

核技术利用项目

浙江大学紫金港校区西区生物物理科研
用房乙级非密封放射性实验室及电子加
速器机房项目
环境影响报告表
(报批稿)

浙江大学(盖章)

2014年 4月

核技术利用项目

浙江大学紫金港校区西区生物物理科研
用房乙级非密封放射性实验室及电子加
速器机房项目
环境影响报告表

法人代表（签名或签章）：林建华

通讯地址：杭州市西湖区余杭塘路 866 号

邮政编码：310058 联系人：梅祥院 叶庆富

电子邮箱：qfye@zju.edu.cn

联系电话：18658885311



项目名称: 浙江大学紫金港校区西区生物物理科研用房乙级非密封放射性实验室及电子加速器机房项目

评价单位 (盖公章): 上海核工程研究设计院

法人代表 (签章): 郑明光

证书编号: 国环评证甲字第 1815 号

项目负责人: 王茹静



评价人员情况				
姓名	职称	上岗证书号	职责	签名
王茹静	工程师	A18150111300	主持编制	王茹静
傅小城	工程师	A18150036	编制	傅小城
黄晓冬	工程师	A18150016	审核	黄晓冬
杜风雷	高工	A18150021300	审定	杜风雷

经环境保护部环境影响评价工程师职业资格登记管理办公室审查，王茹静具备从事环境影响评价及相关业务的能力，准予登记。

职业资格证书编号： 0009481

登记证编号： A18150111300

有效期限： 2010年01月05日至2013年01月04日

所在单位： 上海核工程研究设计院

登记类别： 核工业类环境影响评价



再 次 登 记 记 录

时间	有效期限	签章
2009.06.26	延至2016年01月04日	
	延至	
	延至	
	延至	



表 1 项目概况

单位名称	浙江大学		地址	杭州市西湖区余杭塘路 866 号	
法人代表	林建华	电话	0571-869714 23	邮编	310029
联系人	梅祥院 叶庆富		联系电话	13588019092/1865888 5311	
项目名称	浙江大学紫金港校区西区生物物理科研用房乙级非密封放射性实验室及电子加速器机房项目		项目地点	浙江大学紫金港校区西区	
项目用途	教学、科研		项目依据	浙发改函[2010]266 号	
总投资	3510 万元				
核技术项目投资 (万元)	2960		核技术项目环保投资 (万元)	400	
应用类型	放射性同位素应用	密封源	射线装置	其它	
	乙级	/	II 类	/	
<p>核技术应用的目的是任务：</p> <p>浙江大学拟在紫金港校区西区购置一台电子加速器和使用 ^3H、^{14}C、^{32}P 等 26 种放射性同位素用于教学、研究工作。</p> <p>电子加速器主要用于农产品的辐照加工、保鲜、材料改性、卫生医疗用品消毒等相关研究工作。加速器型号为 CIAE-FZ-10/15，最大电子能量 12MeV。</p> <p>放射性同位素使用的目的是放射性同位素示踪实验。同位素示踪法又称为核素示踪技术，它是利用放射性同位素及其标记化合物作为示踪剂，研究被追踪物质的迁移、转归、代谢降解等行为规律。</p>					

表 2 总论

项目由来

浙江大学原在华家池校区建设了 ^{60}Co 辐照室，使用 26 种放射性同位素的放射实验室，并配备了仪器校准源，以上设施使用地点均为浙江大学原子核农业科学研究所（以下简称核农所），其运行取得了环境保护部颁发的《辐射安全许可证》，国环辐证[00323]号，其许可的种类和范围是：使用 I、V 类放射源，丙级非密封放射性工作场所，有效期至 2014 年 03 月 22 日。

根据杭州市城市建设远景规划及浙江大学总体规划要求，华家池校区核农所已拆除，并将在紫金港校区西区重建。目前该项目已由浙江省发展和改革委员会浙发改函[2010]266 号文件批复同意（见附件 1），预计在 2015 年底竣工投入使用。新建项目总用地面积 10000m^2 ，建筑面积 6000m^2 ，其中科研实验用房 4750m^2 、特殊设备用房 1100m^2 、污废物暂存库 150m^2 。另外温网室（构筑物）占地 800m^2 。而华家池校区核农所拆除前已完成了 I 类 ^{60}Co 辐照装置和丙级非密封放射性实验室的退役工作，退役竣工环境保护验收意见函（环验 [2013] 105 号）见附件 2。

在核农所拆除至紫金港校区西区建成投入使用期间，浙江大学选择华家池校区种子楼作为临时用房进行过渡。在过渡期间，浙江大学停止了原许可证范围内 I 类放射源的使用。同时，申请使用 25 种放射性同位素，其规模由丙级非密封放射性工作场所升级为乙级非密封放射性工作场所，使用目的是同位素示踪，实验地点均在种子楼实验室内，不进行野外示踪实验。目前该过渡项目已经通过环保部门审批，并取得浙江省环保厅颁发的《辐射安全许可证》，浙环辐证[A0149]号（见附件 2）。

根据规划，核农所在紫金港校区西区重建后，种子楼内放射性同位素实验室将再迁往紫金港校区西区。在紫金港校区西区，放射性同位素实验室在原种子楼基础上增加使用一种放射性核素 Ba-133，其规模依然为乙级非密封放射性实验室。同时，新购一台电子加速器，最大电子能量为 12MeV ，用于农产品辐照加工、材料改性等教学研究工作。另外，规划在温网室内建设一放射生态实验室，但由于该放射生态实验室还未确定建设方案，因此暂不在此次评价中考虑。待放射生态实验室设计方案最终确定后，再单独报批环境影响评价文件。

根据《建设项目环境保护管理条例》和《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》及国家有关辐射环境管理规定，电子加速器的使用及放射性同位素的迁建

应进行环境影响评价。为保护环境，保障公众健康，浙江大学委托上海核工程研究设计院对紫金港校区西区生物物理科研用房电子加速器机房及乙级非密封放射性实验室项目进行辐射环境影响评价。本次评价仅对项目涉及的辐射环境影响进行评价，不包括项目建设的其它环境影响，其它环境影响评价内容需另行开展。

评价单位在对本项目拟建位置现场踏勘、辐射环境背景监测和收集有关资料的基础上，按照国家有关环境影响评价技术规范的要求，编制完成本项目的辐射环境影响报告表。

编制依据

- (1) 《中华人民共和国环境影响评价法》，2003 年 9 月；
- (2) 《中华人民共和国放射性污染防治法》，2003 年 10 月；
- (3) 《建设项目环境保护管理条例》，国务院第 253 号令，1998 年；
- (4) 《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》，国务院第 449 号令，2005 年 12 月 1 日；
- (5) 《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》，国家环境保护总局令第 31 号，2006 年 03 月；
- (6) 关于修改《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》的决定，国家环保部令 第 3 号，2008 年 12 月；
- (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 4 月 18 日；
- (8) 《关于进一步下放建设项目环评审批管理权限切实加强监督管理的通知》，浙环发[2009]44 号，2009 年 6 月 4 日；
- (9) 《浙江省建设项目环境保护管理办法》省政府令第 288 号，2011 年 10 月 25 日；
- (10) 《浙江省辐射环境管理办法》省政府令第 289 号，2011 年 12 月 18 日。

项目相关文件

- (1) 《省发改委关于浙江大学紫金港校区西区生物物理可研用房建设工程项目建议书批复的函》，浙发改函[2010]266 号，浙江省发展和改革委员会，2010 年 7 月 22 日，见附件 1；
- (2) 《关于浙江大学原子核农业科学研究所 I 类钴—60 辐照装置和丙级非密封放

射性实验室退役项目竣工环境保护验收意见的函》，环验 [2013] 105 号，中华人民共和国环境保护部，2013 年 5 月 17 日，见附件 2；

(3) 《辐射安全许可证》，浙环辐证[A0149]，浙江省环境保护厅，2013 年 7 月 3 日，见附件 3；

(4) 辐射事故应急处理预案，见附件 4；

(5) 乙级非密封放射性实验室辐射安全管理规章制度，见附件 5；

(6) 工作人员上岗证，见附件 6；

(7) 浙江省疾病预防控制中心个人剂量检测报告，见附件 7；

(8) 浙江大学医学院附属第一医院职业健康检查报告，见附件 8；

(9) 公众告知书，见附件 9，

(10) 《建设项目选址意见书》，选字第 330100201300257 号，见附件 10。

引用标准和导则

《辐射环境保护管理导则—核技术应用项目环境影响报告书（表）的内容和格式》（HJ/T 10.1-1995），原国家环境保护总局。

评价标准

(1) 《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）

本标准适用于实践和干预中人员所受电离辐射照射的防护和实践中源的安全。

① 剂量限制

根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）的规定，本项目放射工作人员和公众（包括本项目的非放射工作人员）的年剂量限值，见下表。

适用范围	有效剂量限值
辐射职业照射	20 mSv/年
公众照射	1 mSv/年

遵循辐射防护最优化原则，在考虑了经济和社会因素后，个人受照剂量的大小、受照射的人数以及受照射的可能性均保持在可合理达到的尽量低水平；根据项目特点，建议本项目放射工作人员和公众（包括本项目的非放射工作人员）的剂量约束值见下表：

适用范围	剂量约束值
辐射职业照射	5 mSv/年
公众照射	0.1 mSv/年

② 表面放射性污染的控制

根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB 18871-2002)的规定,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 B2 所规定的限制要求。

表 2-1 工作场所的放射性表面污染控制水平 单位: Bq/cm²

表面类型		β 放射性物质
工作台、设、墙壁、地面	控制区 ¹⁾	4×10
	监督区	4
工作服、手套、工作鞋	控制区 监督区	4
手、皮肤、内衣、工作袜		4×10 ⁻¹
1) 该区内的高污染子区除外。		

③ 非密封源工作场所的分级

根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB 18871-2002)的规定,非密封源工作场所的分级应按附录 C 的规定进行。

表 2-2 非密封源工作场所的分级

级别	日等效最大操作量/Bq
甲	>4×10 ⁹
乙	2×10 ⁷ ~4×10 ⁹
丙	豁免活度值以上~2×10 ⁷

④放射性物质向环境排放的控制

第 8.6.2 款规定,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 $10ALI_{\min}$ (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 $1ALI_{\min}$, 并且每次排放后用不少于 3 倍排放量的水进行冲洗。

(2) 《粒子加速器辐射防护标准》GB5172-85。

本规定适用于加速粒子的单核能量低于 100MeV 的粒子加速器(不包括医疗用加速器和象密封型中子管之类的可移动加速器) 设施。

第 2.8 条规定, 从事加速器工作的全体放射性工作人员, 年人均剂量当量应低于 5 mSv。

第 2.10 条规定, 加速器产生的杂散辐射、放射性气体和放射性废水等, 对关键居民组的个人造成的有效剂量当量应低于每年 0.1 mSv。

第 3.2.1 条规定, 加速器的屏蔽体厚度必须根据加速粒子的种类、能量和束流强度以及靶材料等综合考虑; 按其可能的最大辐射输出进行设计。

第 3.2.2 条规定, 加速器的屏蔽体厚度还应根据相邻区域的类型及其人口数确定, 使其群体的集体剂量当量保持在可以合理做到的尽可能低的水平。并须保证个人所接受的剂量当量不得超过相应的剂量当量限值。

第 3.2.3 条规定, 在计算屏蔽厚度时, 需给予 2 倍安全系数。

第 E.2.1 条规定, 加速器设施内应有良好的通风, 以保证臭氧的浓度低于 $0.3\text{mg}/\text{m}^3$ 。

(3) 《放射性废物的分类》(GB9133-1995)

第 5 款, 放射性液体废物的分级

第 I 级 (低放废液): 浓度小于或等于 $4 \times 10^6 \text{Bq}/\text{L}$;

第 II 级 (中放废液): 浓度大于 $4 \times 10^6 \text{Bq}/\text{L}$, 小于或等于 $4 \times 10^{10} \text{Bq}/\text{L}$;

第 III 级 (高放废液): 浓度大于 $4 \times 10^{10} \text{Bq}/\text{L}$ 。

第 6 款, 放射性固体废物的分级

含有半衰期小于或等于 60d 的放射性核素的废物, 按其放射性比活度水平分为二级。

第 I 级 (低放废物): 比活度小于或等于 $4 \times 10^6 \text{Bq}/\text{kg}$;

第 II 级 (中放废物): 比活度大于 $4 \times 10^6 \text{Bq}/\text{kg}$ 。

(4) 放射性物质安全运输规程 (GB11806-2004)

第 5.3.3.1 条, A 型货包内的放射性活度不得大于:

a) A1 (对特殊形式放射性物质);

b) A2 (对所有其他放射性物质)。

(5) 工作场所有害因素职业接触限值第 1 部分: 化学有害因素 (GBZ2.1-2007)

第 4.1 条 工作场所空气化学物质容许浓度。其中臭氧容许浓度为 $0.3\text{mg}/\text{m}^3$ 。

参考标准:

(1) 《临床核医学卫生防护标准》(GBZ120-2006)。

(2) 《医用放射性废物的卫生防护管理》(GBZ133-2009)。

评价目的

(1) 对建设场所进行辐射环境质量背景监测, 以掌握所建场所的辐射环境质量背景水平;

(2) 对乙级非密封放射性实验室进行辐射环境影响预测评价;

(3) 对拟购置的 1 台电子加速器进行辐射环境影响预测评价;

(4) 对不利影响和存在的问题提出防治措施, 把辐射环境影响减少到“可合理达到的尽量低水平”;

(5) 满足国家和地方环境保护部门对建设项目环境管理规定的要求, 为学校的辐射环境保护管理提供科学依据。

评价范围

按照 HJ/T10.1-1995 《核技术应用项目环境影响报告书(表)的内容和格式》的规定, 结合本项目特点, 确定本项目评价范围为加速器机房和放射性同位素实验室周围 50m 区域。

该区域内目前还是空地, 其环境现状如下图所示。由于卫星图时效关系, 目前留祥路北侧的创业街办公用房已开始建设。



图 2-1 建设区域环境现状

建设项目评价范围内环境情况如下图所示。从图中可以看出，建设地块北侧为电子加速器机房。中间为科研实验用房（东北侧为放射性同位素实验室），南侧为放射性污物暂存库。评价范围内，电子加速器机房北侧为创业街办公用房，该用房距离电子加速器机房约 40 米，距离放射性同位素实验室约 85 米；南侧为实验农田；西侧为学生公寓，学生公寓距离电子加速器机房约 60 米，距离放射性同位素实验室约 60 米；东侧为大型动物实验用房，距离放射性同位素实验室约 23 米。

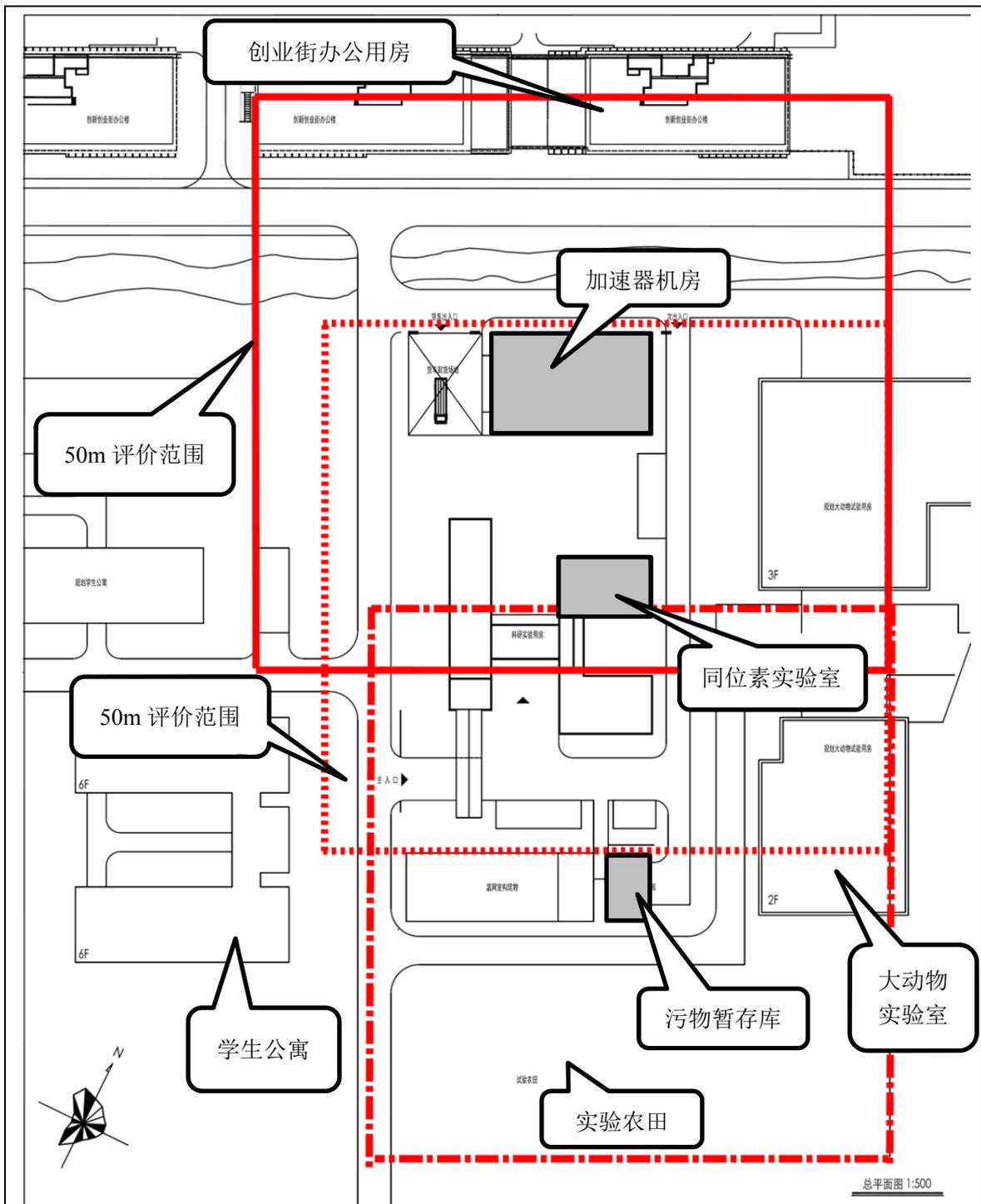


图 2-2 建设项目评价范围内环境情况

环境保护目标

本项目的评价保护对象为浙江大学从事电子加速器和放射性同位素操作的工作人员和周围活动的公众成员。

考虑到评价范围附近有学生公寓等环境敏感点，需要特别关注。

表 3 放射性同位素实验室内使用的 26 种放射性同位素

序号	核素	半衰期	衰变类型	毒性	单次最大操作量 (Bq)	日最大使用量 (Bq)	最大年用量 (Bq)	标记合成/直接示踪
1	³ H	12.33a	β ⁻	低	7.4×10 ⁸	7.4×10 ⁸	7.4×10 ¹⁰	标记合成/直接示踪
2	⁷ Be	53.3d	EC,γ	低	3.7×10 ⁷	7.4×10 ⁷	7.4×10 ⁹	直接示踪
3	¹⁴ C	5730a	β ⁻	中	3.7×10 ⁸	7.4×10 ⁸	7.4×10 ¹⁰	标记合成/直接示踪
4	²² Na	2.602a	β ⁺ , EC,γ	中	3.7×10 ⁶	3.7×10 ⁶	3.7×10 ⁸	直接示踪
5	³² P	14.28d	β ⁻ ,	中	3.7×10 ⁸	7.4×10 ⁸	7.4×10 ¹⁰	标记合成/直接示踪
6	³³ P	25.34d	β ⁻	中	3.7×10 ⁸	3.7×10 ⁸	3.7×10 ¹⁰	标记合成/直接示踪
7	³⁵ S	87. 4d	β ⁻	中	3.7×10 ⁸	3.7×10 ⁸	3.7×10 ¹⁰	标记合成/直接示踪
8	³⁶ Cl	3.01×10 ⁵ a	β ⁻ ,β ⁺ ,EC	中	3.7×10 ⁶	3.7×10 ⁶	3.7×10 ⁸	直接示踪
9	⁴⁰ K	1.24×10 ⁹ a	β ⁻ ,β ⁺ , EC,γ	低	3.7×10 ⁶	3.7×10 ⁶	3.7×10 ⁸	直接示踪
10	⁴⁵ Ca	163d	β ⁻ ,γ	中	3.7×10 ⁷	7.4×10 ⁷	7.4×10 ⁹	标记合成/直接示踪
11	⁵¹ Cr	27.7d	EC,γ	低	3.7×10 ⁷	3.7×10 ⁷	3.7×10 ⁹	直接示踪
12	⁵⁹ Fe	45.1d	β ⁻ ,γ	中	1.85×10 ⁷	1.85×10 ⁷	1.85×10 ⁹	直接示踪
13	⁶⁰ Co	5.26a	β ⁻ ,γ	高	1.85×10 ⁷	1.85×10 ⁷	1.85×10 ⁹	直接示踪
14	⁶⁵ Zn	244.26d	β ⁺ ,EC,γ	中	1.85×10 ⁷	1.85×10 ⁷	1.85×10 ⁹	直接示踪

序号	核素	半衰期	衰变类型	毒性	单次最大操作量 (Bq)	日最大使用量 (Bq)	最大年用量 (Bq)	标记合成/直接示踪
15	⁷⁴ As	17.77d	β,β ⁺ ,EC	中	1.85×10 ⁷	1.85×10 ⁷	1.85×10 ⁹	直接示踪
16	⁸⁶ Rb	18.66d	β ⁻ ,EC,γ	中	1.85×10 ⁷	1.85×10 ⁷	1.85×10 ⁹	直接示踪
17	⁸⁸ Y	106.6 d	β ⁺ ,EC	中	1.85×10 ⁷	1.85×10 ⁷	1.85×10 ⁹	直接示踪
18	⁸⁹ Sr	50.5d	β ⁻ ,γ	高	1.85×10 ⁷	1.85×10 ⁷	1.85×10 ⁹	直接示踪
19	⁹⁰ Sr	28.1a	β ⁻	高	1.85×10 ⁷	1.85×10 ⁷	1.85×10 ⁹	直接示踪
20	⁹⁵ Zr	64.0d	β ⁻ ,γ	中	1.85×10 ⁷	1.85×10 ⁷	1.85×10 ⁹	直接示踪
21	¹⁰⁹ Cd	453d	EC,γ	中	1.85×10 ⁷	1.85×10 ⁷	1.85×10 ⁹	直接示踪
22	¹²⁵ I	60.12d	EC,γ	中	3.7×10 ⁷	3.7×10 ⁷	3.7×10 ⁹	标记合成/直接示踪
23	¹³³ Ba	11.3a	EC	中	7.4×10 ⁵	7.4×10 ⁵	7.4×10 ⁷	仪器校正
24	¹³⁴ Cs	2.062a	β ⁻ ,EC,γ	中	1.85×10 ⁷	1.85×10 ⁷	1.85×10 ⁹	直接示踪
25	¹³⁷ Cs	30.17a	β ⁻ ,γ	中	1.85×10 ⁷	1.85×10 ⁷	1.85×10 ⁹	直接示踪
26	¹⁴¹ Ce	32.5d	β ⁻ ,γ	中	1.85×10 ⁷	1.85×10 ⁷	1.85×10 ⁹	直接示踪

表 4 射线装置

型号	生产厂家	加速粒子	最大能量	流强/剂量率	用途	备注
CIAE-FZ-10/15	中国原子能科学研究院	电子	12 MeV(±5%)	0.42mA/1m 处的 X 射线有用线束辐射产额: $1.2 \times 10^9 \mu\text{Gy} \cdot \text{m}^2/\text{h}$	农产品辐照加工、材料改性等研究	三种工作模式: 1. 电子束能量 10MeV(±5%), 电子束流 2mA, 电子束平均功率 20kW。 2. 电子束能量 12MeV(±5%), 电子束流 0.42mA, 电子束平均功率 5kW。 3. 电子束能量 7.5MeV((±5%), 电子束流 1.4mA, 电子束平均功率 10kW。
废物类型	数量	总活度 (Bq)	主要感生放射性核素		废物去向	
废靶	1 个				由生产厂商回收处理	
放射性废物年产生量	气态	m ³				
	液态	m ³				
	固态	kg				

表 5 区域环境概况

5.1 单位概况

浙江大学原子核农业科学研究所（简称核农所），前身为 1958 年的浙江农学院同位素研究室，1982 年正式建所，长期致力于核技术农业中的应用（同位素示踪技术、辐射生物学和辐照加工工艺技术），并注重与其他现代高新技术特别是生物技术的整合、交叉、创新。核农所也是生物物理学国家重点学科以及农业部和浙江省核学重点开放实验室的依托单位，又是理学硕士、博士学位授予点；博士后流动站学科点和国际原子能机构援建的核农学培训示范中心。

为满足教学、科研工作的需要，学校建造了 ^{60}Co γ 辐照设施，93 年改造、扩建成为设计容量为 $1.85 \times 10^{16}\text{Bq}$ （50 万居里）的 ^{60}Co γ 辐照中心，实际装源 $2.99 \times 10^{15}\text{Bq}$ （8.07 万居里），同时使用了 26 种同位素和校准放射源。该项目于 2009 年 3 月 23 日取得国家环境保护部颁发的《辐射安全许可证》。

根据杭州市城市建设远景规划及浙江大学总体规划要求，华家池校区核农所已拆除，并在紫金港校区西区重建，该项目预计在 2015 年底竣工投入使用。华家池校区核农所拆除前已完成了 I 类 ^{60}Co 辐照装置和丙级非密封放射性实验室的退役工作，退役竣工环境保护验收意见函（环验〔2013〕105 号）见附件 2。

在核农所拆除至紫金港校区西区建成投入使用期间，浙江大学选择华家池校区种子楼作为临时用房进行过渡。在过渡期间，浙江大学停止了原许可证范围内 I 类放射源的使用。同时，申请使用 25 种放射性同位素，其规模由丙级非密封放射性工作场所升级为乙级非密封放射性工作场所，使用目的是同位素示踪，实验地点均在种子楼实验室内，不进行野外示踪实验。目前该过渡项目已经通过环保部门审批，并取得浙江省环保厅颁发的《辐射安全许可证》，浙环辐证[A0149]号（见附件 2）。

根据规划，核农所在紫金港校区西区重建后，种子楼内放射性同位素实验室将再迁往紫金港校区西区。在紫金港校区西区，放射性同位素实验室在原种子楼基础上增加使用一种放射性核素 Ba-133，其规模依然为乙级非密封放射性实验室。同时，新购一台电子加速器，最大电子能量为 12MeV，用于农产品辐照加工、材料改性等教学研究工作。另外，规划在温网室内建设一放射生态实验室，但由于该放射生态实验室还未确定建设方案，因此暂不在此次评价中考虑。待放射生

态实验室设计方案最终确定后，再单独报批环境影响评价文件。

5.2 地理位置

本项目位于浙江大学紫金港校区西区东北侧。项目在紫金港校区西区的平面布置图见附图 1。建设地块北面为留祥路、南面为实验农田，西面为学校生活区，东面为大型动物实验用房，建设用地面积约 1hm²。

本项目建设用地性质为教育科研用地，建设区域内基础设施依托拟建设的紫金港校区西区配套，周边道路、供水、供电、排污和通讯等配套设施可以得到落实。项目建设符合《浙江大学紫金港西校区修建性详细规划》与土地利用总体规划的要求，项目建设用地已经浙江省政府和杭州市国土资源局等的原则同意。建设项目选址意见书（许可证号：选字第 330100201300257 号）见附件 10。项目具体的地理位置图见附图 2。

本建设项目总平面布置图见附图 3。项目北侧为电子加速器机房。中间为科研实验用房（东北侧部分为放射性同位素实验室）。南侧有一个放射性废物暂存库。同位素实验室地下建有一放射性衰变池。电子加速器机房为两层独栋结构，科研用房为 5 层楼房。一层平面具体布置见附图 4。

5.3 自然环境

1、工程地貌、地质条件

建设地块地势平坦，黄海高程 6 米左右，现为校园内部用地，原为水塘和湿地，地势平缓。根据国家地震局、建设部发布的《中国地震烈度区划图》[1990]，杭州市区的地震设防烈度为六度。本项目为教育建筑，按比杭州市区设防烈度高一级别重点设防。

2、气候条件

杭州属亚热带气候，温和湿润，年平均气温 16℃左右；最热月（7 月）平均温度约 32℃左右。年降雨主要集中在 3 至 4 月份和 7 至 9 月份两季，年降雨量为 1480.6 毫米。夏秋季有台风影响。年日照在 1750 小时左右，无霜期 250 天左右。

5.4 社会环境

改革开放以来，浙江省经济社会快速发展，综合实力进一步增强，人民生活向更加宽裕的小康生活迈进。在经济发展的同时，全省教育、卫生、文化、社会保障等社会事业的主要发展指标也居全国领先。其中高等教育实现了从精英教育

向大众化教育的转变。通过建设高教园区、举办独立学院、实施高校后勤社会化等改革措施，使高等学校办学条件得到了极大改善，推动了浙江省高等教育的跨越式发展，为浙江省建设教育强省奠定了坚实基础。至 2012 年底，全省拥有普通高校 105 所（含独立学院及筹建高职院校）；全年普通本专科招生约 28 万人。

项目所在地杭州是长江三角洲南翼中心城市，是浙江省的政治、经济、文化、交通中心。近年来杭州市围绕“发展、创新、稳定、为民”的总要求，积极实施“五大战略”，努力构建和谐社会，使国民经济快速发展。

综上所述，本项目的区位条件优越，当地基础设施配套条件和经济社会条件较好，拥有良好的自然环境、社会环境和深厚的文化环境，能满足学校的建设需要。

5.5 配套设施

本项目位于紫金港校区西区，校区内已经进行了外围的供水、供电、道路、排污等基础设施的配套建设，周边的基础设施条件较为完善，也有保障。

1、交通条件

紫金港校区现有主干道古墩路、申花路、留祥路与市中心相接，对外交通较为便利。区域东侧设有公交首末站一座，现有多条公交线路，并有直通市中心的快速公交线路，可基本满足在校师生的对外公交需求。

2、供水条件

项目供水由城市市政供水系统统一供给，供水水压、水质、水量均能得到保证。项目北侧留祥路现有 DN600 的供水管，且通过改造花蒋路现有 DN800 给水管和新建紫金港隧道上方的 DN1600 给水管，项目南部的吉英路还将布置 DN200~300 的生活给水管与东区相连，可满足西区相关项目的供水需求。

3、排水条件

项目南侧的吉英路拟埋设 D300 的污水管，并接入花蒋路市政污水管道，项目污水排放将可得到保证。

4、供电条件

紫金港校区用电电源来自西园一路南侧、留祥路北侧的 110 千伏浙大变，通过 10 千伏高压电缆引入各用电单位。

表 6 污染源分析

6.1 放射性同位素

(1) 性能参数

放射性核素主要用于示踪实验，核素示踪技术是用示踪剂研究被追踪物质运动、转化规律的技术方法，与其它方法相比，它具有简便、快速、高质、易行、费用低等特点。在农业和生物学研究中常用的核素有 ^{14}C 、 ^3H 、 ^{32}P 等二十余种。本项目中开放实验室拟使用的放射性核素性能参数见表 6-1。

表 6-1 实验室拟使用的放射性核素性能参数表

序号	核素	半衰期	衰变类型	毒性	$E_{\beta \text{ max}}$ (MeV)	$E_{\gamma \text{ 主要}}$ (MeV)	用途
1	^3H	12.33a	β^-	低	0.0186	--	标记合成/直接示踪
2	^7Be	53.3d	EC, γ	低	--	0.47759	直接示踪
3	^{14}C	5730a	β^-	中	0.156	--	标记合成/直接示踪
4	^{22}Na	2.602a	β^+ , EC, γ	中	--	1.27455	直接示踪
5	^{32}P	14.28d	β^- ,	中	1.709	--	标记合成/直接示踪
6	^{33}P	25.34d	β^-	中	0.248	--	标记合成/直接示踪
7	^{35}S	87.4d	β^-	中	0.167	--	标记合成/直接示踪
8	^{36}Cl	$3.017\text{d}5^5\text{a}$	β^- , β^+ , EC	中	0.709	2.30784	直接示踪
9	^{40}K	1.24784^9a	β^- , β^+ , EC, γ	低	1.314	1.46075	直接示踪
10	^{45}Ca	163d	β^- , γ	中	0.257	0.01247	标记合成/直接示踪
11	^{51}Cr	27.7d	EC, γ	低	--	0.32003	直接示踪
12	^{59}Fe	45.1d	β^- , γ	中	0.467	1.09922	直接示踪
13	^{60}Co	5.26a	β^- , γ	高	0.318	1.17321	直接示踪
14	^{65}Zn	244.26d	β^+ , EC, γ	中	--	0.338	直接示踪
15	^{74}As	17.77d	β^- , β^+ , EC	中	1.36	0.5959	直接示踪
16	^{86}Rb	18.66d	β^- , EC, γ	中	1.77	1.0772	直接示踪
17	^{88}Y	106.6 d	β^+ , EC	中	--	1.83613	直接示踪
18	^{89}Sr	50.5d	β^- , γ	高	1.463	--	直接示踪

19	⁹⁰ Sr	28.1a	β -	高	0.546	--	直接示踪
20	⁹⁵ Zr	64.0d	β -, γ	中	0.396	0.72418	直接示踪
21	¹⁰⁹ Cd	453d	EC, γ	中	--	--	直接示踪
22	¹²⁵ I	60.12d	EC, γ	中	--	0.03548	标记合成/直接示踪
23	¹³³ Ba	11.3a	EC	中	--	0.356	仪器校正
24	¹³⁴ Cs	2.062a	β -, EC, γ	中	0.658	0.56929	直接示踪
25	¹³⁷ Cs	30.17a	β -, γ	中	0.5116	0.662 (子体发射)	直接示踪
26	¹⁴¹ Ce	32.5d	β -, γ	中	0.44	0.14544	直接示踪

(2) 工作原理

自然界中的同位素现象是示踪法赖以存在的基础。同位素示踪法又称为核素示踪技术。它是用示踪剂研究被追踪物质运动、转化规律的技术方法，它为人类认识客观事物提供了特有的、精确的技术手段。与其它方法相比，它具有简便、快速、高质、易行、费用低等特点。

核素示踪技术在农业科学中应用虽然很广，但就其类型而言大体可分为三类：①同位素示踪；②非同位素示踪；③放射性示踪。在实验系统中，作为示踪剂的核素或其标记化合物与被追踪的物质将遵循相同的化学和生物学途径转化。放射性同位素示踪技术与放射性自显影结合，可以提供直观的、示踪剂在生物体的器官、组织，甚至细胞内的分布图象，从而能对物质在生物体内的分布进行定位，进而研究物质在生物体内的功能。由于上述特点，自其诞生以来，在短短的数十年间，它在许多领域中得到了广泛的应用，并取得了丰硕的成果，推动了科学的发展。

技术优势如下：①灵敏度高：目前常规化学分析方法，灵敏度约为 10^{-12} g。放射性同位素示踪法可以测定活度为 1Bq 的放射性或更低。如测 ³²P 的灵敏度达 10^{-17} g。高灵敏度在生物学研究中具有十分重要的意义，它使得一些研究有可能在正常的生理状态下进行；②样品制备相对简便、测定快速；③能溯源追踪物质的来源：示踪技术能区分被追踪的物质是实验系统中原有的还是实验过程中加入的；④可进行定位和基本功能研究：放射性同位素示踪技术与放射性自显影结合，可以为我们提供示踪剂在生物体/环境中的直观分布图象。自同位素示踪技术诞生

以来，它在许多科学研究领域得到了广泛的应用，并取得了丰硕的成果，推动了科学的发展。

(3) 操作流程

放射性示踪研究因研究目的、所用的示踪剂、分析测量方法等方面不同，具体操作会有差别，但在研究过程中，一些基本的试验程序是必不可少的。具体操作流程见图 6-1。

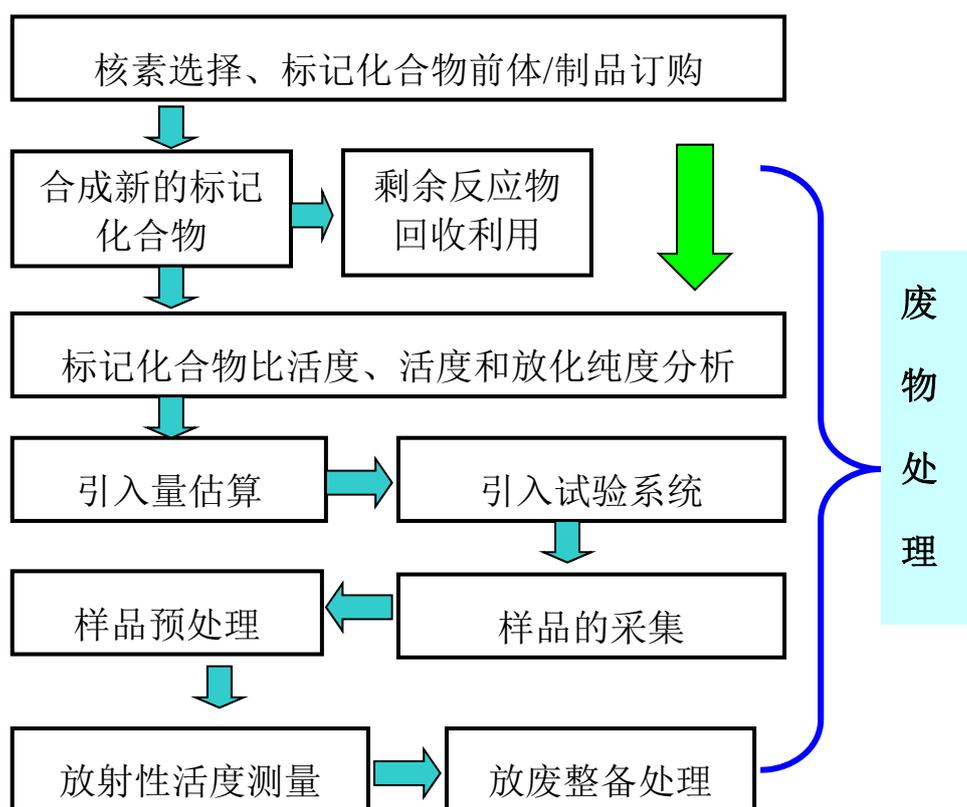


图 6-1 操作流程示意图

几个重要步骤描述如下：

a、样品的购入与分装

核素报批后购入，购入后存入贮存库。每次取用时，在实验室通风橱分装取用。取用的样品直接用于实验示踪或用于合成标记化合物。根据学校提供的最近核素使用情况台帐资料，核农所近三年来核素购买情况如下表所示。

表 6-2 核农所近三年来核素购买贮存情况

序号	核素	出厂日期	出厂活度 (贝可)	用途	来源
1	I-125	2010.1-2010.6	9.25E+6	科研	中国同位素有限公司
2	S-35	2010.4-2010.9	1.48E+9	科研	中国同位素有限公司
3	C-14	2010.4-2010.9	8.325E+7	科研	中国同位素有限公司
4	C-14	2010.8-2011.1	5.55E+8	科研	中国同辐股份有限公司
5	P-33	2011.5-2011.10	1.85E+7	科研	中国同辐股份有限公司
6	C-14	2011.6-2011.11	1.85E+7	科研	中国同辐股份有限公司
7	H-3	2011.11-2012.5	7.4E+7	科研	中国同辐股份有限公司
8	P-32	2012.3	1.85E+9	科研	中国同辐股份有限公司
9	P-33	2012.3	7.4E+8	科研	中国同辐股份有限公司
10	C-14	2012.6	7.4 E+8	科研	中国同辐股份有限公司

b、标记化合物的合成

标记化合物的合成采用一套封闭循环的有机合成系统实现，可以有效地回收合成产物。该系统置于通风橱内，确保合成过程的安全。有机合成系统示意图如下图所示。



图 6-2 有机合成系统示意图

有机合成反应得到的反应物及剩余未能反应的核素通过分离浓缩仪器进行分离浓缩。反应标记物引入实验，剩余未能反应的核素收集转化后放回源库用于下次实验。样品分离浓缩仪如下图所示。



图 6-3 样品分离浓缩仪

c、试验系统

核素或标记化合物通过不同方式引入试验。植物主要通过涂抹的方法引入，动物主要通过喂食方式引入，另外还有土壤中的引入。核素引入试验后，都将置于密闭循环的试验系统进行实验。试验系统示意图如下图所示。

d、样品采集及测量

实验样品采集后通过氧化燃烧仪等仪器，在封闭或循环回路中，将标记化合物和/或放射样品（生物和土壤）转化成溶液可吸收的物质，然后进行测量。

部分样品转化测量仪器如下表所示。

表 6-3 实验测量中涉及到的部分仪器

仪器名称	型号	购置日期
环境放射性核素监测仪	Quantalus-1220	2007 年
液体闪烁测量仪 1	Tricarb-2910TR	2010 年
液体闪烁测量仪 2	achard-1900TR	1996 年
环境放射性核素样品预处理仪	PE-307	2008 年
同位素成像仪	FUJIFILM-1800 II	2002 年
γ 谱仪	FH-1901	1988 年
氚、碳-14 环境样品转换仪	OX-400	1998 年
流动液体闪烁测量仪	PE-610TR	2009 年



图 6-4 生物实验系统示意图



图 6-5 土壤试验系统示意图

浙江大学在操作过程中采取了一系列措施，使放射性同位素回收率 95%以上，具体如下：

①对需要使用的玻璃仪器进行前处理，减少器皿表面对放射性同位素的吸附；

②加入适量的载体，提高常量物质浓度，减少放射性胶体的形成，最大限度减少操作过程中的损耗，提高放射性物质的回收率；

③每操作一步进行放射性的测量，回收各种放射性组份以保持放射性物料的守恒；

④利用氧化燃烧仪，在封闭或循环回路中，将标记化合物和/或放射样品（生物和土壤）转化成溶液可吸收的物质，如将各种碳-14 样品转化成 $^{14}\text{C}-\text{CO}_2$ ，将各种氚标记样品转化成 $^3\text{H}-\text{H}_2\text{O}$ 后，用含 NaOH 或碱性乙醇胺的闪烁液吸收，这种方法的回收率通常高达 95%以上。

同时在各种放射性操作过程中，采取科学的措施进行内照射防护，严防放射性物质通过呼吸道、口腔食入、皮肤进入人体内。主要的内照射防护措施如下：

①工作人员必须熟练掌握辐射安全操作知识和技能，严格按操作规程进行放射性工作实践；

②工作人员进入放射性工作区前，需穿戴工作服、换工作鞋、佩带必要的个人防护用品和器材；

③不准将无关物品带入放射性工作区，严禁在放射性实验室内进食、饮水、吸烟或存放物品；

④工作人员身体有创伤时，禁止从事各种放射性实验操作；

⑤接触放射性物品时必须带上乳胶手套，配备表面污染监测仪和个人剂量计进行剂量监测和控制。涉及放射性粉尘、液体和气体的所有操作必须在通风柜或密封的手套箱内进行，同时带上适宜的防毒面具或含吸附剂的多层口罩，努力实现防护的最优化；

⑥放射性溶液加热、蒸发、浓缩和烘干等操作都必须在通风柜内进行。在操作过程中避免器皿破裂和溶液飞溅；

⑦在操作发射 γ 射线及能量较高的 β 粒子的放射性物质时，须有防护屏（屏蔽铅砖、铅板、铅玻璃或一定厚度的有机玻璃屏）和手套箱等，戴上铅玻璃眼镜，

穿上铅防护服（全身或背心）等。对高能 β 粒子的防护必须考虑韧致辐射；

⑧严禁带着放射性污染的手套任意操作公用仪器和接触非放射性器皿；

⑨离开操作现场时必须认真洗手，并经测量仪器检测，如有放射性污染必须清洗干净后方可离开。

（4）污染因子

从以上操作流程可知，操作过程中会产生放射性废液，主要是滤膜样品及器具洗涤时产生的废水。操作过程中还会对实验室内的工作台面、地面、工作服和手套等产生放射性沾污，造成小面积的 β 放射性表面污染；也会产生一些固体废弃物，还有废水等对水环境的污染。同位素操作严格在负压通风柜内进行，不会产生内照射影响。

因此，同位素示踪试验的污染因子是： γ 射线、 β 表面污染、废水和固体废物中的同位素。

（5）放射性实验室平面布置

放射性同位素实验室位于整个科研用房的东北侧（见附图4阴影部分），仅在西南角通过走道与其它普通实验室相连。一到五层均在西南角走道处设置门禁系统，非应急情况下不开启。因此，同位素实验室基本与其它实验室隔离。同位素实验室一楼设置放射性同位素储源室，由实墙分隔，实行双人双锁管理，并安有与110联网的监控摄像，确保储源室安全。放射性同位素在各个楼层的运输通过应急淋浴间北侧的专用小电梯运送，确保独立安全。各层放射性实验室的平面布置及实验室内的设置见附图5~附图9。

6.2 电子加速器

（1）电子加速器技术参数

浙江大学拟购的1套电子加速器由中国原子能科学研究院采购生产，其主要技术参数见表6-4，本次拟购的电子加速器系统参数见表6-5。

表 6-4 拟购加速器主要技术参数

设备名称	型号	数量	最大电子束能量 (MeV)	电流(mA)	备注
电子加速器	CIAE-FZ-10/15	1	12.0	0.42	拟购，属II类射线装置

表 6-5 拟购加速器系统参数表

序号	名称	规格/指标	说明
加速器分系统			
1	电子束能量	三种能量 7.5±5% MeV 10±5% MeV 12±5% MeV	
2	电子束平均功率	7.5MeV, 电子束功率 10kW 10MeV, 电子束功率 20kW 12MeV, 电子束功率 5kW	
3	表面辐照不均匀性	不超过±5%	
4	束斑直径	35 mm	
5	脉冲宽度	14~16 宽度	
6	重复频率	50~500 PPS, 连续可调	
7	扫描频率	5~20 Hz, 连续可调	
8	开机启动时间	25~35min	
9	电子束扫描角度	≤±25 度	
10	钛窗下 700mm 扫描宽度	400~800 mm, 分档可调, 每 100 mm 一档;	
11	扫描不均匀度	不超过±5%	
12	辐照盒出口钛箔长度	≥650mm	
13	加速器主体整机高度	≤5.3 m	
14	加速器本体高度	≤3m	
15	电子束剂量率	10kGy/S	
16	加装 X 射线转换靶后的 X 射线剂量率	≥8Gy/S	
17	X 射线转换效率	≥8%	
18	X 射线转换靶寿命	≥15000 h	

19	加速管寿命	≥20年（正常使用）	
20	电子枪寿命	≥5000h	
21	速调管	≥45KW	
22	速调管寿命	≥5000h	
23	真空系统从常压到工作真空压力时间	有足够的措施，按具体情况，尽快恢复处理。	
辐射安全连锁			
24	安全连锁钥匙开关	操作台上的设置控制开关	
25	急停装置	急停按钮或急停拉线	
26	门连锁	防护门上安装有门连锁	
27	监控系统	安装数量合适的摄像头、监视器	
28	警告标志	电离辐射警告标志、警灯和警铃	
29	广播语音系统	每次出束前的提示无关人员撤离，及出束时提醒无关人员不要靠近。	
30	剂量监测与报警仪	配备2台个人剂量报警仪、1台X、γ环境剂量仪和1台区域X、γ剂量监测仪。	

（2）加速器工作原理

由辐照加速器产生的高能电子（或X光子），作用于微生物细菌或病原体，达到一定的剂量就全部将它们杀死，达到消毒灭菌的目的。本项目涉及的电子辐照加速器，是采用微波功率射频加速的电子直线型加速器。其基本工作原理为：电子枪产生的电子通过线性的加速结构构成的加速管时，在传输的过程中，由加速管前部的耦合器输入脉冲微波功率，电微波的高频电磁场使电子束加速结构不断获得微波能量而聚焦加速，最后加速的高能、高功率的电子束从加速器出口输出，进入扫描或偏转/扫描空间，利用磁场力将成束的电子扫开成一定的宽度，从薄的金属膜构成的输出窗引出，对运动的被照物件进行辐照。

加速器原理示意图如下图所示:

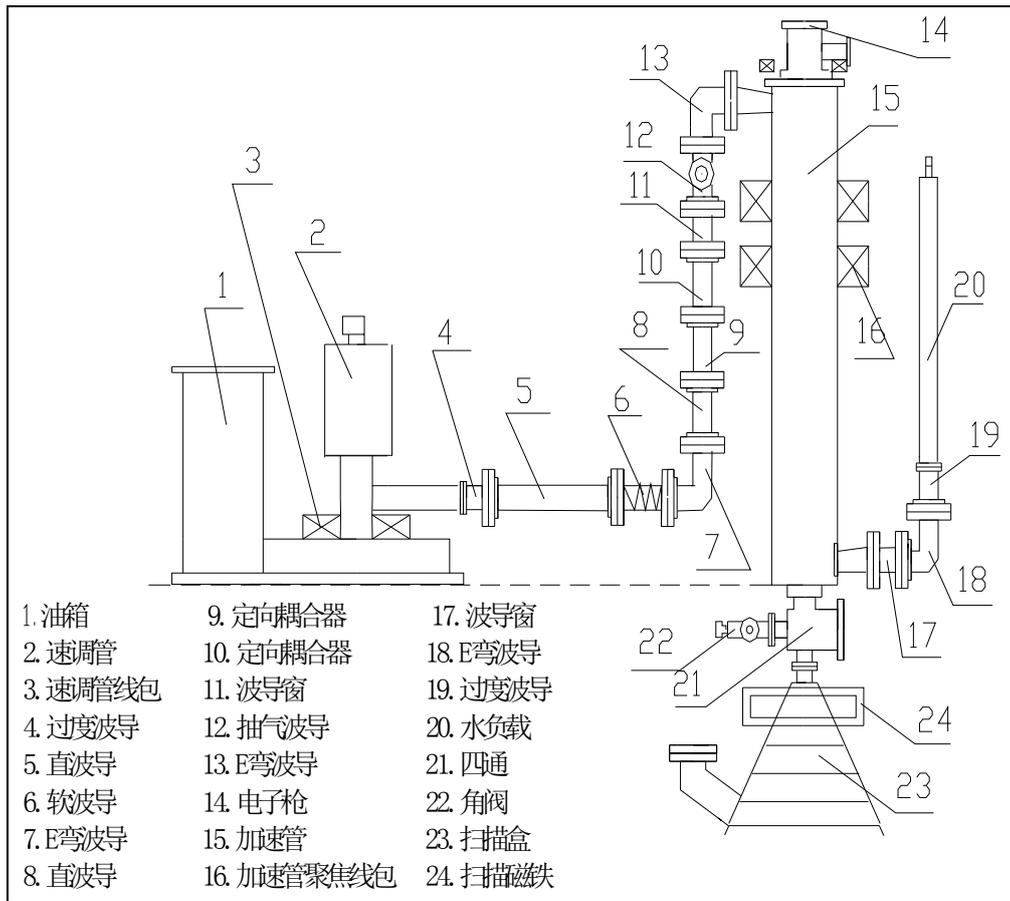


图 6-6 加速器原理示意图

(3) 加速器方案

为了满足科研教学与中试生产的要求，加速器具有三种运行模式，提供相应研究及应用能力，实现“一机多用”。电子直线加速器输出三种能量分别是：7.5MeV、10MeV 和 12MeV。

运行模式 1：提供 10MeV 的电子束，束流功率 20kW，主要应用于科研教学和中试生产研究。

运行模式 2：提供 7.5MeV 的 X 射线，主要应用于食品辐照技术研究。

运行模式 3：提供 12MeV 的电子束，束流功率 5kW，主要应用于半导体材料辐照改性研究。

本项目主要由电子直线加速器主机、束下传输系统、半导体材料辐射改性应用研究系统和辐射防护安全系统四大部分构成。主体布置方案为上下两层结构，加速管、速调管、微波系统和脉冲变压器放置在电子辐照室的正上方(二层)。为

了减少大功率辐照束流的损失，提高束流功率，加速器采用垂直结构，电子束自上而下加速，电子辐照部分直接安装在加速管的正下方，半导体材料辐射改性应用研究系统（模式 3）由偏转磁铁引出，实现由“垂直输出模式”向“水平输出模式”的切换，偏转系统的损失不超过 5%，具有较好的消色散能力。

加速器机房一层平面布置图如附图 10 所示，加速器机房二层平面布置图如附图 11 所示。加速器垂向剖面安装布置图如附图 12 所示。

（4）加速器技术特点

为满足本项目针对科研教学和中试生产的需求，本着辐照应用和研究等多功能综合应用、能量可调、高稳定性、高重复性和可连续运行的原则。

本项目的总体方案设计和特点如下：

采用栅控电子枪：实现了真正的数字化控制；采用进口的阴栅组件，其具有的平面阴极结构使输出的电子束具有非常对称的横向分布，同时具有很长的使用寿命；可拆卸的阴极设计，即能方便快速地更换电子枪，有效地减少了维修时间和维修成本。

采用行波加速管：具有较高的整机工作稳定性。

采用进口的速调管：低功率的微波信号输入，具有高输出功率、高稳定性、高效率和长寿命等特点。

采用进口波导窗：提高了整机运行的稳定性，降低了电子枪中毒的危险。

采用进口终端吸收负载：提高了整机运行的稳定性，避免了应终端负载损坏而带来的一系列问题。

采用进口闸流管：保证了整个调制器安全稳定的运行，从而提高了整机运行的稳定性。

采用模块化、插件化系统：各模块和插件组成相对独立的子系统，提高系统控制的可靠性和实时性，便于维护。

采用闭环束流稳定系统：利用 PLC 控制系统、电子学线路以及适应于加速器结构的水冷恒温系统，保证加速器束流和剂量的稳定性以及扫描的均匀性。

采用便于调整扫描宽度和频率的扫描系统：提高了束流扫描均匀性。

采用驻波比保护装置：有效保护了速调管的安全，从而保证了整机安全稳定的运行。

采用了扫描保护装置：有效保护了钛窗的安全，从而保证了整机安全稳定的运行。

采用了远程控制系统：实现远程监测、诊断等功能，为整个加速器的稳定运行提供有力的支持。

电子直线加速器采用射频型加速结构，加速管的高功率微波由大功率速调管提供，速调管由晶振锁相源激励，速调管输出脉冲功率 5MW，平均功率 45kW，经由波导传输元件如弯波导、软波导、定向耦合器、波导窗等，馈入加速管内。馈入加速管的功率在加速管内建立起加速电场。一部分功率被束流负载吸收，一部分损耗在加速管管壁上，剩余功率由水负载吸收。电子枪提供的电子束流在加速管内与射频加速电场相互作用而获得能量，被加速到 7.5/10/12MeV，通过束流管道进入扫描盒后，由扫描磁铁将电子束扫描成电子帘，穿过钛窗后对被照物进行辐照；在扫描磁铁前，经 90 度偏转系统后传输到 12MeV 电子束应用研究支路。

在辐照路安装 X 射线转换靶，可提供 X 射线、电子束进行辐照。12MeV 电子束应用研究支路分为水平支路和竖直支路，两条支路通过 90 度偏转磁铁分支，每个分支的电子束应用靶有两种：通过扫描盒的低功率靶和真空内的高功率靶。扫描盒将电子束通过钛窗引出到真空外。真空内靶是电子束不进行扫描，对同一个区域持续轰击，束流功率很高，进行真空内的高功率电子束的应用研究。

本项目电子直线加速器采用行波加速结构，电子枪采用栅控结构，通过 90° 偏转系统及束流传输系统，调节束流负载实现多能量电子束输出满足辐照和电子束应用研究功能要求。

采用三极枪则可通过调节栅偏压来改变电子束脉冲流强，输出电子束品质较高，这有利于提高辐照剂量均匀性。此外，由于栅极高压低、功率小，则能更好地结合数字化控制电路控制电子束的稳定度，达到提高束流稳定性和扫描均匀性的目的。

(5) 加速器操作流程

启动总电源

检查剂量监测仪工作是否正常

检查灯光报警仪工作是否正常

检查加速器气压值是否正常

检查加速器真空是否正常

检查束下传输系统工作指示等是否正常

启动臭氧风机

启动恒温水冷机组

检查加速器各路水流量和水压是否正常

启动磁场电源、扫描电源和激励源

加速器合启动

预热等待

检测各个灯丝分压器表头指示是否正常

加速器操作人员对主机厅和迷宫进行巡检，确保无人员停留在辐射场所

检查货物进出口门和主机厅铅门是否均已关闭

合高压

升高压至充电满压状态

启动束下传输系统

出束

升重复频率

降重复频率

停束

停止束下传输系统

降高压至充电零位

断高压

停启动

停止磁场电源、扫描电源和激励源

停止恒温水冷机组

停止臭氧风机

停止总电源

(6) 辐照工艺流程

拟建加速器辐照工艺流程见图 6-7:

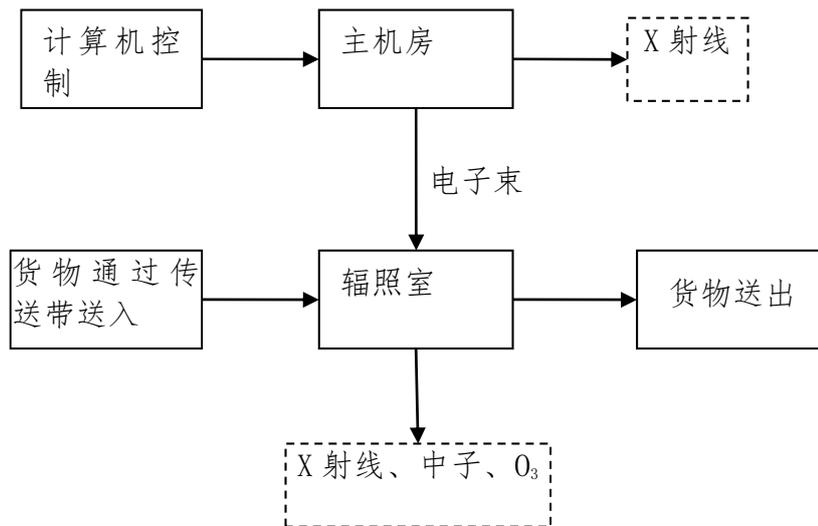


图 6-7 辐照工艺流程示意图

货物通过传送装置进入辐照室，辐照期间工作人员主要在控制室和货物装卸区工作。

(7) 污染因子

电子直线加速器在利用电子束进行辐照时，电子直线加速器产生的电子束受到靶物质（被辐照物和传送装置）的阻挡，产生韧致辐射，即产生 X 射线。该 X 射线是随机器的开关而产生和消失。同时，在 X 射线最大能量超过 10MeV 时，需要考虑中子的辐射影响。在加速器工作时，X 射线与空气中的氧发生作用会产生臭氧。因此，在开机期间，X 射线和中子为加速器污染环境的主要因子，其次为臭氧。另外，对于能量较高的电子加速器，还需要考虑感生放射性的影响。但本项目中，电子加速器能量较低，产生的感生放射性水平较低，衰变也较快。同时，加速器停机后，通风系统会保持一定时间的运行，工作人员也不对加速器进行检修工作。因此本项目的感生放射性可不考虑。

学校放射工作人员仅负责加速器的操作和管理，不包括设备的安装、故障维修、靶材料的更换等工作。与加速器相关的安装、故障维修、靶材料的更换等工作，由加速器生产厂商负责。

表 7 辐射环境现状

浙江大学紫金港校区辐射环境质量背景水平采用现场监测的方法进行调查。

7.1 监测目的

对建设场地进行辐射环境背景水平监测，并采用监测和理论计算的评价方法，预测电子加速器和放射性同位素投入运行后的辐射环境影响。

7.2 监测内容

根据污染因子分析，评价单位委托浙江省辐射环境监测站于 2014 年 1 月 9 日对建设场地周围进行辐射剂量率背景水平监测。

7.3 监测点位

建设场地周围，重点考虑日后人员居留的场所，监测点位见图 7-1。

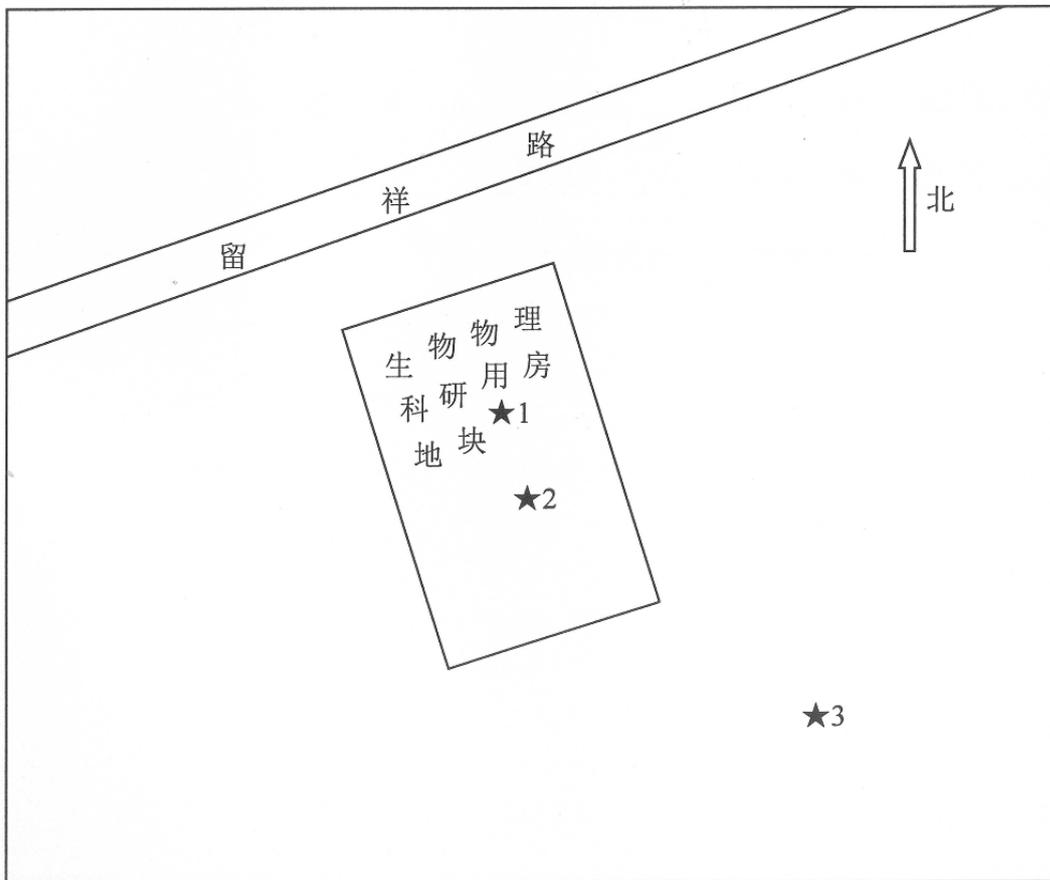


图 7-1 现场监测点位示意图

7.4 监测仪器与规范

监测仪器的参数与规范见表 7-1。

表 7-1 X- γ 射线剂量率监测仪器参数与规范

仪器名称	X- γ 剂量率仪
仪器型号	FH40G+FHZ672E-10
仪器编号	JC-11-5-2009
仪器状态	合格（检定证书有效期至：2014 年 3 月 18 日）
能量响应	60KeV~3MeV
量 程	1nGy/h~100 μ Gy/h
监测规范	《环境地表 γ 辐射剂量率测定规范》（GB/T14583-93）

7.5 质量保证措施

- a 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。
- b 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。
- c 监测仪器每年定期经计量部门检定，检定合格后方可使用。
- d 每次测量前、后均检查仪器的工作状态是否正常，并用检验源对仪器进行校验。
- e 由专业人员按操作规程操作仪器，并做好记录。
- f 监测报告严格实行三级审核制度，经过校对、校核，最后由技术总负责人审定。

7.6 监测结果

目前，建设场地尚未开工建设。因此，评价单位仅对拟建场址背景情况进行了监测，监测结果见表 7-2。

表 7-2 建设场地周围 X- γ 辐射剂量率监测结果

点位 序号	点 位 描 述	辐射剂量率（nSv/h）	
		平均值	标准差
1	加速器机房区域	62.8	3.6
2	放化实验室区域	64.5	2.4
3	背景空地	70.4	3.6

根据表 7-2 的 1~3 可知：建设场地周围 γ 射线空气吸收剂量率在 62.8~70.4nSv/h 之间。由《浙江省环境天然放射性水平调查报告》可知，杭州市室内 γ 辐射剂量率在 56~443nSv/h 之间，可见，该拟建址 γ 辐射本底水平未见异常。

表 8 辐射环境影响分析

8.1 实践正当性分析

放射性同位素的应用在我国是一门成熟的技术，它同位素示踪方面有其他技术无法替代的特点，具有明显的科研效益，能在保证工作人员及公众健康的同时为社会创造更大的科研效益。学校使用放射性同位素应用项目所产生的危害同社会和个人从中取得的利益相比是可以接受的，因此，浙江大学乙级非密封放射性实验室的建设和运行符合《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）中辐射防护“实践正当性”的要求。

电子加速器辐照技术在我国也是一门成熟的技术，在材料改性，杀菌、消毒等方面具有广泛的应用。某些热或光所无法处理的工艺通过电子束辐照能够轻松完成，而且性能非常稳定。浙江大学针对电子加速器项目将开展多个方面的教学研究工作，包括：1) 农作物种质资源的诱变育种研究，2) 微生物基因诱变和 DNA 损伤修复研究，3) 农产品辐照保鲜研究，4) 高分子辐射胶连研究，5) 电子产品的材料改性研究，6) 医用器械辐射灭菌研究，7) 放射生物学研究等。因此，开展电子加速器辐照技术的利用，对学校科研能力的提高具有重要意义。通过合理的防护，能够在保证工作人员及公众健康的同时为社会创造更大的科研效益。因此，浙江大学电子加速器项目的建设和运行符合《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）中辐射防护“实践正当性”的要求。

8.2 建设期环境影响

（1）放射性同位素

在建设过程中，未使用放射性同位素，故放射性同位素不会对周围环境造成电离辐射影响。其用量根据学校需求由供货单位提供，并由供货单位承担运输等安全责任。因此，提供放射性同位素的过程不对学校辐射工作人员及周围公众成员产生辐射影响。

（2）电子加速器

在建设过程中，电子加速器的安装过程中不通电，无辐射产生，安装调试过程中通电期间会有辐射产生，但安装调试过程由生产厂家负责且时间较短，浙江大学放射工作人员及公众受到的辐射照射可以忽略不计。

8.3 运行期环境影响

8.3.1 放射性同位素

(1) 工作场所的分级

根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)附录 C 提供的非密封源工作场所放射性核素日等效最大操作量计算方法,可以计算出各核素综合的日等效最大操作量。

日等效最大操作量的计算公式如下:

$$\text{日等效操作量} = \frac{\text{实际日操作量} \times \text{核素毒性因子}}{\text{操作方式的修正因子}}$$

根据浙江大学提供的核素使用资料,同时根据查得的各核素的毒性因子和操作方式的修正因子。根据上述公式计算得到浙江大学 26 种核素的日等效最大操作量如表 8-1。

表 8-1 浙江大学日等效最大操作量计算表

序号	核素	毒性	日最大使用量 (Bq)	操作方式与、放射源状态修正因子	毒性组别修正因子	日等效操作量
1	³ H	低	7.4×10 ⁸	0.1	0.01	7.40E+07
2	⁷ B	低	7.4×10 ⁷	1	0.01	7.40E+05
3	¹⁴ C	中	7.4×10 ⁸	0.1	0.1	7.40E+08
4	²² Na	中	3.7×10 ⁶	1	0.1	3.70E+05
5	³² P	中	7.4×10 ⁸	0.1	0.1	7.40E+08
6	³³ P	中	3.7×10 ⁸	0.1	0.1	3.70E+08
7	³⁵ S	中	3.7×10 ⁸	0.1	0.1	3.70E+08
8	³⁶ Cl	中	3.7×10 ⁶	1	0.1	3.70E+05
9	⁴⁰ K	低	3.7×10 ⁶	1	0.01	3.70E+04
10	⁴⁵ Ca	中	7.4×10 ⁷	0.1	0.1	7.40E+07
11	⁵¹ Cr	低	3.7×10 ⁷	1	0.01	3.70E+05
12	⁵⁹ Fe	中	1.85×10 ⁷	1	0.1	1.85E+06
13	⁶⁰ Co	高	1.85×10 ⁷	1	1	1.85E+07
14	⁶⁵ Zn	中	1.85×10 ⁷	1	0.1	1.85E+06
15	⁷⁴ As	中	1.85×10 ⁷	1	0.1	1.85E+06
16	⁸⁶ Rb	中	1.85×10 ⁷	1	0.1	1.85E+06

17	⁸⁸ Y	中	1.85×10 ⁷	1	0.1	1.85E+06
18	⁸⁹ Sr	高	1.85×10 ⁷	1	1	1.85E+07
19	⁹⁰ Sr	高	1.85×10 ⁷	1	1	1.85E+07
20	⁹⁵ Zr	中	1.85×10 ⁷	1	0.1	1.85E+06
21	¹⁰⁹ Cd	中	1.85×10 ⁷	1	0.1	1.85E+06
22	¹²⁵ I	中	3.7×10 ⁷	0.1	0.1	3.70E+07
23	¹³³ Ba	中	7.4×10 ⁵	10	0.1	7.40E+03
24	¹³⁴ Cs	中	1.85×10 ⁷	1	0.1	1.85E+06
25	¹³⁷ Cs	中	1.85×10 ⁷	1	0.1	1.85E+06
26	¹⁴¹ Ce	中	1.85×10 ⁷	1	0.1	1.85E+06

由此可得工作场所各核素日等效操作量的叠加值为 2.48×10^9 Bq，对照表 2-2 非密封源工作场所分级标准确定的分级结果为乙级工作场所。根据学校提供的实际日使用情况资料，在实际操作过程中，学校日使用核素最多不超过 5 种，最常用的核素为 ¹⁴C、³²P、³H 和 ³⁵S 四种核素。因此，可得出一般情况下学校日等效操作量为 1.92×10^9 Bq 左右。

参照《临床核医学卫生防护标准》(GBZ120-2006)中关于“按不同级别工作场所室内表面和装备的要求”，见表 8-2。

表 8-2 按不同级别工作场所室内表面和装备的要求

工作场所	地面	表面	通风柜	室内通风	管道	清洗及去污设备
乙	易清洗且不易渗透	易清洗	需要	有较好通风	一般要求	需要

因此，实验室设计上要求各放射性实验室地面采用塑料地平，各地面光滑平整，比较容易清洗。工作台面用大理石拼接，易清洗。实验室需配备有负压通风橱，通风橱要有足够风速(一般风速不小于 1m/s)。通风系统需采用独立通风系统设计，各通风管道上还需装有逆止阀，保证有较好的通风，以满足乙级工作场所的管理要求。

(2) 工作场所分区管理

按照《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)的要求，放射性同位素工作场所依据管理的需要，可分为控制区和监督区。其中，①控制区

为放射性实验室，放射性废水、固体废弃物收集后的贮存室，须张贴电离辐射标志。②监督区为控制区外淋浴房等卫生通过间，同样须张贴电离辐射标志。

放射性同位素储存场所位于实验室一楼，储存室实行双人双锁管理，并安有与 110 联网的监控摄像。核素置于密封容器内并根据要求储存于保险柜或低温冰箱内，确保核素的有效保存，不泄漏。根据整个科研用房的消防设计说明，工程配置消火栓及灭火器作为消防设施，每个消火栓箱内配置三具干粉灭火器，可确保防火安全。一楼储存室核素通过专用的小电梯运送到其他楼层实验室。放射性废物的运输也通过专用小电梯运输至一楼，再外送。

整个放射性工作场所与普通实验室采用门禁隔离，放射工作人员统一从一楼更衣后进入放射性实验室，并从专用小电梯到达其它楼层。非应急情况下，楼层隔离门禁不进出。放射性物品及废物的运输也统一通过专用小电梯运送，具体见附图 5。

（3）放射性废液（废水）

参考《医用放射性废物的卫生防护管理》（GBZ 133-2009）5.1.1 款规定，使用放射性核素其日等效最大操作量等于或大于 $2 \times 10^7 \text{Bq}$ 的临床核医学单位和医学科研机构，应设置有放射性污水池以存放放射性废水直至符合排放要求时方可排放。放射性污水池应合理选址，池底和池壁应坚固、耐酸碱腐蚀和无渗透性，应有防渗漏措施。

实验后，实验废液（放射性核素浓度较高）倒入专用桶内进行固化。盛放废液的器皿（闪烁瓶、烧杯和容量瓶等）倒扣在铺垫吸水纸（足够厚）的塑料盆中，即利用吸水纸吸干残余在容器器皿的废液，最后约用 500ml 水冲洗上述器皿，其中短寿命核素冲洗水倒入衰变池，长寿命核素的冲洗水进入专用桶进行固化。衰变池内低放废液，经审核部门检测确认，可直接排入流量大于 10 倍排放量的普通下水道；每月排放总活度或每一次排放活度不超过 GB18871-2002 所规定的限值要求，且每次排放后用不少于 3 倍排放量的水进行冲洗，每次排放应做记录并存档。

在科研实验用房放射性实验室北侧地下设有放射性衰变池，其所在位置见附图 4。衰变池为连续式设计（如下图所示），池底和池壁坚固、耐酸碱腐蚀、防渗漏措施完善。采用推流式排放，总容积约为 30m^3 。保守假设实验器皿内残留的放

放射性核素用约 500ml 水进行冲洗，其中短寿命核素冲洗水倒入衰变池，长寿命核素的冲洗水进入专用桶进行固化。这里将 ^7Be 、 ^{32}P 、 ^{33}P 、 ^{35}S 、 ^{51}Cr 、 ^{59}Fe 、 ^{74}As 、 ^{86}Rb 、 ^{89}Sr 、 ^{95}Zr 、 ^{125}I 和 ^{141}Ce 共 12 种核素作为短寿命核素，允许进入衰变池。这些核素中半衰期最长的核素为 ^{35}S ，其半衰期为 87.4d，则 10 个半衰期为 874d。假设这 12 个核素每天实验一次，每次用 500ml 水冲洗实验器皿，则实验废水产生量为 6L/d。10 个半衰期 874d 最大需要 5.24m^3 的容积。同时考虑应急淋浴产生的水量，按每月 1 次，一次需水 100L，10 个半衰期 874d 约产生废水 2.9m^3 。因此，设计的衰变池大小 30m^3 可保证废液中核素在衰变池内贮存 10 个半衰期以上。

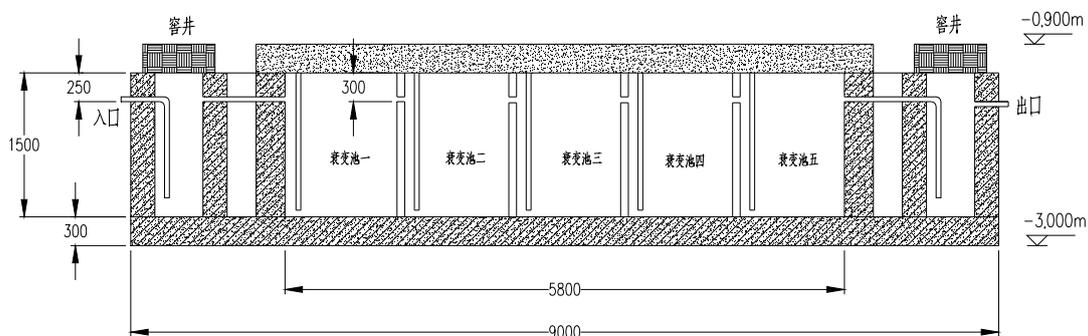


图 8-1 衰变池示意图

废液排放还需满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002) 第 8.6.2 款规定的：

- a) 每月排放的总活度不超过 10ALI_{\min} (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 1ALI_{\min} ，并且每次排放后用不少于 3 倍排放量的水进行冲洗。

同时，本项目相关的废水均收集后处理至中性后排放，排放应有适当的流量和浓度监控设备，排放是受控的，并做好排放记录工作。

根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002) 附录 B 的规定，对于放射性核素 j ，可由相应的食入和吸入单位摄入量所致的待积有效剂量 $e(g)_{j,\text{ing}}$ 和 $e(g)_{j,\text{inh}}$ 计算该核素的年摄入量限值， $I_{j,L}$ ：

$$I_{j,L} = \text{DL} / e_j$$

式中：DL——相应的有效剂量的年剂量限值；

e_j ——放射性核素 j 的单位摄入量所致的待积有效剂量的相应值。

对于职业照射，在一定的假设下，可将 $I_{j,L}$ 用作 ALI。

对于多种核素，检验是否满足下列条件：

$$\frac{H_p}{DL} + \sum_j \frac{I_{j,ing}}{I_{j,ing,L}} + \sum_j \frac{I_{j,inh}}{I_{j,inh,L}} \leq 1$$

H_p ——贯穿辐射照射所致的个人剂量当量；

$I_{j,ing}$ 和 $I_{j,inh}$ ——同一期间内食入和吸入放射性核素 j 的年摄入量；

$I_{j,ing,L}$ 和 $I_{j,inh,L}$ ——食入和吸入放射性核素 j 的年摄入量限值（ALI）。

本项目中的短寿命核素废液排放满足情况计算如下表所示。从表中可知，假设进入衰变池的洗涤废液中放射性核素含量仅为日使用量的 1%，经过 10 个半衰期后产生的废水排放能满足 GB18871-2002 的限值规定。

表 8-3 废液排放满足情况计算表

核素	日最大使用量 (Bq)	10 个半衰期 (Bq)	吸入 ALI (Bq)	食入 ALI (Bq)	ALI _{mi} (B)	单次满足情况	月限值满足情况
⁷ Be	7.40E+05	7.23E+02	4.17E+08	7.14E+08	4.17E+08	1.73E-06	5.20E-06
³² P	7.40E+06	7.23E+03	2.50E+07	8.33E+06	8.33E+06	8.67E-04	2.60E-03
³³ P	3.70E+06	3.61E+03	2.08E+08	8.33E+07	8.33E+07	4.34E-05	1.30E-04
³⁵ S	3.70E+06	3.61E+03	1.54E+07	2.60E+07	1.54E+07	2.35E-04	7.05E-04
⁵¹ Cr	3.70E+05	3.61E+02	5.56E+08	5.26E+08	5.26E+08	6.87E-07	2.06E-06
⁵⁹ Fe	1.85E+05	1.81E+02	5.71E+06	1.11E+07	5.71E+06	3.16E-05	9.48E-05
⁷⁴ As	1.85E+05	1.81E+02	9.52E+06	1.54E+07	9.52E+06	1.90E-05	5.69E-05
⁸⁶ Rb	1.85E+05	1.81E+02	1.54E+07	7.14E+06	7.14E+06	2.53E-05	7.59E-05
⁸⁹ Sr	1.85E+05	1.81E+02	2.67E+06	7.69E+06	2.67E+06	6.77E-05	2.03E-04
⁹⁵ Zr	1.85E+05	1.81E+02	3.64E+06	2.27E+07	3.64E+06	4.97E-05	1.49E-04
¹²⁵ I	3.70E+05	3.61E+02	2.74E+06	1.33E+06	1.33E+06	2.71E-04	8.13E-04
¹⁴¹ Ce	1.85E+05	1.81E+02	5.56E+06	2.82E+07	5.56E+06	3.25E-05	9.76E-05
合计						1.64E-03	4.93E-03

(4) 放射性固体废弃物

由污染源分析可知，放射性固体废弃物主要有经实验后的桶装固化废液，实验产生的部分实验废物（包括动植物样品、土壤样品及测量后的剩余样品等），

同时还包括一次性试验手套，废玻璃器皿，拭擦过废液的纸巾等物品。

同位素试验相关工作场所的放射性固体废弃物收集在专用污物桶内，再将污物桶内的固体废弃物连同垃圾袋存放到放射性污物暂存库内，定期交由有资质的单位回收，污物暂存库位置见附图 3。用来收集放射性固体废弃物的专用污物桶须贴上电离辐射标志，并把受不同核素污染的固体废物分开收储，即按放射性核素的种类标记放射性废物，每次收集时收集袋表面应贴上标签，标明核素种类及最后一天的收集时间。放射性污物暂存库须实行双人双锁，专人管理，大门上显著位置设置电离辐射警告标识，并在平时工作中对该房间及周围环境加强辐射剂量的监督检测。另外，放射性固体废物送至暂存库以及暂存库的固体废物外运处理，均必须在下班后进行，以避免人员高峰。

根据最优化原则，学校还应根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）对源豁免要求的规定，对于符合标准附录 A 中所规定的豁免要求的放射性固体废物向审管部门申请豁免，以减少放射性固体废物的产生量。同时，在实际操作过程中，加强放射性操作器皿及实验用品的重复利用，尽量减少放射性固体废物的产生量。

（5）放射性废气

由污染源分析可知，实验室使用放射性同位素介质基本为水，操作简单。同时采取了一系列措施，使放射性同位素回收率在 95%以上；严防放射性物质通过呼吸道、口腔食入、皮肤进入人体内，避免了食入、吸入等内照射影响。操作放射性药物的实验室都设置有负压通风柜，通风柜工作时应有足够风速（一般风速不小于 1m/s）。同时，考虑到放射性实验室用房西侧 60 米左右规划有 6 层楼高的学生公寓用房。因此，在顶部排风口需加装高效粒子过滤装置，确保能对放射性核素有效过滤。同时，排气口需高于该 6 层学生公寓 5 米。

（6） β 表面污染

实验室投入使用后其 β 表面污染影响采用类比监测的评价方法进行评价。类比对象选取浙江大学核农所原有的实验室。根据学校提供的资料，实验中所用核素相同，实验方法过程一致，核素用量相近，因此具有一定的可比性。

其类比监测结果见表 8-4。

表 8-4 类比项目在用放射性同位素实验室表面污染监测结果

序号	测点描述	β 表面污染 (Bq/cm ²)
1	各实验室工作台面	<0.4
2	各实验室地面	<0.4
3	各实验室墙壁	<0.4
4	操作工作人员衣服	<0.4
5	操作工作人员手	<0.4

从表 8-4 的类比监测结果可以看出，原有核农所各实验室工作台面、地面、墙壁、操作工作人员衣服和操作工作人员手部等各个有可能造成表面污染的场所均未测出有表面污染。

由此可以预测，本项目投入使用后，其 β 表面污染水平也能符合《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002) 中关于 β 表面污染的要求。

(7) 内照射影响

浙江大学在操作过程中采取了一系列措施，使放射性同位素回收率 95% 以上，具体如下：

①对需要使用的玻璃仪器进行前处理，减少器皿表面对放射性同位素的吸附；

②加入适量的载体，提高常量物质浓度，减少放射性胶体的形成，最大限度减少操作过程中的损耗，提高放射性物质的回收率；

③每操作一步进行放射性的测量，回收各种放射性组份以保持放射性物料的守恒；

④利用氧化燃烧仪，在封闭或循环回路中，将标记化合物和/或放射样品（生物和土壤）转化成溶液可吸收的物质，如将各种碳-14 样品转化成 ¹⁴C-CO₂，将各种氚标记样品转化成 H₂O 后，用含 NaOH 或碱性乙醇胺的闪烁液吸收，这种方法的回收率通常高达 95% 以上。

同时在各种放射性操作过程中，采取科学的措施进行内照射防护，严防放射性物质通过呼吸道、口腔食入、皮肤进入人体内。主要的内照射防护措施如下：

①工作人员必须熟练掌握辐射安全操作知识和技能，严格按操作规程进行放射性工作实践；

②工作人员进入放射性工作区前，需穿戴工作服、换工作鞋、佩带必要的个人防护用品和器材；

③不准将无关物品带入放射性工作区，严禁在放射性实验室内进食、饮水、吸烟或存放物品；

④工作人员身体有创伤时，禁止从事各种放射性实验操作；

⑤接触放射性物品时必须带上乳胶手套，配备表面污染监测仪和个人剂量计进行剂量监测和控制。涉及放射性粉尘、液体和气体的所有操作必须在通风柜或密封的手套箱内进行，同时带上适宜的防毒面具或含吸附剂的多层口罩，努力实现防护的最优化；

⑥放射性溶液加热、蒸发、浓缩和烘干等操作都必须在通风柜内进行。在操作过程中严防器皿破裂和溶液飞溅；

⑦在操作发射 γ 射线及能量较高的 β 粒子的放射性物质时，须有防护屏（屏蔽铅砖、铅板、铅玻璃或一定厚度的有机玻璃屏）和手套箱等，戴上铅玻璃眼镜，穿上铅防护服（全身或背心）等。对高能 β 粒子的防护必须考虑韧致辐射；

⑧严禁带着放射性污染的手套任意操作公用仪器和接触非放射性器皿；

⑨离开操作现场时必须认真洗手，并经测量仪器检测，如有放射性污染必须清洗干净后方可离开。

因此，从操作流程可知，95%放射性同位素均被回收，剩余的放射性同位素转入了放射性废液，放射性固体废弃物中。同位素操作严格在负压通风柜内进行，且工作人员采取了严格的措施，因此，操作放射性同位素对工作人员产生的内照射影响可以忽略不计。

（8）外照射剂量估算

射线对辐射工作人员及公众成员的外照射影响采用理论计算的方式进行评价。由于 β 粒子穿透距离较小，通过一定的防护（如有机玻璃及橡胶手套等）并在操作上严格控制，其产生的剂量基本可以忽略。因此，这里主要考虑 γ 射线影响。

①剂量率的选取与估算

放射性同位素无屏蔽时剂量率可按下式计算：

$$D = \frac{A \cdot \Gamma}{R^2} \dots\dots\dots (8-1)$$

式中 D: γ 辐射剂量率水平

A: 辐射源放射性活度

Γ : 各种核素的 γ 照射率常数

R: 预测点离源的距离

年有效剂量当量可按下式计算:

按照联合国原子辐射效应科学委员会 (UNSCEAR) --2000 年报告附录 A, X 射线产生的外照射人均年有效剂量当量按下列公式计算:

$$H_{E,r} = D_r \times t \times 0.7 \times 10^{-6} (mSv) \dots\dots\dots (8-2)$$

其中: $H_{E,r}$: X 射线外照射人均年有效剂量当量, mSv/a;

D_r : X 射线空气吸收剂量率, nGy/h;

t: X 射线照射时间, h/a;

0.7: 剂量换算系数, Sv/Gy。

②辐射工作人员

由公式 8-1 可知, 各同位素对周围环境产生的 γ 辐射剂量率水平与 Γ 成正比。同时, 根据学校统计, 每次实验近距离 (30cm) 接触约为 30min, 根据式 8-2, 可以估算出各同位素实验的辐射工作人员每年所受的年有效剂量当量, 见表 8-5。

表 8-5 各同位素所产生的年有效剂量当量

序号	核素	E_{γ} 主要 (MeV)	$\Gamma(R \cdot m^2/h \cdot Ci)$	年有效剂量当量 mSv
1	3H	--	--	--
2	7Be	0.47759	0.029	1.96E-01
3	^{14}C	--	--	--
4	^{22}Na	1.27455	1.21	4.09E-01
5	^{32}P	--	--	--
6	^{33}P	--	--	--
7	^{35}S	--	--	--
8	^{36}Cl	2.30784	0.00001	3.38E-06
9	^{40}K	1.46075	0.080	2.70E-02

10	⁴⁵ Ca	0.01247	0.00001	6.76E-05
11	⁵¹ Cr	0.32003	0.018	6.08E-02
12	⁵⁹ Fe	1.09922	0.63	1.06E+00
13	⁶⁰ Co	1.17321	1.32	2.23E+00
14	⁶⁵ Zn	0.338	0.314	5.31E-01
15	⁷⁴ As	0.5959	0.45	7.60E-01
16	⁸⁶ Rb	1.0772	0.051	8.62E-02
17	⁸⁸ Y	1.83613	1.32	2.23E+00
18	⁸⁹ Sr	--	--	--
19	⁹⁰ Sr	--	--	--
20	⁹⁵ Zr	0.72418	0.41	6.93E-01
21	¹⁰⁹ Cd	--	1.13	1.91E+00
22	¹²⁵ I	0.03548	0.0043	1.45E-02
23	¹³³ Ba	0.356	0.21	1.42E-02
24	¹³⁴ Cs	0.56929	0.90	1.52E+00
25	¹³⁷ Cs 子体发射	0.662	0.32	5.41E-01
26	¹⁴¹ Ce	0.14544	0.0077	1.30E-02
合计	--	--	--	12.3

从表 8-5 可知，从事所有同位素实验产生的年有效剂量当量合计为 12.3mSv，学校共有 9 名辐射工作人员共同承担示踪实验工作，产生剂量大的核素（主要有 ⁵⁹Fe、⁶⁰Co、⁸⁸Y、¹⁰⁹Cd、¹³⁴Cs 等）由不同的工作人员承担，避免了个别人员剂量超标现象，则每个辐射工作人员所受的附加年有效剂量当量为 1.37mSv。本评价项目以 5mSv 作为管理限值，相比之下，学校的辐射工作人员所接受剂量低于管理限值，符合《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）中关于“剂量限值”的要求。

根据浙江建安检测研究院有限公司对浙江大学核农业科学研究所放射工作人员个人剂量监测的检测报告（见附件 4），学校辐射工作人员 2013 年第一季度的个人累计剂量最大值为 0.25mSv，小于当前理论估算的 1.37/4=0.34mSv。

③公众成员

学校对放射性同位素实验室严格管理，使公众成员不会到达控制区与监督区，因此公众成员不会受到显著的额外辐射照射。

8.3.2 电子加速器

(1) 机房布局合理性分析

本项目中的电子直线加速器装置位于待建加速器机房内，加速器机房为一独立二层建筑，加速器主机厅、电源室及控制大厅位于加速器机房二层，两个辐照室位于机房一层，主射方向向下。二层主机厅西侧为调制室及电源室，再靠外为控制大厅，南侧依次为水冷设备间，备品备件间和休息室，北侧、东侧为机房外空地。一层辐照室东侧为装卸料大厅，其余为机房外空地。加速器机房一、二层平面布置图及立面图见附图10~附图12。在加速器运行时，加速器主机厅和辐照室禁止任何人员进入。在满足屏蔽设计前提下，从整体上看，加速器机房的布局是合理的。

(2) 设计屏蔽分析

加速器机房各层设计屏蔽情况见表8-6，8-7。屏蔽设计材料主要采用普通混凝土(2.35g/cm^3)、石蜡(0.9g/cm^3)和铅(11.34g/cm^3)。在以下所有的设计中都是采用这些屏蔽材料(没有特指的情况下混凝土一般指普通混凝土)。

表 8-6 辐照室设计屏蔽情况一览表

项 目	辐照室
辐照室尺寸	西侧：长、宽、高分别约为 15.5m、2.95m 和 2.3m 东侧：长、宽、高分别约为 15.5m、3.1m(2.6m)和 2.3m
各屏蔽墙厚度	A 墙：3400mm 混凝土墙；B 墙：3200mm 混凝土墙； C 墙：2550mm 混凝土墙；D 墙：3200mm 混凝土墙； E 墙：1500mm 混凝土；F 墙：1100mm 混凝土墙；G 墙：2900mm 混凝土；H 墙：1500mm 混凝土。
顶棚厚度	I 墙：1000mm 混凝土；J 墙：2000mm 混凝土
出入门	东南小门：70mm 铅+两侧各 10cm 石蜡
迷道	迷道宽 1.85m，长约 20m，如附图 10 所示
通风设施	U 型通道，机械通风

表 8-7 主机厅设计屏蔽情况一览表

项 目	加速器主机室
主机室尺寸	长、宽、高分别约为 11.5m、7.35m 和 9.5m
各屏蔽墙厚度	K 墙：3100mm 混凝土墙；L 墙：2900mm 混凝土墙； M 墙：2550mm 混凝土墙；N 墙：2500mm 混凝土墙； O 墙：1800mm 混凝土。
顶棚厚度	J 墙：2000mm 混凝土
出入口	70mm 铅+两侧各 10cm 石蜡，入口处有门机连锁、 光电连锁安全装置
迷道	迷道宽 2.5m，长约 10m，如附图 11 所示
通风设施	机械通风

(3) 辐射分区

按照《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)的要求，辐射工作场所依据管理的需要，可分为控制区和监督区。

在加速器运行时，加速器机房辐照室和主机厅为辐射控制区，控制机房和调制器及电源室为辐射监督区，其它区域不受限制。

(4) 辐射影响分析

1) X射线辐射影响分析

根据学校提供的加速器资料，加速器具有三种运行模式，提供相应研究及应用能力，输出能量分别为：7.5MeV、10MeV和12MeV。本项目评价时保守考虑，均按12MeV进行计算。

加速器产生 X 射线对环境的影响主要存在于加速器周围，影响的主要人群为加速器系统操作人员、辐照物品搬运人员、实验室工作人员以及在加速器厂房内的其他工作人员（公众）。

除本加速器特有的参数和另有标注的内容外，以下计算中出现的公式和系数均参考NCRP 51号报告和NCRP 151号报告。

a) 一层辐照室一次透射X射线剂量估算

一层辐照室屏蔽主要考虑主射线束经辐照物体散射后对屏蔽墙外的影响。两间辐照室取保守侧辐照室计算。

一次 X 射线透射率计算公式为：

$$H_p = \frac{D_0}{10^{\frac{dp}{TVL}} r^2}$$

式中：

H_p ——参考点处的瞬时剂量率控制水平， $\mu\text{Sv/h}$ ；

D_0 ——靶距 1m 处 X 射线产额，取 $1.26 \times 10^9 \mu\text{Gy} \cdot \text{m}^2/\text{h}$ ；

r ——参考点与靶点间的距离，m；

dp ——主屏蔽墙厚度，m；

TVL ——对不同能量的宽束 X 射线，防护材料的十分之一值层厚度，m。

以上各项参数的取值及计算结果见下表，屏蔽厚度和计算路径见附图 10。

表 8-8 各剂量点剂量率计算结果

参数 \ 方位	东侧#1	南侧#2	西侧#3	北侧#4	顶#5	顶#6
r (m)	5.5	10.5	11.5	10.5	7.8	14.5
dp (m)	3.4	2.9	2.55	2.5	3.27	3.0
TVL (m)	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36
H_p ($\mu\text{Sv/h}$)	1.50E-02	1.48E-02	2.33E-02	1.48E-02	1.74E-02	2.78E-02

注：由于二层屋顶上不会有人员停留，因此屋顶厚度按照屋顶无人员长期驻留的情况设计

b) 一层辐照室迷道反射 X 射线剂量估算

西处两个迷道口呈对称设计，因此，这里只分析靠南侧迷道口。射线线束到达迷道口的辐照路径主要考虑三条路径，见附图 10。东南侧迷道口主要考虑二条辐照路径，同时考虑东侧迷道墙处剂量，见附图 10。

射线到达迷道口的剂量率估算公式为：

$$H_n = H_0 \cdot \frac{(a_1 \cdot A_1)(a_2 \cdot A_2) \cdots (a_n \cdot A_n)}{(d_1 \cdot d_2 \cdots d_n)^2}$$

式中：

- H_n X射线在参考剂量点处的剂量率， $\mu\text{Sv/h}$ ；
- H_0 第一次反射面上的入射剂量率， $\mu\text{Sv/h}$ ；
- a_1 X射线第一次反射系数，取 0.003；
- a_n X射线的第 n 次反射系数，取 0.02；
- A_1 第一次反射的反射面积， m^2 ；
- A_n 多于一次反射的迷道截面积， m^2 ；
- d_n 第 $n-1$ 次反射面到第 n 次反射面之间的距离， m ；
- n 反射次数，次。

经计算，迷道口处的剂量率（单位： $\mu\text{Sv/h}$ ）见下表：

表 8-9 迷道口处各剂量点剂量率计算结果

方位路径 参数	西迷道口#7			东南迷道口#8		东南#9
	散射后直 射	直射后 散射	散射至 迷道口	散射至迷 道口	直射	散射后直 射
散射次数	1	2	5	2	0	1
混凝土屏蔽厚度 (cm)	150	200	0	0	280	150
铅屏蔽厚度 (cm)	0	0	0	7	7	0
H_n ($\mu\text{Sv/h}$)	9.12E-07	1.49E-02	4.14E-03	8.62E-03	9.31E-03	3.65E-06
合计 ($\mu\text{Sv/h}$)	1.90E-02			1.79E-02		3.65E-06

c) 二层主机厅一次透射X射线剂量估算

正常情况下，主机厅屏蔽主要考虑一层辐照室内产生的韧致辐射通过一二层间的预设孔洞（二楼主机与一楼扫描装置连接处）照射到二楼加速器主机产生的散射，但由于本项目模式 3 状态下要实现由“垂直输出模式”向“水平输出模式”的切换，这会产生一定的漏射，而漏射强度要高于一层辐照室的散射

线的影响。因此主机室四侧墙体的防护性能主要考虑上述偏转时的漏射线产生的影响。相应的计算公式与上文相同；各项参数的取值及计算结果见下表，屏蔽厚度和计算路径见附图 11。

表 8-10 二层各剂量点剂量率计算结果

参数 \ 方位	东侧#10	南侧#11	西侧#5	北侧#12	顶部#6
$r(m)$	5.5	6.0	3.5	10.5	9
$dp(m)$	3.1	2.9	2.55	2.5	2.0
$TVL(m)$	0.36	0.36	0.28	0.36	0.28
H_p (漏射) ($\mu Sv/h$)	2.43E-02	7.33E-02	1.91E-02	3.09E-01	2.67E-01

注：由于屋顶上不会有人员停留，因此屋顶厚度按照屋顶无人员长期驻留的情况设计。除西侧外，其它侧都为二层楼外，也按无人员长期驻留设计。

d) 二层主机厅迷道反射X射线剂量估算

漏射线束到达迷道口的辐照路径主要考虑二条路径，如附图 11。相应的计算公式与上文相同；经计算，迷道口处的剂量率（单位： $\mu Sv/h$ ）见下表：

表 8-11 二层迷道口剂量点剂量率计算结果

参数 \ 方位路径	二楼西侧迷道口#13	
	散射至迷道口	直射
散射说明	散射至迷道口	直射
散射次数	1	0
混凝土屏蔽厚度 (cm)	0	240
铅屏蔽厚度 (cm)	7	7
H_n ($\mu Sv/h$)	8.26E-03	7.59E-04
合计 ($\mu Sv/h$)	9.02E-03	

2) 中子辐射影响分析

电子加速器的 X 射线最高能量大于 8MeV 时，由被加速的电子产生 X 射线

与物质作用会产生光中子，在有用辐射源外，由于(γ, n)反应而产生的中子辐射称之为直接中子辐射，对经反射后中子产生的辐照，称为反射中子辐射。在设计中应同时考虑对直接中子辐射和反射中子辐射的屏蔽。

由于加速器主机厅泄漏电子产生的 X 射线能量较小，不超过 7MeV，因此产生的中子可忽略不计。对于辐照室，保守假定产生的中子能量为 12MeV(其品质因子取 10)，剂量率与 X 射线一致，则对应的第一个和其后的十分之一减弱层混凝土厚度均为 33cm，对于反射中子其第一个和其后的十分之一减弱混凝土厚度为 13cm，石蜡厚度为 8cm。

a) 直接中子辐射影响计算

直接中子辐射剂量率计算公式为：

$$D = \frac{D_0 \cdot K \cdot Q}{10^{\frac{S-T_1+T_e}{T_e}}} \quad (8-3)$$

式中：

- D 中子辐射剂量率， $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ ；
- S 屏蔽墙厚度，cm；
- T_1 屏蔽层中第一个 1/10 减弱层厚度，cm；
- D_0 中子俘获 γ 射线的剂量率，取 $1.26 \times 10^9 \mu\text{Gy}\cdot\text{m}^2/\text{h}$ ；
- K 在无屏蔽时的剂量衰减系数；
- Q 射线的辐射权重因子；
- T_e 第一个 1/10 减弱层之后的 1/10 减弱层厚度，cm。

用公式(8-3)式计算 D 时，其中直接中子衰减系数 K 用下式计算：

$$K = \frac{\dot{D}_n}{\dot{D}_r} \cdot \frac{1}{a_d}$$

其中：

- $\frac{\dot{D}_n}{\dot{D}_r}$ 距发射点 1m 处的中子辐射剂量率与有用辐射剂量率之比，

$$\text{对 X 射线, } \frac{\dot{D}_n}{\dot{D}_r} = 5 \times 10^{-4};$$

a_d 有用辐射发射点或漏束辐射发射点到参考点的距离, m。

以上各项参数的取值及计算结果见下表, 屏蔽厚度和计算路径见附图 10。

表 8-12 辐照间中子透射各剂量点剂量率计算结果

方位 \ 参数	照射方式 (m)	距离 (m)	混凝土厚度 (cm)	D ($\mu\text{Sv/h}$)
东侧#1	直接照射	5.5	340	5.70E-06
南侧#2	直接照射	10.5	320	1.21E-05
西侧#3	直接照射	11.5	310	2.21E-05
北侧#4	直接照射	10.5	320	1.21E-05
顶#5	直接照射	7.8	326(垂直厚度 210)	1.02E-05
顶#6	直接照射	14.5	300	3.52E-05

b) 反射中子辐射剂量率计算

用公式(8-3)式计算反射中子辐射剂量率时, 其中反射中子衰减系数 K 用下式计算:

$$K = \frac{\dot{D}_n}{\dot{D}_r} \cdot \frac{1}{d_g} \cdot (\alpha_1 \cdot \frac{A_1}{L_1^2}) \cdot (\alpha_2 \cdot \frac{A_2}{L_2^2}) \cdots (\alpha_n \cdot \frac{A_n}{L_n^2})$$

式中:

α_1 中子第一次反射系数;

α_n 中子第一次反射后的反射系数;

d_g 中子从发射点到一次反射面的距离, m;

A_1 第一次反射的反射面积, m^2 ;

A_n 多于一次反射的迷道截面积, m^2 ;

L_n 第 n-1 次反射面到第 n 次反射面之间的距离, m;

n 反射次数;

其余参数说明见公式(8-3)。

经计算，迷道口处的剂量率（单位： $\mu\text{Sv/h}$ ）见下表：

表 8-13 辐照间迷道口中子所致剂量率计算结果

方位 \ 参数	照射方式 (m)	混凝土厚度 (cm)	屏蔽门石蜡厚度 (cm)	屏蔽门铅厚度 (cm)	D ($\mu\text{Sv/h}$)	合计 ($\mu\text{Sv/h}$)
西迷道口#7	先散射后直射	150			3.19E-09	3.66E-05
	先直射后散射	200			2.21E-05	
	多次散射	-			1.45E-05	
东南迷道口#8	直射	280(垂直 235)	20	7	1.68E-04	3.65E-03
	多次散射	-	20	7	3.48E-03	

3) 辐射影响汇总

根据浙江大学提供的资料，加速器的年工作时间为 2000 小时，学校计划安排 3 人负责加速器的操作（1 人负责控制室，1 人负责安全巡检，1 人负责剂量监测），计划安排 8 人负责辐照物品搬运（2 人搬上，2 人搬下，4 人一组，分两组轮换，一组工作两小时），以上人员一天工作 8 小时，一年工作 250 天。加速器系统周围人员（包括放射工作人员和公众）受到的年剂量见下表。

表 8-14 加速器系统周围人员所受年剂量计算结果

考虑的辐射来源	位置	周围环境	辐射分区	居留因子	剂量率 ($\mu\text{Sv/h}$)	年剂量 (mSv/年)
辐照室	东侧#1	一楼室外过道	无限制	1/4	1.50E-02	7.50E-03
	南侧#2	一楼室外过道		1/4	1.48E-02	7.41E-03
	西侧#3	一楼装卸大厅		1	2.33E-02	4.66E-02
	北侧#4	一楼室外过道		1/4	1.48E-02	7.41E-03
辐照室和主机厅	顶#5	二楼控制室（电源室）	监督区	1	3.65E-02	7.30E-02
辐照室和主机厅	顶#6	二楼楼顶	无限制	1/16	2.95E-02	3.69E-02
辐照室	西迷道口#7	一楼装卸大厅		1	1.90E-02	3.81E-02

	东南迷道口#8	一楼室外过道		1/4	2.16E-02	1.08E-02
	东南#9	一楼室外过道		1/4	3.65E-06	1.83E-06
主机厅	东侧#10	二楼室外		1/16	2.43E-02	3.04E-03
	南侧#11	休息室及备件室		1/4	7.33E-02	3.67E-02
	北侧#12	二楼室外		1/16	3.09E-01	3.86E-02
	西迷道口#13	二楼控制室（电源室）	监督区	1	9.02E-03	1.80E-02

注：顶#5和顶#6处的剂量率皆为一层辐照间影响与二层主机厅影响之和。

由上表可见，加速器运行所致最大职业剂量为 $7.30E-02\text{mSv/年}$ ，位于加速器机房二楼控制室内；最大公众剂量为 $4.66E-02\text{mSv/年}$ ，位于一层辐照器西侧货物装卸区。以上剂量值均符合 GB18871 中的限值，也要低于本项目建议的剂量约束值。

保守同时考虑放射性同位素实验操作对放射工作人员的剂量影响，则该加速器操作人员的最大剂量为 1.44 mSv/年 。该剂量值也符合 GB18871 中的限值，并低于本项目建议的剂量约束值。

加速器机房北侧 40 米左右为创业街办公用房，西侧 60 米处为学生公寓，对这两个区域公众人员进行剂量估算。根据前文计算公式，可得创业街办公用房处剂量率为 $1.3E-02\mu\text{Sv/h}$ ，学生公寓处剂量率为 $4.6E-04\mu\text{Sv/h}$ 。与该处环境本底剂量率对比可知，创业街办公用房处剂量率也仅为环境本底剂量率的 1/6 左右，可基本忽略其影响。两处的年剂量值也符合 GB18871 中公众限值的要求，并低于本项目建议的公众剂量约束值。

(5) 电子直线加速器室臭氧对环境影响分析

电子束在空气中的穿行过程中因与空气相互作用而产生臭氧和氮的氧化物等有毒有害气体，其中以臭氧的毒性为最大，产额最高，且限制较氮化物等其它产生的有害气体严。臭氧不仅对人体有害，而且能使橡胶等材料加速老化，因此，它是加速器使用过程中必须考虑的有毒有害气体。当加速器室达到一定的通风要求后，室内臭氧浓度达到限值以下时，则氮氧化物等的浓度会远低于限制值浓度，因此在考虑通风时以臭氧为主。

根据标准 GBZ 2.1-2007 的规定，工作场所的臭氧最大允许浓度为 0.3mg/m^3 ，

它相当于重量比 0.232ppm。

1) 臭氧产生量计算公式

对于本项目的电子直线加速器，当电子在空气中通过时会产生臭氧，需要进行通风。臭氧主要产生在一层辐照间，主机厅臭氧产生可忽略。根据 GB5172-1985，假定辐照室内无通风，臭氧不分解且在靶室内均匀分布，臭氧产生率用以下公式估算：

$$R_{O_3} = 4.19 \times 10^{-3} \cdot \left[\frac{S_{col} \cdot I \cdot d}{V} \right]$$

式中：

R_{O_3} ——单位体积中臭氧的产生率， $\text{mg/m}^3/\text{s}$ ；

S_{col} ——标准状态下，电子在空气中的碰撞阻止本领， keV/cm ；

I ——加速器的电子束流强度， mA ；

d ——器外电子束在辐照间空气中的穿行距离， cm ；

V ——辐照间自由容积， m^3 ；

4.19×10^{-3} 为单位换算常数。

2) 通风条件下臭氧浓度变化

假设辐照期间辐照室有通风，臭氧不分解且在把室内均匀分布，则辐照过程中，臭氧浓度的计算公式如下

$$C(t) = C_{O_3} \cdot V \cdot (1 - e^{-f \cdot t / V}) / f$$

式中：

$C(t)$ 臭氧在辐照工作 t 小时后的浓度， mg/m^3 ；

f 通风量， m^3/h ；

t 通风时间， h 。

其余参数同前。

辐照停止后继续通风，则辐照间内臭氧浓度按下式降低：

$$C'(t) = C_0 \cdot e^{-(f \cdot t / V)}$$

式中：

$C'(t)$ 辐照停止后通风 t 分钟时室内臭氧平衡浓度， mg/m^3 ；

C_0 辐照停止时，室内臭氧浓度， mg/m^3 ；

t 通风持续时间， h ；

其余参数同前。

根据建设单位提供的资料，当加速器开机工作时，通风系统即处于开启状态，通过通风使二层加速器室保持正压防止臭氧溢入，使一层辐照室保持负压防止臭氧溢出；且加速器工作时加速器室和辐照室内禁止人员进入。系统设计排风量为 $8000\text{m}^3/\text{h}$ ，则臭氧产生率及通风平衡浓度计算结果如下表。可见，辐照室内最大臭氧浓度为 $1.52\text{mg}/\text{m}^3$ 。

表 8-15 加速器辐照室臭氧产生率计算结果

电子能量 (MeV)	碰撞阻止本领 (keV/cm)	电流 (mA)	穿透距离 (cm)	室内容积 (m^3)	通风速率 (m^3/h)	臭氧产生率 ($\text{mg}/\text{m}^3 \cdot \text{s}$)	限值浓度 (mg/m^3)	平衡浓度 (mg/m^3)
12	2.6	2.0	100	200	$8.0\text{E}+3$	$2.19\text{E}-2$	0.3	1.52

说明：考虑了 2 倍臭氧浓度分布不均匀性。

加速器停止后，继续通风，辐照间内臭氧浓度变化如下表所示。可见，停止辐照后，还需继续通风 4min，方能满足 GBZ2.1-2007 中对于工作场所中臭氧浓度的规定 ($0.3\text{mg}/\text{m}^3$)，工作人员才能进入辐照间。

表 8-16 加速器辐照室臭氧浓度控制计算结果

通风时间(min)	臭氧浓度(mg/m^3)
1	$1.21\text{E}+00$
2	$6.20\text{E}-01$
3	$3.18\text{E}-01$
4	$1.63\text{E}-01$
5	$8.39\text{E}-02$
6	$4.31\text{E}-02$
7	$2.21\text{E}-02$

8	1.14E-02
9	5.83E-03
10	2.99E-03
11	1.54E-03
12	7.89E-04
13	4.05E-04
14	2.08E-04
15	1.07E-04

说明：考虑了 2 倍臭氧浓度分布不均匀性。

3) 加速器机房排出的臭氧对环境的影响

采用《环境影响评价技术导则-大气环境》(HJ/T 2.2-2008)中推荐的估算模式来计算臭氧对周围大气的影晌。本项目中的臭氧通过 18m 高的排气筒(排气口高于加速器机房屋顶 3 米)排放入大气,计算结果见下表。计算得到臭氧的最大落地浓度为 $3.15\mu\text{g}/\text{m}^3$,出现距离为下风向距排放点 60m 处。GB3095-1996 规定的二级标准的臭氧小时平均浓度限值 $0.2\text{ mg}/\text{m}^3$,由于排气筒高度没有高于周围 200 米内其它建筑 5 米以上,因此标准从严 50%,按 $0.1\text{ mg}/\text{m}^3$ 进行评价,同样满足达标排放。可见,本项目的臭氧排放远小于规定限值,不会对周围敏感点和环境造成明显的影晌。

表 8-17 臭氧最大落地浓度计算结果

臭氧排放速率 (mg/s)	烟囱高度 (m)	最大落地浓度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	最大落地浓度出现距 离(m)
4.36	18	3.15	60

(6) 加速器检修及材料更换

学校放射工作人员仅负责加速器的操作和管理,不包括设备的安装、故障维修、靶材料的更换等工作。与加速器相关的安装、故障维修、靶材料的更换等工作,由加速器生产厂商负责。根据生产厂商的要求,换靶工作在加速器机房的设备间进行,且严格遵守操作程序,并做好相应的辐射监测,必要时须采取一定的

个人防护措施和通风措施。换靶操作需在停束 6 小时以上方可进行。

8.4 事故分析

(1) 放射性同位素

①装有放射性核素药物的货包未按预定的时间到达时的事故。

②由于管理不善，发生放射性物品失窃，造成放射性污染事故。

③由于操作不慎，有少量的液态放射性同位素溅洒。发生这种事故应迅速用吸附衬垫吸干溅洒的液体，以防止污染扩散。然后用备用的塑料袋装清洗过程中产生的污染物品和湿的药棉、纸巾，从溅洒处移去垫子，用药棉或纸巾擦抹，应注意从污染区的边沿向中心擦抹，直到擦干污染区。用表面污染监测仪测量污染区，如果 β 表面污染大于 $40\text{Bq}/\text{cm}^2$ ，表明该污染区未达到控制标准，这时应用酒精浸湿药棉或纸巾擦拭，直到该污染区 β 表面污染小于 $40\text{Bq}/\text{cm}^2$ 为止。

(2) 电子加速器

电子加速器是一种将电能转换成高能电子束的设备，电子束受开机和关机控制，关机时没有射线发出。因此，检修方便，断电状态下也较为安全。在意外情况下，可能出现的辐射事故如下：

①工作人员或其他人员在防护门关闭前尚未撤离辐照室，电子加速器运行可能产生误照射。应在辐照室防护门内与控制室设置有人工紧急停机及开门按钮，只要未撤离人员了解该按钮的作用，可避免此类事故的发生。因此，在加速器机房内应设置此按钮醒目的指示和说明，便于在紧急情况下使用。

②安全连锁装置发生故障状况下，人员误入正在运行的加速器辐照室。只有当连锁装置发生故障情况时，工作人员强行运行电子加速器机，才可能发生此类事故。为避免此类事故的发生，要求工作人员每次上班时首先要检查防护门上的连锁装置是否正常。如果连锁装置失灵，应立即修复，并严格按照电子加速器操作程序进行生产作业。

③由于管理不善，加速器停机后辐照室内通风时间不够，现场调试人员进入 O_3 浓度超标的辐照室内造成伤害。

表 9 污染防治措施、辐射环境管理和监测计划

9.1 污染防治措施

9.1.1 放射性同位素

目前，放射性同位素实验室正在设计阶段。从辐射屏蔽看，普通钢混结构即可满足辐射屏蔽需求。但针对辐射环境防护的需要，设计中还需具有以下污染防治措施：

(1) 工作场所的分级

建设的同位素实验室为乙级工作场所，各放射性实验室地面需采用塑料地平，保持地面光滑平整，容易清洗。工作台面最好采用大理石拼接，易清洗。实验室设计上，需配备有负压通风柜，通风良好，并满足乙级工作场所的管理要求。

(2) 工作场所分区管理

按照《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)的要求，放射性同位素实验室依据管理的需要，可分为控制区和监督区。其中，①控制区为放射性实验室，放射性废水、固体废弃物收集贮存点。②监督区为控制区外淋浴房等卫生通过间。控制区和监督区均须张贴电离辐射标志。

整个放射性工作场所与普通实验室采用门禁隔离，放射工作人员统一从一楼更衣后进入放射性实验室，并从专用小电梯到达其它楼层。非应急情况下，楼层隔离门禁不进出。放射性物品及废物的运输也统一通过专用小电梯运送。

(3) 放射性废液(废水)

在科研实验用房放射性实验室北侧地下设有放射性衰变池，其所在位置见附图 4。衰变池为连续式设计，池底和池壁坚固、耐酸碱腐蚀、防渗漏措施完善。采用推流式排放，总容积约为 30m³。保守假设实验器皿内残留的放射性核素用约 500ml 水进行冲洗，其中短寿命核素冲洗水倒入衰变池，长寿命核素的冲洗水进入专用桶进行固化，经核算，可保证废液中核素在衰变池内贮存 10 个半衰期以上。此时废液的排放能满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)第 8.6.2 款规定的：

a) 每月排放的总活度不超过 10ALI_{min} (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 1ALI_{min}，并且每次排放后用不少于 3 倍排放

量的水进行冲洗。

同时，本项目相关的废水均收集后处理至中性后排放，排放应有适当的流量和浓度监控设备，排放是受控的，并做好排放记录工作。

（4）放射性固体废弃物

同位素试验相关工作场所的放射性固体废弃物收集在专用污物桶内，再将污物桶内的固体废弃物连同垃圾袋存放到放射性污物暂存库内，定期交由有资质的单位回收，污物暂存库位置见附图 4。用来收集放射性固体废弃物的专用污物桶须贴上电离辐射标志，并把受不同核素污染的固体废物分开收储，即按放射性核素的种类标记放射性废物，每次收集时收集袋表面应贴上标签，标明核素种类及最后一天的收集时间。放射性污物暂存库须实行双人双锁，专人管理，大门上显著位置设置电离辐射警告标识，并在平时工作中对该房间及周围环境加强辐射剂量的监督检测。另外，放射性固体废弃物送至暂存库以及暂存库的固体废物外运处理，均必须在下班后进行，以避开人员高峰。

根据最优化原则，学校还应根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）对源豁免要求的规定，对于符合标准附录 A 中所规定的豁免要求的放射性固体废物向审管部门申请豁免，以减少放射性固体废物的产生量。同时，在实际操作过程中，加强放射性操作器皿及实验用品的重复利用，尽量减少放射性固体废物的产生量。

（5）放射性废气

放射性同位素实验室设计中考虑了负压通风柜，操作放射性药物所使用的通风橱，工作中有足够风速（一般风速不小于 1m/s）。通风系统需采用独立通风系统设计，各通风管道上还需装有逆止阀，保证有较好的通风，以满足乙级工作场所的管理要求。考虑到放射性实验室用房西侧 60 米左右规划有 6 层楼高的学生公寓用房。因此，在顶部排风口需加装高效粒子过滤装置，确保能对放射性核素有效过滤。同时，排气口需高于该 6 层学生公寓 5 米。

（6）浙江大学在操作和防护方面采取了一系列措施，其内照射影响可以忽略不计。

（7）考虑到放射性同位素实验室操作对放射工作人员的剂量较大，学校规定对产生剂量大的核素（主要有 ^{59}Fe 、 ^{60}Co 、 ^{88}Y 、 ^{109}Cd 、 ^{134}Cs 等）由不同的工

作人员承担，并实行专人负责取用，防止个别人员剂量超标。同时，个人操作时需配备个人剂量报警仪。

(8) 浙江大学现配备了 LH-III 型 x/γ 个人剂量报警仪、LT-III x/γ 辐射剂量率仪、RAM-II x/γ 辐射剂量率仪、RAM-SURF-1 表面污染检测仪，LT-206 α/β 表面污染测量仪、盖格计数器、LT-3013 辐射剂量（率）仪等放射性污染监测仪器设备，以及乳胶手套、铅眼镜、铅衣服、铅砖、铅玻璃防护屏、有机防护屏、防辐射和防毒面具、口罩、平光眼镜等防护用品。由于本次项目中增加了电子加速器的工作内容，因此，学校还需增加个人报警中子计量仪等防护用品。

(9) 本项目中，如有学生临时参与项目，则该学生必须年满 16 周岁，且在相关放射工作人员陪同指导下工作，其剂量按本项目的公众剂量限值管理。对于参与相关科研课题研究，可能会长期接受照射的学生，必须按放射工作人员管理。

9.1.2 电子加速器机房屏蔽防护措施

(1) 屏蔽防护措施

对于电子加速器机房采用的主要屏蔽材料为普通混凝土(密度为 2.35g/cm^3)，屏蔽厚度满足辐射屏蔽防护需要。由于本项目电子束能量为 12MeV ，所以还需要考虑中子防护，因此，屏蔽门采用铅+石蜡的方式。

土建施工时要保证混凝土屏蔽层的施工质量，保证混凝土屏蔽层中各处的密度不小于 2.35g/cm^3 ，加强振捣措施，特别防止在屏蔽层中出现空洞和缝隙，建议一次性浇灌混凝土；

混凝土屏蔽墙不能随意贯穿，特别是在主束屏蔽范围内不准贯穿。屏蔽墙贯穿会产生漏束辐射，引起局部区域辐射水平的提高。如必须要贯穿混凝土屏蔽墙时，需在贯穿件的外表面和贯穿孔的内表面之间隙中填充屏蔽材料，同时保证本设计报告所要求的屏蔽厚度得到满足；

(2) 类比监测分析

为进一步说明本项目中电子加速器机房屏蔽厚度设计是安全的，现列举上海一医院 15MeV 电子加速器机房工作场所的周围环境辐射水平监测结果，作为类比分析。

本次测试条件为：X 射线能量为 15MeV ，输出剂量率为 4Gy/min ，主射方向为向北。机房的屏蔽材料和厚度如表 9-1 所示，监测结果如表 9-2 所示。

表 9-1 机房屏蔽墙体的材料和厚度

型号	屏蔽墙体
15MeV 直线加速器	东墙为 155cm 混凝土（地下室，墙外为实土），南墙为 160cm 混凝土（地下室，墙外为实土），顶为 250cm 混凝土，西墙为 160cm 混凝土，北墙为 79cm 混凝土加迷道 70cm 混凝土附加 9cm 铅板、15cm 石蜡，屏蔽门为 12mm 钢附加 2.5cm 铅板、16cm 石蜡

表 9-2 加速器机房的监测结果（ $\mu\text{Gy/h}$ ）

机房名称	监测点编号	监测点位置	监测结果
直线加速器	1	机房西面后装治疗室	0.20
	2	机房西面室内过道	0.30
	3	机房西侧大门处	1.3
	4	机房北面加速器机房	0.20
	5	机房楼上车库	0.20

注：以上数据未扣除室内本底值($0.10\mu\text{Gy/h}$)

从类比条件看，本次评价的加速器最大电子能量为 12MeV，能量较类比加速器低，两者评价距离相似，而本项目保守考虑屏蔽墙体厚度更厚，因此该类比加速器的监测结果可进行类比。

从表 9-2 的类比监测结果可以看出，该类比加速器正常工作时，机房周边各测试点辐射剂量水平均符合相关标准要求。因此，在保证施工质量的前提下，其辐射防护水平应该能够达到国家标准的规定限值。

(3) 辐射安全措施

系统采取相应的安全管理措施并配备足够的安全联锁设施，以确保系统正常工况和异常工况下，系统工作人员和公众的辐射安全。具体安全联锁设施要求如下，各主要安全措施的布置点位见附图 13~附图 14。

1. 安全联锁钥匙开关

- 在系统控制室操作台上装有安全联锁钥匙控制开关。

要求：

- (1) 只有开关触点闭合时，加速器才有可能出束；
- (2) 控制开关钥匙只能在开关触点断开位置才能拔出；
- (3) 加速器安全联锁钥匙拨至断开位置时，加速器不能出束或立即停止出束。

2. 急停按钮

- 控制室操作台上装有急停按钮，手动复位；
- 加速器室内装有急停按钮，手动复位；
- 调制器机架外侧装有急停按钮，手动复位；
- 辐照通道出入口处装有急停按钮，手动复位；

要求：当任一急停按钮被按下时，加速器不能出束或立即停止出束。

3. 急停拉线

- 辐照通道内墙上、进入加速器室的通道内墙上装有急停拉线。

要求：当任一急停拉线被拉动时，加速器立即停止出束。

4. 无人巡检按钮

- 在一楼辐照通道和二楼加速器室内（含进入加速器室的迷宫通道，下同）墙上分别按照附图 13 和附图 14 所示路线设置无人巡检按钮。

要求：

- (1) 巡检人员通过按下所有无人巡检按钮能够巡视整个辐照通道或加速器室；
- (2) 只有当所有无人巡检按钮按照预先设定路径被顺序按下时，加速器才允许出束；
- (3) 当任一无人巡检按钮未按预定顺序被按下时，所有无人巡检按钮立即复位；
- (4) 当一楼辐照通道入口门或出口门中任意一个被打开时，一楼辐照通道内所有无人巡检按钮立即复位；
- (5) 当二楼加速器室门被打开时，二楼加速器室内所有无人巡检按钮立即

复位；

(6) 当控制台上安全联锁钥匙被拔出时（并非拨至断开位置），所有无人巡检按钮立即复位。

5. 警示装置

- 控制室内、加速器室入口门外和辐照通道出入口外墙上装有红、黄、绿三种颜色的警灯和警铃。

要求：

(1) 当加速器上电且未就绪时，绿色警灯亮、无警铃，并建议有“通电状态”文字显示；当加速器就绪时，黄色警灯亮、无警铃，并建议有“准备出束”文字显示；当加速器出束时，红色警灯亮、警铃响，并建议有“正在出束”文字显示；在加速器真正出束前，系统须进行至少 10 秒钟预警，预警时黄色警灯亮、警铃响，并建议有“准备出束”文字显示；

(2) 当射线发生不足 1 秒时，指示灯和警铃应能保证至少有 1 秒的工作时间；

(3) 工作状态指示灯和警铃不能正常工作时，加速器不能就绪。

- 在控制室系统控制台上有关加速器状态显示。

要求：显示加速器上电、就绪和出束三种工作状态。

6. 微动开关联锁

- 在调制器门、进入加速器室的门和辐照通道出入口的门上设有微动开关联锁。

要求：卸下任一块面板或打开任一门，加速器不能出束或立即停止出束。

7. 传输故障联锁

- 传输线发生故障时加速器自动停止出束。

要求：当输送线发生故障时，加速器应能立即停止出束，且在该故障恢复前不能再次出束。

8. 排风系统联锁

- 当排风系统不能正常工作时，加速器自动停止出束。

要求：当排风机不能正常工作时，加速器应能立即停止出束，且在该故障恢复前不能再次出束。

9. 辐射防护仪表及辐射防护监测

- 系统配备 2 台个人剂量报警仪和 1 台 X、 γ 环境剂量率仪；
- 系统配备 1 套四探头区域剂量监测仪，主机安装在操作室内控制台附近的墙上、探测器分别安装在控制室内墙上、辐照通道入口门外的墙上、辐照通道出口外的墙上、加速器室入口门外的墙上。

要求：区域剂量监测仪提示剂量率超过设定阈值时，自动停止加速器出束。

以上 1~9 项安全联锁系统各部件安装、接线注意保持独立性功能，并均应满足失效安全的原则。安全联锁系统的工作状态在控制室操作界面上显示。

10. 监视系统

- 在辐照通道内、加速器室内、加速器室入口、辐照通道出入口和进入加速器室的通道内附近装有数量合适的摄像机（注意耐辐照性能），相应的监视器装在系统控制室操作台上。

要求：在系统控制室操作台上，系统操作人员可以观察到整个辐射防护区（系统建筑屏蔽墙、加速器室入口和辐照通道出入口内的封闭区域被划定为辐射防护区）内的情况。

11. 广播音箱系统

- 在辐照通道内、加速器室内和进入加速器室的通道内安装有扬声器，麦克风安装在系统控制台上。

12. 电离辐射标志牌

- 在加速器室入口门外侧和辐照通道出入口门外侧设有电离辐射警告标志。

以上设施在正常工作的情况下可以确保系统正常工况和异常工况下，系统工作人员和公众的辐射安全。

（4）其他

1) 加速器辐照室周围均须设置电离辐射警告标志，并用中文注明“当心电离辐射”，主机室和辐照室迷道入口外 1m 处划黄色警戒线，告诫无关人员不得靠近。

2) 各项辐射环境管理规章制度应张贴于工作现场处。

3) 主机室和辐照室均设置机械通风设施，工作期间应保证机械通风的正常

运行，降低室内臭氧和氮氧化物的浓度。

4) 单位须给每个辐射工作人员配备个人剂量计并按时检测。同时，单位还应为每个辐射工作人员配备个人剂量报警仪，当辐射水平超过预设值时能发出轰鸣警告声。

5) 辐照室排风量要求不小于 $8000\text{m}^3/\text{h}$ ，停机后继续排风 4 分钟，排风口高度高于屋面 3m。

9.2 辐射环境管理

浙江大学已根据相关法律、法规及文件的要求，在基本健全各项规章制度和管理机构的基础上，取得了由浙江省环境保护厅颁发的《辐射安全许可证》，浙环辐证[A0149]（有效期至 2018 年 7 月 2 日），其许可的种类和范围是：乙级非密封放射性物质使用场所。

一、规章制度

学校已制定《乙级非密封放射性实验室辐射安全管理规章制度》。其内容包括总则、安全操作规程、岗位职责、辐射防护制度、个人剂量监测制度、安全保卫制度、设备检修维护制度、人员培训制度、台帐管理制度、辐射场所监测管理制度和附则。详见附件 4。

二、人员管理及安全培训

(1) 学校共有 9 名辐射工作人员，目前均已参加有资质单位组织的上岗培训（见附件 5）。要求新上岗的辐射工作人员也参加上岗培训，取得辐射安全培训合格证书的人员，每四年接受一次再培训。

(2) 学校现有的辐射工作人员均配备了个人剂量仪，个人剂量仪每 3 个月到相关部门检测一次，并建立了个人剂量档案，见附件 6。

(3) 学校已组织辐射工作人员每年进行身体健康检查，并建立了个人健康档案（见附件 7）。对于新上岗工作人员，做好上岗前的健康体检，合格者才能上岗；在本单位从事过辐射工作的人员在离开工作岗位时也要进行健康检查。

(4) 本项目中，如有学生临时参与项目，则该学生必须年满 16 周岁，且在相关放射工作人员陪同指导下工作，其剂量按本项目的公众剂量限值管理。对于参与相关科研课题研究，可能会长期接受照射的学生，必须按放射工作人员管理。

三、其他

(1) 本项目建成后，种子楼临时用房将依法实施退役，并依法编制和报批退役环境影响评价文件。

(2) 本项目实施退役的，应当依法编制和报批退役环境影响评价文件，按照环境保护行政主管部门的批复要求落实各项退役措施并接收验收检查。

四、监测方案

学校已对临时用房进行定期监测，本项目投入使用后，也将定期（每年一次）请有资质的单位对放射性实验室用房和加速器机房周围环境进行辐射环境监测，并建立监测技术档案，监测数据每年年底向省环保厅和当地环保局上报备案。

(1) 监测频度：每年常规监测一次。

(2) 监测范围：放射性实验室周围，各实验室操作台面、地面，工作人员的表面。加速器机房辐照室和加速器室周围，尤其要关注辐照室迷道口处的剂量率。

(3) 监测项目： γ 辐射剂量率， β 表面污染，放射性废水排放前对池水取样监测，放射性固体废弃物出之前对比活度进行监测。

(4) 监测记录应清晰、准确、完整并纳入档案进行保存。

根据《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》（国务院 第 449 号令）的要求，建设单位应当对本单位的射线装置的安全和防护状况进行年度评估。发现安全隐患的，应当立即进行整改。

五、事故应急

学校已建立《浙江大学原子核农业科学研究所突发辐射事故的应急处理预案》。该预案明确了辐射事故应急机构和职责、应急工作原则和准备、辐射突发事件的分级、辐射突发事件的应急响应措施、事故善后、调查、报告、处理程序等。

发生辐射事故时，事故单位应当立即启动本单位的辐射事故应急方案，采取必要的防范措施，并在 2 小时内填写《辐射事故初始报告表》。对于发生的误照射事故，应首先向当地环境保护部门报告，造成或可能造成人员超剂量照射的，还应同时向当地卫生行政部门报告。发生放射性物品丢失事故，还应向公安部门报告。

针对本项目迁扩建放射性同位素实验室及电子加速器机房，浙江大学应在该项目运行前向浙江省环境保护厅重新申领《辐射安全许可证》，并在原有相关要求的基础上补充完善各项辐射环境管理规章制度。具体如下：

1、按照《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》、《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》及环境保护主管部门的要求，完善辐射防护管理机构，并制定相关辐射环境管理规章制度。

2、补充完善辐射安全防护管理制度，建立射线装置使用登记制度，建立使用台帐等；建立设备检修维护制度，明确设备开机检查、设备的检修保养工作等；补充完善岗位职责，明确各工作人员关于电子加速器操作的具体职责；建立辐射防护和安全保卫制度，明确连锁装置、报警装置、警戒线等各项安全措施的实施。

3、建立电子加速器安全操作规程，明确加速器的操作程序及操作过程中的注意事项。

4、建立射线装置安全事故应急处置预案，明确辐射应急工作的责任部门和应急联络方式、提出了预防事故的具体措施、发生事故的处理和报告程序。

5、由于本项目中增加了电子加速器的工作内容，因此电子加速器辐射工作人员的个人剂量监测需包括中子剂量的监测。

表 10 公告

为使学校内部职工及周围公众了解本项目的建设情况及对环境的影响，建设单位就本项目的环境影响于 2014 年 2 月 20 日在浙江大学紫金港校区西区基本建设指挥部及紫金港社区科普文化宣传栏等地张贴了辐射环境影响评价告知书，见图 10-1，内容主要包括工程概况、环境影响及初步评价结论；意见反馈方式主要为电话，时间为 10 个工作日，（见附件 8）。



图 10-1 浙江大学公告现状照片

在公告期间，建设单位、评价单位及环保部门均未接到任何意见反馈。

表 11 从事辐射活动能力评价

根据《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》第十六条规定，使用放射性同位素的单位应具备相应的条件。对浙江大学从事本项目内辐射活动能力的评价见表 11-1：

表 11-1 从事本项目辐射活动能力评价

应具备条件	落实情况
（一）使用 I 类、II 类、III 类放射源，使用 I 类、II 类射线装置的，应当设有专门的辐射安全与环境保护管理机构，或者至少有 1 名具有本科以上学历的技术人员专职负责辐射安全与环境保护管理工作。	已制定
（二）从事辐射工作的人员必须通过辐射安全和防护专业知识及相关法律法规的培训和考核。	共有 9 名辐射工作人员已培训，其余新增人员待培训
（三）使用放射性同位素的单位应当有满足辐射防护和实体保卫要求的放射源暂存库或设备。	放射性同位素储藏室实行专人管理，双人双锁，并有与 110 联网的摄像监控。有放射性同位素专用的负压通风柜和放射型同位素废物库。
（四）放射性同位素与射线装置使用场所防止误操作、防止工作人员和公众受到意外照射要求的安全措施。	需完善相应的操作规程，须张贴电离辐射警示标志。 加速器机房安装门机联锁装置、迷道内设有急停及复位按钮、实时摄像监视系统、声光警示系统、信号指示系统和排风系统。
（五）配备与辐射类型和辐射水平相适应的防护用品和监测仪器，包括个人剂量监测报警、辐射监测等仪器。使用非密封放射性物质的单位还应当有表面污染监测仪。	已配备了个人剂量仪， γ 剂量率测量仪及个人剂量报警仪，还须配备表面污染监测仪等。
（六）有健全的操作规程、岗位职责、辐射防护和安全保卫制度、设备检修维护制度、放射性同位素使用登记制度、人员培训计划、监测方案等。	已制定了乙级非密封放射性实验室辐射安全管理规章制度，针对电子加速器机房管理制度还须完善。
（七）有完善的辐射事故应急措施。	已制定了乙级非密封放射性实验室辐射事故应急预案，还须针对电子加速器辐射事故建立应急措施。

(八) 产生放射性废气、废液、固体废物的, 还应具有确保放射性废气、废液、固体废物达标排放的处理能力或者可行的处理方案。	有专用的放射性废液衰变池, 放射型同位素废物库, 和负压通风柜。
--	----------------------------------

以上分析表明, 浙江大学从事辐射活动的技术能力基本满足相应法律法规的要求, 不足的方面须在申领《辐射安全许可证》前加以完善。

表 12 结论

12.1 实践正当性分析

放射性同位素的应用在我国是一门成熟的技术，它同位素示踪方面有其他技术无法替代的特点，具有明显的科研效益，能在工作人员及公众健康的同时为社会创造更大的科研效益。学校使用放射性同位素应用项目所产生的危害同社会和个人从中取得的利益相比是可以接受的，因此，该单位乙级非密封放射性实验室项目的建设和运行符合《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）中辐射防护“实践正当性”的要求。

电子加速器辐照技术在我国也是一门成熟的技术，在材料改性，杀菌、消毒等方面具有广泛的应用。某些热或光所无法处理的工艺通过电子束辐照能够轻松完成，而且性能非常稳定。浙江大学针对电子加速器项目将开展多个方面的教学研究工作，包括：1) 农作物种质资源的诱变育种研究，2) 微生物基因诱变和 DNA 损伤修复研究，3) 农产品辐照保鲜研究，4) 高分子辐射胶连研究，5) 电子产品的材料改性研究，6) 医用器械辐射灭菌研究，7) 放射生物学研究等。因此，开展电子加速器辐照技术的利用，对学校科研能力的提高具有重要意义。通过合理的防护，能够在保证工作人员及公众健康的同时为社会创造更大的科研效益。因此，浙江大学电子加速器项目的建设和运行符合《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）中辐射防护“实践正当性”的要求。

12.2 选址合理性分析

本项目位于浙江大学紫金港校区西区东北侧内。建设地块北面为留祥路、南面为实验农田，西面为学校生活区，东面为大型动物实验用房，建设用地面积约 1hm²。本项目建设用地性质为教育科研用地，建设区域内基础设施依托拟建设的紫金港校区西区配套，周边道路、供水、供电、排污和通讯等配套设施可以得到落实。项目建设符合《浙江大学紫金港西校区修建性详细规划》与土地利用总体规划的要求，项目建设用地已经浙江省政府和杭州市国土资源局等的原则同意。建设项目选址意见书（许可证号：选字第 330100201300257 号）见附件 10。

本建设项目总平面布置图见附图 3。北侧为电子加速器机房，中间为科研实验用房（东北侧部分为放射性同位素实验室），南侧有一个放射性废物暂存库。

同位素实验室地下建有一放射性衰变池。电子加速器机房为两层独栋结构，科研用房为5层楼房。一层平面具体布置见附图4。

本建设项目放射性区域北侧40m左右为创新创业街用房，南侧为实验农田，西侧60m外为规划的学生公寓，东侧为大型动物实验用房。从评价范围看，周围50m范围内无居民住宅等环境敏感点，评价结果也表明，整个建设项目对周边辐射环境影响较小，其选址基本可行。但考虑到放射性区域北侧的创新创业街用房区域距离本项目加速器机房较近，规划的学生公寓等敏感点也距离放射性同位素实验室较近。这些需要浙江大学相关部门关注，做好污染防治措施及突发事件应急预案。

12.3 主要污染因子及辐射环境影响评价

(1) 放射性同位素

放射性同位素的主要污染因子是 γ 射线、 β 表面污染、废水和固体废弃物中的同位素。

根据类比监测及理论计算结果可知，乙级非密封放射性实验室运行时，从事辐射操作的工作人员和周围公众成员受到的额外照射均小于各自的剂量管理限值（5mSv、0.1mSv），符合《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）中关于“剂量限值”的要求。

(2) 电子加速器

电子加速器机房的主要污染因子为X射线，中子及臭氧。

屏蔽计算结果表明，从事电子加速器操作的工作人员和周围的公众成员受到的额外照射均小于各自的剂量管理限值（5mSv、0.1mSv），符合《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）中关于“剂量限值”的要求。

在保持通风一定时间情况下，辐照间内臭氧浓度满足《粒子加速器辐射防护标准》（GB5172-85）规定的保证臭氧的浓度低于 $0.3\text{mg}/\text{m}^3$ 的要求。同时臭氧排放达标。

12.4 污染防治措施

12.4.1 放射性同位素

目前，放射性同位素实验室正在设计阶段。从辐射屏蔽看，普通钢混结构即

可满足辐射屏蔽需求。但针对辐射环境保护的需要，设计中还需具有以下污染防治措施：

（1）工作场所的分级

建设的同位素实验室为乙级工作场所，各放射性实验室地面需采用塑料地坪，保持地面光滑平整，容易清洗。工作台面最好采用大理石拼接，易清洗。实验室设计上，需配备有负压通风柜，通风良好，并满足乙级工作场所的管理要求。

（2）工作场所分区管理

按照《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）的要求，放射性同位素实验室依据管理的需要，可分为控制区和监督区。其中，①控制区为放射性实验室，放射性废水、固体废弃物收集贮存点。②监督区为控制区外淋浴房等卫生通过间。控制区和监督区均须张贴电离辐射标志。

整个放射性工作场所与普通实验室采用门禁隔离，放射工作人员统一从一楼更衣后进入放射性实验室，并从专用小电梯到达其它楼层。非应急情况下，楼层隔离门禁不进出。放射性物品及废物的运输也统一通过专用小电梯运送。

（3）放射性废液（废水）

在科研实验用房放射性实验室北侧地下设有放射性衰变池，其所在位置见附图4。衰变池为连续式设计，池底和池壁坚固、耐酸碱腐蚀、防渗漏措施完善。采用推流式排放，总容积约为30m³。保守假设实验器皿内残留的放射性核素用约500ml水进行冲洗，其中短寿命核素冲洗水倒入衰变池，长寿命核素的冲洗水进入专用桶进行固化。经核算，可保证废液中核素在衰变池内贮存10个半衰期以上。此时废液的排放能满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）第8.6.2款规定的：

a) 每月排放的总活度不超过10ALI_{min}（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1ALI_{min}，并且每次排放后用不少于3倍排放量的水进行冲洗。

同时，本项目相关的废水均收集后处理至中性后排放，排放应有适当的流量和浓度监控设备，排放是受控的，并做好排放记录工作。

（4）放射性固体废弃物

同位素试验相关工作场所的放射性固体废弃物收集在专用污物桶内，再将污物桶内的固体废弃物连同垃圾袋存放到放射性污物暂存库内，定期交由有资质的单位回收，污物暂存库位置见附图 4。用来收集放射性固体废弃物的专用污物桶须贴上电离辐射标志，并把受不同核素污染的固体废物分开收储，即按放射性核素的种类标记放射性废物，每次收集时收集袋表面应贴上标签，标明核素种类及最后一天的收集时间。放射性污物暂存库须实行双人双锁，专人管理，大门上显著位置设置电离辐射警告标识，并在平时工作中对该房间及周围环境加强辐射剂量的监督检测。另外，放射性固体废物送至暂存库以及暂存库的固体废物外运处理，均必须在下班后进行，以避免人员高峰。

根据最优化原则，学校还应根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）对源豁免要求的规定，对于符合标准附录 A 中所规定的豁免要求的放射性固体废物向审管部门申请豁免，以减少放射性固体废物的产生量。同时，在实际操作过程中，加强放射性操作器皿及实验用品的重复利用，尽量减少放射性固体废物的产生量。

（5）放射性废气

放射性同位素实验室设计中考虑了负压通风柜，操作放射性药物所使用的通风橱，工作中有足够风速（一般风速不小于 1m/s）。通风系统需采用独立通风系统设计，各通风管道上还需装有逆止阀，保证有较好的通风，以满足乙级工作场所的管理要求。考虑到放射性实验室用房西侧 60 米左右规划为 6 层楼高的学生公寓用房。因此，在顶部排风口需加装高效粒子过滤装置，确保能对放射性核素有效过滤。同时，排气口需高于该 6 层学生公寓 5 米。

（6）浙江大学在操作和防护方面采取了一系列措施，其内照射影响可以忽略。

（7）考虑到放射性同位素实验室操作对放射工作人员的剂量较大，学校规定对产生剂量大的核素（主要有 ^{59}Fe 、 ^{60}Co 、 ^{88}Y 、 ^{109}Cd 、 ^{134}Cs 等）由不同的工作人员承担，并实行专人负责取用，防止个别人员剂量超标。同时，个人操作时需配备个人剂量报警仪。

（8）浙江大学现配备了 LH-III 型 x/γ 个人剂量报警仪、LT-III x/γ 辐射剂量率仪、RAM-II x/γ 辐射剂量率仪、RAM-SURF-1 表面污染检测仪，LT-206 α /

β 表面污染测量仪、盖格计数器、LT-3013 辐射剂量（率）仪等放射性污染监测仪器设备，以及乳胶手套、铅眼镜、铅衣服、铅砖、铅玻璃防护屏、有机防护屏、防辐射和防毒面具、口罩、平光眼镜等防护用品。由于本次项目中增加了电子加速器的工作内容，因此，学校还需增加个人报警中子计量仪等防护用品。

（9）本项目中，如有学生临时参与项目，则该学生必须年满 16 周岁，且在相关放射工作人员陪同指导下工作，其剂量按本项目的公众剂量限值管理。对于参与相关科研课题研究，可能会长期接受照射的学生，必须按放射工作人员管理。

12.4.2 电子加速器机房

（1）对于 X 射线及中子的辐射防护，电子加速器机房墙体采用普通混凝土（密度为 2.35g/cm^3 ）进行屏蔽，根据屏蔽计算结果及类比监测结果，屏蔽厚度满足辐射屏蔽防护需要。对于屏蔽门采用铅+石蜡的方式，同时通过迷道设计，整体屏蔽防护满足要求。

土建施工时要保证混凝土屏蔽层的施工质量，保证混凝土屏蔽层中各处的密度不小于 2.35g/cm^3 ，加强振捣措施，特别防止在屏蔽层中出现空洞和缝隙，建议一次性浇灌混凝土；

混凝土屏蔽墙不能随意贯穿，特别是在主束屏蔽范围内不准贯穿。屏蔽墙贯穿会产生漏束辐射，引起局部区域辐射水平的提高。如必须要贯穿混凝土屏蔽墙时，需在贯穿件的外表面和贯穿孔的内表面之间隙中填充屏蔽材料，同时保证本设计报告所要求的屏蔽厚度得到满足；

（2）对于臭氧防护，通过电子加速器机房和辐照间的通风设计，在严格按照通风管理要求的情况下，通风设施能够满足电子加速器机房的使用要求。臭氧通过设于电子加速器机房屋顶的排风口排出，满足达标排放要求。

（3）辐射安全措施，电子加速器系统采取相应的安全管理措施并配备足够的安全联锁设施，以确保系统正常工况和异常工况下，系统工作人员和公众的辐射安全。

12.5 辐射环境管理制度

浙江大学已根据相关法律、法规及文件的要求，在基本健全各项规章制度

和管理机构的基础上，取得了由浙江省环境厅颁发的《辐射安全许可证》，浙环辐证[A0149]（有效期至 2018 年 7 月 2 日），其许可的种类和范围是：乙级非密封性工作场所。

学校已制定《放射防护安全管理机构及职责》、《安全防护管理工作制度》、《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》、《辐射事故应急处理预案》等一系列规章制度。

针对本项目迁扩建放射性同位素实验室及电子加速器机房，浙江大学应在原有相关要求的基础上补充完善各项辐射环境管理规章制度。具体如下：

1、按照《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》、《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》及环境保护主管部门的要求，完善辐射防护管理机构，并制定相关辐射环境管理规章制度。

2、补充完善辐射安全防护管理制度，建立射线装置使用登记制度，建立使用台帐等；建立设备检修维护制度，明确设备开机检查、设备的检修保养工作等；补充完善岗位职责，明确各工作人员关于电子加速器操作的具体职责；建立辐射防护和安全保卫制度，明确连锁装置、报警装置、警戒线等各项安全措施的实施。

3、建立电子加速器安全操作规程，明确加速器的操作程序及操作过程中的注意事项。

4、建立射线装置安全事故应急处置预案，明确辐射应急工作的责任部门和应急联络方式、提出了预防事故的具体措施、发生事故的处理和报告程序。

12.6 安全培训及健康管理

（1）学校共有 9 名辐射工作人员，目前均已参加有资质单位组织的上岗培训。要求新上岗的辐射工作人员也参加上岗培训，取得辐射安全培训合格证书的人员，每四年接受一次再培训。

（2）学校现有的辐射工作人员均配备了个人剂量仪，个人剂量仪每 3 个月到相关部门检测一次，并建立了个人剂量档案。由于本项目中增加了电子加速器的工作内容，因此电子加速器辐射工作人员的个人剂量监测还需包括中子剂量的监测。

（3）学校已组织辐射工作人员每年进行身体健康检查，并建立了个人健康档案。对于新上岗工作人员，做好上岗前的健康体检，合格者才能上岗；在本单

位从事过辐射工作的人员在离开工作岗位时也要进行健康检查。

12.7、其他

(1) 放射生态实验室最终确定设计方案后，需单独编制和报批环境影响评价文件。

(2) 本项目建成后，种子楼临时用房将依法实施退役，并依法编制和报批退役环境影响评价文件。

(3) 本项目实施退役的，应当依法编制和报批退役环境影响评价文件，按照环境保护行政主管部门的批复要求落实各项退役措施并接收验收检查。

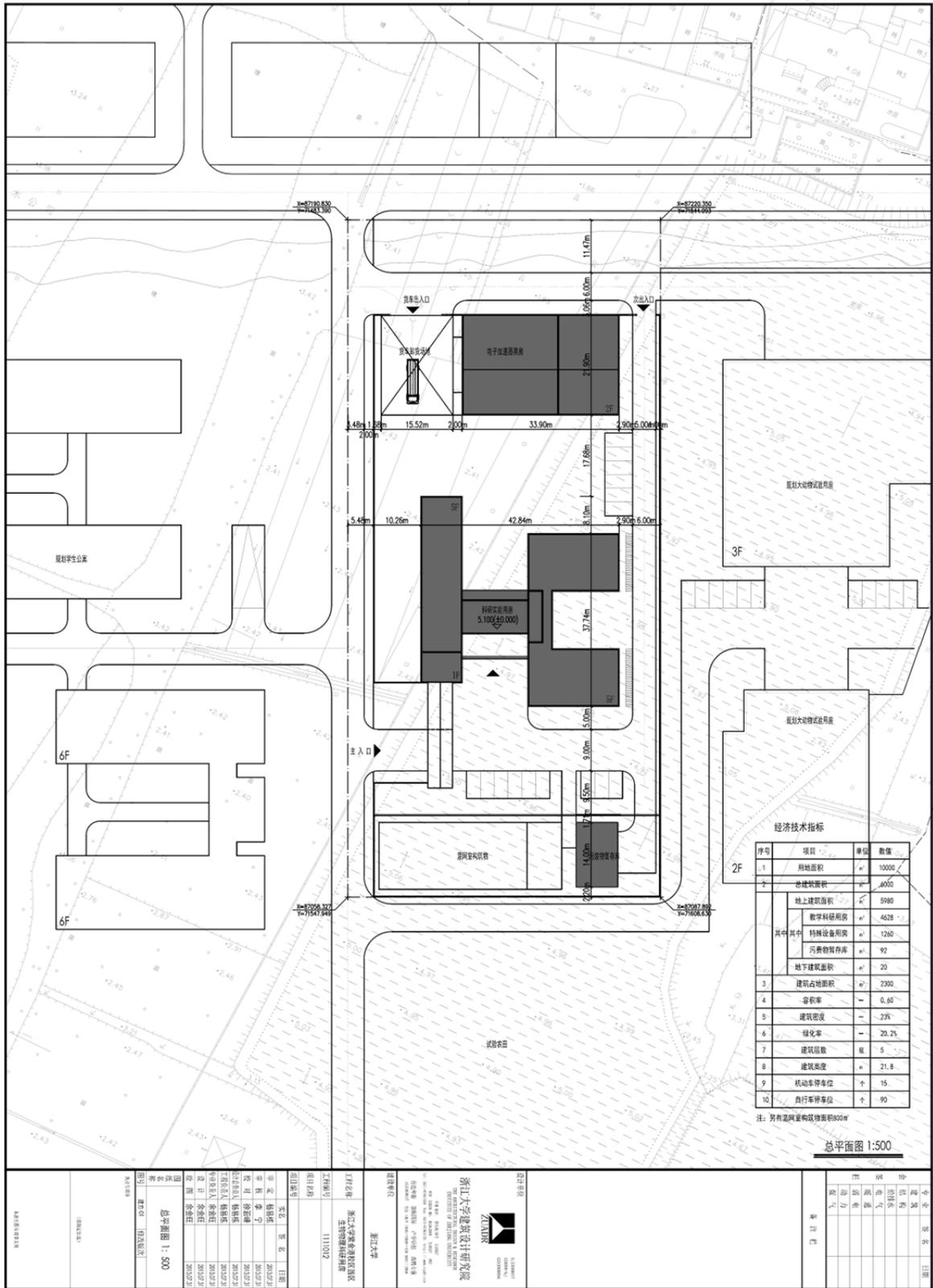
综上所述，浙江大学在全面落实本报告提出的各项污染防治措施和规章制度的前提下，本次乙级非密封放射性实验室及电子加速器机房项目对周围环境的影响能符合辐射环境保护的要求，故从辐射环境保护角度论证，本项目的建设和运行是可行的。



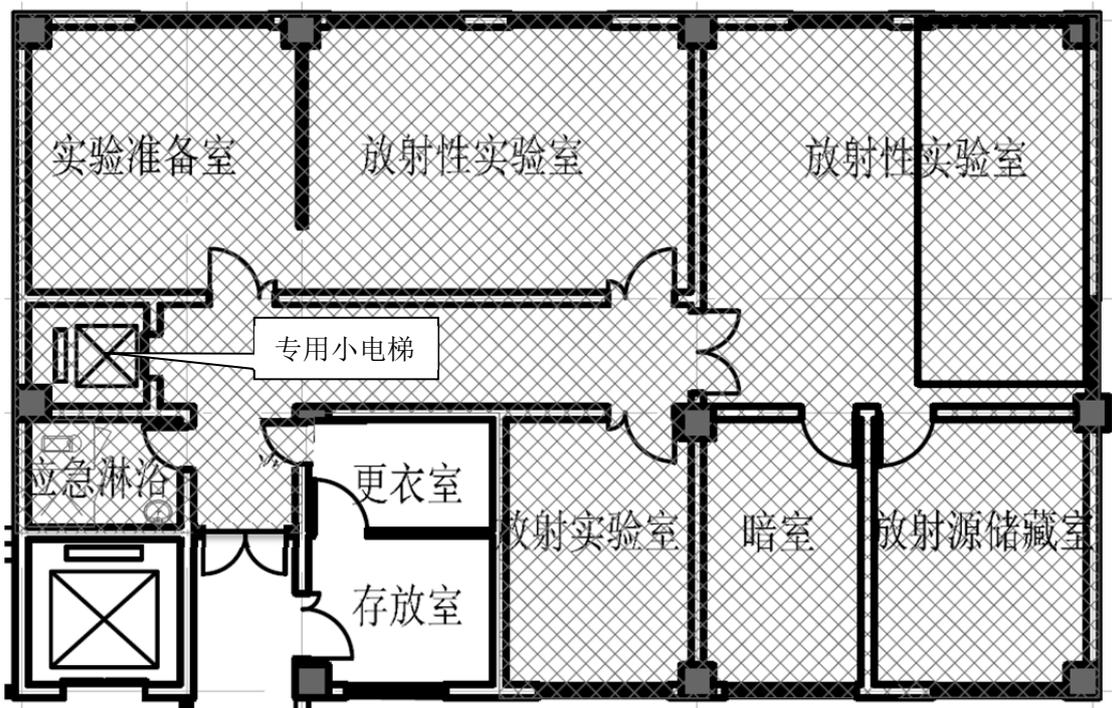
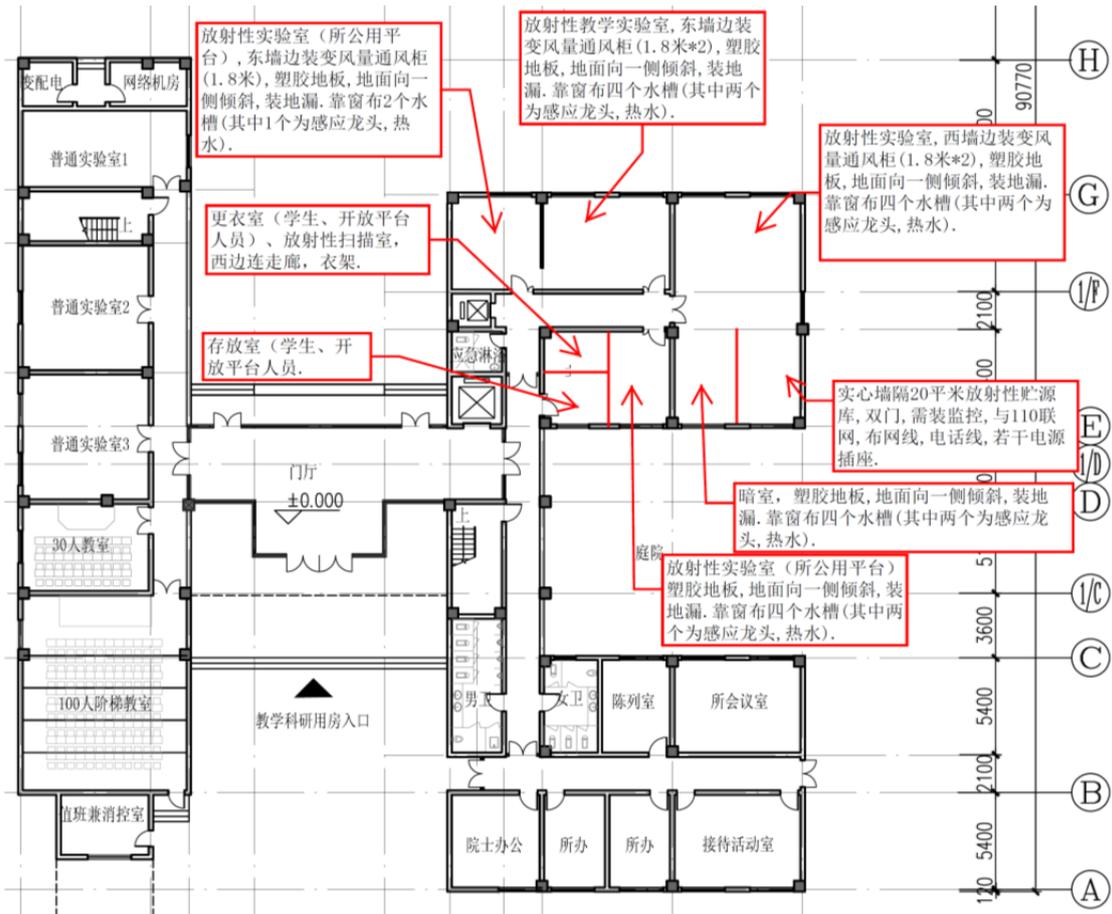
附图 1 浙江大学紫金港校区西区平面布置图



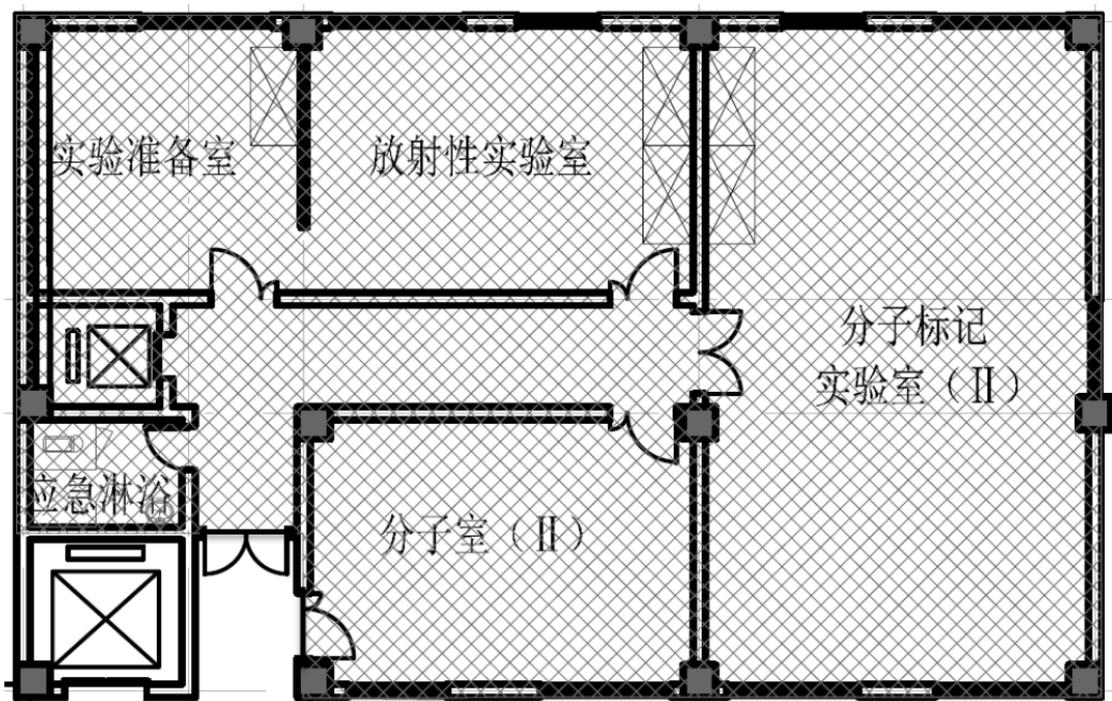
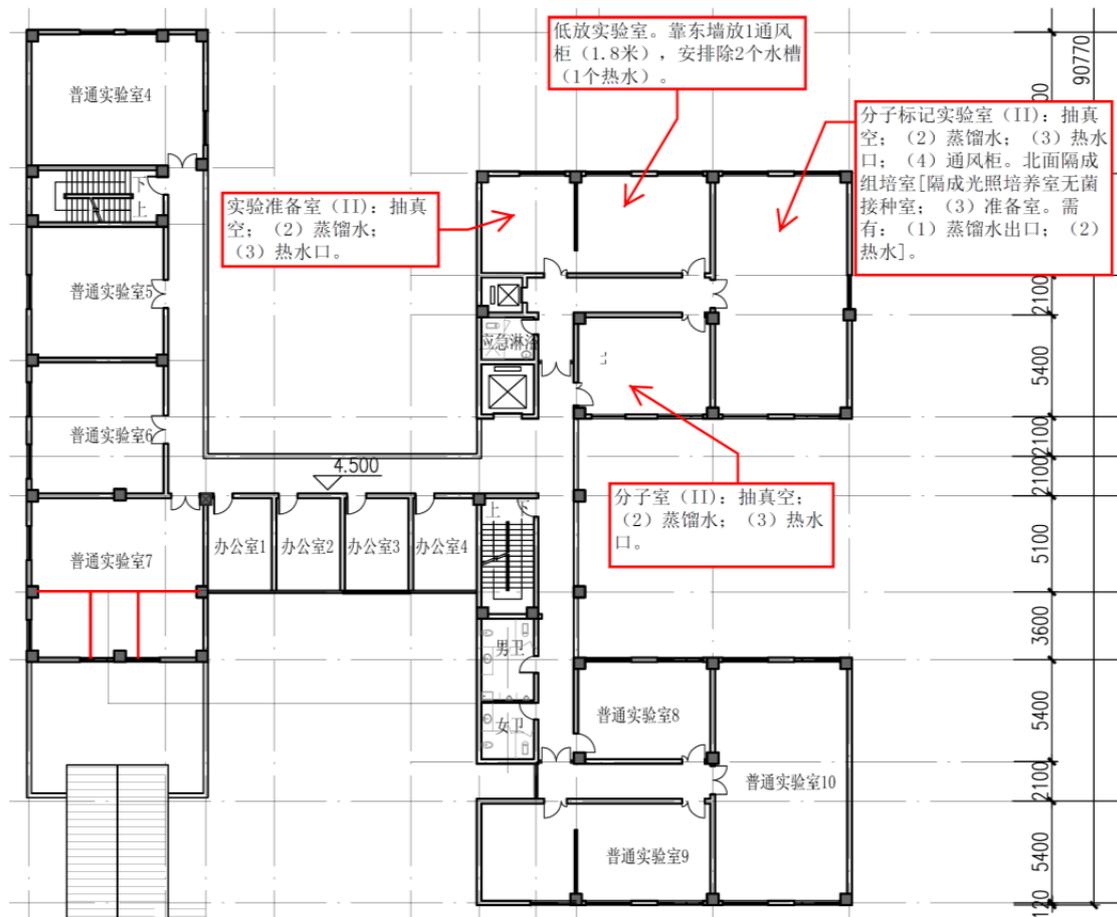
附图2 项目所在地地理位置图



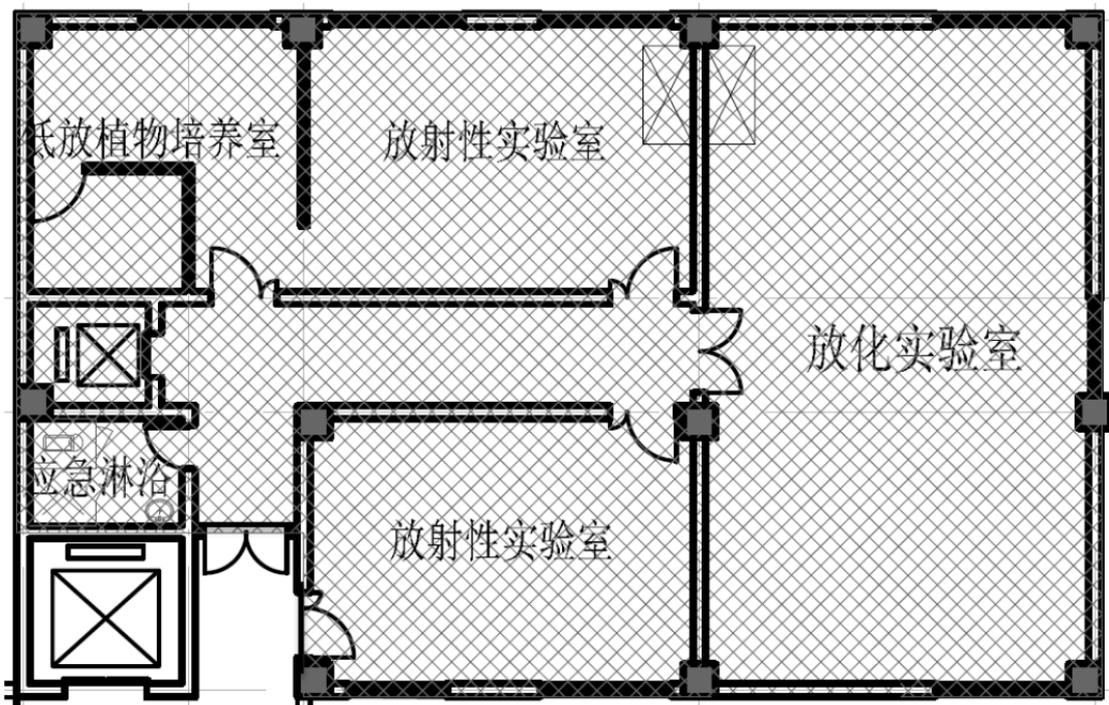
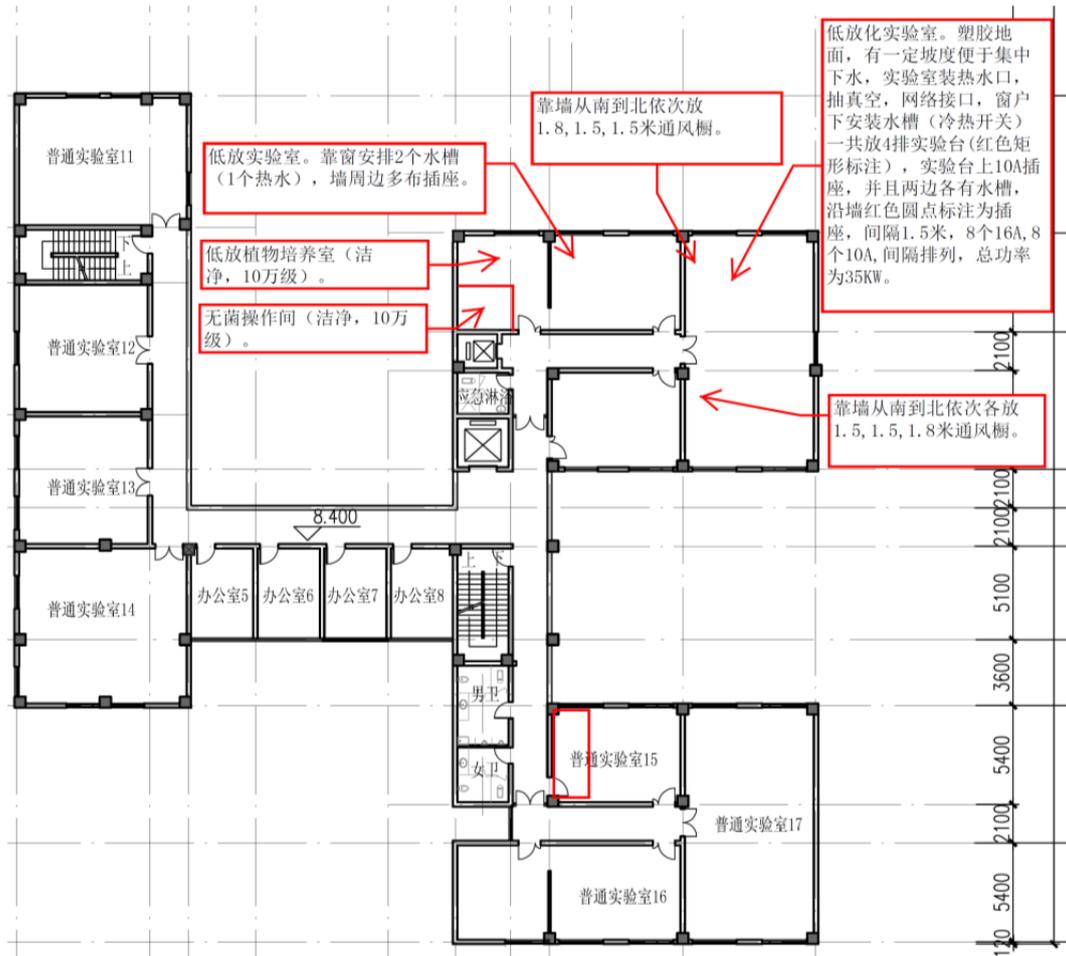
附图3 建设项目总平面布置图



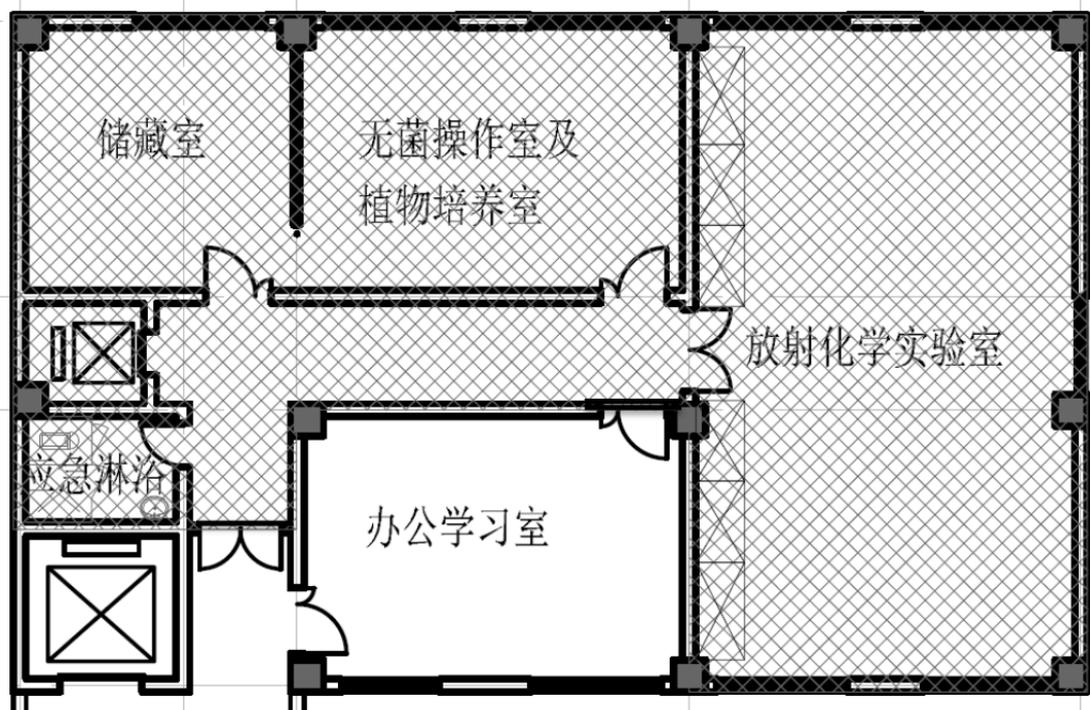
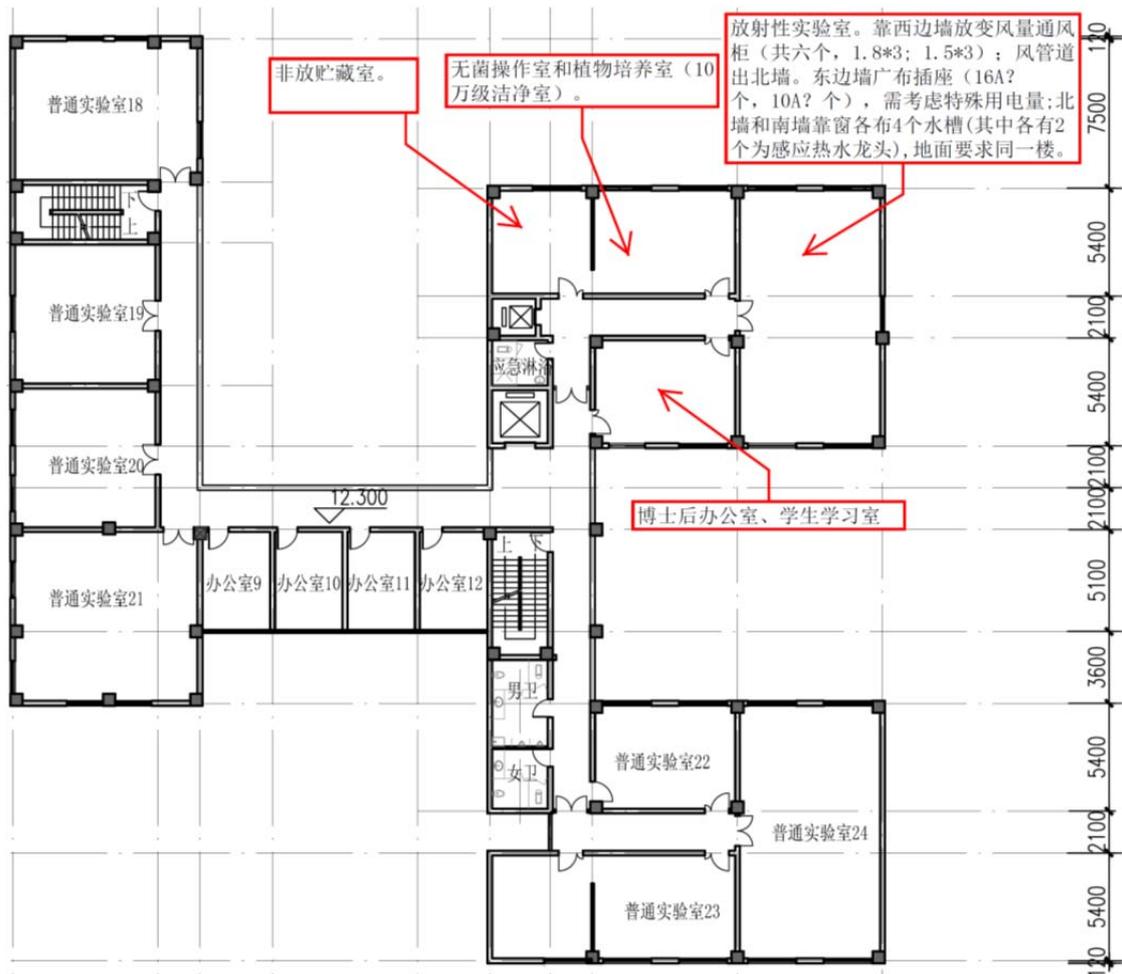
附图 5 放射性同位素实验室一层布置图



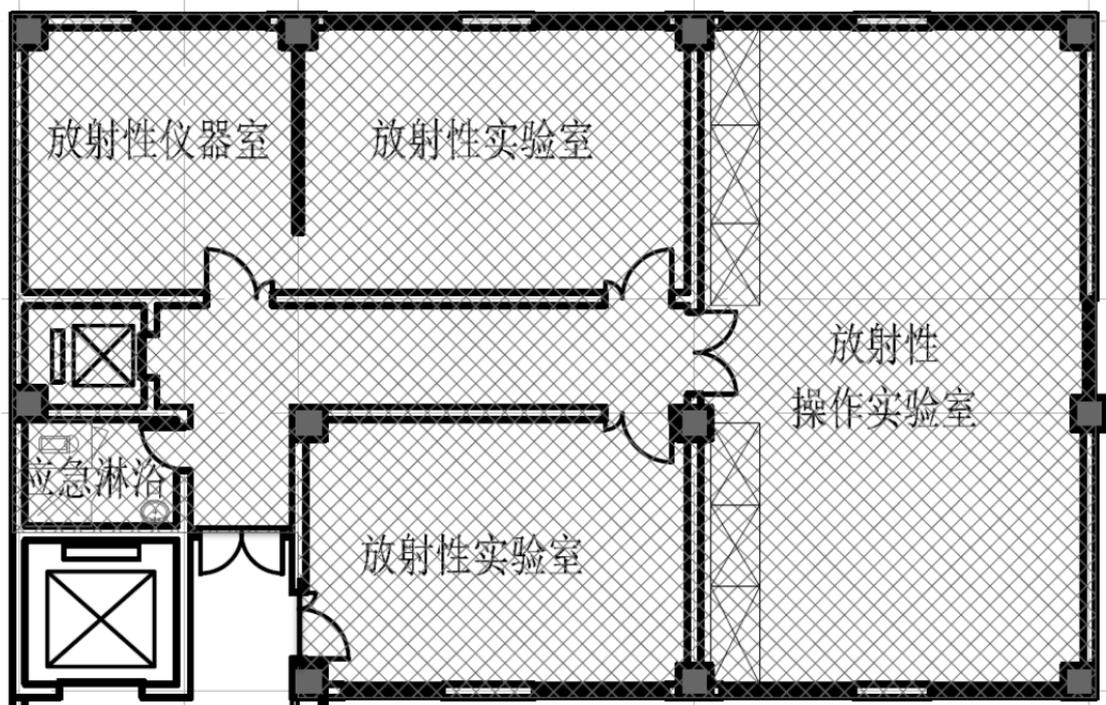
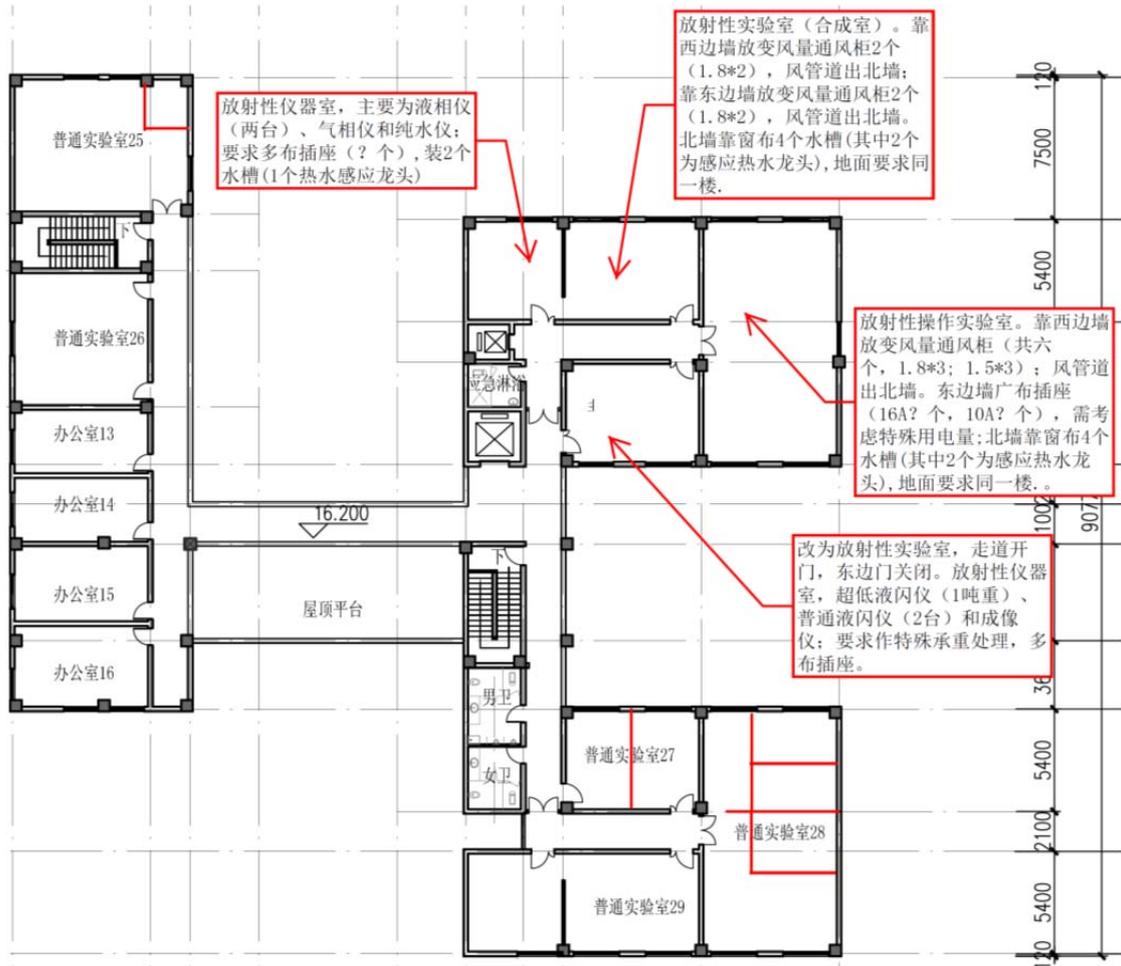
附图6 放射性同位素实验室二层布置图



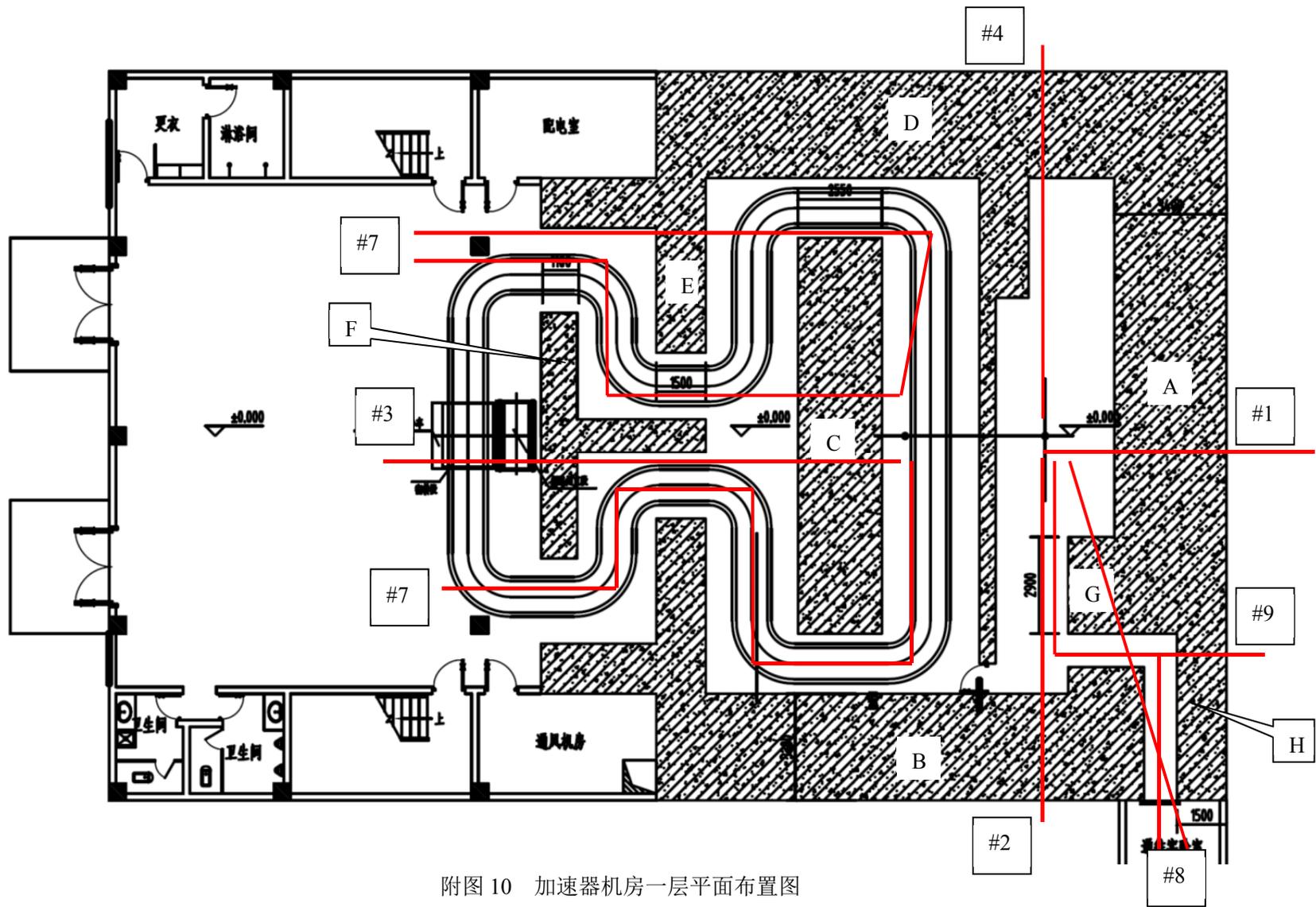
附图 7 放射性同位素实验室三层布置图



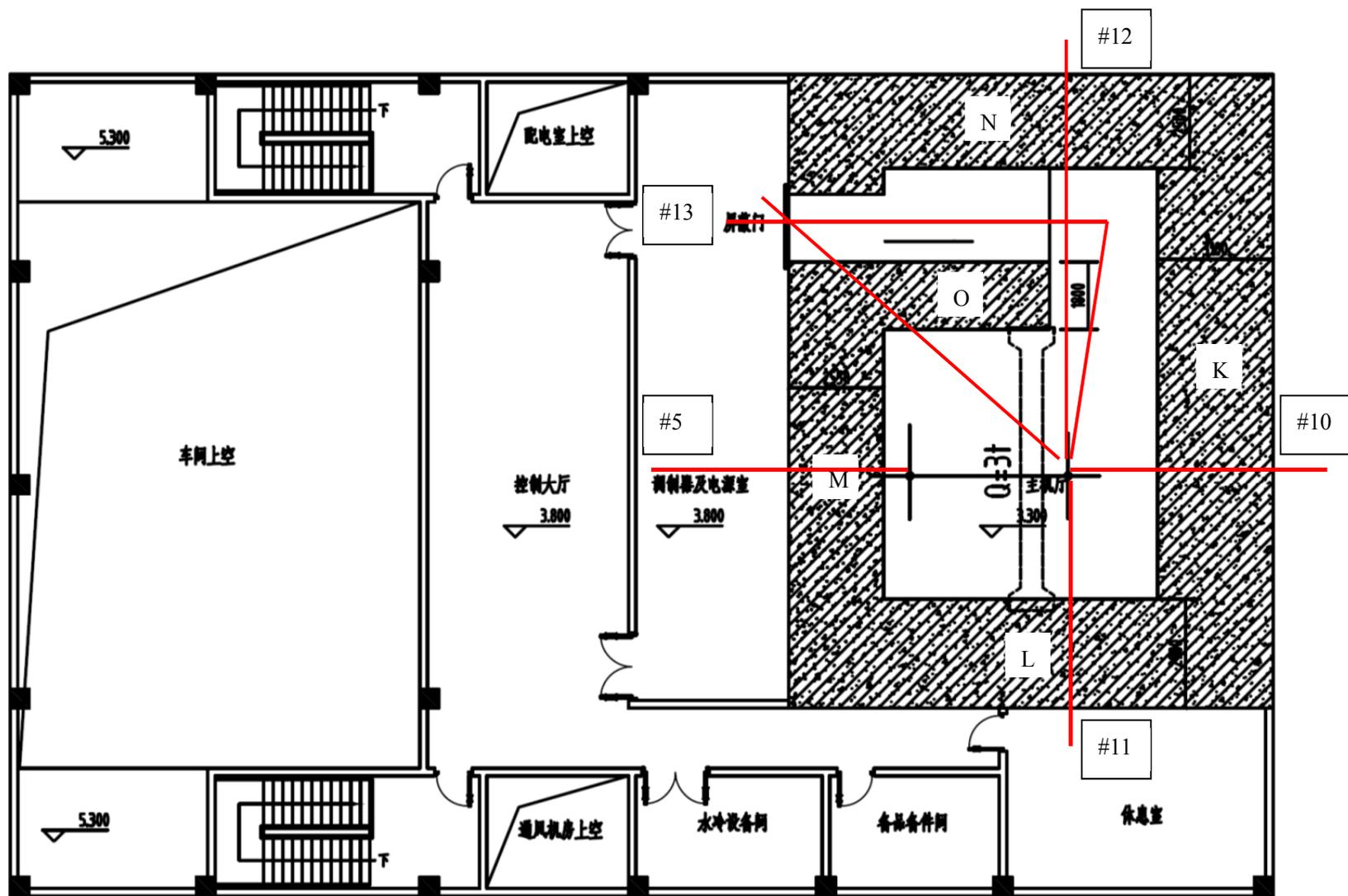
附图 8 放射性同位素实验室四层布置图



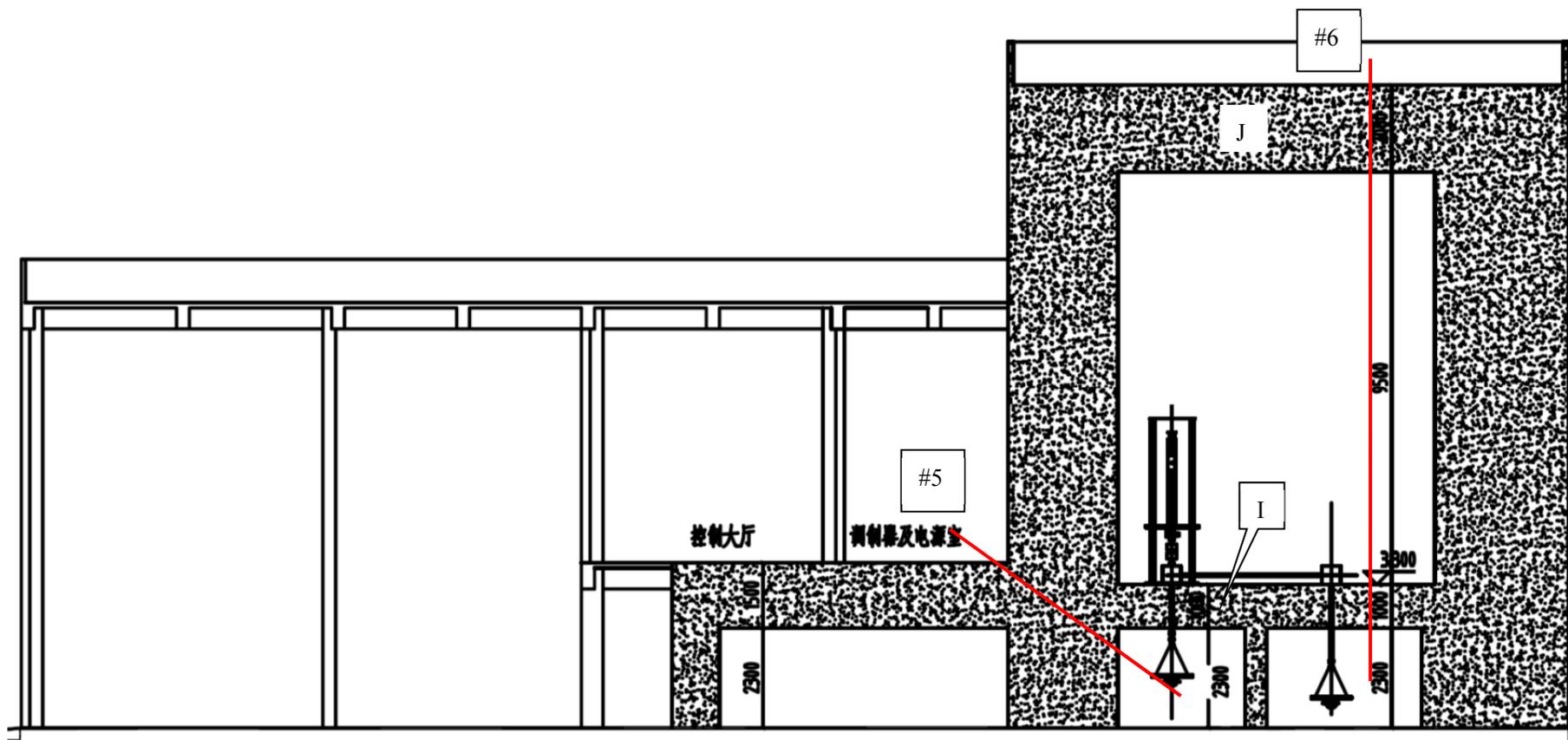
附图9 放射性同位素实验室五层布置图



附图 10 加速器机房一层平面布置图



附图 11 加速器机房二层平面布置图



附图 12 加速器机房立面布置图

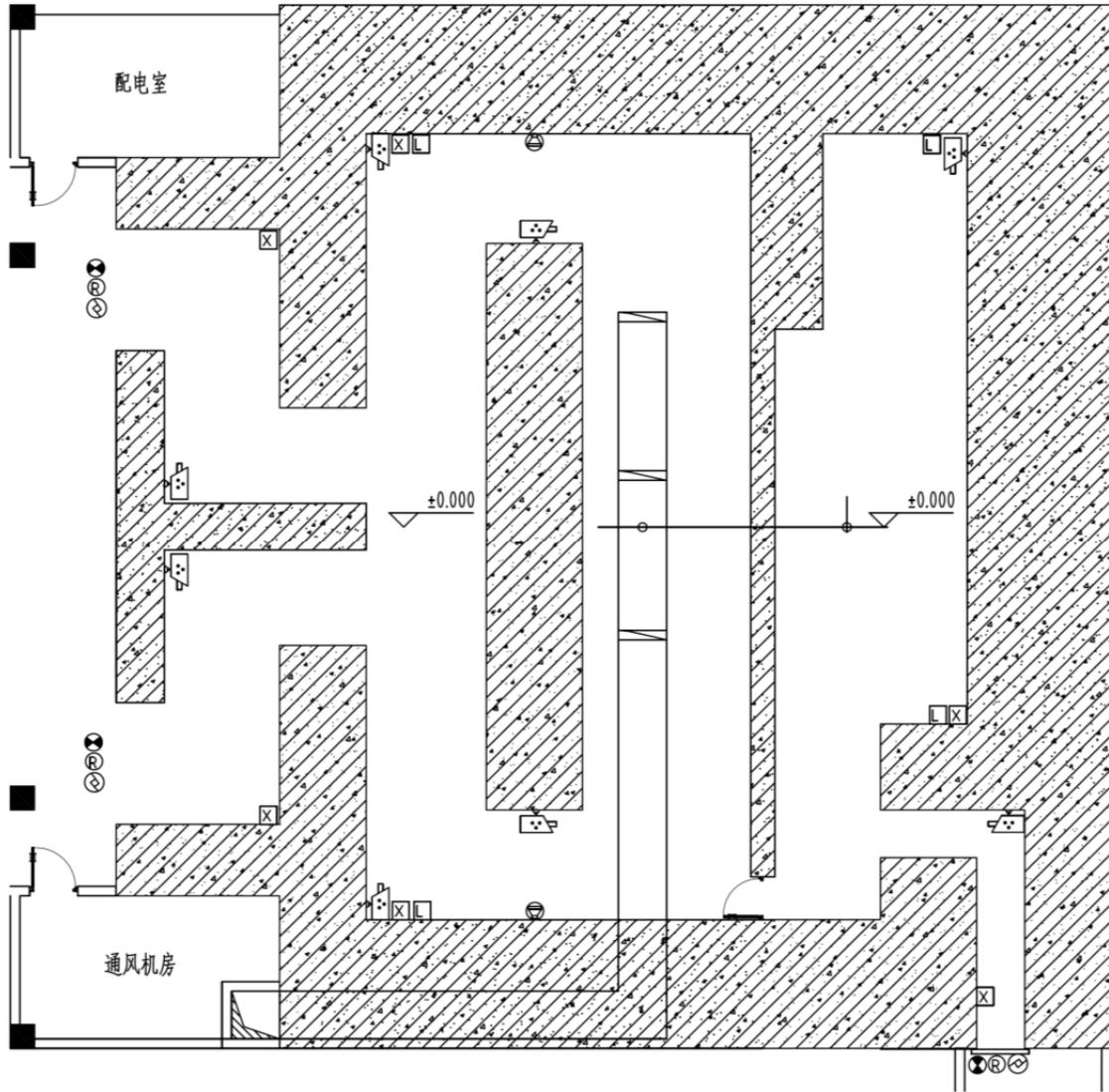


图 例

- | | | |
|---------|--------|--------|
| Ⓡ 剂量监测 | ⊙ 地漏 | ⊗ 三色灯 |
| ⊕ 蜂鸣信号器 | ▬ 配电盘 | ⊕ 联锁机构 |
| ⓐ 光电开关 | Ⓛ 拉线开关 | ⓧ 巡检开关 |
| Ⓜ 监测探头 | Ⓜ 急停开关 | |

附图 13 一层加速器机房安全联锁布置示意图

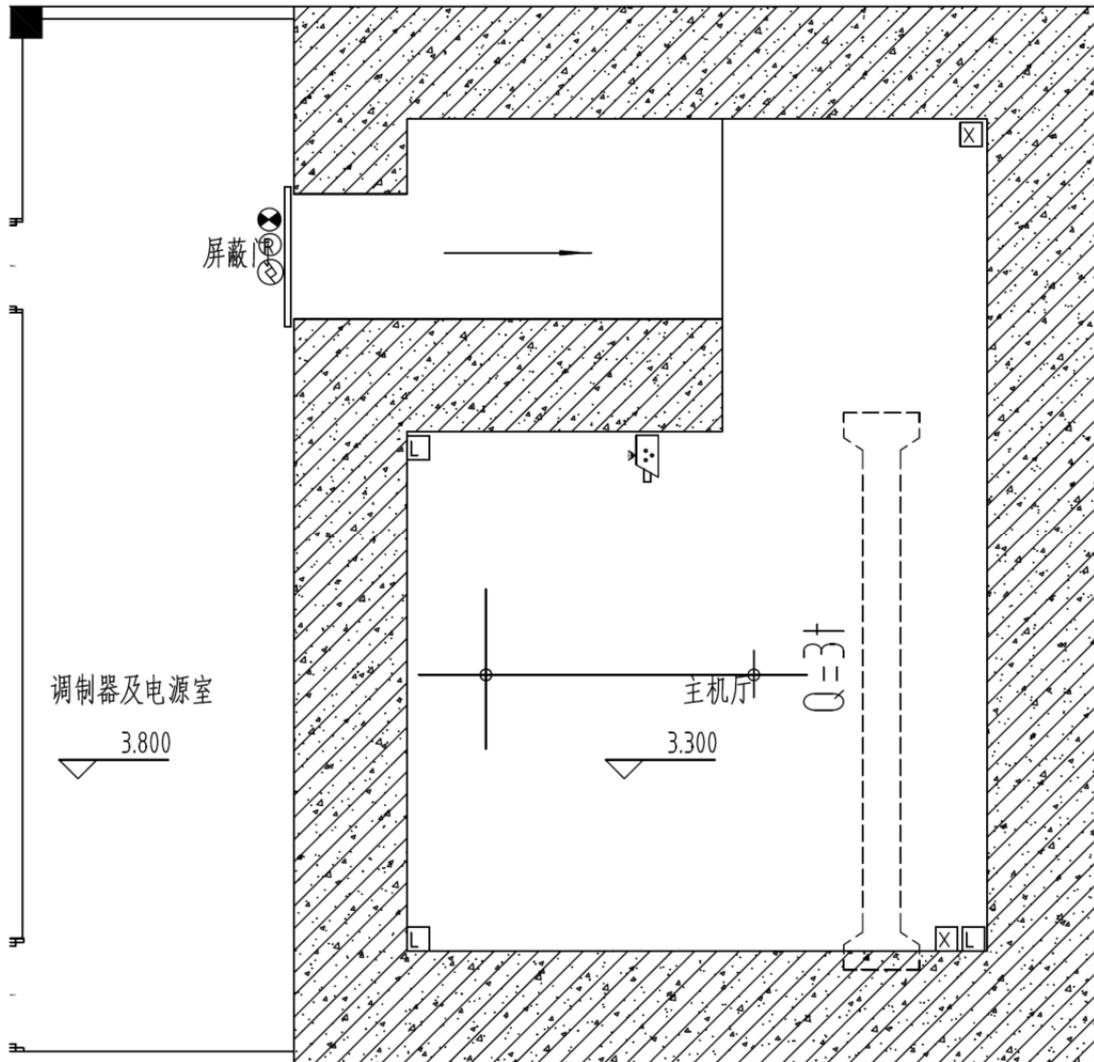


图 例

- | | | |
|---------|--------|--------|
| ⊙ 剂量监测 | ⊘ 地漏 | ⊗ 三色灯 |
| ⊕ 蜂鸣信号器 | ▬ 配电盘 | ⊕ 联锁机构 |
| ⊖ 光电开关 | ⊏ 拉线开关 | ⊗ 巡检开关 |
| ⊖ 监测探头 | ⊏ 急停开关 | |

附图 14 二层加速器机房安全联锁布置示意图

建设项目环境保护审批登记表

填表单位 (盖章): 上海核工程研究所

填表人 (签字): 傅小斌

项目经办人 (签字):

建设项目	浙江紫金港校区西区		建设地点	浙江紫金港校区西区	
建设内容	核物理材料研究用房乙级非密封放射性实验室及电子加速器机房项目		建设性质	<input checked="" type="checkbox"/> 新建 <input type="checkbox"/> 改扩建 <input type="checkbox"/> 技术改造	
行业类别	高等教育 P844		环境影响评价类别	<input checked="" type="checkbox"/> 编制报告书 <input type="checkbox"/> 编制报告表 <input type="checkbox"/> 填报登记表	
总投资 (万元)	3510		环保投资 (万元)	400	
单位名称	浙江大学		单位名称	上海核工程研究院	
通讯地址	浙江省西湖区余杭塘路 866 号		通讯地址	上海市虹漕路 29 号	
法人代表	林建华		证书编号	国环评证甲字第 1815 号	
环境空气质量	<input type="checkbox"/> 自然保护区 <input type="checkbox"/> 基本草原		环境噪声	<input type="checkbox"/> 海水 <input type="checkbox"/> 土壤 <input type="checkbox"/> 其它:	
地表水	<input type="checkbox"/> 饮用水水源保护区 <input type="checkbox"/> 珍稀动植物栖息地		地下水	<input type="checkbox"/> 基本农田保护区 <input type="checkbox"/> 水土流失重点防治区 <input type="checkbox"/> 沙化地封禁保护区 <input type="checkbox"/> 森林公园 <input type="checkbox"/> 森林公园 <input type="checkbox"/> 两控区	
环境敏感特征	<input type="checkbox"/> 自然保护区 <input type="checkbox"/> 文物保护单位 <input type="checkbox"/> 世界自然文化遗产		土壤	<input type="checkbox"/> 重点湖泊 <input type="checkbox"/> 其它:	
排放物及主要污染物	现有工程 (已建+在建) 本工程 (拟建或调整变更) 本工程 (已建+在建+拟建或调整变更)		自身削减量	以新带老削减量 区域平衡替代本工程削减量	
水	实际排放浓度 (1)	允许排放浓度 (2)	核定排放总量 (3)	实际排放总量 (4)	核定排放总量 (5)
化学需氧量					
氨氮					
石油类					
废气					
二氧化硫					
烟尘					
工业粉尘					
氮氧化物					
工业固体废物					
与本项目有关的其它特征污染物					
污染物排放达标与总量控制 (工业建设项目详填)					

注: 1、排放增减量: (+) 表示增加, (-) 表示减少
 2、(12): 指该项目所在区域通过“区域平衡”视为本工程替代削减量
 3、(9) = (7) - (8), (15) = (9) - (11) - (12), (13) = (3) - (11) + (9)
 4、计量单位: 废气排放量——万吨/年; 废气排放浓度——毫克/立方米; 工业固体废物排放量——万吨/年; 水污染物排放量——吨/年; 大气污染物排放量——吨/年

影响及主要措施		名称	级别或 种类数量	影响程度 (严重、一般、 小)	影响方式 (占用、切割阻 断或二者均有)	避让、减免 影响的数量 或采取保护 措施的种类 数量	工程避让投 资 (万元)	另建及功 能区划调 整投资(万 元)	迁地增殖保 护投资 (万元)	工程防护治理投资 (万元)	其它						
生态保护目标	生态保护区										自然保护区	水源保护区	重要湿地	风景名胜区	世界自然、人文遗产地	珍稀特有动物	珍稀特有植物
		类别及形式	临时占用	永久占用	临时占用	永久占用	临时占用	永久占用	临时占用	永久占用							
面积		环评后减缓 和恢复的面积		噪声治理		工程避让 (万元)		隔声屏障 (万元)		隔声窗 (万元)		绿化降噪 (万元)		低噪设备及 工艺 (万元)		其它	
主要生态破坏控制指标																	