

中华人民共和国国家职业卫生标准

GBZ/T 220.3—2015

建设项目职业病危害放射防护评价规范 第3部分： γ 辐照加工装置、中高能加速器

Specification for radiological protection assessment for occupational hazards
in construction projects—

Part 3: γ -Rays irradiation facilities and medium-energy/high-energy accelerator

2015-11-16 发布

2016-05-01 实施

中华人民共和国
国家卫生和计划生育委员会 发布

目 次

前言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 一般要求	1
5 放射防护预评价	2
6 放射防护控制效果评价	5
附录 A (资料性附录) 放射性危害因素	7
附录 B (资料性附录) γ 辐照装置辐射屏蔽估算方法	8
附录 C (资料性附录) 中高能加速器中子屏蔽的一般计算方法	12
附录 D (资料性附录) 中子天空反散射的一般估算方法	14
附录 E (资料性附录) 中高能加速器感生放射性的一般计算方法	16
附录 F (资料性附录) 加速器机房内臭氧(O ₃)的一般估算方法	20
附录 G (资料性附录) 辐照室内氢气浓度的估算方法	21

前 言

本部分按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

GBZ/T 220《建设项目职业病危害放射防护评价规范》分为以下三部分：

- 第 1 部分：核电厂；
- 第 2 部分：放射治疗装置；
- 第 3 部分： γ 辐照加工装置、中高能加速器。

本部分为 GBZ/T 220 的第 3 部分。

本部分起草单位：山东省医学科学院放射医学研究所、中国科学院高能物理研究所、北京市疾病预防控制中心。

本部分主要起草人：邓大平、卢峰、王时进、吴靖民、宋钢、陈英民、朱建国、李海亮。

建设项目职业病危害放射防护评价规范

第3部分:γ辐照加工装置、中高能加速器

1 范围

GBZ/T 220 的本部分规定了γ辐照加工装置、中高能加速器建设项目(以下简称为建设项目)职业病危害放射防护评价的一般要求及方法。

本部分适用于中高能加速器(100 MeV~1 TeV)和水池贮源型γ辐照加工装置建设项目的职业病危害评价,其他类型的辐照加工装置可参照执行。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB 10252—2009 γ辐照装置的辐射防护与安全规范

GB 18871—2002 电离辐射防护与辐射源安全基本标准

GBZ/T 181—2006 建设项目职业病危害放射防护评价报告编制规范

GBZ/T 201.1 放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第1部分:一般原则

GBZ/T 220.2—2009 建设项目职业病危害放射防护评价规范 第2部分:放射治疗装置

WS/T 328 放射事故医学应急预案编制规范

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

水池贮源型γ辐照加工装置 **γ-rays irradiation facilities with source storage in water**

一种用水池贮存密封源的辐照加工装置。这种装置由密封源、传输系统、控制系统、辐照室、安全屏蔽系统、通风系统、贮水池及辅助设备组成。密封源不使用时贮存于水池中并被水完全屏蔽,使用时提升于辐照室内照射物品。

3.2

中高能加速器 **medium-energy/high-energy accelerator**

按照粒子能量的大小,加速器可分为低能加速器(能量小于100 MeV)、中能加速器(能量在100 MeV~1 GeV)、高能加速器(能量在1 GeV~1 TeV)和超高能加速器(能量在1 TeV以上)。本标准中所称中高能加速器是指加速粒子能量在100 MeV~1 TeV之间的加速器,例如北京正负电子对撞机(能量为 2×2.2 GeV)、上海光源(能量为150 MeV)等。

4 一般要求

4.1 评价内容

建设项目职业病危害放射防护预评价及控制效果评价内容应分别满足GBZ/T 181—2006第5章

和第6章的要求。评价内容中一般不包括对非电离辐射危害因素的评价,但包括由放射引起的非放射性危害因素的评价,例如臭氧、氮氧化物等,也包括对可能影响辐射安全的工作条件的评价。

4.2 评价目标

4.2.1 评价目标主要包括年个人剂量评价目标和瞬时剂量率控制目标。采用的年个人剂量评价目标值应严于 GB 18871—2002 关于人员年剂量限值的要求,一般应根据 GB 18871—2002 中 4.3.3.1 的要求,提出适合于本建设项目的年剂量管理目标值。水池贮源型 γ 辐照加工装置的年剂量管理目标值参见 GB 10252—2009 第4章。

4.2.2 中高能加速器屏蔽体外瞬时剂量率控制目标可参照 GBZ/T 201.1 推荐的步骤,推导出适用于屏蔽体外参考点的瞬时剂量率评价目标。水池贮源型 γ 辐照加工装置的瞬时剂量率控制目标应按照 GB 10252 提出的年剂量管理目标值推导提出。

4.3 评价方法

通常采用数学模式法、类比分析法、检查表法、风险评估法等。

预评价报告书上的屏蔽设计计算以数学模式法、类比分析法为主。采用数学模式法时尽可能采用相关标准中推荐的成熟的计算公式,当采用其他计算公式时应在报告书中就其来源、适用范围、可靠性等方面给出必要说明;采用类比分析法时应充分考察类比项目的可类比性。

控制效果评价中以现场调查资料和监测数据为基础,宜采用检查表法,与相应的法规和标准进行对照评价。

4.4 资料收集

预评价所需资料主要由建设单位根据评价单位提出的资料纲目提供,以建设项目的可行性研究报告及相关资料等为主要评价资料。控制效果评价所需资料主要是评价单位在建设项目的现场调查与查验的实际资料,以建筑施工图纸、安装完成的放射装置、安装完成的防护安全设施、已下发执行的文件、相关立项批复文件和具有资质单位现场验收监测的数据、试运行资料等为主要评价资料。

评价资料属建设单位提供的,建设单位应以签字、盖章的形式确认,必要时评价单位还可要求其提供有关的溯源性文件;属评价单位自主采用的,应有规范的原始记录,包括纸质和(或)电子资料。评价所用的资料应长期保存。

5 放射防护预评价

5.1 建设项目概况

评价单位应到现场进行项目概况调查并按照 GBZ/T 181—2006 的 5.2.1 所示内容介绍建设项目概况。现场调查建设项目拟选址周围的环境(建筑物、设施)和人员驻留状况,给出建设项目周围一定范围(如 50 m)内环境布局图;使用环境剂量设备监测选址及其周围一定范围内环境本底辐射水平,进行放射性核素分析,并给出评价。详细介绍建设项目的整体布局及设备分布,岗位及人员等情况。

5.2 辐射源项和辐射危害因素分析

5.2.1 收集建设项目的放射装置资料,对辐射源项进行分析,重点明确与辐射防护有关的参数,如 γ 辐照装置所使用的放射源、辐射特征(如核衰变分支、辐射能量)和设计的额定装源活度等;中高能加速器加速电压、加速粒子种类、束流强度等。

5.2.2 应给出工艺流程。根据辐射源工作原理、工艺流程等,分析在正常运行状态和异常运行状态两种工况下存在的电离辐射危害因素及其产生的环节,宜采用图示法给出。

5.2.3 对辐射危害因素的产生方式、辐射水平等进行分析,结合建设项目特点确定评价因素。建设项目的一般放射性危害因素见附录 A。

5.3 防护措施

5.3.1 收集资料的要求

收集项目可行性论证报告等资料中的初步建筑设计图,应能够体现拟建建设项目工作场所布局、放射防护设计等内容,例如拟设计屏蔽墙的厚度、使用的建筑材料、穿墙管道设计、通风设计等。

5.3.2 建设项目布局

根据建设项目卫生学评价的原则,对建设项目的布局给出评价,提出合理布局的建议。建设项目工作场所的分区应按照相应标准要求给出建议,例如按照 GB 10252—2009 第 5 章的要求, γ 辐照装置工作场所的辐照室和迷路为控制区,辐照货物装卸区域、控制室等直接与辐照室和迷道相邻的区域为监督区。对没有专项标准要求的,按照 GB 18871—2002 的 6.4 提出分区的原则与要求。

5.3.3 建设项目屏蔽设计

屏蔽设计应同时满足防护设施外的年剂量管理目标值和瞬时剂量率控制目标值。当建设项目屏蔽设计不能满足评价目标时,报告书中可给出屏蔽设计建议供建设单位参考:

- 屏蔽设计评价的内容包括放射装置的屏蔽墙、防护门、穿墙管道等。 γ 辐照加工装置辐射屏蔽估算方法见 GBZ/T 220.2—2009 附录 B。中高能加速器中子屏蔽的一般计算方法见 GBZ/T 220.2—2009 附录 C;
- 对照射方式进行分析,对有用射束能直接照射的屏蔽设施作为主屏蔽进行计算,对有用射束不直接照射的屏蔽设施作为副屏蔽进行计算。主屏蔽计算时,应包含对主屏蔽防护宽度的计算;
- 根据建设单位提供的辐射源在屏蔽设施内的位置、人员可能到达的屏蔽设施外的最近位置计算屏蔽设施外瞬时剂量率;
- 辐照室或加速器机房周围一定范围内有高层建筑时,应考虑侧散射辐射危害,对高层建筑内的相关位置处进行放射防护评价;
- 辐照室或加速器机房为单层建筑时,应考虑天空散射辐射对周围地面相关位置处的辐射危害。中高能加速器中子天空散射辐射计算的示意图和一般计算方法参见附录 D。

5.3.4 防护与安全装置

5.3.4.1 γ 辐照装置的防护安全装置:

- 防止其他人员启动放射源架传动系统并提升放射源架的安全装置;
- 探查与防止放射源失去正常位置的安全与联锁设施;
- 5.3.4.2 中涉及的有关内容。

5.3.4.2 中高能加速器的防护安全装置:

- 对建设单位提供的拟安装的中高能加速器的辐射安全性能资料进行分析,主要分析其故障保护系统、安全联锁系统的安全防护逻辑是否全面和有效;
- 列出建设单位对工作场所拟采取的防护安全装置,例如门机联锁装置、剂量报警装置、通讯对讲设施、个人防护用品等。分析评价拟采取的防护安全装置计划是否全面和有效、是否满足多重性、冗余性、纵深防御的原则。

5.3.5 其他防护措施

5.3.5.1 中高能加速器产生的感生放射性可使用类比方法。无类比数据时,其一般计算方法见附录 E。

5.3.5.2 应对辐照室或加速器机房的通风设计进行评价,其有害气体的控制浓度和监测要求应符合 GB 10252。

5.3.5.3 空气中由辐射引起的非辐射危害因素以对臭氧(O₃)的评价为主,加速器机房内由辐射产生的臭氧(O₃)的计算方法可参考附录 F。对于水池贮源型 γ 辐照加工装置还应估算氢气的产生量并予以评价,辐照室内氢气浓度的估算方法见附录 G。

5.4 辐射监测计划

5.4.1 建设单位监测计划至少包括对工作场所和工作人员个人剂量的监测计划。分析建设单位制定的辐射监测计划,并对辐射监测计划是否全面、可靠和具有可操作性作出评价。

5.4.2 列出并评价辐射监测仪器装备计划,如放射工作场所固定安装的剂量仪、个人剂量计和个人剂量报警仪;场所和环境辐射剂量巡测仪;放射性物质表面污染测量仪等的装备计划,包括厂家、型号、技术参数等。

5.4.3 列出或以附录的形式给出辐射监测计划的内容并进行评价,包括建设单位制定的监测项目、周期、使用的仪器与方法、记录的内容与格式、评价指标及监测档案、监测人员等内容。

5.4.4 评价建设单位辐射监测计划有无质量保证措施和措施的完整性、可靠性。

5.4.5 当建设单位无能力实施某些项目的监测或不具备某些监测仪器而需要委托监测时,其监测计划中应包括委托监测的内容、委托监测服务机构应具备的相应资质等要求。

5.5 辐射危害评价

5.5.1 根据建设单位提供的工作负荷预计情况及屏蔽设计计算结果对工作人员和公众进行正常运行状态下的年剂量估算。

5.5.2 根据放射装置的使用和安全设施设置情况,分析可能发生的人员受意外照射的主要事件。简要分析事故状态下可能受到照射的人员类型及数量,给出可能受到的辐射剂量范围。

5.6 应急准备与响应

针对建设单位提供的放射应急计划,重点评价应急计划是否符合 WS/T 328 的要求。对建设单位应急计划中未明确和不正确的内容,评价单位应给出补充和修改建议。

5.7 放射防护管理

5.7.1 依据相关法规和标准中的规定,重点分析管理组织是否健全,管理制度是否全面、可行。

5.7.2 管理制度至少应包括工作人员个人剂量监测、工作人员职业健康监护、工作人员职业健康监护档案管理及安全运行的管理规章制度。建设单位拟建立的放射防护管理机构、拟制定实行的管理制度等可以在报告书附录中列出。

5.7.3 对建设单位放射防护管理工作中未明确和不正确的内容,评价单位应给出补充和修改建议。

5.8 结论和建议

全面总结评价报告书的内容,给出建设项目职业病危害分类。对拟建项目的布局、职业病危害因素、拟采取的放射防护措施等内容做出简洁、概括性的结论,明确建设项目从职业病危害放射防护角度是否可行,并针对具体情况提出防护和管理建议。

6 放射防护控制效果评价

6.1 建设项目概况

描述建成后的项目简况。评价单位到建设单位现场查看,核实建设地址、建设项目性质、建设规模、建设项目周围环境和公众人员状况等概况是否与预评价报告书中相同。有变更时,应说明变更原因并简述变更带来的影响。

6.2 辐射源项分析

根据放射装置说明书、操作规程等资料,重点核实放射装置产生的射线种类、射线能量、辐射强度、主要的感生放射性及其产额等内容,分析建设单位放射装置工艺流程,明确使用过程中与辐射防护、安全有关的环节。

6.3 防护措施评价

6.3.1 根据建筑施工图,核实建筑设施是否按照图纸和预评价报告提出的建议进行建设,重点查看与放射防护有关的内容,例如屏蔽设施的厚度、使用的屏蔽材料、穿墙管道走向、通风设置等。有变更时,应说明变更原因。

6.3.2 可使用检查表法,核实 5.3.4 中放射装置和工作场所的防护安全装置是否安装到位和有效。只要可能,应对所有的防护安全装置逐一查验和核实。现场核实的内容至少应包括:

- a) 控制台设置及显示的内容是否符合相应国家标准要求;
- b) 装置用户文件中标称的防护安全装置是否完善、有效;
- c) 装置用户文件中标称的应急状况下的防护安全装置是否完善、有效;
- d) 工作场所监视和对讲系统是否安装到位和有效;
- e) 各种安全联锁装置是否安装到位和有效;
- f) 工作场所警示灯和警告标志的设置情况;
- g) 个人防护用具的配备和使用情况。

6.4 辐射监测与评价

6.4.1 建设单位的自主监测

核实建设单位是否根据预评价报告书中的建议制定或完善了辐射监测计划,评价辐射监测计划是否满足本单位放射防护监测要求。可在附录中列出建设单位制定的辐射监测计划的内容。对建设单位不具备自主监测能力的,应评价建设单位的委托情况,包括委托单位的资质、委托监测的周期、负责委托监测工作的部门等情况。

6.4.2 评价单位的验证监测

6.4.2.1 验证监测主要包括放射装置防护监测和工作场所防护监测,并在对源项分析、工艺过程分析和满足放射装置质量保证要求的基础上确定其他验证监测的内容。

6.4.2.2 尽可能使用图、表的形式给出验证监测的有关内容,包括监测仪器的技术参数、监测布点、监测结果等。

6.4.2.3 应对验证监测时放射装置的使用状态给出说明,例如对加速器机房屏蔽墙、机房防护门进行防护效果验收监测时,应说明监测位置处辐射剂量最大的照射方式。当这种照射方式不明确时,应对各个可能的照射方式分别进行监测。

6.4.2.4 感生放射性监测应在能够代表放射装置实际运行状态的照射条件下进行。

6.4.2.5 可采用试纸擦拭法或其他放射性污染检测方法对水池贮源型 γ 辐照加工装置的水井盖表面及其周围地表面进行表面污染监测。

6.4.2.6 应对 γ 辐照装置、中高能加速器建设项目产生的气态、液态、固态排出物中的放射性进行监测，评价是否符合相关国家标准要求。

6.4.2.7 评价单位验证监测中的质量控制措施包括人员资质、仪器检定、方法认证、引用资料出处等方面。

6.5 辐射危害综合评价

根据验证监测结果及 5.5 中的内容对工作人员及公众进行年剂量估算，提出对个人剂量监测和健康查体的评价要求。分析异常和事故状态下人员受照情况及其健康影响，提出减少异常和事故照射发生的建议。

6.6 应急准备与响应

分析建设单位制定的应急计划，以及对预评价报告中建议的落实情况。

6.7 放射防护管理

分析建设单位制定的放射防护管理措施，核查的主要内容同 5.7，以及预评价报告中建议的落实情况。

6.8 结论和建议

全面总结评价报告书的内容，说明建设单位落实预评价报告书的情况。对建设项目的布局、职业病危害因素、采取的放射防护措施、防护措施的防护效果、放射防护管理等内容做出简洁、概括性的结论，对不足之处提出改进建议。

附 录 A
(资料性附录)
放射性危害因素

A.1 γ 辐照装置的放射性危害因素列于表 A.1。

表 A.1 γ 辐照装置的放射性危害因素

工况类型	放射性危害因素
γ 辐照装置常规运行	辐照室周围的辐射 贮源状态下贮源水池表面的辐射 贮源水池中放射性核素污染
放射源换装与退役	源容器外的辐射和表面污染 贮源水池水下相关操作中水池上表面的辐射 放射源换装、退役前后,贮源水池中放射性核素污染
注:当贮源水池的水中呈现 ⁶⁰ Co污染时,增加水池中的设备、用具、水池外围和水处理装置的表面污染评价因素,必要时增加空气污染评价因素。	

A.2 中高能加速器的放射性危害因素列于表 A.2。

表 A.2 中高能加速器的放射性危害因素

工况类型	放射性危害因素
中高能加速器常规运行	辐射区屏蔽设施外的辐射:随加速器加速粒子、能量和屏蔽物质的不同,辐射可能由电子、光子、中子、质子、 μ 子、韧致辐射、中子俘获 γ 射线等引起 感生放射性:包括加速器部件、辐射区空气、冷却水、建筑材料、地面土壤等的活化产物 表面污染:生产和使用放射性核素的中高能加速器可能存在核素表面污染
中高能加速器退役	感生放射性:同常规运行工况 表面污染:同常规运行工况

附录 B

(资料性附录)

γ 辐照装置辐射屏蔽估算方法

B.1 点状⁶⁰Co 源 γ 射线剂量估算方法

辐照室外距 A(TBq)点状⁶⁰Co 放射源 R(m)处关注点的周围剂量当量率(\dot{H})以式(B.1)计算:

$$\dot{H} = \frac{A \cdot G}{R^2} \times B \quad \dots\dots\dots (B.1)$$

式中:

\dot{H} ——关注点的周围剂量当量率,单位为微希沃特每小时($\mu\text{Sv/h}$);

A——放射源的活度,单位为太贝可(TBq);

R——距点状放射源的距离,单位为米(m);

B——辐照室对 γ 射线的屏蔽透射因子,由式(B.2)计算。

$$B = 10^{-[X-(TVL_1-TVL)/TVL]} \quad \dots\dots\dots (B.2)$$

式中:

X——屏蔽体的厚度,单位为厘米(cm);

TVL_1 ——屏蔽体衰减辐射的第一个什值层,对于混凝土($\rho = 2.35 \text{ t/m}^3$)⁶⁰Co 源的 γ 辐射屏蔽
 $TVL_1 = 32 \text{ cm}$;

TVL——平衡什值层厚度,对于混凝土($\rho = 2.35 \text{ t/m}^3$)⁶⁰Co 源的 γ 辐射屏蔽, $TVL = 22 \text{ cm}$;

B 值也可以由 GB 10252—2009 的表 A.1 查出。

式(B.1)中,G 为⁶⁰Co γ 射线的一个常数值,不同含义的 G 值如下:

- 距 1 TBq⁶⁰Co 源 1 m 处的周围剂量当量率, $3.1 \times 10^5 \mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1}/\text{TBq}$;
- 距 1 TBq⁶⁰Co 源 1 m 处,人体模体受垂直入射的辐射束照射 1 h 的累积的模体深度 10 mm 处的个人剂量当量, $3.5 \times 10^5 \mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1}/\text{TBq}$ 。

相应不同 B 值的使用,应指明其含义,并且估算的关注点剂量率的含义应与其相应。

B.2 ⁶⁰Co 源 γ 射线迷路散射剂量估算方法

B.2.1 点状⁶⁰Co 源 γ 射线经多次迷路散射后,在迷路入口(关注点)的周围剂量当量率(\dot{H})以式(B.3)计算:

$$\dot{H} = \frac{A \cdot G}{R_0^2} \prod_i \frac{\alpha_i \cdot S_i}{R_i^2} \quad \dots\dots\dots (B.3)$$

式中:

A——放射源的活度,单位为太贝可(TBq);

G——⁶⁰Co γ 射线的一个常数值,不同含义的 G 值如下:

- 距 1 TBq⁶⁰Co 源 1 m 处的周围剂量当量率, $3.1 \times 10^5 \mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1}/\text{TBq}$;
- 距 1 TBq⁶⁰Co 源 1 m 处,人体模体受垂直入射的辐射束照射 1 h 的累积的模体深度 10 mm 处的个人剂量当量, $3.5 \times 10^5 \mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1}/\text{TBq}$ 。

- R_0 —— ^{60}Co 源至第一次散射体中心点的距离,单位为米(m);
 R_i ——自 i 散射体中心至 i 次散射终点的距离,单位为米(m);
 i ——第 i 次散射;
 α_i ——第 i 次散射的散射系数;
 S_i ——第 i 次散射的散射面积,单位为平方米(m^2)。
 作为近似计算,可以用式(B.4)经验方法简化计算:

$$\dot{H} = \frac{A \cdot G}{R_0^2} \times 10^n \times \prod_i \frac{1}{R_i^2} \dots\dots\dots (\text{B.4})$$

式中:

- n ——总散射次数;
 R_0 —— ^{60}Co 源至第一次散射体中心点的距离,单位为米(m);
 R_i ——自 i 散射体中心至 i 次散射终点的距离,单位为米(m);
 i ——第 i 次散射。

B.2.2 估算方法应用提示:

- a) 多次散射辐射存在着诸多的散射路径,剂量估算需要找出主散射路径。判定主散射路径的原则:
 ——一般情况下,总散射次数最少的路径为主散射路径。但当路径中存在着散射面积很小的情况下,应选择较其散射次数还多的其他路径;
 ——每次散射相应位置存在多个散射面,散射体入射角度最小的散射为主散射。顶板和地面散射一般不作为主散射,背向散射(散射方位角大于 90° ,入射辐射与散射辐射处于过散射体中心的散射体垂直线的同侧)也不作为主散射;
- b) 散射辐射的能量决定于入射辐射和入射辐射与散射辐射的夹角(Q_s)。当散射方位角为 0° 时, Q_s 不等于入射角(Q_0)和散射角 θ 之和, $Q_s = 180^\circ - (Q_0 + \theta)$ 。经2次散射后,散射辐射能量接近 0.2MeV 。
- c) 辐照装置室迷路散射是复杂的,入射到散射体的辐射大于自主散射路径射入散射体的辐射,且除主散射路径外存在更多路径的其他散射。因此,在以主散射路径进行剂量估算时,建议附加一个安全系数,例如取安全系数为5。

B.3 贮源水池的水屏蔽估算方法

B.3.1 贮源水池中源板的几何条件示意图见图 B.1。图中 m 为水面距水池顶端的距离, b 为源板下端距水面的距离, h 为源板下端距水池底的距离,水池深度由上述三部分(m 、 b 、 h)组成。依图 B.1 的条件,水表面位置的辐射剂量率以式(B.5)计算:

$$\dot{H} = \frac{A \cdot G}{a^2} \times B \times C \dots\dots\dots (\text{B.5})$$

式中:

- A ——放射源的活度,单位为太贝可(TBq);
 G —— ^{60}Co γ 射线的的一个常数值,不同含义的 G 值如下:
 a) 距 $1\text{TBq}^{60}\text{Co}$ 源 1m 处的周围剂量当量率, $3.1 \times 10^5 \mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1}/\text{TBq}$;
 b) 距 $1\text{TBq}^{60}\text{Co}$ 源 1m 处,人体模体受垂直入射的辐射束照射 1h 的累积的模体深度 10mm 处的个人剂量当量, $3.5 \times 10^5 \mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1}/\text{TBq}$ 。
 a ——源(源板)上端距水面的距离,单位为米(m);

B ——深度为 a 的水层的屏蔽透射因子,可以由图 B.2 查出;

\dot{H} ——水池水表面处的辐射剂量率,单位为微希沃特每小时($\mu\text{Sv/h}$);

C ——源板占位的水吸收因子,由式(B.6)估算。

$$C = \frac{a^2}{b-a} \int_a^b \frac{1}{x^2} \cdot e^{-0.693(x-a)/HVL} dx \quad \dots\dots\dots (B.6)$$

式中:

HVL —— ^{60}Co 源的 γ 射线在水中的平衡半值层,由图 B.2 查出, $HVL=0.14 \text{ m}$, $0.693/HVL=5 \text{ m}^{-1}$ 。

若辐照装置用的 ^{60}Co 的长度为 451 mm,单层源板高度为 0.5 m,二层源板高 1.0 m。一般工业辐照装置为 2~4 层源板,上、下排列, $F^{-0.693(b-a)/HVL} < 0.01$ 。忽略与此相关项,并取 $HVL/0.693=0.2 \text{ m}$,式(B.6)的近似解为:

$$C = \frac{0.2}{b-a} \left(1 - \frac{2 \times 0.2}{a} + \frac{6 \times 0.2^2}{a^2} \right) \quad \dots\dots\dots (B.7)$$

更简便地近似取 $C=0.2/(b-a)$,在 $a > 5 \text{ m}$ 时其与 B.6 的偏差小于 8%。

以 C 作为源占位水吸收修正因子。对于二层源板, $b-a=1 \text{ m}$, $C=0.2$,对于四层源板, $b-a=2 \text{ m}$, $C=0.1$,此时下二层源板在水表面的剂量贡献小于上二层源板的贡献的 1/100。

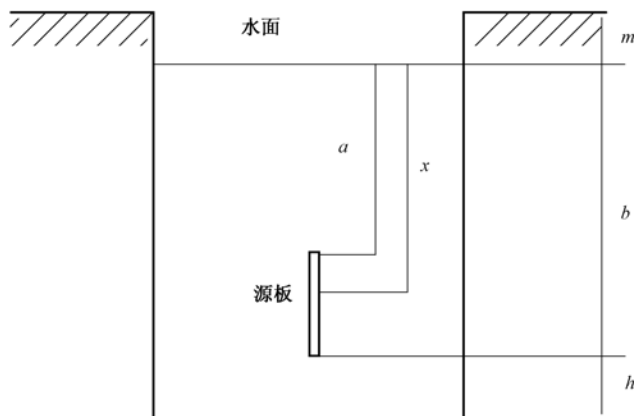


图 B.1 水池中的源板几何位置示意图

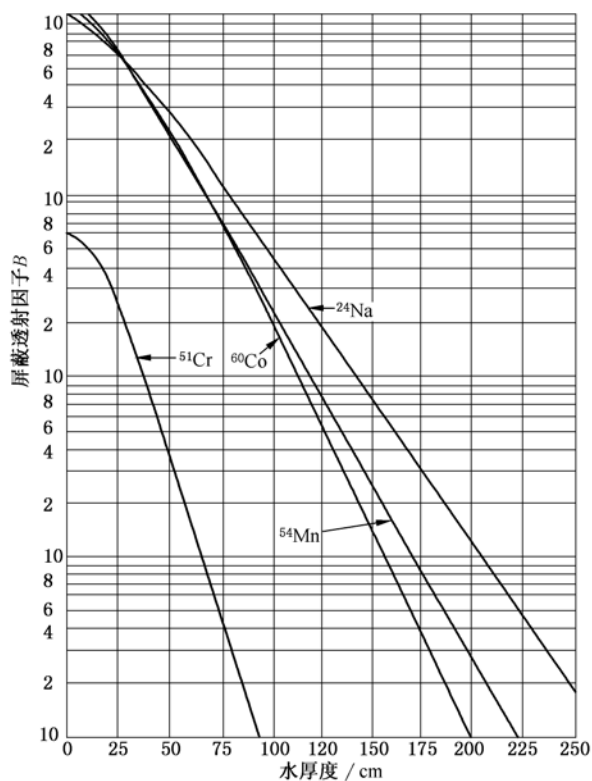


图 B.2 放射性核素屏蔽透射因子与水厚度的关系(引自 γ 射线屏蔽参数手册)

B.3.2 贮源水池的水屏蔽应考虑以下几种情况：

- 源架装源为源板结构；以额定装源活度和 B.3.1 估算贮源条件下的水屏蔽；
- 短的柱状源以直线或花篮式装入源架：以源架上源的顶端为源点，按点状源估算贮源条件下的水屏蔽，此时 B.3.1 中式(B.5)的 C 取为 1， a 为贮源时源顶端距水面的距离；
- 除上述 a) 和 b)，贮源状态外，水屏蔽还需考虑安装放射源的情况，以将源装入源架时源需提升的最高位置和该位置下的最高源活度为基础条件，按点状源估算水屏蔽，同样式(B.5)的 C 取为 1。

B.4 水池中副井的屏蔽

GB 10252—2009 的图 A.5 为水池中副井示意图。屏蔽计算需要考虑副井顶部铅盖和副井侧面铸铁和混凝土屏蔽，屏蔽估算方法类似于 B.2.1。

附录 C

(资料性附录)

中高能加速器中子屏蔽的一般计算方法

C.1 中高能加速器中子的屏蔽计算,先求出中子通过屏蔽层后的透射比 R_n ,计算见式(C.1)。

$$R_n = \frac{H_m \cdot d^2}{\varphi_0 \cdot T} \quad \dots\dots\dots (C.1)$$

式中:

R_n ——屏蔽透射比,单位为希沃特平方厘米($Sv \cdot cm^2$);

φ_0 ——距靶 1 m 处的中子注量率,单位为平方米每平方厘米小时($m^2 \cdot cm^{-2} \cdot h^{-1}$);

H_m ——有效剂量限值,单位为希沃特每小时($Sv \cdot h^{-1}$);

d ——靶与参考点之间的距离,单位为米(m);

T ——区域居留因子。

图 C.1 和图 C.2 分别给出了单能中子、 (γ, n) 和 (γ, fn) 反应产生的中子以及一些离子通过核反应产生的中子在普通混凝土中的屏蔽透射比 R_n 。从而可求出所需普通混凝土的厚度。 (γ, n) 和 (γ, fn) 反应是指当 γ 射线与物质相互作用时,若 γ 射线能量超过了物质原子核的中子束缚能,则通过 (γ, n) 和 (γ, fn) 反应放出中子。

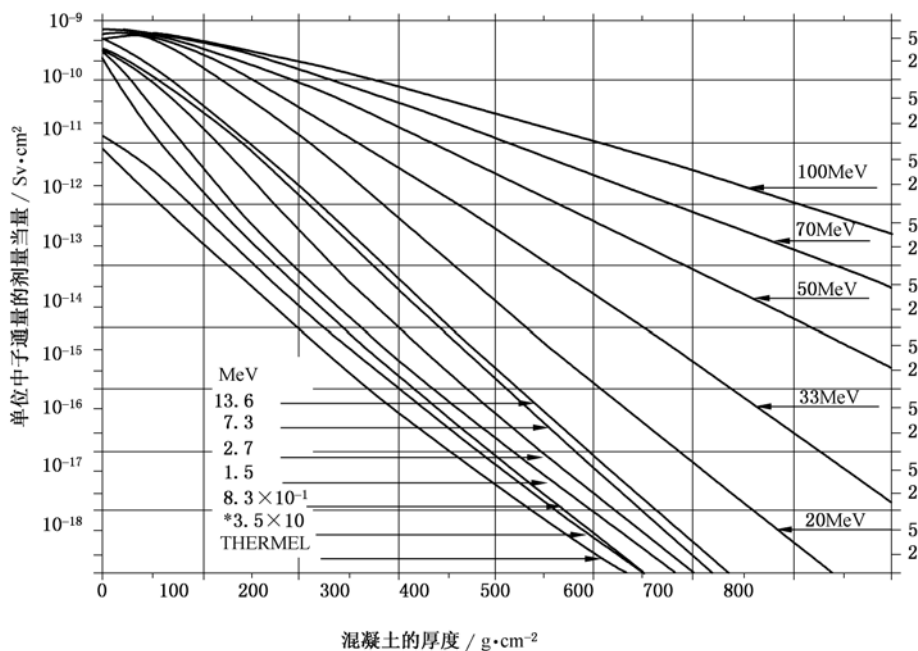


图 C.1 单能中子通过混凝土时的剂量衰减曲线

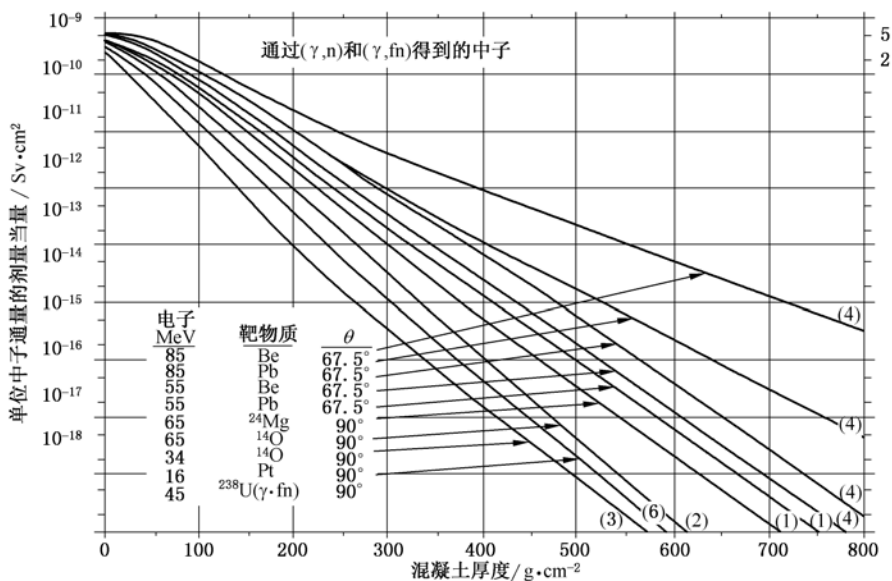


图 C.2 (γ,n)和(γ,fn)反应产生的中子通过混凝土时的剂量衰减曲线

C.2 中子的屏蔽计算,也可以求出减弱中子所需的 1/10 值层的数目,计算见式(C.2)。

$$n = \lg\left(\frac{1}{R_n}\right) \dots\dots\dots (C.2)$$

根据图 C.3 和式(C.3),即可求得所需要的屏蔽层厚度 S。

$$S = T_1 + (n - 1)T_e \dots\dots\dots (C.3)$$

式中:

T_1 ——第一个 1/10 值层;

T_e ——平衡 1/10 值层。

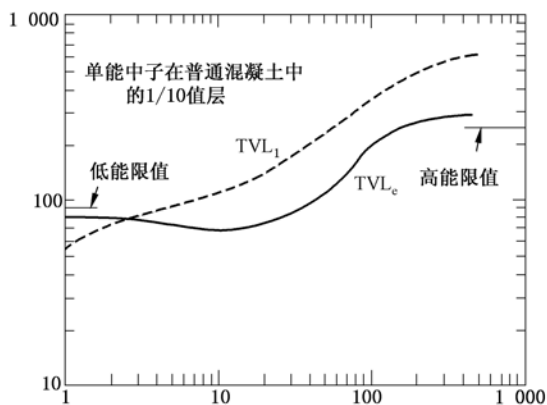


图 C.3 中子在混凝土中的 1/10 值层

附录 D

(资料性附录)

中子天空反散射的一般估算方法

D.1 中子的天空反散射示意图见图 D.1。

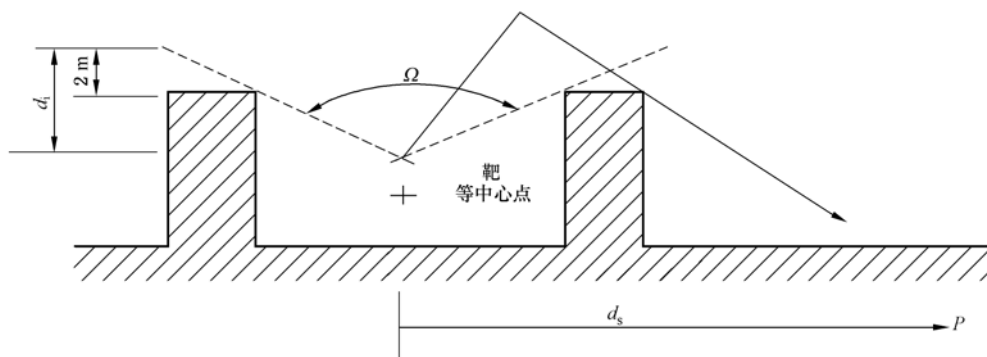


图 D.1 中子天空反散射示意图

D.2 小型加速器中子的天空反散射计算见式(D.1)。

$$D_{ns} = \frac{0.85 \times 10^{-4} D_n \Phi_0 \Omega}{d_i^2} (d_s \leq 20 \text{ m}) \dots\dots\dots (D.1)$$

式中:

 D_{ns} ——单位注量率中子在 P 点的天空反散射有效剂量率,单位为希沃特每小时($\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$); D_n ——单位注量率中子在屋顶外 2 m 处的有效剂量率, $\text{Sv} \cdot \text{cm}^2/\text{中子}$; Φ_0 ——距源 1 m 处中子注量率,中子数 $\cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; Ω ——源与屋顶之间包含的立体角,单位为球面度(Sr); d_i ——中子源至屋顶外 2 m 处的距离,单位为米(m); d_s ——中子源至 P 点的距离,单位为米(m)。

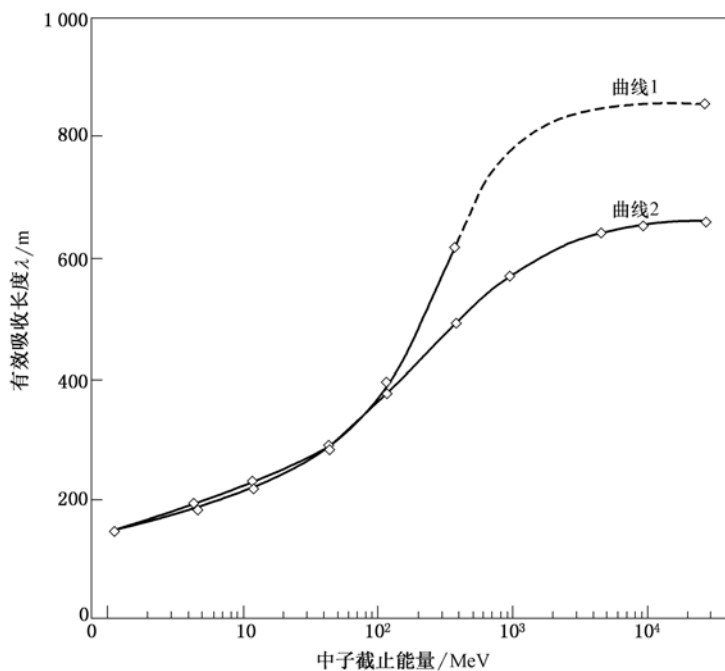
D.3 大型加速器中子的天空反散射计算见式(D.2)。

平均每个中子在 P 点的天空反散射当量剂量率可按式(D.2)估算:

$$D_{ns} = \frac{KQ}{(h + d_s)^2} e^{-d_s/\lambda} \dots\dots\dots (D.2)$$

式中:

 D_{ns} ——单个中子在 P 点产生的剂量当量,单位为希沃特(Sv); K ——单个中子在距源 1 m 处产生的剂量当量, $2 \times 10^{-15} \text{ Sv} \cdot \text{m}^2/\text{中子}$; Q ——射入天空,到达地面高度为 h 时的中子数; h ——常数,40 m; d_s ——中子源至 P 点的距离,单位为米(m); λ ——中子在空气中的有效吸收长度,它是中子能量的函数,见图 D.2。



注：曲线 1 来自 Stevenson and Thomas 的数据；曲线 2 是 Stapleton 等的结果。

图 D.2 中子在空气中的有效吸收长度 λ

附录 E

(资料性附录)

中高能加速器感生放射性的一般计算方法

E.1 加速器部件的活化产物

表 E.1 是加速器结构所用材料中最主要的元素铝、不锈钢和铜产生的部分光核反应及其参数。饱和放射性活度值是加速器每千瓦功率的高能电子束完全打在母体核素含量为 100% 的无限大靶时的饱和放射性值。活化物质中有实际意义的是长寿命的¹⁸²W(γ, n)¹⁸¹W、¹⁸³W(γ, p)¹⁸²Ta、¹⁸⁶W(γ, n)¹⁸⁵W、⁵⁶Fe(γ, n)⁵⁵Fe、⁵⁶Fe(γ, np)⁵⁴Mn、⁵⁴Fe(γ, sp)⁴⁶Sc、⁶⁵Cu(γ, np)⁶³Ni、⁶³Cu($\gamma, n2p$)⁶⁰Co、⁶³Cu(γ, sp)⁵⁸Co 等核素。

表 E.1 铝、铁和铜产生的部分光核反应及其参数

子体核素		主要光核反应			截面 $\mu\text{b} \cdot \text{MeV}^{-1}$	饱和放射性活度 GBqkW^{-1}
核素	半衰期	母体	类型	阈能 MeV		
⁷ Be	53.6 d	²⁷ Al	(γ, sp)	—	2.3	4.8
¹¹ C	20.34 min	²⁷ Al	(γ, sp)	—	1.0	1.9
¹³ N	9.96 min	²⁷ Al	(γ, sp)	—	0.3	0.5
¹⁵ O	123 s	²⁷ Al	(γ, sp)	—	1.4	2.5
¹⁸ F	109.7 min	²⁷ Al	(γ, sp)	—	2.8	5.2
²⁴ Ne	3.38 min	²⁷ Al	($\gamma, 3p$)	—	0.07	0.11
²² Na	2.62 a	²⁷ Al	($\gamma, 3n2p$)	22.51	4.7	9.3
²⁴ Na	14.96 h	²⁷ Al	($\gamma, 1n2p$)	23.71	5.4	10.0
²⁵ Al	7.24 s	²⁷ Al	($\gamma, 2n$)	24.41	0.75	1.4
²⁶ Al	7.4×10^5 a	²⁷ Al	(γ, n)	13.03	420 ^a	330 ^b
^{26m} Al	6.37 s	²⁷ Al	—	—	—	—
²⁷ Mg	9.64 min	²⁷ Al	(γ, π)	≈ 140	0.3	0.59
⁴⁶ Sc	83.9 d	⁵⁴ Fe	(γ, sp)	37.41	—	(7.4) ^e
⁴⁸ V	16.0 d	⁵⁴ Fe	(γ, sp)	25.86	—	(15) ^e
⁵¹ Cr	27.8 d	⁵⁴ Fe	(γ, sp)	19.74	—	(15) ^e
⁵² Mn	5.60 d	⁵⁴ Fe	(γ, np)	20.89	(15) ^e	1.3 ^c
^{52m} Mn	21.1 min	⁵⁴ Fe	(γ, np)	20.89	30	—
⁵⁴ Mn	303 d	⁵⁶ Fe	(γ, np)	20.42	(30) ^e	22
⁵⁶ Mn	2.576 h	⁵⁷ Fe	(γ, p)	10.57	—	1.2
⁵² Fe	8.2 h	⁵⁴ Fe	($\gamma, 2n$)	20.06	—	2.1
⁵³ Fe	8.51 min	⁵⁴ Fe	(γ, n)	13.62	—	27
⁵⁵ Fe	2.60 a	⁵⁶ Fe	(γ, n)	11.21	—	490
⁵⁶ Ni	6.10 d	⁵⁸ Ni	($\gamma, 2n$)	22.45	—	3.7
⁵⁶ Co	77.3 d	—	—	—	—	3.7
⁵⁷ Ni	36.0 h	⁵⁸ Ni	(γ, n)	12.19	—	218
⁵⁷ Co	270 d	—	—	—	—	218
⁶⁰ Co	5.263 a	⁶¹ Ni	(γ, p)	9.86	—	(3.7) ^e

表 E.1 (续)

子体核素		主要光核反应			截面 $\mu\text{b} \cdot \text{MeV}^{-1}$	饱和放射性活度 GBqkW^{-1}
核素	半衰期	母体	类型	阈能 MeV		
^{58}Co	71.3 d	^{63}Cu	(γ, sp)	41.75	—	$\approx 24^{\text{d}}$
$^{58\text{m}}\text{Co}$	9.2 h	^{63}Cu	—	—	—	
^{60}Co	5.263 a	^{63}Cu	($\gamma, \text{n}2\text{p}$)	18.86	—	24
^{63}Ni	92 a	^{65}Cu	(γ, np)	17.11	—	17
^{61}Cu	3.32 h	^{63}Cu	($\gamma, 2\text{n}$)	19.73	—	32
^{62}Cu	9.76 min	^{63}Cu	(γ, n)	10.84	—	407
^{64}Cu	12.80 h	^{65}Cu	(γ, n)	9.91	—	185

^a ^{26}Al 与 $^{26\text{m}}\text{Al}$ 之和。
^b ^{26}Al 与 $^{26\text{m}}\text{Al}$ 之和。
^c ^{52}Mn 与 $^{52\text{m}}\text{Mn}$ 之和。
^d ^{58}Co 与 $^{58\text{m}}\text{Co}$ 之和。
^e 括号内的数值为参考值, 目前没有确切值。

活化核的放射性活度 A (Bq) 计算见式 (E.1):

$$A = N\lambda_{\text{R}} = wfy \cdot \frac{1 - e^{-\lambda_{\text{R}}t_{\text{v}}}}{1 - e^{-\lambda_{\text{R}}T}} (1 - e^{-\lambda_{\text{R}}t}) \dots\dots\dots (E.1)$$

式中:

- w —— 电子束流的功率损失, 单位为瓦特 (W);
 f —— 电子能量转换成韧致辐射并被活化物质吸收额, 0.5;
 y —— 活化核的产额, 单位为每焦耳 (J^{-1});
 λ_{R} —— 活化核的衰变常数, 单位为每秒 (s^{-1})。

E.2 加速器空气的活化

对于高能电子加速器引起空气活化, 主要来自高能韧致辐射的 (γ, n) 反应, 空气中需要考虑的放射性核素只是 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 和 ^{41}Ar 。

活化核的数目随时间的变化满足式 (E.2):

$$N = \frac{Wfy(1 - e^{-x/\lambda})[1 - e^{-(\lambda_{\text{R}} + KF/V)t}]}{\lambda_{\text{R}} + KF/V} (\text{原子数/s}) \dots\dots\dots (E.2)$$

式中:

- W —— 电子束流的功率损失, 单位为瓦特 (W);
 f —— 电子转换为韧致辐射并进入空气被吸收的份额, 一般取 0.5;
 y —— 活化核的产额, 单位为每焦耳 (J^{-1});
 x —— 韧致辐射在空气中的路程, 单位为米 (m);
 λ —— 空气中韧致辐射的衰减长度, 一般取 385 m;
 λ_{R} —— 活化核的衰变常数, 单位为每秒 (s^{-1});
 K —— 考虑活化核在空气中不完全混合的因子, 一般取 1/3;
 F —— 活化区域的通风速率, 单位为立方米每秒 (m^3/s);

V ——活化区域的空气体积,单位为立方米(m^3)。

由于主要的活化核素皆为短半衰期核素(^{13}N , $T_{1/2} = 9.961 \text{ min}$; ^{11}C , $T_{1/2} = 20.39 \text{ min}$; ^{15}O , $T_{1/2} = 2.03 \text{ min}$),因而作为保守的计算,可按饱和放射性来计算,式(E.2)可简化为:

$$N = \frac{Wfy(1 - e^{-x/\lambda})}{\lambda_R + KF/V} \quad \dots\dots\dots(\text{E.3})$$

作为简化的考虑,由于活化是由(γ, n)反应产生,因而活化核的产额可取为韧致辐射在空气中的中子产额,产额 y 计算见式(E.4):

$$y = 1.21 \times 10^8 \times aZ^{0.66} (\text{J}^{-1}) \quad \dots\dots\dots(\text{E.4})$$

式中:

Z ——靶核的原子序数;

a ——靶核的丰度。

对于空气的有效原子序数 $Z = 7.62$,有效丰度 $a = 1$,从而可得出活化核的产额: $y = 4.5 \times 10^8 / \text{J}$ 。

为简化计算,在计算中可取 $\lambda_R = 0.693/9.96 \text{ min} = 1.16 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$,从而算出总的活化核产生量,然后再按 ^{13}N 占88.6%、 ^{15}O 占9.5%和 ^{11}C 占1.9%来分配。

活化核的放射性活度 $A = \lambda_R N$,可得出活化区域内的放射性总活度见式(E.5):

$$A = \frac{2.6 \times 10^5 W(1 - e^{-x/385})}{1.16 \times 10^{-3} + F/3V} (\text{Bq}) \quad \dots\dots\dots(\text{E.5})$$

活化区域的体积为 $V(\text{cm}^3)$,则活化区域的平衡浓度见式(E.6):

$$C = \frac{A}{V} (\text{Bq}/\text{cm}^3) \quad \dots\dots\dots(\text{E.6})$$

E.3 加速器冷却水的活化

对于冷却水的活化主要考虑靶和磁铁处的冷却水,主要活化产物是 $^{16}\text{O}(\gamma, n)^{15}\text{O}$ 、 $^{16}\text{O}(\gamma, 2n)^{14}\text{O}$ 、 $^{16}\text{O}(\gamma, 2np)^{13}\text{N}$ 、 $^{16}\text{O}(\gamma, 3n2p)^{11}\text{C}$ 、 $^{16}\text{O}(\gamma, 4n2p)^{10}\text{C}$ 、 $^{16}\text{O}(\gamma, 5n4p)^7\text{Be}$ 、 $^{16}\text{O}(\gamma, ^3\text{H})^{13}\text{N}$ 等。在这些活化产物中除了 ^7Be ($T_{1/2} = 53.6\text{d}$)和 ^3H ($T_{1/2} = 12.26\text{a}$)之外,其余皆为短寿命核素,很容易达到饱和。其中最重要的核素是 ^{15}O ,在冷却水循环的情况下,由于 $^{16}\text{O}(\gamma, n)^{15}\text{O}$ 反应产生的 ^{15}O 的原子数随时间的变化服从式(E.7):

$$N = \frac{Wfy(1 - e^{-x/\lambda})}{\lambda_R + F(1 - g)/V} [1 - e^{-(\lambda_R + F(1 - g)/V)t}] \quad \dots\dots\dots(\text{E.7})$$

式中:

W ——电子束功率损失率,单位为瓦特(W);

f ——电子能量转换为韧致辐射进入水中并被吸收的份额,0.1;

y ——活化核的产额,单位为每焦耳(J^{-1});

x ——韧致辐射穿过水层的平均路程,通常取0.02 m;

λ ——韧致辐射穿过水层的平均减弱长度,通常取0.5 m;

λ_R —— ^{15}O 的衰变常数, $5.69 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$;

F ——冷却水的循环流量,单位为立方米每秒(m^3/s);

V ——被辐照水的体积,单位为立方米(m^3);

g ——循环一周后剩余放射性的份额, $g = e^{-\lambda_R t}$;

t ——循环一周的时间,单位为秒(s)。

饱和放射性的活度计算公式见式(E.8):

$$A = \lambda_R N = \frac{\lambda_R \omega f y (1 - e^{-x/\lambda})}{\lambda_R + F(1 - g)/V} (\text{Bq}/\text{m}^3) \quad \dots\dots\dots(\text{E.8})$$

水的有效原子序数 $Z=3.34$, ^{16}O 的丰度为 100%, 可计算出: $y=2.68\times 10^8/\text{J}$ 。代入有关参数后, 可得到式(E.9):

$$A = \frac{1.05 \times 10^6 W}{5.68 \times 10^{-3} + F(1 - g)/V} (\text{Bq/m}^3) \dots\dots\dots (\text{E.9})$$

附录 F

(资料性附录)

加速器机房内臭氧(O₃)的一般估算方法

空气在辐射照射下,会发生辐照分解现象,其主要产物是臭氧(O₃)和氮氧化物(NO, NO₂)。氮氧化物的产额约为 O₃ 的 1/3,且以 O₃ 的毒性最高。工作场所空气中 O₃ 的浓度限值为 0.3 mg · m⁻³, 外环境空气中的浓度限值为 0.16 mg · m⁻³。这里主要是介绍臭氧的一般估算方法。

空气的平均电离能为 33.85 eV,空气每吸收 100 eV 能量大约产生 3 个离子对,加上激发、离解等效应,空气每吸收 100 eV 能量实际产生的 O₃ 分子为 7.4 个(低剂量率照射时)至 10.3 个(高剂量率 5 × 10⁸ Gy · s⁻¹ 下照射)。

如果加速器机房内 O₃ 的产生率为 Q(m³ · min⁻¹),这时以分为单位,对于加速器实际应用更为方便。一旦知道了 O₃ 的产生率,则加速器在各种状态下的臭氧浓度很快就可以求出。

假设 O₃ 在机房内均匀分布,开机后 t(min)时刻,机房内 O₃ 的浓度见式(F.1):

$$c(t) = \frac{Q \bar{T}}{V} [1 - \exp(-t/\bar{T})] \quad \dots\dots\dots (F.1)$$

式中:

c(t)——机房内 O₃ 浓度,单位为毫克每立方米(mg/m³);

V ——加速器机房内容积,单位为立方米(m³);

t ——开机运行时间,称有效去除时间,单位为分(min);

\bar{T} ——有效清除时间,单位为分(min),计算公式见式(F.2):

$$\bar{T} = \frac{t_v \cdot t_d}{t_v + t_d} \quad \dots\dots\dots (F.2)$$

式中:

t_v——换气一次需要的时间,单位为分(min);

t_d——O₃ 的有效分解时间,为 50 min。

当开机运行时间 t 远小于有效去除时间 T 时,O₃ 浓度正比于机器运行时间,见式(F.3):

$$c(t) = \frac{Qt}{V} \quad (t \ll \bar{T}) \quad \dots\dots\dots (F.3)$$

当机器运行很长时间后,O₃ 浓度达到饱和,其平衡浓度计算见式(F.4):

$$c_s = \frac{Q \bar{T}}{V} \quad (t \gg \bar{T}) \quad \dots\dots\dots (F.4)$$

在无通风的状况下,O₃ 饱和浓度正比于 O₃ 的分解时间,计算见式(F.5):

$$c_s = \frac{Q \cdot (50 \text{ min})}{V} \quad \dots\dots\dots (F.5)$$

当加速器停机后,O₃ 的浓度随停机时间 t_a 呈指数衰减,计算见式(F.6):

$$c(t_a) = c(t) \exp(-t_a/\bar{T}) \quad \dots\dots\dots (F.6)$$

式中:

c(t)——加速器刚停机时 O₃ 的浓度。

附录 G

(资料性附录)

辐照室内氢气浓度的估算方法

在贮源水井中⁶⁰Co源的 γ 辐射与水作用,发生水解,生成氢气(H₂)。水每吸收 100 eV 辐射能量产生 0.45 个 H₂ 分子。辐照室内氢气浓度 c 由式(G.1)计算:

$$c = \frac{1.5A}{\lambda_0 V} \times 100\% \quad \dots\dots\dots(G.1)$$

式中:

V ——辐照室体积,单位为升(L);

λ_0 ——通风率,单位为次每小时(次·h⁻¹);

A ——放射源活度,单位为拍贝克(PBq)。