

附件



中华人民共和国国家标准

GB□□□□□-20□□

代替GB 5172-85

---

# 粒子加速器辐射安全与防护规定

The rule for radiation protection of particle accelerators

(征求意见稿)

20□□-□□-□□发布

20□□-□□-□□实施

---

生态环境部 发布  
国家市场监督管理总局

# 目 次

前 言.....	II
1 适用范围.....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和定义.....	1
4 一般要求.....	2
5 粒子加速器设施设计中的辐射安全与防护.....	3
6 粒子加速器运行中的辐射安全与防护.....	7
7 放射性废物管理.....	9
8 辐射监测.....	10
9 粒子加速器退役.....	12
附录 A（资料性附录）屏蔽体外剂量率控制水平.....	14
附录 B（资料性附录）冷却水系统产生 H <sub>2</sub> 浓度的估算方法.....	15
附录 C（资料性附录）粒子加速器维修工作条件和工作类别.....	17
附录 D（资料性附录）放射性废液解控要求.....	18
附录 E（资料性附录）一些放射性核素的导出空气浓度.....	19

# 前 言

为贯彻《中华人民共和国环境保护法》《中华人民共和国放射性污染防治法》和《放射性同位素与射线装置保护条例》，防治放射性污染，改善生态环境质量、保障公众和工作人员健康，规范粒子加速器的辐射安全与防护工作，制定本标准。

本标准规定了粒子加速器辐射安全与防护的一般要求，内容包括适用范围、粒子加速器的选址与布局、辐射屏蔽设计、辐射安全联锁系统、通风系统、运行中的辐射安全与防护、放射性废物管理和辐射监测等方面。

本标准首次发布于 1985 年，原标准起草单位为核工业部安全防护卫生局，本次为第一次修订。修订的主要内容如下：

1、修改了标准的适用范围；

2、根据国内外最新辐射防护安全基本标准、粒子加速器辐射安全与防护相关技术报告，结合我国粒子加速器辐射安全与防护的经验和成果，对剂量限值、辐射安全与防护设施的设计原则、运行中的辐射安全与防护、放射性废物管理、辐射监测等内容进行了修订；

3. 增加了选址与布局、辐射工作场所分区、水冷系统的设计等内容；

4. 取消了辐射安全管理内容。

5. 细化了辐射安全联锁系统、通风系统、放射性废物管理和辐射监测的内容。

6. 更新了 1 个附录，取消了 5 个附录，新增了 4 个附录。

本标准自实施之日起，《粒子加速器辐射防护规定》（GB5172-85）废止。

本标准由生态环境部辐射源安全监管司、法规与标准司组织制订。

本标准起草单位：中国原子能科学研究院、中国科学院高能物理研究所、中国科学院近代物理研究所、中国科学院上海高等研究院、中国辐射防护学会粒子加速器辐射防护分会、清华大学、中国科学技术大学。

本标准由生态环境部 2022 年 XX 月 XX 日批准。

本标准自 2023 年 XX 年 XX 月 XX 日起实施。

本标准由生态环境部解释。

# 粒子加速器辐射安全与防护规定

## 1 适用范围

本标准规定了粒子加速器辐射安全与防护的一般要求，包括粒子加速器辐射安全与防护设施的设计、操作中的辐射安全与防护、放射性废物管理和辐射监测等要求。

本标准适用于粒子加速器使用中的辐射安全与防护，带有自屏蔽装置等防护措施且满足相关法规标准要求的粒子加速器不包含在本标准中。已制定相关标准的粒子加速器执行既有标准，使用粒子加速器期间涉及放射性物质操作的辐射防护参照《操作非密封源的辐射防护规定》（GB11930-2010）执行。

本标准不适用于货物/车辆辐射检查系统用加速器和在室外使用的中子发生器。

## 2 规范性引用文件

标准引用了下列文件或其中的条款。凡是注明日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本标准。凡是未注日期的引用文件，其最新版本（包括所有修改单）适用于本标准。

GB18871 电离辐射防护与辐射源安全基本标准

HJ61-2021 辐射环境监测技术规范

## 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本标准。

### 3.1 粒子加速器 accelerator

一种用人工方法产生快速带电粒子束的装置，由粒子源、真空加速系统和导引、聚焦系统三个基本部分组成。

### 3.2 束流终端室 beam terminal region

将粒子加速器引出的束流用于开展科研实验、工业应用（辐照实验）、医疗诊断治疗等用途的场所。该场所一般情况下通过实体屏蔽与加速器束流产生、传输等区域隔离，并配置相应的辐射安全与防护措施。

### 3.3 靶 target

被加速器的带电粒子与其相互作用产生有用辐射的物质。

### 3.4 辐射防护最优化 optimization of radiation protection

在考虑了经济和社会的因素之后，源的设计与利用及与此有关的实践，应保证将辐射照射保持在可合理达到的尽量低水平。

### 3.5 纵深防御 defence in depth

针对给定的安全目标运用多种防护措施，使得即使其中一种防护措施失效，仍能达到该安全目标。

### 3.6 冗余性 redundancy

设置数量多于最低需要的单元或系统（相同的或不同的），以达到任一单元或系统的失效不至于引起所需总体安全功能丧失的措施。

### 3.7 多样性 diversity

为执行某一确定安全功能，设置多重部件或系统，这些部件或系统总体上具有一个或几个不同属性。

### 3.8 独立性 independence

某一安全部件发生故障时，不会造成其他安全部件的功能出现故障或失去作用。

### 3.9 辐射屏蔽 radiation shielding

指在电离辐射源和受其照射的某一区域之间，采用能减弱辐射的材料来降低此区域内的辐射水平。

### 3.10 天空反射 sky shine

又称天空散射或天空反散射，在辐射源设有足够厚的屏蔽墙而无顶部屏蔽，或屋顶较薄的情况下，射向天空的辐射受大气的反散射作用，造成屏蔽墙周围地面附近辐射场增强的现象。

### 3.11 联锁装置 interlock

一种安全控制方法（装置），使有关部件的动作相互关联，每个部件均必须处于规定状态或工况，否则辐射源不能投入运行或使用，或者使已投入运行或使用的辐射源立即关停。

### 3.12 辐射警告标志 radiation precaution sign

在实际或可能发射电离辐射的物质、材料（及其容器）和设备（及其所在区域）上附加的有一定规格和颜色的标志。

## 4 一般要求

4.1 粒子加速器使用单位应当根据国家有关法律、法规的规定建立健全辐射安全与防护管理体系，制定辐射安全与防护大纲，落实岗位职责和操作规程等管理制度。

4.2 粒子加速器使用单位在规划、设计、建设粒子加速器设施和使用粒子加速器的过程中，应遵循实践的正当性、防护最优化和剂量限值的原则，确保辐射工作人员和公众受照剂量处于安全合理的水平。

4.3 应根据纵深防御的原则，设置重叠的多层次的保护，使得即使有一种保护措施失效时，其安全功能也能得到补偿。同时确保辐射安全重要系统的物项具有适当的冗余性、多样性和独立性。

4.4 粒子加速器使用单位应规范收集、妥善暂存和处理其活动期间产生的放射性废物，并遵循“放射性废物最小化”原则。

4.5 应对粒子加速器辐射工作场所和周围环境进行定期的辐射监测和评估，证明采取的辐射安全与防护措施的有效性。

4.6 职业照射和公众照射的年剂量限值应符合 GB18871 中剂量限值的相关规定。

4.7 职业照射和公众照射剂量约束值应符合以下要求：

1) 一般情况下，职业照射约束值不超过  $5\text{mSv/a}$ ；对于高能、强流（一般指束流功率大于等于  $100\text{kW}$  且能量高于  $100\text{MeV}$ ）粒子加速器，检修维护人员的剂量约束值可适当放宽，一般不超过  $10\text{mSv/a}$ 。

2) 一般情况下，公众照射约束值不超过  $0.1\text{mSv/a}$ ；对于高能、强流（一般指束流功率大于等于  $100\text{kW}$  且能量高于  $100\text{MeV}$ ）粒子加速器，公众照射剂量约束值可适当放宽，一般不超过  $0.25\text{mSv/a}$ 。

4.8 粒子加速器辐射工作场所的放射性表面污染控制水平按 GB18871 中的要求执行。

## 5 粒子加速器设施设计中的辐射安全与防护

### 5.1 总的要求

5.1.1 粒子加速器设施的规划与设计阶段，必须对辐射安全与防护设施给予充分考虑，并考虑未来规划中可能使用的新设备、更高能量、更高流强和更大的工作负荷，对其辐射安全与防护设施留有适当的余地。

5.1.2 粒子加速器设施的设计阶段，应有辐射防护相关专业的人员参加。施工阶段，应对辐射安全与防护设施的工程质量进行检查，确保其满足设计要求。

5.1.3 粒子加速器辐射安全与防护设施，必须与主体工程同时设计、同时施工、同时投入使用。

5.1.4 粒子加速器辐射安全与防护设施的设计，应采用故障安全设计原则，安全设备或设备

电源的任何故障能在无需任何触发动作的条件下自动切断加速器束流和其他产生辐射的设备。

5.1.5 粒子加速器 辐射安全与防护设施设计，应充分考虑辐射事故应急的要求（如应急撤离通道、救援通道），任何利于辐射安全与防护的设计不得以牺牲应急需求为代价。

## 5.2 选址和布局

5.2.1 粒子加速器设施宜单独选址、集中建设，或建设在多层建筑物底层的一端。并考虑辐射防护的成本/代价及其对周围环境的影响，充分利用场址周边现有环境条件和设施，不得设在民居、写字楼和商住两用的建筑物内。

5.2.2 粒子加速器设施受束流直接照射的屏蔽体外相邻场所，不宜布置人员办公室、实验室和其他居留因子较高的功能用房。

## 5.3 辐射工作场所分区

5.3.1 粒子加速器辐射工作场所按控制区和监督区划分。一般情况下，控制区主要包括加速器室、束流终端室和放射性废物暂存区域等。

5.3.2 与控制区相邻的、不需要采取专门的防护手段和安全措施，但需要经常对职业照射条件进行监督和评价的区域划定为监督区，通常指与加速器操作有关的、辐射工作人员经常活动的工作区域（公众成员只偶尔出入该区域，且需在辐射工作人员的监督下）。

5.3.3 在控制区的进出口和其他适当位置设立符合 GB18871 中规定的电离辐射警告标志和工作状态指示装置。

5.3.4 在监督区的入口处设置表明监督区的标识。

## 5.4 辐射屏蔽

5.4.1 粒子加速器设施的辐射屏蔽设计应充分考虑粒子种类、能量、功率、靶材料、工作负荷、周围环境等因素，按可能最大的辐射源项进行设计。

5.4.2 辐射主体屏蔽设计时应充分考虑各种类型的瞬发辐射（直接贯穿辐射、天空反射、地面反射、侧向散射等）对周围邻近场所的影响。局部屏蔽设计时，还应考虑感生放射性的影响，对剂量约束值进行合理分配。

5.4.3 束流源项的确定不仅要考虑正常运行工况，还应适当考虑异常工况（如调束和正常运行时全束团突然丢失、储存环全环束流突然丢失）。

5.4.4 屏蔽体外剂量控制应符合以下要求：

- a) 粒子加速器设施屏蔽体外剂量率水平应确保各类人员的受照剂量满足 4.7 节的要求，

可参照附录 A 中的方法确定。

b)设有储存环的粒子加速器，储存环全环束流集中丢失在同一点的单次异常工况所致屏蔽体外累积剂量不超过 1mSv，全年发生该异常工况所致屏蔽体外累积剂量不超过 10mSv。

5.4.5 管道穿墙时（风管、电缆和水管）宜避开束流直接照射、墙外为全居留场所的屏蔽墙，不宜从人员可达区域穿墙。同时应采取不影响其屏蔽效果的方式，并根据计算结果进行屏蔽补偿。

## 5.5 辐射安全联锁系统

5.5.1 粒子加速器主要控制系统应利用开关钥匙或具有类似功能的装置控制，并设置操作控制系统人员的权限，确保在非运行期间开关钥匙或装置处于受控状态。对于控制区范围较大、布局较复杂的粒子加速器，该开关钥匙或具有类似功能的装置同时与加速器室的门禁系统互锁。

5.5.2 加速器室、束流终端室的出入口应设有门禁系统（身份识别系统）以防止人员未经授权进入或误入。

5.5.3 粒子加速器控制区出入口的门应设置门-机联锁，门未完全关闭时不能出束，出束状态下开门停止出束。

5.5.4 加速器室、束流终端室内设紧急开门装置，可从区域内部无条件开门。

5.5.5 加速器室、束流终端室内部墙壁及其各个出入口、控制室/台的显著位置，应设有足够数量的急停按钮。急停按钮周围应设有醒目标识及文字显示能确保上述区域内的人员从各个方向均能观察到且便于触发。

5.5.6 对于无法通过视频监控系统进行清场巡检的粒子加速器，应设置必须手动操作的清场巡检装置，设定清场巡检的响应时间和顺序，超出规定时间或顺序，需重新进行清场。对于设置分区清场的情况，各子区出入口应设联锁门，确保清场完成且联锁门关闭后清场方可生效。

5.5.7 加速器室、束流终端室内部和出入口应设有声光警示装置，宜采用不同颜色的光信号进行警示。加速器清场巡查期间，应同时发出声、光信号，提示人员离开。放射治疗室可只设置灯光警示装置。

5.5.8 加速器室、束流终端室内部应设有视频监控系统并在控制室内显示。

5.5.9 辐射安全联锁系统一旦触发后，须人工就地复位触发联锁的位置并且通过控制台才能重新启动束流。



5.5.10 触发辐射安全联锁系统引起加速器停机时，必须自动切断束流和暗电流等辐射源。

5.5.11 没有特殊理由，不得旁路安全联锁系统。因工作需要旁路安全联锁系统时，应通过单位辐射安全管理机构的批准与见证，对时间、原因等内容进行记录，并在控制台上给出显示，工作完成后应及时进行联锁恢复及功能测试，测试正常后方可继续使用。

## 5.6 区域辐射监测系统

5.6.1 应在加速器室、束流终端室的合适位置设置固定式区域辐射监测仪，监测仪器显示单元可设置在控制室内或机房门附近。监测点位的设置应遵循：

a) 设在加速器室和束流终端室内部的固定式区域辐射监测仪，应能真实反映上述区域内部辐射水平随加速器运行工况的变化；

b) 对于设置多束流终端室的情况，当束流终端室内居留因子较大时，应考虑相邻束流终端室的影响，在各束流终端室内设置固定式区域辐射监测仪，综合考虑辐射场分布和人员居留区域后确定监测仪器的位置；

c) 经前期评估或运行后监测确定感生放射性较严重的粒子加速器，应在加速器室设置固定式区域辐射监测仪，以便充分了解停机后加速器室内的辐射水平。必要时可设置剂量联锁以实现人员延迟进入。

5.6.2 应在高能粒子加速器（一般指能量高于 100MeV）屏蔽体外相邻场所内人员全居留区域、经评估或实际监测确定辐射水平接近由附录 A 确定的剂量率控制水平的场所安装区域辐射监测系统。当监测数据超过设定阈值时，发出报警信号。

5.6.3 应对屏蔽体内、外的辐射场组成和分布进行评估，区域辐射监测仪器的能量响应、测量范围、响应时间等指标应与辐射场的特点相匹配。

## 5.7 通风系统

5.7.1 粒子加速器使用场所内应设有满足辐射防护要求和臭氧、氮氧化物等有害气体排放的通风系统。

5.7.2 对于可能产生放射性气体的粒子加速器，应采取可信的方法对放射性气体浓度进行预测。对于预测结果超出附录 E 中的公众成员导出空气浓度限值  $\text{DAC}_p$  的情况，应在满足加速器运行和保持区域负压的前提下，尽可能通过增加排风口高度及其与周围公众的距离、降低放射性气体排放量（如降低运行期间的换气次数、延长排放前自行衰变时间）等措施，确保排出的放射性气体所致公众受照剂量低于其剂量约束值。

5.7.3 应合理布置粒子加速器使用场所进风口和排风口的位置，确保室内空气充分交换，室

外进风口应避免受到排气的污染。

5.7.4 排风口的位置和高度应结合放射性气体排放量、周围建筑的高度、当地气象条件以及环境影响评价结论等综合考虑后确定。避免设置在门、窗和人流较大的过道等位置，且需要重点关注与排风口等高处的人员受照剂量。

5.7.5 束流损失较大且可能引起空气活化程度较高的区域（如准直器、废束桶区），应考虑采用物理隔离密闭方式对设备进行局部包裹隔离，阻止隔离空间内的空气与外界自由对流。

## 5.8 水冷系统

5.8.1 应考虑可能会产生冷却水感生放射性的粒子加速器循环冷却水系统中位于屏蔽体外的水管、热交换器等对人员的外照射，对冷却水管和其他部件进行合理布局或附加屏蔽体，必要时应将其所在区域作为控制区管理。

5.8.2 封闭的水环境受到加速器较强的辐射场照射时，存在辐射分解产生氢气累积并爆炸的可能性。应按照附录 B 中的方法对其束流损失较大区域（如高功率靶、废束桶）水环境中氢气的产生量进行评估。经评估后若存在爆炸风险，需考虑采用储存、吹扫稀释或催化稀释的方式，定期排放析出的氢气。

5.8.3 应对氢气排放过程中，冷却水中随通风系统排入环境的气态放射性核素进行分析（如冷却水中主要的感生放射性核素和可能由于重靶活化后溶解到冷却水中的感生放射性核素），并对其活度浓度、排放量及其所致公众剂量进行评估。

## 6 粒子加速器运行中的辐射安全与防护

6.1 应当在下列条件同时满足时才能开机出束：

- a) 加速粒子的种类、能量、流强与许可范围一致；
- b) 控制台上的数字显示装置能正常工作；
- c) 联锁和警告系统能正常工作；
- d) 加速器室、束流终端室内除接受放射治疗的患者外不得有人；
- e) 加速器室、束流终端室所有出入口的门都已关闭；
- f) 辐射安全联锁系统和剂量监测系统均处于正常工作状态。

6.2 加速器的开机和停机必须在控制室/台上利用控制开关操作，除紧急情况外，不得用切断联锁的方式切断束流。

6.3 操作活化结构部件时，应严格遵守操作程序，并做好相应的辐射监测，必要时须采取一定的个人防护措施和通风措施。对操作过程中可能产生的碎屑等，应及时收集并对工作区域

进行去污。

6.4 操作活化结构部件结束后，应对工作人员的体表和衣服、工具以及工作地面等进行表面污染监测。

6.5 处理薄靶、剥离膜等活化材料的薄样品时应采用一定的防护措施（如佩戴手套、口罩或在通风柜内操作），必要时，需对操作人员可能接触污染部位的皮肤剂量进行评估。

6.6 中子发生器使用期间，应重点关注氚的防护：

a) 应使用工具操作氚靶，活度较高的氚靶应在通风柜或者手套箱内操作；

b) 氚靶必须存入专用干燥器，并放在具有良好通风的通风柜中。避免将多块未使用的新靶存放在同一容器内；

c) 废真空泵油须存入专门容器内，并防止泄漏，贮存处应有良好的通风。废弃后应作为放射性废物处理；

d) 检修真空泵时，应有合适的工具和工作地面，采取相应的个人防护措施和通风措施，避免真空泵油的泄漏；

e) 换靶或检修期间打开真空系统时应注意避免氚进入空气；

f) 真空系统构件检修期间，应有良好的通风，拆除的部件应存放在塑料袋中，检修人员应使用工具操作并穿戴防氚渗透的手套。

g) 使用含氚量较高的氚靶时，前级泵的排风口应安装氚处理净化系统，且应设计在建筑物外。

6.7 应对辐射安全联锁系统进行定期检查或测试。对于周期性运行的粒子加速器设施，在每个运行周期的开始，都应对整个系统进行全面测试；对于连续运行的粒子加速器设施，时间间隔不得超过 6 个月。此外，对于安全联锁系统整体运行的测试至少每月进行一次。对急停按钮、断束装置、关键设备联锁信号等进行全检，双人检查，做好并保存检查记录。

6.8 任何人员未经授权或允许不得进入控制区。工作人员需在确认加速器室、束流终端室的束流已经终止的情况下方可进入其内部，且需携带个人剂量报警仪。

6.9 应加强对在粒子加速器辐射工作场所工作的短期或流动工作人员的管理，确保其通过辐射安全与防护相关培训并考核合格后方可开展工作。采取一定措施限定其活动范围并按规定为其配备个人剂量计，由专人或专门的机构进行发放、回收和记录。

6.10 控制区范围较大、布局较复杂的大型粒子加速器在调试期间：

a) 调束开始前应确认辐射安全与防护设施功能正常。对于分区调试的情况，还应确认

待调束区下游区域的束流阻挡设备（如束流闸）落下或二级磁铁未通电，防止束流意外引出；

b)调试前期尽量使用单束团、小流强，待束流物理参数达到预期后再逐步增大流强直至达到预定值。应根据辐射水平监测结果对束流丢失的下游屏蔽体外工作场所的人员采取一定的临时隔离或疏散措施；

c)应采取相关技术手段对加速器能量由低到高、功率由小到大过程中的束流损失特征和辐射水平进行跟踪监测，为后续优化辐射防护措施和辐射安全管理提供参考和依据；

d)若发生全束团丢失的情况，应立即切断束流。经束流诊断排查故障后再重新调束。应确保单次全束团随机丢失工况所致屏蔽体外累积剂量不超过 1mSv，全年调束该工况所致屏蔽体外累积剂量不超过 10mSv；

e)应设置束流损失监测系统，确保在设计的束流损失参数范围内调束，并在束流参数超出设计范围时，能快速响应自动切断束流；若因工作需要，使用的束流参数超出设计范围，需制定详细的辐射防护方案，报生态环境监管部门批准后方可进行，并做好记录；

f)若需要进入控制区内部工作，应由辐射防护人员对区域辐射水平进行监测，重点关注束流损失较大位置处的辐射水平，必要时应采取一定的局部屏蔽措施降低人员受照剂量；

g)对于分段建设分段调试的粒子加速器，每阶段调试前都应取得生态环境监管部门的辐射安全许可，同时确保辐射安全与防护设施验收合格后方可开展调试工作。

6.11 维修人员进入加速器室等辐射水平较高的区域前，应先进行工作场所辐射监测，并根据监测结果结合工作人员个人剂量测量值制定工作计划、提出辐射防护措施，由单位辐射安全管理机构批准后方可进入工作。工作人员单次维修期间受照剂量不超过 1mSv，每季度受照剂量不超过年剂量约束值的 1/4。维修工作条件和具体类别见附录 C。

6.12 粒子加速器使用单位应根据可能发生的辐射事故的风险，编制相应的辐射事故应急预案，配备必要的应急设备（如辐射监测仪器、人员防护用品、应急照明和电源等），并定期组织进行应急演练。

## 7 放射性废物管理

7.1 放射性废物管理的规定主要针对能够产生感生放射性的粒子加速器。

### 7.2 放射性固体废物管理要求

7.2.1 不再利用的加速器束流损失区域及其周围的结构部件，应作为放射性固体废物处理。拆除后暂存在加速器控制区或单独的固体废物暂存间内，并根据其表面剂量率水平设置适当的屏蔽容器。

7.2.2 对于暂存在加速器控制区内的放射性固体废物，应在控制区内划定专门的区域，并采取适当的实体屏障进行物理隔离。

7.2.3 放射性固体废物的暂存容器、区域和场所应按规定设置电离辐射警告标志，并采取视频监控等防丢失、防盗措施。冷却水系统产生的废离子树脂的暂存，还应满足《危险废物贮存污染控制标准》中的相关要求。

7.2.4 应建立放射性固体废物台账，存放和处置前进行监测，记录废物名称、质量、辐射类别、监测设备、监测结果（剂量当量率）、监测日期、去向等相关信息。

7.2.5 放射性固体废物的转运，应执行严格的审批制度，并根据其辐射水平采取适当的屏蔽措施，以降低人员受照剂量。对于高辐射水平的放射性固体废物，尽量采用远程操作系统操作。

7.2.6 不能满足解控要求的放射性固体废物最终送交有资质单位收贮，能够满足解控要求的可作为一般固体废物处理。

### 7.3 放射性废液管理要求

7.3.1 循环冷却水系统在事故或检修期间排出的冷却水应按照放射性废液管理要求妥善收集贮存，暂存衰变至满足附录 D 中的解控要求后作为普通废液处理，并做好存档记录。

7.3.2 应在投入运行后三年内对粒子加速器控制区空调系统的冷凝水进行监测，并根据监测结果确定其类别和处理方式。若前期监测结果满足解控要求，在确保加速器运行参数不提升的前提下，可将其作为普通废液处理。

### 7.4 放射性气态废物管理要求

加速器停机后，应加强通风换气，降低加速器控制区内放射性气体的浓度。采取一定措施使人员延时进入加速器控制区，并确保人员进入前，区域内放射性气体浓度低于附录 E 工作人员的导出空气浓度  $DAC_w$ 。

## 8 辐射监测

### 8.1 监测管理

8.1.1 粒子加速器使用单位应制定辐射监测计划，并按照计划落实监测工作。不具备辐射监测能力的单位，可以委托有资质的单位进行监测。

8.1.2 所有辐射监测记录应建档保存，测量记录应包括但不限于测量对象、条件、方法、仪器、时间和人员等信息。

8.1.3 应定期对辐射监测结果进行评价，监测中发现异常情况应及时查找原因并报告，同时

进行整改。

## 8.2 工作场所监测

### 8.2.1 工作场所辐射剂量率监测

8.2.1.1 粒子加速器设施安装调试阶段和竣工后，都应基于最大运行工况下屏蔽体外辐射剂量率水平的监测数据对辐射屏蔽设计和施工效果进行评价，确定符合设计要求后方可投入运行。若监测结果超出由附录 A 确定的剂量率控制水平，应查明原因并及时采取增加局部屏蔽、限制束流参数等措施以确保屏蔽体外剂量率满足设计要求。

8.2.1.2 如加速器运行参数、屏蔽条件或区域的居留情况发生变化，有可能影响辐射安全时，应重新进行工作场所监测。必要时应采取的措施，确保在新条件下辐射水平达标。

8.2.1.3 利用便携式辐射监测仪器进行工作场所巡测时，监测点位应涵盖加速器室、束流终端室等控制区四周屏蔽墙体外 30cm 处、屋顶、迷道口、防护门外、控制室以及其他人员全居留场所。对于辐射水平较高的区域（该区域常规巡测的  $\gamma$  辐射剂量率达到其剂量率控制水平的 3/10，中子剂量当量率高于本底），应适当增加巡测频次。

### 8.2.2 表面污染监测

8.2.2.1 由于活化材料剥落、空气活化等原因可能引起表面污染的区域，应对其设备、墙壁和地面等的表面污染水平进行监测。

8.2.2.2 储存和使用氚靶（或含氚物质）的地方，以及可能存在氚表面污染的区域，必须定期进行表面污染的监测。

8.2.2.3 当各类物体的表面污染水平超过相应的限值时，应采取保护措施或及时去污，防止污染扩散。

### 8.2.3 气载放射性监测

8.2.3.1 对于气载放射性预测结果超出附录 E 中的公众成员导出空气浓度限值  $\text{DAC}_p$  的情况，应考虑设置空气实时监测系统对存在气载放射性区域的浓度和排风口的浓度进行监测，并根据预测结果或监测结果评估气载放射性对公众所致的受照剂量。

8.2.3.2 气载放射性预测结果超出  $\text{DAC}_p$  的粒子加速器，应考虑设置气载放射性的年排放限值。发现超排放限值的情况应及时上报并查找原因，采取措施控制放射性气体排放量。

## 8.3 环境监测

8.3.1 应由有资质的监测机构对粒子加速器设施周围环境的辐射水平进行监测，监测频次应

不少于 1 次/年。

8.3.2 环境监测方案可随加速器运行的不同阶段而改变。投入运行后三年内应根据《辐射环境监测技术规范》（HJ61-2021）中的相关要求开展监测，若前期监测结果无异常，在加速器运行参数不提升的前提下，后期运行时可根据污染物排放情况适当简化监测内容或降低监测频次。

8.3.3 固定式环境辐射监测仪的安装点位应根据粒子加速器产生的辐射场、天空反射特征，并结合周围环境分布和居留因子等因素合理布置，并将监测数据接入计算机管理系统。

#### 8.4 个人剂量监测

8.4.1 粒子加速器使用单位的辐射工作人员应佩戴个人剂量计，对个人外照射剂量进行监测。同时应根据射线类型选择合适的个人剂量计。因工作需要进入辐射工作场所的临时人员应纳入个人剂量监测范围。

8.4.2 如确知或者怀疑人员吸入或摄入了放射性核素时，应进行内照射监测，如取尿样分析或用全身计数器进行测量等。

8.4.3 个人剂量档案应妥善保存，监测数据异常时，应及时查明原因并报告生态环境主管部门。

#### 8.5 监测设备

8.5.1 应根据粒子加速器类型、能量和使用方式等配备相应的辐射监测设备。

8.5.2 辐射监测仪器的选择，应基于辐射场组成、次级粒子的能谱分布等因素综合考虑，配备的辐射监测仪器必须具有以下功能：

- a. 对待测辐射有正确的响应；
- b. 仪器的测量下限不高于设定的控制水平的 1/2；
- c. 仪器有足够的测量上限，应不低于报警阈值的 10 倍；
- d. 脉冲辐射场剂量监测需要选择合适的测量仪器，充分考虑脉冲宽度和仪器死时间的关系。

对于主动式测量仪器无法适用（可能导致测量结果严重偏低）的情况，应采用剂量片等被动式剂量测量方法。

8.5.3 所有的辐射监测仪器应在国家计量部门或其授权的校准机构检定/校准或自行检定/校准，时间间隔不得超过 1 年。维修后（主要指影响探测器响应类型的维修）后需重新检定/校准。

### 9. 粒子加速器的退役

9.1 在粒子加速器设施设计、建造和运行阶段，应考虑未来便于实施退役的要求，优化粒子加速器的设计和运行：

a)应选择合适的材料，尽可能降低其在粒子加速器运行期间的活化程度。材料同时应具备抗化学腐蚀性和耐磨性，便于去污；

b)应考虑运维、去污、拆卸以及退役期间各类设备操作的空间需求，设计易于进出粒子加速器区域的通道；

c)应提高束流传输效率，减少不必要的束流损失。通过优化布局，尽可能避免在束流损失较大的区域周围布置加速器结构部件和设备，以延长电子学设备的使用寿命，减少放射性废物的产生量；

d)应充分考虑运行期间放射性废物的放射性水平和产生量，按照放射性水平、组成进行分类储存、严格管理。并设置合理、充足的废物储存场所和容器，为能够通过自行衰变达到解控水平的放射性废物预留足够的空间和时间。同时，放射性废物储存场所的设计还应能确保退役期间产生的可重复利用的放射性废物（如混凝土墙、建筑支撑结构等大型物料）在解控前能够长期、安全储存，实现废物最小化；

e)加速器运行阶段，应认真做好工作场所和环境监测数据记录、保存，作为将来制定退役计划的依据；

f)满足解控要求的放射性废物应及时实施解控，避免其与新产生的放射性水平较高的放射性废物混合存放，实现放射性废物最小化。

9.2 粒子加速器退役前，应制定详细的退役方案和放射性废物处理方案，尽可能在确保所有放射性废物处理措施能够有效落实后，按照退役方案实施安全退役。

9.3 粒子加速器退役期间，应加强辐射防护和环境保护。整个退役过程中，都应进行环境监测，必要时可进行场外环境监测，以确保环境安全。



## 附录 A

(资料性附录)

### 屏蔽体外剂量率控制水平

粒子加速器屏蔽体外关注点处剂量率控制水平应综合考虑年剂量约束值、加速器年运行时间、使用因子和关注点的居留因子后确定，可按公式 A.1 估算：

$$\dot{H}_c \leq \frac{H}{t \times U \times T} \quad (\text{A.1})$$

式中，

$\dot{H}_c$ ——关注点处剂量率控制水平 (Sv/h)；

H ——关注点处人员的年剂量约束值 (Sv)；

t ——加速器年运行时间 (h)；

U ——使用因子，无量纲；

T ——关注点的居留因子，无量纲；不同场所居留因子的推荐值见表 A.1。

表 A.1 不同场所的居留因子

场所	居留因子 T		示例
	范围	典型值	
全居留	1	1	控制室、人员办公室、值班室、速调管走廊、激光间、操作间、实验大厅、实验站区等
部分居留	1/2~1/5	1/4	相邻的束流终端室、与屏蔽体相邻的设备用房/技术厅、公共设施用房、电源间、高频室、低温厅、实验准备室、设备间、中控机房、仓储库房等走廊、工作人员会议室、休息室等
偶然居留	1/8~1/40	1/16	管线走廊、门外、无人看管的电梯间、楼梯间、卫生间、茶水间、户外道路、无人看管的停车场、仅有行人车辆来往的户外区域、不需要人员达到并只有借助工具才能进入的屋顶区域等

注：已制定相关标准的粒子加速器工作场所的居留因子执行既有标准中的规定。

## 附录 B

(资料性附录)

### 冷却水系统产生 H<sub>2</sub> 浓度的估算方法

粒子加速器循环冷却水系统中的冷却水受到辐照而分解，会产生 H<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 和 H、OH 等各种自由基，并随冷却水循环和这些产物的扩散而分布到整循环冷却水系统。在持续辐照的条件下，经过一定时间后，H<sub>2</sub> 在水中的浓度会达到其饱和溶解度，从而达到平衡状态。之后，产生的 H<sub>2</sub> 将从冷却水储水罐的水中溢出，聚集在储水罐上方的空气中。当冷却水储罐空气中积累的 H<sub>2</sub> 体积浓度达到爆炸下限（4%）时，存在爆炸风险。

B.1 当达到平衡状态时，冷却水中 H<sub>2</sub> 分子的产生速率  $n$  见式 B.1。

$$n = \frac{PG}{N_A \times 6.25 \times 10^{18}} \quad (\text{B.1})$$

式中：

$n$ ——平衡状态时，冷却水中 H<sub>2</sub> 的产生速率（mol/s）；

$P$ ——冷却水中的功率沉积（W）；

$G$ ——水中吸收每单位辐射能量产生 H<sub>2</sub> 分子的个数（eV<sup>-1</sup>），取值 0.0014 eV<sup>-1</sup>；

$N_A$ ——阿伏伽德罗常数（mol<sup>-1</sup>），取值  $6.022 \times 10^{23} \text{mol}^{-1}$ 。

B.2 当达到平衡状态时，冷却水中溶解的 H<sub>2</sub> 量  $N_1$  见式 B.2。

$$N_1 = S \times V_c \quad (\text{B.2})$$

式中，

$N_1$ ——冷却水中溶解 H<sub>2</sub> 的量（mol）；

$S$ ——H<sub>2</sub> 在水中的饱和溶解度（mol/m<sup>3</sup>），取值  $8.0 \times 10^{-3} \text{mol/m}^3$ ；

$V_c$ ——冷却水的体积（m<sup>3</sup>）。

B.3 冷却水中产生 H<sub>2</sub> 的量达到饱和溶解度所需要的时间  $t_1$ （s）见式 B.3。

$$t_1 = \frac{N_1}{n} \quad (\text{B.3})$$

B.4 冷却水储水罐中 H<sub>2</sub> 达到爆炸下限累积的量  $N_2$  见式 B.4。

$$N_2 = \frac{0.04V_{air}}{V_m} \quad (\text{B.4})$$

式中，

$N_2$ ——冷却水储水罐中累积的 H<sub>2</sub> 的量（mol）；

$V_{\text{air}}$ ——冷却水储水罐中空气的体积 ( $\text{m}^3$ )；

$V_m$ ——标准状况下，空气的摩尔体积 ( $\text{m}^3/\text{mol}$ )，取值  $2.24 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{mol}$ ；

B.5 冷却水储水罐中  $\text{H}_2$  达到爆炸下限累积的时间  $t_2$  (s) 见式 B.5。

$$t_2 = \frac{N_2}{n}$$

(B.5)

B.6 假设冷却水中持续产生  $\text{H}_2$ ，且冷却水循环使用，没有更换冷却水或采取其他措施  $\text{H}_2$ 。则从冷却水开始被辐照产生  $\text{H}_2$ ，到  $\text{H}_2$  的产生量第一次达到爆炸下限，需要的总时间  $t$  (s) 见式 B.6。之后，储水罐中  $\text{H}_2$  每次需要被释放的时间间隔为  $t_2$ 。

$$t = t_1 + t_2$$

(B.6)

B.7 假设检修时更换了体积  $V$  的冷却水，该部分冷却水可继续溶解  $\text{H}_2$ 。可利用 B.1~B.6 中的方法计算得出检修后，再一次达到爆炸下限需要的总时间  $t$  以及储水罐中  $\text{H}_2$  每次需要被释放的时间间隔  $t_2$ 。

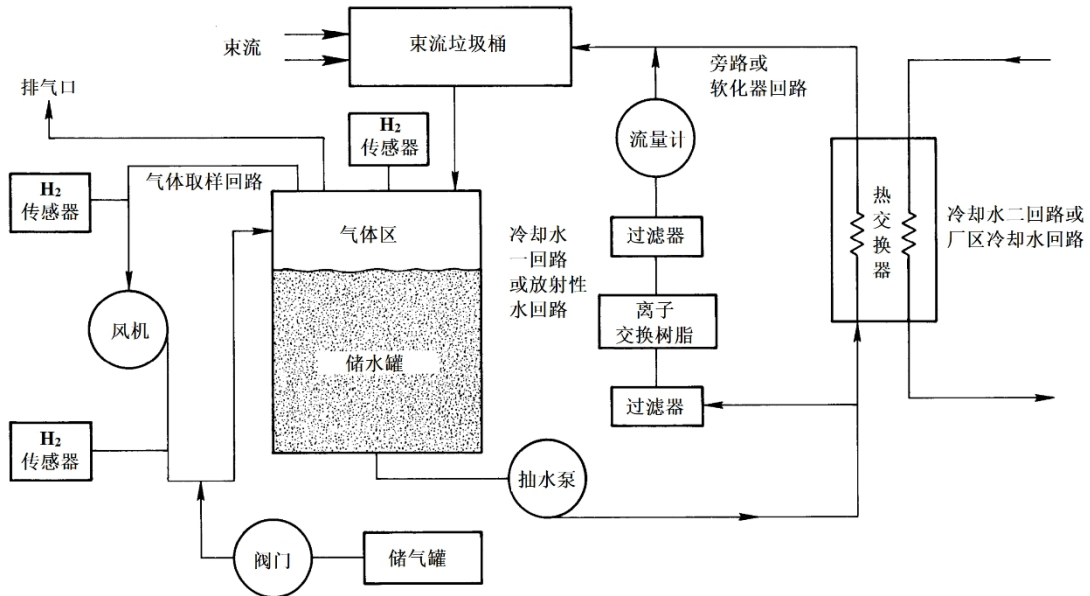


图 B.1 冷却水回路及  $\text{H}_2$  探测、吹扫、排放示意图

## 附录 C

(资料性附录)

### 粒子加速器维修工作条件和工作类别

附表 C.1 粒子加速器维修工作条件和工作类别

维修工作条件	维修工作类别
距设备表面 30cm 处剂量率 <0.1mSv/h	手工维修不受限制
距设备表面 30cm 处剂量率 0.1~1mSv/h	手工维修需要控制时间。具体工作时间根据维修现场剂量率测量结果计算后确定
距设备表面 30cm 处剂量率 >1mSv/h	手工维修工作需要经过单位辐射安全管理机构审批，并采取严格的辐射防护措施

注.任何工作条件下，都应尽量采取延长停机等待时间、增加工作距离、热点区域设置局部屏蔽、剂量分摊等措施合理可行地降低人员受照剂量。

附录 D  
(资料性附录)

放射性废液解控要求

- D.1 放射性废液中可能产生的主要放射性核素的  $ALI_{min}$  值见表 D.1。

表 D.1 放射性废液中可能产生的主要放射性核素的  $ALI_{min}$

核素	单次排放限值 $1ALI_{min}$ , Bq	单月排放限值 $10ALI_{min}$ , Bq
$^3H$	4.76E+08	4.76E+09
$^7Be$	3.85E+08	3.85E+09

D.2 《污水综合排放标准》(GB8978-1996)中规定的污水中放射性物质最高允许排放浓度见表 D.2。

表 D.2 污水中放射性物质的最高允许排放浓度

项目	排放标准, Bq/L
总 $\alpha$	1
总 $\beta$	10

D.3 放射性废液同时满足 D.1 和 D.2 的要求方可作为普通废液处理。

附录 E  
(资料性附录)

一些放射性核素的导出空气浓度

E.1 本附录定义的导出空气浓度 DAC (Derived Air Concentration) 包括针对辐射工作人员规定的导出空气浓度  $DAC_w$  和针对公众成员规定的导出空气浓度  $DAC_p$ 。

E.2 导出空气浓度  $DAC_w$  是根据职业照射剂量限值 20mSv/a 给出的放射性核素在空气中的活度浓度, 并将其作为进入空气活化区前需要评估的量。

E.3 导出空气浓度  $DAC_p$  是根据公众照射剂量限值 1mSv/a 给出的放射性核素在空气中的活度浓度, 并将其作为放射性气体排放前需要进行评估的量。

E.4 照射途径考虑空气浸没 (按无限烟云考虑) 和吸入两种照射途径。

E.5 仅考虑空气吸入途径时, 工作人员、公众成员吸入空气的  $DAC_{inh,w}$  和  $DAC_{inh,p}$  见式 E.1 和式 E.2:

$$DAC_{inh,w} = \frac{E \times 10^{-3}}{t U_{inh} G_{inh,w}} \quad (E.1)$$

$$DAC_{inh,p} = \frac{E \times 10^{-3}}{t U_{inh} G_{inh,p}} \quad (E.2)$$

式中,

$DAC_{inh,w}$  (Derived Air Concentration for workers from inhalation) ——仅考虑空气吸入途径时, 工作人员的导出空气浓度限值 ( $Bq/m^3$ );

$DAC_{inh,p}$  (Derived Air Concentration for the public from inhalation) ——仅考虑空气吸入途径时, 公众成员的导出空气浓度限值 ( $Bq/m^3$ );

E——年有效剂量限值 (mSv); 职业照射年剂量限值取 20mSv, 公众照射年剂量限值取 1mSv;

$G_{inh,w}$ ——工作人员吸入单位放射性核素的待积有效剂量 (Sv/Bq), 具体取值见附表 E1。

$G_{inh,p}$ ——公众成员吸入单位放射性核素的待积有效剂量 (Sv/Bq), 具体取值见附表 E2。

$U_{inh}$ ——每小时吸入空气的量 ( $m^3/h$ ), 见附表 E4;

t——年照射时间 (h), 工作人员取 2000h, 公众成员取 8760h。

E.6 仅考虑空气浸没途径时, 工作人员、公众成员空气浸没的  $DAC_{sub,w}$  和  $DAC_{sub,p}$  见

式 E.3 和式 E.4。

$$DAC_{sub,w} = \frac{E \times 10^{-3}}{tG_{sub,w}}$$

(E.3)

$$DAC_{sub,p} = \frac{E \times 10^{-3}}{tG_{sub,p}}$$

(E.4)

式中：

$DAC_{sub,w}$  (Derived Air Concentration for workers from submersion) ——仅考虑空气浸没途径时，工作人员的导出空气浓度限值 (Bq/m<sup>3</sup>)；

$DAC_{sub,p}$  (Derived Air Concentration for the public from submersion) ——仅考虑空气浸没途径时，公众成员的导出空气浓度限值 (Bq/m<sup>3</sup>)；

$G_{sub,w}$  ——工作人员空气浸没有效剂量转换因子(Sv/s)/(Bq/m<sup>3</sup>)，具体取值见附表 E1。

$G_{sub,p}$  ——公众成员（成人或儿童）空气浸没有效剂量转换因子(Sv/s)/(Bq/m<sup>3</sup>)，具体取值见附表 E3。

$t$  ——年照射时间 (s)，工作人员取  $7.2 \times 10^6$ s，公众成员取  $3.17 \times 10^7$ s。

E.7 同时考虑吸入和空气浸没两种途径，工作人员和公众成员的  $DAC_w$  和  $DAC_p$  见式 E.5 和 E.6。

$$DAC_w = \frac{DAC_{inh} \cdot DAC_{sub}}{DAC_{inh} + DAC_{sub}}$$

( E.5 )

$$DAC_p = \frac{DACS_{inh} \cdot DAC_{sub}}{DACS_{inh} + DAC_{sub}}$$

(E.6)

式中：

$DAC_w$  (Derived Air Concentration for workers) ——同时考虑考虑空气吸入和空气浸没途径时，工作人员的导出空气浓度限值 (Bq/m<sup>3</sup>)；

$DAC_p$  (Derived Air Concentration for the public) ——同时考虑考虑空气吸入和空气浸没途径时，公众成员的导出空气浓度限值 (Bq/m<sup>3</sup>)。

E.8  $DAC_w$  和  $DAC_p$  计算结果见附表 E5~E9。

E.9 对于与肺吸收类别有关的  $DAC_w$  和  $DAC_p$  值，当肺吸收类别不能确定时，从保守角度出发，应取最大值。

E.10 当排放的放射性气体中存在多种核素时，要求每一种核素与其  $DAC_w$  和  $DAC_p$  的比值之和小于 1。



附表 E1 工作人员吸入单位核素的待积有效剂量和空气浸没有效剂量转换因子

核素	类别	吸入单位核素的待积有效剂量 (Sv/Bq)		空气浸没有效剂量转换因子, (Sv/s) / (Bq/m <sup>3</sup> )
<b>H</b>				
H-3 (氚化水)	—	1.80E-11		3.80E-20
H-3 (氚气)	—	1.80E-15		
H-3 (有机氚)	—	4.10E-11		
H-3 (氚化甲烷)	—	1.8E-13		
<b>Be</b>				
Be-7	—	AMAD=1μm	AMAD=5μm	2.18E-15
	M	4.80E-11	4.30E-11	
	S	5.20E-11	4.60E-11	
Be-10	M	9.10E-09	6.70E-09	5.57E-16
	S	3.20E-08	1.90E-08	
<b>C</b>				
C-11 (蒸气)	—	3.20E-12		4.58E-14
C-11 (CO <sub>2</sub> )	—	2.20E-12		
C-11 (CO)	—	1.20E-12		
C-14 (蒸气)	—	5.80E-10		3.86E-17
C-14 (CO <sub>2</sub> )	—	6.50E-12		
C-14 (CO)	—	8.03E-13		
<b>N</b>				
N-13	—	—		4.62E-14
N-16	—	—		2.78E-13
<b>O</b>				
O-14	—	—		1.63E-13
O-15	—	—		4.72E-14
O-19	—	—		5.11E-14
<b>Ar</b>				
Ar-41	—	—		6.20E-14
<b>Kr</b>				
Kr-79	—	—		1.09E-14
<b>Xe</b>				
Xe-122	—	—		2.08E-15
Xe-125	—	—		1.05E-14
Xe-127	—	—		1.09E-14
<b>I</b>				
I-120	—	AMAD=1μm	AMAD=5μm	1.30E-13
	F	1.0E-10	1.91E-10	
I-122	F	1.0E-10	1.91E-10	4.65E-14

注：1. 工作人员吸入单位放射性核素的待积有效剂量取自 GB18871-2002 表 B3 和 ICRP 68 号出版物表 C.1；

2. 工作人员空气浸没外照射剂量转换因子取自《Federal Guidance Report No.15:External Exposure to Radionuclides in Air,Water and Soil》表 4-6 中成年人空气浸没有效剂量转换因子。

3. 由于文献中没有 I-122 的吸入剂量转换因子，考虑到 I-122 与其同位素 I-120 的基本物理化学性质相同、衰变模式相同（均为正电子衰变）、释放能量接近、且半衰期相差不大（I-120 的半衰期略高于 I-122 的半衰期，其空气浸没剂量因子为 I-122 的 2.7 倍），保守考虑，取 I-120 的内照射因子代替 I-122 的内照射因子。

4. 本表中仅列出目前已经鉴别出的与加速器活化空气相关的核素作为示例。

附表 E2 公众吸入单位核素的待积有效剂量, Sv/Bq

核素	类别	≤1 岁	1~2 岁	2~7 岁	7~12 岁	12~17 岁	成年人
氟化水	F	2.60E-11	2.00E-11	1.10E-11	8.20E-12	5.90E-12	6.20E-12
	M	3.40E-10	2.70E-10	1.40E-10	8.20E-11	5.30E-11	4.50E-11
	S	1.20E-09	1.00E-09	6.30E-10	3.80E-10	2.80E-10	2.60E-10
	V	6.40E-11	4.80E-11	3.10E-11	2.30E-11	1.80E-11	1.80E-11
元素氢	V	6.40E-15	4.80E-15	3.10E-15	2.30E-15	1.80E-15	1.80E-15
氟化甲烷	V	6.40E-13	4.80E-13	3.10E-13	2.30E-13	1.80E-13	1.80E-13
有机束缚氟	V	1.10E-10	1.10E-10	7.00E-11	5.50E-11	4.10E-11	4.10E-11
Be-7	M	2.50E-10	2.10E-10	1.20E-10	8.30E-11	6.20E-11	5.00E-11
	S	2.80E-10	2.40E-10	1.40E-10	9.60E-11	6.80E-11	5.50E-11
Be-10	M	4.10E-08	3.40E-08	2.00E-08	1.30E-08	1.10E-08	9.60E-09
	S	9.90E-08	9.10E-08	6.10E-08	4.20E-08	3.70E-08	3.50E-08
C-11	F	1.00E-10	7.00E-11	3.20E-11	2.10E-11	1.30E-11	1.10E-11
	M	1.50E-10	1.10E-10	4.90E-11	3.20E-11	2.10E-11	1.80E-11
	S	1.60E-10	1.10E-10	5.10E-11	3.30E-11	2.20E-11	1.80E-11
C-14	F	6.10E-10	6.70E-10	3.60E-10	2.90E-10	1.90E-10	2.00E-10
	M	8.30E-09	6.60E-09	4.00E-09	2.80E-09	2.50E-09	2.00E-09
	S	1.90E-08	1.70E-08	1.10E-08	7.40E-09	6.40E-09	5.80E-09
N-13	—	—	—	—	—	—	—
N-16	—	—	—	—	—	—	—
O-14	—	—	—	—	—	—	—
O-15	—	—	—	—	—	—	—
O-19	—	—	—	—	—	—	—
Ar-41	—	—	—	—	—	—	—
Kr-79	—	—	—	—	—	—	—
Xe-122	—	—	—	—	—	—	—
Xe-125	—	—	—	—	—	—	—
Xe-127	—	—	—	—	—	—	—
I-120	F	1.3E-09	1.0E-09	4.8E-10	2.3E-10	1.4E-10	1.0E-10
	M	1.1E-09	7.3E-10	3.4E-10	2.1E-10	1.3E-10	1.0E-10
	S	1.0E-09	6.9E-10	3.2E-10	2.0E-10	1.2E-10	1.0E-10
I-122	F	1.3E-09	1.0E-09	4.8E-10	2.3E-10	1.4E-10	1.0E-10
	M	1.1E-09	7.3E-10	3.4E-10	2.1E-10	1.3E-10	1.0E-10
	S	1.0E-09	6.9E-10	3.2E-10	2.0E-10	1.2E-10	1.0E-10

注：1.数据取自 GB18871-2002 表 B7 和表 B9。

2. 由于文献中没有 I-122 的吸入剂量转换因子，考虑到 I-122 与其同位素 I-120 的基本物理化学性质相同、衰变模式相同（均为正电子衰变）、释放能量接近、且半衰期相差不大（I-120 的半衰期略高于 I-122 的半衰期，其空气浸没剂量因子为 I-122 的 2.7 倍），保守考虑，取 I-120 的内照射因子代替 I-122 的内照射因子。

3. 本表中仅列出目前已经鉴别出的与加速器活化空气相关的核素作为示例。

附表 E3 公众成员空气浸没有效剂量转换因子, Sv/Bq

核素	≤1 岁	1~2 岁	2~7 岁	7~12 岁	12~17 岁	成年人
H-3	4.91E-20	4.73E-20	4.48E-20	4.27E-20	3.96E-20	3.80E-20
Be-7	2.94E-15	2.76E-15	2.62E-15	2.49E-15	2.28E-15	2.18E-15
Be-10	6.81E-16	6.62E-16	6.33E-16	6.10E-16	5.76E-16	5.57E-16
C-10	1.06E-13	1.01E-13	9.55E-14	9.08E-14	8.36E-14	8.00E-14
C-11	6.14E-14	5.78E-14	5.49E-14	5.21E-14	4.79E-14	4.58E-14
C-14	4.92E-17	4.76E-17	4.51E-17	4.31E-17	4.02E-17	3.86E-17
N-13	6.19E-14	5.83E-14	5.53E-14	5.26E-14	4.83E-14	4.62E-14
N-16	3.21E-13	3.15E-13	3.06E-13	2.97E-13	2.86E-13	2.78E-13
O-14	2.04E-13	1.96E-13	1.88E-13	1.80E-13	1.69E-13	1.63E-13
O-15	6.31E-14	5.94E-14	5.64E-14	5.36E-14	4.93E-14	4.72E-14
O-19	6.55E-14	6.27E-14	5.94E-14	5.69E-14	5.31E-14	5.11E-14
Ar-41	7.85E-14	7.59E-14	7.21E-14	6.90E-14	6.45E-14	6.20E-14
Kr-79	1.48E-14	1.39E-14	1.31E-14	1.24E-14	1.14E-14	1.09E-14
Xe-122	3.12E-15	2.79E-15	2.58E-15	2.45E-15	2.18E-15	2.08E-15
Xe-125	1.49E-14	1.37E-14	1.26E-14	1.20E-14	1.09E-14	1.05E-14
Xe-127	1.56E-14	1.43E-14	1.32E-14	1.26E-14	1.14E-14	1.09E-14
I-120	1.66E-13	1.59E-13	1.52E-13	1.45E-13	1.36E-13	1.30E-13
I-122	6.18E-14	5.84E-14	5.55E-14	5.28E-14	4.86E-14	4.65E-14

注：1.数据取自 FGR 15 号报告表 4-6。该报告中的年龄分组情况为：≤1 岁、1~3 岁、3~7 岁、7~12 岁、12~17 岁、成年人。

2. 本表中仅列出目前已经鉴别出的与加速器活化空气相关的核素作为示例。

附表 E4 不同年龄组的空气摄入量

年龄组	空气摄入量, m <sup>3</sup> /h
≤1 岁	0.2
1~2 岁	0.2
2~7 岁	0.4
7~12 岁	0.6
12~17 岁	0.8
成年人	0.9

注：表中数据取自 ICRP 89 号出版物中不同年龄组不同性别人群每日空气摄入量。由于本次计算未区分性别，空气摄入量选取不同性别的最大值，每日的摄入时间按 24h 计，可推导得出每小时空气摄入量。

附表 E5 DAC<sub>inh,w</sub> 和 DAC<sub>sub,w</sub>

核素	类别	DAC <sub>inh,w</sub> , Bq/m <sup>3</sup>	DAC <sub>sub,w</sub> , Bq/m <sup>3</sup>
<b>H</b>			
H-3 (氚化水)	—	4.1E+05	7.3E+10
H-3 (氚气)	—	6.2E+09	
H-3 (有机氚)	—	2.7E+05	
H-3 (氚化甲烷)	—	6.2E+07	
<b>Be</b>			
Be-7	M	2.3E+05	1.3E+06
	S	2.1E+05	
Be-10	M	1.2E+03	5.0E+06
	S	3.5E+02	
<b>C</b>			
C-11 (蒸气)	—	3.5E+06	6.1E+04
C-11 (CO <sub>2</sub> )	—	5.1E+06	
C-11 (CO)	—	9.3E+06	
C-14 (蒸气)	—	1.9E+04	7.2E+07
C-14 (CO <sub>2</sub> )	—	1.7E+06	
C-14 (CO)	—	1.4E+07	
<b>N</b>			
N-13	—	—	6.0E+04
N-16	—	—	1.0E+04
<b>O</b>			
O-14	—	—	1.7E+04
O-15	—	—	5.9E+04
O-19	—	—	5.4E+04
<b>Ar</b>			
Ar-41	—	—	4.5E+04
<b>Kr</b>			
Kr-79	—	—	2.6E+05
<b>Xe</b>			
Xe-122	—	—	1.3E+06
Xe-125	—	—	2.7E+05
Xe-127	—	—	2.6E+05
<b>I</b>			
I-120		5.8E+04	2.1E+04
I-122		5.8E+04	6.0E+04

注: 1. 工作人员吸入内照射 DAC 浓度选取 AMAD1 $\mu$ m 和 5 $\mu$ m 对应的剂量转换因子计算结果中的较小值;

2. 本表中仅列出部分与加速器活化空气相关的核素作为示例。

附表 E6 DAC<sub>inh,p</sub>, Bq/m<sup>3</sup>

核素	类别	≤1 岁	1~2 岁	2~7 岁	7~12 岁	12~17 岁	成年人
氟化水	F	1.69E+04	1.55E+04	1.84E+04	1.47E+04	1.55E+04	1.33E+04
	M	1.29E+03	1.15E+03	1.45E+03	1.47E+03	1.72E+03	1.83E+03
	S	3.67E+02	3.10E+02	3.22E+02	3.16E+02	3.26E+02	3.16E+02
	V	6.88E+03	6.46E+03	6.55E+03	5.22E+03	5.07E+03	4.57E+03
元素氢	V	1.03E+08	9.69E+07	9.82E+07	7.84E+07	7.61E+07	6.86E+07
氟化甲烷	V	1.03E+06	9.69E+05	9.82E+05	7.84E+05	7.61E+05	6.86E+05
有机束缚氟	V	6.00E+03	4.23E+03	4.35E+03	3.28E+03	3.34E+03	3.01E+03
Be-7	M	2.64E+03	2.21E+03	2.54E+03	2.17E+03	2.21E+03	2.47E+03
	S	2.36E+03	1.94E+03	2.17E+03	1.88E+03	2.01E+03	2.24E+03
Be-10	M	1.61E+01	1.37E+01	1.52E+01	1.39E+01	1.25E+01	1.29E+01
	S	6.67E+00	5.11E+00	4.99E+00	4.29E+00	3.70E+00	3.53E+00
C-11	—	6.60E+03	6.64E+03	9.51E+03	8.58E+03	1.05E+04	1.12E+04
	—	4.40E+03	4.23E+03	6.21E+03	5.63E+03	6.52E+03	6.86E+03
	—	4.13E+03	4.23E+03	5.97E+03	5.46E+03	6.23E+03	6.86E+03
C-14	—	1.08E+03	6.94E+02	8.46E+02	6.22E+02	7.21E+02	6.17E+02
	—	7.95E+01	7.05E+01	7.61E+01	6.44E+01	5.48E+01	6.17E+01
	—	3.47E+01	2.74E+01	2.77E+01	2.44E+01	2.14E+01	2.13E+01
N-13	—	—	—	—	—	—	—
N-16	—	—	—	—	—	—	—
O-14	—	—	—	—	—	—	—
O-15	—	—	—	—	—	—	—
O-19	—	—	—	—	—	—	—
Ar-41	—	—	—	—	—	—	—
Kr-79	—	—	—	—	—	—	—
Xe-122	—	—	—	—	—	—	—
Xe-125	—	—	—	—	—	—	—
Xe-127	—	—	—	—	—	—	—
I-120	F	5.08E+02	4.65E+02	6.34E+02	7.84E+02	9.78E+02	1.23E+03
	M	6.00E+02	6.37E+02	8.95E+02	8.58E+02	1.05E+03	1.23E+03
	S	6.60E+02	6.74E+02	9.51E+02	9.01E+02	1.14E+03	1.23E+03
I-122	F	5.08E+02	4.65E+02	6.34E+02	7.84E+02	9.78E+02	1.23E+03
	M	6.00E+02	6.37E+02	8.95E+02	8.58E+02	1.05E+03	1.23E+03
	S	6.60E+02	6.74E+02	9.51E+02	9.01E+02	1.14E+03	1.23E+03

注：1.后期可基于全国第七次人口普查数据，获取各年龄组的人口数据。进行加权后得到总的公众成员吸入内照射导出空气浓度。

2. 本表中仅列出部分与加速器活化空气相关的核素作为示例。

附表 E7 DAC<sub>sub,p</sub> , Bq/m<sup>3</sup>

核素	≤1 岁	1~2 岁	2~7 岁	7~12 岁	12~17 岁	成年人
H-3	6.42E+08	6.67E+08	7.04E+08	7.39E+08	7.97E+08	8.30E+08
Be-7	1.07E+04	1.14E+04	1.20E+04	1.27E+04	1.38E+04	1.45E+04
Be-10	4.63E+04	4.77E+04	4.98E+04	5.17E+04	5.48E+04	5.66E+04
C-10	2.98E+02	3.12E+02	3.30E+02	3.47E+02	3.77E+02	3.94E+02
C-11	5.14E+02	5.46E+02	5.75E+02	6.05E+02	6.59E+02	6.89E+02
C-14	6.41E+05	6.63E+05	6.99E+05	7.32E+05	7.85E+05	8.17E+05
N-13	5.10E+02	5.41E+02	5.70E+02	6.00E+02	6.53E+02	6.83E+02
N-16	9.83E+01	1.00E+02	1.03E+02	1.06E+02	1.10E+02	1.13E+02
O-14	1.55E+02	1.61E+02	1.68E+02	1.75E+02	1.87E+02	1.94E+02
O-15	5.00E+02	5.31E+02	5.59E+02	5.89E+02	6.40E+02	6.68E+02
O-19	4.82E+02	5.03E+02	5.31E+02	5.54E+02	5.94E+02	6.17E+02
Ar-41	4.02E+02	4.16E+02	4.38E+02	4.57E+02	4.89E+02	5.09E+02
Kr-79	2.13E+03	2.27E+03	2.41E+03	2.54E+03	2.77E+03	2.89E+03
Xe-122	1.01E+04	1.13E+04	1.22E+04	1.29E+04	1.45E+04	1.52E+04
Xe-125	2.12E+03	2.30E+03	2.50E+03	2.63E+03	2.89E+03	3.00E+03
Xe-127	2.02E+03	2.21E+03	2.39E+03	2.50E+03	2.77E+03	2.89E+03
I-120	1.90E+02	1.98E+02	2.08E+02	2.18E+02	2.32E+02	2.43E+02
I-122	5.10E+02	5.40E+02	5.68E+02	5.97E+02	6.49E+02	6.78E+02

注：1.后期可基于全国第七次人口普查数据，获取各年龄组的人口数据。进行加权后得到总的公众成员空气浸没外照射导出空气浓度。

2. 本表中仅列出部分与加速器活化空气相关的核素作为示例。

附表 E8 DAC<sub>w</sub>, Bq/m<sup>3</sup>

核素	类别	DAC <sub>w</sub>
<b>H</b>		
H-3 (氟化水)	—	4.10E+05
H-3 (氟气)	—	5.71E+09
H-3 (有机氟)	—	2.70E+05
H-3 (氟化甲烷)	—	6.19E+07
<b>Be</b>		
Be-7	M	1.95E+05
	S	1.81E+05
Be-10	M	1.20E+03
	S	3.50E+02
<b>C</b>		
C-11 (蒸气)	—	6.00E+04
C-11 (CO <sub>2</sub> )	—	6.03E+04
C-11 (CO)	—	6.06E+04
C-14 (蒸气)	—	1.90E+04
C-14 (CO <sub>2</sub> )	—	1.66E+06
C-14 (CO)	—	1.17E+07
<b>N</b>		
N-13	—	6.00E+04
N-16	—	1.00E+04
<b>O</b>		
O-14	—	1.70E+04
O-15	—	5.90E+04
O-19	—	5.40E+04
<b>Ar</b>		
Ar-41	—	4.50E+04
<b>Kr</b>		
Kr-79	—	2.60E+05
<b>Xe</b>		
Xe-122	—	1.30E+06
Xe-125	—	2.70E+05
Xe-127	—	2.60E+05
<b>I</b>		
I-120	F	1.54E+04
I-122	F	2.95E+04



附表 E9 DAC<sub>p</sub>, Bq/m<sup>3</sup>

核素	类别	≤1 岁	1~2 岁	2~7 岁	7~12 岁	12~17 岁	成年人
氟化水	F	1.69E+04	1.55E+04	1.84E+04	1.47E+04	1.55E+04	1.33E+04
	M	1.29E+03	1.15E+03	1.45E+03	1.47E+03	1.72E+03	1.83E+03
	S	3.67E+02	3.10E+02	3.22E+02	3.16E+02	3.26E+02	3.16E+02
	V	6.88E+03	6.46E+03	6.55E+03	5.22E+03	5.07E+03	4.57E+03
元素氢	V	8.89E+07	8.46E+07	8.62E+07	7.09E+07	6.95E+07	6.33E+07
氟化甲烷	V	1.03E+06	9.68E+05	9.81E+05	7.83E+05	7.60E+05	6.85E+05
有机束缚氟	V	6.00E+03	4.23E+03	4.35E+03	3.28E+03	3.34E+03	3.01E+03
Be-7	M	2.12E+03	1.86E+03	2.10E+03	1.85E+03	1.91E+03	2.11E+03
	S	1.93E+03	1.66E+03	1.84E+03	1.64E+03	1.76E+03	1.94E+03
Be-10	M	1.61E+01	1.37E+01	1.52E+01	1.39E+01	1.25E+01	1.29E+01
	S	6.67E+00	5.11E+00	4.99E+00	4.29E+00	3.70E+00	3.53E+00
C-11	—	4.77E+02	5.04E+02	5.42E+02	5.66E+02	6.20E+02	6.49E+02
	—	4.60E+02	4.83E+02	5.26E+02	5.47E+02	5.98E+02	6.26E+02
	—	4.57E+02	4.83E+02	5.24E+02	5.45E+02	5.96E+02	6.26E+02
C-14	—	1.08E+03	6.94E+02	8.45E+02	6.21E+02	7.20E+02	6.17E+02
	—	7.95E+01	7.05E+01	7.61E+01	6.44E+01	5.48E+01	6.17E+01
	—	3.47E+01	2.74E+01	2.77E+01	2.44E+01	2.14E+01	2.13E+01
N-13	—	5.10E+02	5.41E+02	5.70E+02	6.00E+02	6.53E+02	6.83E+02
N-16	—	9.83E+01	1.00E+02	1.03E+02	1.06E+02	1.10E+02	1.13E+02
O-14	—	1.55E+02	1.61E+02	1.68E+02	1.75E+02	1.87E+02	1.94E+02
O-15	—	5.00E+02	5.31E+02	5.59E+02	5.89E+02	6.40E+02	6.68E+02
O-19	—	4.82E+02	5.03E+02	5.31E+02	5.54E+02	5.94E+02	6.17E+02
Ar-41	—	4.02E+02	4.16E+02	4.38E+02	4.57E+02	4.89E+02	5.09E+02
Kr-79	—	2.13E+03	2.27E+03	2.41E+03	2.54E+03	2.77E+03	2.89E+03
Xe-122	—	1.01E+04	1.13E+04	1.22E+04	1.29E+04	1.45E+04	1.52E+04
Xe-125	—	2.12E+03	2.30E+03	2.50E+03	2.63E+03	2.89E+03	3.00E+03
Xe-127	—	2.02E+03	2.21E+03	2.39E+03	2.50E+03	2.77E+03	2.89E+03
I-120	F	1.38E+02	1.39E+02	1.57E+02	1.71E+02	1.88E+02	2.03E+02
	M	1.44E+02	1.51E+02	1.69E+02	1.74E+02	1.90E+02	2.03E+02
	S	1.48E+02	1.53E+02	1.71E+02	1.76E+02	1.93E+02	2.03E+02
I-122	F	2.54E+02	2.50E+02	3.00E+02	3.39E+02	3.90E+02	4.37E+02
	M	2.76E+02	2.92E+02	3.47E+02	3.52E+02	4.01E+02	4.37E+02
	S	2.88E+02	3.00E+02	3.56E+02	3.59E+02	4.14E+02	4.37E+02