

# 核技术利用建设项目

## 新瑞阳光粒子医疗装备（无锡）有限公司 生产（含建造）、销售和使用 质子治疗系统项目 环境影响报告书

新瑞阳光粒子医疗装备（无锡）有限公司

2018年10月

环境保护部监制



# 核技术利用建设项目

## 新瑞阳光粒子医疗装备（无锡）有限公司 生产（含建造）、销售和使用 质子治疗系统项目 环境影响报告书

建设单位名称：新瑞阳光粒子医疗装备（无锡）有限公司

建设单位法人代表（签名或签章）

通讯地址：江苏省无锡市钟书路99号国金中心62层

邮政编码：214021

联系人：汪金龙

联系电话：0510-66613019

电子邮箱： wangjl@newrt.com





项目名称：新瑞阳光粒子医疗装备（无锡）有限公司  
生产（含建造）、销售和使用质子治疗系统环境影响报告书项目

评价单位（盖公章）：苏州热工研究院有限公司

法人代表（签章）：王安

环评项目负责人：张峰

编制人员情况				
姓名	职称	证书编号	负责章节	签名
张晓峰	高工	A190403811	1、5、9	张晓峰
王 蒙	高工	A190403710	2、6、7	王蒙
任子理	工程师	A190402610	4、5	任子理
江 君	工程师	A190403310	3、8、附图和附录	江君

	姓名:	张晓峰
	Full Name	张晓峰
	性别:	男
	Sex	男
	出生年月:	1982年04月
	Date of Birth	1982年04月
	专业类别:	
	Professional Type	
	批准日期:	2008年05月
	Approval Date	2008年05月
持证人签名:		
Signature of the Bearer		
	签发单位盖章:	
	Issued by	
	签发日期:	2008年07月29日
	Issued on	2008年07月29日
管理号:		
File No.:	08353243507320035	

环境影响评价工程师

姓名	登记单位	登记证号	职业资格证书号	登记类别	登记有效起始日期	登记有效终止日期	所在省
覃春丽	苏州热工研究院有限公司	A190402311	00017093	核工业	2016-02-17	2019-02-17	江苏省
牛鑫	苏州热工研究院有限公司	A19040031300	0001602	输变电及广电通讯	2015-12-15	2018-12-14	江苏省
朱小康	苏州热工研究院有限公司	A190402311	0003574	核工业	2016-02-17	2019-01-24	江苏省
赵峰	苏州热工研究院有限公司	A19040011300	0001692	核工业	2015-12-15	2018-12-14	江苏省
张晓峰	苏州热工研究院有限公司	A190403811	0008486	核工业	2018-06-15	2021-06-13	江苏省
张启明	苏州热工研究院有限公司	A190403611	0008487	核工业	2018-04-27	2021-04-26	江苏省
游春华	苏州热工研究院有限公司	A190402511	00017087	核工业	2016-02-17	2019-02-17	江苏省
杨宗磊	苏州热工研究院有限公司	A190402411	00017090	核工业	2016-02-17	2019-02-17	江苏省
徐月平	苏州热工研究院有限公司	A190403511	201703320330000 003511320681	核工业	2018-02-11	2021-02-10	江苏省
徐攀	苏州热工研究院有限公司	A190403010	0007836	输变电及广电通讯	2017-01-14	2020-01-14	江苏省
王紫	苏州热工研究院有限公司	A190403710	00008485	输变电及广电通讯	2018-04-27	2021-04-26	江苏省
王丰春	苏州热工研究院有限公司	A19040091300	0003576	核工业	2016-01-25	2019-01-24	江苏省
田新珊	苏州热工研究院有限公司	A19040081300	0003575	核工业	2016-01-25	2019-01-24	江苏省
陶云良	苏州热工研究院有限公司	A190403211	0007680	核工业	2017-01-14	2020-01-14	江苏省
上官志洪	苏州热工研究院有限公司	A19040031300	0001691	核工业	2015-12-15	2018-12-14	江苏省
沙向东	苏州热工研究院有限公司	A190403111	0007679	核工业	2017-01-14	2020-01-14	江苏省
任子理	苏州热工研究院有限公司	A190402610	00017082	输变电及广电通讯	2016-02-17	2019-02-17	江苏省
江君	苏州热工研究院有限公司	A190403310	00018684	输变电及广电通讯	2016-12-15	2019-12-15	江苏省
郝睿	苏州热工研究院有限公司	A190403411	0012547	核工业	2017-01-12	2019-04-27	江苏省
陈洋	苏州热工研究院有限公司	A190402811	0012551	核工业	2016-04-27	2019-04-27	江苏省
陈超峰	苏州热工研究院有限公司	A190402911	0006975	核工业	2016-11-08	2019-11-08	江苏省
鲍昕杰	苏州热工研究院有限公司	A190402010	00017097	输变电及广电通讯	2016-02-17	2019-02-17	江苏省

## 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	项目性质和建设单位.....	1
1.2.2	项目背景与意义.....	3
1.2.3	项目用地.....	4
1.2.4	项目周边环境条件.....	5
1.3	编制依据.....	7
1.3.1	法律、法规.....	7
1.3.2	标准、技术规范 and 部门规章.....	7
1.3.3	项目文件.....	8
1.4	评价标准.....	9
1.4.1	剂量约束值.....	9
1.4.2	环境辐射剂量率控制水平.....	9
1.4.3	放射性废物免于辐射防护监管标准.....	9
1.4.4	噪声评价标准.....	10
1.4.5	电磁辐射评价标准.....	10
1.4.6	施工期噪声排放标准.....	10
1.5	评价范围和保护目标.....	11
1.5.1	评价范围.....	11
1.5.2	环境保护目标.....	11
2	自然环境与社会环境状况.....	15
2.1	自然环境状况.....	15
2.1.1	地理位置.....	15
2.1.2	地形、地貌、地质和地震.....	15
2.1.3	水文、气象.....	16

2.2	社会经济状况.....	17
2.3	环境质量和辐射现状.....	17
2.3.1	贯穿辐射本底 .....	18
2.3.2	空气中放射性核素活度浓度水平 .....	20
2.3.3	土壤中放射性核素本底 .....	21
2.3.4	水体中天然放射性核素本底 .....	22
2.3.5	声环境质量现状 .....	23
2.4	场址适宜性评价.....	24
3	工程分析与源项.....	25
3.1	项目规模与基本参数.....	25
3.2	工程设备.....	26
3.2.1	注入系统 .....	26
3.2.2	中能传输系统 .....	28
3.2.3	主加速器系统 .....	29
3.2.4	高能传输系统 .....	32
3.2.5	扫描治疗头和治疗椅（床） .....	33
3.2.6	辅助系统 .....	34
3.3	工艺流程.....	36
3.3.1	生产使用流程 .....	36
3.3.2	销售流程 .....	37
3.4	污染源项.....	39
3.4.1	瞬发辐射 .....	39
3.4.2	缓发辐射 .....	46
3.4.3	电磁辐射 .....	51
3.4.4	非放射性污染源 .....	52
3.5	废弃物.....	53
3.5.1	废气 .....	53
3.5.2	废水 .....	53

3.5.3	固体废物 .....	53
4	辐射安全与防护 .....	55
4.1	场所布局与屏蔽 .....	55
4.1.1	场所布局 .....	55
4.1.2	屏蔽防护 .....	59
4.2	辐射安全与防护措施 .....	66
4.2.1	加速器安全联锁设计 .....	66
4.2.2	安全保卫 .....	71
4.3	三废的治理 .....	71
4.3.1	放射性废气及处理措施 .....	71
4.4	服务期满后的环境保护措施 .....	74
5	环境影响分析 .....	75
5.1	建设阶段环境影响分析 .....	75
5.1.1	大气环境影响 .....	75
5.1.2	水环境影响 .....	76
5.1.3	声环境影响 .....	76
5.1.4	施工固体废物环境影响 .....	77
5.1.5	生态环境影响 .....	77
5.2	运行阶段环境影响分析 .....	77
5.2.1	辐射屏蔽计算方法 .....	78
5.2.2	场所辐射水平 .....	80
5.2.3	人员受照剂量 .....	89
5.2.4	电磁辐射 .....	98
5.2.5	非放射性污染 .....	98
5.3	事故影响分析 .....	99
5.3.1	人员误入事故 .....	100
5.3.2	工作人员超剂量照射事故 .....	100
5.3.3	冷却水泄漏事故 .....	101

6	辐射安全管理.....	102
6.1	机构与人员.....	102
6.2	辐射安全管理规章制度.....	103
6.3	辐射监测.....	104
6.3.1	工作场所剂量监测系统.....	105
6.3.2	环境监测.....	106
6.3.3	个人剂量监测.....	110
6.4	辐射事故应急.....	110
6.5	辐射安全管理满足相关法律法规的分析.....	112
7	利益-代价分析.....	116
7.1	利益分析.....	116
7.1.1	经济效益.....	116
7.1.2	社会效益.....	116
7.1.3	临床医学效益.....	116
7.2	代价分析.....	117
7.2.1	经济代价.....	117
7.2.2	社会和环境代价.....	118
7.2.3	资源代价.....	118
7.3	正当性分析.....	118
8	公众参与.....	119
8.1	公众参与方案.....	119
8.2	信息公告.....	119
8.2.1	网络公示.....	119
8.2.2	张贴公示.....	120
8.2.3	公众宣传.....	121
8.3	公众调查结果分析.....	123
8.4	公众参与结论与建议.....	124
9	结论与建议.....	125

9.1 项目工程概况.....	125
9.2 辐射安全与防护.....	125
9.3 环境影响分析.....	126
9.4 辐射安全管理.....	126
9.5 公众参与.....	127
9.6 建议.....	127
附录.....	128
附录 A 环评委托书.....	128
附录 B 项目立项文件.....	129
附录 C 整厂环评批文.....	131
附录 D 厂址现状监测报告.....	134

# 1 概述

## 1.1 项目名称、地点

本建设项目名称为新瑞阳光粒子医疗装备（无锡）有限公司生产（含建造）、销售和使用质子治疗系统。行业类别为 C3581 医疗诊断、监护及治疗设备制造。

质子治疗系统用于为医疗机构提供系列放射治疗用质子同步加速器及其配套设施。

企业厂区选址于无锡市梁溪区金石东路与运河西路交叉口西南侧，图 1-1 给出了厂址地理位置示意图。

本项目拟建设的质子治疗系统生产厂房（简称质子厂房）位于厂区南侧，周围 100m 范围内没有居民点、学校、医院等环境敏感目标。

## 1.2 项目概况

### 1.2.1 项目性质和建设单位

新瑞阳光粒子医疗装备(无锡)有限公司成立于 2017 年 4 月，注册地址位于无锡市南湖大道 588 号 217 号，注册资本 10000 万元，经营范围：医疗仪器设备及器械、实验分析仪器的制造、研发、技术咨询、技术转让、技术服务，是一家港澳台独资企业。

2017 年 11 月企业取得了位于无锡市梁溪区金石东路与运河西路交叉口西南侧地块使用权，用地性质为工业用地。企业拟总投资 20 亿元建设粒子技术，粒子技术装备制造中心，粒子装备关键总成和关键配套产品集成中心，全球营销和技术服务中心，全球粒子医疗专业人才培养中心，旨在打造一个以质子、重离子、光子肿瘤治疗装备制造产业为核心，以上下游产业链及关联产业为支撑的集研发、设计、制造、展示、培训为一体的全球粒子产业集群。

本项目是企业的一期项目，投资额约 6000 万元，其中环保投资约 500 万元，占一期投资的 8.3%。一期建成后将具有年产质子治疗系统 40 套的生产能力。投资经费全部由企业自筹。



比例尺 1: 250000

图 1-1 厂址地理位置示意图

## 1.2.2 项目背景与意义

### （1）质子治疗的优势和项目意义

质子治疗装置是一种新型的放疗设备，和目前广泛使用的高能光子和电子相比（例如电子直线加速器），质子能使射线的能量更好地集中在所需要治疗的肿瘤靶区，而避开周围的正常器官和组织，因此可使肿瘤得到足够剂量照射，提高肿瘤局部控制率，同时可较大降低正常器官和组织放射并发症。目前，质子治疗肿瘤的适应症可包括：脑和脊髓肿瘤、颅底肿瘤和有关疾病、眼部肿瘤、头颈部肿瘤、胸腹部肿瘤、盆腔肿瘤和儿童肿瘤等多种肿瘤。尤其对于早期肿瘤患者，质子治疗的五年生存率达到80%以上。对于有重要器官包绕的肿瘤来说，质子治疗也显示了极大的优越性。质子治疗是目前世界上放射治疗领域最为精确和副作用最小，最先进、成熟的高科技治疗手段之一，在未来20-30年内将会成为肿瘤放射治疗的主流手段。

目前我国国内的医疗质子加速器研发刚刚起步，尚未进行大规模商业推广，在设备造价上也不具备优势，技术上与国际一流医疗装备厂家相比也不具备竞争优势，这与我国日益提高的经济发展水平和国际地位不相称。近10年来，我国陆续从欧洲和美国引进了国际领先的质子/重离子加速器，如果国内生产厂家不迅速占领市场，会逐步失去国内甚至国际竞争力。本项目建设单位采用专利技术，研发、设计和建造紧凑型同步型质子加速器，努力降低设备造价，满足人民群众日益增长的高端医治需求，为我国医疗卫生事业做出贡献。

### （2）市场需求

据不完全统计，至2016年底，全球有66个在运质子治疗中心，约185间治疗室；在建和规划中近百个；全球已有近15万临床治疗案例。

随着我国经济的快速发展，居民收入的增加，国人健康意识提高，人们在医疗消费方面的投入逐年增加。根据卫生部门对于家庭卫生服务调查结果，1992年全国医疗消费总额为955.4亿元，占国民经济中所占份额为3.59%，2002年达到4.98%。人均医疗消费水平由1992年的81.5元一路攀升为2002年的406.6元。

随着中国经济快速发展带来的环境污染和生态问题，以及社会竞争带来的精神压力 and 生活方式变化，导致了癌症发病率升高。2004年中国城市地区前五位死因为恶性肿瘤、脑血管病、呼吸系统疾病、心脏病、损伤和中毒，占全部死亡的70.12%。在我国每年新增肿瘤患者约260万例，每年因癌症死亡人数约为140万，占我国死亡总人

数的 20%，并且仍在以每年 1.3% 的速度增加。按照国际算法，2030 年我国预计约 42 万例新增患者可以采用质子进行治疗，按每台装置每年治疗 2000 例患者的保守估计，我国未来对质子肿瘤治疗装置的需求总量在 200 台以上。

### （3）本项目的发展和挑战

目前国内已批准的多数质子医疗装置需要较大面积的土地和建筑成本，辐射防护设计难度大，前期资本投入巨大，设备机架体积庞大，安装调试时间长，运行维护昂贵。

本项目建设单位研发并建造紧凑型同步加速器，可根据治疗计划提供 70MeV~230MeV 的可变能量质子束流，无需降能器，较低的束流损失和较高的束流引出效率有效降低中子辐射，同时不再需要更为厚重的混凝土屏蔽体，可以不经改造，直接放入传统直线加速器单间治疗室。

### 1.2.3 项目用地

企业厂区总体规划用地面积约 100153.7hm<sup>2</sup>，总建筑面积 189040m<sup>2</sup>，划分为 A、B、C 三个地块，分期建设。本项目位于其中的 A 地块（工业用地）范围，质子厂房作为整个厂区一期项目中的主厂房先行建设。A 地块配套建筑群还包括了光子厂房、研发总部、展厅与研发楼、辅助厂房等，B、C 地块（科研设计用地）作为二期项目后期开发。企业已于 2017 年 11 月与无锡市国土资源局签订了国有建设用地使用权出让合同。

表 1-1 A 地块主要经济技术指标一览表

指标		数值	规划	相符性
总用地面积(m <sup>2</sup> )		54699	54699	相符
总建筑面积(m <sup>2</sup> )		54640	/	/
其中	计容建筑面积	54640	/	/
	其中			
	一期建筑面积	79780	/	/
	二期建筑面积	24860	/	/
不计容建筑面积		/	/	/
容积率		≈1.0	1.0	相符
建筑密度%		37.5	<45	相符
绿化率%		15	/	/
停车位		260	/	/

指标		数值	规划	相符性
总用地面积(m <sup>2</sup> )		54699	54699	相符
其中	机动车	150	/	/
	非机动车	110	/	/



图 1-2 厂区地块划分图

#### 1.2.4 项目周边环境条件

项目拟建地点行政隶属于江苏省无锡市梁溪区扬名街道，项目厂址原为无锡市太极实业股份有限公司厂区，该企业已于 2013 年 5 月停产，原厂内设备、主要原材料及废弃物等均已拆除或处置，生产车间、办公楼等建筑物已全部拆除，土地已平整。

本项目质子厂房所在地原为无锡市太极实业股份有限公司办公区和职工活动中心。厂址周边是已开发工业用地和绿化带，环境条件相对简单，距离质子厂房最近的是厂区南侧相隔汇太路的展鹏集团等 3 家工业企业。

项目原址建筑分布示意图见图 1-3，厂址现状见图 1-4。



 原无锡太极实业厂区范围       本项目拟建质子厂房

图 1-3 项目原址周围环境示意图



图 1-4 厂址现状图

### 1.3 编制依据

根据《中华人民共和国放射性污染防治法》、《建设项目环境影响评价分类管理名录》和《射线装置分类》等要求，本项目质子治疗装置属于 I 类射线装置，应编制环境影响报告书，在本报告书编制过程中，遵循了以下法律、法规、标准和技术规范等要求。

#### 1.3.1 法律、法规

- 中华人民共和国环境保护法（修订）（自 2015 年 1 月 1 日起施行）；
- 中华人民共和国环境影响评价法（修订）（自 2016 年 9 月 1 日起施行）；
- 中华人民共和国放射性污染防治法（自 2003 年 10 月 1 日起施行）；
- 中华人民共和国大气污染防治法（自 2016 年 1 月 1 日起施行）；
- 中华人民共和国水污染防治法（自 2008 年 6 月 1 日起施行）；
- 中华人民共和国环境噪声污染防治法（自 1997 年 3 月 1 日起施行）；
- 中华人民共和国固体废物污染环境防治法（2016 年 11 月 7 日修订）；
- 建设项目环境保护管理条例（自 2017 年 10 月 1 日起施行）；
- 放射性废物安全管理条例（自 2012 年 3 月 1 日起施行，国务院令 612 号）；
- 放射性同位素与射线装置安全和防护条例（2005 年 12 月 1 日起施行，国务院令 449 号，2014 年 7 月 29 日修订）等。

#### 1.3.2 标准、技术规范 and 部门规章

##### （1）部门规章和文件

- 建设项目环境影响评价分类管理名录（环境保护部令 44 号，2018 年 4 月 28 日修正）；
- 放射性同位素与射线装置安全许可管理办法（环境保护部令 3 号，2008 年 12 月 6 日起实施；2017 年 12 月 20 日发布环保部令 47 号修改部分内容）；
- 放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法（2011 年 4 月，环境保护部令 18 号）；
- 关于发布射线装置分类的公告（环境保护部和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）等。

##### （2）技术标准和技术导则

- 《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871-2002）；
- 《环境核辐射监测规定》（GB12379-90）；
- 《放射性废物管理规定》（GB14500-2002）；
- 《污水综合排放标准》（GB8978-1996）；
- 《环境空气质量标准》（GB3095-2012）。
- 《声环境质量标准》（GB3096-2008）；
- 《工业企业厂界环境噪声排放标准》（GB12348-2008）；
- 《建筑施工场界环境噪声排放标准》（GB12523-2011）。
- 《电磁环境控制限值》（GB8702-2014）；
- 《辐射环境保护管理导则 核技术利用建设项目 环境影响评价文件的内容和格式》（HJ 10.1-2016）；
- 《放射治疗机房的辐射屏蔽规范第 5 部分：质子加速器放射治疗机房》（GBZ/T201.5-2015）。

### （3） 地方法规

- 江苏省辐射污染防治条例（修订）（2018 年 5 月 1 日起施行）；
- 江苏省固体废物污染环境防治条例（修订）（2018 年 5 月 1 日起施行）；
- 江苏省环境噪声污染防治条例（修订）（2018 年 5 月 1 日起施行）。

### （4） 其它参考资料

- NCRP144 号报告（Radiation Protection for Particle Accelerator Facilities, NCRP Report No.144），国际原子能机构文件，2003-12-31 发布；

## 1.3.3 项目文件

- 新瑞阳光粒子医疗装备（无锡）有限公司一期工程质子治疗系统项目工程设计文件；
- 无锡市梁溪区发展和改革局对新瑞阳光粒子医疗《企业投资项目备案通知书》（备案号（2017）17 号）；
- 无锡市梁溪区行政审批局关于《新瑞阳光粒子医疗装备（无锡）有限公司粒子放疗产业集群项目环境影响报告表》的批复文件，梁行审投许[2018]61 号；
- 本项目环境影响评价技术服务委托书等。

上述部分文件请参见附录。

## 1.4 评价标准

根据本项目建设和运行的特点，施工期环境影响评价主要涉及项目主体工程建筑、设施安装等造成的对水、气、声等环境的影响；运行期间对环境的影响主要包括对公众和职业人员的辐射影响、运行噪声影响等。

### 1.4.1 剂量约束值

根据 GB18871-2002《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》的要求，确定本项目对公众和职业人员剂量约束值为：

- 职业人员：5mSv/a；
- 公众：0.1mSv/a。

### 1.4.2 环境辐射剂量率控制水平

参考《放射治疗机房的辐射屏蔽规范第 5 部分：质子加速器放射治疗机房》（GBZ/T201.5-2015），质子加速器机房四周屏蔽设施外，人员居留场所辐射剂量率不超过 2.5  $\mu$  Sv/h。

加速器机房顶部无人员居留，但加速器所在质子厂房内有局部二层建筑（研发办公区），因此对加速器机房顶部剂量率控制不超过 2.5 $\mu$ Sv/h。

### 1.4.3 放射性废物免于辐射防护监管标准

依据 GB27742-2011《可免于辐射防护监管的物料中放射性核素活度浓度》，对人工放射性核素混合物，应当要求其中各种人工放射性核素的活度浓度与各自免管浓度值的比值之和小于 1，即满足下式要求：

$$\sum_{i=1}^n \frac{C_i}{C_{oi}} \leq 1$$

其中  $C_i$  为第  $i$  种人工放射性核素在物料中的放射性活度浓度，Bq/g；

$C_{oi}$  为表 B2 所列第  $i$  种人工放射性核素的免管活度浓度，Bq/g；

$n$  为物料中人工放射性核素种类。

GB27742-2011 中表 B2 中与本项目相关放射性核素列表如表 1-2 所示。

表 1-2 人工放射性核素免管浓度值（Bq/g）

核素	活度浓度	核素	活度浓度	核素	活度浓度
<sup>3</sup> H	100	<sup>32</sup> P	1000	<sup>51</sup> Cr	100
<sup>7</sup> Be	10	<sup>33</sup> P	1000	<sup>54</sup> Mn	0.1
<sup>14</sup> C	1	<sup>45</sup> Ca	100	<sup>55</sup> Fe	1000
<sup>22</sup> Na	0.1	<sup>48</sup> V	1	<sup>59</sup> Fe	1

#### 1.4.4 噪声评价标准

依据无锡市梁溪区行政审批局对《新瑞阳光粒子医疗装备（无锡）有限公司粒子放疗产业集群项目环境影响报告表》的批复，企业厂区北侧沿运河西路道路红线外 35 米区域环境噪声执行《声环境质量标准》(GB3096-2008)中 4a 类标准，其余三侧执行 2 类标准。项目运行后，厂界噪声执行《工业企业厂界环境噪声排放标准》GB12348-2008 中的排放限值，具体见表 1-3 所示。

表 1-3 运行期厂界环境噪声评价标准

执行标准	昼间	夜间
工业企业厂界环境噪声排放标准(GB12348-2008)2 类	60dB (A)	50dB (A)
工业企业厂界环境噪声排放标准(GB12348-2008)4a 类	70dB (A)	55dB (A)

#### 1.4.5 电磁辐射评价标准

依据 GB8702-2014《电磁环境控制限值》，本项目电磁辐射控制限值见表 1-4。

表 1-4 电磁环境控制限值

执行标准	0.1MHz~3MHz	15GHz~300GHz
电磁环境控制限值 (GB8702-2014)	电场强度 40V/m	等效平面波功率密度 2W/m <sup>2</sup>

#### 1.4.6 施工期噪声排放标准

施工期施工场地厂界执行《建筑施工场界环境噪声排放标准》(GB12523-2011)，见表 1-5。

表 1-5 施工期施工场地厂界噪声排放标准

执行标准	昼间	夜间
------	----	----

建筑施工场界环境噪声排放标准 (GB12523-2011)	70dB	55dB
----------------------------------	------	------

## 1.5 评价范围和保护目标

### 1.5.1 评价范围

依据 HJ10.1-2016《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》的要求，射线装置评价范围一般设为实体屏蔽边界外 50m，考虑到本项目为 I 类射线装置，适当扩大评价范围，确定本次环境影响评价范围为质子加速器机房实体屏蔽墙边界外 100m。

### 1.5.2 环境保护目标

本项目评价范围内的保护目标包括了厂区内工作人员和厂界外公众。建设单位销售的质子加速器在使用单位（医疗机构）调试，参与调试的这部分辐射工作人员（属于建设单位派遣员工）也是本项目的保护目标。

本项目评价范围内保护目标具体见表 1-5，保护目标分布示意图见图 1-5，保护目标现场情况见图 1-6。

表 1-6 评价范围及保护目标

保护目标	方位	距离	人口	保护要求
质子厂房 工作人员	质子厂房内	/	约 50 人	年剂量不超过 5mSv/a
加速器现场 调试工程师	/	/	约 50 人	年剂量不超过 5mSv/a
厂区内其它工 作人员	质子厂房 西侧光子厂房	约 12 m	约 40 人	年剂量不超过 0.1mSv/a
厂区内其它工 作人员	质子厂房 北侧研发楼	约 30 m	约 100 人	年剂量不超过 0.1mSv/a
厂区内其它工 作人员	质子厂房 东侧辅助厂房	约 30 m	约 60 人	年剂量不超过 0.1mSv/a

展鹏科技股份有限公司员工	厂界南侧	约 60m	450 人	年剂量不超过 0.1mSv/a
无锡市联发机电有限公司员工	厂界南侧	约 60m	约 70 人	年剂量不超过 0.1mSv/a
无锡华德兴掀钢杆有限公司员工	厂界东南	约 80m	约 75 人	年剂量不超过 0.1mSv/a



图 1-5 项目周围环境保护目标分布示意图

图例：环境保护目标 ●

评价范围 100m 〰



无锡市联发机电有限公司



展鹏科技股份有限公司



无锡华德兴欣钢杆有限公司

图 1-6 项目周围环境保护目标现状图

## 2 自然环境与社会环境状况

### 2.1 自然环境状况

#### 2.1.1 地理位置

本项目位于无锡市梁溪区金石路与运河西路交叉口西南侧。

本项目北面为运河西路，西面为金石东路，东面为华清科技园，南面相隔汇太路为工业区，周围 100m 范围内没有居民区。厂址周围距离最近的居民点位于厂区西北，金石路北侧分布有养老院和居民住宅。厂址周围环境见图 2-1。



图 2-1 项目周边环境特征示意图

#### 2.1.2 地形、地貌、地质和地震

项目所在地区属太湖平原，地势平坦宽广，平原海拔高度一般在 2-5 米，土质肥沃，河湖港汊纵横分布，河道密如蛛网，地表物质组成以粒径较小的淤积物和湖积物为主。土壤类型为太湖平原黄土状物质的黄泥土，土层较厚，有机质含量高，氮磷钾含量丰富，既保水又爽水，质地适中，土壤酸碱度为中性，土质疏松，粘粒含量 20-30%。

本地区属江苏省地层南区，地层发育齐全，其底未出露。中侏罗纪岩浆活动

喷出物盖在老地层上和侵入各系岩层中，第四纪全新统现代沉积遍及全区，泥盆纪有少量分布为紫红色砂砾岩，石英砾岩，石英岩，向上渐变为砂岩与黑色页岩的交替层，顶部砂质页岩含优质陶土层地下水属松散岩类孔隙含水岩组，潜水含水层岩性为泻湖亚粘土夹粉沙，地耐力为 8-10T/m<sup>2</sup>，水质为地表水所淡化。

项目附近断裂均未发现晚更新世以来活动断裂，周围不存在能动断层。厂址附近地震活动较弱，厂址区域属于地壳较稳定地区。地域地震基本烈度为 6 度设防区。

### 2.1.3 水文、气象

#### 2.1.3.1 水文

项目所在地属苏南水网地区，地势坦荡，河网密布，纵横交汇，形成典型的水乡特色。

厂址北侧有京杭运河，本项目生活污水经区域污水处理厂处理达标后排入京杭运河。京杭运河无锡段全长 39.2 公里，河口宽达 90 米，最小水深 3.2 米，流速 0.05m/s，感官指标浑浊。

根据资料统计，1952—1998 年 46 年无锡市的平均降雨量为 1106.7mm，1991 年降雨总量达 1630.7，而 1978 年降雨总量仅 552.9。无锡地区的汛期为 5—9 月，年降雨量的分布主要集中在汛期，雨量占到年平均雨量的 60% 以上，汛期最大雨量为 91 年 1216.1mm。

#### 2.1.3.2 气象

项目所在地属北亚热带季风性气候区，四季分明，气候温暖，雨水充沛，日照充足，无霜期长，夏季受来自海洋季风控制，炎热多雨；冬季受大陆来的冬季风影响，寒冷少雨，春秋两季处于冬夏季风交替时期，形成了冷暖多变，晴雨无常的气候特征。据气象台历年观测资料统计：项目所在地区平均气温 15.4℃，极端最高气温 38.9℃，极端最低气温-12.5℃。历年平均无霜期 220 天，平均气压 1016.2 百帕，相对湿度 79%，年平均降水量 1106.7mm，年最大降水量 1581.8mm，年最小降水量 552.9mm。年均日照时数为 2019.4 小时。年主导风向为 ESE，风频 10.2%；次主导风向 SE，风频 9.6%，年静风频率 12.8%。冬季以 WNW 风为主，风频 12.8%；夏季以 ESE 为主导风向，频率达 14.8%。项目所在地区全年

以 D 类(中性)稳定度天气为主。

项目所在地区近 5 年平均风速为 2.6m/s。各月平均风速变化幅度在 2.2-2.8m/s (10m 处)之间。风速昼夜变化不大,下午 1-2 点风速最大,可达 3.1m/s;夜间风速平衡,一般在 1.7-1.9m/s 之间。

### 2.1.3.3 植被、生物多样性

本地区天然植被已大部分转化为人工植被,主要种植乔木、灌木、香樟树等树种。地带性植被属落叶林带,随着近年来经济的迅速发展,人类社会经济活动的日益频繁,原有的自然植被已残留无几,现有林木以农田林网和四旁种植为主。

项目建设地附近无自然保护区,无森林,无珍稀濒危物种,仅有鸟类、鼠类、蛇类、蛙类及昆虫等小型动物。

## 2.2 社会经济状况

2015 年 10 月,经国务院批准《关于同意江苏省调整无锡市部分行政区划的批复》(国函[2015]184 号),撤销无锡市崇安区、南长区、北塘区,设立无锡市梁溪区,以原崇安区、南长区、北塘区的行政区域为梁溪区的行政区域,梁溪区人民政府驻崇安寺街道解放南路 688 号。

行政区划调整后,梁溪区的面积为 71.5 平方千米,人口约 101.47 万人。梁溪区现辖 16 个街道:崇安寺街道、通江街道、广瑞路街道、上马墩街道、江海街道、广益街道、迎龙桥街道、南禅寺街道、清名桥街道、金星街道、金匮街道、扬名街道、黄巷街道、山北街道、北大街街道、惠山街道。

本项目位于地属扬名街道。无锡市梁溪区扬名街道,东至京杭运河与金匮街道相邻,南、西与滨湖区太湖街道相邻,北至金城路与金星街道毗邻,总面积 5.3 平方千米,人口约 2.8 万。街道原是无锡郊区工业名镇扬名镇。街道管理 12 个社区,芦庄第一社区、芦庄第二社区、芦庄第三社区、五爱社区、五星社区、清一社区、清二社区、扬名社区、金星社区、新联社区、芦村社区、梁中社区。办事处驻中南路扬名工业大道。

## 2.3 环境质量和辐射现状

为了了解本项目所在区域的辐射环境及声环境质量现状，同时为拟建项目的环境现状评价提供基础数据，建设单位委托苏州热工研究院有限公司环境检测中心于 2018 年 6 月对厂址区域及周围环境进行了环境质量监测。

环境监测单位使用以下监测和分析方法：

- 《辐射环境监测技术规范》 HJ/T 61-2001
- 《环境地表  $\gamma$  辐射剂量率测定规范》 GB/T 14583-1993
- 《工业企业厂界环境噪声排放标准》 GB 12348-2008
- 《声环境质量标准》 GB 3096-2008
- 《空气中放射性元素的  $\gamma$  能谱分析方法》 WS/T 184-1999
- 《气载放射性物质取样一般规定》 HJ/T22-1998
- 《水中氚的分析方法》 GB/T 12375-1990
- 《水中放射性核素的  $\gamma$  能谱分析方法》 GB/T 16140-1995
- 《水中总  $\alpha$  放射性浓度的测定厚源法》 EJ/T 1075-1998
- 《水中总  $\beta$  放射性测定蒸发法》 EJ/T 900-1994
- 《水质-非盐水中总  $\beta$  活度测量方法-厚源法》 ISO 9697-2015
- 《土壤中放射性核素的  $\gamma$  能谱分析方法》 GB/T 11743-2013
- 《高纯锗  $\gamma$  能谱分析通用方法》 GB/T 11713-2015

### 2.3.1 贯穿辐射本底

经现场走访和调查，厂址周围及环境影响评价范围内目前没有核技术利用项目。厂址原单位也未开展核技术利用项目。

监测单位在厂区内、质子厂房拟建区域及厂界周围均匀布点布设 X- $\gamma$  剂量率监测点位，单次测量，共设置 27 个监测点位。监测点位见图 2-2。

根据对厂址附近地区辐射本底调查结果表明， $\gamma$  辐射剂量率范围为  $0.071 \mu\text{Sv/h} \sim 0.095 \mu\text{Sv/h}$ ，处于江苏省放射性环境本底水平范围内。

表 2-1 厂址区域  $\gamma$  辐射剂量率本底监测结果

检测点序号	检测点位置	辐射剂量率( $\mu\text{Sv/h}$ )
1	见检测点位图（图 2-2）	$0.092 \pm 0.002$
2	见检测点位图（图 2-2）	$0.075 \pm 0.001$

检测点序号	检测点位置	辐射剂量率( $\mu\text{Sv/h}$ )
3	见检测点位图（图 2-2）	0.093 $\pm$ 0.002
4	见检测点位图（图 2-2）	0.085 $\pm$ 0.001
5	见检测点位图（图 2-2）	0.088 $\pm$ 0.002
6	见检测点位图（图 2-2）	0.080 $\pm$ 0.001
7	见检测点位图（图 2-2）	0.085 $\pm$ 0.001
8	见检测点位图（图 2-2）	0.093 $\pm$ 0.001
9	见检测点位图（图 2-2）	0.077 $\pm$ 0.002
10	见检测点位图（图 2-2）	0.095 $\pm$ 0.002
11	见检测点位图（图 2-2）	0.090 $\pm$ 0.001
12	见检测点位图（图 2-2）	0.080 $\pm$ 0.002
13	见检测点位图（图 2-2）	0.075 $\pm$ 0.001
14	见检测点位图（图 2-2）	0.081 $\pm$ 0.002
15	见检测点位图（图 2-2）	0.071 $\pm$ 0.001
16	见检测点位图（图 2-2）	0.071 $\pm$ 0.001
17	见检测点位图（图 2-2）	0.074 $\pm$ 0.001
18	见检测点位图（图 2-2）	0.086 $\pm$ 0.001
19	见检测点位图（图 2-2）	0.085 $\pm$ 0.001
20	见检测点位图（图 2-2）	0.083 $\pm$ 0.001
21	见检测点位图（图 2-2）	0.081 $\pm$ 0.002
22	见检测点位图（图 2-2）	0.080 $\pm$ 0.001
23	见检测点位图（图 2-2）	0.086 $\pm$ 0.001
24	见检测点位图（图 2-2）	0.088 $\pm$ 0.002
25	见检测点位图（图 2-2）	0.078 $\pm$ 0.002
26	见检测点位图（图 2-2）	0.087 $\pm$ 0.001
27	见检测点位图（图 2-2）	0.087 $\pm$ 0.001

注：表中数据未扣除宇响值。



图 2-2 X-γ 剂量率及噪声监测点位示意图

### 2.3.2 空气中放射性核素活度浓度水平

苏州热工研究院环境检测中心对厂址附近空气样品进行空气中氡和空气中  $\gamma$  核素测量，测量结果见表 2-2 和表 2-3。

监测结果表明，厂址区域空气氡的活度浓度低于仪器探测限  $10\text{mBq/m}^3$ 。参考生态环境部发布的《2016 全国辐射环境质量报告》，全国空气氡的活度浓度范围为  $0.006\sim 0.034\text{Bq/m}^3$ ，本项目区域空气氡浓度处于全国空气氡的活度浓度范围内。

厂址区域气溶胶中的  $\gamma$  核素的活度浓度也与《2016 全国辐射环境质量报告》中气溶胶中的  $\gamma$  核素活度浓度接近，未见异常。

表 2-2 空气氡检测结果

序号	样品名称	样品比活度(Bq/L)	仪器探测限(mBq/m <sup>3</sup> )
1	拟建区域空气	<0.59	<10

表 2-3 空气中  $\gamma$  核素检测结果

序号	样品名称	核素	活度浓度( $\mu\text{Bq/m}^3$ )
----	------	----	----------------------------

序号	样品名称	核素	活度浓度( $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ )
1	拟建区域空气	铀-238	<121
		钍-232	281 $\pm$ 15
		镭-226	<26
		铍-7	8526 $\pm$ 159
		氡-41	<9.1
		钾-40	2490 $\pm$ 174

### 2.3.3 土壤中放射性核素本底

苏州热工研究院环境检测中心对厂址附近地区土壤样品调查结果表明, 厂区土壤  ${}^7\text{Be}$  的测量结果是 <3.3Bq/kg, 厂界东南处土壤  ${}^7\text{Be}$  的测量结果是 12.4Bq/kg。未监测到其他人工放射性  $\gamma$  核素, 测量结果如表 2-4 所示。

上述检测结果对照《2016 全国辐射环境质量报告》中土壤放射性检测结果可知, 本项目及周围环境土壤中的天然核素的活度浓度均处于正常范围, 未见异常。

表 2-4 土壤中天然放射性核素测量结果 (Bq/kg.干)

序号	样品名称	核素	活度浓度 (Bq/kg干土)
1	厂址区域土壤	铀-238	53.7 $\pm$ 7.2
		钍-232	49.1 $\pm$ 1.0
		镭-226	26.9 $\pm$ 1.0
		铍-7	<3.3
		钠-22	<0.5
		硅-35	<1.3
		钾-40	502 $\pm$ 11
		氡-41	<0.5
		铬-51	<3.3
		锰-54	<0.3
		铁-59	<0.8
2	厂界东南侧土壤	铀-238	39.7 $\pm$ 6.9

序号	样品名称	核素	活度浓度 (Bq/kg干土)
		钍-232	45.6±1.0
		镭-226	23.4±0.9
		铍-7	12.4±1.9
		钠-22	<0.5
		硅-35	<1.2
		钾-40	640±12
		氩-41	<0.5
		铬-51	<3.2
		锰-54	<0.3
		铁-59	<0.8

### 2.3.4 水体中天然放射性核素本底

苏州热工研究院环境检测中心对厂址北侧京杭运河水体样品和企业拟采用的循环冷却水（去离子水）样品进行了水质放射性检测，检测因子为水中总  $\alpha$ 、总  $\beta$  活度浓度、水中氡和水中  $\gamma$  核素，检测结果见表 2-5，表 2-6 和表 2-7。

检测结果表明，厂址北侧运河水样品和去离子水样品中总  $\alpha$  活度浓度为 0.011~0.051Bq/L，总  $\beta$  活度浓度为 0.007~0.216Bq/L。对照《2016 全国辐射环境质量报告》中主要江河流域的水样放射性监测结果（总  $\alpha$ ：0.01~0.41 Bq/L；总  $\beta$ ：0.04~0.69Bq/L），本项目样品中总  $\alpha$ 、总  $\beta$  的活度浓度未见异常。

本项目京杭运河河水和循环冷却水水样中的氡的活度浓度均低于仪器探测限。水样中的  $\gamma$  核素水平对照《2016 全国辐射环境质量报告》中主要江河流域的水样放射性监测结果，本项目水样中天然核素  $\gamma$  核素活度浓度均与其接近，未见异常。

表 2-5 水中总  $\alpha$ 、总  $\beta$  检测结果

序号	样品名称	总 $\alpha$ 活度浓度(Bq/L)	总 $\beta$ 活度浓度(Bq/L)
1	循环冷却水水样	0.011±0.002	0.007±0.001

2	京杭大运河河水	0.051±0.015	0.216±0.009
---	---------	-------------	-------------

**表 2-6 水中氚检测结果**

序号	样品名称	样品比活度(Bq/L)
1	循环冷却水水样	<0.59
2	京杭大运河河水	<0.59

**表 2-7 水中 γ 核素检测结果**

序号	样品名称	核素	活度浓度(mBq/L)
1	京杭大运河河水	铀-238	<112
		钍-232	18.3±2.9
		镭-226	<6.2
		铍-7	<15
		氩-41	<1.5
		钾-40	388±27

### 2.3.5 声环境质量现状

苏州热工研究院有限公司环境检测中心对厂址边界和厂界南侧相邻企业的声环境质量现状进行了监测，监测时间为连续 2 天，昼夜各 1 次。监测结果见表 2-8。

监测结果表明企业厂界、质子厂房拟建区域及周围环境声环境质量良好，满足 4a 类和 2 类声环境功能区要求。

**表 2-8 厂址周围声环境现状检测结果**

检测点序号	检测点位置	昼间噪声值 (dB (A))	夜间噪声值 (dB (A))
1	北厂界外 1m	67.7~68.6	52.1~54.3
	西北厂界外 1m	50.6~53.4	43.8~44.8

检测点序号	检测点位置	昼间噪声值 (dB (A))	夜间噪声值 (dB (A))
2	东厂界外 1m	47.2~46.5	40.1~42.1
3	南厂界外 1m	48.6~51.6	41.2~41.6
4	西厂界外 1m	49.5~50.4	40.5~41.3
	质子厂房拟建区域	46.0~46.7	38.8~39.8
5	厂界南侧公司门卫	51.6~52.1	40.8~41.2

## 2.4 场址适宜性评价

通过上述调查和分析表明：本项目所在区域及周边为平原地带，地质和地震条件良好，未发现影响项目安全稳定运行的颠覆性因素。

本项目所在区域及周边社会环境特征相对简单，结合本项目特征污染因子和环境影响评价范围，周围居民点距离较远，条件较好。

初步的环境质量调查表明，项目所在厂址区域的环境质量良好，辐射水平处于天然辐射本底正常涨落范围内。

本项目所在场址属于有限开发区，项目用地已得到当地国土资源部门的同意，项目选址符合相关土地利用规划。

综上所述，本项目选址是可行的。

### 3 工程分析与源项

#### 3.1 项目规模与基本参数

新瑞阳光粒子医疗装备（无锡）有限公司位于无锡市梁溪区金石路与运河西路交叉口西南侧。项目建成后，预计年产 40 套 70MeV~230MeV 的质子治疗系统。

根据不同的治疗终端，质子治疗系统分为 360°旋转座椅质子治疗系统和 360°旋转机架质子治疗系统两种产品。质子治疗系统的核心系统为 NewRT 同步加速器装置，提供的质子具有能量覆盖宽、束流品质高等特点，质子能量范围为 70-230MeV，脉冲宽度为 1-10s，具有良好的均匀性，可实现质子能量、束流强度在较大范围的连续调节和控制，且性能稳定、操作简单，能很好地满足浅层及深层肿瘤治疗的需要。

质子治疗系统的基本情况见表 3-1，加速器系统的主要技术指标见表 3-2。

表 3-1 质子治疗系统设备情况

产品名称	加速器型号	生产厂家	年产量	射线装置类别
360°旋转座椅质子治疗系统	NewRT	新瑞阳光粒子医疗装备（无锡）有限公司	40 套	I
360°旋转机架质子治疗系统				

表 3-2 NewRT 加速器系统主要技术指标

指标	数值
加速器类型	同步加速器
射线种类	质子
引出能量（可调节）	70MeV~230MeV
标准最大引出电流	2nA
平均引出效率	大于 80%
最大引出束流发射率(1 $\sigma$ ) (水平)	10 $\pi$ mm.mrad
旋转角度	$\pm 190^\circ$
达到最大速度的位移和时间	30°/10s
最高旋转速度	6°/s
标准低旋转速度	1°/s

### 3.2 工程设备

NewRT 加速器装置由注入系统、中能传输系统、主加速器系统、高能传输系统 and 治疗头系统等组成。

加速器装置利用  $H^+$  离子源产生  $H^+$  离子后，注入到直线加速器 RFQ 中进行预加速。RFQ 是同步加速器的注入器，可以为同步加速器提供高品质高流强的脉冲束流。同步加速器装置收集注入的离子并进行数百万圈的加速后，将质子能量提高到预设的能量，然后通过慢引出技术，将同步加速器中的离子在 1-10 秒钟内均匀引出。高能传输系统将引出的质子束传输到治疗终端，并在终端扫描铁的作用下将靶区均匀点扫描。旋转机架可以旋转角度为  $\pm 190^\circ$ ，可为病人任何角度照射视野创造可能。

NewRT 加速器装置的总体布局如图 3-1 所示。

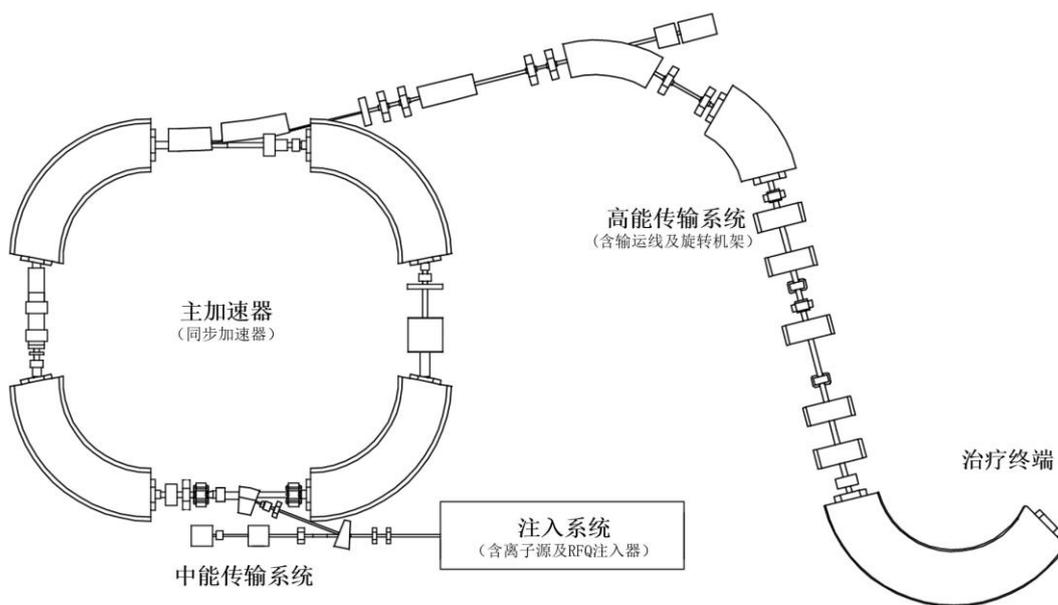


图 3-1 NewRT 加速器系统的总体布局图

#### 3.2.1 注入系统

注入系统用于产生并预加速质子束，可以为同步加速器系统提供 3.5MeV 的质子束。注入系统主要包含  $H^+$  离子源和四翼型射频四极腔（RFQ）。

##### 3.2.1.1 $H^+$ 离子源

$H^+$  离子源采用 ECR 离子源，可以为下游的 RFQ 提供能量为 20keV 的质子束。ECR 离子源将微波馈入到放电室后放电，放电产生的一部分电子被磁镜场

捕获，在轴向磁镜场作用下，绕磁力线回旋并在轴向作往复反弹运动。当电子回旋频率等于微波频率时，电子将被微波电场共振加速，多次反弹多次共振加速可使电子获得较高能量（几十 keV），从而逐步游离中性原子产生高电荷态离子，然后通过引出系统引出。ECR 离子源装置主要由三部分组成即微波系统、放电室及束流引出系统，结构示意图见图 3-2。

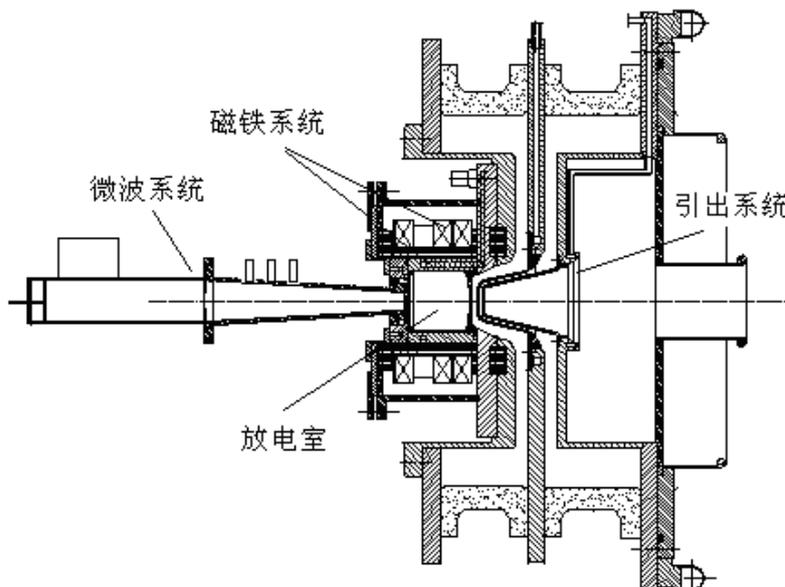


图 3-2 ECR 离子源磁镜场结构示意图

### 3.2.1.2 四翼型射频四极腔

注入系统采用常温直线加速器，其中加速腔是一台四翼型射频四极腔（Radio Frequency Quadrupoles，简称 RFQ），对从离子源引出的直流质子束流进行俘获、横向聚焦、纵向聚束和加速，为下游主加速器提供能量为 3.5MeV 的质子束。四翼型 RFQ 的示意图如图 3-3 所示。

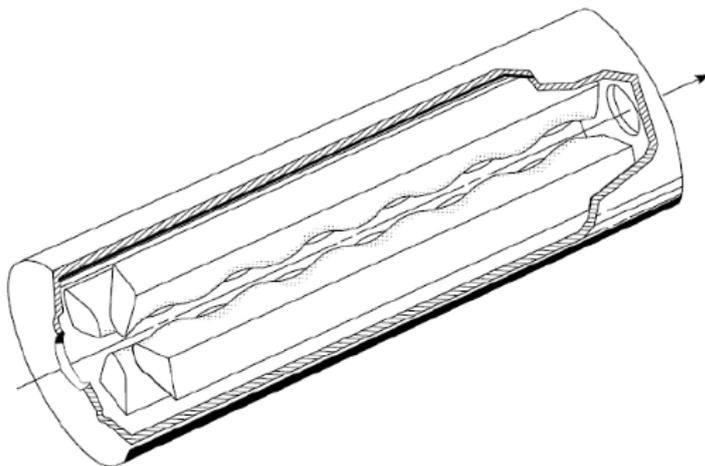


图 3-3 四翼型 RFQ 的示意图

### 3.2.2 中能传输系统

中能传输系统连接注入系统和主加速器系统，满足质子束单圈注入同步加速器的需要，其设计满足同步加速器注入束流相空间匹配的要求。该系统长约 8m，包含 4 台四极磁铁，1 台二极磁铁用于粒子偏转，2 台束流位置探测器，斩波器，交流流强变压器，发射度仪，束流垃圾桶和若干真空元件组成。图 3-4 为中能传输系统的布局图。

粒子从 RFQ 进入中能传输系统后有两种去向，一是在调试期间进入二级磁铁下游，用于测量从 RFQ 引出束流的发射度等参数；二是经过二级磁铁偏转进入主加速器系统。

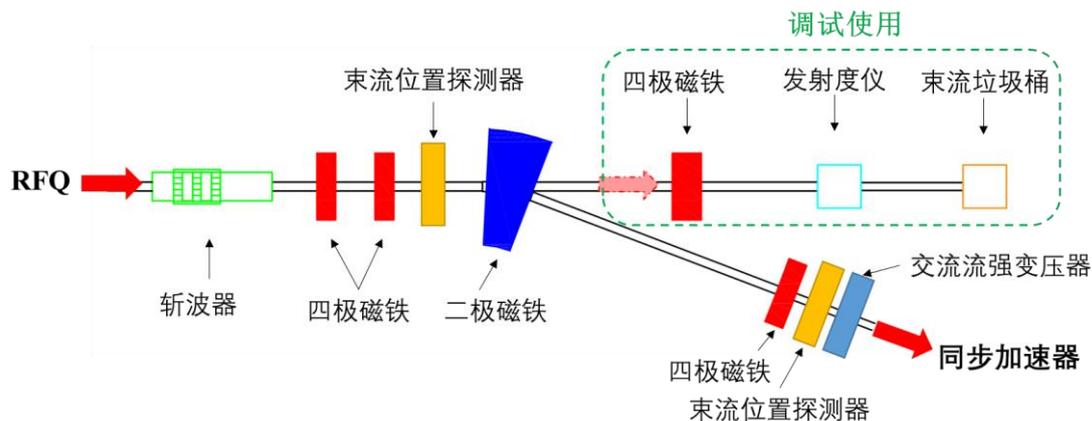


图 3-4 中能传输系统布局图

#### (1) 磁铁系统

磁铁系统构成了加速器装置的骨架，通过磁场对粒子的运动进行控制，改变粒子运动的方向，而不会改变粒子的能量，用于实现粒子的聚焦和偏转功能，可保持束流的轨道及其稳定性。

二极磁铁可以给带电粒子提供在一定范围内分布均匀的磁场，使粒子的运动轨道弯转，使束流发生偏转。四极磁铁的作用是使粒子运动以轨道中心为轴线聚焦，聚焦力的大小与四极磁铁的磁场梯度成正比。

#### (2) 斩波器

束流斩波器（Chopper）用于控制脉冲束的时间结构，满足同步加速器注入的调试需要，同时起机器保护的作用。斩波器是一个脉冲高压静电偏转器，电场是脉冲的，但在每个脉冲顶部是平顶，束流在平顶期间偏离原来轨道。

### （3）束流位置探测器

束流位置探测器（Beam Position Monitor，简称 BPM）是一种非阻挡式束流设备，用于测量束流中心位置和纵向束团形状，广泛应用于直线加速器、回旋加速器和同步加速器中。

### （4）交流流强变压器

交流流强变压器（ACCT）用于脉冲束平均流强测量。当有束流通过 ACCT 时，磁芯上的次级线圈将耦合出束流信号，通过测量该信号从而获得束流流强信息。

### （5）发射度仪

发射度仪利用空间位置扫描的方式确定束流在二维相空间的分布信息。它主要由两个光阑缝构成，前缝以固定的步长移动对束流做位置采样，后缝对前缝的每个采样位置处通过的小束束在整个束截面进行一次全扫描，得到采样位置处通过的小束束对应的角度，最终得到完整的束流的发射度图。

### （6）束流垃圾桶

在束流调试期间，束流垃圾桶用于阻挡上游过来的质子束，避免质子束对环境造成影响。由于从 RFQ 过来的质子束能量较低，使用法拉第筒作为束流垃圾桶。法拉第筒同时还可用于流强测量，分辨率可以达到 0.1 nA。

## 3.2.3 主加速器系统

主加速器是整个加速器装置的核心部分，它承担着束流累积、束流加速及引出到高能传输系统的任务。NewRT 主加速器为同步加速器，可以将能量为 3.5MeV 的质子束加速到 70-230MeV，并能根据治疗计划的要求设置束团脉冲宽度为 1-10ns。主加速器系统包括注入，同步加速器和引出三部分。主加速器系统的布局示意图如图 3-5 所示。同步加速器引出的束流由束流垃圾桶收集。

NewRT 同步加速器装置具有以下特点：

1) 采用单圈注入方式，可以实现束流累积  $2 \times 10^{10}$  ppp。考虑到粒子在低能情况下，空间电荷效应比较明显，环里累积粒子数目受到一定的限制。

2) 采用三阶共振慢引出方式，束流可以在引出平台（平台时间可以设置为 1-10 秒）均匀引出，且引出能量和引出束流时间可控。

3) 采用快循环方案，同步加速器二极磁铁磁场上升/下降速率达到 2.4T/s，可以缩短整个运行周期，提高治疗终端的注量率。

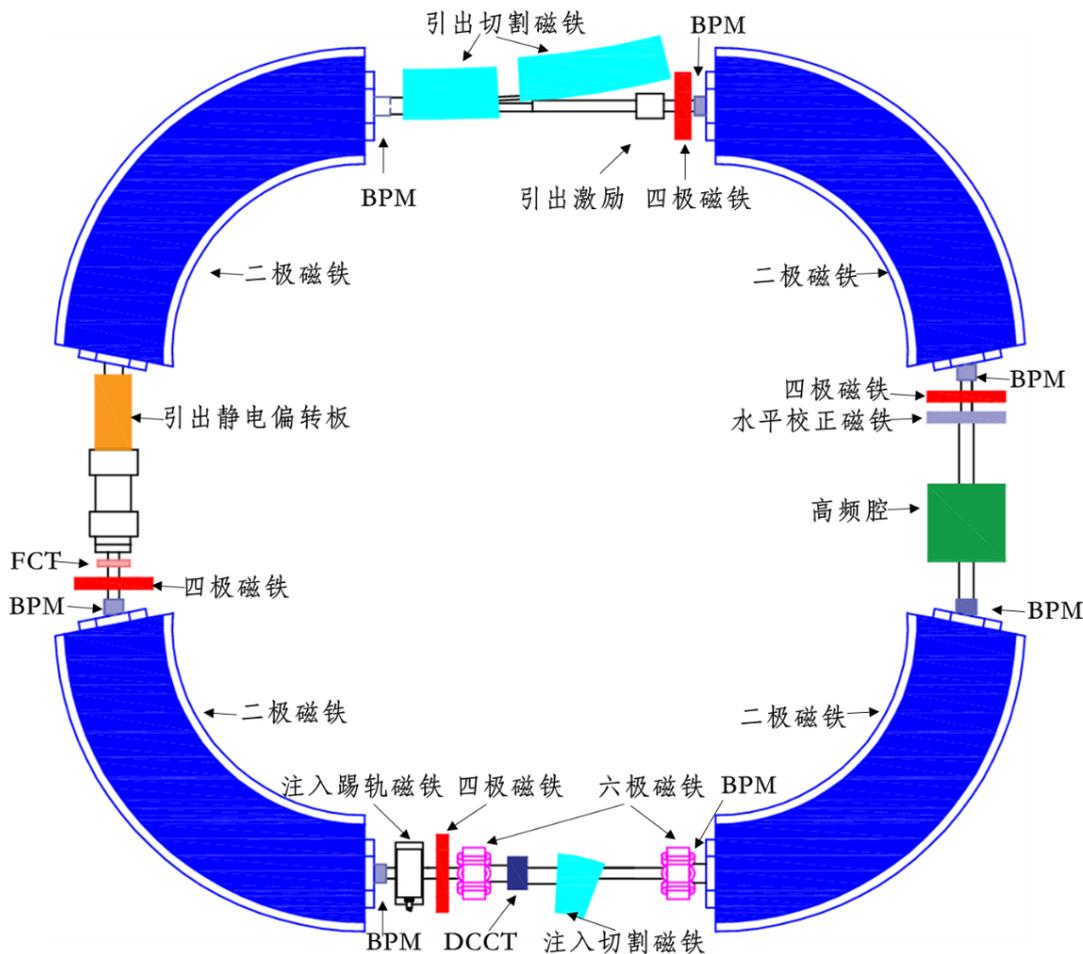


图 3-5 主加速器系统示意图

(1) 注入

NewRT 同步加速器的上一级加速器为直线加速器，考虑到同步加速器的紧凑性，为了使注入元器件比较少，NewRT 同步加速器将采用单圈注入的方式。

单圈注入采用注入切割磁铁和注入踢轨磁铁配合完成。切割磁铁（磁切割板）处于注入束线和同步加速器的交叉处，将束流从低能束线注入到同步加速器中。踢轨磁铁是一种运行时对磁场的上升或下降沿要求较高的特殊二极磁铁，主要用于同步加速器束流的注入和引出系统中。单圈注入原理如图 3-6 所示。

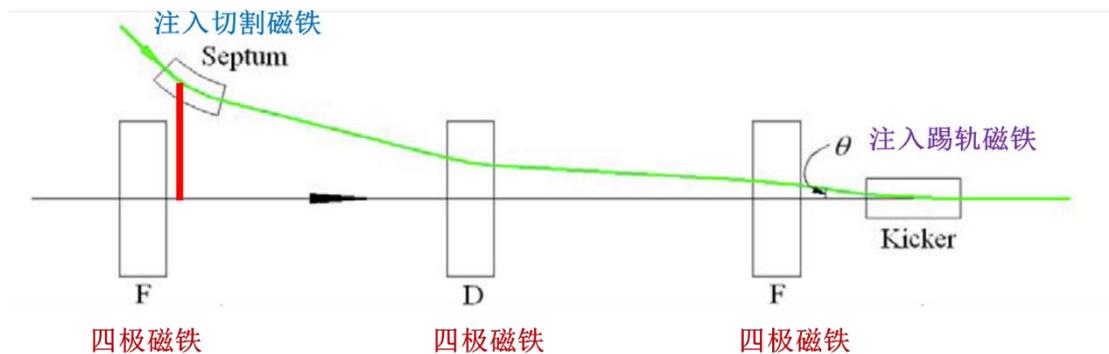


图 3-6 单圈注入的原理示意图

(2) 同步加速器系统

NewRT 的同步加速器由 4 台偏转角度为 90°的二极磁铁，4 台四极磁铁，8 套校正线圈和 1 台独立的水平校正磁铁组成。为实现对束流的加速，同步加速器安装有 1 套射频系统（含风冷型磁合金加速腔）。同时，为实现对束流状态的实时监测，还安装有 7 台平板型束流位置探测器，1 台直流电流变压器和 1 台快速电流变压器。其中：

校正磁铁（线圈）主要用于束流位置的微小调整，要求用于消除磁铁的安装误差引起的束流轨道的偏移。

射频系统又称为高频系统，是加速器装置对束流进行纵向操作的主要元器件，可实现注入束的俘获，累积和加速。射频系统的磁合金加载腔主要为束流提供能量并进行操作，其三维模型如图 3-7 所示。

直流电流变压器（DCCT）用于测量同步加速器循环束流的平均流强。

快速电流变压器（FCT）测量束流相位并输出给低电平用于同步。

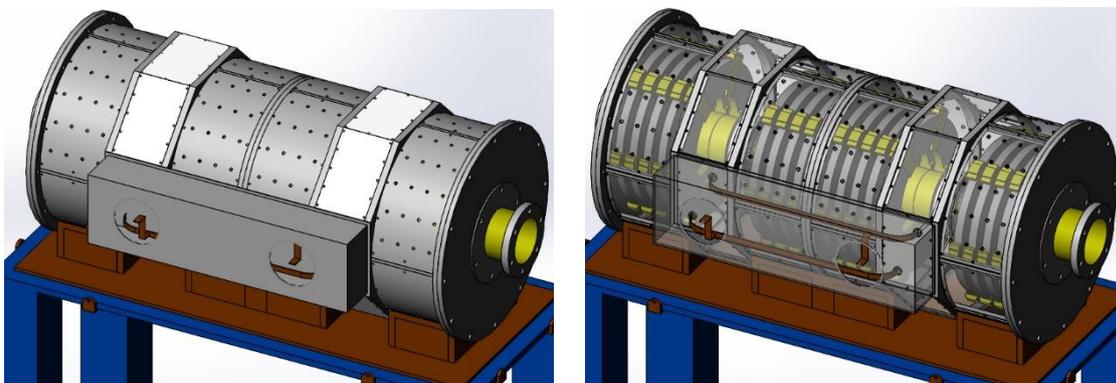


图 3-7 磁合金腔的三维模型

(3) 引出

NewRT 同步加速器采用三阶共振慢引出方式，引出束脉冲宽度在 1-10s 可调。引出系统主要由 2 块共振六极磁铁，1 台横向激励，1 块静电偏转板和 2 块切割磁铁组成。其中：

六极磁铁在加速器物理中主要用于色品校正及慢引出共振。

横向激励由信号发生器、功率放大器以及控制系统组成。控制系统接收加速器控制系统的时序信号，然后输出与束流频率相关的信号，经过功放放大后反相加到一对平行极板上；同时可以通过接收加速器控制信号实现对引出束流的关断，束流开关响应时间约 200 $\mu$ s。

静电偏转板用于改变束流方向、完成束流传输。其高压电极通常选用导电性能、表面光洁度以及硬度较好的钛电极。

### 3.2.4 高能传输系统

高能传输系统的作用是将同步加速器系统引出的束团传输到治疗终端，它包括束流输运线和旋转机架输运线。高能传输系统需要保证机架在旋转 0°~360°过程中，治疗终端的束斑尺寸和形状基本不变，尽可能地减小在肿瘤周围组织中的照射剂量，保证较短的治疗时间、保证剂量分布的可靠性和可控制性等要求。

高能传输系统由 3 块偏转二极磁铁，13 块四极磁铁，3 块校正磁铁，2 套离子电离室，2 套荧光靶和真空元器件组成。二极磁铁用于实现束流的偏转；四极磁铁用于束流聚焦保证高的传输效率；校正磁铁用于微调束流的轨道；离子电离室和荧光靶用于调试过程中束流信息的测量。高能传输系统的示意图如图 3-8 所示。

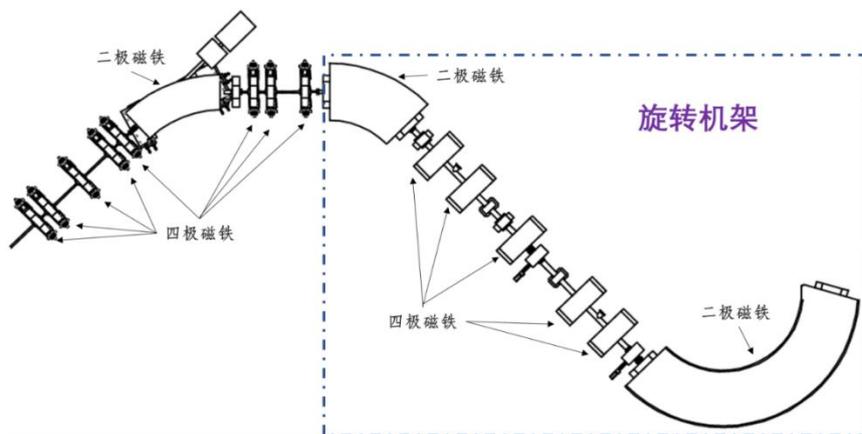


图 3-8 高能传输系统的布局图

### 3.2.5 扫描治疗头和治疗椅（床）

扫描治疗头和治疗椅（床）组成了质子医疗系统的治疗终端，仅安装于医院治疗室，质子厂房四座加速器调试机房内不集成。

#### （1）扫描治疗头

扫描治疗头是束流经过的最后一个系统，它完成三个基本功能：1）对束流进行调制，包括照射场，束流扫描速度等；2）束流参数的测量，包括剂量，束流位置，截面等；3）束流的控制，包括束流的开/关，束流能量等。

其主要部件包括扫描磁铁，电离室，氦气腔，及相应的控制器。扫描磁铁本质上是两个二极铁，实现 X 和 Y 两个方向的束流扫描；电离室用于测量剂量、位置和束流形状。扫描治疗头的示意图如图 3-9 所示。

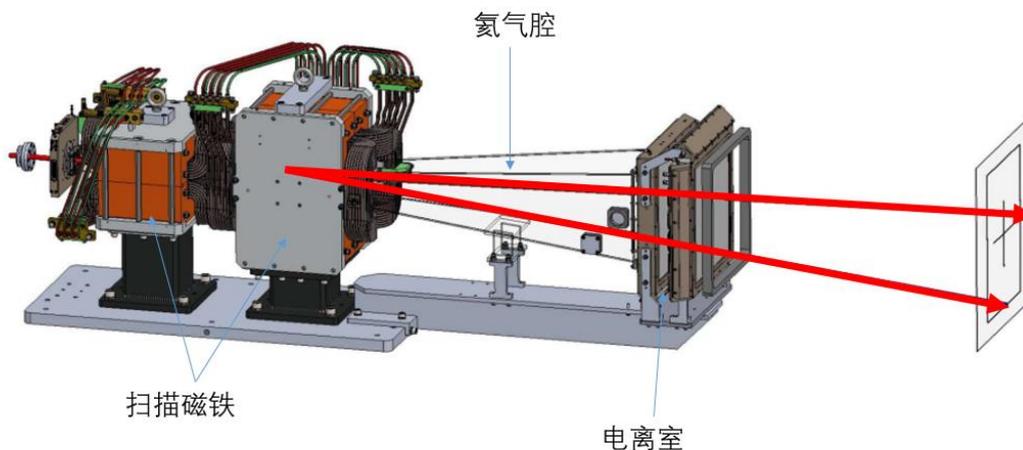


图 3-9 质子医疗系统扫描治疗头示意图

#### （2）治疗椅（床）

治疗椅是质子放射治疗系统中用于支撑、固定和摆位患者的装置。与常规病人支撑系统不同的是，它以坐姿治疗病人。治疗椅机械部分由主旋转、升降和六缸并联机器人平台等机构组成，在控制系统的控制下实现对患者的摆位。

治疗床是质子放射治疗系统中用于支撑、固定和摆位患者的装置。它是一个具有 6 个自由度的机器人手臂式的治疗床，主要结构由金属机械手臂、减速器和轴承一体结构的六个关节组成。治疗床前部将耦合旋转机架（gantry），它可以为一个仰卧的病人在竖直平面内以任何角度照射视野提供可能，避免对病人进行倾斜定位，并方便进行多视野的治疗。旋转机架是一个由机械旋转机构来控制照

射角度的装置，其核心部分包括进行束流传输的偏转磁铁/聚焦磁铁和机械传动系统，也承载整个治疗头系统。通常，不同的治疗头和束流条件采用不同的旋转机架设计方案，包括束流光学设计和机械结构设计。旋转机架三维示意图如图 3-10 所示。旋转机架仅安装于医院治疗室，质子厂房四座加速器调试机房不集成旋转机架。

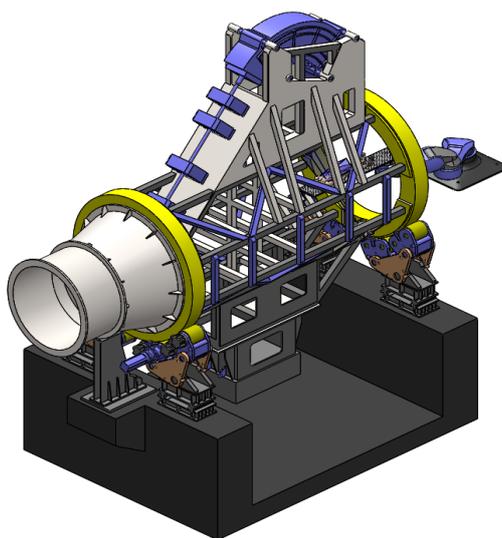


图 3-10 旋转机架三维示意图

### 3.2.6 辅助系统

加速器装置辅助系统主要包括冷却水系统和通风空调系统，作为配套设施提供满足加速器装置运行要求的环境条件。

#### 3.2.6.1 冷却水系统

水冷系统包括冷却塔，制冷剂，分集水器，管路以及控制系统。加速器厂房屋面设冷却塔，冷却塔补水由市政给水管直供。冷却水经过三级分配到达加速器电柜等部件，对设备进行制冷。冷却水的冷源由建筑物制冷机提供，经板式换热器热交换之后制造低温去离子水作为一次水为加速器、电源柜、真空系统提供冷却，一次水用去离子水，控制离子种类和数量，加速器、电源柜、真空系统采用独立的冷却水系统。各用水设备进水端设置过滤器。冷却水系统流程见图 3-11。

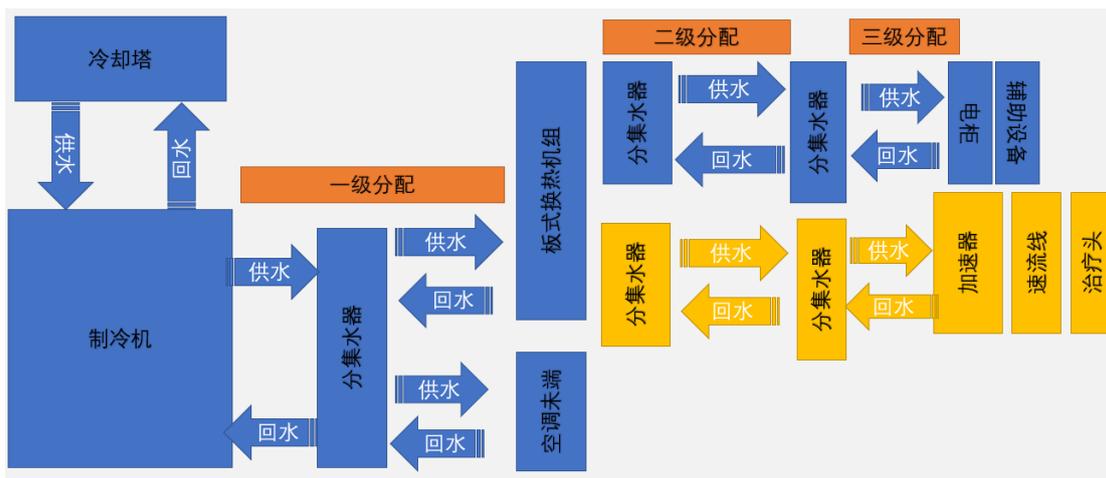


图 3-11 水冷系统流程

电气柜冷却水量流量 4 立方米/小时，系统内总水量 0.3 立方，加速器冷却水流量 40 立方米/小时，系统内总水量约 2 立方。正常拆卸时，排水进入排水沟，集中后流入水池（8 立方米）。

冷却水系统设计水量检测仪器，发生泄漏引起系统水量减少时，系统报警，各排水沟和排水池人设置水量监测仪器，监测有水时切断就近系统的供回水阀门，水池设计 8 立方米，能承担系统多处漏水情况。

### 3.2.6.2 通风与空调系统

通风与空调系统为控制区、监督区的工作人员提供新鲜空气并控制空气的温湿度，可实现空气净化、除湿、降温、供暖、新风量调节等多种功能。

通风与空调系统利用新风过滤器对入风进行净化，新风过滤器采用初、中效两级过滤组合，其过滤效率分别为 30% 和 85%。系统为一次通过模式，出风经过高于附近 50 米范围建筑屋顶 3 米的烟囱排入环境中。为满足工作人员的可居留性要求，控制区的换气频率为 6 次/小时，监督区换气频率为 2 次/小时，并维持控制区压力小于监督区，保证新鲜空气从监督区流向控制区，防止污染。通风与空调系统流程见图 3-12。

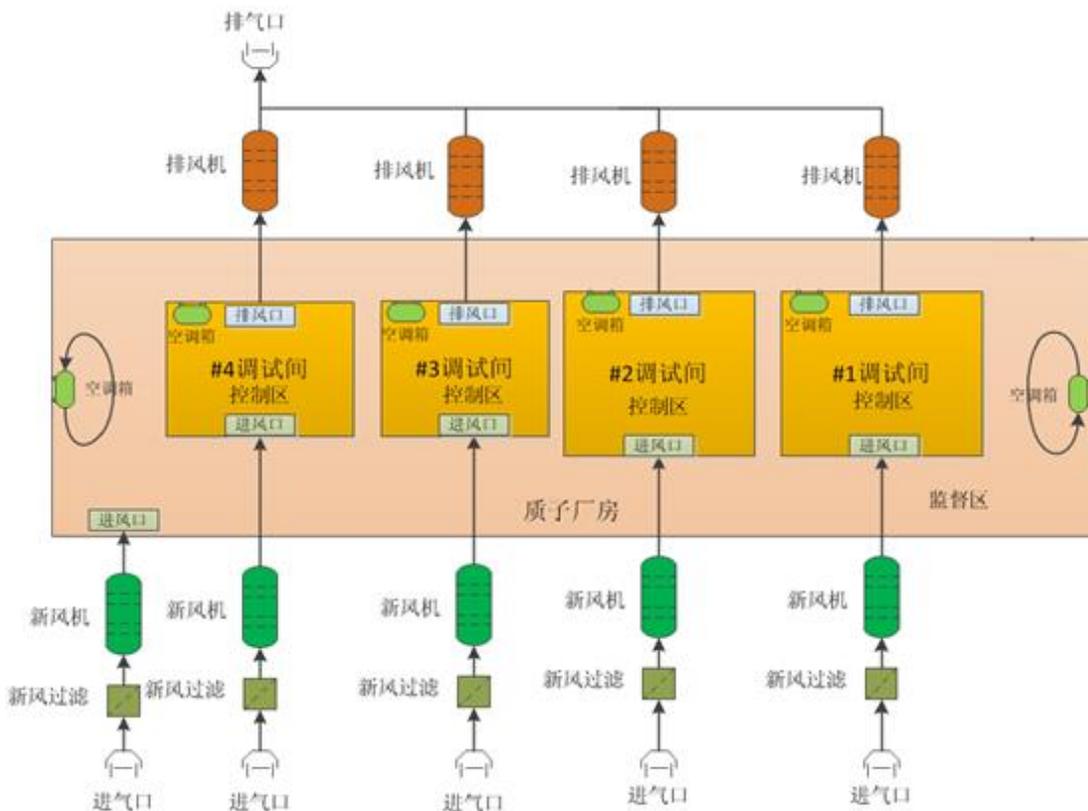


图 3-12 通风与空调系统运行流程

### 3.3 工艺流程

本项目包含了质子医疗系统生产、使用（含建造）、销售的全过程活动。从活动发生地点来分，生产和使用是在项目所在地质子厂房内从事的研发以及相关调试工作；销售是指质子系统销售到医院后的安装调试以及后续维护工作，不包含质子医疗系统的日常的治疗运行。

#### 3.3.1 生产使用流程

质子医疗系统的生产使用主要是指研发调试，生产活动在新建的质子厂房中进行，生产或采购的零部件经验收之后运输进入厂房各个调试机房进行整机组装，研发人员进行集成调试，达到指标后，便可等待销售，待销售合同签订后，拆卸成零部件运输到医院。

在生产使用过程中，项目现场辐射工作人员主要为研发人员，还包括部分参与辐射工作的工人（如调试后负责拆卸的工作工人员）。

厂区内辐射工作人员总数量估计为 50 人。对于每个工作人员，调试工作时间为 1200 小时/年，其中需要停机进入机房内工作时间为 300 小时/年。

### 3.3.2 销售流程

质子治疗系统的销售流程根据项目运行时期的不同分为两种模式：模式一——项目运行前期，模式二——项目运行中后期。

#### 3.3.2.1 项目运行前期

##### （1）质子厂房安装调试拆卸

在项目运行前期，整套质子治疗系统将首先在质子厂房安装调试，系统经调试各项指标参数合格后拆卸成零部件，运往各医院。

##### （2）用户现场安装调试

质子治疗系统送达用户使用场所后，由建设单位确认用户单位是否具备安装条件（包括手续文件、场地等满足安装条件），安装条件满足后方可安排相关技术人员进行现场安装。

设备安装完成后，由建设单位确认联锁系统、监测系统、通风系统、水冷系统等是否都满足运行前条件，所有辅助系统满足条件的情况下进行用户单位现场的系统调试活动，系统调试达标验收后交付医院，标志着销售完成，进入售后阶段。

建设单位负责的安装调试工作包括：1）机械、电气设备的储运，2）机械、电气设备的物理安装；3）独立子系统分阶段调试；4）全系统集成带束调试；5）质子治疗系统验收。

##### （3）用户现场售后

售后阶段主要活动为维修维护，包括质子治疗系统发生故障时的维修和定期维护保养。质子治疗系统维修维护的整个过程，由建设单位的工作人员负责，用户单位负责提供工作场所和协调前期相关准备工作，不参与具体维修维护作业。

##### （4）人员安排

用户现场辐射工作人员包括现场调试工程师和现场维护工程师。

每个治疗间配 3 名现场调试工程师，其中一人担任调试组长，系统交付医院后，现场调试工程师将进入下一个销售项目的调试；每个治疗间配 2 名现场维护工程师，其中 1 名担任维护组长。

现场调试工程师的调试工作时间是 1200 小时/年，其中需要停机进入加速器区域工作时间为 300 小时/年；维护工程师检修、维护工作时间为 1800 小时/年。

### 3.3.2.2 项目运行中后期

项目运行经营的中后期，各项工艺流程趋于熟悉，大多数质子医疗系统可采购零部件后直接运输至医院进行安装调试，用户现场的安装调试维护工作参照模式一。少部分质子治疗系统仍然在项目所在地质子厂房安装调试，质子厂房更多承担新产品研发任务、部分部件返厂调试、产品升级调试等。

本项目的工艺流程如图 3-13 所示。

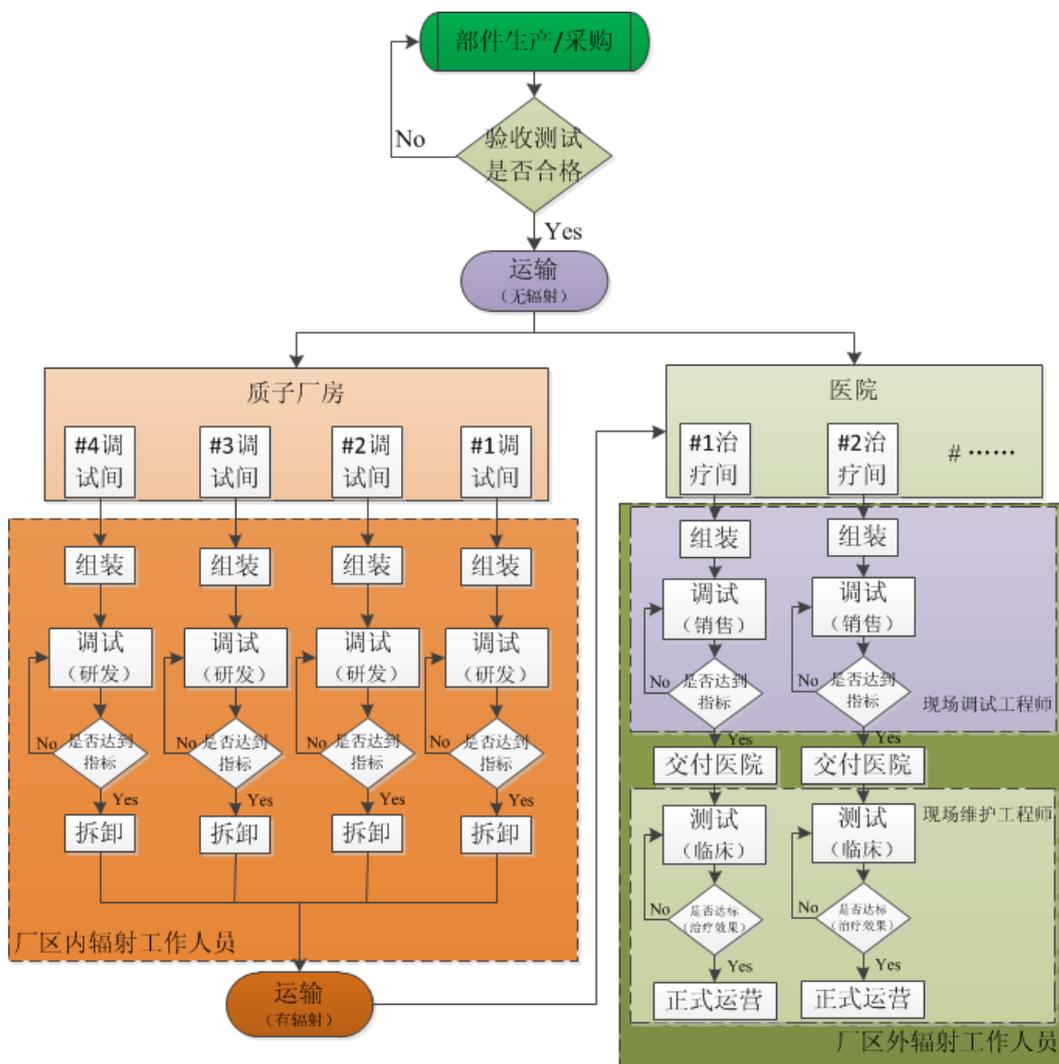


图 3-13 质子医疗系统生产使用销售工艺流程图

### 3.4 污染源项

质子同步加速器运行时产生的辐射场主要包括两个种类，一种为加速器的运行时由初级束和次级束产生的“瞬发辐射”，另一种为加速器停机后活化核素产生的“缓发辐射”。瞬发辐射一般远高于缓发辐射，它决定了对加速调试机房的屏蔽厚度的设计要求，由于辐射工作人员在加速器停机后需要进入加速器机房内开展测量、调试工作，因此缓发辐射是放射性工作人员所受照剂量的主要来源之一。

瞬发辐射是加速器运行时损失束流与加速器部件、终端靶和屏蔽墙等发生核反应产生，特点是能量高、辐射强，但随着加速器的停机而完全消失；缓发辐射主要来自加速器部件、设备冷却水、机房内空气被主束或次级粒子轰击产生的活化产物，在加速器停机后依然存在。

对于医用质子加速器，质子能量高、射程长、流强大，束流聚焦好，沿途散失小。束流轰击终端靶部件时束流损失大，甚至全部，适于采用束流收集器、局部厚屏蔽等措施。加速器运行时产生的辐射主要是高能粒子引起的核反应而发射出的瞬发中子，主要包括由核内级联产生的高能中子及复合核退激出射的蒸发中子（各向同性部分）两部分，其他粒子不论是产生的量还是其是穿透能力均远小于中子。

#### 3.4.1 瞬发辐射

##### 3.4.1.1 中子产额

质子与靶发生核反应得到的中子产额、能谱和角分布与入射粒子种类、能量和流强有密切关系，还受靶核性质的影响。中子产额与能量都随粒子单核能的提高而单调上升。在单核能相同的情况下，中子产额随入射粒子质量数的增加而上升。中、高能质子核反应瞬发中子有两个突出的特点：从角分布看，正前方有尖锐的峰值；从能谱看，几乎各个方向都有一部分高能中子，尤其是前方，其能量可以明显高于入射单核能，这些高能中子是辐射屏蔽的主要对象。

根据本项目 NewRT 型医用质子同步加速器的束流能量和主要屏蔽体材料，采用利用蒙特卡罗程序 FLUKA 选择典型的质子能量 3.5MeV、10MeV、70MeV、230MeV 轰击厚铁靶产生的中子场进行了模拟，图 3-14 分别给出了不同能量的质子束轰击厚铁靶的中子产额随能量的分布。从图中可见，对于 230MeV 入射质

子束，产生的中子最大能量可达入射束的能量，但能量低于 20MeV 的中子占主要部分；对于 70MeV 入射质子，产生的中子最大能量可达入射束的能量，但能量低于 20MeV 的中子占主要部分；模拟计算结果显示对于 10MeV 和 3.5MeV 的质子束流，在轰击铁靶的条件下，中子产额极小，即次级束引去的辐射剂量场可以忽略。因此本项目的源项主要考虑入射质子束流能量大于 10MeV 的工况，场所辐射屏蔽以设计的最大能量进行计算，对于能量小于 10MeV 的工况均以加速器可达到的最大能量进行保守计算和评价。

为了分析质子轰击厚铁靶产生的中子份额，图 3-15 给出了质子轰击厚铁靶厚的总辐射剂量场和中子剂量场的比较。从分析结果可知，质子束轰击靶材料的次级束主要为中子，中子的对辐射剂量场的贡献大于 90%，其余成分主要为光子。

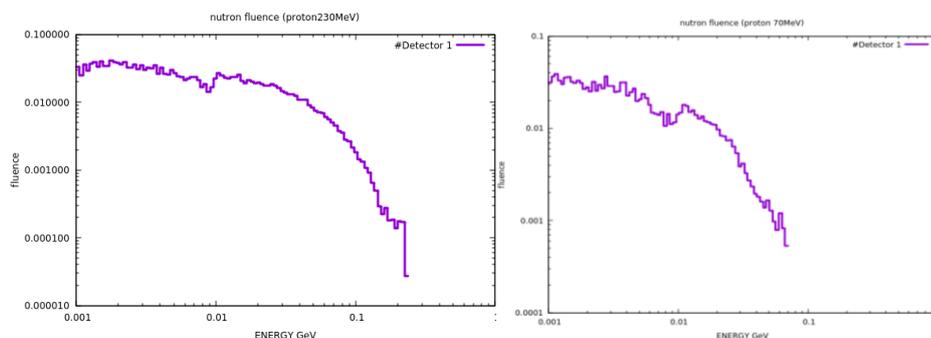


图 3-14 270MeV（左）、70MeV（右）质子束轰击厚铁靶的中子产额

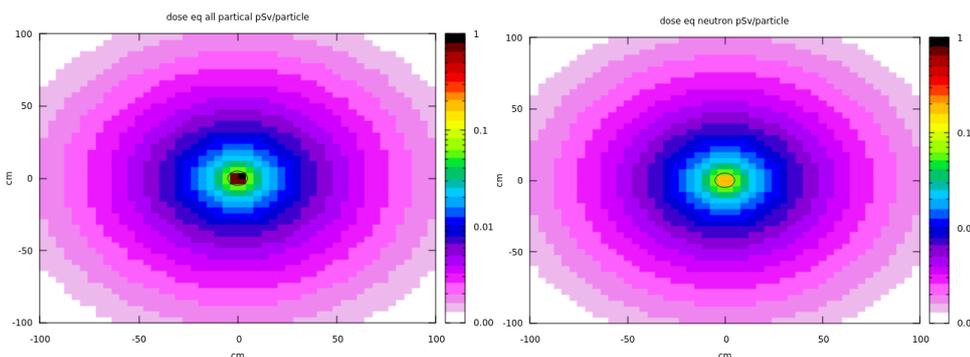


图 3-15 质子轰击厚铁靶的总辐射剂量率场（左）和中子辐射剂量场（右）对比

### 3.4.1.2 束流损失

NewRT 固定束紧凑型同步加速器质子医疗装置包括：注入器，注入系统，同步加速器，引出系统，束流传输线，扫描治疗头和治疗椅（床）。注入器将质

子束流加速器到 3.5 MeV，注入到同步加速器，通过同步加速器环逐渐加速到更高的指定能量，由引出系统引出，再通过束流传输线优化束流参数，最后经过扫描治疗头调制得到临床要求的质子束，打入位于等中心的肿瘤靶区。旋转束紧凑型同步加速器质子医疗装置除了上述组成部分还有旋转机架及机架上的束流传输线。旋转机架的作用是使束流可以 360°打到等中心靶区。

根据本项目的特点，质子同步加速器的主要束流损失区域见图 3-16。束流损失点主要包括注入点损失、同步加环上的损失、引出损失、束流传输损失、扫描机头损失和终端靶区损失。

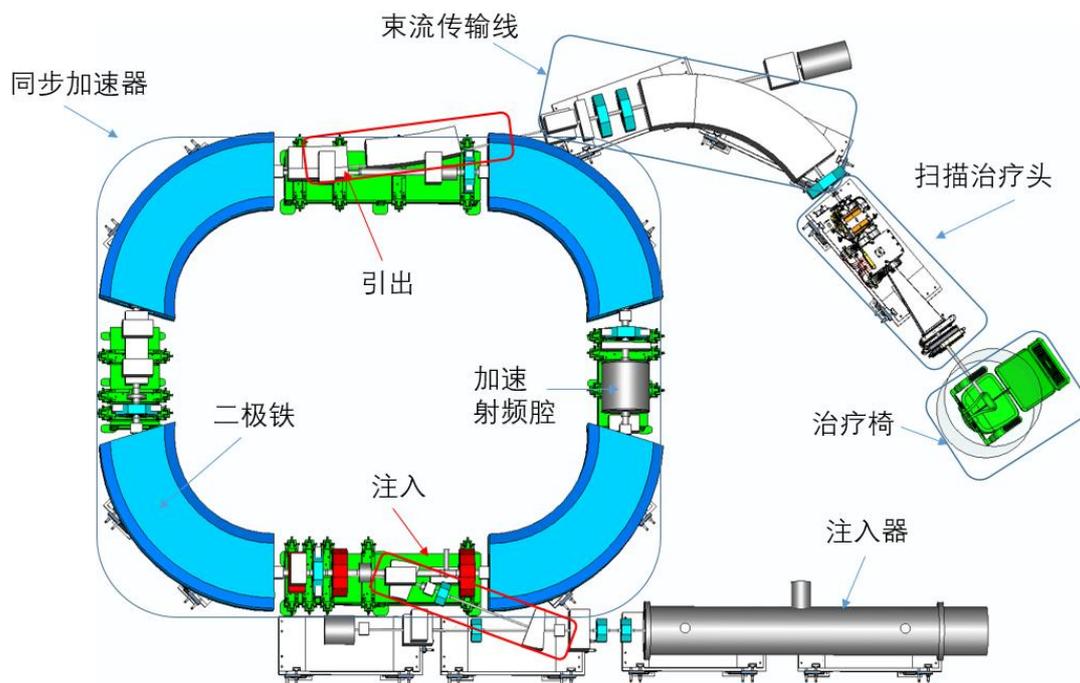


图 3-16 医用质子同步加速器束流损失示意图

(1) 注入损失

注入系统处的损失束流主要损失区在偏转铁之后的大约 10cm 的管道上。管壁材料为钢，偏转角度为 21°。质子能量为 3.5 MeV。注入损失示意图见图 3-17。

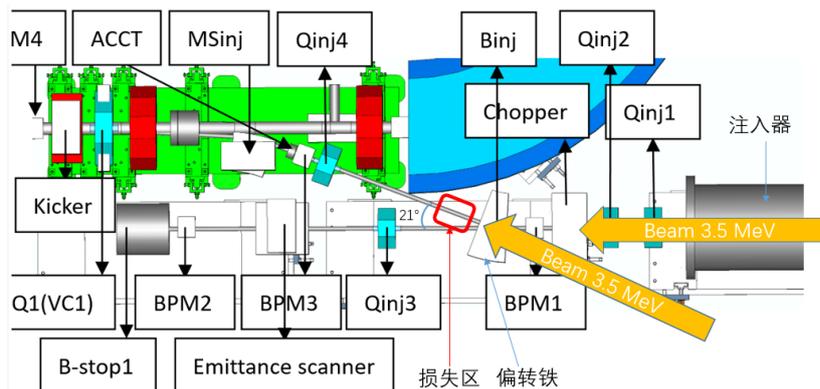


图 3-17 注入损失示意图

(2) 同步加速环上损失

同步加速器环上质子束流均匀损失在四个 90°偏转磁铁内部的束流管道壁上。管壁材料为钢，根据调试和治疗需要质子能量不断加速到指定值，对于 1#、2# 加速器，质子能量最大为 230MeV，对于 3#、4#加速器，质子能量最大为 70MeV。同步加速环束流损失示意图见图 3-18，该同步环共包括 4 个偏转磁铁。

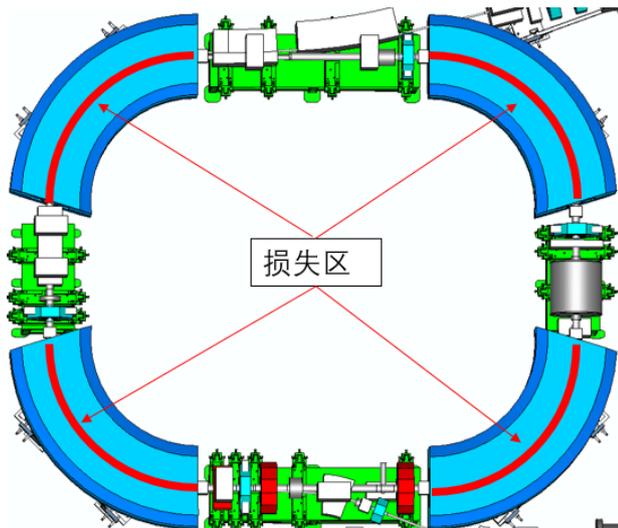


图 3-18 同步加速环损失示意图

(3) 引出损失

质子束流在同步环上加速到指定能量后，在引出点通过偏转磁铁偏转后引出。引出束流主要损失在两块偏转铁的内管道壁上。偏转角度为 14°，管壁材料为钢，根据调试和治疗需要引出指定能量质子，对于 1#、2#加速器，引出点质子能量最大为 230MeV，对于 3#、4#加速器，引出点质子能量最大为 70MeV。束流引出损失示意图见图 3-19。

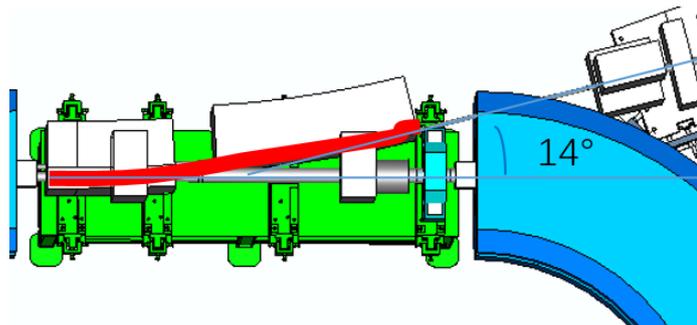


图 3-19 束流引出损失示意图

#### (4) 束流传输线损失

质子束流引出后，通过偏转磁铁偏转到指定方法，在偏转过程中质子束流主要损失在偏转铁的内管道壁上。偏转角度为  $64^\circ$ ，管壁材料为钢。对于 3#、4# 加速器机房，束流引出后直接打在终端束流垃圾桶上，无束流传输损失。对于 1#、2# 加速器机房，束流传输线上质子最大能量为 230MeV。束流传输线损失示意图见图 3-20。

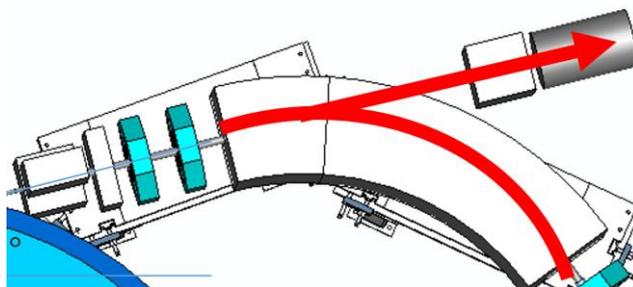


图 3-20 束流传输线损失示意图

#### (5) 扫描治疗头损失

扫描治疗头主要由扫描铁，氦气腔，电离室构成，扫描铁内的束流路径上也充满氦气。电离室和氦气腔两侧都是铝窗，等中心点扫描场大小为  $30 \times 40 \text{ cm}$ 。质子束流穿过该区域与路径上的氦气、铝窗等碰撞损失。1#、2# 加速器机房，扫描治疗头处质子最大能量为 230MeV。束流损失示意图见图 3-21。

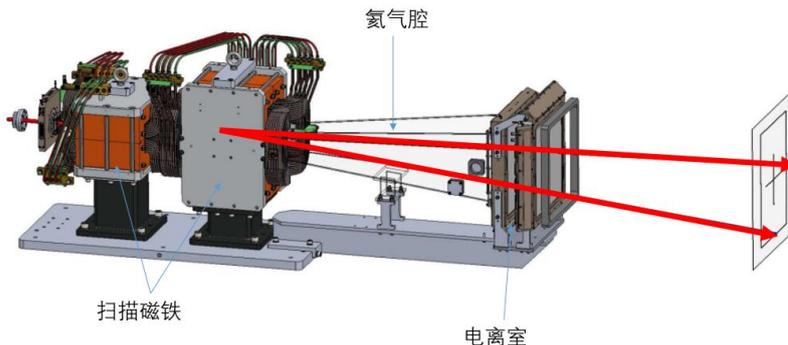


图 3-21 扫描治疗头损失示意图

(6) 终端靶区损失

根据调试和临床需要在等中心点位置出放置不同的把材料。对于调试，在靶区放置带局部屏蔽的束流垃圾桶，材料为水模。对于临床及临床调试，一般采用体模、水模或者 PMMA 材料。束流经过加速偏转后，剩余束流均损失在终端的束流阻挡器上，对于本项目束流垃圾桶为半径 10cm，高 35cm 的圆柱形水模。对于 1#、2#加速器，终端质子能量最大为 230MeV，对于 3#、4#加速器，终端质子能量最大为 70MeV。

根据上述对医用质子同步加速器中质子束流的运输过程和损失的描述，可得到本项目的束流损失表，束流损失表中的参数决定了加速器运行时的瞬发辐射剂量场分布。本项目束流损失表见表 3-3，其中同步加速环设计最大束流强度为 2nA（1.25E+10pps）。

表 3-3 医用质子同步加速器束流损失表

调试机房	束流损失区域	束流最大能量 MeV	束流强度 pps	损失束流	损失束流强度 pps	损失方式
1#、2# 机房	同步加速器环	230	1.25E+10	10 %	1.25E+9	均匀损失
	束流引出点	230	1.13E+10	30 %	3.38E+9	集中损失
	束流传输线	230	7.88E+9	5 %	3.94E+8	均匀损失
	扫描机头	230	7.48E+9	5 %	3.74E+8	集中损失
	终端靶区	230	7.11E+9	100 %	7.11E+9	集中损失
3#、4# 机房	同步加速器环	70	1.25E+10	10 %	1.25E+9	均匀损失

调试机房	束流损失区域	束流最大能量 MeV	束流强度 pps	损失束流	损失束流强度 pps	损失方式
	束流引出点	70	1.13E+10	30 %	3.38E+9	集中损失
	终端靶区	70	7.88E+9	100 %	7.88E+9	集中损失

备注：表中单位 pps 表示每秒传输（损失）的粒子数。

### 3.4.1.3 调试负荷

1#、2#加速器机房内加速器运行的最大能量为 230MeV，3#、4#加速器机房内加速器运行的最大能量为 70MeV。每个加速器机房内加速器的年运行最大时间为 1200h，其中出束时间不超过 600h。根据调试需要，需对加速器在不同能量下进行调试。对于 1#、2#加速器机房：束流能量 230MeV 的年调试时间最大为 60h、束流能量 150MeV 的年调试时间最大为 60h、束流能量 70MeV 的年调试时间最大为 120h、束流能量 10MeV 的年调试时间最大为 180h、束流能量 3.5MeV 的年调试时间最大为 180h。对于 3#、4#加速器机房：束流能量 70MeV 的年调试时间最大为 240h、束流能量 10MeV 的年调试时间最大为 240h、束流能量 3.5MeV 的年调试时间最大为 180h。各加速器机房调试负荷见表 3-4。

表 3-4 各加速器机房调试负荷表

加速器调试机房	束流能量,MeV	年出束时间, h/机房
1#、2#加速器调试机房	230	60
	150	60
	70	120
	10	180
	3.5	180
3#、4#加速器调试机房	70	240
	10	240
	3.5	180

在加速器调式过程中需根据加速器不同的功能部件进行单独调试，不同功能部件的年调试时间分配见表 3-3。以 1#、2#加速器机房 230MeV 调式能量为例，230MeV 的年调式时间为 60h（见表 3-2），其中各部件的调试时间分配见表 3-5，

即靶区调试时间为 3h、扫描机头调试时间为 1.2h、束流传输线调试时间为 1.8h、束流引出点调式时间为 24h，加速器同步环调试时间为 30h，230MeV 的一年调试时间共 60h。

表 3-5 加速器不同区域不同能量的年调式时间，单位： h

加速器调试机房	调试部件区域	调试能量					合计，h
		230 MeV	150 MeV	70 MeV	10MeV	3.5MeV	
1#、2#加速器机房	靶区	3	3	6	9	9	30
	扫描机头	1.2	1.2	2.4	3.6	3.6	12
	束流线	1.8	1.8	3.6	5.4	5.4	18
	束流引出	24	24	48	72	72	240
	加速器环	30	30	60	90	90	300
3#、4#加速器机房	靶区	—	—	24	18	18	60
	束流引出	—	—	96	72	72	240
	加速器环	—	—	120	90	90	300

### 3.4.2 缓发辐射

对于能量较高的质子加速器，感生放射性常常是辐射工作人员受照剂量的主要原因。对于质子加速器来说，感生放射性主要是加速器主束（质子束）与加速器部件以及产生的次级中子、 $\gamma$ 光子与加速器部件、设备冷却水及加速器机房内的空气相互作用引起的。其辐射水平取决于加速粒子的能量、种类、流强、加速器运行时间、冷却时间和被照材料性质等诸多因素。一般来说，半衰期长的核素达到饱和放射性的时间较长，产额低。对于单次运行时间较短的医用质子加速器来说，该类半衰期较长的放射性核素产额一般都很低，主要产生的是短半衰期核素，而半衰期短的核素衰变得非常快，从而导致缓发辐射剂量场在较短的时间内便衰减到较低的水平。

#### 3.4.2.1 空气活化

加速器运行期间初级粒子或次级粒子与加速器调试机房中空气相互作用产生放射性气体。这种空气中的放射性核素一般是短寿命的，即使产生的放射性达到不能接受的高水平，放射性衰变和放射性空气的稀释部分都非常快地使放射性

浓度降低到可接受水平。实际上，只有在非常少的情况下才会使空气的放射性水平达到不可接受的水平。其放射性核素主要通过热中子俘获、(n, 2n)、(γ, n)反应和散裂反应而产生。产生的活化核素主要有 <sup>3</sup>H、<sup>7</sup>Be、<sup>11</sup>C、<sup>13</sup>N、<sup>15</sup>O 和 <sup>41</sup>Ar 等。它们对人体的危害是 β、γ 放射性气体浸没外照射和吸入引起的内照射。

根据本项目加速器的运行情况，单次最大连续出束时间不超过 30min。按照 30min 的连续照射时间以及最大束流能量（1#、2#机房为 230MeV，3#、4#机房为 70MeV），对加速器机房内空气活化的放射性核素活度进行保守计算。空气活化产生的主要放射性核素计算结果见表 3-6。

**表 3-6 最大工况下各加速器调试房间空气中活化核素活度计算结果**

房间	活化核素	核素半衰期	活化活度 Bq/机房	活化活度 Bq/m <sup>3</sup>
1#、2#加速器调试机房	H-3	12.33 y	4.39E+0	3.90E-03
	Be-7	53.29 d	2.58E+2	2.29E-01
	C-11	20.39 min	9.57E+5	8.51E+02
	N-13	9.965 min	2.71E+6	2.41E+03
	O-14	70.6 s	1.93E+5	1.72E+02
	O-15	122.2 s	1.48E+6	1.32E+03
	Cl-39	55.6 min	4.98E+3	4.43E+00
	Ar-41	109.34 min	3.57E+4	3.17E+01
3#、4#加速器调试机房	H-3	12.33 y	4.62E-1	5.13E-04
	Be-7	53.29 d	7.03E+2	7.81E-01
	C-11	20.39 min	6.24E+5	6.93E+02
	N-13	9.965 min	8.95E+5	9.94E+02
	O-14	70.6 s	2.70E+5	3.00E+02
	O-15	122.2 s	6.70E+5	7.44E+02
	Cl-39	55.6 min	1.43E+3	1.59E+00
	Ar-41	109.34 min	4.71E+3	5.23E+00

### 3.4.2.2 冷却水活化

加速器冷却水为去离子水的闭循环模式，每年更换一次。加速器的冷却水因受次级粒子（主要是中子）的照射而活化，主要是中子引起水中  $^{16}\text{O}$  的散裂，活化的放射性核素以  $^{15}\text{O}$ 、 $^{11}\text{C}$  和  $^7\text{Be}$  为主。

质子同步加速器冷却水用于冷却加速部件，而束流主要损失在偏转磁体（二级磁体）处，因此位于二级磁体处的冷却水是冷却水环路中的活化核素的主要来源。本项目二级磁体冷却水模型见图 3-22，束流真空管位于矩形磁铁中心位置，冷却水管路位于磁铁内真空管四周的励磁线圈内，中心束流管为椭圆，短半径 39mm，长半径 79mm，壁厚 1mm；冷却水管直径为 8mm，壁厚 1mm。每个机房冷却水总存水量约为  $2\text{m}^3$ ，水流速度为  $40\text{m}^3/\text{h}$ 。

为进行保守计算，计算模型假设所有束流均匀损失在偏转磁铁处，并且质子均匀损失在磁铁内的加速器真空管壁上，产生的次级束（主要为中子）照射到冷却水管路上导致冷水的活化；冷却水每年更换一次，以年出束时间 600h 做为连续照射时间进行保守计算，计算模型和辐射场见图 3-23。

冷却水活化核素活度浓度计算结果见表 3-7，从表中可以看到，冷却水中的活化核素除了  $^3\text{H}$ 、 $^7\text{Be}$  外，其余活化核素半衰期都很短，辐照后冷却数小时后几乎可衰变完全。企业冷却水存放于冷却水贮存间，放置 1 年后，请有相应检测项目资质的单位检测后排放。从模拟计算结果可知（见表 3-7），冷却水放置一年后，除了  $^3\text{H}$ 、 $^7\text{Be}$  外，其余核素已衰减完全，核素  $^3\text{H}$ 、 $^7\text{Be}$  也处于极低的放射性水平。

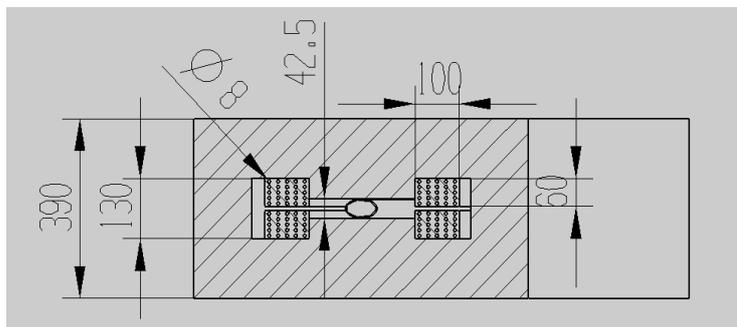


图 3-22 偏转磁铁冷却水模型

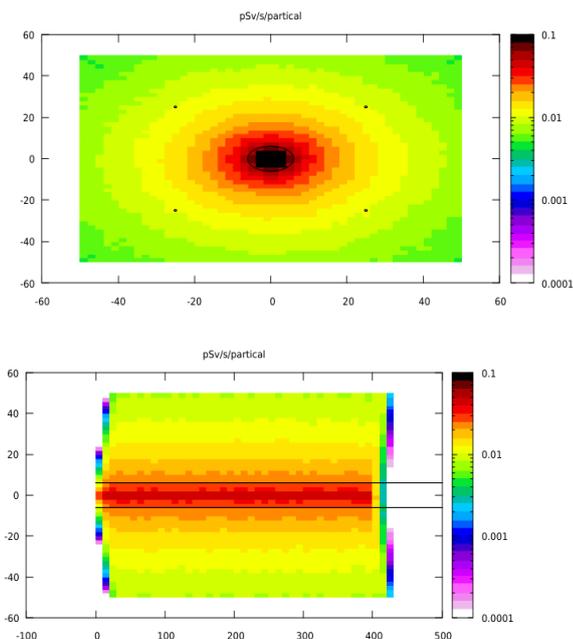


图 3-23 冷却水活化保守计算模型的辐射场

表 3-7 加速器运行一年后各机房冷却水中活化核素活度浓度

调试房间	活化核素	核素半衰期	核素活化活度, Bq	活度浓度, Bq/L	放置 1 年后活度浓度, Bq/L
1#、2# 加速器调试机房	H-3	12.33 y	1.01E+01	5.05E+00	4.77E+00
	Be-7	53.29 d	3.02E+03	1.51E+03	1.31E+01
	C-11	20.39 min	2.47E+04	1.24E+04	0.00E+00
	N-13	9.965 min	1.23E+04	6.15E+03	0.00E+00
	O-15	122.2 s	1.18E+05	5.90E+04	0.00E+00
3#、4# 加速器调试机房	H-3	12.33 y	3.99E+01	2.00E+01	1.89E+01
	Be-7	53.29 d	2.52E+03	1.26E+03	1.09E+01
	C-11	20.39 min	4.00E+04	2.00E+04	0.00E+00
	N-13	9.965 min	5.10E+03	2.55E+03	0.00E+00
	O-15	122.2 s	1.33E+05	6.65E+04	0.00E+00

### 3.4.2.3 终端束流垃圾桶

加速器运行时，加速后的束流，一部分损失在束流运输线上（注入、同步环、引出、传输线等），剩余的束流完全损失在终端的束流垃圾桶上。束流垃圾桶为半径 10cm，高 35cm 的圆柱形水膜，水膜壁材料为塑料。计算模型见图 3-24。

以各加速器机房运行的最大能量进行保守计算，照射时间取年最大出束时间600h，计算结果见表 3-8。

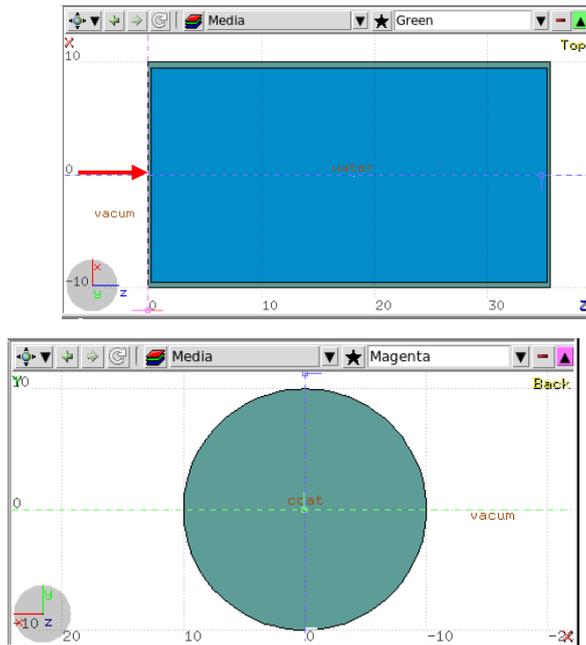


图 3-24 终端束流垃圾桶活化计算模型

表 3-8 终端束流垃圾桶（水膜）活化核素活度计算结果

加速器调试 机房	活化核 素	核素半衰 期	活化活度, Bq/垃圾桶	活化活 度, Bq/L	放置 1 年后活 度活度, Bq/L
1#、2#加速器 机房终端束 流垃圾桶 (230MeV)	H-3	12.33 y	7.75E+03	8.23E+02	7.78E+02
	Be-7	53.29 d	3.22E+05	3.42E+04	2.97E+02
	C-10	19.3s	3.42E+06	3.63E+05	0.00E+00
	C-11	20.39 min	4.87E+07	5.17E+06	0.00E+00
	N-13	9.965 min	1.12E+07	1.19E+06	0.00E+00
	O-14	70.6s	8.11E+06	8.61E+05	0.00E+00
	O-15	122.2 s	1.84E+08	1.95E+07	0.00E+00
3#、4#加速器 机房终端束 流垃圾桶 (70MeV)	H-3	12.33 y	7.70E+03	8.17E+02	7.73E+02
	Be-7	53.29 d	3.63E+05	3.85E+04	3.35E+02
	C-10	19.3s	1.90E+06	2.02E+05	0.00E+00
	C-11	20.39 min	3.03E+07	3.22E+06	0.00E+00
	N-13	9.965 min	6.99E+06	7.42E+05	0.00E+00
	O-14	70.6s	4.00E+06	4.25E+05	0.00E+00

加速器调试 机房	活化核 素	核素半衰 期	活化活度, Bq/垃圾桶	活化活 度, Bq/L	放置 1 年后活 度活度, Bq/L
	O-15	122.2 s	1.10E+08	1.17E+07	0.00E+00

### 3.4.2.4 土壤、地下水活化

本项目加速器机房底部为厚度 3.6m 的混凝土屏蔽墙，由本报告 5.2.2 节“场所辐射水平”的计算结果可知，厚度 3.6m 外的辐射剂量率已接近零。因此，加速器的运行不会对土壤和地下水造成活化影响。

### 3.4.3 电磁辐射

本项目运行后可能产生电磁辐射的区域主要有离子源系统、加速器射频系统以及电源机柜。

本项目质子束离子源采用 ECR 离子源，ECR 离子源装置主要由三部分组成即微波系统、放电室及束流引出系统。放电室位于金属腔体内、微波系统为带有金属外壳的系统。因此离子系统处产生的电磁辐射可被系统自身的金属外壳屏蔽，不会对周围环境造成影响。

在加速器同步环上，为实现对束流的加速，安装有 1 套射频系统（含风冷型磁合金加速腔），其系统磁合金加速腔三维结构见图 3-25。从系统结构图可知，射频系统同样由金属外壳包裹，因此其产生的电磁辐射可被系统自身的金属外壳有效屏蔽，不会对周围环境造成影响。

本项目电源机柜位于 1#、2#加速器调试机房南侧的电控室内，机柜外壳均为金属材料，可有效屏蔽电磁辐射，不会对周围环境造成影响。

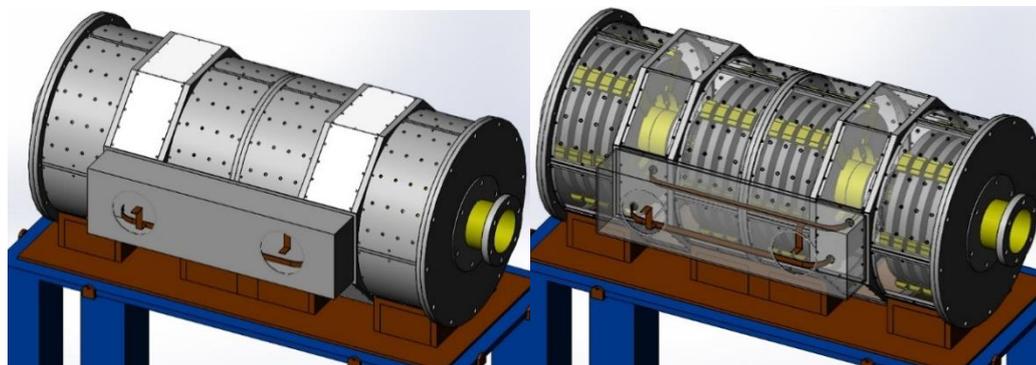


图 3-25 磁合金腔的三维模型

### 3.4.4 非放射性污染源

#### 3.4.4.1 噪声

本项目的噪声源为位于加速器外水循环的 4 各冷却塔，冷却塔均安装于加速器机房楼顶。企业承诺冷却塔选型安装后，冷却塔周围噪声小于 75dB，厂界噪声满足国标标准要求。

#### 3.4.4.2 臭氧

加速器输出的直接致电离粒子束流和空气作用会产生臭氧，依据 NCRP144 号报告，可以采用以下公式估算臭氧的产生量。

$$N(t) = \frac{gI}{\alpha + kI + Q/V} [1 - e^{-(\alpha + kI + Q/V)t}]$$

对长时间照射， $t$  趋于 $\infty$ ，上式变为

$$N = \frac{gI}{\alpha + kI + Q/V}$$

式中，

$N$  为单位体积内产生的臭氧分子数， $m^{-3}$ ；

$I$  为单位体积单位时间在空气中的沉积能量， $eV m^{-3}s^{-1}$ ；

$g$  为单位能量产生的臭氧分子数， $0.074eV^{-1}$ ；

$\alpha$  为臭氧分子的分解速率， $2.3 \times 10^{-4}s^{-1}$ ；

$k$  为单位能量和单位体积被破坏的臭氧分子数量， $1.4 \times 10^{-16}s^{-1}eV^{-1}$ ；

$Q$  为排气速率， $m^3s^{-1}$ ；

$V$  为辐照室内空气体积， $m^3$ 。

在这里以照射量最大的 1#（或 2#）加速器调试机房为例进行计算，采用 FLUKA 进行模拟，计算结果表明，在空气中正负电子和光子的能量沉积平均值为  $1.27 \times 10^{10} eV m^{-3}s^{-1}$ ，调试机房体积约  $1.125 \times 10^3 m^3$ ，排气速率  $1.875 m^3s^{-1}$ 。则单位体积内产生的臭氧分子数为  $4.95 \times 10^{11} m^{-3}$ ，相当于  $3.95 \times 10^{-8} mg/m^3$ ，也就是说调试机房内产生的臭氧浓度远低于《环境空气质量标准》GB3095-1996（2000 年修订）中的一级标准  $0.16 mg/m^3$ 。另一面，NCRP 51 号报告、NCRP 144 号报告和 IAEA 188 号技术报告中描述的臭氧问题都是针对电子加速器和大型正负电子对撞机。

### 3.5 废弃物

#### 3.5.1 废气

放射性废气来源于加速器运行期间初级粒子或次级粒子与隧道、靶室中空气相互作用产生放射性气体。

气体放射性主要通过热中子俘获、 $(n, 2n)$ 、 $(\gamma, n)$ 反应和散裂反应而产生。产生的短寿命核素主要是  $^3\text{H}$ 、 $^7\text{Be}$ 、 $^{11}\text{C}$ 、 $^{13}\text{N}$ 、 $^{15}\text{O}$  和  $^{41}\text{Ar}$ 。它们对人体的危害是 $\beta$ 、 $\gamma$ 气体浸没外照射和吸入引起的内照射。除了  $^7\text{Be}$  半衰期稍长外，其他成分半衰期都很短，不存在长期累积问题，且毒性较小，危害不大。

通过蒙特卡洛程序计算得到机房中每年产生活化气体活度浓度见表 3-6。

#### 3.5.2 废水

加速器的放射性废液主要是活化的冷却水。本加速器所用冷却水为去离子水，去离子水在运行期间循环使用。正常运行情况下，设备冷却水闭路循环不排放，只是在设备相关部位检修时才需要排放。

冷却水系统运行期间，系统发生漏水可通过防漏水监测系统和水冷监测系统发现。系统采用闭式循环，正常运行情况下泄漏损失量非常少。

冷却水每年在检修的时候都会排空一次，采用 FLUKA 蒙特卡洛程序，按照运行一年计算冷却水中产生的放射性核素，计算结果见表 3-7。

#### 3.5.3 固体废物

放射性固体废物主要来自加速器调试、运行、维修过程中产生的废活化元器件、废冷却水过滤滤芯及交换树脂等。

##### （1）活化元器件

主要包括维修更换的加速器活化元器件等。加速器产生的活化元器件很少，每年大约几十公斤，均为低放废物。可在辐射区内设置专用放射性废物暂存柜，产生的一部分活化部件具有很高的再利用价值，可经一段冷却时间后再利用，不能再利用的废物经检测达到免管活度浓度后，按普通废物处理，无法达到免管活度浓度的固体废物不外排，送城市废物库处置。

##### （2）冷却水过滤滤芯和过滤树脂

内循环水净化系统过滤冷却水时，会产生含放射性核素的过滤器滤芯和水净

化树脂等。过滤器滤芯和水净化树脂不可重复利用，每年消耗量约 50kg，均为低放废物。因此，所有更换下来的过滤器滤芯和水净化树脂，均先存放在固体废物柜中。经环保监测达到免管标准后按普通废物处理。

### （3）易耗品

主要包括调试和维修所用的面罩、手套等易耗品，该类物品的产生量根据调试维修的计划而变化，每年产生约几十公斤，放射性水平低，在放射性废物柜内暂存至免管活度浓度后，按普通废物处理。

## 4 辐射安全与防护

### 4.1 场所布局与屏蔽

#### 4.1.1 场所布局

本项目生产调试的机房位于质子厂房，厂房位于地块的南侧，厂房西侧是光子厂房、厂房北侧是研发楼、厂房东部为辅助厂房，厂区内的平面布置见图 4-1。

本项目设 4 个调试机房，自东向西一字排开（分别是 1#~4#机房），分别为 230MeV 样板房（样板房也为调试机房，但其布局、装修、联锁的设置与医院实际使用情况一致，设有治疗椅）、230MeV 调试机房、70MeV 调试机房和 70MeV 调试机房，每个调试机房配一个放射性物品暂存废物柜。4 个调试机房布置在质子厂房的 1 层中部，北侧一层布置活化水静置房、空压机房、水处理冷水机房、冷却系统机房、电源室和配电房，南侧一层布置原料库、生产车间，南侧二层布置实验室、研发办公室，西侧为过道，东侧一层为门厅、二层为办公室。调试机房和北侧均为一层建筑，南侧和东侧有局部二层。质子厂房平面图见图 4-2。

建设单位按照辐射工作场所分区管理要求，对射线装置工作场所进行分区设置和管理，按辐射水平和可能受到辐射影响的范围分为控制区和监督区，详见图 4-3。本项目 4 个调试机房建筑边界内为控制区，在相应的调试机房开机时，禁止任何人员进入。因质子厂房内部不再另设门禁系统，拟质子厂房整体作为监督区控制，厂房内的工作人员参与设备研发、调试的人员，都有可能接触到加速器或其部件，在设备开机调试期间在机房周边活动，都作为职业人员，

**控制区管理要求：**控制区入口处明显位置粘贴电离辐射警告标识。控制区入口设有视频监控和安全联锁，所有涉及辐射操作的工作场所均被视频记录。进入控制区的辐射工作人员必须佩戴个人剂量计和个人报警仪。

**监督区管理要求：**监督区入口处明显位置粘贴电离辐射警告标识，只有经授权人员拥有门禁权限才能进入监督区，进入监督区的人员要佩戴个人剂量计。



图 4-1 新瑞阳光粒子医疗装备（无锡）有限公司总平面布置图

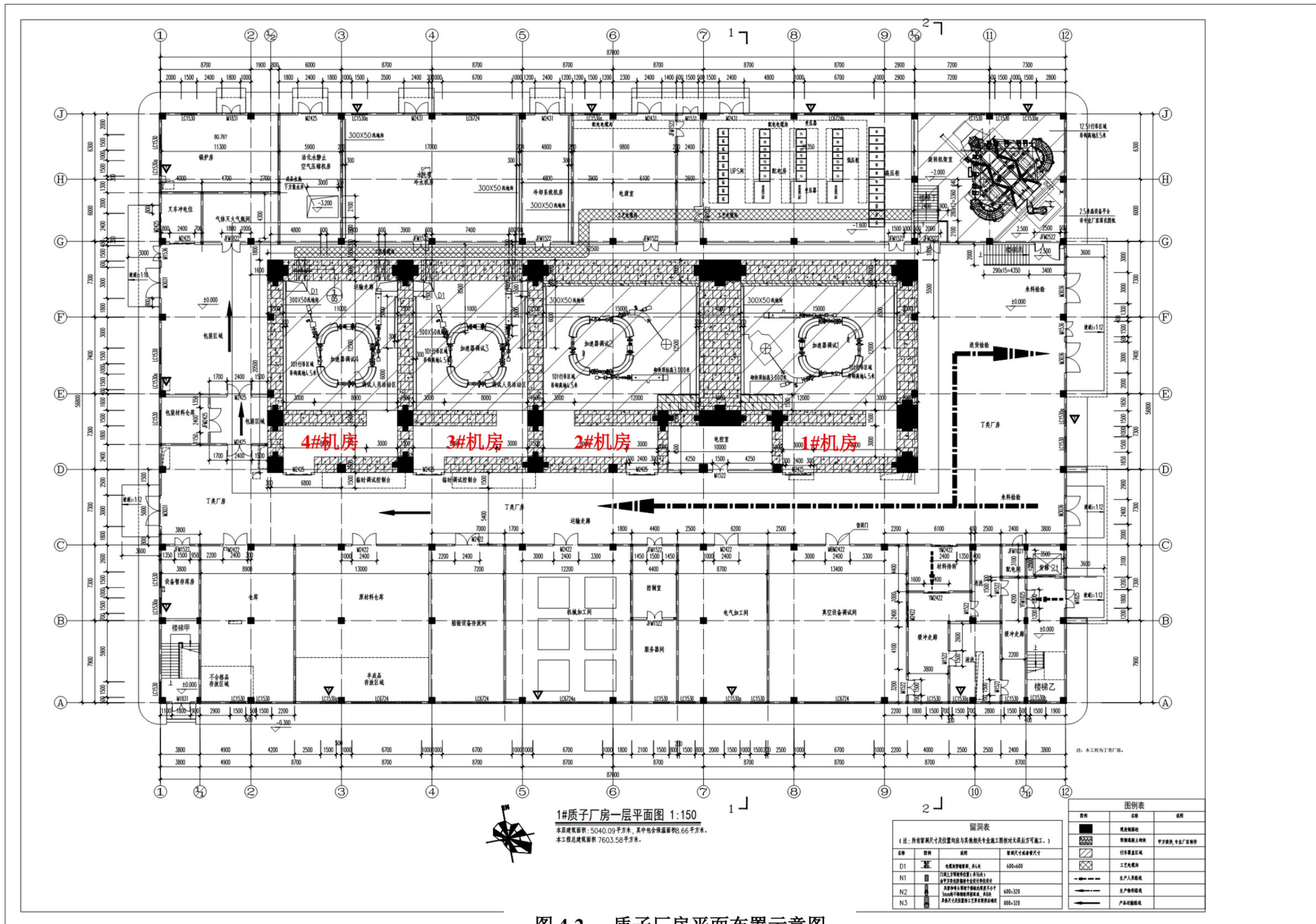


图 4-2 质子厂房平面布置示意图



图 4-3 辐射工作场所分区示意图

— 监督区      — 控制区

## 4.1.2 屏蔽防护

### 4.1.2.1 屏蔽设计

#### 4.1.2.1.1 设计目标

本项目的屏蔽设计目标如下：

- 人员受照剂量管理目标值：职业照射年有效剂量不超过 5 mSv；公众年有效剂量不超过 0.1mSv；
- 屏蔽设施（防护墙、屋顶和迷道防护门外）剂量率部超过 2.5 $\mu$ Sv/h。

#### 4.1.2.1.2 屏蔽体设计

项目屏蔽体拟使用普通商品混凝土，混凝土密度 2.35g/cm<sup>3</sup>。1 号调试机房为样板房，设备调试时最终引出束流朝西北方向，西北墙体厚 4m，2 号调试机房设备调试时最终引出束流朝东南方向，主射方向墙体厚 4m，与 1 号调试机房共用屏蔽墙。西侧的 3 号、4 号 2 间 70MeV 的调试机房的束流引出方向向北，因此北侧的屏蔽墙厚 2m。各调试机房的屏蔽情况见表 4-1，屏蔽结构示意图见图 4-4 和图 4-5。由于本项目设计思路是在迷道外使用普通门，因此在 1 号和 2 号调试机房的迷道内口内墙增加一道 4cm 厚的铁制防护门。

表 4-1 各调试机房屏蔽厚度

机房	屏蔽体	材质、厚度	备注
1 号 调 试 机 房	东侧外墙	200cm 混凝土	墙外为过道
	北侧外墙	250cm 混凝土	墙外为过道
	西侧外墙	400cm 混凝土	墙外为 2 号调试机房
	南侧迷道墙	150cm 混凝土，电控室 位置墙厚 300cm	西南侧外为电控室
	南侧外墙	150cm 混凝土	墙外为过道
	顶部	300cm 混凝土	/
	迷道内口防护门	4cm 铁门	门高 4.5m
	迷道外口防护门	普通门，无防护效果	/
2	东侧外墙	400cm 混凝土	墙外为 1 号调试机房

号 调 试 机 房	北侧外墙	250cm 混凝土	墙外为过道
	西侧外墙	150cm 混凝土	墙外为 3 号调试机房
	南侧迷道墙	150cm 混凝土，电控室 位置墙厚 300cm	东南侧外为电控室
	南侧外墙	150cm 混凝土	墙外为过道
	顶部	300cm 混凝土	/
	迷道内口防护门	4cm 铁门	门高 4m
	迷道外口防护门	普通门，无防护效果	/
3 号 调 试 机 房	东侧外墙	150cm 混凝土	墙外为 2 号调试机房
	北侧外墙	200cm 混凝土	墙外为过道
	西侧外墙	150cm 混凝土	墙外为 4 号调试机房
	南侧迷道墙	150cm 混凝土	南侧迷道
	南侧外墙	150cm 混凝土	墙外为过道
	顶部	300cm 混凝土	/
	迷道外口防护门	普通门，无防护效果	/
4 号 调 试 机 房	东侧外墙	150cm 混凝土	墙外为 3 号调试机房
	北侧外墙	200cm 混凝土	墙外为过道
	西侧外墙	150cm 混凝土	墙外为过道
	南侧迷道墙	150cm 混凝土	南侧迷道
	南侧外墙	150cm 混凝土	墙外为过道
	顶部	300cm 混凝土	/
	迷道外口防护门	普通门，无防护效果	/

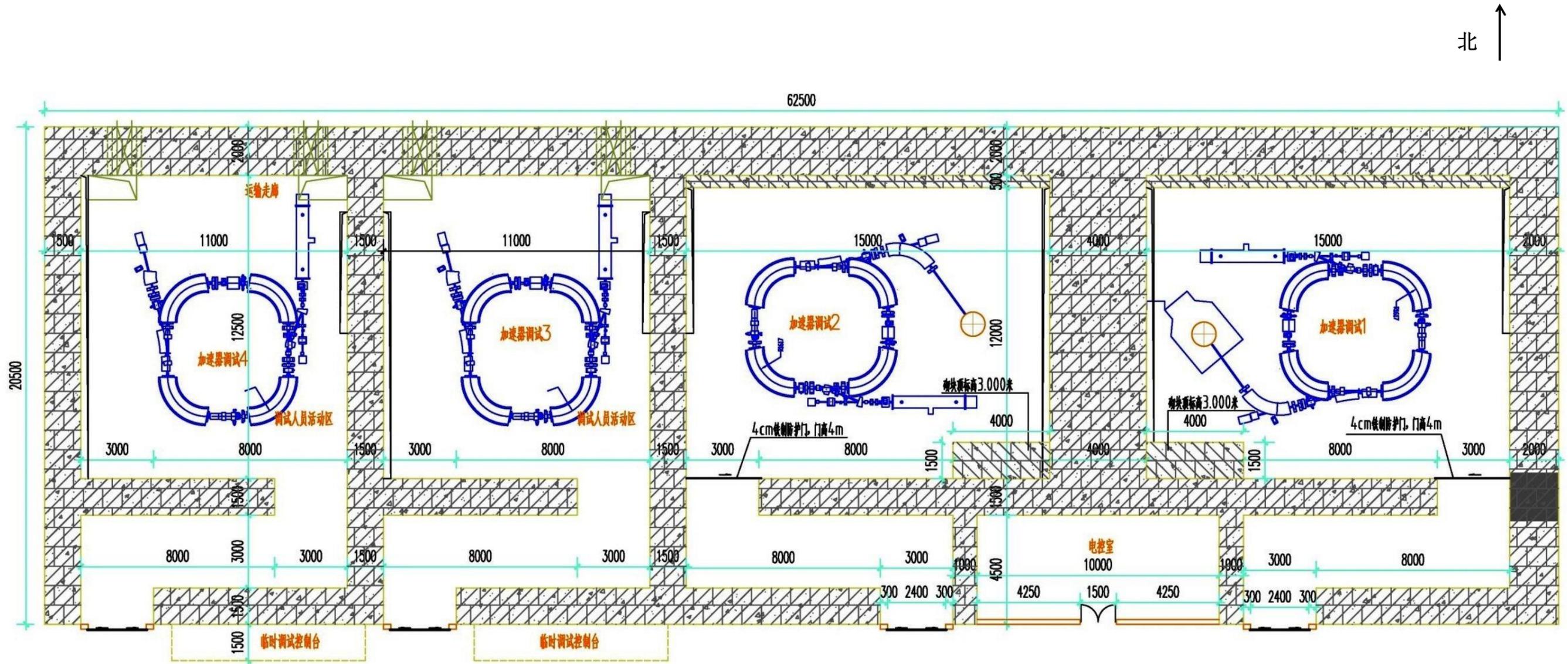


图 4-4 加速器机房屏蔽结构（平面）图

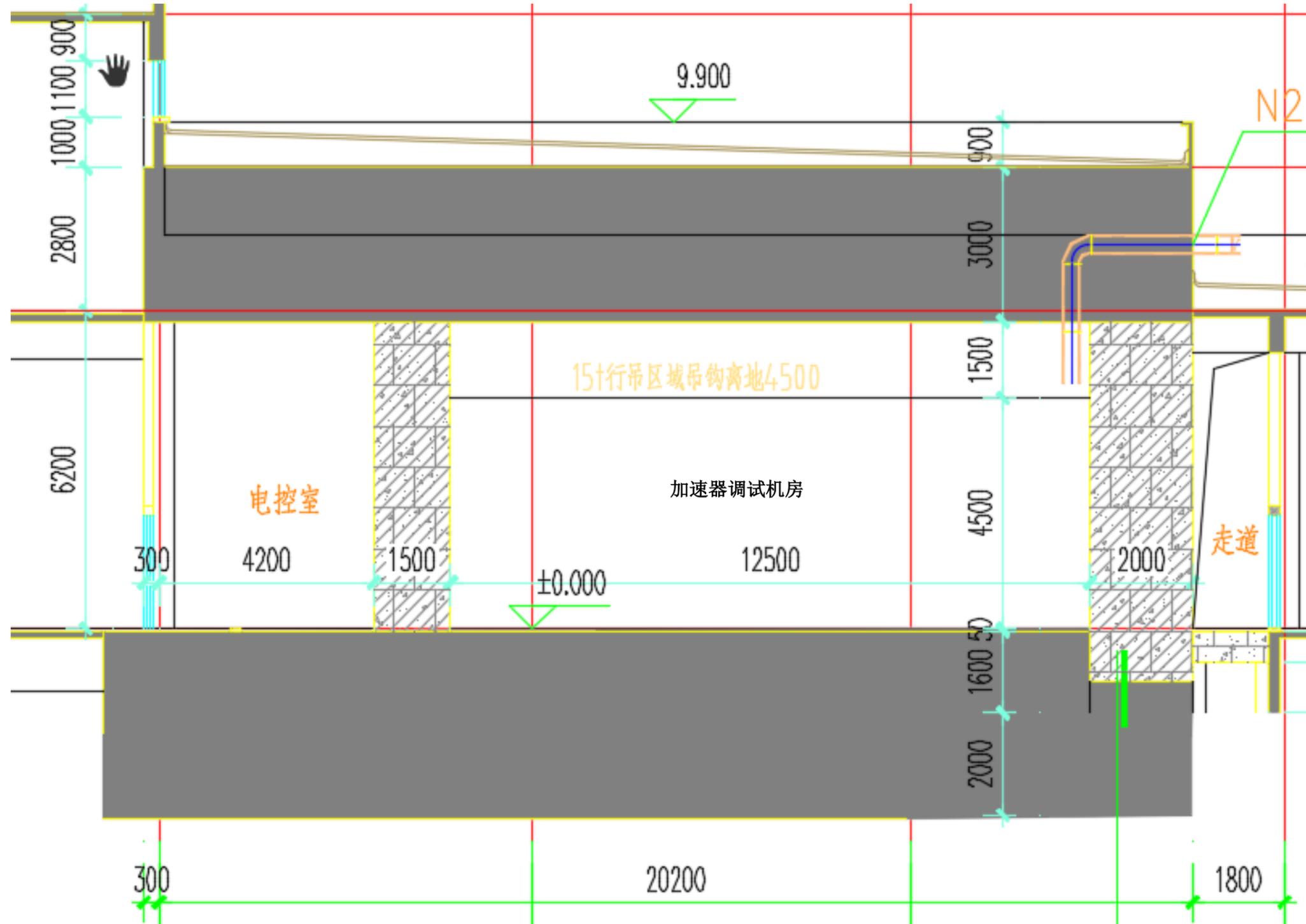


图 4-5 加速器机房屏蔽结构（立面）图

#### 4.1.2.2 管道设计

##### 4.1.2.2.1 电缆管道

本项目电缆管道进入控制区的路径主要分两类。在 1#~4#调试机房，由于房间内的辐射剂量较大，因此电线电缆从配电房出线后，向东绕行到防护门处，从防护门的上方进入控制区，线路沿迷道铺设进入调试机房再与设备连接。

##### 4.1.2.2.2 给排水/冷却水管道

本项目加速器调试时的冷却水在北侧冷水机房内制备，循环冷却水管道绕过加速器调试机房从防护门上方经过迷道进入调试机房。

每个调试机房在东、西两侧均设置 2 个集水沟，集水沟使用 DN100 的排水管连接，排水通过高程差由 1 号调试机房自流到 4 号调试机房，到 4 号调试机房后向北穿墙接入北侧的不锈钢活化水箱。除此之外，电控室也安装一个地漏，向北穿墙接入 2 号调试机房内的排水主管道，在 1 号调试机房的水靶位置正下方设置一个地漏，其排水管道向北穿过 1 号调试机房北侧屏蔽墙接入其他排水总管，最终也接入不锈钢活化水箱。排水管在穿墙处的标高为-1.0m，上面覆盖约 1.0m 厚的混凝土，同时排水管每一次管过调试间之间的屏蔽墙都采用“之”字型穿越，以上措施均可大大降低排水管穿墙的辐射泄漏和机房之间相互的辐射影响。调试机房排水管道走径见图 4-6。

##### 4.1.2.2.3 通风管道

本项目在每个调试机房北侧的东北角和西北角各设 1 个排风管、1 个送风管，风管开口在调试间顶部，向上延伸 1.5m 后向北侧水平折转，穿过 2m 厚的屏蔽墙后到达室外。通风管道穿墙结构见图 4-7。

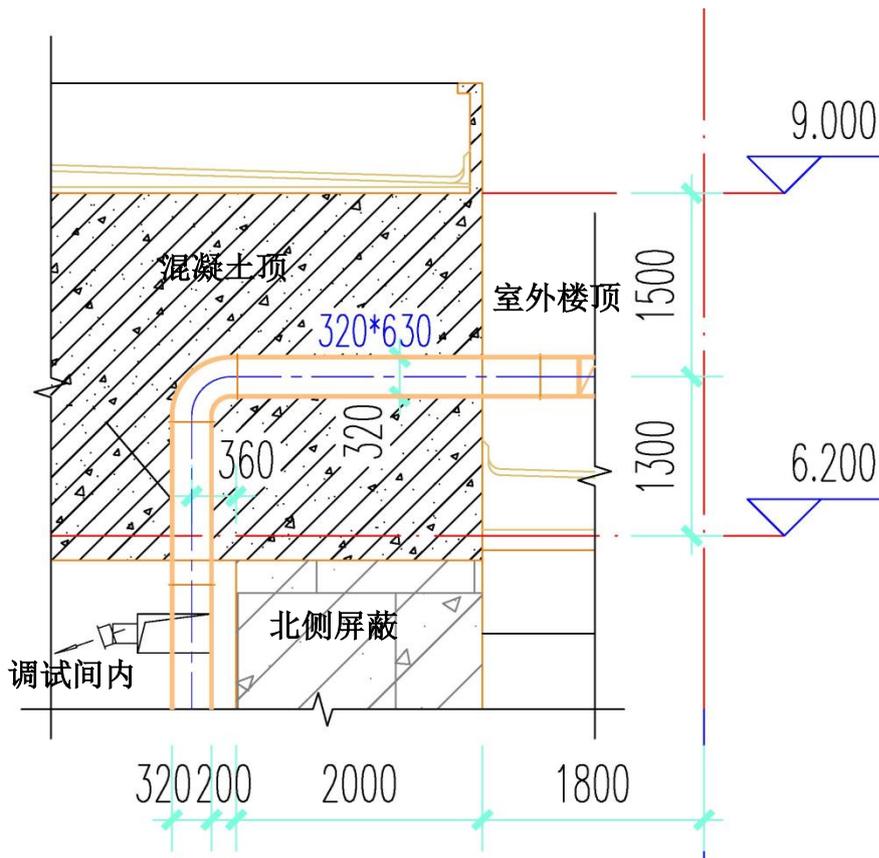


图 4-7 风管穿墙示意图

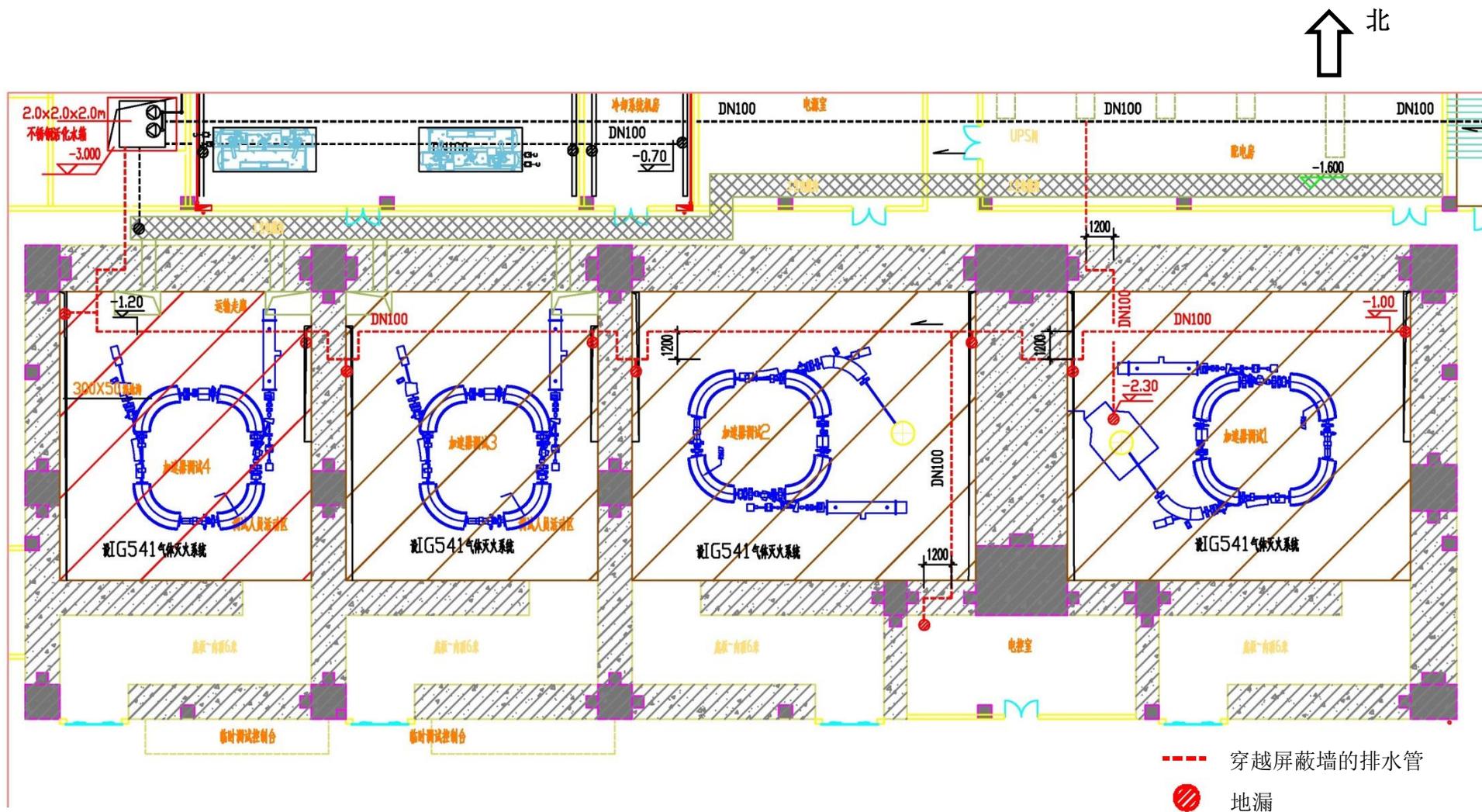


图 4-6 调试机房排水管道示

### 4.1.2.3 出入口迷道设计

本项目设置迷道来降低机房出口处的剂量率水平，4个调试机房最终的束流引出方向均不朝向迷道内口，这样可以使得束流产生的辐射到达迷道口的路径至少多经历一次散射。

1#、2#机房调试的加速器能量较高，为了进一步降低迷道外口处剂量，在1#、2#机房的迷道内口加装1扇4m高、4cm厚的铁制防护门，预测结果1#和2#机房在调试时迷道出口处剂量率均能满足低于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 的控制限值。

## 4.2 辐射安全与防护措施

### 4.2.1 加速器安全联锁设计

#### 4.2.1.1 安全联锁设计原则

安全联锁系统的设计，用于保护辐射工作人员的人身安全，避免加速器开机出束时人员受到超剂量限值照射。安全联锁的设计主要遵循以下原则。

（1）简单可靠：系统设计要力求在简洁的基础上保证运行可靠性及稳定性。

（2）最优切断：当加速器处于“准备”或“运行”状态时，安全联锁系统在加速器中央控制系统联锁逻辑中具有最优先的权力切断加速器的束流。

（3）失效保护：当安全联锁系统关键设备失效时，系统有相应的应急保护措施来保障工作人员的人身安全。

（4）冗余：系统关键设备要采取冗余设计，以保障系统的可靠性、减少系统故障时间并预留有进一步改进的余地。

（5）纵深防护：在设计系统时要充分考虑并合理安排辐射安全设施的联锁逻辑，实现对工作人员人身安全的交叉纵深防护。

（6）自我巡检：系统能对所属联锁设备的工作状态进行巡检并能将巡检结果在上位机界面上实时显示出来，如在巡检过程中发现设备工作异常则生成报警事件并通知工作人员进行处理；

（7）以人为本：安全联锁系统是在保障工作人员人身安全的基础上兼顾加速器的运行安全，此外系统要具备人性化的特点——联锁逻辑简洁合理、操作简单、维护方便、人机交互性好。

#### 4.2.1.2 安全联锁设计

基于上述设计原则，本项目安全联锁系统由联锁 PLC 系统和门禁监控系统两个相互联系的子系统构成。

联锁 PLC 系统由 PLC（可编程逻辑控制器）、联锁钥匙、紧急停机装置、搜索清场装置、红外探测器、警示装置（警灯、报警器、状态指示灯）、门磁联锁等设备和加速器状态等信号构成。系统利用编写在主控器 PLC 内的逻辑程序实现对这些系统信号和设备的联锁控制，保障人员在控制区时加速器无法开机（无法打开）。

门禁监控系统可分为门禁管理和视频监控两个部分，门禁管理部分由门禁控制器、内外读卡器、紧急进出按钮、磁卡和制卡设备、门磁、服务器等设备构成。在联锁 PLC 系统判定控制区内部安全的情况下，门禁系统通过安装在控制区门外的读卡器辨识感应卡，只有经过授权并获取联锁钥匙（开机钥匙），才能进入受控的机房和控制室。视频监控部分通过安装在控制区门内的摄像头监控机房内是否有人员滞留，并提供监控存储和管理服务。具体的安全联锁设计如下：

##### 1、急停开关

调试机房内的四周墙壁和迷道一侧墙壁安装拉线式急停开关、1#调试机房治疗椅和控制台设置按钮式急停开关。急停开关和加速器高压及偏转磁铁电源联锁，按下（或者拉动）急停开关后加速器加速高压和偏转磁铁停止供电，束流损失在偏转磁铁处。任何一个急停开关按下后，加速器都无法进行质子加速，急停按钮不会自动复位，需要工作人员现场检查、复位后才能再次开机（相比 1#调试机房无需在体模放置的治疗床安装急停开关）。

##### 2、巡检开关

调试机房内的设置 4 个巡检开关，操作人员在开机前需要依次触发开关后，设备才能开启加速器。防护门开门开关信号触发后，需要重新依次触发巡检开关后，加速器才能再次启动。

##### 3、门机联锁

加速器机房的门与加速电压和偏转磁铁连锁，防护门打开状态时，设备无法加载高压，在设备开机状态由于紧急情况突然打开防护门，则加速器立即断高压。

##### 4、开门开关

在迷道出口处设置开门开关，当人员在迷道内按下开门开关，加速器立即断高

压，同时防护门自动打开。在设备控制台上也装有开门开关，控制台上的开门开关必须在加速器停机后方可按动。为了应对意外情况，防护门外侧设置了手动开门开关。

#### 5、光电联锁

在迷道外口设置一道光电联锁，在开机状态下有物体经过，光电信号被切断则加速电压和偏转磁铁会立即关闭，人员进入检查后，设备才能再次开机。

#### 6、钥匙开关

设备控制台设钥匙开关，钥匙由专人保管，只有插入钥匙打开开关后加速器系统才能正常开机使用。关机后拔出钥匙，钥匙由经授权的当班操作人员保管。

#### 7、剂量探头

建设单位在质子厂房内外建设固定式辐射监测系统，探头位置分别位于控制区、监督区和质子厂房外公众居留区。

在控制区的监测点用于监测开机时机房内的剂量情况，以便及时发现设备或靶区运行时的异常，并通过对缓发辐射场的测量，判断停机后辐射工作人员的准入条件。监督区剂量探头用于监控加速器开机时对职业人员的辐射影响。质子厂房外的监测点可以随时了解加速器开机前后，公众居留位置的剂量率水平是否发生变化。

监测结果实时值显示在控制台的显示器上，当操作人员发现剂量率显著异常时，按下相应设备的急停按钮，同时在监督区和公众区也设置显示。

#### 8、灯光警示

在调试车间防护门门口上方设置工作状态指示灯，并与加速器高压联锁，绿灯表示可以进入，黄灯表示停机待进入或准备开机，红灯表示装置正在运行，以提醒周围工作人员勿靠近。在加速器开启出束前，黄灯亮起并伴随警报声（预备信号）提醒控制区内的人员撤离，预备信号应持续足够长的时间，以确保控制区内人员安全离开。

#### 9、视频监控

在调试机房内安装视频监控，关注调试机房内的情况。视屏监控可加装铅玻璃以延长视频设备的使用寿命。

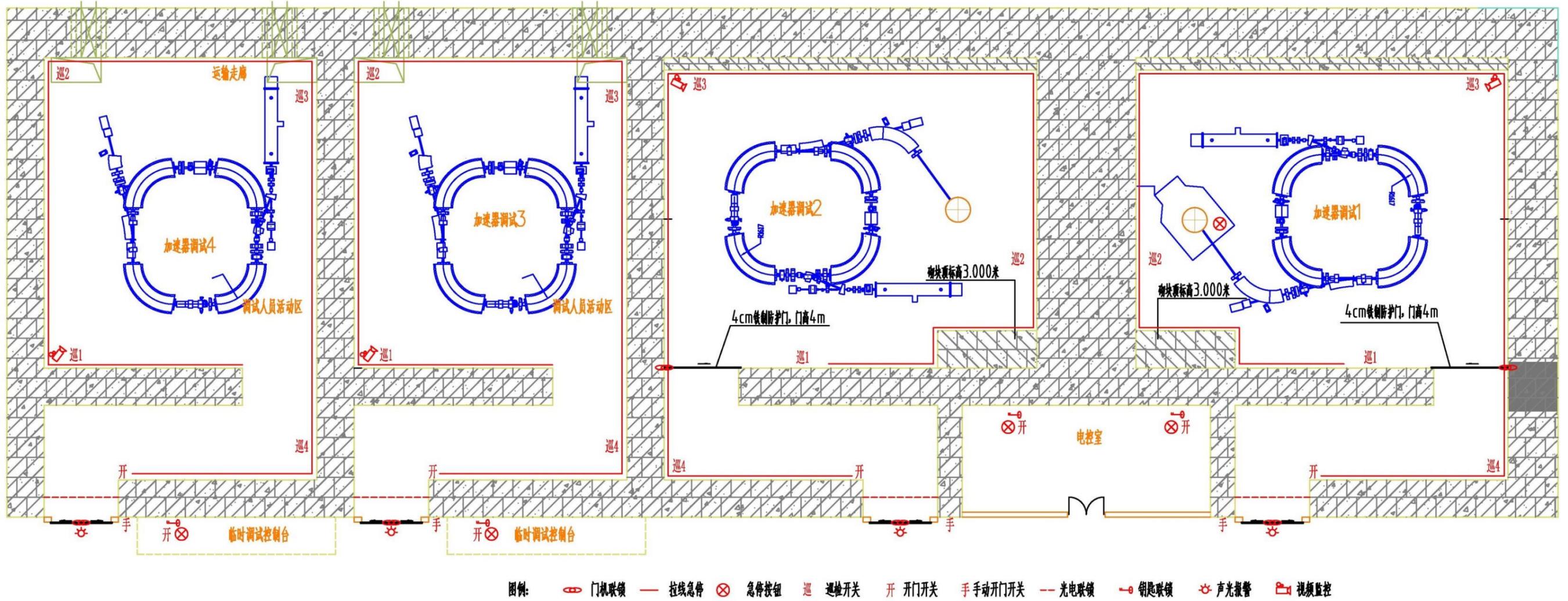


图 4-8 安全联锁设备位置示意图

在各设施设备正常的情况下，加速器开机前开始搜索清场，播放离场广播，完成相关控制区的搜索清场，关闭连锁门，完成后相关控制区安全连锁系统进入待机状态，等待控制系统命令。接收到“开机”命令时，系统进入异常切束联锁建立状态，按预定要求管制相关区域，实时监测可能触发停机或紧急停机的各项信号。接收到“停机”信号后，允许授权人员按规定方式进入控制区。

出现异常情况时，可通过紧急停机按钮、连锁门磁触发紧急停机动作，待异常情况解除后才可重新复位开机。调试机房安全连锁系统的逻辑图见图 4-10。

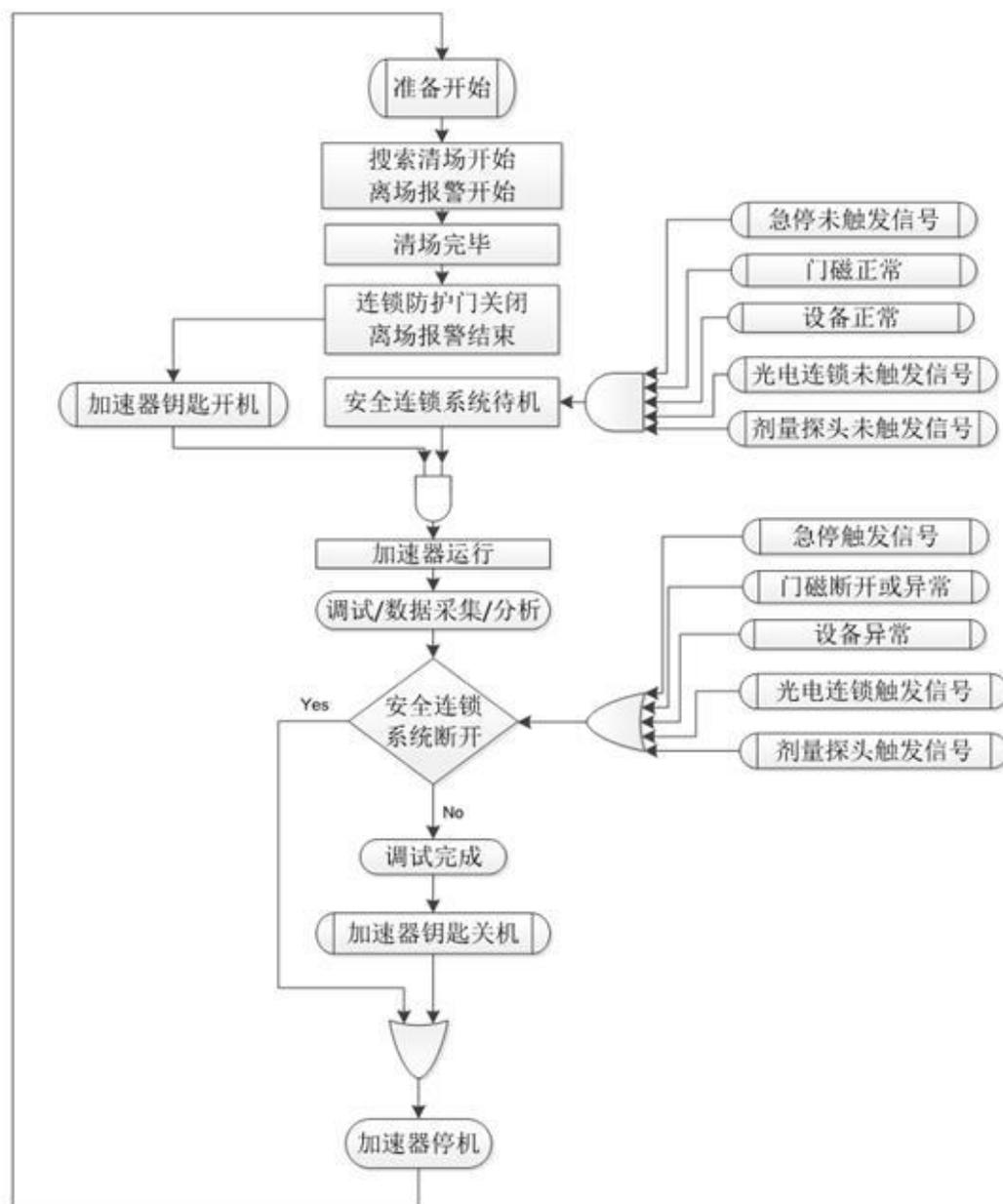


图 4-10 机房联锁控制逻辑图

#### 4.2.2 安全保卫

1#厂房设置门禁，门禁管理与上述调试机房的门禁系统部使用同一套系统，门禁有专人授权管理，只有经过授权的辐射工作人员才能进入 1#厂房内。其他人员如有必要确需进入，则应由专人陪同进入，并禁止在 1#厂房内随意走动。

#### 4.3 三废的治理

##### 4.3.1 放射性废气及处理措施

加速器运行时，室内空气通过热中子俘获、 $(n, 2n)$ 、 $(\gamma, n)$ 反应和散裂反应而被活化，产生的活化核素主要有  $^3\text{H}$ 、 $^7\text{Be}$ 、 $^{11}\text{C}$ 、 $^{13}\text{N}$ 、 $^{15}\text{O}$  和  $^{41}\text{Ar}$  等。根据本项目加速器的运行情况计算得到的空气活化产生的主要放射性核素计算结果见表 3-4。由于活化产物的产生量非常低，因此本项目含有少量放射性同位素的通风废气通过排风口排放进入周围大气。各调试机房均设置独立的通风系统，通风系统的排风口位置位于质子厂房北侧 1 层的屋顶。见图 4-11。

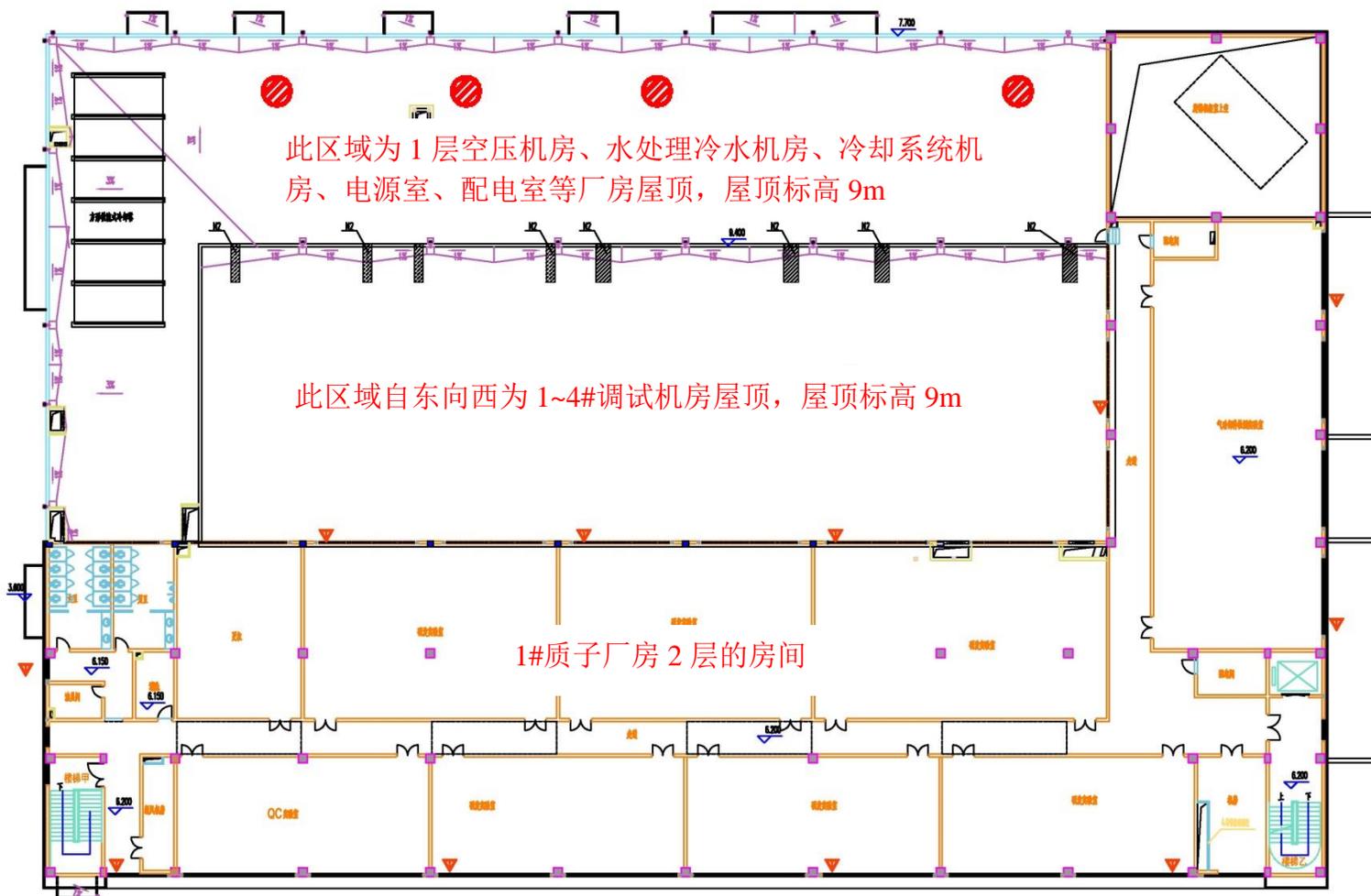


图 4-11 调试机房排风口位置示

 排风口位置

### 4.3.1.1 含放射性核素的废水及处理措施

#### (1) 废水收集

本项目加速器设备的水处理冷水机房、冷却系统机房设专门设专门的排水渠接入空压机房内的活化水静置成品水池，排水渠设 0.1%的坡度，一旦被活化的冷却水在上述房间泄漏，则冷却水漫流进入排水沟渠，在排水沟渠内自动流入活化水静置成品水池。在加速器设备需要拆装、检修时，加速器内的活化水也有计划的排入活化水静置成品水池暂存。故障排除后，加速器重新添加冷却水。应急（检修）水池总存水容积设计约为 6m<sup>3</sup>，可以容纳设备冷却系统的总水量。

#### (2) 排放

进入集水井的废水不进行回用，暂存于活化水静置成品水池内，自然衰变达到 GB27742-2011 规定的免管浓度后，采用提升泵进行加压排放至污水排放系统。

#### (3) 衰变时间估算

加速器运行 1 年水体中活化产生的放射性核素见**错误!未找到引用源。**，停止运行时冷却水中放射性核素含量见表 4-，满足 $\sum_{i=1}^n \frac{C_i}{C_{oi}} \leq 1$ 的免管要求。加速器停止运行冷却 1 天后，大多数短半衰期核素都衰变消失，

表 4-2 加速器运行 1 年活化的冷却水放射性核素含量

房间	活化核素	核素半衰期	活度浓度, Bq/g	免管浓度值, Bq/g
1#、2#加速器 机房	H-3	12.33y	5.05E-06	1000000
	Be-7	53.29 d	1.51E-03	1000
	C-11	20.39 min	1.24E-02	/
	N-13	9.965 min	6.15E-03	/
	O-15	122.2s	5.90E-02	100
3#、4#加速器 机房	H-3	12.33 y	2.00E-05	1000000
	Be-7	53.29 d	1.26E-03	1000
	C-11	20.39 min	2.00E-02	/
	N-13	9.965 min	2.55E-03	/
	O-15	122.2 s	6.65E-02	100

#### 4.3.1.2 放射性固体废物及其处理措施

放射性固体废物主要来自加速器调试、运行、维修过程中产生的废活化元器件、废冷却水过滤滤芯及交换树脂等。放射性固体废物的处理措施包括暂存至免管标准后按普通废物处理以及送往城市废物库处置，具体参照 3.5.3 节。

#### 4.4 服务期满后的环境保护措施

加速器退役的辐射防护问题主要是由于感生放射性引起的，加速器产生的感生放射性的特点是短寿命核素较多，研究表明经过几十年后对环境有影响的唯一长寿命核素为  $^{60}\text{Co}$ ，半衰期 5.3 年，其它核素的影响几乎可以忽略不计。而  $^{60}\text{Co}$  主要存在于受束流直接照射的铜、不锈钢等加速器部件材料中，相对集中形成一个个“热点”。本项目靶材为体模，因此不存在这样的热点，因此设备退役时无需对加速器机房内进行清洁去污。

加速器工作场所退役时，需要对质子厂房放射性废物柜内暂存的固体废物进行安全处置，整个质子厂房按照国家法规要求进行退役。

## 5 环境影响分析

### 5.1 建设阶段环境影响分析

本项目质子治疗系统厂房占地面积约 5040m<sup>2</sup>，预计 2018 年 11 月开工，2019 年 10 月建成投产，整个施工周期约 11 个月，施工期对周围的大气环境、水环境、声环境等产生一定的影响。

本项目质子治疗系统厂房位于公司南侧，离南厂界约 25 米，因此公司在施工期间，应严格按照各项污染防治措施加以控制，以减少对周围环境的影响，特别是对南厂界外环境敏感保护目标的不利影响。下面结合整厂建设项目环境影响评价中施工期环评内容对本工程的情况进行简要分析。

#### 5.1.1 大气环境影响

本项目质子治疗系统加速器机房的主体结构为混凝土，因此本项目土建的主要工程为混凝土浇筑。施工期间的主要大气污染物包括扬尘和汽车尾气，在这些污染物中，扬尘对大气局部环境质量影响较为明显。施工产生的地面扬尘主要来自于施工机械和运输车辆的行驶、地面负挖、物料堆放等环节，TSP 产生量与施工方式、车辆数量、道路路面状况以及天气情况相关。

由于施工现场车辆较多，特别是大型工程车和施工机械设备，在施工和运输过程中会产生一定量的汽车尾气，主要成分为 CO、NO<sub>x</sub> 和烃类物质。

根据施工场地洒水抑尘试验，在施工期内对车辆行驶的路面实施每天洒水 4~5 次进行抑尘，可有效地控制施工扬尘，并可将 TSP 污染距离缩小到 20~50m 范围。因此，在施工活动中，建设方必须加强抑尘措施，通过合理安排施工方式、施工时间，选择合理的运输路线，禁止夜间施工，同时通过洒水抑尘、封闭施工、保持施工场地路面清洁等措施，施工扬尘的影响将局限于施工场地周围，对大气环境影响范围有限。

在一般气象条件下，建设工地的 CO、NO<sub>x</sub> 和烃类物质的影响范围在其下风向约 100 米，若设置临时建筑围墙，则影响距离小于上述值。本项目所在地主导风向为东南风，下风向 100 米范围属于建设单位厂区内，建设阶段无环境敏感目标。

另外，厂房设施施工结束后，将进行室内装修，公司拟采用“环保型”油漆

及涂料，以及加强通风或室内空气净化措施，严格按照《室内空气质量标准》（GB/T18883-2002）控制室内环境，可将装修废气的影响降至最低，装修废气不会对周围环境产生大的影响。

因施工期是暂时的，且施工期结束，上述大气污染源将不再存在，影响时段有限。

### 5.1.2 水环境影响

本项目施工期污水主要为各种施工机械设备清洗用水和施工现场清洗、建材清洗、混凝土养护产生的废水与施工队伍生活污水，施工方应采取以下环保措施：

（1）施工场地应为硬(干)地坪，场地应铺设连接污水管网的通道，并在通道口设置隔栅，防止泥浆、污水中杂物堵塞管道。

（2）道路应坚实、平坦，有排水措施，在现场搅拌、运输砂浆、商品砼过程中要做到不漏、不洒、不剩。所有生产废水因泥沙含量较大均须先经沉淀池沉淀后再行排放，并应尽可能地将沉淀池出水回用于施工现场洒水降尘。

（3）施工现场临时厕所应设置简易化粪池，采用水冲式厕所。

以上污水排入施工场地临时铺设的连接市政污水管网的通道内，进入污水处理厂处理。

由于施工时间较短，施工方采取上述措施后，预计对周围水环境不会产生明显影响。

### 5.1.3 声环境影响

噪声是拟建项目施工期的主要污染因子，产生于施工设备和运输车辆，在实际施工中经常会多种机械同时工作，各种噪声源辐射的相互叠加，使噪声影响值增高，辐射面增大。

根据施工作业经验，仅考虑距离衰减的情况下，在施工机械噪声源约 100 米处，施工噪声值方能达到《建筑施工场界环境噪声排放标准》(GB12523-2011)昼间值标准： $\leq 70\text{dB(A)}$ ；至各噪声源 300 米处，其噪声影响值(除装载机和电锯外)方能达到《建筑施工场界环境噪声排放标准》(GB12523-2011)夜间值标准： $\leq 55\text{dB(A)}$ 。另外，各种施工车辆的运行也将引起道路沿线噪声超标。

质子厂房距离公司南厂界外汇太路南侧的无锡市展鹏科技股份有限公司等工业企业约 60 米，因此，要求建设单位在施工期间必须采取相应措施，例如合

理安排施工进度和作业时间，淘汰落后的生产方式和设备，选用低噪音设备，运输车辆应禁止鸣号等措施，以保证施工过程对厂界外环境保护目标的影响满足标准要求。

#### 5.1.4 施工固体废物环境影响

本项目施工期的固体废弃物主要为生活垃圾、建筑垃圾和废弃土石方。

为将施工期固废对周围环境的影响降至最低，施工期间的固废应采取如下措施：

##### ①生活垃圾

施工期生活垃圾产生量较小，实行袋装化，每天有清洁员清理，送往垃圾收集点，并及时由环卫部门清运处理，做到日产日清，不会对周围环境和人员健康带来不利影响。

##### ②建筑垃圾及土石方

项目产生的建筑垃圾主要是一些包装袋、包装箱、浇筑件、废水泥等。对其中可用部分进行回收，尽量减少建筑材料在运输、装卸、施工过程中的跑、冒、滴、漏，建筑垃圾送往指定的堆放点存放。建筑垃圾及时清运、填埋或综合利用，对周围环境无明显影响。

本项目机房主体结构需要土石方负挖，产生的剩余土方全部用于公司内绿化覆土。

#### 5.1.5 生态环境影响

本项目施工是在拆除原工业企业厂房设施的基础上，重新平整场地后开始建设。项目建设过程中，将有规划地对整个厂区实施绿化，并形成全新的人文景观。预计工程建设对当地局部生态环境不会产生不良影响。

由于本项目施工期不长，对当地大气环境、水环境、声环境、生态环境等影响时间较短，故不会降低当地环境质量现状。

## 5.2 运行阶段环境影响分析

根据加速器工作原理，质子回旋加速器运行时产生的辐射源项包括瞬发辐射和感生放射性，辐射源除通过贯穿辐射途径对屏蔽体外环境产生辐射影响外，工作场所空气中的感生放射核素还将以气载流出物的形式进入大气环境，主要通过

空气浸没外照射和吸入内照射途径对人体产生辐射影响。

### 5.2.1 辐射屏蔽计算方法

《放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第 5 部分：质子加速器放射治疗机房》（GBZ/T 201.5-2015）中给出了估算方法，当关注点与束流损失点的距离远大于束流损失点的几何尺寸(大于 7 倍)时，可将靶视为点源，并给出了点源的墙外剂量率估算公式，当不满足点源条件时可按照线源的估算公式进行计算。

对于本项目，加速器束流损失点多，损失方式复杂、靶材料结构多样。更重要的是除了机房屏蔽墙外，加速器部件，特别是偏转磁铁以及束流阻挡器，均对初级束和次级束有较强的屏蔽作用。因此，通过 GBZ/T201.5-2015 给出的剂量估算方法不能准确模拟和估算加速器机房屏蔽体周围的辐射水平。

本项目采用加速器辐射屏蔽计算的主流程程序---FLUKA 蒙特卡罗程序进行计算。FLUKA 是由意大利 INFN 实验室开发(现由 INFN 和 CERN 共同维护改进)的模拟粒子输运及与物质相互作用过程的大型通用蒙特卡罗程序。主要应用于质子和电子加速器及靶的设计、辐射活化、辐射剂量学、探测器设计、加速器驱动系统、宇宙射线、中微子物理、高能物理模拟、放射治疗等领域。程序可模拟包括中子、电子、质子在内的 60 余种不同的粒子及重离子，其中子能量范围从 10-5eV 到 20TeV (20MeV 以下采用 260 个能群)，光子从 100eV 到 10000TeV，电子从 1keV 到 1000TeV，带电强子及其反粒子为 1keV 到 20TeV，重离子为  $\leq 1000\text{TeV}/n$ 。

FLUKA 的数据库主要采用了美国核数据中心 NNDC 的数据，不仅可以计算瞬发辐射，还可以计算感生放射性，广泛应用于 CERN、SLAC 等大型质子、电子加速器的防护设计。本项目建设单位对加速器屏蔽设计采用 FLUKA 程序，环评单位也采用该程序进行屏蔽校核计算。

根据建设单位提供的项目屏蔽设计参数，环评单位建立的蒙特卡罗计算模型见图 5-1~图 5-3。其中图 5-1 为计算模型外层，显示了混凝土屏蔽墙和 4 个加速器调试的关系；图 5-2 为质子同步加速器在各机房内的布局模型；图 5-3 为质子同步加速器计算模型（该图为 1 号加速器机房内的加速器计算模型）。

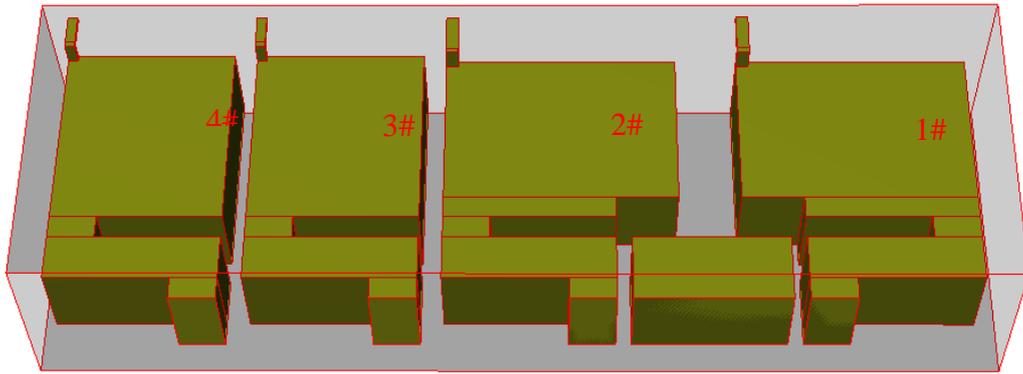


图 5-1 计算模型（灰色部分为混凝土屏蔽墙，绿色部分 1#~4#为加速器机房）

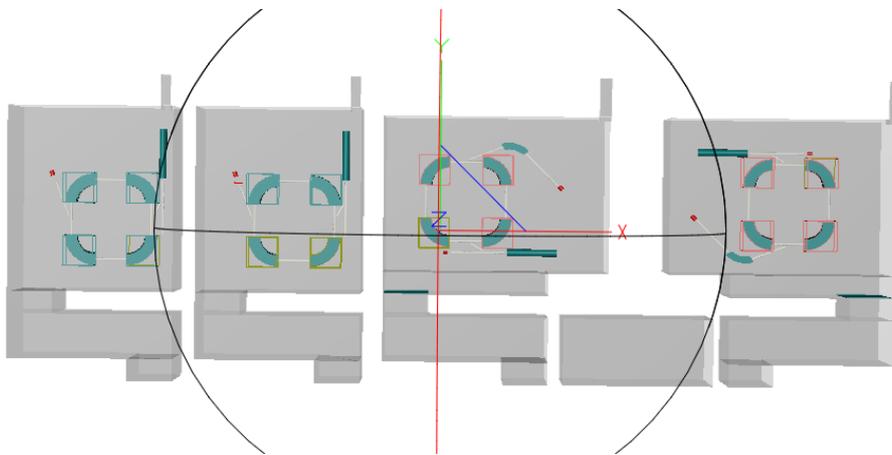


图 5-2 计算模型（各加速器在机房内的布局情况）

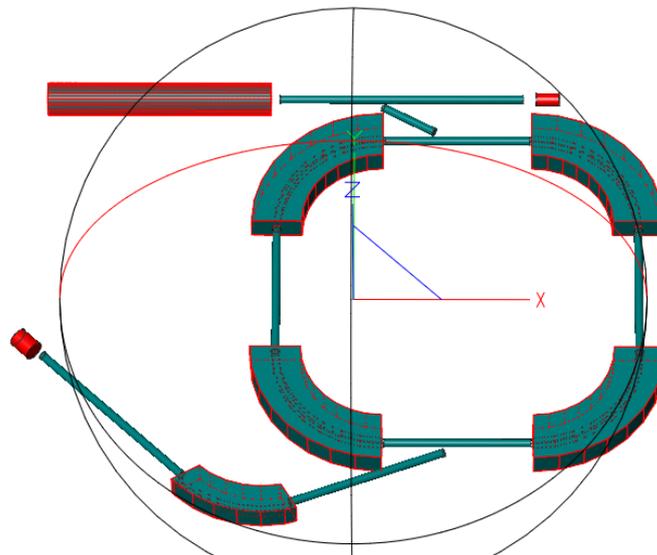


图 5-3 质子同步加速器屏蔽计算模型

## 5.2.2 场所辐射水平

### 5.2.2.1 多台加速器运行时周围辐射剂量率

#### 5.2.2.1.1 计算工况

为评价多台加速器同时运行时加速器调试机房屏蔽体外的辐射水平，以 4 个机房同时开机调试进行保守计算。各台加速器均以最大工况出束，即 1#、2# 加速器能量均为 230MeV，3#、4# 加速器能量均为 70MeV，4 台加速器束流强度均为  $1.25\text{E}+10\text{PPS}$ （即 2nA）。

#### 5.2.2.1.2 计算结果和评价

1#~4# 加速器在最大能量和束流强度工况下同时开机，加速器机房周围辐射剂量率分布结果见图 5-4，其中辐射剂量率大于  $2.5\mu\text{Sv/h}$  的区域见图 5-5。

迷道口处的辐射剂量率见图 5-6 和图 5-7。表 5-1 给出了各屏蔽墙、迷道口外 30cm 处以及各主要关注点的辐射剂量率。图 5-8、图 5-9 给出了计算点位分布示意图。

从计算结果可知，4 个加速器机房内的 4 台加速器均在最大工况条件下开机，机房内最大辐射剂量率可超过  $10\text{mSv/h}$ 。图 5-5 表明，高于  $2.5\mu\text{Sv/h}$  的区域均被包络在机房内。

屏蔽墙外辐射水平：屏蔽墙四周 30cm 处辐射剂量率最大值位于 1# 加速器机房北侧屏蔽墙 30cm 处，达到  $0.47\mu\text{Sv/h}$ ，满足小于  $2.5\mu\text{Sv/h}$  的限值要求。

迷道出口处的辐射水平：加速器产生的辐射经防护门屏蔽和迷道散射、衰减后，1# 加速器机房迷道出口 30cm 处辐射剂量率为  $1.42\mu\text{Sv/h}$ ，2# 加速器迷道出口 30cm 处辐射剂量率为  $0.86\mu\text{Sv/h}$ ，3#、4# 加速器迷道出口 30cm 处辐射剂量率分别为  $0.30\mu\text{Sv/h}$  和  $0.41\mu\text{Sv/h}$ ，均低于  $2.5\mu\text{Sv/h}$ 。

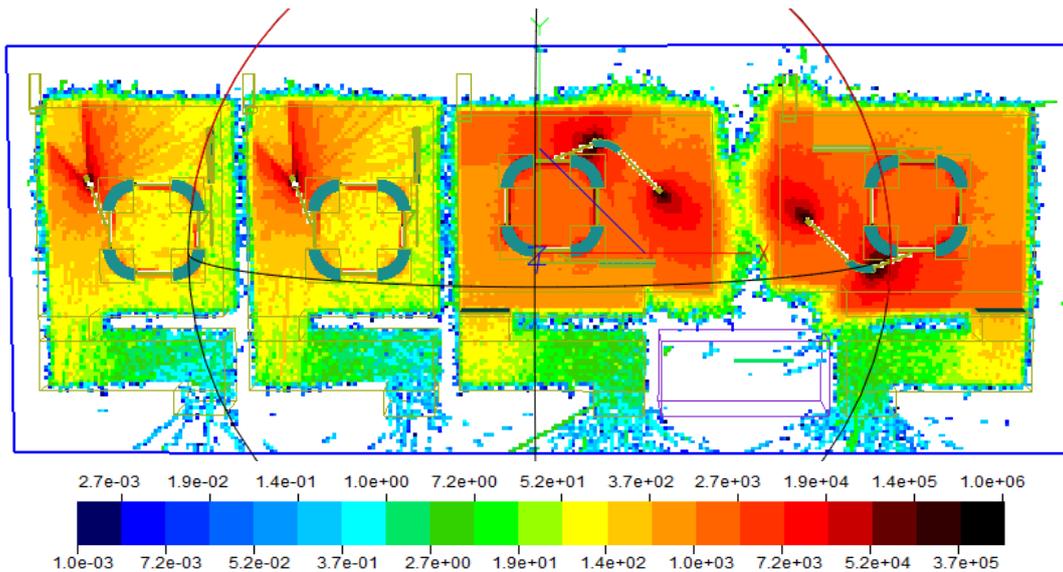


图 5-4 1#—4#号加速器运行时周围剂量场分布图（单位： $\mu\text{Sv/h}$ ）

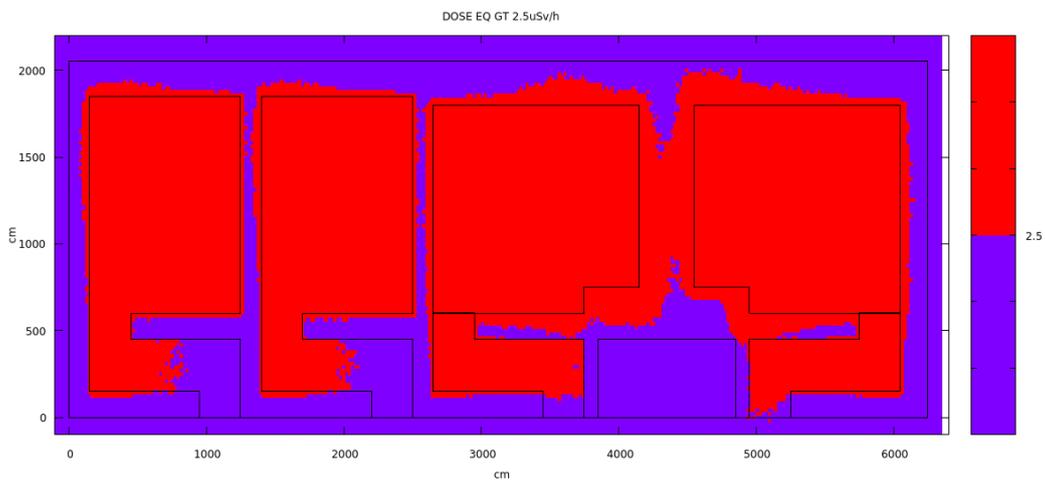


图 5-5 1#—4#号加速器运行时辐射剂量率大于 $2.5\mu\text{Sv/h}$ 的区域(单位： $\mu\text{Sv/h}$ )

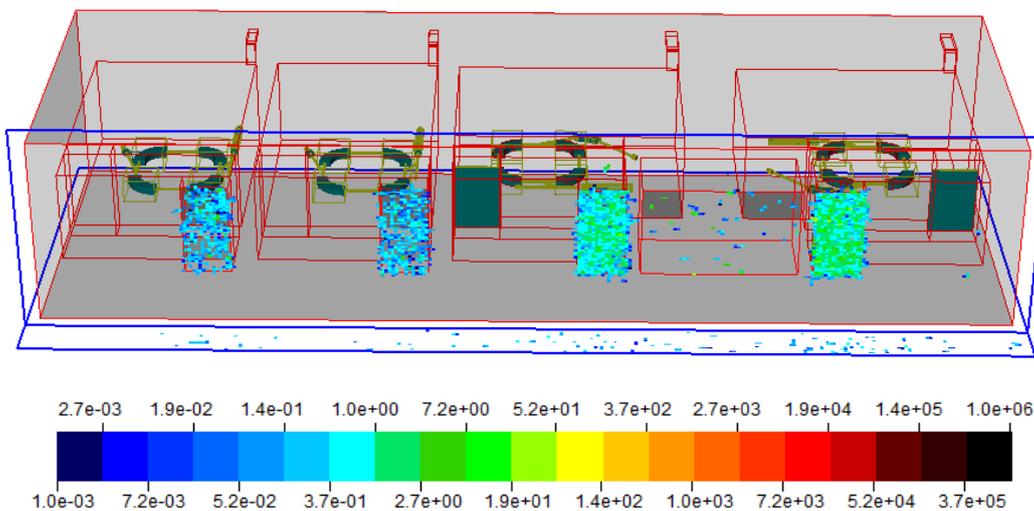


图 5-6 加速器机房迷道口辐射剂量率分布场（单位： $\mu\text{Sv/h}$ ）

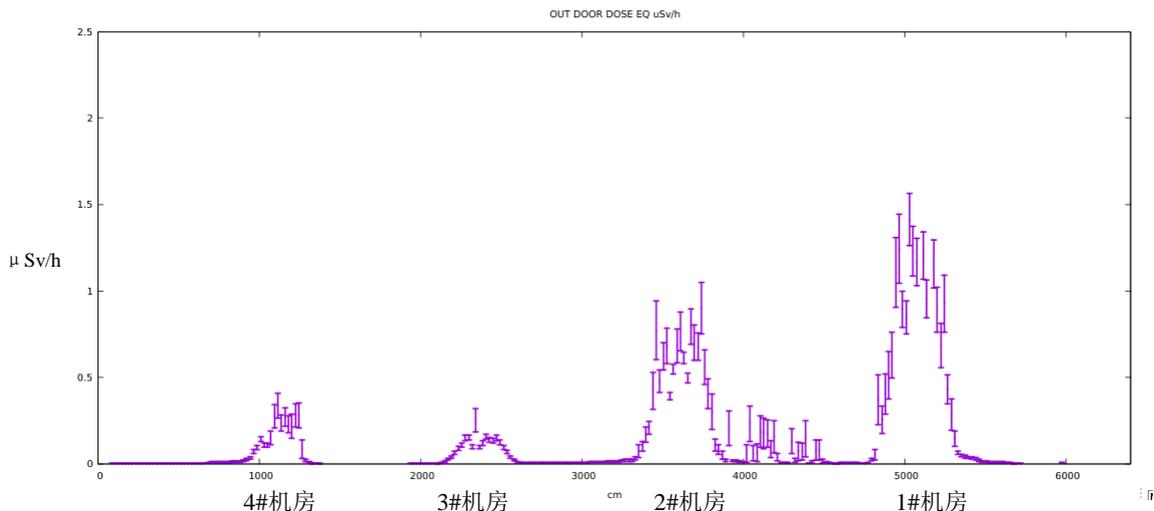


图 5-7 加速器机房迷道口外 30cm 辐射剂量率（单位：μSv/h）

表 5-1 1#~4# 加速器在最大工况同时运行机房周围辐射剂量率

序号	计算区域	点位环境描述	最大辐射剂量率 μSv/h
1	1#机房北侧屏蔽墙外 30cm	厂房内走廊，北为高压配电房	0.47
2	2#机房北侧屏蔽墙外 30cm	厂房内走廊，北为电源室	0.21
3	3#机房北侧屏蔽墙外 30cm	厂房内走廊，北为冷水机房	<0.01
4	4#机房北侧屏蔽墙外 30cm	厂房内走廊，北为活化水静置区	<0.01
5	4#机房西侧屏蔽墙外 30cm	质子厂房内包装区域	0.22
6	1#、2#机房南侧配电室	质子厂房机房配电室	0.27
7	1#机房南侧屏蔽墙外 30cm	质子厂房运输走廊	<0.01
8	1#机房东侧屏蔽墙外 30cm	质子厂房来料/退货检验区	0.16
9	1#加速器机房楼顶	质子厂房楼顶（室外）	<0.01
10	二楼办公区	质子厂房研发实验室	<0.01
11	4#机房迷道口外 30cm	质子厂房内运输走廊	1.42
12	3#机房迷道口外 30cm	质子厂房内运输走廊	0.86
13	2#机房迷道口外 30cm	质子厂房内运输走廊	0.30
14	1#机房迷道口外 30cm	质子厂房内运输走廊	0.41
15	1#机房迷道口外 3m 处	真空设备调试间	0.35
16	2#机房迷道口外 3m 处	机房调试操作室	0.12
17	底部屏蔽体 30cm	土壤	<0.01

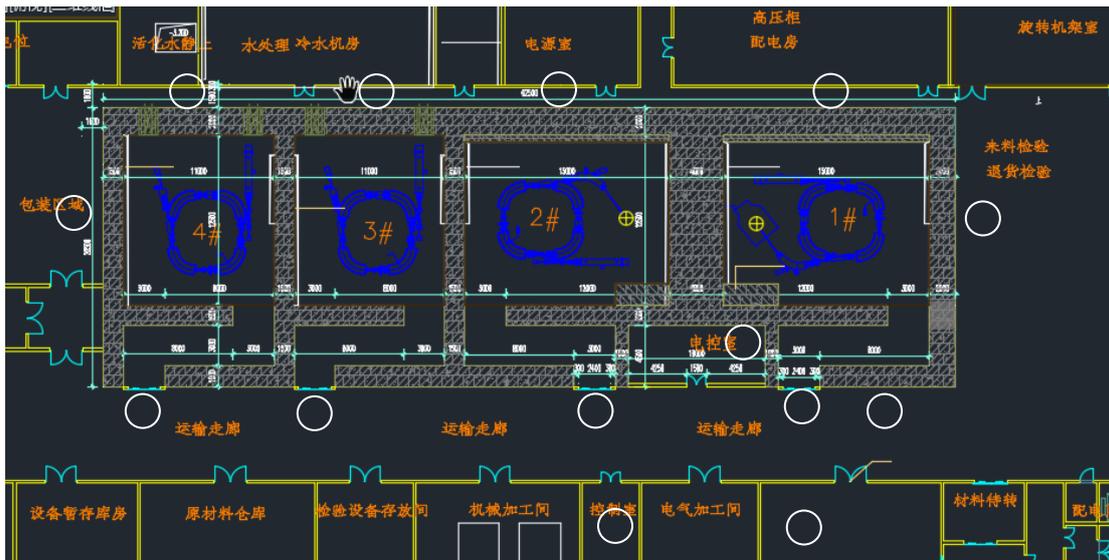


图 5-8 辐射剂量率计算点位分布图（平面图）

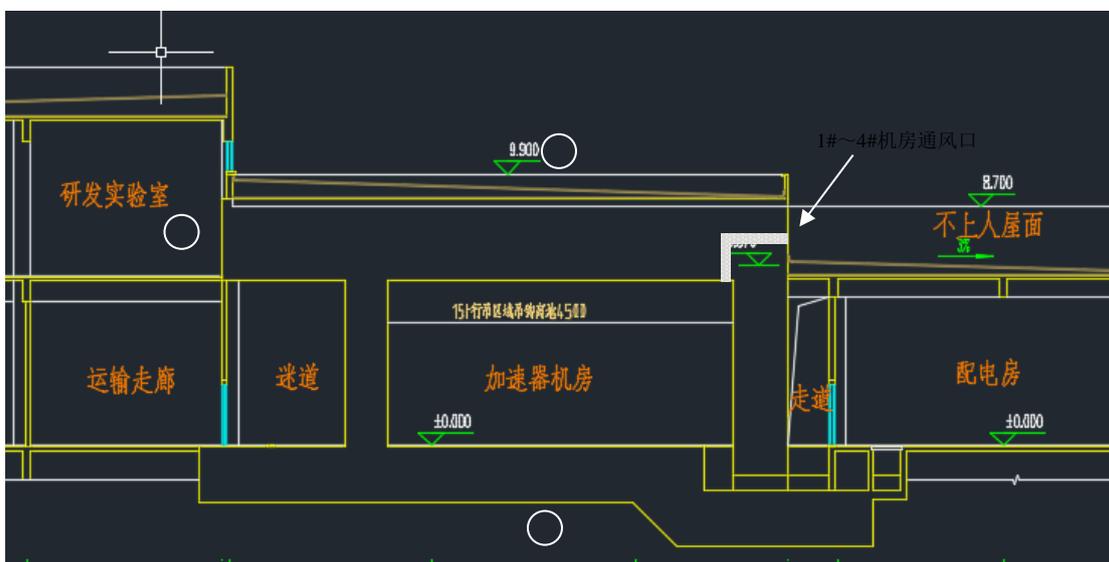


图 5-9 辐射剂量率计算点位分布图（剖面图）

### 5.2.2.2 单台加速器运行时周围辐射剂量率

#### 5.2.2.2.1 计算模型

由于本项目 4 个加速器机房相邻（互为共墙），为了评价加速器运行时对相邻机房的影响，依次对 1#、3#加速器和 2#、4#加速器单独运行时的周围辐射水平进行计算，以评价人员进入相邻机房时的影响。

加速器机房计算模型见图 5-1~5-3。各加速器均在最大工况下运行，例如 1#加速器机房加速质子能量为 230MeV，束流强度为 1.25E+10PPS（即 2nA）；3#加速器机房加速质子能量为 70MeV，束流强度 1.25E+10PPS（即 2nA）。2#和

4#加速器开机时工况相同。

### 5.2.2.2.2 计算结果和评价

1#、3#加速器运行时机房周围辐射剂量率分布见图 5-10，辐射剂量率大于 2.5 $\mu$ Sv/h 的区域见图 5-11。

2#、4#加速器机房内加速器运行时周围辐射剂量率分布见图 5-12，辐射剂量率大于 2.5 $\mu$ Sv/h 的区域见图 5-13。

表 5-2 给出了各加速器运行时相邻机房内屏蔽墙外 30cm 处的辐射剂量率最大值，图 5-14 为各机房辐射剂量率最大值所在的位置区域示意图。

由计算结果可知，各加速器机房内加速器运行时，相邻机房内共墙的屏蔽体外 30cm 处最大剂量率为 0.30 $\mu$ Sv/h，小于 2.5 $\mu$ Sv/h 的剂量率限值。

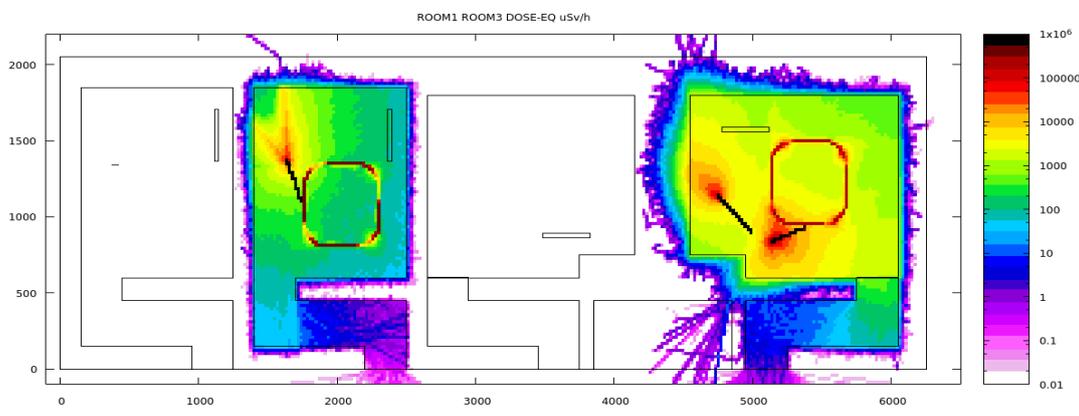


图 5-10 1#、3#机房加速器运行时的周围辐射剂量场分布图(单位： $\mu$ Sv/h)



图 5-11 1#、3#机房运行时辐射剂量率大于 2.5 $\mu$ Sv/h 的区域(单位： $\mu$ Sv/h)

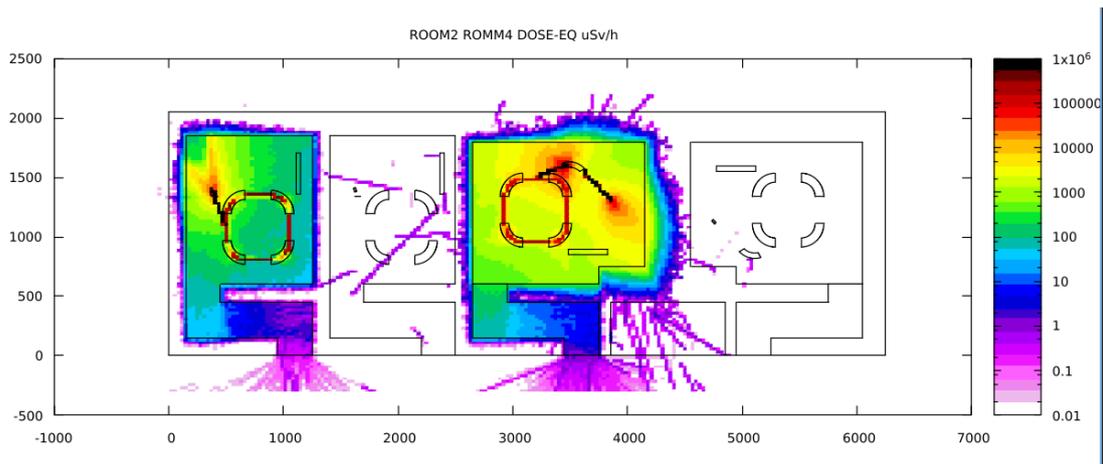


图 5-12 2#、4#机房加速器运行时的周围辐射剂量场分布图(单位:  $\mu\text{Sv/h}$ )



图 5-13 2#、4#机房运行时辐射剂量率大于  $2.5\mu\text{Sv/h}$  的区域(单位:  $\mu\text{Sv/h}$ )

表 5-2 加速器运行时相邻机房内的辐射剂量率计算结果表

序号	计算区域	场所环境	最大辐射剂量率, $\mu\text{Sv/h}$
1	1#加速器机房西侧屏蔽墙外 30cm	2#加速器机房内	0.16
2	3#加速器机房西侧屏蔽墙外 30cm	4#加速器机房内	0.22
3	3#加速器机房东侧屏蔽墙外 30cm	2#加速器机房内	<0.01
4	2#加速器机房西侧屏蔽墙外 30cm	3#加速器机房内	0.30
5	2#加速器机房东侧屏蔽墙外 30cm	1#加速器机房内	0.14
6	4#加速器机房东侧屏蔽墙外 30cm	3#加速器机房内	<0.01



图 5-14 相邻加速器机房辐射剂量率计算点位图示意图

### 5.2.2.3 通风口、地漏孔、电缆管线穿墙屏蔽计算

本项目每个加速器调试机房设置有 2 个通风口，分别是新风送风口和排风吸风口。各机房 2 个通风口均位于机房北侧墙壁左右两端，通过机房顶部风管进出，详细位置见图 5-15。通风管道沿着北侧屏蔽上升至屋顶，在顶部墙体的中间位置转向 90° 并向北侧穿过屏蔽墙，通风管道在顶部屏蔽体内形成直角转弯。4 个机房均采用相同的设计方法，管道路径见图 5-16。其中 1#、2#加速器机房内的通风管道尺寸为 80cm×32cm，3#、4#加速器机房内通风管道尺寸为 63cm×32cm。

各加速器机房内设置了地漏管道，用于排除加速器调试机房内意外产生的漏水或消防水。地漏管道布置和穿墙设计见图 5-17。共 6 处地漏管道穿过屏蔽墙，穿墙区域均采用几字型设计，以减小在屏蔽墙外的辐射泄漏。地漏管道为直径 10cm 的聚乙烯管。为了方便描述，在图 5-17 中依次标记了管道穿墙处的序号为 1 号~6 号。各处几字型转角计算参数详见表 5-3。

加速器机房电缆均从加速器机房的入口迷道顶部进入机房，未对加速器机房屏蔽体造成破坏。

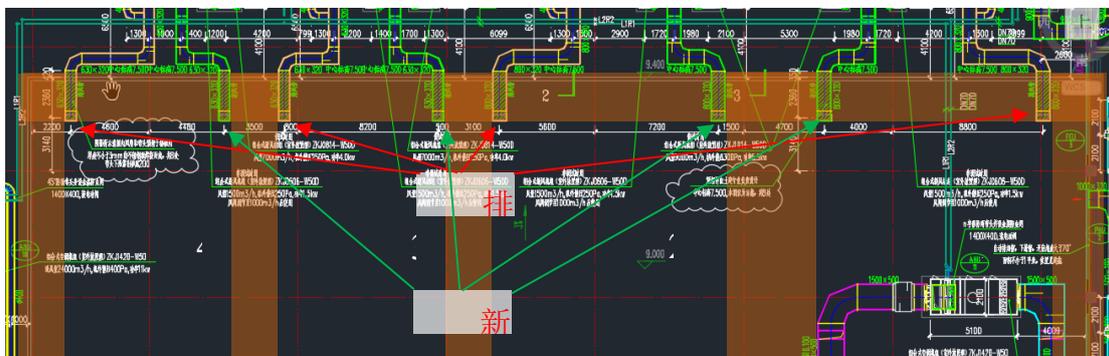


图 5-15 通风管道布置图平面图

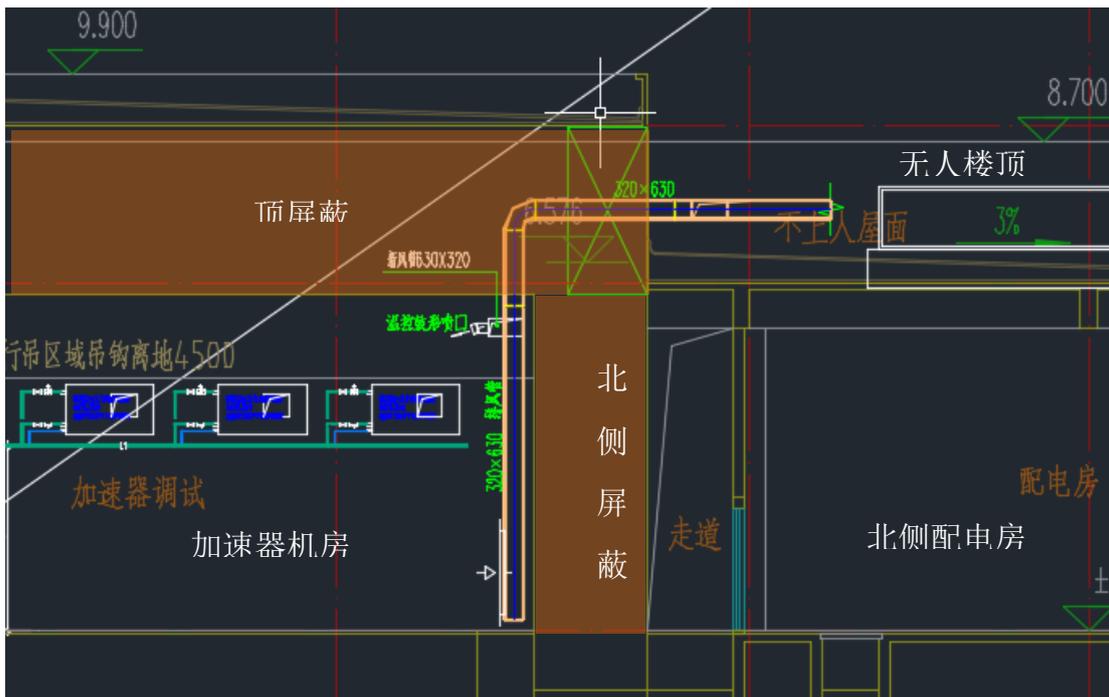


图 5-16 通风管道布置图剖面图



图 5-17 地漏管道穿墙设计图

通风管道、地漏管道相对加速器机房尺寸较小，不易通过 FLUKA 直接进行精确计算。为此，我们首先通过 FLUKA 计算出各加速器机房在最大运行工况下，各通风管道和地漏管道入口所在区域的辐射剂量率。然后，根据 NCRP144 号报告的计算方法进行泄漏辐射值计算。

国际原子能机构 NCRP144 号报告给出了对于穿墙迷宫（转角）外的剂量衰减和迷宫（散射）截面以及相关的长度参数，在有多段迷宫（转角）时，各段迷宫外的剂量率可采用下式进行计算：

$$H(r_i) = \left( \frac{e^{-r_i/0.45} + 0.022A_i^{1.3} e^{-r_i/2.35}}{1 + 0.022A_i^{1.3}} \right) H_{oi}$$

式中：

$r_i$ —第  $i$  段落的迷道长度，m；

$A^i$ —第  $i$  段的迷道截面积， $m^2$ ；

$H_{oi}$ —第  $i$  段迷道入口处辐射剂量率， $\mu Sv/h$ ；

$H(r_i)$ —第  $i$  段迷道出口处辐射剂量率， $\mu Sv/h$ 。

加速器机房通风管道和地漏管道外辐射剂量率计算结果见表 5-3。表中可见，加速器机房通风口处最大辐射剂量率为  $0.41\mu Sv/h$ ，位于 1#机房新风口位置；地漏管道在墙外辐射剂量率最大为  $1.98\mu Sv/h$ ，位于图 5-17 中的 2 号位置。综上所述，加速器排风口和地漏口等穿过加速器机房屏蔽体的管道出口处辐射剂量率均小于  $2.5\mu Sv/h$ ，满足限值要求。

表 5-3 通风管道和地漏管道设计参数及辐射屏蔽计算结果

管道类型	机房内入口处剂量率, $\mu Sv/h$	管道截面积, $m^2$	第一段迷道长度, m	第一段迷道出口处剂量率, $\mu Sv/h$	第二段迷道长度, m	第二段迷道出口处剂量率, $\mu Sv/h$	第三段迷道长度, m	第三段迷道出口处剂量率, $\mu Sv/h$
1#机房新风管道	1133	0.256	1.50	42.51	2.16	0.41	—	—
1#机房排风管道	573	0.256	1.50	21.51	2.16	0.21	—	—
2#机房新风管道	733	0.256	1.50	27.51	2.16	0.27	—	—
2#机房排风管道	800	0.256	1.50	30.01	2.16	0.29	—	—
3#机房新风管道	60	0.2016	1.50	2.22	2.16	0.02	—	—
3#机房排风管道	667	0.2016	1.50	24.68	2.16	0.23	—	—
4#机房新风管道	60	0.2016	1.50	2.22	2.16	0.02	—	—
4#机房排风管道	667	0.2016	1.50	24.68	2.16	0.23	—	—
1号机房地漏管道	1400	0.00785	2.00	16.46	1.20	1.14	2.00	0.01
2号机房地漏管道	800	0.00785	0.75	151.12	1.20	10.50	0.75	1.98
3号机房地漏管道	667	0.00785	0.75	125.93	1.20	8.75	0.75	1.65
4号机房地漏管道	733	0.00785	1.00	79.49	1.20	5.52	1.00	0.60

管道类型	机房内入口处剂量率, uSv/h	管道截面积, m <sup>2</sup>	第一段迷道长度, m	第一段迷道出口处剂量率, uSv/h	第二段迷道长度, m	第二段迷道出口处剂量率, uSv/h	第三段迷道长度, m	第三段迷道出口处剂量率, uSv/h
5号机房地漏管道	1000	0.00785	1.00	108.39	1.2	7.53	1.00	0.82
6号机房地漏管道	547	0.00785	0.75	103.26	1.2	7.18	0.75	1.36

注：表中对于通风管道，“第二段迷道出口”即为通风管道出口；对于地漏管道，“第三段迷道出口”为管道出口。

## 5.2.3 人员受照剂量

### 5.2.3.1 瞬发辐射

根据加速器运行时周围辐射剂量率的计算结果，考虑辐射工作人员年工作时间为 1200h 以及人员居留因子，职业人员和公众年受照剂量计算结果见表 5-4 和表 5-5。

由计算结果可知，辐射工作人员年受照有效剂量最大值为 0.426mSv/a。辐射工作人员和公众年受照剂量均小于本项目剂量管理目标值（即职业人员年有效剂量不超过 5mSv/a，公众年有效剂量不超过 0.1mSv/a）。

表 5-4 辐射工作人员年受照剂量估算

序号	计算区域	场所环境	居留因子	最大辐射剂量率 uSv/h	最大年剂量 mSv
1	1#机房北侧	室内走廊/高压配电房	1/4	0.47	0.141
2	2#机房北侧	室内走廊/电源室	1/4	0.21	0.063
3	3#机房北侧	室内走廊/冷水机房	1/4	0.01	0.003
4	4#机房北侧	室内走廊/活化水静置区	1/4	0.01	0.003
5	加速器机房西侧	包装区域（成品车间）	1	0.22	0.066
6	加速器机房南侧	运输走廊	1/4	0.16	0.048
7	配件间内	配件间	1/16	0.27	0.020
8	加速器机房东侧	来料/退货检验区	1/4	0.16	0.048
9	加速器机房楼顶	室外屋顶	1/16	0.01	0.001
10	二楼办公室	研发办公区	1	0.01	0.012
11	1号机房迷道门口	室内走廊	1/4	1.42	0.426
12	2号机房迷道门口	室内走廊	1/4	0.86	0.258

序号	计算区域	场所环境	居留因子	最大辐射剂量率 uSv/h	最大年剂量 mSv
13	3号机房迷道门口	室内走廊	1/4	0.30	090
14	4号机房迷道门口	室内走廊	1/4	0.41	0.123
15	1#机房迷道外	真空设备调试间	1	0.35	0.420
16	2#机房迷道外	控制室	1	0.12	0.144
17	机房二楼通风口	机房楼顶	1/16	0.14	0.010
18	3#加速器机房西侧	1号加速器机房	1/4	0.22	0.066
19	1#加速器机房西侧	2号加速器机房	1/4	0.16	0.048
20	2#加速器机房西侧	3号加速器机房	1/4	0.30	0.090
21	2#加速器机房东侧	4号加速器机房	1/4	0.14	0.042

表 5-5 公众年受照剂量估算

计算区域	场所环境	居留因子	最大辐射剂量率 uSv/h	*最大年剂量 mSv
厂房北侧	厂内研发楼	1	<0.01	0.012
厂房南侧	厂外企业	1	<0.01	0.012
厂房西侧	厂内光子厂房	1	<0.01	0.012
机房东侧	厂内辅助厂房	1	<0.01	0.012

\* 公众年剂量按照辐射剂量率和年受照时间 1200h 估算。

### 5.2.3.2 缓发辐射

加速器停止运行后，由于束流阻挡器、加速器部件活化等导致在短时间内加速器机房内有较强的辐射场，由于大部分活化核素半衰期极短，活化产生的辐射场在短期内便可降低到较低水平。图 5-15 给出了加速器最大工况条件下连续运行 2min~1h 后，不同的停机冷却时间所对应的加速器机房内的辐射场。

根据加速器调试要求，调试人员要求在加速器停止运行 2min 后允许进入加速器机房内进行相关的调试工作。缓发辐射剂量率高的区域主要集中在束流的主要损失区域，即加速器束流引出点和终端靶点。为了减小工作人员的受照剂量，需在该区域一定范围内设置隔离区。

根据加速器停止运行后 2min 的辐射剂量场分布图，设置的隔离区需至少包

络辐射剂量率大于  $2.5\mu\text{Sv/h}$  的区域。根据计算结果，1#、2#加速器机房，在终端靶点处，隔离区距离靶点处应大于  $2.5\text{m}$ ，1#、2#加速器机房的束流引出点和3#、4#加速器机房的终端靶位置，隔离区距离应大于  $1\text{m}$ 。具体设置可参考图 5-17 中的红色区域。隔离区可以通过开机前在机房内设置隔离栅栏等措施实现。

缓发辐射场随时间衰减较快，图 5-15 给出了加速器停运后 2min、10min 和 1h 的辐射剂量率。可以看到当加速器停机后达到 1h，除了束流引出点和终端靶等隔离区以外，机房内辐射剂量率均下降至  $2.5\mu\text{Sv/h}$  水平以下。调试人员进入机房内，尽量等待该区域内辐射剂量水平衰减到  $2.5\mu\text{Sv/h}$  以下，再进入机房更为安全。若有必要提前进入，则应遵守 2min 的等待时间规定，并尽量远离束流引出点和终端靶位置。

根据建设单位对调试工序的估计，辐射工作人员进入加速器机房内的调试时间最多不超过 300h/a。按照工作场所  $2.5\mu\text{Sv/h}$  的辐射剂量率水平，且不考虑辐射剂量率衰减，则工作人员的年受照剂量估算结果见表 5-6。

**表 5-6 工作人员缓发辐射年受照剂量**

加速机房	停机 2min 后调试区域最大辐射剂量率， $\mu\text{Sv/h}$	年最大居留时间，h	工作人员年受照剂量，mSv
1 号加速器机房	2.5	300	0.75
2 号加速器机房	2.5	300	0.75
3 号加速器机房	2.5	300	0.75
4 号加速器机房	2.5	300	0.75

由表 5-6 可知，因调试进入加速器机房，使得辐射工作人员受到的剂量为  $0.75\text{mSv/a}$ 。

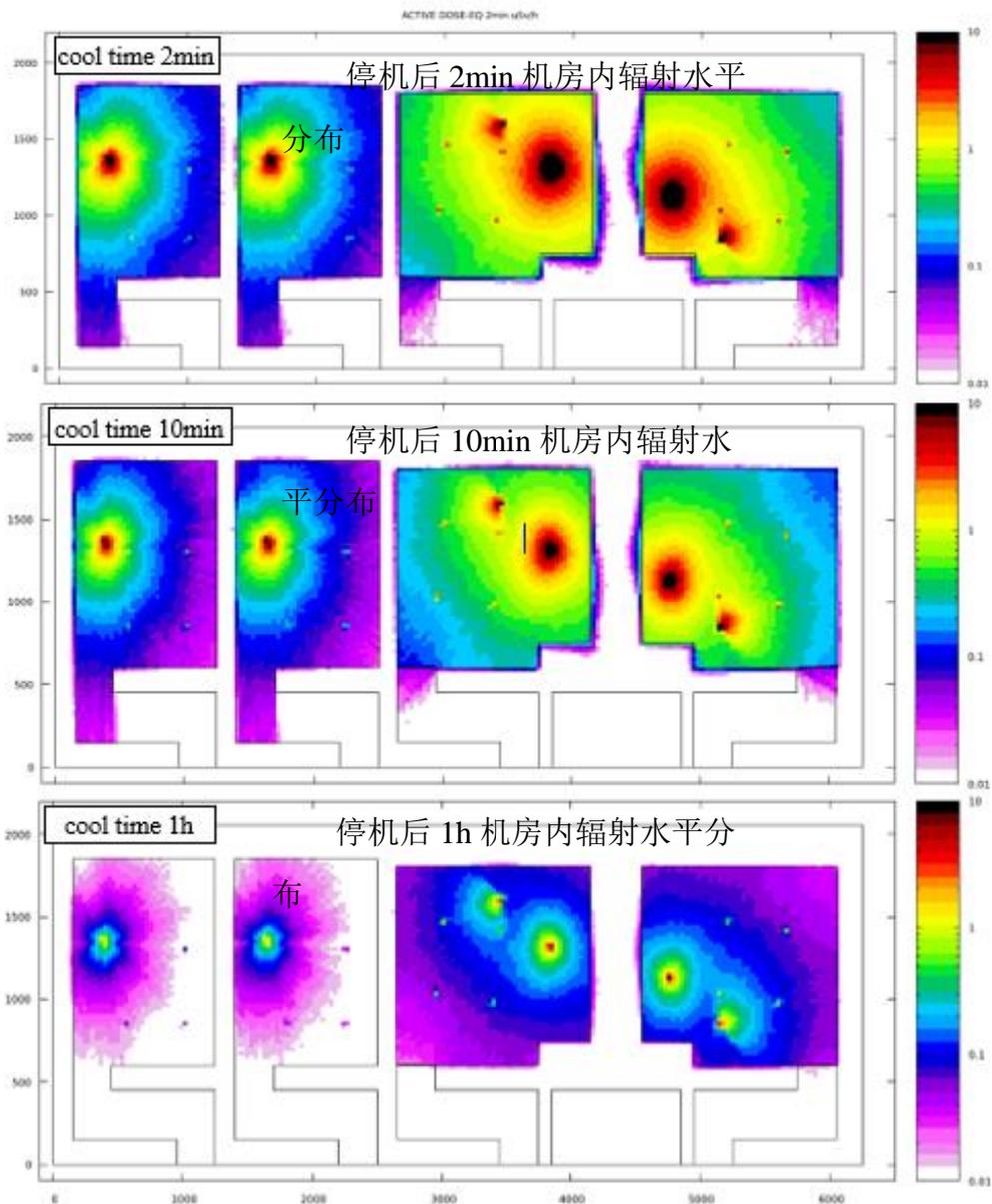


图 5-15 机房停机后缓发辐射场随时间的衰减情况

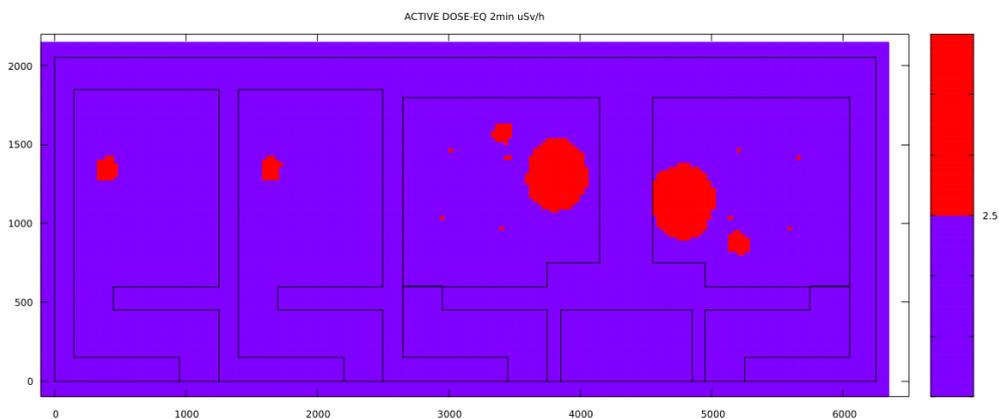


图 5-16 加速器停机后 2 分钟机房内缓发辐射场大于 2.5 $\mu$ Sv/h 的区域



图 5-17 隔离带设置的位置（图中红虚线区域）

### 5.2.3.3 感生放射性

#### 5.2.3.3.1 空气活化

加速器运行时，加速器机房内的空气被活化为放射性气体，通过排风系统排放到大气环境中，对工作人员和周围公众受照剂量造成贡献。辐射影响主要有空气浸没外照射和吸入内照射两类。计算公式如下，结合 3.3 节给出的空气活化核素活度浓度，以排风口处的核素活度浓度（见表 3.6）对辐射工作人员和周围公众年受照剂量进行保守计算。

##### 1) 空气浸没外照射剂量计算

空气浸没外照射剂量计算公式为：

$$D_{EA} = 600 \times \left( \sum_i x_i \cdot DF_{EAi} \cdot F \right)$$

式中：

$D_{EA}$ —计算点处人员浸没于污染的半无限烟云中受到的有效剂量，Sv/a；

$x_i$ —计算点处地面空气中放射性核素 i 的浓度，Bq/m<sup>3</sup>；

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

$F$ —建筑物的屏蔽因子，无量纲；

600—加速器年出束时间，h/a。

##### 2) 吸入内照射剂量计算

空气吸入内照射剂量计算公式为：

$$D_{EI} = 600 \times \left( \sum_i x_i \cdot DF_{EIi} \cdot B_r \right)$$

式中：

$D_{EI}$ —计算点处人员吸入污染空气造成的有效剂量，Sv/a；

$x_i$ —计算点处地面空气中放射性核素 i 的浓度，Bq/m<sup>3</sup>；

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

$B_r$ —人的呼吸率 m<sup>3</sup>/h，；

600—加速器年出束时间，h/a。

计算结果见表 5-7。质子加速器对空气的活化，空气浸没外照射要远高于吸入内照射。1#、2#加速器机房运行时空气浸没外照射年剂量贡献为 0.163 mSv/a，3#、4#加速器机房为 0.078 mSv/a。1#、2#加速器机房运行吸入内照射年剂量贡献值为 0.003 mSv/a，3#、4#加速器机房为 0.002mSv/a。职业人员受到活化空气所致的受照剂量总和为 0.492 mSv/a。

活化空气对公众的影响，根据 FLUKA 计算的烟囱口处活化核素活度浓度，采用《环境影响评价技术导则 大气环境》（HJ2.2-2008）推荐的 Screen3 模式进行计算。公众所在区域距离烟囱最近的居留场所为质子厂房西侧的光子厂房，该厂房边界距离质子厂房边界约 12m（位置分布见图 5-18）。按照衰减距离 12m 进行保守计算，且不考虑核素衰变。由表 5-7 可知，距离质子厂房最近的公众因吸入内照射造成的年剂量为 0.0004mSv/a，叠加空气浸没外照射剂量 0.00169 mSv/a，剂量总和为 0.0021 mSv/a，远小于本项目剂量管理目标值 0.1mSv/a。

由此推断，厂区内其它辅助厂房、研发楼内公众，以及厂界外公众的影响将更小，处于可忽略水平。

**表 5-7 活化空气所致工作人员或公众年受受照剂量计算结果**

加速器机房		空气浸没外照射 mSv/a	吸入内照射 mSv/a	总和 mSv/a
职业人员	1 号加速器机房	0.163	0.003	0.492
	2 号加速器机房	0.163	0.003	
	3 号加速器机房	0.078	0.002	
	4 号加速器机房	0.078	0.002	

加速器机房		空气浸没外照射 mSv/a	吸入内照射 mSv/a	总和 mSv/a
公众	西侧光子厂房	0.00169	0.0004	0.002



图 5-18 最近公众居留场所分布示意图

### 5.2.3.3.2 冷却水活化

加速器机房内冷却水活化核素活度浓度计算结果见表 3-7。计算结果，冷却水中各核素活度浓度远小于 GB18871 中相应核素的豁免水平。

建设单位对循环冷却水计划每年更换一次，每次排放前请有资质的单位对水质进行取样检测，满足《污水综合排放标准》GB8978-1996 中总  $\alpha$  小于 1Bq/L、总  $\beta$  小于 10 Bq/L 的限值后方可排放。

### 5.2.3.3.3 加速器部件活化

每台加速器的部件在机房内调试时间不长，调试合格后被拆卸、包装入库，用于后期销售，期间不再使用，因此加速器用于销售的部件活化问题可不考虑。

加速器机房内的束流阻挡器，属于非销售部件，每年需要更换一次，更换后在放射性废物柜内放置 1 年或更长时间，请有资质单位监测后再处置。经检测达到免管活度浓度后，按普通废物处理，无法达到免管活度浓度的固体废物不外排，送城市废物库处置。

#### 5.2.3.3.4 机房周围土壤和地下水

加速器机房周围辐射剂量率见图 5-19，其中 A 为辐射剂量率平面分布图，图 B、C 为辐射剂量率在剖面①、②处的垂直分布图。

本项目加速器机房底部混凝土厚度约为 3.6m，从 B、C 图中可以看到，屏蔽墙地面 3.6m 外的辐射剂量率已远小于 0.001 $\mu$ Sv/h。因此，加速器的运行不会对土壤或地下水造成影响，可不考虑加速器运行对土壤或地下水造成的活化影响。

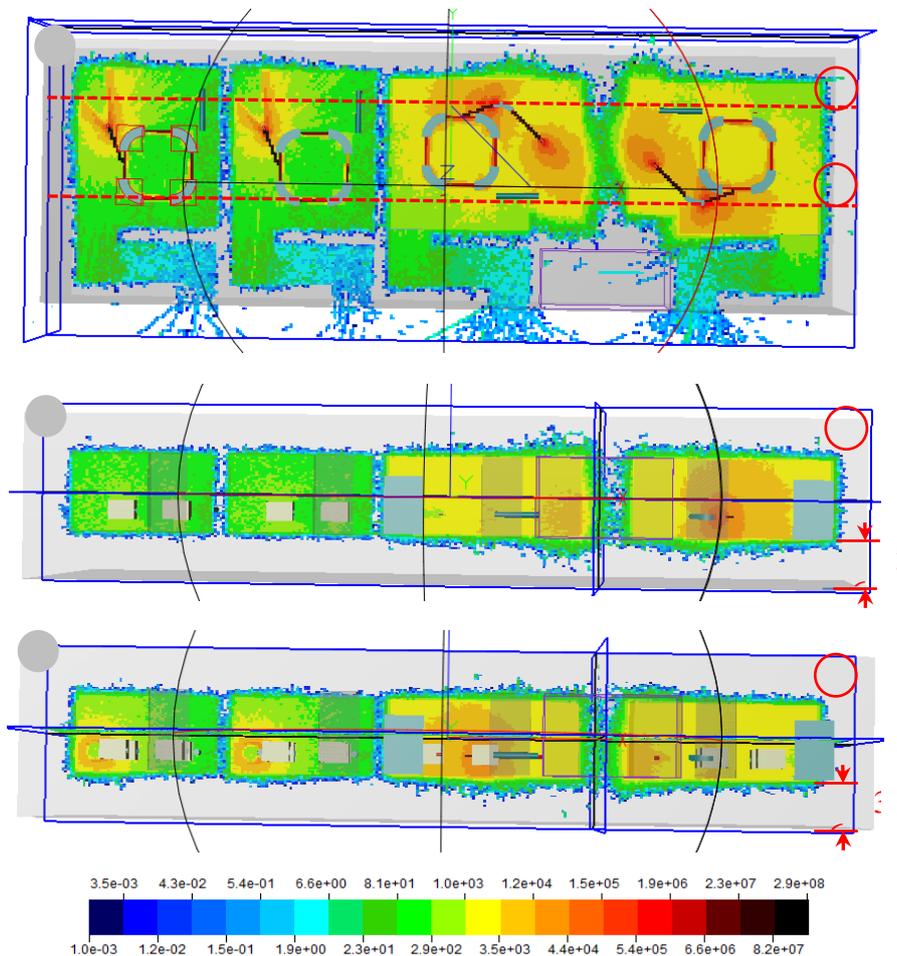


图 5-19 加速器运行时剂量率分布图（A 为平面图，B、C 为剖面图），  
单位  $\mu$ Sv/h

### 5.2.3.4 辐射工作人员和公众年受照剂量

企业辐射工作人员主要分为两类：一类负责在本项目建设单位加速器机房内进行调试；另一部分负责加速销售后（一般是医院）现场安装和调试。

对于在企业加速器机房调式的职业人员，其年受照时间不超过 1200h（一般参与调试 2 台）。每台加速器年出束（调试）时间最不超过 600h。职业人员受到的辐射剂量贡献主要来源于加速器运行时的瞬发辐射、加速停止运行后进入加速器机房内受到的缓发辐射照射以及活化空气所致的浸没外照射和吸入照射，职业人员各途径累积照射剂量见表 5-8。

对于加速器售后现场安装和调试，与企业内加速器调式的工序、操作步骤和调试时间一致，辐射工作人员受到的辐射照射来源相同，即瞬发辐射、缓发辐射和空气浸没外照射和吸入内照射。该类工作人员年工作时间同样不超过 1200h。因此，厂外辐射工作人员和厂内辐射工作人员年受照剂量应在同一水平。考虑到不同客户加速器机房屏蔽参数和构造的差异，可能导致现场按照调试人员年受照剂量有所差异，因此对于现场安装和调式人员受到的瞬发辐射剂量率保守按  $2.5\mu\text{Sv/h}$  进行计算。计算结果列于表 5-8。由计算结果可知，由于这一保守估算，现场安装和调式的辐射工作人员年受照剂量为  $4.242\text{mSv/a}$ ，但仍小于本项目职业人员年剂量约束值  $5\text{mSv/a}$ 。

由表 5-5 可知，厂内公众所在区域外照射辐射剂量率小于  $0.01\mu\text{Sv/h}$ ，厂外公众最近距离质子厂房在 12m 以外，附加剂量不超过  $0.012\text{mSv/a}$ 。活化空气经过一定距离的稀释扩散和物理衰减，对于厂内公众的影响已非常小，通过推荐模式 Screen3 计算的公众年受照剂量为  $0.002\text{mSv/a}$ ，厂外公众则影响更小。

综上所述，辐射工作人员（包括质子厂房辐射工作人员和售后现场按照调试人员）和公众年受照剂量均满足本项目剂量率约束值的要求，即辐射工作人员小于  $5\text{mSv/a}$ ，公众小于  $0.1\text{mSv/a}$ 。本项目运行对厂外公众没有辐射影响。

表 5-8 辐射工作人员和公众年最大受照有效剂量统计结果

人员种类	受照剂量来源	年受照有效剂量, mSv/a	年受照有效剂量总和 mSv/a	剂量约束值, mSv/a
质子厂房 辐射工作	瞬发辐射致年受照剂量	0.426	1.668	5
	缓发辐射致年受照剂量	0.750		

人员	活化空气浸没外照射、吸入照射	0.492		
现场安装和调试工作人员	瞬发辐射致年受照剂量	3.00	4.242	5
	缓发辐射致年受照剂量	0.750		
	活化空气浸没外照射、吸入照射	0.492		
公众	瞬发辐射致年受照剂量	0.012	0.014	0.1
	活化空气浸没外照射、吸入照射	0.002		

### 5.2.4 电磁辐射

本项目产生电磁影响的系统，在设计上考虑了加速器部件采用金属外壳，可有效屏蔽电磁影响。为确保各系统金属外壳屏蔽电磁影响，设计辐射采取措施有：

（1）功率源机柜、插箱在结构上不仅要有承载能力，而且要有一定的电磁屏蔽作用，尽可能消除大的缝隙；

（2）功率源机柜和机箱内设备（模块）应进行合理布局，以减少设备之间空间上的耦合感应与辐射干扰影响；

（3）功率源与腔体通过同轴馈管连接，腔体被屏蔽在微细金属外壳内部，不会产生电磁辐射外漏。

### 5.2.5 非放射性污染

#### （1）噪声

本项目质子厂房的噪声源主要是位于质子厂房顶部的4座冷却塔，企业承诺冷却塔选型噪声源（1m处）小于75dB。噪声距离衰减采用点声源衰减公式：

$$\Delta L = -16 \lg(r_1/r_0)$$

式中： $r_0$ —参考位置距声源的距离，m；

$r_1$ —预测点距声源的距离，m。

根据平面布置图，质子厂房距离南侧厂界约25m，冷却塔距离南厂界约40m。质子厂房距离东、西厂界和北厂界较远（120m以外），冷却塔噪声对东、西厂界及北厂界基本无贡献，因此，本报告仅对南厂界进行噪声预测，结果见如5-9：

表 5-9 南厂界噪声预测情况

厂界	噪声源	数量	噪声值 dB(A)	距预测点 距离 m	距离衰减 值 dB(A)	噪声贡献 值 dB(A)
南厂界	室外屋顶 冷却塔	4	75	40	25.6	55.4

由上表可见，质子厂房主要噪声源经距离衰减后厂界噪声贡献值为 55.4dB(A)，能够达到《工业企业厂界环境噪声排放标准》(GB12348-2008)表 1 中厂界外声环境功能区类别 2 类区标准：昼间 $\leq 60$ dB(A)。由于质子厂房工作时间均为昼间，夜间不工作，因此，本项目夜间厂界噪声也能达标。厂界周围 100m 范围内没有居民点，不会产生噪声扰民的情况。

## (2) 废气

经源项估算，加速器运行时机房内臭氧最大浓度为  $3.95 \times 10^{-8} \text{mg/m}^3$ ，废气经通风管道高出质子厂房屋顶排放大气环境。加速器运行时机房内保持通风，臭氧排放浓度远低于《环境空气质量标准》GB3095-1996（2000 年修订）中的一级标准  $0.16 \text{mg/m}^3$ 。

本项目臭氧产生量较小，总排放量不作定量考虑。

## 5.3 事故影响分析

《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》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。

- 特别重大辐射事故：指 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。
- 重大辐射事故：指 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。
- 较大辐射事故：指 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。

- 一般辐射事故：指IV类、V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人员受到超过年剂量限值的照射。

本项目属于 I 类射线装置，根据《射线装置分类公告》，I 类射线装置：事故时短时间照射可以使受到照射的人员产生严重放射性损伤，其安全与防护要求高。

根据本项目设计特点以及环境特征，质子治疗系统在生产、销售、使用的过程中可能发生的辐射事故主要有：

- 1) 人员误入事故；
- 2) 工作人员超剂量照射事故；
- 3) 冷却水泄漏事故。

### 5.3.1 人员误入事故

质子医疗系统在安装调试以及日常维护的过程中（包括建设单位厂区机房和销售后使用单位机房）会产生电离辐射，如果系统运行出束时发生人员误入控制区内的事故，短时间照射可以使受到照射的人员产生严重放射损伤，事故是有可能造成人员伤亡的重大辐射事故后果的。因此，加速器的安全联锁和安全控制系统必须满足独立性、多重性和冗余性的要求，防止该类事故的发生。

预防措施：

质子加速器的安全联锁系统包括门机联锁、光电联锁、剂量联锁、急停开关、钥匙开关、巡检开关、开门开关等，满足纵深防御的设计要求，能够有效防止误入事故的发生。

为了防止各项安全联锁失效，建设单位在每次开机调试前，必须确认上述安全联锁设施的有效性、佩戴监测仪表的有效性。

应急措施：

- （1）一旦发生人员误入事故，就近按下机房内或操作台上的急停开关，立即停止辐射工作，人员通过开门开关打开机房门实现撤离；
- （2）评估人员是否受到超剂量照射；
- （3）查找事故原因，确认安全联锁等各项安全设施是否发生故障。

### 5.3.2 工作人员超剂量照射事故

在加速器机房内由于元器件的活化，会产生较高辐射剂量的区域，而工作人

员在停机后，必要的情况下需进入这些高剂量辐射区域进行维修、维护活动，如果对这些活动不进行一定的干预和控制，可能会发生工作人员超剂量照射事故。

**预防措施：**

建设单位需严格控制工作人员受照剂量，例如规定调试期间设备停机后，进入机房的必要等待时间、与易活化部件保持一定的距离、调试和维护工作给予详细的操作规程和现场指导等措施，尽量避免超剂量照射事故的发生。日常工作人员进入机房内必须配备移动式报警仪，关注进入高辐射区内人员的剂量，并进行记录。

**应急措施：**

(1) 一旦发生工作人员超剂量照射事故，立即停止辐射工作，剂量初步估算后视情况对受照人员送有资质的机构进行医学检查和治疗；

(2) 立即停止加速器运行，查找事故原因，制定防止再次发生该类事故的措施；

(3) 经辐射安全管理组织（机构）评估，并对相关人员进行培训宣贯后，批准加速器运行。

### **5.3.3 冷却水泄漏事故**

水冷系统设置单独的排水系统，用以收集这些区域的事故排水和检修排水，并通过重力自流到衰变水池。因此，发生冷却水泄露事故不会对环境造成污染。

质子医疗系统设有漏水检测与报警系统，对于机房内现场各处的漏水及渗水可以起到预警作用，提醒维护人员及时处理报警点的各种问题，防止由跑冒滴漏形成的大漏水，避免大事故。

**预防措施：**

定期检查水冷系统运行情况，确认漏水检测与报警系统的有效性。

**应急措施：**

- (1) 一旦发生漏水报警，立即关闭加速器；
- (2) 查找漏水点，采取补救措施，防止形成大的漏水事故；
- (3) 及时报告环保部门，对衰变池中的冷却水进行监测；
- (4) 经检测满足国家相关标准后进行排放。

## 6 辐射安全管理

根据《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》，生产、使用和销售 I 类射线装置的单位申请辐射安全许可证，应有专门的辐射安全和防护管理机构或者专职/兼职辐射安全管理人员，并配备必要的防护用品和监测仪器。

本项目运行后，为保障项目工作人员与公众的健康和安全，保护项目所在区域周围环境，结合项目辐射安全与防护工作的实际情况，企业拟设置辐射安全与环境保护管理机构，制定并执行相应的辐射安全规章制度。

### 6.1 机构与人员

拟设置辐射安全管理委员会作为企业辐射安全工作的最高管理机构，主要成员为单位法人代表、质子治疗系统项目分管领导、现场调试队部门负责人等。

辐射安全管理委员会的主要职责是对以下事宜进行调查、协调、审议、建议和决策：

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

拟设置专门的部门负责质子加速器在厂区机房内调试期间、设备在使用单位调试期间的辐射安全管理，其主要职责是：

- 贯彻落实国家有关辐射安全的法律法规及标准，建立辐射安全规章制度；
- 辐射安全系统的运行和维护，辐射安全措施的落实；
- 辐射监测与评价；
- 放射性废物的处置；
- 放射性废物柜的辐射安全管理；
- 辐射工作人员的健康管理；
- 辐射安全教育和培训；

— **参与辐射事故应急处置，以及其他与辐射安全相关的工作。**

质子厂房生产车间、厂外调试队分别设置 1 名专职辐射安全员，厂房内各部门及现场调试小组分别设置 1 名兼职辐射安全员，在部门负责人的领导下，根据规定开展相关工作：

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

为保证辐射安全工作的开展，根据《《注册核安全工程师执业资格关键岗位名录》（第一批）》的相关要求，业主单位将配备必要的辐射安全工作人员，以及至少两名注册核安全工程师，执业范围涵盖核安全综合管理和辐射防护两个专业。

## **6.2 辐射安全管理规章制度**

为保障项目运行辐射安全，保护工作人员、公众和环境，根据项目特点，建设单位拟建立的辐射安全管理规章制度主要包括：

- 《辐射防护和安全保卫制度》，给出辐射防护原则、辐射安全组织体系及职责、剂量管理体系、环境辐射水平控制原则和措施、辐射监测要求和计划、放射性废物的收集和贮存、放射工作人员健康管理、教育和培训等总体要求。
- 《人员岗位职责》，给出质子厂房内各辐射工作岗位、售后使用单位调试岗位的辐射安全岗位职责，明确企业内辐射安全管理委员会中各管理岗位的职责。
- 《加速器运行辐射安全规定》，规定加速器开机、运行、维修和维护等阶段的辐射安全管理要求和实施措施，包括安全联锁、保卫、事故操作等。
- 《放射性废物暂存库安全管理规定》，明确放射性废物暂存库的安全管理要求，包括收储、暂存、出库等方面。

- 《加速器调试操作规程》，规定加速器和各试验终端的操作规定。
- 《加速器检修维护管理规定及操作规程》，规定加速器检修和维护的流程，包含了检修前准备、检修实施、检修后的工作流程和防护要求。
- 《射线装置及放射性物品台账管理规定》，规定对射线装置和放射性物品建立台账，对放射性废物产生量、处理方法、处置去向进行统计、记录。
- 《辐射工作人员培训和授权管理规定》，规定辐射工作人员的岗位要求、培训要求和授权规定等。
- 《辐射环境监测大纲》，明确本项目日常辐射环境监测的目的、项目布点、频次、监测设备要求、质量保证和结果报送等内容，以及含放射性废水排放和固体废物解控和外运时的监测要求。
- 《个人剂量监测管理规定》，明确工作人员个人剂量监测和管理方面的要求。

总体而言，建设单位拟建立的辐射安全管理制度较全面地覆盖辐射防护制度、操作规程、岗位职责、安全保卫、设备台账、维护和检修、人员培训、三废处理等方面，在结合项目特点建立和健全上述辐射安全规章制度的基础上，可以满足法律法规要求，确保本项目运行后的辐射安全管理。业主单位承诺在申请辐射安全许可证前建立和完善相应的辐射安全管理制度并发布生效。

### 6.3 辐射监测

高能粒子加速器在运行过程中，束流损失使粒子与物质相互作用，通过低能、中能核反应以及高能核反应产生中子。由于以上反应机制使得加速器周围的次级辐射具有以下特征：

1) 具有能量大于 20MeV 的中子和光子，高能中子（特别是能量大于 20MeV 的中子）贡献占 50% 以上，产生的中子最高能量可达 230MeV，要求中子探测器的能量响应范围从热中子到 MeV 量级的级联中子。

2) 周围环境中的杂散辐射剂量中主要贡献是中子，其次是  $\gamma$  射线，中子在辐射场中的贡献比  $\gamma$  高一个数量级以上。

3) 加速器调试机房内是一个瞬发中子、光子以及其他粒子构成的混合辐射

场。要求中子、 $\gamma$ 射线探测器具有很强的中子、 $\gamma$ 射线分辨能力，即中子监测仪器对 $\gamma$ 射线不灵敏， $\gamma$ 射线监测仪器对中子不灵敏。

辐射剂量监测系统主要包括环境剂量监测、工作场所剂量监测及个人剂量监测。

### 6.3.1 工作场所剂量监测系统

#### 1、功能和目的

工作场所剂量监测系统的主要功能是测定加速器的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“可合理达到的尽量低（ALARA）”的原则，保证工作人员和公众的安全；验证屏蔽措施的可靠性，防治辐射泄漏造成环境污染。

#### 2、辐射监测系统的设计总体原则

（1）可靠性与稳定性：所有硬件产品的选型要选用成熟稳定的产品，尽可能在一个系统中选用同一品牌的设备，在无人值守和远程配置的情况下，系统要能够长时间稳定可靠工作。所有软件系统均应经过严格的测试和长时间实际运行考核。图像监控系统的运用不应影响被其监视设备的正常运行，系统局部故障不影响整个监控系统的正常工作。

（2）先进性和实用性：为适应后期医院使用和建设要求，系统设计采用图像监控、网络、计算机等最新发展技术，符合视频监控技术的发展方向，同时要考虑系统的总体成本以及实际的地理条件，保证系统设计尽可能地实用。因此，不仅要求设计严密，布局合理，能与新技术、新产品接轨，而且所选择的设备应在实施若干年后，亦能保持其功能完善、齐全、不至于落后。

（3）易用性：用户监控界面均为图形化界面，可方便进行各种日常维护工作，能够方便地进行软件的重新配置、系统的自检与恢复、软件系统的升级和硬件备品备件的更换等工作。

（4）开放性：系统设计充分考虑系统的功能扩充和容量的扩展，可灵活增减或更新各个子系统来满足不同时期的需要。系统用户管理、系统配置和系统管理全部实现数据库配置维护和管理。系统扩充容易，直接扩充前端设备，系统管理员进行系统配置即可。选用的产品和设备须符合工业标准，以便未来系统的扩展和升级。

(5) 实时性：监测系统最基本要求的就是要将被监控对象发生的事件在有限的时间内及时、准确地反映上来，因此实时性与准确性的原则必须贯穿于整个系统设计，要求数据稳定和实时传输。

## 6.3.2 环境监测

### 6.3.2.1 环境剂量率连续监测系统构架和描述

#### 1、辐射监测系统的构架和描述

辐射监测系统主要负责监测质子加速器厂房内辐射工作场所和厂区内环境辐射水平，保障工作人员和公众安全，验证屏蔽措施的可靠性，监控辐射泄漏情况。

系统主要包括三个部分：

- 数据监控中心：数据存储服务器、监控计算机、网络设备等；
- 监测点设备：中子探测器、 $\gamma$  探测器、就地采集单元等；
- 局域网络：采用工业环网，保证监测点设备与数据监控中心的可靠连接。

系统能够对质子厂房及周边进行实时数据监测，并加以控制。

#### 4、辐射监测点位布设

加速器工作场所辐射剂量监测中，探测器选择对脉冲辐射场性能良好，能作为实时监测，同时稳定可靠，成本较低的是包有慢化体的 BF3 正比计数管（He-3 管）和电离室。

点位布局见图 6-1，在控制区（调试机房内）、监督区（质子厂房）和公众居留区（厂区内其它区域）共布置了 8 个监测点位。其中控制区共 4 个监测点位，监督区共 3 个监测点位，公众区共 1 个监测点位。控制区和监督区每个监测点由 1 台中子探测器和 1 台  $\gamma$  探测器组成。

每个加速器机房内布置一个点位，实时监测加速器机房内中子和  $\gamma$  光子辐射场，监测结果用于机房剂量联锁，并通过对辐射场的测量，判断停机后辐射工作人员的准入条件。

为了保证工作人员和公众的安全，监控屏蔽措施的可靠性，防治辐射泄漏造成环境影响，在辐射工作人员居留的控制室门外布置监测点位，在质子厂房南侧

道路，靠近厂外公众的位置布置一个点位。由于质子厂房内的辅助用房为局部二层，高于4座加速器机房屋顶，因此在加速器机房顶部东侧（靠近2层办公楼）布置一个监测点位。点位布置图局见图1。



图 6-1 辐射剂量连续监测点位布置图

## 2、辐射监测用探测器主要性能要求

### (1) 控制区连续监测

中子剂量探测器技术参数

- 测量范围：1uSv/hr – 1Sv/hr
- 能量响应：0.025eV-40MeV
- 注量率灵敏度：≥100 cps/mSv/hr
- 总不确定度：小于 10%

γ 辐射剂量探测器的技术参数

- 测量范围：0.1uSv/hr -100mSv/h
- 能量响应：80KeV-3MeV
- 灵敏度：0.25 nSv/脉冲
- 总不确定度：小于 10%

### (2) 监督区连续监测

中子剂量探测器技术参数

- 测量范围：0.1uSv/hr – 10mSv/hr

- 能量响应：0.025eV-16MeV
- 注量率灵敏度：≥100 cps/mSv/hr
- 总不确定度：小于 10%

#### γ 辐射剂量探测器的技术参数

- 测量范围：0.01uSv/h -10mSv/h
- 能量响应：80KeV-3MeV
- 灵敏度：0.25 nSv/脉冲
- 总不确定度：小于 10%

### (3) 公众区连续监测

#### γ 辐射剂量探测器的技术参数

- 测量范围：0.01uSv/h -1Sv/h
- 能量响应：80KeV-3MeV
- 灵敏度：0.25 nSv/脉冲
- 总不确定度：小于 10%

综上所述，根据质子治疗系统厂房的布局特点，在工作场所辐射区及周围共布设了 8 个监测点，其中调试机房内、质子厂房内和厂区内布设的监测点位覆盖了人员可达到的控制区、监督区和公众居留区域。监测点位数量和布局合理，满足辐射防护监测要求；中子和 γ 射线剂量率监测仪器能量响应范围满足测量要求，点位覆盖工作场所辐射剂量场范围，仪器灵敏度和测量精度满足测量要求。

#### 6.3.2.2 瞬时剂量率

加速器运行过程中，还会根据监测计划及加速器运行出束能量等参数，采用便携式仪器对机房、质子厂房周边进行中子、γ 剂量率进行监测。每年至少监测 1 次。

#### 6.3.2.3 土壤监测

在厂址边界设置 1~2 个土壤监测点位，监测项目为 Be-7，监测频次为运行后 1 次/年。

#### 6.3.2.4 环境监测大纲

依据 HJ/T61-2001《辐射环境监测技术规范》和本项目特点，制定本项目环境监测大纲见表 6-1。其中土壤和循环冷却水的监测拟委托有资质的单位承担。

表 6-1 质子治疗系统项目环境监测方案

监测对象	监测项目	监测点位	监测频次	监测方式
贯穿辐射	中子剂量率、 $\gamma$ 剂量率	详见图 6-1	连续	连续
贯穿辐射	中子剂量率、 $\gamma$ 剂量率	加速器机房周围、顶部	1 次/年	便携式剂量率仪巡测
土壤	Be-7	厂址边界 1~2 个点位	1 次/年	委托监测
循环冷却水	总 $\alpha$ 、总 $\beta$	贮水池	每次排放前	委托监测
固体废物表面	$\gamma$ 剂量率	废物柜	1 次/年	便携式剂量率仪

综上所述，中子/ $\gamma$  连续剂量率布置环境监测点位均匀覆盖加速器机房周围区域，点位布局合理；同时每年对加速器机房及顶部环境进行中子/ $\gamma$  瞬时剂量率测量，对固体废物外表面进行  $\gamma$  剂量率监测；另外，委托监测土壤中 Be-7 以及冷却水排放前总  $\alpha$ 、总  $\beta$  监测，环境监测点位设置合理，监测项目符合本项目的源项特点。企业监测用中子、 $\gamma$  剂量率仪剂量量程、能量范围、灵敏度等参数满足本项目环境测量要求。

### 6.3.2.5 环保竣工验收监测

为有效落实环境保护“三同时”要求，确保环境保护设施的有效性，依据《建设项目环境保护管理条例》的要求，建设单位在建设完成后，将自主开展竣工环境保护验收工作，根据项目特点，环保竣工验收监测项目及指标见表 6-2。

环保竣工验收应在典型束流达到最高能量条件下进行。

表 6-2 环保竣工验收监测项目及指标

验收监测项目	监测点位	验收指标
中子剂量率 $\gamma$ 剂量率	质子厂房外 (厂区内及周围环境)	附加剂量率不超过 2.5 $\mu$ Sv/h
	质子厂房内 (加速器屏蔽设施外)	附加剂量率不超过 2.5 $\mu$ Sv/h
电磁辐射	质子厂房边界处	0.1MHz~3MHz 频段电场强度 $\leq 40$ V/m, 15GHz~300GHz 频段等效平面波功率密度 $\leq 2$ W/m <sup>2</sup>
噪声	厂界外 1m 处	北侧厂界满足 4a 类标准, 其它三侧厂界噪声满足 2 类标准。

### 6.3.3 个人剂量监测

个人剂量监测拟委托有资质的单位进行监测，同时监测 X- $\gamma$ 剂量和中子剂量，检测周期不超过 3 个月。企业内建立辐射工作人员个人剂量档案，长期保存。

## 6.4 辐射事故应急

本项目按照国家相关要求，建设单位设置辐射应急响应组织机构，并制定《辐射事故应急预案》，做好相应的应急准备工作。

企业制定了初步的《辐射事故应急预案》，主要包括：

### （1）总则

为了加强射线装置的安全防护和监督管理，促进高能加速器的安全应用，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应急能力，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，结合本单位装置的特点，各个等级分别为：

- 特别重大辐射事故，是指射线装置失控导致 3 人以上（含 3 人）急性死亡。
- 重大辐射事故，是指射线装置失控导致 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。
- 较大辐射事故，是指射线装置失控导致 9 人以下（含 9 人）急性重度放射病、局部器官残疾。
- 一般辐射事故，是指射线装置失控导致人员受到超过年剂量限值的照射。

### （3）应急组织体系与职责分工

企业成立辐射事故应急响应指挥部，以单位法定代表人为总指挥，分管领导为副总指挥，质子厂房和厂外调试队部门负责人及其他相关部门负责人为指挥部成员，其主要职责为：负责针对辐射事故的危害程度，发布预警等级，组织实施

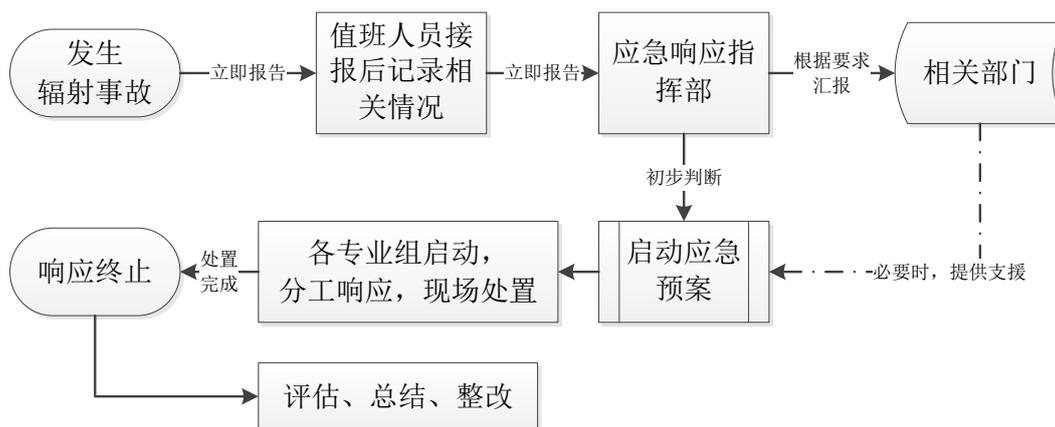
辐射事故应急预案，并将事故情况上报相关部门。

指挥部下设技术处置组、安全保卫组、后勤保障组和医疗救助及善后处置组等四个专业响应组，分别由相应部门人员组成：

- 技术处置组：负责辐射监测、确定污染范围、划定控制区域，装备防止次伤害物资；相应防护装备（服装、器具等）预备。
- 安全保卫组：负责维护现场秩序、人员出入控制等。
- 后勤保障组：负责应急响应物资的准备，应急期间的通讯、交通、水电等的保障。
- 医疗救助与善后处置组：负责事故人员的初步救治、安抚；设施的恢复等善后工作；对事故的基本情况定性定量描述，对整个事故进行评估，进行工作总结。

#### (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：



- 1) 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；
- 2) 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，并根据要求向地方环保、卫生等部门汇报，同时汇报上级主管部门，必要时请求外部支援；
- 3) 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；

- 4) 事故处置期间的事故汇报工作按照地方环境保护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；
- 5) 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各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

辐射事故应急演习分为专项演练和综合演习，专项演练可由应急指挥部和质子厂房、厂外调试队分别开展，一般一年 1 次；综合演习为应急指挥部和各部门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。

分析建设单位初步编制的上述《辐射应急预案》，预案结合自身特点给出了辐射事故应急响应组织、事故分级和响应措施、培训和演习等内容，总体符合相关法律和法规的要求。考虑到企业没有实际运行经验，该预案在后续工作中应按照项目实施情况进一步完善和优化，明确应急人员的具体安排、细化应急物资的准备、定期开展应急人员的培训和演习，并与省市辐射应急预案做好衔接。企业承诺在申请辐射安全许可证取得前修订完成《辐射应急预案》和相应的应急响应执行程序。

## 6.5 辐射安全管理满足相关法律法规的分析

本项目与《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》和《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》的符合性分析见表 6-3。

表 6-3 本项目满足法律、法规要求分析

《放射性同位素与射线装置安全和防护管理办法》要求内容	《放射性同位素与射线装置安全许可管理办法》要求内容	本项目符合性分析
/	使用 I 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；其他辐射工作单位应当有 1 名具有大专以上学历的技术人员专职或者兼职负责辐射安全与环境保护管理工作；依据辐射安全关键岗位名录，应当设立辐射安全关键岗位的，该岗位应当由注册核安全工程师担任。	建设单位拟建立专门的辐射安全管理机构，并设立辐射安全关键岗位，配备 1 名本科（及以上）学历的辐射安全管理人员，辐射安全关键岗位人员由注册核安全工程师担任。
/	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。	项目设计了三废处理方案，满足废物处理要求
第五条：生产、销售、使用、贮存放射性同位素与射线装置的场所，应当按照国家有关规定设置明显的放射性标志，其入口处应当按照国家有关安全和防护标准的要求，设置安全和防护设施以及必要的防护安全连锁、报警装置或者工作信号。射线装置的生产调试和使用场所，应当具有防止误操作、防止工作人员和公众受到意外照射的安全措施。	放射性同位素与射线装置使用场所所有防止误操作、防止工作人员和公众受到意外照射的安全措施。	项目设计了相应的安全连锁系统，具有防止误操作、防止工作人员和公众受到意外照射的安全措施。
第六条：生产、使用放射性同位素与射线装置的场所，应当按照国家有关规定采取有效措施，防止运行故障，并避免故障导致次生危害。	/	建设单位拟建立《加速器检修维护管理规定及操作规程》，防止运行故障

<p>第七条：放射性同位素和被放射性污染的物品应当单独存放，不得与易燃、易爆、腐蚀性物品等一起存放，并指定专人负责保管。</p>	<p>/</p>	<p>对于损坏不再使用的放射性部件、靶件，收集在质子厂房内的放射性废物柜中暂存衰变。</p>
<p>第九条：生产、销售、使用放射性同位素与射线装置的单位，应当按照国家环境监测规范，对相关场所进行辐射监测，并对监测数据的真实性、可靠性负责；不具备自行监测能力的，可以委托经省级人民政府环境保护主管部门认定的环境监测机构进行监测。</p>	<p>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，包括个人剂量测量报警、辐射监测等仪器。</p>	<p>企业拟建立《辐射环境监测大纲》，采用自主监测和委托监测相结合的方式，满足环境监测要求</p>
<p>第十一条：生产、销售、使用放射性同位素与射线装置的单位，应当加强对本单位放射性同位素与射线装置安全和防护状况的日常检查。发现安全隐患的，应当立即整改；安全隐患有可能威胁到人员安全或者有可能造成环境污染的，应当立即停止辐射作业并报告发放辐射安全许可证的环境保护主管部门（以下简称“发证机关”），经发证机关检查核实安全隐患消除后，方可恢复正常作业。</p>	<p>/</p>	<p>建设单位拟建立辐射安全管理规定，对日常检查进行规定，发现安全隐患的，立即整改；可能造成环境污染的，立即停止辐射作业并报告相关审管部门，经相关部门检查核实安全隐患消除后，方可恢复正常作业。</p>
<p>第十二条：生产、销售、使用放射性同位素与射线装置的单位，应当对本单位的放射性同位素与射线装置的安全和防护状况进行年度评估，并于每年1月31日前向发证机关提交上一年度的评估报告。</p>	<p>辐射工作单位应当编写放射性同位素与射线装置安全和防护状况年度评估报告，于每年1月31日前报原发证机关。</p>	<p>建设单位遵照执行。</p>
<p>第十七条：生产、销售、使用放射性同位素与射线装置的单位，应当按照环境保护部审定的辐射安全培训和考试大纲，对直接从事生产、</p>	<p>/</p>	<p>建设单位拟制定《辐射工作人员培训和授权管理规定》，做出相关规定</p>

<p>销售、使用活动的操作人员以及辐射防护负责人进行辐射安全培训，并进行考核；考核不合格的，不得上岗。</p>		
<p>第十八条：使用 I 类射线装置的辐射工作人员，应当接受中级或者高级辐射安全培训。 第二十二條：取得辐射安全培训合格证书的人员，应当每四年接受一次再培训。</p>	<p>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。</p>	<p>拟在《辐射工作人员培训和授权管理规定》中进行规定</p>
<p>第二十三条：生产、销售、使用放射性同位素与射线装置的单位，应当按照法律、行政法规以及国家环境保护和职业卫生标准，对本单位的辐射工作人员进行个人剂量监测；发现个人剂量监测结果异常的，应当立即核实和调查，并将有关情况及时报告辐射安全许可证发证机关。</p>	<p>个人剂量档案和职业健康监护档案应当长期保存</p>	<p>建设单位拟建立《个人剂量监测管理规定》，建立个人剂量档案，长期保存。</p>
<p>第二十四条：生产、销售、使用放射性同位素与射线装置的单位，不具备个人剂量监测能力的，应当委托有资质的机构进行个人剂量监测。</p>	<p>/</p>	<p>拟委托有资质单位开展个人剂量监测</p>
<p>第四十三条：生产、销售、使用放射性同位素与射线装置的单位，应当根据可能发生的辐射事故的风险，制定本单位的应急方案，做好应急准备。</p>	<p>有完善的辐射事故应急措施。</p>	<p>业主单位制定了初步的《辐射事故应急预案》，拟在调试前制定详细的《辐射事故应急预案》</p>
<p>/</p>	<p>辐射工作单位应当建立放射性同位素与射线装置台账，记载放射性同位素的核素名称、出厂时间和活度、标号、编码、来源和去向，及射线装置的名称、型号、射线种类、类别、用途、来源和去向等事项。放射性同位素与射线装置台账应当长期保存。</p>	<p>建设单位拟建立《射线装置台账、使用管理制度》</p>

## 7 利益-代价分析

### 7.1 利益分析

企业生产、使用和销售医疗用质子同步加速器，独立研发带有自主知识产权的紧凑型加速器，设备将在国内外医疗机构使用，提供肿瘤治疗的精准放射治疗装备，项目建设带来的科学技术、经济和社会效益主要表现在以下几个方面。

#### 7.1.1 经济效益

企业自主研发、建造的质子加速器，经调试后投入使用，可以给企业带来可观的经济效益。本项目质子厂房及配套生产装备等计划投资约 6000 万元，使得每套设备的销售价格远低于进口同类型设备价格。企业规划年产 40 台（套）质子治疗系统，按此统计企业的利润将十分可观，由此给地方经济和税收带来的贡献也是巨大的。

#### 7.1.2 社会效益

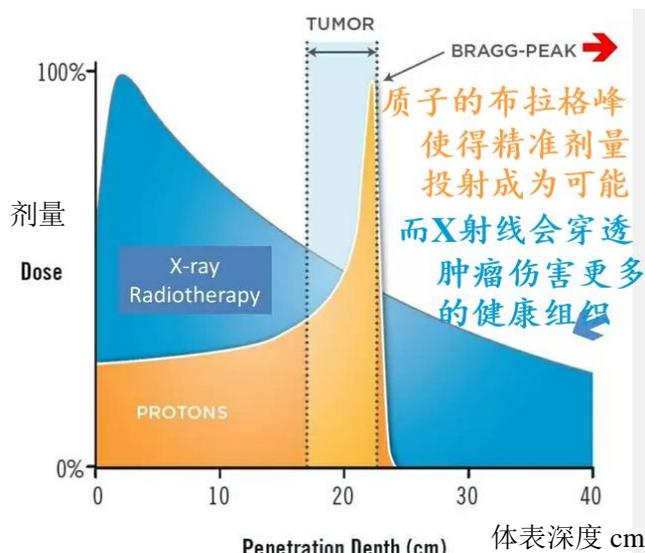
企业在医疗装备领域的研发，有利于吸收和消化国际上先进科研技术的转移转化，促进我国经济社会有关领域的发展。

在项目建设过程中，医疗装置制造企业通过技术研发和自主创新，掌握先进加速器制造的核心技术，带动和提升国内相关医疗装备企业产品的设计、加工制造水平。

通过工程建设和后续的产品更新，培养一批在医用加速器和核物理领域的优秀年轻人，为未来我国高端放射治疗装备的产品性能提升持续提供理论、技术和人才支撑。

#### 7.1.3 临床医学效益

传统的放射治疗中射线照射路径上的所有组织都会损伤（无论是正常组织还是肿瘤），而采用质子加速器发射的射线几乎只在肿瘤处发挥作用，对正常组织的损伤非常小。



质子加速器抗击癌症的一个关键要素就是找到能够达到最优临床结果的最佳方式。质子治疗能够在各类肿瘤的治疗中和治疗后降低整体毒性，接受质子治疗的患者生活质量能明显改善，提高某些类型的肿瘤的生存率，还可以用于肿瘤复发的患者和既往接受过放射治疗的患者。

国际顶尖科学杂志《自然》中如下评价质子治疗：如果不考虑价格的话，许多局部肿瘤患者应选择质子治疗，质子治疗优势主要体现在：质子比传统放疗瞄准肿瘤病灶更精确，肿瘤周围的健康组织的受照剂量低 2-3 倍，因此治疗引发二次原发肿瘤和免疫系统损伤的风险均降低了；使用质子治疗，能够安全的用高剂量放射线照射难治性肿瘤，如颅底肿瘤或肝癌；质子治疗的准确性在儿童肿瘤治疗中尤为关键。

因此，从为临床医学提供高效放射治疗装备的角度分析，本项目产品具有十分明显的临床医疗效应。

## 7.2 代价分析

### 7.2.1 经济代价

本项目企业自筹资金，建设总投资约 6000 万元。无锡市梁溪区政府将提供建设用地，同时负责提供厂址的平整，达到七通一平（路、上水、下水、电、讯、暖、燃气、土地平整）的基础设施标准。

### 7.2.2 社会和环境代价

本项目建设用地不涉及居民拆迁，原企业已搬迁，现场建筑物已拆除完毕，对社会的影响较小。

经预测，本项目对环境的影响满足国家标准要求，对环境的影响是可接受的。

### 7.2.3 资源代价

项目用地为有限开发用地，主要是厂区内用地，不占用厂外道路和土地。厂区用地由当地政府出让土地使用权，其中质子厂房用地面积约 5000m<sup>2</sup>。

## 7.3 正当性分析

综上所述，企业生产、使用和销售质子治疗系统（主要设备是质子同步加速器），是属于国际和国内技术领先的放射医疗装备。建成后，将填补国内生产紧凑型商用质子治疗装备的空白，为国内核技术应用提供研发平台和人才支撑，将使我国质子治疗装备从“紧跟”走向“并行”、并逐步实现“引领”，形成在国际上具有影响力的粒子治疗医学研究中心。

从正当性角度分析，本项目是必要的、正当的。

## 8 公众参与

### 8.1 公众参与方案

公众参与目的是使公众充分了解项目情况，通过采纳他们的各种合理意见和看法，能使项目的建设方案更完善合理，使环保措施更切实可行，从而使项目发挥更好的环境效益、经济效益和社会效益。根据《环境影响评价公众参与暂行办法》（环发[2006]28号）的要求以及结合厂址特点和社会环境状况，建设单位开展了公众参与活动，通过发布信息公告（包括网络公示及现场张贴）、公众宣传（科普宣传及展览）、发放调查问卷等方式开展。本项目评价范围内不涉及居民区、医院、学校等环境敏感点，发放调查问卷的对象主要为厂区南侧相隔汇太路的工业企业。

### 8.2 信息公告

#### 8.2.1 网络公示

根据《环境影响评价公众参与暂行办法》的有关规定，建设单位发布了两次信息公告。第一次公告公示期（征求意见期限）为2018年6月19日至2018年6月31日，第二次公告公示期（征求意见期限）为2018年8月8日至2018年8月21日；两次公告的公示期均为10个工作日。公示情况如图8-1、8-2所示。环境影响报告书简本查阅地点为企业厂区内展览大厅。



图 8-1 江苏环保公众网（一次公示）



图 8-2 江苏环保公众网（二次公示）

### 8.2.2 张贴公示

环境影响评价过程中在项目建设地点周边的张贴了《新瑞阳光粒子医疗装备（无锡）有限公司生产、销售、使用质子治疗系统项目环境影响评价第二次公示》。公示内容包含项目概况、环境保护对策措施、环境影响评价结论，以及建设单位、评价单位的联系方式等信息。通过张贴公告，有利于公众及时了解本项目，同时也方便未得网上公示信息的公众表达对项目建设及环境保护的意见。张贴公示情况如图 8.3~8.4 所示开展现场张贴：分别在厂址附近企业门口以及附近信息公告栏。

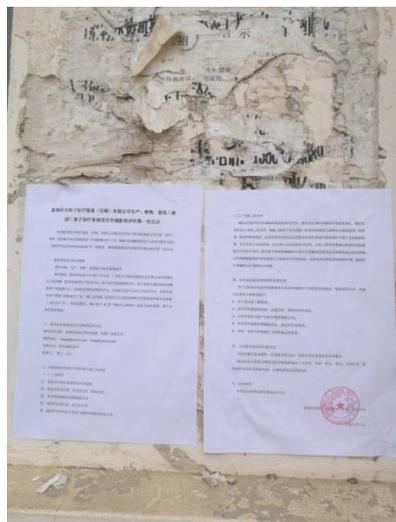


图 8-3 附近工业企业门口张贴



图 8-4 附近信息公告栏张贴

### 8.2.3 公众宣传

建设单位在厂区内建设了公众宣传大厅，主要包括视频宣传、海报科普展览、模型展览等，具体如下。

(1) 科普宣传。建设单位举行了多次公益性科普宣传报告宣讲，就本项目的科学意义和目标、安全性以及核技术产业转化和社会效益等公众关心的主要问题作了讲解。邀请了海内外知名质子加速器专家面向医疗机构、政府管理部门和厂区周围公众做了报告。共约超过 500 人次听取了报告，取得了良好的宣传效果。

(2) 模型展览。制作本项目模型，在厂区内宣传展厅长期展示。针对本项目的前瞻科学性和国家科技战略布局的特殊地位，同时充分考虑公众的科学知识基础和关注问题的多样性，另外还制作了科普宣传片、印制科普宣传册，内容覆盖面广、通俗易懂，取得了良好的宣传效果。

在本工程公众沟通工作中，根据收集到的反馈信息，相关公众很好地了解了质子医疗系统的基本信息，深刻理解了本项目建设的重要意义，相关公众表示欢迎本项目落户并会给予大力支持。现场开展公众宣传的活动情况见图 8-5 所示，公司宣传册见图 8-6 所示。



海报展示



沙盘展示



视频宣传



仿真模型宣传

图 8-5 公众宣传现场照片

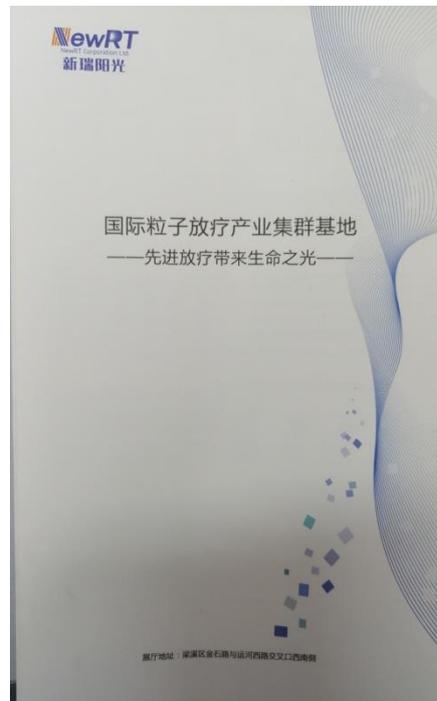


图 8-5 公司发放的宣传册

### 8.3 公众调查结果分析

通过发布信息公告、公开环境影响报告书简本等广泛征求公众意见。在规定的意见反馈期限内，建设单位及评价单位未收到信件、电邮、传真等书面意见。

建设单位对评价范围内可能受本工程影响的厂区南侧相隔汇太路的工业企业发放问卷调查表。问卷调查表具体内容见表 8.1 所示。调查结果显示，本工程的支持率达到 100%，没有被调查单位提出对本工程反对意见。

**表 8.1 新瑞阳光粒子医疗装备（无锡）有限公司生产、销售、使用质子治疗系统项目公众参与调查表**

单位（盖章）			
单位性质			
单位地址			
联系人		电话	
工程概况	工程名称	生产、销售（含建造）、使用质子治疗系统项目	
	建设地点	江苏省无锡市梁溪区金石路与运河西路交叉口	
	建设规模	本项目位于公司厂区南侧，汇太路北侧。建设单位一期工程新建 1 座质子治疗系统厂房，占地面积 5040m <sup>2</sup> 。计划 2018 年下半年开工，2019 年 6 月建成投产。厂房内布设 4 座质子加速器调试机房。项目建成后，预计年生产、销售 40 套 70MeV~230MeV 的质子治疗系统。	
1. 贵单位对本工程建设的了解程度？（单选） <input type="checkbox"/> 一般 <input type="checkbox"/> 很了解 <input type="checkbox"/> 不了解			
2. 贵单位是通过什么渠道了解到本工程相关消息：（可多选） <input type="checkbox"/> 没有听说 <input type="checkbox"/> 建设单位公告 <input type="checkbox"/> 公众议论 <input type="checkbox"/> 电视 <input type="checkbox"/> 网络媒体 <input type="checkbox"/> 其他_____			
3. 贵单位对项目所在地的环境质量现状是否满意？（如不满意注明原因） <input type="checkbox"/> 不确定 <input type="checkbox"/> 满意 <input type="checkbox"/> 不满意 原因_____			
4. 贵单位认为本工程可能对环境的影响因素主要是：（可多选） 施工期： <input type="checkbox"/> 大气 <input type="checkbox"/> 水体 <input type="checkbox"/> 噪声 <input type="checkbox"/> 固体废物 <input type="checkbox"/> 其它_____ 运营期： <input type="checkbox"/> 放射性 <input type="checkbox"/> 大气 <input type="checkbox"/> 水体 <input type="checkbox"/> 噪声 <input type="checkbox"/> 固体废物 <input type="checkbox"/> 其它_____			
5. 贵单位对核技术在医学的应用了解程度？（单选） <input type="checkbox"/> 一般 <input type="checkbox"/> 很了解 <input type="checkbox"/> 不知道			
6. 贵单位认为本项目建设对当地经济和社会的影响如何？（单选） <input type="checkbox"/> 不知道 <input type="checkbox"/> 有利 <input type="checkbox"/> 一般 <input type="checkbox"/> 基本无影响			
7. 贵单位认为本工程运行期采取严格的环境管理和有效的污染防治措施后，对周围环境影响如何？（单选） <input type="checkbox"/> 不知道 <input type="checkbox"/> 有明显影响 <input type="checkbox"/> 有一定影响 <input type="checkbox"/> 基本无影响			
8. 贵单位对本工程建设的态度是：（单选） <input type="checkbox"/> 支持 <input type="checkbox"/> 有条件支持 <input type="checkbox"/> 无所谓 <input type="checkbox"/> 反对，原因是____			
9. 贵单位对本项目环保方面有何建议和要求：_____			

## 8.4 公众参与结论与建议

### （1）合法性

本项目工作参与严格按照《环评影响评价公众参与暂行办法》的相关要求实施，项目信息公开方式、调查问卷的发放范围和数量均满足以上法律法规要求。因此本次工作参与是合法的。

### （2）代表性

本项目公众参与问卷调查覆盖了有可能受到辐射影响的周边工业企业，符合项目周围地区社会经济现状特点，具有较好代表性。

### （3）有效性

公众参与过程中的网上信息公示、及公告张贴均由建设单位确认，书面调查问卷发放中调查对象均提供了单位名称、地址及联系方式。整个公众参与过程是真实有效的。

### （4）总结

本工程环境影响评价过程中，根据相关法规要求开展了信息公告、公众宣传、问卷调查等公众参与工作，向公众征求了对本工程建设和运行的意见和建议。建设单位组织开展的公众参与程序上符合法律法规要求。

从本次公众参与的结果可以看出，周围企业和公众支持本工程的建设，认为本工程的建设对推动当地发展是有利的。同时，也对本工程的建设提出了一些意见和建议。建设单位已通过多种方式对公众的疑问和意见、建议进行了详细答复，后续也将根据国家相关法律、法规和标准的要求切实做好相关工作。

## 9 结论与建议

### 9.1 项目工程概况

本建设项目名称为新瑞阳光粒子医疗装备(无锡)有限公司生产(含建造)、销售和使用质子治疗系统,项目投运后年产 40 台能量为 40MeV~230MeV 能量的质子同步加速器。

企业厂区选址于无锡市梁溪区金石东路和运河西路交叉口西南侧。本项目为一期工程,拟在厂区南侧建设 1 座质子加速器厂房,厂房内设计建造 4 座质子加速器调试机房。本项目的评价对象是新建 4 座调试质子加速器调试机房,运行后对环境和人员的影响。厂区内相关基础设施建设和其他配套设施、光子厂房、辅助厂房等设施的建设和运行,不在本项目评价范围内。

质子同步加速器是用人工方法产生高速离子束流的装置,由加速器系统和配套设备构成。本项目机房仅用于企业生产的部分加速器调试,不设束流治疗终端,不作为放射治疗场所。

### 9.2 辐射安全与防护

#### (1) 辐射防护

本项目加速器调试机房采用地面一层混凝土浇注结构,根据辐射场的特点和机房屏蔽设计参数,校核计算结果表明,质子厂房内调试机房外剂量率不超过  $2.5\mu\text{Sv/h}$ ,满足辐射防护要求。

建设单位将按照射工作场所进行控制区、监督区划分,对辐射工作场所进行分区管理,本项目的安全联锁系统能够满足“多重性”、“冗余性”和“失效保护”设计要求,可以达到保护辐射工作人员人身安全的目的。

辐射工作还涉及企业内工作人员派遣至设备使用单位(医疗机构)从事加速器运行前调试工作,这部分人员作为辐射工作人员纳入企业统一管理。

#### (2) 三废的治理

加速器在运行时空气的活化产生的放射性核素通过排气筒排放到大气中,废气经过一定距离的扩散稀释和物理衰减,对公众的年照射剂量为  $0.002\text{mSv/a}$ ,影响很小。

含放射性核素废水排放到衰变池中衰变，经检测满足《污水综合排放标准》GB8978-1996 中总  $\alpha$  小于 1Bq/L、总  $\beta$  小于 10 Bq/L 后，作为普通废水排放。

加速器调试期间产生的含放射性固体废物如活化部件，在厂房放射性废物柜暂存衰变，后经检测达到免管活度浓度后，按普通废物处理，无法达到免管活度浓度的固体废物不外排，送城市废物库处置。

根据分析，项目运行期间现有的三废治理措施可以满足环境保护的要求。

### 9.3 环境影响分析

#### （1）辐射环境影响

##### — 工作人员受照辐射剂量

质子厂房内工作人员年最大受照剂量为 1.668mSv/a，负责质子治疗系统售后调试人员受到的剂量为 4.242 mSv/a，满足小于其剂量约束值 5 mSv/a 的要求。

加速器调试期间停机后进入机房，从事设备维修/维护的人员，由于工作场所剂量率可能超过 2.5 $\mu$ Sv/h 的控制值，必须在工作前制定辐射防护方案，以保证工作人员年受照剂量不超过 5 mSv/a。

##### — 公众受照剂量

保守估计，公众受照剂量最大值为 0.014mSv/a，小于公众 0.1mSv/a 的剂量约束值。

#### （2）非放射性影响

本项目运行期间厂址边界处噪声满足 GB12348-2008 的排放标准要求。所有电磁辐射源自身采取了良好的屏蔽，满足 GB8702-2014 的要求。

#### （3）事故条件下对环境的影响

本项目可能发生的事故都不会对环境造成污染。总体而言，本项目的建设对环境的影响是可以接受的。

### 9.4 辐射安全管理

本项目为新建项目，建设单位将根据本项目的最终设计和运行方案，成立辐射安全与环境保护管理机构、制定辐射安全管理规章制度、开展辐射环境监测和个人剂量监测等工作，并制定辐射事故应急预案。建设单位在项目运行前建立和完善以上管理制度和应急预案，才能满足辐射安全管理要求。

## 9.5 公众参与

建设单位根据《环境影响评价公众参与暂行办法》开展了公众参与工作，满足相关公众参与暂行办法的要求，公众对本项目建设表示支持。。

## 9.6 建议

### （1）关于辐射安全管理

本项目将质子厂房作为监督区管理，厂房内除了加速器调试人员以外，其它辅助工作人员也作为辐射工作人员管理。这部分人员除了佩戴个人剂量计等防护措施以外，应定期进行辐射安全培训，参与企业的辐射应急演练。

### （2）关于噪声

质子厂房顶部冷却塔噪声较大，厂房距离南厂界较近，根据企业只在日间生产的状况预测，南厂界昼间噪声可以满足标准要求。

但若今后需要夜间使用冷却塔，可能会造成南厂界噪声超标的情况。此时，需要在楼顶建立隔声屏障等措施，进一步降低噪声，满足夜间南厂界达到2类标准要求（夜间 $\leq 50\text{dB(A)}$ ）。

## 附录

### 附录 A 环评委托书

#### 环评项目委托书

苏州热工研究院有限公司：

我单位拟开展 I 类射线装置（质子加速器）生产（含建造）、使用（调试）和销售项目。

根据《建设项目分类管理名录》的要求，需开展环境影响评价，现委托贵公司开展本项目的环境影响报告书的编制工作。

新瑞阳光粒子医疗装备（无锡）有限公司



2018-5-30

## 附录 B 项目立项文件

# 无锡市梁溪区发展和改革局文件

## 企业投资项目备案通知书

备案号（2017）17号

新瑞阳光粒子医疗装备（无锡）有限公司：

你公司《新瑞阳光粒子医疗装备（无锡）有限公司粒子放疗产业集群项目备案申请报告》及相关材料收悉。经审核，该项目符合《国务院关于投资体制改革的决定》（国发[2004]20号）、《企业投资项目核准和备案管理条例》（中华人民共和国国务院令第673号）、《江苏省企业投资项目核准和备案管理办法》（苏政发[2017]88号）等有关要求，准予备案：

一、项目名称：新瑞阳光粒子医疗装备（无锡）有限公司粒子放疗产业集群项目。

二、建设地点：梁溪区金石路与运河西路交叉口西南侧。

三、项目投资及资金来源：项目总投资206649万元，均为固定资产投资。所需资金由公司自筹解决。

四、建设内容及规模：本项目建筑面积约14万平方米。主要建设粒子技术和光学研发中心，粒子技术装备制造中心，粒子装备关键

总成和关键配套产品集成中心，全球营销和技术服务中心，全球粒子医疗专业人才培养中心。

五、接本备案通知后，抓紧向国土、规划、消防、安监、环保等部门办理相关手续，在相关手续办结后方可开工建设，在项目实施过程中，必须按国家、省和市的相关法律、法规和规章的规定，做好节能、消防和安全生产等工作。

本“通知”有效期为2年，自签发之日起计算。项目建设期间，如项目法人、总投资、建设规模、建设地址及项目主要建设内容和产品技术方案等备案条件发生变化（其中总投资、建设规模变化超过20%），应在上述变化或者调整发生之前，及时以书面形式向我局申请重新备案。

项目代码：2017-320213-35-03-561835

无锡市梁溪区发展和改革委员会

2017年11月21日

行政许可专用章

## 附录 C 整厂环评批文

# 无锡市梁溪区行政审批局文件

梁行审投许〔2018〕61号

## 关于《粒子放疗产业集群项目环境影响报告表》的批复

新瑞阳光粒子医疗装备(无锡)有限公司:

你单位申请报批的《粒子放疗产业集群项目环境影响报告表》(以下简称报告表)及无锡市梁溪区环境保护局的审查意见(梁环表审〔2018〕20号)等文件均悉。经研究,批复如下:

一、根据报告表结论及无锡市梁溪区环境保护局审查意见,仅从环保角度考虑,同意建设单位报告表所列建设项目的性质、规模、地点和拟采取的环境保护措施。

项目建设地点位于无锡市梁溪区金石路与运河西路交叉口西南侧,项目总用地面积 100153.7m<sup>2</sup>,总建筑面积 189040m<sup>2</sup>,整个地块分为 A、B、C 三块,其中 A 块为工业用地,B、C 块为科研设计用地。A 块由工业厂房、研发总部、展厅与培训、配套产品集成集群(含粒子技术装备中心、服务中心、营销中心、人

才培训中心、配套产品集成中心等)组成；B 块为配套产品集成中心，C 块为粒子技术和光学研发中心。项目建成后将具有年产质子重离子治疗机 5 套、光子治疗机 10 套的生产能力。项目总投资 206649 万元，其中环保投资 235 万元。

二、在项目工程设计、建设和环境管理中应认真落实报告表中提出的各项环保要求，并重点做好以下工作：

1. 项目排水系统严格落实“雨污分流”制，雨水经雨水管网收集后排入市政雨水管网，项目员工生活污水与食堂含油废水分别经化粪池、隔油池预处理后接入市政污水管网，送芦村污水处理厂处理。污水接管执行《污水综合排放标准》(GB8978-1996)表 4 中的三级标准，氨氮、总磷、总氮执行《污水排入城镇下水道水质标准》(GB/T31962-2015)表 1 要求。

2. 项目运营期内无生产性废气产生，食堂油烟废气经油烟净化器预处理后排放，油烟废气排放执行《饮食业油烟排放标准》(GB18483-2001)中的大型餐饮企业标准。项目燃气锅炉采用清洁能源天然气作为燃料，燃烧废气经 8 米高烟囱排放，废气排放执行《锅炉大气污染物排放标准》(GB13271-2014)表 3 中燃气锅炉标准。

3. 严格落实报告表所述各类噪声防治措施，降低噪声对周边环境的影响。项目距离运河西路道路边界 35 米区域内厂界噪声排放执行《工业企业厂界环境噪声排放标准》(GB12348-2008)中 4 类功能区标准，其余区域执行 2 类功能区标准。

4. 固废处置措施应严格按照报告表要求落实，生活垃圾委

托环卫清运。食堂废油脂委托专门单位处理。

5. 按《江苏省排污口设置及规范化整治管理办法》（苏环控〔1997〕122号）的要求规范化设置各类排污口和标识。

6. 加强施工期环境保护管理。落实报告表提出的施工期污染防治措施，防止施工废水、废气、噪声和固废对环境造成的污染。施工噪声执行《建筑施工场界环境噪声排放标准》（GB12523-2011）中表1标准，夜间施工须报有关部门批准。

三、射线装置及放射性同位素的使用，需另行报批核技术应用项目环境影响评价文件并申领辐射安全许可证。

四、本项目按规定征得相关部门同意后方可开工建设，项目的环保设施必须与主体工程同时建成。项目竣工后须按规定程序实施竣工环境保护验收。项目建设期间的环境现场监督管理由无锡市梁溪区环境保护局负责。

五、环境影响评价文件经批准后，本项目的性质、规模、地点、采用的生产工艺或者防治污染、防止生态破坏的措施发生重大变动的，应当重新报批项目的环境影响评价文件。

无锡市梁溪区行政审批局

2018年4月2日

## 附录 D 厂址现状监测报告



苏州热工研究院有限公司环境检测中心

# 检 测 报 告

报告编号：SNPI环检(电离)字[2018]第315号

项 目 名 称 无锡加速器项目环境本底检测

委 托 单 位 新瑞阳光粒子医疗装备（无锡）有限公司

检 测 类 型 电离本底检测

报 告 日 期 2018年6月21日

苏州热工研究院有限公司环境检测中心

（加盖检测报告专用章）

## 苏州热工研究院有限公司环境检测中心 检测报告

报告编号：SNPI环检(电离)字[2018]第315号

第 1 页/共 5 页

### 检测报告内容

检测项目	X-γ 辐射剂量率，工业企业厂界环境噪声，功能区环境噪声
委托单位	新瑞阳光粒子医疗装备（无锡）有限公司
委托单位地址	无锡市南长区太湖广场钟书路99号国金中心62层
委托日期	2018年6月3日
检测日期	2018年6月8日, 2018年6月9日
检测类别	空气中放射性，噪声
检测方式	现场检测
检测地址	无锡市梁溪区汇太路1号。
检测所依据的技术文件名称及代号	《辐射环境监测技术规范》 HJ/T 61-2001 《环境地表γ辐射剂量率测定规范》 GB/T 14583-1993 《工业企业厂界环境噪声排放标准》 GB 12348-2008 《声环境质量标准》 GB 3096-2008
检测结果	见检测结果表。
检测结论	新瑞阳光粒子医疗装备（无锡）有限公司厂址区域的辐射剂量率范围为0.071 μSv/h~0.095 μSv/h，厂界两日昼间噪声值为46.5dB(A)~68.6dB(A)，夜间噪声值为40.1dB(A)~54.3dB(A)，厂址周围环境两日昼间噪声值为46.0dB(A)~52.1dB(A)，夜间噪声值为38.8dB(A)~41.3dB(A)。
备注	&#x0A;

报告编制人	左伟伟	报告审核人	吴连生	授权签字人	陈超峰
签 名		签 名		签 名	
编制日期	2018.6.20	审核日期	2018.6.20	签发日期	2018.6.21

## 苏州热工研究院有限公司环境检测中心 检测报告

报告编号：SNPI环检(电离)字[2018]第315号

第 2 页/共 5 页

### 现场情况说明

检测环境条件	天气：晴 温度：30.2℃ 湿度：58.9%RH
检测设备	X-γ 剂量率仪 主机：6150AD5/H；探头：6150AD-b/H HJ-144 能量响应范围：20keV-7MeV；剂量率测量范围：5nSv/h - 99.9 μSv/h 有效期：2018-05-10至2019-05-09 声校准器 AWA6221A HJ-19 94 dB、114dB 有效期：2018-04-08至2019-04-07 噪声系统分析仪 AWA6228 HJ-18 25dB ~ 125dB 有效期：2018-04-10至2019-04-09
检测对象参数	/
检测工况	本底检测无工况。
现场情况记录	新瑞阳光粒子医疗装备（无锡）有限公司的厂址目前为一片空地，仅在厂址中心区域建有展馆，加速器厂房拟建区域位于厂址区域的南侧。
检测点位	见检测点位示意图。

## 苏州热工研究院有限公司环境检测中心 检测报告

报告编号：SNPI环检(电离)字[2018]第315号

第 3 页 / 共 5 页

表1 厂址区域X-γ辐射剂量率检测结果

检测点序号	检测点位置	辐射剂量率(μSv/h)
1	见检测点位图	0.092±0.002
2	见检测点位图	0.075±0.001
3	见检测点位图	0.093±0.002
4	见检测点位图	0.085±0.001
5	见检测点位图	0.088±0.002
6	见检测点位图	0.080±0.001
7	见检测点位图	0.085±0.001
8	见检测点位图	0.093±0.001
9	见检测点位图	0.077±0.002
10	见检测点位图	0.095±0.002
11	见检测点位图	0.090±0.001
12	见检测点位图	0.080±0.002
13	见检测点位图	0.075±0.001
14	见检测点位图	0.081±0.002
15	见检测点位图	0.071±0.001
16	见检测点位图	0.071±0.001
17	见检测点位图	0.074±0.001
18	见检测点位图	0.086±0.001
19	见检测点位图	0.085±0.001
20	见检测点位图	0.083±0.001
21	见检测点位图	0.081±0.002
22	见检测点位图	0.080±0.001
23	见检测点位图	0.086±0.001
24	见检测点位图	0.088±0.002

## 苏州热工研究院有限公司环境检测中心 检测报告

报告编号：SNPI环检(电离)字[2018]第315号

第 4 页/共 5 页

检测点序号	检测点位置	辐射剂量率 (μSv/h)
25	见检测点位图	0.078±0.002
26	见检测点位图	0.087±0.001
27	见检测点位图	0.087±0.001

表2 厂界四周6月8日工业企业厂界环境噪声检测结果

检测点序号	检测点位置	昼间噪声值 (dB(A))	夜间噪声值 (dB(A))
1	厂界北侧外1m	67.7	54.3
2	厂界西北侧外1m	53.4	44.8
3	厂界东侧外1m	47.2	42.1
4	厂界南侧外1m	51.6	41.6
5	厂界西侧外1m	50.4	41.3

表3 厂界四周6月9日工业企业厂界环境噪声检测结果

检测点序号	检测点位置	昼间噪声值 (dB(A))	夜间噪声值 (dB(A))
1	厂界北侧外1m	68.6	52.1
2	厂界西北侧外1m	50.6	43.8
3	厂界东侧外1m	46.5	40.1
4	厂界南侧外1m	48.6	41.2
5	厂界西侧外1m	49.5	40.5

表4 周围环境6月8日功能区环境噪声检测结果

检测点序号	检测点位置	昼间噪声值 (dB(A))	夜间噪声值 (dB(A))
5	拟建区域	46.0	38.8
6	厂界南侧公司门卫	52.1	41.3

表5 周围环境6月9日功能区环境噪声检测结果

检测点序号	检测点位置	昼间噪声值 (dB(A))	夜间噪声值 (dB(A))
5	拟建区域	46.7	39.8
6	厂界南侧公司门卫	51.6	40.8

注：“±”后为两倍标准偏差，X-γ剂量率检测结果均未扣除宇宙射线响应值。

— 以下数据空白 —

## 苏州热工研究院有限公司环境检测中心 检测报告

报告编号：SNPI环检(电离)字[2018]第315号

第 5 页 / 共 5 页

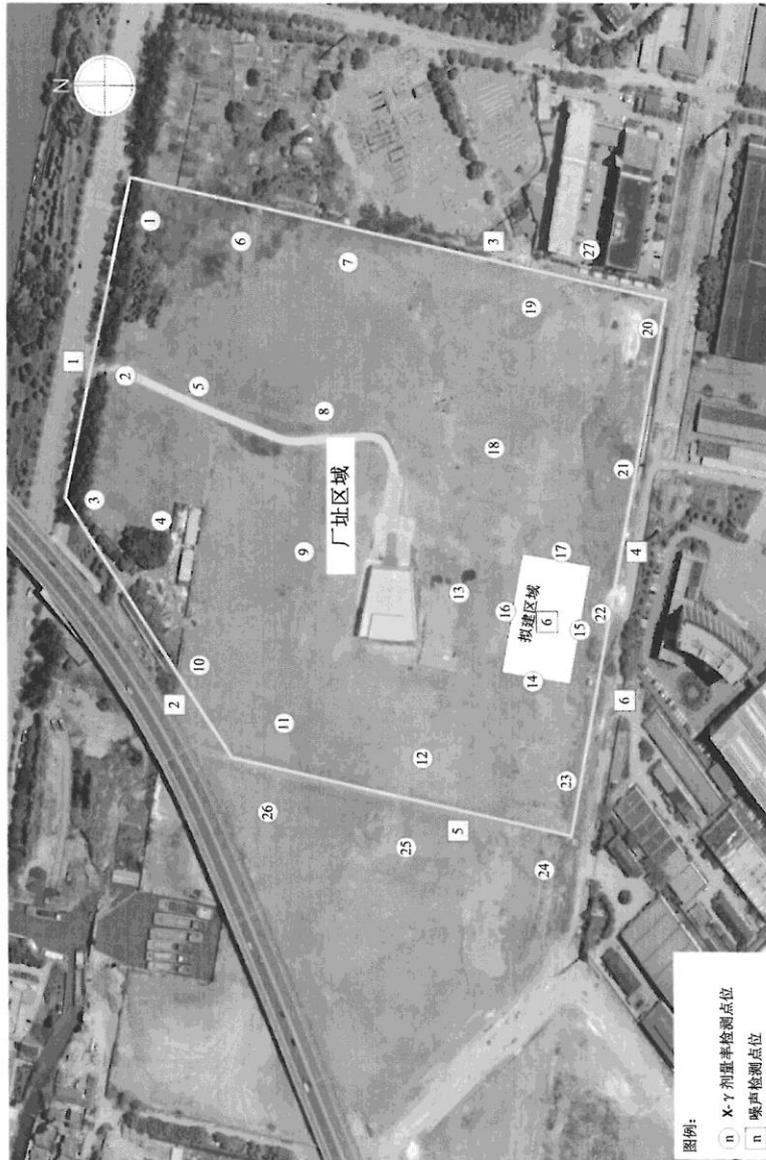


表1 X-γ剂量率及噪声检测点位示意图



## 苏州热工研究院有限公司环境检测中心

# 检测 报 告

报告编号：SNPI环检(电离)字[2018]第347号

项 目 名 称 无锡加速器项目本底检测

委 托 单 位 新瑞阳光粒子医疗装备（无锡）有限公司

检 测 类 型 委托检测

报 告 日 期 2018年7月13日

苏州热工研究院有限公司环境检测中心

(加盖检测报告专用章)

## 报告说明

- 1、报告无本单位检测报告专用章、骑缝章无效。
- 2、复制报告未重新加盖本单位检测报告专用章无效。
- 3、报告涂改无效。
- 4、自送样品的委托检测，其结果仅对来样负责；对不可复现的检测项目，结果仅对所代表的时间和空间负责。
- 5、检测报告版权属本中心，若需复印，需经本中心复印，且应全部复印。

单位名称：苏州热工研究院有限公司环境检测中心

地 址：江苏省苏州市西环路1788号

电 话：0512-68702663

传 真：0512-68702663

电子邮件：qinhongjuan@cgnpc.com.cn

邮政编码：215004

## 苏州热工研究院有限公司环境检测中心 检测报告

报告编号：SNPI环检(电离)字[2018]第347号

第 1 页/共 5 页

### 检测报告内容

委托单位	新瑞阳光粒子医疗装备（无锡）有限公司		
委托单位地址	无锡市南长区太湖广场钟书路99号国金中心62层		
检测核素或内容	空气中 $\gamma$ 核素，空气中氚，水中 $\gamma$ 核素，水中氚，水中总 $\alpha$ ，水中总 $\beta$ ，土壤中 $\gamma$ 核素		
样品来源	采样	采样日期	2018年6月8日
样品状态	干样, 固体, 液体	样品个数	11
样品量	/	分析日期	2018年6月11日
检测依据	《空气中放射性元素的 $\gamma$ 能谱分析方法》WS/T 184-1999 《气载放射性物质取样一般规定》HJ/T22-1998 《水中氚的分析方法》GB/T 12375-1990 《水中放射性核素的 $\gamma$ 能谱分析方法》GB/T 16140-1995 《水中总 $\alpha$ 放射性浓度的测定厚源法》EJ/T 1075-1998 《水中总 $\beta$ 放射性测定蒸发法》EJ/T 900-1994 《水质-非盐水中总 $\beta$ 活度测量方法-厚源法》ISO 9697-2015 《土壤中放射性核素的 $\gamma$ 能谱分析方法》GB/T 11743-2013 《高纯锗 $\gamma$ 能谱分析通用方法》GB/T 11713-2015		
评定依据	/		
检测环境	温度：20±2℃ 湿度：<60%RH		
检测设备名称、型号及编号	N型高纯锗 $\gamma$ 谱仪 GMX50P4-83 HJ-124 有效期:2018-05-03至2020-05-01 低本底 $\alpha$ 、 $\beta$ 测量仪 MPC9604 HJ-30 有效期:2018-01-04至2020-01-03 低本底液体闪烁谱仪 LB-7 HJ-29 有效期:2016-09-29至2018-09-28 高纯锗 $\gamma$ 谱仪 GEM50P4-83, 多道谱仪: DSPEC JR2.0 HJ-26 有效期:2016-09-27至2018-09-26		
设备主要技术指标	HJ-124: 能量范围: 3.0KeV~10MeV; 本底计数率: 2.90cps; 能量分辨率: 2.00keV; 相对探测效率: 50.0% HJ-26: 能量范围: 40KeV~10MeV; 本底计数率: 2.90cps; 能量分辨率: 1.90keV; 相对探测效率: 50.0% HJ-29: 氚测量(40ml): 本底计数4.842cpm、效率32.14%; 碳14测量: 本底计数小于4cpm、效率大于50%。 注: 碳14测量效率和探测限与样品中的碳含量有关。 HJ-30: 本底计数率: $\alpha < 0.1\text{CPM}$ , $\beta < 0.9\text{CPM}$ 探测效率: $\alpha > 40\%$ (Am-241), $\beta > 55\%$ (Sr-90/Y-90)		
检测结果	见检测结果表		
备注	/		

苏州热工研究院有限公司环境检测中心  
检测报告

报告编号: SNPI环检(电离)字[2018]第347号

第 2 页/共 5 页

报告编制人	左伟伟	报告审核人	黄彦君	授权签字人	陈超峰
签 名		签 名		签 名	
编制日期	2018.7.12	审核日期	2018.7.13	签发日期	2018.7.13

## 苏州热工研究院有限公司环境检测中心 检测报告

报告编号: SNPI 环检(电离)字[2018]第 347 号

第 3 页 共 5 页

表 1 空气中氡检测结果

序号	样品名称	样品编号	测量比活度 (Bq/L)	空气样品比活度 (mBq/m <sup>3</sup> )
1	拟建区域空气	ZH18013009001	<0.59	<10

表 2 空气中  $\gamma$  核素检测结果

序号	样品名称	样品编号	核素	活度浓度 ( $\mu$ Bq/m <sup>3</sup> )
1	拟建区域空气	ZH18013001001	铀-238	<121
			钍-232	281 $\pm$ 15
			镭-226	<26
			铍-7	8526 $\pm$ 159
			氫-41	<9.1
			钾-40	2490 $\pm$ 174

表 3 水中总  $\alpha$  检测结果

序号	样品名称	样品编号	总 $\alpha$ 活度浓度(Bq/L)
1	循环冷却水	ZH18013002001	0.011 $\pm$ 0.002
2	京杭大运河河水	ZH18013004001	0.051 $\pm$ 0.015

表 4 水中总  $\beta$  检测结果

序号	样品名称	样品编号	总 $\alpha$ 活度浓度(Bq/L)
1	循环冷却水	ZH18013002001	0.007 $\pm$ 0.001
2	京杭大运河河水	ZH18013004001	0.216 $\pm$ 0.009

表 5 水中氡检测结果

序号	样品名称	样品编号	样品比活度(Bq/L)
1	循环冷却水	ZH18013006001	<0.59
2	京杭大运河河水	ZH18013007001	<0.59

## 苏州热工研究院有限公司环境检测中心 检测报告

报告编号: SNPI 环检(电离)字[2018]第 347 号

第 4 页 共 5 页

表 6 水中  $\gamma$  核素检测结果

序号	样品名称	样品编号	核素	活度浓度 (mBq/L)
1	京杭大运河河水	ZH18013008001	铀-238	<112
			钍-232	18.3±2.9
			镭-226	<6.2
			铍-7	<15
			氡-41	<1.5
			钾-40	388±27

表 7 土壤中  $\gamma$  核素检测结果

序号	样品名称	样品编号	核素	活度浓度 (Bq/kg干土)
1	拟建区域土壤	ZH18013003001	铀-238	53.7±7.2
			钍-232	49.1±1.0
			镭-226	26.9±1.0
			铍-7	<3.3
			钠-22	<0.5
			硅-35	<1.3
			钾-40	502±11
			氡-41	<0.5
			铬-51	<3.3
			锰-54	<0.3
			铁-59	<0.8
2	厂界东南侧土壤	ZH18013005001	铀-238	39.7±6.9
			钍-232	45.6±1.0
			镭-226	23.4±0.9
			铍-7	12.4±1.9
			钠-22	<0.5
			硅-35	<1.2
			钾-40	640±12
			氡-41	<0.5
			铬-51	<3.2
			锰-54	<0.3
铁-59	<0.8			

注: ±后的数值为测量结果的 2 倍标准偏差; <后的数值为最小可探测活度浓度。

—以下数据空白—

## 苏州热工研究院有限公司环境检测中心 检测报告

报告编号：SNPI环检(电离)字[2018]第347号

第 5 页/共 5 页



图1 现场采样点位示意图