辐射空气吸收剂量率	实时	固定式仪表监测
			操作位、四周屏蔽墙外 30cm、防护门、楼上等场所		1 次/季	便携式仪表监测
		表面污染	工作场所（操作位、工作台、墙壁、地面等）、工作人员防护用品（防护服、手套、工作鞋等）、工作场所周围环境	α 、 β 表面污染	每天工作结束后	便携式仪表监测
	靶向药物实验室	外照射	操作位、四周屏蔽墙外 30cm、防护门、楼上等场所	γ 辐射空气吸收剂量率	1 次/季	便携式仪表监测
		表面污染	工作场所（操作位、工作台、墙壁、地面等）、工作人员防护用品（防护服、手套、工作鞋等）、工作场所周	α 、 β 表面污染	每天工作结束后	便携式仪表监测

			围环境			
	辐射管理中心	气溶胶	排风塔气体	碘及关键分离关键核素等	连续监测	固定仪表监测
委托监测	加速器隧道、靶站	外照射	同自行监测点位	γ 辐射空气吸收剂量率、中子剂量当量率	1 次/年	便携式仪表监测
	靶站、热室、超重乙级实验室、靶向药物实验室、辐射管理中心	外照射	同自行监测点位	γ 辐射空气吸收剂量率	1 次/年	便携式仪表监测
		表面污染	同自行监测点位	α 、 β 表面污染	1 次/年	便携式仪表监测
		放射性废水	辐射管理中心、靶向药物实验室	水中总 α 、总 β	排放前	取样检测
		放射性固废	辐射管理中心	γ 辐射空气吸收剂量率和 α 、 β 表面污染	送贮前	便携式仪表监测

表 6-2 本项目环境监测计划表

监测模式	监测对象	点位布设	监测项目	监测频次	监测方式
自行监测	外照射	环境监测站，共 4 个点，见	γ 辐射空气吸收剂量率、中子剂量当量率	连续	固定式仪表监测
		加速器主体建筑墙外 30cm 处开展巡测，加速器主体建筑墙外、顶板上方及厂界相应的关注点开展定点监测	γ 辐射空气吸收剂量率、中子剂量当量率	4 次/年	便携式仪表监测
		以非密封放射性物质工作场所为中心，半径 100m 内布点，测量点覆盖控制区和监督区的每个区域、放射性废物暂存库及周围环境敏感点	γ 辐射空气吸收剂量率	甲级场所 1 次/季 乙级场所 1 次/年	
	气溶胶	环境监测站，共 4 个点，见	特征核素	在线连续监测	固定式仪表监测
	放射性固体废物	放射性固体废物外表面、贮存容器及贮存室外面	γ 辐射空气吸收剂量率和 α 、 β 表面污染	1 次/年	便携式仪表监测
委托监测	外照射	同自行监测，含辐射工作场所及周围环境敏感点	γ 辐射空气吸收剂量率和中子剂量率	1 次/年	便携式仪表监测
	气溶胶	园区排风塔下风向及上风向	总 α 、总 β 、特征核素	1 次/年	取样检测
	气载流出物	废气排风口	总 α 、总 β 、特征核素	1 次/年	取样检测
	液态流出物	废水排放处	总 α 、总 β 、特征核素	每次排放前	取样检测
	地表水	最近的地表水体	总 α 、总 β 、特征核素	1 次/年	取样检测
	土壤	园区边界东南西北四个方位	总 α 、总 β 、特征核素	1 次/年	取样检测
	放射性固体废物	放射性固体废物外表面、贮存容器及贮存室外面	γ 辐射空气吸收剂量率和 α 、 β 表面污染	1 次/年	便携式仪表监测

6.4.4 监测设备

本项目拟配备监测设备见表 6-3。辐射监测仪器应定期送有资质机构进行刻度检定。

表 6-3 本项目配备监测设备

设备名称	数量（台）
便携式 χ - γ 剂量率仪	2
便携式中子剂量率仪	1
便携式表面污染测量仪	1
全身污染测量仪	4
固定式监测仪器	69
固定式气溶胶监测仪	3
个人报警仪	60
低本底 $\alpha\beta$ 测量仪	1
低本底 γ 谱仪	1
低本底液闪谱仪系统	1
α 谱仪	1
氡采样器	1
碳 14 采样器	1
固定式碘监测仪	1
固定式惰性气体监测仪	1
移动式气溶胶监测仪	1
气溶胶采样器	4

6.5 辐射事故应急

根据相关的法律法规，建设单位已经制定了《中科院近代物理研究所辐射事故应急预案》，该预案的部分内容也同样适用于甘肃省同位素实验室，另外，结合本项目特点，建设单位将建立本项目的《辐射事故应急预案》，其主要内容将包括：

（1）总则

为了加强对同位素实验室射线装置的安全防护和监督管理，促进装置的安全应用，有效预防并及时控制和消除潜在的辐射事故，规范突发辐射事故的应急处置工作，提高应对辐射事故的能力，保障人员健康，维护环境安全，按照

《中华人民共和国放射性污染防治法》、《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》等相关法律法规的要求，结合本单位设施的特点，制定本预案。

本预案适用于本单位所辖范围内射线装置、放化及分离热室运行时发生的辐射事故。

（2）辐射事故分级

根据辐射事故的性质、严重程度、可控性和影响范围等因素，从重到轻将辐射事故分为特别重大辐射事故、重大辐射事故、较大辐射事故和一般辐射事故四个等级，事故等级下的事故情形如下表所示：

事故分级	事故情形
特别重大辐射事故（Ⅰ级）	1) Ⅰ类、Ⅱ类放射源丢失、被盗、失控，造成大范围严重辐射污染后果，或者放射性同位素和射线装置失控导致3人以上（含3人）急性死亡； 2) 放射性物质泄漏，造成大范围严重环境辐射污染事故。
重大辐射事故（Ⅱ级）	1) Ⅰ类、Ⅱ类放射源丢失、被盗、失控，或者放射性同位素和射线装置失控导致2人以下（含2人）急性死亡或者10人以上（含10人）急性重度放射病、局部器官残疾； 1)) Ⅰ类、Ⅱ类放射源丢失、被盗、失控，或者放射性同位素和射线装置失控导致2人以下（含2人）急性死亡或者10人以上（含10人）急性重度放射病、局部器官残疾； 2) 放射性物质泄漏，造成较大范围环境辐射污染事故。
较大辐射事故（Ⅲ级）	1) Ⅲ类放射源丢失、被盗、失控，或者放射性同位素和射线装置失控导致9人以下（含9人）急性重度放射病、局部器官残疾； 2) 放射性物质泄漏，造成小范围环境辐射污染事故。
一般辐射事故（Ⅳ级）	1) Ⅳ类、Ⅴ类放射源丢失、被盗、失控； 2) 放射性同位素和射线装置失控导致人员受到超过年剂量限值的照射； 3) 放射性物质泄漏，造成设施内部辐射污染。

（3）应急组织体系与职责分工

近代物理所辐射事故应急领导小组为辐射应急组织的领导机构，负责全所辐射事故应急预案制定、应急物资准备、应急能力保障、应急预案的启动和终止、应急状态报告等工作。发生突发辐射事故时，应急指挥部负责人及专业小

组成员要立即赶赴事故现场，在应急总指挥的统一领导下，各专业小组各司其职，迅速有效开展应急处置行动。

应急领导小组：日常应急管理，应急能力保障；事故状态下启动应急预案、转为应急指挥部。

应急指挥部：向公安、生态环境、卫生等部门上报辐射事故，任命应急总指挥，下达应急预案终止命令。

技术安全办公室：向应急指挥部报告事故。

应急总指挥：指挥应急响应小组进行应急处置，向应急指挥部报告事故处置情况。

安全保卫组：负责保护事故现场、维护现场秩序。

人员救助组：负责受照人员的紧急医疗处理、医学检查。 后勤保障组：负责物资、所内通信及电力畅通等后勤保障工作。

应急监测与防护组：负责事故现场剂量、表面污染监测以及后续对辐射影响的评价。

放射性去污组：负责出现放射性污染的事故现场的去污处理措施。

善后处理组：负责接待、安抚家属，善后补偿、伤残评审。舆情工作组：负责配合政府有关部门做好舆情相关工作。

（4）辐射事故应急响应措施

辐射事故应急响应流程如下图所示：



当发生辐射事故时，有关单位和现场人员应立即通过电话等各种方式报告安全与防护部门值班人员，值班人员记录相关情况（事故发生地点、时间、事故影响等）后，立即报告应急响应指挥部值班领导；

应急指挥部值班领导初步判断后立即启动辐射应急预案，通知应急响应指挥部其他成员和专业组启动，并根据要求向地方生态环境、公安等部门汇报，同时汇报上级主管部门，必要时请求外部支援；

各专业组到现场后根据事故现场实际情况提出事故处置方案，并按照制定的应急响应程序实施现场处置工作，并随时向应急响应指挥部汇报，发生较大及以上辐射事故时，应急响应指挥部相关成员到现场指挥；

事故处置期间的事故汇报工作按照地方生态环境部门辐射应急预案的要求严格实施，事故处置完成后响应终止；

善后处置组人员负责收集、整理所有应急日志、记录和相关书面信息，在应急响应指挥部的指导下编制应急总结报告，按规定提交相关部门；并提出相应的整改措施，并根据应急响应的实践修定应急预案。

（5）应急响应能力的维持

①培训

本预案中规定的应急响应指挥部和专业组人员均需要接受全面的初始培训，了解国家和地方对辐射应急准备和响应的要求和相关基本知识、了解各应急岗位的基本职责，掌握本岗位的技能要求，培训方式包括参加国家和地方组织的辐射事故应急培训和本单位组织的相关培训。

②演习

辐射事故应急演练分为专项演练和综合演习，专项演练可由应急指挥部和各专业小组分别开展，一般一年 1 次；综合演习为应急指挥部和各专业组人员共同参加，一般二年 1 次。培训和演习应有计划、方案和程序，以及总结和报告。

(6) 附则

应急预案应根据国家和地方法律、法规、标准和规章的要求，以及培训、演习和实际应急响应的实践及时进行修订。

6.6 环保投资一览表

本项目拟采取的环境保护措施及环保投资一览表见表 6-4。

表 6-4 本项目拟采取的环境保护措施及环保投资一览表

项目	环境保护（辐射防护）措施	预计投资（万元）
辐射安全管理	辐射安全管理机构：成立辐射安全管理领导小组	--
	辐射安全管理制度：制定操作规程，岗位职责，辐射防护和安全保卫制度，设备检修维护制度，人员培训计划，监测方案，辐射事故应急预案等	
人员培训	工作人员参加辐射防护与安全培训和考核	10
辐射安全联锁设备、辐射监测仪器和防护用品	辐射安全联锁设备、辐射监测仪器	6890
	个人剂量监测档案和职业病健康档案	
	工作服、口罩、手套等	
环境影响评价、验收监测和环境监理		100
工作场所辐射屏蔽工程		--
总计		8000

6.7 环保竣工验收

本项目建成后，近物所应按规定组织自主验收，编制验收监测报告书。本项目的竣工环保验收内容及要求列于表 6-5。

表 6-5 本项目竣工环保验收一览表

序号	验收内容	验收要求	
1	环保资料	本项目审批后的环境影响报告书、环评批复、有资质单位出具的验收监测报告等。	
2	辐射安全管理	建立辐射安全管理机构、确定相应的岗位职责、制定相应的规章制度和应急预案等。	
3	人员要求	1. 设置辐射安全关键岗位，配备注册核安全工程师至少 4 名； 2. 所有辐射工作人员参加辐射安全与防护考核，考核合格后上岗。	
4	辐射工作场所屏蔽和屏蔽体外剂量率水平及电场强度	1. 加速器隧道及靶站设置混凝土屏蔽层，控制区各墙体及防护门外 30cm 处、屋顶剂量率控制水平 $\leq 2.5\mu\text{Sv/h}$ ； 2. 靶站热室屏蔽箱式人员操作位外剂量率控制水平 $\leq 2.5\mu\text{Sv/h}$ ； 3. 靶向药物实验室及超重乙级实验室屏蔽箱式外人员操作位剂量率水平 $\leq 2.5\mu\text{Sv/h}$ ；	
5	辐射防护与安全措施	1. 辐射工作场所分区：将辐射工作场所按控制区、监督区分，并设置明显分区标识，设置电离辐射警告标志和中文警示说明； 2. 安全联锁系统：由 PLC、钥匙控制、出入控制、门机联锁、紧急开门、紧急停机、清场巡检、束流闸、声光警示装置、工作状态指示灯、通风延时开关、剂量联锁等部分组成，且所有安全设备均能正常投入使用； 3. 通风系统：加速器隧道、靶站、热室、靶向药物实验室、辐射管理中心、超重乙级实验室均根据工艺要求，设置通风系统。 4. 场所辐射监测系统：设置在线辐射监测系统，监测点位见 4.5 节。	
6	放射性三废处理设施	废气	1. 加速器运行产生的感生放射性废气由控制区排风系统送至辐射管理中心排风机房过滤后经排风塔外排。 2. 非密封放射性物质工作场所（超重乙级实验室及 T2 热室除外）产生的放射性废气，首先通过装置自带的过滤设备进行就地处理，然后由排风管道送至辐射管理中心排风机房过滤后经排风塔外排。 3. 超重乙级实验室产生少量的放射性废气，经高效过滤后在实验室屋顶经排气口外排。
		废水	1. 加速器隧道内设有集水坑，用于暂存排放出来的活化冷却水。如特殊情况需多次检修，多余的活化冷却水可以排放到辐射管理中心地下一层的废水收集池。活化冷却水经检测结果显示可解控后，可以用于场内回用或排放。若活化冷却水经衰变后不能达到解控要求，进行固化处理；

			2. 低放废液在各子项暂存后，通过管道输送至辐射中心低放废液罐中，定期监测，满足排放要求的条件下申请排放，若不满足排放要求则委托有资质单位进行固化处理处置； 3. 中放废液在各子项暂存后，通过管道输送至辐射中心中放废液罐中，定期委托有资质单位进行固化处理处置； 4. 靶向药物实验室放射性废液在实验室区域内废物储存室暂存，定期监测，经检测达标，经省管部门认可后可排入园区污水管网。
		固体废物	1. 加速器装置、靶站热室、超重乙级实验室的固体废物首先暂存在其内部的废物暂存区，定期监测后经过场内输送至辐射管理中心，定期交由有资质单位进行处理。 2. 靶向药物实验室产生的放射性固体废物在实验室区域内废物储存室暂存，一般放射性固体废物暂存定期监测，满足清洁解控水平，申请按一般固废处理，小动物尸体和垫料放射性固体废物暂存后定期监测，满足清洁解控水平，申请按医疗废物进行处理。
7	辐射监测	工作场所监测	包括自行监测和委托监测。其中，自行监测采用固定式在线区域辐射监测和巡测相结合的方式，具体监测计划列于表 6-1。
		环境监测	包括自行监测和委托监测。其中，自行监测采用固定式在线区域辐射监测和巡测相结合的方式。
		个人剂量监测	1. 本项目辐射工作人员个人剂量监测采取累积式个人剂量监测计监测为主，个人剂量报警仪为辅的方式进行。 2. 外照射剂量监测每季度委托有资质的单位负责测定一次。其中加速器系统工作人员个人剂量计和个人剂量报警仪具有监测X-γ和中子的功能。 3. 对非密封放射性物质辐射工作人员进行内照射剂量监测，每半年委托有资质单位监测一次。 4. 建设单位对本项目辐射工作人员建立个人健康档案。
		监测设备	便携式χ-γ剂量率仪：2 台 便携式中子剂量率仪：1 台 便携式表面污染测量仪：1 台 全身污染测量仪：4 台 固定式监测仪器：69 台 固定式气溶胶监测仪：3 台 个人报警仪：60 台 低本底$\alpha\beta$测量仪：1 台 低本底γ谱仪：1 台 低本底液闪谱仪系统：1 台 α谱仪：1 台 氡采样器：1 台

			碳 14 采样器：1 台 固定式碘监测仪：1 台 固定式惰性气体监测仪：1 台 移动式气溶胶监测仪：1 台 气溶胶采样器：4 台
--	--	--	--

7 利益-代价分析

7.1 利益分析

(1) 经济效益

目前世界上有 150 多个国家开展了核技术应用的研究。核技术应用在发达国家已形成庞大的产业链。美国核技术应用产业的年产值占国民经济总产值的比例约为 4%~5%，日本和欧洲相应所占比例为 2%~3%，全世界核技术产业规模超过万亿美元。国内核技术应用产业的年产值在 2010 年已达 1000 亿元，占当年 GDP 的 0.3%，到 2015 年相关产值已达 3000 亿元，占当年 GDP 的 0.4%。根据 MEDraysintell 测算，2017 年全球放射性同位素药物市场规模为 48 亿美元，增速为 7%。其中美国占 38%，欧洲占 24%，中国占约 10%（约 35 亿元人民币，出厂价格）。预计到 2030 年，放射性治疗药物占比将达到 60%，市场规模将达到 240 亿美元。与美国、欧洲、日本等发达国家和地区相比，中国核技术应用产业仍有非常大的发展空间，未来预计可达万亿级别的市场。

本项目建成后，将实现我国医用同位素及其他高价值医用同位素放射性同位素的生产，将积极带动国内核技术应用产业的发展。

(2) 社会效益

中国科学院近代物理研究所自成立以来，面向重离子科学国际前沿、面向国家重大战略需求、面向国民经济发展，开展跨学科、跨领域协同创新，取得了一批重大原创性基础研究成果，催生了一批具有变革性、能带动国家产业升级和保障国家安全的高新技术。本项目是中国科学院近代物理研究所着力打造的具有国际领先地位的同位素实验室，随着多试验装置的建成，同位素产生、高效分离等关键核心技术的不断深入研究，甘肃将成为世界知名超重元素研究基地、世界知名同位素核心技术、新产品及其装备研发基地。此外，随着放射性同位素靶向治疗肿瘤药物及其产生试验装置的研发，甘肃将成为肿瘤治疗用放射性同位素靶向药物国际知名研发基地，并通过该实验室的建设和运行，在甘肃省形成同位素相关人才绿洲。

此外，本项目的建成会突破以 α 同位素生产技术为代表的“卡脖子”问题，填补国内空白，实现我国医用 α 同位素及其他高价值医用同位素的自主生产，促进我国放射性同位素应用技术创新和技术进步，带动我国抗癌创新靶向核药的量产，带动区域抗癌创新药的研发，是“彻底解决国内医用放射性同位素供应安全问题，推动我国核医学应用进一步普及与发展，全面提升人民医疗健康水平”的重要手段。

本项目建成后还可实现示范效应，在保障同位素生产的同时，为我国科研事业提供重要的科研支撑。

（3）实践国家战略和规划

我国恶性肿瘤发病人数庞大、治愈率低；核医药医疗技术水平和普及率又大大落后于发达国家，成为我国的民生之痛。医用放射性同位素作为癌症诊疗用放射性药物最重要的原材料，中国几乎全部依赖进口，用于生产医用放射性同位素的加速器也几乎全部依赖进口。目前我国医用放射性同位素仅能利用反应堆生产少量 ^{131}I 、 ^{89}Sr 满足部分市场需求，其他医用放射性同位素主要依赖进口。

2021年6月24日，国家原子能机构联合科技部等八部门正式发布《医用同位素中长期发展规划（2021-2035年）》。规划的总目标为“建立稳定自主的医用同位素供应保障体系，满足人民日益增长的健康需要，为建成与社会主义现代化国家相适应的健康国家提供坚强保障”。规划中的重点任务包括“（一）加大技术研发，促进创新发展”，其子任务包括“应用前景广阔医用同位素制备技术研究”。

本项目的建设是对《医用同位素中长期发展规划（2021-2035年）》的任务的积极响应。

7.2 代价分析

（1）经济代价

本项目的经济代价主要包括建筑场地成本、设备投资成本和环保投资等三个方面的成本。

（2）环境代价

本项目的环境代价主要为：少量的辐射穿过屏蔽层进入周围环境，工作人员和周围公众受到少量的辐射照射；少量的放射性物质和有害气体进入大气环境和水环境；每年将有少量的放射性固体废物产生等。根据前面章节的分析，给环境带来的这些影响均低于国家标准中规定的限值。

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

8 结论和承诺

8.1 结论

本项目在运行过程中严格遵守《中华人民共和国环境保护法》、生态环境部、地方生态环境部门颁布的有关法规标准，主要的环境影响评价结论如下。

8.1.1 项目工程概况

甘肃省同位素实验室（一期）变更项目位于甘肃省兰州市兰州新区中国科学院近代物理研究所大科学装置科技创新创业园东北角，地块基本呈矩形，总建筑面积约 28181m²，主要包括基于质子加速器的同位素应用研发、超重乙级实验室、靶向药物实验室的建设，以及辐射管理中心、低温厅、冷却水站、排风塔等相关设施的建设。项目总投资约 54000 万元，其中环保投资约 8000 万元，占总投资的 14.8%。

8.1.2 实践的正当性

本项目建成后将为积极开展同位素分离、收集及应用，加快推进超重稳定同位素性质和应用的研究，以及放射性药物研发具有重要支撑作用，具有重要的社会意义；本项目设计并建造了完善的辐射防护与安全设施以尽量降低对工作人员和公众的辐射影响。经分析评价，本项目对工作人员和公众的辐射影响满足国家相关标准要求。本项目带来的利益是大于可能引起的辐射危害的。因此，本项目核技术应用实践活动是正当的。

8.1.3 辐射安全与防护

（1）辐射工作场所分区：按照控制区和监督区对辐射工作场所进行划分，采取安全控制措施严防人员进入控制区内。

（2）辐射安全联锁系统：设计了安全、冗余的辐射安全联锁系统，由门禁控制、清场搜索、紧急停机、警铃警灯控等组成，触发任一条件，装置都立即停

止出束。确保当控制区内有束流时，人员无法进入。或当控制区内有人时，束流无法传输进入。

(3) 辐射屏蔽：根据我国法规标准要求确定各辐射工作场所屏蔽体外剂量率控制水平，射线装置区域采用混凝土作为主屏蔽体，非密封放射性物质工作场所工作箱室采用屏蔽材料设计，经计算各辐射工作场所屏蔽体外瞬时剂量率均低于其设计的剂量率控制水平。

(4) 放射性三废处理：放射性废物经辐射管理中心处理后外运，满足相关要求。

8.1.4 环境影响分析

通过理论预测，本项目正常运行期间所致工作人员和公众均低于本次评价确定的 5mSv/a 的职业照射剂量约束值和 0.1mSv/a 的公众照射剂量约束值。

8.1.5 辐射安全管理

近物所拟建立本项目的辐射安全管理机构，拟制定的辐射安全管理规程涵盖了人员岗位职责、辐射防护、设备检修、废物管理、人员培训、辐射监测等方面内容；已制定的《辐射事故应急预案》经完善后能够满足相关法规要求；本项目相关辐射工作人员均已参加环保部门组织的辐射安全与防护培训并取得合格证书，目前合格证均在有效期内；已制定的辐射环境监测方案、辐射工作场所监测方案能够满足本项目运行的要求。

综上所述，本项目在落实本报告书中的各项污染防治措施和管理措施后，将具备其所从事的辐射活动的技术能力和辐射安全防护能力，本项目的建设对环境和影响符合环境保护的要求，故从环境保护的角度考虑，本项目的建设是可行的。

8.2 承诺与建议

8.2.1 承诺

(1) 项目单位在运行前补充完善的现有的辐射安全管理制度和应急预案，并针对本项目的运行制定相应的操作规程、辐射防护措施、和设备检修维护等制度。

(2) 本项目投入试运行 3 个月后，建设单位应根据“关于发布《建设项目竣工环境保护验收暂行办法》的公告（国环规环评【2017】4 号）”及国家相关规定的要求及时组织该建设项目竣工环境保护验收，编制环境保护验收监测报告，并进行公示备案，接受生态环境部门的监督检查。

8.2.2 建议

(1) 落实环评中提出的管理措施和辐射防护措施要求，不断完善相应的辐射管理规章制度和事故应急预案，并保证各种规章制度的有效执行，并受生态环境部门的监督检查并及时整改检查中发现的问题。

(2) 每年至少进行一次辐射工作场所监测和环境监测，建立监测技术档案，监测数据定期上报生态环境部门备案。